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]I804:24011-200000265429

2016년 02월

석사학위 논문

우주 비행체 열 제어 시스템을 위한 MEMS 기반 가변 방사율 라디에이터의 설계 및 성능 검증

조선대학교 대학원

항공우주공학과

한 성 현

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

우주 비행체 열 제어 시스템을 위한 MEMS 기반 가변 방사율 라디에이터의 설계 및 성능 검증

Design and Performance Verification of MEMS-based Variable Emissivity Radiator for Spacecraft Thermal Control System

2015년 2월 25일

조선대학교 대학원

항공우주공학과

한 성 현

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

우주 비행체 열 제어 시스템을 위한 MEMS 기반 가변 방사율 라디에이터의 설계 및 성능 검증

지도교수 김 태 규

이 논문을 석사학위 신청 논문으로 제출함

2015년 10월

조선대학교 대학원

항공우주공학과

한 성 현

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

한성현의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 오 현 웅 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 재 수 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 태 규 (인)

2015년 11월

조선대학교 대학원

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

Ⅰ. 서론 ····· 1

Ⅱ. MEMS 기반 가변 방사율 라디에이터 ····· 4
1. MEMS 가변 방사율 라디에이터 ····· 4

Ⅲ. 라디에이터 설계 및 제작 ····· 10
1. 라디에이터 설계 ····· 10
1) 재질선정 ····· 10
2) MEMS 가변 방사율 라디에이터 열 해석 ····· 11
2. 라디에이터 제작 ····· 12

Ⅳ. 라디에이터 열 제어 성능 평가 ····· 18
1. 라디에이터 성능 실험 ····· 18
1) 방사율 가변 시험 ····· 18
2) 열 제어 성능 시험 ····· 19
3) MEMS 가변 방사율 라디에이터 유효 방사율 비교 ····· 20
4) MEMS 가변 방사율 라디에이터 커버 유무에 대한 성능 분석 ····· 21

Ⅴ. 결론 ····· 28

【참고 문헌】 ····· 30
【연구 실적】 ····· 32

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF FIGURES

Figure 1. Configuration of OSR (Optical Solar Reflector) ····· 4

Figure 2. SRD on ther spacecraft MUSES-C ····· 5

Figure 3. Configuration of electrostatic radiator ····· 6

Figure 4. Operating Concept of MEMS variable emissivity radiator ····· 8

Figure 5. Configuration of MEMS radiators thermal model ····· 14

Figure 6. Result of thermal analysis on MEMS variable emissivity radiators ····· 16

Figure 7. Simplified mathematical model of the variable emissivity radiator ····· 17

Figure 8. The effective emissivity of the MEMS variable emissivity radiator for closed mode ····· 18

Figure 9. The effective emissivity of the MEMS variable emissivity radiator for closed mode ····· 19

Figure 10. Fabrication process flow of MEMS variable emissivity radiator ····· 20

Figure 11. Configuration of MEMS variable emissivity radiator ····· 21

Figure 12. Configuration of silicon beads ····· 22

Figure 13. Experimental setup for the function test of the variable emissivity radiator ····· 29

Figure 14. Operation result of MEMS variable emissivity radiator from closed mode to open mode ····· 30

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 15. Experimental setup for the thermal test of the variable emissivity radiator ····· 31

Figure 16. IR images of the variable emissivity radiator for the hot and cold case ····· 32

Figure 17. result of thermal analysis on MEMS variable emissivity radiator ····· 34

Figure 18. Experimental setup for the thermal test of the variable emissivity radiator ····· 32

Figure 19. IR images of the variable emissivity radiator for w/o cover to with cover 32

LIST OF TABLE

Table 1. MEMS variable emissivity radiator material ····· 15

Table 2. Thermal and optical properties of radiator materials ····· 15

Table 3. Analysis result of MEMS variable emissivity radiator ····· 15

Table 4. Thermal test and thermal analysis result of MEMS variable emissivity radiator ····· 33

Table 5. Thermal test result of MEMS variable emissivity radiator 37

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Design and Performance Verification of MEMS-based Variable Emissivity Radiator for Spacecraft Thermal Control System Radiator

Han Sung Hyeon
Advisor : Prof. Kim Tae Gyu, Ph. D.
Department of Aerospace Engineering,
Graduate School of Chosun University

Recently, MEMS-based louver and shutter variable emissivity radiators have been developed to achieve the efficient thermal control by varying their emissivity according to the temperature condition. However, they are still problematic to be applied for space missions because they consume the power continuously to maintain the intended emissivity and their actuating parts are weak in terms of the mechanical strength. In this study, to overcome above drawbacks, we proposed a MEMS-based variable emissivity radiator, which can change the emissivity property according to the polarity change of electrodes by using electric charge of the silicon powder. The radiator was placed in the vacuum chamber to minimize the effect of convection heat transfer. The thermal control performance was evaluated by measuring temperature differences between two modes at the high and low temperatures. The temperature was recorded by an infrared (IR) camera. The IR thermographs at the hot and cold cases. The temperature difference at two cases. When the plate on which the radiator is attached is fixed to 53°C, the temperature at the closed mode was 45.6°C because of the high emissivity. On the other hand, at the open mode, the radiator temperature was 52°C because of the low emissivity. Overall, the radiator temperature at the open mode tended to be higher than that at the closed mode. The temperature difference between two

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

modes at the hot case was 6.4°C. At the cold case where the radiator temperature was 10°C, the radiator temperature at the close mode was 13.1°C, whereas it is 6.2°C at the open mode. Thus, the radiator temperature at the closed mode was higher than that at the open mode. The temperature difference between two modes was 6.9°C. Based on the results, it is suggested that the operating concept and thermal control performance of the MEMS variable emissivity of radiator proposed in the present study was verified at the open and closed modes, respectively. In this study, the effectiveness of the performance tested the MEMS-based variable emissivity radiator.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅰ. 서론

위성을 구성하는 여러 가지 서브시스템 중 열 제어 서브시스템은 위성이 극심한 우주 열 환경에서 운용되는 동안 성공적으로 임무를 수행할 수 있도록 저온 영역에서는 히터에 의해 열을 인가하고 고온 영역에서는 라디에이터에 의해 열을 방출하는 등 다양한 열 제어 장치를 통해 위성 및 전장품의 작동 허용온도 범위를 유지하는 역할을 한다[1]. 열 제어 서브시스템은 크게 두 가지 열 제어 방식으로 나뉜다. 먼저 MLI(Multi Layer Insulation), OSR(Optical Solar Reflector), SSM(Second Surface Mirror), 표면코팅 등 소재 자체 특성을 이용하는 수동적 열 제어 방식과 히터 및 루버 방식 라디에이터 등 열 제어 장치를 통해 열 제어를 실시하는 능동적 방식이 있다. Figure 1은 수동적 열제어 방식의 대표적인 OSR의 형상을 나타낸다[2]. 기존의 OSR, SSM과 같은 수동적 열 제어 장치는 냉각 장치로서 열·광학 물성 특성을 이용해 발열원의 열을 방출하는 역할을 수행하지만 고정된 높은 방사율로 인해 탑재 장비의 비운용 시에도 지속적인 방열에 의한 열 손실을 발생하여 히터와의 조합에 의한 열 제어가 요구된다. 이러한 수동적 열 제어 장치들이 가지는 고정된 열·광학 물성 특성인 방사율을 온도에 따라 변화시킨다면 추가적인 열 공급 장치 및 전력소모를 줄일 수 있어 효율적인 열 제어가 가능하다.

해외 대학 및 연구 기관에서는 열·광학 물성 특성을 변경 가능한 열 제어 장치를 연구 중이며 주로 방사율을 변경시키는 열 제어 장치들이 개발되고 있다. 가변 방사율 라디에이터는 기존의 고정 방사율 라디에이터들과 달리 저온 조건에서는 낮은 방사율로 가변하여 추가적인 히터 열 제어에 의한 전력 소모 최소화가 가능하며, 고온 조건에서는 고정 방사율 라디에이터와 같이 높은 방사율로 가변되어 방열 기능을 수행할 수 있어 효율적인 열 제어가 가능한 라디에이터이다. 현재 가변 방사율 라디에이터는 LSMO($La_{1-x}Sr_xMnO_3$) 및 VMNO($V_{1-x-y}M_xN_yO^n$) 등 소재 자체 특성으로 방사율이 가변하는 수동형과 루버 및 셔터 방식 등 모터의 구동으로 블레이드 및 셔터의 개폐를 통해 방사율을 가변하는 능동형 방식으로 개발 중이다.

K. Shimazaki 등[3-4]은 페로브스카이트형 결정 구조를 가지는 망간 산화물을 합성하여 온도 변화에 따라 소재의 방사율이 가변하는 LSMO를 수동형 가변 방사율 라디에이터로 개발하였고 재료의 합성 비율에 따른 방사율과 흡수율을 최적화하였다. 그리

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

고 LSMO의 높은 흡수율을 해결하기 위해 표면에 다층박막구조를 가지는 연구도 수행되었다. 한선우 등[5]은 LSMO의 높은 합성 온도를 낮추면서 가변 방사율 특성을 유지하는 Sol-gel법을 기반으로 하는 공정법을 제안하였고 제작된 LSMO를 진공 및 극저온 환경에서의 시험을 수행하여 LSMO의 성능에 대한 우주 환경 적합성을 확인하였다.

Sumitaka 등은 기존의 LSMO에 탄소를 함유하여 SRD(Smart Radiation Device)를 개발하였다. LSMO($La_{0.825}Sr_{0.175}MnO3$), LCMO($La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$), LSCMO($La_{0.775}Sr_{0.115}Ca_{0.11}MnO_3$) 총 세 개의 SRD를 제안하여 실험을 통하여 LSMO를 MUSE-2에 탑재하였다. Figure 2는 SRD를 적용한 위성 MUSE-C의 형상을 나타낸다. MUSE-C 위성에 탑재하여 궤도 환경에서 SRD 가변 방사율 라디에이터의 성능을 검증하고 있다.[6]

V. V. Vlassov 등은 가변 방사율 재질의 높은 흡수율을 해결하기 위하여 두 개의 층을 가지는 VESPAR(Variable Emittance SPAce Radiator)를 개발하였다[7-8]. 하단은 가변 방사율 재질로 코팅되어 있으며 상단은 일반적인 저 흡수율, 고 방사율을 가지는 라디에이터로 구성되어 있으며 각 층간의 복사 열 전달의 효율을 증가시키기 위해 내부에는 핀 형태로 제작되었다. 그리고 열 해석을 통해 VESPAR의 성능 분석을 수행하였다. 열 해석 결과 고온 영역에서는 고정 방사율 라디에이터와 같이 방열을 수행하였고 저온 영역에서는 과냉각으로 인하여 높은 히터 전력 및 사용량이 요구되는 동일한 면적의 고정 방사율 라디에이터와 달리 VESPAR는 열 제어를 위한 히터 전력을 최소화할 수 있었다. 하지만 두 개의 층과 핀 형태로 인하여 무게가 증가하는 문제점이 존재하여 더 가벼운 재질로 제작되는 것이 요구되었다.

Figure 3은 W. Biter 등이 개발한 높은 방사율과 전도율을 가지는 필름의 탈·부착을 통해 능동적으로 열 제어를 수행하는 ESR(Electrostatic Switched Radiator)를 나타낸다[9]. ESR은 전기적 대전을 통해 필름의 부착을 유지하는 원리로 덮개 필름이 표면에 부착될 경우 높은 열전도성을 가지는 덮개 필름에 의해 표면의 열을 전달하여 높은 방열 성능을 가지며 탈착 상태의 경우 덮개 필름은 단열 상태가 되고 열 전달은 낮은 방사율을 가지는 표면의 방사로만 이루어지는 원리로 열 제어를 수행하는 장치이다.

D. Farrar 등[10]은 탑재 장비의 온도 조건에 따라 루버가 개폐하는 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 기반 루버 라디에이터를 개발하여 기존의 대형 위성에 적용되던 루버 방식 라디에이터의 문제점인 부피 및 무게 그리고 구동 전력을 크게 축소하였다. R. Osiander 등[11-12]은 MEMS 기반 루버 라디에이터가 극심한 발사 환경에서의 기계적 구동부가 갖는 취약점을 셔터 방식으로 보완하여 설계를 개선하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그리고 열악한 우주 환경에서의 외부 유입물에 의한 고장 방지 및 흡수율을 낮추고 UV 저항성을 높여주기 위해 셔터 외부에 LaRC^{TM}CP1 재질의 덮개를 적용하는 연구를 수행하였다.

최근 이창욱 등은 정전기력을 이용하여 대전체 위치에 따라 방사율이 가변 되는 MEMS 기반 가변 방사율 라디에이터를 제안하였으며 특정 물성치를 선정하여 이에 대한 연구가 진행 중에 있다[13-14].

본 연구에서는 전기력으로 대전되는 실리콘 비드를 이용하여 대전체 구동에 따라 방사율 조정이 가능한 방식의 MEMS 기반 가변 방사율 라디에이터의 개념을 제안하였다. 이와 같은 구동 방식을 이용할 경우, 기계적 구동부 대신 전기적인 힘에 의한 구동으로 기존의 MEMS 기반 루버 및 셔터 방식 라디에이터가 갖는 발사 환경에서의 구조적 취약점을 보완할 수 있으며, 대전된 비드가 정전효과에 의해 격벽에 고정되어 변경된 방사율 유지가 가능하기 때문에 지속적인 전력 소모가 불필요로 하여 소모 전력의 최소화가 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 제안한 MEMS 기반 가변 방사율 라디에이터를 설계 및 제작을 수행하였다. 방사율 가변의 원리를 분석하고 진공환경을 모사한 진공 챔버 내부에서 방사율 가변 실험을 통해 구동 가능성을 확인하였다. 또한 실리콘 비드의 위치에 따라 낮은 방사율을 구현하는 Open mode와 높은 방사율을 구현하는 Close mode 상태의 MEMS 라디에이터의 열 제어 성능 시험을 수행하였다. 수행한 시험 결과로 이론적 및 실질적 유효 방사율을 도출 하여 비교 분석을 수행하였다. 또한 Thermal desktop을 활용하여 MEMS 라디에이터의 열 모델을 도출하고 열 해석을 실시하였다. 도출한 열 해석 결과와 열 성능 시험 결과 값을 비교 분석을 수행하여 본 연구에서 제안한 MEMS 가변 방사율 라디에이터의 설계성 및 열 제어 가능성을 확인하였다.

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

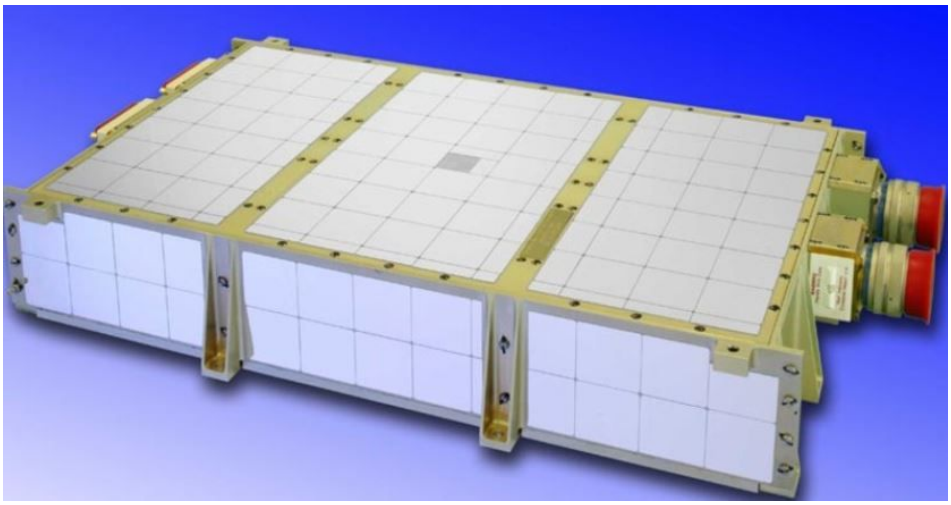

Fig. 1 Configuration of OSR [2]

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 2 SRD on the spacecraft MUSES-C [3]

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

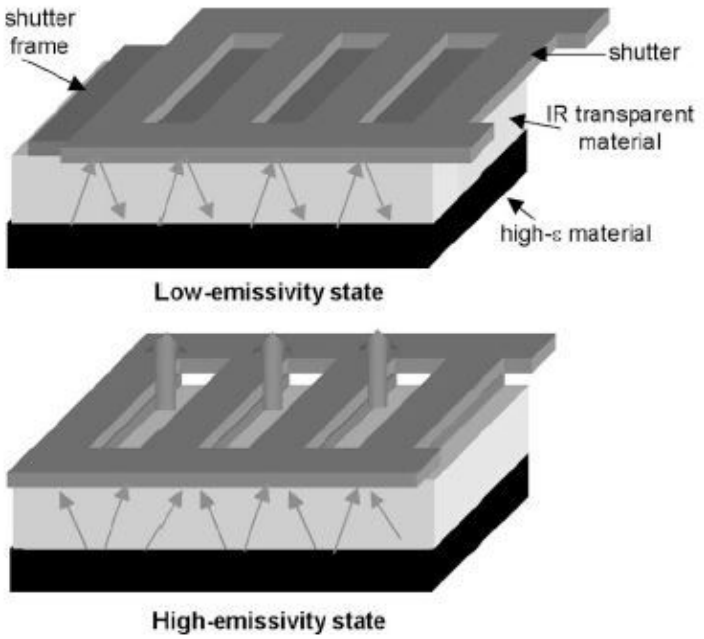

Fig. 3 Configuration of electrostatic radiator [10]

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅱ. MEMS 기반 가변 방사율 라디에이터

1. MEMS 가변 방사율 라디에이터

1) 구성 및 원리

본 연구에서 제안한 MEMS 가변 방사율 라디에이터의 크기는 30mm X 30mm X 20mm 이며 총 3개의 레이어로 구성 되어 있다. 바닥면은 쿼츠 글라스 재질의 전극 레이어, 실리콘 재질인 구조체 레이어, 쿼츠 글라스 재질인 커버 레이어로 구성되어 있다. 방사율이 낮은 모드에서 효과적으로 열을 방출하기 위하여 방사율이 낮은 재질이 바닥 레이어 위에 표면 코팅되어있다.

셀 내부의 실리콘 비드의 배치에 따라 고온 환경에서는 방사율이 높은 Closed mode와 방사율이 낮은 Open mode로 구성된다. Figure 4는 Closed mode와 Open mode의 구상을 나타낸다. 방사율이 높은 대전체가 바닥 면에 배치되어 높은 방사율 유지가 가능하며 대전체가 구조체 양벽 면에 대전되어 Closed mode 라디에이터가 Open mode로 가변이 가능하다. 기존의 MEMS 루버 및 셔터 방식 가변 방사율 라디에이터는 변경된 방사율 유지를 위해 지속적인 전력공급이 필요하다. 하지만 본 연구에서 제안한 대전체 위치에 따른 MEMS 기반 가변 방사율 라디에이터의 경우 대전체와 구조체 간의 대전력으로 인해 추가적인 전압의 공급 없이도 장시간동안 변경된 방사율을 유지하여 지속적인 전력 소모를 감소시킬 수 있다. 또한 구동부인 전기적인 제어를 통해 셀 내부에 별도의 기계적 장치가 필요 없이 라디에이터의 방사율 가변이 가능하다. 또한 MEMS 공정으로 제작을 수행하면 높은 고유 진동수 대역으로 설계가 가능하기 때문에 기존의 가변 방사율 라디에이터들이 발사 환경에서 가지는 기계적 구동부의 취약점을 보완 할 수 있다. 기존의 MEMS 셔터 라디에이터의 경우는 내부에 존재하는 셔터의 구동부가 방열 면적의 20%를 차지하여 전체 방열 면적을 감소시키는 단점 극복이 가능하다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

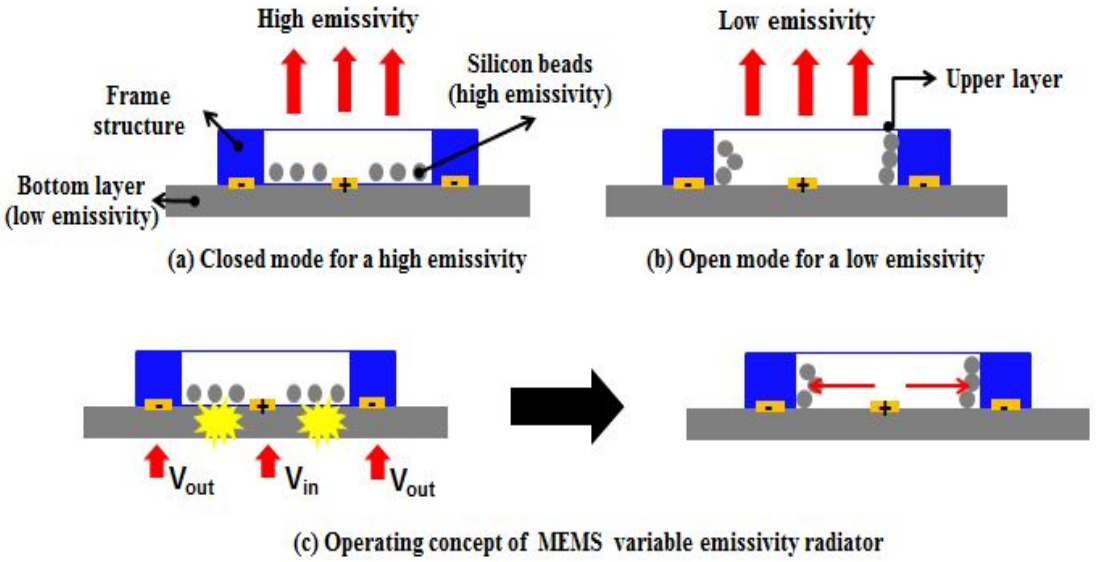

Fig. 4 Operating concept of MEMS variable emissivity radiator

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅲ. 라디에이터 설계 및 제작

1. 라디에이터 설계

1) 재질의 선정

MEMS 기반 방사울 라디에이터의 실리콘 비드 구동 방식은 정전기력으로 구동하게 되며, 대전된 두 입자 사이에 작용하는 정전기적인 인력이 두 전하의 비례하고, 두 입자 사이의 거리의 제곱에 반비례하게 된다. 이러한 정전기력은 다음과 같이 식(1)로 표현 할 수 있다.

$$F = K_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \qquad (1)$$

위 식에서의 Ke는 쿨롱 상수를 의미하며 q_1, q_2는 양전극의 전하의 크기를 나타내고 r은 전극간의 거리를 나타낸다. 전하는 전기현상을 일으키는 주체적인 원인으로, 어떤 물질이 갖는 전기의 양을 일컫는다. 전하량은 재료 및 기하학적 특성에 의해 결정할 수 있으며 식(2)로 표현 할 수 있다.

$$q = f(\varepsilon, A, \phi, d^{-1}) \qquad (2)$$

ε는 재료에 대한 유전율을 의미하며, A는 재료의 면적, ϕ은 전압, d는 전극 간의 거리를 의미한다. 본 연구에서는 재료에 대한 유전율을 이용하여 고정 대전체와 덮개 및 바닥 면의 재질을 선정 하였다. 구조체는 비드와의 효과적인 대전을 위해 유전율이 높은 재질이어야 하며, 덮개 및 바닥은 유전율이 낮은 재질을 사용하여야 한다[15]. 통상적인 실리콘의 유전율은 11.8이고, 유리는 5.6의 유전율을 가지게 된다. 또한 대전체 의 경우 Closed mode를 구현 하기 위해 방사율은 높은 재질 이면서 유전율이 높은 실리콘으로 선정 하였다. 상기 내용을 토대로 고정 대전체는 유전율이 높고 MEMS 공정에 적합한 실리콘 웨이퍼로 선정 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2) MEMS 가변 방사율 라디에이터 열 해석

MEMS 가변 방사율 라디에이터의 제작에 앞서 MEMS 라디에이터의 열 성능을 열 해석 모델을 통하여 선정된 재질의 물성치를 반영하여 열 성능을 검증해야한다. 열 해석 모델은 상용 소프트웨어인 Thermal Desktop[16]을 사용하여 Fig. 5과 같이 Open mode, Closed mode의 MEMS 가변 방사율 라디에이터 열 모델을 구축하였다. MEMS 가변 방사율 라디에이터의 열 해석 모델은 각 모드에 따른 열 제어 효과를 검증하기 위해 라디에이터 바닥 면에서 동일한 열 유속을 포함하는 열 해석 모델로 가정하였다. 먼저 히터를 모사하기 위한 면을 모사를 하였다. 그리고 히터 면 위에 32 mm X 32 mm 크기의 Closed, Open mode 라디에이터를 모사하여 배치하였다. 이때 MEMS 라디에이터와 히터간의 접촉 열전도율은 1500 W/m^2k를 사용하였으며 히터에는 1 W를 인가하였다. Closed mode 라디에이터의 경우는 구조체 내부에 실리콘 비드를 모사할 수 있는 쉘을 채웠다. 모사한 라디에이터 주변에 임의의 챔버를 모사하여 모사한 챔버 내부의 온도를 25°C로 설정하여 라디에이터 주변 온도를 상온으로 맞추었다. Open mode 라디에이터의 경우 바닥 면 위에 Kaptone layer(ε=0.4)를 모사하였다. Table 1은 열 모델에 사용된 광학 물성치를 나타내며 Table 2는 선정된 재질들의 열전도율과 방사율과 흡수율을 나타낸다.

Figure 6은 열 해석을 수행한 열 모델을 나타내며 Table 3은 해석 결과를 나타낸다. 알루미늄 히터에 1W를 인가하였을 때 바닥 온도는 53°C 이었으며 Open mode 라디에이터는 52.3°C , Closed mode 라디에이터의 온도는 44.7°C 이었다. 상기 해석 결과를 토대로 53°C 조건에서 두 라디에이터의 온도 차이는 7.6°C 임을 확인 하였으며, 본 연구에서 제안한 MEMS 가변 방사율 라디에이터의 열 제어 가능성을 확인하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3) 수학적 모델을 통한 유효 방사율

본 연구에서 제안한 MEMS 가변 방사율 라디에이터의 유효 방사율을 알아보기 위하여 수학적 기반의 모델을 구축하였다. Figure 7은 각 모드별 설계한 수학적 모델을 나타낸다. 바닥 면 위에 Open, Closed mode의 라디에이터가 배치 되어있으며 열 유속은 동일하다는 조건으로 설계하였다. Closed mode에서는 비드의 높이와 비드의 방사율에 따라 유효 방사율이 달라진다. Open mode같은 경우 비드의 열리는 면적과 바닥 면의 방사율에 따라 유효 방사율이 결정 된다. 상기 모델에서 열 유속이 동일하다는 조건으로 MEMS 라디에이터의 이론적 유효 방사율은 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{eff,theoretical} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_2}+\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1}+\frac{1}{F_{1-2}}+\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2}} \quad (3)$$

ε_1 = Bead emissivity for closed mode
Bottom emissivity for open mode
ε_2 = Cover emissivity
F_{1-2} = Shape factor

ε_1은 MEMS 가변 방사율 라디에이터의 모드에 따라 달라진다. Open mode에서는 저 방사율을 구현하는 바닥 면에 대한 방사율이며, Closed mode에서의 ε_1은 높은 방사율을 구현 하는 비드에 대한 방사율이다. ε_2는 라디에이터 커버에 대한 방사율이다. 하지만 수학적 모델에는 커버에 대한 두께가 고려가 안 되어있으므로 임시적인 커버의 방사율을 사용하였다. 커버의 방사율은 고방사율을 구현하는 재질을 사용한다는 가정 하에 커버 방사율 (ε=0.95)를 사용하였다. F_{1-2}는 형상계수로써 형상계수는 면과 면이 수평으로 정렬이 되어 있을 때 식(4)로 나타 낼 수 있다[17]. 본 연구에서 제안한 MEMS 라디에이터의 경우 열 유속이 바닥 면에서부터 덮개 표면까지 수평으로 정렬이 되어 있는 형태이므로 식(4)를 이용하였다.

$$F_{1-2} = \frac{2}{\pi\overline{x}\overline{y}}\left[\ln\sqrt{\frac{(1+\overline{x}^2)(1+\overline{y}^2)}{1+\overline{x}^2+\overline{y}^2}} + \overline{x}(1+\overline{y}^2)\tan^{-1}\frac{\overline{x}}{\sqrt{1+\overline{y}^2}} + \overline{y}(1+\overline{x}^2)\tan^{-1}\frac{\overline{y}}{\sqrt{1+\overline{x}^2}} - \overline{x}\tan^{-1}\overline{x} - \overline{y}\tan^{-1}\overline{y}\right] \quad (4)$$

$\overline{x}$와 $\overline{y}$는 노멀라이즈된 비드 층의 높이와 비드가 열리는 면적을 기하하적인 측면에서 나타낸 길이를 의미한다. 각 모드에 관련된 노멀라이즈된 크기는 식(5)로 나타낼 수 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\bar{x} = \frac{x}{h-b}, \quad \bar{y} = \frac{y}{h-b} \qquad \text{for closed mode}$$

$$\bar{x} = \frac{x}{h}, \quad \bar{y} = \frac{\zeta y}{h} \qquad \text{for open mode} \tag{5}$$

본 연구에서 제안한 수학적 모델을 바탕으로 각 모드별 이론적 유효 방사율을 도출하였다. Figure 8는 Closed mode에서 비드의 높이와 비드의 방사율에 따른 유효 방사율을 나타낸다. 결과로 비드 높이와 방사율이 높을수록 유효 방사율이 증가됨을 알 수 있다. 실리콘 비드(ε=0.7)를 0.4mm만큼 채우고 사용 할 경우 Closed mode의 유효 방사율은 0.62이다. Figure 9은 Open mode에서 Opening ratio area와 바닥의 방사율에 따른 유효 방사율을 나타낸다. 결과를 보았을 때 opening ratio는 유효 방사율에 큰 영향을 주지 않지만 바닥 면의 방사율에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 사용 된 바닥 면은 Kaptone layer (ε=0.4)이며, Open mode의 유효 방사율은 0.32로 예측하였다.

본 절에서 도출한 이론적 유효 방사율 결과는 Closed mode의 유효 방사율은 0.62, Open mode의 유효방사율은 0.32로 두 라디에이터의 유효 방사율의 차이는 0.3이었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. MEMS 가변 방사율 라디에이터 제작

1) MEMS 제작 공정

열 해석 결과를 통해 MEMS 가변 방사율 라디에이터의 열 제어 가능성 확인을 토대로 MEMS 가변 방사율 라디에이터를 제작 하였다. 라디에이터의 MEMS 제작 공정은 Fig. 10의 제작 공정도와 같이 진행되며 먼저 감광액인 PR(Photoresist)를 구조체용 웨이퍼 표면에 스핀 코팅을 통해 얇고 일정한 PR층을 형성한다. 그 후 웨이퍼 상에 축소 투영을 수행하는 Lithography를 통해 PR층이 형성된 웨이퍼 위에 구조체의 패턴을 찍는다. 자외선에 노출된 PR층 부분은 화학적 구조가 변경되어 노출된 부분만 깎이게 된다. DRIE(Deep Reactive Ion Etching) 공정을 통해 웨이퍼를 구조체 형태로 식각한다. 그 후 PR층을 벗겨내고 구조체를 들어내어 내부의 구조물을 제거하여 셀 구조체를 완성한다. 다음은 전극 패턴을 가지는 하층부로 웨이퍼 위에 PR층을 코팅하고 전극 패턴을 가지는 Mask를 통해 Lithography를 수행하여 전극 패턴을 찍는다. 이후 백금(Pt)의 접착력을 위한 티타늄(Ti)을 증착하고 전극에 사용되는 백금을 코팅한다. 그 후 웨이퍼를 아세톤 용액으로 처리하면 백금/티타늄 전극 패턴만 웨이퍼 상에 남게 된다. 저 방사율 코팅부를 가지는 상층부는 방사율이 낮은 은을 코팅하여 하층부와 동일한 과정을 통해 상층부를 제작한다. 그 후 전극 패턴을 가지는 하층부 위에 셀 구조체를 접합하고 비드를 수납한다. 그리고 저 방사율 코팅부를 가지는 상층부를 접합하여 완성한다.

Figure 11은 제작된 MEMS 가변 방사율 라디에이터의 형상을 나타낸다. MEMS 라디에이터의 크기는 32 X 32 X 1.5mm 이며 방사율 면적은 4.95cm^{2}이다. 라디에이터의 무게는 1.6 g이며 비드를 수납할 수 있는 총 170개의 쉘이 배치 되어있다. 모든 쉘에 실리콘 비드를 포함한 라디에이터의 총 무게는 4.1g 이다.

Figure 12은 구조체에 수납 되는 비드의 형상을 나타낸다. 비드의 재질은 구조체와 동일한 실리콘 웨이퍼를 갈아서 제작하였다. 실리콘 비드는 고운 가루 형태이며 크기는 100μm 미만이다. 실리콘 비드는 한 쉘에 0.4mm 높이로 채워진다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

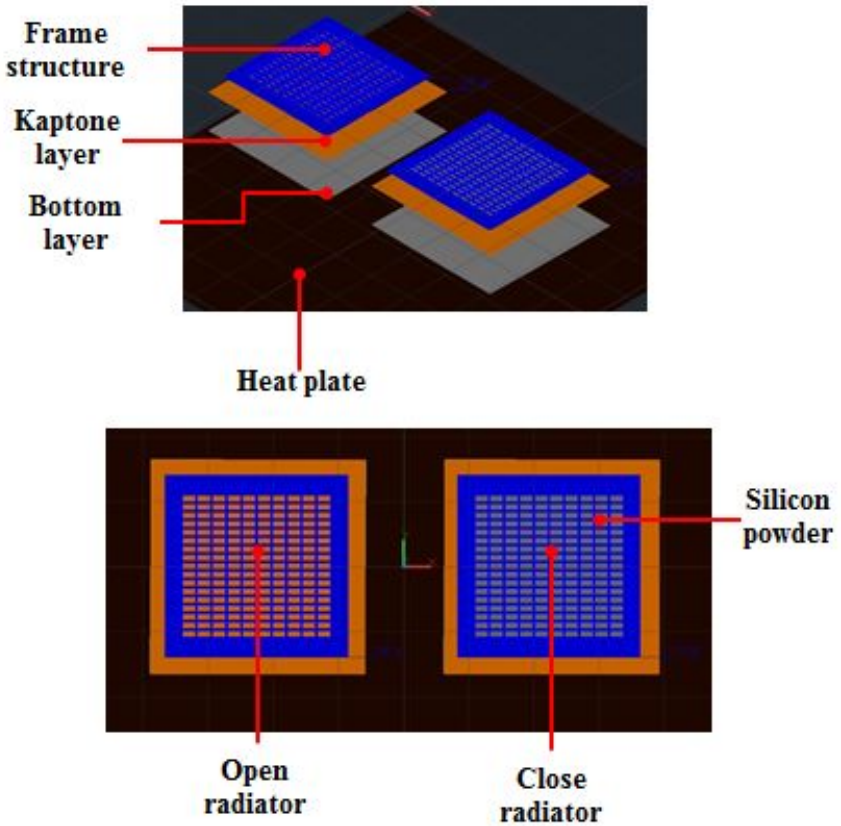

Fig. 5 Configuration of MEMS radiators thermal model

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 1 MEMS variable emissivity radiator material

Parts	Material	Emissivity	Remark
Frame Structure/Beads	Silicon	0.7	High emissivity surface
Kaptone layer	Kaptone	0.4	Low emissivity surface
Bottom layer	Quartz glass	0.95	
Heat plate	Aluminum	0.2	

Table. 2 Thermal and optical properties of radiator materials

Material	Thermal conductivity (W/m-K)	Emissivity	Absorptivity
Silicon	350	0.7	0.7
Quartz	12	0.95	0.95
Aluminum	120	0.2	0.2

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

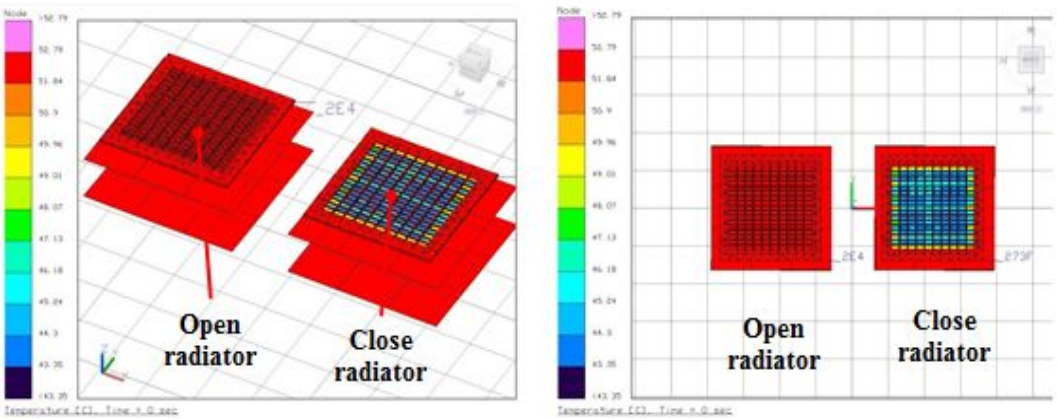

Fig. 6 Result of thermal analysis on MEMS variable emissivity radiators

Table. 3 Analysis result of MEMS variable emissivity radiator

Part	Aver. temperature (℃)	Radiator mode
Silicon Beads	44.76	Closed
Kaptone layer	52.31	Open
Heat plate	53	-

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

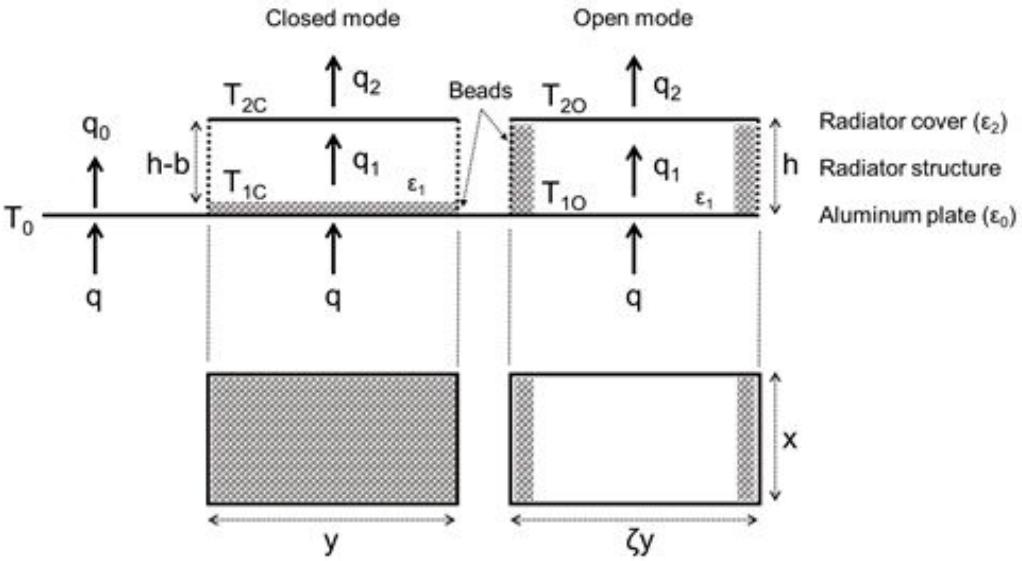

Fig. 7 Simplified mathematical model of the variable emissivity radiator

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

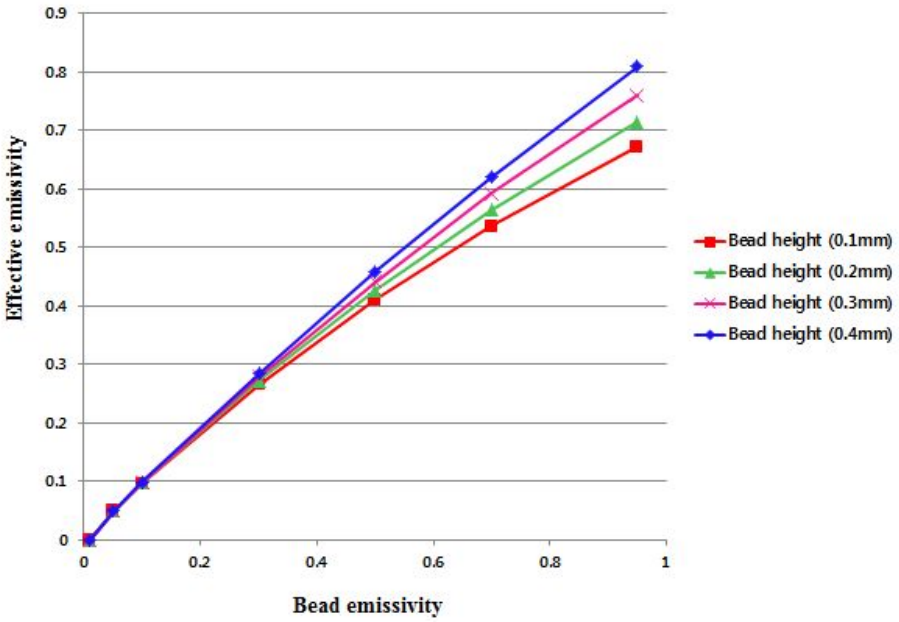

Fig. 8 The effective emissivity of the MEMS variable emissivity radiator for closed mode

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

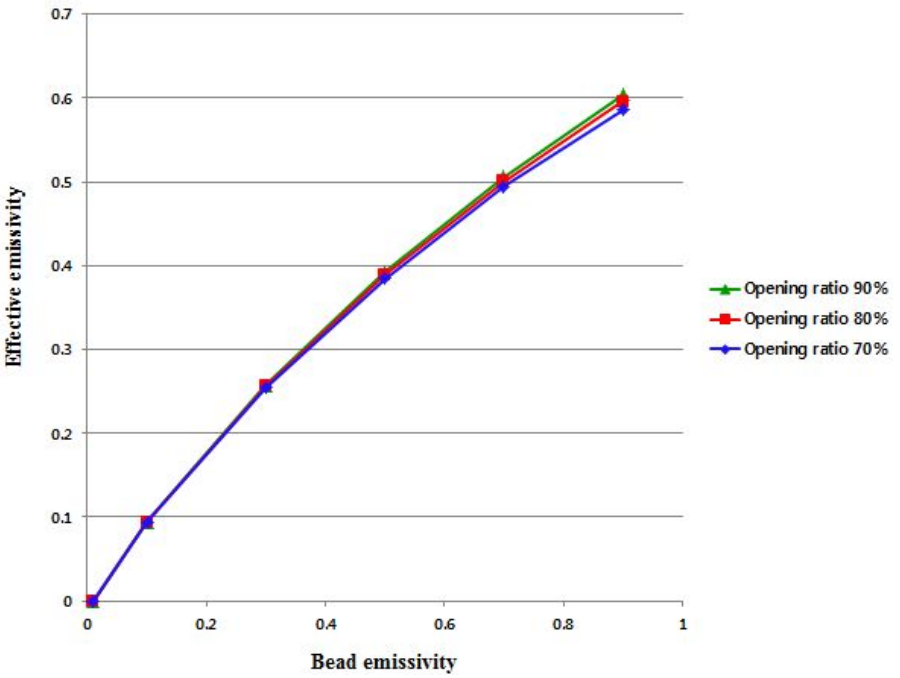

Fig. 9 The effective emissivity of the MEMS variable emissivity radiator for open mode

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

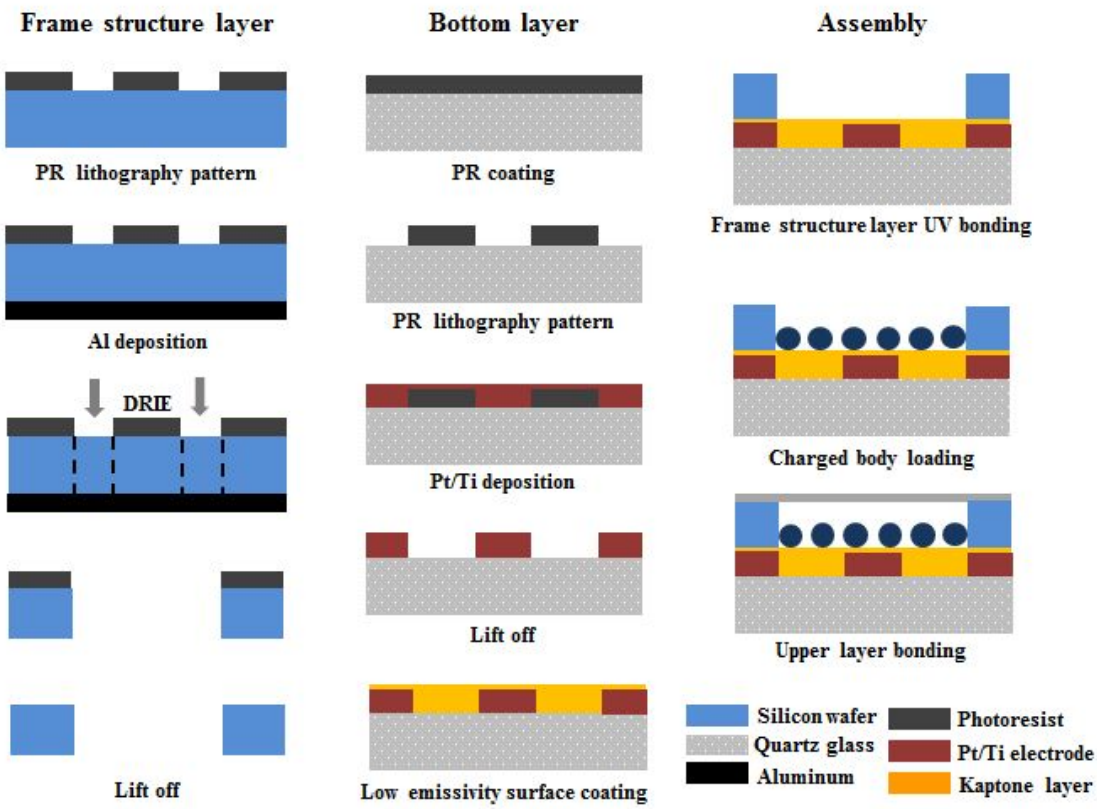

Fig. 10 Fabrication process flow of MEMS variable emissivity radiator

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

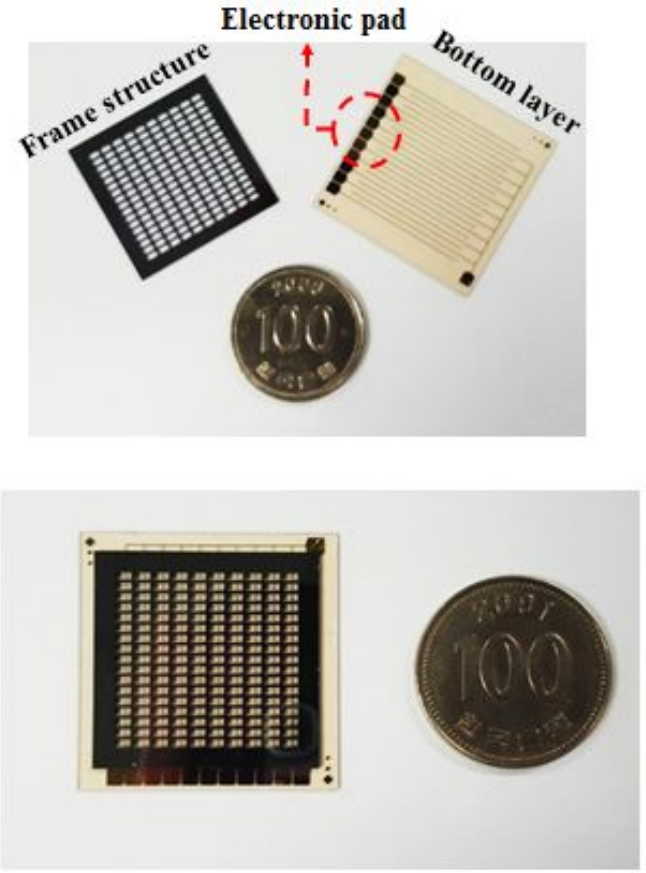

Fig. 11 Configuration of MEMS variable emissivity radiator

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Fig. 12 Configuration of silicon bead

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅳ. MEMS 가변 방사율 라디에이터 성능 평가

1. 라디에이터 성능 실험

1) 방사율 가변 시험

Figure 13은 MEMS 가변 방사율 라디에이터의 방사율 가변 시험 구성을 나타낸다. 방전 효과를 극대화하기 위해 MEMS 가변 방사율 라디에이터를 진공(10^{-2}torr) 환경에 배치 후 외부에서 320mV 펄스(30ms) 전압을 MEMS 가변 방사율 라디에이터 바닥 면에 인가하여 방사율 가변 시험을 수행하였다. Figure 14는 시험 결과를 나타낸다. 시험 결과 Closed mode MEMS 라디에이터가 바닥 면에 전압 인가 후 실리콘 비드가 양 벽면에 대전되어 바닥 면이 노출되어 Open mode로 가변이 됨을 확인하였다. 상기 결과를 토대로 본 연구에서 제안한 방사율 가변 방식에 대한 검증을 수행하였다.

2) 열 제어 성능 실험

Figure 15은 열 제어 성능 시험 구성을 나타낸다. 대류의 영향을 최소화하기 위해 진공(10^{-2}torr) 챔버 내부에 두 개의 MEMS 가변 방사율 라디에이터를 배치를 하였다. 하나는 방사율이 낮은 Open mode로 남은 하나는 방사율이 높은 Closed mode 라디에이터를 플레이트에 배치 후 상온을 기준으로 고온 및 저온 환경에서 시험 하였다. 고온 구간에서는 외부에서 MEMS 라디에이터 하단부에 배치된 히터에 전압을 인가하였으며 저온 구간에서는 MEMS 라디에이터 하단부에 드라이아이스를 배치하여 시험하였다. 진공 챔버 외부에서는 Open mode와 Closed mode 라디에이터의 온도 차이는 외부에서 IR 카메라를 이용하여 확인하였다. Figure 16는 고온 및 저온 구간에서의 IR 이미지를 나타낸다. 바닥 온도가 53°C 일 때, 방사율이 높은 Closed mode의 온도는 45.6°C 이고, 방사율이 낮은 Open mode 라디에이터는 52°C이었다. 고온 구간에서는 Open mode 라디에이터가 Close mode 라디에이터 보다 온도가 높은 경향을 보였다. 고온 구간에서 두 라디에이터의 온도 차이는 6.4°C 이었다.

저온 실험은 바닥 온도가 10°C 일 때, Closed mode 라디에이터는 13.1°C 이며, Open mode 라디에이터는 6.2°C 이었다. 저온 구간에서는 Closed mode 라디에이터가 Open mode 라디에이터 보다 온도가 높은 경향을 보였으며 두 라디에이터의 온도 차

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이는 6.9°C 이었다. Closed mode 라디에이터가 바닥 온도 보다 높은 것은 경계 조건이 이론적인 저온 시험과 다르기 때문이다. 통상적인 저온 시험은 라디에이터의 바닥 면과 챔버 내부의 온도 또한 저온 환경이 이상적인 환경이나, 라디에이터 주변 환경은 상온이기 때문에 바닥 면의 온도 보다 높게 나온 것으로 판단된다.

Table 4는 고온 구간에서의 해석 결과와 시험 결과 비교를 나타낸다. 알루미늄 히터에 1W를 인가하였을 때 바닥 온도는 53°C 이었으며 Open mode 라디에이터는 52.3°C , Closed mode 라디에이터의 온도는 44.7°C 이었다. Closed mode 라디에이터의 경우 해석 값과 실험값의 온도 차이는 0.9°C 이었으며, Open mode 라디에이터의 온도 차이는 0.3°C이었다. 상기 결과를 토대로 본 연구에서 제안한 가변 방사율 라디에이터의 Open mode와 Closed mode의 성능을 확인하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3) MEMS 가변 방사율 라디에이터 유효 방사율 비교

앞서 MEMS 라디에이터의 해석 결과와 시험 결과의 비교를 통해 설계성 및 기능성을 확인하였다. 본 절에서는 수학적 모델과 실험적 결과를 통해 이론 및 실질적 유효 방사율에 대한 검증을 수행 하고자 한다. 수학적 모델을 기반으로 도출한 이론적 유효 방사율의 결과는 실리콘 비드(ε=0.7)를 0.4mm만큼 채우고 사용 할 경우 Closed mode의 유효 방사율은 0.62이이며, Open mode에서는 바닥 면을 Kaptone layer (ε=0.4)를 사용 하였을 때 Open mode의 유효 방사율은 0.32임을 확인하였다. 제작한 MEMS 가변 방사율 라디에이터의 좀 더 명확한 열 제어 성능을 확인하기 위해서는 열 제어 시험을 통해 획득한 시험 결과를 토대로 실질적인 유효 방사율을 도출하여 이론적으로 도출한 유효 방사율과 비교하여 유효 방사율에 대한 성능을 검증할 필요가 있다. 실험적 결과를 토대로 실질적 유효 방사율은 식(6)을 통하여 도출 할 수 있다.

$$\varepsilon_{eff,actual} = \frac{\varepsilon_2 T_2^4}{\varepsilon_0 \alpha T_0^4 + T_2^4}$$

$$\alpha = \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{1-2}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \qquad (6)$$

ε_0 = Heat plate emissivity
ε_1 = Bead emissivity for closed mode
Bottom emissivity for open mode
ε_2 = Cover emissivity
T_0 = Heat plate temperature
T_2 = Cover temperature
F_{1-2} = Shape factor

ε_0와 T_0는 알루미늄 플레이트의 방사율과 온도를 의미한다. ε_2는 커버의 방사율을 의미한다. 하지만 수행 된 열 제어 시험에서는 커버가 없는 상태에서 두 라디에이터의 열 성능 시험을 수행 하였고, 수학적 모델에서도 커버에 대한 두께가 고려가 되어 있는 모델 이므로 커버의 방사율로 실험절 유효 방사율을 도출 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 임시적으로 커버는 방사율이 높은 재질을 사용 한다는 가정 하에 고 방사율을(ε=0.95)를 사용하였다. T_2는 커버의 표면 온도를 의미하지만 본 연구에서는 커버가 없이 열 제어 시험을 하였기에 각 모드에 대한 라디에이터의 표면온도를 사용하였다. α를 계산하고자 필요한 변수는 다음과 같다. ε_1은 MEMS 라디에이터의 모드에 따라 달라지며, Open mode에서는 저 방사율을 구현하는 바닥 면에 대한 방사율이며, Closed mode에서의 ε_1은 높은 방사율을 구현 하는 비드에 대한 방사율이다. F_{1-2}는 형상계수로써

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

형상계수는 식(4)에서 도출한 결과를 사용한다.

수학적 모델링을 통하여 유효 방사율을 도출하였을 때 Closed mode의 유효 방사율은 0.62, Open mode의 유효 방사율은 0.32이었다. 식(6)을 이용한 유효 방사율 결과로는 Closed mode의 유효 방사율은 0.63, Open mode의 유효 방사율은 0.31로 이론적 유효 방사율 결과와 동일함을 확인하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4) MEMS 가변 방사율 라디에이터 커버 유무에 대한 성능 분석

앞 절에서는 제작전 MEMS 가변 방사율 라디데이터를 이론적인 측면에서 재질과 유효 방사율을 도출 하였으며, 선정된 재질의 물성치를 바탕으로 열 해석을 수행 하였다. 또한 진공환경에서 수행된 방사율 가변 시험과 열 제어 성능 시험결과를 토대로 유효 방사율 비교와 열 해석 결과 비교를 바탕으로 본 연구에서 제안한 MEMS 라디에이터의 성능을 확인하였다. 하지만 상기 수행된 검증 방법은 MEMS 라디에이터의 커버가 없을 경우로 가정하여 수행된 내용이다.

MEMS 라디에이터 위에 커버가 배치가 되면 표면 방사율이 달라진다. 커버 유무에 대한 성능 확인을 위해 Thermal desktop을 활용하여 앞서 설계한 동일한 각 모드에 대한 MEMS 라디에이터 열 모델에 쿼츠 글라스(ε=0.95) 커버를 배치하여 열 해석을 수행하였다. Figure 17은 커버를 배치한 각 모드에 대한 MEMS 라디에이터의 해석 결과를 나타낸다. 해석 결과는 바닥 온도가 53°C 일 때 두 라디에이터의 온도는 36°C로 동일하였다. 이는 기존에 앞서 수행한 성능 검증 방법에서는 MEMS 라디에이터의 표면이 비드와 바닥면이었으나 MEMS 라디에이터 위에 커버가 되치 됨으로써, 라디에이터 표면의 방사율이 변경이 되면서 내부 라디에이터 온도 영향이 아닌 순수한 커버에 대한 온도가 측정이 된 것으로, 바닥에서 동일한 열 유속이 인가되고 있으며 커버의 재질이 동일하므로, 커버의 온도가 36°C로 동일하게 측정이 된 것으로 판단된다.

앞서 설계한 수학적 모델은 커버의 두께가 고려가 되어 있지 않는 상태에서 커버의 방사율만 고려되었으며 이러한 수학적 모델로는 유효 방사율의 차이는 명확함을 확인하였다. 하지만 실제로 두께가 0에 가까운 커버를 제작하는 것에는 많은 어려움이 있다. MEMS 공정으로 얇은 커버를 제작한다 하여도, 가혹한 발사 환경에서 구조적으로 안전하다는 보장이 없다. 이를 극복 할 수 있는 방안으로 본 연구에서는 Mesh 형태의 커버를 제안하였다. 제안한 Mesh 형태의 커버의 성능을 확인하기 위하여 진공 환경에서 열 제어 성능 시험을 수행하였다. 두 라디에이터에 36개의 쉘에 실리콘 비드를 수납 하였으며, 하나의 라디에이터에 서스 재질의 Mesh 형태의 커버를 배치하여 두 라디에이터의 성능을 확인하였다. Figure 18은 두 라디에이터의 커버 유무에 대한 열 성능 시험 구성을 나타내며, Fig. 19는 MEMS 가변 방사율 라디에이터에 Mesh 형태의 커버를 배치 후 수행한 열 제어 성능 결과를 나타낸다. 결과로 바닥 온도가 50.1°C 일 때 커버가 없는 MEMS 라디에이터의 온도는 실리콘 비드 쪽은 41.3°C, 캡톤 테잎 영

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

역의 온도는 48.6°C이었다. 커버를 배치한 MEMS 라디에이터의 온도는 실리콘 비드 영역은 39.7°C, 캡톤 테잎 영역은 41.6°C 이었다. Table 5는 커버를 배치한 MEMS 라디에이터의 열 제어 성능 결과를 나타낸다. 커버가 배치된 라디에이터와 커버가 없는 라디에이터의 온도 차이는 실리콘 비드 영역은 41.3°C와 39.7°C로 실리콘 비드 영역의 온도차이는 1.6°C이었으며 커버가 없는 캡톤 테잎 영역은 41.6°C, 커버가 없는 영역은 48.6°C로 온도차이는 7°C 임을 확인하였다. 비록 커버가 없을 때 보다 커버를 배치한 MEMS 라디에이터에서 실리콘 비드 영역의 열 제어 성능이 다소 떨어지지만, 미세하게라도 열 제어 가능성을 확인하였다. 향후 서스나 금속 계열이 아닌, MEMS 공정으로 제작이 용이한 유리 계열소재를 사용하여 Mesh 형태로 커버를 제작한다면 열 제어가 가능 할 것으로 판단된다.

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

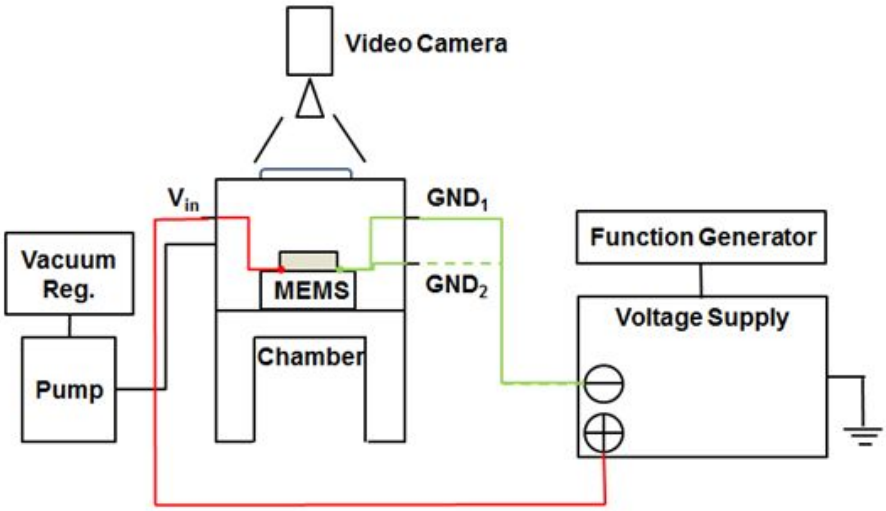

Fig. 13 Experimental setup for the function test of the variable emissivity radiator

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

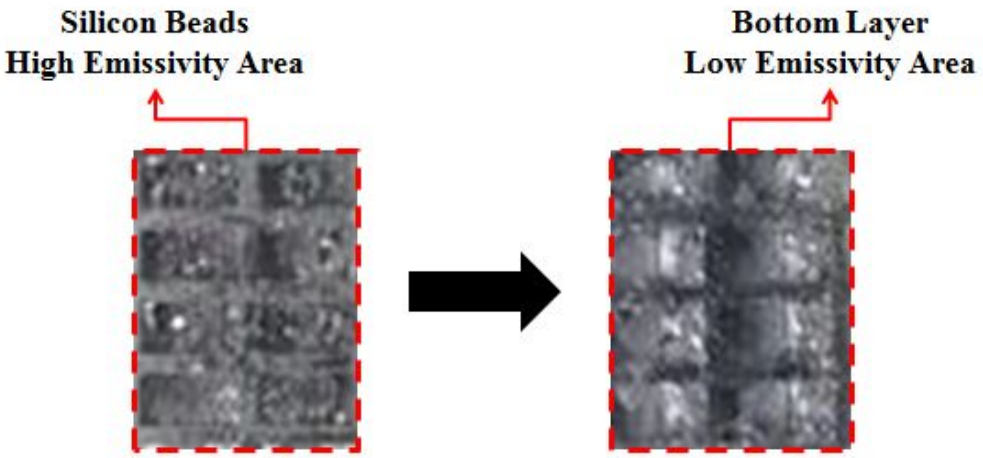

Fig. 14 Operation result of MEMS variable emissivity radiator from closed mode to open mode

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

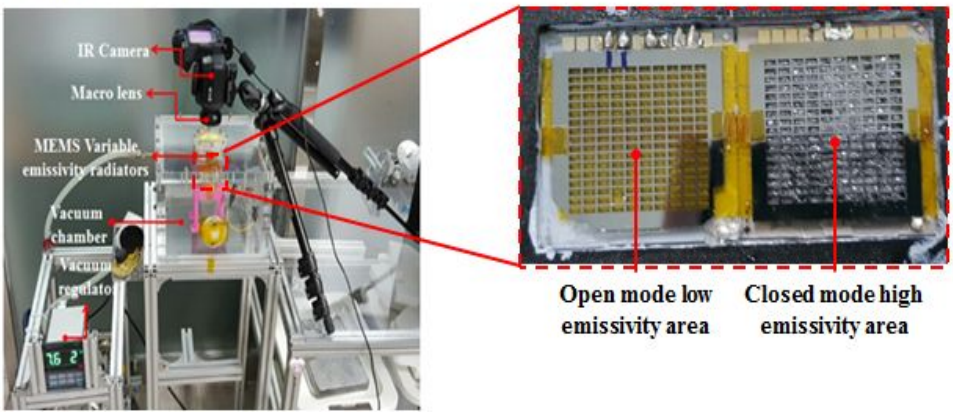

Fig. 15 Experimental setup for the thermal test of the variable emissivity radiator

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

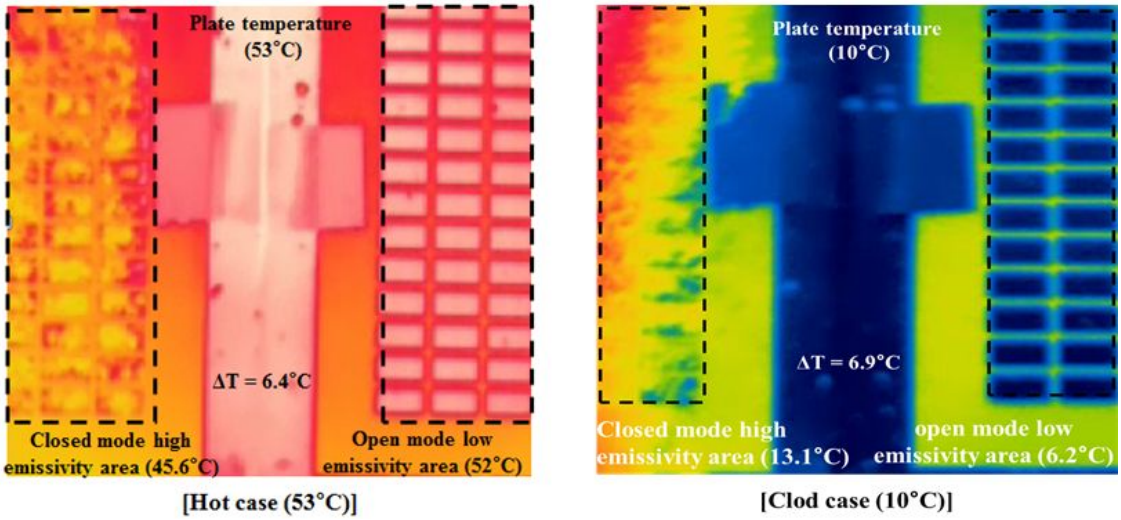

Fig. 16 IR images of the variable emissivity radiator for the hot and cold case

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 4 Thermal test and thermal analysis result of MEMS variable emissivity radiator

Radiator mode	Test name	Temperature (℃)	Difference (℃)
Closed mode	IR thermal test	45.6	0.9
	Thermal analysis	44.7	
Open mode	IR thermal test	52	0.32
	Thermal analysis	52.3	

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

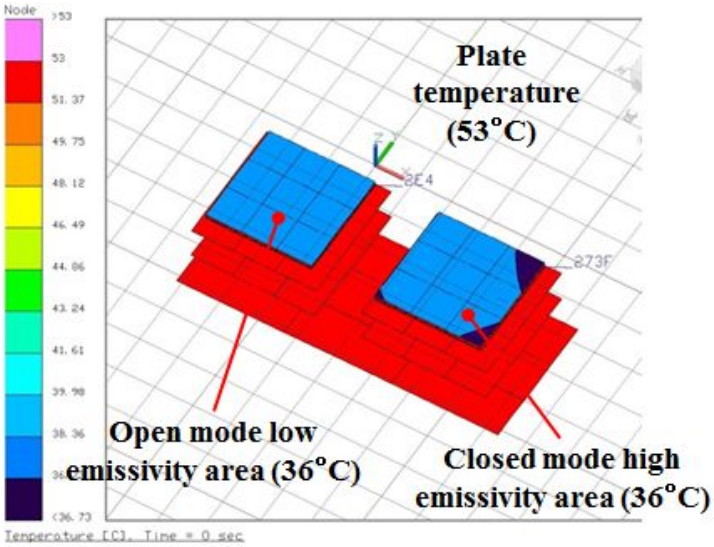

Fig. 17 Result of thermal analysis on MEMS variable emissivity radiators

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

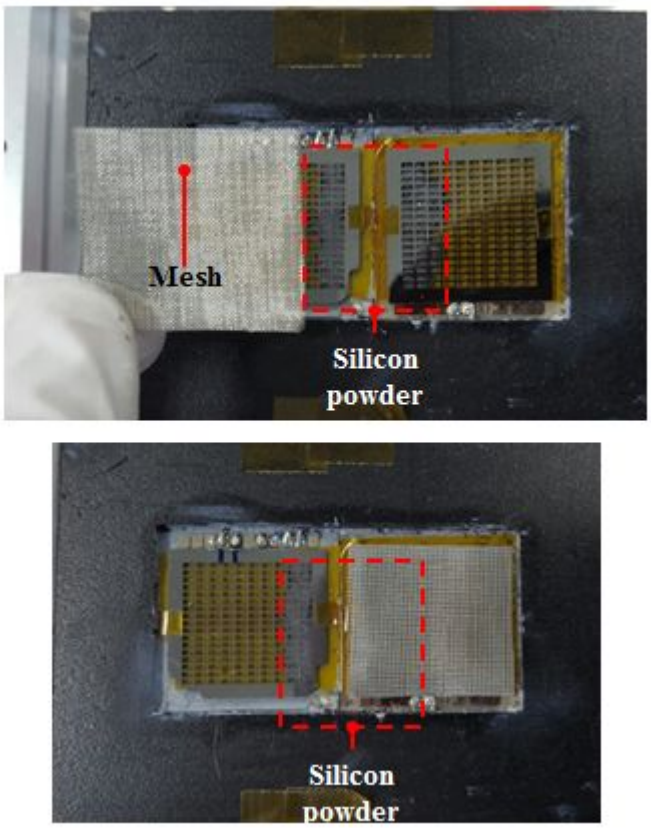

Fig. 18 Experimental setup for the thermal test of the variable emissivity radiator

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

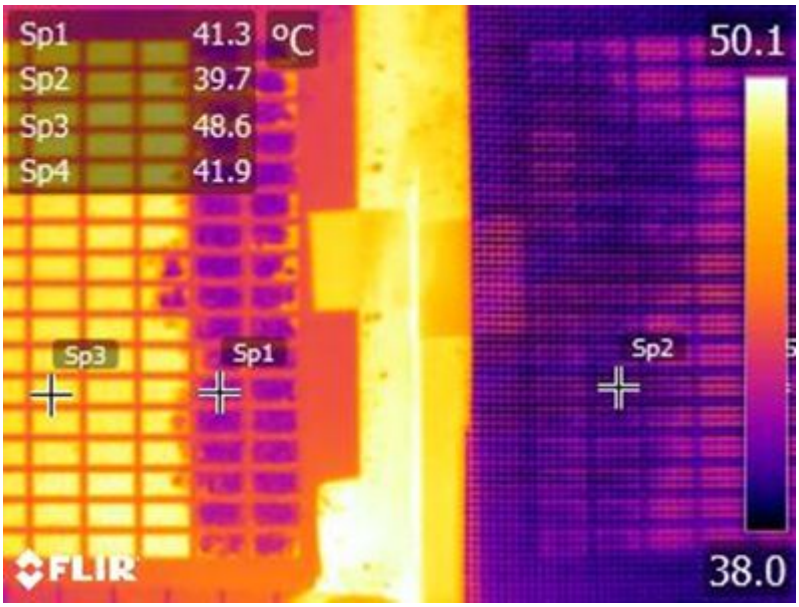

그림 19 IR images of the variable emissivity radiator for w/o cover to with cover

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table. 5 Thermal test result of MEMS variable emissivity radiator

Spot number	Spot point	temperature (℃)	Difference (℃)
Sp1	Sil. Powder (w/o mesh)	41.3	1.6
Sp2	Sil. Powder (with mesh)	39.7	
Sp3	Kaptone (w/o mesh)	48.6	7
Sp4	Kaptone (with mesh)	41.6	
Sp5	Plate	50.1	-

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

V. 결론

본 연구에서는 전기력으로 대전되는 실리콘 비드를 사용하여 비드가 양 벽면에 대전되어 방사율이 가변하는 MEMS 기반 가변 방사율 라디에이터를 제안하였다. 제작한 MEMS 가변 방사율 라디에이터의 크기는 30mm X 30mm X 1.5mm이며 총 3개의 레이어로 구성 되어있다. 라디에이터의 모드는 저 방사율을 유지하는 Open mode와 고 방사율을 유지하는 Closed mode로 구성 되어있다. 방사율 모드의 개념은 Closed mode의 경우 구조체 내부에 방사율이 높은 실리콘(ϵ=0.7) 비드를 삽입하여 저온 환경에서 위성 내부의 열의 방출을 막아주는 역할을 한다. Open mode의 경우 MEMS 가변 방사율 라디이이터 구조체 바닥 면에 방사율이 낮은 캡톤(ϵ=0.4) 레이어를 코팅하여 고온 환경에서 위성 내부의 열을 방출하는 역할을 수행한다. 방사율 가변은 라디에이터 바닥 윗면에 배치된 전극에 펄스 전압을 인가하게 되면 구조체 내부에 수납된 실리콘 비드가 구조체 양벽 면에 대전되어 방사율을 가변 하는 원리이다.

본 연구에서는 MEMS 가변 방사율 라디에이터 제작을 위하여 재질의 유전율을 이용하여 구조체와 덮개 및 바닥 면의 재질을 선정 하였다. 구조체는 비드와의 효과적인 대전을 위해 유전율이 높은 재질이어야 하며, 덮개 및 바닥은 유전율이 낮은 재질을 사용하여야 한다. 통상적인 실리콘의 유전율은 11.8이고, 유리는 5.6의 유전율을 가지게 된다. 이며 MEMS 공정에 적합한 재질로 선정하였다.

또한 MEMS 가변 방사율 라디에이터의 실제 제작에 앞서 MEMS 라디에이터의 열 성능을 열 해석 모델을 통하여 선정된 재질의 물성치를 반영하여 열 성능 검증을 위하여. 열 해석 모델은 상용 소프트웨어인 Thermal Desktop을 사용하여 Open mode, Closed mode의 MEMS 가변 방사율 라디에이터 열 모델을 구축하였다. 열 해석 결과로는 바닥 온도 53°C 일 때 Open mode 라디에이터는 52.3°C, Closed mode 라디에이터의 온도는 44.7°C 이었다. 고온 53°C 조건에서 두 라디에이터의 온도 차이는 7.6°C 임을 확인하였다. 상기 결과를 토대로 MEMS 공정으로 가변 방사율 라디에이터 제작을 수행하였다.

제작한 MEMS 가변 방사율 라디에이터의 유효 방사율을 확인을 위해 수학적 기반의 모델을 구축하였으며 이론적 유효 방사율 결과로 Closed mode의 경우 비드 높이와 방사율이 높을수록 유효 방사율이 증가됨을 확인하였고 실리콘 비드(ε=0.7)를 0.4mm만

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

큼 채울 경우 Closed mode의 유효 방사율은 0.62이다. Open mode의 유효 방사율은 opening ratio는 유효 방사율에 큰 영향을 주지 않지만 바닥 면의 방사율에 따라 증가하였다. 본 연구에서 사용 된 바닥 면은 Kaptone layer (ε=0.4)이며, Open mode의 유효 방사율은 0.32임을 확인하였다.

구동 검증을 위해 수행된 방사율 가변 시험 결과 또한 Closed mode MEMS 라디에이터가 바닥 면에 전압 인가 후 실리콘 비드가 양 벽면에 대전되어 바닥 면이 노출되어 Open mode로 가변이 됨으로써 본 연구에서 제안한 방사율 가변 방식에 대한 가능성을 확인하였다.

또한 MEMS 라디에이터의 열 제어 성능을 확인하기 위하여 열 제어 성능 시험을 진공(10^{-2}torr) 환경에서 수행하였다. 고온 구간에서는 Open mode 라디에이터가 Close mode 라디에이터 보다 온도가 높은 경향을 보였다. 고온 구간에서 바닥 온도가 53°C 일 때, 두 라디에이터의 온도 차이는 6.4°C 이었다. 저온 실험은 바닥 온도가 10°C 일 때, 두 라디에이터의 온도 차이는 6.9°C 이었다. 해석 값의 검증을 위하여 고온 구간에서의 해석 결과와 시험 결과 비교를 하였다. 알루미늄 히터에 1W를 인가하였을 때 바닥 온도는 53°C 이었으며 Open mode 라디에이터는 52.3°C , Closed mode 라디에이터의 온도는 44.7°C 이었다. Closed mode 라디에이터의 경우 해석 값과 실험값의 온도 차이는 0.9°C 이었으며, Open mode 라디에이터의 0.7°C의 성능을 확인하였다.

수학적 모델을 통해 도출한 이론적 유효 방사율과 열 제어 성능 시험을 통하여 도출한 실험적 유효 방사율을 비교를 통하여 유효 방사율에 대하여 검증하였다. 수학적 모델링을 통하여 유효 방사율을 도출하였을 때 Closed mode의 유효 방사율은 0.62, Open mode의 유효 방사율은 0.32이었다. 열 제어 성능 시험 결과를 이용한 유효 방사율 결과로는 Closed mode의 유효 방사율은 0.63, Open mode의 유효 방사율은 0.31로 이론적 유효 방사율 결과와 동일함을 확인하였다.

끝으로 커버 유무에 대한 열 제어 성능에 대한 분석을 수행하였다. 닥 온도가 50.1°C 일 때 커버가 없는 MEMS 라디에이터의 온도는 실리콘 비드 쪽은 41.3°C, 캡톤 테잎 영역의 온도는 48.6°C이었다. 커버를 배치한 MEMS 라디에이터의 온도는 실리콘 비드 영역은 39.7°C, 캡톤 테잎 영역은 41.6°C 이었다. Table 5는 커버를 배치한 MEMS 라디에이터의 열 제어 성능 결과를 나타낸다. 커버가 배치된 라디에이터와 커버가 없는 라디에이터의 온도 차이는 실리콘 비드 영역은 41.3°C와 39.7°C로 실리콘 비드 영역의 온도차이는 1.6°C이었으며 커버가 없는 캡톤 테잎 영역은 41.6°C, 커버가 없는 영역은

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

48.6°C로 온도차이는 7°C 임을 확인하였다. 비록 커버가 없을 때 보다 커버를 배치한 MEMS 라디에이터에서 실리콘 비드 영역의 열 제어 성능이 다소 떨어지지만, 미세하게라도 열 제어 가능성을 확인하였다. 향후 서스나 금속 계열이 아닌, MEMS 공정으로 제작이 용이한 유리 계열소재를 사용하여 Mesh 형태로 커버를 제작한다면 열 제어가 가능 할 것으로 판단된다.

상기 결과를 토대로 본 연구에서 제안한 MEMS 가변 방사율 라디에이터의 설계성 및 기능검증을 성공적으로 완수하였다. 향 후 본 연구가 진전이 된다면 기존의 MEMS 셔터 및 루버 라디에이터 보다 간단한 MEMS 공정으로 양산이 가능하며 기존의 문제점을 극복할 수 있을 것으로 기대된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

【참고문헌】

[1] S. M. Shin, H. U. Oh, "Thermal Design and Analysis for Space Imaging Sensor on LEO", Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 2011, Vol. 39, No. 5, pp. 474-480

[2]http://www.ruag.com/space/products/satellite-structures-mechanisms-mechanical-equipment/thermal-systems/space-thermal-hardware/optical-solar-reflectors-osr/

[3] K. Shimazaki, S. Tachikawa, A. Ohnishi, Y. Nagasaka, "Temperature Dependence of Total Hemispherical Emittance in Perovskite-type Manganese Oxides, $La_{1-x}Sr_xMnO_3$", High Temperature-High Pressures, 2001, Vol. 33, pp. 525-531

[4] K. Shimazaki, A. Ohnishi, Y. Nagasaka, "Development of Spectral Selective Multilayer Film for a Variable Emittance Device and Its Radiation Properties Measurements", International Journal of Thermophysics, 2003, Vol. 24, pp. 757-769

[5] S. W. Han, B. S. Choi, T. H Song, S. J Kim, B. J Lee, "Experimental Investigation on Variable Emittance Material Based on (La, Sr)MnO_3", Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 37, No. 6, 2013, pp. 583-590

[6] Tachikawa, S., Shimazaki, K., Ohnishi, A., Hirosawa, H., Shimakawa, Y., Ochi, A., & Nakamura, Y. (2003, September). Smart radiation device based on a perovskite manganese oxide. In Materials in a Space Environment Vol. 540, pp. 41-47.

[7] V. V. Vlassov, F. L. Sousa, A. P. C. Cuco, A. J. S. Neto, "New Concept of Space Radiator with Variable Emittance", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 32, No. 4, 2010, pp. 400~408

[8] V. V. Vlassov, A. T. Santos, "Experimental Results of VESPAR Space Radiator Development Model", 20th International Congress of Mechanical Engineering, 2009

[9] W. Biter, S. Oh, S. Hess, "Electrostatic Switched Radiator for Space Based Thermal Control", 2002 AIP Conference Proceedings, 2002, pp. 65-72

[10] D. Farra, W. Schneider, R. Osiander, J.L. Champion, M.A.G. Darrin, D. Douglas, T.D. Swanson, "Controlling Variable Emittance (MEMS) Coating for Space

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Applications", Inter Society Conference on Thermal Phenomena, 2002, Vol. 8, pp. 1020-1024

[11] R. Osiander, S.L. Firebaugh, J.L. Champion, D. Farra, M.A.G. Darrin, "Microelectromechanical Device for Satellite Thermal Control", IEEE Sensors Journal, 2004, Vol. 4, No. 4, pp. 525-530

[12] M. Darrin, R. Osiander, J. Lehtonen, D. Farrar, "Novel Micro ElectroMechanical System (MEMS) Packaging for the Skin of the Satellite", 2004 IEEE Aerospace Conference, 2004

[13] Changwook lee, Hyung-Ung Oh and Taegyu Kim "Fabrication and performance analysis of MEMS-based Variable Emissivity Radiator for Space Applications." 2014 Journal of Physics: Conference Series, Volume 557, 012082

[14] H. W. Ha, S. J. Kang, S. H. Han, T. G. Kim, H. U. Oh, "Optimization of Thermo-optical Property for Electrostatic Actuating MEMS-based Variable Emissivity Radiator", Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 2015, Vol. 43, No. 2, pp. 149-155

[15] S. H. Han, H. W. Ha, H. U. Oh, T. G. Kim, "Operation Verification of variable emissivity radiator force according to the Position of Charged Body Driven by Electrostatic Force", KMEMS Conference in Jeju, 2015

[16] D. Panczak, G. Ring, J. Welch, D. Johnson, P. Bell, "Sinda/Fluint Thermal Desktop User's Manual", C&R Technology, 2008

[17] Bergman, T. L., Incropera, F. P., & Lavine, A. S. (2011). Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

【연구 실적】

1. 논문

1) 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

2) 하헌우, 강수진, **한성현**, 김태규, 오현웅 "**정전 구동형 MEMS 기반 가변 방사율 라디에이터의 광학 물성치 최적화 설계**", 한국항공우주학회지, 제43권 제 2호, 149-155, 2015

3) 이창욱, 심주형, **한성현**, 윤수환, 김태규 "**DBD 플라즈마 구동기를 이용한 원통모델의 공기저항저감**", 한국추진공학회지, 제19권 제 1호, 25-32, 2015

4) 장수은, **한성현**, 김태규, 이종광, 장태성, 오현웅 "**큐브위성 탑재를 위한 MEMS 고체 추력기의 구조설계 및 검증**", 한국항공우주학회지, 제43권 제 5호, 432-439, 2015

2. 학회 발표

1) **한성현**, 이종광, 김태규 "**마이크로/나노 위성체 적용을 위한 MEMS 고체 추진기의 열주기 시험**", 항공우주시스템공학회 2013 추계학술대회, 한국항공우주시스템공학회, 2013. 10. 31

2) 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, 한국항공우주시스템공학회, 2013. 10. 31

3) **한성현**, 오현웅, 이종광, 김태규 "**큐브위성 STEP Cube Lab.의 탑재를 위한 MEMS 고체 추력기 및 인터페이스보드 설계**", 한국마이크로중력학회 2014 춘계학술대회, 한국항공우주시스템공학회, 2014. 04. 17

4) 하헌우, **한성현**, 강수진 "**큐브위성 탑재를 위한 MEMS 기반 고체 추력기의 마이크로 점화기를 이용한 궤도 열제어**", 제 2회 한국항공우주학회 학부생 논문대회, 한국항공우주학회, 2014. 04. 18

5) **한성현**, 오현웅, 김태규 "**큐브위성용 초소형 추력기 개발현황**", 항공우주시스템공학회 2014 춘계학술대회, 한국항공우주시스템공학회, 2014. 05. 14

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

6) 강수진, 하헌우, **한성현**, 서정기, 오현웅 "**Verification of Functional Performance for STEP Cube Lab. Payloads through Thermal Vacuum Test**", 2014년 한국우주과학회 추계학술대회, 2014. 10. 29

7) 장수은, 전수현, 권성철, 이명재, **한성현**, 박태용, 장태성, 오현웅 "**Payload Level Launch Environment Verification Test of STEP Cube Lab.**", 2014년 한국우주과학회 추계학술대회, 2014. 10. 30

8) 이창욱, **한성현**, 하헌우 "**인공위성 열 제어를 위한 MEMS 기반의 가변 방사율 라디에이터의 성능 검증**", 2014년 제12회 KAI 항공우주논문대회, 2014. 10. 31

9) **한성현**, 하헌우, 오현웅, 김태규 "**정전기력에 의해 구동되는 대전체 위치에 따른 가변 방사율 라디에이터 작동 검증**", 2015 제17회 KMEMS 학술대회 , 2015. 04. 03

10) **Sung-Hyeon Han**, Hyun-Ung OH, Jongkwang Lee, Taegyu Kim, "Fabrication and Verification of MEMS Solid Thruster for Ignition in Vacuum" Proceedings of 2015 Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science, May 21, 2015

3. 수상 실적

[1] 오현웅, 권성철, 하헌우, 정현모, **한성현**, 이명재, 박태용, 강수진, 전수현, 차진영, 채봉건, 장수은, **2013 큐브위성 경연대회 최종 3팀 선정, 2013**

[2] 권성철, 하헌우, 정현모, **한성현**, 전수현, 강수진, 이명재, 박태용, 차진영, 장수은, 채봉건, "STSL-I 큐브 솔루션", **2013, 조선대학교 창업 아이디어 공모전, 우수상**

[3] **한성현**, 오현웅, 이종광, 김태규 "**큐브위성에 탑재를 위한 MEMS 고체 추력기 I/F 보드 설계", 장려상**

[4] 하헌우, **한성현**, 강수진, "**큐브위성 탑재를 위한 MEMS 기반 고체 추력기의 마이크로 점화기를 이용한 궤도 열제어**", 2014, 제2회 항공우주공학회 학부생 논문경진대회, **준우수**상

[5] **한성현**, 오현웅, 김태규 "**큐브위성용 초소형 추력기 개발 현황**", 2014, 춘계 항공우주시스템공학회, **우수논문상**

[6] 이창욱, **한성현**, 하헌우, "**인공위성 열 제어를 위한 MEMS 기반의 가변 방사율 라디에이터의 성능 검증**", 2014, 제 12회 **KAI 항공우주 논문상, 최우수상**

Collection @ chosun