

초기압축변위에 따른 형상기억합금 메쉬 와셔 절연계의 절연 성능 비교

Comparisons of Isolation Performances for the SMA Mesh Washer Isolator with the Variation of Pre-compressed Displacement

윤 세 현* · 정 호 경* · 한 재 흥†

Se-Hyun Youn, Ho-Kyeong Jeong and Jae-Hung Han

(2010년 12월 2일 접수 ; 2011년 1월 25일 심사완료)

Key Words : SMA(형상기억합금), Mesh Washer(메쉬 와셔), Isolator(절연계), Pyroshock(파이로충격), Random Vibration(랜덤 진동)

ABSTRACT

Launch vehicles and satellites experience severe vibration and pyroshock during the flight phase. These severe dynamic loading could result in the malfunction of electric devices which equipped in the launch vehicle and satellite. In this paper, mesh washer isolators are applied to attenuate these severe shock and vibration and isolation performances are enhanced by applying pseudoelastic SMA wire material. Through random vibration and ground pyroshock tests, outstanding isolation performances are studied. Especially, comparison of isolation performances due to the change of pre-compressive displacement of mesh washer itself are suggested and applicability to the adaptive vibration control are confirmed.

1. 서 론

위성과 발사체는 일반적으로 임무 수행을 위한 비행 중 이륙, 최대동압비행, 최대추력비행 등의 비행 구간에서 큰 진동(vibration) 하중을 겪게 되고 화약을 이용한 단분리, 페어링분리, 위성분리 등의 분리 이벤트에서는 큰 파이로충격(pyroshock) 하중을 경험하게 된다. 이러한 큰 진동 및 충격 하중은 발사체 또는 위성에 장착된 전자 장비(electric device)에 영향을 끼치게 되어 전자 장비의 오작동(malfunction)을 유발할 가능성이 크다⁽¹⁾. 아무리 사

소한 전자 장비의 오작동도 발사체 또는 위성의 임무 실패(catastrophic failure)로 연결될 수 있기 때문에 이러한 큰 진동 및 충격 하중이 전자 장비에 전달되는 것을 막기 위해 절연계(isolator)를 전자 장비 및 탑재 구조물 사이에 장착하는 것이 일반적이다⁽²⁾.

이 논문에서는 새로운 형태의 절연체인 형상기억합금 메쉬 와셔 절연계(shape memory alloy mesh washer isolator)를 개발하여 전자 장비에 전달되는 진동 및 충격을 저감시키는 연구를 수행하였다.

메쉬 와셔 절연계는 연속적인 와이어를 이용하여 편조(knit)된 와이어메쉬(wiremesh)를 기체작된 금형을 이용, 압착 공정을 통해서 제작된 와셔 형태의 절연계로 내부의 50~70%가 빈 공간으로 이루어지게 된다. 이러한 메쉬 와셔의 특성에 의해 압축 또

† 교신저자; 정희원, 한국과학기술원 항공우주공학전공
E-mail : jaehunghan@kaist.edu

Tel : (042)350-3723, Fax : (042)350-3710

* 한국항공우주연구원 발사체구조팀

는 인장 하중을 받으면 내부 와이어 사이에서 발생하는 마찰력 및 국부적인 와이어의 소성 변형에 의한 에너지 소산(energy dissipation)이 발생하여 절연 특성이 나타나게 된다⁽³⁾.

여기에 추가로 와이어 소재를 의탄성 형상기억합금(pseudoelastic shape memory alloy) 소재로 적용하여 절연 성능을 더욱 향상시켰다. 의탄성 효과란 외부 하중에 의해 크게 변형된 재료가 하중을 제거하면 원래의 형태로 되돌아가는 특성을 의미하며 의탄성 형상기억합금의 경우 외부 하중의 부하-제하시(loading-unloading) 하중-변위 선도가 비선형 이력 곡선(nonlinear hysteretic curve)의 특성을 보이게 되고 이러한 비선형 이력 하중 거동의 내부 면적 크기는 형상기억합금 상변화에 의한 소산된 에너지의 크기에 비례하게 된다. 따라서 의탄성 형상기억합금의 경우 일반 금속 소재에 비해 매우 뛰어난 절연 성능을 보유 할 수 있게 된다⁽⁴⁾.

적용된 메쉬 와셔 절연계는 초기압축변위(pre-compressive displacement, PCD)의 변화에 따라 절연계 자체의 강성이 바뀌게 되는데 이에 따라 절연 시스템의 고유진동수가 달라지고 절연 특성 역시 변화하게 된다. 이러한 초기압축변위에 따른 절연 특성의 변화를 추후 적응진동제어(adaptive vibration control) 분야로의 확장 적용을 확인하기 위해서 이 논문에서는 초기압축변위 치구를 적용하여 초기압축변위에 따른 절연 특성 및 동특성 변화도 추가적으로 연구하였다.

2. 본 론

2.1 형상기억합금 메쉬 와셔 절연계

메쉬 와셔 절연계의 절연 성능 비교를 위하여 세 종류의 와이어 소재를 이용하여 메쉬 와셔 절연계를 각각 제작하였다. 첫 번째로는 일반적인 스테인리스 소재인 STS310S 소재를 사용하였고 두 번째 소재로는 의탄성 효과가 지배적인 형상기억합금 SE508 소재를 선정하였으며 세 번째 소재로는 형상기억효과(shape memory effect)가 지배적인 형상기억합금 SM495 소재를 사용하였다. 각 소재의 특성은 Table 1에 비교하였고 사용된 형상기억합금 소재는 미국 NDC corp.에서 제작한 소재이다⁽⁵⁾.

위의 세 종류의 와이어 소재를 이용하여 세 종류의

Table 1 Physical characteristics of wires

Wire material	Density (g/cm ³)	Wire diameter (mm)	Young's modulus(GPa)		Failure stress (GPa)
			EA	EM	
SE508	6.5	0.20	42.4	17.9	1430
SM495		0.18	52.8	13.8	1180
STS310	7.8	0.20	199.9		520

Table 2 Physical characteristics of each mesh washer isolator

Isolator	Wire material	Density (g/cm ³)	Size(mm)	Volume fraction
SE-WI	SE508	2.5	16/8/5 (outer diameter/ inner diameter/ height)	0.38
SM-WI	SM495			
STS-WI	STS310	3.0		

메쉬 와셔 절연계를 제작하였다. 제작 방법은 우선 각각의 와이어를 이용하여 와이어메쉬를 직조한 후 이를 기설계된 금형에 삽입, 압착 공정을 통해 제작을 수행하였다⁽³⁾. 제작된 세 종류의 메쉬 와셔 절연계의 특성은 Table 2와 같고 앞으로는 각각의 절연계 명칭을 SE-WI, SM-WI, 그리고 STS-WI로 축약하여 명기하기로 한다.

메쉬 와셔 절연계는 외부의 진동 및 충격 하중이 전자 장비에 전달되지 않도록 설계가 되어야 한다. 따라서 Fig. 1과 같은 개념으로 절연계가 장착되어야 하고 이것을 기반으로 초기압축변위를 변화하기 위해 초기압축변위 치구를 Fig. 2와 같이 설계/제작하였다. 동일한 적용 개념을 유지하기 위해서 초기압축변위 치구는 준정적 하중 시험, 랜덤 진동 시험, 그리고 파이로 충격 시험에 모두 사용되었다.

초기압축변위 치구는 전자 장비를 모사한 하중부가 판재와 상부 치구 그리고 하부 치구와 하중부가 판재 사이에 각각 4기씩의 메쉬 와셔 절연계를 장착하여 총 8기의 메쉬 와셔 절연계가 외부에서 전달되는 진동 및 충격의 절연이 가능하도록 하였다. 초기압축변위의 조정은 4기의 높이 조절용 실린더를 교체하여 강제적으로 메쉬 와셔 절연계의 초기압축변위가 가해지도록 되어있고 이 연구에서는 4기의 높이 조절용 실린더를 사용하여 각각 0.0, 0.5, 1.0, 1.5 mm의 초기압축변위를 각 메쉬 와셔 절연계에 부가할 수 있도록 하였다.

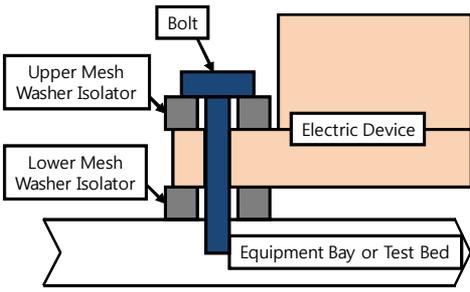


Fig. 1 Basic application concept of mesh washer isolators

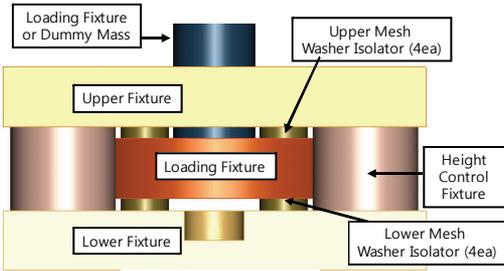


Fig. 2 Pre-compressive displacement fixture assembly

2.2 준정적 하중 시험

세 종류의 메쉬 와셔 절연계의 기본적인 절연 성능을 비교해보기 위해 MTS810 유압 시험 장비와 초기압축변위 치구를 이용하여 준정적 하중 시험을 수행하였다. 초기압축변위 치구에 적용된 메쉬 와셔 절연계에는 압축 하중만 작용하게 되고 이 때 나타나는 절연 능력을 소산 에너지(dissipated energy)와 비감쇠능(specific damping capacity, SDC, Ψ)을 계산하여 제시하였다. 여기서 소산 에너지는 이력 하중 곡선의 내부 면적을 나타내고 비감쇠능은 총 가해진 외부 에너지와 소산된 에너지의 비를 의미한다⁽⁶⁾. 따라서 동일한 외부 하중이 가해졌을 때 소산 에너지와 비감쇠능이 크면 클수록 더 뛰어난 절연 성능을 지니고 있음을 의미하게 된다⁽⁷⁾.

동일 하중 조건에서 각각의 초기압축변위에 따른 세 종류의 하중-변위 선도는 Fig. 3에 보였고 이때 계산된 내부 소산 에너지와 비감쇠능을 Table 3에 제시하였다.

초기압축변위가 커질수록 동일한 변위로 압축하기 위한 하중이 비선형적으로 늘어나는 것을 알 수 있다. 이러한 시험 결과는 진동의 관점에서 강성의

Table 3 Comparisons of isolation capacity

Performances		SE-WI	SM-WI	STS-WI
Dissipated energy (Nm)	PCD 0.0 mm	0.169	0.146	0.044
	PCD 0.5 mm	0.326	0.253	Plastically deformed range
	PCD 1.0 mm	0.382	0.111	
Specific damping capacity (SDC, Ψ)	PCD 0.0 mm	0.51	0.49	0.40
	PCD 0.5 mm	0.48	0.42	Plastically deformed range
	PCD 1.0 mm	0.46	0.30	

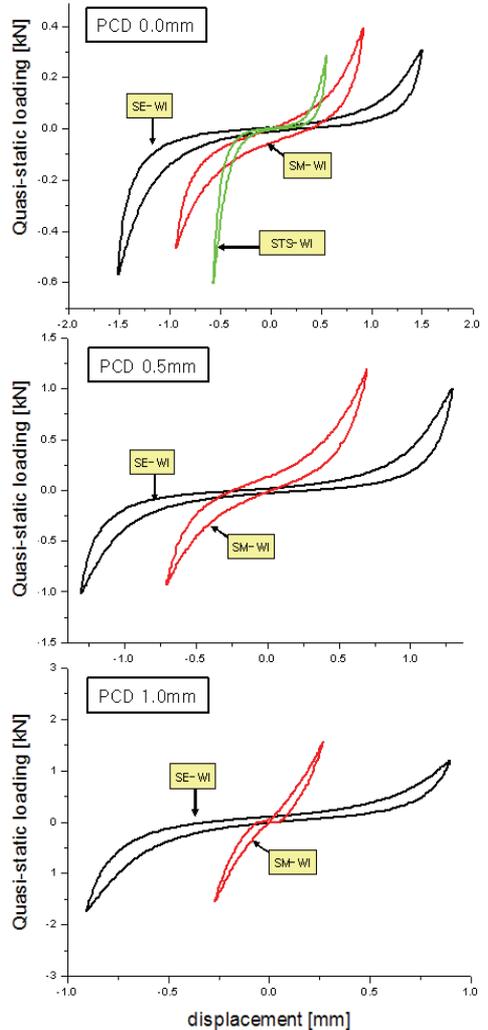


Fig. 3 Load-displacement relationship of each mesh washer isolator with PCD

증가로 나타나기 때문에 초기압축변위가 커질수록 메쉬 와셔 절연계 자체의 고유진동수가 높아지는

현상으로 연결된다. STS-WI의 경우는 0.5 mm의 초기압축변위 조건에서 작은 하중에 대해 소성 변형이 일어나고 하중 제거 후 원래 형상으로 회복이 되지 않는 현상이 명확히 나타난다.

내부 소산 에너지의 경우 각 초기압축변위 값에 대해 SE-WI, SM-WI, STS-WI 순으로 크게 계산되었고 이는 동일 초기압축변위 조건에서 SE-WI가 가장 좋은 절연 성능을 갖고 있는 것을 의미한다. 비감쇠능의 비교 결과 역시 SE-WI의 경우가 가장 뛰어난 절연 능력을 보유하고 있는 것으로 나타났다.

초기압축변위 값이 증가함에 따라 전체적으로 절연 능력은 조금씩 떨어지는 것이 보이고 SE-WI에 비해 SM-WI의 절연 능력이 떨어지는 비율이 더 큰 것이 보인다. STS-WI의 경우 0.5 mm 이상의 초기압축변위 조건에서는 소성변형이 발생하여 시험 결과는 의미가 없는 것으로 나타났다. 그러나 일반적인 금속의 비감쇠능 값이 0.1~0.2 정도로 나타나는 것에 비해 메쉬 와셔 절연계 자체의 절연 특성이 뛰어난 것은 확인 할 수 있다. 이러한 SE-WI의 뛰어난 절연 능력은 메쉬 와셔 절연계의 자체 절연 특성에 추가로 의탄성 형상기억합금의 고유한 성질인 응력에 의한 상변화 효과에 의해 나타나게 된다.

2.3 랜덤 진동 시험

초기압축변위에 따른 세 종류의 메쉬 와셔 절연계의 진동 하중에 대한 절연 성능을 확인하기 위해 랜덤 진동 시험을 수행하였다. 시험은 LDS V8 가진기와 초기압축변위 치구를 이용하여 20 Hz~2000 Hz의 주파수 영역에 총 12 g_{rms} 레벨의 진동하중이 동일하게 가해지도록 입력 하중을 구성하였다. Fig. 4에는 가속도계 부착 위치를 나타냈는데 더미 질량 4 kg 위에 부착된 가속도에서 저감된 진동 레벨이 계측되고 치구 위에서는 입력 진동 레벨이 계측된다. 이 두 계측값의 비로 전달률을 구하였다.

각각의 0.0, 0.5, 1.0, 1.5 mm의 초기압축변위는 조건에서의 시험 결과를 Table 4에 제시하였다. SE-WI와 SM-WI에 초기압축변위에 대한 절연 성능 변화를 대표적으로 고유진동수의 변화를 Fig. 5와 Fig. 6에 제시하였다.

모든 시험 결과에서 초기압축변위가 커질수록 강성의 증가가 나타나 고유진동수가 높아지고 있고 저주파 영역에서의 절연 성능이 점점 떨어지는 것을

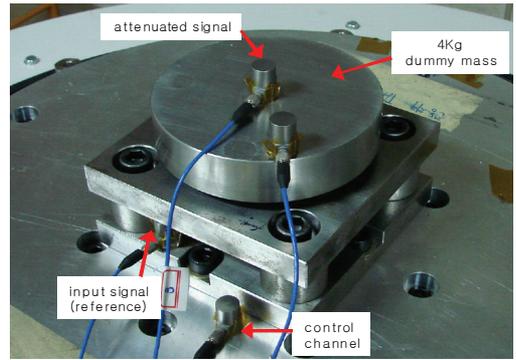


Fig. 4 Sensing location of accelerometers

확인 할 수 있다.

결과적으로 동일 초기압축변위 및 진동 환경 조건에 대해서 형상기억합금 소재로 제작된 메쉬 와셔 절연계가 STS-WI에 비해 매우 좋은 절연 성능이 보이고 있고 형상기억합금 메쉬 와셔 절연계 중에서도 SE-WI가 SM-WI보다 절연 성능이 더 좋은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 계측된 가속도 실효값(g_{rms})의 크기 비교와 시간 영역의 가속도 크기 비교를 통해 쉽게 파악이 가능하다. 특히 SE-WI의 경우 1.0 mm의 초기압축변위 조건의 진동 절연 성능이 SM-WI의 0.0 mm 조건의 절연 성능 보다 뛰어난 것으로 나타나 초기압축변위의 증가에 따른 절연 성능 저하가 크지 않음이 확인되었다. 이는 SE-WI의 의탄성 거동에 의해 절연 성능이 크게 향상되어 진동 에너지를 더 잘 소산시키기 때문이다.

초기압축변위에 따른 고유진동수의 변동은 초기압축에 따른 메쉬 와셔 절연계의 강성의 변화에 기인한 현상이라고 설명을 하였는데 이러한 현상을 응용하여 좀 더 다양한 환경에서의 진동/충격 절연 및 제어가 가능할 것이다.

예를들어 압전재료(piezoelectric material) 또는 형상기억효과를 이용한 형상기억합금 등의 스마트 재료(smart material)를 응용한 작동기(actuator)를 이용하여 의탄성 메쉬 와셔 절연계의 초기압축변위를 환경에 맞게 변화시키는 적응진동제어(adaptive vibration control) 기법을 도입한다면 외부의 변화하는 환경에 적절히 대응하여 과도한 진동 또는 충격을 제어할 수 있는 스마트 시스템(smart system)으로의 적용이 가능할 것이다.

또한 기계작된 의탄성 메쉬 와셔 절연계의 적용

시 간단한 체결 볼트의 토크(torque) 값만의 조절에 의한 초기압축변위를 변화를 통해, 새롭게 절연계 시스템을 제작하지 않고 원래의 시스템에서 원하는 고유진동수를 유지할 수 있도록 적용이 가능하다.

Table 4 Random vibration test result of each mesh washer isolator

12 grms Random vibration test		PCD			
		0.0 mm	0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm
SE-WI	Natural freq.(Hz)	55	70	130	345
	g _{rms}	6.3	6.7	8.2	16.7
	Tr	3.6	3.8	3.4	5.6
SM-WI	Natural freq.(Hz)	65	120	560	1400
	g _{rms}	8.8	9.4	22.3	72.0
	Tr	3.8	4.2	10.4	25.8
STS-WI	Natural freq.(Hz)	140	1370		
	g _{rms}	14.7	72.2	N/A	N/A
	Tr	3.8	20.3		

그리고 이러한 여러 응용 환경하에서 초기압축변위에 따른 동특성 변화의 특성을 적용할 때 SE-WI의 경우 절연 성능의 저하가 크지 않아 변화된 환경에서도 좋은 절연 능력을 보일 수 있기 때문에 적용성이 매우 다양할 것으로 기대된다.

2.4 파이로 충격 시험

초기압축변위에 따른 파이로충격에 대한 절연 성능 변화를 살펴보기 위해 Fig. 7과 같이 항공우주연구원에서 개발된 지상 충격 시험장비와 초기압축변위 치구를 이용하여 파이로충격 절연 성능 확인 시험을 수행하였다. 지상 파이로충격 시험 장비는 충격 해머 당겨서 스프링을 압축시킨 후 순간적으로 공명판에 충격을 가하여 원하는 파이로충격 하중을 구현하는 원리로 설계되었다⁽⁸⁾.

Fig. 8에는 충격 계측을 위한 충격 가속도계 부착 위치를 제시하였다. 모든 시험에서 입력 하중이 동일

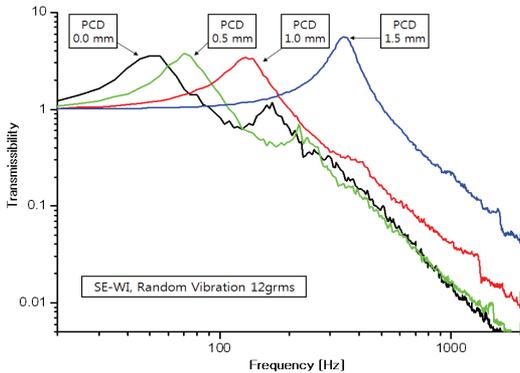


Fig. 5 Transmissibility of SE-WI with the variation of PCD

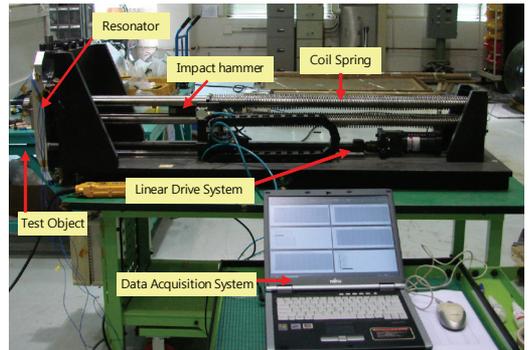


Fig. 7 Ground shock test machine

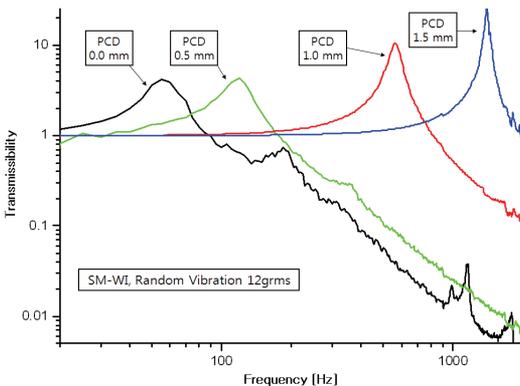


Fig. 6 Transmissibility of SM-WI with the variation of PCD

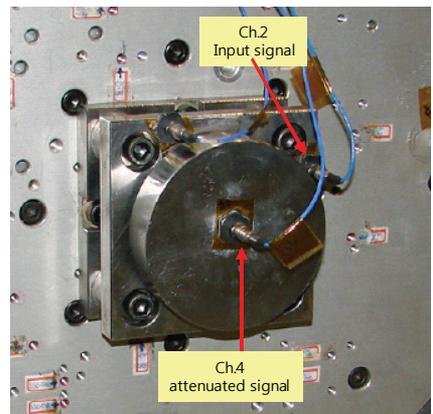


Fig. 8 Shock sensor locations

하게 구현되도록 동일한 스프링 압축변위 조건에서 시험을 수행하였고 시험 결과는 Ch 4의 절연 후의 시험 결과를 비교하였다. 초기압축변위는 0.0, 0.5, 1.0, 1.5 mm의 네 가지 경우를 적용하였고 STS-WI의 경우는 소성 변형 문제로 인해 0.5 mm 까지만 적용하였다. 시간영역에서 얻어진 자료를 기본으로 주파수 영역에서의 절연 효과를 상세히 살펴보기 위해 충격응답스펙트럼(shock response spectrum, SRS)을 구하였고 이때 주파수 간격은 1/6 옥타브 밴드(octave band)로, Q값은 10을 적용하였다.

시간 영역에서 계측된 충격 피크(peak) 값을 Table 5에 제시하였다. 모든 메쉬 와셔 절연계에서 큰 감쇠가 나타남을 확인 할 수 있다. 앞의 시험 결과와 마찬가지로 SE-WI의 피크 감쇠 성능이 가장 뛰어났고 초기압축변위가 커질수록 감쇠 성능은 떨어지지만 그래도 좋은 감쇠 성능을 보이고 있음이 확인된다.

시간 영역의 계측 결과를 바탕으로 구해진 충격 응답스펙트럼 결과를 각각의 초기압축변위에 대해 정리하여 Fig. 9에 비교/제시하였다.

형상기억합금 메쉬 와셔 절연계의 경우 전주파수 영역에서 뛰어난 절연 성능을 보이고 있고 역시 SE-WI의 절연 특성이 가장 뛰어남을 확인하였다. 특히 SE-WI의 경우는 큰 초기압축변위 조건에서도 좋은 절연 성능을 유지하고 있음을 확인하였다.

시험 결과에서 보여지는 SE-WI의 뛰어난 절연 성능은 형상기억합금의 의탄성 효과에 의한 영향에 의해 나타나는 것이고 SM-WI의 경우도 의탄성 효과가 어느 정도 나타나 영향을 주고 있으나 SE-WI에 비해서는 그 영향이 크지 않기 때문에 절연 능력이 떨어지는 것으로 나타났다. STS-WI의 경우는

Table 5 Comparison of peak acceleration value resulted from pyroshock test

Pyroshock test		PCD			
		0.0 mm	0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm
Input peak acceleration, Ch 2		2780 g			
SE-WI	Measured peak acceleration Ch. 2	28	29	46	581
SM-WI		57	66	983	1275
STS-WI		1183	1723	N/A	

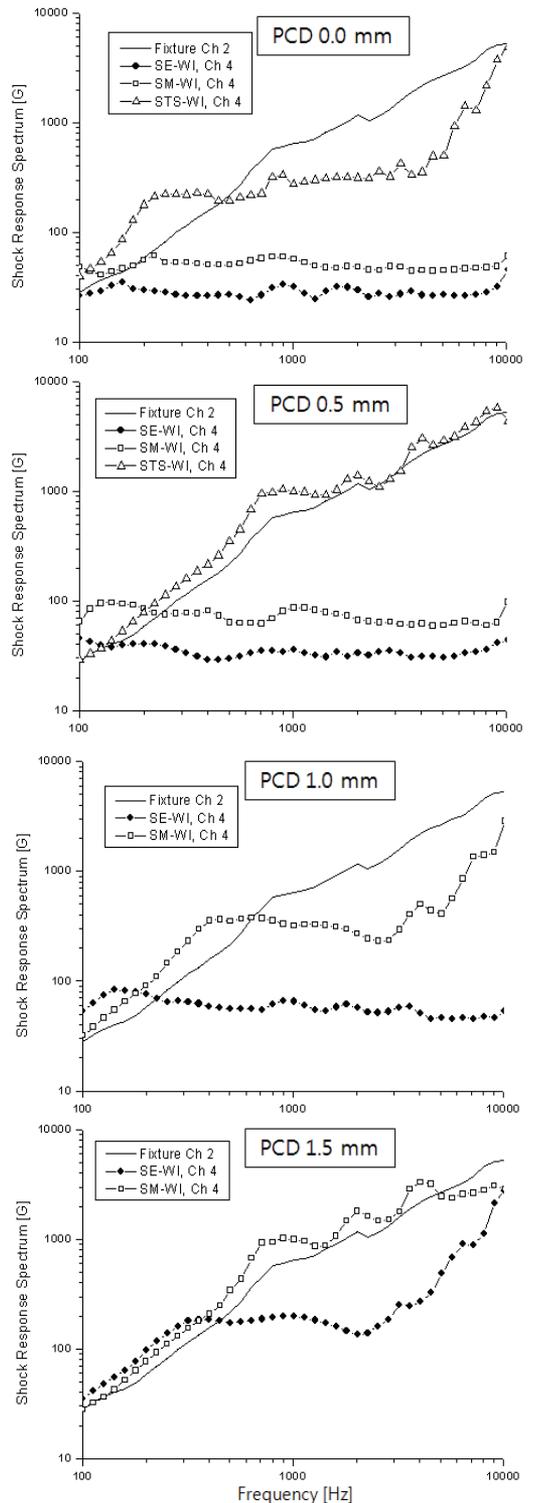


Fig. 9 Comparison of SRS resulted from pyroshock test

메쉬 와셔의 특성에 의한 절연 효과만 나타나고 형상기억합금 의탄성 효과가 없기 때문에 절연 성능이 떨어진다고 할 수 있다. 실제 적용성에서도 같은 파괴로 충격 하중에 대해 STS-WI의 경우는 큰 하중 조건에서 쉽게 소성 변형이 발생하여 적용성이 떨어지는 문제점을 확인하였다.

SE-WI의 경우 초기압축변위가 1.0 mm까지 커져도 좋은 절연 효과를 보여주고 있어 초기압축변위에 의한 절연 성능 저하가 크지 않음을 확인하였고 이러한 특성은 추후 초기압축변위의 변경에 따른 강성 변화 성질을 응용한 적응진동제어용 절연체로의 적용시 절연 성능에 문제가 없음을 보여주고 있다.

3. 결 론

위성과 발사체의 경우 중요 비행 구간에서 큰 진동 하중을 겪게 되고 화약을 이용한 여러 분리 이벤트에서는 큰 충격 하중이 유발되게 된다. 이러한 큰 진동 및 충격 하중은 발사체 또는 위성에 장착된 전자 장비의 오작동을 유발할 가능성이 크다. 이 논문에서는 전자 장비에 전달되는 진동 및 충격을 저감시키기 위해 새로운 형태의 절연체인 형상기억합금 메쉬 와셔 절연체를 개발하였다.

형상기억합금 메쉬 와셔 절연체는 메쉬 형태의 자체 절연 특성에 응력에 의한 상변화 효과를 이용한 의탄성 형상기억합금 와이어를 적용하여 절연 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 특히 메쉬 와셔 절연체는 초기압축변위에 따라 동특성의 변화가 발생하게 되는데 이러한 특성을 이용한 적응진동제어 분야로의 확장성에 대한 연구도 추가로 수행하였다.

준정적 하중 시험을 수행, 내부 소산 에너지와 비감쇠능을 측정/계산하여 의탄성 형상기억합금 메쉬 와셔 절연체의 뛰어난 절연 능력을 확인하였다. 랜덤 진동 시험 및 지상 파이로 충격 시험을 통해서 의탄성 형상기억합금 메쉬 와셔 절연체의 진동 및 파이로 충격에 대한 뛰어난 절연 성능을 검증하였다. 초기압축변위를 변화시키면서 시험을 수행한 결과 큰 초기압축변위에서도 뛰어난 절연 성능을 유지하여 의탄성 메쉬 와셔 절연체가 적응진동제어 분야의 적용 가능성이 매우 뛰어나함을 확인하였다.

후 기

이 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab)으로부터 지원받아 수행되었습니다(과제번호 2009-0091934).

참 고 문 헌

- (1) Moening, C. J., 1985, Pyrotechnic Shock Flight Failures, Institute of Environmental Sciences Pyrotechnic Shock Tutorial Program, 31st Annual Technical Meeting, Institution of Environmental Science.
- (2) Mercer, C. A. and Rees, P. L., 1971, An Optimum Shock Isolator, Journal of Sound and Vibration, Vol. 18, No. 4, pp. 511~520.
- (3) Youn, S.-H., Jang, Y.-S. and Han, J.-H., 2010, Compressed Mesh Washer Isolators Using the Pseudoelasticity of SMA for Pyroshock Attenuation, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 21, pp. 407~421.
- (4) Duerig, T. W., Melton, K. N., Stockel, D. and Wayman, C. M., 1990, Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, Butterworth Heinemann, London.
- (5) <http://www.nitinol.com/>
- (6) Predki, W. and Kloenne, M., 2002, Damping of Superelastic NiTi-alloys under Torsional Loading, Shape Memory and Superelastic Technologies and Shape Memory Materials, pp. 115~119.
- (7) Yiu, Y. C. and Regelbrugge, M. E. 1995. Shape-memory Alloy Isolators for Vibration Suppression in Space Applications, Structures, Structural Dynamics and Materials, AIAA-95-1120-CP, pp. 3390~3398.
- (8) Kim, H.-B., Oh, J.-H., Moon, S.-M., Woo, S.-H. and Lee, S.-S., 2000, Development of Shock Testing M/C to Simulate Pyro-technic Device Explosion of Space Vehicle, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 581~586.