

함정의 3차원 RCS 측정 데이터를 활용한 유도탄 대응 기법 연구

곽상열
국방기술품질원 기획조정팀

A Study on the Solutions of Guided Missile Attacks using 3-D RCS Data of Maritime Ship

Sang-Yell Gwak

Planning & Coordination Team, Defense Agency for Technology and Quality

요약 RCS(Radar Cross Section)는 레이더 신호가 반사되어 수신되는 파장의 강도를 나타내는 가상의 영역이다. 함정의 RCS는 고유의 스텔스 성능을 나타내고 이 값이 곧 함정의 생존성을 나타내기 때문에 이를 감소시키기 위해 함정 설계 단계부터 건조까지 다양한 분야에서 노력하고 있다. 함정의 RCS 값은 설계도면과 CAD 모델을 활용하여 예측할 수 있지만, 실제 운항 환경인 해상에서는 해수면 클러터(Clutter)와 다중경로 반사가 발생하므로 해상에서 RCS 값을 측정할 필요가 있다. 하지만 이러한 RCS 예측 값과 측정값은 사용자에게 단순한 상대적인 크기만 제공할 뿐 이를 활용할 방법에 대해서는 연구가 많이 진행되지 않았다. 본 논문에서는 함정의 실 운항환경에서 측정된 3차원 RCS 측정 데이터를 활용하여 함정에 다가오는 유도탄에 대응할 수 있는 기법을 연구하였다. 함정에서는 유도탄의 위치 정보를 추적하여 유도탄에서 바라보는 함정의 고각 및 방위각을 추정하게 되고, 이를 미리 측정된 3차원 RCS 측정값에 맵핑하여 RCS 값을 역산하게 된다. 또한, 유도탄의 이동 정보를 활용하여 유도탄이 바라보는 RCS를 미리 예측하고 이를 활용하여 함정의 기동 및 기만체계를 이용한 대응 계획을 제안하게 된다.

Abstract The Radar Cross Section (RCS) is a virtual region indicating the strength of a wavelength at which a radar signal is reflected and received. As the ship's RCS represents its own stealth performance and survivability, efforts have been made in various areas from design to construction to reduce the RCS. The RCS can be predicted using design drawings and CAD models, but it is necessary to measure the RCS at sea since sea clutter and multipath reflections occur in the sea environment. However, such RCS predictions and measured values provide only a simple relative magnitude to the user, and there has not been much research on this topic. In this paper, a missile countermeasure technique was studied using 3D RCS measurement data in an operating environment. The elevation and azimuth angle of the ship viewed from the missile were estimated using the location information of the missile, and the RCS value was inverted by mapping it to previously measured 3D RCS measurement data. In addition, by using the movement information of the missile, the RCS observed by the missile could be predicted in advance, and this method can be used to propose a response plan based on the maneuvering and chaff system.

Keywords : RCS, Guided Missile, Maritime Ship, Chaff, Missile Attack

*Corresponding Author : Sang-Yell Gwak(Defense Agency for Technology and Quality)

email: sygwak@dtaq.re.kr

Received February 11, 2020

Accepted April 3, 2020

Revised March 3, 2020

Published April 30, 2020

1. 서론

1.1 레이더 반사 단면적

1.1.1 이론

레이더 반사 단면적(RCS: Radar Cross Section, 이하 RCS)은 레이더 신호가 반사되어 수신되는 파장의 강도를 나타내는 가상의 영역이다[1]. 해상에서 운행 되는 함정의 RCS 값은 함정의 고유 스텔스 성능을 나타내며 이를 예측하고 감소시키기 위한 연구가 많이 진행되고 있다[2-3]. 하지만 함정이 운항되는 해상은 해수면 클러터(Clutter)와 다중경로 신호가 발생하는 특수한 환경이기 때문에 예측 값이 실제 운용되는 함정의 RCS 값과 많이 달라진다. 그렇기 때문에 실제 함정이 운항되는 환경에서 함정의 RCS를 측정하는 기법이 필요하다.

1.1.2 RCS 측정 기법

함정의 RCS를 측정하는 가장 좋은 방법은 해상 위의 함정을 대상으로 레이더가 그 주변을 돌면서 RCS를 측정하는 것이다. 하지만 이를 위한 측정 장비는 현재 비용 및 운용 측면에서 비효율적이므로 고정 설치된 RCS 측정 장비를 운용하고 있다. 측정 대상 함정은 함정의 6 자유도를 측정할 수 있는 장비를 설치한 상태로 고정된 RCS 측정 장비 시야에서 360° 회전 기동을 하게 된다. 이때 RCS 측정 장비에는 레이더로 반사되는 신호의 SNR을 측정하게 되고, 함정에 설치된 6 자유도 측정 장비는 실시간으로 함정의 기동 상태를 저장하게 된다. 이 데이터들은 최종 후처리 과정에서 시간동기화와 방위각 및 고각 산출을 통해 3차원 RCS 값으로 분석되게 된다[4].

1.2 3차원 RCS 데이터의 활용

이 3차원 RCS 값은 함정의 고유 스텔스 성능을 나타내지만, 이 값은 레이더 반사 신호의 강도를 나타낼 뿐이므로 값 자체만을 실제 함정의 작전에 활용하기엔 어려움이 있다. 특히 함정의 RCS 특성을 이용하여 유도탄의 유도성능을 향상시키기 위한 연구는 수행되고 있지만, RCS값을 이용한 함정의 유도탄 대응 기법의 연구는 거의 진행되지 않았다[5]. 하지만 함정을 공격해오는 유도탄의 위치 정보를 알 수 있다면 유도탄이 추적하고 있는 함정의 RCS 값을 역산할 수 있게 되고 이를 함정 작전에 활용할 수 있게 된다.

본 논문에서는 함정의 유도탄 추적정보를 이용하여 유도탄이 바라보고 있는 RCS 값을 역산하고 이 값이 감소

될 수 있도록 기동하는 기법에 대해 연구하였다. 또한, 유도탄 기동 정보를 활용하여 유도탄이 바라보는 미래의 RCS 값을 예측하고 RCS 값이 가장 작아지는 시점에서 chaff를 발사할 수 있도록 하는 기법에 대해 제안한다.

2. 본론

본 논문의 연구절차는 Fig. 1과 같다. 3차원 RCS 측정 및 분석기법에 대해 소개하고, 미리 측정된 3차원 RCS 데이터를 이용하여 유도탄에서 바라본 함정의 RCS를 역산한다. 또한, 유도탄의 위치 정보 및 이동 정보를 이용하여 RCS가 가장 작아질 수 있도록 기동경로를 추천하며, 최저 RCS 지점에서 기만체계를 발사할 수 있도록 시점을 제시한다.

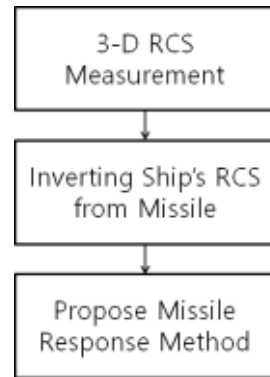


Fig. 1. Flow chart of proposed method

2.1 3차원 RCS 측정 및 분석 기법

현재 운항중인 함정을 대상으로 한 RCS 측정은 고정된 RCS 측정 장비를 이용하여 측정되고 있다. 피 측정 함정은 RCS 측정 장비의 시야가 확보된 장소에서 회전 기동을 하게 되고 측정 장비는 레이더 신호를 송신하여 반사되는 신호의 크기를 저장한다. 이 신호의 크기를 이용하여 후처리 과정을 통해 SNR을 계산하게 되고, 교정 치구를 이용하여 함정의 RCS 값으로 변환되게 된다. 이때 피 측정함정에는 함정의 자세와 위치 정보를 기록할 수 있는 장비를 설치하고 시험 시간동안 함정의 6 자유도(6 DOF: 6 Degrees Of Freedom)를 측정하여 저장하게 된다. 여기서 6 자유도는 운동체의 6개 운동방향을 나타내는 정보로 3개의 회전 운동 정보와 3개의 위치 운동 정보로 이루어져있다. 함정에 설치되는 6 자유도 측정

장비와 측정을 위한 함정의 기동과정을 그림으로 나타내면 Fig. 2와 같다.

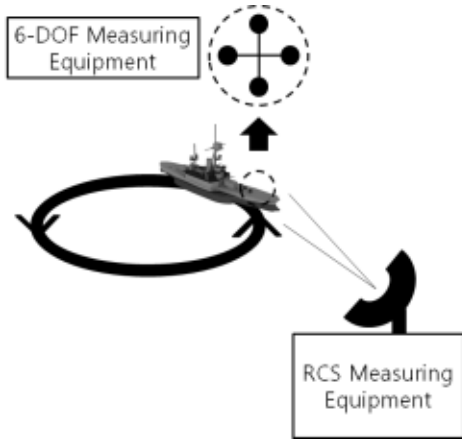


Fig. 2. RCS measuring equipment and ship maneuver

이렇게 RCS 측정 장비에서 저장된 반사 신호의 크기와 함정에서 저장된 6 자유도 데이터는 후처리 과정에서 시간동기화를 거쳐 고각과 방위각 대 RCS 측정결과를 도출하게 된다. 이 과정을 그림으로 나타내면 Fig. 3과 같다[4].

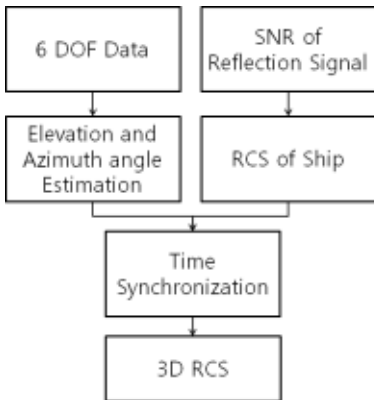


Fig. 3. Flow chart of 3D RCS estimation

이런 3차원 RCS 값을 이용하여 함정의 스텔스 성능과 특성을 확인할 수 있지만 이 값 자체만으로는 함정의 작전에 사용하기 어렵다. 그렇기 때문에 RCS 값을 고각 및 방위각에 따른 3차원 행렬 데이터 형태로 저장하여 실시간으로 작전에 활용할 수 있는 기법이 필요하다.

2.2 유도탄 대응 기법

2.2.1 유도탄에서 바라본 함정의 RCS 역산 기법

실제 운항 중인 함정의 RCS를 측정하여 데이터화한 상태로 저장하고 있다면 측정 장비 대신 유도탄이 있다고 가정하고 유도탄에서 바라본 RCS 값을 역산할 수 있게 된다. 이때 함정에서는 추적레이더를 이용하여 유도탄의 위치 정보를 획득하고 있다고 가정한다. 만약 함정의 위치를 원점인 (0, 0, 0)으로 설정한다면 유도탄의 상대 위치는 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$(x_m, y_m, z_m) \quad (1)$$

Where, x_m, y_m, z_m denotes coordinates of the Missile

유도탄의 상대 위치를 알고 있다고 해도 유도탄에서 바라본 함정의 고각 및 방위각은 함정의 회전 정보에 따라 변화하게 된다. 그러므로 함정의 회전 정보를 실시간으로 활용하여 유도탄이 바라본 고각 및 방위각을 계산할 필요가 있다. 이때 함정의 회전 정보는 3가지로 Roll (θ), Pitch(ϕ)와 Heading(ψ)로 표현할 수 있다.

Roll은 우현이 위로 갈 때 양의 값을 가지며, Pitch는 선수가 내려갈 때 양의 방향이다. Heading의 양의 방향은 시계방향이며, 이 3가지 회전 정보를 그림으로 표현하면 Fig. 4로 표현할 수 있다.

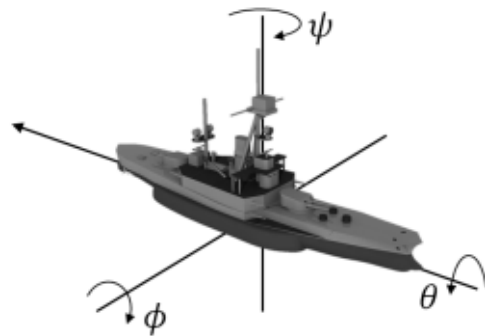


Fig. 4. Roll, pitch and heading direction of ship

유도탄에서 바라보는 함정의 방위각(Azimuth angle)은 함정의 Heading 정보와 유도탄의 상대 위치를 통해 계산할 수 있으며, 식으로 표현하면 Eq. (2)과 같다.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{x_m}{y_m}\right) + 360^\circ - \psi \quad (2)$$

Where, α denotes relative azimuth angle between missile and ship

함정의 방위각은 Heading 값을 이용하여 쉽게 계산할 수 있지만, 유도탄에서 바라보는 함정의 고각 (Elevation angle)은 Roll, Pitch와 Heading 세 가지 회전 정보에 따라 변화하므로 회전 행렬을 이용하여 계산해야한다. 이때 회전 행렬은 Eq. (3)과 같으며 각 행렬의 구성요소는 각 회전 성분이 3차원 좌표에 끼치는 영향을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 & MR \cdot MP \cdot MH \\
 MR &= \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix} \\
 MP &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix} \\
 MH &= \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Where, MR denotes rotation matrix of roll
 MP denotes rotation matrix of pitch
 MH denotes rotation matrix of heading

이 회전 행렬은 배를 회전시키는 것과 같은 효과를 주며, 배를 평면으로 가정하였을 때 생기는 법선 벡터도 기울이는 효과를 준다. 이 법선 벡터(\vec{n})와 유도탄 및 함정 간의 벡터(\vec{m})를 이용하여 유도탄이 바라보는 함정의 고각을 구할 수 있게 된다. 이 관계를 이용하여 계산한 유도탄에서 바라본 함정의 고각은 Eq. (4)와 같으며, 이때의 상황을 그림으로 그리면 Fig. 5와 같다.

$$\beta = 90 - \cos^{-1} \left(\frac{\vec{m} \cdot \vec{n}}{|\vec{m}| |\vec{n}|} \right) \tag{4}$$

Where, β denotes relative elevation angle between missile and ship

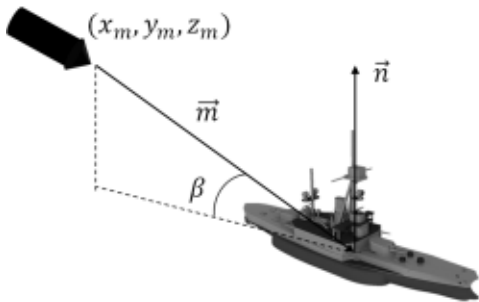


Fig. 5. Geographical location of missile and ship

이렇게 구해진 유도탄에서 본 함정의 방위각과 고각은 미리 측정해둔 3차원 RCS 값에 맵핑되어 유도탄이 본 함정의 RCS 값을 구할 수 있게 된다. Table 1은 미리 측정해둔 3차원 RCS 값 매트릭스의 예시이며, 만약 유도탄에서 본 함정의 고각이 1°, 방위각이 0° 라면 RCS 값은 31.8 [dB]가 된다.

Table 1. RCS[dB] of ship with respect to azimuth and elevation angle

$\beta [^\circ]$ \ $\alpha [^\circ]$	0	1	...	29	30
0	32.1	31.8	...	36.1	36.0
1	30.5	29.9	...	34.9	34.7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
359	28.5	27.2	...	33.6	32.9
360	32.1	31.8	...	36.1	36.0

2.2.2 유도탄 이동정보를 활용한 대응 기법

유도탄에서 본 함정의 RCS 값을 역산하면 이를 이용하여 유도탄 대응 계획을 수립할 수 있다. 이때 첫 번째 고려해야할 사항은 유도탄과 함정과의 위치 및 유도탄의 속도이다. 이 정보들을 이용하여 유도탄이 함정 타격까지 걸리는 시간을 계산할 수 있으며, 유도탄에서 바라본 함정의 고각의 변화를 예측할 수 있다. 이 시간과 고각의 변화는 함정이 유도탄에 대응하여 기동할 수 있는 범위를 제시하며, RCS를 최저로 낮출 수 있는 기동 계획과 Chaff 탄 발사 가능 시기를 추천하는데 사용된다. 이 과정을 간략하게 나타낸 것이 Fig. 6이다.

유도탄의 함정 도달 시간(t_r)은 Eq. (5)로 간단하게 구할 수 있다.

$$t_r = \frac{\sqrt{x_m^2 + y_m^2 + z_m^2}}{v_m} \tag{5}$$

Where, v_m denotes velocity of missile

이 함정 도달 시간을 이용하여 함정 기동으로 생기는 최대 방위각 변화 범위를 설정할 수 있다. 또한, 유도탄에서 본 함정의 고각 변화는 유도탄의 속도를 고려하여 Eq. (3)과 Eq. (4)로 계산할 수 있다. 고각의 변화는 시간에 따른 유도탄의 위치를 예상해서 계산하므로 시간에 따라 값이 정해지게 된다. 하지만 방위각 변화 범위 내에서 최저 RCS 값이 나오는 선회 방향을 추천한다. 만약 함정의 선회 특성이 1초당 0.25° 변화가 가능하고 타격까지 걸

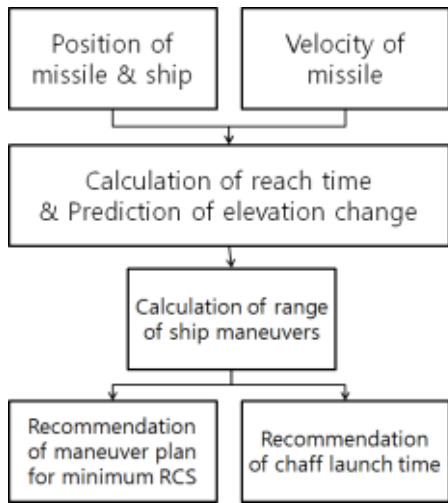


Fig. 6. Flow chart of missile response plan

리는 시간은 20초라고 가정한다면 최대 방위각 변화 범위는 5°가 된다. 이때 유도탄에서 본 함정의 현재 방위각은 45°이며, 고각의 변화는 5°에서 10°로 선형적이라고 가정한다. 이러한 상황에서 함정의 기동 가능 범위를 측정 해놓은 RCS 값 매트릭스에 표시하면 Table. 2의 굵은 테두리 범위와 같다. 기동 가능 범위에서 최저 RCS 값은 25.3 [dB]로 시점으로는 도달 시간이 4초 남았을 때이다. 그러므로 유도탄이 본 함정의 RCS 값을 최저로 만들기 위해 함정 운용자가 유도탄이 본 함정의 방위각이 47°가 되도록 16초 안에 기동하는 것을 제안할 수 있다. 또한, 도달시간이 4초 남았을 때가 기만체계인 Chaff 탄을 발사하여 유도탄의 추적 대상을 혼동할 수 있도록 하는 최적의 시점이라고 추천할 수 있을 것이다.

Table 2. RCS[dB] range of ship with respect to azimuth and elevation angle change

t_r [s]	20	16	12	8	4	0	
β [°]	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10	
α [°]	40	35.8	28.4	26.5	28.4	33.3	30.9
	41	31.7	26.8	29.4	32.0	30.6	29.7
	42	32.8	31.0	28.3	29.7	27.5	30.4
	43	27.9	30.6	28.0	28.6	28.3	29.0
	44	29.1	30.1	27.7	32.7	29.6	31.7
	45	29.5	27.3	28.9	29.6	31.6	27.3
	46	32.2	32.3	26.0	28.8	27.3	30.9
	47	29.4	30.7	31.9	29.4	25.3	28.3
	48	31.4	29.4	31.0	28.3	27.1	29.3
	49	25.9	30.0	30.0	27.8	30.7	31.1
	50	29.3	29.5	29.9	35.1	30.8	32.1

추가적으로 chaff 탄을 사용 횟수를 미리 설정하여 기만 체계 발사 시점을 횟수에 맞추어 추천할 수도 있을 것이다. 해당 예시에서 16초 동안 45°에서 47°로 선회하므로 도달 시점이 12초이며 방위각이 46°일 때 첫 번째 chaff 탄을 발사하도록 추천할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 실 운항환경에서 측정한 3차원 RCS 데이터를 활용하여 함정을 표적으로 발사된 유도탄에 대해 대응할 수 있는 기법을 연구하였다. 이미 측정한 RCS 값을 고각과 방위각에 대한 RCS 값 매트릭스로 구성하여 유도탄이 바라본 함정의 RCS 값을 역산하였다. 이를 얻기 위해 유도탄의 위치를 기반으로 유도탄에서 본 함정의 방위각과 고각을 계산하였다. 또한, 유도탄 이동정보를 활용하여 RCS 값 변화를 예측하였으며 RCS 값이 가장 작아지는 고각 및 방위각으로 회피 기동을 추천하는 기법을 연구하였다. 이 기법에서 회피 기동 중 RCS 값이 변함에 따라 기만 체계인 chaff 탄 발사 시점도 함께 제공하였다. 추후 실제 함정별로 다양하게 측정한 RCS 측정 데이터를 이용하여 이를 검증하는 연구가 필요하다.

References

- [1] Eugene F. Knoff, Radar cross section measurements, p.546, Springer Science & Business Media, 2012, pp.1-5.
- [2] B. J. Ahn, "A Study on the Recent Analysis Method for the RCS reduction for Naval Ships", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol.25, No.3, pp.333-338, Mar. 2014. DOI: <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2014.25.3.333>
- [3] J. T. Kang, *Development of Stealth Design Systems for Naval Ship*, Master's thesis, Seoul National University, pp.64-76, 2016.
- [4] S. Y. Gwak, H. I. Jung, "Measurement and Analysis for 3-D RCS of Maritime Ship based on 6-DOF Model", *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol.21, No.4, pp.429-436, Aug. 2018. DOI: <https://doi.org/10.9766/KIMST.2018.21.4.429>
- [5] B. Dan, Y. Jiang, J. Li, "Anti-Ship Missile Target Selection Method Based on the Target RCS Information", *Applied Mechanics and Materials*, Vol.333, pp.616-622, July 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.333-335.616>

곽 상 열(Sang-Yell Gwak)

[정회원]



- 2017년 2월 : 경북대학교 대학원
전자공학부 (공학석사)
- 2017년 2월 ~ 2018년 12월 :
국방과학연구소 연구원
- 2018년 12월 ~ 현재 : 국방기술
품질원 연구원

〈관심분야〉

신호처리, 국방과학