

방위각 변화율을 이용한 방호용레이다 위협 판단 알고리즘

Threat Decision Algorithm of Missile Warning Radar Using Azimuth Angular Rate

하 종 수*

Ha, Jong-Soo

ABSTRACT

It is difficult for a MWR(Missile Warning Radar) to perform a threat decision accurately since there is no tracking part which gives more accurate threat information to the MWR. In this paper, the threat decision algorithm is proposed using an azimuth angular rate to improve the accuracy. The azimuth angular rate is dependent upon the direction of an approaching target. The target is classified into a threat or non-threat using a boundary condition of the azimuth angular rate. The boundary condition is determined using the Monte-Carlo simulation. The performance of the proposed algorithm is evaluated using this condition at field tests of MWR. The efficiency of the proposed method for the threat decision is proved by comparing the results of field tests with the simulation results.

주요기술용어(주제어) : Missile Warning Radar(방호용레이다), Threat Decision Algorithm(위협 판단 알고리즘), Azimuth Angular Rate(방위각 변화율), Boundary Condition(경계 값 조건), Time To Impact (위협 도달 시간)

1. 머리말

흑표체계 능동방호장치의 탐지 센서인 방호용레이다는 모노펄스 레이더로서 대전차 위협체를 탐지, 추적하고 위협을 판단하는 기능을 수행한다^[1]. 일반적으로 위협 판단은 추적에 의해 표적의 예상 진로를 추정하고, 추정된 진로를 근거로 표적이 해당 무기 체계를 공격하는지 아니면 인접 무기 체계를 공격하는지를 판단하는 과정을 통해 이루어진다. 그러나 방호용레이다는 체계 장착을 위해 소형화되어야 하고 단

거리/중거리를 동시에 탐지해야 하며, 추적 레이더 없이 탐지 레이더만으로 탐지와 추적을 동시에 수행해야 한다.

이러한 제약으로 인해 방호용레이다는 표적 추적을 위해 소프트웨어에 의한 추적인 TWS(Track While Scan)을 사용한다. 그러나 방호용레이다는 수신안테나의 빔 방사 패턴이 넓으면서 진폭비교 방식의 방위각 추정 방법을 사용하기 때문에 방위각 분해능이 좋지 않다는 점, 중거리 탐지용인 넓은 펄스폭(Pulse Width)을 이용하기 때문에 거리분해능이 좋지 않다는 점에서 단순한 TWS에 의한 추적만으로는 정확한 위협 판단을 수행하기 어렵다. 따라서 위협 판단을 수행하는 새로운 알고리즘이 필요하게 되었다.

본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 새로운 위협 판

† 2007년 11월 29일 접수~2008년 2월 1일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

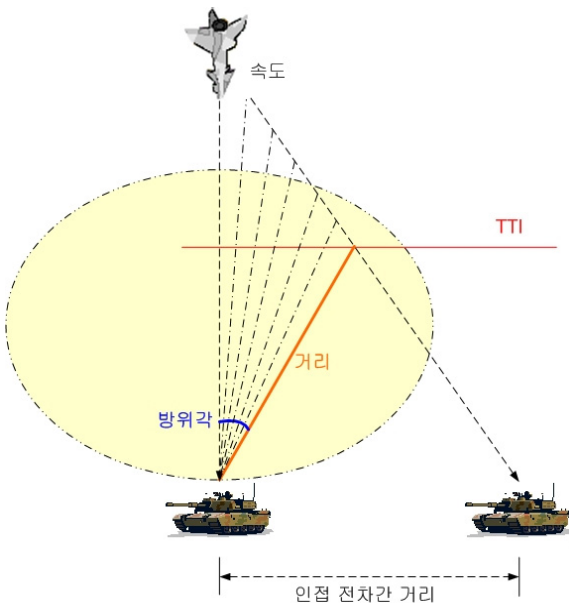
주저자 이메일 : jsha@add.re.kr

단 알고리즘을 도출하는 과정과 제안하는 알고리즘에 대해 설명하고, 이 알고리즘에 대해 시뮬레이션을 수행하여 방호용레이다의 위협 판단 성능의 효과도를 분석하였다. 그리고 실제 야외 시험 데이터에 대한 방호용레이다의 위협 판단 결과를 제시함으로써 제안하는 알고리즘의 성능을 검증하였다.

2. 본론

가. 위협 판단 변수 결정

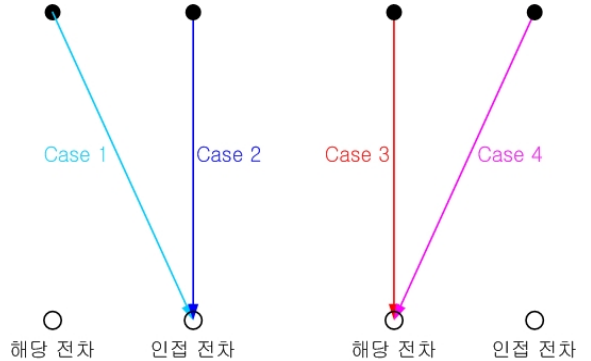
위협 판단을 위해서 먼저 위협 판단에 사용할 변수를 결정해야 한다. 방호용레이다는 표적의 거리, 속도, 방위각 3가지 정보를 제공한다. 이러한 정보를 이용하여 방호용레이다는 임의의 TTI(Time To Impact)에서 위협/비위협을 판단하는데 그 기본 개념은 그림 1과 같다.



[그림 1] 위협 판단 기본 개념도

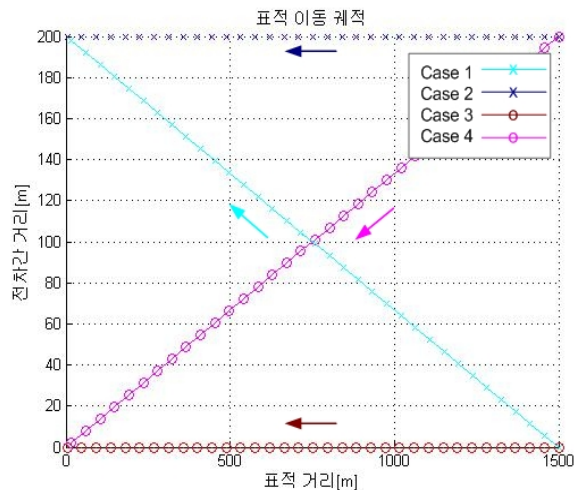
위협 판단을 위한 시나리오는 그림 2의 4가지로 분류된다. 경우 1은 표적이 정면에서 인접 무기 체계, 경우 2는 표적이 대각선에서 인접 무기 체계로 향하는 경우이다. 경우 3은 표적이 정면에서 해당 무기

체계, 경우 4는 표적이 대각선에서 해당 무기 체계로 향하는 경우이다.



[그림 2] 위협 판단 시나리오

그림 3은 시뮬레이션을 수행하였을 때 각 시나리오의 표적 이동 궤적을 나타낸다. 'o'선은 해당 무기 체계를 향하는 표적을 나타내며 'x'선은 인접 무기 체계를 향하는 표적을 나타낸다.

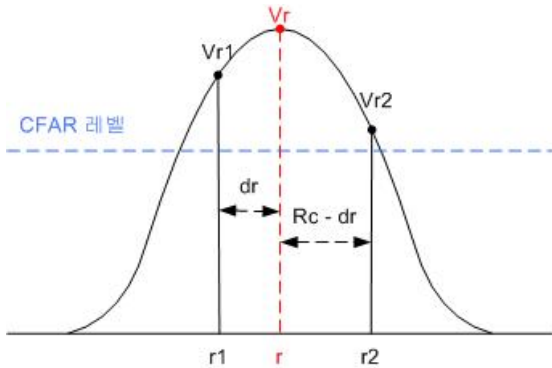


[그림 3] 표적 이동 궤적

1) 거리 변수

방호용레이다는 보다 정확한 거리를 추정하기 위해 그림 4와 같은 거리보간 기법을 사용한다.

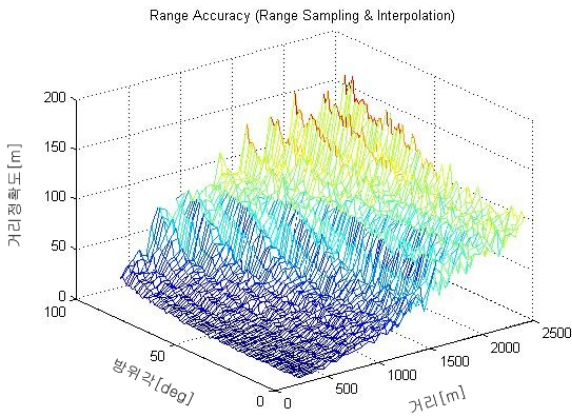
따라서 거리 정확도를 구하기 위해서는 dr 의 정확도를 구하면 되며, 그 값은 식 (1)과 같다^[2].



[그림 4] 거리보간 기법

$$dr = \frac{R_c}{2} + \frac{\sigma_R^2}{R_c} \cdot \log_e \left(\frac{V_{r_2} + n_{r_2}}{V_{r_1} + n_{r_1}} \right) \quad (1)$$

σ_R 는 수신펄스의 표준편차이며 R_c 는 거리 셀의 크기이다. 식 (1)의 dr 정확도를 구한 결과를 그림 5에 도시하였다^[3].

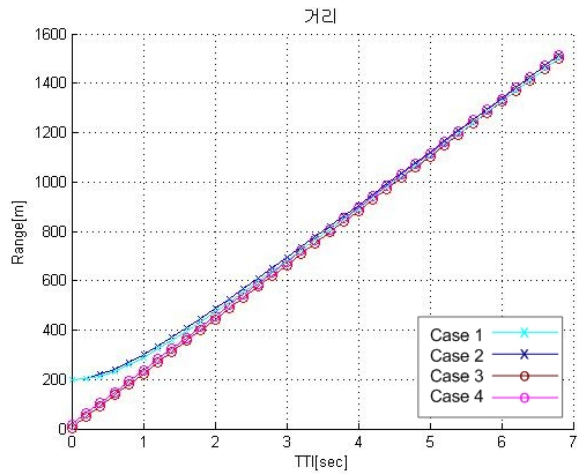


[그림 5] 거리 정확도 계산 결과

거리 정확도는 거리별로 다르며 변화 패턴도 지그재그 형태를 가지지만 기준 거리와 기준 방위각에서 약 50m~70m의 정확도를 가진다. 각 시나리오에 대해 거리 오차를 배제하고 구한 표적의 거리 변화 그래프를 그림 6에 나타내었다.

그림 6에서 거리 변화값이 TTI 3초대를 기준으로 시나리오별로 크게 구분되지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 그림 5와 6의 결과를 고려할 때 거리 변수를

위협 판단 변수로 사용하기에는 어려움이 따른다.

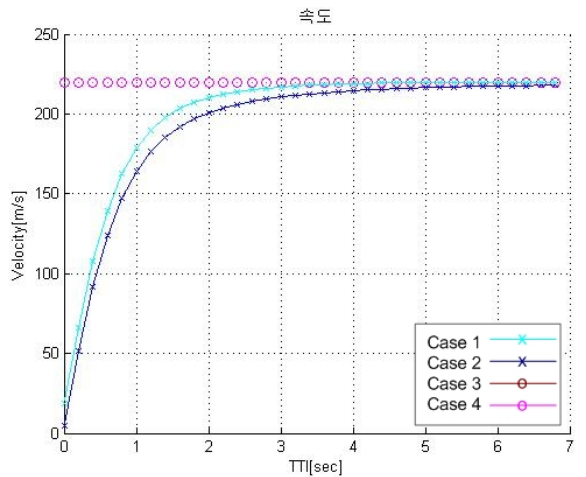


[그림 6] 시간 변화에 따른 표적의 거리 변화

2) 속도 변수

속도의 경우 PRF(Pulse Repetition Frequency)와 속도 셀 수의 관계로부터 도플러주파수 f_d 를 계산하고 도플러주파수, 빛의 속도, 반송주파수 f_c 의 관계로부터 속도 정확도 dv 를 식 (2)와 같이 계산할 수 있다. 계산 결과 속도 정확도는 약 0.8% 정도이다^[4].

$$dv = \frac{f_d \cdot c}{2 \cdot f_c} \quad (2)$$



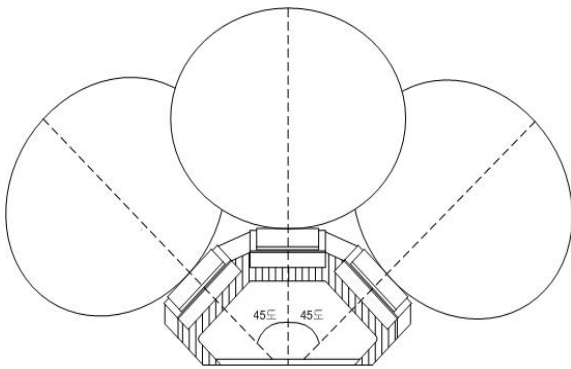
[그림 7] 시간 변화에 따른 표적의 속도 변화

속도 오차를 배제하고 시나리오별로 속도 변화 그래프를 구하면 그림 7과 같다.

위 시뮬레이션에서 표적의 속도는 등속도로 가정하였다. 그림에서 TTI 3초 이내에서 위협체와 비위협체의 속도 변화가 차이는 것을 확인할 수 있다. 그러나 속도의 경우 표적들이 다양한 가속 패턴을 가지는데 반해 운용자는 그 패턴을 알 수 없다는 점에서 속도 변수를 위협 판단에 사용하기에는 어려움이 있다.

3) 방위각 변수

방호용레이다의 안테나 구조는 그림 8과 같다.



[그림 8] 방호용레이다 안테나 구조

중앙에 송신 안테나, 양쪽에 수신 안테나가 위치하며 식 (3)을 이용하여 방호용레이다의 방위각 정확도 σ_θ 를 구할 수 있다^[5].

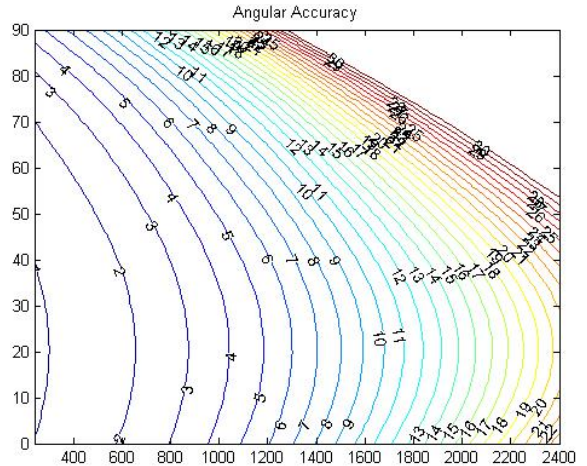
$$\sigma_\theta = \frac{\theta_{bw}}{k_m \sqrt{2S/N}} \quad (3)$$

θ_{bw} 는 3-dB 빔폭이며, k_m 은 normalized monopulse slope이다. 그림 9에 방위각 정확도를 구한 결과를 도시하였다.

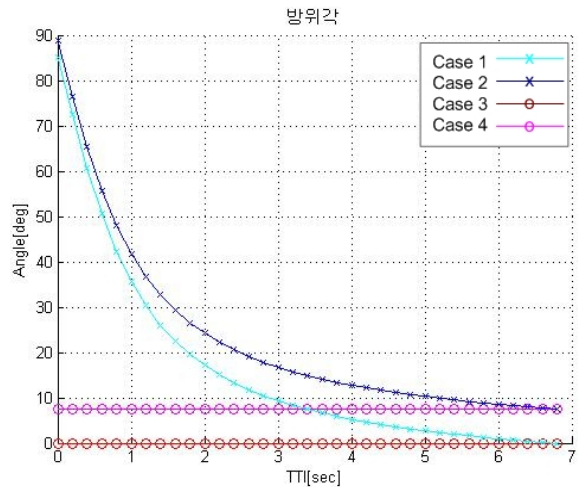
방위각 정확도는 거리별로 다르지만 관심 영역을 기준으로 약 8°~11°를 만족한다. 방위각 오차를 배제하고 시나리오별로 방위각 변화 그래프를 구하면 그림 10과 같다.

그림 10에서 TTI 3초대를 기준으로 위협체와 비위협체의 방위각 변화 패턴이 확연한 차이를 보임을 알

수 있다. 따라서 방위각 변수의 경우 정확도는 나쁘지만 거리, 속도, 방위각 변수 중에서 방위각 변수를 사용하는 것이 정확한 위협 판단을 위해서는 가장 효과적이라고 할 수 있다.



[그림 9] 방위각 정확도 계산 결과



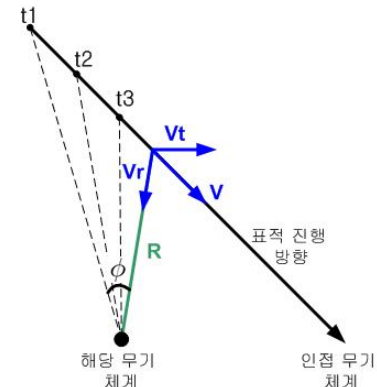
[그림 10] 시간 변화에 따른 표적의 방위각 변화

나. 위협 판단 알고리즘

1) 방위각 변화율 위협 판단 알고리즘

본 논문에서는 위협 판단 알고리즘으로 방위각 변화를 이용 알고리즘을 제안한다. 그림 11에서 보듯이 인접 무기 체계를 지향하는 비위협체의 경우 방위각

이 계속 변화하는 반면 해당 무기 체계를 지향하는 위협체의 경우 방위각이 일정하게 유지된다.



[그림 11] 표적 경로와 방위각 변화

그림 11에서 위협 판단의 기준이 되는 방위각 ϕ 의 변화율 $\dot{\phi}$ 는 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{\phi} = \frac{V_i}{|R|} = \frac{V - V_r}{|R|} = \frac{V - (V \cdot \hat{R})\hat{R}}{|R|} \quad (4)$$

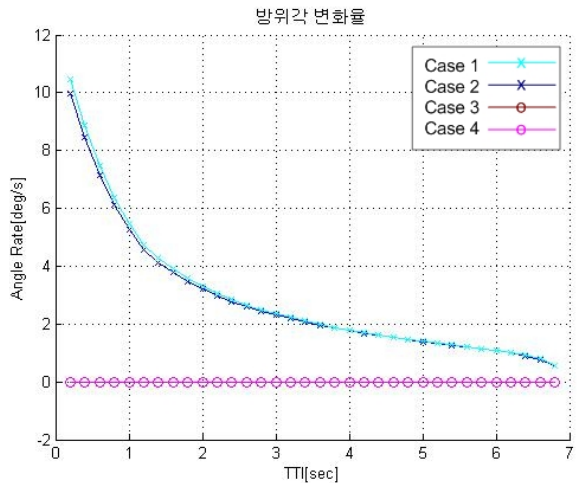
\hat{R} 은 R 방향의 단위 벡터이다. 제안하는 알고리즘에서는 TTI를 기준으로 $|\dot{\phi}| \leq \dot{\phi}_T$ 를 만족하는 경우 위협으로 판단한다. $\dot{\phi}_T$ 는 위협 판단의 기준이 되는 방위각 변화율 경계 값이다. 시간에 따른 방위각 변화율 그래프를 아래와 같은 시뮬레이션 조건에 따라 그림 12에 도시하였다.

- ① 표적은 1.5km 거리에서 등속 220m/s로 접근
- ② 해당-인접 무기 체계간 거리는 200m
- ③ 스캔갱신시간은 0.2초

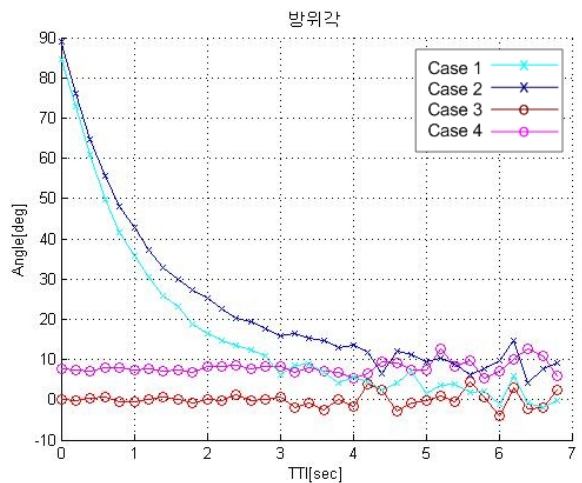
그림 12에서 보듯이 TTI 시작점부터 위협체와 비위협체의 방위각 변화율이 확연히 구분됨을 알 수 있다. 그러나 실제 표적은 방위각 오차를 가지며 이러한 오차가 반영될 경우 위협 판단 성능은 저하될 수 밖에 없다.

그림 13은 그림 10의 방위각 변화 그래프에 방위각 정확도를 반영한 결과이며, TTI 초기부터 방위각

이 심하게 요동침을 볼 수 있다.



[그림 12] 시간에 따른 방위각 변화율 그래프

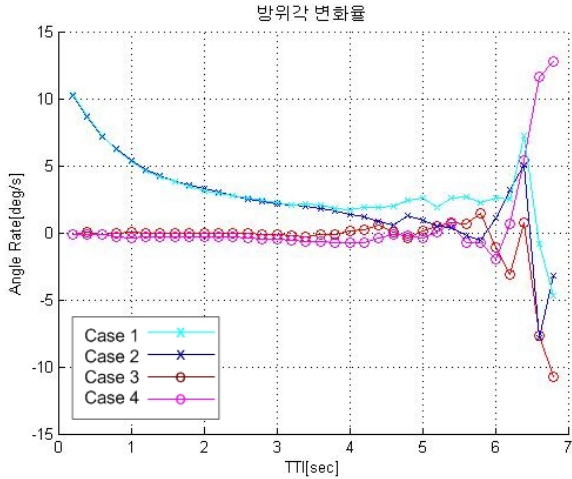


[그림 13] 시간 변화에 따른 표적의 방위각 변화 - 방위각 오차 반영

그림 14는 방위각 정확도를 반영한 방위각 변화율을 보여주고 있으며, TTI 초기부터 심하게 요동침을 알 수 있다.

방위각 변화율을 위협 판단의 기준으로 사용하기 위해서는 위협 판단 시에 충분한 개수의 데이터를 확보하여야 한다. 그러나 그림 13과 같이 위협 판단 이전에 확보되는 방위각 데이터들은 그 오차가 매우 크

다. 따라서 이러한 데이터들 간의 오차를 줄이는 선형 근사를 수행할 필요가 있다.



[그림 14] 시간에 따른 방위각 변화율 그래프 - 방위각 오차 반영

2) 가중 선형 근사 알고리즘

식 (4)를 이용해서 방위각 변화율을 구할 경우 매 스캔 발생하는 방위각 오차를 위험 판단에 그대로 반영하게 되는 단점이 있다. 따라서 방위각 오차를 최소화하기 위해 식 (5)의 오차 E 를 최소화하는 $\dot{\phi}$ 와 c 를 구하는 가중 선형 근사 알고리즘을 사용한다^[6].

$$E = \sum \left[\frac{\phi_i - (\dot{\phi}t_i + c)}{\sigma_i} \right]^2 \tag{5}$$

ϕ_i 는 표적의 각도정보이며 t_i 는 TTI를 나타낸다. 식 (5)의 오차 E 를 최소로 하는 조건 $\frac{\partial E}{\partial \dot{\phi}} = 0$ 으로부터 식 (6)을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \frac{T \cdot \bar{\phi} - \bar{T} \cdot \bar{\Phi}}{T^2 - \bar{T}^2} \tag{6} \\ \bar{T} &= \frac{\sum w_i^2 t_i}{\sum w_i^2}, \bar{T}^2 = \frac{\sum w_i^2 t_i^2}{\sum w_i^2}, \bar{\Phi} = \frac{\sum w_i^2 \phi_i}{\sum w_i^2} \\ \bar{T} \cdot \bar{\Phi} &= \frac{\sum w_i^2 t_i \phi_i}{\sum w_i^2}, w_i = \frac{1}{\sigma_i}, \sigma_i = \frac{\theta_{BW}}{k_m \sqrt{2S/N}} \end{aligned}$$

σ_i 는 식 (3)의 σ_θ 와 같으며 가중치 w_i 는 σ_i 의 역수를 취한다.

다. 위험 판단 효과도 분석

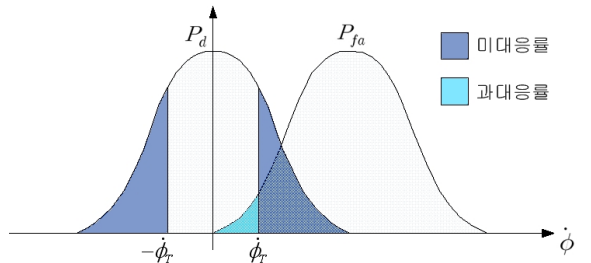
1) 과대응률/미대응률

해당 무기 체계를 향하는 표적의 방위각 변화율을 $\dot{\phi}_1$, 인접 무기 체계로 향하는 표적의 방위각 변화율을 $\dot{\phi}_2$ 라 할 때 과대응률 p_o 와 미대응률 p_m 은 식 (7)과 같이 표현된다^[7].

$$p_o = p(|\dot{\phi}_2| \leq \dot{\phi}_T) \tag{7}$$

$$p_m = p(|\dot{\phi}_1| \geq \dot{\phi}_T)$$

$\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2$ 의 PDF(Probability Density Function)를 $f_1(\dot{\phi}_1), f_2(\dot{\phi}_2)$ 라 할 때 이를 영역으로 표시하면 그림 15와 같다.



[그림 15] PDF내 과대응률/미대응률 분포 형태

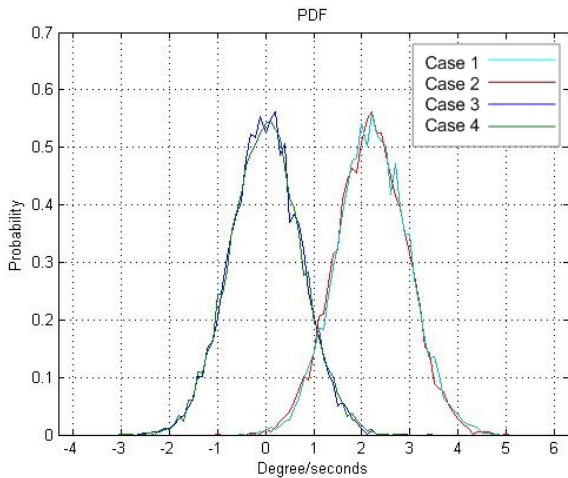
제안하는 알고리즘에서는 위험 판단 시 $\dot{\phi}_T$ 를 고정시키고 과대응률과 미대응률을 구하는 모드와 미대응률을 고정시키고 $\dot{\phi}_T$ 를 가변시킴으로써 과대응률을 구하는 두 가지 모드를 운용한다.

2) Monte-Carlo 시뮬레이션

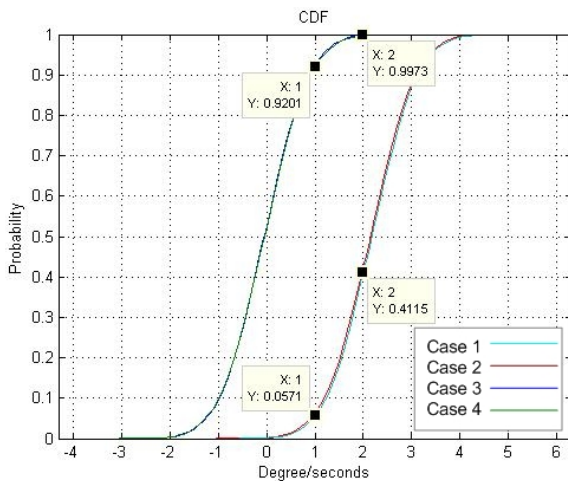
그림 2의 4가지 시나리오에 대해 그림 9의 방위각 정확도를 대입하여 Monte-Carlo 시뮬레이션을 1만회 반복하여 수행하였다^[8]. 본 논문에서는 아래 두 가지 경우에 대한 방위각 변화율의 PDF와 CDF(Cumulative Distribution Function) 결과를 제시한다. 첫 번째 시뮬레이션의 조건은 다음과 같으며 그림 16, 17에 결

과를 도시하였다.

- ① 표적은 1.5km 거리에서 등속 220^{m/s}로 접근
- ② 해당-인접 무기 체계간 거리는 200m
- ③ 스캔갱신시간 0.2초, 위협 판단 TTI 3.0초



[그림 16] 효과도 분석 PDF - 거리 1.5km

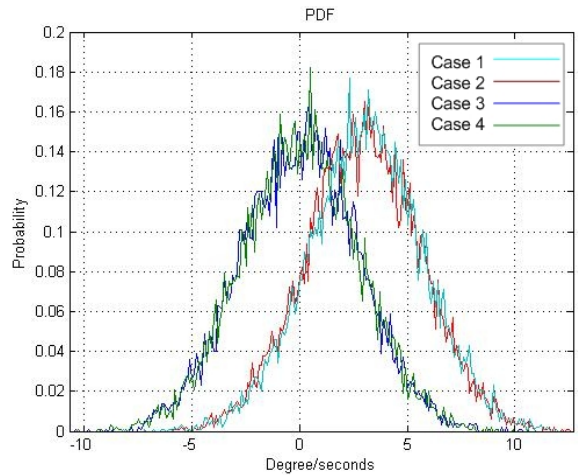


[그림 17] 효과도 분석 CDF - 거리 1.5km

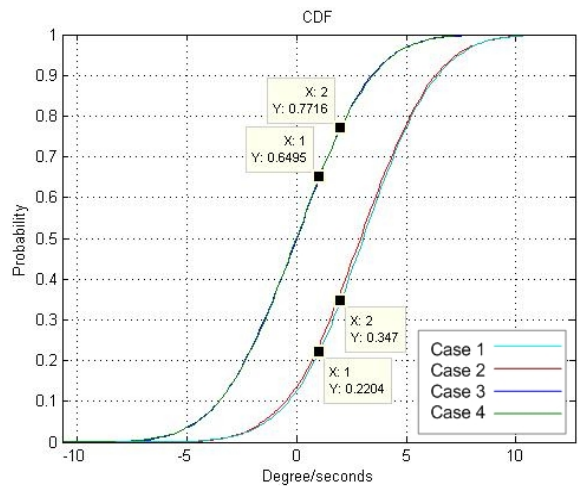
그림 17에서 위협 판단의 기준이 되는 방위각 변화율 경계 값이 1°/sec로 정할 경우 과대응률은 5.7%, 미대응률은 16%가 되며 방위각 변화율 경계 값을 2°/sec로 정할 경우 과대응률은 41%, 미대응률은 0.5%

가 된다. 두 번째 시뮬레이션의 조건은 다음과 같으며 그림 18, 19에 결과를 도시하였다.

- ① 표적은 1.0km 거리에서 등속 220^{m/s}로 접근
- ② 해당-인접 무기 체계간 거리는 200m
- ③ 스캔갱신시간 0.2초, 위협 판단 TTI 3.0초



[그림 18] 효과도 분석 PDF - 거리 1.0km



[그림 19] 효과도 분석 CDF - 거리 1.0km

그림 19에서 방위각 변화율 경계 값이 1°/sec일때 과대응률은 22%, 미대응률은 70.1%가 되며 방위각 변화율 경계 값이 2°/sec일 경우에는 과대응률은 34.7%,

미대응률은 45.7%가 된다.

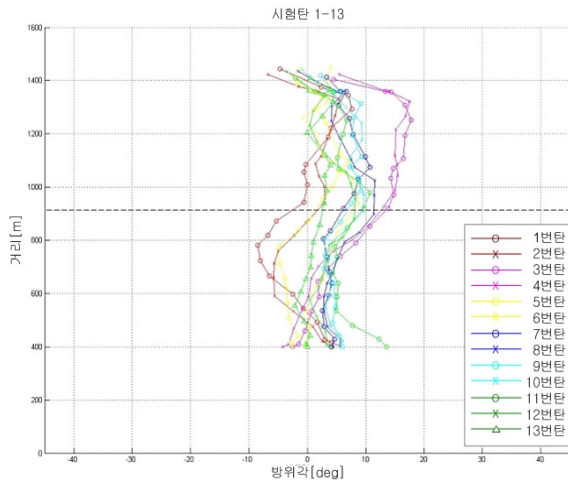
위의 두 분석 결과에서 보듯이 표적의 조건에 따라 그래프의 기울기, x축 거리 등이 달라지며 방위각 변화율 경계 값에 따라 과대응률과 미대응률이 반비례 관계로 달라지는 특성을 보인다. 따라서 효과적인 위협 판단을 위해서는 과대응률과 미대응률 값을 절충하여 경계 값을 결정해야 한다.

라. 야외시험결과위협 판단 효과도 분석

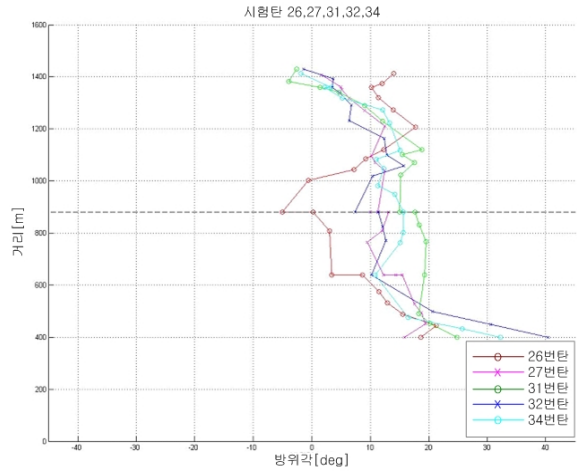
위와 같은 결과를 바탕으로 야외에서 아래와 같은 조건으로 시험탄을 발사하여 1, 2차 시험을 수행하였다. 그림 20에 1차 시험 때 정면으로 발사한 표적의 탐지 궤적들을, 그림 21에 1차 시험 때 400m이상 이격하여 발사한 표적의 탐지 궤적들을 도시하였다.

- ① 표적은 전용 시험탄 사용, 발사거리는 1.4km
- ② 속도는 210~250m/s에서 가속 변화
- ③ 이격발사거리는 정면, 200, 400, 500m
- ④ 스캔 갱신 시간 0.2초, 위협 판단 TTI 3.0초
- ⑤ 위협 판단 경계 값은 2°/sec

그림 20, 21에서 표적의 탐지 궤적이 휘면서 지그재그로 움직이는 경향을 보이는데, 이는 방위각 및 거리 오차, 펄스 특성, 안테나 빔 특성, 멀티 패스 등 복합적 요인에 의한 결과로 보인다.



[그림 20] 표적 탐지 궤적 - 정면



[그림 21] 표적 탐지 궤적 - 400m 이상 이격

[표 1] 야외 시험 결과

이격거리	정면	200m	400m	500m
1차 시험	(1) 3.5	(20) 3.2	(27) 3.2	(28) x
	(2) 3.2	(21) 3.0	(31) x	(29) x
	(3) 3.5	(22) 3.0	(32) 3.2	(30) x
	(4) 3.5		(34) 2.7	
	(5) 3.3			
	(6) 3.3			
	(7) 3.2			
	(8) 3.4			
	(9) 3.3			
	(10) 3.5			
	(11) 3.3			
	(12) 3.4			
2차 시험	(1) 3.3	(7) 2.0	(14) x	
	(3) 3.3	(8) 2.4	(15) x	
	(4) 3.2	(16) 2.0		
	(5) 3.4			
	(19) 3.5			
대응확률	100%	50%	33.3%	0%

표 1에 1, 2차 시험 결과를 종합하여 정리하였다. Monte-Carlo 시뮬레이션과는 표적의 가속 특성 등이

다르다는 차이점이 있지만 시뮬레이션에서 이격거리 200m, 경계 값 $2^\circ/\text{sec}$ 의 과대응률과 미대응률이 각각 41%, 0.5%였던 점을 감안할 때 야외 시험에서 정면 100% 대응(미대응률 0%), 이격거리 200m 50% 대응(과대응률 50%)의 결과는 시뮬레이션에 부합하는 결과라고 할 수 있다.

표 1에서 숫자 '3.5', '3.0' 등은 TTI를 나타내며, 'x'는 비위협으로 판단한 것을 나타낸다.

3. 맺음말

본 논문에서는 체계 장착성 등의 제약으로 인해 추적 시 TWS를 사용하는 소형 모노 펄스 레이더인 방호용레이더의 위협 판단 알고리즘을 제안하였다. 레이더가 제공하는 거리, 속도, 방위각 정보 중 위협 판단 시 사용할 변수 선택에 대한 타당성을 검증하였으며 그 결과 방위각 변수를 위협 판단 시 사용하는 변수로 결정하였다.

제안하는 방위각 변화율을 이용한 위협 판단 알고리즘은 특정 TTI에서 특정 경계 값을 기준으로 위협 여부를 판단하는 알고리즘이며 수집된 데이터들 간의 오차를 줄이기 위하여 가중 선형 근사 알고리즘을 사용한다.

제안하는 알고리즘의 효과도는 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통하여 과대응률/미대응률이라는 지표로 제시하였으며 실제 야외 시험을 통해 제안하는 알고리즘의 성능을 검증한 결과 시뮬레이션 결과와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

비록 좋지 않은 탐지 정확도에도 불구하고 방호용레이더 단독 시험의 경우 만족할만한 결과를 얻을 수 있었지만, 실제 체계에 장착될 경우 예상하지 못한 다른 현상이 발생할 수도 있으므로 앞으로 이에 대한 보완 작업이 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 박규철, 이종민, “고속/소형 표적 탐지 센서의 모의표적 신호발생기 설계”, 국방과학연구소 기술보고서, 2003.
- [2] J. Martin, “Range and doppler accuracy improvement for pulse doppler radar”, Radar 97(Publication No. 449 ©IEE 1997), October 1997.
- [3] 하중수, 박규철, “방호용레이더 정확도 분석”, 국방과학연구소 연구보고서, 2006.
- [4] Skolnik, M. I., Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill Book Company, 3rd edition 2001.
- [5] Samuel M. Sherman, Monopulse Principles and Techniques, Artech House, 1985.
- [6] Kwak and Hong, Linear Algebra, Birkhauser.
- [7] 박규철, 하중수, 이정수, 공영균, 홍성용, “확률모델을 이용한 방호용레이더 효과도 분석 기법 연구”, 제15회 지상무기 학술대회, 2007.
- [8] 하중수, 박규철, 이종민, “방호용레이더 과대응률/미대응률 분석”, 국방과학연구소 연구보고서, 2006.