



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

博士學位論文

電氣映像技法을 利用한 大地抵抗
率과 接地抵抗 分析에 관한 研究

濟州大學校 大學院

電氣電子工學科

夫 唱 填

2006年 12月

電氣映像技法을 利用한 大地抵抗 率과 接地抵抗 分析에 관한 研究

指導教授 金 豪 贊

夫 唱 墳

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2006年 12月

夫唱墳의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2006年 12月

A Study on the Analysis of Earth Resistivity
and Grounding Resistance Using Electrical
Image Technique

Chang-Jin Boo

(Supervised by Professor Ho-Chan Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2006. 12.

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	viii
LIST OF SYMBOLS	ix
SUMMARY	x
I. 서 론	1
II. 대지저항률과 접지저항	6
1. 대지저항률과 대지파라미터	6
1) 대지저항률 변화요인	7
2) 겘보기대지저항률	9
3) 지층별 대지파라미터 해석	12
2. 대지저항률 측정방법	14
1) 기본 측정방법	14
2) Wenner 방법	16
3) Schlumberger 방법	17
4) Dipole-dipole 방법	17
3. 접지저항	19
1) 기본이론	19
2) 접지저항 측정방법	21
III. 전기영상기법	24
1. 전기영상에서의 수학적 모델 설계	24
1) 측정 오차발생 요소	25
2) 전기영상기법의 수학적 모델	27
2. 전기영상 기법에 사용되는 전극배열	28
3. 전기영상복원기법	30
1) Gauss-Newton 방법	32
2) TSVD 방법	35
3) SIRT 방법	37
4) TLS 방법	38
4. 전기영상기법에서의 대지모델	39
1) 2층 구조 대지모델	39
2) 3층 구조 대지모델	40

3) 수직 구조 대지모델	41
5. 전기영상기법에서 다층구조의 대지파라미터	43
IV. 사례연구	51
1. 컴퓨터 시뮬레이션	51
1) 모델설계	51
2) 컴퓨터 시뮬레이션 결과	53
2. 실시간 접지저항 취득시스템	67
3. 현장 사례 결과 및 분석	73
1) 대지저항률 측정결과	73
2) 대지저항률 측정결과 분석	77
3) 실시간 접지저항측정 결과분석	95
4. 결과고찰	110
V. 결 론	112
참 고 문 헌	115
부록	119
부록 A. 클램프온 측정법을 이용한 접지저항 측정데이터	119
부록 B. TCP/IP 기반의 접지저항데이터 취득시스템	120
부록 C. Bluetooth를 이용한 접지저항 취득시스템	121
부록 D. SMS를 이용한 접지저항 취득시스템	122
감사의 글	124

LIST OF FIGURES

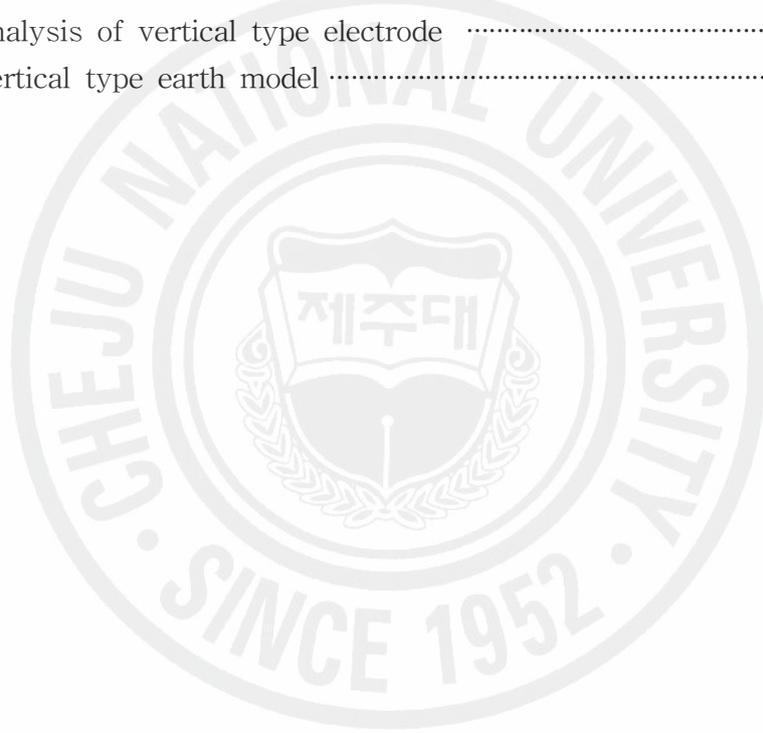
Fig. 1 The relationship between earth resistivity and season	9
Fig. 2 Electrical current flow in a half-space	11
Fig. 3 Potential between two-current electrode	11
Fig. 4 Injection current in a half-space	11
Fig. 5 Property of apparent resistivity curved line in 3-layer earth model	13
Fig. 6 Electrical distribution of current lines and equipotential surface between two current electrode	15
Fig. 7 Wenner configuration to measure soil resistivity	18
Fig. 8 Schlumberger configuration to measure soil resistivity	18
Fig. 9 Dipole-dipole configuration to measure soil resistivity	18
Fig. 10 Hemispherical grounding resistance	20
Fig. 11 Distance from driven rod resistance	22
Fig. 12 Composition of clamp-on measurement equipment (a) equivalent circuit, (b) field test	23
Fig. 13 The three different models used in the interpretation of resistivity measurements (a) 1D model, (b) 2D model, (c) 3D model	25
Fig. 14 The measurement sequences for building up a pseudo-section (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array	29
Fig. 15 Flowchart of the electrical image technique	31
Fig. 16 Flowchart of Gauss-Newton algorithm	33
Fig. 17 TLS algorithm	39
Fig. 18 Design models and inversion results in 2-layer earth model (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array	40
Fig. 19 Design models and inversion results in 3-layer earth model (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array	41
Fig. 20 Design models and inversion results in 2-layer verticality earth model (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array	42
Fig. 21 Design models and inversion results in 3-layer verticality earth model (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array	43
Fig. 22 Multi-layer earth model	45
Fig. 23 Flowchart of genetic algorithm	50
Fig. 24 Arrangement of model blocks (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array	52

Fig. 25 Forward response errors of electrode arrays (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array	52
Fig. 26 Forward responses (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array(n=10), (d) dipole-dipole array(n=25)	53
Fig. 27 Sensitivity of electrode arrays in central position (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array	54
Fig. 28 Design of model and inversion result in 2-layer earth model (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array ..	55
Fig. 29 Design models and inversion results in 3-layer model (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array	56
Fig. 30 Design models and inversion results in vertical 3 layer model (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array ..	57
Fig. 31 Relative RMS errors of several layer models (a) 2-layer model, (b) 3-layer model, (c) vertical-layer model	58
Fig. 32 Inversion results of various algorithms in 2-layer model (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	60
Fig. 33 Inversion results about depth of various algorithms in 2-layer model (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	60
Fig. 34 Inversion results of various algorithms in 3-layer model (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	61
Fig. 35 Inversion results about depth of various algorithms in 3-layer model (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	61
Fig. 36 Inversion results of several algorithms in vertical layer model (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	62
Fig. 37 Inversion results about depth of various algorithms in vertical layer model (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	63
Fig. 38 Relative RMS errors of several algorithms (a) 2-layer model, (b) 3-layer model, (c) vertical layer model	64
Fig. 39 Variation of soil resistivity versus the distance between the electrodes (a) Case 1, (b) Case 2	66
Fig. 40 Seasonal variation of earth resistance	67
Fig. 41 Horizontal electrode configuration	68
Fig. 42 Configuration of multi-switching system	69
Fig. 43 Stand alone grounding system (a) system block, (b) electrode group configuration	71
Fig. 44 Vertical type electrode configuration	72

Fig. 45	Electrode configuration in field	73
Fig. 46	Earth resistivity tester	74
Fig. 47	Data point of earth resistivity measurement in Wenner array	75
Fig. 48	Resistivity measurement results in line 1 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array	76
Fig. 49	Resistivity measurement results in line 2 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole	76
Fig. 50	Resistivity measurement results in line 3 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole	77
Fig. 51	Data and forward responses in line 1 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array	78
Fig. 52	Data and forward responses in line 2 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array	78
Fig. 53	Data and forward responses in line 3 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array	79
Fig. 54	Inversion results of Wenner array in line 1 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	80
Fig. 55	Inversion results of Wenner array according to depth position in line 1 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	80
Fig. 56	Inversion results of Schlumberger array in line 1 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	81
Fig. 57	Inversion results of Schlumberger array according to depth position in line 1 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	82
Fig. 58	Inversion results of dipole-dipole array in line 1 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	83
Fig. 59	Inversion results of dipole-dipole array according to depth position in line 1 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	83
Fig. 60	RMS errors of several algorithms in line 1 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array	84
Fig. 61	Inversion results of Wenner array in line 2 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	85
Fig. 62	Inversion results of Wenner array according to depth position in line 2 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	86
Fig. 63	Inversion results of Schlumberger array in line 2 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	87
Fig. 64	Inversion results of Schlumberger array according to depth position in	

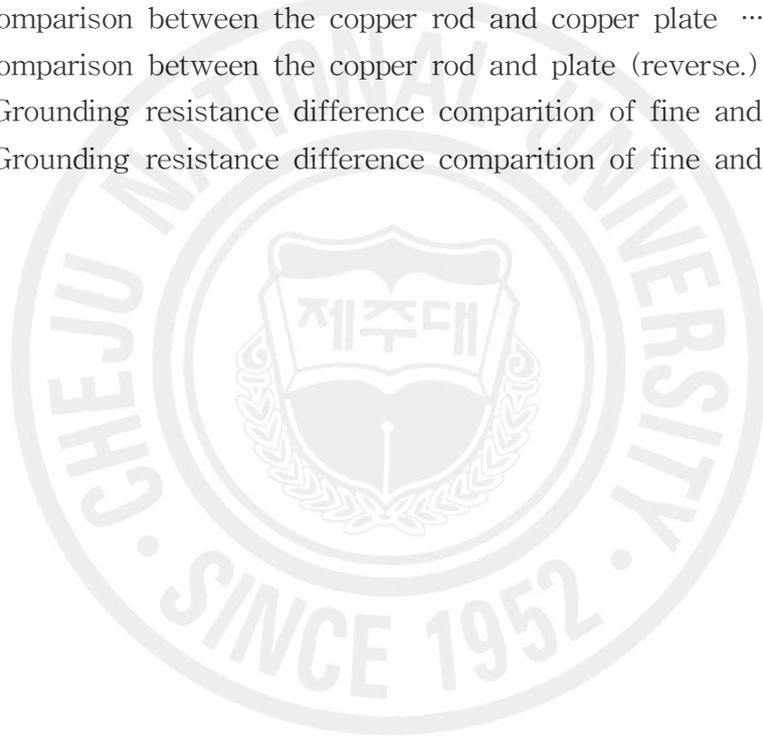
line 2 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	87
Fig. 65 Inversion results of dipole-dipole array in line 2	
(a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	88
Fig. 66 Inversion results of dipole-dipole array according to depth position in	
line 2 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	89
Fig. 67 RMS errors of several algorithms in line 2	
(a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array ..	90
Fig. 68 Inversion results of Wenner array in line 3	
(a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	91
Fig. 69 Inversion results of Wenner array according to depth position in	
line 3 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	91
Fig. 70 Inversion results of Schlumberger array in line 3	
(a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	92
Fig. 71 Inversion results of Schlumberger array according to depth position in	
line 3 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	93
Fig. 72 Inversion results of dipole-dipole array in line 3	
(a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	93
Fig. 73 Inversion results of dipole-dipole array according to depth position in	
line 3 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS	94
Fig. 74 RMS errors of several algorithms in line 3	
(a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array ..	95
Fig. 75 Measurement of grounding resistance configuration	96
Fig. 76 Measured grounding resistance of copper rod	97
Fig. 77 Variation copper rod grounding resistance for 7 electrode	98
Fig. 78 Grounding resistance variation for several electrode (a) rod, (b) plate,	
(c) rod with reduction agent, (d) plate with reduction agent	98
Fig. 79 Analysis of grounding resistance variation for forward (a) rod, (b)	
plate, (c) rod with reduction agent, (d) plate with reduction agent ..	99
Fig. 80 Grounding resistance variation for reverse direction (a) rod, (b) plate,	
(c) rod with reduction agent, (d) plate with reduction agent	100
Fig. 81 Analysis of grounding resistance variation for reverse (a) rod, (b)	
plate, (c) rod with reduction agent, (d) plate with reduction agent	101
Fig. 82 Grounding resistance variation for 19 auxiliary electrode	
(a) case 1, (b) case 2, (c) case 3, (d) case 4	102
Fig. 83 Analysis of grounding resistance variation for 20 electrode system	
(a) case 1, (b) case 2, (c) case 3, (d) case 4	103

Fig. 84	Grounding resistance variation for weather (a) fine and rain day, (b) difference grounding resistance	103
Fig. 85	Analysis of grounding resistance variation for stand alone electrode group 1	105
Fig. 86	Analysis of grounding resistance variation for stand alone electrode group 2	105
Fig. 87	Analysis of grounding resistance variation for stand alone electrode group 3	106
Fig. 88	Grounding resistance variation for weather (a) fine and snow day, (b) difference grounding resistance	106
Fig. 89	Grounding resistance of Vertical type electrode variation	108
Fig. 90	Analysis of vertical type electrode	109
Fig. 91	Vertical type earth model	109



LIST OF TABLES

Table 1 Resistivity for various types of soil	7
Table 2 Variations of soil resistivity with moisture content	8
Table 3 Variation of resistivity with temperature in a mix of sand and clay with moisture content of about 15% by weight	8
Table 4 Data models in electrode array	52
Table 5 Results of the application of the GA	66
Table 6 Specifications of earth resistivity tester (MiniSting)	74
Table 7 Comparison between the ground copper rod and plate	97
Table 8 Comparison between the copper rod and copper plate	99
Table 9 Comparison between the copper rod and plate (reverse.)	101
Table 10 Grounding resistance difference comparison of fine and rain	104
Table 11 Grounding resistance difference comparison of fine and snow	107



LIST OF SYMBOLS

a	전극간 거리
$diag$	대각행렬
N	데이터의 수
$d \in \mathbb{R}^N$	데이터 벡터
M	모델파라미터의 수
$S \in \mathbb{R}^{N \times M}$	감도행렬
$R^M \in \mathbb{R}^{M \times M}$	모델 해상도 행렬
$R^D \in \mathbb{R}^{M \times M}$	데이터 정보 행렬
H	Hessian 행렬
λ	regulariztion / Lagrangian 파라미터
ρ_i	단일모델 파라미터
ρ^k	k 단계 모델파라미터
$\Delta\rho$	모델 갱신벡터
Φ_d	데이터 함수
$\hat{S} = DS$	가중 감도행렬
J	자코비안 행렬
J_0	영차 베셀함수
$p(\vec{r})$	공간 파라미터 분포
U	전위
I	전류
ρ_a	겉보기저항률
k	거리계수
σ	도전률
$\underline{\rho}$	대지저항률
\underline{j}	전류밀도
\underline{E}	전기장
x_e	전극의 위치
$f(\rho)$	포워드 응답
n	노이즈 벡터
ρ_0	기준모델
Φ	목적함수
s_i	특이값
k	거리계수

SUMMARY

The grounding system of the subsurface should ensure the safe and reliable operation of power systems, and guarantee a human being's safety in the situation of grounding fault in the power system. The safety of power apparatus in the subsurface can be reached by decreasing grounding resistance and grounding potential rise of subsurface. The optimal design of grounding systems for subsurface can ensure the equalization of the potential distribution of the ground surface above the grounding system, and can obviously improve the safety of the grounding system.

This thesis deals with the 2-dimensional reconstruction of the earth's resistivity distribution based on DC resistivity data. This task represents a nonlinear and ill-posed minimization problem with many degrees of freedom.

In this work, techniques for regularization and controlling of this problem are described and classified. The system of equations as resulting from the application of the Gauss-Newton minimization can be solved efficiently. The characteristics of the four reconstruction algorithms such as Gauss-Newton, TSVD(truncated singular value decomposition), SIRT(simultaneous iterative reconstruction algorithm), and TLS(truncated least squares) algorithm are compared and analyzed.

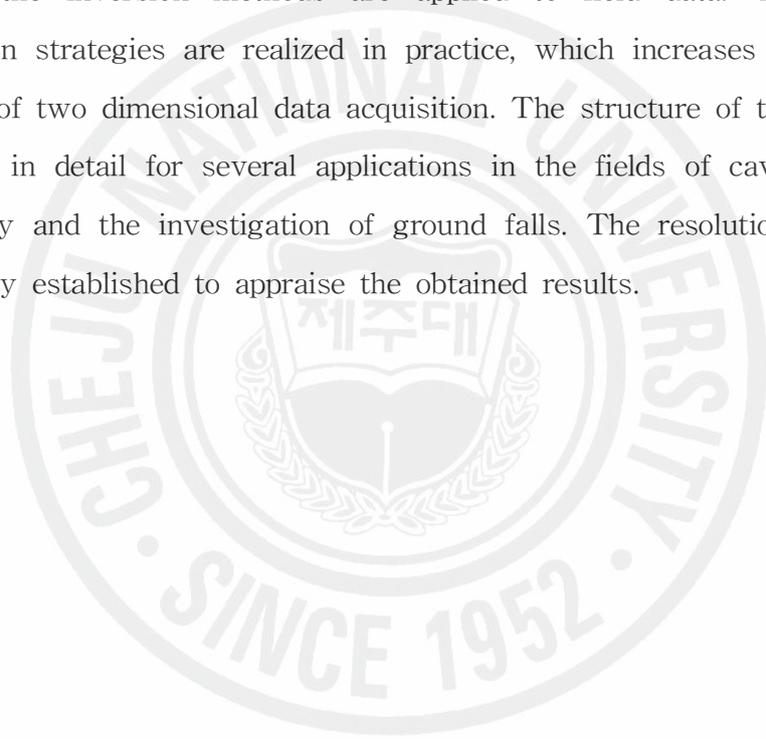
Furthermore, a modified FEM scheme is used to test several widely-used resistivity arrays, namely Wenner, Schlumberger and dipole-dipole. The electrode arrangement of the arrays is described and the characteristics of above three array types are compared and analyzed.

The proposed methodology has been proposed according to which, after carrying out a set of soil resistivity measurements, one can compute the parameters of the multi-layer earth structure using a genetic algorithm(GA). The results provided by the GA constitute the indispensable data that can be used in circuital or field simulations of grounding systems. The methodology

allows to proceed toward a very efficient simulation of the grounding system and an accurate calculation of potential on the ground surface.

Methods of error estimation, forward modeling and the calculation of the Jacobian matrix for DC resistivity data are developed. Procedures for appropriate parameterization and inversion control are pointed out by studies of synthetic models. Different inversion and regularization methods are examined in detail. A linearized study is used to compare different data sets considering their efficiency.

Finally the inversion methods are applied to field data. The described optimization strategies are realized in practice, which increases the economic relevance of two dimensional data acquisition. The structure of the subsurface is imaged in detail for several applications in the fields of cavity detection, archaeology and the investigation of ground falls. The resolution analysis is successfully established to appraise the obtained results.



I. 서론

경제사회의 발전에 따라 전기에너지는 현대생활에서 떼어놓고는 생각할 수 없는 중요한 부분으로, 생활수준의 향상에 따라 그 의존도는 점점 더 높아 질 것으로 예상된다. 따라서 정전사고가 없는 양질의 전기 공급을 위한 노력과 고밀도 에너지인 전기를 사용함에 따른 화재, 감전 등의 재해 발생가능성을 염두에 두지 않을 수 없다. 이때 정전사고 및 재해를 방지하기 위하여 필요한 것이 바로 접지 설비로, 변압기의 중성점, 전기설비의 외함, 철대 등을 대지와 전기적으로 접속하여, 낙뢰·지락사고 등의 전기적인 고장으로 인한 위험으로부터 설비 및 사람을 보호하기 위한 것이다. 이것은 고장전류가 접지를 통해 대지로 흘러 들어갈 때 나타나는 대지전위와 전기설비 외함의 전위상승을 억제하는 중요한 안전설비이다. 따라서 전기적인 고장으로 접지설비에 고장전류가 흐를 때, 고장전류와 접지 저항의 곱으로 나타나는 전위상승을 줄이기 위해서는 접지저항을 규정 값 이하로 낮추어야 한다[1].

일반적으로 접지저항은 전극저항, 전극과 대지의 접촉저항 및 대지저항 등 세 가지에 의하여 결정된다[2]. 전극저항은 도체의 종류와 크기에 따라 정해지는 아주 작은 값이고, 접촉저항 또한 무시할 수 있을 정도까지 낮기 때문에, 결국 접지저항의 크기는 이 세 가지 요소 중 대지저항에 의하여 가장 큰 영향을 받는다. 그러나 대지저항은 토양의 성질, 구조와 온도, 습도 등의 환경적인 여러 요인에 따라 변화되는 복잡한 특성을 갖고 있어, 이를 통상 대지의 고유한 성질을 개념적으로 표시한 대지저항률(soil resistivity)로 표현한다. 그러나 이 대지저항률은 토양의 비균질성, 즉 토양내의 점토, 자갈, 모래, 암반등의 서로 다른 인자들의 비균질한 혼합으로 이를 정확히 측정한다는 것은 거의 불가능하다. 따라서 아직까지는 비균질한 대지를 점토층, 모래층, 자갈층 등의 균질한 층들의 병렬로 구성되어 있다고 가정하고 각 대지층의 저항률, 두께, 반사율 즉 대지파라미터를 구하고 이를 이용하는 대지저항률을 계산하는 방법을 사용하고 있다.

대지파라미터를 구하는 방법은 전극간격을 변화시켜가면서 외부에서 전류를 인가하여 나타나는 전압을 측정하고, 이 값을 저항으로 환산해 구하는 데 이 값을 겉보기저항률(apparent resistivity)이라 한다[3,4]. 이 저항률 값들로부터 대지

파라미터를 구하기 위해서는 저항률 값과 각 파라미터 사이의 관계를 알아야 한다. 전기 분야에서 겘보기저항률의 측정은 여러 측정법 중 Wenner 방법과 Schlumberger 방법을 가장 많이 사용한다[5].

대지저항률 해석에 관한 지금까지의 연구동향을 살펴보면, 실험적 방법, 분석적 방법, 컴퓨터 프로그램에 의한 방법으로 나눌 수 있다[6]. 먼저 실험적인 방법은 다수의 측정과 해석과정 속에서 연습을 통해 얻어진 경험에 근본을 두고 있어 통계학적으로 기술될 수 있다. Gish와 Rooney는 대지고유저항 측정 곡선의 변곡점은 임의의 전극간격에 해당하는 깊이에서 지층의 변화가 있는 것으로 간주하고 지층의 두께를 추정하여 토양을 모델링 하였고[7], 그 후 1930년에 Lancaster-Jones는 겘보기 저항곡선의 상층과 하부층의 변곡점이 Wenner 전극법의 전극간격의 2/3일 때 발생한다는 가정 하에서 지층의 두께를 추정하여 대지모델을 분석하는 방법을 사용하였다[8].

분석적인 방법은 이론적으로 계산된 마스터곡선을 기준으로 측정결과로 얻어진 곡선을 비교하여 대지모델을 추정하는 방법으로, 대수곡선일치 방식과 부분곡선일치 방식을 사용하여 해석하며 경험적 방법보다 신뢰도가 높은 해석방법이다. 이는 원칙적으로 사람에 따라 그 결과가 다를 수는 거의 없지만, 곡선일치방식은 2배 이상 큰 차이가 발생하는 경우도 있다. 1960년대에서 1970년대 동안 지층별에 대한 겘보기저항 계산에 대한 다양한 알고리즘이 개발되었는데[9,10], 이것은 역산에 대한 다양한 방법을 제공하였고 복잡한 수학적 계산을 보다 쉽게 할 수 있는 컴퓨터가 개발 보급됨에 따라 측정된 겘보기저항률과 대지파라미터의 관계식으로부터 직접 대지파라미터를 계산하는 프로그램이 개발되어 사용이 간편해지고 신뢰도는 더욱 높아졌다[11,12]. 그 대표적인 예가 캐나다의 Dawalibi와 Takahashi가 발표한 2층 이상의 다층구조를 해석하는 방법으로 곡선일치 방법보다는 신뢰도가 높은 것으로 평가되고 있다[13,15].

컴퓨터 프로그램에 의한 방법은 위의 경험적 방법의 전제들에서의 오류와 대용량의 컴퓨터가 개발됨에 따라 계산속도의 획기적인 증가로 수치해석을 빠르고 정확하게 계산할 수 있게 됨으로써 사용되기 시작한 방법으로, 1980년대 이후 2층 이상을 분석할 수 있는 SES(Safe Engineering Services & technologies ltd.)사의 CDEGS 프로그램 내의 RESAP[14], 1990년의 Takahashi의 다층구조에 대

한 연구 등이 진행되어오면서 대지파라미터에 대한 해석을 보다 더 정확하게 할 수 있었다[15,16].

위의 분석적 방법들은 비균질한 대지를 균질한 2층 또는 그 이상의 다층구조라는 전제하에 설계되기 때문에 실제의 대지저항률과는 차이가 많아 현장에서 이용하는 데는 한계가 있다. 또한 계산된 대지파라미터로부터 다시 등가 대지저항률을 계산해야 하는 번거로움이 있어, 현장에서는 두 가지의 분석적 방법 이외에도 공사현장의 토양샘플을 채취하여 그 토양의 고유의 저항률을 그대로 적용하는 경우도 적지 않다[4]. 따라서 실제의 비균질한 대지를 정밀하게 모델링 할 수 있는 대지모델이 필요하다.

1990년대 이후 지질 분야에서는 멀티 스위칭 장치의 개발로 인해 10~20개의 측정전극을 측정자가 현장에서 직접 이동시키면서 데이터 취득하는 방식에서 벗어나 최소 25 데이터 포인트에서 1000 데이터 포인트 이상의 데이터를 자동으로 취득하여 대지를 분석하는 방법이 일반적으로 사용되고 있다. 지질학적인 목적으로 많이 사용되는 전기영상기법(electrical image technique)[17,18]을 접지 시스템에 적용하기 위해서는 다양한 알고리즘을 통한 신뢰성 높은 대지모델 분석과 접지설계를 위한 최적의 시공지점 선정이 필요하다.

본 논문에서는 신뢰도 높은 대지모델을 설계하기 위해 수평구조와 수직 구조에 대한 데이터를 동시에 취득하여 2차원 전기영상기법을 통해 대지모델을 설계하는 방법을 제안하도록 한다. 그리고 전기영상기법을 이용하여 대지의 비선형 특성을 잘 반영하는 최적 접지 시공지점 선정과 시공된 접지 시설에 대한 접지 변동률을 실시간 측정할 수 있는 방법을 살펴보도록 한다.

본 논문에 포함된 연구내용은 다음과 같다.

첫째, 일반적으로 접지시스템을 설계할 때는 깊이에 대한 대지저항을 쉽게 측정할 수 있는 Wenner 4전극법이 많이 사용되지만 깊은 곳의 대지저항을 측정할 때는 오차도 많이 발생한다[12]. 따라서 정밀한 대지저항률 측정을 위해 제시한 2차원 전기영상기법에서는 Wenner, Schlumberger 배열 뿐 아니라 지질과 토목 등에 많이 사용되는 dipole-dipole 배열을 적용하여 2차원 대지구조의 특성을 비교분석하고 다 채널을 통한 신뢰도 높은 데이터 취득과 시간을 줄일 수 있는 측정방법을 연구한다[19,20].

둘째, 전기영상기법에서 불균질한 지반의 대지저항률 분포에 대한 영상복원을 위해 반복적 역산 알고리즘이 필요하다. 대지의 구조를 해석하는데 사용되는 대부분의 비선형 역산문제들은 비고유(non-unique)나 비정치성(ill-posed)을 가지게 되는데, 본 논문에서는 Gauss-Newton[21], TSVD(truncated singular value decomposition)[22], TLS(truncated least square)[23,24] 및 SIRT(simultaneous iterative reconstruction technique)[25,26] 방법들을 적용하여 성능을 비교분석하도록 한다.

셋째, 유전알고리즘(genetic algorithm)[27,28]을 사용하여 측정된 대지저항률들로부터 대지파라미터들을 계산하는 방법을 제안한다. 일반적으로 N 층 구조의 대지파라미터를 구하는 것은 N 개층의 대지저항률 값과 $(N-1)$ 개의 대지 높이를 변수로 하는 $(2N-1)$ 개의 파라미터 최적화문제가 된다. 따라서 지능 최적화 방법인 유전알고리즘을 사용하여 대지구조의 저항률과 두께에 대한 정확한 선정을 하고자 한다.

넷째, 최적지점에 접지가 시공 되었는지를 확인하기 위해 실시간 접지저항 취득시스템을 구현하였으며, 이를 통해 현장에 봉 형태와 판 형태를 대상으로 접지저항을 실시간으로 측정하였다. 접지저항을 측정할 때 각각의 보조전극을 스위칭하여 최적의 보조전극위치를 선정하여 시간에 따른 접지저항의 변동을 분석하며, 독립형 접지저항 취득시스템을 사용하여 분석된 대지모델에 다수의 실험용 접지전극을 설치하여 선택적으로 온·습도데이터를 포함하는 접지저항 변동을 분석한다. 또한 수직형 구조의 접지저항 취득시스템을 사용하여 동일 층상에서 깊이에 대한 접지저항 변동을 분석하였다. 그리고 접지저항측정을 원격지에서 수행할 수 있는 원격접지저항 측정시스템의 구성하여 대지저항률에 따른 접지저항의 변동에 대한 데이터를 취득하여 환경에 최소의 영향을 받는 접지를 시공할 수 있는 지점 선정에 대하여 살펴본다.

본 논문에서 제시한 전기영상기법을 이용한 대지 모델의 검증을 위한 수직형 접지저항 측정 시스템은 전기영상기법과 연동하여 대지의 공극률 등을 파악하여 기존에 사용되고 있는 저감제의 유출이나 접지의 성능저하를 파악하여 접지보강 시기를 선정할 수 있는 시스템에 적용할 수 있다. 그리고 제안한 실시간 접지저항 취득시스템의 멀티 스위칭방법을 현장의 대지저항률 측정에 사용하면 전극을

측정자가 이동하지 않고도 특정한 n 층에 대한 수평 및 수직 측정데이터 취득이 가능하므로 접지설계에서 중요한 비중을 차지하는 대지모델의 신뢰도 높일 수 있는 온·습도 등의 정보를 포함 시킬 수 있어 유사지역의 접지시스템 구축 시에 환경변수로써 고려할 수 있게 된다. 이러한 데이터들은 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 분석 시에 낙뢰나 서지 등의 모델과 접목시켰을 때 이상 현상에 대한 원인을 분석하는 접지설계 분야에 활용이 가능하다.

본 논문의 내용을 전개하기 위한 구성은 다음과 같다.

제1장에서는 연구의 배경과 필요성, 기대효과에 대하여 간단히 살펴보고, 제2장에서는 대지저항률과 접지저항에 대하여 기본개념과 측정법에 대하여 기술한다. 제3장에서는 전기영상기법을 이용한 전극배열과 제시된 알고리즘에 대하여 자세히 설명하고, 전기영상기법에서의 대지 모델에 대하여 살펴본다. 제4장은 제안된 전기영상기법을 컴퓨터 시뮬레이션과 실제 현장 측정결과를 통해 제안된 전기영상기법의 성능을 분석하고, 실시간 접지저항 취득시스템을 활용하여 얻은 결과를 통하여 본 논문에서 제시한 방법의 타당성을 검증하도록 한다. 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 요약정리하고 향후 연구 되어야 할 사항들을 제안하도록 한다.

II. 대지저항률과 접지저항

일반적으로 지구는 접지시스템과 연결될 때 무제한 공급되는 전류를 거의 무한대로 흡수할 수 있는 체적을 가진다고 가상할 수 있으며, 이러한 전류는 금속 접지전극을 대지에 연결하였을 때, 연결전극을 통해 땅속으로 흐른다. 이때의 접지저항은 가장 가까이 있는 전계구가 가장 크고, 점차 외부 방향으로 이동할 때 저항이 낮아진다. 요구한 접지 사양을 만족시키는 최적의 접지 시스템을 설계하기 위해서는 시공 위치에 대한 대지저항률의 특성을 알아야하며, 반드시 현장에서 측정해야 한다.

1. 대지저항률과 대지파라미터

지하의 전기적인 물성의 차이에 의한 반응을 지표에서 측정하여 지하구조를 영상화시키는 모든 방법을 큰 의미의 전기탐사(electrical prospecting)라 한다. 여러 가지 대지저항률 측정법 중에서 그 이론이 간단하고 측정방법이 간편한 측정법은 전류전극과 전위전극을 이용하여 지하매질의 대지저항률 분포를 알아내는 방법이다[18].

임의의 물체 양단에 일정한 전압을 걸어주면 어떤 물체는 많은 양의 전류를 흘러 보내지 못한다. 이와 같이 전류의 흐름을 방해하는 특성을 그 물체의 전기저항 R 이라 하는데, 만약 도선에 전류를 흘러 보낸다고 가정하면, 도선은 그 도선을 이루는 물체의 성질과 길이 l 에 비례하고 단면적 A 에는 반비례하는 전기저항 $R = \rho \frac{l}{A}$ 을 갖게 된다. 이때 ρ 는 비례상수로서 물체의 모양, 크기에는 무관하게 물체의 고유한 전기적 특성을 나타내는 값으로 이를 전기저항률(electrical resistivity)이라 하며, 그 단위는 Ωm 가 된다. 즉 전기저항률이란 단위체적의 물질이 갖는 전기저항이라고 정의할 수 있다.

지구의 내부를 이루고 있는 흔히 우리가 땅속이라 부르는 곳은 여러 종류의 암석으로 구성되어 있다. 이 암석들은 암석의 공극률(porosity), 공극 내 유체의 성질, 유체의 포화도(saturation), 조암광물의 종류, 암석 구성입자의 크기 및 성

질, 암석의 고화도 등 암석 자체의 성질과 파쇄대, 균열대, 단층 등의 외부적인 요인에 의해 자연 상태에서 각기 다른 전기저항률 값을 갖게 된다. 대지저항률 측정에서는 이러한 토양의 대지저항률의 분포를 파악함으로써 대지구조를 규명하게 된다.

1) 대지저항률 변화요인

가) 토양의 성분에 따른 변화

대지저항률은 동일 지역이라도 각 지층별로 그 값이 다르고 특히 지표면 10 [m] 이내 지층 구성의 변동이 아주 심하여 측정 장소에 따라 대지저항률 값의 변동이 크다. 그 차이는 토양의 전기적 특성에 따라 달라지므로 대지저항률은 각 토양의 저항률이라 할 수 있다. Table 1은 토양의 종류에 따른 대지저항률로 접지설계 시에 기초자료로 활용하고 있다[4].

Table 1 Resistivity for various types of soil

Type of soil	Resistivity [Ωm]
Loam, Garden soils, etc	5-50
Clays	8-50
Clay, Sand and Gavel mixtures	40-25
Sands and Gravel	60-100
Slate, Shale, Sandstone, etc	10-500
Crystalline rock	200-10,000

나) 수분함수량에 따른 변화

대지저항률은 수분함유량, 즉 함수량의 정도에 영향을 받아 습기가 25[%] 이상에서는 거의 변화가 없으나 그 보다 건조하면 현저히 증가한다. Table 2는 토양의 함수율에 따른 저항률의 변화 상태를 보인 것으로 함수율이 22[%] 이하가 되면 대지저항률이 급격하게 상승하여 함수율이 5[%]일 때 저항률은 가장 작을 때의 400배 이상이 된다. 토양의 함수율은 보통 건조기에 10[%], 습윤기에 35[%], 그리고 평균은 16~18[%] 정도이므로 함수량의 변화가 대지저항률에 미치는 영향은 매우 크다.

Table 2 Variations of soil resistivity with moisture content

Type of soil \ Moisture	Dry [10%]	Std. [20%]	Wet [50%]
Loam with salt [Ωm]	25	5.0	1.5
Loam [Ωm]	30	10-20	5.0
Clay [Ωm]	500	300	50
Sand, Clay Mixtures [Ωm]	300	130	50
Sandstorm [Ωm]	1,500	300	70

다) 온도에 따른 변화

대지저항률은 물질의 온도에 따라 변화한다. 이것은 물질의 온도계수에 따라 달라지며 실험에 의하면 온도 T_1 [°C] 일 때 저항은 R_1 [Ω], 온도 T_2 [°C] 일 때 저항을 R_2 [Ω] 이라면 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_2 = R_1 \{1 + \alpha(T_2 - T_1)\} \quad (1)$$

여기서 α 는 온도 T_1 에서의 저항의 온도계수이다.

토양의 경우는 온도 특성의 차로 구한다. Table 3과 같이 온도 20[°C] 기준으로 해서 온도가 내려가면 저항률은 서서히 증가하여 0[°C]에서 약 2배가 되고 토양이 동결상태가 되면 저항률은 약 4배가 되며 -15[°C]에서는 46배나 된다. 이것은 함수율 15[%] 때 토양의 온도특성으로 추운지역에서는 충분한 고려가 필요하다.

Table 3 Variation of resistivity with temperature in a mix of sand and clay with moisture content of about 15% by weight

Temperature [°C]	Typical value of resistivity [Ωm]
20	72
10	99
0(water)	138
0(ice)	300
-5	790
-15	3,300

라) 계절변동에 따른 대지저항률 변화

대지저항률은 계절에 따라 변화하는데 이것은 온도 뿐 만 아니라 토양의 함수율과 밀접한 관계가 있다. Fig. 1에서 실선은 지표 아래 얇은 곳, 점선은 지표 아래 깊은 곳을 나타내며 2월이 가장 높고 8월이 가장 낮으며 약 2배 차이가 난다.

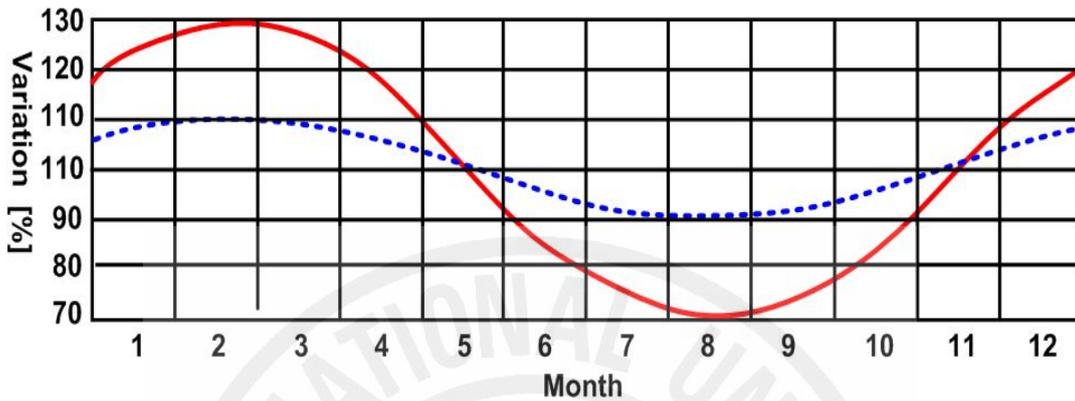


Fig. 1 The relationship between earth resistivity and season

2) 결보기대지저항률

공기는 매우 높은 전기적 저항률을 지니고 있어 모든 전류는 대지로 흘러든다. Fig. 2와 같이 지름이 r 인 반구형의 전극을 균일한 토양에 매설한다고 가정할 때, 구형 대칭으로 등전위선은 반구상에 존재하며 대지저항 R 은 식(2)로 정의되므로 전위차 ΔV 는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{\rho dr}{2\pi r^2} = \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi r^2} dr \quad (3)$$

계산되는 전위 V 는 $V=0$ 인 경계조건에 적용되어 $r=\infty$ 일 때 적분형으로 나타내면 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \int_r^\infty \frac{1}{r^2} dr = \frac{I\rho}{2\pi} \left[-\frac{1}{r} \right]_r^\infty = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (4)$$

이처럼 등가 전위의 표면은 전극에 중앙에 집중된 반구이며, 전류 흐름은 등가전위의 수직에 나타나게 된다.

전극 A와 B사이의 전압은 $\Delta V_{AB} = V_A - V_B$ 로 나타나며 또한 식(5)와같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta V_{AB} = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right] \quad (5)$$

여기서 r_A 와 r_B 는 Fig. 2의 전류전극 I 로부터 전위전극 A와 B까지의 거리이며 저항률 ρ 는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V_{AB}}{I \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right)} \quad (6)$$

이것은 옴의법칙(Ohm's law)에 거리계수(geometric factor)가 추가된 것이다.

Fig. 3과 같이 두 개의 전극을 대지 표면에 설치하면, 전류전극 C_1 을 통해 대지로 전류가 인가되어 전류전극 C_2 로 흘러들어 간다. 이때 계산되는 전극의 전위는 전류전극 C_1 과 C_2 에 의해 생성된 전위로 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{p1} = \frac{I\rho}{2\pi r_1} - \frac{I\rho}{2\pi r_2} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (7)$$

단일 전류전극을 통해 인가된 전류에 의한 전위분포와 두 개의 전류전극을 통해 인가된 전류에 의한 전위분포를 구체적으로 살펴보기 위해 대지저항률 ρ 가 $100[\Omega m]$ 인 균등한 대지 구조에 $1[A]$ 의 전류를 인가했을 때 $z[m]$ 방향으로 +전위와 -전위의 분포를 Fig. 4에 나타내었다.

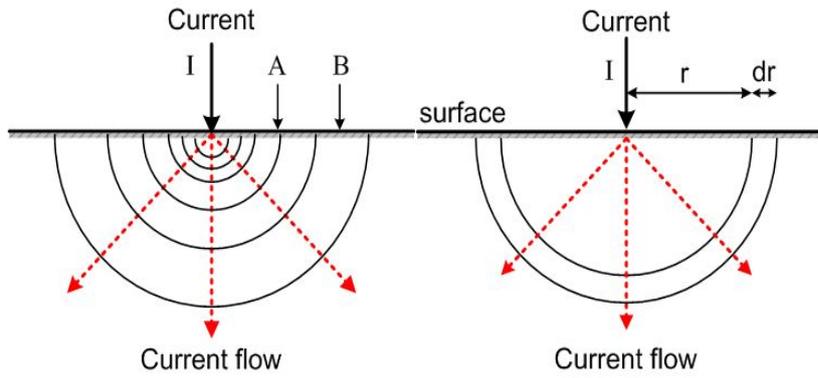


Fig. 2 Electrical current flow in a half-space

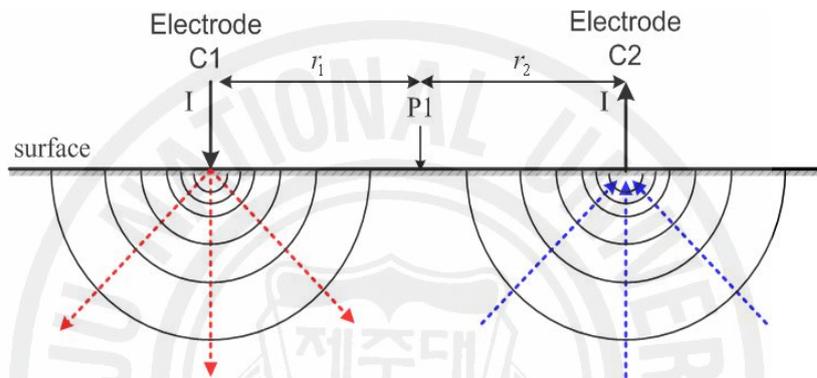


Fig. 3 Potential between two-current electrode

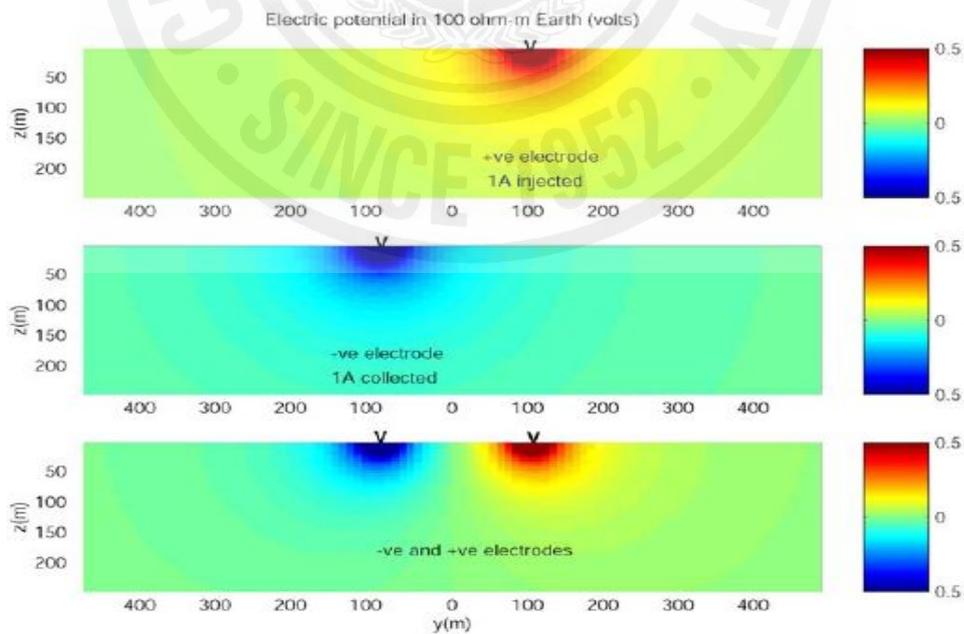


Fig. 4 Injection current in a half-space

현장에서 측정된 대지저항률 값으로부터 대지파라미터를 해석하는 것은 고도의 기술을 요하는 작업이다. 실제의 대지구조는 지층별로 서로 다르기 때문에 이 저항률의 변화가 발생하여 전극간격에 따른 함수로 나타내는 겉보기저항률이 변하게 된다. 대지저항률은 통상 비균질 특성 때문에 측정 장비를 이용하여 직접 측정할 수는 없으므로, 땅을 파서 지층을 분석하는 직접적인 방법을 사용하거나 대지저항률 측정기로 측정한 값을 역산하여 구하는 방법을 사용한다[20]. 이 방법 중에 경제성, 간편성 때문에 현재 많이 사용하는 방법은 후자인 간접적인 측정방법인데, 이 방법은 측정 위치나 방법 등에 따라 측정값이 다르게 나타나므로 전극간격을 달리한 다수의 측정 결과를 필요로 한다. 이때, 측정된 값은 대지저항률이 아니고 대지 밖에서 본 값으로, 이를 특별히 겉보기저항률이라 정의하고, 이를 분석하게 된다.

3) 지층별 대지파라미터 해석

대지를 수평구조로 가정하고 다층대지를 고려한 겉보기 대지저항률의 이론식에 대입하여 $\rho-a$ 곡선을 작성하는 것과 $\rho-a$ 곡선으로부터 지층별 대지파라미터를 추정하는 것은 등가적이다[29]. 대지의 수평구조에 대한 $\rho-a$ 곡선과 그 대지파라미터 해석에서 전극간격을 크게 잡으면 지층의 심부까지 정보를 얻을 수 있지만, 측정하려는 대지 깊이의 3배 이상의 거리를 수평방향으로 확보해야하기 때문에 현실적으로 어려운 면이 많다.

대지의 구조가 ρ_1, ρ_2, ρ_3 의 저항률과 두께 h_1, h_2 , 그리고 h_∞ 로 구성된 3층의 대지구조일 경우 Fig. 5와 같이 ρ_1, ρ_2, ρ_3 저항률 파라미터에 의해 1~3층에 대한 $\rho-a$ 곡선의 변화로 나타내며 곡선의 변곡점의 위치에 따라 두 개의 층에 대한 경계문제가 발생하게 되며 이러한 3층 구조의 곡선의 유형은 K형, H형, A형, Q형으로 나타낼 수 있다..

i) 모델 K형

모델 K형은 Fig. 5(a)와 같이 $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ 인 구조로 나타낼 수 있고, 중간층의 ρ_2 가 높으므로 산 모양으로 되어있다. $\rho-a$ 곡선은 제 1층의 ρ_1 부터 증가하고, 최종적으로는 최하층의 ρ_3 에 수렴한다. ρ_2 는 ρ_3 의 영향 때문에 낮아지며 1~3층 구분이 명확하다.

ii) 모델 H형

모델 H형은 Fig. 5(b)와 같이 $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ 인 구조로 나타낼 수 있고, 모델 K형과는 달리 중간층 ρ_2 가 낮으므로 계곡모양으로 나타난다. ρ_1 부터 감소하고 최종적으로 ρ_3 까지 다시 증가한다. ρ_2 는 ρ_3 의 영향 때문에 최소치는 ρ_2 의 값보다 높게 된다.

iii) 모델 A형

모델 A형은 Fig. 5(c)와 같이 $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ 인 구조로 나타낼 수 있고, 중간층 ρ_2 에서 변곡점이 2개소 발견된다. ρ_1 과 ρ_3 의 값을 통해 1층과 3층에 대한 예측은 용이하게 이루어지나 중간층의 ρ_2 의 추정은 곤란하다.

iv) 모델 Q형

모델 Q형은 Fig. 5(d)와 같이 모델 A형과는 반대로 $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ 인 구조로 나타낼 수 있고, 중간층 ρ_2 에서 변곡점이 2개소 발견된다. ρ_1 과 ρ_3 의 값을 통해 1층과 3층에 예측은 용이하게 이루어지나 중간층의 ρ_2 의 추정은 곤란하다.

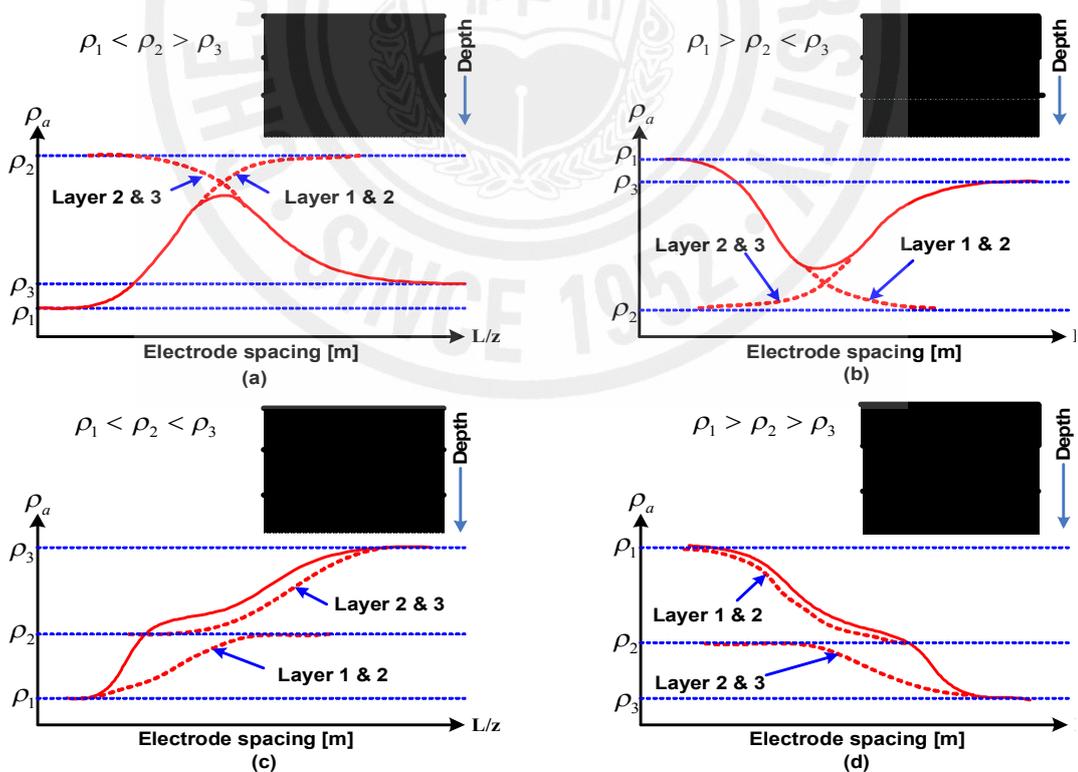


Fig. 5 Property of apparent resistivity curved line in 3-layer earth model

2. 대지저항률 측정방법

대지표면에서 깊은 지점까지 동일한 지질로 이루어진 토양의 단층 구조의 대지는 거의 없고 대단히 복잡한 지층, 지형으로 이루어져 있는 경우가 대부분이므로 대지표면의 지층을 비롯하여 지하층의 대지저항률을 정확하게 측정할 필요가 있다. 대지저항률 측정은 2전극법, 4전극법, 그리고 접지저항계를 이용한 간이측정법 등이 있는데, 4전극법이 정확도가 우수하고 측정도 간편하므로 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 대지저항률의 측정값은 토양구조, 토양성분, 측정장소 등에 따라 큰 차이를 나타내므로 현장에서 신뢰성 있는 대지저항률을 측정하는 것이 매우 중요하다.

1) 기본 측정방법

어떤 물체의 양단에 걸어준 전압과 그 물체에 흐르는 전류는 서로 비례하는 성질이 있다. 즉, 걸어주는 전압이 크면 클수록 흐르는 전류량은 많아지게 되는데, 이러한 음의 법칙을 수식으로 표현하면 $V=IR$ 이 되므로 대지저항률은 $\rho = \frac{A}{l} \frac{\Delta V}{I}$ 로 표현된다. 즉, 우리는 땅속에 일정한 전류를 흘려 보낸 후 지표에서 전위차를 측정하는 방법으로 지하매질의 대지저항률 분포를 알아낼 수 있다. Fig. 6과 같이 대지저항률이 균일한 지하매질에 전류전극 C_1 과 C_2 를 통해 일정한 전류를 흘려주면 이 전류는 전류경로를 통해 C_1 에서 C_2 로 흘러간다. 이때, 이 전류경로에 수직 방향으로 등전위선이 형성되는데, 이 등전위선은 지면까지 이어지게 된다. 우리는 지표의 전위전극 P_1 과 P_2 사이에 전위계를 설치하여 두 전극에 닿은 등전위선의 차이, 즉 전위차를 측정한다. 전류전극과 전위전극의 위치, 흘려준 전류량과 측정된 전위차를 이용하면 우리는 균질한 지하매질의 정확한 대지저항률 값을 알 수 있게 된다.

그러나 지하매질이 균일하지 않는 경우에는 대지저항률이 낮은 물질 쪽으로 더 많이 흐르게 되어 결국 전류경로에 수직인 등전위선에 변형을 일으키고 지표면에서 측정되는 전위차에도 영향을 미치게 된다. 이로부터 지표면에서 측정한 전위차를 이용하여 지하매질이 전기적으로 변화하는 지점에 관한 정보를 가지고 있는 걸보기 대지저항률을 얻을 수 있다.

이를 정리하면, 대지저항률 측정은 지하에 일정한 전류를 흘려보낸 후, 전위차를 측정하여 파쇄대나 균열대, 지하수 등의 요인에 의하여 나타날 수 있는 대지저항률 이상 지점을 찾아내고자 하는 것이다.

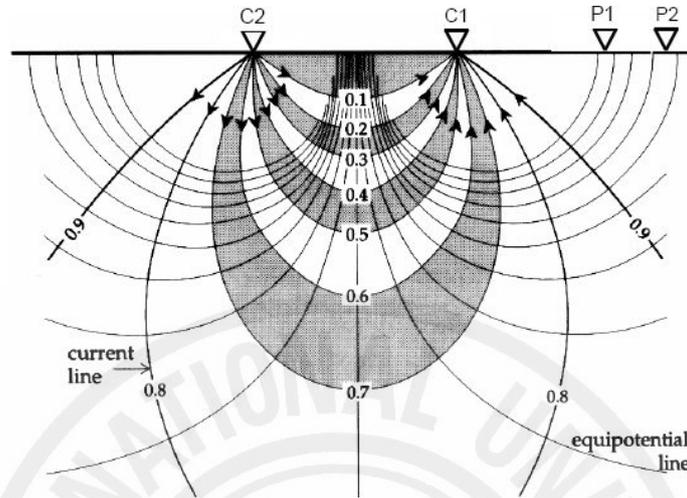


Fig. 6 Electrical distribution of current lines and equipotential surface between two current electrode

대지저항률의 계산에 대해 좀 더 자세히 살펴보기 위해 반무한 공간에서의 전류의 흐름에 대해 고려해 보면, 반지름이 r 인 반구상에서 전류는 방사상으로 흐르게 되므로 위의 대지저항률은 $\rho = 2\pi r \frac{\Delta V}{I}$ 로 나타낼 수 있고, 전류전극 C_1 에는 $+I$, 전류전극 C_2 에는 $-I$ 의 전류라고 가정하면 전위전극 P_1 과 전위전극 P_2 에서는 각각 $V_{p1} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{+I}{C_1P_1} + \frac{-I}{C_2P_1} \right)$ 와 $V_{p2} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{+I}{C_1P_2} + \frac{-I}{C_2P_2} \right)$ 과 같은 전위가 걸리게 된다. 따라서 전류전극 C_1 과 C_2 에 의해서 생기는 전위전극 P_1 과 P_2 에서의 전위차는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta V = V_{p1} - V_{p2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{C_1P_1} - \frac{1}{C_2P_1} - \frac{1}{C_1P_2} + \frac{1}{C_2P_2} \right) \quad (8)$$

여기서 대지저항률 ρ 는 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{C_1P_1} - \frac{1}{C_2P_1} - \frac{1}{C_1P_2} + \frac{1}{C_2P_2}\right)} \frac{\Delta V}{I} = k \frac{\Delta V}{I} \quad (9)$$

식(9)에서의 거리계수 k 는 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{C_1P_1} - \frac{1}{C_2P_1} - \frac{1}{C_1P_2} + \frac{1}{C_2P_2}\right)} \quad (10)$$

여기서 거리계수는 전류전극과 전위전극의 배열에 의해서만 결정되는 값이다. 따라서 전극배열에 따라 거리계수 값을 계산하고 흘려주는 전류량에 대한 전위차를 측정함으로써 겘보기 대지저항률을 계산할 수 있다.

2) Wenner 방법

대개의 대지저항률 측정기술은 Frank Wenner가 처음으로 제안한 등간격 4전극방법을 변형시킨 기술이다. Wenner 방법은 전극간격이 길어졌을 때 전위전극에서 발생하는 전위차가 매우 작아 길지 않은 전극간격이 요구될 때 적용되어 왔다. 이 방법은 사용되는 기기가 다양하고 측정결과의 해석방법이 간단하므로 대지저항률 측정방법으로 많이 이용되어 왔다.

Wenner 방법은 Fig. 7과 같이 측정선 일직선상에 안쪽에 전위전극 P_1 과 P_2 를 두고 외부에 전류전극 C_1 과 C_2 를 설치하여 C_1-P_1 , P_1-P_2 , P_2-C_2 의 측정전극 사이의 거리 a [m]를 등간격이 되도록 한다.

외부전류 전극 C_1 과 C_2 에 전류 I 를 주입시키고 내부의 전위전극 P_1 과 P_2 사이의 전위차 ΔV 를 측정하여 대지저항 R 을 구한다. 이 대지저항 R 은 전극간격 a [m]일 때 겘보기 대지저항률 ρ 에 비례하며 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = k \cdot \frac{V}{I} = k \cdot R \quad (11)$$

k 는 측정전극간격에 따른 거리계수로 Wenner 방법인 경우 $2\pi a$ 이므로 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = 2\pi a R \quad (12)$$

3) Schlumberger 방법

Fig. 8에서 Schlumberger 방법은 측정선의 일직선상에서 내부에 전위전극 P_1 과 P_2 , 외부에 전류전극 C_1 과 C_2 를 설치하고 전위전극 P_1 과 P_2 의 간격 $a[m]$ 가 전류전극 C_1 과 C_2 의 간격이 $1/5[m]$ 을 초과하지 않도록 한다.

외부전극 C_1 과 C_2 에 전류 I 를 주입시키고 내부의 전위전극 P_1 과 P_2 사이의 전위차 ΔV 를 측정하여 대지저항 $R = \frac{V}{I} [\Omega]$ 을 구하고, 이 대지저항 R 과 겘보기 대지저항률 ρ 와의 관계식은 Wenner 방법과 동일하다. 다만 전극배열 거리계수 k 가 $k = \pi \left(\frac{L}{a} + a^2\right)^2$ 이므로 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = k \cdot R = \pi \left(\frac{L}{a} + a^2\right)^2 R \quad (13)$$

4) Dipole-dipole 방법

Dipole-dipole 방법은 한 쌍의 전류전극 간격과 다른 한 쌍의 전위전극 간격이 같은 방법으로 Fig. 9에서와 같이 일직선상의 한쪽 편에 전류전극 C_1 과 C_2 를 고정시킨 후 전위전극 P_1 과 P_2 를 등간격 $a[m]$ 을 유지하며 전류전극 C_1 과 C_2 , 전위전극 P_1 과 P_2 의 사이를 $a, 2a, \dots, na[m]$ 간격이 되도록 단계적으로 이동하여 전위차 ΔV 를 측정하여 겘보기 대지저항률을 계산한다. Dipole-dipole 방법은 반응이 정밀하나 측정전극의 대지내에 접촉상태 또는 대지 깊이에 대한 전기전도도 변화에 민감하며 대지저항이 작을 경우 전위전극 사이의 전위차 ΔV 가 적어 측정이 곤란하다.

Dipole-dipole 방법은 유도분극탐사(induced polarization prospecting)에서 주로

사용되며, 우리나라에서는 지층의 대지저항이 높아 지질분야의 대지저항률 측정에서 가장 널리 사용되는 방법이다.

Dipole-dipole 방법의 거리계수 $k = n(n+1)(n+2)\pi a$ 이므로 식(14)와 같이 겉보기 대지저항률을 산출하여 나타낼 수 있다.

$$\rho = k \cdot R = n(n+1)(n+2)\pi a R \quad (14)$$

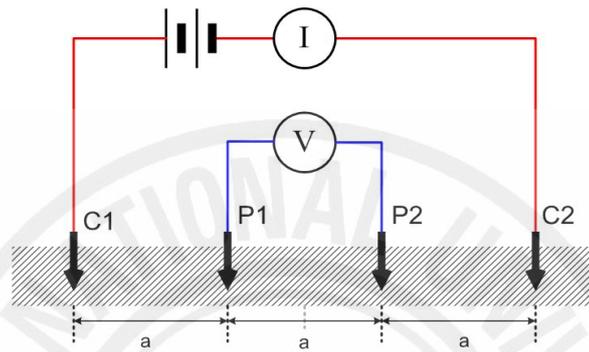


Fig. 7 Wenner configuration to measure soil resistivity

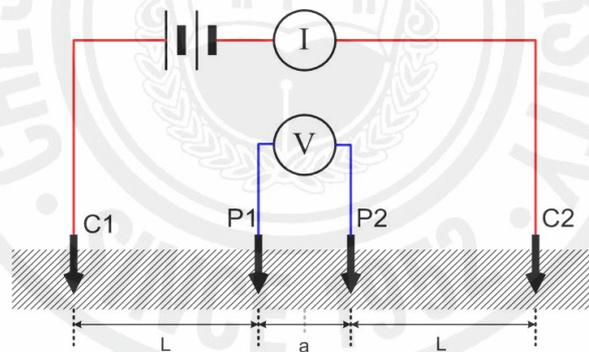


Fig. 8 Schlumberger configuration to measure soil resistivity

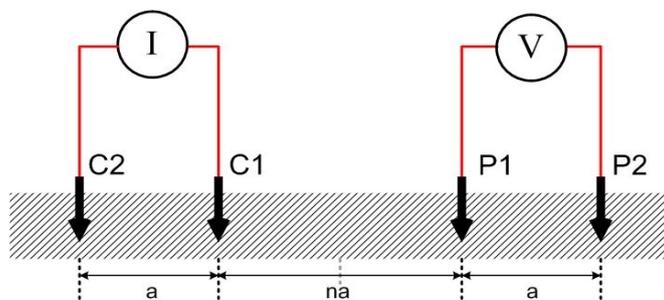


Fig. 9 Dipole-dipole configuration to measure soil resistivity

3. 접지저항

접지를 유럽에서는 Earth, 미국에서는 Ground라고 하며, 양호한 접지시스템은 장비보호, 정전기에 대한 보호, 그리고 장비운용자를 안전하게 보호한다. 또한 접지시스템은 단락에 의한 지락전류, 낙뢰전류, 전력선 혹은 내외부의 강한 서지전압, 그리고 전류로부터 통신 및 각종 제어장치 손상을 예방한다[30]. 그러므로 이러한 본래의 보호기능을 수행하기 위해서는 세계적으로 공인된 IEEE, ANSI, NEC, OSHA 등의 규정에 의한 권고 사양을 만족시키는 신뢰성 높은 접지시스템이 요구된다. 이러한 안정성과 신뢰성을 지닌 접지시스템을 시공하기 위해 정확한 접지 저항 측정 및 설계가 가장 중요하다.

1) 기본이론

접지의 문제는 반공간으로서 반구모양의 전극이 이론적인 취급이 용이하기 때문에 접지이론의 기초가 된다.

Fig. 10에 나타낸 바와 같이 균일한 대지저항률 ρ 로 이루어진 대지표면에 평행하게 매설된 반구형 접지전극에 접지전류 $I[A]$ 가 방사상의 방향으로 균등하게 흐를 때, 접지전극의 중심으로부터 거리 $x[m]$ 만큼 떨어진 점의 등전위면과 두께 dx 부분의 등전위면사이의 저항 dR 은 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$dR = \rho \frac{dx}{2\pi x^2} \quad (14)$$

접지저항은 식(14)를 접지전극 표면 즉, 접지전극의 반경 r 에서부터 무한원점까지 직렬로 연결되어 있어 전극표면 r 로부터 거리 r_1 까지 사이에 포함되고 있는 저항률 dR 을 r 에서 r_1 까지 적분하면 구하면 식(15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \int_r^{r_1} \rho \frac{dx}{2\pi x^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (15)$$

여기서 접지저항은 전극으로부터 무한히 먼 곳까지 포함되는 전 저항으로 r_1 을 무한대로 하면 $\frac{1}{r_1}=0$ 이 된다.

매설된 반구형 접지전극의 접지저항 R 은 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (16)$$

단일 수직 봉상 전극의 경우 Tagg식, Dwight식 그리고 Laurent식 등이 있는데 일반적으로 사용하는 Dwight식을 살펴보면 다음과 같다[10].

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left\{ \ln \frac{4l}{r} - 1 \right\} \quad (17)$$

여기서 ρ 는 대지저항률[Ωm], l 은 접지봉의 길이[m], r 은 접지전극의 반경[m]을 나타낸다.

우리나라와 같이 복잡한 다층구조 대지에서는 ρ 값을 취하는 방법에 따라서 접지저항 계산의 오차가 발생하여 다층구조 대지를 균일층으로 처리하는 접지저항 계산은 문제가 있다.

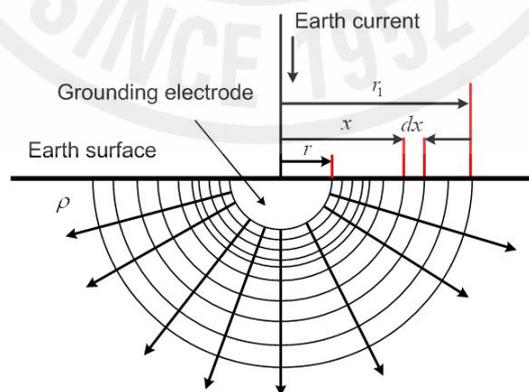


Fig. 10 Hemispherical grounding resistance

N 개의 접지봉을 병렬 접지한 경우의 합성저항 R_0 는 식(18)과 같이 나타낼 수

있다.

$$R_0 = \zeta \frac{R}{N} \quad (18)$$

여기서 ζ 는 집합계수로 봉간의 간격이 커지면 병렬효과가 나타나 ζ 가 작아진다.

2) 접지저항 측정방법

가) 3점 전위강하법

접지저항의 측정에서 측정전류와 접지전극에 생기는 유한구간의 전위상승을 인가전압에 대한 전위강하로 접지저항 값을 나타낸다.

타설된 접지봉의 3점 전위강하법의 구성은 Fig. 11과 같으며, 측정의 대상이 되는 타설된 봉과 측정용 보조전극까지의 결보기저항의 변화 값은 타설된 접지봉에서 멀어지면서 증가하는 것을 알 수 있다. 이 곡선에 나타난 평탄한 부분은 타설된 접지봉과 원거리에 이격된 전극의 영향을 받지 않는 곳이며, 측정대상 접지전극의 접지저항 값이 된다. 일반적으로 측정하고자 하는 접지봉으로부터 이격거리의 약 61.8[%]가 되는 곳의 저항 값을 접지저항으로 채택하게 된다. 하지만 원거리로 이격된 전류전극이 최소 이격거리를 초과하고 측정 요구조건이 단지 특정 접지저항치 이하를 만족하는지의 여부 판별을 위한 것이라면 50% 지점의 값으로 가름하여도 된다.

나) 클램프온 접지저항 측정법

이 측정법은 간단한 원리에 의한 측정방법으로 전위차 측정법을 대체할 수 있는 측정법이다. 측정 시 접지시스템을 장비와 분리시키지 않고 측정할 수 있으며, 접지시스템에 연결된 모든 접지저항을 측정할 수 있는 장점이 있다. 또한 장비와 직접 접촉하지 않으므로 안전하며 측정절차가 쉽고 매우 정확한 측정을 할 수 있는 장점이 있다.

MGN(multi grounding neutral) 전력시스템이나 통신케이블의 경우처럼 다중접지된 시스템의 경우 Fig. 12와 같이 등가 회로로 모델링될 수 있다.

등가회로 상에서 전압 U 가 특별한 변압기를 통해 측정하고자 하는 접지 시설물

에 인가된다면, 접지 내로 전류 I 가 흐르게 된다. 전체 접지회로부터 다음과 같은 방정식을 얻게 된다.

$$\frac{U}{I} = R_x + \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} \quad (19)$$

일반적으로 식(19)에서의 합성저항은 무시할 수 있으므로, 접지저항은 식(20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{U}{I} \approx R_x, \text{ if } R_x \gg \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} \quad (20)$$

만일 전압 U 가 일정하여 전류 I 를 검출할 수 있다면, 측정할 접지봉의 접지저항을 얻을 수 있다. 따라서 식(20)으로부터 접지저항(R_x)을 얻게 된다. Fig. 12에서 전류 I 는 일정한 전압 발전기에서 전력증폭기를 거친 후 변압기를 통해 장비의 송신단에서 공급되고, 이 전류는 장비의 수신단에서 검출할 수 있게 된다.

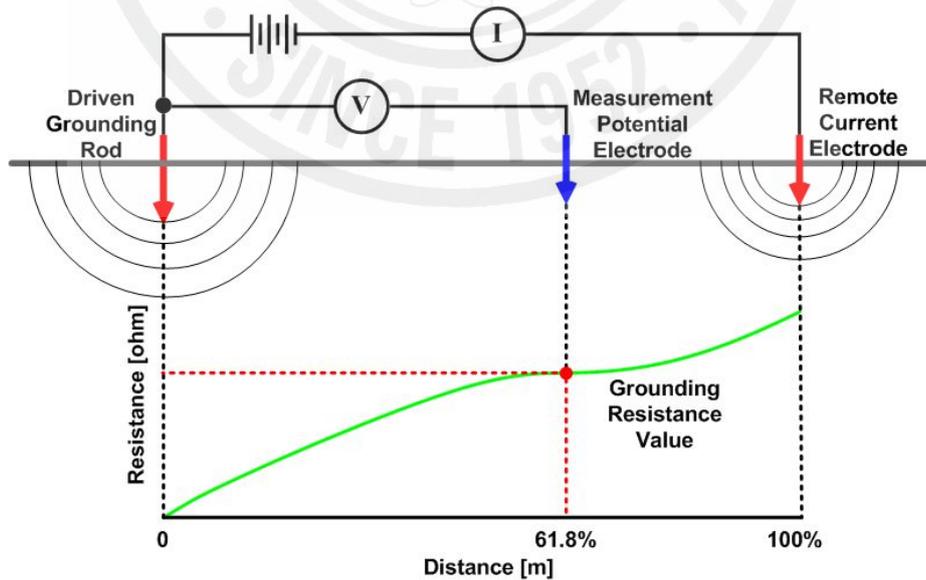


Fig. 11 Distance from driven rod resistance

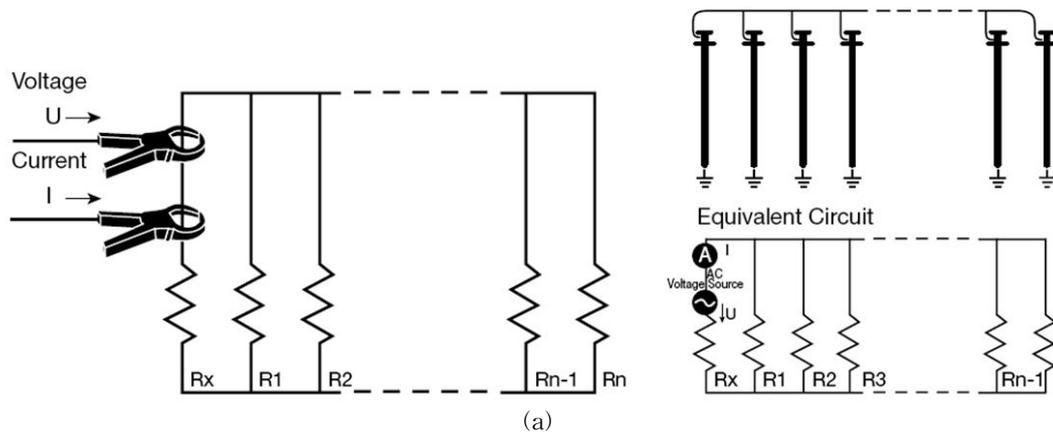


Fig. 12 Composition of clamp-on measurement equipment (a) equivalent circuit, (b) field test

Ⅲ. 전기영상기법

전기영상기법은 직류 또는 저주파수의 교류를 사용하는 대지저항률 측정 장치를 사용하여 전극배열에 따라 수평방향으로 데이터를 측정하고, 이를 영상으로 나타내는 기법이다. 일반적으로 접지에서 많이 사용하는 방법은 4개의 전극을 현장 측정자가 단계적으로 이동시키면서 측정 데이터를 취득하여 깊이에 대한 층의 저항률이나 두께를 분석하는 방법과 유사하나, 전기영상기법은 다전극을 사용한 스위칭 시스템을 이용하여 많은 데이터를 자동으로 취득하게 되며 분석 시에 영상을 통해 최적의 시공지점 선정이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

1. 전기영상에서의 수학적 모델 설계

일반적으로 대지의 구조를 해석하는 방법은 Fig. 13에서 3가지의 형태로 나타낼 수 있다. 전기 분야에서는 Fig. 13(a)와 같이 1차원 대지구조로 해석하여 접지 전극을 설치하게 된다. 1차원 대지구조 해석은 지하구조가 1차원 구조로 되어 있다는 가정 하에서 특정 지점의 깊이에 대한 수직 구조의 측정이 이루어지며 해석 또한 1차원적으로 하게 된다. 다시 말해 지하구조가 수평 다층구조라는 가정 하에 표준곡선이나 모델링을 이용하여 시행착오법 혹은 컴퓨터를 이용한 역산을 통해 해석이 이루어진다. 하지만 현실적으로 지하구조가 1차원이라는 것은 타당성이 없고 1개 측점에 대한 측정결과만으로 어느 한 지역에 대한 지질학적인 구조를 판단하거나 해석하는 것은 해석상 오류를 범할 수 있는 한계점을 가지고 있다.

본 논문에서는 대지저항률 측정이 단순한 어느 한 지점에 대해 이루어지는 것이 아닌 Fig. 13(b)와 같이 2차원 구조의 대지모형을 가정한 측정과 분석이 이루어지며, 접지 시공 지점에 대한 전체적인 대지모형을 설계하고자한다.

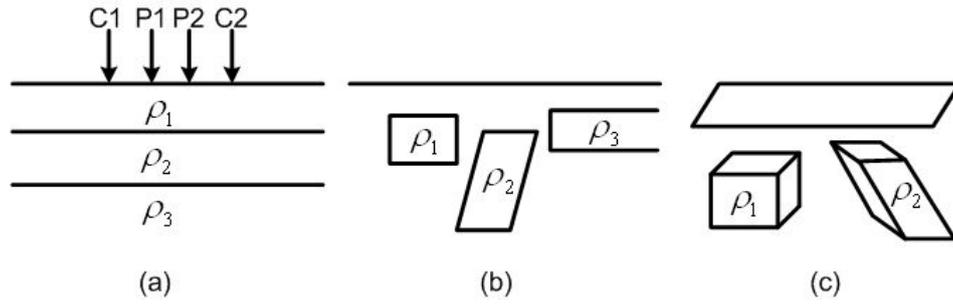


Fig. 13 The three different models used in the interpretation of resistivity measurements (a) 1D model, (b) 2D model, (c) 3D model

1) 측정 오차발생 요소

겉보기저항률 ρ 의 최대상대오차는 거리 a 의 값을 증가시키는 전극배열에서의 거리계수 k 와 전압 V 그리고 전류 I 에 의해 나타낼 수 있다.

$$\left| \frac{\Delta\rho}{\rho} \right| \leq \left| \frac{\Delta k}{k} \right| + \left| \frac{\Delta V}{V} \right| + \left| \frac{\Delta I}{I} \right| \quad (21)$$

측정전류는 일정한 값으로 인가 되기 때문에 전류의 변동은 고려하지 않고 실제적으로 측정의 오차는 전극배열에 의한 거리계수 k 와 대지저항률 측정 장치에서 측정전압 V 로 나타낼 수 있다.

가) 거리계수 오차

거리계수 오차는 전극배열시 거리계수 k 의 변경으로 나타낼 수 있다.

$$\left| \frac{\Delta\rho}{\rho} \right| = \left| \frac{\Delta k}{k} \right| \quad (22)$$

이 값은 지표면이 굴곡이 불규칙하거나 전극배열을 변경시켰을 때 나타날 수 있다. 표면의 굴곡에 대한 오차는 지표의 경사도가 높아지거나 낮아지는 형태에 따라 일정 패턴을 보이므로 정문제 계산에서 고려할 수 있다. 식(10)에서 지표면 측정에 대한 전극 배열의 거리계수 k 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{2\pi}{\bar{k}}, \quad \bar{k} = \frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} + \frac{1}{C_2 P_2} \quad (23)$$

전극의 위치 x_e 를 결정하고 k 의 편도함수를 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial x_e} = \frac{\partial k}{\partial \bar{k}} \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_e} = -\frac{2\pi}{\bar{k}^2} \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_e} = -\frac{k^2}{2\pi} \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_e} \quad (24)$$

여기서 \bar{k} 는 $\frac{1}{x_1 - x_2} + \dots \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_{1/2}} = -\frac{1}{(x_1 - x_2)^2} \cdot \pm 1$ 의 형태로 나타난다.

본 논문에서 측정전극의 간격을 1[m]로 고정하여 사용하였을 때의 측정오차는 Wenner 방법이 가장 적고 상대적으로 dipole-dipole 방법이 가장 높다. 따라서 전극배열 방법에서 측정전극의 간격을 조정하며 오차를 고려해야 한다.

나) 측정 전압오차

전압오차는 계측기를 이용한 측정에서 측정된 전압이 불확실성 때문에 상대적으로 나타나는 변화 값이다.

$$\left| \frac{\Delta \rho_a}{\rho_a} \right|_V = \left| \frac{\Delta V}{V} \right| = \left| \frac{\Delta V k}{\rho_a I} \right| \quad (25)$$

전위차 ΔV 는 0[V]에 가까운 매우 낮은 전압이다. 일반적으로 측정 장치는 아날로그를 디지털로 바꾸는 A/D 컨버터의 성능과 대지저항률 측정에서 전극간 발생하는 전위차의 정도에 따라 측정의 정밀도가 결정된다. 대지의 내부에 전도성 물질과 이온이 많게 되면 대지저항률 값이 일반적으로 매우 낮다. 대지저항률이 낮으면 측정되는 전위차가 매우 작기 때문에 전기적 잡음이 포함될 가능성이 매우 높다. 이러한 잡음을 제거하기 위해서는 많은 전류를 대지에 흘려 주어 S/N비를 높이게 된다. 대지저항률이 높게 나타나는 부분은 측정 전위차가 높으므로 상대적으로 S/N비가 높게 나타난다.

2) 전기영상기법의 수학적 모델

대지 표면의 경계면에서 여러 개의 전극을 통하여 전류를 주입하고 이미 알고 있는 저항률의 경계면에 유기되는 전압은 다음과 같이 Poisson 방정식으로 나타낼 수 있다[31].

$$-\nabla \cdot (\rho^{-1} \nabla \phi) = \nabla \cdot I \quad (26)$$

여기서 ρ 는 대지저항률, ϕ 는 전위, 그리고 I 는 주입되는 전류를 나타낸다. 위의 지배방정식에 대하여 일반적인 유한요소법의 절차에 따라 대지구조를 요소로 분할하고 유한요소방정식을 전개한 후, 경계조건을 적용하고, 각 요소에 대한 결점에 대하여 조합하면 식(27)과 같은 유한요소 행렬식을 얻게 된다.

$$YU_c = I_c \quad (27)$$

여기서 Y 는 캐패시턴스 행렬 또는 결합계수행렬, U_c 는 전위벡터, 그리고 I_c 는 전위벡터를 나타낸다. 이때 결합계수 행렬 Y 는 유한요소방정식에 사용된 요소의 형상과 대지저항률 만의 함수로 표시되며, 전체 절점수가 N 인 경우 그 크기는 $N \times N$ 의 일정한 띠폭을 가지는 거대한 대칭 희소행렬(sparse matrix)이다. 경계조건으로는 지표에서의 전기장의 수직성분이 0인 Neumann 형의 경계조건과 인위적인 경계면에 대해서는 혼합경계조건을 적용하였다.

위의 Neumann 형의 경계조건을 갖는 비선형 Poisson 방정식의 해석적인 해는 구하기가 매우 어려우므로, 본 논문에서는 Wenner 배열, Schlumberger 배열과 dipole-dipole 배열과 같은 전극배열에 대한 포워드응답 메쉬를 통한 유한요소법을 사용하도록 한다. 28개의 전극을 1[m]간격으로 설정하였을 경우, 각각의 전극 배열에 대한 영향을 분석하기 위한 데이터 포인트의 수는 Wenner 배열 117개, Schlumberger 배열 169개, 그리고 dipole-dipole 배열 325개이다. 데이터에 포워드 계산은 Wenner 배열 15×120, Schlumberger 배열 17×93, dipole-dipole 배열의 경우 16×120에 대한 셀들을 계산 하게 된다.

2. 전기영상 기법에 사용되는 전극배열

일반적으로 전극배열법 가운데 2차원 전기영상 기법에 사용될 수 있는 전극배열로는 Wenner, Schlumberger, pole-pole, pole-dipole 및 dipole-dipole 배열을 들 수 있다[19]. 본 논문에서는 현재 간접측정방법으로 가장 널리 쓰이는 Wenner, Schlumberger, 그리고 dipole-dipole 전극배열을 사용하도록 한다.

2차원 전기영상을 얻으려면 Fig. 14와 같이 각 전극배열법에 따라 설계한 측정 데이터 포인트의 수만큼의 측정이 필요하다. Schlumberger 배열은 인접한 한쌍의 전위전극이 멀리 떨어진 다른 한쌍의 전류전극 사이에 위치하여 전위전극 하부의 전기적 물성을 조사한다. 보통 전류전극의 중심에 전위전극을 위치시키고 전류전극 사이의 간격을 설정된 간격으로 증가시키면서 수직적인 대지저항률의 변화를 측정한다. Wenner 배열은 Schlumberger 배열과 비슷하나 전류전극 및 전위전극 간의 간격이 동일하도록 한다. 보통 동일 간격의 전극을 측정선을 따라 일정한 간격으로 이동시켜 지하의 수평적인 전기적 물성 분포를 파악하며, 지하의 대지저항률이 매우 낮은 곳에서 많이 사용된다. 측정값은 전위전극의 중심 하부에 표시한다. Dipole-dipole 배열은 한 쌍의 전류전극 간격과 다른 한 쌍의 전위전극 간격이 같은 전극 배열로 전류전극과 전위전극의 거리를 연속적으로 dipole-dipole 길이의 정수 배만큼 증가시켜 2차원적 측정방법으로 수행한다. 측정값은 전류전극의 중심과 전위전극의 중심점을 45°로 이어 만나는 점에 표시한다. 반응이 정밀하나 전극의 접지 상태 또는 지표면 부분의 대지저항률 변화에 민감하며 지하의 대지저항률이 작을 경우 전위전극에서의 전위차가 적어 측정이 곤란하다.

일반적으로 Wenner 배열은 Schlumberger 배열에 비하여 측정전위차가 매우 높으므로, 즉 S/N비가 매우 높으므로, 지하 매질이 전기가 잘 통하는 지역에서 적합하나 매 측정마다 전위전극의 위치가 이동되므로 지표의 국부적인 이상에 의하여 측정 곡선이 왜곡될 우려가 매우 높으며 분해능이 상대적으로 낮다는 단점이 있다. Dipole-dipole 배열은 다양한 전극배열법 중에서 가장 분해능이 뛰어난 장점이 있지만 측정 자료의 질을 의미하는 S/N비가 낮아 잡음의 영향을 받기 쉬운 단점도 갖고 있다.

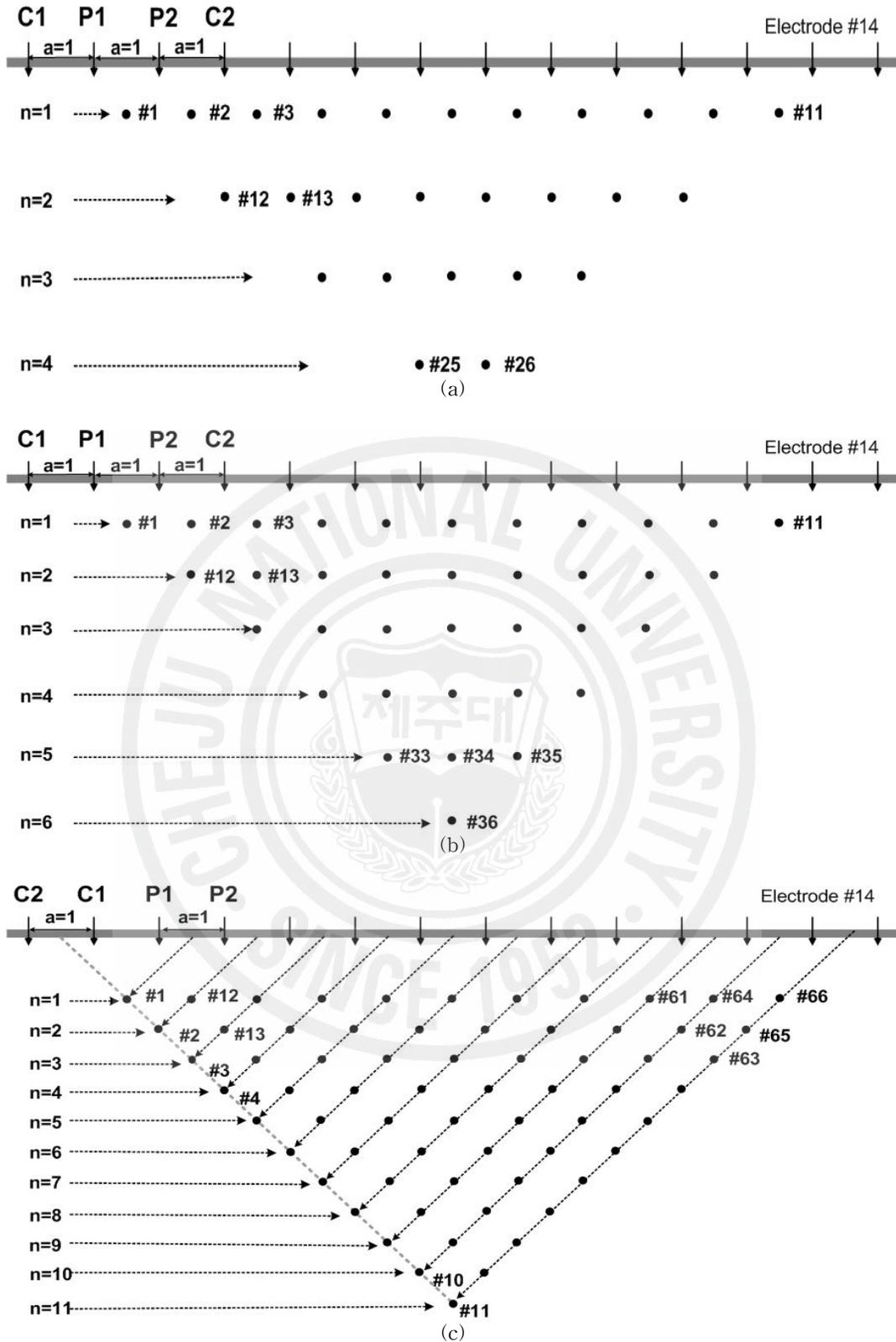


Fig. 14 The measurement sequences for building up a pseudo-section (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array

3. 전기영상복원기법

전기영상기법을 이용한 영상복원 문제는 기본적으로 정문제(forward problem)와 역문제(inverse problem) 두 단계로 구성된다. 정문제 단계에서는, 미리 가정된 또는 앞서 계산된 대지저항률을 이용하여 Poisson 방정식으로부터 대지 지하 및 경계에서의 전위를 구한다. 그리고 역문제 단계에서는, 경계면에서 측정된 전위와 계산된 전위 사이의 차이가 최소제곱의 관점에서 최소화 될 수 있도록 적절한 방법을 통해 대지저항률을 조절하며, 이러한 과정은 원하는 수렴 정도를 만족할 때까지 반복된다. 여기에서, 역문제라 함은 대지저항률 측정에서 이미 알고 있는 대지저항률과 경계조건을 이용하여 내부 전기장의 해를 구하는 정문제에 정확히 역의 문제이기 때문이다. 역문제의 경우에 직접 대지저항률을 구할 수 있는 방법은 알려진 바가 없다. 따라서, 역문제에서는 계산 그리고 측정 전위의 차를 최소화하는 대지저항률 분포를 구하게 된다.

불균질한 대지의 대지저항률 분포에 대한 영상복원 위하여 이론적인 전위와 측정된 전위 사이의 오차를 줄여가는 반복적 역산 방법을 적용하여 오차가 충분히 줄어든 경우 종료시킨다. 대지의 구조를 해석하는데 사용되는 대부분의 비선형 역산문제들은 비고유(non-unique)나 비정치성(ill-posed)을 가지게 되는데, 본 논문에서는 대지저항률 분포에 대한 영상을 복원하기 위하여 역산 방법으로 Gauss-Newton[21], TSVD(truncated singular value decomposition)[22], TLS(truncated least squares)[23,24], SIRT(simultaneous iterative reconstruction technique)[25,26] 방법을 적용하도록 한다.

대지표면의 물리적 속성 $p(\vec{r})$ 에 영향을 받는 N 번의 데이터를 측정하였을 때 데이터 벡터는 $d = (d_1, d_2, \dots, d_N)^T$ 로 나타낼 수 있다. M 개의 대지 모델 파라미터를 사용하여 대지표면을 근사화 시키면 공간 파라미터 분포(spatial parameter distribution) $p(\vec{r})$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(\vec{r}) = \sum_{i=1}^M \rho_i \phi_i(\vec{r}), \quad \phi_i(\vec{r}) = \begin{cases} 1 & \vec{r} \in \Omega_i \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (28)$$

여기서 ρ_i 는 대지모델 파라미터이며 다음과 같이 모델 벡터로 정의할 수 있다.

$$\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_M)^T \quad (29)$$

역산의 목적은 포워드 응답 $f(\rho)$ 이 데이터벡터 d 를 근사화 시키는 대지모델 ρ 를 추정하는 것으로서, 선형모델인 경우에는 포워드 응답 $f(\rho)$ 과 ρ 는 식(30)과 같이 선형관계로 나타낼 수 있다.

$$f(\rho) = F\rho \quad (30)$$

일반적으로 대지표면에서 포워드 응답 $f(\rho)$ 는 비선형이므로, 대지모델 ρ 는 $\rho_{k+1} = \rho_k + \Delta\rho_k$ 형태로 놓고 순차적으로 포워드 응답 $f(\rho)$ 가 데이터 d 에 수렴하는 ρ_k 를 구하도록 한다.

Fig. 15는 전기영상기법에서 2차원 영상을 역산하는 방법에 대하여 나타내었다.

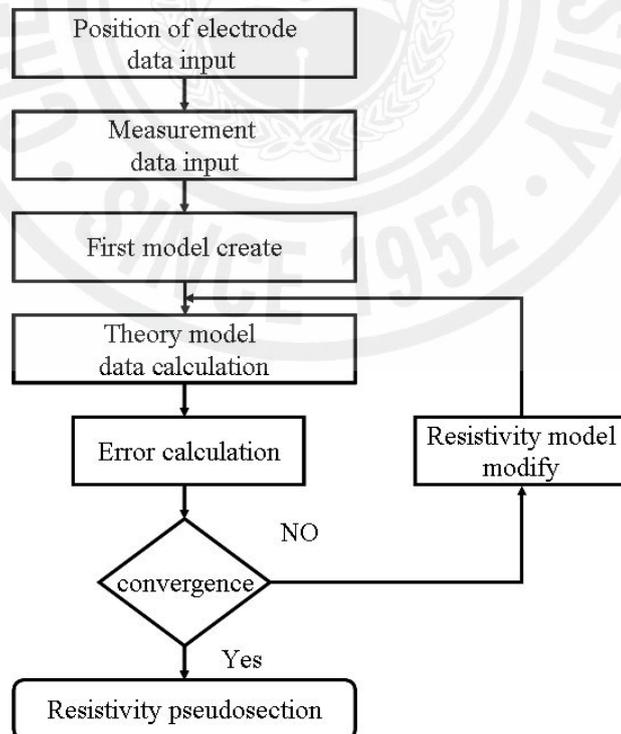


Fig. 15 Flowchart of the electrical image technique

1) Gauss-Newton 방법

Loke와 Dahlin[21]은 다양한 복원 방법들을 비교 분석한 결과 Gauss-Newton 방법이 다른 방법에 비해 수렴 속도, 잔류 오차등의 측면에서 비교적 좋은 성능을 나타냄을 발표하였다. Gauss-Newton 방법에서 최소화시켜야 할 목적함수는 식(31)을 이용한 오차의 제곱의 합으로 정의된다.

$$\Phi_d = \sum_i^N \left(\frac{d_i - f_i(\rho)}{\epsilon_i} \right)^2 = \| (D(d - f(\rho))) \|_2^2 = \Phi_d^*, \quad D = \text{diag} \left\{ \frac{1}{\epsilon_1}, \dots, \frac{1}{\epsilon_N} \right\} \quad (31)$$

여기서 d 와 $f(\rho)$ 는 각각 수집한 데이터와 모델 포워드 응답이고 D 는 데이터가 중행렬을 나타낸다. 이때 식(31)에서 주어진 모델 제약함수를 최소화함으로써 모델 ρ 을 찾는 것이다. 식(31)로 주어지는 목적함수를 최소화시키는 문제를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_d' = - [f'(\rho)]^T D^T D [d - f(\rho)] = 0 \quad (32)$$

위의 식(32)는 비선형이므로 다음과 같이 반복적인 선형화를 하여 푼다.

$$\Phi_d'(\rho_{k+1}) \approx \Phi_d'(\rho_k) + \Phi_d''(\rho_k)(\rho_{k+1} - \rho_k) = 0 \quad (33)$$

여기서 Φ_d'' 은 Hessian 행렬이라 부르며, 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi_d'' = [f'(\rho)]^T D^T D f'(\rho) + [f''(\rho)]^T \{ I \otimes [d - f(\rho)] \} \quad (34)$$

이때 \otimes 는 Kronecker 행렬 곱을 나타낸다. $f''(\rho)$ 은 계산하기 어렵고 상대적으로 작은 양이므로, 위 식에서 두 번째 항은 보통 무시된다. 따라서 Hessian 행렬은 다음과 같이 된다.

$$\Phi_d'' = [f'(\rho)]^T D^T D f'(\rho) \quad (35)$$

위의 식들을 정리하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\Delta\rho_k = \rho_{k+1} - \rho_k = H^{-1}\{S^T[d - f(\rho_k)]\} \quad (36)$$

여기서 Hessian 행렬 H 는 다음과 같이 정의되고

$$H = S^T D^T D S \quad (37)$$

S 는 자코비안(Jacobian) 또는 요소들의 감도(sensitivity) 행렬을 나타내고, 각 성분은 다음과 같이 주어진다.

$$s_{ij} = \frac{\partial f_i(\rho)}{\partial \rho_j} \quad (38)$$

Gauss-Newton 방법은 Fig. 16과 같이 각 단계에 대해 반복계산을 수행하게 된다.

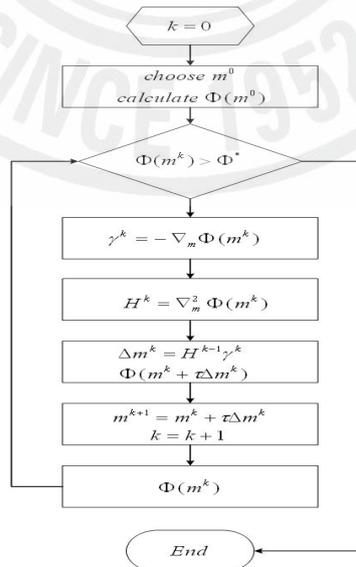


Fig. 16 Flowchart of Gauss-Newton algorithm

Gauss-Newton 방법은 비선형 특성의 선형화에 따른 모델링 오차와 Hessian 행렬의 비정칙성 때문에 만족스러운 영상을 얻기가 쉽지 않다. 특히, Hessian 행렬의 비정칙성은 역행렬 계산 시 부정확한 결과를 나타내게 되어 영상복원의 성능을 저하시킨다. 이러한 문제를 완화하기 위하여 본 논문에서는 다음과 같이 목적함수에 정규화(regularization) 항을 포함시키도록 한다[22].

$$\Phi = \Phi_d + \lambda\Phi_\rho = \|D(d-f(\rho))\|_2^2 + \lambda\|C(\rho-\rho_0)\|_2^2 \quad (39)$$

여기서 ρ_0 는 사전지식을 통해 알고 있는 기준모델이고 C 는 모델 가중행렬을 나타낸다. 라그랑지승수(Lagrange multiplier) λ 는 모델과 데이터 함수 $\Phi = \Phi_d + \lambda\Phi_\rho$ 를 결합하는데 사용된다. 일반적으로 대상값 Φ_d^* 는 데이터 n_d 의 수와 같으며, 데이터는 표준편차 내에서 조정된다.

Gauss-Newton 방법을 사용하여 $\rho_{k+1} = \rho_k + \Delta\rho_k$ 로 반복하고 Φ 를 최소화하도록 한다. 모든 반복 k 단계에서 잘 알려진 정규화 일반식은 다음의 식으로 풀 수 있다.

$$((DS)^T DS + \lambda C^T C) \cdot \Delta\rho_k = (DS)^T D(d-f(\rho_k)) - \lambda C^T C(\rho_k - \rho_0) \quad (40)$$

식(40)에서 에러가 가중된 감도행렬 $\hat{S} = DS$ 와 일반적인 역행렬 $\hat{S}^\dagger, C^\dagger$ 을 사용하면 다음의 결과를 얻는다.

$$\Delta\rho_k = \hat{S}^\dagger D(d-f(\rho_k)) - C^\dagger C(\rho_k - \rho_0) \quad (41)$$

여기서 $\hat{S}^\dagger = (\hat{S}^T \hat{S} + \lambda C^T C)^{-1} \hat{S}^T$ 와 $C^\dagger = \lambda(\hat{S}^T \hat{S} + \lambda C^T C)^{-1}$ 이고 $\hat{S}^T \hat{S} + C^T C = I$ 의 관계를 만족한다.

한편 데이터 d 는 다음과 같이 모델 ρ_{true} 의 포워드 응답에 잡음 n 이 포함된 것으로 가정하면 식(42)와 같이 나타낼 수 있다.

$$d = f(\rho_{true}) + n \quad (42)$$

이때 k 단계에서 모델 ρ_k 이 모델에 이미 근접했다고 가정하면 선형화 영역은 식 (43)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d = f(\rho_k) + S(\rho_{true} - \rho_k) + n \quad (43)$$

식(43)를 식(41)에 대입하면 추정모델 ρ_{est} 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho_{est} &= \rho_k + \hat{S}^\dagger DS(\rho_{true} - \rho_k) - C^\dagger C(\rho_k - \rho_0) + \hat{S}^\dagger Dn \\ &= \rho_k + \hat{S}^\dagger \hat{S} \rho_{true} - (\hat{S}^\dagger \hat{S} + C^\dagger C) \rho_k + C^\dagger C \rho_0 + \hat{S}^\dagger Dn \\ &= R^M \rho_{true} + (I - R^M) \rho_0 + \hat{S}^\dagger Dn \end{aligned} \quad (44)$$

여기서 해상도 행렬 $R^M = \hat{S}^\dagger \hat{S}$ 이다.

추정모델 ρ_{est} 은 원형모델과 기준모델, 그리고 잡음 포함된 것에 의해 재구성된다. 이때 R^M 는 일반화된 역행렬 \hat{S}^\dagger 을 포함하므로 추정모델의 해상도와 민감도를 결정하는 중요한 행렬이 된다.

본 논문에서는 R^M 을 결정하는 방법으로 TSVD 방법을 사용하고 역행렬을 직접 구하는 대신에 반복적인 수행으로 원하는 해를 구하는 TLS 방법과 SIRT 방법 등을 사용하도록 한다.

2) TSVD 방법

비선형 특성의 선형화에 따른 모델링 오차와 Hessian 행렬의 비정칙성이 존재하는 경우에는 식(40)과 식(41)에서 일반적인 역행렬 계산 시 부정확한 결과를 나타낼 수 있는데, TSVD방법을 사용하면 식(44)의 R^M 를 쉽게 계산할 수 있다. 계수(rank)가 r 인 $m \times n$ 실계수 행렬 A 에 대하여, 행렬 A 를 $A = UDV^T$ 로 분해할 수 있다. 여기서 행렬 D 는 대각선 성분이 실수로서 식(45)의 성질을 만족하는

$m \times n$ 대각행렬이다.

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r \geq \sigma_{r+1} = \dots = \sigma_q = 0, \quad q = \min(m, n) \quad (45)$$

U 와 V 는 각각 $m \times m$, $n \times n$ 인 직교행렬들이다. 이때, 행렬 D 의 대각선성분 σ_i 를 행렬 A 의 특이값(singular values)이라 하며, σ_i^2 은 대칭행렬 AA^T 의 고유값이 되는데 이들은 유일하게 정해진다. 한편, 행렬 U 의 열들은 AA^T 의 고유벡터들이며 각각을 행렬 A 의 좌특이벡터라 하고, 행렬 V 의 열(또는 V^T 의 행)들은 $A^T A$ 의 고유벡터들이며 각각을 행렬 A 의 우특이벡터라 한다.

축소된 SVD를 살펴보기 위해 위에서 주어진 행렬 D, U 와 V 를 다음과 같이 분해하도록 한다.

$$D = \begin{pmatrix} D_r & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad D_r = \text{diag}\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r\} \quad (46)$$

$$V = (V_r \ V_0), \quad U = (U_r \ U_0)$$

여기서 행렬 V_r 과 U_r 는 각각 V 와 U 의 처음 r 개의 행을 나타낸다. 이때 V 와 U 는 역이 존재하는 행렬이므로 다음의 성질을 쉽게 만족한다.

$$A = UDVT^T = U_r D_r V_r^T, \quad A^\dagger = V_r D_r^{-1} U_r^T \quad (47)$$

본 논문에서는 대지저항률을 구하는 과정에서 TSVD 방법은 행렬 $R^M = \hat{S}^T \hat{S}$ 을 계산할 때 사용되는데, 이를 위해서는 먼저 행렬 \hat{S} 와 $\hat{S}^\dagger = (\hat{S}^T \hat{S} + \lambda C^T C)^{-1} \hat{S}^T$ 에 대해 SVD를 수행한다. 이때 \hat{S} 와 \hat{S}^\dagger 가 다음과 같이 주어지는 경우에

$$\begin{aligned} \hat{S}^\dagger &= V_r \text{diag}\left\{\frac{f_i}{s_i}\right\} U_r^T, \\ \hat{S} &= U_r \text{diag}\{s_i\} V_r^T \end{aligned} \quad (48)$$

행렬 R^M 은 다음과 같이 쉽고 정확하게 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} R^M &= V_r \text{diag}\left\{\frac{f_i}{s_i}\right\} U_r^T U_r \text{diag}\{s_i\} V_r^T \\ &= V_r \text{diag}\{f_i\} V_r^T \end{aligned} \quad (49)$$

3) SIRT 방법

SIRT(simultaneous iterative reconstruction technique) 방법은 파선 토모그래피 기법의 하나로 대수적 영상 구성 기법을 발전시킨 기법이다. 대수적 영상구성 기법(algebraic reconstruction technique)은 한번에 한 경로에 대해 보정값을 계산하는 반면, SIRT는 주어진 영역을 통과하는 모든 파선에 대한 보정값을 동시에 계산한다. 모든 영역에 대한 보정값이 계산되면 이를 각 영역에 대해 일시에 보정한다. 이러한 과정을 반복하여 오차를 줄여나가는 방법이다.

일반적으로 모델 파라미터나 데이터의 개수가 적절히 제한되는 경우에는 Gauss-Newton 방법이나 TSVD 방법을 사용하여 대지저항률을 구하나 모델 파라미터나 데이터의 개수가 많은 경우에는 행렬의 크기가 커져 직접 역행렬을 구하기가 쉽지 않아 TLS 방법을 많이 사용한다. 행렬이 비정칙성을 고려하여 정규화 등을 포함한 TLS 방법을 수행하기 위해서는 계산시간이 많이 필요하므로 수렴속도를 빠르게 하기 위해 SIRT 방법을 사용한다. SIRT 방법에서는 정규화 과정 등이 필요 없이 다음과 같이 가중치 행렬을 사용한다.

측정된 겉보기저항률 데이터 d_i 는 다음과 같이 모델의 저항률 분포 $\rho(r)$ 를 이용하여 나타낼 수 있다[25].

$$d_i = \int_{\Omega} W_i(r, \rho) \rho(r) d^2r, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (50)$$

여기서 가중치 커널(kernel) 행렬 W 는 파라미터 $\rho(r)$ 에 대응하는 겉보기저항률 d_i 의 Frechet 미분값들을 포함하고 N 는 측정데이터의 개수를 나타낸다.

SIRT 방법을 사용한 모델의 대지저항률의 추정치 $\rho_i(j=1, 2, \dots, M)$ 는 다음과

같이 나타난다[32].

$$\begin{aligned}\rho_{k+1}^j &= \rho_k^j + \frac{\sum_{i=1}^N w_{ij}(d_i - d_i^{(n)})}{\sum_{i=1}^N |w_{ij}|}, \quad m_0^j = \bar{d}, \quad \forall j \\ d_i^{(n)} &= \sum_{j=1}^M w_{ij} m_n^j, \quad m_0^j = \bar{d}, \quad \forall i\end{aligned}\tag{51}$$

4) TLS 방법

TLS(truncated least square) 방법에서 식(41)의 해 $\Delta\rho_k$ 는 행렬 S , D , C $d-f(\rho_k)$ 와 $\rho_k - \rho_0$ 에 의해 결정된다. 일반적으로 행렬 S 는 정칙(nonsingular)이지만, D 와 C 는 정칙이 아닌 경우가 존재하고 모델 파라미터나 데이터의 개수가 많아지면 행렬의 크기가 커져 직접 역행렬을 구하기가 힘들어진다. 이를 해결하기 위해 역행렬을 구하는 대신 반복적인 방법을 사용하여 역행렬을 구하도록 한다.

일반적으로 다음과 같이 주어지는 정규방정식을 conjugate gradient 방법 형태로 나타낸다.

$$(A^T A + \lambda I)x = A^T b\tag{52}$$

이때 기본방정식의 나머지를 나타내는 변수 $z = Ax - b$ 와 정규방정식의 나머지를 나타내는 변수 $r = A^T z - \lambda x$ 를 이용하면 대지저항률 ρ 를 다음과 같은 반복적인 TLS 방법을 통해 얻을 수 있다.

```

k = 0
z0 = D(Ax0 - b)
p0 = r0 = ATDTz - λCTCx0
while k ≤ kmax do
    qk+1 = DApk
    αk+1 =  $\frac{\|r_k\|^2}{q_k^T q_k + \lambda p_k^T C^T C p_k}$ 
    xk+1 = xk + αk+1pk
    zk+1 = zk - αk+1qk
    rk+1 = DAzk+1 - λCTCxk+1
    βk+1 =  $\frac{\|r_{k+1}\|^2}{\|r_k\|^2}$ 
    pk+1 = rk+1 + βk+1pk
    k = k + 1
endwhile

```

Fig. 17 TLS algorithm

4. 전기영상기법에서의 대지모델

ρ -a곡선 해석법에서 사용하는 층상 구조의 대지모델은 전기영상기법을 이용한 대지모델로 변환 될 수 있다. 대지가 층상이라는 가정 하에 각각의 층은 균일한 깊이와 저항률을 가지고 있으므로 일반적인 접지에 사용되는 2층과 3층 구조의 대지 모델을 설계 할 수 있다.

본 논문에서는 접지설계에 이용되는 습한 유기질 토양(wet organic soil) 10 [Ωm], 습한 토양(moist soil) 100 [Ωm], 건조한 토양(dry soil) 1000 [Ωm]의 대지저항률 파라미터를 사용하여 2층 구조 대지모델, 3층 구조 대지모델과 수직 구조 대지모델들을 설계하여 각각의 전극배열에 대한 역산을 Gauss-Newton 알고리즘을 이용하여 대지모델 특성을 나타내면 다음과 같다.

1) 2층 구조 대지모델

Wenner, Schlumberger, dipole-dipole 배열에 대해 저항률 ρ_1 은 10 [Ωm], ρ_2 는 1000 [Ωm], 깊이에 대한 h_1 는 Wenner 배열인 경우 0~1.1 [m], Schlumberger 배열인 경우 0~1.16 [m], dipole-dipole 배열의 경우 0~1.06 [m]인 2층 구조 대지모

델을 나타내면 Fig. 18과 같다.

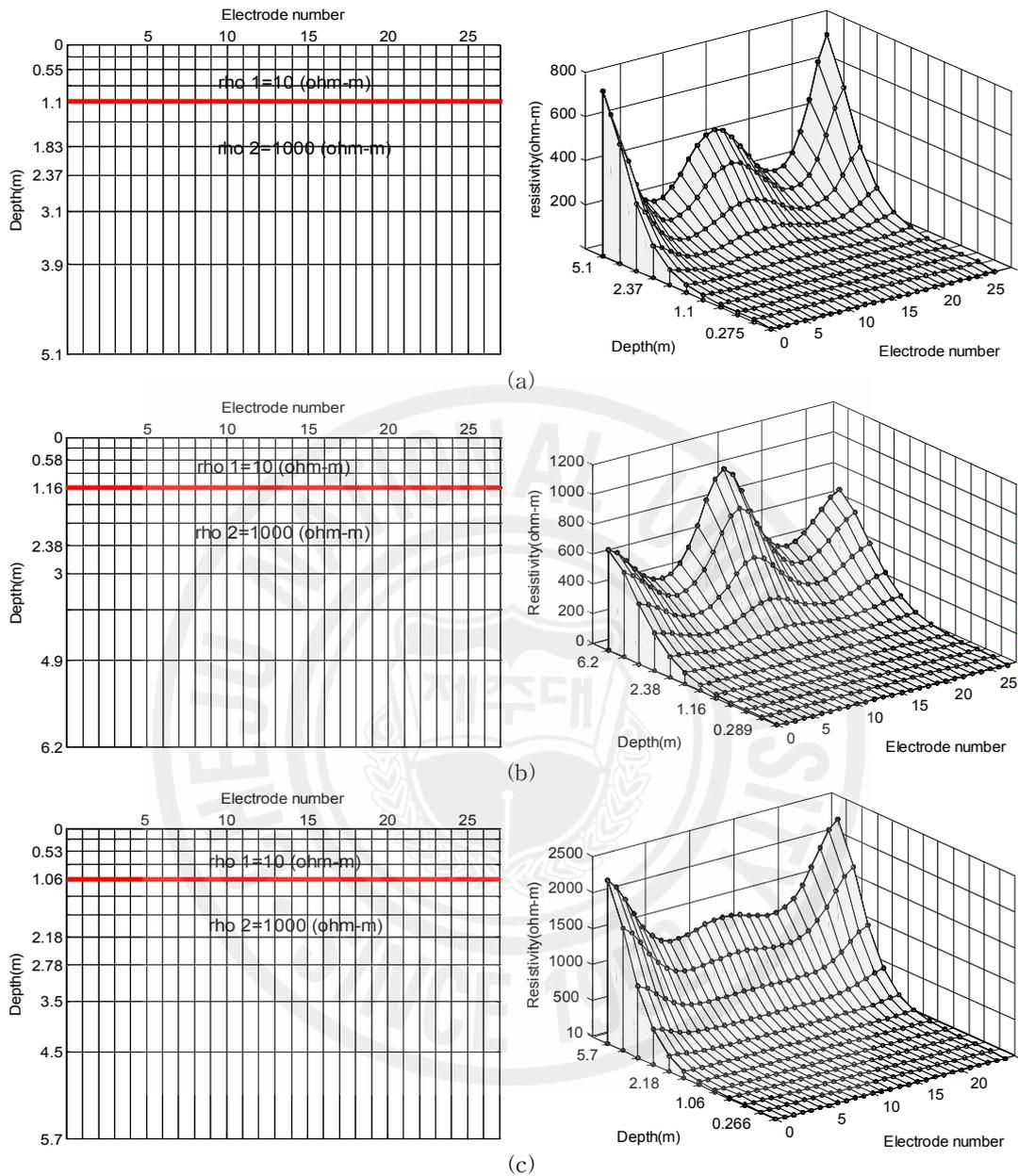


Fig. 18 Design models and inversion results in 2-layer earth model
 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array

2) 3층 구조 대지모델

3층 구조 대지모델의 경우 ρ - a 곡선 해석방법을 이용한 대지파라미터 해석시의 3층 구조 대지모델 A형에 해당하는 3층 구조를 가정하여 설계하였다. 3가지

배열을 사용한 3층 구조 대지모형을 전기영상 기법으로 역산을 하면 Fig. 19와 같다.

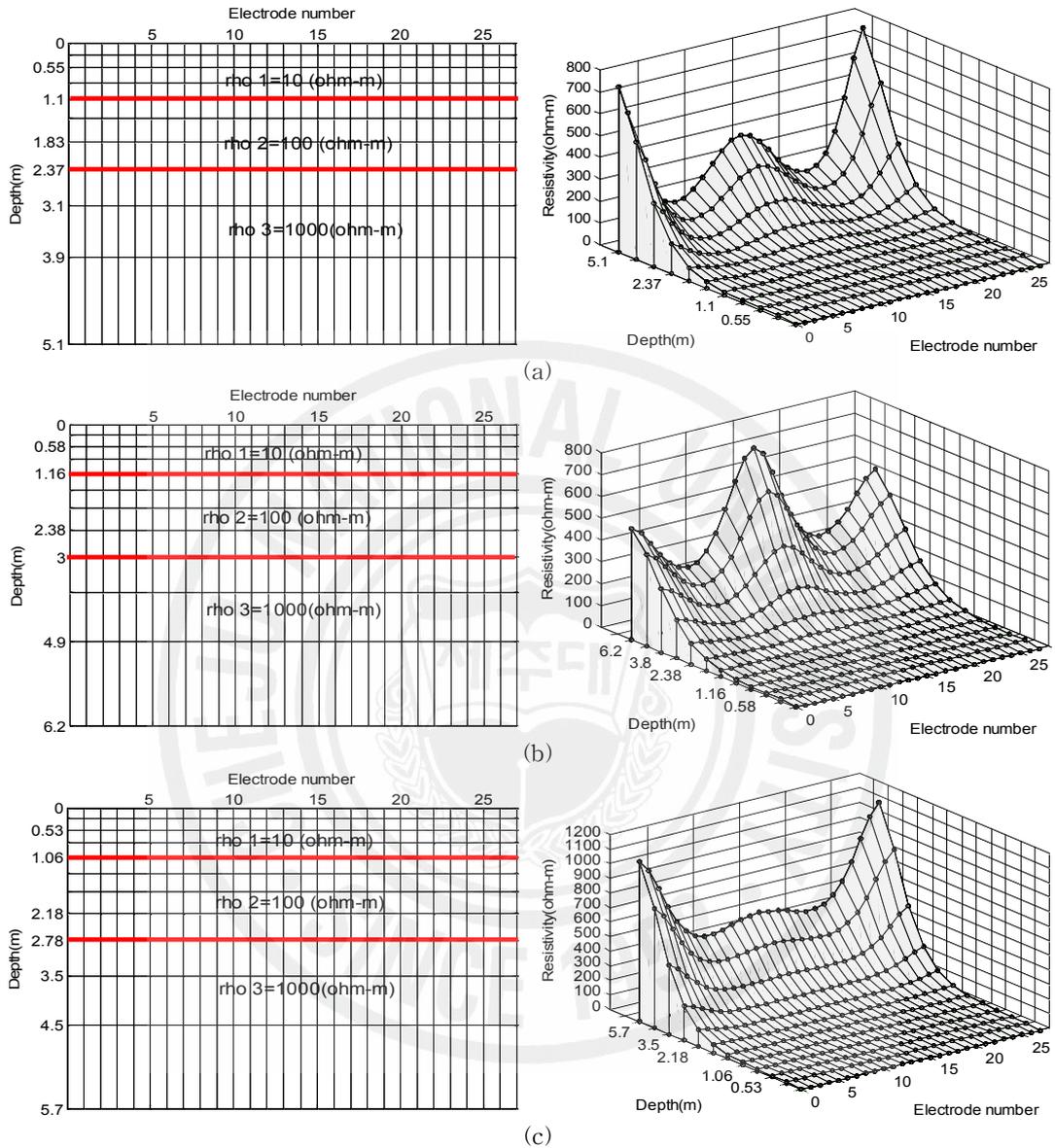


Fig. 19 Design models and inversion results in 3-layer earth model
 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array

3) 수직 구조 대지모형

접지설계를 위한 대지저항률 측정 시 대지구조가 수평 층상 구조가 아닌 수직 구조를 가정하여 설계하였을 때 ρ_1, ρ_2, ρ_3 가 수직으로 이루어진 층이 존재하게

된다. 중앙의 한 점을 기준으로 측정하는 기존의 1차원 측정의 경우 오차가 발생하여 현장의 대지 분석의 어려움을 초래하게 된다.

Wenner 배열에서 수직 구조의 2층과 3층의 대지모형을 전기영상기법으로 나타내면 Fig. 20, Fig. 21과 같다.

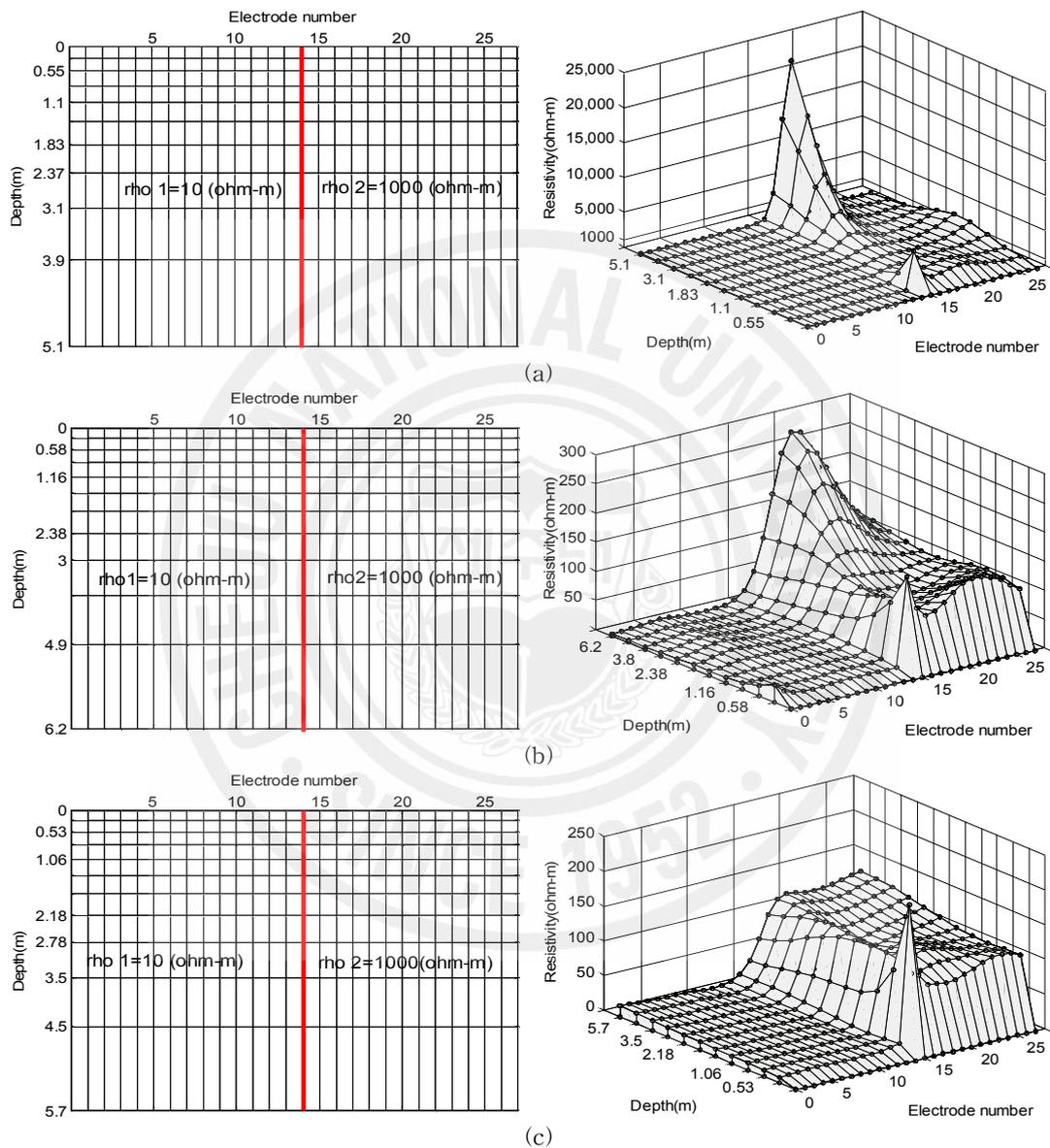


Fig. 20 Design models and inversion results in 2-layer vertically earth model (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array

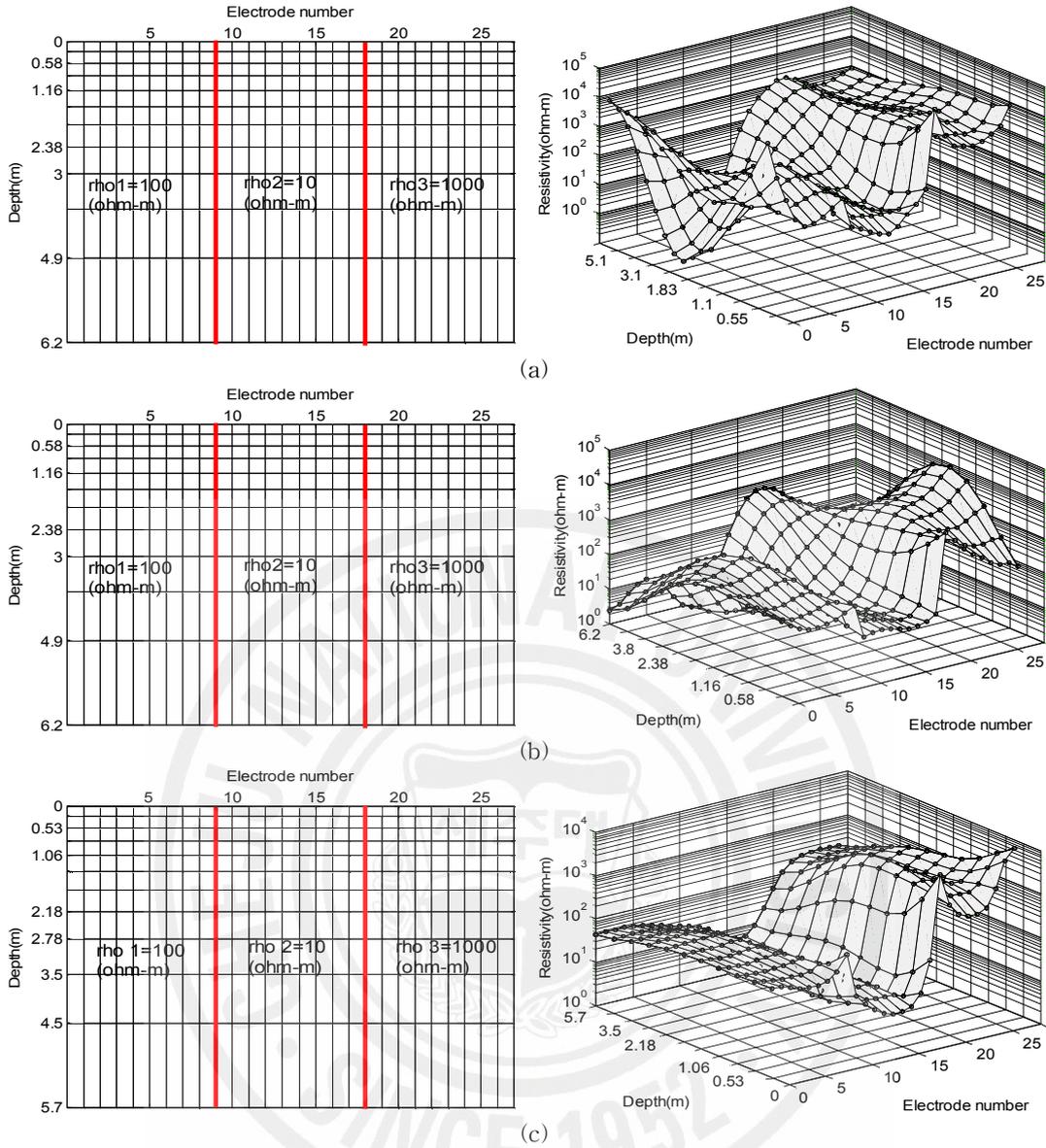


Fig. 21 Design models and inversion results in 3-layer vertically earth model (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array

5. 전기영상기법에서 다층구조의 대지파라미터

접지시스템 설계에 있어서 접지체를 시설하는 지역의 대지 구성 및 전기적 특성을 파악하는 것은 접지 성능 결정에 기반이 되는 요소이다. 이러한 대지의 전기적 특성은 대지저항률이라는 파라미터로써 특징 지워진다. 이 대지구조 해석은

대지의 구조상 대부분 다층구조의 대지 특성을 가지며, 일반적으로 대지저항률은 연중 계절의 온도와 습도에 따라 변하며, 여름에 대지저항률은 최고치를 나타낸다[4,33]. 이러한 이유로 변동하는 다층구조의 대지에서 파라미터들을 구하는 것은 최적화문제로 연결된다.

본 논문에서 제안한 방법은 유전알고리즘(genetic algorithm, GA)에 기반한 것이며, 측정된 대지저항률을 이용하여 대지의 다층구조에서 파라미터들을 구한다. 동일 지역의 최적의 시공지점 선정되고, 선정된 지점에 대해 깊이에 대한 정밀도가 높은 분석을 수행하기 위해 다른 연구결과들과 비교하여 효율성이 뛰어난 것으로 알려져 있는 GA 알고리즘을 이용하여 다층구조의 정확한 파라미터 값들을 구할 수 있는 방법을 이용하게 된다. 이 값들은 접지를 설치할 때 매우 중요한 입력 자료로 사용되며, 대지의 층수에 상관없이 사용가능하며, 그리고 비교적 빠른 계산수렴을 하는 장점을 가지게 된다.

가) 다층구조에서의 대지저항률

대지의 표면에 있는 점 전극으로부터 주입되는 전류 I 에 의한 전위 $V_0(x)$ 를 원통좌표계 (x, θ, z) 에 의해 표시하면 다음과 같은 식으로 표현 가능하다[4].

$$V_0(x) = \frac{\rho_0 I}{2\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda \cdot |z|} J_0(\lambda x) \lambda d\lambda \quad (53)$$

여기서 J_0 는 영차의 첫째 종류의 Bessel 함수이다.

수평적 2층 구조의 Tagg 모델을 사용하면, 대지면에서 점 전극에 의해 주입되는 전류 I 에 의한 전위 V_2 는 식(54)와 같이 나타낼 수 있다[4].

$$V_2(x) = \frac{\rho_1 I}{2\pi x} [1 + F_2(x)] \quad (54)$$

여기서 $F_2(x)$ 는 식(55)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_2(x) = 2x \int_0^{\infty} \frac{k_1 e^{-2\lambda h}}{1 - k_1 e^{-2\lambda h}} J_0(\lambda x) \partial \lambda \quad (55)$$

여기서 k_1 은 위층과 아래층에 대한 반사계수이며 식(56)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_1 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (56)$$

다층구조의 지층에서 표면전위를 계산방법은 Takahashi와 Kawase[15,16]에 의해 개발되었다. 일반적인 N 층 구조의 모델은 Fig. 22와 같이 나타난다. 첫째 층의 대지저항률과 지층의 두께는 ρ_1 과 h_1 , 두 번째 층의 대지저항률과 지층의 두께는 ρ_2 와 h_2 , 최종적으로 마지막 층의 대지저항률과 지층의 두께는 ρ_N 과 h_N 인 다층구조의 대지모델로 나타낼 수 있다.

점 전극에 의해 주입되는 전류 I 에 의한 지표면상의 좌표 x 에서의 전위 $V_N(x)$ 는 다음의 식(57)~(61)에 의해 표현가능하다[15,16].

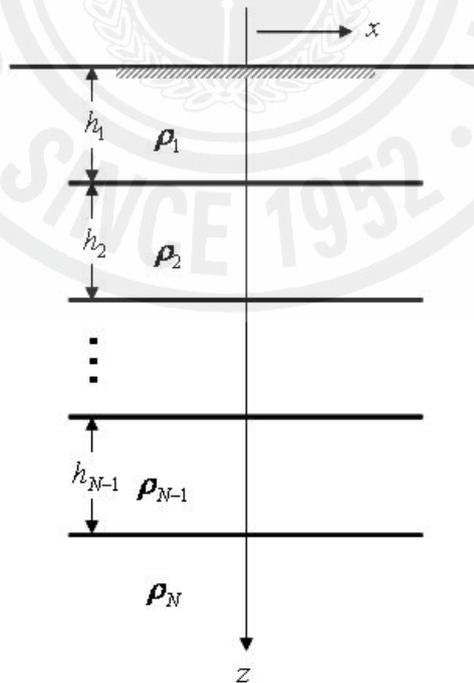


Fig. 22 Multi-layer earth model

$$V_N(x) = \frac{\rho_1 I}{2\pi x} [1 + F_N(x)] \quad (57)$$

여기서

$$F_N(x) = 2x \int_0^\infty \frac{k_{N1} e^{-2\lambda h_1}}{1 - k_{N1} e^{-2\lambda h_1}} J_0(\lambda x) \partial \lambda \quad (58)$$

이고 두 개의 연결된 지층에 관한 반사계수 k_i ($1 < i < N-1$)는 다음식과 같이 표현된다.

$$k_i = \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} \quad (59)$$

그리고 $N > 2$ 과 $1 < S < N-2$ 에서, K_{NS} 는 다음과 같이 표현된다.

$$K_{NS} = \frac{k_S + K_{N(S+1)} e^{-2\lambda h_{S+1}}}{1 + k_S K_{N(S+1)} e^{-2\lambda h_{S+1}}} \quad (60)$$

$$K_{N(N-1)} = k_{N-1} \quad (61)$$

많은 그룹들의 측정결과로부터 지하의 대지구조는 여러 층으로 되어 있음을 결론내릴 수 있다[13,34-36]. 결론적으로 지하구조의 파라미터들을 계산하는 방법들은 매우 필요하다는 것이다. 참고문헌에서 2층 구조[13,34]와 3층 구조[35,36]에 대한 파라미터들을 구하는 방법들을 찾을 수 있다. 2층 구조의 파라미터들을 구하는 문제는 3개의 파라미터 최적화문제가 된다. 즉, 두 개 층의 대지 저항률과, 위층의 두께로 3개의 파라미터들을 찾아내는 문제가 된다. 그리고 밑층의 두께는 무한대로 가정한다. 마찬가지로 3층 구조의 파라미터들은 5개의 파라미터 최적화문제가 된다(3개 층의 대지 저항률 그리고 위 두 층의 두께, 여기서도 제

일 밑층의 두께는 무한대로 가정한다). 따라서, 이를 확장하면, N 층 구조의 파라미터들을 구하는 문제는 $(2N-1)$ 의 파라미터의 최적화문제가 된다.

나) 다층구조의 대지파라미터 계산

2층 구조의 대지파라미터를 구하는 문제는 최적화 문제이다. 두 층의 대지저항률과 층의 두께 파라미터를 구하기 위해, 목적함수 F_g 가 필요한 데, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_g = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{|\rho_{ai}^m - \rho_{ai}^c|}{\rho_{ai}^m} \quad (62)$$

여기서 ρ_{ai}^m 는 전극사이의 거리가 a 일 때 i 번째의 측정값이고, ρ_{ai}^c 는 같은 거리에서 계산된 대지저항률이다. 대지저항률의 계산은 다음의 식을 사용하여 구할 수 있다[13,34].

$$\rho_a^c = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} = 2\pi a \frac{2(V_2(a) - V_2(2a))}{I} = \rho_1(1 + 2F_2(a) - F_2(2a)) \quad (63)$$

$$F_2(a) = 2a \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_1^n}{\sqrt{a^2 + (2nh_1)^2}} \quad (64)$$

이때 정확한 대지저항률의 계산은 무한대항까지 계산해야 하지만, 실제로 k_1 값이 1보다 작으므로 n 값을 n_k 까지만 취하면 근사화된 대지저항률의 계산은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_a^c = \rho_1 \left(1 + 4 \sum_{n=1}^{n_k} k_1^n \left(\frac{1}{\sqrt{A}} - \frac{1}{\sqrt{A+3}} \right) \right), \quad A = 1 + \left(\frac{2nh_1}{a} \right)^2 \quad (65)$$

일반적으로 N 층 구조의 대지를 분석하는 문제는 $2N-1$ 개의 파라미터를 가진

최적화 문제이다. N 층 구조의 대지저항률의 계산은 식(58)을 사용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다[15].

$$\rho_a^c = \rho_1(1 + 2F_N(a) - F_N(2a)) \quad (66)$$

일반적으로 대지의 지층구조가 복잡할수록 대지저항률의 계산은 아주 복잡하게 나타나게 된다. 2층구조에서와 마찬가지로 다층구조에서 $N=3$ 인 3층구조에서는 다음과 같이 근사화된 대지저항률을 계산할 수 있다.

$$\rho_a^c = \rho_1(1 + 2F_3(a) - F_3(2a)) \quad (67)$$

$$F_3(a) = 4a \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \sum_{l=0}^m C_n^m C_m^l (-1)^{m-l} \left[\frac{k_1^{m+1} k_2^{n-l}}{\sqrt{a^2 + 4[(n-m+l+1)h_1 + (n-l)h_2]^2}} + \frac{k_1^m k_2^{n-l+1}}{\sqrt{a^2 + 4[(n-m+l+1)h_1 + (n-l+1)h_2]^2}} \right] \quad (68)$$

다) 유전알고리즘을 사용한 다층구조의 대지파라미터 선정

유전알고리즘은 자연 세계의 진화과정을 컴퓨터에서 구현함으로써 복잡한 실세계의 문제를 해결하고자 하는 계산 모델이다. 1970년대 초반 J. Holland에 의해 제시된 GA는 자연계에 존재하는 적자생존의 원리를 이용하여 적합도가 큰 개체를 다음 세대에 복제함으로써 전역해(global solution)를 찾아가는 최적화 기법이다[37]. GA를 이용하여 문제를 푸는 경우, 각 개체는 풀고자하는 문제의 해에 관련한 정보를 가지며 이는 일련의 비트, 정수, 혹은 실수 스트링으로 표현되는데, 이러한 스트링을 염색체(chromosome)라고 한다. 각 개체가 풀고자 하는 문제에 얼마나 적합한지는 적합도(fitness)에 의해 평가되며, 이 적합도 값에 따라 집단 내에서 그 개체의 생존 여부가 결정이 된다. GA는 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation) 연산자를 사용하여 최적해를 탐색하게 된다. GA는 기존의 탐색 또는 최적화 방법들과 달리 점(point)이 아닌 개체(population)에 의해 주어진 탐색방법이다. 따라서 탐색 공간에 대해 연속성

이나 미분 가능성 등의 제약 조건을 필요로 하지 않는다.

GA에서 최적해를 탐색하기 위해 재생, 교차 및 돌연변이 연산자를 사용한다. 재생 연산자는 적합도 값에 의해서 개별적인 스트링이 복제되는 과정으로, 이 연산자를 통해 보다 높은 적합도를 갖는 스트링이 이후의 세대에서 더 많은 수의 자손을 가지게 된다. 교배 연산자는 두 개체 사이에 임의로 선택된 지점에서 각 스트링(string)을 잘라내어 서로 교배하는 한 점 교배(one-point crossover)를 사용한다. 이때 미리 정하여둔 교배가 일어날 확률 즉, 교배율에 의하여 교배를 제한한다. 돌연변이 연산자는 한 개체를 택하여 임의의 한 비트를 바꿈으로써 전혀 다른 형질을 가질 수 있도록 한다. 돌연변이 연산을 적절하게 일어나게 함으로서 지역해에서 벗어나 전역해에 수렴하도록 한다. 이 연산자는 너무 자주 행하여지면 무작위 탐색법의 특성을 가지게 되며 연산 시간이 길어지게 되고 도리어 나쁜 영향을 미칠 수도 있기 때문에 돌연변이가 일어날 확률을 돌연변이율에 의해 제한하여 필요 이상으로 연산이 수행되는 것을 막는다[27,38].

본 논문에서는 GA를 사용한 다층구조의 대지저항률 최적화문제로서 이하의 다층구조의 파라미터 값들을 찾을 수 있는 방법을 제안한다.

겉보기 대지저항률과 대지의 파라미터 사이의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\rho_a^c = \rho(a, \rho_1, h_1, \rho_2, h_2, \dots, \rho_N) \quad (69)$$

이때 겉보기 대지저항률을 계산하기 위해서는 대지의 층수를 결정해야 하는데, 일반적으로 Wenner 방법을 사용하여 얻은 대지저항률 값을 Gauss-Newton 방법[39]등을 이용하여 대지의 층수와 ρ - a 곡선을 결정하게 된다.

적합도 함수는 해결하고자 하는 문제에 따라 특징하게 결정이 되며 일반적으로 목적 함수의 역수나 지수 함수를 사용하여 정의한다. $2N-1$ 개의 파라미터(N 층의 대지저항률과 $N-1$ 층의 두께)을 구하기 위해 본 논문에서의 적합도 함수는 다음과 같이 역문제에서 상대적 복원 오차의 역수이다[38].

$$f_c = M \left(\sum_{i=1}^M \frac{|\rho_{ai}^m - \rho_{ai}^c|}{\rho_{ai}^m} \right)^{-1} \quad (70)$$

여기서 M 은 Wenner 방법을 사용하여 얻은 대지저항률의 총 수를 나타낸다.
유전자 알고리즘의 계산과정은 Fig. 23에 나타나있다.

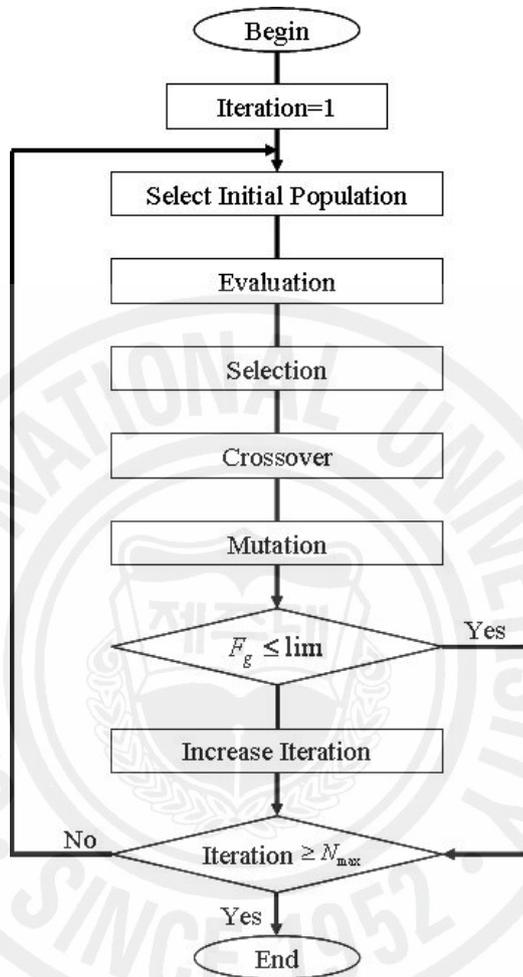


Fig. 23 Flowchart of genetic algorithm

IV. 사례연구

사례연구에서는 앞에서 제시한 대지저항률을 측정하기 위한 3가지 전극배열에 대한 영향과 전기영상기법의 알고리즘에 대한 성능을 분석하였다. 또한 분석한 결과를 기반으로 하여 현장에 최적지점이라고 예상되는 지점에 실험용 접지 전극을 설치하여 순차적으로 접지저항 데이터를 취득하여 분석하였다. 이때 설치된 봉형 전극과 관형 전극에 대한 보조전극 각각의 접지저항값을 취득하기 위한 7 전극을 사용하는 방법과 8전극을 사용방법으로 데이터를 취득하였다. 그리고 접지저항 측정의 원거리의 C극에 대한 선정을 위한 스위칭 시스템을 통해 18~20 전극 시스템으로 확장하여 각각의 측정전극에 대한 접지저항 변화와 맑은 날과 우천 시, 동절기의 눈오는 날의 접지저항 변동을 분석하며, 또한 독립형 접지저항 취득시스템을 구현하여 동일 지역에서 여러 접지전극에 대한 데이터를 취득 및 분석을 수행하고, 전기영상기법을 이용한 대지모델에 대한 검증을 위해 수직 구조의 전극을 설치하여 깊이에 대한 역산의 결과를 확인하였다.

1. 컴퓨터 시뮬레이션

1) 모델설계

본 논문에서는 전기영상기법을 이용하여 대지의 전기적 모델을 설계하기 위한 각각의 전극배열에 따른 2차원적 분석을 수행하였으며 Gauss-Newton, TSVD, TLS, SIRT 알고리즘을 적용하였으며, 기존에 사용되는 전기적 대지모델의 신뢰도를 높일 수 있는 유전자 알고리즘을 사용하는 방법을 제시하였다. 설계된 대지 모델에 대한 포워드 계산은 Wenner 배열의 경우 모든 전극에 대해 주위셀 (surrounding cells)은 2, 경계셀(boundary cells)은 4를 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 각각의 전극배열에 대한 모델설계를 위한 데이터를 Table 4에 나타내었으며, 여기서 첫 번째 전극은 기준이 되는 측정지점의 시작을 나타내는 0[m]에서의 측정전극 1이며, 이때의 간격은 등 간격으로 하였다.

Fig. 24에서는 각각의 전극배열에 대한 모델을 나타내었다. x 축 0[m]~27[m]는 각각의 전극배열에서 측정전극 1~28을 의미하며, y 축은 깊이에 대한 증분을 의미한다. Wenner 배열은 깊이에 대해 $n = 1 \sim 10$, Schlumberger 배열은 n

= 1~11까지, dipole-dipole 배열의 경우 n = 1~10까지 설정하였다.

Dipole-dipole의 경우 거리를 조정하게 되면 n을 증가시킬 수 있으나 본 논문에서는 Wenner 배열과 Schlumberger 배열을 고려하여 n을 10으로 선정하였다.

대지가 균등한 $100[\Omega m]$ 의 대지저항률이라고 가정하면 각각의 전극배열에 대한 측정단계 n에 대한 측정데이터의 포워드 계산에 대한 오차값을 Fig. 25에 나타내었다. Dipole-dipole 배열의 경우 n의 수를 계속 증가 시키게 되면 대지의 깊이는 증가하게 되지만, 고정된 전류전극에 대한 전위전극의 거리가 증가하게 되어 깊이에 대한 감도가 저하되어 오차가 높아지게 된다.

Table 4 Data models in electrode array

Electrode Arrangement	Wenner array	Schlumberger array	dipole-dipole array
Number of electrode	28	28	28
First electrode position[m]	0	0	0
Electrode space[m]	1	1	1
Error estimate	3%+0.1[mv] at 100[mA] current	3%+0.1[mv] at 100[mA] current	3%+0.1[mv] at 100[mA] current
Number of data	117	169	205
Error[%]	3.4-7.0	5.5-7.0	7.5-11.2

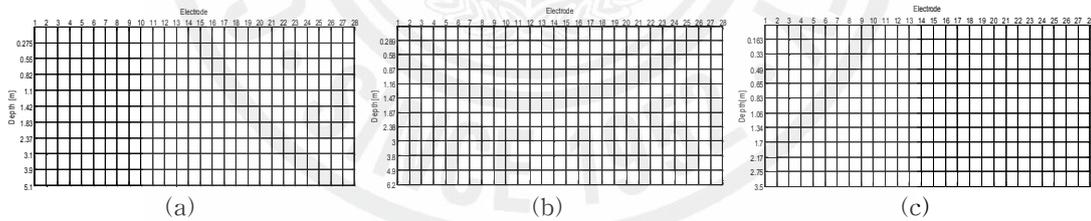


Fig. 24 Arrangement of model blocks (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array

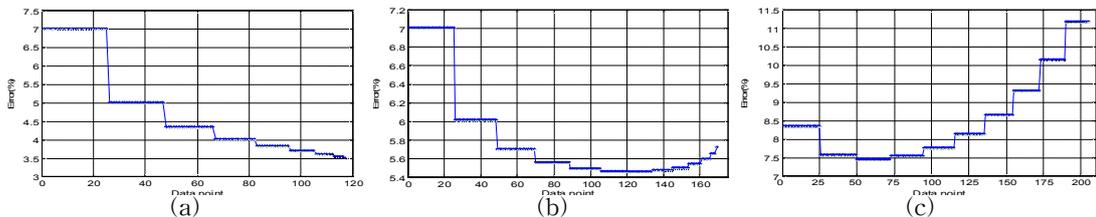


Fig. 25 Forward response errors of electrode arrays (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array

2) 컴퓨터 시뮬레이션 결과

가) 전극배열에 의한 결과

2층 구조 대지구조에서 1층의 저항률 $10[\Omega m]$, 2층의 저항률 $1000[\Omega m]$ 의 모델에 측정전극 12~14 사이의 대지저항률 파라미터를 설정하고, 층상 깊이를 1.1~3[m]사이의 대지의 경사를 주어 설계한 대지구조에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 각각의 전극배열에 대해 모델을 설계하여 참값으로 놓고 포워드 계산을 수행하여 측정값과 계산된 값을 비교하게 되며, 전극배열의 특성상 Wenner 배열의 경우 가장 적은 측정 데이터 포인트를 사용하고, dipole-dipole 배열의 경우 가장 많은 측정 데이터 포인트를 사용하게 됨으로써 Wenner 배열이나 Schlumberger 배열에서 고려되지 못한 부분을 포함하게 되어 3가지 배열 중에 가장 넓은 영역으로 측정이 이루어짐을 볼 수 있고, 이는 dipole-dipole 배열의 경우가 해상도 측면에서 3가지 전극배열 중 가장 높음을 알 수 있다. 시뮬레이션은 각각의 전극 배열에 따른 대지 구조모델에서 저항률 데이터와 깊이에 대한 데이터를 설정하고 Gauss-Newton 알고리즘을 이용한 역산을 수행하여 대지구조 모델에 대한 영향을 분석하였다. Fig. 26에 각각의 전극배열에 대한 포워드 응답에 대해 나타내었는데, 여기서 Fig. 26(d)는 dipole-dipole 배열에서 n의 수를 25로 설정한 경우로써 전류전극을 0, 1[m] 전위전극을 26, 27[m]의 데이터 포인트가 325가 되는 포워드 응답을 나타낸 것이다.

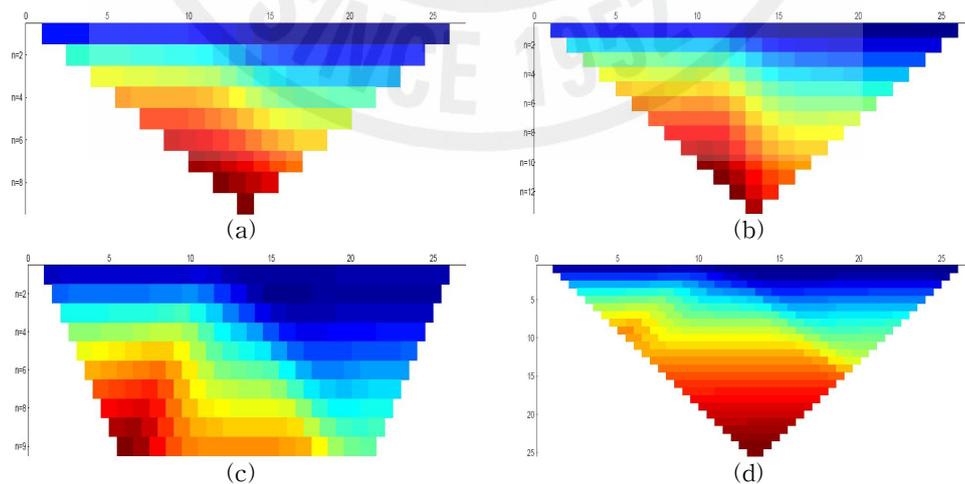


Fig. 26 Forward responses (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array(n=10), (d) dipole-dipole array(n=25)

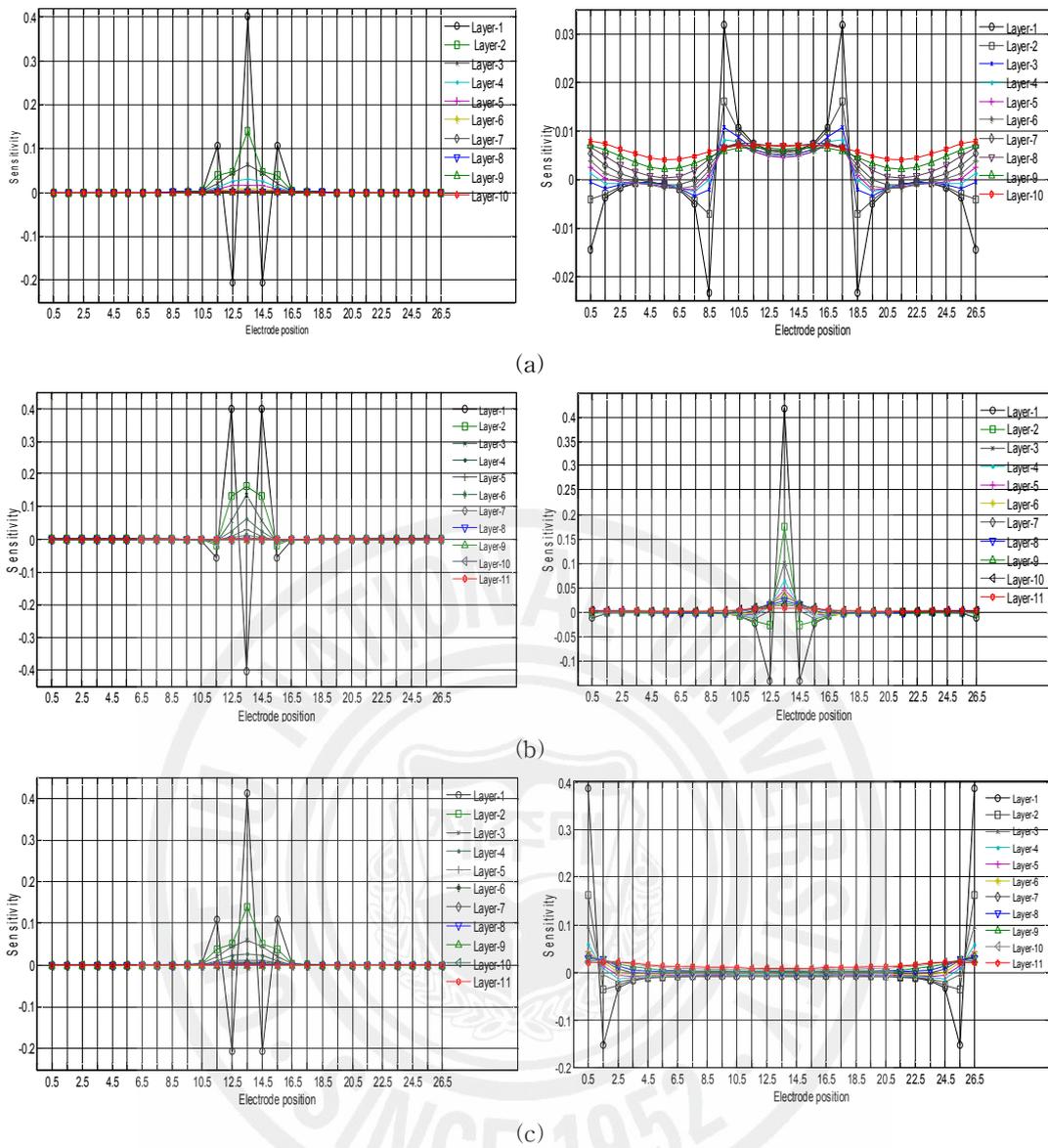


Fig. 27 Sensitivity of electrode arrays in central position (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array

i) 2층 구조 대지모델

수평 2층 구조 대지모델 전극배열에서 가장 깊이 볼 수 있는 측정 전극 12~14사이 위치에 경사도를 주어 각각의 전극배열에 대한 영향을 분석하기 위해 대지모델을 설계하고, Gauss-Newton 알고리즘을 이용하여 역산을 수행한 결과를 Fig. 27에 나타내었다.

역산의 결과를 비교하였을 때 Wenner 배열의 경우 경사의 경계면에서 역산결과

가 다른 전극배열에 비해 완만하게 되었으며, 이것은 깊이에 대한 측정 데이터 포인트의 수가 적어 변화모양을 자세히 나타낼 수가 없기 때문이다..

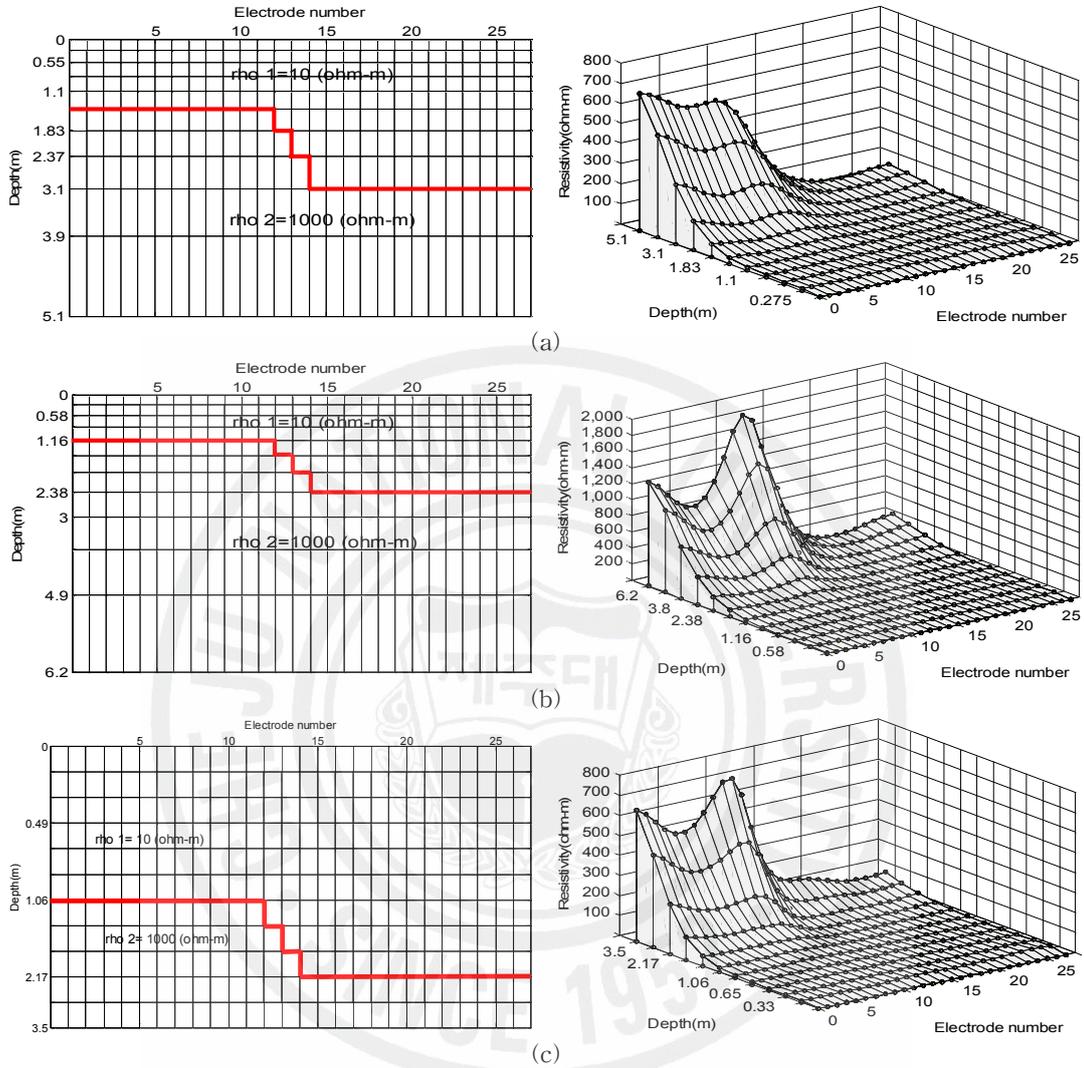


Fig. 28 Design of model and inversion result in 2-layer earth model
 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array

ii) 3층 구조 대지모델

수평 3층 구조 모델에서 측정전극 11~12 사이의 층상의 변화를 시뮬레이션 하기 위해 각각의 배열에 대한 대지저항률 ρ_1 은 $10[\Omega m]$, 대지저항률 ρ_2 는 $100[\Omega m]$, 대지저항률 ρ_3 는 $1000[\Omega m]$ 으로 설정하였다. 깊이 대해 Wenner 배열은 $0 \sim 1.1[m]$, $1.1 \sim 3.1[m]$, $3.1 \sim 5.1[m]$ 이고, Schlumberger 배열은 $0 \sim 1.16[m]$, $1.16 \sim 3.16[m]$, $3.16 \sim 6.2[m]$ 이다.

3.0[m], 3.0~6.2[m]이며, dipole-dipole 배열은 0~1.06[m], 1.06~3.5[m], 3.5~5.7 [m]로 설정하여 대지모형을 설계하였으며, 설계한 대지모형을 Gauss-Newton 알고리즘을 이용하여 역산한 결과를 Fig. 29에 나타내었다.

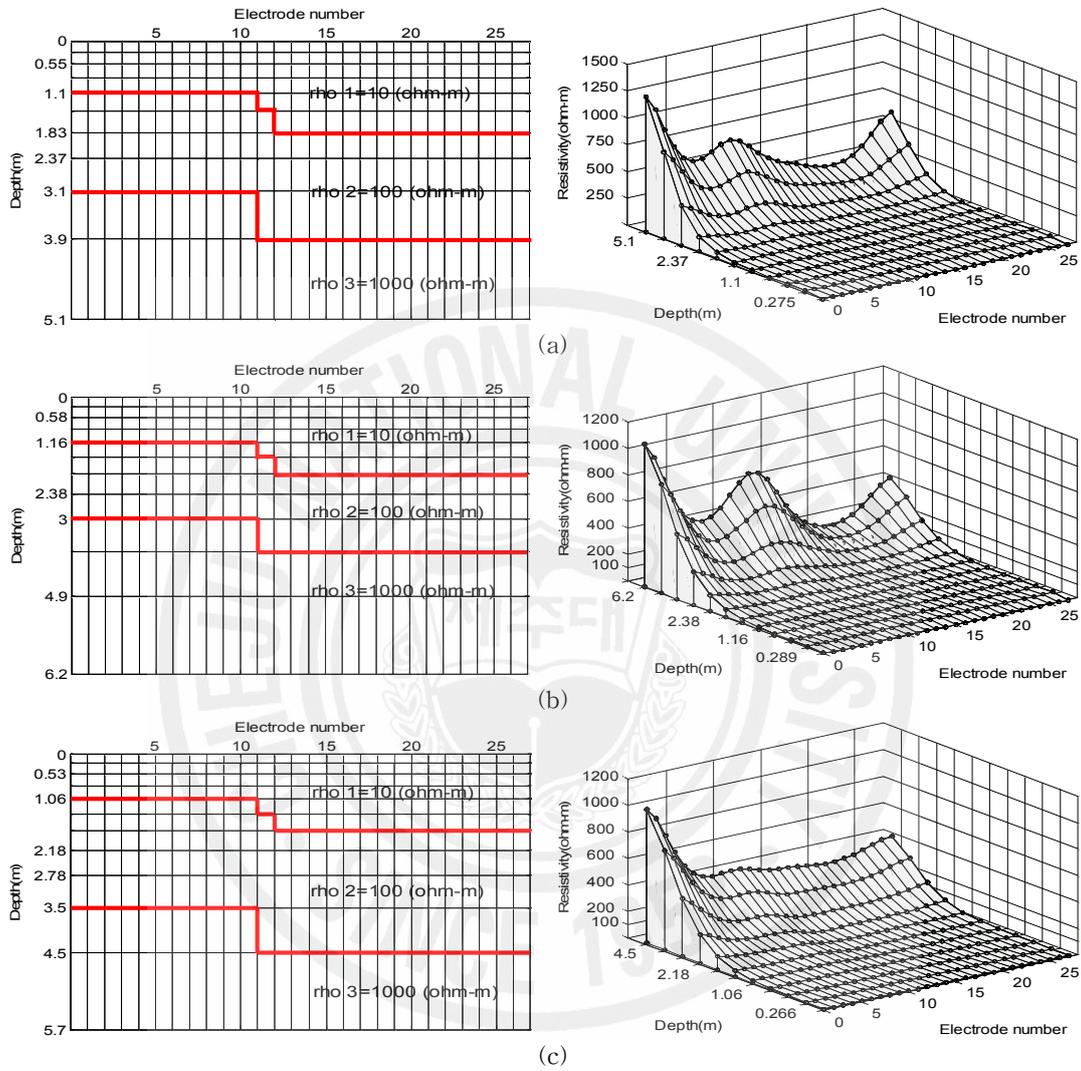


Fig. 29 Design models and inversion results in 3-layer model (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array

iii) 수직 3층 구조 대지모형

수평 1층 구조와 수직 3층인 모델에서 수직 구조 대지모형의 경우 측정전극 9~18에서의 층상의 변화를 시뮬레이션 하기 위해 각각의 배열에 대해 수평 층의 대지저항률 ρ_1 은 10[Ωm]로 설정하였고, 수직 층의 경우 측정전극 1~9사이의

대지저항률 ρ_2 는 $1000[\Omega m]$, 측정전극 9~18사이의 대지저항률 ρ_3 는 $100[\Omega m]$, 측정전극 18~27사이의 대지저항률 ρ_4 는 $1000[\Omega m]$ 으로 설정하였다. 깊이에 대해 Wenner 배열은 수평 층 $0\sim 0.275[m]$, 수직 층 $0.275\sim 5.1[m]$, Schlumberger 배열의 경우 수평 층 $0\sim 0.289[m]$, 수직 층은 $0.289\sim 6.21[m]$, dipole-dipole 배열의 경우 수평 층 $0\sim 0.531[m]$, 수직층은 $0.53\sim 5.7[m]$ 로 설정하여 대지모형을 설계하였다. 설계한 대지모형을 Gauss-Newton 알고리즘을 이용한 역산의 결과를 Fig. 30에 나타내었다.

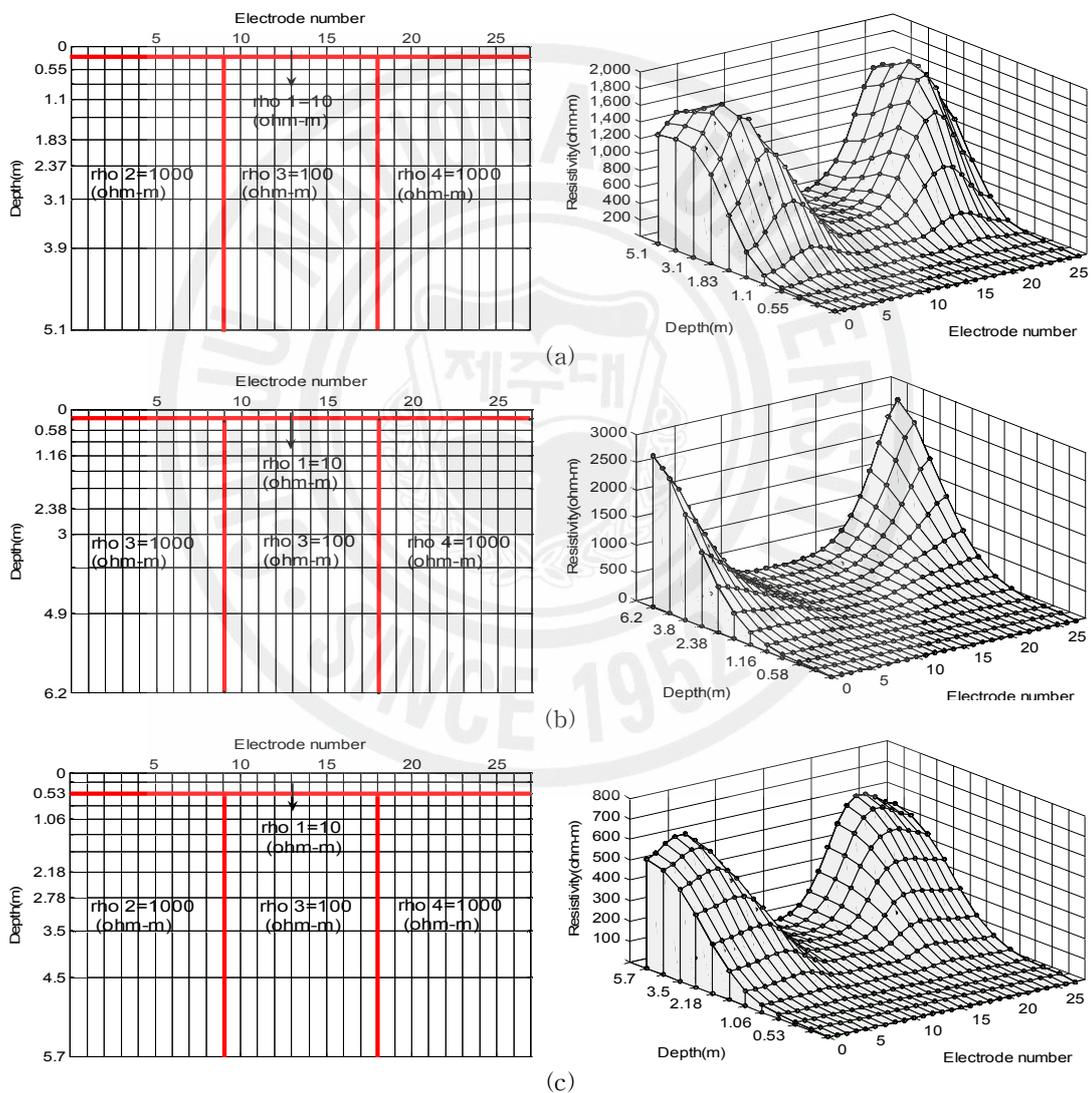


Fig. 30 Design models and inversion results in vertical 3 layer model
 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array

iv) 전극배열에 대한 RMS 오차분석

각각의 대지모델에 대한 RMS 오차 분석결과를 Fig. 31에 나타내었다. Wenner 배열의 경우가 RMS 오차가 가장 적게 나타났으며 3층 구조의 대지모델의 경우 dipole-dipole 배열이 타 전극배열에 비해 상대적으로 오차가 높다.

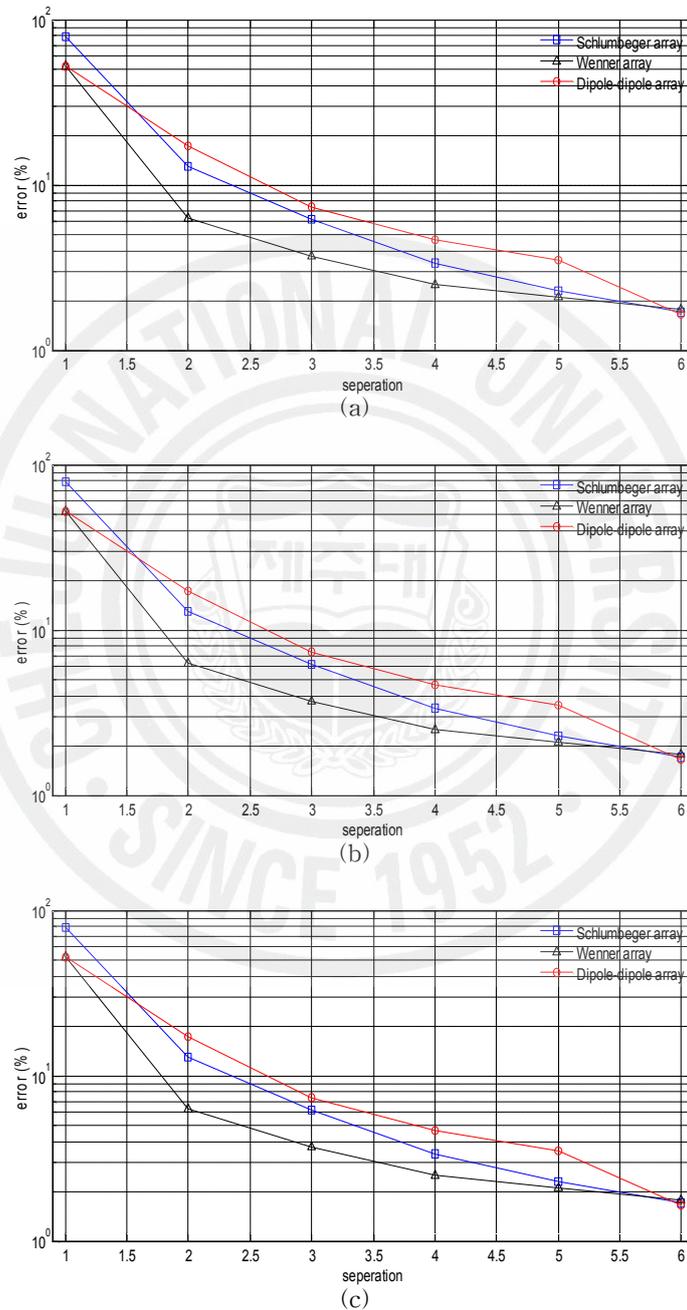


Fig. 31 Relative RMS errors of several layer models (a) 2-layer model, (b) 3-layer model, (c) vertical-layer model

나) 전기영상기법 알고리즘 비교

접지설계를 목적으로 대지저항률 측정 시에 일반적으로 사용되는 측정방법이 Wenner 방법이다. 이러한 측정이 이루어지는 Wenner 배열을 사용한 대지 모델에 다양한 전기영상기법 알고리즘을 적용하여 역산을 수행한 후 그 성능을 비교하였다.

i) 2층 구조 대지모델

앞에서 설계한 2층 구조 대지모델 중 Wenner 배열을 사용한 대지모델에 대해 다양한 전기영상기법 알고리즘들을 사용하여 역산을 수행한 결과를 Fig. 32에 나타내었다. Gauss-Newton 알고리즘의 경우 모델에 대한 역산결과가 가장 유사하며 TSVD, TLS 알고리즘의 경우 측정전극 10~15사이에 표토 층에 대한 대지저항률 값의 변화가 나타나며, 측정전극 19지점에서 우측지점에 접지를 설계하는 것이 바람직하다. Fig. 33은 역산의 결과를 깊이에 대한 대지저항률 변화로 나타낸 것으로, Gauss-Newton 알고리즘은 설계한 2층 구조 대지모델과 형태상의 차이를 보이고, SIRT 알고리즘의 경우 대지저항률 값의 차이를 보였으나 설계한 모델에 형태상 가장 유사하다.

ii) 3층 구조 대지모델

앞에서 설계한 3층 구조 대지모델 중 Wenner 배열을 사용한 대지모델에 다양한 알고리즘을 사용하여 역산을 수행한 결과를 Fig. 34에 나타내었다.

Gauss-Newton 알고리즘의 경우 모델에 대한 역산결과가 층간 경계 부분에서 설계된 모델과 가장 유사하며 SIRT 알고리즘의 경우 층간 경계면에서는 좋으나 1층에 대한 저항률값이 상승함을 볼 수 있다. TLS 알고리즘의 경우 층간에 저항률이 변화가 심하게 나타나고 있다. 측정전극 10~15사이의 낮은 저항률 층에 대한 대지저항률 값에 오차를 나타내고 있다. 이러한 역산의 오차는 접지 설계에서 정상적인 모델의 경우 측정전극 19~20사이의 지점이 가능하지만, 역산 결과에서는 접지설계 위치가 변경되어야 한다.

Fig. 33은 역산의 결과를 깊이에 대한 대지저항률 변화를 나타내었다. Gauss-Newton 알고리즘의 경우 모든 전극에 대한 저항률이 완만한 3층 대지모델을 보이고, TLS 알고리즘의 경우 대지 표면의 변동이 심하게 나고 하층으로 들어 갈수록 깊이에 대한 대지저항률의 변화가 있다..

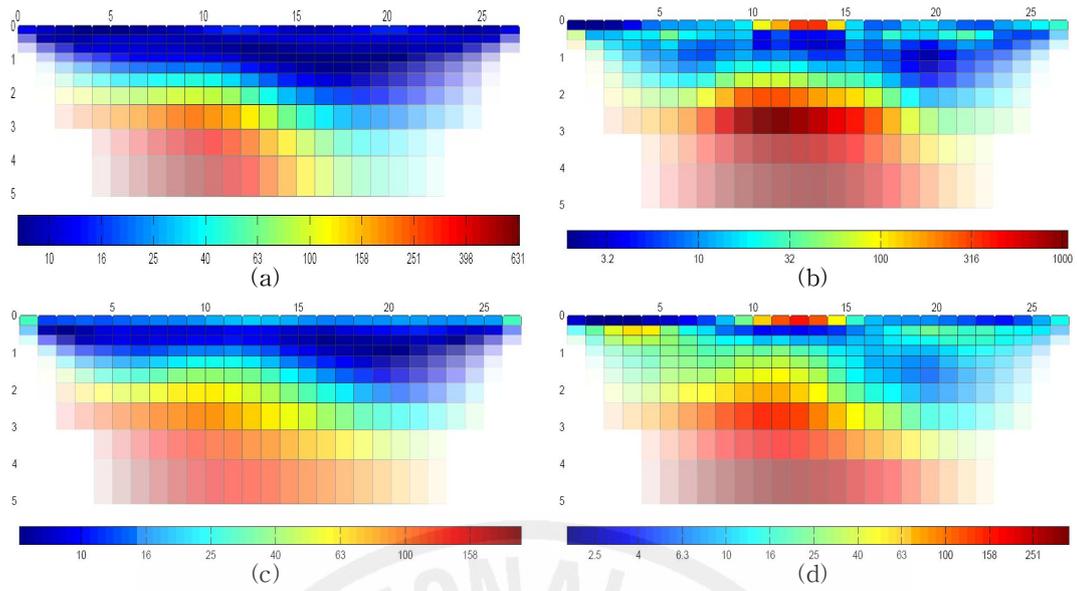


Fig. 32 Inversion results of various algorithms in 2-layer model
 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

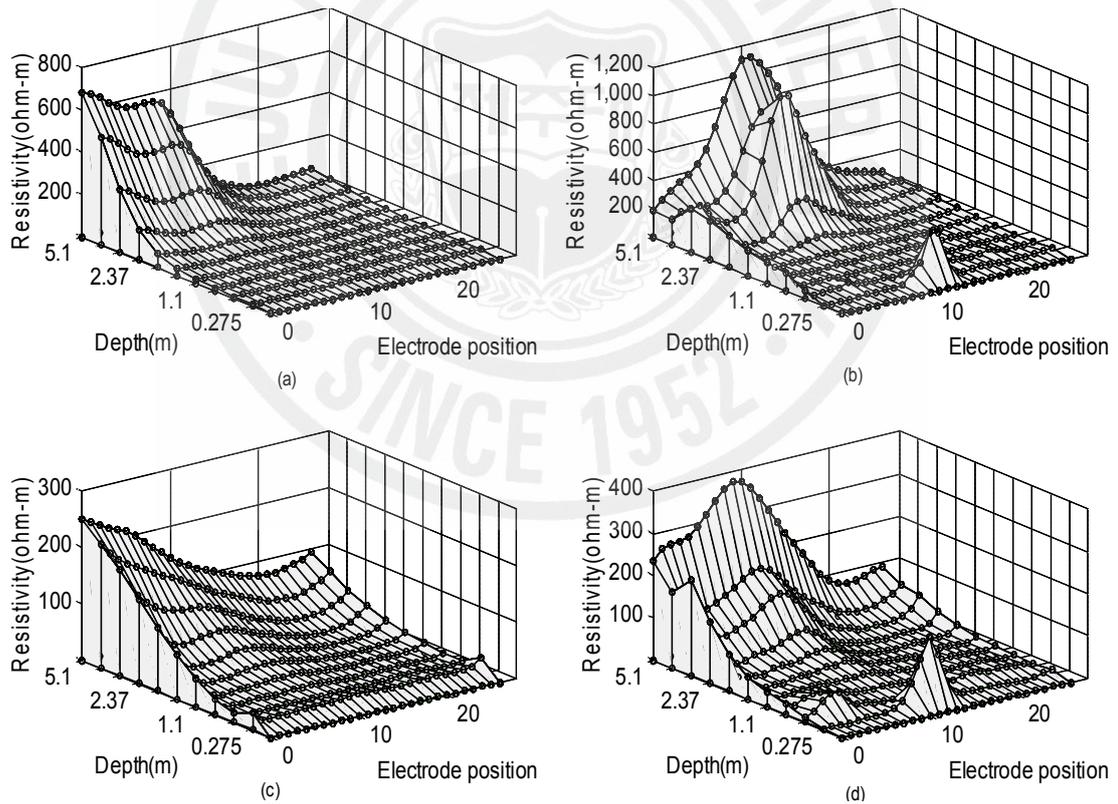


Fig. 33 Inversion results about depth of various algorithms in 2-layer model
 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

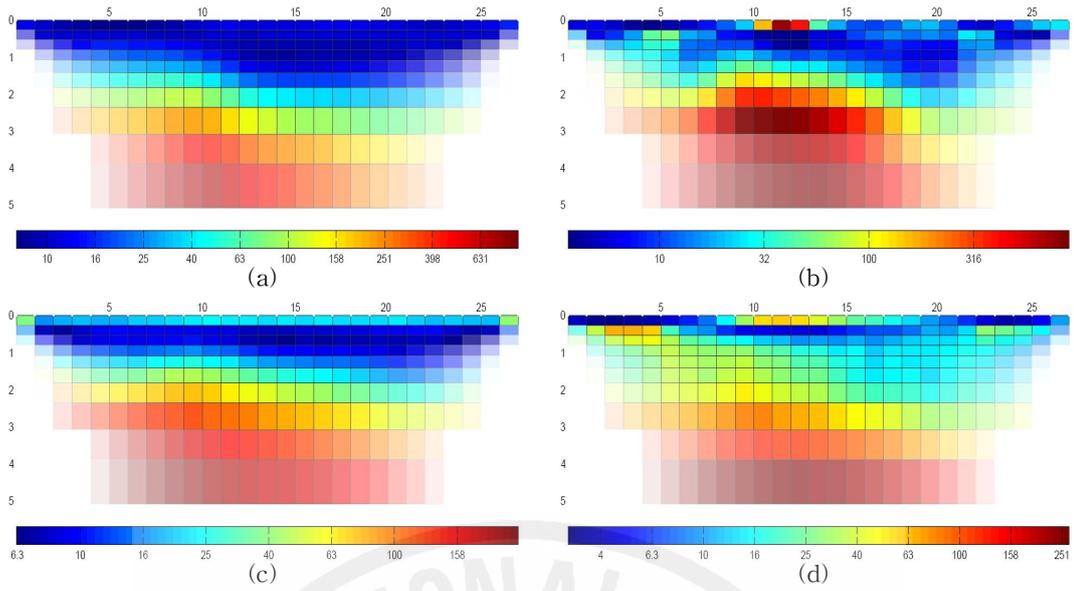


Fig. 34 Inversion results of various algorithms in 3-layer model
 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

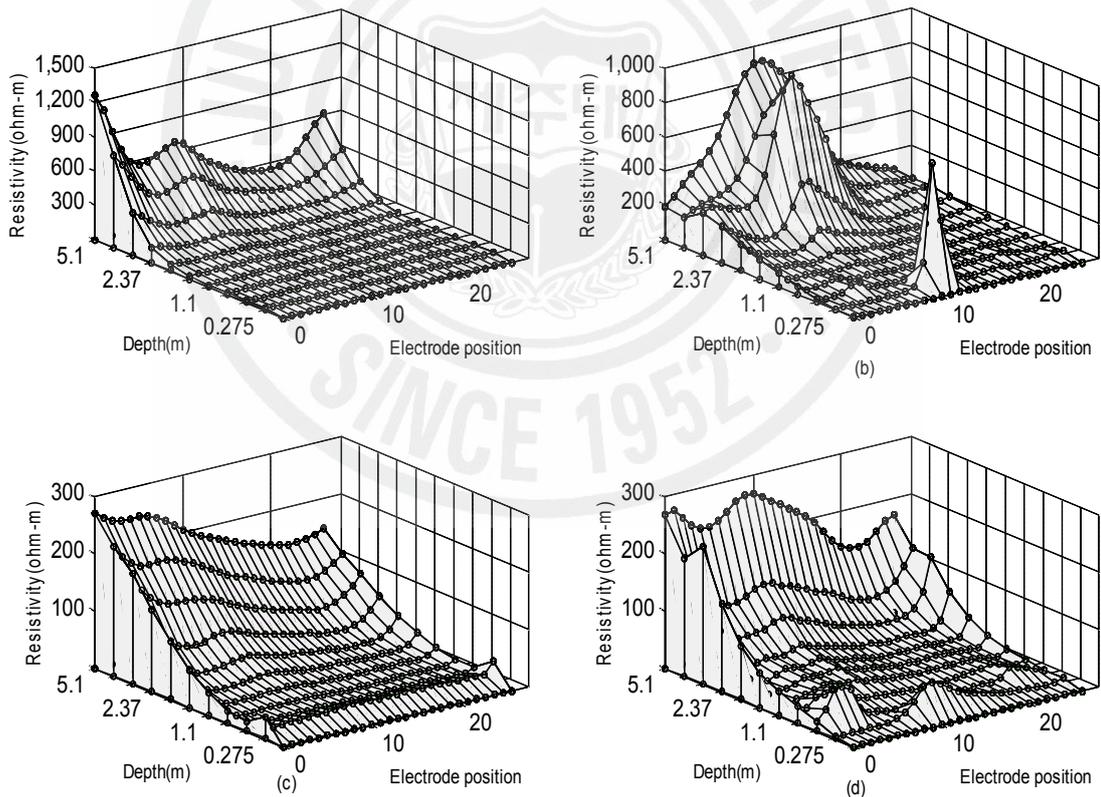


Fig. 35 Inversion results about depth of various algorithms in 3-layer model
 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

iii) 수직 구조 대지모델

앞에서 설계한 수직 구조 대지모델을 갖는 Wenner 배열을 사용한 대지모델에 4가지 알고리즘을 사용하여 역산을 수행한 결과를 Fig. 36에 나타내었다.

역산결과 Gauss-Newton 방법이 측정전극 1~9사이의 수직 구조에 위치한 대지저항률 ρ_2 과 측정전극 18~27사이의 수직 구조에 위치한 대지저항률 ρ_4 의 영향으로 측정전극 9~18 사이의 대지저항률 ρ_3 값이 높아지기는 했으나 설계된 대지 모델 형태와 가장 유사하였다. 다른 알고리즘들은 대지저항률 ρ_2, ρ_4 의 영향으로 설계된 대지 모델의 형태를 나타내지 못하고 있다.

역산의 결과를 깊이에 대한 대지저항률 변화를 Fig. 37에 나타내었다. Gauss-Newton 알고리즘의 경우 중간 경계에서의 구분이 명확하게 나타나지만, 다른 알고리즘들의 경우 경계에서의 대지저항률 변화가 설계된 모델보다 높은 값을 나타내어 상대적으로 수직 구조의 경계 구분이 명확하지 않다.

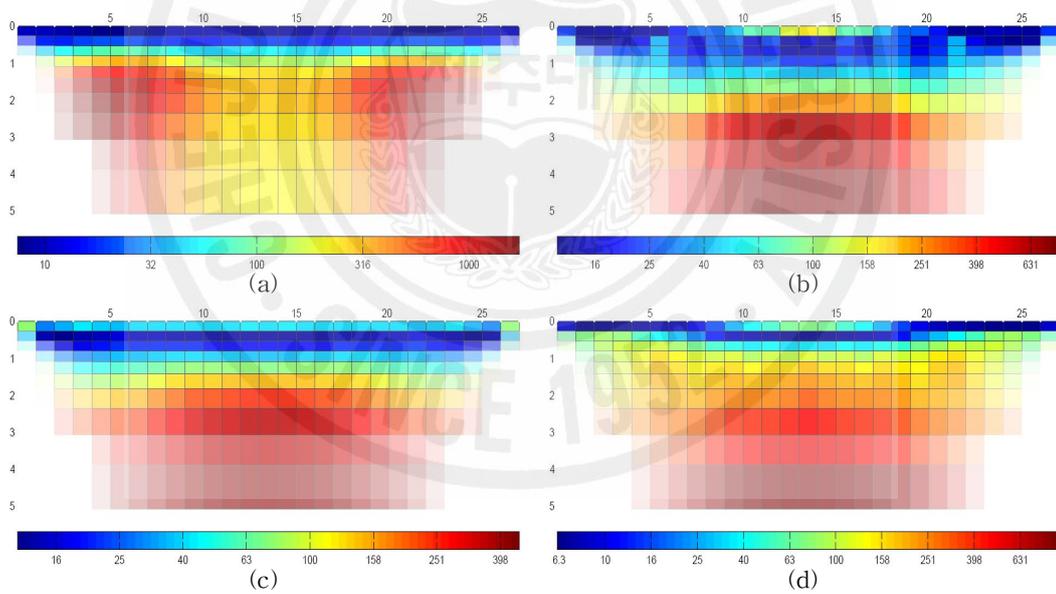


Fig. 36 Inversion results of several algorithms in vertical layer model
 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

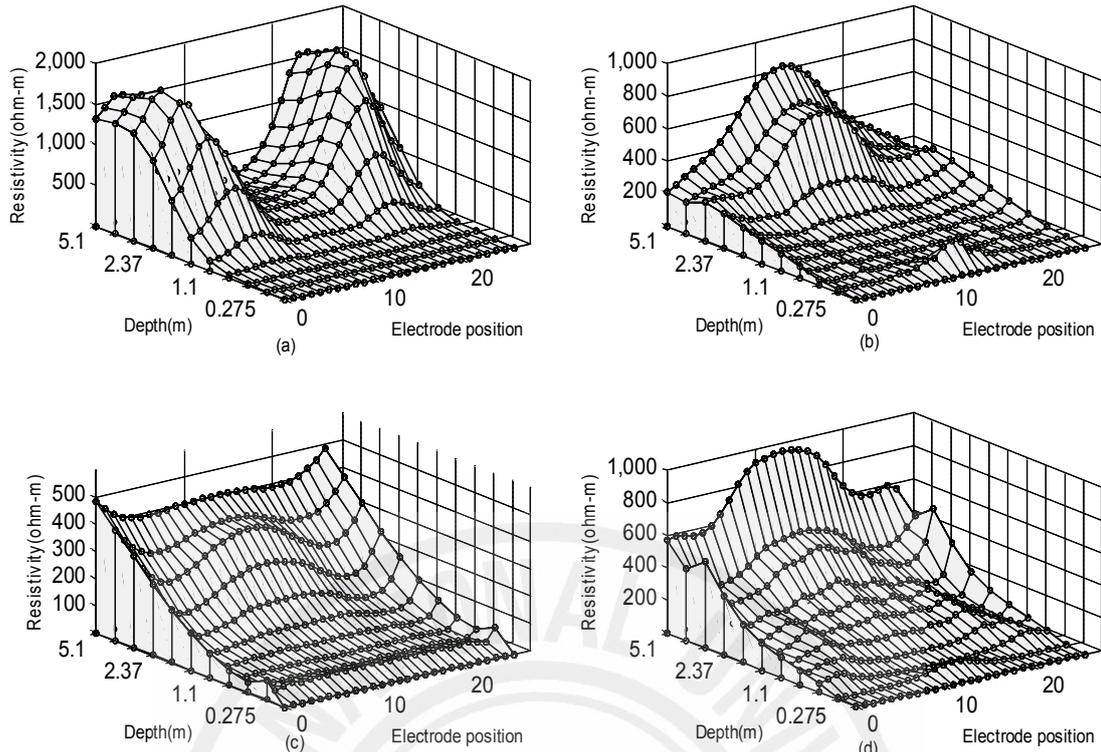


Fig. 37 Inversion results about depth of various algorithms in vertical layer model (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

iv) 전기영상기법 알고리즘들에 대한 RMS 오차분석

Wenner 배열의 대지모델에 4가지 전기영상기법 알고리즘들에 대한 RMS 오차 분석결과를 Fig. 38에 나타내었다. 각각의 대지 구조 모델에서는 Gauss-Newton 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해 성능면에서 우수하게 나타났으며, 2층 구조 대지모델과 수직 구조 대지모델에서는 TLS 알고리즘도 우수한 성능을 나타내었으나, 3층 구조 대지모델에서는 다른 알고리즘들에 비해 상대적으로 성능이 우수하지 못하였다. 3층 대지구조 모델에서는 TSVD 알고리즘이 Gauss-Newton 알고리즘 다음으로 우수한 성능을 나타내었다.

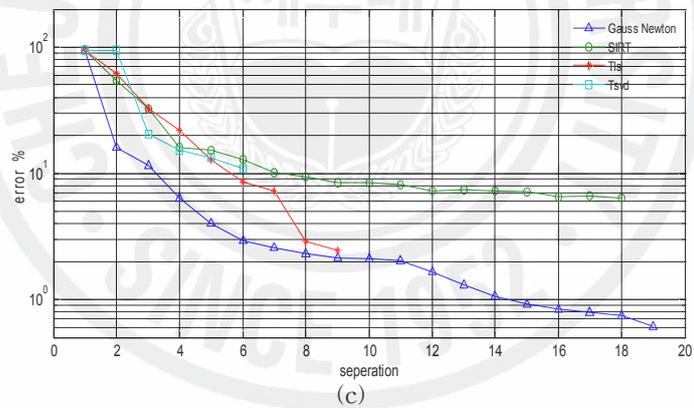
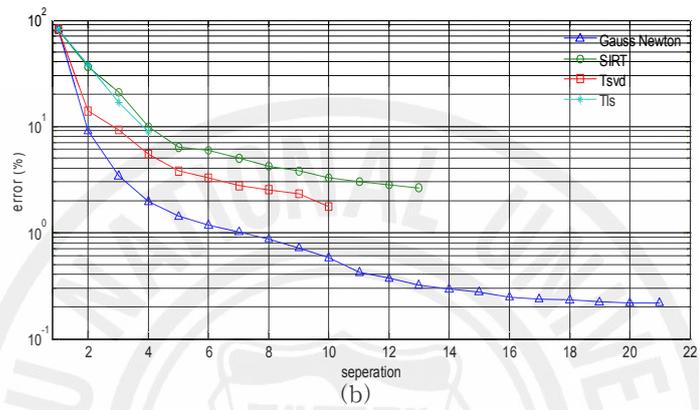
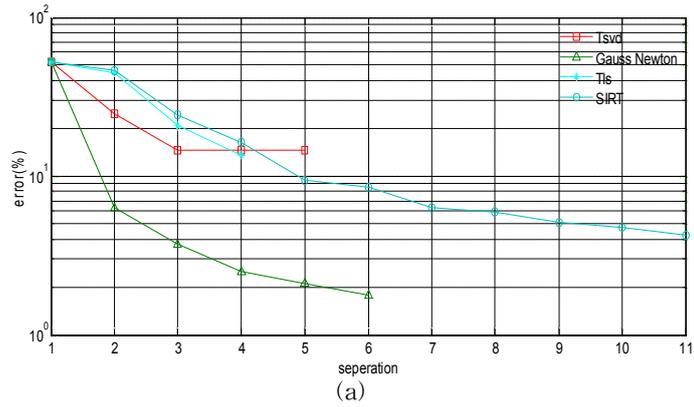


Fig. 38 Relative RMS errors of several algorithms (a) 2-layer model, (b) 3-layer model, (c) vertical layer model

다) 유전알고리즘 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 방법의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 살펴보기 위하여 실제현장에서 측정된 대지저항률 측정값을 활용하고, 2층 및 3층으로 나타나는 대지를 GA를 사용하여 대지의 구조 분석하도록 한다.

GA알고리즘에 설정은 염색체에 대해 이진(binary) 표현법을 사용했으며, 각

유전자는 12비트로 나타내었다. 따라서 한 개의 개체는 2층과 3층구조에서는 각각 36비트와 60비트의 길이로 표현된다. GA의 성능은 주로 GA에 사용된 매개변수인 유전율과 돌연변이율 및 개체군의 크기에 따라 결정되는데, 본 논문에서는 개체군의 크기는 40, 교배확률은 0.95, 돌연변이 확률은 0.01로 하고 부모 개체는 roulette wheel 선택법을 사용하였는데 GA는 10,000세대까지 구하였을 때의 결과를 나타내었다.

대지저항률 측정은 측정선의 특정지점을 기준으로 일직선상에서 $C_1 - P_1$, $P_1 - P_2$, $P_2 - C_2$ 의 거리를 등간격이 되도록 하였다[40]. 전극의 간격은 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30[m]를 특정지점의 좌우로 이동시켜 측정하였다.

Table 5에서 2층 구조 대지모델 보다 3층 구조 대지모델로 대지저항률을 분석할 경우에 오차값이 작게 나타남을 확인할 수 있으나, Case 1의 3층 구조 대지모델 분석에서 2번째 층의 두께(h_2)가 작게 나타남에 따라 Case 1은 2층 구조 대지모델로 해석할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 Case 2인 경우에는 3층 구조 대지모델 분석에서 2번째 층의 두께(h_2)가 상당히 크게 나타남에 따라 Case 2는 반드시 3층 구조 대지모델 이상의 모델로 해석해야 함을 알 수 있다.

Fig. 39의 (a)와 (b)는 Table 5에 나타난 지층의 대지저항률 파라미터를 이용하여 $\rho - a$ 곡선과 대지저항률 측정치를 나타낸 것으로 전반적으로 측정된 대지저항률을 잘 표현함을 확인할 수 있다. Fig. 39(a)에서 2층과 3층 구조 대지모델 분석에서의 대지저항률 값들은 비슷한 형태로 나타나 Case 1인 경우에는 2층 구조 대지모델로 분석할 수 있으리라 기대되고, Fig. 38(b)에서 2층 구조 대지모델 분석인 경우에는 실제 측정치와 전혀 다른 형태로 나타나 Case 2인 경우는 반드시 3층 구조 대지모델 이상으로 분석해야 함을 확인할 수 있다.

Table 5 Results of the application of the GA

$a_i[m]$	Case 1		Case 2	
	2 Layer	3 Layer	2 Layer	3 Layer
$\rho_1[\Omega m]$	679.5	669.1	1179.2	1552.6
$\rho_2[\Omega m]$	2454.8	1641.6	5255.6	5436.9
$\rho_3[\Omega m]$	-	2491.5	-	776.3
$h_1[m]$	1.58	1.55	0.67	1.03
$h_2[m]$	-	0.32	-	20.08
Error F_g	0.127	0.096	0.207	0.166

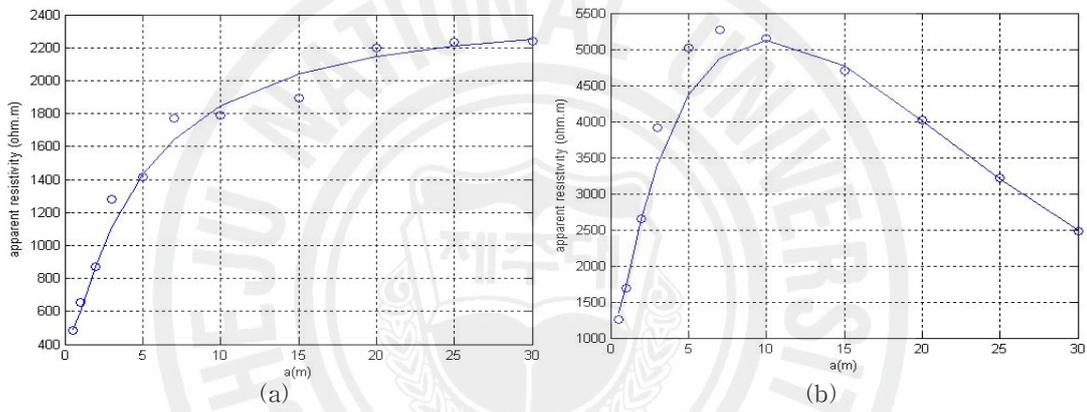


Fig. 39 Variation of soil resistivity versus the distance between the electrodes (a) Case 1, (b) Case 2

2. 실시간 접지저항 취득시스템

접지저항의 측정은 접지공사가 이루어진 현장을 방문하여 측정하게 된다. 접지저항은 측정하는 현장 대지의 온도, 습도, 측정시간 및 다양한 변화인자에 의해 다른 값을 나타내게 된다. 정상상태의 접지저항 측정을 위한 전위강하법 측정을 하는 경우에는 보조전극의 범위설정에 따라서도 다른 접지저항 값을 발생 시킬 수 있다.

Fig. 40은 3/4[inch] 관형태의 접지전극을 돌이 섞인 점토에서의 접지저항의 경년변화를 나타내며 Curve 1은 1[m]의 대지, Curve 2는 3[m]의 대지에 설치했을 때의 경년변화를 나타낸 것이다. 비가 많이 오는 여름에 접지저항 값이 낮아지고 동결되는 겨울철에 접지저항 값이 높아지는데 이는 대지의 경년변화에 기인한 것이다.

현장에 설치된 접지전극에서 온도, 습도, 측정시간 등의 다양한 변화인자에 의한 접지저항의 변동 영향 분석과 전위강하법 측정에 보조극의 적절한 선정을 해결하기 위해 실시간 접지저항시스템을 구현하고, 이를 통해 분석하고자 한다.

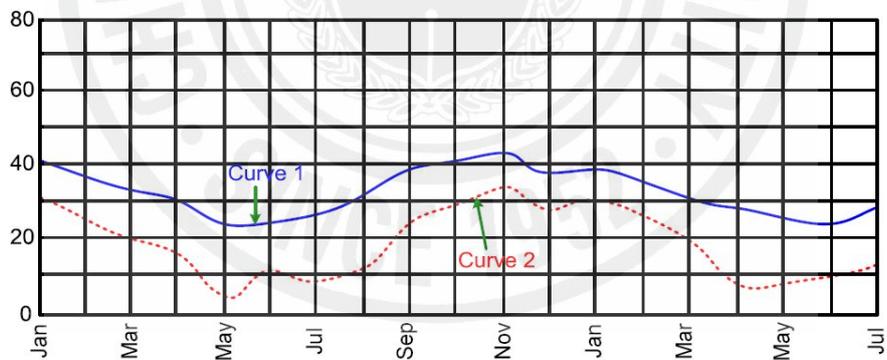


Fig. 40 Seasonal variation of earth resistance

가) 스위칭 3점 전위강하법 접지저항 취득시스템

접지 시스템의 가장 확실한 측정법은 전위강하법(fall-of potential)이라고 한다. 본 논문에서 제안한 수평구조에 대한 스위칭 전위강하법 측정 시스템의 구조를 Fig. 41에 나타내었다.

측정방법은 2개의 측정전극을 선택하여 측정하고자 하는 접지봉으로부터 일직

선상으로 원 거리로 이격된 C1지점을 선택하여 일정간격의 P1~Pn사이의 전극을 선택하여 측정하는 방법이다. 접지동봉이나 접지판 E와 원거리에 이격된 C1극 사이로 접지저항계의 전류원에서 일정한 전류를 공급하고, 다른 한 개의 측정전극 P1에서 전압강하를 측정하는 것이다. 본 논문에서는 보조전극의 위치를 이동시켜 변동하는 각각의 접지저항값의 변동을 측정할 수 있는 시스템을 제작하여 정방향(forward)과 역방향(reverse)의 측정을 통해 보조전극 신뢰성 있는 측정데이터 취득하여 분석하고자 한다.

실험에 사용된 시스템은 C1~Cn, D1~Dn극의 이동을 통해 전극을 선정하고 멀티채널의 데이터 취득시스템과, P극의 측정 위치를 자동으로 변경시킬 수 있는 릴레이 스위칭 시스템으로 구성되었다.

Fig. 42는 선택적으로 전극을 설정할 수 있는 스위칭 시스템의 구성도를 나타낸 것으로 마이크로프로세서의 메모리에 설계된 전극 선택 명령어는 릴레이 드라이버로 전송되고 릴레이 드라이버는 현장에 설치된 전극을 선택하게 된다. 이러한 구성은 현장에 어떠한 전극 배치를 하더라도 선택적으로 데이터 취득이 가능하며, 현장에서 측정전극을 이동시키면서 발생할 수 있는 측정거리 오차를 줄일 수 있다는 장점이 있다.

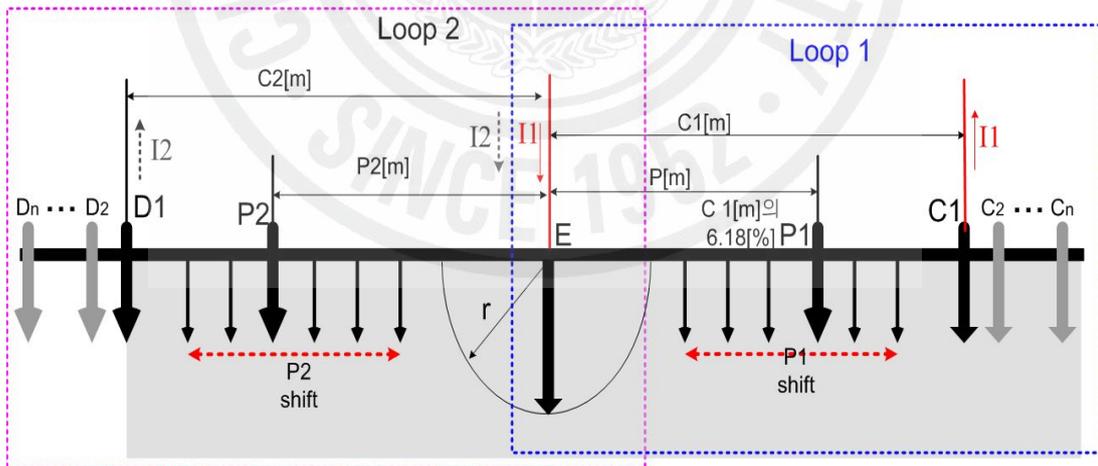


Fig. 41 Horizontal electrode configuration

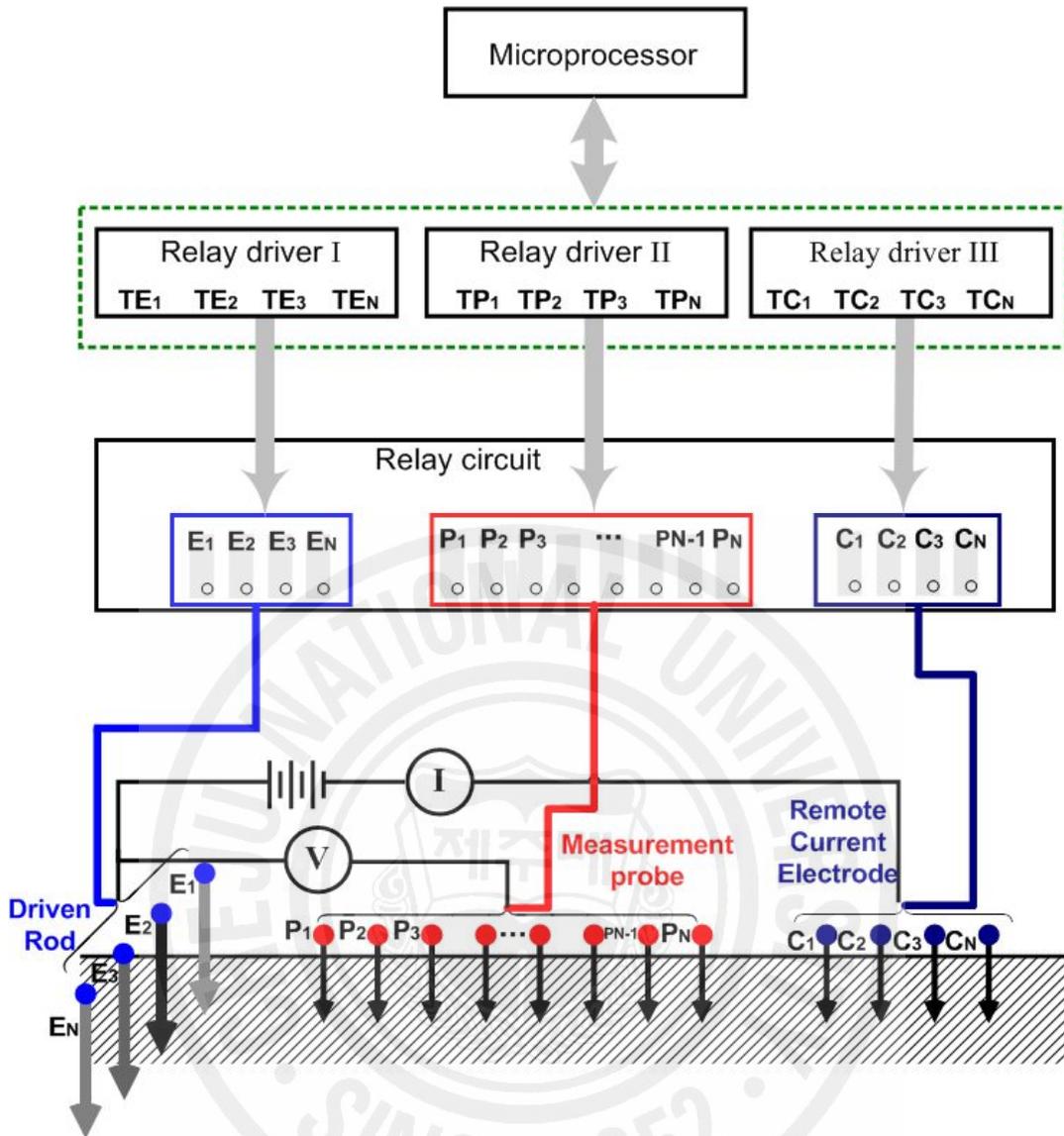


Fig. 42 Configuration of multi-switching system

본 논문에서 제작하여 현장에 설치된 접지저항 취득시스템의 경우 현장에 접근이 어려운 경우에 대해 근거리에서 사용자가 접근하여 블루투스로 접속하여 실시간 데이터를 취득할 수 있는 시스템으로 구현하였는데, 이로 인해 전파간섭이 적고 보안성이 뛰어난 블루투스의 장점을 고려하여 시스템을 설계하였다. 따라서 본 논문에서 제작한 시스템을 활용하면 차후 장비의 배치 변동 시 배선 재배치 공사 없이 설치가 가능하며 케이블공사가 힘든 장소에서도 구매 받지 않고 장치를 배치 할 수 있고 공간제약 없이 무선 모니터링이 가능하다. 이는 기존의 유선 망 설치가 불가능한 지역에 설치하면 유용하게 사용될 수 있다.

3점 전위강하법 접지저항 측정이 가능한 형태로써 실시간 접지저항을 측정하게 된다. 마이크로프로세서는 측정에 대한 명령어를 접지저항계로 전송하게 되고, 접지저항계에서 측정한 데이터를 RS232포트를 통해 데이터를 취득하게 된다. 이때 데이터 비교기를 통해 취득데이터에 대한 정상적인 측정에 의해 얻어졌는지를 확인하고 되고 전송장애 등에 의한 데이터는 다시 측정을 시도하게 된다. 이때 리얼타임 클럭을 통해 측정일자와 시간 등을 측정할 수 있으며 또한 사용자 설정에 의해 원하는 날짜와 시간에 측정을 할 수 있게 된다. 측정된 데이터는 사용자 블루투스 장비 또는 근처에 설치된 블루투스 서버 등에 측정된 데이터에 대해 수신부의 RxD 핀으로 전송하게 되면 사용자에게 의해 데이터가 처리될 수 있다.

이는 현장에 근접한 지역에 인터넷 환경 제공시에 유용하게 사용할 수 있다. 블루투스 간의 통신은 연결을 유지할 기기를 설정하게 되고 암호화 된 연결을 사용하게 된다.

나) 독립형 접지저항 취득시스템

접지설계를 위해 대지저항률을 분석의 신뢰도를 높이기 위해 접지시공 지점을 확장시켜 분석하기 위해서는 접지전극 위치에 보조전극을 변경과 접지저항 취득시스템이 추가로 설치되어야 하기 때문에 비용적인 부담이 증가하게 된다. 따라서 본 논문에서는 설치된 접지저항 시스템과 통신을 하여 전극을 설정할 수 있는 독립형 접지저항 취득시스템을 제안하였다. 이 시스템은 외부의 시스템에 측정지점에 대한 정보를 전송하고 인증이 되면 그 지점에 대한 측정을 하게 된다. 외부시스템으로부터 동작에 필요한 전원을 충전 시킬 수 있고 측정시에는 접지전극 E(+)와 원거리에 이격된 C극으로 선택되어 접지저항을 측정할 수 있게 된다. Fig. 43에 독립형 접지저항 취득 시스템의 구성도를 나타내었다.

Fig. 43(a)는 시스템의 구성도를 나타내었고, Fig. 43(b)는 독립형 접지저항 취득시스템의 전극그룹의 구성도를 나타내었다. 여기서 전극그룹은 확장하여 사용되어 지며 각각 독립적으로 신호를 전송하게 되며, 외부측정시스템의 인증이 있을 때에만 동작할 수 있는 구조로 되어 있다.

다) 수직형 접지저항 취득시스템

전기영상기법을 이용하여 분석한 대지모델에 대한 저항률과 깊이에 대한 검증을 위해 수직으로 설계된 전극을 통해 각 층상에 대한 접지저항 값을 측정하기 위한 시스템을 구현하였다.

본 논문에서는 Fig. 44에서 대지의 층상에 대해 수직전극으로 설치하게 되는데 설치 시 수직전극 설치 공간만큼 보링작업을 하게 된다. 먼저 수직 형 전극을 대지와 수직으로 접촉시키고 전극 보조용 장치를 설치된 전극에 씌우고, 전극과 설치용 장치 사이의 공간에 타설 장치를 밀어 넣으면 전극이 설치된다. 지표에 설치된 보조전극들은 스위칭시스템에 의해 위치선정을 위한 각각의 수직전극에 대한 접지저항 값을 측정하게 되며 측정 된 데이터는 대지저항률 분석과 비교하여 대지구조를 확인하고자 한다.

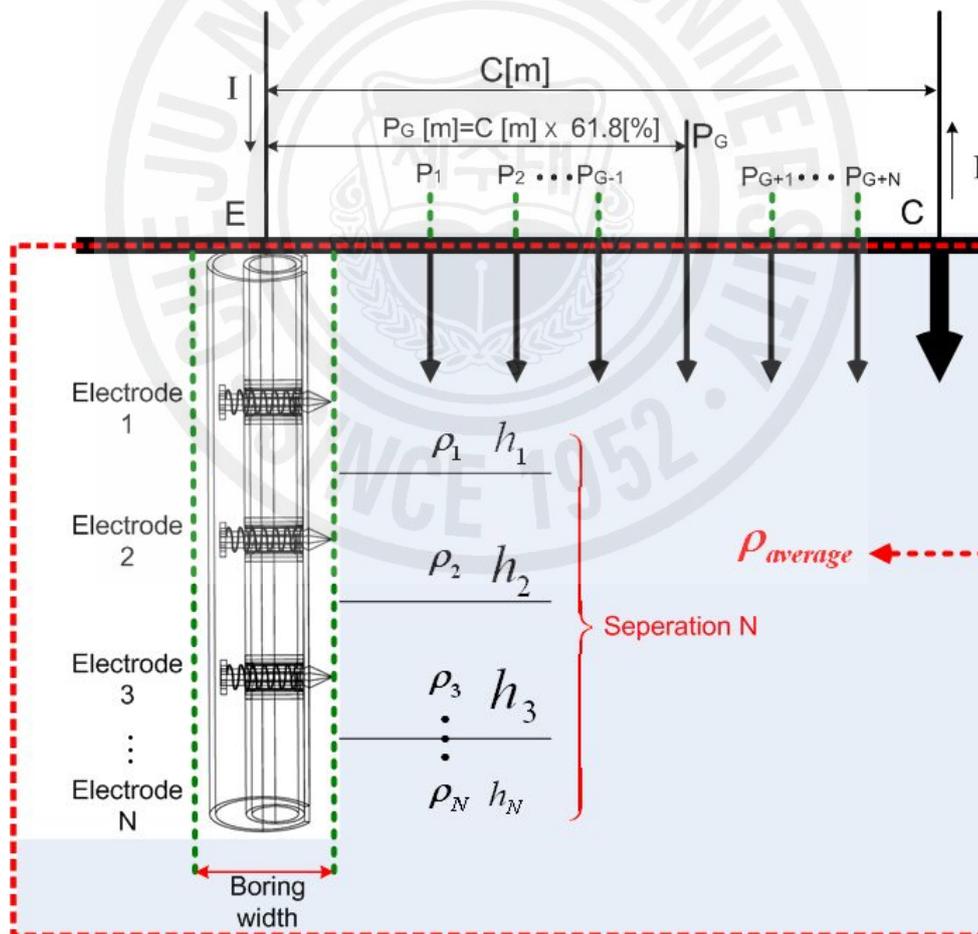


Fig. 44 Vertical type electrode configuration

3. 현장 사례 결과 및 분석

1) 대지저항률 측정결과

가) 측정데이터의 취득

대지구조에 대한 분석을 위해 선정된 현장에서 Wenner 배열, Schlumberger 배열 그리고 마지막으로 dipole-dipole 배열 순서로 대지저항률 데이터 취득하며, 이때 측정에 사용된 전극은 Fig. 45와 같이 측정전극 사이의 거리를 1[m]로 설정하고 측정전극 28개를 측정선 1에 일직선으로 설치하게 된다. 측정선 2와 3을 같은 방법으로 측정전극을 설치하고 순차적으로 측정을 수행하는데, 이때 측정선과 측정선 사이의 거리를 1[m]의 간격을 설정하여 동일 지역에서의 대지저항률 데이터를 분설하게 되며, 현장에 설치되어 사용되어지는 전체 측정전극은 84개이다.

설치된 다수의 전극은 Fig. 46에 나타낸 AGI(Advanced Geoscience Inc.)의 MiniSting을 사용하여 측정하게 되며, 이 장비는 최대 400[k Ω]에서 0.1[m Ω]까지 정밀한 측정이 가능 한데, 이것은 기존의 점지저항계가 지원하는 대지저항률 측정 장비에 비해 상대적으로 신뢰도 높은 대지저항률 데이터를 취득 할 수가 있다. 측정에 사용된 대지저항률 측정 장비의 특성을 Table 6에 나타내었다.

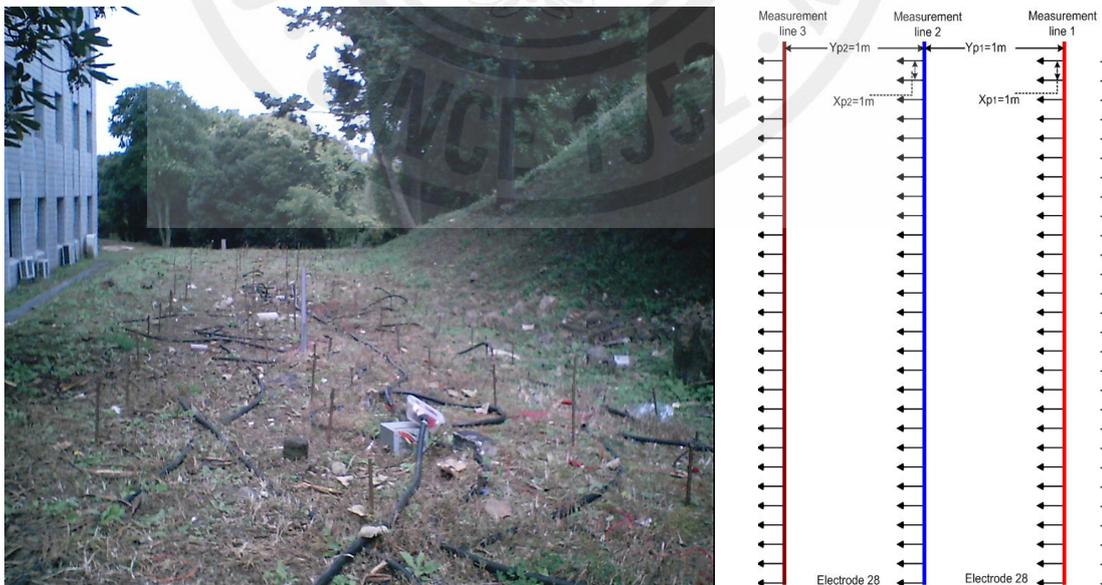


Fig. 45 Electrode configuration in field



Fig. 46 Earth resistivity tester

Table 6 Specifications of earth resistivity tester (MiniSting)

Measurement modes	Apparent resistivity, resistance, voltage(SP), induced polarization(IP), battery voltage
Measurement range	400[k Ω] ~ 0.1[m Ω] 0-500[V] full scale voltage autoranging
Measuring resolution	Max 30[nV], depends on voltage level
Output current	1-2-5-10-20-50-100-200-500[mA]
Input impedance	>20[M Ω]
Power supply	12/24[V] DC external power
Dimensions	Width 255[mm], length 255[mm], height 123 [mm]

Wenner 배열에 대한 대지저항률 측정은 x 축을 기준으로 전극간 거리가 1[m] 일 때 $C_1=1$, $C_2=4$, $P_1=2$, $P_2=3$ 일 때 측정을 시작하여 Fig. 46과 같이 순차적으로 측정을 하게 되며 측정전극사이의 거리 a 가 9[m]인 측정전극 14번과 15번 사이의 14.5지점을 117번 데이터로 취득하게 된다. Schlumberger 배열의 경우 첫번째 측정은 Wenner 배열과 동일하나 전위전극이 $P_1=3$, $P_2=4$ 일 때, $C_1=2$, $C_2=5$, $P_1=3$, $P_2=4$ 인 지점의 측정을 하고나서 전위전극을 고정시킨 상태에서 전류전극 간격 a 를 1[m] 이동시켜 $C_1=1$, $C_2=6$, $P_1=3$, $P_2=4$ 지

점을 측정하게 된다. Dipole-dipole 배열의 경우 측정전극 1번과 2번을 전류전극으로 설정하면, 측정전극 3과 4번이 전위전극이 되고, 다음은 측정전극 1번과 측정전극과 2번을 고정시키고 측정전극 4번과 5번이 전위 전극이 된다. 순차적으로 측정을 하여 최종적으로 205개의 측정 데이터를 측정하게 된다.

본 논문에서는 dipole-dipole 배열의 경우 측정용 전극 28개로 구성할 수 있는 측정은 325개까지 데이터 취득이 가능하지만 측정에 대한 오차가 7.5~62.1[%]까지 증가하므로 $n=10$ 으로 고정하여 전극배열을 설계하여 측정을 하였다.

Wenner 배열의 경우에 대한 측정순서를 Fig. 47에 나타내었다. $n=1$ 인 경우 전극간 거리 a 를 1[m]로 하여 측정순서 1~25까지 순차적으로 측정하게 되고, 측정지점 26일때는 전극간 간격 a 를 2[m]로 증가시키고 $n=2$ 인 지점에 대한 측정을 수행하여 최종적으로 측정전극 사이의 간격 a 가 9[m]로 증가시켜서 $n=9$ 인 지점의 117번 데이터 포인트의 대지저항률 값을 취득하게 된다. 순차적인 측정이 이루어지면 일정하게 측정 데이터 포인트가 줄어들어 측정전극 14와 측정전극 15 사이의 14.5 지점에 대하여 기존의 수직방향의 대지저항을 측정한 효과를 얻을 수 있다.

Fig. 48~Fig. 50는 현장에서 측정된 각각의 전극배열에 대한 측정 데이터를 나타내었다. 측정된 데이터들은 전극배열에 따라 측정 포인트와 취득데이터의 수의 차이를 보이게 되는데, dipole-dipole의 경우 전류전극 C_1 과 C_2 를 고정시켜 전위전극 P_1 과 P_2 를 연속하여 이동시키는 측정법의 특징에 의해 가장 많은 측정을 수행하게 되며 측정된 데이터를 보면 n 이 증가할수록 높은 대지저항률 값을 나타내는데 이는 상층보다 하층의 대지저항률이 높아지고 있음을 의미한다.

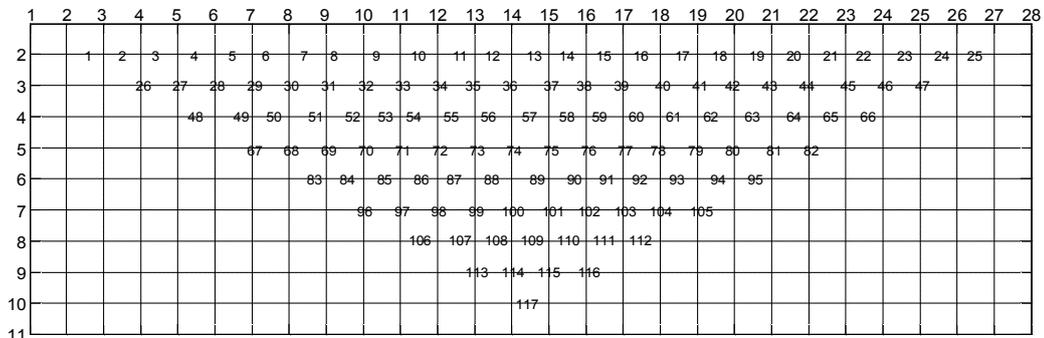


Fig. 47 Data point of earth resistivity measurement in Wenner array

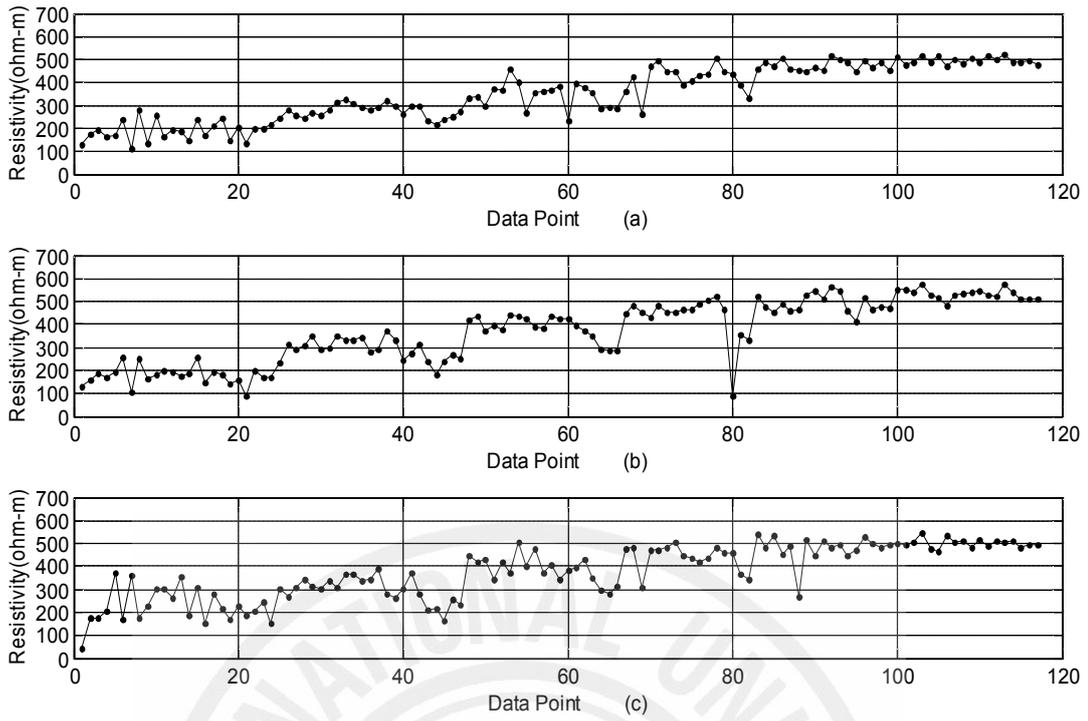


Fig. 48 Resistivity measurement results in line 1 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array

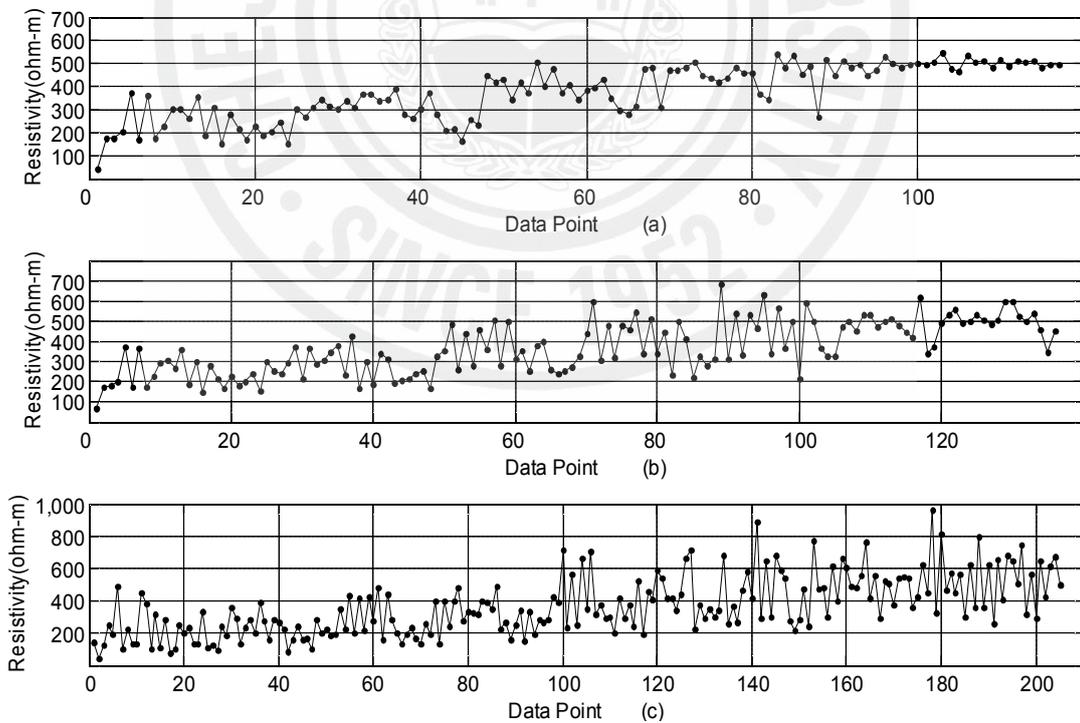


Fig. 49 Resistivity measurement results in line 2 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole

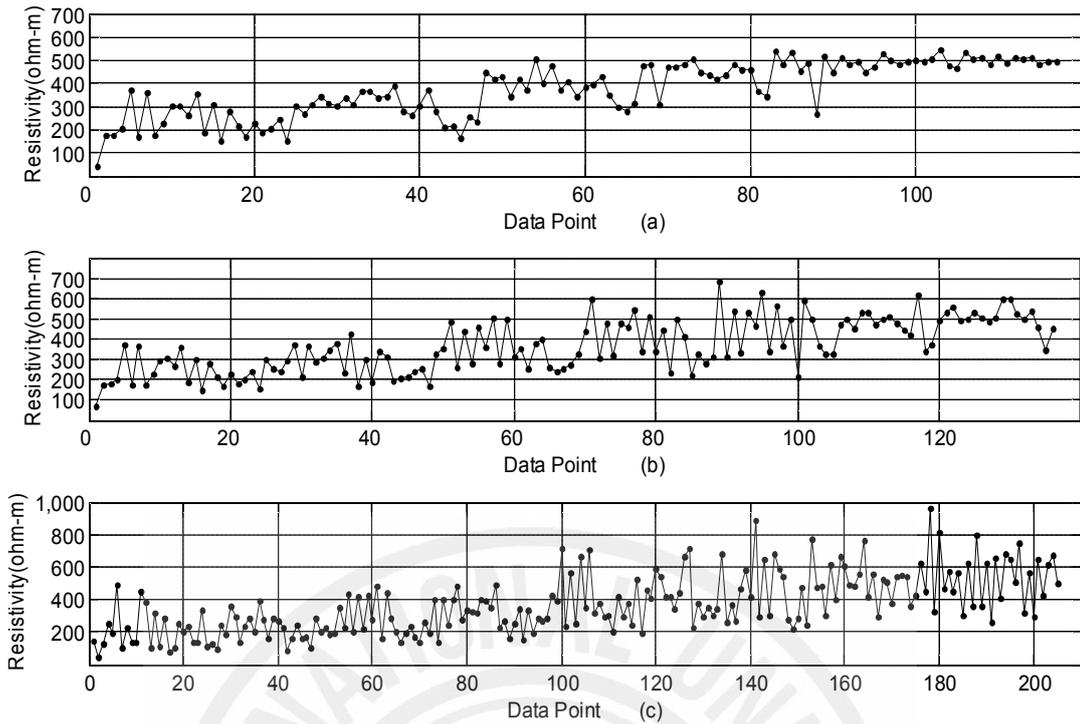


Fig. 50 Resistivity measurement results in line 3 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole

2) 대지저항률 측정결과 분석

현장에서 설치된 측정선 3곳에 대해 각각의 전극배열에 대한 측정된 데이터를 각각의 전극배열과 전기영상기법 알고리즘을 사용하여 역산을 수행하여 대지를 분석하고 깊이에 대한 저항률 변화를 분석하여 접지 시공 시 최적의 시공이 가능한 위치를 고려해 보고, 각각의 RMS 오차를 비교하여 나타내었다.

Fig. 51~53는 각각의 측정선에서 측정한 데이터에 대한 포워드 응답을 나타낸 것이다. 측정데이터에서 표시되지 않은 부분은 측정시 오차가 발생하여 측정이 불가능한 지점을 나타내며 측정지점 3곳의 대지저항률이 상층은 낮게 나타나고 하층은 높게 나타났다. 특히 측정선 3번의 경우 대지저항률이 전반적으로 높게 나타났다.

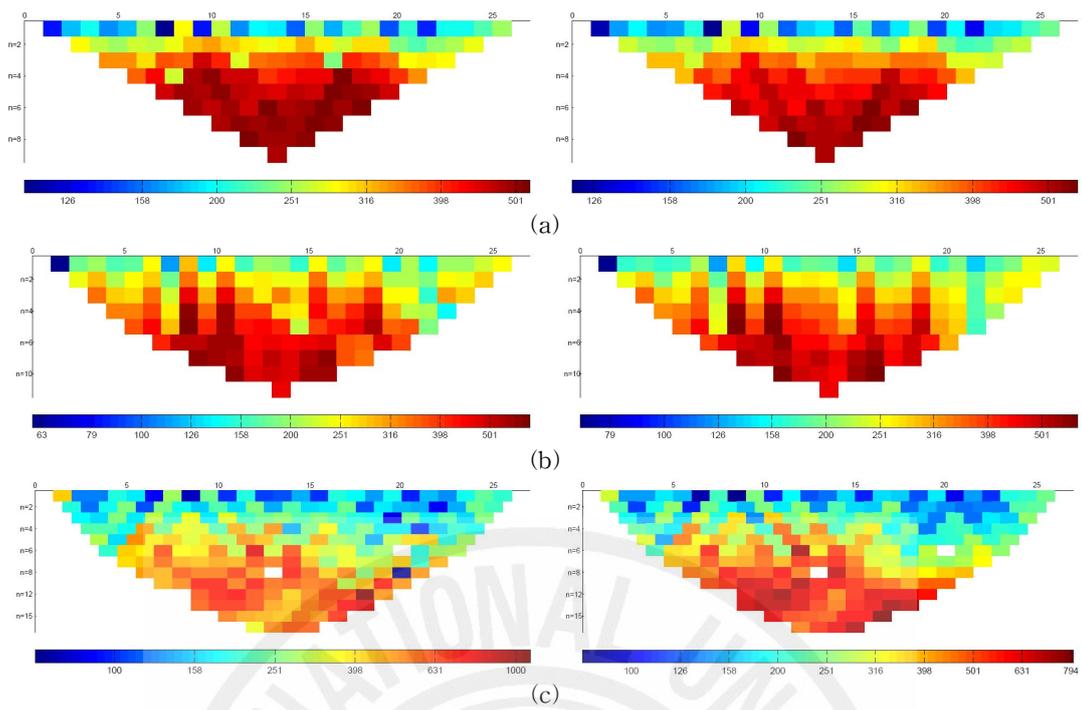


Fig. 51 Data and forward responses in line 1 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array

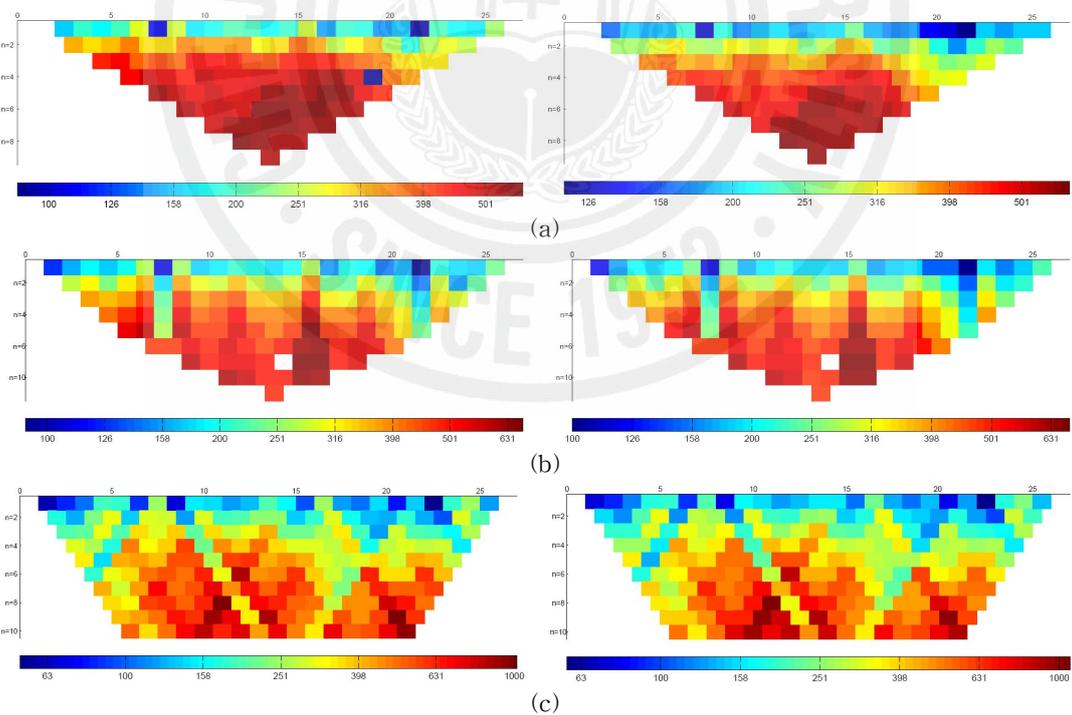


Fig. 52 Data and forward responses in line 2 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array

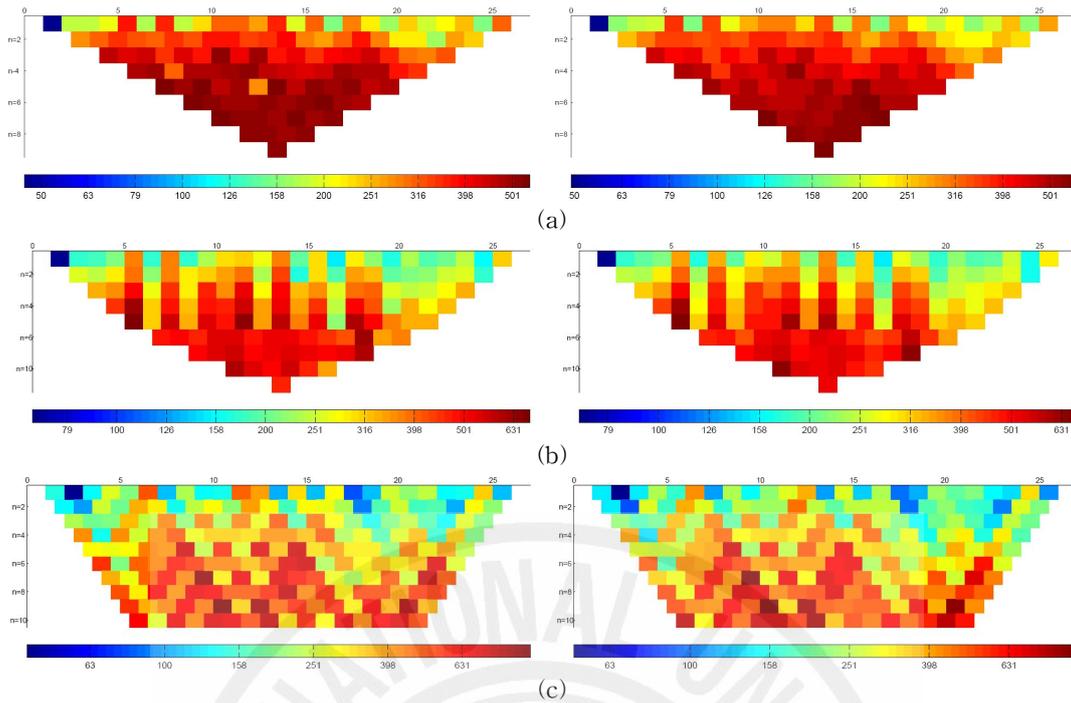


Fig. 53 Data and forward responses in line 3 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array

가) 측정선 1에서의 측정결과 분석

i) Wenner 배열 측정결과 분석

Wenner 배열을 사용한 측정 데이터를 본 논문에서 제시한 4가지 알고리즘을 사용하여 역산을 수행한 결과를 Fig. 54에 나타내었다. 전반적으로 상층의 대지는 저항률이 $63 \sim 100[\Omega m]$ 정도의 대지저항률로 역산이 이루어졌으나 심도에 2 [m] 이후의 대지에는 $1000[\Omega m]$ 가 넘는 높은 대지구조를 보이고 있다. 경계층에 $300[\Omega m]$ 정도의 대지를 보이고 있으며 Gauss-Newton 역산의 경우 측정전극 10 번의 수직부근에 높은 저항률을 가진 형태를 보이고 있다. 앞에서 보았던 3층 구조의 대지모델을 시뮬레이션 했던 경우와 유사한 경우로 볼 수 있다.

Fig. 55에 깊이에 대한 대지저항률의 변화를 나타내었다. Gauss-Newton의 경우 수직 구조를 가진 3층 구조를 보이는 대지모델과 유사한 대지저항률 변화를 나타내고 있으며, 깊이에 대한 대지저항률이 높아지고 있다. 다른 알고리즘에서도 깊이에 따른 변화를 볼 수 있다.

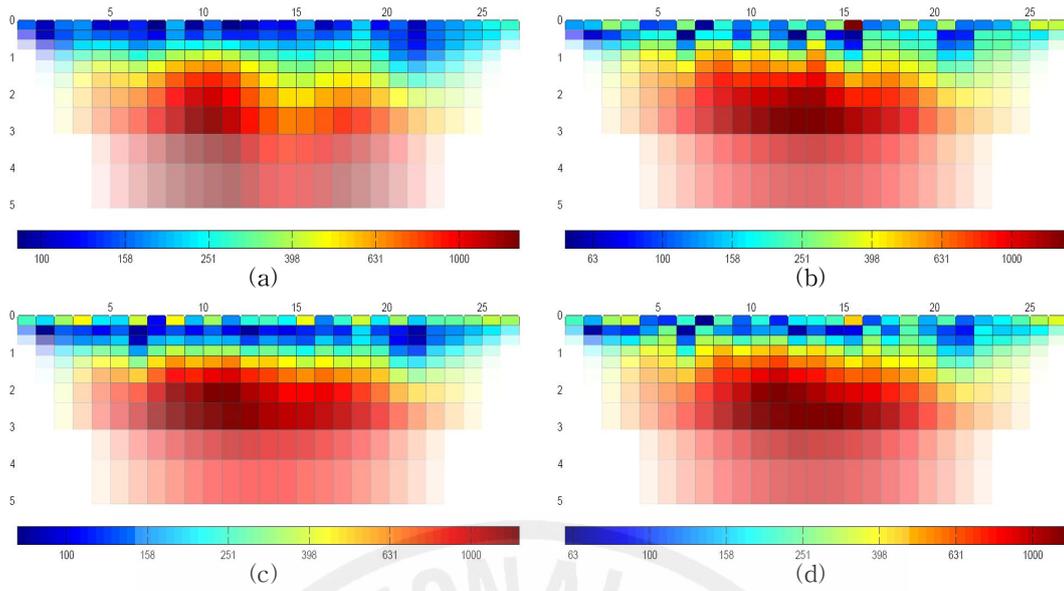


Fig. 54 Inversion results of Wenner array in line 1 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

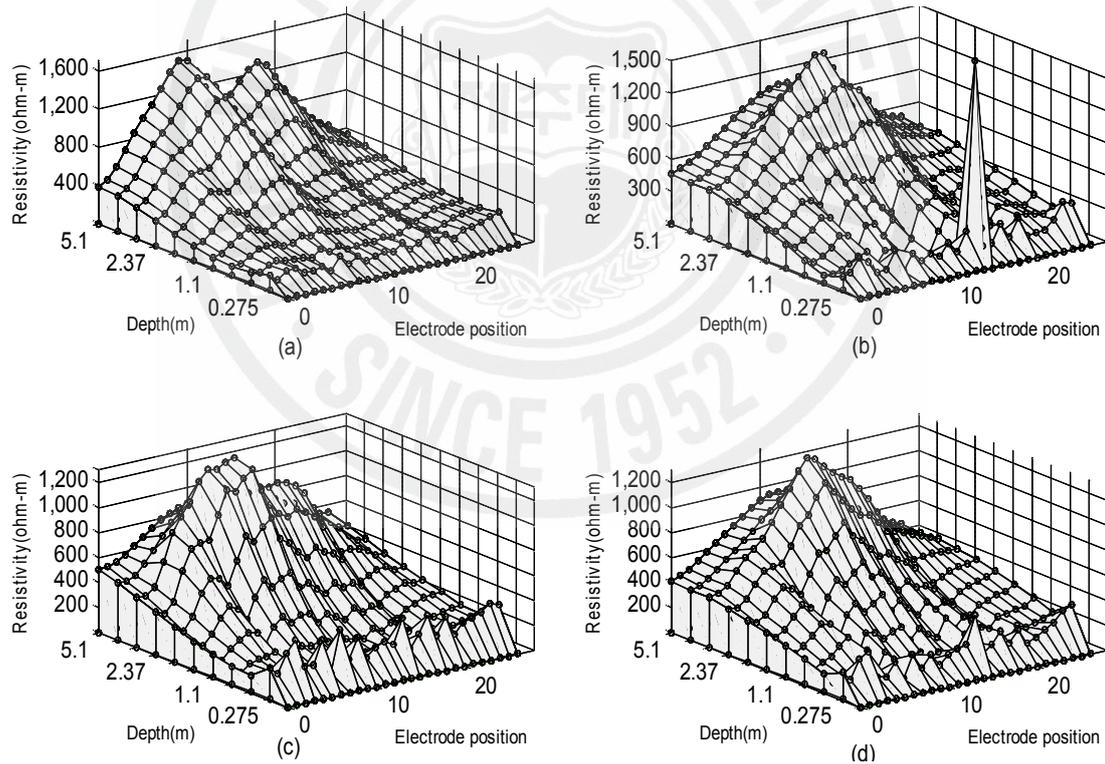


Fig. 55 Inversion results of Wenner array according to depth position in line 1 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

ii) Schlumberger 배열 측정결과 분석

Schlumberger 배열을 사용한 측정 데이터를 4가지 알고리즘을 사용하여 역산을 수행한 결과를 Fig. 56에 나타내었다. Gauss-Newton 알고리즘의 경우 전반적으로 상층의 대지는 저항률이 32~320[Ωm] 정도의 대지저항률로 역산이 이루어졌으나 하층 2[m] 이후의 대지에는 3000[Ωm]가 넘는 높은 대지구조를 보이고 있다. 경계층에 300[Ωm] 정도의 대지를 보이고 있으며 Gauss-Newton 역산의 경우 측정전극 10번의 수직부근에 높은 저항률을 가진 형태를 보이고 있으나 측정전극 15~20사이의 지점에는 낮은 저항률을 보이고 있다. 이는 다른 알고리즘들과 비교하여 봤을 때도 접지 시공 지점 측면에서 측정전극 16 우측방향에 시공이 적합한 경우이다.

Fig. 57에 깊이에 대한 대지저항률의 변화를 나타내었다. Gauss-Newton의 경우 곡선의 변화가 하층에 대해서 변화폭이 크게 나타났으며, 4가지 알고리즘의 경우 모두 0.53[m] 지점에서 큰 변화 폭을 보이고 있으며 이는 경계에서의 대지저항률 변동이 크다는 것을 의미한다.

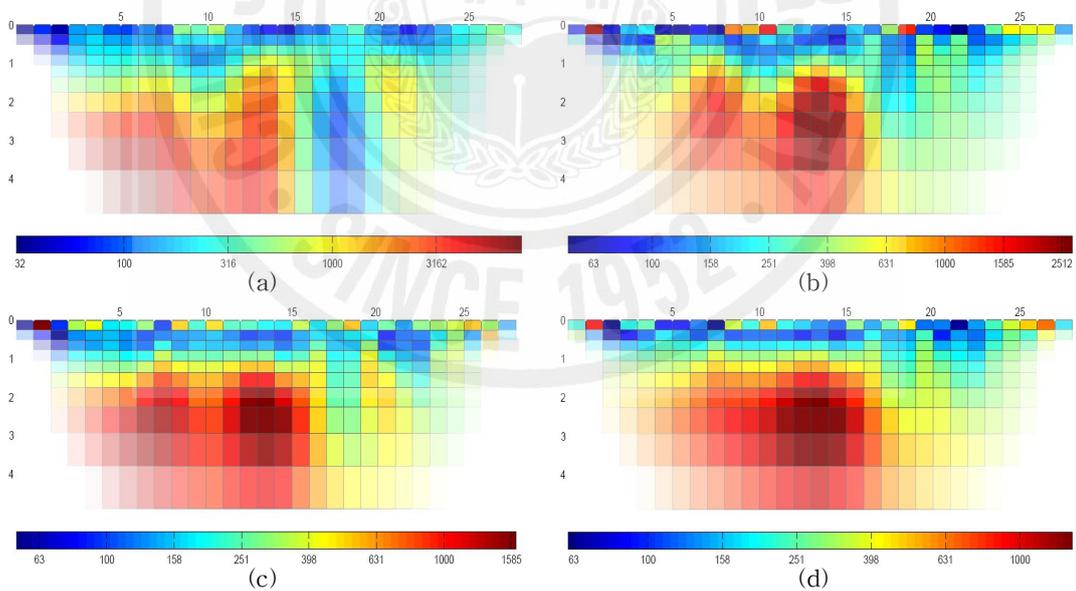


Fig. 56 Inversion results of Schlumberger array in line 1 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

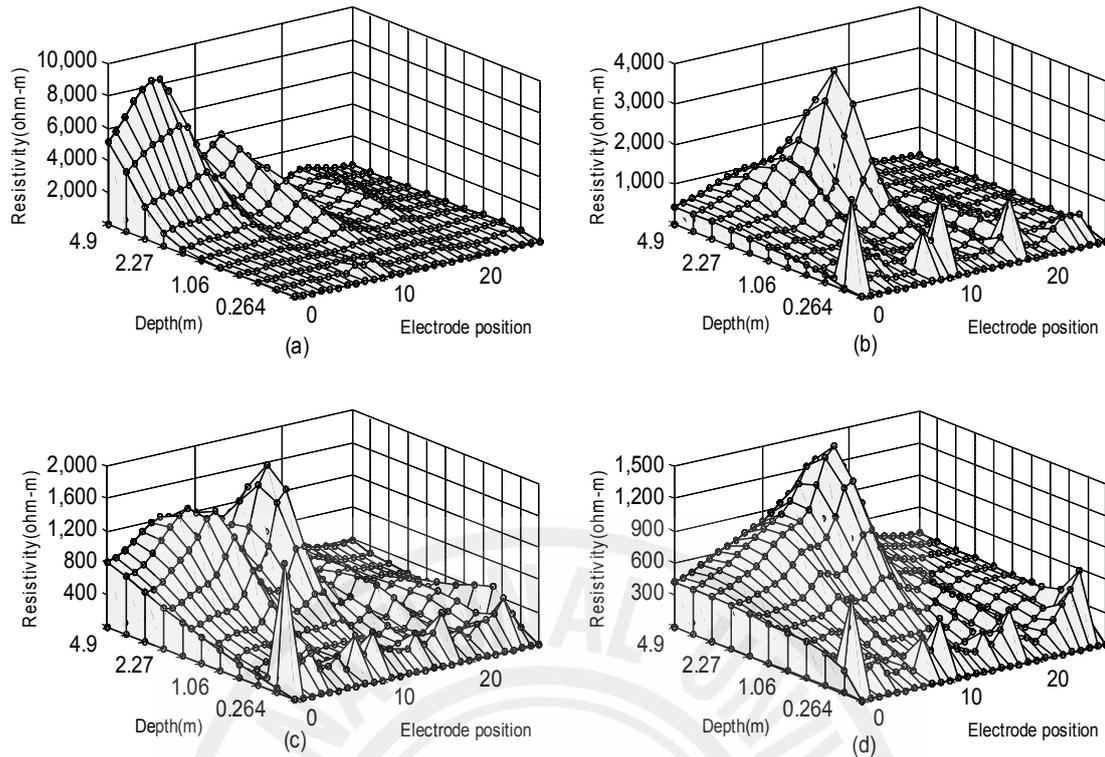


Fig. 57 Inversion results of Schlumberger array according to depth position in line 1 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

iii) Dipole-dipole 배열 측정결과 분석

Dipole-dipole 배열을 사용한 측정 데이터를 4가지 알고리즘을 사용하여 역산을 수행한 결과를 Fig. 58에 나타내었다. Gauss-Newton 알고리즘의 경우 전반적으로 상층의 대지는 저항률이 32~600[Ωm] 정도의 대지저항률로 역산이 이루어졌으나 하층 1.5[m] 이후의 대지에는 3000[Ωm]가 넘는 높은 대지구조를 보이고 있다. 특히 측정전극 8~13사이의 대지저항률이 높게 나타난다. 다른 역산 알고리즘의 경우에도 동일한 지점에 높은 저항률을 나타내고 있다.

Fig. 59는 깊이에 대한 대지저항률의 변화를 나타내었다. 깊이 1.18[m] 지점부터 깊이에 대한 대지저항률 패턴이 상승하고 있다. 이는 대지의 높은 저항률의 암반 등이 매립되어 있음을 예측할 수 있다.

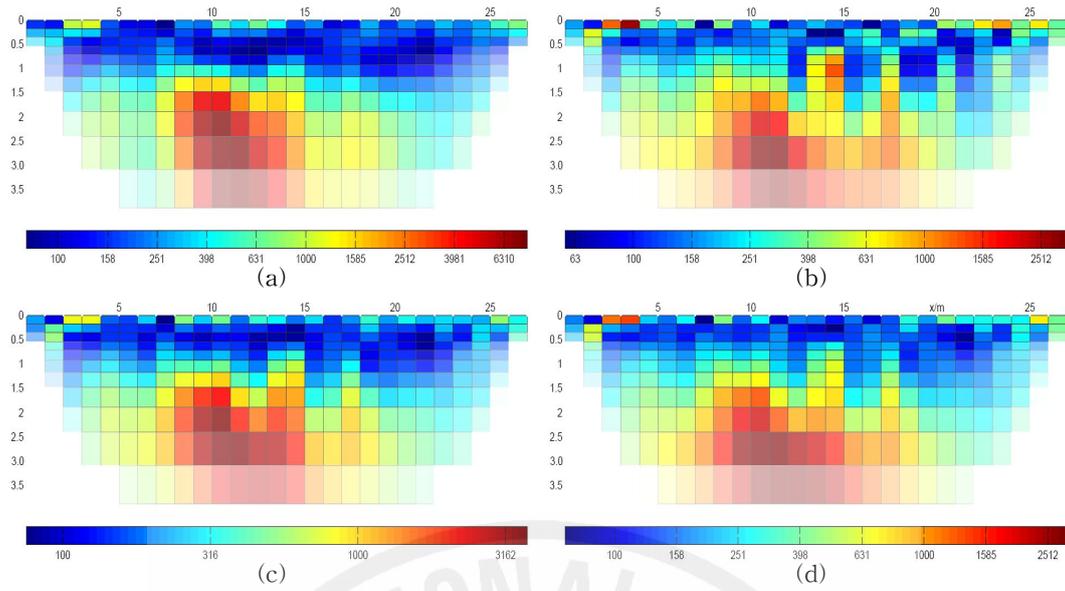


Fig. 58 Inversion results of dipole-dipole array in line 1 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

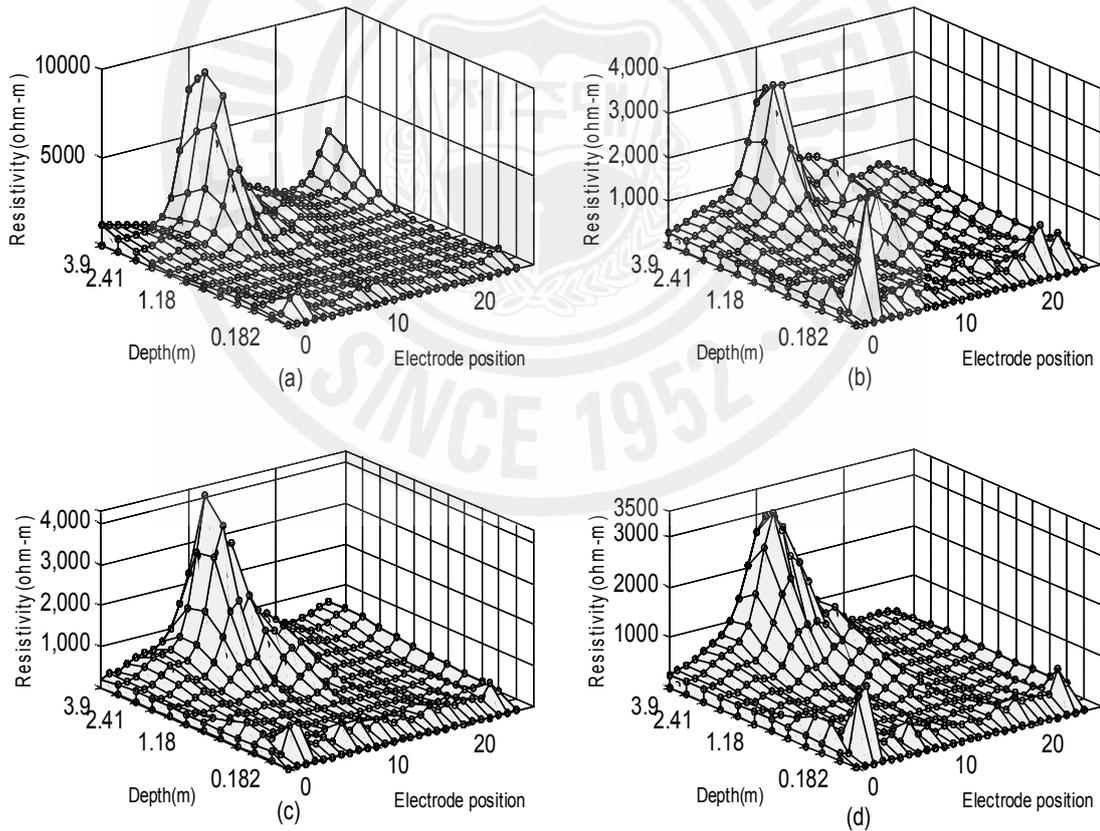


Fig. 59 Inversion results of dipole-dipole array according to depth position in line 1 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

iv) 측정선 1에서의 알고리즘들에 대한 RMS 오차분석

Fig. 60은 전극배열에 따른 전기영상 기법의 알고리즘에 대한 RMS 오차를 나타내었다. Wenner 배열의 경우 Gauss-Newton이 빠른 수렴 특성을 보이며 전반적으로 오차의 값이 적게 나타났으며, Schlumberger 배열의 경우 TSVD 알고리즘이 가장 빠른 수렴특성을 보였으나 수렴특성은 늦어도 Gauss-Newton 알고리즘 또한 같은 결과를 나타냈다. Dipole-dipole 배열의 경우 SIRT 알고리즘이 가장 적은 RMS 오차를 나타냈다.

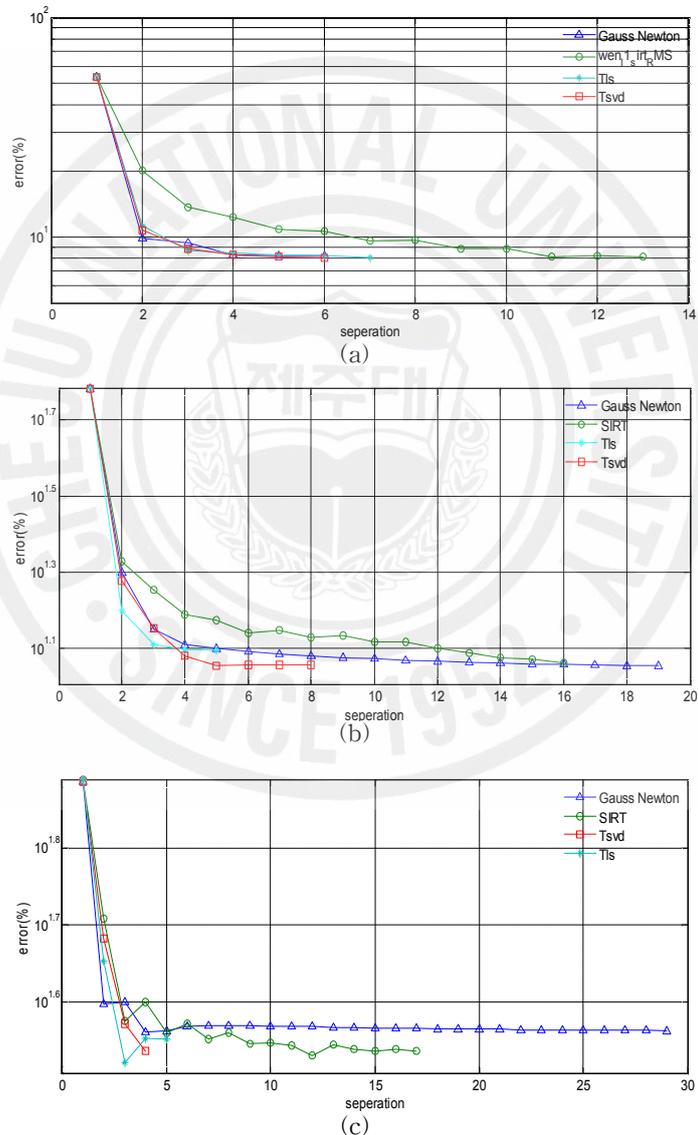


Fig. 60 RMS errors of several algorithms in line 1
 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array

나) 측정선 2에서의 측정결과 분석

i) Wenner 배열 측정결과 분석

Wenner 배열을 사용한 측정 데이터를 4가지 알고리즘을 사용하여 역산을 수행한 결과를 Fig. 61에 나타내었다. 전반적으로 상층의 대지는 저항률이 $63[\Omega m] \sim 251[\Omega m]$ 정도의 대지저항률로 역산이 이루어졌으나 하층 1[m] 이후의 대지에는 $1000[\Omega m]$ 가 넘는 높은 대지구조를 보이고 있다. 경계층에 $300[\Omega m]$ 정도의 대지를 보이고 있으며 Gauss-Newton 역산의 경우 측정전극 12의 수직부근에 $600[\Omega m]$ 저항률을 가진 형태를 보이고 있으나 다른 알고리즘의 역산에서는 높은 저항률로 나타나고 있다. 접지 설계 시 측정전극 14 주변부분은 피하는 것이 바람직하다.

Fig. 62에 깊이에 대한 대지저항률의 변화를 나타내었다. Gauss-Newton 방법의 경우 수직 구조를 가진 3층 구조를 보이는 대지모델과 유사한 구조를 보이고 있다.

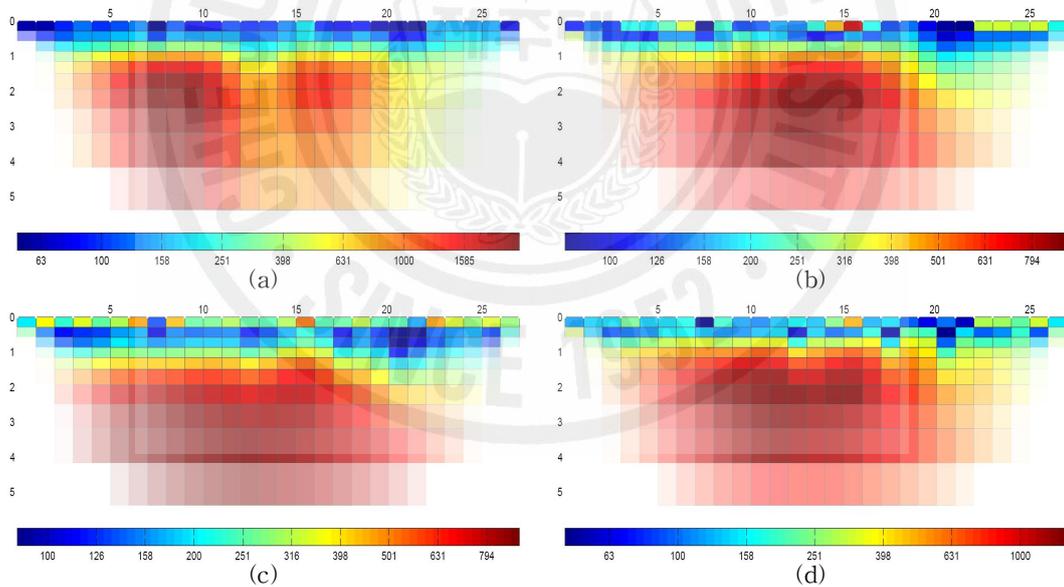


Fig. 61 Inversion results of Wenner array in line 2 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

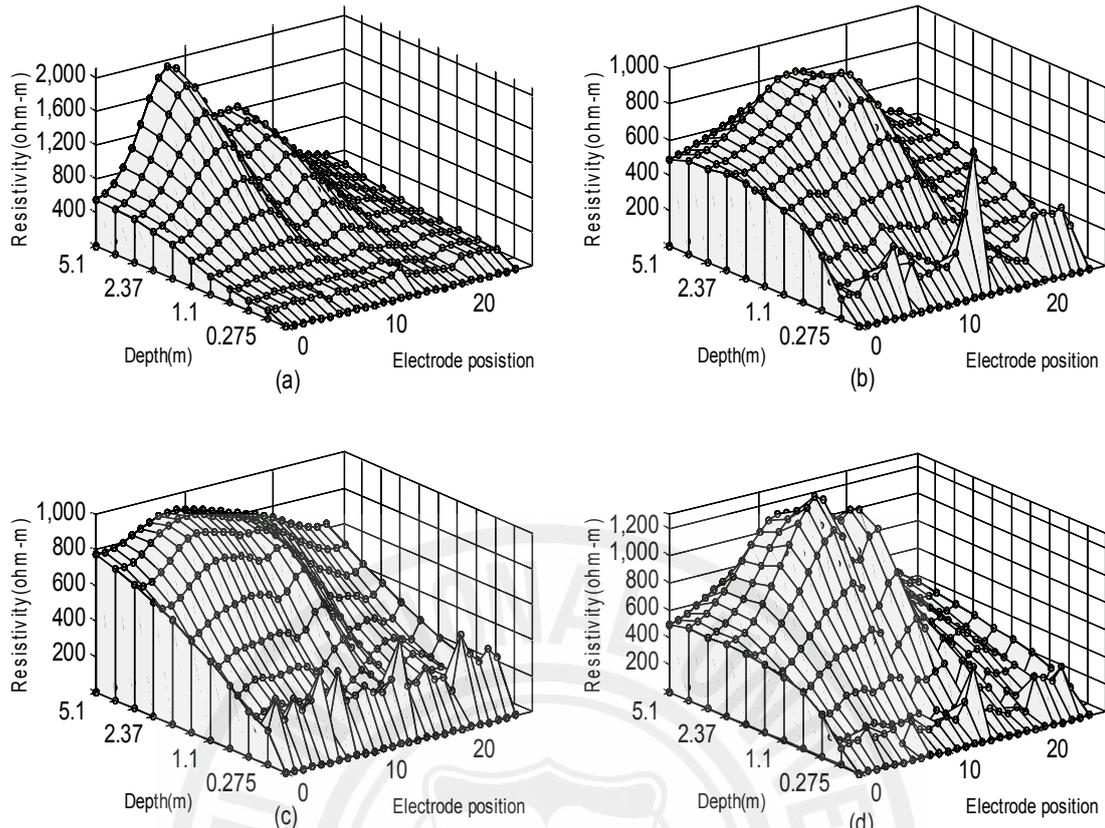


Fig. 62 Inversion results of Wenner array according to depth position in line 2 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

ii) Schlumberger 배열 측정결과 분석

Schlumberger 배열을 사용한 측정 데이터를 4가지 알고리즘을 사용하여 역산을 수행한 결과를 Fig. 63에 나타내었다. Gauss-Newton 알고리즘의 경우 전반적으로 상층의 대지는 저항률이 63~398[Ωm] 정도의 대지저항률로 역산이 이루어졌으나 하층 1[m] 이후의 대지에는 1500[Ωm]가 넘는 높은 대지구조를 보이고 있다. 경계층에 300~631[Ωm] 정도의 대지를 보이고 있으며 다른 알고리즘의 역산 결과를 통해서도 대지구조가 3층으로 나타나고 있으며 하층의 대지저항률이 높은 지역으로 나타났다.

Fig. 64에 깊이에 대한 대지저항률의 변화를 나타내었다. 깊이에 대하여 1.06~2.94[m] 지점에서 가장 높은 대지저항률 분포를 나타내고 있다.

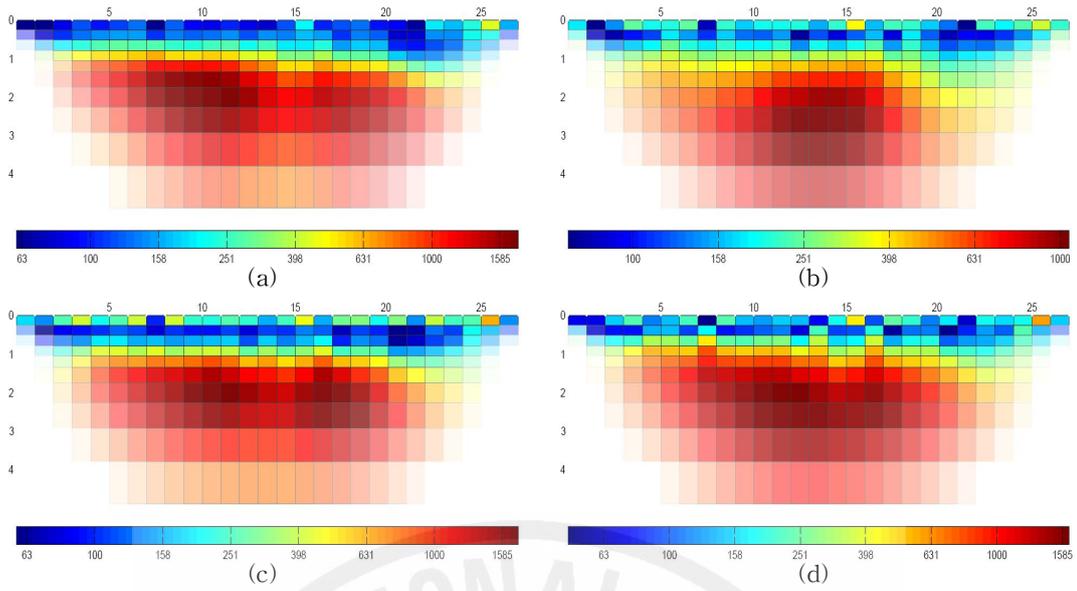


Fig. 63 Inversion results of Schlumberger array in line 2
 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

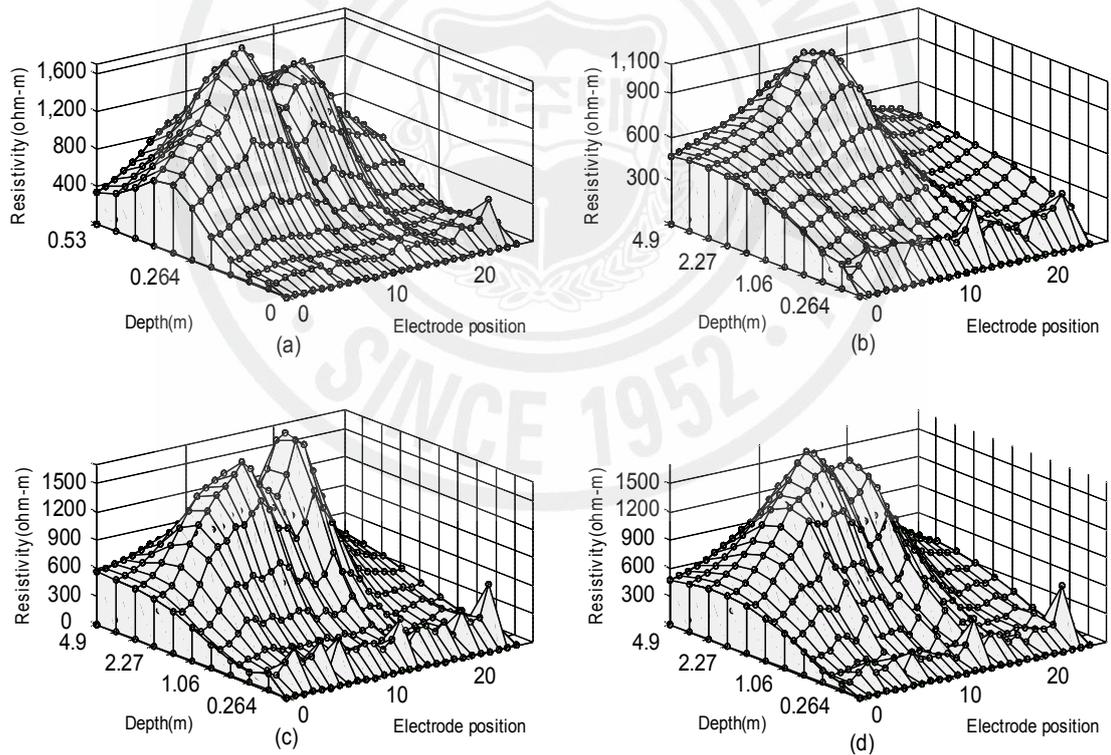


Fig. 64 Inversion results of Schlumberger array according to depth position in line 2
 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

iii) Dipole-dipole 배열 측정결과 분석

Dipole-dipole 배열을 사용한 측정 데이터를 4가지 알고리즘을 사용하여 역산을 수행한 결과를 Fig. 65 에 나타내었다. 전반적으로 상층의 대지는 저항률이 40~631[Ωm] 정도의 대지저항률로 역산이 이루어졌으나 하층 1[m] 이후의 대지에는 1000[Ωm]가 넘는 높은 대지구조를 보이고 있다. 경계층에 300[Ωm] 정도의 대지를 보이고 있으며 Gauss-Newton 역산의 경우 측정전극 10~15사이의 수직 부근에 가장 높은 대지저항률을 가진 형태를 보이고 있으며 다른 알고리즘의 역산에서도 높은 저항률로 나타나고 있다. 접지 시 공시 중앙 부분은 피하는 것이 바람직하다.

Fig. 66에 깊이에 대한 대지저항률의 변화를 나타내었다. 전반적으로 하층의 대지저항률이 높아지는 형태를 나타내고 있다.

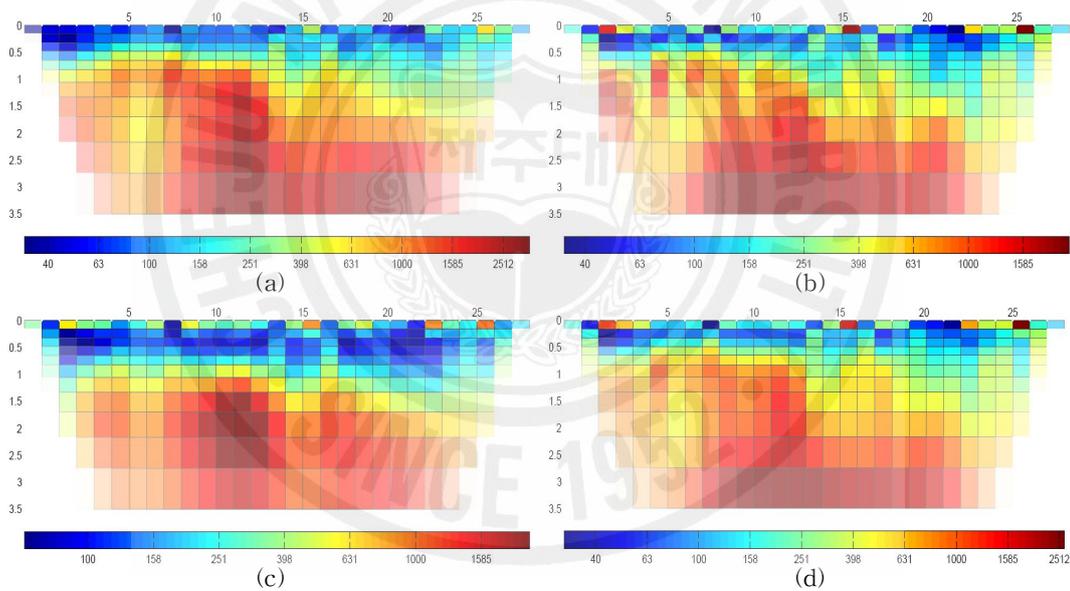


Fig. 65 Inversion results of dipole-dipole array in line 2 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

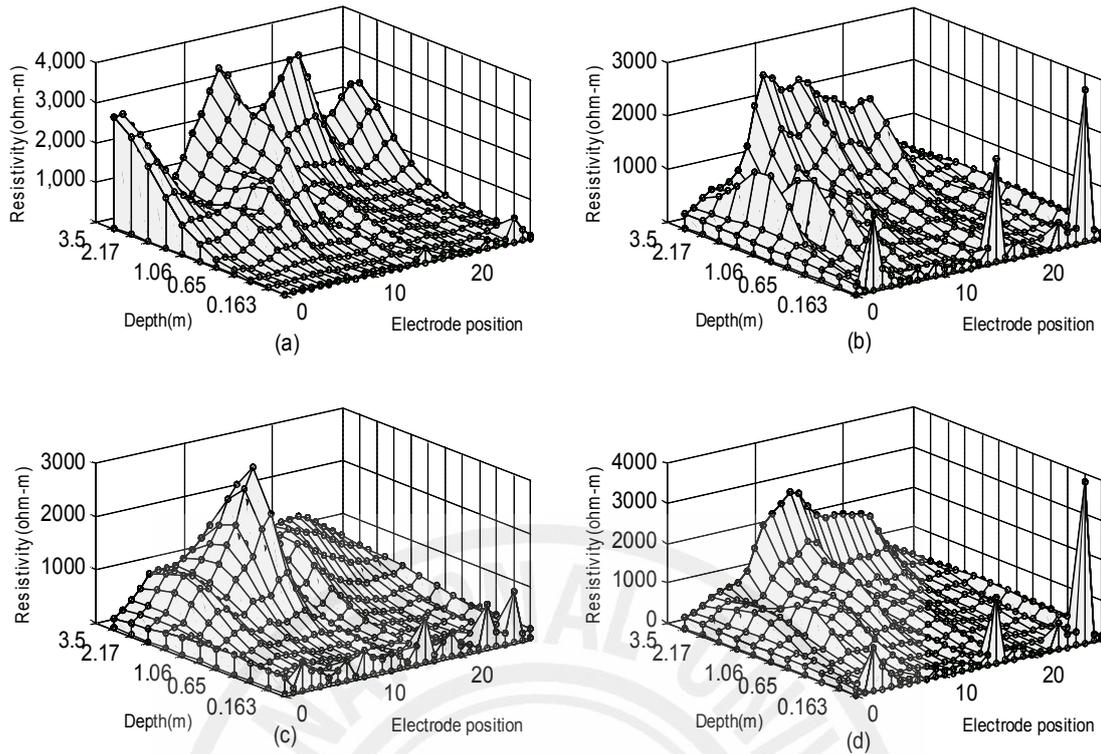
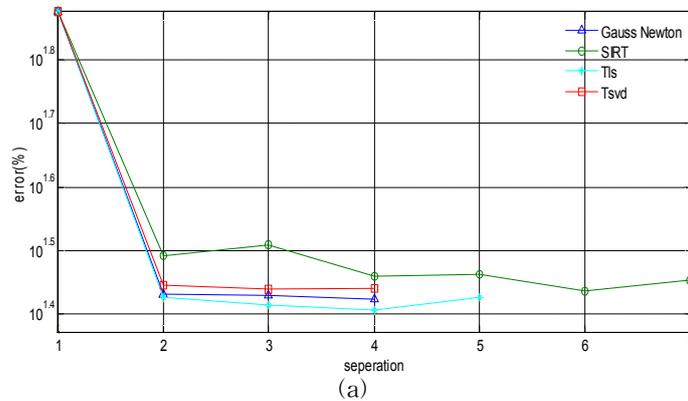


Fig. 66 Inversion results of dipole-dipole array according to depth position in line 2 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

iv) 측정선 2에서의 알고리즘들에 대한 RMS 오차분석

Fig. 67 에 전극배열에 따른 전기영상 기법의 알고리즘에 대한 RMS 오차를 나타내었다. Wenner 배열의 경우 TLS 알고리즘과 Gauss-Newton 알고리즘이 RMS 오차가 낮게 나타났으며, Schlumberger 배열과 dipole-dipole 배열법의 경우 Gauss-Newton 알고리즘이 가장 낮은 RMS 오차값을 나타내었다.



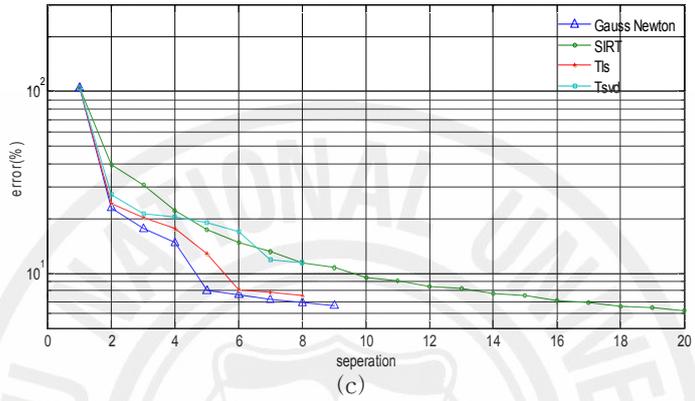
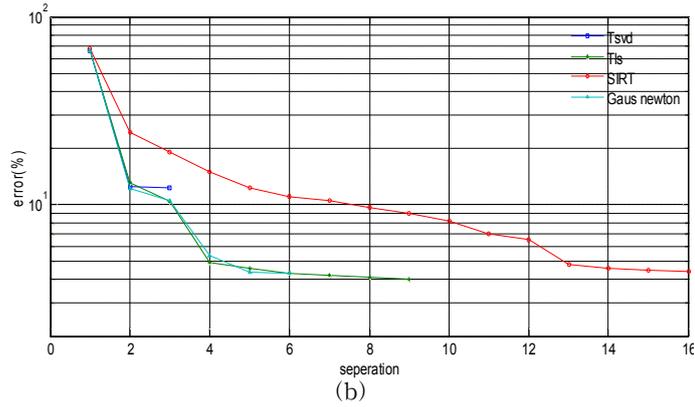


Fig. 67 RMS errors of several algorithms in line 2 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array

다) 측정선 3에서의 측정결과 분석

i) Wenner 배열 측정결과 분석

Wenner 배열을 사용한 측정 데이터를 4가지 알고리즘을 사용하여 역산을 수행한 결과를 Fig. 68 에 나타내었다. 전반적으로 상층의 대지는 저항률이 40~398[Ωm] 정도의 대지저항률로 역산이 이루어졌으나 하층 1[m] 이후의 대지에는 1000[Ωm]가 넘는 높은 대지구조를 나타내고 있다. 경계층에 300[Ωm] 정도의 대지구조이지만, Gauss-Newton 방법 역산의 경우 깊이 1[m] 이내의 지점에 대해 낮은 대지저항률을 나타내고, 하층의 경우 높은 대지저항률을 나타낸다. 다른 알고리즘의 역산에서도 하층의 경우 높은 저항률로 나타나고 있다.

Fig. 69에 깊이에 대한 대지저항률 변화를 나타내었다. Gauss-Newton 알고리즘의 경우 상층과 하층이 깊이에 대해 완만한 대지저항률 변화를 보이는 수직구조의 대지모델을 나타내고 있으나 다른 알고리즘들은 상층에 높은 대지저항률 변화를 보이고 있다.

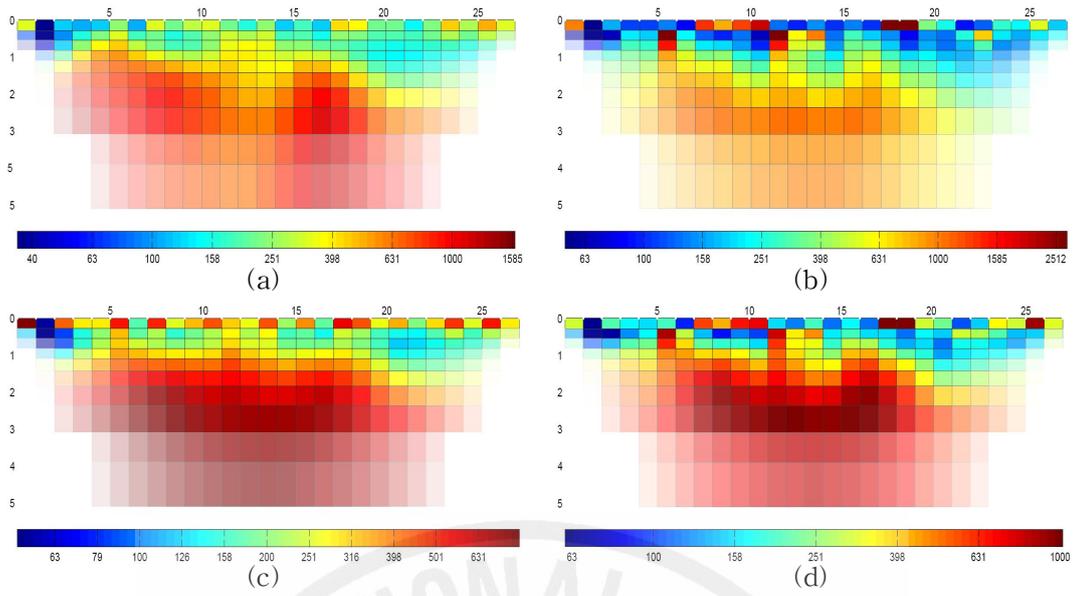


Fig. 68 Inversion results of Wenner array in line 3 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

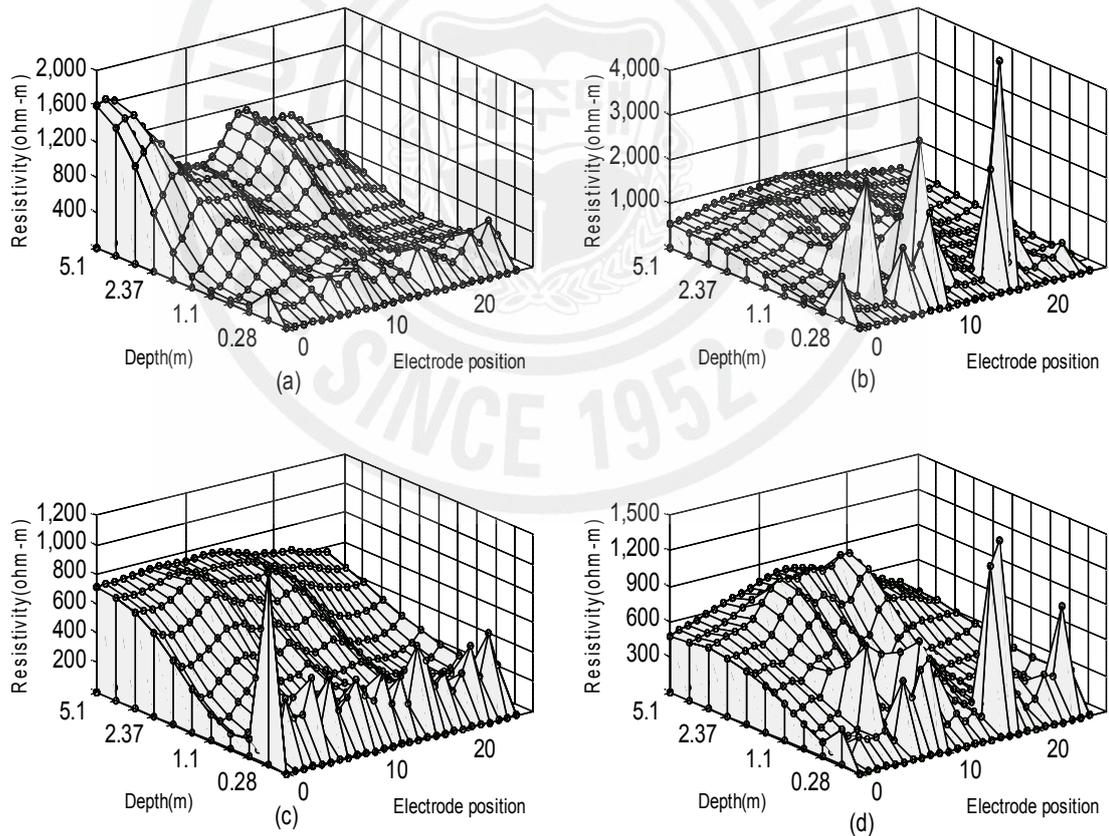


Fig. 69 Inversion results of Wenner array according to depth position in line 3 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

ii) Schlumberger 배열 측정결과 분석

Schlumberger 배열을 사용한 측정 데이터를 4가지 알고리즘을 사용하여 역산을 수행한 결과를 Fig. 70에 나타내었다. 전반적으로 상층의 대지는 저항률이 38~398[Ωm] 정도의 대지저항률을 보이며 앞에서 살펴본 3층 구조 대지모델 중 특징지점에 경사를 준 모델과 같은 전형적인 3층 구조의 대지 구조 형태를 보이고 있다. Gauss-Newton 역산의 경우 측정전극 10~15사이에 층이 높은 대지저항률을 보이고 있다.

Fig. 71에 깊이에 대한 대지저항률의 변화를 나타내었다. Gauss-Newton의 경우 측정전극 4~8사이에 층상의 경사도로 인한 굴곡 점이 나타난다. 깊이에 대해 우측으로 낮은 대지저항률을 보이고 있으므로 접지설계에서 측정전극 20~27사이의 지점에 대한 선택이 적절하다.

iii) Dipole-dipole 배열 측정결과 분석

Dipole-dipole 배열을 사용한 측정 데이터를 4가지 알고리즘을 사용하여 역산을 수행한 결과를 Fig. 72에 나타내었다. 전반적으로 상층의 대지는 저항률이 63~631[Ωm] 정도의 대지저항률로 역산이 이루어졌으나 하층 1.5[m] 이후의 대지에는 1000[Ωm]가 넘는 높은 대지구조를 보이고 있다.

Fig. 73에 깊이에 대한 대지저항률의 변화를 나타내었다. 전반적으로 하층의 대지저항률이 높게 나타났다.

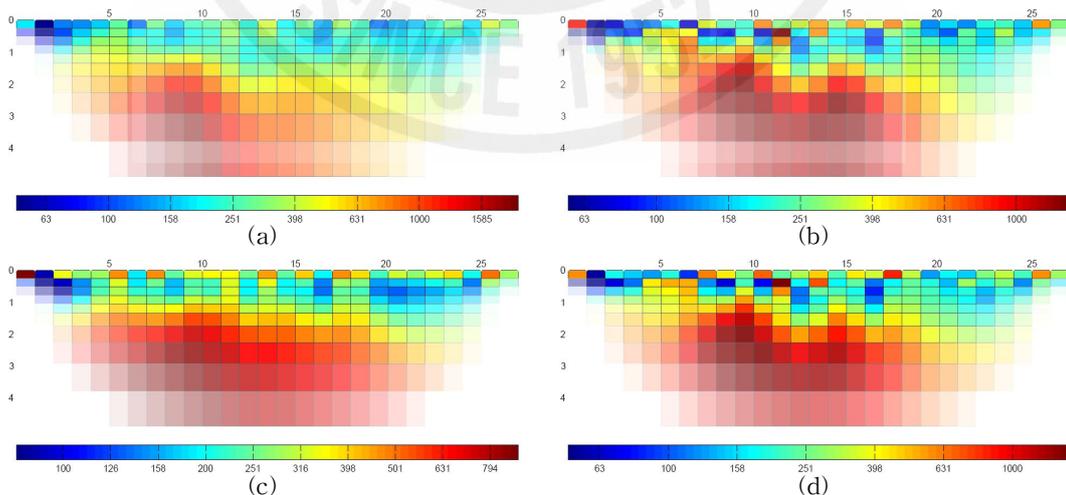


Fig. 70 Inversion results of Schlumberger array in line 3 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

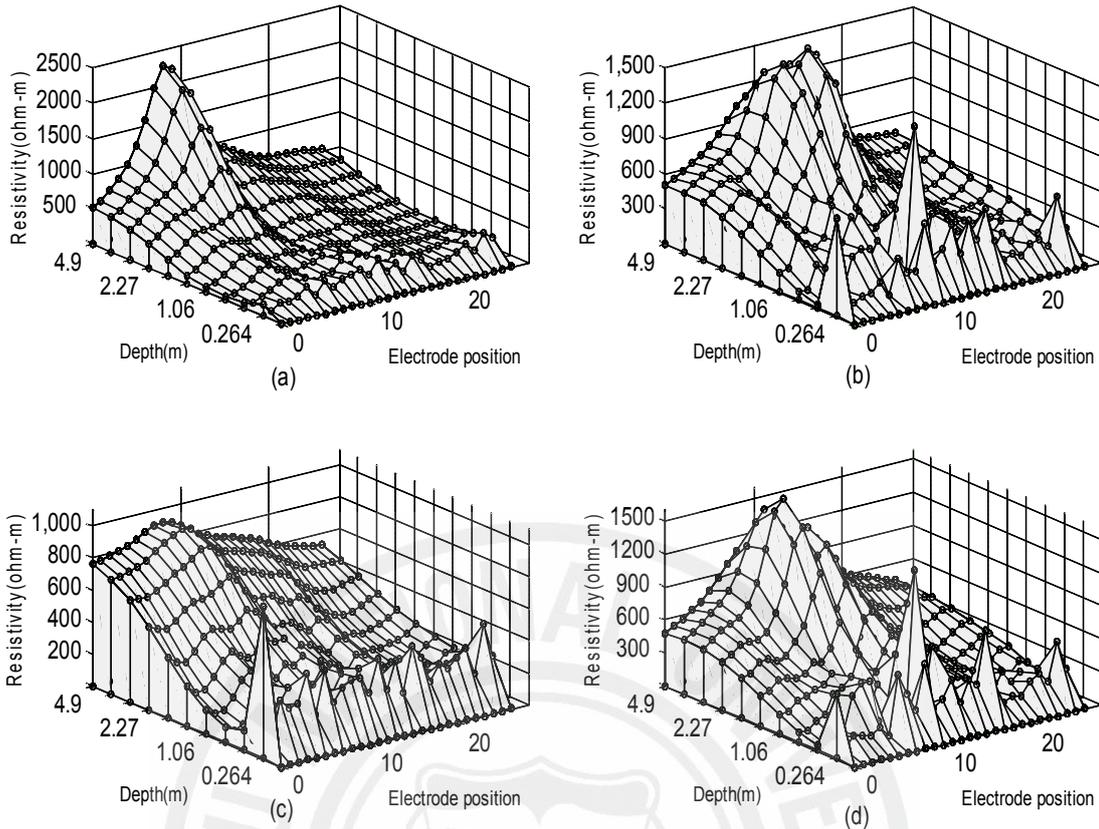


Fig. 71 Inversion results of Schlumberger array according to depth position in line 3 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

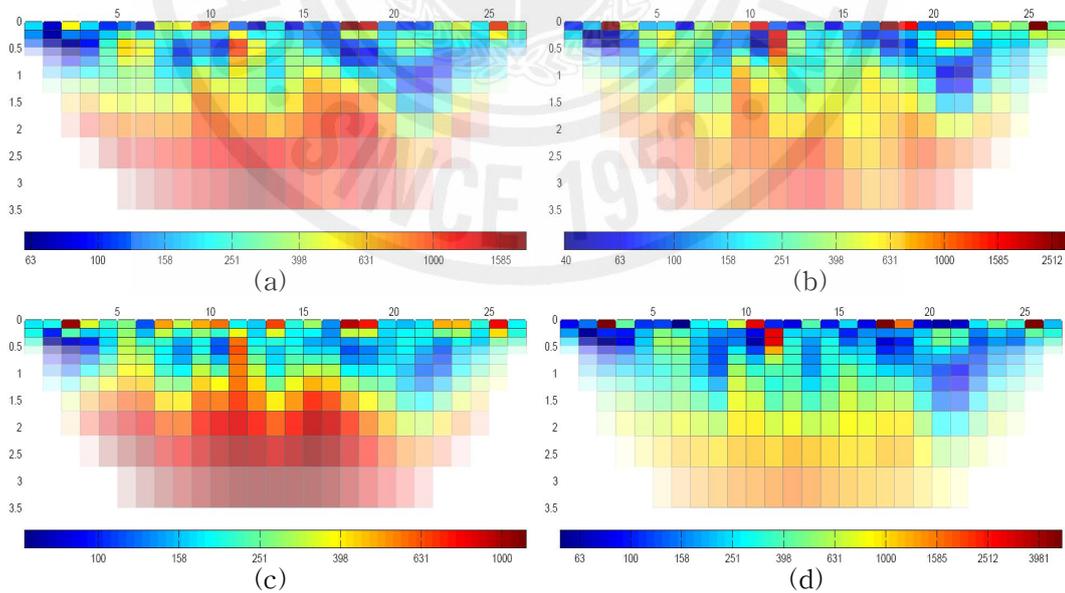


Fig. 72 Inversion results of dipole-dipole array in line 3 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

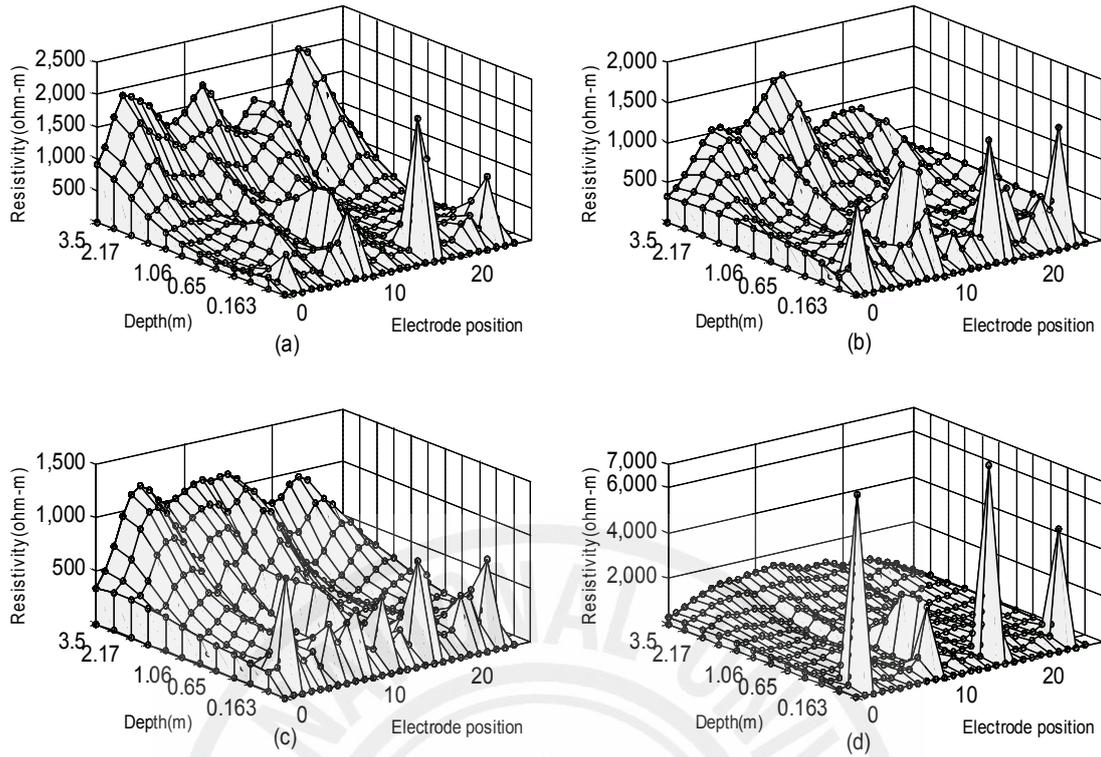
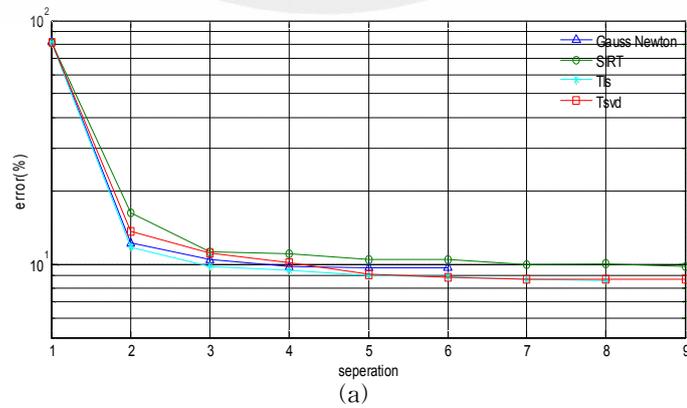


Fig. 73 Inversion results of dipole-dipole array according to depth position in line 3 (a) Gauss-Newton, (b) TSVD, (c) SIRT, (d) TLS

iv) 측정선 3에서의 알고리즘들에 대한 RMS 오차분석

Fig. 74에 전극배열에 따른 전기영상기법의 알고리즘에 대한 RMS 오차를 나타내었다. Wenner 배열의 경우 TSVD 알고리즘과 TLS 알고리즘이 RMS 오차가 낮게 나타났으며, Schlumberger 배열과 dipole-dipole 배열법의 경우 TLS 알고리즘이 가장 낮은 RMS 오차값을 나타내었다.



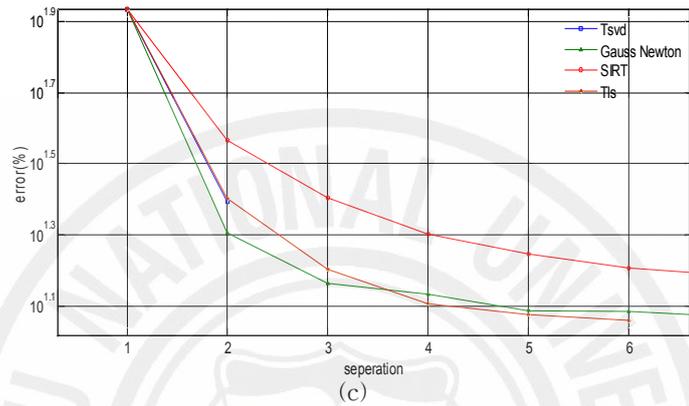
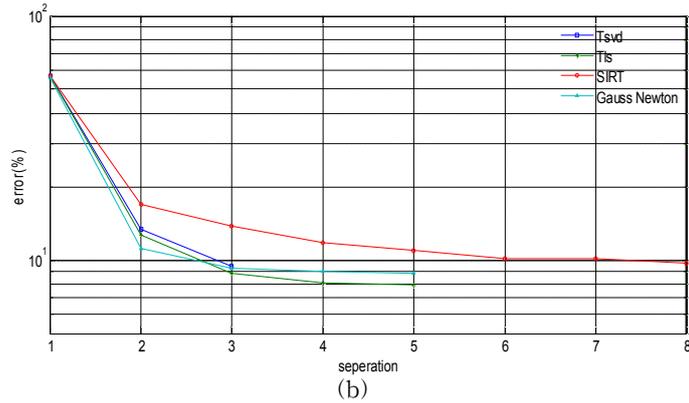


Fig. 74 RMS errors of several algorithms in line 3
 (a) Wenner array, (b) Schlumberger array, (c) dipole-dipole array

3) 실시간 접지저항측정 결과분석

가) 다전극을 이용한 접지저항 취득시스템

전기영상 기법을 통해 분석된 자료를 바탕으로 현장에 시공의 최적지점을 선정하여 접지동판과 동봉을 시공하여 시간에 따른 접지저항 변화를 측정하였다. 측정의 신뢰도를 확인하기 위해 6~7 보조전극을 선정하여 순차적으로 측정하였으며 시간당 16개의 데이터를 취득하였다. 접지저항 측정 시 이 보조전극은 총 길이의 61.8[%]를 취하게 된다.

Fig 75에 현장에 설치한 접지저항 측정 시스템의 전극위치를 나타내었다. 현장에 대지저항률 측정선으로 사용되는 다전극 시스템을 접지저항 측정용으로 사용하고, 접지 전극은 대지저항률 분석에서 낮은 대지저항률을 나타내는 측정전극 8~9지점 사이에 설치하게 되고, 측정전극 9~10 사이에는 수직형 접지저항 취득 시스템의 접지전극 VP1~VP4을 설치하여 깊이에 대한 대지모델에서 분석한 결과와 비교하여 시스템의 신뢰성을 검증하게 된다.

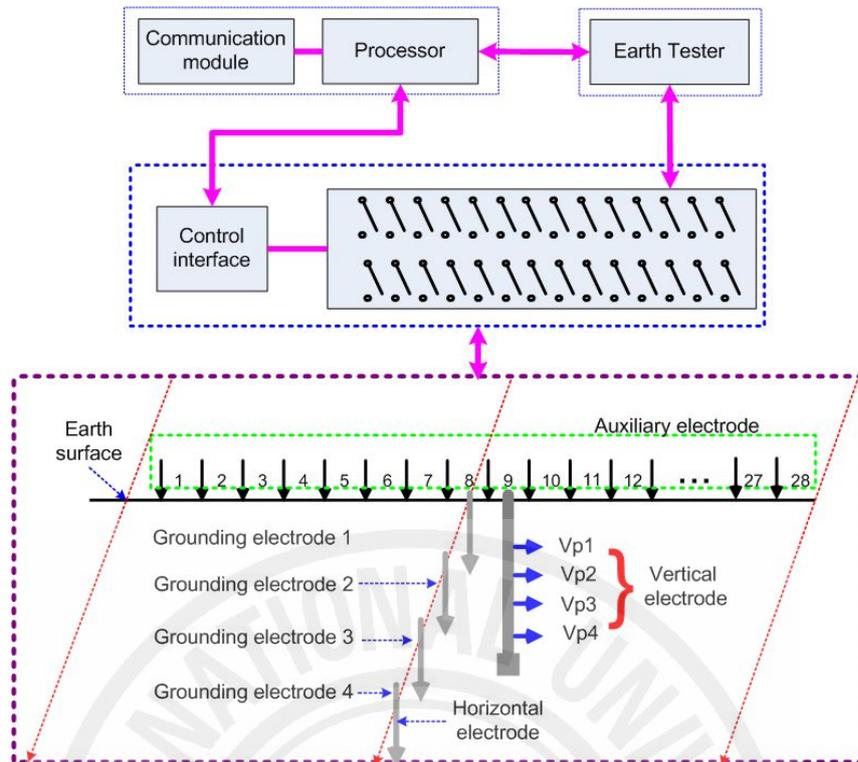
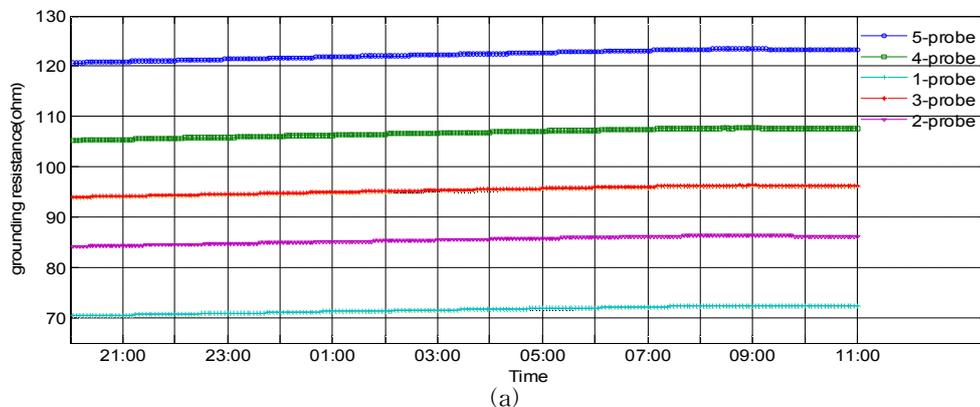


Fig. 75 Measurement of grounding resistance configuration

i) 6전극 접지저항 취득시스템

접지체에 설치하는 E극과 원거리에 설치하는 C극 사이에 5개의 보조전극을 통한 접지저항 측정데이터는 보조전극의 설치 거리에 따라 접지저항값의 변동을 나타낸다. Fig. 76(a) 와 Fig. 76(b)는 동판과 동봉 접지시설물에 대한 5개의 보조전극에서 측정된 접지저항의 시간적 변화를 나타낸 것이다. 접지 동판이 시간 변화에 변동이 거의 없고 낮은 접지저항을 나타내었다.



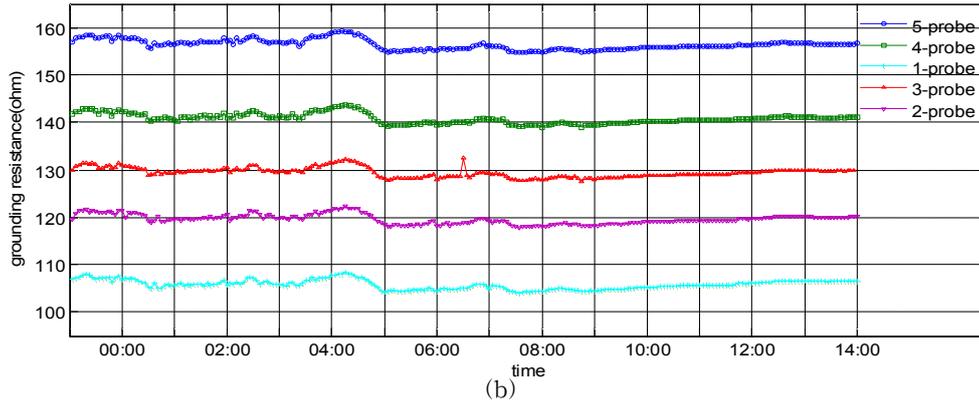


Fig. 76 Measured grounding resistance of copper rod

Table 7 Comparison between the ground copper rod and plate

	Copper rod[Ω]					Copper plate[Ω]				
	1[m]	2[m]	3[m]	4[m]	5[m]	1[m]	2[m]	3[m]	4[m]	5[m]
Min	104	117.9	127.5	139	154.7	70.5	84.2	94	105.3	120.7
Max	108.5	122.3	132.5	143.7	159.3	72.4	86.4	96.3	107.8	123.4
Mean	105.8	119.6	129.4	140.8	156.4	71.61	85.48	95.32	106.8	122.3
Median	105.8	119.6	129.4	140.8	156.4	71.7	85.55	95.4	106.9	122.4
mode	105.7	119.3	129.7	141	156	72.3	86.2	96.1	107.7	123.3

ii) 7전극 접지저항 취득시스템

전극 P를 확장 시키고 측정에 사용된 접지전극 또한 저감제를 첨가한 동봉과 접지동판, 저감제를 사용하지 않은 접지 동봉과 접지 동판을 사용하여 실시간 측정하였다. 측정된 데이터는 각 전극에 대한 보조전극 데이터 6개씩 각각의 접지체에 대해 측정을 해야 하기 때문에 1시간에 3.5번 정도의 측정이 가능하였다. 측정결과를 Fig. 77에 나타내었다. 측정결과 저감제를 투입한 접지동판이 가장 낮은 접지저항 값을 나타내었다.

Fig. 78 은 4개의 접지전극에 대한 오전 6시부터 다음날 오전 6시까지의 시간에 따른 접지저항의 변동을 나타내었다. 저감제를 투입한 접지 동판이 변동가장 적고 낮은 접지저항 값을 갖는다.

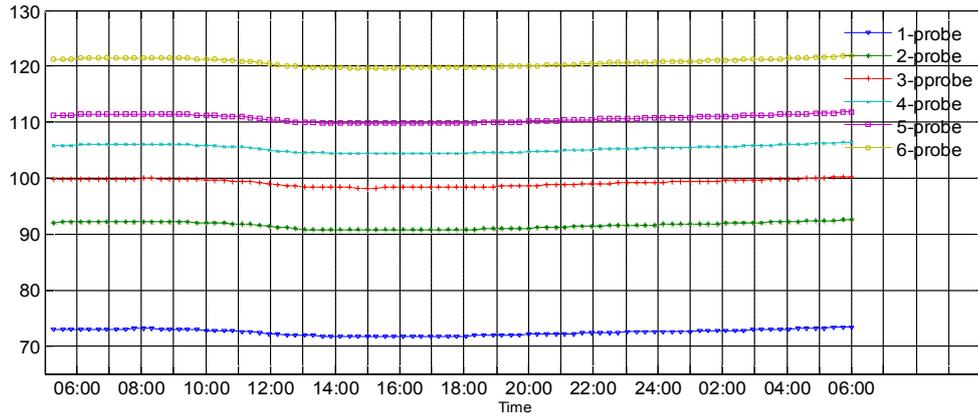


Fig. 77 Variation copper rod grounding resistance for 7 electrode

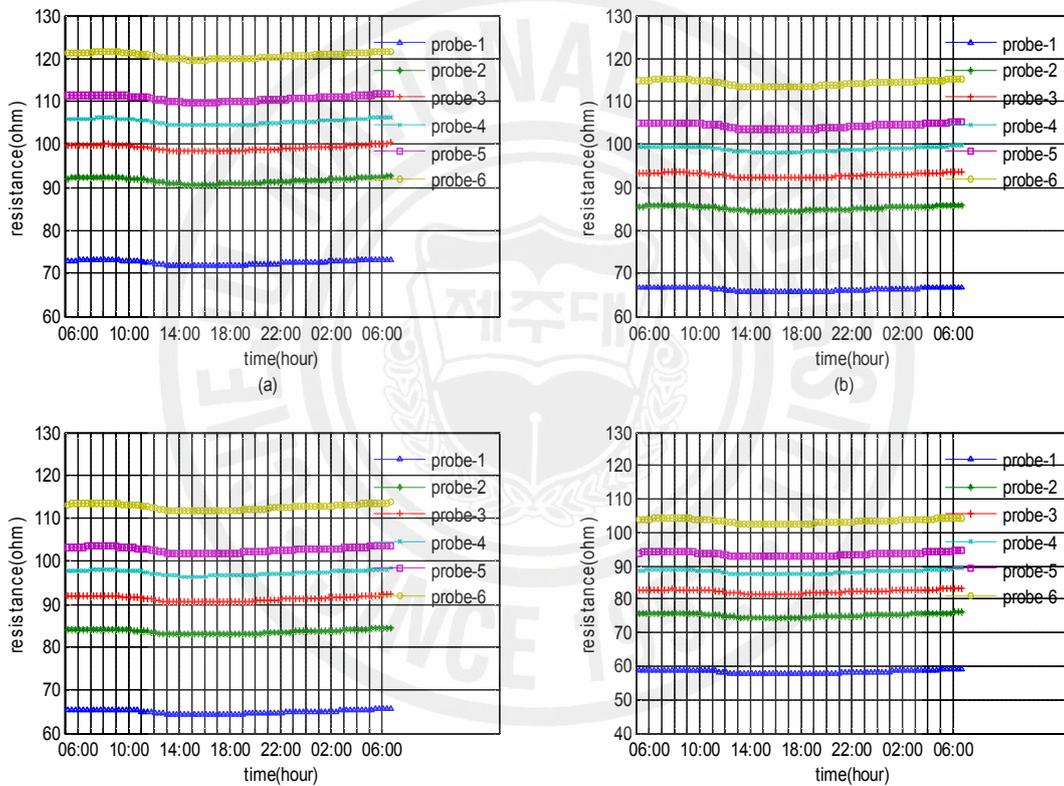


Fig. 78 Grounding resistance variation for several electrode (a) rod, (b) plate, (c) rod with reduction agent, (d) plate with reduction agent

Fig. 79 에 거리에 따른 접지전극들의 접지저항 변동을 나타내었다. 보조전극이 접지전극에 가까울수록 낮은 접지저항을 나타내며 거리가 증가함에 따라 접지저항값이 증가하게 된다. Table 8 에 최소값, 최대값, 평균값, 중간값, 최빈값에 대해 나타내었다.

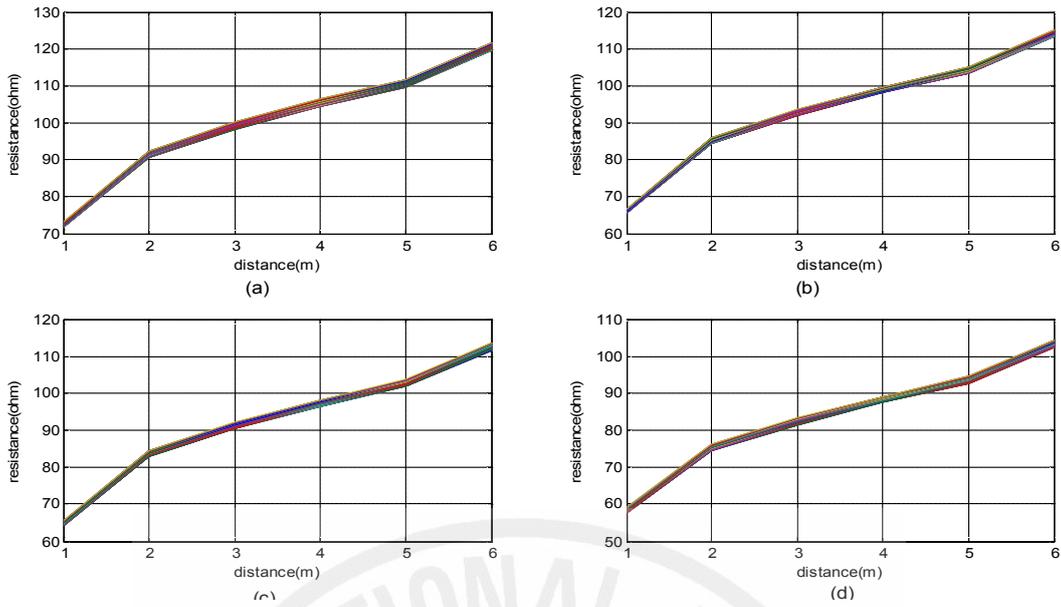


Fig. 79 Analysis of grounding resistance variation for forward (a) rod, (b) plate, (c) rod with reduction agent, (d) plate with reduction agent

Table 8 Comparison between the copper rod and copper plate

	Copper rod[Ω]						Copper plate[Ω]					
	1[m]	2[m]	3[m]	4[m]	5[m]	6[m]	1[m]	2[m]	3[m]	4[m]	5[m]	6[m]
Min	71.8	90.7	98.3	104.4	109.8	119.7	65.6	84.5	92.1	98.2	103.5	113.5
Max	73.3	92.5	100.3	106.4	111.8	121.8	66.8	85.9	93.7	99.8	105.2	115.2
Mean	72.47	91.54	99.23	105.3	110.7	120.7	66.19	85.16	92.84	98.94	104.3	114.3
Median	72.5	91.65	99.3	105.4	110.8	120.8	66.25	85.2	92.9	99	104.4	114.3
mode	71.8	92.2	98.4	104.5	109.8	119.8	65.7	84.5	92.1	98.2	103.6	113.5
	Copper rod with reduction agent[Ω]						Copper plate with reduction agent[Ω]					
	1[m]	2[m]	3[m]	4[m]	5[m]	6[m]	1[m]	2[m]	3[m]	4[m]	5[m]	6[m]
Min	64.3	82.9	90.5	96.5	101.9	111.8	57.7	74.5	81.6	87.5	97.7	102.5
Max	65.6	84.5	92.2	98.3	103.7	113.7	59.1	76.1	83.4	89.2	94.6	104.4
Mean	64.91	83.63	91.25	97.32	102.7	112.7	58.33	75.23	82.42	88.28	93.56	103.4
Median	65	83.7	91.3	97.4	102.8	112.7	58.4	75.3	82.5	88.35	93.65	103.5
mode	65.4	84.2	90.5	96.6	101.9	111.8	58.8	74.5	81.7	87.5	94.2	102.6

현장에 설치한 접지전극의 역방향으로 측정을 실시하여 3점 전위강하법에서의 보조전극 위치에 대한 시간변화를 Fig. 80에 나타내었다. 정방향 측정시와 거리에 따른 측정데이터가 변동이 생기게 된다.

Fig. 81은 현장에 설치한 접지전극의 역방향으로 보조전극을 선택하여 측정에 대한 보조전극 거리에 대한 접지저항 값을 나타내었다.

정방향과 비교하였을 때 저감제를 투입한 접지 동판이 접지저항이 가장 낮은 접지저항값을 나타냈으며 일반 동봉의 경우 가장 높은 접지저항 값을 갖게 되었다.

Table 9 에 최소값, 최대값, 평균값, 중간값, 최빈값에 대해 나타내었다.

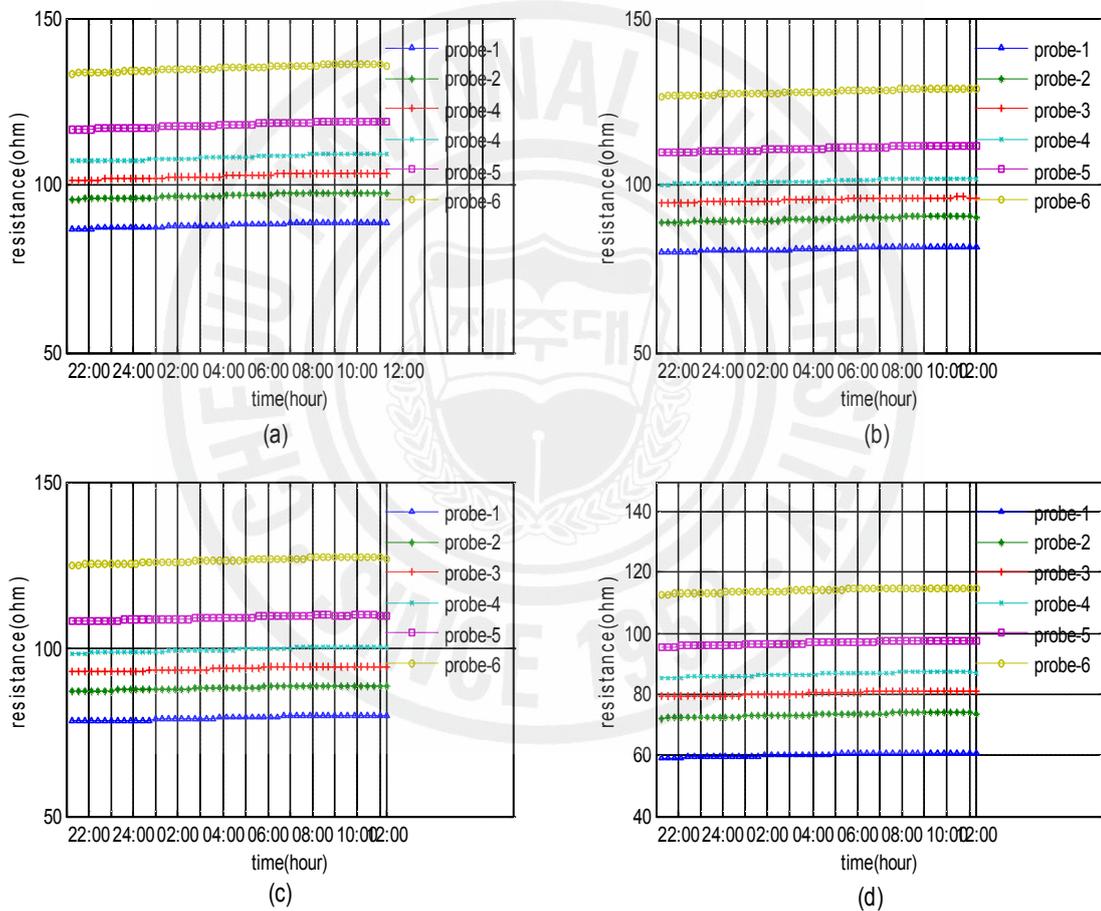


Fig. 80 Grounding resistance variation for reverse direction (a) rod, (b) plate, (c) rod with reduction agent, (d) plate with reduction agent

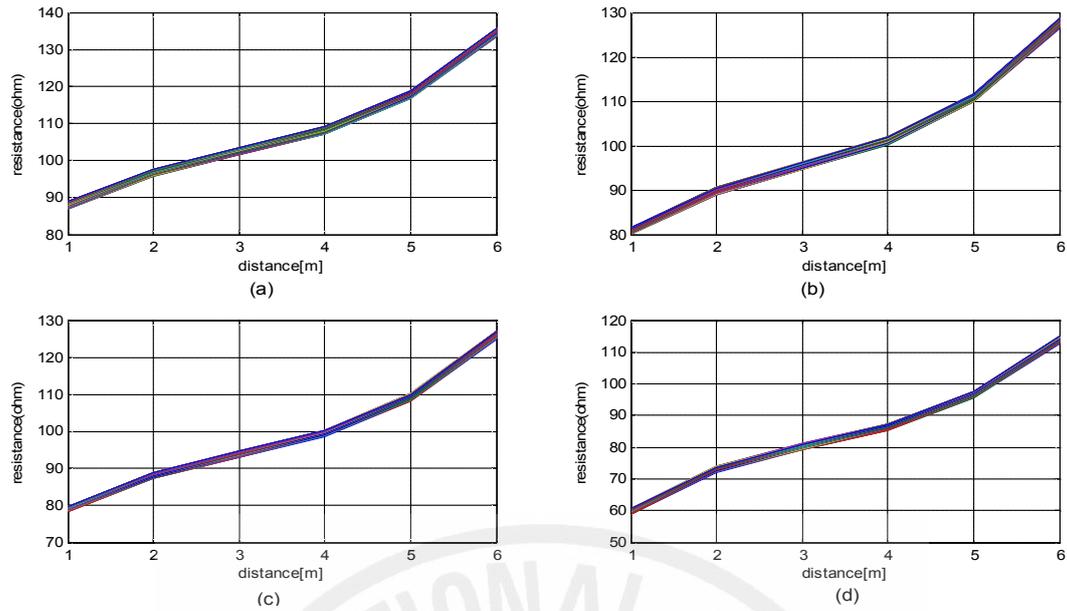


Fig. 81 Analysis of grounding resistance variation for reverse (a) rod, (b) plate, (c) rod with reduction agent, (d) plate with reduction agent

Table 9 Comparison between the copper rod and plate (reverse.)

	Copper rod[Ω]						Copper plate[Ω]					
	1[m]	2[m]	3[m]	4[m]	5[m]	6[m]	1[m]	2[m]	3[m]	4[m]	5[m]	6[m]
Min	86.9	95.7	101.5	107.1	116.6	113.3	80.1	88.9	94.7	102.2	109.8	126.5
Max	88.8	97.8	103.6	109.2	118.9	135.9	81.6	90.6	96.4	102	117.7	128.7
Mean	88.01	96.91	102.7	108.3	117.9	134.9	80.92	89.81	95.61	101.2	110.8	127.9
Median	88.05	96.95	102.7	108.3	118	134.9	80.9	89.8	95.65	101.2	110.8	127.8
mode	88.8	97.7	103.5	109.2	118.8	135.9	81.6	90.5	96.3	101.9	111.6	128.7
	Copper rod with reduction agent[Ω]						Copper plate with reduction agent[Ω]					
	1[m]	2[m]	3[m]	4[m]	5[m]	6[m]	1[m]	2[m]	3[m]	4[m]	5[m]	6[m]
Min	78.3	87.3	93	98.6	108.2	124.9	59.1	72.1	79.2	85.4	95.6	112.7
Max	79.9	89	94.8	100.4	110.1	127.2	60.9	74	81.1	87.4	97.7	115.1
Mean	79.28	88.26	94.06	99.66	109.3	126.3	60.2	73.27	80.32	86.58	96.89	114.3
Median	79.35	88.3	94.1	99.7	109.3	126.3	60.25	73.3	80.35	86.65	96.95	114.3
mode	79.9	88.9	94.7	100.4	110.1	127.1	60.9	74	81	87.3	97.6	115.1

iii) 20 전극 접지저항 취득시스템

전극 P에 대한 안정된 접지저항 변화를 확인하기 위해 접지체 E 와 C 전극을 20[m]이상의 거리로 이격시킬 수 있는 거리를 확보한 후 대지저항률 분석에서 측정선 2의 최적의 선정 지점과 측정선 3에서의 저항률이 높은 지점에 대한 검증용 접지동봉을 측정선 2와 측정선 3 사이의 0.1[m] 간격을 두고 측정선에 수직인 방향으로 설치하고 각각의 보조전극 P의 접지저항 값을 측정한 결과를 Fig. 82에 나타내었다. 검증용 접지전극의 재료 및 거리는 동일하며, 19개의 보조전극 데이터를 순차적으로 시간에 따라 자동으로 측정하여 총 데이터 수는 19×15×4인 1140데이터 수를 갖는다. Fig. 83 (a)와 (b)는 측정선 2에서 낮은 대지저항률을 보인 지점의 접지저항 변동이고, (c)와 (d)는 측정선 3에서 분석된 높은 대지저항률 지점의 접지저항 변동을 나타낸다.

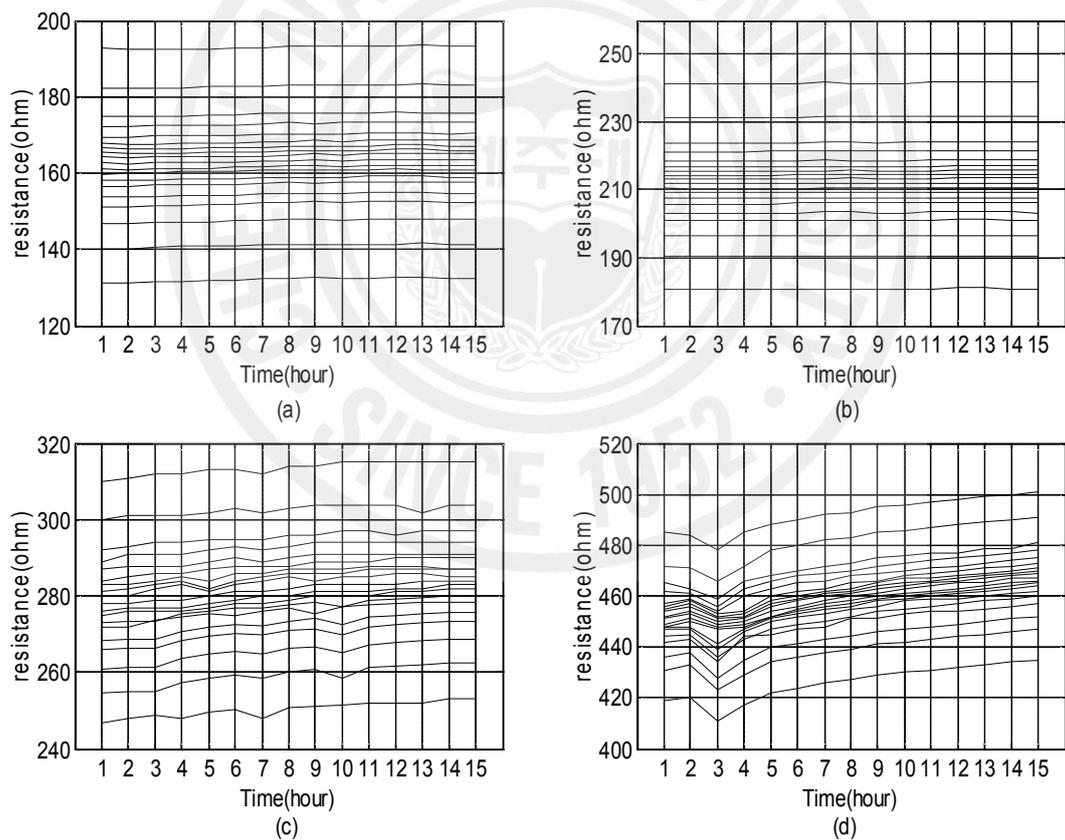


Fig. 82 Grounding resistance variation for number of times (a) case 1, (b) case 2, (c) case 3, (d) case 4

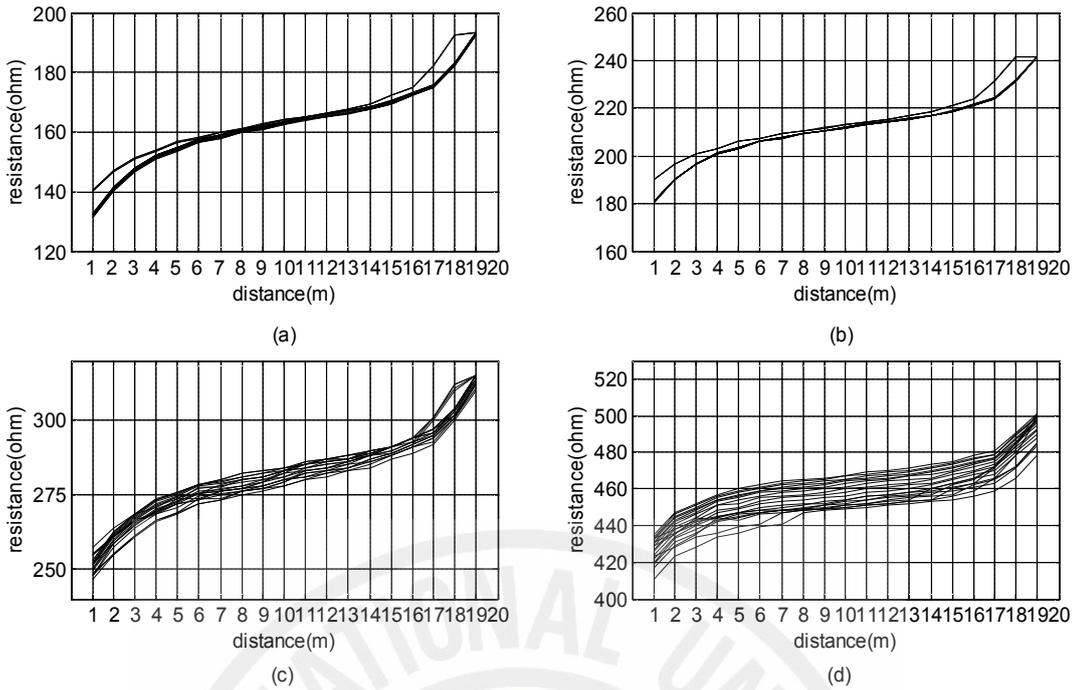


Fig. 83 Analysis of grounding resistance variation for 20 electrode system (a) case 1, (b) case 2, (c) case 3, (d) case 4

접지저항은 대지의 수분함량에 의해 변화를 하는데 분석한 대지모델에서의 수분함량에 따른 변화를 검증하기 위해 우천 시와 맑은 날의 접지저항 데이터를 취득하여 비교 분석한 결과를 Fig. 84에 나타내었다. 대지의 수분 함량이 증가로 인해 각각의 보조전극에서 접지저항이 증가하였고 접지저항 선정의 기준이 되는 61.8[%] 접지저항 변동은 13[Ω]정도의 변동 폭을 보였다. Table 10은 우천 시와 맑은 날의 접지저항 값과 접지저항 값에 대한 차이를 나타내었다.

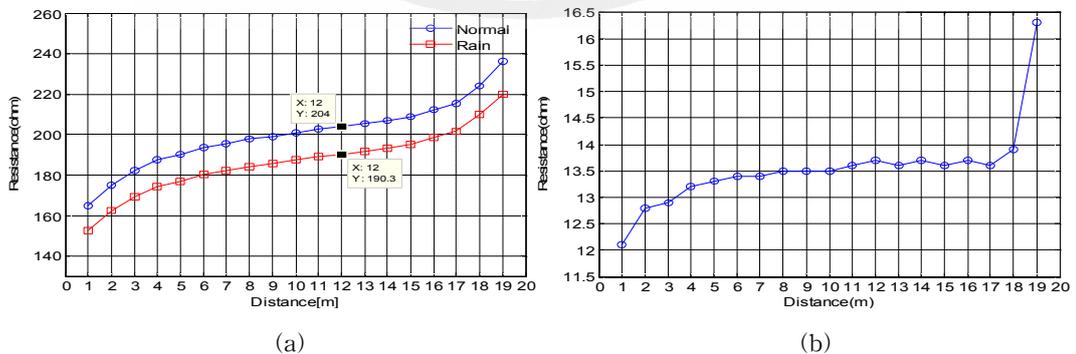


Fig. 84 Grounding resistance variation for weather (a) fine and rain day, (b) difference grounding resistance

Table 10 Grounding resistance difference comparison of fine and rain day

Distance[m] \ Status	Fine day resistance [Ω]	Rain day resistance [Ω]	Distance value [Ω]
1	164.9	152.8	12.09
2	175.2	162.4	12.79
3	182.2	169.3	12.89
4	187.6	174.4	13.19
5	190.4	177.1	13.30
6	193.7	180.3	13.39
7	195.5	182.1	13.40
8	197.7	184.2	13.5
9	199	185.5	13.5
10	200.9	187.4	13.5
11	202.8	189.2	13.60
12	204	190.3	13.69
13	205.4	191.8	13.59
14	206.9	193.2	13.70
15	208.9	195.3	13.59
16	212.2	198.5	13.69
17	215.2	201.6	13.59
18	224	210.1	13.90
19	236.3	220	16.30

나) 독립형 접지저항 취득시스템 접지저항 측정

현장의 대지저항률을 분석하기 위해 측정선 1~3을 사용하였는데 각각의 경우 최적의 접지 시공 지점이 다르기 때문에 보조전극의 설치를 이동 시켜야 한다.

본 논문에서 제안한 독립형 접지저항 취득시스템을 사용하여 각 측정선에서 상층의 안정적인 대지저항률 분포를 보인 지점에 대해 실험용 접지전극을 설치하고 각각의 전극그룹에 대한 접지저항을 값을 Fig. 85~87에 나타내었다.

Fig. 85~86은 측정전극을 18개를 사용한 경우로, 각 측정용 전극에 대해 측정 횟수는 25이며, 접지저항이 최대값 그래프와 최소값 그래프의 차를 나타내는 접지저항 변동률이 적은 것을 알 수 있다.

Fig. 87은 온·습도 센서를 동작시켜 접지저항 데이터를 취득한 경우를 나타내었다.

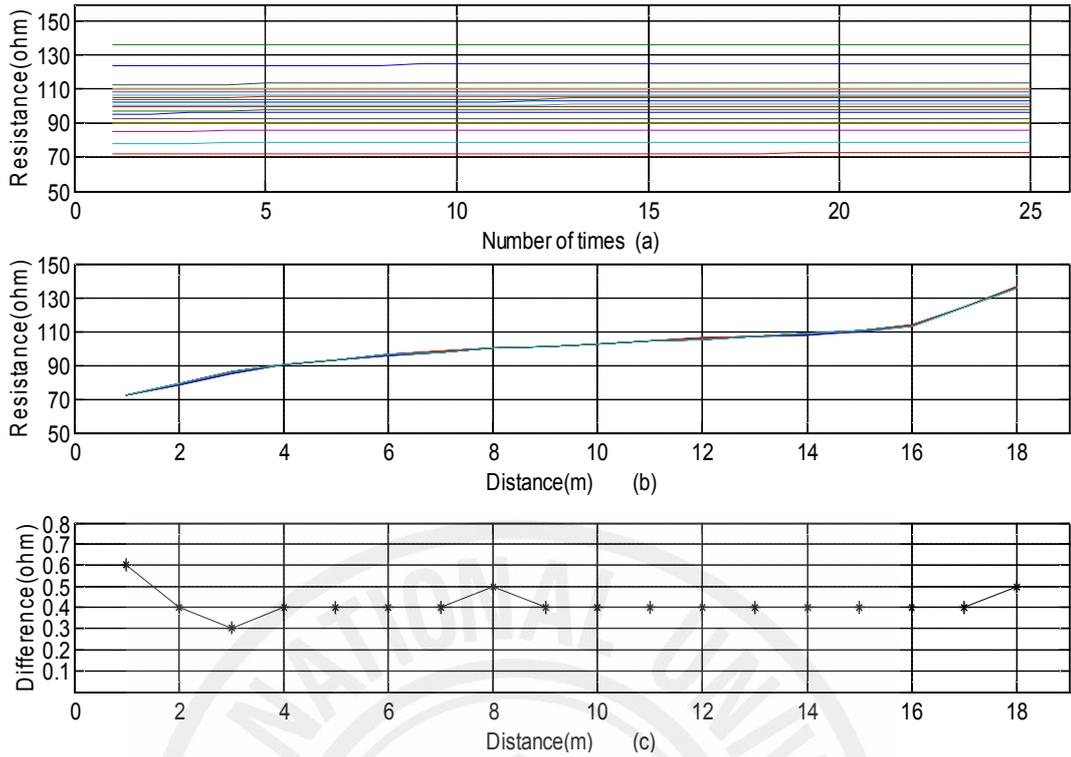


Fig. 85 Analysis of grounding resistance variation for stand alone electrode group 1

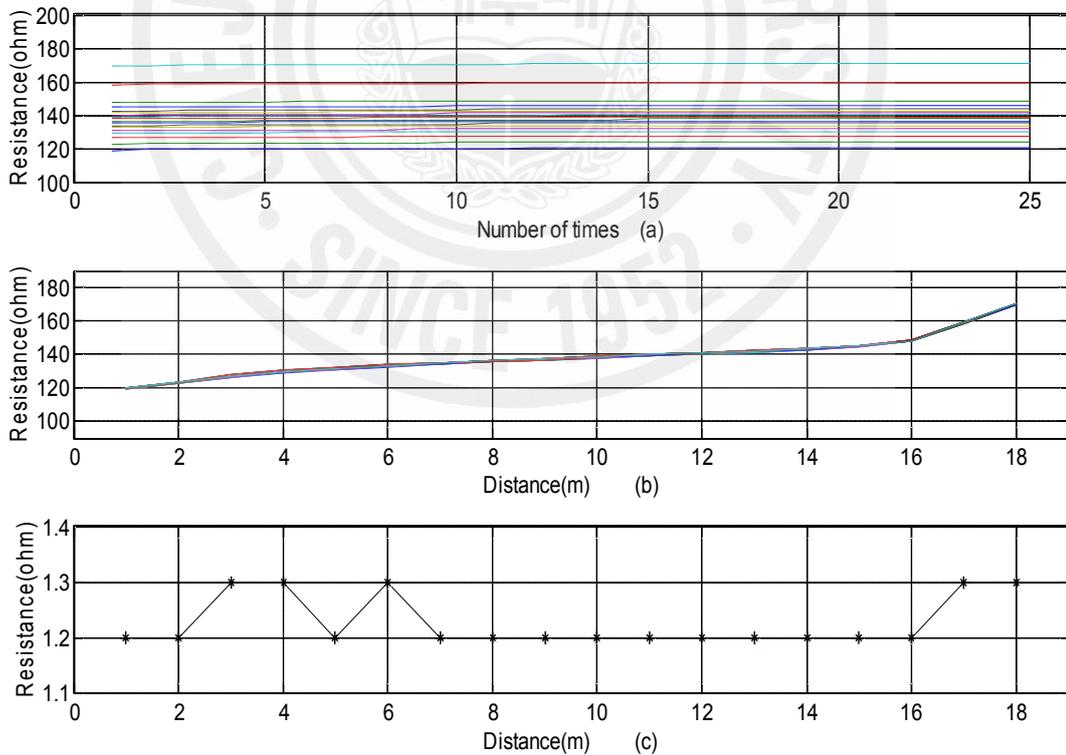


Fig. 86 Analysis of grounding resistance variation for stand alone electrode group 2

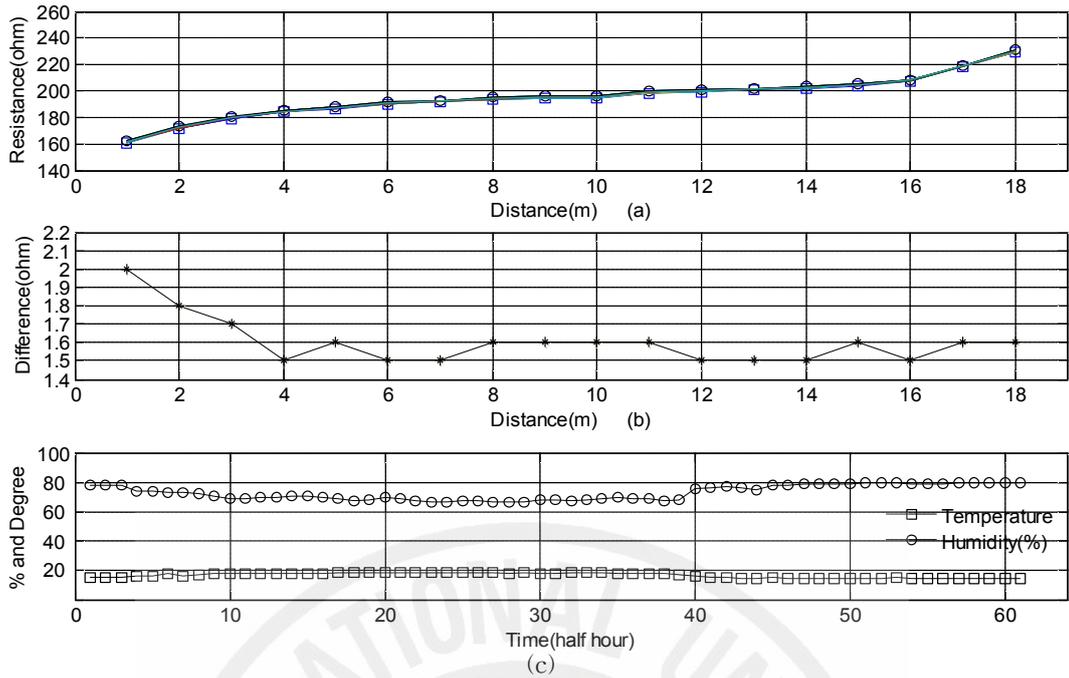


Fig. 87 Analysis of grounding resistance variation for stand alone electrode group 3

Fig. 88에 동절기에 맑은 날과 눈이 쌓인 날의 접지저항 취득 데이터를 나타내었다. 15 측정전극을 사용하였으며, 각각의 측정전극에 대한 측정횟수는 15이다.

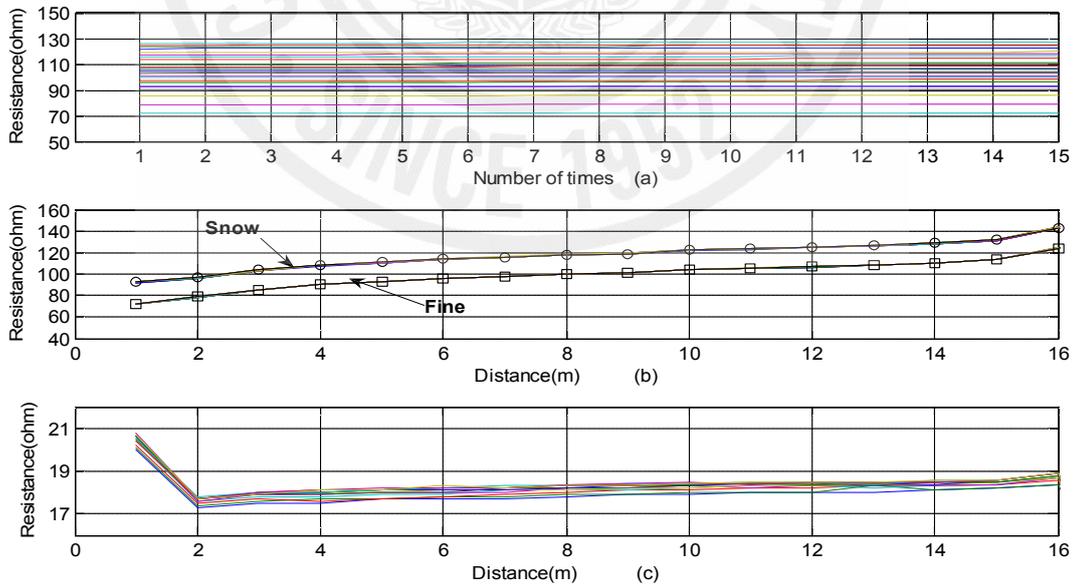


Fig. 88 Grounding resistance variation for weather
(a) fine and snow day, (b) difference grounding resistance

Table 11은 맑은 날과 눈오는 날의 각전극의 시간에 따른 접지저항값의 변동 값을 나타내었다. 각 측정전극에서의 접지저항의 변동 접지전극에 가장 가까운 전극의 변화가 가장 크게 나타나며 전체적으로 17[Ω]이상 변동이 나타난다.

Table 11 Grounding resistance difference comparison of fine and snow day

Resistance [Ω] Time [Hour]	1[m]	2[m]	3[m]	4[m]	5[m]	6[m]	7[m]	8[m]	9[m]	10[m]	11[m]	12[m]	13[m]
1	20	20.1	20.2	20.4	20.6	20.5	20.5	20.6	20.6	20.4	20.5	20.8	20.7
2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.6	17.7	17.7	17.7	17.7	17.7	17.8	17.7	17.7
3	17.5	17.6	17.7	17.8	17.9	17.9	17.9	17.9	18	18	18	18	17.9
4	17.5	17.7	17.6	17.8	17.9	18	17.9	18	18	18.1	18	18.1	18.1
5	17.7	17.7	17.7	17.9	18	18	18	18.1	18.1	18.1	18.1	18.2	18.1
6	17.7	17.8	17.8	17.9	18	18.1	18	18.1	18.2	18.2	18.2	18.2	18.3
7	17.7	17.8	17.9	18.1	18	18.1	18.2	18.1	18.2	18.2	18.3	18.2	18.2
8	17.8	17.9	18	18.1	18.2	18.1	18.2	18.2	18.3	18.3	18.3	18.4	18.3
9	17.9	17.9	18.1	18.1	18.2	18.2	18.2	18.3	18.3	18.3	18.4	18.4	18.3
10	17.9	18	18.1	18.2	18.3	18.2	18.3	18.3	18.4	18.4	18.4	18.5	18.4
11	18	18	18.2	18.3	18.2	18.3	18.4	18.4	18.4	18.4	18.5	18.4	18.5
12	18	18	18.2	18.3	18.3	18.3	18.4	18.5	18.4	18.5	18.5	18.5	18.5
13	18	18.3	18.3	18.2	18.3	18.4	18.3	18.4	18.4	18.5	18.4	18.5	18.5
14	18.1	18.1	18.3	18.3	18.3	18.4	18.5	18.4	18.5	18.5	18.6	18.5	18.6
15	18.2	18.2	18.4	18.4	18.4	18.5	18.5	18.6	18.5	18.6	18.6	18.6	18.6
16	18.4	18.4	18.6	18.7	18.7	18.7	18.8	18.9	18.8	18.9	18.9	18.9	18.9
17	6.8	6.9	7.1	7.1	7.2	7.1	7.2	7.3	7.3	7.3	7.3	7.4	7.3

다) 수직형 접지측정

현장에 수직형 접지저항을 측정하기 위해 보링작업을 하고 현장에 수직형 전극을 설치하고 0.5, 0.6, 0.7, 0.8[m]지점에 대한 수직형 접지저항을 측정하였다. 측정된 결과를 Fig. 89에 나타내었다. 측정용 전극을 통해 높은 접지저항이 나타났으나 수직 층에 대한 일정 패턴의 값을 나타내었다.

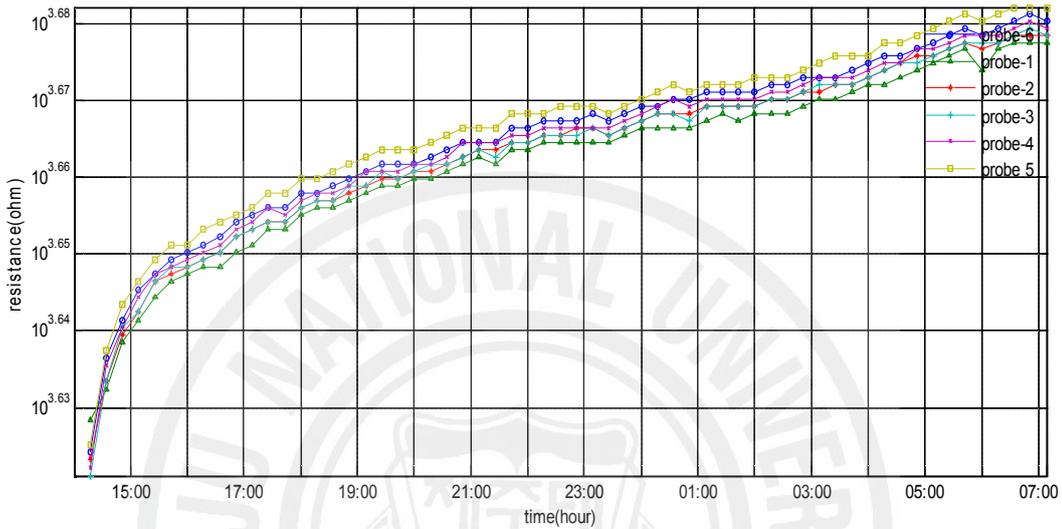


Fig. 89 Grounding resistance of Vertical type electrode variation

측정된 4개의 접지전극에 취득된 6개의 각각 데이터를 분석해본 결과 0.8[m] 깊이의 VP1 지점과 0.5[m] 깊이의 VP4 위치에서 층상이 비슷한 접지저항 값을 나타내었다. 4전극 데이터에 대한 분석결과를 Fig. 90에 나타내었다. 측정전극 1과 4는 같은 층을 가지고 있으며 상대적으로 측정전극 3과 4에서는 저 접지저항 값을 나타내고 있다. 수직형 전극을 통한 시간 변화에 대한 데이터를 각 전극에 대해 수직형 대지모델로 나타내면 Fig. 91과 같이 나타낼 수 있다.

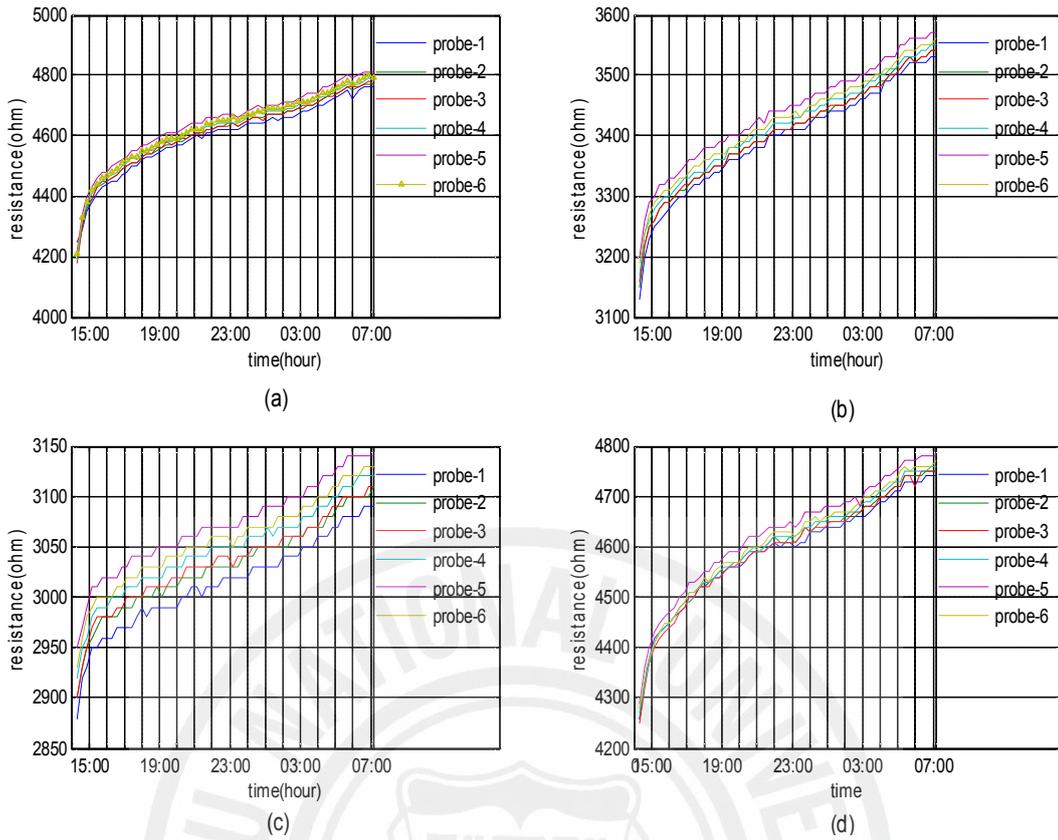


Fig. 90 Analysis of vertical type electrode

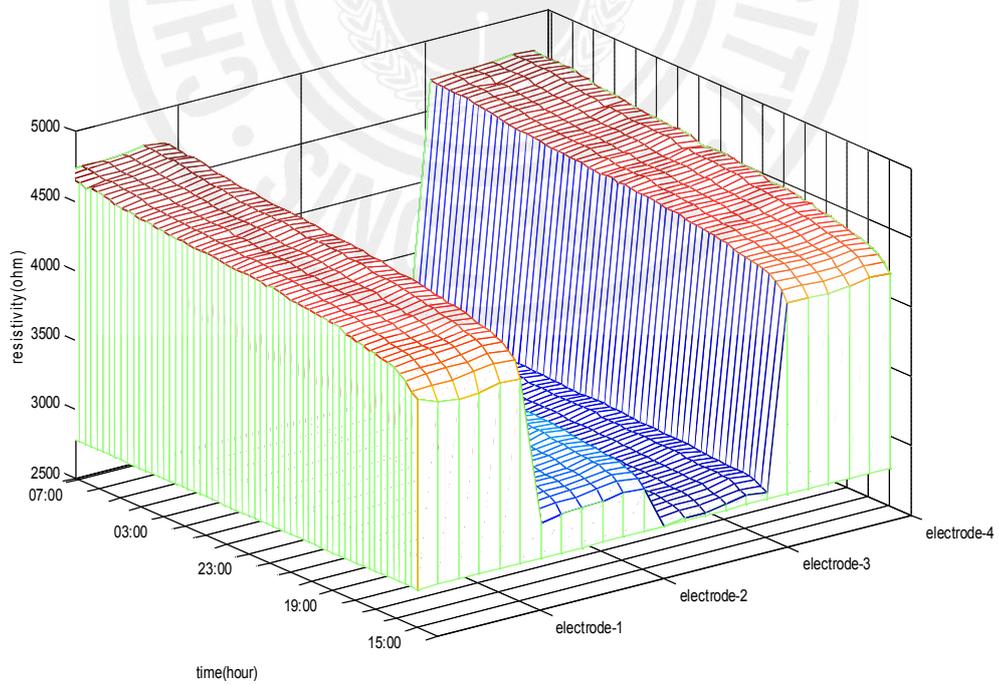


Fig. 91 Vertical type earth model

4. 결과고찰

본 논문에서는 동일한 장소에서 28전극을 사용하여 측정선을 3곳으로 나누어 Wenner 배열, Schlumberger 배열, dipole-dipole 배열에 대한 측정을 수행하였다. Wenner 배열의 경우 측정 포인트가 가장 적기 때문에 상대적으로 측정시간에 대한 장점을 가지고 있으나 대지의 하층의 대지저항률이 상승함에 따라 상층의 낮은 저항률의 측정이 거의 되지 않았다. Schlumberger 배열의 경우 Wenner 배열과 비슷한 측정패턴을 보였으나 하층이 대지저항률이 증가하여도 전위전극을 고정시켜 전류전극을 이동시켰을 때 상층의 낮은 저항률도 측정이 가능하였다. Dipole-dipole 배열의 경우 전극의 간격을 1[m]로 고정시켜서 측정을 하였기 때문에 다른 전극배열에 비해 낮은 깊이의 측정이 이루어졌으며 동일 지역에서의 측정에서 다른 전극배열에 비해 상층의 낮은 저항률에 대한 측정이 고려되었다. 하층의 대지저항률이 증가하여도 상층의 낮은 저항률이 나타남을 확인하였다.

각각의 전극배열에 대한 측정에 대한 전기영상기법 알고리즘에 대한 비교를 살펴보면 Gauss-Newton 방법이 전반적으로 우수한 성능을 나타내었으며 특히 대지의 저항률이 증가한 지역에서의 분석결과 다른 알고리즘에 비해 특히 성능이 우수하였으며, 측정에 대한 대지의 변동이 적을수록 기존의 $\rho-a$ 곡선 분석에서 나타나는 층상의 대지모델을 확인할 수 있다. 각 측정 포인트에서의 수직적인 저항률 곡선의 간격이 좁을수록 대지는 컴퓨터 시뮬레이션 상에서 살펴보았던 층상에 가깝게 나타났고 간격이 커지거나 깊이에 따른 대지저항률 곡선의 형태가 복잡한 형태의 경우 암반이나 다른 대지내의 이상 물체의 영향으로 층상구조를 나타내지 않는다.

전기영상기법을 이용하여 동일지역에 대한 각기 다른 구조를 갖는 대지 구조를 분석하여 최적의 위치를 선정하여 접지를 시공하게 되는데, 선정에 대한 검증 을 위하여 일반 동봉과 동판, 저감제를 투입한 동봉과 동판의 경우에 대해 실시간 접지저항 측정시스템을 통해 시간에 따른 접지저항값을 비교하였다. 측정의 정확성을 기하기 위해 보조전극을 다수 설치하여 각각에 대한 데이터를 취득하여 분석한 결과 저감제 투입한 동판의 경우에 가장 낮은 접지저항값과 동봉의 경우에 가장 높은 접지저항값을 나타내었다. 이는 전기영상기법을 이용한 분석에

서의 최적의 위치 선정이 적절했음을 의미하며, 또한 맑은 날과 우천 시, 눈오는 날에 대한 접지저항을 비교한 결과 13[Ω]과 17[Ω]이상의 차이를 보이고 시간적인 접지저항 측정을 통해 접지저항 변동을 최소화 시킬 수 있는 접지 설계가 이루어져야 한다.

전기영상기법을 사용한 대지분석에서 대지모델의 상층은 낮은 대지저항률값을 갖는 것을 확인 할 수 있었다. 그러나 전극간격을 고려할 때 접지전극이 설치될 지점부근에 이상지점이 발생할 수 있으므로 수직형 접지저항을 측정하여 유사한 저항 값을 갖는 경우에만 동일 토양이라 가정할 수 있는데, 현장 측정결과 수평형 측정에서 비슷한 형태의 저항률을 나타낸 지점에서도 깊이에 따라 대지가 포함된 토양성분의 차이를 확인할 수 있었다.

본 논문에서 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

현장에 설치한 다 전극을 사용하여 3가지 측정법을 통해 측정 데이터를 취득하고, 전기영상기법 알고리즘을 통한 분석을 통해 동일 지역 중 최적의 시공지점을 선정하였다. 그리고 적합한 접지전극의 설계와 시공은 선정된 지점에 대한 수직적 측정을 통해 깊이에 대한 이상지점이 발생을 확인한 후 수행하였다. 마지막으로 접지공사의 적합성은 신뢰도 높은 접지저항을 측정하여 시간에 따른 접지저항의 변동을 확인하여 평가하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 비균질한 대지를 대상으로 접지를 설계할 때에 필요한 대지모델을 전기영상기법을 이용하여 2차원 영상으로 복원하고 대지저항률을 결정함으로써 최적의 접지설계와 접지 시공지점에 선정하는 방법을 제안하였다. 또한, 전극배열에 따른 대지모델과 겘보기저항률로부터 대지구조를 분류하는 알고리즘의 성능을 비교하였다. 그리고 분석된 대지모델을 기반으로 하여 접지를 시공하여 보조전극의 위치를 변화시켜 신뢰도 높은 접지저항과 시간에 따른 접지변동을 측정할 수 있는 방법을 제안하였다. 이상과 같은 연구 결과들을 토대로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

i) 다양한 전극배열에 대한 대지구조에 대한 분석

제시한 방법은 대지파라미터를 2차원으로 나타내므로 대지를 균질한 2층 또는 다층구조라는 전제하에 대지파라미터를 결정하는 분석에 비해 다양한 대지구조에 대해 적용할 수 있었고, 특히 수직 다층구조의 경우 설계 값과 실제 값과 차이를 줄일 수 있다.

ii) 전기영상기법을 통한 대지구조에 대한 분석

전기영상기법에서 불균질한 지반의 대지저항률 분포에 대한 영상복원을 위해 반복적 역산 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 Gauss-Newton 알고리즘, TSVD, SIRT 및 TLS 알고리즘을 사용하여 대지에 대한 전기영상기법을 통한 영상복원을 수행하였으며 기존의 접지측정 및 해석에 비하여 대지의 수평과 수직 구조에 대한 특정지점 선정하는데 뛰어난 성능을 나타내었다. Gauss-Newton 알고리즘이 비교적 우수하게 동작함을 확인할 수 있었고 제시한 방법들을 실제 현장에 적용하기 위해서는 사용되는 역산 알고리즘의 민감도와 수렴성 등에 대한 추가적인 고려가 있어야 하겠다.

iii) 유전알고리즘을 사용한 다층구조의 대지파라미터 선정

지능 최적방법인 유전알고리즘을 사용하여 측정된 대지저항률들로부터 대지파라미터들을 계산하는 방법을 제안하였는데, 유전알고리즘은 대지구조 파라미터를 추정하는데 좋은 성능을 보였고 대지구조에 대한 사전지식을 활

용할 수 있으므로 좋은 깊이와 대지저항률 값을 추정함을 확인할 수 있었다.

iv) 실시간 접지저항 취득시스템 구현

최적지점에 접지가 시공 되었는지를 확인하기 위해 수평형 접지저항 측정과 독립형 접지저항 취득시스템, 수직형 접지저항 측정시스템을 구현하였으며, 시간에 따라 접지저항값의 변동이 나타나며, 또한 보조전극의 선정에 따라 접지저항값의 차이를 나타내었다. 제안한 18~20전극 측정시스템을 통해 측정에 사용되는 보조전극들의 변화를 분석하여 정확한 접지저항값 데이터 취득 및 접지저항 변동폭을 확인할 수 있었고 접지저항측정을 원격지에서 수행 할 수 있는 원격접지저항 측정시스템의 구성을 통해 기후적인 영향으로 측정이 불가능한 우천 시, 눈내리는 날, 맑은 날 접지저항의 변동폭이 크게 나타남을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 방법을 기반으로 신뢰성 높은 데이터를 취득하고 현장의 대지구조를 정확하게 분석하면 시공 시 최적지점 선정이 가능하므로 공사비용을 절약할 수 있을 뿐 아니라 접지설계에서 중요한 비중을 차지하는 대지에 대한 정밀한 분석이 가능하여 접지시설물의 접지저항 예측, 보폭전압, 전위상승 등의 영향 분석의 데이터로 활용이 기대된다. 원격 실시간 접지저항 취득시스템을 사용하면 시간과 환경변화에 따른 접지저항 변동을 원격지에서 측정할 수 있으므로 우천이나 눈 등의 기상요건 특히 대지가 동결 시의 접지저항의 변동등과 같은 접지저항의 시간적, 환경적 변동요인을 분석이 할 수 있다.

본 논문과 관련하여 폭 넓은 적용과 신뢰성 확보를 위해서는 향후 다음 사항에 대한 추가 연구가 필요하다.

i) 다양한 전극배열을 통한 접근

전극배열에 대한 거리 간격의 조정을 통한 적응형 측정법으로의 개선

ii) 알고리즘을 통한 영상기법의 적용

노이즈가 추가되었을 때의 알고리즘의 성능평가

ii) 다전극 시스템을 사용한 비용 및 시간의 절약

특정층을 연속하여 측정하여 원하는 층상에 대한 신뢰성 있는 데이터 취득 및 측정시간 단축을 위한 측정법

iv) 층상구조에 대한 검증

수직형 전극에 대한 전극 재료의 개선으로 측정시 정확한 데이터 취득에 관한 연구

v) 전기영상기법을 이용한 대지 모델을 통한 과도상태의 대지저항률과 접지저항 분석에 관한 연구



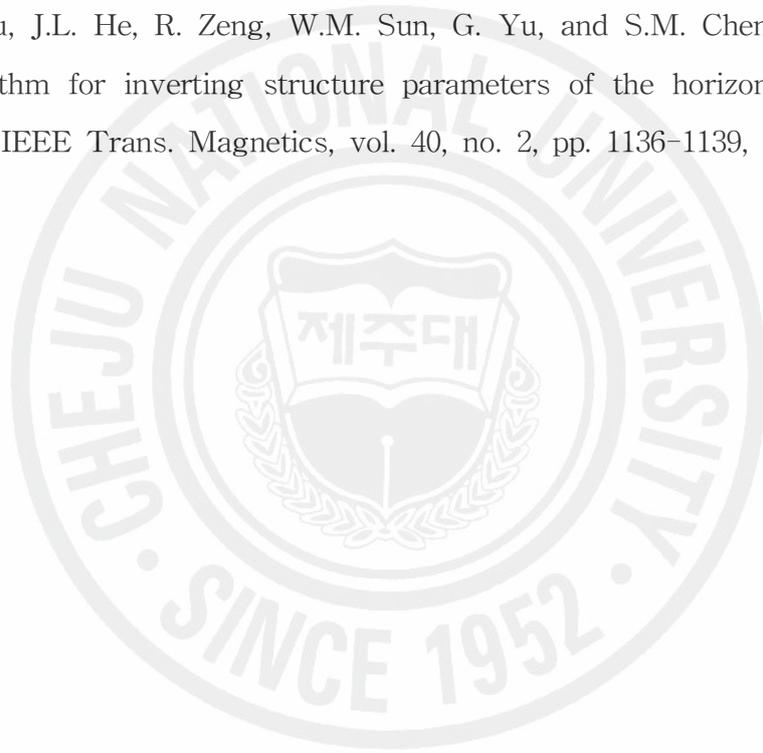
참 고 문 헌

- [1] IEEE STD-80, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, 1996.
- [2] 이형수, *접지기술입문*, 동일출판사, 1995.
- [3] F. Dawalibi, "Earth resistivity measurement interpretation techniques," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 103, pp. 374-382, Feb. 1984.
- [4] G. F. Tagg, *Earth Resistance*, George Newnes Ltd., 1964.
- [5] F. Dawalibi and D. Mukhedkar, "Optimum design of substation grounding in two-layer earth structure - Part II comparison between theoretical and experimental results," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-94, no. 2, pp. 262-266, March/April 1975.
- [6] 정길조, 김선구, 최중기, "축소형 변전소 접지효과 증대방안 연구, 전력연구원, 1998
- [7] E. D. Sunde, *Earth Conduction effects in Transmission system*, Dover Pub., 1968.
- [8] R. W. Moore, "An Empirical method of interpretation of earth resistivity measurement," *Trans. on A.I.M.E.*, 164, p. 197, 1945.
- [9] H. M. Mooney, E. Orellana, H. Pickett, and L. Tornheim, "A resistivity computation method for layered earth models," *Geophysics*, vol. 31, no. 1, pp. 192-203, 1966.
- [10] H. B. Dwight, "'Calculation of resistance to ground,'" *Elect. Eng.*, vol. 55, pp. 1319-1328, 1936.
- [11] J. R. Inman, J. Ryu, and S. H. Ward, "Resistivity inversion," *Geophysics*, vol. 38, no. 6, pp. 1088-1108, 1973.
- [12] A. A. R. Zhody, "A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves," *Geophysics*, vol. 54, no. 2, pp. 245-253, 1989.
- [13] F. Dawalibi and C. J. Blattner, "Earth Resistivity Measurement Interpretation Technique," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*,

- vol. PAS-103. no. 2, pp. 374-382, Feb. 1984.
- [14] F. P. Dawalibi and F. Donoso, "Integrated analysis software for grounding, EMF, and EMI," IEEE Comput. Appl. Power, vol. 6, pp. 19-24, 1993.
- [15] T. Takahashi and T. Kawase, "Analysis of apparent resistivity in a multilayer earth structure," IEEE Trans. Power Del., vol. 5, pp. 604-612, Apr. 1990.
- [16] T. Takahashi and T. Kawase, "Calculation of earth resistance for deep-driven rod in multi-layer earth structure," IEEE Trans. Power Del., vol. 6, no. 1, pp. 608-614, 1991.
- [17] M. H. Loke, *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies - A practical guide to 2D and 3D surveys*. Short training course lecture notes, University Sains Malaysia, 1997.
- [18] R. Herman, "An introduction to electrical resistivity in geophysics," Am. J. Phys., vol. 69, no. 9, pp. 943-952, 2001.
- [19] A. Dey, W. H. Meyer, H. F. Morrison, and W. M. Dolan, "Electric field response of two-dimensional inhomogeneities to unipolar and bipolar electrode configuration," Geophysics, vol. 40, no. 4, pp. 630-640, 1975.
- [20] A. C. Tripp, G. W. Hohmann, and C. M. Swift Jr., "Two-dimensional resistivity inversion," Geophysics, vol. 49, pp. 1708-1717, 1984.
- [21] M. H. Loke, and T. Dahlin, "A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion," Journal of Applied Geophysics, vol. 49, pp. 149-162, 2002.
- [22] C. R. Vogel, *Computational methods for inverse problems*, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.
- [23] L. R. Lines and S. Treitel, "Tutorial : A review of least squares inversion and its application to geophysical problems," Geophysical Prospecting, vol. 32, pp. 159-186, 1984.
- [24] A. Tarantola and B. Valette, "Generalized nonlinear inverse problems

- solved using least squares criterion,” *Rev. Geophys. Space Phys.*, vol. 20, pp. 219–232, 1982.
- [25] I. Brunner, S. Friedel, F. Jacobs, and E. Danckwardt, “Investigation of a tertiary maar structure using three-dimensional resistivity imaging,” *Geophys. J. Int.*, vol. 136, pp. 771–780 1999.
- [26] L. Yu, M. Chouteau, D. E. Boerner, and J. Wang, “On the imaging of radio-frequency electromagnetic data for cross-borehole mineral exploration,” *Geophys. J. Int.*, vol. 135, pp. 523–541, 1998.
- [27] 진강규, 유전 알고리즘과 그 응용, 교우사, 2000.
- [28] I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, “Estimation of multilayer soil parameters using genetic algorithm,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 1, pp. 100–106, 2005.
- [29] 이동수, 접지설계입문, 동일출판사, 1993.
- [30] 강인권, 최신 피뢰 시스템과 접지기술, 성안당, 2004
- [31] A. C. Tripp, G. W. Hohmann, and C. M. Swift Jr., “Two-dimensional resistivity inversion,” *Geophysics*, vol. 49, pp. 1708–1717, 1984.
- [32] G. A. Kyriacou, C. S. Koukourlis, J. N. Sahalos, and K. Batas, “Reconstruction of impedance images using a modified perturbation method,” *Clin. Physiol. Meas.*, vol. 13, pp. 91–94, 1992.
- [33] IEEE Std. 81, *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System*, 1983.
- [34] J. L. Del Alamo, “A comparison among eight different techniques to achieve an optimum estimation of electrical grounding parameters in two-layered earth,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 8, no. 4, pp. 1890–1899, 1993.
- [35] I. F. Gonos, *Transient behavior of grounding system*, Ph.D. dissertation, Nat. Tech. Univ. Athens, Greece, 2002.
- [36] P. J. Lagace, J. Fortin, and E. D. Crainic, “Interpretation of resistivity sounding measurements in N-layer soil using electrostatics images,”

- IEEE Trans. Power Del., vol. 11, no. 3, pp. 1349-1354, 1996.
- [37] H. Holland, *Adaptatin in Nature and Arificial Systems*, Ann Arbor, MI, Univ. Michgan Press, Athens, Greece, 1992.
- [38] I. F. Gonos, N. E. Mastorakis, and M. N. S. Swamy, "A genetic algorithm approach to the problem of factorization of general multidimensional polynomials," IEEE Trans. Circuits and Syst., pt. 1, vol. 50, no. 1, pp. 16-22, 2003.
- [39] B. Chen, *Theory and Arithmetic of Optimization*, Beijing, Tsinghus University Press, 1989.
- [40] J. Zou, J.L. He, R. Zeng, W.M. Sun, G. Yu, and S.M. Chen, "Two-stage algorithm for inverting structure parameters of the horizontal multilayer soil," IEEE Trans. Magnetics, vol. 40, no. 2, pp. 1136-1139, 2004.

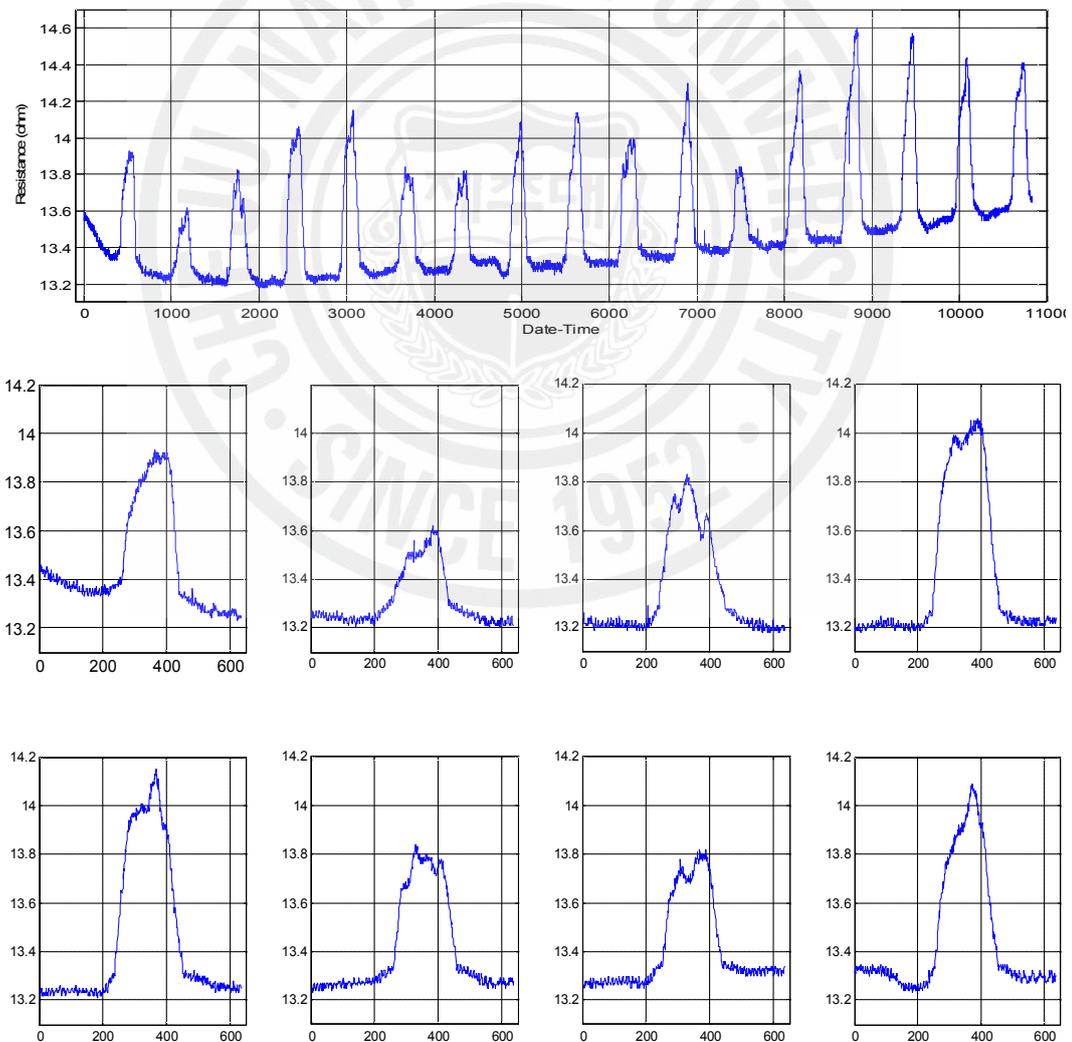


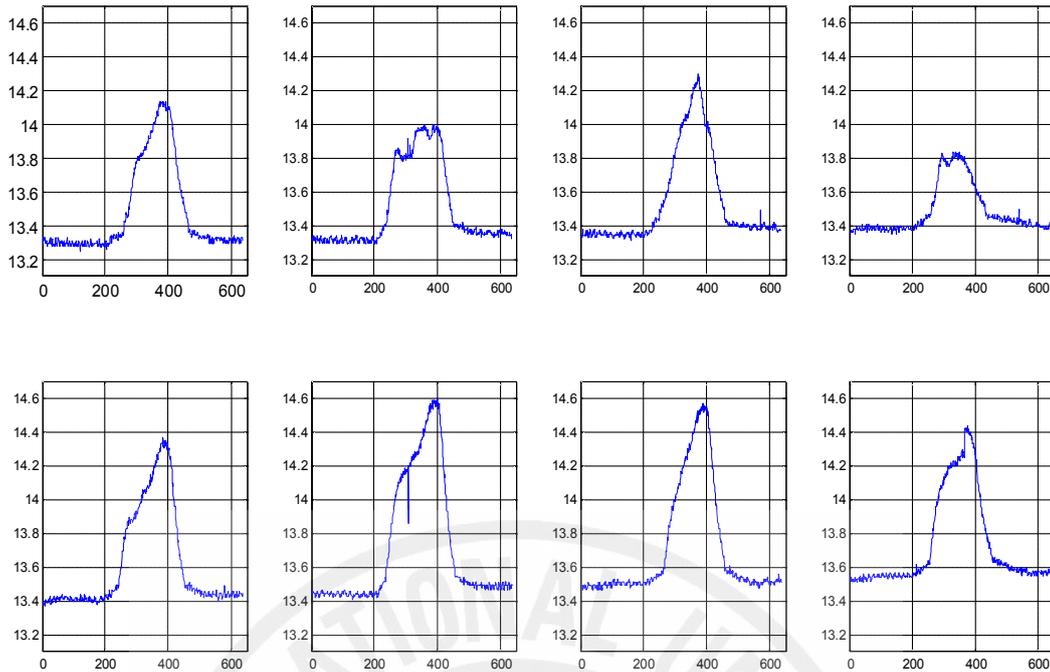
부록

부록 A. 클램프온 측정법을 이용한 접지저항 측정데이터

2006년 9월 24일 00시부터 2006년 10월 9일 00시까지의 접지저항 변동에 대해 나타내었다. 데이터 포인트 1000을 하루 주기로 변동은 주간에 접지저항이 상승하여 야간 또는 새벽에 접지저항변동이 안정됨을 볼 수 있다.

16일간의 접지저항률 변동은 일정 패턴을 가지고 주기적으로 변화 하였으며 최대값은 $14.6[\Omega]$ 최소값은 $13.18[\Omega]$ 을 나타내었고 점차적으로 접지저항값이 높아짐을 알 수 있다.

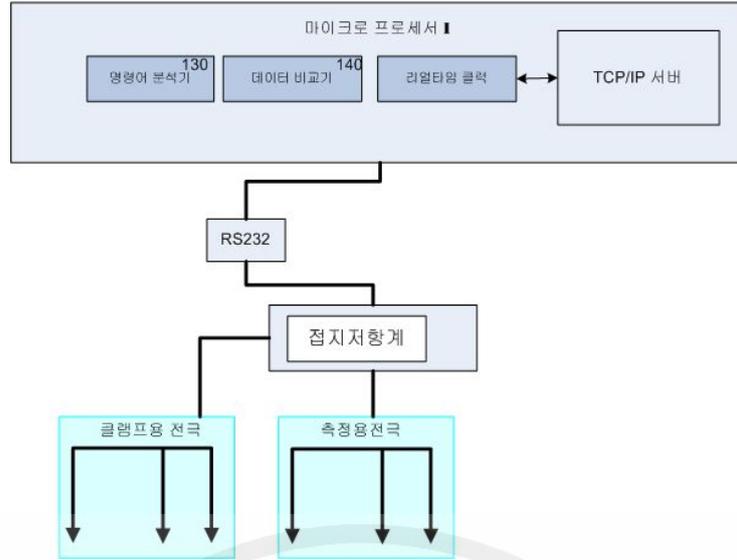




부록 B. TCP/IP 기반의 접지저항데이터 취득시스템

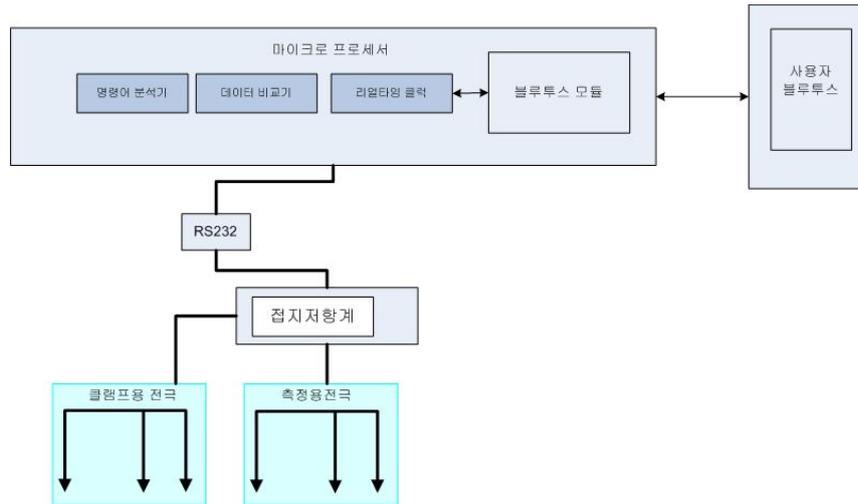
현장에 설치된 접지 전극에 대한 접지저항 데이터를 모니터링 하는 기술 중 가장 일반적인 방법인 TCP/IP 기반의 취득시스템 구현을 위해 가장 일반적으로 사용되는 인터넷 환경에서 임베디드 시스템을 활용한 웹서버를 구축하여 현장의 변화하는 접지저항 모니터링 시스템을 구현하였다. 기존의 인터넷 망을 사용하게 되면, 저 비용으로 접지저항 모니터링 시스템 구현이 가능하여 다양한 선택적 측정이 가능하며 통신망의 안정성과 신뢰성이 보장되는 장점을 가지고 있다.

마이크로프로세서I은 제어용으로써 명령어 분석기, 데이터 비교기, 리얼타임 클럭, 과 TCP/IP 임베디드 서버로 구성된다. 서버에 포팅 된 웹서버는 사용자의 접속이 가능한 웹서버로서 사용자가 선택적으로 메뉴를 선택할 수 있는 구조로 되어있다. 서버에서 RS-232 포트를 이용하여 설치된 접지저항계로 명령을 보내게 되면 접지저항계는 측정을 실시하게 되고 측정된 데이터는 서버의 DB로 들어가 사용자가 확인이 가능하게 된다. 사용자는 인터넷 환경이 제공되는 어느 곳에서도 접속하여 접지저항을 확인할 수 있게 된다.



부록 C. Bluetooth를 이용한 접지저항 취득시스템

현장에 설치된 접지저항 취득시스템의 경우 현장에 접근이 어려운 경우에 대해 근거리에서 사용자가 접근하여 블루투스로 접속하여 실시간 데이터를 취득하는 시스템 구현을 위한 것으로 전파간섭이 적고 보안성이 뛰어난 블루투스의 장점을 고려한 시스템이다. 차후 장비의 배치 변동 시 배선 재배치 공사 없이 설치가 가능하며 케이블공사가 힘든 장소에서도 구매 받지 않고 장치를 배치 할 수 있으며 공간 제약 없이 무선 모니터링이 가능하게 되었다. 기존의 유선 망 설치가 불가능한 지역에 설치하는 것이 바람직하다.



부록 D. SMS를 이용한 접지저항 취득시스템

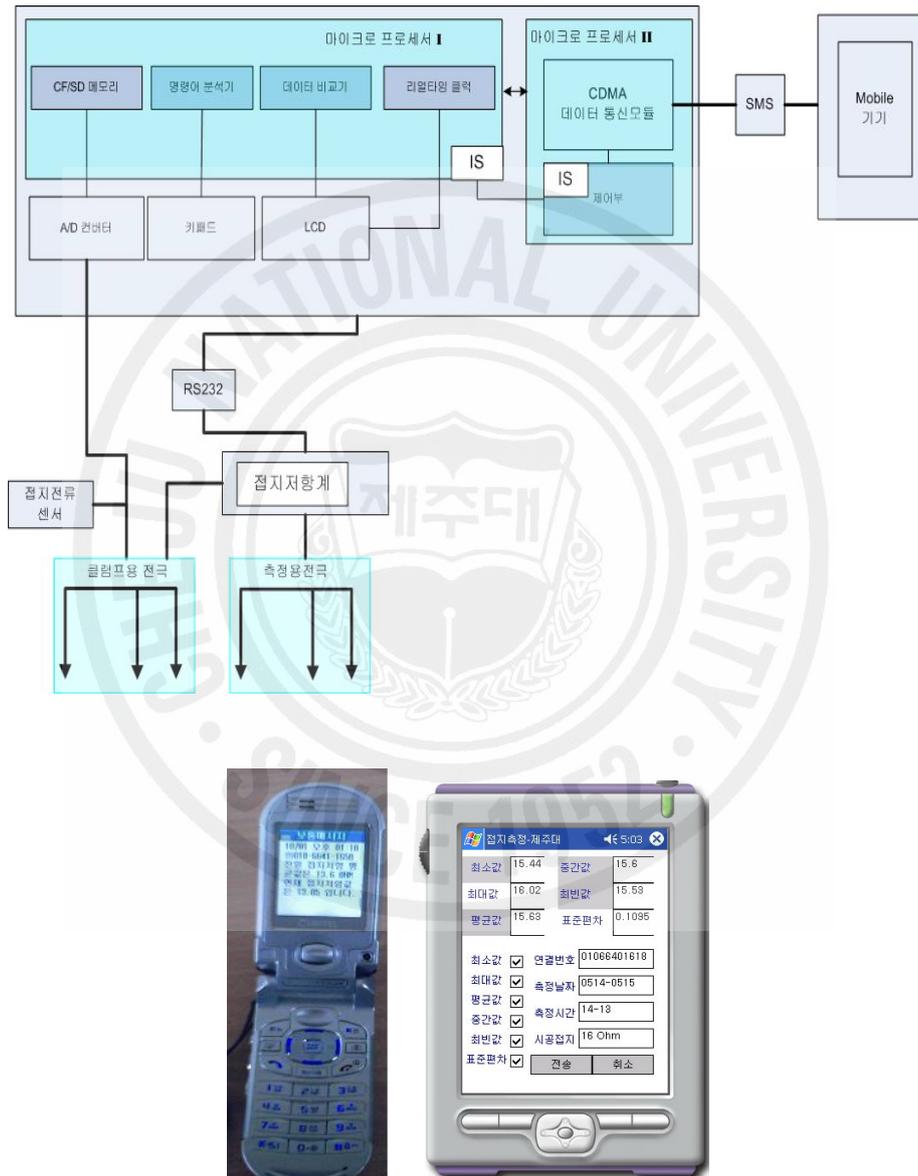
현장의 여건으로 인한 기존의 유선통신망 또는 무선통신망의 제약을 받는 경우 통신회사의 CDMA 통신망을 이용하여 실시간 접지저항을 취득하여야 한다. 그러나 국내 통신망의 경우 패킷 당 요금이 산정되어 인터넷 환경의 시스템은 비용적인 문제가 발생하게 되어 비용이 저렴하면서도 사용자가 선택적으로 측정 데이터를 취득할 수 있는 단문서비스(SMS)를 상용한 취득시스템을 구성하였다.

마이크로프로세서 I은 접지저항의 변화인자에 따른 측정된 접지저항을 산출하고, 마이크로프로세서II는 외부로부터 각 변화인자에 따른 접지저항의 경년변화를 마이크로프로세서 I로부터 입력받아 외부로 전송한다.

마이크로프로세서I은 접지저항계의 측정을 위한 명령어 전송과 수신을 분석할 수 있는 명령어 분석기와 측정데이터의 스케줄링에 따른 측정 데이터의 범위를 비교하는 데이터 비교기, 시간설정이 가능한 리얼타임 클럭, 측정데이터 저장용 CF/SD 타입의 메모리 구조를 포함하며 IS은 마이크로프로세서II의 제어부에서 전송된 인터럽트에 대한 루틴을 포함한다. 또한 접지전류센서에서 측정값은 A/D 컨버터를 통해 데이터 취득되며 키패드와 LCD는 현장에서 장치의 설정이 가능하게 한다.

마이크로프로세서II은 모바일기기에서 수신요구 SMS에 의한 수신 데이터의

처리를 하며 CDMA데이터통신모듈에서 수신하여 제어부에서 처리하게 되며 수신된 내용은 IS를 통해 마이크로프로세서I으로 전송되어 현재 측정 시에는 대기하고 비 측정 시에 CF/SD 메모리(120)에서 데이터 비교기를 통해 계산되며 사용자가 요구하는 데이터 값을 CDMA데이터통신모듈을 통해 SMS를 통해 모바일기에 전송하게 된다.



감사의 글

앞만을 보며 달려왔던 박사과정이 이제 막바지에 다다랐습니다. 석사과정에서 박사과정까지 6년여 동안 생활해온 연구실이 20여년 살아온 집보다 더 익숙해 버려 막상 떠나려 하니 섭섭한 마음이 앞섭니다. 실수도 많았지만 그 속에서 하나의 방법을 찾으려고 노력했던 시간들이 앞으로 살아갈 저의 날들에 많은 도움이 되리라 생각합니다.

그동안 따뜻한 격려와 가르침으로 부족한 저를 지도해 주신 김호찬 교수님께 글로 표현하지 못할 감사의 마음을 드립니다. 그리고 대학원 생활 동안 가르침을 주신 좌종근 교수님, 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김일환 교수님, 김세호 교수님, 그리고 바쁘신 중에도 논문심사를 맡아 주신 송실대학교 송경빈 교수님께도 감사의 마음을 전합니다. 또한 저에게 관심을 가져주시고 학업에 정진할 수 있도록 격려해 주신 산업정보대학 강경보 교수님과 고봉운 교수님께도 감사의 마음을 전합니다.

대학원 생활을 하며 아낌없는 조언을 해주었던 동춘이형, 삶의 지혜가 가득한 도진이형, 내가 생각한 아이디어에 대한 자문을 해주었던 승건이형 그리고 어려움을 이겨 나가기 위하여 함께 노력하고 즐거워했던 경윤, 재현, 성민, 백훈, 정보와 학과 사무실에 가면 늘 밝게 대해주던 상민이와 진엽이에게도 감사의 마음을 전합니다. 그리고 대학원 진학을 결심하게 만들어준 경욱이, 세상에서 가장 착한 정신적 지주 석훈이, 초등학교 때부터 대학까지 변함없는 우정을 지켜준 예비신랑 동길이, 후배의 장난도 허물없이 받아주던 경훈이형, 하드웨어 지존 재완이형, 전기실무에 대해 많은 조언을 해준 형국이, 해외출장으로 바쁜 와중에도 나를 잊지않고 격려해준 경표, 앞으로 진로에 대해 많은 얘기를 해준 승엽이와 이름을 모두 거론하지 못했지만 전기공학과 94학번 친구들과 사공회 친구들에게 고마운 마음과 영원한 우정을 전합니다.

.항상 가족처럼 저에게 이해와 격려를 아끼지 않으신 주영이 부모님께도 고마운 마음을 전합니다. 그리고 가장 가까운 곳에서 따뜻한 마음과 격려를 해준 주영이는 이제까지와 마찬가지로 앞으로도 나에게 큰 힘이 될 것입니다.

대학원 생활을 시작할 때부터 지금까지 늘 관심과 격려를 아끼지 않으신 형님

과 형수님, 그리고 뒤에서 항상 격려해 주고 따뜻함을 주었던 두 동생에게 감사의 마음을 전합니다

끝으로 오랜 학업으로 인하여 심려만 끼치고 자식의 도리를 제대로 다하지 못한 저에게 이 조그마한 결실을 맺을 수 있도록 항상 헌신적인 사랑으로 감싸주시고 격려해 주신 부모님께 존경과 사랑을 전합니다. 언제나 사랑으로 보살펴주시고 올바른 삶의 자세를 가르쳐 주셨기에 오늘의 제가 있음을 잊지 않고 고개 숙여 감사드립니다.

