《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 25, No. 5, October 2014, pp. 245-253 ISSN : 1225-6285(Print)
DOI: http://dx.doi.org/10.3807/KJOP.2014.25.5.245 ISSN : 2287-321X(Online)

Long-Distance Plume Detection Simulation for a New MWIR Camera

Jeeyeon Yoon[1], Dongok Ryu[2], Sangmin Kim[3], Sehyun Seong[2], Woongsup Yoon[3], Jieun Kim[4], and Sug-Whan Kim[2†]

[1]*Seeker&EO/IR Laboratory, LIG nex1, Yongin 446-798, Korea*
[2]*Space Optics Laboratory, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea*
[3]*Advanced Energy & Propulsion Laboratory, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea*
[4]*3rd R&D Institute, Agency for Defense Development, Daejeon 305-600, Korea*

(Received August 28, 2014; Revised manuscript September 25, 2014; Accepted September 30, 2014)

We report a realistic field-performance simulation for a new MWIR camera. It is designed for early detection of missile plumes over a distance range of a few hundred kilometers. Both imaging and radiometric performance of the camera are studied by using real-scale integrated ray tracing, including targets, atmosphere, and background scene models. The simulation results demonstrate that the camera would satisfy the imaging and radiometric performance requirements for field operation.

Keywords: Plume detection, IR camera, Plume modeling, Performance simulation, Integrated ray tracing
OCIS codes: (110.0110) Imaging systems; (110.3080) Infrared imaging; (110.1758) Computational imaging

장거리 화염 탐지용 적외선 카메라 성능 광선추적 수치모사

윤지연[1] · 류동옥[2] · 김상민[3] · 성세현[2] · 윤웅섭[3] · 김지은[4] · 김석환[2†]

[1]LIG넥스원 탐색기/광학연구센터
㊞ 446-798 용인시 기흥구 마북로 207

[2]연세대학교 우주광학연구실
㊞ 120-749 서울특별시 서대문구 연세로 50

[3]연세대학교 미래에너지추진연구실
㊞ 120-749 서울특별시 서대문구 연세로 50

[4]국방과학연구소 제 3기술연구본부
㊞ 305-600 대전광역시 유성구 수남동 111

(2014년 8월 28일 받음, 2014년 9월 25일 수정본 받음, 2014년 9월 30일 게재 확정)

본 논문에서는 사거리가 수백 km에 이르는 장거리 미사일의 화염을 발사 초기에 탐지할 수 있는 적외선 카메라에 대한 현실적 영상성능 수치모사 결과를 제시한다. 적외선 카메라는 중적외선 대역용 다수의 렌즈로 구성된 굴절식 광학계이다. 관측대상과 배경의 모델링 전체를 포함하는 규모의통합적 광선추적을 수행함으로 카메라를 통해 보는 영상과 검출기에 도달하는 빛의 세기에 대한 정보를 획득하였다. 관측대상이 되는 미사일 화염의 방사휘도(radiance)는 CFD 타입의 복사전달 기법으로 계산하였으며 이를 광원으로 삽입하여 광선추적을 수행하였다. 관측배경이 되는 대기 모델은 MODTRAN을 사용하여 열복사의 경로, 단일/다중 산란 복사와 투과율을 계산하였다. 광선추적 수치모사의 결과로써 관측대상의 이미지와 도달한 복사전달 성능(radiometric performance)의 검증을 통해 적외선 카메라가 요구사항을 만족함을 입증하였다.

Keywords: 화염탐지, 적외선카메라, 화염 모델링, 성능 수치모사, 통합적 광선추적
OCIS codes: (110.0110) Imaging systems; (110.3080) Infrared imaging; (110.1758) Computational imaging

†E-mail: kimsfield@gmail.com
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

I. 서 론

정찰 및 감시를 위한 가시광 및 적외선 광학계의 광학적 성능은 선진국에서 지난 수십 년간 많은 발전을 거듭해왔으며 현재 우리나라에서도 그 와 같은 광학계 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 본 연구에서는 원거리 미사일 화염을 발사초기에 3~5 um에 이르는 중적외선 대역에서 탐지하기 위해 새롭게 설계된 카메라의 성능수치모사를 제시한다. 이 적외선 카메라의 광학계는 F수 2의 굴절식으로 설계되었으며 적외선 검출기는 화소크기 20 μm로 640×512의 배열로 구성되어있다. 이러한 적외선 카메라가 바라보는 대상과 배경의 모델링 전체를 포함하는 광선추적을 수행함으로 카메라를 통해 보는 영상과 검출기에 도달하는 빛의 세기에 대한 정보를 획득하였다.

모델링의 주요 요소는 관측을 위한 광학계와 대상이 되는 화염과 배경, 이 3가지로 구성되어 계산이 이루어진다. 원거리 미사일 화염의 방사휘도는 CFD(Computational fluid dynamics) 타입의 복사전달 기법으로 계산하였으며 이는 광선추적 모델에서 광원으로 삽입되었다. 화염의 배경은 크게 대기와 지형으로 이루어지는데 대기모델은 MODTRAN 프로그램을사용하여 열복사의 경로, 단일/다중 산란 복사와 투과율을 계산하였으며 지형모델은 BRDF(Bidirectional reflectance distribution function)모델을 사용하여 통합적 광선추적을 수행하였다. 이를 바탕으로 특정 관측 조건 하에서 카메라가 추적하는 미사일 화염의 광학계 검출면에 결상된 이미지와 정량적인 복사량을 계산하였다.

이를 위해서 2장에서는 적외선 광학계의 설계 결과와 수치모사 방법론을 소개하며 3장에서는 수치모사의 주요 입력요소인 화염과 대기, 지면의 모델링을 서술하였다. 마지막으로 4장에서는 광선추적 수치모사의 결과를 제시함으로 시스템 레벨에서의 기기 성능검증을 수행하였다.

II. 광학계 설계 및 관측대상 탐지 계획

2.1. 광학계 설계 및 성능

운용개념과 요구사항에 맞는 성능의 원거리 화염탐지용 적외선카메라를 설계하기 위해 운용개념에 맞는 탐지거리를 기준으로 하여 대기투과 특성, 광학계/검출기 특성, 화염의 세기, 미사일 관측 거리 등을 통하여 주요 광학 설계요소를 도출하였다. 이렇게 설계된 카메라는 Table 1과 같은 기본 사양을 갖추고 있다. 센서는 640×512의 배열을 가지는 냉각식 적외선 검출기를 채택하였으며 광학계는 F수 2의 3~5um의 파장대역의 적외선 카메라로 투과율 65% 이상을 달성하기 위하여 렌즈 매수를 최대한 제한하여 설계하였다. 또한 Fig. 1에서 보듯 축거울 2장을 사용하여 90도로 두 차례 광로를 꺾어 소형화 하였다.

이렇게 설계된 광학계는 Fig. 2에서 보듯 하나의 화소에 에너지가 얼마나 집광될 수 있는 지를 나타냄으로 성능을 측정하는 encircled energy를 통해[1]화소크기 20㎛의 원에 축상으

TABLE 1. General specifications of the MWIR camera

Parameter	Specification
F-number	2
Spectral range	3~ 5 μm
Pixel size	20 μm × 20 μm
Pixel number	640 × 512
Transmittance	65%
MTF at nyquist frequency	≥0.3
Nyquist frequency	25 cycles/mm

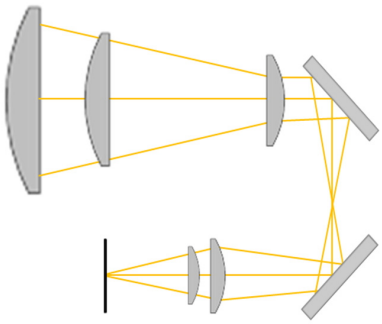


FIG. 1. Optics design concept[13].

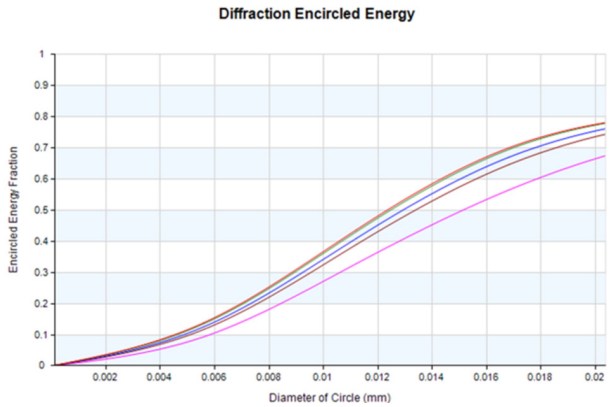


FIG. 2. Encircled energy of IR camera.

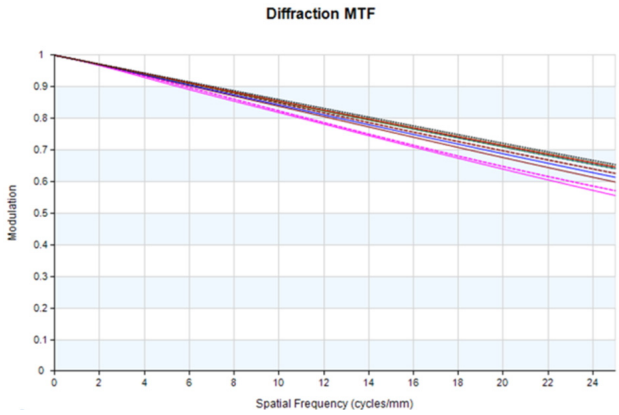


FIG. 3. Optics MTF of IR camera.

로 들어온 광량이 75% 이상 집광됨을 확인할 수 있다. 또한 전체 광학계의 성능을 대표하는 광학적 성능 지수인 MTF (Modulation transfer function)를 통하여 공간주파수 증가에 따른 contrast의 저하를 확인할 수 있었다[2]. Figure 3에서 보듯 나이퀴스트 주파수인 25cycles/mm에서 화면 전체영역 0.58 이상이었으며 특히 중심영역에서의 MTF값이 회절한계에 근접함을 확인하였다.

2.2. 모델링 및 수치모사 방법

설계된 적외선 카메라의 발사지역이나 대기조건 등과 같은 특정 관측조건하에서 탐지 대상인 화염이 검출면에 결상되는 열 영상을 수치모사하기 위해 통합적 광선추적 기법을[3] 사용하였다. 이 기법은 류동옥[4] 등에 의하여 수 년간 개발되어 다양한 광학 시스템의 성능을 시스템 레벨에서 성능을 예측해왔다. 수치모사 환경에 광원, 관측대상, 관측조건, 관측기기를 구성하고, 광원에서 출발한 빛이 관측기기의 검출면에 도달할 때까지의 광선의 경로를 추적하여, 관측기기의 결상 및 복사성능을 예측하도록 구성하였다. 이렇게 거리 D만큼 떨어진 표적에서 결상면으로 도달할 광선의 추적은 식 (1)과 같이 정량적으로 플럭스 밀도(flux density)로 표현된다[5]. 이러한 통합적 광선추적 기법을 통해 광학적 성능 지표인 encircled energy나 MTF를 대신하여 화염의 영상과 복사전달 성능을 제시함으로 적외선 카메라의 시스템 레벨의 성능 분석이 가능하다.

$$d\phi = dL_s dA_s d\Omega = dL_s dA_s \frac{dA_d}{D^2} \quad (1)$$

식 (1)에서 $d\phi$는단위 플럭스를, dA_s는 결상면 단위면적, $d\Omega$는 단위입체각, dA_s는 관측대상 단위면적을 나타낸다. 검출면에서의 미사일 화염의 영상과 밝기에 대한 정량적인 수치모사를 위해서는 먼저 장거리 미사일 및 단거리 미사일의 거리에 맞춰 수십 또는 수백 km에 화염 모델링을 위치시켜야 하며 카메라는 이동 중에도 시선을 계속적으로 미사일 발사장의 좌표를 지향하고 있어야 한다. 또한 배경의 수치모사는 발사 직후부터 이어질 화염의 궤적을 카메라로 촬영하는 시나리오를 토대로 수행되었다. 이에 관측 목표물을 지향하고 있는 광학계로 입사되는 빛의 경로를 추적하였는데 이는 대기와 광학면에서 반사, 투과, 흡수, 굴절 및 산란되어, 최종적으로 검출면에 도달하는 복사량 및 분포를 수치모사 하였으며 이에 대한 개략도는 Fig. 4와 같다. 적외선 검출기의 화소크기, 등가잡음온도차(NETD), 최소분해 가능온도차(MRTD) 등을 이용하며 관측시간에 따라 변화되는 요소들을 고려하여 결상면에서의 영상을 생성하였다.

III. 광선추적 모델의 구성

3.1. 미사일 화염 모델

광원이 되는 미사일은 앞서 예측된 화염의 IR 신호의 파장별 분포와 복사 강도를 이용하여 사거리가 수십 km 정도의 단거리 미사일과, 수백 km에 달하는 장거리미사일을 모델링하였다. 미사일 화염의 복사신호를 예측하기 위해 온도, 압력 및 화학종의 몰분율을 알고 있어야 하며 따라서 유동장에 대한 해석이 선행되어야 한다[6]. 유동장 해석은 질량, 운동량 및 에너지 보존식과 유동장 내에서의 화학 반응을 모사하기 위한 화학종 방정식의 해를 구하였다. 미사일의 화염은 노즐을 통과하여 초음속으로 배출되는 고 Reynolds 수의 유동과 발사 초기부터 가속, 탄도 비행의, 저 Reynolds 수부터 고

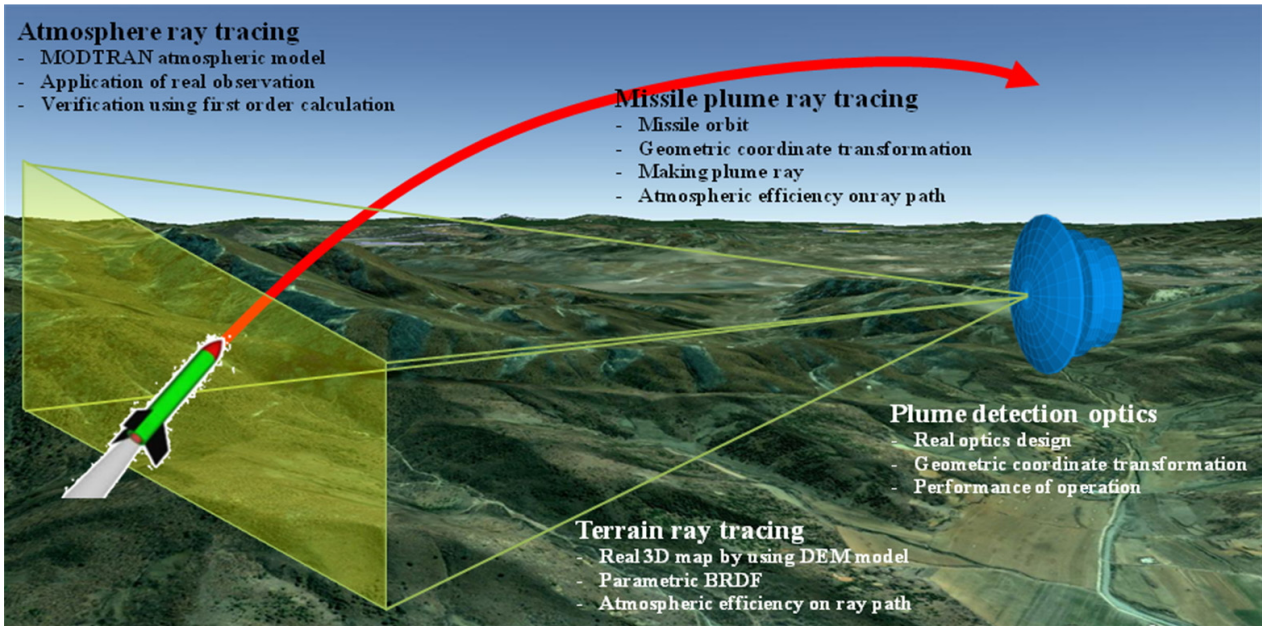


FIG. 4. Ray tracing model concept[13].

Reynolds 수의 외기 유동을 모사해야 하며, 화염 내부에 복잡한 충격파 구조를 예측해야 한다. 특히 미연소된 연료가 외기의 산소와 만나 발생하는 2차연소는 IR 신호에 크게 영향을 미치기 때문에[7]정확한 화염 모델링을 위해 꼭 고려되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 density based 기반의 해석기법을 사용하였으며, 비점성항의 차분은 정확한 충격파 모사를 위해 Roe의 FDS를 사용하였다. 난류 모델은 standard k- 모델을 사용하였으며, 2차 연소를 고려하기 위해 Avital이 [8] 제시한 9개의 화학종 및 10개의 요소반응식을 사용하였다.

미사일 화염의 복사신호를 구하기 위해 layered integration model을 사용하였다. 이 모델은 광선이 진행하는 비균질 매질을 여러 균질 매질의 층으로 가정하여 해석하는 방법[9]으로, Monte Carlo 기법이나 Discrete Ordinate기법과 같은, 공간적인 복사 열전달을 해석하는 방법이 아닌 광선 자체의 복사강도를 구한다는 점에서 방법적으로 간단하고 계산 시간이 줄어든다는 장점을 가진다. 산란을 무시할 경우 특정 방향으로 진행하는 광선의 복사강도는 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dI_\eta}{ds} = \kappa_\eta (I_{b,\eta} - I_\eta) \qquad (2)$$

여기서 는 파장에 따른 복사강도이며, 는 이동 방향, 는 매질의 흡수계수를 나타낸다. 따라서 각각의 광선에 대해 식 (2)의 복사강도를 구하였다.

복사 물성치인 흡수계수는 온도, 압력 및 화학종의몰분율에 따라 달라지며, 이를 예측하기 single group line 기법[9]을 사용하였다. 비균질 매질에 대한 영향을 고려하기 위해 Curtis-Godson 기법[9]을 고려하였다. 본 연구에서는 주요 방사체인 CO_2, H_2O, CO, OH 및 HCl을 고려하였다.

유동장 해석결과인 온도 등곡선은 Fig. 5와 같이, 이를 바탕으로 방사특성을 예측을 통한 복사 세기에 대한 결과의 일부가 Fig. 6과 같이 확인되었다. 이러한 화염의 복사데이터는 ASAP (Advanced System Analysis Program)에 광원으로 삽입되어 광선추적이 수행되었다.

이렇게 모델링된 미사일은 발사 후 시간에 따른 기하학적 위치변화는 미사일 종류와 시간에 따른 가속량, 발사 지점과 타격지점 등의 요소를 토대로 계산되었다. 이렇게 얻어진 미사일의 궤도는 각 프레임별 time interval에 따라 적용하여

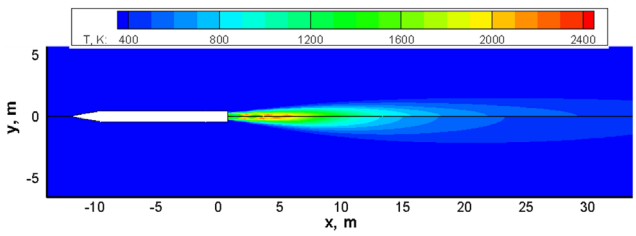


FIG. 5. Temperature contour of short range missile, which flight speed is mach number 0.8 (upper) and 0.2 (bottom).

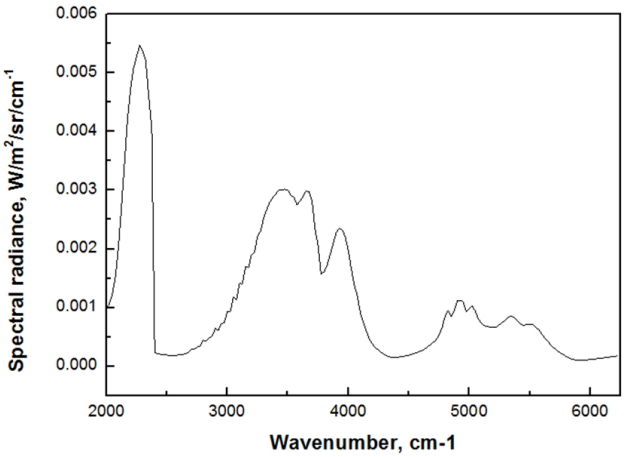


FIG. 6. Typical spectral radiance of ray which pass the high temperature region.

광선추적을 하여 영상을 획득하였다. 미사일 표면 및 화염의 방사특성은 흑체를 가정하여 등방성을 가지고 산란되는 Lambertian 모델을 식 (3)의 Total integrated scatter(TIS)를 전체 산란 각도에 균일하게 적용함으로 구현하였다.

$$\mathrm{TIS}(\theta_0, \phi_0) = \int_0^{4\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \mathrm{BRDF}\,(\theta, \phi, \theta_0, \phi_0) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (3)$$

여기서, θ는 산란고각, ϕ는 산란방위각, θ_0는 반사고각, ϕ_0는 반사방위각을 의미한다.

3.2. 대기 배경 모델링

화염의 복사량은 대기를 투과하면서 흡수, 방사, 굴절, 반사 및 산란의 효과에 의하여 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향을 정량적으로 표현할 수 있는 대기투과도 MODTRAN을 이용하여 계산이 가능하다. 카메라의 운용환경을 고려하여 25 km의 시정(Visibility), rural 에어로졸 모델, 청명한 여름의 중위도 지역을 기본 조건으로 입력하여 대기투과도를 계산하였다.

대기의 열적 방사(thermal emission)를 수치모사하기 위해는 Fig. 7에서 보듯 광선추적을 이용하여 하나의 화소가 가지는 광로의 기하학적 정보 (X, Y, Z 위치 좌표, 카메라 천정각, 지구중심각)를 계산하였다. 그래프는 검출기 640× 512 배열에 X, Y, Z 좌표의 기하학적 정보를, 천정각 (Zenith angle)은 검출기 배열을 보간하여(interpolation) 대표값을 할당하였다. 이러한 기하학적 정보를 주요 입력요소로 하여 MODTRAN을 통해 하여 Fig. 8과 같이 검출기 배열로 입사되는 대기의 투과율과 복사량(W/m²/sr)을 구하였다.

3.3. 지형배경 모델링

적외선 파장대역에서는 관측대상 및 배경 자체가 열원이자 광원이 되므로 IR 광학계의 검출면까지 도달하는 광선의 복사량을 이용하여 수치모사를 진행해야 한다. 이러한 화염영

TABLE 2. MODTRAN calculation parameter

Parameter	Specification
Radiative transfer model	MODTRAN V5.2.1
Atmosphere	- Model atmosphere : Mid-latitude Summer - Types of atmospheric Path : Slant path to space or ground - Mode of execution : Radiance with scattering / Transmission - Multiple scattering : MS on flux at H2 (surface) - Gas altitude profiles : Default to model atmosphere
Surface :	Pre-stored spectrally variable surface albedo - Mixed forest - Ocean
Solar data	- Irradiance parameter : Default TOA - Zenith angle : 22 deg(clear sky), 60 deg (cloud)
Aerosol	- Clear sky : Rural VIS 23km - Cloud : Nimbostratus cloud model (0.16km~0.66km) - Mie scattering
Geometry and spectrum	- 80×64 different input zenith angle, interpolate to 640×512 - Wavelength : 3~5㎛ - Spectral resolution : 1 cm^{-1}

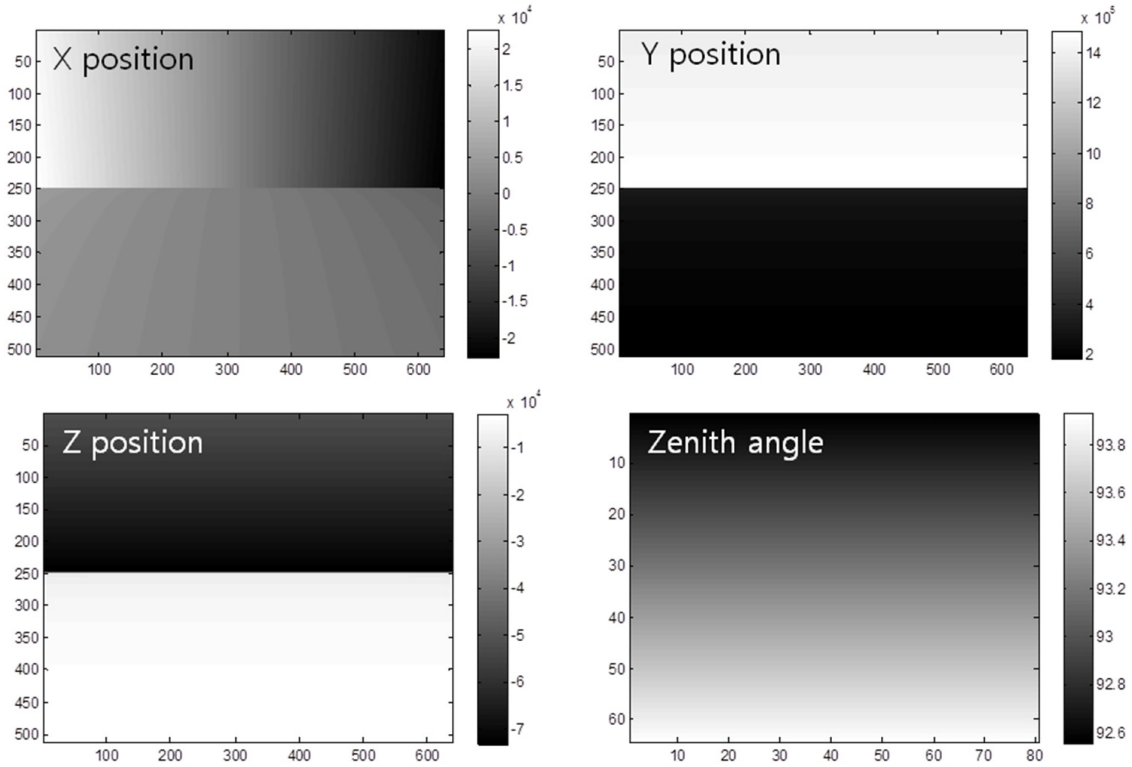
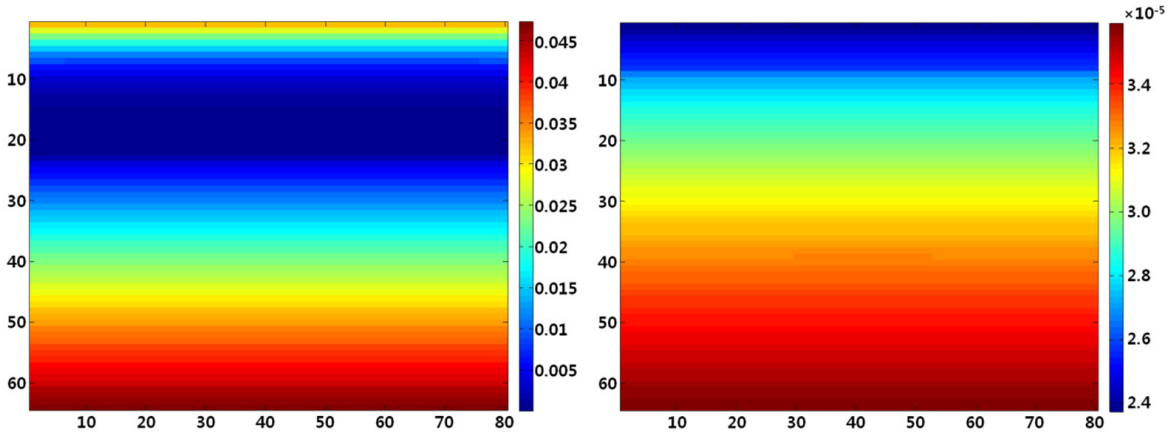


FIG. 7. Optical path geometric information of one pixel by ray tracing.

상의 배경이 되는 지형모델은 발사지 주변의 3차원 지형 모델을 확보하여 구현하였는데 이는 고도 해상도 1m, 공간 해상도 30m 급의 DEM(Digital elevation model)을 사용하였다. 이렇게 구성된 3차원 지형모델은 광선추적 프로그램 내에 삽입하여 계산에 활용한다. 3차원 지형모델의 표면은 Mixed forest로 비등방성의 산란특성을 가지는 BRDF로 표현되는데 이는 Roujean[10]에 의해 정의된 “Ross_thick”의 volumetric kernel을 통해 계산되었으며 이는 Breon[11]에 의한 hot spot 모듈과 통합된 모델이다. 이렇게 구현된 3차원 지표면 모델링은 미사일 발사장을 포함하여 Fig. 9와 같은 형태를 가진다. 이러한 지표면은 이동 경로를 따라 구동하는 카메라의 움직임을 모사하기 위하여 회전시키며 영상을 획득하였다.



(a) (b)

FIG. 8. Clear sky atmospheric transmittance (a) and background radiance (b).

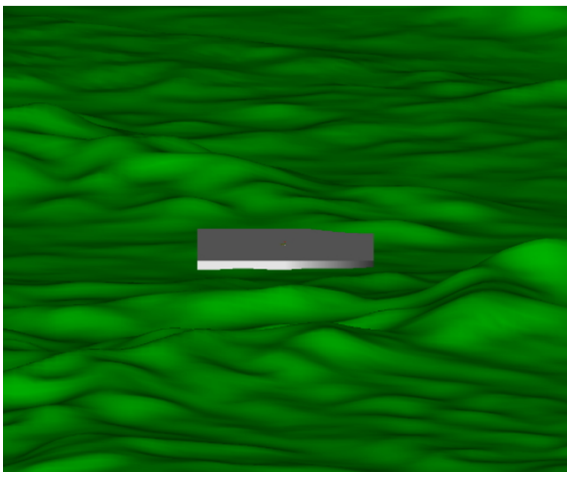


FIG. 9. 3D Digital elevation data input to ray tracing.

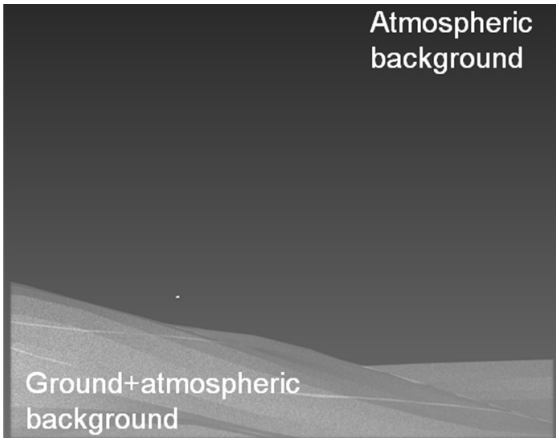


FIG. 10. Ground and atmospheric background image by ray tracing.

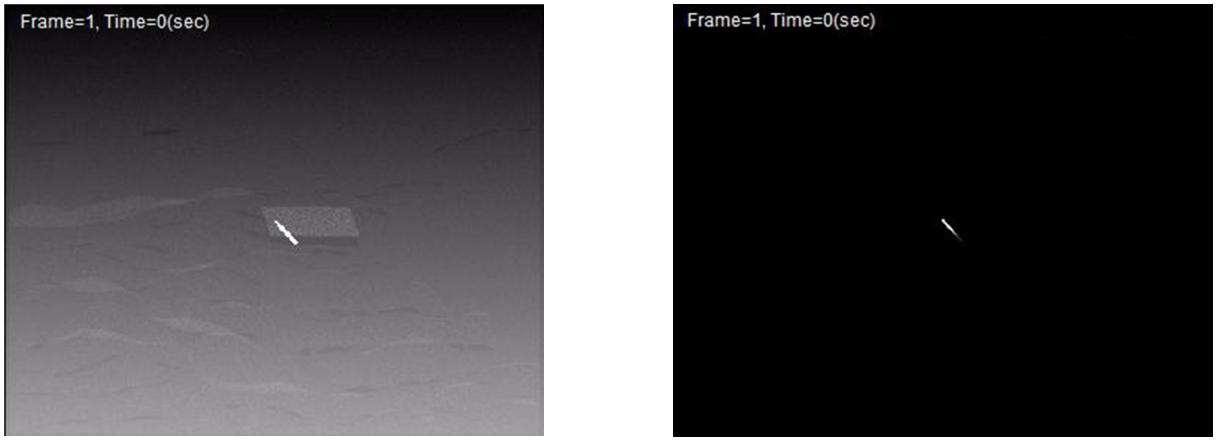
광선추적을 통해 획득된 대기 배경모델과 지형 배경모델은 Fig. 10과 같다.

IV. 수치모사 결과

최종적으로 적외선 카메라의 관측조건과 관측배경(화염모델, 대기모델, 지형모델), 관측대상(화염 모델)을 3차원 공간상에 기본적으로 배치하고 광원에서부터 검출면까지 광선을 추적하여 아래와 화염영상을 획득하였다. 획득된 영상의 Dynamic range 조정을 통해 나타난 화염은 Fig. 11과 같다. 광원이 되는 화염의 IR 신호가 광학계의 검출면까지 도달하는 광선의 복사량을 이용하여 수치모사를 통해 계산되었는데 확대된 영상에서 검출면으로 화염의 형태가 잘 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 가상의 화염영상은 카메라의 기동, 화염의 움직임과 같은 시간의 변화에 따른 3차원 공간상의 카메라와 화염의 위치 변화 효과를 Fig. 12와 같이 계산하여 적용함으로 실제 검출면에서 얻을 수 있는 영상성능을 더 유사하게 모의할 수 있다.

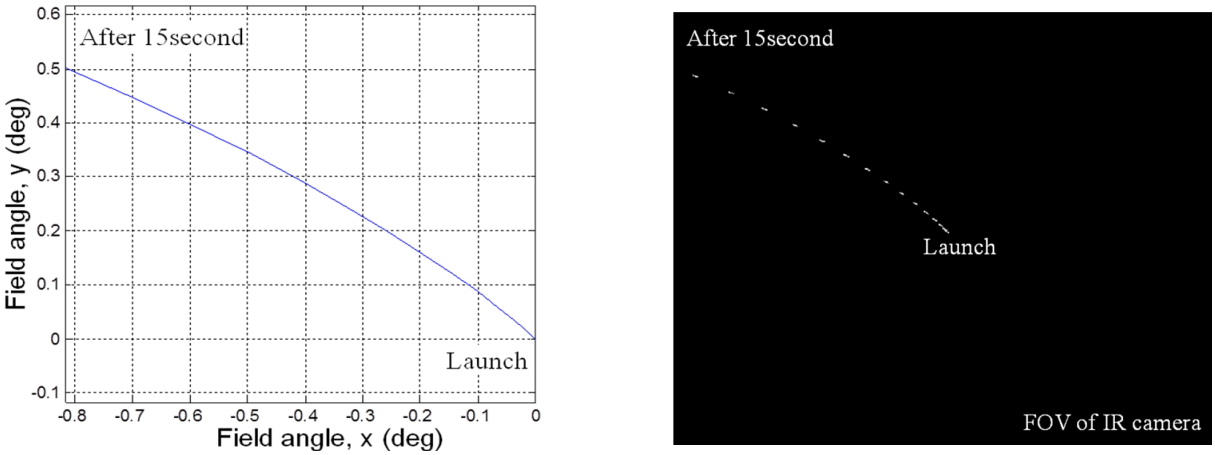
최종적으로 구현된 4가지 경우의 설계된 적외선 카메라의 영상성능의 결과는 Fig. 13과 같다. 이 이미지들은 초당 30프레임의 14bit 영상의 snap shot으로 gray scale로 표현되었다[12]. case1은 청명한 대기조건의 발사 13초 후의 단거리급 미사일의 화염영상으로 카메라와의 거리는 수십 km이며 case2는 수백 km 거리의 장거리급 미사일의 발사 27초 후의 화염영상이다. case3와 case4는 난층운(nimbostratus)이 형성된 날씨 조건으로 case3는 수십 km 거리에서 관측한 단거리급 미사일, case4는 수백 km 거리에서 관측한 장거리급 미사일의 영상이다. 두 경우 모두 발사 후 구름 층을 통과한 후 화염 탐지가 가능하였으며 모든 case study의 경우 10초에서 20초 내에 검출기 14비트 기준 화염의 digital level의 최대치인 25200에 도달함을 확인하였다.

특히 case3의 경우 미사일 규모가 작아 화염의 복사세기와 기상조건 면에서 가장 탐지가 어려운 경우로 발사 후 1.0 km 이상 화염이 상승하게 되면 탐지가 가능해지는데, 발사 후 15초, 1.2 km이상 상승하면 화염의 digital level이 10086, 배경의 digital level이 4200으로 화염이 배경 대비 2.4배 이상



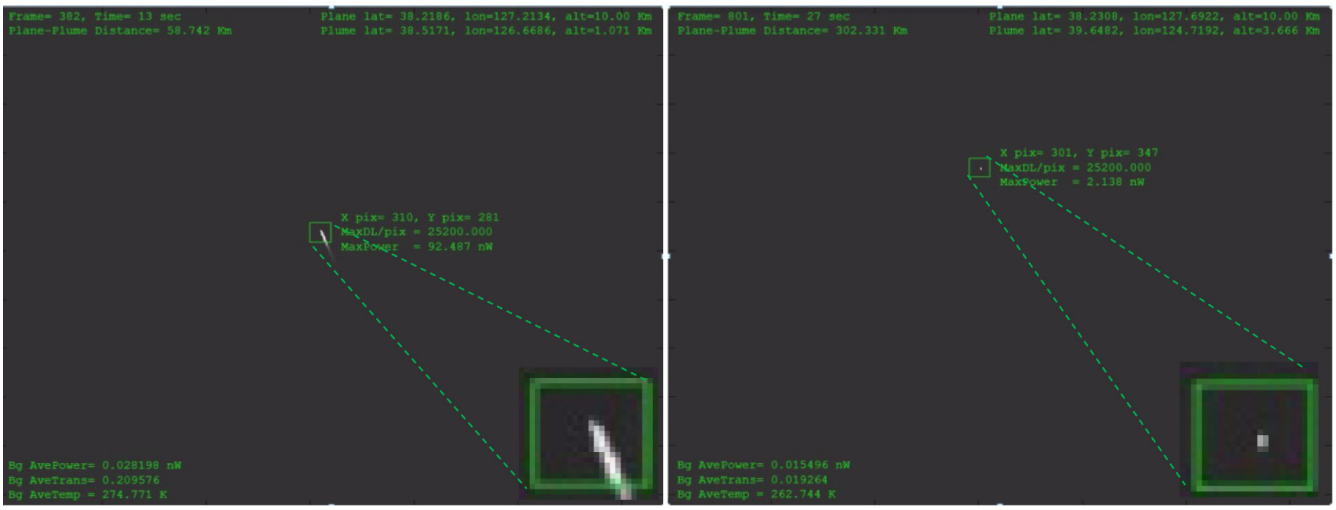
(a) (b)

FIG. 11. Trial plume scene as observed by background base dynamic range (a) and by whole image dynamic range (b).



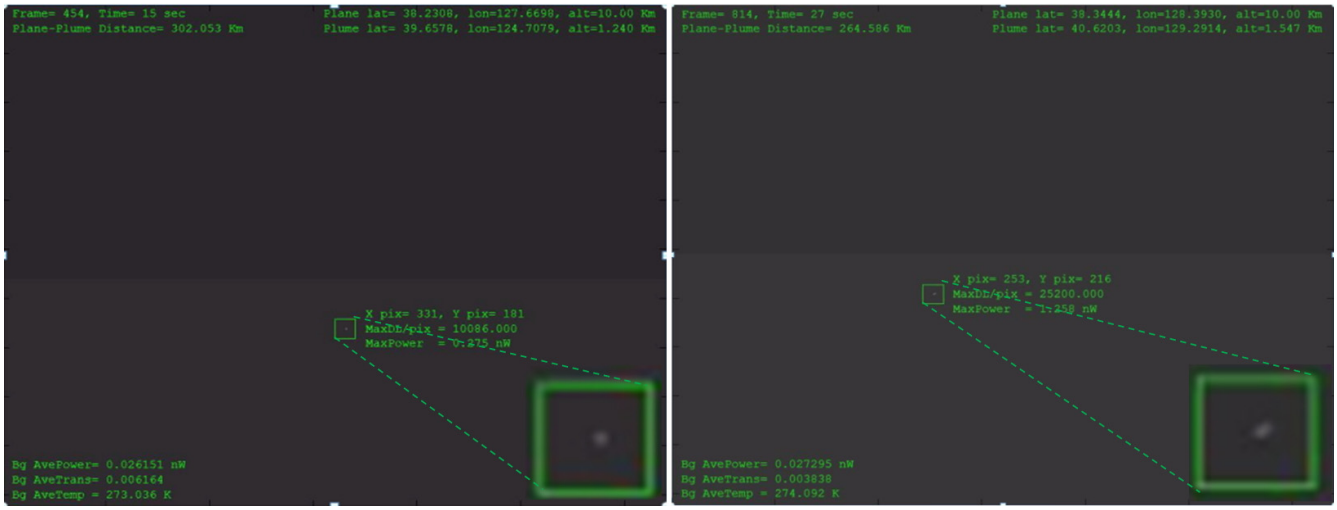
(a) (b)

FIG. 12. Trial target position integrated over 15 seconds after the launch by orbit calculation (a), by ray tracing (b).



(case1) (case2)

FIG. 13. Case study of imaging and radiometric performance for plume; (case1); (case2); (case3); (case4) (Continued).



(case3) (case4)

FIG. 13. Case study of imaging and radiometric performance for plume; (case1); (case2); (case3); (case4).

의 신호가 검출기에 도달하여 탐지가 가능함은 물론 영상에서 육안으로도 확인이 가능하다. 이러한 결과로써 수십~수백에 이르는 거리에서 단거리 및 장거리 미사일 주어진 조건에서 탐지 가능함을 분석적으로 확인하였다. 이러한 검출면의 영상은 640×512 배열의 적외선 검출기를 바탕으로 얻어졌으며 영상성능에 영향을 줄 수 있는 주요 특성은 다음과 같다: gain(~330), floor read out noise (~3700DL), 양자효율(~90%), 적분시간(2ms), 최대 축전량(6.5Me-)

V. 결 론

결과적으로 앞서 수치모사 결과에서 보듯 화염의 영상 수치모사를 통해 설계된 광학계가 수십~수백km의 원거리의 미사일 화염의 IR 신호를 검출 가능성을 예측해 볼 수 있었다. 본 연구에서는 미사일 화염의 분광학적 특성을 반영하는 복사 세기, 대기 및 발사지의 복사 및 산란 특성을 보다 현실에 가깝도록 구현하여 통합적 광선추적 기법의 수치모사를 통하여 추적된 검출면에서의 화염영상 신호의 복사전달 성능을 도출하였다. 이를 위해 미사일 화염 및 지상과 대기의 배경 모델링에 대한 현실성을 부여하기 위하여 CFD 타입의 복사전달 모델, volume scattering, MODTRAN 프로그램을 각각 적용하였다. 결과적으로 사례별 분석을 통해 이동하는 적외선 카메라가 단거리급과 장거리급 미사일이 관측거리와 날씨와 같은 조건의 변화에 따라 탐지할 수 있는지 가능성 여부에 대하여서도 분석적으로 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 설계된 적외선 카메라의 화염탐지 성능을 시스템 레벨에서 입증하였다.

감사의 글

이 논문은 한국연구재단 및 은화진화연구센터의 SRC 프로그램의 지원과 (No. 2010-0027910) Breault Research Organization의 ASAP 사용자 라이센스 제공으로 수행되었습니다.

References

1. G. C. Holst, “Testing and evaluation of infrared imaging system,” SPIE Press **PM185**, 140-145 (2008).
2. A. Mann, “Infrared optics and zoom lenses,” SPIE Press **TT42**, 18-19 (2000).
3. S. Seong, J. Yu, D. Ryu, J. Hong, J. Yoon, S. Kim, J. Lee, and M. Shin, “Imaging and radiometric performance simulation for a new high-performance dual-band airborne reconnaissance camera,” Proc. SPIE **7307**, 730705-1~730705-13 (2009).
4. D. Ryu, S. Seong, J. Lee, J. Hong, S. Jeong, Y. Jeong, and S. Kim, “Integrated ray tracing simulation of spectral bio-signatures from full 3-D earth model,” Proc. SPIE **7441**, 74410A-1~74410A-11 (2009).
5. Breault Research Organization, Inc., “Radiometriy,” ASAP Technical Guide, brotg **0909**, 8-12 (2014).
6. J. Troyes, I. Dubois, V. Boric, and A. Boischot, “Multi-phase reactive numerical simulations of a model solid rocket motor exhaust jet,” 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 9-12 (2006).
7. F. S. Simmons, Rocket Exhaust Plume Phenomenology, The Aerospace Press, California & Virginia (2000).
8. G. Avital, Y. Cohen, L. Gamss, Y. Kanelbaum, J. Macales, B. Trieman, S. Yaniv, M. Lev, J. Stricker, and A. Sternlieb, “Experimental and computational study of infrared emission from underexpanded rocket exhaust plumes,” Journal of Thermophysics and Heat Transfer **15**, 4 (2001).
9. C. B. Ludwig, W. Malkmus, J. E. Reardon, and J. A. L. Thomson, “Handbook of infrared radiation from combustion gases,” NASA **SP-3080** (1973).

10. J. L. Roujean, M. Leroy, and P. Y. Deschamps, "A bi-directional reflectance model of the earth's surface for the correction of remote sensing data," JGR **97**, 455-468 (1992).
11. F. M.Breon, F. Maignan, M. Leroy, and I. Grant, "Analysis of hot spot directional signatures measured from space," JGR **107**, 282-296 (2002).
12. O. Nesher, S. Elkind, A. Adin, I. Nevo, A. B. Yaakov, S. Raichshtain, A. B. Marhasev, A. Magner, M. Katz, T. Markovitz, D. Chen, M. Kenan A. Gannany, J. Oiknine Schlesinger, and Z. Calahorra, "A digital cooled InSb detector for IR detection," Proc. SPIE **5074**, 120-129 (2003).
13. J. Yoon, D. Ryu, S. Kim, S. Seong, J. Kim, S. Kim, and W. Yoon, "Performance simulation model for a new MWIR camera for missile plume detection," Proc. SPIE **8896**, Electro-Optical and Infrared Systems (2013).