항공기 적외선 스텔스 기술 적용을 위한 다양한 배경조건에서의 방사율 제어구조 성능 분석

배 문 장¹ · 김 태 환¹ · 김 태 일¹ · 정 대 윤² · 조 형 희^{1*}

¹연세대학교 기계공학과, ²국방과학연구소 제3기술연구본부

Analysis on Infrared Stealth Performance with Emissivity Controlled Aircraft Surface Structure at Various Background

Munjang Bae¹, Taehwan Kim¹, Taeil Kim¹, Daeyoon Jung² and Hyung Hee Cho^{1*}

¹Department of Mechanical Engineering, Yonsei Univ., Seoul, 03722, Korea

²The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Daejeon, 34186, Korea

Abstract

Survivability of an aircraft has been greatly threatened by the development of a weapon system using infrared. Therefore, the infrared stealth technology is a very important technique to improve the survivability of an aircraft. In this study, the infrared signal of an aircraft was analyzed which corresponding to the aircraft surface temperature and environmental conditions with various surface conditions(especially emissivity changed). Based on the analyzed infrared signal, the optimized surface emissivity was suggested to reduce the average contrast radiance and contrast radiant intensity(CRI). In addition, we confirmed that the infrared contrast radiant intensity between the aircraft and the background can be minimized through an appropriately controlled surface emissivity of the aircraft at specific background.

Keywords : *infrared stealth, surface emissivity, numerical analysis, contrast radiance intensity*

1. 서 론

적외선을 이용하여 목표물을 탐지하고 추적하는 적외선 유도무기의 급격하고 지속적인 발달로 인해 항공기는 많은 위협을 받고 있다(Ab-Rahman *et al.*, 2009). 적외선 스텔스 기술은 이러한 외부 위협으로부터 항공기를 보호하고 생존성을 높일 수 있는 중요한 기술로써, 최근 미국, 유럽, 중국, 러시아 등 주요 군사 강국을 중심으로 연구가 활발히 이루지고 있다(Heo *et al.*, 2015; Yunpeng *et al.*, 2015; Pan *et al.*, 2015).

적외선 유도 무기는 목표물과 주변 배경의 적외선 복사 에너지 차이를 감지하여 목표물을 탐지하고 추적한다. 적외선은 절대온도 0K 이상의 모든 물체에서 발생하는 열복사 에너지로 온도의 4제곱에 비례하기 때문에 고온의 물체일수록 탐지 및

식별이 비교적 용이하다. 따라서 초창기 적외선 유도 무기는 항공기에서 발생하는 적외선 에너지 중 고온의 엔진과 그 주변부 및 배기가스(1,000K 내외)에서 발생하는 3~5 μ m 대역의 적외선 신호를 탐지 및 추적할 수 있도록 설계되었다. 그러나 섬광탄과 같은 고온 발열체를 활용한 기만체계의 개발과 엔진 및 노즐의 적외선 신호 감소를 위한 형상설계, 외피냉각방식 등의 적외선 유도무기 회피수단으로 인해 새로운 방식의 발전된 적외선 유도무기의 개발이 요구되었다. 이러한 발전된 적외선 유도무기는 기술의 발달로 인해 비교적 저온이라 할 수 있는 표면온도 300K 내외의 8~12 μ m 영역 까지 탐지가 가능하며, 이로 인해 FLIR(forward looking infrared)이나IRST(infrared search & track)와 같은 추적 장비가 개발되었고, 탐지영역의 증가로 인해 최신의 적외선 유도 미사일들은 항공기를 모든 방향에서 격추할 수

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2123-7227; E-mail: hhcho@yonsei.ac.kr

Received August 8 2016; Revised August 24 2016;

Accepted August 25 2016

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

있게 되었다.

따라서 본 논문에서는 점점 그 위협이 증대되고 있는, 적외선 유도무기로 입사하는 항공기의 8~12 μ m 대역 적외선 신호의 감소를 위하여, 항공기 표면 적외선 신호 방사 및 반사를 조절하여, 궁극적으로 적외선 스텔스 성능을 갖는 표면 구조체의 설계 가이드라인을 제시하고자 한다. 이를 위해 항공기의 표면 구조 특성 중 방사율(emissivity)을 제어하여 항공기와 주위 배경과의 적외선 신호대비 값을 줄이고, 항공기의 적외선 스텔스 효과를 높이하고자 하였다. 그리고 전산수치해석을 통한 대류·전도·복사 열전달 통합분석 및 해석기법을 정립하고 실제 비행환경을 적용하여 설계 가이드라인을 검증하였다.

2. 수치해석 방법

표면 방사율 제어 구조체 설정 및 이에 따른 항공기 스텔스 효과 검증을 위해 두 가지 수치해석 프로그램을 사용하였다 (Kim *et al.*, 2014). 전체적인 해석과정은 Fig. 1과 같이 진행하였다. 첫째로 ANSYS Fluent 15.0을 사용하여 대류 열전달에 의한 항공기의 표면온도 변화를 계산하였다. 둘째로 TAIthermIR 10.4로 항공기 표면 방사율 구조체 조절에 따른 항공기 및 배경의 복사 및 전도 열전달에 의한 적외선 신호 값을 계산하였다. 이 두 종류 프로그램의 복합해석을 통해 적외선 유도무기에 입사하는 항공기 및 주위 배경의 적외선 신호 값을 획득하였다. 그리고 획득된 항공기와 배경의 적외선 신호 값을 바탕으로 표면 방사율 변화에 따른 평균복사대비

Fig. 1 Analysis procedure of infrared stealth performance with different surface emissivity

(average contrast radiance)와 항공기 표면적을 고려한 CRI(contrast radiance intensity)를 산출하여, 적외선 스텔스 구조체의 성능을 검증하였다.

3. 실제 비행환경을 고려한 해석진행

3.1 방사율에 따른 항공기 적외선 신호분석

물체는 복사에너지를 방사하는 것뿐만 아니라 주위 환경에서 입사되는 복사에너지의 일부 흡수하고, 반사하거나 또는 투과시킨다. 단위 시간당 단위 면적에 받는 복사에너지를 조사(irradiation)라고 부르며 G 로 나타낸다. 열역학 제1법칙에 의해 G 는 다음과 같이 표현할 수 있다(Yunus *et al.*, 2007).

$$G = \alpha G + \rho G + \tau G \quad (1)$$

여기서, α 는 흡수율, ρ 는 반사율, τ 는 투과율이다.

Fig. 2는 적외선 유도무기로 입사하는 항공기의 적외선 신호를 나타낸 것으로, 적외선 신호는 공력가열로 인한 표면온도 상승으로 인해 자체적으로 발생하는 신호(ϵE_b)와 태양·대기·지구복사 에너지가 항공기 표면에 입사 후 반사되는 신호(ρG)로 구성된다. 항공기에서 자체적으로 발생하는 적외선 신호는 표면의 온도(T)와 방사율(ϵ), 항공기 형상과 표면특성 등에 따라 달라진다. 이 때 항공기 표면은 대체로 불투명한 재질이므로 투과율(τ)을 0으로 가정할 수 있으므로, Kirchhoff 법칙에 의하여 흡수율(α)은 방사율(ϵ)과 같게 된다. 적외선 유도무기로 입사하는 항공기 적외선 신호는 다음과 같이 표면 방사율에 관한 식으로 나타낼 수 있다.

$$L_{target} = \epsilon L_{self-emission} + (1 - \epsilon) L_{background} \quad (2)$$

$$L_{background} = L_{sunshine} + L_{skyshine} + L_{earthshine} \quad (3)$$

Fig. 2 Incident radiation of infrared guided weapon from aircraft surface

3.2 표면 구조체 및 항공기 적외선 신호분석

Planck의 법칙으로 알려져 있는, 파장 흑체방사도(spectral blackbody emissive power)는 절대온도(T)에서 단위 시간당, 단위 면적당 파장(λ)에서 흑체가 방사하는 복사 에너지이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{d\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(C_2/\lambda T) - 1} \quad (4)$$

$$C_1 = 3.74177 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2, \quad C_2 = 1.43878 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

항공기 표면과 동일한 온도의 흑체가 8~12 μm 대역에서 방사하는 에너지(blackbody radiance)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L_{\text{blackbody}} = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda=8}^{\lambda=12} E_{b\lambda} d\lambda \quad (5)$$

앞서 살펴봤듯이, 항공기 표면으로부터 적외선 유도무기로 입사되는 적외선 신호는 항공기 표면의 방사율과 반사율의 합으로 표현될 수 있다. 표면 방사율은 표면상태(광택, 거칠기, 산화 등)에 따라서 그 값이 달라지며, 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 항공기 표면을 완전확산체(perfect diffuse reflection)인 회체(graybody)로 설정하였다. 방사율은 0.1에서 0.9까지 0.1 단위로 변화시켜 해석을 진행하였다.

표면 방사율을 고려하여 항공기 표면에서 자체적으로 방사 되는 적외선 신호는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$L_{\text{self-emission}} = \frac{\varepsilon}{\pi} \int_{\lambda=8}^{\lambda=12} E_{b\lambda} d\lambda \quad (6)$$

결국 항공기 자체에서 발생하는 8~12 μm 적외선 신호는 표면 절대온도(T)와 표면 방사율(ε)에 따라 결정된다.

먼저 항공기의 표면 절대온도를 바탕으로 한 적외선 신호

Fig. 3 Design concept of IR emissivity control layer

Fig. 4 Aircraft modeling mesh

Fig. 5 Distribution aircraft surface temperature in Altitude 3000m, MACH 1.2 (standard atmosphere)

분석을 위해서 항공기 형상을 단순화시킨 후 수치해석을 위한 해석격자를 작성하였다. 격자생성프로그램은 ICEM CFD를 이용하였으며, 현재 다수의 국가에서 운용중인 Su-27을 모델링 하여 185,152개의 표면격자와 5,049,687개의 체적격자를 Fig. 4와 같이 생성하였다. ANSYS Fluent와 TAIthermIR의 복합해석을 통한 항공기 표면 온도분포 결과는 Fig. 5와 같다.

3.3 주위 배경을 고려한 적외선 신호분석

항공기 주위 배경에서 발생하는 태양·대기·지구복사 에너지는 항공기에 반사되어 적외선 유도무기에 입사하는 동시에 그 자체가 배경신호로서의 역할을 한다.

최근의 연구(Mahulikar *et al.*, 2007) 등을 통해 태양·대기·지구복사가 항공기의 표면 방사율에 의해 반사되어 적외선 유도 무기에 입사됨에 따라서 항공기와 배경과의 적외선 신호 대비 값에 변화를 주게 되며, 이는 저고도 영역에서 크게 작용한다고 알려져 있다. 특히 지구 표면은 우리의 주 관심 영역인 8~12 μm 대역의 적외선 에너지를 방출하여 항공기 적외선 신호에 많은 영향을 준다(Mahulikar *et al.*, 2009).

따라서 이러한 태양·대기·지구복사 에너지가 항공기와 배경간 적외선 신호대비 값의 차이에 미치는 영향을 확인하기 위하여 TAIthermIR을 이용하여 수치해석을 진행하였다. Fig. 6과 같이 항공기와 지표면은 실제 환경과 유사하게 모델링하였다(Gao *et al.*, 2010).

다양한 배경조건에서 표면 방사율 변화에 따른 항공기와 배경의 적외선 신호 대비 값을 알아보기 위하여, ANSYS

Fig. 6 Numerical simulation model

Fluent를 통해서 비행고도 3000m, 비행마하수 $Ma=1.2$ 에서 해석한 항공기 표면 온도분포 결과를 바탕으로, 대한민국 서울의 여름철과 겨울철 맑은 날의 기상자료를 적용하여 해석을 진행하였다. 가상으로 설정한 지표면의 온도는 여름철 302K, 겨울철 278K이며, 지표 방사율은 0.9를 적용하였다. 가장 중요한 항공기 표면 구조체 방사율의 경우 앞서 설정한 기본 구조를 바탕으로 방사율을 0.1에서 0.9까지 0.1 단위로 변화시키며 수치해석을 진행하였다. 구체적인 수치해석 조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Numerical analysis condition

Condition	Value	
Weather	Summer	Winter
Solar radiance	985.89W/m ² (Zenith 16.63° Azimuth 154.9°)	504.64W/m ² (Zenith 61.40° Azimuth 171.4°)
Sky irradiance	8.96W/m ² ·sr	4.95W/m ² ·sr
Ground irradiance	36.81W/m ² ·sr	24.18W/m ² ·sr
Aircraft emissivity	$\epsilon = 0.1 \sim 0.9$	
Location	Seoul(N37.57 W126.96 Time zone -9 hr, F.E 85.5 m)	
Sensor parameter	F.O.V : 2°×2°, Pixel : 480×480 Range : 1km	

3.4 방사율 조절 표면 구조에 따른 설계 가이드라인

Fig. 7은 계절별 항공기와 배경의 표면 방사율에 따른 복사에너지 강도와 항공기와 배경간의 평균복사대비(average contrast radiance)를 Look Up(-90°) 상태에 대해서 나타낸 것이다. 이 때 average contrast radiance는 항공기의 평균 radiance 값과 배경의 평균 radiance 값의 차이를 절대값으로 나타낸 것이며, 단위 입체각 당 방사되는 복사에너지

Fig. 7 Aircraft and sky background radiance in different emissivity at look up case

강도(W/m²·sr)로 표현된다. 겨울철이 여름철보다 단위 면적당 입사되는 총 태양조사 값이 48.8% 감소되며, 이로 인해 겨울철 지표면과 배경의 적외선 신호 값이 여름철에 비해 Table 1에 나타난 것처럼 배경하늘은 44.8%, 지표면은 34.3% 감소하게 된다. 반면에 항공기의 자체 적외선 신호는 비행마하수에 크게 영향을 받는다. 동일한 마하수일 경우 대기온도에 따라 그 차이가 있으나 대체적으로 계절에 관계 없이 높은 적외선 신호를 나타내며, 해석 조건인 비행마하수 $Ma=1.2$ 에서는 앞선 수치해석 결과와 같이 평균 300K 내외의 표면온도 분포와 이에 상응하는 적외선 신호를 방출한다. 이러한 항공기의 적외선 신호는 여름철 지표면의 온도와 유사하며, 지표면 방사율이 0.9이므로, look up(-90°) 상태에서는 항공기 표면이 지표면 복사에너지에 많은 영향을 받을 것으로 예상된다. 구체적으로 Fig. 7을 분석해 보면 여름철의 경우 지구복사 및 반사되는 지표면의 태양복사 적외선 신호가 항공기 자체의 적외선 신호와 비슷한 값을 갖게 되어 항공기 표면 방사율이 감소하더라도 반사되는 주위배경의 복사 에너지로 인해 항공기의 전체적인 radiance에는 큰 변화가 없다. 반면에 겨울철의 경우 항공기에 비해 상대적으로 낮은 지구복사에너지 및 반사되는 태양복사에너지로 인해 항공기의 표면 방사율이 감소할수록 적외선 유도무기에 입사하는 항공기의 적외선 신호는 감소하게 된다.

Fig. 8은 계절별 항공기 표면 방사율에 따른 평균복사대비 값을 탐지각도(detecting angle)에 따라서 Look Up(-90°), Level(0°), Look Down(+90°) 상태로 구분하여 계산한 결과이다.

- 1) Look Up 상황에서는 배경이 하늘이며, 항공기에 입사되는 지구복사에너지의 영향을 크게 받는다. 여름철에 비해 겨울철이 방사율에 따른 평균복사대비 변화가

(a) Look up

(b) Level

(c) Look down

Fig. 8 Contrast radiance in different detecting angle and surface emissivity change

크며, 이는 상대적으로 항공기 자체에 비해 주위 배경의 적외선 신호 값이 작기 때문이다.

- 2) Level 상황에서는 배경이 하늘이며, 항공기에 입사되는 태양·대기·지구복사에너지의 영향이 복합적으로 나타난다. 여름과 겨울철 모두 항공기 표면 방사율이 작을

(a) CRI

(b) Infrared image

Fig. 9 The change value in different emissivity and detecting angle

수록 평균복사대비 값이 감소하는데, 이는 정면에서 봤을 때 nose, leading edge, intake 등의 정체점에서 공력가열에 의한 온도상승으로 자체 적외선 신호값이 크기 때문이다.

- 3) Look Down 상황에서는 배경이 지표면이며, 항공기에 입사되는 태양, 대기복사에너지의 영향을 주로 받는다. 겨울철은 항공기의 공력가열에 의한 자체 적외선 신호에 비해 지표면의 적외선 신호가 작기 때문에 어느 특정 항공기 표면 방사율에서 항공기와 지표면과의 평균복사 대비가 0에 가깝게 된다.

- 4) 항공기 아랫면의 경우 평균복사대비가 방사율 0.1이 0.9보다 겨울철에 31.9% 감소하며, 정면의 경우에는 39.6%(여름철), 56.3%(겨울철) 감소하였다. 따라서 적외선 스텔스 효과를 높이기 위해서 항공기 아랫면과 정면은 표면 방사율을 0.1이하로 설정해야 한다.
- 5) 항공기 윗면의 경우 여름철에는 표면 방사율이 0.9가 0.1보다 80.4% 평균복사대비가 감소한다. 그러나 겨울철의 경우에는 0.65 부근으로 표면 방사율을 설정할 경우 평균복사대비를 0에 가깝게 만들어 적외선 스텔스 효과를 극대화 할 수 있다.
- 6) 동일한 비행조건이라도 계절에 따라 태양·대기·지구복사 에너지의 영향으로 다른 적외선 radiance를 가지며, 이로 인해 배경과의 평균복사대비가 크게 달라진다.

복사강도대비(CRI)는 적외선 신호 분석 및 평가에 주로 사용되며, 항공기와 주위 배경과의 radiance 차이에 항공기의 면적을 곱하여 산출한다.

Fig. 9는 앞선 항공기와 배경간의 평균복사대비 중 겨울철 결과를 바탕으로, look down(+90°)에서 look up(-90°) 까지 수직으로 총 180° 각도에 대해서 항공기와 배경간의 CRI를 계산하고, 대표적으로 look down, level, look up 상황에서의 적외선 이미지를 나타낸 것이다.

CRI와 적외선 이미지를 통해서도 알 수 있듯이, 겨울철에는 항공기 윗면은 표면 방사율을 0.6으로, 정면과 아랫면은 표면 방사율을 0.1로 설정하면 적외선 스텔스 효과를 높일 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 항공기의 표면 구조체 방사율 설계를 위해서, 수치해석 프로그램을 이용한 통합분석 및 해석기법을 실제 비행환경을 고려한 적외선 신호분석에 사용하였다. 그리고 수치해석 결과를 바탕으로 항공기와 주위 배경간의 적외선 신호대비 값이 최소가 되는 표면 구조체 방사율의 가이드 라인을 제시하고, 스텔스 효과를 검증하였다. 그 결과 주변 배경조건에 맞춰서 최적화된 표면 구조체의 방사율에서 평균 복사대비 감소를 통해 적외선 스텔스 효과를 극대화하고 생존성을 높일 수 있음을 확인하였다.

향후에는 다양한 주위 배경에 따라서 실시간으로 항공기 표면 방사율을 가변적으로 조절할 수 있는 구조체의 설계 연구가 수행될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방과 탐지감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Ab-Rahman, M.S., Hassan, M.R. (2009) Lock-on Range of Infrared Heat Seeker Missile, *Int. Conf. Electr. Eng. & Inform.*, 2, pp.472~477.
- Gao, S., Jin, W., Wang, J., Wang, H., Li, H., Guo, A. (2010) Study on Camouflage Effect of Targets with Different Characteristics under Typical Background, *5th Int. Sympo. Adv. Optical Manuf. & Testing Tech.*, Proc. of SPIE, 7656, 765652-1.
- Heo, N.J., Yoo, J.H. (2015) Infrared Reflector Design using the Phase Field Method for Infrared Stealth Effect, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea* 28(1), pp.63~69.
- Kim, T., Bae, J.Y., Kim, T., Jung, D., Hwang, C.S., Cho, H.H. (2014) Analysis of MWIR and LWIR Signature of Supersonic Aircraft to Air-to-air and Surface-to-air Missile by Coupled Simulation Method, *J. Korea Inst. Mil. Sci. & Tech.*, 17(6), pp.764~772.
- Mahulikar, S.P., Potnuru, S.K., Rao, G.A. (2009) Study of Sunshine, Skyshine, and Earthshine for Aircraft Infrared Detection, *J. Opt., A: Pure & Appl. Opt.*, 11(4), 045703.
- Mahulikar, S.P., Sonawane, H.R., Rao, G.A. (2007) Infrared Signature Studies of Aerospace Vehicles, *Prog. Aerosp. Sci.*, 43(7), pp.218~245.
- Pan, X., Wang, X., Wang, R., Wang, L. (2015) Infrared Radiation and Stealth Characteristics Prediction for Supersonic Aircraft with Uncertainty, *Infra. Phys. & Tech.*, 73, pp.238~250.
- Yunpeng, M., Pei, Z. (2015) Calculation and Analysis of Aircraft Infrared Detection Probability under the Single Background, *IIICEC*.
- YUNUS, A. Çengel; AFSHIN, J. GHAJAR. (2007) *Heat and Mass Transfer*, Mc Graw Hill, New York.

요 지

적외선을 이용한 무기체계의 발달로 인해 항공기의 생존은 큰 위협에 직면해 있다. 따라서 항공기의 생존성 향상을 위해서 적외선 스텔스 기술이 매우 중요하다. 본 논문에서는 수치해석을 통해 실제 비행환경에서의 항공기 표면온도 및 주위 배경에 따른 적외선 신호를 분석하고 이를 바탕으로 적외선 스텔스를 위한 항공기 표면 구조체 방사율의 가이드라인을 제시하고 그 성능을 검증하고자 한다. 수치해석 결과, 주위 배경에 따라서 항공기 표면 방사율을 최적화한다면 항공기와 배경간의 복사대비강도를 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 적외선 스텔스, 표면 방사율, 수치해석, 복사대비강도