

論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.8.688>

엔진 노즐 형상이 Plume 적외선 신호에 미치는 영향에 관한 연구

안성용*, 김원철**, 오성환***

A Study on the Effect of Engine Nozzle Configuration
on the Plume IR Signature

Sungyong An*, Woncheol Kim** and Seonghwan Oh***

ABSTRACT

A study on the effect of engine nozzle configuration on the engine plume Infra-red (IR) signature characteristics is performed. Configuration design of an engine nozzle with high aspect ratio to reduce IR signature level and a cylindrical nozzle which is typically used for conventional aircraft which does not require IR signature reduction is performed. And CFD analysis for the two nozzles is performed to compare the flowfields characteristics of the two nozzles. Finally IR signature analysis for the two nozzles is accomplished to calculate the total intensity level at mid-wave infra-red and investigate the differences of IR signature characteristics between the two nozzles.

초 록

본 연구에서는 엔진 노즐 형상이 엔진 Plume의 적외선 신호 특성에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 이를 위해 적외선 신호 감소 효과를 가지는 큰 세장비의 엔진 노즐과 적외선 감소가 요구되지 않는 항공기에 적용되는 일반적인 원통형 형상의 노즐에 대한 형상설계를 수행하였다. 그리고 두 노즐에 대한 열유동해석을 수행하고 두 노즐의 유동장 특성을 비교하였다. 이후 열유동해석 결과를 이용하여 두 노즐에 대한 적외선 신호 해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

Key Words : Infrared Signature Analysis(적외선 신호해석), Engine Nozzle(엔진 노즐), Configuration Design(형상 설계), CFD Analysis(전산 유동해석), Plume (플룸), MWIR (중적외선)

1. 서 론

전장에서 비행체의 생존성 향상을 위해서는 항공기로부터 배출되는 적외선 신호의 감소가 필

수적으로 요구된다. 일반적으로 항공기로부터 배출되는 적외선 신호 발생 요소로는 뜨거운 엔진 및 노즐 표면, 엔진으로부터 배출되는 Plume 및 공력 가열에 의한 기체 표면 등이 있다[1]. 전장에서 빠른 속도로의 이동 및 임무수행이 요구되는 비행체의 경우에는 비행속도가 최대 고아음속 영역까지이고 엔진 추력은 최대 수천 파운드 정도로 요구된다. 이러한 비행체에 장착되는 엔진의 경우 적외선 열추적 미사일로부터의 추적을 피

† 2012년 5월 5일 접수 ~ 2012년 7월 19일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소

** 정회원, 국방과학연구소

*** 정회원, 국방과학연구소

교신저자, E-mail : kwc@add.re.kr

하거나 탐지 거리를 최대한 크게 하여 항공기 생존성 향상을 높이기 위해서는 엔진 Plume로부터 배출되는 3~5 μm 영역대의 중적외선(MWIR; Mid-wave IR) 신호를 최대한 감소시켜야 한다 [2]. 서방 선진국에서는 이러한 목적에 부합이 되도록 엔진노즐 형상에 대한 설계를 통해 비행체에 적합한 적외선 감소 노즐을 개발하고 있는바, 프랑스 닷소사 주도로 개발중인 Neuron 비행체의 경우 엔진으로부터 배출되는 적외선 신호의 방출을 최대한 억제하기 위해 엔진 노즐의 세장비(Aspect ratio)를 크게 하고 배기덕트를 휘도록 설계한 형상을 장착하고 있다[3].

본 논문에서는 적외선 신호 감소가 요구되는 비행체용 엔진 노즐 설계 과정에서 필수적으로 요구되는 노즐 형상 확정을 위해 노즐 설계 형상이 엔진 배기 노즐에서 배출되는 Plume 적외선 신호에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 위해 적외선 신호 감소가 요구되는 엔진 노즐과 적외선 신호 감소가 요구되는 않는 일반적인 엔진노즐에 형상 설계를 수행하고, 이 두 노즐에 대한 열유동해석을 수행하였다. 이로 부터 열유동해석 결과를 이용하여 두 노즐에 대한 적외선 신호해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다.

II. 노즐 형상 설계

2.1 노즐 설계 조건

노즐이 장착될 비행체의 최대 운용 속도가 아음속이고, 장착될 엔진이 터보제트 형태임을 감안하여 노즐 형태는 축소형 노즐로 설정하였다. 그리고 노즐의 기하학적 치수 및 형상은 엔진 싸이클 데이터 및 항공기에의 장착 요구조건 등을 고려하여 설정하였다.

2.2 노즐 설계 형상

두 노즐의 설계 형상 및 Geometry 정의는 Fig. 1 및 Table 1에서 제시하였다. IR 저감 설계가 고려된 노즐(Case 1)은 터빈 출구 디스크 형상이 노즐 출구에서 최대한 보이지 않도록 길이 방향으로 곡면 형태를 가지며 출구 단면은 세장비가 큰타원 형태이다. 일반 노즐(Case 2)은 길이방향으로 직선 형태이며 노즐 출구 단면은 원형으로 설계하였다. 노즐 입/출구 면적 및 길이는 소형 비행체 적용을 고려하여 결정하였다.

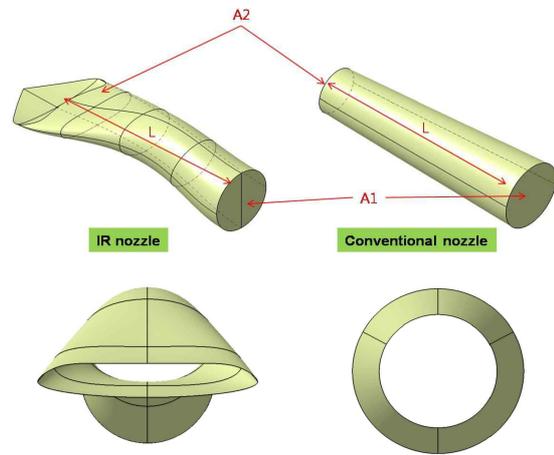


Fig. 1. 노즐 형상 정의 및 출구 단면 형상 (IR 저감 노즐 및 일반 원통형 노즐)

Table 1. 노즐의 Geometry 값

항 목	값	
	IR 노즐 (Case 1)	일반 노즐 (Case 2)
Nozzle Inlet Area (A1)	59,014 mm ²	
Nozzle Exit Area (A2)	27,840 mm ²	
Nozzle Length (L)	936 mm	
Nozzle Inlet Radius(R1)	137 mm	
Nozzle Exit Radius(R2)	-	94 mm

III. 노즐 유동 해석

3.1 해석 조건

전산유동해석이 수행되는 3차원 공간 및 경계 조건은 Fig. 2에서 제시하였다. 해석 공간은 아음속 노즐 하류 흐름을 충분히 모의할 수 있는 길이를 주었다. 노즐 입구는 Mass flow inlet, 나머지 벽면은 Pressure far field 및 Pressure outlet으로 하였으며 노즐 좌우를 Symmetry 처리하였다. 유동 해석을 위한 노즐 입구 조건으로서 노즐로 유입되는 공기 유량은 10.1 kg/s, 노즐 입구에서의 전온도는 1,125K, 전압력은 300,100Pa로 고려하였다. 그리고 노즐 입구에 공급되는 연소가스의 화학종(몰 분율)은 H₂O(0.03), O₂(0.16), CO(0.02), CO₂(0.03), N₂(0.76)를 고려하였으며, 노즐 외부 공기 유동 마하수는 0.85이다. 각 노즐 유동해석에서 생성된 격자수는 약 50만개이며 플

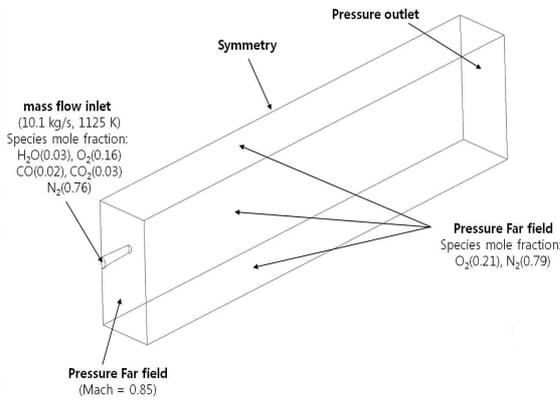


Fig. 2. 유동장 해석 영역 및 경계조건

림 부분에 조밀한 격자를 부여하였다.

계산에 사용된 난류모델은 k- ω , 복사모델은 P1, 반응 모델은 Species transport이며 ANSYS Fluent 13을 솔버로 사용하였다.

3.2 유동 해석 결과 및 검토

두 노즐의 유동해석 결과로서 XY, YZ 평면에서의 물성치 분포와 배기가스 온도 산정 결과를 비교하였다. 플룸의 속도 분포는 Fig. 3, 4에서 제시하였고, 플룸의 적외선 신호에 직접적인 영향을 주는 온도 및 CO₂ 분포 결과는 Fig. 5 - 8에서 제시하였다. 두 노즐에서 속도, 온도, CO₂ 분포를 비교해보면 IR 저감 특성이 고려된 노즐(case 1)은 노즐 하류 지점으로 갈수록 온도와 CO₂ 분율이 보다 빠르게 감소하는 특성을 보이고 있다. 즉 노즐 중심축의 같은 하류 위치에서 볼 때 IR 감소 노즐에서 배출된 플룸의 온도, CO₂ 분포가 상대적으로 낮은 특성을 보인다. 이는 IR 감소 노즐의 출구 단면이 큰 세장비를 가져 플룸의 두께가 얇고 폭이 넓은 특성을 가지게 되는데 노즐 하류로 가면서 주위의 차가운 대기와 보다 더 잘 혼합되기 때문으로 볼 수 있다. Fig. 9에서는 플룸에서 350K 이상인 영역을 렌더링한 결과를 제시하였다. 상기 온도 분포 결과와 마찬가지로 IR 저감 특성이 반영된 노즐의 플룸 길이가 더 짧게 나타남을 확인할 수 있었고, 이런 특성은 더 낮은 적외선 신호 값을 나타내어 피탐지성을 높여 줄 것으로 예상할 수 있다. 다만 이러한 IR 감소 노즐의 경우 원통형 노즐에 비해 노즐 출구에서의 유동 속도가 상대적으로 작아 이로 인한 운동량의 감소로 인해 엔진 추력이 감소하는 단점이 있다. 그리고 같은 출구 압력 조건에서 질량유량 10.1 kg/s를 공급하기 위

한 압력을 비교해보면, Case 1/2에서 각각 241146 Pa / 196146 Pa으로 나타나 IR 저감이 고려된 Case 1 노즐은 압력 손실이 다소 크게 나타났다.

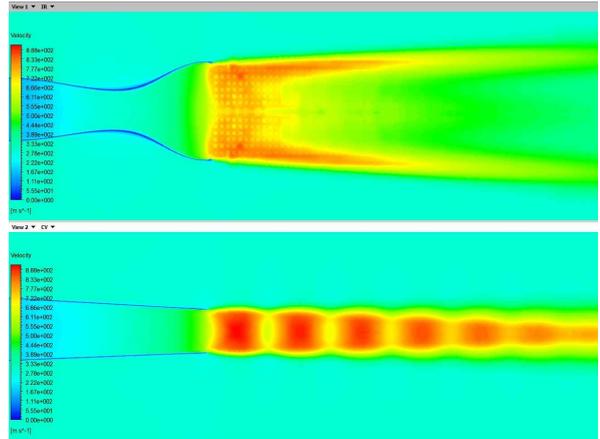


Fig. 3. XY 평면에서 속도 비교

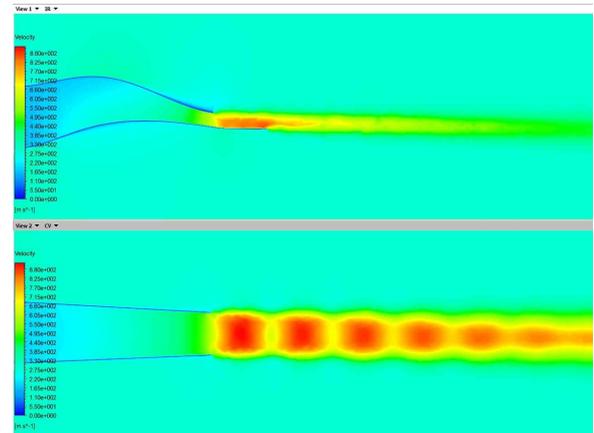


Fig. 4. YZ 평면에서 속도 비교

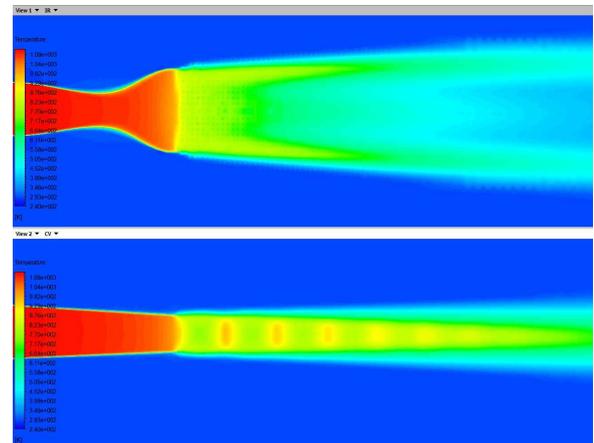


Fig. 5. XY 평면에서 온도 비교

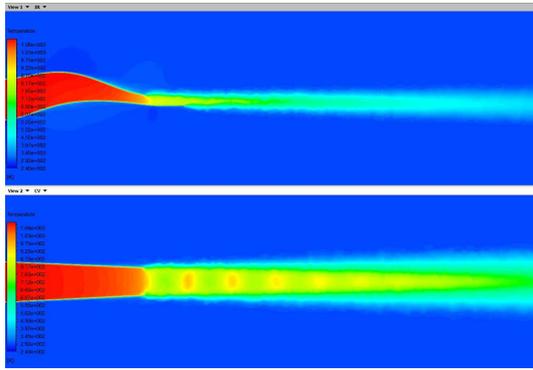


Fig. 6. YZ 평면에서 온도 비교

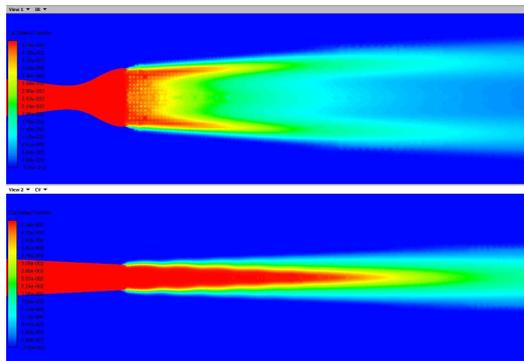


Fig. 7. XY 평면에서 CO₂ 질량 분율 비교

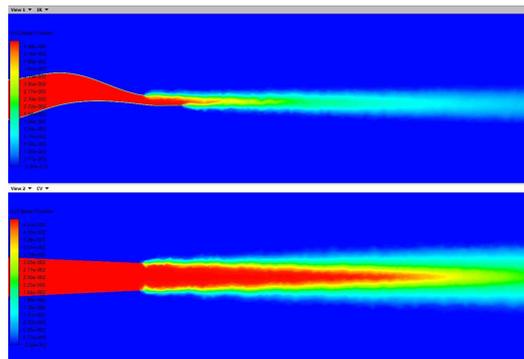


Fig. 8. YZ 평면에서 CO₂ 질량 분율 비교

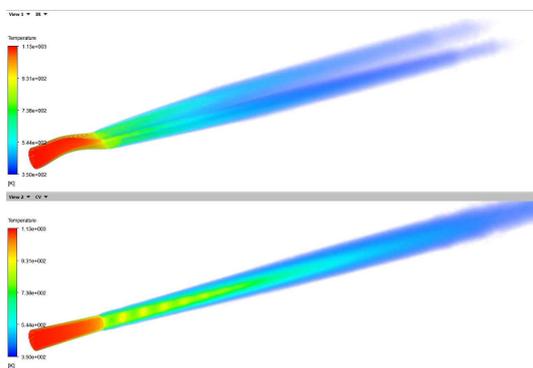


Fig. 9. 플룸 온도 렌더링 (350 - 1125 K)

IV. 적외선 신호 해석

4.1 해석 조건

적외선 신호 해석은 플룸 적외선 예측이 가능한 프랑스 OKTAL사의 SE-WORKBENCH 소프트웨어[4]를 이용하였다. 동 Code는 NATO의 IR 해석 Code인 NIRATAM (NATO Infrared Air Target Model)을 기초로 하고 있으며 각종 항공기의 Plume IR 해석에 적용되고 있다 [5]. 동 Code는 엔진 노즐끝단의 플룸에서 발생하는 파장별 복사신호를 예측하기 위해 Ray tracing 기법을 이용하여 산란, 흡수 반사 과정을 거쳐 최종적으로 센서에 도달하는 일정 파장구간에서의 복사 물성치를 평균하여 나타내는 방법인 밴드모델을 이용하고 있다[5]. IR 해석에 필요한 입력 자료로서는 유동해석 결과 및 Plume 외기 조건 등이 있으며, IR 해석 조건은 표 2에서 정리하였다. 해석에서 플룸의 영향만을 비교하기 위해 노즐 고체 표면에서 발생하는 적외선 신호는 고려하지 않았다. 또한 노즐 형상에 따른 외부 플룸 유동장이 IR에 미치는 영향을 보기 위해 노즐 내부 플룸에 의한 적외선 신호는 고려하지 않았다. 플룸은 항공기 표면에 비해 고온이므로 중적외선(MWIR, 3~5 μ m)만 고려하였다. 또한 플룸의 IR 신호 특성만을 고려하기 위해 대기 특성을 고려하지 않고 IR 신호가 100 % 투과된다고 가정하였다. View point(VP)와 Target point(TP)사이의 거리는 5,000 m로 설정하였다. IR 센서가 노즐을 바라보는 위치는 노즐 후방부를 고려하였고, Azimuth/elevation angle은 Fig. 10의 정의에 따라 -90°에서 90°까지 고려하였다. 노즐 플룸 형상이 좌/우면에서 서로 대칭이므로 Azimuth 0°에서 90° 범위에서 계산된 IR 신호 값이 -90°에서 0° 범위의 값과 동일하다고 가정하였다. IR 저감 노즐의 경우 노즐 출구면 하단부가 출구 상단부보다 길게 나와 있어 노즐 후방하단부(elevation -90° ~ 0°)에서 바라볼 때 플룸을 가리게 되므로 후방상단부(elevation 0° ~ 90°)에서 보는 IR 신호보다 낮은 값이 나타나게 된다. 반면, 일반노즐의 경우 노즐 출구 하단면이 길게 나와 있지 않으므로 상하 대칭인 플룸 및 IR 신호 값이 나타나게 된다. 즉, 두 노즐의 출구 하단면의 형상 차이로 인해 동등한 조건에서의 IR 신호를 비교가 용이하지 않다. 따라서, 동일한 노즐 출구 하단부 형상 조건을 비교하고자 IR 저감 노즐의 elevation 0°에서 90° 범위에서 예측된 IR 신호 값은 -90°(270°)에서 0° 범위와 동일한 것으로 간주하고 원통형 노즐의 IR 신호와 비교하였다.

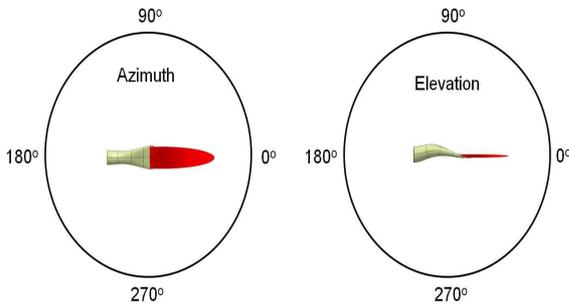


Fig. 10. Azimuth/Elevation 각도 정의

Table 2. 적외선 신호 해석 조건

해석조건 항목	특성 / 값
파장영역 (wavelength)	중적외선 (3~5 μm)
대기 특성 고려여부	고려하지 않음
VP, TP 사이 거리	5,000 m
Field of View (FOV)	0.05°(H)×0.05°(V)
센서의 IR 투과특성	100 %
Azimuth angle	0 ~ 90° (10° 간격)
Elevation angle	0 ~ 90° (10° 간격)

4.2 적외선 신호 해석 결과 및 검토

적외선 신호 비교는 FOV의 면적이 고려된 Total intensity[W/sr]를 기준으로 하였으며 Azimuth/elevation 각도에 따른 상대적인 Total intensity 차이는 Fig. 11, 12와 같다. 두 결과 모두 VP 위치에 따라 값의 차이가 있지만 유동 해석결과에서 예상된 바와 같이 IR 저감설계가 반영된 노즐(Case 1)에서 방출된 플룸의 적외선 신호 수준이 일반적인 원통형 노즐(Case 2)의 플룸 적외선 신호보다 약 50% 낮게 예측되었다.

Azimuth angle 변화에 따른 결과를 살펴보면, 두 노즐의 IR intensity가 0° 위치에서는 낮은 intensity를 보이지만 나머지 위치에서는 각도 증가에 따라 조금씩 감소되는 유사한 경향을 보였다. 0° Angle에서 낮은 신호가 측정되는 것은 모든 플룸이 국부적인 영역으로 중첩되어 보이게 되는데 안쪽의 고온 플룸이 바깥쪽의 차가운 플룸에 의해 가려지는 영향 및 FOV에서 보이는 플룸 면적이 작기 때문이다.

Elevation angle 변화에 따른 결과를 살펴보

면, 일반적인 원통형 노즐(Case 2)은 Azimuth angle 변화에 따른 경향성과 유사하게 나타남을 알 수 있고, IR 감소 노즐(Case 1)의 경우에는 Elevation angle이 10도와 350도 조건에서 최대 값을 가짐을 알 수 있다.

Table 3에서 Azimuth angle 0, 40, 90° 인 경우의 IR image를 제시하였다. 노즐 출구에서의 유동해석조건이 Under-expansion 조건이기 때문에 수축노즐임에도 노즐 출구 이후에 Shock 패턴이 보이는데, 이를 통과하면서 수반되는 온도 변화가 적외선 이미지에 반영되어 있음을 확인할 수 있다. 두 노즐의 플룸 모두 출구면 직후에는 높은 IR 신호를 나타내다가 하류로 흘러감에 따라 점차 감소하고 있으나 차이를 보인다. IR 감소 노즐의 경우 급격히 Radiance가 감소하는 반면, 일반 노즐은 더 긴 하류 위치에서 Radiance가 감소하는 특성을 확인하였다.

어느 파장영역이 주된 적외선을 방출하는지 살펴보기 위해 상대적인 Spectral radiance 값을 비교하였다. 이를 위해 3~5 μm 파장영역에서 0.02 μm 단위로 계산된 100장의 Radiance image data를 추출한 후 이 과정에서 얻어진 파장 간격별 적분된 Radiance 값을 미분하였다. 대표적인 결과는 Fig. 13에서 제시하였으며 그 결과 적외선 신호는 4.2~4.4 μm 의 Wavelength에서 집중되는 경향을 보였다. 이는 플룸 적외선에 대부분의 영향을 미치는 CO₂ 파장의 대기투과특성과 일치한다[6, 7].

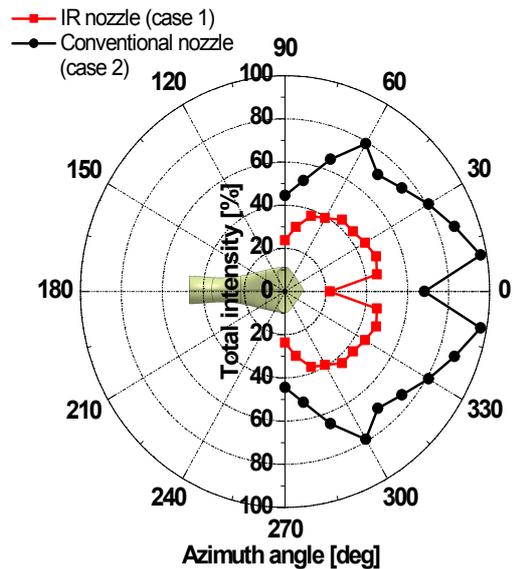


Fig. 11. Azimuth각도에 따른 Total intensity

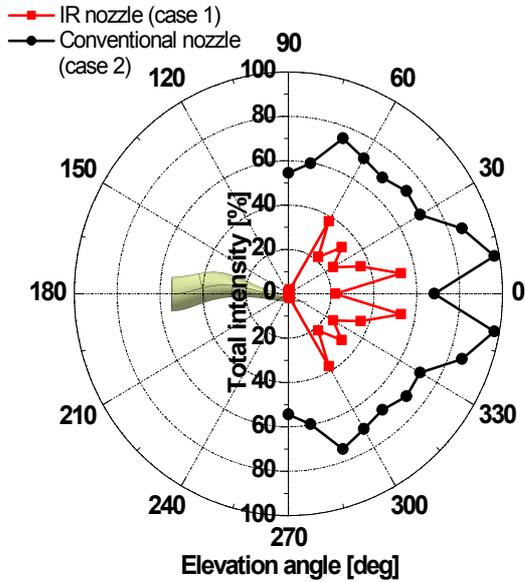


Fig. 12. Elevation 각도에 따른 total intensity

Table 3. Azimuth angle 0, 40, 90°에서 IR 이미지

구분	Azimuth angle		
	0°	40°	90°
IR 감소 노즐			
일반 노즐			

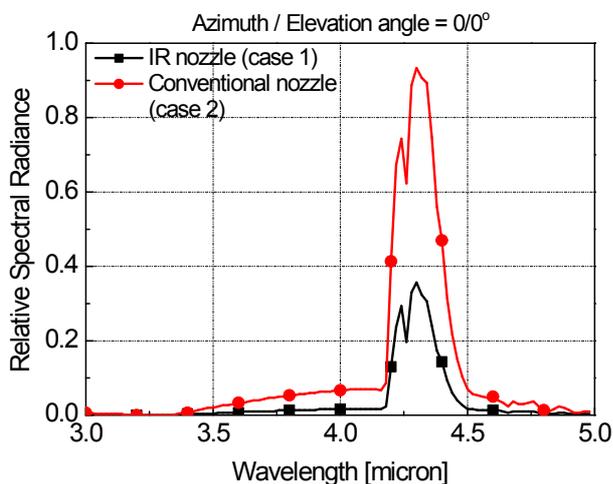


Fig. 13. 두 노즐의 Spectral intensity 비교

추가적으로 터빈 출구(노즐 입구) 온도 변화에 따른 적외선 신호 특성을 고찰하였다. 터빈 출구 온도는 기본 온도인 1,125K 이외에 1,000K, 1,200K, 1,300K 세 경우를 추가하였으며 IR 감소 노즐의 경우에 한하여 계산하였다.

터빈 출구 온도에 따른 상대적인 Spectral intensity를 Fig. 14에서 비교하였다. 충분히 예측되는 결과이지만 터빈 출구 온도 상승은 플룸 온도를 상승시키게 되므로 터빈 출구 온도가 증가함에 따라 IR intensity가 증가하는 경향을 보이고 있다. 온도 상승에 따라 타 파장영역에서 특성이 나타나는 등의 경향은 나타나지 않았으며, CO₂에서 방사되는 4.2 - 4.4μm 파장 영역에서 주된 IR 방사가 나타남을 확인하였다.

Fig. 15는 적외선 Total intensity 결과를 Azimuth angle에 따라 제시하였으며, 일반 노즐에서 부여한 1,125 K 경우와 같이 비교하였다. 마찬가지로 터빈 출구 온도가 증가함에 따라 IR Intensity가 증가하는 경향이 나타났고 온도를 약 1,300K까지 증가시킨 경우 일반 노즐 입구온도 1,125K 결과와 대등한 Intensity를 보였다. 즉, IR 특성이 고려된 노즐의 특성상 터빈 출구 온도가 상당히 증가하더라도 일반 노즐에 비해 낮은 IR 방출 특성을 나타내고 있고 이는 IR 감소 노즐을 채택할 경우 터빈 재질이 허용하는 범위 내에서 온도를 올려 엔진 성능을 보다 증가시키더라도 일반 노즐보다 플룸 자체에 의한 피탐지성이 우수할 수 있음을 의미한다. Table 4는 터빈 출구 온도에 따른 IR 이미지를 Azimuth angle = 0, 40, 90°인 경우에 대해 비교/제시한 결과이다. 온도가 상승함에 따라 플룸 온도가 상승하여 IR 센서에 도달하는 플룸 형상이 보다 밝게 나타나 더 잘 추적될 것으로 예상되었다.

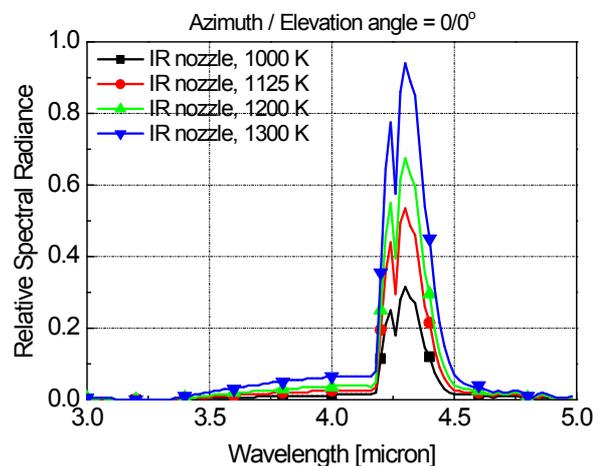


Fig. 14. 터빈출구 온도 변화에 따른 spectral intensity 비교

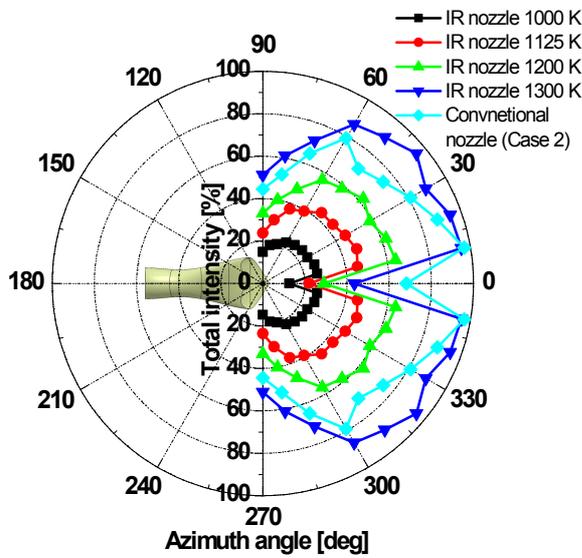


Fig. 15. 터빈출구 온도에 따른 Total intensity

Table 4. 터빈출구 온도에 따른 적외선 이미지

구분	Azimuth angle		
	0°	40°	90°
1000 K			
1125 K			
1200 K			
1300 K			

V. 결 론

본 논문에서는 적외선 신호 감소가 요구되는 비행체용 엔진 노즐 형상 최적화 설계를 위해 적외선 신호 감소가 고려된 IR 저감 노즐과 동 특성이 고려되지 않은 일반적인 원통형 엔진노즐에 형상 설계를 수행하고, 이 두 노즐에 대한 열유동해석을 수행하였다. 유동해석 결과로부터 적외선 저감 설계가 고려된 노즐의 경우 노즐 출구 단면이 큰 세장비를 가져 플룸의 두께가 얇고 폭이 넓은 특성을 가지게 됨으로써 노즐 하류로 가면서 주위의 차가운 대기과 보다 더 잘 혼합이 됨을 알 수 있었고, Plume 길이가 더 짧게 나타남을 확인할 수 있었다. 열유동해석 결과를 이용하여 두 노즐에 대한 적외선 신호해석을 수행한 결과, IR 저감 특성이 반영된 노즐이 일반적인 노즐에 비해 약 50% 정도의 적외선 신호 수준을 나타냈다. 이로부터 IR 저감 설계가 반영된 노즐의 경우 낮은 적외선 신호 값을 나타내어 피탐지성을 크게 향상시켜 줄 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) Mahulikar, S. P., Prasad, H. S. S. and Rao, G. A., "Infrared Signature Studies of Aerospace Vehicles," *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 43, 2007, pp. 218-245.
- 2) Rao, G. A. and Mahulikar, S. P., "Aircraft Powerplant and Plume Infrared Signature Modelling and Analysis," *AIAA 2005-221*, January 2005
- 3) Saab UAV and UCAV Roadmap, Saab
- 4) SE-WORKBENCH, OKTAL, 2011
- 5) Nicolas DOUCHIN and Jean LATGER, "PRESAGE Project: extension of the SE-Workbench for the computation pf aircraft infrared signatures", *ITBM&S 2010 Workshop proceedings*
- 6) 전재용, "적외선 대역에서의 비행체 탐지를 위한 열적 모델링," 석사학위논문, 연세대학교, 1998.
- 7) 임상민, 김병로, "IR 방사 수준 변화에 따른 항공기 생존성 및 치사성 변화 연구," *KSAS08-1702*, 2008, pp.855-858.