

# 전위강하법에 의한 접지저항 측정시 보조전극의 위치변화에 따른 오차 분석

논문

59P-2-17

## Measurement Error Analysis of Ground Resistance Using the Fall-of-Potential Method According to the Locations of Auxiliary Probes

김 동 우<sup>†</sup> · 길 형 준\* · 김 동 옥\*\* · 이 기 연\*\* · 문 현 옥\*\*\* · 김 향 곤<sup>§</sup>

(Dong-Woo Kim · Hyoung-Jun Gil · Dong-Ook Kim · Ki-Yeon Lee · Hyun-Wook Moon · Hyang-Kon Kim)

**Abstract** - This paper presents numerical analysis of measurement errors of ground electrode using the fall-of-potential method. In order to analyze ground resistance error according to the positions of auxiliary probes, firstly, national and international standards were researched. Secondly, numerical ground resistance error of hemispheric electrode was analyzed according to the locations of auxiliary probes and the angle between probes. Then, error-reduced positions of auxiliary probes were shown according to the distance to auxiliary current probe versus ground electrode size. Finally, error compensation method was presented. The results presented in this paper provide useful information regarding ground resistance error of alternative positions of auxiliary probes in case that the auxiliary probes could not be located at the proper position in such cases as there are buildings, roadblock or underground metallic pipe at that position.

**Key Words** : Measurement Error, Fall-of-Potential, Ground Resistance, Auxiliary Probes

### 1. 서 론

접지란 대지에 전기적으로 전극을 접속하는 것으로서, 접지의 목적은 인체에 대한 감전 방지와 전기설비나 기기에 대한 재해 방지 등이 있다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 보호대상 설비에 대한 전위상승을 최대한 억제하여야 하며, 이에 따라 접지저항도 낮게 유지하는 것이 바람직하다[1-2].

따라서 접지저항은 접지시스템을 평가하는데 중요한 기술적 요소중의 하나이며, 현행 전기설비기술기준의 판단기준에 접지공사는 제1종 접지공사, 제2종 접지공사, 제3종 접지공사, 특별 제3종 접지공사의 4종류로 분류되어 있으며, 접지저항은 제1종 접지공사 및 특별 제3종 접지공사의 경우 10[Ω]이하로 유지하는 등 해당 종별로 지정한 값 이하로 유지되도록 되어 있다[3-4]. NEC 2008의 경우 단일접지전극은 25[Ω]을 넘지 않도록 규정하고 있으며, IEC 60364 및 BS 7671에서도 TN계통, TT계통, IT계통에 따라 접지 저항측정 방법 및 판정기준이 정해져 있다[5-6]. 그러나 일반적인 접지저항 측정방법인 전위강하법을 이용하여 접지저항을 측정할 때 피측정 접지전극으로부터 적절한 거리를 이격하여 일직선상에 전류보조전극과 전위보조전극의 배치가 필요하다. 설치하고자 하는 보조전극의 위치에 장애물 등이 있는 경우 희망하는 위치에 보조전극의 설치가 어려운 실정이며, 보조전극의 위치 변화에

따른 접지저항의 오차에 대한 정보가 부족할 실정이다.

따라서 본 논문에서는 접지저항 측정시 널리 사용되고 있는 전위강하법을 모의하여, 보조전극이 일직선상에 배치시 적용되는 61.8[%]법 이외의 지점에 설치되었을 때 수치 모델을 통한 오차를 분석하여, 장애물 등으로 보조전극의 위치 변화가 생겼을 경우 분석 결과를 통하여 접지저항의 오차를 최소화 하고 이를 보상하는 기법을 제시하고자 한다.

### 2. 접지저항 측정법의 국내외 기준분석

#### 2.1 국내기준

상기한 바와 같이 전기설비기술기준의 판단기준에 접지공사는 제1종 접지공사, 제2종 접지공사, 제3종 접지공사, 특별 제3종 접지공사의 4종류로 분류되어 있다. 제1종 접지공사는 특고압 계기용변성기의 2차측 전로, 고압용 또는 특고압용 기기의 철대의 접지등 고전압의 침입 우려가 있는 경우에 요구되는 것으로 접지저항 값은 10[Ω]이하로 되어 있다. 제2종 접지공사는 고압 또는 특고압이 저압과 혼촉할 우려가 있는 경우에 저압전로의 보호를 위하여 시설하는 것으로 혼촉시 접지선에 고압 또는 특고압전로의 지락전류가 흐를 경우의 전위상승에 의한 저압기기의 절연파괴를 방지하기 위하여 접지점의 전위가 150[V]를 초과할 수 없도록 되어 있다. 제3종 접지공사는 400[V] 미만의 저압용 기기의 철대 접지 등에 사용되며 접지저항값은 100[Ω]이하로 되어 있다. 특별 제3종 접지공사는 400[V] 이상의 저압용 기기의 철대 접지등 누전에 의한 감전 위험도가 큰 경우에 시설하는 것으로 접지저항값은 10[Ω]이하로 되어 있다[3-4].

정보통신단체표준에서는 보조 전류전극과 보조 전위전극의 위치를 결정하는 방법이 기술되어 있다. 전류전극의 이격거리는 수직깊이형 접지시설인 경우 이상적으로 충분한

<sup>†</sup> 교신저자, 정회원 : 전기안전연구원 주임연구원

E-mail : kdwtk98@naver.com

\* 정 회 원 : 전기안전연구원 선임연구원 · 공박

\*\* 정 회 원 : 전기안전연구원 주임연구원

\*\*\* 정 회 원 : 전기안전연구원 연구원

<sup>§</sup> 시니어회원 : 전기안전연구원 책임연구원

접수일자 : 2010년 1월 4일

최종완료 : 2010년 4월 6일

이격거리는 접지체 시설깊이의 10배이며, 이격거리 확보가 불가능할 경우 최소한 접지체 시설 깊이의 2배 이상 이격되도록 하고 있다. 수평집면형 접지시설인 경우 집면 중심으로부터, 그 점유 면적에 대한 대략적인 면적 환산직경의 10배를 권고하고 있으며, 이격거리 확보가 불가능한 경우 최소한 면적 환산 직경의 2배 이상 이격하도록 되어 있다[7].

**2.2 국외기준**

IEC 60364 및 BS 7671에서는 TN계통, TT계통, IT계통에 따라 저항측정 방법 및 판정기준이 정해져 있다. TT계통에서 누전차단기가 고장 보호를 위해 사용되는 경우 접지 저항은 다음의 조건을 만족해야 한다[5-6].

$$R_A \times I_{\Delta n} \leq 50[V] \quad (1)$$

여기서  $R_A$ 는 노출도전부에 대한 보호도체의 저항과 접지 저항의 합이며,  $I_{\Delta n}$ 은 정격감도전류이다.

다음은 IEC 60364에서 제시된 접지저항 측정의 예이다. 접지극 T와 T에서 두 접지극의 저항구역이 겹치지 않는 거리에 설치한 전류보조전극  $T_1$  사이에 정상값의 교류전류를 흘려보내고 전위보조전극  $T_2$ 는 T와  $T_1$ 의 중간에 삽입되고, T와  $T_2$  사이의 전압강하가 측정된다. 접지극의 저항값은 T와  $T_2$  사이의 전압값을 T와  $T_1$ 사이를 흐르는 전류값으로 나눈 값이다. 단 저항구역이 겹치지 않는다고 가정한다. 접지극의 저항이 참값인가를 확인하기 위해서는 전위보조전극  $T_2$ 를 T로부터 약 6[m] 떨어진 상태 그리고 T에 약 6[m] 근접시킨 상태에서 추가로 두 판독값을 취한다. 세 측정값이 상당히 일치하는 경우 세 값의 평균이 접지극 T의 저항값으로 구해진다. 세 측정값이 일치하지 않는 경우 T와  $T_1$  간의 거리를 늘려 시험을 반복한다.

**3. 보조전극의 위치변화에 따른 접지저항 오차의 수학적 분석**

**3.1 보조전극의 위치변화에 따른 접지저항 오차에 대한 수식 유도**

그림 1에 나타낸 바와 같이 측정대상 접지전극 E와 전류보조전극 C가 반구형 전극이고, 접지전극 E의 반경이 r이며,  $P_1$ 지점의 전위 보조전극 P와  $C_1$ 지점의 전류보조전극 C 사이의 각도가  $\theta$  라면, 대지저항률이  $\rho$ 인 균일대지인 경우 접지전극 E의 전위  $V_E$ 는 다음과 같이 구할 수 있다[8].

$$V_E = I \times \int_r^{C_1} \rho \frac{dx}{2\pi x^2} = \frac{\rho I}{2\pi r} - \frac{\rho I}{2\pi C_1} \quad (2)$$

또한, 전위보조전극 P의 전위  $V_P$ 는 접지전극 E에 유입되는 전류에 의한 전위와 전류보조전극 C에 유출되는 전류에 의한 전위의 합이며, 전위는 다음과 같다.

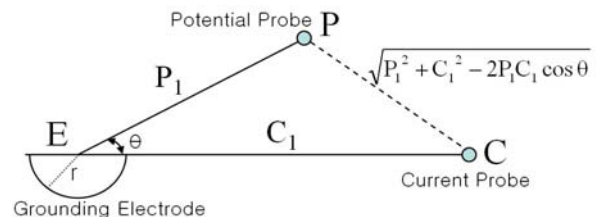
$$\begin{aligned} V_P &= I \times \int_{\infty}^{P_1} \rho \frac{dx}{2\pi x^2} + \\ &(-I) \times \int_{\infty}^{\sqrt{P_1^2 + C_1^2 - 2P_1 C_1 \cos\theta}} \rho \frac{dx}{2\pi x^2} \\ &= \frac{\rho I}{2\pi P_1} - \frac{\rho I}{2\pi \sqrt{P_1^2 + C_1^2 - 2P_1 C_1 \cos\theta}} \end{aligned} \quad (3)$$

따라서, 구하고자 하는 접지저항 값  $R_m = (V_E - V_P)/I$  와 같으며, 위의 수식을 대입하면,

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{C_1} - \frac{1}{P_1} + \frac{1}{\sqrt{P_1^2 + C_1^2 - 2P_1 C_1 \cos\theta}} \right) \quad (4)$$

이다. 여기서, 반구형 접지저항의 참값  $R_g = \frac{\rho}{2\pi r}$  이므로, 오차값  $R_e = R_g - R_m$ 이 되어 아래의 식을 유도할 수 있다[8].

$$R_e = \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{P_1} - \frac{1}{\sqrt{P_1^2 + C_1^2 - 2P_1 C_1 \cos\theta}} \right) \quad (5)$$



**그림 1** 접지저항 측정을 위한 전극배치도  
**Fig. 1** Arrangement of auxiliary probes for ground resistance measurement

위의 수식에서 유도된 오차값  $R_e$  가 0이 되었을 때의 보조전극 배치에 대한 조건을 살펴보면 다음과 같다.

$$\frac{1}{C_1} + \frac{1}{P_1} - \frac{1}{\sqrt{P_1^2 + C_1^2 - 2P_1 C_1 \cos\theta}} = 0 \quad (6)$$

식(6)의 조건과  $\frac{P_1}{C_1} = x$ 로 두고 수식을 전개하면 다음과 같이 된다.

$$\cos\theta = \frac{x^4 + 2x^3 + x^2 + 2x + 1}{2x(x+1)^2} \quad (7)$$

이며,  $\cos\theta \leq 1$  이므로, 근이 존재할 조건을 구하면, x는 다음과 같다.

$$\sqrt{\frac{3 - \sqrt{5}}{2}} \leq x = \frac{P_1}{C_1} \leq \sqrt{\frac{3 + \sqrt{5}}{2}} \quad (8)$$

식(7)에서  $P_1$ 의 위치는  $C_1$  위치의 약 0.618~1.618배의 지점에 위치할 때 근이 존재함을 의미하며, 식(7)에서 구한 x의 변화에 따른 식(6)의 보조전극간 각도  $\theta$ 의 변화를 나타낸 것이 그림 2이다.

그림 2에 나타낸 바와 같이 보조전극간 각도가 0도일때 전위보조전극의 위치( $P_1$ )는 전류보조전극의 위치( $C_1$ )의 0.618배 또는 1.618배에 위치하였을 때 오차가 0이 된다. 마찬가지로 각도가 10도 일때,  $P_1$ 이  $C_1$ 의 0.637배 또는 1.571배에 위치하고, 20도 일때  $P_1$ 이  $C_1$ 의 0.706배 또는 1.416배에 위치하였을 때 접지저항의 오차가 0이 되는 정확한 보조전극의 위치가 존재한다.

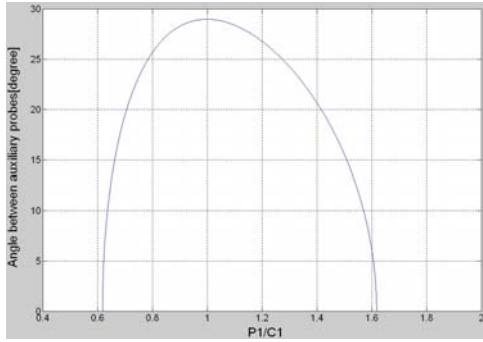


그림 2 보조전극간 각도(y축)변화에 따른 측정오차가 0이 되는 전류보조전극에 대한 전위보조전극의 위치(x축)

Fig. 2 Zero measurement error locations of auxiliary potential probe versus auxiliary current probe according to the angle between auxiliary probes

그림 2와 식(7)과 식(8)에서 오차가 0이 되는 정확한 보조전극의 위치는 접지전극에서 전류보조전극과 전위보조전극 사이의 각도  $\theta$ 가  $28.955^\circ$  이하 일 때 존재하며, 특히, 전류보조전극과 전위보조전극의 거리가 같으면, 식(7)에서  $x=1$ 이 되고, 이때  $\theta = 28.955^\circ$ 가 된다. 이는 접지전극에서 전류보조전극과 전위보조전극 사이의 각도가  $28.955^\circ$  이고, 접지전극에서 전류보조전극까지의 거리와 전위보조전극까지 거리가 같으면, 위치변형에 따른 오차가 0이 되는 것을 의미한다.

오차율  $\varepsilon = R_e/R_g$ 로 두면,

$$\varepsilon = r \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{P_1} - \frac{1}{\sqrt{P_1^2 + C_1^2 - 2P_1C_1\cos\theta}} \right) \quad (9)$$

이고,  $\alpha = \frac{C_1}{2r}$ ,  $\beta = \frac{P_1}{C_1}$  로 두면, 식(9)는 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{1}{2\alpha} \left( 1 + \frac{1}{\beta} - \frac{1}{\sqrt{1 + \beta^2 - 2\beta\cos\theta}} \right) \quad (10)$$

따라서, 접지저항의 오차율은 식 (10)과 같이 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리( $\alpha$ )와 접지전극에서 전류보조전극까지의 거리에 대한 전위보조전극까지의 거리의 비( $\beta$ )로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리  $\alpha = 1$ 배, 2배, 2.5배, 5배, 10배, 50배인 경우를 가정하여,  $\beta = \frac{P_1}{C_1} = 0.618$ 배, 1배,

1.618배, 2배, 3배인 경우 접지저항의 오차율을 분석하였다.

전류보조전극의 이격거리 설정과 관련하여, 정보통신단체 표준에서는 수평접면형 접지시설인 경우 접면 중심으로부터, 그 점유 면적에 대한 대략적인 면적 환산직경의 10배를 권고하고 있으며, 이격거리 확보가 불가능한 경우 최소한 면적 환산 직경의 2배 이상 이격하도록 되어있다[7]. 일본의 발변 전규정에서는 망상형 접지전극의 경우 접지전극 한변 길이의 4~5배 이상 이격하도록 하고 있으며[9], IEEE 81.2에서는 전류보조전극과 전위보조전극이 접지전극 규모의 6.5배 이격하였을 때와 50배로 이격하였을 때 접지임피던스의 정확도는 95[%]와 98.5[%]로 각각 규정하고 있다[10]. 이와 같

은 규정 등을 참고하여  $\alpha$ 를 1배, 2배, 2.5배, 5배, 10배, 50배로 설정하고 오차를 분석하였다.

### 3.2 오차분석 : 61.8% 위치

그림 3에 나타난 바와 같이 전위보조전극의 위치가 전류보조전극의 위치의 61.8%에 위치한 경우, 보조전극간 각도 변화에 따른 오차분석을 위해 식(10)에서  $\beta = 0.618$ 로 고정하고, 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리  $\alpha = \frac{C_1}{2r} = 1, 2, 2.5, 5, 10, 50$ 으로 변화시키면서 연산을 수행하였으며 그 결과를 그림 4에 나타내었다.

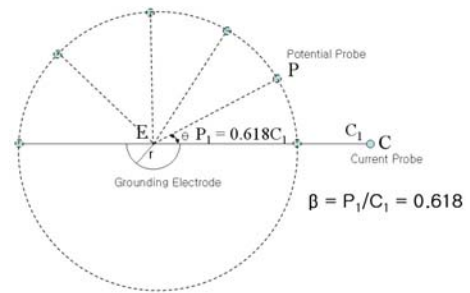
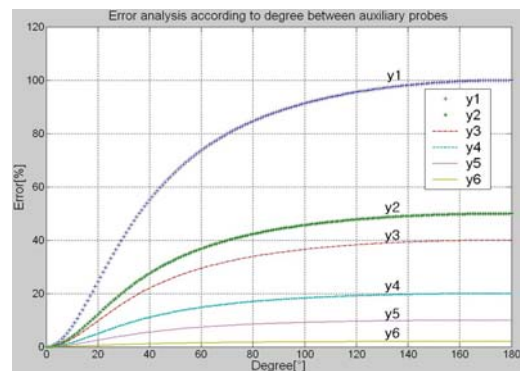


그림 3 전위보조전극이 전류보조전극의 61.8% 위치시 각도변화에 따른 전극배치

Fig. 3 Arrangement of auxiliary probes according to the angle in case that auxiliary potential probe is located at 61.8% of auxiliary current probe

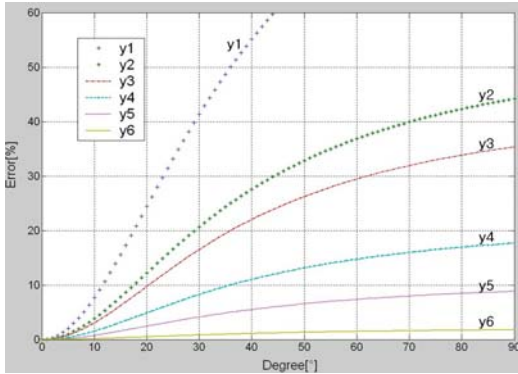
그림 4의 y1은 접지전극의 규모(반구형전극의 직경, 2r)에 대한 전류보조전극의 이격거리( $C_1$ )가 1배인 경우를 나타내며, y2는 2배인 경우, y3는 2.5배인 경우, y4는 5배인 경우, y5는 10배인 경우, y6은 50배인 경우를 나타낸다.

그림 4에 나타난 바와 같이, 전위보조전극의 길이가 전류보조전극의 길이의 0.618배의 거리에 위치한 경우, 오차가 가장 적은 경우는 보조전극간 각도가 0도인 경우이며, 보조전극간 각도가 증가할 수록 오차가 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리  $\alpha$ 가 적으면 적을수록 각도증가에 따른 오차가 급격히 증가하였으며, 반대로  $\alpha$ 가 클수록 각도변화에 따른 오차변화가 줄어들었다.  $\alpha$ 가 5인 경우 보조전극간 각도가 180도 일 때

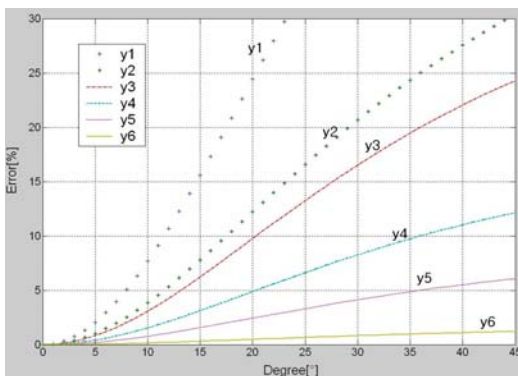


(a) 보조전극간 각도가 0~180도 인 경우

(a) In case the angle between probes is 0~180 degrees



(b) 보조전극간 각도가 0~90도 인 경우(a)의 일부 확대)  
 (b) In case the angle between probes is 0~90 degrees(magnified image of (a))



(c) 보조전극간 각도가 0~45도 인 경우(b)의 일부 확대)  
 (c) In case the angle between probes is 0~45 degrees(magnified image of (b))

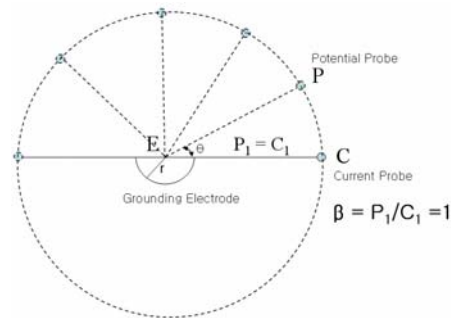
**그림 4** 보조전극간 각도변화에 따른 접지저항의 오차 : 61.8%의 위치

**Fig. 4** Ground resistance error according to the angle between auxiliary probes : 61.8% position

접지저항이 참값에 비해 약 20[%] 적게 측정이 되었으며,  $\alpha$ 가 10인 경우 접지저항이 참값에 비해 약 10[%] 적게 측정이 되었다. 따라서, 이 경우 일직선 배치가 가장 바람직하며, 장애물이 있을 경우 보조전극간 각도를 최소화하는 것이 바람직하다. 또한 보조전극간 각도를 90~180도 가량 둘 수밖에 없는 조건이라면 접지저항의 오차를 8.8~10[%] 이내로 허용하는 경우 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리를 최소 10배 이상 이격하는 것이 바람직하다.

**3.3 오차분석 : 100% 위치**

그림 5에 나타난 바와 같이 접지전극에서 전위보조전극까지의 거리와 접지전극에서 전류보조전극까지의 거리가 같은 경우, 보조전극간 각도변화(20도~180도)에 따른 오차분석을 위해 식(10)에서  $\beta = 1$ 로 고정하고, 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리  $\alpha = \frac{C_1}{2r} = 1, 2, 2.5, 5, 10, 50$ 으로 변화시키면서 연산을 수행하였으며 그 결과를 그림 6에 나타내었다.

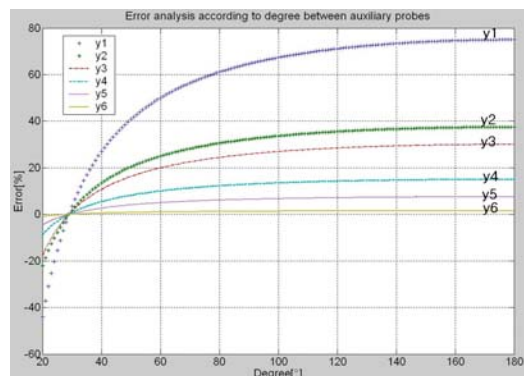


**그림 5** 전위보조전극이 전류보조전극의 100% 거리에 위치시 각도변화에 따른 전극배치

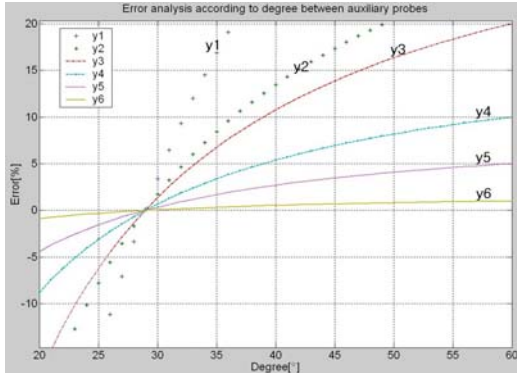
**Fig. 5** Arrangement of auxiliary probes according to the angle in case that distance to auxiliary potential probe is located at 100% of auxiliary current probe

그림 6의 y1은 접지전극의 규모(반구형전극의 직경, 2r)에 대한 전류보조전극의 이격거리( $C_1$ ),  $\alpha = \frac{C_1}{2r}$ 가 1배인 경우를 나타내며, y2는 2배인 경우, y3는 2.5배인 경우, y4는 5배인 경우, y5는 10배인 경우, y6은 50배인 경우를 나타낸다.

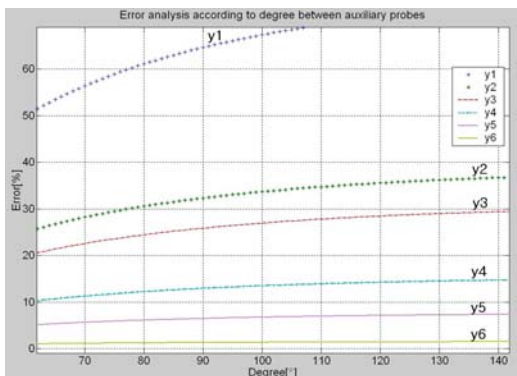
그림 6에 나타난 바와 같이, 접지전극에서 전위보조전극까지의 거리와 접지전극에서 전류보조전극까지의 거리가 같은 경우, 보조전극간 각도가 0에 가까울수록 오차가 대단히 크기 때문에 피하는 것이 바람직하며, 오차가 0인 경우는 보조전극간 각도가 28.955도인 경우이며, 28.955도를 기준으로 각도가 감소하거나 증가할수록 오차가 증가하였으며, 각도가 감소할수록 참값에 비해 접지저항이 크게 나타나며, 각도가 증가할수록 참값에 비해 접지저항이 작게 나타났다. 특히 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리  $\alpha$ 가 적으면 적을수록 각도증가에 따른 오차가 급격히 증가하였으며, 반대로  $\alpha$ 가 클수록 각도변화에 따른 오차변화가 줄어들었다.  $\alpha$ 가 5인 경우 보조전극간 각도가 180도 일 때 접지저항이 참값에 비해 약 15[%] 적게 측정이 되었으며,  $\alpha$ 가 10인 경우 접지저항이 참값에 비해 약 8[%] 적게 측정이 되었다. 따라서, 이 경우 보조전극간 각도를 최대한 28.955도 배치가 가장 바람직하며, 장애물이 있을 경우 보조전극간 각도를 최소 20도 이상 유지하는 것이 바람직하다. 또한 보조전극간 각도를 60도 가량 둘 수밖에 없는 조건이라면 접지저항의



(a) 보조전극간 각도가 20~180도 인 경우  
 (a) In case the angle between probes is 20~180 degrees



(b) 보조전극간 각도가 20~60도 인 경우(그림(a) 확대)  
 (b) In case the angle between probes is 20~60 degrees(magnified image of (a))



(c) 보조전극간 각도가 62~142도 인 경우(그림(a) 확대)  
 (c) In case the angle between probes is 62~142 degrees(magnified image of (b))

**그림 6** 보조전극간 각도변화에 따른 접지저항의 오차 : 100%의 위치

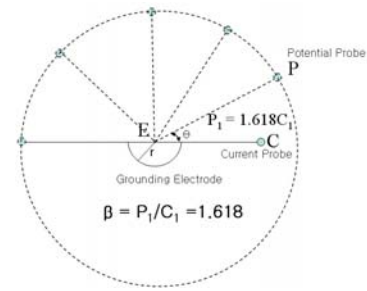
**Fig. 6** Ground resistance error according to the angle between auxiliary probes : 100% position

오차를 약 10[%] 이내로 허용하는 경우 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리(a)를 최소 5배 이상 이격하는 것이 바람직하며, 보조전극간 각도를 90~180도 가량 돌 수밖에 없는 조건이라면, 오차를 약 6~8[%] 이내로 허용하는 경우  $\alpha$ 를 최소 10배 이상 이격하는 것이 바람직하다.

**3.4 오차분석 : 161.8% 위치**

그림 7은 전위보조전극의 위치가 전류보조전극의 위치의 161.8%에 위치한 경우를 나타낸다. 보조전극간 각도변화(0도~180도)에 따른 오차분석을 위해 식(10)에서  $\beta = 1.618$ 로 고정하고, 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리  $\alpha = \frac{C_1}{2r} = 1, 2, 2.5, 5, 10, 50$ 으로 변화시키면서 연산을 수행하였으며 그 결과를 그림 8에 나타내었다.

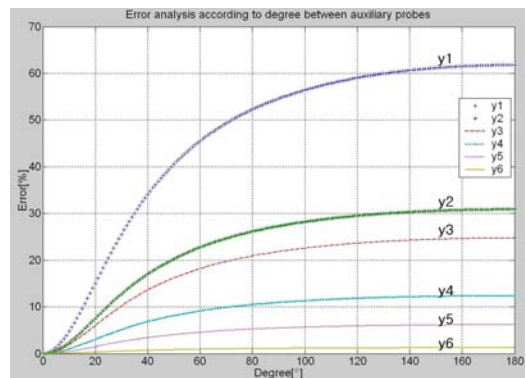
그림 8의 y1은 상기 그래프들과 마찬가지로  $\alpha = \frac{C_1}{2r}$ 가 1배인 경우를 나타내며, y2는 2배인 경우, y3는 2.5배인 경우, y4는 5배인 경우, y5는 10배인 경우, y6은 50배인 경우를 나타낸다.



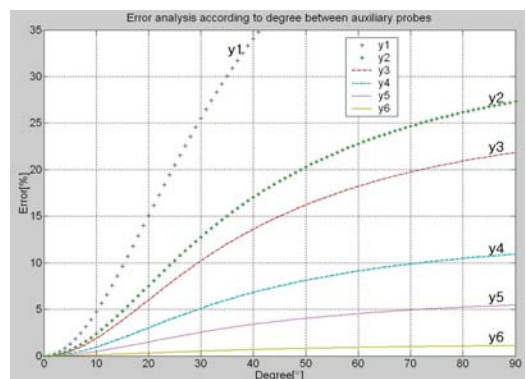
**그림 7** 전위보조전극이 전류보조전극의 161.8% 거리에 위치시 각도변화에 따른 전극배치

**Fig. 7** Arrangement of auxiliary probes according to the angle in case that distance to auxiliary potential probe is located at 161.8% of auxiliary current probe

그림 8에 나타낸 바와 같이, 전위보조전극의 길이가 전류보조전극의 길이의 1.618배의 거리에 위치한 경우, 오차가 가장 적은 경우는 보조전극간 각도가 0도인 경우이며, 보조전극간 각도가 증가할수록 오차가 증가하는 경향을 나타내었다. 특히



(a) 보조전극간 각도가 0~180도 인 경우  
 (a) In case the angle between probes is 0~180 degrees



(b)보조전극간 각도가 0~90도 인 경우(그림(a) 확대)  
 (b) In case the angle between probes is 0~90 degrees(magnified image of (a))

**그림 8** 보조전극간 각도변화에 따른 접지저항의 오차 : 161.8%의 위치

**Fig. 8** Ground resistance error according to the angle between auxiliary probes : 161.8% position

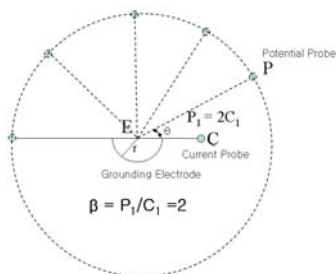
상기한 바와 마찬가지로 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리  $\alpha$ 가 적으면 적을수록 각도증가에 따른 오차가 급격히 증가하였으며, 반대로  $\alpha$ 가 클수록 각도변화에 따른 오차변화가 줄어들었다.  $\alpha$ 가 5인 경우 보조전극간 각도가 90도~180도 일 때 접지저항이 참값에 비해 약 11~12[%] 적게 측정이 되었으며,  $\alpha$ 가 10인 경우 접지저항이 참값에 비해 약 5~6[%] 적게 측정이 되었다. 따라서, 이 경우 61.8[%]경우와 마찬가지로 일직선 배치가 가장 바람직하며, 장애물이 있을 경우 보조전극간 각도를 최소화하는 것이 바람직하다. 보조전극간 각도를 90~180도 가량 들수밖에 없는 조건이라면 접지저항의 오차를 약 6[%] 이내로 허용하는 경우 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리를 최소 10배 이상 이격하는 것이 바람직하다.

**3.5 오차분석 : 200% 위치**

그림 9에 나타난 바와 같이 전위보조전극의 위치가 전류보조전극의 위치의 200%에 위치한 경우, 보조전극간 각도변화(0도~180도)에 따른 오차분석을 위해 식(10)에서  $\beta = 2$ 로 고정하고, 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리  $\alpha = \frac{C_1}{2r} = 1, 2, 2.5, 5, 10, 50$ 으로 변화시키면서 연산을 수행하였으며 그 결과를 그림 10에 나타내었다. 그림 10은 상기 그래프와 마찬가지로 y1은  $\alpha$ 가 1배인 경우를 나타내며, y2는 2배인 경우, y3는 2.5배인 경우, y4는 5배인 경우, y5는 10배인 경우, y6은 50배인 경우를 나타낸다.

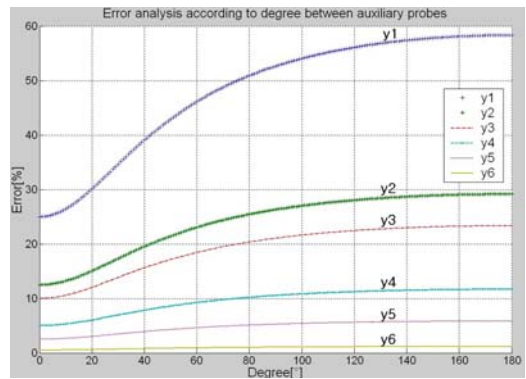
그림 10에 나타난 바와 같이, 전위보조전극의 길이가 전류보조전극의 길이의 2배의 거리에 위치한 경우, 오차가 가장 적은 경우는 보조전극간 각도가 0도인 경우이며, 보조전극간 각도가 증가할수록 오차가 증가하는 경향을 나타내었다.

특히 상기한 바와 마찬가지로 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리  $\alpha$ 가 적으면 적을수록 각도증가에 따른 오차가 증가하였다.  $\alpha$ 가 5인 경우 보조전극간 각도가 0도 일 때 접지저항이 참값에 비해 약 5[%] 적게 측정이 되었으며,  $\alpha$ 가 10인 경우 접지저항이 참값에 비해 약 3[%] 적게 측정이 되었다. 따라서, 이 경우 보조전극간 각도를 최소화하는 것이 바람직하며, 보조전극간 각도를 90~180도 가량 들수밖에 없는 조건이라면 접지저항의 오차를 약 11~12[%] 이내로 허용하는 경우 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리를 최소 5배 이상 이격하는 것이 바람직하다.



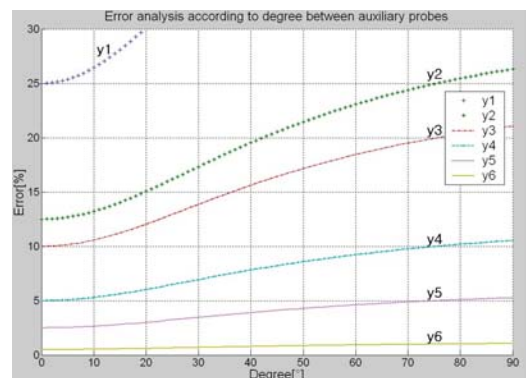
**그림 9** 전위보조전극이 전류보조전극의 200% 거리에 위치시 각도변화에 따른 전극배치

**Fig. 9** Arrangement of auxiliary probes according to the angle in case that distance to auxiliary potential probe is located at 200% of auxiliary current probe



(a) 보조전극간 각도가 0~180도 인 경우

(a) In case the angle between probes is 0~180 degrees



(b)보조전극간 각도가 0~90도 인 경우(그림(a) 확대)

(b) In case the angle between probes is 0~90 degrees(magnified image of (a))

**그림 10** 보조전극간 각도변화에 따른 접지저항의 오차 : 200%의 위치

**Fig. 10** Ground resistance error according to the angle between auxiliary probes : 200% position

**3.6 오차분석 : 300% 위치**

그림 11에 나타난 바와 같이 전위보조전극의 위치가 전류보조전극의 위치의 300%에 위치한 경우, 보조전극간 각도변화(0도~180도)에 따른 오차분석을 위해 식(10)에서  $\beta = 3$ 로 고정하고, 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리  $\alpha = \frac{C_1}{2r} = 1, 2, 2.5, 5, 10, 50$ 으로 변화시키면서 연산을 수행하였으며 그 결과를 그림 12에 나타내었다.

그림 12의 y1은 상기 그래프들과 마찬가지로  $\alpha = \frac{C_1}{2r}$ 가 1배인 경우를 나타내며, y2는 2배인 경우, y3는 2.5배인 경우, y4는 5배인 경우, y5는 10배인 경우, y6은 50배인 경우를 나타낸다. 그림12에 나타난 바와 같이, 전위보조전극의 길이가 전류보조전극의 길이의 3배의 거리에 위치한 경우, 오차가 가장 적은 경우는 보조전극간 각도가 0도인 경우이며, 보조전극간 각도가 증가할수록 오차가 완만히 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 상기한 바와 마찬가지로 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리  $\alpha$ 가 적으면 적을수록 각도증가에 따른 오차가 증가하였으나 각도에 따른 오차 변화

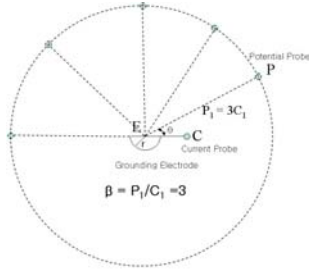


그림 11 전위보조전극이 전류보조전극의 300% 거리에 위치시 각도변화에 따른 전극배치

Fig. 11 Arrangement of auxiliary probes according to the angle in case that distance to auxiliary potential probe is located at 300% of auxiliary current probe

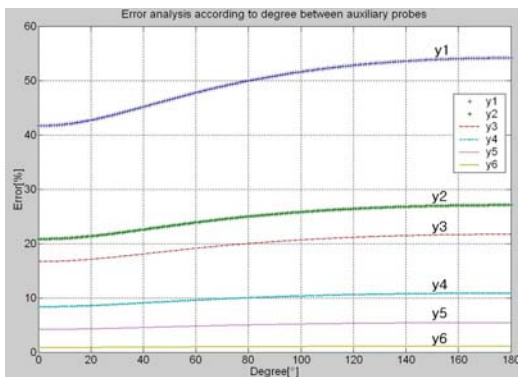


그림 12 보조전극간 각도변화에 따른 접지저항의 오차 : 300%의 위치

Fig. 12 Ground resistance error according to the angle between auxiliary probes : 300% position

폭은 적었다. α가 5인 경우 보조전극간 각도가 0도 일 때 접지저항이 참값에 비해 약 8[%] 적게 측정이 되었으며, α가 10인 경우 접지저항이 참값에 비해 약 4[%] 적게 측정이 되었다. 따라서, 이 경우도 전위보조전극이 전류보조전극의 200[%]지점에 위치한 경우와 마찬가지로 보조전극간 각도를 최소화하는 것이 바람직하며, 보조전극간 각도를 90~180도 가량 들수밖에 없는 조건이라면 접지저항의 오차를 약 10~11[%] 이내로 허용하는 경우 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리를 최소 5배 이상 이격하는 것이 바람직하다.

#### 4. 접지저항의 오차보상 기법

이상과 같이 접지전극에서 전류보조전극까지의 거리에 대한 전위보조전극까지의 거리의 비(β)가 각각 61.8[%], 100[%], 161.8[%], 200[%], 300[%]인 경우 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리(α) 및 보조전극간 각도에 따른 오차를 분석하였으며, 이에 따라 오차를 일정 범위 내에 허용하는 경우 보조전극간 각도와 α를 제시하였다. 이와 같은 방법은 주어진 조건에서 오차를 인정하는 범위 내에서 측정하는 방법을 나타낸 것으로 접지저항 측정시 유용한 정

보를 제공할 것으로 판단되나 위치선정에는 한계가 있다. 따라서, 오차가 크지 않다면 측정위치가 변화되더라도 오차를 보상하는 기법을 통한다면 보조전극이 어느 위치에 배치되더라도 좀 더 정확한 접지저항을 추정할 수 있다.

만약, 측정하고자 하는 접지전극에 대한 접지저항의 참값을  $R_t$ 로 두고, 측정값을  $R_m$ 으로 두면, 측정 오차율 E는

$$E = \frac{R_t - R_m}{R_t} \times 100 [\%] \text{ 가 되며, 이를 } R_t \text{를 기준으로}$$

전개하면, 다음과 같은 식(11)을 유도할 수 있다.

$$R_t = \frac{100 \times R_m}{100 - E} \tag{11}$$

예를 들어, 측정된 접지저항 값이  $R_m = 8[\Omega]$ 이고, 측정 오차율이  $E = 20[\%]$ 면, 접지저항의 참값  $R_t$ 는 식(11)에 대입하여 구할 수 있으며, 이 경우  $R_t = 10[\Omega]$ 이 된다. 접지전극이 반구형 전극이고 균일 대지 저항률일 경우 보조전극의 위치변화에 따른 측정오차의 값은 식(10)을 적용하여 추정할 수 있으며, 표 1~표 6에 보조전극간 각도가 30도, 60도, 90도, 120도, 180도 인 경우 α(1, 2, 2.5, 5, 10, 50) 및 β(0.618, 1, 1.618, 2, 3)의 변화에 따른 접지저항의 측정오차율을 나타내었다.

표 1은 보조전극간 각도가 30도인 경우 α(1, 2, 2.5, 5, 10, 50) 및 β(0.618, 1, 1.618, 2, 3)의 변화에 따른 접지저항의 측정오차율을 나타낸 것이다. 표 1에 나타난 바와 같이 접지저항의 측정값은 참 값에 비해 항상 작게 측정이 되었으며, β = 1 인 경우(접지전극에서 전류보조전극까지의 거리와 전위보조전극까지의 거리가 같은 경우) 측정오차가 가장 작게 나타나므로 가능한 β = 1에 가깝도록 유지하는 것이 바람직하며, 이 조건을 유지하기 어려워 측정시 오차가 어느정도 생기더라도 해당 위치에 대한 측정 오차율과 측정된 접지저항 값을 식(11)을 적용하여 접지저항의 참값에 가까운 값을 구할 수 있다.

표 1 보조전극간 각도가 30도인 경우 α 및 β 변화에 따른 접지저항의 측정 오차율

Table 1 Measurement error rate of ground resistance in case angle between auxiliary probes is 30 degrees according to the variations of α and β

α	측정 오차율[%]				
	β=0.618	β=1	β=1.618	β=2	β=3
1	41.32	3.41	25.53	34.66	43.85
2	20.66	1.70	10.21	17.33	21.93
2.5	16.53	1.36	12.77	13.86	17.54
5	8.26	0.68	5.11	6.93	8.77
10	4.13	0.34	2.55	3.47	4.39
50	0.83	0.07	0.51	0.69	0.88

표 2는 보조전극간 각도가 60도인 경우 α(1, 2, 2.5, 5, 10, 50) 및 β(0.618, 1, 1.618, 2, 3)의 변화에 따른 접지저항의 측정오차율을 나타낸 것이다. 표 2의 경우는 표 1의 경우(보조전극간 각도가 30도인 경우) 보다 접지저항의 측정값이 참값에 비해 더 작게 측정이 되었으며(측정 오차율이 증가하

였음), 이 경우 가능한  $\beta$ 를 약 1.5~1.6 정도 유지하는 것이 바람직하며, 상기한 바와 마찬가지로 측정시 오차가 어느정도 생기더라도 식(11)을 적용하여 접지저항의 참값에 가까운 값을 구할 수 있다.

**표 2** 보조전극간 각도가 60도인 경우  $\alpha$  및  $\beta$  변화에 따른 접지저항의 측정 오차율

**Table 2** Measurement error rate of ground resistance in case angle between auxiliary probes is 60 degrees according to the variations of  $\alpha$  and  $\beta$

$\alpha$	측정 오차율[%]				
	$\beta=0.618$	$\beta=1$	$\beta=1.618$	$\beta=2$	$\beta=3$
1	73.70	50	45.55	46.13	47.77
2	36.85	25	18.22	23.07	23.88
2.5	29.48	20	22.77	18.45	19.11
5	14.74	10	9.11	9.23	9.55
10	7.37	5	4.55	4.61	4.78
50	1.47	1	0.91	0.92	0.96

표 3~6은 보조전극간 각도가 각각 90, 120, 150, 180도인 경우  $\alpha$ (1, 2, 2.5, 5, 10, 50) 및  $\beta$ (0.618, 1, 1.618, 2, 3)의 변화에 따른 접지저항의 측정오차율을 나타낸 것이다. 표 3~6의 경우는 표 1, 2의 경우 보다 접지저항의 측정값이 참값에 비해 더 작게 측정이 되었으며(측정 오차율이 증가하였음). 오차율은 보조전극간 각도가 증가할수록 커짐, 이 경우 가능한  $\beta \geq 3$  으로 유지하는 것이 바람직하며, 상기한 바와 마찬가지로 측정시 오차가 어느정도 생기더라도 식(11)을 적용하여 접지저항의 참값에 가까운 값을 구할 수 있다.

보조전극간 각도를 90도 이상 유지하는 방법은 측정시 오차가 크기 때문에 바람직한 방법은 아니다. 그러나, 접지전극의 규모가 상당히 크고, 접지저항이 1[ $\Omega$ ] 미만의 경우 보조전극의 측정선간의 유도 결합에 의한 영향이 크므로, 이러한 영향을 저감시키기 위해서 보조전극간 각도를 90~180도 및 180~270도로 유지하도록 되어있다. 이 경우 90도를 유지하는 것이 유도 결합에 의한 영향을 가장 받지 않는 방법이며, 보조전극간 각도를 90~180도 및 180~270도 배치시 측정 오차가 크게 존재하므로 상기한 바와 같은 오차 보상 기법을 적용한다면 유도 결합에 의한 영향도 저감시키면서도 오차를 보상하여 참값에 가까운 값을 구할 수 있다.

**표 3** 보조전극간 각도가 90도인 경우  $\alpha$  및  $\beta$  변화에 따른 접지저항의 측정 오차율

**Table 3** Measurement error rate of ground resistance in case angle between auxiliary probes is 90 degrees according to the variations of  $\alpha$  and  $\beta$

$\alpha$	측정 오차율[%]				
	$\beta=0.618$	$\beta=1$	$\beta=1.618$	$\beta=2$	$\beta=3$
1	88.37	64.44	54.62	52.64	50.86
2	44.18	32.32	21.85	26.32	25.43
2.5	35.35	25.86	27.31	21.06	20.34
5	17.67	12.93	10.92	10.53	10.17
10	8.84	6.46	5.46	5.26	5.09
50	1.77	1.29	1.09	1.05	1.02

**표 4** 보조전극간 각도가 120도인 경우  $\alpha$  및  $\beta$  변화에 따른 접지저항의 측정 오차율

**Table 4** Measurement error rate of ground resistance in case angle between auxiliary probes is 120 degrees according to the variations of  $\alpha$  and  $\beta$

$\alpha$	측정 오차율[%]				
	$\beta=0.618$	$\beta=1$	$\beta=1.618$	$\beta=2$	$\beta=3$
1	95.55	71.13	59.05	56.10	52.80
2	47.77	35.57	23.62	28.05	26.40
2.5	38.22	28.45	29.53	22.44	21.12
5	19.11	14.23	11.81	11.22	10.56
10	9.55	7.11	5.91	5.61	5.28
50	1.91	1.42	1.18	1.12	1.06

**표 5** 보조전극간 각도가 150도인 경우  $\alpha$  및  $\beta$  변화에 따른 접지저항의 측정 오차율

**Table 5** Measurement error rate of ground resistance in case angle between auxiliary probes is 150 degrees according to the variations of  $\alpha$  and  $\beta$

$\alpha$	측정 오차율[%]				
	$\beta=0.618$	$\beta=1$	$\beta=1.618$	$\beta=2$	$\beta=3$
1	98.97	74.12	61.17	57.81	53.84
2	49.49	37.06	24.47	28.91	26.92
2.5	39.59	29.65	30.58	23.13	21.54
5	19.79	14.82	12.23	11.56	10.77
10	9.90	7.41	6.12	5.78	5.38
50	1.98	1.48	1.22	1.16	1.08

**표 6** 보조전극간 각도가 180도인 경우  $\alpha$  및  $\beta$  변화에 따른 접지저항의 측정 오차율

**Table 6** Measurement error rate of ground resistance in case angle between auxiliary probes is 180 degrees according to the variations of  $\alpha$  and  $\beta$

$\alpha$	측정 오차율[%]				
	$\beta=0.618$	$\beta=1$	$\beta=1.618$	$\beta=2$	$\beta=3$
1	100	75	61.80	58.33	54.17
2	50	37.5	24.72	29.17	27.08
2.5	40	30	30.90	23.33	21.67
5	20	15	12.36	11.67	10.83
10	10	7.5	6.18	5.83	5.42
50	2	1.5	1.24	1.17	1.08

### 5. 결 론

본 논문에서는 접지저항 측정시 널리 사용되고 있는 전위강하법을 모의하여, 반구형 접지전극 및 균일 대지저항률 조건에서 보조전극이 일직선상에 배치시 적용되는 61.8[%]범이외의 지점에 설치되었을 때 수치 모델을 통한 오차를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 오차가 0이 되는 정확한 보조전극의 위치는 접지전극에서 전류보조전극과 전위보조 전극 사이의 각도가 약 28.955°미만 일 때 두 군데가 존재하며, 각도가 28.955° 일



때 한 군데가 존재하며(전류보조전극까지 거리=전위보조전극까지 거리), 각도가 28.955°를 초과할 경우 오차가 항상 존재한다.

(2) 전위보조전극의 길이가 전류보조전극의 길이의 0.618배의 거리에 위치한 경우, 오차가 가장 적은 경우는 보조전극간 각도가 0도인 경우이며, 보조전극간 각도가 증가할수록 오차가 증가하는 경향을 나타내었다. 이 경우 일직선 배치가 가장 바람직하며, 장애물이 있을 경우 보조전극간 각도를 최소화하는 것이 바람직하다. 또한 보조전극간 각도를 90~180도 가량 둘 수밖에 없는 조건이라면 접지저항의 오차를 8.8~10[%] 이내로 허용하는 경우 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리를 최소 10배 이상 이격하는 것이 바람직하다.

(3) 접지전극에서 전위보조전극까지의 거리와 접지전극에서 전류보조전극까지의 거리가 같은 경우, 보조전극간 각도가 28.955도를 기준으로 각도가 감소하거나 증가할수록 오차가 증가하였으며, 각도가 감소할수록 참값에 비해 접지저항이 크게 나타나며, 각도가 증가할수록 참값에 비해 접지저항이 작게 나타났다. 따라서, 이 경우 보조전극간 각도를 최대한 28.955도 배치가 가장 바람직하며, 보조전극간 각도를 60도 가량 둘 수밖에 없는 조건이라면 접지저항의 오차를 약 10[%] 이내로 허용하는 경우 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리( $\alpha$ )를 최소 5배 이상 이격하는 것이 바람직하며, 보조전극간 각도를 90~180도 가량 둘 수밖에 없는 조건이라면, 오차를 약 6~8[%] 이내로 허용하는 경우  $\alpha$ 를 최소 10배 이상 이격하는 것이 바람직하다.

(4) 전위보조전극의 길이가 전류보조전극의 길이의 1.618배의 거리에 위치한 경우, 61.8[%]경우와 마찬가지로 일직선 배치가 가장 바람직하며, 장애물이 있을 경우 보조전극간 각도를 최소화하는 것이 바람직하다. 보조전극간 각도를 90~180도 가량 둘수밖에 없는 조건이라면 접지저항의 오차를 약 6[%] 이내로 허용하는 경우 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리를 최소 10배 이상 이격하는 것이 바람직하다.

(5) 전위보조전극의 길이가 전류보조전극의 길이의 2배의 거리에 위치한 경우, 오차가 가장 적은 경우는 보조전극간 각도가 0도인 경우이며, 보조전극간 각도가 증가할수록 오차가 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 보조전극간 각도를 최소화하는 것이 바람직하며, 보조전극간 각도를 90~180도 가량 둘수밖에 없는 조건이라면 접지저항의 오차를 약 11~12[%] 이내로 허용하는 경우 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리를 최소 5배 이상 이격하는 것이 바람직하다.

(6) 전위보조전극의 길이가 전류보조전극의 길이의 3배의 거리에 위치한 경우, 오차가 가장 적은 경우는 보조전극간 각도가 0도인 경우이며, 보조전극간 각도가 증가할수록 오차가 완만히 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서, 이 경우도 전위보조전극이 전류보조전극의 200[%]지점에 위치한 경우와 마찬가지로 보조전극간 각도를 최소화하는 것이 바람직하며, 보조전극간 각도를 90~180도 가량 둘 수밖에 없는 조건이라면 접지저항의 오차를 약 10~11[%] 이내로 허용하는 경우 접지전극의 규모에 대한 전류보조전극의 이격거리를 최소 5배 이상 이격하는 것이 바람직하다.

(7) 접지저항 측정시 보조전극의 측정위치가 변화되더라도 변화된 위치에 해당하는 오차를 수식적으로 추정하였으며,

추정된 오차를 보상하는 기법을 제시하였다. 이러한 오차보상기법을 통해 참값에 가까운 접지저항을 구할 수 있다.

### 감사의 글

본 논문은 지식경제부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] 高橋健彦, “접지기술입문”, 동일출판사, pp.34 1995.
- [2] 이복희, 이승철, “접지의 핵심 기초 기술“, 도서출판 의제, pp.4-5, 1999.
- [3] 지식경제부 공고 제2009-60호, “전기설비기술기준의 판단기준”, 지식경제부, 2009.
- [4] 대한전기협회, “전기설비기술기준 해설서”, pp.107-110, 2009.
- [5] IEC, “IEC 60364-4-41”, pp.11-15, 2005.
- [6] BSI, “BS 7671:2008”, pp.47-52, 2008.
- [7] 정보통신단체표준, “TTAS.KO-04.0026/R1”, 2007.
- [8] Jinxi Ma, “Extended Analysis of Ground Impedance Measurement Using the Fall-of-Potential Method”, IEEE Trans. power Delivery, Vol. 17, No. 4, pp.881-885, Oct. 2002.
- [9] 일본전기협회, “발변전규정(JEAC 5001)”, pp.295, 2000.
- [10] IEEE, “IEEE Std 81.2-1991”, pp.20, 1991.

### 저 자 소 개



#### 김 동 우 (金東佑)

1972년 3월 20일생. 1996년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 화재감전연구부 주임연구원.

Tel : 031-580-3036

Fax : 031-580-3045

E-mail : kdwtk98@naver.com



#### 길 형 준 (吉亨准)

1969년 8월 27일생. 1997년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 화재감전연구부 선임연구원.

Tel : 031-580-3034

E-mail : fa523@paran.com



**김 동 옥 (金 桐 郁)**

1971년 1월 6일생. 1998년 2월 인천대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년 3월~현재 동 대학원 박사과정. 2000년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 화재감전연구부 주임연구원.

Tel : 031-580-3035

E-mail : dokim@kesco.or.kr



**문 현 옥 (文 鉉 旭)**

1975년 2월 14일생. 2000년 8월 경북대학교 전자전기공학부 졸업. 2004년 University of Florida, Electrical & Computer Engineering 졸업(석사). 2006년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 화재감전연구부 연구원.

Tel : 031-580-3038

E-mail : hwmoon@kesco.or.kr



**이 기 연 (李 璣 燕)**

1975년 5월 12일생. 2002년 2월 시립인천대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 화재감전연구부 주임연구원.

Tel : 031-580-3039

E-mail : lkycj@kesco.or.kr



**김 향 곤 (金 珣 坤)**

1970년 12월 14일생. 1996년 조선대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년 동 대학원 전기공학과 박사과정수료. 1996년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 화재감전연구부 부장/책임연구원.

Tel : 031-580-3031

E-mail : kon0704@kesco.or.kr