碩士學位論文

제주도에 분포하는 세립 화산재의 공학적 특성

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學 專攻

高 英 實

2004

碩士學位論文

제주도에 분포하는 세립 화산재의 공학적 특성

指導敎授 南 正 萬

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

高 英 實

2 0 0 4

제주도에 분포하는 세립 화산재의 공학적 특성

指導敎授　南　正　萬

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2004年　7月　　日

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科 土木工學專攻

高　英　實

高英實의 工學 碩士學位論文을 認准함.

2004年　7月　　日

委員長 _____ ㊞

委　員 _____ ㊞

委　員 _____ ㊞

목 차

목 차 ····· i
List of Figures ·····iii
List of Tables ·····iv
Summary ·····vi

Ⅰ. 서론 ·····1

Ⅱ. 연구범위 및 연구방법 ·····2
1. 연구범위 ·····2
2. 자료의 이용 ·····4
  1) 지질도 이용 ·····4
  2) 제주 지질도폭 ·····5
3. 실내시험방법 ·····7

Ⅲ. 화산재의 지질학적 특성 ·····11
1. 화산분출물 ·····11
2. 화산쇄설물의 퇴적 ·····13

Ⅳ. 시료채취 ·····16
1. 제주도에 분포하는 화산재의 형태 ·····16
2. 시료채취위치 ·····18

Ⅴ. 화산재의 공학적 특성 ·····22
1. 화산재의 화학성분 ·····22
2. 화산재의 물리적 특성 ·····25
3. 화산재의 입도 특성 ·····26
  1) 현무암류 기반암의 화산재 ·····27

2) 조면현무암류 기반암의 화산재 ·····29
3) 조면암류 기반암의 화산재 ·····32
4) No.200체 통과량 및 점토입자 크기 함량 ·····33
4. 화산재의 액·소성한계 특성 ·····36
1) 액·소성한계 ·····36
2) 소성도표 ·····39
3) 압축지수 및 활성도 ·····40
5. 입도분석 및 액·소성한계시험에 의한 흙의 분류 ·····44
1) 입자 크기에 따른 분류 ·····44
2) 입도 및 액·소성한계에 의한 분류 ·····45
6. 화산재의 다짐특성 ·····56
7. 점착력 및 내부마찰각 ·····60

Ⅵ. 결론 ·····65

List of Figures

Fig. 2.1 Geologic map of Jeju Island ·····5
Fig. 4.1 Section shape of Volcanic ash ·····17
Fig. 4.2 Location of sampling in the study area ·····19
Fig. 4.3 Geologic map and location of sampling in the study area ·····21
Fig. 5.1 Chemical component of volcanic ash ·····24
Fig. 5.2 Different types of particle-size distribution curves ·····26
Fig. 5.3 Grain size distribution curve of basaltic volcanic ash ·····27
Fig. 5.4 Grain size distribution curve of trachybasaltic volcanic ash ···29
Fig. 5.5 Grain size distribution curve of trachy volcanic ash ·····32
Fig. 5.6 Atterberg limits ·····36
Fig. 5.7 Plasticity chart of test sample ·····39
Fig. 5.8 Relationship between plasticity index and clay-size contained percent for volcanic ash ·····42
Fig. 5.9 Classification of volcanic ash by plastic chart ·····48
Fig. 5.10 Classification chart of volcanic ash for AASHTO ·····53
Fig. 5.11 Compaction curve of volcanic ash ·····57
Fig. 5.12 Mohr's circle and failure envelope of volcanic ash ·····61

List of Tables

Table 2.1 Different types of soil based on their mode origin ·····3
Table 2.2 Correlation of volcano-stratigraphy of Jeju Island ·····6
Table 2.3 Method of compaction test ·····10
Table 3.1 Granulometric classification of pyroclasts ·····12
Table 4.1 Location of sampling in the study area ·····19
Table 5.1 Chemical composition of volcanic ash ·····23
Table 5.2 Kind and application of physical characteristic tests for soils ·····25
Table 5.3 Liquid and plastic limit test result of basaltic volcanic ash ··34
Table 5.4 Liquid and plastic limit test result of trachybasaltic volcanic ash ·····35
Table 5.5 Liquid and plastic limit test result of trachytic volcanic ash ·35
Table 5.6 Liquid and plastic limit test result of basaltic volcanic ash ···37
Table 5.7 Liquid and plastic limit test result of trachybasaltic volcanic ash ·····38
Table 5.8 Liquid and plastic limit test result of trachy volcanic ash ··38
Table 5.9 Compression index and activity of basaltic ash ·····40
Table 5.10 Compression index and activity of trachybasaltic ash ·····41
Table. 5.11 Compression index and activity of trachy ash ·····41
Table. 5.12 Particle-size classifications ·····44
Table. 5.13 Unified Soil Classification System, U.S.C.S ·····46
Table. 5.14 USCS of volcanic ash ·····47
Table. 5.15 Distribution rate of volcanic ash by USCS ·····49

Table. 5.16 Classification of Highway Subgrade Materials ·····51
Table. 5.17 AASHTO classification of volcanic ash ·····52
Table. 5.18 Distribution rate of volcanic ash for AASHTO ·····54
Table. 5.19 Compaction property of volcanic ash ·····56
Table. 5.20 Cohesion intercept and angle of internal friction ·····60
Table. 5.21 Roughly soil strength parameters ·····63

Engineering characteristics of volcanic ash distributed in Jeju Island

Young-Sil Ko

Department of Construction and Environmental Engineering
Graduate School of Industry
Jeju National University

Supervised by Professor Jung-Man Nam

Summary

Jeju-Island is a volcanic island formed between the Tertiary Period and Quaternary Period of the Cenozoic Era which is consisted of volcanic rocks such as basalt, trachybasalt, trachyandesite, trachyte. The soil layer that forms the surface is also a sedimentary layer of volcanic ash mostly formed during a volcanic eruption, not soil of weathered residual soil accumulated by mechanical or chemical weathering, and the volcanic ash which is the first product forms a soil layer shape and some weathering is progressed to form soil.

A physical and dynamic characteristic test was done by collecting samples from the depths of the sedimentary section of volcanic ash, excluding the eroded regions. Also, the characteristics of volcanic

ash were examined by classifying the basis rocks as it is presumed that the volcanic eruption of these rocks is related to the sedimentary section according to the fact that the main rocks consisting Jeju-Island's surface geology are basalt, trachybasalt, trachyte.

In a grain size analysis, basalts showed a passage amount of No.200 sieve and a confluence amount of less than 0.002mm, which is higher compared to trachybasalts and trachytes, and the liquid limit and plastic index of the rocks resulted in the order of basalts, trachybasalts, and trachytes. According to USCS, most basalts classify as CL, trachytes as SM, and trachybasalts classify into various types such as CL, ML, and SC.

The results of the compaction test showed that the optimum moisture content of the volcanic ash of basalts, trachytes, and trachybasalts were 29.7%, 29.6%, 21.5%, and the maximum unit weight of the rocks were 1.389t/㎡, 1.419t/㎡, 1.603t/㎡, showing that the optimum moisture content of trachytes are low while the maximum unit weight is high, and the compaction radius is narrow, proving that trachytes have a better compaction than basalts and trachybasalts.

The cohesion intercept and the angle of internal friction were 0.10~0.38㎏/㎠ and 13.3~19.7° , so it was difficult to decide the characteristics of volcanic ash according to the type of rock because the number of samples was too small, but amount of Jeju-Island's volcanic ash layer was slightly higher than the clay layer of weathered residual soil.

Ⅰ. 서 론

제주도는 신생대 제3기~4기에 형성된 화산도로 수십 차례에 걸친 화산분출에 의해 형성되어 화산원지형이 많이 보전되어 있는 신생화산도이다. 따라서, 풍화·침식·퇴적에 따른 퇴적암 및 화강암의 분포가 미약하며 대부분 조면암·안산암·현무암질의 화산암이 분포되고 있다. 이들 암질 뿐만아니라, 상부에 피복되고 있는 토사층 또한 신생화산도에 기원하여 차이를 보인다.

고기층에 분포되고 있는 흙은 일반적으로 기반암의 물리적·화학적 풍화에 의한 잔류토 및 침식·퇴적된 작은 입자들의 2차적인 산물이나, 제주도 내에 분포되고 있는 흙은 대부분 화산분출 시 생성된 화산쇄설물인 1차적인 산물이다. 토사층을 이루는 화산쇄설물은 화산재·화산사·화산력 및 스코리아 등으로 구성되며 이들은 점토 내지 자갈 형태로 다양하게 나타난다. 형성기원에서 육지부 고기층의 토사층과 차이를 보일 뿐 만아니라, 형태 또한 다양하게 나타나는 이들 화산쇄설물에 대한 특성을 파악하는 것이 중요하며, 그 특성을 파악하여 건축 및 토목 공사 시 이용될 흙의 품질 적합성 여부를 판단하는데 유용한 자료를 제공하고자 한다.

또한, 흙의 공학적 특성을 분석하기 위해서는 흙의 형성 기원을 파악하는 것이 중요하며, 이를 위하여 기 조사 발간된 지질도폭을 참조하였다. 지하수자원의 효율적인 개발과 보전을 위한 기초자료 연구의 일환으로 지표지질조사 및 심부시추자료를 종합 분석하여 지질도폭 및 지질보고서가 발행되었다. 이렇게 조사·발행된 지질자료를 그 자체로서의 성과 뿐 만아니라, 지하수 개발·보전 관리에 유용하게 이용되는 것처럼 건축·토목 현장에서 또한 지반공학분야의 기초자료로 이용될 수 있도록 본 연구에서는 흙의 특성을 지질학적인 측면에서 접근하였다.

본 연구범위는 지역적으로는 제주도 전역을 대상으로 하였으며, 실내시험에 의한 물리·역학적 특성을 파악하였고, 이들 특성을 수치화시킴으로서, 세립 화산재에 대한 새로운 이론을 밝히기 보다는 제주도 내에 분포되는 화산재 기원의 흙이 갖는 공학적 특성에 관한 지표를 제시하고자 한다.

Ⅱ. 연구범위 및 연구방법

1. 연구범위

한라산을 정점으로 하여 제주도 내에 수십 차례에 걸쳐 이뤄진 화산분출 및 그에 수반되어 형성된 화산재 퇴적층은 지역적 특성을 뚜렷하게 나타내지 않을 것으로 추정되며, 본 연구의 대상지역은 제주도 전역으로 하였다.

제주도는 신생대 제3기~4기에 형성된 화산도로 암반은 현무암·조면암·안산암의 화산암이 주를 이루고 있으며, 흙은 고기층에서 풍화·침식·퇴적된 풍화토보다는 대부분 화산재로 구성되고 있다. 또한, 화산암 및 화산재 외에 화산력·스코리아·클링커 등 화산지대에서 나타나는 여러 가지 특이한 지층들이 분포되고 있다. 최근 들어 제주도 내에 분포하고 있는 화산암 및 스코리아 등에 관한 연구는 꾸준히 이뤄지고 있으나, 화산재에 관한 연구는 미흡한 것으로 판단되며, 본 논문에서는 화산지대에 분포되고 있는 여러 지층 중에 점토 내지 실트 크기의 세립 화산재에 관하여 연구하고자 한다.

점토 내지 실트의 세립토는 차수를 목적으로 할 경우는 유용토로 구분될 수 있으나, 골재로 이용될 경우는 점성 및 압축성에 의해 불량토로 구분되기도 하므로 그 특성을 검토하는 것이 중요하다.

실제적으로 건설토목 현장에서는 화산재에 해당되는 흙을 토공용 재료로 이용되고 있음에 따라, 건설토목 현장에서의 유용토 및 안정성 검토에 필요한 물리·역학적 특성을 파악하는데 중점을 두었다.

화산재에 대한 분석항목으로는 입도분석, 액성한계, 소성한계 시험에 의한 물리적 특성을 파악하였고, 다짐시험 및 삼축압축시험에 의해 최적함수비와 최대건조밀도, 점착력 및 내부마찰각 등의 역학적 특성을 검토하였다.

또한, 제주도에 표층을 이루거나 암층 내 협재되고 있는 흙은 화산분출 시 형성된 화산재 퇴적층이 풍화가 덜 진행된 상태로 그 자체가 점토·실트질의 세립토 형태를 보이기도 하지만, 화산재가 풍화되어 토양화되기도 하고, 일부는 스코리아, 분석, 곶자왈, 클링커 또는 파쇄 암반 부분에서 떨어져 나온 미세 입자가 퇴적되어 토층을 이루기도 할 것이다. 그러나, 본 연구에서는 화산재가 원지형이거나 풍화

되어 토양화된 것에 대한 구분을 시키지 않았으며, 다른 암질에서 떨어져 나온 것은 그 두께가 미미할 것으로 추정되어 그 근원에 따른 구분 또한 배제시켰으나, 이에 따른 특성은 토양학 및 지질학 측면에서 앞으로 꾸준한 연구가 지속되어져야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 흙(soil)에 관한 것이며, 신생화산도를 이루고 있는 제주도 내에 분포되고 있는, 화산분출 시 형성된 흙 형태의 화산재 퇴적층에 관한 것이다. 일반적인 흙은 생성원인과 형태에 따라 여러 가지가 있으며, 그 종류는 <Table 2.1>과 같다(건설교통부, 1997).

Table 2.1 Different types of soil based on their mode origin

구 분		흙의 종류
잔류토	잔류토	-. 하부의 모암이 풍화로 형성된 지층 -. 규질암의 화학적 풍화, 혈암(shale)의 물리적 풍화, 석회암의 탄산질 용해로 형성된 지층. -. 심도가 깊어지면 더 단단하고 암석 같으며 풍화가 적음.
	유기질토	-. 식물이 죽어 부패로 형성된 유기질 지층 -. peat, muck
운적토	충적토	-. 흐르는 물에 의해 운반되어 퇴적된 지층 -. 범람퇴적토, point bar, channel fill, back wamp, alluvial terrace daposit, estuarine deposit, alluvial-lacustrine dep
		-. 흐르는 물에 의해 운반되어 퇴적된 지층 -. deltaic deposit, piedmont deposit
	풍적토	loess, dune sand
	빙적토	-. 빙하나 빙하가 녹은 물에 의해 운반퇴적된 층 -. lateral moraine, ground moraine.
	해성퇴적토	-. 해안가나 근해에파도와 조류에 의해 운반 퇴적된층 -. shore deposit, marine clay.
	붕적토	-. 중력에 의해 운반 퇴적된 층 -. talus, hillwash,
	화산쇄설토	-. 화산에 의하여 분출된 후 중력, 바람, 대기 등에 의해 운반 퇴적된 층 -. ejecta, pumice, 파편 같은 입자

<Table 2.1>에서 보여지는 바와 같이 공학에서 언급되는 일반적인 흙은 잔류토, 충적토 및 풍적토이다. 제주도 내에 전반적으로 분포되고 있는 흙은 이들 중 극히 일부를 차지하고 있는 화산쇄설토로 화산분출 시 낙하되어 퇴적되거나 쇄설류로 이동되어 퇴적되므로 1차적인 생성물이라도 운적토 범위 안에 포함시키고 있는데, 충적토·풍적토·붕적토 등은 대부분 모암에서 풍화→·침식→이동→퇴적된 2차적인 산물이 대부분을 차지할 것이다. 이들 충적토·풍적토 또는 잔류토 등을 대상으로하여 일반적으로 제시되고 있는 물리·역학적 특성 및 적용기준을 화산쇄설토에 적용시키는 것은 많은 무리가 따른다. 이에 따라, 제주도내의 공사현장에 이용되는 토사층, 즉 화산재가 주를 이루는 화산쇄설토에 대한 물리·역학적 특성을 파악해야하는 필요성이 요구된다.

<Table 2.1>에는 화산에 의하여 분출된 후 중력, 바람, 대기 등에 의해 운반 퇴적된 층을 화산쇄설토로 구분시키고 있으며, 이들 내에는 화산재, 화산력, 화산탄, 부석 등을 포함하고 있는데, 본 연구에서는 건설현장 특히, 도로 노상토 재료로 주로 쓰이는 세립 화산재(육안관찰에 의하면 2㎜ 이하 크기가 주를 이루는 화산재)에 한정시켜 분석하였다.

2. 자료의 이용

1) 지질도 이용

본 연구는 흙의 근원이 풍화잔류토가 아닌 화산분출 시 형성된 화산재 퇴적층에 관한 것으로 제주도의 지질특성을 고려하여 지질학적인 측면에서 접근하였으며, 지질적인 자료는 전문가들에 의해 수 년에 걸쳐 조사 발간된 지질도를 이용하였다.

제주도 화산지질에 대한 지질학적인 조사·연구는 1920년대 말부터 시작되어 原口九萬(1928), 이상만(1966), 원종관(1976), Miyake et al.(1993), Tamanyu(1990), 박준범과 권성택(1991, 1993a, 1993b), 박준범(1994) 등에 의해 화산암과 화산활동에 관한 연구가 있었다. 또한, 농업진흥공사(현 농업기반공사)는 1970년부터 1971년까지 제주도 전역에 대한 지질조사를 실시하여 1971년에 1/10만 지질도를 처음으로 발간하였고, 한국수자원공사(1993, 1995)는 1/5만의 성산·표선도폭을 작성하였으며, 제주도(1998)는 한국자원연구소에 의뢰하여

1/5만의 제주·애월도폭을 발간하였다(宋, 2000). 한국자원연구소(현 한국지질자원연구원)에서는 제주·애월도폭을 시작으로 하여 서귀포·하효리도폭 및 모슬포·한림도폭을 발간하였으며, 이들 도폭을 발간하기 위한 조사·연구와 병행하여 2000년도에 1/25만의 제주도 전역에 대한 제주 지질도폭을 발간하였다.

본 연구에서는 향상된 기술력으로 가장 최근에 발간되었을 뿐 만아니라 오랜 기간에 걸친 야외지질 조사와 실내연구를 통한 집적된 자료에 대한 종합도이면서, 제주도 전역을 대상으로 하여 발간된 도폭인 1/25만의 제주 지질도폭을 이용하였는데, 본 도폭에서는 1/5만 지질도폭에서 각 표식지별로 상세하게 구분된 암석명을 성분 및 형성시기 등을 고려하여 단순하게 구분되고 있다.

2) 제주 지질도폭

제주도 구성 암석은 역암(암), 용암분출에 의해 형성된 화산암, 화산 폭발에 의해 형성된 화산쇄설암이 있다. 화산암은 성분에 따라 현무암, 조면현무암, 현무암질조면안산암, 조면안산암, 안산암 및 조면암류로 분류된다(한국자원연구소, 2000). 제주 지질도폭 상에 제시된 지질도는 아래 <Fig. 2.1>과 같고, 제주도 구성 암석의 지질계통은 <Table 2.2>에 나타내었다.

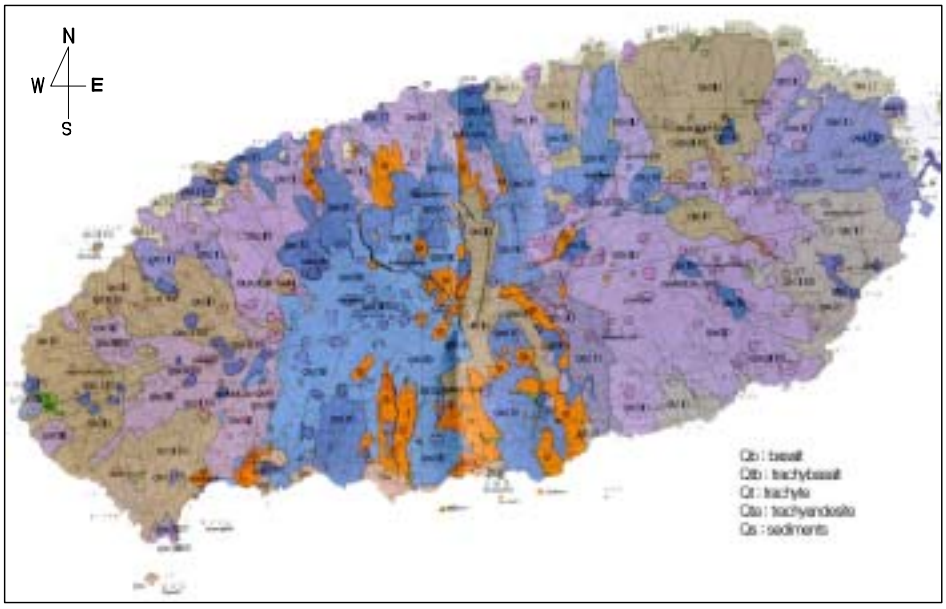


Fig. 2.1 Geologic map of Jeju Island(KIGAM, 2000)

Table 2.2 Correlation of volcano-stratigraphy of Jeju Island

Quaternary	Trachybasalt(Ⅷ)-Qtb(Ⅷ)
	Trachybasalt(Ⅶ)-Qtb(Ⅶ)
	Basalt(Ⅲ)-Qb(Ⅲ)
	Trachybasalt(Ⅵ)-Qtb(Ⅵ)
	Trachybasalt(Ⅴ)-Qtb(Ⅴ)
	Trachyte-Qt
	Sediments-Qs
	Trachybasalt(Ⅳ)-Qtb(Ⅳ)
	Trachybasalt(Ⅲ)-Qtb(Ⅲ)
	Basalt(Ⅱ)-Qb(Ⅱ)
	Trachybasalt(Ⅱ)-Qtb(Ⅱ)
	Basalt(Ⅰ)-Qb(Ⅰ)
	Trachybasalt(Ⅰ)-Qtb(Ⅰ)
	Trachyandesite-Qta
Tertiary	Seogwipo Formation-SF
	Unconsolidated Sediment-US
Cretaceous Period	Tuff-Kav
	Granite-Kgr

<Table 2.2> 지질계통표 및 <Fig. 2.1> 지질도에 제시된 암층들은 SiO_2와 Na_2O+K_2O의 비를 이용한 화산암류 명명도(Cox et al., 1979; Le Bas et al., 1986)에 의한 것이다.

화산암이 주를 이루는 제주도 지표지질은 <Fig. 2.1>에 의하면, 현무암(Ⅰ)~(Ⅲ), 조면현무암(Ⅰ)~(Ⅷ) 및 조면암이 비교적 광범위하게 나타나고 있으며, 그 외에 조면안산암, 퇴적암 등이 협소하게 분포되고 있다. 본 연구에서는 이들 도폭 자료를 참조로 하여 광범위하게 분포되는 현무암, 조면암질현무암 및 조면암의 3종류 암층으로 구분시켜 이들 암층이 분포되는 지역의 화산재 특성에 대해서 연구하였다. 위치적으로 지질도폭 상에 나타나는 암층과 그 지역에 분포되는 화산재를

연관시켜 검토되었으나, 본 연구에서는 기반암과 화산재의 근원을 파악하는 부분까지는 시험되지 않았고, 추후 이들에 대한 연구가 계속적으로 이뤄져야 할 것이다.

또한, 본 연구의 대상이 되는 세립 화산재는 화산분출 시 분화구 주변에 퇴적되기도 하지만, 입자가 가벼운 특성 때문에 수 ㎞ 또는 수십 ㎞ 원거리로 이동하여 퇴적될 수 있으며, 이럴 경우 하부에 분포되는 기반암과 분출기원이 다를 수 있다. 우선적으로 화산재를 형성시킨 근원과 이와 연관된 용암류를 파악하여 공학적인 특성이 검토되어져야 할 것이나, 본 연구에서는 지질도 나타나는 기반암 종류에 따른 그 지역에 분포되는 화산재 특성을 파악하는 형태를 취하였다. 이에 따라, 일부 위치적으로 유사한 지역에 분포되더라도 형성기원이 다를 수 있으나, 각 기반암 종류에 따른 차이보다는 제주도에 분포하는 화산재의 전반적인 공학적 특성을 파악하는데 유용한 자료로 이용될 수 있을 것으로 본다.

3) 실험자료 이용

본 연구에서는 제주도 전역을 대상으로 하였는데, 표층에 흙이 두껍게 노출되는 부분에 대해서는 직접 시료를 채취하여 실내시험을 실시하였고, 토층이 표층에 노출되지 않거나 시료 채취가 어려운 일부 위치에 대해서는 시추조사 시 채취된 시료에 대해 기 분석된 실내시험자료를 참조하였다.

토층 단면이 노출되는 구간에서는 흙의 분포 형태가 육안관찰이 가능하므로 대표되는 시료에 대하여 sampling이 가능하나, 지표면 하부에 대한 시추조사 시 채취된 시료는 채취 sample에 한하여 그런 특성을 나타내는지 아니며, 그 지역 전체가 그와 유사한 형태를 보이는지는 명확치 않다.

3. 실내시험방법

본 연구를 위해 채취된 화산재 시료에 대하여 실내시험을 실시하였으며, 시험방법은 KSF 규정을 기준으로 하였고, 각 항목에 따른 정의 및 개략적인 시험특성은 다음과 같다.

1) 입도분석

흙의 입도를 구하기 위해서 입도분석 시험이 실시되는데, 입도는 흙을 구성하는 흙입자의 전 입경에 대한 각 입경의 중량분포로서 나타내며, KSF에서는 「낱알 크기의 분포 상태를 중량백분율로 나타낸 것」이라 정의하고 있다. 입도는 조립토의 분류 및 흙의 공학적 성질을 판단하는데 이용된다.

① 체분석

No.10체에 잔류한 시료에 대해서는 체분석에 의한 입도분석을 한다. 19.1, 9.5, 4.75(No.4), 2(No.10), 0.42(No.40), 0.15(No.100), 0.75(No.200)mm체를 순서대로 놓고 체분석을 하며, 각 체에 잔류한 시료 및 No.4체를 통과한 시료의 중량을 측정한다.

각 체마다 잔류한 시료의 중량백분율을 전시료 중량에 대해서 구한다.

○ 전시료에 대한 잔유율 $P_r = \dfrac{\text{각 체의 잔류 건조시료중량}}{\text{전 노건조 시료중량}} \times 100(\%)$

○ 가적잔류율 $P_r' = \Sigma P_r$

○ 가적통과율 = 100−가적잔류율(%)

② 비중계분석

비중계분석은 물 속에 가라앉는 흙입자의 침강원리를 바탕으로 한다. 흙시료가 물속에서 분산되면 흙입자들은 입자의 형상, 크기, 중량, 물의 점성에 따라 각각 다른 속도로 가라앉는다. 비중계를 임의의 시간 t일 때 현탁액 속에 집어넣고 침강이 시작될 때부터 측정을 하는데, 이것은 깊이 L에서 현탁액의 비중을 측정하는 것이다. 메스실린더에 현탁된 흙입자의 입경은 다음과 같은 식에 의해 구해진다.

$$d = \frac{\sqrt{30\eta L}}{980(G_s - G_w)t \cdot \gamma_w} \quad (mm)$$

③ 입도분포곡선

체분석과 비중계분석의 결과들을 반대수 용지 위에 표시하며, 이를 입도분포곡선이라고 한다. 입자 직경은 대수 눈금으로 표시하며, 주어진 입경보다 가는 입자들의 백분율은 산술 눈금으로 표시된다.

2) 액성한계시험

액성한계는 흙이 액상을 나타내는 최소의 함수비를 말하며 KSF에서는 「시료를

넣은 접시를 1cm의 높이에서 1초에 2회의 비율로 25회 떨어뜨렸을 때 양쪽으로 나뉜 부분의 흙이 홈의 양측으로부터 유출하여 약 1.5cm의 길이로 합쳐졌을 때의 함수비」라고 정의되어 있다. 입도분석과 마찬가지로 액성한계는 세립토의 분류 및 흙의 공학적 성질을 판단하는데 이용된다.

시험은 함수량이 적은 상태로부터 차츰 함수량을 증가시켜 충분히 섞어 시료를 유연한 상태로 하면서 행한다. 시험결과는 반대수용지의 대수 눈금에 낙하횟수를, 산술눈금에 함수비를 취하고 이들의 교점을 연결하는 선이 적합한 직선이 되도록 그리면 유동곡선이 얻어지는데, 25회 낙하횟수와 연결되는 함수비가 액성한계이다.

3) 소성한계시험

흙의 소성한계를 구하기 위하여 실시되는 것으로 이와 동시에 액성한계가 구해지게 되면 소성지수가 계산에 의하여 얻어진다. 소성한계는 흙의 소성상태와 반고체 상태의 한계를 나타내는 함수비를 말하고 KSF에서는 「흙덩어리를 손으로 밀어 직경 3mm의 국수 모양으로 만들어 부슬부슬 부서질 때의 함수비」라고 정의되어 있다. 소성한계는 소성도를 이용한 세립토의 분류와 흙의 공학적 성질의 추정 등에 이용된다.

흙의 소성지수 Ip는 액성한계(w_L)와 소성한계(w_p)와의 차이를 말하며 $Ip=w_L-w_p$로 구한다.

4) 다짐시험

다짐시험은 37.5mm체를 통과한 흙을 램머로서 어느 일정한 방법으로 다져 함수량과 건조밀도를 구하고 그들 값으로 다짐곡선을 그린 후 그 곡선에서 최정점의 값이 최대건조밀도와 그 때의 함수비인 최적함수비를 구하는 KSF 2312에 규정되어 있는 시험법이다. 이 시험의 결과는 주로 현장의 다짐시공관리, 사질토의 상대밀도를 구하는 경우에 이용된다.

다짐시험방법은 몰드 크기와 램머 무게의 조합에 따라 다음 <Table 2.3>과 같이 A,B,C,D,E 등 5가지가 있는데, 본 연구에서는 다짐재료 시험에 주로 이용되고 있는 D다짐 방법에 의해 실시되었다.

Table 2.3 Method of compaction test

Compac-tion type	Hammer weight (kg)	The inside diameter of Proctor mold (㎝)	The number of layers	Number of blows/layer	Maxim particle Dia.(㎜)
A	2.5	10	3	25	19
B	2.5	15	3	55	37.5
C	4.5	10	5	25	19
D	4.5	15	5	55	19
E	4.5	15	3	92	37.5

시험결과에 따라 함수비-건조밀도에 의한 다짐곡선을 작성할 수 있으며, 최적함수비 및 최대건조밀도를 파악하고, 다짐곡선이 뾰족하거나, 완만한 형태 등에 의해 다짐특성을 알 수 있다.

5) 삼축압축시험

삼축압축 시험(Triaxial Compression Test)은 전단 강도 정수를 결정하기 위하여 이용하는 시험 방법들 중에서 가장 신뢰성이 있다. 시험 방법은 배수조건에 따라 UU시험(비압밀 비배수시험), CU 및 $\overline{CU}$시험(압밀비배수시험), CD시험(압밀배수시험)으로 분류되는데, 본 연구에서는 가장 일반적으로 이용되고 있는 CU시험법에 의해 실시되었다. 이 시험은 공시체에 멤브레인을 씌운 후에 등방압축 σ_3를 가한 다음, 축차응력을 읽어서 σ_1을 구하는 것을 반복 시행하여 σ_1과 σ_3로써 Mohr's 응력원을 그려 그 접선을 파괴포락선이라 하고, 그 선에서 c, ϕ값을 구한다.

Ⅲ. 화산재의 지질학적 특성

1. 화산분출물

화산(火山; volcano)은 '지하에 있는 용융 물질의 저장소가 구멍이나 틈을 통하여 지표에 열려 녹은 돌·가스·화산회를 분출하는 곳'(정창희, 1993)이라 명하고, 화구(火口)를 통하여 분출되는 가스·용암·암편·화산재를 총칭하여 이들을 화산분출물(volcanic products)이라고 한다(정창희, 1993).

본 연구는 이들 화산분출물 중 화산재 퇴적층에 관한 것이며, 이에 따라 화산재를 포함한 화산쇄설물의 특징을 살펴보고자 한다.

① 가스

화구로 분출되는 수증기가 큰 구름기둥을 만드는 것을 보아 화산이 다량의 수분을 토하고 있음은 짐작되나 실측에 의해서도 화구에서 나오는 모든 기체의 60~95% 또는 그 이상이 수증기임이 밝혀졌다. 분출되는 가스 중에는 수소와 산소도 들어 있으며 그 중의 일부는 화합하여 물이 된다. 산소와 수소가 화도 안에서 급격하게 화합하면 폭발을 일으킨다. 수증기 다음으로 많은 가스는 이산화탄소이다. 어떤 화산은 승화된 유황과 그 화합물인 황화수소(H_2S)·아황산가스(SO_2)를 분출하고, 염소(Cl_2)와 염화수소(HCl)를 포함하는 화산가스도 방출한다.

② 용암

마그마가 지표에 분출될 때에는 그 중의 가스를 거의 전부 잃어버리고 용암으로 되어 버린다. 용암이 굳어진 것이 고체용암 또는 화산암(volcanic rock)이다. 용암은 SiO_2의 함유량에 따라 유문암, 안산암 및 현무암으로 크게 3분된다. 용암의 유동성은 그 온도와 SiO_2의 함량에 의하여 결정되어 고온이고 고철질일수록 유동성이 크고, 저온이고 규장질이면 점성이 커서 유동성이 작다.

③ 화성쇄설물

화구로부터 분출되는 암편과 화산재를 총칭하여 화성쇄설물(火成碎屑物;

pyroclastic materials, 또는 tephra)이라고 한다. 그 중 직경이 32㎜ 이상인 것이 화산암괴(volcanic block)이고, 이에는 화산의 기반이 되어 있던 암석도 섞인다. 암괴에는 최대 60톤 이상에 달하는 것이 있다. 직경이 32㎜ 이상이면서 어느 정도 둥글거나 방추형(紡錐刑)으로 생긴 것은 화산탄(火山彈; volcanic bomb)이며, 이는 용암이 공중에서 회전하며 냉각되어 만들어진 것이다. 모양이 불규칙하고 직경이 4~32㎜ 사이에 있는 것은 화산력(lapilli) 또는 분석(噴石; cinder)이다. 4㎜ 이하의 세편을 화산재(volcanic ash), 1/4㎜ 이하의 가루를 화산진(火山塵; volcanic dust)이라고 한다(정창희, 1993).

또한, 박 등(2000)은 화성쇄설물 중 2~64㎜를 화산력, 1/16㎜를 화산재, 1/16 이하를 화산진이라 분류하기도 하였으며, 학자에 따라 화성쇄설물을 구분하는 입자 크기는 다소 차이를 보이는데, 보다 세밀하게 나타내고 있는 Shon(1988)의 구분은 다음과 같다.

Table 3.1 Granulometric classification of pyroclasts(Sohn, 1988)

Clast size		Non-volcanic	Pyroclastic
mm	ϕ		
256	-8	Boulder	Coarse block
64	-6	Cobble	Fine block
16	-4	Pebble	Coarse lapillus
4	-2		Medium lapillus
2	-1	Granule	Fine lapillus
1/2	1	Very coarse sand Coarse sand Medium sand	Coarse ash
		Fine sand	Medium ash
1/16	4	Very fine sand	
1/16이하	4이하	Silt Clay	Fine ash

<Table 3.1>은 화성쇄설물(Pyroclastic)의 입도 크기에 대한 구분을 일반적인 토사(Non-volcanic)의 구분과 비교하여 제시(Sohn, 1988)한 것을 나타내고 있으며 이에 따르면 화성분출물의 화산재는 입도에 따라 Very fine sand~Very coarse sand 정도에 해당되는 것임을 알 수 있다.

일반적으로 화산재(volcanic ash)라 불리는 것은, 1/16㎜ 이하의 크기에 대한 화산진을 세분하지 않고 2㎜ 이하 크기의 화성쇄설물을 통틀어서 말하기도 하며, 본 연구에서 또한, 화산재와 화산진을 세분하지 않고, 세립질의 화산재라 명하여 그 특성을 검토하였다.

2. 화산쇄설물의 퇴적

화산폭발이나 분출의 양상은 마그마의 휘발성분(특히 물과 이산화탄소의 함량정도)과 점성도에 따라 달라진다. 지하 깊은 곳에서는 이러한 휘발성분들이 마그마 내에 용해된 상태로 존재하지만 지표 가까이 마그마가 올라오면 가스 성분들이 마그마로부터 분리되어 팽창하게 된다. 이렇게 마그마가 다량의 기포를 포함하게 되어 거품 덩어리 같은 형태를 띠며 지표로 나와 식으면 부석을 형성하게 된다. 산성의 마그마는 염기성의 마그마에 비해 휘발 성분을 더 많이 포함하여 점성도가 낮으므로 보다 넓은 지역에 걸쳐 화산쇄설물을 분포시킬 수 있다(朴과 鄭, 1993).

주로 화산재로 구성된 화산쇄설성 퇴적물은 응회암(tuff)이라 하고, 화산력으로 이루어진 화산쇄설성 퇴적물은 lapilli-stone, 화산탄이나 block으로 이루어진 퇴적물은 집괴암(agglomerate) 또는 화산각력암이라고 한다.

화산쇄설성 퇴적물은 형성 기원에 따라 분류하여 그 특성을 기술하는 것이 일반적인데, 대표적 형태로는 화성쇄설성 낙하퇴적물(pyroclastic-fall deposits), 화산쇄설류 퇴적물(volcaniclastic flow deposits), 그리고 hyaloclastites 등이 있다(朴과 鄭, 1993).

1) 화성쇄설성 낙하 퇴적물

이러한 형태의 퇴적물은 화산분출구를 통해 분출된 암석 파편들이 낙하하여 형성된 것으로, 대부분의 경우 공기 중에서 형성되어 air-fall 응회암을 이루나 때로

는 물속으로 낙하하여 퇴적층을 형성하기도 한다. 육상에서 형성된 퇴적물들은 대개 분출구에서 멀어질수록 층의 두께나 입자의 크기가 감소하는 것이 특징이다. Block이나 화산탄 크기의 퇴적물은 주로 분출구 주변에 쌓이나, 화산재 같은 입자들은 분출구로부터 수십 ㎞까지, 화산진은 수천㎞ 이상 운반되기도 한다. 육상에서 형성된 화성쇄설성 낙하 퇴적층들은 특징적으로 점이층리를 보이나 어떤 경우에는 부석이나 암편조각들에 의해 역점이층리를 보여주기도 한다(Self, 1976).

2) 화산쇄설류 퇴적물

지표에서 형성되는 두 가지 주요한 형태의 화산쇄설류 퇴적물은 마그마 내부의 가스에 의해 유동성을 가지고 분출되어 형성된 ignimbrite와 화산재의 매우 빠른 흐름에 의해 생성된 기저와류(base surge)층이며, 그 외의 형태로 lahar와 화산이류(volcanic mudflow)가 있다(朴과 鄭, 1993).

① ignimbrite

가스나 물이 상승하여 입자들의 운동을 유채와 비슷한 형태로 만드는 유동화과정(fluidization)은 마그마 속에 녹아있던 가스가 팽창하거나 또는 분출물이 지상에서 이동하면서 흡수한 공기에 의해 이루어진다. 이러한 흐름은 100㎞가지 이동하기도 하며, 평탄한 대지 위를 흐를 수도 있다. 이러한 과정에 의해 형성된 퇴적물인 ignimbrite는 분급은 좋지 않으나 균질하게 보이는 특징이 있으며 세립의 화산재로 이루어져 있다. 암석편들이 섞여있는 경우에는 보통 암석편들이 점이층리를 보이며, 부석이 섞이는 경우에는 부석들이 역점이층리를 이룬다.

② 기저와류 퇴적물

기저와류는 마그마가 지표면 부근 지하수에서 물을 공급받으면서 또는 마그마가 지표면의 물과 접촉하면서 분출한 뒤 형성된 흐름이다. 기저와류는 지표면을 매우 빠르게 이동하는 화산쇄설물과 물, 가스(수증기)의 혼합체이다. 기저와류 퇴적물의 특징으로는 층리면의 발달을 들 수 있는데 평면층리와 사층리를 보인다. 층의 두께나 입자의 크기는 근원지로부터 멀어질수록 감소하는 경향을 보이고, 최대 층후는 대개 1m 이내이다.

③ Lahar 퇴적물

Lahar, 즉 화산이류는 지표에서 분출된 화산의 사면에서 발달하는데, 미고화된 화산재 위로 폭우가 쏟아져 형성된 이류는 찬 lahar(cold lahr)라 하고, 화구호 내에서 화산재가 분출하여 만든 이류는 더운 lahar(hot lahar)라 한다. Lahar 퇴적물은 선상지에서 이류에 의해 생성되는 퇴적물과 유사한 구조의 퇴적층을 형성하는데, 분급이 불량하며 기질에 의해 지지되는 조직을 보인다.

3) Hyoloclastite

분출된 용암이 물과 만나서 급속히 냉각되면 잘게 부서진다. 용암류의 표면부가 냉각되면서 계속 이동하면 표피부근이 부서지면서 작은 입자로 떨어져 나오고, 보다 깊숙한 내부의 마그마가 차츰 냉각되며 쪼개지게 된다. 이러한 과정을 통해 생성된 화산쇄설성 퇴적물을 통칭하여 hyaloclastite, 혹은 수성기원(aquagene) 응회암이라고 부른다. 이런 종류의 응회암은 용암이 직접 물속에서 분출되거나, 용암이 지표면에서 분출되어 물속으로 흘러 들어갈 때 형성된다. 이 때 생성된 암석이 다공질의 작은 용암 조각들로 구성된 hyaloclastite인데, 조각들 각각의 크기는 수 ㎜에서 수 ㎝ 정도이다.

Ⅳ. 시료 채취

1. 제주도에 분포하는 화산재의 형태

제주도에 분포되는 흙은 대부분 화산기원의 화산재 퇴적층이다. 화산재 퇴적층은 대·소규모 화산분출 시 생성된 화산재가 퇴적된 원지형일 수도 있으나, 1차적으로 퇴적된 화산재가 재이동되어 퇴적되기도 하며, 화산재 또는 그 외의 화산분출물이 물리·화학적 풍화를 받고 이들에서 유래된 입자가 퇴적된 부분도 있을 것이나, 본 연구에서는 이들의 형성원리에 대해서는 구분하지 않았다.

육지부 고기층에서 형성되는 풍화잔류토는 매우 두껍게 분포되는 경우가 많으나, 제주도는 토사층 발달이 미약하며, 화산재층 또한 그 두께는 1~5m 정도의 두께로 대부분 얇게 형성되고 있다. 표층부에 이들 화산재 퇴적층이 분포되지 않고 암반이 노출되거나 곶자왈, 클링커 등의 파쇄암이 분포되는 부분이 많다. 따라서, 본 연구에서는 화산재 퇴적층이 두껍게 분포되어 노출되는 부분 외에, 지하 수 m 구간에 대한 시추 시 확인되는 화산재층 시료에 대해서 시험된 자료를 이용하였다.

심부에 분포되는 화산재층의 단면을 정확히 파악하기는 어려우나, 표층을 이루고 있는 흙, 즉 화산재 퇴적층에 대한 절취단면에서 육안관찰에 의해 파악되는 특성을 <Fig. 4.1>에 나타내었다.

흙이 두껍게 분포되는 지역에 대한 절취 단면에서 확인된 바에 의하면, 일부 위치에서는 상부는 세립질, 하부로 갈수록 조립질을 이루는 정점이 형태를 나타내기도 하나, 일반적인 퇴적암에 비해 분급이 불량한 상태로 나타나는 것이 대부분인 것으로 확인된다. 화산재 퇴적층은 비교적 입도가 균등한 형태이고, 하부 또는 상부에 분포되는 스코리아 퇴적층 또는 클링커면과 접하면서 육안상 관찰에 의해서도 뚜렷한 구분이 가능할 정도로 입도분포에서 차이를 보이기도 한다. 또한, 풍화잔류토의 토양단면에서 확인되는 것처럼 상부는 잔류 암편이 거의 없으나, 하부에서는 암반과 접하면서 풍화가 덜 진행된 모암편이 남아있는 형태를 보이지 않으며 화산재가 암층과 접하여 형성될 경우는 뚜렷한 경계면을 이룬다. 화산재의 분급 및 입도분포 특성은 Ⅲ-2 장에서 설명된 화산쇄설물 퇴적 형태에 따라 차이를 보

이는데, 분급이 양호하여 점이층리를 보이고 세립질로 균등하게 나타나는 세립 화산재는 대부분 낙하 퇴적물에서 나타나는 특징이다.

본 연구에서는 <Fig. 4.1>에서 A 형태의 중간층 및 B 형태에 나타나는 층 즉, 균질한 입도분포를 보이며, 비교적 풍화가 덜 진행된 세립 화산재에 대해서 시험되었으며, 육안관찰에 의해 부식되거나 풍화가 심하게 진행되고, 나무 및 풀뿌리를 포함하거나 유기물이 포함되는 구간 즉, A 형태의 상부층 및 C 형태의 흙에 대해서는 시험되지 않았다.

구분	노 출 형 상	특 성
A		-. 표층부는 부식되고 심하게 풍화됨. -. 표층 이하부에는 세립질로 입도가 균등한 중간층 및 파쇄암편을 포함하고 비교적 조립질로 나타나는 하부층으로 구분됨. -. 점이적인 입도변화를 보이지는 않으나, 하부에는 모래, 자갈 크기의 조립질 토함.
B		-. 점토질의 화산재가 주를 이룸. -. 암황색을 띰. -. 점착력이 있어서 입자가 쉽게 떨어지지 않음. -. 입도 균등.
C		-. 표층부를 이루는 것으로 세립의 실트 및 암편이 불규칙하게 혼재됨. -. 빈입도 분포를 보임. -. 화산분출 시 퇴적된 원지형이 아닌 재이동 퇴적된 것으로 추정. -. 표면에 노출되어 부식되고, 풍화됨.

Fig. 4.1 Section shape of Volcanic ash

2. 시료채취위치

화산재의 물리·역학적 특성을 파악하기 위하여 토층이 노출되는 지역에서 시료를 채취하였는데, 상부의 약간 부식된 암흑색토를 제거한 후 하부의 토층 즉, <Fig. 4.1>의 A단면에서 중간층 정도에 해당되는 흙을 채취하였다.

또한, <Fig. 2.1>의 지표지질도를 참조하여, 지질학적으로 구분되는 화산암 종류에 따라 구분시켜 시료를 채취하였다. 제주 지질도폭에 의하면 조면현무암류에 해당되는 암층이 가장 넓게 분포되고 있고, 그 다음 현무암류가 넓은 범위를 차지하고 있으나, 조면암류는 협소하게 나타나고 있음에 따라 조면현무암류 지역에서 20개로 가장 많이 실시되었고, 현무암류 15개, 조면암류 9개로 총 44개 지역에서 시료를 채취하여 분석하였다. 본 연구에 이용된 시료에 대한 명칭은 첫 번째 영문자에서 채취된 화산재가 퇴적된 되는 지역에 분포되는 기반암의 종류에 따라 'b'(basalt), 'tb'(trachybasalt), 't'(trachyte)를 구분하여 기반암의 종류를 알기 쉽게 하였고, 이하의 영문은 채취 지역명을 나타내었으며, 각 암종류별로 일련번호를 붙혀서 쉽게 구분될 수 있도록 하였다.

본 연구에 적용된 시료 채취 위치는 <Fig. 4.2>에 나타내었고, 상세 지역은 <Table 4.1>에 정리하였다. 또한, 시료채취 및 특성 분석은 기반암 종류에 따라 구분시켜 실시되었으므로, 시료가 채취된 위치의 기반암 종류 즉, 지표지질을 동시에 확인하기 위하여 제주 지질도폭(한국지질자원연구소, 2000) 상에 표시하여 <Fig. 4.3>에 나타내었다. 시료채취 위치는 제주시 지역에 중점적으로 실시되었으며, 그 외의 제주도 전역에 대해서 이뤄졌고, 제주시 외의 지역에서는 화산재와 기반암의 형성기원이 동일할 것으로 예측되는 시료를 채취하기 위하여 동질의 기반암이 광범위하게 분포되는 지역의 중심부에서 채취하는 것을 원칙으로 하였다.

시험항목은 물성시험의 경우 44개 전체 시료에 대해서 실시하였고, 그 외 화학분석, 다짐시험, 삼축압축시험은 선별적으로 실시하였다.

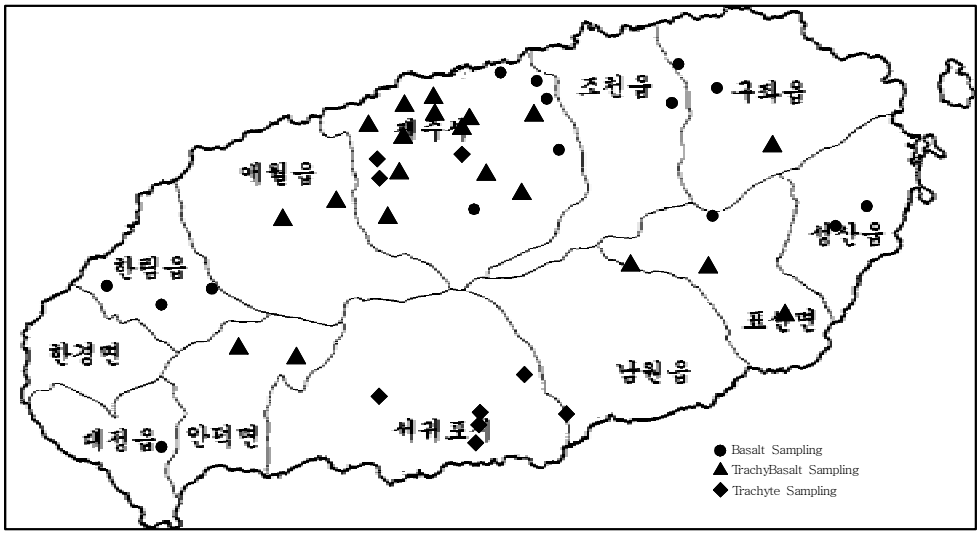


Fig. 4.2 Location of sampling in the study area

Table 4.1 Location of sampling in the study area

NO.	designation	Location	rock type	remark
1	b·hb-1	Jeju hwabuk-dong	Basalt	compaction test
2	b·hc-2	Jeju heochon-dong	Basalt	
3	b·hc-3	Jeju hoechon-dong	Basalt	chemical component, compaction, triaxial test
4	b·bg-4	Jeju bonggae-dong	Basalt	
5	b·od-5	Jeju odung-dong	Basalt	
6	b·gn-6	Bukjeju gimnyeong-ri	Basalt	
7	b·sh-7	Bukjeju sonhul-ri	Basalt	compaction test
8	b·wj-8	Bukjeju woljung-ri	Basalt	
9	b·su-9	Namjeju sungeup-ri	Basalt	
10	b·ns-10	Namjeju nansan-ri	Basalt	chemical component, compaction, triaxial test
11	b·ns-11	Namjeju nansan-ri	Basalt	
12	b·ou-12	Bukjeju eum-ri	Basalt	
13	b·wj-13	Bukjeju worjeong-ri	Basalt	
14	b·wr-14	Bukjeju worryeong-ri	Basalt	
15	b·as-15	Bukjeju anseong-ri	Basalt	

Table 4.1 Continued.

NO.	designation	Location	rock type	remark
16	tb·hc-1	Jeju hoechon-dong	Trachybasalt	
17	tb·yp-2	Jeju ungpyeong-dong	Trachybasalt	
18	tb·id-3	Jeju ido-dong	Trachybasalt	chemical component test
19	tb·id-4	Jeju ido-dong	Trachybasalt	
20	tb·ar-5	Jeju ara-dong	Trachybasalt	
21	tb·yd-6	Jeju yongdam-dong	Trachybasalt	compaction test
22	tb·or-7	Jeju ora-dong	Trachybasalt	triaxial test
23	tb·y-8	Jeju yun-dong	Trachybasalt	
24	tb·y-9	Jeju yun-dong	Trachybasalt	
25	tb·ha-10	Jeju haian-dong	Trachybasalt	
26	tb·nh-11	Jeju nohyung-dong	Trachybasalt	chemical component, compaction test
27	tb·ih-12	Jeju iho-dong	Trachybasalt	triaxial test
28	tb·sd-13	Bukjeju songdang-ri	Trachybasalt	
29	tb·gs-14	Namjeju gasi-ri	Trachybasalt	
30	tb·su-15	Namjeju sungeup-ri	Trachybasalt	compaction test
31	tb·sh-16	Namjeju sehwa-ri	Trachybasalt	
32	tb·kr-17	Bukjeju gwangryeong-ri	Trachybasalt	
33	tb·gd-18	Bukjeju kumdeok-ri	Trachybasalt	
34	tb·sc-19	Namjeju sangchun-ri	Trachybasalt	
35	tb·dk-20	Namjeju dongkwang-ri	Trachyte	
36	t·ar-1	Jeju ara-dong	Trachyte	chemical component, compaction test
37	t·ha-2	Jeju haian-dong	Trachyte	triaxial test
38	t·nh-3	Jeju nohyung-dong	Trachyte	
39	t·sh-4	Jeju sanghyo-dong	Trachyte	
40	t·sh-5	Seoguipo seohong-dong	Trachyte	chemical component, compaction test
41	t·sh-6	Seoguipo seohong-dong	Trachyte	
42	t·sg-7	Seoguipo seogui-dong	Trachyte	
43	t·hh-8	Seoguipo hahyo-dong	Trachyte	
44	t·hs-9	Seoguipo hoesu-dong	Trachyte	

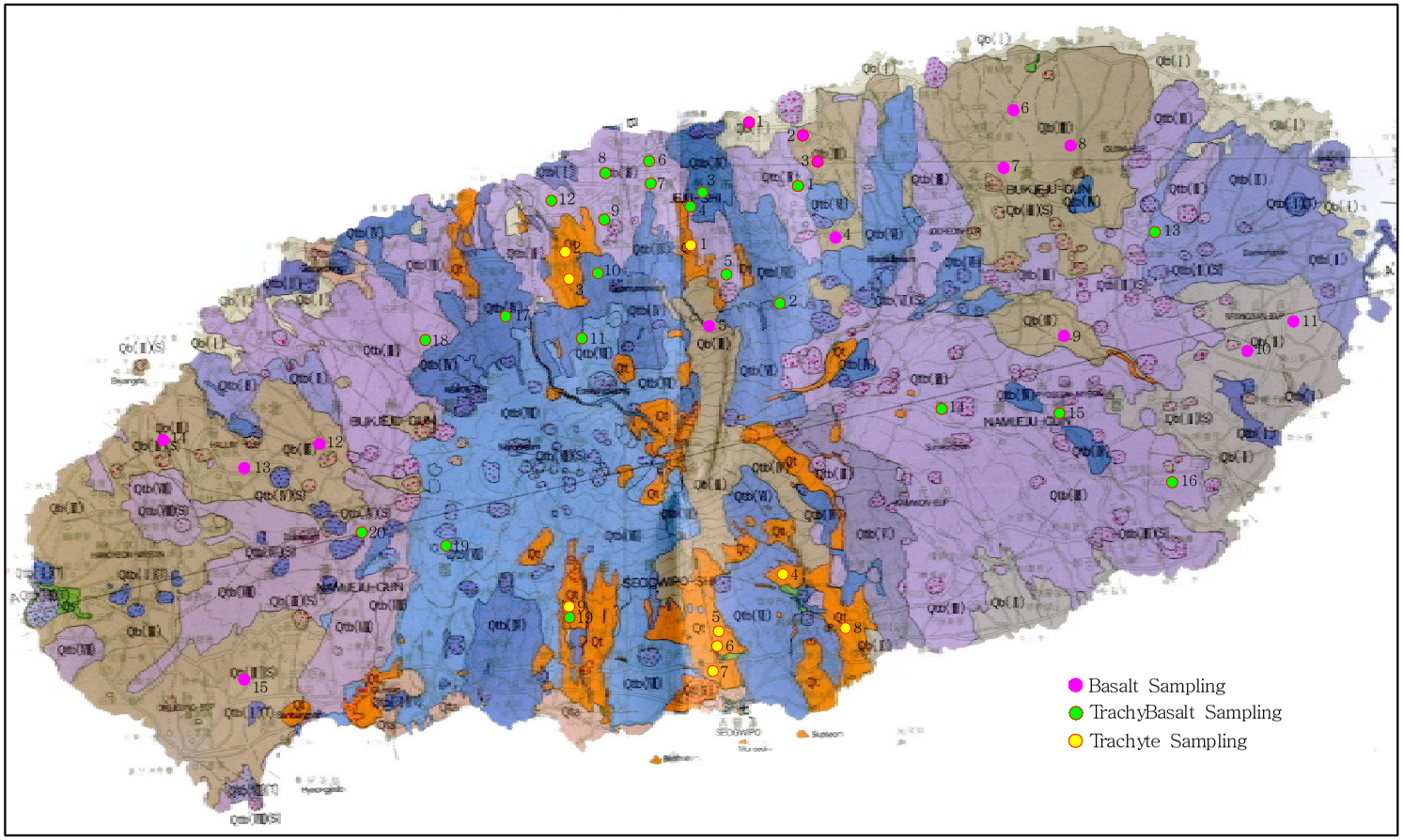


Fig. 4.3 Geologic map location of sampling in the study area

Ⅴ. 화산재의 공학적 특성

1. 화산재의 화학성분

일반적인 점토광물은 암반의 풍화작용과 함께 생기는 2차적 생성물로 규산 사면체와 알루미늄 팔면체의 두 기본단위로 구성된 알루미늄 규산염 복합물이다. 이들 점토 광물은 원자 구조에 따라 카올리나이트(kaolinite), 일라이트(illite), 몬트몰로나이트(montmorillite) 등이 있으며, 이들의 화학구성성분은 차이를 보일 것이다. 본 연구는 세립 화산재의 공학적 특성에 관한 것으로 화산재가 풍화되어 점토광물을 구성하고 점토광물의 특성까지는 검토되지 못하였으며, 신생화산도인 제주도에 특이하게 분포되는 화산재에 대해 지질학적인 측면에서 접근하였으므로, 화산암을 구분시키는 화학성분 특성과 비교될 수 있는 분석을 실시하였다.

제주도 내에 분포되는 화산암은 SiO_2와 Na_2O+K_2O의 화학성분에 따라 현무암, 조면현무암 및 조면암 등으로 구분되는데, 화산재 또한 화산암에 주를 이루는 화학성분인 SiO_2, Na_2O, K_2O, Al_2O_3 및 Fe_2O_3 등이 다량 포함되며, 분출기원이 되는 화산체의 특성에 따라 그 함량은 다소 차이를 보일 것이다.

지질도폭에 구분된 지표를 구성하고 있는 암층은 액상의 용암 분출이 고결된 것이나, 본 연구의 대상이 되는 화산재는 세립토로 화산분출 시 수 백 m 또는 수 ㎞ 원거리로 이동하여 퇴적될 수 있고, 또한 1차적으로 퇴적된 화산재가 바람·유수의 작용에 의해 인근 지역으로 재 이동되어 퇴적될 수 있다. 따라서, 지질도폭 상에 현무암·조면현무암 또는 조면암이라 구분되어지더라도 그들 암반을 피복하고 있는 상부 토사층이 하부의 암층과 동일 기원의 화산체에서 형성되었는지는 불분명하다.

일반적인 점토광물은 화학조성이 암석의 풍화과정에서 생성된 규산알루미늄의 결정구조를 주체로 하고 있는데, 본 연구는 앞서 말한바와 같이 화산분출 시 형성된 1차적인 생성물인 화산재에 대한 것으로, 풍화작용에 의한 2차 생성물인 점토광물에 나타나는 화학성분 분석보다는 기반암과의 연관성을 파악하기 위하여 화산암 구분의 기준이 되는 SiO_2와 Na_2O+K_2O의 화학성분분석을 실시하였다. 즉, XRF 방식에 의해 산화물 성분 분석하는 것을 중점으로 하였다.

본 연구에서는 현무암류·조면현무암류·조면암류로 구분되는 화산암과 이들 화산체와 연관된 화산재 즉, 점토·실트질의 세립토에 대한 것으로 연구 구분 대상이 되는 3가지 종류의 화산암류로 판단되는 지역에 대하여 총 11개 시료를 선정하여 화학분석을 실시하였다.

본 연구는 화산암류에 따른 화산재의 특성을 구분하는 형태로 이뤄지고 있음에 따라, 분석 대상이 되는 화산재가 갖는 화학성분을 분석하여 어떤 암종과 연관이 있는지를 파악해야 하는 것이 중요하나, 화학성분분석만으로 그 분출기원을 찾기 어려울 뿐만 아니라, 각 암종별로 4개, 4개, 3개로 총 11개 시료에 한하여 분석되었으므로 동일한 기원의 화산재로 결론짓는 것은 무리가 따르지만, 화학분석 결과를 제주 지질도폭에 적용된 화산암 명명도 <Fig. 5.1>에 나타내어 암종에 따른 구분이 쉽게 파악될 수 있도록 하였다.

본 연구에서 실시된 화산재 시료에 대한 화학성분분석 결과는 <Table 5.1>과 같다.

Table 5.1 Chemical composition of volcanic ash

NO.		Chemical composition(wt%)										
		SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	MnO	P_2O_5	Loi
①	b	49.31	18.63	1.60	12.42	2.72	0.60	1.79	2.14	0.13	0.22	10.85
②	b	46.82	19.02	2.72	12.72	2.12	0.74	2.11	2.95	0.20	0.27	11.14
③	b	45.94	19.64	3.05	13.24	3.25	0.75	0.54	1.35	0.20	0.27	12.41
④	b	48.01	18.76	2.84	12.43	3.22	0.62	0.91	1.83	0.11	0.26	10.97
⑤	tb	56.32	16.83	1.08	8.32	1.28	0.49	2.91	3.28	0.20	0.17	9.09
⑥	tb	52.00	17.95	1.43	10.41	2.31	0.56	2.52	2.86	0.21	0.16	9.47
⑦	tb	48.53	18.87	2.14	12.14	2.02	0.69	2.13	3.08	0.15	0.25	10.11
⑧	tb	51.05	18.12	1.47	10.68	2.24	0.58	2.65	3.22	0.17	0.20	9.95
⑨	t	59.83	16.55	0.91	7.70	1.22	0.43	3.41	3.61	0.19	0.13	6.64
⑩	t	61.64	15.92	0.87	6.36	1.04	0.66	3.43	3.83	0.15	0.10	6.12
⑪	t	62.23	15.73	0.74	6.63	0.84	0.34	3.51	3.81	0.14	0.09	5.92

b: basalt area, tb: trachybasalt area, t: trachyte basalt Loi: Loss of ignition

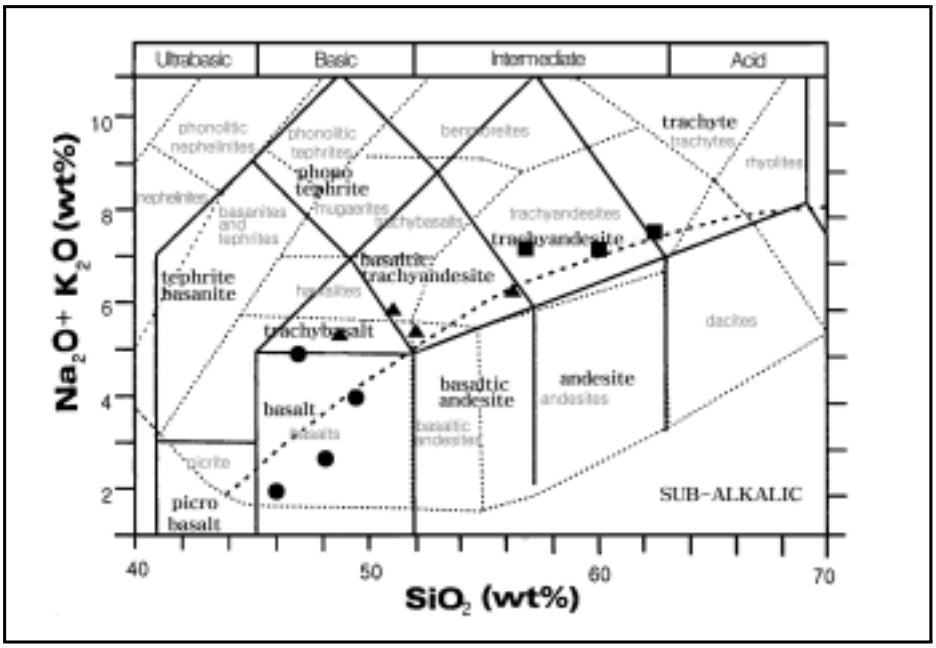


Fig. 5.1 Chemical component of volcanic ash

<Fig. 5.1>은 화학성분 분석 결과를 SiO_2와 Na_2O+K_2O의 비를 이용한 화산암류 명명도(Cox et al., 1979; Le Bas et al., 1986)에 표시한 것인데, basalt, trachybasalt, basaltic trachyandesite, trachyandesite 및 trachyte 범위에 plot 되고 있다.

화산분출 시 형성된 화산재의 화학성분은 용암류의 기반암과 동일하지 않을 수 있으며, 풍화정도 및 2차적인 혼합물, 분술물의 포함 정도에 따라 차이를 보일 수 있음을 감안해야 하며, 이에 따른 연구는 앞으로 추가 되어져야 필요할 것이다.

2. 화산재의 물리적 특성

흙의 물리적 특성이란 비중, 함수비, 입도, 간극비, 포화도, 단위중량, 및 Atterberg 한계 등으로 표현된다. 이들 특성치가 갖는 공학적 의미는 각종 해석에 직접 이용된다는 점과 이들 값이 다른 역학적 특성과 상관관계를 맺고 있다는 점에서 찾을 수 있다.

Table 5.2 Kind and application of physical characteristic tests for soils(Lee et al., 2001)

division	test type	test method	test result	application	KS
Physical characteri-stic test	specific gravity	·pycnometer	·specific gravity of soil particles	·calculate void ratio, degree of saturation, unit weight et. -hydrometer analysis	F 2308
	water content	·oven dried method (105℃±5℃)	·water content	·basic characteristics of soil ·decision sensitivity of soil	F 2306
	particle-size	·sieve analysis ·hydrometer analysis	·Grain size distribution curve ·uniformity coefficient ·curvature coefficient ·fine gained size content	·classification of soil · compression evaluation of cohesive soils ·stability evaluation of cohesionless soils ·estimate hydraulic conductivity ·design filter	F 2302
	consistency	·liquid limit ·plastic limit ·shrinkage limit	·liquid limit, flow index ·plastic limit ·shrinkage limit ·liquidity index ·plasticity index	·stability appraisal of granular soil ·decision of soils ·evaluate suitability of highway subgrade material ·estimate compression index ·classification of soil ·activity	F 2303 F 2304 F 2305
	field density test	·sand cone method ·rubber balloon method ·nuclear method	·moist density ·dry density	·basic characteristics of soil ·estimate earth pressure ·decision degree of compaction	F 2311
	relative density	·mold method	·maximum density ·minimum density	·decision degree of compaction ·decision liquefaction	
	seepage	·constant head test ·falling head test ·consolidation test	·hydraulic conductivity of soil	·design of permeability soil ·ground water matter	F 2322

일반적인 흙의 물리적특성 시험의 종류 및 적용 사항은 <Table 5.2>에 제시된 바와 같고, 본 연구는 점토·실트질에 해당되는 세립 화산재의 특성에 중점을 두고 있음으로 입도분석 및 액·소성한계 시험에 대하여 중점적으로 실시하였다.

3. 화산재의 입도 특성

흙의 입도분포는 흙을 분류하는 기준의 척도가 되며, 입도분포에 따라 지반강도가 좌우되기도 하므로 흙의 특성을 파악하는데 있어서 입도분석은 가장 기본적이고 필수적인 항목이라 할 수 있다. 본 연구에서 또한, 제주도 내 분포되고 있는 세립 화산재 퇴적층 중 현무암류 15개, 조면현무암류 20개, 조면암류 9개로 총 44개 시료에 대하여 체분석 및 비중계분석에 의한 입도분석시험을 실시하였으며, 각 기반암 종류별로 구분시켜 입도분포특성을 검토하였다.

입자의 직경(mm)에 따른 중량통과백분률(%)로 입도분포곡선을 작성하였다. 입도분포곡선은 흙 속에 함유되어 있는 입자크기의 분포뿐만 아니라 분포된 흙의 유형을 알려준다.

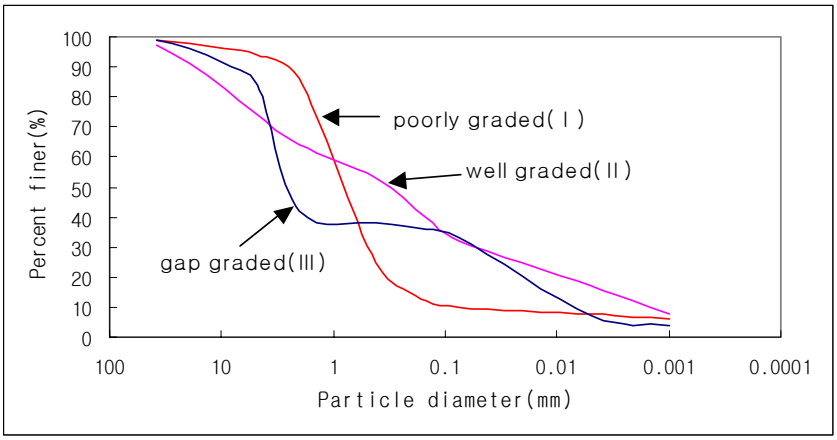


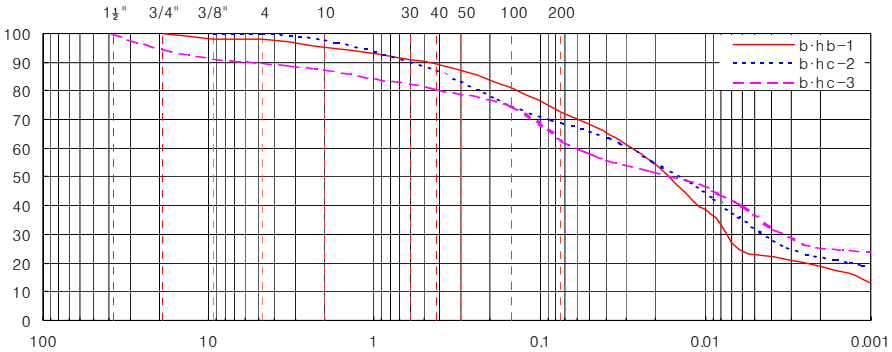
Fig. 5.2 Different types of particle-size distribution curves(Braja M. Das, 1998)

여러 형태의 입도분포곡선을 <Fig. 5.2>에 나타내었는데, 곡선Ⅰ에 나타나는 흙의 유형은 대부분의 흙입자가 같은 크기로 입도분포가 나쁜 흙(poorly graded soil)이라 부른다. 곡선Ⅱ가 나타내는 흙의 유형은 넓은 범위에 걸쳐 분포되어 있

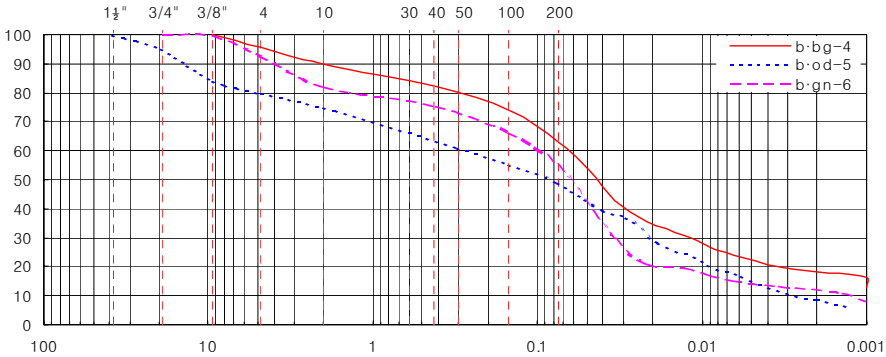
으며, 입도분포가 좋은 흙(well graded)이라고 부른다. 어떤 흙은 곡선Ⅲ에서와 같이 두 개 이상의 균일한 크기의 입도가 분포되어 있는 흙이 있다. 이런 형태의 흙들은 불균형 입도를 갖는 흙(gap graded)이라 부른다. 본 연구에서 입도분석시험 결과 얻은 값에 따라 입도분포곡선을 작성하였으며, 입자크기의 분포뿐만 아니라 분포 형태를 검토하였다.

1) 현무암류 기반암의 화산재

기반암이 현무암류로 나타나는 지역의 화산재 퇴적층에 대해 15개 시료에 대해 입도분석시험을 실시한 결과, 대부분 No.200체 통과량이 50% 이상인 세립토로 나타나고 있으며, 점토 크기에 해당되는 0.002mm 이하는 최소 9.1~25.8% 이며, 평균 함유량은 16.8%로 확인된다.

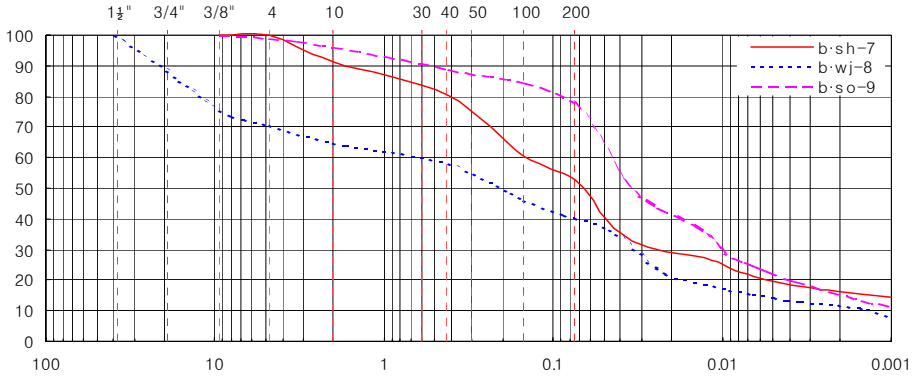


a) Grain size distribution curve of b·hb-1, b·hc-2, b·hc-3

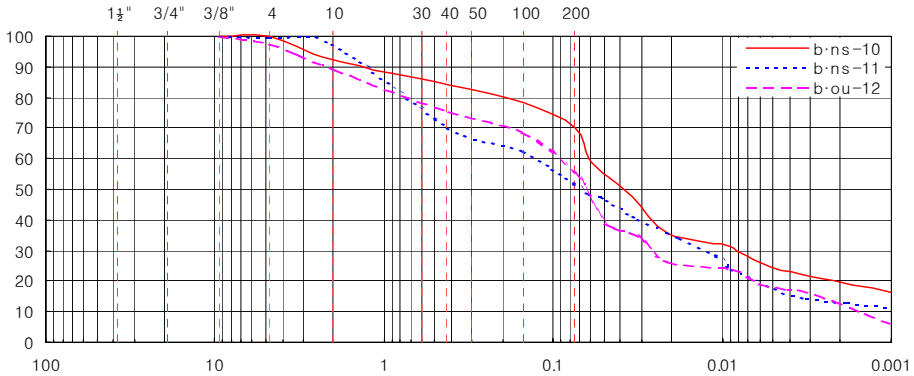


b) Grain size distribution curve of b·bg-4, b·od-5, b·gn-6

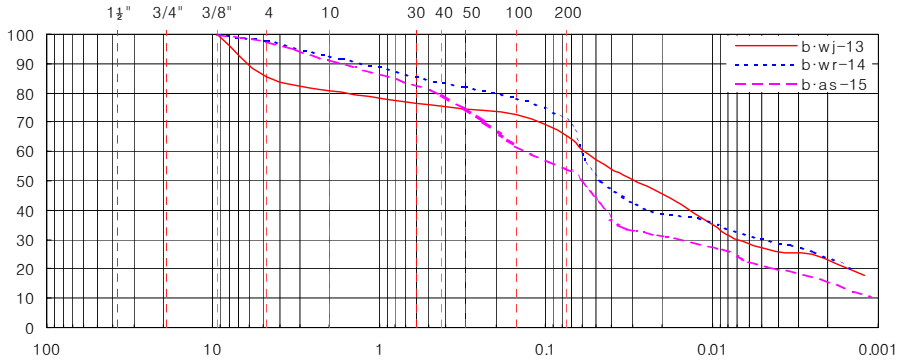
Fig. 5.3 Grain size distribution curve of basaltic volcanic ash



c) Grain size distribution curve of b·sh-7, b·wj-8, b·so-9



d) Grain size distribution curve b·ns-10, b·ns-11, b·ou-12



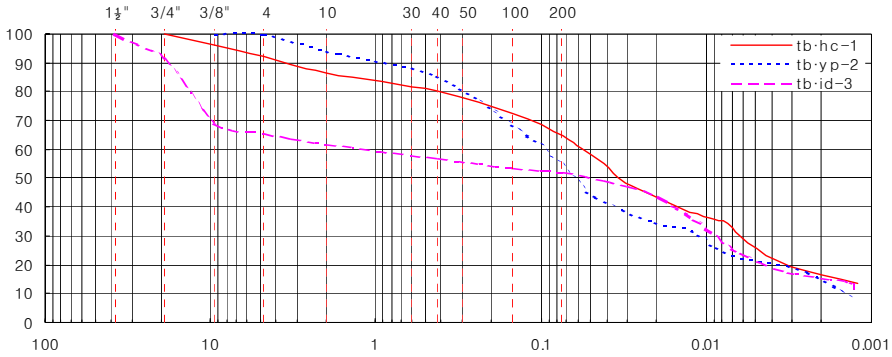
e)Grain size distribution curve of b·wj-13, b·wr-14, b·as-15

Fig. 5.3 Grain size distribution curve of basaltic volcanic ash

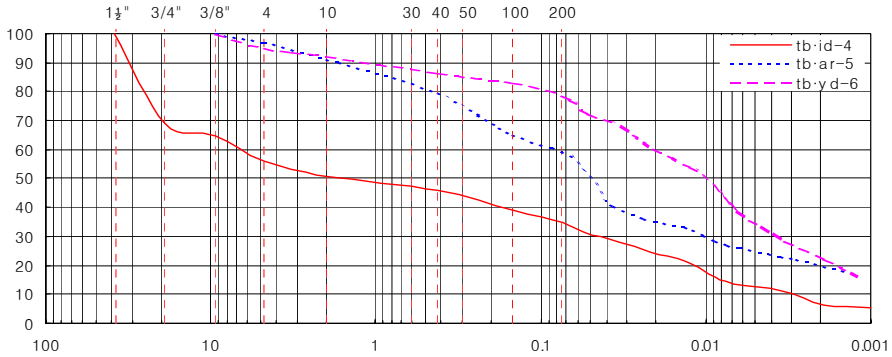
<Fig. 5.3> a의 입도분포곡선은 세립토 및 점토 함량이 매우 높게 나타나면서 입도분포가 나쁜 흙의 형태를 보여주고 있고, b~e에 나타나는 시료에서는 세립토 함량이 높으나 일부 모래질 함량이 다소 높기도 하며, 점토함량 또한 약간 감소하기도 한다. 이에 따라 입도분포곡선은 대부분 우측부에거 급격히 낮아지는 형태 또는 점차적으로 낮아지는 형태를 보인다.

2) 조면현무암류 기반암의 화산재

조면암류 기반암이 분포되는 지역에서는 총 20개 시료에 대하여 입도분석시험을 실시하였으며 입경에 따른 통과중량백분율을 나타내는 입도분포곡선은 아래 <Fig. 5.4>의 a~g 7개 그림과 같다.

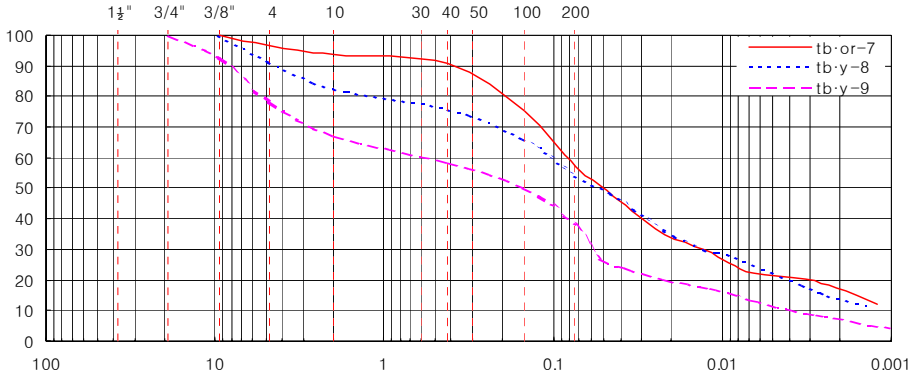


a) Grain size distribution curve of tb·hc-1, tb·yp-2, tb·id-3

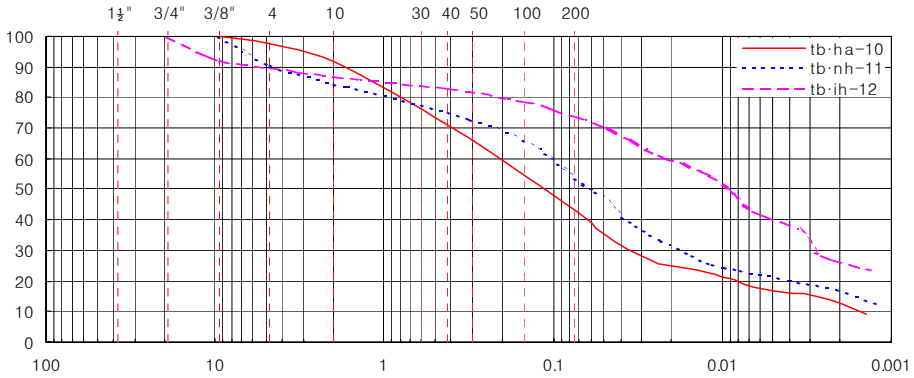


b) Grain size distribution curve of tb·id-4, tb·ar-5, tb·yd-6

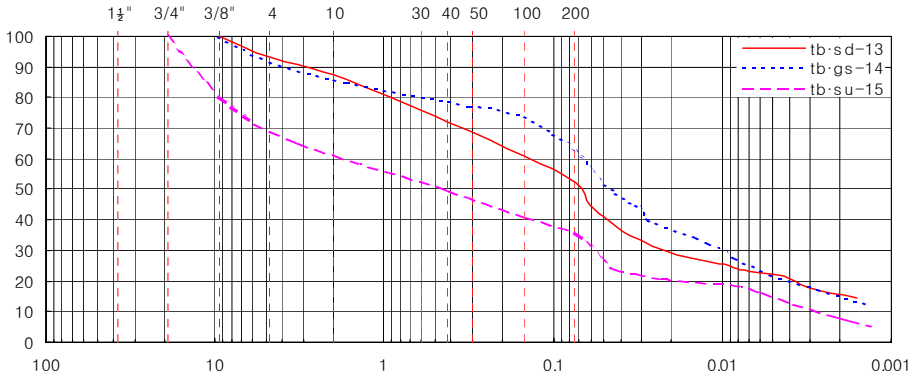
Fig. 5.4 Grain size distribution curve of trachybasaltic volcanic ash



c) Grain size distribution curve of tb·or-7, tb·y-8, tb·y-9

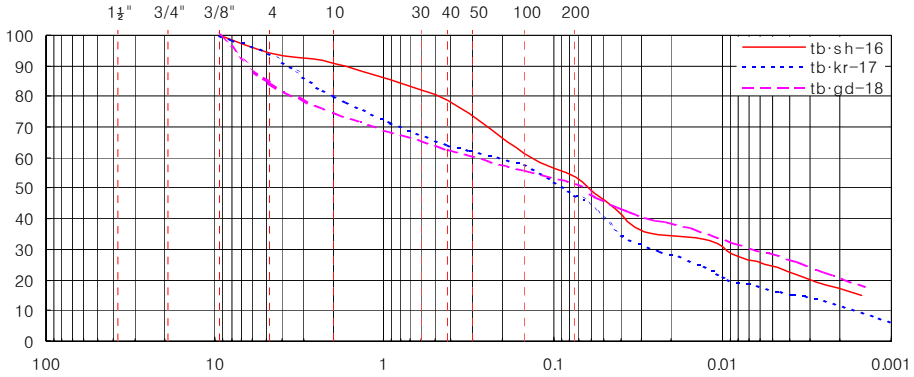


d) Grain size distribution curve of tb·ha-10, tb·nh-11, tb·ih-12

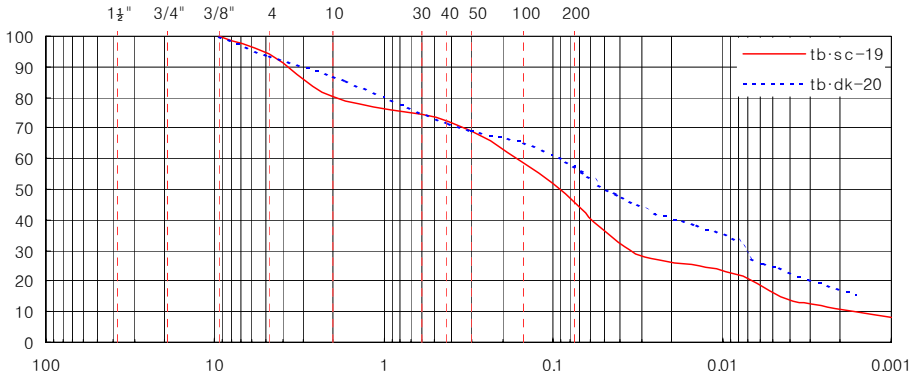


e) Grain size distribution curve of tb·sd-13, tb·gs-14, tb·su-15

Fig. 5.4 Grain size distribution curve of trachybasaltic volcanic ash



f) Grain size distribution curve of tb·sh-16, tb·kr-17, tb·gd-18



g) Grain size distribution curve of tb·sc-19, tb·dk-20

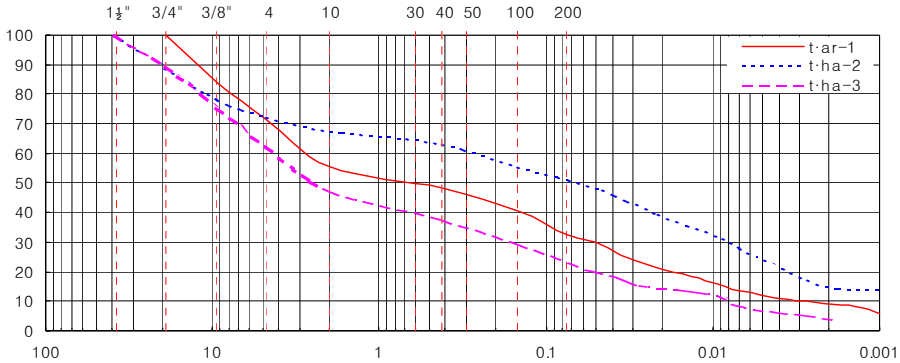
Fig. 5.4 Grain size distribution curve of trachybasaltic volcanic ash

<Fig. 5.4>에 나타나는 조면현무암류 기반암이 분포되는 지역에서 채취된 화산재의 입도분포곡선은 현무암류 화산재에 비해 곡선형태가 다양한 것으로 보여진다. 일부 세립토 함량이 매우 높음에 따라 우측부에서 급격이 낮아지는 곡선 형태를 보이기도 하고, 일부 자갈을 포함하기도 하여 좌측부에서부터 곡선이 낮아지는 형태를 보이기도 한다. 또한, d~g 그림에서는 입도분포곡선이 좌측에서부터 우측으로 굴곡이 완만한 선형을 이루고 있으면서 입도분포가 양호한(well graded) 형태를 나타내고 있다. 또한, 0.002㎜ 이하 점토크기 입자의 함량도 현무암류 화산재에 비해 낮은 것으로 확인된다.

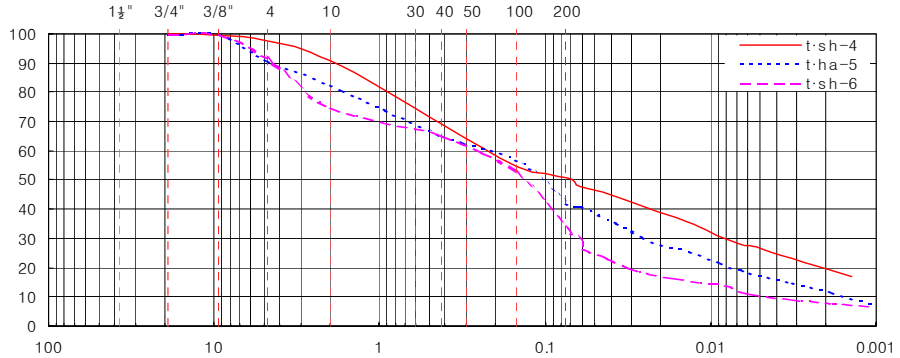
3) 조면암류 기반암의 화산재

지질도폭 상에 기반암이 조면암류로 확인되는 지역의 화산재는 일부 위치에 한하여 분포되고 있음에 따라 총 9개소에 한하여 시험되었다. 조면암류 화산재는 육안관찰에 의해서도 미세한 점토크기의 세립분이 적게 포함되고 있음을 알 수 있을 뿐만 아니라 입도분석 결과에 의해서도, No.200체 통과량이 50% 이상으로 나타나는 것은 3개 시료에 불과했다. 그러나, No.200체 통과량은 대부분 30% 이상을 나타내고 있으며, 0.002mm 이하의 크기는 4.9~19.9%로 일부 세립분이 함유되고 있음을 알 수 있다.

또한, 세립분의 함량은 적으나 입경가적곡선이 직선에 가까운 형태를 보이고 있음에 따라 입도분포가 양호한 것으로 확인된다.

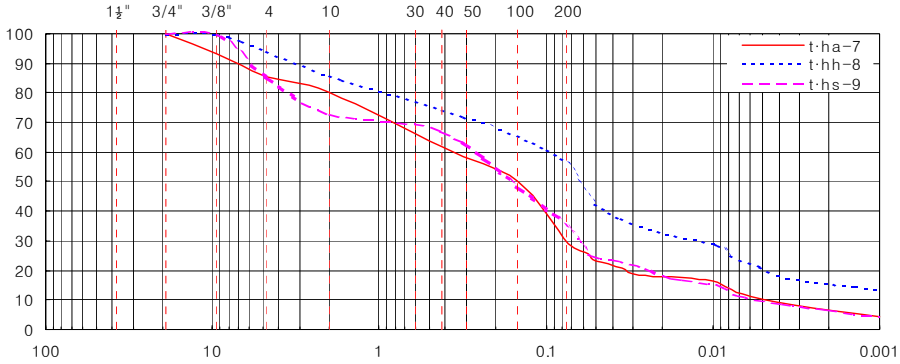


a) Grain size distribution curve of t·ar-1, t·ha-2, t·ha-3



b) Grain size distribution curve of t·sh-4, t·ha-5, t·sh-6

Fig. 5.5 Grain size distribution curve of trachy volcanic ash



c) Grain size distribution curve of t·ha-7, t·hh-8, t·hs-9

Fig. 5.5 Grain size distribution curve of trachy volcanic ash

4) No.200체 통과량 및 점토입자 크기 함량

현무암류·조면현무암류·조면암류 화산재의 입도분포곡선은 상기 <Fig. 5.3>, <Fig. 5.4>, <Fig. 5.5>와 같고, 암종류에 따른 각 시료별로 조립토-세립토 구분의 기준이 되는 No.200체 통과량 및 점토 크기의 미립자로 구분이 되는 0.002mm 이하의 크기에 대한 함유량을 정리하면 <Table 5.3>과 같다.

No.200체 통과량을 보면 현무암류 화산재의 경우 대부분 50%이상으로 세립토에 해당되고 있으며, 70%이상 갖는 시료가 30%이상 나타나고 있다. 조면암류 화산재는 No.200체 통과량의 평균값은 53.6%로 현무암류보다 약간 낮은 함유율을 보이고 있으며, 현무암류의 경우는 38.7%로 50% 이하의 낮은 값을 나타내고 있다. 입자크기에 의하면 현무암류 화산재는 점토질이 우세하고, 조면암류 화산재는 모래질이 상대적으로 우세하며, 조면암류 화산재는 이들 중간 정도에 해당되나 현무암질 화산재에 근접한 값을 나타내는 것으로 확인된다.

점토입자 크기의 0.002mm 함유량 또한 각각 17.8%, 15.3%, 10.9%로 현무암류가 가장 높고, 조면현무암류, 조면암류 순서로 나타나는데, 현무암류 및 조면현무암류는 근접한 값을 나타내나, 조면암은 다소 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 0.002mm 이하의 미립자 함량이 많으면 점성이 높고, 압축성이 크며, 활성도 또한

높을 가능성이 있으므로 공사용 재료로 이용할 때는 엄격한 품질관리가 요구된다.

입도분석 시험이 실시된 결과에 따라 입도분포곡선을 작성하였으며, <Fig. 5.2>에 나타나는 입도분포 유형을 개략적으로 검토하였다. 입도분포 유형을 판단하는 것은 정량적인 분석이기보다는 정성적인 분석으로 약간의 변화폭이 있을 수 있으며, 검토 결과는 <Table 5.3>, <Table 5.4> 및 <Table 5.5>에 나타내었다.

개략적인 형태를 보면 현무암류의 경우는 세립토가 주를 이루면서 입도분포가 나쁜 흙인 Ⅰ 형태로 나타내고 일부 입도 분포가 넓은 범위에서 형성되는 Ⅱ 형태로 나타나기도 한다. 조면현무암류는 Ⅰ 및 Ⅱ 형태가 주를 이루나 일부 불균형 입도를 갖는 Ⅲ 형태로 나타나기도 한다. 또한, 조면암류 화산재에서는 입도분포가 나쁜 Ⅰ 형태는 없으며, Ⅱ 및 Ⅲ 형태로 나타나고 있다.

Table 5.3 Liquid and plastic limit test result of basaltic volcanic ash

NO.	Sample	#200 passing rate	content of 0.02㎜ or under	shape
1	b·hb-1	72.3	19.0	Ⅰ
2	b·hc-2	69.2	24.7	Ⅰ
3	b·hc-3	70.3	25.8	Ⅰ
4	b·bg-4	62.3	18.2	Ⅰ
5	b·od-5	49.2	9.1	Ⅱ
6	b·gn-6	54.8	12.5	Ⅰ
7	b·sh-7	53.1	16.8	Ⅱ
8	b·wj-8	40.2	12.0	Ⅱ
9	b·su-9	77.9	18.7	Ⅰ
10	b·ns-10	70.4	19.9	Ⅰ
11	b·ns-11	52.1	12.7	Ⅰ
12	b·ou-12	55.4	12.8	Ⅱ
13	b·wj-13	65.4	23.4	Ⅱ
14	b·wr-14	70.7	24.2	Ⅰ
15	b·as-15	54.3	16.5	Ⅱ
	average	61.2	17.8	

Table 5.4 Liquid and plastic limit test result of trachybasaltic volcanic ash

NO.	Sample	#200 passing rate	content of 0.02㎜ or under	shape
16	tb·hc−1	64.9	15.3	Ⅱ
17	tb·yp−2	54.8	13.8	Ⅱ
18	tb·id−3	52.3	16.0	Ⅲ
19	tb·id−4	35.0	7.0	Ⅰ
20	tb·ar−5	59.6	17.8	Ⅱ
21	tb·yd−6	78.6	22.8	Ⅰ
22	tb·or−7	57.1	17.0	Ⅰ
23	tb·y−8	54.3	13.8	Ⅱ
24	tb·y−9	38.4	8.0	Ⅲ
25	tb·ha−10	42.8	13.9	Ⅱ
26	tb·nh−11	53.7	14.4	Ⅱ
27	tb·ih−12	73.9	27.0	Ⅰ
28	tb·sd−13	52.4	13.5	Ⅱ
29	tb·gs−14	62.3	16.6	Ⅰ
30	tb·su−15	35.8	8.2	Ⅱ
31	tb·sh−16	53.6	17.6	Ⅱ
32	tb·kr−17	47.6	12.0	Ⅱ
33	tb·gd−18	51.9	21.6	Ⅱ
34	tb·sc−19	45.6	10.8	Ⅱ
35	tb·dk−20	57.9	18.6	Ⅱ
	average	53.6	15.3	

Table 5.5 Liquid and plastic limit test result of trachytic volcanic ash

NO.	sample	#200 passing rate	content of 0.02㎜ or under	shape
36	t·ar−1	32.6	9.2	Ⅱ
37	t·ha−2	51.3	15.8	Ⅱ
38	t·nh−3	22.3	4.9	Ⅱ
39	t·sh−4	50.7	19.9	Ⅱ
40	t·sh−5	41.9	12.3	Ⅱ
41	t·sh−6	33.5	6.8	Ⅲ
42	t·sg−7	28.8	7.4	Ⅲ
43	t·hh−8	55.8	14.9	Ⅲ
44	t·hs−9	31.7	6.6	Ⅲ
	average	38.7	10.9	

4. 액·소성한계 특성

1) 액·소성한계

점토가 다량 포함된 세립토의 경우 점토 입자 주의에 있는 흡착수 때문에 점착성을 갖게 되고, 어느 정도의 함수비를 유지하면 부서지지 않고 재성형할 수 있다. 1900년대 초에 스웨덴 과학자 아터버어그(Atterberg)가 함수비 변화에 따른 세립토의 연경도를 설명할 수 있는 방법을 개발하였다. 매우 낮은 함수비일 때 흙은 고체덩어리와 같이 거동하고, 함수비가 매우 높으면 흙과 물은 액체와 같이 흐른다. 함수비에 따라 흙은 고체·반고체·소성·액성의 네 가지 기본상태로 나뉜다. 고체상태에서 반고체 상태로 변하는 순간의 함수비를 수축한계(shrinkage limit), 반고체 상태에서 소성상태로 변하는 순간의 함수비를 소성한계(plastic limit), 소성상태에서 액체상태로 변하는 순간의 함수비를 액성한계(liquid limit)라 하며, 이 모든 변수들을 모두 일컬어 아터버어그 한계(Atterberg limits)라 한다(Braja M. Das, 1999).

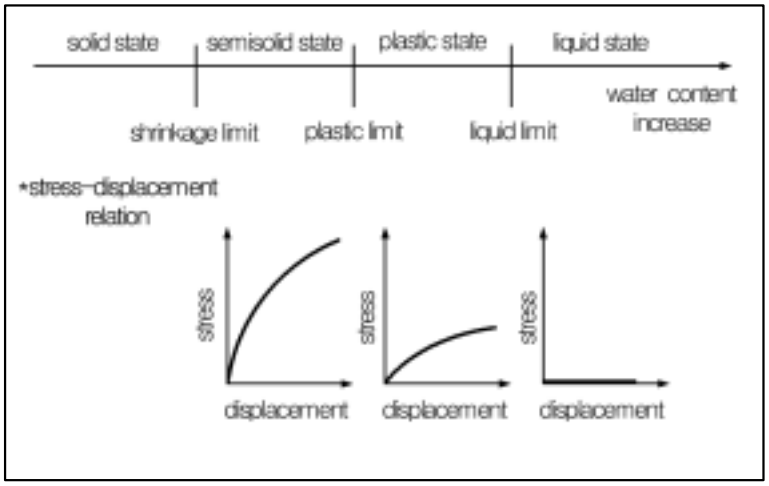


Fig. 5.6 Atterberg limits

흙의 거동은 함수비와 연관되며, 함수비가 적은 고체·반고체 상태에서는 안정적이나 소성·액성 상태에서는 함수비가 높아지면서 불안정한 상태에 놓일 수 있다. <Table 5.2>에 제시된 것처럼 흙의 안정성 평가, 도로지반의 적부판정, 압축지수 예측 및 흙의 분류, 활성도 등을 판단하는데, 흙의 소성한계 및 액성한계를 파악하

는 것이 중요하며, 본 연구에서 또한 KS F 규정에 의거 시험을 실시하였다.

시험시료는 입도분석 시험에 이용되었던 시료 44개를 대상으로 하였으며, 체분석 시험 과정에서 No.40체 통과량 시료에 대하여 실시하였다. 시험 결과는 <Table 5.6>, <Table 5.7>, <Table 5.8>에 나타내었다.

토목현장에서 이용되고 있는 흙의 통일분류(USCS)에서는 No.200체 통과량이 50% 이상과 이하에 따라 조립토와 세립토로 구분되고, 세립토의 경우 액성한계 및 소성지수에 따라 고소성-저소성 실트 및 점토 등으로 구분됨에 따라 시험결과는 흙의 분류에 쉽게 이용될 수 있도록 No.200체 통과량 및 액·소성한계, 소성지수에 관하여 정리하였다.

아래의 시험결과 표에 보여지는 것처럼 현무암류 화산재에서는 액성한계가 34.7~59.1%로 대부분 40% 이상의 높은 값을 나타내고 있으며, 조면현무암류 및 조면암류는 대부분 35~40 범위에 형성되고 있다. 액성한계의 평균값은 각각 45.4%, 41.1%, 34.7%를 나타내고, 소성지수는 18.5, 15.1, 8.6으로 현무암류>조면현무암류>조면암류 순서로 높게 나타나고 있음이 확인된다.

Table 5.6 Liquid and plastic limit test result of basaltic volcanic ash

NO.	sample	#200 passing rate	LL	PL	PI
1	b·hb-1	72.3	47.5	24.6	22.9
2	b·hc-2	69.2	59.1	35.3	23.8
3	b·hc-3	70.3	56.4	29.6	26.8
4	b·bg-4	62.3	44.3	26.0	18.3
5	b·od-5	49.2	39.6	30.1	9.5
6	b·gn-6	54.8	41.8	25.8	16.0
7	b·sh-7	53.1	40.1	21.3	18.8
8	b·wj-8	40.2	38.9	24.6	14.3
9	b·su-9	77.9	48.2	31.1	17.1
10	b·ns-10	70.4	50.8	28.0	22.8
11	b·ns-11	52.1	34.7	20.6	14.1
12	b·ou-12	55.4	43.8	27.2	16.6
13	b·wj-13	65.4	45.6	26.8	18.8
14	b·wr-14	70.7	48.8	29.2	19.6
15	b·as-15	54.3	41.6	24.0	17.6
	average	61.2	45.4	26.9	18.5

Table 5.7 Liquid and plastic limit test result of trachybasaltic volcanic ash

NO.	sample	#200 passing rate	LL	PL	PI
16	tb·hc-1	64.9	46.3	32.2	14.1
17	tb·yp-2	54.8	37.8	24.3	13.5
18	tb·id-3	52.3	38.7	23.4	15.3
19	tb·id-4	35.0	35.4	27.5	7.9
20	tb·ar-5	59.6	45.1	26.7	18.4
21	tb·yd-6	78.6	52.9	28.9	24.0
22	tb·or-7	57.1	42.2	23.1	19.1
23	tb·y-8	54.3	38.9	23.5	15.4
24	tb·y-9	38.4	32.6	25.3	7.3
25	tb·ha-10	42.8	37.8	28.4	9.4
26	tb·nh-11	53.7	40.1	29.2	10.9
27	tb·ih-12	73.9	48.4	26.8	21.6
28	tb·sd-13	52.4	37.6	22.2	15.4
29	tb·gs-14	62.3	44.1	27.0	17.1
30	tb·su-15	35.8	35.9	27.5	8.4
31	tb·sh-16	53.6	43.9	27.1	16.8
32	tb·kr-17	47.6	38.6	23.9	14.7
33	tb·gd-18	51.9	43.8	22.9	20.9
34	tb·sc-19	45.6	38.4	26.8	11.6
35	tb·dk-20	57.9	43.7	24.1	19.6
	average	**53.6**	**41.1**	**26.0**	**15.1**

Table 5.8 Liquid and plastic limit test result of trachy volcanic ash

NO.	sample	#200 passing rate	LL	PL	PI
36	t·ar-1	32.6	29.5	24.7	4.8
37	t·ha-2	51.3	40.2	27.1	13.1
38	t·nh-3	22.3	32.6	27.1	5.5
39	t·sh-4	50.7	60.9	41.9	19.0
40	t·sh-5	41.9	38.4	27.0	11.4
41	t·sh-6	33.5	28.7	20.8	7.9
42	t·sg-7	28.8	35.7	27.1	8.6
43	t·hh-8	55.8	39.1	27.3	11.8
44	t·hs-9	31.7	33.6	28.3	5.3
	average	**38.7**	**34.7**	**26.2**	**8.6**

2) 소성도표

흙의 소성지수 Ip는 흙의 액성한계와 소성한계와의 차이를 말하며 다음 식으로 구한다.

$$Ip = W_L - W_P$$

<Fig. 5.7>은 소성도표로서 액성한계와 소성지수 값을 소성도표 위에 plot하여 그 위치에 따라 흙의 성질 (압축성, 투수성 및 건조강도 등)을 추정하고, 액성한계-소성지수 그래프상에 따라 세립토 분류에도 주로 이용된다. 44개 시료의 액성한계 및 소성한계시험에 의한 측정값을 <Fig. 5.7>의 소성도표에 plot한 결과, 현무암류는 대부분 저소성점토(CL)에 해당되나, 일부 고소성점토(CH)에 해당되고 있으며, 조면현무암류는 대부분 CL이고 일부 ML(저소성실트)로, 조면암류는 대부분 CL에 해당되고 있다. 그러나, 이는 No.200체 통과량이 50% 이상 또는 이하를 구분하지 않고 시험이 실시된 전체 시료에 대한 액성한계와 소성지수 값에 한한 구분이며, 입도분석에서의 No.200체 통과량 등을 종합적으로 적용시켜 흙의 분류가 검토되어질 것이다.

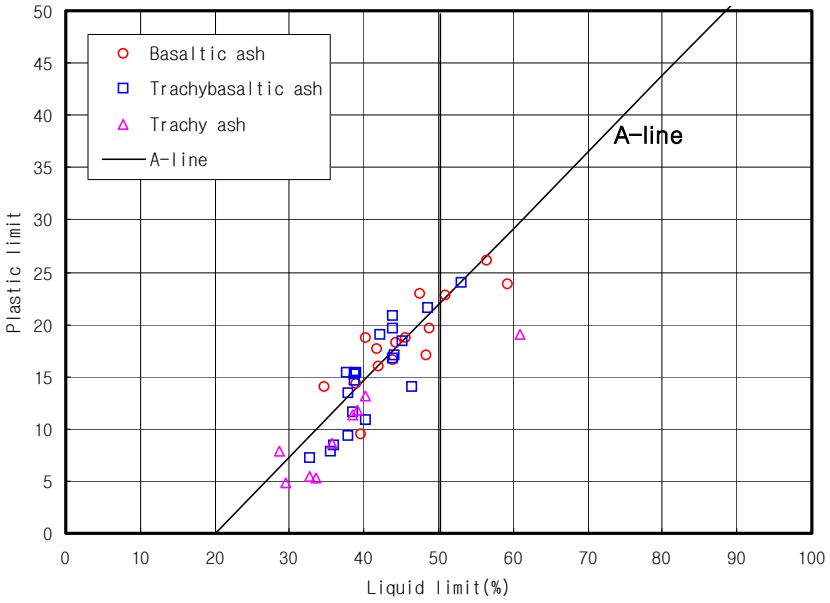


Fig. 5.7 Plasticity chart of test sample

3) 압축지수 및 활성도

또한, <Table 5.4>에 의하면 No.200체 통과량이 높을수록 즉, 점토질의 세립분이 많을수록 액성한계가 대체로 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 일반적으로 흙입자는 입경이 작아진 만큼 동일체적에 대한 표면적이 커지기 때문에 액성한계도 크게 되는데, 제주도 세립 화산재에서 또한 유사한 형태를 보이고 있다. 액성한계가 큰 흙은 압축성이 큰 지반이라고 예상할 수 있는데. Skempton(1967)은 압축지수 Cc를 액성한계(W_L)에 의하여 아래와 같이 추정할 수 있음을 제안했다.

$$Cc = 0.009(W_L - 10)$$

단, 이 관계식은 예민비가 작은 점토에 적용되며, 유기물을 함유한 흙과 W_L>100%인 흙과 Wn>W_L인 경우는 적용하지 못한다.

제주도 화산재의 압축지수는 현무암류가 0.32, 조면현무암류 0.28, 조면암류는 0.22 조면암류가 가장 낮은 값을 나타내고 있다.

Table 5.9 compression index and activity of basaltic ash

NO.	sample	content of 0.02㎜ or under	liquid limit	plastic index	compression index	activity
1	b·hb-1	19.0	47.5	22.9	0.34	1.21
2	b·hc-2	24.7	59.1	23.8	0.44	0.96
3	b·hc-3	25.8	56.4	26.8	0.42	1.04
4	b·bg-4	18.2	44.3	18.3	0.31	1.01
5	b·od-5	9.1	39.6	9.5	0.27	1.04
6	b·gn-6	12.5	41.8	16.0	0.29	1.28
7	b·sh-7	16.8	40.1	18.8	0.27	1.12
8	b·wj-8	12.0	38.9	14.3	0.26	1.19
9	b·su-9	18.7	48.2	17.1	0.34	0.91
10	b·ns-10	19.9	50.8	22.8	0.37	1.15
11	b·ns-11	12.7	34.7	14.1	0.22	1.11
12	b·ou-12	12.8	43.8	16.6	0.30	1.30
13	b·wj-13	23.4	45.6	18.8	0.32	0.80
14	b·wr-14	24.2	48.8	19.6	0.35	0.81
15	b·as-15	16.5	41.6	17.6	0.28	1.07
	average	17.8	45.4	18.5	0.32	1.07

Table 5.10 compression index and activity of trachybasaltic ash

NO.	sample	content of 0.02㎜ or under	liquid limit	plastic index	compression index	activity
16	tb·hc-1	15.3	46.3	14.1	0.33	0.92
17	tb·yp-2	13.8	37.8	13.5	0.25	0.98
18	tb·id-3	16.0	38.7	15.3	0.26	0.96
19	tb·id-4	7.0	35.4	7.9	0.23	1.13
20	tb·ar-5	17.8	45.1	18.4	0.32	1.03
21	tb·yd-6	22.8	52.9	24.0	0.39	1.05
22	tb·or-7	17.0	42.2	19.1	0.29	1.12
23	tb·y-8	13.8	38.9	15.4	0.26	1.12
24	tb·y-9	8.0	32.6	7.3	0.20	0.91
25	tb·ha-10	13.9	37.8	9.4	0.25	0.68
26	tb·nh-11	14.4	40.1	10.9	0.27	0.76
27	tb·ih-12	27.0	48.4	21.6	0.35	0.80
28	tb·sd-13	13.5	37.6	15.4	0.25	1.14
29	tb·gs-14	16.6	44.1	17.1	0.31	1.03
30	tb·su-15	8.2	35.9	8.4	0.23	1.02
31	tb·sh-16	17.6	43.9	16.8	0.31	0.95
32	tb·kr-17	12.0	38.6	14.7	0.26	1.23
33	tb·gd-18	21.6	43.8	20.9	0.30	0.97
34	tb·sc-19	10.8	38.4	11.6	0.26	1.07
35	tb·dk-20	18.6	43.7	19.6	0.30	1.05
	average	15.3	41.1	15.1	0.28	1.00

Table 5.11 compression index and activity of trachy ash

NO.	sample	content of 0.02㎜ or under	liquid limit	plastic index	compression index	activity
36	t·ar-1	9.2	29.5	4.8	0.18	0.52
37	t·ha-2	15.8	40.2	13.1	0.27	0.83
38	t·nh-3	4.9	32.6	5.5	0.20	1.12
39	t·sh-4	19.9	60.9	19.0	0.46	0.96
40	t·sh-5	12.3	38.4	11.4	0.26	0.93
41	t·sh-6	6.8	28.7	7.9	0.17	1.16
42	t·sg-7	7.4	35.7	8.6	0.23	1.16
43	t·hh-8	14.9	39.1	11.8	0.26	0.79
44	t·hs-9	6.6	33.6	5.3	0.21	0.80
	average	10.9	34.7	8.6	0.22	0.91

또한, 흙의 소성은 점토입자를 둘러싸고 있는 흡착수와 관련이 있으며, 흙 속에 있는 점토 광물의 종류에 그 함유량은 점토의 액성한계와 소성한계에 영향을 미친다. Skempton(1953)에 의하면 흙의 소성지수는 점토중량으로 0.002㎜보다 작은 입자의 함량(%)에 정비례하고, 다른 점토 종류의 PI와 점토함량과의 관계는 각각 별도의 선형관계를 이룬다고 하였으며, PI와 0.002㎜보다 입자가 작은 점토의 함량(%) 사이의 관계를 나타내는 직선의 기울기를 활성도(Activity)라 정의하였다.

$$A = \frac{PI}{\text{점토입자의 중량백분율}}$$

활성도는 점토의 팽창 가능성을 나타내는 지표로 사용되므로, 본 연구가 실시된 화산재에 대해 입도분석 및 액·소성한계 시험결과에 의해 활성도를 추정하였으며, 그 수치는 <Table 5.5>에 기재하였고, 점토크기 입자 이하의 함유량에 따른 소성지수에 대한 그래프는 <Fig. 5.8>과 같다.

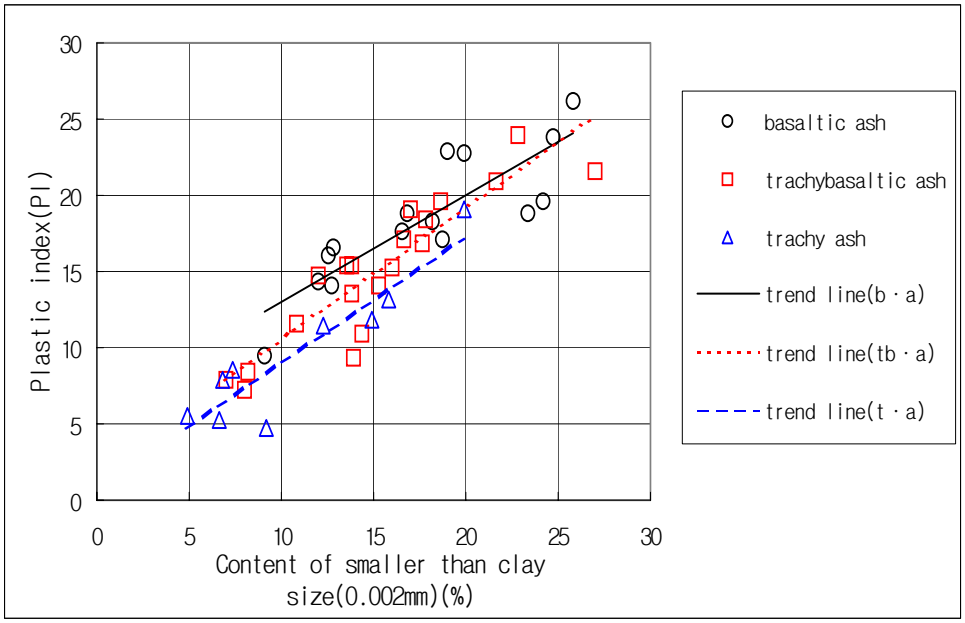


Fig. 5.8 Relationship between plasticity index and clay-size contained percent for volcanic ash

활성도의 분포범위를 보면 현무암류 화산재에서는 0.80~1.30, 현무암류는 0.68~1.23, 조면암류는 0.52~1.16으로 나타나며, 최대값이 1.30으로 비교적 팽창성이 낮은 흙으로 확인되었다. 화산암류에 대한 활성도의 평균값은 각각 1.07, 1.00, 0.91로 현무암류 화산재가 가장 높고 조면암류 화산재가 가장 낮게 나타나는 형태를 보이고 있으나, 큰 차이는 없는 것으로 나타나는데 이는 압축지수와 유사한 형태를 보이고 있다.

따라서 입도 및 액·소성한계에 의한 추정 값이긴 하나 제주도에 분포되는 화산재는 점토질의 세립분이 다량 함유되더라도 압축지수 및 활성도가 비교적 낮은 안정적인 흙으로 판단된다.

5. 입도분석 및 액·소성한계시험에 의한 흙의 분류

흙이 갖는 물리적 성질 중 입도분석 및 액·소성한계 특성은 가장 기본적인 것이며, <Table 5.2>에 제시된 바에 의하면 이들 특성이 흙을 분류하는데 적용된다고 하였다. 본 연구에서 세립 화산재에 대한 입도분석 및 액·소성한계 시험을 중점적으로 실시하였고, 이들 결과에 따른 흙의 분류를 파악하였다.

1) 입자 크기에 따른 분류

흙은 입도에 따라 크게 조립토와 세립토로 나눈다. 조립토는 표력, 자갈 및 모래로 이루어진 흙을 말하며 일반적으로 점착력이 없는 비점성토이고, 세립토는 실트 및 점토로 이루어진 흙을 말하며 일반적으로 점착력이 커서 점성토라 불린다.

흙을 구성하는 흙입자 크기의 범위는 광범위하다. 일반적으로 흙은 흙 속에 주축을 이루는 입자의 크기에 따라 자갈, 모래 또는 점토로 불린다. 입자의 크기에 따라 흙을 구분하기 위하여 여러 기관들이 입도 분류법을 개발하였으며, <Table 5.12>에는 매사추세츠 공과대학(MIT), 미국 농림부(USDA), 미국도로협회(AASHTO) 및 통일분류법(USCS)을 제시하였다.

Table 5.12 Particle-size classifications(Braja M. Das, 1998)

Name of organization	Diameter(mm)			
	gravel	sand	silt	clay
MIT	>2	2~0.06	0.06~0.002	<0.002
USDA	>2	2~0.05	0.05~0.002	<0.002
AASHTO	76.2~2	2~0.075	0.075~0.002	<0.002
USCS	76.2~4.75	4.75~0.075	Fines (i.e., silts and clays) <0.075	

화산쇄설물 중 지질학에서 구분되는 화산재는 2mm 이하의 것을 말하며 <Table

5.12>에 따르면 화산재는 점토·실트·모래에 해당되고 있음을 알 수 있다.

2) 입도 및 액·소성한계에 의한 분류

입자크기에 의한 흙 분류법은 소성을 고려하고 있지 않기 때문에 여러 가지 매우 중요한 흙의 성질을 전적으로 설명할 수 없다. 따라서, 이 방법은 대부분의 공학적 목적으로 사용되기에는 부적합하다. 현재 더 진보된 두 가지의 흙 분류법이 토질 공학자들에 의해 빈번히 사용되고 있다. 두 가지 방법 모두 입도분포와 아터버그 한계(Atterberg limit)를 고려하였다. 이들 방법은 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials)분류법과 통일분류법(USCS, Unified Soil Classification System)이다. 세계 도처에서는 통일분류법이 널리 사용되고 있는데, AASHTO 분류법은 주정부 도로국에서 사용되며, 일반적으로 지반공학자들은 통일분류법을 선호한다(Braja M. Das, 1998). AASHTO 분류법은 1929년에 미국 공립 도로국 분류법(Public Road Administration Classification System)으로 개발되었다. 이 분류법은 여러 차례 수정을 거쳐 1945년 연방 도로 연구위원회의 노상토 및 기층 형태 도로용 재료 분류위원회에 의하여 현재의 분류법이 제시되었다.

흙이 대부분 도로공사 시의 포장 및 성토재료로 주로 이용되고 있으며, 본 연구의 목적은 흙이 건설토목현장에 적합하게 이용되기 위한 지표를 제시하는데 있음에 따라, AASHTO 분류법 및 USCS 분류법에 의한 화산재의 분류 특성을 분석하였다.

① 통일분류법(USCS)

흙의 분류는 이들 입자 크기에 의한 1차적인 구분 이외에, 소성도 및 각 입도의 분포 중량에 따라 세분되어지며, 화산재가 이들 분류기준 중 어떤 항목에 주로 해당되는지를 검토하였다.

<Table 5.13>은 통일분류법을 제시하고 있으며, 이에 따른 화산재의 분류 결과는 <Table 5.14>에 나타내었다.

Table 5.13 Unified Soil Classification System, U.S.C.S

Classification		Criteria		Group symbol
Coarse grained soils F < 50%	Gravelly soil	passing No.200 sieve<5%	Cu≥4 and 1<Cg<3	GW
		passing No.200 sieve<5%	not meeting both criteria for GW	GP
		passing No.200 sieve>12%	PI<4 or plot below A-line	GM
		passing No.200 sieve>12%	PI>7 and plot above A-line	GC
		passing No.200 sieve>12%	fall in "CL-ML" marked area	GC-GM
		5≤passing No.200 sieve≤12%	meets the criteria for GW and GM	GW-GM
		5≤passing No.200 sieve≤12%	meets the criteria for GW and GC	GW-GC
		5≤passing No.200 sieve≤12%	meets the criteria for GP and GM	GP-GM
		5≤passing No.200 sieve≤12%	meets the criteria for GP and GC	GP-GC
	Sandy soil	passing No.200 sieve<5%	Cu≥6 and 1<Cg<3	SW
		passing No.200 sieve<5%	not meeting both criteria for SW	SP
		passing No.200 sieve>12%	PI<4 or plot below A-line	SM
		passing No.200 sieve>12%	PI>7 and plot above A-line	SC
		passing No.200 sieve>12%	fall in "CL-ML" marked area	SC-SM
		5≤passing No.200 sieve≤12% plot below A-line	meets the criteria for SW and SM	SW-SM
		5≤passing No.200 sieve≤12% plot above A-line	meets the criteria for SW and SC	SW-SC
		5≤passing No.200 sieve≤12% plot below A-line	meets the criteria for SP and SM	SP-SM
		5≤passing No.200 sieve≤12% plot above A-line	meets the criteria for SP and SC	SP-SC
Inorganic Fine grained soils F≥50%	LL<50%	PI<4 or plot below A-line		ML
		PI>7 and plot above A-line		CL
		4≤PI≤7, fall in "CL-ML" marked area of plasticity chart		CL-ML
	LL≥50 %	plot below A-line of plasticity chart		MH
		plot above A-line of plasticity chart		CH
Organic Fine grained soils F≥50%	LL<50%	$\frac{\text{LL- oven dried}}{\text{LL- ot dried}} < 0.75$		OL
	LL≥50 %			OH

※ F; passing through the No. 200 sieve(%)

Table 5.14 USCS of volcanic ash

NO.	sample	#200 passing and classification of soil		USCS
1	b·hb-1	72.3	F.S	CL
2	b·hc-2	69.2	F.S	MH
3	b·hc-3	70.3.	F.S	CH
4	b·bg-4	62.3	F.S	CL
5	b·od-5	49.2	C.S	SC
6	b·gn-6	54.8	F.S	CL
7	b·sh-7	53.1	F.S	CL
8	b·wj-8	40.2	C.S	SC
9	b·su-9	77.9	F.S	ML
10	b·ns-10	70.4	F.S	CH
11	b·ns-11	52.1	F.S	CL
12	b·ou-12	55.4	F.S	ML
13	b·wj-13	65.4	F.S	CL
14	b·wr-14	70.7	F.S	ML
15	b·as-15	54.3	F.S	CL
16	tb·hc-1	64.9	F.S	ML
17	tb·yp-2	54.8	F.S	CL
18	tb·id-3	52.3	F.S	CL
19	tb·id-4	35.0	C.S	SM
20	tb·ar-5	59.6	F.S	CL
21	tb·yd-6	78.6	F.S	CH
22	tb·or-7	57.1	F.S	CL
23	tb·y-8	54.3	F.S	CL
24	tb·y-9	38.4	C.S	SM
25	tb·ha-10	42.8	C.S	SC
26	tb·nh-11	53.7	F.S	ML
27	tb·ih-12	73.9	F.S	CL
28	tb·sd-13	52.4	F.S	CL
29	tb·gs-14	62.3	F.S	ML
30	tb·su-15	35.8	C.S	SM
31	tb·sh-16	53.6	F.S	ML
32	tb·kr-17	47.6	C.S	SC
33	tb·gd-18	51.9	F.S	CL
34	tb·sc-19	45.6	C.S	SC
35	tb·dk-20	57.9	F.S	CL

Table 5.14 Continued

NO.	sample	#200 passing and classification of soil		USCS
36	t·ar-1	32.6	C.S	SM
37	t·ha-2	51.3	F.S	ML
38	t·nh-3	22.3	C.S	SM
39	t·sh-4	50.7	F.S	MH
40	t·sh-5	41.9	C.S	SC
41	t·sh-6	33.5	C.S	SM
42	t·sg-7	28.8	C.S	SM
43	t·hh-8	55.8	F.S	ML
44	t·hs-9	31.7	C.S	SM

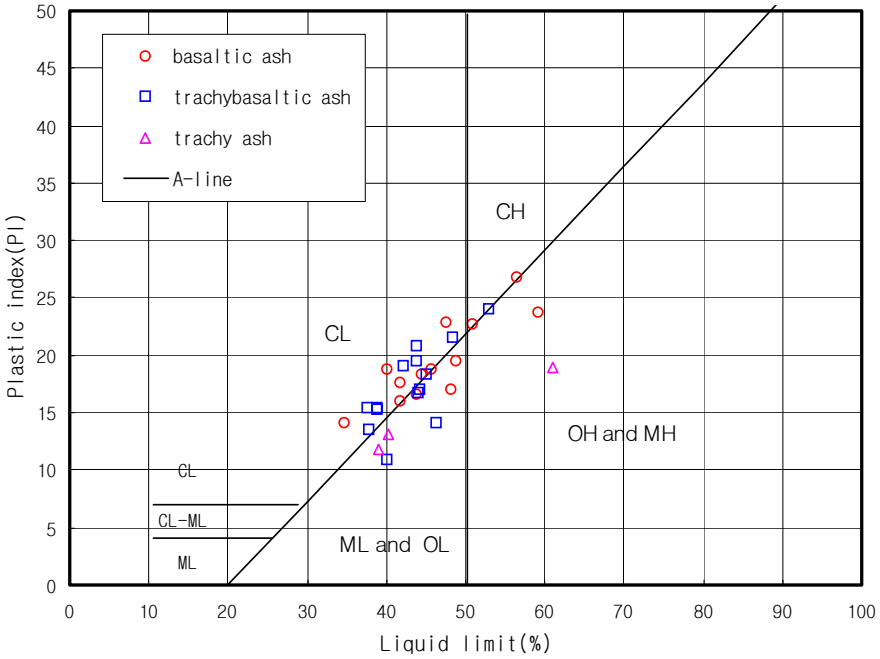


Fig. 5.9 Classification of volcanic ash by plastic chart

Table 5.15 distribution rate of volcanic ash by USCS

division	USCS		the number of article	distribution rate(%)	
				clay/silt/sand	F.S/C.S
Basaltic (total 15)	F.S	CL	7	60.0	86.7
		CH	2		
		ML	3	26.7	
		MH	1		
	C.S	SC	2	13.3	13.3
		SM	–		
Trachybasaltic (total 20)	F.S	CL	9	50.0	70.0
		CH	1		
		ML	4	20.0	
		MH	–		
	C.S	SC	3	30.0	30.0
		SM	3		
Trachy (total 9)	F.S	CL	–	–	33.3
		CH	–		
		ML	2	33.3	
		MH	1		
	C.S	SC	1	66.7	66.7
		SM	5		

※ F.S; fine grained soils, C.S; Coarse grained soils

통일분류법의 구분 기준은 No.200체 통과량 50%를 기준으로 하여 이상이면 조립토, 이하이면 세립토로 나뉘는데, <Fig. 5.7>의 소성도표에서는 조립토-세립토 구분없이 액성한계와 소성지수 값에 의한 44개 전체 시료에 대하여 Plot한 것이며, <Fig. 5.9>에서는 통일분류법에 의한 구분을 위하여 No.200체 통과량 50% 이상되는 세립토에 한하여 소성도표에 나타내었다. 이에 따라 세립토 중 점토·실트, 저소성·고소성 흙이 구분되어진다.

<Table 5.15> 및 <Fig. 5.9>에 보여지는 바와 같이, 세립 화산재의 통일분류법에 의한 구분으로는 현무암류의 경우 60가 점토에 해당되고 점토 및 실트질을 나타내는 세립토는 86.7%나 된다. 또한, 모래질의 조립토는 13.3%로 낮은 수치를 나타내고 있으며 점토 함유량이 많은 점토질모래(SC)에 해당되고 있다.

조면현무암류의 화산재는 점토가 50%로 현무암류에 비해서는 약간 낮은 수치이나 점토·실트의 세립토가 70%로 대부분을 차지하고 있고, 조립토로 나타나는 경우

는 점토질모래 또는 실트질모래가 비슷한 비율을 나타내고 있다. 또한, 조면암류의 화산재는 점토에 해당되는 시료는 없으며, 실트에 해당되는 세립토가 33.3%를 차지하고 있다. 세립토 비율은 현무암류 및 조면현무암류와 큰 차이를 나타내는데, 대부분 조면암류 기반암 지역에 나타나는 화산재는 대부분 실트질모래(SM) 형태로 나타나고 있다.

조면암류는 대부분 입도 및 액성한계, 소성지수 면에서 양호한 흙으로 나타나나, 현무암류는 2개 시료가 불량한 흙에 해당되는 CH(고소성점토)로 나타나고 있으며, 조면현무암류는 또한 MH(고소성실트)로 나타나고 있음을 유의해야 한다.

조립토와 세립토의 구분이 No.200체 통과량 50%를 기준으로 하고, 세립토에 해당되는 흙은 소성도표에서 세분되어지는데, 고소성-저소성은 액성한계 50%를 기준으로 구분되어짐에 따라 본 연구에서 입도분석 및 액·소성한계시험에서 이들 기준선상에 근접한 값들이 다수 분포되고 있음에 따라, 뚜렷한 구분은 어려우나, <Table 5.15>에 나타나는 전반적인 Pattern은 확인할 수 있다.

건설토목 현장의 각종 시방서 및 설계기준에서 흙의 지반정수는 입도 및 액·소성한계에 의한 흙의 분류에 따라 토질별로 각각 다른 기준값을 제시하고 있으며, 설계 및 시공 시 당 현장 내에서 시험이 실시되지 못할 경우 이들 일반적인 기준값을 참조하는 경우가 많으므로 제주도 내에 분포되는 화산재의 통일분류법에 의한 분류 특성을 파악해두는 것이 중요하다.

② AASHTO분류법

현재 사용되고 있는 AASHTO 분류법은 <Table 5.16>에 나타내었다. 이 방법에 의하면, A-1부터 A-7까지 7개의 주요 그룹으로 세분되는데, A-1, A-2, A-3 그룹하의 흙은 No.200체 통과량이 35% 이하인 사질토이고, No.200체 통과량이 35% 이상인 흙은 대부분이 실트와 점토 형태의 흙으로 A-4, A-5, A-6, A-7 그룹에 속한다. 입자 크기에 따른 구분 기준은 75mm체를 통과하고 2mm체에 남는 흙을 자갈이라 하고, 2mm체를 통과하고 0.075mm(No.200체)체에 남는 흙을 모래라 하며, 0.075mm체를 통과하는 흙은 실트와 점토로 구분한다. 또한, 세립토의 경우 소성지수가 10 이하일 때 실트란 용어를 사용하며, 소성지수가 11이상인 세립토에 대해서는 점토란 용어를 사용한다.

Table 5.16 Classification of Highway Subgrade Materials

General classification	Granular materials (35% or less of total sample passing No.200)						
Group classification	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Sieve analysis percent passing							
No.10	50 max.						
No.40	30 max.	50 max.	51 min.				
No.200	15 max.	25 max.	10 max.	35 max.	35 max.	35 max.	35 max.
Characteristics of fraction passing No.4							
Liquid limit				40 max.	41 min.	40 max.	41 min.
Plasticity index	6 max.		NP	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.
Usual type of significant constituent materials	Stone fragments, gravel, and sand		Fine sand	Silty or clayey gravel and sand			
General subgrade rating	Excellent to good						

General classification	Silt-clay materials (more than 35% of total sample passing No.200)			
Group classification	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5[a] A-7-6[b]
Sieve analysis percent passing				
No.10				
No.40				
No.200	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Characteristics of fraction passing No.4				
Liquid limit	40 max.	41 min.	40 max.	41 min.
Plasticity index	10 max.	10 max.	11 min.	11 min.
Usual type of significant constituent materials	Silty soils		Clayey soils	
General subgrade rating	Fair to poor			

[a] For A-7-5, PI ≤ LL − 30, [b] For A-7-6, PI > LL − 30, NP; Non-Plastic

Table 5.17 AASHTO classification of volcanic ash

NO.	sample name	No.200 passing rate	LL	PI	AASHTO
1	b·hb-1	72.3	47.5	22.9	A-7-6
2	b·hc-2	69.2	59.1	23.8	A-7-5
3	b·hc-3	70.3	56.4	26.2	A-7-5
4	b·bg-4	62.3	44.3	18.3	A-7-6
5	b·od-5	49.2	39.6	9.5	A-4
6	b·gn-6	54.8	41.8	16.0	A-7-6
7	b·sh-7	53.1	40.1	18.8	A-7-6
8	b·wj-8	40.2	38.9	14.3	A-6
9	b·su-9	77.9	48.2	17.1	A-7-5
10	b·ns-10	70.4	50.8	22.8	A-7-6
11	b·ns-11	52.1	34.7	14.1	A-6
12	b·ou-12	55.4	43.8	16.6	A-7-6
13	b·wj-13	65.4	45.6	18.8	A-7-6
14	b·wr-14	70.7	48.8	19.6	A-7-6
15	b·as-15	54.3	41.6	17.6	A-7-6
16	tb·hc-1	64.9	46.3	14.1	A-7-5
17	tb·yp-2	54.8	37.8	13.5	A-6
18	tb·id-3	52.3	38.7	15.3	A-6
19	tb·id-4	35.0	35.4	7.9	A-2-4
20	tb·ar-5	59.6	45.1	18.4	A-7-6
21	tb·yd-6	78.6	52.9	24.0	A-7-6
22	tb·or-7	57.1	42.2	19.1	A-7-6
23	tb·y-8	54.3	38.9	15.4	A-6
24	tb·y-9	38.4	32.6	7.3	A-4
25	tb·ha-10	42.8	37.8	9.4	A-4
26	tb·nh-11	53.7	40.1	10.9	A-7-6
27	tb·ih-12	73.9	48.4	21.6	A-7-6
28	tb·sd-13	52.4	37.6	15.4	A-6
29	tb·gs-14	62.3	44.1	17.1	A-7-6
30	tb·su-15	35.8	35.9	8.4	A-2-4
31	tb·sh-16	53.6	43.9	16.8	A-7-6
32	tb·kr-17	47.6	38.6	14.7	A-6
33	tb·gd-18	51.9	43.8	20.9	A-7-6
34	tb·sc-19	45.6	38.4	11.6	A-6
35	tb·dk-20	57.9	43.7	19.6	A-7-6

Table 5.17 Continued.

NO.	sample	No.200 passing rate	LL	PI	AASHTO
36	t·ar-1	32.6	29.5	4.8	A-2-4
37	t·ha-2	51.3	40.2	13.1	A-7
38	t·nh-3	22.3	32.6	5.5	A-2-4
39	t·sh-4	50.7	60.9	19.0	A-7
40	t·sh-5	41.9	38.4	11.4	A-6
41	t·sh-6	33.5	28.7	7.9	A-2-4
42	t·sg-7	28.8	35.7	8.6	A-2-4
43	t·hh-8	55.8	39.1	11.8	A-6
44	t·hs-9	31.7	33.6	5.3	A-2-4

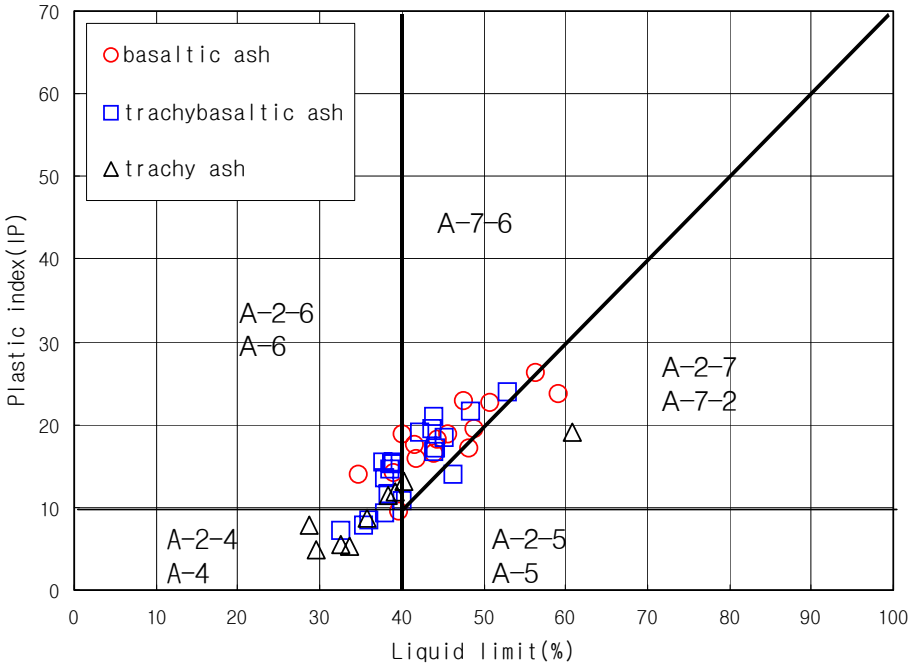


Fig. 5.10 Classification chart of volcanic ash for AASHTO

Table 5.18 Distribution rate of volcanic ash for AASHTO

division	the road soil grade	AASHTO	the number of article	distribution rate(%)	
				sand/silt/clay	grade
Basaltic ash (total 15)	excellent ~ good	A-2-4	-	-	-
	fair ~ poor	A-4	1	20.0	100.0
		A-6	2		
		A-7-5	3	80.0	
		A-7-6	9		
Trachybasaltic ash (total 20)	excellent ~ good	A-2-4	2	10.0	10.0
	fair ~ poor	A-4	2	40.0	90.0
		A-6	6		
		A-7-5	1	50.0	
		A-7-6	9		
Trachy ash (total 9)	excellent ~ good	A-2-4	5	55.6	55.6
	fair ~ poor	A-4	-	22.2	44.4
		A-6	2		
		A-7-5	1	22.2	
		A-7-6	1		

통일분류법과 유사한 형태로 No.200체 통과량·액성한계·소성지수를 이용하여 AASHTO 분류법에 세립 화산재를 분류한 결과는 <Table 5.17>과 같고, 화산재의 분포비율 및 도식화한 그림은 <Table 5.18>과 <Fig. 5.10>에 나타내었다.

현무암류 화산재의 경우 노상토 등급이 '매우 우수~우수'에 해당되는 시료는 없으며, 20%에 해당되는 시료가 실트질 흙으로 '양호'한 정도에 해당되고 있다. 조면현무암류는 극소수인 10%에 한하여 '우수'한 등급에 해당되며, 90%에 해당되는 대부분의 흙이 '양호~불량'의 등급으로 나타나고, 실트와 점토질 흙의 비슷한 비율을 이루고 있다. 조면암류의 화산재는 '우수'한 등급에 해당되는 시료가 55.6%로 50% 이상을 차지하고, '양호~불량'한 등급에 44.4%가 해당되는데, 이들 중 실트와 점토질 흙이 동일한 비율로 분포되고 있다. 현무암류 및 조면현무암류는 유사한 형태를 갖는 것으로 확인되고, 대부분 실트-점토질 흙으로 일

반적 노상토 등급에서는 ‘양호~불량’에 해당되나 대부분 불량한 정도인 것으로 판단된다. 이에 반해 조면암류는 모래질의 조립토가 50% 이상을 차지하면서 ‘우수’한 등급에 해당되는 것으로 도로 노상토 재료로 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

6. 화산재의 다짐특성

세립 화산재층에 대하여 물성시험이 실시된 일부 지역에 대하여 다짐특성을 검토하였다. 시료명은 근접지역에서 채취된 것이므로 물성시험이 실시된 시료명과 동일한 것을 적용시켰다. 화산암류에 따른 특성을 파악하기 위하여 현무암류·조면현무암류·조면암류에 대하여 육안관찰에 의한 대표적인 시료를 채취하여 시험되었다. 기반암 종류 별로 각각 4개, 4개, 2개의 총 10개 시료에 대하여 시험되었고, 다짐시험 시 확인된 최적함수비(O.M.C) 및 최대건조밀도(rd_{max})는 <Table 5.19>에 정리하여 나타내었고, 그래프는 <Fig. 5.11>에 구분시켜 나타내었다.

Table 5.19 compaction property of volcanic ash

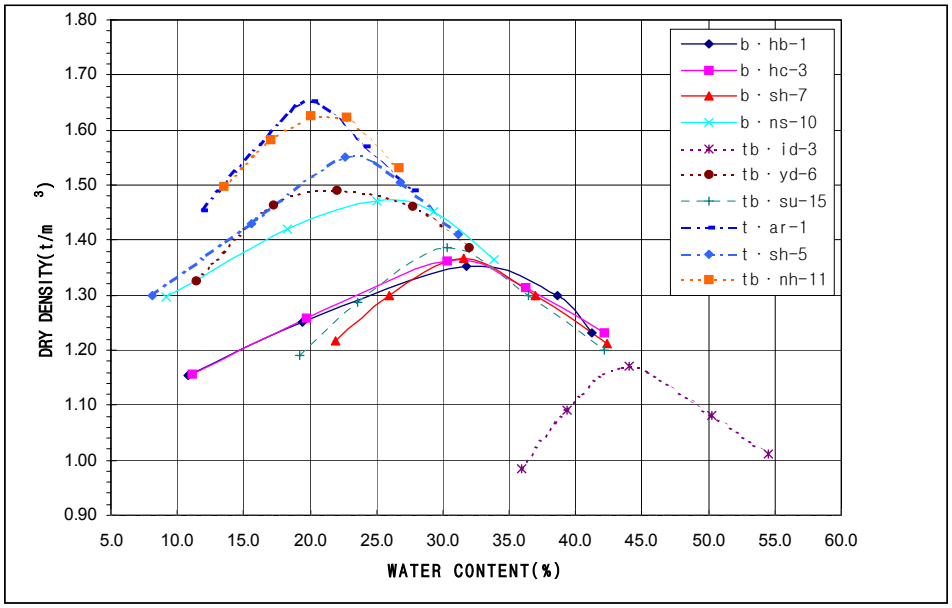
division	sample	O.M.C(%)		rd_{max}(t/㎡)	
		value	average	value	average
basaltic ash	b·hb-1	31.0	29.7	1.352	1.389
	b·hc-3	31.2		1.363	
	b·sh-7	31.6		1.368	
	b·ns-10	25.1		1.472	
trachybasalic ash	tb·id-3	44.0	29.6	1.172	1.419
	tb·yd-6	23.0		1.490	
	tb·nh-11	21.2		1.628	
	tb·su-15	30.3		1.387	
trachy ash	t·ar-1	20.0	21.5	1.652	1.603
	t·sh-5	23.0		1.554	

다짐시험 결과, 현무암류 기반암이 분포되는 지역에 대한 화산재 시료의 최대건조밀도는 1.352~1.472t/㎡, 최적함수비는 25.1~31.6% 범위를 나타내면서 비교적 유사한 값을 갖고 있고, 조면암류 화산재에 해당되는 시료의 최대건조밀도 1.172~1.628t/㎡, 최적함수비는 21.2~44%로 비교적 값 차이가 크게 나타나고 있다. 또한, 조면암류 화산재는 2개 시료에 한하여 시험되어 대푯값으로 판단하기

어려우나 최대건조밀도 1.554~1.652t/㎥로 높은 값을 나타내고, 최적함수비 20~23%로 낮은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

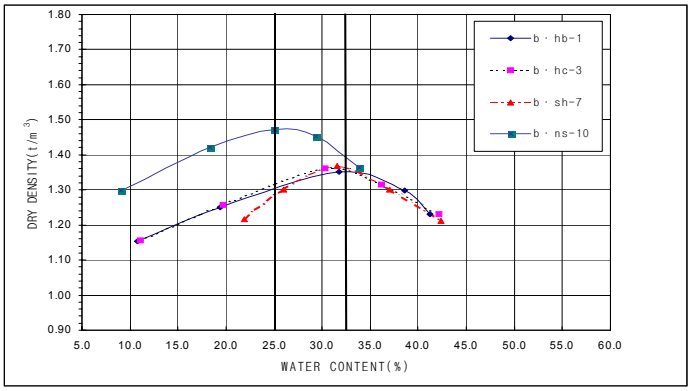
다짐시험에 따른 최적함수비와 최대건조밀도를 표시한 그래프는 <Fig. 5.11>에 나타내었는데, a는 시험이 실시된 전체 시료에 대한 것을, b~d에는 기반암 종류별로 구분시켜 그 특성을 검토하였다.

제주도 화산재 퇴적층 시료에 대한 다짐시험 결과, 그래프의 개략적인 형태는 다짐반경이 넓게 나타나는 것과, 약간 뾰족한 형태를 보이면서 다짐반경이 좁은 것으로 구분되고 있고, 최적함수비 값 또한 다소 차이를 보이고 있음에 따라 그래프 표시 범위가 약간 넓게 형성되고 있다. 'tb·id-3' 시료에 한하여 최대건조밀도가 매우 낮고, 최적함수비가 매우 높으면서 급격하게 차이를 보이고 있는데, 그 외에는 대부분 최적함수비 30%-최대건조밀도 1.38t/㎥ 부근과, 최적함수비 23%-최대건조밀도 1.6t/㎥ 부근에 그래프가 형성되고 있는 것이 확인되며, 제주도 화산재가 갖는 일반적인 값으로 예측할 수 있다.

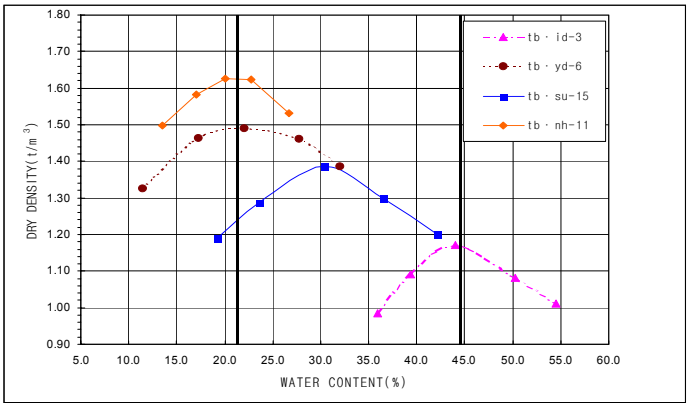


a) Compaction curve of tested all sample

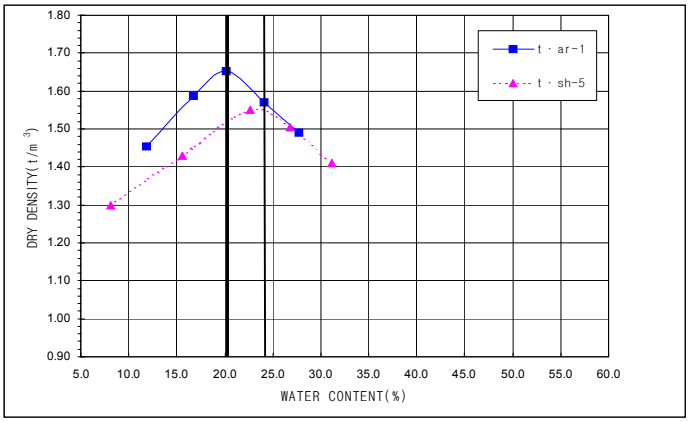
Fig. 5.11 Compaction curve of volcanic ash



b) Compaction curve of basaltic ash sample



c) Compaction curve of trachybasaltic ash sample



d) Compaction curve of trachy ash sample

Fig. 5.11 Compaction curve of volcanic ash

<Fig. 5.11>의 b~d 그래프를 보면, 현무암류의 화산재에 대한 다짐곡선은 곡선 반경이 넓고, 대체로 유사한 형태를 보이고 있으며, 조면현무암류 화산재에서는 다짐곡선 반경이 약간 뾰족한 형태를 보이기도 하나 반경이 넓은 형태를 보이기도 할 뿐만아니라 그래프 형성 범위가 비교적 다양하게 나타나고 있다. 이와 달리 조면암류 화산재에서는 다짐곡선 반경이 좁고 뾰족한 형태를 보이고 있다.

대체적으로 현무암류 화산재는 다짐곡선 반경이 넓고, 조면암류 화산재는 뾰족한 형태를 보이고 있어 상대적으로 조면암류 화산재가 다짐성이 양호한 흙으로 판단된다.

전체 시험시료가 10개에 불과에 각 기반암 종류별로 화산재 특성을 규정짓기는 어려우나, 제주도에 분포되는 화산재의 전반적인 다짐특성을 예측할 수는 있을 것으로 판단된다.

7. 점착력 및 내부마찰각

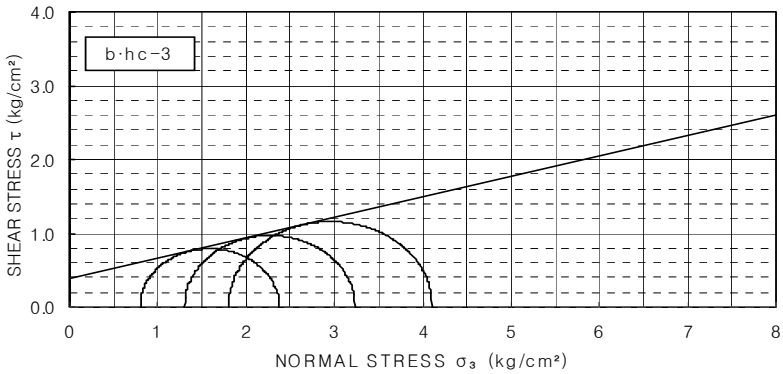
제주도 내에 분포하면서 토층을 이루고 있는 화산재층은 표층부의 경우 노출 단면이 미약하고 두께가 얇으며, 대부분 풀·나무 뿌리들이 포함되거나 파쇄 암편이 Block 형태로 혼재되는 경우가 많아 흐트러지지 않은 자연시료 채취가 어렵다. 이런 이유로 인해 도로 및 건축공사 설계 시에도 당 현장 내에 분포되는 화산재층의 C값 ϕ값 등을 산정하여 적용시키기 보다는 일반적인 구조물 기초설계기준 및 각 종 시방서 상에 제시된 토사층의 일반적인 값을 적용시키는 경우가 많다. 그러나, 제주도 내에 분포되고 있는 화산재 퇴적층은 육지부의 침식·풍화·퇴적된 층과는 상이하므로 화산재의 고유값을 파악하는 것이 중요하다.

사질토에서는 점착력이 거의 없음에 따라 불교란시료 채취가 어렵고, 점성토로 확인되는 지역을 중심으로 하여 Piston sampler에 의한 불교란시료(Undisturbed Sample)시료를 채취하였고, 점착력 및 내부마찰각을 구하기 위하여 삼축압축시험(CU)을 실시하였다. 점성토로 구분되어지더라도 N값이 4이하로 매우 연약한 지반에서 불교란시료 채취가 가능하나 본 제주도 화산재 퇴적층의 경우 매우 연약한 형태로 나타나는 경우는 거의 없으며, 약간 견고하더라도 수차례의 시행착오를 거쳐 시료를 채취하였고, 5개 시료에 한하여 시험되었다.

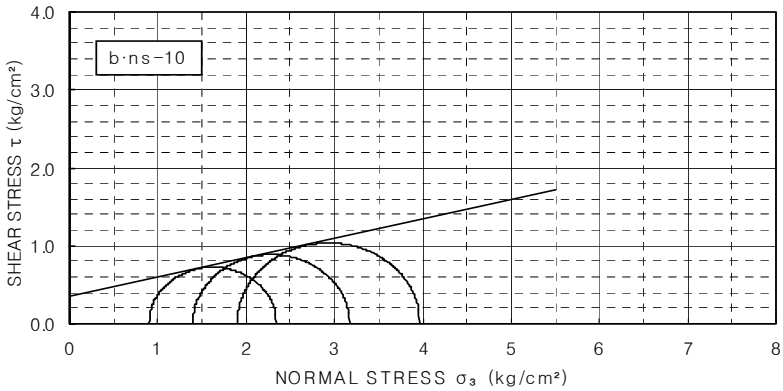
시료채취가 어려움에 따라 입도분석 및 액·소성한계 등의 물성시험이 실시되었던 동일 시료에 대해서 불교란시료가 채취된 것은 아니며, 삼축압축시험을 위한 불교란시료 채취지점과 접한 곳에 위치한 시료명을 그대로 적용시켰다.

Table 5.20 Cohesion intercept and angle of internal friction

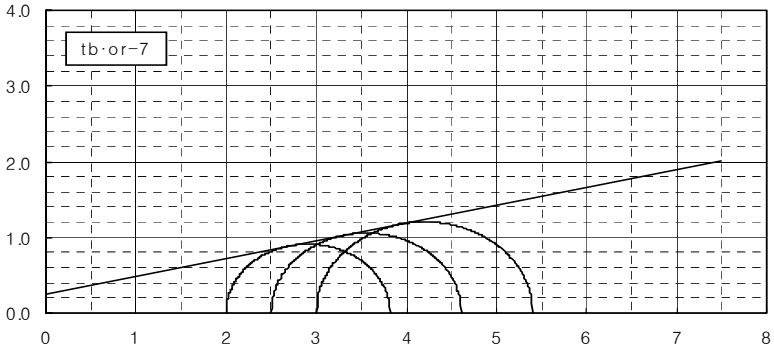
sample	LL (%)	PI	C (kg/㎠))	ϕ (°)
b·hc-3	57.6	27.8	0.38	15.5
b·ns-10	52.6	24.7	0.35	13.9
tb·or-7	48.4	23.6	0.25	13.3
tb-ih-12	43.2	20.1	0.16	16.7
t·ha-2	42.3	18.1	0.10	19.7



a) Mohr's circle and failure envelope of sample 'b·hc-3'

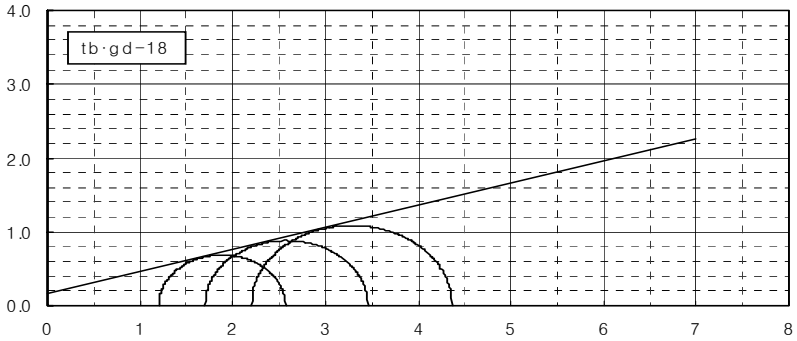


b) Mohr's circle and failure envelope of sample 'b·ns-10'

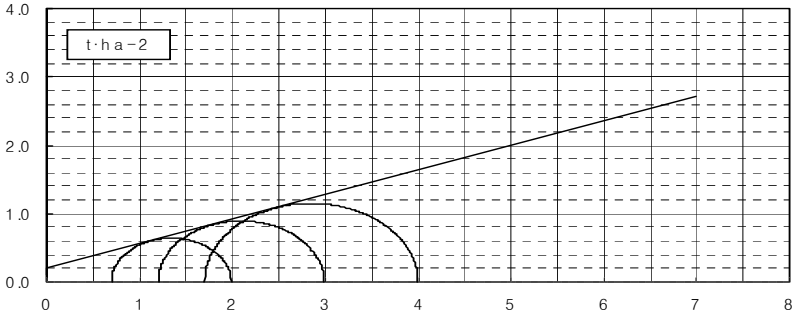


c) Mohr's circle and failure envelope of sample 'tb·or-7'

Fig. 5.12 Mohr's circle and failure envelope of volcanic ash



d) Mohr's circle and failure envelope of sample 'tb·gd-18'



e) Mohr's circle and failure envelope of sample 't·ha-2'

Fig. 5.12 Mohr's circle and failure envelope of volcanic ash

삼축압축시험(CU test) 전응력 방법에 의해 구해진 값을 도식화한 Mohr-Coulomb 파괴포락선은 <Fig. 5.12>와 같고, 이에 따른 점착력 및 내부마찰각은 <Table 5.21>에 정리하였다.

화산재 시료에 대한 삼축압축시험 결과, 점착력은 0.10~0.38㎏/㎠, 내부마찰각은 13.3~19.7° 로 현무암류에서는 점착력은 높고, 내부마찰각이 낮으며, 조면암류에서는 점착력이 낮고 내부마찰각이 다소 높은 경향을 보이고 있으나, 시험된 시료가 5개 밖에 되지 않음에 따라 화산암 종류에 따른 점착력 및 내부마찰각 특성을 규정짓기는 어렵다. <Fig. 5.12>에 보여지는 것처럼, 각 기반암 종류에 따른 화사재 퇴적층 시료별로 그래프는 특이한 형태를 보이지 않고 유사한 형태로 확인되고

있으며, 시험결과 나타나는 내부마찰각 및 점착력이 약간의 차이를 보일 뿐이다.

그러나, 시험결과를 전체적으로 볼 때 화산재의 점착력은 0.10~0.38㎏/㎠으로 <Table 5.21>에 의하면 건설토목현장에서 일반적으로 점토층에서 적용하도록 제시하고 있는 점착력 1.5t/㎡(0.15㎏/㎠)보다 전반적으로 높은 값을 나타내고 있다. 또한, 내부마찰각은 화산재층에 대한 시험값이 13.3~19.7° 로 점토층 구간에서는 지반정수 적용 시 내부마찰각을 0으로 무시되어지기도 하는데 본 시험에 따르면 대부분 15° 이상의 값을 나타내고 있다.

Table 5.21 Roughly soil strength parameters

종 류		재료의 상태	단위체적 중량 (t/m^3)	내 부 마찰각 φ(도)	점착력 C (t/m^2)	분류기호 (통일분류)
자연 지반	모래	밀실한 것 또는 입도가 좋은 것	2.0	35	0	SW,SP
		밀실하지 않은 것 또는 입도가 나쁜것	1.8	30	0	
	사질토	밀실한 것	1.9	30	3이하	SM,SC
		밀실하지 않은 것	1.7	25	0	
	점성토	굳은 것(손가락으로 강하게 눌러 조금 들어감)	1.8	25	5이하	ML,CL
		약간 무른 것(손가락 중간정도의 힘으로 들어감)	1.7	20	3이하	
		무른 것(손가락이 쉽게 들어감)	1.7	20	1.5이하	
	점토 및 실트	굳은 것(손가락으로 강하게 눌러 조금 들어감)	1.7	20	5이하	CH,MH,ML
		약간 무른 것(손가락 중간정도의 힘으로 들어감)	1.6	15	3이하	
		무른 것(손가락이 쉽게 들어감)	1.4	10	1.5이하	

시험시료가 5개로 극소수이므로 이들을 화산재의 대푯값으로 적용시키기는 다소 무리가 따르지만, 시험값에서는 일반적으로 제시되고 있는 점토층의 기준값보다 다소 높게 나타나고 있으며, 시험이 실시된 시료는 상대적으로 연약한 구간에서 실시되었음에 따라 그 이상의 값을 가질 수 있을 것으로 판단된다. 화산재 퇴적층은

기반암의 오랜 시간 경과에 따라 형성된 풍화잔류토와는 달리 화산분출 시 형성된 것으로 자체 포함된 화학성분 물질에 의해 고결화되어가는 과정에 있으므로 입도 및 액·소성한계에 따라 점토층으로 구분되어지더라도 점착력이 다소 높은 것으로 예측된다. 또한, 풍화잔류토에 비해 표면이 거칠고, 면모의 마모가 덜된 상태이며, 분출 시 퇴적된 그 자체의 형태를 유지하고 있음에 따라 내부마찰각도 상대적으로 높을 것으로 예상되어지는데, 이들에 관해서는 풍화정도와 점토광물의 포함 정도에 연관시켜 추가적인 연구가 필요하다.

Ⅵ. 결 론

제주도는 화산원지형이 많이 보전되어 있는 신생화산도로, 흙 또한 대부분 화산분출 시 형성된 화산재 퇴적층이다. 일반적으로 건설토목 현장에서 적용되고 있는 흙의 지반정수는 및 특성은 풍화·침식·퇴적에 의해 형성된 흙을 기준으로 제시된 값들임에 따라 제주도 내에 분포되는 화산재에 대한 실내시험을 실시하여 건설토목 현장에서 유용하게 이용될 수 있는 물리·역학적 특성을 제시하고자 하였으며, 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 표층을 이루는 화산재 퇴적층의 노출단면을 확인한 결과, 상단부 수십cm 정도는 약간 부식·풍화되고 유기물을 포함하면서 암흑색을 띠고, 이하부에는 황색 내지 암황색을 띠고 있는데, 일반적으로 상부는 세립의 균질한 흙을 구성하고 있으나, 하부는 파쇄 암편을 포함하면서 모래·자갈이 주를 이루거나, 다량 포함되는 형태로 분포되고 있다.

2. 화산재 퇴적층의 화학성분은 SiO_2는 45.94~62.23%, Na_2O+K_2O는 2.74~7.32% 범위를 나타내고 있는데, 위치 및 풍화정도에 따라 차이를 보일 것으로 예상된다.

3. 입도분석 결과, 현무암류는 세립토가 주를 이루는 입도분포가 나쁜 흙, 조면현무암류는 분포가 양호하거나 나쁜 흙으로 나타나고, 조면암류는 입도분포가 양호하거나, 불량한 입도 형태를 보여주고 있으며, No.200체 통과량의 평균값은 각각 61.2%, 53.6%, 38.7%로 현무암류>조면현무암류>조면암류 순서로 높게 나타나는데, 조면암류 화산재의 차이가 큰 것으로 확인된다.

4. 액성한계는 현무암류가 34.7~59.1%, 조면현무암류 32.6~52.9%, 조면암류는 2.87~40.2% 범위로 현무암류 및 조면현무암류에서는 액성한계가 50% 이상을 나타내는 불량한 흙이 다량 포함되고 있다. 현무암류, 조면현무암류, 조면암류 순서로 액성한계 및 소성지수 또한 높게 나타나고 있으나, 소성한계는 큰 차이 없이

유사한 값을 보이고 있다.

5. 액성한계와 소성지수 및 점토입자 크기의 함량에 따라 압축지수 및 활성도를 개략적으로 산정하면 현무암류가 가장 높고, 조면암류가 가장 낮은 값을 나타내고 있으며, 활성도는 1.30이하로 제주도 화산재는 점토함량이 높더라도 활성도가 낮은 상대적으로 안정적인 흙으로 확인된다.

6. 입도분석 및 액·소성한계 시험결과에 따라 흙을 분류하면, 통일분류법에서는 세립토로 구분되는 시료가 현무암류 86.7%, 조면현무암류는 70.0%, 조면암류는 33.3%로 나타나며, 현무암류에서는 대부분 'CL', 조면암류는 'SM'에 해당되며, 조면현무암류는 'CL, ML, SC, SM' 등으로 비교적 다양한 형태를 보이고 있다. 또한, AASHTO 분류법에 따르면 현무암류는 80%, 조면현무암류는 50%가 점토질로 노상토 등급의 불량한 흙에 해당되고 있으며, 조면암류는 55.6%가 모래질의 조립토로 노상토 등급으로는 우수한 것으로 분류되었다.

7. 다짐시험 결과, 최적함수비는 조면암류에서 급격하게 낮은 값을 가지며, 최대건조밀도는 1.389t/㎥, 1.419t/㎥, 1.603t/㎥ 정도로 현무암류 및 조면현무암류는 비교적 낮고, 조면암류는 높은 값을 나타낸다. 현무암류 화산재의 다짐곡선은 반경이 넓고, 조면현무암류는 다짐반경이 약간 뾰족한 형태를 보이나 시험 시료마다 최대건조밀도의 범위가 넓게 나타나고 있다. 조면암류는 다짐반경이 좁고, 최대건조밀도가 높을 뿐만 아니라 최적함수비가 낮아 다른 두 종류에 비해 다짐성이 양호한 흙으로 판단된다.

8. 점착력 및 내부마찰각은 각각 0.10~0.38㎏/㎠, 13.3~19.7° 로 현무암류의 경우 점착력이 높고, 내부마찰각이 작으며, 조면암류는 점착력이 낮고 내부마찰각이 큰 것으로 나타나나, 5개 시료에 한한 결과임에 따라 암 종류에 따른 화산재의 특성을 규정짓기 어렵다. 그러나, 풍화잔류토의 점토층에서 일반적으로 제시되고 있는 값에 비해 화산재층이 다소 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

건설교통부, 1996, 구조물 기초 설계기준, p1~16.

김성균 외 7, 1994, 지질공학원론. p89~106.

김영묵 외 1, 1989, 토질 및 기초연습. p1~17.

서창민, 2001, 대형 직접전단시험기를 이용한 송이의 강도특성에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, p34~44.

이용일, 1994, 퇴적암석학, p284~296.

정남수, 1999, 응용지질학 입문, p144~147.

정창희, 1993. 지질학개론. p39~47.

쇄설성 퇴적암, 2000, 박병권·정대교, p133~145.

송시태, 2000, 제주도 암괴상 아아용암류의 분포 및 암질에 관한 연구, 박사학위논문, p1~4.

민원, 2001, 도로공학, p93~98.

오재화, 조중제, 김상규, 1979, 제주도산 송이의 공학적 특성, 대한토목학회 논문집 제27권, 제6호.

원종관, 1975, 제주도의 형성과 화산활동에 관한 연구, 건국대학교 이학논총 제1집.

이문원, 1994, 제주도 형성사와 지질구조, 대한지하수환경학회, 전략광물자원연구센터 공동 학술심포지엄 논문집.

이송 외 6, 2001, 실용 토질 시험법 및 해설.

제주도, 1998, 제주·애월도폭 지질보고서, p1~10.

제주도, 2000, 서귀포·하효리도폭 지질보고서, p1~3.

제주도, 2000, 모슬포·한림도폭 지질보고서, p1~6.

최대호, 1999, 토질시험. p53~p114.

한국자원연구소, 2000, 제주(백아도, 진남포) 지질도폭 설명서. p11~18.

Braja M. Das, 1999, Principles of geotechnical engineering, 제3판,

p79~101.

Robert Decker, 1995, 火山. p102~116.

Robert F. Craig, 1982, Soil mechanics. p1~24.

Sparks, R.S.J., 1976, Grain size variations in ignimbrites and implictions for the transport of pyroclastic flows. Sedimentology 23, p147~188.

감사의 글

여러 모로 너무도 부족한 제가 본 논문을 완성하기까지 많은 인내와 안타까운 마음으로 지켜봐주셨던 많은 분들께 감사의 글을 올립니다.

우선 학문의 길로 인도하여 주시고, 본 논문이 완성되는 마지막 순간까지 가장 큰 가르침과 아낌없는 지도를 해주신 남정만 교수님께 머리 숙여 진심으로 감사드립니다. 아울러, 심사를 맡아주신 박상렬 교수님과 김성근 교수님을 비롯하여 학기동안 많은 가르침을 주신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 이병걸 교수님, 김상진 교수님, 고호성 교수님께 감사드립니다.

그리고, 실험 분야에 능력이 모자란 저에게 여러 가지 경험과 지식을 안겨준 조영웅씨를 포함한 강보규, 조성환, 김광일 군에게도 고마움을 전합니다.

관심과 애정 어린 마음으로 충고를 아끼지 않으시는 박원배 박사님과, 보이는 것 이상으로 도움을 주시고, 제주도 지질 연구에 기여하시면서 저 같이 미흡한 사람들이 좋은 자료를 볼 수 있도록 힘써주시는 고기원 박사님과 박기화 박사님께 꼭 감사드리고 싶습니다.

바쁜 회사일정에도 불구하고 제가 학문의 길을 병행하여 갈 수 있도록 배려해주시고 아낌없는 격려로 마지막 순간까지 힘을 넣어주신 김봉상 사장님께 깊은 감사를 드리며, 본 논문이 완성될 수 있도록 가장 가까운 곳에서 크고 작은 일들을 챙겨주신 고택균 차장님을 비롯하여 진산 직원 동료들에게도 감사의 마음을 전합니다.

여전히 모자람이 많은 것 같은 논문을 내 놓기가 조심스럽지만, 학업을 마치고 논문이 완성되기까지 몸 걱정 마음 걱정으로 편할 날 없이 하루하루를 보내셨을 아버지·어머니와 오빠, 언니, 형부, 동생 미정이 미옥이에게 미안함과 고마움을 모아 작은 결실의 기쁨을 나누고 싶습니다.