



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

제주도 물영아리오름 습지의 분포범위 및 심도 파악을 위한 3차원 전기비저항탐사



부 경 대 학 교 대 학 원

환 경 탐 사 공 학 과

차 우 성

공 학 석 사 학 위 논 문

제주도 물영아리오름 습지의 분포범위 및 심도 파악을 위한 3차원 전기비저항탐사



2009 년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

환 경 탐 사 공 학 과

차 우 성

차우성의 공학석사 학위논문을 인준함

2009년 2월



주	심	공학박사	왕 수 균
위	원	공학박사	공 영 세
위	원	공학박사	김 희 준



목 차

List of Figures	iii
List of Tables	vi
Abstract	vii
1. 서 론	1
2. 제주도의 지형과 지질 개요	4
2.1 지형구분과 한라산의 정의	4
2.2 지질개요	5
2.3 오름과 분석구	10
3. 물영아리오름 개관	12
3.1 물영아리오름 습지	12
3.1.1 주요 특징 및 현황	12
3.1.2 습지 정의 및 기능	13
3.1.3 물영아리 오름의 습지 분류	14
3.2 물영아리오름의 지형 특성	18
3.2.1 지형분석	18
3.2.2 경사도 및 경사방향분석	21
3.2.3 수문환경	23
4. 3차원 전기비저항 이론	24
5. 3차원 전기비저항 역산	27
6. 전기비저항 탐사	31
6.1 탐사 방법	31
6.2 탐사 결과의 해석 방법	34
6.3 축선별 해석	36
6.4 3차원 역산결과	40
6.5 습지 영향구역 검토	45
7. 결 론	47

8. 참고문헌	48
요약	53
감사의 글	54



List of Figures

Fig. 1.1. The southern side-view of the Mulyeongarioreum wetland.	3
Fig. 1.2. The inner side-view of the southern ridge of the Mulyeongarioreum wetland	3
Fig. 1.3. The foreground of the Mulyeongarioreum wetland	3
Fig. 2.1. Geologic map of Jeju Island (ADC, 1971). □ indicates the Mulyeongarioreum	5
Fig. 2.2. Geologic map of Jeju Island (Park et al., 2000). □ indicates the Mulyeongarioreum	6
Fig. 2.3. Geologic map of Jeju Island (Yoon et al., 2006). □ indicates the Mulyeongarioreum	7
Fig. 2.4. Strombolian eruption (Stromboli Volcano, Photo glossary of volcano terms, USGS)	11
Fig. 2.5. Cinder cone deposit (Jeju Island, photograph by S. Yoon, in august, 1986)	11
Fig. 3.1. 3-D Satellite feature of the Mulyeongarioreum wetland (I)	19
Fig. 3.2. 3-D Satellite feature of the Mulyeongarioreum wetland (II)	19
Fig. 3.3. 3-D Satellite feature of the Mulyeongarioreum wetland (III)	19
Fig. 3.4. Mountain system around the Mulyeongarioreum wetland	20
Fig. 3.5. Topography feature of the Mulyeongarioreum wetland	20
Fig. 3.6. Dip angles and directions of the outer and inner slopes of the cinder cones and topographic slopes around the Mulyeongarioreum wetland	21
Fig. 3.7. Dip angles and directions of the outer and inner slopes of the Mulyeongarioreum wetland	22
Fig. 3.8. Water system around the Mulyeongarioreum wetland	23

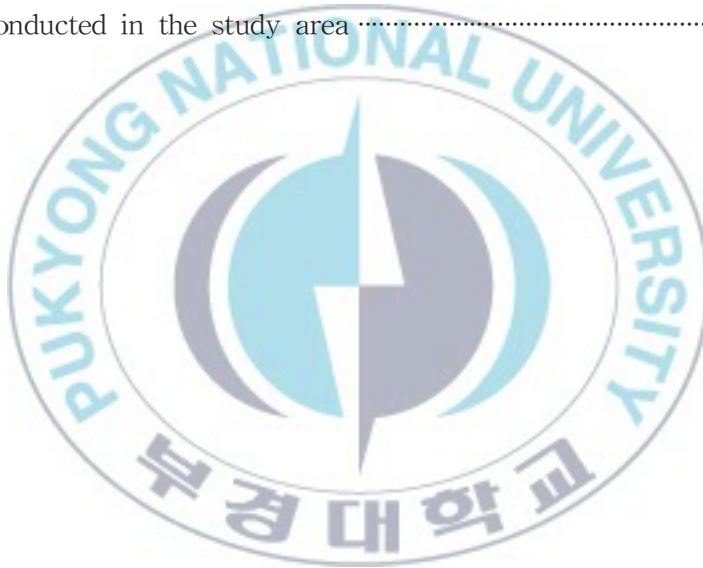
Fig. 4.1. A 3-D mesh assembled from (a) hexahedral elements and (b) tetrahedral elements. Hexahedral elements is assembled from five tetrahedron	26
Fig. 6.1. Four resistivity surveys lines arranged in the study area	32
Fig. 6.2. Surface topography around the Mulyeongarioreum wetland	32
Fig. 6.3. Method of plotting dipole-dipole in a pseud-section	33
Fig. 6.4. Flow chart for resistivity inversion	35
Fig. 6.5. Resistivity section reconstructed from dipole-dipole data measured along line RE-01	36
Fig. 6.6. Resistivity section reconstructed from dipole-dipole data measured along line RE-02	37
Fig. 6.7. Resistivity section reconstructed from dipole-dipole data measured along line RE-03	38
Fig. 6.8. Resistivity section reconstructed from dipole-dipole data measured along line RE-04	39
Fig. 6.9. A 3-D inversion zone of the Mulyeongarioreum wetland	40
Fig. 6.10. Variation of Rms misfits as a function of iteration	41
Fig. 6.11. 3-D inversion results obtained from dipole-dipole data measured in the Mulyeongarioreum wetland	42
Fig. 6.12. 3-D inversion results along lines RE-01~RE-04 in the Mulyeongarioreum wetland	43
Fig. 6.13. A 3-D resistivity image of the inner part with the survey lines in the Mulyeongarioreum wetland	44
Fig. 6.14. Outside resistivity images of the inner volume in the Mulyeongarioreum wetland	44
Fig. 6.15. A wetland influence zone deduced from the 2-D inversion in the Mulyeongarioreum wetland	46

Fig. 6.16. A wetland influence zone deduced from the 3-D inversion in the Mulyeongarioreum wetland 46



List of Tables

Table 2.1 Geologic sequence of Jeju Island (Yoon et al., 2006)	8
Table 3.1 Wetland classifications of the Mulyeongarioreum wetland (Ministry of Environment Republic of Korea, 2001)	14
Table 3.2 Definitions of HGM wetland classes (modified from U.S Department of Agriculture, NRCS)	15
Table 3.3 Ramsar classification system for wetland type	17
Table 6.1 Survey constants used in the dipole-dipole resistivity surveys conducted in the study area	31



Three-dimensional resistivity surveys for investigating the extent and depth of the Mulyeongarioreum wetland in Jeju Island, Korea

Woo-Sung Cha

Department of Environmental Exploration Engineering, The Graduate School
Pukyong National University

Abstract

Recently, wetlands are of growing concern because about half of them have disappeared in the whole world and the loss rate has been gradually speeded up since 1950's. Preservation of wetlands is quite important in a viewpoint of environmental conservation because wetlands have abilities of water storage, storm protection, flood mitigation, shoreline stabilization, erosion control, groundwater recharge and maintenance, and water purification. The Mulyeongarioreum wetland in Jeju Island, Korea was registered in Ramsar Convention Wetland because of its environmental and geological importance: it is emergent to support a variety of living things in its ecological value, and it is a scoria cone which is formed by the geologically important strombolian eruption.

In this study, we investigate the extent and depth of the Mulyeongarioreum wetland to collect basic data available for wetland management and conservation. We carried out dipole-dipole resistivity surveys along four latticed lines in the wetland and performed three-dimensional interpretation of measured apparent resistivities using a finite-element method. In the inversion, a Jacobian matrix was calculated efficiently with reciprocity principle. The inverted resistivity images show that the Mulyeongarioreum wetland occupies an elliptic area of 80 m x 60 m and reaches to depths of about 5 - 25 m in dry season, and is deeper in the northwest region.

1. 서 론

습지는 영구적으로 또는 계절적으로 습윤 상태를 유지하고 있고, 특별히 적응된 식생이 서식하고 있는 곳이며(Cylinder et al., 1995), 육지 특성을 지닌 건륙생태계(terrestrial system)와 수생태계(aquatic system) 사이의 전이지대로서(Cowardin et al; 1979), 종 다양도가 높은 생태계이다(Mitch and Gosselink, 1993). 또한 습지는 지구상에서 가장 영양물질이 풍부하고 생산성이 높은 생태계로 인식되고 있으며, 여러 가지 생태적 기능을 제공한다(Mulamootti et al., 1996).

1960년대에 접어들면서 습지의 홍수조절, 수질정화 및 야생동물 서식지 등 탁월한 환경보전 기능에 대한 중요성이 재평가되면서 각 나라마다 랍사르 협약에 등록된 습지를 중심으로 습지를 관리하고 보호하려는 추세이다. 그러나 우리나라에서는 1990년대 중반에 들어서야 습지의 중요성을 인식하게 되었고, 1999년도에 이르러 비로소 습지보전법이 제정되었다. 이와 같은 맥락에서 환경부에서는 전국의 내륙습지 34개소에 대하여 연차적인 생태적 조사를 수행하거나 계획 중에 있으며 이 중 우포늪, 무제치늪, 낙동강하구, 대암산 용늪, 물영아리오름 등 5개소 외에 생태계가 우수한 습지에 대하여 습지보호 지역으로 지정하고 있다.

습지에 대한 연구는 최근 수 십년사이에 습지의 중요성이 강조되면서 급격히 증가되었고 습지 내 생물상 및 종 다양도, 토양, 식생 등의 다양한 자료들이 수집되고 연구되었다. 특히 제주도의 경우 제3기~4기에 형성된 화산지대로 360여개의 오름이 분포하고 그 중 350여개가 분석구이다. 350여개의 분석구 중에서 원형의 분화구에 물이 고여 있는 분화구는 5개인데, 그 중에서 물영아리오름 습지는 생태학적, 지질학적 중요성을 인정받아 2006년도 랍사르협약 습지로 등록되었다(Figs. 1.1, 1.2 and 1.3).

물영아리오름 습지의 경우 생태학적으로 다양한 생물이 서식하는 보전가치

가 뛰어난 습지이나, 현재 정확한 습지의 분포 범위 및 심도에 관한 자료는 없는 실정이어서 직접 내지 간접적인 조사 방법에 의한 습지의 형상을 파악하는 과정이 필요한 상황이다. 그러나 물영아리오름 습지와 같은 고산 습지의 경우 시추 등과 같은 직접적인 조사방법에 의해 습지의 범위와 심도를 조사하기는 환경보존 차원에서 어렵기 때문에 지구물리탐사와 같은 간접적인 조사방법에 의하여 조사가 이루어질 수밖에 없는 제약이 있다

본 연구에서는 전기비저항법을 이용하여 물영아리오름 습지의 분포범위 및 심도를 파악하고자 한다. 전기비저항 탐사는 국내에서 지하자원조사, 온천조사 및 지하수조사 등 매우 다양하게 쓰이며, 대형구조물 건설을 위한 토목공사나 지반침하의 안정성 해석, 산 사면의 안정성 해석, 매립장의 오염조사 및 폐광지역의 조사 등에도 유용하게 사용되고 있다. 특히 전기비저항 탐사법은 주변지역과 전기전도도차가 큰 습지의 경우 매우 효과적일 것으로 판단된다(Ward, 1990). 본 연구에서는 물영아리오름 습지 표면에 총 4개의 측선을 격자형으로 설정하여 쌍극자배열 전기비저항 자료를 얻었으며, 이 자료를 바탕으로 유한요소법을 이용한 3차원 역산과정을 통해 습지의 범위 및 심도를 영상화하였다.



Fig. 1.1. The southern side-view of the Mulyeongarioreum wetland.



Fig. 1.2. The inner side-view of the southern ridge of the Mulyeongarioreum wetland.



Fig. 1.3. The foreground of the Mulyeongarioreum wetland.

2. 제주도의 지형과 지질 개요

2.1. 지형구분과 한라산의 정의

제주도는 평면도상에서 장축은 동북동~서남서 방향으로 길이 약 74km, 단축은 북북서~남남동 방향으로 길이 약 32km의 타원형이며, 중심부에는 해발고도 1950m의 한라산이 솟아있다. 제주도의 지형은 해안에서 내륙의 중심부를 향하여 3부분으로 나눌 수 있다. 해안에서 해발고도 200m에 이르는 지대는 낮은 구릉들이 있는 평탄한 해안지대이며, 200m에서 500m에 이르는 지대는 완만한 사면을 이루는 중산간지대이며, 500m 부근에서부터는 사면이 급하여져서 한라산의 정상에 이른다.

윤선 외(2005)는 한라산의 산체를 “고려시대에 조성된 목마장(牧馬場)의 최상부지역과 현재 산림청이 관리하고 있는 요존국유림(要存國有林)의 경계 지역인 해발고도 약 500m에서 1950m에 이르는 제주도의 중심부”라고 정의하였다. 한라산의 정상에는 백록담이라고 부르는 원형의 오목한 형태의 원형구(圓形口)가 있다. 한라산의 북사면과 남사면은 경사가 급한 반면, 동사면과 서사면은 비교적 완경사를 이루고 있다. 한라산에는 계곡의 발달이 많이 이루어져 있지 않으나, 정상으로부터 북쪽으로 2개와 남쪽으로 1개의 깊고 긴 계곡이 발달되어 있다. 이 계곡들은 해발고도 1200m에서부터 정상직하(해발고도 1500m)에 이르는 부분에서는 깊이가 200m 이상에 달하나 해발고도 600~700m 부근에서는 20~30m 정도이다. 이 계곡들은 정상에서 방사상으로 발달되어 있다.

2.2. 지질 개요

제주도의 한라산은 일본인 지질학자 原口九萬(1930, 1931)에 의하여 최초로 조사가 이루어진 후, 농업진흥공사(현, 한국농촌공사)의 축척 1:100,000축척의 지질도(Fig. 2.1)와 한국자원연구소(현, 한국지질자원연구원)의 1:250,000축척의 지질도(Fig. 2.2)에 이르기까지 한라산은 산정의 분화구(백록담)에서 분출한 용암들이 겹겹이 쌓여 형성된 성층화산(stratovolcano)이고 제주도는 화산도라고 알려져 왔다. 이러한 설을 성층화산론이라고 한다.

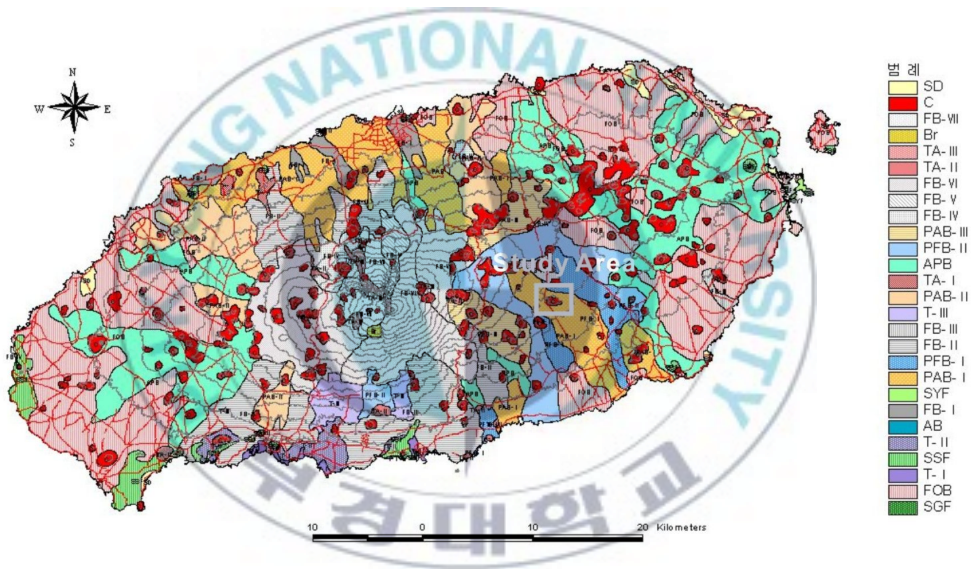


Fig. 2.1. Geologic map of Jeju Island (ADC, 1971). □ indicates the Mulyeongarioreum.

이에 대하여, 한국농촌공사 제주도본부가 발간한 “제주도의 지질”(Fig. 2.3)에서는 한라산은 하성 쇄설층인 탐라층이 백록담조면암군을 형성한 마그마의 상승에 의하여 융기되어 형성된 거대한 돔상 융기산체(cryptodome)이며, 한라산 정상으로부터 방사상으로 발달한 3개의 협곡은 돔상 융기산체의 정상에서 방사상으로 형성된 열곡들이라고 하였다. 한라산체를 융기시킨 백록담조면암군의 관입체의 하나인 백록담용암돔을 형성한 백록담조면암의 방사성 동위원소(K-Ar) 연령이 $0.07 \pm 0.01 \text{Ma}$ 이므로 한라산은 약 7만여년전에 돔상으로 융기되어 형성되었다. 이 시대는 최종빙기(뽕빙기 10~1만년전)로 해수면이 현재보다 약 150~160m 낮았었으며, 제주도에서 한반도에 이르기

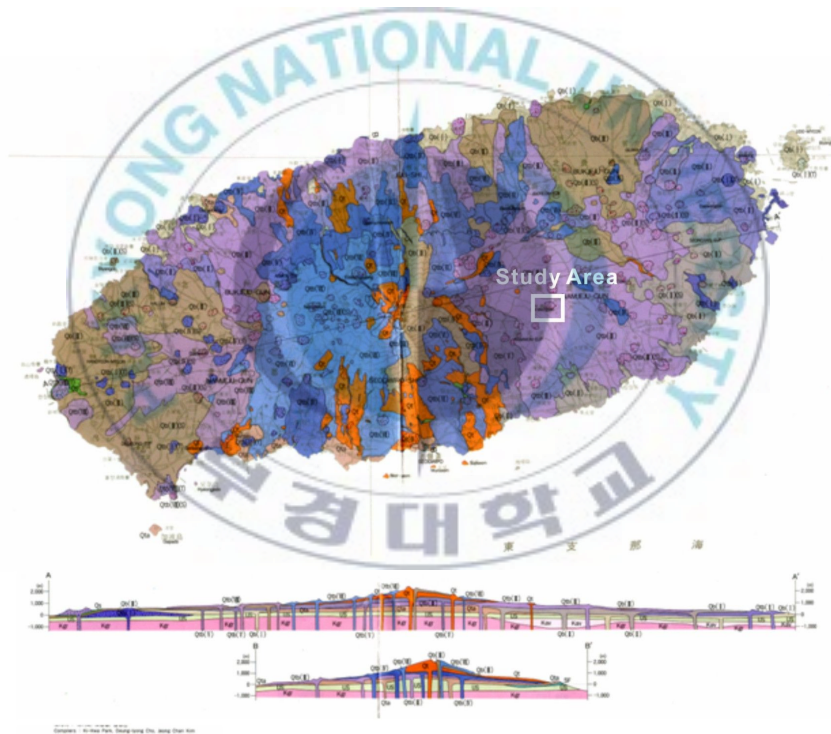


Fig. 2.2. Geologic map of Jeju Island (Park et al., 2000). □ indicates the Mulyeongarioreum.

까지 넓은 육지가 펼쳐져 있었다. 이 시대에는 한라산은 광활한 육지에 거

대한 산체로 솟아 있었으나, 그 후 후빙기에 들어와서 해수면이 상승함에 따라 침수되어 섬으로 되었다. 화산도는 해저화산이 성장하여 해수면 위로 노출되어 형성된 섬이므로, 제주도는 화산도가 아니며 또한 순상화산도 아니다. 이러한 설을 돗상 용기산체론이라고 한다.

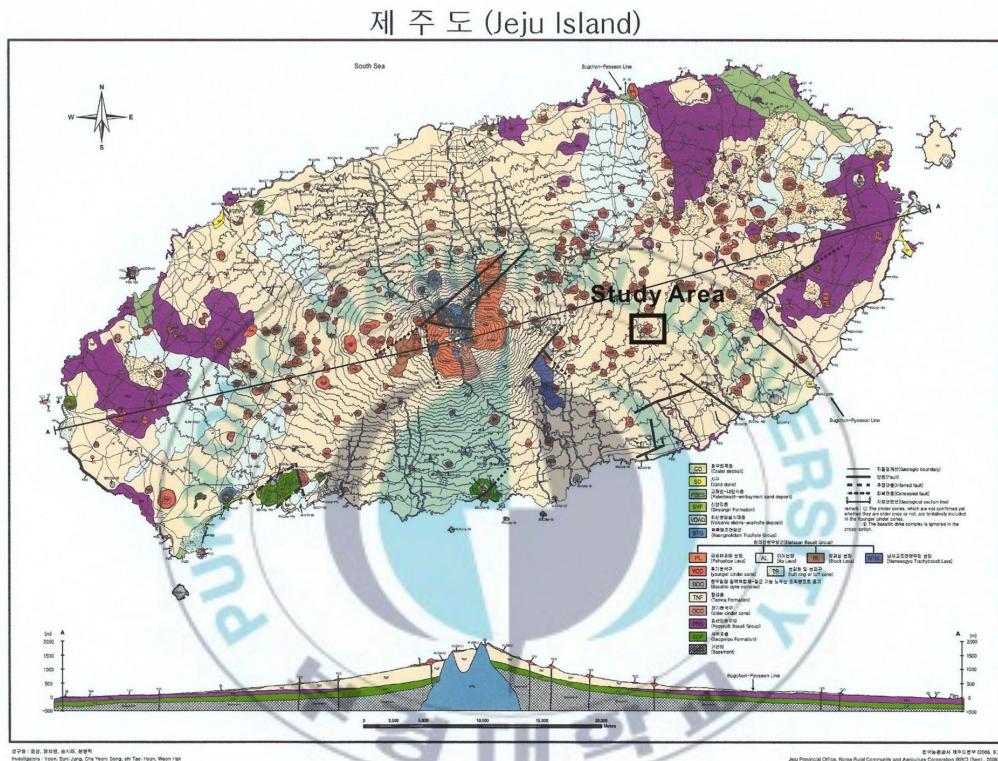


Fig. 2.3. Geologic map of Jeju Island (Yoon et al., 2006). □ indicates the Mulyeongarioreum.

돗상 용기산체론에 의하면, 제주도의 지질층서는 하위로부터 상위로 기반암, 고제주화산암, 서귀포층, 표선리현무암군, 탐라층, 현무암질 암맥복합체, 한라산현무암군, 백록담조면암군, 화산성 암설사태층, 신양리층 및 고해빈-내만사층으로 구분된다(Table 2.1). 기반암과 고제주화산암은 해수면하에 분

포하고 있는데, 기반암은 대보화강암에 속하는 흑운모화강암과 불국사화강암에 속하는 미문상화강암 및 유천층군에 속하는 것으로 추정되는 용결응회암과 화산력응회암 등 화성쇄설암으로 구성되어 있어 한반도 서남단 해남~강진지역의 옥천대가 제주도에까지 연장되어 있음을 시사한다. 고제주화산암은 서귀포층에 들어있는 화산암력들에 의하여 그 존재를 알 수 있을 뿐이다.

Table 2.1 Geologic sequence of Jeju Island (Yoon et al., 2006).

시 대	층서단위	비 고	분석구	응회환	
홀로세	고해빈~내만사층	사암, 패각층의 해성층			
	신양리층	역암과 사암의 해성층			
플라이스토세 후기	화산성암설사태층 층서관계 불명확 백록담조면암군	다양한 종류의 암괴와 암설			
		용암돔, 암맥			
	한라산현무암군	파호에호에 및 아아 용암			
	현무암질 암맥복합체	암맥군과 쉬트상 단독암맥	후기분석구	응회환	
	탐라층	주로 역암, 함력 사암 등 하성 역질 퇴적층			
	표선리현무암군	파호에호에 용암			
	플라이오세 후기	서귀포층	역암, 사암, 이암의 해성층, 상부에 유리쇄설암과 응회 환층 협재	전기분석구	
		고제주화산암	서귀포층에 포함된 현무암질, 조면암질의 역들		
팔레오세 선캄브리아기	기반암	미문상화강암 (불국사화강암), 화산성 사암 및 이암, 용결응회암, 화산력 응회암, 흑운모화강암(대보화강암)			

서귀포층은 지표에는 서귀포시 해안을 비롯하여 해안을 따라 점점이 소규모로 분포하고 있으나 지하에는 제주도 전역에 걸쳐 분포하고 있으며, 해양생물화석들이 산출하는 해성층이다. 표선리현무암군은 서귀포층을 부정합으로 피복하고 있는 현무암질의 파호에호에 용암들로 구성되어 있다. 탐라층은 표선리현무암군을 부정합으로 피복하며, 역암, 함력 사질 이암, 사암, 사질 이암, 이암 등으로 구성되어 있다. 역들은 현무암질과 조면암질이다. 본층은 해안에서부터 한라산 정상부에 이르기까지 제주도 전역에 걸쳐 넓게 분포하고 있으며, 해안지역에서는 수m에서 수십m의 비교적 얇은 층후를 나타내지만 한라산체에 접근할수록 두꺼워져 정상직하(해발고도 1500m 부근)에서는 200m 이상에 이른다. 탐라층의 연령은 약 50~60만년 전후로 추정된다.

현무암질 암맥복합체는 탐라층을 관입하고 있으며, 이들의 관입상은 크게 나누어 암맥군을 이루고 있는 것들과 저경사 내지 수평한 자세로 관입한 쉬트(sheet)상의 단독암맥들로 구분할 수 있다. 암맥군을 이루고 있는 암맥들은 대부분 수직 내지 고경사의 자세를 이루고 있으며 두께는 약 0.5~1.5m이다. 쉬트상 단독암맥들은 두께가 수m 내지 십여m이다.

한라산현무암군은 탐라층을 부정합으로 피복하며, 파호에호에 용암과 아아 용암의 산상을 나타내는 현무암과 조면현무암으로 구성되어 있다. 백록담조면암군은 한라산 정상 부근에 용암돔을 형성하고 있는 것을 비롯하여, 영실, 선작지왓 남측 능선 등에 분포하고 있으며, 99계곡의 산체, 모슬포의 산방산을 이루고 있는 조면암들도 이에 속하는 것으로 생각된다.

화산성 암설사태층은 분석구의 산체붕괴로 생성된 것들로서 제주도 동부의 중심부에 주로 분포하고 있다. 신양리층은 제주도 동쪽 해안의 신양리와 성산일출봉 사이의 해안에 분포하는데, 세력~소력 역암층과 조립사암이 호층을 이루고 있는 내만성 퇴적층이며, 연체동물화석의 방사성 동위원소 연령(^{14}C)은 $4780 \pm 60 \text{ y.B.P.}$ 이다. 고해빈~내만사층은 동쪽 해안의 세화리 부근과 서쪽 해안의 협재 부근에 분포하고 있는 패사층이다. 이 층은 그 연변은

사구의 요소를 가지고 있으나 중심부에는 폐각층을 협재하여 내만의 퇴적층임을 보여준다. 방사성 동위원소 연령(^{14}C)은 약 3500y.B.P.이다.

2.3. 오름과 분석구

제주도민이 “오름”이라고 부르는 소규모의 산체가 약 368개 분포하고 있는데 성인에 따라, 분석구, 응회환, 용암돔, 돔상 용기산체, 지괴운동에 의한 용기산체, 침식잔류산체, 침식잔류산체와 분석구의 복합산체로 분류할 수 있다(윤선 외, 2006).

분석구(cinder cone)는 스트롬볼리형 분출(Strombolian eruption)에 의하여 분석들이 화구 주위에 쌓여 형성된 소화산체인데 제주도에는 약 350개의 분석구가 있다. 스트롬볼리형 분출에서는 마그마가 분출하는 압력과 속도에 의하여 잘게 파쇄되어 분출되는데, 이 파쇄물들을 분석(cinder)이라고 한다(Fig. 2.4). 제주도에서 분석의 크기는 일반적으로 직경이 수mm~수10mm인데, 직경이 256mm 이상이며 둥근 형태를 이루고 있는 것을 화산탄이라고 한다. 분석구를 형성하고 있는 분석들은 층을 이루고 있으며(분석구층) 매우 엉성하게 쌓여 있어 공극률이 매우 높다(Fig. 2.5). 분석구는 탐라층을 경계로하여 그 이전의 전기분석구와 그 이후의 후기분석구로 구분할 수 있다.

분석구들은 산정이 원형의 분화구를 이루고 있는 것과 한쪽 산능이 산체 붕괴나 용암의 분출에 의하여 파괴되어 터져서 말굽형을 이루고 있는 것들이 있다. 원형의 분화구를 이루고 있는 것들 중에 분화구 내에 물이 고여 있는 것은 매우 드물어서 한라산의 동쪽에 있는 5개가 있을 뿐이다. 그 중에서 4개(사라오름, 물장오리, 물чат오름, 동수악)는 한라산의 동측 산록에 위치하며, 1개(물영아리오름)는 중산간지대에 위치한다. 물영아리오름은 탐라층 위에 형성되어 있는 후기분석구에 속하며, 산정에는 원형의 분화구가 있으며 분화구 내에는 물이 고여 있어 습지를 이루고 있다.



Fig. 2.4. Strombolian eruption (Stromboli Volcano, Photo glossary of volcano terms, USGS).



Fig. 2.5. Cinder cone deposit (Jeju Island, photograph by S. Yoon in august, 1986).

3. 물영아리오름 개관

3.1 물영아리오름 습지

3.1.1 주요 특징 및 현황

물영아리오름은 탐라층으로 되어 있는 표고 380m의 중산간 평탄한 지대에 있으며(Fig. 2.3), 산정의 표고는 508m로서 비고는 약 128m이다. 중심좌표는 N 33°22'56.0" E 126°41'42.0"으로, 남제주군 남원읍 수망리 188번지에 위치한다. 물영아리오름은 분석구의 원형을 그대로 보존하고 있으며, 분화구에는 물이 고여 있어 온대 산지습지의 생태적 특징을 가지고 있다. 물영아리오름은 남조로변 남원읍 충혼묘지 길 건너 동북쪽에 위치한 오름으로 물영아리오름은 '수령악(水靈岳)'이라고도 부르며 산정에 화구호가 있어 물이 잔잔하게 고여 있다는데서 연유한 이름이라 한다. 산정의 화구호는 다양한 생태계를 이루는 습지(濕地)로서 습지보전법이 제정된 후에 전국에서 처음으로 습지보호지역으로 지정되었고(환경부, 2000. 12. 5) 최근에는 랍사르협약 습지로 등록되었다(환경부, 2006. 10. 18).

람사르협약 습지는 독특한 생물지리학적 특성을 가진 곳이거나 희귀동식물 종의 서식지 또는 특히 물새 서식지로서의 중요성을 가진 습지를 대상으로 지정하는데, 이번에 랍사르협약 습지로 등록된 물영아리오름 습지는 화산활동의 결과로 형성된 분화구내의 습지로서 멸종위기종 2급인 물장군, 맹꽁이, 그 밖에 물여귀 등 습지식물 210종, 47종의 곤충과 8종의 양서·파충류 등 다양한 생물군이 서식하는 보전가치가 뛰어난 습지이다. 또한, 물영아리오름 습지는 하천·지하수 등 외부에서 습지내로 유입되는 유지용수는 따로 존재하지 않으며, 오직 강우에 의해 물이 공급되는데도 불구하고, 습지생물이 다양하게 서식하고 있다.

3.1.2 습지 정의 및 기능

습지는 다양하게 정의되며 일반적으로 습지에 대한 개념을 말할 때 영구적으로 또는 계절적으로 습윤 상태를 유지하고 있고, 특별히 적응된 식생이 서식하고 있는 곳이며(Cylinder et al., 1995), 육지 특성을 지닌 건륙생태계와 수생태계 사이의 일종의 전이지대로서(Cowardin et al; 1979), 종 다양도가 높은 생태계이다(Mitch and Gosselink, 1993).

습지보전법 제2조에서는 “담수, 기수 또는 염수가 영구적 또는 일시적으로 그 표면을 덮고 있는 지역으로 내륙습지와 연안습지를 말한다.”라고 정의하였으며, 세계적으로 널리 통용되는 람사르협약 제1조에서는 “자연 또는 인공이든, 영구적 또는 일시적이든, 정수 또는 유수이든, 간조 시 수심 6m를 넘지 않는 곳을 포함하는 늪, 습원, 이탄지”로 규정하고 있다.

습지의 기능이란 습지 내에서 발생하는 일련의 과정으로 정의될 수 있으며, 그 과정에는 수문 저장, 영양물질의 변형, 생명체의 성장, 습지 식생의 다양성 등을 포함한다. 습지는 각 야생동식물의 서식처로서 물에 포함된 침전물과 유기물을 제거하며, 지하수 저장 및 충전, 지표수 공급 및 유량 조절, 기타 레크레이션 기능 등 다양한 기능을 지니고 있다. 람사르협약에서는 습지의 물리적, 생물학적, 화학적 구성 요소—토양, 물, 식생, 동물—간의 상호작용으로 다음과 같은 기능을 갖는다고 하였다. 물저장(water storage), 폭풍방지(storm protection), 홍수억제(flood mitigation), 호안의 안정성 확보 및 침식 조절(shoreline stabilization and erosion control), 지하수 보충 및 유지(groundwater recharge and maintenance), 수질정화(water purification) 등의 기능이 있다.

3.1.3 물영아리오름의 습지 분류

습지의 유형분류체계는 국제 습지 협약인 람사르협약과 습지 평가에 대한 기능 지표를 설정 적용한 Hydrogeomorphic (HGM) System 등이 있다.

HGM 습지분류체계를 적용하여 물영아리오름 습지를 분류하면 Depression (지표수가 모일 수 있도록 폐쇄된 함몰지)에 해당되며(Table 3.2), 람사르협약 습지분류체계를 적용하여 물영아리오름 습지를 분류하면 우선 내륙습지이며 습원성습지(Palustrine), 영속적습지(Permanent), 습생식물습지(Emergent), 이탄지 및 소택지(Open peat bogs and fens), 분류코드 U에 해당한다고 할 수 있다 (Table 3.3).

HGM 습지분류체계, 람사르협약 습지분류체계 등을 종합하여 입지 및 자연/인공성, 입자유형, 침수 등 수문조건, 기반조건, 습지의 형태, 서식처기능, 식물성상 등에 따라 물영아리오름 습지를 분류하면 다음과 같다(Table 3.1).

Table 3.1 Wetland classifications of the Mulyeongarioreum wetland (modified from Ministry of Environment Republic of Korea, 2001).

Super system	System	Sub-system	Class	Subclass
입지 및 자연/ 인공성	입자유형	침수 등 수문 조건	기반조건	습지의 형태, 서식처 기능, 식물 성상 등
Inland	Palustrine	Permanent	Depression	이탄지 소택지

Table 3.2 Definition of HGM Wetland Classes(U.S Department of Agriculture, NRCS)

HGM class	Definition
RIVERINE	RIVERINE wetlands occur in flood plains and riparian corridors in association with stream channels. Dominant water sources are often overbank flow from the channel or subsurface hydraulic connections between the stream channel and wetlands. However, sources may be interflow and return flow from adjacent uplands, occasional overland flow from adjacent uplands, tributary inflow, and precipitation. At their head water, RIVERINE wetlands often are replaced by SLOPE or DEPRESSIONAL wetlands where the channel morphology may disappear, They may intergrade with poorly drained flats or uplands. Perennial flow in the channel is not a requirement
DEPRESSIONAL	DEPRESSIONAL wetlands occur in topographic depressions. Dominant water sources are precipitation, ground water discharge, and both interflow and overland flow from adjacent uplands, The direction of flow is normally from the surrounding uplands toward the center of the depression. Elevation contours are closed, thus allowing the accumulation of surface water. DEPRESSIONAL wetlands may have any combination of inlets and outlets or lack them completely. Dominant hydrodynamics are vertical fluctuations, primarily seasonal DEPRESSIONAL wetlands may lose water through intermittent or perennial drainage from an outlet, by evapotranspiration and, if they are not receiving ground water discharge, may slowly contribute to ground water. Peat deposits may develop in DEPRESSIONAL wetlands. Prairie potholes are a common example of DEPRESSIONAL wetlands.
SLOPE	SLOPE wetlands normally are found where there is a discharge of ground water to the land surface. They normally occur on sloping land; elevation gradients may range from steep hillsides to slight slopes. SLOPE wetlands are usually incapable of depressional storage because they lack the necessary closed contours. Principal water sources are usually ground water return flow and interflow from surrounding uplands, as well as precipitation. Hydrodynamics are dominated by downslope unidirectional water flow. SLOPE wetlands can occur in nearly flat landscapes if ground water discharge is a dominant source to the wetland surface. SLOPE wetlands lose water primarily by saturation subsurface and surface flows and by evapotranspiration. SLOPE wetlands may develop channels, but the channels serve only to convey water away from the SLOPE wetland. Fens are a common example of SLOPE wetlands.
MINERAL SOIL FLATS	MINERAL SOILS FLATS are most common on interfluvies, extensive relic lake bottoms, or large historic flood plain terraces where the main source of water is precipitation. They receive no ground water discharge, which distinguishes them from DEPRESSIONAL and SLOPE wetlands Dominant hydrodynamics are vertical fluctuations. MINERAL SOIL FLATS lose water by evapotranspiration, saturation overland flow, and seepage to underlying ground water. They are distinguished from flat upland areas by their poor vertical drainage, often due to spodic horizons and hardpans, and low lateral drainage, usually due to low hydraulic gradients. MINERAL SOIL FLATS that accumulate peat can eventually become the class ORGANIC SOIL FLATS. Pine flatwoods with hydric soils are a common example of MINERAL SOIL FLAT wetlands.

ORGANIC SOIL FLATS	ORGANIC SOIL FLATS, or extensive peatlands, differ from MINERAL SOIL FLATS, in part because their elevation and topography are controlled by vertical accretion of organic matter. They occur commonly on flat interfluvies, but may also be located where depressions have become filled with peat to form a relatively large flat surface. Water source is dominated by precipitation, while water loss is by saturation overland flow and seepage to underlying ground water. Raised bogs share many of these characteristics, but may be considered a separate class because of their convex upward form and distinct edaphic conditions for plants. Portions of the Everglades and northern Minnesota peatlands are common examples of ORGANIC SOIL FLAT wetlands.
ESTUARINE FRINGE	ESTUARINE FRINGE wetlands occur along coasts and estuaries and are under the influence of sea level. They intergrade landward with RIVERINE wetlands where tidal currents diminish and riverflow becomes the dominant water source. Additional water sources may be ground water discharge and precipitation. The interface between the ESTUARINE FRINGE and RIVERINE classes is where bidirectional flows from tides dominate over unidirectional ones controlled by flood plain slope of RIVERINE wetlands. Because ESTUARINE FRINGE wetlands frequently flood and water table elevation are controlled mainly by sea surface elevation, ESTUARINE FRINGE wetlands seldom dry for significant periods. ESTUARINE FRINGE wetlands lose water by tidal exchanges, by saturated over flow to tidal creek channels, and by evapotranspiration. Organic matter normally accumulates in higher elevation marsh areas where flooding is less frequent and the wetlands are isolated from shoreline wave erosion by intervening areas of low marsh. <i>Spartina alterniflora</i> salt marshes are common examples of ESTUARINE FRINGE wetlands.
LACUSTRINE FRINGE	LACUSTRINE FRINGE wetlands are adjacent to lakes where the water elevation of the lake maintains the water table in the wetland. In some cases, these wetlands consist of a floating mat attached to land. Additional sources of water are precipitation and ground water discharge, the latter dominating where LACUSTRINE FRINGE wetlands intergrade with uplands or SLOPE wetlands. Surface water flow is bidirectional, usually controlled by water-level fluctuations such as seiches in the adjoining lake. LACUSTRINE FRINGE wetlands are indistinguishable from DEPRESSIONAL wetlands where the size of the lake becomes so small relative to fringe wetlands that the lake is incapable of stabilizing water tables. LACUSTRINE FRINGE wetlands lose water by flow returning to the lake after flooding, by saturation surface flow, and by evapotranspiration. Organic matter normally accumulates in areas sufficiently protected from shoreline wave erosion. Unimpounded marshes bordering the Great Lakes are a common example of LACUSTRINE FRINGE wetlands

Table 3.3 Ramsar classification system for wetland type

Sub-system	System	Sub-system	Class	Sub-class	code	sort
Marine and Coastal	Marine	Subtidal		Shallow marine waters	A	coastal wetlands including coastal lagoons, rocky shores and coral reefs
			Aquatic bed	Marine aquatic beds	B	
			Reef	Coral reefs	C	
		Intertidal	Rocky	Rocky marine shores	D	
			Unconsolidated	sand/shingle beaches	E	
	Estuarine	Subtidal		Estuarine waters	F	including deltas, tidal marshes and mangrove swamps
		Intertidal	Unconsolidated	Intertidal mudflats	G	
			Emergent	Salt Marshes	H	
			Forested	Mangrove, tidal forest	I	
	Lacustrine/ Palustrine	Permanent/ Seasonal		Brackish/saline lagoons	J	
				Coastal fresh lagoons	K	
Inland	Riverine	Perennian		Permanent river/stream	L	wetlands along rivers and streams
			Emergent	Delta	M	
				Intermittent river/ stream	N	
		Intermittent	Emergent	Floodplain wetlands	O	
	Lacustrine	Permanent		Permanent freshwater lakes	P	wetlands associated with lakes
		Seasonal		Seasonal freshwater lakes	Q	
		Permanent/ Seasonal		Permanent/Seasonal saline lakes and marshs	R	
	Palustrine	Permanent	Emergent	Permanent freshwater poods and marshs	Sp	marshes, swamps and bogs
				Open peat bogs, fens	U	
				Alpine/tundra wetlands	V	
			Shrubs dominated	Shrub-dominated swarnps	W	
			Forested	freshwater swamp forest	Xf	
				Peat swamp forest	Xp	
		Seasonal	Emergent	Freshwater springs, oasest	Y	
				Seasonal freshwater marshes	Ss	
	Geothermal			Geothermal wetlands	Zg	
Man-made	Aquaculture			Fish, shrimp ponds	1	fish and shrimp ponds farm ponds, irrigated agricultural land, salt pans, resevoirs, gravel pits, sewage farms and canals
	Agriculture			Farm ponds, small tanks	2	
				Irrigated land, rice fields	3	
				Seasonally-flooded arable land	4	
	Salt exploitation			Salt pans, salines	5	
	Urban and industrial			Reservoirs, barrages	7	
				Graver pits	8	
				Sewage farms	9	

3.2 물영아리오름의 지형

3.2.1 지형 분석

물영아리오름 주변지역은 한라산 산체의 동측부로서 동남방향으로 표고가 낮아지는 지형을 보이며, 분석구들이 산재한다. 물영아리오름이 위치한 지대는 남제주군 남원읍 수망리 일원으로서 중산간지대의 비교적 완만하게 경사진 평탄한 지대이며(Figs. 3.1, 3.2 and 3.3), 대상지의 북쪽에는 영아리(518m), 북서쪽으로 거문오름(704m), 괴평이오름(784m), 남서쪽으로 민악(446m) 거인악(536m), 남동쪽으로 응악(180m)과 여절악(210m)이 위치하고 있다(Fig. 3.4).

물영아리오름이 위치한 수망리는 한라산의 남동쪽에 위치하여 남으로 의귀리 동으로는 신흥 2리와 접하고 있고 서남쪽에는 한남리가 인접한다. 제주시에서 약 39km, 서귀포시에서 23km 거리에 위치하고 있으며, 남원과 제주시를 연결하는 주요도로인 지방도 1118호(남조로)가 수망리 내를 관통하고 있다.

물영아리오름은 한라산 중산간지대 표고 380m에 위치하는 전형적인 원형의 분석구 오름인데, 산정의 표고는 508m로 비고는 128m이다. 처경은 1,526m로 저변면적은 717,013m²이며, 화구경은 220m이고, 안정각은 21.5°이다. 물영아리오름 습지보호지역의 경계는 오름의 대략 5부 능선을 따라 설정되어 있다(Fig. 3.5).



Fig. 3.1. 3-D Satellite image of the Mulyeongarioreum wetland (I).



Fig. 3.2. 3-D Satellite image of the Mulyeongarioreum wetland (II).



Fig. 3.3. 3-D Satellite image of the Mulyeongarioreum wetland (III).

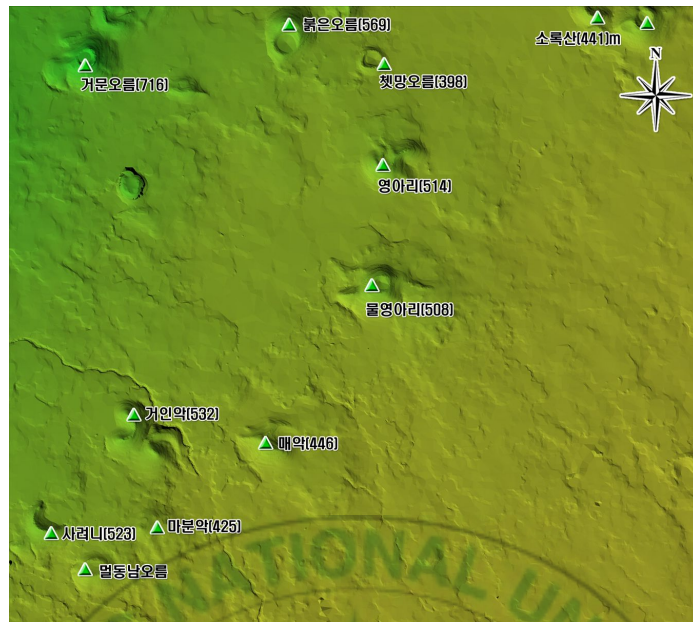


Fig. 3.4. Mountain system around the Mulyeongarioreum wetland.

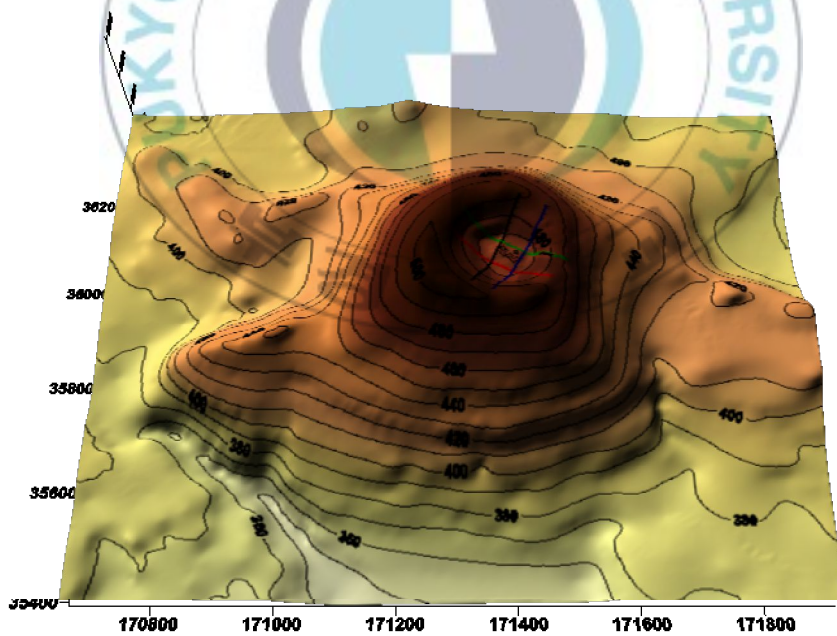


Fig. 3.5. Topography feature around the Mulyeongarioreum wetland.

3.2.2 경사도 및 경사방향 분석

물영아리오름 습지 주변에 분포하는 분석구들의 산사면의 외측은 대체로 10~20°의 경사를 보이나 분석구들의 주변의 평탄지의 경사면은 10°내외의 경사를 보인다(Fig. 3.6-a). 물영아리오름 습지 분석구의 산사면의 외측 경사는 10~20°이내이다. 분화구 내의 물이 고여 있는 습지부는 연변에서 중심을 향하여 10°이내의 완만한 경사를 보이는 것으로 분석되었다(Fig. 3.7-a).

물영아리오름 습지 주변에 분포하는 분석구들은 원형의 분석구로서 산릉의 외측 사면은 전방위의 경사방향을 보여주나 특히 N의 경사방향이 빈도가 높다. 분석구 외의 지대는 비교적 평탄한 경사지대인데 경사면은 주로 SE-SW 방향이다. 분화구 내에서는 산릉의 내측 사면은 분화구의 내측을 향하여 경사지고 있다(Fig. 3.6-b). 물영아리오름 역시 동서방향으로 길쭉한 원형 분석구의 형태를 이루고 있어 산릉의 외측 사면은 전방위의 경사방향을 보여주며, 분화구의 내측 사면은 분화구의 내측을 향하여 경사지고 있다(Fig. 3.7-b).

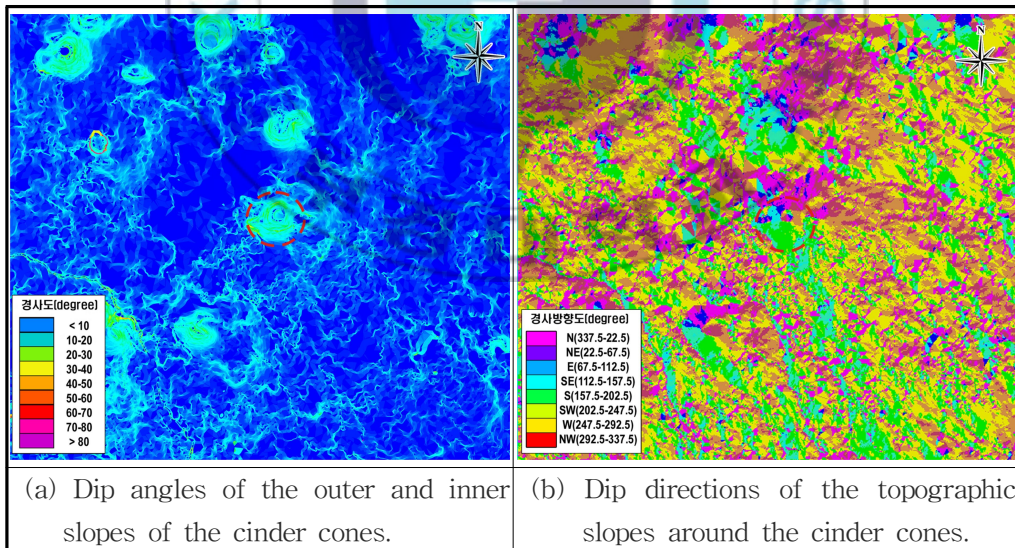


Fig. 3.6. Dip angles and directions of the outer and inner slopes of the cinder cones and topographic slopes around the Mulyeongarioreum wetland.

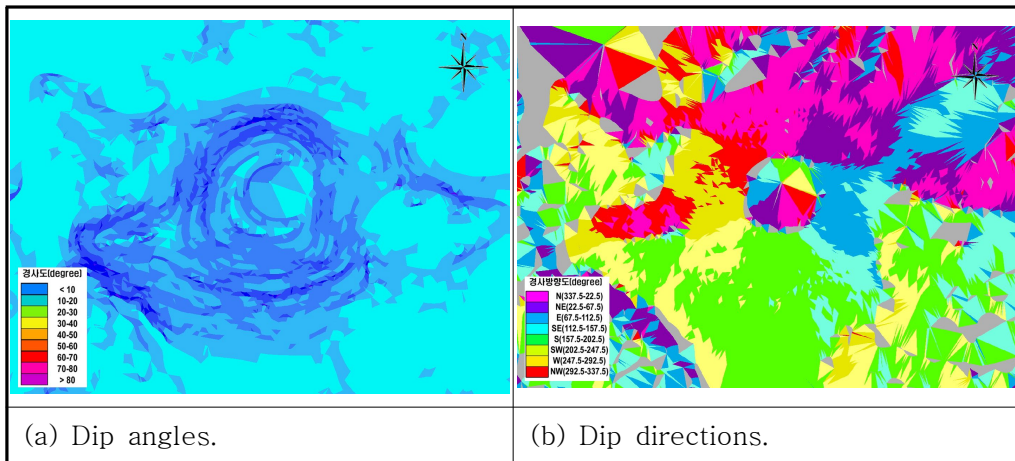


Fig. 3.7. Dip angles and directions of the outer and inner slopes of the Mulyeongarioreum wetland.



3.2.3 수문환경

제주도는 하천의 발달이 미약하며 대부분이 건천의 형태를 띤다. 물영아리오름 주변지역은 의귀천이 남동류하여 태흥리 포구를 통하여 바다에 유입된다. 또한 조사지역 인근에는 등천, 서중천, 신흥천, 송천, 안좌천 등이 남동류하여 남해로 이어지는 수지상의 수계상을 보인다(Fig. 3.8).

물영아리오름 습지의 수문환경의 가장 큰 특징은 지형특성 상 폐쇄된 수문환경을 가지고 있다는 것이다. 하천, 지하수 등 외부에서 습지내로 유입되는 유지용수는 따로 존재하지 않으며 오직 강우에 의하여 습지 내로 물이 공급되는 것으로 파악된다. 또한 외부와 연결된 배출구가 존재하지 않은 것으로 볼 때, 화구호를 중심으로 형성된 집수구역에서 습지로 집수된 물은 지표수 침투, 증발산에 의하여 소모되는 것으로 파악된다(환경부, 2001). 물영아리오름 습지의 집수구역은 화구호(火口湖)의 능선부를 따라 형성되며 면적은 40,075m²이다.

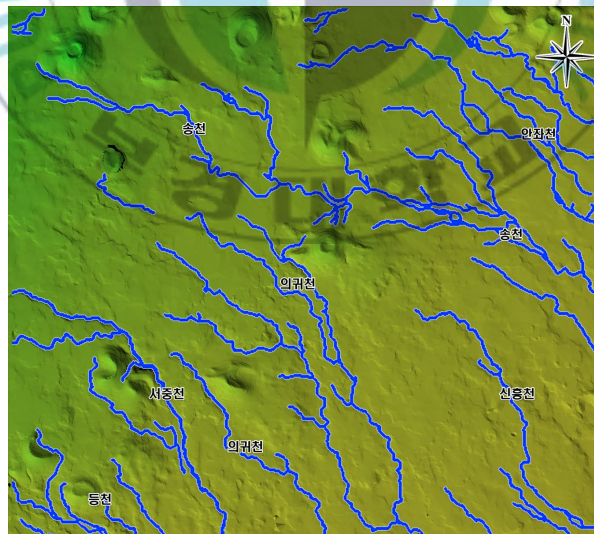


Fig. 3.8. Water system around the Mulyeongarioreum wetland.

4. 3차원 전기비저항 이론

균질등방성 매질 내에 전류가 흐르고 있는 경우, 전기비저항에 대한 지배 방정식은 전기장 강도 $\mathbf{E}$ 에 대한 전류 밀도 $\mathbf{J}$ 에 관한 옴의 법칙으로 나타나게 된다.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (4-1)$$

여기서 σ 는 전기전도도 (electrical conductivity)이다. 전기장은 보존이 되며, 이것을 스칼라 전위로 표시하면 다음과 같다.

$$\mathbf{E} = -\nabla u \quad (4-2)$$

여기서 u 는 전기포텐셜 (electrical potential)이고, 전기포텐셜의 변화를 설명하는 편미분방정식은 다음과 같이 포아송방정식(Poisson's equation)으로 표현된다.

$$-\nabla \cdot \sigma \nabla u = \nabla \cdot \mathbf{J}_s \quad (4-3)$$

여기서 σ 는 전기전도도(S/m), $\mathbf{J}_s$ 는 소스의 전류밀도(A/m²)이다. (4-3) 식으로부터 다음의 변분적분이 유도된다.

$$\chi = \int \left[\sigma (\nabla u)^2 - 2u \nabla \cdot \mathbf{J}_s \right] dv \quad (4-4)$$

(4-4) 식의 해는 적분 x 를 정상(stational)으로 만드는 u 로 주어진다.

모델화해야 할 3차원 영역을 다수의 직육면체요소로 나눈다. 이것은 다시 다섯 개의 사면체요소로 나눌 수도 있으며(Fig. 4.1), 사면체 요소를 이용하는 것이 직육면체요소를 이용하는 것 보다 계산이 빠르다고 하였다(Zhou and Greenhalgh, 2001).

구하고자 하는 포텐셜은 각각의 요소에서 u 의 절점값을 사용하여 정의되는 선형다항식으로부터 근사된다(Rucker et al.(2006)은 전극을 격자점이 아닌 요소 내부에 설정할 때에는 선형다항식보다 고차다항식이 더 유용하다고 하였다). (4-4) 식에 선형다항식을 대입하고 요소의 체적에 대해 적분하면 u 의 절점 값에 관한 요소적분을 낳는다. 전체 적분 x 는 이들 요소적분의 합이다. 적분 x 의 최소는 절점 값에 대하여 x 의 일차미분을 0으로 놓음으로써 찾을 수 있으며, 결국 다음과 같은 유한요소 행렬식이 유도된다.

$$\mathbf{Ku}' = \mathbf{s}$$

(4-5)

여기서 $\mathbf{K}$ 는 띠 모양의 대규모 산재 계수 행렬, $\mathbf{u}$ 는 모든 절점에서의 포텐셜 값으로 구성된 벡터이고, $\mathbf{s}$ 는 소스 벡터이다.

계수행렬 $\mathbf{K}$ 는 지배방정식에 대한 블록에 대한 요소의 형상과 전기전도도의 함수로 나타나며, 전체 절점의 수가 M 개이면 $M \times M$ 의 행렬을 가지며 일정한 띠폭(banded), 대칭(symmetric) 및 희소(sparse) 행렬이다. 이러한 계수행렬방정식의 해를 풀이하는데 일반적으로 직접법과 반복법으로 구분할 수 있으나 3차원의 경우에는 직접법으로 풀이하기에는 컴퓨터 용량이 막대하여 풀이하기가 어려우므로 반복법을 이용하여 풀이를 한다.

일반적으로 (4-5) 식은 ICCG (incomplete Cholesky conjugate gradient) 법으로 효율적으로 풀 수 있고 실제로 Sasaki (1999)와 Zhou and Greenhalgh (2001)은 3차원 계산시 효과적으로 해가 수렴하기 위해서는 ICCG법이 적절하

다고 하였다. 그러나 최근 Wu (2003)에 의하면 유한요소 행렬의 경우 ICCG 법이나 행렬의 대각요소에만 가중치를 두는 modified ICCG(MICCG)법으로는 수렴이 느리거나 아예 수렴하지 않는 경우가 있으며, 비 대각요소에도 가중치를 주는 shifted ICCG(SICCG)법이 유효하다는 것이 밝혀졌다. 본 논문에서는 3차원 모델링에서 유한요소 방정식을 풀이하기 위하여 ICCG 반복법을 사용하였다.

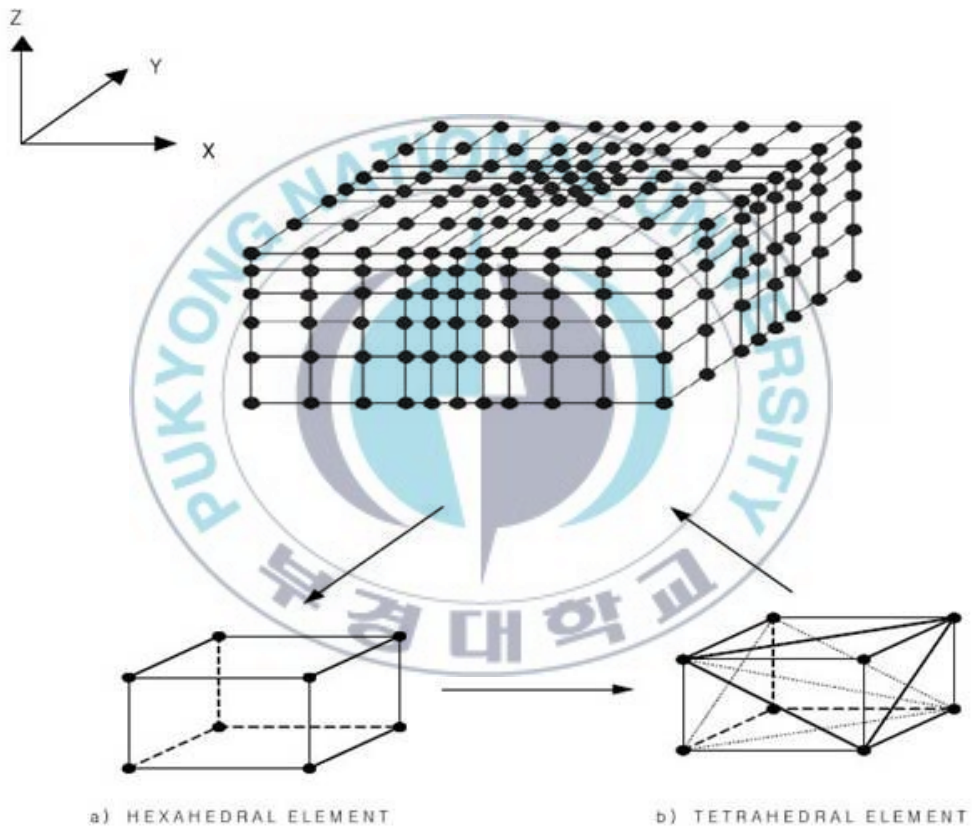


Fig. 4.1. A-3D mesh assembled from (a) hexahedral elements and (b) tetrahedral elements. Hexahedral elements are assembled from five tetrahedrons

5. 3차원 전기비저항 역산

일반적으로 비선형 최소자승 역산은 측정자료와 이론모델 반응치의 차에 대한 목적함수를 최소화하는 방식으로 얻어지며, 전기전도도로 구성된 블록의 모델변수 벡터를 최적화하기 위하여 모델 블록의 전기비저항 값에 관한 측정자료의 미분법을 사용한다.

본 연구에서 사용된 전기비저항 탐사 자료의 역산은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \mathbf{d} = \mathbf{J} \Delta \mathbf{m} \quad (5-1)$$

여기서 $\Delta \mathbf{d}$ 는 측정한 자료와 모델링으로 계산한 자료의 차이로 구성된 벡터, $\Delta \mathbf{m}$ 은 초기모델 $\mathbf{m}_0$ 에 대한 보정 벡터, $\mathbf{J}$ 는 자코비안 행렬(모델 변수에 대한 모델링 응답의 편미분 행렬)이다. 모델의 매개변수화(parameterization)를 위하여 모델을 미지의 매개변수로 이루어지는 많은 블록으로 나눈다. 자코비안 행렬의 안정화를 도모하고 전기비저항을 양의 값으로 제한하기 위해 모델 전기비저항과 측정된 겉보기비저항의 대수 값을 이용하여 매개변수와 자료를 규격화한다.

대부분의 물리탐사 역산 문제에서처럼 (5-1) 식의 역산과정을 안정시키기 위해서 거칠기(roughness, 매끄러움(smoothness)의 역)항을 도입한다 (Tikhonov and Arsenin, 1997). 역산에서 가장 매끄러운 해를 구하기 위하여 최소화해야 할 목적함수는 아래와 같다.

$$U = \|\mathbf{W}_d(\mathbf{J}\Delta \mathbf{m} - \Delta \mathbf{d})\|^2 + \lambda \left[\|\mathbf{W}_m(\mathbf{m}_0 + \Delta \mathbf{m})\|^2 + \varepsilon \|\Delta \mathbf{m}\|^2 \right] \quad (5-2)$$

여기서 $\|\cdot\|^2$ 는 유클리드 L_2 놈(norm), $\mathbf{W}_d$ 와 $\mathbf{W}_m$ 는 각각 자료와 모델의

가중행렬, λ 는 라그랑지 곱수, ε 는 양의 상수이다.

(5-2)식에서 정규화(regularization) 변수인 라그랑지 곱수 λ 는 자료의 비적합도 (misfit)와 모델 거칠기 사이의 비중을 조절한다(Tikhonov and Arsenin, 1977; Parker, 1994). 지구물리 역산은 대부분의 경우 불안정성을 내포하고 있으므로 이와 같은 점을 개선하고자 라그랑지 곱수를 사용하여 역산에 의하여 계산되는 해에 제한을 가하고자 하는 것이다. 라그랑지 곱수는 블록의 크기와 유사하게 영상의 평활함을 조절하는 계수로 역산의 안정성 및 분해능을 좌우하는 요소이다. λ 가 커지면 분해능은 나빠지나 매끄럽고 안정된 해를 구할 수 있는 반면에, λ 가 작아지면 잘못된 모델을 초래하기 쉬운 악조건 (ill-condition) 최소자승 역산문제에 더 가까워지게 된다(e.g., Parker, 1980).

한편 역산 해를 제약하기 위한 추가적인 방법은 가중치를 도입하는 것이다. 가중치는 라그랑지 곱수와 유사한 값으로서 반복적 비선형 역산에서 안정성을 제시할 수 있으며 가중치가 너무 커지면 반복적 비선형 역산에서 $\mathbf{J}^T\mathbf{J}$ 의 고유치 향이 적게 나타나므로 역산의 안정성을 극대화 할 수 있으나 분해능이 떨어지는 단점이 있으므로 가급적 작은 가중치를 곱하는 것이 좋다. 자료 가중행렬 $\mathbf{W}_d$ 는 일반적으로 자료 표준 편차의 역수값을 성분으로 하는 대각행렬이며 $\mathbf{W}_d$ 는 대각요소를 측정값의 역수로 놓을 수도 있다(Torres Verdin et al., 2000). 그리고 모델 가중행렬 $\mathbf{W}_m$ 로서는 모델 거칠기를 정량화하기 위한 유한차분 연산자가 많이 사용되고 있다.(e.g., Sasaki, 1989; deGroot Hedlin and Constable, 1990).

(5-2) 식의 최소화는 다음과 같은 정규방정식의 형태인 선형 연립방정식을 유도한다.

$$\left[\mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \mathbf{J} + \lambda (\mathbf{W}_m^T \mathbf{W}_m + \varepsilon \mathbf{I}) \right] \Delta \mathbf{m} = \mathbf{J}^T \mathbf{W}_d^T \mathbf{W}_d \Delta \mathbf{d} - \lambda \mathbf{W}_m^T \mathbf{W}_m \mathbf{m}_0 \quad (5-3)$$

관측방정식의 형태로는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}_d \mathbf{J} \\ \sqrt{\lambda} \mathbf{W}_m \\ \sqrt{\lambda \varepsilon} \mathbf{I} \end{bmatrix} (\Delta \mathbf{m}) = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_d \Delta \mathbf{d} \\ -\sqrt{\lambda} \mathbf{W}_m \mathbf{m}_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5-4)$$

여기서 $\mathbf{I}$ 는 항등(identity)행렬이다. (5-4) 식으로부터 구해지는 해는 (5-3) 식에서 얻어지는 해보다 정확하다고 알려져 있다(e.g., Lines and Treitel, 1984). 보정 벡터 $\Delta \mathbf{m}$ 은 초기 벡터 $\mathbf{m}_0$ 에 더해진다. 이러한 과정은 측정자료와 모델링 자료 사이의 차이 $\Delta \mathbf{d}$ 가 만족스러운 수준으로 감소될 때까지 반복된다. 그 판단의 기준으로 주로 이용되는 평균 제곱근인 잔차 E 는 다음과 같다.

$$E = \sqrt{\frac{\Delta \mathbf{d}^T \Delta \mathbf{d}}{N}} \quad (5-5)$$

여기서 N 은 자료의 개수이다.

이러한 Gauss-Newton법에서는 전진해(모델링 응답)의 모델변수에 대한 편미분을 필요로 한다. 어떤 블록의 전기비저항에 관해서 (4-5)식의 양쪽을 미분하면 아래와 같다.

$$\mathbf{K} \mathbf{u}' = -\mathbf{K}' \mathbf{u} \quad (5-6)$$

여기서 ‘는 미분을 나타낸다. 역산에서 많은 모델 변수에 대한 편미분은 서로 다른 소스지점에서 얻어져야 한다. (5-6) 식의 오른쪽 항의 개수는 (4-5) 식의 소스벡터 개수와 모델 변수 개수의 곱과 같다. 이렇게 많은 행렬식 개수는 편미분 계산을 어렵게 한다. 그러나 상반성(reciprocity)원리를 적용하면 편미분은 행렬식을 직접 풀지 않고서도 효율적으로 얻어질 수 있다(Rodi, 1976;

Tripp et al., 1984; Sasaki, 1989). 그 개념의 핵심은 수신기 지점에 위치하는 (가상의 단위)소스로부터 도출되는 전진해의 1차 결합에 의해 얻어지게 된다는 것이다. 즉 실제 전원과 수신위치에서의 가상전원에 관한 모든 절점에서 포텐셜이 한번에 계산되고, 이러한 포텐셜이 모델변수에 대한 편미분으로 저장한다.

평활화제약 역산의 반복과정에서 최적의 라그랑지 곱수 λ 을 결정하기 위해서 Constable et al.(1987)에 의해 제안된 Occam법을 적용하였다. Occam법의 두드러진 특징은 변수 λ 가 각 반복단계에서 수정량의 제어와 평활화 변수로써 동시에 사용되는 것이다(deGroot-Hedlin and Constable, 1990; Parker, 1994). 관측방정식 (5-4) 식 혹은 정규방정식 (5-3) 식을 일련의 시험적인 λ 값에 대해 풀 뒤, 각각의 λ 에 대해 (5-5) 식에 의해서 정의되는 비적합(평균 제곱근 잔차)은 3차원 전진 문제 (4-3) 식을 풀면 구해진다. Occam 과정은 다음 반복을 위한 출발로써 최소 비적합을 주는 λ 로 구해지는 모델을 선택한다. 그 최소화는 간단한 1차원적 추적(one-dimensional search)에 의해 수행 될 수 있다.

최적의 λ 을 결정하기 위한 다른 방법으로는 ABIC(Akaike's Bayesian information criterion)법(e.g, Uchida, 1993), GCV(generalized cross-validation)법(e.g., Haber and Oldenburg, 2000), L-curve(e.g., Gunther et al., 2006) 등도 있다. 한편 이명중 등(1999)과 Yi et al.(2001)은 단일 λ 가 아닌 공간적으로 변화하는 λ 을 Backus-Gillbert 전개함수의 원리를 바탕으로 유도하는 ACB(active constraint balancing)법을 제안하였다.

6. 전기비저항 탐사

6.1 탐사 방법

제주시 남제주군 남원읍 수망리 물영아리오름 습지의 분포범위 및 심도를 파악하기 위해 물영아리오름 습지의 가장자리를 통과하도록 4개의 탐사측선을 격자 형태로 설정하여 탐사자료를 획득하였다(Figs. 6.1 and 6.2). RE-01과 RE-03 측선의 경우 서쪽에서 동쪽 방향으로 전개한 측선으로 전극 간격 5.0m, 전극 39~40개, 측선길이 190~195m, 전개계수 $n=9$ 로 하여 쌍극자배열로 탐사를 실시하였다. 습지의 남쪽에서 북쪽 방향으로 전개한 RE-2측선은 전극간격 2.0m, 전극갯수 98개, 측선길이 194m, 전개계수 $n=9$ 으로, RE-04측선은 전극간격 5.0m, 전극갯수 40개, 측선길이 195m, 전개계수 $n=9$ 로 탐사야외상수를 설정하여 마찬가지로 쌍극자배열법(Fig. 6.3)으로 탐사를 실시하였다(Table 6.1).

Table 6.1 Survey constants used in the dipole-dipole resistivity surveys conducted in the study area

Line	Dipole spacing	Line length	No. of electrodes	Position	
				From	To
RE-01	5 m	190 m	39	X: 171292.7 Y: 35962.0	X: 171455.9 Y: 35872.1
RE-02	2 m	194 m	98	X: 171358.1 Y: 35837.6	X: 171451.6 Y: 36010.3
RE-03	5 m	195 m	40	X: 171310.8 Y: 35997.7	X: 171482.4 Y: 35910.5
RE-04	5 m	195 m	40	X: 171324.5 Y: 35856.6	X: 171407.3 Y: 36029.6

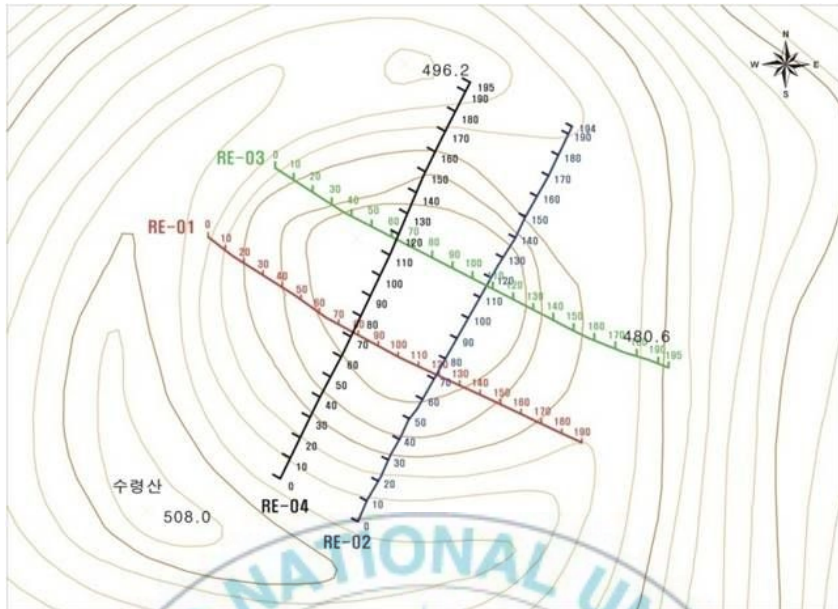


Fig. 6.1. Four resistivity surveys lines arranged in the study area.

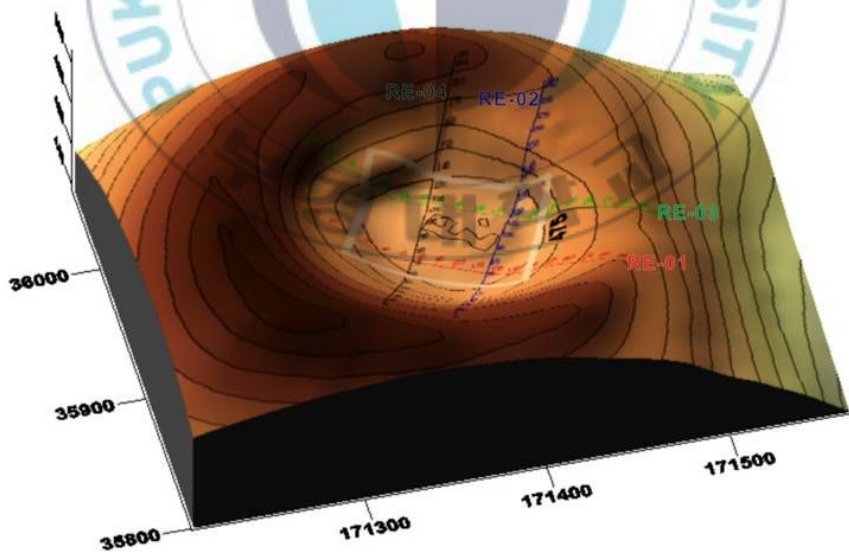


Fig. 6.2. Surface topography around the Mulyeongarioreum wetland.

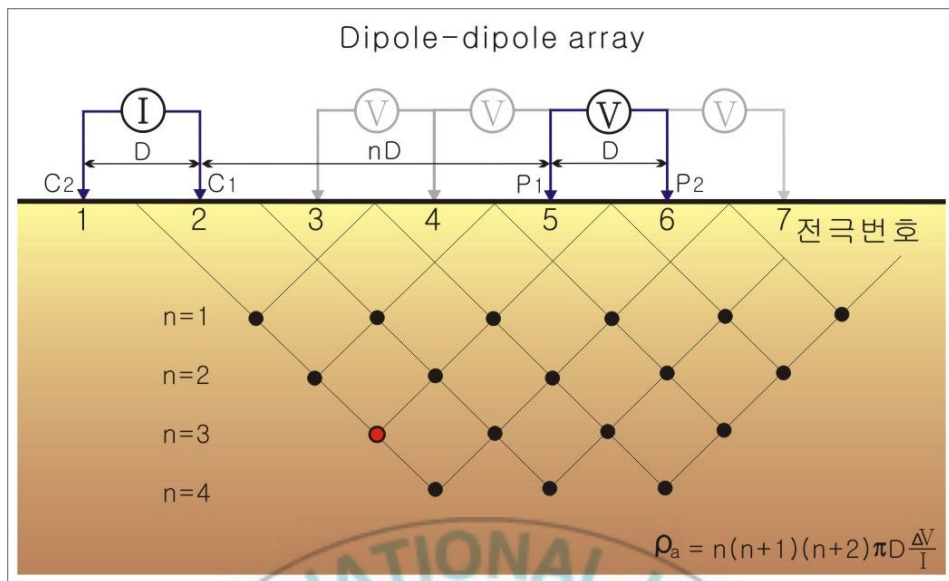
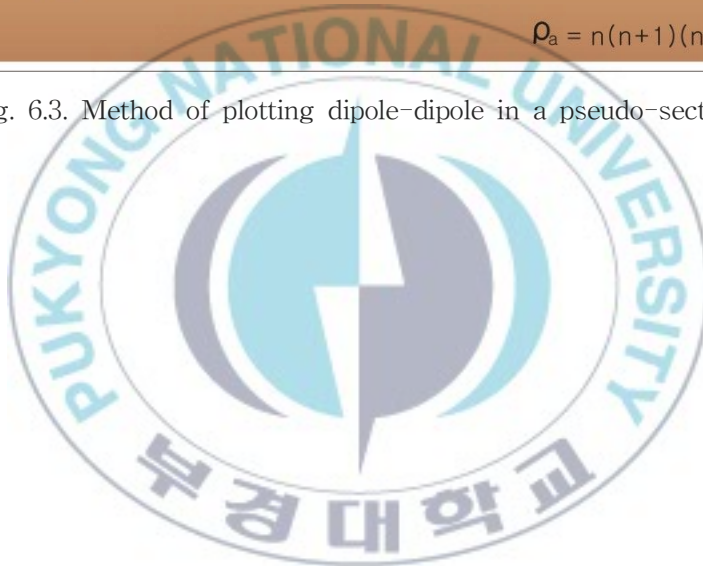


Fig. 6.3. Method of plotting dipole-dipole in a pseudo-section.



6.2 탐사 결과의 해석 방법

현장 자료는 전극간격 2.0~5.0m, 전개계수 $n=9$ 로 탐사야외상수를 설정하여 연구지역에 총 4개의 측선을 격자형으로 하여 쌍극자 배열법으로 겹보기 비저항을 취득하였다. 지하 구조모델에 대한 모델링 단계에서는 유한요소 방정식을 풀이하기 위하여 ICCG 반복법을 사용하였으며, 역산 단계에서는 쌍극자 배열법을 통해 취득된 RE-01~RE-04 측선의 겹보기 비저항과 이론적 비저항과의 오차를 최소화 시키는 방법으로 반복적 비선형 최소자승 역산을 사용하였다. 즉 겹보기 비저항 가단면도는 그 자체가 지하구조 모델을 말해 주는 것이 아니라 단지 지하구조에 의한 반응의 표현일 뿐이므로 이론적인 지하모델의 비저항값과의 비교를 통해 가장 근접한 지하모델을 선택하는 것이다(Fig. 6.4).

역산은 5장에서 언급한 평활화제약(smoothness constraint) 역산법을 이용하였으며, 평활화제약 역산의 반복과정에서 최적의 라그랑지 곱수를 결정하기 위해서 2차원 역산의 경우 이명종(1999), Yi et al.(2001) 등에 의해 개발된 공간적으로 변화하는 라그랑지 곱수를 이용하는 방식인 ACB(active constraint balancing)법을 사용하였으며 3차원 역산의 경우 Constable et al.(1987)에 의해 제안된 Occam법을 사용하였다.

3차원 역산의 경우 물영아리오름 습지에서 실시된 총 4개의 측선을 통해 얻어진 겹보기 비저항 데이터 가운데 경사기록이 없는 화구로 추정되는 평지에서의 데이터를 바탕으로 역산을 수행하였다. 이는 습지부의 경우 지형기록이 없으므로 역산 시 나타날 수 있는 지형의 영향을 배제되므로 정확한 습지 범위 및 심도를 영상화 할 것으로 판단되었기 때문이다.

역산결과 도출된 물영아리오름 습지의 비저항 분포로부터 습지의 영향 범위는 습지에서 채취된 시료의 전기전도도를 기준으로 $200\Omega\text{m}$ 이하의 비저항 범위로 추정하였다.

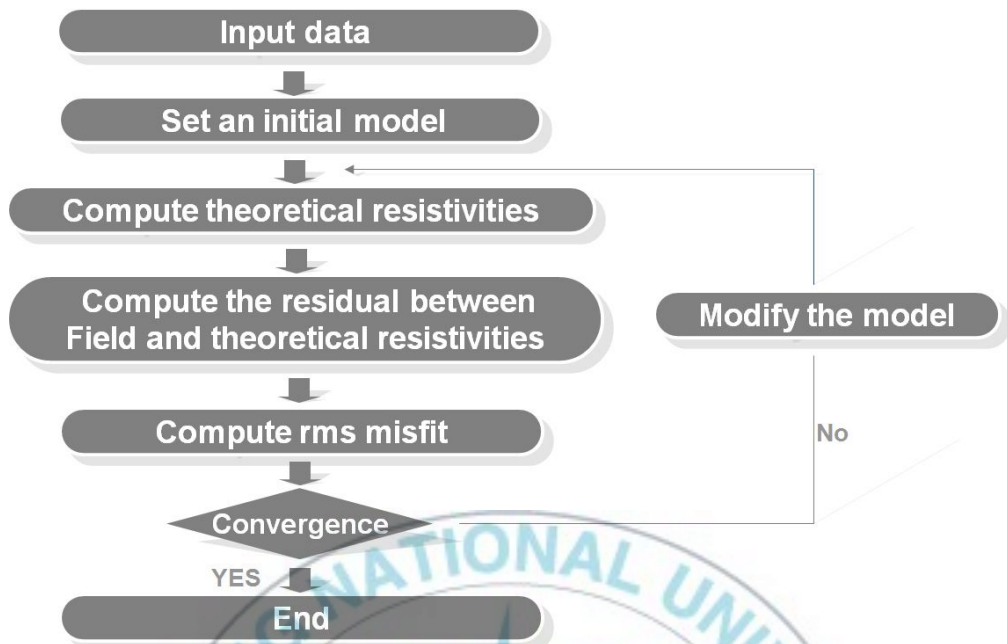


Fig. 6.4. Flow chart for resistivity inversion.

6.3 측선별 해석

RE-01 측선은 화구 남측에서 서쪽에서 동쪽 방향으로 전개한 측선으로 전극간격 5m, 전극개수 39개, 측선길이 190m, 전계개수 $n=9$ 로 설정하여 탐사를 실시하였다. Rms misfit는 7번의 반복을 거친 후 7.0%로 비교적 낮은 수준까지 떨어졌으며, 역산 결과는 상당히 양호한 것으로 판단된다.

RE-01 단면상에서 습지로 추정되는 부분은 $200\Omega\text{m}$ 이하의 낮은 비저항 분포 영역으로서 중앙부가 깊고 측면부로 갈수록 높아지는 경향을 보인다. 화구 주위의 고도가 상대적으로 높은 지역으로 분류되는 화구연 구간은 지표하 3~5m 내외(비저항 $1,000\Omega\text{m}$ 이하)를 제외하고 $2,000\sim 20,000\Omega\text{m}$ 내외의 높은 비저항 분포를 보이며, 화구연 상부에서 하부로 갈수록 비저항이 점차 높아지는 경향을 보인다. 이는 표토 하부에 분포하는 기반암 또는 스코리아가 하부로 갈수록 신선해 지는 것으로 판단된다. 한편 습지 하부(EL. 445.0~455.0m)는 $2,500\sim 4,000\Omega\text{m}$ 내외의 다소 높은 비저항으로 형성되고 있다(Fig. 6.5).

전기비저항 탐사결과 화구로 추정되는 평지에 형성된 $200\Omega\text{m}$ 이하로 추정되는 습지는 측선거리 60~120m 구간에 걸쳐 분포하고 있으며, 최대 영향심도는 5m로 측선거리 90m 지점에서 나타난다.

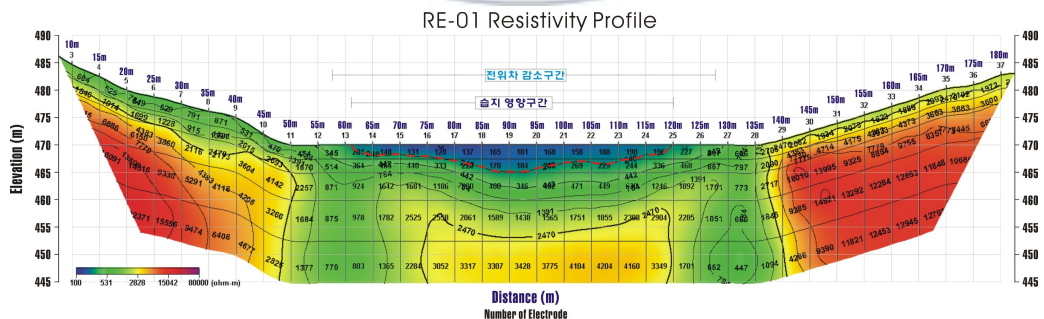


Fig. 6.5. Resistivity section reconstructed from dipole-dipole data measured along line RE-01.

RE-02 측선은 화구 남측에서 남쪽에서 북쪽 방향으로 전개한 측선으로 전극간격 2m, 전극개수 98개, 측선길이 194m, 전계개수 $n=9$ 로 설정하여 탐사를 실시하였다. Rms misfit는 7번의 반복을 거친 후 7.7%로 비교적 낮은 수준까지 떨어졌으며, 역산 결과는 RE-01과 마찬가지로 상당히 양호한 것으로 판단된다.

RE-02 단면상에서 습지로 추정되는 부분은 $200\Omega\text{m}$ 이하의 낮은 비저항 분포 영역으로서 중앙의 우측부에서 가장 깊고 측면부로 갈수록 얕아지는 경향을 보인다. 습지의 형태가 다른 측선에 비해 요철형으로 나타나는데 이는 전극간격을 2m로 설정하여 습지 경계부가 보다 정밀하게 해석되었기 때문이다. 화구 주위의 고도가 상대적으로 높은 지역으로 분류되는 화구연 구간은 지표 하 3m 내외(비저항 $1,000\Omega\text{m}$ 내외)를 제외하고 $2,000\sim 80,000\Omega\text{m}$ 내외의 높은 비저항 분포를 보이고, 특히 136~152m구간은 주변 화구연 보다 높은 비저항으로($10,000\sim 80,000\Omega\text{m}$ 내외) 형성되고 있다(Fig. 6.6).

전기비저항 탐사결과 화구로 추정되는 평지에 형성된 $200\Omega\text{m}$ 이하로 추정되는 습지는 측선거리 64~122m 구간에 걸쳐 분포하고 있으며, 최대 영향심도는 7m로 측선거리 106m 지점에서 나타난다.

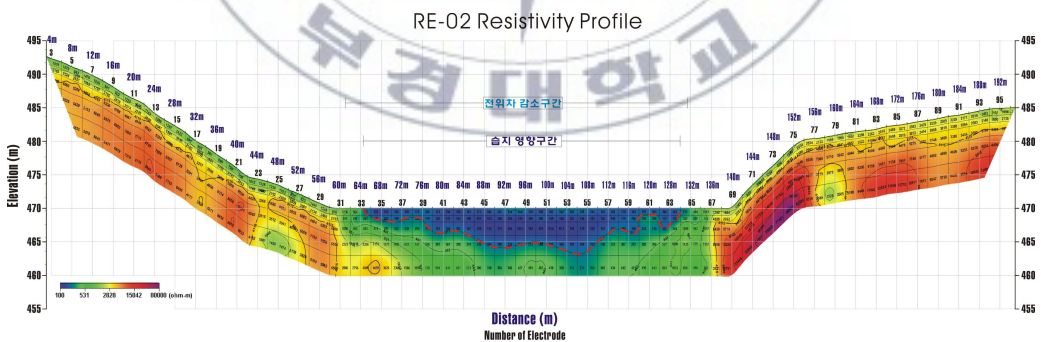


Fig. 6.6. Resistivity section reconstructed from dipole-dipole data measured along line RE-02.

RE-03 측선은 화구 북측에서 서쪽에서 동쪽 방향으로 전개한 측선으로 전극간격 5m, 전극개수 40개, 측선길이 195m, 전계개수 $n=9$ 로 설정하여 탐사를 실시하였다. Rms misfit는 7번의 반복을 거친 후 7.7%로 비교적 낮은 수준까지 떨어졌으며, 역산 결과는 RE-01 및 RE-02 측선과 마찬가지로 상당히 양호한 것으로 판단된다.

RE-03 단면상에서 습지로 추정되는 부분은 $200\Omega\text{m}$ 이하의 낮은 비저항 분포 영역으로서 중앙부가 평탄하고 측면부로 갈수록 높아지는 경향을 보인다. 화구 주위의 고도가 상대적으로 높은 지역으로 분류되는 화구연 구간은 좌측구간은 지표 하 5m 이상, 우측구간은 2~3m 내외를 제외하고 $2,000\Omega\text{m}$ 이상의 상대적으로 높은 비저항 분포를 보이고, 화구연 좌측구간 하부에서 습지 하부로의 고비저항 연장대가 길게 나타난다. 특히 측선거리 85~115m 하부에 주변보다 낮은 저비저항이 형성되며, 이는 과거 화도로 추정된다. 화구연 하부는 상부에서 하부로 갈수록 비저항값이 점차 증가되며 하부로 갈수록 기반암 또는 스코리아가 선명한 상태일 것으로 판단된다(Fig 6.7).

전기비저항 탐사결과 화구로 추정되는 평지에 형성된 $200\Omega\text{m}$ 이하로 추정되는 습지는 측선거리 44~120m 구간에 걸쳐 분포하고 있으며, 최대 영향심도는 8m로 측선거리 75~100m 지점에 넓은 범위로 나타났다.

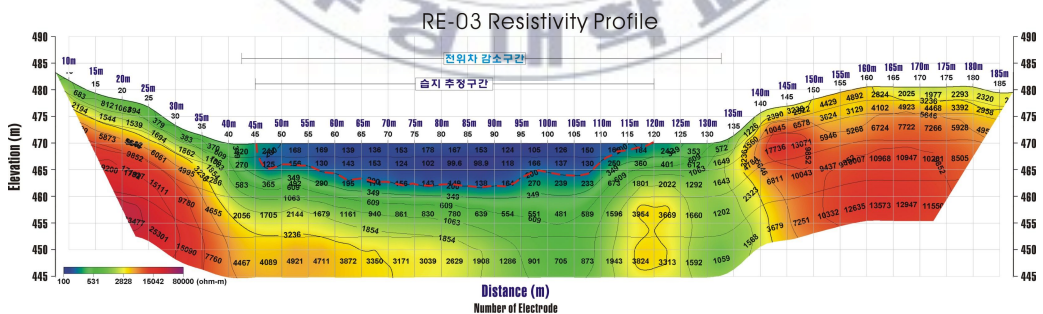


Fig. 6.7. Resistivity section reconstructed from dipole-dipole data measured along line RE-03.

RE-04 측선은 화구 서측에서 남쪽에서 북쪽 방향으로 전개한 측선으로 전극간격 5m, 전극개수 40개, 측선길이 195m, 전계개수 $n=9$ 로 탐사야의 설계상수를 설정하여 탐사를 실시하였다. Rms misfit는 7번의 반복을 거친 후 13.6%로 다른 측선에 비해 높게 나타났다.

RE-04 단면상에서 습지로 추정되는 부분은 $200\Omega\text{m}$ 이하의 낮은 비저항 분포 영역으로서 중앙 우측부가 가장 깊고 측면부로 갈수록 알아지는 경향을 보인다. 화구 주위의 고도가 상대적으로 높은 지역으로 분류되는 화구 연 구간은 지표하 3~5m 내외(비저항 $1,000\Omega\text{m}$ 이하)를 제외하고 $2,000\sim 60,000\Omega\text{m}$ 내외의 상대적으로 높은 비저항 형성되고 있으며 화구연 좌측구간 하부에서 습지 하부로의 고비저항 연장대가 길게 나타난다. 특히 RE-03 측선과 마찬가지로 측선거리 50~135m 하부에 주변보다 낮은 저비저항대가 형성되며, 이는 과거 화도로 추정된다. 화구연 하부는 상부에서 하부로 갈수록 비저항값이 점차 증가되며 하부로 갈수록 기반암 또는 스코리아가 신선한 상태일 것으로 판단된다(Fig. 6.8).

전기비저항 탐사결과 화구로 추정되는 평지에 형성된 $200\Omega\text{m}$ 이하로 추정되는 습지는 측선거리 69~128m 구간에 걸쳐 분포하고 있으며, 최대 영향심도는 10m로 측선거리 100m 내외에서 나타났다.

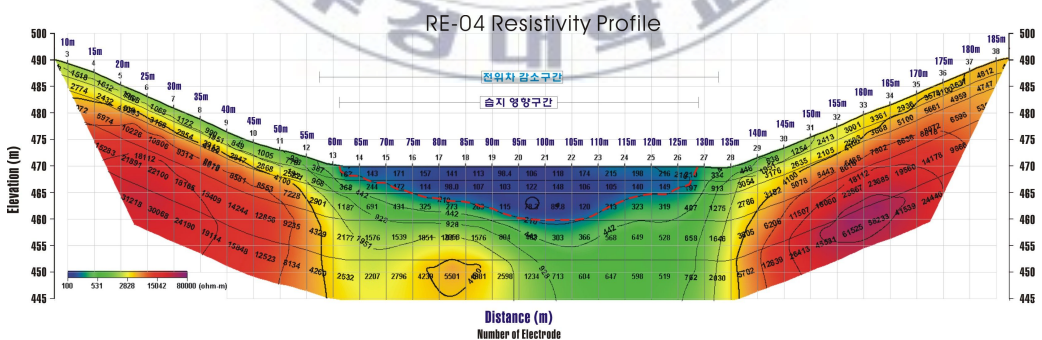


Fig. 6.8. Resistivity section reconstructed from dipole-dipole data measured along line RE-04.

6.4 3차원 역산 결과

3차원 역산은 물영아리오름 습지에서 실시된 총 4개의 측선을 통해 얻어진 결보기 비저항 데이터 가운데 화구로 추정되는 곳의 데이터를 바탕으로 수행되었다. 특히 습지부의 경우 지형기복이 없으므로 역산 시 나타날 수 있는 지형의 영향을 배제하였기 때문에 정확한 습지 범위 및 심도를 영상화될 가능성이 많을 것으로 판단되었다.

3차원 모델은 $111 \times 91 \times 41 (=414141)$ 개의 유한요소 절점으로 구성하였으며, 5개의 요소를 한 개의 블록으로 하여 전체 $18 \times 14 \times 7 (=1764)$ 개로 나누었다 (Fig. 6.9). 심도에 따른 블록의 크기는 심도에 따라 감도(sensitivity)가 큰 천부의 경우에 작게 하였으며, 감도가 낮은 심부의 경우에 크게 하였고 역산 시 7번의 반복을 실시하였으며, 최종 Rms misfit는 4.6%로 2차원 역산에서 나타난 7.0~13.6% 보다 훨씬 낮게 나타난다(Fig. 6.10).

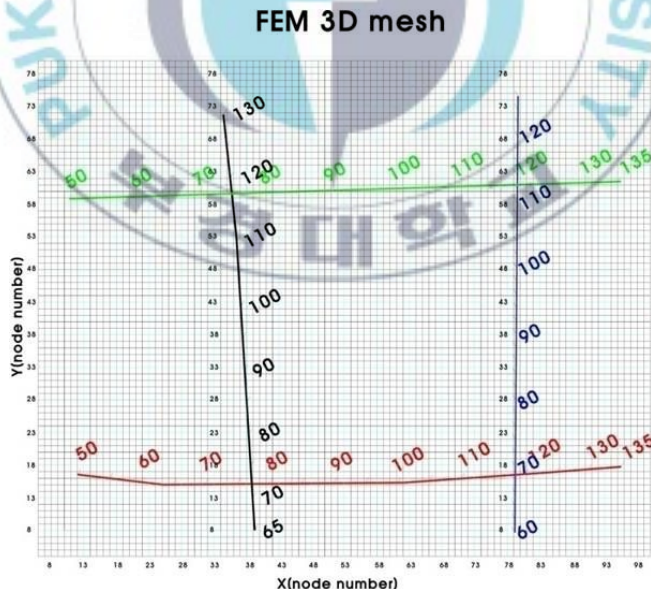


Fig. 6.9. A 3-D inversion zone of the Mulyeongarioreum wetland.

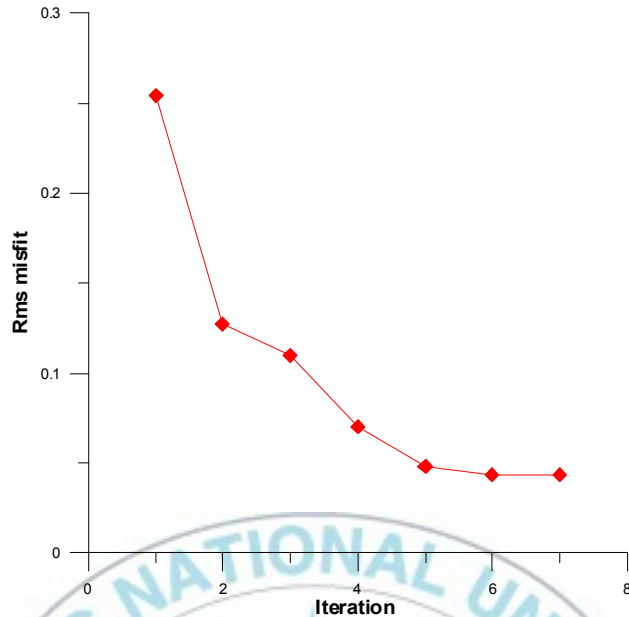


Fig. 6.10. Variation of Rms misfits as a function of iteration.

물영아리오름 습지의 화구로 추정되는 평지에 3차원 역산을 수행한 결과 얕은 곳에서는 전반적으로 $200\Omega\text{m}$ 이하의 낮은 비저항분포가 나타났으며, 습지의 영향 범위로 추정된다. 이 저비저항대는 RE-01과 RE-02 측선에서는 5m내외의 심도를 보이는 반면 RE-03과 RE-04 측선은 5~25m내외의 다소 깊은 심도를 보인다. 하지만 전반적인 비저항 분포는 2차원 역산결과와 유사하게 나타난다. 4개 측선으로 둘러싸인 중앙부분은 주변에 비해 다소 높은 비저항을 나타내는데 이는 습지 중앙부가 고도가 높은 비탈면에서 가장 멀어서 일조량이 주변에 비해 높아 다소 건조한 상태로 분포하기 때문으로 판단된다.

한편 비탈면과 습지의 경계부에 위치하는 측선가장자리(분석구 구간)는 일부지역(RE-01, RE-04 측선)에서 $2,000\Omega\text{m}$ 내외의 상대적으로 높은 비저항분포를 나타낸다. 이는 표토 및 습지 하부에 분포하는 기반암의 영향인 것으로 판단된다(Figs 6.11~6.14).

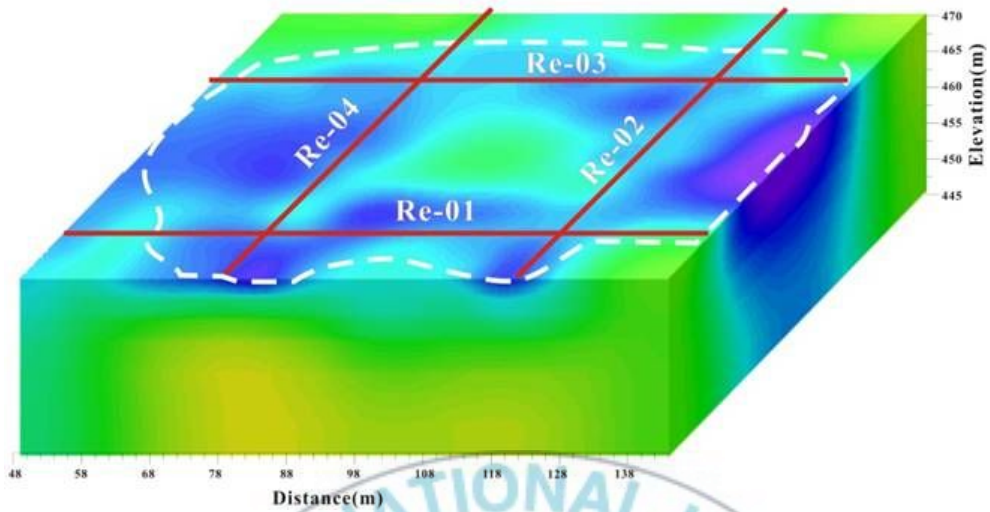


Fig. 6.11. 3-D inversion results obtained from dipole-dipole data measured in the Mulyeongarioreum wetland.



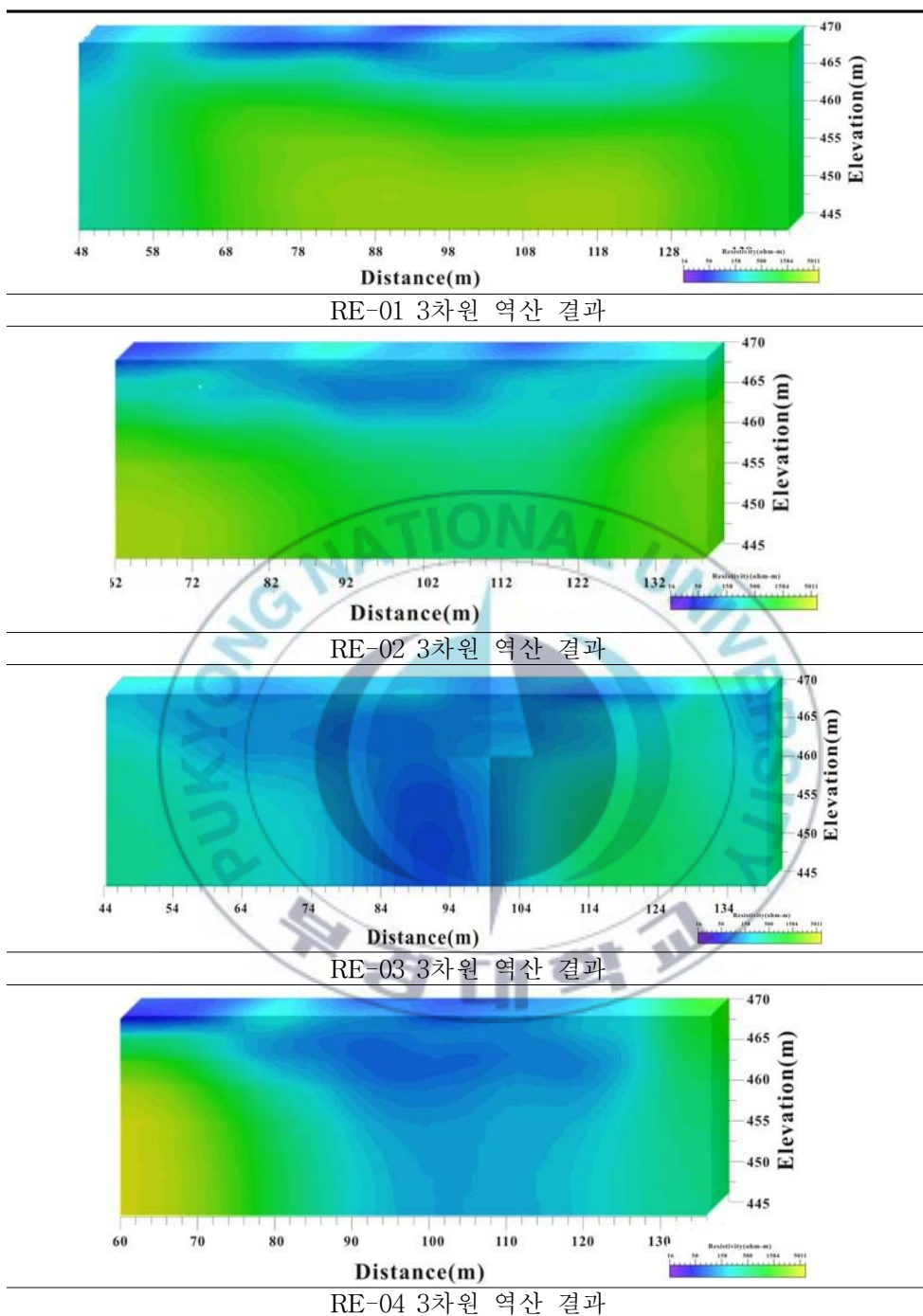


Fig. 6.12. 3-D inversion results along lines RE-01~RE-04 in the Mulyeongarioreum wetland.

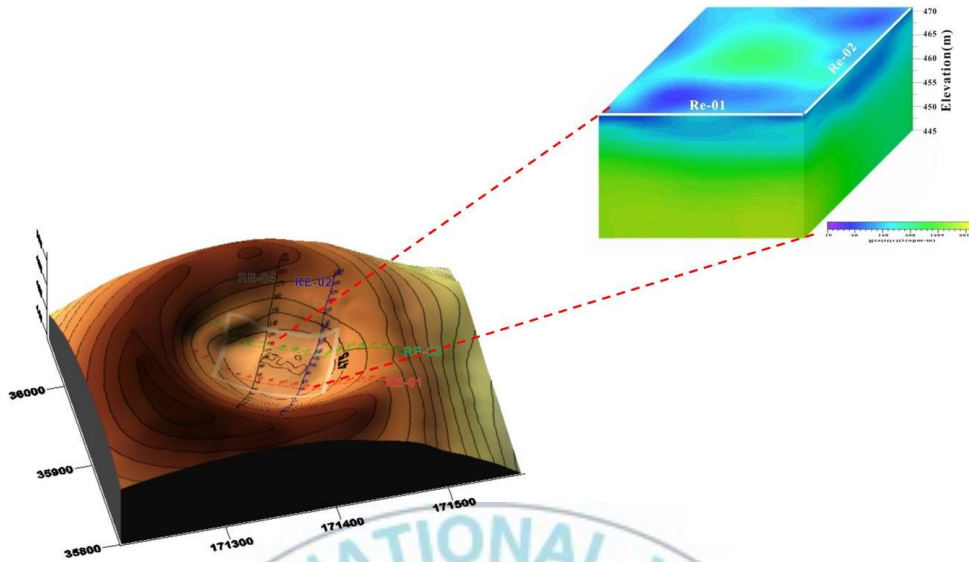


Fig. 6.13. A 3-D inversion image of the inner part with the survey lines in the Mulyeongarioreum wetland.

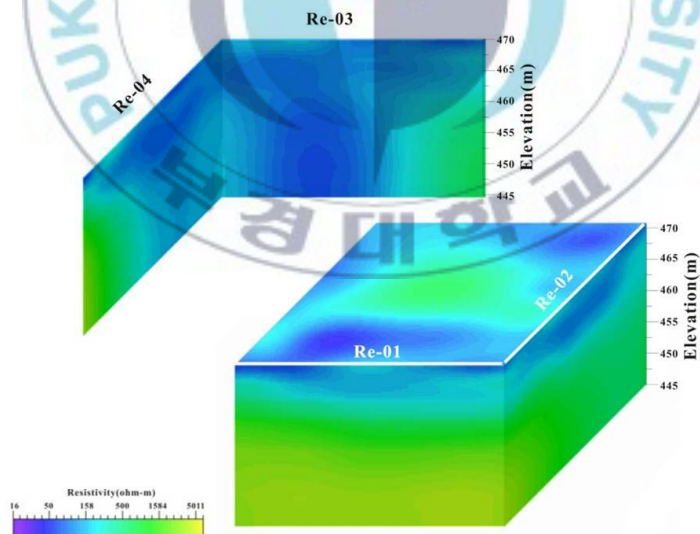


Fig. 6.14. Outside resistivity images of the inner volume in the Mulyeongarioreum wetland.

6.5 습지 영향구역 검토

물영아리 습지보전구역 내에서 건기 시 총 4측선의 전기비저항 탐사를 실시하였으며, 3차원 영상과 2차원 단면을 조합한 Fence Diagram으로 작성하여 습지의 영향구역을 검토하였다.

습지의 영향구역은 건기 시 N60W 방향으로 80 × 60m 규모의 장방형인 형태로 분포하며, 전기비저항 탐사 해석단면상에서 확인되는 깊이는 2차원 역산결과 5.0~10.0m로, 3차원 역산결과 5.0~25.0m로 나타났으며, 최대 깊이는 25.0m 내외인 것으로 분석되었다(Figs. 6.15 and 6.16). 특히 습지의 NW 방향의 지역이 주변보다 다소 깊은 형태를 띠는 것으로 확인되었다.

2차원 및 3차원 역산 결과, 습지는 중앙부가 가장 깊고 측면부로 갈수록 얕아지는 경향을 보이며 화구연구간 상부에서 습지부 하단까지의 고비저항 분포는 대체로 유사하게 나타났다. 또한 3차원 역산결과 NW(RE-03, RE-04)방향이 다소 깊은 형태를 보여주며 2차원 역산에서도 마찬가지로 NW방향에서 화도로 추정되는 주변보다 낮은 비저항대를 보여 2, 3차원 역산결과가 서로 유사한 것으로 판단된다.

한편 3차원 역산 결과 습지 중심부의 지표근처에서 비교적 높은 비저항분포가 나타났다. 이러한 영상은 2차원 해석으로는 알 수 없는 것으로 3차원 해석의 우월성을 단적으로 보여주는 사례라고 여겨진다. 그러나 그러한 고비저항대의 진실 여부는 분명치 않다. 그곳이 습지 중앙부이기 때문에 현장에서 접근할 수 없었기 때문이다.

건기 시와 달리 우기 시의 경우 습지의 영향구역이 건기 시 보다 확장되어 물영아리 오름의 화구의 평탄부 전체로 확대될 것으로 예상된다

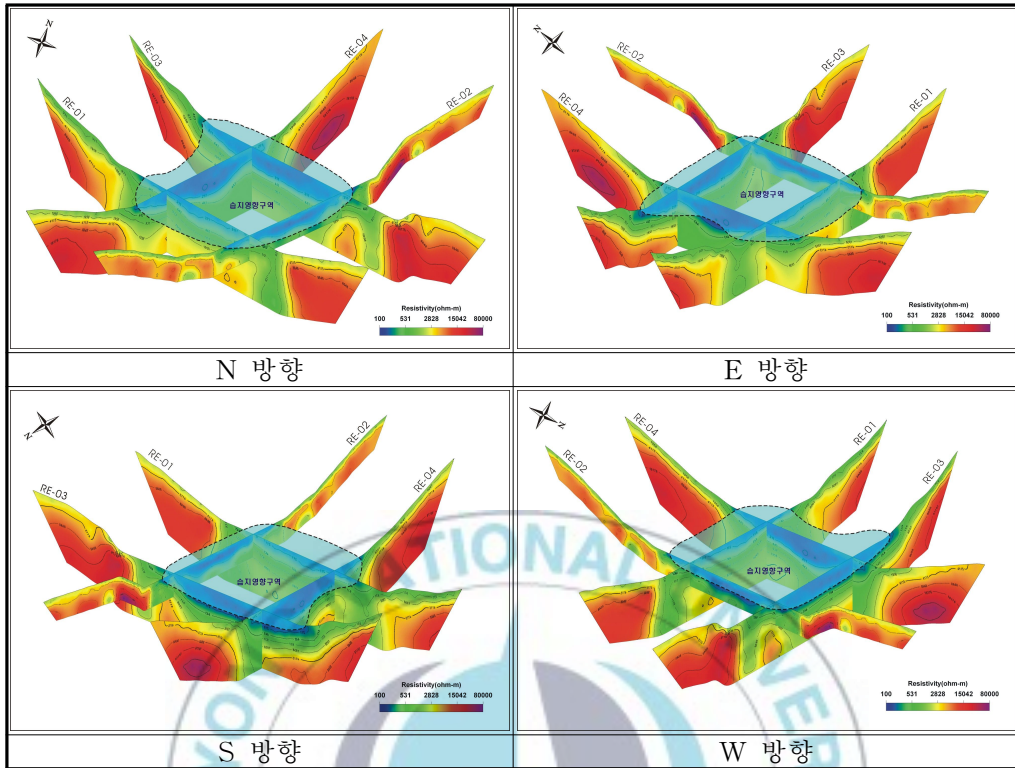


Fig. 6.15. A wetland influence zone deduced from the 2-D inversion in the Mulyeongarioreum wetland.

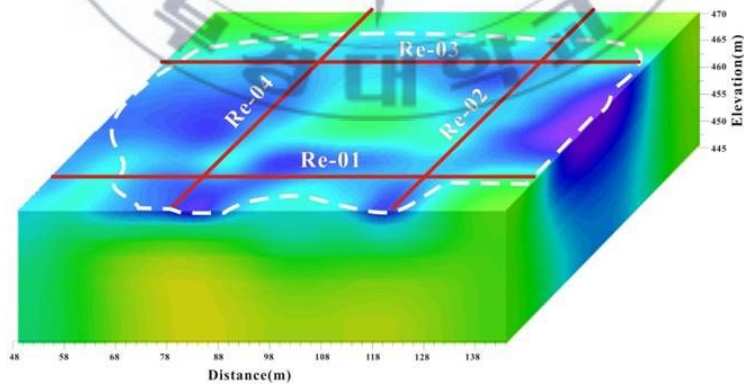


Fig. 6.16. A wetland influence zone deduced from the 3-D inversion in the Mulyeongarioreum wetland.

7. 결 론

습지는 지구상에서 가장 영양물질이 풍부하고 생산성이 높은 생태계로 인식되고 있으며, 여러 가지 생태적 기능을 제공해 준다. 특히 물영아리오름 습지의 경우 생태학적으로 다양한 생물이 서식하는 습생식물습지이고, 지질학적으로는 스트롬볼리형 분출에 의한 분석구로 그 중요성이 매우 크다. 대형 조사장비의 사용이 극히 제한적이거나 불가능한 지역인 물영아리오름 습지(고산습지)의 분포범위 판단에 있어서, 지구물리탐사방법 중 주변지역과 전기전도도차가 큰 습지에서 적용성이 뛰어난 전기비저항 탐사법이 매우 효과적일 것으로 판단된다.

본 논문에서는 물리탐사 기술 중에 지표에서 많이 사용되고 있는 쌍극자 배열 전기비저항법을 이용하여 물영아리오름 습지의 분포 범위 및 심도를 파악하였고 그 하부구조에 대해 정밀한 지하구조 영상을 획득할 수 있었다. 3차원적인 전위 분포를 모델링하기 위하여 유한요소법을 이용하였으며, 현장자료는 2차원 및 3차원 역산과정을 수행하여 해석하였다.

습지의 영향구역은 현장에서 취득된 시료의 전기전도도를 바탕으로 200 ohm-m이하의 비저항을 기준으로 설정하였으며 Rms misfit는 2차원 역산의 경우 7.0~13.6%의 범위를 나타냈고 3차원 역산의 경우 이보다 낮은 4.6%로 비교적 좋은 수렴 상태를 보인다. 역산 결과 나타난 습지는 N60W 방향으로 80 × 60m 규모의 장방형인 형태로 분포하고 있으며, 전기비저항 탐사 해석단면상에서 확인되는 깊이는 5~25m 내외인 것으로 분석되었다. 그리고 NW 방향의 지역이 25m 내외로 다소 깊게 나타났다.

마지막으로 본 논문에서 제시된 3차원 전기비저항 역산은 습지의 분포범위 및 심도를 확인할 수 있는 지구물리탐사법으로 향후 물영아리오름 습지와 같은 환경과 유사한 지하구조에 대해 정밀한 영상 제공을 할 수 있을 것으로 판단된다.

8. 참고문헌

- 구본학, 김귀곤. 2001. 습지기능 및 가치 평가를 위한 방법론에 대한 고찰.
한국환경복원녹화기술학회 하계학술발표 논문집, pp 42-46.
- 김희준, 2006. 5. 한국의 전기비저항탐사, 자원환경지질, 제 39권, 제 4호, pp 473-483.
- 농업진흥공사(ADC), 1971. 제주도 지하수보고서, pp 1-381, 1 지질도 (1:100,000 축척), 4 도면.
- 박기화 외, 2000. 제주(백아도, 진남포) 지질도폭, 한국자원연구소, pp 1-59.
- 박종오, 김희준, 송무영, 2004. 3. 지형효과를 포함한 3차원 전기비저항 역산, the Journal of Engineering Geology, Vol. 14, No.1, pp 21-28.
- 박종오, 김희준, 송무영, 유영준, 2005. 3. 3차원 전기비저항 역산방법을 이용한 삼보 광산에서 금광 탐사, the Journal of Engineering Geology, Vol. 15, No.1, pp 19-27.
- 박충화, 2007. 3. 전기비저항 탐사의 다양한 배열 방법에 대한 해석 기법, the Journal of Engineering Geology, Vol. 17, No.1, pp 49-55.
- 신성희, 2003. 4. 전남 무안지역에 대한 3차원 전기비저항탐사에 관한연구, 대전대학교 석사학위논문, pp 6-40.
- 이명종, 김정호, 조성준, 정승환, 송윤호 (1999) 전기비저항 자료의 3차원 역산, 물리탐사, 2권, pp 191-201.
- 윤선 · 정차연 · 송시태 · 현원학, 2006. 제주도의 지질, 한국농촌공사 제주도 본부, pp 1-73, 1 지질도(1:150,000 축척).
- 윤선 · 현원학 · 정차연, 2005. 제주도 한라산의 지질. 지질학회지, 41(4), pp 481-497.
- 최현일, 최범영, 홍승호, 지광훈, 김주용, 이승렬, 이승구, 박덕원, 한종규, 1997. 응용지질학적활용을 위한 열극해석연구, 과학기술처, 181p.

- 환경부, 2001. 12 제주 물영아리 오름 습지보호지역 보전·관리대책수립,
pp 64-79.
- 原口九萬, 1930. 濟州火山島. 小川教授還曆記念論文集, pp.595-649, 1 地質圖.
- 原口九萬, 1931. 濟州島の地質. 朝鮮總督府 地質調査所 朝鮮地質調査要報,
10(1), pp 1-34, 11 圖版; pp 1-12, pl. 1 (英文)
- Constable, S.C., Parker, R.L. and Constable, C.G. (1987) A practical
algorithm for generating smooth models from electromagnetic
sounding data. *Geophysics*, v.52, pp 289-300.
- Cowardin, L.M., V. Carter and E.T. LaRoe. 1979. CLASSIFICATION OF
WETLANDS AND DEEPWATER HABITATS OF THE UNITED
STATES. U.S. Department of the Interior Fish and Wildlife Service
Office of Biological Services.
- Cylinder, P.D., K.M. Bogdan, E.M. Davis and A.I. Herson. 1995. Wetlands
Regulation: A complete guide to federal and California programs.
Point Arena : Solano Press Books.
- deGroot-Hedlin, C. and Constable, S. (1990) Occam's inversion to
generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric
data. *Geophysics*, v. 55, pp 1613-1624.
- Dey, A., and Morrison, H, F., 1979, Resistivity modeling for arbitrarily
shaped three-dimensional structures. *Geophysics*, Vol. 44, No. 4, pp
753-780.
- Fox, R. C., Hohmann, G.W., Lillpack, T.J., and Rijo, L., 1980,
Topographic effects in resistivity and induced-polarization surveys,
Geophysics, Vol. 45, No. 1, pp 75-93.
- Gunther, T., Rucker, C. and Spitzer, K.(2006) Three-dimensional
modeling and inversion of dc resistivity data incorporating
topography II. Inversion. *Geophysics. J. Int.*, v. 166, pp 506-517.

- Haber, E. and Oldenburg, D.W (2000) A GCV based method for nonlinear ill-posed problems. *Comput. Geosci.*, v. 4, pp 41-63.
- Kim, H.J. and Kim, Y. 1998, Two-dimensional inversion for dipole-dipole resistivity data. *J.Korean Inst. Mining Geology.*, vol, 21 pp 107-113.
- Kim, H.J. Yi, M-J., Cho, S-J. 2004, Application of high resolution geoelectric imaging techniques to geotechnical engineering in Korea, *Proc. ISRM Internat, Symp. 3rd ARMS. Kyoto, Japan*, pp 191-196.
- Lines, L.R. and Treitel, S. (1984) Tutorial: A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophys. Prosp.*, v.32, pp 159-186.
- Mitsch, W.J. and J.G. Gosselink. 1993. *Wetlands* (2nd. ed.). John Wiley & SONS, INC.
- Mulamoottil, G., B.G. Warner and E.A. McBean. 1996. *Wetlands: Environmental Gradients, Boundaries, Buffers*. Lewis Publishers.
- Parker, P.L. (1994) *Geophysical Inverse Theory*. Princeton Univ. Press.
- Ramsar Convention. 1993. *Towards the Wise Use of Wetlands: Report of the Ramsar convention Wise Use Project*.
- Ramsar Convention. 1998. *The Criteria for Identifying Wetlands of International Importance*.
- Rodi, W.L, 1976, A technique for improving the accuracy of finite element solutions for magnetotelluric data. *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, v44, pp 483-506.
- Rucker, C., Gunther, T. and Spitzer, K. (2006) Three-dimensional modeling and inversion of dc resistivity data incorporating topography I. Modeling. *Geophys. J. int.*, v. 166, pp 495-505.
- Sasaki, Y. 1981, Automatic interpretation of resistivity sounding data over two-dimensional structure (I). *Butsuri-Tanko*, v. 166, pp 495-505.

- Sasaki, Y. 1989, Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data. *Geophysics*, v. 5, pp 254-262.
- Sasaki, Y. 1992, Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophys. Prosp.*, v,40, pp 453-463.
- Sasaki, Y. 1994, 3-D resistivity inversion using the finite-element method, *Geophysics*, Vol.59, No, 11, pp 1839-1848.
- Sasaki, Y. 1999, 3-D inversion of electrical and electrical and electromagnetic data on PCs: *Proc.3-D EM*, pp 128-131.
- Sasaki, Y. 2001, Three-dimensional inversion of static-shifted magnetotelluric data, 5th SEGJ International Symposium, pp 185-190.
- Tikhonov, A.N. and Arsenin, V.Y. (1977) *Solutions to Illposed problems*. John Wiley and Sons, Inc.
- Tiner, R.W. 1999. *Wetland Indicators: A Guide to Wetland Identification, Delineation, Classification, and Mapping*. Lewis Publishers.
- Tripp, A.C., Hohmann, G.W. and Swift, C.M. (1984) Two dimensional resistivity inversion. *Geophysics*, v. 49, pp 1708-1717.
- Torres-Verdin, C., Druskin, V.D., Fang, S., Knizhnerman, L.A. and Malinverno, A. (2000) A dual-grid nonlinear inversion technique with applications to the interpretation of dc resistivity data. *Geophysics*. v. 65. pp 1733-1745
- Uchida, T. (1993) Smooth 2-D inversion for magnetotelluric data based on statistical criterion ABIC. *J. Geomag. Geoelectr.*, v. 45. pp 841-858.
- U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 2008, *Hydrogeomorphic wetland classification system: an overview and modification to better meet the needs of the natural resources conservation service*, Technical note No. 190-8-76.

- Ward, S. H., 1990, Resistivity and induced polarization methods, Geotechnical and Environmental Geophysics, pp 147–186.
- Yi, M., J., Kim, J., H., Song, Y., H., Cho, S., J., Chung, S., H., and Suh, H., 2001, Three-dimensional imaging of subsurface structure using resistivity data, Geophysical Prospecting, 49, pp 483–497.
- Zhou, B, and Greenhalgh. S.A, 2001, Finite element three-dimensional direct current modeling: accuracy and efficiency considerations. Geophys. J. Int., v. 145, pp 679–688.



요 약

최근 세계적으로 습지의 반이 사라져가고 있고 1950년도 이후로는 사라져가는 속도가 점차적으로 증가되고 있어 습지에 대한 관심이 높아지고 있다. 습지가 물 저장, 폭풍방지, 홍수억제, 호안의 안정성 확보 및 침식조절, 지하수 보충 및 유지, 수질정화 등의 기능을 가지고 있어 습지보전은 환경 보호 측면에서 매우 중요하다. 제주도의 물영아리오름의 경우 생태학적으로는 다양한 생물이 서식하는 습생식물습지로서, 지질학적으로는 스트롬볼리형 분출에 의한 분석구로서 그 환경학적 중요성이 인정되어 랍사르 협약습지에 등록되었다.

본 연구는 물영아리오름 습지의 분포 범위 및 심도를 조사하여 습지의 관리 및 보호에 필요한 기초자료를 확보하고자 하는데 목적을 둔다. 물영아리오름 습지에서 총 4개의 측선을 격자형으로 설정하여 쌍극자 배열로 탐사를 실시하였고 획득된 자료를 바탕으로 유한요소법에 의한 3차원 해석이 수행되었다. 역산과정에서 상반성(reciprocity)의 원리로 자코비안(Jacobian)행렬의 효율성을 극대화 시켰다. 3차원 역산결과, 물영아리오름 습지는 건기시 80×60m의 장방형 형태로 5~25m의 분포 심도를 나타내었고, NW방향의 지역이 다소 깊은 형태를 띠는 것으로 확인되었다.

감사의 글

부족한 저를 이끌어 주시고, 논문이 완성되기까지 아낌없는 지도와 도움을 주신 김희준 교수님께 진심으로 감사드립니다. 아울러 심사기간 중에 학문의 편달과 도움을 주신 이기하 교수님, 공영세 교수님, 왕수균 교수님께 지면으로 감사를 표합니다. 학부 및 대학원 기간동안 성심껏 지도해주신 환경탐사 공학과 조태진 교수님, 엄정기 교수님, 김대철 교수님, 이광훈 교수님께도 다시 한번 감사드립니다. 그리고 이 논문에 대한 관심을 보여주시고 많은 도움을 주신 윤 선 교수님, 박미경 박사님, 이동성 박사님, (주)동해이엔지의 이창섭 사장님, (주)RockInfo의 이상배 부장님께도 진심으로 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

실험실에서 학문에 대한 충고와 격려, 연구의 어려움에 처할때마다 도움을 주신 장한누리, 한누리, 최지향님과 그리고 김도완, 김범임 후배님께 감사의 마음을 전합니다. 대학원 생활을 함께 하면서 여러 모로 도움을 주신 윤영호, 우기한, 한상훈, 남병훈 선배님들, 이성암, 김재홍, 문경호, 진정호, 신명호 동기님들, 석재욱, 이광수, 이보연, 김주연, 박소영, 김동현, 한선영, 서석완, 최형욱, 최대철, 정지윤 후배님들께 감사의 마음을 표합니다. 그리고 항상 힘이 되어준 벗인 민길, 호영, 진한, 정걸, 현주, 은정이에게 고마움을 전합니다. 또한 현장자료수집에 많은 도움을 주신 (주)동해이엔지 이병욱 차장님, 김종국 과장님, 허인실 대리님, 박미숙 대리님에게 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

마지막으로 항상 격려를 해주시며 아무 말씀 없이 저를 믿어주시고 힘이 되어주신 부모님과 형님에게 진심으로 감사드립니다.