

지상기동 장비용 미사일 경고 레이더의 성능 평가

The Performance Evaluation of Missile Warning Radar for GVES

박 규 철 · 흥 성 용*

Gyu-Churl Park · Sung-Yong Hong*

요 약

지상기동 장비에 장착되는 미사일 경고 레이더는 탐지된 표적에 의한 위협을 효과적으로 판단해야 한다. 본 논문에서는 위협 판단 기법인 선형 근사 알고리즘과 가중 선형 근사 알고리즘에 대해 확률 모델을 적용한 시뮬레이션을 통해 성능을 평가하였다. 또한 실제 측정을 통해 위협 판단 알고리즘의 타당성을 확인하였다.

Abstract

A MWR(Missile Warning Radar) of GVES(Ground Vehicle Equipment System) has to effectively decide the threat for a detected target. Linear Approximation Fitting(LAF) and Weighted Linear Approximation Fitting(WLAF) algorithm is proposed as algorithm for a threat decision method. The target is classified into a threat or non-threat using a boundary condition of the angular rate, and the boundary condition is determined using probability model simulation. This paper confirms the performance of proposed threat decision algorithm using measurement.

Key words : Missile Warning Radar, Threat Decision, Time To Impact, Linear Approximation Fitting(LAF), Weighted Linear Approximation Fitting(WLAF), Probability Model

I. 서 론

대전차 미사일을 탐지하기 위한 미사일 경고 레이더는 모노펄스 레이더로서 위협체를 탐지, 추적하여 표적의 거리 및 방위각을 계산하고, 위협을 판단하는 기능을 수행한다^[1]. 이러한 레이더의 성능은 과대응률과 미대응률로 평가된다. 과대응률은 인접한 지상기동 장비로 발사된 미사일에 대해 대응하는 확률이며, 미대응률은 내 지상기동 장비로 발사된 미사일에 대하여 대응하지 않을 확률이다^[2].

추적에 의해 얻은 데이터를 이용하여 표적의 예상 진로를 추정한다. 추정된 진로를 근거로 표적이 해당 지상기동 장비를 공격하는지 인접 지상기동 장비를 공격하는지를 판단한다. 그러나 미사일 경고

레이더는 체계 장착을 위해 소형화되고 단거리와 중거리를 동시에 탐지해야 하며, 양산가를 줄이기 위해 고가의 추적 레이더 대신 소프트웨어 추적 방식인 TWS(Track While Scan)을 사용한다.

그러나 이 경우 방위각은 진폭 비교 방식으로 계산하는데 레이더의 안테나 빔 방사 패턴이 넓어 방위각 분해능이 떨어진다. 또한 송수신 펄스 폭이 넓기 때문에 TWS 추적 데이터만으로는 위협을 정확하게 판단하기가 어렵다.

이러한 단점을 보완하기 위해 기존 논문에서 가중 선형 근사 알고리즘을 제안하였다^[3]. 본 논문에서는 선형 근사 알고리즘과 가중 선형 근사 알고리즘에 확률 모델을 적용하여 시뮬레이션을 통해 성능을 비교하였다. 또한 실제 측정을 통해 위협 판단 알고리

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

*충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science & Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 20090903-102

· 수정완료일자 : 2009년 10월 20일

증의 타당성을 확인하였다.

II. 위협 판단 알고리즘

2-1 선형 근사 알고리즘

그림 1에 미사일 경고 레이더의 위협 판단에 대한 기본 개념도를 나타내었다. TTI(Time To Impact)와 방위각이 선형 관계라고 가정하면, 측정된 방위각과 TTI로부터 curve fitting으로 구한 1차 방정식의 차에 의한 오차 E 를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다^[4].

$$E = \sum [\phi_i - (\bar{\phi} t_i + c)]^2 \quad (1)$$

이때 ϕ_i 는 표적의 방위각이며 t_i 는 TTI이다.

위협 판단의 지표인 방위각 변화율 $\bar{\phi}$ 는 식 (1)에 나타낸 오차 E 를 최소화하면 구할 수 있다. 오차 E 를 최소로 하는 $\bar{\phi}$ 와 c 를 구하는 방법을 선형 근사(LAF: Linear Approximation Fitting) 알고리즘이라고 한다^[5]. E 를 최소화하는 필요 충분 조건인 $\nabla_x E = 0$ 으로부터 LAF 알고리즘을 이용하여 방위각 변화율 $\bar{\phi}$ 를 구하면 식 (2)와 같다.

$$\bar{\phi} = \frac{\overline{T \cdot \phi} - \overline{T} \cdot \overline{\phi}}{\overline{T^2} - (\overline{T})^2} \quad (2)$$

이때 \overline{T} , $\overline{T^2}$, $\overline{\phi}$, $\overline{T \cdot \phi}$ 는 다음과 같다.

$$\overline{T} = \frac{\sum t_i}{N}, \quad \overline{T^2} = \frac{\sum t_i^2}{N},$$

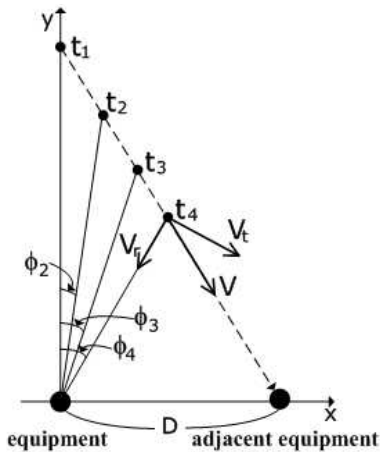


그림 1. 위협 판단 알고리즘 개념도
Fig. 1. The concept of threat decision algorithm.

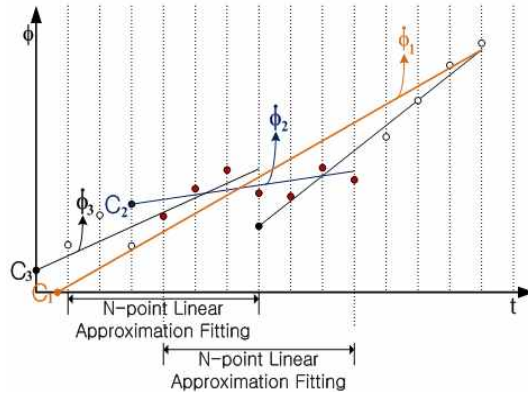


그림 2. 선형 근사 알고리즘의 $\bar{\phi}$ 와 c 의 관계
Fig. 2. The $\bar{\phi}$ and c of linear approximation fitting algorithm.

$$\bar{\phi} = \frac{\sum \phi_i}{N}, \quad \overline{T \cdot \phi} = \frac{\sum t_i \phi_i}{N} \quad (3)$$

여기서 N 은 수집된 데이터의 총 개수이다.

그림 2에 LAF 알고리즘에서 $\bar{\phi}$ 와 c 의 관계를 나타내었다. 1/3 시점에서부터 LAF 알고리즘을 적용하면 방위각 변화율은 $\bar{\phi}_2$ 가 얻어지고 탄착 지점은 c_2 가 된다. 만일 처음부터 LAF 알고리즘을 적용하면 방위각 변화율은 $\bar{\phi}_1$ 이 얻어지고 탄착 지점은 c_1 이 된다. 즉, 알고리즘 적용을 시작하는 TTI에 따라서 얻어지는 $\bar{\phi}$ 와 c 가 달라짐을 그림에서 알 수 있다. 최종 예측 탄착 지점은 c_3 가 되어야 하는데, LAF 알고리즘에서는 c_1 이 된다.

2-2 가중 선형 근사 알고리즘

식 (2)를 이용해서 방위각 변화율을 구하는 LAF 알고리즘은 매 스캔 발생하는 방위각 오차가 위협 판단에 그대로 반영되어 정확도가 떨어진다. 이러한 방위각 오차의 영향을 최소화하기 위해 식 (4)와 같이 가중치 w_i 를 적용한 파라미터를 식 (2)에 적용하여 $\bar{\phi}$ 를 계산한다. 이 방법을 가중 선형 근사(WLAF: Weighted Linear Approximation Fitting) 알고리즘이라 한다. 이때 \overline{T} , $\overline{T^2}$, $\overline{\phi}$, $\overline{T \cdot \phi}$ 는 다음과 같다.

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad \overline{T} = \frac{\sum w_i t_i}{\sum w_i}, \quad \overline{T^2} = \frac{\sum w_i t_i^2}{\sum w_i},$$

지상기동 장비용 미사일 경고 레이더의 성능 평가

$$\bar{\phi} = \frac{\sum w_i \phi_i}{\sum w_i}, \quad T \cdot \bar{\phi} = \frac{\sum w_i t_i \phi_i}{\sum w_i} \quad (4)$$

이때 σ_i 는 측정된 방위각 ϕ 의 거리에 따른 오차로 식 (5)와 같이 표적에 대한 신호 대 잡음의 함수로 나타낼 수 있다^[6].

$$\sigma_i = \frac{\theta_{BW}}{k_m \sqrt{2 \frac{S}{N}}} \quad (5)$$

식 (5)의 θ_{BW} 는 안테나의 3 dB 빔 폭이며, k_m 은 정규화된 모노 펄스의 기울기이다.

그림 3에 WLAF 알고리즘에서 ϕ 와 c 의 관계를 나타내었다.

그림 3으로부터 가중치를 적용한 WLAF 알고리즘이 LAF 알고리즘에 비해 최종 예측 탄착 지점 c_1 이 c_3 와 같아지는 것을 알 수 있다. 따라서 WLAF 알고리즘이 LAF 알고리즘보다 우수함을 예측할 수 있다.

2.3 위협 판단 가변 임계값 결정

임계값에 의해 위협 판단의 평가 지표인 과대응률 p_o 와 미대응률 p_m 을 확률 모델 기법을 이용하여 구하면 다음 식과 같이 쓸 수 있다^[3].

$$p_o = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\phi_T - m_2}{\sqrt{2} \sigma_2} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{-\phi_T - m_2}{\sqrt{2} \sigma_2} \right) \quad (6)$$

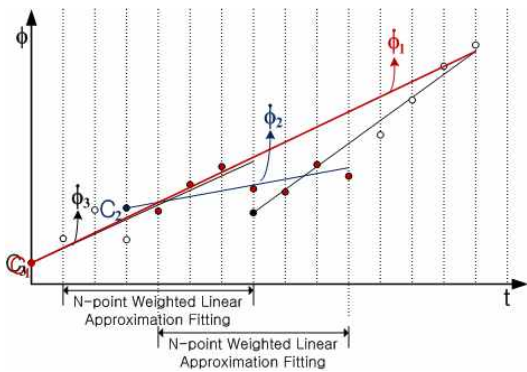


그림 3. 가중 선형 근사 알고리즘의 ϕ 와 c 의 관계
Fig. 3. The ϕ and c of weighted linear approximation fitting algorithm.

$$p_m = \operatorname{erfc} \left(\frac{\phi_T - m_1}{\sqrt{2} \sigma_1} \right) \quad (7)$$

이때 가변 임계값 ϕ_T 는 식 (8)과 같다.

$$\phi_T = \operatorname{erf}^{-1} (1 - p_m) \times \sqrt{2} \sigma_1 + m_1 \quad (8)$$

III. 시뮬레이션 결과

위협 판단 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 세 개의 조건에 대해 식 (6)~(8)에 나타낸 고정 임계값과 가변 임계값을 이용하여 과대응률과 미대응률을 시뮬레이션 하였다.

3-1 시뮬레이션 조건 1

지상기동 장비간의 거리를 200 m, 표적의 최초 탐지 거리와 초기 속도를 각각 1,380 m, 240 m/s로 시뮬레이션 조건 1로 설정하였다. 이 조건은 155 mm 곡사포를 이용한 미사일 경고 레이더의 시험탄 탐지 시험 조건과 유사하다.

3-1-1 LAF 알고리즘

그림 4는 시뮬레이션 조건 1에 대해 LAF 알고리즘을 이용한 시뮬레이션 결과이다. 이때 x축은 TTI를 y축은 대응률을 나타낸다. 그림 4의 결과에서 Const. Th(CT)는 ϕ_T 를 2°/sec로 고정시킨 고정 임계값의 경우이며, Adaptive Th(AT)는 미대응률을 20%로 고정시켜 ϕ_T 값이 변하는 가변 임계값의 경우이다. 시뮬레이션 결과 TTI 3.35초에서 AT의 경우 과대응률은 6.847%, 미대응률은 20%로, CT의 경우 과대응률은 24.36%, 미대응률은 3.76%로 나타

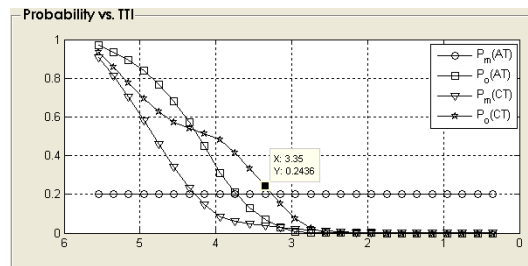


그림 4. LAF 알고리즘을 이용한 조건 1의 시뮬레이션 결과

Fig. 4. Simulation result of simulation condition 1 using LAF algorithm.

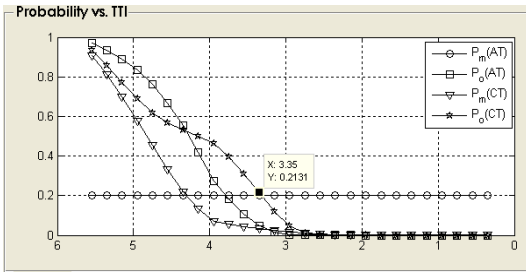


그림 5. WLAF 알고리즘을 이용한 조건 1의 시뮬레이션 결과
 Fig. 5. Simulation result of simulation condition 1 using WLAF algorithm.

났다.

3-1-2 WLAF 알고리즘

그림 5는 시뮬레이션 조건 1에 대해 WLAF 알고리즘을 이용한 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과, TTI 3.35초에서 AT의 경우 과대응률은 4.95 %, 미대응률은 20 %로 고정 값이며, CT의 경우 과대응률은 21.31 %, 미대응률은 3.209 %로 나타났다.

3-2 시뮬레이션 조건 2

미사일 경고 레이더의 실제 시험탄 탐지 시험에서 근거리 시험과 비슷한 조건을 시뮬레이션 조건 2로 설정하였다. 시뮬레이션 조건 2는 표적의 최초 탐지 거리는 1,110 m, 지상기동 장비간 거리 200 m, 초기 표적 속도는 240 m/s이다.

3-2-1 LAF 알고리즘

그림 6은 시뮬레이션 조건 2에 대해 LAF 알고리즘을 이용한 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과, TTI 3.425초에서 AT의 경우 과대응률은 26.13 %, 미대응률은 20 %로 고정 값이며, CT의 경우 과대응률은 27.86 %, 미대응률은 20.42 %로 나타났다.

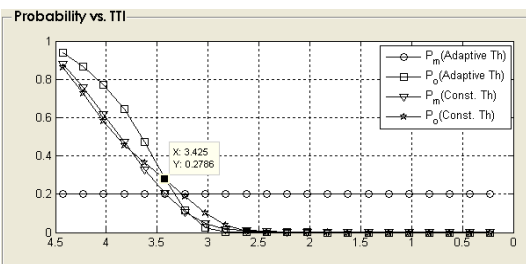


그림 6. LAF 알고리즘을 이용한 조건 2의 시뮬레이션 결과
 Fig. 6. Simulation result of simulation condition 2 using LAF algorithm.

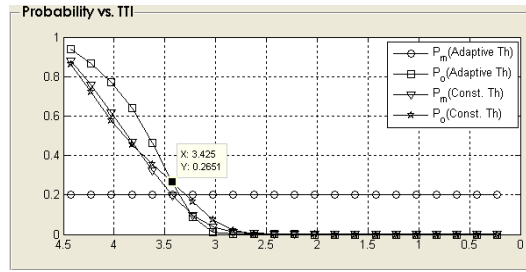


그림 7. WLAF 알고리즘을 이용한 조건 2의 시뮬레이션 결과
 Fig. 7. Simulation result of simulation condition 2 using WLAF algorithm.

그림 7은 시뮬레이션 조건 2에 대해 WLAF 알고리즘을 이용한 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과, TTI 3.425초에서 AT의 경우 과대응률은 26.13 %, 미대응률은 20 %로 고정 값이며, CT의 경우 과대응률은 27.86 %, 미대응률은 20.42 %로 나타났다.

3-2-2 WLAF 알고리즘

그림 7은 시뮬레이션 조건 2에 대해 WLAF 알고리즘을 이용한 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과, TTI 3.425초에서 AT의 경우 과대응률은 26.13 %, 미대응률은 20 %로 고정 값이며, CT의 경우 과대응률은 26.51 %, 미대응률은 19.59 %로 나타났다.

3-3 시뮬레이션 조건 3

시뮬레이션 조건 3을 표적의 최초 탐지 거리 840 m, 지상기동 장비간 거리 200 m, 초기 표적 속도 180 m/s로 설정하였다. 이 조건은 근거리 탐지 데이터의 위협 판단 성능을 보기 위하여 위협탄이 근거리에서 발사될 경우를 기준으로 설정하였다.

3-3-1 LAF 알고리즘

그림 8은 시뮬레이션 조건 3에 대해 LAF 알고리즘을 이용한 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과, TTI 3.467초에서 AT의 경우 과대응률은 1.809 %, 미대응률은 20 %로 고정 값이며, CT의 경우 과대응률은 5.687 %, 미대응률은 7.228 %로 나타났다.

3-3-2 WLAF 알고리즘

그림 9은 시뮬레이션 조건 3에 대해 WLAF 알고리즘을 이용한 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과, TTI 3.467초에서 AT의 경우 과대응률은 1.809 %, 미대응률은 20 %로 고정 값이며, CT의 경우 과대응률은 5.687 %, 미대응률은 7.228 %로 나타났다.

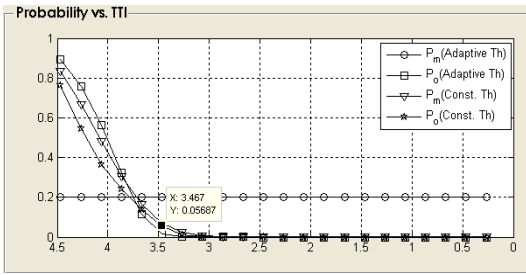


그림 8. LAF 알고리즘을 이용한 조건 3의 시뮬레이션 결과
 Fig. 8. Simulation result of simulation condition 3 using LAF algorithm.

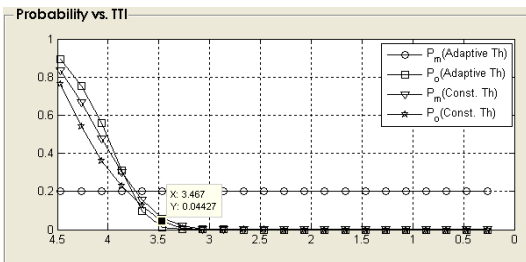


그림 9. WLAF 알고리즘을 이용한 조건 3의 시뮬레이션 결과
 Fig. 9. Simulation result of simulation condition 3 using WLAF algorithm.

과, TTI 3.467초에서 AT의 경우 과대응률은 1.146 %, 미대응률은 20 %로 고정 값이며, CT의 경우 과대응률은 4.427 %, 미대응률은 6.329 %로 나타났다.

근거리 탐지 표적의 경우, 과대응률 및 미대응률 모두 작게 나타났는데, 이는 근거리의 표적에 대한 신호 대 잡음비가 매우 높아 방위각 정확도가 높아졌기 때문으로 판단된다.

3.4 시뮬레이션 결과 비교

그림 10에 시뮬레이션 조건 1, CT, TTI 3~4초의 경우에 LAF와 WLAF 알고리즘의 시뮬레이션 비교 결과를 나타내었다. 그림 10으로부터 TTI 3초에 가까이 갈수록 WLAF 알고리즘의 미대응률이 LAF 알고리즘보다 더 많이 향상됨을 알 수 있다.

LAF와 WLAF 알고리즘에 대한 시뮬레이션 결과에 대한 요약은 표 1에 나타내었다. 표 1로부터 모든 조건에서 WLAF 알고리즘이 LAF 알고리즘보다 0.55

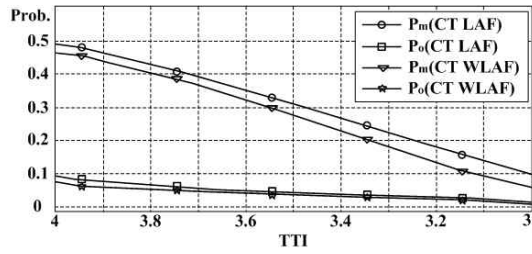


그림 10. 조건 1에 대한 LAF와 WLAF 알고리즘의 시뮬레이션 결과 비교
 Fig. 10. Comparison of simulation results for simulation 1 using LAF and WLAF algorithm.

표 1. 시뮬레이션 결과 요약

Table 1. Simulation results.

			LAF(%)	WLAF(%)	TTI
조건 1	CT	P_o	24.4	21.3	3.35
		P_m	3.76	3.21	
	AT	P_o	6.85	4.95	
		P_m	20	20	
조건 2	CT	P_o	27.9	26.5	3.425
		P_m	20.4	19.6	
	AT	P_o	28.3	26.1	
		P_m	20	20	
조건 3	CT	P_o	5.69	4.43	3.467
		P_m	7.23	6.33	
	AT	P_o	1.81	1.15	
		P_m	20	20	

%에서 3.1 %까지 개선됨을 알 수 있다. 또한 표적의 속도가 같은 경우 탐지 거리가 짧을수록 과대응률과 미대응률이 나빠짐을 알 수 있다.

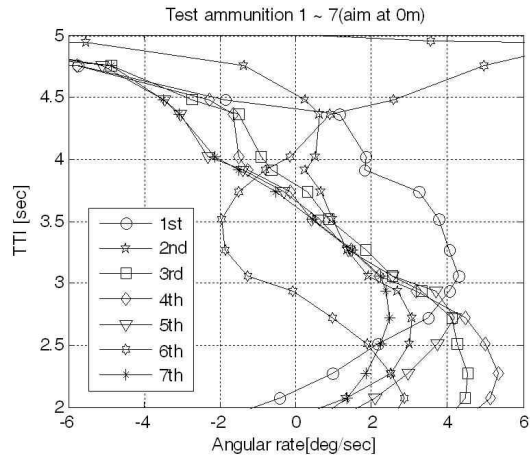
IV. 위협 판단 측정

앞 장에서 시뮬레이션을 수행한 위협 판단 알고리즘의 타당성을 확인하기 위해 측정 시험을 실행하였다. 시험 조건은 아래에 나타난 바와 같이 시뮬레이션 조건 1과 유사하게 설정하였다.

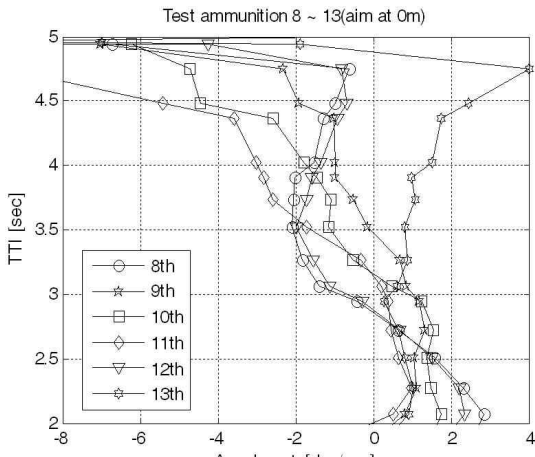
- ① 시험탄 발사 거리: 1,380 m
- ② 속도: 250~210 m/s에서 감속 변화

- ③ 이격 발사 거리: 정면, 200, 400, 500 m
- ④ 스캔 갱신 시간: 0.2초
- ⑤ 위협 판단 TTI: 3.2~3.5초
- ⑥ ϕ_r : 2°/sec, 시뮬레이션의 CT 조건 사용

위와 같은 조건으로 155 mm 시험탄을 발사하여 위협 판단을 측정하였다. 이격 발사 거리를 정면, 200 m, 400 m로 하였을 때 측정한 위협 판단 결과를 그림 11~13에 각각 나타내었다. 시험 결과에서 표적의 탐지 궤적들이 휘면서 지그재그로 움직이는 경향을 보이는 이유는 방위각 오차, 거리 오차, 펄스의 특성, 안테나의 빔 특성, 멀티 패스 등 복합적인 요인으로 판단된다.



(a) Test 1~7



(b) Test 8~13

그림 11. 위협 판단 결과(이격 거리 : 0 m)
Fig. 11. Threat decision results - aim at 0 m.

측정 결과에서 TTI 3.2~3.5초 사이, 방위각 변화율은 시험 조건 ⑥에 의한 $-2^\circ/\text{sec} \sim 2^\circ/\text{sec}$ 를 통과하는 표적을 위협으로 판단하였다. 그림 11에서 시험탄 1번을 제외하고 모든 시험탄에 대해 위협으로 판정하였다. 그림 12에서는 시험탄 14, 18, 19를 위협으로 판정하였다. 그림 13에서는 시험탄 20번을 제외하고 모두 비위협으로 판정하였다. 이 범위 안에 있는 큰 TTI 값을 표 2에 정리하였다. 표 2에서 숫자 '3.5', '3.3' 등은 위협으로 판단하였으며, 'x'는 위협이 아닌 것으로 판단했음을 나타낸다.

시뮬레이션과 실제 시험과는 표적의 가속 특성과 주변 환경에 의한 방위각 정확도의 이론적인 오차 등이 달라지지만, 시뮬레이션에서 이격 거리 200 m,

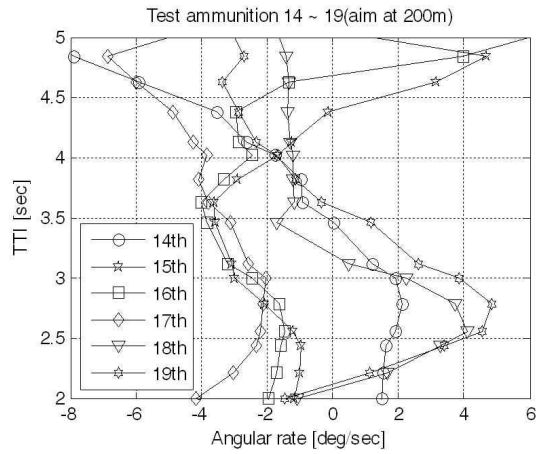


그림 12. 위협 판단 결과(이격 거리 : 200 m)
Fig. 12. Threat decision results - aim at 200 m.

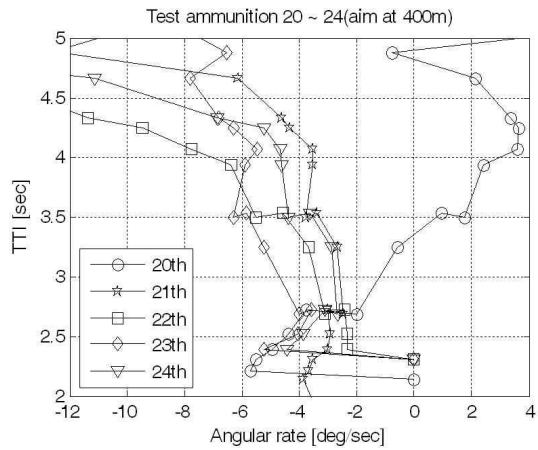


그림 13. 위협 판단 결과(이격 거리 : 400 m)
Fig. 13. Threat decision results - aim at 400 m.

표 2. 위협 판단 측정 결과

Table 2. Threat decision measurement result.

이격 거리	정면	200 m	400 m	500 m
	(1) 2.5	(14) 3.4	(20) 3.3	(25) x
	(2) 3.3	(15) 2.6	(21) x	(26) x
	(3) 3.5	(16) 2.8	(22) x	(27) x
	(4) 3.5	(17) x	(23) x	
	(5) 3.3	(18) 3.4	(24) x	
	(6) 3.3	(19) 3.4		
	(7) 3.5			
	(8) 3.3			
	(9) 3.3			
	(10) 3.5			
	(11) 3.3			
	(12) 3.3			
	(13) 3.3			
대응 확률	92.3 %	50 %	20 %	0 %

경계 값 2°/sec의 과대응률이 24.4 % 미만이고, 미대응률이 3.8 % 미만이었던 점을 감안할 때 야외 시험에서 정면 92.3 % 대응(미대응률 7.7 %), 이격 거리 200 m 이상에서 28.6 % 대응(과대응률 28.6 %)의 결과는 시뮬레이션에 부합하는 결과라고 판단할 수 있다.

V. 결 론

경제성이 우수한 TWS을 사용하는 모노 펄스 방식의 지상기동 장비용 미사일 경고 레이더의 위협 판단 방식인 선형 근사 알고리즘과 가중 선형 근사

알고리즘의 과대응률과 미대응률을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과, 가중 선형 근사 알고리즘의 과대응률과 미대응률이 선형 근사 알고리즘보다 우수하다는 것을 확인하였다.

또한 측정 결과, 정면에 대해 92.3 %, 측면에 대해 28.6 %를 대응하였다. 시뮬레이션 결과와 비교하면 정면에 대해 3.9 %, 측면에 대해 4.2 % 정도 차이가 나지만 지상기동 장비에서 요구한 규격(정면에 대해 80 % 대응)보다 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 박규철, 하중수, "진차 탑재 L-밴드 펄스 도플러 레이더 설계 및 제작", 한국전자과학기술논문지, 20(6), pp. 580-588, 2009년 6월.
- [2] 하중수, 박규철, 이종민, "방호용 레이더 과대응률/미대응률 분석", 국방과학연구소 연구보고서, GSDC-417-060937, 2006년 9월.
- [3] 박규철, 홍성용, "확률 모델을 이용한 미사일 경고 레이더의 효과도 분석", 한국전자과학기술논문지, 20(6), pp. 544-550, 2009년 6월.
- [4] 하중수, 박규철, "방호용 레이더 위협 판단 및 간섭억제 기술 개발", 국방과학연구소 연구보고서, ADDR-517-080626, 2008년 6월.
- [5] J. H. Kwak, S. Hong, *Linear Algebra*, Birkhauser, 1997.
- [6] Samuel M, Sherman, *Monopulse Principles and Techniques*, Artech House, 1984.

박 규 철



1989년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학사)
 1991년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학석사)
 2004년 3월~현재: 충남대학교 전자공학과 박사과정
 1991년 2월~현재: 국방과학연구소

선임연구원

[주 관심분야] 근거리 레이더 시스템 설계, Tx/Rx 모듈 설계

홍 성 용



1985년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
 1988년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1994년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1996년 9월~현재: 충남대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 초고주파 회로