creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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

[UCI]I804:24011-200000264945

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

2015년 8월

석사학위 논문

MEMS 기반 대전입자형 가변 방사율 라디에이터의 설계 및 열 제어 성능 평가

조선대학교 대학원

항공우주공학과

하 헌 우

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

MEMS 기반 대전입자형 가변 방사율 라디에이터의 설계 및 열 제어 성능 평가

Design and Performance Evaluation of Thermal Control for MEMS-base Charged Particle Type Variable Emissivity Radiator

2015년 8월 25일

조선대학교 대학원

항공우주공학과

하 헌 우

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

MEMS 기반 대전입자형 가변 방사율 라디에이터의 설계 및 열 제어 성능 평가

지도교수 오 현 웅

이 논문을 석사학위 신청 논문으로 제출함

2015년 4월

조선대학교 대학원

항공우주공학과

하 헌 우

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

하헌우의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 태 규 (인)

위 원 조선대학교 교수 오 현 웅 (인)

위 원 한밭대학교 교수 이 종 광 (인)

2015년 5월

조선대학교 대학원

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

목 차

Ⅰ. 서론 ····· 1
1) 수동형 가변 방사율 라디에이터 ····· 1
2) 능동형 가변 방사율 라디에이터 ····· 2

Ⅱ. MEMS 가변 방사율 라디에이터 ····· 4
1. 대전입자형 가변 방사율 라디에이터 ····· 4
1) 구조 및 원리 ····· 4
2. 구동 이론 ····· 6
3. 구동 검증 실험 ····· 9

Ⅲ. 라디에이터 설계 및 제작 ····· 15
1. 라디에이터 설계 ····· 15
1) 열 설계 ····· 15
2) 열 해석 ····· 19
(1) 열 해석 조건 ····· 19
3) 열 해석 결과 ····· 24
(1) 라디에이터 덮개 재질 및 높이 선정 ····· 24
(2) 라디에이터 덮개의 광학 물성치 선정 ····· 24
(3) 비드 재질의 선정 ····· 25
(4) 라디에이터 비교 열 해석 ····· 25
4) 유효 방사율 분석 ····· 31
2. 라디에이터 제작 ····· 35
1) MEMS 제작 공정 ····· 35

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅳ. 라디에이터 열 제어 성능 평가 ····· 41
1. 라디에이터 성능 실험 ····· 41
1) 방사율 예측 실험 ····· 41
2) 열 제어 성능 실험 ····· 47
3) 라디에이터 열 해석 ····· 52

Ⅴ. 결론 ····· 56

【참고 문헌】 ····· 58
【연구 실적】 ····· 60

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF FIGURES

Figure 1. Operation Principle of Charged Particle Type Variable Emissivity Radiator ····· 5
Figure 2. Various Force Affected in Unit Cell ····· 8
Figure 3. Movement of Bead by Electrostatic Discharge ····· 11
Figure 4. Required Operating Voltage as a Size of Bead ····· 12
Figure 5. Improved Electrode Pattern of Test Specimen ····· 13
Figure 6. Operation Test of Beads under Electrostatic Condition ····· 14
Figure 7. Thermal Mathematical Model of Variable Emissivity Radiator ····· 17
Figure 8. Thermal Mathematical Model of Fixed Emissivity Radiator ····· 18
Figure 9. On-orbit Profile of Thermal Mathematical Model ····· 22
Figure 10. Thermal Analysis Results Summary by Cover Location ····· 27
Figure 11. Box Temperature Obtained from Variable Emissivity Radiator with Various Beads ····· 29
Figure 12. Performance Comparison between Variable Emissivity Radiator and Conventional Radiator ····· 30
Figure 13. Schematic of Radiator using the Near-field Thermal Radiation ····· 33
Figure 14. Difference of Radiation Area by Electrode Pattern ····· 37
Figure 15. Mask Shapes of Variable Emissivity Radiator ····· 38
Figure 16. Fabrication Process Flow of MEMS-based Charged Particle Type Variable Emissivity Radiator ····· 39
Figure 17. Fabricated Test Specimen of MEMS-based Charged Particle Type Variable Emissivity Radiator by MEMS Process ····· 40
Figure 18. Test Configuration by using the IR Camera ····· 43
Figure 19. Temperature and Predicted Emissivity of Alumina Bead by Type · 44
Figure 20. Temperature and Predicted Emissivity of Quartz Wafer and Silver Coating Surface ····· 45
Figure 21. Test Specimen of Variable Emissivity Radiator ····· 48
Figure 22. IR Image and Temperature Results of Variable Emissivity Radiator by Location of Bead (Heating Plate = 70℃) ····· 49
Figure 23. Temperature Results of Variable Emissivity Radiator by Location of Bead (Heating Plate = 150℃) ····· 50

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Figure 24. Thermal Mathematical Model of Improved Variable Emissivity Radiator ····· 53
Figure 25. Thermal Analysis Results by Heat Transfer of Structure ····· 54
Figure 26. Temperature Comparison between Variable Emissivity Radiator and Fixed Emissivity Radiator ····· 55

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

LIST OF TABLES

Table 1. Orbit Parameters for Thermal Design ····· 21
Table 2. Analysis Parameters for Optimization Design ····· 23
Table 3. Thermal Analysis Results with regard to Material Variation of Radiator Cover ····· 27
Table 4. Thermal Analysis Results Summary with Various by Optical Property on Radiator Cover ····· 28
Table 5. Thermo-optical Property by Bead Type ····· 29
Table 6. Designed Thermo-optical Property and Effective Emissivity of Variable Emissivity Radiator ····· 34
Table 7. Predicted Thermo-optical Property and Effective Emissivity of Test Specimen ····· 46
Table 8. Average Temperature by State and Measurement Point ····· 51

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

ABSTRACT

Design and Performance Evaluation of Thermal Control for MEMS-base Charged Particle Type Variable Emissivity Radiator

Ha Heon Woo
Advisor : Prof. Oh Hyun Ung, Ph. D.
Department of Aerospace Engineering,
Graduate School of Chosun University

The radiator is a thermal control device that radiates waste heat of satellite from a spacecraft to outer space by radiant heat transfer processes. However, radiating heat also in cold case, the radiator had require to thermal control by heater. The variable emissivity radiator that can change the emissivity properties in accordance with a temperature condition was developed to solve the conventional drawback. But, the conventional variable emissivity radiator was difficult to apply to small satellite because that has a large weight and mass. MEMS(Micro Electro Mechanical System)-base louver and shutter type variable emissivity radiators was developed to solve weight and mass of the conventional variable emissivity radiator. However, there are some drawbacks such as a structural safety of the mechanical moving parts under sever launch environment and constant power consumption to maintain the intended emissivity. In this study, to overcome above drawbacks, proposed a MEMS-base charged particle type variable emissivity radiator, that can change the emissivity property according to the direction of electronic field by using electric charge of the bead. And can minimize the power consumption for maintain to emissivity due to bead holds to the partition by electrostatic force. In this study, a principle and operating characteristics of MEMS-base charged particle type variable emissivity

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

radiator was analyzed and performed to test by bead operating. And it performed the optimization design of thermo-optical property for MEMS-base charged particle type variable emissivity radiator through the thermal analysis. The effectiveness of the optimized radiator design has been demonstrated through the comparison of efficiency with the fixed emissivity radiator. And MEMS-base charged particle type variable emissivity radiator, which was made in MEMS process, measured the emissivity of alumina bead, quartz wafer and silver coating for performance verification. And calculated the effective emissivity of the measured emissivity using the mathematical calculations, analyzed the effective emissivity of open and close state. Through test, that performed the evaluation of thermal control performance by change of emissivity and it analyzed problem via thermal analysis model. The applicability of the MEMS-base charged particle type variable emissivity radiator has been demonstrated through improved thermal analysis model.

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 열 제어 방식이 있다. 그 중 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 추가적인 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. 이를 해결하기 위해 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 OSR, SSM과 같은 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.

1) 수동형 가변 방사율 라디에이터

K. Shimazaki 등[2,3]은 페로브스카이트형 결정 구조를 가지는 망간 산화물을 합성하여 온도 변화에 따라 소재의 방사율이 가변하는 LSMO를 수동형 가변 방사율 라디

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

에이터로 개발하였고 재료의 합성 비율에 따른 방사율과 흡수율을 최적화하고 반사율을 이용하여 흡수율을 계산하는 연구를 수행하였다. 그리고 LSMO의 높은 흡수율을 해결하기 위해 표면에 다층박막구조를 가지는 연구를 수행하고 과학위성에 탑재하여 실제 우주환경에서 시험을 수행하였다. 한선우 등[4]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.

V. V. Vlassov 등은 가변 방사율 재질의 높은 흡수율을 해결하기 위하여 두 개의 층을 가지는 VESPAR(Variable Emittance SPAce Radiator)를 개발하였다[5,6]. 하단은 가변 방사율 재질로 코팅되어 있고 상단은 일반적인 저 흡수율, 고 방사율을 가지는 라디에이터로 구성되어 있으며 내부에는 각 층간의 복사 열 전달의 효율을 증가시키기 위해 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.

2) 능동형 가변 방사율 라디에이터

W. Biter 등은 높은 방사율과 전도율을 가지는 필름의 탈·부착을 통해 능동적으로 열 제어를 수행하는 ESR(Electrostatic Switched Radiator)를 개발하였다[7]. 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[8]은 탑재 장비의 온도 조건에 따라 루버가 개폐하여 방열을 수행하는 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[9]은 MEMS 기반 루버 라디에이터가 극심한

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

발사 환경에서의 기계적 구동부가 갖는 취약점을 셔터 방식으로 보완하여 설계를 개선하였다. 셔터 방식 라디에이터는 사다리 형태의 셔터 구조체와 셔터 블록으로 구성되어 있으며 고온 조건에서는 셔터 구조체와 블록의 틈새사이로 방열을 수행하고 저온 조건에서는 셔터 블록이 빠져나가는 열을 차폐하는 원리로 작동된다. 그리고 열악한 우주 환경에서의 외부 유입물에 의한 고장 방지 및 흡수율을 낮추고 UV 저항성을 높여주기 위해 셔터 외부에 LaRC^{TM}CP1 재질의 덮개를 적용하였다[10].

하지만 기존의 수동형 가변 방사율 라디에이터는 방사율을 가변하기 위해 큰 온도 변화폭이 요구되었고 능동형인 루버 및 셔터 방식 가변 방사율 라디에이터는 변경된 방사율을 유지하기 위해서 지속적인 전력 소모가 요구되었으며 구동부가 방열면 내부에 존재하여 방열 면적을 감소시키는 단점이 있었다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 정전 효과로 대전되는 비드를 이용하여 단 한 번의 전기장의 방향 변화에 따라 방사율 조정이 가능한 방식의 가변 방사율 라디에이터를 제안하였고 이에 대한 열 설계와 열 제어 성능 평가에 관해 기술하고자 한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅱ. MEMS 가변 방사율 라디에이터

1. 대전입자형 가변 방사율 라디에이터

1) 구조 및 원리

Fig. 1은 본 연구에서 제안한 대전된 비드의 구동에 따라 방사율이 가변하는 라디에이터의 구동 개념도 및 형상으로서 라디에이터는 3 개의 층으로 구성되어져 있다. 먼저 하단에는 부도체인 쿼츠 웨이퍼 위에 전기장 형성을 위한 전극이 배치된다. 그리고 비드의 수납을 위한 실리콘 재질의 셀 구조가 있으며 비드보다 유전율이 낮은 절연 재질로 선정하여 구조체가 대전되어 비드의 구동에 영향을 미치는 것을 방지하였다. 상부에는 셀 내부의 기밀성 확보 및 외부 유입물의 차단을 위해 덮개가 부착되며 덮개는 각각 저 방사율, 고 방사율로 구성되어 방사율이 낮은 비드의 위치에 따라 방사율이 가변하는 라디에이터를 구성하였다.

셀 내부에서 전기장의 방향에 따라 위치가 결정되어지는 저 방사율 비드는 고온 환경에서 저 방사율 코팅부로 전기장의 방향 형성 시 Fig. 1의 Open 상태와 같이 덮개에 코팅된 저 방사율 코팅부 아래로 이동하여 절반의 고 방사율 코팅 부분에 의해 방열을 수행하고, 저온 환경에서는 전기장의 방향이 반대로 인가되어 비드가 Fig. 1의 Close 상태와 같이 고 방사율 부분으로 이동하여 방사율이 낮은 비드가 고 방사율 코팅 부분으로 빠져나가는 열을 차단하는 방식으로 저 방사율 환경을 구현한다. 기존의 MEMS 루버 및 셔터 방식 가변 방사율 라디에이터는 변경된 방사율 유지를 위해 지속적인 전력공급이 필요하였지만 본 연구에서 제안한 대전입자형 가변 방사율 라디에이터는 대전된 비드가 전극에 유도되어 전극과 비드 상호간에 생성된 인력으로 셀 격벽에 고정되어 추가적인 전압의 공급 없이도 장시간동안 변경된 방사율을 유지하여 지속적인 전력 소모를 감소시킬 수 있다. 그리고 구동부인 비드의 전기적인 제어를 통해 셀 내부에 별도의 기계적 구동부없이 라디에이터의 방사율을 가변하기 때문에 기존의 MEMS 기반 가변 방사율 라디에이터들이 발사 환경에서 가지는 기계적 구동부의 취약점과 내부에 존재하는 셔터의 구동부가 방열 면적의 20%를 차지하여 전체 방열 면적을 감소시키는 단점을 극복 가능하다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

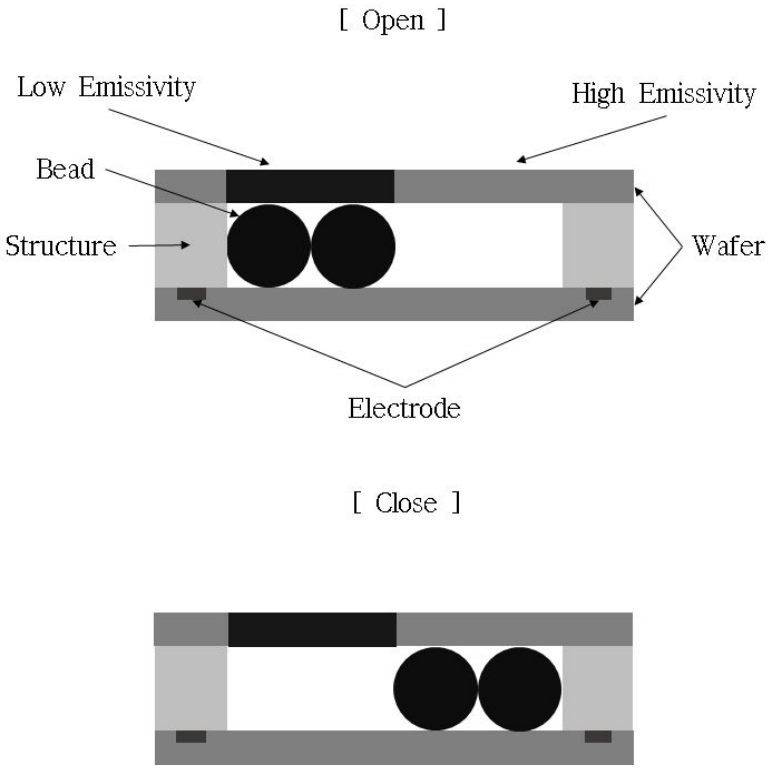


Fig. 1. Operation Principle of Charged Particle Type Variable Emissivity Radiator

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 구동 이론

+극과 -극 사이에서 형성되는 전기장의 방향에 따라 비드가 구동하는 원리로 방사율을 가변하는 대전입자형 가변 방사율 라디에이터는 셀 내부의 전극 사이에서 작용하는 여러 가지 힘들에 의해 영향을 받는다. Fig. 2는 셀 내부에서 작용하는 힘과 비드에 작용하는 힘들을 나타내었으며, 대표적으로 전기장이 형성되면 작용하는 힘으로는 비드의 운동에 영향을 미치는 전기장에 의한 힘(Electric Field Force), 정전기적 인력인 분자간 결합 힘(Van der Waals Force), 셀 격벽에 부착되게 하는 영상력(Image Force)과 입자들 간의 쿨롱 힘(Coulomb Force)이 있다. 셀 내부에서 작용하는 여러 가지 힘들 중 전기장에 의한 힘과 영상력이 비드를 구동하는데 있어서 가장 큰 영향을 미친다[11-13].

먼저 전압에 의해 +극과 -극 사이에서 생성되는 전기장에 의한 힘은 다음과 같다.

$$F_E = qE \qquad (1)$$

전기장에 의한 힘(F_E)은 비드가 전극 사이를 이동할 수 있는 실질적인 힘으로서 비드의 고유전하량(q)과 전기장(E)의 세기에 비례하게 된다. 전기장은 두 전극 간의 인가전압을 통해 생성되며 다음의 식으로 표현된다.

$$E = \frac{V}{d} \qquad (2)$$

d는 두 전극 간의 거리를 의미하며 V는 인가전압이다. 전하량을 일정한 값으로 가정하였을 경우 비드를 움직이는 전기장에 의한 힘은 식 (2)를 통해 인가전압에 비례하고 전극 간의 거리에 반비례하는 것을 알 수 있다. 전기장에 의한 힘으로부터 비드의 구동 전압을 구하기 위해서는 전기장에 의한 힘이 운동 방향과 같은 방향으로 작용하여 비드가 셀 내부에서 등가속도 직선 운동을 한다고 가정하였을 때 식 3과 같고, 두 힘을 구동 전압에 대해 정리하면 식 4로 표현된다.

$$\frac{qV}{d} = \frac{1}{2}mv^2 \qquad (3)$$

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$V = \frac{md}{2q}v^2 \qquad (4)$$

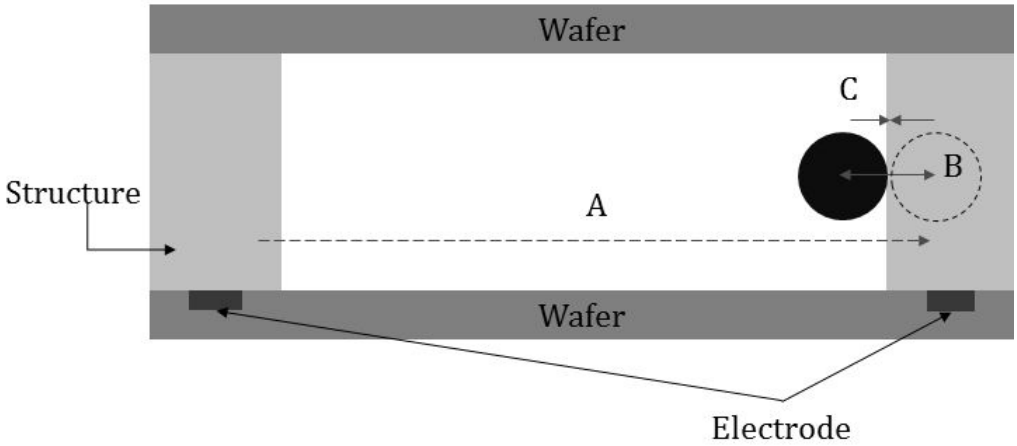
식 4를 통해 구동 전압은 비드의 질량과 전극 간의 거리에 비례하며 전하량에 반비례하는 것으로부터 구동 전압을 낮추기 위해서는 전극 간의 거리가 근접하고 크기가 작은 비드를 적용해야함을 알 수 있다.

분자 간 결합의 힘에 의한 영상력은 비드가 이동한 후에도 추가적인 전력소비 없이 비드가 셀 격벽에 장시간 부착되어 유지할 수 있는 메모리 효과(Memory Effect)라 불리는 쌍안정성 효과를 가지게 한다. 영상력은 다음의 식으로 표현된다.

$$F_i = q^2/16\pi\epsilon x^2 \qquad (5)$$

F_i는 영상력이며, ϵ는 유전율, x는 전하와 전극간의 거리이며 비드의 크기에 비례하는 값이다. 식으로부터 영상력은 전하량이 크고 비드의 크기가 작을수록 효과가 증가하지만 영상력을 극복하고 반대편 전극으로 이동하는데 필요한 에너지가 증가하여 구동 전압을 높이게 된다. 영상력은 전하량에 반비례하고 비드의 크기에 비례하는 식 4와 반대되는 결과를 가져온다. 따라서 식들의 변수들을 고려하여 실험을 통해 최적화된 구동 전압, 비드의 크기 그리고 전극간의 거리를 가지게 해야 한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



A – Electric Field Force, B – Van der Waals Force, C – Image Force

Fig. 2. Various Force Affected in Unit Cell

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3. 구동 검증 실험

본 연구에서 제안한 MEMS 기반 대전입자형 가변 방사율 라디에이터 설계 개념의 적용 가능성 검증을 위해 비드 구동성 검증용 치구를 제작하여 실험을 수행하였다. Fig. 3은 구동 이론을 바탕으로 제작한 시험 치구로서 셀 구조체 양 옆에 전극을 배치하였으며 비드의 구동을 위해 고전압 증폭기(Treck 20/20C)와 함수발생기(Agilent 33200A)를 사용하여 +극, -극을 바꿔가며 인가하였다. 그리고 셀 내부에는 대전체인 감마 알루미나 비드를 수납하여 전기장에 의한 비드의 구동을 확인하고 비드의 크기에 따른 구동 전압을 확인하기 위한 실험을 수행하였다.

실험 결과, Fig. 3의 치구에 전압이 인가됨에 따라 전극 사이에 형성된 전기장이 대전된 비드를 반대편으로 이동시켜 가변 방사율 라디에이터로서의 가능성을 확인하였다. Fig. 4는 비드 크기에 따른 구동 전압으로서 비드의 크기가 1 mm인 경우 비드를 구동하기 위해 5 kV의 전압이 요구되었으며, 1.6 mm의 경우 6 kV, 2.4 mm의 경우 7 kV로 비드의 크기가 증가할수록 높은 구동 전압이 요구되었다. 비드 크기의 증가는 전극 간의 거리를 늘려 구동 전압을 증가시키는 문제점으로도 연결되기 때문에 라디에이터를 설계함에 있어 비드의 크기는 중요한 설계 인자임을 알 수 있다.

하지만 반복된 실험으로부터 한번 이동한 비드를 반대편으로 이동시키기 위해서는 초기 구동 전압보다 높은 구동 전압을 요구하였다. 그리고 전압을 계속 가해줄 경우 전기장의 방향과 상관없이 비드가 양극 사이를 반복적으로 움직이는 현상이 관찰되었다. 이와 같은 현상은 시험 치구의 넓은 전극 간격으로 인하여 구동 전압이 높아진 것과 과도한 고전압으로 인해 운동에너지가 증가하여 비드가 격벽에 큰 에너지로 충돌하게 되어 비드의 전하량을 감소시켜 불안정한 운동 상태를 야기하는 것으로 판단된다. 또한 시험용 셀 구조체가 비드보다 높은 유전율 특성으로 인하여 셀 구조체가 먼저 대전되어 비드의 구동에 영향을 미치게 된 것으로 판단된다. 그리고 5 kV의 매우 높은 구동 전압으로 위성에 적용하기에는 고전압 장치를 추가로 적용해야 하는 문제점이 따르기 때문에 구동 전압을 낮추는 방안이 필요하였다.

이를 해결하기 위해 구조체는 비드보다 유전율이 낮은 재질로 변경하였고 전극 간의 간격을 절반으로 축소시켜 구동 특성 및 재현성을 향상시키도록 Fig. 5와 같이 치구를 개선하였다. 치구는 셀 내부에 +극이 배치되며 양 옆으로 -극이 배치되는 형태로 기존의 전극 배치보다 양 전극 간의 거리를 절반으로 감소시켰다. 치구는 하나의 비드를

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

가지는 셀들이 배열된 형태로 제작되었으며 실제 제작될 MEMS 기반 라디에이터와 같이 평판에 다수의 셀들이 배열된 형태와 각 셀 내부의 비드가 동시에 움직이는 환경을 모사하였다. 그리고 시험 치구 안에 1 mm 크기의 감마 알루미나 비드를 각각 삽입한 뒤 비드의 수납 및 기밀성 유지를 위한 투명한 커버를 배치하여 전기장에 의한 비드의 구동 실험을 재수행하였다[14]. 실험 결과, Fig. 6의 왼쪽과 같이 두 전극에 +극과 -극이 인가되고 +극 부근에서 +극으로 대전된 비드가 정전기력에 의해 동시에 일정한 방향으로 -극으로 이동하여 고정되었으며, 반대편 전극에 전압 인가 시 오른쪽 그림과 같이 비드는 일제히 반대편으로 이동하였다. 또한 전극 간의 거리가 기존보다 절반으로 감소되어 구동 전압이 식 (4)에서 전극 간의 거리에 비례함에 따라 5 kV에서 2 kV로 감소되었다. 그리고 전압을 한 번만 인가하였을 경우보다 일정한 시간차를 두고 여러 번 인가하는 경우에서 비드의 구동성이 향상되었으며 앞서 관찰되던 과도한 전압에 의해 비드가 전극에 유도되지 못하여 양극 사이를 반복적으로 움직이던 현상을 제어할 수 있었다. 따라서 MEMS 공정을 통해 셀 구조체의 간격을 축소하고 이에 상응하는 미소한 크기의 비드를 선정한다면 구동 전압을 1 kV 이내로 더 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

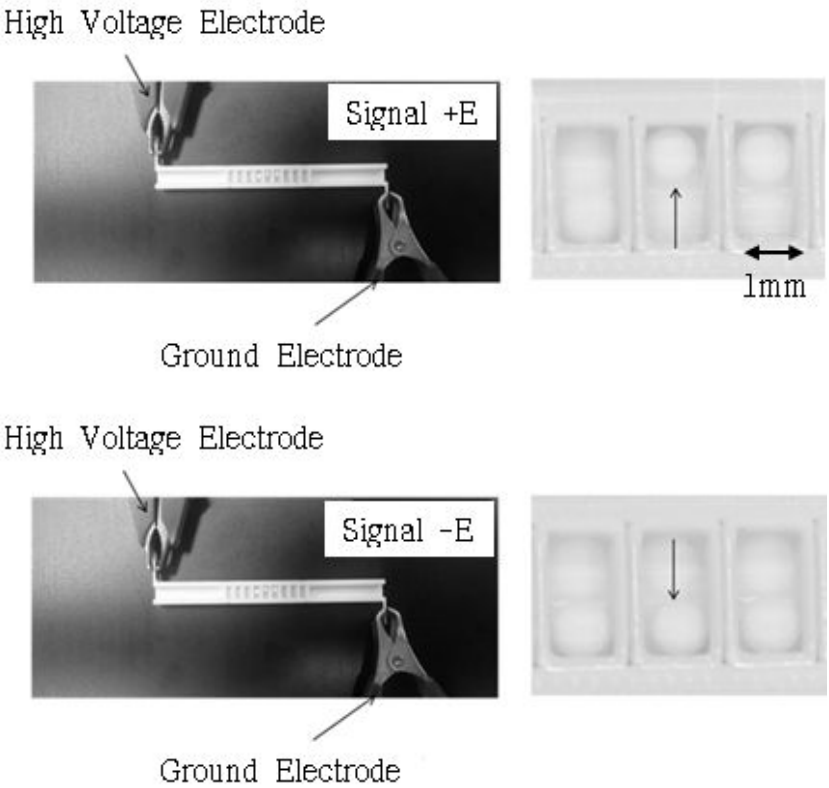


Fig. 3. Movement of Bead by Electrostatic Discharge

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

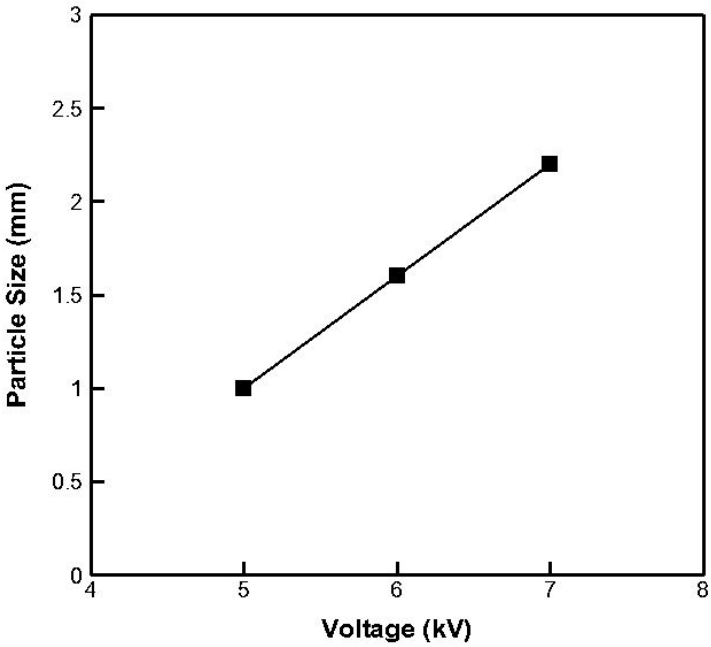


Fig. 4. Required Operating Voltage as a Size of Bead

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

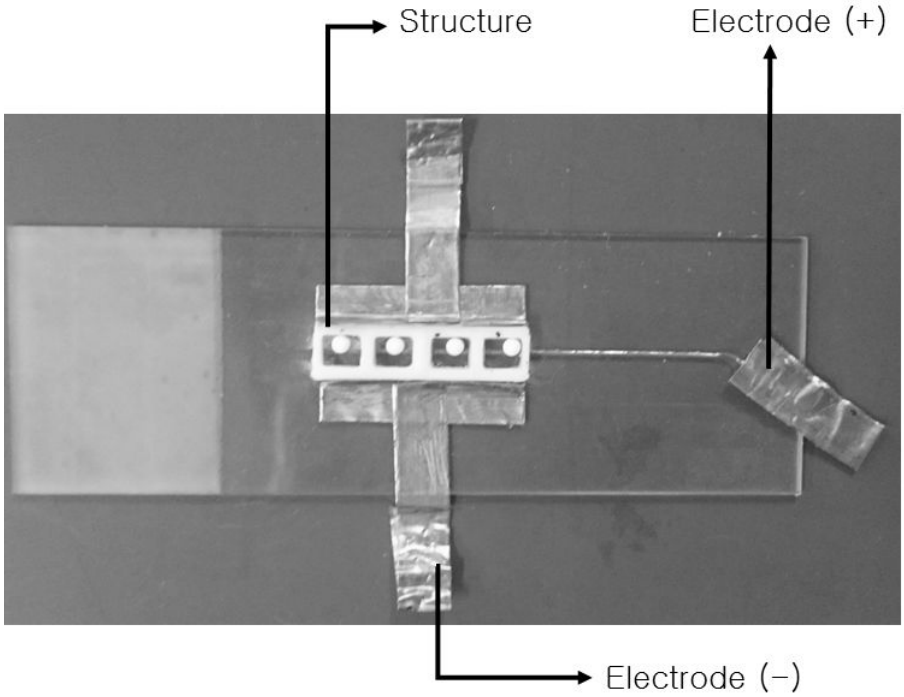


Fig. 5. Improved Electrode Pattern of Test Specimen

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

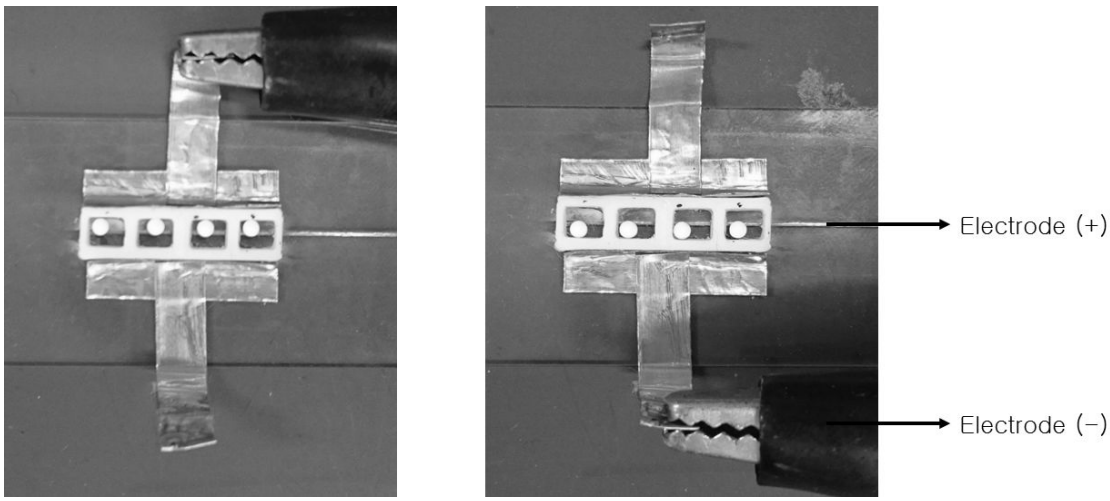


Fig. 6. Operation Test of Beads under Electrostatic Condition

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅲ. 라디에이터 설계 및 제작

1. 라디에이터 설계

1) 열 설계

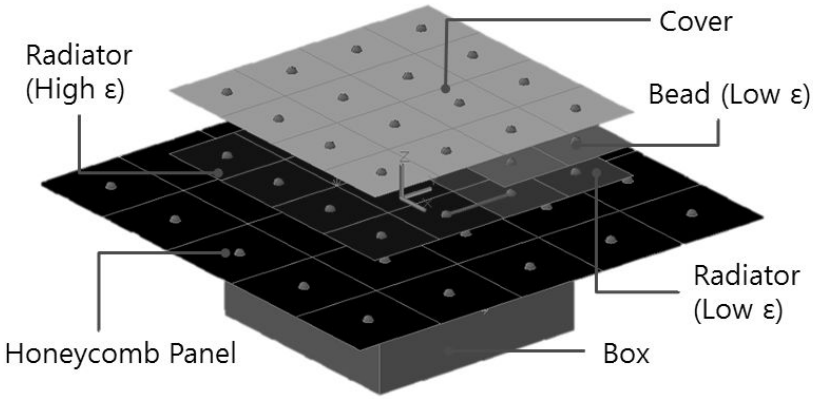
구동 검증된 대전입자형 가변 방사율 라디에이터의 제작에 앞서 본 연구에서 제안한 대전입자형 가변 방사율 라디에이터의 열 제어 성능을 수학적 열 해석 모델을 구축하여 최적화된 광학 물성치를 선정하고 열 제어 성능을 검증해야 한다. 수학적 열 해석 모델은 상용 소프트웨어인 Thermal Desktop[15]을 사용하여 Fig. 7과 같이 단순화된 라디에이터를 구축하였다. 라디에이터의 수학적 열 해석 모델은 비드 구동에 따른 열 제어 효과를 검증하기 위해 전장품과 허니컴 패널을 포함하는 열 해석 모델로 가정하였다. 전장품은 허니컴 패널 하부에 배치하였으며, 전장품의 열 제어를 목적으로 패널 상부에는 가변 방사율 라디에이터를 배치하였다. 그리고 고온 조건에서는 비드가 저 방사율 코팅부로 이동하여 고 방사율 상태, 저온 조건에서는 비드가 고 방사율 코팅부로 이동하여 저 방사율 상태가 유지되도록 하는 라디에이터의 특성을 모델링에 반영하였다. 라디에이터와 허니컴 패널의 열전도도는 1500 W/m^2K, 허니컴 패널과 전장품의 열전도도는 1000 W/m^2K로 적용하였으며 라디에이터 면을 제외한 패널과 전장품에는 열적 단열을 위해 MLI를 적용하였다.

가변 방사율 라디에이터의 크기는 셀 단위의 라디에이터가 확장된 30 cm × 30 cm로 가정하였으며, 전장품의 발열 조건으로는 15 W로 가정하여 적용하였다. 가변 방사율 라디에이터 소재로는 MEMS 공정에 일반적으로 사용되는 실리콘 웨이퍼를 적용하였으며, 허니컴 패널부에 인접한 라디에이터 하부면에는 고·저 방사율 코팅을 각각 절반씩 적용하였다. 코팅부에 적용된 방사율은 가변 방사율 효과의 차이를 확인하기 위해 알루미늄의 방사율(ε=0.2)과 OSR의 방사율(ε=0.81)로 가정하였다. 방사율 가변을 위한 구동부에 해당하는 구형 비드의 경우 각각의 모델링을 수행하지 않고 비드 구동에 따른 방열 면적 변화에 의한 열 제어 효과를 검토하기 위해 특정 광학 물성치를 갖는 평판으로 모델링을 수행하였다. 따라서 고·저 방사율 코팅부 위에는 비드 구동에 따른 방사율 가변을 모델링에 반영하기 위해 두께 1 mm의 비드가 셀 내부에 채워진 것을 모사한 평판을 배치하였다. 비드의 수납 및 기밀성 확보를 목적으로 비드의 상부에는

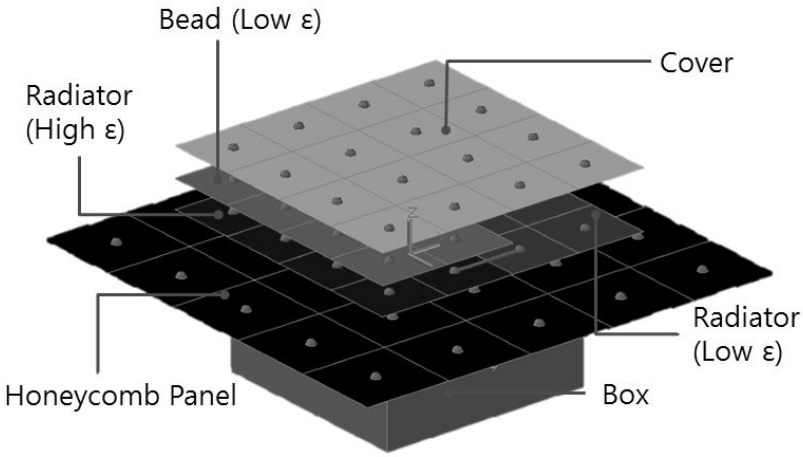
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

공정 가능성이 있는 0.25 mm 두께의 덮개를 배치하였고 덮개와 라디에이터간의 실리콘 구조체를 고려하여 실리콘 웨이퍼의 열전도율인 0.1489 W/m^2K를 적용하였다. 그리고 가변 방사율 라디에이터와의 성능 비교를 위해 Fig. 8와 같은 동일한 면적의 라디에이터 크기 및 열전도도의 조건을 가지는 고정 방사율 라디에이터의 수학적 열 해석 모델을 구축하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) High Emissivity State



(b) Low Emissivity State

Fig. 7. Thermal Mathematical Model of Variable Emissivity Radiator

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

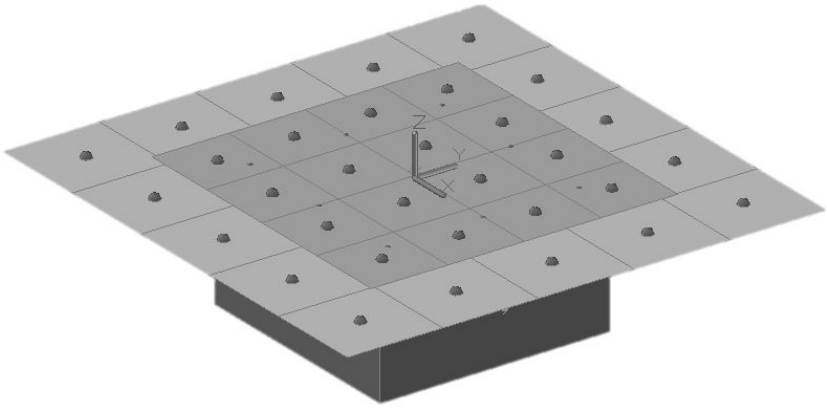


Fig. 8. Thermal Mathematical Model of Fixed Emissivity Radiator

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2) 열 해석

열 해석에서는 가변 방사율 라디에이터의 광학 물성치 최적화 설계를 수행하기 위해 덮개의 유·무에 따른 라디에이터의 열 제어 특성을 비롯해 상이한 광학 물성치 적용에 따른 온도 분석을 실시하였다. 또한 하층부 주 방열면으로부터의 덮개 위치에 따른 열 제어 성능 분석과 가변 방사율 구현을 위해 구동용 비드의 소재 변화에 따른 열 제어 성능 분석을 실시하였다. 이와 같이 최적화된 가변 방사율 라디에이터의 유효성 검토를 위해 Fig. 8과 같은 열 해석 모델에 일반적으로 고정 방사율 라디에이터로 적용되는 OSR의 물성치(α/ε=0.12/0.81)를 수학적 열 해석 모델에 적용하여 가변 방사율 라디에이터와의 열 제어 성능비교를 수행하였다.

(1) 열 해석 조건

위성은 극심한 온도차를 보이는 우주에서 생존하기 위해 최악의 조건에서도 모든 탑재장비가 허용 온도 범위내로 유지될 수 있도록 최악의 조건을 고려하여 궤도 열 해석을 실시해야한다. 공전궤도 중 태양 복사와 지구 적외선 등 열적 입사량이 가장 높은 동지 조건에서 Fig. 7의 열 모델의 전장품이 최대로 발열하고 임무 수행을 위해 지구를 지향하며 전장품이 태양 복사를 받는 경우를 고온 조건, 위성으로의 열적 입사량이 가장 적은 하지 조건에서 전장품이 운용되지 않으며 심우주 환경을 지향하는 경우를 저온 조건으로 정의하였다.

Table 1는 위성이 저궤도 환경에서 운용되는 조건[5]을 가정한 궤도 열적 조건이며 고온 조건 및 저온 조건에서의 열적 입사량을 나타내었다. Fig. 9는 저온 조건에서 라디에이터가 태양을 지향하는 상태와 고온 조건에서 라디에이터가 지구를 지향하는 열 모델의 궤도 프로파일을 나타낸다. 상기의 궤도 열 환경 조건을 바탕으로 본 연구에서 제안한 가변 방사율 라디에이터의 열 제어 성능 확인 및 광학 물성치 설계 그리고 고정 방사율 라디에이터와의 열 제어 성능 비교를 위해 열 해석을 수행하였다.

광학 물성치 최적화는 Table 2과 같은 절차로 열 해석을 진행하였다. 먼저 비드의 수납과 기밀성 확보를 목적으로 적용된 덮개의 재질과 광학 물성치를 변경하는 열 해석을 수행하였다. 덮개의 재질은 Johns Hopkins 대학에서 개발한 MEMS Shutter 라디에이터의 덮개로 낮은 흡수율과 높은 UV 저항성을 가진 LaRC^{TM}CP1[10]과 일반적인 MEMS 가공 재질인 실리콘 웨이퍼를 적용하여 비교하였다. 덮개 재질의 선정 후

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

덮개의 광학 물성치를 최적화하는 열 해석 수행 및 비드의 재질 및 광학 물성치의 최적화를 수행하는 열 해석을 수행하였다. 최종적으로 해석을 통해 최적화된 광학 물성치를 가변 방사율 라디에이터에 적용하여 고정 방사율 라디에이터와의 열 제어 성능 비교를 수행하였다.

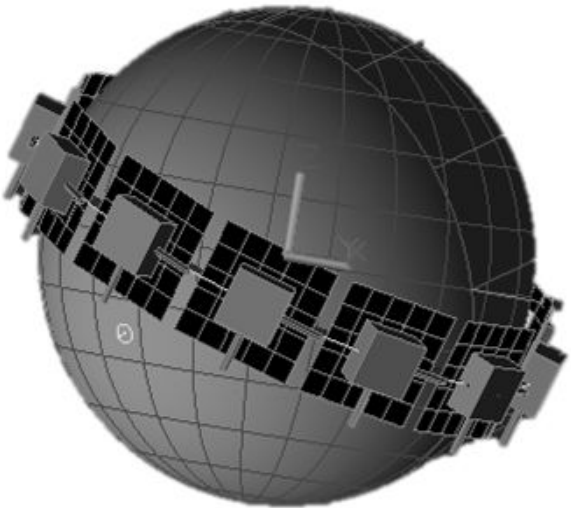
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 1. Orbit Parameters for Thermal Design

Parameter	Orbit Condition	
	Cold Case	Hot Case
Orbit Type	Sun-Synchronous	
Orbit Inclination	20°	
Attitude (km)	750	
Solar Flux (W/m^2)	1287	1420
Albedo	0.3	0.35
IR Flux (W/m^2)	227	245

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

(a) Cold case



(b) Hot case

Fig. 9. On-orbit Profile of Thermal Mathematical Model

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 2. Analysis Parameters for Optimization Design

	Optimization Design Sequence	
1	Radiator Cover Material	
	LaRC^{TM}CP1	Silicon
2	Radiator Cover Optical Property	
	Cover Top (α/ε)	Cover Bottom (α/ε)
3	Bead Material & Optical Property	

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

3) 열 해석 결과

(1) 라디에이터 덮개 재질 및 높이 선정

라디에이터 덮개 재질 및 위치 선정을 위해 1mm 크기의 알루미나 비드를 적용하였으며 덮개 상·하부의 광학 물성치는 0.12/0.81(α/ε)로 가정하였다. Table 3는 덮개 유·무에 따른 비교 열 해석 결과이며 저온 조건에서의 열해석 결과 온도 프로파일의 최저 온도는 T_{min}, 고온 조건의 최대 온도는 T_{max}로 정의하였다. 해석 결과, 덮개 미적용 시 전장품은 8 ~ 44.5℃의 온도 분포를 보이나 Johns Hopkins 대학에서 MEMS Shutter 라디에이터의 덮개로 적용된 LaRC^{TM}CP1[10] 소재를 적용할 경우, 소재의 광학적 물성 특성으로 모든 해석 조건에서 덮개 미적용 시보다 5 ℃ 이상 상승하였다. 또한, LaRC^{TM}CP1은 필름 형태의 유연한 재질로 인해 MEMS 공정 중 진공하에서의 작업 시 기밀성 유지에 어려움이 수반된다. 하지만 MEMS 공정에서 일반적으로 적용되는 실리콘의 경우, 덮개로 적용하였음에도 불구하고 덮개 미적용 시와 유사한 온도 분포를 보이고 MEMS 공정이 가능한 단단한 재질로 비드의 수납 및 기밀성 확보를 목적으로 하는 덮개로서의 조건을 충족하였다.

선정된 실리콘을 기반으로 라디에이터의 주 방열면으로부터의 덮개 위치에 따른 분석을 수행하였다. 해석 결과, Fig. 10과 같이 덮개 위치에 따른 온도 변화는 미약함을 알 수 있으며 이로부터 덮개의 위치는 방열 성능에 영향을 끼치지 않는 것을 확인하였다. 상기의 결과로부터 라디에이터의 덮개는 MEMS 공정과 비드의 크기를 고려하여 실리콘 재질을 기반으로 주 방열면으로부터 1.1mm 높이에 위치하도록 설계하였다.

(2) 라디에이터 덮개의 광학 물성치 선정

덮개의 광학 물성치 선정을 위해 1mm 크기의 알루미나 비드와 실리콘 재질의 덮개를 열 해석 모델에 적용하여 해석을 수행하였고 Table 4에 라디에이터 덮개의 열 광학 물성치 최적화를 위한 해석 조건과 열 해석 결과를 나타내었다. 먼저 Case 1과 같은 광학 물성치가 적용된 경우 높은 방사율에도 불구하고 높은 흡수율로 인하여 전장품 온도가 최대 70 ℃까지 상승하였다. Case 2는 Case 1보다 덮개 상·하부가 저 흡수율인 경우로 덮개 상부의 흡수율이 낮아짐에 따라 열적 입사량이 감소하여 전장품의 온도 또한 45 ℃로 낮아지는 것을 확인하였다. 광학 물성치에 따른 결과 비교를 위해 Case 2의 결과를 기준으로 광학 물성치에 대한 비교 열 해석을 수행하였다. Case 3와

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

Case 4는 덮개 하부의 광학 물성치를 변경한 조건으로 Case 3는 덮개 하부가 고 흡수율·저 방사율로 전장품의 온도가 Case 2보다 고온 조건에서 6 ℃ 정도 증가하였고, Case 4의 경우 Case 2보다 흡수율이 높은 조건이지만 Case 2의 결과와 유사한 온도 분포를 나타내어 덮개 하부의 광학 물성치는 흡수율보다 방사율이 중요한 인자로 작용하는 것을 알 수 있다. Case 5는 Case 4의 조건에서 덮개 상부의 흡수율이 증가한 조건으로 해석 결과, 우주로 노출된 덮개 상부가 높은 흡수율로 인하여 열적 입사량이 증가함에 따라 전장품의 온도가 Case 2보다 21 ℃ 상승하였다. 따라서 덮개 상부에는 흡수율이 낮고 방사율은 높은 광학 물성치를 적용해야 한다. 기 수행된 해석 결과로부터 도출된 최적화 조건으로 덮개 상부에서는 낮은 흡수율을 가지면서 높은 방열 성능을 가지고 하부에서는 높은 흡수율·방사율을 가지는 Case 4의 조건을 선정하였다.

(3) 비드 재질의 선정

비드 재질의 선정을 위해 선정된 실리콘 재질의 덮개 및 광학 물성치(Top=0.15/0.91 (α/ε), Bottom=0.97/0.91(α/ε))와 1mm 크기의 비드를 열 해석 모델에 적용하여 해석을 수행하였고 비드의 재질에 따른 라디에이터의 열적 특성분석을 위해 Table 5의 비드의 재료 및 열적 광학 물성치를 적용하여 열 해석을 수행하였다. Fig. 10의 해석 결과로부터 비드의 재질의 상이함에도 불구하고 전장품의 온도는 5 ~ 44 ℃의 유사한 온도 분포로 비드의 재질은 라디에이터의 열 제어 성능을 결정함에 있어 영향성이 미약함을 알 수 있다. 따라서, MEMS 가변 방사율 라디에이터의 비드 선정은 비드의 대전 특성이 좋은 알루미나 비드와 금 비드를 선정하였으나 제작 단가가 높은 금 비드 대신 경제성이 좋은 알루미나 비드를 선정하였다.

(4) 라디에이터 비교 열 해석

상기의 해석으로부터 도출된 가변 방사율 라디에이터의 소재 및 광학 물성치는 실리콘 재질의 덮개이며 상부의 광학 물성치(α/ε)는 0.15/0.91, 하부는 0.97/0.91, 비드는 알루미나 비드로 이를 적용하여 방사율이 고정된 라디에이터와의 성능 비교를 수행하였다.

Fig. 11은 가변 방사율 라디에이터와 고정 방사율 라디에이터의 비교 열 해석 결과로서 고온과 저온 조건에서의 전장품의 온도를 나타낸다. 고온 조건의 경우, 고정 방사율 라디에이터는 38 ℃이지만 절반의 방사율 면적을 가진 고정 방사율 라디에이터의

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

경우 방열 면적의 감소와 이에 따른 허니컴 패널의 흡수율의 증가로 인해 50 ℃까지 상승하였다. 하지만 가변 방사율 라디에이터는 절반의 고 방사율 코팅 면적으로 44 ℃까지 하강하여 충분히 방열을 수행하는 것으로 판단된다. 저온 조건의 경우, 고정 방사율 라디에이터는 저온 조건에서도 고정된 높은 방사율로 인해 전장품의 지속적인 방열을 수행하여 -9 ℃와 -5 ℃까지 하강하였다. 하지만 가변 방사율 라디에이터는 최저 6.7 ℃의 온도로 낮은 방사율의 비드가 고 방사율 코팅부로 이동하여 저 방사율 상태로 유지되어 추가적인 히터를 요구하지 않지만 고정 방사율 라디에이터는 동일한 열 제어를 위해 10 W이상의 히터 전력 소모가 필요함으로부터 가변 방사율 라디에이터의 효율적인 열 제어 유효성을 입증하였다[16].

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 3. Thermal Analysis Results with regard to Material Variation of Radiator Cover

Material Type	Material Property	T_{min}	T_{max}
w/o Cover	-	8	44.5
LaRC™CP1	k = 0.12W/mK ρ = 1434kg/m^3 c_p = 1094J/kgK	12	49
Silicon	k = 148.9W/mK ρ = 2330kg/m^3 c_p = 0.198J/kgK	6.7	44

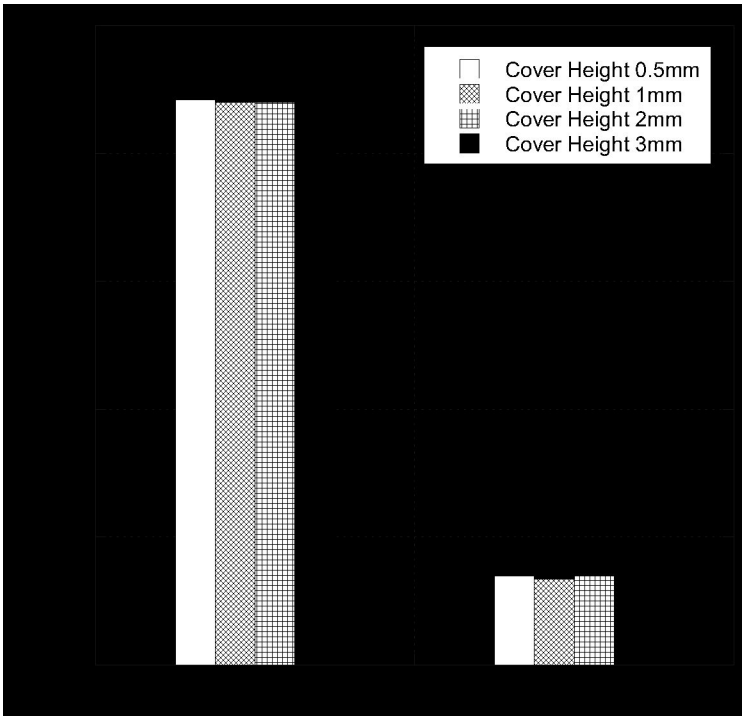


Fig. 10. Thermal Analysis Results Summary by Cover Location

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 4. Thermal Analysis Results Summary with Various by Optical Property on Radiator Cover

Case	Top (α/ε)	Bottom (α/ε)	T_{min}	T_{max}
1	1.0/1.0	1.0/1.0	14	70
2	0.15/0.91	0.15/0.91	7	45
3	0.15/0.91	0.91/0.15	8.5	52
4	0.15/0.91	0.97/0.91	6.7	44
5	0.97/0.91	0.97/0.91	10	65

α : Absorptivity ε : Emissivity

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 5. Thermo-optical Property by Bead Type

Bead Material	Optical Property (α/ε)	Thermal Conductivity (W/m℃)
Alumina	0.1/0.2	30
Glass	0.1/0.9	1.5
Gold	0.19/0.02	318
Silicon	0.7/0.3	148.9

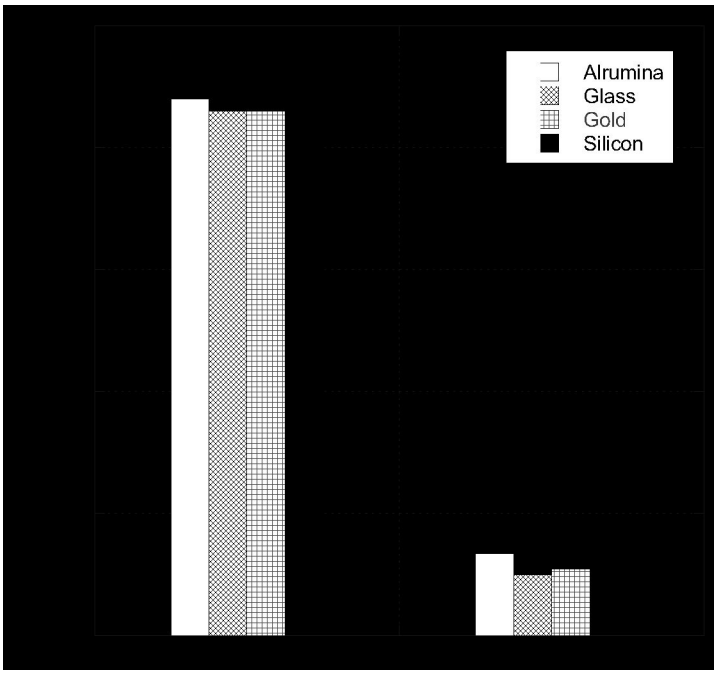


Fig. 11. Box Temperatures Obtained from Variable Emissivity Radiator with Various Beads

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

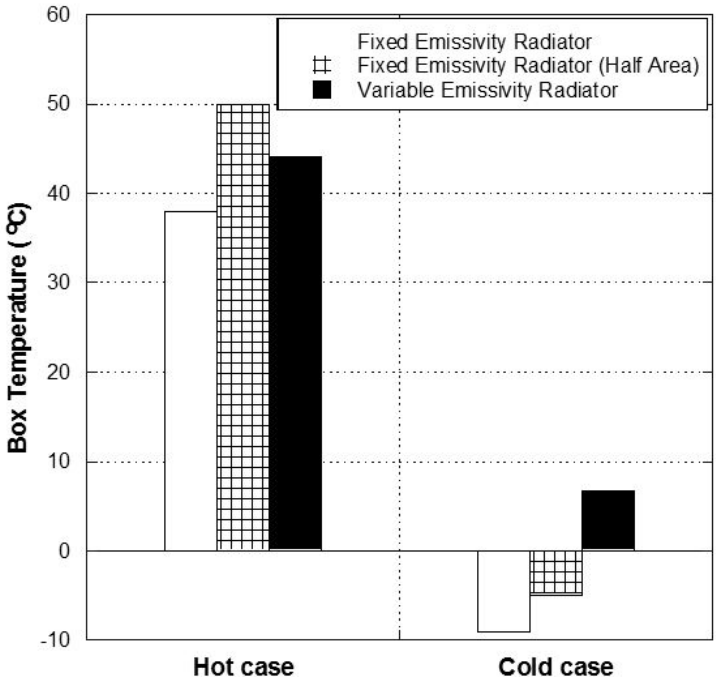


Fig. 12. Performance Comparison between Variable Emissivity Radiator and Conventional Radiator

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

4) 유효 방사율 분석

선정된 방사율에 대한 유효 방사율을 계산하기 위해 가변 방사율 라디에이터의 수학적 모델은 대류와 열전도에 의한 열 교환은 이루어지지 않는 조건으로 방사에 의한 열전달만 있다고 가정하여 단순화하였다. 먼저 비드가 없는 부분의 유효 방사율은 Fig. 13 (a)와 같이 가변 방사율 라디에이터 내·외부에서 복사열이 전달되는 과정을 통해 계산할 수 있다. T_1은 바닥층의 온도, T_2는 상층부 내부의 온도, T_3는 상층부 외부의 온도를 나타낸다. 상층부 외부에서 열 복사량은 식 (6)과 같이 표현된다[17].

$$q_2 = \varepsilon_3 \sigma T_3^4 \qquad (6)$$

σ는 스테판-볼츠만 상수이며, ε_3는 상층부 외부의 방사율이다. 표면의 두께는 매우 얇은 μm로 T_3=T_2 로 가정할 수 있다. 바닥층과 상층부 사이의 복사 열전달식은 식 (7)과 같이 표현되고 열량 보존 법칙에 따라 q_2=q_1을 통해서 T_2의 값을 추정할 수 있으며 이를 통해 유효 방사율을 계산할 수 있다[17].

$$q_1 = \frac{\sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right)}{\dfrac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} + \dfrac{1}{F_{ij}} + \dfrac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1}} \qquad (7)$$

F_{ij}는 바닥층을 떠나서 상층부에 도달하는 에너지의 부분율이며 식 (8)과 같이 표현된다. 여기서 x는 라디에이터의 가로, y는 세로, l은 높이를 나타내며 $\overline{x}$는 가로와 높이의 비, $\overline{y}$는 세로와 높이의 비를 나타낸다.

$$F_{ij} = \frac{2}{\pi \overline{x}\,\overline{y}} \left(\ln\left[\frac{\left(1+\overline{x^2}\right)\left(1+\overline{y^2}\right)}{1+\overline{x^2}+\overline{y^2}}\right]^{1/2} + \overline{x}\left(1+\overline{y^2}\right)^{1/2} \tan^{-1}\frac{\overline{x}}{\left(1+\overline{y^2}\right)^{1/2}}\right.$$
$$\left. + \overline{y}\left(1+\overline{x^2}\right)^{1/2} \tan^{-1}\frac{\overline{x}}{\left(1+\overline{y^2}\right)^{1/2}} - \overline{x}\,tan^{-1}\overline{x} - \overline{y}\,tan^{-1}\overline{y}\right) \qquad (8)$$

식 (6)과 식 (7)의 T_2에 대해 정리하면 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{\sqrt[4]{1+\varepsilon_3\left(\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2}+\frac{1}{F_{ij}}+\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1}\right)}} \qquad (9)$$

유효 방사율은 Fig. 13 (a)의 바닥층과 상층부에 의한 복합적인 복사 열 전달 과정이 단순한 표면의 복사 열 전달로 표현될 때의 방사율로 식 (6)과 같은 열 복사량을 가지며 이를 ε_e에 대해 정리하면 식 (10)과 같이 표현된다.

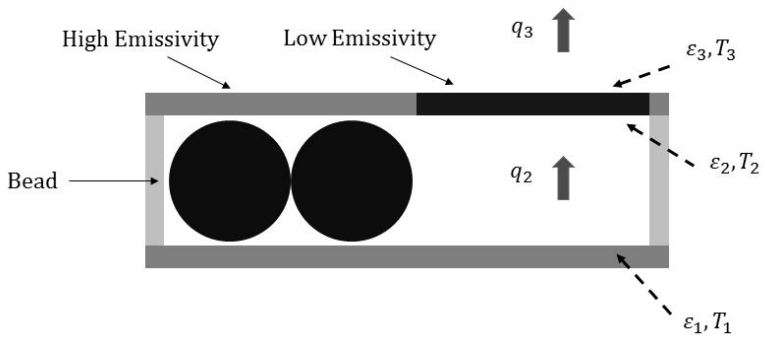
$$\varepsilon_e = \varepsilon_3\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4 \qquad (10)$$

Fig. 13 (b)는 다음은 비드가 있을 경우의 복사 열이 전달되는 과정으로서 비드는 낮은 방사율을 가지는 복사 차폐물로 가정하였고 비드는 바닥층과 상층부 사이의 복사 열 전달을 감소시키며 내부의 복사 열전달은 식 (11)과 같이 표현된다.

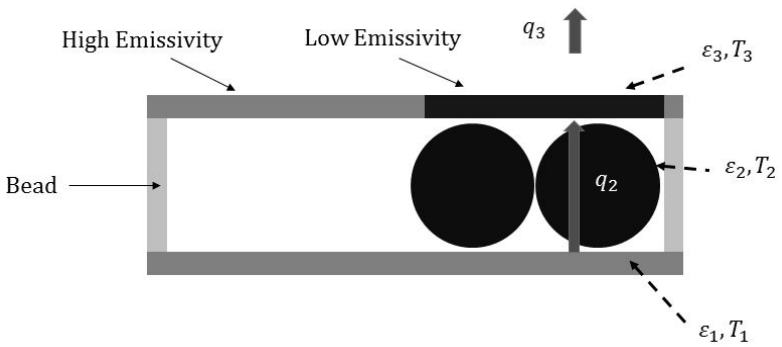
$$q_2 = \frac{\sigma\left(T_1^4 - T_2^4\right)}{\frac{1}{\varepsilon_1}+\frac{1}{\varepsilon_2}+\frac{1-\varepsilon_{3,1}}{\varepsilon_{3,1}}+\frac{1-\varepsilon_{3,2}}{\varepsilon_{3,2}}} \qquad (11)$$

복사 차폐물인 비드가 적용된 경우에도 비드가 없는 경우와 동일하게 T_2를 계산하여 유효 방사율을 구할 수 있다. Table. 6은 선정한 방사율 물성치를 대입하여 상기의 식을 통해 계산된 유효 방사율 값으로 Open 상태는 비드가 저 방사율 코팅부 아래에 있는 상태로 유효 방사율은 비드가 없는 경우의 고 방사율 0.704, 비드가 있는 경우의 저 방사율 0.018, Close 상태는 비드가 고 방사율 코팅부 아래에 있는 상태로 비드가 있는 고 방사율 부는 0.562, 비드가 없는 저 방사율 부는 0.019의 값으로 계산되었다. 총 유효 방사율은 동일 평판 내의 두 값의 평균으로 가정하였을 때, 대전입자형 가변 방사율 라디에이터의 유효 방사율은 0.29~0.36의 값을 가지며 0.19의 유효 방사율 값을 가지는 MEMS 셔터 라디에이터보다 높은 유효 방사율을 가지게 되어 방열 성능을 향상시킬 수 있다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Radiation Exchange between Parallel Planes



(b) Radiation Exchange between Parallel Planes with Bead

Fig. 13. Schematic of Radiator using the Near-field Thermal Radiation

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 6. Designed Thermo-optical Property and Effective Emissivity of Variable Emissivity Radiator

	Open State		Close State	
	w/o Bead	with Bead	w/o Bead	with Bead
ε_1	0.9	0.9	0.9	0.9
ε_2	0.9	0.2	0.9	0.2
ε_3	0.9	0.02	0.02	0.9
ε_e	0.704	0.018	0.562	0.019

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2. 라디에이터 제작

1) MEMS 제작 공정

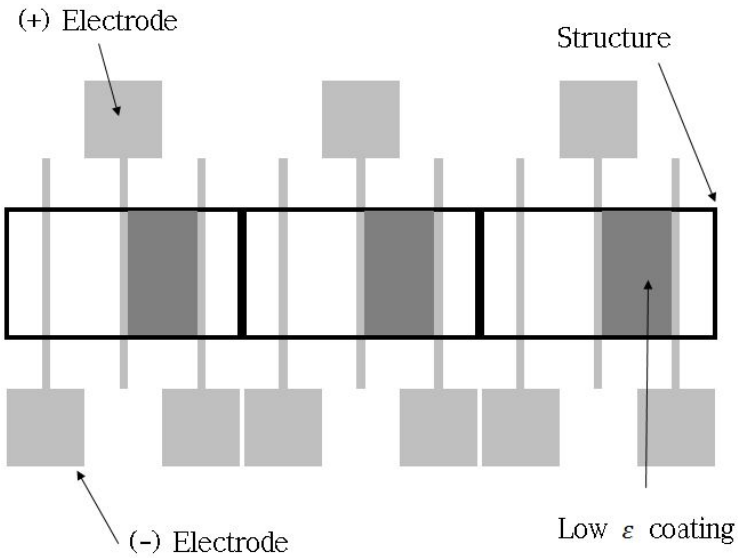
MEMS 공정을 통한 제작에 앞서 라디에이터를 제작하기 위해서는 재질, 코팅, 전극 위치 등 여러 가지 설계 변수들을 고려해야한다. 본 연구에서 제안한 가변 방사율 라디에이터의 제작 시 고려해야 할 사항으로는 전극 패턴이 중요하다. 전극 패턴은 비드의 움직임을 제어하는 주요 변수로서 +극과 -극의 배열에 따라 방열 면적과 저 방사율 코팅부 위치에 영향을 미치게 된다. Fig. 14 (a)와 같은 패턴의 경우 비드의 구동이 동일한 방향으로 움직이고 저 방사율 코팅부의 위치 또한 왼쪽에만 코팅되어 단순하지만 전압을 인가하기 위한 패드의 크기로 인하여 셀들의 간격이 증가하여 방열 면적이 감소하게 되는 문제, 그리고 비드가 근접한 -극 간의 척력에 영향을 받는 문제가 발생한다. 라디에이터는 방열 면적이 주요 변수로 작용하기 때문에 이를 해결하기 위해 Fig. 14 (b)와 패턴 같은 적용하였다. 각 셀 내부의 비드의 움직임은 서로 반대로 움직이고 저 방사율 코팅부의 위치는 Fig. 14 (b)와 같이 한 쌍씩 배열되어 코팅된다. 변경된 패턴은 전극 패드의 감소로 이어져 Fig. 14 (a) 대비 동일한 면적에서 약 1.33배의 방열 면적을 가지게 한다. 최종적으로 설계 변수들을 고려한 가변 방사율 라디에이터의 Mask는 Fig. 15와 같으며 (a)는 전극 패턴, (b)는 구조체 그리고 (c)는 저 방사율 코팅이다. 10 cm 규격의 원형 웨이퍼에 31.9 mm × 31.9 mm 크기로 가정한 라디에이터 시편이 4개가 제작되며 Mask의 양끝 모서리의 +마크를 배치하여 시편의 전극, 구조 그리고 코팅부가 조립 시 서로 일치하는지 확인하고 Mask 작업을 수행한다.

라디에이터의 MEMS 제작 공정은 Fig. 16의 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

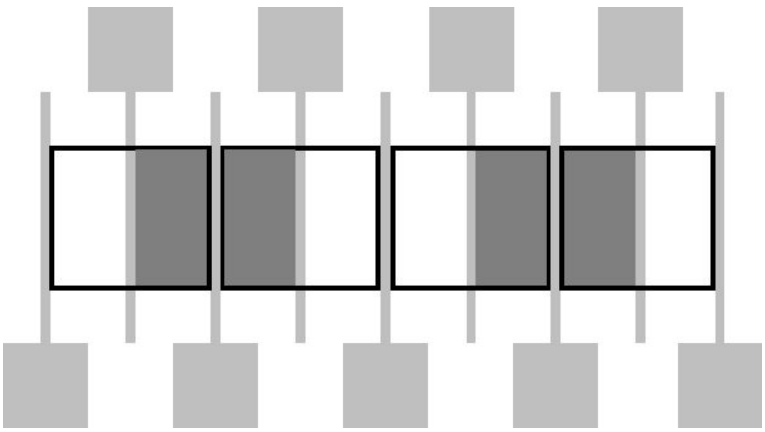
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

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. Fig. 17은 MEMS 공정을 통해 제작된 대전입자형 가변 방사율 라디에이터의 시편으로서 제작된 시편을 통해 가변 방사율 라디에이터의 열 제어 성능 평가를 수행하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



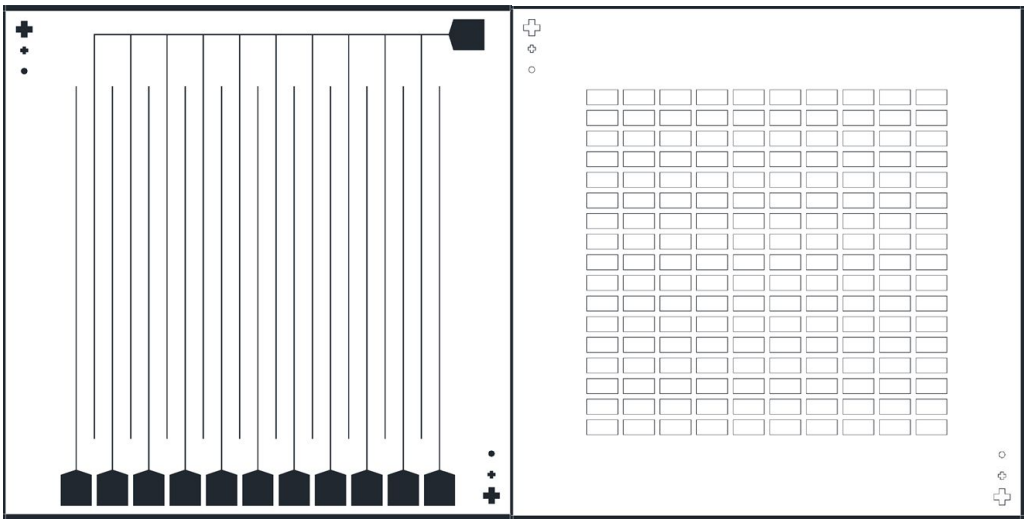
(a) Before



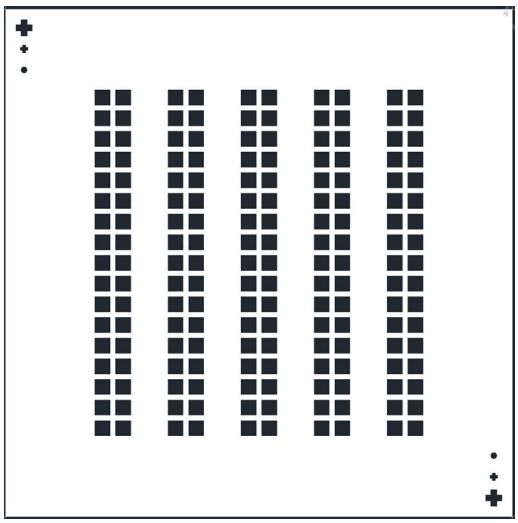
(b) After

Fig. 14. Difference of Radiation Area by Electrode Pattern

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Electrode (b) Structure



(c) Low Emissivity Coating

Fig. 15. Mask Shapes of Variable Emissivity Radiator

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

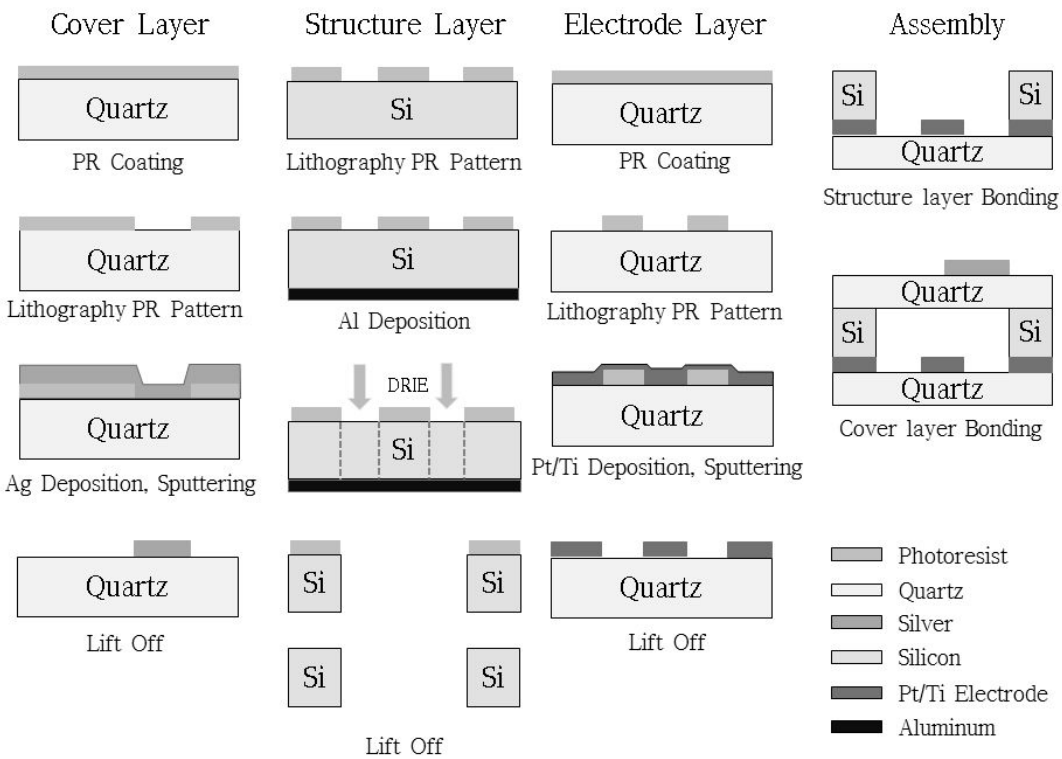


Fig. 16. Fabrication Process Flow of MEMS-based Charged Particle Type Variable Emissivity Radiator

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

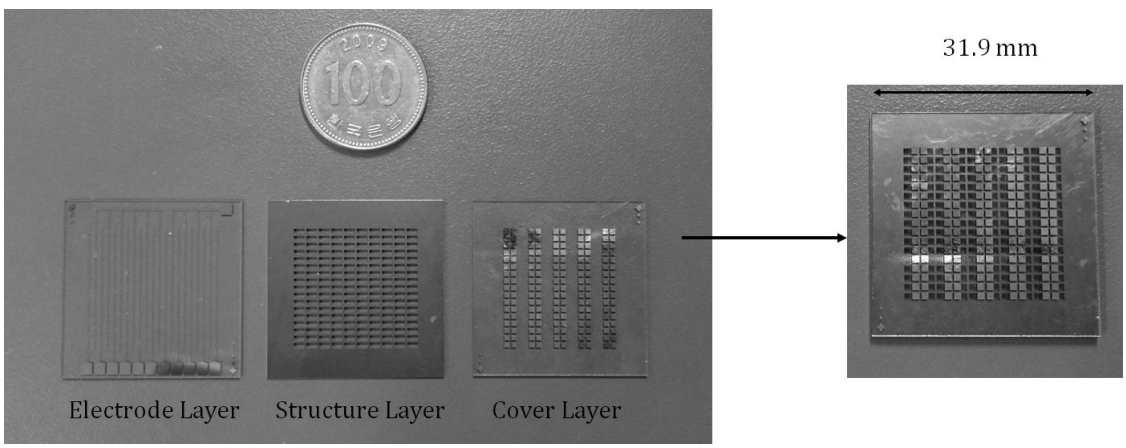


Fig. 17. Fabricated Test Specimen of MEMS-based Charged Particle Type Variable Emissivity Radiator by MEMS Process

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅳ. 라디에이터 열 제어 성능 평가

1. 라디에이터 성능 실험

1) 방사율 예측 실험

본 장에서는 앞서 선정된 방사율과 제작된 시편의 방사율이 일치하는지 확인하기 위해 IR 카메라를 통한 방사율 예측 실험을 수행하였다. IR 카메라를 통한 방사율 예측은 얇고 방사율을 알고 있으며 투과율 및 반사율을 최소화할 수 있는 테이프를 측정하고자 하는 시편에 부착하여 테이프가 붙여진 부분과 붙여지지 않은 시편 표면의 온도를 측정하여 방사율을 대략적으로 예측할 수 있다. Fig. 18은 라디에이터의 시험 구성으로서 온도 조절을 위한 히팅 플레이트 위에 알루미늄 블록을 배치하고 그 위에 방사율 측정을 위한 시편 및 라디에이터를 배치하는 형태로 구성하였다. IR 카메라를 통해 히팅 플레이트의 가열부를 확인하고 위에 알루미늄 블록을 배치하여 온도가 일정하게 증감 및 유지되도록 구성하였으며 두 면 사이에 서멀 그리스를 도포하여 열 전도성을 개선하였다. 또한 알루미늄 블록과 실험 시편 사이에도 서멀 그리스를 도포하여 열 전달을 원활하게 구성하였다. IR 카메라는 0.03℃의 분해능을 가지는 FLIR T460을 사용하였다. 실험은 실온(22℃)에서 히팅 플레이트를 70℃까지 가열하고 열 평형 상태에 도달하였을 때의 시편의 온도를 측정하였다.

먼저 비드의 방사율을 측정하기 위해 알루미늄 블록 위에 셔터로 적용되는 100~300 μm 크기의 비드를 배치하고 가운데에 테이프를 부착하여 실험을 진행하였다. 비드로 사용된 감마 알루미나의 방사율은 0.2~0.6 범위 값을 가지지만 Fig. 19 (a)의 결과, 온도차로부터 계산된 비드의 방사율은 0.87의 값으로 도출하였다. 이는 무수히 작은 비드들로 인하여 100~300 μm의 그루브 형태를 가지는 평판의 방사율처럼 높게 측정된 것으로 판단된다. 따라서 알루미나 비드의 방사율을 측정하기 위해서는 평판으로 실험을 수행하여야 한다. Fig. 19 (b)는 알루미나 평판으로 재측정한 결과, 온도차로부터 예측된 방사율은 0.76으로서 상기의 결과보다 감소하였지만 0.2~0.6보다 높은 방사율로 측정시 반사율과 측정각 등을 고려한 정확한 측정 방법이 아니기에 추후 정확한 방사율 측정 및 참고 문헌 조사가 요구된다.

Fig. 20은 상층부 덮개인 쿼츠 웨이퍼와 저 방사율 코팅부인 은의 방사율을 측정한

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

것으로 온도차로부터 예측된 방사율은 쿼츠 0.86, 은 0.29의 값으로 쿼츠(ε=0.8~0.9)와 은(ε=0.02~0.1)의 방사율은 다소 유사하게 측정되었다. 이 또한 측정시 반사율 및 측정각 등의 여러 가지 변수들의 영향과 은 코팅부가 1 mm×1 mm 크기의 작은 크기를 가지기 때문에 IR 카메라가 정확히 측정하지 못하여 오차가 발생한 것으로 판단된다. 예측한 방사율의 값으로 유효 방사율을 계산하였을 경우를 Table. 7에 나타내었고, Open 상태 시 고 방사율 부는 0.67, 비드가 수납된 저 방사율 부는 0.234이며, Close 상태 시 비드가 수납된 고 방사율 부는 0.603, 저 방사율 부는 0.256으로 알루미나 비드의 높은 방사율로 인해 방사되는 열 에너지를 차폐하지 못하여 비드의 위치에 따른 가변 방사율 효과를 발휘하지 못하게 된다. 따라서 방사율 가변을 위한 비드는 매우 낮은 방사율을 가지며 대전 특성이 좋은 은, 금 등의 금속성 재질로 선정되어야 한다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

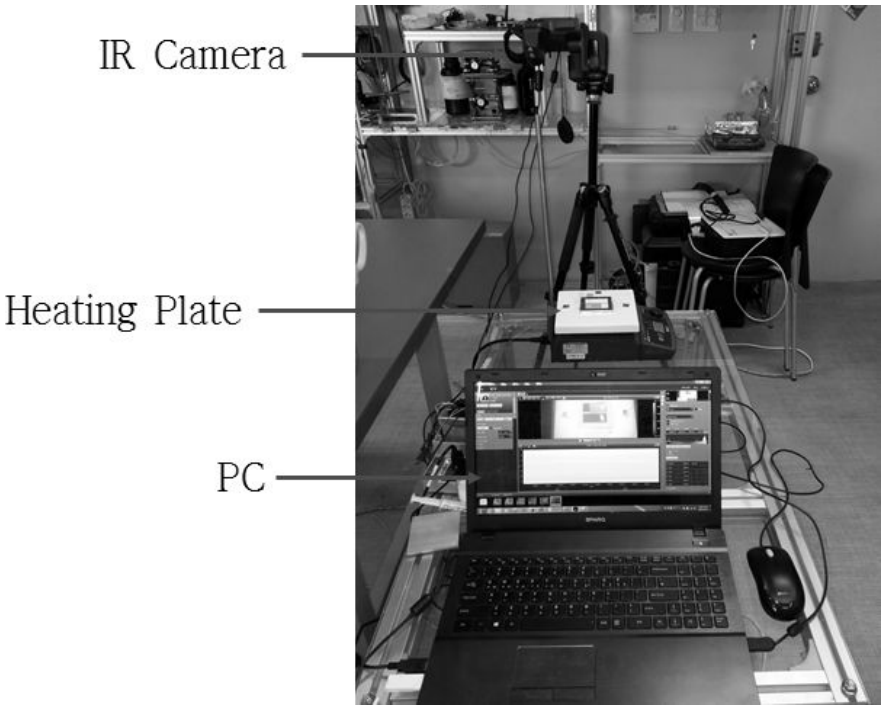
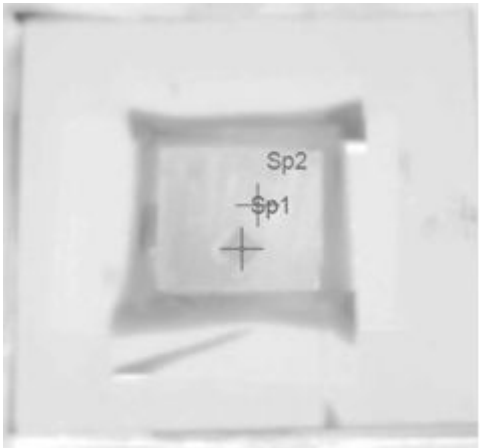


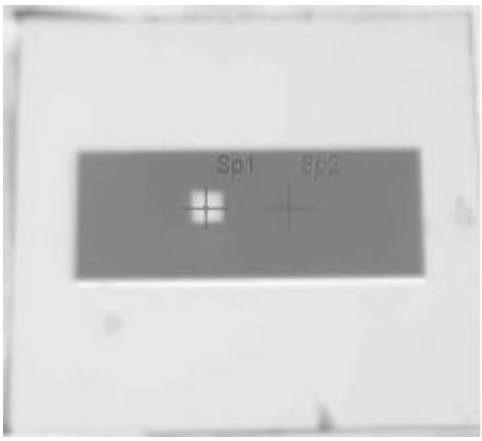
Fig. 18. Test Configuration by using IR Camera

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



Sp1 = 61.6℃
Sp2 = 62.8℃
$\varepsilon_{predict}$ = 0.87

(a) Powder Type

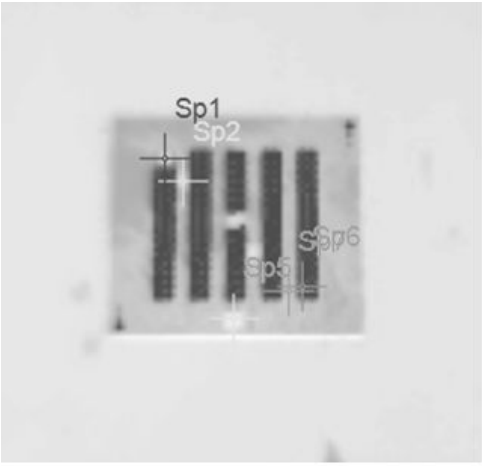


Sp1 = 63℃
Sp2 = 55.6℃
$\varepsilon_{predict}$ = 0.76

(b) Plate Type

Fig. 19. Temperature and Predicted Emissivity of Alumina Bead by Type

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



Sp1 = 63.4℃

Sp2 = 62.8℃

Sp5 = 64.3℃

Sp6 = 35.3℃

Sp7 = 61.6℃

Silver $\varepsilon_{predict}$ = 0.29

Quartz $\varepsilon_{predict}$ = 0.86

Fig. 20. Temperature and Predicted Emissivity of Quartz Wafer and Silver Coating Surface

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 7. Predicted Thermo-optical Property and Effective Emissivity of Test Specimen

	Open State		Close State	
	w/o Bead	with Bead	w/o Bead	with Bead
ε_1	0.86	0.86	0.86	0.86
ε_2	0.86	0.76	0.86	0.76
ε_3	0.86	0.29	0.29	0.86
ε_e	0.67	0.234	0.259	0.603

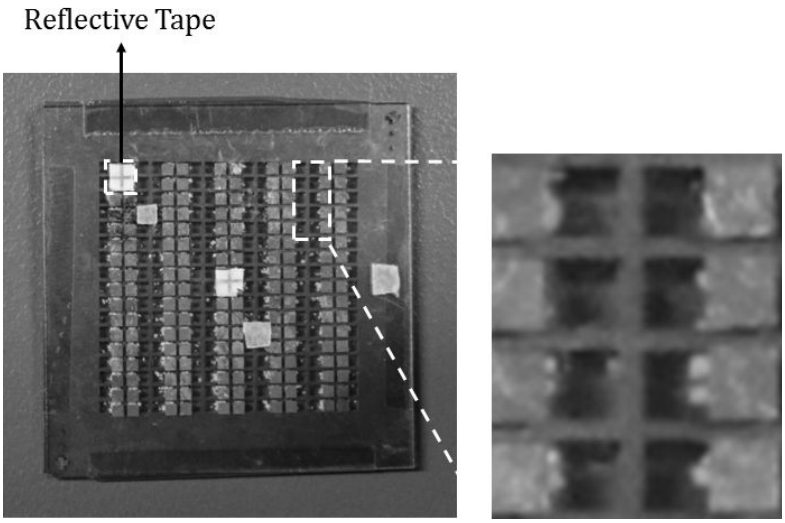
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2) 열 제어 성능 실험

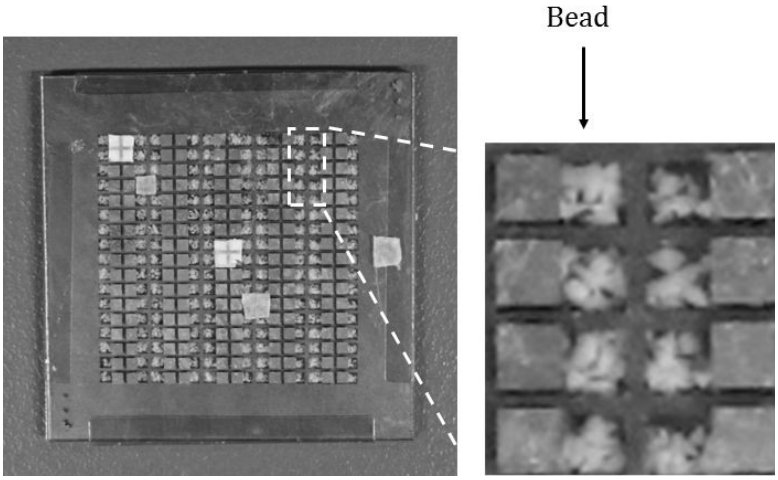
비드의 위치 변화에 따른 MEMS 기반 가변 방사율 라디에이터의 열 제어 성능을 확인하기 위해 Fig. 18과 동일한 실험 구성으로 실험을 수행하였다. 알루미늄 블록 위에 서멀 그리스를 도포하고 그 위에 라디에이터 시편을 배치하였으며 온도는 IR 카메라를 활용하여 측정하였다. 실제 표면의 온도를 확인하기 위하여 Fig. 19, 20과 같이 측정하고자 하는 지점인 시편의 왼쪽 상단과 중앙의 저 방사율 코팅부와 고 방사율 부에 투과율과 반사율을 최소화할 수 있는 테이프를 붙여 온도를 측정하였다. 시험 온도는 앞서 수행한 온도인 70℃와 복사에 의한 열 전달 효과를 높이기 위한 150℃ 두 가지 경우로 수행하였다. 그리고 온도 측정은 온도의 변화가 없는 구간에서 50초 간격으로 15번 측정하였고 비드 위치에 따른 온도 비교를 위해 Fig. 21과 같이 비드가 저 방사율 코팅 아래에 있는 Open 상태와 비드가 고 방사율 부분 아래에 있는 Close 상태를 측정하였다.

Fig. 22 (a)는 Open, Close 상태의 IR 사진으로서 Sp1, Sp3는 저 방사율 코팅부, Sp2, Sp4는 고 방사율 코팅부, Sp5는 구조체 부분이다. Fig. 22, 23은 측정 결과, Table. 8은 온도의 평균값으로, 먼저 히팅 플레이트가 70℃인 경우, Open 상태의 경우 59℃대의 분포, Close 상태의 온도는 61℃대의 분포로 비드의 위치에 따른 방사율 변화로 인한 온도차가 발생하는 것을 확인하였다. 그리고 150℃인 경우에도 Open 상태와 Close 상태의 온도차가 발생함으로부터 비드에 의한 열 제어가 가능함을 확인하였다. 하지만 실험 조건이 우주 환경 내의 위성의 열 전달과 같이 전도, 복사로만 이루어지는 것이 아니기 때문에 두 상태의 온도차가 미미한 것으로 판단된다. 또한 저 방사율 코팅부와 고 방사율 부를 포함한 상층부가 500μm의 얇은 두께로 인하여 쉽게 열이 전도되는 것과 비드가 채워진 방열 면적 외의 넓은 구조체 영역에서 전도되는 열로 인하여 두 부분의 온도차가 미미한 것으로 판단된다. 구조체 영역은 고온 조건에서 쿼츠의 높은 방사율과 넓은 방열 면적으로 열 제어 성능을 향상시킬 수 있지만 낮은 방사율을 필요로 하는 저온 영역에서는 유효 방사율을 높이는 문제점이 생기기 때문에 라디에이터의 가변 열 제어 효과를 위해서는 구조체의 면적을 감소시켜 전도에 의한 열 전달을 최소화한다면 비드에 의한 열 제어가 가능할 것으로 판단된다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



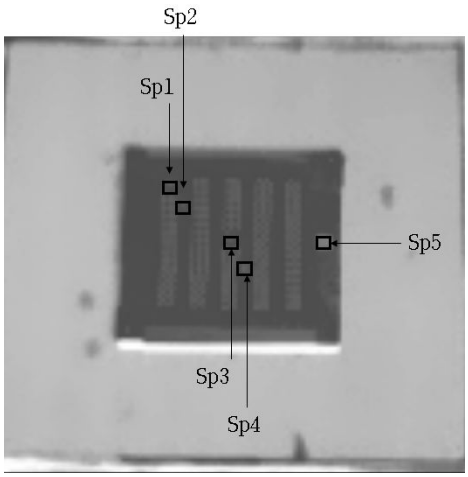
(a) Open State (Bead is Located below Low Emissivity Surface)



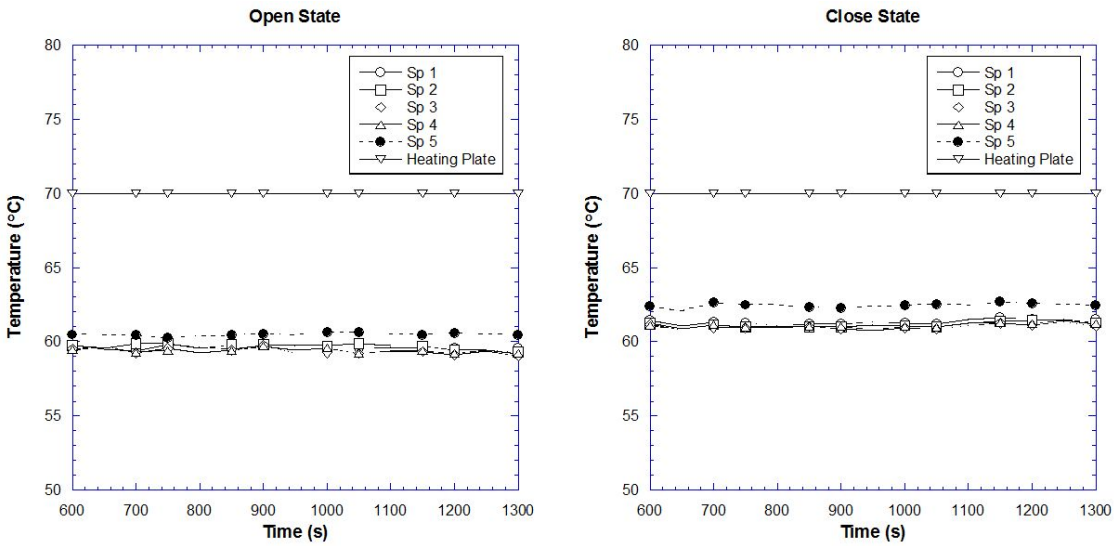
(b) Close State (Bead is Located below High Emissivity Surface)

Fig. 21. Test Specimen of Variable Emissivity Radiator

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) IR Image of Variable Emissivity Radiator



(b) Temperature Results of Variable Emissivity Radiator by Location of Bead

Fig. 22. IR Image and Temperature Results of Variable Emissivity Radiator by Location of Bead (Heating Plate = 70℃)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

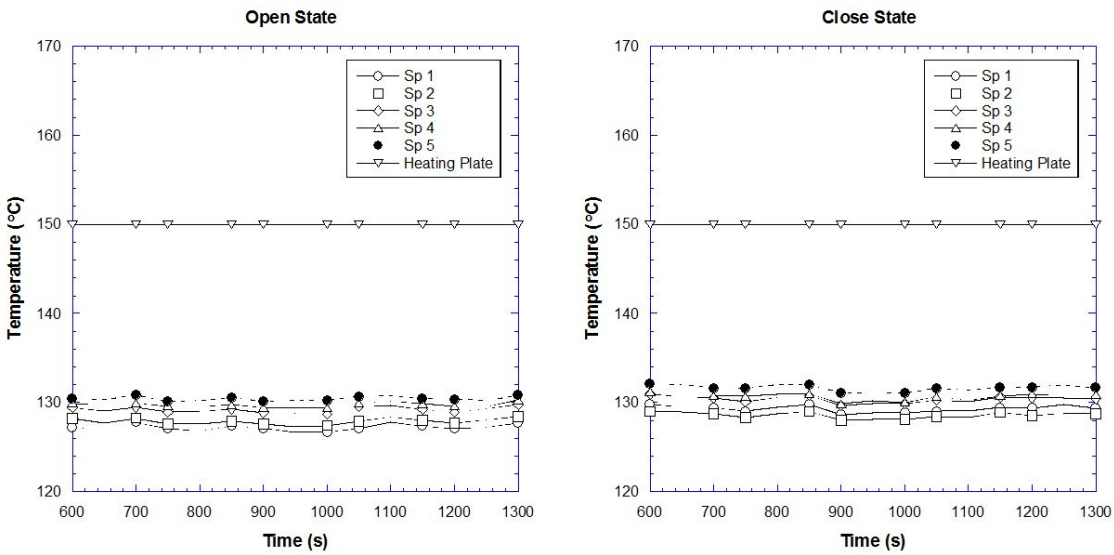


Fig. 23. Temperature Results of Variable Emissivity Radiator by Location of Bead (Heating Plate = 150℃)

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Table 8. Average Temperature by State and Measurement Point

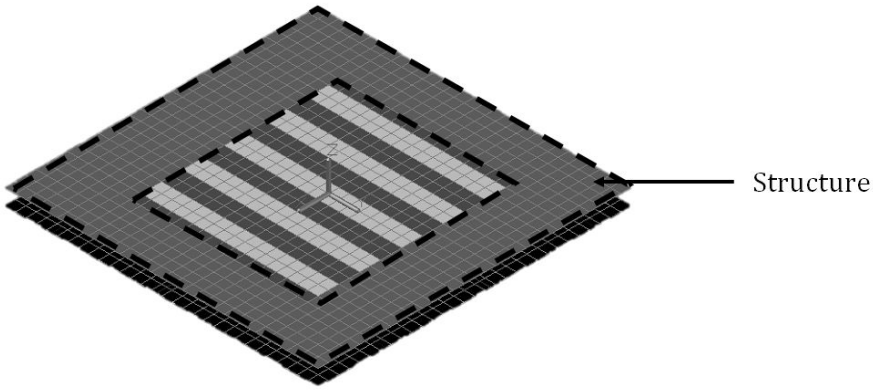
	Sp 1	Sp 2	Sp 3	Sp 4	Sp 5
Open State (70℃)	59.61	59.68	59.36	59.41	60.47
Close State (70℃)	61.34	61.15	61.01	61.09	62.44
Open State (150℃)	127.19	127.87	129.19	129.73	130.41
Close State (150℃)	129.29	128.58	130.35	130.66	131.61

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

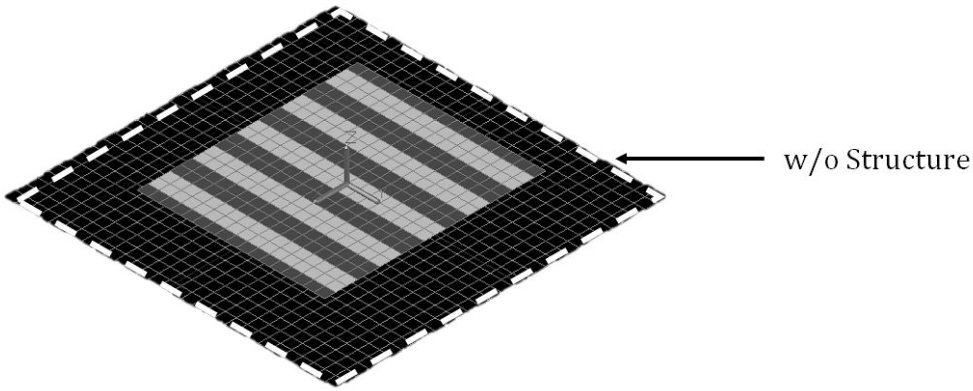
3) 라디에이터 열 해석

실험 결과로부터 가변 방사율 라디에이터를 개선하기 위해 Fig. 24와 같이 비드가 채워진 방열 면적 외의 구조체 부분을 구현한 수학적 열 모델과 이를 축소한 수학적 열 모델 두가지를 구축하여 열 해석을 수행하였다. 수학적 열 모델은 가변 방사율 라디에이터와 동일한 셀의 개수와 크기를 가지며 Open, Close 상태의 비드의 위치 또한 고려하여 구축하였고, 실험 환경과 동일한 환경 조건인 히팅 플레이트가 70℃로 인가되는 상태에서의 열 해석을 수행하였다. Fig. 25의 해석 결과, 제작된 시편과 같은 Fig. 24 (a) 모델의 경우, Open, Close 두 가지 해석 결과 모두 실험 결과와 유사하게 고 방사율 부와 저 방사율 코팅부가 비드의 이동에 따른 온도차가 미미하였다. 하지만 구조체의 면적을 축소시켜 전도율에 의한 영향을 줄인 (b) 모델의 결과, Open 상태에서 고 방사율 부는 47.42℃, 저 방사율 코팅부는 55.79℃ 이며 Close 상태에서는 고 방사율 부는 51.39℃, 저 방사율 코팅부는 54.21℃의 온도로 비드 위치에 따라 약 4℃의 온도차를 나타내었다. 이와 같은 결과는 바닥층에서 전달되는 열이 방열 면적 외의 구조체를 통하여 열 전달량이 증가하여 약 15℃ 이상 상승함을 알 수 있다. 따라서 열 해석 결과와 같이 가변 방사율 라디에이터의 방열 면적 외의 구조체 면적을 축소하여 개선된다면, 전도에 의한 열전달이 감소하여 라디에이터의 온도가 상승하는 문제를 해결할 수 있으며 비드 위치에 따라 온도차가 발생하여 가변 방사율 열 제어가 가능할 것으로 판단된다. 개션된 가변 방사율 라디에이터의 열 모델을 기반으로 Fig. 26 (a)와 같이 기존의 30mm × 30mm에서 300mm × 300mm의 크기로 개수를 확장하여 3장의 열 설계에서 수행한 열 모델에 적용하였고 궤도 열 해석을 수행하여 설계된 열 해석 결과와 비교를 하였다. Fig. 26 (b)의 해석 결과, 개선된 가변 방사율 라디에이터는 전극 패드의 부착을 위한 방열 면적의 감소로 인하여 기존의 결과보다 약 3℃ 상승하였지만 기존의 가변 방사율 라디에이터 열 모델과 같이 고온 조건에서는 방열을 수행하고 저온 조건에서는 비드가 고 방사율 코팅부로 이동하여 저 방사율 상태로 유지되어 추가적인 히터 전력을 요구하지 않는 것으로 부터 MEMS기반 가변 방사율 라디에이터의 열 제어 가능성을 확인하였다.

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



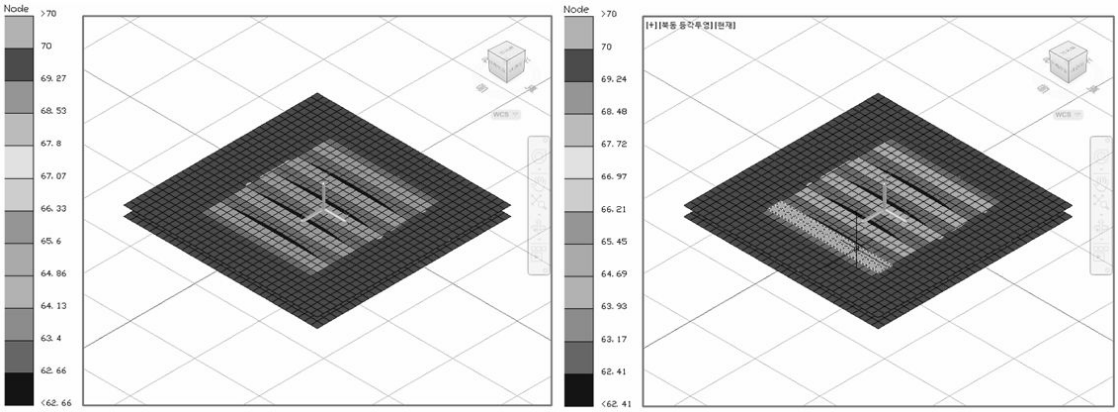
(a) Current Thermal Mathematical Model



(b) Modified Thermal Mathematical Model

Fig. 24. Thermal Mathematical Model of Improved Variable Emissivity Radiator

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



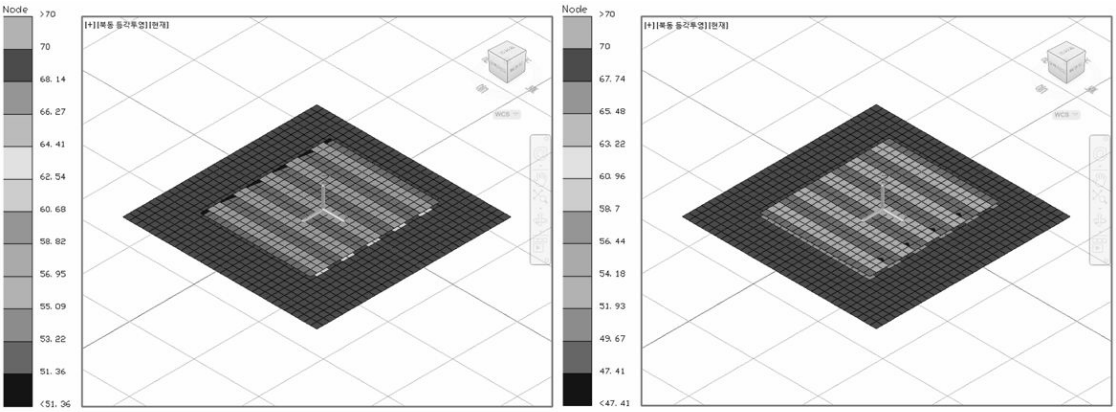
Open State

$T_{\varepsilon_{high}}$ = 62.63℃, $T_{\varepsilon_{low}}$ = 65.15℃

Close State

$T_{\varepsilon_{high}}$ = 62.85℃, $T_{\varepsilon_{low}}$ = 63.85℃

(a) Current Structure



Open State

$T_{\varepsilon_{high}}$ = 47.42℃, $T_{\varepsilon_{low}}$ = 55.79℃

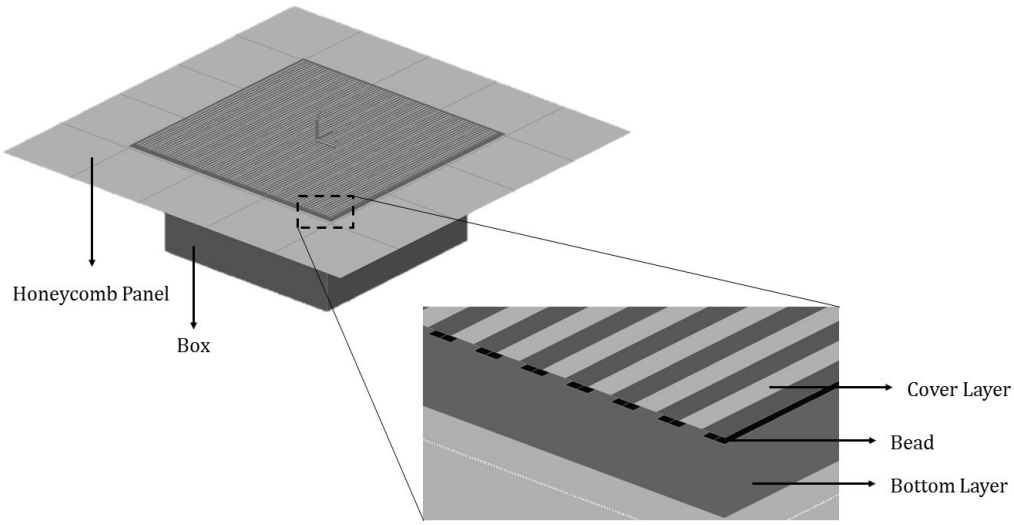
Close State

$T_{\varepsilon_{high}}$ = 51.39℃, $T_{\varepsilon_{low}}$ = 54.21℃

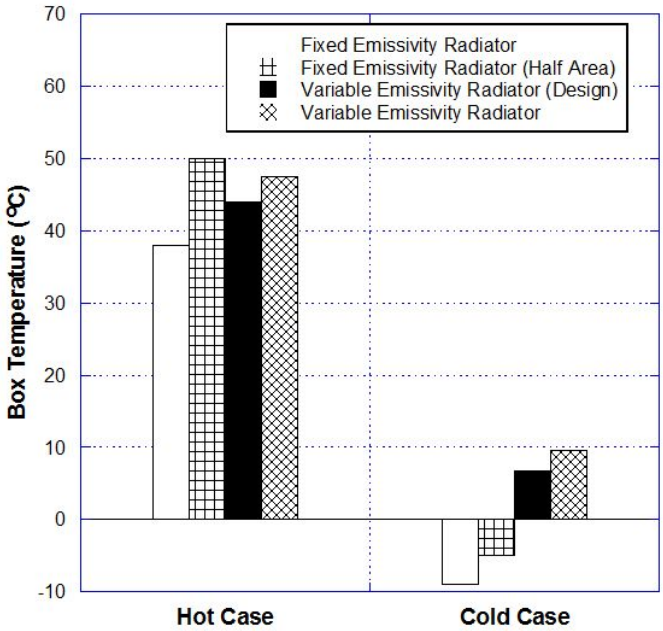
(b) Modified Structure

Fig. 25. Thermal Analysis Result by Heat Transfer of Structure

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



(a) Variable Emissivity Radiator applied to Thermal Mathematical Model



(b) Analysis Results

Fig. 26. Temperature Comparison between Variable Emissivity Radiator and Fixed Emissivity Radiator

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ⅴ. 결론

기존의 MEMS 가변 방사율 라디에이터는 전력을 지속적으로 공급하여 변경된 방사율을 유지하였고 구동부가 방열면 내에 존재하여 방열 면적을 감소시키는 단점을 해결하기 위해 전기장의 힘에 의해 비드가 이동하고 셀 격벽에 부착되게 하는 영상력에 의해 격벽에 고정되는 원리를 적용한 대전입자형 가변 방사율 라디에이터를 제안하였고 이에 대한 열 설계 및 열 제어 성능 평가에 관하여 연구하였다.

제안된 가변 방사율 라디에이터의 이론 분석과 구동 실험을 통해 비드의 크기와 전극 간격이 비드를 움직이는 구동력과 격벽에 고정하는 영상력에 미치는 영향을 분석하였다. 그리고 두 개의 -극 중간에 +극을 배치하는 전극 배치로 개선하여 낮은 구동 전압과 높은 구동 재현성을 확보하였고 가변 방사율 라디에이터의 방사율 가변을 위한 구동 개념의 적용 가능성을 확인하였다.

그리고 대전입자형 가변 방사율 라디에이터의 설계를 위해 수학적 열 해석 모델을 통해 덮개의 재질과 높이, 광학 물성치 그리고 알루미나 비드를 선정하였고 동일한 방열 면적을 가지는 고정 방사율 라디에이터와 비교 열 해석을 수행하였다. 해석 결과, 고온에서 가변 방사율 라디에이터는 고정 방사율 라디에이터처럼 방열을 수행하고 저온에서는 낮은 방사율로 가변하여 고정 방사율 라디에이터보다 10℃ 이상의 온도와 10W 이상의 히터 전력을 확보 가능하여 제안한 가변 방사율 라디에이터의 효율적인 열 제어 유효성을 확인하였다. 해석으로부터 선정된 재질 및 광학 물성치를 고려하여 MEMS 공정을 통해 가변 방사율 라디에이터 시편을 제작하였고 유효 방사율을 예측하였다. 대전입자형 가변 방사율 라디에이터의 유효 방사율은 0.29~0.36의 값을 가지게 되어 0.19의 유효 방사율 값을 가지는 MEMS 셔터 라디에이터보다 높은 유효 방사율 값을 가지는 것을 확인하였다.

그리고 제작된 가변 방사율 라디에이터 시편의 열 제어 성능 평가를 위해 비드의 위치에 따른 Open, Close 상태의 온도를 측정하였을 때 제작된 라디에이터는 Open, Close 상태 시 두 상태는 2℃의 온도차로 미미하지만 비드에 의한 열 제어가 가능함을 확인하였다. 이를 토대로 MEMS로 제작된 시편의 개수를 확장하여 궤도 열 해석을 수행한 결과, 고온 조건에서는 방열을 수행하고 저온 조건에서는 비드가 고 방사율 코팅부로 이동하여 저 방사율 상태로 유지되어 MEMS기반 대전입자형 가변 방사율 라디

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

에이터의 열 제어 가능성을 확인하였다.

실험 결과를 토대로 제안된 대전입자형 가변 방사율 라디에이터의 비드 재질을 금이나 은 등 방사율이 매우 낮은 금속성 재질로 선정하여 유효 방사율의 차를 증가시키고 구조체에 의한 방열 면적을 감소시킨다면 열 제어 효과를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

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] 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

[3] 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

[4] 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

[5] 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

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

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

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

[9] 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

[10] M. Darrin, R. Osiander, J. Lehtonen, D. Farrar, "Novel Micro ElectroMechanical

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

System (MEMS) Packaging for the Skin of the Satellite", *2004 IEEE Aerospace Conference*, 2004

[11] S. H. Kwon, Y. H. Kim, W. K. Kim, J. I. Han, "Analysis of Force Acting on a Charged Particle", *2007 Proceedings of the KIEE Conference*, 2007

[12] K. Y. Kwon, S. W. Kim, I. S. Hwang, Y. C. Kim, "The Driving Method of a Charged Particle Type Display", *Journal of Korea Academia-industrial Cooperation Society*, 2008, Vol. 9, No. 1, pp. 35-40

[13] G. W. Kim, S. Y. Cho, S. K. Chang, Y. C. Kim, "A Driving Mechanism Analysis of Charged Particle Type Electronic Paper", Journal of Korea Knowledge Information Technology Society, 2011, Vol. 6, No. 5, pp. 75-80

[14] C. U. Lee, H. W. Ha, H. U. Oh, T. K. Kim, "Experimental Validation of MEMS-based Variable Emissivity Radiator for Space Applications", *2014 The Korean MEMS Conference*, 2014

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

[16] 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

[17] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, D. P. Dewitt, "Introduction to Heat Transfer", *John Wiley & Sons Inc.*, 2011

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

【연구 실적】

1. 논문

[1] **하헌우**, 오현웅, “영구자석 안정화 방식을 적용한 극초소형 위성의 자세제어 성능분석”, 항공우주시스템공학회지, 2013, 제 7권, 제 1호, pp. 44-48

[2] 권성철, 정현모, **하헌우**, 한성현, 이명재, 전수현, 박태용, 강수진, 채봉건, 장수은, 오현웅, 한상혁, 최기혁, "우주기반기술 검증용 극초소형 위성 STEP Cube Lab.의 시스템 개념설계", 한국항공우주학회지, 2014, 제 42권, 제 5호, pp. 430-436

[3] 채봉건, **하헌우**, 장수은, 오현웅, "상용 반이중 통신방식 UHF대역 송수신겸용 안테나를 적용한 큐브위성의 통신시스템 구현", 한국항공우주학회지, 2014, 제 42권, 제 6호, pp. 522-528

[4] 강수진, **하헌우**, 오현웅, "우주기반기술 검증을 위한 극초소형 위성 STEP Cube Lab.의 궤도 열해석", 한국항공우주학회지, 2014, 제 42권, 제 9호, pp. 795-801

[5] **하헌우**, 강수진, 조문신, 오현웅, "MEMS 기반 고체 추력기의 마이크로 점화기를 이용한 궤도 열제어", 한국항공우주학회지, 2014, 제 42권, 제 9호, pp. 802-808

[6] **하헌우**, 강수진, 한성현, 김태규, 오현웅, "정전 구동형 MEMS 기반 가변 방사율 라디에이터의 광학 물성치 최적화 설계", 한국항공우주학회지, 2015, 제 43권, 제 2호, pp. 149-155

2. 학회 발표

[1] 권성철, **하헌우**, 정현모, 한성현, 이명재, 전수현, 김영욱, 박태용, 강수진, 차진영, 장수은, 채봉건, 오현웅, “우주기반기술 검증용 STEP Cube Lab.의 시스템 설계”, 한국우주과학회 2013 추계학술대회

[2] **하헌우**, 정현모, 채봉건, 장수은, 오현웅, “UHF 송수신 겸용 안테나를 적용한 큐브위성의 통신계 설계”, 항공우주시스템공학회 2013 추계학술대회

[3] 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

[4] 이창욱, **하헌우**, 오현웅, 김태규, “인공위성 열 제어를 위한 MEMS기반 가변 방사율 라디에이터의 실험적 검증”, 한국마이크로 중력학회 2014 춘계학술대회

조선대학교 CHOSUN UNIVERSITY

[5] **하헌우**, 강수진, 이창욱, 김태규, 오현웅, “가변 방사율 라디에이터를 이용한 궤도 열제어”, 항공우주공학회 2014 춘계학술대회

[6] **하헌우**, 한성현, 강수진, “큐브위성 탑재를 위한 MEMS 기반 고체 추력기의 마이크로 점화기를 이용한 궤도 열제어”, 제 2회 2014 한국항공우주학회 학부생 논문대회

[7] **하헌우**, 오현웅, “우주용 가변 방사율 라디에이터 개발동향”, 항공우주시스템공학회 2014 춘계학술대회

[8] 강수진, **하헌우**, 한성현, 서정기, 오현웅, “Verification of Functional Performance for STEP Cube Lab. Payloads through Thermal Vacuum Test”, 한국우주과학회 2014 추계학술대회

[9] **하헌우**, 한성현, 이창욱, 김태규, 오현웅, “MEMS 기반 가변 방사율 라디에이터의 광학 물성치 최적화 설계”, 한국항공우주학회 2014 추계학술대회

[10] **Heon-Woo Ha**, Soo-Jin Kang, Sung-Hyeon Han, Tae-Gyu Kim, Hyun-Ung Oh, "Thermal Design for Electrophoresis Actuating MEMS-based Variable Emissivity Radiator", Proceedings of 2015 Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science

3. 특허

[1] 김태규, 오현웅, 이창욱, **하헌우**, “멤스 기반 우주용 가변 방사율 라디에이터”, 등록 -101491949

4. 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] **하헌우**, 박민현, 이승용, 권성철, 정석만, 임현우, 정현모, 전수현, “히팅 와이어 커팅 방식의 단분리 장치를 적용한 분리시간 조절형 2단 물로켓 설계”, 2013, 조선대학교 캡스톤디자인 경진대회, 최우수상

[4] **하헌우**, 학과 공로상, 2014

[5] **하헌우**, 한성현, 강수진, “큐브위성 탑재를 위한 MEMS 기반 고체 추력기의 마이크로

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

점화기를 이용한 궤도 열제어", 2014, 제2회 항공우주공학회 학부생 논문경진대회, 준우수상

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

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

감사의 글

먼저 항상 실험실에서 부족한 저를 이끌어주시고 많은 가르침과 조언 그리고 기회를 주시는 지도 교수님이신 오현웅 교수님께 깊은 감사를 드리며, 정성껏 심사를 해주시고 조언을 주신 김태규 교수님, 이종광 교수님께 감사드립니다.

실험실 생활은 모든 것이 낯설고 익숙하지 않던 것이었지만 가족같이 지내고 많은 도움을 준 실험실 식구들인 현모, 수진이, 봉건이, 태용이, 명재형, 수은이, 수현이, 성철이에게 감사드립니다.

그리고 항상 물심양면으로 도와주시고 믿고 지켜봐주신 부모님과 형에게 감사드립니다. 언제나 곁에서 응원과 격려를 아끼지 않고 위로해주며 이해해주는 은정이에게 고마움을 전합니다.

심사를 마치고서 떠나는 이야기를 듣다 보니 실험실에서의 추억들이 떠오릅니다. 아무 것도 없던 시절에서부터 지금까지 수많은 지식과 경험을 쌓을 기회들이 있었는데 제가 부족하여 완벽히 습득하지 못한 것에 대해 많은 아쉬움이 남아있습니다. 하지만 이것 또한 경험으로 삼고 스스로에게 부끄럽지 않고 후회하지 않도록 더욱더 증진하도록 하겠습니다.