

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(1), 40-48(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.1.40

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

## 미소진동 발생원으로부터의 전기에너지 재생 및 진동절연을 위한 복합시스템의 실험적 성능검증

권성철\*, 전수현\*\*, 오현웅\*\*\*

### Experimental Investigation of Complex System for Electrical Energy Harvesting and Vibration Isolation

Seong-Cheol Kwon\*, Su-Hyeon Jeon\*\* and Hyun-Ung Oh\*\*\*

Space Technology Synthesis Lab., Dept. of Aerospace Engineering, Chosun University\* ,\*\*\*

Spaceborne SAR R&amp;D Lab., LIG Nex1\*\*

#### ABSTRACT

Micro-vibration induced by on-board appendages that have mechanical moving parts has always been treated as an useless objective that has to be isolated, in order to comply with a high-resolution mission requirement of the observation satellite. In this study, we proposed a tuned mass damper energy harvester combined with a conventional passive vibration isolator for exhibiting dual functions of both electrical energy harvesting and micro-vibration isolation. The feasibility of the proposed dual-function complex system has been demonstrated through the comparison with numerical simulations, based on the results of basic characteristic tests, and experiments of the harvested power and micro-vibration.

#### 초 록

관측위성의 고 해상도 임무요구조건 충족을 위해 기계적 구동부를 갖는 탑재장비로부터의 미소진동은 항상 차폐의 대상으로 존재하였다. 본 연구에서는 차폐의 대상이던 미소진동에 주목하여, 전기에너지 재생이 가능하고 동시에 진동절연이 가능한 복합 시스템 구현을 목표로 동조질량 흡진기 형태의 전자기 하베스터와 결합된 수동형 진동절연 시스템을 제안하였다. 아울러 하베스터의 기본특성 측정시험 결과에 기인한 수치해석과 미소진동 시험 및 생성전력 측정시험을 통해 본 연구에서 제안한 복합시스템은 미소진동 절연과 동시에 전기에너지 재생에 유효함을 입증하였다.

**Key Words** : Energy Harvesting(에너지 재생), Vibration Isolation(진동 절연), Micro-vibration(미소진동), Energy Harvester(에너지 하베스터)

#### I. 서 론

임무장비의 극저온 유지를 위한 냉각기, 위성

의 자세제어용 액츄에이터인 플라이 휠, 자세정보 제공을 위한 기계식 자이로, 안테나의 기계적 구동이 가능한 김벌식 안테나, 태양전지판의 태

† Received : March 11, 2015      Revised : December 2, 2015      Accepted : December 4, 2015

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

양추적 구동기 등과 같이 기계적 회전 또는 병진 구동부를 갖는 탑재장비는 목적하는 기능을 구현함과 동시에 미소진동을 수반한다. 이러한 진동 발생원으로부터의 진동외란은 그 크기가 극히 미소함에도 불구하고 정밀 지향성능이 요구되는 고해상도 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[2-3]이 일반적으로 적용되고 있다. 대표적인 예로서, Riabzev et al. [2]은 극저온 냉각이 요구되는 관측 장비와 냉각기의 콜드팁 사이에 스프링의 횡방향 저항성 특성을 활용한 3자유도의 수동형 진동절연기를 배치함으로써 150Hz를 기점으로 주파수분리를 통한 진동절연효과를 실험적으로 입증하였다. Richard et al. [3]은 중적외선(Mid-wavelength Infrared) 탑재체의 지향성능 향상을 목적으로 6각 형태의(Hexapod) 저항성 지지구조를 형성하는 수동형 진동절연기를 제안하였으며, 플렉서의 두께 및 굽힘횟수에 따른 고유진동수를 제시하여 우주용 냉각기를 포함한 궤도 미소진동발생원의 주 가진 주파수와 주파수 분리를 위한 진동절연기로서 적용 가능함을 수치해석을 통해 입증하였다.

본 연구에서는 상기와 같이 항상 차폐의 대상으로만 존재하는 미소진동을 회수하여 전기에너지로 재생하는 에너지 하베스팅 기술의[4-8] 적용 가능성에 주목하였다. 에너지 하베스팅 기술의 경우 현재 다양한 연구개발이 진행 중에 있으며 그 대표적 예로서, Zhongjie et al. [4]은 별도의 정류장치 없이도 기계적 랙-피니언(Rack&Pinion) 기어의 움직임으로부터 직류전원의 하베스팅이 가능한 차량용 충격흡수기를 제안하였으며, 실제 차량의 운전속도에 따른 생성전력량을 비교 및 분석함으로써 설계의 유효성을 입증하였다. Ibrahim et al. [5]은 지상용 무선 센서노드의 전력원으로서 MEMS기반의 외팔보 하베스터를 제안하였으며, 실험을 통해 약 3.6kHz의 가진주파수에서 0.5uW의 전력이 생성됨을 입증하였다. Rahimi et al. [6]은 Active 전과정류기능을 겸비한 전자기 에너지 하베스터를 제안하였으며, 재생된 에너지를 Active 정류기를 위한 전력원 및 이로부터의 직류전원을 실제 지상용 전력원으로

서 활용 가능함을 실험을 통해 입증하였다. Thomas et al. [7]은 인체의 움직임으로부터 발생하는 진동에너지를 대상으로 소형 전자기 에너지 하베스터를 제안하였으며, 인체의 움직임에 따라 8.7~2100uW의 에너지가 재생 가능함을 실험적으로 입증하였다. 상기의 예와 같이 지상용으로는 현재 다양한 연구 및 개발이 보고되고 있으며, 상용화 단계에 있는 기술 또한 다수 존재한다. 하지만, 우주적용을 목적으로 수행된 관련 연구 및 개발은 국내외적으로 모두 미흡한 실정이며, 우주적용을 목적으로 하는 기초 연구의 일환으로 Makihara et al. [8]이 대형 트러스 구조물의 제진을 목적으로 피에조를 적용한 에너지 재생형 반능동 진동제어를 제안하였다.

본 연구에서는 에너지 하베스팅 기술의 우주적용을 목적으로 Pulse-tube형 우주용 냉각기를 에너지 재생원으로 선정하였다. Pulse-tube형 냉각기는 일반적으로 신뢰도 만족을 위하여 비상모드를 제외하고는 상시 운용되어[9] 지속적인 에너지 재생 및 활용에 있어 유리하고, 단일 특정 주파수로 냉각기가 구동되는 관계로 동특성 파악이 용이하여 에너지 하베스터 설계 관점에서 유리한 장점을 갖는다.

본 논문에서는 우주용 냉각기로부터 발생하는 미소진동을 전기에너지로 재생함과 동시에 진동절연 성능이 보장되는 전자기 에너지 하베스터를 제안하였다. 전자기 하베스터의 설계유효성은 선행연구에서 수치해석을 통해 입증되었으며[10], 본 논문에서는 실제 하베스터의 제작 및 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다. 하베스터의 에너지재생 및 진동절연성능 향상을 목적으로 동 흡진기에 기초한 하드웨어를 설계하였으며, 본 연구에서 목적하는 에너지 재생 및 진동절연 구현을 위해 기 발명된 수동형 진동절연시스템[11]과 하베스터가 결합한 복합시스템을 구축하였다. 동 흡진기형 전자기 하베스터 단독의 기본특성 파악을 위해 영구자석의 적용개수에 따른 자속측정시험 및 자유감쇠진동시험을 실시하였으며, 이로부터 영구자석의 적용개수에 따른 하베스터의 자속(Magnetic Flux) 및 댐핑(Damping Ratio)특성을 측정하였다. 또한, 상기의 기본특성시험으로부터 도출된 하베스터의 설계인자 및 복합시스템의 측정치에 기인한 수치해석과 미소진동 및 생성전력 측정시험을 실시하였다. 상기의 결과로부터, 본 연구에서 제안한 복합시스템의 수학적 모델이 유효함을 입증하였으며, 설계가 목적하는 에너지 재생과 진동절연에 있어 유효함을 입증하였다.

## II. 본 론

### 2.1 전기에너지 재생 및 진동절연을 위한 복합시스템 개요

Figure 1은 본 연구에서 제안한 복합시스템의 수학적 모델을 나타내며[10], 궤도운동 시 미소진동을 발생하는 우주용 냉각기(Cryocooler)와 이를 저항성 탄성 지지하는 수동형 진동절연시스템[11], 냉각기의 미소진동으로부터 에너지 재생 및 진동절연의 복합기능 보장을 위한 동 흡진기형 에너지 하베스터로 구성된다. 여기에서 냉각기 미소진동절연을 목적으로 기 개발된 수동형 진동절연시스템은[11] 발사구속장치의 적용 없이도 발사환경과 궤도환경이라는 서로 상이한 진동환경에 동시 적용 가능하며, 발사환경에서의 진동저감 성능향상 및 궤도 미소진동 절연을 목적으로 의탄성 형상기억합금(Shape Memory Alloy) 메쉬 와셔를[12] 적용하였다. 수동형 진동절연시스템은 주로 발사환경에서 냉각기 고정축 운동 시 에너지 소산을 유발하는 SMA 메쉬와셔와, 궤도 0g 환경에서 장력이 이완되는 스틸 와이어 및 냉각기 열제어를 위한 히트파이프 그리고 검출기 냉각을 위해 헬륨가스가 통과하는 트랜스퍼라인으로 구성된다. 이들로 저 강성 탄성지지되는 냉각기 조립체의 고유진동수는 냉각기 구동주파수인 36Hz와 충분한 주파수 분리가 이루어져 주요 탑재체로의 전달력 최소화 가능하도록 설계되었다. Fig. 1에서, 궤도 운동 시 36Hz의 구동주파수에서 미소진동을 발생하는 냉각기의 질량을 나타내며,  $k_1$ 과  $c_1$ 은 전술한바와

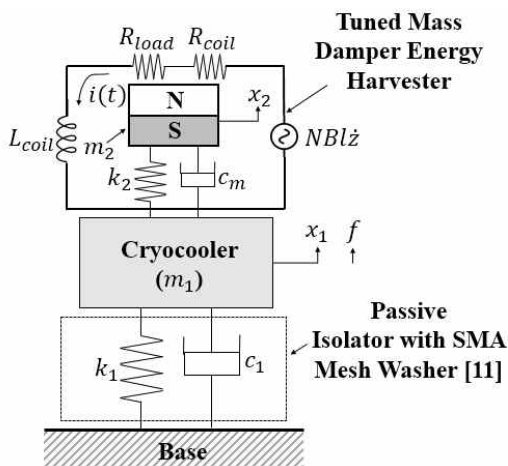


Fig. 1. Numerical Simulation Model of the Complex System [10]

같이 각각 장력이 이완된 스틸와이어, 트랜스퍼라인 그리고 히트파이프로 저 강성 탄성 지지되는 수동형 진동절연시스템의 강성 및 감쇠계수를 각각 나타낸다. 동 흡진기 에너지 하베스터의  $m_2$ 는 영구자석과 더미메스를 포함한 하베스터의 운동질량, 및  $c_m$ 은 각각 냉각기 구동주파수와 동조를 위한 하베스터의 스프링계수 및 기계적 감쇠계수를 나타낸다. 또한, 에너지 하베스터는 유도코일로부터 전기적 에너지를 위해 코일 인덕턴스  $L_{coil}$ , 코일저항  $R_{coil}$ , 그리고 임피던스 정합을 위한  $R_{load}$ 로 구성되며 여기에서  $i$ 는 전류를 의미한다.

본 연구에서 제안한 복합시스템의 수학적 모델을 나타내는 Fig. 1의 설계유효성은 선행연구[10]에서 제안한 운동방정식의 수치해석을 통해 기 입증되었으며, 본 논문에서는 선행연구에 이어 실제 하베스터의 제작 및 실험을 통해 설계의 타당성을 검증하였다.

### 2.2 동 흡진기 전자기 하베스터

본 연구에서 목표하는 미소진동으로부터의 전기에너지 재생 및 향상된 진동절연성능의 복합기능 구현을 위해 동 흡진기에(Tuned Mass Damper, TMD) 기초한 전자기 하베스터를 설계 및 제작하였다. 전자기 하베스터는 중심부에 코일 권선부를 갖는 외부 하우징, 냉각기의 구동주파수와 동조를 위해 설계된 구리 재질의 플레이트 스프링 및 이와 결합되어 냉각기로부터의 미소진동에 의해 병진운동을 하는 운동질량으로 구성되어 있으며, 이 운동질량은 직렬로 연결된 복수개의 영구자석과 더미메스로 구성되어 있다. 영구자석의 경우 에너지 재생효율을 높이기 위해 잔류자속밀도와 보자력이 높은 네오디뮴자석(Nd-Fe-B, 25 $\phi$ , 4T)을 선정하였으며, 권선된 코일 내부에서 병진운동을 함으로써 유도전류를 발생하여 냉각기로부터의 미소진동 에너지를 전기 에너지로 재생하는 특징을 갖는다. Fig. 2는 동 흡진기 전자기 하베스터의 기본특성을 측정하기 위한 시험구성을 나타낸다. 여기에서, 하베스터는 영구자석의 병진운동 방향과 일치하도록 정렬되어 있는 가진기(Shaker)와 결합되어 있다. 하베스터의 자유감쇠진동 응답을 측정하기 위해 가진기에 단일 임펄스 입력신호를 인가하였으며, 이로부터 발생된 하베스터의 운동질량 진동응답은 비접촉식 와전류센서(Eddy Current Sensor)를 통해 측정되었다. 실험 시, 영구자석의 적용개수를 증가시키며 하베스터의 동특성을 분석하였으며 설계가 의도한 하베스터의 고유진동수를 유지

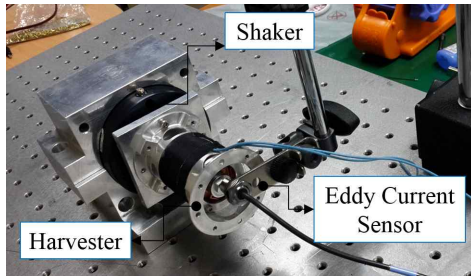


Fig. 2. Basic Characteristics Measurement Test for TMD Harvester

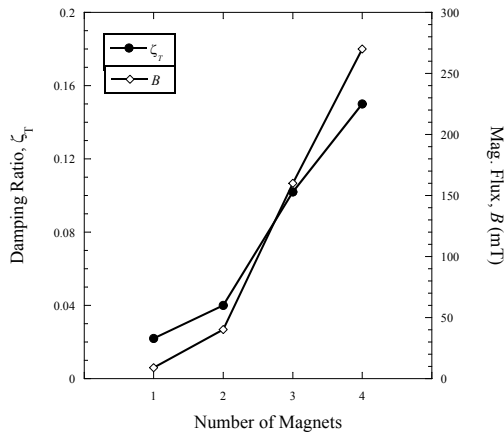


Fig. 3. Damping and Magnetic Flux w.r.t the Number of Magnets

하기 위해 영구자석과 동일한 무게를 갖는 더미 매스를 적용하였다. 아울러 가우스미터를 활용하여 각각의 영구자석 개수에 따른 자기력을 측정하였으며, 직렬로 적층된 영구자석의 길이방향, 동일위치에서 각각 측정하였다.

Figure 3은 각각의 자석개수에 따른 하베스터의 기본특성 시험결과를 나타낸다. 하베스터에 적용된 자석의 개수가 증가할수록 댐핑과 자력이 비례하여 증가하고 있으며, 전기 에너지 재생관점에서 최대생성전력을 나타내는 참고문헌[10]의 식 (15)  $\max \kappa w^2 X_1^2 / 8(\zeta_m + \zeta_e)^2 (R_{load} + R_{coil})$  를 고려할 때, 냉각기의 구동주파수와 공진을 일으켜 최대의 동적응답을 일으키는 하베스터는 적용 영구자석의 개수가 증가할수록 시스템의 댐핑이 증가하여 최대 생성전력이 감소한다. 하지만 영구자석의 개수가 증가함에 따라 자력 역시 증가하며, 상기 식을 고려할 때 기계-전기 연성계수  $\kappa$ 의 증가를 의미한다. 이는 곧 최대 생성전력의 증가를 의미한다. 따라서 하베스터 설계 시 두 개의 설계인자 사이에서 목적하는 성능구현이

가능한 설계치를 도출해야하며, 다음 절에서 보다 상세히 다루고자 한다.

### 2.3 복합시스템의 전기에너지 재생 및 진동절연 성능검증

#### 2.3.1 수치해석

본 연구에서는 진동발생원인 냉각기로부터의 미소진동을 회수하여 전기에너지로 재생함과 동시에 향상된 진동절연 성능이 보장되는 에너지 재생형 수동형 진동절연 복합시스템을 제안하였다. 복합시스템의 유효성을 입증하기 위해 Table 1의 설계인자를 적용하여 수치해석을 실시하였다. 냉각기의 무게와 구동주파수를 나타내는  $m_1$  과  $w$  값은 대상 냉각기의 제원에 근거하며, 수동형 진동절연시스템의 고유진동수와 댐핑을 나타내는  $w_1$ 과 값은 진동절연시스템의 기본특성 측정치를 적용하였다. 에너지 하베스터의 영구자

Table 1. Parameter Values for Simulation

Parameter	Specification
$m_1$ (kg)	5.6
$m_2$ (kg)	0.1156
$w$ (rad/s)	$36\text{Hz} \times 2\pi$
$w_1$ (rad/s)	$6\text{Hz} \times 2\pi$
$w_2$ (rad/s)	$36\text{Hz} \times 2\pi$
$\zeta_1$	0.04
Coil Turns (N)	20000
$coil$ (K $\Omega$ )	18.8

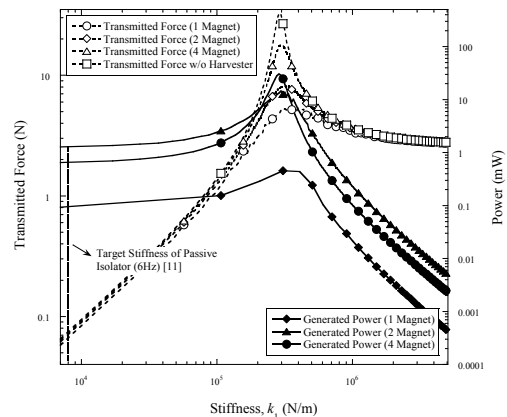


Fig. 4. Simulated Transmitted Force and Generated Power w.r.t the Number of Applied Magnets for Variable Stiffness Value of  $k_1$

석과 더미메스를 포함한 운동질량은 하베스터 개발모델의 측정치로부터 도출하였고,  $w_2$ 는 상기의 에너지 하베스터 자유감쇠진동시험 결과로부터 도출되었다. oil은 0.062mm의 직경을 갖는 코일을  $N$ 회 권선하였을 때의 측정치를 적용하였다.

본 연구에서 제안한 복합시스템의 실험적 성능검증에 앞서 상기의 기본특성측정시험을 통해 도출된 Fig. 3의 측정치 및 Table 1의 설계인자를 토대로 수치해석을 실시하였다. Fig. 4는 수동형 진동절연시스템의 강성치  $k_1$ 이 증가할 때, 하베스터의 영구자석 적용 개수에 따른 기저면으로의 전달력 및 생성전력의 경향성 분석을 위한 수치해석 결과로서, 강성치  $k_1$ 의 증가는 수동형 진동절연시스템의 고유진동수  $w_1$ 의 증가를 의미한다. Fig. 4의 결과를 에너지 재생관점에서 고찰해 볼 때, 강성치  $k_1$ 이 냉각기 구동주파수인 36Hz와 일치하는 지점까지 증가할수록 하베스터로부터 생성되는 최대 전력량이 증가하는 반면, 이를 기점으로  $k_1$ 이 증가할수록 최대 생성전력량은 크게 감소하게 된다. 초기 강성치 증가에 따른 최대 전력량 상승구간은 냉각기를 지지하는 수동형 진동절연기의 고유진동수가 냉각기의 구동주파수와 동조를 이루어 냉각기의 변위  $x_1$ 이 큰 폭으로 증가하였기 때문이며, 전기적 최대생성전력을 나타내는 참고문헌[10]의 식(15)로부터, 냉각기의 변위 증폭은 전기적 최대생성전력에 비례함을 알 수 있다. 또 하나의 중요한 특징으로, 저강성 영역에서 각각의 영구자석 적용 개수에 따른 최대 생성전력량을 고찰해보면 영구자석 2개를 적용하

였을 때 다른 두 조건보다 더욱 뛰어난 에너지 재생효율을 보이고 있으며, 냉각기의 변위  $x_1$ 과, 연성계수  $\kappa$ , 임피던스 정합을 위한 부가저항  $R_{load}$ 에 의한 복합적인 요인으로 판단된다. 한편, 진동절연 관점에서 Fig. 4를 고찰해보면, 초기 저항성 부근에서는 36Hz의 특성을 갖는 냉각기 구동주파수와 충분한 주파수 분리가 이루어져 최적의 진동절연능력이 관찰되며, 강성이 증가하여 수동형 진동절연시스템의 고유진동수가 냉각기 구동주파수와 일치하는 지점에서는 냉각기의 변위응답이 증폭되어 최대의 에너지 재생 성능이 보장되는 반면, 기저면으로의 전달력이 크게 증폭되어 본 연구에서 목적하는 진동절연성능을 기대할 수 없다. 아울러 각각의 영구자석 적용개수에 따른 기저면으로의 전달력에 대해 관찰해 볼 때, Fig. 3의 결과에서 알 수 있듯이 적용 영구자석 개수가 증가할수록 시스템의 댐핑이 증가하여 하베스터 운동질량의 변위가 감소하고, 이는 곧 하베스터의 대시팟(Dashpot) 요소로부터 산일화되는 진동에너지의 감소를 의미한다. 상기의 결과로부터 종합해 보면, 약 7700N/m의 저항성 지지구조로 6Hz의 고유진동수를 갖는 수동형 진동절연 시스템은[11], 동 흡진기 에너지 하베스터와 결합하여 본 연구에서 목적하는 에너지재생 및 향상된 진동절연의 복합기능 구현에 있어 적합한 설계치를 보장한다.

### 2.3.2 실험구성

본 연구에서 제안한 복합시스템의 에너지 재생 및 진동절연성능을 실험적으로 입증하기 위해 Fig. 5와 같이 생성전압 및 미소진동 측정시스템

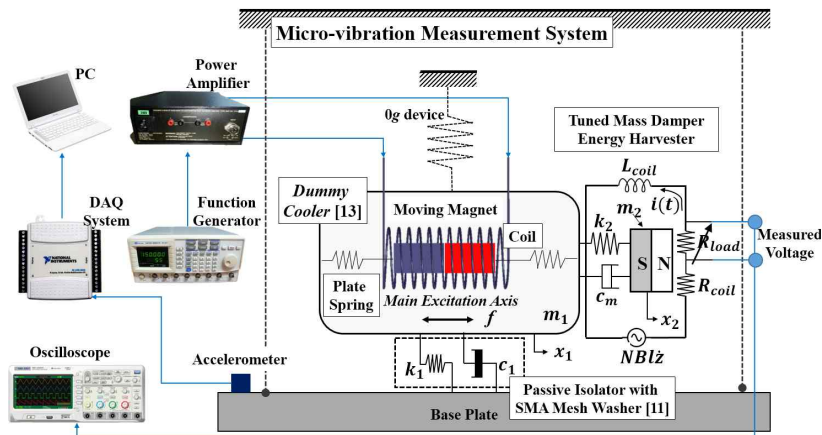


Fig. 5. Schematic Diagram of Energy Harvesting and Micro-vibration Measurement Test Set-up

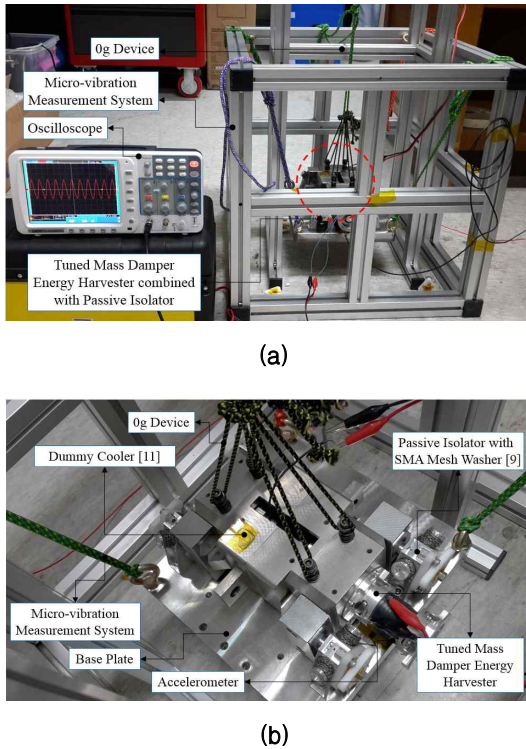


Fig. 6. Energy Harvesting and Micro-vibration Isolation Measurement Test Set-up [(a):Entire Set-up, (b):Close-up View]

을 구축하였다. 실제 우주용 냉각기의 궤도 운용 시 발생하는 주 가진 주파수 36Hz에서의 최대 전달력 2.6N을 모사하기 위해 별도로 제작된 더미 냉각기를 적용하였다[13]. 또한, 궤도환경 모사를 위해 저 강성 탄성외이어로 제작된 0g 장치를 이용하여 냉각기 조립체가 전 방향 free-free 경계조건을 갖도록 구성하였다. 이러한 더미 냉각기는 전술한 수동형 진동절연시스템[11]으로 저 강성 탄성 지지되며, 동 흡진기에 기초한 하베스터를 결합함으로써 향상된 진동절연성능 및 전기 에너지 재생의 복합기능이 보장된다. 냉각기로부터 발생하는 미소진동은 기저면(Base Plate)에 부착된 가속도센서(Accelerometer)로부터 획득되며, 이로부터 획득된 가속도 데이터(g)는 냉각기가 발생하는 기저면으로의 전달력으로 산출된다. 냉각기와 결합된 하베스터로부터의 최대생성 전력은 임피던스 정합을 위해 조정된 부가저항 ( $Z_{oad}$ ) 및 오실로스코프(Oscilloscope)로 측정된 생성전압(V)으로부터 산출된다. Fig. 6 (a), (b)는 생성전압 및 미소진동 측정시스템의 실제 형상을 나타내며, Fig. 6 (a)는 전체 실험구성 형상을,

Fig. 6 (b)는 측정 장치에 결합된 복합시스템의 확대형상을 각각 나타낸다.

### 2.3.3 실험 결과

Figure 7은 미소진동 측정시험으로부터 획득된 기저면 전달력의 시간이력을 나타내며, 36Hz성분의 더미 냉각기로부터의 외란력 2.6N에 대해 하베스터 적용 시 수동형 진동절연시스템만 적용한 경우보다 향상된 진동절연성능을 보이지만, 영구자석 적용개수에 따른 성능 차이는 미미하다. 이는 냉각기 무게에 비해 하베스터의 영구자석이 상대적으로 작은 무게비를 갖기 때문이며, 무게비를 증가시킬수록 보다 향상된 절연성능 확보가 가능하다 [14]. Fig. 8은 하베스터에 적용된 영구자석의 개수를 증가시키며 획득한 생성전압 결과와 기본특성시험으로부터 도출된 복합 시스템의 설계인자에 기인한 시뮬레이션 결과를 비교한 그래프를 나타낸다. 설계가 의도한 하베스터의 정확한 주파수 조정불가 및 중력 작용에 의한 운동질량의 회전모드 등 복합적 요소를 고려하지 않아 일부 구간에서 다소 불일치점이 존재하나, 전압 관계식을 나타내는 참고문헌 [10]의 식(4)가 실제 에너지 하베스터의 특성을 근사적으로 추정하고 있음을 알 수 있다. Fig. 8의 결과로부터, 에너지 하베스터로부터의 최대 생성 전압은 영구자석 한 개 적용 시 218mV, 두 개 적용 시 530mV, 네 개 적용 시 710mV이며, 자석 네 개 적용 시 가장 큰 전압이 생성됨을 알 수 있다. 하베스터로부터의 생성전압을 나타내는 참고문헌[10]의 식(4)로부터 상기의 결과를 고찰하면, 자석 적용개수에 따라 가변하는 댐핑과 자력은 하베스터의

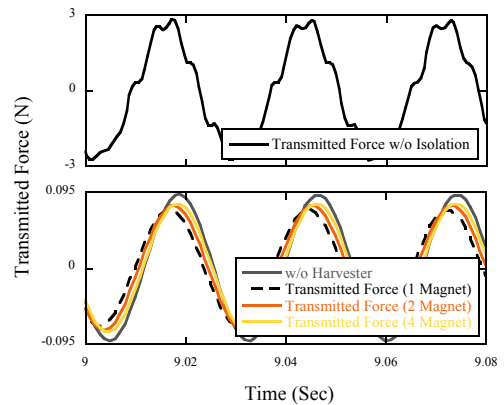


Fig. 7. Comparison with Transmitted Force obtained from Micro-vibration Measurement Test w.r.t the Number of Magnets

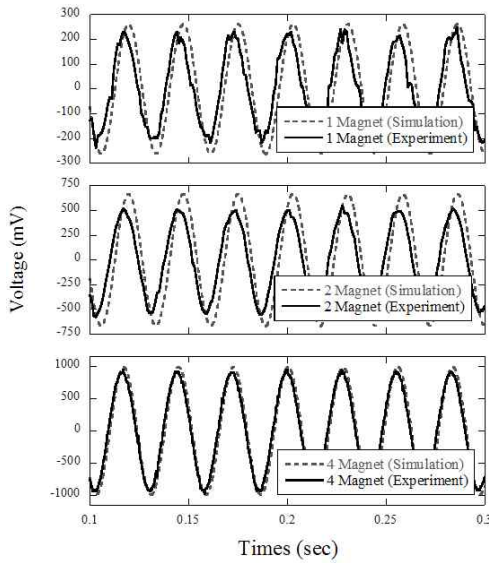


Fig. 8. Comparison with Simulated and Experimented Voltage w.r.t the Number of Magnets

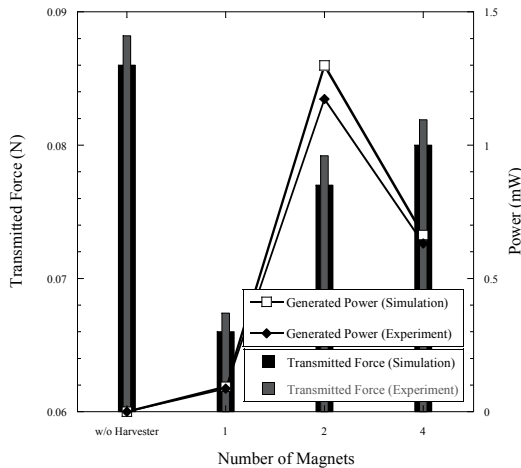


Fig. 9. Comparison between Simulated and Experimented Results of Transmitted Force and Generated Power w.r.t the Number of Magnets

생성전압에 상반된 영향을 미치며, 자석 증가에 따라 생성전압이 증가하는 Fig. 8의 결과로부터 유추해 볼 때, 최대 생성전압은 시스템의 댐핑 증가에 의한 성능저감 보다는 자기력의 증가로 인한 성능향상이 훨씬 지배적임을 유추할 수 있다.

Figure 9는 Fig. 5의 실험구성으로부터 획득된 기저면으로의 전달력(N) 및 최대생성전력(mW)

을 나타내며, 하베스터의 영구자석 적용 개수에 따른 경향성을 나타낸다. 아울러, 본 연구에서 제안한 수치해석 모델의 유효성을 입증하기 위하여 기본특성시험으로부터 획득된 Fig. 3의 설계인자 및 Table 1의 실제 측정치에 기인한 수치해석 결과를 상기의 실험결과와 비교 및 분석하였다. Fig. 9의 결과로부터, 영구자석 적용 개수에 따른 기저면으로의 전달력과 생성전력량의 수치해석 결과가 실험치의 경향성을 근사적으로 추정하고 있음을 알 수 있으며, 기존의 냉각기 진동절연시스템에 하베스터를 결합할 경우 영구자석의 적용 개수에 따라 절연성능에는 차이가 존재하나 동흡진기형 하베스터의 작용으로 진동절연시스템만 적용되었을 경우보다 향상된 진동절연성능을 보이고 있다. 이는 냉각기의 구동주파수와 공진을 이루도록 설계된 동조질량형(TMD) 하베스터의 운동질량이 큰 폭으로 변위를 발생함으로써 대시 팻 요소로부터의 에너지 산일화가 작용했음을 의미한다. 특히, 영구자석 1개를 적용하였을 경우 작은 무게의 하베스터 운동질량을 큰 폭으로 운동시키기에 시스템의 댐핑이 충분히 작아 가장 뛰어난 진동절연 성능을 보이고 있으며, 냉각기가 발생하는 미소진동 외란력 2.6N에 대해 37배 이상의 저감성능을 보이고 있다. 한편, 하베스터의 최대 생성전력은 영구자석 2개일 경우 약 1.2mW로서 다른 두 경우보다 높은 에너지 재생 성능을 보이고 있으며, 최대 생성전압이 영구자석 4개를 적용하였을 때를 나타내는 Fig. 8의 결과와 비교해볼 때 상반된 결과를 나타내고 있다. 이를 최대 생성전력을 나타내는 참고문헌[10]의 식(15)로부터 고찰해 볼 때, 각각의 영구자석 적용 개수에 따라 임피던스 정합을 위한 부가저항 값에 차이가 존재하기 때문이며, 상대적으로 시스템의 댐핑이 높은 영구자석 4개의 경우 임피던스정합을 위한 부가저항이 약 760 로서, 약 210Ω의 부가저항이 요구되는 2개의 경우보다 상대적으로 내부 임피던스가 높아 다소 저감된 전력생성효과를 보이는 것으로 판단된다.

상기의 결과로부터, 수치해의 결과가 실험치를 근사적으로 추정함으로써 본 연구에서 제안한 수학적 모델의 유효성을 입증하였으며, 실제 실험 결과를 통해 본 연구에서 목적하는 에너지 재생 및 진동절연의 복합성능 구현에 있어 타당함을 입증 하였다. 아울러, 하베스터로부터 수확되는 전력량이 미소한 수준이나, 이를 충전할 시 MEMS 기반 저 전력 임무장비의 구동에 활용 가능하다.

### III. 결 론

차폐의 대상으로 존재하던 우주용 냉각기 미소진동에 주목하여 이로부터 전기에너지 재생 및 진동절연의 복합성능 구현이 가능한 동 흡진기형 전자기 하베스터를 제안하였으며, 최적의 성능구현을 위해 기 발명된 우주용냉각기 진동절연시스템과 결합된 복합시스템을 고안하였다. 동 흡진기형 에너지 하베스터 단독의 기본특성을 측정하기 위해 영구자석의 적용 개수에 따른 자기력측정 및 자유감쇠진동시험을 수행하였으며, 적용 영구자석의 개수가 증가할수록 하베스터의 자기력 및 댐핑이 선형 증가함을 입증하였다. 하베스터의 영구자석 적용개수에 따른 기본특성을 기초로, 복합시스템의 생성전압 및 미소진동측정시험을 수행하였다. 실험 결과, 본 논문에서 제안한 복합시스템은 영구자석 적용개수에 따라 성능에는 차이가 존재하나 우주용 냉각기의 미소진동으로부터 에너지 재생과 동시에 진동절연의 복합성능구현에 있어 유효함을 입증하였다. 또한, 하베스터의 기본특성 및 실제 복합시스템의 측정치를 기반으로 도출된 수치해의 결과가 실험결과를 근사적으로 추정함으로써 본 연구에서 제안한 수학적 모델의 타당성을 입증하였다. 향후 복합시스템으로부터의 전기에너지를 충전 가능한 시스템을 구축하고, 저 전력으로 구동되는 MEMS 기반 장비의 전력원으로서 활용가능성에대한 유효성을 입증할 예정이다.

### 후 기

본 연구는 한국연구재단의 우주핵심기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다(NRF-2013M1A3 A3A02041817).

### 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) Riabzev, S. V., Veprik, A. M., Vilenchik, H. S., Pundak, N. and Castiel, E., "Vibration-free Stirling Cryocooler for High Definition Microscopy", *Cryogenics*, Vol. 49, No.

12, pp. 707-713.

3) H. U. Oh, K. J. Lee and 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.

4) L. Zhongjie, Z. Lei, K. Jian and L. George, "Energy-harvesting shock absorber with a mechanical motion rectifier", *Smart Materials and Structures*, Vol. 22, No. 2, 2013, pp. 1-10.

5) S. Ibrahim, B. Tuna and K. Haluk, "A Wideband Electromagnetic Micro Power Generator for Wireless Microsystems", *Solid State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2007, Transducers 2007, IEEE*, p. 275-278.

6) A. Rahimi, O. Zorlu, A. Muhtaroglu and H. Kulah, "Fully Self-powered Electromagnetic Energy Harvesting System with Highly Efficient Dual Rail Output", *Sensors Journal, IEEE*, Vol. 12, No. 6, 2012, pp. 2287-2298.

7) V. B. Thomas, D. M. Paul, C. G. Tim, M. Y. Eric, S. H. Andrew and T. Gerhard, "Optimization of Inertial Micropower Generators for Human Walking Motion", *Sensors Journal, IEEE*, Vol. 6, No. 1, 2006, pp. 28-38.

8) K. Makihara., J. Onoda and 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.

9) H. U. Oh, M. K. Lee, S. M. Shin and J. S. Hong, "A Numerical and Experimental Investigation of the Thermal Control Performance of A Spaceborne Compressor Assembly", *Cryogenics*, Vol. 55, No. 9, 2011, pp. 477-484.

10) S. C. Kwon, M. S. Jo and H. U. Oh, "Numerical Investigation of Complex System for Electrical Energy Harvesting and Vibration Isolation", *J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Science*, Vol. 42, No. 8, 2014, pp. 648-653.

11) H. U. Oh, S. C. Kwon and S. H. Youn, "Characteristics of Spaceborne Cooler Passive Vibration Isolation by using A Compressed



Shape Memory Alloy Mesh Washer”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, No. 1, 2015, pp. 015009.

12) S. H. Youn, Y. S. Jang and J. H. Han, “Compressed Mesh Washer Isolators using the Pseudoelasticity of SMA for Pyroshock Attenuation”, *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21, No. 4, 2010, pp. 407-421.

13) S. C. Kwon, S. H. Jeon and H. U. Oh,

“Performance Evaluation of Spaceborne Cryocooler Micro-vibration Isolation System Employing Pseudoelastic SMA Mesh Washer”, *Cryogenics*, Vol. 67, 2015, pp. 19-27.

14) J. S. Bae, J. H. Hwang, J. H. Roh, J. H. Kim, M. S. Yi, J. H. Lim, “Vibration Suppression of a Cantilever Beam using Magnetically Tuned-mass-damper”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 331, No. 26, 2012, pp. 5669-5684.