

# 2-color 동심원 레티클 탐색기의 시뮬레이션 및 LMS 방법을 이용한 반대응능력

정희원 홍 현 기\*

## Simulation of 2-color Concentric Annular Ring Reticle Seeker and Counter-countermeasure using LMS Algorithm

Hyun-ki Hong\* *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 단소자 적외선 레티클 탐색기의 단점을 해결하기 위해 적외선의 두 대역을 이용하는 2-color 회전 동심원 레티클 탐색기(concentric annular ring reticle seeker)의 시뮬레이션 틀이 제안된다. 표적 및 섬광탄(flare)의 모델링과 비례항법 유도(proportional navigation guidance) 루프를 포함한 동적인 시뮬레이션 틀 상에서 동심원 레티클 탐색기의 추적 성능과 섬광탄에 의한 영향 등을 분석한다. 또한 다양한 상황에서 운용되는 섬광탄의 영향을 효과적으로 배제하기 위해 LMS 방법을 이용한 새로운 반대응능력(counter-countermeasure)이 제안된다. SWIR 및 MWIR 대역에서 표적과 섬광탄의 상대적 분포특성을 이용함으로써 섬광탄에 효과적으로 대처할 수 있으며, 교전 시나리오에서 기존 반대응 기법과의 비교를 통해 제안된 알고리즘의 향상된 추적 성능을 확인하였다.

ABSTRACT

This paper presents a dynamic simulation loop that gives tracking results of 2-color concentric annular ring (CAR) reticle seeker. Our simulation tool includes the target/flare model and a proportional navigation guidance (PNG) loop. The CAR reticle system performances and the flare effects are analyzed in various scenarios. When a flare is present in the field of view (FOV), the simulation results show that the reticle seeker cannot keep a precise target tracking. In this paper, we propose 2-color counter-countermeasure (CCM) using the least mean square (LMS) method to cope with a presence of IR flare. The proposed method makes a simultaneous process in two infrared (IR) wavelength bands: MWIR and SWIR. The simulation results have shown that our adaptive IRCCM algorithm can achieve an effective cancellation of the flare signal with a relatively high intensity.

### I. 서 론

적외선(infrared; IR) 미사일은 비행기나 차량 등과 같은 표적을 추적하기 위해 열적(thermal) 특성을 이용한다. 미사일에서 눈의 역할을 하는 탐색기(seeker)는 고려되는 시계(FOV; Field of View)상에 존재하는 표적 신호를 수신하고 이를 신호처리 하여, 대상 표적의 위치 정보 등을 구한다. 미사일의

적외선 탐색기에 가장 널리 사용되는 레티클(reticle) 시스템은 시계상의 표적 신호를 변조(modulation)함으로써, 대상 표적의 추적에 필요한 위치 정보 등을 탐지한다<sup>[1][2]</sup>. 레티클 탐색기는 단소자 검출기(detector)를 이용하기 때문에 H/W 구성이 간단하고 가격이 저렴한 장점이 있지만, 시계상에 다수의 표적 또는 가상 표적 등이 존재하는 경우 정확하게 표적을 추적하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 레

\* 중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학과(hhk@imagelab.cau.ac.kr)

논문번호 : 010224-0821, 접수일자 : 2001년 8월 21일

※ 본 연구는 한국학술진흥재단 신진교수연구과제(2000-003-E00206) 지원으로 수행되었습니다.

티클 탐색기의 이러한 문제점을 해결하기 위해 적외선의 두 대역을 동시에 이용하는 2-color 탐색기 연구가 선진국을 중심으로 활발하게 진행되고 있다.

유도 무기 관련 기술이 급속도로 발전함에 따라 우수한 성능의 첨단 미사일이 실전에 개발·배치되고 있으며, 현대전에서 표적의 대상이 되는 항공기 등은 미사일의 추격에 효과적으로 대처할 수 있는 반대응능력(countermeasures; CM)을 필수적으로 탑재하고 있다<sup>3)4)</sup>. 이러한 반대응능력은 탐색기의 추적 성능을 방해하거나 기만하기 위해 사용된다. 예를 들면, 조종사가 육안으로 식별하거나 자동으로 동작하는 경보(warning) 시스템을 통해 자신을 추적하는 미사일의 존재 여부를 판단하고, 이에 대처하기 위해 섬광탄을 발사한다. 일반적으로 섬광탄은 표적의 적외선 에너지보다 더 큰 방사 에너지를 방출함으로써, 탐색기가 표적 대신 섬광탄을 추적하도록 한다. 또한 탐색기의 개발단계에서 섬광탄에 의해 영향받지 않고 대상 표적에 대한 정확한 추적이 이루어지도록 하기 위한 적외선 반대응능력(counter-countermeasures; IRCCM) 연구도 계속되고 있다. 반대응 기법은 섬광탄과 표적의 방사량 차이, 이동 궤적의 차이, 스펙트럼 분포의 차이 등을 이용하여, 섬광탄의 존재를 발견하고 이를 대상 표적과 구별하도록 한다.

일반적으로 섬광탄과 표적의 상대적 크기 및 온도 분포에는 많은 차이가 존재하며, 따라서 각각의 방사 특성은 매우 다르다. 따라서 섬광탄과 표적을 효과적으로 구별하기 위해 적외선의 두 대역을 동시에 사용하는 2-color 탐색기 관련 연구가 중요하다. 적외선 레티클 탐색기의 반대응능력에 대한 많은 연구가 있었지만, 새로운 2-color 반대응 알고리즘에 대한 연구는 상대적으로 매우 부족한 상황이다<sup>5-9)</sup>. 특히 유도 무기에 대한 기초 기술과 응용 능력은 일부 선진국에서 제한적으로 독점하고 있으며, 국내의 기술 수준은 매우 미비한 실정이다.

레티클 시스템에 적용될 수 있는 기존 2-color 방식에는 반송파 억제(carrier suppression), 2-color 제거(cancellation) 방법 등이 있다. 반송파 억제 방법

은 레티클의 투명/불투명 격자 부분을 투과율이 다른 광학 필터로 대체하고, 대상 표적과 간섭의 변조 신호 비를 최대로 하여 표적에 의한 신호를 추출하도록 한다. 그러나 레티클의 실제 크기가 수 밀리미터에 불과하기 때문에 대상 레티클을 실제의 광학 필터로 구현하기 어렵다. 2-color 제거 방법은 두 개의 분리된 검출기를 통해 대상 표적과 간섭, 그리고 간섭에 의한 변조신호를 각각 입력받고, 두 신호의 차분을 한 주기 동안 적분한 다음, 이를 이용하여 가변 이득값(gain)을 조정하여 간섭 신호를 제거한다. 이 방법은 표적과 가상 표적의 방사 에너지 분포가 매우 분명한 차이를 보이는 경우, 같은 온도를 가지는 다수의 간섭 신호가 시계상에 존재할 때 적용할 수 있다. 실제로는 시간과 거리에 따라 표적의 크기 및 방사세기(intensity)가 변화하며, 가변 이득의 조정만으로는 이에 대한 대처가 어렵다<sup>4)</sup>. 또한 대부분의 대역에서 섬광탄의 방사세기가 대상 표적 보다 크기 때문에 표적과 가상 표적 신호를 구분할 수 있는 검출기가 존재하지 않으며, 따라서 위의 방법으로는 우수한 성능을 기대할 수 없다.

본 논문에서는 표적 및 섬광탄의 모델링과 비례 항법 유도(proportional navigation guidance; PNG) 루프를 포함한 2-color 동심원(concentric annular ring; CAR) 레티클 탐색기의 동적인 시뮬레이션 틀이 제안된다. 구성된 틀 상에서 대상 탐색기의 추적 성능과 섬광탄에 의한 영향 등을 분석하며, 이를 바탕으로 섬광탄의 영향을 배제하기 위해 LMS 방법을 이용한 새로운 반대응 알고리즘을 제안한다. 제안된 방법은 두 개의 고려 대역에서 섬광탄과 표적의 상대적인 적외선 방사량의 차이를 효과적으로 이용하여, 선형 결합된 변조 신호에서 섬광탄 성분만을 제거한다. 기존 반대응 기법과의 비교를 통해 제안된 알고리즘의 향상된 추적 성능을 다양한 시나리오 상에서 확인하였다.

## II. 2-Color 회전 동심원 레티클 탐색기

2-color 탐색기의 시뮬레이션을 위해 먼저 표적과

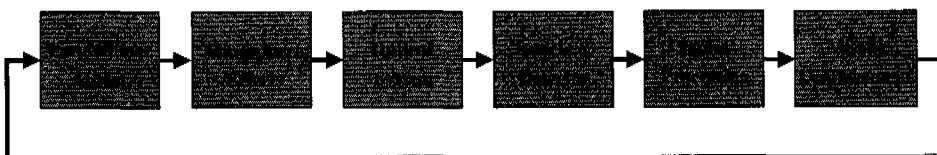


그림 1. 구성된 시뮬레이션 틀의 구성.

섬광탄의 적외선 특성을 모델링한다. 대상 표적과 섬광탄 등의 가상 표적에 대한 적외선 모델은 다양한 상황에서 표적의 특성 등을 예측할 수 있는 효과적인 방법이며<sup>[7][10]</sup>, 구성된 탐색기의 입력으로 이용된다. 그리고 대기의 표준 투과(transmission) 특성, 광학 필터링, 검출기의 반응도 등의 요소들이 시뮬레이션에 포함된다. 탐색기의 추적 오차 신호 출력에 따른 미사일의 실제 추적 결과를 확인하기 위해 비례 항법(PNG) 루프를 구성하였다. 구성된 시뮬레이션 틀은 가상 시나리오 상에서 대상 탐색기를 탑재한 유도탄의 추적 결과 분석 및 다양한 형태의 대응능력과 반대응 기법의 상대적 성능 비교 등을 위한 연구 등에 활용될 수 있다. 그림 1은 구성된 시뮬레이션 틀의 블록도이다.

1. 2-Color 회전 동심원 레티클 탐색기

회전 FM 동심원 레티클 탐색기는 레티클이 회전하고 광학계가 고정되어 있는 방식으로, 표적의 입력 신호를 차단 혹은 통과시키는 격자(spoke)의 개수가 레티클 반경에 따라 각각 다르다. 따라서 표적의 위치에 따라 다른 반송 주파수(carrier frequency)로 변조되며, 이는 격자의 개수와 회전 주파수의 곱에 의해 결정된다<sup>[4][7][10]</sup>. 레티클의 어느 동심원 상에 표적이 위치하는지를 판단하기 위해 변조된 신호를 동심원의 개수만큼의 대역 통과(bandpass) 필터에 각각 통과시킨 후, 최대의 신호를 선택하여 이를 복조(demodulation)한다<sup>[2][4][8]</sup>. 회전 동심원 레티클은 공간 해상도가 높기 때문에 다른 동심원 상에 위치하는 다중 표적에 대한 해석이 가능하다는 장점이 있다. 그리고 표적에 대한 위상 정보를 얻기 위해 투과율이 50%인 위상(phase) 격자를 배치하며, 이는 그림 2의 동심원 레티클의 아래 약간 어두운 부분에 해당한다.



그림 2. 회전 동심원 레티클.

탐색기의 신호처리부는 표적을 격추하기 위해 필

요한 대상 표적의 위치 정보 등을 판단하며, 얻어진 출력 오차는 대상 표적의 위치 오차를 줄이기 위해 (on boresight) 추적(tracking) 루프에 전달된다. 신호처리부에 있는 자동 이득 조정기(automatic gain control; AGC)는 입력 신호의 세기 변화에 관계없이 일정한 신호 레벨로 유지시키는 역할을 하며, 자동 이득 조정기의 시상수(time constant)는 유도탄과 표적의 상대적인 접근에 따른 입력 신호의 상승 영향을 고려해야 한다<sup>[10][11]</sup>. 그리고 유도탄의 실제 기동(manuevering)을 위한 다양한 제어 명령은 유도 및 제어부 등에서 계산된다<sup>[12]</sup>.

2. 표적 및 섬광탄의 모델링

2-color 레티클 탐색기는 대상 표적과 섬광탄의 방사 특성 분포 차이를 이용하기 때문에, 표적과 섬광탄의 적외선 특성에 대한 모델링이 필요하다. 실제 비행체의 적외선 방사량은 측정되는 동안의 주위 배경의 온도 및 종류, 엔진의 온도와 비행 속도 등을 포함한 다양한 요소에 의해 영향을 받는다<sup>[9][10]</sup>. 따라서 시뮬레이션 모델을 이용하여 대상 표적의 검출(detection)을 위해 방사 특성을 예측하는 연구도 매우 중요하다. 검출기의 고려 대역은 대상 표적의 방사 및 대기 투과 특성에 의해 결정된다. 일반적으로 적외선 탐색기에서는 2~2.5  $\mu m$ (short-wave IR; SWIR), 3~5  $\mu m$ (mid-wave IR; MWIR), 8~12  $\mu m$ (long-wave IR; LWIR)의 대역이 이용된다. 특히 MWIR 대역에서는 배출되는 플럼과 태양의 방사량 등이, LWIR 대역에서는 동체의 열 방사 및 지표면의 열 반사가 중요한 열 특성이 된다<sup>[5]</sup>.

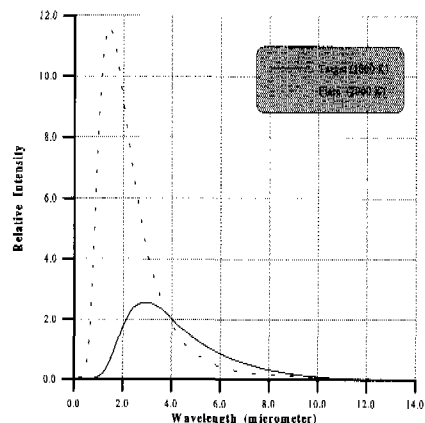


그림 3. 전형적인 섬광탄과 표적 스펙트럼.

본 논문에서는 대상 표적과 섬광탄을 각각 500,

2000K의 흑체(blackbody)로 가정했으며, 임의의 온도에 따른 방출량(emittance) 등을 플랑크 방사식(Planck's radiant equation)으로 계산하였다. 그러나 온도 및 크기 등의 차이만을 고려하는 본 논문의 경우와는 달리, 그림 3과 같이 섬광탄의 방사 특성은 표적과 약간의 차이가 있다<sup>[10]</sup>. 일반적으로 섬광탄은 2000~2500K의 높은 온도를 가지는 작은 물체이며, 비행체는 섬광탄에 비해 상대적으로 차갑고 부피가 크기 때문이다. 방사 분포의 차이에 의해 SWIR과 MWIR 대역의 입력비가 본 논문의 시뮬레이션 조건보다 커지며, 따라서 제안된 반대응 기법이 실제 상황에 보다 효과적으로 적용될 수 있다.

섬광탄의 적외선 특징은 탐색기가 이용하는 디코이(decoy) 대역(그림 3에서는 MWIR)에서 표적과 유사하도록 설계된다. 또한 섬광탄의 높은 온도로 인해 특성상 짧은 대역에서 더 많은 에너지를 방출하게 된다. 따라서 SWIR 대역에서는 섬광탄의 특성상 방사 에너지가 대상 표적에 비해 매우 높지만, MWIR 대역에서는 표적과 섬광탄의 특성이 거의 유사함을 그림 3에서 확인할 수 있다. 이는 MWIR 대역을 주로 이용하는 유도탄의 탐색기를 기반하기 위해 설계된 섬광탄의 스펙트럼 분포를 나타낸다. 두 대역을 동시에 효과적으로 이용하면, 두 대역에서 표적 및 섬광탄의 상이한 적외선 특성 관계로부터 섬광탄의 영향을 배제할 수 있다.

물체로부터의 복사 에너지는 대기로 전파되는 과정에서 대기 내에 있는 H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, NO 등의 분자에 의해 감쇄(attenuation), 산란(scattering) 현상이 일어나게 된다. 그리고 대기 구성 물질의 분자 구조나 원자 개수 등에 따라 탐색기에 입력되는 대상 표적의 스펙트럼 분포에 영향을 미치게 된다. 이러한 대기 전파(atmospheric propagation)에 대해 많은 연구가 이루어지고 있으며, 대표적인 시뮬레이션 모델은 LOWTRAN, MIDTRAN, HITRAN 등이 있다<sup>[2][4][7][10]</sup>. 이들은 특정 고도, 기상 조건, 주위 환경 및 대기의 구성 물질 등을 포함해 표적의 방사에 영향을 미치는 다양한 파라미터들을 고려하여 실제와 가까운 대기 특성을 모델링한다. 본 논문에서는 대기 투과 특성에 가장 많은 영향을 주는 구성물질인 H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub>의 특정 조건에서의 투과율(그림 4)을 고려하였다.

일반적으로 모든 적외선 대역에서 섬광탄의 방사 세기가 대상 표적 보다 크며, 두 신호는 대기 투과 특성 등에 의해 함께 영향을 받게 되기 때문에 두 신호의 상대적인 방사 특성 등은 크게 변화하지 않

는다.

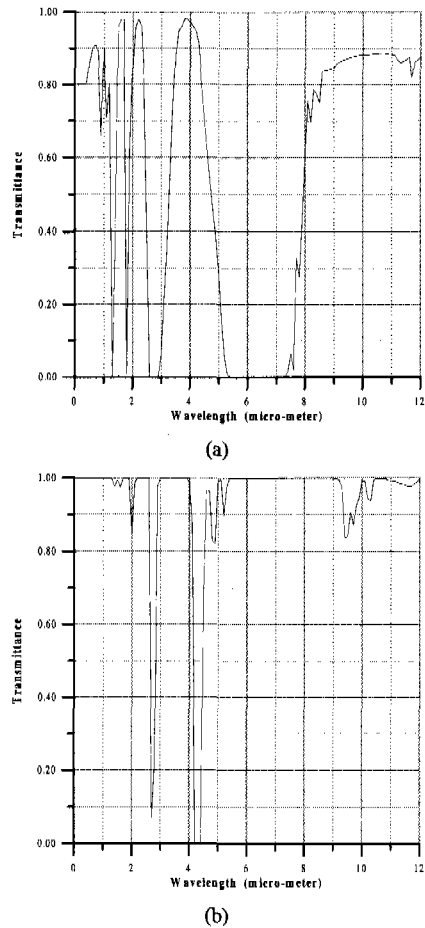


그림 4. (a) 수분함유량이 10mm 일 때, H<sub>2</sub>O에 의한 대기 투과율, (b) 거리가 5km 일 때, CO<sub>2</sub>에 의한 대기 투과율<sup>[4]</sup>.

### 3. 비례 항법 유도 루프의 구성

모델링된 표적과 섬광탄의 적외선 방사 신호는 고려된 일정 대기를 투과하여 광학 시스템에 입력된다. 그리고 구성된 탐색기의 신호처리부를 이용하여 레티클에 의한 변조 신호로부터 표적의 위치 정보를 구한다<sup>[2][4][7][10]</sup>. 탐색기의 출력에 따른 유도탄의 추적 결과를 확인하기 위해 본 논문에서는 비례 항법 유도 루프를 구성하였다. 대부분의 공대공 적외선 유도 미사일은 표적을 요격하기 위해 구원이 용이한 비례항법 유도를 이용한다. 비례항법 유도에서 미사일은 표적의 앞 방향으로 사영된 지점을 향해 비행하며, 교전의 최종 상황(end game)에서 요격 지점의 최단 비행 경로를 구한다<sup>[12]</sup>.

비례항법 유도에서 미사일의 기동을 위한 명령

가속도  $a_n$ 은, 항법 계수 비  $N$ (보통 3~5), 미사일과 표적과의 거리 감소율을 의미하는 접근 속도(closing velocity)  $V_c$ , 탐색기로부터 얻어지는 시선(line of sight; LOS) 변화율  $\lambda$ 로부터 구할 수 있으며, 이 관계는 식 (1)과 같다.

$$a_n = NV_c \lambda \quad (1)$$

구성된 2-color 동심원 레터클을 장착한 유도탄은 2차원의 관성(inertial) 좌표계에서 시물레이션 된다. 여기서 1축의 아래 방향(downrange)과 2축의 고도 혹은 수평 방향(crossrange)으로 각각 고정된다. 중력과 인력(drag) 영향 등은 고려되지 않았으며, 유도탄은 유도 명령에 의해 이상적으로 제어되는 비행체로 가정하였고 유도탄과 표적은 비행 궤적 상에서 점으로 표현된다. 2차원의 유도탄 및 표적의 교전 관계를 식 (2)와 그림 5에 나타내었다. 유도탄은 시선에 대해 L + HE 의 방향, 속도  $V_M$ 으로 비행하고 있으며, 각도 L과 HE는 미사일 전진(lead) 각도 및 초기 미사일의 전진 방향과 기준 축과의 초기 오차 각도이다. 표적과 유도탄을 연결한 가상의 선분은 시선이며, 시선의 길이를  $R_{TM}$ 으로 나타내었다. 성공적인 유도는 예상되는 요격 시간에서 유도탄과 표적 간의 거리를 0으로 만드는 것이며, 교전 상황에서 표적과 유도탄이 가장 근접한 거리를 빗맞춤 거리(miss distance)라고 한다.

$$V_c = R_{TM} \dot{\lambda} = \frac{-(R_{TM1} V_{TM1} + R_{TM2} V_{TM2})}{R_{TM}} \quad (2)$$

$$L = \sin^{-1} \frac{V_T \sin(\beta + \lambda)}{V_M}$$

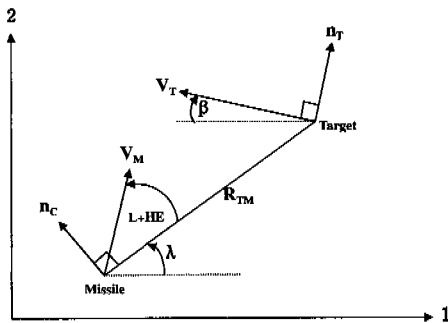


그림 5. 탐색기의 시선 변화율 계산<sup>[12]</sup>.

구성된 동심원 레터클 탐색기는 시계상의 표적 위치와 시선 변화율을 구하여 다음의 유도 루프에

전달한다. 시선 변화율과 비례항법 유도 식으로부터 계산된 명령 가속도는 순시(instantaneous) 시계에 수직으로 작용하며, 구성된 시물레이션 들은 이를 두 번 적분하여 임의 시간 동안의 이동 변위와 속도를 결정하고, 실제 유도탄의 위치를 변경한다. 섬광탄이 시계상에 존재하는 경우 거짓 표적을 추적하게 되며, 이는 미사일의 유도 작용에 영향을 주게 된다.

### III. LMS 방법을 이용한 2-color 반대응능력

섬광탄은 탐색기의 시계를 벗어나기 전에 표적의 방사 세기 이상의 에너지를 방출하며, 대부분 1~5 초 이내에서 유효 방사량에 도달한다<sup>[3][10]</sup>. 탐색기의 시계상에 섬광탄이 존재하면, 일정 시간 동안 표적과 섬광탄의 신호 성분이 동시에 입력되며 표적 및 섬광탄의 각 신호 성분은 시간과 상대 거리 등에 따라 변화한다. 그림 3에서 확인한 바와 같이 표적과 섬광탄의 스펙트럼 분포 특성은 서로 다르며, 본 논문에서는 표적과 섬광탄의 신호 성분을 구분하기 위해 적응적 잡음 제거(adaptive noise cancellation; ANC) 방법을 이용하는 2-color 반대응 알고리즘을 제안한다. 이는 백색 가우시안(white gaussian) 잡음이나, 원하지 않는 간섭(interference) 신호를 제거하기 위해 적용되는 방법으로, 신호와 잡음 또는 간섭이 함께 포함된 주(primary) 입력과 이와 상관도가 높은 잡음, 혹은 간섭신호의 기준(reference) 입력을 동시에 이용한다. 잡음/간섭신호와 이에 비해 약하거나 측정하기 어려운 원 신호가 결합된 기준 입력이 적응적으로 필터링되어, 주 입력에서의 간섭신호를 제하여 표적 신호만을 얻는 방법이다<sup>[13~15]</sup>. 2-color 탐색기에서 표적과 섬광탄의 방사 차이를 최대화할 수 있는 해당 스펙트럼 대역을 효과적으로 결정하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 일반적으로 사용되는 SWIR와 MWIR 대역을 고려하며, 해당 대역에서 스펙트럼 응답 특성이 같다고 가정하였다.

탐색기의 시계상에 섬광탄이 존재하면, 표적과 섬광탄의 선형 결합된 변조신호가 얻어진다<sup>[7]</sup>. 그림 3에서 SWIR 대역에서는 섬광탄의 특성이 표적에 비해 상대적으로 매우 높으며, MWIR 대역에서는 표적과 섬광탄의 적외선 특성이 거의 유사함을 확인하였다. 제안된 시스템에서는 SWIR 대역의 적외선 검출기 출력을 기준 입력( $x_k$ )으로, MWIR 대역의 출력을 주 입력( $d_k$ )으로 이용한다. MWIR과 SWIR

대역에서 실제 운용되는 섬광판과 대상 표적의 방사 세기 비(ratio)로부터 제안된 시스템의 적응 여부를 결정할 수 있다.

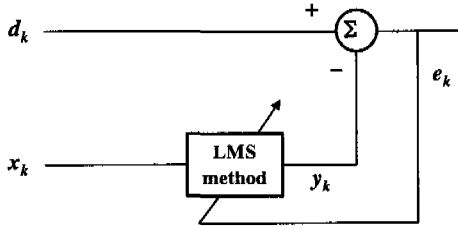


그림 6. LMS 방법을 이용한 반대응능력.

그림 6의 적응 시스템에서 MWIR 대역의 변조 신호인 주 입력  $d_k$ 는 표적 신호  $s_k$ 와 원하지 않는 잡음 성분  $n_k$ 의 합이며, 여기서 신호와 잡음 성분은 서로 무상관(uncorrelated)하다고 가정한다. 이러한 가정은 일반적으로 표적과 섬광판의 상이한 움직임으로 인해 공간상에서 짧은 시간 안에 서로 분리되

며, 또한 동심원 레티클 탐색기가 공간상의 해상도가 높기 때문에 만족된다. 그리고 시스템의 기준 입력은 SWIR 대역의 변조신호로서 적응적 필터의 입력  $x_k$ 이며, 이는 주 입력에서의 잡음 성분  $n_k$ 와 상관있는(correlated) 신호이다. 결론적으로 제안된 필터의 계수를 조정하여 출력  $y_k$ 를 주 입력에서의 잡음 성분  $n_k$ 와 같도록 하는 것이며, 따라서 이를 통해 잡음을 제거한 신호 성분  $s_k$ 만을 시스템의 출력으로 구할 수 있다. 적응 필터의 전달 함수  $H_k(z)$ 는 시변(time-varying) FIR 필터로 구현되었다.

$$g_k = d_k - W_k^T x_k, \tag{3}$$

$$W_{k+1} = W_k + 2\mu e_k x_k.$$

본 논문에서는 각 표본(sample) 상에서 시스템 출력의 평균 자승 오차(mean-square-error)를 최소화 하는 방법으로 Widrow-Hopf LMS 알고리즘을 이용하며, 각 필터의 계수를 식 (3)과 같이 구한다. LMS 시스템은 신호 및 잡음 성분에 대한 사전 정

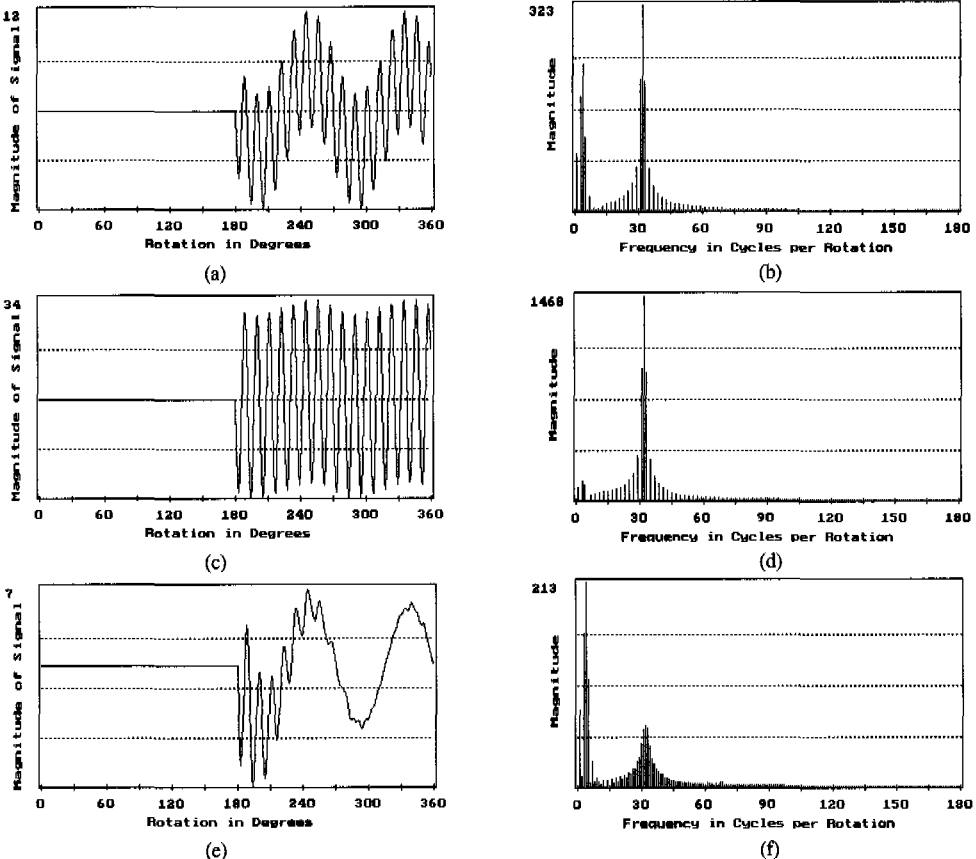


그림 7. MWIR 및 SWIR 대역의 검출기 출력 신호 ((a)와 (c)); DFT 결과 ((b)와 (d)); 제안된 방법에 의해 얻어진 출력 신호 (e)와 DFT 결과 (f).

보를 필요로 하지 않으며, 대신 순시적인 추정치(estimate)를 이용한다. 필터의 계수( $W_k$ )는 시간이 지나면서 신호 성분의 특성에 따라 조정되고, 계수의 수렴을 위한 조건은  $0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$  이며, 여기서  $\lambda_{\max}$ 는 입력 데이터의 공분산(covariance) 행렬의 최대 고유치(eigenvalue)이다. 식 (4)에서 계단 크기(step size) 파라미터  $\mu$  는 최적(optimal) 해로의 알고리즘 수렴성을 결정한다.

구성된 2-color 탐색기의 이상적인 기준 입력은 섬광탄 신호만을 포함해야 하지만, 기준 및 주 입력단에는 선형 결합된 표적과 섬광탄 성분이 동시에 입력된다. 따라서 기준 입력에 결합된 표적 신호 성분으로 인해 주 입력의 원래의 표적 성분이 제거되어 신호의 왜곡(distortion)이 일부 발생한다. 그러나 제안된 시스템에서는 두 대역간의 상대적인 신호비에 의해 요구 신호의 왜곡 정도가 결정되기 때문에, 효과적으로 섬광탄 신호를 제거할 수 있음을 시뮬레이션 결과로부터 확인하였다<sup>[16]</sup>.

동심원 레티클과 대상 표적을 이치원 영상으로 구성하여 제안된 반대응 기법의 신호처리 결과를 분석하였다. 영상처리를 이용하는 방법은 대상 표적의 형태와 개수 등을 다양하게 결정할 수 있으며, 광학 시스템에 따른 영향과 대기 특성 등을 표적 영상에 적용하기 용이한 장점이 있다. 임의의 시나리오 상에서 표적의 비행 상태에 대한 모델링을 통하여 일정 시간 동안 레티클을 거쳐 검출기로 입력되는 표적 신호가 결정된다.

그림 2의 대상 동심원 레티클은 동심원 5개를 가지며,  $240 \times 240$  화소(pixel), 반경은 120, 검은 부분과 흰 부분은 0 및 1, 위상 격자는 0.5의 값을 각각 가진다. 표적은 매  $1^\circ$  간격으로 1 회전하면서, 360개의 투과된 화소값의 합을 구하여 검출기 출력 신호를 얻는다. 대상 표적과 섬광탄은 방사량을 포함한 원으로 설정하였으며, 지름은 각각 3, 2 화소이다<sup>[17][9][17]</sup>.

표적이 두 번째, 그리고 섬광탄은 네 번째 동심원 상에 위치하는 경우의 2-color 레티클 탐색기의 검출기 출력을 분석한다. 레티클에 의해 한 주기 동안 변조된 MWIR 및 SWIR 대역의 검출기 출력을 각도에 의한 함수 형태로 그림 7 (a)와 (c)에 나타내었다. 고려되는 두 적외선 대역에서 표적과 섬광탄의 방사 에너지와 대기의 모델링된 투과 특성, 그리고 광학 필터링 계수의 곱을 적분하여 출력신호를 결정한다. 그림 7의 (a)와 (c) 신호에서 얻어진 표적 위치를 분석하기 위해 (b)와 (d)에 검출 신호의

DFT 결과를 보였다. 시뮬레이션 결과에서는 표적 대신 섬광탄이 위치한 동심원의 격자 개수에 해당하는 주파수(32cycle/rotation)에서 최고치를 보이며, 따라서 섬광탄의 상대적인 방사 세기 차이에 의해 탐색기는 표적 대신 섬광탄을 추적하게 된다.

LMS 방법을 이용한 제안된 반대응 기법은 두 개의 적외선 검출기에 함께 입력된 섬광탄과 표적 신호에서 섬광탄 성분만을 제거한다. SWIR 대역에서 상대적으로 우세한 섬광탄 성분을 이용하여, MWIR 대역의 주 입력에서 섬광탄 신호를 제거한 결과를 (e)에, 그리고 DFT 결과를 (f)에 각각 보였다. 사용된 데이터의 개수는 360개, LMS 필터의 탭(tap) 수는 5개, 안정 및 수렴 속도와 관련된 파라미터  $\mu$  는 0.0007이다. 그림 7의 (e)와 (f)에서 실제 표적 위치에 해당하는 반경 정보를 얻을 수 있다. 얻어진 시뮬레이션 결과로부터 제안된 LMS 방법을 이용하여 입력 신호의 한 주기(0.01초) 이내에 입력되는 섬광탄 신호를 효과적으로 제거함을 확인하였다.

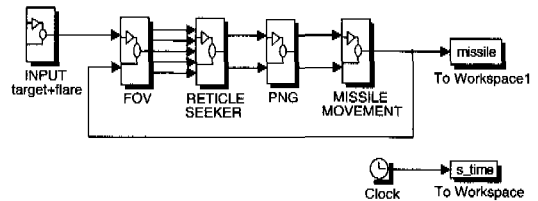


그림 8. 구성된 시뮬레이션 플의 블록도.

유도탄의 추적으로부터 자신을 보호하기 위해 표적은 다수의 섬광탄을 발사한다. 따라서 반대응능력 관련 연구는 유도탄의 추적 과정에서 상대 거리에 따른 표적과 섬광탄의 방사량 변화, 표적의 형태 및 발사된 섬광탄의 개수 등을 고려해야 한다. 본 논문에서는 표 1의 4가지 교전 시나리오 상에서 구성된 동심원 레티클 탐색기와 제안된 LMS 반대응 기법을 이용한 2-color 탐색기의 추적 성능을 확인한다.

시뮬레이션 플은 MATLAB-Simulink ver. 1.3 c 상에서 구성되었으며, 탐색기의 블록도를 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 INPUT 블록은 추적하는 유도탄을 회피하기 위해 운영되는 섬광탄 및 표적의 적외선 특성과 대기 특성 등을 모델링한다. 또한 설정된 시나리오에 따라 표적의 움직임과 임의의 방향으로 투하되는 섬광탄의 궤적 등을 결정한다. FOV 블록은 2차원 좌표계에서 이동하는 표적과 섬

광탄의 상대 위치에 따른 시계상의 위치를 구한다. SEEKER 블록에서는 표적을 추적하기 위한 시선각의 변화율을 계산하여, 명령 가속도를 결정하는 PNG 블록으로 전달한다. 본 논문에서는 이상적인 탐색기 시스템을 가정하였으며, 미사일의 이동을 위해 필요한 추가적인 제어(control) 요소 등은 생략하였다. MISSILE MOVEMENT 블록은 탐색기의 한 주기 동안의 PNG 블록의 출력을 적분하여 미사일의 이동속도와 변위를 구한다.

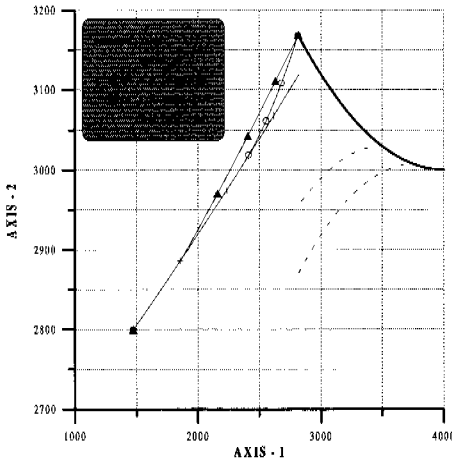


그림 9. 시나리오 1에서 단순 기억 방법을 이용한 미사일의 추적 결과. (2.5초 이후)

본 논문의 시뮬레이션에서 항법 상수는 3이며, 각 시나리오 상에서 제안된 반대응 기법을 이용하는 2-color 회전 동심원 레티클 탐색기를 탑재한 미사일과 기존 방법 및 반대응능력을 탑재하지 않은 미사일의 추적 결과를 그림 9, 10에 보였다.

대표적인 반대응능력인 단순기억(simple memory)

을 이용한 유도탄이 시나리오 1의 섬광탄 발사 후, 2~4초 동안의 추적 결과를 그림 9에 보였다. 단순 기억 기법은 탐색기의 시계상에 섬광탄의 존재를 판단하면, 일정 시간 동안 이전의 추적 정보를 유지하는 방법이다. 본 시뮬레이션에서는 1초 후에 발사된 섬광탄의 영향을 배제하기 위해, 2, 3, 4초 동안의 이전 추적 궤적을 유지하였다. 표적이 시계상에 존재하기 때문에 유도탄의 발사 시각을 기준으로 3~4초까지는 (2, 3초 동안 유지) 표적을 추적한다. 그러나 5초 후부터는 시계 내에 표적이 존재하지 않게 되며, 더 이상 표적 추적이 불가능하게 됨을 확인하였다. 따라서 단순 기억 방법의 성능은 각 상황에 따라 다르며, 그 운용 기간이 매우 중요함을 알 수 있다. 또한 섬광탄의 발사 이후 짧은 시간 동안에 그 영향을 줄일 수 있는 장점도 확인하였다.

시나리오 1에서 반대응 기법을 이용하지 않는 기존의 탐색기는 표적 대신 1초 후에 발사된 섬광탄을 추적함을 그림 10 (a)로부터 확인할 수 있다. 제안된 방법을 이용한 유도탄은 효과적으로 표적을 추적하며, 최종의 빗맞음 거리는 0.030m이다. 시나리오 2에서 유도탄은 -20°의 초기 오차를 가지고 있으며, 따라서 시나리오 1보다 급격한 선회를 한다. 최종 빗맞음 거리는 0.043m이고, 반대응능력을 적용하지 않는 레티클 탐색기는 표적 대신 발사된 섬광탄을 추적한다(그림 10 (b)). 시나리오 3과 4에서의 추적 결과를 그림 10 (c), (d)에 보였으며, 빗맞음 거리는 각각 6.818, 4.294m이다. 시나리오 1과 2의 경우에 비해 빗맞음 거리가 상대적으로 많은 차이를 보이는 이유는 표적이 앞의 경우와는 달리 빠른 속도로 이동하며, 미사일의 추적으로부터 벗어나기 위한 회피 기동으로 인해 선회 비행 중 발생하는 가속도 변화 때문이다. 그러나 일반적으로 비

표 1. 유도탄과 표적의 교전 시나리오

	표 적				유 도 탄		
	초기위치(m)	속도 (m/sec)	회피 기동	섬광탄	초기위치(m)	속도(m/sec)	소요시간
시나리오 1	X = 4000 Y = 3000	250	+Y 방향 1.5 G	1초 후, 2개 (초당 1개)	X = 0 Y = 2500	600	4.81
시나리오 2	X = 1000 Y = 3000	100	+Y 방향 1 G	1초 후, 1개	X = 0 Y = 1000 초기오차 : -20 deg.	600	3.79
시나리오 3	X = 4000 Y = 3000	400	1초 후, +Y 방향 0.5 G	1초 후, 초당 1개씩 2개, 3.5초에 1개	X = 0 Y = 3000	600	3.95
시나리오 4	X = 10000 Y = 3000	450	+Y 방향 1.5 G	4초 후, 초당 1개씩 2개	X = 0 Y = 3000	600	9.53



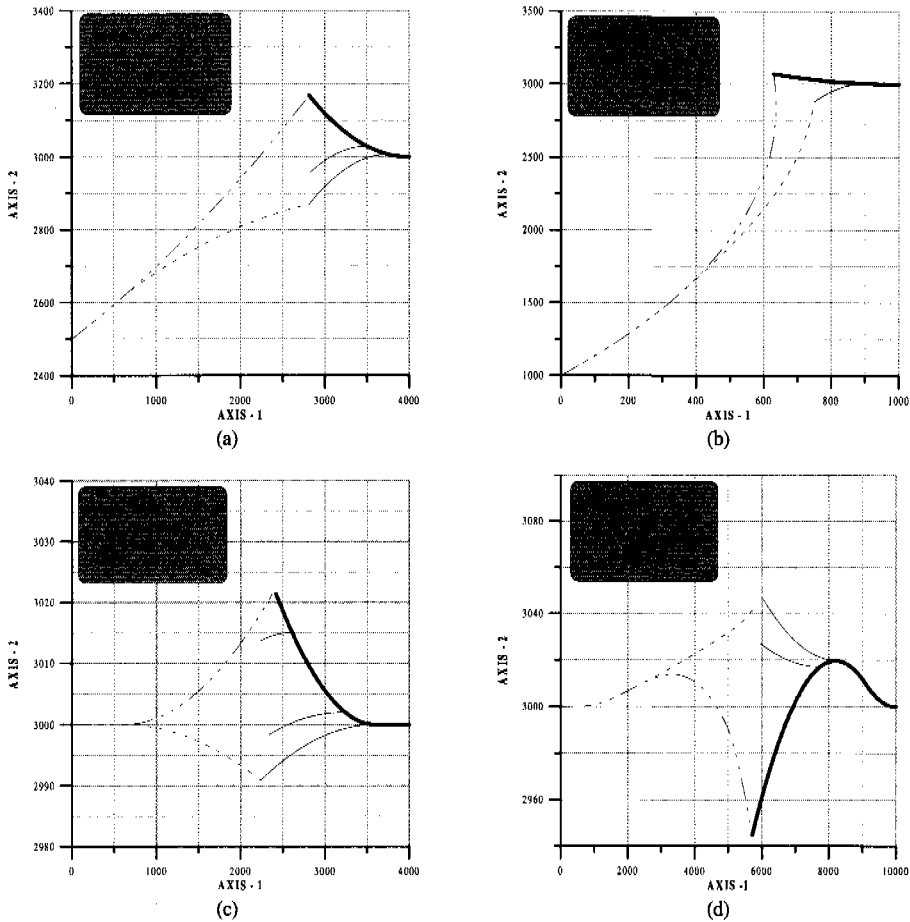


그림 10. 다양한 시나리오에서 LMS 방법을 이용한 미사일의 추적 결과.

사일의 살상 반경은 10m 이내이며<sup>[18]</sup>, 따라서 표 1의 모든 교전 상황에서 제안된 반대용 기법을 적용한 미사일은 대상 표적을 정확하게 명중시킴을 확인하였다.

### V. 결론

본 논문에서는 다양한 시나리오 상에서 추적 성능을 확인할 수 있는 2-color 동심원 레티클 탐색기의 시뮬레이션 툴을 구성하였으며, LMS 방법을 이용한 새로운 반대용능력을 제안하였다. 구성된 시뮬레이션 툴 상에서 표적과 섬광탄의 적외선 특성을 모델링하며, 이를 대상 탐색기의 입력으로 이용한다. 그리고 대기의 구성 물질에 따른 투과 특성의 영향, 광학계의 구조, 검출기의 크기, 반응 대역 등의 파라미터들이 시뮬레이션에 포함되며, 표적과 유도탄의 추적 성능을 확인하기 위해 비례항법 유도 루프

를 구성하였다. 구성된 시뮬레이션 툴은 거리에 따른 표적신호의 변화와 이에 따른 영향을 분석하여 실제 탐색기의 H/W 구성에 참고할 수 있으며, 섬광탄에 의한 영향 예측 등에 활용될 수 있다. 본 논문에서는 SWIR 및 MWIR 대역에서 섬광탄과 표적의 스펙트럼 분포 차이를 이용하여 섬광탄의 간섭 신호를 효과적으로 배제하는 새로운 2-color 반대용 알고리즘이 제안되었다. 임의의 교전 시나리오 상에서 제안된 반대용 기법을 적용한 미사일이 기존 방법에 비해 향상된 추적 결과를 보임을 확인하였다.

이후 연구에서는 실제의 3차원 형태와 크기를 가지는 표적과 시간에 따라 적외선 방사 특성이 변하는 섬광탄을 모델링할 예정이다. 또한 대상 표적 및 주위 배경의 적외선 방사 특성 변화를 시뮬레이션에서 고려하며, 다양한 교전 시나리오 상에서 구성된 탐색기 시스템의 표적 발견 및 인식 관련 연구가 계속될 예정이다.

