

표적 관측 위치에 따른 레이더 수신 전력에 관한 연구

박태용^{1*} · 이유라²

A Study on Radar Received Power based on Target Observing Position

Tae-yong Park^{1*} · Yura Lee²

^{1*}Department of Defense & Science Technology, Howon University, 64 Howondae 3gil, Gunsan-si, Jeollabuk-do, Korea

²Pangyo R&D center, 333, Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-City, Gyenggi-do, Korea

요 약

표적의 RCS(Radar Cross Section)는 레이더 탐지 성능을 결정하는데 중요한 요소이므로 표적을 효율적으로 탐지하기 위해 RCS가 크게 나타나는 위치에 레이더를 배치하는 것이 유리하다. 그러나 표적의 RCS와 함께 표적과 레이더 간의 거리 또한 레이더에 수신되는 신호의 강도를 결정하는 중요한 요소이다. 본 논문에서는 탄도미사일을 대상으로 동일한 횡축 선상에서 위치를 변경하면서 표적을 관측하였을 때 레이더에 수신되는 전력을 계산하고, 탐지 효율을 높이기 위한 레이더 배치 방안에 대해 연구하였다.

ABSTRACT

Since the RCS(Radar Cross Section) of target is important factor to determine radar performance, it is important to locate radar where large RCS is observed. However, the distance between the target and the radar is an important factor of the received power, as well as RCS. In this paper, it is calculated that received power from ballistic missile to radar based on different observed position and it is studied that to place radar for high detection efficiency.

키워드 : 탄도미사일, 레이더, Radar Cross Section, RCS

Key word : Ballistic Missile, Radar, Radar Cross Section, RCS

접수일자 : 2014. 10. 24 심사완료일자 : 2014. 11. 14 게재확정일자 : 2014. 11. 28

* **Corresponding Author** Tae-yong Park(E-mail:sirpak75@gmail.com, Tel:+82-63-450-7741)

Department of Defense & Science Technology, Howon University, 64 Howondae 3gil, Gunsan-si, Jeollabuk-do, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.12.3063>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

레이더는 전자파를 송신하여 표적에 맞고 돌아오는 전자파를 감지하여 표적과의 거리를 측정한다. 레이더의 성능을 나타내는 지표는 최대탐지거리, 방위분해능, 거리분해능 등 운용 목적에 따라 여러 가지 기준으로 구분할 수 있으며 최대탐지거리는 레이더의 궁극적인 목적인 원거리 탐지를 위해 중요하게 고려되는 성능이다.

최대탐지거리는 레이더방정식을 구성하는 파라미터인 레이더 송신출력, 안테나 이득, 표적의 RCS(Radar Cross Section), 레이더의 수신감도 등에 의해 결정된다. 스텔스 기술을 적용하여 RCS를 줄이면 상대방에게 피탐되는 확률이 낮아진다. 반면 동일한 표적이라 하더라도 표적의 RCS가 크게 발생하는 곳에 레이더를 배치하여 관측하면 표적을 원거리에서 탐지할 수 있다.

탄도미사일은 현대전에서 가장 위협이 되는 장거리 무기체계 중 하나로서, 미사일을 빨리 탐지(Early detection)하여 조기 경보(Pre-warning) 함으로써 미사일 요격 확률을 높일 수 있기 때문에 많은 국가에서 이에 관한 분야를 연구하고 있다[1]. 특히 북한은 1970년대부터 탄도미사일 개발을 시작하여 1993년에 사거리 1,000km인 노동미사일을, 2009년에는 우주발사체인 대포동 2호를 시험 발사하였고[2], 2012년에는 은하 3호 발사에 성공함으로써 대륙간 탄도미사일을 개발할 수 있는 능력이 있음을 증명하였다.

레이더는 탄도미사일을 조기에 탐지하고 추적하는데에 핵심적인 역할을 하는 장비이며, 레이더 배치 위치에 따라 탄도미사일의 RCS값과 미사일과 레이더간 거리에 따른 수신 전력의 크기가 달라지므로 표적 탐지 확률에 영향을 미치게 된다.

북한의 탄도미사일 위협에 노출되어있는 우리나라는 유사시 탄도미사일을 정확히 요격하기 위해 조기에 탐지하여 지속적으로 추적해야한다. 레이더를 이용하여 표적을 조기에 탐지하고 지속적으로 추적하기 위해서는 표적의 RCS가 크게 관측되는 지점과 거리에 의한 수신 전력의 감쇄율을 함께 고려하여 수신 전력이 높은 곳에 레이더를 배치하여야 한다.

본 논문에서는 북한이 보유한 SCUD-B 탄도미사일의 개략적인 탄도 및 RCS를 계산하고, 레이더 위치를 변경함에 따라 관측되는 RCS와 수신되는 전력을 계산

하였다. 또한 각 관측 위치에서 탄도미사일 비행 단계별 수신 전력의 패턴을 분석하였다.

II. 레이더방정식

일반적으로 레이더의 최대탐지거리는 레이더방정식을 이용하여 구할 수 있다. 송신안테나와 수신안테나를 공통으로 사용하는 monostatic 레이더일 경우 레이더방정식은 식(1)과 같다[3].

$$R_{RDR} = \sqrt[4]{\frac{P_T G_T^2 \lambda^2 \sigma_t}{(4\pi)^3 P_R^{RDR}}} \quad (1)$$

여기서, 여기서, P_T 는 송신 출력, G_T 는 레이더 안테나 이득, P_R^{RDR} 은 레이더에 수신되는 전력, λ 는 레이더 반송파의 파장, σ_t 는 표적의 RCS, R_{RDR} 은 레이더 탐지 거리이다. 만일 수신 전력인 P_R^{RDR} 이 레이더의 수신감도, 즉 수신기가 처리할 수 있는 최소의 전력(threshold)이 될 경우 R_{RDR} 은 최대탐지거리가 된다.

식(1)을 P_R^{RDR} 의 함수로 정리하면 거리에 따른 수신 전력을 구할 수 있다.

$$P_R^{RDR} = \frac{P_T G_T^2 \lambda^2 \sigma_t}{(4\pi)^3 R_{RDR}^4} \quad (2)$$

일반적으로 레이더의 송신 출력, 안테나 이득, 주파수 등은 레이더 고유의 파라미터이므로 설계자 또는 운용자가 그 값을 이미 알고 있고, 그 변화되는 정도를 사전에 파악할 수 있지만 표적의 RCS와 표적과의 거리는 외적 요인에 의해 결정되는 값이다.

III. 탄도미사일의 특성

탄도미사일이란 발사된 후 로켓의 추진력으로 가속되어 대기권 내·외에서 포물선 형태의 탄도(彈道)를 그리며 비행하는 미사일을 말한다[2]. 탄도미사일의 비행 단계는 부스트 단계(boosting phase), 중간 단계

(midcourse phase), 재진입 단계(reentry phase) 또는 부스트 단계, 중간 단계, 종말 단계(terminal phase) 등 3단계로 구분된다[4, 5]. 부스트 단계는 탄도미사일에 탑재된 연료가 연소되면서 추력을 얻으며 일정 고도까지 상승하는 단계이고, 중간 단계는 연료의 연소가 종료된 후부터 관성에 의해 대기권 밖을 비행하는 구간이며, 종말 단계는 대기권에 재진입하여 목표지점까지 낙하하는 구간을 의미한다.

탄도미사일의 비행 궤적은 다양한 운동 방정식에 의해 계산할 수 있으나 본 논문에서는 비행 궤적을 비행체의 고도와 수평거리로 간략화 한 기존의 연구결과를 활용하였다[2].

$$y = Ax^2 + Bx + \epsilon \quad (3)$$

$$A \text{ or } B = \alpha \times \exp(\beta \times S) + \gamma \times \exp(\delta \times S) \quad (4)$$

여기서, x 는 비행체의 고도, y 는 비행체의 수평 이동 거리이다. 비행체가 사거리 300km인 SCUD-B일 경우 A와 B는 표 1을 이용하여 구할 수 있고, 비행궤적은 그림 1과 같다.

표 1. A와 B를 구하기 위한 파라미터
Table. 1 Parameters for calculating A and B

구분	α	β	γ	δ
A	-0.0974	-0.0262	-0.0215	-0.006
B	2.75	-0.0323	2.27	-0.00246

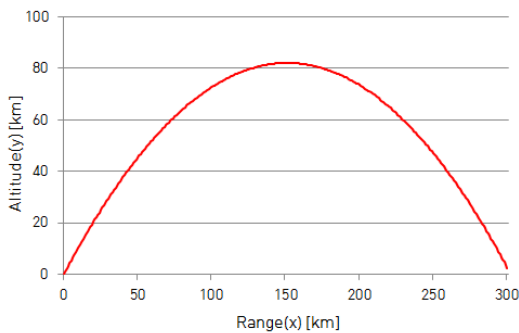


그림 1. SCUD-B의 개략적 탄도
Fig. 1 Rough Trajectory of SCUD-B

일반적으로 공개된 자료를 근거로 하여 모델링한 SCUD-B의 개략적인 형태는 그림 2와 같다.

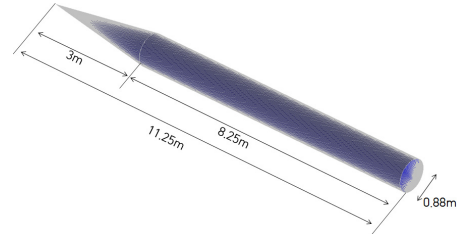


그림 2. SCUD-B의 개략적 형태
Fig. 2 Rough Design of SCUD-B

SCUD-B는 탄두와 부스터가 일체형인 단발 로켓으로 비행 구간 동안 추진체 분리에 의한 형태의 변화는 없다. 그림 2 모델에 대해 PO(Physical Optics) 기법으로 계산한 360도 전 방위 RCS 패턴은 그림 3과 같다. 이때 주파수는 3GHz 이다.

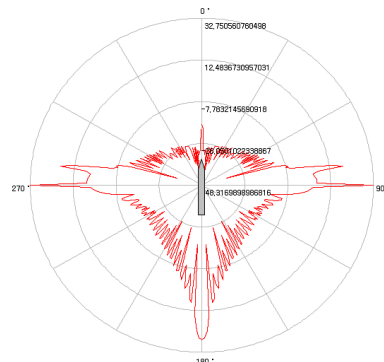


그림 3. 탄도미사일의 RCS 패턴
Fig. 3 RCS Pattern of Ballistic Missile

사거리 300km의 탄도미사일이 발사지점에서부터 목표물 까지 그림 1의 궤적을 그리며 비행하는 동안 그림 3의 90°와 270°, 즉 미사일의 양 측면 부분의 RCS가 가장 크고, 삼각뿔 모양의 전면보다 원기둥 형태의 후측면 부분의 RCS가 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 탄도미사일 발사지점으로부터 탄도궤적의 중간지점(사거리 300km일 경우 발사 지점으로부터 150km 지점)에 레이더를 배치하면 미사일의 RCS가 큰 부분을 관측할 수 있다.

IV. 관측 위치에 따른 표적의 RCS와 수신전력

식(2)에서 표적으로부터 되돌아와서 레이더에 수신되는 전력은 레이더의 송신 출력, 안테나 이득, 송신 주파수, 표적의 RCS, 표적까지의 거리 등에 의해 결정된다. 송신 출력, 안테나 이득, 송신 주파수 등은 레이더 개발자 또는 운용자에 의해 선택되는 파라미터이지만 표적의 RCS와 표적까지의 거리는 외적 요인에 의해 결정되는 요소이다.

위치에 따라 관측되는 탄도미사일의 RCS와 수신 전력을 비교하기 위해 그림 4와 같은 상황을 가정하였다. P1은 미사일 탄도의 지상 궤적 상이고, P2는 수평 방향으로 150km 떨어진 지점이며 P3는 수평 방향으로 300km 떨어진 지점이다. 미사일의 진행 방향인 x축상의 위치는 탄도의 중간인 150km 지점으로 하였다. 지구 곡률에 의한 레이더 가시거리(line of sight)의 제한과 미사일 관측각의 변화는 고려하지 않았고, 탄도각과 미사일 자세각은 동일한 것으로 가정하였다. 레이더를 운용하는 환경은 대기 중의 수분 입자, 대기 밀도 등에 의한 영향이 없는 자유공간으로 가정하였으며, 거리에 따른 전력의 세기는 레이더 방정식에 따라 계산되는 것으로 가정하였다.

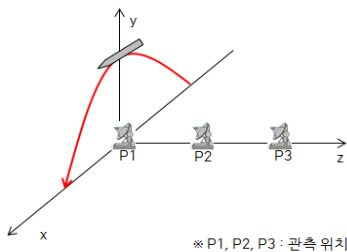


그림 4. 미사일 탄도와 레이더 위치
Fig. 4 Trajectory of Missile & Radar Position

그림 4에서 레이더 위치가 P1에서 P3로 갈수록 레이더와 표적간의 거리가 멀어진다. 탄도미사일과 레이더간의 거리 R은 식(5)에 의해 간단히 구할 수 있다.

$$R = \sqrt{(150-x)^2 + y^2 + z^2} \text{ [km]} \quad (5)$$

여기서, x는 탄도미사일의 수평 좌표, y는 탄도미사일의 고도, z는 탄도의 지상궤적으로부터 레이더까지

의 최단거리이다.

각각의 레이더 위치에서 모델링한 탄도미사일의 RCS를 계산한 결과는 그림 5와 같다. 이때 계산 방법은 PO이고, 주파수는 3GHz이다.

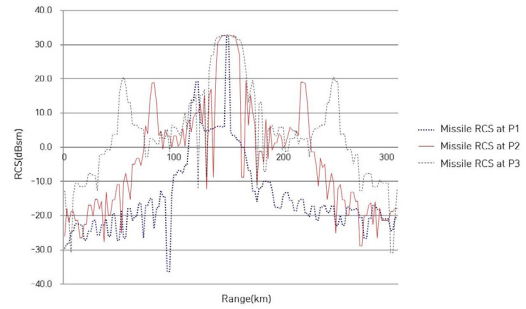


그림 5. 관측 위치에 따른 미사일 RCS
Fig. 5 Missile RCS due to Observing Position

P1, P2, P3 모두 탄도각이 수평이 되는 탄도의 정점 위치, 즉 탄도의 중간 지점에서 미사일의 정 측면을 바라보게 되므로 최대 RCS인 32.8dBsm(1,884m²)이 된다. 그러나 레이더 위치가 탄도에서 멀어질수록 평균 RCS 값은 커진다. 이는 레이더 위치가 탄도에서 멀어질수록 미사일이 비행하는 동안 RCS가 큰 부분인 미사일의 측면을 관측하는 비율이 높아지기 때문이다.

이지스함에 탑재되어 탄도미사일을 탐지하는 레이더인 AN/SPY-1D 레이더의 정확한 체원은 공개되지 않았으나, 언론에 공개된 자료를 참고하여 RCS 0.03m²의 표적을 310km까지 탐지 가능한 것으로 가정하였고[6], 레이더의 수신감도는 -60dBm으로 임의로 설정하였다. 즉 식(2)에서 RCS는 0.03m², 거리 R은 310km 일 때 P_R 이 -60dBm이 되도록 나머지 파라미터를 일반화하였다. 이러한 가정을 식(2)에 적용하여 P1, P2, P3 위치에서 표적으로부터 수신되는 전력을 계산한 결과는 그림 6과 같다.

표적으로부터 레이더로 수신되는 전력은 거리의 4승에 반비례하므로 레이더의 위치가 멀어질수록 수신 전력이 낮아지게 되나, 그림 6과 표 2에서 P1, P2, P3에서의 평균 수신 전력이 서로 크게 차이가 나지 않는다. 이는 관측 위치가 z축 방향으로 멀어짐에 따라 관측되는 평균 RCS값이 커지므로 거리에 의한 수신 전력 감쇄요인이 상쇄되기 때문이다.

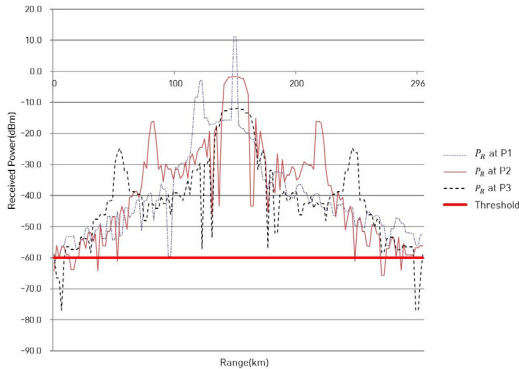


그림 6. 관측 위치에 따른 수신 전력
Fig. 6 Received Power due to Observing Position

표 2. 관측 위치에 따른 평균 수신 전력
Table. 2 Average received power according to position

구분	평균수신전력	평균 RCS	평균거리
P1	-39.7dBm	-14.14dBsm	104.3km
P2	-38.9dBm	-3.31dBsm	183.5km
P3	-41.0dBm	-4.22dBsm	318.2km

P2에서 탄도미사일을 관측하는 경우 RCS가 큰 측면을 관측하는 비율이 P3보다는 적으나 P1보다는 많고, 레이더-표적 간 평균거리는 P1과 P3의 중간이며, 평균 수신 전력이 가장 높게 나타났다.

관측 위치에 따라 탄도미사일 비행 단계별 수신 전력의 패턴 또한 다르게 나타났다. 발사 초기에는 P1에서의 수신 전력이 다소 높다가 탄도의 정점 때 까지 P3-P2-P1 순으로 높아지고, 정점 이후 P1-P2-P3 순으로 높아지며, 최종 탄착지점 부근에서는 P1에서의 수신 전력이 가장 높다. 발사 초기와 최종 탄착지점에서 P1에서 관측되는 미사일의 RCS가 가장 작음에도 수신 전력이 P2, P3보다 높은 이유는 관측 위치별 RCS 값이 차이나는 것에 비해 P2와 P3의 거리가 상대적으로 더 멀기 때문이다.

V. 결 론

본 논문에서는 레이더 위치에 따른 표적 RCS의 크기를 계산하고, 레이더 위치에 따라 표적과 레이더간 거리에 따른 전파의 감쇄를 고려하여 수신되는 전력을

비교하였다. 그 결과 미사일의 탄도 측면 방향에서 관측하는 것이 RCS를 크게 관측하는 점에서 유리하지만, 레이더 탐지확률을 결정하는 요인인 일정수준 이상의 수신 전력을 확보하기 위해서는 RCS는 물론 표적과 레이더간의 거리도 함께 고려해야한다는 것을 알 수 있었다.

본 연구결과를 실제 탄도미사일 탐지 상황에 적용하면 레이더를 지상보다는 동해상 또는 서해상에 배치하는 것이 탄도미사일을 효율적으로 탐지/추적할 수 있다는 것을 예상할 수 있다.

실제로 북한이 은하 3호 로켓을 발사했을 때 서해안 태안군 서남쪽 166km 해상에 전개해 있던 세종대왕함이 최초로 탐지하여 전파하였다[7].

우리 해군은 탄도미사일을 탐지할 수 있는 능력을 갖춘 세종대왕함급 이지스함을 보유하고 있고, 이지스함은 육상기반 레이더와 달리 우수한 기동성을 기반으로 탐지 확률이 높은 위치를 선정하여 배치할 수 있는 장점이 있다.

본 연구 결과를 응용하면 탄도미사일의 부스트 단계, 중간 단계, 종말 단계 등 각 비행단계별 탐지 및 추적에 유리한 위치를 선정하거나, 다수의 레이더를 적절히 배치하여 미사일 비행구간 동안 일정 수준 이상의 수신 전력을 지속적으로 확보할 수 있는 방안을 연구하는데 활용할 수도 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 LIG넥스원(주)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

REFERENCES

- [1] Peng Peng, Tong Chuang-ming, Sun Jiajia, Li Dan, Wang Tong, "Dynamic RCS feature of ballistic missile for detection and classification in the boost phase," in *proceeding Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWS)*, Chengdu, China, pp.427-430, 2013.
- [2] Heung Seob Kim, Ki Tae Kim, Geonwook Jeon, "A

- requirement assessment algorithm for antiballistic missile considering ballistic missile's flight characteristics," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol.14, no.6, pp. 1009-1017, Dec. 2011.
- [3] Charalampos Fougias, Charalampos Menychtas, *Netted LPI Radars*, Monterey, CA: Naval Postgraduate School, pp.7-8, pp.10-28, 2011.
- [4] Liu Li-hua, Wang Zhuang, Hu Wei-dong, "Precession period extraction of ballistic missile based on radar measurement," in *proceeding 2006 CIE International Conference on Radar (CIE ICR '06)*, Shanghai, China, pp.1-4, 2006.
- [5] Kwon Yong Soo, Choi Bong Suk, "Analysis of the trajectory characteristics of ballistic missiles," *Journal of Military Operation Research Society of Korea*, vol.32, no.1, pp.176-187, Jun. 2006.
- [6] Byung-yong Kim, "A brief study on SM-3 intercept missile," *Korea Defense Issue & Analysis*, vol.1503(14-8), 2014.
- [7] Ah-ram An, "Sejong the Great, Detect first North Korean rocket launching in 94 second," *Hankookilbo*, Dec.12.2012.



박태용(Tae-yong Park)

1997년 2월 : 해군사관학교 전자공학과(공학사)
2005년 2월 : 포항공대 정보통신학과(공학석사)
2005년 1월 ~ 2007년 7월 : 해군사관학교 정보통신공학과 전자공학교관(전임강사)
2011년 6월 ~ 2013년 2월 : LG넥스원 해외사업본부 매니저
2013년 3월 ~ 현재 : 호원대학교 국방기술학부 조교수
※관심분야 : 해군 무기체계, 지휘통제체계, 레이더



이유라(Yura Lee)

2007년 2월 : 이화여자대학교 정보통신학과(공학사)
2009년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과(공학석사)
2012년 1월 ~ 현재 : LG넥스원 전투체계연구센터 선임연구원
※관심분야 : 신호처리, 컴퓨터비전, 표적탐지