

차량용 에어클리너 인슐레이터의 진동 내구성 평가[#]

Estimation of the Vibration Endurance Characteristics of Air Cleaner Insulators for Vehicles

김정헌* · 김석현[†]

Jung Heon Kim and Seockhyun Kim

(2004년 6월 29일 접수 : 2004년 7월 22일 심사완료)

Key Words : Air Cleaner Insulator(에어클리너 인슐레이터), Vibration Endurance Test(진동 내구성 시험), Frequency Response Characteristics(주파수응답특성)

ABSTRACT

In this paper, a vibration endurance test is performed on rubber insulators used for vehicle air cleaners. Based on the test results, the endurance characteristics depending on the type and the material of the insulators are estimated. The frequency response characteristics of the air cleaner system including the insulator are investigated to identify the cause of wear and failure of the insulator. New insulator models with improved endurance characteristics are proposed and tested. Test results show that the vibration endurance property of the insulator is strongly dependent on the frequency response characteristics of the air cleaner system as well as the deformed shape of the insulator.

1. 서론

자동차를 구성하는 많은 부품 가운데 고무 요소는 부품들 사이에서 각 부품의 운동을 적절히 제어함으로써, 시스템이 적절한 동적 성능을 갖도록 하는데 필수적인 요소이다. 이러한 고무 요소는 지속적인 하중과 온도의 변화로 사용기간이 경과되면서 재질 특성이 변화하고, 초기에 설계된 시스템의 동적 성능을 저하시킨다. 따라서, 그 내구성을 적절하게 평가하고 문제점을 사전에 파악하여 보증 기간 내에 파손으로 인한 제품의 신뢰도 저하를 방지하는 것이 필요하다. 차량용 고무제품의 내구성에 대해서는 주로 엔진용 고무 마운트의 피로 강도에 관한 연구와,⁽¹⁾ 형상 설

계 및 피로수명 예측,⁽²⁾ 동 흡진기의 진동 내구성의 실험적 연구⁽³⁾ 등이 보고되고 있다. 본 논문에서 다루는 에어클리너(air cleaner)용 인슐레이터는 엔진 가까이에 위치하므로, 진동과 온도 변화의 영향을 피할 수 없다. 본 연구에서는 국산 승용차에 사용되는 고무 인슐레이터의 진동 내구성을 평가하고, 내구성 시험과정에서의 마모 및 파손의 원인을 규명하여 내구성 개선을 위한 정보를 확보하고자 한다. 제품의 내구성은 차량사가 제공하는 진동 내구성 시험기준에 근거하여 평가한다. 또한, 에어클리너 진동계의 주파수응답특성을 고려하여 내구성의 문제점을 검토한다. 최종적으로, 인슐레이터의 형상 및 재질, 경도 등의 설계인자에 따라 진동계의 주파수응답 특성이 어떻게 변화 하는지를 살펴보고 내구성 개선 방안을 제시하고자 한다.

2. 에어클리너와 인슐레이터의 사양

Fig. 1은 국산 소형 승용차용 에어클리너를 보이는 데, 에어클리너를 차체에 고정시키는 인슐레이터는 차종에 따라 다른 모델이 사용된다. Fig. 2에 평가 대

[†] 책임저자 : 정회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부
E-mail : seok@kangwon.ac.kr

Tel : (033) 250-6372, Fax : (033) 257-4190

* 정회원, SV(주)

[#] 이 논문은 2004년 춘계학술대회에서 우수발표논문으로 추천되었음.

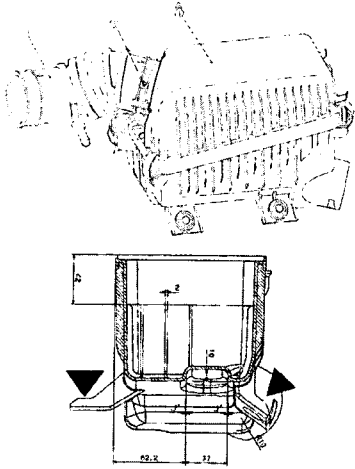


Fig. 1 Air cleaner system

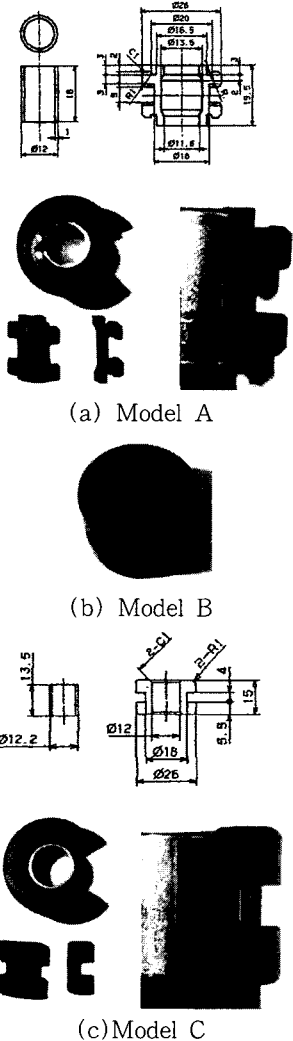


Fig. 2 Structures of the insulators

상인 3가지 모델의 인슐레이터를 보인다. A형은 소형 승용차용 모델이고, B형은 A형의 형상을 부분적으로 개선한 모델이다. C형은 중형 승용차용으로 사용중인 모델이다.

소형 승용차용 초기 모델인 A형은 조립 후 Fig. 3(a)에서와 같이, 상하단 와셔에 안쪽 돌출부가 많이 늘리면서 압착되어, 인슐레이터의 가운데가 바깥쪽으로 굽어진다. 그 결과, 브라켓과의 접촉 면적이 줄어들고, 체결시 브라켓의 상하면을 눌러 주기 보다는 배 부분을 통해서 집중적으로 힘을 전달받게 된다. 인슐레이터와 내부의 콜라가 조립되면 내부 중앙은 공기층이 형성되어 들뜨고 와셔에는 상하부 모서리만 접촉된다. 따라서 작용력이 집중된 모서리와 배 부분에 마찰에 의한 마모가 쉽게 발생된다. 또한, 에어클린어의 상-하 진동에서 고무제의 스프링 강성이 작아져 고유 진동수가 낮아진다. 이와 같은 A형의 변형 특성을 고려하여 개선한 모델이 B형이다. Fig. 3(b)에서와 같이, B형은 바깥 돌출부를 내부 돌출부와 같이 상하단의 와셔에 닿도록 높게 한 점이 A형과 다르다. 내/외 돌출부가 동시에 와셔에 압착되면서 브라켓을 감싸게 되어 힘의 전달 면적이 증가하고 내마모성 측면에서 유리할 것으로 예상된다. 중형 승용차에 사용되는 C형은 조립 후 와셔와 상-하면 전체가 접촉하고 변형후 브라켓과의 압착 상태도 B형과 대동소이하다.

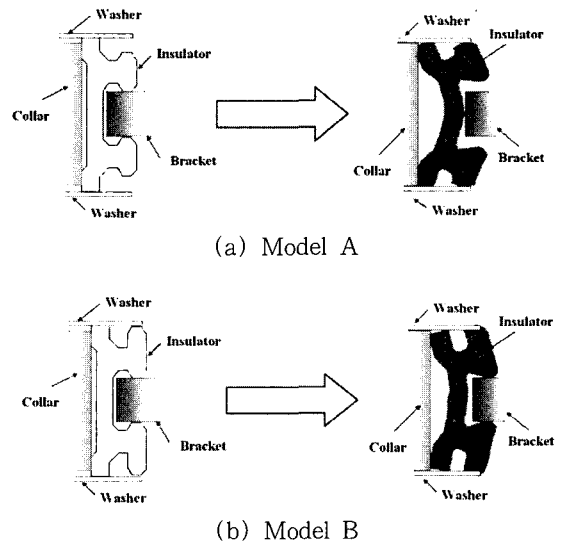
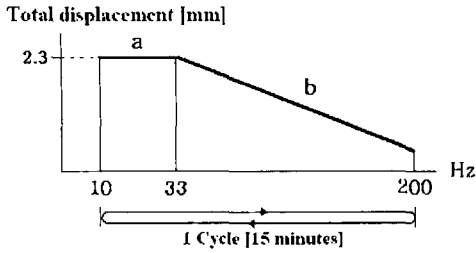
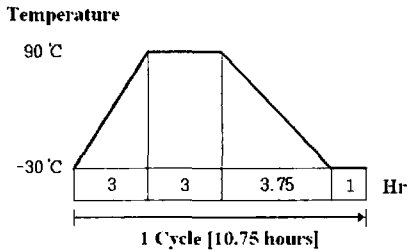


Fig. 3 Deformed shapes of the insulators

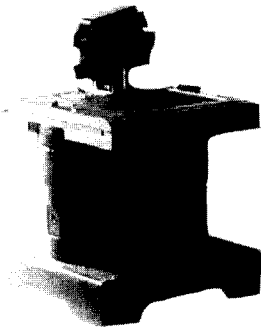


(a) Excitation condition

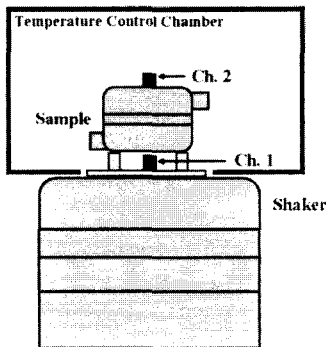


(b) Temperature condition

Fig. 4 Conditions of the endurance test



(a) Testing machine for the endurance test



(b) Measurement of FRF

Fig. 5 Experimental set up for the test

3. 진동 내구성의 평가방법

진동 내구성 평가시험에서 가진 조건으로는 국내 차량사의 요구 기준인 HMC ES28110-6(2) 시험조건⁽⁴⁾을 적용한다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이, 15분 간에 걸쳐 10 Hz부터 200 Hz 까지 가진 하고 다시 역 방향으로 가진 하는 것을 한 주기로 반복한다. 가진은 상하 방향으로만 가해지며, a구간에서는 2.3 mm의 전진폭(최저점~최고점간 거리)으로 가진되고, b구간에서는 5 g의 일정 가속도로 가진된다. 시험중 가진 조건이 설정값의 3 %를 벗어나지 않도록 가진 조건이 제어된다. 또한 가진은 Fig. 4(b)의 온도 환경을 제공하는 온도제어실 내에서 진행된다. 온도변화는 10시간 45분을 한 주기로 반복된다. 이러한 시험환경을 충족시키기 위하여 Fig. 5의 내구성 시험 전용장치(UD TA240-S202/LP)를 사용하였다.⁽⁵⁾ 시험 기준은 총 진동수가 10^7 회 이르면 가진을 멈추고 인슐레이터의 상태를 평가하는 것을 요구한다. 이러한 시험 기준은 제품의 사용 환경을 고려하여 차량사가 인슐레이터 제작 업체에 요구하고 있는데, 그 기준이 실차 사용 환경을 어느 정도 반영하는가의 문제는 별도의 연구과제가 될 수 있을 것이다.^(3, 6, 7)

4. 설계변화에 따른 내구성의 평가

인슐레이터 제작 현장에서 제품의 설계시 고려하는 주요 인자로는 고무의 재질과 경도, 형상이다. 이들을 각각 변경시킨 모델을 대상으로 진동 내구성 차이를 평가하였다. Table 1에 시험의 종류별 시험 결과를 종합적으로 정리한다. 시험의 재질로는 통상적으로 사용되는 EPDM(ethylene propylene - diene rubber)과 ACM(poly-acrylate)⁽⁶⁾을 사용하였으며, 재질의 경도로 쇼어 경도치를 표시하였다. Fig. 6은 내구성 시험 종료후 손상된 A형 인슐레이터와 브라켓 시험을 보인다. Table 1에서 인슐레이터의 파손은 A형 EPDM-45 HS에서만 발생하며(○는 발생, ×는 발생하지 않음을 의미). 이때 브라켓 상에서도 손상이 발생하였다. 형상과 재질이 동일할 때, 경도가 증가되면서 인슐레이터 및 브라켓의 마모와 파손은 감소하는 결과를 보였다. 50 HS 이상의 경도를 갖는 시험에서는 파손이 발생하지 않고, 60 HS부터는 마모도 거의

보이지 않는 것으로 확인되었다. B형과 C형의 경우, A형과 동일한 재질(EPDM)과 경도(45 HS)에서도 마모와 파손은 보이지 않는다. 전술한 바와 같이, 두 모델의 형상이 A형과 달리 체결시의 하중이 일부분에 집중되지 않도록 설계된 것이 한 원인이 될 수 있을 것이다. 그러나, 인슐레이터의 제원 변화는 에어클리너 진동계의 진동 특성에 영향을 미치므로 이에 대한 검토가 함께 진행될 필요가 있다.

5. 에어클리너 진동계의 주파수응답특성

내구성 평가시험은 시험기준에 주어진 가진 주파수의 변화를 따라 수행되므로 진동계의 주파수응답 특성이 인슐레이터의 변형과 관계되어 내구성에 영향을 줄 가질 가능성이 매우 높다. 본 연구에서는 Fig5의 내구성 시험 가진 장치를 사용하여 지지부와 하우징상단 사이의 가속도 전달계수(Acceleration Transmissibility)⁽⁹⁾를 검토하였다. 식 (1)로 정의되는 전달계수를 Fig. 4(a)의 가진 조건 하에서 측정하였다.

$$\text{Acceleration transmissibility} = \left| \frac{A_2(\omega)}{A_1(\omega)} \right| \quad (1)$$

여기서 $A_1(\omega)$ 는 지지부의 가속도 스펙트럼이고 $A_2(\omega)$ 는 에어클리너 하우징 상단의 가속도 스펙트럼이다. 또한, 주파수에 따른 인슐레이터의 변형을 파악하기 위하여 하우징상(Ch.2)의 변위도 함께 측정하였다. 이 경우, 지지부의 가진 변위(Ch.1)는 Fig. 4(a)의 가진 조건으로 산정이 가능하다. Fig. 7은 A형 인슐레이터에서 경도만을 변화시킬 때의 가속도 전달계수와 변위 응답 특성이다. 경도 증가에 따라, 공진 주파수대역은 50 Hz에서 100 Hz까지 증가한다. 에어클리너 진동계의 주파수응답 특성은 인슐레이터가 스프링이 되어 상하 진동을 하는 1자유도 진동계의 거동에 가깝다. 그 결과 저주파수 영역에서의 전달계수는 1에 가깝고, 공진 이후의 고주파수 영역에서는 1보다 작은 주파수특성을 보인다. 가속도 전달계수에서 공진 피크의 레벨은 거의 일정하나, 변위의 피크치는 경도 증가에 따라 현저히 감소한다. 이 결과는 시험 기준에서 33 Hz 이후에는 가진되는 변위가 주파수의 제곱에 반비례하여 작아지는데 기인한다. 변위의 감소는 인슐레이터 변형의 감소를 의미하고, 마모 및 파손이 감소하는 결과로 이어진다. 따라서 내구성 개선을 위해서는 인슐레이터의 강성을 내구 시험기준에 맞추어 변형을 극소화 시킬 필요가 있다. Fig. 8은 동일한 경도를 갖는 ACM과 EPDM 재질의 A형 인슐레이터의 주파수응답 특성을 보인다. 공진점 위치를 볼 때, EPDM이 ACM보다 높은 강성을 갖는 것으로 보인다. 그러나, 변위는 두 모델이 비슷한 크기를 보이며, 공진점을 제외하고는 지지부에서 입력되는 변위와 거의 비슷한 수준의 변위응답을 보인다. 이러한 결과는 내구성 측면에서 유리하게 작용할 것이다.

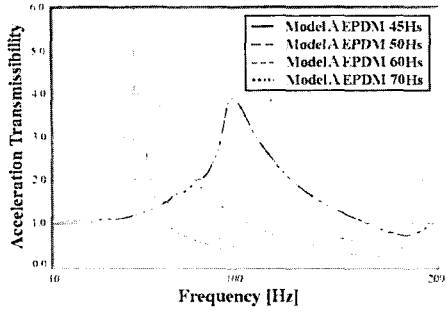
흥미로운 점으로, 대부분의 시편에서 시험경과에 따라 공진 주파수대역이 저주파수 대역으로 점차 떨어져 시험의 종료시점에서는 20 Hz 부근까지(초기 모델 EPDM 45 HS의 경우) 감소하는 것으로 확인되었다. 이러한 공진점의 변화는 대부분의 시편에서 관찰되었는데, 인슐레이터가 마모되면서 고정상태가 헐거워지는 것이 그 원인으로 확인되었다. 개선 모델인 B형 인슐레이터에서는 그 변화가 매우 작았다.

Table 1 Results of the endurance test

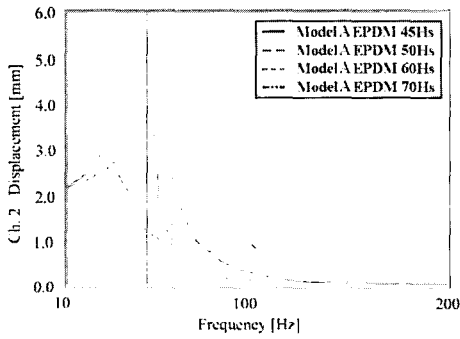
Model	Material	Hardness (HS)	Test result		
			Failure	Wear	Bracket damage
A	EPDM	45	○	○	○
	EPDM	50	×	○	×
	EPDM	60	×	×	×
	EPDM	70	×	×	×
	ACM	70	×	×	×
B	EPDM	45	×	×	×
	ACM	70	×	×	×
C	EPDM	45	×	×	×
	ACM	70	×	×	×



Fig. 6 Damaged insulators and brackets

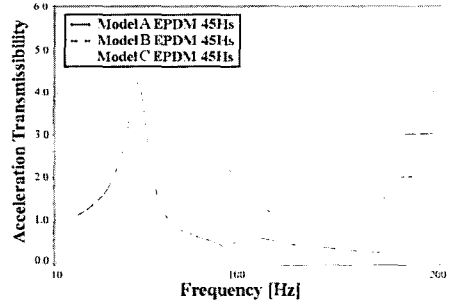


(a) Acceleration transmissibility

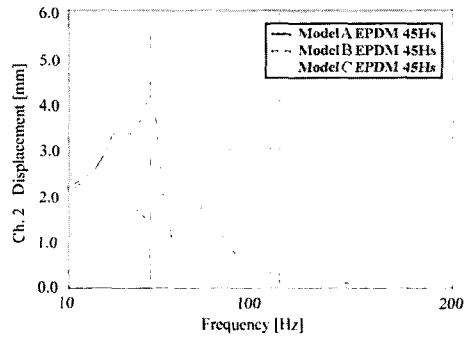


(b) Displacement of the housing

Fig. 7 Frequency response characteristics of the air cleaner system with different hardness insulators

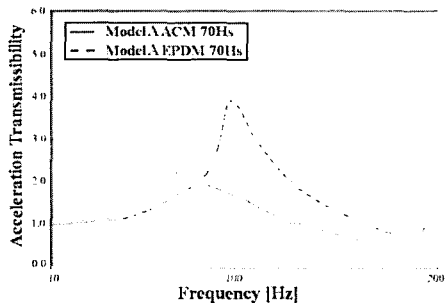


(a) Acceleration transmissibility

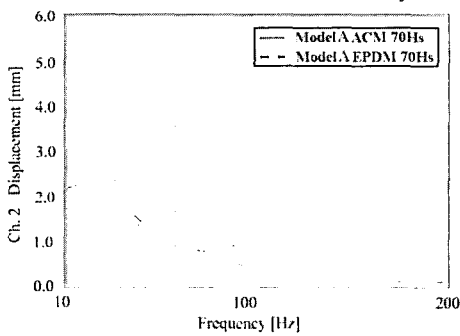


(b) Displacement of the housing

Fig. 9 Frequency response characteristics of the air cleaner system with different shape insulators

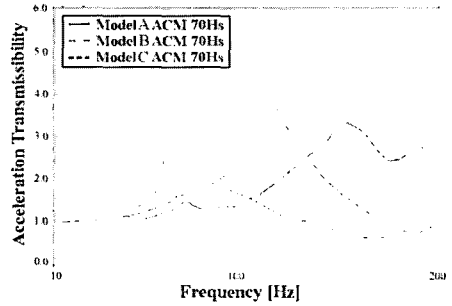


(a) Acceleration transmissibility

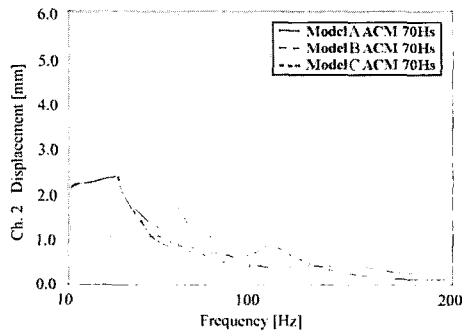


(b) Displacement of the housing

Fig. 8 Frequency response characteristics of the air cleaner system with different material insulators



(a) Acceleration transmissibility



(b) Displacement of the housing

Fig. 10 Frequency response characteristics of the air cleaner system with different shape insulators

재질이 동일한 경우, 형상에 따른 주파수응답 특성의 변화가 내구성에 영향을 줄 수 있다. Fig. 9는 현재 사용되는 EPDM 45 HS 재질로 제작된 A, B, C 세가지 형상의 인슐레이터에 대한 주파수응답 특성을 보인다. A형에 비하여 C형은 강성이 현저히 높아, 공진 주파수가 100 Hz 이상에서 나타나고, 변위의 크기도 다른 모델이 비해서 매우 낮게 나온다. B형 및 C형의 이러한 주파수응답 특성은 진동 내구성 측면에서 유리한 요인이 되고, Table 1에서와 같이 마모와 파손이 전혀 발생하지 않는 결과를 가져온다. Fig. 10은 ACM 70 HS 로 제작된 A, B, C형 인슐레이터의 주파수응답 특성을 보인다. 역시 C형이 가장 높은 공진 주파수를 보이며, 세 모델은 전반적으로 낮은 변위를 보인다. Table 1의 내구성 시험결과에서, 세가지 모델 모두에서 마모 및 파손이 발생하지 않은 것은 이러한 주파수응답 특성과의 관련성을 뒷받침한다. 이상의 시험결과로부터 에어클리너 진동계의 공진점의 위치가 마모 및 파손 상태에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 즉, 차량사의 내구성 시험조건 하에서는 33 Hz 아래에서는 일정 변위 진폭으로 가진하고 그 이상에서는 일정 가속도로 가진한다. 따라서, 인슐레이터를 포함하는 에어클리너 진동계의 공진 주파수가 너무 낮아지면, 저주파수 대역에서의 공진에 의하여 인슐레이터에 심한 변형(Fig. 7(b)의 45 HS와 50 HS곡선 참조)이 발생되고, 결국 마모나 파손으로 이어질 가능성이 높아진다.

6. 결 론

차량용 에어클리너 인슐레이터의 마모 및 파손 문제에 대한 대책 수립을 위하여 진동 내구성 시험을 수행하였다. 시험결과, 초기 인슐레이터 모델(Model A-EPDM 45 HS)에서 발생하는 마모 및 파손의 원인으로, 체결력이 인슐레이터내의 일부부에 집중되는 점과, 에어클리너 진동계의 공진 주파수가 너무 낮아, 공진점 부근에서 인슐레이터에 과도한 변형을 발생시키는 2가지 측면의 문제로 확인되었다. A형의 형상을 개선한 B형과, C형에서는 브라켓과의 접촉 면적

을 넓혀 마찰력을 분포시키는 한편, 에어클리너 진동계의 공진주파수를 높임으로써 차량사의 시험 조건하에서 내구성이 좋게 나오는 결과를 가져왔다. 결론적으로 인슐레이터의 내구성을 높이기 위해서는 체결력이 일부부에 집중되지 않도록 하는 형상 설계와, 시험기준을 고려하여 에어클리너 진동계의 주파수응답 특성을 설계하는 두 가지 측면이 함께 고려되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Racca, R. Sr., 1982, "How to Select Power Train Isolator for Good Performance and Long Service Life," SAE Paper 821095.
- (2) 김현영, 김중재, 1996, "엔진마운트 고무의 최적형상설계와 내구수명 예측," 한국자동차공학회지, 제 18 권, 제 6 호, pp. 23~32.
- (3) 사종성, 김찬목, 1999, "4륜 구동 자동차의 동력기관에서 진동저감을 위한 동 흡진기의 진동내구성에 대한 실험적 연구," 한국소음공학회는문집, 제 9 권, 제 6 호, pp. 1166~1172.
- (4) 현대자동차, 1987, 자동차 엔진용 수지재 박스형 건식 에어 클리너: HMC ES28110-6(2).
- (5) UD Co., 2002, UD-V win Vibration Controller Operating Manual.
- (6) 최창하, 1995, "궤도차량 탑재장비의 진동 내구성 평가를 위한 시험 수준 결정방법 연구," 환경영향평가, 제 4 권, 제 2 호, pp. 123~130.
- (7) 윤용하 외, 1995, "제품의 진동시험수준 결정에 관한 고찰," 한국소음진동공학회 춘계학술대회는문집, pp. 322~327.
- (8) Japanese Society for Mechanical Engineers, 1999, JSME Mechanical Engineers Handbook, Part B.
- (9) Harris C. M., 1988, Shock Vibration Handbook, 3rd edition: Ch. 30 Theory of Vibration Isolation.