creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

博士學位論文

제주 도심하천의 강우분석 및 홍수량 산정방법 연구

A Study on Rainfall Analysis and Estimation Method of Flood Discharge in Jeju Urban Streams

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

康 普 盛

2019年 8月

제주 도심하천의 강우분석 및 홍수량 산정방법 연구

指導敎授 楊 城 基

康 普 盛

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2019年 6月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

康普盛의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長 김 남 형

委 員 김 상 진

委 員 김 서 준

委 員 정 우 열

委 員 양 성 기

濟州大學校 大學院

2019年 6月

A Study on Rainfall Analysis and Estimation Method of Flood Discharge in Jeju Urban Streams

Bo Seong Kang
(Supervised by Professor Sung Kee Yang)

A dissertation submitted in partial fullment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering

2019. 6.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

This dissertation has been examined and approved by

Doctoral Committee

Professor	Nam Hyeong Kim
Professor	Sang Jin Kim
Professor	Seo Jun Kim
Doctor	Woo Yeol Jung
Professor	Sung Kee Yang

June. 2019

DEPARTMENT OF CIVIL & OCEAN ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Tables ····· Ⅳ
List of Figures ····· Ⅷ
Abstract ····· Ⅻ

1. 서 론 ····· 1
1.1 연구 배경 ····· 1
1.2 연구 동향 ····· 3
1.3 연구 목적 ····· 6
1.4 연구 방법 ····· 8

2. 이론적 배경 ····· 10
2.1 강우관측 장비 및 설치 ····· 10
2.1.1 강우관측 장비 ····· 10
2.1.1 강우관측 장비 설치 기준 ····· 11
2.2 유역평균 강우량 산정 ····· 12
2.2.1 산술평균법 ····· 12
2.2.2 티센다각형법 ····· 13
2.2.3 등우선법 ····· 14
2.3 Kriging 기법 ····· 15
2.3.1 Kriging ····· 15
2.3.2 Inverse Distance Weighted ····· 19
2.2.3 Spline ····· 20
2.4 유효우량 산정 ····· 21
2.4.1 SCS 방법에 의한 유효우량 산정 ····· 21
2.4.2 유출곡선지수(CN) 결정 ····· 25
2.5 매개변수 산정 ····· 33
2.5.1 단위유량도 선정 ····· 33
2.5.2 도달시간 산정 ····· 34

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.5.3 유역 저류상수 산정 ····· 37
2.5.4 홍수량 산정지점 선정 ····· 39
2.6 강우-유출 모형 ····· 40
2.6.1 강우-유출 모형의 분류 ····· 40
2.6.2 HEC-HMS 모형 ····· 43

3. 연구대상 유역 ····· 45
3.1 유역 형상 및 지형적 특성 ····· 45
3.2 유역 표고 및 경사 분석 ····· 47
3.2.1 한천 ····· 47
3.2.2 병문천 ····· 49
3.2.3 독사천 ····· 51
3.2.4 산지천 ····· 53

4. 하천 현장관측 및 호우사상별 유출량 분석 ····· 55
4.1 현장관측 지점 ····· 55
4.2 호우사상 및 유역별 홍수유출량 ····· 59
4.2.1 이동식 전자파표면유속계를 이용한 유출량 ····· 59
4.2.2 고정식 Kalesto를 이용한 유출량 ····· 61

5. 강우분석 방법에 따른 면적강우량의 정확도 비교·분석 ····· 63
5.1 티센다각형법에 의한 면적강우량 산정 ····· 63
5.2 등우선법에 의한 면적강우량 산정 ····· 69
5.3 면적강우량 비교·분석 및 강우관측소의 공간적 분포 특성 ····· 73
5.3.1 강우관측소의 위치 및 공간적 분포 특성 ····· 73
5.3.2 면적강우량 정확도 비교·분석 ····· 80

6. 홍수량 산정 방법 개선 및 적용 ····· 84
6.1 CN 보정 및 홍수량 산정 ····· 85
6.1.1 경사를 고려한 CN 보정 ····· 85

제주대학교 중앙도서관

6.1.2 CN 보정에 따른 홍수량 산정 ····· 86
6.1.3 도심 하천별 CN 보정 및 검토 ····· 92
6.2 신규 도달시간 산정 및 홍수량 산정 ····· 101
6.2.1 신규 도달시간 산정식 개발 ····· 102
6.2.2 신규 도달시간 적용 및 홍수량 산정 ····· 105
6.2.3 도심 하천별 적용 및 검토 ····· 110
6.3 소유역 구분 및 홍수량 산정 ····· 114
6.3.1 소유역 구분 ····· 114
6.3.2 소유역 구분에 따른 홍수량 산정 ····· 116
6.3.3 도심 하천별 소유역 구분 및 분석 ····· 120
6.4 하천별 매개변수 적용 및 홍수량 산정 ····· 126
6.4.1 매개변수 조합에 의한 홍수량 ····· 126
6.4.2 도심 하천별 홍수량 산정 ····· 132

7. 결론 ····· 139

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

8. 부록 ····· 142

List of Tables

Table 2.1 The runoff curve number of the agricultural area of the US SCS (AMC-II) ····· 22
Table 2.2 The runoff curve number of the urban area of the US SCS (AMC-II) ····· 23
Table 2.3 Classification of hydrologic soil group ····· 25
Table 2.4 Antecedent moisture condition ····· 27
Table 2.5 Comparison of land use classification between Korea and SCS ····· 29
Table 2.6 Comparison of land cover and land use classification ····· 30
Table 2.7 Land Use Classification and runoff Curve number of Korea(AMC-Ⅱ) ····· 31
Table 2.8 Comparison of characteristics of lumped model and distributed model ····· 42
Table 3.1 Geographical characteristics and shape of study watershed ····· 46
Table 3.2 Altitude analysis of Han stream ····· 47
Table 3.3 Slope analysis of Han stream ····· 48
Table 3.4 Altitude analysis of Byeongmun stream ····· 49
Table 3.5 Slope analysis of Byeongmun stream ····· 50
Table 3.6 Altitude analysis of Doksa stream ····· 51
Table 3.7 Slope analysis of Doksa stream ····· 52
Table 3.8 Altitude analysis of Sanji stream ····· 53
Table 3.9 Slope analysis of Sanji stream ····· 54
Table 4.1 Stream runoff observation point of Jeju Island ····· 55
Table 5.1 Area ratio of urban streams by Thiessen method ····· 64
Table 5.2 Rainfall events using the Thiessen method ····· 65
Table 5.3 Area rainfall in urban streams by Thiessen method ····· 66
Table 5.4 Rainfall Observatory in Jeju Island ····· 70
Table 5.5 Altitude distribution and area ratio of Thiessen method ····· 75

제주대학교 중앙도서관

Table 5.6 Minimum standard of observation network density for rainfall observations ····· 76
Table 5.7 Density of rainfall observatories in the five major river basins of Korea's inland regions ····· 77
Table 5.8 Density of rainfall observatories in urban streams basin of Jeju Island ····· 79
Table 6.1 Peak flow by heavy rainfall history observed in Han stream for the last 5 years ····· 84
Table 6.2 Curve number of Han stream(Single watershed) ····· 86
Table 6.3 Comparison of flood discharge of typhoon Bolaven by CN calibration of the Han stream watershed ····· 88
Table 6.4 Comparison of flood discharge of typhoon Sanba by CN calibration of the Han stream watershed ····· 89
Table 6.5 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by CN calibration of the Han stream watershed ····· 90
Table 6.6 Comparison of flood discharge and error by CN calibration in the Han stream watershed ····· 91
Table 6.7 Curve number of Byeongmun stream(Single watershed) ····· 92
Table 6.8 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by CN calibration of the Byeongmun stream watershed ····· 94
Table 6.9 Curve number of Doksa stream(Single watershed) ····· 95
Table 6.10 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by CN calibration of the Doksa stream watershed ····· 97
Table 6.11 Curve number of Sanji stream(Single watershed) ····· 97
Table 6.12 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by CN calibration of the Sanji stream watershed ····· 99
Table 6.13 Accuracy comparison of flood discharge by CN calibration ····· 100
Table 6.14 Rainfall events applied for developing Time of Concentration formula ····· 103

제주대학교 중앙도서관

Table 6.15 Comparison of flood discharge of typhoon Bolaven by applying the new travel time of the Han stream watershed ····· 106
Table 6.16 Comparison of flood discharge of typhoon Sanba by applying the new travel time of the Han stream watershed ····· 107
Table 6.17 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by applying the new travel time of the Han stream watershed ····· 108
Table 6.18 Comparison of flood discharge and error by Time of concentration in the Han stream watershed ····· 109
Table 6.19 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by applying the new travel time of the Byeongmun stream watershed ····· 111
Table 6.20 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by applying the new travel time of the Doksa stream watershed ····· 112
Table 6.21 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by applying the new travel time of the Sanji stream watershed ····· 113
Table 6.22 Accuracy comparison of flood discharge by Time of concentration ····· 113
Table 6.23 Comparison of flood discharge of typhoon Bolaven by sub-watershed division of the Han stream watershed ····· 117
Table 6.24 Comparison of flood discharge of typhoon Sanba by sub-watershed division of the Han stream watershed ····· 118
Table 6.25 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by sub-watershed division of the Han stream watershed ····· 119
Table 6.26 Comparison of flood discharge and error by sub-watershed division of the Han stream watershed ····· 119
Table 6.27 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by sub-watershed division of the Byeongmun stream watershed ····· 121
Table 6.28 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by sub-watershed division of the Doksa stream watershed ····· 122
Table 6.29 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by sub-watershed division of the Sanji stream watershed ····· 124

제주대학교 중앙도서관

Table 6.30 Accuracy comparison of flood discharge by sub-watershed division ····· 125
Table 6.31 Comparison of flood discharge and error by combination of parameters in the Han stream watershed ····· 131
Table 6.32 Comparison of parameters for estimation of flood discharge ····· 137
Table 6.33 Accuracy comparison of flood discharge by combination of parameters ····· 138
Table 8.1 Curve Number considering sub-watershed classification and river slope of Han stream watershed ····· 142
Table 8.2 Curve Number considering sub-watershed classification and river slope of Byeongmun stream watershed ····· 146
Table 8.3 Curve Number considering sub-watershed classification and river slope of Doksa stream watershed ····· 149
Table 8.4 Curve Number considering sub-watershed classification and river slope of Sanji stream watershed ····· 151

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

List of Figures

Fig. 1.1 Flow chart ····· 9
Fig. 2.1 Thiessen polygon method ····· 13
Fig. 2.2 Isohyetal method ····· 14
Fig. 2.3 Determine the assessment of the forest's hydrologic condition class ··· 26
Fig. 2.4 Curve Number decision based on evaluation of forest hydrologic condition ····· 26
Fig. 2.5 Inclination interval velocity distribution required for continuous Kraven formula induction ····· 36
Fig. 3.1 Study watershed ····· 46
Fig. 3.2 Altitude analysis of Han stream ····· 48
Fig. 3.3 Slope analysis of Han stream ····· 48
Fig. 3.4 Altitude analysis of Byeongmun stream ····· 50
Fig. 3.5 Slope analysis of Byeongmun stream ····· 50
Fig. 3.6 Altitude analysis of Doksa stream ····· 52
Fig. 3.7 Slope analysis of Doksa stream ····· 52
Fig. 3.8 Altitude analysis of Sanji stream ····· 54
Fig. 3.9 Slope analysis of Sanji stream ····· 54
Fig. 4.1 Stream runoff observation point of Jeju Island ····· 57
Fig. 4.2 Observation of stream runoff using observation equipment ····· 58
Fig. 4.3 Observation at stream runoff site ····· 58
Fig. 4.4 Runoff hydrograph of the typhoon Bolaven in the Han stream ····· 59
Fig. 4.5 Runoff hydrograph of the typhoon Sanba in the Han stream ····· 60
Fig. 4.6 Runoff hydrograph of the typhoon Chaba in the Han stream ····· 60
Fig. 4.7 Runoff hydrograph of the typhoon Chaba in the Byeongmun stream · 61
Fig. 4.8 Runoff hydrograph of the typhoon Chaba in the Doksa stream ····· 62
Fig. 4.9 Runoff hydrograph of the typhoon Chaba in the Sanji stream ····· 62
Fig. 5.1 Application of Thiessen method in Jeju urban streams ····· 64
Fig. 5.2 Area rainfall in urban streams by Thiessen method(Typhoon Khanun) 66

제주대학교 중앙도서관

Fig. 5.3 Area rainfall in urban streams by Thiessen method(Typhoon Bolaven, Tembin) ····· 67
Fig. 5.4 Area rainfall in urban streams by Thiessen method(Typhoon Sanba) 67
Fig. 5.5 Area rainfall in urban streams by Thiessen method(Typhoon Nakri) ·68
Fig. 5.6 Area rainfall in urban streams by Thiessen method(Typhoon Chaba) 68
Fig. 5.7 Rainfall observation network of Jeju Island ····· 69
Fig. 5.8 Estimate area rainfall using the isohyetal method ····· 72
Fig. 5.9 Location of rainfall observatories in urban stream watershed and thiessen network ····· 73
Fig. 5.10 Distribution of rainfall observatories in the five major river basins of Korea's inland regions ····· 78
Fig. 5.11 Comparison of area rainfall of altitudinal distribution with thiessen method and isohyetal method ····· 82
Fig. 6.1 Comparison of flood discharge of typhoon Bolaven by CN calibration of the Han stream watershed ····· 88
Fig. 6.2 Comparison of flood discharge of typhoon Sanba by CN calibration of the Han stream watershed ····· 89
Fig. 6.3 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by CN calibration of the Han stream watershed ····· 90
Fig. 6.4 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by CN calibration of the Byeongmun stream watershed ····· 94
Fig. 6.5 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by CN calibration of the Doksa stream watershed ····· 96
Fig. 6.6 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by CN calibration of the Sanji stream watershed ····· 99
Fig. 6.7 Process for the development of time-of-concentration formulas ····· 102
Fig. 6.8 Flood hydrograph by applying new time-of-concentration formulas··· 103
Fig. 6.9 Examination of applicability of new time-of-concentration formulas···104
Fig. 6.10 Comparison of flood discharge of typhoon Bolaven by applying the new travel time of the Han stream watershed ····· 105

제주대학교 중앙도서관

Fig. 6.11 Comparison of flood discharge of typhoon Sanba by applying the new travel time of the Han stream watershed ····· 107
Fig. 6.12 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by applying the new travel time of the Han stream watershed ····· 108
Fig. 6.13 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by applying the new travel time of the Byeongmun stream watershed ····· 110
Fig. 6.14 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by applying the new travel time of the Doksa stream watershed ····· 111
Fig. 6.15 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by applying the new travel time of the Sanji stream watershed ····· 112
Fig. 6.16 Watershed characteristics and sub-watershed distribution of the Han stream ····· 115
Fig. 6.17 Comparison of flood discharge of typhoon Bolaven by sub-watershed division of the Han stream watershed ····· 116
Fig. 6.18 Comparison of flood discharge of typhoon Sanba by sub-watershed division of the Han stream watershed ····· 117
Fig. 6.19 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by sub-watershed division of the Han stream watershed ····· 118
Fig. 6.20 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by sub-watershed division of the Byeongmun stream watershed ····· 121
Fig. 6.21 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by sub-watershed division of the Doksa stream watershed ····· 122
Fig. 6.22 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by sub-watershed division of the Sanji stream watershed ····· 123
Fig. 6.23 Comparison of flood discharge of typhoon Bolaven by combination of parameters in the Han stream watershed ····· 127
Fig. 6.24 Comparison of flood correlation coefficients of typhoon Bolaven by combination of parameters in the Han stream watershed ····· 127
Fig. 6.25 Comparison of flood discharge of typhoon Sanba by combination of parameters in the Han stream watershed ····· 128

제주대학교 중앙도서관

Fig. 6.26 Comparison of flood correlation coefficients of typhoon Sanba by combination of parameters in the Han stream watershed ····· 129
Fig. 6.27 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by combination of parameters in the Han stream watershed ····· 130
Fig. 6.28 Comparison of flood correlation coefficients of typhoon Chaba by combination of parameters in the Han stream watershed ····· 130
Fig. 6.29 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by combination of parameters in the Byeongmun stream watershed ····· 132
Fig. 6.30 Comparison of flood correlation coefficients of typhoon Chaba by combination of parameters in the Byeongmun stream watershed ····· 133
Fig. 6.31 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by combination of parameters in the Doksa stream watershed ····· 134
Fig. 6.32 Comparison of flood correlation coefficients of typhoon Chaba by combination of parameters in the Doksa stream watershed ····· 134
Fig. 6.33 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by combination of parameters in the Sanji stream watershed ····· 135
Fig. 6.34 Comparison of flood correlation coefficients of typhoon Chaba by combination of parameters in the Sanji stream watershed ····· 136

제주대학교 중앙도서관

Abstract

A water control project are established to prevent flood damages from typhoons and localized heavy rain. When establishing water control projects, flood volume plays an important role in determining size of the hydraulic structure. Flood volume is calculated according to the Guideline for Calculating Design Flood Volume (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2012). However, the Guideline for Calculating Design Flood Volume fails to properly reflect hydrologic characteristics of Jeju Island because it was written based on the conditions of inland areas of South Korea. For the analysis and evaluation of flood volume in rivers of Jeju Island, it is necessary to develop a flood volume calculation method for Jeju based on river observation data taken from Jeju Island.

Accordingly, this study was conducted to calculate flood volume that reflects topographic and hydrologic characteristics of rivers in Jeju Island by improving the parameters presented in the Guideline for Calculating Design Flood Volume. In addition, flood volume of urban rivers in Jeju Island was reviewed using hydrologic component survey data observed at river sites over many years.

When calculating areal rainfall, the Thiessen polygon method cannot account for changes in rainfall according to altitude (mountain effect). Also, since there is no areal reduction factor (ARF) appropriate for Jeju Island, the Thiessen polygon method was determined to be inadequate for calculating areal rainfall of mountainous rivers in Jeju Island. The applicability was checked by comparing with areal rainfall using the isohyetal method.

Areal rainfall calculated by the Thiessen polygon method can be partially applied to rivers in Jeju Island depending on altitude, but this method is inappropriate for mountainous rivers in Jeju Island because errors are created by altitude. Therefore, the isohyetal method is a more appropriate method that can account for the location of rainfall observatories and the effects of mountainous areas without creating errors from altitude.

제주대학교 중앙도서관

Urban rivers in Jeju Island do not have large basin area and are characterized by sharp slopes. When flood runoff occurs, it occurs at a fast flow rate of 7m/s or above. In addition, as topographic characteristics according to altitude and changes in land use are shown clearly, flood volume was calculated by applying the parameters considering topographic and hydrologic characteristics of rivers. In comparison to the Guideline for Calculating Design Flood Volume, the accuracy of peak runoff rate was increased by 1.2% according to runoff characteristics. Also, the R^2 value of the runoff hydrograph was increased by 20.6% compared to observed flood volume. When combined with the parameters reflecting river characteristics of Jeju Island, flood volume was calculated more accurately compared to the conventional method.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

1. 서 론

1.1 연구 배경

제주도는 지리적 특성상 태풍의 길목에 위치하고 있어 태풍 및 집중호우에 의한 돌발홍수 및 풍해 등의 자연재해에 연중 노출되어 있다. 또한 연평균 강우량이 전국 대비 약 1.5배인 2,061 mm에 달하는 국내 최다우 지역이며, 태풍 및 호우로 인한 피해가 매년 크게 증가하고 있다(Jung and Yang, 2009).

제주도의 하천은 투수성이 높은 지질특성으로 인해 대부분 평상 시 건천 상태를 유지하고 있다. 또한 강우에 의해 점진적으로 하천유량이 증가하는 내륙지역과는 달리 하천 표층이 포화된 후 갑작스럽게 하천유출이 발생하며 약 1일 이내의 짧은 시간 동안 유출이 발생한 후 바다로 유입되는 수문학적 특성이 있다(Kim et al., 2017). 제주도는 내륙과는 다른 특수한 수문학적 특성으로 인하여 홍수재해로부터 비교적 안전지대로 여겨져 왔었으나 2007년 태풍 '나리' 내습 시 제주도에서 약 1,600억 원의 재산피해와 14명의 인명피해가 발생한 후 재해에 대한 인식이 크게 바뀌었다(Yang et al., 2017).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

최근 기후변화로 인한 태풍 및 집중호우 등의 발생빈도가 증가하고 규모가 대형화됨에 따라 많은 피해가 발생하고 있으며 자연재해로 인한 피해가 사회적 문제로 대두되고 있다(Kang et al., 2014). 제주시와 서귀포시 도심부근에서 일강우량 200 mm 이상인 경우가 빈번하게 나타나고 있으며, 한라산 정상 부근에서 500 mm 이상의 집중호우 발생빈도도 급증하고 있다.

2012년에는 약 50년 만에 7월 태풍 '카눈'부터 9월 태풍 '산바'까지 4개의 태풍이 내습하였으며, 7월에는 태풍 '카눈'과 '볼라벤', '덴빈'이 연달아 상륙하여 많은 재산 및 인명피해가 발생하였다(CCIC, 2012). 또한 2014년 8월에 발생한 태풍 '나크리'는 제주도 기상청 관측 사상 최대인 1,500 mm의 일강우량을 기록하였고, 2018년 10월 태풍 '콩레이'는 도심지에서 335 mm의 일강우량이 발생하여 태풍 '나리' 이후 역대 2번째의 강우를 기록하였다. 과거와 달리 9월, 10월에 가을 태풍이 발생하여 내습하는 경우가 빈번해 짐에 따라 호우재해로 인한 피해 및 위험도가 증가하고 있다.

집중호우의 발생빈도가 급증하고 일강우량의 극치 경신도 빈번하게 발생함에 따라 홍수피해의 위험도 증가하고 있어 예방대책이 시급하다. 특히 증가하고 있는 홍

수 피해를 줄이기 위해서는 제주도 시정에 적합한 홍수량 산정방법 및 적용을 통한 제주형 하천기본계획 및 유역종합치수계획의 수립이 시급한 실정이다.

제주도는 2007년 발생한 태풍 '나리' 이후 유역종합치수계획 및 하천기본계획에서 홍수설계빈도를 50년에서 100년으로 상향조정하여 설계홍수량을 산정하고 있으나 기후변화에 인한 강우빈도의 증가로 하천범람 등 홍수피해가 매년 발생하고 있다(Kang et al., 2015). 설계홍수량은 홍수피해를 예방하기 위한 치수구조물의 규모 결정 시 가장 중요한 부분이지만 매개변수 및 적용방법에 따라 결과가 상이하게 나타난다. 특히 제주도 하천을 대상으로 홍수량 비교 시 많은 오차가 발생하고 있어 신뢰도 향상을 위한 기존 설계홍수량 산정 방안의 개선이 요구되고 있다.

대부분의 하천관련 연구·조사 및 실무에서는 강우분석 시 설계홍수량 산정요령(국토교통부, 2012)에 제시되어 있는 Thiessen 다각형법을 적용하여 면적강우량을 산정하고 있으나, Thiessen 다각형법은 고도를 고려하지 못하는 단점이 있다. 특히, 도서지역인 제주도는 한라산이 중심부에 위치하여 고도에 따른 강우편차가 극명하게 나타나기 때문에 Thiessen 다각형법에 대한 적용성 검토가 이뤄져야 한다. 또한 제주도 대부분의 하천은 한라산에서 발원하여 해안가까지 형성되어 있는 산지형 하천으로 상류부터 하류까지 고도차가 심한 특성을 띄고 있어 Thiessen 다각형법을 활용한 면적강우량 산정에 대한 검토가 필요하다. 홍수량 산정 시 필요한 매개변수(CN, 도달시간 등) 역시 설계홍수량 산정요령에서 제시하는 방법들을 적용하고 있으나 내륙지역을 기준으로 수립되어 제주도와 같이 하상경사가 급한 산지형 하천에 그대로 적용할 경우 많은 오차가 발생하는 것으로 분석되었다(Yang et al., 2017).

제주도는 내륙지역과는 달리 유량조사 기관이 없어 홍수량 관측 자료가 전무하였으며, 이론적 방법으로 산정된 홍수량 결과에 대한 검증 및 검토가 제대로 이루어지지 않았다. 또한 홍수량 검증자료의 부재로 인하여 산정된 홍수량 값에 대한 신뢰성을 갖지 못한 채 국토교통부에서 제시한 설계홍수량 산정요령을 적용할 수밖에 없는 현실이었다. 그러나 최근 국가 R&D 과제인 '제주형 물순환 해석 및 수자원 관리 기반구축 연구'(2010~2015)와 '제주지역 기후변화 대응을 위한 물관리 및 수재해 저감기술'(2014~2018) 과제를 통하여 다년간의 현장관측이 수행되어 일부 하천 유출량 관측자료를 확보할 수 있었으며, 제주도 하천의 홍수량을 비교·검토한 결과 설계홍수량 산정요령에 의한 결과 값과 차이가 크게 발생하여 정확한 홍수량 산정의 필요성이 대두되고 있다.

제주대학교 중앙도서관

1.2 연구 동향

홍수량 산정은 하천의 치수·이수 계획 수립 시 인명 및 재산의 피해를 예방하는데 매우 중요하다. 강우 및 홍수량과 관련된 국외에서의 연구는 Hornor와 Jens(1942)가 강우를 임의배열에 의해 시간분포로 제시하였으며, Huff(1967)는 강우자료의 누가곡선으로 누가곡선의 평균 또는 지속시간이나 강우크기를 제한하는 연구를 수행하였다. 또한 미국 Illinois 지역을 대상으로 4분위법에 의한 시간분포를 누가확률곡선으로 제시하였다. Pilgrim과 Cordery(1975)는 강우의 시간분포 기준을 제시하기 위하여 호주 시드니 지방에 평균 이동법을 분석하였고, Yen과 Chow(1977)는 강우의 시간분포를 무차원 1, 2차 모멘트를 이용하여 삼각형과 사다리꼴 우량주상도 형태로 제시하였다.

Sabol(1988)은 Clark 단위도법의 저류상수 산정 방법과 관련된 경험식을 제시하였으며, Eulogio(1998)는 연평균 강우자료를 공간적으로 분포시키기 위하여 Thiessen 가중법과 Kriging 기법에 의한 두 가지 결과를 제시하여 비교하였다. Goovaert(2000)는 Thiessen 가중법, IDW(Inverse Distance Weighting)법, Kriging 기법을 이용하여 강우자료의 지형적 공간 분포 특성을 파악하였으며 강우자료만 이용한 경우와 DEM(Digital Elevation Model) 자료를 적용하여 공간적으로 예측한 결과를 비교하였다.

Ibbitt(1972)은 홍수량 산정의 정확도를 향상시키기 위하여 자료의 오차를 최소화하는 매개변수 최적화 연구를 수행하였으며, McCuen(1973)은 강우-유출 모형에 필요한 매개변수들의 민감도 분석을 실시하여 각 매개변수의 영향 및 변화특성을 파악하였다. Mein과 Brown(1978)도 매개변수들 간 상관성 분석 및 문제점에 대한 연구를 수행하였으며 Cooley(1982)는 강우-유출모형에서 필요한 매개변수들의 민감도 분석을 실시하여 매개변수의 추정 및 범위를 제안하였다.

강우의 시간분포와 홍수량의 관계에 관한 국내 연구는 대부분 강우의 시간분포에 따른 첨두유출의 상관성 분석을 중심으로 수행되었다. 서승덕(1965)이 국내에서 최초로 호우의 시간분포 개념을 고찰하였고, 박찬영(1981), 이근후(1983) 등이 Huff의 4분위법을 연구하였다. 박재현 등(2006)은 Huff 방법에 의한 첨두홍수량의 임계지속시간을 산정하여 실측자료를 이용한 빈도분석 결과와 비교하였으며, 장수형 등(2006)은 Huff 방법의 시간분포 고려에 대해 국내 적용성을 비교하여 지속시간별

제주대학교 중앙도서관

Huff 분포를 고려하는 방안을 제시하였다.

국내 설계홍수량 산정에 관한 연구는 도달시간, 저류상수 등 매개변수 및 소유역 분할 등 확실한 기준 정립을 위한 방향으로 수행되고 있다. 홍수량 추정을 위한 합성단위유량도 유도의 연구조사(건설부, 1974)에서 윤용남(1986)이 제시한 Snyder형의 합성단위도 작성을 위한 경험 공식이 설계홍수량 산정방법 개발의 최초 연구였으며 그 이후 많은 연구가 이루어지고 있다.

윤광원(1994)은 Clark 단위도법에 의한 홍수량 산정 시 영향을 미치는 매개변수들에 대한 민감도 분석을 실시하였으며, 윤여진 등(1998)은 Clark 단위도법의 매개변수 민감도 분석을 통하여 임계지속시간 도입의 필요성을 제안하였다. 또한, 윤태훈 등(2005)은 Clark 단위도법의 저류상수를 유역면적(A)과 유로연장(L) 등으로 산정할 수 있는 식을 제시하였다. 서규우(1998)는 강우지속기간 변화에 따른 도시유출모형 매개변수의 민감도 분석 연구와 유역특성 변화에 따른 도시유출모형의 매개변수 민감도 분석을 통하여 매개변수 결정을 위한 상대적인 민감도 분석을 실시하였다.

채석준(2000)은 강우 유출모형을 이용한 유역면적의 크기와 강우지속기간 및 강우분포형을 통하여 도시하천의 민감도 분석을 연구하였고, 정대명(2001)은 Clark 방법의 시간-면적곡선이 유출해석에 미치는 영향분석을 통하여 시간-면적곡선의 유·무가 유출량 산정의 정확도에 미치는 영향을 분석하였다. 김대근(2004)은 Clark 모형을 사용한 민감도 분석을 통하여 여러 매개변수들이 설계홍수량에 미치는 영향을 파악하였으며, 윤국희 등(2009)은 대곡·사연댐 유역에서 HEC-HMS를 이용하여 매개변수를 적절하게 최적화하는 방법을 연구하였다. 채수권 등(2013)은 PMF 산정을 위하여 단위도의 최적 매개변수를 추정하였다. 윤선권 등(2009)은 매개변수적 지점빈도해석 방법과 비매개변수적 지점빈도해석 방법으로 추정한 확률 홍수량을 강우빈도해석(rainfall frequency analysis)방법과 홍수빈도해석(flood frequency analysis)방법을 통하여 확률홍수량 산정 방법별로 비교·분석하여 설계홍수량 산정 방법별로 비교·분석하는 연구도 다양하게 이루어졌다.

김남원 등(2006)은 우리나라의 설계홍수량 산정기법에 대한 일반적인 관행과 문제점을 분석하여 체계적이고 합리적인 가이드라인이 필요하다고 제시하였다. 건설교통부(2007)에서 객관적인 설계홍수량 산정 절차의 수립을 위하여 홍수빈도 및 강우-유출 모형 분석 방법을 정리한 홍수량 산정기법 가이드라인(건교부, 2007)을 제

제주대학교 중앙도서관

시하였으며, 추후 국토교통부(2012)에서 일관성 있는 홍수량 산정을 위하여 실무에서 적용되는 방법들을 정리한 「설계홍수량 산정 요령(국토교통부, 2012)」을 제시하였다. 그러나 내륙 지역 기준의 설계인 만큼 제주도 하천에 적용 시 실제 관측 유량과 많은 오차가 발생하는 등 실무 적용에 적합하지 않은 문제점이 발생하였다.

안재현 등(2014)은 국내 약 50여개 지점의 세밀한 강우-유출 자료의 검증 및 최적 매개변수 검정을 실시하여 국내유역의 특성이 현실적으로 반영된 홍수량 산정 방안의 필요성을 강조하였다. Kanak et al.(2015)은 제주 한천유역을 대상으로 도달시간에 대한 연구를 진행하였으며 Clark 단위도법을 활용한 결과 실제 관측 자료와 많은 오차가 발생하여 기존 홍수량 산정 방식의 문제점을 검증하였다. 최종인 등(2015)은 상대적으로 유역면적이 작은 지역에서는 강우-유출 해석 후 연 최대 첨두홍수량 빈도해석방법이 좋은 결과를 나타냄을 검증하였으며 유역의 형상, 경사 등 홍수량 산정에 영향을 주는 인자들에 대한 추가연구를 통하여 합리적인 홍수량 산정방법을 제안하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

1.3 연구 목적

절해고도인 제주도는 하천분포가 한라산 정상을 중심으로 남·북사면 방향으로 급경사를 이루며 발달하고 있으나, 동·서부 지역은 완만한 경사와 평탄한 용암지대로 이루어져 하천 발달이 극히 미약하다. 지방하천 60개와 소하천 83개로 이루어진 하천은 평상시 양호한 투수성으로 인해 대부분 건천형태를 보이고 있으며 기저유출로 인한 상시하천은 9개에 불과하여 내륙지역과는 달리 매우 상이하고 특이한 수문환경을 보이고 있는 특수지역이다. 또한 하천유출은 일정량 이상의 강우에 의해서만 발생하며 하천유출 시 짧은 시간(수 시간~1일 이내)동안 급격한 돌발성 유출형태로 발생한다(Kang and Yang, 2015).

제주도 하천의 하상은 암반 및 자갈로 구성되어 있어 홍수 유출 발생 시 유속이 매우 빠르며 급격한 난류 흐름이 발생한다. 따라서 하천 현장에서의 직접적인 유량관측은 매우 어렵고 위험하며, 기존 내륙지역의 일반적인 유량관측 방법을 그대로 적용할 경우 분명한 한계가 있다. 이뿐만 아니라 대부분의 하천은 평상 시 건천상태이기 때문에 태풍 및 집중호우가 발생할 경우에만 현장관측이 가능하며, 그 횟수도 연간 5~10회 정도에 지나지 않아 하천 유출량 관측이 매우 난해하거나 불가한 특이지역에 해당된다.

제주도는 한라산의 영향으로 인해 고도에 따른 강우편차가 크게 발생하고 있어 강우분석 시 내륙지역에서 주로 활용되는 Thiessen 다각형법을 적용하여 면적강우량을 산정할 경우 문제가 있을 수 있다. 대부분의 하천은 한라산에서 발원하여 바다로 유출되고 있어 고도의 영향을 반영한 면적강우량 산정이 중요하게 된다. 따라서 이 연구에서는 기존 강우 분석방법인 Thiessen에 의한 면적강우량 산정방법과 고도의 영향을 고려할 수 있는 등우선방법을 비교·검토하여 보다 정확한 면적강우량을 산정하였다.

제주도 하천은 화산암반의 높은 투수계수와 숨골 등으로 인해 하천수의 침투와 지하수로의 유입이 활발하여 연속방정식이 거의 성립하지 않는 지역이다. 또한 급속류로 인한 상·하류층의 유속차이와 난류성 흐름 및 사류의 특성이 나타나고 있어 홍수량 관측뿐만 아니라 홍수량 산정도 매우 난해한 지역이다. 특히 직접유출량 산정 시 제주도 유출 특성을 거의 고려하지 않고 수문모형에 의한 유량을 산정하고 있다. 또한, 현장 관측자료의 부재로 인하여 보정 및 검증이 거의 이루어지지 않아

제주대학교 중앙도서관

홍수유출량의 정확도에도 상당한 오차가 발생하는 한계가 있을 수밖에 없다. 그러나 현행의 제주도 유역종합치수계획 및 하천기본계획 등의 치수계획에서는 대부분 국내 내륙지역 기준(하천법, 설계홍수량 산정요령 등)과 수문모형 결과에 의존하여 수립되고 있어 제주도 하천특성을 거의 반영하지 못하고 있는 실정이다.

우리나라 하천법에서는 전국 하천의 수위, 유량, 조도계수 등 유역 및 수문조사의 실시와 수문조사망 구축 등을 제시하고 있으나 제주도는 반영되지 않아 제주도 실정에 적합한 기준 수립 및 시행을 권고하고 있다. 그러나 제주도는 국가하천이 없어 국가적인 수자원 관리 관측망 및 시스템 구축이 전무하며, 기초적인 수문자료의 확보조차도 일부 연구단의 조사 외에는 거의 수행되지 않고 있어, 제주도의 수문특성을 고려한 기준수립 및 시행이 절실히 요구되는 시점이다. 따라서 기 수립된 우리나라 내륙지역 기준의 홍수량 산정방법은 제주도의 수문학적 특성을 제대로 반영하지 못하고 있어 홍수량 분석·평가 시 제주도 특유의 하천현장 관측자료를 기반한 제주형 홍수량 산정법 개발과 현실적인 적용이 필요하다.

이 연구에서는 제주대학교 제주수자원연구단이 제주도 도심하천을 중심으로 현장 관측한 다년간의 수문성분조사 자료를 기반으로 하천의 지형적 특성 및 수문학적 특성을 반영한 홍수량을 산정하였다. 이러한 연구결과는 제주도 유역의 신규 하천기본계획 및 홍수방어대책 수립 시 활용될 수 있으며, 기 수립된 하천치수계획(하천기본계획, 수자원종합계획 등)의 문제점 및 개선방안을 도출하는데 기여 할 수 있다.

제주대학교 중앙도서관

1.4 연구 방법

설계홍수량 산정 시 실무에서는 설계홍수량 산정요령(국토교통부, 2012)을 기준으로 홍수량을 산정하고 있다. 설계홍수량 산정요령은 국내·외 연구방법들을 국내 실정에 맞도록 내륙지역을 기준으로 수립되어 제주도의 유역 및 수문학적 특성은 제외 되었다.

국내에서는 강우 및 홍수량 산정에 관하여 가이드라인으로 제시한 설계홍수량 산정요령(2012)이 수립된 바 있으며 면적강우량 산정 시 Thiessen 다각형법 사용을 권장하고 있다. 그러나 면적강우량은 강우의 공간분포를 정확하게 분석할 수 있어야 하나 기존 방법은 강우의 고도를 고려하지 못하기 때문에 산악지대가 많고 한라산이 중심부에 위치하고 있는 제주도에는 적합하지 않은 것으로 판단된다. 이에 따라 이 연구에서는 산지형 하천에 Thiessen 다각형법과 등우선법을 활용한 면적강우량을 비교·분석하여 고도가 반영된 제주도에 적합한 면적강우량 산정 방법을 평가하고자 한다.

면적강우량 산정 시 일반적으로 사용되는 Thiessen 다각형법과 제주도의 지형(고도)을 고려하기 위한 등우선법 간 면적강우량을 비교·분석하여 강우의 정확도를 비교하였다. 또한 제주도 지형 및 수문학적 특성이 반영된 매개변수를 산정하여 홍수량을 검토하였다.

유역구분에 있어서 제주도 하천은 유역면적이 $250km^2$ 넘지 않아 소·중규모 유역에 해당되지만 경사가 급하고 고도 및 지형특성에 따른 토지이용과 토양도가 명확히 구분되고 있어 소유역 분할 후 홍수량을 비교·검토하였다. 또한 경사가 가파른 유역특성을 고려하여 CN값 결정 시 경사를 고려할 수 있는 식을 적용하여 CN값을 재산정 하였으며, 제주 도심하천에 적용 가능한 신규 도달시간을 산정하여 홍수량을 비교·검토하였다.

산정된 홍수량은 이동식 전자파표면유속계와 고정식 Kalesto로 획득한 현장관측자료와 비교·검증하였으며 다양한 분석 방법 및 매개변수를 적용하여 제주지역에 적합한 홍수량 산정 방법의 개선방안을 제안하였다.

제주대학교 중앙도서관

Fig. 1.1 Flow chart

2. 이론적 배경

2.1 강우관측 장비 및 설치

2.1.1 강우관측 장비

우량계는 일정시간 동안 내린 강우를 용기에 받아서 양을 측정하는 강우관측 장비로 보통유량계와 자기우량계가 있다.

(1) 보통우량계

보통우량계는 구경 20cm의 수수구를 통하여 용기로 들어오는 강우량을 측정하는 장비로 측정 장소에서 멀리 떨어지지 않은 곳에서 간단하게 측정할 수 있다.

(2) 자기우량계

자기우량계는 측정 장소에서 멀리 떨어진 곳에서 강우량을 자동계측하기 위한 장비로 수수량이 회전축을 중심으로 좌우로 전도되는 용기에 사용된다. 용기 속의 빗물이 증가하면 반대쪽으로 전도되게 되어 있다. 전도될 때마다 계전기를 껐다 켰다 할 수 있기 때문에 그 횟수를 측정함으로써 우량을 원격 계측할 수 있다. 자기우량계는 대표적인 전도형 자기우량계, 부자형 자기우량계 이외에도 저수형 자기우량계, 청량형 자기우량계, 단위시간의 강우강도를 측정하는 장비 등이 있다.

제주대학교 중앙도서관

① 전도형 자기우량계

수수구(물받이)를 통하여 유입된 일정량의 빗물이 수수컵에 고여 저수조로 배수되며, 이때 전도횟수를 전기신호로 바꾸어 강우량을 기록하는 장치이다.

② 부자형 자기우량계

수수구로 들어온 비가 실린더에 차오를 때 부자가 상승하여 연결된 펜이 움직이며 자기 회전시계가 방안지를 일정속도로 회전시킴으로써 회전드럼의 기록지에 강우량의 시간적 변화를 기록하는 장치이다.

2.1.2 강우관측 장비 설치 기준

강우관측 장비는 다우지역이나 과우지역에 관측망이 집중되지 않고 유역의 공간적 및 지역적 분포 특성 등을 고려하여 설치되어야 하며 유역을 대표할 수 있는 관측망을 운영해야 한다.

우량관측소 설치 시 수계를 고려한 효과적인 관측이 이루어질 수 있도록 유역면적의 크기, 강수형태, 지형특성 등 평면 배치와 표고차를 고려해야 하며 강수 발생 상황을 표현할 수 있는 지점이어야 한다. 특히 지형이 협소하여 풍향·풍속이 특수한 값을 나타내지 않고 바람의 영향으로 특수한 강수상황을 나타내지 않는 곳이어야 한다.

강수계측망 구축 시 다우지역이나 과우지역에 치우쳐 배치하지 않고 유역에 내리는 지역적 분포를 고려할 수 있도록 계획해야 한다.

홍수 예·경보 등을 위한 자료를 수집하기 위해서는 관측밀도를 높게 해야 하며 댐이 설치된 유역과 같이 중요한 구역에서는 관측소를 기준밀도보다 조밀하게 배치해야 한다. 도시하천 등에서는 50 km^2 당 2개 관측소 이상의 설치를 권장하고 있다(하천설계기준 및 해설, 국토해양부, 2009).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.2 유역평균 강우량 산정

일반적으로 언급되는 강우량은 우량관측소에서 관측되는 지점 강우량을 의미하며, 수문분석 시 지점 강우량이 아닌 면적평균 강우량으로 변환하여 이용한다. 면적평균 강우량은 가중된 강우량의 합에서 가중치를 어떻게 부여하는지에 따라 산정방법이 달라지게 되며 산술평균법, 티센다각형법, 등우선법이 있다.

2.2.1 산술평균법

면적 평균강우량을 산정하는 방법 중 가장 간단한 방법으로 유역 내 강우량 자료를 산술평균하는 방법으로 각 관측소마다 동일한 가중치(1/n)를 부여하여 평균강우량을 산정한다.

$$P_m = \frac{P_1 + P_2 + \cdots + P_n}{n} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_i \qquad \text{(식 2.1)}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

여기서 P_m은 유역의 평균강우량, $P_1, \cdots, P_n$은 유역 내 n개 관측소에서 관측된 강우량을 의미한다.

2.2.2 티센다각형법

티센다각형법은 국내 실무에서 일반적으로 사용하는 방법이며, 각 관측소에서 관측된 강우량에 해당 유역 내 관측소 주위로 작도한 티센다각형의 면적 비를 가중치로 부여하여 면적평균 강우량을 산정하는 방법이다.

$$P_m = \frac{A_1P_1 + A_2P_2 + \cdots + A_nP_n}{A_1 + A_2 + \cdots + A_n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_iP_i}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \qquad \text{(식 2.2)}$$

여기서 P_m은 유역의 평균강우량, $P_1, \cdots, P_n$은 유역 내 n개 관측소에서 관측된 강우량, $A_{1,\ \cdots,}A_n$은 각 관측점의 지배면적이다.

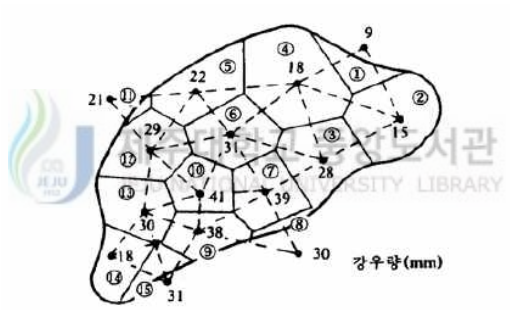


Fig. 2.1 Thiessen polygon method

티센다각형법은 각 관측소마다 지배면적을 가중치로 부여하여 평균강우량을 구하게 된다. 이 방법은 유역 내 우량관측소의 상대적인 위치와 관측망의 상대적인 밀도 등을 고려하고 있어 산술평균법보다 좋은 결과를 보이나 고도에 따른 강수의 변화는 고려하지 못한다.

2.2.3 등우선법

등우선법은 각 우량관측소에서 관측된 강우자료와 관측소 사이의 강우량을 보간하는데 필요한 정보를 이용하여 등우선을 작도한 후 등우선 간의 면적을 구하여 유역의 평균강우량을 산정하는 방법으로 산악효과를 고려할 수 있다. 등우선 작도 시 강우는 고도와 밀접한 관계가 있기 때문에 등고선 자료는 중요한 정보가 된다. 등우선간 평균강우량에 등우선간 면적을 가중치로 부여함으로써 전 유역의 평균강우량을 산정할 수 있다.

이 방법은 면적을 가중인자로 한다는 점에서 티센다각형법과 유사하나 관측된 강우량에 직접 가중치를 부여하지 않고 등우선간 평균강우량에 면적 가중치를 부여한다는 점에서 차별성이 나타난다.

$$P_m = \frac{A_1 P_{1m} + A_2 P_{2m} + \cdots + A_n P_{nm}}{A_1 + A_2 + \cdots + A_n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A_i P_{im}}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \qquad (식\ 2.3)$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

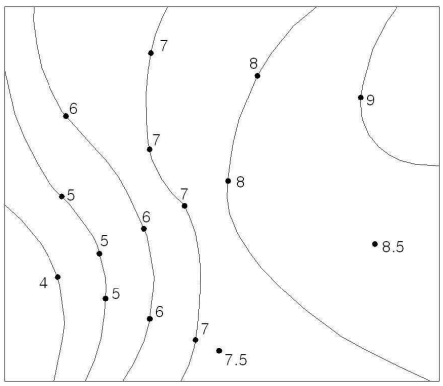


Fig. 2.2 Isohyetal method

여기서 P_m은 유역의 평균강우량, P_{im}은 두 인접 등우선간 면적에 대한 평균강우량, n은 등우선에 의해 구분되는 면적구간의 수, $A_{1,\ldots,}A_n$은 등우선에 의해 구분되는 면적이다.

2.3. Kriging 기법

2.3.1 Kriging

크리깅(Kriging)은 자료 점들 사이의 공간거리에 따라 변화하는 비율로 어떤 특정위치에서의 데이터 값이 추정될 수 있는 것이다. 즉, 어떤 특정 위치에서의 값은 주변에 위치한 값들과 서로 관계하고 있기 때문이다. 즉, 관심 있는 지점에서 특성값을 이미 알고 있는 주위 값들의 가중선형 조합으로 예측하는 방법으로서 가중치는 일반적으로 예측오차를 최소로 하면서 추정식이 편향되지 않도록 결정한다. 이를 위해 공간적 상관관계를 나타내는 베리오그램이 사용되며 분리거리에 따라 공분산을 계산한다.

크리깅 모형으로 자료를 분석하기 위해서는 우선 관심 있는 변수의 표본공간을 정의하는 것이 필요하다. 이때 표본공간은 정상성(stationarity)을 가져야 하며 그렇지 않은 경우는 그 변화양상을 고려하여 비정상성을 만족하는 모형을 연구해야 한다. 정상성은 시계열 모형을 고려하는 관점에서 적용 가능한 시계열 모형이 많기 때문에 시계열 모형 중에서 어떤 특정한 성질을 갖는 일부만을 고려해 보자는 취지에서 나온 개념이 정상성 개념이다. 이러한 정상성 개념을 만족한다는 것은 공간데이터는 추세가 없고, 공분산은 거리 h 에만 의존하는 함수라는 것이다(Choi, 2008).

크리깅 예측을 위해 정의된 표본공간 내에서 얻을 수 있는 모든 자료를 얻어 경험적 베리오그램(Variogram)을 계산한다. 베리오그램은 일정한 거리에 있는 자료들의 유사성을 나타내는 척도로 일정거리만큼 떨어진 두 자료들의 간의 차이를 제곱한 것의 기댓값이다. 거리가 가까우면 그 값들이 비슷하므로 베리오그램은 일반적으로 작게 나타나고 거리가 멀어질수록 그 값이 크게 나타난다.

경험적 베리오그램이 계산되면 이를 가장 잘 묘사하는 이론적 베리오그램을 구한다. 마지막으로 최종적으로 선택된 이론적 베리오그램과 관측된 자료를 이용하여 크리깅 모형으로 원하는 미계측 지점에서의 공간예측 값을 생성하고 예측오차를 파악한다.

지구통계학적 방법 중 최선의 선형불편추정자(Best linear unbiased estimator)인 크리깅은 1960년 말에 개발되어 현재는 자료의 형태 및 유형에 따라 선택이 가능한 다양한 종류의 방법들이 개발되어 있다.

제주대학교 중앙도서관

(1) Simple Kriging(SK)

크리깅은 관측된 값일 이용하여 가중선형 조합으로 미계측지역의 근사치를 예측하는 방법이다. 가중치는 예측오차를 최소화 하면서 추정식이 편향되지 않도록 결정하는데, 이를 위해서 공간적 상호관계를 나타내는 베리오그램이 사용되고, 거리에 따라 공분산이 계산된다. 크리깅 모형으로 미지의 값을 예측하기 위해서는 반드시 가중치를 알아야 한다. 가중치를 구하는 방법에는 여러 가지가 있는데 단순히 예측오차를 최소로 하는 가중치를 구하여 미지값을 예측하는 경우를 단순크리깅(SK)이라 한다. 이미 값을 알고 있는 n개의 자료 값을 이용하여 단순크리깅에 의한 특정 지점에서 변수 z의 선형 추정값 z_o^* (식 2.4)과 오차분산 (식 2.5)은 다음과 같다.

$$z_o^* = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i z_i \qquad \text{(식 2.4)}$$

$$\sigma_{SK}^2 = E[(z_o - z^{*}{}_{o})^2] \qquad \text{(식 2.5)}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

여기서 z_o는 예측하고자 하는 참값, z_o^*는 단순크리깅에 의한 예측값, i=1, …, n은 z_o를 둘러싼 상관영역 내 n개의 측정치이며, λ_i는 가중치이다. 그리고 n은 사용한 자료의 총 개수이다. σ_{SK}^2은 오차분산을 나타내며, 이를 최소로 하는 가중치들을 결정한다. z_o는 x_o위치에서의 특성 값으로 $z(x_o)$를 간단히 표시한 것이다. 오차분산은 참값과 예측 값의 차이의 제곱에 대한 기댓값으로 정의되며 가중치의 함수이다. 즉, z가 이차정상성을 가진다는 가정 하에 z^* 는 각각의 z_i와 동일한 평균값을 가지며, 참값 z_o에 대해 가능한 최소분산을 갖는다는 두 조건을 만족시키는 λ_i을 유도한다.

(2) Ordinary Kriging(OK)

단순크리깅(SK)은 오차분산을 최소로 하는 가중치를 구하여 주위의 알려진 값들의 선형조합으로 미지의 값을 예측하는 방법이다. 하지만 단순크리깅 추정식은 편향되어 추정식의 평균이 모집단의 평균과 일치하지 않는다는 문제점이 있다. 이를 극복하기 위해 크리깅 추정식이 편향되지 않으면서 오차분산을 최소로 하는 크리깅을 정규크리깅(OK)이라 한다.

크리깅 식에 사용된 모든 자료는 실제 주어진 자료이므로 동일한 평균값을 가지게 된다. 또한 크리깅 식이 항상 편향되지 않기 위해서는 가중치의 합이 1이 되어야 한다. 정규크리깅(OK)은 오차분산을 최소로 하고 편향되지 않는 추정치를 만들기 때문에 BLUE(best linear unbiasedestimator)라고도 한다. 대부분의 경우 단순크리깅의 오차분산이 더 작은 값을 나타내는데 이는 아무런 제약조건 없이 구한 최소값이 제약조건을 만족하는 최소값보다 작기 때문이다.

(3) Universal Kriging(UK)

일반크리깅(UK)은 크리깅모형 적용시 공간적으로 변하거나 특정한 경향을 갖는 모형에서 공간적 추세를 제거한 후 잔차를 통해 공간모형을 재구축하는 방법이다. 일반크리깅도 주위에 알려진 자료들의 선형조합을 이용하여 미지값을 예측한다. 단지 불변성을 만족하지 않고 변화하는 경향을 고려하기 위한 수학적 기법이 가미된 가장 일반화된 크리깅 모형이다. 만약 평균이 임의로 변화한다면 이를 기술할 수 있는 실제적인 방법이 없다. 따라서 일반크리깅을 적용하기 위해서는 그 평균을 알 수 없지만 공간적으로 부드럽게 변화한다고 가정한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

중요한 점은 자료 값이 위치에 따라 변화하는 경향은 알 수 없지만 그 경향을 나타내는 기본적인 함수(functionality)는 알고 있다는 것이다. 일반크리깅은 주어진 자료 값이 일정한 경향을 나타내는 경우에도 사용할 수 있는 장점이 있다. 하지만 구체적 모델링을 위해 많은 계산을 요구한다는 단점을 가지고 있다. 또한 자료 값의 경향을 결정하는데 주관적인 판단이 필요하다.

(4) Cokriging(CK)

두 가지 이상의 변수의 선형조합을 사용하여 자료가 알려지지 않은 지점의 값을 예측하는 크리깅을 Cokriging(CK)이라 한다. 이때 예측하고자 하는 변수를 주변수라하며, 주변수가 아닌 변수를 이차변수라한다. 이차변수는 여러 개가 될 수 있으며, Cokriging의 일반식은 다음과 같다(식 2.6).

$$z^* = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i z_i + \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{K=1}^{m_j} \lambda_{jk} u_j(x_{jk}) \qquad \text{(식 2.6)}$$

여기서 z는 주변수, n은 사용된 주변수의 총 표본수, n_s는 사용된 이차변수의 총 갯수, u_j는 j번째 이차변수, m_j는 j번째 이차변수의 총 표본수, λ는 가중치, x는 각 자료의 이치이다. 따라서 주변수 값을 예측하기 위하여 총 (n_s+1)의 변수와 $(n+n_s{*}m_j)$개의 자료가 사용된다.

공동크리깅은 주변수의 양은 적고 이차변수의 양은 많을 때 사용되며 대개의 경우 이차변수는 정확도가 떨어진다. 하지만 두 변수는 반드시 공간적 상호관계가 있어야 하며 공동크리깅을 통해 이차변수들을 사용함으로 불확실성을 줄일 수 있다. 공동크리깅을 사용하기 위해서는 반드시 각 변수들에 대한 베리오그램이 있어야 하고, 주변수와 각 이차변수들 사이의 교차 베리오그램이 필요하다. 각 베리오그램의 모델링도 많은 시간과 노력을 필요로 하는데 모든 교차 베리오그램이 양의 정부호를 만족하도록 모델링하는 것은 쉬운 작업이 아니다. 따라서 특별한 경우를 제외하고는 주변수와 하나의 이차변수를 사용하여 공동크리깅을 하는 경우가 대부분이다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(5) Empirical Bayesian Kriging(EBK)

Empirical Bayesian Kriging은 크리깅 기법을 적용하는데 세미 베리오그램(Semi Variogram)을 추정하고 보간 하는 지리통계기법이며, 세미 베리오그램은 지리통계학적 분석에서 관측치 간의 공간적인 특징의 베리오그램을 나타내는 그래프이다(Lee와 Son, 2016).

세미 베리오그램의 변수는 제한 최우도 방법(Restricted Maximum Likelihood, REML)을 적용하여 일부 데이터로부터 추정된다. 추정된 세미 베리오그램을 이용하여 새로운 데이터를 시뮬레이션하고, 시뮬레이션 된 결과를 이용하여 새로운 세미 베리오그램을 추정하는 방법이다(Chiles와 Delfiner, 1999). 단순크리깅 및 정규크리깅 등의 일반적인 크리깅 기법에서는 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해 변수를 조정하여 관측 값과 유사하도록 보정하고, 미지의 값을 예측한다. 그러나 EBK은 시뮬레이션을 통해 변수를 자동으로 보정하여 관측 값과의 높은 상관성을 도출하고, 미지의 값을 예측하여 비교적 신뢰도가 높은 방법이다(Gribov와 Krivoruchko, 2012).

2.3.2 Inverse Distance Weighted

역거리가중치 보간법(IDW)은 토블러의 법칙(Toble's Law of Geography)을 이용한 방법으로 관측지점과 인접지점 사이의 거리에 따라 가중치를 부여하는 내삽방법이다. 특히, 가까이 있는 실측값에 더 큰 가중 값을 주어 선형가중이동평균을 하여 보간하는 방법으로 거리가 가까울수록 높은 가중 값이 적용된다. 토블러의 법칙은 인접한 지점들의 공간특성은 멀리 떨어져 있는 지점에 비해 유사성이 있음을 보여주고 있다. 일반적으로 가중치는 거리의 역수에 대한 거듭제곱을 사용하며, 내삽지점 주위로 일정 기준에 따라 내삽 및 연속면 생성을 수행한다. IDW의 가장 단순한 형태는 Shepard기법(shepard, 1968)으로 내삽지점의 값을 도출하는 식은 다음과 같다(식 2.7).

$$\hat{Z}(x_j) = \frac{\sum_{i=1}^{n} Z(x_i) d_{ij}^{-p}}{\sum_{i=1}^{n} d_{ij}^{-p}} \qquad \text{(식 2.7)}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

여기서 x_j는 미지점으로 인접한 관측점들을 통해 추정하고자 하는 점, x_i는 관측지점의 관측 값, d_{ij}는 내삽지점과 관측지점 간의 거리, p는 가중치이다.

IDW는 구역 내의 자료 값에 가중치를 거리에 반비례하여 적용하는 보간법으로 계산과정이 다른 보간법에 비해 비교적 간소하면서 정확도가 높은 값을 산출 할 수 있다. 하지만 보간 수행과정에 활용하는 관측점의 분포에 따라 미지점의 추정치가 결정되기 때문에 얼마만큼의 관측점 수를 적용해서 보간 해야 하는지, 인접한 관측점이 미지점에서 최대 얼마만큼 떨어져 있는지 입력 변수 값의 선정에 어려운 경우가 많으며, 최소측정값 또는 최대측정값을 예측하지 않는 한계점이 있다. 따라서 IDW보간법을 적용 시에는 자료의 특성, 관측 자료의 정확도 등 분석에 영향을 미치는 요소를 고려하여 적절한 표본을 추출하고, 거리를 설정해야 한다.

IDW는 관측값이 밀집된 경우에 적절한 방법이며 표본의 선형가중조합(Liner Weighted Combination)으로 임의 지점의 값을 산정하며, 표본에서 거리가 멀수록 결과에 미치는 영향력은 작아진다.

2.3.3 Spline

Spline기법은 곡선 또는 표면의 집합을 설명하기 위하여 국부적으로 정의된 p차 다항식들에 기초한 공간예측기법으로 다항식들은 관측치에 대하여 접합되어 서로 부드럽게 연결되며, 다항식에 대한 $p-1$차 도함수는 연속이 된다. knot는 부분 곡선 또는 표면들이 연결되는 지점으로서 knot는 임의적으로 부여되고 Spline은 자료를 통과하도록 제약조건을 설정할 수 있다. 관측점에서 떨어진 knot를 선택하고 최소제곱법 (leastsquares)또는 기타 방법을 이용하여 부드러운 Spline곡선 또는 표면을 생성할 수 있다. 일반적으로 Spline의 차수 (degree)는 3을 사용하며, 이것을 3차 Spline(Cubicspline)이라고 한다(Webster and Oliver,2001). 따라서 보간하는 함수의 첫 번째 미분항이 없거나 계산될 수 없을 때 활용하는 것이 효과적이다. Spline보간법은 부분적으로 급격히 변하는 함수의 변화에 대해 높은 정확도의 추정 값을 제공하지만 구역별로 데이터에 대한 함수식을 가지고 있어 하나의 단일함수로 표현은 불가능하며 이에 따라 낮은 차수로의 다항식으로 제한된다.

Spline보간법은 전체 구간을 소구간 별로 나누어 저차수의 다항식으로서 완화 표면에 가장 적절하며, 눈에 띄는 급격한 변화를 보이는 표면에 대해서는 보간이 잘 되지 않으며, 선형보간이기 때문에 해안선과 장벽이 있을 시에 보간이 되지 않는다. 또한 Spline보간법은 일반 표면 보간에서 많이 사용되며 최소허용범위에 기초한 선택된 선을 완화하거나 일반화 하는데 사용된다.

제주대학교 중앙도서관

2.4 유효우량 산정

유효우량은 총 강우량 중에서 직접유출에 기여하는 부분으로 증발, 침투 등 강우 손실분을 총 강우량에서 제외한 것이다. 단위도를 이용하여 직접유출수문곡선 계산 시 설계우량의 시간분포에서 침투에 의한 손실량을 제외하는 방법으로 산정한다.

국내에서는 유효우량 산정 시 미자연자원보존국(NRCS)에서 개발한 유출곡선지수 방법(runoff curve number method)을 채택하고 있다. 이 방법은 유출곡선지수(CN)를 산정한 후 총강우량-유효우량 관계 모형을 이용하여 유효우량을 산정할 수 있다.

2.4.1 SCS 방법에 의한 유효우량 산정

유효우량 산정을 위한 SCS방법에서 유출곡선지수(CN)는 대상유역의 토지이용상태, 식생피복처리상태, 수직배수 능력을 나타내는 수문학적 조건 및 토양군의 종류 등에 따라 결정된다.

제주대학교 중앙도서관

SCS 유효우량 산정법에서의 토지이용상태는 크게 재배농경지, 기타농경지, 도시지역으로 구분하고 있으며, 식생피복의 처리상태는 직선열 경작지, 등고선 경작지, 테라스식 경작지로 구분하고, 수문학적 조건은 수직배수가 불량하여 유출률이 높은 불량(poor), 수직배수가 보통이어서 유출률이 중간인 보통(fair), 수직배수가 양호하여 유출률이 낮은 양호(good)로 구분하고 있다.

토지이용상태, 피복처리상태, 수문학적 조건 및 토양군에 따른 미국 SCS의 유출곡선지수 산정 기준은 농경지역은 Table 2.1, 도시지역은 Table 2.2와 같다. 이와 같은 유출곡선지수는 선행함수조건인 AMC-Ⅱ 조건이므로 실제 분석에 적용할 경우에는 AMC-Ⅲ 조건 등으로 변환하여 사용하여야 한다.

Table 2.1 The runoff curve number of the agricultural area of the US SCS (AMC II)

토지이용상태	피복처리상태	수문학적 조건	토양군			
			A	B	C	D
휴경지(fallow)	직선열 경작(straight row)	-	77	86	91	94
이랑경작지 (row crops)	직선열 경작 (straight row)	불 량	72	81	88	91
		양 호	67	78	85	89
	등고선 경작 (contoured)	불 량	70	79	84	88
		양 호	65	75	82	86
	혼합식 경작 (contoured & terraced)	불 량	66	74	80	82
		양 호	62	71	78	81
조밀경작지 (small grains)	직선열 경작 (straight row)	불 량	65	76	84	88
		양 호	63	75	83	87
	등고선 경작 (contoured)	불 량	63	74	82	85
		양 호	61	73	81	84
	혼합식 경작 (contoured & terraced)	불 량	61	72	79	82
		양 호	59	70	78	81
조밀식재 콩과식물경작지(close-seeded legumes) 또는 윤번초지(rotation meadow)	직선열 경작 (straight row)	불 량	66	77	85	89
		양 호	58	72	81	85
	등고선 경작 (contoured)	불 량	64	75	83	85
		양 호	55	69	78	83
	혼합식 경작 (contoured & terraced)	불 량	63	73	80	83
		양 호	51	67	76	80
자연목초지(pasture) 또는 목장(range)	가축 방목을 위한 초지	불 량	68	79	86	89
		보 통	49	69	79	84
		양 호	39	61	74	80
초지(meadow)	등고선 경작	양 호	30	58	71	78
수림(woods)	마을에 가까운 조성림 등이 해당	불 량	45	66	77	83
		보 통	36	60	73	79
		양 호	25	55	70	77
농가(farmsteads)	불투수면적 약 30% 정도	-	59	74	82	86
수면(water surface)	하천, 호소	-	100	100	100	100

제주대학교 중앙도서관 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 2.2 The runoff curve number of the urban area of the US SCS (AMC II)

토지이용상태	피복처리상태	수문학적 조건	토양군			
			A	B	C	D
개활지 (open space)	잔디, 공원, 골프장, 묘지 등	불량	68	79	86	89
		보통	49	69	79	84
		양호	39	61	74	80
도시지구 (urban districts)	상업 및 사무실지역 (불투수면적 85%)	-	89	92	94	95
	공업지역 (불투수면적 72%)	-	81	88	91	93
주거지구 (residential districts)	소구획 500m² 이하 (불투수면적 65%)	-	77	85	90	92
	소구획 500m²~1,000m² (불투수면적 38%)	-	61	75	83	87
	소구획 1,000m²~1,320m² (불투수면적 30%)	-	57	72	81	86
	소구획 1,320m²~2,000m² (불투수면적 25%)	-	54	70	80	85
	소구획 2,000m²~4,000m² (불투수면적 20%)	-	51	68	79	84
	소구획 4,000m²~8,000m² (불투수면적 12%)	-	46	65	77	82
도로 (streets & roads)	포장도로 및 가로	-	98	98	98	98
	포장 : 연석아래 우수관거설치	-	83	89	92	93
	포장 : 개거, 자갈도로	-	76	85	89	91
	흙도로	-	72	82	87	89
불투수지역 (impervious area)	포장된 주차장, 지붕, 접근도로	-	98	98	98	98
개발중인 지역 (developing area)	택지개발, 단지개발 등	-	77	86	91	94

제주대학교 중앙도서관 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(1) SCS 유출곡선지수 적용의 문제점

미국 SCS의 유출곡선지수 결정 기준을 우리나라에 적용함에 있어서 발생되는 주요 문제점은 다음과 같고 이에 대한 개선 방안이 필요하다.

- 직파재배가 아닌 담수재배하는 논에 대한 CN 기준 미제시
- 우리나라의 많은 면적을 차지하고 있는 산림에 대한 CN 기준 미포함
- 우리나라 토지이용 형태에 적합한 미국 SCS 기준의 토지이용상태와 피복처리상태의 조합을 선택할 수 있는 기준 미흡
- 초기손실이 최대잠재보유수량의 20%인 관계로 고정($I_a = 0.2S$)되어 있어 제주도와 같은 투수성 지반에는 별도 기준 필요

(2) 유출곡선지수 산정

우리나라의 경우 국토지리정보원에서 제공하는 수치토지이용도 및 환경부에서 작성한 수치토지피복도 등을 활용하여 토지이용상태를 고려한 유출곡선지수를 산정할 수 있으나, SCS 분류방법과 우리나라 수치도의 분류 기준이 정확히 일치하지 않으므로 유사기준을 적용하고 수문학적 조건 또한 판단기준이 명확하지 않아, 설계안전 차원에서 유출률이 높은 불량(poor) 조건을 주로 채택하고 있으므로, 추후 관련 연구성과 또는 수위 관측지점에서의 검·보정을 통하여 보완할 필요가 있다.

(3) 토양군 분류

수문학적 토양군은 A, B, C, D 4개 종류로 분류되며 토양군별 침투능의 크기는 A, B, C, D 순이므로 유출률은 반대로 D, C, B, A 순이다.

우리나라의 경우 토양군별 면적 구분에는 일반적으로 농림부 산하 농업과학기술원에서 제작한 축척 1:25,000 이상인 수치화된 정밀토양도를 사용하고 있으며, 우리나라 전역에 산재하여 있는 토양 종류는 약 1,200여 가지로 조사된 바 있고, 각각 토양부호 및 개별 토양부호별로 수문학적 토양형(A, B, C, D) 중의 하나로 분류되도록 되어 있다.

Table 2.3 Classification of hydrologic soil group

토 양 형	토양의 성질	침투율(mm/hr)
Type A	침투율이 매우 크며, 자갈이 있는 토양	7.62 ~ 11.43
Type B	침투율이 대체로 크고, 자갈이 섞인 사질토	3.81 ~ 7.62
Type C	침투율이 대체로 작고, 세사질 토양층	1.27 ~ 3.81
Type D	침투율이 대단히 작고, 점토질 토양층	0.00 ~ 1.27

2.4.2 유출곡선지수(CN) 결정

(1) 논의 유출곡선지수

우리나라 논의 경우 홍수기에 담수상태이므로 「논의 유출곡선번호 추정(임상준 등, 한국수자원학회 논문집, 제30권 제6호, 1997.8)」에서 제시한 바와 같이 토양군에 관계없이 CNⅡ(AMC-Ⅱ 조건)를 79로 적용한다.

기존 「하천정비기본계획수립 및 하천대장작성 업무처리요령(건설교통부, 2001)」에서 AMC-Ⅱ의 78을 제시한 결과 실무에 혼선을 초래하였으나, 향후 79로 통일하여 적용하는 것이 필요하다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(2) 산림의 유출곡선지수

미국 SCS 유출곡선지수 기준에는 주거지 인근 숲인 수림(woods)은 제시되어 있는 반면 자연하천유역의 많은 면적을 차지하고 있는 산림(forest)의 경우 제시되지 않고 있다.

산림의 유출곡선지수는 미국 산림청(U.S. Forest Service)에서 제시한 방법에 따라 부식토의 깊이(humus depth, H) 및 압밀정도(compactness factor, C)에 따라 Fig. 2.3에서 산림의 수문학적 조건의 등급(hydrologic condition class, HC)을 결정하고, Fig. 2.4에서 산림의 수문학적 조건의 등급별, 토양군별 유출곡선지수를 산출한다.

지금까지 우리나라 실무에서는 산림의 수문학적 조건의 등급을 유출이 가장 높은

HC=1을 대부분 적용하여 왔으나 이는 현재 우리나라의 산림의 조건과 차이가 크므로 개선이 필요하다. 우리나라는 분석대상 유역 산림의 수문학적 조건의 등급을 제대로 결정할 수 없는 실정이므로 실무적으로 적절한 기준을 제시하고 있다.

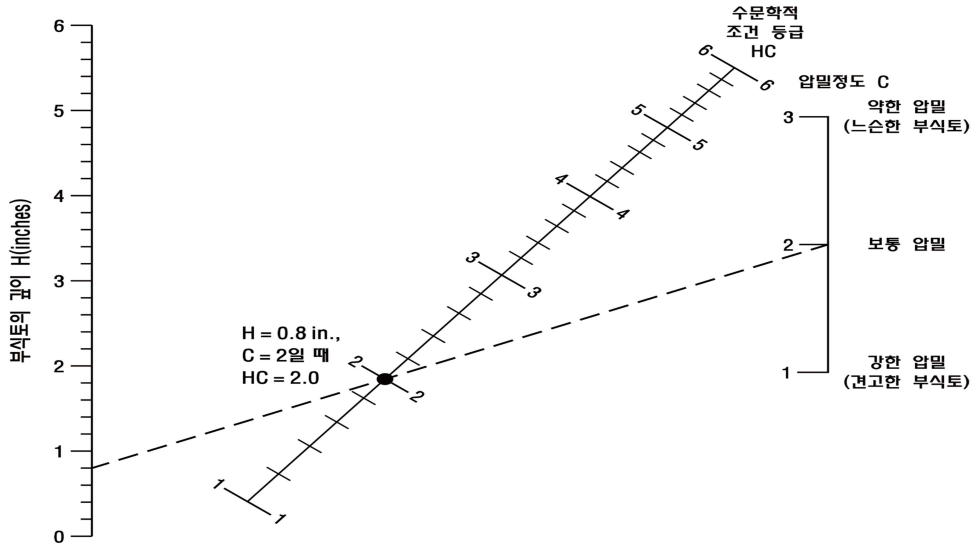


Fig. 2.3 Determine the assessment of the forest's hydrologic condition class

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

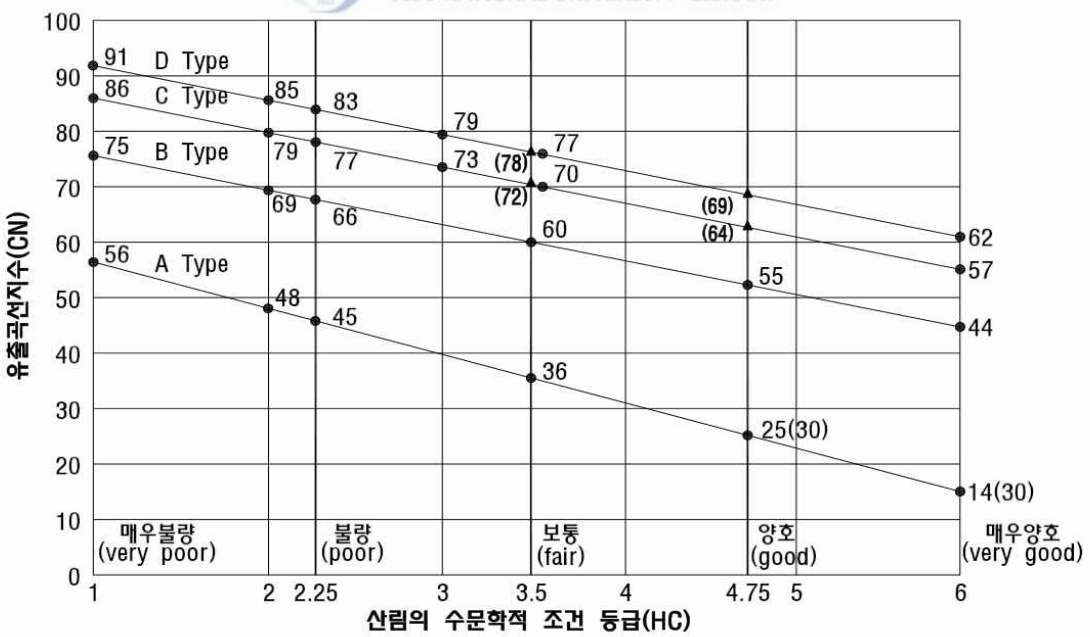


Fig. 2.4 Curve Number decision based on evaluation of forest hydrologic condition

미국 SCS에서 제시하고 있는 기준을 살펴보면 산림(forest)과 상대적으로 유사한 수림(woods)이 있으며, 우리나라는 설계안전 차원에서 수문학적 불량(poor) 조건을 채택하고 있으며 이 경우의 유출곡선지수가 Fig. 2.4에서 산림의 수문학적 조건 등급 HC =2.25로 나타나고 있음을 알 수 있다.

이를 토대로 산림의 유출률이 수림보다 상대적으로 높은 점 등을 감안한다면 산림의 수문학적 조건 등급(HC)은 수림보다 유출률이 높은 조건을 적용하는 것이 필요하며 또한, 유출률이 가장 높은 HC=1은 지나치게 과대한 점 등을 고려하여 산림의 수문학적 조건 등급 HC=2를 적용하는 것을 원칙으로 한다. 산림의 수문학적 조건 등급 HC=2를 적용할 경우 산림의 유출곡선지수는 A Type 48, B Type 69, C Type 79, D Type 85이다.

(3) 선행토양함수 조건에 따른 유출곡선지수 조정

대상 유역에 동일한 강우가 내릴 때 선행강우가 존재할 경우 토양이 함유하고 있는 수분이 많기 때문에 침투는 감소하게 되며 유출율은 높아지게 된다. 이처럼 선행강우는 총강우량과 유효우량 분석에 있어 중요한 역할은 하며 NRCS방법에서는 주로 5일 선행강우를 적용하고 있다.

NRCS방법에서는 선행토양함수조건을 성수기와 비성수기로 구분하고 있으며 5일 선행강우량의 크기에 따라 AMC 조건을 결정하고 있다.

Table 2.4 Antecedent moisture condition

AMC	선행토양수분상태	5일 선행강우량 P_5 (mm)		토양 수분 (%)
		성수기	비성수기	
I	토양이 건조한 상태로 유출율이 낮은 상태	$P_5 < 35.56$	$P_5 < 12.70$	10
II	토양의 수분과 유출율이 보통인 상태	$35.56 \leq P_5 < 53.34$	$12.70 \leq P_5 < 27.94$	50
III	선행강우로 인하여 토양이 포화상태로 유출율이 높은 상태	$P_5 \geq 53.34$	$P_5 \geq 27.94$	90

제주대학교 중앙도서관

NRCS방법에서 제시하는 토양의 종류 및 토지이용상태에 따른 CN값은 선행토양함수조건 AMC-Ⅱ이며 유효우량을 산정하기 위해서는 실제 AMC 조건에 맞도록 CN값을 조정해야 한다. AMC-Ⅱ 조건의 CNⅡ를 AMC-I 또는 AMC-Ⅲ 조건의 CN으로 변경하기 위해서는 아래 식을 사용하면 된다.

$$CN(I) = \frac{4.2\,CN(II)}{10 - 0.058\,CN(II)} \qquad \text{(식 2.8)}$$

$$CN(III) = \frac{23\,CN(II)}{10 + 0.13\,CN(II)} \qquad \text{(식 2.9)}$$

선행토양함수조건은 설계안전을 고려하여 유출률이 가장 높은 AMC-Ⅲ 조건을 적용하여 CNⅢ를 채택한다.

예외적으로 제주도와 같은 특수한 지형(숨골, 곶자왈 등 투수성 지층)에는 CNⅡ를 채택하고 아울러 초기손실도 Ia=0.2S에서 대폭 상향 조정(Ia=0.4S 이상)하는 방법을 도입하는 것이 바람직하다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(4) 국내 토지이용 분류 기준 및 유출곡선지수 결정

미국 SCS 기준의 토지이용상태와 피복처리상태의 조합에서 우리나라 토지이용형태에 적합한 조건을 채택하는 기준이 모호하므로 이에 대한 명확한 기준을 제시하는 것이 필요하다.

우리나라에서 유출곡선지수 산정에 활용 가능한 토지이용현황 자료는 국토해양부 산하 국토지리정보원에서 제공하는 수치토지이용도와 환경부 산하 정보화담당관실에서 제공하는 수치토지피복도 등이 있다.

우리나라 수치토지이용도와 미국 SCS 방법의 토지이용분류 기준을 비교하면 Table 2.5와 같고, 수치토지피복도와 수치토지이용도의 분류기준을 비교하면 Table 2.6 같다.

미국 SCS의 유출곡선지수와 토지이용 분류기준을 종합적으로 고려하여 수치토지이용도 및 수치토지피복도의 분류기준별 유출곡선지수를 결정할 수 있는 기준인 우리나라 토지이용 분류기준에 따른 유출곡선지수 기준을 Table 2.7과 같이 제시하였다.

Table 2.5 Comparison of land use classification between Korea and SCS

지역구분	중분류	세분류	SCS분류	비 고
농경지역 및 산림지역	논	- 경지정리답 - 미경지정리답		
	밭	- 보통·특수작물 - 과수원, 기타	- row crops(이랑 경작지) - small grains(조밀 경작지)	
	초지	- 자연초지 - 인공초지	- close-seeded legumes or rotation meadow(조밀식재 콩과식물 또는 윤번초지) - pasture or range(자연목초지 또는 목장) - meadow(초지)	
	임목지	- 침엽수림 - 활엽수림 - 혼합수림	- forest(산림)	
	주거지 및 상업지	- 나대지 및 인공녹지	- woods(수림)	
	교통시설	- 도로 - 철도 및 주변지역	- roads(도로)	
도시지역	임지 (기타)	- 골프장 - 공원묘지 - 문화재 및 유원지 - 암벽 및 석산	- 개활지(잔디, 공원, 골프장, 공원묘지)	
	교통시설	- 도로 - 철도 및 주변지역	- 도로와 길 - 불투수지역(주차장, 지붕, 접근로)	
	주거지 및 상업지	- 일반주택지 - 고층주택지 - 상업 및 업무지	- 주거지(500 m^2 이하) - 도시지역(상업 및 사무실지역)	
	공업지	- 공업용지 - 공업나지, 기타	- 공업지역	
	공공시설	- 발전시설 - 처리장 - 교육군사시설 - 공공용지	- 주거지역(1,000 m^2 이상)	

수문학(청문각, 2008)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 2.6 Comparison of land cover and land use classification

수치토지피복도 (23단계, 환경부)		수치토지이용도 (37단계, 국토해양부)		수치토지피복도 (23단계, 환경부)		수치토지이용도 (37단계, 국토해양부)	
중분류	코드번호	세분류	코드번호	중분류	코드번호	중분류	코드번호
주거지역	110	일반주택지	3110	활엽수림	310	활엽수림	2220
		고층주택지	3120	침엽수림	320	침엽수림	2210
공업지역	120	공업시설	3310	혼효림	330	혼효림	2230
상업지역	130	상업·업무지역	3130	자연초지	410	자연초지	2110
위락시설지역	140	유원지	2330	골프장	420	골프장	2310
교통지역	150	도로	3210	기타초지	430	인공초지	2120
		철로 및 주변지	3220			공원묘지	2320
		공항	3230	내륙습지	510	-	-
		항만	3240	연안습지	520	갯벌	4110
공공시설지역	160	발전시설	3410			염전	4120
		처리장	3420	채광지역	610	채광지역	3520
		교육·군사시설	3430			광천지	3540
		공공용지	3440	기타 나지	620	암벽 및 석산	2340
		매립지	3530			나대지 및 인공	3140
		댐	4320			공업나지·기타	3320
논	210	경지정리답	1110			백사장	4410
		미경지정리답	1120	내륙수	710	하천	4210
밭	220	보통·특수작물	1210			호소	4310
하우스재배지	230	-	-	해양수	720	-	-
과수원	240	과수원·기타	1220				
기타재배지	250	가축사육시설	3550				

인공위성 영상자료를 이용한 토지피복지도 구축(환경부, 2005)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 2.7 Land Use Classification and runoff Curve number of Korea(AMC-Ⅱ)

수치토지이용도		수치토지피복도		토 양 군				비 고 (SCS 분류기준 등)
세분류	코드번호	중분류	코드번호	A	B	C	D	
경지정리답	1110	논	210	79	79	79	79	별도 기준(논)
미경지정리답	1120			79	79	79	79	
보통, 특수작물	1210	밭	220	63	74	82	85	조밀 경작지, 등고선 경작, 불량
과수원기타	1220	과수원	240	70	79	84	88	이랑 경작지, 등고선 경작, 불량
자연초지	2110	자연초지	410	30	58	71	78	초지, 등고선경작, 양호
인공초지	2120	기타초지	430	49	69	79	84	자연목초지 또는 목장, 보통
침엽수림	2210	침엽수림	320	48	69	79	85	산림, HC=2
활엽수림	2220	활엽수림	310	48	69	79	85	
혼합수림	2230	혼효림	330	48	69	79	85	
골프장	2310	골프장	420	49	69	79	84	개활지, 보통
공원묘지	2320	기타초지	430	49	69	79	84	
유원지	2330	위락시설 지역	140	49	69	79	84	
암벽 및 석산	2340	기타나지	620	77	86	91	94	개발중인 지역
일반주택지	3110	주거지역	110	77	85	90	92	주거지구, 소구획 500㎡ 이하
고층주택지	3120			77	85	90	92	
상업, 업무지	3130	상업지역	130	89	92	94	95	도시지역, 상업 및 사무실지역
나대지 및 인공녹지	3140	기타나지	620	77	86	91	94	개발중인 지역
도로	3210	교통지역	150	83	89	92	93	도로, 포장도로 (도로용지 포함)
철로 및 주변지역	3220			83	89	92	93	

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

공항	3230			83	89	92	93	
항만	3240			83	89	92	93	
공업시설	3310	공업지역	120	81	88	91	93	도시지구, 공업지역
공업나지, 기타	3320	기타나지	620	77	86	91	94	개발중인 지역
발전시설	3410	공공시설 지역	160	61	75	83	87	주거지구, 소구획 500~1,000㎡
처리장	3420			61	75	83	87	
교육, 군사시설	3430			61	75	83	87	
공공용지	3440			61	75	83	87	
양어장, 양식장	3510			100	100	100	100	별도기준(수면)
채광지역	3520	채광지역	610	68	79	86	89	개활지, 불량
매립지	3530	공공시설 지역	160	61	75	83	87	주거지구, 소구획 500~1,000㎡
광천지	3540	채광지역	610	68	79	86	89	개활지, 불량
가축사육시설	3550	기타재배지	250	68	79	86	89	자연목초지 또는 목장, 불량
갯벌	4110	연안습지	520	100	100	100	100	별도기준(수면)
염전	4120							
하천	4210	내륙수	710	100	100	100	100	
호, 소	4310							
댐	4320	공공시설 지역	160	61	75	83	87	주거지구, 소구획 500~1,000㎡
백사장	4410	기타나지	620	77	86	91	94	개발중인 지역
-	-	하우스 재배지	230	76	85	89	91	도로, 포장, 개거
-	-	내륙습지	510	100	100	100	100	별도기준(수면)
-	-	해양수	720	100	100	100	100	

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.5 매개변수 산정

2.5.1 단위유량도 선정

단위유량도 또는 단위도는 특정 단위시간 동안 균일한 강도로 유역 전반에 걸쳐 균등하게 내리는 단위유효우량에 의한 직접유출수문곡선으로 정의된다. 단위도는 유출과정에 영향을 미치는 유역의 특성을 반영하기 때문에 유효우량이 공간적으로 균등하고 유역 반응이 선형성에 부합할 경우 정확한 홍수량을 산정할 수 있으며, 관측 자료가 없는 경우에는 합성단위도를 이용하여 홍수량을 산정할 수 있다.

유역의 대표단위도는 다수의 호우 사상별 강우-유출 자료로부터 유도될 수 있으나 실무에서는 자료의 제약 때문에 관측 자료로부터의 단위도 유도가 곤란하므로 대부분의 경우 미계측 유역에 적용하는 합성단위도 방법을 사용하고 있으며, 국내 실무에서 사용되고 있는 합성단위도 방법에는 Clark, SCS, Snyder, Nakayasu 단위도법 등이 있다.

국내 실무에서 주로 사용되는 합성단위도법 중 Clark, SCS, Snyder 단위도법은 미국에서 개발된 방법으로 미국육군공병단의 수문공학연구소(Hydrologic Engineering Center, HEC)에서 개발한 HEC-1(혹은 HEC-HMS) 프로그램에 홍수량 산정 알고리즘이 내장되어 있으며, Nakayasu 종합단위도법은 단위도 개념을 도입하여 일본에서 개발된 방법이다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

상기 4가지 단위도법 중 SCS 단위도법은 미국 내 여러 농경유역에서 개발된 단위도를 무차원화한 합성단위도를 사용하며 Snyder 단위도법은 미국 Appalachia 산맥 지역의 유역들에서 개발된 단위도의 매개변수를 유역특성인자의 항으로 표시하여 단위도를 합성하는 방법이다. Nakayasu 종합단위도법은 일본의 다수유역의 강우-유출 자료를 분석하여 유도한 합성단위법이다. 따라서 이들 3가지 방법은 모두 단위도가 유도된 유역의 지역성을 많이 가지고 있기 때문에 우리나라 유역에서의 적용성에 대한 신뢰도가 문제로 여겨져 왔다.

Clark 단위도법은 순간단위도 원리를 이용한 유역추적방법으로 유역의 도달시간과 유역의 저류능을 대표하는 유역저류상수 등 2개의 매개변수의 결정만으로 단위도를 합성할 수 있을 뿐 아니라 다른 3가지 방법과는 달리 지역성을 가지지 않는 비교적 객관적인 방법이라 할 수 있다.

국내에서는 2000년대 이후 수문실무에서 상기 4가지 방법으로 산정한 홍수량을 비교하여 최적치를 채택하여 왔으나, 대부분의 경우 Clark 단위도법으로 산정된 홍수량을 채택해 왔다.

2.5.2 도달시간 산정

(1) 도달시간의 정의

도달시간(travel time) 혹은 집중시간(time of concentration)은 유역의 최원점에서 하도의 시점까지 표면류 흐름(overland flow)의 유하시간과 하도시점에서 하도종점까지의 하도흐름의 유하시간의 합으로 정의되며, 표면류 흐름의 유하시간과 하도흐름의 유하시간은 산정 방법을 달리 적용하는 것이 원칙이다.

그러나 실무에서는 유역의 최원점에서 하도시점까지 표면류 흐름의 유하시간을 무시할 수는 없지만 중규모 이상 하천유역의 경우 전체 도달시간에서 차지하는 비중이 작은 점, 하도시점이 지도축척에 따라 달라지는 문제점 등을 감안하여 유역의 최원점에서 하도종점까지의 유하시간을 동일한 방법을 적용하여 산정하고 있는 경우가 많다.

이에 따라 도달시간은 유역의 최원점에서 하도종점까지의 유하시간을 동일한 방법으로 산정하는 방식을 채택하는 것이 바람직하며, 이와 같은 방식을 적용할 경우 구간을 적절히 구분하여 처리할 필요가 있다.

(2) 하천경사 산정 및 도달시간 구간 분할 방법

경사 산정 방법은 단순경사와 등가경사(equivalent slope) 중 등가경사 방법을 채택하는 것을 원칙으로 한다.

도달시간 산정을 위한 구간 분할 시에는 유역 최원점에서 유역 출구점까지 종단도를 그린 후 유역의 경사 변화를 반영할 수 있도록 고려하면서 경사가 유사한 구간을 하나의 구간으로 구분하는 것으로 적절할 개소수로 분할하되, 추가적으로 홍수량 산정에서 고려하는 지류 합류점 및 주요 구조물 지점 등을 고려하여야 한다.

이와 같이 구간을 분할한 후 구간별 도달시간의 합으로 전체 도달시간을 산정하

제주대학교 중앙도서관

는 방법과 전체 등가경사를 계산한 후 전체 구간에 대한 도달시간을 한꺼번에 산정하는 방법이 있다.

두 가지 방법 중에서 구간별 도달시간을 합하여 산정하는 방법이 물리적으로 보다 타당성을 가지는 방법이며, 이 방법의 경우 구간을 적절하게 분할하는 것이 중요하다.

(3) 기존 도달시간 공식 (I)

자연하천유역의 도달시간 산정에는 다음과 같이 외국에서 개발된 Kirpich 공식, Rziha 공식, Kraven 공식(Ⅰ), Kraven 공식(Ⅱ) 등의 경험공식들을 주로 사용하고 있다.

- Kirpich 공식: 농경지 소유역을 대상으로 유도된 공식

$$T_c = 3.976 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad \text{(식 2.10)}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

- Rziha 공식: 자연하천의 상류부(S≥1/200)에 적용되는 공식

$$T_c = 0.833 \frac{L}{S^{0.6}} \quad \text{(식 2.11)}$$

- Kraven 공식(Ⅰ): 자연하천의 하류부(S<1/200)에 적용되는 공식

$$T_c = 0.444 \frac{L}{S^{0.515}} \quad \text{(식 2.12)}$$

- Kraven 공식(Ⅱ): 자연하천의 경사별 유속을 적용하는 공식

$$T_c = 16.667 \frac{L}{V} \quad \text{(식 2.13)}$$

(S<1/200 : V= 2.1 m/s, 1/200≦S≦1/100 : V= 3.0 m/s, S>1/100 : V= 3.5 m/s)

여기서 T_c는 도달시간(min), L은 유로연장(km), S는 평균경사(무차원), V는 평균유속(m/s)이다.

기존 도달시간 경험공식을 대상유역에 적용하여 보면 대부분 산정 결과의 차이가 매우 크게 나타나지만 적절한 채택 기준은 아직까지 제시되지 않고 있으므로, 유속을 토대로 도달시간을 산정하는 Kraven(Ⅱ) 공식이 가장 많이 사용되고 있다.

(4) 기존 도달시간 공식 (Ⅱ)

현재 실무에서 가장 많이 사용되고 있는 Kraven(Ⅱ) 공식의 경우 경사구간별 유속을 제시하고 있으므로 유속의 불연속이 발생하게 되며, 경사가 매우 완만한 구간 및 경사가 매우 급한 구간에는 적용하기 곤란한 문제점 등을 가지고 있다.

이를 보완하기 위하여 급경사부의 유속은 기존 소하천정비종합계획 내용을 참조하고 완경사부의 유속은 「금강유역종합치수계획 보고서(국토해양부, 2008)」에서 제시되고 있는 수정 Kraven(Ⅱ) 공식의 결과 등을 참조하여 급경사부와 완경사부 유속을 보완하여 연속형 Kraven 공식으로 제안하였다.

연속형 Kraven 공식 형태는 Kraven 공식(Ⅱ)과 동일하며 단지 경사구간별 유속을 급경사부와 완경사부로 나누어서 나타낸 결과는 Fig. 2.5과 같고, 평균유속 V를 하도경사 S의 항으로 표시한 회귀식은 다음과 같다.

급경사부(S>3/400) : $V = 4.592 - \frac{0.01194}{S}$, V_{max} =4.5 m/s

완경사부(S≤3/400) : $V = 35{,}151.515S^2 - 79.393939S + 1.6181818$, V_{min} =1.6 m/s

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

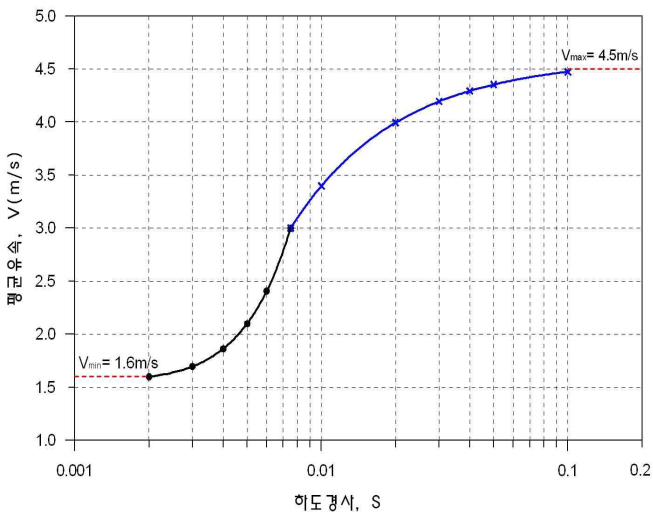


Fig. 2.5 Inclination interval velocity distribution required for continuous Kraven formula induction

2.5.3 유역 저류상수 산정

Clark 단위도법의 유역저류상수를 산정하기 위한 경험공식 중 과거에는 Russel 공식의 형태를 채택하여 왔으나 최근 들어 Sabol 공식, 수정 Sabol 공식을 많이 채택하고 있다.

- Clark 공식

$$K = C\frac{L}{\sqrt{S}} \qquad \text{(식 2.14)}$$

- Linsley 공식

$$K = \frac{bL\sqrt{A}}{\sqrt{S}} \qquad \text{(식 2.15)}$$

- Russel 공식

$$K = \alpha\, T_c \qquad \text{(식 2.16)}$$

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

여기서 K는 유역저류상수(hr), α는 도시지역(developed catchments)은 1.1~2.1, 자연지역(rural catchments)은 1.5~2.8, 산림지역(forested catchments)은 8.0~12.0 범위의 계수, T_c는 도달시간(hr)이다.

- Sabol 공식

$$K = \frac{T_c}{1.46 - 0.0867\frac{L^2}{A}} \qquad \text{(식 2.17)}$$

- 수정 Sabol 공식

$$K = \frac{T_c}{\frac{97.28}{SF^{-2.88}+128.19}+0.59} \qquad \text{(식 2.18)}$$

여기서 K는 유역저류상수(hr), T_c는 도달시간(hr), L은 유로연장(km), A는 유역면적(km^2), SF는 형상계수(A/L^2)이다.

Clark 공식은 유로연장과 평균경사만을 고려하기 때문에 유역규모 및 형상은 고

려하지 못하며 Linsley 공식은 유역규모는 고려할 수 있으나 유역형상을 고려하지 못하는 문제점이 있다. Russel 공식은 유역규모 및 유역형상을 고려하지 못하며 계수 α의 결정이 임의적인 문제점을 지니고 있다. α값을 제시되는 범위와 달리 0.8~1.2 범위를 적용하며 일반적으로 1.0을 채택하고 있으나 그 근거가 미약한 실정이다. Sabol 공식은 유역규모를 고려하지 못하는 문제점은 동일하지만 유역형상을 형상계수의 역수 형태로 고려하므로 Russel 공식보다 합리적이라 할 수 있기 때문에 Sabol 공식을 유역저류상수 산정 방법으로 채택하고 있다.

기존 Sabol 공식으로 형상계수에 따른 도달시간-저류상수 관계를 살펴보면 형상계수가 0.15 이하에서는 T_c/K가 매우 작아지는 경향을 나타내고 있으며 이 경우 홍수량이 작게 산정되는 문제점이 발생하게 된다. 제주도는 형상계수가 0.15 이하인 유역이 많기 때문에 형상계수가 0.15 이상일 경우에도 기존 도달시간-저류상수 관계를 유사하게 유지할 수 있고 0.15 이하에서도 적용할 수 있는 수정 Sabol 공식 적용을 권장한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.5.4 홍수량 산정지점 선정

홍수량 산정지점은 소유역 분할과 일정부분 관계를 가지며, 지점별로 결정된 홍수량은 지점을 포함한 상류쪽의 홍수량 산정지점까지의 대표치로서 해당지점의 유역특성인 강우량, 강우분포, 유로연장, 하상경사, 유역면적 등을 포함한 복합적인 유역의 반응을 대표하는 수문량이다. 이러한 홍수량을 홍수량 산정지점별 입력자료로 하여 하도의 수리·수문학적 안정성을 결정하기 위한 홍수위 산정 등을 시행한다.

따라서, 홍수량 산정지점 간격을 너무 길게 결정하면 상류의 홍수위가 과다 산정될 우려가 있는 점을 감안하여야 하며 후술되는 소유역 분할에 따른 문제점과의 연계도 미리 고려할 필요가 있다. 또한, 홍수량 산정지점은 유역 상·하류의 홍수량 변화를 파악할 수 있을 정도의 구간 설정, 지류합류점 및 주요구조물 지점 등을 고려하여 선정하여야 하므로 다음과 같은 사항을 고려하여 선정하도록 한다.

① 과거 홍수량 산정지점, 주요 지류합류점, 수위표 지점, 치수계획에 필요한 지점을 중심으로 선정하며, 주요 지류와 본류의 합류점의 경우 지류의 영향을 검토할 수 있도록 합류 전·후 모두를 채택한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

② 지형특성 및 하도특성을 고려한다.

③ 홍수량 산정지점 선정시 대유역은 국가하천과 지방하천의 중요지점, 특히 지방하천은 일정규모 이상 하천의 하구부의 홍수량을 산정하고, 피해위험성이 큰 도시 및 인구밀집지역이 포함된 지류 하천의 경우 홍수방어대책수립이 용이하도록 산정지점을 좀 더 세분화하여 선정할 수 있다.

④ 홍수조절지, 방수로, 강변저류지 등과 같은 홍수방어대안이 계획되어 있거나 홍수조절효과를 판단할 수 있는 지점에 대해서도 산정지점으로 결정한다.

2.6 강우-유출 모형

2.6.1 강우-유출 모형의 분류

수문학적으로 강우-유출은 호우기간 동안 발생하는 일련의 반응을 의미한다. 일정 기간 동안의 강우로 인한 일, 월 혹은 계절 유출용적을 계산하거나, 실제로 발생한 단기간 동안의 호우사상이나 혹은 설계호우로 인한 유출수문곡선을 계산하는 것을 의미한다.

강우-유출 모형이란 수문순환의 각 과정을 물리적, 수학적 방법으로 모의할 수 있도록 구축한 모형으로 정의되며 일반적으로 물리적 기반의 강우-유출모형과 개념적 기반의 강우-유출모형으로 구분할 수 있다. 물리적 기반의 강우-유출모형은 유역의 수문순환과정에 대한 일련의 이론적인 원리를 수학적 공식으로 산정할 수 있도록 구성된 모형을 의미하며(Grayson 등, 1992), 이러한 물리적 시스템이 경험적으로 유도된 매개변수들로 단순화된 모형을 개념적 기반의 강우-유출모형이라 하며 물리적 원리보다는 상당한 보정작업을 거친 후 결과를 산정하게 된다(Vieux, 2001).

제주대학교 중앙도서관

강우-유출모형은 공간적인 변동성을 어떻게 고려하는지에 따라서도 집중형 모형(lumped-model)과 분포형 모형(distributed-model)로 구분된다(Bedient와 Huber, 2002). 집중형 모형의 경우 입·출력 자료로 어떠한 공간적 변동성도 고려하지 않으며, 구축된 유역이 여러 소유역으로 분할되어 있어도 각각의 소유역별로 평균화된 수문학적 매개변수가 입력될 뿐이다(Molnar와 Julien, 2000). 이러한 집중형 모형의 단순화는 장점이 될 수도 있지만, 수문학적 모의과정 중 내부적으로 영향을 미치는 인자를 파악하는 부분에서 응용성이 제한되고 있다(Muzik, 1996).

집중형 모형은 일반적으로 수문순환의 개념적 관계들을 통하여 강우사상에 대한 유역의 유출반응을 묘사한다. 집중형 모형의 가장 일반적인 모형인 개념적 강우-유출(Conceptual Rainfall-Runoff, CRR)모형은 강우에서부터 유출까지의 일련의 물리적인 수문과정을 개념적인 강우-유출과정으로 묘사 후 각 단계별로 일련의 수학적 관계공식으로 표현하여 유출을 모의한다. 여기서, 수학적 관계공식이란 개념적으로 묘사된 강우-유출과정의 각 단계별 물리현상에 근거한 경험적 또는 물리적으로 산정된 공식을 의미한다. CRR 모형에서 가장 일반적으로 사용되는 모델은 미육군공병단의 수문공학연구소에서 개발한 HEC-1, HEC-HMS, TR-20 및 EPA-SWMM

등이 있다.

이러한 모형들은 실제 관측된 자료에 대한 보정작업을 필요로 하며, 이러한 보정작업은 공간적으로 변동하는 매개변수들의 대표적인 값을 결정하기 위하여 수행된다. 하지만 이러한 과정은 자료획득과 관측 자료를 통합하는 방법 등에서 오차를 발생 시킬 수 있으며(Colosomo와 Mendicino,1996), 매개변수 간의 불확실한 영향을 미치는 구간에서 비체계적인 매개변수 관계를 얻어낼 수 있다. 이러한 결과는 근본적으로 각각의 매개변수에 해당하는 제약조건이 부족하고 목적함수 값만으로는 수문곡선의 보정과정이 어렵기 때문이다(Vieux,2001). 또한, 각각의 매개변수는 모형의 각 단계별 특정과정만을 표현하지만, 이러한 매개변수간의 상호관계가 산정되는 결과에 영향을 미치기 때문이다(Dunn과 Lilly,2001). 물리적 공식을 바탕으로 유출해석을 수행하는 물리적 기반의 분포형 모형을 사용하더라도 물리적 공식으로 유추할 수 없는 오차가 발생되며 과대한 매개변수가 산정될 수 있다.

분포형 모형은 집중형 모형과는 반대로 공간적 변동성을 반영하여 전형적인 질량보존 방정식, 운동량보존 방정식 및 에너지 방정식을 통하여 수문학적 과정을 묘사한다(Vieux,2001). 분포형 모형은 집중형 방식이 아닌 동일한 성질의 매개변수를 갖는 상호관의 연관된 격자 형태로 구성된다(Colosomo와 Mendicino,1996). 많은 분포형 모형들은 각각의 매개변수들을 확률변수가 아닌 물리적 기반의 형태로 완전한 확정론적 모형을 추정한다(Abbott 등, 1986). 이러한 물리적 기반의 분포형 모형은 분석적인 계산이 가능한 수학적 공식인 유한차분법 혹은 유한요소법을 통하여 개별적으로 계산된다. 하지만 비선형적인 공식들은 알 수 없는 경계조건에서 분석적으로 계산되기 어렵기 때문에 특정 확률분포의 확률변수를 갖는 추계학적 매개변수들이 사용되게 된다(Woolhiser, 1996).이러한 단순화는 모형의 세분화, 해상도, 모형의 범위가 모의과정 및 모의시간에 미치는 영향을 해소하기 때문에 정당화 된다.

결론적으로 분포형 모형의 세분화의 정도와 계산과정은 상반관계를 갖게 된다. 집중형 모형과 분포형 모형의 구분은 모형의 사용자가 집중형 모형을 사용할 때 공간적 변동성을 고려하는지에 따라 모호해질 수 있다(Olivera와 Maidment, 1999). 일반적인 예로 HEC-1의 사용자는 유역의 공간적 변동성을 고려하기 위하여 더 많은 소유역 분할을 고려할 수 있다. 또한 HEC-HMS의 Modfied Clark방법의 경우 격자별로 유역 홍수 추적법을 적용하며 분포형 강우자료의 사용기능을 제공한다. 이러한 모형은 집중형 모형뿐만 아니라 분포형 모형의 기능까지 포함한다고 할 수 있기

제주대학교 중앙도서관

때문에 준분포형 모형(semi-distributed model)이라고 정의된다.

Table 2.8 Comparison of characteristics of lumped model and distributed model

구분		집중형 모형 (Lumped Model)	분포형 모형 (Distributed Model)	비고
모형의 범주		경험적/개념적	이론적/물리적	
강우-유출 과정 묘사		블랙박스	동수역학적 묘사	
매개 변수	공간적 변화	공간적으로 불변 (소유역내 일정)	위치에 따라 변화	
	보정	반드시 필요 (실측 강우-유출 필요)	보정 없이도 합리적 결과 제공	
규모의 문제		소유역 세분화에 따른 홍수량 증가	격자 크기에 따른 매개변수 조정 필요	
대표적 모형		단위도법 (HEC-1, HEC-HMS)	물리기반 격자형 모형 (TOPMODEL, Vflo)	

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2.6.2 HEC-HMS 모형

HEC-HMS(Hydrologic Modeling System)은 미국 육군공병단 수문연구소에서 개발된 강우-유출 해석 프로그램으로 여러 가지 기능을 제공하며, 기존 강우-유출 해석 프로그램이었던 HEC-1을 보완한 후속 버전으로 개발된 프로그램이다.

HEC-HMS 초기 버전에는 HEC-1 프로그램에 포함되어 있는 단위도 및 수문학적 홍수추적 옵션 이외에도 격자형 강우자료(레이더 데이터)를 이용하여 적용할 수 있는 유사분포 유출변환(quasi-distributed runoff transformation)과 장기 연속모의(continuous simulation)에 적용할 수 있는 간단한 수분감소 등을 추가적으로 포함하고 있다.

HEC-HMS는 GUI(Graphical User Interface) 환경, 통합 수문분석 성분, 자료 저장 및 관리 능력, 그래픽 처리 및 리포트 출력 기능 등으로 구성되어 있다.

HEC-HMS 모형은 크게 유역의 특성인자와 매개변수를 설정하는 Basin Model Manager, 강우와 같은 수문기상 요소를 설정하는 Meteorologic Model Manager, 모형의 시간에 관련되는 모든 정보를 취급하는 Control Specifications Manager로 구성되어 있으며, 모형 내의 모든 계산은 SI 단위계로 이루어지나, 입력 자료에는 SI 단위계와 영국 단위계를 모두 사용할 수 있으며, 출력 자료의 단위계도 사용자가 선택할 수 있도록 되어 있다.

HEC-HMS 모형을 이용한 모의는 수문요소들로 구성된 유역을 표현하는 것이며 수문요소에는 소유역, 하도구간, 저수지, 합류점, 분류점, 수원점, 함몰점 등 7가지가 있다. 유역의 강우입력 지정은 여러 가지 방법으로 가능하며 관측지점의 점강우량을 이용하는 방법, 레이더를 이용하여 작성된 격자형 강우자료를 이용하는 방법, 계산된 확률강우량을 이용하는 방법 등이 있다.

제주대학교 중앙도서관

(1) Basin Model

Basin Model은 HEC-HMS 내에서 유역의 유출계산 방법의 설정 및 유역특성인자와 매개변수 입력을 담당한다. 유역에서 유출계산과정은 크게 수문학적 손실 산정, 단위도법, 기저유출량 산정, 홍수추적과정으로 구성되며, 수문학적 손살산정 방법의 경우 Green and Ampt, Gridded Green and Ampt, Gridded SCS Curve

Number, SCS Curve Number 등이 있고, 단위도법은 Clark Unit Hydrograph, Kinematic Wave, ModClark, SCS Unit Hydrograph, Snyder Unit Hydrograph 등이 있고 기저유출량 산정방법은 Constant Monthly, Linear Reservoir, Nonlinear Boussinesq 등이 있으며 홍수추적방법은 Kinematic Wave, Lag, Muskingum, Muskingum-Cunge 등이 있다.

(2) Meteorological Model

Meteorological Model은 HEC-HMS 내의 기상자료를 구성하는 역할을 한다. 기상자료에는 강우(Precipitation), 증발산(Evapotranspiration), 융설(Snowmelt) 부분이 포함되어 있다. 또한, 기상자료는 직접 입력 가능하며 HEC-1의 자료저장시스템(DSS : Data Storage System) 파일을 불러와 사용할 수도 있다.

기상자료 입력 시 강우부분은 Frequency Storm, Gage Weight, Gridded Precipitation, Inverse Distance, Specified Hyetograph 등이 있으며 증발산 부분은 Gridded Priestly-Taylor, Monthly Average, 융설 부분은 Gridded Temperature Index, Temperature Index가 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(3) Control Specifications

Control Specifications은 HEC-HMS 모형의 시작시간과 날짜, 모의계산 시간간격 등 시간에 관련된 정보를 입력할 수 있다. HEC-1은 자료 구축 시 모든 자료를 독립 자료군으로 입력해야 하지만 HEC-HMS에서의 Control Specifications로 입력자료의 구성을 쉽게 할 수 있다. 또한 HEC-HMS는 장기간에 걸친 연속적인 수문곡선 모의가 가능하다.

3. 연구대상 유역

제주도는 지방하천 및 소하천을 포함하여 총 143개의 하천이 분포하고 있으며, 투수성이 매우 좋은 지질특성을 가지고 있어 대부분 하천은 평상시 물이 흐르지 않는 건천 상태를 유지하고 있다(Kang, 2014). 또한 제주도 하천은 대부분 한라산을 중심으로 경사가 급한 남북사면에 위치하고 있으며 건천 134개소와 상시하천 9개소가 분포하고 있다.

이 연구에서는 제주시 도심에 위치한 하천 중 평상시 건천 상태를 유지하고 있으나 태풍 및 집중호우 시 홍수유출로 인해 많은 피해가 발생하고 있는 하천(한천, 병문천, 독사천, 산지천)을 연구대상 유역으로 선정하였다.

3.1. 유역 형상 및 지형적 특성

연구대상 유역의 지형적 특성을 파악하기 위하여 수치지형도(1/5,000)를 이용하였으며 유역면적 및 연장, 형상계수 등을 분석하였다.

제주대학교 중앙도서관

연구대상 유역 중 한천과 병문천은 한라산 북쪽 정상부 부근에서 발원하고 있으며, 산지천은 관음사 부근에서 발원하고, 독사천은 도심과 가까운 중산간 부근에서 발원하여 해안으로 유하하고 있다.

도심하천의 지역특성인자를 분석한 결과 한천은 유역면적 36.69 km^2, 유로연장 20.18 km, 유역 평균 폭 1.82 km, 형상계수는 0.09로 조사되어 연구대상 유역 중 가장 길고 큰 하천으로 나타났으며, 병문천은 유역면적 11.87 km^2, 유로연장 19.43 km, 형상계수 0.03으로 나타났다. 독사천은 유역면적 5.90 km^2, 유로연장 7.25 km, 형상계수 0.11로 가장 짧고 작은 하천으로 조사되었으며 산지천은 유역면적 14.65 km^2, 유로연장 13.47 km, 형상계수 0.08로 나타났다(Fig. 3.1, Table 3.1).

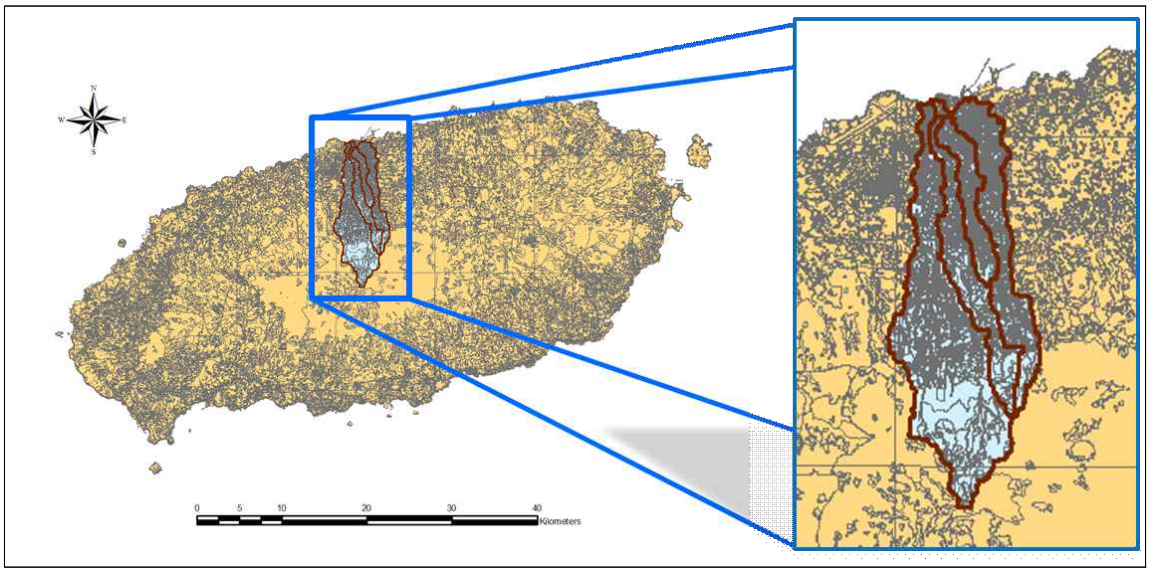


Fig. 3.1 Study watershed

Table 3.1 Geographical characteristics and shape of study watershed

Stream	Area (km^2)	Length (km)	Mean width of Basin (km)	Shape factor
Han Stream	36.69	20.18	1.82	0.09
Byeongmun Stream	22.69	19.43	1.17	0.06
Doksa Stream	5.90	7.25	0.81	0.11
Sanji Stream	14.65	13.47	1.09	0.08

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3.2 유역 표고 및 경사 분석

3.2.1 한천

한라산 EL.1,950 m 고지에서 발원하여 용담동 해안으로 유입되는 하천으로 유로 연장은 20.18 km 이고 유역면적은 36.69 km^2 이며, 유역형상은 지류가 거의 없는 직류형 하천형태를 보이고 있다.

(1) 표고분석

한라산 정상이 발원지인 한천 유역의 표고를 분석한 결과 평균고도는 643.82 m로 나타났으며, 해발 200 m 이하 지역은 유역 전체의 19.06 %, 200~400 m 지역은 16.57 %, 400~600 m 지역은 18.93 %, 600~1000 m 지역은 21.23 %, 1000 m 이상 지역은 24.21 %를 차지하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 3.2 Altitude analysis of Han stream

Elevation (m)	Area (km^2)	Area ratio (%)	Accumulation area (km^2)	Accumulation rate (%)
0 ~ 200	7.01	19.06	7.01	19.06
200 ~ 400	6.09	16.57	13.10	35.63
400 ~ 600	6.96	18.93	20.06	54.56
600 ~ 1000	7.81	21.23	27.87	75.79
1000 ~	8.82	24.21	36.69	100

(2) 경사분석

한천 유역 경사를 분석한 결과 평균 경사는 11.83 °로 나타났으며, 10° 이하의 평탄, 완경사 지역은 유역면적의 52.75 %로 나타났다. 토지의 활용도가 높은 경사 20° 이하 지역은 84.33 %로 나타났으며 30° 이상의 급경사지는 유역면적의 7.84 %를 차지하였다.

Table 3.3 Slope analysis of Han stream

Slope (°)	Area (km^2)	Area ratio (%)	Accumulation area (km^2)	Accumulation rate (%)
0 ~ 10	19.32	52.75	19.32	52.75
10 ~ 20	11.61	31.58	30.93	84.33
20 ~ 30	2.88	7.83	33.81	92.16
30 ~ 40	1.81	4.92	35.62	97.08
40 ~	1.07	2.92	36.69	100

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

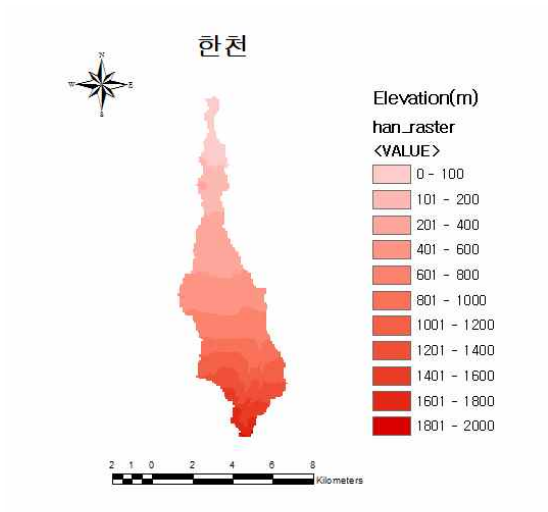


Fig. 3.2 Altitude analysis of Han stream

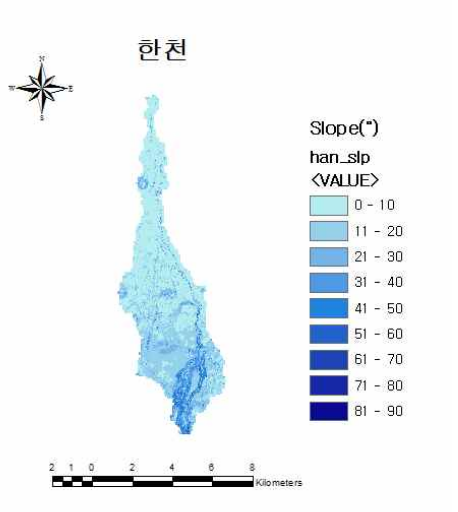


Fig. 3.3 Slope analysis of Han stream

3.2.2 병문천

제주시 오라동에서 발원하여 용담동 해안으로 유입되는 지방하천으로 유로연장은 19.43 km이고 유역면적은 22.69 km^2인 직류형 하천이다. 유역 상류부는 바위 및 자갈 등으로 구성되어 있으며, 하류부는 바위와 자갈, 모래 등으로 이루어져 있다.

(1) 표고분석

병문천 유역의 표고를 분석한 결과 평균고도는 430.23 m 로 나타났으며, 해발 200 m 이하 지역은 유역 전체의 38.02 %, 200~400 m 지역은 22.24 %, 400~600 m 지역은 13.18 %, 600~1000 m 지역은 13.75 %, 1000 m 이상 지역은 12.81 %를 차지하였다.

Table 3.4 Altitude analysis of Byeongmun stream

Elevation (m)	Area (km^2)	Area ratio (%)	Accumulation area (km^2)	Accumulation rate (%)
0 ~ 200	8.6	38.02	8.6	38.02
200 ~ 400	5.03	22.24	13.63	60.26
400 ~ 600	2.98	13.18	16.61	73.44
600 ~ 1000	4.39	13.75	21.0	87.19
1000 ~	1.69	12.81	22.69	100

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(2) 경사분석

병문천 유역 경사를 분석한 결과 평균 경사는 6.57 °로 나타났으며, 10° 이하의 평탄, 완경사 지역은 유역면적의 76.47 %로 나타났다. 토지의 활용도가 높은 경사 20° 이하 지역은 96.52 %로 나타났으며 30° 이상의 급경사지는 유역면적의 0.66 %를 차지하였다.

Table 3.5 Slope analysis of Byeongmun stream

Slope (°)	Area (km^2)	Area ratio (%)	Accumulation area (km^2)	Accumulation rate (%)
0 ~ 10	17.35	76.47	17.35	76.47
10 ~ 20	4.55	20.05	21.9	96.52
20 ~ 30	0.64	2.82	22.54	99.34
30 ~ 40	0.13	0.57	22.67	99.91
40 ~	0.02	0.09	22.69	100

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

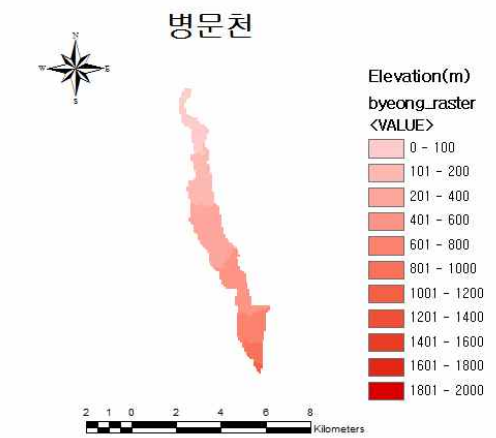


Fig. 3.4 Altitude analysis of Byeongmun stream

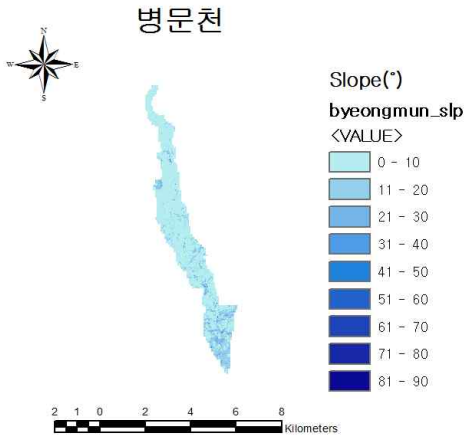


Fig. 3.5 Slope analysis of Byeongmun stream

3.2.3 독사천

제주시 오등동에 위치한 들위오름 북측 EL.466m 고지에서 발원하여 병문천의 우안으로 합류하는 제 1지류로써 유로연장은 7.25 km이고 유역면적은 5.90 km^2이며, 유역의 형상은 지류가 거의 없는 직류형 하천형태를 보이고 있다.

(1) 표고분석

독사천 유역의 표고를 분석한 결과 평균고도는 156.54 m로 나타났으며, 해발 200 m 이하 지역은 유역 전체의 70.17 %, 200~400 m 지역은 29.15 %, 400~600 m 지역은 0.68 %를 차지하였다.

Table 3.6 Altitude analysis of Doksa stream

Elevation (m)	Area (km^2)	Area ratio (%)	Accumulation area (km^2)	Accumulation rate (%)
0 ~ 200	4.14	70.17	4.14	70.17
200 ~ 400	1.72	29.15	5.86	99.32
400 ~ 600	0.04	0.68	5.90	100
600 ~ 1000	-	-	-	-
1000 ~	-	-	-	-

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(2) 경사분석

독사천 유역 경사를 분석한 결과 평균 경사는 3.96 °로 나타났으며, 10° 이하의 평탄, 완경사 지역은 유역면적의 92.54 %로 나타났다. 또한 20° 이하의 지역은 99.49 %로 대부분 경사가 완만한 유역으로 나타났다.

Table 3.7 Slope analysis of Doksa stream

Slope (°)	Area (km^2)	Area ratio (%)	Accumulation area (km^2)	Accumulation rate (%)
0 ~ 10	5.46	92.54	5.46	92.54
10 ~ 20	0.41	6.95	5.87	99.49
20 ~ 30	0.03	0.51	5.90	100
30 ~ 40	-	-	-	-
40 ~	-	-	-	-

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

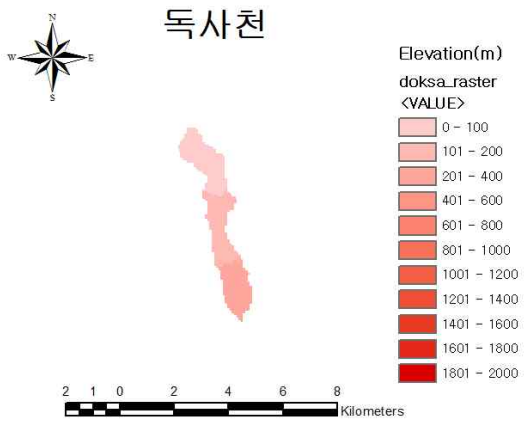


Fig. 3.6 Altitude analysis of Doksa stream

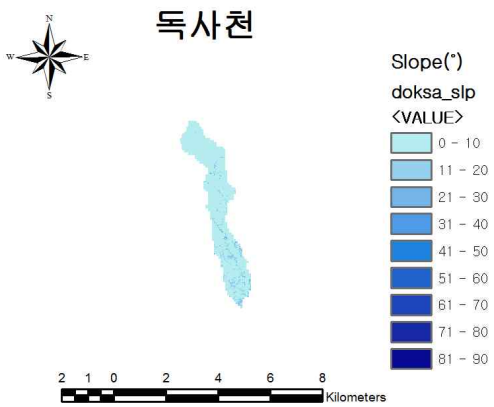


Fig. 3.7 Slope analysis of Doksa stream

3.2.4 산지천

한라산 중산간부에 위치한 삼의양오름 서측에 위치한 EL.715 m 고지에서 발원하여 건입동 해안으로 유입되는 하천으로 유로연장은 13.47 km이고 유역면적은 14.65 km^2이며, 유역의 형상은 지류가 거의 없는 직류형 하천형태를 보이고 있다.

(1) 표고분석

산지천 유역의 표고를 분석한 결과 평균고도는 231.77 m 로 나타났으며, 해발 200 m 이하 지역은 유역 전체의 56.45 %, 200~400 m 지역은 19.86 %, 400~600 m 지역은 21.30 %, 600~1000 m 지역은 2.39 %를 차지하였다.

Table 3.8 Altitude analysis of Sanji stream

Elevation (m)	Area (km^2)	Area ratio (%)	Accumulation area (km^2)	Accumulation rate (%)
0 ~ 200	8.27	56.45	8.27	56.45
200 ~ 400	2.91	19.86	11.18	76.31
400 ~ 600	3.12	21.30	14.3	97.61
600 ~ 1000	0.35	2.39	14.65	100
1000 ~	-	-	-	-

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(2) 경사분석

산지천 유역 경사를 분석한 결과 평균 경사는 4.84 °로 나타났으며, 10° 이하의 평탄, 완경사 지역은 유역면적의 86.89 %로 나타났다. 토지의 활용도가 높은 경사 20° 이하 지역은 97.95 %로 나타났으며 30° 이상의 급경사지는 유역면적의 0.21 %를 차지하였다.

Table 3.9 Slope analysis of Sanji stream

Slope (°)	Area (km^2)	Area ratio (%)	Accumulation area (km^2)	Accumulation rate (%)
0 ~ 10	12.73	86.89	12.73	86.89
10 ~ 20	1.62	11.06	14.35	97.95
20 ~ 30	0.27	1.84	14.62	99.79
30 ~ 40	0.03	0.21	14.65	100
40 ~	-	-	-	-

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

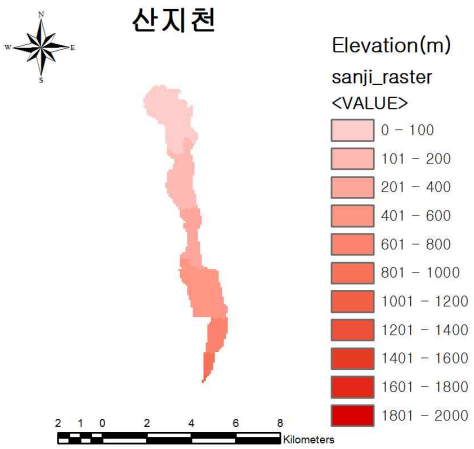


Fig. 3.8 Altitude analysis of Sanji stream

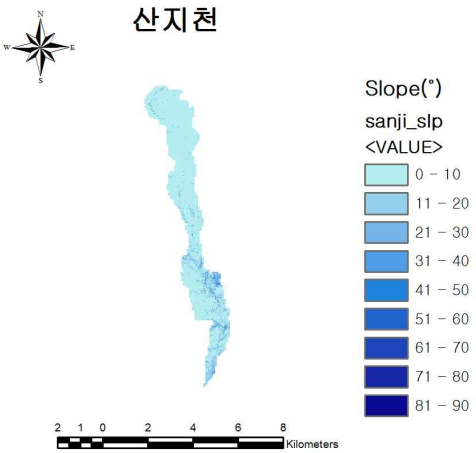


Fig. 3.9 Slope analysis of Sanji stream

4. 하천 현장관측 및 호우사상별 유출량 분석

4.1. 현장관측 지점

태풍 및 집중호우 시 하천의 유출량을 관측하기 위하여 제주특별자치도는 총 48개 지점에 Kalesto를 설치하여 운영하고 있으며 한국지질자원연구원에서 제주시 주요지점 5개소를 이관 받아 하천 유출을 관측하고 있다. Kalesto는 하천의 표면유속과 수위를 실시간으로 관측하여 유량을 산정할 수 있다. 또한 비접촉식으로 지속적인 측정이 가능하여 하천 현장에서의 유량관측이 매우 힘든 제주도 하천에서 많이 활용되고 있다(Table 4.1).

Table 4.1 Stream runoff observation point of Jeju Island

설치위치	측정항목	표고(m)	구분
가마천	수위/유속	5.0	
강정천	수위/유속	19.9	
강정천	수위	104.5	
고산1배수로	수위	10.0	
금성천	수위/유속	1.0	
독사천(독사제5교)	수위/유속	102.0	
독사천(오장교)	수위/유속	140.0	
돈내코	수위	130.0	
동홍천	수위	150.8	
맹사리	수위	142.6	
무릉배수로	수위/유속	5.0	
병문천(삼오교)	수위/유속	67.3	
병문천1(신성2교)	수위/유속	74.3	한국지질자원연구소
병문천2(탐라성)	수위/유속	273.1	한국지질자원연구소
산지천	수위/유속	120.0	한국지질자원연구소

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

산지천(산지1교)	수위/유속	63.8	
산지천(오현1교)	수위/유속	17.3	
산지천(제2저류지)	수위/유속	258.9	
산지천2	수위/유속		
삼수천	수위/유속	41.0	
서중천	수위/유속	15.4	
속골천	수위	50.4	
솜반내	수위	91.6	
송천	수위/유속	3.9	
신흥천	수위/유속	4.0	
연외천	수위/유속	50.6	
영락배수로	수위/유속	15.0	
옹포천	수위/유속	5.4	
외도천1(외도정수장)	수위/유속	7.5	
외도천2(제2광령교)	수위/유속	521.5	한국지질자원연구소
월림배수로	수위	5.0	
의귀천	수위/유속	21.0	
인성배수로	수위/유속	9.1	
중문천	수위/유속	5.0	
중문천	수위	130.8	
창고천	수위/유속	5.0	
천미천	수위/유속	45.0	
천미천1	수위/유속	418.1	
천미천2	수위/유속	128.0	
한림천	수위/유속	7.5	
한천1(제4한천교)	수위/유속	37.8	
한천2(한천제2저류지)	수위	357.0	
한천3(탐라계곡)	수위/유속	500.0	한국지질자원연구소

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

한천5(제2동산교)	수위/유속	57.7	
한천6(제주교도소)	수위/유속	210.0	
한천6(한북교)	수위/유속	184.0	
화북천	수위/유속	20.0	
효례천	수위/유속	20.0	

제주대학교 제주수자원연구단에서는 2010년부터 2018년까지 제주시에 위치한 도심하천(한천, 병문천 등)을 중심으로 Kalesto 및 전자파표면유속계를 활용하여 하천유출 관측을 실시하였다. 특히, 한천 유역은 2010년부터 현장 조사 관측을 수행하였으며 호우사상별 홍수량 자료를 구축하였다.

이 연구에서는 한천, 병문천, 독사천, 산지천을 연구대상 유역으로 선정하였으며 Kalesto가 위치한 한천교(한천), 삼오교(병문천), 독사제5교(독사천), 오현1교(산지천)에서 집중호우 및 태풍 내습 시 하천현장 관측을 수행하였다(Fig. 4.1).

제주대학교 중앙도서관

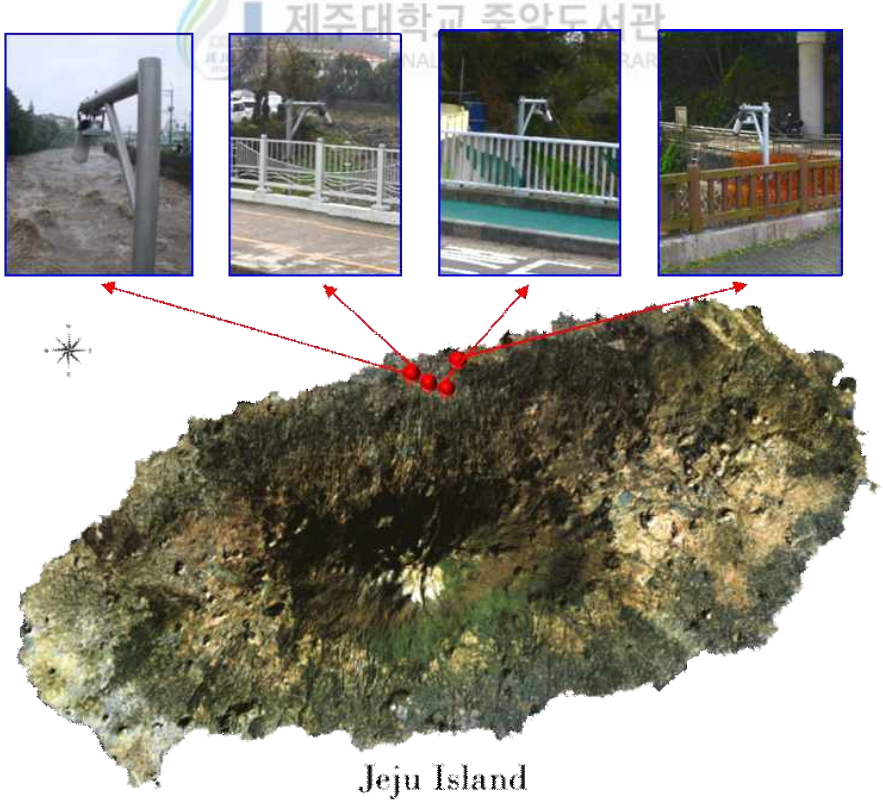


Fig. 4.1 Stream runoff observation point of Jeju Island

Fig. 4.2 Observation of stream runoff using observation equipment

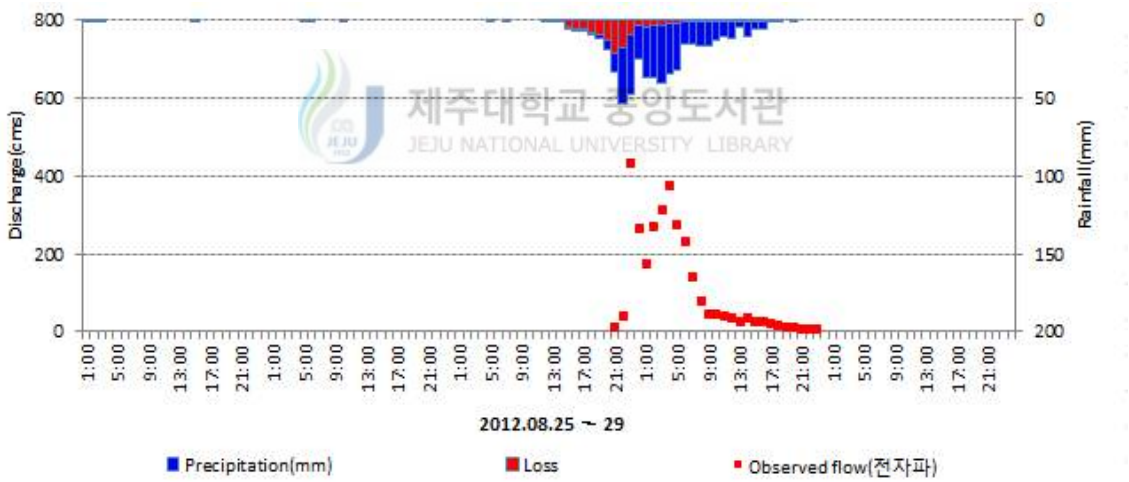
Fig. 4.3 Observation at stream runoff site

4.2 호우사상 및 유역별 홍수유출량

4.2.1 이동식 전자파표면유속계를 이용한 유출량

(1) 태풍 볼라벤(2012.08)

태풍 볼라벤 내습 시 한천 하류부에 위치한 한천교에서 이동식 전자파표면유속계를 이용하여 홍수유출량을 관측하였다. 8월 27일 22시에 53.26 mm의 면적강우량이 발생하여 첫 번째 첨두강우량이 나타났고, 28일 03시에 두 번째 첨두강우량인 39.76 mm의 면적강우량이 나타났다. 첨두유출량은 2회 발생하였으며 첨두강우량 발생 1시간 후인 8월 27일 23시와 28일 04시에 431.82 cms와 375.95 cms 발생하였다(Fig. 4.4).



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 4.4 Runoff hydrograph of the typhoon Bolaven in the Han stream

(2) 태풍 산바(2012.09)

태풍 산바 내습 시 한천 하류부에 위치한 한천교에서 전자파표면유속계를 이용하여 홍수유출량을 관측하였다. 9월 17일 08시에 첨두강우량인 66 mm의 면적강우량이 발생하였으며, 첨두유출량은 544.69 cms로 첨두강우량 발생 1시간 후인 9월 17일 09시에 발생하였다(Fig. 4.5).

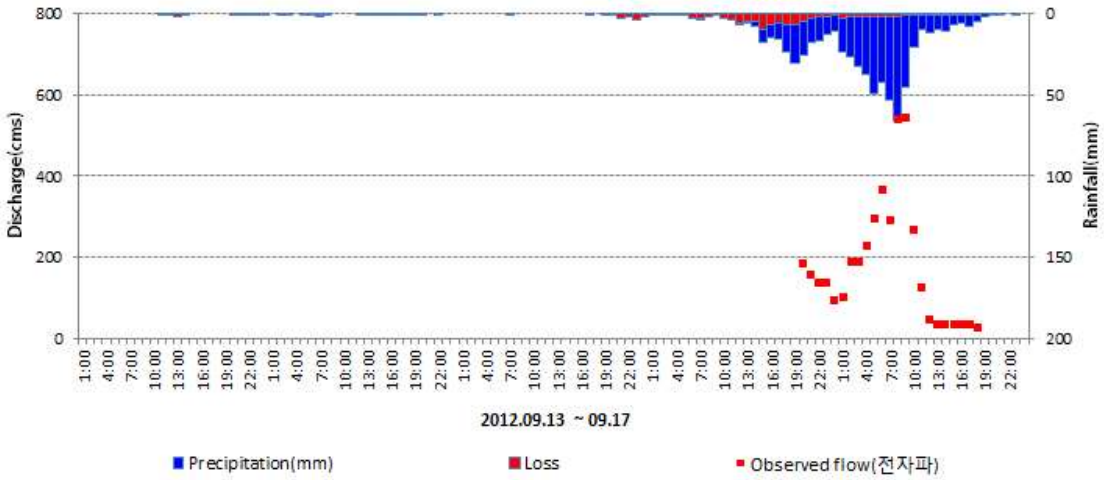


Fig. 4.5 Runoff hydrograph of the typhoon Sanba in the Han stream

(3) 태풍 차바(2016.10)

태풍 차바 내습 시 한천 하류부에 위치한 한천교에서 전자파표면유속계를 이용하여 홍수유출량을 관측하였다. 10월 05일 04시에 첨두강우량인 119.3 mm의 면적강우량이 발생하였으며, 첨두유출량은 846.33 cms로 첨두강우량 발생 30분 이후인 10월 05일 04시 30분에 발생하였다(Fig. 4.6).

제주대학교 중앙도서관

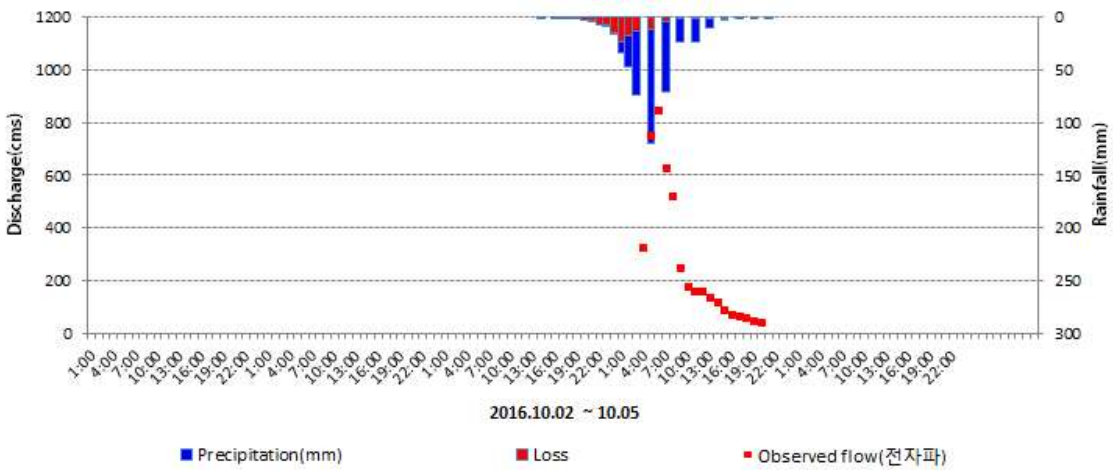


Fig. 4.6 Runoff hydrograph of the typhoon Chaba in the Han stream

4.2.2 고정식 Kalesto를 이용한 유출량

(1) 병문천

태풍 차바 내습 시 병문천 하류부에 위치한 삼오교에서 고정식 Kalesto를 이용하여 홍수유출량을 관측하였다. 10월 05일 04시에 첨두강우량인 110.97 mm의 면적강우량이 발생하였으며, 첨두유출량은 204.04 cms로 첨두강우량의 발생 1시간 후인 10월 05일 05시에 발생하였다(Fig. 4.7).

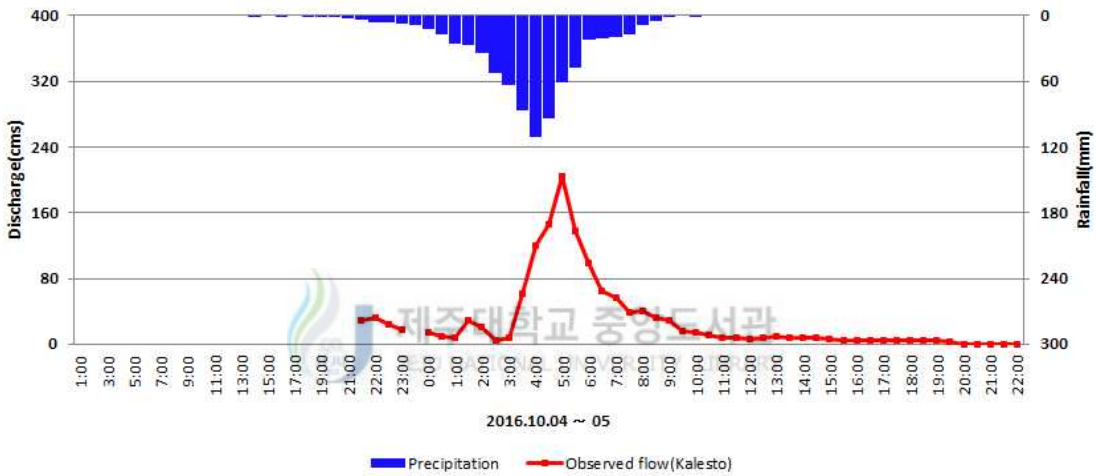


Fig. 4.7 Runoff hydrograph of the typhoon Chaba in the Byeongmun stream

(2) 독사천

태풍 차바 내습 시 독사천 하류부에 위치한 독사제5교에서 Kalesto를 이용하여 홍수유출량을 관측하였다. 10월 05일 04시에 첨두강우량인 87.11 mm의 면적강우량이 발생하였으며, 첨두유출량은 74.33 cms로 첨두강우량의 발생 30분 후인 10월 05일 04시 30분에 발생하였다(Fig. 4.8).

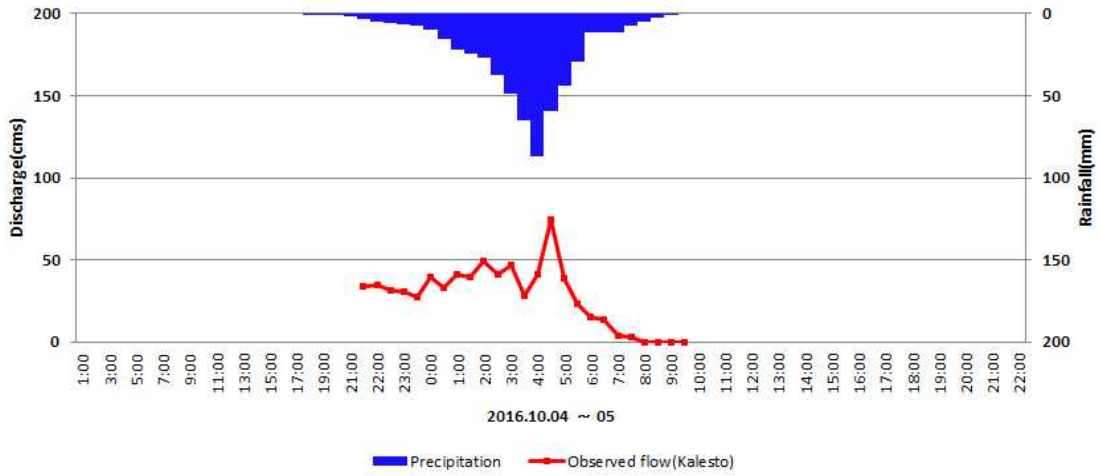


Fig. 4.8 Runoff hydrograph of the typhoon Chaba in the Doksa stream

(3) 산지천

태풍 차바 내습 시 산지천 하류부에 위치한 오현1교에서 Kalesto를 이용하여 홍수유출량을 관측하였다. 10월 05일 04시에 첨두강우량인 97.53 mm의 면적강우량이 발생하였으며, 첨두유출량은 222.25 cms로 첨두강우량과 동시간인 04시에 발생하였다(Fig. 4.9).

제주대학교 중앙도서관

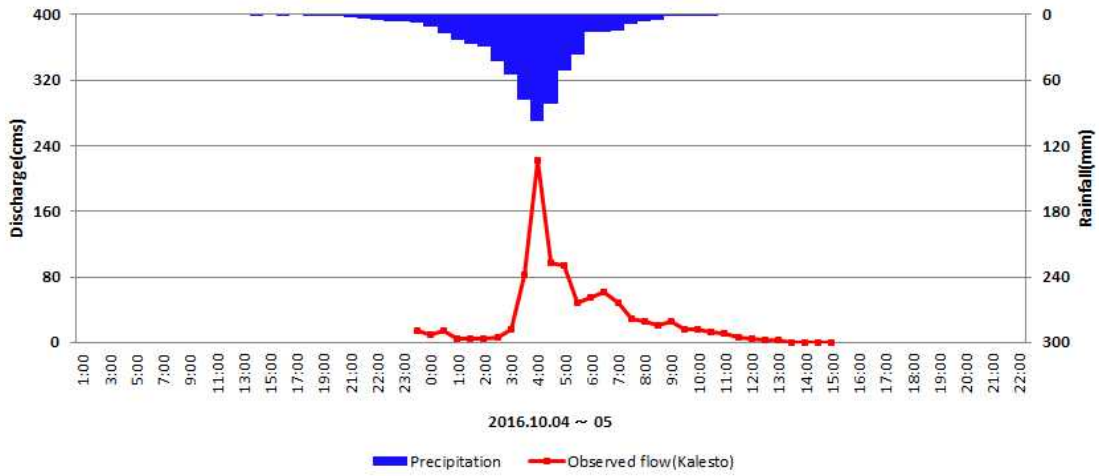


Fig. 4.9 Runoff hydrograph of the typhoon Chaba in the Sanji stream

5. 강우분석 방법에 따른 면적강우량의 정확도 비교·분석

강우량은 홍수량을 산정하기 위한 필수조건이며 강우량 산정 시 지점 강우량이 아닌 면적 개념의 면적평균 강우량을 산정하게 된다. 면적강우량을 산정하는 방법은 산술평균법, 티센다각형법, 등우선법 등이 있다. 산술평균법은 평야지역이나 강우분포가 균일한 경우에 적용 가능한 방법으로 제주도와 같이 산간지역으로 이루어져 고도에 따른 강우분포가 상이한 지역에는 적합하지 않다.

티센다각형법은 연구 및 실무에서 가장 많이 활용되고 있는 방법으로 유역 내 관측소의 위치와 관측망의 상대적인 밀도 등을 고려할 수 있으나 고도에 따른 강우의 변화를 고려하지 못한다. 이에 따라 이 연구에서는 고도에 따른 강우량을 고려할 수 있는 등우선법과 티센다각형법에 의한 면적강우량을 비교하고 그 적용성을 검토하였다.

5.1 티센다각형법에 의한 면적강우량 산정

제주대학교 중앙도서관

티센다각형법을 적용하여 제주시 주요 도심하천인 한천, 병문천, 독사천, 산지천의 면적강우량을 산정하였다. 티센다각형망 구축 시 한천은 윗세오름, 진달래밭, 어리목, 아라, 제주 관측소의 영향을 받으며, 병문천은 진달래밭, 아라, 제주 관측소, 독사천은 아라, 제주 관측소, 산지천은 진달래밭, 아라, 제주 관측소의 영향을 받고 있다(Fig. 5.1).

티센다각형망 구성에 따른 관측소의 면적비를 하천별로 분석한 결과 유역 면적이 가장 큰 한천 유역은 대부분 산간지역에 위치한 어리목(39.53 %), 진달래밭(18.37 %), 윗세오름(7.6 %) 관측소의 영향을 받고 있다. 병문천과 산지천 유역은 중산간 유역에서 발원하고 있어 도심지에 위치한 아라 관측소(60 % 이상)의 영향을 받으나, 유역 면적이 가장 작은 독사천 유역은 제주(45.84 %), 아라(54.16 %) 관측소의 영향을 받고 있다(Table 5.1).

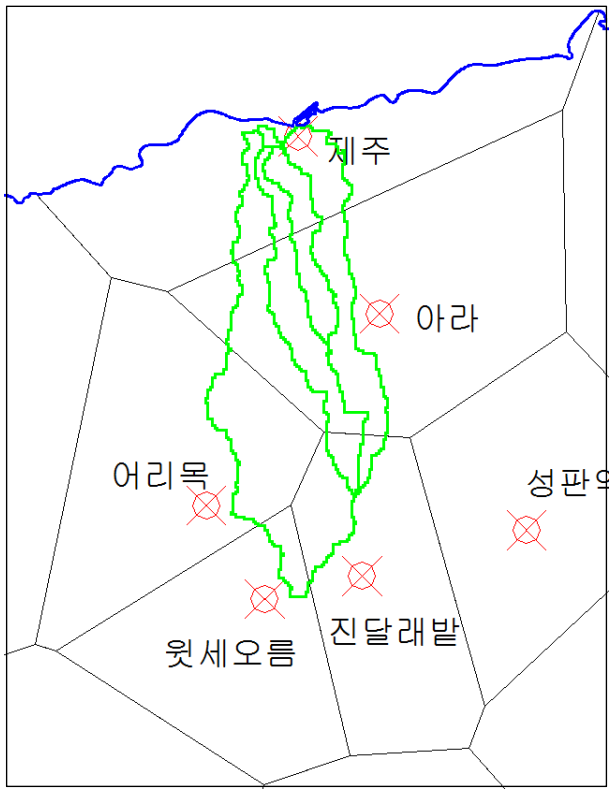


Fig. 5.1 Application of Thiessen method in Jeju urban streams

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 5.1 Area ratio of urban streams by Thiessen method

		Rainfall Observatory				
		Jeju	Ara	Eorimok	Witseoreum	Jindallaebat
Han Stream	Area(km^2)	3.92	8.98	14.78	2.84	6.87
	Ratio(%)	10.48	24.02	39.53	7.6	18.37
Byeongmun Stream	Area(km^2)	1.88	8.11	-	-	1.88
	Ratio(%)	15.84	68.32	-	-	15.84
Doksa Stream	Area(km^2)	2.91	3.45	-	-	-
	Ratio(%)	45.84	54.16	-	-	-
Sanji Stream	Area(km^2)	4.81	8.82	-	-	1.02
	Ratio(%)	32.83	60.2	-	-	6.97

티센다각형법 적용 및 면적강우량 산정을 위한 강우자료는 2010년 이후 발생한 호우사상들 중 강우가 많이 발생한 사상들을 선정하였다. 2012년 8월에 발생한 태풍 '볼라벤', '덴빈'은 태풍이 연속적으로 내습하여 9일 동안 강우가 지속되었다. 2016년 10월에 발생한 태풍 '차바'는 강우기간이 2일에 불과하나 가장 높은 강우강도를 기록하였다(Table 5.2).

Table 5.2 Rainfall events using the Thiessen method

No	Rainfall event	Time of occurrence	Rainfall duration
1	Typhoon 'Khanun'	2012. 07. 17 ~ 19	3 days
2	Typhoon 'Bolaven' & 'Tembin'	2012. 08. 22 ~ 30	9 days
3	Typhoon 'Sanba'	2012. 09. 15 ~ 17	3 days
4	Typhoon 'Nakri'	2014. 07. 31 ~ 08. 04	5 days
5	Typhoon 'Chaba'	2016. 10. 04 ~ 05	2 days

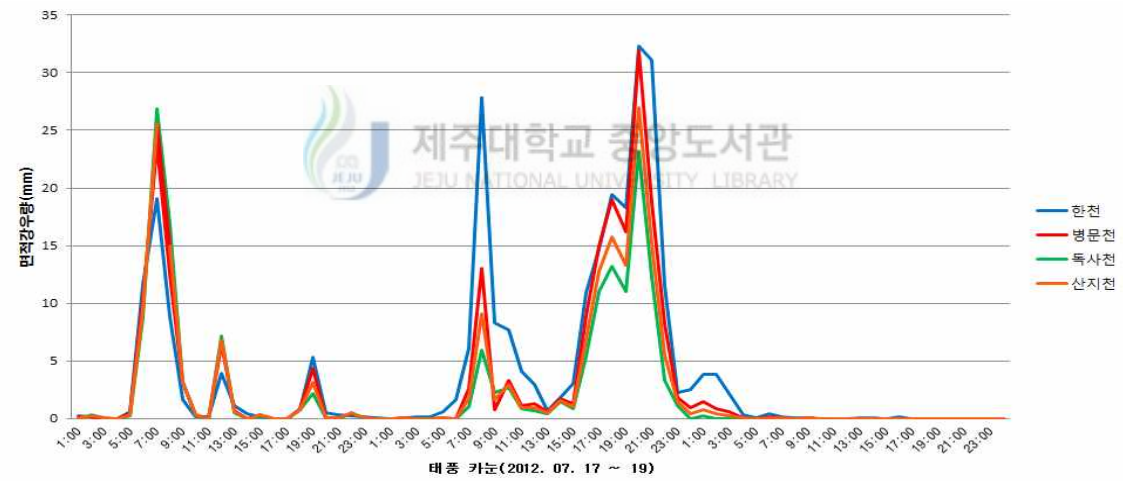
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

티센다각형법에 의한 하천별 면적강우량 산정 시 유역 면적에 비례하여 면적강우량이 한천 유역에서 가장 높게 나타났으며, 독사천 유역에서 가장 낮았다. 또한 티센다각형법 면적비 중 고도가 높은 곳에 위치한 윗세오름과 진달래밭, 어리목 관측지점의 비율이 높을수록 면적강우량이 크게 나타났으며, 산지천 유역보다 크기가 작은 병문천 유역의 면적강우량이 2번째로 높게 산정되었다(Table 5.3).

태풍 '볼라벤', '덴빈' 사상은 강우지속 기간이 길어 면적강우량이 호우사상 중 가장 크게 나타났으며, 단일 사상으로는 태풍 '나크리'의 면적강우량이 가장 크게 나타났다. 강우강도를 의미하는 시우량(hr/mm)과 일강우량(day/mm)은 태풍 '차바' 사상이 123.06 hr/mm, 242.42 day/mm로 가장 크게 나타났다(Fig. 5.2 ~ 5.6).

Table 5.3 Area rainfall in urban streams by Thiessen method

	Area rainfall(mm)			
	Han Stream	Byeongmun Stream	Doksa Stream	Sanji Stream
Typhoon 'Khanun'	275.01	214.26	165.12	186.84
Typhoon 'Bolaven' & 'Tembin'	1092.17	901.29	712.47	796.06
Typhoon 'Sanba'	670.5	578.03	496.09	532.14
Typhoon 'Nakri'	861.86	500.64	283.46	379.68
Typhoon 'Chaba'	484.83	379.66	281.22	324.53



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 5.2 Area rainfall in urban streams by Thiessen method(Typhoon Khanun)

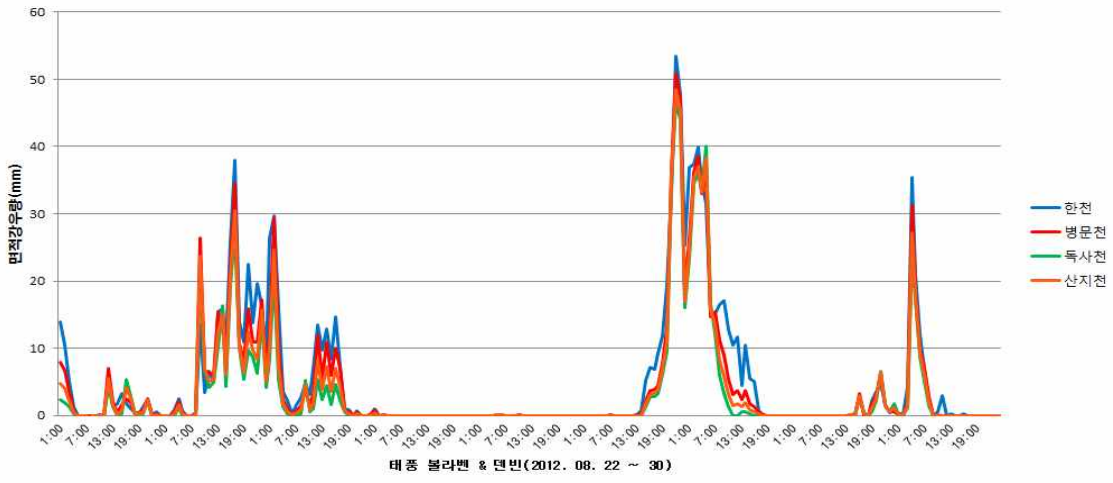
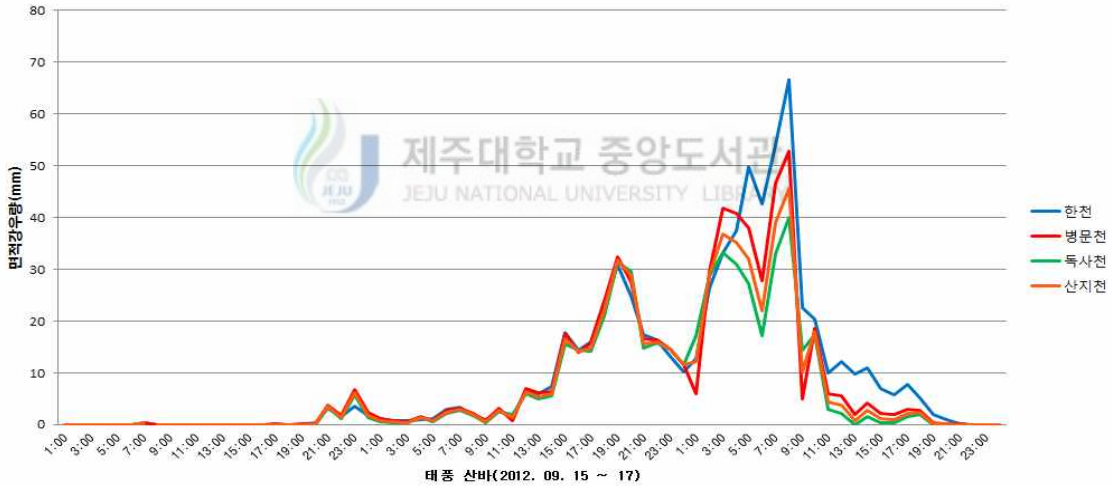


Fig. 5.3 Area rainfall in urban streams by Thiessen method (Typhoon Bolaven, Tembin)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 5.4 Area rainfall in urban streams by Thiessen method(Typhoon Sanba)

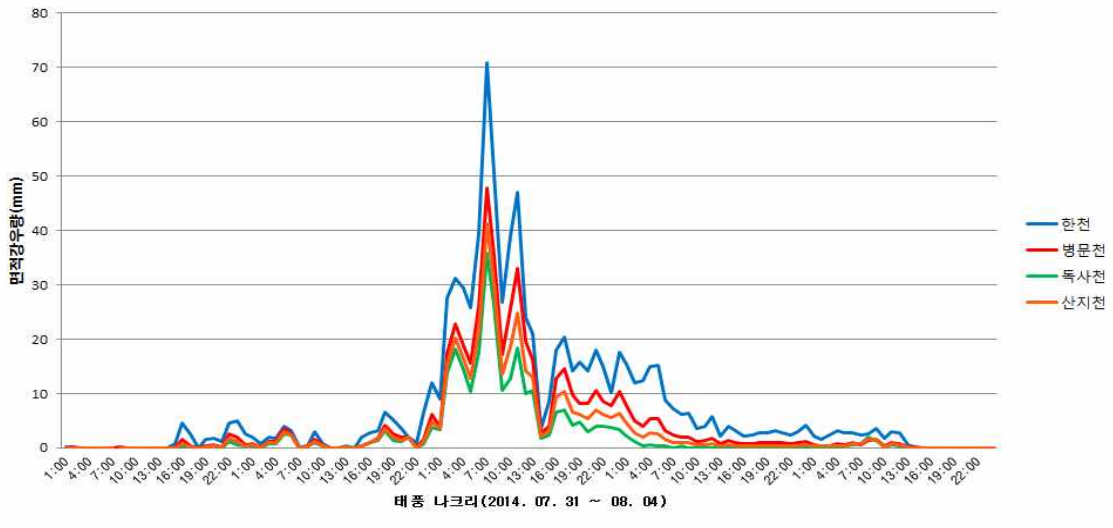
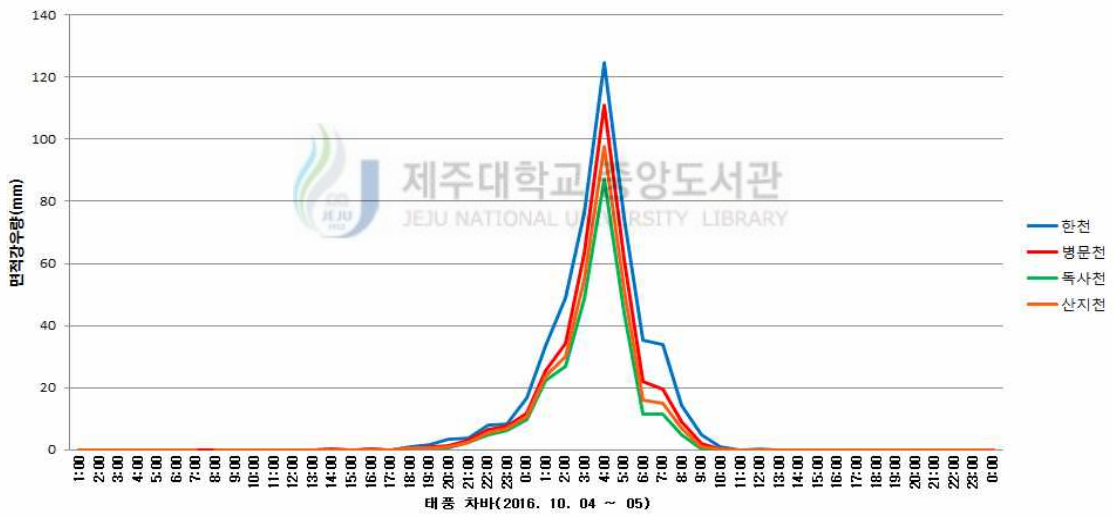


Fig. 5.5 Area rainfall in urban streams by Thiessen method(Typhoon Nakri)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 5.6 Area rainfall in urban streams by Thiessen method(Typhoon Chaba)

5.2 등우선법에 의한 면적강우량 산정

등우선법은 면적강우량 산정 시 면적을 가중인자로 취하는 부분은 티센다각형법과 유사하다 그러나 등우선법은 관측 자료에 가중치를 부여하지 않고 등우선간의 평균강우량에 면적 가중치를 부여하여 산정한다.

등우선도 작도 시 강우자료는 기상청의 기상관측 자료를 활용하였으며, 등우선도는 Kriging 기법으로 작도하였다. 티센다각형법은 유역에 영향을 미치는 인접 관측소의 자료를 활용한 반면, 등우선법은 Kriging 기법을 통하여 등우선도를 작도하기 때문에 제주도에 위치한 전 우량 관측소(도서지역 제외)에서 관측한 자료를 활용하였다.

<제주지방기상청, 2018>

Fig. 5.7 Rainfall observation network of Jeju Island

제주도는 고도에 의한 강우편차가 발생하며 산악지형의 비중이 크게 나타나고 있어 강우관측소의 분포 및 밀도가 중요하다. 제주도에 설치된 강우관측소는 총 38개 지점으로 동부지역 6개소, 서부지역 6개소, 남부지역 9개소, 북부지역 8개소, 산지지역 8개소, 추자도에 1개소가 설치되어 있다(Table 5.4).

Table 5.4 Rainfall Observatory in Jeju Island

관측소명	관측소 위치	해발고 (m)	지역
제주	제주시 일도일동 제주지방기상청	20	북부
산천단	제주시 아라일동 KBS제주방송총국 아라송신소	375	북부
외도	제주시 외도일동 외도정수장	86	북부
오등	제주시 오등동	234	북부
새별오름	제주시 애월읍 봉성리	435	북부
유수암	제주시 애월읍 유수암리 제주경마공원	423	북부
대흘	제주시 조천읍 대흘리 제주특별자치도수자원본부	144	북부
선흘	제주시 조천읍 선흘리	251	북부
삼각봉	제주시 오라이동	1528	산지
한라생태숲	제주시 용강동	618	산지
어리목	제주시 해안동 한라산국립공원관리사무소	965	산지
사제비	제주시 애월읍 광령리	1434	산지
윗세오름	제주시 애월읍 광령리 윗세오름대피소	1668	산지
성판악	제주시 조천읍 교래리 성판악탐방안내소	760	산지
영실	서귀포시하원동	1260	산지
진달래밭	서귀포시 남원읍 하례리 진달래밭대피소	1489	산지
서귀포	서귀포시 서귀동 서귀포관측소	49	남부
기상(과)	서귀포시 서호동 국립기상과학원	178	남부
강정	서귀포시 강정동	143	남부
색달	서귀포시 색달동 제주다원	425	남부
중문	서귀포시 색달동 중문골프클럽	63	남부

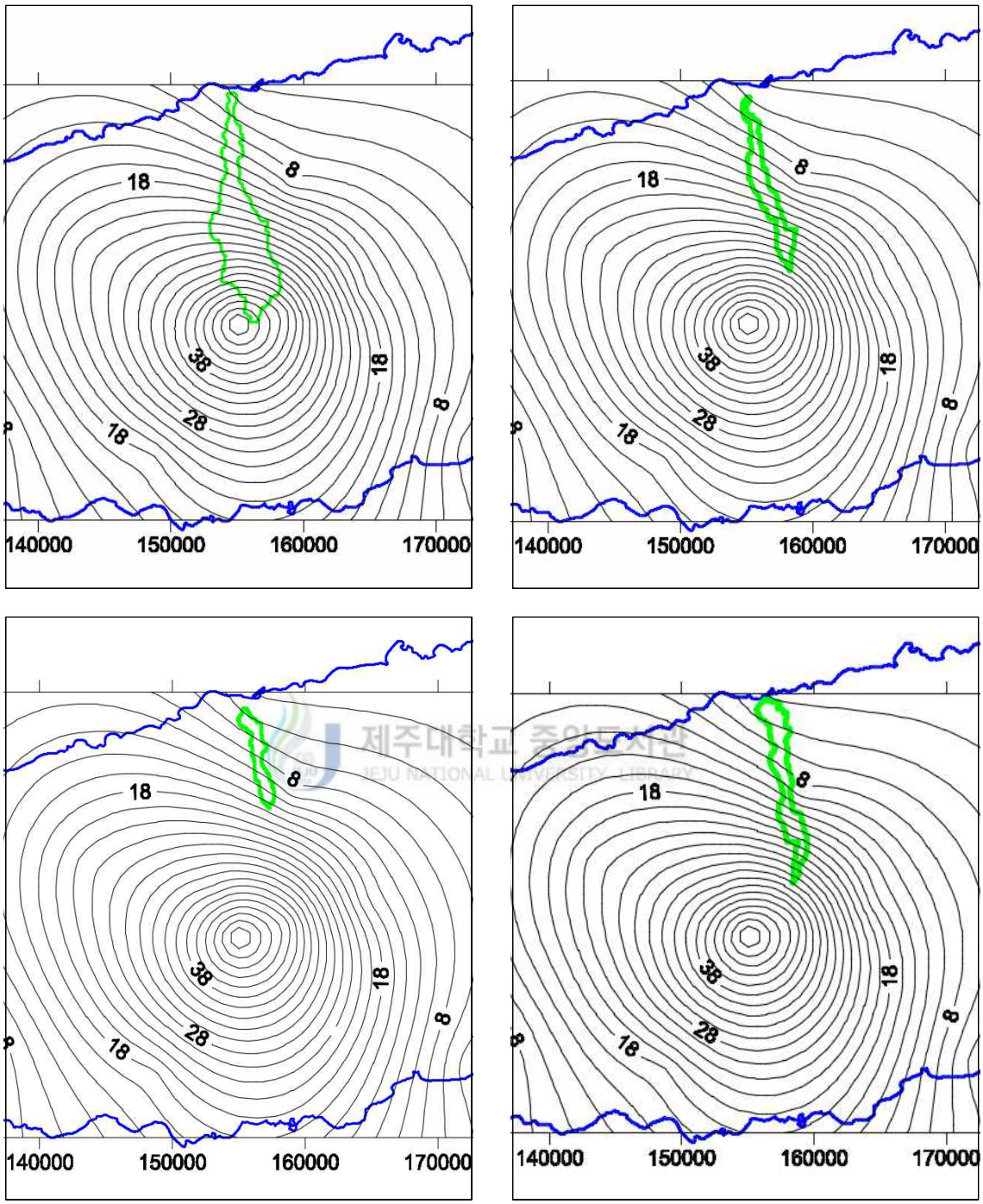
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제주남원	서귀포시 남원읍 남원리 남원생활체육관	26	남부
태풍센터	서귀포시 남원읍 한남리 국가태풍센터	244	남부
신례	서귀포시 남원읍 신례리 생물종다양성연구소	302	남부
서광	서귀포시 안덕면 서광리 서광정수장	187	남부
성산	서귀포시 성산읍 신산리 성산기상레이더관측소	20	동부
월정	제주시 구좌읍 월정리 월정정수장	34	동부
구좌	제주시 구좌읍 하도리	18	동부
송당	제주시 구좌읍 송당리 송당리사무소	194	동부
우도	제주시 우도면 연평리	9	동부
표선	서귀포시 표선면 하천리 표선생활체육관	77	동부
고산	제주시 한경면 고산리 고산기상레이더관측소	71	서부
금악	제주시 한림읍 금악리 금악정수장	338	서부
한림	제주시 한림읍 명월리	39	서부
대정	서귀포시 대정읍 일과리	3	서부
가파도	서귀포시 대정읍 가파리	4	서부
마라도	서귀포시 대정읍 가파리	12	서부
추자도	제주시 추자면 영흥리	8	

<제주지방기상청, 2018>

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

등우선법에 의한 면적강우량 산정 시 제주도 인근에 위치한 4개 섬(우도, 가파도, 마라도, 추자도)의 강우자료는 연구대상 유역의 하천유출 시 영향을 미치지 않고 고도에 의한 영향이 없기 때문에 제외하였다. 등우선도 작도 시 대부분 한라산 정상부에 위치한 윗세오름, 진달래밭, 성판악 관측지점을 기준으로 작도되며 저지대인 해안으로 갈수록 강우의 분포가 작아진다(Fig. 5.8)



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 5.8 Estimate area rainfall using the isohyetal method

5.3 면적강우량 비교·분석 및 강우관측소의 공간적 분포 특성

5.3.1 강우관측소의 위치 및 공간적 분포 특성

(1) 강우관측소 위치

티센다각형망 구축 시 연구대상 유역에 영향을 미치는 강우관측소는 5개소로 고도 600m 이하 지점에 제주 관측소(20.5m)와 아라 관측소(374.7m)가 위치하고 있으며, 고도 600m 이상 지점에는 어리목(965m), 진달래밭(1489m), 윗세오름 관측소(1672m)가 위치하고 있다(Fig. 5.9).

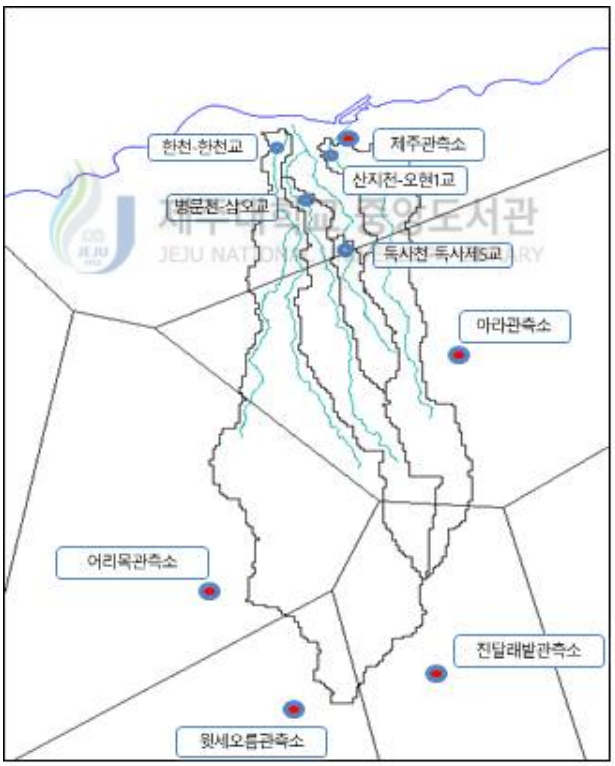


Fig. 5.9 Location of rainfall observatories in urban stream watershed and thiessen network

제주도는 태풍 및 집중호우 시 해안가(저지대)보다 한라산이 위치한 중심부(고지대)로 갈수록 강우량이 증가하는 양상을 보인다. 따라서 티센다각형망 구축 시 고도

가 높은 곳에 강우관측소가 위치할수록 정확한 면적강우량 산정이 가능하다.

제주관측소(20.5m)는 최저지대인 해안지역에 위치하고 있어 제주관측소 면적비 중 최고도인 160m까지 발생한 강우를 정확하게 반영하지 못하고 있다. 제주관측소 위치를 기준으로 도심 하천유역의 티센면적비를 분석한 결과 제주관측소가 위치한 20m 까지의 면적비는 5.55 % 였으며, 20m 이상 160m 이하의 면적비는 94.45 %로 나타났다. 이에 따라 티센다각형법으로 160m 이하의 면적강우량 산정 시 오차가 클 것으로 분석되었다. 아라관측소(374.7m)는 면적비의 중앙 부근에 위치하고 있어 관측지점보다 상위 고도(최대 650m)의 강우량을 고려하지 못하고 있다. 아라관측소가 위치한 375m까지의 면적비는 54.23 % 였으며, 375m 이상 650m 이하의 면적비는 45.77 %였다. 이에 따라 아라관측소의 티센면적비가 차지하는 650m 이하의 면적강우량 산정 시 오차가 클 것으로 분석되었다(Table 5.5).

반면, 산간지역에 위치한 어리목(965m), 윗세오름(1,672m), 진달래밭(1,489m) 관측소는 연구대상 유역 및 티센다각형망에서 최상단에 위치하고 있다. 어리목의 티센면적비 중 어리목보다 고도가 낮은 320m 이상 965m 이하의 면적비는 81.09 % 이며, 965m 이상 1280m 이하의 면적비는 18.91 %로 나타났다. 윗세오름의 티센면적비 중 윗세오름보다 고도가 낮은 1,120m 이상 1,672m 이하의 면적비는 97.59 %로 대분을 차지하고 있으며, 1,672m 이상 1850m 이하의 면적비는 2.41 %로 나타났다. 진달래밭은 고도가 낮은 620m 이상 1,489m 이하의 면적비는 97.16 %, 고도가 높은 1489m 이상 1680m 이하의 면적비는 2.84 %로 윗세오름과 유사하게 분석되었다(Table 5.5).

따라서 티센다각형법에 의한 면적강우량 산정 시 저지대에서는 고도의 영향이 제대로 반영되지 않아 오차가 크게 발생하는 반면, 고지대의 유역에서는 고도의 영향이 반영된 정확한 면적강우량 산정이 가능하였다.

제주대학교 중앙도서관

Table 5.5 Altitude distribution and area ratio of Thiessen method

Rainfall Observatory	Altitude (m)	Altitude distribution of Thiessen method		Area ratio of Thiessen method	
		Min (m)	Max (m)	Downstream (%)	Upstream (%)
Jeju	20.5	10	160	5.55	94.45
Ara	374.7	110	650	54.23	45.77
Eorimok	965	320	1280	81.09	18.91
Witseoreum	1672	1120	1850	97.59	2.41
Jindallaebat	1489	620	1680	97.16	2.84

(2) 강우관측소의 밀집도

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

강우 관측소는 접근성 및 예산, 필요목적에 따라 설치·운영되고 있어 일부지역에 편중되거나 자료의 측정이 중복되는 문제 발생한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 강우 관측소 설치 시 강우관측망 밀도를 분석하여 지역 편차 및 관측의 중복성을 줄이고 있다.

제주도 하천에 대한 강우관측망 밀도를 분석한 결과 유역면적 대비 강우관측지점의 밀집도가 내륙지역과 달리 높게 나타났다. 강우관측소는 보통강우관측소와 자기강우관측소로 구분되며 WMO(World Meteorological Organization)에서 제시한 기준을 바탕으로 설치된다. 우리나라의 경우 대부분 자기우량계가 설치되어 있으며 지형별 관측소 설치 기준은 다음과 같다(Table 5.6).

Table 5.6 Minimum standard of observation network density for rainfall observations

구 분	관측최소밀도(㎢)	
	자기우량계	보통우량계
해안지역	9,000	900
산지지역	2,500	250
평야지역	5,750	575
구릉지역	5,750	575
도서지역	250	25
도시지역	10～20	-
건조 및 극지역	100,000	10,000

<WMO(세계기상기구), 1994>

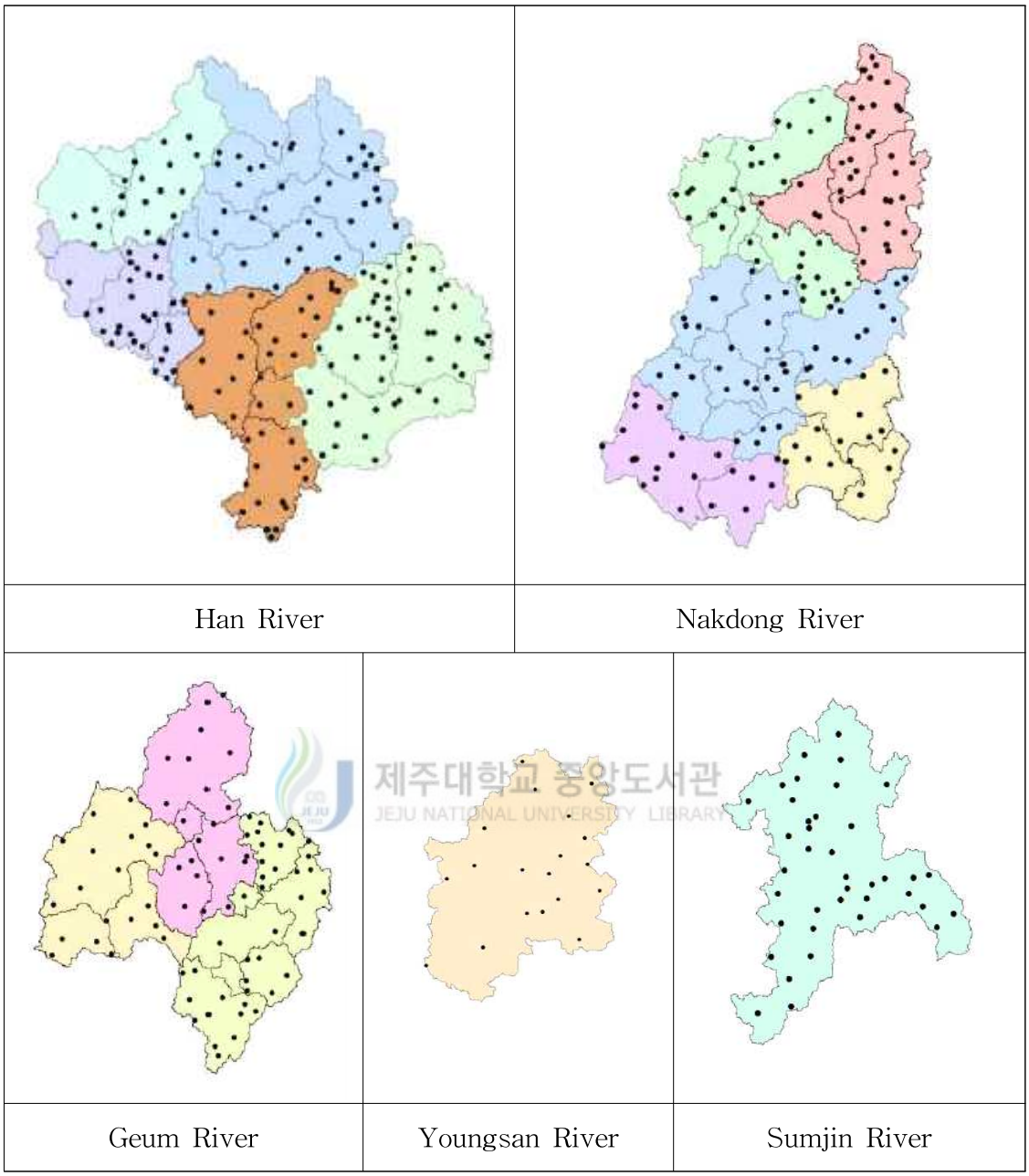
우리나라 내륙지역의 하천은 크게 5대강(한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강) 유역을 중심으로 구분되며 강우관측소 밀도는 136.0 km^2/EA 로 나타났다. 유역별 강우관측소 밀도를 분석한 결과 한강 유역은 140.5 km^2/EA, 낙동강 유역은 135.4 km^2/EA, 금강 유역은 120.9 km^2/EA, 영산강 유역과 섬진강 유역은 각각 182.6 km^2/EA, 126.0 km^2/EA 로 분석되었다. 한강 유역은 강우관측소가 가장 많이 설치되어 있으나 유역 면적이 넓어 밀도가 낮은 편이며, 금강 유역에서 가장 높은 강우관측소의 밀도가 나타나고 있다. 반면, 영산강 유역은 19개소의 강우관측소가 설치되어 있어 5대강 유역 중 면적 대비 가장 낮은 강우관측소 밀도가 나타나고 있다(Table 5.7, Fig. 5.10). 내륙지역의 강우관측소 밀도는 세계기상기구(WMO)에서 제시한 2가지 기준(자기우량계, 보통우량계)의 최소 관측밀도를 모두 충족하고 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 5.7 Density of rainfall observatories in the five major river basins of Korea's inland regions

	Area (km^2)	Rainfall Observatory	A/R.O (km^2/EA)	R.O/A (EA/km^2)
Han River	26264.9	187	140.5	0.0071
Nakdong River	23701.9	175	135.4	0.0074
Geum River	9915	82	120.9	0.0083
Youngsan River	3469.4	19	182.6	0.0055
Sumjin River	4914.3	39	126.0	0.0079
Total	68,265.5	502	136.0	0.0074

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 5.10 Distribution of rainfall observatories in the five major river basins of Korea's inland regions

제주도 전역에 걸쳐 강우관측 지점은 38개소가 위치하며, 티센다각형망 구축 시 한천, 병문천, 독사천, 산지천은 5개소(제주, 아라, 어리목, 진달래밭, 윗세오름) 강우관측 지점의 영향을 받고 있다. 하천별 강우관측소 밀도를 분석한 결과 한천 유역은 7.34 km^2/EA, 병문천 유역은 3.96 km^2/EA, 독사천 유역은 3.18 km^2/EA, 산지천

유역은 4.89 km^2/EA이다. 제주도 하천은 내륙지역과 같이 유역면적이 크지 않고 강우 관측소가 조밀하게 분포되어 있어 내륙지역과 비교 시 약 25배 이상의 밀집도를 나타내고 있으며, 관측소 당 10km^2가 넘지 않는 매우 높은 강우관측망 밀도를 보이고 있다(Table 5.8).

Table 5.8 Density of rainfall observatories in urban streams basin of Jeju Island

	Area (km^2)	Rainfall Observatory (EA)	Density	
			A/R.O (km^2/EA)	R.O/A (EA/km^2)
Han Stream	36.69	5	7.34	0.136
Byeongmun Stream	11.87	3	3.96	0.253
Doksa Stream	6.35	2	3.18	0.315
Sanji Stream	14.67	3	4.89	0.204

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

5.3.2 면적강우량 정확도 비교·분석

일정한 강우지속기간 동안 내린 강우량은 호우중심으로부터 멀어질수록 감소한다. 면적강우량은 유역에 내린 총강우량을 유역면적으로 나눈 등가 우량깊이를 의미하므로 호우중심으로부터 멀어질수록 면적강우량은 점점 작아지게 된다. 이와 같이 공간분포 및 이동 등에 의하여 강우가 유역 전반에 걸쳐 동일한 형태로 발생하지 않으므로 유역의 면적강우량은 관측소의 지점강우량보다 작게 나타난다.

면적강우량은 유역 내에 관측소가 다수 존재할 경우 티센다각형법 등으로 가중평균한 동시간 임의시간 면적강우량의 최대치 계열을 작성한 후 빈도해석을 수행한다. 그러나 우리나라는 동시간 임의시간에 대한 강우량자료의 수집이 곤란하여 다른 방안을 적용하는 것이 필요하다. 일반 실무에서는 홍수량 산정지점별로 유역면적에 대하여 관측소별 지점확률강우량을 산정하고 티센다각형법으로 가중평균한 후 면적우량환산계수(ARF : Areal Reduction Factor)를 곱하여 면적확률강우량을 산정하고 있다.

티센다각형법은 각 관측소마다 지배면적을 가중치로 부여하여 평균강우량을 산정하는 방법으로 유역 내 우량관측소의 상대적인 위치와 관측망의 상대적인 밀도 등을 고려한다. 그러나 고도(산악효과)에 따른 강수의 변화를 고려하지 못하는 단점이 있다. 또한, 제주도와 같이 산지형 하천유역에서는 적합한 면적우량환산계수(ARF)가 없어 제주도 산지형 하천의 면적확률강우량 산정 시 적합하지 않아 등우선법을 활용한 면적강우량과 비교하였다.

제주도 유역을 대상으로 면적강우량 산정과 관련한 연구가 다양하게 진행되었다. Kim et al(2012)은 제주도 미계측 지역의 관측 강수 자료 생성을 위하여 PRISM(Parameter-elevation Regression on Independent Slope Model) 기법을 적용하였다. Um(2014)은 공간보간 기법인 PRISM 기법과 티센다각형법으로 면적강우량을 산정하였으며 PRISM 기법에 의한 면적강우량이 티센다각형법의 의한 결과보다 1% 정도 큰 결과를 도출하였다.

Jung(2013)은 한천 유역의 티센다각형법과 등우선법을 이용한 면적강우량을 산정하고 관측자료 간 변환식을 개발하였다. 그러나 호우사상별 오차가 상이하게 발생하여 호우사상 전체를 적용하기 위해서는 더 많은 자료 분석이 필요하다. 또한 면적강우량의 고도별 분석이 아닌 하류부 관측지점에서의 시간별 면적강우량이기 때

제주대학교 중앙도서관

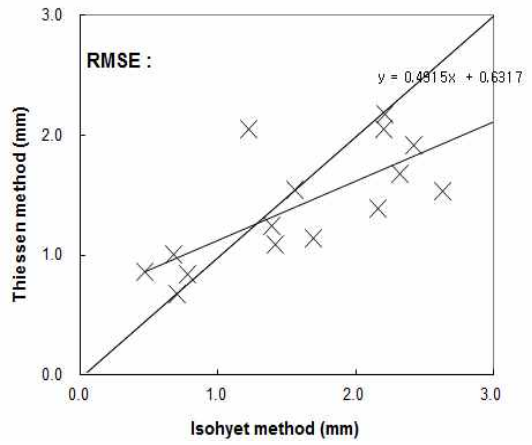
문에 이 연구의 분석방향과는 차이가 있다.

티센다각형법과 등우선법 간 가장 큰 차이점인 고도의 영향을 고려하기 위하여 200 m 간격으로 고도별 면적강우량을 산정하였다. 면적강우량 비교 시 매시간별 동시간의 강우자료를 적용하여 두 방법 간 상관계수를 분석하였다.

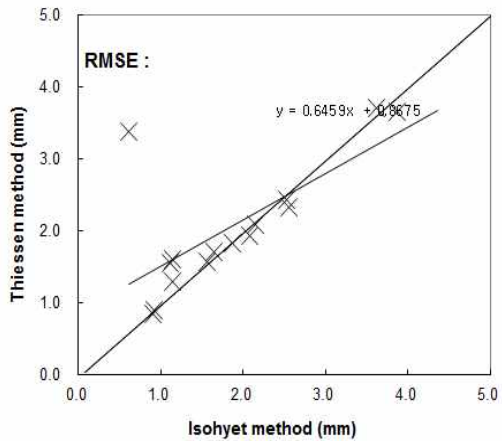
고도별 면적강우량 비교 결과 대부분의 도심지가 위치한 고도 600m 이하에서 두 방법 간 면적강우량의 상관계수가 0.48 ~ 0.53 으로 나타나 많은 오차가 발생하였다. 반면, 600m 이상의 고도에서는 티센다각형법과 등우선법 간 면적강우량의 상관계수가 0.7 ~ 0.96 으로 높았으며, 고도 1200m 이상의 고지대에서는 상관계수가 0.8 ~ 0.96 으로 매우 높게 나타나고 있다.

이러한 결과들은 앞서 5.3.1에서 분석한 결과에서도 나타나고 있다. 티센다각형망 구축 시 제주관측소는 고도 160m 까지 영향을 미치고 있으나, 고도 20m에 설치되어 있어 제주관측소의 티센면적비 중 5.5 %에 불과하고, 94.5 %에 해당하는 유역에서 강우의 오차가 발생하고 있다. 또한 아라관측소는 티센면적비 중 45.8%의 면적에서 강우의 오차가 발생하고 있어 고도 600m 이하의 유역에서는 상관계수의 오차가 크게 나타났다. 그러나 600m 이상의 고도에서는 고지대에 위치한 관측소의 영향을 받으며 티센면적비 중 어리목 18.91 %, 윗세오름 2.41 %, 진달래밭 2.84 %의 면적에서 강우 오차가 발생하여 상관계수도 높게 분석되었다. 특히, 고도 1200m 이상의 지역은 윗세오름과 진달래밭 관측소의 영향을 받고 있어 3 % 미만의 면적 오차가 발생하였으며 등우선법에 의한 면적강우량과 상관계수가 매우 높게 분석되었다 (Fig. 5.11).

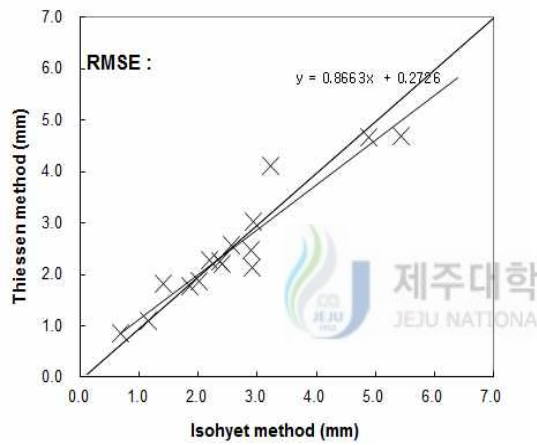
제주대학교 중앙도서관



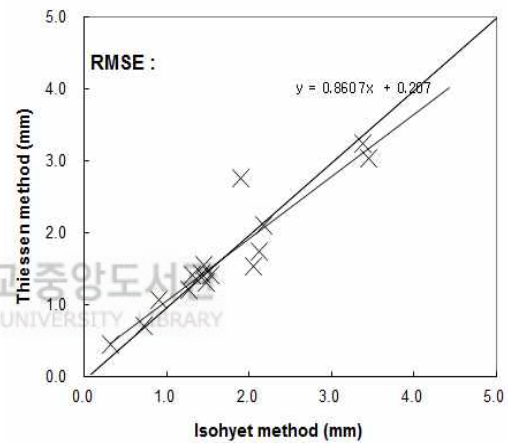
0～200m



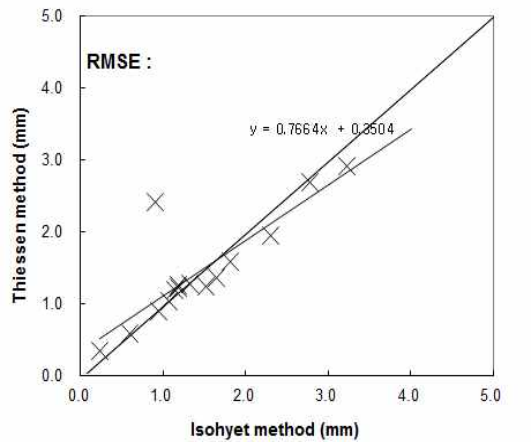
200～400m



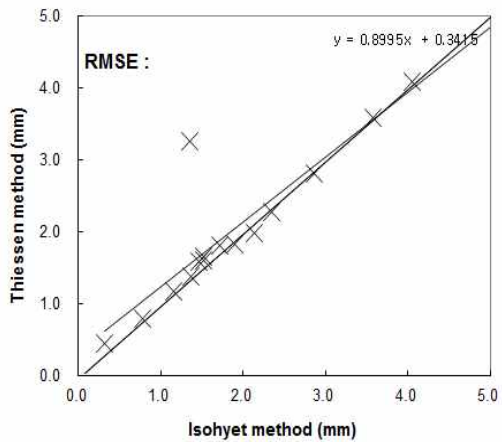
400～600m



600～800m



800～1000m



1000～1200m

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

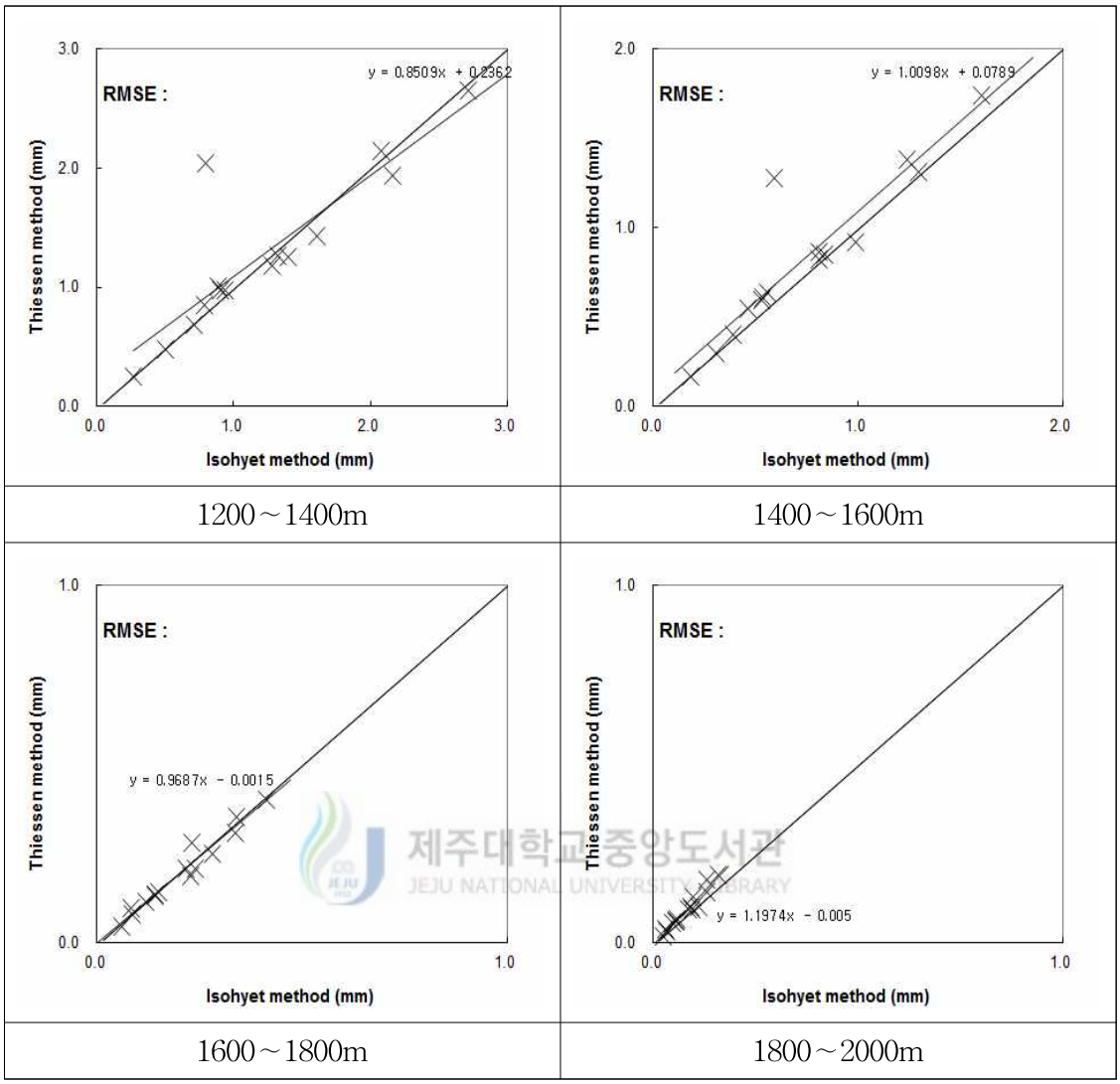


Fig. 5.11 Comparison of area rainfall of altitudinal distribution with thiessen method and isohyetal method

제주도 하천의 면적강우량 산정 시 티센다각형법은 고도에 따라 부분적으로 적용 가능할 것으로 판단되나 고도에 따른 오차가 발생하고 있어 제주도 하천과 같은 산지형 하천에 적합하지 않다. 따라서 고도에 따른 오차가 발생하지 않고 강우관측소의 위치 및 산간지역의 영향을 고려할 수 있는 등우선법이 보다 적합하였다.

6. 홍수량 산정 방법 개선 및 적용

제주도 도심하천인 한천 유역에서는 평균적으로 유효강수량 66 ㎜ 이상, 유출지속시간 14.1 시간 이상 지속될 경우 하천유출이 발생한다(Seo et al., 2014). 2012년부터 2016년까지 현장관측을 통해 확인한 유역의 유출발생 빈도는 2012년 7회, 2013년 1회, 2014년 4회, 2015년 1회, 2016년 1회로 총 14회였으며 풍수기인 7월 ~ 9월 경 많이 발생되었다. 14건의 유출사상 중 첨두유출량이 100 cms 이하인 사상은 4건, 100 ~ 400 cms 사상은 7건, 400 cms 이상은 3건으로 분석되었다. 그 중 이 연구에서 홍수량 검증자료로 활용한 사상은 첨두유출량이 400 cms 이상으로 가장 큰 홍수유출이 발생했던 2012년 태풍 '볼라벤', '산바', 2016년 태풍 '차바' 사상에 대한 분석결과를 제시하였다(Table 6.1).

Table 6.1 Peak flow by heavy rainfall history observed in Han stream for the last 5 years

NO.	Time of occurrence	Rainfall event	Peak flow (cms)
1	2012.04.21	Severe rainfall	162.36
2	2012.04.25	Severe rainfall	54.42
3	2012.07.18	Typhoon 'Khanun'	167.36
4	2012.08.23	Severe rainfall	128.25
5	2012.08.28	Typhoon 'Bolaven'	431.82
6	2012.08.30	Typhoon 'Tembin'	139.70
7	2012.09.17	Typhoon 'Sanba'	544.69
8	2013.05.27	Severe rainfall	106.74
9	2014.07.06	Severe rainfall	58.20
10	2014.07.09	Severe rainfall	45.77
11	2014.08.02	Typhoon 'Nakri'	331.55
12	2014.09.24	Typhoon 'Fungwong'	32.84
13	2015.07.11	Typhoon 'Chanhom'	289.63
14	2016.10.05	Typhoon 'Chaba'	846.33

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

6.1 CN 보정 및 홍수량 산정

6.1.1 경사를 고려한 CN 보정

홍수량 산정을 위한 유효우량 산정 시 미국에서 개발된 SCS 방법을 채택하여 국내 실정에 적합하도록 개선한 방법을 적용하고 있다. 설계홍수량 산정요령(국토교통부, 2012)에서 토지이용형태 및 토양군을 국내 토지이용분류 기준에 맞춰 유출곡선지수를 제시하고 있으나 경사도에 따른 적용성 검토는 이뤄지지 않았다. 유효우량 산정을 위한 SCS 방법은 미국 중서부 지역(경사도 5% 미만)을 기준으로 개발된 방법으로 제주도와 같이 하천유역의 경사가 큰 경우(평균경사 20% 이상, 산간지역 40% 이상) 상당한 오차가 발생하였다. 이에 따라 이 연구에서는 기존 SCS의 유효우량 산정방법에 지형경사를 고려할 수 있는 CN 보정식을 적용하여 유효우량을 산정 후 홍수량을 비교하였다.

지형경사를 고려한 CN 보정식에 대한 많은 연구가 이루어졌으며 대표 경험식으로 Sharpley and Williams (1990), Huang et al.(2006)에 의한 식이 있다. Huang et al.(2006)에 의한 보정식은 경사에 따른 CN 값의 차이가 크지 않기 때문에 CN II와 CN III를 이용한 보정이 가능하고 국내 및 도내 연구사례에서 활용도가 높은 Sharpley- Williams(1990) 방법을 적용하였다(식 6.1).

Sharpely and Williams 공식

$$\mathrm{CN}_{\mathrm{II\,slp}} = \frac{(\mathrm{CN}_{\mathrm{III}} - \mathrm{CN}_{\mathrm{II}})}{3} \cdot [1 - 2 \cdot \exp(-13.86 \cdot slp)] + CN_{II} \qquad (식\ 6.1)$$

여기서, $CN_{\mathrm{II}\,slp}$는 경사를 고려한 CNⅡ이며, slp는 경사, S는 최대잠재보유수량, CNⅡ, CNⅢ는 선행토양함수조건을 띈 유출곡선을 의미한다.

6.1.2 CN 보정에 따른 홍수량 산정

한천유역의 CN 산정 시 기존방법인 설계홍수량 산정요령(국토교통부, 2012)을 적용할 경우 70.16이며, Sharpely and Williams 공식을 적용한 CN은 74.50으로 산정되었다. 경사도를 고려한 CN은 기존방법에 의한 CN 보다 6.2 % 상승하였다.

Table 6.2 Curve number of Han stream(Single watershed)

토지피복(중분류)	CN	유역면적	면적가중 CN	구성비(%)
골프장	69	0	0	0
공공시설지역	75	234221.19	17566589.62	0.63
공업지역	88	0	0	0
과수원	79	1003839.41	79303313.07	2.70
교통지역	89	566439.46	50413111.64	1.53
기타나지	86	856324.30	73643889.55	2.31
기타재배지	79	4311.63	340618.99	0.01
기타초지	69	0	0	0
내륙수	100	21367.73	2136773.23	0.06
내륙습지	100	11309.38	1130938.44	0.03
논	79	0	0	0
밭	74	3481739.40	257648715.56	9.37
상업지역	92	171931.53	15817701.16	0.46
연안습지	100	0	0	0
위락시설지역	69	0	0	0
자연초지	58	2960049.09	171682846.94	7.97
주거지역	85	730183.58	62065604.24	1.97
채광지역	79	0	0	0

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

침엽수림	69	7280434.49	502349979.67	19.60
하우스재배지	85	0	0	0
해양수	100	1539.53	153953.27	0
혼효림	69	2341205.28	161543164.18	6.30
활엽수림	69	14715287.56	1015354841.79	39.62
문화·체육·휴양시	69	190842.01	13168098.88	0.51
시설재배지	85	97073.69	8251263.57	0.26
인공초지	69	2357624.92	162676119.43	6.35
자연나지	86	116875.18	10051265.34	0.31

(1) 태풍 '볼라벤'

태풍 '볼라벤' 내습 시 유출 현장에서 홍수량 관측 결과 첨두유출은 8월 27일 23시와 28일 04시에 2회 발생하였으며, 전자파표면유속계에 의해 현장관측한 첨두유출량은 431.82 cms, 375.95 cms였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

CN 보정에 따른 홍수량 산정방법의 정확도를 비교하기 위하여 홍수량 산정 시 매개변수 등은 설계홍수량 산정요령(국토교통부, 2012)을 참고하였으며, CN 보정 후 한천 유역의 홍수량 산정 결과는 Fig. 6.1과 같다.

설계홍수량 산정요령에 의한 첨두유출량은 322.86 cms로서 관측 값보다 53.09 cms 낮게 산정되어 14.12 %의 오차율이 발생하였으며, 첨두유출 발생 시간은 05시였다. 반면 CN을 보정한 후 홍수량 산정 시 첨두유출량은 339.83 cms로 산정되었으며 9.61 %의 오차율이 발생하였다. 제주도 하천의 경사를 고려하여 CN 보정 시 첨두유출량의 정확도는 4.5 % 향상되었다(Fig. 6.1, Table 6.3).

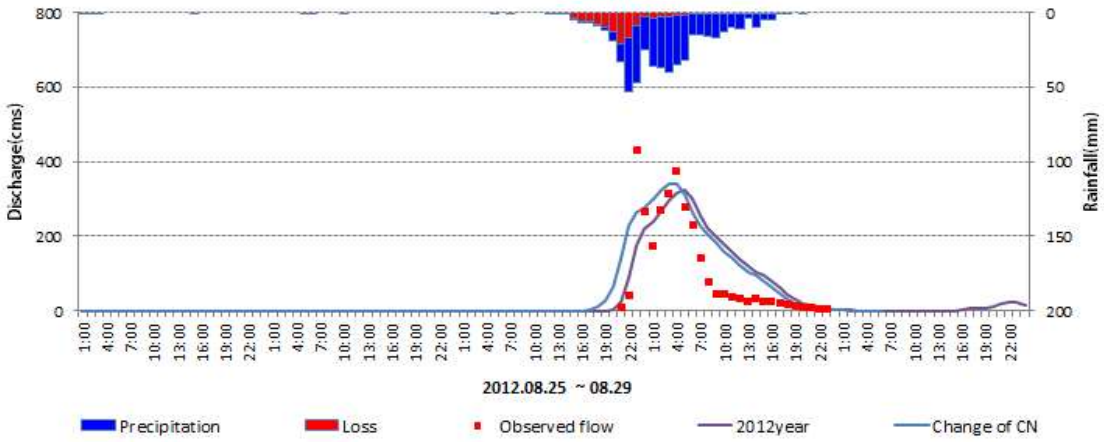


Fig. 6.1 Comparison of flood discharge of typhoon Bolaven by CN calibration of the Han stream watershed

Table 6.3 Comparison of flood discharge of typhoon Bolaven by CN calibration of the Han stream watershed

	Flood discharge (cms)	Peak Time	Error		Ratio (%)
			Discharge (cms)	Peak Time	
Observed	431.82	8/27 23:00	-	-	-
	375.95	8/28 04:00	-	-	-
Manual (2012)	322.86	8/28 05:00	-53.09	1hr	-14.12
CN calibration	339.83	8/28 05:00	-36.12	1hr	-9.61

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(2) 태풍 '산바'

태풍 '산바' 내습 시 홍수량 관측 결과 첨두유출은 9월 17일 09시에 발생하였으며 첨두유출량은 544.69 cms 였다.

설계홍수량 산정요령(국토교통부, 2012)에 의한 첨두유출량은 466.53 cms로서 관측 값보다 78.16 cms 낮게 산정되어 14.35 %의 오차율이 발생하였다. 반면 CN을 보정한 후 홍수량 산정 시 첨두유출량은 339.83 cms로 산정되었으며 9.61 %의 오

차율이 발생하였다. 제주도 하천의 경사를 고려하여 CN 보정 시 첨두유출량의 정확도는 1.5 % 향상되었다(Fig. 6.2, Table 6.4).

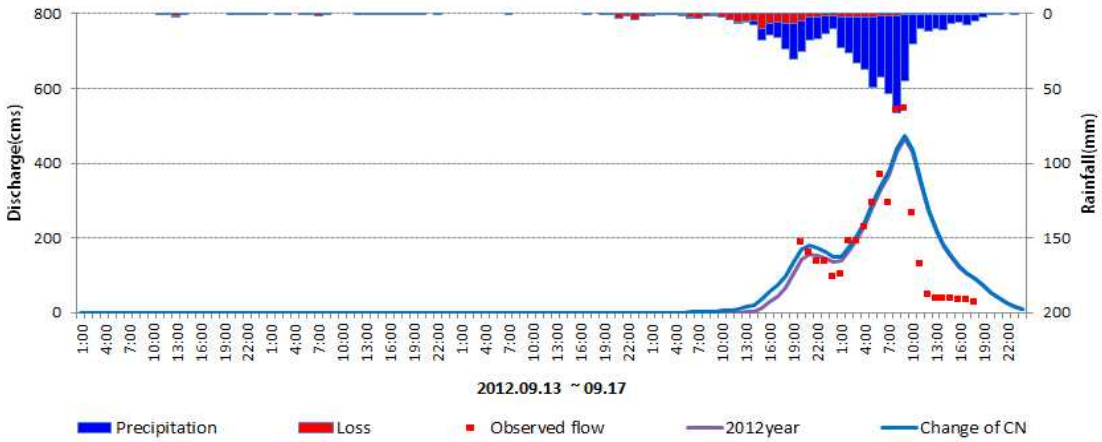


Fig. 6.2 Comparison of flood discharge of typhoon Sanba by CN calibration of the Han stream watershed

Table 6.4 Comparison of flood discharge of typhoon Sanba by CN calibration of the Han stream watershed

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

	Flood discharge (cms)	Peak Time	Error		Ratio (%)
			Discharge (cms)	Peak Time	
Observed	544.69	9:00	-	-	-
Manual (2012)	466.53	9:00	-78.16	-	-14.35
CN calibration	474.52	9:00	-70.17	-	-12.88

(3) 태풍 '차바'

태풍 '차바' 내습 시 홍수량 관측 결과 첨두유출은 10월 05일 04시 30분에 발생하였으며 첨두유출량은 846.33 cms 였다.

설계홍수량 산정요령(국토교통부, 2012)에 의한 첨두유출량은 528.46 cms로서 관

측 값보다 317.87 cms 낮게 산정되어 37.56 %의 오차율이 발생하였다. 반면, CN을 보정한 후 홍수량 산정 시 첨두유출량은 583.05 cms로 산정되어 31.11 %의 오차율이 발생하였다. 제주도 하천의 경사를 고려하여 CN 보정 시 첨두유출량의 정확도는 6.4 % 향상되었다(Fig. 6.3, Table 6.5).

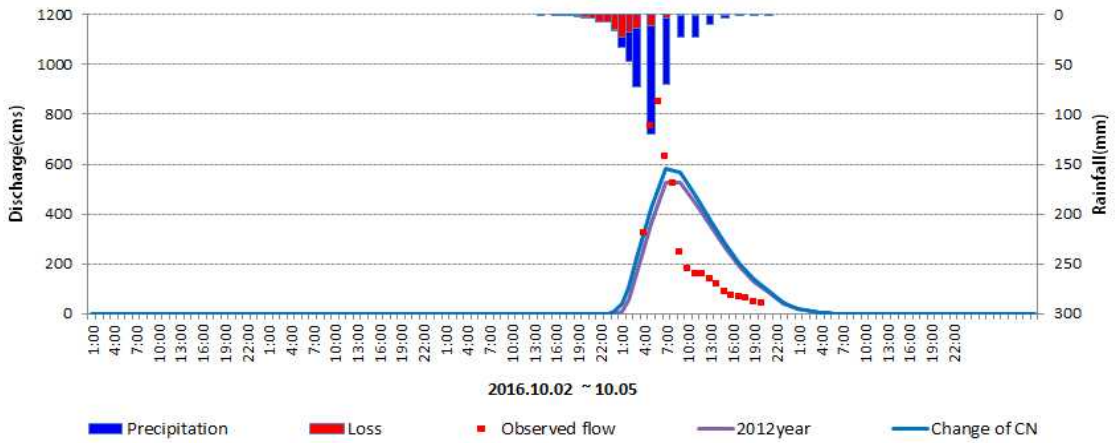


Fig. 6.3 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by CN calibration of the Han stream watershed

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 6.5 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by CN calibration of the Han stream watershed

	Flood discharge (cms)	Peak Time	Error		Ratio (%)
			Discharge (cms)	Peak Time	
Observed	846.33	04:30	-	-	-
Manual (2012)	528.46	05:30	-317.87	1hr	-37.56
CN calibration	583.05	05:00	-263.28	0.5hr	-31.11

현장관측을 통한 홍수량을 기준으로 기존방법(설계홍수량 산정요령, 2012)과 경사를 고려한 CN 보정에 따른 홍수량을 비교하였다.

기존방법으로 홍수량 산정 시 관측자료 대비 14.12 ~ 37.56 %의 오차가 발생한

반면, CN을 보정하여 홍수량 산정 시 9.61 ~ 31.11 %의 오차가 발생하여 기존 방법 대비 1.47 ~ 6.45 %의 오차율이 개선되었다(Table 6.6).

Table 6.6 Comparison of flood discharge and error by CN calibration in the Han stream watershed

	Flood discharge(cms)			Observed vs Manual(2012)		Observed vs CN calibration	
	Observed	Manual (2012)	CN calibration	Error (cms)	Error rate (%)	Error (cms)	Error rate (%)
Bolaven	375.95	322.86	339.83	53.09	14.12	36.12	9.61
Sanba	544.69	466.53	474.52	78.16	14.35	70.17	12.88
Chaba	846.33	528.46	583.05	317.87	37.56	263.28	31.11

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

6.1.3 도심 하천별 CN 보정 및 적용

한천 유역을 대상으로 CN 보정에 따른 홍수량 검토 시 기존(설계홍수량 산정요령, 2012) 방법 대비 첨두유출량의 오차율이 개선되었으며 현장관측 홍수량과의 상관계수 역시 향상되었다. CN 보정에 따른 정확도 향상 여부를 검증하기 위하여 한천유역과 인접한 도심하천인 병문천, 독사천, 산지천에 적용하였으며 최근 발생한 태풍 '차바' 사상의 홍수량을 비교하였다.

(1) 병문천

병문천 유역의 CN 산정 시 기존방법인 설계홍수량 산정요령(국토교통부, 2012)을 적용할 경우 74.14이며, Sharpely and Williams 공식을 적용한 CN은 76.32로 산정되었다. 경사도를 고려한 CN은 기존방법에 의한 CN 보다 2.94 % 상승하였다.

Table 6.7 Curve number of Byeongmun stream(Single watershed)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

토지피복(중분류)	CN	유역면적	면적가중 CN	구성비(%)
골프장	69.00	0.00	0.00	0.00
공공시설지역	75.00	106586.14	7993960.74	0.90
공업지역	88.00	0.00	0.00	0.00
과수원	79.00	948547.19	74935227.93	7.99
교통지역	89.00	464431.95	41334443.12	3.91
기타나지	86.00	683537.31	58784208.59	5.76
기타재배지	79.00	18382.00	1452178.29	0.15
기타초지	69.00	0.00	0.00	0.00
내륙수	100.00	0.00	0.00	0.00
내륙습지	100.00	0.00	0.00	0.00
논	79.00	0.00	0.00	0.00

밭	74.00	2855708.62	211322437.53	24.06
상업지역	92.00	129931.83	11953728.19	1.09
연안습지	100.00	0.00	0.00	0.00
위락시설지역	69.00	0.00	0.00	0.00
자연초지	58.00	79398.25	4605098.51	0.67
주거지역	85.00	589650.39	50120282.79	4.97
채광지역	79.00	0.00	0.00	0.00
침엽수림	69.00	1062570.24	73317346.86	8.95
하우스재배지	85.00	0.00	0.00	0.00
해양수	100.00	0.00	0.00	0.00
혼효림	69.00	275756.81	19027220.12	2.32
활엽수림	69.00	3700269.81	255318616.55	31.17
문화·체육·휴양시	69.00	110904.69	7652423.92	0.93
시설재배지	85.00	137180.87	11660373.99	1.16
인공초지	69.00	602250.69	41555297.75	5.07
자연나지	86.00	105594.65	9081139.63	0.89

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

태풍 '차바' 내습 시 유출 현장에서 홍수량 관측 결과 첨두유출은 10월 05일 05시에 발생하였으며 첨두유출량은 204.04 cms 였다. CN 보정에 따른 홍수량 산정방법의 정확도를 비교하기 위하여 홍수량 산정 시 매개변수 등은 설계홍수량 산정요령(국토교통부, 2012)을 참고하였으며 CN 보정 후 병문천 유역의 홍수량을 산정하였다(Fig. 6.4).

설계홍수량 산정요령에 의한 첨두유출량은 144.09 cms 로 관측 값보다 59.95 cms 낮게 산정되어 29.38 %의 오차율이 발생하였으며 첨두유출 발생 시간은 5시 30분으로 분석되었다. CN을 보정한 후 홍수량 산정 시 첨두유출량은 148.55 cms로 산정되어 27.2 %의 오차율이 발생하였다. 제주도 하천의 경사를 고려하여 CN 보정 시 첨두유출량의 정확도는 2.1 % 향상되었다(Table 6.8).

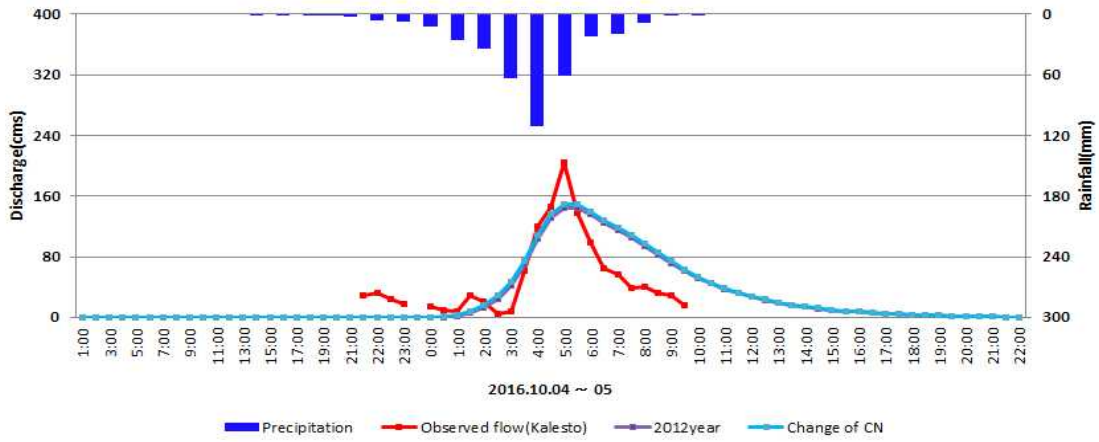


Fig. 6.4 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by CN calibration of the Byeongmun stream watershed

Table 6.8 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by CN calibration of the Byeongmun stream watershed

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

	Flood discharge (cms)	Peak Time	Error		Ratio (%)
			Discharge (cms)	Peak Time	
Observed	204.04	05:00	-	-	-
Manual (2012)	144.09	05:30	-59.95	0.5hr	-29.38
CN calibration	148.55	05:30	-55.49	0.5hr	-27.2

(2) 독사천

독사천 유역의 CN 산정 시 기존방법인 설계홍수량 산정요령(국토교통부, 2012)을 적용할 경우 79.39이며, Sharpely and Williams 공식을 적용한 CN은 79.95로 산정되었다. 경사도를 고려한 CN은 기존방법에 의한 CN 보다 0.7 % 상승하였다.

Table 6.9 Curve number of Doksa stream(Single watershed)

토지피복(중분류)	CN	유역면적	면적가중 CN	구성비(%)
골프장	69.00	0.00	0.00	0.00
공공시설지역	75.00	74793.56	5609517.19	1.18
공업지역	88.00	0.00	0.00	0.00
과수원	79.00	863809.06	68240916.11	13.59
교통지역	89.00	785063.53	69870654.24	12.35
기타나지	86.00	310573.45	26709316.37	4.89
기타재배지	79.00	3108.45	245567.36	0.05
기타초지	69.00	0.00	0.00	0.00
내륙수	100.00	0.00	0.00	0.00
내륙습지	100.00	0.00	0.00	0.00
논	79.00	0.00	0.00	0.00
밭	74.00	1017438.62	75290458.03	16.00
상업지역	92.00	289169.21	26603567.23	4.55
연안습지	100.00	0.00	0.00	0.00
위락시설지역	69.00	0.00	0.00	0.00
자연초지	58.00	74545.35	4323630.18	1.17
주거지역	85.00	1472206.47	125137550.18	23.16
채광지역	79.00	0.00	0.00	0.00

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

침엽수림	69.00	1057775.84	72986532.78	16.64
하우스재배지	85.00	0.00	0.00	0.00
해양수	100.00	0.00	0.00	0.00
혼효림	69.00	104611.51	7218194.47	1.65
활엽수림	69.00	97358.78	6717755.94	1.53
문화·체육·휴양시	69.00	34474.13	2378714.88	0.54
시설재배지	85.00	78464.93	6669518.67	1.23
인공초지	69.00	79837.95	5508818.69	1.26
자연나지	86.00	13869.16	1192748.08	0.22

태풍 '차바' 내습 시 유출 현장에서 홍수량 관측 결과 첨두유출은 10월 05일 04시 30분에 발생하였으며 첨두유출량은 74.33 cms 였다.

설계홍수량 산정요령에 의한 첨두유출량은 111.52 cms로서 관측 값보다 37.19 cms 낮게 산정되어 50.03 %의 오차율이 발생하였다. 반면 CN을 보정한 후 홍수량 산정 시 첨두유출량은 112.12 cms로 산정되었으며 50.84 %의 오차율이 발생하였다. 유역 면적이 매우 작은 독사천은 CN 보정 시 첨두유출량의 변동이 미미하였으며 홍수량을 정확하게 해석하지 못하였다(Fig. 6.5, Table 6.10).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

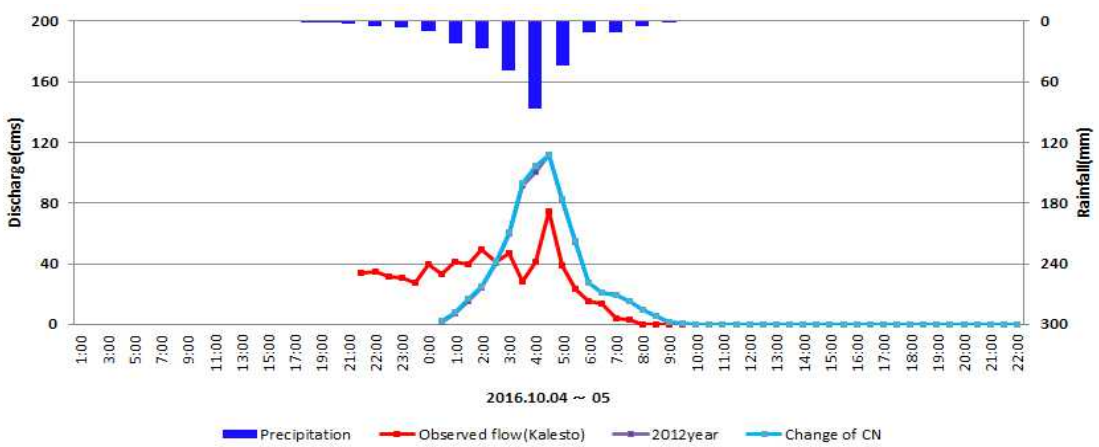


Fig. 6.5 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by CN calibration of the Doksa stream watershed

Table 6.10 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by CN calibration of the Doksa stream watershed

	Flood discharge (cms)	Peak Time	Error		Ratio (%)
			Discharge (cms)	Peak Time	
Observed	74.33	04:30	-	-	-
Manual (2012)	111.52	04:30	37.19	-	50.03
CN calibration	112.12	04:30	37.79	-	50.84

(3) 산지천

산지천 유역의 CN 산정 시 기존방법인 설계홍수량 산정요령(국토교통부, 2012)을 적용할 경우 76.42이며, Sharpely and Williams 공식을 적용한 CN은 78.28로 산정되었다. 경사도를 고려한 CN은 기존방법에 의한 CN 보다 2.43 % 상승하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 6.11 Curve number of Sanji stream(Single watershed)

토지피복(중분류)	CN	유역면적	면적가중 CN	구성비(%)
골프장	69	0.00	0.00	0.00
공공시설지역	75	376253.13	28218984.96	2.57
공업지역	88	12847.97	1130621.17	0.09
과수원	79	811564.22	64113573.07	5.54
교통지역	89	1457099.13	129681822.21	9.95
기타나지	86	1055885.26	90806132.23	7.21
기타재배지	79	27941.19	2207353.84	0.19
기타초지	69	0.00	0.00	0.00
내륙수	100	21685.17	2168516.52	0.15

내륙습지	100	94369.73	9436972.60	0.64
논	79	0.00	0.00	0.00
밭	74	867356.58	64184386.99	5.92
상업지역	92	514157.95	47302531.57	3.51
연안습지	100	0.00	0.00	0.00
위락시설지역	69	0.00	0.00	0.00
자연초지	58	627642.42	36403260.25	4.28
주거지역	85	2362473.30	200810230.50	16.13
채광지역	79	0.00	0.00	0.00
침엽수림	69	1831057.32	126342954.76	12.50
하우스재배지	85	0.00	0.00	0.00
해양수	100	0.00	0.00	0.00
혼효림	69	715380.00	49361220.05	4.88
활엽수림	69	2664008.54	183816588.93	18.18
문화·체육·휴양시	69	169043.88	11664027.91	1.15
시설재배지	85	4092.47	347859.75	0.03
인공초지	69	1036812.41	71540056.54	7.08
자연나지	86	0.00	0.00	0.00

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

태풍 '차바' 내습 시 유출 현장에서 홍수량 관측 결과 첨두유출은 10월 05일 04시에 발생하였으며 첨두유출량은 222.25 cms 였다.

설계홍수량 산정요령에 의한 첨두유출량은 189.34 cms 로 관측 값보다 53.09 cms 낮게 산정되어 14.12 %의 오차율이 발생하였다. 반면, CN을 보정한 후 홍수량 산정 시 첨두유출량은 194.73 cms 로 분석되어 12.38 %의 오차율이 발생하였다. 제주도 하천의 경사를 고려하여 CN 보정 시 첨두유출량의 2.5 % 향상되었다(Fig. 6.6, Table 6.12).

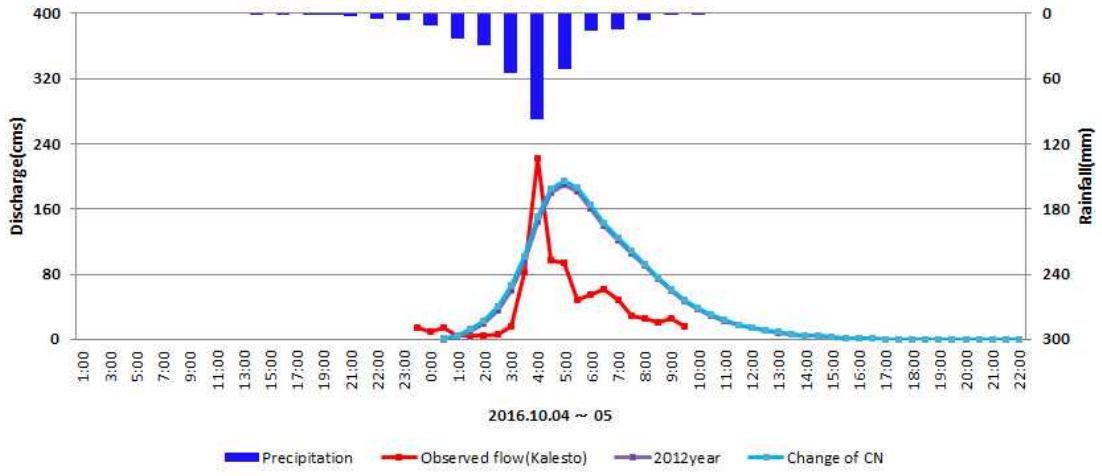


Fig. 6.6 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by CN calibration of the Sanji stream watershed

Table 6.12 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by CN calibration of the Sanji stream watershed

	Flood discharge (cms)	Peak Time	Error		Ratio (%)
			Discharge (cms)	Peak Time	
Observed	222.25	04:00	-	-	-
Manual (2012)	189.34	05:00	-32.91	-	-14.81
CN calibration	194.73	05:00	-27.52	-	-12.38

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제주도의 하천은 유역이 독립적으로 형성되어 있고 경사가 급한 특성을 띄고 있어 CN 산정 시 Sharpely and Williams 공식을 적용하여 경사를 고려한 홍수량을 산정하였다. CN 보정 시 유역면적의 크기가 클수록 변동 폭이 컸으며 설계홍수량 산정요령(국토교통부, 2012) 기준과 비교 시 첨두유출량의 정확도는 유출 사상에 따라 1.5 ~ 6.4 % 증가하였다. 또한 관측 홍수량과 비교한 유출수문곡선의 R^2 값은 경사를 고려한 CN값 보정 시 기존 방법에 의한 홍수량보다 1 ~ 18.49 % 증가하여 정확한 홍수량 산정이 가능하였다(Table 6.13).

Table 6.13 Accuracy comparison of flood discharge by CN calibration

	Accuracy of flood discharge			Accuracy of flood correlation coefficients		
	Bolaven	Sanba	Chaba	Bolaven	Sanba	Chaba
Han Stream	4.5% ↑	1.5% ↑	6.4% ↑	11.9% ↑	5.2% ↑	18.5% ↑
Byeongmun Stream			2.1% ↑			1% ↑
Doksa Stream			0.8% ↓			1.5% ↑
Sanji Stream			2.5% ↑			1.8% ↑

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

6.2 신규 도달시간 산정 및 홍수량 산정

하천기본계획, 유역종합치수계획 등 하천관련 계획에서 활용되는 설계홍수량은 강우-유출 분석을 통해 산정되고 있으나, 강우-유출 분석 과정에 적용되는 이론 및 경험공식 등이 다양하고 기준 또한 명확하지 않다. 이에 국토교통부에서는 국내 수문환경을 반영하여 표준화한 「설계홍수량 산정요령(2012)」을 제시하였다. 그러나 「설계홍수량 산정요령(2012)」에서 제시하는 설계홍수량 산정 방법은 제주도의 수문 특성(평상시 건천상태, 고투수성, 급한 하상경사 등)을 충분히 반영하고 있지 않다.

특히 강우가 유역의 최상류 지점에서 최하류부(유역 출구점)까지 도달하는데 소요되는 시간인 도달시간은 경험 공식에 의한 유역추적 매개변수 중 하나로 유출모형 적용 시 매우 중요한 인자로 작용하기 때문에 정확한 산정이 필요하다.

현재 주로 사용되는 도달시간 공식들(Kirpich 공식, Rziha 공식, Kraven 공식(Ⅰ), Kraven 공식(Ⅱ))은 대부분 외국에서 개발된 경험공식들이며 제주도 하천 특성이 반영 되어 있지 않다. 또한 홍수유출 발생 시 관측된 유속을 분석한 결과 제주도 하천은 최대 $7m/s$ 이상의 유속이 발생하여 기존 경험공식 적용이 적합하지 않다.

따라서 본 연구에서는 제주시 도심하천(한천, 병문천, 독사천, 산지천)을 대상으로 강우자료와 실측을 통한 유출 자료의 회귀분석을 통해 제주지역의 하천특성을 반영한 도달시간을 산정하여 제시하였다.

제주대학교 중앙도서관

6.2.1 신규 도달시간 산정식 개발

연구대상 유역에 적용할 수 있는 도달시간 개발을 위해 Fig. 6.7과 같이 계획을 수립하였으며 2008~2016년의 하천별 강우-수위 관측자료를 활용하여 수문자료를 구축하였다. 수문자료 구축 시 한천의 44개 수문사상과 병문천, 독사천, 산지천의 51개 유출사상을 선정하여 총 95개 사상을 구축하였다(Table 6.14)

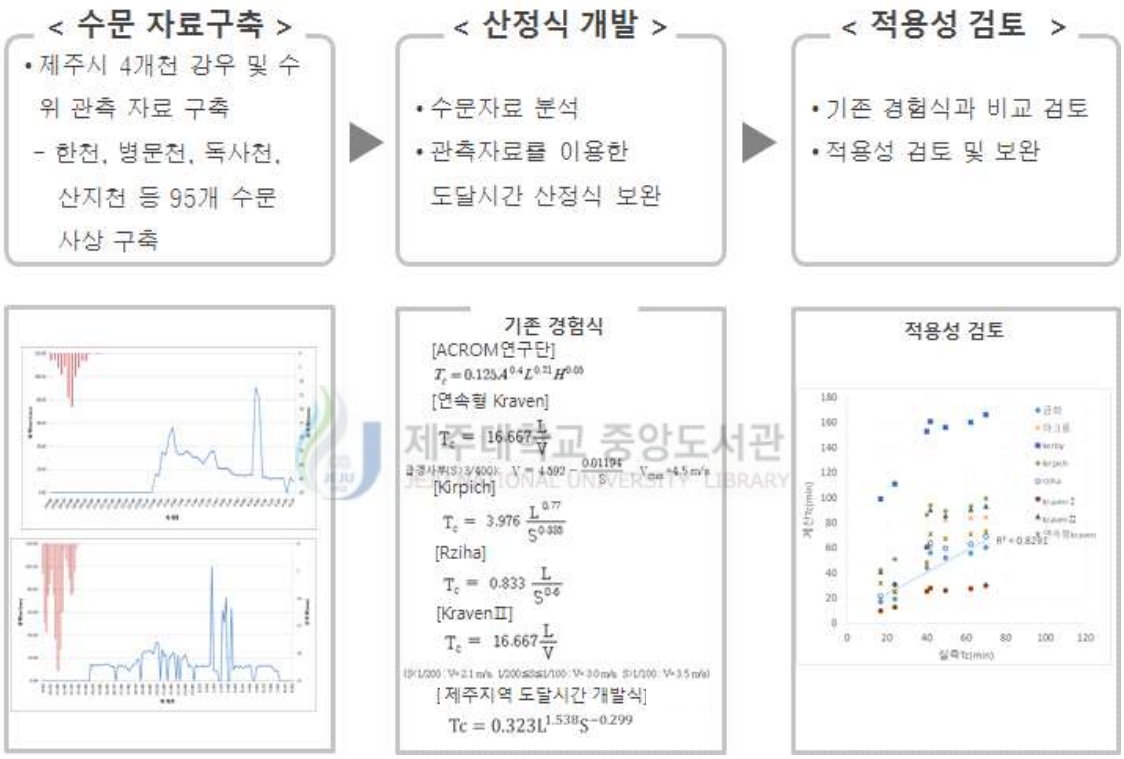


Fig. 6.7 Process for the development of time-of-concentration formulas

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 6.14 Rainfall events applied for developing Time of Concentration formula

Year	Number of rainfall events per observation points				Total
	Han Stream	Byeongmun Stream	Doksa Stream	Sanji Stream	
2008	2				2
2009	2				2
2010	10				10
2011	7				7
2012	10	2	1	1	14
2013	1	7		3	11
2014	5	4			9
2015	4	1	3	6	14
2016	3	9	8	6	26
Total	44	23	12	16	95

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

4개 하천의 95개 수문사상을 분석하여 홍수수문곡선을 유도한 결과 홍수유출 및 지속시간은 대부분 24시간 이내로 분석되었으며 투수성이 높은 수문학적 특성으로 인하여 유출 지속시간이 짧게 나타났다(Fig. 6.8).

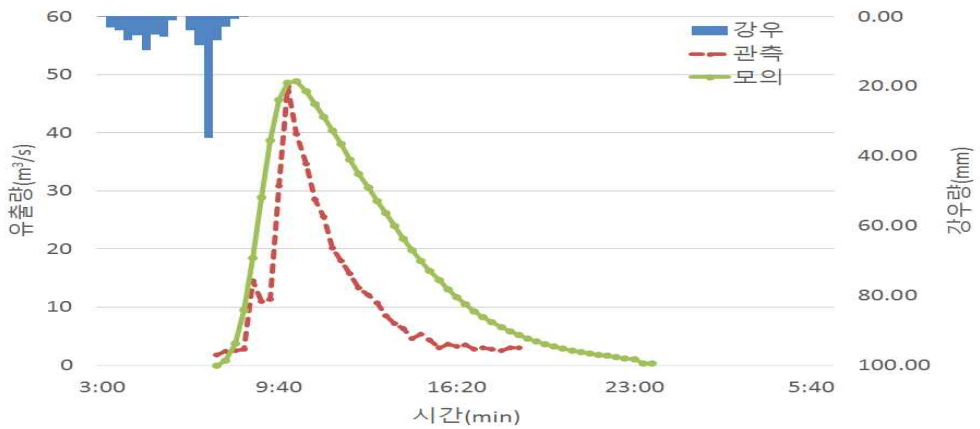


Fig. 6.8 Flood hydrograph by applying new time-of-concentration formulas

수문사상별로 산정된 도달시간을 유로연장(L), 경사(S) 등의 지형인자로 회귀분석을 실시하여 식 6.2와 같은 신규 도달시간 산정식을 개발하였다.

$$T_c = 0.55L^{1.226}S^{-0.437} \qquad (식\ 6.2)$$

신규 도달시간 산정식의 적용성 검토를 위하여 기존 공식인 Kirpich 공식, Rziha 공식, Kraven 공식(Ⅰ), Kraven 공식(Ⅱ)과 첨단기술 기반 하천 운영 및 관리 선진화 연구단(이하 ARCROM)에서 제안한 도달시간 공식을 비교·검토하였다. 검토 결과 상관계수(R^2)가 0.83으로 분석되어 실무에서 사용되는 연속형 Kraven 공식보다 더 높은 정확도를 나타냈다(Fig. 6.15). 이에 따라 연구대상 유역인 제주지역 4개 하천의 강우-유출 관측 자료를 통하여 개발된 도달시간 산정식은 제주 하천의 설계홍수량 산정 시 활용 가능할 것으로 판단된다.

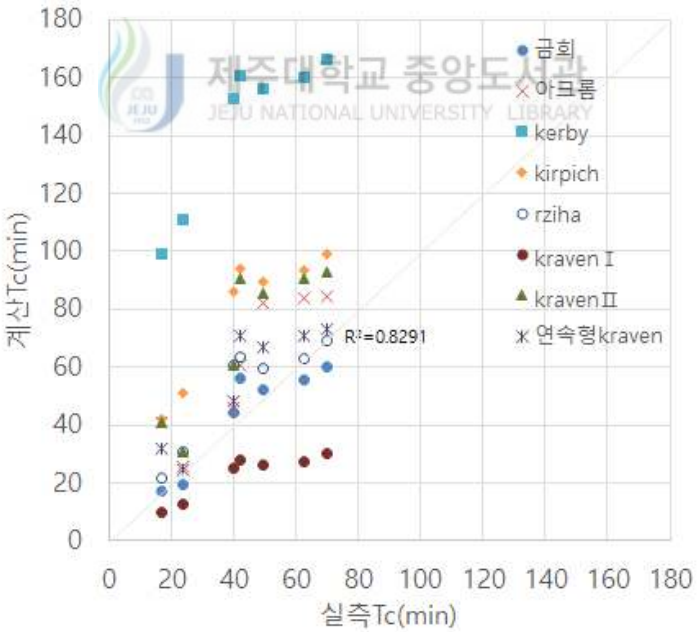


Fig. 6.15 Examination of applicability of new time-of-concentration formulas

6.2.2 신규 도달시간 적용 및 홍수량 산정

(1) 태풍 '볼라벤'

태풍 '볼라벤' 내습 시 유출 현장에서 홍수량 관측 결과 첨두유출은 8월 27일 23시와 28일 04시에 2회 발생하였으며 첨두유출량은 431.82 cms, 375.95 cms로 관측되었다.

신규 도달시간 적용에 따른 홍수량 산정방법의 정확도를 비교하기 위하여 홍수량 산정 시 매개변수 등은 설계홍수량 산정요령(2012)을 참고하였으며, 신규 도달시간 적용 후 한천 유역의 홍수량을 산정하였다(Fig. 6.10).

설계홍수량 산정요령(2012)에 따라 연속형 Kraven II 공식을 적용하여 홍수량을 산정할 경우 첨두유출량은 322.86 cms 로 관측 값보다 53.09 cms 낮게 산정되어 14.12 % 의 오차율이 발생하였으며 첨두유출 발생 시간도 1시간의 오차가 발생하였다. 반면, 제주형 특성을 고려한 신규 도달시간 산정 후 홍수량 산정 시 첨두유출량은 341.83 cms로 관측 홍수량과 9.08 %의 오차율을 보여 5 %의 정확도가 향상되었으며 첨두 시간도 동일 시간에 발생하였다(Table 6.15).

제주대학교 중앙도서관

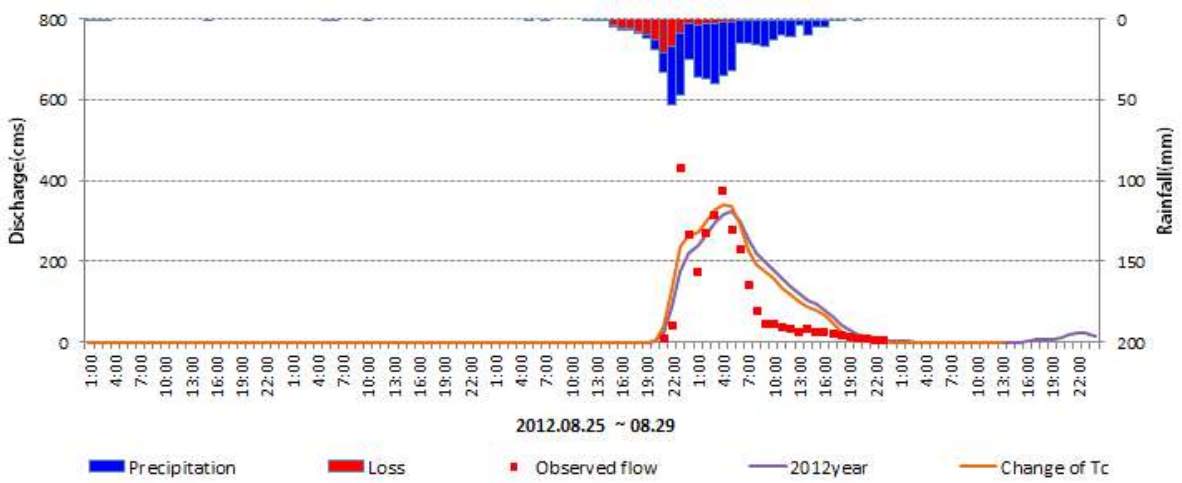


Fig. 6.10 Comparison of flood discharge of typhoon Bolaven by applying the new travel time of the Han stream watershed

Table 6.15 Comparison of flood discharge of typhoon Bolaven by applying the new travel time of the Han stream watershed

	Flood discharge (cms)	Peak Time	Error		Ratio (%)
			Discharge (cms)	Peak Time	
Observed	431.82	8/27 23:00	-	-	-
	375.95	8/28 04:00	-	-	-
Manual (2012)	322.86	8/28 05:00	-53.09	1hr	-14.12
New Tc	341.83	8/28 04:00	-34.12	-	-9.08

(2) 태풍 '산바'

태풍 '산바' 내습 시 홍수량 관측 결과 첨두유출은 9월 17일 09시에 발생하였으며 첨두 유출량은 544.69 cms 로 관측되었다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

설계홍수량 산정요령(2012)에 따라 연속형 Kraven Ⅱ 공식을 적용하여 홍수량을 산정할 경우 첨두유출량은 466.53 cms 로 관측 값보다 78.16 cms 낮게 산정되어 14.35 % 의 오차율이 발생하였다. 반면, 신규 도달시간을 적용 후 홍수량 산정 시 첨두유출량은 506.38 cms 로 분석되어 관측 홍수량과 7.03 % 의 오차율이 발생하여 정확도가 7.3 % 증가하였으며 첨두유출도 동일 시간에 발생하였다(Fig. 6.11, Table 6.16).

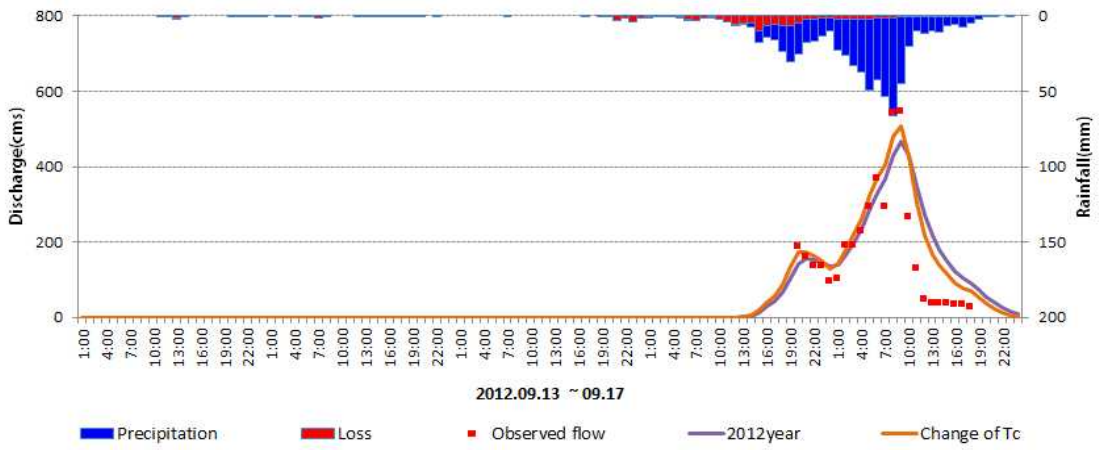


Fig. 6.11 Comparison of flood discharge of typhoon Sanba by applying the new travel time of the Han stream watershed

Table 6.16 Comparison of flood discharge of typhoon Sanba by applying the new travel time of the Han stream watershed

	Flood discharge (cms)	Peak Time	Error		Ratio (%)
			Discharge (cms)	Peak Time	
Observed	544.69	9:00	-	-	-
Manual (2012)	466.53	9:00	-78.16	-	-14.35
New Tc	506.38	9:00	-38.31	-	-7.03

제주대학교 중앙도서관 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(3) 태풍 '차바'

태풍 '차바' 내습 시 홍수량 관측 결과 첨두유출은 10월 05일 04시 30분에 발생하였으며 첨두유출량은 846.33 cms 로 관측되었다.

설계홍수량 산정요령에 따라 연속형 Kraven II 공식을 적용하여 홍수량을 산정할 경우 첨두유출량은 528.46 cms로 관측 값보다 317.87 cms 낮게 산정되어 37.56 % 의 오차율이 발생하였으며 첨두 유출 발생 시간도 1시간 늦게 발생하였다. 반면, 신규 도달시간을 적용 후 홍수량 산정 시 첨두유출량은 669.51 cms 로 관측 홍수량과 20.89 % 의 오차율이 발생하여 정확도가 16.7 % 증가되었다(Fig. 6.12, Table 6.17).

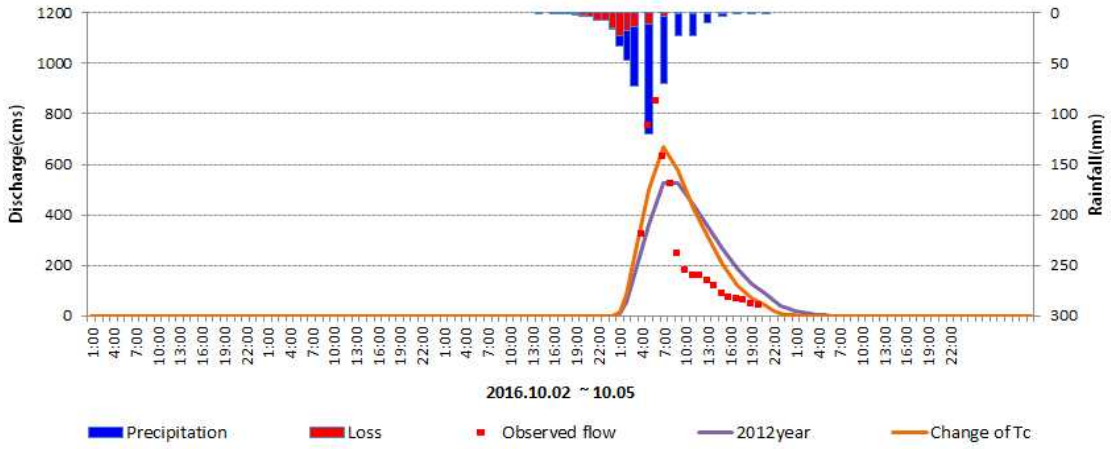


Fig. 6.12 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by applying the new travel time of the Han stream watershed

Table 6.17 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by applying the new travel time of the Han stream watershed

	Flood discharge (cms)	Peak Time	Error		Ratio (%)
			Discharge (cms)	Peak Time	
Observed	846.33	04:30	-	-	-
Manual (2012)	528.46	05:30	-317.87	1hr	-37.56
New Tc	669.51	05:00	-176.82	0.5hr	-20.89

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

현장관측을 통한 홍수량을 기준으로 기존(설계홍수량 산정요령, 2012) 방법과 신규 도달시간 적용에 따른 홍수량을 비교하여 정리하였다(Table 6.18).

기존방법으로 홍수량 산정 시 관측자료 대비 14.12 ~ 37.56 %의 오차가 발생한 반면, 신규 도달시간 적용에 따른 홍수량 산정 시 7.03 ~ 20.89 %의 오차가 발생하여 기존 방법 대비 5.04 ~ 16.67 %의 오차율이 개선되었다.

Table 6.18 Comparison of flood discharge and error by Time of concentration in the Han stream watershed

	Flood discharge(cms)			Observed vs Manual(2012)		Observed vs New Tc	
	Observed	Manual (2012)	New Tc	Error (cms)	Error rate (%)	Error (cms)	Error rate (%)
Bolaven	375.95	322.86	341.83	53.09	14.12	34.12	9.08
Sanba	544.69	466.53	506.38	78.16	14.35	38.31	7.03
Chaba	846.33	528.46	669.51	317.87	37.56	176.82	20.89

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

6.2.3 도심 하천별 적용 및 검토

한천 유역을 대상으로 신규 도달시간 적용에 따른 홍수량 검토 시 기존(설계홍수량 산정요령, 2012) 방법 대비 오차율이 개선되었으며 현장관측 홍수량과의 상관계수 역시 향상되었다. 신규 도달시간 적용에 따른 홍수량 정확도 향상 여부를 검증하기 위하여 한천유역과 인접한 도심하천인 병문천, 독사천, 산지천에 적용하였으며 최근 발생한 태풍 '차바' 사상(2016)으로 검토하였다.

(1) 병문천

태풍 '차바' 내습 시 병문천에서 홍수량 관측 결과 첨두유출은 10월 05일 05시에 발생하였으며 첨두유출량은 204.04 cms 로 관측되었다.

신규 도달시간 적용에 따른 홍수량 산정방법의 정확도를 비교하기 위하여 홍수량 산정 시 매개변수 등은 설계홍수량 산정요령(2012)을 참고하였으며 병문천 유역의 홍수량 산정 결과는 다음과 같이 분석되었다(Fig. 6.13).

제주대학교 중앙도서관

설계홍수량 산정요령에 따라 도달시간 산정 시 연속형 Kraven II 공식을 적용하여 홍수량을 산정할 경우 첨두유출량은 144.09 cms 로 관측 값보다 59.95 cms 낮게 산정되어 29.38 % 의 오차율이 발생하였다. 신규 도달시간 적용 후 홍수량 산정 시 첨두유출량은 173.38 cms 로 15.03 % 의 오차율이 발생하여 14.4 % 의 정확도가 증가하였으며 첨두유출 발생 시간도 관측 시간과 동일하게 분석되었다(Table 6.19).

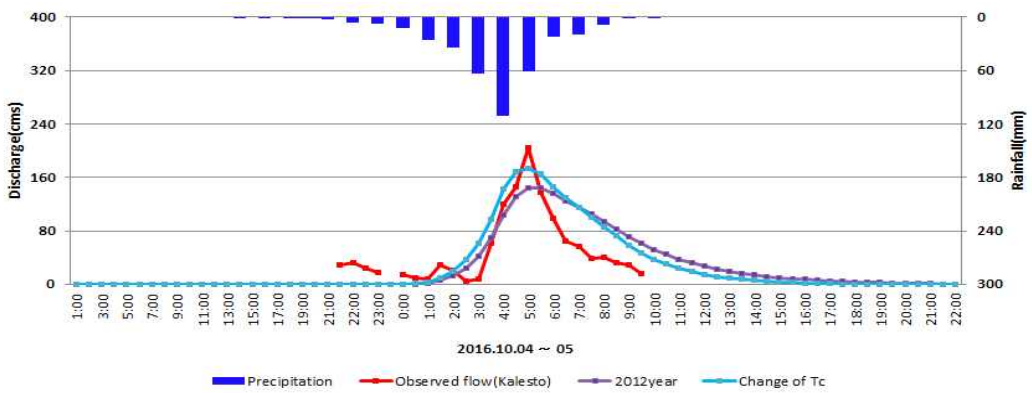


Fig. 6.13 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by applying the new travel time of the Byeongmun stream watershed

Table 6.19 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by applying the new travel time of the Byeongmun stream watershed

	Flood discharge (cms)	Peak Time	Error		Ratio (%)
			Discharge (cms)	Peak Time	
Observed	204.04	05:00	-	-	-
Manual (2012)	144.09	05:30	-59.95	0.5hr	-29.38
New Tc	173.38	05:00	-30.66	-	-15.03

(2) 독사천

태풍 '차바' 내습 시 독사천에서 홍수량 관측 결과 첨두유출은 10월 05일 04시 30분에 발생하였으며 첨두유출량은 74.33 cms 로 관측되었다.

도달시간 산정 시 연속형 Kraven II 공식을 적용하여 홍수량을 산정할 경우 첨두유출량은 111.52 cms 로 관측 값과 비교 시 50.03 %의 높은 오차율이 발생하였으며, 신규 도달시간 적용 후 홍수량 산정 시에도 첨두 유출량은 46.55 % 의 높은 오차율이 발생하였다(Fig. 6.14, Table 6.20).

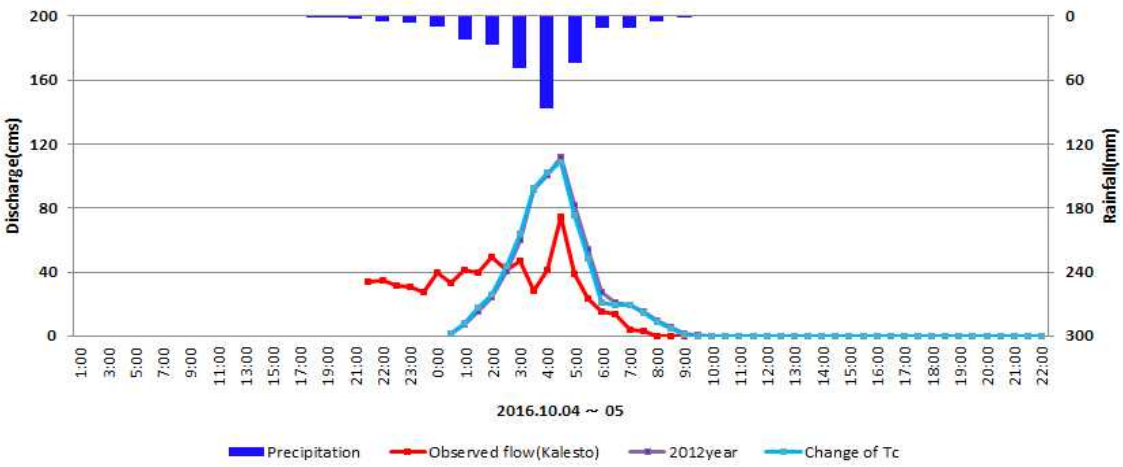


Fig. 6.14 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by applying the new travel time of the Doksa stream watershed

Table 6.20 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by applying the new travel time of the Doksa stream watershed

	Flood discharge (cms)	Peak Time	Error		Ratio (%)
			Discharge (cms)	Peak Time	
Observed	74.33	04:30	-	-	-
Manual (2012)	111.52	04:30	37.19	-	50.03
New Tc	108.93	04:30	34.6	-	46.55

(3) 산지천

태풍 '차바' 내습 시 산지천에서 홍수량 관측 결과 첨두유출은 10월 05일 04시에 발생하였으며 첨두유출량은 222.25 cms 로 관측되었다.

설계홍수량 산정요령에 따라 홍수량을 산정할 경우 첨두유출량은 189.34 cms 로 관측 값보다 32.91 cms 낮게 산정되어 14.81 % 의 오차율이 발생하였으며 첨두발생 시간도 1시간의 오차가 발생하였다. 반면 신규 도달시간 적용 후 홍수량 산정 시 첨두유출량은 216.87 cms 로 2.48 % 의 오차율이 발생하였으며 12.3 %의 정확도가 향상되었다(Fig. 6.15, Table 6.21).

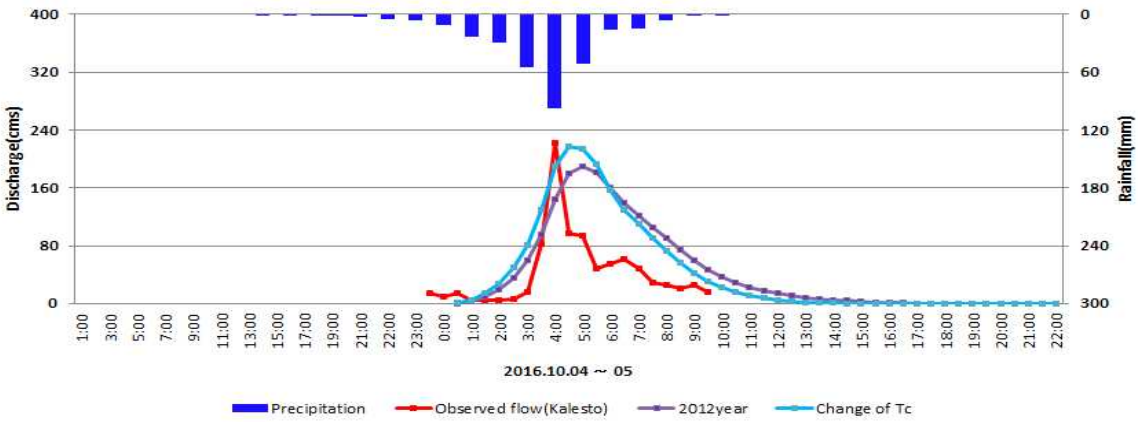


Fig. 6.15 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by applying the new travel time of the Sanji stream watershed

Table 6.21 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by applying the new travel time of the Sanji stream watershed

	Flood discharge (cms)	Peak Time	Error		Ratio (%)
			Discharge (cms)	Peak Time	
Observed	222.25	04:00	-	-	-
Manual (2012)	189.34	05:00	-32.91	-	-14.81
New Tc	216.87	04:30	-5.38	0.5hr	-2.48

제주도의 하천은 경사가 급하고 유출 발생 시 난류와 사류의 흐름 특성이 나타나며 유속이 7 m/s를 상회하여 도달시간 산정 시 기존 공식의 적용이 불가하였다. 이에 따라 제주도 하천의 특성이 반영된 신규 도달시간을 산정하여 홍수량을 비교·검토하였으며 설계홍수량 산정요령 기준과 비교 시 첨두 유출량의 정확도는 유출 사상에 따라 3.5 ~ 16.7 % 증가하였다. 또한 관측 홍수량과 비교한 유출수문곡선의 R^2 값은 12.2 ~ 77.2 % 증가하여 신규 도달시간 적용 시 기존 방법 대비 정확한 홍수량 산정이 가능하였다(Table 6.22).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 6.22 Accuracy comparison of flood discharge by Time of concentration

	Accuracy of flood discharge			Accuracy of flood correlation coefficients		
	Bolaven	Sanba	Chaba	Bolaven	Sanba	Chaba
Han Stream	5%↑	7.3%↑	16.7%↑	23.4%↑	28.9%↑	77.2%↑
Byeongmun Stream			14.4%↑			15.6%↑
Doksa Stream			3.5%↑			12.2%↑
Sanji Stream			12.3%↑			23.4%↑

6.3 소유역 구분 및 홍수량 산정

국토교통부에서 제안한 설계홍수량 산정요령(2012)은 유역면적이 250km² 이하인 경우 하도저류효과를 무시할 수 있어 소유역 구분 없이 단일유역으로 취급하여 홍수량을 산정한다고 명시되어 있다.

제주도 하천은 유역면적이 250km² 이하로 소·중규모 유역에 해당하기 때문에 설계홍수량 산정요령에 따라 홍수량을 산정할 경우 단일유역으로 홍수량을 산정해야 한다. 그러나 제주도는 내륙지역 특성과 달리 고도에 따라 경사가 급하게 변화하고 토지이용 및 지형특성이 명확하게 구분된다. 또한 투수성이 매우 높은 수문학적 특성을 띄고 있어 단순히 유역면적에 따라 저류효과를 무시할 경우 홍수량 산정 시 오차가 발생할 것으로 판단된다. 이에 따라 연구대상 유역의 홍수량 산정 시 지형특성 및 토지이용 등에 따른 소유역을 구분하였다.

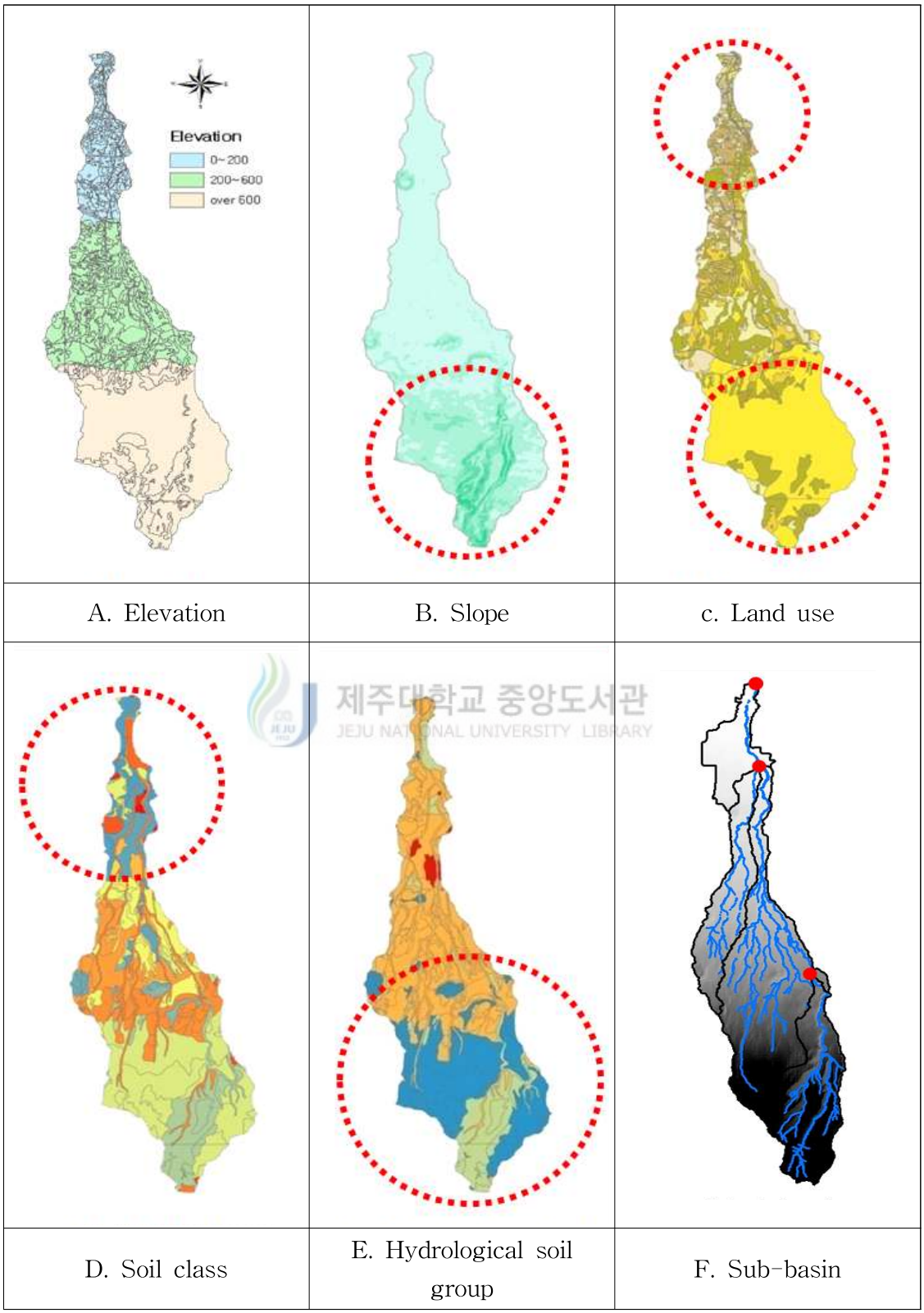
6.3.1 소유역 구분

제주대학교 중앙도서관

제주도 도심하천의 정확한 홍수량을 산정하기 위하여 제주도 지형특성 및 토지이용 구분에 따라 소유역을 구분하였다(Fig. 6.16).

고도에 따른 토지이용에 대하여 분석한 결과 200m 이하의 지역은 대부분 개발지역이며, 200 ~ 600m 지역은 혼합지역, 600m 이상 지역은 산림지역으로 토지이용 특성이 명확히 구분되었다. 뿐만 아니라 토양도 역시 고도 및 지형특성에 따라 명확히 구분되었으며 수문학적 특성 또한 상류지역은 A와 B군, 중하류 지역은 C군으로 지형조건에 따라 다른 특성이 나타났다.

이와 같이 제주도는 유역이 크지 않음에도 내륙지역과 상이한 수문학적 특성을 나타내고 있어 정확한 홍수량을 산정하기 위해서는 제주형 특성에 맞는 소유역 구분이 필요하다. 소유역 구분을 통한 홍수량 산정지점 선정 시 토지이용 및 토양도 분석 후 경계지점의 주요 지류합류점, 구조물 등을 고려하였으며 한천의 경우 4개의 소유역으로 구분되었다.



A. Elevation	B. Slope	c. Land use
D. Soil class	E. Hydrological soil group	F. Sub-basin

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 6.16 Watershed characteristics and sub-watershed distribution of the Han stream

6.3.2 소유역 구분에 따른 홍수량 산정

(1) 태풍 '볼라벤'

태풍 '볼라벤' 내습 시 유출 현장에서 홍수량 관측 결과 첨두 유출은 8월 27일 23시와 28일 04시에 2회 발생하였으며 첨두 유출량은 431.82 cms, 375.95 cms로 관측되었다.

소유역 구분에 따른 홍수량 산정방법의 정확도를 비교하기 위하여 홍수량 산정 시 매개변수 등은 설계홍수량 산정요령(2012)을 참고하였으며, 단일유역과 소유역 구분에 따른 한천 유역의 홍수량을 비교하였다(Fig. 6.17).

설계홍수량 산정요령(2012)에 따라 단일 유역으로 홍수량을 산정할 경우 첨두 유출은 1회 발생하였으며 322.86 cms 로 분석되었다. 관측 홍수량과 비교 시 53.09 cms 낮게 산정되어 14.12 %의 오차율이 발생하였으며 첨두 유출 발생 시간도 1시간 늦은 8월 28일 05시로 분석되었다. 반면, 제주형 특성을 고려한 소유역 분할 후 홍수량 산정 시 첨두 유출량은 365.42 cms 와 367.23 cms 로 2회로 분석되었으며 각각 66.4 cms 와 9.72 cms 낮게 산정되었다. 첫 첨두 유출량의 오차는 15 % 를 상회하고 있으나 소유역 구분을 통하여 2회의 첨두 유출을 모두 분석할 수 있었다(Table 6.23).

제주대학교 중앙도서관

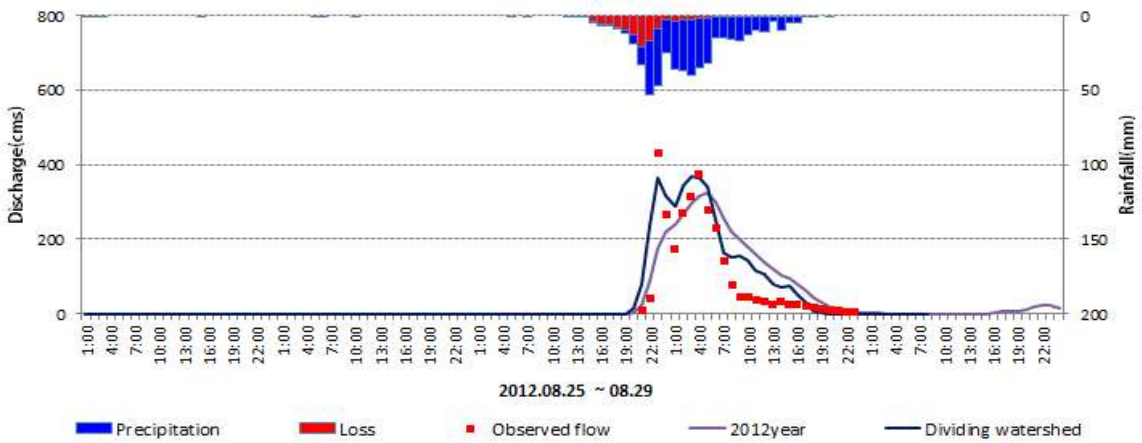


Fig. 6.17 Comparison of flood discharge of typhoon Bolaven by sub-watershed division of the Han stream watershed

Table 6.23 Comparison of flood discharge of typhoon Bolaven by sub-watershed division of the Han stream watershed

	Flood discharge (cms)	Peak Time	Error		Ratio (%)
			Discharge (cms)	Peak Time	
Observed	431.82	8/27 23:00	-	-	-
	375.95	8/28 04:00	-	-	-
Manual (2012)	322.86	8/28 05:00	-53.09	1hr	-14.12
Sub-basin	365.42	8/27 23:00	-66.4	-	-15.38

(2) 태풍 '산바'

태풍 '산바' 내습 시 홍수량 관측 결과 첨두 유출은 9월 17일 09시에 발생하였으며 첨두 유출량은 544.69 cms 로 관측되었다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

설계홍수량 산정요령(2012)에 따라 단일 유역으로 홍수량을 산정할 경우 첨두 유출량은 466.53 cms 로 관측 값보다 78.16 cms 낮게 산정되어 14.35 % 의 오차율이 발생하였다. 반면, 소유역 분할 후 홍수량 산정 시 첨두 유출량은 568.85 cms 로 분석되어 관측 홍수량과 3.72 % 의 오차율이 발생하였으며 첨두 유출 발생 시간도 동일 시간으로 분석되었다(Fig. 6.18, Table 6.24).

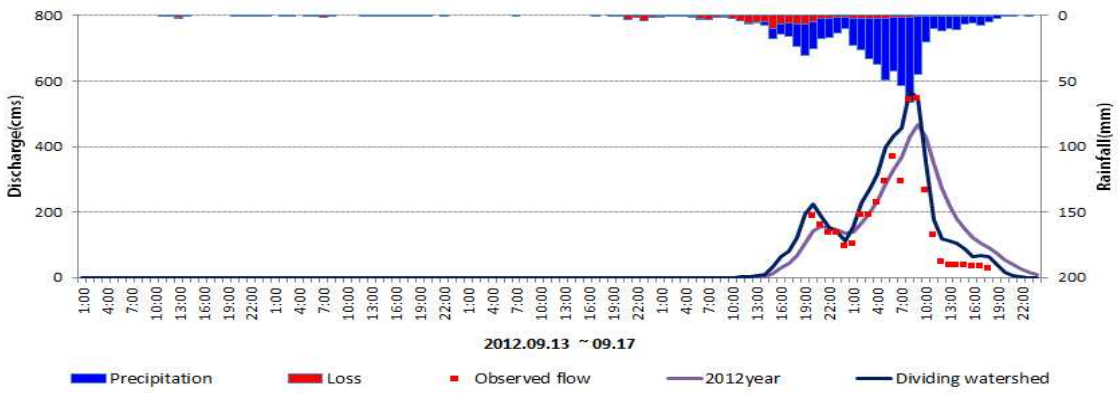


Fig. 6.18 Comparison of flood discharge of typhoon Sanba by sub-watershed division of the Han stream watershed

Table 6.24 Comparison of flood discharge of typhoon Sanba by sub-watershed division of the Han stream watershed

	Flood discharge (cms)	Peak Time	Error		Ratio (%)
			Discharge (cms)	Peak Time	
Observed	544.69	9:00	-	-	-
Manual (2012)	466.53	9:00	-78.16	-	-14.35
Sub-basin	568.85	9:00	24.16	-	4.44

(3) 태풍 '차바'

태풍 '차바' 내습 시 홍수량 관측 결과 첨두 유출은 10월 05일 04시 30분에 발생하였으며 홍수량은 846.33 cms 로 관측되었다.

설계홍수량 산정요령에 따라 단일 유역으로 홍수량을 산정할 경우 첨두 유출량은 528.46 cms로 관측 값보다 317.87 cms 낮게 산정되어 37.56 %의 오차율이 발생하였으며 첨두 유출 발생 시간도 1시간 늦게 발생하였다. 반면, 제주형 특성을 고려한 소유역 분할 후 홍수량 산정 시 첨두 유출량은 885.22 cms 로 관측 홍수량과 4.60 % 의 오차율이 발생하였으며 첨두 유출 발생 시간은 30분 늦은 05시로 분석되었다 (Fig. 6.19, Table 6.25).

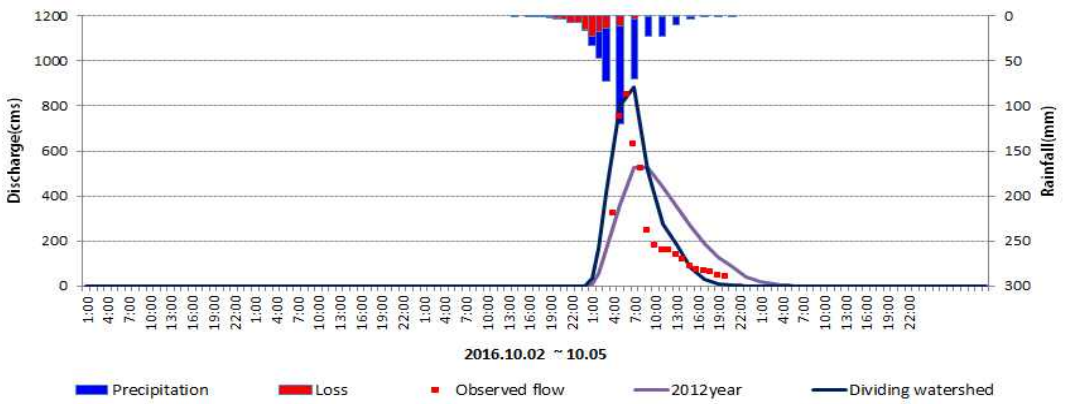


Fig. 6.19 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by sub-watershed division of the Han stream watershed

Table 6.25 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by sub-watershed division of the Han stream watershed

	Flood discharge (cms)	Peak Time	Error		Ratio (%)
			Discharge (cms)	Peak Time	
Observed	846.33	04:30	-	-	-
Manual (2012)	528.46	05:30	-317.87	1hr	-37.56
Sub-basin	885.22	05:00	38.89	0.5hr	4.60

현장관측을 통한 홍수량을 기준으로 기존(설계홍수량 산정요령, 2012) 방법과 소유역 구분에 따른 홍수량을 비교하였다(Table 6.26).

기존방법으로 홍수량 산정 시 관측자료 대비 -37.56 ~ -14.12 % 의 오차가 발생하였다. 반면, 소유역 구분에 따른 홍수량 산정 시 -15.38 ~ 4.60 % 의 오차가 발생하여 기존 방법 대비 오차율이 개선되었다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 6.26 Comparison of flood discharge and error by sub-watershed division of the Han stream watershed

	Flood discharge(cms)			Observed vs Manual(2012)		Observed vs Sub-basin	
	Observed	Manual (2012)	Sub basin	Error (cms)	Error rate (%)	Error (cms)	Error rate (%)
Bolaven	431.82	-	365.42	-	-	-66.4	-15.38
	375.95	322.86	367.23	-53.09	-14.12	-9.72	-2.59
Sanba	544.69	466.53	568.85	-78.16	-14.35	24.16	4.44
Chaba	846.33	528.46	885.22	-317.87	-37.56	38.89	4.60

6.3.3 도심 하천별 소유역 구분 및 검토

한천 유역을 대상으로 소유역 구분에 따른 홍수량 검토 시 기존(설계홍수량 산정요령, 2012) 방법 대비 오차율이 개선되었으며 현장관측 홍수량과의 상관계수 역시 향상되었다. 소유역 구분에 따른 정확도 향상 여부를 검증하기 위하여 한천유역과 인접한 도심하천인 병문천, 독사천, 산지천에 적용하였으며 최근 발생한 태풍 '차바' 사상(2016)으로 검토하였다.

(1) 병문천

태풍 '차바' 내습 시 현장 관측 결과 첨두 유출은 10월 05일 05시에 발생하였으며 홍수량은 204.04 cms 로 관측되었다.

소유역 구분에 따른 홍수량 산정방법의 정확도를 비교하기 위하여 홍수량 산정 시 매개변수 등은 설계홍수량 산정요령을 참고하였으며, 유역 구분 시 한천 유역에 적용한 기준을 병문천 유역에 적용한 결과 3개의 소유역으로 구분되었다. 단일유역과 소유역 구분에 따른 병문천 유역의 홍수량 산정 결과는 Fig. 6.20과 같다.

설계홍수량 산정요령에 따라 단일 유역으로 홍수량을 산정할 경우 첨두 유출량은 144.09 cms로 관측 값보다 59.95 cms 낮게 산정되어 29.38 %의 오차율이 발생하였으며 첨두 유출 발생 시간은 05시 30분으로 30분 늦게 발생하였다. 반면, 제주형 특성을 고려한 소유역 분할 후 홍수량 산정 시 첨두 유출량은 227.6 cms 로 관측 홍수량과 11.55 % 의 오차율을 보여 정확도는 기존대비 개선되었으나 첨두 유출 발생 시간은 30분 전인 4시 30분에 발생하였다(Table 6.27).

제주대학교 중앙도서관

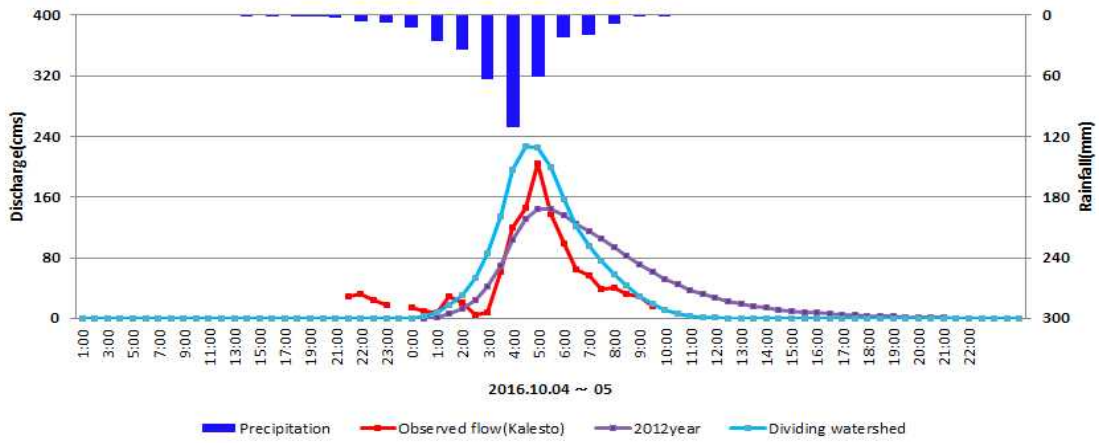


Fig. 6.20 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by sub-watershed division of the Byeongmun stream watershed

Table 6.27 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by sub-watershed division of the Byeongmun stream watershed

	Flood discharge (cms)	Peak Time	Error		Ratio (%)
			Discharge (cms)	Peak Time	
Observed	204.04	5:00	-	-	-
Manual (2012)	144.09	5:30	-59.95	0.5hr	-29.38
Sub-basin	227.6	4:30	23.56	-0.5hr	11.55

제주대학교 중앙도서관 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(2) 독사천

태풍 '차바' 내습 시 현장 관측 결과 첨두 유출은 10월 05일 04시 30분에 발생하였으며 홍수량은 74.33 cms 로 관측되었다.

유역 구분 시 한천 유역에 적용한 기준을 독사천 유역에 적용한 결과 2개의 소유역으로 구분되었으며 단일유역과 소유역 구분에 따른 독사천 유역의 홍수량을 비교하였다(Fig. 6.21).

설계홍수량 산정요령에 따라 단일 유역으로 홍수량을 산정할 경우 첨두 유출량은 111.52 cms 로 관측 값보다 37.19 cms 높게 산정되어 50.03 % 의 오차율이 발생하

였다. 제주형 특성을 고려한 소유역 분할 후 홍수량 산정 시 첨두 유출량은 109.67 cms 로 관측 홍수량과 47.54 %의 오차율이 발생하였으며 첨두 유출 발생 시간은 04시 30분으로 분석되어 동일 시간에 발생하였다(Table 6.28).

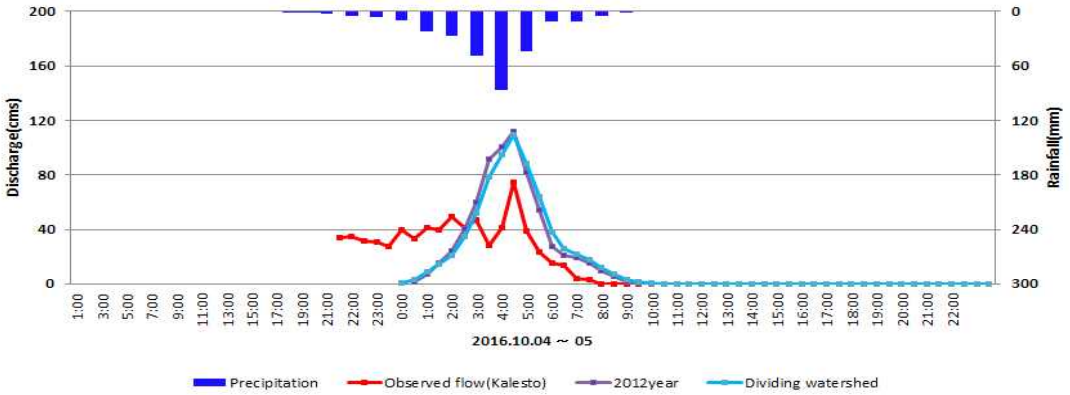


Fig. 6.21 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by sub-watershed division of the Doksa stream watershed

Table 6.28 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by sub-watershed division of the Doksa stream watershed

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

	Flood discharge (cms)	Peak Time	Error		Ratio (%)
			Discharge (cms)	Peak Time	
Observed	74.33	04:30	-	-	-
Manual (2012)	111.52	04:30	37.19	-	50.03
Sub-basin	109.67	04:30	35.34	-	47.54

앞서 분석한 한천, 병문천 유역과 달리 오차가 크게 발생한 원인은 유역 면적 및 유역 발원지의 위치에 의한 것으로 해석된다. 유역면적이 5.90 km^2로 매우 작은 소유역에 해당하는 독사천 유역을 2개의 소유역으로 구분하여 홍수량을 산정할 경우 도달시간 및 저류상수가 매우 작게 분석되어 홍수량이 과다 산정된다. 또한 독사천 유역의 발원지가 한라산이 아닌 도심지에서 발원하고 있어 불투수층의 비중이 높게 나타남에 따라 관측 홍수량보다 모델링 결과 값이 높게 산정되었다.

(3) 산지천

태풍 '차바' 내습 시 현장 관측 결과 첨두 유출은 10월 04일 04시에 발생하였으며 홍수량은 222.25 cms 로 관측되었다.

소유역 구분에 따른 홍수량 산정방법의 정확도를 비교하기 위하여 홍수량 산정 시 매개변수 등은 설계홍수량 산정요령을 참고하였으며, 유역 구분 시 한천 유역에 적용한 기준을 산지천 유역에 적용한 결과 3개의 소유역으로 구분되었다. 단일유역과 소유역 구분에 따른 산지천 유역의 홍수량 산정 결과는 Fig. 6.22와 같다.

설계홍수량 산정요령에 따라 단일 유역으로 홍수량을 산정할 경우 첨두 유출량은 189.34 cms 로 관측 값보다 32.91 cms 낮게 산정되어 14.81 % 의 오차율이 발생하였으며 첨두 유출 발생 시간은 1시간 늦은 5시로 분석되었다. 반면, 제주형 특성을 고려한 소유역 분할 후 홍수량 산정 시 첨두 유출량은 241.89 cms 로 관측 홍수량과 8.84 %의 오차율을 보였으며 첨두 유출 발생 시간은 30분 후인 4시 30분으로 분석되었다(Table 6.29).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

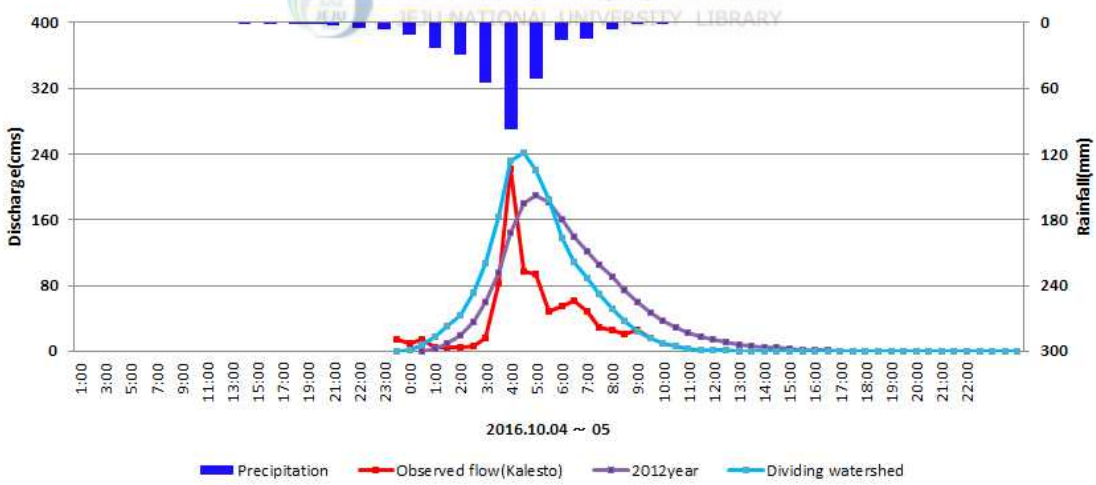


Fig. 6.22 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by sub-watershed division of the Sanji stream watershed

Table 6.29 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by sub-watershed division of the Sanji stream watershed

	Flood discharge (cms)	Peak Time	Error		Ratio (%)
			Discharge (cms)	Peak Time	
Observed	222.25	04:00	-	-	-
Manual (2012)	189.34	05:00	-32.91	1hr	-14.81
Sub-basin	241.89	04:30	19.64	0.5hr	8.84

홍수량 산정 및 비교 결과 연구대상 유역 중 유역면적이 가장 작은 독사천을 제외한 3개 하천(한천, 병문천, 산지천)에서 설계홍수량 산정요령(2012)에 의한 홍수량 산정 결과가 현장관측 홍수량 보다 낮게 산정되었다. 이와 같이 홍수량 모의 결과가 관측 홍수량보다 낮을 경우 하천 범람의 위험이 있는 것을 의미하며 인명 및 재산피해로 이어질 수 있다. 또한 첨두 유출의 발생 시간도 최대 1시간의 오차가 발생함에 따라 피해가 더욱 가중될 수 있다. 반면 토지이용 및 지형 특성을 반영하여 소유역 분할 후 홍수량을 산정한 결과 관측 홍수량보다 높게 산정되어 홍수범람의 위험에서 안전성을 확보할 수 있었으며 지속시간 동안의 유출수문곡선도 유사하게 나타났다.

제주도의 하천은 유역면적이 크지 않고 소·중규모 유역에 해당하여 홍수량 산정 시 단일유역으로 분석해야 한다. 그러나 고도에 따른 지형특성 및 토지이용 등의 변화가 뚜렷하게 나타나고 있어 소유역을 구분하여 홍수량을 산정하였다. 설계홍수량 산정요령 기준과 비교 시 첨두유출량의 정확도는 유출 사상에 따라 11.5 ~ 37.6 % 증가하였다. 또한 관측 홍수량과 비교한 유출수문곡선의 R^2 값은 37.1 ~ 66.1 % 증가하여 소유역 분할 시 기존 방법 대비 정확한 홍수량 산정이 가능하였다 (Table 6.30).

제주대학교 중앙도서관

Table 6.30 Accuracy comparison of flood discharge by sub-watershed division

	Accuracy of flood discharge			Accuracy of flood correlation coefficients		
	Bolaven	Sanba	Chaba	Bolaven	Sanba	Chaba
Han Stream	11.5% ↑	14.35% ↑	37.6% ↑	37.4% ↑	66.1% ↑	65.2% ↑
Byeongmun Stream			29.4% ↑			27.1% ↑
Doksa Stream			2.5% ↑			
Sanji Stream			14.8% ↑			37.1% ↑

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

6.4 하천별 매개변수 적용 및 홍수량 산정

제주도 하천유역은 가파른 경사 특성을 띄고 있으며 내륙지역의 유역특성과는 달리 유역의 형상계수가 매우 작고 홍수 유출 발생 시 7 m/s 이상의 빠른 유속으로 급격한 유출이 발생한다. 이에 따라 제주도 하천을 대상으로 홍수량 산정 시 제주형 특성이 반영된 매개변수 산정 및 조합을 통한 홍수량 산정이 필요하다.

앞서 각각의 매개변수(CN, 도달시간, 소유역 구분)에 대한 보정 또는 신규 제안을 통하여 홍수량 산정 결과를 비교하였다. 매개변수 보정에 따른 독립적인 홍수량 산정 시 기존 방법(설계홍수량 산정요령) 대비 정확도는 증가하였으나 실제 수문곡선과 많은 오차가 발생했다. 보다 더 나은 홍수량 산정 결과를 얻기 위하여 매개변수를 조합하여 홍수량을 산정하였으며 관측 홍수량과 비교하였다.

6.4.1 매개변수 조합에 의한 홍수량

한천 유역의 토지이용 및 지형 특성을 고려한 소유역 구분 시 4개의 소유역으로 나뉘며 Sharpely and Williams 공식을 적용하여 경사도를 고려한 CN 값은 소유역별로 각각 78.97, 71.83, 69.44, 68.41로 분석되었다(부록 Table 8.1).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(1) 태풍 ‘볼라벤’

태풍 ‘볼라벤’ 내습 시 유출 현장에서 홍수량 관측 결과 첨두 유출은 8월 27일 23시와 28일 04시에 2회 발생하였으며 첨두 유출량은 431.82 cms, 375.95 cms로 관측되었다.

설계홍수량 산정요령(국토교통부, 2012)에 따라 홍수량을 산정할 경우 첨두 유출량은 304.93 cms로 관측 값보다 71.02 cms 낮게 산정되어 23.3 %의 오차율을 보였으며 첨두 시간도 1시간의 오차가 발생하였다. 반면, 제주형 특성을 고려한 매개변수 보정(CN값 보정, 신규 도달시간 적용, 소유역 분할) 후 홍수량 산정 시 첨두 유출량은 394.2 cms 와 374.69 cms로 관측 홍수량과 각각 8.71 %, 0.34 %의 오차율을 보였으며 첨두 시간도 동일한 시간에 발생하는 것으로 분석되었다(Fig. 6.23).

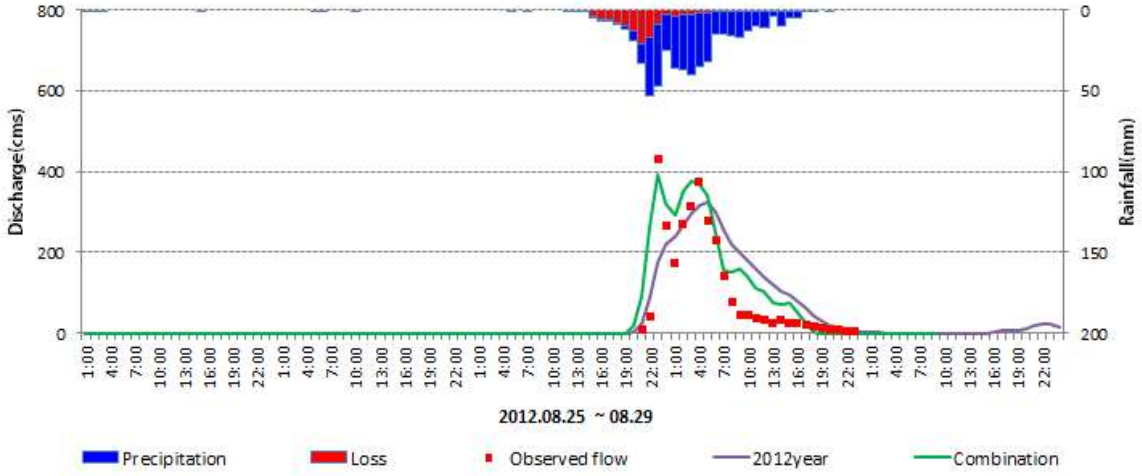


Fig. 6.23 Comparison of flood discharge of typhoon Bolaven by combination of parameters in the Han stream watershed

홍수량의 정확도 비교를 위하여 관측 홍수량을 기준으로 상관계수 R^2 값을 비교·분석한 결과 설계홍수량 산정요령에 의한 홍수량 산정 시 R^2 값은 0.614로 오차가 발생한 반면, 매개변수 조합에 따른 홍수량 산정 시 R^2 값은 0.837로 분석되어 매개변수 보정 및 조합 시 홍수량의 정확도가 36.32 % 향상되었다(Fig. 6.24).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

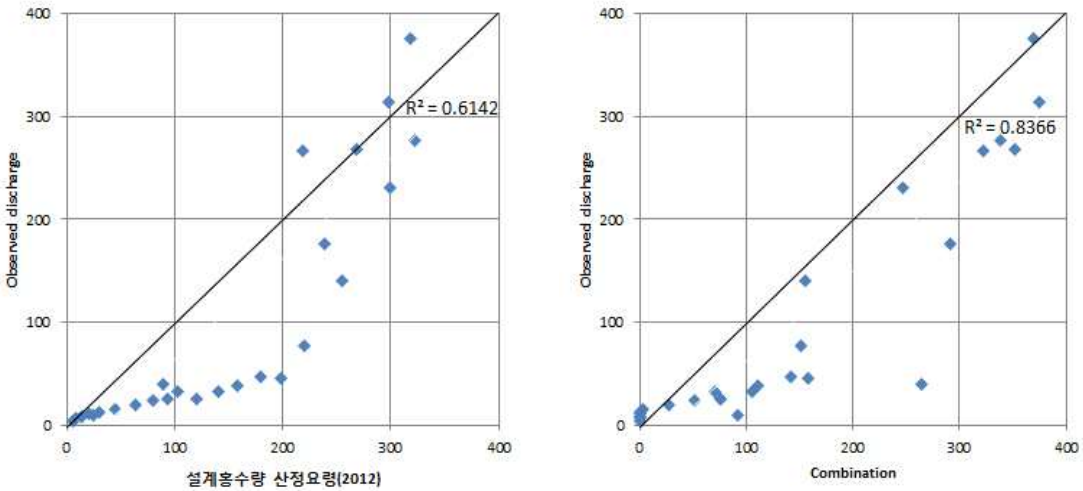


Fig. 6.24 Comparison of flood correlation coefficients of typhoon Bolaven by combination of parameters in the Han stream watershed

(2) 태풍 '산바'

태풍 '산바' 내습 시 유출 현장에서 홍수량 관측 결과 첨두 유출은 9월 17일 09시에 발생하였으며 첨두 유출량은 544.69 cms 로 관측되었다.

설계홍수량 산정요령(2012)에 따라 홍수량을 산정할 경우 첨두 유출량은 466.53 cms 로 관측 값보다 78.16 cms 낮게 산정되어 14.35 % 의 오차율이 발생하였다. 반면, 제주형 특성을 고려한 매개변수 보정(CN값 보정, 신규 도달시간 적용, 소유역 분할) 후 홍수량 산정 시 첨두 유출량은 583.04 cms로 관측 홍수량과 7.04 %의 오차율이 발생하였다(Fig. 6.25).

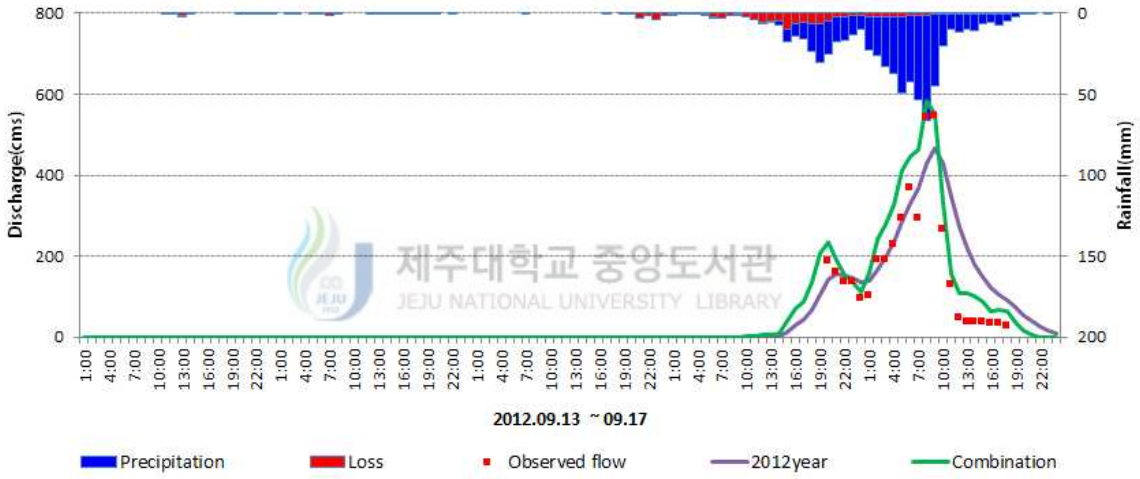


Fig. 6.25 Comparison of flood discharge of typhoon Sanba by combination of parameters in the Han stream watershed

홍수량의 정확도 비교를 위하여 관측 홍수량을 기준으로 상관계수 R^2 값을 비교·분석한 결과 설계홍수량 산정요령에 의한 홍수량 산정 시 R^2 값은 0.635로 오차가 발생한 반면, 매개변수 조합에 따른 홍수량 산정 시 R^2 값은 0.944로 분석되어 매개변수 보정 및 조합 시 홍수량의 정확도가 48.66 % 향상되었다(Fig. 6.26).

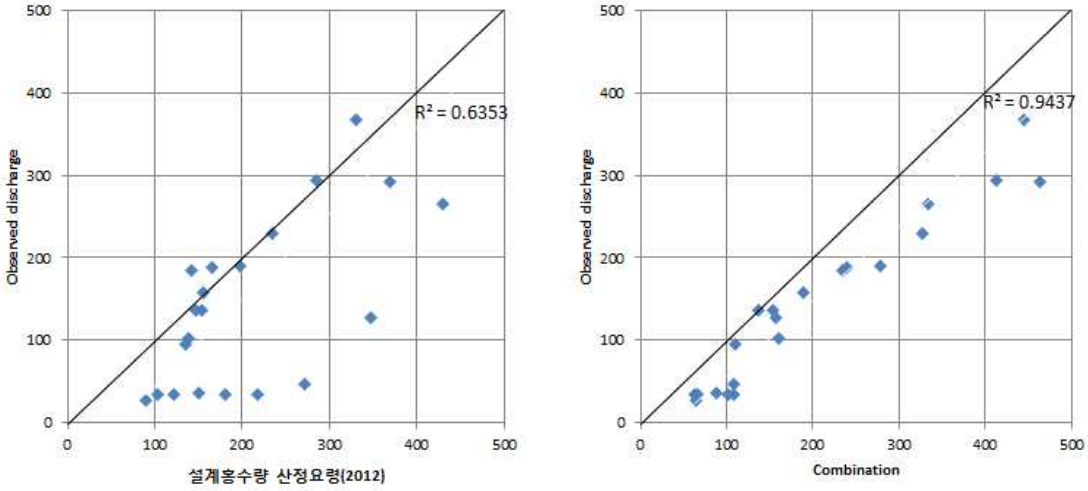


Fig. 6.26 Comparison of flood correlation coefficients of typhoon Sanba by combination of parameters in the Han stream watershed

(3) 태풍 '차바'

태풍 '차바' 내습 시 홍수량 관측 결과 첨두 유출은 10월 05일 04시 30분에 발생하였으며 홍수량은 846.33 cms 로 관측되었다.

설계홍수량 산정요령(2012)에 따라 홍수량을 산정할 경우 첨두 유출량은 528.46 cms 로 관측 값보다 317.87 cms 낮게 산정되어 37.56 %의 오차율이 발생하였다. 반면, 제주형 특성을 고려한 매개변수 보정(CN값 보정, 신규 도달시간 적용, 소유역 분할) 후 홍수량 산정 시 첨두 유출량은 920.52 cms로 관측 홍수량과 8.77 %의 오차율이 발생하였다(Fig. 6.27).

두 방법에 의한 홍수량의 정확도 비교를 위하여 관측 홍수량을 기준으로 상관계수 R^2 값을 비교·분석한 결과 설계홍수량 산정요령에 의한 홍수량 산정 시 R^2 값은 0.342로 오차가 크게 발생한 반면, 매개변수 조합에 따른 홍수량 산정 시 R^2 값은 0.929로 분석되어 매개변수 보정 및 조합 시 홍수량의 정확도가 크게 향상되었다(Fig. 6.28).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

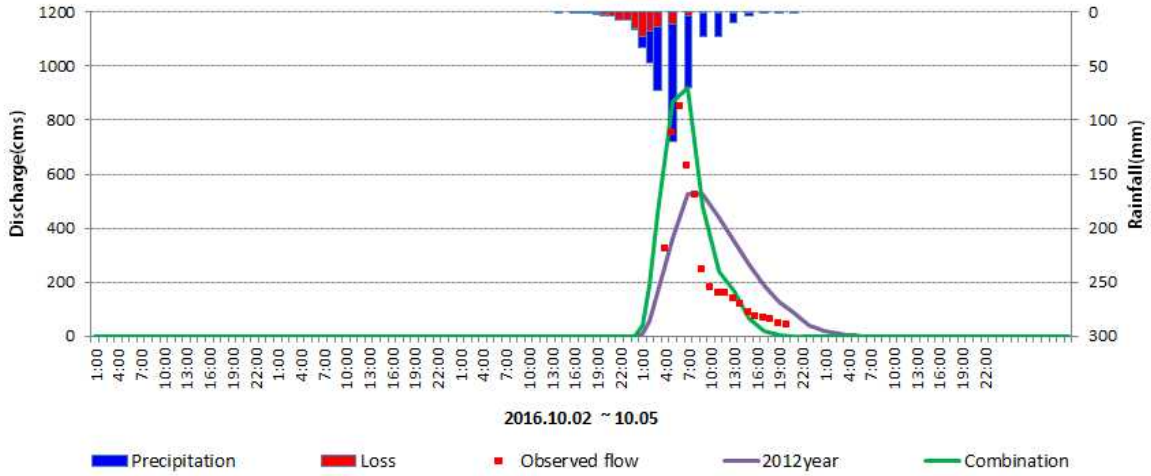
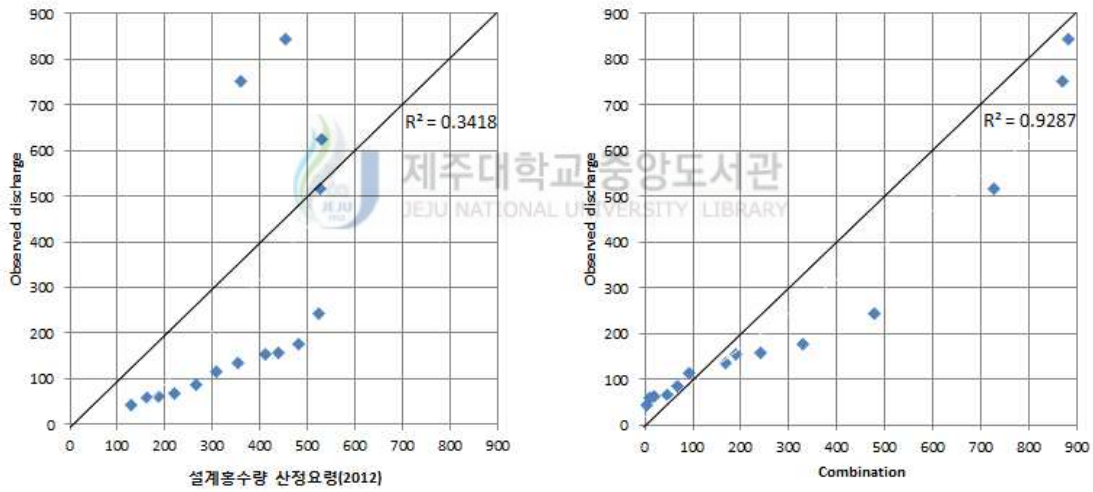


Fig. 6.27 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by combination of parameters in the Han stream watershed



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 6.28 Comparison of flood correlation coefficients of typhoon Chaba by combination of parameters in the Han stream watershed

하천 현장관측을 통한 홍수량을 기준으로 기존방법(설계홍수량 산정요령, 2012)과 제주도 도심 하천의 지형 및 수문학적 특성을 고려한 매개변수 조합에 따른 홍수량을 비교하였다. 기존방법으로 홍수량 산정 시 관측자료 대비 14.35 ~ 37.56 %의 오차가 발생한 반면, 매개변수 조합에 의한 홍수량 산정 시 0.34 ~ 8.77 %의 오차가 발생하여 기존 방법 대비 7.31 ~ 28.79 %의 오차율이 개선되었다(Table 6.31).

Table 6.31 Comparison of flood discharge and error by combination of parameters in the Han stream watershed

	Flood discharge(cms)			Observed vs Manual(2012)		Observed vs Combination	
	Observed	Manual (2012)	Combi nation	Error (cms)	Error rate (%)	Error (cms)	Error rate (%)
Bolaven	375.95	322.86	374.69	71.12	23.3	1.26	0.34
	544.69	466.53	583.04	78.16	14.35	38.35	7.04
Sanba	846.33	528.46	920.52	317.87	37.56	74.19	8.77
Chaba	846.33	528.46	885.22	-317.87	-37.56	38.89	4.60

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

6.4.2 도심 하천별 홍수량 산정

(1) 병문천

태풍 '차바' 내습 시 유출 현장에서 홍수량 관측 결과 첨두 유출은 10월 05일 05시에 발생하였으며 첨두 유출량은 204.04 cms 로 관측되었다.

매개변수 보정에 따른 홍수량 산정방법의 정확도를 비교하기 위하여 홍수량 산정 후 비교한 결과는 Fig. 6.29와 같다.

병문천 유역의 토지이용 및 지형 특성을 고려한 소유역 구분 시 3개의 소유역으로 나뉘며 Sharpely and Williams 공식을 적용하여 경사도를 고려한 CN 값은 소유역별로 각각 79.27, 73.48, 69.14로 분석되었다(부록 Table 8.2).

설계홍수량 산정요령에 따라 홍수량을 산정할 경우 첨두 유출량은 144.09 cms 로 관측 값보다 59.95 cms 낮게 산정되어 29.38 % 의 오차율이 발생하였으며 매개변수 보정(CN값 보정, 신규 도달시간 적용, 소유역 분할) 후 홍수량 산정 시 첨두 유출량은 241.9 cms로 분석되어 18.56 % 의 오차율이 발생하였다(Fig. 6.29).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

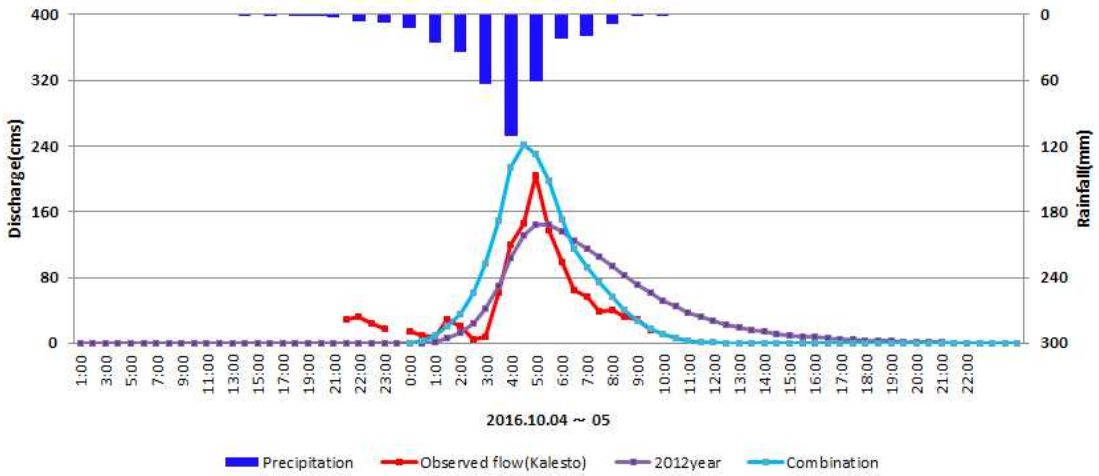


Fig. 6.29 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by combination of parameters in the Byeongmun stream watershed

홍수량 정확도 비교를 위하여 관측 홍수량을 기준으로 상관계수 R^2 값을 비교·분석한 결과 설계홍수량 산정요령(2012)에 의한 홍수량 산정 시 R^2 값은 0.72로 분

석되었으며, 매개변수 조합에 따른 홍수량의 R^2 값은 0.868로 분석되어 매개변수 보정 및 조합 적용 시 홍수량의 정확도가 20.56 % 향상되었다(Fig. 6.30).

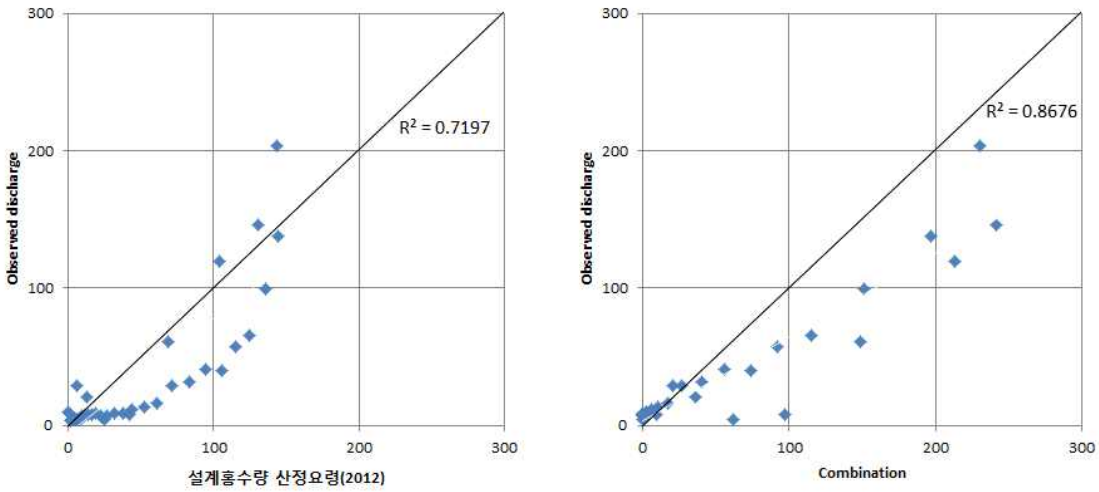


Fig. 6.30 Comparison of flood correlation coefficients of typhoon Chaba by combination of parameters in the Byeongmun stream watershed

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(2) 독사천

태풍 '차바' 내습 시 유출 현장에서 홍수량 관측 결과 첨두 유출은 10월 05일 04시 30분에 발생하였으며 첨두 유출량은 74.33 cms 로 관측되었다.

독사천 유역의 토지이용 및 지형 특성을 고려한 소유역 구분 시 2개의 소유역으로 나뉘며 Sharpely and Williams 공식을 적용하여 경사도를 고려한 CN 값은 소유역별로 각각 83.85, 73.31로 분석되었다(부록 Table 8.3).

설계홍수량 산정요령에 따라 홍수량을 산정할 경우 첨두 유출량은 111.52 cms 로 관측 값보다 37.19 cms 높게 산정되어 50.03 % 의 오차율이 발생하였으며 매개변수 보정(CN값 보정, 신규 도달시간 적용, 소유역 분할) 후 홍수량 산정 시 첨두 유출량은 109.61 cms로 분석되어 47.46 % 의 오차율이 발생하였다(Fig. 6.31).

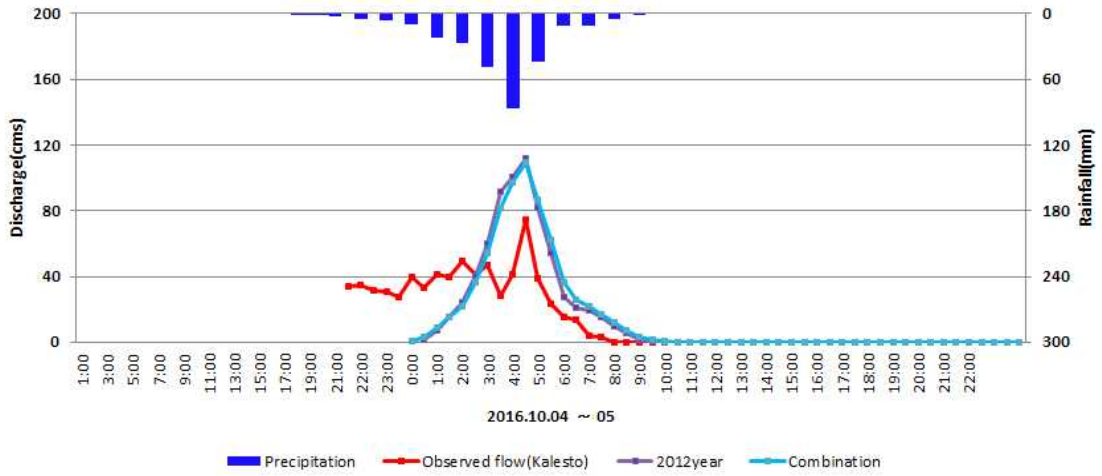


Fig. 6.31 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by combination of parameters in the Doksa stream watershed

홍수량 정확도 비교를 위하여 관측 홍수량을 기준으로 상관계수 R^2 값을 비교·분석한 결과 설계홍수량 산정요령(2012)에 의한 홍수량 산정 시 R^2 값은 0.254로 분석되었으며, 매개변수 조합에 따른 홍수량의 R^2 값은 0.213으로 분석되어 더 큰 오차가 발생하였다(Fig. 6.32). 이와 같은 결과로 유역면적이 작고 중산간 지역보다 낮은 곳에서 발원하는 하천에서는 매개변수 보정(CN 보정, 도달시간, 소유역 분할)의 결과를 적용하기에 적합하지 않은 것으로 판단된다.

제주대학교 중앙도서관

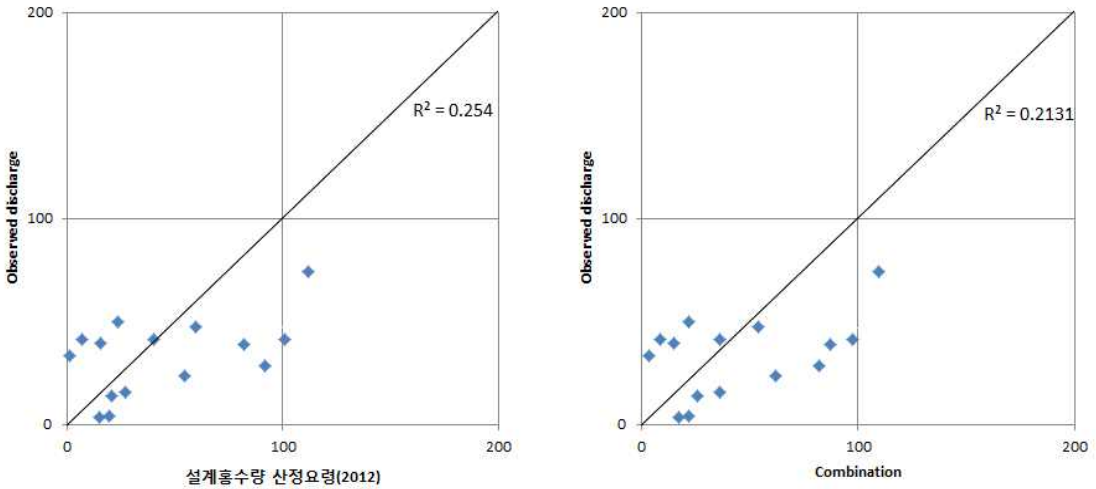


Fig. 6.32 Comparison of flood correlation coefficients of typhoon Chaba by combination of parameters in the Doksa stream watershed

(3) 산지천

태풍 '차바' 내습 시 유출 현장에서 홍수량 관측 결과 첨두 유출은 10월 05일 04시에 발생하였으며 첨두 유출량은 222.25 cms 로 관측되었다.

산지천 유역의 토지이용 및 지형 특성을 고려한 소유역 구분 시 3개의 소유역으로 나뉘며 Sharpely and Williams 공식을 적용하여 경사도를 고려한 CN 값은 소유역별로 각각 83.0, 70.41, 68.95로 분석되었다(부록 Table 4).

설계홍수량 산정요령에 따라 홍수량을 산정할 경우 첨두 유출량은 189.34 cms 로 관측 값보다 32.91 cms 낮게 산정되어 14.81 % 의 오차율이 발생하였으며 매개변수 보정(CN값 보정, 신규 도달시간 적용, 소유역 분할) 후 홍수량 산정 시 첨두 유출량은 252.56 cms로 분석되어 13.64 % 의 오차율이 발생하였다(Fig. 6.33).

홍수량 정확도 비교를 위하여 관측 홍수량을 기준으로 상관계수 R^2 값을 비교·분석한 결과 설계홍수량 산정요령(2012)에 의한 홍수량 산정 시 R^2 값은 0.501로 분석되었으며, 매개변수 조합에 따른 홍수량의 R^2 값은 0.7로 분석되어 매개변수 보정 및 조합 적용 시 홍수량의 정확도가 39.72 % 향상되었다(Fig. 6.34).

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

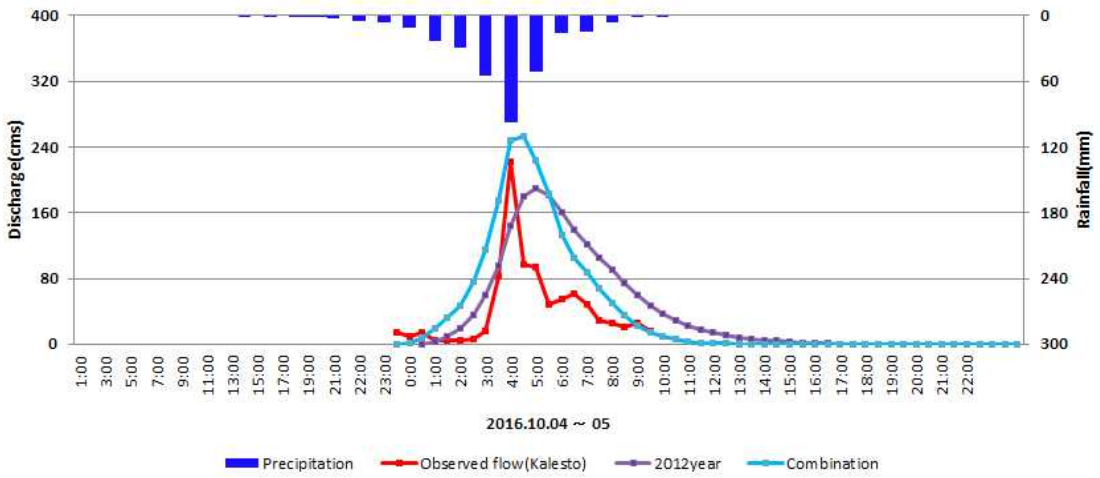


Fig. 6.33 Comparison of flood discharge of typhoon Chaba by combination of parameters in the Sanji stream watershed

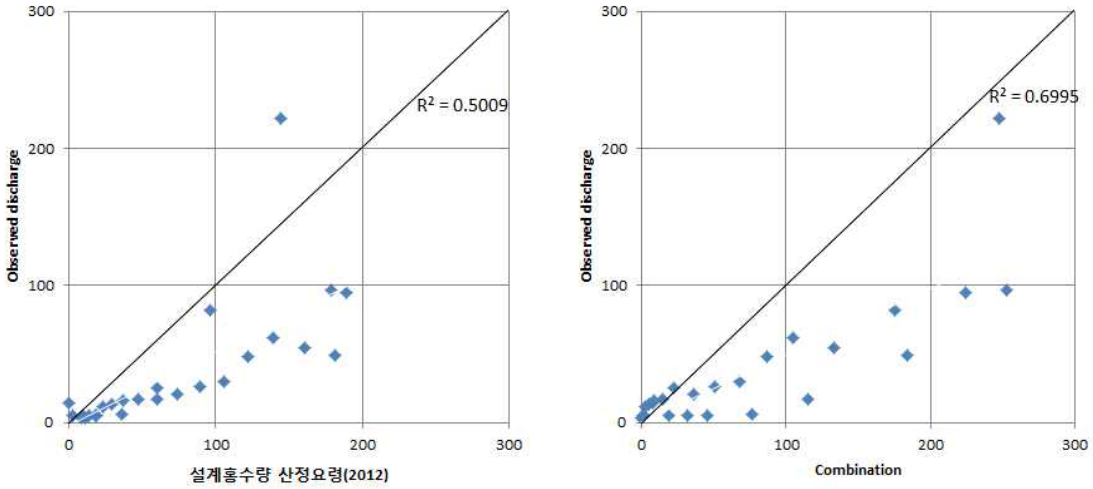


Fig. 6.34 Comparison of flood correlation coefficients of typhoon Chaba by combination of parameters in the Sanji stream watershed

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 6.32 Comparison of parameters for estimation of flood discharge

구 분		기존	금회
		홍수량 산정요령(국토교통부, 2012)	도심하천 홍수량 산정법 개선 결과
강우	공간분포 (면적강우량)	· 티센다각형법 적용	· 등우선법 적용
유효우량	유효우량	· SCS 방법의 분류기준 및 국내 분류기준을 통합·요약한 분류표 내에서 유출곡선지수(CN) 산정 후 안전측인 CN III 채택	· SCS 방법의 및 국내 분류기준을 통합·요약한 분류표 내에서 유출곡선지수(CN) 산정 후 제주도 수문특성을 고려하여 CN II 채택
매개변수	도달시간	· Kraven II 공식의 문제점을 보완한 연속형 Kraven 공식 적용	· 신규 도달시간 산정식 제시
	저류상수	· Russel 공식에 비해 유역형상을 고려할 수 있는 Sabol 공식 적용	· Russel 공식 및 수정 Sabol 공식 적용
	단위도	· 합성단위도 방법(Clark, SCS, Snyder, Nakayasu) 고려하여 홍수량을 산정 · Clark 단위도 적용	· 합성단위도 방법(Clark, SCS, Snyder, Nakayasu) 고려하여 홍수량을 산정 · Clark 단위도 적용
	소유역 분할 및 하도추적	· $250km^2$ 이하 유역은 단일유역으로 홍수량 산정 · $250km^2$ 이상 유역은 유역 구분 후 하도추적 실시	· $250km^2$ 이하 유역이지만 제주도 유역특성 및 수문특성을 고려하여 소유역 구분 실시

제주대학교 중앙도서관 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

제주도 도심 하천은 유역면적이 크지 않고 경사가 급한 특성을 띄고 있으며 홍수 유출 발생 시 7 m/s 이상의 빠른 유속으로 유출이 발생한다. 또한 고도에 따른 지형특성 및 토지이용 등의 변화가 뚜렷하게 나타나고 있어 하천의 지형 및 수문학적 특성을 고려한 매개변수를 적용하여 홍수량을 산정하였다(Table 32)). 설계홍수량 산정요령 기준과 비교 시 첨두유출량의 정확도는 유출 사상에 따라 1.2 ~ 28.8 % 증가하였다. 또한 관측 홍수량과 비교한 유출수문곡선의 R^2 값은 20.6 ~ 171.6 % 증가하여 매개변수 조합 시 기존 방법 대비 정확한 홍수량 산정이 가능하였다 (Table 6.33).

Table 6.33 Accuracy comparison of flood discharge by combination of parameters

	Accuracy of flood discharge			Accuracy of flood correlation coefficients		
	Bolaven	Sanba	Chaba	Bolaven	Sanba	Chaba
Han Stream	23% ↑	7.3% ↑	28.8% ↑	36.3% ↑	48.7% ↑	171.6% ↑
Byeongmun Stream			10.8% ↑			20.6% ↑
Doksa Stream			2.6% ↑			-
Sanji Stream			1.2% ↑			39.7% ↑

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

7. 결론

태풍 및 집중호우에 의한 홍수피해를 예방하기 위해서 치수계획이 수립된다. 치수계획 수립 시 홍수량은 수공구조물의 크기를 결정하는데 중요한 역할을 하며 설계홍수량 산정요령(국토교통부, 2012)에 따라 산정하고 있다. 그러나 설계홍수량 산정요령은 우리나라 내륙지역 기준으로 수립되어 제주도의 수문학적 특성을 제대로 반영하지 못하고 있다. 제주도 하천의 홍수량 분석·평가 시 제주도 특유의 하천현장 관측자료를 기반한 제주형 홍수량 산정법 개발이 필요하다. 제주도 도심하천을 중심으로 하천현장에서 관측한 다년간의 수문성분조사 자료를 기반으로 하천의 지형적 특성 및 수문학적 특성을 반영한 홍수량 산정방법의 연구 결과는 다음과 같다.

1. 티센다각형망 구축 시 제주관측소와 아라관측소는 티센면적비 중 94.5 %, 45.8 %의 유역에서 강우 오차가 발생하고 있어 연구대상 유역의 고도 600m 이하에서는 등우선법에 의한 면적강우량과 오차가 크게 발생한다. 그러나 600m 이상의 고도에서는 고지대에 위치한 관측소의 영향으로 티센면적비 중 어리목 18.91 %, 윗세오름 2.41 %, 진달래밭 2.84 %의 면적에서 강우 오차가 발생하였다.

2. 연구대상 유역별 강우관측소 밀도를 분석한 결과 한천 유역은 7.34 km^2/EA, 병문천 유역은 3.96 km^2/EA, 독사천 유역은 3.18 km^2/EA, 산지천 유역은 4.89 km^2/EA으로 나타났다. 제주도 하천은 내륙지역과 같이 유역면적이 크지 않고 강우 관측소가 조밀하게 분포되어 있어 내륙지역과 비교 시 약 25배 이상의 밀집도를 나타냈으며 관측소 당 10km^2가 넘지 않는 매우 높은 강우관측망 밀도를 보였다

3. 대부분의 도심지가 위치한 고도 600m 이하에서 두 방법 간 면적강우량의 상관계수가 0.48 ~ 0.53 으로 분석되어 많은 오차가 발생하였다. 그러나 600m 이상의 고도에서는 티센다각형법과 등우선법 간 면적강우량의 상관계수가 0.7 ~ 0.96 으로 높게 나타났다. 특히, 고도 1200m 이상의 지역은 윗세오름과 진달래밭 관측소의 영향을 받고 있어 3 % 미만의 면적 오차가 발생하였으며 등우선법에 의한 면적강우량과 상관계수가 0.8 ~ 0.96 으로 매우 높게 분석되었다.

제주대학교 중앙도서관

4. 제주도의 하천은 경사가 급한 특성을 띄고 있어 CN 산정 시 경사를 고려하여 홍수량을 산정하였다. CN 보정 시 유역면적의 크기가 클수록 변동 폭이 컸으며 설계홍수량 산정요령(2012) 기준과 비교 시 첨두 유출량의 정확도는 유출 사상에 따라 1.5 ~ 6.4 % 증가하였다. 또한 관측 홍수량과 비교한 유출수문곡선의 R^2 값은 1 ~ 18.49 % 증가하여 경사를 고려한 CN값 보정 시 기존 방법 대비 정확한 홍수량 산정이 가능하였다.

5. 제주도의 하천은 경사가 급하고 유출 발생 시 난류와 사류의 흐름 특성이 나타나며 유속이 7 m/s를 상회하여 도달시간 산정 시 기존 공식의 적용이 불가하였다. 이에 따라 제주도 하천의 특성이 반영된 신규 도달시간을 산정하여 홍수량을 비교·검토하였으며 설계홍수량 산정요령 기준과 비교 시 첨두 유출량의 정확도는 유출 사상에 따라 3.5 ~ 16.7 % 증가하였다. 또한 관측 홍수량과 비교한 유출수문곡선의 R^2 값은 12.2 ~ 77.2 % 증가하여 신규 도달시간 적용 시 기존 방법 대비 정확한 홍수량 산정이 가능하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

6. 제주도의 하천은 유역면적이 크지 않고 소·중규모 유역에 해당하여 홍수량 산정 시 단일유역으로 분석해야 한다. 그러나 고도에 따른 지형특성 및 토지이용 등의 변화가 뚜렷하게 나타나고 있어 소유역을 구분하여 홍수량을 산정하였다.

설계홍수량 산정요령 기준과 비교 시 첨두유출량의 정확도는 유출 사상에 따라 11.5 ~ 37.6 % 증가하였다. 또한 관측 홍수량과 비교한 유출수문곡선의 R^2 값은 37.1 ~ 66.1 % 증가하여 소유역 분할 시 기존 방법 대비 정확한 홍수량 산정이 가능하였다

7. 제주도 도심 하천은 유역면적이 크지 않고 경사가 급한 특성을 띄고 있으며 홍수 유출 발생 시 7 m/s 이상의 빠른 유속으로 유출이 발생한다. 또한 고도에 따른 지형특성 및 토지이용 등의 변화가 뚜렷하게 나타나고 있어 하천의 지형 및 수문학적 특성을 고려한 매개변수를 적용하여 홍수량을 산정하였다. 설계홍수량 산정요령 기준과 비교 시 첨두유출량의 정확도는 유출 사상에 따라 1.2 ~ 28.8 % 증가하였다. 또한 관측 홍수량과 비교한 유출수문곡선의 R^2 값은 20.6 ~ 171.6 % 증가하여

매개변수 조합 시 기존 방법 대비 정확한 홍수량 산정이 가능하였다.

제주도는 태풍의 길목에 위치하여 매년 홍수 피해가 발생하는 등 기상 및 수문학적으로 매우 중요한 지역임에도 불구하고 국가 주도의 관리 및 계획 수립 반영이 미흡하다. 따라서 관측자료 기반의 제주도 수문학적 특성을 고려한 홍수량 산정 연구는 필수적이며, 이와 같은 연구결과들은 기 수립된 하천치수계획의 문제점 및 개선방안을 도출하는데 기여 할 수 있다.

향후 제주도 유역의 치수계획(신규 하천기본계획, 홍수방어대책 등) 수립 시 정확한 홍수량 산정 및 대책을 마련하기 위해서는 지속적인 현장관측 및 수문자료 확보를 통하여 매개변수 보정 및 검증에 관한 연구가 수행되어야 한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

8. 부록

Table 8.1 Curve Number considering sub-watershed classification and river slope of Han stream watershed

유역	토지피복(중분류)	CN	유역면적	면적가중 CN	구성비(%)
Sub basin 1	골프장	69	0.00	0.00	0.00
	공공시설지역	75	71858.31	5389373.57	2.40
	공업지역	88	0.00	0.00	0.00
	과수원	79	432237.57	34146768.28	14.45
	교통지역	89	315645.54	28092452.71	10.55
	기타나지	86	39319.78	3381501.47	1.31
	기타재배지	79	4311.63	340618.99	0.14
	기타초지	69	0.00	0.00	0.00
	내륙수	100	6147.34	614734.44	0.21
	내륙습지	100	0.00	0.00	0.00
	논	79	0.00	0.00	0.00
	밭	74	638091.17	47218746.71	21.33
	상업지역	92	142330.34	13094391.09	4.76
	연안습지	100	0.00	0.00	0.00
	위락시설지역	69	0.00	0.00	0.00
	자연초지	58	55087.36	3195067.16	1.84
	주거지역	85	630290.44	53574687.29	21.07
	채광지역	79	0.00	0.00	0.00
	침엽수림	69	328077.34	22637336.77	10.97
	하우스재배지	85	0.00	0.00	0.00
	해양수	100	1539.53	153953.27	0.05
	혼효림	69	0.00	0.00	0.00
	활엽수림	69	32035.63	2210458.76	1.07
	문화·체육·휴양시	69	128338.58	8855361.86	4.29
	시설재배지	85	45259.91	3847092.25	1.51
	인공초지	69	54347.05	3749946.78	1.82
	자연나지	86	66270.69	5699278.98	2.22

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Sub basin 2	골프장	69	0.00	0.00	0.00
	공공시설지역	75	17567.93	1317594.44	0.39
	공업지역	88	0.00	0.00	0.00
	과수원	79	339365.88	26809904.58	7.53
	교통지역	89	91888.47	8178073.76	2.04
	기타나지	86	103215.31	8876517.05	2.29
	기타재배지	79	0.00	0.00	0.00
	기타초지	69	0.00	0.00	0.00
	내륙수	100	15220.39	1522038.79	0.34
	내륙습지	100	11309.38	1130938.44	0.25
	논	79	0.00	0.00	0.00
	밭	74	1147267.86	84897821.61	25.46
	상업지역	92	24685.94	2271106.13	0.55
	연안습지	100	0.00	0.00	0.00
	위락시설지역	69	0.00	0.00	0.00
	자연초지	58	314694.10	18252257.58	6.98
	주거지역	85	96537.53	8205689.88	2.14
	채광지역	79	0.00	0.00	0.00
	침엽수림	69	847373.64	58468781.48	18.81
	하우스재배지	85	0.00	0.00	0.00
	해양수	100	0.00	0.00	0.00
	혼효림	69	158726.01	10952094.59	3.52
	활엽수림	69	253160.35	17468064.17	5.62
	문화·체육·휴양시	69	22232.31	1534029.44	0.49
	시설재배지	85	27164.61	2308991.88	0.60
	인공초지	69	1034441.87	71376489.09	22.96
	자연나지	86	665.66	57246.69	0.01

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Sub basin 3	골프장	69	0.00	0.00	0.00
	공공시설지역	75	102869.73	7715229.96	0.61
	공업지역	88	0.00	0.00	0.00
	과수원	79	232235.95	18346640.11	1.38
	교통지역	89	151151.29	13452465.19	0.90
	기타나지	86	605911.63	52108400.32	3.59
	기타재배지	79	0.00	0.00	0.00
	기타초지	69	0.00	0.00	0.00
	내륙수	100	0.00	0.00	0.00
	내륙습지	100	0.00	0.00	0.00
	논	79	0.00	0.00	0.00
	밭	74	1678238.29	124189633.77	9.95
	상업지역	92	4915.26	452203.94	0.03
	연안습지	100	0.00	0.00	0.00
	위락시설지역	69	0.00	0.00	0.00
	자연초지	58	1694161.46	98261364.43	10.04
	주거지역	85	3355.61	285227.23	0.02
	채광지역	79	0.00	0.00	0.00
	침엽수림	69	3628693.40	250379844.35	21.51
	하우스재배지	85	0.00	0.00	0.00
	해양수	100	0.00	0.00	0.00
	혼효림	69	1309427.70	90350511.40	7.76
	활엽수림	69	6087775.27	420056493.53	36.09
	문화·체육·휴양시	69	40271.12	2778707.58	0.24
	시설재배지	85	24649.17	2095179.43	0.15
	인공초지	69	1256379.55	86690189.09	7.45
	자연나지	86	49938.83	4294739.60	0.30

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Sub basin 4	골프장	69	0.00	0.00	0.00
	공공시설지역	75	41925.22	3144391.43	0.33
	공업지역	88	0.00	0.00	0.00
	과수원	79	0.00	0.00	0.00
	교통지역	89	7754.16	690120.13	0.06
	기타나지	86	107877.58	9277472.28	0.84
	기타재배지	79	0.00	0.00	0.00
	기타초지	69	0.00	0.00	0.00
	내륙수	100	0.00	0.00	0.00
	내륙습지	100	0.00	0.00	0.00
	논	79	0.00	0.00	0.00
	밭	74	18142.10	1342515.56	0.14
	상업지역	92	0.00	0.00	0.00
	연안습지	100	0.00	0.00	0.00
	위락시설지역	69	0.00	0.00	0.00
	자연초지	58	896106.16	51974157.51	7.01
	주거지역	85	0.00	0.00	0.00
	채광지역	79	0.00	0.00	0.00
	침엽수림	69	2476290.06	170864014.25	19.38
	하우스재배지	85	0.00	0.00	0.00
	해양수	100	0.00	0.00	0.00
	혼효림	69	873051.57	60240558.15	6.83
	활엽수림	69	8342316.30	575619824.86	65.30
	문화·체육·휴양시	69	0.00	0.00	0.00
	시설재배지	85	0.00	0.00	0.00
	인공초지	69	12456.42	859493.00	0.10
	자연나지	86	0.00	0.00	0.00

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 8.2 Curve Number considering sub-watershed classification and river slope of Byeongmun stream watershed

	토지피복(중분류)	CN	유역면적	면적가중 CN	구성비(%)
Sub basin 1	골프장	69	0.00	0.00	0.00
	공공시설지역	75	78534.86	5890114.44	2.21
	공업지역	88	0.00	0.00	0.00
	과수원	79	596816.95	47148539.15	16.77
	교통지역	89	415762.25	37002840.20	11.68
	기타나지	86	163377.03	14050424.62	4.59
	기타재배지	79	0.00	0.00	0.00
	기타초지	69	0.00	0.00	0.00
	내륙수	100	0.00	0.00	0.00
	내륙습지	100	0.00	0.00	0.00
	논	79	0.00	0.00	0.00
	밭	74	923366.97	68329155.75	25.94
	상업지역	92	102972.02	9473426.11	2.89
	연안습지	100	0.00	0.00	0.00
	위락시설지역	69	0.00	0.00	0.00
	자연초지	58	14831.26	860213.26	0.42
	주거지역	85	586765.11	49875034.76	16.49
	채광지역	79	0.00	0.00	0.00
	침엽수림	69	158935.15	10966525.42	4.47
	하우스재배지	85	0.00	0.00	0.00
	해양수	100	0.00	0.00	0.00
	혼효림	69	6201.86	427928.43	0.17
	활엽수림	69	87470.62	6035472.69	2.46
	문화·체육·휴양시	69	110856.55	7649101.68	3.11
	시설재배지	85	98623.99	8383039.45	2.77
	인공초지	69	141839.21	9786905.40	3.99
	자연나지	86	72799.30	6260739.46	2.05

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Sub basin 2	골프장	69	0.00	0.00	0.00
	공공시설지역	75	27580.98	2068573.85	0.51
	공업지역	88	0.00	0.00	0.00
	과수원	79	351730.26	27786690.16	6.55
	교통지역	89	35577.91	3166433.69	0.66
	기타나지	86	515710.05	44351064.21	9.60
	기타재배지	79	6623.44	523251.69	0.12
	기타초지	69	0.00	0.00	0.00
	내륙수	100	0.00	0.00	0.00
	내륙습지	100	0.00	0.00	0.00
	논	79	0.00	0.00	0.00
	밭	74	1932341.56	142993275.59	35.99
	상업지역	92	26959.81	2480302.32	0.50
	연안습지	100	0.00	0.00	0.00
	위락시설지역	69	0.00	0.00	0.00
	자연초지	58	60836.32	3528506.62	1.13
	주거지역	85	2742.16	233083.24	0.05
	채광지역	79	0.00	0.00	0.00
	침엽수림	69	815820.38	56291606.46	15.19
	하우스재배지	85	0.00	0.00	0.00
	해양수	100	0.00	0.00	0.00
	혼효림	69	224841.34	15514052.42	4.19
	활엽수림	69	914912.40	63128955.72	17.04
	문화·체육·휴양시	69	48.12	3320.09	0.00
	시설재배지	85	38556.88	3277334.57	0.72
	인공초지	69	382512.38	26393354.33	7.12
	자연나지	86	32795.35	2820400.15	0.61

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Sub basin 3	골프장	69	0.00	0.00	0.00
	공공시설지역	75	470.30	35272.35	0.02
	공업지역	88	0.00	0.00	0.00
	과수원	79	0.00	0.00	0.00
	교통지역	89	13091.79	1165169.40	0.45
	기타나지	86	4450.21	382718.02	0.15
	기타재배지	79	11758.56	928926.60	0.40
	기타초지	69	0.00	0.00	0.00
	내륙수	100	0.00	0.00	0.00
	내륙습지	100	0.00	0.00	0.00
	논	79	0.00	0.00	0.00
	밭	74	0.00	0.00	0.00
	상업지역	92	0.00	0.00	0.00
	연안습지	100	0.00	0.00	0.00
	위락시설지역	69	0.00	0.00	0.00
	자연초지	58	3730.67	216378.58	0.13
	주거지역	85	143.14	12166.66	0.00
	채광지역	79	0.00	0.00	0.00
	침엽수림	69	87814.75	6059217.63	2.98
	하우스재배지	85	0.00	0.00	0.00
	해양수	100	0.00	0.00	0.00
	혼효림	69	44713.61	3085239.27	1.52
	활엽수림	69	2697886.66	186154179.47	91.70
	문화·체육·휴양시	69	0.00	0.00	0.00
	시설재배지	85	0.00	0.00	0.00
	인공초지	69	77899.15	5375041.05	2.65
	자연나지	86	0.00	0.00	0.00

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 8.3 Curve Number considering sub-watershed classification and river slope of Doksa stream watershed

	토지피복(중분류)	CN	유역면적	면적가중 CN	구성비(%)
Sub basin 1	골프장	69	0.00	0.00	0.00
	공공시설지역	75	67316.24	5048717.70	1.83
	공업지역	88	0.00	0.00	0.00
	과수원	79	378945.93	29936728.73	10.33
	교통지역	89	739554.14	65820318.04	20.16
	기타나지	86	215929.67	18569951.73	5.89
	기타재배지	79	3095.88	244574.70	0.08
	기타초지	69	0.00	0.00	0.00
	내륙수	100	0.00	0.00	0.00
	내륙습지	100	0.00	0.00	0.00
	논	79	0.00	0.00	0.00
	밭	74	383411.80	28372473.26	10.45
	상업지역	92	282218.90	25964138.36	7.69
	연안습지	100	0.00	0.00	0.00
	위락시설지역	69	0.00	0.00	0.00
	자연초지	58	381.49	22126.59	0.01
	주거지역	85	1438373.68	122261762.57	39.20
	채광지역	79	0.00	0.00	0.00
	침엽수림	69	80979.68	5587597.72	2.21
	하우스재배지	85	0.00	0.00	0.00
	해양수	100	0.00	0.00	0.00
	혼효림	69	13403.70	924855.30	0.37
	활엽수림	69	0.00	0.00	0.00
	문화·체육·휴양시	69	20282.07	1399463.07	0.55
	시설재배지	85	9650.64	820304.11	0.26
	인공초지	69	21708.93	1497916.34	0.59
	자연나지	86	13623.68	1171636.14	0.37

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Sub basin 2	골프장	69	0.00	0.00	0.00
	공공시설지역	75	7477.33	560799.82	0.28
	공업지역	88	0.00	0.00	0.00
	과수원	79	484863.13	38304187.44	18.04
	교통지역	89	45509.40	4050336.33	1.69
	기타나지	86	94643.78	8139364.98	3.52
	기타재배지	79	12.57	992.70	0.00
	기타초지	69	0.00	0.00	0.00
	내륙수	100	0.00	0.00	0.00
	내륙습지	100	0.00	0.00	0.00
	논	79	0.00	0.00	0.00
	밭	74	634026.81	46917984.19	23.59
	상업지역	92	6950.31	639428.82	0.26
	연안습지	100	0.00	0.00	0.00
	위락시설지역	69	0.00	0.00	0.00
	자연초지	58	74163.86	4301503.60	2.76
	주거지역	85	33832.78	2875786.63	1.26
	채광지역	79	0.00	0.00	0.00
	침엽수림	69	976796.15	67398934.39	36.34
	하우스재배지	85	0.00	0.00	0.00
	해양수	100	0.00	0.00	0.00
	혼효림	69	91207.81	6293339.17	3.39
	활엽수림	69	97358.77	6717755.34	3.62
	문화·체육·휴양시	69	14192.05	979251.77	0.53
	시설재배지	85	68814.29	5849214.76	2.56
	인공초지	69	58129.02	4010902.46	2.16
	자연나지	86	245.49	21111.91	0.01

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 8.4 Curve Number considering sub-watershed classification and river slope of Sanji stream watershed

	토지피복(중분류)	CN	유역면적	면적가중 CN	구성비(%)
Sub basin 1	골프장	69	0.00	0.00	0.00
	공공시설지역	75	309421.15	23206586.43	4.27
	공업지역	88	12847.97	1130621.17	0.18
	과수원	79	660388.95	52170726.74	9.11
	교통지역	89	1328659.07	118250657.25	18.33
	기타나지	86	728690.51	62667384.00	10.05
	기타재배지	79	10060.67	794792.73	0.14
	기타초지	69	0.00	0.00	0.00
	내륙수	100	7185.82	718581.64	0.10
	내륙습지	100	89681.74	8968174.27	1.24
	논	79	0.00	0.00	0.00
	밭	74	676212.02	50039689.79	9.33
	상업지역	92	497976.61	45813847.95	6.87
	연안습지	100	0.00	0.00	0.00
	위락시설지역	69	0.00	0.00	0.00
	자연초지	58	58362.76	3385039.96	0.80
	주거지역	85	2280635.82	193854044.77	31.46
	채광지역	79	0.00	0.00	0.00
	침엽수림	69	288457.87	19903593.18	3.98
	하우스재배지	85	0.00	0.00	0.00
	해양수	100	0.00	0.00	0.00
	혼효림	69	50321.69	3472196.90	0.69
	활엽수림	69	30899.60	2132072.64	0.43
	문화·체육·휴양시	69	114534.84	7902903.85	1.58
	시설재배지	85	4092.47	347859.75	0.06
	인공초지	69	101768.68	7022038.94	1.40
	자연나지	86	0.00	0.00	0.00

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

	골프장	69	0.00	0.00	0.00
	공공시설지역	75	66831.98	5012398.19	1.29
	공업지역	88	0.00	0.00	0.00
	과수원	79	151175.27	11942846.21	2.91
	교통지역	89	127261.08	11326236.28	2.45
	기타나지	86	327076.48	28128576.86	6.30
	기타재배지	79	17880.52	1412561.11	0.34
	기타초지	69	0.00	0.00	0.00
	내륙수	100	14499.35	1449934.88	0.28
	내륙습지	100	4687.98	468798.31	0.09
	논	79	0.00	0.00	0.00
	밭	74	191144.56	14144697.48	3.68
	상업지역	92	16181.34	1488683.13	0.31
Sub basin 2	연안습지	100	0.00	0.00	0.00
	위락시설지역	69	0.00	0.00	0.00
	자연초지	58	544971.67	31608356.86	10.50
	주거지역	85	73640.47	6259440.35	1.42
	채광지역	79	0.00	0.00	0.00
	침엽수림	69	1202448.65	82968957.08	23.16
	하우스재배지	85	0.00	0.00	0.00
	해양수	100	0.00	0.00	0.00
	혼효림	69	544985.19	37603978.33	10.50
	활엽수림	69	932671.96	64354365.17	17.97
	문화·체육·휴양시	69	54509.04	3761124.05	1.05
	시설재배지	85	0.00	0.00	0.00
	인공초지	69	921323.26	63571305.14	17.75
	자연나지	86	0.00	0.00	0.00

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Sub basin 3	골프장	69	0.00	0.00	0.00
	공공시설지역	75	0.00	0.00	0.00
	공업지역	88	0.00	0.00	0.00
	과수원	79	0.00	0.00	0.00
	교통지역	89	1178.97	104928.64	0.05
	기타나지	86	118.27	10171.31	0.01
	기타재배지	79	0.00	0.00	0.00
	기타초지	69	0.00	0.00	0.00
	내륙수	100	0.00	0.00	0.00
	내륙습지	100	0.00	0.00	0.00
	논	79	0.00	0.00	0.00
	밭	74	0.00	0.00	0.00
	상업지역	92	0.00	0.00	0.00
	연안습지	100	0.00	0.00	0.00
	위락시설지역	69	0.00	0.00	0.00
	자연초지	58	24308.00	1409863.77	1.10
	주거지역	85	8197.00	696745.30	0.37
	채광지역	79	0.00	0.00	0.00
	침엽수림	69	340150.80	23470404.86	15.40
	하우스재배지	85	0.00	0.00	0.00
	해양수	100	0.00	0.00	0.00
	혼효림	69	120073.11	8285044.82	5.44
	활엽수림	69	1700436.96	117330150.53	77.01
	문화·체육·휴양시	69	0.00	0.00	0.00
	시설재배지	85	0.00	0.00	0.00
	인공초지	69	13720.47	946712.43	0.62
	자연나지	86	0.00	0.00	0.00

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

참고문헌

강보성, 양성기, 정우열, 김용석, 2014, 영상장비를 활용한 하천의 홍수유출량 산정, 한국환경과학회지, Vol. 23, No. 4.

강보성, 양성기, 정우열, 2015, 강우량 증가에 따른 홍수량 변동 및 홍수범람 분석, 한국환경과학회지, Vol. 24, No. 4.

건설교통부, 2000, 지역적 설계 강우의 시간적 분포.

국토해양부, 2009, 하천설계기준 및 해설.

국토해양부, 2011, 확률강우량도 개선 및 보완연구.

국토해양부, 2012, 설계홍수량 산정요령.

기상청(CCIC), 2012, 이상기후 보고서.

김남원, 이계윤, 2006, 설계홍수량 산정기법 가이드라인 작성 연구, 대학토목학회지, Vol. 2006, No. 10.

김용석, 2013, 표면영상유속계(SIV)를 이용한 한천의 홍수유출량 측정, 제주대학교, 석사학위논문

김용석, 양성기, 류권규, 김동수, 2013, 표면영상유속계(SIV)를 이용한 홍수유출량 측정, 한국환경과학회지, Vol. 22, No. 5.

박재현, 안상진, 함창학, 최민호, 2006, 강우시간분포를 고려한 설계홍수량 산정, 한국수자원학회지, Vol. 18, No. 5.

박찬영, 1981, 소유역의 설계유량 산정을 위한 강우형상분석에 관한 연구, 한국수문학회지, Vol. 14, No. 4.

서규우, 1997, 도시유출모형의 매개변수결정을 위한 민감도 분석 연구, 연세대학교, 박사학위논문.

서승덕, 1965, 폭우의 시간분포에 관한 고찰, 한국농공학회지, Vol. 7, No. 2.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

서정아, 김용철, 문덕철, 고기원, 김용제, 2014, 제주도 한천저류지 지표 침투율 평가, 지질학회지, Vol. 50, No. 3.

안재현, 정환엽, 2014, 설계홍수량 산정 방법의 표준화 방안, 물과 미래.

양성기, 김민철, 강보성, 김용석, 강명수, 2017, 한천유역의 수문학적 특성을 고려한 관측자료 기반 홍수량 산정, 한국환경과학회지, Vol. 26, No. 12.

윤광원, 원석연, 윤용남, 1994, Clark 유역추적법에 의한 계획홍수량 산정에 미치는 매개변수의 민감도 분석, 한국수문학회지, Vol. 27, No. 4.

윤선권, 오태석, 문영일, 계대영, 2009, 확률홍수량 산정에 관한 방법론적 비교연구, 한국수자원학회, 한국수자원학회 학술발표회 초록집.

윤여진, 1998, 설계홍수량에 영향을 미치는 매개변수의 민감도 분석: 자연유역을 중심으로, 한국수자원학회지, Vol. 31, No. 6.

윤용남, 2008, 수문학, 청문각.

윤태훈, 김성탁, 박진원, 2005, 한국 중소하천의 Clark 모형 도달시간 및 저류상수의 재정의, 대한토목학회지, Vol. 25, No. 3B.

이근후, 1983, 폭우의 시간분포에 관한 연구, 서울대학교, 박사학위논문.

장수형, 윤재영, 윤용남, 2006, Huff 강우시간분포방법의 개선방안 연구 : Ⅰ, Ⅱ., 한국수자원학회지, Vol. 39, No. 9.

정대명, 배덕효, 김태희, 2002, Clark 방법의 시간-면적곡선이 유출해석에 미치는 영향 분석, 대한토목학회지, Vol. 2002, No. 11.

정우열, 양성기, 2009, SWAT 모형을 이용한 제주도 하천의 유출량 모의, 한국환경과학회지, Vol. 18, No. 9.

정종호, 윤용남, 2008, 수자원설계실무

채석준, 2000, 강우-유출모형을 이용한 도시하천의 민감도 분석, 한양대학교, 석사학위논문.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

최종인, 지정원, 이재응, 2015, 설계홍수량 산정을 위한 강우-유출 빈도해석에 관한 연구, 한국수자원학회지, Vol. 48, No. 8.

Kanak Kanti Kar, 양성기, 이준호, 2015, Assessing Unit Hydrograph Parameters and Peak Runoff Responses from Storm Rainfall Events: A Case Study in Hancheon Basin of Jeju Island, 한국환경과학회지, Vol. 24, No. 1.

Cooley, R.L., 1982, Incorporation of prior Information on Parameters into Regression Ground Water Flow Models, 1. Theory, Water Resources Research, Vol. 18, No. 4.

Eulogio, P. I., 1998, Comparison of Geo-statistical Method for Estimating the Areal Average Climatological Rainfall Mean using Data on Precipitation and Topography, International Journal of Climatology, Vol. 18.

Goovaerts, P., 2000, Geostatistical Approaches for Incorporating Elevation into the Spatial Interporation of Rainfall, Journal of Hydrology, Vol. 228.

Hornor, W.W. and Jens, S.W., 1942, Surface runoff determination from rainfall without using coefficient, Transactions, Vol. 107.

Huang, M., et al., 2006, A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. Hydrological processes, 20.

Huff, F.A., 1967, Time distribution of rainfall in heavy storms, Water Resources Research, Vol. 3, No. 4.

Ibbit, B.P., 1972, Effect of Random Data Errors on the Parameter Value for a Conceptual Model, Water Resources Research.

McCuen, Richard H, 1973, The Role of Sensitivity Analysis in Hydrologic Modeling, Journal of Hydrology, Vol. 18.

Mein, R.G. and Brown, B.M., 1978, Sensitivity of Optimized Parameter in Watershed Models, Water Resources Research. Vol. 14, No. 2.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Pilgrim, D.H. and Cordery, I., 1975, Rainfall Temporal Patterns for Design Floods, Journal of the Hydraulic Division, Vol. 101, No. HY1.

Sabol, G.V., 1988, Clark unit hydrograph and r-parameter estimation, J. Hydraulic Eng., Vol. 114.

Sharpley, A.N. and J.R. Williams, 1990, EPIC-erosion/ productivity impact calculator : 1. Model documentation. Technical Bulletin-United States Department of Agriculture, 1768 Pt 1.

U.S. Army Corps of Engineers Davis, 1997, HEC-HMS User's Manual(draft), Hydrologic Engineering Center.

Yen, B.C. and Chow, V.T., 1977, Feasibility Study on Research of Local Design Stoms.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

감사의 글

박사학위 논문이 완성되기까지 많은 우여곡절이 있었고 오랜 시간이 걸렸습니다. 그동안 많은 일들이 있었지만 아낌없는 지도와 격려를 해주신 양성기 지도교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

그리고 바쁘신 가운데도 논문 검토 및 심사를 통하여 세심한 충고와 지적을 해주신 김남형 교수님, 김상진 교수님, 김서준 교수님, 정우열 박사님께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 대학원 과정을 수료하는 동안 많은 가르침을 주신 박상렬 교수님, 이병걸 교수님, 이동욱 교수님께도 다시 한 번 감사드립니다.

대학생이었던 20대에 연구실 막내로 들어와 대학원을 졸업하기까지 7년 정도가 걸렸습니다. 그동안 옆에서 함께 지켜봐주고 응원해준 가족같은 수리학 연구실 사람들인 원석이형, 명수형, 준호형, 용석이형, 이광배, 김지영 선생님께 고마운 마음을 전합니다. 특히 대학원 과정 내내 희노애락을 함께한 민철이형, 함께 공부하고 함께 고생한 양세창 전문위원님께 감사의 인사를 드립니다. 또한 연구실을 통하여 소중한 인연을 맺게 된 김동수 교수님, 박원배 박사님, 고재욱 사장님, 오승태 이사님, 박재규 차장님, 김승현 박사님, 문경태 박사님께도 감사드립니다.

이 밖에도 언급하진 못했으나 소중한 인연이 닿고 도움을 주신 많은 분들께 감사의 인사를 드립니다.

끝으로 논문을 쓰는 동안 항상 옆에서 저를 걱정하고 배려해준 나의 아내 상림에게 진심으로 고마운 마음을 표하며 이 기쁨을 함께 하고자 합니다.

논문을 작성하는 동안 많은 관심과 응원, 격려를 받았고, 소중한 만남과 인연이 이어졌습니다. 한분 한분께 진심으로 감사의 말씀을 드리며, 도움을 주신 모든 분들의 기대를 저버리지 않도록 더욱 정진하고 노력하겠습니다. 또한 박사학위가 끝이 아닌 시작이라는 생각으로 매사에 더욱 열심히 하겠습니다. 감사합니다.

2019년 6월

강 보 성 배상

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY