

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(5), 373-382(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.5.373>

적외선 영상탐색기를 탑재한 대함유도탄-함정방어체계 교전모의 프로그램 개발

박상섭*, 김도완*, 최기영*, 김정호**, 유창경*

Development of Engagement Simulation Program between ASM with IIR Seeker and Defense System

Sang-Sup Park*, Do-Wan Kim*, Kee-Young Choi*, Jung-Ho Kim** and Chang-Kyung Ryoo*

Department of Aerospace Engineering, Inha University*,

Agency for Defence Development**

ABSTRACT

In this paper, in order to analyze the performance of a decoy system for ship defense against an anti-ship missile(ASM) with an infrared image(IIR) seeker, the modeling and engagement simulation program is introduced. The IIR seeker on the ASM detects the infrared signal of ship from a distance and approaches the ship based on proportional navigation guidance(PNG) or impact angle control guidance(IACG). Hence the guidance performance of the ASM is basically depend on the target tracking algorithm of the seeker as well as the infrared signal of the ship. Using the developed program, we can investigate the effect of the ship decoy system such as flares and surface cooling system of the ship with respect to various kinds of tracking algorithms of the IIR seeker of the ASM.

초 록

본 논문에서는 적외선 영상탐색기가 탑재된 대함유도탄에 대한 함정 방어용 기만 체계의 성능 분석을 위한 교전모의 프로그램을 소개한다. 대함유도탄에 탑재된 적외선 영상탐색기는 함정의 적외선 신호를 탐지하는 거리로부터, 비례항법 유도법칙 또는 입사각 제어 유도법칙에 기반하여 접근한다. 그러므로 대함유도탄의 유도 수행 능력은 기본적으로 탐색기의 표적 추적 알고리즘뿐만 아니라 함정의 적외선 신호에 의존한다. 개발한 프로그램을 사용하여, 대함유도탄 적외선 영상탐색기의 다양한 추적 알고리즘으로 flare와 함정 표면을 냉각하기 위한 Counter-Measures Wash-Down System(CMWDS) 같은 함정 기만 체계의 영향을 살펴볼 수 있다.

Key Words : Anti-Ship Missile(대함유도탄), IIR-Seeker(적외선 영상탐색기), Tracking Algorithm(추적 알고리즘), Decoy(기만기), Engagement Simulation Program(교전모의 프로그램)

† Received: December 28, 2012 Accepted: April 30, 2013

* Corresponding author, E-mail : ckryoo@inha.ac.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

I. 서론

해상 교전에 유도탄이 도입된 이후, 대함유도탄은 함정을 위협하는 가장 대표적인 요소가 되었다. 대함유도탄은 함정, 항공기 등에서 발사되며 초기 및 중기유도까지 관성유도 방식으로 비행하고, 종말유도 단계에서 능동 Radio Frequency(RF) 탐색 방식 혹은 적외선 추적 방식으로 전환되어 공격한다. 함정은 대함유도탄과의 교전 상황에서 여러 방어 체계를 작동한다. 방어 수단에는 대공 방어 유도탄이나 Close In Weapon System(CIWS)을 이용해 대함유도탄을 직접 파괴하는 hard kill 방식과 flare, chaff, Electric Counter Measure(ECM) 등으로 대함유도탄의 탐색기를 기만하는 soft kill 방식이 있다.

대함유도탄 개발 초기에는 능동 RF 탐색기가 많이 쓰였다. 그러나 ECM같은 전자 방해 기술이 개발되면서 능동 RF 탐색기의 기만이 가능해졌고, 이러한 취약성을 보완하기 위하여 적외선 탐색기의 개발이 최근 활발하게 진행되고 있다[1]. 적외선 탐색기는 물체가 지나는 온도에 따라 방출되는 에너지 및 파장이 다른 점에 착안하여 물체를 식별한다. 그러나 대함유도탄의 적외선 탐색기에서 측정되는 적외선은 계절, 시간, 기온 등의 주위 환경 뿐만 아니라, 대함유도탄과 함정 사이의 상대 거리 및 함정의 자세와 같은 전장 상황에 따라서도 변화한다. 따라서 적외선 영상 탐색기의 영상을 모사하기 위해서는 위와 같은 영향을 모두 고려해야 한다.

적외선 탐색기 개발 초기에는 장애물이 거의 없이 단순하고 균일한 환경에서 나오는 배경신호와 이와 다르게 열 소스를 발산하는 표적신호만을 구별하여 탐지하였기 때문에 기만 체계에 취약하였다. 그러나 최근에는 적외선 검출소자의 성능 향상으로 인하여 기존의 기만 체계에 대해 강인함을 가지게 되었다[2]. 따라서 함정은 대함유도탄을 기만하기 힘들게 되었고, flare 같은 기만기의 높은 가격으로 인하여 경험에 따른 통계적 고찰도 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 이러한 실정에 따라 함정의 적외선 신호 방출을 없애거나, 유사한 신호를 함정 부근에 방출하는 등 실제 상황에 대한 Modeling and Simulation (M&S) 연구가 활발히 진행 중이다.

이러한 실태에 따라, 적외선 영상탐색기를 탑재한 대함유도탄과 이를 기만하기 위한 함정 간의 교전모의 프로그램을 개발하였다. 대함유도탄을 모델링하고, 획득된 적외선 영상자료에 표적의 탐지, 추적 기법을 적용한 탐색기의 유도 정

보를 바탕으로 함정 방어용 기만 체계 영향도를 분석하였다. 분석한 자료를 바탕으로 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 불확실성 요소에 대한 확률적인 해석 수행 및 통계적 관점의 함정 생존성 지표를 도출하였다.

II. 교전모의 프로그램

2.1 대함유도탄 모델링

2.1.1 유도탄 모델

본 논문에서 사용된 대함유도탄 모델은 프랑스에서 개발되어 운용중인 엑조세(Exocet)를 대상으로 하였고, 그 제원은 Table 1과 같다[3].

대함유도탄 모델 내부는 함정의 위치정보를 기반으로 유도 명령을 산출하는 유도 제어 부분과 수치 시뮬레이션을 위한 6자유도 운동방정식(6DOF)으로 구성되어 있다. Fig. 1은 이러한 대함유도탄의 유도 및 항법 개념도를 나타낸 것이다. 일반적으로 유도탄 동역학을 구성하기 위해서는 유도탄의 운동 상태나 그 변화를 나타내는 운동방정식의 유도가 필요하다. 운동방정식은 질량 모델, 추력 모델, 환경 모델, 공력 모델, 구동장치 모델 등의 모든 힘과 모멘트를 고려해야 한다. 유도탄은 4개의 조종면을 가지고 있으며, xy 평면과 xz 평면에 대하여 대칭형 동체라고 가정하여 공력 모델링을 하였다. 대함유도탄에 작용하는 힘과 모멘트를 계산하기 위해 필요한 동체 좌표계의 공력 계수들은 엑조세의 2차원 평면도

Table 1. Exocet Data

최대 속도	315m/s
사거리	70km ~ 180km
무게	670kg(탄두 165kg)
길이/직경	4.7m/0.348m

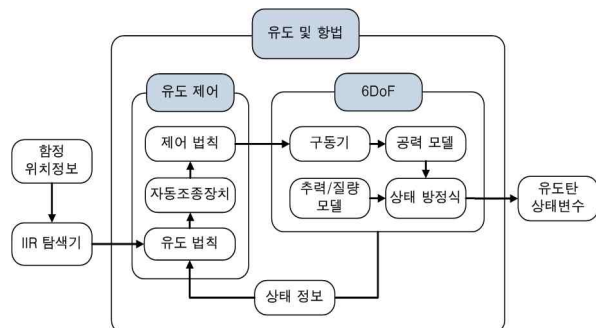


Fig. 1. ASM Guidance and Navigation Block Diagram

를 스케일링하여 Missile DATCOM을 통해 구하였다[4]. 추력모델은 대함유도탄의 속도를 300m/s로 유지하기 위하여, 추력을 2682N으로 일정하다고 가정하였다. 또한 구동기 모델은 1차 응답으로 가정하였고, 구동기 변위 한계는 $\pm 25^\circ$ 이다. 자동조종장치는 유도 법칙으로부터 요구되는 가속도를 대함유도탄이 내도록 설계하였다. 여기에서 유도탄은 대칭이라 가정했으므로, 피치 축과 요 축에 대해 같은 자동조종장치를 사용한다. 그러나 롤 축은 유도탄의 안정화를 위하여 별개의 자동조종장치를 구성하였다.

2.1.2 유도 제어/회피 기동 알고리즘

대함유도탄의 유도법칙은 비례항법(Proportional Navigation, PN) 유도법칙과[5] 입사각 제어(Impact Angle Control, IAC) 유도법칙을 구성하여 적용하였다. 비례항법 유도법칙은 피치 평면과 요 평면의 시선각 변화율에 따른 가속도 명령에 중력 보상항을 더하여 구성하였다. 따라서 유도탄에 인가되는 가속도 명령은 식 (1)과 같다.

$$a_{p_c, y_c} = N V_m \dot{\sigma}_{p, y} + a_{gravity} \quad (1)$$

- a_{p_c, y_c} : 피치 축과 요 축의 가속도 명령
- N : 항법 상수
- V_m : 유도탄의 현재 속도
- $\dot{\sigma}_{p, y}$: 피치 축과 요 축의 시선각 변화율
- $a_{gravity}$: 중력 보상항

입사각 제어 유도법칙은 유도탄이 고도를 유지한 상태에서 방위각이 제어 가능하도록 구성하였다. 에너지 최적화 관점에서 도출한 최적유도법칙의 유도명령은 식 (2)와 같이 정의되고, 최종 입사각(σ_f)은 식 (5)와 같이 유도탄과 표적의 속도와 경로각을 통하여 나타낼 수 있다[6-8].

$$a_c = N_\gamma V_m \dot{\sigma} + \frac{N_f V_m^2}{r} (\sigma - \sigma_f) \quad (2)$$

$$N_\gamma = 2(N+2) \quad (3)$$

$$N_f = (N+1)(N+2) \quad (4)$$

$$\sigma_f = \tan^{-1} \frac{V_t \sin \gamma_t - V_m \sin \gamma_m}{V_t \cos \gamma_t - V_m \cos \gamma_m} \quad (5)$$

- a_c : 유도탄에 인가되는 가속도 명령
- r : 유도탄과 표적 사이의 상대거리
- σ : 유도탄과 표적 사이의 시선각
- V_t : 표적의 속도
- γ_t : 표적의 경로각

언급한 유도법칙의 성능 검증을 위하여 Table 2의 초기조건으로 시뮬레이션을 수행하였다. 유도탄이 함정을 향해 유도되는 것을 Fig. 2의 케적 결과를 통해 확인할 수 있다.

일반적인 대함유도탄의 성능을 최대한 모사하기 위하여, Sea-skimming 기동과 Pop-up 기동을 구성하여 적용하였다. Sea-skimming 기동은 해수면으로부터 5m 고도를 유지하도록 설계하였고, 유도탄의 고도와 목표 고도에 대한 오차항과 중력 보상항을 더하여 고도 오차를 수렴시키도록 식 (6)과 같은 피치 가속도 명령을 생성한다.

$$Z_{a_{cmd}} = -2.1 \cdot V_Z + 1.5 \cdot (Z_D - Z_M) + g \quad (6)$$

- $Z_{a_{cmd}}$: 유도탄의 z축에 대한 가속도 명령
- V_Z : 유도탄의 z축에 대한 속도
- Z_D : 유도탄이 유지할 고도
- Z_M : 유도탄의 현재 고도
- g : 중력가속도

Table 2. ASM Initial Condition

ASM	위치 및 좌표 [m]	유도 기법
#1	함정으로부터 5564m (-220, -5560, 5)	PN N=3
#2		IAC $\psi = -90^\circ$
#3		IAC $\psi = 90^\circ$

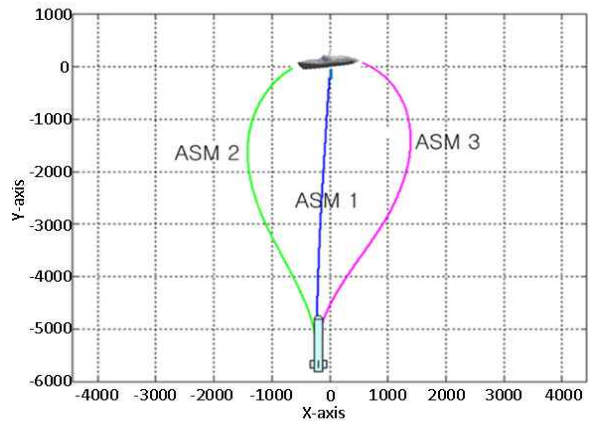


Fig. 2. ASM Trajectory in Yaw Plane

Table 3. Pop-up Acceleration Command

	가속도 명령
Phase 1	Sea Skimming Altitude = 5m
Phase 2	Climbing Altitude = 100m
Phase 3	Homing PNG

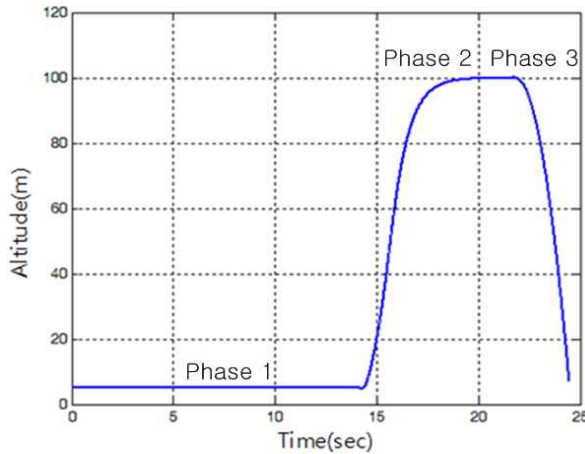


Fig. 3. ASM Trajectory in Pitch Plane

Pop-up 기동은 원하는 지점에서 요구하는 고도만큼 상승시킨 후, 비례항법 유도법칙을 적용하여 최종 호밍 유도하도록 구성하였다. 요구하는 고도만큼 상승시키는 가속도 명령은 식 (6)을 이용하였다.

Sea-skimming 기동과 Pop-up 기동의 성능 검증을 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. Table 3은 대함유도탄이 Sea-skimming 기동으로 비행하다가 Pop-up 기동으로 전환되며 인가되는 가속도 명령의 상태를 나타낸 것이다. 그 결과는 Fig. 3을 통해서 확인할 수 있는데, 대함유도탄이 사용자가 입력한 고도를 만족시키며 비행하는 것을 확인할 수 있다.

2.2 함정의 적외선 영상 모델링

적외선 영상탐색기에서 측정되는 적외선 신호를 실제와 동일하게 구성하기에는 한계가 있다. 따라서 개발한 프로그램에서는 적외선 신호 생성에 지배적인 영향을 미치는 함정 자체에서 방사하는 적외선 신호($L_{thermal}$)와 태양복사에너지가 함정 표면에서 반사되어 나오는 적외선 신호(L_{solar}^R)만을 고려하였다. 또한 함정에서 나오는 적외선 신호는 대기의 성분, 오염 물질, 수증기의 양, 거리 등에 영향을 받아 손실이 발생하므로, 이에 대한 영향을 고려하기 위해서 대기 투과율(τ)을 계산에 포함시켜야 한다.

$$L_{sensor} = \tau \times (L_{thermal} + L_{solar}^R) \quad (7)$$

$$\tau = e^{-(d \times a)} \quad (8)$$

d : 함정에서 적외선 탐색기까지의 거리(km)

a : 대기 조건에 따른 손실계수(km^{-1})

본 연구에서는 대기에 의한 손실 계수를 1로 가정하고($a=1$) 거리에 따른 손실효과만 고려하였다.

2.2.1 함정 자체에서 방사하는 적외선 신호

적외선 영상탐색기에서 사용하는 파장대는 중적외선과 원적외선으로 알려져 있다[9]. 따라서 플랑크의 분배 법칙으로 알려진 분광 흑체 방사도(E_{λ})를 모든 영역에 대해서 적분하여 함정 자체에서 방사하는 적외선 신호를 계산할 수 있다. 또한 함정 표면에서의 방사는 흑체가 아니므로, 주어진 함정 표면의 온도와 파장에서 방출되는 최대 복사에너지를 계산하기 위해서는 방사율(Emissivity, ϵ)을 고려하여야 한다. 방사율은 주어진 온도에서 흑체로부터 방사되는 복사에너지와 실제 표면에서 방사되는 복사에너지의 비로 정의된다. 표면의 방사율은 $0 \leq \epsilon \leq 1$ 값을 가지며, 방사율이 $\epsilon=1$ 인 흑체에 견주어 유사한 정도를 판단할 수 있는 지표를 제공한다[10]. 중적외선 신호와 원적외선 신호의 계산식은 다음과 같다[11].

- 중적외선 신호 생성

$$L_{thermal(MWIR)} = \int_3^6 \epsilon \cdot \frac{C_1}{\lambda^5 [e^{(C_2/\lambda T)} - 1]} d\lambda \quad (9)$$

- 원적외선 신호 생성

$$L_{thermal(LWIR)} = \int_6^{15} \epsilon \cdot \frac{C_1}{\lambda^5 [e^{(C_2/\lambda T)} - 1]} d\lambda \quad (10)$$

λ : 방사된 복사의 파장

T : 표면의 절대 온도

$$C_1 = 2\pi hc_0^2 = 3.742 \times 10^8 [W \cdot \mu m^4 / m^2]$$

$$C_2 = hc_0/k = 1.439 \times 10^4 [\mu m \cdot K]$$

2.2.2 태양 반사에 의한 적외선 신호

함정 표면에서 태양 복사에너지의 반사에 대한 적외선 신호를 생성하기 위해서는 함정 표면에 도달하는 태양 복사에너지와 함정 표면의 광학적 특성인 반사율(Reflectivity, ρ) 2가지 요소를 고려해야 한다. 본 논문에서는 태양 복사에너지를 간략화하여 태양상수($S_c = 1353 [W/m^2]$)로 가정하였다. 반사율은 표면에 입사되는 복사에너지에 대한 반사 비율을 의미하는데, 이는 함정을 구성하는 물체 표면의 광학적 특성에 따라 다른 값을 가진다. 이를 토대로 태양 복사에너지가 함정 표면에서 반사되어 나오는 적외선 신호는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{solar}^R = \rho \cdot S_c \cos\theta \quad (11)$$

θ 는 면의 법선 벡터와 태양이 이루는 각이다.

2.2.3 함정 영상 생성

함정 모델은 길이 150m, 폭 20m로 설정하였다. 적외선 영상탐색기에서 함정의 영상은 입사각에 대한 태양광의 영향을 받는다. 그러나 입사각이 90°가 아닌 이상 그 효과는 매우 미비하므로 함정의 모든 구조물을 표현할 필요가 없다. 따라서 함정 모델은 입사각을 고려하여 선체 부분, 갑판 부분, 함교 부분, 연돌 부분으로 나누어 정의하였다. 선체 부분은 바닷물과 접촉하기 때문에 비교적 온도가 낮고, 태양광의 입사각과 바닷물에 반사되는 빛을 모두 고려한 온도 분포가 측정된다. 갑판 부분은 태양광이 거의 90°로 입사한다. 함교 부분은 비교적 많은 곡면으로 구성되어 있어서 태양의 위치에 따라 온도 분포가 상이하게 나타난다. 연돌 부분은 배기가스가 나오는 부분으로 가장 뜨거운 부분이다. 이러한 요소들을 모두 고려하여 Table 4와 같은 조건에서 OpenGL을 통해 구현한 함정 모델의 적외선 영상은 Fig. 4와 같다.

2.3 기만 시스템 모델링

본 연구에서는 적외선 영상탐색기를 기만하기 위하여, soft kill의 일종인 CMWDS와 flare를 모델링하였다. CMWDS는 함정에 해수를 무상으로 분사하여 함정의 온도를 급속 냉각시키는 기만기이다. 냉각시킬 온도를 선택할 수 있도록 구성하였고, 기동 시에 함정 전체의 온도 분포가 감소한다고 가정하였다. Table 4의 조건을 바탕으로

Table 4. Ship Model Temperature condition

대기 온도	25℃	태양 방위각	45°
해수면 온도	15℃	태양 고각	45°
선체 온도	25℃	갑판 온도	40℃
함교 온도	40℃	연돌 온도	70℃

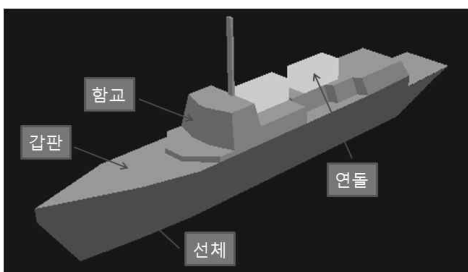


Fig. 4. IIR of Ship Model

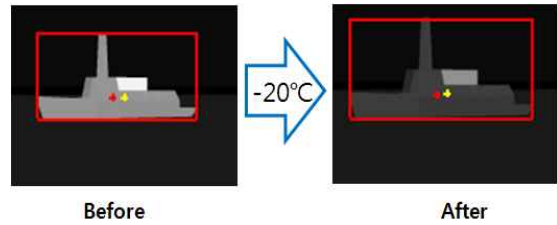


Fig. 5. CMWDS IIR Realization

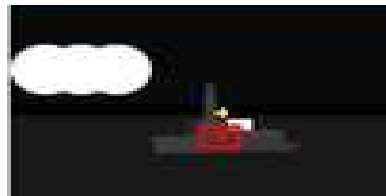


Fig. 6. Flare IIR Realization

CMWDS를 구현하였을 때, 적외선 영상탐색기가 촬영하고 있는 영상정보를 나타낸 그림은 Fig. 5와 같다.

Flare는 고온의 섬광을 발생시켜 적외선 영상탐색기로 하여금 표적을 혼란시키는 기만기이다. 독일에서 개발한 차세대 유도탄 기만 체계(Multi Ammunition Soft-kill System, MASS)를 대상으로 모델링 하였다[12]. Flare는 열원을 중심으로 구체를 이루고, 구체는 동일한 온도분포를 가진다고 가정한다. 또한 flare의 지속시간 동안 중력과 바람의 영향으로 인하여 그 위치가 매시간 조금씩 변하게 된다. 최대 10개의 flare를 개별 운용 가능하도록 구성하였으며, 각각의 위치는 사용자가 입력할 수 있다. Fig. 6은 flare 3개를 운용할 때, 적외선 영상탐색기가 촬영하고 있는 영상 정보를 나타낸 그림이다.

2.4 적외선 영상탐색기 모델링

대함유도탄에 장착되는 탐색기는 함정을 탐색한 후에 혹은 탐색하면서, 올바른 표적이라고 인식되는 경우에 lock-on 하여 추적하는 장치를 말한다. 이러한 탐색기는 유도 성능에 직접적인 영향을 미치기 때문에 대함유도탄의 성능평가를 위해서는 탐색기에 대한 모델이 포함되어야 한다. 본 프로그램에서는 김발형 탐색 방식을 도입하여 탐색기 모델링을 수행하였다.

Fig. 7은 프로그램 내부에서 대함유도탄과 탐색기 김발각, 그리고 표적의 관계로 설계한 탐색기 블록선도를 나타낸 그림이다. 표적 시선각(Line of Sight, λ)은 관성 공간상에서 표적과 유도탄 사이에 이루는 시선각을 의미한다. 김발탐색기는 동체에 붙어서 표적을 찾기 위해 움직이고 있으므로, 유도탄 동체와 탐색기 사이의 각인

탐색기 김발각(θ_g)이 생긴다. 이 탐색기 김발각이 0일 때, 탐색기와 표적이 이루는 시선각이 된다. 탐색기 김발각 오차인 boresight error(ϵ)는 탐색기가 표적을 향해서 더 움직여야 하는 각을 의미한다. Boresight error는 탐색기의 회전 각속도(ω_{gc})에서 유도탄의 각속도(ω_b)를 차분하여 시간 지연을 통해 탐색기가 표적을 향해 회전해야 하는 탐색기 김발각의 각속도(ω_g)를 계산하고, 이 각속도의 적분 과정을 통하여 현재 김발각과의 차분을 통해 구할 수 있다.

본 연구에서의 탐색기는 적외선 영상을 바탕으로 표적을 탐지·추적하게 되므로, 표적을 추적할 수 있는 알고리즘이 포함되어야 한다. 이를 위해서 중심점 기법과 특징점 기법을 구현하고, 이를 바탕으로 영상의 이준화 기준 밝기 이상의 픽셀 중 근접한 픽셀을 동일영역으로 분류하는 영역 분할 개념을 더하여 4가지의 추적기법을 구현하였다. 여기서 표적탐지란 단일 프레임의 영상만을 이용하여 표적을 탐지하는 기법이며, 표적추적은 이전 프레임의 표적탐지 정보가 존재한다는 가정 하에 표적의 탐지를 유지하는 기법이다. 중심점 추적기법은 적외선 영상에서 표적을 판별하는 가장 간단한 방법으로, 표적의 판단 기준은 영상 밝기에 대한 문턱치(threshold value)로 주어진다. 적은 연산량을 장점으로 들 수 있으나 뚜렷한 열원을 가진 표적만 추적 가능하고, 클러스터 및 기만기에 대해 취약한 성능을 보인다. 특징점 추적기법은 코너의 특징점을 추출하여, 코너 위치의 평균을 표적 중심으로 추적하는 방법으로 Trajkovic과 Hedley가 개발한 Features from Accelerated Segment Test(FAST) 알고리즘을 사용하였다[13,14]. 함정과 대함유도탄 사이의

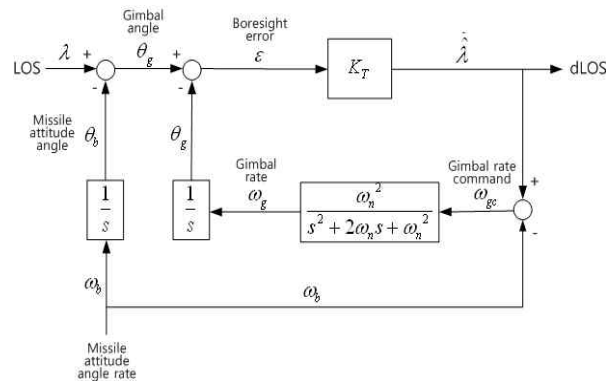


Fig. 7. Gimbal Seeker Model Block Diagram

거리에 따라 변화하는 표적에 대하여 강건하나, 매 프레임마다 특징점 정보의 저장으로 인하여 연산 부하가 크다는 단점이 있다.

III. 시뮬레이션

3.1 단일 시뮬레이션

개발한 교전모의 프로그램의 성능을 검증하고 분석하기 위한 흐름도는 Fig. 8과 같다. 프로그램은 각각 대함유도탄, 적외선 영상탐색기, 함정/방어체계 모듈로 구성되고, 멀티 쓰레드(Thread) 기법을 사용하여 각 모듈의 실시간성을 고려하였다. 이를 바탕으로 앞장에서 언급한 표적탐지 및 추적기법에 대한 기만기의 실행여부에 따라 Fig. 9와 같은 교전 시나리오를 구성하고, 유도 오차를 도출하였다. 이 때의 시뮬레이션 초기조건은 Table 5와 같다. 대함유도탄은 앞에서 고려한 비례항법 유도법칙과 입사각 제어 유도법칙을 통해 함정으로 접근한다. 입사각 제어 유도법칙의 경

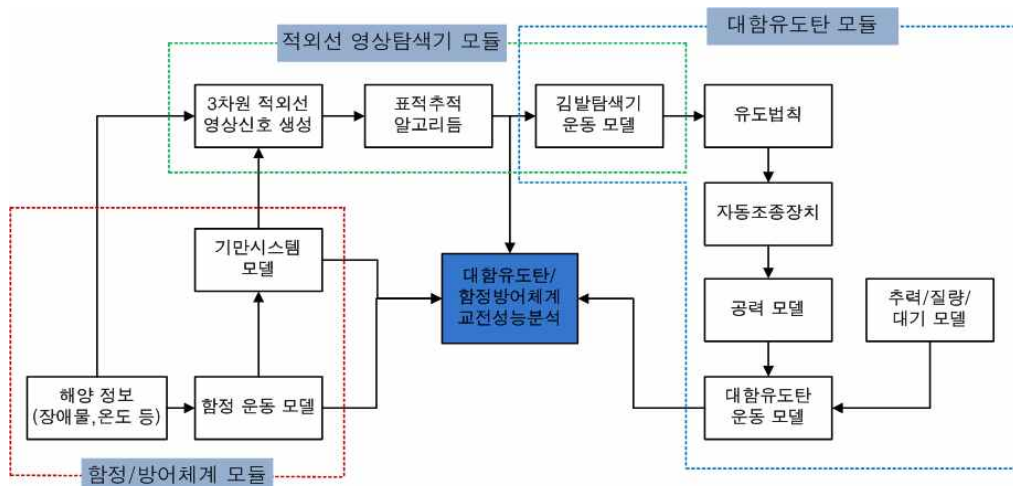


Fig. 8. ASM-Ship Defense System Engagement Performance Analyze Flow Chart

우 대함유도탄의 입사각 및 함정의 방위각과 연관된다. 따라서 대함유도탄의 정확한 입사각을 위하여, 함정이 정지한 상태에서 Table 2와 같은 각도로 함정에 접근하는 교전 상황을 고려하였다. 이는 함정의 정면, 측면, 후면으로 접근할 때의 결과를 살펴보기 위함이다. 함정이 기동할 때의 속도는 이지스(AEGIS) 함 급의 순항속도인 10m/s로 설정하였다.

Table 5. Simulation Initial Condition

파라미터	설 명
유도탄 발사 조건	
초기 위치	(-220m, -5560m, 5m)
초기 자세	(0°, 2.7311°, 0°)
초기 속도	300m/s
유도 기법	I) PN + Sea-skimming II) IAC + Sea-skimming
함정 정보	
초기 위치	(0m, 0m, 5m)
초기 자세	(0°, 180°, 0°)
초기 속도	기동할 시 10.3m/s
초기 온도	연돌 부분 : 70℃ 나머지 면의 온도 : 35℃

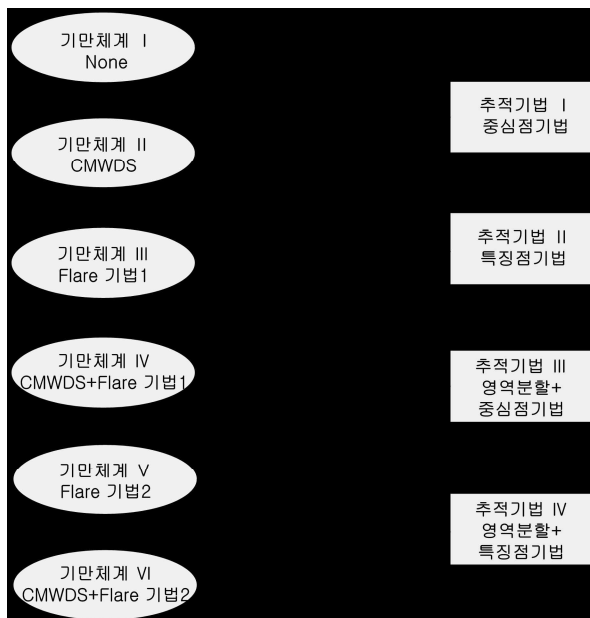


Fig. 9. Engagement Simulation Scenario

CMWDS는 함정과 대함유도탄의 상대거리가 3500m인 순간부터 기만하고, 함정의 온도는 전체적으로 15℃ 감소한다고 가정한다. Flare는 함정에서 가장 높은 온도를 구성하는 연돌 부분이 25m 높이에 위치하기 때문에, 연돌의 영향을 알아보기 위해서 다음의 두 가지 운용기법에 대해 고려하였다. 또한 함정을 가리기 위하여 10개의 Flare 구체가 일렬 배치되고, 70℃의 온도를 가진다고 가정하였다.

Case I) 함정으로부터 수평 150m, 수직 50m

Case II) 함정의 연돌을 가리는 대함유도탄과 함정 사이의 수평 150m, 수직 25m

Figure 10, Fig. 11은 개발한 교전모의 프로그램의 교전 상황에 따른 영상을 나타낸 것이다. 메인 프레임의 영상은 대함유도탄이 바라보는 실제 환경에 대한 영상, 왼쪽 하단의 gray scale로 모의된 영상은 대함유도탄의 적외선 탐색기에서 인식되고 있는 영상 정보를 출력한 영상이다. 또한 해수면에 섬과 같은 장애물이 존재할 때 출력되는 영상을 Fig. 11에 도시하였다. 대함유도탄이 비례항법 유도법칙을 통해 함정으로 유도될 때, 함정의 기동 여부와 교전 시나리오에 따른 시물

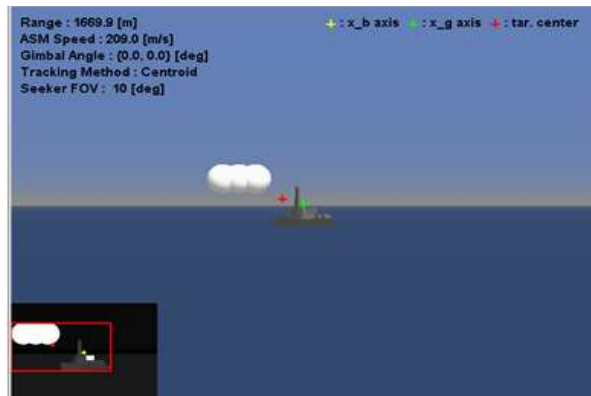


Fig. 10. Engagement Simulation Program Image



Fig. 11. Program Image with Island

Table 6. Error Distance(Ship Stop, PN)

		추적기법			
		I	II	III	IV
기 만 체 계	I	1.1	13.1	1.0	4.7
	II	14.4	12.7	10.9	16.7
	III	실패	22.1	실패	18.3
	IV	실패	25.2	실패	20.7
	V	실패	실패	실패	실패
	VI	실패	실패	실패	실패

Table 7. Error Distance(Ship Maneuver, PN)

		추적기법			
		I	II	III	IV
기 만 체 계	I	1.6	15.2	2.3	11.7
	II	14.6	21.8	11.2	18.7
	III	실패	16.5	실패	16.4
	IV	실패	36.1	실패	33.7
	V	실패	17.5	실패	18.4
	VI	실패	실패	실패	실패

Table 8. Error Distance(IAC 유도, $\sigma_f = 0^\circ$)

		추적기법			
		I	II	III	IV
기 만 체 계	I	1.6	12.7	1.3	7.4
	II	13.8	12.5	11.0	16.4
	III	실패	22.7	실패	18.3
	IV	실패	24.8	실패	20.5
	V	실패	실패	실패	실패
	VI	실패	실패	실패	실패

Table 9. Error Distance(IAC 유도, $\sigma_f = 90^\circ$)

		추적기법			
		I	II	III	IV
기 만 체 계	I	1.8	16.5	1.2	14.6
	II	7.4	20.3	8.1	19.9
	III	실패	실패	실패	실패
	IV	실패	실패	실패	실패
	V	실패	실패	실패	실패
	VI	실패	실패	실패	실패

Table 10. Error Distance(IAC, $\sigma_f = -90^\circ$)

		추적기법			
		I	II	III	IV
기 만 체 계	I	1.4	18.7	1.4	17.5
	II	8.2	20.8	5.3	19.2
	III	실패	실패	실패	실패
	IV	실패	실패	실패	실패
	V	실패	실패	실패	실패
	VI	실패	실패	실패	실패

레이션 결과는 Table 6, 7과 같다. 또한 입사각 제어 유도법칙을 통해 함정으로 유도될 때의 시뮬레이션 결과는 Table 8~10과 같다.

기만기가 없거나 CMWDS를 통한 단독 기만시, 중심점 추적기법이 특징점 추적기법보다 그 성능이 뛰어남을 확인할 수 있다. 이는 온도가 높은 연돌 부분이 함정의 중심부에 위치하여, 뚜렷한 열원만을 추적하는 중심점 추적기법의 특성이 잘 반영된 것이라고 할 수 있다. 그러나 flare를 통한 기만 시에는 함정의 기동 여부와 상관없이 격추 실패하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 함정과 flare를 모두 열원으로 인식하고 탐지된 표적들의 중심을 향해 추적하기 때문이다.

특징점 추적기법은 flare의 배치에 따라 그 결과가 상이하다. 함정이 정지해 있을 때, 기만 체계 III, IV와 같이 flare 운용 기법을 Case I)과 같이하하면 유도 오차가 증가해도 함정을 격추하는 것을 확인할 수 있다. 이는 매 프레임마다 특징점의 정보를 템플릿(template)에 저장하기 때문에, 중심점 추적기법보다 flare에 강건하기 때문이다. 그러나 flare의 운용 기법을 Case II)와 같이하하면, 템플릿에 저장되는 함정의 특징점 정보가 업데이트 되지 않고 flare를 향해 유도되기 때문에 격추 실패하는 것을 확인할 수 있다.

함정의 기동 시에는 전체적으로 유도 오차가 증가하는 양상을 보이는데, 기만 체계 V를 이용한 기만시에 함정이 정지해 있을 때와는 다르게 격추 성공하는 것을 확인할 수 있다. 이는 flare에 가려진 연돌이 함정의 기동으로 인해 flare 밖으로 나오면서, 템플릿에 남아있는 함정의 특징점 정보가 다시 인식되기 때문이다.

Table 8과 같이 입사각 제어 유도법칙을 적용하여 최종 입사각이 0° 일 때는 비례항법 유도법칙과 유사한 결과가 나타난다. 이는 함정의 자세 및 영상 환경이 비례항법 유도법칙을 통해 유도될 때와 변화 없이 동일하게, 대함유도탄이 함정의 측면을 향해 접근하고 있기 때문이다. 그러나 최종 입사각이 90° , -90° 일 때는 함정의 정면 및 후면을 향해 대함유도탄이 접근하는 교전 상황이다. 이는 적외선 영상탐색기에 인식되는 함정의 부피가 측면에 비해 작고, flare의 부피가 더 크기 때문에 대부분 격추 실패하는 결과를 Table 9, 10을 통해 확인할 수 있다.

3.2 몬테카를로 시뮬레이션

통계적 관점의 함정 생존성 지표를 도출하기 위하여, 단일 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 기만에 큰 영향을 미치는 flare와 유도성공률이 높

Table 11. Simulation Uncertainty Parameter

No.	불확실성 요소	STD/Range
환경 요소		
1	바람 방향	0~180deg
2	바람 속도	7m/sec
3	전장 환경 온도	2℃
대함유도탄 요소		
4	관성 모멘트	1%
5	힘 관련 공력 계수	3%
6	모멘트 관련 공력 계수	1%
탐색기 요소		
7	측정 각도 오차	0.01deg
8	측정 DL값 오차	2%
9	하우징 온도 오차	2℃
기만기 요소		
10	flare 크기 오차	3%
11	flare 발사 위치	5m
12	CMWDS 지속 시간	3%
13	CMWDS 목표 온도	7℃
함정 요소		
14	함정 온도	2℃

은 특징점 추적기법을 기준으로 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 통계학적으로 시뮬레이션 250회 이상 수행 시, 신뢰도 변화율은 미비하다 [15]. 따라서 시뮬레이션은 flare 조건에 따라 유도탄 탄착점의 경향성을 살필 수 있는 정도인 300회 수행하였다. 또한 불확실성 검정에 사용된 각 요소들은 Table 11과 같다. 이 불확실성 요소

중 바람 방향은 균등 분포를 따르고, 나머지는 정규 분포를 따른다. 또한 탐색기 요소는 실시간으로 변화하기 때문에, 실시간으로 난수를 발생시켜 대입하는 path wise 방법을 따른다.

Flare는 운용 기법에 따라 그 결과가 상이하다. 따라서 Table 11의 오차 요소 및 flare 작동 시점에 따른 시간 변수 3개, flare 고도에 따른 변수 4개를 고려하여 3600(4×3×300)회의 시뮬레이션을 수행하였다. 단일 시뮬레이션 결과를 통하여 함정은 대함유도탄이 함정의 측면을 바라보며 유도될 때 더 많이 격추되므로, 대함유도탄은 함정의 측면을 향해 비행하고 있다고 가정한다.

- Flare 좌표 : [250m, 0m, 30~60m]

- Flare 작동시점 : 5~9sec

또한 몬테카를로 시뮬레이션을 수행함에 있어서 원형공산오차(Circular Error Probable, CEP)를 도출하였다. CEP는 탄도학에서 탄환이나 유도탄의 명중 정도를 나타내는 단위로서, 유도탄의 1/2가 목표에 명중하도록 그린 원의 반경이다[16].

Flare는 중력에 의해 하강하므로, flare를 높고 빠르게 또는 낮게 천천히 기동시킨 결과가 유사하게 나타날 수 있다. Table 12를 통해 이를 확인할 수 있는데, flare 고도 30m, 기동시점 7, 9초의 결과와 flare 고도 50m, 기동시점 5, 7초의 결과가 비슷한 것을 확인할 수 있다. 그러나 flare 고도 60m 일 때는 기동시점에 상관없이 함정의 피격성이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 flare 운용 고도는 60m 이내여야 한다. 또한 flare 고도 40m 일 때는 기동시점에 상관없

Table 12. Result of Monte-Carlo Simulation

		Flare 기동시점 5sec	Flare 기동시점 7sec	Flare 기동시점 9sec
Flare 고도 30m	Mean Point	[24.03, 19.05] m	[26.61, 36.97] m	[12.36, 41.56] m
	CEP boundary	15.00 m	40.84 m	44.74 m
Flare 고도 40m	Mean Point	[55.76, 30.71] m	[34.97, 46.49] m	[-2.90, 50.42] m
	CEP boundary	31.02 m	39.34 m	44.38 m
Flare 고도 50m	Mean Point	[18.68, 50.35] m	[-4.07, 23.81] m	[4.29, 20.61] m
	CEP boundary	41.95 m	43.96 m	6.59 m
Flare 고도 60m	Mean Point	[4.21, 19.68] m	[7.25, 21.99] m	[7.71, 19.30] m
	CEP boundary	14.89 m	6.95 m	3.86 m

이 함정에서 가장 먼 mean point와 CEP boundary를 가지므로 적절한 운용고도라 할 수 있다.

IV. 결 론

함정 방어용 기만기에 대한 적외선 영상탐색기의 효과를 분석하기 위하여, 적외선 영상탐색기를 탑재한 대함유도탄과 이를 방어하기 위해 탐색기를 기만하는 함정 간의 교전모의 프로그램을 개발하였다. 대함유도탄의 공격을 모의하기 위해 공력 모델, 추력 모델, 중력 모델 등을 포함한 6자유도 시뮬레이션을 구성하였다. 또한 비례항법 유도법칙과 입사각 제어 유도법칙, 회피 기동의 일환으로 Sea-skimming 기동과 Pop-up 기동을 구성하여 적용하였다. 적외선 영상탐색기에서의 함정 영상을 모사하기 위해 열역학적 변화에 따른 적외선 신호를 생성하고, 함정과 유도탄 사이의 상대거리 등을 계산하여 영상에 적용하였다. 이 적외선 영상을 기반으로 중심점 기법, 특징점 기법의 표적탐지 및 추적기법을 구성하였다. 또한 적외선 영상탐색기를 기만하기 위하여, 실제 전장에서 활용중인 CMWDS와 flare를 모델링하여 추적 알고리즘에 대한 함정 기만 체계의 영향을 살펴보았다. 이 프로그램은 모듈로 구성되어 프로그램의 각 내부 파트가 독립적으로 동작하고, 모듈 별로 신뢰도 향상이 가능하게끔 개발되어 확장성이 뛰어나 향후 발전 가능성이 높다. 또한 파라미터 변경을 통하여 원하는 교전 상황을 사용자가 만들 수 있다.

이 프로그램을 통하여 대함유도탄의 협업 공격이나 다양한 유도 법칙에 대해서 기만 효율 극대화를 위한 기만 체계 운용기법을 도출할 수 있다. 또한 강화학습 같은 기계 학습법을 통하여 교전 상황에 따른 기만 체계의 운용 자동화를 모색할 수 있다.

References

- 1) H.N. Yoon, "KIDA Defense Weekly", Korea Institute for Defense Analyses, No. 1279, 2009, pp.9-43.
- 2) D.H. Pollock, "The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook", SPIE Press,

vol. 7, Counter Measure Systems, 1993.

- 3) <http://bemil.chosun.com>
- 4) W.B. Blake, "MISSILE DATCOM", Air Force Research Laboratory, 1998.
- 5) P. Zarchan, "Tactical and Strategic Missile Guidance", AIAA, Vol. 219, 2007, pp.15-21.
- 6) C.K. Ryoo, H. Cho, and M. J. Tahk, "Optimal Guidance Laws with Terminal Impact Angle Constraint", Journal of Guidance, Control, Dynamics, Vol. 28, No. 4, 2005, pp.724-732.
- 7) K.S. Kim and Y. Kim, "Design of Generalized Conceptual Guidance Law Using Aim Angle", Control Engineering Practice, Vol. 12, No. 2, 1998, pp.75-87.
- 8) C.K. Ryoo, "Impact-Angle-Control Guidance Laws for Maneuvering Targets", Proceedings of the 2006 KSAS Spring Conference, 2006, pp.655-658.
- 9) S.K. Jang, et. al., "Analysis of the Infrared Image property with respect to the variation of time and wavelength", Proceedings of the 2009 IEEK Summer Conference, 2009, pp.1040-1041.
- 10) McCreary and Jeremy, "Infrared (IR) basics for digital photographers-capturing the unseen (Sidebar : Black Body Radiation)", Digital Photography For What It's Worth, 2004.
- 11) Byrnes and James, "Unexploded Ordnance Detection and Mitigation", Springer, 2009, pp.21-22.
- 12) "Full-speed ahead for MASS", www.rheinmetall-detec.de, 2011.
- 13) M. Trajkovic and M. Hedley, "Fast Corner Detection", Image and Vision Computing, Vol. 16, No. 2, 1998, pp.75-87.
- 14) E. Rosten and T. Drummond, "Machine Learning for High-Speed Corner Detection", European Conference on Computer Vision, 2006.
- 15) J.S. Bendat and A.G. Piersol, "Random Data-Aanalysis and Measurement Procedures", John Wiley&Sons, 1986.
- 16) C.K. Ryoo, "PN Guidance and Error Analysis", 2011 KSAS Spring Conference Tutorial Workshop, 2011, pp.32-37.