

터널 애자류 오염도 분석과 세정주기 선정에 관한 연구

(A Study on Selection of Cleaning Period and Pollution Analysis of Insulators in Tunnel)

김영석* · 송길목 · 최명일

(Young-Seok Kim · Kil-Mok Shong · Myeong-Il Choi)

요 약

본 연구는 터널구간 내 설치된 각종 애자류의 오염도를 평가하여 각 터널구간마다 세정주기를 마련하기 위해 연구를 수행하였다. 세정주기는 전국의 각 지역을 대상으로 공해, 산업단지, 염해지역을 샘플링하여 애자류에 부착된 오염도에 의해 평가되었다. 그 결과, 오염물의 증가에 의해 포집량과 도전율은 증가하였고, 각 터널마다 그 값은 서로 다르게 나타났다. 특히, 공해 및 염해가 심한 지역은 도전율이 높게 나타났으며, 주기적인 세정계획을 수립하여 관리하는 것이 사고를 미연에 방지할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 기존에 애자 표면에 도포하는 절연그리스는 사용을 자제하는 것이 장기적으로 사고를 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract

This paper was carried out to estimate pollution levels of various insulators in tunnel and establish cleaning period in each tunnel section. We estimate pollution level that is attached to insulators in environmental pollution area, industrial area, salt damage area. These results that the pollution quantity and conductivity were increased by pollution accumulation period. However, the conductivity showed each other big difference in each tunnel. In particular, the conductivity showed big in environmental pollution(tunnel A) and salt damage(tunnel C) area, It is considered to prevent accident that manage establishing periodic state of cleaning plan. Also, the Grease that spread on the insulator surface in existing is considered that it can prevent accident for long-term by restrain use.

Key Words : Pollution, Insulator, Conductivity, Pollution quantity, Tunnel

1. 서 론

* 주저자 : 전기안전연구원 진단기술연구부 주임연구원
Tel : 031-580-3064, Fax : 031-580-3111
E-mail : athens9@kesco.or.kr
접수일자 : 2010년 2월 2일
1차심사 : 2010년 2월 4일
심사완료 : 2010년 3월 18일

전기철도는 전기에너지가 철도에 이용되면서 예전의 화석연료에 의존하여 나타났던 오염물질이 줄어들고, 속도와 안정감 등이 향상되어 매우 유용한 운송수

단이 되고 있다. 전기철도 운행에 필요한 가선설비는 급전선, 조가선, 전차선, 브래킷 및 전주로 구성되어 있으며, 특히, 브래킷에 사용되는 애자는 자기애자 혹은 폴리머애자를 사용하고 있다. 애자는 전차선에서 흐르는 전류를 외부에 유입되지 않도록 차단하는 것과 절연이격 확보 등의 중요한 역할을 담당한다. 최근에는 자기애자 보다 폴리머 애자가 현장에 널리 이용되고 있다[1].

전기철도에서의 장애원인을 살펴보면, 전차선의 마모에 의한 끊어짐, 브래킷 애자의 절연과괴 등으로 사고가 발생한다. 특히, 터널구간에 설치된 브래킷 애자에는 열차이용에 따른 부유분진이 축적되기 쉽고, 자연세정이 되지 않으며, 터널 내부의 노후화에 따른 수분의 증가의 의해 열차의 장애요소를 많이 유발하게 된다. 특히 분진의 침적은 주변 수분과 결합하여 전기사고를 유발하게 됨으로 주의가 요구된다[2-4]. 따라서 터널내부의 브래킷 애자의 장애요인을 제거하기 위해 애자에 부착된 분진의 오염상태를 측정하고 적절한 교체 주기와 세정주기 등의 산정이 필요하다. 하지만, 국내 터널내부의 애자 유지 관리는 주변 환경을 고려하지 않고 일률적으로 세정주기가 선정되어 있어 사고예방을 위해 각 터널별로 분진 오염상태를 파악하고 터널상태를 비교 평가할 필요가 있다.

본 논문에서는 각 터널구간마다의 세정주기를 마련하기 위해 터널내부에 설치된 각종 애자류에 오염도를 분류 평가하여 고장예측과 이를 통한 점검주기, 세정주기 선정을 위한 연구를 수행하였다.

2. 터널애자의 오염도 평가방법

KS C IEC 60507(2005)에서는 “교류시스템에 사용되는 고압애자의 인공오염 시험”에 관한 사항으로 적용범위는 최고전압이 1,000[V]에서 765[kV]인 교류시스템에 사용된다[5]. 절연체 표면으로 금속부와 결합용 소재는 표면에서 제외된 상태에서 부착된 염분의 양을 표면적으로 나눈 값으로 정의하는 염분부착밀도(SDD)에 대해 이를 활용하여 애자의 오손정도를 파악하는데 이용된다. 평가방법은 부피를 알고 있는 물에 부착물을 세정하고 얻어진 현탁액을 약 2분 동안 교반

한 후 온도 θ [°C]에서의 총 전도도 σ_{θ} [S/m]를 측정한다. 관계식을 이용하여 σ_{20} 로 보정한다. σ_{20} 는 0.004~0.4[S/m] 범위 안에 있는 경우, 다음 식으로 현탁액의 염도 $S_a = (5.7\sigma_{20})^{1.03} \text{ kg/m}^3$ 으로 결정한다.

$$SDD = \frac{S_a \cdot V}{A} \quad (1)$$

V : 현탁액의 부피(cm^3), A : 세척한 표면 면적(cm^2)
이를 이용하여 기준염분부착밀도는 시험특유의 염분부착밀도값을 정량화하여 판정하는 근거로 활용한다. 따라서 본 연구에서는 현장에서의 상태를 일정주기를 두고 다수 점검하여 데이터를 취득하는 방법을 채택하여 비교 평가하였다.

3. 터널 애자의 선정 및 오염물 채취

본 연구의 대상이 된 터널은 전국 지역을 대상으로 4개 터널구간을 선택하였으며, 표 1에 터널명과 오염물의 누적기간을 나타낸다. 오염도 평가를 위한 채취 장소와 환경 구분에 있어서 공해의 영향이 있는 터널 A, 염해의 영향, 산업시설에 의한 영향이 있는 터널 B, C, 염해의 영향이 있는 터널 D에 대하여 채취하였다.

표 1. 터널명과 오염물의 누적기간
Table 1. Accumulative period of pollution in tunnel

터널	오염물 누적기간	Grease 사용여부
터널 A	19개월	미 사용
터널 B	33개월	"
터널 C	12개월	사용
터널 D	17개월	"

오염물의 채취는 동일 터널애자를 대상으로 오염물 누적기간에 대해 첫 번째로 채취하고 8개월이 지난 후, 두 번째 오염물을 채취하였다. 또한, 오염물질의 적절한 평가를 위해서는 현장의 상태를 원형 그대로 보존하여 시험소까지 전달함이 중요하다. 따라서 가장 적절하고 현장에서 활용이 가능한 분진채취방법과 분석기기 활용방법을 선정하여 전차선로 터널 내 애

자의 오염도평가에 대한 객관성을 확보하는데 우선하였다. 데이터 수집은 필세법을 활용하였으며 이는 현장의 특성을 보존하여 평가하는데 가장 접근하기 쉬우면서 정확한 방법이라 판단된다. 이 방법은 애자 표면에 부착된 오염물을 채취하는 방법으로 절연체 표면에 부착된 염분을 조심스럽게 수거, 금속부를 제외한 절연체 표면전체 또는 윗면과 아랫면을 따로 세척한다. 세척은 스프레이로 애자에 증류수를 분무하면서 브러시를 이용하여 부착된 오염물질을 제거하였다.

그림 1은 터널구간에서 애자에 부착된 오염물질을 채취하는 지점을 나타낸 것이다. 터널 내부에서의 오염물 채취지점은 터널 입구부, 터널 출구부, 터널 중반부로 하여 총 3개소에서 오염물을 채취하였다. 현장에서 채취한 분진의 포집량은 일정한 단위면적에서 채취한 것이 아니기 때문에 애자를 일정한 단위면적으로 통일하고 평가하였다.

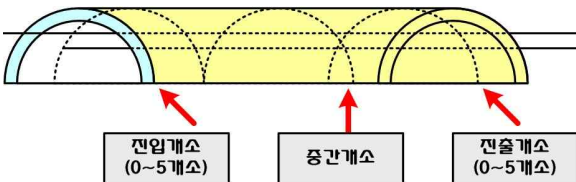


그림 1. 터널구간 애자의 오염물질 채취 위치
Fig. 1. Collection position of pollution of insulator in tunnel

4. 터널애자 오염물의 도전율 및 포집량 특성

도전율과 포집량을 비율적으로 평가하여 각 터널에서의 오염도를 분석하였다. 그림 2는 터널구간 애자류에서 포집된 오염물의 도전율을 측정하는 개략도 및 측정사진을 나타낸 것이다. 먼저 포집된 오염물을 백색매디아 시약병에 옮겨 담고, 23.5±0.50[°C]의 탈이온수(水)량을 400[mL]로 일정하게 맞추어, 도전율 측정기를 이용하여 도전율을 측정하였다. 또한 채취된 오염물의 도전율을 측정하고 난 뒤, 오염물을 여과지(filter)로 걸러내어 건조시킨 후, 전자저울을 이용하여 중량을 측정하였으며, 그림 3에 나타낸다.

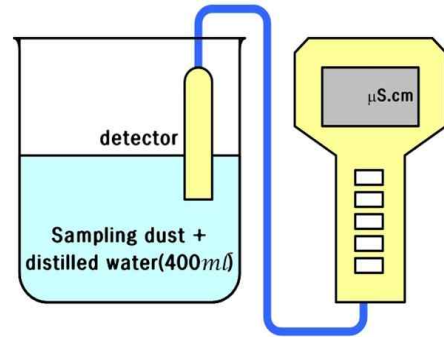


그림 2. 도전율 측정방법
Fig. 2. Measurement method of conductivity



그림 3. 포집량 측정방법
Fig. 3. Measurement method of pollution quantity

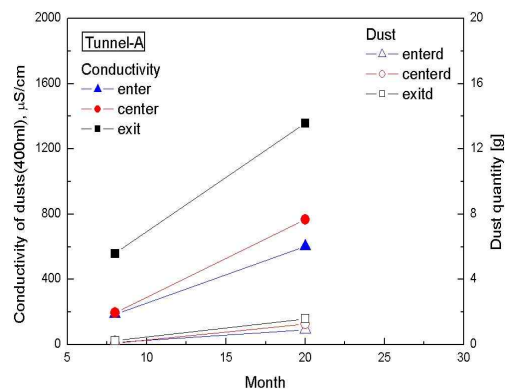


그림 4. 터널 A구간의 도전율과 포집량
Fig. 4. Conductivity and pollution quantity in tunnel A

그림 4는 터널 A 구간으로 공해의 영향이 있는 곳의 도전율과 포집량 특성을 나타낸다. 터널 A의 경우는 오염물 누적기간이 19개월과 8개월 후의 도전율과 포집량을 비교한 것이다. 두 경우 모두 포집량이 증가할수록 도전율은 증가하는 것으로 나타났다. 19개월간

의 누적기간에서의 포집량은 1~1.6[g] 정도였으며, 그때의 도전율은 600~1,400[$\mu\text{s}/\text{cm}$]로 편차가 크게 나타났으며, 8개월간의 누적기간에서는 포집량이 0.1~0.25[g] 정도로 채취량이 아주 적었지만, 도전율은 180~560[$\mu\text{s}/\text{cm}$]로 높게 나타났다. 즉, 포집량이 적더라도 오염물의 성분에 따라 도전율이 크게 영향을 받을 수 있다는 것을 알 수 있었다.

그림 5는 터널 B 구간으로 염해의 영향과 산업시설의 영향이 있는 곳의 도전율과 포집량 특성을 나타낸다. 터널 B의 경우는 오염물 누적기간이 33개월과 8개월 후의 도전율과 포집량을 비교한 것이다. 두 경우 모두 포집량이 증가할수록 도전율은 증가하는 것으로 나타났지만, 오염물 누적에 따른 도전율의 큰 차이는 나타나지 않았다.

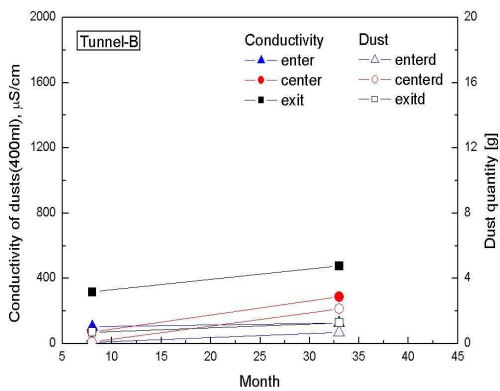


그림 5. 터널 B구간의 도전율과 포집량
Fig. 5. Conductivity and pollution quantity in tunnel B

그림 6은 터널 C 구간으로 염해의 영향과 산업시설의 영향이 있는 곳뿐만 아니라, 터널애자에 그리스(Grease)가 도포된 도전율과 포집량 특성을 나타낸다. 그림에서 터널 C의 경우는 오염물 누적기간이 12개월인 경우 포집량은 20[g]에서 32[g]으로 전체 터널중 가장 많았으며, 도전율은 340~1,220[$\mu\text{s}/\text{cm}$]였다. 한편 오염물 누적기간이 8개월인 경우는 포집량과 도전율이 상대적으로 낮게 나타났으며, 이는 1차 오염물 채취 후 그리스를 도포하지 않았기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 따라서 터널애자의 그리스 도포는 주변 오염물질을 부착하기 쉬운 조건상태가 되며, 향후 그

리스 도포에 대한 영향 분석이 많이 필요할 것으로 판단된다.

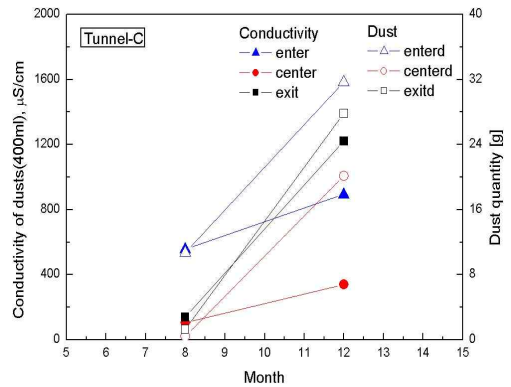


그림 6. 터널 C구간의 도전율과 포집량
Fig. 6. Conductivity and pollution quantity in tunnel C

그림 7은 터널 D 구간으로 염해의 영향과 터널애자에 절연 그리스가 도포된 도전율과 포집량 특성을 일 때 포집량이 1~7[g]였으며, 도전율은 520~710[$\mu\text{s}/\text{cm}$]였다. 한편 오염물 누적기간이 8개월인 경우는 그림 6과 유사하게 포집량과 도전율이 낮게 나타났으며, 그리스를 도포하지 않았기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 터널 내 애자의 오염정도가 채취 지점마다 다른 이유는 일반적으로 외부에 노출된 경우 비와 바람에 의해 일부 자연 세정이 가능하나, 터널 내에서는 그러한 조건이 없기 때문에 분진이 누적되는 결과이며, 특히 외부 부유분진이 터널입구부에 진입하여 애자의 표면에 부착된 상태에서 자연 세정이 없는 경우 그 지역적 환경에 따라 도전율이 다르게 나타나는 것으로 판단된다. 고분자 폴리머 애자의 특성상 수분에 대한 발수특성이 우수하나 분진에 대한 경우에는 우수한 편이 아니므로 터널 내에서는 이를 고려한 관리가 요구된다.

터널의 애자오염에 대한 특징을 규정하기 위해서는 현장에서 포집한 성분을 파악하고 분포특성을 해석하는 것이 바람직하다. ICP-AES는 성분함량을 분석한 것으로 성분분포 특성을 해석하는데 매우 유익하다. 그림 8은 각 터널애자에 부착된 오염물의 성분분포를 나타낸다. 터널내부는 입구부와 출구부를 제외하고는

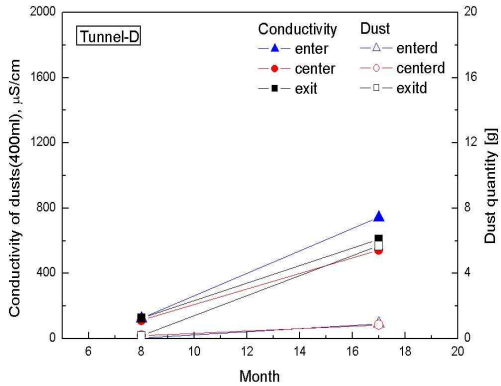


그림 7. 터널 D구간의 도전율과 포집량
Fig. 7. Conductivity and pollution quantity in tunnel D

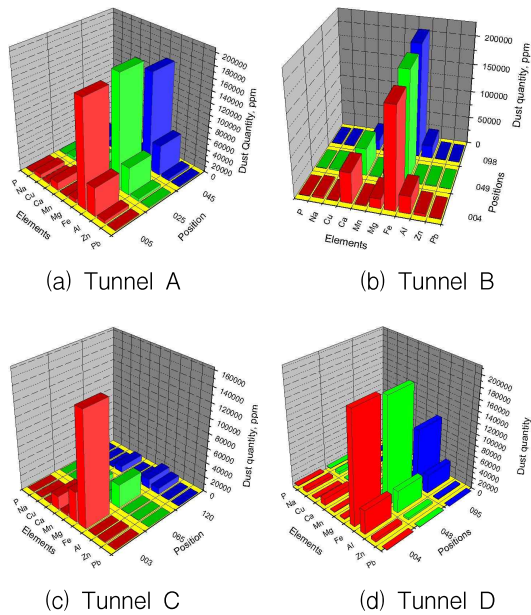


그림 8. 각 터널구간의 오염물 성분
Fig. 8. Element of pollution in each tunnel

밀폐된 공간으로 구성되어 있으며, 전차선로에 바퀴의 마찰에 의해 부유한 먼지가 애자에 부착되는 과정을 거친다. 터널내부에 존재하는 성분 중 가장 높은 비율을 차지하고 있는 것은 철 성분이었다. 다음으로는 알루미늄, 칼슘, 나트륨 등의 순으로 나타났다. 즉, 운행에 따른 레일과 전차 사이의 부유분진으로 판단되며, 도전성 성질을 가지고 있어 수분과 결합한다면 애자

표면으로 연면방전을 쉽게 발생시킬 수 있어 애자 관리의 주의가 요구된다.

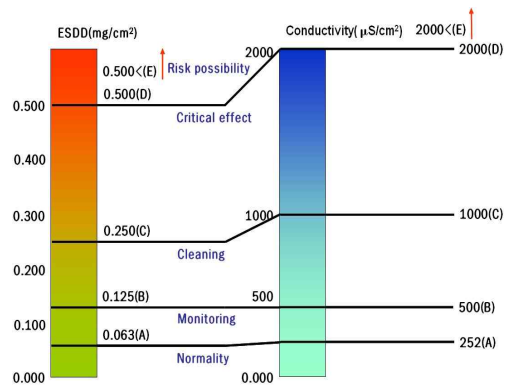


그림 9. ESDD평가 및 도전율의 관계
Fig. 9. Relation of conductivity and ESDD

터널 오염의 객관적인 결과는 오염물의 성분, 포집량 등을 비교하고 이에 따른 ESDD평가를 통해 이루어져야 할 것으로 판단되며, 그림 9에 나타난다. 그림에서 알 수 있듯이 ESDD에 의해 애자류의 열화정도를 A, B, C, D, E 등급으로 나눌 수 있으며, 도전율과 비교하면, 252[$\mu\text{S}/\text{cm}$]이하이면 정상, 500[$\mu\text{S}/\text{cm}$]이하이면, B 등급으로 모니터링(점검), 500[$\mu\text{S}/\text{cm}$]이상 1,000[$\mu\text{S}/\text{cm}$]이하이면, C 등급으로 애자의 세정계획 수립 및 1개월 이내의 세정, 1,000[$\mu\text{S}/\text{cm}$]이상 2,000[$\mu\text{S}/\text{cm}$]이하이면 D 등급으로 즉시 세정, 2,000[$\mu\text{S}/\text{cm}$]이상이면 E 등급의 위험가능성이 높으므로 즉시세정 및 정밀점검으로 나눈다.

표 2. 애자의 오염상태에 따른 절연파괴 특성비교
Table 2. Comparison of breakdown of insulator by pollution

오염상태	미소방전전압, [kV]		절연파괴전압, [kV]	
	건조	수분	건조	수분
- greece : ≈ 0 [%] - dust : ≈ 0 [%]	-	-	>150	>150
- greece : < 50[%] - dust : > 50[%]	60 \pm 5	45 \pm 5	105	100.5

터널내부 애자의 오염물 및 절연 그리스 사용에 대한 절연성능을 비교 분석하였다. 표 2는 오염상태에 따른 절연과피 특성을 나타낸다.

표에서 절연 그리스와 오염물이 존재하지 않으면 미소방전과 절연과피 전압이 터널내부의 애자의 성능조건을 모두 만족시키는 것으로 나타났다. 하지만, 절연 그리스와 오염물이 동시에 존재하게 되면, 그림 10과 같이 초기 불꽃방전이 진행하면서 오염물이 탄화되고 불꽃방전이 발생하여 열화 시키는 형태가 나타났다.



(a) 갓(shed) 부분에서의 연면방전



(b) 전체 불꽃 발생



(c) 오염물 탄화(breakdown)



(d) 연면방전에 의한 화재 진행

그림 10. 절연 그리스가 도포된 애자의 내전압 시험
Fig. 10. Withstand test of insulator attached to Grease

즉, 수분에 의한 절연과피 전압이 급격하게 낮아지는 것을 알 수 있으며, 이는 전차 운행에 영향을 줄 것

으로 판단된다. 따라서 터널내부 애자에 절연 그리스를 도포하는 것은 초기 상태에서는 누설전류 방지 및 절연내력에 일정한 영향을 줄 수 있지만, 시간 경과에 의한 누적 등으로 누설전류가 흘러 연면방전을 일으킬 가능성이 큰 것으로 판단된다.

이상의 측정과 분석으로부터, 각 터널에 대한 위험성을 평가한 결과를 표 3에 나타낸다. 터널 A의 경우는 터널 내부 애자에 오염물이 부착되기 쉬운 환경과 공해지역에 위치하고 있어 주기적인 점검과 즉시 세정을 요구하며, 세정주기는 12개월 이내로 하는 것이 알맞은 것으로 판단된다. 터널 B의 경우에는 초기에 오염물질이 많이 쌓이지만, 시간이 흐를수록 포화되는 경향을 보여 정상상태이며 세정주기를 36개월로 설정해도 크게 무리가 없을 것을 판단된다. 터널 C의 경우는 염해와 산업시설이 위치해 있는 지역으로 터널내부 애자에 절연그리스가 도포되어 있어 오염물이 쉽게 부착되며, 오염물이 급격하게 증가하여 즉시 세정하여 사고를 미연에 방지할 필요가 있을 것을 판단된다. 또한 세정주기는 12개월 이내로 설정할 필요가 있다. 터널 D의 경우에는 설치 초기에 절연그리스가 도포되지 않아 오염물의 축적이 쉽지 않지만, 절연그리스를 도포하게 되면 오염물 축적이 쉽게 되고 세정계획을 세우고 청소를 할 필요가 있을 것으로 판단된다. 그러나 이 터널구간에서는 오히려 절연그리스를 도포하지 않고 운영하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

표 3. 터널구간 애자류의 상태결과
Table 3. State results of insulator in tunnel

터널명	8개월		누적기간		Comment
	도전율 (Max)	ESDD 판단	도전율 (Max)	ESDD 판단	
Tunnel A	559	C	1357	D	즉시세정
Tunnel B	317	B	476	B	정상
Tunnel C	557	C	1220	D	즉시세정
Tunnel D	125	A	744	C	세정계획

5. 결 론

터널구간 내 설치된 각종 애자류의 오염도를 평가하

여 각 터널구간마다의 세정주기를 마련하기 위해 연구를 수행하였다. 전국의 각 지역을 대상으로 공해, 산업단지, 염해지역을 샘플링하여 애자류에 부착된 오염도를 평가하였다. 연구결과, 현재의 일률적인 세정주기에 의해 애자의 오염도를 제거하는 것은 경제적 손실을 가져 올 수 있을 것으로 판단되며, 각 터널마다의 맞춤형 세정주기 필요할 것으로 판단된다. 각 터널에 대한 평가 결과, 공해가 심한 지역은 주기적인 세정계획을 수립하여 관리하는 것이 사고를 미연에 방지할 수 있을 것으로 판단되며, 기존에 애자 표면에 도포하는 절연그리스는 사용을 자제하는 것이 장기적으로 사고를 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 지식경제부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] 남정석, 김용기, 황종규, 한영재, 김현숙, “산업선 터널 및 공장 분진지역에서의 전철설비에 대한 안전대책연구, 한국철도기술연구원 보고서, 1996.
- [2] 김영석, 송길목, 정진수, 정종욱, 김선구, “염수 및 분진에 의한 고분자 절연물의 표면누설전류 특성과 사고 위험성”, 한국조명전기설비학회, Vol. 21, No. 8, pp. 129-135, 2007.
- [3] 송길목, 김영석, 김선구, “현장 분진포집에 의한 도전을 측정과 전기설비 위험평가”, 한국조명전기설비학회 추계 학술대회, 2007.
- [4] 김천영 외 5, “비용해성 산업용 분진이 배전용 자기제 현수애자의 전기적 특성에 미치는 영향”, 대한전기학회 Vol. 50C, No. 4, pp. 183-189, 2001.
- [5] KSC IEC 60507(교류시스템에 사용되는 고압애자의 인공 오염 시험), 기술표준원, 2005.
- [6] KSC 0223(환경시험방법(전기전자) 염수분무시험방법), 기술표준원, 2005.

◆ 저자소개 ◆



김영석(金榮錫)

1974년 4월 27일생. 1996년 2월 경상대학교 공대 전기공학과 졸업. 1999년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001~2002년 야마구치대학 전기전자공학과 객원연구원. 2003년~현재 전기안전연구원 진단기술연구부 주임연구원.

Tel : (031)580-3064

Fax : (031)580-3111

E-mail : athens9@naver.com



송길목(宋佳穆)

1967년 3월 31일생. 1994년 2월 숭실대 공대 전기공학과 졸업. 2003년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 전기안전연구원 진단기술연구부 책임연구원.

Tel : (031)580-3061

Fax : (031)580-3111

E-mail : natasder@kesco.or.kr



최명일(崔明日)

1975년 5월 30일생. 2002년 2월 창원대학교 전기공학과 졸업. 2004년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 8월 광운대학교 정보통신대학원 졸업(석사). 2003~2006년 한국전기안전공사 재직. 2006년~현재 전기안전연구원 진단기술연구부 주임연구원.

Tel : (031)580-3065

Fax : (031)580-3111

E-mail: ken2003@kesco.or.kr