

절연구간 조가선 FRP 절연봉의 절단사고 원인분석

장동욱, 이기원, 김주락, 박현준
한국철도기술연구원 전기신호연구본부

Analysis of Breaking Accident of FRP Insulator Rod installed in Dead Section

Donguk Jang, Kiwon Lee, Jurak Kim, and Hyunjune Park
KRRI

Abstract

The accident of breaking insulator rod leads to interruption of moving the subway. We investigate the analysis of breaking accident of FRP insulator rod installed in dead section for catenary feeding system. To analysis of accident reason, SEM is used to analysis microscopic structure on surface of cross section of broken FRP insulator rod. At the same time, we examine the change of atomic amount on surface of accident insulator through EDX analysis. Also, the test for tensional breaking load is conducted to check the mechanical strength.

Key Words : FRP insulator rod, brittle fracture, catenary feeding system

1. 서론

현재 전기철도 시스템에서는 교류-직류, 교류-교류 구간을 분리시켜 주기 위해서 절연구간을 설치하고 있다. 본 논문은 교류/직류 절연구간에 설치되어 있는 조가선 FRP 테프론제 절연봉의 절단원인을 분석한 결과이다. FRP 테프론제 절연봉의 절단 원인을 분석하기 위해서 절단면의 EDX분석을 통하여 절연봉 절단면의 성분변화를 검토하였고, SEM분석을 통하여 절단면의 미세조직 검사를 수행하였다^[1-4]. 또한, 절연봉의 인장력을 측정하여 기계적 강도를 검토하였다. 분석결과 절연봉 말단 금구 틈으로 수분이 침투되고 고전압이 상시 인가되어 취성파괴가 진행한 것을 확인할 수 있었으며, 인장파괴 강도에서도 철도용품 규격을 만족하지 못하는 것을 확인하였다.

2. 본론

2.1 절연봉 절단사고 개요 및 육안분석

그림 1과 같은 절연구간에서 A부분에 설치되어 있던 절연봉의 연결 금구부분이 절단되어 전동차 지

붕에 지락되어 전동차의 운행이 정지되는 사고가 발생을 하였으며, B와 C부분의 절연봉 또한 부러져 있었다.

그림 2는 A지점에 설치되었던 것이 절단된 형상을 나타내고 있으며, 그림에서 금구 부분이 전동차 지붕에 접촉되어 아크에 의해서 검게 그을린 것을 확인할 수 있다. 그림 3과 4는 각각 A, B, C지점의 절단된 절연봉 단면 및 절단된 형상을 나타내고 있다. 사고품 1의 절단면의 사진을 육안 확인결과 약간의 변색이 된 것을 확인할 수 있었다.

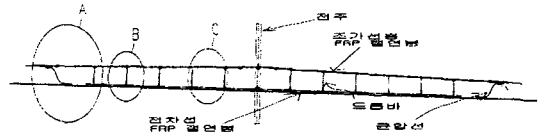
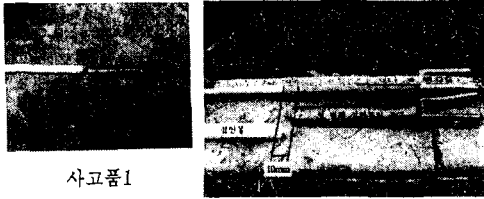


그림 1. 절연봉 설치 상태 및 절단위치.

Fig. 1. Installation and breaking accident position of section insulation rod.



사고품1

사고품1의 절단형상

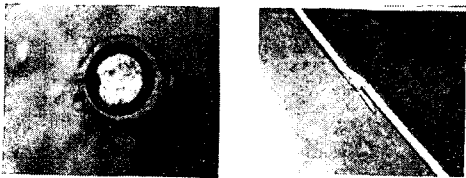
그림 2. 사고품 1의 형상.

Fig. 2. Shape of broken insulation rod 1.



그림 3. 사고품1의 절단면.

Fig. 3 Cross section of broken insulation rod 1.



(a) 사고품 2 (b) 사고품 3

그림 4. 사고품 2, 3.

Fig. 4 Broken insulation rod 2 and 3.

2.2 FRP 절연봉의 구성

FRP 절연봉은 2001년 12월 21일에 설치된 것이며, 교·교절연구간으로 전차선부분은 FRP 2m×11개로 되어 있고, 조가선부는 인류봉(2m×2)과 절연봉(2m×10)로 그림 1과 같이 설치되어 있다.

사용한 FRP 절연봉은 2호 토프론제 21 ϕ L=2,000mm이며, 유효절연거리는 1,630mm이다. 취부금구는 Eye형과 Clevis형으로 된 Aluminum재질로 이며, 코어는 FRP(ϕ 14mm)이고 몸체는 Teflon(ϕ 21mm)으로 구성되어 있다.

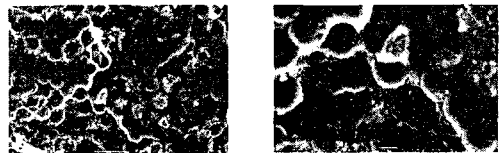
2.3 시험방법

절연봉의 절단면의 미세구조를 분석하기 위해서 SEM 촬영을 실시하였다. SEM과 동시에 EDX분석을 통하여 절단면의 원소변화를 검토하였다. 절연봉의 기계적 강도를 검토하기 위해서 인장파괴강도를 측정하였다.

2.4 시험결과 및 원인분석

그림 3, 4의 절단면을 보면, 그림 3(사고품1)의 절단은 절단면이 약간 주름진 상태로 절단이 진행되었고, 약간의 잔류파단이 남아있다. 그림 4의 사고품2, 3은 절단면이 매끄럽지가 않고, 부러진 형상이 외부의 힘에 의해서 부러진 것으로 볼 수 있다.

그림 5, 6에 의해서 사고품1의 SEM사진을 분석해 볼 때, 그림 5 (a), (b)의 경우, 유리섬유의 잘린 면이 거칠지 않고 매끄럽게 잘린 것으로 보아 시간이 서서히 지남에 따라서 취성파괴현상이 진행된 것을 나타내고 있다. 육안으로 검사한 결과도 외력에 의해서 절단된 면에 의한 사고보다도 점진적으로 사고가 진행되어 절단된 것을 나타내고 있다. 그림 6 (a)와 (b)는 사고품2의 절단된 면을 SEM사진을 촬영한 것으로 유리섬유가 절단된 면이 각이 져서 절단이 된 것을 확인할 수 있다. 이것은 먼저 첫 번째 절연봉이 절단되어 사고품 2가 굽혀지면서 부러진 것으로 볼 수 있다.

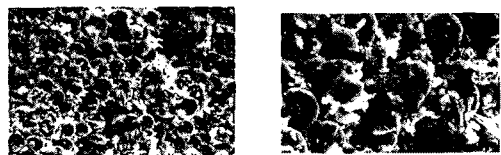


(a) $\times 400$

(b) $\times 1,000$

그림 5. 사고품1의 SEM사진.

Fig. 5 Picture of SEM of broken insulation rod.



(a) $\times 400$

(b) $\times 1,000$

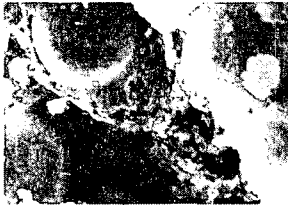
그림 6. 사고품2의 SEM사진.

Fig. 6. Picture of SEM of broken insulation rod 2.

그림 7은 절단면 중에서 유리섬유 사이에 있는 수지가 방전현상에 의해서 녹은 흔적을 발견할 수 있었다. 이러한 방전과 금구부분의 sealing 미처리에 의한 외부로부터 수분의 유입이 가능하여 취성파괴가 일어날 수 있다.



(a) ×4,300



(b) ×2,300

그림 7. 사고품1의 SEM사진.
Fig. 7. Picture of SEM of broken insulation rod 1.

수지모재와 절단된 유리섬유가 그림 5와 같이 동일면에 존재하며, 절단에 의한 유리섬유가 빠져나오는 것이 아주 적고, 절단면이 그림 6에 비교하면 깨끗하며, 파편이 많이 발견되지 않고 있다.

위의 내용으로 사고품1은 취성파괴로 절단되었을 가능성이 있음을 알 수 있고, 나머지 사고품2, 3은 사고품1이 절단된 후 전동차에 조가선 절연봉이 끌려가면서 절단된 것으로 판단할 수 있다.

표 1은 사고품1과 사고품2의 표면성분분석 결과이다. 표에서 알 수 있듯이 Al과 Ca성분이 사고품1에서 적게 검출이 되고 있다. 이러한 결과는 H⁺이온이 Al³⁺과 Ca²⁺과 교체되어 감소가 되는 것으로 볼 수 있으며, Al³⁺과 Ca²⁺이온은 유리섬유를 구성하게 하는 요소이므로 이것이 H⁺으로 교체하게 되면 유리섬유가 파괴되고 크랙이 진전하게 된다.

표 1. EDX분석 결과

Table 1. Result of EDX analysis.

성분	사고품1(atomic %)	사고품2(atomic %)
Al	1.27	1.40
Ca	1.77	2.06

현장철거품과 신품을 가지고 인장시험을 실시하였다. 인장시험용 절연봉은 그림 8과 같이 2 m인 절연봉을 약 60 cm로 절단한 후, 테프론 외피를 제거하여 제작하였다. 그림 8과 같이 제작된 인장시험용 절연봉을 인장기에 설치하여 인장파괴 강도시험을 실시하였다^[5].

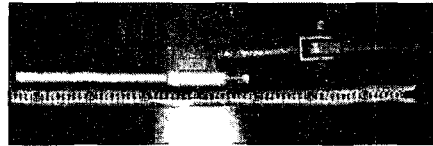


그림 8. 인장시험용 절연봉형상.
Fig. 8. The specimen of test for tensional breaking load.

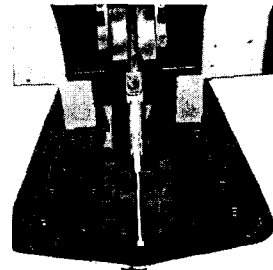


그림 9. 인장시험장면
Fig. 9. Picture of test for tensional breaking load.

먼저 신품1, 2, 4의 경우는 인장파괴하중이 각각 11.055 ton, 8.49 ton, 8.52 ton으로 철도용품 규격을 만족하고 있으나, 신품2의 경우는 7.1 ton으로 용품 규격을 만족하지 못했다. 현장철거품은 구로-오류상1선에 설치되었던 것은 7.67 ton, 경인선 부천-부평 상2선에 설치되었던 것은 6.53 ton으로 측정되었다. 현장철거품 3, 4, 5, 6은 절연구간의 중간부분에 설치되었던 것이며, 시험결과를 보면 철도용품표준

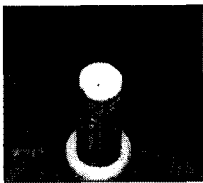
규격을 만족하지 않는 제품도 있는 것을 확인하였다.

표 2. 인장파괴하중 시험결과.

Table 2. Result of test for tensional breaking load.

시험품	인장파괴하중[ton]	시험품	인장파괴하중[ton]
신품1	11.055	현장철거품1	7.67
신품2	8.49	현장철거품2	6.53
신품3	7.1	현장철거품3	7.86
신품4	8.52*	현장철거품4	8.425
		현장철거품5	6.795
		현장철거품6	9.085

* 인장시험 중 연결금구가 8.52 ton에서 부러짐



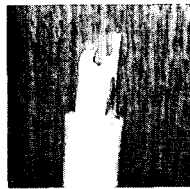
수거품1



수거품2



신품1



신품2

그림 10. 인장파괴하중 시험 후 형상

Fig. 10. Shape after test for tensional breaking load.

본 결과로 볼 때 절연봉이 설치된 후 인장파괴하중이 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 이것은 설치 후에 절연봉이 외부에서 수분이 내부로 침투되어 냉은 사이클에 의해서 금구의 압착력이 약화된 것으로 생각할 수 있다. 또한 설치된 절연봉은 약 1.5 ton의 인장하중과 전동차 운행시 판토품에 의한 상하진동이 주기적으로 작용하여 피로가 절연봉에 가해져 금구압착력이 약해져 인장파괴하중이 줄어든 것으로 볼 수 있다.

3. 결 론

사고품의 절단면을 SEM 및 EDX로 분석한 결과를 볼 때 취성파괴 현상에 의한 형상과 유사함으로 이에 의해서 절단이 되었다고 할 수 있다. 사고품1 이외의 것은 절단형상 검토한 결과 절연봉에 외부에서 충격이 가해져서 절단된 것으로 분석되었다. 금구부분에 제작시 sealing 처리 - 내부에 수분이 침투하지 못하도록 실란트처리를 실시하거나 내부에 수분침투 방지용 링을 설치한다. FRP 유리섬유를 내산성이 강한 재료(ECR-glass)로 대체하여 제작하는 것을 검토할 필요가 있다. 절연봉 설치시에 sealing 부분과 테프론 외피에 손상이 가지않도록 주의하여 설치한다. 단기적으로 이미 설치된 절연봉에 대해서는 우선 절연구간의 첫 번째와 마지막 절연봉은 sealing처리된 새제품으로 교체를 실시하고 나머지 절연봉들은 수거하여 sealing 처리한 후 다시 설치할 실시해야한다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 기본연구사업(철도 안전성능평가 기술개발(철도사고방지 및 안전확보를 위한 핵심기술 개발))에 의해서 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] “架空送電用有機かいしの現状と今後の展望”, 電氣協同研究, 제56권 제 1호
- [2] J.M.Seifert et al., “Quality requirements of fiber reinforced polymer materials for hv composite long rod insulator”, 2001 IEEE 7th ICSD, June
- [3] Insulators for high voltage, J.S.T.Looms, Peter Peregrinus Ltd., 1990
- [4] Frank Schmuck et al., “Brittle Fractures of Composite Insulators an Investigation of their Occurrence and Failure Mechanisms and a Risk Assessment”
- [5] 철도 5970-3322, “철도용품표준규격(절연봉)”, 2000