creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000265430

2016년 2월

석사학위 논문

우주용 냉각기의 미소진동을 활용한 압전 에너지 하베스팅에 관한 연구

조선대학교 대학원

항 공 우 주 공 학 과

정 현 모

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

우주용 냉각기의 미소진동을 활용한 압전 에너지 하베스팅에 관한 연구

- A Study on Piezoelectric Energy Harvesting using Micro-vibration of Spaceborne Cryocooler -

2016년 2월 25일

조선대학교 대학원

항 공 우 주 공 학 과

정 현 모

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

우주용 냉각기의 미소진동을 활용한 압전 에너지 하베스팅에 관한 연구

지도교수 오 현 웅

이 논문을 공학 석사학위 신청 논문으로 제출함.

2015년 10월

조선대학교 대학원

항 공 우 주 공 학 과

정 현 모

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

정현모의 석사학위논문을 인준함

위원장 항공우주연구원 책임연구원 김 홍 배 (인)

위 원 항공우주연구원 책임연구원 우 성 현 (인)

위 원 조선대학교 교 수 오 현 웅 (인)

2015년 11월

조선대학교 대학원

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES ····· iii

LIST OF TABLES ····· v

ABSTRACT ····· vi

제 1 장 서 론 ····· 1

제 2 장 미소진동 에너지 수확 시스템 ····· 8

제 1 절 Pulse Tube형 우주용 냉각기 ····· 8

제 2 절 압전 에너지 수확 시스템 ····· 11

제 3 절 복합 시스템의 구성 ····· 18

1. 수동형 진동 절연 시스템 ····· 20

2. 압전 에너지 수확 시스템 ····· 23

제 4 절 복합 시스템의 유효성 분석 ····· 28

1. 복합 시스템의 기본 특성 ····· 28

가. 진동 절연기의 기본 특성 ····· 28

나. 압전 에너지 수확 장치 시스템 기본 특성 ····· 38

2. 복합 시스템의 수학적 성능 검토 ····· 41

제 3 장 복합 시스템의 실험적 성능검증 ····· 49

제 1 절 시험 구성 ····· 51

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 미소진동 절연 및 에너지 재생 측정시험 ···· 58

제 4 장 결 론 ····· 66

【참고문헌】 ····· 68

【연구실적】 ····· 71

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Image Quality Degradation due to Micro-vibration Disturbance Sources[23] ····· 6
Fig. 2 Energy Sources of Surrounding Environment[24] ····· 7
Fig. 3 Pulse Tube Type Cryocooler[23] ····· 9
Fig. 4 Vibration Output of Pulse-tube and Stirling Type Cryocooler[23] ····· 10
Fig. 5 Schematic of Direct Piezoelectric Effect ····· 14
Fig. 6 Schematic of Converse Piezoelectric Effect ····· 14
Fig. 7 (a) 31 Mode (b) 33 Mode of Piezoelectric Material ····· 15
Fig. 8 (a) Perovskite Structur and (b) Crystal Structure of Pb(Zr, Ti)O_3 ····· 17
Fig. 9 Complex System for Dual Functions of Micro-vibration Isolation and Energy Harvesting ····· 19
Fig. 10 Passive Launch and On-orbit Vibration Isolator Employing SMA Mesh Washer[23] ····· 21
Fig. 11 Vibration Isolator Assembly Combined with Cryocooler[23] ····· 22
Fig. 12 (a) Unimorph Structure and (b) Bimorph Structure Cantilever ····· 24
Fig. 13 Mode Analysis (a) Model, (b) Result and (c) Cantilever model of the Proposed Piezoelectric Energy Harvesting Module ····· 25
Fig. 14 Piezoelectric Energy Harvesting System ····· 27
Fig. 15 Vibration Isolator Assembly Static Load Test Configuration ····· 32
Fig. 16 Displacement-Load Relation of Vibration Isolator Assembly in y-axis ····· 33
Fig. 17 Vibration Isolator Assembly Free Vibration Test Configuration ····· 34
Fig. 18 Time Profiles of Excitation Force in Free Vibration Test in y-axis ····· 35
Fig. 19 Frequency Responses in Free Vibration in y-axis ····· 36
Fig. 20 Basic Vibration Transmissibility Curve ····· 37
Fig. 21 (a) Schematic and (b) Experimental Set-up for Measuring Resonant

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Frequency and Damping ····· 39
Fig. 22 Time Profiles of Excitation Force in Free Vibration Test ····· 40
Fig. 23 Single Degree of Freedom System with a Piezoelectric Transduce ·· 44
Fig. 24 Simulated Values of Transmitted Force ····· 45
Fig. 25 Simulated Values of Generated Voltage ····· 46
Fig. 26 Generated Voltage Sensitivity According to the Variations of Eigenfrequency of the Piezoelectric ····· 47
Fig. 27 An Array of Cantilever with (a) Six Fingers Having Different Length and (b) an Array of Cantilever with Five Fingers Having Different Width [21] ····· 48
Fig. 28 Image Quality Degradation by Micro-vibration [(a):Blurred Image by Micro-vibration, (b):High-Quality Image without Micro-vibration Affection] [31] ····· 50
Fig. 29 Whole Schematic Diagram for the Micro-vibration and Energy Harvesting Measurement Test ····· 52
Fig. 30 Dummy Cryocooler Internal Configuration ····· 53
Fig. 31 Linear Motor for Micro-vibration of the Spaceborne Cryocooler ····· 54
Fig. 32 Entire Test Set-up for the Micro-vibration and Recycled Energy Measurement Test ····· 56
Fig. 33 Close-up Test Set-up for the Micro-vibration and Recycled Energy Measurement Test ····· 57
Fig. 34 Rigid Condition by Inserting Blocking Bracket between Displacement Limiter and Shaft Cover ····· 60
Fig. 35 Nominal Position of the Vibration Isolator Assembly ····· 61
Fig. 36 Comparison of Measured Force w/o & with Isolation ····· 62
Fig. 37 Comparison of Measured Voltage w/o & with Isolation ····· 63
Fig. 38 Comparison of Measured Force and Voltage w/o & with Isolation ··· ····· 64
Fig. 39 Stored Energy into the 10μF Capacitor 2 ····· 65

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF TABLES

Table 1 Comparison of Typical Piezoelectric Coefficients of the Representative Materials [24] ····· 16
Table 2 Measurement of Piezoelectric Ceramic Parameters ····· 26
Table 3 Voice Coil Motor Specifications ····· 55

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

A Study on Piezoelectric Energy Harvesting using Micro-vibration of Spaceborne Cryocooler

by Jeong, Hyeon-Mo
Advisor : Prof. Oh, Hyun-Ung, Ph. D.
Department of Aerospace Engineering
Graduate School of Chosun University

Pulse tube-type spaceborne cooler, used to cool down the infrared imaging sensor, produces undesirable micro-vibration during its on-orbit operations and its micro-vibration seriously affects the image quality of the observation satellite. To assure the high-quality image, the cooler-induced vibration has always been subjected to an isolation objective. However, in this study, we focused on the feasibility of positively utilizing the cooler-induced vibration as a renewable power as well as simultaneously assuring vibration isolation capability. To implement this strategy, we proposed a complex system composed of energy recycling system combined with passive vibration isolator. The basic characteristics of the complex system were demonstrated by dual functions of the energy generation and the vibration isolation was then evaluated through performing the function test at assembly level of the complex system.

Key Word : Spaceborne Cryocooler, Micro-vibration, Piezoelectric, Energy Harvesting System, Vibration Isolator

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 장 서 론

최근 위성의 임무요구조건이 상향됨에 따라 이를 만족하기 위한 임무 장비 및 각종 구성품이 탑재된다. 이러한 위성체의 다양한 임무 장비와 구성품 중 위성의 자세제어용 액추에이터인 플라이 휠, 위성의 자세정보 획득을 위한 기계식 자이로, 안테나의 기계적 구동이 가능한 짐벌식 안테나, 태양전지판의 태양추적 구동기, 임무장비의 극저온 유지를 위한 냉각기 등의 탑재 장비들이 존재한다. 이와 같은 탑재 장비는 기계적 회전 또는 병진 가동부를 갖으며, 목적하는 기능을 구현함과 동시에 미소진동을 수반한다. 이러한 진동발생원으로부터의 미소진동 외란은 그 크기가 극히 미소함에도 불구하고 Fig. 1 과 같이 정밀 지향성능이 요구되는 고 해상도 관측위성의 영상품질을 저하시키는 주요 원인으로 작용한다[1]. 고해상도 관측위성의 임무요구조건 충족을 위해서는 진동 발생원으로부터의 미소진동이 구조체 또는 주요 임무 탑재장비에 전달되지 않도록 진동절연기를 적용하는 방법 또는 저진동 탑재장비를 개발하는 방법 등 추가적인 기술적 노력들이 요구된다.

상기의 궤도상 미소진동 절연을 구현하기 위한 방법 중 진동절연기를 적용하는 방식으로는 위성임무에 요구되는 신뢰도 및 시스템의 안정화 요구조건을 만족하기 위해 주로 수동형 절연방식[2-8]이 일반적으로 적용되고 있다.

그 대표적인 예로서, Karl et al. [2]은 가시광선이나 적외선에 비해 X-ray라는 파장이 매우 짧은 광선을 집속하는 임무장비의 고해상도 요구조건을 충족하기 위하여 리액션 휠로부터 발생하는 미소진동에 대해 수동형 진동절연기를 배치함으로써 전체 구동주파수 대역에서 2.8배 이상의 진동절연효과가 있음을 보고하고 있다. Poter et al. [3]이 제안한 2개의 스프링과 점성 감쇠 요소로 이루어진 3요소 진동절연기는 스프링과 점성 감쇠만의 2요소로 구성된 절연기에 비해 모멘텀 휠 진동절연에 효과적임을 보고하고 있다. Kim et al. [4]은 수동형 동조질량 진동흡수기를 적용함으로서 극저온 냉각기와 같이 궤도 운용 시 일정 주파수의 하모닉을 발생하는 탑재장비의 진동 저감에 효율적임을 실험을 통해 입증하였다. Richard et al. [5]은 중적외선(Mid-wavelength Infrared) 탑재체의 지향성능 향상을 목적으로 6각형태의(Hexapod) 저강성 지지구조를 형성하는 수동형 진동절연기를 제안하였으며, 냉각기의 복수 하모닉 성분(55, 110, 165Hz)을 대상으로 20dB이상의 진동절연 효과가 있음을 입증하였다. Veprik et al. [6]은 75Hz의 단일주파수의 하모닉을 발생하는 우주용 냉각기를 대상으로 수동형 동조질

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

량흡수기를 적용함으로써 100배 이상의 진동절연효과가 있음을 실험을 통해 입증하였다. Riabzev et al. [7]은 극저온 냉각이 요구되는 관측 장비와 냉각기의 콜드팁 사이에 스프링의 횡방향 저강성 특성을 활용한 3자유도의 수동형 진동절연기를 배치함으로써 150Hz를 기점으로 하는 진동절연 효과를 실험적으로 입증하였다. Kamesh et al. [8]은 플랙셔 형태의 수동형 진동절연기를 제시하였으며, 플랙셔의 두께 및 굽힘 횟수에 따른 고유진동수를 제시하여 우주용 냉각기를 포함한 궤도 미소진동발생원의 주 가진 주파수와의 주파수 분리를 위한 진동절연기로서 적용 가능함을 수치해석을 통해 입증하였다.

상기의 예와 같이 궤도상 진동절연을 구현하기 위해 기존의 수동형방식의 경우 주파수 분리에 근거한 진동절연기 지지구조를 비교적 저강성 탄성 지지구조로 형성함으로써 목적하고자하는 미소진동 절연성능 확보에는 적합한 반면, 극한 진동환경인 발사하중에서 저강성 탄성 지지된 미소진동발생원 및 진동절연기의 구조건전성 확보에는 어려움이 존재하여 저강성 지지구조의 진동절연기와 함께 별도의 발사구속장치로 보호되는 이중구조가 요구된다. 반면, 별도의 발사구속장치 적용 시 구조건전성 확보에는 용이하나 시스템의 복잡화 및 신뢰도 측면에서 단점이 존재하며, 시스템 전체의 무게증가, 발사구속장치 작동 시 수반되는 충격에 의한 임무장비 손상의 위험성, 분리장치의 구속해제 실패 시 궤도상 미소진동절연 불가에 대한 단점이 존재한다. 상기의 단점을 극복하기 위해 Oh et al. [9]은 별도의 발사구속장치 없이 우주용 냉각기를 대상으로 진동환경이 서로 상이한 발사 및 궤도환경에 동시 적용 가능한 수동형 진동절연기를 제안하였으며, 실제 궤도 운용을 통해 그 유효성을 입증하였다. 하지만 궤도 미소진동절연을 위해 적용된 코일스프링이 발사환경에서는 아무런 진동감쇠 역할을 하지 못하는 단점이 존재하여, 비록 냉각기의 설계하중에 대한 요구조건을 초과하진 않았으나 정현파 진동시험에서의 우수한 저감성능 효과를 보장할 수 없었다. 이는 곧 진동절연기와 결합된 임무장비의 설계 요구조건이 높을 경우, 구조건전성 확보에 어려움이 존재 할 가능성으로 존재하였다. 이러한 단점을 보안하기 위해 Oh et al. [10-11]은 의탄성 형상기억합금을 적용한 수동형 진동절연 시스템을 제안하였으며, 인증수준의 발사환경시험[10] 및 미소진동 측정시험을[11] 통해 그 유효성을 입증하였다.

전술 하였듯 고해상도의 영상정보를 충족하기 위해서는 진동 발생원으로부터의 미소진동은 항상 차폐의 대상으로만 존재하였으나, 본 연구에서는 이러한 미소 진동을 회수하여 전기 에너지로 재생하는 에너지 수확기술의 적용 가능성에 주목하였다.

에너지 수확(Energy Harvesting) 기술은 신재생 에너지로 각광받고 있는 기술로써

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

기존의 대규모 전력을 생성하는 발전소로부터 전기를 공급하는 일반적인 전력 시스템과 달리 주변에 자연적으로 발생되는 에너지원으로부터 에너지를 수확하여 전기 에너지로 변환 후 배터리와 같은 이차전지에 저장하여 향후 전력을 필요 시 공급하는 일련의 과정을 말하며, 미소한 에너지 발생원으로부터 비교적 간단하게 에너지를 변환하여 용이하게 사용할 수 있는 장점을 지니고 있다. 이러한 에너지 수확 기술은 Fig. 2와 같이 태양에서 발생되는 태양광 에너지와 태양열 에너지, 교량에서 발생되는 진동에너지, 통신타워에서 전송되는 전자기 에너지와 진동에너지, 신체의 이동 시 생성되는 진동에너지와 지속적으로 발생하는 열에너지, 가정에서 사용하는 각종 전자제품 및 차량에서 발생하는 열과 진동에너지 등 무수히 많으며, 이로부터 발생하는 미소한 에너지원을 에너지 변환 소재를 활용하여 유용한 전기 에너지로 변환 및 활용하는 기술로써 궁극적으로 추가적인 에너지 공급 없이 주변의 에너지를 이용하여 독립적으로 구동이 가능하도록 하는 기술이다[12].

에너지 수확의 에너지원이 되는 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하기 위한 대표적인 방식으로는 압전(Piezoelectric) 방식, 정전(Electrostatic) 방식[13], 전자기(Electromagnetic) 방식[14-15]으로 나뉠 수 있다. 압전 방식의 경우 구조체에 진동이 발생할 경우 구조체 표면에 접합되어 있는 압전체의 변형을 통해 전기 에너지를 발생하며, 정전기 방식의 경우 진동하는 전극 구조 사이의 간격 변화에 따라 유전체의 정전용량이 변화하는 원리를 이용한다. 전자기 방식은 자성체와 금속 코일과 같은 전도성 구조물로 구성되어 자성체가 진동이 발생함에 따라 주변에 배치된 전도성 구조물에 유도되는 전기장 변화로부터 전기 에너지가 발생됨을 활용한다.

에너지 수확 기술을 구현하기 위한 방식으로는 높은 에너지 밀도 및 전압을 생성하며, 진동 환경에 최적화가 가능한 구조물의 설계 및 제작이 용이한 압전 방식을 이용한 에너지 수확 기술의 연구[16-20]가 진행 중에 있다. 그 예로서, Taylor et al. [16]은 유연한 넓은 면적의 압전소자를 이용하여 해저나 강물 아래에 설치하여 물결의 흐름으로부터 전기에너지를 생산할 수 있으며, 향후 이를 이용하여 배터리 교환이나 전력공급이 힘든 해저나 대양의 바다 위에 존재하는 감지기 및 부표의 동력원으로 가능할 것으로 예상하고 있다. Wang et al. [17]은 ZnO 나노선 에너지 수확 소자를 제작하여 전극 소재와 갈지자형(Zigzag) 구조의 전극 개발을 통해 쇼트키 접합 특성을 개선함으로써 출력특성을 향상시켰으며, 나노선 어레이의 집적화 연구를 통해 출력 효율의 개선을 위한 연구가 수행되었다. Wang et al. [18]은 ZnO의 낮은 압전 특성으로 인하여 고출력을 내는 압전 나노선 에너지 수확 소자를 연구하였으며, ZnO보다 압전특성이

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

10~30배 우수한 $BaTiO_3$ 나노선을 기반으로 하는 압전 나노발전기를 제작하여 출력 특성을 확인하였으며, Park et al. [19]는 이를 이용하여 심장 박동, 혈액 흐름과 같은 미세한 움직임으로도 전기를 만들 수 있는 새로운 형태의 나노 압전발전기술을 개발하였다. Choi et al. [20]은 ZnO 나노선을 기반으로 하는 투명 나노전력발전소자로 그래핀(Graphene) 박막이 상하의 전극을 이루는 압전 발전 소자를 연구하였다.

에너지 수확 시스템의 활용은 상기에서 전술하였듯 해저 및 강물에 배치됨에 따라 배터리 교환, 전력공급에 있어 어려움이 존재하는 바다 위의 감지기 및 부표의 동력원으로 사용 가능하며, 인체에 내장하여 호흡, 심장박동 및 혈액의 흐름 등으로부터 전기에너지를 발생하여 의료기기의 전원 공급 장치로 이용될 수 있다. 또한, 마이크로미터의 소형 크기로 제작되는 MEMS(Micro Electro Mechanical System)은 크기가 작을 뿐만 아니라 소비 전력도 높지 않은 장점으로 이를 구동하기 위해 에너지 수확 시스템에서의 최소전력 요구조건은 50μW이며[21], MEMS 공정으로 3축 자이로스코프와 3축 가속도 센서를 조합시킨 6축 MEMS 콤보 칩 경우 6.1mW의 저전력이 소비되어 에너지 수확 시스템으로부터 재생된 전기 에너지를 활용하여 구동 할 수 있다[22].

이와 같이 추가적인 에너지 공급 없이 주변에서 버려지는 미소한 에너지원을 이용한 에너지 수확 기술이 화두 됨에 따라 이에 관련된 연구 및 개발이 상당수 진행되어 현재 지상용으로 상용화 수준에 이르는 기술도 다수 존재 하지만 우주적용을 목적으로 수행한 에너지 수확 시스템 개발 및 연구는 국내·외적으로 미흡한 실정이며, 부분적으로 기초 연구만 수행되고 있다. 본 연구에서는 에너지 수확 기술의 우주적용을 목적으로 에너지 수확에 필요한 기계적 에너지인 미소진동 에너지원으로 우주용 냉각기를 선정하였다. 여기서 우주용 냉각기의 미소진동은 에너지 수확 시스템의 에너지 재생원으로써 반드시 필요한 사항이나, 고해상도 관측위성의 영상 품질을 저하시키는 요인으로 반드시 절연되어야 한다.

상기의 미소진동 절연 및 에너지 수확의 복합기능을 구현하기 위해, 본 연구에서는 선정한 우주용 냉각기로부터의 미소진동 절연 성능이 보장되며, 이와 동시에 진동 발생원으로부터의 미소진동을 전기 에너지로 수확하는 복합 시스템을 제안하였다. 복합 시스템은 냉각기를 저강성 탄성 지지하는 형상기억합금을 이용한 수동형 진동 절연기[11] 및 고 출력 전압과 구조물의 설계 및 제작이 용이한 압전소자를 이용한 에너지 수확 시스템으로 구성되며, 압전소자는 에너지 재생 성능의 극대화를 위해 선정된 냉각기의 구동주파수와 동일한 고유진동수를 갖도록 설계하였다. 이후 복합 시스템 및 이와 결합된 전기 에너지 저장회로의 설계, 제작, 실험을 통해 그 타당성을 입증하였으

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

며, 제안한 복합시스템은 구성품 수준에서의 기본특성 시험을 수행하였다. 또한, 압전 소자로부터 생성된 전력을 정류 및 저장을 위한 회로와 복합 시스템의 조립체 수준에서의 미소진동과 이에 따른 출력전력 측정시험을 수행하였다. 상기의 결과로부터 본 연구에서 제안한 복합 시스템은 진동 발생원으로부터의 미소진동 절연을 통해 위성의 구조체 및 타 전장품으로의 진동 전달력이 저감되며, 이와 동시에 차폐의 대상인 미소진동을 압전 에너지 수확 시스템을 이용하여 전기 에너지 재생이 가능함을 입증하였다. 향후 본 연구에서 재생된 전기 에너지는 방사율을 가변하여 열제어를 수행하는 라디에이터의 구동 전력으로 적용을 위해 연구가 수행될 예정이다. 이러한 라디에이터 구동에 필요한 전력은 우주용 냉각기의 미소진동으로부터 주기적으로 전기 에너지를 재생하며, 이로부터 수확한 전기 에너지는 배터리에 축적함으로써 라디에이터 구동 전력으로 사용된다. 여기서 가변방사율 라디에이터의 구동을 위해 항시 전압을 인가하는 것이 아닌 한 번의 구동 전압으로 방사율을 가변하는 방식이므로 라디에이터 구동 전에는 배터리 충전을 수행하며, 라디에이터 구동 시 배터리로부터 라디에이터 구동에 필요한 전력이 소비된다.

본 논문의 구성으로 제 1장에서는 미소진동 절연 및 이를 활용한 압전 에너지 수확 시스템으로 구성된 복합 시스템의 연구 제안 배경을 설명하였다.

제 2장에서는 본 연구에서 선정한 우주용 냉각기를 소개하며, 본 연구에서 제안하는 복합 시스템의 구성인 압전 에너지 수확 시스템 및 수동형 진동 절연기를 소개한다. 아울러 복합 시스템에 적용되는 압전 에너지 수확 시스템의 에너지 재생성능 향상을 위해 세라믹 압전소자를 설계하였다. 또한, 진동 절연기 및 압전 에너지 수확 시스템의 기본 특성 실험을 수행 하였으며, 복합 시스템에서의 에너지 재생 성능을 수치해석으로 예측함으로써 진동 절연 및 압전 에너지 수확의 적용 가능성을 분석하였다.

제 3장에서는 궤도 미소진동 환경에 대한 소개와 미소진동 측정시험을 위해 별도로 제작된 미소진동 측정 시스템을 소개하며, 이를 활용하여 실시한 궤도 미소진동 환경에서의 미소진동 절연 및 압전 에너지 재생성능에 대해 서술하였다.

제 4장에서는 결론, 참고문헌 및 연구실적을 정리하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

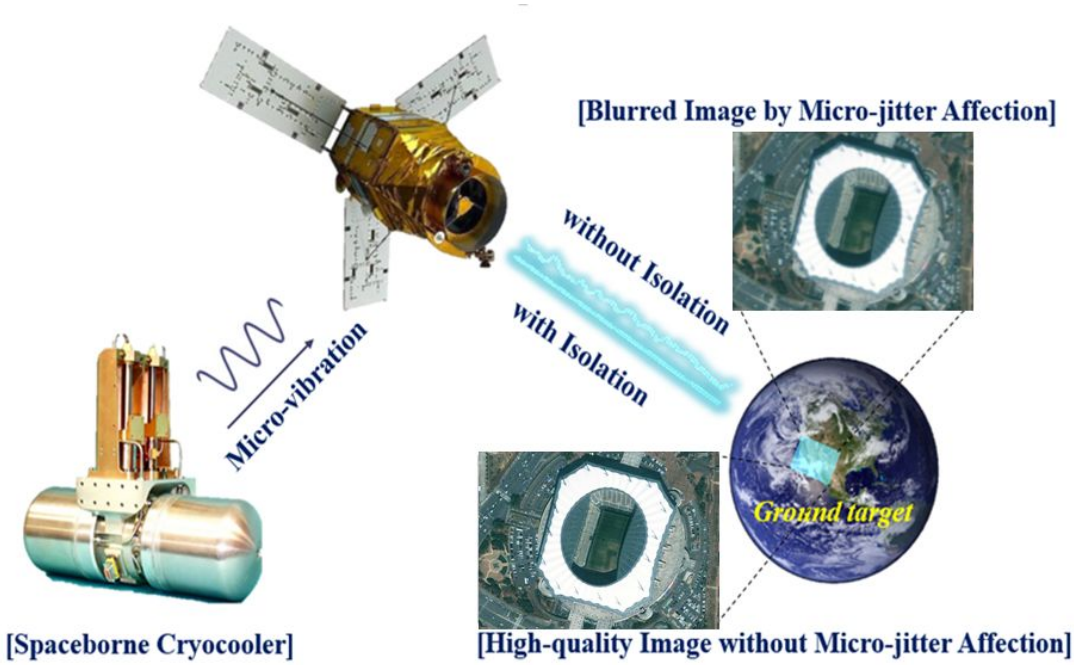


Fig. 2 Image Quality Degradation due to Micro-vibration Disturbance Sources [23]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 3 Energy Sources of Surrounding Environment [24]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 장 미소진동 에너지 하베스팅

제 1 절 Pulse Tube형 우주용 냉각기

에너지 수확 시스템의 우주적용 목적으로 전기 에너지 수확에 필요한 미소진동 에너지원으로 Fig. 3의 Pulse Tube형 냉각기를 선정하였다. Pulse Tube형 냉각기는 주요 임무장비의 극저온 냉각을 위한 헬륨가스가 통과하는 트랜스퍼라인(Transfer Line), 극저온 구현이 요구되는 임무장비와 연결되는 냉촉(Cold Finger)으로 구성된다. Pulse Tube형 냉각기는 저비용, 메커니즘의 단순성 그리고 고 신뢰도 등의 장점을 갖으며, Fig. 4와 같이 Stirling형 냉각기와는 달리 기구적 구동부가 없기 때문에 임무장비의 냉각을 위한 궤도 운용 시 저 진동 구현이 가능하여 관측지향 성능이 요구되는 위성에서 널리 적용되고 있다[23].

우주용 냉각기의 경우 일반적으로 신뢰도 만족을 위하여 비상모드를 제외하고는 상시 운용되며, 일반적으로 특정방향에 단일 특정 주파수로 구동되는 특성을 갖는다. 본 연구에서 적용한 냉각기의 제원으로 무게는 3.8kg, 구동 주파수 30Hz에서의 최대 외란력은 2.5N이다.

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

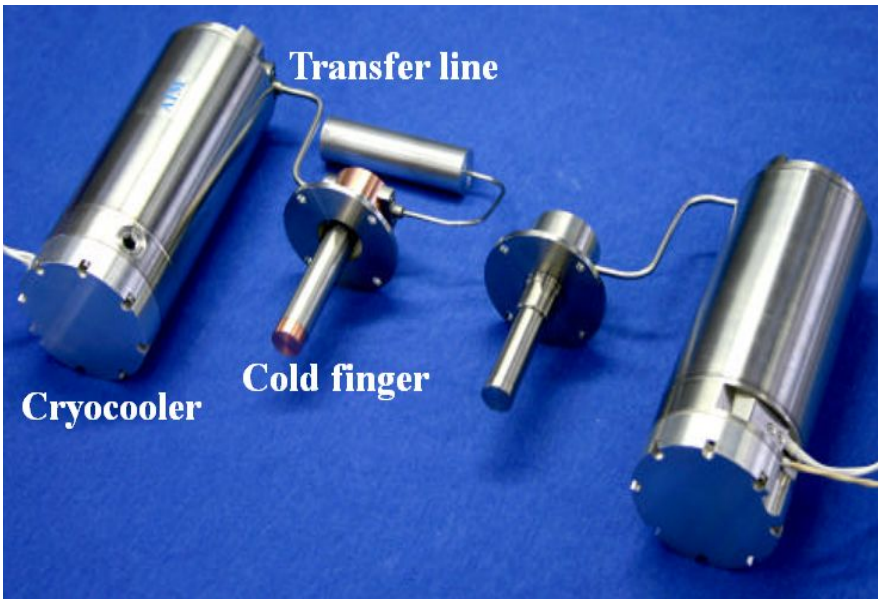


Fig. 4 Pulse Tube Type Cryocooler [23]

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

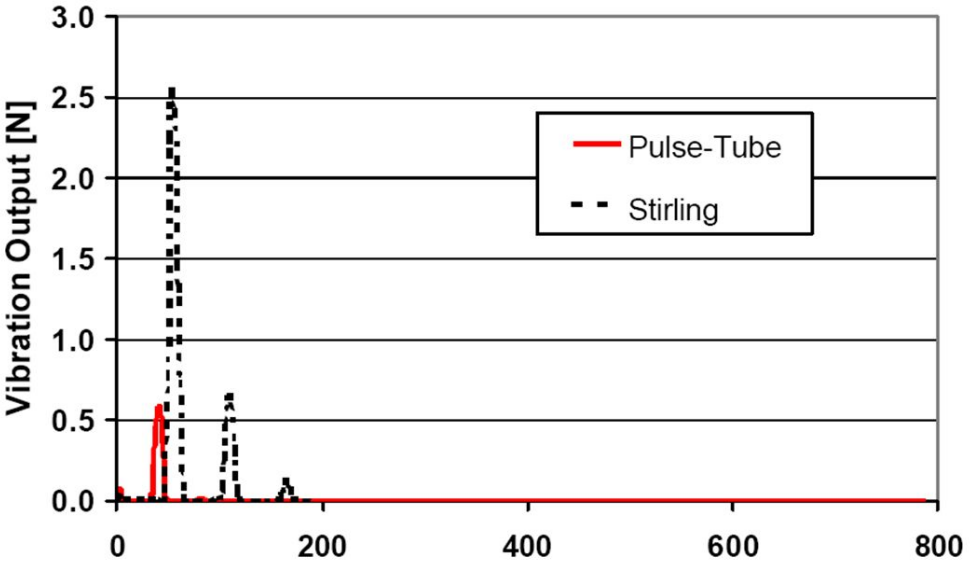


Fig. 5 Vibration Output of Pulse-tube and Stirling Type Cryocooler [23]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 압전 에너지 수확 시스템

압전 현상은 피에르와 폴 자크 퀴리 형제가 외부의 기계적인 압력의 변화에 따라 전하가 발생되는 결정물을 발견하였으며, 이를 1880년 French Academy of Science에서 발표하였다. 이러한 압전소자는 발견 1년 후인 1881년에 가브리엘 리프만의 수학적 추론 계산에 의해 역 압전 효과의 존재를 예측하고 이를 퀴리 형제가 실험 및 검증하였다. 일반적으로 물질의 결정 상태는 대칭성에 따라 32정족으로 분류되며, 이 중 11정족은 중심 대칭성을 갖고 21정족은 중심 비대칭성을 갖는다. 이러한 중심 비대칭 결정족은 결정구조에 따라 나타나는 압전, 초전성 광학활성 등의 성질을 지닌다. 여기서 20개의 결정족은 외부에서 기계적 에너지를 받았을 때 전기 에너지가 발생하는 압전 현상 성질을 지니고 있으며, 이러한 성질을 지닌 물질을 압전소자라 한다[24].

상기의 특성을 지닌 압전 소자가 압전성을 갖기 위해서는 물질의 자성을 잃는 온도인 퀴리 온도(Curie Temperature) 이상의 온도에서 높은 전기장을 인가하면 압전 소자 내부의 분자가 전기장에 따라 재배열 된다. 이러한 과정을 극화처리 또는 분극처리(Poling Procedure)라 하며, 분극처리 된 압전 소자는 비로소 낮은 전기장을 가하면 수축, 팽창하는 특성을 가진다. 이와 반대로 압전 소자에 인장, 압축과 같은 변형을 가해도 수축 및 팽창하는 특성을 가지며, 이로부터 전기장이 생성된다. 이러한 압전소자의 특성을 각각 순방향 효과(Direct Effect), 역방향 효과(Converse Effect)라하며, Fig. 5와 같이 외부에서 응력이나 압력을 가하면 전하분포나 전기장이 발생하는 현상이 순방향 효과이고, Fig. 6과 같이 외부에서 전기장을 가했을 때 변형이 생기는 현상이 역방향 효과이다. 여기서 순방향 효과의 압전 소자는 하중에 대하여 변형이 생기는 순간에는 전하가 발생하나 변형된 상태에서 압전 재료가 폐회로가 구성하면 곧 전하가 소멸되므로 주로 동적 거동 에너지 수확 시스템에 적합하다.

앞서 언급하였듯 분극과정을 거친 압전소자의 경우 전기장을 인가하였을 때 수축 또는 팽창의 변형을 발생시킨다. 이때, 전기장은 분극의 방향에 대해 임의로 인가할 수 있으며, 인가되는 전기장의 방향에 따라 다른 응력과 변형을 발생시키므로 압전상수(Piezoelectric Charge Constant)는 방향성을 갖는다. 압전상수인 d_{31}은 Fig. 7 (a)와 같이 3방향으로 전기장을 인가하였을 때 1방향으로 변형이 발생하는 압전상수이며, d_{33}은 Fig. 7 (b)와 같이 3방향으로 전기장을 인가하였을 때 동일한 방향으로 변형이 발생하는 압전상수를 의미한다. 이 중 전기기계 결합계수 (Electromechanical Coupling Coefficient, k)는 순방향 압전효과에서는 기계적 에너지를 인가했을 때 생성되는 전기

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

적 에너지 크기, 역방향 압전효과에서는 전기 에너지를 인가했을 때 출력되는 기계적 에너지 크기와 같이 기계-전기에너지의 변환 또는 전기-기계에너지의 변환을 나타내며, 이에 대표적인 압전소자의 압전전하상수 및 전기기계 결합계수를 Table 1에 나타낸다 [25-26].

대표적인 압전 소자로는 박막 재료, 고분자 재료, 다결정 세라믹, 다결정 재료와 고분자 재료를 복합한 복합재료로 나눌 수 있다. 박막 소재로는 ZnO, AlN 등이 있으며, 이와 같은 압전소재는 새롭게 연구되고 있는 GHz 대역 압전박막 공진기의 대역 필터(Band Pass Filter) 재료로 응용되고 있다. 고분자 압전 재료는 PVDF (Polyvinylidene-fluoride)가 있으며, 다결정 소재로는 $Pb(Ti,Zr)O_3$, $BaTiO_3$ 등이 있다. 여기서 세라믹 압전소자인 PZT(Lead Zirconate Titanate)는 가공성이나 압전특성이 우수하고 가격이 저렴하여 초음파 진동자, 필터 및 센서 등에 가장 널리 응용되고 있으며, 고분자재료와 PZT계의 복합재료는 재료의 특성상 시트형태로 가공이 쉽기 때문에 각종 키보드나 수중 음향부품 등에 주로 응용되고 있다.

상기의 대표적인 압전소자 중 넓은 주파수 응답성, 높은 출력 전압 등으로 에너지 수확 재료로써 적합한 세라믹 압전소자인 $Pb(Ti,Zr)O_3$은 페로브스카이트(ABO_3)구조로 상온에서 정방정계(Tetragonal)를 가진다. 이러한 페로브스카이트 구조는 Fig. 8 (a)와 같이 Pb^{2+}이온이 모서리를 차지하고 O^{2-}이온은 각 면의 중심을 차지하며, Ti^{4+}, Zr^{4+}이온은 체심 자리에 위치한다. 여기서 체심에 위치하고 있는 Ti^{4+}, Zr^{4+}이온은 체심 자리에서 Fig. 8 (b)와 같이 z축으로 치우쳐 있고, O^{2-} 이온은 면심의 위치에서 Ti^{4+}, Zr^{4+}이온과 반대방향의 z축으로 치우쳐 있어서 $Pb(Ti,Zr)O_3$구조는 +전하의 중심과 −전하의 중심이 서로 일치하지 않아 쌍극자를 형성하게 된다. 이러한 이유로 +, - 전하중심이 서로 다른 물질에 응력을 가해지면 +, - 전하중심 사이의 거리가 변하게 되며, 이 거리에 비례하여 전위차가 발생하게 된다. 압축응력과 인장응력은 서로 전위차가 반대로 생겨나며 전위차의 크기는 변위에 비례하고 +, - 전하중심이 다른 물질에 전기장을 인가 시 같은 극성 때, 반발력이 작용하고 다른 극성일 때, 인력이 작용하여 전위의 크기에 비례하여 변형이 생긴다. 전술한바와 같이 $Pb(Ti,Zr)O_3$ 와 같은 다결정은 쌍극자가 무질서하게 분포하고 있어 공간적으로 순(net) 쌍극자 모멘트가 상쇄되어 압전성이 나타내지 않기 때문에 분극과정을 통하여 쌍극자를 일정한 방향으로 정렬함으로써 전하중심이 차이가 나게 되어 압전성을 갖게 된다[12].

상기의 특성을 지니는 세라믹 압전소자를 에너지 수확 시스템에 적용 시 동일한 기능을 수행하는 에너지 수확 시스템보다 단위 면적당 출력 전력이 우수하고, 자기장의

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

영향을 받지 않아 타 전장보드의 주변에 있어도 간섭이 발생하지 않는 장점을 지니고 있지만 얇은 판의 형성으로 이루어진 압전소자로부터 높은 전력을 수확하기 위해 여러 적층 구조로 구성되어야 한다. 또한, 압전소자의 변형에 비례하여 생성 전력이 상승됨에 따라 고 전력을 수확하기 위해 최대한의 굽힘을 유발하며, 이로부터 압전소자의 파손 위험이 커지는 단점 또한 존재한다.

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

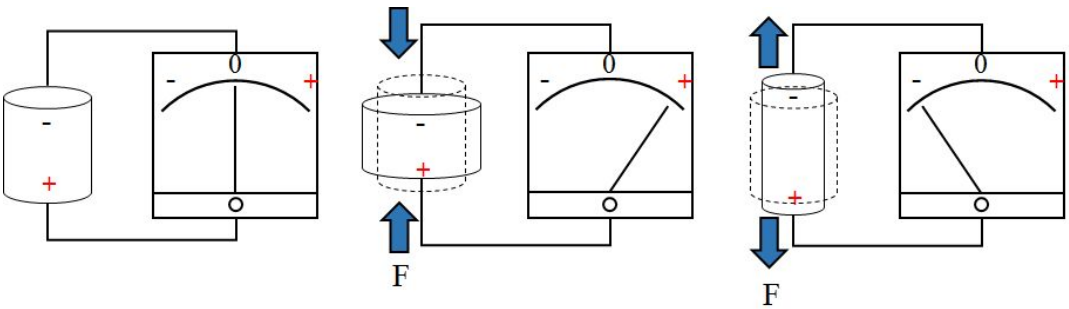


Fig. 6 Schematic of Direct Piezoelectric Effect

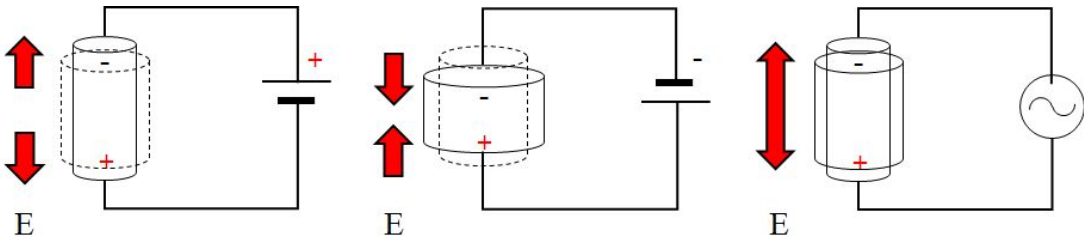
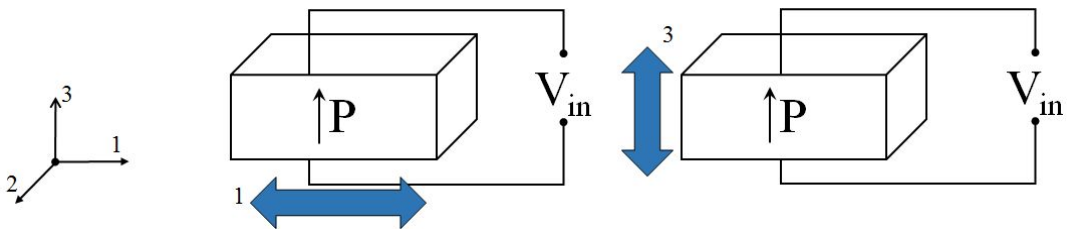


Fig. 7 Schematic of Converse Piezoelectric Effect

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) (b)

Fig. 8 (a) 31 Mode (b) 33 Mode of Piezoelectric Material

Collection @ chosun

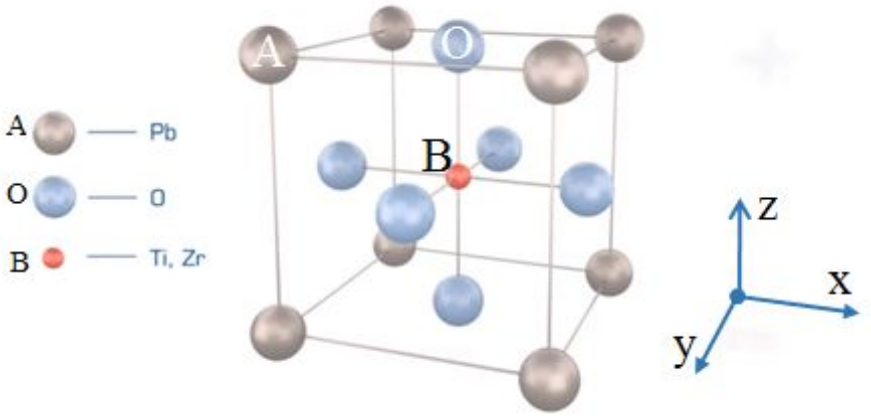
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 1 Comparison of Typical Piezoelectric Coefficients of the Representative Materials [24]

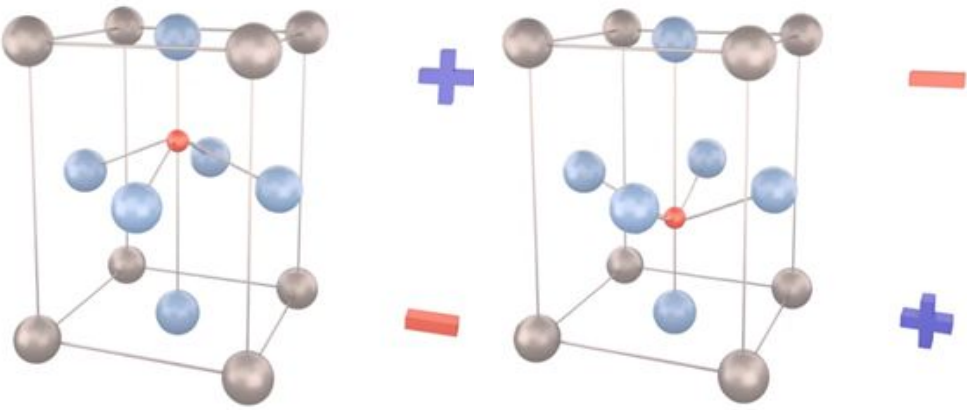
	ZnO	AIN	PVDF	PZT	PMN-PT
d31 (pC/N)	-2.3 ~ -4.7	-2	-8	-171 ~ 340	-777 ~ 977
d33 (pC/N)	0.19	-	0.12	0.22 ~ 0.41	0.52
k31 (CV/Nm)	7.5 ~ 12.4	3.4 ~ 5.1	30 ~ 33	90 ~ 223	> 2200
k33 (CV/Nm)	0.28 ~ 0.41	0.21	0.16	0.49 ~ 0.71	0.93

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a)



(b)

Fig. 8 (a) Perovskite Structur and (b) Crystal Structure of Pb(Zr, Ti)O_3

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 절 복합 시스템의 구성

Figure 9는 본 연구에서 제안하는 복합 시스템의 수학적 모델 및 압전소자의 기계-전기에너지 변환 회로와 이로부터 생성된 전압의 정류 및 저장 회로를 나타낸다. 복합 시스템은 궤도 운용 시 미소진동 발생원인인 우주용 냉각기와 이를 저 강성 탄성으로 지지하는 수동형 진동 절연기[23], 냉각기의 미소진동인 기계적 에너지를 수확하여 전기 에너지로 변환하는 압전 에너지 수확 시스템으로 구성된다.

여기서 수동형 진동 절연기로 저 강성 탄성지지 되는 냉각기 조립체의 고유진동수는 냉각기의 구동 주파수인 30Hz와 충분한 주파수 분리가 이루어져 위성의 구조체 및 주요 탑재체로의 전달력을 최소화 하도록 설계 되었다. m_1은 궤도 운용 시 30Hz에서 2.5N의 미소진동 외란력을 발생시키는 냉각기의 질량을 나타내며, k_1과 c_1은 앞서 설명한 수동형 진동절연기의 강성 및 감쇠계수를 각각 나타낸다. 에너지 수확 시스템의 m_2, k_2 및 c_2은 세라믹 압전소자로 구성된 에너지 수확 시스템의 질량, 스프링 계수 및 기계적 감쇠계수를 나타낸다. 여기서 냉각기로부터 발생하는 미소진동에 의해 캔틸레버 구조의 압전소자는 쌍극자를 형성하게 됨으로써 +, - 전하중심 사이의 거리가 변하게 되며, 이 거리에 비례하여 전위차가 발생함에 따라 압전소자의 캐패시턴스 C_{PZT}와 압전소자의 저항 R_{PZT}로 구성된 압전소자의 내부에서 V_0 전압이 발생된다. 또한, 정류를 위한 D_1, D_2 다이오드와 C_1 캐패시터로 구성된 정류부는 냉각기의 미소진동에 기인하여 생성된 30Hz의 교류전압을 직류전압으로 전환하며, 전기 에너지 저장을 위해 C_2 캐패시터로 구성된 저장부로 결합된 에너지 정류 및 저장 회로를 나타낸다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

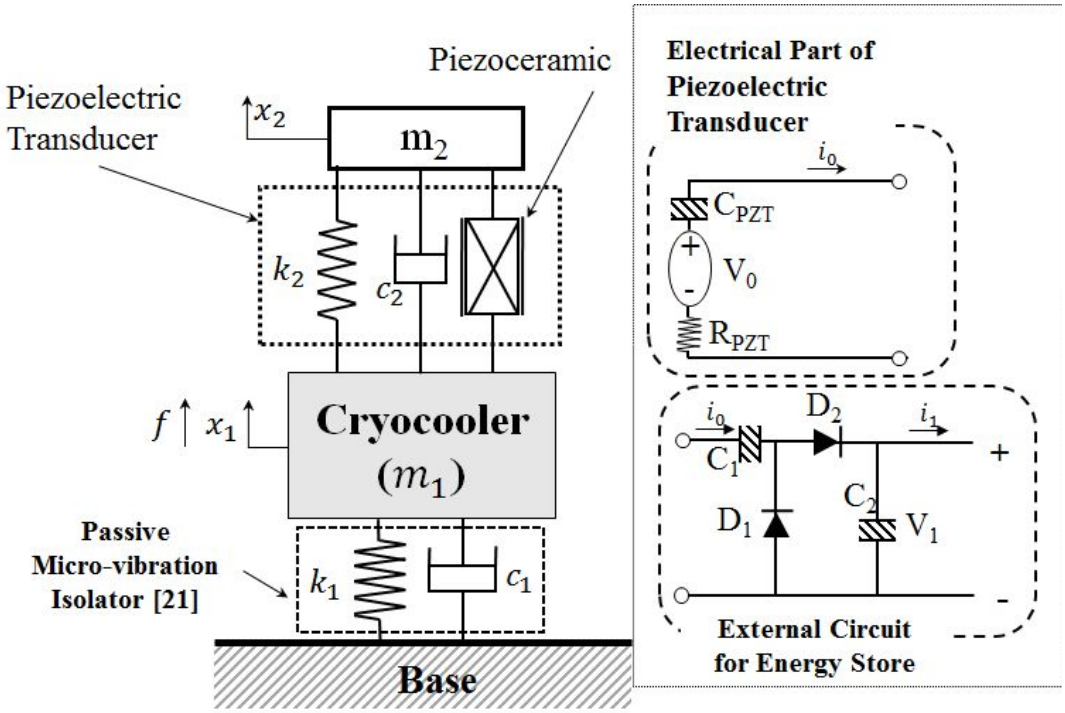


Fig. 9 Complex System for Dual Functions of Micro-vibration Isolation and Energy Harvesting

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1. 수동형 진동 절연 시스템

Figure 10과 11은 각각 본 연구에서 적용한 수동형 진동절연기 및 냉각기와 결합된 진동절연기 조립체의 형상을 나타내며, 발사구속장치의 적용 없이도 진동환경이 상이한 발사 진동과 궤도 미소진동 저감에 동시적용 가능하다.

Figure 10의 형상기억합금이 적용된 수동형 진동절연기는 냉각기를 연결하는 고정축과 이를 감싸는 델린 소재의 고정축 커버, 트랜스퍼라인을 허용변위인 ±3mm 이내로의 유지를 위한 델린 소재의 변위구속블록, 발사하중에서의 댐핑 특성 부가를 위한 형상기억합금, 발사 환경에서의 냉각기 고정축 운동 시 형상기억합금의 압축을 유발하여 진동에너지 소산을 부여하는 스틸 와이어로 구성된다.

Figure 11은 냉각기와 결합된 진동절연기 조립체의 형상을 나타내며, 4개의 수동형 진동절연기와 우주용 냉각기, 극저온 냉각을 위해 헬륨가스가 통과하는 트랜스퍼라인, 극저온 냉각 시 발생하는 냉각기의 열 수송을 위한 히트파이프로 구성된다. 냉각기에 적용된 진동절연기는 발사환경에서 냉각기의 모멘트 발생에 따른 트랜스퍼라인의 손상을 방지하기 위하여 냉각기의 동일 중심면상에 45° 각도로 배치되어 변위구속블록과의 조합으로 추가적인 발사구속장치 없이도 발사환경에서의 구조건전성 확보가 가능한 장점이 있다. 궤도 0g 환경에서는 발사하중에 의해 큰 변형이 유발된 형상기억합금이 의탄성 거동으로 소성변형 없이 초기형상으로 복원함에 따라 냉각기가 공칭 위치(Nominal Position)로 이동함으로써 스틸 와이어의 장력이 이완되고, 이와 동시에 냉각기에 구비된 트랜스퍼라인과 히트파이프로부터 냉각기가 저강성 탄성 지지되도록 하여 냉각기 운용 시 발생하는 주 가진 주파수와의 충분한 주파수 분리로 미소진동 절연성능을 구현 하였다[23].

본 연구에서는 선행 연구된 Kwon [23]의 수동형 진동절연기의 배치 형상과 달리 냉각기의 동일 중심면상에서 90° 각도로 배치되어 냉각기의 주 구동축(y-axis)으로부터의 미소진동 절연성능을 구현하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

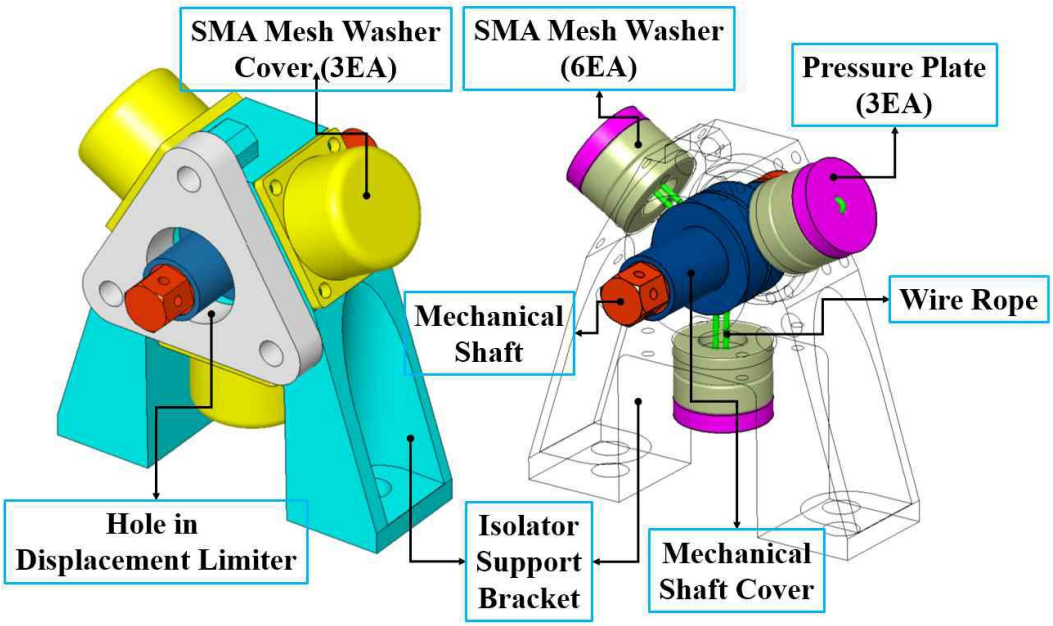


Fig. 10 Passive Launch and On-orbit Vibration Isolator Employing SMA Mesh Washer [23]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

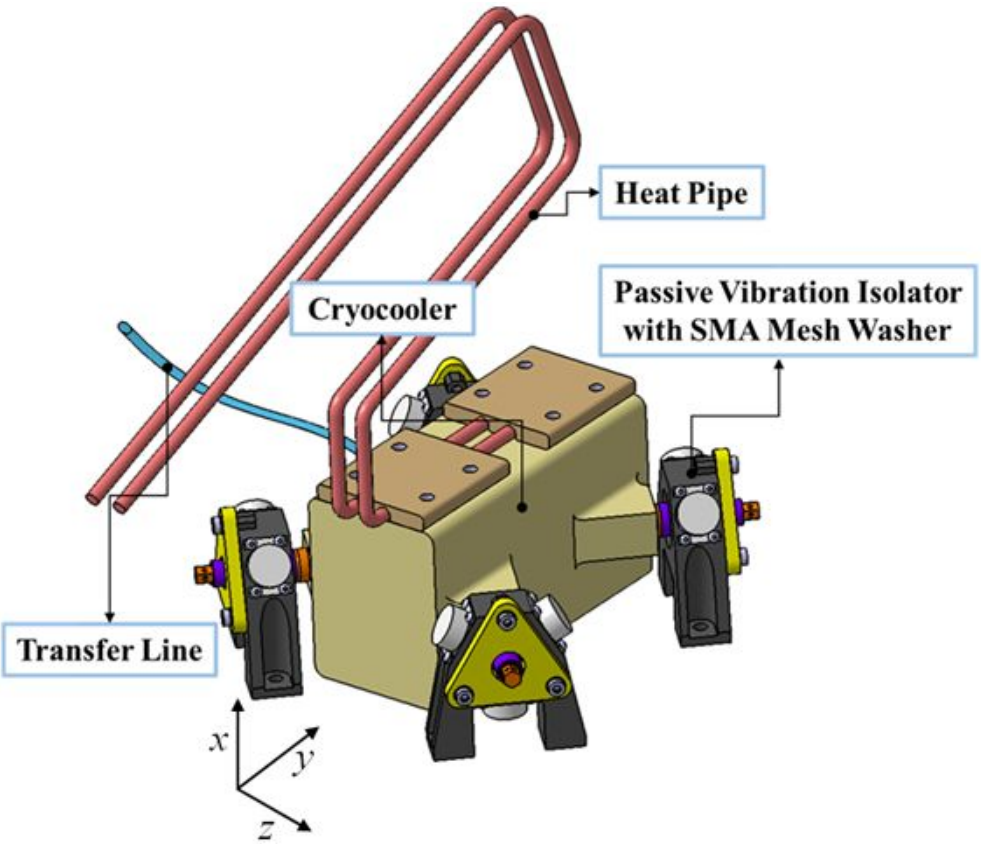


Fig. 11 Vibration Isolator Assembly Combined with Cryocooler [23]

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 압전 에너지 수확 시스템

일반적으로 세라믹 압전체는 한쪽이 구속된 캔틸레버(Cantilever) 형태의 압전소자로 제작한다. 여기서 캔틸레버 지지하는 바(Substrate Material)의 한쪽 면에만 압전체를 접합한 Fig. 12 (a)와 같은 유니몰프(Unimorph) 형태는 비교적 제조공정 및 취급이 용이하여 대량 생산, 제조가격이 저렴함이 특징이며, 이를 에너지 수확 시스템에 적용할 수 있다. 하지만 유니몰프 형태의 경우 에너지 효율이 낮은 관계로 인해 에너지 수확 시스템 보다 압전 부저나 액추에이터와 같이 전기 에너지에 의해 구동되는 음향기, 기계적 위치 변위를 목적으로 사용한다. 상기의 유니몰프 형의 낮은 에너지 효율을 보안하기 위해 Fig. 12 (b)와 같은 바이몰프(Bimorph) 형태는 캔틸레버 지지 바의 양쪽 면에 압전체를 접합하여 두 개의 압전체에서 동시에 전력이 생성됨에 따라 보다 높은 출력을 얻을 수 있는 장점을 지니고 있어 전기 에너지 수확 시스템에 다수 사용 되고 있다.

본 연구에서는 냉각기의 기계적 에너지를 전기 에너지로의 효율을 높이기 위해 바이몰프 형태의 압전 에너지 수확 시스템을 설계 하였다. 설계한 압전소자는 캔틸레버 지지하는 바의 경우 SUS304 재질로 길이 (l) 52mm, 폭 (w) 12mm, 두께 (t) 0.1mm이며, 세라믹 압전체는 길이 (l) 45mm, 폭 (w) 10mm, 두께 (t) 0.31mm로 모델링 하여 냉각기의 구동 주파수와 동일한 고유진동수를 갖도록 설계함으로써 압전소자의 최대변위를 발생시킴으로 최대의 전력을 생성하도록 설계하였다. 설계한 압전소자의 해석 모델링과 시뮬레이션 형상을 Fig. 13 (a), (b)에 나타내며, 상기 해석결과로부터 제작된 압전소자의 형상 및 물성치를 Fig. 13 (c), Table 1에 각각 나타낸다.

본 연구에서 제안하는 압전 에너지 수확 시스템은 Fig. 14와 같이 3개의 바이몰프 형태의 압전소자로 구성하였으며, 냉각기의 구동력에 의해 압전체가 접합된 캔틸레버가 진동하게 된다. 이로부터 캔틸레버의 휨(Strain)에 의해 냉각기의 구동력방향으로 압전체의 변형이 발생하며, 이 변형에 의해 전력이 생성된다. 캔틸레버 구조는 상하 교대로 휨이 발생하게 되며, 냉각기 구동력방향으로 압축과 인장이 교대로 발생함에 기인하여 생성되는 전력은 방향이 교대로 발생함으로써 교류 전력이 생성된다. 여기서 교류 전력은 정류회로를 통해 정류 되며, 이후 캐패시터를 이용하여 전기 에너지를 저장하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

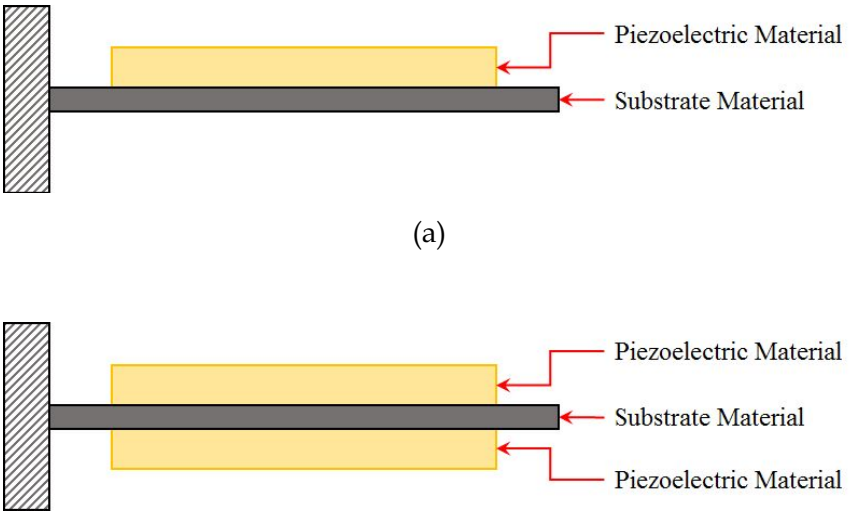
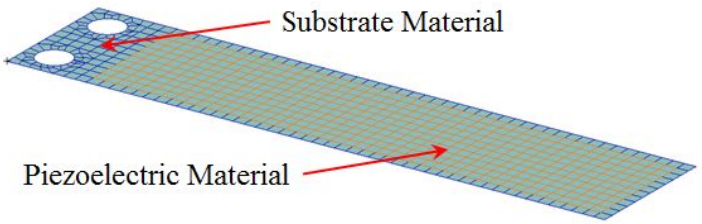


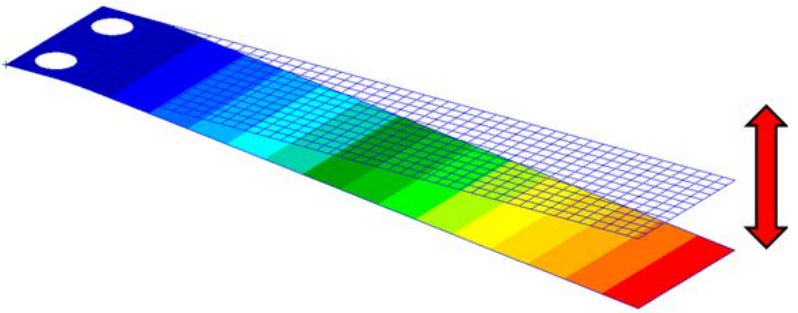
Fig. 12 (a) Unimorph Structure and (b) Bimorph Structure Cantilever

Collection @ chosun

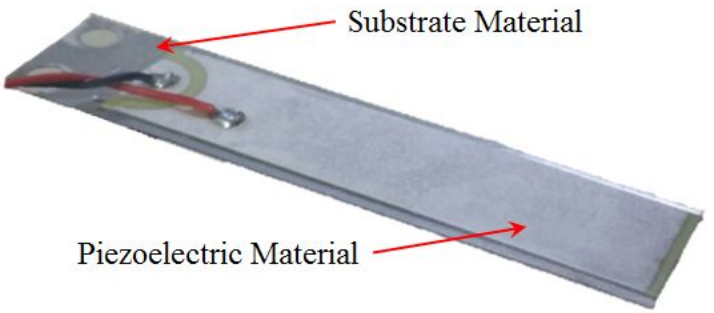
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a)



(b)



(c)

Fig. 13 Mode Analysis (a) Model, (b) Result and (c) Cantilever model of the Proposed Piezoelectric Energy Harvesting Module

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 2 Measurement of Piezoelectric Ceramic Parameters

Property	Symbol	Values	Unit
Density	ρ	7.60	g/cm3
Curie temperature	Tc	260	oC
Dielectric Constants	$\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$	2,300	-
Dissipation Factor	tgδ	1.5	%
Coupling Coefficients	K_p	71.0	%
	K_t	51.0	
	K_{31}	38.0	
Frequency constants	N_p	2,080	m·Hz
	N_t	2,040	
	N_L	1,545	
Mechanical Quality Factor	Qm	80	-
Piezoelectric Charge Constants	d_{33}	450	$\times 10^{-12}$M/V
	d_{31}	- 200	
Piezoelectric Voltage Constants	g_{33}	22.1	$\times 10^{-3}$Vm/N
	g_{31}	- 11.1	
Elastic Constants	S^{E}_{11}	13.8	$\times 10^{-12}m^2/N$
	S^{D}_{11}	11.8	

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

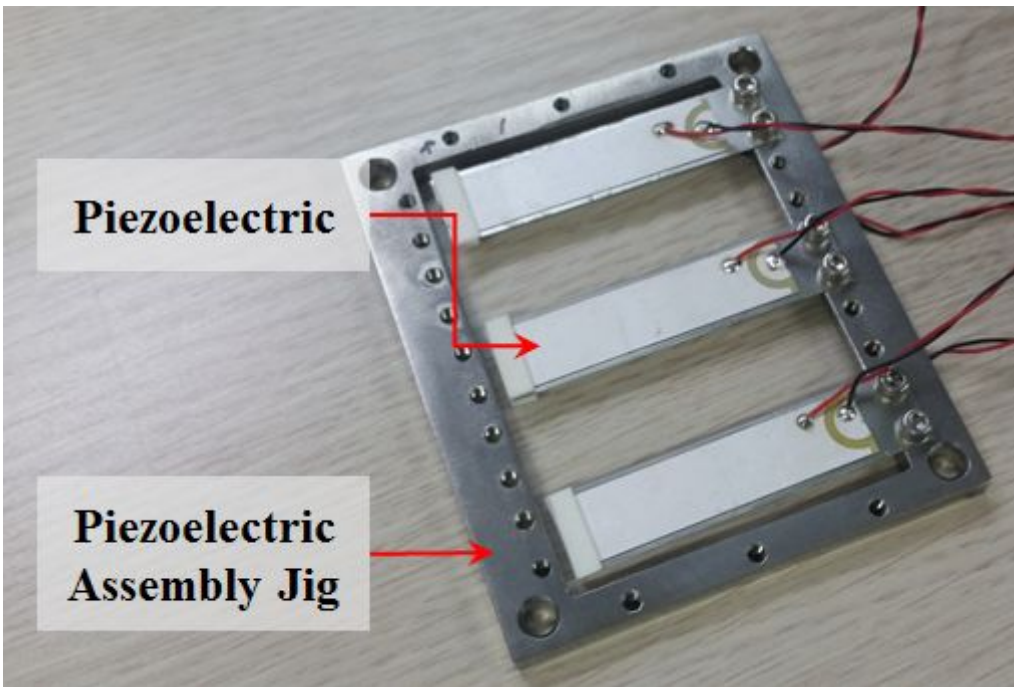


Fig. 14 Piezoelectric Energy Harvesting System

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 절 복합시스템의 유효성 분석

1. 복합시스템의 기본 특성

가. 진동 절연기의 기본특성

Figure 15는 더미 냉각기와 조립된 진동 절연기의 기본특성 파악을 위한 정하중 시험 형상을 나타내며, Fig. 16은 길이방향(y-axis)으로 결합된 진동절연기 조립체의 정하중시험으로부터 획득된 변위(d)-하중(p) 결과를 나타낸다. 실제 우주용 냉각기의 경우 길이방향(y-axis)으로 기계적 구동을 수행함에 따라 해당 축에서 주 가진력을 유발한다. 따라서 냉각기의 길이방향이 본 연구에서 제안한 진동절연기의 주 절연 대상 축으로 고려되었다. 상기의 시험 결과로부터 인가 변위의 증가함에 따라 진동절연기 조립체의 강성치가 지수 함수적으로 증가하고 있으며, 압축-인장에 따라 큰 폭의 히스테리시스 곡선을 나타내고 있다. 이는 진동절연기의 의탄성 거동특성으로부터 유발된 현상이며, 큰 폭의 히스테리시스 특성은 큰 댐핑에 의한 발사환경에서의 뛰어난 진동 저감이 가능함을 의미한다. 초기 ±1mm 범위 내에서는 스틸와이어의 장력 이완범위 포함 및 진동절연기 내부의 와이어 변형에 의해 와이어 사이의 공간이 채워지면서 작은 하중으로도 변형이 발생하며, 해당 구간의 기울기로부터 산출된 강성치는 약 12.08N/mm로, 냉각기의 무게 및 상기의 강성치로부터 산출된 진동절연기 조립체의 고유진동수는 약 8.97Hz이다.

Figure 17은 더미 냉각기와 결합된 진동절연기의 자유감쇠 진동시험 형상을 나타내며, Fig. 18과 19는 각각 1g환경에서 더비 냉각기의 길이방향(y-axis) 축에 3mm의 최대 가용변위를 인가 후 자유감쇠 진동 하에서 측정된 시간(t)-힘(N) 응답특성 및 이에 대한 주파수 응답을 나타낸다. 여기에서 3mm는 진동절연기 설계 시 고려된 최대 가용변위로서 발사환경에서 유발하는 최대 변위에 상응한다.

상기의 시험결과를 종합해 볼 때, 인가 변위에 따른 강성 및 댐핑이 증가하는 형상기억합금에 의한 거동특성으로 극한 진동레벨의 발사환경 영역에서는 상대적으로 고유진동수 및 감쇠비가 높은 수치를 나타내며, 큰 감쇠비는 발사환경에서의 큰 진동 레벨을 효과적으로 감쇠 가능함을 의미한다. 진동이 감쇠되어 냉각기의 궤도 운용 시 발생하는 미소진동레벨에 해당하는 가속도영역에서는 감쇠비가 0.4에서 0.27로 감소하였으며, 1g 조건에 의한 37.24N의 냉각기 자중이 작용하였음에도 불구하고, 약 8Hz의 저주

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

파 응답특성이 지배적으로 나타나고 있다. 상기의 정하중 시험에서 도출된 진동 절연기 조립체의 고유진동수와 유사함을 확인하였으며, 냉각기의 궤도 운용 시 발생하는 주 가진 주파수 30Hz와의 충분한 주파수 분리가 가능하여 미소진동 절연에 유효할 것으로 추정된다.

진동 절연기 조립체의 기본특성 시험 결과로부터, 본 연구에서 제안한 수동형 진동 절연기는 인가변위에 따른 가변 강성 및 형상기억합금의 의탄성 효과에 의한 에너지 소산효과로 상대적으로 진동하중이 큰 발사하중 조건에서는 고 댐핑 특성으로 발사환경에서의 큰 진동레벨을 효과적으로 감쇠 가능함을 유추할 수 있으며, 진동이 감쇠되어 냉각기의 궤도 운용 시 발생하는 미소진동레벨에 해당하는 가속도 영역에서는 진동절연기의 강성이 감소하여 진동절연기 조립체의 고유진동수가 저주파 영역으로 가변함으로써 우주용 냉각기의 궤도 운용 시 발생하는 주 가진 주파수 30Hz와의 충분한 주파수 분리가 가능하여 미소진동 절연에 유효할 것으로 추정한다[23].

여기서 Fig. 9의 복합시스템이 수동형 진동절연기와 냉각기로만 구성되었을 경우에 대해 미소진동 절연성능을 고찰하고자 하며, m_1은 30Hz의 주 구동주파수에서 2.5N의 외란력 f를 유발하는 3.8kg의 냉각기 무게를 나타낸다. 우주용 냉각기의 궤도 운용 중 발생하는 미소진동은 저강성 영역에서의 도출된 진동절연기 조립체의 강성치 k_1 (12.08N/mm)과 감쇠계수 c_1을 통해 기저면으로 전달되며, 궤도 0g 환경에서 진동절연기의 장력이 이완된 스틸와이어를 통해 기저면으로의 전달력 최소화가 가능하다.

상기의 1자유도 모델로부터 기본 진동 전달률 이론에[27] 기인한 기저면으로의 전달력의 전달함수를 도출할 수 있다. 냉각기의 변위를 x_1으로 정의 할 경우, 진동절연기 조립체의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m_1\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 + k_1x_1 = f \tag{1}$$

여기서 수동형 진동 절연기를 통해 기저면으로 전달되는 힘 f_T는,

$$f_T = c_1\dot{x}_1 + k_1x_1 \tag{2}$$

로 정의된다. 여기서 냉각기가 유발하는 진동 외란력 f와 진동절연기 조립체를 통해 기저면으로 전달되는 힘 f_T의 크기 비로 식(1)과 (2)를 조합하면,

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\frac{f_T}{f} = \frac{c_1\dot{x}_1 + k_1 x_1}{m_1\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 + k_1 x_1} \tag{3}$$

이며, $c_1 = 2\zeta_1 m_1 \omega_1$, $\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}$ 로 정의될 때, 양변에 라플라스 변환(Laplace Transform)을 취하면,

$$\frac{F_T(s)}{F(s)} = \frac{2\zeta_1\omega_1 s X_1(s) + \omega_1^2 X_1(s)}{s^2 X_1(s) + 2\zeta_1\omega_1 s X_1(s) + \omega_1^2 X_1(s)} \tag{4}$$

로 정리된다. 여기서 s는 복소수 변환변수이고, $X_1(s)$는 냉각기의 변위 x_1을 라플라스 변환한 것을 나타낸다. 만일 복소수 변환변수 s값이 복소수평면에서 허수축을 따라서만 움직이도록 제한한다면(s=$j\omega$) 식(4)은,

$$\frac{F_T}{F} = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta_1\gamma)^2}{(1-\gamma^2)^2 + (2\zeta_1\gamma)^2}} \tag{5}$$

로 정리된다. 여기에서 $\gamma = \omega/\omega_1$을 나타내고, w는 냉각기의 구동주파수, w_1은 진동절연기 조립체의 고유진동수를 각각 나타낸다.

식 (5)의 기본 진동 전달률 식으로부터 Fig. 20과 같은 진동 전달률 선도를 도출 할 수 있으며, 이로부터 진동절연기 적용 시 기저면으로의 진동 저감성능을 예측할 수 있다. 일반적으로 진동절연기의 설계에 있어 Fig. 20과 기본 진동 전달률선도는 초기 설계지표로 유용하게 사용되며, 전달률이 최소가 되도록 γ 혹은 ζ 값을 조정하게 된다. 여기서 주목할 것은 주파수비 γ가 $\sqrt{2}$보다 큰 경우에는 전달률이 1보다 작아지며 진동절연 영역이라 명시할 수 있다. 이 영역에서는 감쇠가 증가할수록 전달률이 상승하기 때문에 낮은 감쇠비가 통상적으로 요구된다. 따라서 절연 대상체의 무게가 일정하다고 가정하면 $\gamma > \sqrt{2}$ 를 만족하는 강성치 및 최소의 감쇠비를 갖도록 설계를 진행하나, 발사 및 궤도환경과 같이 서로 상이한 진동환경을 겪는 우주용 진동절연기를 설계하기 위해서는 발사환경에서의 저주파 가진력을 반드시 고려해야한다. 발사환경에서의 저주파 영역에서는 대개 공진점 $\gamma = 1$ 을 통과하게 되고 상대적으로 저강성 구조로

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

설계된 진동절연기 및 진동절연 대상체의 구조건전성 확보를 위해 감쇠 또는 구속분리 장치가 반드시 요구된다. 따라서 주파수비 $\sqrt{2}$를 기점으로 적절한 강성치와 감쇠비를 선정해야하며 이는 설계의 제한사항으로 존재한다. 하지만 본 연구에서 적용한 수동형 진동 절연기는 진동환경에 따라 강성 및 감쇠비가 가변함으로써 상기의 단점을 해결 가능하며, 별도의 발사구속장치 없이도 발사환경에서의 구조건전성 확보가 가능하다. 또한, 진동절연기 조립체의 정하중 시험 및 동하중 시험 결과에 기인하여 궤도 미소진동영역에 대한 진동절연성능을 고찰해볼 때, 진동절연기로 저강성 지지되는 진동절연기 조립체의 미소진동 영역에서의 고유진동수는 약 8Hz이며, 감쇠비는 약 0.27이다. 여기에서 궤도운용 시 30Hz의 구동주파수를 갖는 냉각기에 대해 Fig. 20으로부터 예상되는 진동 저감율은 약 4.25배 이며, 2.5N의 외란력을 발생하는 냉각기로부터 기저면으로 전달되는 전달력은 약 0.588N으로 뛰어난 미소진동 절연성능을 예측할 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

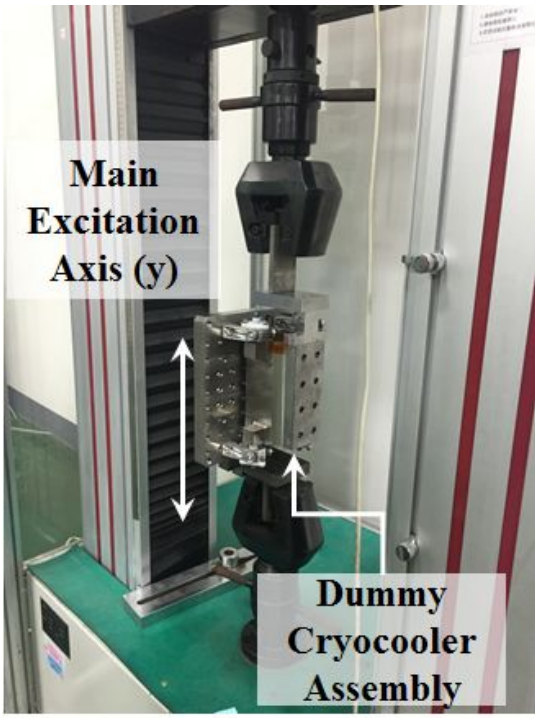


Fig. 15 Vibration Isolator Assembly Static Load Test Configuration

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

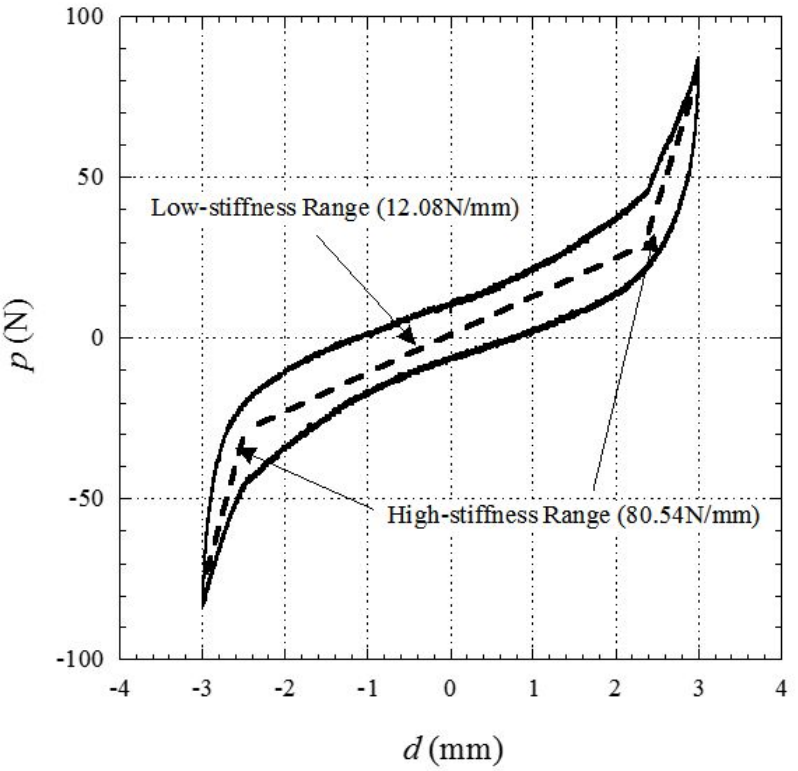


Fig. 16 Displacement-Load Relation of Vibration Isolator Assembly in y-axis

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

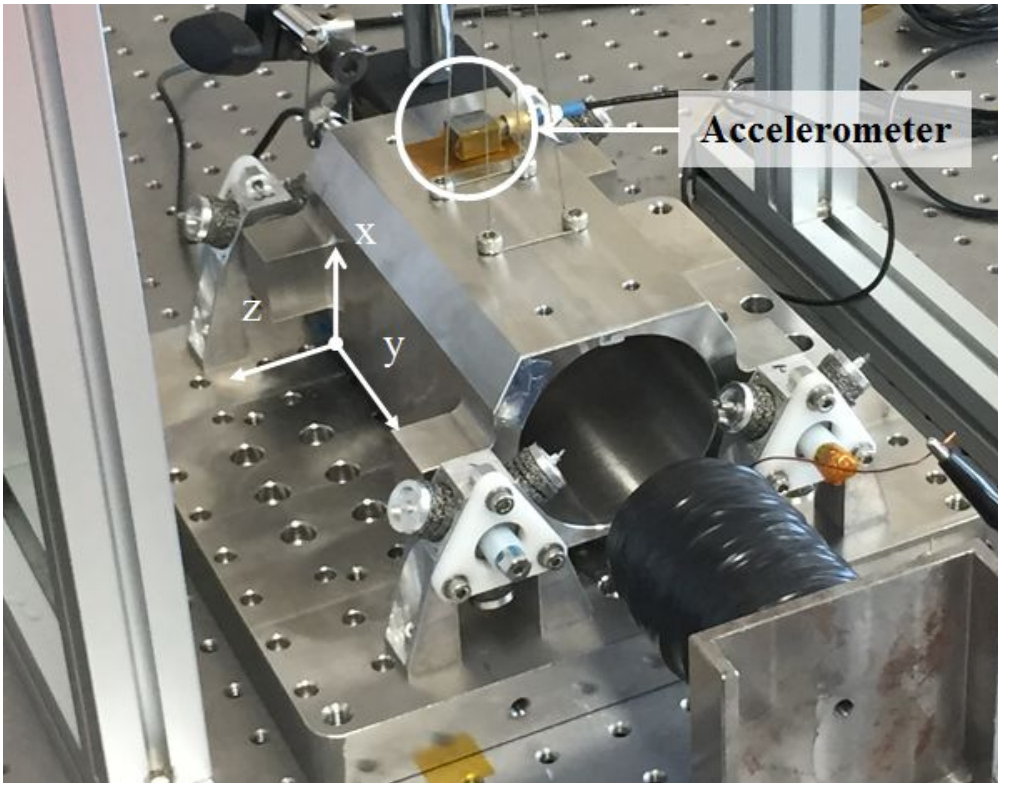


Fig. 17 Vibration Isolator Assembly Free Vibration Test Configuration

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

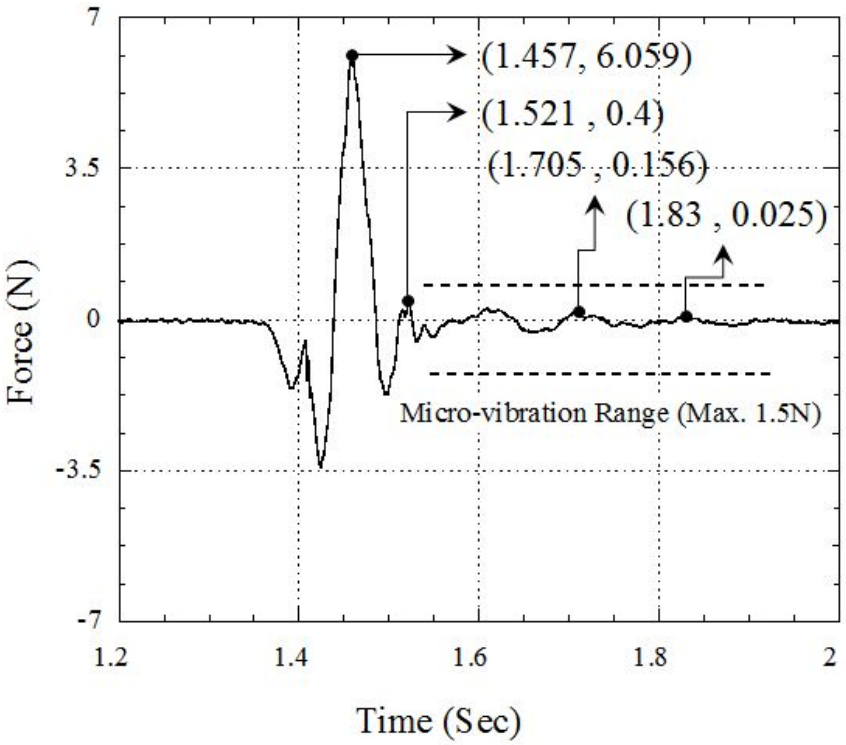


Fig. 18 Time Profiles of Excitation Force in Free Vibration Test in y-axis

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

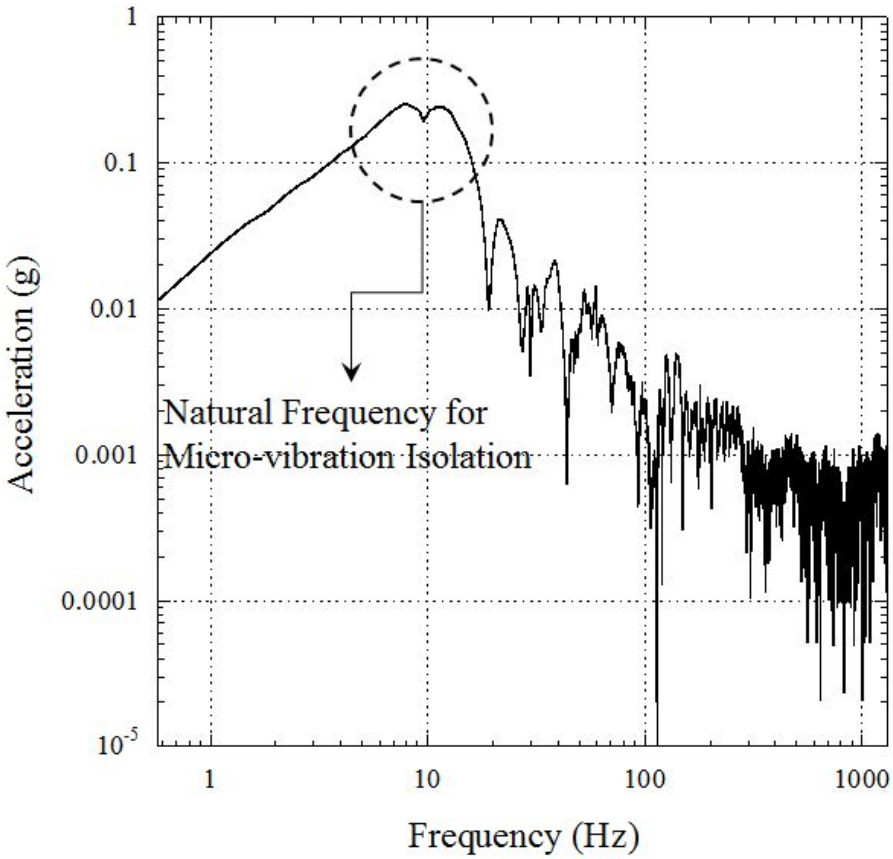


Fig. 19 Frequency Responses in Free Vibration in y-axis

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

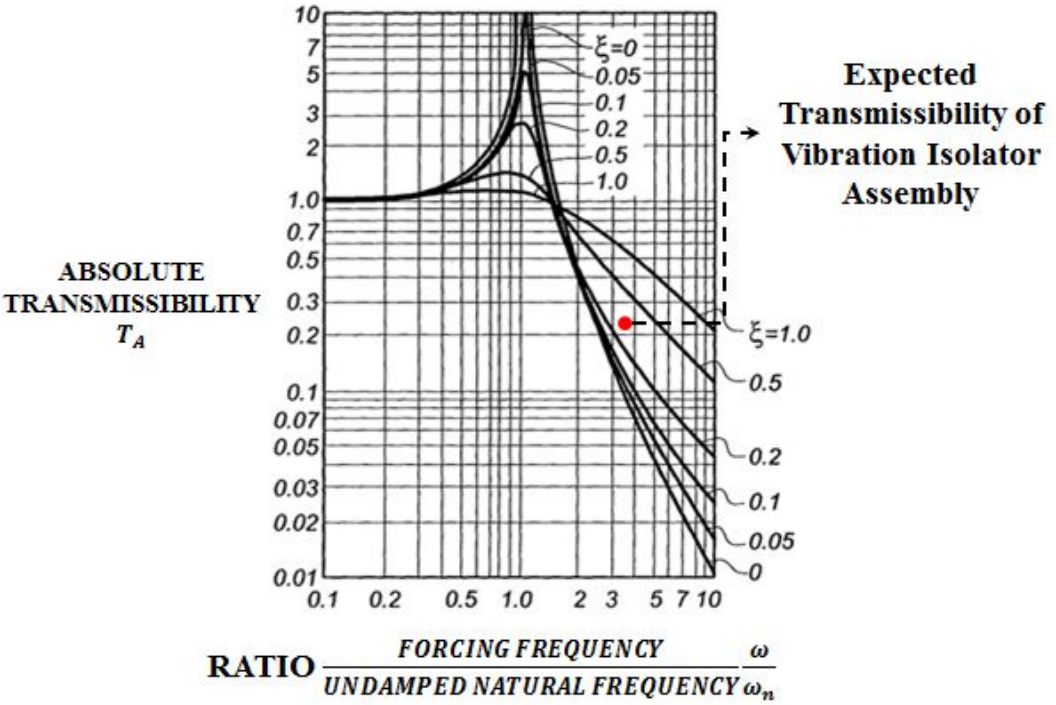


Fig. 20 Basic Vibration Transmissibility Curve [27]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

나. 압전 에너지 수확 시스템의 기본 특성

Figure 21은 설계한 세라믹 압전소자의 자유감쇠 진동시험 구성을 나타내며, Fig. 22는 압전소자에 가용변위 인가 후 자유감쇠 진동시험으로부터 획득된 시간(t)-변위(d) 응답특성 및 이에 대한 주파수, 감쇠비 응답을 나타낸다.

여기에서 감쇠비는 다음의 대수 감소율(Logarithmic Decrement)로부터 산출되며,

$$\delta = \ln \frac{x(t)}{x(t+T)} \tag{6}$$

T는 진동 주기를 나타내고, $x(t)$는 t초에서의 진폭을 나타낸다. 이 식을 감쇠비 ζ 로 나타내면,

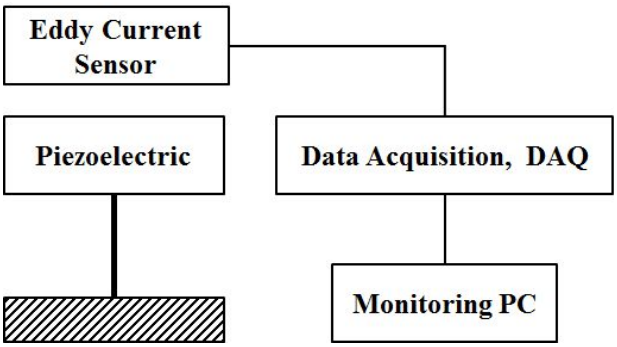
$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \tag{7}$$

로 정리된다. 이식은 대수 감소율 값으로 감쇠비를 결정하는 식이며, Fig. 22의 결과로부터 산출 가능하다.

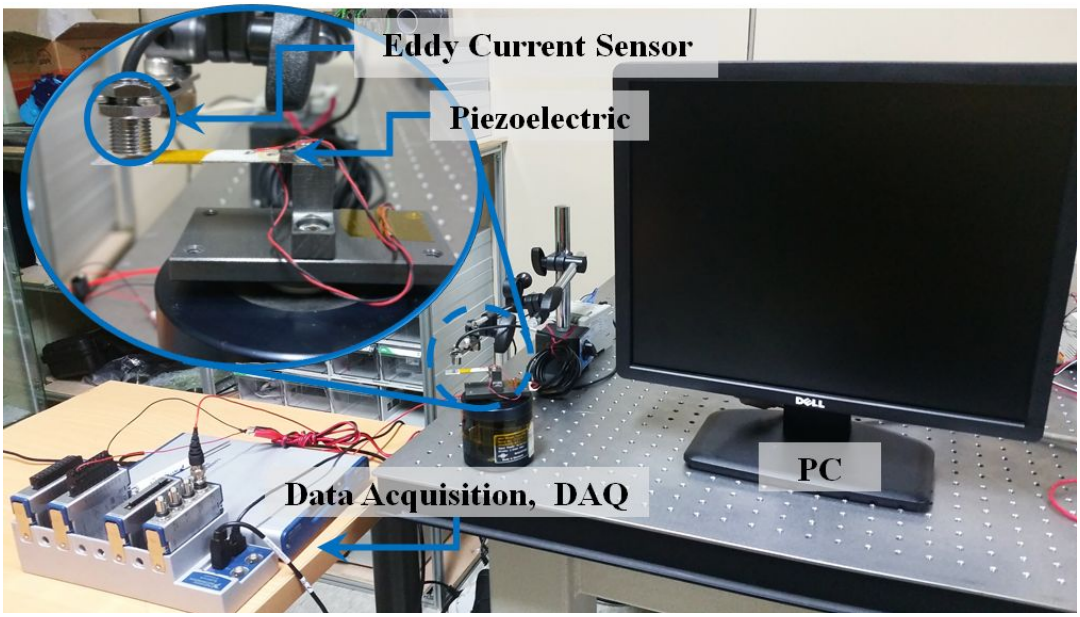
상기의 시험결과를 종합해 볼 때, 감쇠비는 0.0031로 측정되었으며, 압전소자의 고유진동수는 28.32Hz가 측정 되었다. 이는 앞서 설계한 압전소자 수확 시스템이 의도한 공진 주파수와 약 2Hz의 차이가 존재하였으며, 이러한 차이를 보이는 이유는 압전소자에 구성되어있는 전원선(Power Line)에 따라 고유 진동수가 민감하게 변동됨을 확인하였고 복합시스템에 적용 시 전원선의 배치가 중요한 변수임을 확인 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a)



(b)

Fig. 21 (a) Schematic and (b) Experimental Set-up for Measuring Resonant Frequency and Damping

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

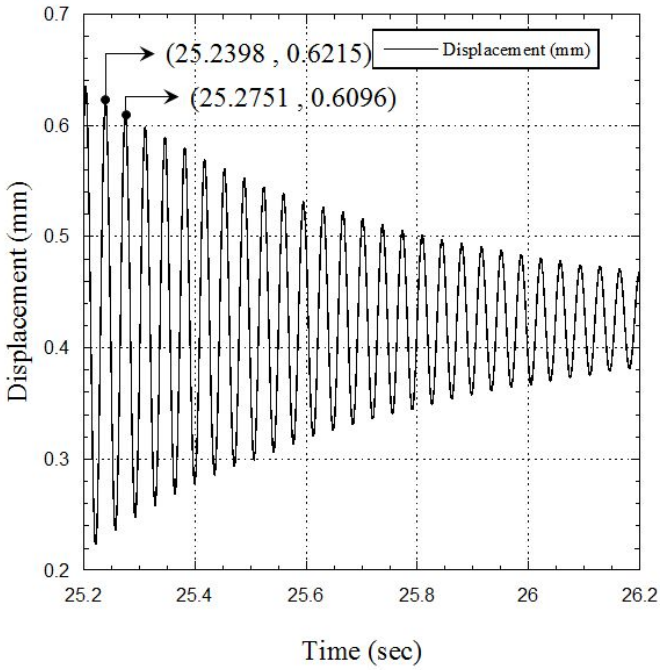


Fig. 22 Time Profiles of Excitation Force in Free Vibration Test

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 복합 시스템의 수학적 성능 검토

Figure 23은 Fig. 9의 복합시스템에 적용된 압전소자의 수학적 모델을 나타낸다. 여기에서, 냉각기의 가진 주파수와 동조를 이루도록 설계된 압전소자에 냉각기에 기인한 진동이 발생하면, 다음과 같은 관계식이 성립한다. 여기서 m_2은 궤도 운용 시 30Hz에서 f의 미소진동 외란력을 발생시키는 압전 에너지 수확 시스템 중 1개의 압전소자 질량을 나타내며, k_2, c_2은 압전소자의 강성 및 감쇠계수를 각각 나타낸다.

$$f = k_2 x_2 - b_a Q \tag{8}$$

$$V = -b_a x_2 + Q / C_{PZT} \tag{9}$$

여기서 b_a는 전기기계 결합계수(Electromechanical Coupling Coefficient), Q는 압전 전하 계수(Piezoelectric Charge Constants)를 나타내며, 상기의 관계식 및 Fig. 9의 복합 시스템을 기초로 다음과 같은 운동관계식을 도출 가능하다

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 + c_2 (\dot{x}_1 - \ddot{x}_2) + k_2 (x_1 - x_2) + b_a Q = f \tag{10}$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 (\ddot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 (x_2 - x_1) - b_a Q = 0 \tag{11}$$

$$R_{PZT} \dot{Q} + Q / c_{PZT} = b_a x \tag{12}$$

여기서

$$\dot{Q} = \frac{b_a}{R_{PZT}} (x_2 - x_1) - \frac{Q}{C_{PZT} R_{PZT}} \tag{13}$$

상기의 운동방정식을 상태방정식으로 나타내면,

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{(k_1+k_2)}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & -\frac{(c_1+c_2)}{m_1} & \frac{c_2}{m_1} & \frac{b_a}{m_1} \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{k_2}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & -\frac{c_2}{m_2} & -\frac{b_a}{m_2} \\ -\frac{b_a}{R_{PZT}} & \frac{b_a}{R_{PZT}} & 0 & 0 & -\frac{1}{C_{PZT}R_{PZT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ Q \end{bmatrix} \tag{14}$$

상기의 상태방정식을 계산하기위해 룽게쿠타[28]식을 활용하여 수치해석을 실시하였다. 본 연구에서 제안한 미소진동 절연 및 에너지 재생의 유효성을 검토하기 위해 상기의 식으로부터 냉각기의 강체 구속조건일 때와 수동형 진동 절연기의 적용 시 우주용 냉각기의 구동력이 기저면으로의 전달력 및 이에 기인하여 압전 에너지 수확 시스템으로부터의 전기 에너지 재생성능의 유효성을 확인 하였다. Figure 24를 살펴보면 냉각기의 강체구속 조건에서 기저면으로의 전달력은 약 2.6N이 인가되었으며, 수동형 진동 절연기 적용하였을 때, 조립체의 저강성 탄성 지지구조로 기저면으로의 전달력이 약 0.53N의 진동 절감 효과를 예상하였다. 여기서 상기와 동일한 조건에서 전기 에너지 재생성능을 확인하였으며, 앞서 설계된 바이몰프 형태의 압전소자의 한쪽 면에서의 생성전압을 예측하였다. 강체 구속조건에서 0.006V의 미소한 전압이 출력되었으나 수동형 진동 절연기 적용 시 0.11V의 생성 전압이 도출 되었으며, 그 결과를 Fig. 25에 나타낸다. 본 연구에서 제안하는 압전 에너지 수확 시스템의 경우, 캔틸레버 지지판의 양면으로 압전체가 접합되어 있는 바이몰프 형태의 압전소자가 3개로 구성되어 있다. 이는 총 6개의 압전체로부터 전기 에너지 생성이 가능하며, 제 3장의 복합 시스템의 실험적 성능검증에서는 총 6개의 출력 전력을 직렬 연결하였을 때, 약 0.66V의 전압 생성을 예측하였다.

추가적으로 앞서 수행한 압전소자의 자유감쇠 진동시험의 시험 결과에서 확인할 수 있듯 압전소자의 구성인 전원선 및 제작 시 크기, 무게 등의 오차는 설계 의도된 압전소자의 고유진동수에 영향이 존재한다. 이러한 고유진동수 변화는 공진을 요구하는 에너지 수확 시스템에서 출력 전력에도 영향이 있음을 의미하며, 가진 주파수의 변화 시 출력 전력이 감소될 가능성이 존재한다. 상기의 이유로 본 연구에서는 압전소자 민감성을 수치해석을 통해 확인해 보았으며, 그 결과를 Fig. 26에 나타낸다. 압전소자의 민

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

감성 결과를 살펴보면 냉각기 구동주파수 30Hz에서 압전소자의 공진으로 최대 전압이 출력 되었으며, 압전소자의 공진주파수 30Hz의 ±5Hz에서 약 3배의 출력 전압이 감소되었다. 상기 결과로부터 확인 할 수 있듯 압전소자 고유진동수 변화 또는 진동발생원으로부터의 가진 주파수 변화는 출력 전력에도 영향이 있음을 확인 할 수 있다.

여기서 상기의 압전소자의 민감성 보완 방안으로는 Fig. 27과 같이 복수의 압전소자를 하나로 구성하며, 길이 또는 폭을 다르게 하여 서로 다른 고유진동수를 갖는 압전소자를 설계함으로써 넓은 폭의 주파수 영역 내에서 전기 에너지를 수확 할 수 있으며 [21], 다수의 전기 에너지 수확 시스템을 이용하여 각각의 에너지 수확 시스템의 전기적 연결을 직·병렬 조합으로 작동 주파수를 조절할 수 있다[29].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

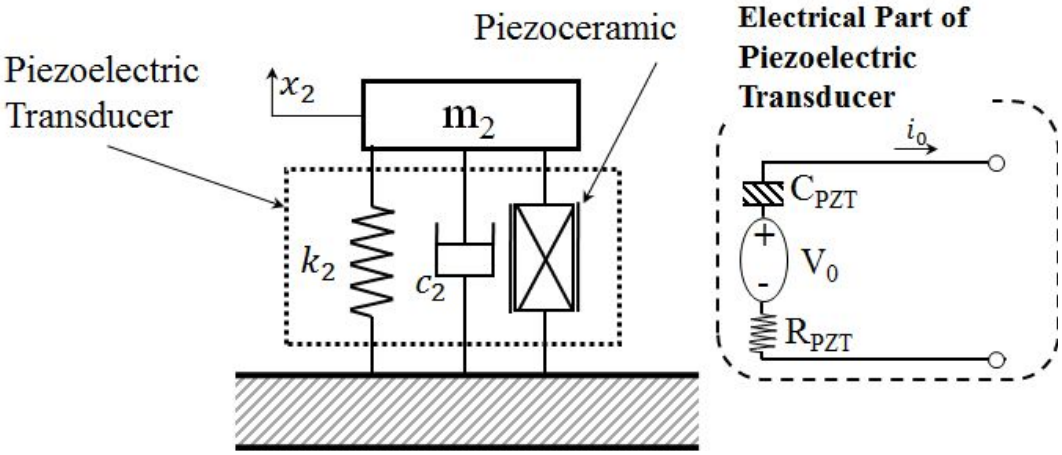


Fig. 23 Single Degree of Freedom System with a Piezoelectric Transduce

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

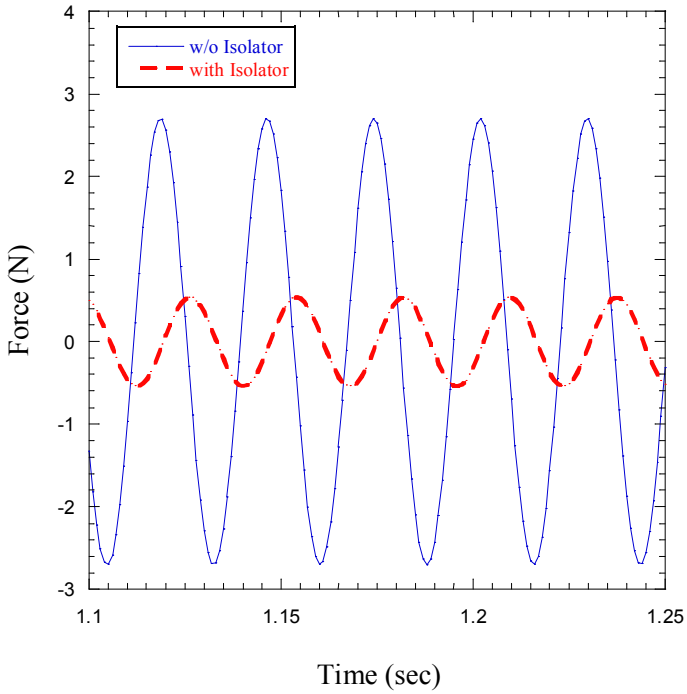


Fig. 24 Simulated Values of Transmitted Force

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

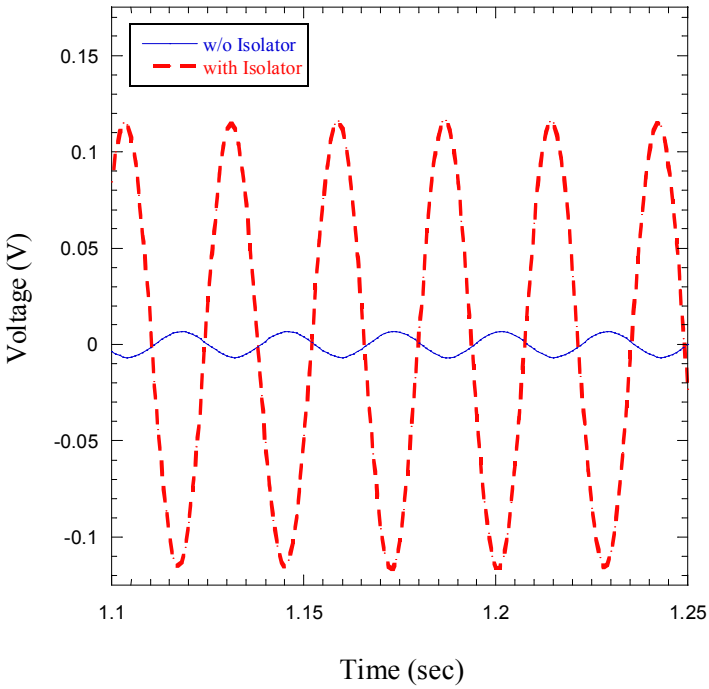


Fig. 25 Simulated Values of Generated Voltage

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

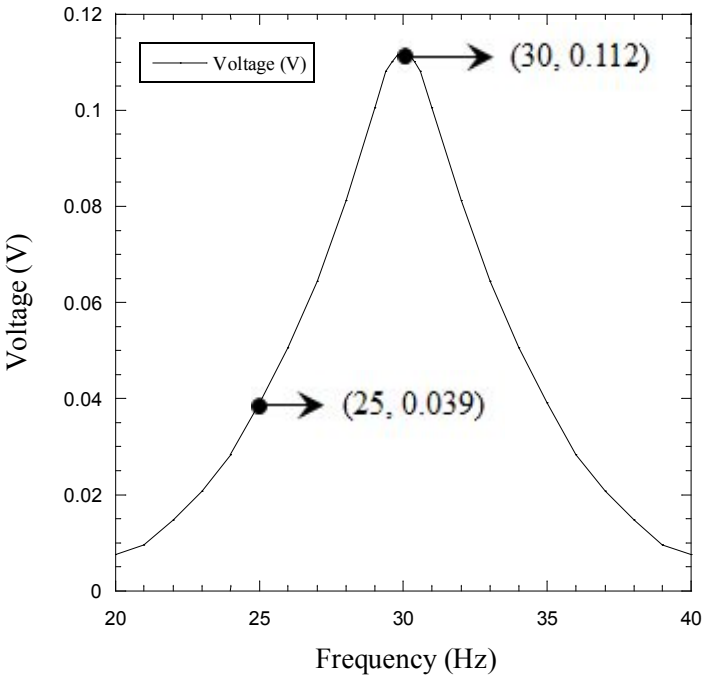
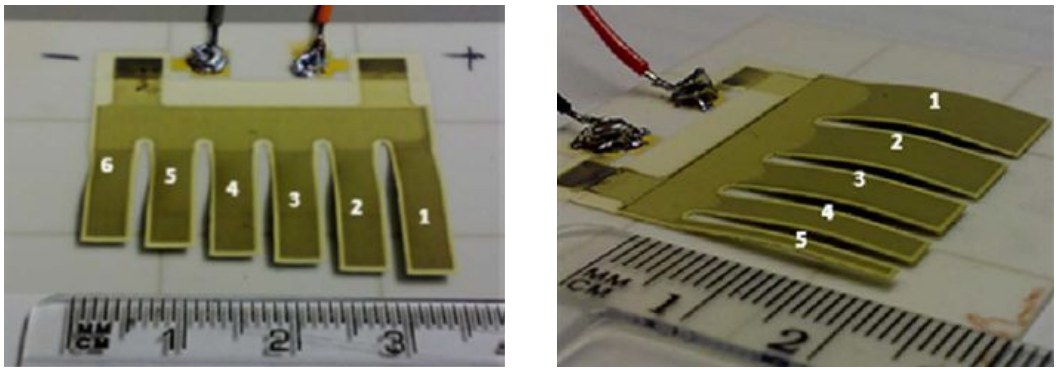


Fig. 26 Generated Voltage Sensitivity According to the Variations of Eigenfrequency of the Piezoelectric

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) (b)

Fig. 27 An Array of Cantilever with (a) Six Fingers Having Different Length and (b) an Array of Cantilever with Five Fingers Having Different Width [21]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 3 장 복합 시스템의 실험적 성능검증

Figures 28 (a)는 고해상도 관측위성의 미소진동에 의한 영향으로 영상품질이 저하된 사진의 예를 나타낸다. LOS(Line of Sight) 지터(jitter)는 관측위성의 영상 촬영 임무 시 광학 탑재체 초점면상에 야기하는 시변 운동을 의미하며, 위성체의 내부 또는 외부의 다양한 진동 발생원으로부터 영향을 받는다. 일반적으로 지터는 위성 영상품질에 큰 영향을 미치는 위성 구조체의 고주파 랜덤진동을 의미하며, 영상품질의 질을 평가하기 위한 중요한 성능지표로 고려된다. 따라서 Fig. 28 (b)와 같은 고해상도 영상품질을 확보하기 위해서는 초기 설계단계에서부터 실험적 혹은 수치 해석적 방법으로 엄격한 지터 관리가 요구된다. 만일 할당된 지터 요구조건을 충족하지 못할 경우, 진동절연기를 적용하는 방법 또는 진동을 유발하는 탑재장비를 재설계 하는 방법 등을 고려해야하며, 비용 및 현실적 요인들을 고려하여 진동절연기를 적용하는 방법이 주로 적용되고 있다[30].

지터를 유발하는 위성체의 내란원으로는 위성의 자세제어용 액추에이터인 플라이휠, 안테나의 기계적 구동이 가능한 짐벌식 안테나, 자세정보 제공을 위한 기계식 자이로, 임무장비의 극저온 유지를 위한 냉각기 등과 같이 기계적 회전 또는 병진 가동부를 갖는 탑재장비가 있으며, 목적하는 기능을 구현함과 동시에 지터를 유발하는 미소진동을 수반한다. 이러한 내란발생원으로부터의 진동은 그 크기가 극히 미소하나 정밀 지향성능이 요구되는 고해상도 관측위성의 영상품질을 저하시키는 주요 원인으로 작용한다. 고해상도 영상품질 획득을 위한 위성 미소진동 절연기술은 고해상도 관측위성의 관측성능과 직결되며, 고해상도 요구조건 충족을 위해 반드시 필요한 기반기술이다[31].

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(a)

(b)

Fig. 28 Image Quality Degradation by Micro-vibration [(a):Blurred Image by Micro-vibration, (b):High-Quality Image without Micro-vibration Affection] [32]

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 1 절 시험 구성

Figure 29은 진동절연기의 궤도 미소진동 절연성능 및 압전 에너지 재생성능을 측정하기 위한 전체 개략도를 나타내며, 지지판위에 장착된 수동형 진동절연기 및 이와 결합된 더미 냉각기, 지지판을 러버(Rubber) 계열의 탄성와이어로 지지하여 Free-Free의 경계조건에서 미소진동이 측정 가능한 시스템, 궤도환경 모사를 위해 전 방향 Free-Free조건 구현이 가능한 4N/mm의 저강성 탄성와이어로 제작된 0g 장치로 구성되어 있으며, 이를 통해 별도의 Counter-mass를 사용하지 않고 진동절연기 조립체가 공칭위치에 위치할 수 있도록 구현하였다.

더미 냉각기의 경우, 실제 우주용 냉각기의 궤도 운용 시 발생하는 냉각기 길이 방향(y-axis) 주 구동 주파수 30Hz에서의 최대 전달력 2.5N을 모사하기 위해 Fig. 30과 같이 더미 냉각기 내부에 주 가진 주파수와의 동조 및 최대 전달력을 모사하기 위해 H2W Technologies 사의 리니어 모터를 선정하였으며, Fig. 31과 Table 3에 형상 및 사양을 각각 나타낸다. 여기에서 Function Generator로부터 생성된 신호를 Power Amplifier를 통해 모터 내부에 감긴 코일로 인가하면 리니어 모터의 영구자석은 코일 내부에 발생하는 기전력에 의해 선형 왕복운동을 하게 되며, 이로 인해 우주용 냉각기 모사가 가능한 미소진동이 발생한다. 이러한 더미냉각기는 미소진동 측정시스템과 무게중심이 정확히 일치되도록 배치됨으로써 원치 않는 모멘트발생에 의한 회전운동을 최소화하였다. 상기를 통해 구현된 더미 냉각기로부터의 미소진동은 냉각기의 길이방향(y-axis)과 일치하도록 지지판에 부착된 1개의 가속도 센서로부터 획득되며, 이로부터 획득된 y축 가속도 데이터(g)는 진동절연기 조립체 및 지지판의 전체무게(10.2kg)와 중력가속도($9.8m/s^2$)의 곱으로부터 냉각기가 발생하는 기저면으로의 전달력으로 산출된다.

압전 에너지 수확 시스템은 더미 냉각기의 가진 방향 (y-axis)에 배치되어 캔틸레버 구조에서의 최대변위를 갖도록 하였다. 여기서 각각의 압전소자로 부터 출력된 전력을 직렬로 연결하여 출력 전압 상승효과를 얻었으며, 측정 장비인 DAQ System을 이용하여 출력 전압과 가속도 데이터를 수집 하였다.

Figure 32, 33은 진동 절연기의 궤도 미소진동 절연 성능 및 압전 에너지 재생성능을 측정하기 위한 전체 시험 구성 및 복합 시스템의 형상과 전기 에너지의 정류 및 저장을 위한 회로를 나타낸다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

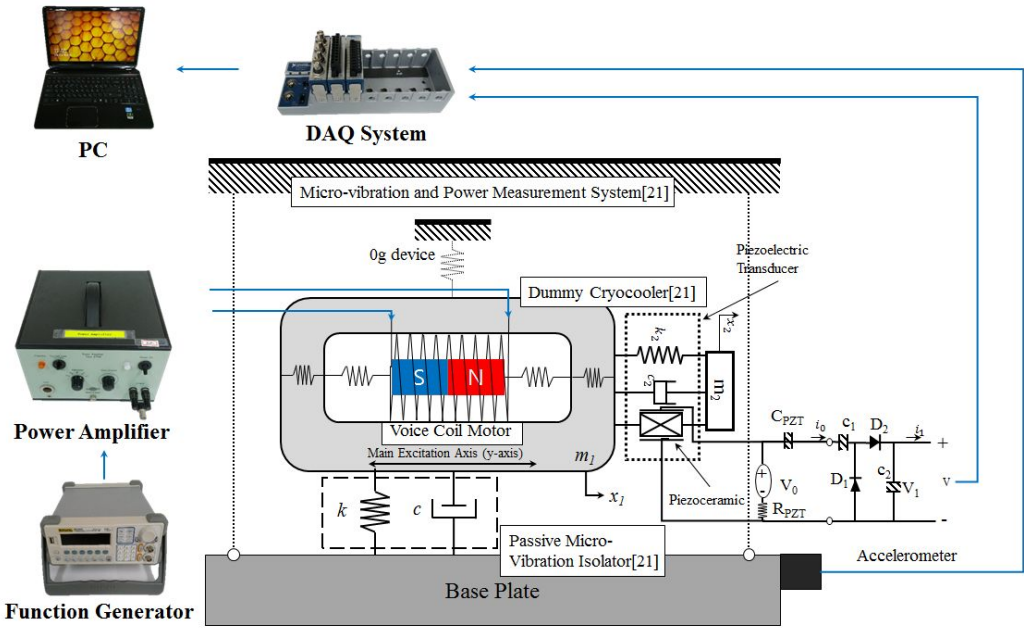


Fig. 29 Whole Schematic Diagram for the Micro-vibration and Energy Harvesting Measurement Test

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

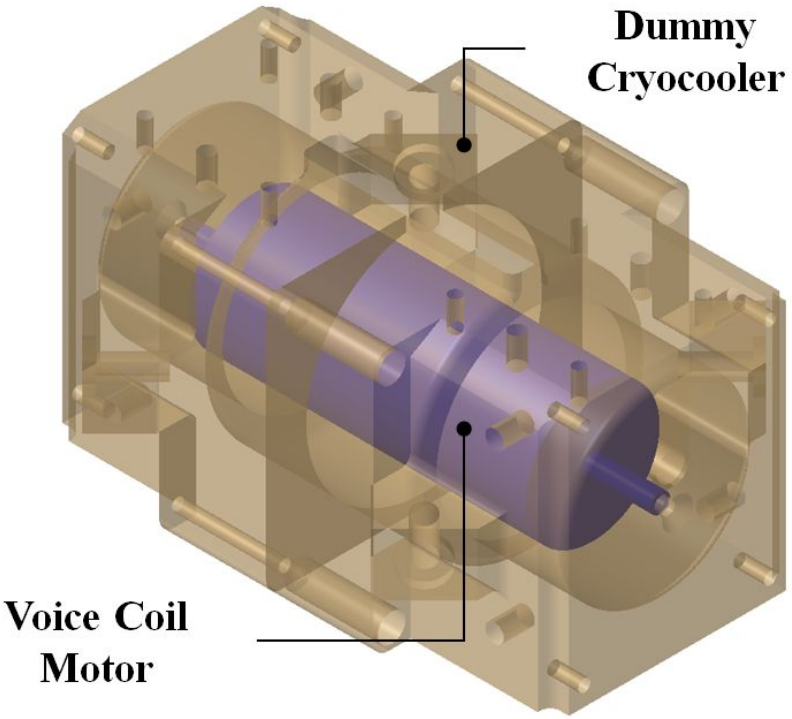


Fig. 30 Dummy Cryocooler Internal Configuration

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

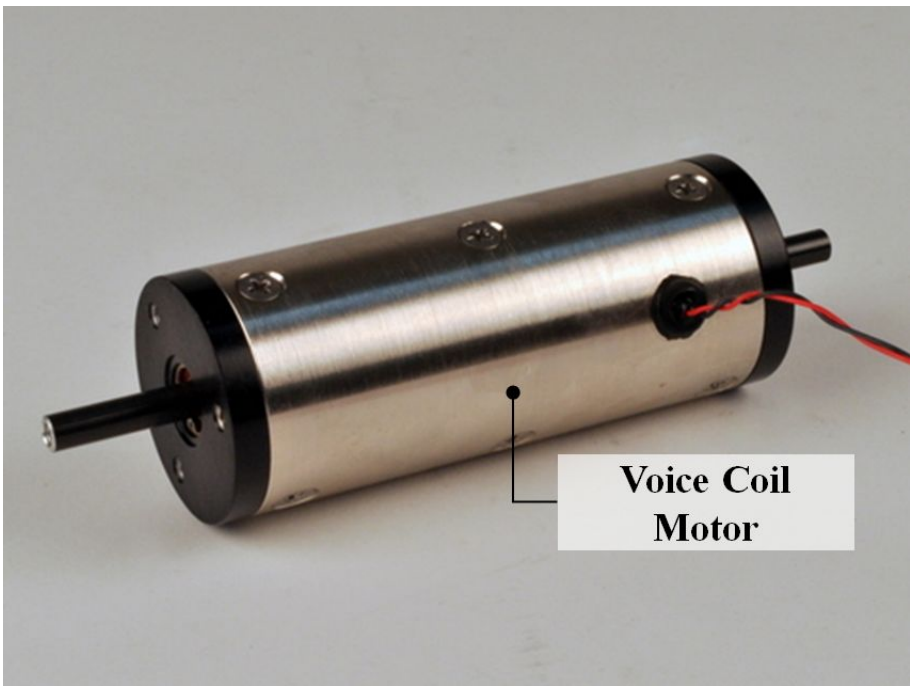


Fig. 31 Linear Motor for Micro-vibration of the Spaceborne Cryocooler

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3 Voice Coil Motor Specifications

Items	Values	Unit
Model No.	NCM08-17-050-2LB	-
Stroke	19.1	mm
Bearing Type	Linear Bushings	-
Moving Mass	166	grams
Total Mass	700	grams
Resistance @ 20C	6.4	ohme
Inductance @ 20C	2.9	mH
Electrical Time Constant	0.46	msec
Motor Constant	4.93	N/SQRT(Watt)
Force Constant	12.4	N/Amp
Back EMF	12.4	V/m/sec
Continuous Force	22.3	N
Max Power @ 100% Duty	20	Watts
Peak Force	66.8	N
Max Power @ 10% Duty	183	Watts

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

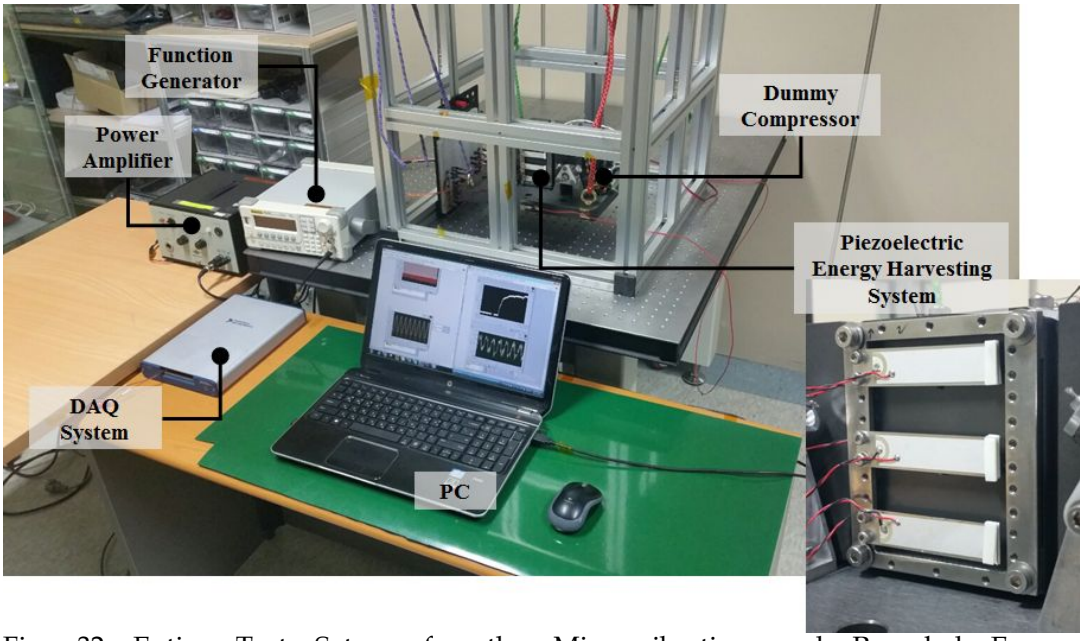


Fig. 32 Entire Test Set-up for the Micro-vibration and Recycled Energy Measurement Test

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

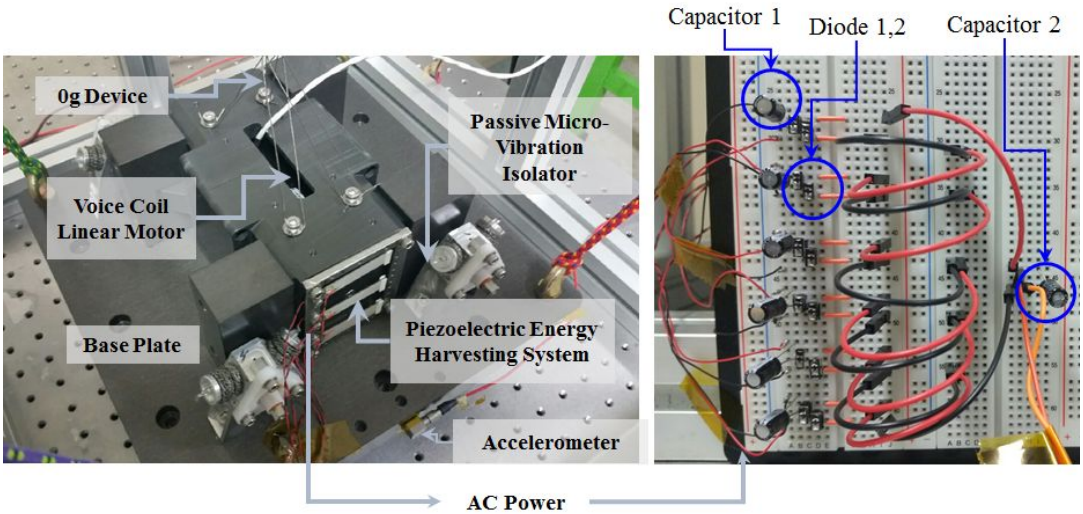


Fig. 33 Close-up Test Set-up for the Micro-vibration and Recycled Energy Measurement Test

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 2 절 궤도 미소진동 압전 에너지 재생성능 검증시험

본 연구에서 궤도상 미소진동 절연과 동시에 전기 에너지 수확 및 저장하는 복합시스템을 구현하고자 한다. 여기서 미소진동 절연의 원리는 우주용 냉각기의 길이방향(y-axis) 주 구동주파수와의 충분한 주파수 분리를 실현시키는 것으로 궤도상에서는 냉각기를 저강성 탄성 지지함으로써 목적하고자 하는 미소진동 절연성능을 구현할 수 있다. 진동절연기 조립체의 정하중시험 및 자유감쇠 진동시험 결과로부터 미소진동 레벨의 가속도 영역에서는 냉각기의 주 가진축인 y축에 대해 진동절연기 조립체의 고유진동수가 약 8Hz 대역에 존재하며, 궤도 0g 환경에서는 스틸와이어의 장력이 이완됨으로써 냉각기 조립체의 저강성 탄성지지구조를 구현하게 된다. 압전 에너지 수확 시스템은 냉각기의 주 가진 방향인 냉각기의 길이방향(y-axis)으로 캔틸레버 구조가 진동할 수 있게 구속하여 냉각기의 미소진동을 효과적으로 수집할 수 있도록 구성하였다. 여기서 압전 에너지 수확 시스템의 구성인 바이몰프 형태의 압전소자 3개는 각각 생성전압을 정류 회로를 통해 직류로 전환 하였으며, 이 후 직렬 연결하여 하나의 캐패시터에 전압을 저장하였다.

본 연구에서 제안한 진동절연기의 미소진동 절연성능을 검증하기 위해 Fig. 32의 미소진동 측정시스템을 적용하였으며, 진동절연기의 절연성능 비교를 위한 강체 구속조건 및 궤도 미소진동 절연성능 검증을 위한 0g 조건에서 시험을 실시하였다. 강체 구속조건의 경우 Fig. 34과 같이 별도의 Blocking Bracket을 고정축 커버와 변위구속블록 사이에 삽입함으로써 구현가능하며, 0g 조건의 경우 Fig. 35와 같이 스팅 와이어를 이용하여 공칭위치에 도달함으로써 구현이 가능하다.

미소진동 측정시험 시 궤도 0g 환경은 상기의 시험구성에서 전술한대로 별도의 0g 장치를 통해 구현되었으며, 미소진동 측정시스템과 무게중심이 정확히 일치되도록 배치됨으로써 원치 않는 모멘트발생에 의한 회전운동을 최소화하였다.

Figures 36, 37는 각각 궤도 미소진동 시험으로부터 획득된 기저면 전달력의 시간이력 및 압전 에너지 재생성능을 나타내며, 진동절연기의 절연성능 및 에너지 재생 비교를 위해 강체구속조건과 진동 절연기 적용 시 조건을 각각 나타내었다.

상기의 결과로부터, 강체 구속조건에서 발생하는 냉각기의 주 구동 주파수인 30Hz에서의 최대 전달력 2.665N이 인가되며, 고해상도 관측위성의 영상품질저하를 유발하는 주요 원인된다. 하지만 본 연구에서 제안한 진동 절연기 적용 시 설계가 의도한대로 스틸와이어의 장력이 이완되어 진동절연기 조립체의 저강성 탄성 지지구조가 가능하여

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

기저면으로의 전달력이 0.65N으로 저감되었으며, 강체 구속조건의 최대 전달력 대비 4.1배의 미소진동 절연이 가능함을 입증하였다. 또한, 상기의 저감비는 Fig. 20의 기본 진동 전달률 이론으로부터 유추된 저감비 4.25배와 거의 일치함을 확인하였다.

냉각기에 배치된 압전 에너지 수확 시스템에서의 에너지 생성성능을 살펴보면, 강체 구속조건 일 때, 냉각기의 구동력이 기저면으로 전달됨에 따라 압전 에너지 수확 시스템에 전해지는 가진력이 낮아 0.005V의 출력 전압으로 낮은 에너지 재생성능을 보이고 있으나 진동 절연기의 높은 절연성능을 보이는 0g 환경의 경우 기저면으로의 전달력이 감소되어 냉각기의 구동력이 압전 에너지 수확 시스템으로 전달되는 가진력이 증가됨에 따라 0.6V의 출력 전압으로 강체 구속조건의 에너지 재생 성능 대비 120배 뛰어난 에너지 재생이 가능함을 입증하였다. 여기서 상기의 진동 절연 및 전기 에너지 재생성능 시험 결과는 앞서 수행한 복합 시스템의 기본특성 결과로부터 도출된 수치해석 결과와 유사함을 확인하였다.

본 연구에서는 진동 발생원으로부터의 미소진동 절연과 함께 전기에너지 재생을 목적으로 냉각기의 강체 구속조건 및 진동절연기 적용 시 발생하는 기저면으로의 전달력과 이에 기인하여 압전 에너지 수확 시스템의 에너지 재생성능을 종합하여 Fig. 38에 나타낸다. Figure 39은 0g 조건에서의 수집된 전기적 에너지는 정현파 형태의 정류 전압으로써 이를 10μF의 캐패시터를 이용하여 평활 및 저장됨을 확인하였을 때, 약 0.165V의 전압이 저장됨을 확인하였다.

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

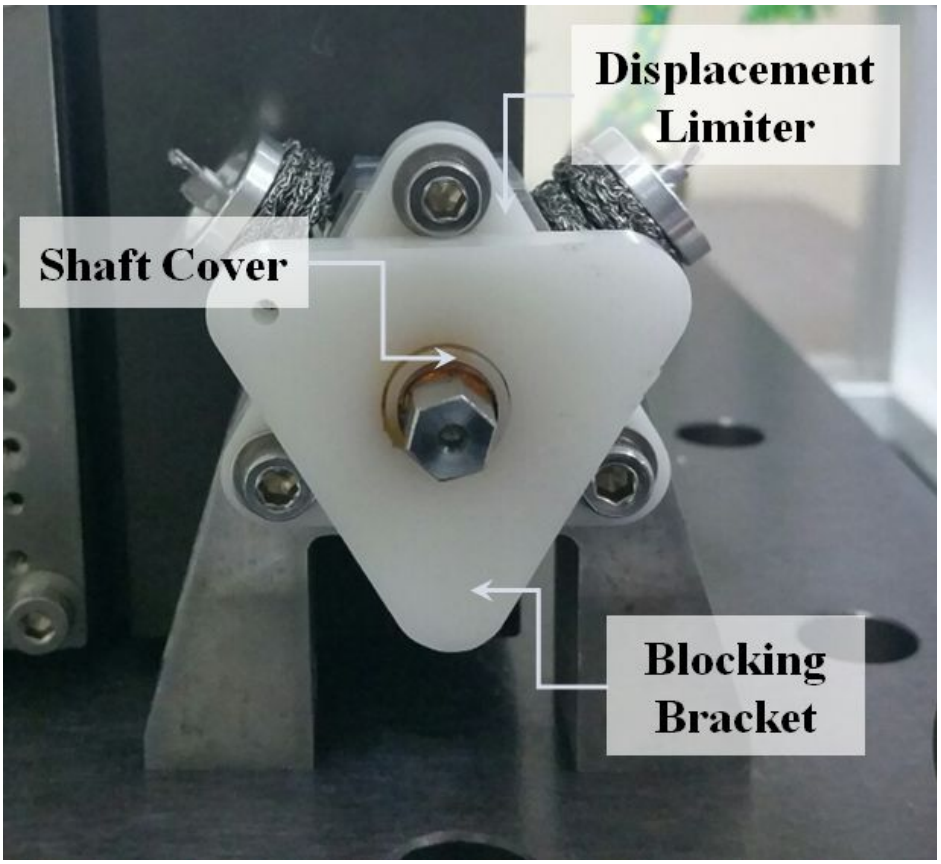


Fig. 34 Rigid Condition by Inserting Blocking Bracket between Displacement Limiter and Shaft Cover

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

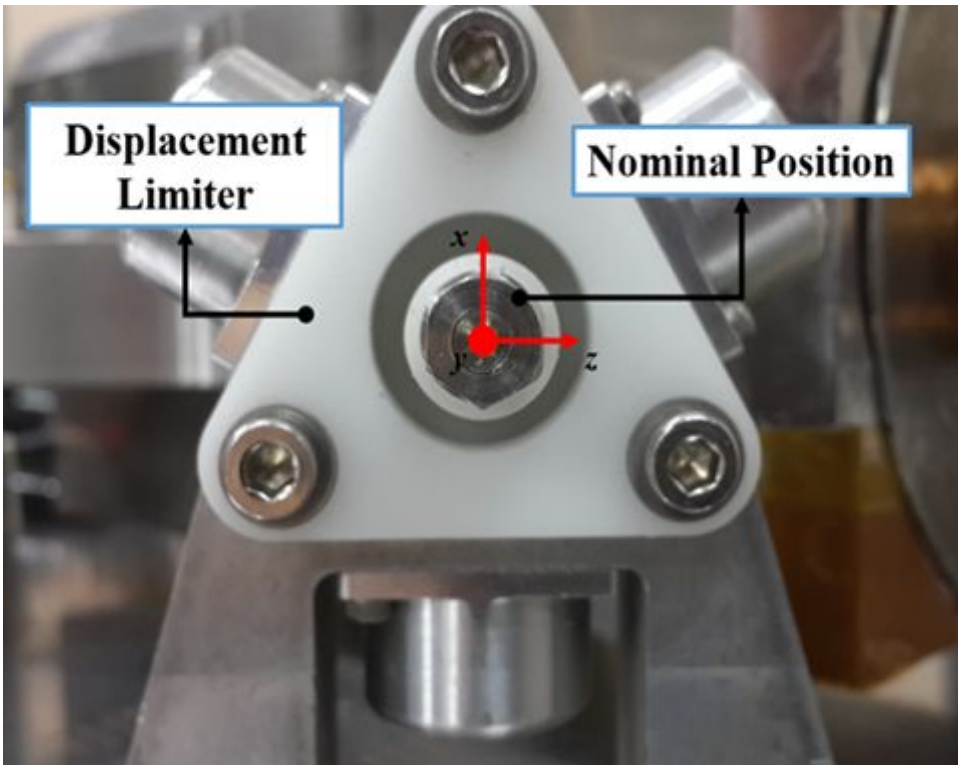


Fig. 35 Nominal Position of the Vibration Isolator Assembly

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

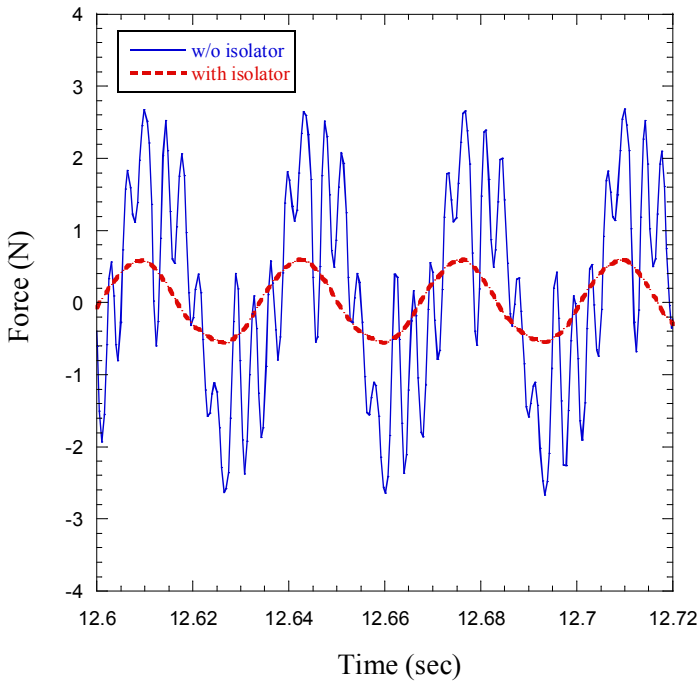


Fig. 36 Comparison of Measured Force w/o & with Isolation

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

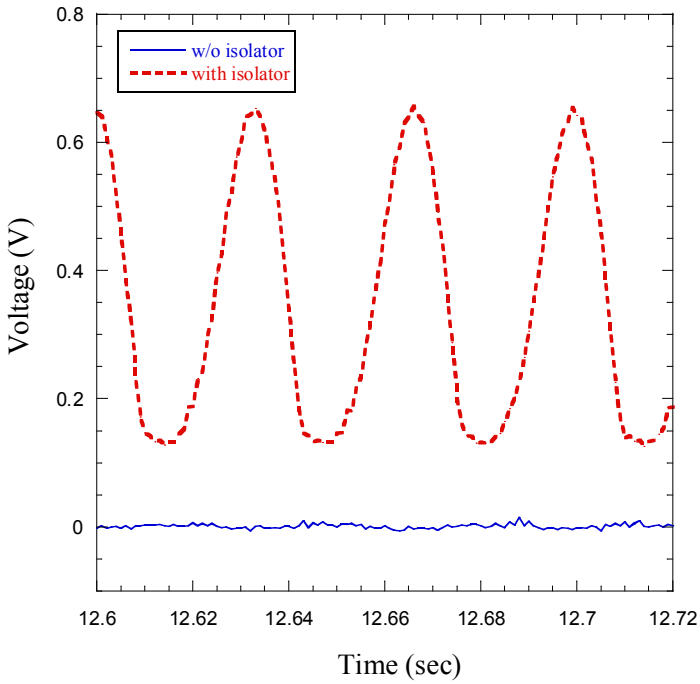


Fig. 37 Comparison of Measured Voltage w/o & with Isolation

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

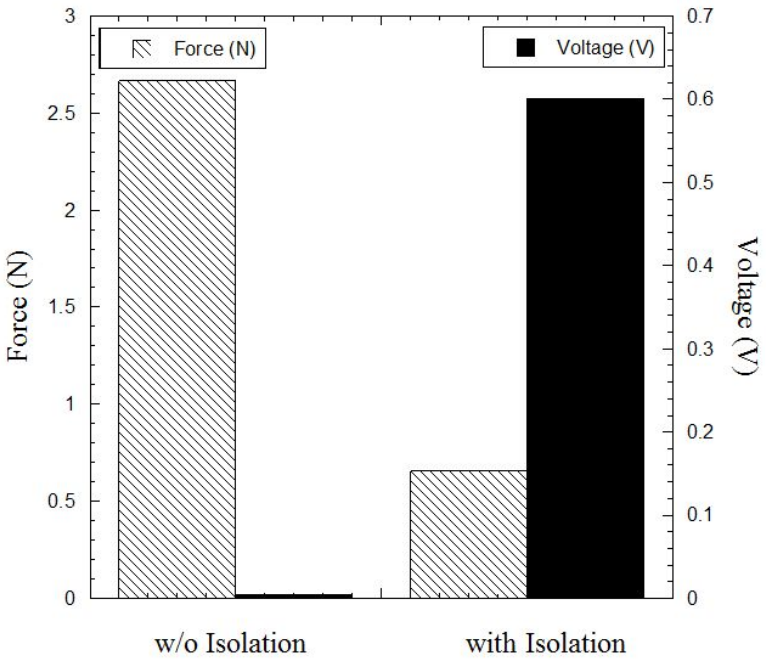


Fig. 38 Comparison of Measured Force and Voltage w/o & with Isolation

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

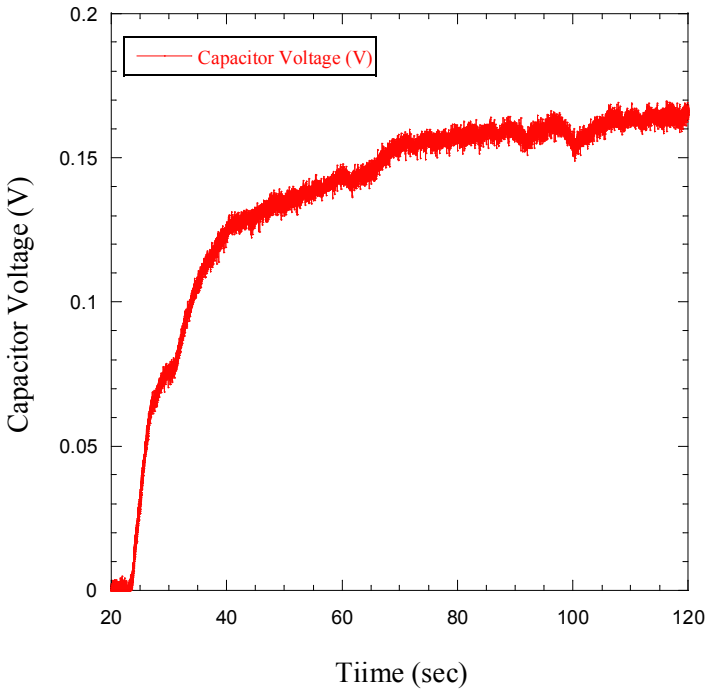


Fig. 39 Stored Energy into the 10μF Capacitor 2

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제 4 장 결 론

본 연구에서는 진동 발생원으로부터의 미소진동 절연 및 에너지 수확 시스템의 복합 기능을 구현하기 위해, 선정된 우주용 냉각기로부터의 미소진동 절연 성능이 보장되며, 이와 동시에 진동 발생원으로부터의 미소진동을 전기 에너지로 수확하는 복합 시스템을 제안하였다.

상기의 복합 시스템을 구현하기 위해 형상기억합금을 적용한 수동형 진동 절연기를 냉각기와 결합하여 기본 특성 실험을 수행하였다. 여기서 진동절연기와 결합된 더미 냉각기 조립체 수준에서의 정하중 및 자유감쇠 진동시험을 통해 본 연구에서 제안한 수동형 진동절연기는 궤도 미소진동 영역에서는 상대적으로 낮은 고유진동수 및 감쇠비로 기저면으로의 진동 전달력 감소의 유효성을 확인하였다. 또한, 우주용 냉각기의 구동 주파수와 동일한 고유진동수를 갖는 압전소자를 설계 기본 특성시험을 수행하였다. 여기서 감쇠비를 측정하여 복합 시스템에서의 전기에너지 재생성능의 수치해석 변수로 적용 하였다. 또한, 고유 진동수를 측정 시 약 2Hz의 차이를 확인하였으며, 이는 압전소자의 전원선으로 인한 결과로 복합 시스템에 적용 시 전원선의 적정 배치를 통해 냉각기의 구동 주파수와 공진으로 최대변위를 발생함으로써 높은 에너지 재생성능이 가능함을 확인하였다.

여기서 복합 시스템의 기본특성 결과로부터 복합 시스템의 수치해석 시 더미 냉각기의 강체 구속조건에서 약 2.6N의 기저면으로의 전달력이 인가되었으며, 이때의 전기 에너지 재생성능은 0.006V의 미소 전압이 생성되었다. 여기서 수동형 진동 절연기 적용 시 약 0.53N의 기저면으로의 전달력이 감소됨을 예측하였으며, 이에 기인하여 0.66V의 전기 에너지 재생성능을 예측하였다.

본 연구에서 제안하는 복합 시스템의 유효성을 위해 궤도 미소진동 절연 및 압전에너지 재생성능 시험을 수행하였으며, 강체 구속조건의 우주용 냉각기의 주 구동 주파수 30Hz, 기저면으로의 최대 전달력 2.665N에 대해 수동형 진동 절연기 적용 시 0.65N의 전달력으로 약 4.1배의 미소진동 절연 효과가 있음을 확인하였다. 또한, 냉각기에 배치된 압전 에너지 수확 시스템은 바이몰프 형태의 압전소자 3개로 구성되며, 전기 회로의 정류부를 경유하여 교류에서 직류로 전환 후 직렬로 연결하였다. 이러한 압전 에너지 수확 시스템은 상기의 미소진동 절연 시험 수행과 동시에 수행되었다. 에너지 재생 성능 결과 강제 구속조건에서 0.005V의 낮은 에너지 재생성능을 확인하였으

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

며, 진동 절연기 적용 후 0g 환경을 모사하였을 때 약 0.6V의 높은 에너지 재생성능을 보였으며, 이는 강체 구속조건에 대해 120배의 에너지 재생성능 효과임 입증하였다. 여기서 상기의 미소진동 절연성능 및 전기 에너지 재생성능 검증시험결과는 앞서 수행한 복합 시스템의 수치해석 결과로 도출된 수치와 비교하였을 때, 상당부 유사함을 확인하였다.

또한, 교류전압의 정류 후 정현파 형태의 직류전압은 C_2 캐패시터를 이용하여 평활 및 전기 에너지의 저장을 확인하였을 때, 약 0.165V의 전압이 저장 되었다. 여기서 캐패시터에 저장된 전압의 경우 인가 전압보다 낮은 전압이 저장 되었으며, 이는 회로에서 사용된 소자에서의 전압 손실로 향후 저전력 구동 소자를 사용함으로써 전압 손실을 줄일 것이라 판단한다.

본 연구에서는 진동 발생원으로부터의 미소진동 절연을 통해 위성 구조체 및 타 전장품으로의 진동 전달력 최소화와 이와 동시에 차폐 대상인 미소진동을 이용하여 전기적 에너지 재생을 구현하기 위한 복합 시스템을 제안하였으며, 상기의 결과로부터 기저면으로의 미소진동 절연효과 및 전기적 에너지 재생이 가능함을 입증하였다.

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

【참 고 문 헌】

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) J. P. Karl and C. J. Schauwecker, "Use of a Passive Reaction Wheel Jitter Isolation System to Meet the Advanced X-ray Astrophysics Facility Imaging Performance Requirements", Progress in Biomedical Optics and Imaging, No. 3356, 1998, pp.1078-1094.

3) D. Poter, C. David and H. John, “Advanced 1.5 Hz Passive Viscous Isolation System”, Proceeding of the 35th AIAA SDM Conference, Hilton Head, South Carolina, April, 1994.

4) Y. K. Kim, H. B. Kim, E. H. Kim and 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.

5) G. C. Richard, M. S. Jeanne, D. Alok, L. P. Davis, T. T. Hyde, D. Torey, H. R. Zahidul and T. S. John, "Vibration Isolation and Suppression System for Precision Payloads in Space", Smart Materials & Structures, Vol. 8, No. 6, 1999, pp.798-812.

6) A. M. Veprik, S, Zechtzer, N. Pundak, S. V. Riabzev, C. Kirckonnel and J. Freeman, "Low Vibration Microminiature Split Stirling Cryogenic Cooler for Infrared Aerospace Applications", AIP Conference Proceedings Series, Vol. 1434, No. B, 2012, pp.1473-1480.

7) S. V. Riabzev, A. M. Veprik, H. S. Vilenchik, N. Pundak and E. Castiel, "Vibration-free Stirling Cryocooler for High Definition Microscopy", Cryogenics, Vol. 49, No. 12, 2009, pp.707-713.

8) D. Kamesh, R. Pandiyan and A. Ghosal, "Passive Vibration Isolation of Reaction Wheel Disturbances using a Low Frequency Flexible Space Platform", Journal of Sound and Vibration, Vol. 331, No. 6, 2012, pp.1310-1330.

9) H. U. Oh, K. J. Lee and M. S. Jo, "A Passive Launch and On-orbit Vibration

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Isolation System for the Spaceborne Cryocooler", Aerospace Science and Technology, Vol. 28, No. 1, 2013, pp.324-331.

10) H. U. Oh, S. C. Kwon and S. H. Youn, "Characteristics of Spaceborne Cooler Passive Vibration Isolator By Using A Compressed Shape Memory Alloy Mesh Washer", Smart Materials and Structures, Vol. 24, No.1, 2015, pp.015009.

11) S. C. Kwon, S. H. Jeon and H. U. Oh, "Performance Evaluation of Spaceborne Cryocooler Micro-Vibration Isolation System Employing Pseudoelastic SMA Mesh Washer", Cryogeics, Vol. 67, 2015, pp.19-27.

12) 정영훈, '압전에너지 하베스팅 전망 및 최신 기술 동향', 하연 출판, 2012

13) R. Amirtharajah, A. P. Chandrakasan, "Self-Powered Signal Processing Using Vibration-Based Power Gneration", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 33, No. 5, 1998, pp. 687-695.

14) E. P. James, M. J. Tudor, S. P. Beeby, N. R. Harris, P. Glynne-Jones, J. N. Ross and N. M. White, "An Investigation of Self Powered Systems for Condition Monitoring Applications", Sensors and Actuators A, Vol. 110, 2004, pp. 171-176.

15) S. Meninger, J. O. Mur-Miranda, R. Amirtharajah, A. P. Chandrakasan, and J. H. Lang, "Vibration to Electrical Energy Conversion", IEEE Transaction VLSI System, Vol. 9, No. 1, 2001, pp. 64-76.

16) G. W. Taylor, J. R. Burns, S. M. Kammann, W. B. Powers, and T. R. Welsh, "The Energy Harvesting Eel: A Small Subsurface Ocean/River Power Generator", IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 26, No. 4, 2001, pp. 539-547.

17) X. Wang,J. Song, J. Liu and Z. L. Wang, "Direct-Current Nanogenerator Driven by Ultrasonic Waves", Science, Vol. 316, No. 5821, 2007, pp. 102-105.

18) Z. Wang, J. Hu, A. P. Suryavanshi, K. Yum and M. F. Yu, "Voltage Generation From Individual BaTiO3 Nanowires Under Periodic Tensile Mechanical Load", Nano Letters, Vol. 7, No. 10, 2007, pp. 2966-2969.

19) K. I. Park, S. Xu, Y. Liu, G. T. Hwang,† S. J. L. Kang, Z. L. Wang and K. J. Lee, "Piezoelectric BaTiO3 Thin Film Nanogenerator on Plastic Substrates", Nano Letters, Vol. 10, No. 12, 2010, pp. 4939-4943.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

20) D. H. Choi, M. Y. Choi, W. M. Choi, H. J. Shin, H. K. Park, J. S. Seo, J. B. Park, S. M. Yoon, S. J. Chae, Y. H. Lee, S. W. Kim, J. Y. Choi, S. Y. Lee, and J. M. Kim, "Fully Rollable Transparent Nanogenerators Based on Graphene Electrodes", Advanced Materials, Vol. 7, No. 22, 2010, pp. 2187-2192.

21) S. L. Kok, N. Mohamad, D. F. W. Yap, S. K. Chen, C. F. Dee, "Multi-Frequency Energy Harvesting Using Thick-Film Piezoelectric Cantilever", INECCE, 2011, pp. 420-423.

22) http://www.nano-i.com/?mid=webjin&listStyle=viewer&document_srl=618485

23) S. C. Kwon, "A Study on Spaceborne Cryocooler Passive Micro-vibration Isolator with a Launch Vibration Attenuation Capability", 석사학위논문, 2015

24) http://wonderfulengineering.com/german-engineer-makes-a-free-energy-harvesting-device/

25) M. K. Kim, "Study on The MEMS Vibration Energy Havesting Using Piezoelectric Cantilever", 석사학위논문, 2013

26) J. W. Kim, H. U Ko, S. C. Mun, J. H. Kim and H. S. Kim, "Recent Advancement of Piezoelectric Energy Harvesting", KIC News, Vol. 16, No. 4, 2013, pp. 27-34.

27) J. I. Daniel, “Engineering Vibration” 3rd Edition.

28) http://pinkwink.kr/675

29) J. E. Kim, "Design of a Vibration-Powered Piezoelectric Energy-Harvesting Module by Considering Variations in Excitation Frequency", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 34, No. 5, 2010, pp. 637-644.

30) D. K. Kim and H. T. Choi, “Velocity Optimization Method of X-band Antenna for Jitter Attenuation”, The 23th International Congress on Sound and Vibration, 2014, Beijing.

31) 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.

32) http://techjun.com/578

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

【연 구 실 적】

<국내논문>

1. 이명재, 정현모, 오현웅, “복수구조 전개 및 발사체 분리직후 시스템 자동운용을 위한 큐브위성의 메커니즘 설계”, 항공우주시스템공학회지, 제 7권 제 3호, 20-25, 2013.
2. 강수진, 정현모, 오현웅, “영구자석 안정화 자세제어 방식이 적용된 큐브위성의 열적 특성분석”, 항공우주시스템공학회지, 제 7권 제 3호, 26-32, 2013.
3. 박태용, 채봉건, 정현모, 오현웅, “큐브위성용 상용 전력계 부품을 적용한 영구자석 자세제어 안정화 방식 큐브위성의 전력계 개념설계”, 항공우주시스템공학회지, 제 8권 제 1호, 42-47, 2014.
4. 권성철, 정현모, 하헌우, 한성현, 이명재, 전수현, 박태용, 강수진, 채봉건, 장수은, 오현웅, 한상혁, 최기혁, “우주기반기술 검증용 극초소형 위성 STEP Cube Lab.의 시스템 개념설계”, 한국항공우주학회지, 제 42권 제 5호, 430-436, 2014.
5. 전수현, 장수은, 정현모, 차진영, 오현웅, “Structural Design and Analysis of Pico-class Satellite named STEP Cube Lab”, 항공우주시스템공학회지, 제 1권 제 1호, 34-43, 2014.
6. 강수진, 정현모, 서정기, 오현웅, “큐브위성 STEP Cube Lab. 비행모델의 열진공 시험을 통한 성능 및 열제어계 설계”, 한국항공우주학회지, 제 43권 제 9호, 814-821, 2015.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

<학회발표>

1. 권성철, 이명재, 전수현, 정현모, “큐브위성용 비폭발식 구속분리 장치의 실험적 성능검증”, 한국항공우주학회 학부생 논문대회, 한국항공우주학회, 2012.
2. 강수진, 정현모, 오현웅, “영구자석 안정화 자세제어 방식이 적용된 큐브위성의 열적성능 분석”, 항공우주시스템공학회 2013 춘계학술대회, 항공우주시스템공학회, 2013.
3. 이명재, 정현모, 오현웅, “큐브위성 복수구조 전개 및 P-POD 분리직후 시스템 자동운용을 위한 메커니즘 설계”, 항공우주시스템공학회 2013 춘계학술대회, 항공우주시스템공학회, 2013.
4. 박태용, 정현모, 오현웅, “큐브위성 전용 상용 전력계를 적용한 영구자석 안정화 자세제어 방식 큐브위성의 전력계 개념설계”, 항공우주시스템공학회 2013 춘계학술대회, 항공우주시스템공학회, 2013.
5. 정현모, 권성철, 이명재, 전수현, 박태용, 강수진, 차진영, 오현웅, “극초소형위성 TRANSCUBER의 시스템 개념설계”, 항공우주시스템공학회 2013 춘계학술대회, 항공우주시스템공학회, 2013.
6. 권성철, 하헌우, 정현모, 한성현, 이명재, 전수현, 김영욱, 박태용, 강수진, 차진영, 장수은, 채봉건, 오현웅, “우주기반기술 검증용 STEP Cube Lab.의 시스템 설계”, 한국우주과학회, 2013.
7. 권성철, 정현모, 하헌우, 한성현, 전수현, 이명재, 김영욱, 강수진, 박태용, 차진영, 채봉건, 장수은, 오현웅, “우주기초기술의 궤도검증을 위한 STEP Cube Lab.의 시스템 개념설계”, 항공우주시스템공학회 2013 추계학술대회, 항공우주시스템공학회, 2013.
8. 하헌우, 정현모, 채봉건, 장수은, 오현웅, “UHF 송수신 겸용 안테나를 적용한 큐브위성의 통신계 설계”, 항공우주시스템공학회 2013 추계학술대회, 항공우주시스템공학회, 2013.
9. 정현모, 한성현, 이명재, 박태용, 오현웅, “큐브위성 STEP Cube Lab.의 우주기술 검증용 탑재체”, 2014년 한국우주과학회 춘계학술대회, 2014.
10. 정현모, 김가람, 전성용, 신석주, 오현웅, “상용 탑재컴퓨터를 적용한 큐브위성 명령 및 데이터 처리계 개념설계”, 항공우주시스템공학회, 2014.
11. 김가람, 정현모, 전성용, 오현웅, “큐브위성용 비행소프트웨어 개발 및 검증 방

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

안",항공우주시스템공학회 추계학술대회, 2014.

12. 정현모, 권성철, 하헌우, 전수현, 이명재, 박태용, 강수진, 장수은, 채봉건, 전영현, 한성현, 전성용, 오현웅, "큐브위성 STEP Cube Lab.의 비행모델 개발", 2015년 한국우주과학회 춘계학술대회, 2015.
13. 채봉건, 권성철, 전수현, 이명재, 한성현, 정현모, 강수진, 장수은, 오현웅, "A Series of Parocedure for Developing Flight Model of STEP Cube Lab.", 한국우주과학회 2015 추계학술대회, 2015.
14. 정현모, 권성철, 조문신, 이용근, 강석주, 오현웅, "우주용 냉각기의 미소진동을 활용한 압전에너지 수확 모듈 설계", 항공우주시스템공학회 2015 추계학술대회, 2015.
15. 강수진, 정현모, 이용근, 강석주, 서정기, 오현웅, "극초소형위성 STEP Cube Lab. 비행모델의 열진공시험", 한국항공우주학회 2015 추계학술대회, 2015.

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

<특허>

1. 오현웅, 이명재, 정현모, “분리너트형 비폭발식 구속분리장치”, 출원번호 10-2013-0108729, 2013. 9. 10

<수상>

1. 권성철, 이명재, 전수현, 정현모 “큐브위성용 비폭발식 무충격 구속분리 장치의 실험적 성능검증”, 2012 한국항공우주학회 학부생 논문경진대회 준우수상
2. 정현모, 권성철, 이명재, 전수현, 박태용, 강수진, 차진영, 오현웅, “극초소형위성 TRANSCUBER의 시스템 개념 설계” 항공우주시스템공학회 2013 춘계학술대회 우수논문 선정
3. 2013 큐브위성 경연대회 최종 개발팀 선정, 미래창조과학부
4. 권성철, 하헌우, 정현모, 한성현, 전수현, 강수진, 이명재, 박태용, 차진영, 장수은, 채봉건, 2013 창업 아이디어 공모전”, 우수상
5. 하헌우, 박민현, 이승용, 권성철, 정석만, 임현우, 정현모, 전수현, “2013 조선대학교 산학협력선도대학 캡스톤 경진 대회”, 최우수상
6. 박태용, 채봉건, 정현모, 전성용, “제 1회 에너지기술 창의 아이디어 공모전”, 우수상 (한국 신재생 에너지 학회장상)
7. 이명재, 정현모, 전수현, 채봉건, “제 2회 조선대학교 대학(원)생 발명(특허) 경진대회”, 은상

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

【감사의 글】

학부 3년 동안 오로지 학부 졸업 후 취업을 목표로만 가지고 있던 저에게 오현웅 교수님의 본교 부임은 하늘이 저에게 주신 기회라고 여기며 연구실에서 교수님의 가르침을 받은 지 어언 3년이라는 시간이 지났습니다. 되돌아보면 학부생 때 그저 흥미로만 시작한 연구실 생활 도중 학업의 기로에서 아무것도 모르고 부족한 저에게 교수님께서는 선 듯 손을 내밀어 주셔서 시작한 대학원 과정이었습니다. 저를 가르침에 있어 많이 답답하시고 힘드셨겠지만 끝까지 놓지 않으시고 새로운 기회, 삶을 살아감에 있어 많은 조언 등의 아낌없는 지원과 가르침으로 이끌어주신 덕분에 지금 이 자리까지 올 수 있었습니다. 이렇게 제 삶에 많은 지식과 소양을 쌓게 도와주신 오현웅 교수님께 어떠한 말로도 감사의 말을 표현해 드릴 수 없지만 지금까지 진심어린 마음으로 지도해주신 오현웅 교수님께 진심을 다해 감사하다는 말 드리고 싶습니다.

지금까지 같은 연구실 생활을 하며, 악으로 깡으로 똘똘 뭉쳐 힘든 일도 같이 헤쳐 나아간 멤버로 본인 일과 더불어 모든 멤버들의 일을 도와주면서, 특히 본 연구를 마칠 수 있도록 많은 시간과 열정을 쏟아 부은 성철이한테 많은 고마움을 전하고 힘들 때 맥주 하나로 속 시원히 털어 놓을 수 있는 헌우, 가장 맏형으로써 많은 용기와 힘들 불어 넣어준 명재형, 실험실 왕 언니로서 남자들 대신 밑의 여동생들을 도맡아 챙겨준 수현이, 쾌활한 성격으로 주위 멤버들의 기분까지 즐겁게 만들어주는 수진이, 말 한마디로 연구실 분위기를 즐겁게 만들어주는 태용이, 맡은바 임무에 불철주야 열정을 가지고 끝까지 해내는 수은이, 연구실 막내로 궂은일을 도맡아 담당했던 봉건이에게 고마움을 전합니다. 또한, 함께 큐브위성 개발을 위해 끝까지 힘써준 나의 정신적 멘토 성현이, 위성 소프트웨어로 고생한 성용이형 외 연구에 집중할 수 있도록 지원해준 진영이, 지상국 건설에 힘써준 영현이, C&DH 팀으로써 같이 고생하고 한 가족의 가장이 된 가람이에게 고마움을 전합니다.

아울러 저의 논문 심사를 위해 귀하신 시간을 내주신 김홍배 박사님과 우성현 박사님께도 감사의 말씀을 드리고 싶습니다. 보다 좋은 논문으로 마칠 수 있도록 많은 코멘트와 연구자로서 더욱 깊은 사고를 할 수 있도록 가르쳐주셔서 본 연구에 대해 다시금 되돌아 볼 수 있도록 해주셨습니다. 이에 깊은 감사의 말씀을 드리고 싶습니다.

마지막으로 항상 저를 믿고 지지해주시며, 아낌없는 사랑으로 보살펴주시는 부모님께 이 논문을 바칩니다. 이 외에 제가 미처 한명, 한명 언급하지 못한 고마운 분들이 너무나 많으나 모두 새기지 못함을 죄송하게 생각하며, 진심으로 감사드립니다.

2015년 12월

정현모

Collection @ chosun