

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(8), 648-653(2014)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.8.648>

미소진동 발생원으로부터의 전기에너지 재생 및 진동절연을 위한 복합 시스템의 해석적 검토

권성철*, 조문신**, 오현웅***

Numerical Investigation of Complex System for Electrical Energy Harvesting and Vibration Isolation

Sung-Cheol Kwon*, Mun-Shin Jo** and Hyun-Ung Oh***

Chosun University* / ***, Samsung Thales**

ABSTRACT

Fly-wheel, gimbal antenna, mechanical gyro and cryocooler with moving parts generate a micro-vibration during their on-orbit operation. For the acquisition of high quality image of observation satellite, additional technical efforts are required to reduce the micro-vibration level from the vibration sources. In this study, we proposed a passive isolation system combined with a tuned mass damper-type energy harvester to generate electrical energy from the micro-vibration which has always been subjected to useless isolation objectives. The feasibility of the system has been investigated through the numerical simulation.

초 록

플라이 휠, 구동형 안테나, 기계식 자이로, 냉각기 등과 같이 기계적 구동부를 갖는 탑재장비는 궤도 운용 시 미소진동을 발생한다. 고해상도 관측위성의 영상품질 향상을 위해서는 주로 진동발생원으로부터의 미소진동이 주요 임무장비에 전달되지 않도록 진동절연기의 적용 등 추가적인 기술적 노력들이 요구된다. 본 연구에서는 항상 차폐의 대상으로 여겨진 미소진동에 주목하여 이로부터 전기에너지 재생이 가능하고 동시에 진동절연이 가능한 복합 시스템 구현을 위해 동 흡진기 형 전자기 하베스터와 결합된 수동형 진동절연 시스템을 제안하였으며, 수치해석을 통해 복합 시스템의 유효성을 입증하였다.

Key Words : Energy Harvesting(에너지 재생), Vibration Isolation(진동 절연), Micro-vibration(미소진동), Cryocooler(냉각기)

1. 서 론

임무장비의 극저온 유지를 위한 냉각기, 위성의 자세제어용 액츄에이터인 플라이 휠, 자세정보 제공을 위한 기계식 자이로, 안테나의 기계적

구동이 가능한 김벌식 안테나, 태양전지판의 태양추적 구동기 등과 같이 기계적 회전 또는 병진 구동부를 갖는 탑재장비는 목적하는 기능을 구현함과 동시에 미소진동을 수반한다. 이러한 진동 발생원으로부터의 진동외란은 그 크기가 극히 미

† Received: February 15, 2014 Accepted: July 18, 2014

*** Corresponding author, E-mail : ohu129@chosun.ac.kr<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

소함에도 불구하고 정밀 지향성능이 요구되는 고 해상도 관측위성의 영상품질을 저하시키는 주요 원인으로 작용한다[1].

고해상도 임무요구조건 충족을 위해서는 진동 발생원으로부터의 미소진동이 주요 임무 탑재장비에 전달되지 않도록 진동절연기를 적용하는 방법 또는 저진동 탑재장비를 개발하는 방법 등 추가적인 기술적 노력들이 요구된다. 진동절연기를 적용하는 방식으로는 위성임무에 요구되는 신뢰도 및 시스템의 안정화 요구조건을 만족하기 위해 주로 수동형 절연방식[2-5]이 일반적으로 적용되고 있다. 대표적인 예로서, 허블 우주관측 망원경의 관측성능 향상을 위해 리액션 휠이 발생하는 외란 차단을 목적으로 절연기 내부 작동유체의 점성을 이용하는 수동형 진동절연기가 있다 [2]. Porter et al. [3]은 2개의 스프링과 점성감쇠 요소로 이루어진 3요소 진동절연기는 스프링과 점성감쇠만의 2요소로 구성된 절연기에 비해 모멘텀 휠 진동절연에 효과적임을 보고하고 있다. 우주용 적외선 검출기의 극저온 유지를 위한 냉각기의 미소진동절연을 목적으로 Oh et al. [4]은 진동환경이 상이한 발사 및 궤도환경에 동시 적용 가능한 수동형 진동절연기를 제안하였으며, 발사환경시험과 미소진동시험을 통해 진동절연기의 성능을 검증하였다. Kim et al. [5]은 냉각기의 미소진동 저감에 동흡진기를 적용할 경우, 냉각기의 주요 구동 주파수에서 발생하는 외란력에 대해 수동형 절연기만 배치하였을 경우에 비해 높은 진동저감효과를 해석적으로 입증하였다.

본 연구에서는 상기와 같이 항상 차폐의 대상으로만 존재하는 미소진동을 회수하여 전기에너지로 재생하는 에너지 하베스팅 기술의 적용 가능성에 주목하였다. 에너지 하베스팅 분야의 경우, Williams et al. [6]이 4.4kHz의 가진 주파수에서 $0.3\mu W$ 의 전력을 발생시킬 수 있는 진동형 전자기식 에너지 하베스터를 처음으로 발표한 이래로, 다양한 연구개발이 진행 중에 있으며 지상용으로 현재 상용화 단계에 있는 기술 또한 다수 존재한다. 한편, 우주 적용을 목적으로 하는 기초 연구의 일환으로 Makihara et al. [7]은 피에조를 적용한 에너지 재생형 반능동 진동제어를 제안하였으며 대형 트러스 구조물의 제진시험을 통해 그 유효성을 입증하였다.

본 논문에서는 진동발생원으로부터의 미소진동을 회수하여 전기에너지로 재생함과 동시에 진동절연 성능이 보장되는 에너지 재생형 수동형 진동절연 복합시스템을 제안하였다. 이를 적용하기 위한 진동발생원으로는 일반적으로 위성의 비

상모드를 제외하고는 상시 운용되어 에너지 재생에 유리하며, 단일 구동 주파수의 특정화가 비교적 용이한 우주용 냉각기를 선정하였다. 에너지 재생 효율 증가를 위해 동 흡진기에 기초한 전자기 형태의 에너지 하베스터를 적용하였으며, 이와 결합된 수동형 진동절연 복합시스템은 설계가 목적하는 에너지 재생과 진동절연에 있어 효과적임을 수치해석을 통해 입증하였다.

II. 본 론

2.1 우주용 냉각기와 미소진동절연기 개요

본 연구에서는 미소진동 발생원으로부터의 에너지 재생을 위해 Fig. 1과 같은 Pulse Tube형 냉각기를 선정하였다. 냉각기는 극저온 구현이 필요한 주요 임무 탑재장비의 냉각을 위해 사용되며, 저진동, 저비용, 메커니즘의 단순성 그리고 신뢰도의 장점으로 인해 Pulse Tube형 냉각기가 주로 우주임무에 적용되고 있다. 냉각기의 경우, 일반적으로 신뢰도 만족을 위하여 비상모드를 제외하고는 상시 운용되어 지속적인 에너지 재생 및 활용에 있어 유리하다. 또한, 일반적으로 단일 특정 주파수로 냉각기가 구동되는 관계로 냉각기의 동특성 파악이 용이하여 에너지 하베스터 설계 측면에서도 유리한 장점을 갖는다. 본 연구에서 적용하고자 하는 냉각기의 제원으로 무게는 3.8kg, 구동 주파수 36Hz에서의 최대 진동 레벨은 1.6N이다

냉각기 미소진동절연을 목적으로 개발된 수동형 진동절연기 (PLOVIS: Passive Launch and On-orbit Vibration Isolation System [4])는 발사 구속장치의 적용 없이 진동환경이 상이한 발사환경과 궤도환경에 동시 적용 가능한 장점을 갖는다. 진동절연기는 주로 미소진동 절연을 목적으로 냉각기를 저장성 탄성지지하기 위한 코일 스프링, 냉각기 열제어를 위한 히트파이프 그리고 검출기 냉각을 위해 헬륨가스가 통과하는 트랜스퍼라인으로 구성된다. 이들로 저장성 탄성지지되는 냉각기 조립체의 고유진동수는 약 8Hz로

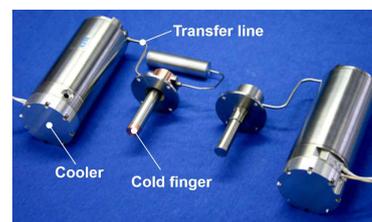


Fig. 1. Pulse Tube-type Cooler [4]

냉각기 구동 주파수인 36Hz와는 충분한 주파수 디커플링이 이루어져 주요 탑재체의 전달력 최소화가 가능하도록 설계되었다.

2.2 수치해석 모델과 운동방정식

냉각기 미소진동절연을 목적으로 개발된 수동형 진동절연기[4]에 동 흡진기에 기초한 전자기 형태의 에너지 하베스터를 결합하여 미소진동으로부터의 전기에너지 재생 및 진동절연이 동시에 가능한 복합시스템의 유효성을 검증하기 위한 수치해석 모델을 Fig. 2에 나타낸다. 수치해석 모델은 미소진동 발생원인 냉각기(Cryocooler), 미소진동절연을 위한 수동형 진동절연기 (PLOVIS) [4], 그리고 동 흡진기 형태의 에너지 하베스터 (TMD Energy Harvester)로 구성된다. 여기에서, m_1 은 미소진동을 발생하는 냉각기의 질량, k_1 과 c_1 은 전술한바와 같이 각각 코일스프링, 트랜스퍼라인 그리고 히트파이프로 저장성 탄성 지지되는 수동형 진동절연기 시스템의 강성과 감쇠계수를 각각 나타낸다. 동 흡진기 에너지 하베스팅 시스템의 m_2 는 영구자석의 질량, k_2 는 냉각기 구동주파수와 동조를 위한 스프링 계수 그리고 c_m 은 기계적 감쇠계수로 나타낸다. 또한, 에너지 하베스팅 시스템은 유도코일로부터 전기적 에너지 재생을 위한 코일 인덕턴스(L_{coil}), 코일저항(R_{coil}) 그리고 임피던스 정합을 위한 부하저항(R_{load})으로 구성되며 i 는 전류를 나타낸다.

냉각기가 발생하는 미소진동 외란력을 다음과 같이 정의하면,

$$f = f_0 e^{i\omega t} \quad (1)$$

여기에서, f_0 는 냉각기가 발생하는 외란력의 진폭, ω 는 구동주파수를 나타낸다.

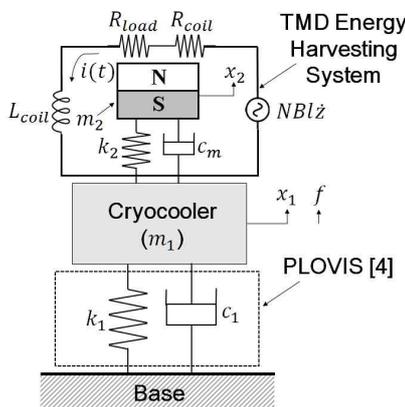


Fig. 2. Numerical Simulation Model

Figure 2의 수치해석 모델에서의 냉각기와 영구자석의 변위를 각각 x_1 과 x_2 로 정의할 경우, 복합시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 - c_m \dot{z} - k_2 z = f \quad (2)$$

$$m_2 \ddot{z} + c_m \dot{z} + k_2 z + \kappa i = -m_2 \ddot{x}_1 \quad (3)$$

$$\kappa \dot{z} - L_{coil} \frac{di}{dt} - (R_{coil} + R_{load})i = 0 \quad (4)$$

여기에서, z 는 상대변위인 $x_2 - x_1$ 을 나타내며, 코일의 권선수(N), 자속밀도(B) 그리고 코일의 둘레길이 (l)로 부터의 연성계수 κ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\kappa = NBl \quad (5)$$

구조 진동계가 전기 진동계에 비해 충분히 느리기 때문에 Fig. 2의 등가 회로상 인덕턴스로 발생하는 전압인 $L_{coil}(di/dt) \approx 0$ 으로 가정하면, 식 (4)로부터

$$i = \frac{\kappa \dot{z}}{(R_{load} + R_{coil})} \quad (6)$$

도출되며, 이를 식(3)에 대입하면,

$$m_2 \ddot{z} + \left(c_m + \frac{\kappa^2}{R_{load} + R_{coil}} \right) \dot{z} + k_2 z = -m_2 \ddot{x}_1 \quad (7)$$

가 얻어지며, 전기적 감쇠계수 c_e 는

$$c_e = \frac{\kappa^2}{R_{load} + R_{coil}} \quad (8)$$

로 정의된다. 여기에서, 전체 시스템의 총 감쇠계수를,

$$c_T = c_m + c_e \quad (9)$$

로 정의하면, 식 (7)은 다음과 같이 정리된다.

$$m_2 \ddot{z} + c_T \dot{z} + k_2 z = -m_2 \ddot{x}_1 \quad (10)$$

$x_1 = X_1 e^{i\omega t}$, $z = Z e^{i\omega t}$ 로 가정하고, P_T 를 c_m 과 c_e 를 포함하는 기계적 시스템에서 산일화된 총전력으로 정의할 경우, 순간전력인 $c_T (dz/dt)^2$ 으로부터 얻어지는 한 주기 동안의 총 평균전력은 다음과 같다.

$$P_T = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau (c_T (Z \omega e^{i\omega t}) (\overline{Z \omega e^{i\omega t}})) dt = \frac{c_T |Z|^2 \omega^2}{2} \quad (11)$$

여기에서, $\tau = 2\pi/w$ 를 나타낸다. 또한, 식 (10)과 식 (11)의 조합으로부터,

$$P_T = \frac{1}{2} \frac{c_T m_2^2 w^6 X_1^2}{[(k_2 - m_2 w^2)^2 + (c_T w)^2]} \quad (12)$$

얻어지며, $w = \sqrt{k_2/m_2}$ 에서 얻어지는 최대 생성 전력 P_{Tmax} 는 다음과 같다.

$$P_{Tmax} = \frac{m_2^2 w^4 X_1^2}{2c_T} \quad (13)$$

P_T 는 기계적 산일화로부터의 소모되는 전력 P_M 과 전기적 에너지 변환으로부터의 생성되는 전력 P_E 의 조합으로 이루어지며, $P_E = P_T \times (c_e/c_T)$ 로부터, 전기적 최대생성전력 P_{Emax} 는,

$$P_{Emax} = P_{Tmax} \times \frac{c_e}{c_T} \quad (14)$$

로 정의되며, $c_T = 2\zeta_T m_2 w_2$, $\zeta_T = \zeta_m + \zeta_e$ 로 가정할 때,

$$P_{Emax} = \frac{\kappa^2 w^2 X_1^2}{8(\zeta_m + \zeta_e)^2 (R_{load} + R_{coil})} \quad (15)$$

얻어지며, 이로부터 냉각기의 미소진동으로부터 전기적 최대생성전력을 산출할 수 있다. 여기에서, $c_e = 2\zeta_e m_2 w_2$ 로 가정할 때, 식 (8)로부터,

$$\zeta_e = \frac{\kappa^2}{2m_2 w_2 (R_{load} + R_{coil})} \quad (16)$$

로 정의된다.

한편, Fig. 2에서의 에너지 하베스팅 시스템은 냉각기 미소진동으로부터의 전기에너지 재생과 동시에 동 흡진기에 의한 진동절연 효과가 기대 가능하다. 냉각기 구동주파수와 냉각기 조립체의 고유진동수 비를 $\gamma = w/w_1$, 냉각기의 질량과 영구자석의 질량비를 $m_2/m_1 = \mu$, 냉각기와 동 흡진기 에너지 하베스팅 시스템의 고유진동수비를 $w_2/w_1 = \beta$ 그리고 $k_1 = m_1 w_1^2$, $c_1 = 2\zeta_1 m_1 w_1$ 로 가정하면, 식(2)와 (10)의 운동방정식으로부터 다음과 같은 기저면 으로의 전달력의 전달함수가 얻어진다.

$$TR = \sqrt{\frac{(\beta^2 - \gamma^2)^2 + (2\zeta_T \beta \gamma)^2}{[(\gamma^2 - 1)(\gamma^2 - \beta^2) - 4\zeta_1 \zeta_T \beta \gamma^2 - \mu \beta^2 \gamma^2]^2 + [2\zeta_T \beta \gamma (1 - \gamma^2 - \mu \gamma^2) + 2\zeta_1 \gamma (\beta^2 - \gamma^2)]^2}} \quad (17)$$

2.3 동 흡진기에 기초한 에너지 하베스팅 수동형 진동절연 복합시스템

본 논문에서는 진동발생원인 냉각기로부터의 미소진동을 회수하여 전기에너지로 재생함과 동시에 진동절연 성능이 보장되는 에너지 재생형 수동형 진동절연 복합시스템을 제안하였으며, 이에 대한 유효성을 입증하기 위해 Table 1의 파라미터를 적용하여 수치해석을 실시하였다. m_1 과 w 값은 대상 냉각기의 제원에 근거하며, w_1 과 ζ_1 값은 수동형 진동절연기[4]의 측정치를 적용하였다. 전자기 에너지 하베스터의 ζ_m 은 본 논문에서 적용하고자 하는 하드웨어의 크기를 기초로 최대 전기에너지의 재생이 가능한 값으로 선정하였고, κ 와 R_{coil} 은 예비설계로부터 도출된 값이며, m_2 는 대상 영구자석의 무게로부터 도출되었다.

Table 1. Parameter Values for Simulation

Parameter	Specification
m_1 (kg)	3.8
m_2 (kg)	0.1
w (rad/s)	$36\text{Hz} \times 2\pi$
w_1 (rad/s)	$8.2\text{Hz} \times 2\pi$
w_2 (rad/s)	$36\text{Hz} \times 2\pi$
ζ_1	0.01
ζ_m	0.01
R_{coil} (Ω)	300
κ (V/m/s)	18.97

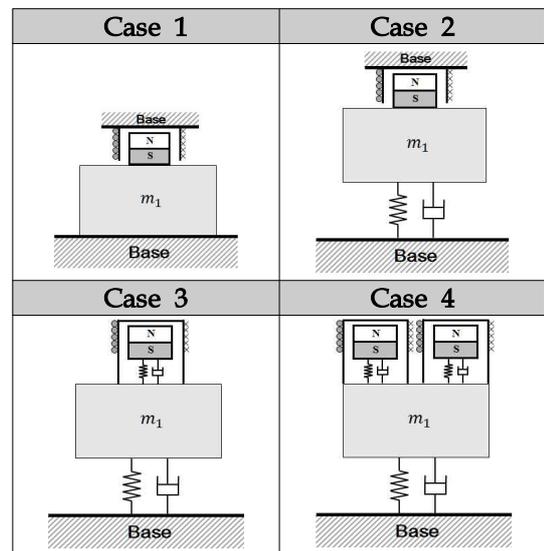


Fig. 3. Simulation Cases

Figure 3은 수치해석 조건을 나타내며, 이들 조건으로부터 각각의 생성전력 및 기저면으로의 미소진동 전달력을 비교하였다. Case 1과 Case 2는 냉각기에 직접 영구자석이 배치된 경우로, 냉각기는 각각 강체구속된 상태와 수동형 진동절연기로 지지되는 경우를 나타낸다. Case 3과 Case 4의 경우, Case 2와 동일하게 냉각기는 수동형 진동절연기로 지지되고 일반적으로 적용되는 동일한 성능의 동 흡진기형 에너지 하베스터가 결합된 경우를 나타내며, 단 하베스터의 개수에 차이가 존재한다.

Figure 4는 각각의 해석조건에서의 부하저항 R_{load} 에 따른 미소진동으로부터 회수되어 전기에너지로 재생된 전기적 최대생성전력을 나타낸다. 냉각기가 강체구속된 Case 1의 경우, 영구자석의 변위가 극히 미소하여 전 부하저항 영역에서 생성 전력은 극히 미소함을 알 수 있다. Case 2의 경우, 진동절연기로 저항성 탄성지지되는 냉각기의 변위가 증가하여 부하저항이 임피던스 정합인 약 3500Ω 일 때, 최대 $95.6\mu W$ 의 전력이 생성됨을 알 수 있다. 한편, 본 논문에서 제안한 냉각기의 구동 주파수와 동조를 이루도록 설계된 동 흡진기형 에너지 하베스터 적용 시, 식 (14)의 P_{Tmax} 조건에 부합하여, 부하저항이 임피던스 정합인 490Ω 일 때 최대생성전력은 약 $294\mu W$ 로 Case 2에 비해 약 3배의 전력상승 효과가 있음을 알 수 있다. 동 흡진기 에너지 하베스터가 추가로 장착된 Case 4의 경우, 한 개의 하베스터로부터 약 $136\mu W$ 의 최대전력이 생성되고, 두 개의 영구자석으로부터 총 $272\mu W$ 의 전력 생성이 가능함을 알 수 있다. Case 4의 경우, Case 3에 비해 낮은 전력이 얻어지며 이는 Figs. 5와 6의 결과로부터 알 수 있듯이 동 흡진기의 효과로 상대변위 z 가 감소됨에 따라 생성효율이 저하된 것으로 판단된다.

Figure 5는 임피던스 정합이 발생하는 지점의 전기적 댐핑을 적용하여 각 해석조건에서의 식 (17)로부터 얻어진 기저면 전달력의 전달함수를 나타낸다. 수동형 진동절연기와 결합된 냉각기의 고유진동수는 8Hz 대역에 존재하며, 에너지 하베스터의 적용에 따른 질량 증가 시에도 크게 변함이 없음을 알 수 있다. 미소진동에 따른 영향성 분석을 위해 중요한 냉각기 구동주파수인 36Hz 부근에서는 Case 2의 수동형 진동절연기 적용에 따라 강체구속에 비해 높은 미소진동절연 효과를 확인할 수 있으며, 전기 에너지 재생을 목적으로 하는 동 흡진기형 에너지 하베스터의

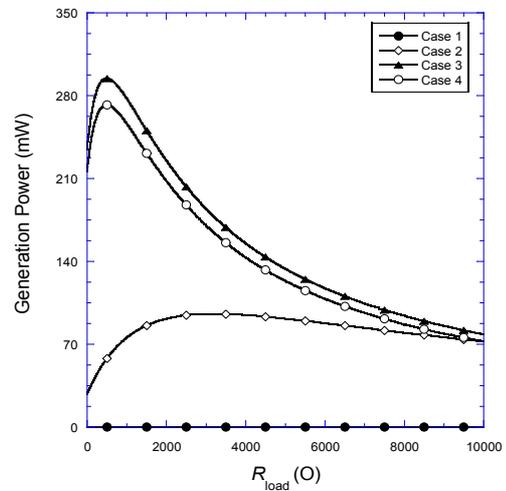


Fig. 4. Generation Power w.r.t Load Resistors

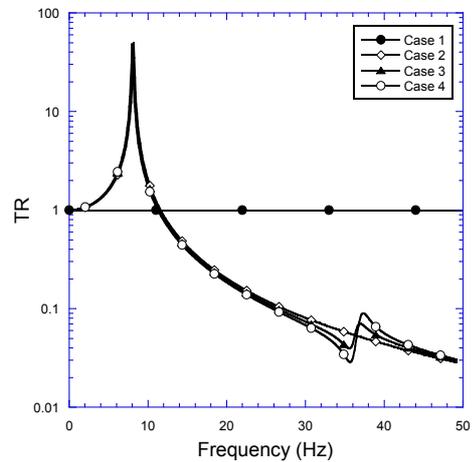


Fig. 5. Frequency Response Spectrum of Each Cases

적용시 진동절연 효과가 보다 증가함을 알 수 있다.

Figure 6은 임피던스 정합이 발생하는 지점의 전기적 댐핑을 적용하여 냉각기의 구동주파수 36Hz에서 각각의 해석조건에서 얻어진 기저면 전달력의 시간 프로파일로 수동형 진동절연기 적용시 미소진동에 의한 전달력은 약 0.4N으로 냉각기 강체구속조건에 비해 약 3.8배의 절연효과가 얻어짐을 알 수 있다. 또한, 가장 높은 절연효과를 보이는 Case 4의 경우, 전달력은 0.18N으로 약 8.3배의 높은 절연효과 증가를 확인할 수 있다.

상기의 수치해석 결과로부터, 본 논문에서 제안한 동 흡진기형 에너지 하베스터 복합시스템은 미소진동으로부터의 에너지 재생과 진동절연에 효과적임을 확인할 수 있다.

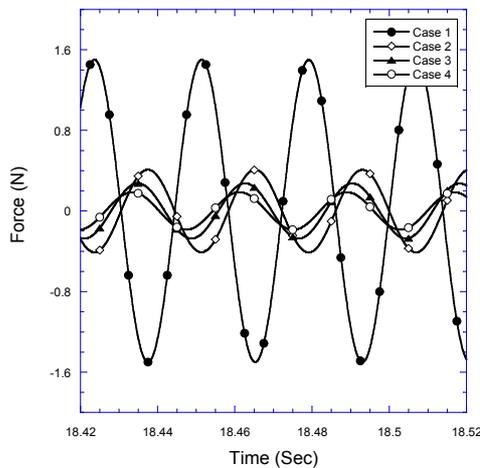


Fig. 6. Simulated Time Histories of Transmitted Force to the Base

III. 결 론

차폐의 대상으로 존재하던 미소진동에 주목하여 이로부터 전기에너지 재생을 위한 동 흡진기형 에너지 하베스팅 시스템을 제안하였으며, 선행연구에서 제안된 수동형 진동절연기에 이를 결합한 복합시스템의 수치해석을 실시하였다. 수치해석 결과, 본 논문에서 제안한 복합시스템은 미소진동으로부터의 에너지 재생과 동시에 진동절연에 효과적임을 확인하였다. 수치해석에서 확인된 생성 전기에너지는 미약하지만, 일반적으로 냉각기가 비상모드를 제외하고 상시 운용되는 점을 고려할 때, 배터리에 충전시 저전력으로 구동되는 멤스 기반 탑재체의 전력원으로서의 효율적 사용이 가능할 것으로 판단된다. 향후, 동 흡진기형 에너지 하베스팅 시스템의 실험실 모델 제작 및 시험을 통해 설계의 유효성을 검증 예정이다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 우주핵심기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다(NRF-2013 M1A3A3A02041817).

References

- 1) H. U. Oh, "Variable Damping Semi-Passive Vibration Isolation for Enhancing Pointing Performance of On-board Payload", *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 35, No. 6, 2007, pp.533-538.
- 2) Rodden, J. J., Dougherty, L. F., Reschke, M. D., Hasha, Davis, L. P., "Line-of-Sight Performance Improvement with Reaction-Wheel Isolation", *Proceedings of Guidance and Control Conference*, Keystone, CO, Sandiego, CA, Univelt, Inc., February, 1986.
- 3) Porter, D., David, C., John, H., "Advanced 1.5 Hz Passive Viscous Isolation System", *35th AIAA SDM Conference*, Hilton Head, South Carolina, April, 1994.
- 4) H. U. Oh, K. J. Lee, M. S. Jo, "A Passive Launch and On-orbit Vibration Isolation System for the Spaceborne Cryocooler", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 28, No. 1, 2013, pp.324-331.
- 5) Y. K. Kim, H. B. Kim, E. H. Kim, K. S. Kim, "Design of Passive Tuned Vibration Absorber for Linear Cryogenic Cooler Vibration Suppression in Space Application", *60th International Astronautical Congress*, Daejeon, Korea, October 2009.
- 6) C. B. Williams and R. B. Yates, "Analysis of a Micro-Electric Generator for Microsystems", *Solid-State Sensor and Actuators*, Vol. 1, pp.369-372, 1995.
- 7) K. Makihara., J. Onoda, K. Minesugi, "A Self-sensing Method for Switching Vibration Suppression with a Piezoelectric Actuator", *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 2, 2007, pp. 455-461.