

## 고댐핑 요크 구조 적용 대형 태양전지판의 수동형 제진에 관한 연구

박재현<sup>1</sup> · 박연혁<sup>2</sup> · 박성우<sup>3</sup> · 강수진<sup>3</sup> · 오현웅<sup>1,2,†</sup><sup>1</sup>조선대학교 스마트이동체융합시스템공학부<sup>2</sup>(주) 스텝랩<sup>3</sup>엘아이지 넥스원 (주)

## A Study on the Passive Vibration Control of Large Scale Solar Array with High Damping Yoke Structure

Jae-Hyeon Park<sup>1</sup>, Yeon-Hyeok Park<sup>2</sup>, Sung-Woo Park<sup>3</sup>, Soo-Jin Kang<sup>3</sup> and Hyun-Ung Oh<sup>1,2,†</sup><sup>1</sup>Department of Smart Vehicle System Engineering, Chosun University<sup>2</sup>STEP Lab Ltd.<sup>3</sup>LIG Nex1 Co. Ltd.

## Abstract

Recently, satellites equipped with high-performance electronics have required higher power consumption because of the advancement of satellite missions. For this reason, the size of the solar panel is gradually increasing to meet the required power budget. Increasing the size and weight of the solar panel is one of the factors that induce the elastic vibration of the flexible solar panel during the highly agile maneuvering of the satellite or the mode of vibration coupling to the satellite or the mode of vibration coupling to the micro-jitter from the on-board appendages. Previously, an additional damper system was applied to reduce the elastic vibration of the solar panel, but the increase in size and mass of system was inevitable. In this study, to overcome the abovementioned limitations, we proposed a high-damping yoke structure consisting of a superplastic SMA(Shape Memory Alloy) laminating a thin FR4 layer with viscoelastic tape on both sides. Therefore, this advantage contributes to system simplicity by reducing vibrations with small volume and mass without additional system. The effectiveness of the proposed superelastic SMA multilayer solar panel yoke was validated through free vibration testing and temperature testing using a solar panel dummy.

## 초 록

최근 인공위성 임무 고도화에 따라 고성능의 전장품이 탑재되어 시스템 소요전력이 증가되고 있다. 이에 따라 충분한 전력확보를 위하여 태양전지판 크기 또한 점차 증가하고 있다. 태양전지판의 크기 증가 및 중량화는 위성체 자세 기동 시 발생하는 진동과의 커플링 등에 의해 태양전지판 탄성 진동의 크기 증가를 유발한다. 상기 진동은 힌지 및 요크를 통해 위성체에 전달되어 지향성능이 요구되는 고정밀 관측위성의 지향성능과 직결되어 고해상도 영상 획득 임무 성능을 저하시킨다. 종래에는 태양전지판의 탄성 진동을 저감시키고자 고강도 설계에 집중 또는 별도의 보강재 및 댐퍼 시스템을 적용하였다. 그러나, 이는 부피 및 무게를 증가시키며 시스템 복잡성이 증가하는 한계점이 존재한다. 본 연구에서는 상기 한계점을 극복하고자 초탄성 형상기억합금(SMA: Shape Memory Alloy) 양면에 점탄성 테이프로 박막층을 적층함으로써 댐핑 특성을 극대화하였으며, 별도 시스템 적용없이 작은 부피 및 무게로 진동을 저감하여 시스템 경량화에 기여할 수 있는 설계기법을 제안하였다. 제안한 초탄성 SMA 적층형 태양전지판 요크를 태양전지판 더미에 적용시켜 자유감쇠시험 및 온도시험을 통해 설계 유효성을 입증하였다.

**Key Words** : Shape Memory Alloy(초탄성 형상기억합금), Solar Panel(태양전지판), Passive Vibration Damping(수동 진동 감쇠), Viscoelastic Adhesive Tape(점탄성 테이프)

발이 국내/외적으로 급증하고 있으며, 경제적인 위성개발 방식에 기반하여 저비용으로 단기간에 개발이 가능한 소형위성의 대량생산 및 군집운용 체계가 증대되고 있다[1]. 상기 소형위성들은 시한성 표적에 대한 고해상도 관측 및 통신임무 등과 같은 임무를 수행하기 위해 고기동성 및 자세 안정화가 요구된다. 그러나, 고도화된 임무 수행에 요구되는 시스템 소요전력을 충족시키기 위해 전개형 태양전지판 및 안테나 등과 같은 탑재체들의 크기가 점차 증가하고 있으며, 위성 외부에 장착됨에 따라 큰 관성모멘트를 발생시킨다. 또한, 상기 탑재체들의 크기 증가와 중량화는 위성체의 자세 기동, 궤도 이동, 열충격에 따른 위성의 강체 진동 및 리액션휠, 제어모멘트 자이로스코프, 냉각기 등과 같은 교란원을 가진 진동과의 커플링 등에 의해 탄성 진동의 크기 증가를 유발한다. 이에 상기 진동은 요크를 통해 위성체에 전달되어 자세안정화 시간을 지연시키거나, 카메라의 시선각 교란에 따른 관측목표 지향성능 저하 등을 초래한다. 따라서 상기 탑재체들에 발생하는 진동은 지향성능이 요구되는 고정밀 관측위성 등의 임무성능과 직결되기 때문에 시스템의 복잡성 증가에 따른 신뢰도 저하 방지가 가능한 수동적 제어 방식 기반 고효율의 진동 저감 기술 확보가 필수적이다.

진동 저감 기술은 일반적으로 수동적 방법과 능동적 방법으로 나눌 수 있다. 수동형 진동 제어방법은 능동형 제어방법에서 일어나는 Spill-over 현상이 일어나지 않을뿐더러 소형/경량화, 신뢰성 측면에서 유리한 기술이다[2]. 종래 연구에서 여러 유형의 수동형 제진 기술이 제안되어 왔는데, Kienholz et al.[3]은 전개식 대형 태양전지판의 저주파 모드용 TMD (Tuned Mass Damper)를 활용한 수동형 감쇠 시스템을 제안했다. 이 시스템의 유효성은 실험을 통해 검증되었으며, 그 결과 TMD를 장착하였을 때 감쇠 성능이 4.5% 더 높은 것으로 나타났다. Anandakrishnan et al.[4]은 SA-3의 허블 우주 망원경(HST) 태양전지판을 위한 티타늄 굴곡 및 점탄성 감쇠 재료로 구성된 댐퍼를 제안했다. 상기 댐퍼는 전체적인 구조 감쇠 성능을 향상시켰으며, 제어계에 유발되는 구조적 진동을 저감시키기 위하여 태양전지판 마스트 하단부에 적용하였다. Kong et al.[5]은 다중 패널 태양 지향 전개식 태양전지판을 위한 수동형 진동 감쇠 장치를 제안했

다. 이 장치는 태양전지판의 구조적인 댐핑 성능을 증가시키기 위하여 수동형 점성 댐퍼를 태양전지판 루트 힌지 부에 적용하여 패널의 전개속도 및 전개 시 발생하는 충격을 감소시켰다.

본 연구에서는 대형 태양전지판의 탄성 진동 저감을 위해 수동적 제어 방식을 적용한 초탄성 SMA 기반 적층형 태양전지판 요크를 제안하였다. 제안한 요크에 고댐핑 특성을 구현하기 위하여 기술적 측면에 두 가지 초점을 맞추었다. 이는 각각 스마트 소재인 초탄성 형상기억합금(SMA) 적용과 점탄성 테이프를 적용시킨 다층 박판을 SMA 요크 구조에 적용하는 것이다. SMA 소재는 크게 오스테나이트(Austenite) 상과 마르텐사이트(Martensite) 상으로 존재하며, 상변화 온도와 작동환경 온도와 관계에 따라 형상기억 및 초탄성 효과를 나타낸다[6]. 형상기억효과는 상변화 온도 이하의 작동환경 온도에서 외부하중에 의해 소재 자체에 구조적 변형이 발생하여도 상변화 온도 이상으로 가열될 경우 본래 형상으로 복원되는 특성이다. 또한, 초탄성 효과는 작동환경 온도가 상변화 온도 이상일 때, 외부하중에 의해 형상변형이 발생하여도 하중 제거 시 잔류응력 없이 본래 형상으로 복원되는 특성이다[7]. 이러한 특성은 외부하중의 유무에 따른 오스테나이트-마르텐사이트 간의 상변화 시 기계적 에너지의 일부가 손실되는 히스테리시스 작용하는 특성을 지니며, 이를 기반으로 진동환경에서 우수한 댐핑 성능을 보이므로 유연한 전개식 대형 태양전지판에 적용시킬 수 있다. 우주 응용 분야에서 진동 감쇠를 위한 초탄성 SMA를 적용한 예시로, Kwon et al.[8]은 과도하중 조건에서 소성 변형을 일으키지 않고 micro-jitter 절연 성능을 향상시키기 위하여 2축 집벌형 X-밴드 안테나를 적용한 초탄성 SMA 기어 휠을 제안하였다. Kwon et al.[9]은 일반적인 티타늄 소재가 아닌 초탄성 SMA 소재로 설계한 블레이드형 냉각기 절연기를 제안했다. 또한, 초탄성 SMA 블레이드의 효과를 실험적으로 검증하고 티타늄으로 만들어진 절연기의 효과와 비교하였다.

그러나, SMA 소재는 응력이 상변화가 발생하는 임계 응력 지점을 초과할 때 효과적인 댐핑 성능을 나타낸다. 이는 소재 자체에 구조적 변형이 충분히 크지 않을 경우 SMA 소재의 댐핑 성능이 떨어질 수 있다.

따라서, 점탄성 테이프를 적용한 적층 구조를 제안된 초탄성 SMA 요크에 적용하여 비교적 작은 구조적 변형에서도 댐핑 성능을 극대화시켰다.

댐핑 성능 향상에 있어 점탄성 테이프 기반 적층 구조의 효과는 종래 연구들에서 입증되었다. Minesugi et al.[10]은 위성의 배터리 패널에 전달되는 진동을 저감시키기 위해 Polyimide 적층형 점탄성 테이프의 감쇠 장치를 제안했다. 시험 결과에 따르면 적층형 점탄성 테이프를 적용했을 때 적용시키지 않았을 경우보다 5배 높은 댐핑 성능을 얻었다. Bhattarai et al. [11]은 점탄성 테이프 기반 적층 구조가 있는 다층 보강재를 사용하는 고댐핑 전개식 태양전지판 모듈을 제안했다. 태양전지판 패널 모듈의 설계 효과는 발사 진동 시험을 통해 검증되었다. Stoudt et al. [12]은 나노 크기의 다층 코팅을 사용하여 피로 내구성을 크게 높일 수 있다고 가정하였다. 이 가설을 검증하기 위해 Cu 코팅 필름과 다양한 표면 처리를 한 후 Cu-Ni 다층을 포함하여 피로 하중 시험을 수행했다. 그 결과, 각 층 사이의 슬립이 응력-에너지-소산 메커니즘으로 작용하여 주기-하중 조건에서 Cu-Ni 다층 필름이 다른 일반 필름보다 6배 이상의 피로 수명을 가진 것으로 나타났다.

본 연구에서는 제안한 초탄성 SMA 기반 적층형 태양전지판 요크의 유효성 검증을 위해 약 1 Hz의 고유 진동수를 갖는 더미 태양전지판에 적용시켜 기본특성 시험을 수행하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 초탄성 SMA 적층형 태양전지판 요크 개요

Figure 1 (a)와 (b)은 각각 제안한 고댐핑 요크의 태양전지판 적용 예시와 상세 형상 및 적층 개념을 나타낸다. 제안한 고댐핑 요크는 태양전지판 더미와 결합되는 요크부에 적용되었다. 고댐핑 요크부는 초탄성 SMA 플레이트 양면에 다층 박판(FR4)을 점탄성 테이프로 적층하는 형태로 설계하였다. SMA 소재는 고댐핑 특성, 높은 피로 내구성을 가지고 있으며, 소재 자체에 최대 8 ~ 15 % 변형이 일어나도 본래 형상으로 회복되는 초탄성 효과를 가지고 있다[7]. 또한, SMA는 소재 자체에 상변화가 발생하는 임계 응력점을 초

과할 때 기계적 에너지의 일부가 손실되는 히스테리시스 작용하는 특성이 있어 효과적인 감쇠 성능을 나타낸다. 이에 따라 SMA 소재는 큰 변형이 발생하는 유연 대형구조물인 태양전지판의 거동 변위를 감소시키기 적합할 것으로 판단된다. 그러나, SMA는 임계 응력점 이하에서의 구조 변형에서는 큰 감쇠 성능을 기대하기 어렵다. 이에 점탄성 테이프를 이용한 구속층을 적용함으로써 상대적으로 작은 구조적 변형에서도 진동 저감 성능을 보장하였다. 본 연구에서 사용한 점탄성 재료는 실제 우주임무 적용 이력이 있는 제품이며, 에너지 소산력이 우수하여 댐핑 성능이 높다. 이에 따라 제안한 요크의 구속층과 점탄성 테이프 사이의 마찰로 진동 저감 성능을 극대화시켰다. 또한, 적층된 구속층의 두께는 수 mm이하이며, 별도의 보강재를 적용한 강성에 의존하는 종래 설계 대비 작은 부피 및 중량으로 진동을 효과적으로 저감 가능하여, 시스템 경량화에 기여할 수 있다[13]. Table 1은 본 연구에서 적용된 초탄성 SMA의 재료적 특성 제원을 나타낸다. Table 2는 적층에 사용된 점탄성 테이프인 3M966 양면 아크릴 테이프의 제원을 나타낸다.

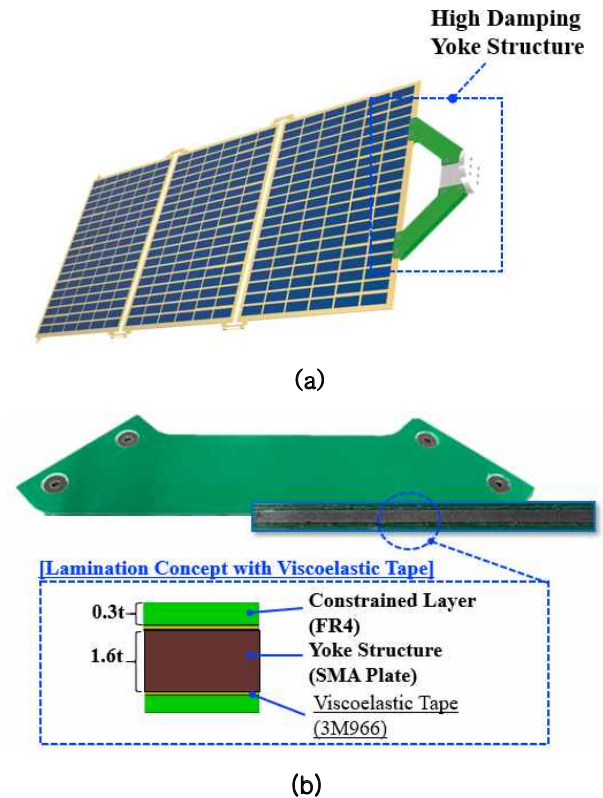


Fig. 1 Configuration of Multilayered SMA Yoke

**Table 1** Material Properties of Hyperelastic SMA

Characteristic		Value
Martensite Finish Temperature ( $M_f$ , °C)		-21
Martensite Start Temperature ( $M_s$ , °C)		-12
Austenite Start Temperature ( $A_s$ , °C)		-5
Austenite Finish Temperature ( $A_f$ , °C)		15
Young's Modulus ( $GPa$ )	Martensite	75
	Austenite	80
Tensile Strength ( $MPa$ )		1300
Elongation at Break (%)		45
Density ( $kg/m^3$ )		6450
Poisson's Ratio		0.33

**Table 2** Specifications of Viscoelastic Adhesive Tape (3M966) [14]

Item	Specification
Type	Double-sided Tape
Thickness (mm)	0.06
Adhesion Strength to Steel (N/100mm)	58 (20 min Dwell)
	85 (72 hr Dwell)
	159 (Ultimate Bond)
Allowable Temperature (°C)	-40 ~ 232
Thermal Conductivity (W/mK)	0.178 (@ 41 °C)
	0.183 (@ 71 °C)
	0.187 (@101 °C)
CTE (ppm/°C)	1.99
Outgassing (% TML/CVCM)	0.93 / 0.01

## 2.2 자유감쇠시험

제안한 고댐핑 요크 구조를 태양전지판 더미에 적용하여 자유감쇠시험을 통해 설계 유효성을 검증하였다. 시험에 적용되는 요크 구조의 Case는 두 가지로 Case 1은 적층되지 않은 SMA 요크이며, Case 2는 구속층 유무에 따른 감쇠 성능을 비교하기 위한 FR4 구속층이 2단인 적층형 SMA 요크이다. Table 3은 Case 별 요크 제원을 나타낸다.

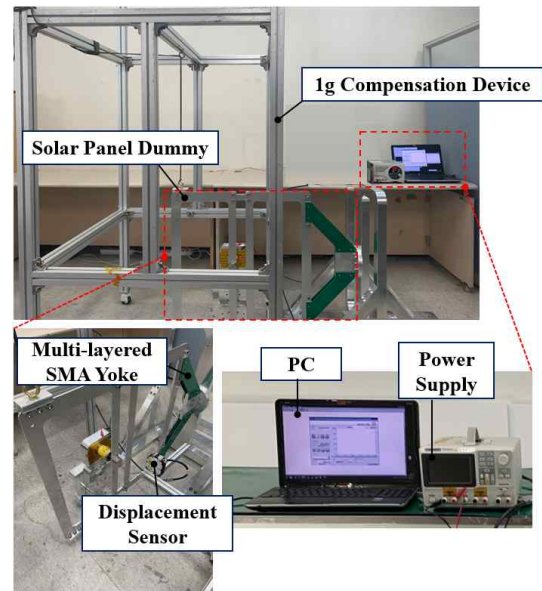
Figure 2는 자유감쇠시험 구성을 나타낸다. 시험 구성은 크게 초탄성 SMA 적층형 요크, 태양전지판 더미, 1g 보상장치, 태양전지판의 변위 측정을 위한 Micro-Epsilon 사의 레이저 변위센서 optoNCDT

2300 LL로 이루어져 있다[15]. 또한, 지상에서의 시험 시 태양전지판의 중력 영향을 최소화하기 위해 별도의 1g 보상장치로 지지되었으며, 레이저 변위 센서를 사용하여 약 1 Hz의 1차 고유진동수를 갖는 태양전지판 더미의 거동 변위를 10~40 mm 까지 측정하였다. 자유감쇠시험은 각 Case 별로 5회 반복시험을 수행하였으며, 각 회차 당 큰 오차 없이 도출된 고유진동수와 감쇠비를 평균 내어 값을 도출하였다.

Figure 3은 대표적인 태양전지판 더미 끝단에 초기 변위 조건 40 mm을 인가 후 자유감쇠 조건에서의 시험 결과를 나타낸다. SMA에 적층이 적용된 Case 2의 경우 약 100 초 경과 시 태양전지판 더미의 감쇠가 거의 완료된 반면에 Case 1의 경우 150 초가 경과되어도 감쇠가 완료되지 않은 것을 관찰할 수 있다. 이를 통해 제안한 고댐핑 요크는 적층 수 적용에 따라 감쇠 성능이 향상되는 것을 알 수 있다.

**Table 3** Yoke Specifications for each Case

Case	1	2
Material	SMA	SMA, FR-4
No. of Layers	0	2
Thickness (mm)	1.5	2.1
Mass (g)	236	270

**Fig. 2** Basic Characteristic Test Set-up

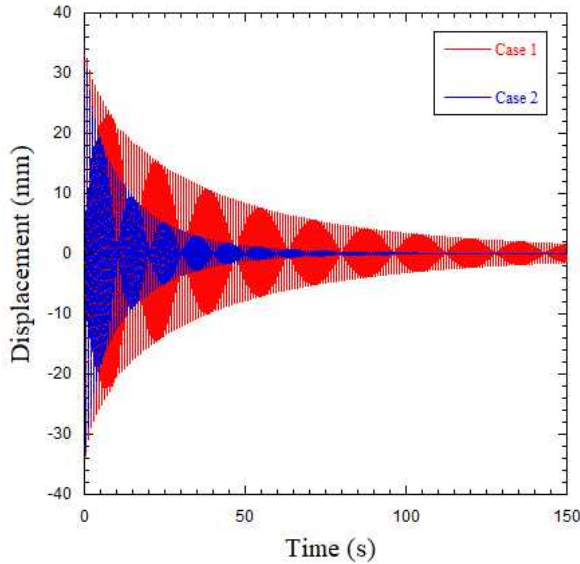


Fig. 3 Free Vibration Test Results for each Case (Initial Displacement = 40 mm)

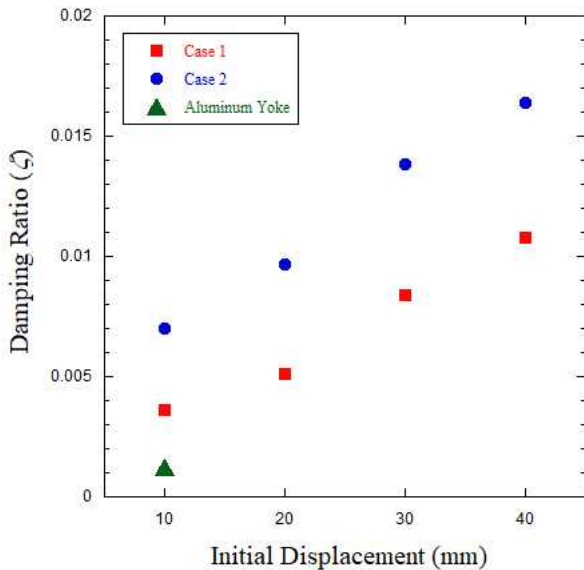


Fig. 4 Damping Ratio for each Displacement

Table 4 Natural Frequency for each Case

Item	Natural Frequency
Aluminum Yoke	1.268 Hz
SMA yoke w/o layer (Case 1)	1.234 Hz
SMA yoke with 2 layer (Case 2)	1.253 Hz

본 연구에서는 Case 1과 Case 2의 대수감소율을 식 (1)을 통해 산출하였다.

$$\delta = \ln\left(\frac{x(t_1)}{x(t_2)}\right) \quad (1)$$

여기서,  $x(t_1)$ 은 자유감쇠 시간 이력 그래프상의 첫 번째 Peak의 y축 값을 의미하며,  $x(t_2)$ 는 두 번째 Peak의 y축 값을 의미한다.

식 (1)을 통해 산출한 대수감소율  $\delta$  값을 식 (2)에 적용하여 감쇠비를 산출하였다.

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (2)$$

Figure 4는 10~40 mm 초기 변위 조건의 시간 이력에서 도출된 감쇠비를 나타낸다. SMA 적용 유무에 따른 감쇠비 차이를 확인하기 위해 알루미늄 재질의 요크를 제작하여 초기 변위 조건 10 mm로 자유감쇠시험을 수행하여 Case 1과 비교하였다. 그 결과, Case 1의 감쇠비는 약 0.0036(초기 변위 10mm 기준)으로 감쇠비가 약 0.0012인 알루미늄 요크 대비 약 3배 높은 것으로 관찰된다. 이를 통해 SMA 적용 시 감쇠 성능이 일반 금속 재질 대비 감쇠 성능이 효과적임을 관찰할 수 있다.

제안한 고댐핑 요크의 구속층 유무에 따른 시험 결과, 전체 변위 영역 내에서 Case 2가 Case 1에 비해 감쇠비가 약 1.6 ~ 2배 높은 것을 관찰할 수 있다. 이는 다층 박판 사이 점탄성 테이프의 마찰로 인해 적층형 SMA 요크의 감쇠 성능을 향상시켰기 때문으로 판단된다. 또한, 초기 변위 조건이 증가할수록 제안한 고댐핑 요크의 감쇠비가 증가하는 경향을 보이는데, 이는 SMA 소재의 변형이 크게 일어날수록 초탄성 효과로 인해 댐핑 성능이 향상됨을 알 수 있다. Table 4는 각 알루미늄 요크 포함 각 Case 별 고유진동수를 나타낸다. 이를 통해 고유진동수 변화 없이 SMA 및 구속층 적용만으로도 효과적인 감쇠 성능을 구현할 수 있음을 관찰할 수 있다.

상기 시험 결과를 토대로 일반 금속 재질인 알루미늄 대비 고유진동수의 큰 변화 없이 SMA 및 구속층

을 적용함으로써 댐핑 성능이 향상되는 것을 알 수 있다. 이에 따라 작은 부피 및 중량으로 진동을 효과적으로 저감 가능하여 시스템 경량화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

### 2.3 온도 시험

Figure 5는 Case 2인 2단 적층형 고댐핑 요크의 온도에 따른 감쇠비 그래프이다. 제안한 초탄성 SMA 적층형 태양전지판 요크에 적용된 SMA 소재와 점탄성 테이프 3M966은 온도 조건에 따라 특성이 민감하게 변하는 성질을 가지고 있다. 따라서, SMA 소재의 상변화 온도와 점탄성 테이프 3M966의 허용 온도 범위를 고려하여 시험 장소에서 구현 가능한  $-15\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 온도조건에서 40 mm 초기 변위 조건의 자유감쇠시험을 수행하여 감쇠비 변화를 파악하였다. 온도시험은 요크부를 로컬 실딩(Local Shielding)하여 온도 구현을 하였으며, 요크부에 부착한 써모커플을 통해 온도변화를 측정하여 해당온도에 도달할 때 시험을 수행하였다. 온도시험 결과,  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  조건에서 제안한 요크의 댐핑 성능이 높은 것을 관찰할 수 있다. 이는 해당 온도 기준으로 온도가 증가할수록 점탄성 테이프의 접착력이 떨어지고, 낮은 온도에서는 점탄성 소재가 유리 상태로 변화하려는 성질에 의해 감쇠비 차이가 일어나는 것으로 보인다. 이를 통해 제안한 고댐핑 요크의 온도에 따른 댐핑 성능은 점탄성 테이프를 이용한 구속층이 주된 요소라 판단된다. 또한, 제안한 적층형 고댐핑 요크는 온도에 따라 댐핑 성능 차이를 보이고 있으나, 요크의 온도 변화가 일어나도 시험한 범위 내 모든 온도에서의 감쇠비가 상온에서의 일반 금속 재질인 알루미늄 대비 항상 높은 것을 관찰할 수 있다. 상기 시험 결과를 토대로 적층형 SMA 요크부 온도를 추가적인 열설계를 통해 댐핑 성능이 향상되는  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  내외로 유지하면 제안한 적층형 요크의 댐핑 성능을 극대화시킬 수 있을 것으로 기대된다.

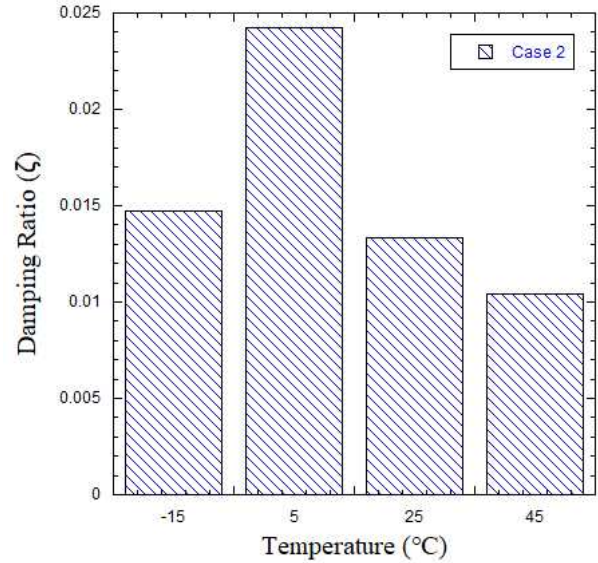


Fig. 5 Damping Ratio for each Temperature

## 3. 결 론

제안한 초탄성 SMA 적층형 태양전지판 요크는 대형 태양전지판의 탄성 진동 저감을 목적으로 설계 및 제작하였다. 약 1 Hz의 고유진동수를 갖는 태양전지판에 제안한 고댐핑 요크를 적용시킨 후 이에 대한 진동 저감 성능 확보 여부를 파악하기 위하여 자유감쇠시험 및 온도시험을 수행하였다. 자유감쇠시험으로부터 SMA 적용 유무에 따른 감쇠 성능을 확인하기 위하여 알루미늄 재질인 요크를 초기 변위 조건 10 mm로 시험하였으며, 이로부터 SMA 요크 적용 시 일반 금속 재질인 알루미늄보다 감쇠 성능이 효과적임을 입증하였다. 또한, 구속층 유무에 따른 댐핑 성능을 비교하기 위하여 10~40 mm의 초기 변위 조건 하 시험을 수행한 결과, Case 2가 Case 1 대비 동일한 변위 조건에서 향상된 댐핑 성능이 구현됨을 입증하였다. 온도시험 결과, 다양한 온도조건에서도 상온에서의 일반 금속 재질인 알루미늄 대비 제안한 적층형 SMA 요크의 뛰어난 감쇠특성을 확인하였다. 이에 따라 별도의 보강재 없이 SMA 소재에 점탄성 테이프를 적용함으로써 댐핑 성능을 극대화시킴과 동시에 시스템 경량화에 기여할 수 있다고 판단된다.

## 후 기

이 논문은 LIG넥스원 (주)의 지원을 받아 수행된 연구임.

## References

- [1] S. H. Han, Y. J. Choi, D. H. Cho, W. S. Choi, H. C. Gong, H. D. Kim and G. H. Choi, "Analysis of Cubesat Development Status in Korea", *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, vol. 45, no. 11, pp. 975-988, 2017.
- [2] M. K. Kwak and S. Heo, "Active Vibration Control of Smart Grid Structure by Multiinput and Multioutput Positive Position Feedback Controller", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 304, no. 1-2, pp. 230-245, 2007.
- [3] D. A. Kienholz, S. C. Pendleton, K. E. Richards Jr, and D. R. Morgenthaler, "Demonstration of Solar Array Vibration Suppression", *International Society for optics and Photonics, Smart Structures and Materials 1994: Passive Damping*, vol. 2193, pp. 59-72, 1994.
- [4] S. M. Anandakrishnan, C. T. Connor, S. Lee, E. Shade, J. Sills, J. R. Maly and S. C. Pendleton, "Hubble Space Telescope Solar Array Damper for Improving Control System Stability", *IEEE aerospace conference. Proceedings (Cat. No. 0TH8484)*, vol. 4, pp. 261-276, 2000.
- [5] Y. Kong and H. Huang, "Design and Experiment of a Passive Damping Device for the Multi-panel Solar Array", *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 1-10, 2017.
- [6] X.J. Yan and J.X. Nie, "Study of a New Application Form of Shape Memory Alloy Superelasticity", *Smart Mater. Struct.*, vol.12, no. 6 pp. 14-23, 2003
- [7] H.K. Jeong, J.H. Han, S.H. Youn and J.H. Lee, "Frequency Tunable Vibration and Shock Isolator using Shape Memory Alloy Wire Actuator", *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 25, no. 7, pp. 908-919, 2013
- [8] S. C. Kwon and H. U. Oh, "Passive Micro-jitter Isolation of Gimbal-type Antenna by using a Superelastic SMA Gear Wheel", *Mechanical Systems & Signal Processing*, vol. 114, pp. 35-53, 2019
- [9] S. C. Kwon, Y. H. Jeon and H. U. Oh, "Micro-jitter Attenuation of Spaceborne Cooler by using a Blade-type Hyperelastic Shape Memory Alloy Passive Isolator", *Cryogenics*, vol. 87, pp. 35-48, 2017.
- [10] K. Minesugi, J. Onoda, H. Ohkubot and Y. Hanawa, "Experimental Study on Damping 17 Capability of Thin Film with Viscous Lamina", *Proceedings of 37th Structure, Structural Dynamics and Materials Conference*, pp. 1016-1023, 1996.
- [11] S. Bhattarai, H. R. Kim and H. U. Oh, "CubeSat's Deployable Solar Panel with Viscoelastic Multi-layered Stiffener for Launch Vibration Attenuation", *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2020, pp. 1-10, 2020.
- [12] M. R. Stoudt, R. E. Ricker and R. C. Cammarata, "The Influence of a Multilayered Metallic Coating on Fatigue Crack Nucleation", *International Journal of Fatigue*, vol. 23, pp. 215-223, 2001.
- [13] M. Focardi, S. Pezzuto, R. Cosentino, G. Giusi, M. Pancrazzi, V. Noce, R. Ottensamer, M. Steller, AM Di Giorgio, E. Pace, P. Plasson, G. Pete and I.Pagano, "The Instrument Control Unit of the ESA-PLATO 2.0 Mission", *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*, vol. 9904, 99042Y:1~15, 2016.
- [14] [https://www.3m.com/3M/en\\_US/company-us/all-3m-products/~3M-Adhesive-Transfer-Tape-966/?N=5002385+3293241971&rt=rud](https://www.3m.com/3M/en_US/company-us/all-3m-products/~3M-Adhesive-Transfer-Tape-966/?N=5002385+3293241971&rt=rud).
- [15] <https://www.micro-epsilon.com/displacement-position-sensors/laser-sensor/LL-Laser-sensors/>