

고속전차선로 유리애자 현장 적합성 기반 구축 연구

The Suitability of Toughened Glass Stem Insulator for Korea High Speed Catenary System

이기천[†] · 전용주* · 이종우**

Gi-Chun Lee · Yong-Joo Jeon · Jong Woo Lee

Abstract The operation of KTX in Korea has launched since 2004, which brought about a great change in railroad industry. We have acquired lots of great know-hows, especially in railroad construction and operation field. Therefore, we have been building up numerous operation skills until now. However, it was necessary to investigate some of the equipment based on our own environment because the high speed train system were totally imported. In case of Toughened Glass Stem Insulator, it was totally new type in domestic. This paper introduces estimation method and result in three different field aspect, such as an electrical field, a physical field, and environmental circumstances. First, in case of an electrical field, amplitude and a number of time for switching surge voltage data were collected. Second, in case of a physical field, amplitude and trend of vibration in to the insulator were examined. Finally, in case of environmental circumstances, flying possibility of gravel and ice clod were investigated. Also shrink and expand characteristic according to temperature were reviewed. Through this basic data, suitability for Toughened Glass Stem Insulator using in domestic high speed railway have been accumulated and estimated.

Keywords : Toughened glass stem insulator, high speed catenary system

요 지 고속철도의 전차선로에 사용되는 유리애자는 국내에 적용 사례가 없으며 해외에서도 프랑스를 중심으로 한정적으로 적용되는 품목으로서 국내 적용시 특성분석을 통한 적합성 평가가 요구된다. 본 논문에서는 2004년 이후 운영데이터를 바탕으로 유리애자의 현장 적합성을 평가하기 위해 전기적, 기계적, 외부적(환경) 요인의 3가지 대항목을 선정하여 분야별로 특성 분석을 수행하여 기초데이터를 축적하고 적합성을 평가하였다.

주요어 : 유리애자, 고속 전차선로

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

2004년 개통된 고속철도는 국내 철도산업에 큰 변화를 가져왔다. 특히 철도건설과 관련된 기술 분야는 팔목할 만한 know-how를 습득하였고 현재는 다양한 운영기술을 습득하여 선진철도 운영 국으로 탈바꿈하고 있다. 그러나 고속철도의 모델이 해외에서 운영 중인 선로를 기반으로 완전한 package로 적용되어 일부 설비에 대해서는 우리의 환

경과 운행특성에 맞는 분석이 요구된다. 특히 전차선로에 사용되는 유리애자의 경우 운영중 원인불명의 파손사례가 주요 운영국인 프랑스 대비 빈번하여 시스템의 불안요소로 작용하고 있다. 이에 2004년 4월 이후부터 축적된 운영데이터를 바탕으로 적합성 분석을 수행하였다.

합리적이고 타당성 있는 유리애자의 현장 적용성 분석을 위하여 전기적요인, 기계적요인, 외부환경적요인 요인의 3가지 대항목을 선정하고, 전기적요인에서는 고속철도 운행구간에서 발생하는 이상전압의 크기와 빈도를 바탕으로 애자에 미치는 영향을, 기계적요인에서는 열차의 운행중 발생하는 진동이 애자에 미치는 영향과 정량적인 Force를 측정하여 애자의 강도를 판단해보았다. 끝으로 외부적요인에 대해서는 전차선로 내에서 얼음이나 자갈 등이 비

[†] 책임저자 : 코레일 총복지사 전기팀장

E-mail : lgctajan@yahoo.co.kr

TEL : (042)609-3886 FAX : (042)609-3720

* 코레일 연구원 팀원

** 정회원, 서울산업대학교 교수

산가능성과 온도변화에 따른 애자의 수축 팽창시 특성을 중심으로 분석을 수행하여 유리애자 파손과 설비 적합성에 대해 다각적으로 검토를 수행하였다.

2. 요인별 영향분석

2.1 전기적 요인

전기철도는 가선과 Pantograph가 접촉된 상태로 이동을 하며 전력을 수수하는 특징이 있으며 특히 고속철도의 경우 최고속도 300km/h로 운행하며 전력이 집전되므로 접촉부에 전기적인 충격이 지속적으로 발생된다. 이는 계통내 전기설비에 충격을 야기하여 때로는 수명이전 파손의 원인이 되기도 한다. 따라서 Switching 썬지가 유리애자에 미치는 영향을 파악하기 위해 고속철 변전소를 대상으로 AMETEK 장비를 이용하여 정격 피크치의 110%를 초과하는 값을 기준으로 데이터를 기록하여 결과를 Table 1에 나타내었다. 계절별 발생 가능한 특징을 평가하기 위하여 총 4차례 춘, 하, 추, 동으로 구분하였으며 고속선 변전소 3개소를 샘플로 1회 측정시 1주간 측정하였다.

Table 1. Abnormal voltage count number for shin chung ju substation

변전소(1일기준)		1월 측정	5월 측정	8월 측정
신청주 S/S(고속)	F1	14119	19626	10256
	F2	13783	18838	10012
	F3	10291	15715	7429
	F4	8990	15715	6490

그 결과 고속전차선로의 신청주 변전소에서 기준값 초과 횟수가 가장 빈번하게 발생되었다. 약 20,000회에 가까운 Switching 썬지가 발생되었으며 이 측정 데이터를 토대로 애자의 피로시험을 수행하였다. 피로시험은 애자의 수명을 30년으로 계산하여 월별 측정된 최대 썬지 전압을 임펄스 형태로 애자에 인가하여 수행하였다. 그러나 유리애자에는 어떠한 변화도 확인되지 않았다. 유리애자의 주절연재 물리적 특성이 “건전상태”를 유지하거나 “파손상태”로만 판정[1]되는 것에 비유해 볼때 애자에 누적되는 영향은 없는 것으로 판단된다. 아울러 운행의 안전성 확보측면에서 유리애자 4개 shell 중 1개가 파손된 상태에서 애자 절연성능을 파악하였다. 상용주파고전압시험, 50% 섬락시험, 주수 섬락시험이 수행되었고, 그 결과 아크발생경로, 탄화로 형성과정을 제외한 “열화상태”나 “부분적인 파손” 관련 변화는 확인되지 않았다. 최악의 시험조건인 주수섬락 시험결과 약 118kV로 확인되어 전기적인 측면에서 안전함을 확

인할 수 있었다. 기계적인 강도의 경우도 세라믹애자와 달리 Pin-Cap 사이의 분리를 야기하는 내부폭발대신 파손표면으로만 아크가 발생되어 안전운행에 영향을 미치지 않을 것으로 보인다. 추가적으로 프랑스 현지노선 답사결과 1개 shell이 파손시에도 정상적인 운영에 이은 정기 점검시 교체를 수행하고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 국내의 경우도 본 결과를 통해 정기계획에 의한 점검 교체가 가능할 것이다.

2.2 기계적 요인

2.2.1 고유진동 측정

유리애자는 재료의 특성상 일정 고유진동수에서 작은 진동으로도 큰 기계적 성능의 변화가 충분히 관측될 수 있으며 이는 운행상의 장애로 연결될 수 있을 것으로 판단되어 고유진동 주파수를 측정해 보았다. 하나의 물체는 기준위치에 대해 반복운동을 하는 고유진동수를 가지며, 물체의 고유진동수는 무수히 많다. 고유진동수 측정은 가속도계(Accelerometer, 96.10mV AC240-1A, CTC사)와 충격해머(Impact Hammer, 1.25mV/N, 086C04, PCB사)를 사용하였으며, Fig. 1에 측정 개략도를 나타낸다.

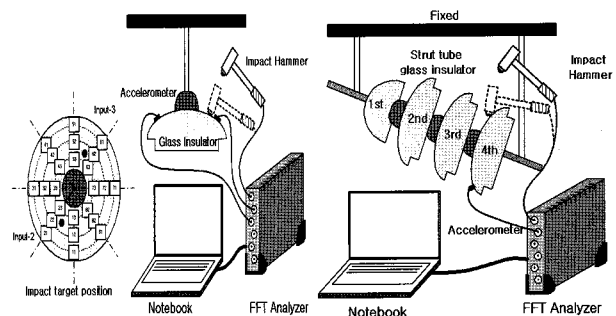
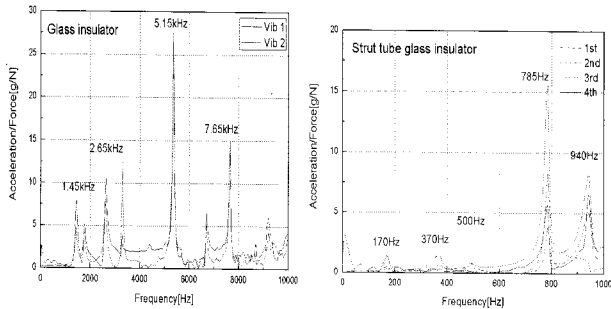


Fig. 1. Glass insulator natural frequency measure design

1shell로 된 유리애자의 고유진동은 유리애자에 충격을 주고자하는 지점을 선택하고 충격해머로 가진을 시켰다. 이때 애자의 떨림 현상은 가속도계를 통해 FFT분석기에서 측정하였다. 장간애자의 고유진동수는 네 번째 유리애자 shell 표면에 가속도계를 설치하고 첫 번째에서 네 번째까지 순차적으로 유리애자 표면에 충격해머로 가진을 주면서 측정하였다. Fig. 2는 유리애자의 고유진동 주파수를 나타낸다. 초기 측정에서는 1shell의 유리애자 주파수 범위의 확인이 곤란하여 10kHz까지 측정범위를 설정하였으며, 5.15kHz에서 가장 큰 진폭의 고유진동수가 측정되었다. 그러나 현장에서 가장 많이 파손되는 장간애자와 비교를 위해 주파수 범위를 1kHz로 축소하여 상세히 분석을 수행하였고 그림 2(b)와 같이 170Hz, 370Hz, 500Hz, 785Hz, 940

Hz의 주파수가 관측되었다. 이들 중 모든 가속도계에서 검출되는 785Hz에서 고유진동수가 관측되었다.



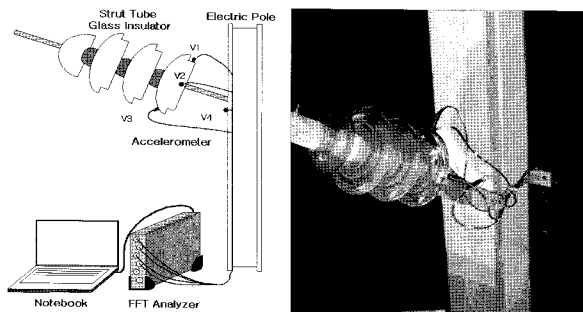
(a) Measured data for 1 shell (b) Measured data for inclination pipe insulator

Fig. 2. Natural frequency data for glass insulator

2.2.2 현장 진동실측

고속열차(KTX) 운행중 실제 발생하는 진동에 대한 영향을 평가하기 위해 교량구간과 토공구간을 각각 1군데씩 선정하고 파손 영향이 가장 빈번히 발생하는 브라켓의 장간 애자를 대상으로 진동을 측정 하였다. Fig. 3은 현장 진동 측정 모습이다. 고속철도 운전의 안전성을 위하여 장간애자에서 전계의 영향이 가장 작은 네 번째를 shell을 대상으로 선정하여 수직진동(V1), 수평진동(V2), 애자표면진동(V3), 전주(V4)에서 고속열차(KTX)가 지나갈 때 진동을 측정하였다.

측정결과 교량구간이 토공구간에 비해 약 1.5~2배 진동이 크게 발생됨을 확인할 수 있었으며 측정 방향별로는 애자표면진동(V3)이 가장 크게 측정되었다. Fig. 4에 측정데이터 파형과 주파수 분석값을 나타내었다.

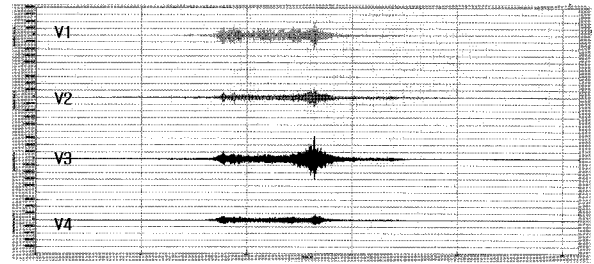


(a) Local installation diagram (b) Local installation picture

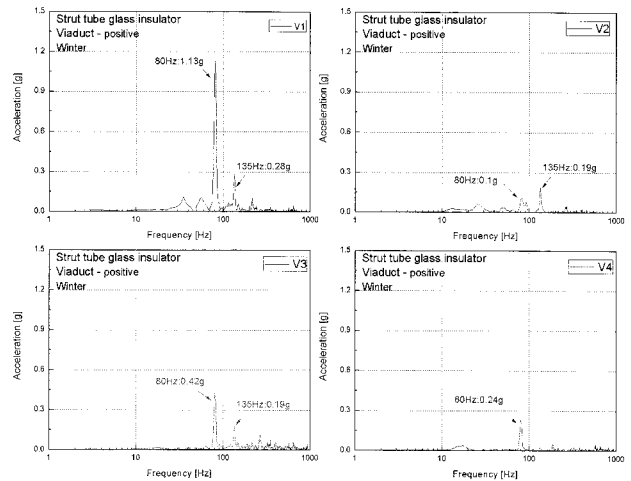
Fig. 3. Measuring local vibration

교량구간의 경우 진동신호는 고속열차가 교량에 진입하는 시점부터 발생하기 시작하여 가속도계가 부착된 전주를 지나는 순간 큰 신호가 감지되었고, 토공구간에서는 일정한 진폭으로 진행하다가 팬터그래프가 지나가는 순간 가장

큰 진폭을 가지는 것으로 나타났다. 이는 교량구간에서는 가선설비주변으로 방음벽(차음벽)이 설치되어 열차의 진행할 때 바람, 진동 등이 모두 영향을 미친 것으로 판단된다.



(a) Measured data



(b) FFT analysis data

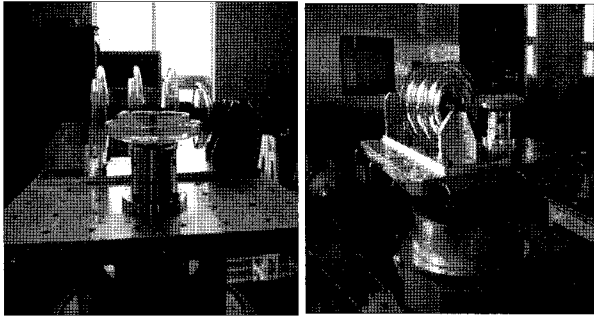
Fig. 4. Vibration data for bridge

FFT 분석한 결과 주파수 수직방향은 80Hz에서 1.13g로 가속되었으며, 수평방향(V2)에서는 135Hz에서 0.19g, 애자표면진동(V3)에서는 80Hz에서 0.42g, 마지막으로 전주(V4)에서는 80Hz에서 0.24g로 가속되었으며, 200Hz이하의 저주파 신호가 감지되었다.

유리애자 자체의 고유진동과 현장 진동 특성을 비교해보면, 유리애자의 고유진동은 1kHz 이상의 고주파대역에서 높은 진폭값이 주로 분포하고 있으며, 현장 진동 측정에서는 1kHz 이하의 저주파대역에서 높은 진폭값이 분포하는 것으로 측정되었다. 따라서 고유진동과 현장진동 특성에서 주파수 일치에 따른 공진 주파수대역을 찾을 수 없었으며, 겨울철 및 여름철의 현장 진동 측정결과에서도 고유진동 주파수대역에서 진폭이 커지는 공진 현상은 나타나지 않았다. 따라서 공진에 의한 유리애자의 파손 가능성은 낮은 것으로 판단된다. 이상의 고유진동과 교량구간의 현장진동 특성에서 고유주파수 일치에 따른 공진현상으로 파손되는 유리애자는 관측되지 않았고 임계값은 측정할 수 없었다. 다만 임계치 이상의 충격에 의한 파손 가능성은 배제할 수 없다.

2.2.3 유리애자 가진시험

현장 측정한 진동 주파수 특성을 활용하여 진동에 의한 유리애자의 파손원인 분석을 위해 유리애자의 가진 시험을 수행하였다



(a) 1 shell type (b) Total insulator type

Fig. 5. Vibration accelerate test

유리애자에 대한 시험방법은 국제규격에 제시된 것이 없어 현장에서 실측한 데이터를 바탕으로 시험을 수행하였다. 시험방법은 Fig. 5와 같이 1shell 유리애자와 장간애자를 진동시험기(G-0215NS, Shinken, Japan)에 설치하고, Fig. 6과 같은 방법으로 가진 시험을 하였다. 주파수는 현장진동특성에서 약 80~82Hz가 측정되어 최악의 조건으로 82Hz로 설정하고 Force는 2g와 8g로 설정하였으며, 주기는 10분간 인가하고 10분간 인가하지 않은 상태로 하여 총 2시간 동안 시험을 수행 하였다. 시험결과 가진 시험에 의한 유리애자의 파손은 관측되지 않았고 심지어, 평소 운행에 따른 진동조건보다 4배 이상의 진동이 가해져도 유리애자의 파손에 크게 영향이 없는 것을 알 수 있었다. 하지만, 유리애자에 결함이 존재하는 상태에서 진동이 가해지면 파손 될 가능성은 배제할 수 없다.

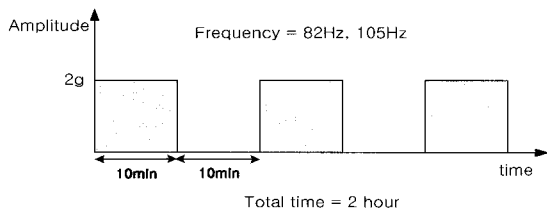


Fig. 6. Vibration inject logic

2.3 환경적 요인

2.3.1 비산물 검출망 설치

자갈도상으로 이루어진 선로에서 고속으로 차량이 주행하면 열차에 의한 후폭풍이 크게 발생하며 교차 시에는 와류풍 역시 상당히 발생된다. 이런 풍속은 때로는 차상에 부착된 고체물질이나 지상의 자갈 등의 비산 발생을 야기

할 수 있으며, 실제 프랑스 TGV-Nord 선에서는 우박 등의 비산물에 의한 파손이 보고된바 있다[2].

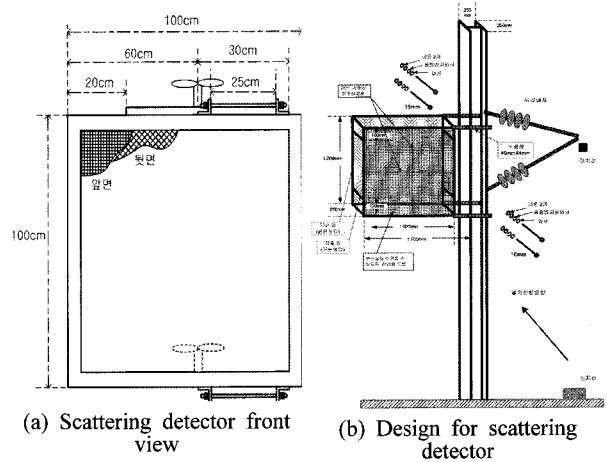
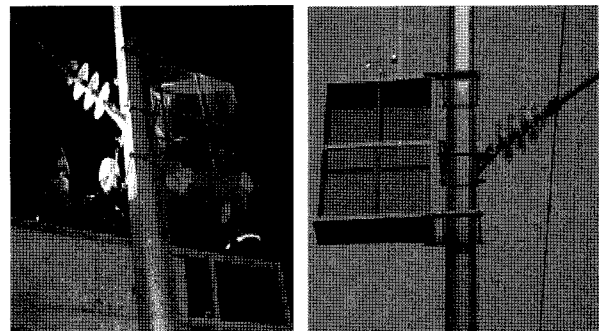


Fig. 7. Scattering detector outline

국내에서도 악천 후시 KTX 유리창이 충격에 의해 파손되는 등 비산의 흔적이 보고되고 있다[3]. 따라서 비산물이 어느 정도의 크기로 얼마나 영향을 미치는지의 평가를 위해 운행선로에 Fig. 7과 같이 비산물 검출망을 제작하여 설치하고 운영함으로써 비산가능성을 검토해 보았다.



(a) Installation (b) After installation

Fig. 8 .Scattering detector installation view

설치장소는 운영이력을 바탕으로 비산 가능성이 가장 높은 개소를 선정하고 연속적으로 5개의 비산망을 설치하였으며 6개월 이상 장기간에 설치함으로써 객관성 입증에 노력하였다. '08년 2월 설치하여 Fig. 8와 같이 운영 하였으며 지속적으로 검출가능성을 점검하였다. 비산망은 1m×1m의 크기로 2단으로 제작하여 1차망은 강도가 낮은 철망을 사용하고 2차는 강도를 강화하여 비산물이 검출망에 의해 검출될 수 있는 구조로 제작되었다. 주간 정기적인 육안점검과 월간 현장 정밀점검을 수행하여 검출망의 소손여부와 상태변화 여부 등을 지속적으로 감시하였다.

현재까지의 연구결과에 따르면 열차풍에 의해 1차 비산하는 경우 비산하는 자갈의 속도는 피해를 줄 만큼 빠르지는 않지만 열차 하부나 차륜 등에 부딪혀 2차 비산을 하는 경우에는 큰 운동에너지를 얻게 되어 매우 빠른 속도로 주변으로 비산하게 되며 이러한 2차 비산은 차량이나 시설물 또는 인명에 심각한 피해가 유발될 수 있다고 분석된바 있으나[4] 현재 설치된 비산망으로는 확률상 이미 검출시기가 지났음에도 비산물은 발견할 수 없었다.

2.3.2 진동타격시험

외부요인으로 비산물 발생시 정량적인 Force를 판단하기 위해 진동타격기를 활용 유리아자가 파손되는 특성 및 자기애자와의 비교 평가를 서술하였다.

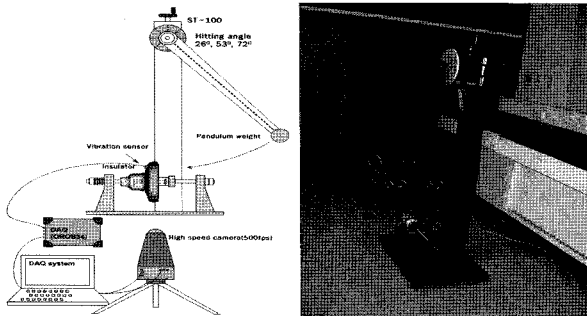


Fig. 9. Insulator hitting test(KS C 3801) measure diagram

실험에는 KS C 3801에 준한 시험법의 하나로서 Fig.9와 같이 타격시험기(ST-100, Sharp-Eng, KOR)를 제작하여 진자 추(pendulum weight)에 의해 원운동을 하면서 애자를 단계별로 파손시켰으며, 이때 고속카메라와 가속도계를 이용하여 그 특성을 분석하였다. 타격각도는 규격에서 정한 방법에 의해 26°, 37°, 45°, 53°, 60°, 66°, 72°에서 타격할 때의 현상에 대해 측정하였다. 유리아자와의 상관관계를 확인하기 위하여 절연파괴전압과 크기가 유사한 자기애자를 선택하여 비교하였다.

시험수행결과를 Table 2에 나타낸다. 시험결과 진자에 의해 타격하여 파손되는 각도는 72°로서 그 이동거리와 시간을 연산하여 속도로 환산하였다. 타격하는 진자 추의 이동거리를 고속카메라에 의해 측정하여 평균한 값은 60.82 mm였다. 이를 최초의 무게와 진자 중심에서 진자 추까지의 무게중심의 값을 대입한 결과 힘은 58.16N으로 계산되었다. 유리아자는 자기애자와는 달리 파괴강도를 갖는 진자 추에 의해 타격되는 순간 스템(stub)를 중심으로 애자 전체에 균열이 발생하고 일시에 무너지는 특성을 확인할 수 있다. Fig. 10에 동일조건에서의 유리아자와 자기애자 파손현상을 비교 나타내었다.

Table 2. Pendulate test result for angle stage

Steps	Angle, °	Breakdown		
		Porcelain ins.		Glass ins (255mm)
		254mm	191mm	
1	26	×	×	×
2	37	×	×	×
3	45	△	△	×
4	53	△	△	△
5	60	△	○	△
6	66	△	-	△
7	72	○	-	○

× : 손상없음, △ : 일부 흠집 발생, ○ : 전체 또는 일부파손

자기애자로서 균열되고 파손되는 부분은 진자 추가 타격한 부분으로 그 범위는 유리아자와 달리 전체적으로 파손되지는 않았다. 진자 추에 의한 파괴 임계치를 가지는 각도는 실제 파손되는 과정과는 달리 일정한 것을 확인하였다. 따라서 유사한 크기, 동일조건에서의 타격, 인가전압 등이 적용되는 애자에 대해 파손시점은 유리 및 자기애자가 거의 유사하게 나타났다. 하지만, 비산각도, 비산물이 4m 이상 부유할 조건, 유리아자의 갯 끝부분을 타격할 조건 등을 고려한다면, 파손빈도는 매우 낮아질 것으로 판단된다.

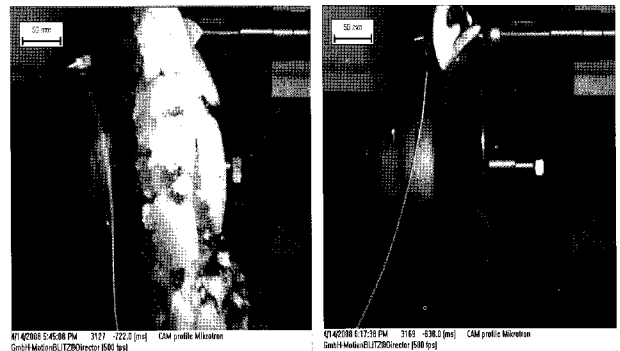


Fig. 10. Glass and porcelain insulator pendulate result for angle 72°

2.3.3 온도변화에 의한 특성

유리아자 파손의 또 하나의 가능성으로 기후환경을 들 수 있다. 애자의 생산 및 주사용처인 프랑스의 경우 국내에 비해 겨울철에 따뜻하고 여름철에 시원하여 온도에 대한 연교차가 비교적 적다. 그러나 국내의 경우 겨울철에 영하 10°C 이하의 온도로 운영되고 아울러 연평균강수량 또한 상대적으로 높다. 이러한 환경적 차이점으로 인해 프랑스 환경에 사용하기에 적합한 재료가 때로는 국내에 사용하기 곤란한 경우가 발생할 수 있어 그 가능성을 분석해 보았다. 애자와 지지물을 연결하는 주철부와 절연을 확보하기 위한

유리부로 구분된다. 이때 주철부와 유리부는 온도에 따른 열팽창률에 차이가 있어 온도에 따라 유리부가 파손될 가능성이 있으므로 온도 특성 시험을 Fig. 11과 같이 수행하였다.

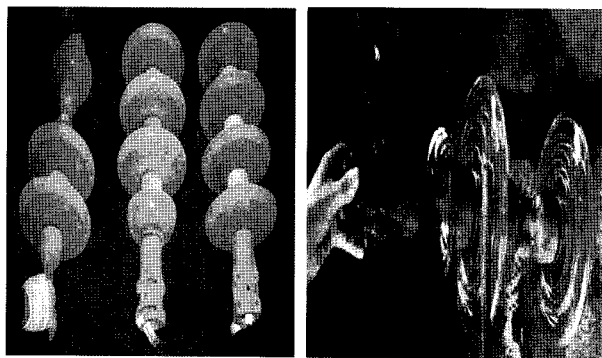


Fig. 11. Figure of temperature (cold and heating) test

운행노선의 안전성 평가를 위하여 한 개의 shell이 파손된 경우와 정상인 경우의 장간애자를 모두 시험하여 상호 차이를 확인해보았다. 유리아자에 대한 검사는 KS C IEC60168(공칭 전압 1000[V] 이상의 자기 및 유리제 포트 애자 시험 방법)을 통한 온도 사이클 시험과 KS C IEC60383-1을 각각 준용하였다.

냉열시험은 크게 2가지 규격 시험과 이와 병행하여 급랭 후 상온에 방치시켜 이상여부를 확인하는 시험 총 3가지를 실시하였다. 시험결과 KS C IEC 60383-1 및 KS C IEC 60168 모두 정상구간과 사고구간에서 이상 없는 것을 확인하였다. 절연저항 측정의 경우 정상 애자에서는 $\infty[\Omega]$ 가 나타났으나 파손 애자에서는 10[M Ω] (1shell)의 절연저항이 나타났다. 결과적으로 절연저항의 경우 파손된 애자에서 저하되는 것을 확인할 수 있었으나 전체적으로는 절연확보가 가능한 것으로 나타났다(건전구간 3개 shell의 절연저항 $\infty[\Omega]$). 단, 시멘트부분에 검은 회색의 변색이 발견되는 것으로 미루어 보아 시멘트가 수분에 장시간 노출될 경우 수분과 결합하여 유리아자 파손에 영향을 미칠 수 있을 것이라 판단되며 향후 재료분석을 통해 이를 입증할 필요가 있다.

3. 결론

2004년 4월 KTX의 개통이후 고속철도의 설계 및 운영 기술은 급속한 발전을 이루고 있다. 그러나 시스템이 Core 계약되어 도입됨으로 인하여 아직도 국내에 사용 중인 많은 설비들에 대한 현장 적합성 평가가 이루어 지지 않은 것이 현실이다. 향후 철도선진국의 대열로 진입하기 위해서는 반드시 사용설비들에 대한 안정성 평가가 수행되어야 하며, 본 논문에서는 다수 발생하는 유리아자의 파손에 대한 영향 평가를 수행하였다.

전기적 원인의 검토결과 스위칭 서지로 인한 피로도 누적에는 영향이 없을 것으로 분석되었으며, 추가적으로 1개의 shell이 파손되어도 전기적, 기계적으로 안정적인 사용이 가능함을 확인하였다. 유리아자의 고유진동과 교량구간의 현장진동 특성에서 고유주파수 일치에 따른 공진현상으로 파손되는 유리아자는 관측되지 않았지만, 임계치 이상의 충격에 의한 파손 가능성은 배제할 순 없다. 자갈 비산 및 우박 등에 의한 비산물에 의한 유리아자의 파손 가능성도 확률적으로 상당히 낮은 것으로 판단된다. 또한 온도변화에 따른 특성 역시 애자의 상태변화에 크게 영향을 미칠 수 없음을 확인하였다. 상기 연구를 통하여 애자에 영향을 주는 인자에 대해 일부의 경우 확실한 제거를 수행할 수 있었으나 직접적인 파손의 원인은 상기의 원인들이 복합적으로 작용 되었을 때 발생된 것으로 추정된다. 향후 본 데이터를 바탕으로 지속적인 발전을 통해 고속철도 운영국으로서 위상을 확립할 것으로 기대한다.

참고 문헌

1. LG Chem, Worldwide Data Service What's glass [Online]. Available; <http://lghighsash.com/info03.htm>
2. 전기안전공사, 고속전차선로 보호계통 시스템 분석에 관한연구, 코레일 연구원 완료보고서, 2008. 09.
3. 소진섭 외, KTX 유리창 파손 원인분석 및 실험연구, 철도연구개발센터 완료보고서, 2006.12.
4. 한국철도기술연구원, "고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술개발", 고속철도기술개발사업 제 4차년도 연차보고서, 2006.9.15.

접수일(2008년 10월 6일), 수정일(2008년 12월 22일),
게재확정일(2009년 4월 10일)