

레이돔 표면에 금속 나노코팅을 적용한 적외선 저피탐 성능특성 연구

이용우¹⁾ · 장인중¹⁾ · 남주영¹⁾ · 배형모¹⁾ · 조형희^{*,1)}

¹⁾ 연세대학교 기계공학과

Analysis on Infrared Stealth Performance of Metal Nano-coating on Radome Surface

Yongwoo Lee¹⁾ · Injoong Chang¹⁾ · Juyeong Nam¹⁾ · Hyung Mo Bae¹⁾ · Hyung Hee Cho^{*,1)}

¹⁾ Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Korea

(Received 13 December 2021 / Revised 16 February 2022 / Accepted 18 April 2022)

Abstract

Infrared stealth technology used in aircraft is applied to reduce the infrared signal by controlling surface temperature and emissivity using internal heat sink, low emissivity material or metamaterial. However, there is one part of the aircraft where the use of this technology is limited, and that is the radome. Especially, radome should have transmittance for the specific radio frequency, therefore, common stealth technology such as emissivity control surfaces cannot be applied to radome surface. In this study, we developed metal nano-coating for infrared stealth which is applicable to radome surface. We designed slot-type pattern for frequency selective transmission in X-band, and also controlled thickness of metal nano-coating for long wavelength infrared emissivity control. As a result, our infrared stealth surface for radome has 93.2 % transmittance in X-band and various infrared emissivities from 0.17 to 0.57 according to nano-coatings thickness. Also, we analyzed infrared signature of radome through numerical simulation, and finally reduced contrast radiant intensity by 97.57 % compared to polyurethane surface.

Key Words : Radome(레이돔), Metal Nano-coating(금속 나노코팅), Infrared Signature(적외선 신호), Frequency Selective Surface(주파수 선택 표면), Numerical Analysis(수치해석)

기 호 설 명

CRI : Contrast Radiance Intensity, 배경대비복사

RCS : Radar Cross Section, 레이더 단면적

FSS : Frequency Selective Surface, 주파수 선택 표면

I : Radiance intensity, 복사강도

A : 적외선 탐지기 화상 투영 면적

P : Pitch

W_p : patch width

* Corresponding author, E-mail: hhcho@yonsei.ac.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

W_g : grid width
 PU : polyurethane, 폴리우레탄
 M : mach number, 마하 수
 ϵ : emissivity, 방사율
 τ : transmissivity, 투과율
 $\tan\delta$: loss tangent, 손실 탄젠트
 ϵ : permittivity, 유전율
 λ : wavelength, 파장
 t_{Al} : 금속 나노코팅 두께(nm)

1. 서론

과학기술이 발달함에 따라 현대전에서는 스텔스 기술의 영향력이 전쟁의 승패를 좌우하는 능력으로 중요하게 여겨지고 있다. 전투기에 적용되는 스텔스 기술은 크게 레이더 스텔스 기술과 적외선 스텔스 기술 두 가지로 나뉜다. 레이더 스텔스 기술은 반사되어 돌아오는 신호를 줄여 레이더 반사 단면적(Radar Cross Section, RCS)을 저감하는데 그 목적이 있으며 주로 형상설계 및 전파흡수재료와 주파수 선택 표면(Frequency Selective Surface, FSS)을 도입하여 스텔스 성능을 구현할 수 있다^[1]. 반면, 적외선 스텔스 기술은 전투기 자체에서 방사되는 적외선 신호와 배경과의 신호 차이를 줄이는 데 목적이 있다. 물체에서 방사되는 적외선 신호는 온도와 방사율의 함수이므로 전투기 내부에 heat sink로 작용할 수 있는 장치를 활용하여 표면온도를 저감하거나 방사율이 낮은 물질을 사용하여 방사율을 낮춤으로써 적외선 스텔스 성능을 구현할 수 있다^[2]. 전투기에 적용되는 스텔스 기술은 하나의 파트에 하나의 기술만 적용되는 것이 아니라 레이더 스텔스 기술과 적외선 스텔스 기술을 복합적으로 적용하여 최적의 스텔스 성능을 구현한다.

일반적으로 전투기에 적용되는 이러한 스텔스 기술을 복합적으로 적용하는데 제한이 되는 파트가 있는데 바로 레이돔이다. 레이돔은 레이더 대역의 전파투과 성능이 필수적으로 유지되어야 하는 특성 때문에 투과 특성에 영향을 줄 수 있는 전파흡수구조, 저방사율 물질 등을 통한 스텔스 성능구현이 제한된다^[3]. 이러한 이유 때문에 레이돔만을 타겟으로 하는 레이더 스텔스 기술인 FSS가 적용되어 특정 주파수 대역의 투과 특성을 유지함과 동시에 사용하지 않는 주파수 대역은 차단함으로써 RCS를 줄여 스텔스 성능을 구현

하고 있다. 그러나 레이돔에 적용되는 적외선 스텔스 기술에 대해서는 최신 5세대 이후 최신 전투기에 적용되어 있으나 구체적인 기술 정보는 공개되지 않았다^[1].

한편, 적외선 신호는 복사 열전달 방정식에 의해 표면 방사율과 온도에 의해 결정되며, 첨단부 공력가열에 의해 8 ~ 12 μm 대역의 장파장 대역의 신호가 주로 방사된다^[3]. 적외선 유도탄은 타겟에서 자체적으로 방사되는 적외선 신호와 배경의 적외선 신호의 차이인 배경 대비 복사(Contrast Radiant Intensity, CRI)를 이용하여 타겟을 탐지·추적한다. 그렇기 때문에 타겟은 추적당하고 있다는 사실을 인지하기 힘들어 대응 시간이 부족하게 된다^[4,5]. 이러한 이유로 전투기의 적외선 신호 분석과 적외선 스텔스에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다. Bae et al.^[2]과 Kim et al.^[6]에 따르면 전투기의 경우 표면방사율, 태양/대기/지구복사 등의 환경조건, 지표/하늘 등의 배경조건, 비행조건에 따라 CRI가 최소가 되는 표면 방사율 최적점이 존재함을 확인하였고, 따라서 레이돔 위장 연구 시에도 해당 부분을 고려해야 함을 확인하였다.

이에 본 연구에서는 레이돔에 적용이 가능하도록 X-band 투과특성을 가지면서 적외선 방사율 제어가 가능한 적외선 스텔스 표면을 개발하고, 위장 표면을 레이돔에 적용했을 때의 적외선 신호 특성을 분석하였다.

2. 본론

본 연구에서는 레이돔 적용을 위하여 주파수 선택 투과 특성과 적외선 방사율 제어가 가능한 금속 나노코팅을 설계 및 제작하고, 이를 레이돔 표면에 적용했을 때 레이돔의 적외선 신호 특성을 분석하고자 한다. 이를 위해서 첫 번째로 X-band 투과 특성을 가질 수 있도록 FSS 패턴을 설계하였고, 두 번째로 금속 나노코팅의 두께에 따른 적외선 방사율 특성을 분석하였으며, 마지막으로 위장 표면을 레이돔에 적용하였을 때 적외선 신호 특성 분석을 통해 적외선 스텔스 성능을 평가하였다.

2.1 레이돔 표면 금속 나노코팅 설계·제작

2.1.1 FSS 패턴 설계 및 제작

레이돔에 적용하기 위한 FSS 패턴 설계를 위해 상용프로그램 COMSOL Multiphysics 5.3a를 사용하여 수치해석을 진행하였다. 전투기 안테나의 경우 단·중거

리 탐색 및 추적, 사격통제에 주로 사용되는 X-band (8 GHz ~ 12 GHz) 대역이 사용된다. 본 연구에서도 X-band 대역을 타겟 주파수 대역으로 설정하였고, 이에 따라 설계하고자 하는 FSS의 중심주파수를 10 GHz로 가정하였다. 레이돔 표면에 적용하기 위하여 전투기 도장으로 사용되는 폴리우레탄 페인트를 기반으로 하여 FSS 패턴 설계를 수행하였다. 레이더 특성 설계에 사용된 폴리우레탄의 유전율 및 손실계수는 Dielectric Assessment Kit product line(DAK) 장비로 측정된 값을 사용하였다. FSS 패턴이 되는 금속층의 소재는 레이돔에 적용되는 폴리우레탄(PU) 페인트의 회색계열의 색과 이질감이 없고 적외선 대역에서 0.1 수준의 낮은 방사율을 가지는 알루미늄(Al)을 사용하였다. 알루미늄의 plasma frequency와 damping in time 값은 문헌에 나온 값을 참고하여 사용하였다^[7]. FSS band-pass 특성을 설계하기 위해 각각 low-pass filter와 high-pass filter 특성을 나타내는 patch, grid 패턴을 선정하고 적외선 신호제어가 용이하도록 알루미늄의 면적이 최대가 되는 슬롯(slot) 타입의 패턴을 선정하였다^[8]. Pitch(P), patch width(W_p), grid width(W_g), 알루미늄 코팅 두께, 폴리우레탄 코팅 두께를 변수로 하여 변수 연구(parameter study)를 수행하였다. P가 증가할수록 중심주파수 및 투과대역폭이 감소하고, W_p 가 증가할수록 투과율과 중심주파수가 증가하고, W_g 가 증가할수록 중심주파수가 증가하는 특성을 보였다. 또한 알루미늄 코팅의 두께가 증가할수록 투과율이 증가하고 폴리우레탄 코팅의 두께가 증가할수록 중심주파수가 감소하는 특성을 나타냈다. 이를 바탕으로 중심주파수는 10 GHz, 투과율은 90 % 이상, 적외선 신호제

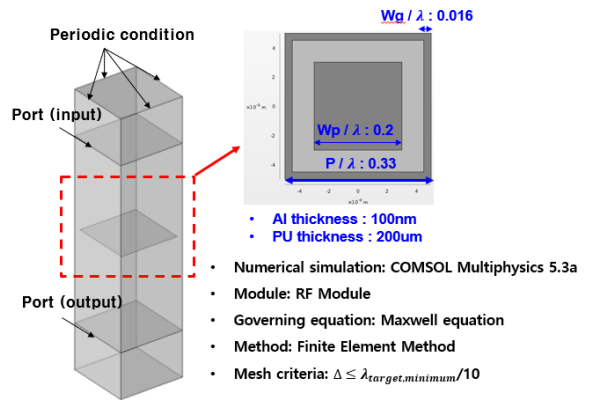


Fig. 1. Numerical simulation conditions and Optimal design

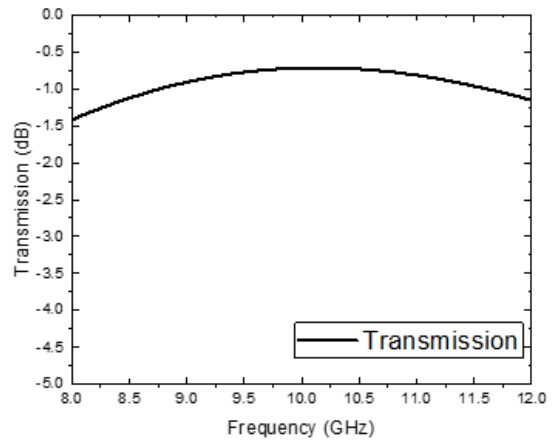


Fig. 2. 8 ~ 12 GHz band Transmission numerical simulation result

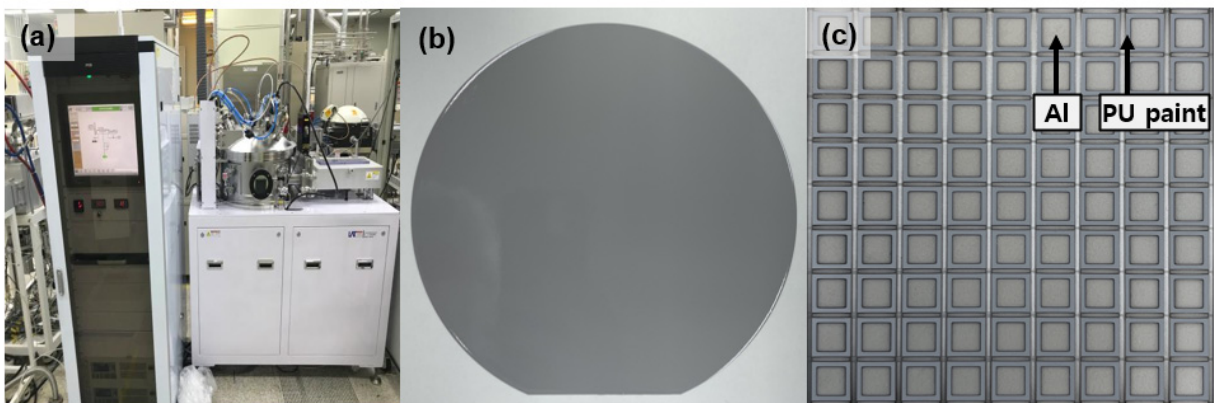


Fig. 3. FSS skin making (a) D.C/R.F Magnetron Sputter equipment (b) PU skin (c) Slot pattern Al nano-coating

어가 용이하도록 알루미늄의 코팅 면적이 단위 면적 중 50 % 이상 차지하도록 설계 목표를 설정하여 설계 변수 최적화를 진행하였다. Figure 1은 수치해석 조건과 변수 연구를 통해 최적화된 디자인 형상이다. Figure 2는 수치해석을 통해 FSS의 투과 특성을 분석한 결과로 중심주파수는 10 GHz, 투과율은 92 %, 알루미늄 코팅 면적이 단위 면적의 55 %인 X-band 대역에서 투과특성을 갖는 FSS 패턴을 설계하였다.

설계한 슬롯 타입의 패턴을 표면에 구현하기 위하여 shadow mask와 스퍼터(sputter)를 이용하였다. Figure 3(a)는 알루미늄을 수백 나노미터 두께로 코팅하기 위해 사용한 스퍼터 장비이며 (b)는 위장이 되지 않은 일반적인 레이돔 표면을 구현한 폴리우레탄 표면이다. Figure 3(c)는 폴리우레탄 표면에 shadow mask를 올리고 스퍼터링(sputtering)하여 슬롯 패턴을 코팅한 표면이다. Table 1은 스퍼터를 이용해 폴리우레탄 표면위에 알루미늄을 코팅하기 위한 레시피이다.

Table 1. Sputtering recipe

Recipe	<ul style="list-style-type: none"> • DC power : 590 W • Pre-sputter : 120 sec • pressure : 1 mTorr • Sputter-time : 17 ~ 340 sec
--------	--

2.1.2 알루미늄 나노코팅을 적용한 레이돔 표면 모사시편 제작

선행 연구에 따르면 레이돔 적외선 신호는 표면방사율, 태양/대기/지구복사 등의 환경조건, 지표/하늘 등의 배경조건, 비행조건에 따라 변하게 되고 이로 인해 CRI가 최소가 되는 적외선 최적점이 존재한다²⁾. 따라서 레이돔의 적외선 신호 및 CRI 특성을 분석하고 이를 바탕으로 레이더 투과 특성을 가져 레이돔에 적용이 가능하고, CRI를 최소화할 수 있는 저방사 표면 개발이 필요하다. 이를 구현하기 위하여 나노 두께의 금속 코팅의 경우 두께에 따라 광특성이 변한다는 선행연구를 참고하여 알루미늄 나노코팅 두께를 변화하여 방사율을 조절하고자 한다⁹⁾.

두께 별 알루미늄 나노코팅을 구현하기 위하여 앞서 제작한 방법과 동일하게 스퍼터 장비를 이용하였다. 제작 방법(recipe)은 Table 1과 같은 조건에서 스퍼터링 시간을 조절하여 5 nm, 10 nm, 50 nm, 100 nm, 500 nm 두께로 알루미늄을 코팅하였으며, 알루미늄 나노코팅의 두께 별 실험 케이스 요약은 Table 2에 나타내었다. Figure 4(a)는 PU 표면이고 (b)는 알루미늄으로 FSS 패턴을 나노코팅한 시편이다. Figure 4(c)는 폴리우레탄 표면과 폴리우레탄 표면 상부에 Al 나노코팅을 두께별로 제작한 시편으로 코팅 두께가 증가하더라도 폴리우레탄 페인트의 회색계열의 색상과 유사한 수준을 유지하는 것을 확인하였다.

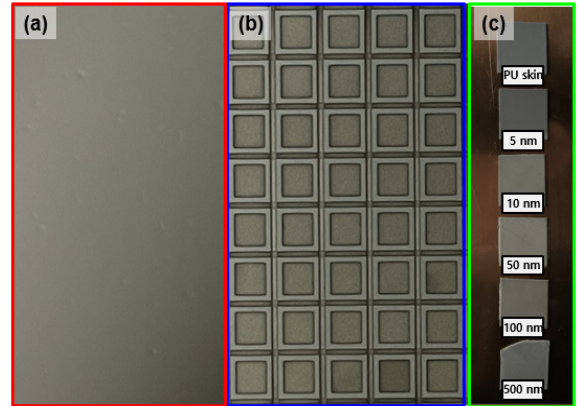


Fig. 4. Radome skin (a) PU skin (b) Al nano-coating pattern skin (c) Al nano-coating skin by thickness

2.2 레이돔 적외선 신호 수치해석 방법

비행조건을 고려한 레이돔의 내부 및 외부 복합 열전달 해석을 통해 레이돔의 적외선 신호 특성을 파악하고, 이를 바탕으로 레이돔 표면에 알루미늄 나노코팅 적용 시 적외선 신호와 저피탐 특성을 분석하기 위해 두 가지 수치해석 프로그램을 사용하였다. 전체적인 해석과정은 Fig. 5와 같이 진행하였다. 레이돔 적외선 신호를 분석하기 위해 5세대 전투기의 레이돔 형상을 모델링 하였으며 유동 해석을 위해 약 2천만 개의 격자를 작성하였다. 비행 조건은 극한조건을 묘사하기 위하여 고도 10,000 m, 속도 Ma 2로 설정하였다. 열 유동 해석은 상용 솔버인 ANSYS Fluent 17.2의 *k-w* SST 난류 모델을 이용하여 수행하였다¹⁰⁾. ANSYS Fluent를 통한 대류 열전달 해석을 통해 얻을 수 있는 대류 열전달 계수와 유동 온도 데이터를 전도, 복사 solver인 TAIthermIR의 경계조건으로 입력하여 열전달 해석을 진행하여 레이돔의 표면 온도를 도출하였다¹¹⁾. 도출한 레이돔의 표면 온도 분포를 TAIthermIR을 이용하여 복사 강도를 도출하고, 레이돔

의 복사 강도(I_{Radome})와 배경의 복사 강도($I_{Background}$)의 차이에 적외선 탐지기 화상 투영 면적(A_{Target})을 곱함으로써 다음 식 (1) 과 같이 CRI를 계산하였다.

$$CRI = (I_{radome} - I_{background}) \times A_{target} \quad (1)$$

또한 적외선 이미지를 통한 신호특성을 분석하기 위하여 TAIthermIR의 Bidirectional Reflectance Distribution Function(BRDF) 기법을 이용하였다. 이때 사용한 센서 변수(sensor parameters)는 Table 3과 같다.

Table 2. Case information summary

CASE #	1	2	3	4	5	6
Al nano-coating thickness (nm)	0 (PU skin)	5	10	50	100	500

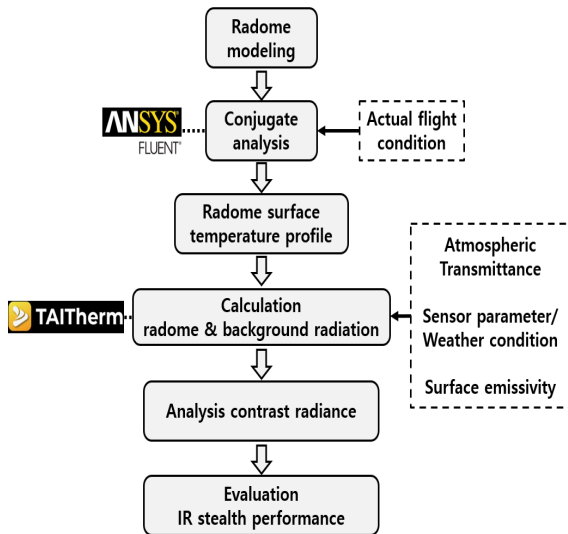


Fig. 5. Analysis procedure of infrared stealth performance

Table 3. Sensor parameters

Sensor parameters	<ul style="list-style-type: none"> Distance : 0.1 km Field of view : $2^\circ \times 2^\circ$ Pixel : 480×480
-------------------	---

2.3 금속 나노코팅의 적외선 저피탐 성능특성 분석

2.3.1 금속 나노코팅의 FSS 성능평가

알루미늄 나노코팅을 통한 FSS 시편의 레이더 대역의 전파투과특성을 분석하기 위해 실험을 진행하였다. Figure 6과 같이 투과특성을 측정하였으며, 측정 장비는 vector network analyzer와 X-band(8 GHz ~ 12 GHz) 대역의 lens horn antenna를 사용하였다. Figure 7은 수치해석을 통한 투과특성 측정결과와 실험을 통한 측정결과를 비교하여 타당성을 검증한 결과이다. 수치해석으로는 중심주파수 10 GHz, 투과율 92 %였고, 제작 시편을 실험을 통해 측정한 결과 중심주파수 10 GHz, 투과율 93.2 %, 알루미늄 코팅의 면적비 55 %가 나와 설계 목표로 설정한 값을 만족하였다.

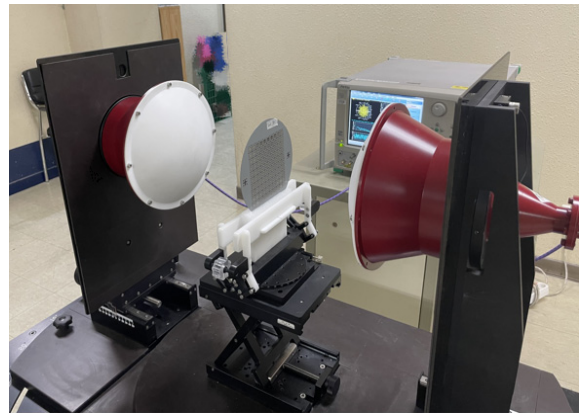


Fig. 6. Radar transmission measurement

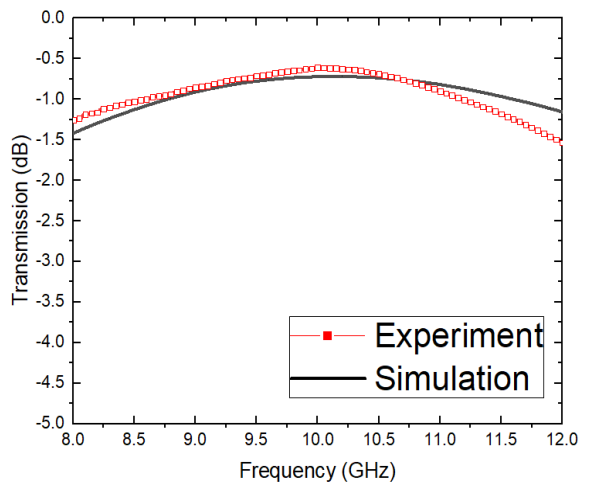


Fig. 7. Radar transmission validation

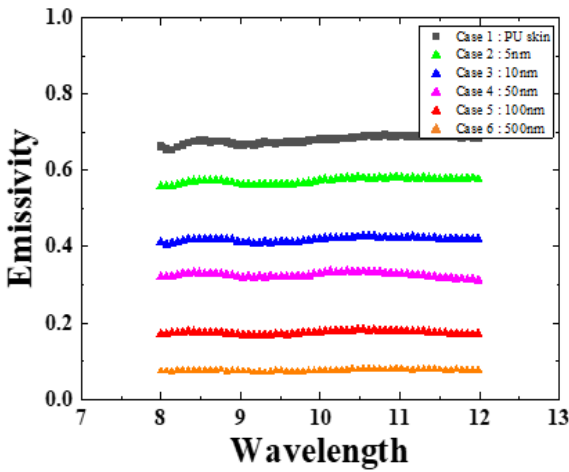


Fig. 8. Emissivity measurement result

Table 4. Emissivity by case

CASE #	Thickness	Wavelength 8~12 um average emissivity
1	PU skin	0.67 ± 0.009
2	5 nm	0.57 ± 0.007
3	10 nm	0.42 ± 0.004
4	50 nm	0.32 ± 0.007
5	100 nm	0.17 ± 0.004
6	500 nm	0.07 ± 0.004

2.3.2 금속 나노코팅 두께에 따른 적외선 방사율 및 신호 특성

알루미늄 나노코팅 두께에 따른 방사율 특성을 분석하기 위해 제작한 시편을 fourier transform infrared spectroscopy(FT-IR; Vertex 70, Bruker) 장비를 사용하여 8 ~ 12 um 대역의 방사율을 측정하였다. Figure 8 에 제작한 시편의 방사율 측정 결과를 나타냈고, Table 4는 측정값의 평균 방사율과 표준편차를 나타냈다. 각 케이스 별 평균 방사율은 각각 폴리우레탄 표면인 case 1에서 0.67 ± 0.009 , 알루미늄 코팅의 두께가 각각 5, 10, 50, 100 500 nm인 경우 0.57 ± 0.007 , 0.42 ± 0.004 , 0.32 ± 0.007 , 0.17 ± 0.004 , 0.07 ± 0.004 으로 측정되었다. 이로부터 알루미늄 나노코팅 두께에 따라 방사율이 조절되는 것을 확인하였다. 이후 방사율에 따른 적외선 신호 특성을 분석하기 위하여 case

별 시편들을 100 °C로 가열된 hot plate에 올려놓고 7.5 ~ 14 um 대역을 측정할 수 있는 적외선 카메라 (FLIR A655sc)를 이용하여 촬영하였다. 이때 낮은 적외선 신호를 가지는 배경을 모사하기 위해 방사율 0.05를 갖는 copper plate를 사용하였다. Figure 9는 적외선 카메라를 이용하여 촬영한 적외선 이미지이다. Figure 9(a)는 폴리우레탄 표면의 적외선 이미지로 면 평균 겉보기 온도는 92.46 °C로 측정되었다. Figure 9(b)는 Al으로 FSS 패턴을 나노코팅한 시편의 적외선 이미지로 면평균 겉보기 온도가 53.3 °C로 측정되어 (a)대비 42.35 %가 감소하는 것을 확인하였다. Figure 9(c)는 case별 시편들의 적외선 이미지로 알루미늄 나노코팅 두께 증가에 따라 겉보기 온도가 76.66 °C ~ 28.69 °C로 측정되어 case 1 대비 17.08 % ~ 68.97 % 까지 감소하는 것을 확인하였다. 결과적으로 알루미늄 나노코팅을 통해 겉보기 온도를 조절함으로써 배경과의 온도 차이를 조절할 수 있고 이를 통해 적외선 스텔스 성능을 구현할 수 있을 것으로 예측된다.

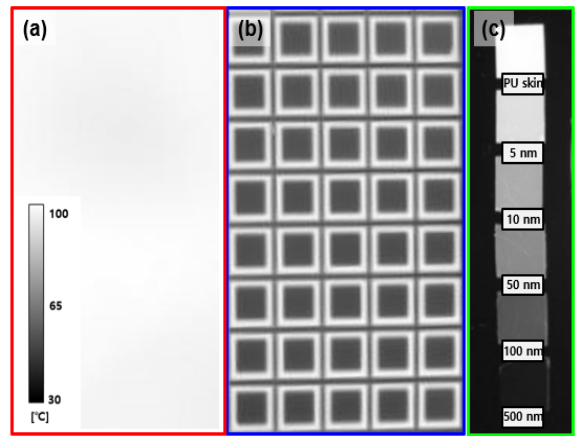


Fig. 9. The infrared image of (a) PU skin (b) Al nano-coating pattern (c) Al nano-coating by thickness

2.4 레이돔 적외선 신호 분석 결과

레이돔 적외선 신호를 분석하기 위해 첫 번째로 TAIthermIR에서 BRDF 기법을 이용하여 레이돔의 적외선 신호 이미지를 도출하고 두 번째로 CRI 값을 계산함으로써 레이돔 적외선 저피탐 성능특성을 확인하였다. Figure 10은 미사일이 항공기를 내려다보는 경우를 가정하였을 때 case 별 레이돔 적외선 신호 이미

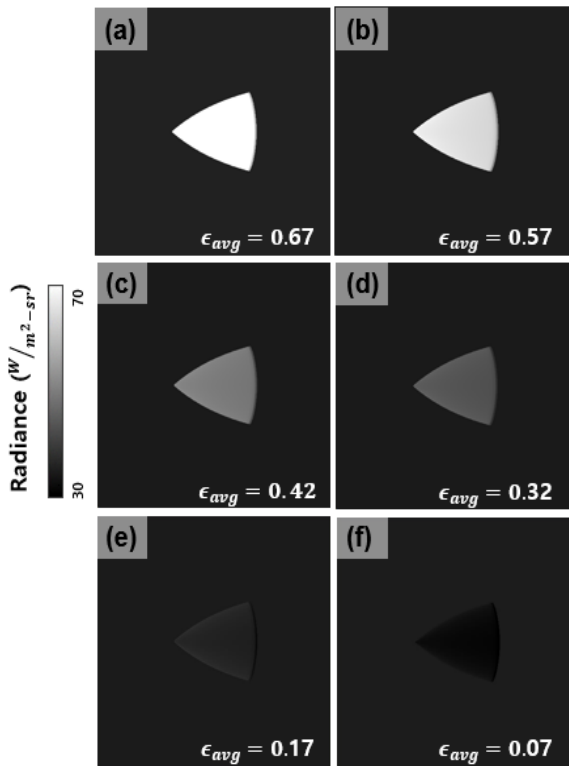


Fig. 10. Radome BRDF infrared image for (a) Case 1 ($\epsilon_{avg} = 0.67$) (b) Case 2 ($\epsilon_{avg} = 0.57$) (c) Case 3 ($\epsilon_{avg} = 0.42$) (d) Case 4 ($\epsilon_{avg} = 0.32$) (e) Case 5 ($\epsilon_{avg} = 0.17$) (f) Case 6 ($\epsilon_{avg} = 0.07$)

지를 나타내었다. 이 경우 레이돔의 배경은 지표 배경이 된다. Figure 10(a)는 case 1인 폴리우레탄 표면의 방사율을 적용했을 때의 이미지이고, (b) ~ (f)는 case 2 ~ case 6의 방사율을 적용했을 때의 이미지이다. 적외선 이미지 분석결과 방사율이 감소함에 따라 레이돔의 적외선 신호가 감소하여 배경신호와의 차이가 줄어들었다. Case 5에서는 레이돔 적외선 신호와 배경신호의 차이가 최소가 되어 적외선 스텔스 성능이 가장 우수하였다. 그러나 case 6에서는 방사율이 더 떨어졌음에도 불구하고 레이돔 적외선 신호가 배경신호보다 낮아지는 역대비가 발생하여 오히려 적외선 신호가 작음에도 피탐지성이 증가하는 것으로 나타났다. 두 번째로 적외선 신호 분석을 위하여 CRI를 계산하였고, case 1의 CRI를 기준으로 비교하였다. 그 결과 case 2 ~ 5 까지는 알루미늄 나노코팅 두께가 증가함

에 따라 방사율이 감소하고, 이로 인해 CRI도 감소하였으며, case 5에서는 case 1 대비 97.57 %까지 감소하였다. 하지만 case 6에서는 case 1 대비 91.52 %가 감소하여 case 5에서 오히려 신호 저감 효과가 큰 것을 확인하였다. 다시 말해, 단순히 방사율을 저감하는 것이 적외선 저피탐 측면에서 더 불리할 수 있음을 파악하였다.

3. 결론

본 연구에서는 레이돔에 적용이 가능하도록 X-band 투과특성을 가지면서 적외선 방사율 제어가 가능하도록 금속 나노코팅을 적용한 적외선 스텔스 표면을 개발하고, 이를 레이돔에 적용했을 때의 적외선 신호 특성을 분석함으로써 적외선 스텔스 성능을 분석하였다.

먼저 FSS 패턴 설계를 통해 레이더 대역의 전파투과특성을 구현함과 동시에 적외선 스텔스 기술을 적용하기 위해 Al 나노코팅을 사용하였다. FSS 패턴은 수치해석을 통해 최적 디자인을 설계하였으며, 스퍼터 장비와 shadow mask를 이용하여 시편을 제작하였다. 제작된 시편을 통해 전파투과특성을 측정하였으며 측정결과 X-band 대역에서 93.2 % 투과율을 가졌다. 이후 Al 코팅을 5 nm 부터 500 nm 까지 두께별 시편을 제작하여 FTIR 장비를 활용해 방사율을 측정하고 적외선 카메라를 이용하여 적외선 신호를 분석하였다. 방사율 측정 결과 Al 나노코팅 두께에 따라 0.57에서 0.17까지 표면 방사율 조절이 가능함을 확인하였으며, 이를 적용하여 레이돔의 적외선 신호를 수치해석으로 분석하였다. 레이돔의 방사율이 감소함에 따라 레이돔의 적외선 신호가 감소하여 배경신호와의 차이가 줄어들어는 경향이 있으나, 방사율이 매우 낮은 경우 오히려 역대비에 의하여 피탐지성이 감소한다. 또한 배경 신호와 레이돔의 적외선 신호가 유사해지는 방사율($\epsilon_{avg} = 0.17$)을 적용하게 되면 폴리우레탄 표면 대비 CRI가 약 97.57 %까지 저감되었다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 항공 피탐지 감소기술 특화연구실 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Robert P. Haffaet, James H. Patton, "Analogues of Stealth," Northrop Grumman, 2002.
- [2] M. Bae, T. Kim, T. Kim, D. Jung and H. H. Cho, "Analysis on Infrared Stealth Performance with Emissivity Controlled Aircraft Surface Structure at Various Background," Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 29, No. 5, pp. 455-461, 2016.
- [3] R. D. Hudson, "Infrared System Engineering," Wiley, New York, 1969.
- [4] A. Rogalski, "History of Infrared Detectors," Optoelectronics Review, Vol. 20, No. 3, pp. 279-308, 2012.
- [5] A. Rogalski, "Infrared Detectors: Status and Trends," Progress in Quantum Electronics, Vol. 27, No. 2-3, pp. 59-210, 2003.
- [6] T. Kim, J. Song, J. Cha, J-Y. Bae, D. Jung and H. H. Cho, "IR Characteristics of an Aircraft in Different Atmospheric/Background Conditions," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 17, No. 4, pp. 456-462, 2014.
- [7] Edward F. Crawley, Edward F. Crawley, "Material Damping in Aluminum and Metal Matrix Composites," Journal of Composite Materials, Vol. 21, pp. 553-568, 1987.
- [8] S. Lee, W. Oh, Y. Kim and I. P. Hong, "A Study on the Analysis of Semi-infinite Array Structures for Defect Analysis in Frequency Selective Radome," Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 24, No. 1, pp. 1-8, 2020.
- [9] Sheila Edalatpour, Mathieu Francoeur, "Size Effect on the Emissivity of Thin Films," Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, Vol. 118, pp. 75-85, 2013.
- [10] T. Kim, H. Lee, J-Y. Bae, T. Kim, J. Cha, D. Jung and H. H. Cho, "Susceptibility of Combat Aircraft Modeled as an Anisotropic Source of Infrared Radiation," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 52, No. 5, pp. 2467-2476, 2016.
- [11] J. Nam, I. Chang, Y. Lee, J. Kim and H. H. Cho, "Effect of Flight Altitude on Minimal Infrared Signature of Combat Aircraft," Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 33, No. 6, pp. 375-382, 2020.