

지하철 고분자 지지애자의 설계 및 특성 평가

한세원, 조한구, 송홍준*

한국전기연구원 신소재응용연구그룹, *태양산업(주)

Study on a design and characteristics tests of polymeric insulators for subway

Han Se-Won, Cho Han-Goo, *Song Hong Jun

Advanced Electrical Materials Group KERI, *Tae Yang Co.

Abstract

Polymeric suspended insulators for subway and electrical track line had been designed and manufactured. The main elements to design polymeric insulators were the insulation ability and the optimal structure. To get the insulation ability, electrical and mechanical tests according to standards had done on housing rubbers and FRP cores and selected the sample with best properties as a insulator. The insulator shape and fitting parts with minimum electrical stress was simulated by FEM electrical field analysis program. The manufactured insulator set had been tested and estimated the electrical and mechanical according to ES and KS, and showed good characteristics in these tests.

Key Words : Polymeric Insulator, Subway and Electric Track Line, Silicone Rubber, FRP core, FEM Analysis, Electrical Properties

1. 서 론

지하철 또는 전차 선로용 절연물은 기존 전력 계통의 절연물보다 안전에 대한 신뢰성이 높게 요구되며 설치 개수가 많아 관리, 교체 작업이 빈번하게 이루어진다. 현재 사용 중인 자기재 애자 갓과 금속류의 부속품으로 만들어진 애자 장치는 무게가 무겁고 구조가 복잡하여 설치 및 관리상 비효율적이란 지적이 있어 왔다. 더욱이 지락 또는 아크 등에 의한 사고 발생 시 자기재 소재의 파편 비산은 안전사고의 가능성을 내포하고 있어 이에 대한 대체 절연물 개발은 대단히 중요하다. 전차 선로의 급전이 직류(DC)로 이루어지므로 급구류로 기계적 강도를 유지하는 기존 자기재 애자 장치의 구조는 쉽게 전식(electrolytic corrosion)에 노출되어 절연물의 열화로 이어지고 결국 파손되는 내구성 문제도 가지고 있다.

최근 자기재 애자보다 무게가 가볍고 절연성과 내

구성이 우수한 복합 폴리머(composite polymer) 애자 장치가 개발되어 미국, 일본, 캐나다 등에서는 그 사용이 보편화 되어가는 실정에 있다. 특히 전력 계통의 배전용 절연체로서 그 우수성이 알려져 이미 국내에서도 개발이 이루어져 시제품이 사용되고 있다. 국내의 경우도 하우징 및 FRP에 대한 국산화 소재 개발이 활발히 진행 중에 있고, 외국 기업의 국내 시장 공략이 본격화되는 이 시점에서 전차 선로용 자기재 애자 장치를 복합 고분자 하우징과 FRP로 구성된 시스템을 개발, 국산화하는 과제는 국가 산업적 발전 차원에서 대단히 중요하다.

지하철용 고분자 지지애자는 기존 자기애자의 단점인 폭발에 의한 비산이 전혀 발생하지 않도록 폴리머 하우징과 FRP 코어 소재와 복합체 케이싱 고정판으로 설계, 제작되며 특히 무게에 있어서 기존 자기재 애자의 1/3로 경감이 가능한 신소재 절연물로 지하철과 같이 안전성과 고신뢰성이 요구되는 사용개소에 적합한 신기술이다. 본 연구에서는 지하철

용 고분자 지지애자를 설계 제작하여 규격에 따르는 특성을 시험 평가하였다.

2. 절연 설계 및 특성 시험

그림 1은 기존 자기재 지지애자 장치의 실제 사진이다. 자기재 애자의 기계적 지지력을 자기부에 급구 캡과 핀을 시멘트로 접착하여 얻는다. 하지만 고분자 애자의 경우 그림 2와 같이 중심에 FRP 코아를 두고 실리콘 고무로 하우징 갓을 형성하므로 기본 개념이 전혀 다르다.

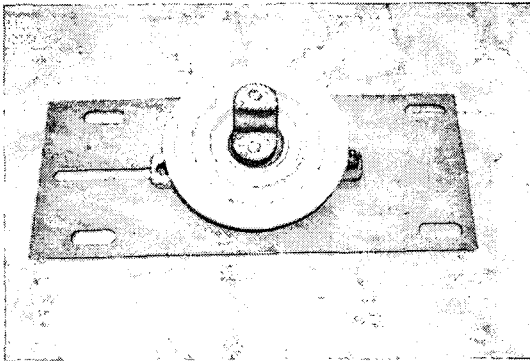


그림 1. 기존 자기재 지지애자 장치(250mm).

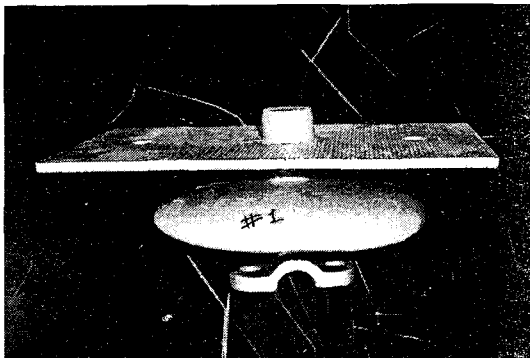


그림 2. 고분자 지지애자 장치(250mm).

설계된 전차 선로용 고분자 애자의 누설거리는 전차 환경을 고려한 중오손 환경의 절연 등급을 적용하여 기존 자기재 애자의 안전율보다 상향 설정하여 설계하였다. 표 1은 요구 절연 설계치를 나타낸 것이다.

표 1. 절연 설계치.

항목	특성치
상용주파주수내전압	22kV
상용주파내전압	55kV
내충격내전압	80kV
상용주파유중파괴전압	140kV
과전파괴하중	1000kgf
급림파파괴하중	500kgf
고주파내전압	200kHz, 3-5sec
표면누설거리	290mm

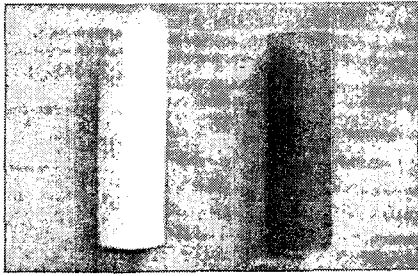
고분자 애자의 외부 갓 설계는 누설 거리를 확보하는 것 외에 주수 낙하 경향, 흐름성, 단락 현상 그리고 오손 특성 등이 종합적으로 고려하여 설계한다. 기본적으로 전력용 고분자 애자의 경우 주변 절연 거리 확보의 문제 등으로 인해 단순한 스커트의 수평 배열 형상이 일반적이지만 전차 선로용 애자의 경우 주어진 거리의 한정성이 있기 때문에 수평 배열 형상보다는 자기재 애자 형상으로 내부 주름을 이용한 누설 거리 증대와 오손 대책을 마련한다. 이러한 형태는 강우나 착설 등의 환경적 오손으로부터 보호가 유리하며 갓을 성형하기에 편리한 구조로 볼 수 있다.

표 2에 지하철 선로용 애자의 코아로 제조된 FRP의 기본 특성치를 나타내었고, 그림 3-17는 실제 FRP 코아의 제품 모습과 미세 조직 사진이다. 여기서는 기공의 상태를 정량적으로 확인한 결과 기공율은 1%이하로 억제되어 제조된 것을 확인할 수 있었다.

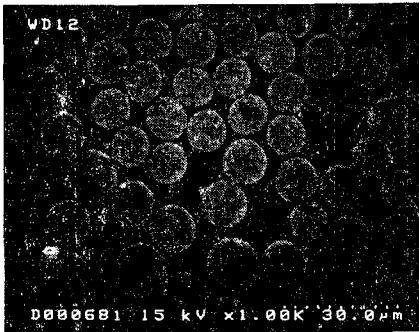
표 2. 제조에 사용된 FRP 코아의 기본 물성치.

특성 요소	특성치
종류	E Glass
직경	29mm
섬유 직경	< 10 μ m
비중	2.0
유리섬유함량	70%

한편 계면 및 베이스 상의 화학적 상태를 확인하기 위해 계면에 대한 EDX 분석을 실시한 결과, 화학적 안정성에 문제가 되는 성분은 발견할 수 없고 전형적이 FRP 제조시에 나타나는 성분만 확인되었다.



(a) FRP 코아 형상



(b) FRP 코아의 유리 섬유 배향의 미세 조직 사진.

그림 3. FRP 코아 실제 모습과 유리 섬유 배향의 미세 조직 사진.

표 2는 절연 갯으로 사용하기 위해 필라 조성을 달리한 실리콘고무 시편에 대한 전기적 내전압과 절연 특성을 시험한 결과이다. 내전압강도와 유전특성이 우수한 시편2를 선택하여 갯으로 적요하였다.

표 3. 실리콘 고무의 전기적 특성.

시편	SAMPLE1	SAMPLE2	SAMPLE3
내전압강도 KV/mm	27	32	30
절연저항 Ω cm	5×10^{14}	9.4×10^{14}	9.2×10^{14}
유전상수 rate	4.5	3.7	4.3
표면발수성 grade	3	3	3

지하철 선로용 애자를 축 대칭으로 하여 Maxwell 2D Simulator를 이용하여 전계 분포를 해석하였다. 구성 요소는 전극, FRP, 실리콘 고무의 유전율을 재료 파라미터로 설정하여 정전계 해석을 하였다. 표 4는 해석 대상이 된 모델을 정리한 것이다. 지하철 선로용 애자는 정격전압이 DC 1500V이므로 모델에 1500V 전압을 설정하였다. 그림 4의 모델 6는 250mm

형 지지애자에 FRP 지지판이 부착된 형상으로 설계된 제품에 대해 접지 위치를 FRP 코아 중심 상단에 두고 전계 해석을 실시한 모델이다. 그림 5, 6는 모델 6에 대한 등전위 분포와 전계 분포를 나타낸 것으로 최대 전계값이 5.5093×10^5 V/m로 모델 1에서 나타난 최대 전계값과 비교하여 더 낮은 값으로 지지판이 존재하는 경우 전계 완화 효과를 갖는 것을 알 수 있다.

표 4. 애자의 전계 해석 모델.

모델명	설 정 내 용
Model1	기본모델(250mm)
Model2	모델(250mm)에 대한 전극부 실리콘 강화
Model3	기본모델(180mm)
Model4	실모델(180mm)에 대한 FRP 코아 부 접지 전계해석
Model5	실모델(180mm)에 대한 지지판 상부접지 전계해석
Model6	실모델(250mm)에 대한 FRP 코아 상부접지 전계해석
Model7	실모델(250mm)에 대한 지지판 상부접지 전계해석

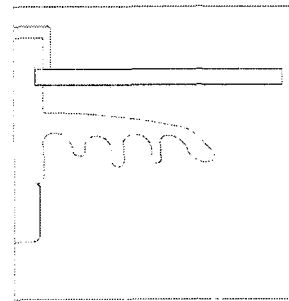


그림 4. 모델 6.

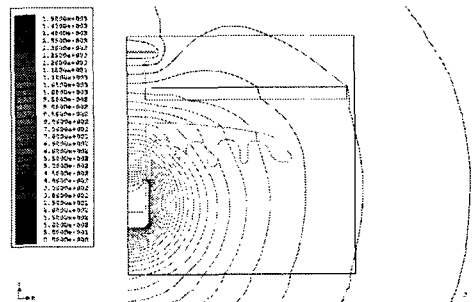


그림 5. 등전위선 분포도(인가전압=1500V).

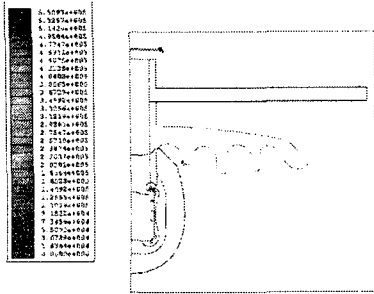


그림 6. 전계분포(최대 전계값=5.5093×10⁵ V/m) .

3. 결론

지하철용 지지애자(180mm 및 250mm형)를 신소재 고분자 하우징 절연물과 FRP 코아 소재 및 복합재 케이블 고정판으로 설계, 제작하여 각 소재의 전기적, 기계적 특성을 시험 평가한 후 가능한 규격시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

- 1) 기존 자기계 애자 장치의 구성 요소에서 절연을 담당하는 하우징은 실리콘 고무를 사용하였으며 기계적 지지를 담당하는 부분은 고강도 FRP 코아를 적용하여 제작하였다. 한편 기존 금속 지지판은 FRP 지지판으로 대체하여 설계 제작하였다.
- 2) 절연 하우징으로 사용한 실리콘 실리콘 고무에 대하여 내전압 강도, 유전특성 및 절연 저항 등의 전기적 특성 시험을 실시하였으며, 32kV/mm의 내전압 강도를 갖는 소재를 시제품에 적용하였다.
- 3) STRI 시험 기준에 따르는 표면 발수성 시험에서 절연 하우징으로 사용한 실리콘 고무의 경우 3등급의 우수한 표면 발수성을 갖고 있어 내오손에 대한 성능이 우수한 소재임을 확인하였다. 한편 FRP 코아의 내전압 강도와 유전 상수는 13kV/mm 및 4.0의 값을 갖는 소재를 사용하였다. 이 값은 지하철용 지지애자로 사용되는 코아 소재로서 안정한 전기적 특성의 범위에 해당하는 값이다.
- 4) FRP 코아의 경도, 인장 강도, 압축 강도 및 굴곡 강도 등을 시험하여 기계적 강도 특성을 확인하였다. 이때 시제품에 적용된 FRP 코아의 인장 강도는 625 N/mm²의 양호한 기계적 특성을 나타내었다.
- 5) 실리콘 고무의 트래킹 침식 내구성을 확인하기 위해 IEC 60587의 시험 방법에 따라 시험하였다.

경사 표면법에 따른 오손액 침식 내구성 시험으로 트래킹에 대한 침식 내구성은 양호한 결과를 얻었다.

- 6) 시제품의 형상은 기존 제품과 비교하여 충분한 절연 내구성을 확보하도록 설계되었으며 특히 FRP 절연 지지대의 적용으로 기존 애자 장치보다 전계 강도 완화 효과가 큰 것을 나타냈다.

참고 문헌

- [1] 한국전기전자재료학회 2001년 춘계학술대회 학술지, “전차 선로용 폴리머 현수애자 적용 기술” p59-p61, 2001.
- [2] 한국전기전자재료학회 2001년 춘계학술대회 학술지, “배전용 폴리머 현수애자의 형상에따른 전계 해석” p66-p68, 2001.
- [3] POWERCON 2001, “A study on the microstructural reinforcement of aluminous porcelain insulators with high strength”, Proceedings, Vol.3, p1501-p1504, Dec,2000.
- [4] 지하철용 폴리머 애자 표준화 사업 참여, “KS C 2001”, 2001.
- [5] 산학연 콘서시업 사업 세미나 2000년, “초고압 절연물 실리콘 고무 특성 평가”, 세미나집, p129-p199, Dec. 2000.
- [6] P. J. Smith, M. J. Owen, P. H. Holm and G. A. Toskey, “Silicone studies of corona treated silicone rubber HV insulation”, 1992 IEEE Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Victoria, Canada, pp. 829-836, 1992.