



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](#)

2018年
8月
博士學位論文

2018年 8月
博士學位論文

접지전극의 접지저항 보정계산과 경제성 평가에 대한 연구

접지전극의 접지저항 보정계산과
경제성 평가에 대한 연구

趙煥澈

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

趙煥澈

접지전극의 접지저항 보정계산과 경제성 평가에 대한 연구

A Study of the Correction for Ground Resistance and
the Economic Assessment of Grounding Electrode

2018年 8月 24日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

趙 煥 澈

접지전극의 접지저항 보정계산과 경제성 평가에 대한 연구

指導教授 曹錦培

이 論文을 工學博士學位 論文으로 提出함.

2018年 4月

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

趙煥澈

趙煥澈의 博士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 최효상 印

委 員 東國大學校 教授 심건보 印

委 員 朝鮮大學校 教授 김남훈 印

委 員 朝鮮大學校 教授 최연옥 印

委 員 朝鮮大學校 教授 조금배 印

2018年 6月

朝鮮大學校 大學院

< 목 차 >

ABSTRACT

I. 서 론	1
II. 이론적 고찰	4
A. 접지시스템	4
B. 접지의 목적	6
C. 접지의 분류	9
D. 접지저항의 특성	13
E. 접지전극의 저항	19
F. 접지시스템과 인체의 안전	32
G. 대지의 전기적인 특성	44
III. 접지전극의 접지저항 보정계수	48
A. 대지 저항률의 측정과 분석	48
B. 접지 저항의 측정과 분석	56
C. 접지 저항과 측정계수 산정 및 보정계수 모델	59

D. 보정계수의 산정	61
E. 보정계수를 적용한 접지저항의 계산	64
F. 목표 저항값을 위한 접지전극 수의 계산	67
IV. 접지전극 재료별 경제성 평가	69
A. 수명(생애)주기 비용에 의한 경제성 평가	69
B. 접지전극 공사비의 계산 모델	79
C. 접지전극의 경제성 평가를 위한 데이터	81
D. 경제성 평가를 위한 목표 저항값별 공사비의 계산	85
V. 결 론	97

참 고 문 헌

〈표목차〉

Table 1. Formulas for grounding resistance of electrodes	20
Table 2. Body Current by Reaction	34
Table 3. Results of Soil Resistivity by analysis	56
Table 4. Number of Electrode(copper-clad rod)	69
Table 5. Number of Electrode(advanced electrode)	69
Table 6. Number of Electrode(concrete rod)	69
Table 7. Life of ground electrode	83
Table 8. Cost of grounding electrode material	84
Table 9. Consumer price index	84
Table 10. Interest rates on loans and discounts	85
Table 11. Labor cost(2017.09)	85
Table 12. Installation cost of 1st year(100 Ω)	87
Table 13. Installation cost of 1st year(25 Ω)	87
Table 14. Installation cost of 1st year(10 Ω)	88
Table 15. Installation cost of total year(100 Ω)	89
Table 16. Installation cost of total year(25 Ω)	89
Table 17. Installation cost of total year(10 Ω)	90

〈도목차〉

Figure 1. Grounding of enclosure of electrical equipment	7
Figure 2. Solid grounding of low-voltage system	10
Figure 3. Ungrounded low-voltage system	11
Figure 4. Potential distribution in homogeneous soil	14
Figure 5. Grounding grid with grounding rods	15
Figure 6. Shielding effect between same polarity point sources	16
Figure 7. Vertical grounding rod	21
Figure 8. Horizontal grounding electrode	21
Figure 9. Horizontal grounding plate	22
Figure 10. Horizontal tabular grounding electrode	23
Figure 11. Coefficient K in McCrocklon formula	24
Figure 12. Hemispherical electrode by image method in the two-layer soil	25
Figure 13. Vertical rod by image method in the two-layer soil	27
Figure 14. Vertical ground rod into the bottom layer	28
Figure 15. Time/Current zones of effects on persons	35
Figure 16. Two disc electrode model	41

Figure 17. The relationship between the correction coefficient	43
Figure 18. Resistivity of materials	45
Figure 19. 4-point method by Wenner	49
Figure 20. Flow of equivalent resistivity	52
Figure 21. Calculation model of electrode by FEM	53
Figure 22. Variations of equivalent soil resistivity and depth	54
Figure 23. Principle of the FOP method	56
Figure 24. Measurement circuit & result	58
Figure 25. Corrective coefficient of copper-clad rod	61
Figure 26. Corrective coefficient of advanced electrode	62
Figure 27. Corrective coefficient of concrete rod	63
Figure 28. Variation of grounding resistance(copper-clad rod)	65
Figure 29. Variation of grounding resistance(advanced electrode)	65
Figure 30. Variation of grounding resistance(concrete rod)	66
Figure 31. Variation of service condition by performance	70
Figure 32. Maintenance of service condition variation	71
Figure 33. Concept of life cycle cost incidence	71
Figure 34. Flowchart of LCC	72
Figure 35. Components of LCC	73

Figure 36. Installation cost of 1st year(100 Ω) 90

Figure 37. Installation cost of 1st year(25 Ω) 90

Figure 38. Installation cost of 1st year(5 Ω) 91

Figure 39. Installation cost of total year(100 Ω) 92

Figure 40. Installation cost of total year(25 Ω) 93

Figure 41. Installation cost of total year(5 Ω) 93

Figure 42. Installation cost for variation of life(100 Ω) 94

Figure 43. Installation cost for variation of life(25 Ω) 95

Figure 44. Installation cost for variation of life(5 Ω) 95

ABSTRACT

A Study of the Correction for Ground Resistance and the Economic Assessment of Grounding Electrode

Young-Chol Cho

Advisor : Prof. Geum-Bae Cho, Ph.D.

Department of Electrical Engineering

Graduate School of Chosun University

The formula for calculating the ground resistance for the ground electrode is already well known as the formula for calculating the soil resistivity and the type of ground electrode. However, it is a reality that the equation of resistance of the ground electrode is insufficient from the viewpoint of calculating the accurate ground resistance value according to the deformation of the ground electrode or the variation of the soil resistivity.

Although some grounding resistance equations are provided for some ground electrode materials, it is suggested to apply a constant value irrespective of changes in soil resistivity, although other correction factors should be applied according to changes in soil resistivity, which is an important variable of grounding resistance. However, there are difficulties in practical application in the field.

Therefore, in this paper, to solve these problems, we installed a ground electrode directly in the field test, and proposed a correction factor for the calculation of ground resistance according to the variation of soil resistivity through measurement. The proposed equation of ground resistance is a formula of ground resistance applying the correction factor which is a variable of soil resistivity. To receive size of same ground resistance by form of construction work of ground electrode, there is difference of amount or price of used resources, and should construct ground electrode little more effectively because appear to differ in life period according to nature of ground electrode resources, but should consider economical efficient.

I. 서론

근래에 사용하는 모든 에너지 중 전기에너지는 사용이 매우 편리하고 제어하기가 쉬울 뿐 아니라, 인류의 능력을 확대시키는데 필수이기 때문에 전기에너지의 사용은 지속적으로 증가하고 있는 추세다 [1]. 최근 산업의 발달에 따른 다양한 요구에 의해 각종 시설물과 전기설비는 다양화 및 복잡화가 되고 있다. 따라서 전기에 대한 인류의 안전과 전기설비의 안정된 운용을 확보한다는 점은 아주 중요한 의미를 가지게 되었다.

낙뢰로 인한 서지 또는 개폐서지 등의 전기설비에 발생하는 이상전압과 지락에 의한 고장전류가 전기설비에 유입되면, 이로 인해 전기설비의 내부 및 주변에서 전위상승이 발생하게 된다 [1-3]. 이러한 전위상승의 효과적인 억제와 고장전류의 전로를 제어하는 등의 적절한 대책을 수립해 인체를 보호하는 것이 접지이다. 접지의 목적을 세분화하면 인체에 대한 감전방지, 정전기 장애의 방지, 등전위화, 뇌해 방지, 대지귀로의 이용, 통신장애 저감 등이 있으며, 접지를 실시하는 대상설비는 전력설비, 피뢰설비, 통신설비, 컴퓨터 설비, 의료설비 등이 있다 [2].

전기설비에 설치된 접지시스템의 목적은 설비 내의 고장이나 낙뢰 등에 의한 이상전류가 발생 시 대지 표면의 전위 상승을 억제해 인체에 대한 감전사고 위험 또는 전력기기의 손상을 방지하기 위함이다. 따라서 전력설비의 고장 및 낙뢰 등에 의해 접지도체를 통한 이상전류가 흐를 시 대지표면 전위를 낮추기 위해 기본적으로 접지저항 값은 작아야 한다 [3]. 하지만 무조건 접지저항 값을 낮추는 것은 의미가 없고 고장전류의 크기나 접지 대상지역의 다양한 조건에 부합하는 접지시스템의 설계가 이루어져야 한다. 이에 따라 접지의 시행목적에 맞는 규정 및 기준을 정해야 하는데, 한국과 일본은 접지에 대한 규정 및 기준이 설계의 조건인 접지대상 대지의 크기, 대지의 전기적 성질, 주변 환경 등을 고려 않고 접지저항의 크기만 정해져 있어 접지설계의 목적도 일정 접지저항 값을 얻기 위한 설계가 주로 되고 있다. 그러나 미국을 비롯하여 구미의 수많은 나라에서는 접지시스템에 의한 대지 표면의 전위상승 값과 관련한 대지전위상승, 전이전압, 보폭전압, 접촉전압 등의

크기를 제한하고 있어 대지 표면의 전위상승을 경감시키는 방향으로 설계가 이루어지고 있다 [4].

접지는 그 목적에 따라 공사방법이 다양하고 접지를 시공하는 대상 부지의 토양 특성에 따라서도 공사방법이 상이할 수 있어, 접지공사는 설계 및 시공방법, 접지 저항, 위험전압의 특성, 유지관리 등을 종합적으로 검토 및 계획해야 합리적인 방안을 수립할 수 있다. 하지만 국내 접지기술 수준은 아주 낮은 수준이며, 현재 대부분 전기설계용역을 담당하는 엔지니어링 회사는 접지설계를 위한 기본적인 대지 저항률 특성도 분석하지 않으며 접지저항 값의 계산도 하지 않고 설계도면에 접지공사의 종류만 표시하고 있는 실정이다. 이런 현상은 현장에서 공사시행 시 많은 혼란과 시행착오 등을 일으키며, 경제적으로도 많은 손실을 발생시킨다. 이러한 현실에서 위험전압, GPR, EMC, EMI 등에 대해 논하는 것은 현실성에 어긋나는 상황이다 [5]. 또 접지와 관련한 기준은 나라마다 차이는 보이지만, 근본적으로 인체에 대한 감전위험을 줄이고, 기기의 안정적인 구동을 목적으로 한다는 것에는 차이가 없다.

본 논문에서는 전력설비에서 접지전극의 설계와 공사 부분에서 문제가 될 수 있는 접지전극의 접지저항 크기의 계산 문제와 접지전극의 재료별 접지공사비용의 경제성 검토를 중심으로 연구가 진행되었다.

첫 번째 주제인 접지 저항의 크기를 계산하는 문제에서 일반적으로 사용되고 있는 접지전극의 저항 계산식들은 접지전극의 변형이나 대지 저항률의 변동에 따른 정확한 접지저항 값을 계산하는 관점에서는 매우 미흡한 것이 현실이다. 일부 접지전극 재료별로 접지저항 계산식들은 제공되고 있으나, 접지저항의 중요한 변수인 대지 저항률의 변화에 따라 다른 보정계수를 적용해야 함에도 불구하고 대지 저항률의 변화와 상관없이 일정한 값을 적용하도록 제시되고 있어서 현장에서 실질적으로 적용할 때의 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결해 보고자 현장시험에서 직접 접지전극을 설치하여 측정을 통한 대지 저항률의 변동에 따라 접지저항의 계산을 위한 보정계수를 다르게 적용할 수 있도록 대지 저항률이 변수인 보정계수의 계산식을 제안하였다.

두 번째 주제는 접지전극의 공법(재료)별 경제성 검토를 위하여 대지 저항률별

접지전극별로 일정한 접지저항의 크기를 얻기 위하여 필요로 하는 접지전극 재료의 소요량과 공사비용을 포함하는 초기 공사비용과 검토 대상기간을 일정한 기간으로 선정하여 전체 기간 중에 접지전극의 불량이나 수명에 의하여 보수하거나 재시공하는 유지보수비용을 포함하여 경제성 분석을 수행하였으며, 일정기간의 전반에 걸쳐서 소요되는 비용의 합을 일정한 시점으로 등가 환산하여 경제성을 평가하는데 사용되는 기법인 LCC(Life Cycle Cost)기법을 도입하였다 [1-3].

II. 이론적 고찰

A. 접지시스템

전기설비에서 필연적으로 발생하는 고장에 의한 전류, 특히 지락으로 인한 고장의 발생은 고장전류가 대지로 흐르게 되어 전기설비 내부나 주변에 전위차를 발생시켜 인체의 안전과 설비의 절연에 위험이 발생하게 된다 [6-7]. 근래에 전력사용량이 증가함에 따라서 고장용량 또한 증가하고 있으며 고장전류에 의한 대지전위 상승이 증가하여 인체의 안전과 설비의 절연 등에 미치는 영향이 커지고 있다. 이러한 위험에 대비한 것이 접지(Grounding 또는 Earthing)이다. 접지는 전기 설비 및 설비의 일부 부품 또는 전원 시스템의 중성점을 접지에 연결하기 위하여 제공된다. 이러한 접지는 고장 전류 및 뇌격 전류에 대한 분산 경로를 제공하여 전위를 안정화시키고 영전위 기준점으로 작용하여 전력 공급시스템 및 전기 설비의 안전한 동작과 전력 시스템의 운영자 및 기타 작업자의 안전을 보장하여야 한다. 접지는 대지에 묻혀있는 접지 전극을 통하여 달성된다. 전력 시스템의 접지 전극은 송전선로 첩탑에 대한 접지는 수평 접지 전극, 수직 접지봉 또는 링 접지 전극과 같이 비교적 간단한 것으로 분류할 수 있으며 다른 하나는 변전소 또는 발전소 등의 접지 그리드로 분류된다 [8-10].

접지 전극은 수평 또는 수직으로 매립된 금속 도체, 금속 부품, 금속 파이프, 구조물의 철근 콘크리트 기초, 금속 장비 또는 토양의 금속 그리드를 포함하여 단일의 금속 도체 또는 토양에 묻혀있는 금속 도체 그룹이다. 접지 시스템은 변전소 또는 발전소의 접지 전극 및 전원 장치 및 전력 설비의 모든 금속 탱크, 첩탑, 가공지선, 변압기의 중성점 및 케이블의 금속 외피를 포함하는 전체 시스템을 의미한다. 접지 전극의 전기적 특성을 나타내는 기본적인 매개 변수는 접지 저항이다 [9]. 이 값은 무한대의 영전위 점에 대한 전위와 접지 전극의 전위차와 접지 전극에 흐르는 전류의 비로서 표시되며, 전류가 상용주파수를 갖는 교류(AC)인 경우 접지 저항을 상용 주파수 접지 저항이라고 하고, 전류가 낙뢰 전류와 같은 임펄스 전류

인 경우에 이를 임펄스 접지 임피던스라고하며 시간 경과에 따른 과도 저항특성을 나타낸다. 접지 전극의 임펄스 접지 저항은 일반적으로 인입점에서 발생한 전압의 최대값 과 접지 전극으로 주입된 임펄스 전류의 최대값 I_m 의 비율로 정의된다 [11].

B. 접지의 목적

접지는 다양한 종류의 전기·전자·통신설비 기기 등을 대지와 전기적으로 접속하는 것이다. 이를 접속하기 위한 터미널이 접지전극이며, 이 전극이 대지와 사이에서 전기적인 저항(접지저항)을 가지므로 지락전류가 발생하면 옴의 법칙에 따라서 전위상승이 발생하며, 이러한 전위상승에 따른 장애가 인체에 미치게 되면 감전이 되고, 기기에 미치면 손상이나 노이즈발생 또는 오작동 등이 발생하게 된다. 여러 장애를 발생시키게 된다 [12-15]. 이론적으로는 접지저항이 영(0)이면 전위상승이 발생되지 않아 어떠한 장애도 일어나지 않지만 현실적으로는 불가능 하다. 이러한 장애를 줄이거나 없애기 위한 접지의 목적은 다음과 같다.

1) 전기 설비의 절연 수준 감소. 전력 시스템의 중성점을 접지함으로써 형성된 계통 접지는 전력 설비의 동작 전압을 감소시킬 수 있고, 이에 의해 전력 장치의 절연 레벨을 감소시킬 수 있다 [16].

2) 전력 시스템의 안전한 동작 보장. 송전 첩탑의 접지 저항은 송전 첩탑 상단과 상도체 사이의 전위차를 줄이기 위해 특정 값보다 낮아야 한다. 절연체의 임펄스 플래시 오버 전압의 50 %보다 작은 값은 송전 선로의 안전한 동작을 보장할 수 있다. 접지 저항이 너무 크면 애자 스트링 플래시 오버를 트리거 할 만큼 높은 첩탑 상단 전위가 발생할 수 있으며 정전이 발생할 수 있다. 또한 피뢰침, 차폐 전선 및 서지 피뢰기와 같은 변전소의 낙뢰 보호 시스템은 낙뢰 에너지를 대지에 방전하기 위해 접지 전극에 접지되어야 한다.

3) 인체 안전 보장. 보호 접지는 모든 전력 설비의 외함을 접지하기 위한 것이다. 외함을 접지함으로써 설비 절연체의 손상이나 노화로 외함이 활선상태가 되면 설비의 외함과 접촉하는 사람의 안전을 보장할 수 있다. 그러나 변전소의 접지 전극은 접지 저항을 줄이고 등전위 대책을 취함으로써 인체의 접촉 전압과 보폭 전압이 원하는 안전 요구 사항을 충족하는지 확인할 수 있다. 접촉 전압은 전력 시스템의 고장 시에 설비의 외함 또는 금속 성분 요소에 접촉할 때 한 손과 한 발 사이의 전위차이며 보폭 전압은 두 발 사이의 전위차이다 [17-18].

4) 정전기 사고 제거. 정전기는 폭발과 화재의 원인이 될 수 있으며, 저장 탱크와 천연 가스 파이프라인은 특히 정전기 방전으로 인한 폭발의 위험이 있다. 또한 정전기는 반도체 전자 장치의 정상적인 동작을 방해할 수 있다. 접지를 통해 마찰 및 기타 요인에 의해 생성되어 수집된 정전기는 정전기로 인한 사고 및 손상을 방지하기 위해 가능한 빨리 대지로 방출될 수 있다.

5) 지락 고장의 감지. 개인 및 재산의 안전을 보장하기 위해 누전 차단기 및 기타 누전 차단 장치가 저전압 회로에 사용된다. 회로의 한 지점에서 지락이 발생하면 보호 장치를 동작시키기 위해 매우 큰 지락 전류가 있어야 한다. 이 조건을 충족시키려면 강압 변압기의 2 차측의 중성점을 접지해야 한다. 대조적으로 중성점 접지 회로의 경우, 전기 장비의 인클로저가 접지되지 않은 경우, 절연 파괴 또는 기타 이유로 전기 설비의 외함이 충전되면 분산 콘덴서에 의해 회로에 생성된 전류로 보호를 트리거할 수 없다. 따라서 그림 1과 같이 설비의 외함을 접지해야 한다 [19]. 전류 는 다음 식과 같다.

$$I = \frac{U}{R_0 + R_E} \quad (1)$$

여기서 U 는 회로의 상전압, R_0 는 중성점의 접지 저항이고 R_E 는 전기설비의 접지 저항이다.

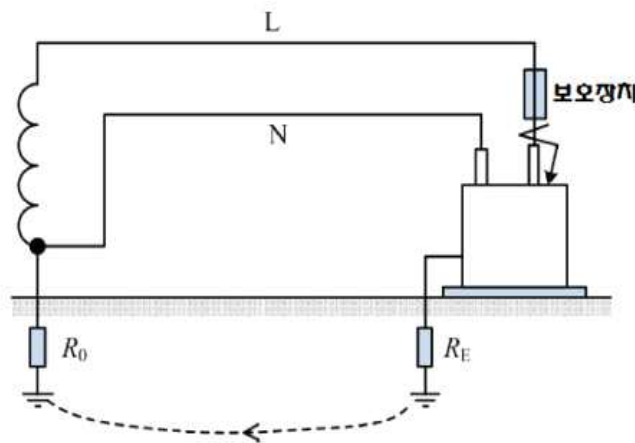


Figure 1. Grounding of enclosure of electrical equipment

6) 등전위 본딩. 등전위 본딩은 장치의 외부에서 노출된 도전체가 동일한 전위를 갖도록 하는 연결 모드의 일종이다. 건물 내부의 전력 설비는 외함을 주 접지 모드로 접지함으로써 등전위 본딩을 달성할 수 있다. 등전위 본딩의 목적은 접지 연결로 형성된 루프가 외부 전자기장에 취약하고 루프 전류가 장비의 정상적인 동작을 방해하므로 여러 장치 사이의 위험한 전위차를 방지하거나 루프를 형성하지 않도록 하는 것이다 [20-23].

7) 전자파 간섭 감소. 외부 전자기 간섭으로 인해 전자 장치가 오동작하거나 케이블에 의해 전송된 신호를 방해할 수 있다. 이는 전기 장비의 차폐 셸 및 케이블 차폐 시스템을 접지함으로써 감소되거나 제거될 수 있다. 또한, 전자 장치에 의해 발생된 고주파 에너지가 다른 장치와 간섭하는 것을 방지하기 위해, 전자 장치도 접지되어야 한다. 전자기 간섭을 방지하기 위한 접지에는 차폐 실 또는 차폐층의 접지, 케이블 차폐 덮개의 접지, 변압기 정전기 접지의 접지, 정밀 계측을 위한 보호 장치의 접지 등과 같은 여러 유형이 있다. 전기 또는 전자 장치의 인입구에 있는 전원 라인 필터도 접지해야 한다. 요컨대, 전자기 간섭에 대한 접지는 에너지가 대지로 방출되는 통로를 제공한다 [24].

8) 기능 접지. 일부 장비는 기능적으로 접지되어야 한다. 예를 들어 음극 보호는 금속 부식을 방지하기 위해 전기 화학적인 방법을 사용한다. 부식 전류를 대지로 흐르게 하려면 음극 보호 시스템을 접지해야 한다. 또한 안정적인 전위를 가진 기준점을 사용하여 컴퓨터 및 기타 전기 장비의 정기적인 동작을 보장해야 하며 이는 접지로 달성할 수 있다 [25].

9) 계통 접지. 전력계통의 운용자가 정전 사고가 발생한 경우에 송전선로에서 작업 할 때 송전선로를 통해 유도된 전류로 인한 작업자의 위험을 방지하기 위해 송전선로 및 기타 장비에 저장된 에너지는 접지에 의해 방전되어야 한다. 또한, 타인의 잘못된 조작으로 인해 조작원에게 치명적인 피해를 입히지 않게 할 수 있다.

C. 접지의 분류

접지는 그 목적에 따라서 인체 또는 설비기기의 안전을 확보하기 위한 목적으로 실시하는 계통접지, 기기접지, 뇌 보호용 접지 등의 보안용 접지와 노이즈 대책을 위한 접지, 방송용 접지, 전위기준화용 접지 등과 같은 전자·정보·통신기기들의 안정적인 동작을 위한 목적으로 실시하는 기능용 접지 등으로 구분 된다 [1-3].

1. 계통 접지

교류 전력 시스템은 중성점의 접지 여부에 따라 중성점 유효 접지 시스템 또는 중성점 무효 접지 시스템(중성점 비접지 시스템, 중성점 저항 접지 시스템 및 중성점 리액티브 접지 시스템 포함)으로 분류할 수 있다. 전력설비의 절연에 대하여 동작 전압을 줄이기 위해 일정한 전압 이상의 전력 시스템의 중성점을 직접 접지한다. 이와 같은 접지방식을 계통 접지라고 한다 [26-29]. 중성점이 효과적으로 접지된 동작의 경우 정상적인 상황에서 전력 설비 절연의 전압이 상전압이다. 중성점이 비접지된 경우 1선 지락고장이 발생하면 차단기가 고장을 차단하기 전에 전력 설비의 절연체 전압이 위상 전압만큼 높은 전압이 된다. 동작을 효과적으로 접지할 수 있는 중성점은 전력 설비의 절연에 대한 전압을 효과적으로 감소시킬 수 있고 전력 설비의 절연 수준이 감소되므로 절연 크기를 줄이고 설비비용을 낮출 수 있다. 중성점이 직접 접지된 시스템의 경우, 접지 전극을 통과하는 전류는 일반적인 상황에서 시스템의 불균형 전류이며, 단락고장이 발생하면 수십 킬로암페어(kA)의 단락 전류가 흐르게 된다. 일반적으로 접지 전극을 통해서 흐르는 단락 전류는 약 수 초 정도 지속된다 [30].

배전 시스템의 경우, 고전압 시스템과 저전압 시스템을 연결하기 위해 강압 변압기가 사용되며 변압기의 중성점이 접지되어 있는지 여부에 따라 저전압 배전 시스템을 접지 시스템(직접 또는 임피던스를 통해) 또는 비접지 시스템으로 구분된다. 그림 2는 중성점을 접지한 저전압 배전 시스템을 나타낸다. 인체가 저전압 도체에 닿으면 인체를 통과하는 전류가 인체와 접지 사이의 접촉 저항과 관련이 되는 루

프가 형성된다. 접촉 저항이 작으면 위험한 전류가 인체를 통해 흐르고 위험하게 된다 [31].

수중 조명 및 기타 전력 공급 선로의 경우에는 2차측 중성점이 접지되지 않은 절연 변압기가 추가로 설치되어야 한다. 이런 종류의 시스템을 중성점 비접지 시스템이라고 한다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 사람이 중성점 비접지 시스템의 2차 회로에 접촉하면 분포된 커패시턴스에 의해 형성되는 루프 회로를 통해 매우 작은 전류만 흐르고 인체를 통과하기 때문에 더 안전하다. 비접지 시스템의 한 가지 단점은 이 비정상적인 전압을 억제할 수 있는 방법이 없다는 것이고, 고전압과 저전압 회로의 혼합 접점과 같은 특별한 이유 때문에 시스템 전압이 증가할 때, 낙뢰 임펄스, 스위칭 이상전압 등이 포함된다. 또 다른 단점은 절연 열화로 파괴되어 지락 고장이 발생할 수 있다는 것이다.

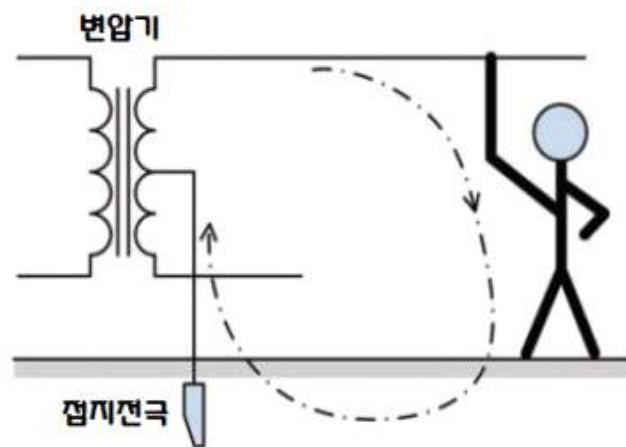


Figure 2. Solid grounding of low-voltage system

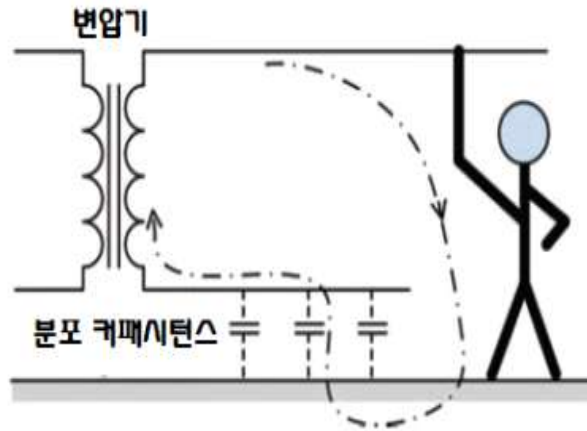


Figure 3. Ungrounded low-voltage system

2. 보호 접지

전기 설비의 절연 실패가 발생하면 외함이 환선상태가 되고, 외함에 접촉한 인체는 감전될 수 있다. 개인의 안전을 보장하기 위해 모든 전기 설비의 외함을 접지해야 한다. 이런 종류의 접지를 보호 접지라고 한다 [32].

절연 파괴로 전기 설비의 외함이 환선상태로 되는 경우에 보호 접지 전극을 통해 흐르는 고장 전류가 릴레이 보호 장치를 트리거하여 고장 설비를 차단해야 하며 접지 저항을 줄여서 전압이 나타나는지 확인하여야 한다. 외함의 전압이 인체의 안전 전압 값보다 낮게 나타나야 감전 사고를 피할 수 있다 [33-36].

3. 낙뢰 보호 접지

전력 시스템 및 사람에게 낙뢰의 위험을 방지하기 위해 피뢰침, 차폐 전선, 서지 피뢰기 및 기타 낙뢰 보호 장치가 일반적으로 채택된다. 이러한 낙뢰 보호 장치는 모두 낙뢰 전류를 대지로 유도하기 위해 적절한 접지 전극에 연결해야 한다 [37-40]. 이런 종류의 접지를 낙뢰 보호 접지라고 합니다. 낙뢰 보호 접지 전극을 통과하는 낙뢰 전류는 매우 커서 수백 킬로암페어에 달할 수 있지만 일반적으로 수십 마이크로초의 매우 짧은 지속 시간을 갖는다.

4. 신호 기준 접지

반도체 전자 장치를 기반으로 하는 많은 계측 및 제어 장치가 최신 전력 시스템에 널리 사용되지만 이러한 장치는 동작 중에 신호 기준점을 필요로 한다 [41]. 신호 기준 접지는 전자 장치와 컴퓨터 제어 시스템이 정기적으로 동작하는지 확인하는 데 매우 중요한 역할을 한다 [42-43]. 그러나 현대의 전력 시스템에서는 간섭 없이 순수한 신호 기준 접지를 제공하는 것이 매우 어려워 신호 접지의 간섭 방지 기능을 향상시키는 방법은 신호 접지를 설계할 때 고려해야 할 중요한 문제 중 하나이다. 기능적인 측면에서 신호 기준 접지는 일종의 특수 동작 접지이다.

D. 접지저항의 특성

1. 접지저항의 정의

접지저항은 접지 전극의 전위와 접지 전극을 통해 접지로 흐르는 전류 사이의 비율로서 접지 전극의 토양 특성과 크기 및 모양과 관련이 있다.

토양에 전류가 흘렀을 때의 토양저항을 전류 분산 저항이라고 한다. 접지저항은 접지선의 저항, 접지선과 접지 전극 사이의 접촉 저항, 접지 도체 자체의 저항, 접지 도체와 토양 사이의 접촉 저항 및 토양의 전류 분산 저항으로 구성된다. 전류 분산 저항은 다른 4가지 저항보다 훨씬 크기 때문에 접지 전극의 접지 저항은 전류 분산 저항에 가깝다 [44-46].

일반적으로 수치적 방법 또는 실험식에 의하여 계산된 접지 전극의 접지 저항은 토양의 전류 분산 저항이지만 실제로 측정된 값은 일반적으로 계산된 결과보다 크게 나타난다. 이것은 접지 도체와 토양 사이의 실제 접촉이 완전한 표면과 같은 접촉이 아니라 점접촉으로 이루어지기 때문이다. 또한 접지 도체와 토양 사이의 접촉 저항, 특히 접촉 저항이 때로는 매우 높은 암석 지역에서의 접촉 저항을 나타내기도 한다. 이 접촉 저항은 설치 중의 토양 압축도, 토양 입자 상태, 토양 수분 등과 관련하여 불확실한 값을 가지지만 접촉 저항은 계산식에 반영될 수 없다 [47].

예를 들어, 그림 4에서 볼 수 있듯이, 반구형 접지 전극의 반경은 r 이고, 접지 전극을 통해 접지로 흐르는 전류는 I 이며, 토대는 ρ 의 고유 저항을 가진 균질 토양이라고 가정하면 반구형 접지 전극의 중심까지 거리 r 이 있는 점의 전위는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$v = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (2)$$

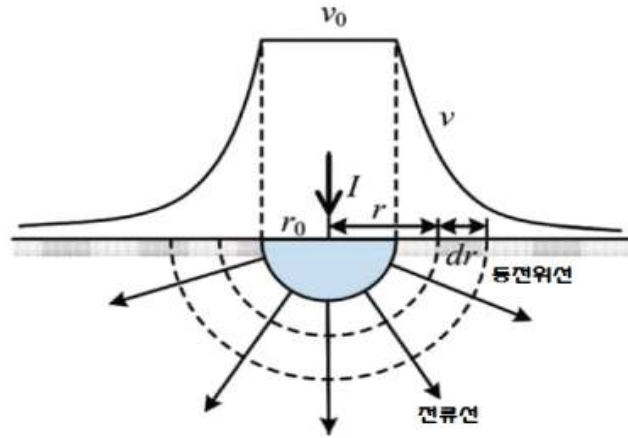


Figure 4. Potential distribution in homogeneous soil

= r 일 때, 방정식 (1), (2)에 의하여 접지전극의 전위 v_0 를 다음 식과 같이 구할 수 있다 [48].

$$v_0 = \frac{\rho}{2\pi r_0} \quad (3)$$

반구형 접지 전극의 전위 분포는 그림 4에 나타내었다. 접지 저항의 정의에 따라 반구형 접지 전극의 접지 저항은 다음 식과 같다.

$$R = \frac{v_0}{I} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (4)$$

2. 접지저항과 접지커패시턴스의 관계

정전기장과 정전류장의 유사성에 따라, 접지 저항과 접지 전극의 정전 용량사이의 관계를 매우 쉽게 구할 수 있다.

$$R = \frac{v_0}{I} = \frac{\rho \epsilon}{C} \quad (5)$$

여기서, ϵ 은 토양의 유전율(F/m 단위)이고, C 는 무한대에 대한 접지 전극의 정전 용량(단위는 F)이다.

토양의 저항을 ρ 과 유전율 ϵ 가 상수일 때, 정전 용량은 접지저항 크기에 반비례한다. 식 (5)로부터 접지 전극의 접지 저항이 정전 용량에 반비례한다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 접지 전극의 크기가 클수록 커패시턴스가 커지고 접지 저항이 낮아진다. 실제 접지 설치의 경우, 기본적으로 접지 그리드의 면적에 대한 접지 저항이 정의되면 접지 그리드의 접지 저항이 결정된다 [49-50].

많은 수평 도체로 구성된 접지 그리드는 격리된 평면으로 근사화 될 수 있다. 이 평면의 정전 용량은 주로 면적으로 결정된다. 그림 5에서와 같이, 짧은 수직 접지봉이 평면에 연결되면 커패시턴스에 거의 영향을 미치지 않으므로 접지 저항이 약간 감소한다. 해석에 따르면 수직 접지 막대의 길이가 접지 그리드의 등가 반경과 일치할 수 있을 때만 접지 저항이 크게 감소한다.

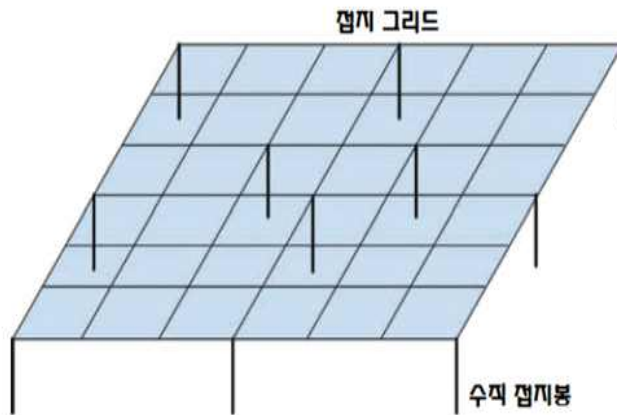


Figure 5. Grounding Grid with grounding rods

3. 접지 도체사이의 차폐 효과

접지 전극은 대개 접지 도체의 그룹으로 구성되며 전류가 한 도체를 통해 토양으로 분산될 때 다른 도체의 영향을 받는다. 접지 그리드에 수평 도체를 추가하거나 접지 그리드에 짧은 수직 막대를 추가하면 접지 저항이 약간 감소할 수 있다 [51]. 이러한 점은 접지 그리드의 내부 도체가 주변 도체에 의해 차폐되어 있기 때

문이다. 엄밀히 말하면 두 도체 사이의 거리가 무한할 때만 하나의 접지 도체에서 생성된 전계가 다른 도체에 영향을 받지 않는다. 이 차폐 효과를 고려할 때, 접지 전극의 접지 저항은 모든 접지 도체의 접지 저항의 병렬 값과 동일하지 않다.

접지 전극의 서로 다른 접지 도체는 동일한 극성을 갖는 전류를 토양으로 분산 시키기 때문에 두 개의 인접한 점전원(그림 6 참조)를 사용하여 이들 사이의 상호 작용을 분석할 수 있다. 두 점전원은 동시에 같은 전류를 대지로 주입하지만, 전원 A에서 분산되는 전류가 수직 평면 ON의 오른쪽으로 분산될 수 없기 때문에 단일 점전원처럼 주변에서 방출되지 않는다. 또한 AB 연결선의 중간점에 대하여 수직이고, 점전원 B에서 분산되는 전류는 평면 ON의 왼쪽으로 분산될 수 없다. 따라서 평면 ON은 전류가 통과하는 것을 막는 차폐층과 같게 된다 [52].

이러한 현상은 접지 도체 사이의 차폐 효과 또는 전류선의 반발 작용이라고 한다. 접지 도체 사이의 차폐 효과 때문에 전류 분산 영역은 하나의 접지 도체의 것보다 훨씬 작고 하나의 접지 도체의 해당 접지 저항은 하나의 접지 도체의 접지 저항보다 크게 된다. 그림 6에서 점전류원으로부터 전류가 횡단면을 통과할 때 전류 분산 중에 마주치는 저항이 증가한다는 것을 확인 할 수 있으며, 이 저항을 전류 분산 저항이라 한다 [53].

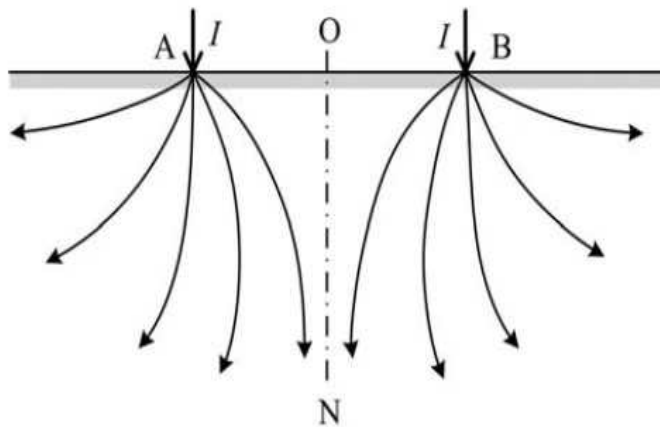


Figure 6. Shielding effect between same polarity point sources

보통 2 개의 접지 도체 사이의 상호 저항은 그 사이의 상호 작용을 나타낸다. 즉, 접지 도체 A가 토양에 단위 전류를 분산시킬 때 전류가 흐르지 않고 도체 B에 전위가 생성되는 반면, 접지 도체 A 자체를 자기 저항이라고 부르는 경우 n개의 접지 도체의 전위는 다음과 같이 표현될 수 있다 [54].

$$\begin{cases} V_1 = R_{11}I_1 + R_{12}I_2 + \dots + R_{1n}I_n \\ V_2 = R_{21}I_1 + R_{22}I_2 + \dots + R_{2n}I_n \\ \vdots \\ V_n = R_{n1}I_1 + R_{n2}I_2 + \dots + R_{nn}I_n \end{cases} \quad (6)$$

여기서, V_1, V_2, \dots, V_n 은 모든 도체의 전위, I_1, I_2, \dots, I_n 은 도체에 흐르는 전류이며, R_{ii} 와 R_{ki} 는 접지 도체 i 의 자기저항과 도체 i 와 k 사이의 상호 저항이다.

전류 I 가 두 개의 인접한 도체를 통해 토양으로 분산될 때, 상응하는 전위 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{cases} V_1 = R_{11}I_1 + R_{12}I_2 \\ V_2 = R_{21}I_1 + R_{22}I_2 \end{cases} \quad (7)$$

두 도체가 서로 연결되어 있으면 같은 전위를 나타내게 되므로 식 (7)에 이러한 조건을 대입하면 인접한 두 도체로 구성된 복합 접지 전극의 접지 저항은 다음과 같다.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{R_{11}R_{22} - R_{12}^2}{R_{11} + R_{22} - 2R_{12}} \quad (8)$$

분명하게 복합 접지 전극의 접지 저항은 두 자체 저항의 병렬 저항 R 와 동일하지 않다.

$$R_p = \frac{R_{11}R_{22}}{R_{11} + R_{22}} \quad (9)$$

복합 접지 전극의 접지 저항 은 자기저항의 병렬 값 R 보다 크다. 차폐 효과에 의해 생기는 상호 저항의 존재로 인하여 접지 전극의 접지 저항이 증가한다.

기술적인 측면에서 간섭 계수 는 일반적으로 접지 전극의 도체 사이의 차폐 효과를 나타내기 위해 사용되며, 다음과 같이 정의되며 간섭 계수 η 는 1보다 작다.

$$\eta = R_p / R \quad (10)$$

E. 접지전극의 저항

간단한 구조의 접지 전극에 대하여는 전자기장의 이론적 해석에 따라 접지 저항을 계산하는 공식을 얻을 수 있다. 그러나 복잡한 구조의 접지 전극에 대한 경우 전자기장에 대한 수치적 방법으로 얻은 계산 결과를 회귀 분석하여 근사 계산공식을 유도할 수 있다. 표 1은 문헌 [4~6]에서 얻은 서로 다른 간단한 구조의 접지 전극에 대한 접지 저항을 계산하기 위해 일반적으로 사용되는 공식을 나열한 것이다.

1. 균질 지층에서의 접지저항

a. 수직 접지봉의 접지저항

수직 접지봉의 접지 저항은 표 1에 정리된 Sunde 및 Dwight 공식뿐만 아니라 다음 두 공식으로도 계산할 수 있다. Tagg와 Ollendorf 및 Zingraff[4]에 의한 회전 타원체에서 파생된 해석적인 식은 다음과 같다.

$$\frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d} \quad (11)$$

Rudenberg와 Datta에 의한 식은 다음과 같다.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{d} \quad (12)$$

Table 1. Formulas for grounding resistance of electrodes

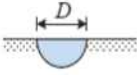
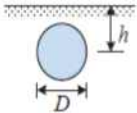
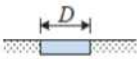
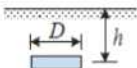
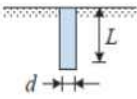
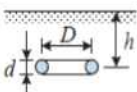
접지전극의 형태	크기와 모양	접지저항 계산 공식
Hemisphere		$R = \frac{\rho}{\pi D}$
Sphere deeply buried in soil		$R = \frac{\rho}{\pi D} \left(0.5 + \frac{D}{8h} \right) \quad (D < h)$
Circular flat-plate		$R = \frac{\rho}{2D}$
Circular flat-plate deeply buried in soil		$R = \frac{\rho}{2D} \left(0.5 + \frac{D}{4\pi h} \right) \quad (D < 2h)$
Vertical ground rod		Sunde, Dwight formula $R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{8L}{d} - 1 \right) \quad (d \ll L)$
Ring-shaped grounding electrode		$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{16D^2}{hd}$
Horizontal grounding device	<i>L is the length of the grounding conductor, d is the diameter of the grounding conductor, h is the burial depth</i>	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{L^2}{dh} + A \right)$ A is the shape factor, shown in Table 1.2 [5].

그림 7에 보인 매설 깊이 h 의 수직 접지봉에 대한 그 접지 저항은 다음의 두 식으로 계산할 수 있다.

$$= \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{3L + 4h}{L + 4h} \quad (13)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{d} - 1 + \frac{1}{2} \ln \frac{3L + 4h}{L + 4h} \right) \quad (14)$$

식 (13)은 지면과 평행한 로드 상단을 갖는 수직 접지 막대의 접지 저항을 계산하기 위한 식 (11)에 해당한다. 식 (14)는 표 1에 나열된 수직 접지 막대의 접지 저항을 계산하기 위한 Sunde 및 Dwight 식에 해당한다.

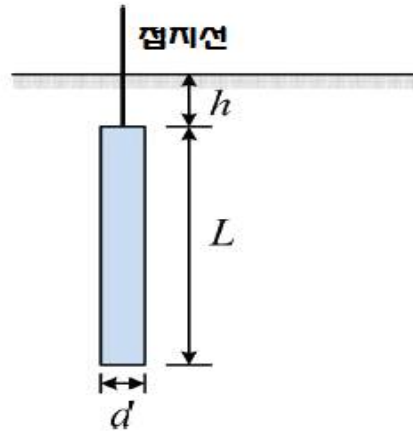


Figure 7. Vertical grounding rod

그림 8과 같이 길이 , 매설 깊이 , 지름 d 의 수평 접지 전극의 접지 저항은 식 (15) ~ (18)[4-6]의 식에 의해 계산할 수 있다.

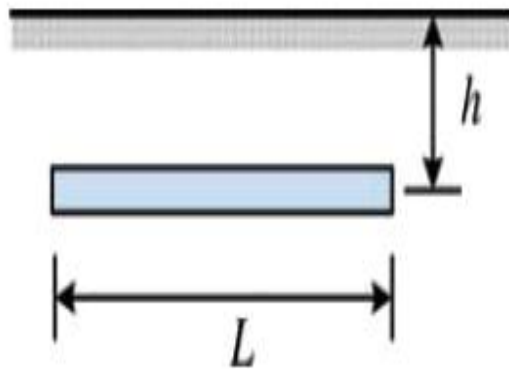


Figure 8. Horizontal grounding electrode

1) Rudenberg and Zingraff의 공식:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{d} \left(1 + \frac{\ln \frac{L}{2h}}{\ln \frac{2L}{d}} \right) \quad (15)$$

2) Tagg and Dwight의 공식:

$$\frac{\rho}{2\pi L} \ln \left(\frac{4L}{d} + \ln \frac{L}{h} - 2 + \frac{2h}{L} - \frac{h^2}{L} + \frac{h^4}{8L^2} \right) \quad (16)$$

3) 평균 전위법에 의한 Sunde and Schwarz의 공식:

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \ln \left(\frac{2L}{dh} - 1 \right) = \frac{\rho}{\pi L} \ln \left(\frac{L^2}{dh} - 0.61 \right) \quad (17)$$

중간점 전위법에 의한 Sunde and Schwarz의 공식:

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \ln \frac{2L}{\sqrt{dh}} = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{dh} \quad (18)$$

4) 수평 원형 접지봉이 지면에 묻혀있는 경우, 평균 전위법에 의한 접지 저항의 계산 공식:

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \ln \left(\frac{4L}{d} - 1 \right) \quad (19)$$

중간점 전위법에 의한 접지 저항의 계산 공식:

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \ln \frac{2L}{d} \quad (20)$$

b. 수평 접지판의 접지저항

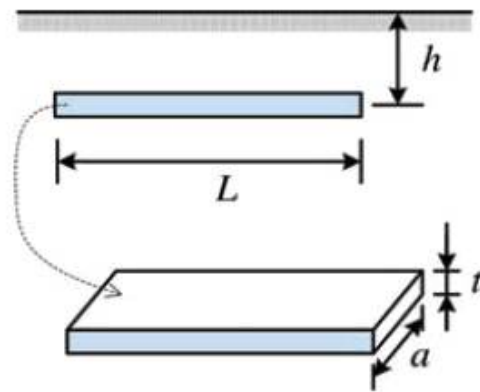


Figure 9. Horizontal grounding plate

수평 접지 전극은 그림 9와 같다. 일반적으로 길이 L 은 폭 a 및 두께 t 보다 훨씬 길다. 두께 t 는 폭 a 의 1/8보다 작고 매설 깊이 h L 보다 작다. 수평 접지 전극의 접지 저항을 계산하기 위한 공식은 다음과 같은 두 가지 형태가 있다[4].

1) Tagg과 Dwight의 공식:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{a} + \frac{a^2 - \pi at}{2(a+t)} + \ln \frac{L}{h} - 1 + \frac{2h}{L} - \frac{h^2}{L^2} + \frac{h^4}{2L^2} \quad (21)$$

2) Rudenberg의 공식:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{a} \quad (22)$$

c. 판형 접지전극의 접지저항

폭이 a 이고 길이가 b 인 판형 접지 전극은 그림 10에 나타냈다. 접지 전극의 크기가 매설 깊이 h 보다 훨씬 클 경우 나중에 도입된 등가 면적법을 사용하여 원판이나 타원형 판으로 변환할 수 있으며 매설 깊이는 무시할 수 있다. 길이와 너비 및 매설 깊이의 비율을 고려해야 할 경우 다음 공식을 사용할 수 있으며 여기서 판의 두께는 무시된다.

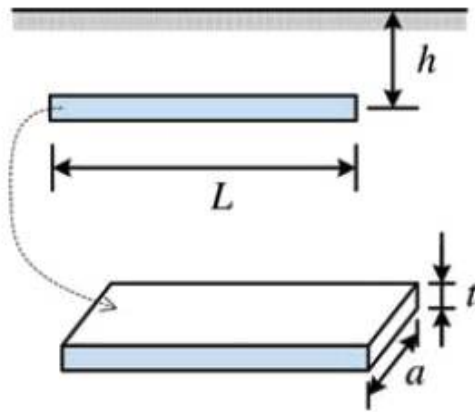


Figure 10. Horizontal tabular grounding electrode

1) McCrocklin의 공식[7]:

$$\frac{\rho K}{10.16 \pi b} = \frac{0.1 \rho K}{\pi b} \quad (23)$$

여기서 K 는 그림 11에서 보는 바와 같이 모양 계수이고, ρ 는 대지저항률 $\Omega \cdot m$ 과 b m는 길이이다.

2) 접지전극을 등가 원판으로 등가화한 Tagg의 공식[4]:

$$R = \frac{\rho}{4} \frac{\pi}{ab} \quad (24)$$

그림 11에서 길이 대 폭 비율 $a/b = 1$ 이 되면 이는 접지 전극이 정사각형임을 의미하고, $a/b = 2$ 이면 직사각형이다.

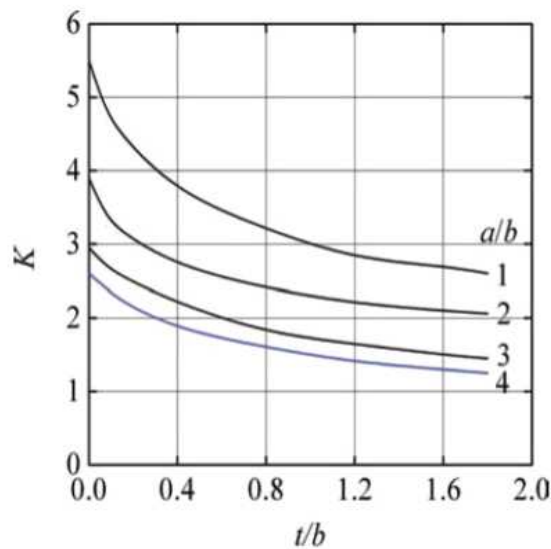


Figure 11. Coefficient K in McCrocklon formula

2. 비균질 토양에서의 접지저항

앞에서의 접지 저항에 대한 계산식은 모두 토양이 균질하다는 것을 기초로 유도되지만, 실제로 균질 토양은 매우 드물다. 토양은 일반적으로 두 개 이상의 수평층 또는 수직 층의 모델과 동일할 수 있다. 전류장을 계산하면 관심 지점의 전위를 얻을 수 있다. 접지 전극의 전위는 대개 접지 저항의 정의에 따라 접지 전도체의 중간 전위 또는 평균 전위로 표시된다. 비 균질 토양의 전위 분포는 이미지 법과 라플라스 방정식을 풀면 얻을 수 있다.

a. 2층 대지구조에서의 반구형 접지전극

그림 12는 이층 토양에 반경이 r 인 반구형 접지 전극과 그 이미지를 보여준다. 두께가 h 인 상층 토양의 저항률은 ρ_1 이고, 하층 토양의 저항률은 ρ_2 이다. $h = 2r$ 인 경우 이미지 전류는 구의 중심에 있는 점 전류원과 같을 수 있다. 반구형 도체의 전위를 나타내기 위해 중심점 전위를 사용하는 경우 중첩 원리를 사용하여 다음 공식을 유도할 수 있다 [5].

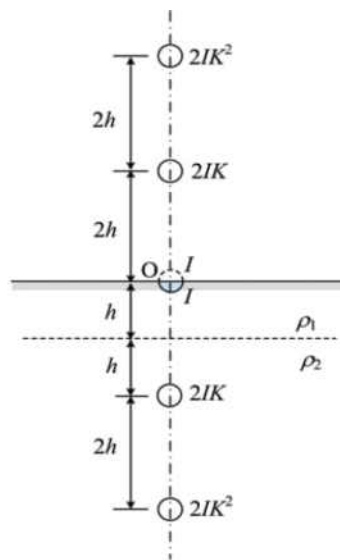


Figure 12. Hemispherical electrode by image method in the two-layer soil

$$\frac{\rho I}{2\pi r} + 2 \frac{\rho_1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2K^n I}{2nh} = \frac{\rho_1 I}{2\pi r} \left(1 + 2r \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{2nh} \right) \quad (25)$$

여기서, $K = (\rho_2 - \rho_1)/(\rho_2 + \rho_1)$ 이며 2층 구조의 대지구조에 묻혀있는 반구형 접지전극의 저항[5]은 다음과 같다.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho_1}{2\pi r} \left(1 + \frac{r}{h} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{n} \right) = \frac{\rho_1}{2\pi r} \left[1 - \frac{r}{h} \ln(1 - K) \right] \quad (26)$$

여기서 첫 번째 항은 $\rho_1 = \rho_2, K = 0$ 일 때와 같은 균질 토양의 대지저항률이 ρ_1 인 경우의 접지 저항이다. 두 번째 항은 하층 토양에 의해 도입된 추가적인 접지 저항 ΔR 이다. 하층의 토양 저항률 ρ_2 가 상층의 ρ_1 보다 작으면 $K < 0$ 이므로 식 (26)의 부가 항은 음수이다. 즉, 하층 토양의 저항률이 상층 토양의 저항률보다 낮으면, 반구형 접지 전극의 접지 저항은 상층 토양과 동일한 저항률을 갖는 균질 토양의 동일한 전극보다 작다는 것을 의미한다.

하층의 토양 저항률 ρ_2 가 상층의 저항률 ρ_1 보다 커서 $K > 0$ 이면, 식 (26)의 부가 항은 양수이다. 즉, 높은 저항성을 가진 하층의 토양은 접지 저항을 증가시킨다. 해석 결과에 의하면 $K > 0$ 일 때가 $K < 0$ 일 때 보다 하층 토양의 영향이 더 뚜렷하다는 것을 알 수 있다. 따라서 K 가 매우 높으면 하층 토양의 저항률이 상층의 저항률보다 훨씬 높다는 것을 의미하므로 접지 전극의 크기를 늘려 접지 저항을 줄이는 것이 명확하지 않다.

b. 2층 대지구조에서의 수직 접지봉

수직 접지봉이 하층 토양에 침투하지 않으면 그림 13과 같이 영상법으로 이미지를 설정할 수 있다. $2ih$ 에 의해 서로 분리된 임의의 이미지 커플 $2K^i I$ 의 전류 밀도는 다음과 같다 [5].

$$J_i = 2K^i I / (2L) = K^i I / L \quad (27)$$

중간점 전위법을 사용하여 전체 접지봉의 전위를 나타내기 위해 중간점 O의 전위를 계산할 수 있다면, 도체 자체와 그 사이의 상호 저항은

$$\frac{V_i}{I} = \frac{\rho_1 J_i}{4\pi I} \int_{-2ih-x}^L dx = \frac{\rho_1 K^i}{2\pi L} \ln \frac{2ih+L}{2ih-L} \quad (28)$$

이 되고, 접지 저항 R' 은 상층 토양과 동일한 저항률을 갖는 균질 토양의 접지 저항과 이층 토양의 이미지에 의해 생성된 상호 저항의 합이다.

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi L} \ln \frac{2L}{r} + \sum_{i=1} K^i \ln \frac{2ih+L}{2ih-L} \quad (29)$$

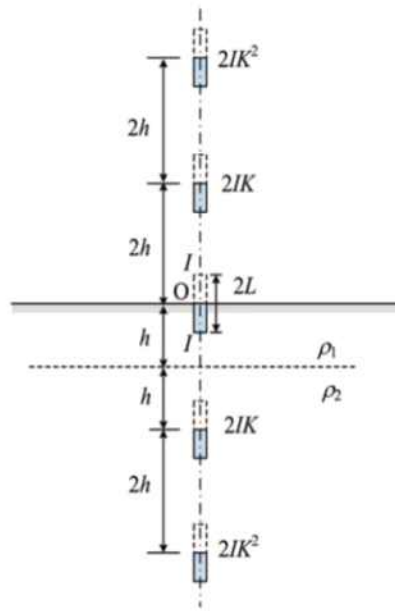


Figure 13. Vertical rod by image method in the two-layer soil

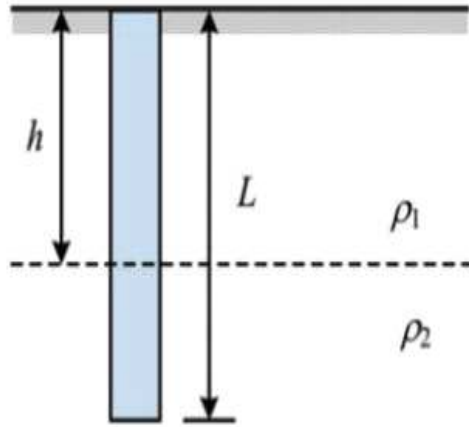


Figure 14. Vertical ground rod into the bottom layer

수직 접지봉이 그림 14와 같이 하층의 토양으로 침투하면 두 층의 저항성이 다르기 때문에 두 층에 있는 접지봉에서 두 부분의 전류 밀도가 달라진다. 적당한 가정은 접지 도체의 분산 전류 밀도가 토양 저항률에 반비례한다는 것이다. 상층 토양에서의 전류 밀도와 하층 토양 ρ_2 에서의 전류 밀도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$J_1 \rho_1 = J_2 \rho_2 \quad (30)$$

$$J_1 h + J_2 (L - h) = I \quad (31)$$

그러면 두층에 걸쳐 있는 접지봉의 전류밀도는 다음과 같다[5].

$$J_1 = \frac{\rho_2 I}{\rho_1(L - h) + \rho_2 h} \quad (32)$$

$$J_2 = \frac{\rho_1 I}{\rho_1(L - h) + \rho_2 h} \quad (33)$$

그림 13과 같이 상층과 하층의 도체 부분의 영상을 설정하면 하층에 침투하는 접지봉의 접지 저항 R 을 도출할 수 있다[5].

$$R = \frac{\rho_1 \rho_2}{2\pi [\rho_1(L - h) + \rho_2 h]} \left[\ln \frac{2L}{r} + \sum_{i=1}^{\infty} K^i \ln \frac{2ih + L}{L + 2(i - 1)h} \right] \quad (34)$$

Tagg은 이층 토양구조에서 수직 접지봉의 접지 저항을 계산하기 위해 다음 공식을 제안했다.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \sum_{i=1}^n \frac{K^i}{2} \ln \frac{nh + L}{nh - L} \quad (35)$$

식 (35)는 수직 도체가 하층 토양으로 침투하는지 여부를 고려하지 않았기 때문에 Blattner는 봉의 길이 $L > h$ 일 때 이 공식을 수정했다.

$$R = \frac{\rho_1}{L} \left[1 + \sum_{i=1}^n \frac{K^i}{2} \ln \frac{nh + L}{nh - L} \right] / \ln \frac{4L}{d} - 1 \quad (36)$$

봉의 길이 $L > h$ 일 때:

$$R = \frac{\rho_1 \rho_2}{(L - h)\rho_1 + h\rho_2} \left[1 + \sum_{i=1}^n K^i \ln \frac{2nh + L}{(2n - 2)h + L} \right] / \left(\ln \frac{4L}{d} - 1 \right) \quad (37)$$

c. 다층구조의 토양에서 접지저항

다층 토양구조에서 점전원에 의해 생성된 지표면의 전위는 라플라스 방정식[5]을 푸는 방법으로 유도할 수 있다. h_1 은 첫 번째 층의 두께이고, h_j 는 j번째 층의 두께이다. 이층 토양의 점전원과 r 거리를 가진 지표면상의 어떤 점 사이의 저항 $R_{12}(r)$ 은 다음과 같다.

$$R_{12}(r) = \frac{\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty \frac{1 + K_{12}e^{-2mh_1}}{1 - K_{12}e^{-2mh}} J_0(mr) dm \quad (38)$$

식 (38)을 다시 정리하면:

$$R_{12}(r) = \frac{\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty A_{12} J_0(mr) dm \quad (39)$$

여기서,

$$K_{12} = \frac{1 + K_{12} e^{-2mh_1}}{1 - K_{12} e^{-2mh_1}} \quad (40)$$

3층 대지구조에서의 저항은 다음과 같다.

$$R_{13}(r) = \frac{\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty A_{13} J_0(mr) dm \quad (41)$$

여기서,

$$A_{13} = \frac{1 + K_{13} e^{-2mh_1}}{1 - K_{13} e^{-2mh_1}} \quad (42)$$

$$K_{13} = \frac{\rho_2 A_{23} - \rho_1}{\rho_2 A_{23} + \rho_1} \quad (43)$$

$$A_{23} = \frac{1 + K_{23} e^{-2mh_1}}{1 - K_{23} e^{-2mh_1}} \quad (44)$$

$$K_{23} = \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_3 + \rho_2} \quad (45)$$

n 층 대지구조에서의 저항은 다음과 같다.

$$R_{1n}(r) = \frac{\rho_1}{2\pi} \int_0^\infty A_{1n} J_0(mr) dm \quad (46)$$

여기서,

$$A_{1n} = \frac{1 + K_{1n} e^{-2mh_1}}{1 - K_{1n} e^{-2mh_1}} \quad (47)$$

$$K_{1n} = \frac{\rho_2 A_{2n} - \rho_1}{\rho_2 A_{2n} + \rho_1} \quad (48)$$

$$A_{jn} = \frac{1 + K_{jn} e^{-2mh_j}}{1 - K_{jn} e^{-2mh_j}} \quad (49)$$

$${}^n \frac{\rho_{j+1} A_{(j+1)n} - \rho_j}{\rho_{j+1} A_{(j+1)n} + \rho_j} \tag{50}$$

$$A_{(n-1)n} = \frac{1 + K_{(n-1)n} e^{-2mh_{n-1}}}{1 - K_{(n-1)n} e^{-2mh_{n-1}}} \tag{51}$$

$$K_{(n-1)n} = \frac{\rho_n - \rho_{n-1}}{\rho_n + \rho_{n-1}} \tag{52}$$

F. 접지시스템과 인체의 안전

감전 사고는 대개 사람의 중요한 부분을 통과하는 전류의 주파수, 크기 및 지속 시간에 의해 결정된다. 전류가 심장을 통과할 때 심실 세동을 일으키고, 전류가 신경 센터를 통해 흐르면 호흡 센터를 억제하고 심혈관 센터를 고갈시킨다. 감전으로 인한 호흡 정지 수축은 질식을 일으킬 수 있다.

1. 감전전류의 단계

일반적으로 인간이 느낄 수 있는 최소 전류는 약 1mA이며, 전류가 9-25mA로 인해 인체에 자극을 주는 것은 다소 고통스럽다. 근육이 제어력을 상실하게 만들 수 있으며 손에 든 물건을 뺄 때 힘들거나 불가능할 수 있다. 전류가 지속적으로 증가하면 근육의 수축이 호흡 곤란을 유발할 수 있지만, 이는 호흡을 억제할 수 있는 더 큰 전류에서의 상황과는 다르다. 이 현상은 영구적이지 않으며 근육 수축이 아주 심각하거나 호흡이 멈추지 않는 한 전류가 차단되면 사라진다. 이것은 전류의 지속 시간이 수분 이상이 될 때에만 발생하지만 현대의 릴레이 보호 장치나 다른 보호 장치는 전기 충격 전류를 수 초 이내에 제거 할 수 있으므로 근육 수축으로 인한 질식이 일어나지 않을 수 있다. 전류가 커지면 심실 세동이 일어나 사망을 초래한다.

따라서 접지 시스템의 안전 설계에서 고려해야 할 주요 문제는 심실 세동을 일으키는 전기 충격 전류의 임계값이다. 많은 학자들이 허용 인체 전류의 한계를 연구했으며, 주파수가 50~60Hz인 교류 전류의 경우 사람의 반응에 따라 세 가지 범주로 분류할 수 있다.

1) 감지 전류 : 인간이 느낄 수 있는 최소 전류로서, 남성 성인의 경우 1.1 mA이고 여성 성인의 경우 0.7 mA이다.

2) 구출 전류 : 이것은 전기 충격 후에 사람이 자체적으로 벗어날 수 있는 최대 전류이다. 또한 성별과도 관련이 있어서 남성 성인의 경우 16mA이며 여성 성인의 경우 10.5mA이다.

3) 치명적인 전류 : 심실 세동이나 질식을 유발하여 가장 짧은 시간에 생명을 위협하는 최소 전류이다.

감전전류가 인체에 미치는 영향에 대하여 통전 경로가 손, 몸통, 다리로 순으로 되며, 인체 내 통전시간이 1초인 경우에 대한 인체의 생리적 반응별 전류를 4가지 등급으로 분류한다. 인체를 통과하는 전류크기가 약 25mA 이하인 1등급은 인체가 전류를 감지하는 상태에서 자발적인 이탈이 불가능하게 되는 상태로 심장박동의 리듬과 신경계통에는 영향을 미치지 않는다. 인체 통전전류가 25 ~ 80mA인 2등급은 인체가 견딜 수 있는 전류의 크기로 혈압이 상승하고 심장박동의 불규칙 또는 회복 가능한 심정지의 상태가 되며, 개인에 따라 50mA에서 실신상태에 이르게도 한다. 3등급은 통전전류 크기가 80~3000mA로 실신이나 심실세동 상태에 이르게 되며, 통전전류가 3000mA이상인 4등급은 혈압상승을 더불어 회복 불가능한 심정지 및 부정맥 폐기종이 발생하는 가장 위험한 상태다. 각각 전류범위에 따른 인체의 작용과 전류 값을 보인 것이 표 2이다.

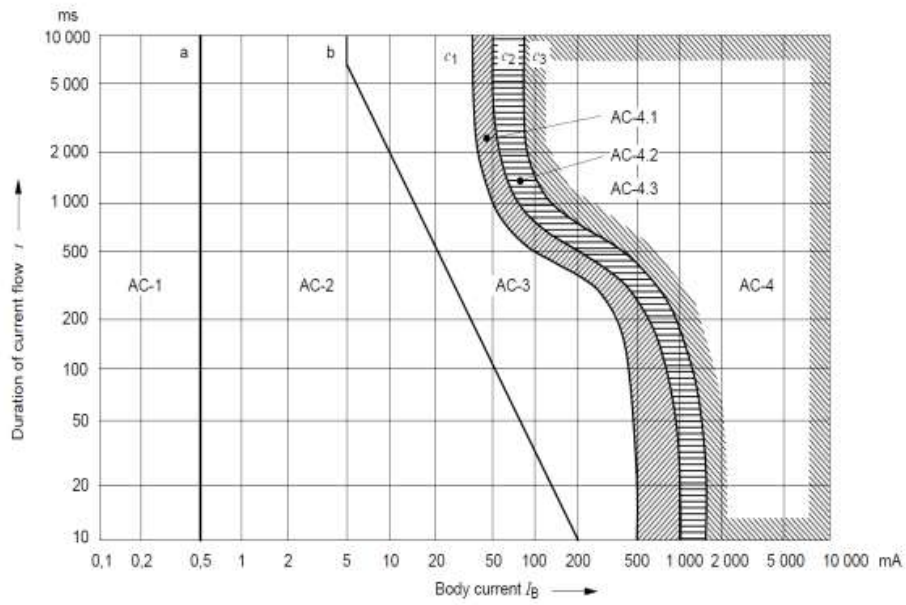
2. 국제기술기준에 의한 안전전류기준

일반 사람들의 감지전류는 통전전류가 0.5~12mA로 전류가 흐른다는 느낌을 느낄만한 정도의 크기며, 10~15mA 정도의 통전전류가 흐르게 되면 근육이 수축되는 정도의 크기이다. 심실세동 전류는 전류가 수십mA 정도로 흐르며 심근에 경련이 발생하고 혈액순환 기능에 영향을 미쳐서 사망에 이를 수 있는 전류다. 심실세동 전류의 한계는 전류크기와 통전시간을 곱해 표시하며, 감전에 의한 인체의 영향을 저감시키기 위해 인체에 흐르는 통전전류 크기를 줄이는 방법과 통전시간을 줄이기 위하여 빠른 속도로 통전전류를 차단하는 방법을 고려해 볼 수 있다.

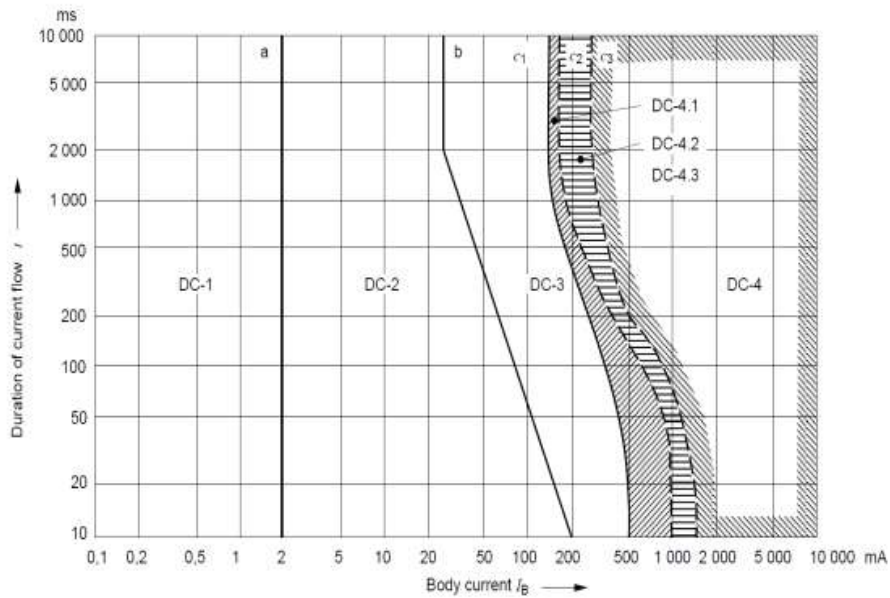
Table 2. Body Current by Reaction

분류	생 리 작 용	전류의 크기[mA]
1등급	- 자발적으로 이탈이 불가능하게 된 상태 - 심장박동 리듬, 신경계통 영향 없음	약 25 이하
2등급	- 참을 수 있는 전류 - 혈압상승, 심장맥동 불규칙, 심장정지 - 50[mA]에서는 실신한다.	25~80
3등급	- 실신, 심실 세동	80~3000
4등급	-혈압상승, 회복불가성 심장정지, 부정맥 폐기종	약 3000 이상

국제전기기술위원회(IEC, International Electro-technical Commission)에서 감전 전류의 안전한계에 관한 국제적인 기준인 IEC TC-64(국제전기기술위원회 건축전기설비 전문위원회)에서의 심의 결과로 전류가 인체에 미치는 영향에 관한 것은 그림 15에서와 같이 교류인 경우와 직류인 경우에 대한 안전한계 곡선을 감전보호 대책의 기초 자료로 Pub. IEC 60479(인체 내 통과전류의 영향)을 사용하고 있으며, 달질(C. F. Dalziel)이나 켈펜(Keoppen)의 연구 결과를 적용하였으나, 최근에 오스트리아의 비겔마이어(Biegelmeir)에 의한 연구결과를 반영해 새로운 기준이 제정되었다. 상기 기준은 비겔마이어의 연구결과에 나온 특정범위의 통전전류와 통전시간에서는 일정위험도를 발생시킨다는 내용을 반영한 것으로, 달질 연구결과와 통전전류와 통전시간의 관계에 따른 위험성의 영역을 좀 더 세분화 시킨 것이다. 그림 15에서는 인체에 미치는 교류와 직류전류의 영향에 관한 사항을 정리한 것이다.



(a) AC Case



(b) DC Case

Figure 15. Time/Current zones of effects on persons

- AC-1 (a 이하) : 영향이 없고 감지전류라 하며 0.5mA 정도이다.
- AC-2 (a~b사이) : 위험한 영향이 없고 이탈 한계전류라 하며 10mA 정도이다.
- AC-3 (b~c사이) : 예상하지 못한 장애가 없으며 2초 이상 흐르면 근육경련과 호흡곤란 및 심장의 자극이 발생한다. 통전전류 크기 및 통전시간 경과에 따라서 일시적 심실세동이나 심실세동이 없는 심정지 발생 가능성이 있다.
- AC-3 (c이상) : AC-3의 영향보다 심한 장애가 발생하며 통전전류의 크기 및 시간의 경과에 따라 심정지와 호흡정지 및 화상 등의 인체 영향이 나타날 가능성이 크다.
- AC-4.1 (c1~c2이하) : 심실세동이 일어날 가능성이 약 5%정도 있다.
- AC-4.2 (c2~c3이하) : 심실세동이 일어날 가능성이 약 50%정도 있다.
- AC-4.3 (c3이상) : 심실세동이 일어날 가능성이 50%정도 있다.

직류전류의 영향과 관련한 내용은 다음과 같다.

- DC-1 (a 이하) : 전류의 흐름, 차단, 갑작스런 전류 흐름의 방향을 바꿀 때 발생하며 약간 따끔한 감각이 있다.
- DC-2 (a~b사이) : 전류의 인가, 차단, 갑작스런 전류 흐름의 방향을 바꿀 때 발생하며 비자의적인 근육수축이 일어날 수 있으나, 전기 생리학적으로 인체에 해롭지 않다.
- DC-3 (b~c1사이) : 비자의적이고 강한 근육의 반응이 발생하고 전류크기와 시간이 증가함에 따라서 심장의 회복 가능한 기능장애나 박동전도가 일어날 수 있다. 일반적으로 기관의 손상은 되지 않은 것으로 나타났다.
- DC-4.1 (c1~c2사이) : 심실 세동의 가능성이 약 5 %정도까지 커진다.
- DC-4.2 (c2~c3사이) : 심실 세동의 가능성이 약 50 %정도까지 커진다.
- DC-4.3 (c3이상) : 심실 세동의 가능성이 50 %를 초과한다.

3. 인체 허용전류

인체 통과전류의 크기는 인체에 대한 전기 충격에서 중요한 역할을 한다. 그러나 인체를 통과하는 전류의 위험을 판단할 때 전류의 지속 시간도 고려해야 한다.

해석에 따르면, 지속 시간이 매우 짧으면 인간이 견딜 수 있고 심실 세동을 유발하지 않는 전류는 다음과 같다.

$$I^2 t = K \quad (53)$$

여기서 I 의 단위는 A이며, K 는 인체의 체중과 관련된 에너지 계수이다. 인체의 체중이 50kg과 70kg의 에너지 계수는 각각 $K_{50} = 0.0135$ 와 $K_{70} = 0.0247$ 이다. 따라서 50kg의 인체에 대해 허용되는 신체 전류 I_{K50} 을 얻을 수 있다[15].

$$I_{K50} = 0.166 / \sqrt{t} \quad (54)$$

70kg 인체의 허용 신체 전류 I_{K70} 은 다음과 같다[15,25].

$$I_{K70} = 0.157 / \sqrt{t} \quad (55)$$

4. 인체 허용전압

인체 허용 전류 I_K 에 인체 저항 R_B 를 곱하면 인체 허용 전압 U_{SV} 를 얻을 수 있다.

$$U_{SV} = I_K R_B \quad (56)$$

직접 접지된 전력시스템에서 단상 또는 2상 접지 고장은 장시간 유지될 수 없으

므로 식 (54)를 식 (56)에 대입하면 50kg의 인체에 대한 단시간 인체 허용 전압은 다음과 같다.

$$v_0 = 0.166 R_B / t \quad (57)$$

또한 70kg 인체에 허용되는 인체 전압도 얻을 수 있다:

$$I_{SV70} = 0.157 R_B / \sqrt{t} \quad (58)$$

5. 인체 허용 전위차

인체의 허용 가능한 전위차는 접촉 전압, 보폭 전압 및 전이 전압을 포함한다. 보폭 전압은 다른 접지된 설비에 접촉하지 않고 2m 거리에서 1m 거리를 잇는 사람이 겪는 표면 전위차이다. 보폭 전압은 대지 전위 상승 (GPR)과 지표면 전위 간의 전위차이다. 사람이 서있는 지점과 동시에 그의 손이 접지된 설비와 접촉하고 있는 지점의 전위이고, 전이 전압은 GPR이 변전소 밖으로 전이될 때 접촉 전압의 특수한 경우이다. 전형적으로 전이된 전압의 경우는 사람이 변전소 구역 내에 서서 원격 지점에 접지된 도체에 닿거나 사람이 원격 지점에 서서 변전소 접지 그리드에 연결된 도체에 닿으면 발생한다.

식 (54)와 식 (55)에 의해 허용되는 인체 전류를 구한 후, 인체의 적절한 매개 변수가 결정되면 접촉점 사이에 발생하는 허용 전위차를 계산할 수 있다. 임의의 두 점 사이에 허용되는 전위차는 회로 파라미터 및 허용되는 인체 전류에 따라 계산될 수 있다. 에너지 등가 정리에 따르면 두 접점을 연결하는 외부 회로가 직렬로 연결된 경우 두 지점 사이의 인체 전류는 인체 저항의 전압에 의해 생성된 전류와 같다. 엄밀히 말하면 외부 전류는 두 개의 병렬 경로를 가질 수 있다. 하나는 대지를 통과하는 직접 경로이고, 다른 하나는 외부 병렬 회로를 통과하는 경로이다. 고장 전류는 수백~수천 암페어만큼 높기 때문에, 허용되는 신체 전류는 밀리암페어 (milliampere) 수준으로 제한되어야 하지만, 적용된 전압에 대한 인체의 영향은 무

시 될 수 있다. 전기 쇼크 이전의 모든 전위의 차이는 변하지 않는다고 가정할 수 있다. 사람이 대지를 걷는 경우, 양 발과 지면 사이의 접촉 저항()과 인체 저항 (R_B)이 직렬로 연결되고, 두 발 사이의 허용 보폭 전압(U_S)은 다음과 같다:

$$U_S = \frac{R_B}{R_B + 2R_F} V_S \quad (59)$$

여기서 V_S 는 사람이 서있지 않은 상태에서 두 지점 사이의 전위차이다. 사람이 대지에 서서 접지된 금속 도체와 접촉할 때, 두 발과 대지 사이의 접촉 저항은 평행하고 한 손과 한 발 사이의 실제 전압(즉, 허용 접촉 전압 U_T)은 다음과 같다:

$$U_T = \frac{R_B}{R_B + 0.5R_F} V_T \quad (60)$$

여기서 V_T 는 사람이 없는 상태에서 두 지점 간의 전위차이다. 발이 지면과 접촉할 때, 한 발과 지면 사이의 접촉 저항 R_F 는 인체 전류에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 한 발을 반경 b cm의 둥근 판으로 간주되고 균질 토양에서 R_F 는 다음과 같이 계산될 수 있다[18].

$$R_F = \frac{\rho_S}{4b} \quad (61)$$

여기서 ρ 는 토양의 저항률 $\Omega \cdot m$ 이다. 일반적으로 $b = 8cm$ 이라고 하면 한 발의 접촉 저항은 $3\rho_s \Omega$ 이다. 허용되는 인체 전류를 계산하기 위한 식 (54)에 의하면, 지락 고장 전류가 큰 전력 시스템에서 50kg 인체에 대한 최대 허용 보폭 전압 U_{S50} 과 접촉 전압 U_{T50} 을 얻을 수 있다.

$$U_{S50} = (R_B + 2R_F)I_K = (1000 + 6\rho_S) \frac{0.116}{t} = \frac{116 + 0.7\rho_S}{\sqrt{t}} \quad (62)$$

$$U_{T50} = (R_B + R_F/2)I_K = (1000 + 1.5\rho_S) \frac{0.116}{\sqrt{t}} = \frac{116 + 0.17\rho_S}{\sqrt{t}} \quad (63)$$

또한 70kg 인체의 최대 허용 보폭 전압 U_{S70} 과 접촉 전압 U_{T70} 을 얻을 수 있다 [16].

$$U_{S70} = (R_B + 2 R_F) I_K = (1000 + 6 \rho_S) \frac{0.157}{t} = \frac{157 + 0.942 \rho_S}{\sqrt{t}} \quad (64)$$

$$U_{T70} = (R_B + R_F/2) I_K = (1000 + 1.5 \rho_S) \frac{0.157}{\sqrt{t}} = \frac{157 + 0.2355 \rho_S}{\sqrt{t}} \quad (65)$$

최대 허용 보폭 전압과 접촉 전압이 허용 인체 전압 U_S 인 것으로 가정하면 최대 허용 보폭 전압 V_S 과 접촉 전압 V_T 는 다음과 같이 도출될 수 있다.

$$V_S = \frac{R_B + 6 \rho_S}{R_B} U_S \quad (66)$$

$$V_T = \frac{R_B + 1.5 \rho_S}{R_B} U_S \quad (67)$$

6. 인체 안전과 지표면 저항률의 영향

앞의 해석에 따르면 허용되는 접촉 전압과 보폭 전압은 지표면 토양의 저항률을 높이면 증가할 수 있는 지표면 토양층의 저항률에 의해 직접 결정된다. 또한 고저항률 층을 지표면에 포장하는 것은 고장 전류가 지표층으로 흐르는 것을 방지하는데 효과적이다. 지표면 전압은 지표면 고저항률 지층이 없는 전압에 가깝다. 접촉 저항이 증가하기 때문에 인체를 통과하는 전류가 감소한다.

변전소에는 일반적으로 지면에 15~38cm 두께의 자갈 또는 아스팔트 콘크리트 포장이 깔려 있다. 비오는 날에도 자갈 또는 아스팔트 콘크리트는 $5000 \Omega \cdot m$ 의 저항률을 유지할 수 있다. 콘크리트는 물 흡수성을 지니고 있기 때문에 보통의 콘크리트 포장은 지표면 저항률을 높이기 위해 사용할 수 없다는 것에 특별한 주의가 필요하다. 비흡수성은 비오는 날에 저항력이 수십 $\Omega \cdot m$ 으로 떨어질 것이다.

한 발과 지면 사이의 접촉 저항 R_F 를 계산하기 위한 식 (61)은 균질 토양 모델을 기반으로 한다. 지면에 고저항률 층을 포장한 후 접촉 저항 R_F 는 이층 토양 모

텔에 따라 분석해야 한다. 접촉 저항 은 지표면 고저항률 층과 토양의 저항률의 비율과 관련이 있다. 또한 지표면 고저항률 층의 두께와 관련이 있으며, IEEE Std 80-2000은 고저항률 층의 영향[16]을 고려하기 위해 다음과 같은 단순화된 방법을 사용할 것을 권장한다. 고저항률 지표면 층의 경우에 바닥에 서있는 사람 한쪽의 접지 저항은 고저항률 층의 영향을 고려하기 위해 다음 공식으로 수정된다[16].

$$R_F = \frac{C_S \rho_S}{4b} \quad (68)$$

여기서, C_S 는 고저항률 층을 고려한 발 접지 저항의 보정 계수이다.

$$C_S = 1 + \frac{16b}{\rho_S} \sum_{n=1}^{\infty} K^n R_M(2nh_S) \quad (69)$$

K 는 반사 계수이다.

$$K = \frac{\rho - \rho_S}{\rho + \rho_S} \quad (70)$$

여기서, h_S 는 고저항률 지표면층의 두께 m , ρ_S 는 고저항률 층의 저항률 $\Omega \cdot m$, ρ 은 고저항률 층 아래의 균질 토양의 저항률 $\Omega \cdot m$, $R_M(2nh_S)$ 는 $2nh_S$ 의 거리를 가진 두 개의 유사한 평행 동축 디스크의 상호 접지 저항이며, 토양은 그림 16에서와 같이 저항이 ρ_S 인 무한 매체이다.

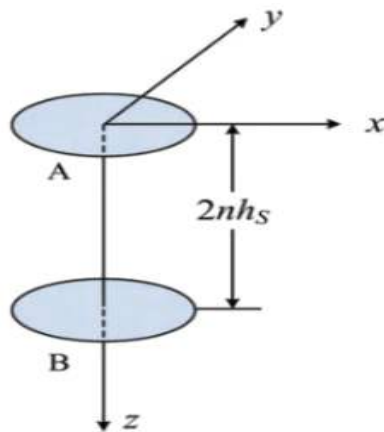


Figure 16. Two disc electrode model

그림 16에서 나타낸 바와 같이 반경 b 를 가진 디스크 A 가 x-y 평면에 있고, z 축은 디스크의 중앙을 통과하고 디스크 A 의 z 좌표는 0입니다. 디스크 A 에서 무한 매체로 흐르는 전류는 I 와 축 대칭 좌표를 사용하여 임의의 점 $P(r, z)$ 의 전위를 얻을 수 있다.

$$V(r, z) = \frac{I\rho}{4\pi b} \sin^{-1} \left[\frac{2b}{(r-b)^2 + z^2 + \sqrt{(r+b)^2 + z^2}} \right] \quad (71)$$

여기서, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $z = 2nh_s$, 디스크 B와 디스크 A의 동축 전위는 평균 포텐셜 법으로 풀 수 있다.

$$V_B = \frac{1}{\pi b^2} \int_0^b 2\pi x V(x, 2nh_s) dx \quad (72)$$

따라서 디스크 A와 B 사이의 상호 저항 $R_M(2nh_s)$ 은 다음과 같다

$$R_M(2nh_s) = \frac{V_B}{I} \quad (73)$$

그림 17은 보정 계수 C_S 와 표면층의 두께 h_s 사이의 계산된 곡선이다. 따라서 표면층의 두께와 반사 계수 K 를 알면 그림 17의 해당 보정 계수 C_S 를 얻을 수 있다. 또한 보정 계수는 다음의 실험식을 사용하여 계산할 수 있다[24].

$$C_S = 1 - \frac{a(1 - \rho/\rho_S)}{2h_s + a} \quad (74)$$

여기서, 상수 $a = 0.09$ m이고 h_s 와 b 의 단위는 m이다. 식 (74)는 K 가 0에서 0.98 범위이고 h_s 가 0에서 0.3 m인 조건에 적합하다. 그림 17에서 점선은 식 (74)에 의해 계산된 결과이다. 컴퓨터 모델은 또한 C_S 의 값을 결정하는데 사용되었다 [23,26]. 실선의 수치 결과와 비교하면, 식 (74)의 오차는 5 % 미만이다.

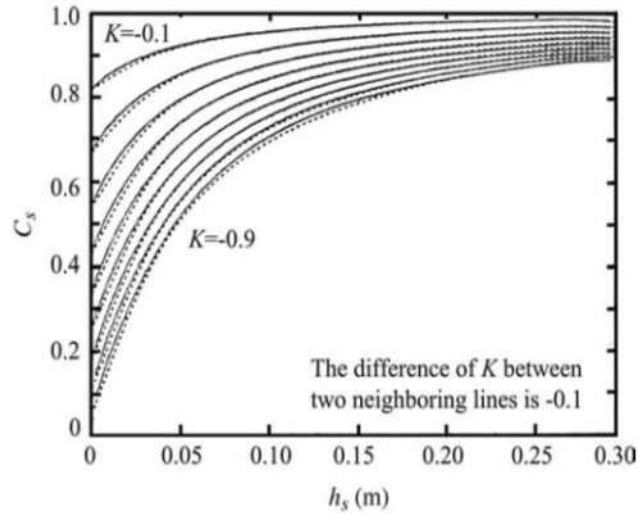


Figure 17. The relationship between the correction coefficient

발 접지 저항에 대한 지표면층 재료의 영향을 고려한 후, 지락 고장전류가 큰 전력 시스템에서 50kg 인체의 최대 허용 보폭 전압 U_{50} 및 최대 허용 접촉 전압 U_{T50} 을 계산하기 위한 공식이 다음과 같이 변경된다.

$$U_{50} = (1000 + 6\rho_S C_S) \frac{0.116}{\sqrt{t}} = \frac{116 + 0.7\rho_S C_S}{\sqrt{t}} \quad (75)$$

$$U_{T50} = (1000 + 1.5\rho_S C_S) \frac{0.116}{\sqrt{t}} = \frac{116 + 0.17\rho_S C_S}{\sqrt{t}} \quad (76)$$

비슷한 방법으로 70 kg 인체에 대한 공식은 다음과 같다[16].

$$U_{570} = (1000 + 6\rho_S C_S) \frac{0.157}{\sqrt{t}} = \frac{157 + 0.942\rho_S C_S}{\sqrt{t}} \quad (77)$$

$$U_{T70} = (1000 + 1.5\rho_S C_S) \frac{0.157}{\sqrt{t}} = \frac{157 + 0.2355\rho_S C_S}{\sqrt{t}} \quad (78)$$

G. 대지의 전기적인 특성

매설된 접지전극의 접지저항은 접지전극의 형성, 재료, 크기, 접지 전극이 매설된 대지를 구성하는 토양의 형태, 조건, 대지 구조 등에 따라 변화하고, 특히 대지 저항률의 크기에 지배적인 영향을 받는다. 접지전극을 매설하는 부근의 토양 저항률(soil resistivity)과 대지저항률(earth resistivity)이 접지효과를 크게 좌우하게 된다. 따라서 접지전극의 설계 및 시공에 있어 접지전극의 매설지점 대지 저항률과 지층의 구조를 정확하게 알아내는 것은 굉장히 중요하다. 접지전극을 매설한 장소의 대지 저항률은 토질 또는 토양 내 함유된 염분, 화학물질, 수분 함유량, 토양 온도 등에 따라서 크게 변화하므로 이들의 특성에 따라 접지저항은 변동한다. 따라서 대지 저항률을 결정하는 것은 주변의 환경과 토질, 지층구조를 잘 이해해야만 가능하기 때문에 간단한 일은 아니다.

적합한 접지전극을 설계하려면 기본적으로 전류 분포를 이해 해야 한다. 대지의 전류 분포는 전류의 주파수와 관련이 있다. 상이한 주파수의 전류 하에서의 대응하는 관통 깊이는 상이 할 것이다. 또한 전류 분포는 대지의 전기적 특성, 즉 토양의 전기적 특성에 의해 결정되며, 토양의 전기적 특성을 특징짓는 주된 매개 변수는 저항률, 유전 상수 및 자기 도전성을 포함한다.

1. 대지저항률

대지(토양)의 저항률은 토양의 종류, 수분 함량, 온도, 토양의 물에 녹아있는 염분의 함량, 토양의 입자 크기와 분포, 장력, 인가된 전기장 등에 의해 광범위하게 변화한다. 토양의 저항률은 수십 $\Omega \cdot m$ 에서 5000 $\Omega \cdot m$ 이상의 범위로서, 화강암과 현무암의 변성암, 그리고 수 $k\Omega \cdot m$ 에서 수십 $k\Omega \cdot m$ 사이의 저항률을 지닌 석회암 및 사암의 퇴적암을 포함하여 낮은 다공성 물질로 저항률이 높다.

토양의 주성분은 규산과 산화알루미늄이므로 완전한 건조 상태에서는 전기가 흐르지 않는 절연체이다. 하지만 자연계의 토양이 완전한 건조 상태는 아니기 때문에 어느 정도의 도전성을 가지게 되며, 토양에 수분이 함유되어 있으면 저항률이 급격

히 낮아져 전기가 잘 흐를 수 있게 된다. 즉, 금속에 비해 도전율이 매우 작은 반도체로도 볼 수 있고, 그 대표적인 물질들의 저항률은 그림 18에 나타내었다.

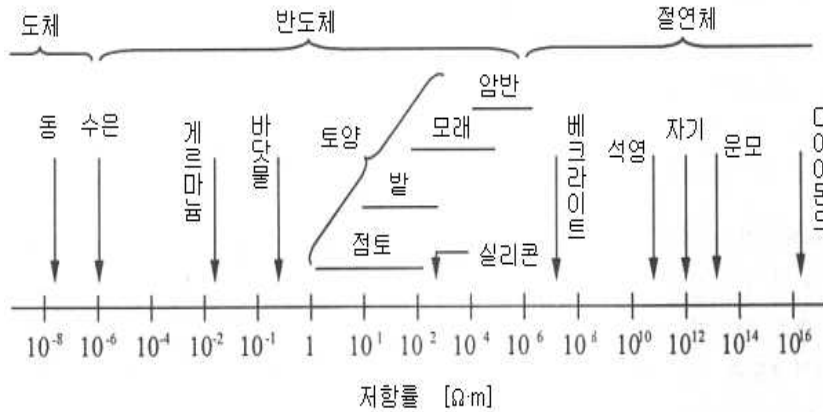


Figure 18. Resistivity of materials

대지 저항률은 항상 일정 값을 나타내는 것은 아니고 기후나 온도, 습도나 주위 환경조건에 따라서도 변화한다. 대지 저항률 변화에 영향을 미치는 요인들로는 토양종류, 토양에 용해된 화학물질의 종류와 농도, 수분 함유량, 온도, 토양을 구성하는 입자크기와 분포, 대지 표면으로부터의 깊이와 관련한 압력과 조밀도 등이 있다. 대지 저항률은 토양에 함유된 전해질의 저항률에 따라 영향을 미친다고 볼 수 있고, 지표수(surface water)는 대지 저항률에 크게 영향을 미치지 않는다. 토양은 대체로 고체, 액체, 기체 구성 요소가 있는 매우 복잡한 시스템 구조다. 토양의 매개변수는 온도, 습도, 주과수 및 토양 입자크기와 같은 토양 특성에 따라 다르다.

토양에서 저항률에 대한 주과수의 영향은 다음과 같다.

- 1) 토양의 저항률은 주과수가 증가함에 따라 감소한다. 특히 건조한 토양의 경우 더욱 그렇다.
- 2) 토양 수분 함량의 감소와 더불어 토양 내성에 대한 주과수의 영향이 강해진다. 건조한 토양의 경우, 이 영향은 매우 분명하다. 그러나 습도가 10 % 인 토

양의 경우 영향력이 약하다. 1 Hz에서 1 MHz까지의 주파수 범위에서 토양 저항률은 거의 변하지 않는다.

- 3) 온도는 습도가 낮은 토양의 저항에 약한 영향을 미치지만, 습도가 높아질수록 이러한 영향이 커진다. 습도가 10%에 이르면 그 영향은 매우 강하게 나타난다.

2. 대지의 유전율

높은 저항률 영역에서는 토양에서 변위 전류의 영향이 고려되어야 한다. 변위 전류는 토양의 유전율과 직접 관련이 있다. 따라서 유전율의 영향은 고 저항 영역에서의 접지 설계에서 고려되어야 한다.

알려진 바와 같이 진공 상태에서 주어진 점전하 q_0 에 의해 생성된 전기 강도는 주변 공간에서 다음과 같다.

$$E_0 = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (79)$$

여기서, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m은 진공에서 유전율이며, r 은 한 점과 점전하 사이의 거리이다.

이 점전하가 상대 유전율 ϵ_r 을 갖는 전해질에 놓여 있으면 동일한 거리 r 을 갖는 한 점에서 점전하에 의해 생성되는 전기 강도는 다음과 같다.

$$E_0 = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2} \quad (80)$$

그러므로 상대 유전율 ϵ_r 을 갖는 전해질 내의 점전하에 의해 생성된 전기 강도는 진공에서의 전기 강도와는 반대로 감소된다. 이는 점전하 q_0 가 반대 전하를 가진 결합된 전하층으로 둘러싸이기 때문이다. 이 효과는 일반적으로 분극된 전하(결합된 전하)에 의한 q_0 에 대한 특정 차폐 효과에 기인한다.

실제로 토양의 유전율은 일정하지는 않지만 토양 성분, 습도, 압력 및 온도뿐만 아니라 측정 중에 적용되는 전류의 빈도에 따라 달라진다.

토양에서 유전율에 대한 주파수의 영향은 다음과 같다.

- 1) 토양의 유전율은 빈도가 증가함에 따라 감소한다.
- 2) 토양 수분 함량의 증가와 더불어 토양 유전율에 대한 주파수의 영향이 증가한다.
- 3) 온도가 높은 토양의 유전율은 더 작다. 습한 토양의 유전율에 대한 온도의 영향은 건조한 토양의 유전율보다 훨씬 분명하다.
- 4) 건조한 토양의 유전율은 습도가 높은 토양의 유전율보다 작다.

Ⅲ. 접지전극의 접지저항 보정계수

일반적으로 현장에서 설치되는 접지전극의 접지저항을 계산하는 식은 접지전극의 형태별로 잘 알려져 있다. 그러나 이러한 접지전극의 저항 계산식들은 접지전극의 변형이나 대지 저항률의 변동에 따른 정확한 접지저항 값을 계산하는 관점에서는 매우 미흡한 것이 현실이다. 일부 접지전극 재료별로 접지저항 계산식들은 제안되어 있으나, 접지저항의 중요한 변수인 대지 저항률의 변화에 따라 다른 보정계수를 적용해야 함에도 불구하고 대지 저항률의 변화와 상관없이 일정한 값을 적용하도록 제시되고 있어서 현장에서 실질적으로 적용할 때의 어려움이 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하고자 현장시험에서 직접 여러 종류의 접지전극을 설치하여 측정을 통한 대지 저항률의 변동에 따라 접지저항의 계산을 위한 보정계수를 다르게 적용할 수 있도록 대지 저항률이 변수인 보정계수의 계산식을 제안하였다. 특히 접지전극별 접지저항의 경년변화 특성을 시험하기 위하여 설치된 접지전극에 대하여 주기적으로 접지저항과 대지 저항률의 변화를 같이 측정하고 그 결과를 분석하였다.

이러한 목적을 위하여 여러 장소에서 접지 전극에 대한 시험을 하여야 하지만 여건상 불가능한 일이므로 본 논문에서 접지전극의 계절적인 변화에 대하여 주기적으로 접지저항과 대지 저항률을 측정한 결과를 이용하였다.

A. 대지 저항률의 측정과 분석

1. 대지 저항률의 측정방법

접지전극이 위치하는 대지의 전기적인 특성이 매우 다양하고 복잡해 대지의 저항률 결정을 위하여 다양한 측정 방법과 측정 기술이 검토되어 왔다. 대지저항률 측정 방법은 크게 직접적인 측정 방법과 간접적인 측정 방법으로 분류된다.

직접적인 측정 방법은 깊이별로 여러 개의 토양의 시료를 추출해 전문적인 실험실에서 조사하는 방법이다. 이러한 방법은 시료의 추출과정에서 토양이 뒤섞이지

않는다고 가정하면 매우 정확하고 직접적인 조사 방법이다. 그러나 조사대상 부지를 대표할 만한 충분한 수량의 고가의 보링(Boring)작업을 필요로 한다.

간접적인 측정 방법은 전기토양학적으로 가장 선호되는 방법으로 지표면에 직선으로 4개의 전극을 배치한다. 이후 한 쌍의 전극을 통해 대지에 전류를 주입하고 다른 한 쌍의 전극사이의 대지 전위차를 측정한다. 저항 값을 통해 대지구조를 해석하는 방법이다. 측정된 대지 저항 값은 대지 저항률과는 상이하게 대지 파라미터와의 함수관계로 나타나는 물리적인 값으로, 대지 저항률과 대지 파라미터와의 알려진 관계를 이용해서 대지 구조를 결정하는 것이다. 전기설비에 관한 접지 시스템을 설계하기 위해 가장 많이 쓰이는 대지 저항률 측정 방법인 4전극 배치법은 크게 Wenner법, Schlumberger법, Dipole-dipole법으로 분류할 수 있다. 이와 같이 4전극법은 정확도가 우수하고 측정도 간편해 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 대지 구조가 복잡한 경우 대지 저항률의 측정은 간단하지 않고, 특히 측정용 전극의 매설 깊이에 따라 대지 저항률의 변동이 크다.

2. 대지 저항률의 측정

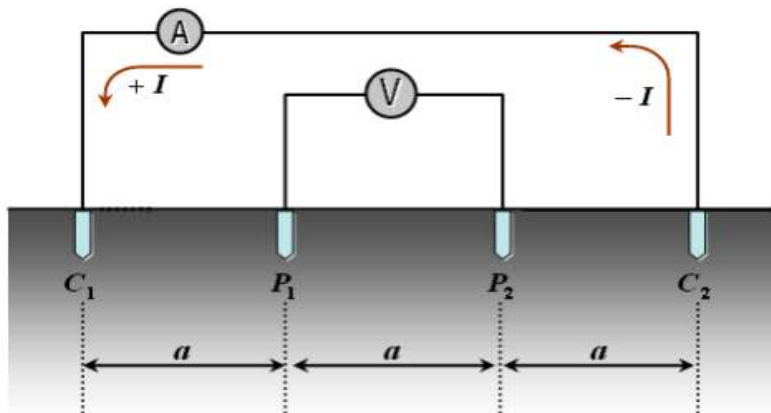


Figure 19. 4-point method by Wenner

현장에서 설치된 접지전극에 대한 저항값의 크기에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 대지 저항률이다. 따라서 접지전극의 저항의 변화를 분석하기 위해서는 대지 저항률의 변화도 함께 측정하고 분석하여야 하는 중요한 요소이다. 본 논문에서는 현장에서 대지 저항률을 측정하는 가장 일반적인 측정 방법인 Wenner의 4전극 법으로 그림 19과 같은 방법으로 계절별로 대지 저항률을 측정하였다.

3. 대지 저항률의 해석 방법

현장에서 측정한 대지 저항률의 측정값을 통한 대지구조를 해석하는 작업은 매우 어려운 작업에 속한다. 실제 대지구조는 지층별로 대지 저항률이 크게 다르기 때문에 대지 저항률의 변화가 복잡한 경우가 많고, 일반적인 경우에 전극의 간격에 대한 함수로 나타내진 겉보기 저항은 측정 전극의 간격에 따라서 크게 변한다. 이것은 대지가 불균일하다는 것을 의미하고, 일반적으로 겉보기 대지 저항률의 변화 곡선은 완만하게 변화하며 급격하게 변동하지는 않는다. 만일 변화곡선이 급격하게 변동하는 경우는 대지가 수직구조로 변화했거나, 대지표면의 부근에 국부적인 불연속점이 있을 경우이다. 곡선의 변화가 급변하는 크기는 두 개의 인접한 지층 매질의 저항률 값의 차이로 나타 낼 수 있다.

겉보기 대지 저항률의 측정값과 관련한 결과를 올바르게 해석할 수 있는 기본적인 방법은 일반적으로 지질학자들이 사용하는 다양한 해석방법과 기술이 있으나, 이러한 모든 방법이 접지문제에 적용될 수 없기 때문에 여기에서는 접지 기술자가 가장 유용하게 사용할 수 있는 신뢰성 높은 방법을 제시한다.

대지 저항률의 측정값을 해석하기 위해 사용하는 방법은 크게 실험적 방법(Empirical method), 분석적 방법(Analytical method), 수치 해석적 방법(Numerical Analysis method)으로 분류 할 수 있다.

해석적 방법은 이론적으로 해석을 하는 사람에 따라 결과가 다를 수 없으나, 실험적 방법의 결과는 해석자의 이론적 배경 및 경험에 의해 영향을 크게 받는다. 따라서 해석의 정확성을 극대화하고 부정확성을 줄이기 위해서는 두 가지의 접근법을 조합해 사용하는 것이 효율적이다. 예를 들면 해석적 방법에 의해 2개나 그 이상의 지층구조 모델이 부합할 것으로 판단된다고 가정하면, 이상적인 선택은 실험

적인 내용을 고려하는 방법도 있으며, 저항곡선을 눈으로 조사하여 결정하는 방법이 있다. 어떠한 경우에도 대지저항률 해석에 관한 경험이 해석과정에서 중요한 역할을 한다.

4. 대지 저항률의 해석

현장에서 측정되어진 겉보기 대지 저항률 측정값으로 대지 파라미터를 해석하기 위한 방법으로 $-a$ 곡선을 통한 방법 뿐 아니라 최근에 일반적으로 많이 보급되고 있는 컴퓨터프로그램을 이용해 해석하는 방법이 있다. 여러 방법들 중 대표적인 것은 일본의 T. Takahashi에 의해 제안된 다층구조의 대지 저항률 해석법과 캐나다의 F. Dawalibi에 의해 제안된 다층구조의 대지저항률 해석법 등이 있다.

본 논문에서는 현장에서 측정된 대지 저항률은 접지시스템 설계용 해석프로그램인 CDEGS의 RESAP모듈을 사용해 다층 구조의 대지 파라미터로 분석하였다. 또한, 정확한 접지시스템의 계산 및 해석을 위하여 다층구조의 대지 파라미터를 사용하여야 맞지만 현실적으로 현장에서 기술자들의 인식은 다층구조로 표현되는 것보다 단일지층의 대지 저항률로 표현하는 것이 일반적이다.

5. 대지 저항률의 등가화

대지 또는 토양은 지층의 구조, 지층의 두께 및 각 지층의 저항률 등과 같은 많은 요소들로 이루어진 복잡한 구조를 갖는 매질이며, 따라서 이들을 단일의 저항률을 갖는 매질로 나타내는 것은 많은 가정이 전제되어야만 한다. 그러나 때로는 사람들의 이해를 돕기 위하여 단일의 저항률을 갖는 균일 매질로 토양을 등가화하여 표현하는 것이 유용한 경우가 많다. 본 논문에서는 접지전극의 성능을 시험하기 위하여 접지전극을 대표하는 접지저항이 주요 관심사이므로, 실제 토양이 서로 다른 저항률 층을 갖는 다층구조이라고 하더라도 이를 접지저항에 등가인 균질의 토양으로 등가화하기 위한 알고리즘을 세우고, 일정한 절차를 수립하였다.

다층 대지구조를 균질 대지 구조로 등가화하기 위한 순서는 그림 20과 같다.

- 1) 먼저 Wenner의 4전극법을 이용하여 부지의 겉보기 대지 저항률을 측정하여 이를 겉보기저항률 곡선에 등가인 수평 다층구조의 매질로 분석하여 등가화를

한다.

- 2) 유한요소 해석방법에 의한 접지전극의 접지저항 계산알고리즘을 이용하여 100 Ωm의 균일한 토양에서의 접지전극(여기서는 2 m 길이의 접지봉을 가정)을 매설했을 때의 접지저항($R_{uniform}$)을 계산한다. 접지전극과 토양구조가 간단하므로 일반적으로 알려진 계산식을 이용하여 계산할 수도 있다.
- 3) 다음은 유한요소 해석에 의한 접지저항 계산알고리즘을 이용하여 단계 1에서 얻어진 수평 다층구조의 토양모델 내에 동일한 접지극(2 m 길이의 접지봉)을 매설했을 때의 접지저항($R_{multilayer}$)을 다시 계산한다.

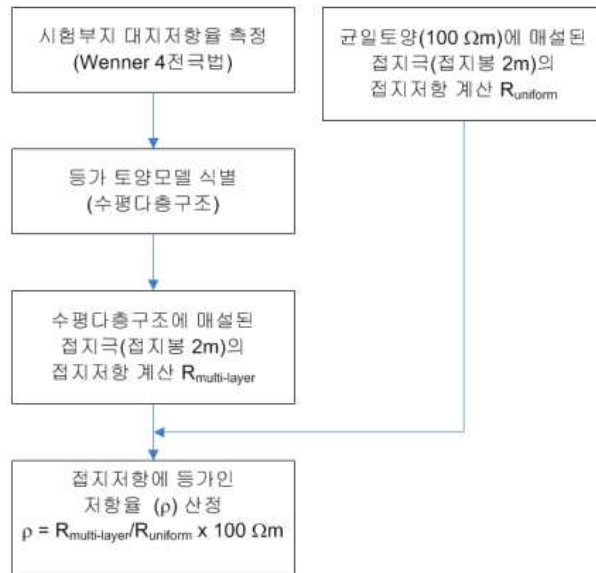


Figure 20. Flow of equivalent resistivity

그림 21는 유한요소해석에 의한 접지저항 계산과정의 이해를 돕기 위하여 수평 2층 구조에 매설된 접지봉의 접지저항을 계산하는 모델을 보인 것이다. 계산과정은 식 (81) 및 (82)와 같다. 먼저 접지봉을 여러 개의 도체조각으로 분할한 후 k 번째 도체조각으로부터 빠져 나오는 전류를 I_k , 전압을 V_k 라고 한다. 도체 내의 전압강하를 무시하면 $V_1 = V_2 = V_3 = V$ 가 되며, 접지봉에 주입한 전류(I)는 아는 값이라고 한다.

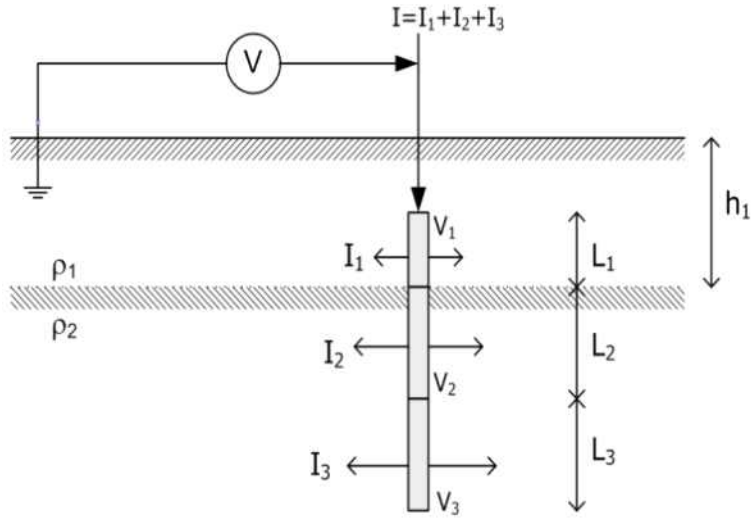


Figure 21. Calculation model of Electrode by FEM

그러면 식 (81)에 의해 다층구조 토양에 매설된 접지봉의 접지저항(R)을 계산할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} \Leftrightarrow \frac{1}{V} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (81)$$

$$\frac{1}{V}(I_1 + I_2 + I_3) = \frac{I}{V} = K \Leftrightarrow R = \frac{V}{I} = \frac{1}{K} \quad (82)$$

여기서, $K = \begin{pmatrix} [Z_{11} & Z_{12} & Z_{13}]^{-1} [1] \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & 1 \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & 1 \end{pmatrix}$

4) 균일토양을 가정한 경우 접지극의 접지저항은 대지 저항률에 비례한다는 점을 이용하여 3단계에서 계산된 접지저항이 산출되기 위한 대지 저항률을 산정한다. 계산식은 아래와 같다.

$$\rho = \frac{R_{multilayer}}{R_{uniform}} \frac{\Omega}{\Omega} \times 100 [\Omega m] \quad (83)$$

5) 등가저항률 계산식 (84)를 이용하여 역산한 등가깊이(H)를 계산한다.

$$\rho(H) = \frac{H}{L_1/\rho_1 + L_2/\rho_2 + \dots + (H - L_1 - L_2 \dots - L_n)/\rho_{n+1}} \quad (84)$$

여기서, H : 등가깊이,

 : k번째 지층의 두께,

 : k번째 지층의 저항률

6. 대지 저항률의 분석 결과

시험을 위하여 접지전극을 설치한 지역에서 측정한 대지 저항률에 대하여 다층 구조로 분석하였으며, 일반적으로 대지 저항률을 표현하는 단일 지층의 대지 저항률로 등가화 하였다. 본 논문에서는 접지전극의 성능을 시험하기 위하여 접지전극을 대표하는 접지저항이 주요 관심사이므로, 실제 토양이 서로 다른 저항률 층을 갖는 다층구조이라고 하더라도 이를 접지저항에 등가인 균일 매질의 토양으로 등가화하기 위한 알고리즘을 세우고, 일정한 절차를 수립하였다. 표 3과 그림 22는 그 결과를 보인 것이다.

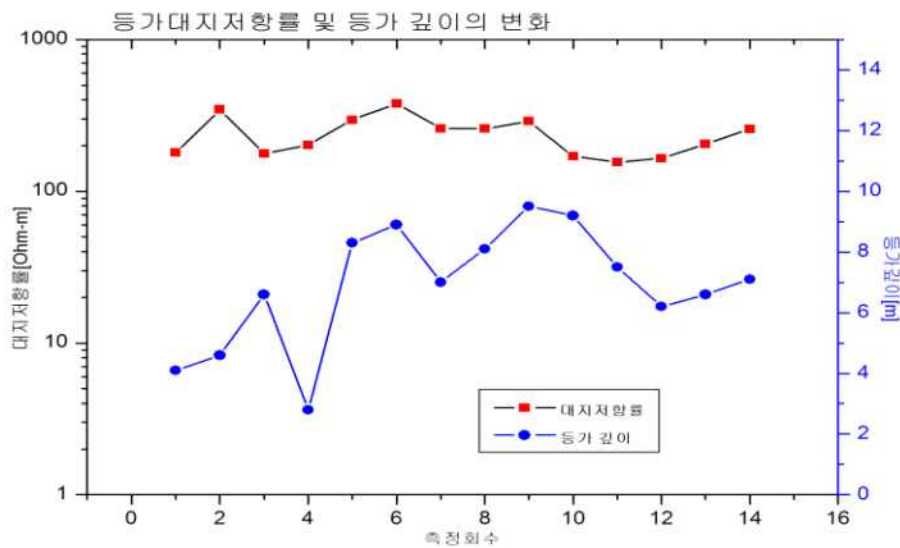


Figure 22. Variations of Equivalent Soil Resistivity and Depth

Table 3. Results of Soil Resistivity by analysis

측정 회수	대지 저항률 [Ωm]	지층깊이 [m]	등가 대지 저항률 [Ωm]	등가깊이 [m]
01	289.98	1.89	179.5	4.1
	84.41	1.38		
	1598.89			
02	356.71	4.08	345.6	4.6
	91.72	3.86		
	2556.22			
03	243.23	0.98	177.5	6.6
	139.8	4.63		
	4925.05			
04	587.26	1.66	201.9	8
	1044	3.1		
	5605.87			
05	590.14	03	295.6	8.3
	154.26	3.75		
	6340.92			
06	505.52	12	378.3	8.9
	256.59	4.53		
	1354.8			
07	413	1.66	259.5	7
	183.41	4.04		
	1625.96			
08	343.26	1.58	258.4	8.1
	197.23	5.17		
	2669.98			
09	128.49	0.82	289.4	9.5
	301.62	7.61		
	838.52			
10	161.2	88	170.1	9.2
	74.9	58		
	2175.8			
11	1819	2	155.4	7.5
	107.42	3.94		
	18621			
12	191.24	1.61	165.2	6.2
	128.03	3.65		
	1623.91			
13	144.41	0.99	204.2	6.6
	201.93	5.04		
	1250.53			
14	195.26	1.09	257.9	7.1
	260.37	5.64		
	1260.56			

B. 접지 저항의 측정과 분석

그림 23은 접지전극의 저항을 측정하는 원리를 나타낸 것으로서, 측정해야 할 접지전극, 측정할 대상 접지전극과 충분히 멀리 떨어진 임의의 다른 접지전극인 귀환 전류전극, 또 두 전극 사이에 전류를 흐를 수 있도록 사용하는 전원을 표시하고 있다. 접지저항은 무한거리 만큼 떨어져 있는 귀환 전류전극에 대해 전류를 흘려줌으로써 발생하는 측정 대상 접지전극의 전위 상승값을 측정하는 것이다.

접지저항 측정에서 겪게 되는 주된 어려움은 귀환전류전극의 적절한 위치를 결정하는 것으로 측정을 용이하게 하기 위해서는, 측정 대상전극과 귀환전류전극이 금속의 전도성 경로나 상호 대지저항에 대하여 가능한 한 충분하게 이격되어 있어야 한다. 기존의 구조물이 귀환전류전극으로 사용해야 한다면, 두 전극 사이에 금속성 접속이 간접적으로도 없다는 것을 확인해야 한다. 실제로 이것을 만족시키는 것은 매우 어려운 일이다.

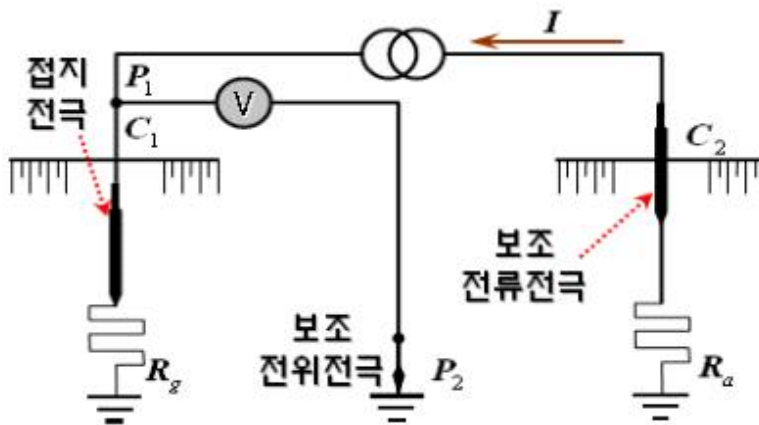


Figure 23. Principle of the FOP method

결과적으로 측정을 목적으로 새로운 귀환전류전극을 설치해야 한다는 점이다. 귀환전류전극을 위한 필요조건은 측정된 접지시스템의 특성에 의해서 광범위하게 검토되어야 한다. 일반적으로 측정에 있어서의 문제점은 접지시스템의 접지 임피던스 감소, 접지시스템 규모의 증가, 그리고 주변의 전기적 잡음 정도와 대지 저항률의 증가에 따른 점 등이다.

임의 접지전극의 저항 측정 시 이상적인 무한거리의 대지기준점을 쉽게 정하는 것을 가능하게 하고, 측정 대상전극과 귀환전류전극 사이 이격이 보장된다면, 저항 측정은 아주 단순한 과정이다. 주어진 측정전류에 대하여 접지시스템과 무한거리 사이 전압을 측정하는 것은 원하는 결과를 나타낼 것이다. 그러나 실제로 이상적 무한 기준점이나 이격거리를 얻을 수 없기 때문에, 유효한 결과를 얻을 수 있도록 이상적인 배치에 의해 보상하거나 확인 가능한 측정기법이 사용되어야 한다. 전위강하법은 이러한 관점에서 가장 광범위하게 사용되는 측정기법이다.

전위강하법에 의한 접지전극의 저항결정은 보조 귀환전류전극과 측정 대상 접지전극으로부터 거리를 증가시키며 측정하는 일련의 대지표면전위 측정에 따른다. 보조 접지전극이 접지전극과 충분히 멀리 떨어져 있고, 전압과 전류선 사이에 커플링의 효과가 측정결과에 영향을 주지 않는다면, 전위 측정은 측정전류에 의해 측정 대상전극의 전위 상승을 파악하는(또는 접근적인) 수준에 이를 것이다. 전위강하법에 의한 접지저항을 측정하기 위한 전극의 일반적인 배치는 그림 23과 같다. 전류전극 C_1 과 고정 전위전극 P_1 은 접지시스템 상에 위치한다. 무한거리의 보조전류전극은 C_2 로 표현된다. 전위전극 P_2 는 C_1 으로부터 일정 간격만큼 멀어지면서 위치하고, 전류와 전압의 측정은 각각의 P_2 지점마다 행해진다. 겐보기 저항값은 전압과 전류의 측정값 각각의 조합으로부터 결정된다. 만약 겐보기저항이 전극사이의 거리에 대하여 그려진다면, 겐보기 저항값들의 값은 전위전극 P_2 가 접지시스템으로부터 멀어지면서 변화하는 것이 관찰된다.

전위강하법에 의한 측정을 수행하는데 있어서, 전압선은 전류선과 같은 방향이거나 또는 보통 90° 의 각도로 펼쳐진다. 비록 좀 불편하더라도, 전압과 전류선을 서로 직각으로 유지하는 것이 전선사이의 상호 임피던스를 최소화할 수 있다. 이것은 접지전극의 임피던스를 측정할 때가 가장 바람직한 배치이다.

측정대상 접지전극의 저항이 1 Ω 보다 더 크고 귀환전류전극이 적절히 배치되어 있다면, 측정 접지전극에서부터 귀환전류 전극까지 측정된 전위강하곡선(potential profile)은 그림 24의 전위 분포곡선과 유사할 것이다. 곡선에서 측정대상 접지전극 뿐만 아니라 귀환전류전극의 영향도 받지 않는 영역을 나타내는 부분은 뚜렷하게 평평한 부분이라는 것을 쉽게 알 수 있다. 이 곡선의 평평한 부분에서 관찰되는 결 보기 저항 값이 측정대상 접지전극의 저항 값이 된다. 그러나 많은 경우에 전위강하법으로 측정한 결과로부터 얻어지는 곡선은 그림 24의 전위분포곡선 모양과 비슷하지 않기 때문에 측정데이터를 이용한 해석절차를 거치거나 측정 위치 등을 수정하여야 한다.

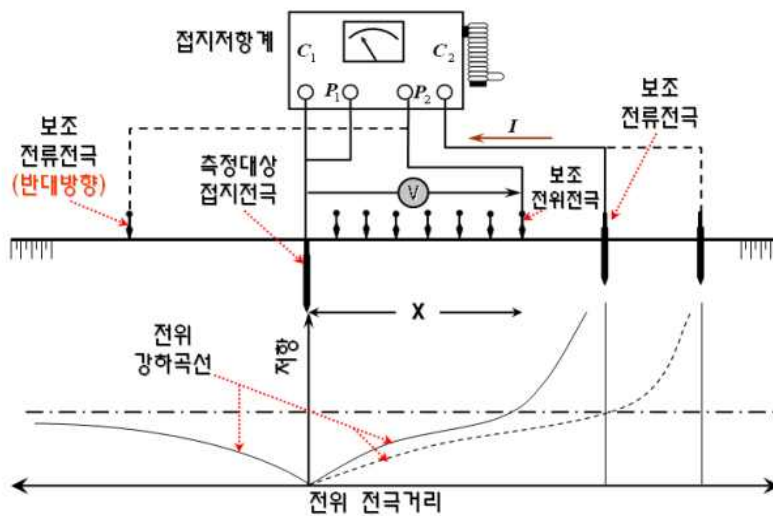


Figure 24. Measurement circuit & result

C. 접지 저항과 측정계수 산정 및 보정계수 모델

1. 접지 저항의 계산

접지전극이 임의의 모양으로 연결된 경우에 대하여 전류가 흐를 때 접지전극의 전위분포를 구하면 병렬접지저항을 계산할 수 있다. 반지름 r 이고 길이가 l 인 봉상전극은 등가적으로 회전타원체 전극의 극한 ($r \ll l$)의 형상으로서, 접지전극에 접지전류 I 가 유입하고 있을 때, 전극에서 x 만큼 떨어진 지표면의 전위분포는 다음과 같다.

$$V(x) = \frac{\rho I}{4\pi kl} \ln \frac{1+e}{1-e} \quad (85)$$

$$\text{여기서, } k = \frac{1-r^2}{l} \quad (86)$$

$$e = \sqrt{1 - \frac{r^2 + \lambda}{l^2 + \lambda}} \quad (87)$$

$$\lambda = x^2 - r^2 \quad (88)$$

따라서 접지전극간 거리가 S 인 n 개의 병렬접지 전극에 대한 접지저항 R_0 은 전위전극 V 와 접지전류 I 와의 비례 관계이므로 다음과 같이 표현된다.

$$R_0 = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{[1, 1, 1, \dots, 1] F^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}} \quad (89)$$

여기서,

$$\left[\begin{array}{cc} R & f(S_{12}) \\ f(S_{21}) & R_f \end{array} \right] \quad (90)$$

$$\left[\begin{array}{cc} f(S) & R_f \end{array} \right]$$

$$f(x) = \ln \frac{1 + e}{1 - e} \quad (91)$$

x : 전극간 거리

2. 측정계수의 환산

설치된 각각의 접지전극에 대하여 단일 지층의 대지구조로 표현된 대지 저항률에 대하여 계산한 접지저항과 측정된 접지저항의 크기에 대한 비례상수(측정계수)를 식 (92)와 같이 정의하였다.

$$\text{측정계수} = \frac{\text{측정한 접지저항}}{\text{계산한 접지저항}} \quad (92)$$

따라서 각각의 설치된 접지전극에 대하여 대지 저항률의 변화에 대한 측정계수들을 구할 수 있다.

3. 보정계수의 산정 모델

본 논문에서는 대지 저항률에 변화에 대한 접지저항 보정계수의 관계식을 식 (93)과 같이 모델링을 하고, 계절별로 측정된 접지전극의 접지저항 값에 대한 측정계수들에 대하여 파라미터 계산을 위한 일반적인 해법인 최소자승법(Least Square method)에 의하여 대지 저항률 변화에 대한 접지전극 별 접지저항 보정계수 모델의 파라미터를 구할 수 있다.

$$\text{보정계수} = 1 * \text{EXP} \left(-\frac{x}{t1} \right) + y0 \quad (93)$$

여기서, x : 대지저항률

$t1, y0$: 파라미터

D. 보정계수의 산정

접지전극으로 사용되는 접지동봉, 심타용 강봉 및 콘크리트 접지봉에 대하여 측정한 접지저항 값과 단일 지층으로 표현된 대지 저항률을 이용하여 계산한 접지저항 값으로부터 식 (92)에 의하여 접지전극별 측정계수를 계산하였으며, 계산된 측정계수는 대지 저항률의 변화에 따라 분포하고 분포된 측정계수로부터 각각의 접지전극별 보정계수를 최소자승법으로 보정계수 모델의 파라미터를 결정하였다.

1. 접지동봉

가장 일반적으로 많이 사용되고 있는 접지동봉에 대하여 접지저항을 계산하기 위한 보정계수를 산출한 결과를 그림 25에 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 대지 저항률의 크기가 증가함에 따라 접지저항 보정계수의 크기도 감소하며, 대지 저항률의 크기가 커질수록 보정계수의 감쇄가 지수 함수적으로 감소하다가 변화가 거의 없어지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 이미 잘 알려진 내용으로서 본 논문의 결과에서도 확인할 수 있다.

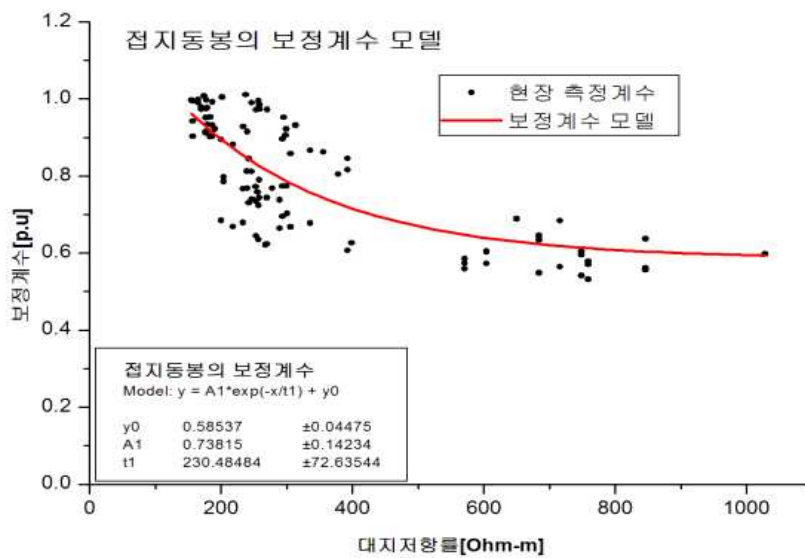


Figure 25. Corrective coefficient of copper-clad rod

2. 심타용 강봉

봉형 접지전극인 심타용 용융아연도금 접지봉(심타용 강봉) 전극에 대하여도 접지저항을 계산하기 위한 보정계수를 산출하였으며, 그림 26은 심타용 접지봉의 대지 저항률별 측정계수의 분포와 산출한 보정계수를 보인 것이다. 심타용 강봉은 대지 저항률이 작은 영역에서 보정계수의 변화가 급격하게 감소하는 현상이 나타났다.

3. 콘크리트 접지봉

콘크리트 접지봉 전극에 대하여도 접지저항을 계산하기 위한 보정계수를 산출하였으며, 그림 27은 콘크리트 접지봉의 대지 저항률별 측정계수의 분포와 산출한 보정계수를 보인 것이다. 콘크리트 접지봉도 마찬가지로 대지저항률의 크기에 따라 보정계수의 크기가 역비례한다.

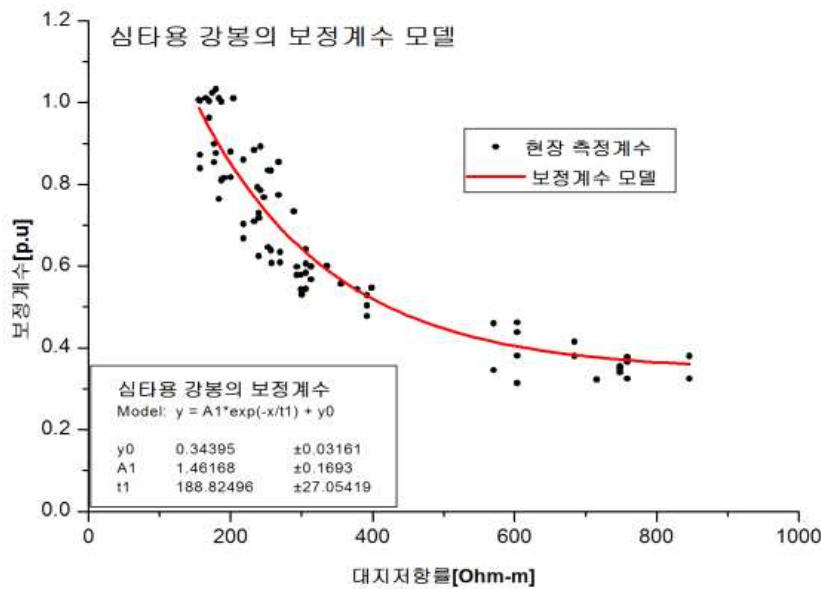


Figure 26. Corrective coefficient of advanced electrode

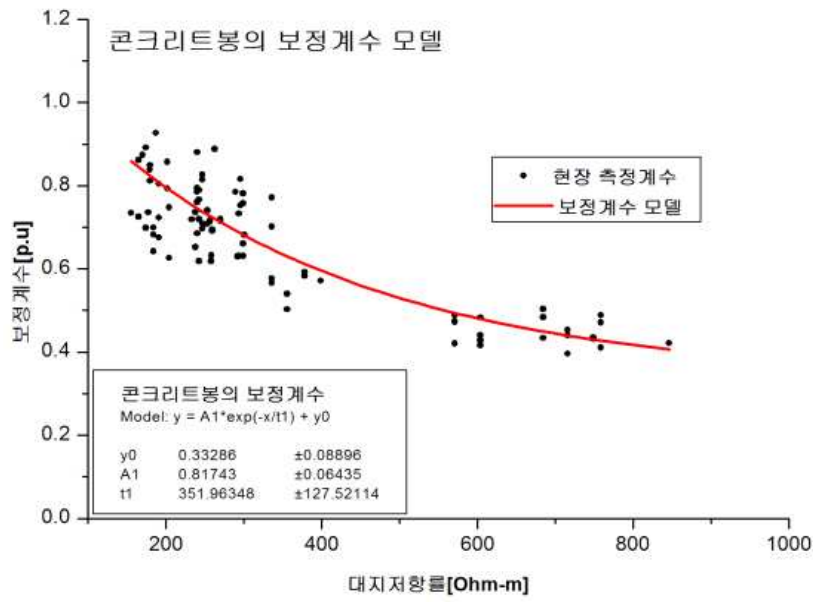


Figure 27. Corrective coefficient of concrete rod

E. 보정계수를 적용한 접지저항의 계산

일반적으로 알려진 형상별 접지전극의 접지저항 계산식은 접지재료의 특성을 반영하지 않은 식으로서, 현장에서 접지설계 등의 목적을 위하여 직접적으로 적용하기에는 여러 가지의 문제점이 있다. 특히 일정한 값인 보정계수를 이용한 접지저항을 그대로 적용하여 설계 및 설치 등에 반영하게 되면 커다란 오류가 발생할 수 있게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 접지재료별의 보정계수도 필요하지만 설치 장소의 특성인 대지 저항률의 변화와 접지전극의 길이 등에 대한 종합적인 보정계수가 필요한 것이다. 따라서 본 논문에서는 현장에서 시험을 위하여 설치한 접지전극에 대한 대지 저항률과 접지저항의 측정을 통하여 접지전극 재료(형상)별로 대지 저항률을 변수로 하는 새로운 보정계수를 제안하였으며, 제안된 접지저항 계산을 위한 보정계수를 이용하여 접지전극의 재료별로 대지 저항률의 변화에 따라 접지전극의 수를 변화시키면서 병렬 접지전극사이의 거리를 2 m로 하여 접지저항을 계산하여 제안된 보정계수의 특성을 비교하였다. 제안된 접지저항 계산을 위한 대지 저항률 변화에 따른 보정계수를 적용하여 각각의 접지전극별 접지전극의 접지저항 계산은 대지 저항률을 50, 100, 200, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000 및 2500 $\Omega \cdot m$ 으로 변화시키고, 접지전극의 수를 한 개부터 100개까지 변화시키면서 접지저항의 크기를 계산하였다.

1. 접지동봉

접지공사에서 가장 일반적으로 사용되는 접지동봉에 대하여 대지 저항률에 따라 변화하는 보정계수를 이용하여 전극의 길이가 1 m인 접지동봉의 접지저항을 계산하고, 그 결과를 그림 28에 보였다.

2. 콘크리트 접지봉

콘크리트 접지전극에 대하여도 보정계수를 이용하여 전극의 길이가 1 m인 콘크리트 접지봉의 접지저항을 계산하고, 그 결과를 그림 29에 보였다.

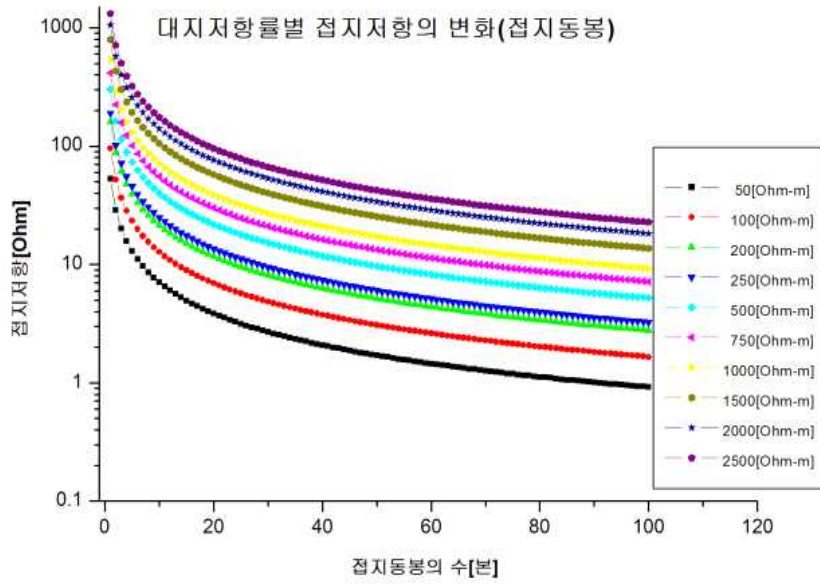


Figure 28. Variation of grounding resistance(copper-clad rod)

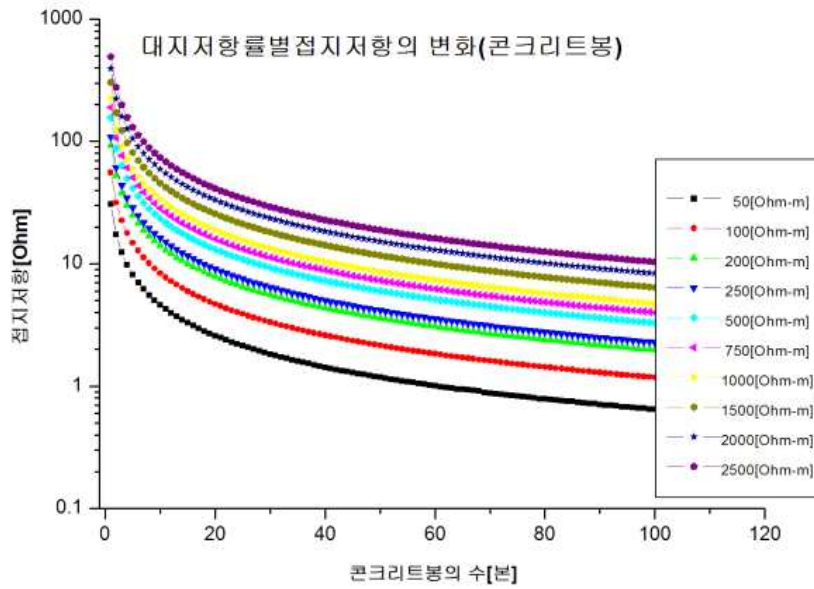


Figure 29. Variation of grounding resistance(concrete rod)

3. 심타용 강봉

접지동봉과 마찬가지로 용융아연도금 접지봉(심타용 강봉) 전극에 대하여도 보정 계수를 이용하여 전극의 길이가 1 m인 심타용 강봉의 접지저항을 계산하고, 그 결과를 그림 30에 보였다.

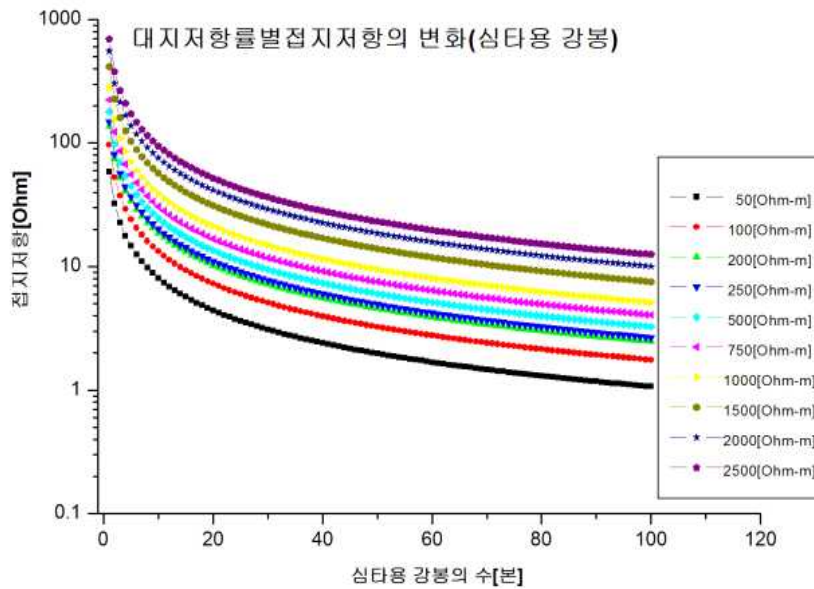


Figure 30. Variation of grounding resistance(advanced electrode)

4. 계산 결과의 검토

접지전극을 병렬로 연결하는 경우에 일반적인 계산식으로 접지저항을 계산할 때에 어려움이 접지전극 사이의 결합계수를 산출하는 것인데, 임의의 전극 배치에 따른 전위분포로 접지저항을 계산하는 방법을 사용하여 접지전극의 결합계수를 찾을 수 있었다.

또한, 접지전극의 재료별로 접지저항 크기를 계산할 때, 대지 저항률의 변화에 대한 각각의 접지전극 재료별의 접지저항 보정계수에 의한 접지저항 크기의 변화가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

F. 목표 저항값을 위한 접지전극 수의 계산

일반적인 접지저항 계산식을 이용하여 접지전극 재료별로 목표로 하는 접지저항을 얻기 위한 전극의 수를 결정하는 것은 매우 어려운 문제이다. 특히 접지전극의 재료별 및 제작하는 회사별로 서로 다른 특성을 나타내기 때문에 제작회사 등에서 제공하여 대지 저항률이나 접지전극의 수와 상관없이 일괄적으로 적용되는 접지저항 보정계수를 이용하여 수계산 등을 통한 접지설계를 하는 일은 어려움이 있는 것이다. 따라서 대지 저항률별로 접지전극의 재료에 따라 접지전극의 수를 미리 결정하여 놓은 표를 이용한다면 현장의 기술자들에게는 매우 유용한 기초자료가 될 것으로 생각된다. 좀 더 정확한 접지전극 재료별 전극의 수를 결정하기 위해서는 많은 시간과 현장의 시험 시공을 통한 자료의 축적이 필요하겠지만 본 논문에서는 부족하나마 아직까지의 시험 결과를 토대로 목표 저항값을 위한 접지재료별 접지전극의 수를 결정하여 제시하였다. 본 논문에서는 시험 시공한 접지전극인 접지동봉, 용융아연도금 접지봉(심타용 강봉) 및 콘크리트 접지봉에 대한 접지저항의 측정을 통하여 접지전극 재료별로 대지 저항률을 변수로 하는 새로운 보정계수를 산출하였으며, 산출된 접지저항 보정계수를 이용하여 접지전극의 재료와 길이별로 대지저항률을 변화시키면서 접지저항을 계산하였다. 그 결과를 토대로 목표 저항값을 100, 25 및 5 Ω 이하로 지정하는 경우에 대하여 각각의 접지재료별로 접지전극의 수를 정리하였다. 다만, 접지전극사이의 병렬 이격거리는 2 m로 하여 계산된 결과이다.

1. 접지동봉

접지전극의 사용 목적상 접지저항이 100, 25 및 5 Ω 이하의 크기가 필요한 경우에 대하여 접지전극 길이 1 m에 대한 접지동봉의 병렬 접지전극 수를 정리한 것이 표 4이다. 표에서 보는 바와 같이 대지 저항률이 증가할수록 병렬 접지전극의 수가 증가하며, 목표 저항값이 5 Ω 이하인 경우에 대지 저항률이 일정값 이상인 경우에 100 개 이상의 접지전극을 설치하여야 한다.

Table 4. Number of Electrode(copper-clad rod)

	대지저항률[Ω·m]									
	50	100	200	250	500	750	1000	1500	2000	2500
100[Ω]	1	1	2	3	4	6	7	11	15	19
25[Ω]	3	5	9	11	18	25	33	52	71	91
5[Ω]	19	29	53	62	100 ↑	100 ↑	100 ↑	100 ↑	100 ↑	100 ↑

2. 콘크리트 접지봉

마찬가지로 콘크리트 강봉에 대하여도 접지전극의 사용 목적상 접지저항이 100, 25 및 5 Ω이하의 크기가 필요한 경우에 대하여 접지전극 길이 1m에 대한 병렬 접지전극 수를 정리한 것이 표 5이다.

Table 5. Number of Electrode(concrete rod)

	대지저항률[Ω·m]									
	50	100	200	250	500	750	1000	1500	2000	2500
100[Ω]	1	1	1	2	2	3	3	4	6	7
25[Ω]	2	3	5	6	10	12	15	21	28	37
5[Ω]	10	19	35	41	62	78	94	100 ↑	100 ↑	100 ↑

3. 심타용 강봉

심타용 강봉에 대하여도 접지전극의 사용 목적상 접지저항이 100, 25 및 5 Ω이하의 크기가 필요한 경우에 대하여 접지전극 길이 1m에 대한 병렬 접지전극 수를 정리한 것이 표 6이다.

Table 6. Number of Electrode(advanced electrode)

	대지저항률[Ω·m]									
	50	100	200	250	500	750	1000	1500	2000	2500
100[Ω]	1	1	2	2	2	3	4	6	8	10
25[Ω]	3	5	8	8	10	13	17	26	36	47
5[Ω]	12	31	46	50	62	100 ↑	100 ↑	100 ↑	100 ↑	100 ↑

IV. 접지전극 재료별 경제성 평가

접지전극의 재료별로 같은 접지저항의 크기를 얻기 위하여 사용되는 자재의 양이나 가격의 차이가 있으며, 접지전극 재료의 성질에 따라 수명기간도 다르게 나타나므로 접지전극의 기능을 살리기 위하여 효과적인 재료와 방법에 따라 시공하기도 하여야 하지만 접지전극 재료에 따른 경제성도 검토하여야 한다.

본 논문에서는 접지전극의 재료별 경제성 검토를 위하여 시험 시공을 한 접지전극별로 일정한 접지저항의 크기를 얻기 위하여 필요로 하는 접지전극의 소요 자재 물량에 대한 비용, 시공비를 포함하는 초기 공사비용과 일정한 기간을 선정하여 전체 기간 중에 시설물의 불량이나 수명에 의하여 보수하거나 재시공하는 비용을 포함하여 경제성 분석을 수행하였으며, 일정기간의 전반에 걸쳐서 소요되는 비용의 합을 일정한 시점으로 등가 환산하여 경제성을 평가하였다. 이러한 경제성 검토를 위한 방법의 대표적인 해법이 수명주기 비용(LCC : Life Cycle Cost) 기법이다.

A. 수명(생애)주기 비용에 의한 경제성 평가

1. LCC 기법의 개요

수명주기(Life Cycle)는 어떤 항목, 제품, 설비 혹은 시스템이 개념에서부터 폐기까지를 지나는 모든 단계를 의미한다. 수명주기 비용(LCC : Life Cycle Cost)은 설비 혹은 시스템이 설계, 개발, 생산, 운영, 정비 그리고 제거 및 폐기의 전체 과정에서 발생하거나 발생할 것이라고 예상되는 모든 비용들의 총합이다. 여기에는 직접·간접·반복 비용, 비반복적 비용들이 포함된다.

수명주기 비용 기법이란 기본적으로 설비, 시스템 또는 시설 등에 대해 경제적 수명 기간에 걸쳐 소요되는 초기 시공비용, 사용 중에 발생하는 모든 비용(유지·보수비용 등)을 설비의 경제수명 범위에서 비교하기 위하여 일정한 시점으로 등가 환산한 가치로 경제성을 평가하는 기법이다. 즉, LCC기법은 오랜 기간 동안 사용하

는 설비나 시스템의 경우에 발생하는 전체적인 총비용(Total Cost)을 분석하여 설비나 시스템의 경제성을 평가하여 의사결정을 하는 분석 기법이라고 할 수 있으며 가장 중요한 것은 각 대체안의 경제성을 평가하는 데 있어서 동일시점으로 등가적인 환산을 해주는 것이다.

수명주기비용은 지정된 수명주기 동안에 적용될 수 있는 설비나 시스템과 관련된 모든 비용을 말하는 것으로서, 각각의 단계별로 관련된 설비나 시스템의 수명주기는 수명주기비용의 산정 시에 가장 기본이 되는 요소이다.

그림 31은 어떤 설비나 재료의 성능 조건에 따라 서비스조건의 변화를 보인 것이며, 그림 32는 재료별의 성능에 따른 서비스 조건에 따라 유지·보수를 필요로 하는 개념을 보인 것이다. 이러한 재료별 성능의 변화에 따른 유지·보수에 의하여 수명주기 기간 동안 발생하는 비용의 개념을 보인 것이 그림 33이다.

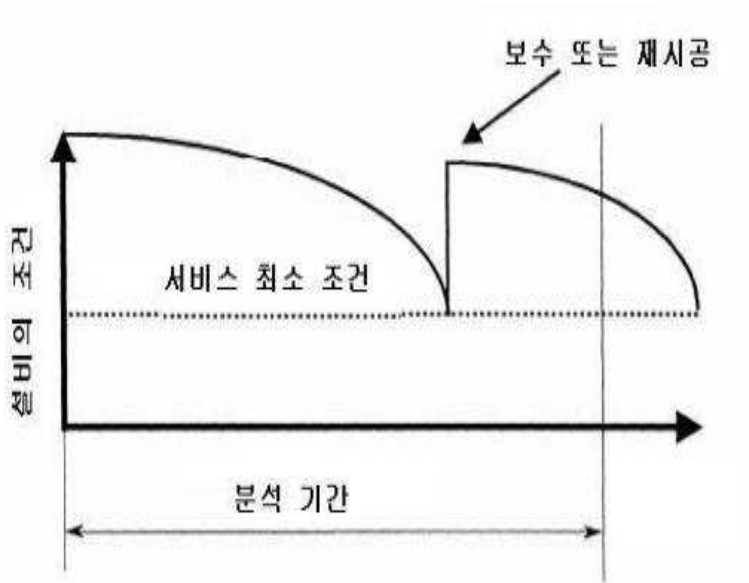


Figure 31. Variation of service condition by performance

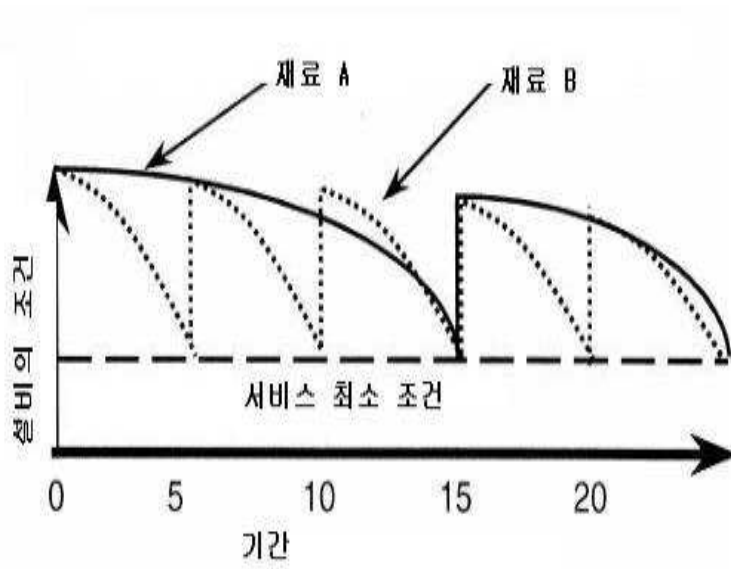


Figure 32. Maintenance of service condition variation

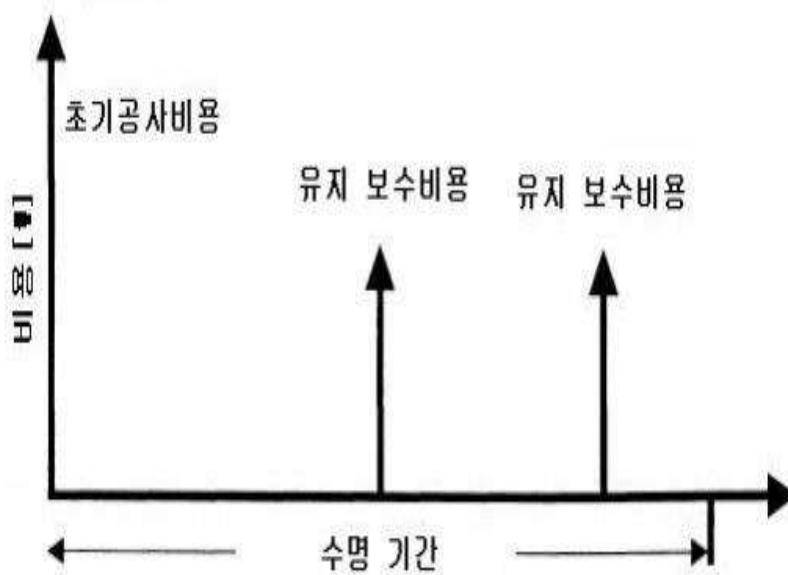


Figure 33. Concept of life cycle cost incidence

2. 수명주기 비용 분석의 절차와 평가

수명주기 비용 분석을 위한 많은 분석 절차들이 제안되어 왔으나 대상이 되는 시스템들 간의 차이 때문에 제안된 절차들은 완전히 동일하지 않다. 그러나 제안된 분석 과정들 사이에 일부 공통적인 단계들을 발견할 수 있으며 이것은 그림 34와 같이 핵심적인 6개 단계로 요약될 수 있다.

수명주기 비용 분석에 있어서 대상이 되는 설비의 범위, 평가기준, 운영방식을 정확히 정의해주는 것이 첫 단계이며, 비용구조를 분류하고 범주를 정의하는 것이 두 번째 단계이다. 정의된 방식으로 운전될 때의 가동성, 정비성, 규제 및 위험성, 사람에 의한 실수 등을 반영하여 모델을 선정하는 것이 세 번째 단계이며, 실제 모델에 반영될 운영정보 혹은 예측값을 모으는 것이 네 번째 단계이고, 인플레이션, 세금, 감가상각과 할인율을 고려하여 전체비용을 산출하는 것이 다섯 번째 단계이며, 마지막 단계에서 각 비용 요소들의 비중과 민감도 분석 등을 통해 최종 의사결정에 이르게 된다.



Figure 34. Flowchart of LCC

수명주기 비용은 기본적으로 취득 비용들과 유지비용들, 이 두 가지로 나뉜다. 취득비용과 유지비용은 상호 간에 독립적이다. 일반적으로 유지비용에 폐기 비용을 포함시키기도 하며 별도로 구분하기도 한다. 이러한 비용은 올바른 입력 값 수집과 데이터베이스의 구축을 통하여 얻을 수 있으며 생애주기 비용 평가와 비용 요인들의 규명을 위해 민감도 분석을 수행하는 데 사용된다.

그림 35는 초기 비용과 유지비용의 구조에 대한 예를 나타내고 있다.

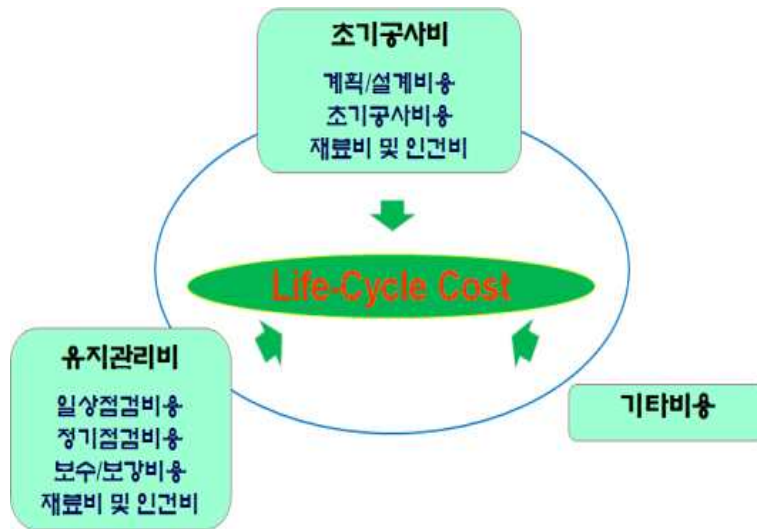


Figure 35. Components of LCC

3. 비용의 환산

어떤 설비나 시스템을 설치하여 수명주기 분석 대상기간 동안에 소요되는 비용을 검토하기 위하여 LCC 분석기법으로부터 산출되는 총비용을 비교 평가하기 위해서는 어느 시점으로 발생하는 모든 비용을 환산하여야 한다. 각각의 대안에 대해 발생하는 현재와 미래의 비용을 공통시점으로 환산해 비교하는 방법으로 주로 사용하는 방법은 현가법(Present Value method)과 년가법(Annual value method)들이 있다.

일반적으로 미래에 발생하게 될 비용은 현재 비용보다 증가하는 경향성이 있다. 또한 보수교체비용의 경우는 미래 임의시점에 발생될 임의부분의 보수 교체비용은 현재의 그 부분의 공사비보다 증가할 것이다. 그 이유는 물가 및 인건비 상승으로 인한 화폐 구매력의 저하에 원인이 있다.

이때의 증가를 물가상승이라 하며, 그 증가비율을 물가상승률이라고 한다. 현재의 금액은 시간이 경과함에 따라서 이자가 발생되고, 임의시점의 미래가 되었을 때는 현재 금액과 그 동안 이자를 합산한 금액이 되기 때문이다. 일반적으로 현재 금액을 미래 금액으로 환산할 시 물가상승률이나 이자율을 적용하며, 미래가치를 현재가치로 환산할 시 물가상승률이나 이자율을 적용한다. 미래가치를 현재가치로 환산할 때는 할인율을 적용하게 되며, 할인율은 일반적으로 이자율을 대체해 사용하게 된다. 또 총비용은 전 기간에 대하여 이자율을 일정하게 적용하는 경우와 변동 이자율을 적용하는 경우에 따라라도 달라지지만 일반적으로는 전 기간의 평균이자율을 사용하여 일정하게 하는 방법이 사용된다.

시스템과 프로젝트의 비용 발생은 오랜 시간에 걸쳐 현실화되기 때문에 각각 대상의 수명주기 동안 발생하는 시간단계별 비용의 흐름 결정시 인플레이션이 이자율과 함께 고려해야 한다. 지난 몇 십년동안 인플레이션은 제품 및 서비스 비용의 증가와 돈의 구매력 감소에 있어 중요한 요인이었다. 이와 같은 인플레이션의 영향은 주로 아래 서술한 것과 같이 자재비용 및 노동력과 연관이 있다.

가) 노무비에 적용되는 인플레이션 요인은 직접비 부분인 봉급 및 임금의 증가, 생계비 증가, 그리고 간접비 부분인 개인의 가외 수당 및 퇴직금, 보험 등의 증가가 있다. 인플레이션 요인은 각 노동의 종류별로 결정해야 하고, 수명주기 내에서 각각의 연도별로 추정되어야 한다.

나) 재료비에 적용되는 인플레이션 요인은 재료의 가격 상승, 재료의 가공비용 상승, 재료의 하역운반비의 상승 등이다. 인플레이션 요인은 각각의 자재 종류에 따라 다르기 때문에 수명 주기에 있어 각 연도별로 추정되어야 한다.

인플레이션은 다음과 같은 형태로 발생되는데, 이는 공급자와 새로운 계약, 새로운 노동계약과 단체협약, 구입정책 수정, 자재공급선 변화, 생산기술 변화, 생산계획 변화, 생산성 변화, 양적인 변화, 그리고 회사 간, 개인 간의 상호 비교의 결과

로 인해 발생한다. 또 인플레이션 요인들은 지리적 위치나 경쟁에 의하여 어느 정도 영향을 받는다. 여러 인플레이션의 원인을 조사할 때, 인플레이션 효과의 과다한 계상 및 이중 계산을 피하기 위해 주의해야 한다. 한 예로 공급자의 제안서에 인플레이션에 대한 규정이 있으나 계산에 언급되어 있지 않으면 인플레이션을 이중으로 계산할 수도 있다.

인플레이션 요인들은 가능한 1년을 기준으로 평가되어야 하며, 인플레이션은 일반적으로 경제적인 여건들에 의해 변화가 다양하기 때문에 먼 미래의 비용 추정값들, 예를 들어 5년 이상은 적어도 매년 재조사가 이루어져야 하고 각 요구에 따른 조정이 필요하다. 인플레이션 요인들은 가격지수 등을 이용해 보정 가능하다.

인플레이션을 측정할 수 있는 대표적인 지수로는 현재 발표되고 있는 소매물가지수, 도매물가지수, GNP환가지수다.

LCC분석에서는 이 같은 물가상승률과 명목이자율(할인율)을 동시에 고려해 하나의 실질이자율로 나타내고, 이러한 실질이자율을 활용해 미래에 발생하는 금액을 현재의 가치로 환산하거나 현재금액을 미래의 가치로 등가 환산하게 된다. 이때 등가 환산은 현실 화폐가치로 변환하는 것을 의미한다. 실질이자율은 물가상승률과 명목이자율을 사용해 식 (94)와 같이 나타낼 수 있다.

$$= \frac{1+i'}{1+P} - 1 \quad (94)$$

여기서, i : 실질이자율

i' : 명목이자율,

P : 물가상승률

1) 현가법(Present Value method)

현가법이란 현재와 미래의 모든 비용을 현재가치로 환산하는 방법을 말한다. 현가법에서 초기비용은 이미 현재가치로 환산되어 있으므로 미래에 발생하는 비용을 다음 공식 (95)를 이용해 현재가치로 환산한다.

가) 반복 비용(매년 동일하게 발생하는 비용)

$$A \times \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)} = A \times (\text{가계수}) \quad (95)$$

여기서, A : 연가

i : 연이율 즉, 기대하는 최소한의 이익률

n : 년수

: 현재가치의 합계

나) 비반복 비용(몇 년 후에 단 1회만 발생하는 비용)

$$P = F \times \frac{1}{(1+i)^n} = F \times (\text{현재가계수}) \quad (96)$$

여기서, F : n 년 후의 기말지불액 또는 기말 수령액

2) 연가법(Annual value method)

연가법은 경제성분석에서 현재가법과 같이 널리 사용되고 있는 방법으로 현재가법과 매우 유사하다. 분석 대상들의 이익과 비용 등을 등가 균일 연가로 나타내는 방법이다. 연가법은 화폐의 총 현재가가 일련의 균일연가 비용으로 평균화한 것이다. 초기비용, 반복비용, 비반복 비용 등은 모든 LCC를 매년의 비용으로 변환하는 방법이며 다음의 공식 (97)을 사용한다.

$$A = P \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} = P \times (\text{자본회수계수}) \quad (97)$$

여기서, A : 연가

P : 초기투자액

일반적으로 현재가법은 사례비교에 있어 사례의 총비용 산정기간이 일정할 경우 유용한 방법이며 연가법은 사례의 내용 연수가 상이할 경우 적합하다. 따라서 본 연구에서는 접지전극의 내용 연수가 가장 긴 재료를 검토기간으로 정하고, 소요되는 총비용을 현재의 가치로 환산하여 비교하는 현재가법을 적용하였다.

4. 분석모형 파라미터

분석 대상의 LCC를 산정하기 위해서는 예측의 요인에 대한 정확한 가정이 있어야 한다. 이러한 예측요인이 LCC분석의 관련요소가 되며 분석항목에 의해 작성된 수학적 분석모델에 산입되는 근거자료로서 그 중요도는 상당하다. 이러한 예측요인은 초기공사비 뿐만 아니라 장차 영향을 받게 될 경제상태, 즉 설비의 사용계획 연수, 이자율, 물가 상승률, 부품별 구성요소의 내구연한 및 보수주기, 교체주기 및 인건비 등이 포함되어야 한다.

이와 같은 관점에서 본 논문에서는 접지전극의 재료별 초기공사비산정을 위하여 분석하고자 하는 현 시점의 물가와 현실에 맞는 [종합 적산정보], 교체주기 및 보수주기 등의 자료가 필요하며 특히 LCC기법의 산정에서 매우 중요한 예측데이터인 물가 상승률, 이자율(법정은행 대출 금리) 및 공사비를 산정하기 위한 인건비, 공사비 부분에 대한 인건비 산출을 위한기술자의 등급별 1일당 인건비와 각각의 공정별로 소요되는 품셈 자료 등을 필요로 한다.

1) 접지전극의 내용 연수

접지전극의 내용 연수에는 크게 물리적 내용 연수 (Physical Life)와 경제적 내용 연수(Economic Life)가 있으며 물리적 내용 연수는 접지전극 재료가 물리적으로 존속할 것으로 예견되는 사용가능기간을 말한다. 따라서 경제적 내용 연수는 물리적 내용 연수보다 그 기간이 짧으며, 경제적 내용 연수는 정상적으로 사용할 수 있는 접지전극의 기능을 가지고 있다는 판단이 되는 연수를 의미한다.

2) 접지전극 재료의 가격

접지전극을 시공하기 위하여 필요로 하는 접지전극 재료에 대한 재료비는 물가 정보지인 사단법인 한국물가정보에서 제공하는 [종합물가정보]를 참고로 하였으며, 물가 정보지에 등록되어 있지 않은 일부 접지재료에 대하여는 제작 및 판매하는 회사에서 제공하는 자료를 인용하였다.

3) 접지전극의 보수주기 및 보수율

접지전극의 주전극과 소요되는 자재의 수명을 파악하여 전체적인 수명과 부분적인 수명을 고려하여야 하나 현재의 우리나라 실정으로는 이러한 자료가 없으므로

한국전력공사나 참고문헌상에 부분적으로 나타나 있는 자료를 근거로 평균하여 적용하였다.

4) 물가 상승률

일반 물가지수와 접지전극 자재의 일반 물가지수 등은 한국은행 발행 [조사통계월보]를 조사하여 적용하였다.

이에 의하면 과거 몇 년간의 평균치를 가지고 미래를 예측한다는 것은 모순이지만 본 논문에서는 일반물가상승률 평균치를 매년의 물가상승률로 적용하였다.

5) 이자율

현가환산은 일반적으로 “할인”이라는 말로 표현되므로 경제학에서는 현가환산을 위해서 사용되는 이자율을 할인율이라고 한다. 이 할인율은 여러 가지 조건에 의해서 정해질 수 있으나 본 논문에서는 법정 은행대출 금리를 적용하였다.

6) 인건비

접지공사의 경제성 평가를 위하여 공사비의 산정을 위한 인건비는 필요한 기술자의 등급별 노무비를 매년 분기별의 시중 노무비 단가를 적용하였으며, 접지공사의 공정별 필요 인력을 대한건설협회에서 제공하는 표준품셈을 참조하여 적용하였다.

B. 접지전극 공사비의 계산 모델

본 논문에서는 일정한 목표 저항 값에 대하여 접지전극 시공을 위한 대상 부지에서 대지 저항률을 측정하고 분석한 결과를 검토하여 접지전극 재료별로 접지 저항 보정계수를 고려한 접지전극의 수에 따라 설계를 하고, 시공에서 소요되는 접지전극의 재료에 대한 접지공사비용을 대상으로 경제성 평가를 위하여 각각의 접지전극별로 접지공사비를 계산하는 프로그램을 개발하였으며, 경제성 평가 대상 접지전극은 접지동봉, 심타용 용융아연도금 접지봉(심타용 강봉) 및 콘크리트 접지봉(보링작업과 오가작업)을 대상으로 구분하였다.

각각의 접지전극 재료별 접지공사비는 재료비, 인건비 및 시공비를 합한 것으로서, 각 접지재료에 대한 가격은 목표 접지저항의 크기에 대한 접지전극의 수에 따라 필요 수량을 계산하였으며, 인건비는 공정별로 필요한 품셈을 적용하고 시공비는 접지전극을 시공하면서 필요로 하는 공사의 공정별로 사용되는 기계설비의 사용비용을 중심으로 계산하였다. 식 (98)는 공사비의 계산식을 나타낸다.

$$C = M_{\text{cost}} + P_{\text{cost}} + C_{\text{cost}} \quad (98)$$

여기서, FC : 초기공사비

M_{cost} : 접지전극 재료비

P_{cost} : 인건비, C_{cost} : 시공비

1. 접지전극 재료비

접지전극의 재료비는 현장에서 접지전극을 설치하면서 소요된 접지전극의 소요 물량에 단가를 곱한 비용의 합으로 표현된다.

$$M_{\text{cost}} = \sum_{i=1}^n GM_i \cdot GC_i \quad (99)$$

여기서, GM_i : 접지전극 재료의 소요량

GC_i : 접지전극 재료의 단가

n : 접지전극 재료의 종류

2. 인건비

현장에서 접지전극을 설치할 하면서 소요되는 공정별 인건비를 합한 값으로서, 공정별 기술자의 등급별 노무비와 품셈을 적용하여 구한 비용의 합으로 식 (100)과 같이 표현된다.

$$C_{\text{cost}} = \sum_{i=1}^m PM_i \cdot PC_i \quad (100)$$

여기서, PM_i : 공정별 품셈

PC_i : 공정별 노무비 단가

m : 공정의 종류

3. 시공비

접지전극을 현장에서 시공을 하면서 필요로 하는 기계설비 및 공구류의 사용료를 합한 값으로서, 공정별 필요 기계설비의 사용료 단가와 품셈을 적용하여 구한 비용의 합으로 표현된다.

$$C_{\text{cost}} = \sum_{i=1}^l CM_i \cdot CC_i \quad (101)$$

여기서, CM_i : 공정별 품셈

CC_i : 공정별 기계설비 사용료 단가

l : 공정의 종류

C. 접지전극의 경제성 평가를 위한 데이터

경제성 평가 대상의 LCC를 산정하기 위해서는 예측의 요인에 대한 정확한 가정이 있어야 한다. 이러한 예측요인이 LCC평가의 관련요소가 되며 평가항목에 의해 작성된 수학적 평가모델에 도입되는 근거자료로서 그 중요도는 매우 높다. 이러한 예측요인은 초기공사비 뿐만 아니라 미래에 영향을 받게 될 경제상황, 즉 설비의 계획년수, 이자율, 물가 상승률, 부품별 구성요소의 내구 년한 및 보수주기, 교체주기, 인건비 등이 포함되어야 한다.

이와 같은 관점에서 본 논문에서는 접지전극별 초기공사비의 계산은 현행물가와 사단법인 한국물가정보에서 발행한 [종합 적산정보]를 적용하였으며, 접지전극별 교체주기 및 보수주기는 기존 자료를 적용하였고, 특히 LCC기법의 계산에서 매우 중요한 예측데이터인 물가 상승률은 한국은행 발행 [조사통계월보]를 적용하여 일반 물가지수에서 물가상승률을 고려하여 적용하였다. 또한 이자율은 현재 적용되고 있는 법정은행 대출 금리를 적용하였다. 이 이외에도 공사비를 산정하기 위한 인건비를 적용하여야 하는데, 공사비 부분에 대한 인건비는 필요한 기술인력의 등급별 1일당 인건비와 각각의 공정별로 소요되는 품셈을 필요로 한다.

본 논문에서 접지전극의 설치를 위한 재료별 공사비에 대한 경제성 평가를 위하여 접지전극의 재료에 대한 데이터를 수집하였으며, 수집이 불가능한 데이터는 통상적으로 적용하고 있는 데이터를 적용하고자 하였다.

1. 접지전극의 내용 수명

접지전극의 수명에 대한 내용 수명에는 크게 물리적 내용 수명(Physical Life)와 경제적 내용 수명(Economic Life)이 있으며, 물리적 내용 수명은 접지전극 재료가 물리적으로 존속할 것으로 예견되는 사용가능기간을 말한다. 따라서 경제적 내용 수명은 물리적 내용 수명보다 그 기간이 짧으며, 경제적 내용 수명은 정상적으로 사용할 수 있는 접지전극의 기능을 유지하고 있다는 판단이 되는 수명년수를 의미한다.

접지전극의 내용 수명에 대한 데이터는 검증된 데이터가 없어서 통상적으로 현장에서 적용이 되고 있는 데이터와 개념을 도입하였다. LCC기법에 의한 경제성 평가를 위하여 접지전극 재료별로 내용 수명은 경제성 평가의 중요한 파라미터이지만 검증된 자료가 없다는 점은 매우 유감스러운 일이다. 다만, 콘크리트 접지봉의 경우에 일반적으로 콘크리트의 특성이 관련 문헌에 의하면 시공을 한 후에 50년 동안 경화되고, 경화된 후에 50년 동안 열화가 진행되는 과정에 따라 100년 이상의 수명을 갖는 것으로 나타나고 있지만, 일반적으로 전력설비는 현장의 여러 여건상 25년 이상을 사용하지 않는다는 가정을 하였다. 접지동봉이나 심타용 용융아연도금 강봉과 같은 다른 재료들에 대한 지중에서의 수명 등에 대한 자료는 확인된 바가 없다. 따라서 본 논문에서는 각각의 접지전극에 대하여 표 7의 수명을 적용하는 평가와 각각의 접지전극 재료별 경제적인 수명을 5년에서 25년 까지를 변화시키면서 경제성 평가를 수행하였다.

Table 7. Life of ground electrode

항 목 전극 재료	물리적 내용 수명	경제적 내용 수명	비고
접지동봉	6	5	
콘크리트 접지봉	25	20	
심타용 강봉	9	8	

2. 접지전극 재료의 가격

접지전극 재료에 대한 재료비는 물가정보지인 사단법인 한국물가정보에서 제공하는 [종합물가정보]와 대한건설협회에서 제공하는 [월간 거래가격]을 참고로 하였으며, 물가 정보지에 등록되어 있지 않은 일부 접지재료에 대하여는 제작 및 판매하는 회사에서 제공하는 자료를 인용하였다. 표 8에 각각의 접지공사에서 사용되는 접지전극 재료의 가격을 정리하였다.

Table 8. Cost of grounding electrode material

항목	구성 재료명	규격	가격[원]	비고
접지전극	접지동봉	φ14×1000	7,500	
	리드단자	φ14	3,762	공통
	압착슬리브	50mm ²	1,700	공통
	나동선	50mm ² , m당	4,990	공통
	GV 전선	50mm ² , m당	5,291	공통
콘크리트 봉	콘크리트 접지봉	φ100×1000	82,000	
	콘크리트봉 부속자재		5,648	
심타용 강봉	심타용 강봉	1000	8,800	
	강봉 리드단자		5,500	
	작업용 캡		3,200	

3. 접지전극의 보수주기 및 보수율

접지전극 소요자재의 수명, 보수주기 및 보수율 등에 대한 공개된 자료가 거의 없으며, 실질적으로 접지전극이 설치된 현장의 여건에 따라 다르지만 본 논문의 경우에는 한국전력공사나 참고문헌상에 부분적으로 나타나 있는 자료는 2년마다의 불량률에 대한 보수율 자료가 있으므로 이를 근거로 하면 접지동봉의 경우에 0.7정도이나 다른 접지전극에 대한 자료는 없으므로 모든 전극에 대하여 일률적으로 0.5를 적용하였다.

4. 물가 상승률

접지전극 재료의 물가 상승률은 한국은행에서 발행되는 [경제동향 연차보고서] 등에서 발표되는 연도별 소비자물가지수 상승률 데이터를 2007년부터 2016년도까지의 값을 평균하여 34 %를 적용하였다. 표 9는 그 내용을 정리하였다.

Table 9. Consumer price index

년도	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	평균
항목											
소비자 물가[%]	5	4.7	8	9	4.0	2	1.3	1.3	0.7	1.0	3.4

5. 이자율

접지전극별 LCC 평가를 위한 현가 환산을 위하여 비용에 대한 이자율은 여러 가지 조건에 의해서 정해질 수 있으나 본 논문에서는 법정 은행대출 금리를 적용하였으며, 한국은행에서 발행된 [경제동향 연차보고서] 등에서 발표되는 데이터를 2007년부터 2016년도까지의 값을 평균하여 5.18 %를 적용하였다. 표 10은 그 내용을 정리하였다.

Table 10. Interest rates on loans and discounts

항 목 \ 년도	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	평 균
대출금리 [%]	6.55	7.17	5.65	5.51	5.76	5.40	4.64	4.26	3.53	3.37	5.18

6. 인건비

접지전극의 시공을 위한 접지공사비의 산정을 위한 인건비를 계산하기 위해서는 접지공사의 공정별로 필요한 기술자의 등급별 노무비와 공정별 필요인력의 품셈이 적용되어야 하며, 본 논문에서는 노무비는 2017년도 후반기의 시중 노무비 단가를 적용하였으며, 접지공사의 인건비 계산을 위한 공정별 필요 인력을 대한건설협회에서 제공하는 표준품셈을 참조하여 적용하였다. 표 11은 본 논문에서 적용한 접지공사를 위하여 필요로 하는 노무비의 일당을 정리하였다.

Table 11. Labor cost(2017.09)

번호 \ 항목	분류(등급)	노 무 비[원/일]	비고
1	배전전공	310,429	
2	보통 인부	106,846	
3	변전전공	269,720	

D. 경제성 평가를 위한 목표 저항값별 공사비의 계산

접지전극별로 대지 저항률을 변화시키면서 사용 목적에 따라 저항값을 얻기 위하여 접지저항 보정계수를 도입한 접지저항의 계산으로부터 결정된 접지전극의 수에 대한 접지공사비용을 대상으로 각각의 접지전극별로 접지공사비를 계산하였다. 본 논문에서 대상으로 하는 접지전극인 접지동봉, 콘크리트 접지봉 및 심타용 용융아연도금 접지봉(심타용 강봉) 전극에 대한 목표 접지 저항별로 각각의 접지재료별에 대한 공사비를 계산하였다. 각각의 접지재료별 공사비의 계산은 검토 대상기간을 일정하게 정하여 전체적인 기간에 소요되는 공사비를 현가화한 종합 공사비용에 대한 계산과 대상기간의 초기 년도에 필요로 하는 초기공사비용의 계산으로 구분할 수 있는데, 본 논문에서는 접지전극의 경제성 검토 기간을 25년으로 정하여 그 기간 전체에 대한 공사비의 합과 초기 년도의 공사비를 각각 계산하여 비교하였다.

각각의 접지전극 재료별 접지공사비는 재료비와 인건비 및 시공비를 합한 것으로서, 각 접지재료에 대한 가격은 목표 접지저항의 크기에 대한 접지전극의 수에 따라 필요 수량을 계산하였으며, 인건비는 공정별로 필요한 품셈을 적용하였다. 또한, 접지재료별의 보수율을 적용하여 불량에 따른 보수공사비도 재료비와 인건비 및 시공비를 물가 상승률에 따라 계산하여 현재의 가치로 환산하였으며, 초기 공사비용과 전체 공사비용에 대한 내용을 구분하여 정리하였으며, 접지전극별 수명에 대한 자료가 부정확하므로 수명을 변화시키면서 전체 공사비에 대하여 검토하였다.

1. 초기 공사비용의 계산

접지전극별로 사용 목적상 저항값의 크기 100, 25 및 5 Ω 을 얻기 위한 초기 년도에 소요되는 접지공사비용을 대지 저항률의 변화에 대하여 계산하였다.

a. 목표 저항값 : 100 Ω

목표 저항의 크기가 100 Ω 인 경우에 대하여 각각의 대지 저항률별로 필요로 하는 접지전극의 수를 보정계수를 적용한 접지저항의 계산을 통하여 결정한 전극의 길이가 1 m인 경우의 초기 접지공사비를 계산한 결과를 표 12에 정리하였다.

Table 12. Installation cost of 1st year(100 Ω)

대지저항률 \ 접지전극	접지 전극의 공사비 [천원]			비고
	접지동봉	콘크리트접지봉	심타용 강봉	
50	168.20	662.69	174.44	
100	168.20	662.69	174.44	
200	278.41	662.69	287.69	
250	407.35	1303.79	287.69	
500	531.26	1303.79	287.69	
750	779.06	1944.88	419.67	
1,000	902.96	1944.88	546.61	
1,500	1401.68	2585.98	800.49	
2,000	1897.28	3868.16	1054.37	
2,500	2392.89	4509.26	1308.25	

b. 목표 저항값 : 25 Ω

목표 저항의 크기가 25 Ω인 경우에 대하여 각각의 대지 저항률별로 필요로 하는 접지전극의 수를 보정계수를 적용한 접지저항의 계산을 통하여 결정한 전극의 경우에 대한 초기 접지공사비용을 계산하여 결과를 표 13에 정리하였다.

 Table 13. Installation cost of 1st year(25 Ω)

대지저항률 \ 접지전극	접지 전극의 공사비 [천원]			비고
	접지동봉	콘크리트접지봉	심타용 강봉	
50	407.35	1303.79	419.67	
100	655.16	1944.88	673.55	
200	1150.77	3227.07	1054.37	
250	1401.68	3868.16	1054.37	
500	2268.99	6432.54	1308.25	
750	3139.41	7717.84	1692.17	
1,000	4133.73	9641.12	2199.93	
1,500	6494.08	13490.79	3345.50	
2,000	8854.43	17978.45	4618.01	
2,500	11338.69	23751.40	6017.45	

c. 목표 저항값 : 5 Ω

마찬가지로 목표 저항의 크기가 5 Ω인 경우에 대하여 각각의 대지 저항률별로 필요로 하는 접지전극의 수를 보정계수를 적용한 접지저항의 계산을 통하여 결정된 전극의 초기 접지공사비용을 계산하여 결과를 표 14에 정리하였다.

Table 14. Installation cost of 1st year(10 Ω)

대지저항률 \ 접지전극	접지 전극의 공사비 [천원]			비고
	접지동봉	콘크리트접지봉	심타용 강봉	
50	2392.89	6432.54	1565.23	
100	3635.02	12205.50	3983.31	
200	6617.99	22469.22	5890.51	
250	7736.21	26318.89	6398.27	
500	↑ 12453.81	39788.07	7927.77	
750	↑ 12453.81	50048.69	↑ 12760.81	
1,000	↑ 12453.81	60312.41	↑ 12760.81	
1,500	↑ 12453.81	↑ 64158.98	↑ 12760.81	
2,000	↑ 12453.81	↑ 64158.98	↑ 12760.81	
2,500	↑ 12453.81	↑ 64158.98	↑ 12760.81	

2. 전체 공사비용의 계산

접지전극별로 목표 저항값 100, 25 및 5 Ω을 유지하기 위한 전체 검토 대상기간에 소요되는 전체 접지공사비용을 대지 저항률의 변화에 대하여 계산하였다.

a. 목표 저항값 : 100 Ω

목표 저항의 크기가 100 Ω인 경우에 대하여 각각의 대지 저항률별로 필요로 하는 접지전극의 수를 보정계수를 적용한 접지저항의 계산을 통하여 결정한 전극의 경우에 대한 전체 접지공사비용을 계산하여 결과를 표 15에 정리하였다.

Table 15. Installation cost of total year(100 Ω)

대지저항률 \ 접지전극	접지 전극의 공사비 [천원]			비고
	접지동봉	콘크리트접지봉	심타용 강봉	
50	1058.41	662.69	457.97	
100	1058.41	662.69	457.97	
200	1535.51	662.69	657.41	
250	2179.45	1303.79	657.41	
500	2507.94	1303.79	657.41	
750	3663.52	1944.88	988.62	
1,000	4516.15	1944.88	1115.56	
1,500	6650.54	2585.98	1677.79	
2,000	8985.62	3868.16	2139.01	
2,500	11116.90	4509.26	2696.84	

b. 목표 저항값 : 25 Ω

목표 저항의 크기가 25 Ω인 경우에 대하여 각각의 대지 저항률별로 필요로 하는 접지전극의 수를 보정계수를 적용한 접지저항의 계산을 통하여 결정한 전극의 경우에 대하여 전체 접지공사비용을 계산하고 결과를 표 16에 정리하였다.

Table 16. Installation cost of total year(25 Ω)

대지저항률 \ 접지전극	접지 전극의 공사비 [천원]			비고
	접지동봉	콘크리트접지봉	심타용 강봉	
50	2092.18	1303.79	988.62	
100	3038.48	1944.88	1454.24	
200	5283.72	3227.07	2139.01	
250	6392.03	3868.16	2139.01	
500	10065.03	6432.54	2696.84	
750	13874.85	7717.84	3495.45	
1,000	18173.17	9641.12	4516.86	
1,500	28192.80	13490.79	6784.32	
2,000	38719.76	17978.45	9289.11	
2,500	49336.87	23751.40	12227.50	

c. 목표 저항값 : 5 Ω

목표 저항의 크기가 5 Ω인 경우에 대하여 각각의 대지 저항률별로 필요로 하는 접지전극의 수를 보정계수를 적용한 접지저항의 계산을 통하여 결정한 전극에 대한 대상기간의 전체 접지공사비용에 대하여 계산한 결과를 표 17에 정리하였다.

Table 17. Installation cost of total year(5 Ω)

대지저항률	접지 전극의 공사비 [천원]			비고
	접지동봉	콘크리트접지봉	심타용 강봉	
50	10278.76	6432.54	3161.17	
100	15324.20	12205.50	8143.12	
200	27721.85	22469.22	11893.22	
250	32326.07	26318.89	12912.27	
500	↑ 51906.12	39788.07	15980.70	
750	↑ 51906.12	50048.69	↑ 25632.49	
1,000	↑ 51906.12	60312.41	↑ 25632.49	
1,500	↑ 51906.12	↑ 64158.98	↑ 25632.49	
2,000	↑ 51906.12	↑ 64158.98	↑ 25632.49	
2,500	↑ 51906.12	↑ 64158.98	↑ 25632.49	

3. 접지전극별 초기공사비용의 경제성 평가

접지전극 재료별로 목표 저항값을 얻기 위한 초기년도의 접지공사비를 대지 저항률별로 변화하는 특성을 통하여 경제성 평가를 수행하였다.

a. 목표 저항값 : 100 Ω

목표 저항의 크기가 100 Ω인 경우에 각각의 대지 저항률별로 필요로 하는 접지전극의 수에 대하여 초기년도에 소요되는 접지공사비용의 계산 결과를 그림 36에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 접지동봉 및 심타용 강봉을 이용한 접지전극의 공사비용이 콘크리트 접지봉을 이용한 접지전극의 공사비용보다 전체적으로 적게 소요되는 것을 확인할 수 있다.

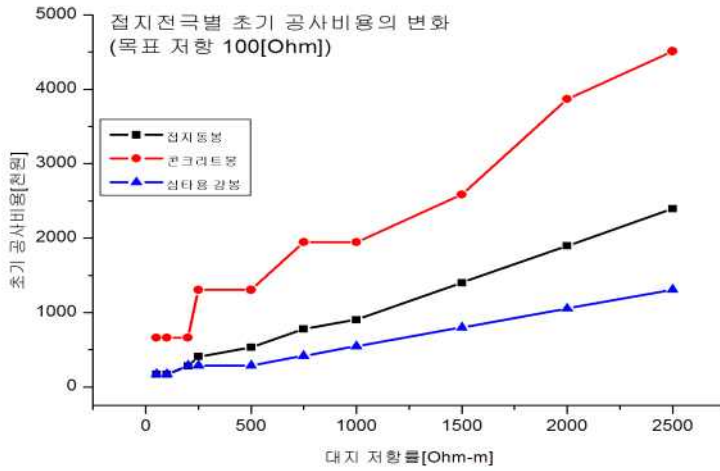


Figure 36. Installation cost of 1st year(100 Ω)

b. 목표 저항값 : 25 Ω

목표 저항의 크기가 25 Ω인 경우에도 초기 년도의 접지공사비 계산 결과를 그림 37에 각각 보였으며, 그림에서 보는 바와 같이 다른 접지전극에 비하여 콘크리트 접지봉의 공사비용이 전체적으로 많이 소요되는 것을 확인할 수 있다.

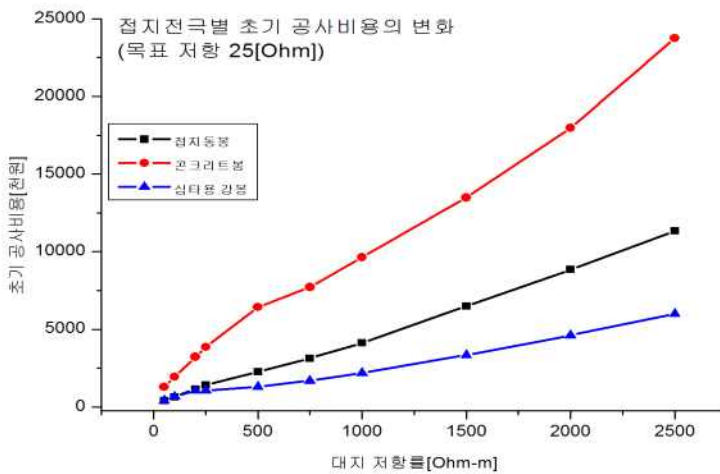


Figure 37. Installation cost of 1st year(25 Ω)

c. 목표 저항값 : 5 Ω

목표 저항의 크기가 5 Ω인 경우에 각각의 대지 저항률별로 필요로 하는 접지전극에 대하여 전체 접지공사비용의 계산한 결과를 그림 38에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 콘크리트 접지봉에 의한 접지전극의 공사비가 높게 나타나고 있으나 심타용 강봉은 대지저항률 800 Ω·m, 접지 동봉은 1500 Ω·m에서 100개 이상의 접지전극이 필요한 것으로 나타났으나, 콘크리트 접지봉 전극은 목표 접지저항의 크기를 만족할 수 있으므로 사용이 가능할 것으로 판단된다.

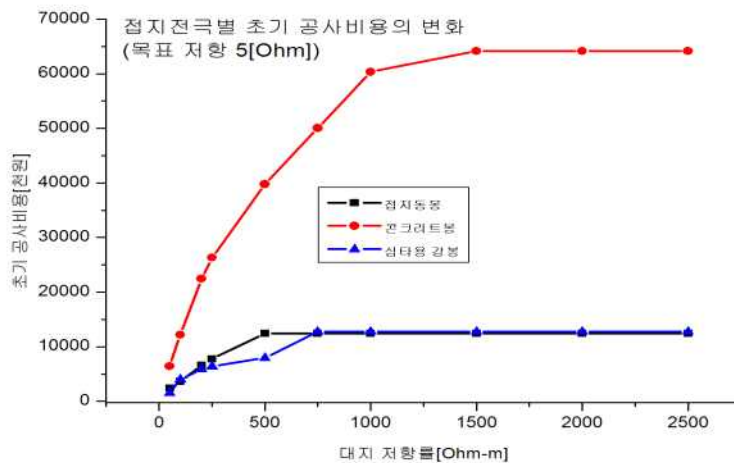


Figure 38. Installation cost of 1st year(5 Ω)

4. 접지전극별 전체 공사비용의 LCC법에 의한 경제성 평가

접지전극 재료별로 목표 저항 크기에 대한 전체 대상기간에 필요로 하는 전체 공사비용은 초기 공사비용과 각각의 접지재료별로 경제적인 내용 년수에 따라 보강되는 접지전극의 유지보수 공사비용 등을 합한 비용이 된다. 본 논문에서는 접지전극 재료별로 경제적인 내용 수명이 경과한 전극에 대한 공사비용을 현가로 환산하여 초기 공사비용과 합한 전체 접지전극의 공사비용을 대지 저항률별로 변화하는 특성을 비교하였다.

a. 목표 저항값 : 100 Ω

목표 저항의 크기가 100 Ω인 경우에 각각의 대지 저항률별로 필요로 하는 접지전극의 수에 대하여 전체 접지공사비용을 계산한 결과를 그림 39에 나타냈다. 그림 39에서 보는 바와 같이 접지전극의 길이에 따라 심타용 강봉을 이용한 접지전극의 공사비용이 접지동봉과 콘크리트 접지봉을 이용한 접지전극의 공사비보다 전체적으로 적게 소요되는 것을 확인할 수 있다. 특히 심타용 강봉, 콘크리트 접지봉 및 접지동봉의 순으로 전체 접지공사비용이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

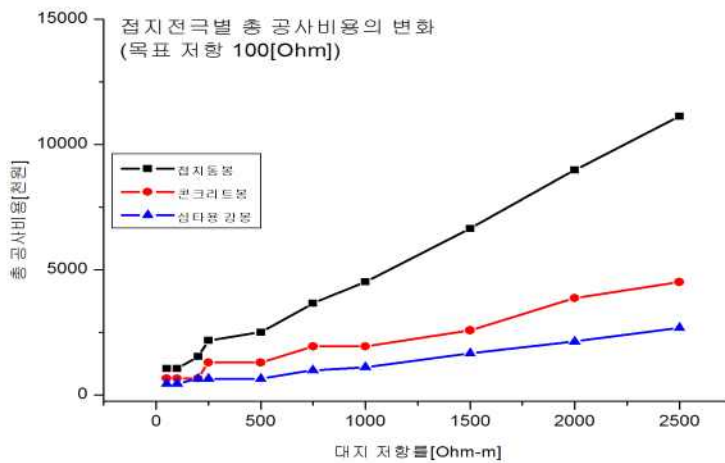


Figure 39. Installation cost of total year(100 Ω)

b. 목표 저항값 : 25 Ω

목표 저항의 크기가 25 Ω인 경우에 각각의 대지 저항률별로 계산한 전체적인 접지공사비를 그림 40에 보였으며, 그림 40에서 보는 바와 같이 심타용 강봉의 전체 접지공사비용이 접지동봉이나 콘크리트 접지봉의 비용보다 전체적으로 적게 소요되는 것을 확인할 수 있다. 대지 저항률의 변화와 상관없이 접지동봉과 콘크리트 접지봉의 공사비용 증감도 비슷한 경향을 보여주지만 접지동봉인 경우에는 전극의 수가 많아져서 실질적으로 접지공사가 어려울 수 없다.

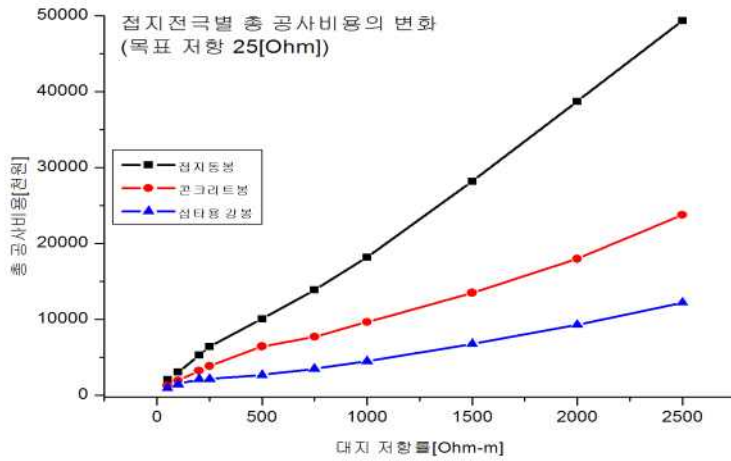


Figure 40. Installation cost of total year(25 Ω)

c. 목표 저항값 : 5 Ω

목표 저항의 크기가 5 Ω인 경우에 대지 저항률별로 필요로 하는 접지전극의 수에 대하여 계산한 전체 접지공사비의 결과를 그림 41에 나타냈다. 그림 41에서 보는 바와 같이 접지전극 재료와 상관없이 접지전극의 수가 100개 이상을 필요로 하므로 현장에서 실질적인 접지공사를 시행하기는 어려운 상태이다.

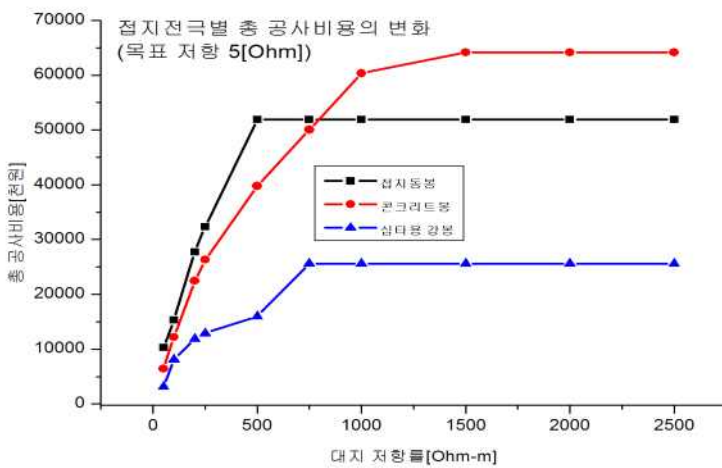


Figure 41. Installation cost of total year(5 Ω)

5. 접지전극별 수명 변화에 대한 경제성 평가

본 논문에서는 경제성 평가의 중요한 파라미터인 접지전극에 대한 내용 년수에 대한 자료는 검증된 데이터가 없다는 점을 고려하여 각각의 접지전극에 대하여 경제적인 내용 수명을 5년에서 25년까지 변화시키면서 접지전극의 수명을 다한 접지전극에 대하여 유지·보수공사를 진행하고 그 비용과 초기공사비용을 현가로 환산한 총 공사비용에 대하여 비교·평가하였다. 앞서서와 마찬가지로 접지전극별로 목표 저항의 크기를 100, 25 및 5 Ω인 경우에 대하여 총 공사비용을 산출하였다.

a. 목표 저항값 : 100 Ω

목표 저항의 크기가 100 Ω인 경우에 각각의 접지전극별 수명을 5년부터 25년까지 변화시키면서 전체 접지공사비용을 계산한 결과를 그림 42에 나타냈다. 그림 42에서 보는 바와 같이 접지전극의 수명을 변화시키는 경우에 콘크리트 접지봉의 전체 공사비용이 가장 고가로 나타나고 있으며, 심타용 강봉을 이용한 접지전극의 공사비용이 접지동봉 보다도 접지전극의 공사비가 전체적으로 적게 소요되는 것을 확인할 수 있다.

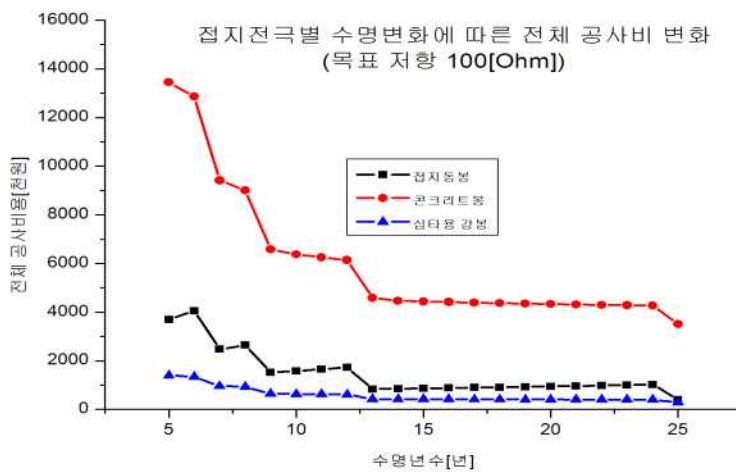


Figure 42. Installation cost for variation of life(100 Ω)

b. 목표 저항값 : 25 Ω

목표 저항의 크기가 25 Ω인 경우에 각각의 접지전극별 수명을 5년부터 25년까지 변화시키면서 전체 접지공사비용을 계산한 결과를 그림 43에 나타냈다.

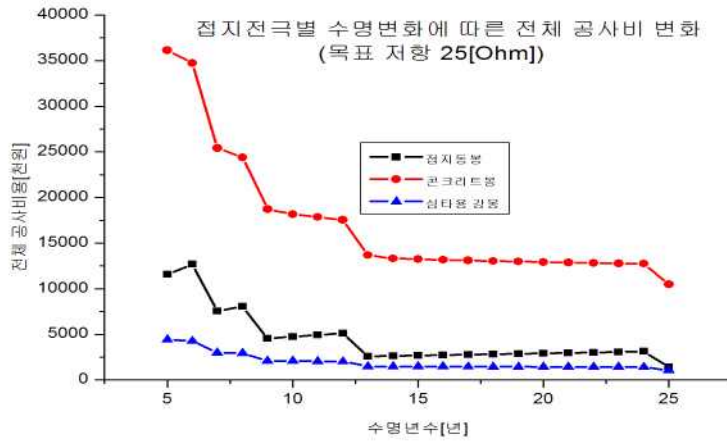


Figure 43. Installation cost for variation of life(25 Ω)

c. 목표 저항값 : 5 Ω

목표 저항의 크기가 25 Ω인 경우에 위와 마찬가지로 전체 접지공사비용을 계산한 결과를 그림 44에 나타냈다.

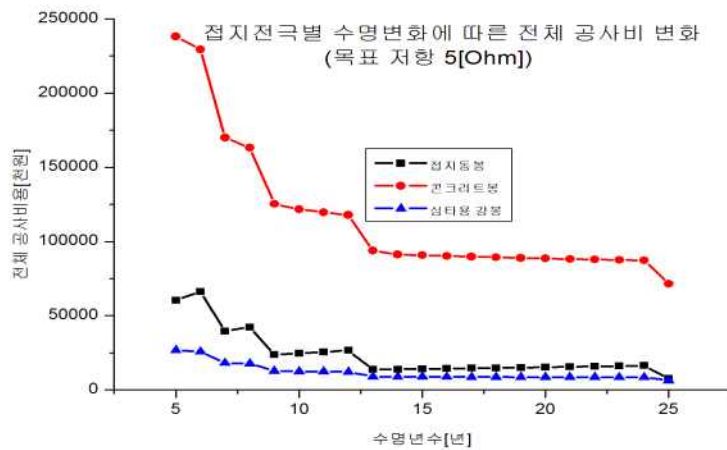


Figure 44. Installation cost for variation of life(5 Ω)

6. 결과 검토 및 고찰

본 논문에서는 대지 저항률을 변화시키면서 목표 접지저항의 크기를 얻기 위하여 필요로 하는 접지전극의 수에 따라 변화하는 접지공사비용을 초기 년도에 소요되는 초기공사비용과 25년을 대상기간으로 하였을 때 유지보수 공사비용을 포함하는 전체 공사비용을 계산하여 접지전극의 재료별로 비교·검토하였다. 초기 공사비용의 측면에서 콘크리트 접지봉을 시공하는 경우에 가장 높은 공사비용을 필요로 하는 것으로 나타났으며, 심타용(용융아연도금) 강봉을 이용한 접지전극의 초기 공사비용이 낮게 나타났다.

전체 대상기간을 25년으로 가정하였을 경우에 소요되는 전체적인 공사비용에 대한 계산의 결과는 접지동봉만을 이용한 접지전극과 콘크리트 접지봉에 의한 공사비용이 심타용 강봉에 의한 접지전극의 시공비용보다 높게 나타났다. 다만, 이 결과는 접지전극의 재료별 수명기간에 대한 데이터가 없어서 본 논문에서는 각각의 접지전극 재료별로 물리적인 수명과 경제적인 수명을 가정하여 공사비용의 계산에 적용하였으나, 각각의 접지전극별 수명을 5년부터 25년까지 변화시키면서 목표 접지저항의 크기를 변화시키면서 전체 공사비용을 검토한 결과 콘크리트 접지봉의 비용이 가장 많이 소요되고, 심타용 강봉의 공사비용이 가장 낮게 계산된 결과를 보여주고 있다.

하지만 본 논문의 결과가 정확한 결과는 아니므로 이 부분에 대한 정확한 연구가 지속적으로 필요할 것으로 사료된다.

V. 결 론

접지시스템의 목적은 설비의 고장에 의한 고장이나 낙뢰 등에 의해 이상전류가 발생할 때 대지표면의 전위상승을 억제해 인체에 대한 감전사고나 전력기기의 손상을 방지하기 위한 것이다. 따라서 전력설비의 고장이나 낙뢰 등에 의해 접지도체에 이상전류가 발생할 때 대지표면의 전위를 낮추기 위해서는 기본적으로 접지 저항이 작아야 한다.

접지의 목적에 따라서 공사방법이 다르고, 접지를 시공하는 대상부지의 토양특성에 따라서도 공사방법이 다를 수 있기 때문에 접지공사는 설계, 시공방법, 접지저항이나 위험전압의 특성 및 유지관리 등의 종합적인 검토와 계획을 통해 합리적인 방안이 수립될 수 있다.

본 논문에서는 전력설비에서 목적에 따라 접지전극의 설계와 공사 부분에서 문제가 될 수 있는 접지전극의 접지저항 크기의 계산 문제와 접지전극의 재료별 접지공사비용의 경제성 검토를 중심으로 연구가 진행되었다.

첫 번째 주제인 접지 저항의 크기를 계산하는 문제에서 일반적으로 사용되고 있는 접지전극의 저항 계산식에 대하여 접지저항의 계산을 위한 보정계수를 다르게 적용할 수 있도록 대지 저항률이 변수인 보정계수의 계산식을 제안하였다.

접지시스템의 설계 혹은 시공을 위하여 접지전극의 접지저항 크기를 계산하고자 하는 경우에 일반적으로 접지전극에 대한 접지저항의 크기를 계산하는 식은 매우 중요한 공식이다. 그러나 이러한 접지전극의 저항 계산식들은 접지전극의 변형이나 대지 저항률의 변동에 따른 정확한 접지저항 값을 계산하는 관점에서는 매우 미흡한 것이 현실이다. 일부 접지전극 재료별로 접지저항 계산식들은 제공되고 있으나, 접지저항의 중요한 변수인 대지 저항률의 변화에 따라 다른 접지저항의 계산 공식이 필요하다. 본 논문에서는 접지전극을 현장에 직접 설치하고, 주기적으로 대지 저항률과 접지전극의 저항을 측정한 결과를 이용하여 접지전극에 대한 접지저항의 계산을 위한 대지 저항률의 변화에 따라 크기가 바뀌는 접지저항 계산의 보정계수

를 두 가지 접지전극에 대하여 제안하였으며, 산출된 접지저항의 보정계수를 이용하여 각각의 접지전극 별로 대지 저항률의 변화에 대한 병렬접지전극의 수에 따른 접지저항을 계산하였다. 따라서 본 논문에서 제안하는 대지저항률 변화에 따른 접지전극별 접지저항의 보정계수는 새롭게 제안되는 내용이며, 특히 현장에서 접지전극을 설치하고 장시간에 걸쳐 주기적인 측정을 통하여 얻어진 결과로서 접지전극의 설치를 위한 설계와 시공분야의 현장에서 직접 적용이 가능할 것이다.

두 번째 주제는 접지전극의 재료별 경제성 검토를 위하여 대지 저항률별 접지전극별로 일정한 접지저항의 크기를 얻기 위하여 필요로 하는 접지전극 재료의 소요량과 공사비용을 포함하는 초기 공사비용과 검토 대상기간을 일정한 기간으로 선정하여 전체 기간 중에 접지전극의 불량이나 수명에 의하여 보수하거나 재시공하는 유지보수비용을 포함하여 경제성 평가에 대하여 LCC(Life Cycle Cost)기법을 도입하여 수행하였다. 본 논문에서는 접지전극의 공법별로 경제성을 검토 하기위해 시험 시공을 한 접지전극별로 일정 접지저항의 크기를 얻기 위해 필요로 하는 접지전극의 소요 자재량 및 시공비를 포함한 초기 시공비용, 일정기간을 선정해 전체 기간 중 시설물 불량이나 수명에 의한 보수 및 재시공 비용을 포함하여 경제성 분석을 수행하였다. 또한 일정기간의 전반에 걸쳐 소요된 비용의 합에 대한 경제성을 평가하는데 사용하는 기법인 LCC(Life Cycle Cost) 기법을 도입해 접지전극의 경제성 평가를 위한 프로그램을 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 대지저항률 변화에 따른 목표 저항의 크기를 얻기 위하여 접지동봉, 용융아연 도금 강봉(심타용 강봉) 및 콘크리트 접지봉에 대하여 초기 공사비 측면에서 콘크리트 접지봉을 시공하는 경우 가장 높은 공사비용을 요구되는 것으로 나타났으며, 심타용 강봉을 이용한 접지전극의 초기 시공비용이 낮은 것으로 나타났다.

2) 25년을 전체 대상기간으로 소요되는 전체적인 시공비용에 대한 계산결과는 접지동봉만을 이용한 접지전극에 의한 시공비용이 콘크리트 접지봉과 심타용 강봉에 의한 접지전극의 시공비용보다 높게 나타났다. 다만, 접지전극의 재료별 수명기간에 대한 정확한 데이터가 없어서 본 논문에서는 각각의 접지전극 재료별로 물리적인 수명과 경제적인 수명을 가정하여 공사비용의 계산에 적용하였다.

3) 각각의 접지전극 재료별로 수명기간 자료가 미비하다는 점을 고려하여 본 논

문에서는 접지전극 재료별 초기 공사비와 수명기간을 5년부터 25년까지 변화시키면서 대상기간을 25년으로 하여 총공사비용을 LCC법에 의하여 계산하였으며, 목표 접지저항의 크기 및 수명기간별로 접지전극 재료별 전체 공사비용을 비교·검토한 결과 콘크리트 접지봉의 공사비용이 가장 높은 것으로 나타났으며, 수명기간이 길어질수록 전체적인 접지전극의 총 공사비용이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 접지전극의 재료별 수명기간에 대한 검증된 자료가 없어서 각각의 접지전극 재료별로 경제적인 수명 기간을 가정하거나 5년부터 25년까지 변화시키면서 전체공사비용의 계산에 적용하였으나, 이 부분에 대한 정확한 연구가 지속적으로 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 高橋健彦, 이형수역, 接地設計 入門, 동일출판사, 음사, 1993.
- [2] 高橋健彦, 이형수역, 接地技術 入門, 동일출판사, 음사, 1995.
- [3] 高橋健彦, 이형수역, 접지시스템 입문, 성안당, 음사, 2003.
- [4] Tagg, G.F. (1964) Earth Resistances, George News, London.
- [5] Xie, G.R. (1991) Grounding Technique of Power System, China Hydraulic and Electrical Engineering Press, Beijing.
- [6] Sunde, E.D. (1968) Earth Conduction Effects in Transmission Systems, Dover Publications, New York.
- [7] McCrocklin, A.J. and Wendlandt, C.W. (1952) Determination of resistance to ground of grounding grids. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part III, Power Apparatus and Systems, 71 (12), 1062 - 1064.
- [8] Blattner, C.J. (1985) Analysis of soil resistivity test methods in two-layer earth. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 104 (12), 3603 - 3608.
- [9] Harold M. Mooney, Ernesto Orellana, Harry Pickett, Leonard Tornheim, "A Resistivity Computation Method for Layered Earth Models", Geophysics, Vol. XXX1, No. 1, Feb. 1966, pp 192~203
- [10] R.L. Araujo, H.G. Assumpcao, W.A.C. Triginelli, M.A. Almeida, "Behaviour of High Resistivity Soils in a Tropical Area", IEEE PAS, Vol. 98, No. 6, Nov./Dec. 1979, pp 2076~2082
- [12] C. J. Blattner, "Prediction of Soil Resistivity and Ground Rod Resistance for Deep Ground Electrodes", IEEE PAS, Vol. 99, No. 5, Sep./Oct. 1980, pp 1758~1761

- [13] C. J. Blattner, "Study of Driven Ground Rods and Four Point Soil Resistivity Tests", IEEE PAS, Vol. 101, No. 8, 1982, pp 2837~2850
- [14] IEC 479-1-1994, "Effects of current on human beings, Part I: general aspects."
- [15] IEC 479-2-1987, "Effects of current on human beings, Part II: special aspects."
- [16] Dalziel, C.F. (1946) Dangerous electric currents. AIEE Transactions, 65, 579 - 585.
- [17] Geddes, L.A. and Baker, L.E. (1971) Response to passage to electric current through the body. Journal of Association for the Advancement of Medical Instruments, 2, 13 - 18.
- [18] Gieiges, K.S. (1956) Electric shock hazard analysis. AIEE Transactions, 75, 1329 - 1331.
- [19] Dalziel, C.F. and Massogilia, F.P. (1956) Let-go currents and voltages. AIEE Transactions, 75, 49 - 56.
- [20] Biegelmeier, U.G. and Lee,W.R. (1980) New considerations on the threshold of ventricular fibrillation for AC shocks at 50 60Hz. Proceedings of the IEEE, 7, 103 - 110.
- [21] Dalziel, C.F. and Lee, R.W. (1968) Reevaluation of lethal electric currents. IEEE Transactions on Industry and General Applications, 4 (5), 467 - 476.
- [22] IEEE Standard 80-2000, "Guide for safety in AC substation grounding."
- [23] IEEE Standard 665-1995, "IEEE standard for generating station grounding."
- [24] Laurent, P.G. (1951) Les bases generales de la technique des mises a la terredans les installationselectriques. Bulletin de la Societe Franscaise

des Electriciens, 1 (7), 368 - 40

- [25] Loucks, W.W. (1954) A new approach to substation grounding. Electrical News and Engineering, 1954 (15 May), 62 - 64.
- [26] Langer, H. (1954) Messungen von erderspannungen in einem 220 kV umspanwerk. Electrotechnische Zeitschrift, 75 (4), 97 - 105.
- [27] Dawalibi, F.P., Southey, R.D., and Baishiki, R.S. (1990) Validity of conventional approaches for calculating body currents resulting from electric shocks. IEEE Transactions on Power Delivery, 5 (1), 613 - 626.
- [28] Dawalibi, F.P., Xiong, W., and Ma, J. (1993) Effects of deteriorated and contaminated substation surface covering layers on foot resistance calculations. IEEE Transactions on Power Delivery, 8 (1), 104 - 113.
- [29] Thaper, B., Gerez, V., and Kejriwal, H. (1994) Reduction factor for the ground resistance of the foot in substation yards. IEEE Transactions on Power Delivery, 9 (1), 360 - 368.
- [30] Dalziel, C.F. (1972) Electric shock hazard. IEEE Spectrum, 9 (2), 41 - 50.
- [31] Meliopoulos, A.P.S., Xia, F., Joy, E.B., and Cokkonides, G.J. (1993) An advanced computer model for grounding system analysis. IEEE Transactions on Power Delivery, 8 (1), 13 - 23.
- [32] ANSI/IEEE Standard 81-1983, "IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system."
- [33] Griffith, H. and Pilling, N. (2004) Earthing, in Advances of High Voltage Engineering (eds A. Haddad and D.Warne), Institution of Engineering and Technology, London.
- [34] Meliopoulos, A. P. S., Power System Grounding and Transients, Marcel Dekker, Inc., 1988.

- [35] EPRI, Transmission Line Grounding, Vol.1, Research Project 1494-1, Report EL 2695, Principal Author F.Dawalibi, 198
- [36] F. Dawalibi, "Ground fault current distribution between soil and neutralconductors", IEEE PAS, Vol. 99, No. 2, 1980, pp 452~461
- [37] J. Robert Eaton, Edwin Cohen Electric power transmission systems, Prentice-Hall, Inc. 1991
- [38] IEEE Std 142-2007, IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.
- [39] IEEE Std 1100-2005, IEEE Recommended Practice for Electric Powering and Grounding Electronic Equipment.
- [40] NESC(National Electrical Safety Code), 2006 Edition.
- [41] IEC 60364, The International Electrotechnical Commission. 2000
- [42] Chien-Hsing Lee & A. P. Meliopoulos "A Comparison of IEC 479-1 and IEEE Standardd-80 on Grounding Safety Criteria" IEEE Trans. Vol. 23, No. 5, 1999. pp 612-621
- [43] P. G. Biegelmeier, W. R. Lee " New considerations on the threshold of ventricular fibrillation for AC shocks at 50-60Hz" IEE proceedings Vol. 1270, No.2, pt. A, March 1980 pp103-110
- [44] SES Ltd., Power System Grounding and Electromagnetic Field, TechnicalSeminar, San Francisco, 1994.
- [45] G. Parise, "A Summary of the IEC Protection Against Electric Shock", IEEE Trans. on Industry Applications, SEP/OCT 1998.
- [46] Institute of Electrical and Electronic Engineering, IEEE Brown book, IEEE standard-399, 1980, Industrial and commercial power system analysis, IEEE New York, 1980
- [47] Institute of Electrical and Electronic Engineering, IEEE green book,

IEEE standard-142, 1982, IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems, IEEE New York 1982

- [48] 통계청, 소비자물가지수 연보(2016년), 2017. 6.
- [49] 한국은행, 경제통계연보, 2017. 6.
- [50] 대한전기협회, 전기부문표준품셈, 2018.
- [51] 사단법인 한국물가정보, 종합물가정보, 2018. 5.
- [52] 임강민, “생애주기비용의 이해와 운영절차”, 품질경영, 2008. 10. pp. 98~101.
- [53] Stanford University Land and Buildings, Guidelines for Life Cycle Cost Analysis, 2005.
- [54] Sieglinde Fuller, Life-cycle Cost Analysis(LCCA), WBDG, 2016. 9.