

KTX 운행에 따른 가선설비 유리에자의 진동특성과 파손 가능성 검증

논 문

58-3-20

The Verification of Breakage Possibility and Vibration Properties of Glass Insulators by the High-speed Railway Service

김 영 석[†] · 송 길 목* · 정 진 수* · 전 용 주**

(Young-Seok Kim · Kil-Mok Shong · Jin-Su Jung · Yong-Joo Jeon)

Abstract - This paper has studied breakage possibility of glass insulators by resonance and accelerated deterioration through the comparison of the natural vibration and on site vibration. The natural frequencies of the strut tube glass insulator was measured within a range of less than 1kHz. In the on site vibration, the largest frequency that was imposed on strut tube glass insulators was 80Hz with 1.13g of vertical vibration in the viaduct section, the largest vertical vibration (0.38g) was detected at 103Hz in the open route section. When site vibration and natural vibration of strut tube glass insulators were compared in terms of characteristics, the resonance frequency was not the same. In both the viaduct and open route sections, it seems that the impact by vertical vibration in strut tube glass insulators is large. It's very unlikely that glass insulators were damaged by fatigue accumulation of vibration since the possibility of damage by resonance was very low in consideration of the characteristics of natural vibration and site vibration of glass insulators. In addition, no damage was detected in the accelerated deterioration test.

Key Words : Glass insulator, Vibration, Resonance, Breakage, High-speed railway

1. 서 론

2004년 3월부터 운영되고 있는 고속열차(KTX)는 전국을 만나질 생활권과 장거리 출퇴근 교통수단으로 만들었다. KTX는 시속 300km/h의 운행에 따른 신속성을 장점으로 하고 있지만, 사고 발생 시에는 승객의 안전뿐만 아니라, 경제적 손실, 국가 이미지 추락 등의 손실이 크므로 KTX 설비의 안전성이 무엇보다 중요하다. 알려진 대로, KTX는 프랑스의 테제베(TGV) 기술을 이용하여 건설되었지만, 20량으로 구성되어 한 번에 약 1,000명 정도의 승객을 수송할 수 있는 장점도 가지고 있으며, 최근 KTX-II가 국내의 기술로 개발되었다. KTX 운행은 열차인 KTX, 레일 그리고 고속선로에 전기를 공급할 수 있는 가선설비로 구성되어 있다[1]. 이들 중에서 가선설비는 급전선, 조가선, 브래킷 및 전주로 구성되어 있으며, 브래킷에 사용되는 애자는 일반 전차선로에 사용되는 자기애자 혹은 폴리머애자 대신에 유리에자를 사용하고 있다. 가선설비에서 유리에자의 역할은 KTX 운전 전압인 25,000V의 절연 역할과 조가선을 기계적으로 잡아주는 역할을 담당한다. 또한 유리에자는 폴리머애자 및 자기애자에 비해 파손의 발견이 용이하고, 전기적, 기계적으로도 자기애자와 동등 이상의 특성을 가지고 있다[2].

하지만, 최근 가선설비의 유리에자가 파손되는 경우가 자

주 발생하여 2004년 운행 시부터 현재까지 약 120여개가 파손되었다. 유리에자의 파손원인을 추측해 보면, KTX 운행 중 팬터그래프(Pantograph)와 전차선 이선으로 발생하는 썬지 전압, 뇌 충격 등의 전기적 요인과 조가선 및 전주의 진동, 동절기 비산되는 자갈 등의 기계적 요인, 기후변화에 따른 환경적 요인을 들 수 있지만, 정확한 원인은 알 수 없다. 또한 프랑스의 TGV에서도 지난 10년간 80여개의 유리에자가 파손되었지만, 원인을 알지 못하고 있다.

우리나라의 고속선로구간은 지형적 특성을 고려하여 토공구간, 터널구간, 교량구간으로 시설되어 있지만, 프랑스 TGV에 비해 교량구간과 터널구간이 많이 점유하고 있으며, 교량구간에서의 유리에자의 파손비율이 전체구간 중에서 52%를 차지하여 가장 많이 파손되었다. 또한 가선설비에서 유리에자는 급전선애자, 상부애자, 경사애자로 구분되며, 이들 중 경사애자의 파손이 가장 많이 발생하였다. 따라서 파손원인을 규명하기 위하여 추측되는 3가지 요인 중, KTX가 하루에 80여회 운행됨에 따른 진동에 의한 원인과 이에 따른 공진에 의해 파손 될 가능성이 있는지 연구 할 필요가 있다[3].

본 논문은 KTX 가선설비의 유리에자의 진동 특성을 조사하고 유리에자 자체의 고유진동수 특성과 현장 진동 특성을 비교하고 분석하여 공진현상에 의한 유리에자의 파손 여부, 진동에 의한 KTX 운행상의 안전성에 대해 연구하였다.

2. 유리에자의 파손과 진동영향 분석

그림 1은 KTX 구간의 선로점유율과 유리에자 파손 비율을 나타내며, 그림 2는 위치별 유리에자 파손 개수를 나타낸

† 교신저자, 정회원 : 한국전기안전공사 전기안전연구원

* 정 회 원 : 한국전기안전공사 전기안전연구원

** 정 회 원 : KORAIL

E-mail : athens9@kesco.or.kr

접수일자 : 2008년 11월 27일

최종완료 : 2009년 1월 20일

다. KTX 구간은 토공구간이 27.7%, 터널구간이 45.9%, 교량구간이 26.5%로 터널구간이 가장 많이 점유하고 있다. 하지만, 유리애자의 파손 비율은 반대로 교량구간이 52%, 토공구간이 32.5%, 터널구간이 15.5%를 차지하였다. 위치별 유리애자의 파손 개수는 경사애자가 가장 많은 78개였으며, 상부애자가 29개, 급전선 애자가 16개가 파손되었다.

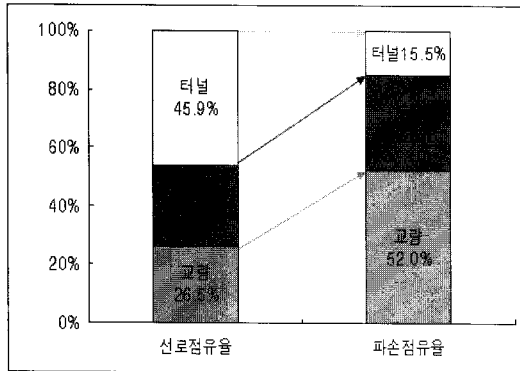


그림 1 고속선로 점유율 및 애자파손 점유율
Fig. 1 The possession rate of KTX line and breakage

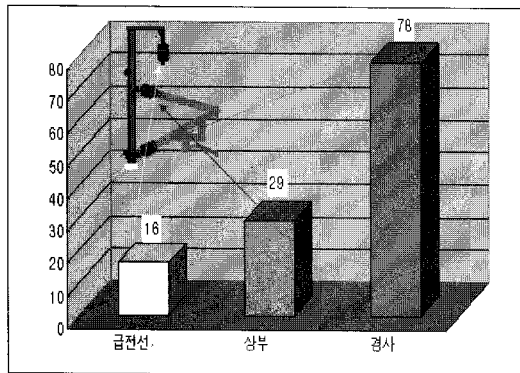


그림 2 위치별 유리애자의 파손 개수
Fig. 2 The breakage number of glass insulator per position

유리애자는 주철과 강화유리 형태의 셸(shell)로 구성된 것을 각각 접합하여 4 shell 형태로 만들어지며, 강화유리와 주철의 연결 접합은 시멘트를 사용하고 있다. 유리애자가 파손 되면, 그림 3과 같이 강화유리 부분만 파손되고 애자가 기계적으로 분리되는 경우는 없다. 또한 유리애자는 임계값 이상이 되어야 파손되는 "Binary"모드이므로 진동 누적에 의한 파손의 가능성은 희박할 것으로 추측된다.

그림 4는 KTX의 운행 시 유리애자에 미치는 진동의 영향을 표시한 것이다. KTX가 운행하지 않을 시에는 바람에 의한 영향을 고려할 수 있고 KTX가 300km/h의 속도로 운행할 시에는 운행에 따른 바람과 열차의 레일을 통한 영향으로 브래킷이 움직일 수 있으며[4][5], 브래킷에 가장 영향을 많이 주는 것은 전압공급을 담당하는 KTX 팬터그래프가 브래킷을 통과하는 시점이다. 참고적으로 KTX 운행시의 전기 공급은 맨 뒤쪽의 기관차에서 팬터그래프를 통해 이루어지고 있다. 이때, 발생한 진동은 가장 가까운 경사애자로부터 급전선애자까지 영향을 미치게 되며, 진동의 세기에 의

한 파손의 가능성을 비취볼 때 그림 2에서 나타난 것과 같이 경사애자가 가장 많이 파손될 것으로 추측되나, 원인을 정확하게 파악할 수는 없다. 따라서 정확한 원인규명을 위해서는 KTX운행 시의 진동 특성을 조사하여 파손 가능성을 규명하는 것이 중요하다.

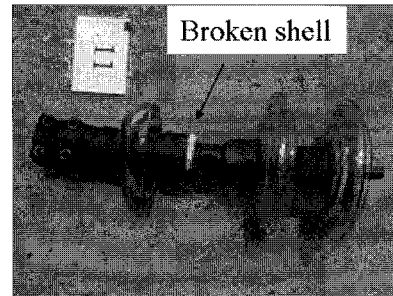


그림 3 파손된 유리애자
Fig. 3 Photograph of broken glass insulator.

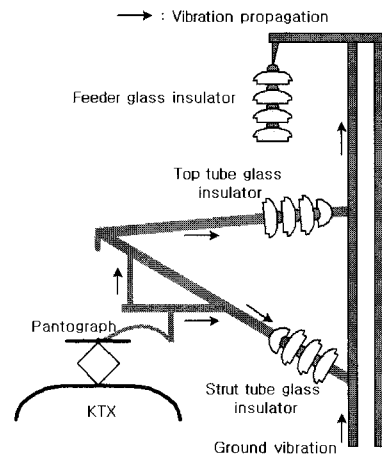


그림 4 유리애자에 미치는 진동의 영향의 개략도
Fig. 4 A schematic diagram of the effects of vibration on glass insulators.

3. 유리애자 진동 측정방법

1) 유리애자의 고유진동수 측정방법

그림 5는 유리애자의 고유진동수를 측정하기 위한 개략도를 나타낸다. 하나의 물체는 기준위치에 대해 반복운동을 하는 고유진동수를 가지며, 물체의 고유진동수는 무수히 많다. 유리애자 1 shell의 고유진동 주파수와 4 shell로 된 유리애자(이하 경사애자)의 고유진동수를 측정하기 위하여 정밀도가 96.10mV인 가속도계(Accelerometer, AC240-1A, CTC사)와 정밀도가 1.25mV/N인 충격해머(Impact Hammer, 086C04, PCB사)를 사용하였다. 1shell로 된 유리애자의 고유진동은 유리애자에 충격을 주고자하는 지점을 선택하고 충격해머로 가진을 시켰다. 이때 애자의 떨림 현상은 가속도계를 통해 FFT분석기를 통해 고유진동수를 측정하였다. 경사애자의 고유진동수는 네 번째(4th) 유리애자 표면에 가속도계를 설치하고 첫 번째에서 네 번째까지 순차적으로 유리애자 표면에 충격해머로 가진을 주면서 측정하였다.

2) 고속철도 가선설비의 현장 진동측정 방법

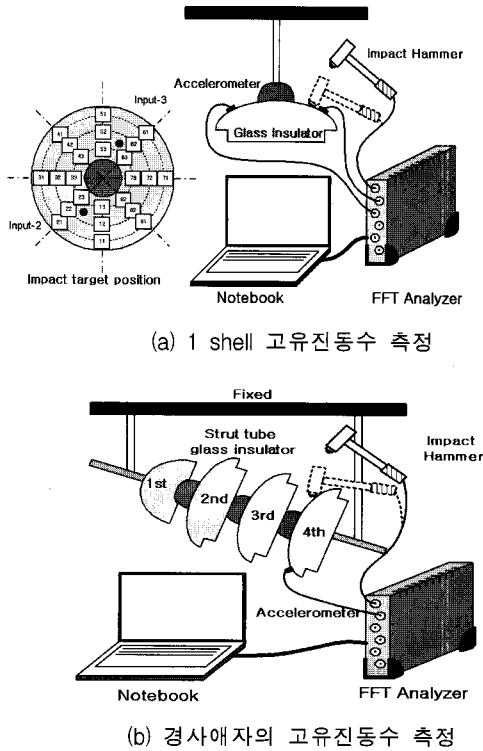


그림 5 유리에자의 고유진동수 측정
Fig. 5 Measurement of natural frequencies of glass insulators.

현장에서의 진동측정은 실험 여건 상 교량구간과 토공구간을 각각 1군데씩 선정하고 가장 파손비율이 높은 경사애자를 대상으로 하여 실험하였다. 그림 6은 현장 진동측정을 위한 개략도를 나타낸다. 고속철도 운전의 안전성을 위하여 경사애자에서 전계의 영향이 가장 작은 네 번째 shell에 수직방향, 수평방향, 애자표면에 가속도계를 부착하였으며, 전주부분에도 가속도계를 부착하여 바람과 지반을 통해 전달되는 진동을 측정하였다. 이때 KTX가 지나갈 때의 진동을 수직진동(V1), 수평진동(V2), 애자표면진동(V3), 전주진동(V4)으로 정의하였으며, KTX가 가속도계를 부착한 경사애

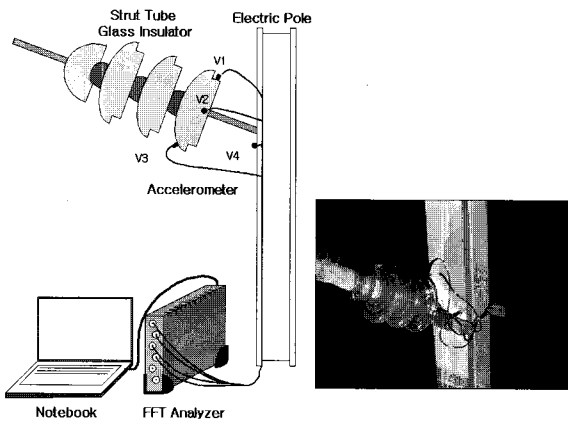


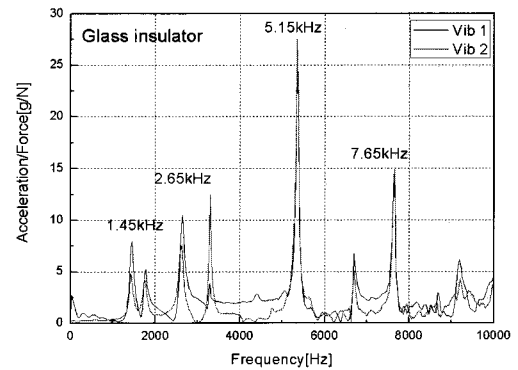
그림 6 현장 진동측정을 위한 개략도
Fig. 6 Schematic diagram of site vibration a viaduct and an open route section.

자를 지나갈 때를 Positive로 하고 반대 측 레일로 KTX가 지나갈 때를 Negative로 하였다. 또한 주위 환경적 영향을 고려하여 겨울철과 여름철에 현장 진동 측정을 수행하였다.

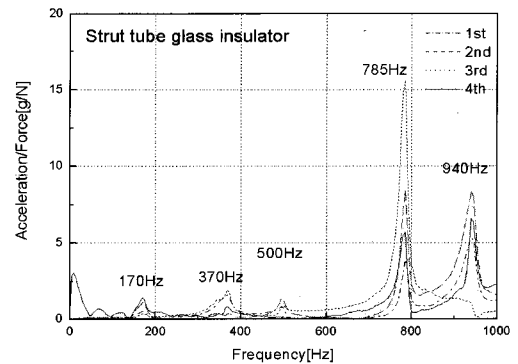
4. 유리에자의 고유진동수 및 현장 진동 특성

1) 유리에자의 고유진동수 특성

그림 7은 유리에자 1 shell의 고유진동 주파수를 나타낸다. 고유진동 주파수 측정 시에는 임의로 주파수 범위를 넓게 하여 10kHz까지 설정하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 고유진동수는 10kHz 범위에서 전체적으로 형성된 것을 알 수 있으며, 5.15kHz에서 가장 큰 진폭 특성을 나타내는 고주파수 대역 인 것으로 나타났다. 파손되는 애자는 경사애자가 다수를 차지하고 있기 때문에 경사애자의 고유진동 특성은 1kHz 이하 범위에서 측정하였으며, 그림 5에 나타낸다. 경사애자의 고유진동 주파수는 170Hz, 370Hz, 500Hz, 785Hz, 940Hz에서 나타났다.



(a) 1 shell 유리에자의 고유진동수



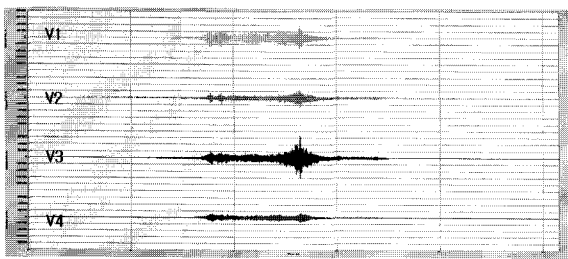
(b) 경사애자의 고유진동수

그림 7 유리에자의 고유진동수
Fig. 7 The natural frequency of glass insulator

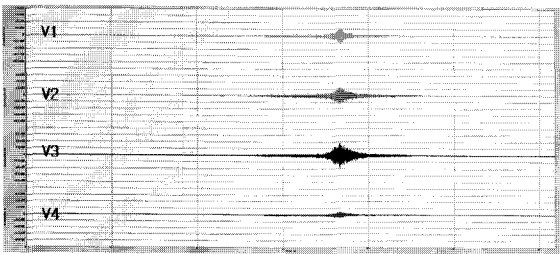
2) 현장 진동특성

그림 8은 겨울철 교량 및 토공구간에서의 KTX가 지나갈 때의 시간에 따른 진동 신호를 나타낸다. x축은 시간이며, y축은 진폭 값인 중력가속도 g값을 나타낸다. 여기서 중력가속도 g는 9.8m/s²이다. 그림에서 알 수 있듯이, 진동신호는 두 구간 모두 고속열차의 팬더그래프가 가속도계가 부착된 경사애자를 지나가는 순간 가장 큰 진폭을 가졌다. 그림

8(a)의 교량구간에서의 진동신호는 그림 8(b)과 비교해서 KTX가 가속도계가 부착된 경사애자를 지나가는 순간부터 큰 신호가 감지되는 것을 알 수 있으며, 토공구간에서는 일정한 진폭으로 진행하다가 펜터그래프가 지나가는 순간 가장 큰 진폭을 가지는 것으로 나타났다. 이는 교량구간에서는 가선설비 주변으로 방음벽이 설치되어 열차운행 중 바람, 진동 등이 모두 유리아자에 영향을 주는 것으로 판단되며, 토공구간에서는 주변에 장애물이 없기 때문에 주변 바람, 진동 등의 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 또한 진동신호는 교량구간의 애자 표면진동에서 가장 큰 12.5g 값을 가졌으며, 반대 측으로 KTX가 지나갈 때는 상대적으로 낮은 g 값을 나타내었다. 이들 그래프는 단순히 시간에 대한 g 값을 나타낸 것으로 정확한 진동분석을 위해서는 진동신호가 감지되는 부분의 FFT분석이 필요하다.



(a) 교량구간 Positive

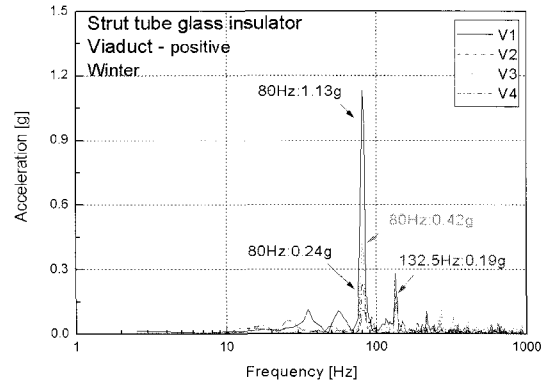


(b) 토공구간 Positive

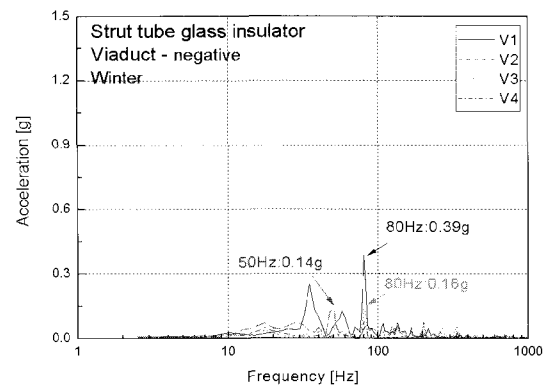
그림 8 겨울철 교량 및 토공에서의 현장진동 신호

Fig. 8 The vibration signals when KTX passed through the viaduct and open route sections in winter.

그림 9는 그림 8(a)의 교량구간에서 진동이 감지되는 지점부터 끝나는 부분까지 FFT 분석한 결과이다. 그림 9(a)는 교량구간에서 positive의 경우로, 주파수 범위는 200Hz이하의 저주파수가 나타났다. 경사애자에 가해지는 가장 큰 주파수는 80Hz로 수직진동에서 1.13g, 애자표면진동에서 0.42g, 전주진동에서 0.24g의 값을 나타내었으며, 132.5Hz에서 수평진동의 진폭은 0.19g의 값을 가졌다. 그림 9(b)의 교량구간에서 negative의 주파수 분석결과, 주파수 80Hz에서 수직진동의 진폭은 0.39g, 애자표면진동의 진폭은 0.16g의 값을 가졌다. positive방향과 비교해서 진폭은 낮게 나타났지만, 진동주파수는 거의 동일한 대역에서 발생하였으며, 반대방향으로 KTX가 진행할 경우에 있어서도 미미하지만 지반과 교량의 방음벽을 통한 바람의 영향으로 인해 진동 영향이 있는 것으로 판단된다. 측정결과로부터 교량구간은 저주파수에서 g값이 크고 고주파수에서 g값은 작게 되어 현장에서는 느리게 흔들리는 진동인 것을 알 수 있다.



(a) 교량구간 Positive



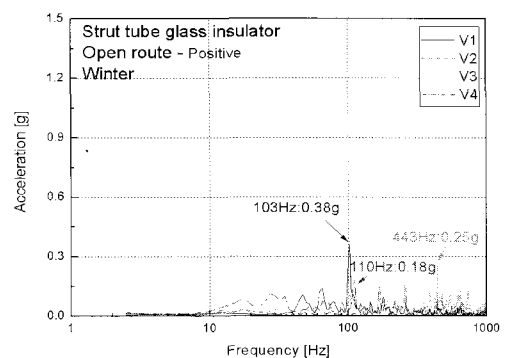
(b) 교량구간 Negative

그림 9 겨울철 교량구간에서의 FFT 분석

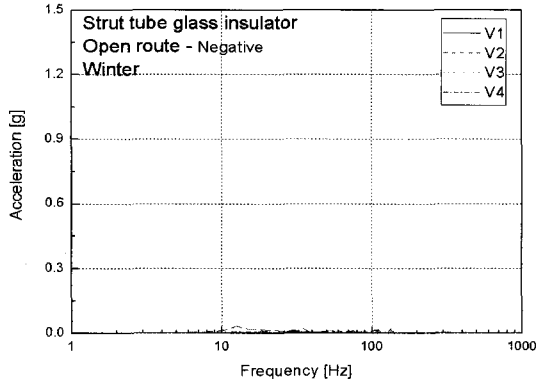
Fig. 9 The results of FFT analysis in the viaduct section in winter.

그림 10은 토공구간에서의 현장진동 측정에 따른 FFT분석 결과를 나타낸다. 그림 10(a)의 토공구간에서 positive 방향의 진동 주파수 분석 결과를 보면, 그림 9(a)와 비교해서 진폭 값은 크지 않지만, 주파수 103Hz에서 수직진동이 가장 큰 0.38g의 값을 가졌다. 또한 애자표면진동은 넓은 주파수 대역(260Hz, 443Hz, 733Hz)을 가지며, 443Hz에서 0.25g의 값을 가졌다. 주파수 110Hz에서 수직진동은 0.18g의 값을 가졌지만, 그림 10(b)의 negative의 경우에는 진동신호가 미미한 것을 알 수 있었다.

그림 11은 여름철에 교량구간에서의 현장진동 측정에 따른 FFT분석 결과를 나타낸다. FFT분석은 그림 7과 동일한



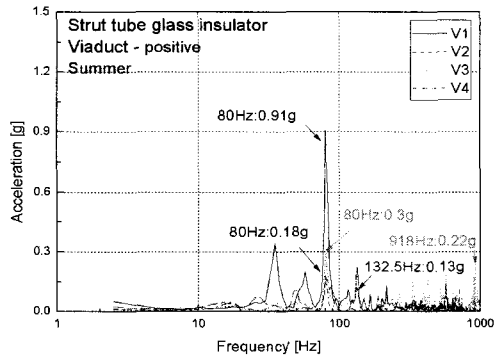
(a) 토공구간 Positive



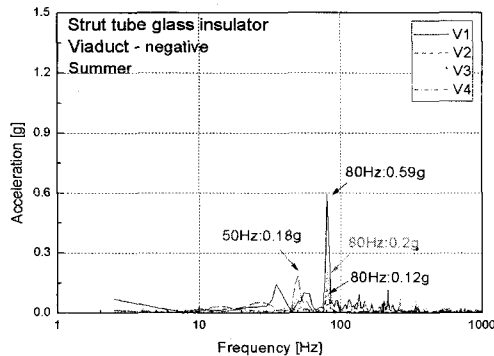
(b) 토공구간 Negative

그림 10 겨울철 토공구간에서의 FFT 분석
Fig. 10 The results of FFT analysis in the open route section in winter

방법으로 하였으며, 그림 9(a)의 positive의 경우, 수직진동에서 그림 7(a)과 유사한 80Hz에서 0.9g의 진폭 값을 나타내었으며, 35Hz, 135Hz에서 비교적 높은 진폭의 값을 가졌다. 애자표면진동에서는 넓은 범위에 걸쳐 주파수 대역이 나타났으며, 80Hz, 570Hz, 918Hz에서 비교적 큰 진폭 값을 나타내었다. 그림 9(b)의 분석결과, positive와 비교해서 진폭은 낮게 나타났지만, 80Hz에서 수직진동에 의한 영향이 가장 큰 것으로 나타났다.



(a) 교량구간 Positive



(b) 교량구간 Negative

그림 11 여름철 교량구간에서의 FFT 분석
Fig. 11 The results of FFT analysis in the viaduct section in summer.

현장진동 특성과 경사애자 고유진동 특성을 비교해 보면, 주파수가 일치하는 공진주파수를 발견할 수 없었으며, 교량구간과 토공구간에서는 모두 경사애자의 수직진동, 즉 상하진동에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다. 이에 경사애자 자체의 수직진동에 따른 고유진동수를 측정할 것을 그림 12에 나타낸다. 경사애자 자체의 수직진동은 가속도계를 수직방향에 설치하고 임팩트 해머를 이용하여 수직방향으로 충격을 가하여 측정하였다. 경사애자의 수직방향 고유진동 주파수는 910Hz, 985Hz, 1,130Hz 대역에 존재하였으며, 이는 현장진동 특성과 일치되는 공진주파수가 존재하지 않았다. 유리아자의 고유진동 특성은 고주파수 대역이 주로 분포하고 있으며, 현장 진동 특성은 저주파수 대역이 분포하는 것으로 조사되었다. 따라서 공진에 의한 유리아자의 파손 가능성은 낮은 것으로 판단된다.

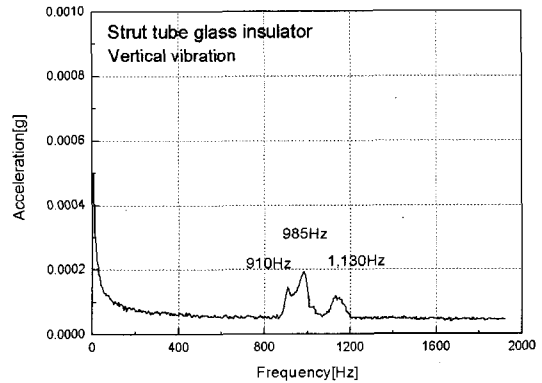


그림 12 경사애자의 수직고유진동
Fig. 12 The natural frequencies on the vertical vibration of strut tube glass insulator.

5. 가속시험에 의한 유리아자의 파손 여부

KTX는 하루 80여회 운행되기 때문에 현장진동 특성을 근거로 하여 가속열화시험을 하여 유리아자의 파손여부를 규명할 필요가 있다. 하지만, 유리아자에 대한 진동시험방법은 국제규격에 제시된 것이 없으므로 현장에서 실측한 데이터를 바탕으로 시험을 수행하였다. 시험방법은 그림 13과 같이 경사애자를 진동시험기(G-0215NS, Shinken, Japan)에 설치하고, 파손비율이 가장 높은 교량구간의 진동 주파수 특성을 이용하여 80Hz, 2g와 8g에서 실험을 수행하였다. 가진 조건은 첫 단계로 80Hz, 2g로 10분간 인가하고 10분간 인가하지 않은 상태로 하여 총 2시간 동안 시험하였으며, 첫 단계의 시험이 종료 후, 진폭을 8g로 증가시켜 동일한 방법으로 2시간을 인가하였다. 경사애자의 가진 시험 후 유리의 파손은 관측되지 않았다. 따라서 경사애자에 일정한 진폭이 가해지더라도 연속적인 경우가 아니라면 진동 누적에 의한 파손의 가능성은 낮은 것으로 판단된다. 하지만, 경사애자의 제조는 각shell을 접합하기 때문에 각 shell의 접합의 비틀림이 발생하여 생산된 제품에 진동이 가해지면 파손될 가능성이 있는 것으로 추측된다.

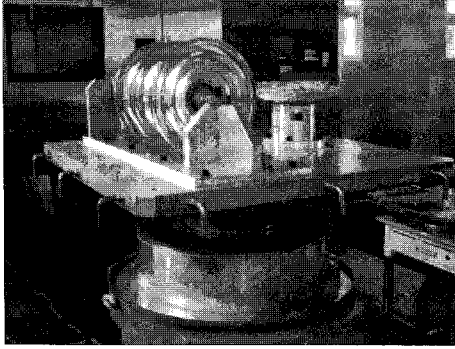


그림 13 유리애자 가진 시험

Fig. 13 Accelerated degradation test based on the characteristics of site vibration

6. 결 론

본 논문에서는 고속철도에 사용되는 유리애자 고유진동 특성과 현장 진동특성을 비교하여 유리애자 파손여부를 분석하였다. 유리애자 1 shell의 고유진동은 고주파수 대역에 존재하였으며, 경사애자의 고유진동 주파수는 170Hz, 370Hz, 500Hz, 785Hz, 940Hz에서 나타났다. 현장 진동특성은 교량 및 토공구간에서 KTX의 팬터그래프가 가속도계가 부착된 경사애자를 지나가는 순간 가장 큰 진폭을 가졌으며, 경사애자의 애자 표면진동의 진폭이 가장 크게 나타났다. 하지만, 교량구간과 토공구간의FFT분석결과 두 구간 모두 경사애자의 수직진동에 의한 영향이 크며, 교량구간은 82Hz, 토공구간은 103.5Hz의 주파수가 큰 진폭 값을 나타내었다. 경사애자의 수직고유진동과 현장진동 특성으로 부터 공진에 의한 파손 가능성은 낮았고 또한 경사애자의 가속열화 시험에서도 유리애자의 파손현상이 관측되지 않아 진동의 피로누적에 의한 유리애자 파손 가능성은 낮은 것으로 판단된다. 단, 하루 80여회 운행되는 KTX는 항상 가선설비에 충격을 가하게 되므로 유리애자가 일정 임계값을 넘게 되면 파손될 가능성이 남아있지만, 경사애자의 shell 한 개 정도가 파손되더라도 전기적으로 절연성능을 유지하며, 기계적으로 떨어져 나가지는 않기 때문에 KTX 운행에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 전력산업기반기금 및 한국철도공사 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Yang, Eung Chow, "A basic Study on Catenary System Corresponding to Speed-up of the Railway", Master paper of Seoul National University of Technology, pp.47-57, 2004.
 [2] Xingliang Jiang, Jihe Yuan, Lichun Shu, Zhijin Zhang, Jianlin Hu, Feng Mao, "Comparison of DC Pollution Flashover Performances of Various Types

of Porcelain, Glass, and Composite Insulators", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, Issue 2, pp.1183-1190, 2008.

[3] Young-Seok Kim et al, "Analysis of Fault Possibility and Vibration of Glass Insulator on High-Speed Railway", KIEE Summer conference, pp.2044-2045, 2008.
 [4] Dong Myung Bae, Chang Hyuk Shin, Chul Eun Choi, Sang Gon Park and Young Jin Baek, "A Study on the Characteristics of Transferring Vibration and Effect of Nearby-Building Induced by the High-Speed Train in Operation", Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.11, No.2, pp.354~364, 2001.
 [5] Takemiya. H. and Goda. K, "Prediction of Ground Vibration Induced by High Speed Operation", Procs of 5th Int. Cong. On Sound and Vibration, pp. 2681-2688, 1997.

저 자 소 개



김 영 석 (金榮錫)

1974년 4월 27일생. 1996년 2월 경상대학교 공대 전기공학과 졸업. 1999년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001~2002년 야마구치대학 전기전자공학과 객원연구원. 2003년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 연구원
 Tel : 031-580-3064
 Fax : 031-580-3111
 E-mail : athens9@naver.com



송 길 목 (宋侏穆)

1967년 3월 31일생. 1994년 2월 숭실대 공대 전기공학과 졸업. 2003년 8월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원.
 Tel : 031-580-3065
 Fax : 031-580-3111
 E-mail : natasder@kesco.or.kr



정진수 (鄭鎭洙)

1976년 9월 12일생, 2003년 2월 명지대학교 전기공학과 졸업. 2005년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 연구원.

Tel : 031-580-3067

Fax : 031-580-3111

E-mail : mirmir0822@hanmail.net



전용주 (全容胄)

1971년 10월 7일생, 2001년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~2004년 현대중공업 근무. 2005년~현재 한국철도공사 철도연구원 과장

Tel : 042-609-3886

Fax : 042-609-3720

E-mail : elecbank@empal.com