

접지저항 저감제 성능분석

강연욱, 최종기, 광주식, 주형준, 심음보, 방항권*
 한전전력연구원, 한국전력공사*

The analysis on the characteristic of the conductivity concrete materials

Y.W. Kang, J.K. Choi, J.S. Kwak, H.J. Joo, E.B. Shim, H.K. Bang*
 KEPRI, KEPCO*

Abstract - The tower footing resistance is an extremely important parameter in the determination of lightning flashover. For the reduction of back flashover faults, power utility companies have had a concern to decrease the footing resistance. There are two manufactures of the conductivity concrete materials in Korea.

In this paper, we investigated possibility of soil pollution due to the conductivity concrete materials. Also, we analyzed on the reduction characteristics of footing resistance of those.

Keyword : RESAP, MALT, MALZ

1. 서 론

송변전설비의 안정적인 운전을 위해서는 절연협조가 중요하다. 특히 가공 송전선로의 경우 사고의 약 40% 이상이 낙뢰에 의한 사고이다. 낙뢰에 의한 사고는 차폐실패 사고와 역섬락 사고로 구분할 수 있으며, 역섬락 사고를 감소시키기 위해서는 탐각 접지저항의 저감이 필요하다.

송전선로는 주로 산악지를 경유하여 건설되기 때문에, 산악지의 대지 성격상 대지 저항율이 높다. 따라서 매설지선의 시공으로 접지저항을 낮추기 위해서는 많은 어려움과 경비가 소요된다.

따라서 본 논문에서는 국내에서 시판중인 2개사의 접지저항 저감제의 성능분석을 통해 접지저항 저감효과와 분석 및 환경에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 접지저항 저감제 성분분석

2.1 성분분석 배경

현재 땅속에 매설지선을 매설하여 철탑의 접지저항을 낮추고 있으나, 대지 저항율이 높은 경우 매설지선에 접지저항 저감제를 같이 매설하는 시공방법을 통해 접지저항을 낮출 수 있는 방법이 검토되고 있다.

표 1. 중금속 물질에 대한 토양오염 우려기준

[단위 : mg/kg]

물질	가지역	나지역
Cd	1.5	12
Hg	4	16
Cu	50	200
Pb	100	400

- * 가지역 : 과수원, 목장용지, 임야, 학교용지, 하천, 수도용지, 공원, 유원지
- * 나지역 : 공장용지, 도로, 철도용지 및 잡종지역

접지저항 저감제는 일반 콘크리트보다 도전성이 좋은 콘크리트 물질로서 국내 2개사에서 시판중에 있다. 송전선 낙 사고를 저감을 위한 여러 가지 방법 중에서 철탑의 접지저항을 저감하는 방법으로 접지저항 저감제의 적용이 검토되고 있다.

현재 환경부에서는 표 1과 같이 4가지 중금속 물질에 대하여 “토양 오염 우려 기준”을 제정하여 토양 오염에 대한 대책을 마련하고 있으며, 접지저항 저감제 사용시 토양 오염물질의 존재여부의 검토가 필요하다.

2.2 용출시험

국내에서 시판중인 접지저항 저감제의 토양 오염물질의 분석을 위해 환경부에서 공시한 토양오염공정시험법에 준하여 용출시험을 수행하였다.

표 2. 용출시험 결과 [단위 : mg/kg]

성분	"A" 사	"B" 사
Cd	ND	ND
Pb	ND	ND
Hg	ND	ND
Ba	4.2	4.8
Ca	10328	14048
Cr	6.8	5.2
Cu	ND	ND
Fe	ND	ND
K	3851	1450
Mn	ND	ND
Mo	9.7	8.3
Na	227	267
Sr	32.0	12.3
Zn	0.08	0.10

접지저항 저감제는 콘크리트 상태로 땅속에 매설되어 사용되는데, 장기간 사용하게 되면 눈, 비와 같은 수분에 노출되어 접지저항 저감제를 구성하는 성분이 토양으로 용출되게 된다. 이러한 용출특성을 인공적으로 수행하는 시험을 용출시험이라 하며 2개사 제품에 대한 분석결과 는 표 2와 같다. 표 2에서 알 수 있는 것과 같이 토양오염 기준 중금속 물질인 Cd, Pb, Hg, Cu는 2개사 제품 모두 검출되지 않았으며, 현장에서 사용해도 토양 오염의 우려가 없는 것으로 분석되었다.

3. 접지저항 저감 효과 분석

3.1 컴퓨터 모의시험에 의한 성능비교

접지저항은 접지극의 형상과 토양의 전기적 특성, 즉 토양의 구조와 저항율에 의해 결정된다. 실증시험은 특정 토양조건에 대해서만 시행할 수 있기 때문에 측정결

과의 일반화에 오류가 포함될 수 있다. 따라서 모든 잡음요소, 예를 들면 온도, 습도의 변화 및 토양구조의 영향 등이 배제된 이상적인 조건하의 시험 및 이를 토대로 한 시험결과의 일반화를 위해서는 컴퓨터 모의실험이 효과적이며, 다음의 절차에 의해 수행되었다.

- 1) 토양모델링을 위한 겔보기 저항율을 측정의 수행
- 2) 식별된 토양모델에서의 접지시료간 이격거리 산정 및 실증시험에의 적용
- 3) 간략 모델에 근거한 수계산 해석결과의 도출
- 4) 컴퓨터 모델에 근거한 해석결과의 도출 및 수계산 해석결과와의 비교
- 5) 실증시험 결과와 컴퓨터 해석결과의 비교

3.1.1 시험부지의 토양모델 식별

그림 1은 실증시험을 수행 할 시험부지에서 측정된 겔보기 저항율 곡선과 토양구조 해석프로그램인 RESAP 프로그램을 이용하여 분석한 결과를 비교한 것이다. 전극간격에 따른 겔보기저항율의 곡선으로 판단할 때 표토층과 심층의 대지저항율이 비교적 크고, 중간층의 저항율이 상대적으로 작은 수평 3층구조의 토양으로 판별되었다. 그림에서 보이는 바와 같이 측정치와 계산치가 비교적 잘 일치하고 있으며, 계산된 수평 3층 토양구조 각 층의 저항율과 두께는 표 3과 같다.

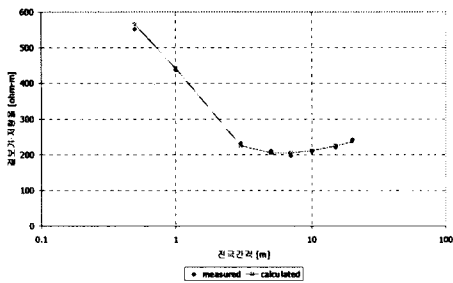


그림 1. 겔보기 저항율 측정/계산치 비교

표 3. 수평 3층구조 등가토양모델

	저항율 [Ωm]	층 두께 [m]
표 토 층	609.8491	0.7675847
중간층	193.7362	9.016217
심 층	279.7386	∞

3.1.2 접지시료간 이격거리 산정

접지저항 저감제의 성능비교를 위한 시료 크기는 시험부지의 넓이를 고려하여 결정하였으며, 시료 단면은 가로 30 cm, 세로 10 cm이며 시료길이는 10 m 로 결정하였다. 시료의 종류는 ① 접지도체(100sq)만 시공, ② 접지도체+시멘트 시공, ③ 접지도체+접지저감제#1(A사) 그리고 ④ 접지도체+접지저감제#2(B사)이다.

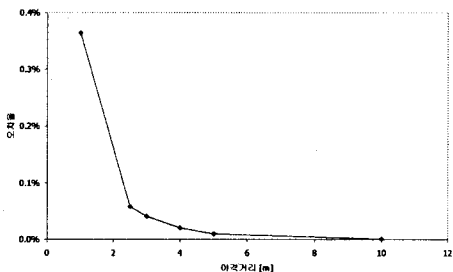


그림 2. 시료별 이격거리에 따른 접지저항 측정오차

네 종류의 시료를 너무 근접하게 시공하면, 시료간 도전성 결합이 측정에 영향을 미치는 경우가 생길 수 있다. 따라서 MALT 프로그램을 이용한 컴퓨터 모의실험을 통해 시료간 이격거리에 따른 측정오차를 계산하였으며, 그 결과는 그림 2와 같다. 이격거리가 가까워짐에 따라 측정오차가 많이 생기며, 이격거리가 5 m 이상이면 측정오차가 거의 0 % 가 됨을 알 수 있다. 이 결과에 따라 시료간 이격거리는 5 m로 결정하였다.

3.1.3 수계산 모델에서의 접지저항 저감제 성능검토

본 절에서는 간략모델을 이용하여 접지저항 저감제의 효과를 검토하였다. 이를 위하여 그림 3과 같이 직사각형인 저감제 포설단면을 동일한 외부반경의 원으로 가정하였다.

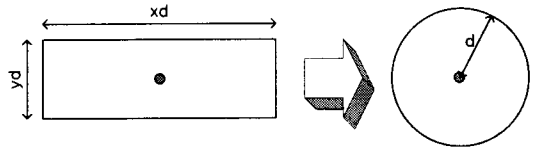


그림 3. 등가 원형도체로의 환산
($2(xd+yd)=2d\pi \Rightarrow d=(xd+yd)/\pi$)

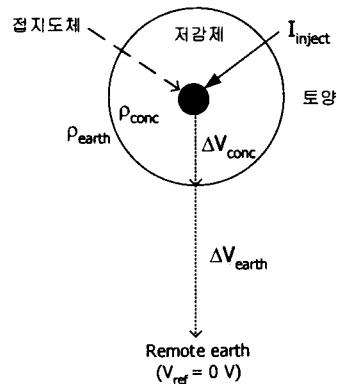


그림 4. 접지저항저감제 포설시 접지저항 계산모델

그림 4는 접지도체 외부에 접지저항 저감제로 코팅이 되어있는 상태에서의 접지저항 계산 모델이다. 접지도체로 전류(I_{inject})가 유입되어 접지저항 저감제를 통과하여 토양으로 누설되고 무한원점(remote earth)에 도달할 때까지 전류의 경로를 따라 전압강하 ($\Delta V_{conc} + \Delta V_{earth}$)가 발생된다. 접지저항(R_g)은 식 1.1과 같이 이 전압강하를 주입전류로 나눈 값이 된다.

$$R_g = \frac{\Delta V_{conc} + \Delta V_{earth}}{I_{inject}} \quad (1.1)$$

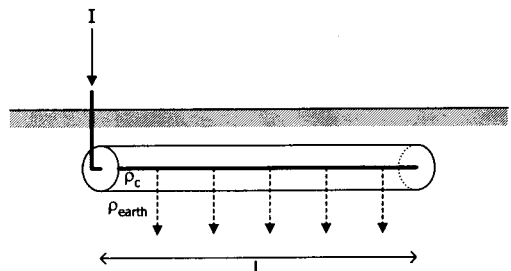


그림 5. 접지저항 계산모델

만일 접지저항 저감제 포설면적이 동일하다면 전류의 경로 중 토양내에서의 전압강하(ΔV_{earth})는 접지저항 저감제와는 상관없이 결정되는 값이므로, 저감제 내에서의 전압강하(ΔV_{conc})의 감소에 의해서만 접지저항 저감효과가 나타난다.

그림 5와 같은 접지극에서 접지도체로부터의 거리를 r 이라고 하면, 거리 r 에서의 전류밀도 및 전계는 식 1.2 와 같다.

$$J(r) = \frac{I}{2\pi r L} \quad [A/m^2] \quad \Leftrightarrow \quad E(r) = \frac{\rho I}{2\pi r L} \quad [V/m] \quad (1.2)$$

도체 내 적분경로 상의 전압강하는 식 1.3에 의해 계산되며, 이를 저항값으로 환산하면 식 1.4가 된다. 여기서 d_0 는 접지도체의 반경이며, d 는 접지저감제의 반경이다.

$$\Delta V = \int_{d_0}^d E(r) dr = \int_{d_0}^d \frac{\rho_{\text{conc}} I}{2\pi r L} dr = \frac{\rho_{\text{conc}} I}{2\pi L} \int_{d_0}^d \frac{1}{r} dr = \frac{\rho_{\text{conc}} I}{2\pi L} \ln\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (1.3)$$

$$\therefore \Delta R = \frac{\Delta V}{I} = \frac{\rho_{\text{conc}}}{2\pi L} \ln\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad [\Omega] \quad (1.4)$$

접지저감제의 포설단면을 $0.3 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ 라고 하면, 동일한 외부반경을 갖는 원의 반지름(d)은 $0.127323 \text{ m} = (0.3 \times 0.1)/\pi$ 가 된다. 접지도체의 단면적이 100 sq 이므로, 그 반경(d_0)은 $\sqrt{100/\pi} \text{ [mm]} = 0.0056 \text{ m}$ 가 된다. 이상에서 간략히 기술한 계산모델은 접지극 양 끝단의 end effect (주. 접지극 양 끝단에서 전류가 도체표면의 수직방향이 아닌 다른 방향으로도 누설되는 효과)를 고려하지 않은 것이다.

3.1.4 컴퓨터 모의실험에 의한 검토

실증실험은 특정 모양을 대상으로 한 것이므로 모양조건이 달라지면, 동일한 접지극일지라도 다른 결과가 나올 수 있다. 따라서 실증실험에 의해 얻어진 결과와 등가인 컴퓨터 모델을 식별하고, 이 모델 내에서 여러 가지 모양조건을 달리하는 모의실험을 통해 최소한의 비용으로 실험결과를 일반화할 수 있게 된다.

여기서는 저주파수에서 접지해석이 가능한 MALT 프로그램을 이용하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였다.

종단 효과(end effect)가 고려된 계산결과를 얻기 위하여 접지극의 주파수영역 해석이 가능한 MALZ 프로그램을 이용하여 접지저항 저감제의 저항율(ρ_{conc})에 따른 접지저항을 계산하였다. 단, 계산모델의 토양저항율은 $100 \Omega\text{m}$, 접지시료의 길이는 각각 $10, 100 \text{ m}$, 매설깊이는 0.2 m 를 가정하였다. 그림 6에 표시된 ΔR 값은 MALZ 계산결과인데 이 값은 식 1.4에 의한 계산결과와도 거의 차이가 없었다.(종단효과 무시해도 무방함).

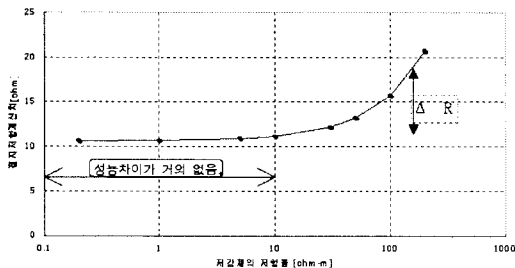


그림 6. 접지저항 저감제의 저항율에 따른 접지저항계산 결과 ($\rho_{\text{earth}} = 100 \Omega\text{m}$, 접지시료길이 $L = 10\text{m}$)

결론적으로 그림 6의 계산 결과에서 알 수 있는 것같이, 접지저감제의 저항율이 $10 \Omega\text{m}$ 미만인 경우에는

접지저항에 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 철도용품 표준규격의 접지첨가제 규격에서 전기저항율을 $0.2 \Omega\text{m}$ 이하로 규정하고 있으며 이같은 규격을 만족하면, 제품별로 접지저항 저감제의 성능에는 차이는 거의 없을 것으로 예상된다. 저감제의 저항율이 토양저항율($100 \Omega\text{m}$)과 같아지면 접지저감제를 포설하지 않은 것과 마찬가지로, 이 때의 접지저항값과 비교하여 저감제의 저항율이 $0.2 \Omega\text{m}$ 인 경우의 접지저항값은 약 68%로서, 저감제 사용에 의한 접지저항 저감율은 약 32%로 계산된다.

그러나 이러한 저감율은 시료크기가 커질수록 작아지며, 일례로 동일한 조건에서 시료의 길이를 $10 \rightarrow 40 \text{ m}$ 로 증가시켜 계산했을 때의 저감제 사용에 따른 접지저항 저감율은 약 25%이며, 계산결과를 요약하면 표 4와 같다.

표 4. 접지저항 계산결과 요약

토양저항율	100 Ωm		1000 Ωm	
시료 길이	10 m	40 m	10 m	40 m
저감제 미포설시	15.7 Ω	4.9 Ω	157.0 Ω	49.9 Ω
저감제 포설시	10.7 Ω	3.7 Ω	106.4 Ω	37.3 Ω
	(∇ 32%)	(∇ 25%)	(∇ 32%)	(∇ 25%)

컴퓨터 모의실험 결과, 접지저항 저감제의 저항율이 철도용품 표준규격($0.2 \Omega\text{m}$)을 만족한다면 제품별 성능차이는 거의 없을 것으로 예상되며 저감제 포설에 의한 접지저항의 저감율은 접지극이 길어질수록 감소함을 알 수 있다.

3.2 실증시험에 의한 성능비교

3.2.1 접지저항 측정 방법

각 시료의 접지저항은 전위강하법(Fall-Of-Potential Test)으로 측정하였다. 시험전류 순환을 위한 전류전극은 IEEE Std 81의 권고에 따라 시료의 크기(10 m)로부터 6.5 배 이상인 70 m 거리에 시공하였다. 측정대상 접지극과 전류전극 사이에 시험전류를 흘리고 두 전극 사이의 지표면전위와 측정대상 접지극 사이의 전위차를 측정하여, 이를 전류로 나눔으로써 결보기 저항값을 얻는다. 전위강하법 측정회로는 그림 7과 같다.

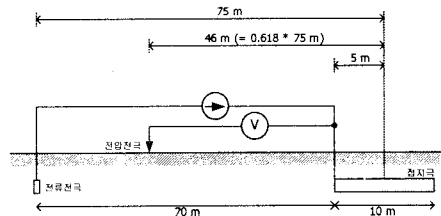


그림 7. 전위강하법 측정회로

접지극과 전류전극에 유입되는 전류의 방향이 대지를 기준으로 서로 반대방향이므로 두 전극의 극성이 반대가 된다. 따라서 두 전극 사이에는 영전위점이 생기게 되며 61.8% 법칙에 의해 측정대상 접지극과 전류전극간 거리의 61.8% 지점이 영전위점이 되므로, 전압전극이 75 m 의 61.8%인 46 m 지점에 위치했을 때의 결보기 저항값(V/I)이 접지극의 접지저항이 된다.

그림 8에서 처럼 접지극 인근에 물웅덩이 같은 낮은 저항율을 매질이 존재하는 경우에는, 전류가 이 매질을 통과하는 동안에 전압강하가 거의 0이 되기 때문에 접지저항이 낮아지는 효과가 나타난다.

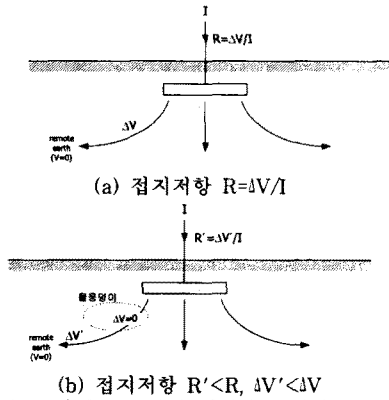


그림 8. 접지극 근처의 저저항을 매질의 영향

실증시험 부지 주변의 표토층을 육안으로 관찰했을 때, 국부적으로 습지가 존재했으며, 일부 접지시료와 습지간의 거리가 가까워 이것이 측정에 영향을 미쳤을 가능성이 있다고 판단되어 대기 저항을 세밀히 재 측정하였으며, 그 결과는 표 5와 같다.

표 5. 습지를 고려한 등가 토양모델

	접지저항 저감제 인근 토양모델		나동선 인근 토양모델	
	저항율	두께	저항율	두께
	표토층	244.9938	3.035981	335.2893
중간층	230.1841	0.2256584	508.5296	0.2004548
심 층	649.9556	infinite	597.1358	infinite

3.2.2 접지저항 측정 결과

접지 재료에 따른 접지저항 저감을 분석을 위해 실증 시험 부지의 대기 저항율이 위치에 관계없이 같다고 가정한 경우, 접지저항 저감율은 표 6 및 그림 9와 같다.

표 6. 재료별 접지저항 저감을 실측치 (보정 전)

측정일	일반시멘트	저감제(A사)	저감제(B사)
1차('03.10.10)	15%	38%	49%
2차('03.10.27)	11%	36%	48%
3차('04.03.30)	27%	47%	58%
4차('04.04.21)	29%	48%	57%

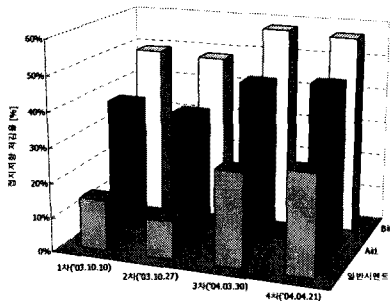


그림 9. 재료별 접지저항 저감을 비교 (보정 전)

그러나 실증시험 부지 주변의 습지의 영향을 고려한 접지저항 저감효과의 분석이 필요하며, 이를 위해 습지를 고려한 등가 토양모델을 표 5에서와 같이 구했으며, 이것을 적용하여 보정한 접지저항 저감효과는 표 7 및 그림 10과 같다.

표 7. 재료별 접지저항 저감을 실측치 (보정 후)

측정일	일반시멘트	저감제(A사)	저감제(B사)
1차('03.10.10)	6%	21%	23%
2차('03.10.27)	2%	19%	22%
3차('04.03.30)	19%	29%	32%
4차('04.04.21)	20%	30%	31%

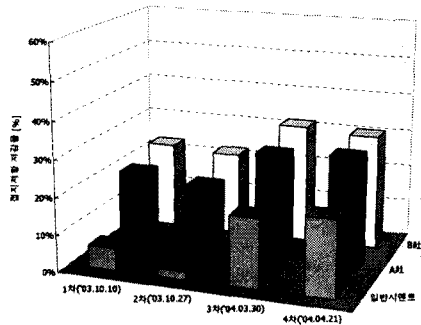


그림 10. 재료별 접지저항 저감을 비교 (보정 후)

이상의 검토결과로 볼 때, 접지저항을 낮추기 위해 일반적인 시공방법인 나동선 단독 시공과 비교하여 콘크리트나 접지저항 저감제를 병행하여 시공하는 방법이 더 효과적임을 알 수 있다.

또한 접지저감제 재료의 차이로 인한 저감효과는 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 일반시멘트의 경우는 접지저감제보다 저감효과가 적은 것으로 추정된다. 또한 접지저항 저감제를 사용한 경우 측정일시에 따른 저감효과가 비교적 일정하게 유지되었으나, 시멘트를 사용한 경우는 변동폭이 상대적으로 큰 것으로 생각된다.

4. 결 론

가공 송전선로의 사고의 약 40% 이상을 점유하는 낙뢰에 의한 사고에서 역섬락 사고를 감소시키기 위해서는 탐각 접지저항의 저감이 필요하며, 이것을 위해서는 접지저항 저감제의 사용의 검토도 필요하다.

따라서 본 논문에서는 접지저항 저감제의 사용시 환경에 미치는 영향 및 접지저항 저감효과를 분석했으며, 분석 결과 환경 오염의 문제점은 없으며 접지저항 저감효과도 있음을 알 수 있었다. 향후 장기간 사용시 성능 유지 효과의 분석이 필요하다고 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of a ground system, IEEE Std 81-1983
- [2] IEEE guide for safety in AC substation grounding, IEEE Std 80-2000
- [3] SES, CDEGS Users' Guide, 2000
- [4] F.P.Dawalibi, J.Ma, R.Southey, "Behavior of grounding systems in multilayer soils", IEEE Trans. on PD, vol.9, no.1, pp.332-334, Jan. 1994
- [5] 전력연구원, 축소형변전소 접지효과 증대효과 방안 연구(최종보고서), 1998.4