

전차선로 절연 행거 개발에 대한 안전성 검토  
**The review of the safety for the development of insulated  
hanger in overhead contact line**

이재봉\*                      박원찬\*\*  
Jae-Bong Lee   Weon-Chan Park

---

**ABSTRACT**

A subway in Seoul has had a major role of public transportation after the opening of Seoul Subway Line 1 on August 15, 1974 and it has reached 34.7% of the transportation of Seoul citizens.

The extended length of the subway system supplied with DC power in Korea is about 500km. In this system, the devices which are proper for regenerative power system are being required because of changeover from old braking and ATS signal system to regenerative braking and ATO signal system.

In this paper, we reviewed the safety standards for the insulated hangers in overhead contact line. These hangers which have depended on foreign imports are being developed in Korea considering ease of demand and supply and economic effects.

---

**1. 서론**

서울 지하철은 1974년 8월 15일 1호선 개통을 시작으로 대중교통의 중심으로 자리 매김하면서, 국내 직류공급방식 도시철도는 500km에 서울지역 교통수단별 수송 분담율은 34.7%에 달하고 있다. 하지만, 전기차의 효율성을 감안한 제동방식 변경과 운전신호의 지상자방식(ATS)에서 차상자방식(ATO)으로 전환 등으로 차량 및 운전조건이 변화되면서, 회생전력으로 인한 전차선로 구성에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 제품을 지속적으로 개발이 요구되는 실정에 있다.

본 논문에서는 외국제품 수입에 의존하는 전차선로용 절연 행거를 국내 기술로 수요 공급의 용이성과 경제적 효과 등을 고려하여 개발하는 제품에 대한 안전성을 검토하였다.

**2. 절연행거의 구조 설계**

절연 행거는 전차선에 고정되는 이어금구와 절연체에 인서트 성형된 행거 고정금구와 조가선에 고정되는 행거로 구성된다. 절연체는 엔지니어링 플라스틱과 옥외용 에폭시수지를 사용하여 설계하였으며, 전차선의 일정한 장력을 유지하는 용도로 그림1과 같이 설치 간격은 5m이다.

---

\* 정회원, 서울메트로 기술본부 전기팀 차장

E-mail : catenarysm@paran.com

TEL : (02)6110-5445 FAX : (02)6110-5449

\*\* 서울메트로 기술본부 전기팀

E-mail : tbird95@hanmail.net

TEL : (02)6110-5462 FAX : (02)6110-5449

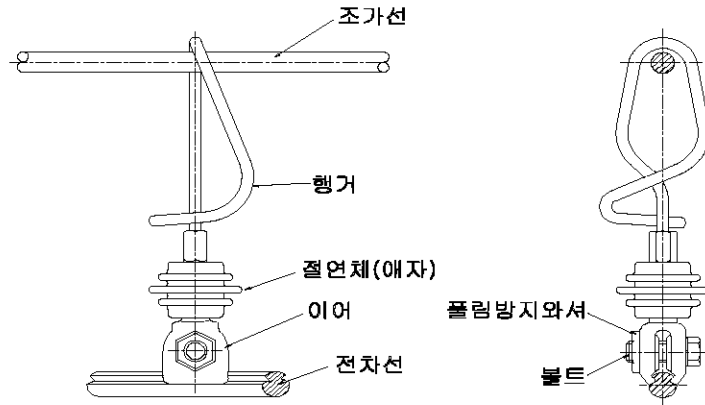


그림 1. 절연행거이어

## 2.1 절연체의 절연내력(Insulating Strength)

절연내력은 플라스틱이 절연체로써의 전기적 강도를 나타내는 척도로서 재료의 절연내력은 습도 및 형상에 따라 달라지기 때문에 시편의 크기 등과 같은 조건이 같지 않을 경우, 시행한 시험결과를 직접 적용할 수 없으며, 절연내력 시험의 결과는 절대적인 비교 보다는 상대적인 비교 값으로 사용해야 한다. 도표1은 각종 수지의 절연내력 값을 나타낸 것이다

도표 1. 각종 수지의 절연 내력 값

합 성 수 지	절연내력 (Volt/mil)
R-PVC(Regenerated-Poly Vinyl Chloride)	800~1400
PP(Poly Propylene)	650
PS(Poly Styrene)	500
PE(Poly Ethylene)	480
PC(Poly Carbonate)	450
ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene)	415

- 1) 1mil은 1inch의 1,000분의 1로 약 0.0254mm에 해당한다.
- 2) 시험 기준 전압 : 30kV 이상
- 3) 절연체에 30kV 까지 전압을 인가하였을 경우, 절연을 파괴하는데 이르는 절연체 절연두께(mm)
- 4) 절연두께(일반P.C) =  $\frac{30kV \times 0.0254mm}{450V} \approx 1.7[mm]$
- 5) PBT(GF 15% 이상) = 34[kV/mm]

## 2.2 전계의 분포

행거에 절연체를 그림2와 같이 삽입하고 고정금구간의 절연거리 13.4[mm]에 사용전압 직류 1,500[V]를 인가하여 내부에 삽입된 고정금구간의 전계분포를 검토하였다.

그림3은 FLUX 2D 전계해석 프로그램을 활용하여 전기적 특성을 사용 조건(직류 1,500[V] 인가)을 모의한 것으로서, 절연체의 내부에 있어서 상단부분 행거측 금구와 하단부분 이어측 금구의 간격 사이에 전계 집중 현상이 발생하고, 절연체의 중심에서 바깥쪽으로 갈수록 전계세기의 기울기가 완만해진 것을 알 수 있다.

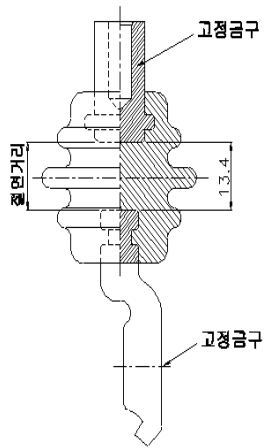


그림 2. 절연 행거의 절연거리

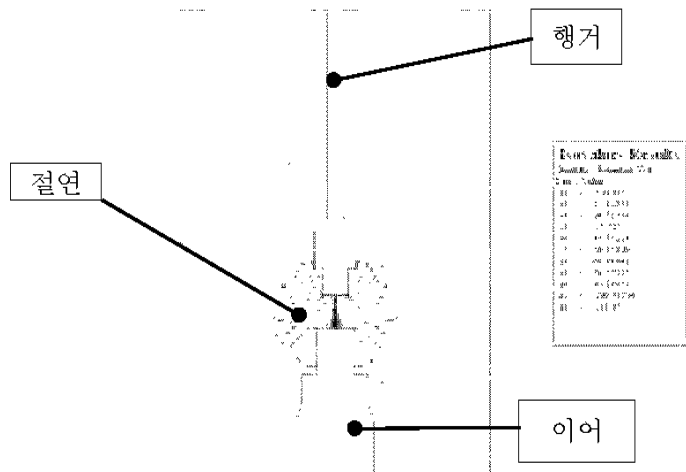


그림 3. 전체의 세기 등전위선도

### 2.3 인서트금구의 응력 해석

Solidworks(COSMOS)해석 프로그램을 활용하여 행거에 절연체를 삽입하여 외부 하중에 의한 절연체의 변형 강도를 분석하였다.

해석 조건으로 절연체의 하부를 고정하고, 상부에 500[kgf]의 인장 하중을 인가하여 외부 하중에 대한 절연체 재료강도의 적정여부를 분석하였다. 따라서 외부 하중은 500[kg]인가하여 절연체 재료 강도는 1,200[kgf/cm<sup>2</sup>]로 설정하여 응력 해석한 결과, 취약 부분인 절연체 상부 인서트 부분에서 발생하는 파괴 강도는 957[kgf/cm<sup>2</sup>]로 절연체 재료 강도와 비교할 때 안전율은 1.25이다.

그림4,5,6은 인장하중 500[kgf] 인가할 경우, 절연체와 조합되는 상부 인서트금구 응력, 절연체의 응력, 행거의 응력 분포도를 나타낸 것이다.

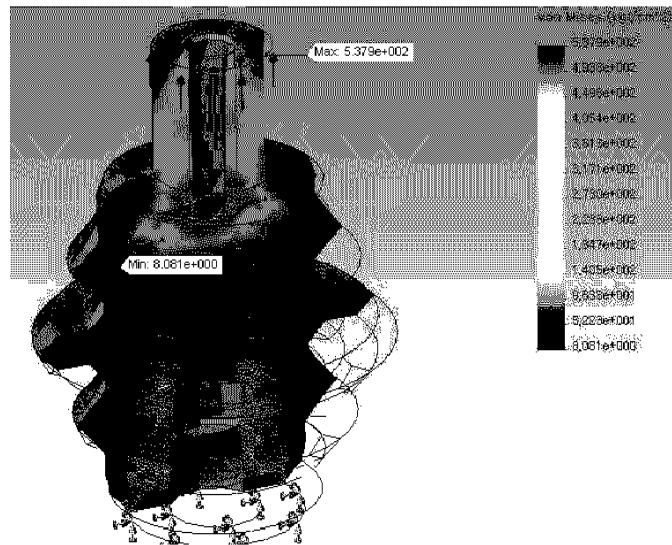


그림 4. 절연체 상부 인서트금구 응력분포도

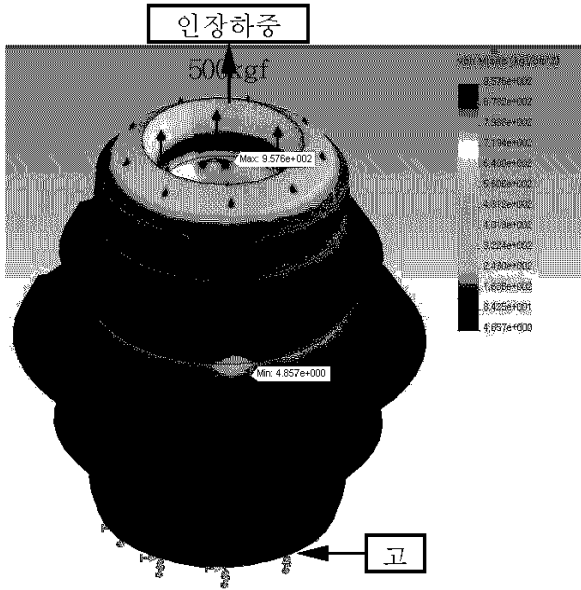


그림 5. 절연체의 응력분포도

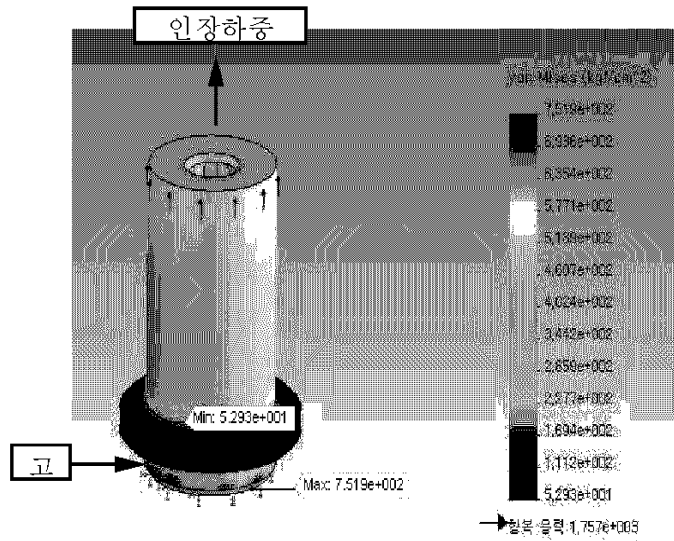


그림 6. 행거의 응력분포도

## 2.4 행거의 고정금구 검토

행거는 전차선로 구성에 진동으로 인한 변형이 없고 충분한 기계적 강도와 중량이 가볍고 내 부식성이 좋으며, 고강도의 절연체로 균열 및 환경부식에 내구성 크고 유지보수에 대한 점검이 용이하여야 한다. 따라서 행거 고정 금구의 구조 설계는 위의 구비조건을 만족하도록 충분한 강도 특성을 유지할 수 있게 행거 고정금구의 압착 직경과 깊이를 선정하여야 한다.

### 2.4.1 고정금구의 압착 조합

행거 연결용 압착 부분은 그림6의 절연체와 행거를 연결해 주는 중요한 부분으로서, 사용하고 있는 압착 다이스에 적합한 행거 연결용 압착 금구의 직경은 다음과 같이 나타난다.

#### 1) 압착부위 강도

$\sigma_s$  (압착부, 재료 STS304, 항복강도) : 21[kgf/mm<sup>2</sup>]

$d_s$  (압착부 내경) :  $\Phi 5.3$ [mm]

T (적용 인장하중) : 행거 최대인장하중(500kgf)이 적어, 전차선 장력(2,000kgf)으로 계산

$d_s$ (압착부 내경) =  $1.02 \times (\text{Steel Dia.} : \Phi 5) + 0.2 = \Phi 5.5$ [mm]

$$D_s(\text{압착부 외경}) = \frac{\sqrt{4 \times 0.95 \times T + \frac{d_s^2}{4}}}{\pi \times \sigma_s} = \frac{\sqrt{4 \times 0.95 \times 2000 \text{ kgf} + \frac{\Phi 5.3 \text{ mm}^2}{4}}}{\pi \times 21 \text{ kgf/mm}^2} = 10.73 \text{ [mm]}$$

∴ 압착부는 최소  $\Phi 10.73$ [mm] 이상의 압착 다이스를 선정한다.

#### 2) 압착다이스 선정

$d = 12$ [mm]

∴ 압착부의 직경  $\Phi 10.73$ (11mm)에 적합한 압착 다이스는 #60이며, 참고로 육각 다이스의 종류는 14,22,38,60,80,100,150,200,250,325 등이 있다.

#### 3) 행거 고정금구의 압착부 삽입길이

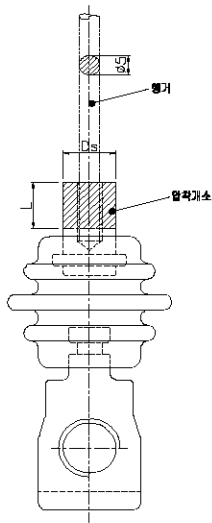


그림 7. 행거 압착개소

- P : 행거의 최대 인장하중 (시험기준치; 500kgf)
- d : 행거의 직경 (Φ5mm)
- σ : 행거의 인장강도 (53kgf/mm<sup>2</sup> ; KS D 3697, STS304)
- P1 : 행거(Φ5mm)의 인장파괴하중[kgf]
- L : 행거의 압착부 길이[mm]

$$P1 = \sigma \times (\pi \times d^2 / 4) = 53[\text{kgf/mm}^2] \times (\pi \times 5^2 / 4) = 1,040[\text{kgf}]$$

$$L = \frac{0.95(\text{여유계수}) \times P(=500\text{kgf})}{\pi \times \Phi 5\text{mm}} \times (K=0.5, \text{상수}) = 15 \pm 2[\text{mm}]$$

∴ 압착부분 삽입 길이는 최소 15±2[mm] 이상으로 한다.

#### 2.4.2 절연체 취약 부분의 강도

절연체의 강도 취약 부분은 그림8과 같이 행거 고정금구가 절연체 상부에 인서트한 부분이며, 절연체의 재료 인장강도가 시험하중(500kgf)에 견딜 수 있도록 하여야 한다.

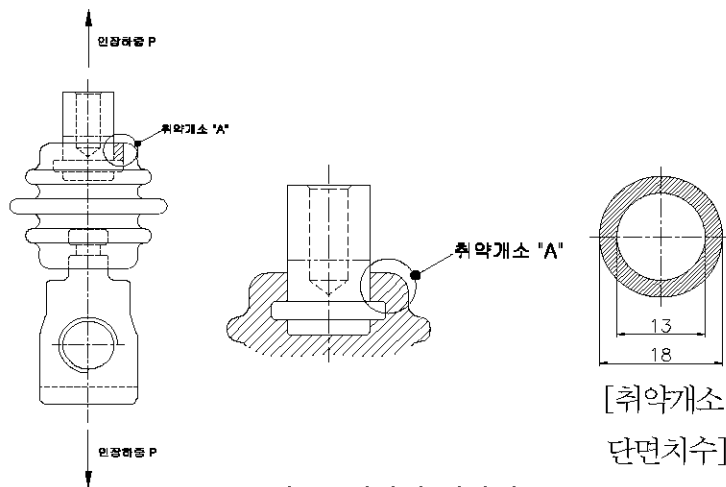


그림 8. 절연체 취약개소

P : 적용 인장하중 500[kgf]

A : 취약 개소의 단면적 [cm<sup>2</sup>]

σ : 취약 개소의 단면에 작용하는 응력 [kgf/cm<sup>2</sup>]

σ<sub>1</sub> : 절연체 재료의 인장강도 (PBT, GF30%인 경우, 1,200kgf/cm<sup>2</sup>)

$$A = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = \frac{\pi \times (1.8^2 - 1.3^2)}{4} = 1.22[\text{cm}^2]$$

$$\sigma = 500\text{kgf} / 1.22\text{cm}^2 = 409.8[\text{kgf/cm}^2]$$

∴ σ < σ<sub>1</sub> (=1,200kgf/cm<sup>2</sup>), 안전율은 2.92이므로, 결과적으로 절연체(에자) 재료강도는 시험하중 500[kgf]에 대하여 충분하다.

### 2.4.3 이어(주조품) 취약부분의 강도

그림9와 같이 인장하중 시험기준치 500kgf를 이어(A)에 인가시, 이어의 취약부분 임의의 단면 직각 방향에 작용하는 법선(수직)응력을 산출하여 이어 재료에 대한 인장강도를 나타낸다.

여기서, 이어의 인장강도(σ) : 5,000[kgf/cm<sup>2</sup>] (KS D 6024, CAC 702)

취약 개소의 단면적 (A) : [0.528cm<sup>2</sup>]

시험 하중(P) : 500[kgf]

법선(수직)응력(σ<sub>n</sub>) : [kgf/cm<sup>2</sup>]

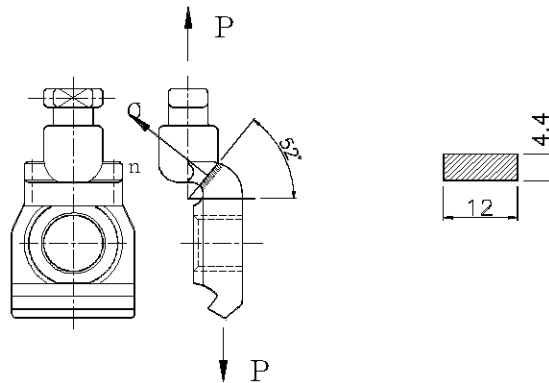


그림 9. 인장하중 선도

이어(A)의 취약 개소의 단면적은 1.2×0.440.528cm<sup>2</sup>이며,

$$\sigma_n = \frac{500\text{kgf}}{0.528\text{cm}^2} \times \cos^2 52^\circ = 359\text{kgf/cm}^2 < 5,000\text{kgf/cm}^2 \text{이므로, 재료 강도가 충분하다.}$$

### 2.5 이어부분 재질에 대한 특성

일정한 체결부력을 가져야 할 이어부분의 재질(STS304)에 대한 화학적 성분과 기계적 성질에서 온도 변화에 따라 인장강도가 변한다. 따라서 금형주물은 60[kgf/mm<sup>2</sup>]이상, 셀몰드주물은 50[kgf/mm<sup>2</sup>]이상의 인장강도를 가져야 한다.

#### 1) 화학 성분

C : 0.08[%]이하, Mn : 2.00[%]이하, Si : 1.00[%]이하, P : 0.040[%]이하,

Cr : 18.00/20.0[%], Ni : 8.0/10.50[%]

#### 2) 기계적 성질

- 탄성계수 : 28,000,000psi , 비전기저항 (상온 : Micro ohms-cm) : 72.0
  - 비열(Btu/lb/°F)32-212[°F] : 0.12, 비중 : 7.94,
  - 밀도(21℃에서) : 0.29lb/cu.in(7.9SG)
  - 인장강도 : 박판 대(Strip) 59.77[kg/mm<sup>2</sup>], 봉 및 냉간인발(고장력) 77.36~87.90[kg/mm<sup>2</sup>]
  - 항복강도 : 박판 대(Strip) 21~24.5[kg/mm<sup>2</sup>], 봉 및 냉간인발(고장력) 52.5~66.5[kg/mm<sup>2</sup>]
  - 연신율(%) : 박판 대(Strip) 50~60%, 봉 및 냉간인발(고장력) : 25~60[%]
- 3) 일반 강도 : 인장강도 53[kgf/mm<sup>2</sup>] 이상, 항복점 21[kgf/mm<sup>2</sup>] 이상, 연신율 40[%] 이상

### 3. 안전성 기준검토

#### 3.1 인장 파괴하중 시험

행거이어를 전차선에 사용 상태로 설치하여 육각머리볼트로 300[kgf.cm]로 조인후, 행거와 전차선간에 파괴인장하중을 가하였을 때 500[kgf] 이상이어야 한다.

항 목	구 분	시험기준	시험결과			판 정
			#1	#2	#3	
최대 인장 파괴 하중	엔지니어링 플라스틱 절연체	500[kgf] 이상	712	630	613	양 호
	옥외용 에폭시수지 절연체		722	705	730	양 호

#### 3.2 인장 내하중 시험

행거이어를 전차선에 사용 상태로 설치하여 육각머리볼트로 300[kgf.cm]로 조인후, 행거와 전차선간에 인장하중을 가하였을 때 300[kgf]에서 3분간 유지하여야 한다.

항 목	구 분	시험기준	시험결과			판 정
			#1	#2	#3	
인장 내하중	엔지니어링 플라스틱 절연체	300[kgf], 3분간 유지	유지	유지	유지	양 호
	옥외용 에폭시수지 절연체		유지	유지	유지	양 호

※ 행거재료 강도 검토

- ① 소선 : φ5, 재질 : STS304,
- ② 인장내력 : 2,100[kgf/cm<sup>2</sup>], 인장강도 5,300[kgf/cm<sup>2</sup>]
- ③ 인장강도 기준 : 산출하중 p=1,040[kgf]
- ④ 인장내력 기준 : 산출하중 p=412[kgf]
- ⑤  $P=5,300\sim 2,100\text{kgf/cm}^2 \times [(\pi \times 0.52)/4]$

#### 3.3 비틀림 내하중 시험

행거이어를 전차선에 사용 상태로 설치하여 육각머리볼트로 300[kgf.cm]로 조인후, 행거와 접속된 행거 고정금구를 전차선 축과 직각 방향으로 비틀었을 때, 250[kgf-cm]에서 3분 유지하여야 한다.

항 목	구 분	시험기준	시험결과			판 정
			#1	#2	#3	
비틀림 내하중	엔지니어링 플라스틱 절연체	250[kgf-cm],	265	280	265	양 호
	옥외용 에폭시수지 절연체	3분 유지	270	280	270	양 호

### 3.4 횡 미끄럼 내하중 시험

행거이어를 전차선에 사용 상태로 설치하여 육각머리볼트로 300[kgf.cm]로 조임 후, 행거와 전차선의 축과 평행한 방향으로 이어에 하중을 가했을 때, 100[kgf]에서 3분 유지하여야 한다.

항 목	구 분	시험기준	시험결과			판 정
			#1	#2	#3	
횡 미끄럼 내하중	엔지니어링 플라스틱 절연체	100[kgf], 3분 유지	양호	양호	양호	양 호
	옥외용 에폭시수지 절연체		양호	양호	양호	양 호

### 3.5 행거 내굴곡 시험

행거를 굴곡 반경 8[mm]로 90° 반복 굴곡한 경우, 7회 이상이어야 한다.

항 목	구 분	시험기준	시험결과			판 정
			#1	#2	#3	
행거 내굴곡	엔지니어링 플라스틱 절연체	7회 이상	양호	양호	양호	양 호
	옥외용 에폭시수지 절연체		양호	양호	양호	양 호

### 3.6 Ear Rod 인장내하중 시험

행거 "고리"부를 직경 10mm±1의 강봉에 조가하여 강봉과 이어간에 150kf의 하중을 3분간 걸었을 때 현저하게 변형되어서는 않된다.

항 목	구 분	시험기준	시험결과			판 정
			#1	#2	#3	
행거인장 내하중	엔지니어링플라스틱 절연체	150[kgf], 3분간 하중을 인가하였을 때 현저하게 변형되어서는 안된다.	양호	양호	양호	양 호
	옥외용 에폭시수지 절연체		양호	양호	양호	양 호

### 3.7 내진동 시험

행거를 전차선에 사용상태로 설치하여 6각 구멍볼이 볼트를 300[kgf-cm]로 조였을 때, 전선의 대호면(펜터그래프 습동면)쪽으로부터 반복 타격을 주어, 진폭 +20mm~0, 주기 3~5[Hz]의 진동을 가하여 규정 회수를 시행한 다음, 인장내하중(300kgf/3분)과 횡 미끄럼내하중(100kgf/3분)의 시험을 하여 각각의 규정에 적합하여야 한다.

※ 주기 = 1/5[Hz] = 0.2초, 주기 2×106 경우, 1.85시간 소요

### 3.7 내전압(절연내력) 시험



행거를 전차선에 사용상태로 체결하여 그림10과 같이 유중 상에서 30[kV] 전압을 3분간 인가시, 절연이 유중을 관통하여 파괴되지 않아야 한다. 따라서 시료는 외부 접촉(연면방전)이 일어나지 않도록 절연용기에 절연유를 담아서 시험한다.

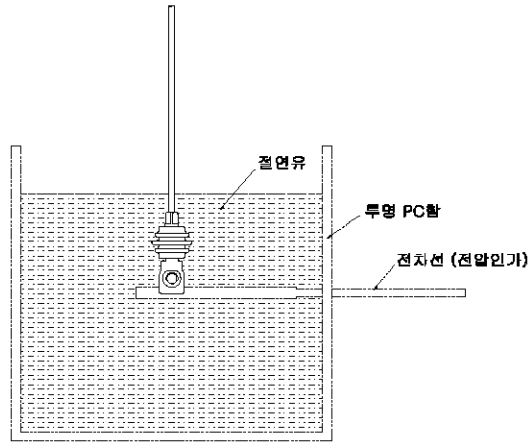


그림 10. 시험방법

항 목	구 분	시험기준	시험결과			판 정
			#1	#2	#3	
내전압 (절연내력)	엔지니어링 플라스틱 절연체	30[kV] 전압을 3분간 인가시 절연관통 파괴되지 않아야 한다.	양호	양호	양호	양 호
	에폭시 절연체		양호	양호	양호	양 호

### 3.8 경도 시험

이어의 경도에 대해서는 KSB 0806에 의한 측정 방법으로 검사하여 (금형 주물인 경우, 로크웰 HRB 84 이상), 셀몰드 주물인 경우, 로크웰 HRB 75 이상)의 도포2와 같이 규정에 적합하여야 한다.

도표 2. 이어의 경도기준

종 류	인 장 시 험			경도 로크웰 (HRB)
	인장강도 (kgf/mm <sup>2</sup> )	신율 (%)	내력 (kgf/mm <sup>2</sup> )	
금형주물	60이상	20이상	20이상	84이상
셀몰드주물	50이상	20이상	18이상	75이상

### 3.9 고용화 열처리 시험

스테인레스강에 대해서는 현미경으로 고용화 열처리 상태를 검사하고 크롬탄화물 등의 취화상의 색출이 있어서는 않된다. 또한 KSD 0220에 의한 시험에서 입계부식의 떨어짐이 있어서는 않된다.

## 4. 결 론

본 논문은 절연 행거 개발에 가장 중요한 절연체는 노출 환경에 유리하고 전차선로 구성에 대한 조화와 이어부분 금구와 행거부분 금구의 결합과정에서 인장 파괴하중과 비틀림 내하중이 크며, 절연체 균열과 환경부식 등을 고려하여 안전성이 우수한 옥외용 에폭시수지 절연체로 선택하였다.

#### 참고문헌

1. 서울특별시지하철공사(1992), “전차선자재표준사양서” pp.139-141
2. 서울특별시지하철공사(2002), “전기용어해설집” pp.89-90
3. 한국전기철도기술협회(2006), “전기철도공학” pp.95-98
4. 서울메트로(2006), “전기철도공학” pp.102-103
5. 대광서림(2007) “에폭시수지” pp.19-21
6. 기전연구사(2008) “엔진니어링 플라스틱 편람” pp.27-189
7. JIS E 2201(2002) “전차선로 가선 금구”
8. JIS E 2001(2001) “전차선로 금구 시험방법”
9. 일본 주조공학 제70권(1998) “중력 금형 주조법”
10. 일본 주조공학 제68권(1996) “동 및 동합금의 용해 기술”