

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 46(7), 575-582(2018)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2018.46.7.575

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

적층형 블레이드가 적용된 냉각기용 진동절연기의 발사환경에서의 구조건전성 검증

전영현*, 고대호**, 조문신***, 오현웅****

Validation of Structural Safety on Multi-layered Blade-type Vibration Isolator for Cryocooler under Launch Vibration Environment

Young-Hyeon Jeon*, Dai-Ho Ko**, Mun-Shin Jo*** and Hyun-Ung Oh****

Department of Aerospace Engineering, Chosun University*, ****

Hanwha Systems**

Korea Aerospace Research Institute***

ABSTRACT

The spaceborne cooler is applied to cool down of the focal plane of the infrared detector of the observation satellite. However, this cooler induces unnecessary micro-jitter which can degrade the image quality of the high-resolution observation satellite. In this study, we proposed a multi-layered blade type vibration isolator to attenuate micro-vibration generated from a spaceborne cooler, while assuring structural safety of the cooler under severe launch loads without an additional launch-lock device. The blade of the isolator is formed with multi-layers in order to obtain durability against fatigue failure and an adhesive is applied between each layers for granting high damping capability under launch vibration environment. In this study, the basic characteristics of the isolator were measured using the free-vibration test. The effectiveness of the isolator design was demonstrated by launch vibration test at qualification level.

초 록

우주용 냉각기는 관측위성의 적외선 검출기 초점면부의 극저온 냉각을 위해 적용되며, 궤도운용 시 단일 주파수 형태의 미소진동을 발생한다. 상기 미소진동은 관측위성의 영상 품질을 저하시키는 주된 요인이며, 이에 따라 미소진동 절연이 요구된다. 본 연구에서는 상기 우주용 냉각기의 미소진동 절연을 목적으로 별도의 발사구속장치 적용 없이도 발사진동 및 궤도 미소진동환경에 동시적용 가능한 적층형 블레이드 진동절연기를 제안하였다. 본 진동절연기에 적용된 블레이드는 얇은 금속 박판을 다층으로 적층하고 각 층 상호면에 점탄성 특성 부여가 가능한 테이프를 적용하여 발사환경에서의 피로 내구성 향상 및 고댐핑 특성 부여를 목적하였다. 제안된 진동절연기의 기본특성 확인을 위해 자유감쇠 시험을 실시하였으며, 인증수준에서의 발사진동 시험을 통해 설계유효성을 입증하였다.

† Received : April 30, 2018 Revised : June 18, 2018 Accepted : June 21, 2018

**** Corresponding author, E-mail : ohu129@chosun.ac.kr

Key Words : Spaceborne Cooler(우주용 냉각기), Vibration Isolator(진동 절연기), Launch Vibration(발사진동), Structural Safety(구조건전성), Multi-layered Blade(적층형 블레이드), Viscoelasticity(점탄성)

1. 서 론

우주용 냉각기는 적외선 검출기의 극저온 냉각을 위해 위성에 탑재되며, 궤도운영동안 냉각가스의 압축 및 순환을 위한 피스톤 구동을 수행한다. 상기의 피스톤 구동은 단일 주파수 형태의 미소진동을 유발하며, 이로 인해 광학 탑재체의 시선 각이 교란되어 관측위성의 영상품질을 저하시키는 요인으로 작용한다[1]. 따라서 관측위성의 고해상도 영상품질 요구조건 충족을 위해서는 냉각기로부터 수반되는 미소진동 절연이 요구된다. 일반적으로 궤도상 미소진동 절연을 위해 시스템 단순화에 용이한 수동형 진동절연 방식이 적용되고 있으며, 냉각기를 저장성 탄성 지지함으로써 냉각기 주요 구동 주파수와 진동절연 시스템간의 주파수 분리에 기인하여 미소진동 절연성을 확보한다. 그러나 상기 진동절연 방식은 궤도 미소진동 환경에만 주목한 이유로 진동 레벨이 극심한 발사진동 환경에서는 냉각기 및 진동절연기 자체의 구조건전성이 확보되지 못하는 문제점이 존재한다. 이를 위해 별도의 발사구속장치를 적용하여 발사환경에서 구속하고 목표궤도 진입이후 구속 해제함으로써 전술한 구조건전성의 문제점 해결에는 용이하나, 위성 시스템 측면에서 시스템 복잡화로 인한 신뢰도 저하, 무게증가, 개발비용 증액 등의 단점이 존재한다. 또한 발사구속장치 구속해제 실패시 궤도상 미소진동 절연성 확보가 불가능하여 목적하는 고해상도 영상품질 획득 실패에 직결되는 문제점이 존재한다[2-4]. 따라서 전술한 문제점 극복을 위해 별도의 발사구속장치 없이도 극심한 발사진동 환경에서 구조건전성을 확보함과 동시에, 궤도상 미소진동 절연이 가능한 수동형 진동절연기 개발이 요구된다.

한편, Oh et al.[5]은 상이한 발사진동 및 궤도 미소진동 환경에 동시적용 가능한 수동형 진동절연기를 제안하였다. 상기 진동절연기는 코일 스프링의 적용을 통해 냉각기를 저장성 탄성 지지하여 미소진동 절연성을 확보하며, 진동절연기에 변위구속블록을 적용하여 발사환경에서의 구조건전성을 확보하였다. 그러나 발사환경에서 미소진동 절연을 목적으로 적용된 저장성 코일스프링의 감쇠특성 부재로 인증수준의 정현파 진동시험에서 충분한 발사진동 감쇠성을 확보하지 못

한 단점이 존재한다. 따라서 Oh et al.[6]는 전술한 진동절연기[5]에 초탄성 형상기억합금(Shape Memory Alloy, SMA) 메쉬와서를 적용하여 발사환경에서의 감쇠특성을 확보하고자 하였다. 전술한 초탄성 SMA는 작동환경 온도가 초기에 설정된 상변화 온도(Austenite Finish Temperature, A_f) 이상의 온도조건에서, 외부 하중에 의해 형상변형이 발생하여도 하중을 제할 시 잔류응력 없이 본래의 형상으로 회복하는 특성을 가진다[5]. 하지만, 상기 진동절연기는 냉각기 및 진동절연기 간의 조립정렬에 따라 미소진동 저감성능 변화에 민감하여 일정한 저감성능 보장이 불가능한 한계가 있다. 또한 지상조건에서 냉각기 자중에 의해 SMA 메쉬와서가 압축될 시 미소진동이 진동절연기 구조체를 통해 바닥면으로 전달되는 문제점이 존재한다. 이에 따라 지상 미소진동측정 시험을 위해 별도의 중력보상 장치의 적용을 통해 상기 문제점 해결이 가능하나, 위성체 수준에서의 시험의 경우 공간상 제약으로 중력보상장치의 접근이 용이하지 못한 문제점이 존재한다.

이를 위해, Kwon et al.[7]는 전술한 위치 민감도 문제점 극복이 가능한 초탄성 SMA 블레이드 수동형 진동절연기를 제안하였다. 블레이드 형상의 진동절연기 적용을 통해 지상조건에서도 중력의 영향성이 최소화 되어 위치 민감도에 대해 둔감하여 일정한 미소진동절연 성능이 보장되며, 위치민감도 측정시험을 통해 설계유효성을 실험적으로 입증하였다. 그러나 인증수준에서의 정현파 진동시험에서 블레이드 단에 피로파괴가 발생하여 구조건전성을 확보하지 못하였다.

본 연구에서는 기존 Kwon et al.[7]가 제안한 초탄성 SMA 블레이드 진동절연기의 구조건전성 문제를 극복하기 위해 일부의 설계가 변경된 적층형 블레이드 진동절연기를 제안하였다. 기존 솔리드 타입의 블레이드를 얇은 박판의 블레이드를 다층으로 적층하였으며, 각 블레이드 층 상호면에 점탄성체를 추가 적용을 통해 피로파괴의 내구도 및 진동에너지 산일화 향상을 목적하였다. 본 연구에서 제안한 진동절연기의 기본특성 확인을 위해 자유감쇠시험을 실시하였으며, 각 층 상호면의 다양한 점탄성 조건에 따른 특성을 비교분석하였다. 또한 진동절연기의 설계유효성 검증을 위해 인증수준에서의 발사진동환경 시험을 수행하였다.

II. 본 론

2.1 기존 초탄성 SMA 블레이드 진동절연기[7]

Figure 1은 기존 초탄성 SMA 블레이드 진동절연기와 결합된 냉각기 조립체 형상을 나타낸다. 냉각기 조립체는 크게 2개의 진동절연기로 지지되는 극저온 냉각기, 냉각기의 열 수송을 위한 히트파이프, 극저온 헬륨가스의 이동통로인 트랜스퍼라인으로 구성된다.

기존 선행연구에서 제안된 초탄성 SMA 블레이드 진동절연기는 Fig. 2와 같이 진동절연기의 주요 구조물인 지지브라켓을 중심으로 SMA 블레이드가 결합되며 이와 동시에 SMA 블레이드는 인터페이스 블록과의 결합으로 냉각기를 저장성 탄성 지지한다. 또한 상기 블레이드는 냉각기의 주요 구동축이 냉각기의 길이방향(y축)임을 고려하여 y축에 대해 유연한 구조로 배치되었다. 발사환경에서 트랜스퍼라인의 구조건전성 확보를 위해 트랜스퍼라인에 요구되는 허용변위가 $\pm 3\text{mm}$ 임을 고려하여 변위구속블록과 프로텍터의 조합을 통해 냉각기의 변위가 $\pm 3\text{mm}$ 내로 유지되도록 하였다. 추가적으로 구조체 내부 브라켓 및 프로텍터는 변위구속에 의한 발사환경에서의 범핑 충격을 저감하기 위해 금속에 비해 진동감쇠 특성이 우수한 델린 소재를 적용하였으며, 이와 더불어 지지브라켓 결면 및 프로텍터 블록에 고무소재의 커버를 적용하였다.

Kwon et al.[7]은 SMA의 초탄성 효과에 주목하여 고댐핑, 고탄성 특성으로 발사환경에서 냉각기 조립체 및 진동절연기 자체의 구조건전성을 보장하고자 하였으며, 냉각기를 저장성 탄성 지지하여 냉각기 주요 구동주파수와 냉각기 조립체 고유진동수간의 주파수분리에 기인하여 미소진동 저감 성능을 확보하였다. 전술한 바와 같이 냉각기 조

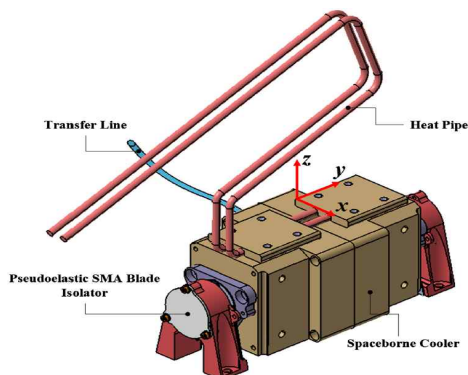


Fig. 1. Cooler Assembly with the Pseudoelastic SMA Blade Isolator[7]

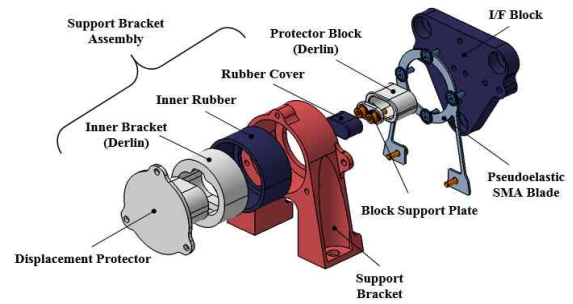


Fig. 2. Exploded View of the Pseudoelastic SMA Blade Isolator[7]

립체의 공칭위치(Nominal Position)에 대한 위치민감도는 미소진동 절연성과 직결되는 중요한 요소이다. 냉각기와 결합된 히트파이프가 발사하중에 의한 정렬 틀어짐, 궤도 열환경에 의한 열변형 등으로 냉각기 조립체가 공칭위치로부터 허용범위 이상으로 이격될 시 진동절연 성능의 저하가 발생한다. 따라서 블레이드 형상 적용을 통해 냉각기 구동방향(y축)에 대해서만 유연하고 이에 비해 상대적으로 x, z축에는 고강성 설계가 수행되어 전술한 기존 선행연구[6]의 위치민감도 문제를 극복하고자 하였다. 아울러, 상기에 대한 설계유효성 검증을 위해 공칭위치 이격에 따른 미소진동측정 시험을 수행하였으며 위치민감도에 대해 둔감하여 일정한 진동절연 성능이 보장됨을 실험적으로 입증하였다. 추가적으로 블레이드가 냉각기의 자중을 충분히 지지함에 따라 중력의 영향성 최소화가 가능하여 지상조건에서의 미소진동측정 시험 시 별도의 중력보상장치가 불필요하게 되어 위성 시스템 수준에서의 시험이 용이한 설계가 수행되었다.

그러나 냉각기의 구조건전성 검증을 위한 인증 수준에서의 발사진동시험에서 냉각기 자중에 의해 블레이드 단에 초기 응력이 부하됨과 동시에 발사 진동에 의해 블레이드의 굽힘 거동이 반복됨에 따라 피로가 누적되어 Fig. 3과 같이 블레이드 단에 정현파 진동 시험도중 국부적 피로파괴가 발생하여 구조건전성을 확보하지 못하였다.

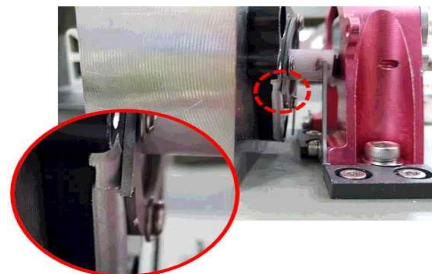


Fig. 3. Fatigue Fracture of the Blade after Sine Vibration Test

2.2 적층형 블레이드 진동절연기 개요

본 연구에서는 전술한 기존 블레이드 진동절연기의 위치민감도 및 지상 시스템 수준 미소진동 측정시험에서의 장점을 겸비함과 동시에, 발사환경에서의 구조건전성 문제를 극복하기 위해 적층형 블레이드 진동절연기를 제안하였다. 이를 위해 전술한 선행연구[7]에서 냉각기의 저장성 탄성 지지를 목적으로 적용된 솔리드 타입의 초탄성 SMA 블레이드를 얇은 금속 박판이 다층으로 적층된 적층형 블레이드로 대체 적용하였다. 따라서 얇은 블레이드는 적층형 구조에 기인한 효과에 설계 주안을 두기위하여 초탄성 SMA가 아닌 일반적인 금속재료를 사용하였으며, Fig. 4와 같이 스테인리스 계열인 SUS 304 재질로 0.3 mm의 두께를 가진다. 또한 냉각기의 자중을 지지함과 동시에 주파수분리를 위한 목표 고유진동수 구현이 가능하고 냉각기로부터 전달되는 하중 분산을 위해 다층으로 적층된다. 추가적으로 각 블레이드 층 상호 면에 점탄성 역할을 수행하는 폴리이미드(Polyimide) 계열의 단면 또는 아크릴(Acrylic) 계열의 양면테이프를 적용하였으며, 단면 테이프는 DUPONT™사의 Kapton, 양면 테이프의 경우 고진공환경에서 탈기체 특성(Out-gassing)이 적은 3M™사의 3M966 모델을 선정하였다. 각 테이프의 물성치 정보는 Table 1에 나타내었다.

본 연구에서는 각 층 상호 면에 적용된 테이프에 따라 적층형 블레이드를 Case 1, 2, 3로 구분하였다. Case 1은 점탄성이 부여되지 않아 금속간의 마찰만 작용하는 조건, Case 2는 단면 Kapton 테이프가 적용되어 금속과 테이프 간의 마찰 및 테이프의 일부 점탄성이 작용하는 조건, Case 3은 양면 3M 테이프가 적용되어 각 블레이드가 상호 접착되어 큰 점탄성이 작용하는 조건으로 각 블레이드 층 상호면간의 접촉조건에 따른 특성을 비교분석 하였다.

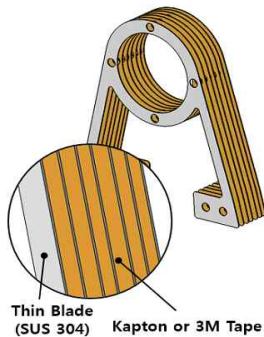


Fig. 4. Multi-layered Blade applied with tapes Configuration

Table 1. Properties of the Tape applied to the Blade

Blade	Kapton Tape[8]	3M966 Tape[9]
Type	Single-sided Tape	Doble-sided Tape
Adhesive Material	Silicone	Acrylic
Thickness (mm)	0.04	0.02
Density (g/cc)	1.42	1.012
Adhesion Strength to Steel (oz/in)	25	53
Use Temperature Range (°C)	-75 ~ 260	-40 ~ 232
Thermal Conductivity (W/mK)	0.46	0.178
CTE (ppm/°C)	20	19.9

CTE: Coefficient of Thermal Expansion

2.3 유한요소해석

본 연구에서 제안하는 진동절연기의 미소진동 절연방식은 수동형 방식으로써 주파수 분리에 기인하여 미소진동저감 성능을 확보한다. 따라서 본 진동절연기와 결합된 냉각기 조립체의 고유진동수가 냉각기의 주요 구동 주파수인 40Hz와 충분히 이격되기 위해 적절한 블레이드 적층 수가 선정되어야한다. 이와 동시에 냉각기 자중을 충분히 지지해야 한다. 따라서 본 절에서는 상용 구조해석 툴을 이용해 유한요소해석모델을 구축하고 블레이드 적층에 따른 고유진동수를 도출하여 적절한 적층 수를 선정하였다. 유한요소해석 모델은 각 층 상호간에 적용된 점탄성체는 별도로 반영되지 않았으며, 적층 구조에만 주목하였다.

Figure 5는 블레이드 적층에 따른 고유진동수 및 냉각기 자중에 의한 정적 처짐 변화곡선을

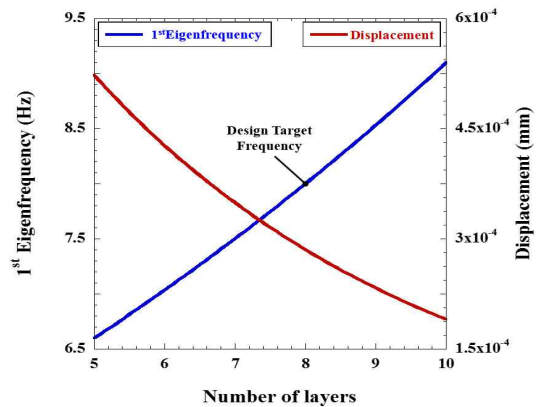


Fig. 5. 1st Eigenfrequency of the Cooler Assembly according to Number of Layers

나타낸다. 주파수분리를 위한 목표 고유진동수인 8Hz를 부합하기 위해서는 8층 이내로 적층되어야 한다. 따라서 본 논문에서 제안하는 적층형 블레이드는 7장으로 선정하여 냉각기 조립체의 고유진동수를 7.5Hz로 설정함으로써 구동 주파수 40Hz와의 주파수 분리를 수행하였다. 또한 7장 적층 시 냉각기 자중에 의한 z방향 처짐량은 변위 0.0003mm로 충분한 지지가 될 것으로 판단된다.

2.4 자유감쇠시험

본 적층형 블레이드 진동절연기의 기본특성을 분석하기 위해 Fig. 6과 같이 구성하여 냉각기 주요 구동방향으로 제한된 초기변위 $\pm 3\text{mm}$ 조건에서 블레이드 각 Case 별 자유감쇠진동시험을 수행하였다. 진동의 주기 및 대소 감쇠율을 이용하여 고유진동수와 감쇠비를 산출하였으며, 각 Case 1, 2, 3에 따른 특성을 비교분석하였다.

Figure 7은 각 Case 별 자유감쇠시험 결과로 시간에 따른 가속도 응답을 나타낸다. 먼저 Case 1의 시험결과를 살펴보면, 주기를 통해 도출된 고유진동수가 7.15Hz로 냉각기의 미소진동 절연 성능을 확보하기 위해 설정한 목표 고유진동수인 8Hz 이내에 부합하고 있으며, 본 논문 2.3절의 해석결과인 7.5Hz와도 유사함을 확인할 수 있다. 그러나 감쇠비의 경우 0.0084로 기존 초탄성 SMA 블레이드의 감쇠비인 0.028보다 약 3배 낮은 수치이다. 상기 시험결과를 고찰하면 Case 1의 경우 금속 간의 마찰 및 슬립작용에 기인한 진동에너지 산일화를 목적하였으나, 블레이드의 마찰면적이 협소하여 지배적인 작용을 못하고 있음을 유추할 수 있다.

Case 2에 대한 시험 결과로 고유진동수 및 감쇠비가 Case 1과 유사한 7.3Hz, 0.0082로 각 블레이드 층 상호면의 접촉조건이 다름에도 불구하고 유사한 특성을 가진다. 이는 점탄성 부여를 위해 적용된 단면 Kapton 테이프가 아무런 감쇠 역할을 하지 못하고 있음을 의미한다.

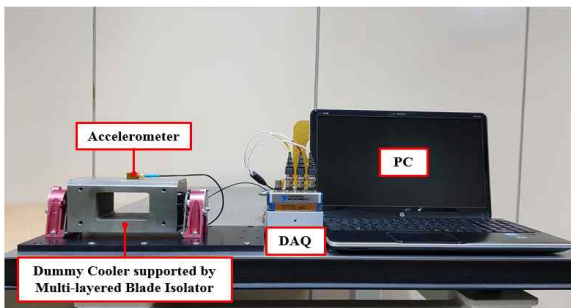


Fig. 6. Free-vibration Test Set-up

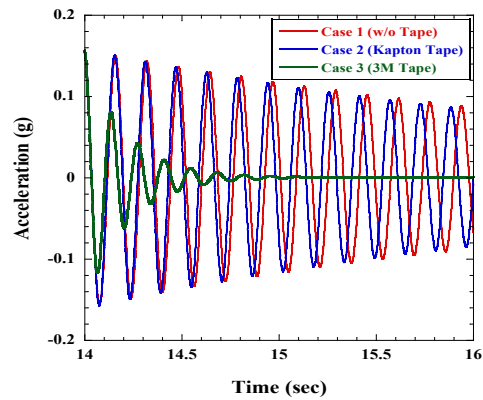


Fig. 7. Free-vibration Test Results along Y-axis

반면에, 양면 3M 테이프가 적용된 Case 3의 고유진동수는 약 7.8Hz로 양면테이프 적용에 따라 각 블레이드가 상호접착 되어 Case 1, 2보다 고유진동수가 비교적 높으나, 여전히 목표 고유진동수가 8Hz 이내에 부합하고 있다. 감쇠비의 경우 대변위에서는 0.1048, 미소변위에서는 0.05의 감쇠비를 갖는다. 양면테이프에 의해 블레이드 상호 면이 접착됨에 따라 점탄성조건이 단면 Kapton 테이프에 비해 더 지배적으로 작용함에 따라 고감쇠 특성을 보유한 이유이다. 기존 초탄성 SMA 블레이드 및 각 Case 별 블레이드 기본 특성시험 결과를 Table 2에 정리하였다.

추가적으로 자유감쇠시험 결과를 토대로 Fig. 8과 같이 전달선도를 도출하여 케도상 미소진동 절연성능을 예측하였다. 상기의 결과를 보아 냉각기로부터 발생하는 외란대비 약 16.6배의 미소진동절연 효과가 있을 것으로 판단된다.

Table 2. Free-Vibration Test Results

Blade	Frequency (Hz)	Damping Ratio
SMA[7]	9.2	0.028
Case 1	7.15	0.0064
Case 2	7.3	0.0062
Case 3	7.8	0.05

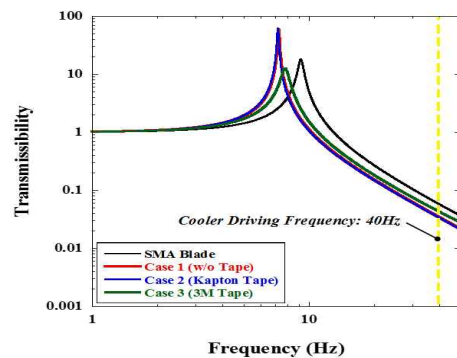


Fig. 8. Transmissibility for the Various Blade Types

2.5 발사진동 시험

2.5.1 발사진동 시험 개요

본 연구에서 제안한 적층형 블레이드 진동절연기의 설계유효성 검증을 위해 Fig. 9와 같이 시험을 구성하여 인증시험 규격에 준하여 정현파 및 랜덤진동 시험을 수행하였으며, Tables 3, 4에 시험 요구규격을 나타내었다. 본 절에서의 발사진동 시험결과는 냉각기의 주요 구동방향이 y축임을 고려하여, 대표적인 예로 y축 가진에 대한 결과를 기술하였다. 또한 Case 1, 2의 경우 Figs. 10, 11과 같이 x축 랜덤시험도중 누적되는 진동피로로 인해 소성이 발생하였기 때문에 각 블레이드 층 상호 면에 양면 3M 테이프가 적용된 Case 3의 결과에 대해서만 기술하였으며, 각 축별 진동 가진에 따른 동일 축 응답결과판을 제시하였다.

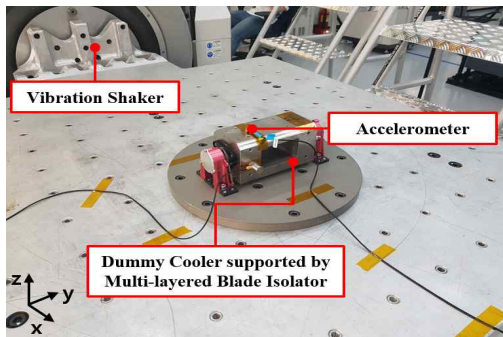


Fig. 9. Test Set-up for Launch Vibration Test

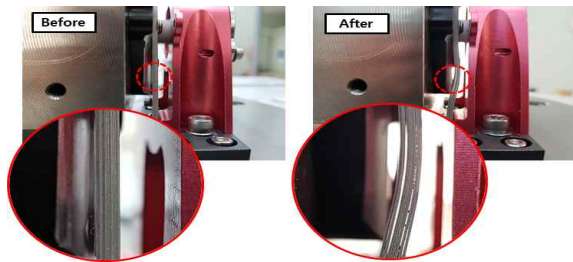


Fig. 10. Plastic Deformation of Case 1 after Random Vibration Test along X-axis

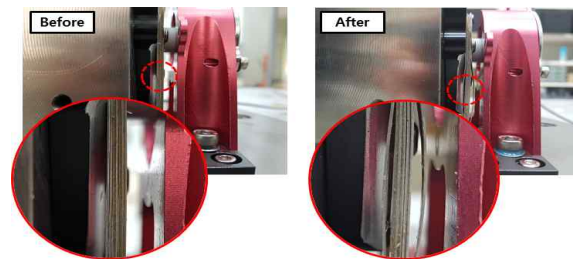


Fig. 11. Plastic Deformation of Case 2 after Random Vibration Test along X-axis

Table 3. Sine Vibration Specification

X, Y-axis		Z-axis	
Freq. (Hz)	Acceleration(g)	Freq. (Hz)	Acceleration(g)
5~12	±8mm	5~12	±9.2mm
12~30	6.5	12~30	9.0
30~100	3.0	30~100	3.0

Table 4. Random Vibration Specification

Freq. (Hz)	PSD (g ² /Hz)	Grms	Duration (min)
20	0.057	15.4	2
70	0.200		
700	0.200		
2000	0.035		

2.5.2 발사진동 시험 결과

Figure 12는 Case 3의 정현파 진동시험 결과를 나타낸다. 인증수준에 부합하는 정현파 진동인가 시 제안된 진동절연기로 지지된 냉각기로부터 획득한 최대 가속도 응답은 44.2g로 요구되는 설계하중 50g보다 낮은 결과이다. 상기 결과는 진동절연기의 변위구속블록 및 프로텍터 간의 범핑현상에 기인한 결과이며 정현파 진동에 대한 요구조건을 만족함을 확인할 수 있다.

Figure 13은 Case 3의 랜덤진동시험 결과를 나타낸다. 인증시험규격인 15.4grms의 랜덤진동을 인가하였을 때의 가속도 응답은 1.43grms로 본 연구에서 제안한 Case 3 블레이드를 적용함에 따라 약 10배 이상의 발사진동 저감 효과가 있음을 입증하였다. 또한 상기 랜덤진동시험 결과는 Fig. 12의 정현파 시험 결과에 비해 발사진동 저감 성능이 효과적임을 알 수 있다. 이는 진동절연기와 결합된 냉각기 조립체의 고유진동수가 약 8Hz로, 이를 기점으로 주파수 분리에 기인한 결과이며, 이를 비롯해 정현파 진동보다 진동 레벨이 낮기 때문에 범핑에 의한 가진 요인이 줄어들기 때문이다.

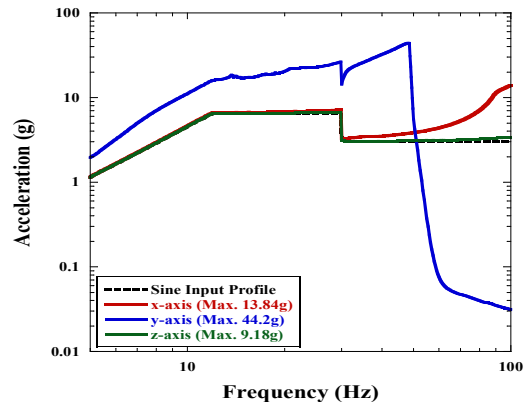


Fig. 12. Sine Vibration Test Results of Case 3 along Y-axis

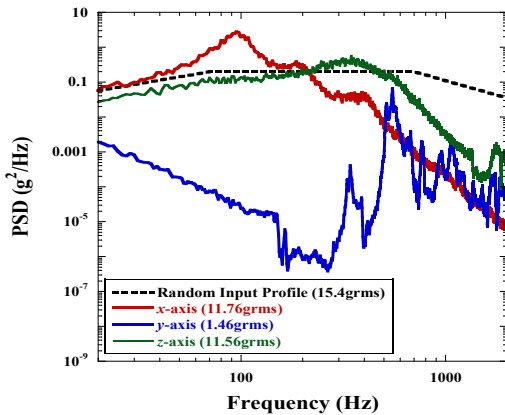


Fig. 13. Random Vibration Test Results of Case 3

정현파 및 랜덤진동을 포함한 각 모든 축에 대한 진동시험에 종료 후에 구조건전성이 확보됨을 확인하기 위해 시험 전/후의 동특성 비교 및 블레이드 육안검사를 수행하였다. Fig. 14는 시험 전/후 y축의 동특성 비교 그래프를 나타낸다. 시험 전 냉각기 조립체의 1차 고유진동수는 7.95Hz, 시험 후의 고유진동수는 7.8Hz로 요구되는 고유진동수 변화 5%[10] 이내를 만족한 결과이다. 또한 진폭의 경우에도 시험 전/후의 가속도 응답 변화비가 0.9로 요구되는 3dB[10] 미만임을 확인할 수 있다. 아울러, 블레이드 육안검사를 실시하여 블레이드의 소성변형 및 블레이드 상호간에 테이프의 접착상태를 확인하였다. Case 1 및 2와는 달리 Fig. 15와 같이 어떠한 피로파괴 및 소성변형도 발생하지 않았으며, 초기의 형상을 그대로 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 추가적으로 블레이드의 층간 박리현상을 상세히 관찰하기 위해, Fig. 16과 같이 진동피로 및 하중이 가장 집중되는 부분을 절삭하여 SEM(Scanning Electron Microscope) 촬영을 수행하였다. 촬영 결과, Fig. 17과

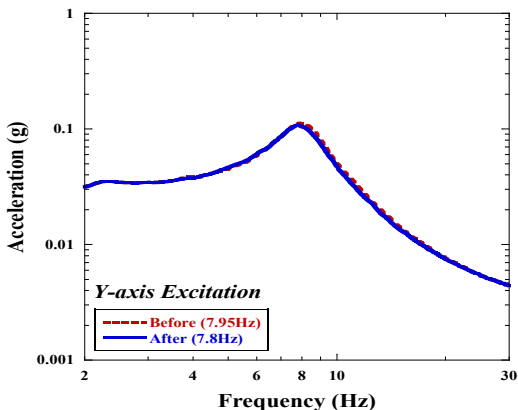


Fig. 14. LLSS Results along Y-axis after Launch Vibration Test

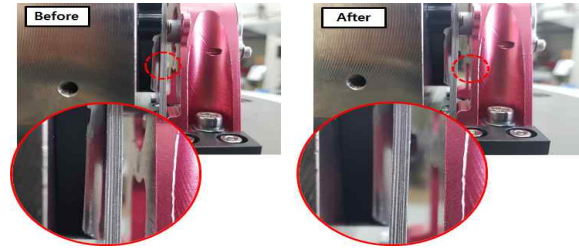


Fig. 15. Visual Inspection Check



Fig. 16. Sectioning Position for SEM Microscopy

같이 발사진동 시험 이후에도 블레이드 각 층 표면이 박리되어 떨어지지 않고 상호 접촉되어 있으며, 금속 박판의 경우에도 소성변형 없음을 확인할 수 있다.

궁극적으로, 본 시험결과로부터 양면 3M 테이프가 적용된 진동절연기가 발사진동 환경에서의 구조건전성이 확보됨을 입증할 수 있다.

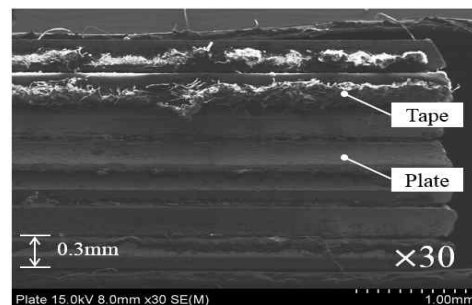
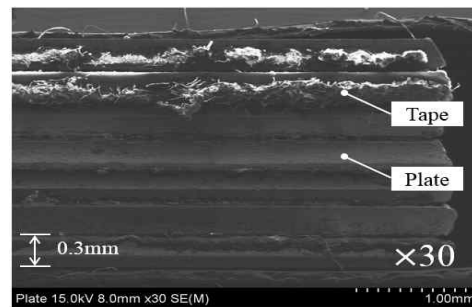


Fig. 17. SEM Microphotograph of Cross section of Multi-layered Blade [(a) Left Side (b) Right Side]

III. 결 론

본 연구에서는 기존 초탄성 SMA 블레이드 진동절연기의 구조건전성 문제를 극복하기 위해 적층형 블레이드 진동절연기를 제안하였다. 제안된 적층형 블레이드는 얇은 금속 박판의 블레이드를 다층으로 적층하고 각 층 상호면에 점탄성체인 테이프를 적용함으로써 기존 블레이드보다 피로 파괴의 내구성 및 고댐핑 특성 향상에 주목하였다. 또한 테이프 적용조건에 따라 적층형 블레이드를 Case 1, 2, 3으로 구분하여 각각에 대한 특성 비교를 수행하였다.

시험에 앞서 냉각기 조립체의 적절한 블레이드 적층 수를 선정하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 적층 수에 따른 냉각기 조립체 고유진동수 및 냉각기 자중에 의한 중력방향 처짐량을 도출하였으며, 시험 결과를 고려하여 적층 수를 7장으로 선정하였다.

자유감쇠시험을 통해 고유진동수 및 감쇠비를 도출하였다. Case 1, 2의 경우 서로 유사한 결과를 보이고 있으며 블레이드의 마찰 및 슬립의 면적이 협소하여 특성이 지배적으로 작용하고 있지 못함을 유추할 수 있다. 반면에 Case 3의 경우 양면 3M 테이프 적용에 따라 블레이드 각 층이 상호 접촉되어 Case 2에 비해 점탄성 특성이 지배적으로 작용하며 이에 따라 기존 초탄성 SMA 블레이드 진동절연기보다 감쇠비가 3.7배 향상되었다.

발사진동 시험에서 Case 1, 2의 경우 X축 랜덤시험 도중 소성이 발생하였다. 이에 반해 Case 3의 경우 정현파 인가 시 요구되는 가속도 응답 이내로 만족하고 있으며, 랜덤진동의 경우에도 랜덤진동 인가대비 10배 이상의 진동이 저감되었다. 또한 모든 발사진동 시험 이후에 냉각기 조립체의 동특성 측정 시에도 요구되는 고유진동수 및 진폭 변화율 이내에 부합하고 있으며, 육안검사 또한 소성변형 없이 초기형상을 유지하고 있다. 이로부터 본 논문에서 제안한 Case 3의 적층형 블레이드 진동절연기의 구조 건전성이 확보됨을 입증하였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 거대과학연구개발사업(다목적실용위성7호 개발사업)의 지원(NRF-2018 M1A3A4A07058062)으로 수행되었습니다.

References

- 1) Kim, Y. G., Kim, H. B., Kim, E. H. and Kim, K. S., "Isolating vibration in miniature linear cryogenic cooler with tuned vibration absorber," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 34, No. 5, 2010, pp. 605~609.
- 2) Veprik, A. and Twitto, A., "Attenuation of cryocooler induced vibration in spaceborne infrared payloads," *American Institute of Physics*, Vol. 1573, No. 1, 2014, pp. 1784~1791.
- 3) Ross, R. G., "Vibration suppression of advanced space cryocoolers - an overview," *Presented at the International Society of Optical Engineering, Smart Structures and Materials Conference*, California, Vol. 5052, 2003, pp. 1~12.
- 4) Lee, M. J., Han, J. H. and Oh, H. U., "Verification of launch vibration and shock isolation performance for spaceborne compressor vibration isolator with SMA mesh washer," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 24, No. 7, 2014, pp. 517~524.
- 5) Oh, H. U., Lee, K. J. and Jo, M. S., "A passive launch and on-orbit vibration isolation system for the spaceborne cryocooler," *Aero-space Science and Technology*, Vol. 28, No. 1 2013, pp. 324~331.
- 6) Oh, H. U., Kwon, S. C. and Youn, S. C., "Characteristics of spaceborne cooler passive vibration isolator by using a compressed shape memory alloy mesh washer," *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, No. 1, 2014, pp. 1~11.
- 7) Kwon, S. C., Jeon, Y. H. and Oh, H. U., "Micro-jitter attenuation of spaceborne cooler by using a blade-type hyperelastic shape memory alloy passive isolator," *Cryogenics*, Vol. 87, 2017, pp. 35~48.
- 8) www.dupont.com
- 9) www.3m.com
- 10) European Cooperation for Space Standardization (ECSS-E-HB-32-26A), 2013.