

# 지상 기동 장비용 펄스 도플러 레이더의 방위각 계산 알고리즘 The Azimuth Calculation Algorithm of Pulse-Doppler Radar for GVES

박 규 철 · 하 종 수

Gyu Churl Park · Jong Soo Ha

## 요 약

지상 기동 장비용 펄스 도플러 레이더에서 표적에 대한 위협 판단이 매우 중요하다. 위협 판단은 방위각 변화율에 따라 결정되고, 정확한 방위각 계산에 의해 위협 판단 성능이 좋아지기 때문에 방위각 계산 알고리즘이 매우 중요하다. 방위각 변화율은 접근하는 표적의 방향에 관계되며, 표적은 방위각 변화율의 경계 값에 따라 위협 또는 비위협으로 구분된다. 본 논문은 8개의 방위각 계산 방법을 제시하고, 결과를 비교하였다.

## Abstract

The decision of threat target in the MWR(Missile Warning Radar) of GVES(Ground Vehicle Equipment System) such as MBT(Main Battle Tank) is very important. Threat decision is judged by angular rate and the accurate azimuth calculation for good threat decision is very important. The 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 angular rate. This paper presents the eighth azimuth calculation methods and compares the results.

Key words : Missile Warning Radar, Threat Decision, Time To Impact, Angular Rate, Azimuth Calculation

## I. 서 론

대전차 미사일을 탐지하기 위한 탐지 센서인 펄스 도플러 레이더(MWR: Missile Warning Radar)는 모노펄스 레이더로서 표적을 탐지, 추적하여 표적의 거리 및 방위각을 추정하고, 방위각 변화율을 이용하여 위협 판단 기능을 수행한다<sup>[1]</sup>. 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. 과 대응률은 인접한 무기 체계로 발사된 미사일에 대하여 대응하는 확률이며, 미 대응률은 내 무기 체계로 발사된 미사일에 대하여 대응하지 않을 확률이다<sup>[2]</sup>.

그러나 펄스 도플러 레이더는 체계 장착을 위해

소형화되었고, 단거리와 중거리를 동시에 탐지해야 하며, 위협 판단을 위해 꼭 필요한 추적 레이더의 기능은 없다. 이러한 제약으로 표적 추적은  $\alpha-\beta$  추적기를 이용하여 소프트웨어 추적 방법인 TWS(Track While Scan)을 사용한다.

또한, 레이더는 수신 안테나의 방위각 빔 폭이 90°이고, 진폭 비교 방식으로 방위각을 추정하기 때문에 방위각 분해능이 좋지 않다. 5개 버스트 각각 좌우 채널에서 CFAR(Constant False Alarm Rate) 임계값을 통과하는 값이 여러 개 존재하게 된다. 이 값을 이용하여 방위각을 계산하는 데, 본 논문에서 8가지 방위각 계산 알고리즘을 제안하였다.

실제 야외 시험을 통해 획득한 데이터들을 이용하여 방위각을 계산하였고, 이 방위각 결과들에 따른 방위각 변화율을 계산하여 위협 판단 여부를 결정하

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20100420-045

· 교신저자 : 박규철(e-mail : harnil@add.re.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 7월 19일

였다. 본 논문에서는 이 결과들을 이용하여 방위각 계산 알고리즘들의 성능을 비교하였다.

## II. 방위각 계산 알고리즘

### 2.1 방위각 정확도

레이더의 송신과 수신 안테나의 구조는 그림 1과 같다<sup>[1]</sup>. 중앙에 송신 안테나, 양쪽에 수신 안테나가 위치하는 구조이며, 식 (1)을 이용하여 그림과 같은 안테나 구조를 갖는 레이더의 방위각 정확도를 구할 수 있다<sup>[3]</sup>.

$$\Delta\phi = \frac{\theta_{BW}}{k_m \sqrt{2SNR}} \quad (1)$$

여기서  $\theta_{BW}$ 는 안테나의 빔 폭,  $k_m$ 은 정규화된 monopulse slope, SNR(Signal to Noise Ratio)은 표적의 신호대 잡음비이다.

그림 2에 방위각 정확도를 구한 결과를 도시하였다<sup>[4]</sup>. 방위각 정확도는 거리별로 다르지만 관심 영역을 기준으로 약  $8^\circ \sim 11^\circ$ 를 만족한다.

### 2.2 방위각 계산 알고리즘

방위각은 그림 3에서 안테나의 수신 전력 레벨의 비 곡선(그림에서 사각형)에 수신기의 좌 채널과 우 채널에서 수신된 전력의 차이 값을 대입하여 계산하며, 방위각 계산식은 수신 전력 레벨의 비 곡선을 3차 방정식으로 fitting하여 얻었다. 계산식은 다음과 같다<sup>[5]</sup>.

$$\phi_i \cong \sum_{j=0}^3 a_j (P_{R,i} - P_{L,i} - P_{R,cal} + P_{L,cal})^j \quad (2)$$

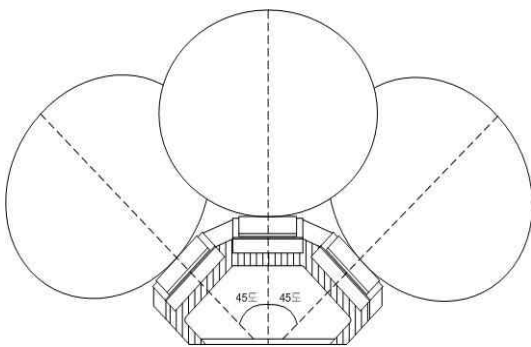


그림 1. 레이더 안테나 구조  
Fig. 1. Antenna structure of radar.

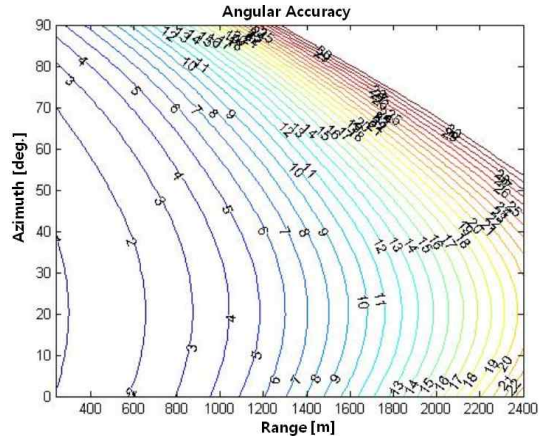


그림 2. 레이더의 방위각 정확도  
Fig. 2. The azimuth accuracy of radar.

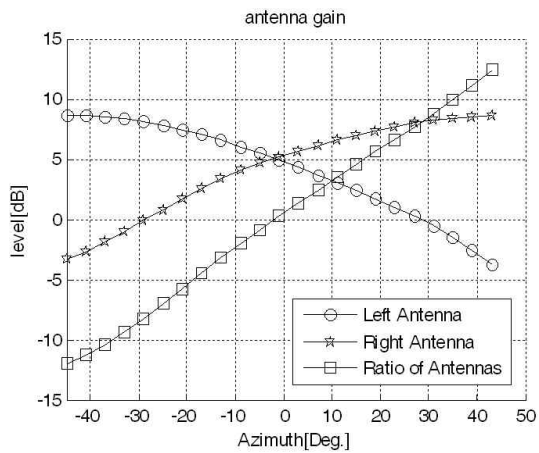


그림 3. 레이더 안테나의 각도별 이득  
Fig. 3. The antenna gain of radar.

여기서  $a_3 = -0.0013$ ,  $a_2 = -0.0007$ ,  $a_1 = -3.8267$ ,  $a_0 = 3.3311$ 이고, 이들 계수는 그림 3으로부터 안테나의 수신 전력의 비 값을 3차 방정식으로 fitting하여 얻었다.  $P_{R,i}$ 은 우측 채널의 수신 전력,  $P_{L,i}$ 는 좌측 채널의 수신 전력이고,  $P_{R,cal}$ 은 우측 채널의 조정 전력,  $P_{L,cal}$ 은 좌측 채널의 조정 전력이다.

좌측 채널과 우측 채널의 전력 값( $P_{R,i}$ ,  $P_{L,i}$ )을 선택하는 8개의 알고리즘을 다음에 나타내었다.

#### 2-2-1 Algorithm 1

가중 평균 비교 알고리즘으로 클러스터 내의 값들을 SNR에 따라 가중 평균을 취하여 방위각을 계

산하는 방법이다.

2-2-2 Algorithm 2

피크 비교 알고리즘으로 가장 큰 값과 대응되는 다른 채널의 수신 전력 값으로 방위각을 계산하는 방법이며, 그림 4에서 좌측 채널의 32와 우측 채널의 25로 계산한다. 가장 큰 값에 대응하여 계산함으로써 최대 값에 근접한 값을 사용한다는 점에서 신뢰성이 있으나 한쪽 채널에 돌발적으로 큰 값이 나타나는 경우에 방위각이 튀는 현상이 있다. 결정 알고리즘 수식은 식 (3), (4)와 같다.

$$P_{Ra} = \max \left[ \sum_{a=1}^n P_{R,a} \right]$$

$$P_{La} = \max \left[ \sum_{a=1}^n P_{L,a} \right] \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_{Ri} = P_{Ra} & P_{Ra} > P_{La} \\ P_{Li} = P_{Lk} & \\ P_{Ri} = P_{Rm} & P_{Ra} \leq P_{La} \\ P_{Li} = P_{La} & \end{cases} \quad (4)$$

여기서  $k$ 는 오른쪽 채널의 최대 값 위치이고,  $m$ 은 왼쪽 채널의 최대 값 위치이다.  $n$ 은 좌우 채널에서 CFAR를 통과한 최대 개수이다.

2-2-3 Algorithm 3

미약 신호 제거 알고리즘으로 방위각 계산을 위해 평균 값을 구하여 방위각을 계산하는 방법이며, 그림 4에서 좌측 채널의 15, 우측 채널의 16, 18과 같이 같은 클러스터 내의 다른 값보다 수 dB 이상 작은 값의 데이터는 사용하지 않는다. 즉, 식 (3)에서 얻어진 최대 값으로부터 8 dB 뺀 값보다 작은 셀들을 제외

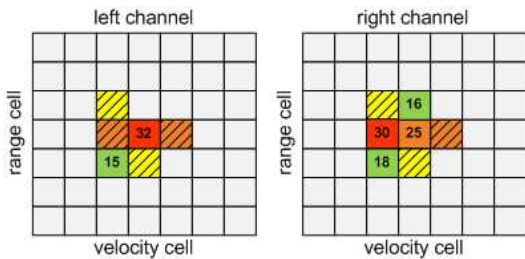


그림 4. 방위각 계산을 위한 도플러 셀들  
Fig. 4. The Doppler cells for azimuth calculation.

한 나머지 셀들의 평균을 구하여 방위각 계산을 위한  $P_{R,i}$ 와  $P_{L,i}$ 를 구하는 방법이다.

2-2-4 Algorithm 4

거리 보간<sup>[6]</sup> 추정 알고리즘으로 거리 보간 위치에 서 전력 값을 추정하여 방위각을 계산하는 방법이며, 정확한 위치를 구해 그 지점의 전력을 비교한다는 점에서 이상적이거나 거리 보간 기법 자체가 오차를 갖기 때문에 예러가 존재한다. 거리 보간에 의한 거리는 식 (5)와 같이 구한다.

$$r = R_0 + \Delta R \times \left[ 0.5 - \frac{(\log_{10} p_0 - \log_{10} p_1)}{2 \times 1.369} \right] \quad (5)$$

$R_0$ 는 2개의 셀 중에서 근거리 셀의 거리이고,  $p_0$ 는 근거리 셀의 전력,  $p_1$ 은 원거리 셀의 전력,  $\Delta R$ 은 거리 셀의 간격이고, 240 m이다. 식 (5)의 계산 결과에 따라 거리 보간은 식 (6)과 같이 보정한다.

$$r = \begin{cases} R_0 & \text{if } r < R_0 \\ R_0 + \Delta R & \text{if } r > R_0 + \Delta R \end{cases} \quad (6)$$

2-2-5 Algorithm 5

CFAR 가중 평균 비교 알고리즘으로 dB 값이 아닌 신호 레벨에서 CFAR 값을 뺀 값으로 가중 평균을 구하여 방위각을 계산하는 방법이다.

2-2-6 Algorithm 6

전력 가중 평균 비교 알고리즘으로 dB 값이 아닌 전력 값을 사용하여 가중 평균을 구하여 방위각을 계산하는 방법이다.

2-2-7 Algorithm 7

버스트별 CFAR 가중 평균 비교 알고리즘으로 버스트별로 최대 값을 구하고, 이 값에 대해 CFAR 가중 평균을 구하여 방위각을 계산하는 방법이다.

2-2-8 Algorithm 8

버스트별 전력 가중 평균 비교 알고리즘으로 버스트별로 최대 값을 구하고, 이 값들에 대해 전력 가중 평균을 구하여 방위각을 계산하는 방법이다.

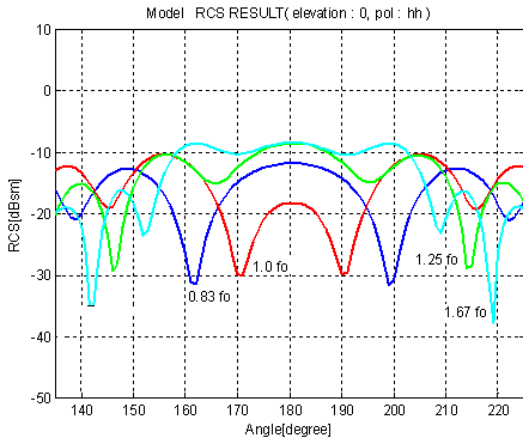


그림 5. 시험탄에 대한 RCS 측정 결과  
Fig. 5. RCS measurement result for test ammunition.

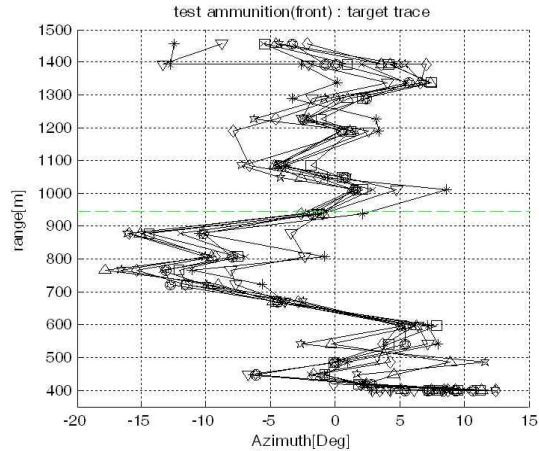


그림 7. 시험탄 방위각 탐지 궤적 - 정면  
Fig. 7. The detection trace of test ammunition - front.

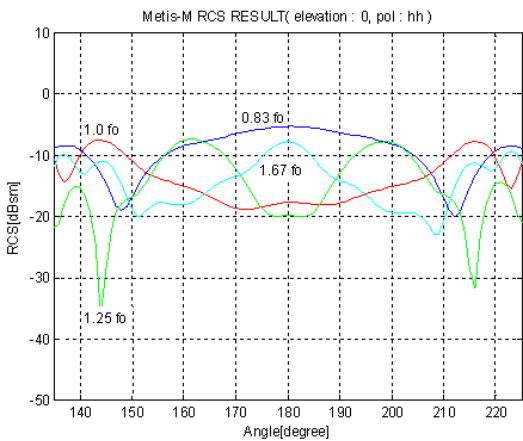


그림 6. 메티스 엠에 대한 RCS 측정 결과  
Fig. 6. RCS measurement result for Metis-M.

### 2-3 시험탄과 메티스 엠의 RCS 측정

그림 5에 시험탄에 대한 방위각에 따른 RCS( Radar Cross Section) 측정 결과를 나타내었고, 그림 6에 메티스 엠에 대한 방위각에 따른 RCS 측정 결과를 나타내었다. 두 그림에서 180°가 탄의 정면을 바라보는 각도를 나타내며, 두 종류의 탄에 대한 정면에서의 크기는 대략 -20 dBsm 정도이다.

## III. 알고리즘 시험 결과

### 3-1 정면 시험 결과

위협 판단을 위한 변수로 거리, 속도, 방위각을 고

려할 수 있다<sup>4)</sup>. 먼저 거리 변수는 거리 변화값이 TTI (Time To Impact) 3.0~3.5초를 기준으로 크게 변화하지 않아 구분할 수 없다. 속도 변수는 위협체와 비 위협체 간에 동일 탄일 경우 속도 변화가 차이가 나지만, 일반적인 탄들의 속도 정보를 알 수 없어 속도 변화 차이만으로 판단할 수 없어 사용할 수 없다. 마지막으로 방위각 변수는 비 위협체 즉, 측면으로 발사된 탄의 방위각 패턴은 확연한 차이를 보이나, 방위각 정확도가 뛰어나지 않아 사용할 수 없지만, 이를 이용한 시간당 방위각의 변화율은 위협 판단 변수로 사용할 수 있다. 따라서 지상 기동 장비용 펄스 도플러 레이더의 위협 판단 변수로 방위각 변화율을 사용하였다.

다음의 위협 판단 결과, 그림에서 방위각 변화율  $-2^\circ/s \sim 2^\circ/s$ 와 TTI 3.0~3.5초 안의 사각형을 통과한 알고리즘은 위협으로 판단한 경우이고, 사각형을 통과하지 않은 알고리즘은 위협으로 판단하지 않은 경우이다.

정면 시험은 방위각 0°, 1.43 km 떨어진 지점에서 방위각 0°, 0 m 위치로 탄을 발사하는 시험을 의미한다. 그림 7은 정면 시험탄에 대해 거리별로 8개의 방위각 계산 알고리즘에 의해 계산된 방위각의 궤적을 나타내었다. 그림 8은 이 방위각 데이터로 얻어진 방위각 변화율을 이용한 위협 판단 결과를 나타내었다. 7, 8번 알고리즘을 제외한 모든 알고리즘들이 사각형을 통과하였으므로 TTI 3.0~3.5초에 위협을 판단하였다.

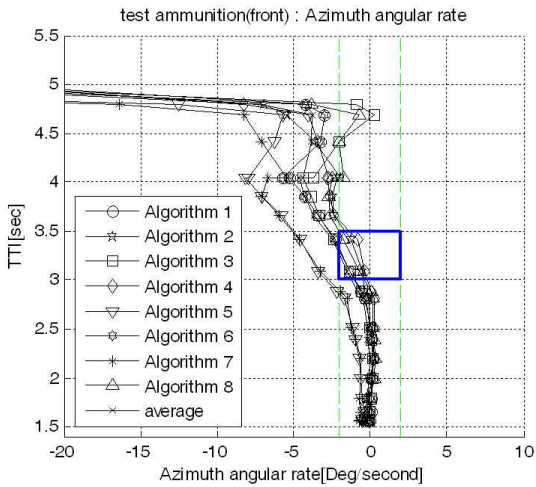


그림 8. 시험탄 위협 판단 결과 - 정면  
Fig. 8. The result of test ammunition threat decision - front.

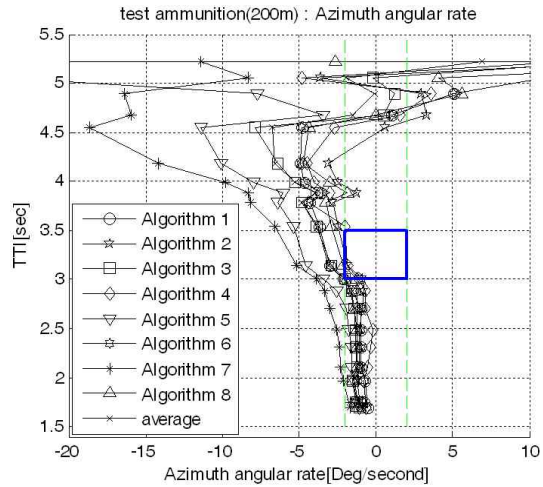


그림 10. 시험탄 위협 판단 결과 - 200 m  
Fig. 10. The result of test ammunition threat decision - 200 m.

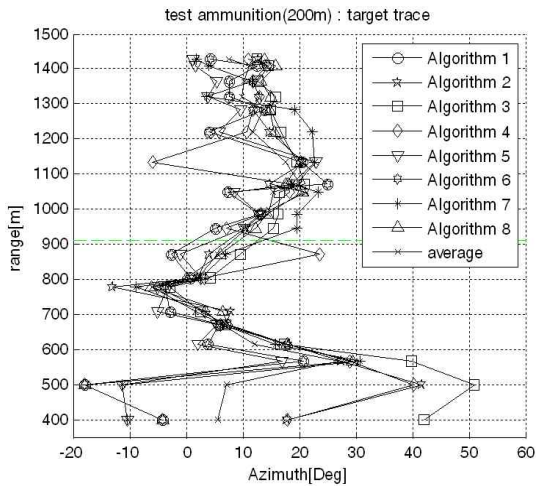


그림 9. 시험탄 방위각 탐지 궤적 - 200 m  
Fig. 9. The detection trace of test ammunition - 200 m.

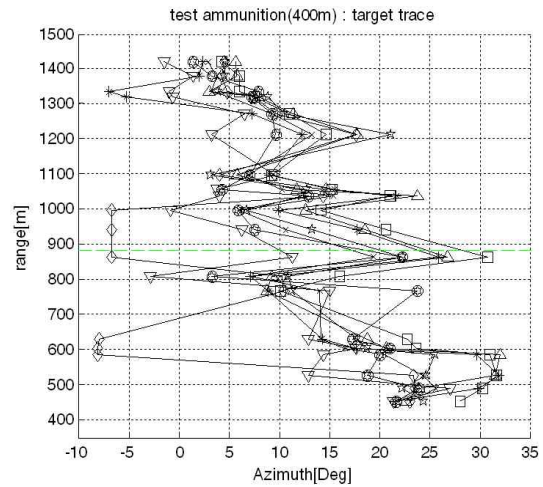


그림 11. 시험탄 방위각 탐지 궤적 - 400 m  
Fig. 11. The detection trace of test ammunition - 400 m.

3-2 200 m 측면 시험 결과

200 m 측면 시험은 방위각 0°, 1.43 km 떨어진 지점에서 방위각 0°, 0 m 위치로부터 우측으로 200 m 떨어진 지점으로 탄을 발사하는 시험을 의미한다. 그림 9는 이러한 200 m 측면 시험탄에 대해 거리별로 8개의 방위각 계산 알고리즘에 의해 계산된 방위각의 궤적을 나타내었고, 그림 10은 이 방위각 데이터로 얻어진 방위각 변화율을 이용한 위협 판단 결과를 나타내었다. 2, 4, 8번 알고리즘들이 사각형을 통과하였으므로 TTI 3.0~3.5초에 위협을 판단하

였고, 나머지는 비 위협으로 판단하였다.

3-3 400 m 측면 시험 결과

400 m 측면 시험은 방위각 0°, 1.43 km 떨어진 지점에서 방위각 0°, 0 m 위치로부터 우측으로 400 m 떨어진 지점으로 탄을 발사하는 시험을 의미한다. 그림 11은 이러한 400 m 측면 시험탄에 대해 거리별로 8개의 방위각 계산 알고리즘에 의해 계산된 방위각의 궤적을 나타내었고, 그림 12는 이 방위각 데이터로 얻어진 방위각 변화율을 이용한 위협 판단

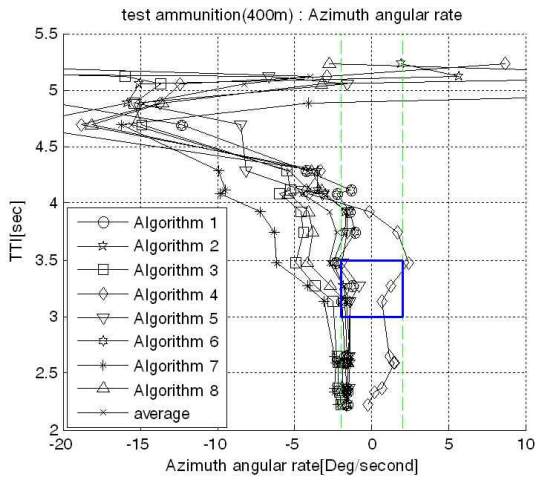


그림 12. 시험탄 위협 판단 결과 - 400 m  
Fig. 12. The result of test ammunition threat decision - 400 m.

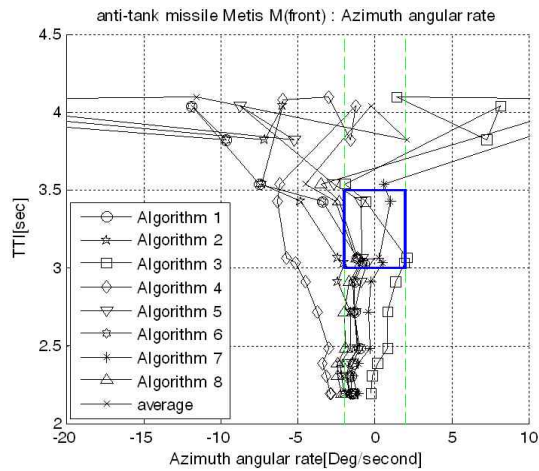


그림 14. 메티스 엠 위협 판단 결과 - 정면  
Fig. 14. The result of Metis M threat decision - front.

3.5초에 위협을 판단하였다.

### 3-5 위협 판단을 위한 야외 시험 결과

표 1에 알고리즘 선택을 위한 분석 결과를 나타내었다. 표로부터 2, 4, 8번 알고리즘은 정면 시험탄 13개 중에서 위협으로 판단하지 못한 경우가 있으므로 제외하였고, 나머지 알고리즘으로부터 위협 판단 순서를 보면 1 순위 1, 6번, 2 순위 3번, 3 순위 7번, 4 순위 5번 알고리즘으로 판별되었다.

표 1. 알고리즘 선택을 위한 분석 결과  
Table 1. Analysis result for algorithm selection.

시험탄 번호	-2°/s~2°/s 안에 들어간 알고리즘 순서	위협 판단이 안된 알고리즘
1	3 → 1, 6 → 5 → 7 → 2, 4, 8	
2	8, 3, 1, 6 → 4 → 2 → 7 → 5	
3	8 → 2 → 4 → 1, 6 → 3 → 7 → 5	
4	8 → 2 → 1, 6 → 3 → 5 → 7	4
5	4 → 1, 6 → 3 → 5, 7	2, 8
6	1, 6 → 4, 8 → 2 → 3 → 5 → 7	
7	1, 6 → 3, 8 → 4, 2 → 5 → 7	
8	4 → 1, 2, 3, 6, 8 → 7 → 5	
9	2 → 4, 8 → 1, 6 → 3 → 7 → 5	
10	8, 2 → 4 → 1, 6, 3 → 7 → 5	
11	5, 1, 6, 7, 8 → 3 → 4 → 2	
12	4 → 2 → 8 → 1, 6, 3 → 7 → 5	
13	3 → 2, 4, 8 → 1, 6 → 7 → 5	

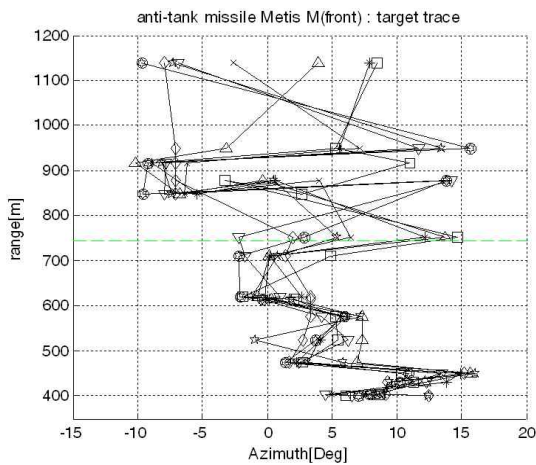


그림 13. 메티스 엠 방위각 탐지 궤적 - 정면  
Fig. 13. The detection trace of Metis M - front.

결과를 나타내었다. 알고리즘 3과 7을 제외한 알고리즘들이 사각형을 통과하였으므로 TTI 3.0~3.5초에 위협을 판단하였다.

### 3-4 대전차 미사일 메티스 엠 시험 결과

그림 13은 대전차 미사일인 메티스 엠의 정면에 대한 거리별로 8개의 방위각 계산 알고리즘에 의해 계산된 방위각의 궤적을 나타내었고, 그림 14는 이 방위각 데이터로 얻어진 방위각 변화율을 이용한 위협 판단 결과를 나타내었다. 알고리즘 4를 제외한 알고리즘들이 사각형을 통과하였으므로 TTI 3.0~

표 2. 야외 시험 결과  
Table 2. Field test result.

시험조건 및 이격 거리		정면	200 m	400 m
1차 시험	시험탄	(1) 3.5	(14) 3.4	(20) 3.3
		(2) 3.2	(15) 2.6	(21) x
		(3) 3.5	(16) 2.8	(22) x
		(4) 3.5	(17) x	(23) x
		(5) 3.3	(18) 3.4	(24) x
		(6) 3.3	(19) 3.4	
		(7) 3.2		
		(8) 3.4		
		(9) 3.3		
		(10) 3.5		
		(11) 3.3		
		(12) 3.4		
		(13) 3.3		
2차 시험	시험탄	(1) 3.2	(7) 3.4	(11) x
		(2) 3.4	(8) x	(12) x
		(3) 3.2	(9) 3.5	
		(4) 3.4	(10) x	
		(5) 3.4		
		(6) 3.2		
	메티스 엠	(M1) 3.3		
		(M3) 3.3		
대응 확률		100 %	50 %	14.3 %

따라서 8개의 방위각 계산 알고리즘 중에 알고리즘 1번을 펄스 도플러 레이더의 방위각 계산 알고리즘으로 결정하였으며, 그 위협 판단 결과를 표 2에 나타내었다. TTI 3.0~3.5초 안에 위협을 판단하면 시험탄이나 메티스 엠에 대해 위협 대응을 했다고 볼 수 있다. 표에서 1차 시험의 정면 1번 시험탄이 참고문헌 [5]에서는 2.5초에서 위협이 발생했었는데, 알고리즘 1을 적용한 후에 3.5초에서 위협이 발생하여 미대응률이 4.8 %에서 0 %로 4.8 % 개선되었다. 또한, 2차 시험의 12, 13번 시험탄의 경우에도 2.9초에서 위협이 발생했었는데, 알고리즘 1을 적용한 후에 위협이 발생하지 않았으며, 2.9초에서도 위협에 대응하지 않기 때문에 대응 확률에는 변화가 없다. 200 m 이상에서는 대응 확률이 0 %이어야 좋은 결과인데, 이 알고리즘 적용 후에도 모두 35.3 % 대응

하였다. 다만 평가 지표인 정면에 대한 대응하지 않을 확률이 20 %이었는데, 모두 대응하여 평가에 합격하였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 체계 장착성과 경제성 등의 제약으로 인해 추적시 소프트웨어 추적 방법인 TWS을 사용하는 소형 모노 펄스 레이더인 펄스 도플러 레이더의 위협 판단에 대한 성능 개선을 위해 8개의 방위각 계산 알고리즘을 제시하였다. 또한, 각 알고리즘에 대한 방위각 계산 결과를 반영하여 최적의 알고리즘에 대한 위협 판단 결과를 제시하였다.

결과적으로 실제 야외 시험 데이터를 이용해 위협 판단 성능을 확인한 결과, 알고리즘 1과 6이 가장 좋은 결과를 얻었으며, 실제 펄스 도플러 레이더에 알고리즘 1을 적용하였다. 이 알고리즘 1로 시험한 결과, 평가 지표에 중요한 정면에서 모두 대응했기 때문에 매우 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 박규철, 하중수, "전차 탑재 L-밴드 펄스 도플러 레이더 설계 및 제작", 한국전자과학회논문지, 20(6), pp. 580-588, 2009년 6월.
- [2] 하중수, 박규철, 이종민, "방호용 레이더 과대응률/미대응률 분석", 국방과학연구소 연구보고서, 2006년 9월.
- [3] 박규철, 홍성용, "확률 모델을 이용한 미사일 경고 레이더의 효과도 분석", 한국전자과학회논문지, 20(6), pp. 544-550, 2009년 6월.
- [4] 하중수, "방위각 변화율을 이용한 방호용 레이더 위협 판단 알고리즘", 한국군사과학기술학회지, 11(1), pp. 93-101, 2008년 2월.
- [5] 박규철, 하중수, "고속 Multi-DSP를 이용한 전차 탑재 펄스 도플러 레이더 신호처리기 개발", 한국전자과학회논문지, 20(11), pp. 1171-1177, 2009년 11월.
- [6] J Martin, "Range and Doppler accuracy improvement for pulse Doppler radar", *IEE Radar 97*, pp. 439-443, Oct. 1997.

박 규 철



1989년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학사)

1991년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학석사)

2010년 8월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)

1991년 2월~현재: 국방과학연구소

선임연구원

[주 관심분야] 근거리 특수 레이더 시스템 설계, Transceiver 설계

하 중 수



2001년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)

2003년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학석사)

2003년 3월~현재: 국방과학연구소  
선임연구원

[주 관심분야] 근거리 특수 레이더

신호 처리, 센서 및 성능 분석 M&S