

서지 전류에 의한 접지계의 과도응답 특성 및 접지저항 비교

신동호*, 김 응*, 정철희**, 조대훈**, 김필수***
 동국대학교 전기공학과*, 한국XIT(주)**, 대림대학***

A Comparison on the Resistance and characteristics of Transient response of Grounding Systems under Surge Currents

D.H.Shin*, Y. Kim*, Chul-Hee Jung**, Dae-Hoon Cho**, Pil-Soo Kim***
 Dongguk University*, XIT Korea. Ltd**, Daerim College***

Abstract - This paper presents the surges response of the grounding systems using frequency domain electromagnetic field analysis software package. The frequency and time domain performance of a building grounding systems subjected to a lightning strike is described and discussed. The computed scalar potentials is presented graphically as a function of spatial coordinates. A double exponential lightning surge current is injected at one corner or the building grounding systems. Time-variant response of rod, mesh and xit grounding systems under impulse currents have been obtained. This paper deals with the results of studies on the time variation of ground resistance in three grounding systems.

1. 서 론

정보 통신 및 전력전자 기술의 비약적인 발전으로 노이즈에 민감한 전자장비와 디지털 장비들의 사용이 급증하면서 고주파 및 뇌서지에 대한 관심이 증가하게 되었다. 전기엔지니어들의 관심도 전력주파수의 안정, 절연설계, 설비보전과 같은 고전적인 측면에서 서지 전류에 의한 전기적 장애 발생시 빌딩 내부의 전자·통신 및 제어설비의 보호와 안정적 운용의 확보 차원으로 뇌서지에 대한 과도응답 및 주파수응답 특성에 대한 연구가 이루어지게 되었다.^[1]

이미 많은 연구 결과를 통해 확인된 것처럼 수kHz ~ 수MHz의 주파수 성분을 가진 스위칭 서지나 뇌서지가 유입될 때 접지시스템의 리액턴스 성분으로 인해 접지 임피던스는 60Hz의 상용주파수 임피던스 특성과는 전혀 다른 반응을 나타낸다.^{[2][4]} 이러한 원인으로 인해 종래의 접지저항, 접촉 및 보폭전압과 같은 인명의 안전측면과 더불어 고주파 및 뇌서지가 유입될 때의 접지시스템별 과도응답 특성 연구가 필요하게 되었다. 그러나, 아직까지 뇌서지 및 고주파 특성에 따른 접지시스템의 성능을 다룬 연구가 부족한 실정이다.^{[9][11]}

본 논문에서는 뇌서지 및 고주파 서지로 인한 사소한 장애가 전력계통 및 전자, 통신시스템 운용과 유지에 막대한 지장을 초래할 수 있으므로 이에 대한 보호대책 차원에서 접지시스템의 과도응답특성을 비교 연구하였다. 접지계로 침입하는 뇌서지와 과전압에 대한 설비나 전자기기의 보호를 위해서는 접지전극의 형상과 규모에 따른 접지전위크기와 급준한 서지에 대한 접지 임피던스의 과도특성파악이 반드시 이루어져야 한다. 비교 분석의 정확성을 위해 산업 현장에서 많이 사용되는 여러 접지극 중에서 동봉, 메쉬, XIT(습식 전해질)접지극에 대하여 각각 동일 조건하에서 접지계를 설계하여 고주파 서지에 대한 접지시스템별 과도응답특성을 분석하였다.^[13] 또한, 정확한 시공 및 장기간에 대한 접지계의 안정성 확보가 중요하므로, 현장 시공을 통해 접지저항을 측정 비교하였고, 시간 변화에 따른 각 접지시스템의 접지저항변화를 분석하였다.^[12]

2. 본 론

2.1 현장 토양의 모델링

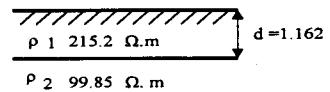


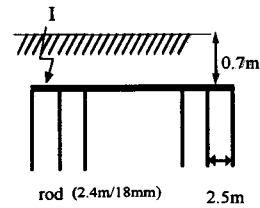
그림 2.1 수평 2-지층 모델링

Fig 2.1 Horizontal-2 Layer model

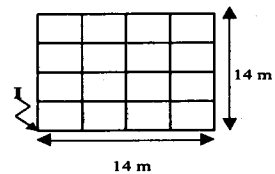
접지시스템 설계 및 현장 실험을 위해 선정된 토양의 대지저항률을 4-점 웨너법으로 실측하여 CDEGS의 RESAP을 이용하여 분석함으로써 대지를 그림2.1과 같은 정량적인 값을 갖는 토양 구조로 모델링을 하였다.^{[3],[6]}

2.2 접지시스템 설계

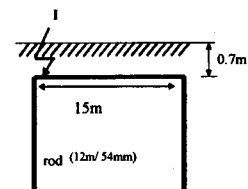
세 가지 접지시스템을 접지저항 5Ω이하가 되도록 각각 설계하였다.^{[3],[5],[8]}



(a) 일반동봉접지 구조



(b) 메쉬접지 구조



(c) XIT 접지(습식전해질) 구조

그림 2.2 뇌서지가 유입되는 세 가지 접지시스템
 Fig. 2.2 Grounding systems struck by a lightning surge

일반동봉 접지계는 18mm/2.4m 일반봉을 병렬로 2.5m씩 이격하여 15개를 병렬로 설계하였다. 접지극 매설 깊이는 0.7m, 접지 리이드선의 길이는 1m이다. 메쉬접지는 100mm 나동선을 면적14m×14m, 깊이0.7m, 간격 3.5m로 시공하도록 설계하였으며, XIT접지(습식 전해질)는 12m XIT 전해질 접지봉 2set를 간격15m로 이격하여 설계하였다.^[7] XIT 접지의 설계는 XIT 접지봉과 Lynconite충전제의 특성을 코팅된 도체로 보고 $\rho=0.025 \Omega \cdot m$, $t = 0.048m$ 을 넣어 CDEGS로 시뮬레이션 설계하였다.^[9]

2.3 주파수 영역의 접지 성능

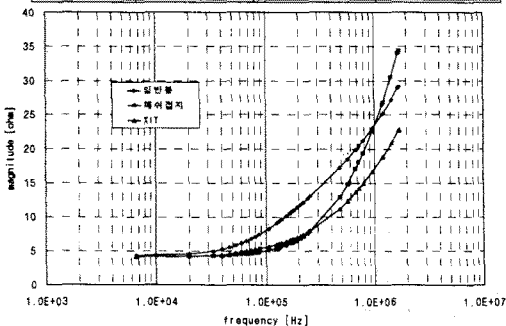
세 가지 접지계에 대한 주파수 응답 특성은 단위전류 $(1+j0.0)A$ 를 기준으로 시뮬레이션 하였고, 전체 주파수 응답 중 21개의 샘플링을 통해 응답 결과를 도표화하였다.

(1) 접지 임피던스 특성

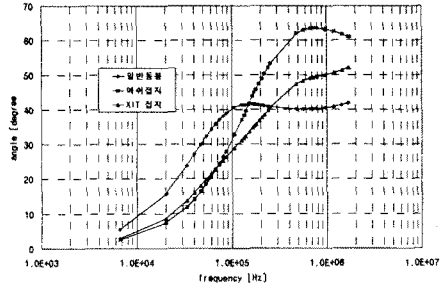
세 가지 형태로 모델링된 접지계의 주파수 임피던스 응답 특성은 표1과 같으며, 그림2.3(a)는 주파수에 따른 접지 임피던스의 크기 변화를 나타내고, 그림2.3(b)는 그에 대한 위상 응답을 보여준다. 접지 임피던스는 주파수의 크기에 따라 매우 큰 차이를 나타냄을 알 수 있으며, 저주파에서 고주파로 갈수록 상용의 접지저항과는 전혀 다른 접지 임피던스 크기를 나타낸다. 또한 위상 특성을 통해 임피던스의 유도성 및 용량성의 영향을 분석할 수 있으며, 접지전극의 길이와 포설 면적에 따라 고주파로 갈수록 유도성에서 용량성 임피던스 특성을 지남을 알 수 있다.^{[1],[2]}

표. 1 주파수별 접지임피던스
Table.1 Grounding impedance of frequency

주파수(Hz)	Impedance		
	일반봉	메쉬	XIT
0.0	4.26 ∠ 0.00°	4.08 ∠ 0.00°	4.11 ∠ 0.00°
6666.67	4.29 ∠ 5.56°	4.10 ∠ 2.51°	4.11 ∠ 2.82°
20000.0	4.53 ∠ 15.66°	4.13 ∠ 7.32°	4.18 ∠ 8.30°
33333.3	4.94 ∠ 23.86°	4.20 ∠ 11.91°	4.34 ∠ 13.73°
46666.7	5.48 ∠ 29.94°	4.29 ∠ 16.29°	4.53 ∠ 17.99°
53333.3	5.78 ∠ 32.27°	4.35 ∠ 18.39°	4.66 ∠ 19.79°
86666.7	7.35 ∠ 38.97°	4.72 ∠ 27.88°	5.27 ∠ 26.29°
106667	8.26 ∠ 40.58°	5.01 ∠ 32.73°	5.62 ∠ 28.94°
126667	9.11 ∠ 41.31°	5.33 ∠ 36.97°	5.95 ∠ 31.12°
140000	9.64 ∠ 41.50°	5.56 ∠ 39.47°	6.16 ∠ 32.40°
166667	10.59 ∠ 41.53°	6.05 ∠ 43.80°	6.56 ∠ 34.69°
173333	10.81 ∠ 41.50°	6.18 ∠ 44.75°	6.66 ∠ 35.22°
180000	11.03 ∠ 41.45°	6.31 ∠ 45.66°	6.76 ∠ 35.73°
206667	11.82 ∠ 41.23°	6.85 ∠ 48.87°	7.16 ∠ 37.62°
220000	12.18 ∠ 41.10°	7.13 ∠ 50.25°	7.36 ∠ 38.49°
566667	18.45 ∠ 40.11°	14.80 ∠ 62.92°	12.33 ∠ 48.29°
673333	19.84 ∠ 40.17°	17.05 ∠ 63.44°	13.66 ∠ 49.02°
786667	21.18 ∠ 40.26°	19.34 ∠ 63.53°	14.95 ∠ 49.49°
980000	23.00 ∠ 40.45°	22.61 ∠ 63.22°	16.72 ∠ 49.98°
1680000	28.90 ∠ 41.75°	34.00 ∠ 60.99°	22.62 ∠ 51.99°
1710000	29.08 ∠ 41.80°	34.37 ∠ 60.92°	22.82 ∠ 52.07°



(a) 접지임피던스 크기



(b) 접지임피던스 위상 응답

그림 2.3 접지임피던스의 주파수 응답 특성
Fig. 2.3 Frequency response of Impedance

(2) 상용주파수와 고주파에서의 접지전위분포

접지계의 한 지점에 서지전류가 유입될 때, 유입되는 전류의 주파수에 따라 지표면의 접지 전위 상승치가 크게 변화된다. 그림 2.5, 2.7, 2.9는 상용주파수 60Hz에서 접지전위상승을 나타내고, 그림 2.6, 2.8, 2.10은 고주파 0.96MHz에서의 전위상승을 나타낸다. 저주파인 경우 전류가 유입되는 지점에서 전위상승이 높고, 전체적으로 낮은 범위에서 전위가 상승함을 알 수 있다. 그러나 고주파의 경우는 전류 유입점 근처에서 매우 높은 전위상승을 나타내고, 반면에 다른 모든 부분은 높은 범위의 평탄한 전위 분포를 나타낸다. 결과적으로, 접지시스템에 고주파 전류가 유입될 때는 접지전극 전체의 접지 임피던스는 상승하고, 접지전류는 유입되는 접지전극 주위에 순간적으로 집중됨을 알 수 있다.^[4]

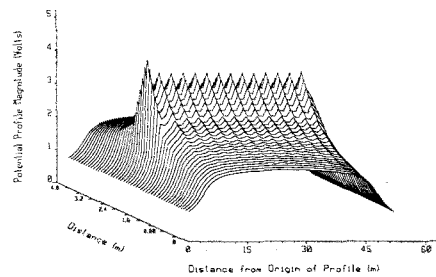


그림 2.4 지표면 전위상승 60Hz(일반동봉)
Fig. 2.4 Earth surface potential at 60 Hz (rod systems)

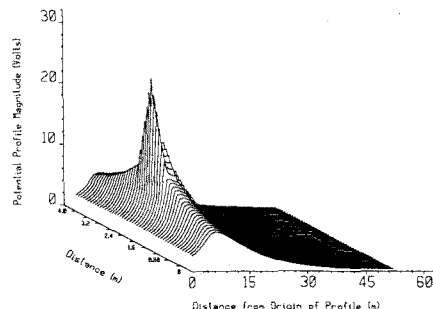


그림 2.5 지표면 전위상승 0.96 MHz(일반동봉)
Fig. 2.5 Earth surface potential at 0.96 MHz(Rod systems)

(3) 접지시스템별 임피던스 성능

세 가지 접지계에서 주파수에 따른 접지 임피던스 크기와 접지전위 상승 특성은 XIT(습식전해질)접지계가 가장 좋은 성능으로 나타났다.

접지시스템의 주파수 응답 특성을 살펴볼 때 접지도체의 형상과 접지 포설 면적이 접지 임피던스 크기와 접지전위분포를 결정하는 중요한 요소임을 알 수 있다.^{14),112)}

2.4 시간 영역의 접지 성능

실험 현장의 분석된 지층구조인 상층 215.2 Ω·m, 하층 99.854 Ω·m 지층두께 1.162m의 수평 2층 구조 토양에 대해 설계된 세 가지 접지계에 임펄스 전류를 인가하는 경우, 유입되는 지점에서의 각각의 전위 상승치를 분석하였다. 임펄스 전류에 대한 접지시스템의 응답특성을 확인함으로써 낙뢰와 같은 대용량의 뇌전류가 접지시스템에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 임펄스 전류 파형은 아래와 같은 이중 지수 함수를 사용하였다.

$$I(t) = 9000 (e^{-4 \times 10^7 t} - e^{-3 \times 10^7 t}) + 115 (e^{-1 \times 10^6 t} - e^{-2.2 \times 10^5 t})$$

임펄스 전류 파형의 최대전류(Ipeak)는 8.4kA, 시간(tp)은 1.4μs, 전류상승률은 6.4 kA/μs이고, 최대 전류값의 절반으로 떨어질 때의 시간은 17μs, 펄스지속시간(td)은 0.47 ms이다. 그림 2.10은 이중지수함수형태의 임펄스전류 파형이다.^{11),12)}

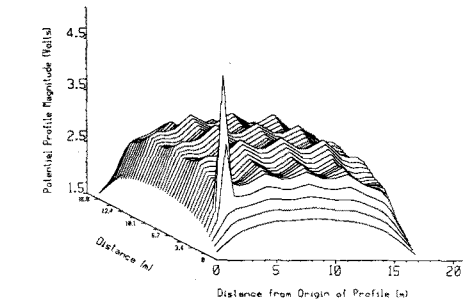


그림 2.6 지표면 전위상승 60Hz (메쉬접지)
Fig. 2.6 Earth surface potential at 60 Hz (Mesh)

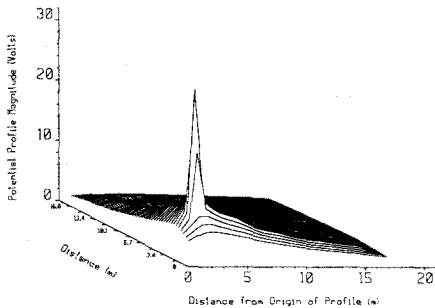


그림 2.7 지표면 전위상승 0.96 MHz (메쉬접지)
Fig. 2.7 Earth surface potential at 0.96 MHz (Mesh)

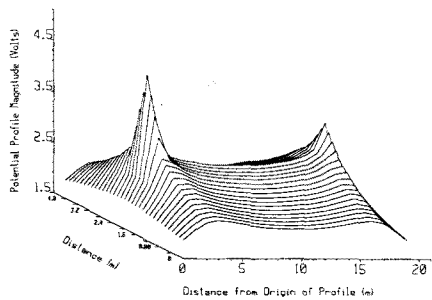


그림 2.8 지표면 전위상승 60Hz (XIT 접지)
Fig. 2.8 Earth surface potential at 60 Hz (XIT Rod)

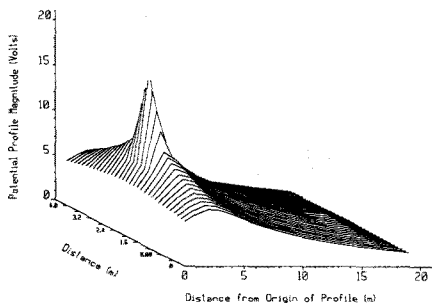


그림 2.9 지표면 전위상승 0.96 MHz (XIT 접지)
Fig. 2.9 Earth surface potential at 0.96 MHz (XIT Rod)

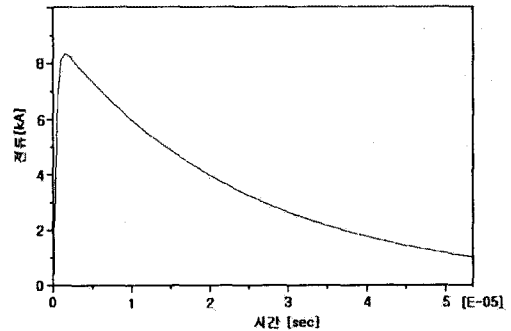


그림 2.10 임펄스 전류 파형
Fig. 2.10 Impulse Current Wave

세 가지 접지시스템 각각에 대하여 임펄스 전류를 인가하고, 시간 영역에서 시뮬레이션 하였을 때 접지전위 상승 크기는 그림 2.11과 같다.

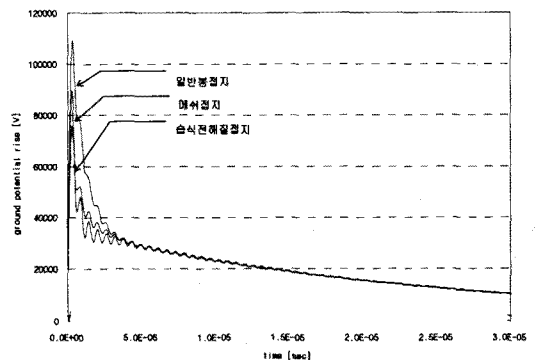


그림 2.11 유입점에서의 접지극 전위상승
Fig. 2.11 Ground Potential Rise

시간영역에서 임펄스 전류를 인가할 때, 접지 시스템별 전위 상승특성과 임펄스 임피던스 크기는 정상 상태의 임피던스보다 매우 커짐을 알 수 있으며, 또한 접지봉의 형상 및 접지 도체의 포설면적에 영향이 크다. XIT 접지시스템이 임펄스 전류에 대해 가장 낮은 전위 상승치를 가짐을 확인하였다. 표 2는 임펄스 전류가 인가될 때의 접지시스템 각각에 대한 임펄스 임피던스 크기를 나타낸다.

표 2. 접지 임피던스
Table 2 Ground Impedance

저항치	구분	V max	임펄스임피던스	상용접지저항
일반봉		106825.1 V	12.77 Ω	4.26Ω
메쉬접지		89467.9 V	10.70 Ω	4.08Ω
XIT		75170.2 V	8.99 Ω	4.11Ω

1) 임펄스 임피던스 : V_{max} / I_{max}

2.5 시험시공에 의한 접지저항의 측정 및 분석

각 접지시스템별 접지저항특성을 시험 테스트하기 위하여 설계 조건에 따라 측정된 현장대지에 대해 각각 시공하여 접지저항을 측정하였다. 일반동봉접지는 현장 0.7m 깊이로 터를 파고 18mm/2.4m 동봉 15 개를 2.5m 거리로 이격하여 병렬로 타설하고, 100mm² 나동선을 발열용접하여 시공하였다. 메쉬접지 시공은 100mm² 나동선을 면적(14m×14m), 간격 3.5m로 사각형으로 포설하여 발열용접으로 접속 시공하였다. XIT전해질 접지봉은 천공 장비를 이용하여 지반을 천공한 후 12m/54mm 전해질 XIT봉을 매입하여 2개를 15m로 이격하여 100mm² 나동선으로 발열용접(Exothermic Welding)하여 시공하였다. 접지저항 측정은 3점 전위차 측정법으로 디지털측정기(128Hz)로 측정하였다.^[12]

표 3 접지저항 측정값
Table 3. Measured Value of Resistance

일자	구분	일반동봉	메쉬접지	XIT접지
시공 직후		4.8Ω	4.7Ω	4.7Ω

2.6 시간경과에 따른 접지저항 측정비교

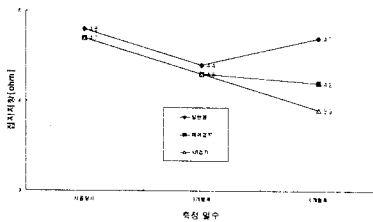


그림 2.12 시간경과에 따른 접지저항의 변화
Fig 2.12 Time variations of the ground resistance of the ground systems

시간경과에 따른 접지저항의 변화를 분석하기 위하여 각각의 시험 시공한 접지계에 대하여 3개월을 주기로 접지저항을 측정하였다. 일반동봉, 메쉬접지, XIT 접지(습식전해질)를 시험 시공한 직후의 측정치와 3개월경과 후 측정치를 비교하여 그림 2.12에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 XIT 접지시스템은 시간 경과에 따라 접지 저항치가 향상되고 접지저항의 계절적인 변화가 적음을 알 수 있다.^[11]

4. 결 론

본 연구에서는 서지 전류에 대한 여러 가지 접지시스템의 과도응답 특성을 확인하였고, 또한 각 접지시스템의 주파수 응답 및 임펄스 응답 특성을 시뮬레이션 분석하였으며, 현장 시공을 통한 접지 성능 및 계절 변화를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 지표면 접지전위상승은 주파수 특성에 크게 의존하며 특히, 전류 유입지점에서 영향이 매우 크다. 최초 수 μs 에서 전체적으로 급상승하고, 접지극의 끝점으로 진행하면서 감소한다.
- 2) 접지시스템의 주파수 특성분석시 고주파수일수록 유도성 인덕턴스의 영향을 받음을 알 수 있었고, 세 가지 접지계 중 XIT 접지계가 고주파 전류에 대해 지표면 전위상승이 가장 낮음을 확인하였다.
- 3) 접지계에 임펄스전류가 유입될 때, 유입지점의 전위상승(GPR)을 모의실험 한 결과 XIT접지봉의 성능이 가장 우수함을 알 수 있었다.
- 4) 시험 시공 측정 및 시간 경과에 따른 접지저항의 변화 특성을 계절별로 측정하였을 때, XIT 접지시스템의 접지저항이 가장 안정적임을 확인하였다.

본 논문에서는 이상과 같이 세 가지 접지시스템에 대하여 고주파 및 뇌서지 전류에 대한 접지임피던스와 지표면 전위상승 그리고 접지전극의 전위상승을 분석하여 보았다.

결론적으로 현장 실험된 접지시스템 중에서 과도응답성능 및 시간경과에 따른 접지저항변화가 적은 XIT 접지시스템의 성능이 가장 우수함을 알 수 있었다. 차후에는 지상구조물을 고려한 서지 특성연구가 수행되어야 하겠으며, 장기간에 걸친 접지저항의 경년 변화 및 부식 특성도 지속적으로 연구되어야 할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] F.Dawalibi, W.Xoing, "Transient Performance of Substation Structure and Associated Grounding Systems", IEEE Transactions on Industry Application, Vol.31.No.3 May/June 1995.
- [2] F.Dawalibi, W.Xoing, "Transient Performance of Substation Grounding Systems Subjected to Lighting and Similar Surge Currents", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9. No.3, July 1994
- [3] SES(Safe Engineering Services & technologies ltd.), CDEGS(Current and Soil structure analysis)사용자지침서. Version 97 for Windows.
- [4] 이복희, 박종순, "임펄스 전류에 대한 메쉬접지계의 과도임피던스특성", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.361~363, 1997.11.
- [5] David M. Volz "Morden Land Mobile Communications site Grounding" Telecomputer Energy World proceeding, 1995
- [6] 高橋建彦, 李炯秀 共譯, 接地設計入門, 東逸出版社, 1993
- [7] 최세하, 알기쉬운 접지실무기술, 진한도서, 1999
- [8] (주)맥암, XIT 접지 시스템 기술집, 1997
- [9] IEEE Std. 80, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", 1986
- [10] Warren R. Jone, "Bentonite Rods Assure Ground Rod Installation In Problem Soils", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No.4 July/Aug 1980, pp. 1343-1345
- [11] IEEE Std. 81, "Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System", 1983
- [12] 양정재, "접지저항의 계절적 변동 및 지락에 의한 전위분포" 인하대학교 학위논문 1998.2
- [13] 신동호, 김 용, 정철희, 조대훈 "지질분석에 따른 접지방식별 특성연구" 대한전기학회 하계학술지. pp.1293-1296, 1999.7