

# 북한 SLBM 탐지를 위한 레이더 수신전력 간편 추정 방법

서형필 · 박형훈 · 이경행<sup>†</sup>

## Convenient Radar Received Power Prediction Method for North Korea SLBM Detection

Hyeong-Pil Seo · Hyoung Hun Park · Kyoung-Haing Lee<sup>†</sup>

### ABSTRACT

This research focuses on convenient radar received power prediction method for detection predictions of North Korea SLBM(Submarine Launched Ballistic Missile). Recently, North Korea tested launching of SLBM which is threatening international security. Therefore, for active response to these threat, it is essential to analyze the radar detection prediction of SLBM. In this point of view, this work suggests a method for detection predictions for SLBM by simulating of RCS(Radar Cross Section) and wave propagation.

**Key words** : SLBM, Trajectory, Radar Cross Section, Propagation, Radar Range Equation

### 요약

본 연구에서는 시물레이션을 거친 북한의 잠수함 발사 탄도미사일의 비행궤적에 대하여 레이더 수신전력에 대한 간편 추정방법에 대해 제시하였다. 최근 북한은 잠수함 발사 탄도미사일의 비행시험에 성공하였으며, 이는 국제적인 안보에 상당한 위협이 되고 있다. 따라서 이러한 위협에 능동적으로 대응하기 위해서는 잠수함 발사 탄도미사일의 위협에 대해 레이더를 이용한 탐지특성에 대한 과학적이고 논리적인 분석이 이루어져야 한다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 북한의 잠수함 발사 탄도미사일의 비행궤적에 따른 레이더의 탐지특성을 분석하기 위해 레이더 반사 면적(RCS)과 전파특성에 대한 모델링 및 시물레이션을 실시하였다.

**주요어** : 잠수함 발사 탄도미사일, 비행궤적, 레이더 반사 면적, 전파(Propagation), 레이더 거리 방정식

## 1. 서론

최근 국방부는 지난 2년간 변화된 북한군 동향을 상세히 반영한 2016년 국방백서를 발간하였다. 여기에서 주목할 만한 것은 북한의 잠수함발사 탄도미사일이 처음으로 언급된 점이다. 또한 북한은 2016년 12월에 탄도탄 콜드론칭(Cold Launching) 기술을 확보하기 위한 목적으로 육상 발사 시험을 실시하였다. 콜드론칭은 잠수함에서 탄도미사일을 발사할 때 잠수함 내부에서 연료를 분사시키지 않고 가스 등의 압력으로 미사일을 외부로 쏘아 올

린 뒤 공중에서 점화하는 기술이다. 콜드론칭 기술은 발사플랫폼인 잠수함의 안정성을 확보하면서 다양한 사거리 조절방법에 의해 비행시간과 속력을 제어하여 원하는 목표지점에 공격을 수행할 수 있는 장점이 있다. 따라서 북한은 작년 4월과 7월, 8월 SLBM 발사시험에도 콜드론칭 발사방법을 적용하였으며, 특히, 고각도(over-lofted)에 의한 사거리 500km 발사에 성공함에 따라 동북아 최대의 안보현안으로 부각되었다. SLBM의 실전배치가 임박하면서 동북아 안보현안 당사국들은 각국의 첨단 지휘정찰 자산을 활용하여 한반도 주변해역에 대한 감시활동을 강화하고 있다.<sup>[1]</sup>

SLBM에 대한 대응을 위해서는 일반적으로 탐지, 추적, 식별, 위협평가, 무장할당, 요격 및 판정의 시나리오가 순차적으로 이루어진다. 그중 가장 중요한 단계는 레이더에 의한 탐지 단계이다. 그 이유는 최초 탐지 여부의

Received: 7 February 2017, Revised: 8 June 2017,  
Accepted: 8 June 2017

<sup>†</sup> Corresponding Author: Kyoung-Haing Lee  
E-mail: onego778888@gmail.com  
Defense Acquisition Program Administration

신속, 정확성에 따라 대응할 수 있는 요격체계의 가용성이 증가하기 때문이다. 따라서 SLBM을 탐지하기 위한 레이더의 위치를 기반으로 한 전파환경과 SLBM의 RCS 특성이 탐지를 시도하는 레이더에 대해 어떻게 되는지를 예측하는 것이 중요하다. 이러한 분석이 수행되어야 어떠한 레이더를 어느 위치에 배치하는지의 위치 선정 문제가 해결된다. 따라서 본 연구에서는 북한의 잠수함 발사 탄도미사일의 비행궤적에 따른 이지스(Aegis) SPY-1D 레이더의 탐지특성에 대하여 레이더 반사 면적(RCS)과 전파 모델링을 통하여 시뮬레이션을 통해 탐지특성을 예측하는 방법을 제시하였다.

## 2. SLBM 탐지특성 예측 시뮬레이션 구조

레이더에 수신되는 전력에 비례해서 탐지확률이 증가되므로 본 연구에서는 비행특성 모델, 전파 모델 및 레이더 반사파 모델을 시뮬레이션한 후에 레이더 거리방정식(Radar Range Equation)을 이용하며 레이더에서 방사된 전파가 SLBM에 반사되어 수신되는 레이더파의 전력을 계산하여 탐지가능성을 예측하였다. 본 연구에 사용된 SLBM 탐지특성 예측을 위한 시뮬레이션 구조는 Fig. 1과 같다.

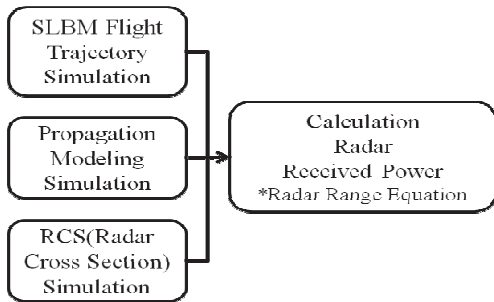


Fig. 1. Diagram of Simulation for Detection Prediction

### 2.1 시나리오 구성

SLBM의 비행궤적에 대한 시뮬레이션은 일반적인 탄도미사일과 마찬가지로 추진제가 연소됨에 따라 질량이 감소되고, 고도가 변함에 따라 중력가속도와 대기밀도가 변화하게 된다.<sup>[2-4]</sup> 이러한 로켓의 운동은 Fig. 2 블록선도와 같이 부스트 단계, 중간 단계, 재진입 단계로 구분하여 도출되며 변수는 Table 1과 같다.<sup>[5]</sup>

SLBM을 탐재할 것으로 예측되는 북한 고래급 잠수함의 작전반경(operational radius)은 약 2,000km 이상으로

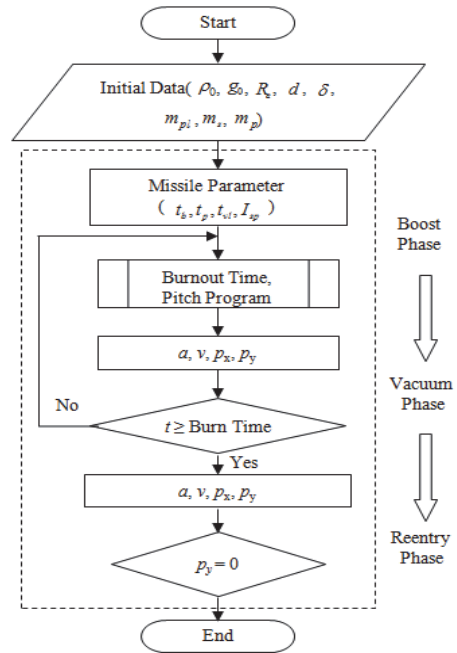


Fig. 2. Flow Chart of the SLBM Trajectory Simulation

Table 1. Parameter of SLBM Trajectory Simulation

$\rho_0$	atmospheric density of 0ft altitude
$g_0$	gravitational acceleration
$R_0$	radius of the earth
$d$	radius of the warhead
$\delta$	angle of warhead cone
$m_{pl}$	propellant mass
$m_s$	structure mass
$m_p$	payload mass
$a$	ballistic missile acceleration
$v$	ballistic missile velocity
$P_x$	ballistic missile x-position
$P_y$	ballistic missile y-position

한반도 작전전구 전 해역에서 운용이 가능하지만 잠수함 작전의 핵심인 은밀성과 기습타격의 목표를 달성하기 위해 상대적으로 잠수함 최적심도(best depth)가 넓고 깊게 분포된 동해에서 발사할 가능성이 매우 높다. 또한 지상 배치 레이더(GBR: Ground Based Radar)의 탐지권과 해상북방한계선(NLL: Northern Limit Line)에 집중된 대잠작전체력을 고려한다면 NLL 근해의 북한 해역에서 발사할 가능성이 매우 높다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 이지스함에 탑재된 SPY-1D 레이더의 위치를 독도

근해로 가정하고 NLL 근해에서 북한 잠수함의 SLBM이 발사되어 서울을 공격하는 상황을 가정하였으며, 위치는 Table 2와 같이 설정하였다.

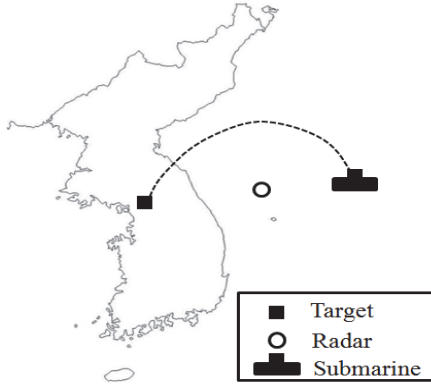


Fig. 3. Scenario of the Analysis of Tracking a SLBM

Table 2. Position of the Submarine and Radar

Platform		Position
Submarine		Latitude : 38° 29' Longitude : 134° 55'
Radar	Aegis Ship (SPY-1D)	Latitude : 38° 04' Longitude : 132° 43'

### 2.2 전파(Propagation) 모델링

시나리오에 따른 레이더의 위치에서 탐지가능 여부를 분석하기 위해 2002년 미 SPAWAR System Center(SSC)에서 개발하여 일반적으로 공개된 전산도구인 Advanced Propagation Model(APM) version 1.3.1 을 활용하여 레이더 전파특성을 모델링하고 전파손실(Propagation Loss)을 도출하였다.<sup>[6]</sup>

APM은 전자파가 이동하는 경로의 표면 지형과 지질, 대기공간의 수평 또는 수직적인 대기굴절율에 따라 변화하는 전자파의 전파 손실을 계산하며 Table 3과 같이 전파효과가 모델링된다.

Table 3. Propagation Effects Modeled by APM

Propagation Effects Mechanisms	Due To Environment		
	Sea	Terrain	Atmosphere
Range-dependent Refractive conditions			✓
Variable terrain		✓	
Multi-path	✓	✓	✓
Diffraction	✓	✓	
Terrain masking		✓	

APM에 입력하는 변수는 주파수, 안테나 설치고도, 안테나 패턴, 안테나 편파, 안테나 수직빔폭, 안테나 고각, 최대 해석 높이와 해상도, 최대 해석 거리와 해상도, 대기 흡수 감쇄율, 굴절 지수의 개수와 레벨의 개수, 지형타입 및 지형 고도의 정보 등이다.

변수 중 레이더의 규격(specifications)과 관련된 파라미터는 Table 4와 같이 일반적으로 공개된 제작사의 제공자료(provision)를 입력하였고 동일한 조건을 적용하였다. 주파수는 주파수영역의 중간 주파수를 선택하였고, 안테나는 실제 설치환경을 고려하였다. 안테나 패턴은 위상배열 레이더의 특성을 고려하여  $\text{Sine}(X)/X$ 의 배열함수를 적용하였다. 빔폭은 일반적인 수직 빔폭인 2°, 안테나 고각은 레이더가 설치되어 지향하고 있는 각도인 5°를 적용하였다. 실제레이더는 4면의 위상배열 고정안테나로 수평적으로는 360°, 수직적으로는 90° 까지 전자적으로 주빔(main beam)을 조정할 수는 있지만 본 논문에서 사용된 APM 모델의 경우 고정된 빔패턴 기반의 시뮬레이션 모델인 점을 고려하여 5°의 고각을 적용하였다. 또한 APM은 5°를 초과하는 고각과 2.5km 이내의 영역에 대해서는 지구의 곡률이 적용되지 않는 FE region으로 인식하여 flat-earth ray-optics 모델이 자동적으로 적용된다. 안테나 편파(polarization)는 배열 안테나를 구성하는 일반적인 element 소자의 편파인 수직편파를 가정하였다.

Table 4. Radar Input Parameter to APM

Radar	Freq (GHz)	Ant. Alt.(m)	Ant. Pattern	Pol.	BW (deg)	Ant. El.(deg)
Aegis Ship (SPY-1D)	3.3	15	$\text{Sine}(X)/X$	V	2	5

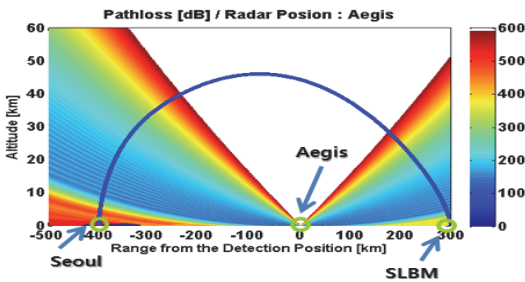
지구환경 입력 파라미터의 경우 대기 흡수 감쇄율은 0.006dB/km, 굴절 지수는 M-Profile(Modified Refractive Index)를 사용하였고  $M = N_0 + 0.157h$  (h는 m 단위 고도),  $N_0$ 는 한반도 주변으로 한정하여 여름 315, 겨울 375 중 여름에 해당하는 315를 적용하였고, Ducting 현상을 고려하지 않은 표준 대기를 적용하였다.<sup>[7]</sup>

지형 변수는 Table 5와 같이 레이더로부터 SLBM이 발사되는 잠수함 예상위치까지의 고도를 구글어스를 이용하여 산출하여 적용하였고, 지형 타입은 해상에서 발사되어 지상을 공격하는 시나리오를 감안하여 영역별로 해수, 건조, 중간 지면 등으로 구분하여 설정하였다.

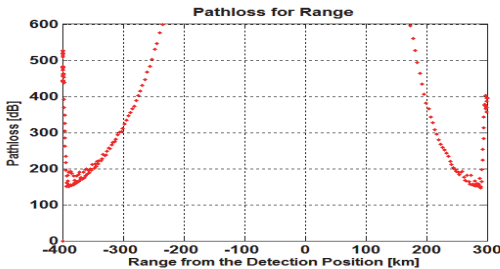
전파손실(propagation loss)의 경우 Fig. 4와 같이 동해상 발사지점 근방에서 초기손실이 발생하지만 거리가

**Table 5.** Terrain Input Parameter to APM for Radar

Range (km)	-500	-487	-485	-470	-446	-439	-433
Altitude (m)	0	0	0	20	100	30	375
Range (km)	-425	-405	-400	-392	-384	-382	-363
Altitude (m)	700	380	170	627	273	674	700
Range (km)	-347	-320	-316	-300	0	300	
Altitude (m)	1000	500	100	0	0	0	



**Fig. 4.** Propagation Loss of the Radar and Flight Trajectory of SLBM



**Fig. 5.** Propagation Loss of the Radar

이지스함 위치에 가까워질수록 손실이 감소하며, 레이더 고각이 커질수록 경로손실(pathloss)이 급격히 증가한다. 이는 Table 4에서 제시된 입력파라미터 중 안테나 이득이 반영된 배열안테나의 방사패턴, 빔폭과 5°로 설정된 고각 등에 의한 영향으로 음영구역(blind arc)이 발생한 것이며 흰색영역은 레이더 전파가 도달하지 않은 영역이다. 150km 이상부터 지구곡률과 산맥 등 지형적인 영향에 따라 음영구역이 점차 증가한다. Fig. 5는 SLBM의 비행경로를 따라 추출한 경로손실로 300km 지점이 SLBM 발사위치, 0점이 이지스함 위치, -400km가 탄착점의 위치이다. APM 모델의 한계로 레이더 해석이 되지 않은

고각 음영구역을 제외한 부분에 대해 경로손실을 나타낸다. 따라서 이러한 결과는 북한의 SLBM을 탐지하기 위한 이지스함의 최적의 배진위치를 결정하는데 중요한 기술자료로 활용될 수 있다.

**2.3 RCS 예측**

물체가 전자기파에 노출될 경우 입사한 에너지는 전 방향으로 분산시킨다. 이러한 에너지의 공간상의 분배를 산란(scattering)이라고 하고 에너지가 입사된 물체를 산란체(scatterer)라고 한다. 이렇게 산란된 에너지가 입사된 방향으로 다시 돌아가는 현상은 산란체에 의한 레이더 반향에 직접적인 영향을 준다. 여기서 반사된 에너지의 강도를 산란체의 레이더 반사 단면적(RCS: Radar Cross Section)라 정의한다.  $r$ 을 전자파 방사위치와 산란체 사이의 거리라고 할 때 RCS( $\sigma$ )는 식 (1)과 같은 형태로 나타내어질 수 있다.

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} \tag{1}$$

여기서,  $E^i$ 는 산란체에 입사되는 전기장 강도이며,  $E^s$ 는 산란체에서 레이더에 수신된 전기장의 강도이다. RCS를 해석하는 3가지 영역은 산란체가 중심에 있는 구를 가정하고 전자파 방사체가 거리  $r$ 인 구의 표면에 있다고 가정할 때, 파수(wave number)  $k = \frac{\lambda}{2\pi}$ ,  $\lambda$ 는 파장이라고 할 때,  $kr < 1$ 인 Rayleigh 영역,  $kr > 10$ 인 optics 영역 및  $1 < kr < 10$ 인 resonance 영역으로 구분된다. Table 4와 같이 중심주파수가 3.3 GHz일 때, 파수  $k = 1/(22\pi)$ 이므로  $r > 220\pi$ 일 때 optics영역에 해당된다. 즉, 거리 691.15m 이상인 위치에서는 optics 영역으로 해석 가능하며, 일반적으로 탄도미사일과 같은 금속 물체의 RCS는 물리광학법 해석이 잘 맞는다.<sup>[8]</sup> 따라서 본 논문의 SLBM RCS 예측은 물리광학법을 사용한 시뮬레이션 도구(tool) 중 미해군대학원에서 개발되어 일반적으로 사용되어지는 Pofacet's 4.3을 사용하였다.<sup>[9]</sup>

Fig. 6은 Pofacet's을 활용하여 z방향으로 세워진 형태로 설계한 단분리 전 SLBM과 단분리(staging) 후 탄두(warhead)의 기하구조(geometry)이다.

RCS 분석은 Table 4의 수직편파를 가정하고 Fig. 6의 z축을 기준으로  $\beta$ 는 0°~360°까지 1°간격으로 수행하였다. RCS는 주파수와 바라보는 각도에 대한 함수이다. 실제 SPY-1D 레이더는 ECCM(Electronic Counter-Counter



Fig. 6. Geometry of SLBM Full Body and Warhead

Measure) 기능으로 여러 개의 주파수를 번갈아가면서 사용하지만 본 논문은 간편 추정 방법을 제시하므로 중심 주파수에 대해서만 고려하였다. 또한 탄도탄은 종말단계에서 고속으로 나선형 운동을 하므로 이 단계에 대해서는 동적 RCS 분석이 필요하지만 마찬가지로 간편 추정 방법을 제시하므로 정적 RCS 분석만 고려하였다. 본 논문의 시나리오에서는 종말단계는 내륙에서 이루어지며, 레이더는 해상에서 바라보므로 탄도탄과 요격 유도탄과의 상대속도 차이로 대응이 어려운 단계이므로 정적 RCS 분석만으로도 탐지경향을 볼 수 있다고 판단하였다. 레이

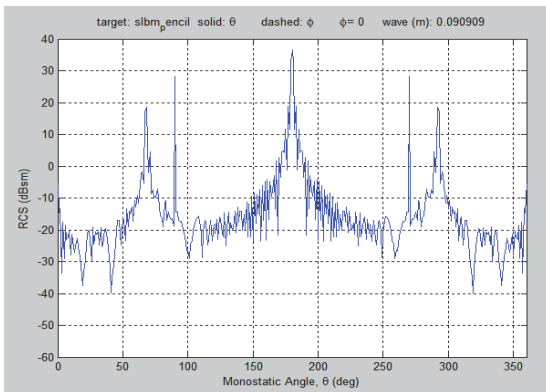


Fig. 7. Mono-static RCS of SLBM due to angle of theta

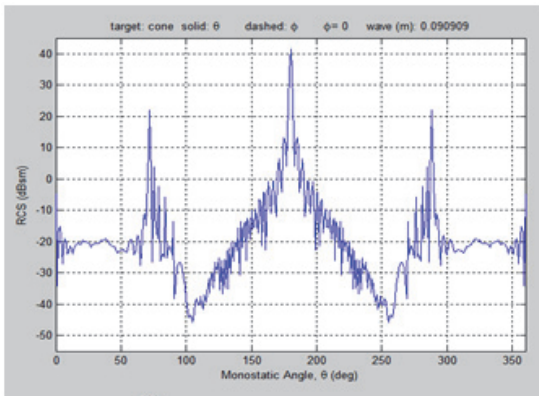


Fig. 8. Mono-static RCS of Warhead due to angle of theta

더의 운용주파수에 대하여 단 분리 전의 SLBM과 단 분리 후의 탄두의 RCS를 산출하면 Fig. 7과 Fig. 8과 같다. RCS분석의 결과는 공통적으로 SLBM 기준 정 아래에서 바라보는 각도인 180°에서 최대값(peak)을 보였다. 또한 주파수가 높아질 수록 RCS의 최대값도 상승하였다. 또한 단 분리 전의 SLBM RCS는 정형 방향인 90° 방향에서 두 번째 최대값을 보였다. 단 분리 후의 탄두 RCS는 약 70°에서 두 번째 최대값을 보였다.

Fig. 9의  $\theta$ 는 SLBM의 비행각도(flight angle)이며, 식 (2)에 의해 구해지고 0°일 때 지표면과 수평이고 90°일 때 수직이 된다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{dh}{dr}\right) \quad (2)$$

여기서  $r$ 은 잠수함에서 SLBM까지 시간에 따른 거리이며,  $h$ 는 SLBM의 시간에 따른 고도이다. POfacet's 모델의 RCS 시뮬레이션 결과는 Fig. 9에서 SLBM의 중심 축인  $z$ 축을 기준으로 구형좌표계의  $\theta$ 에 의해 산출되므로 레이더가 탄도탄을 바라보는 관측각인  $\beta$ (observation angle)를 도출하는 것이 필요하다.  $\beta$ 는 탄도탄의 위치에 따라 레이더가 탄도탄을 바라보는 각도(position angle)인  $\alpha$ 에 의해 산출될 수 있다.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{r_{\max} - r + l}{h}\right) \quad (3)$$

식 (3)에서  $r_{\max}$ 는 탄도탄의 최대거리로 잠수함으로부터 SLBM 탄착지점까지의 거리이며,  $l$ 은 탄착지점으로부터 레이더의 위치를 나타내는 변수이다.  $l$ 이 0보다 크면 레이더는 탄착지점보다 잠수함으로부터 먼 위치에 있고 0보다 작으면 탄착지점보다 잠수함으로부터 가까운 곳에 위치한다. 즉,  $l$ 값이 0이면 레이더가 탄착지점에 정확히 위치하는 것을 의미한다. 따라서  $\beta$ 는 식 (4)에 의해 도출된다.

$$\beta = 90^\circ + \theta - \alpha \quad (4)$$

단, 탄도탄의 궤적이 레이더의 상공을 통과 시  $\beta$ 는 식 (5)와 같이 도출된다.

$$\beta = 90^\circ + \theta + \alpha \quad (5)$$

$\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\theta$ 의 상관관계는 Fig. 10과 같이 표현된다.



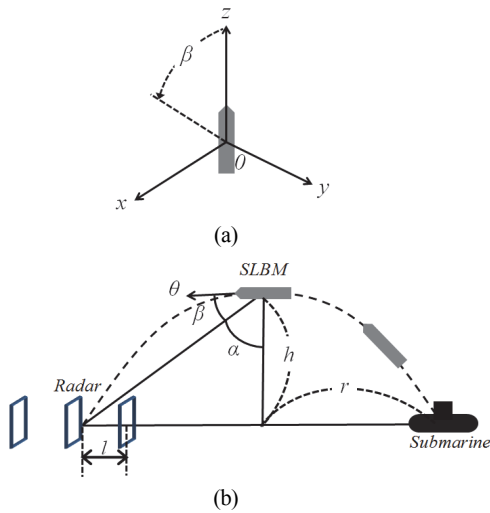


Fig. 9. Definition of Coordinates (a) Coordinates for RCS Analysis (b) Definition of Flight angle( $\theta$ ), Position angle( $\alpha$ ) and Observation angle( $\beta$ )

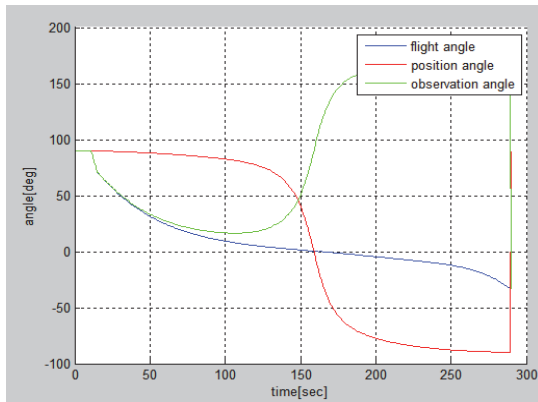


Fig. 10. SLBM Observation angle of Radar

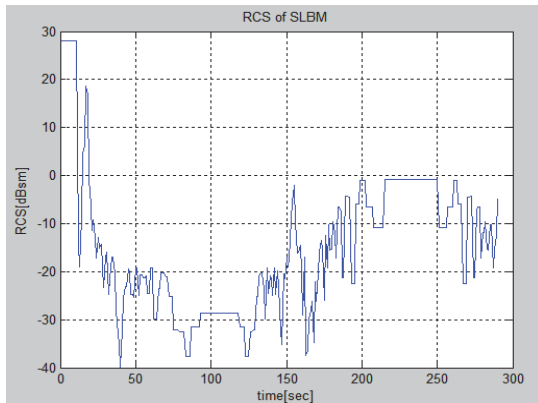


Fig. 11. Mono-static RCS of SLBM due to Flight Time

RCS의 관측각이 산출됨에 따라 SLBM을 이지스함의 SPY-1D 레이더로 추적할 때 시간에 따른 RCS를 Fig. 11과 같이 도출할 수 있다.

### 2.4 레이더 거리방정식과 탐지가능성 분석

레이더의 거리방정식을 계산하기 위해서는 평균전력 (average power)과 이득이 입력파라미터로 가정되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 일반적으로 공개된 이지스함의 레이더의 제원인 평균출력 77kW와 42dB를 평균전력과 이득으로 활용하였다.

일반적인 레이더 거리방정식은 식 (6)과 같으며 이를 상수부분과 공간손실에 대한 부분으로 정리하면 식 (7)로 표현될 수 있다.<sup>[8]</sup> 또한, 거리와 주파수에 대한 성분은 식 (8)에 의해 도출된다. 여기서 주목할 점은 APM에서 도출한 Propagation Loss는 Space Loss(공간손실)로 볼 수 있다는 점이다. 따라서 APM의 결과를 기반으로 시간에 따른 Propagation loss를 산출하면 Fig. 12와 같으며 2.3 절에서 예측한 RCS 값을 레이더 거리 방정식에 적용하여 시간에 따른 수신 전력을 도출한 결과는 Fig. 13과 같다.

$$P_r = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda_0^2}{(4\pi)^3 R^4} \tag{6}$$

$$P_{r,pl} = P_t G^2 \sigma \cdot \frac{1}{L_{fs}^2} \cdot \frac{4\pi}{\lambda_0^2} \tag{7}$$

$$L_{fs} = \frac{(4\pi R)^2}{\lambda^2} \tag{8}$$

레이더의 탐지 문턱값(threshold)을 -200 dBW(굵은 점선)로 가정한다면 Fig. 13에서 잠수함에서 발사된 SLBM은 30초에 탐지가 가능하고 70초에서 110초까지 약 40

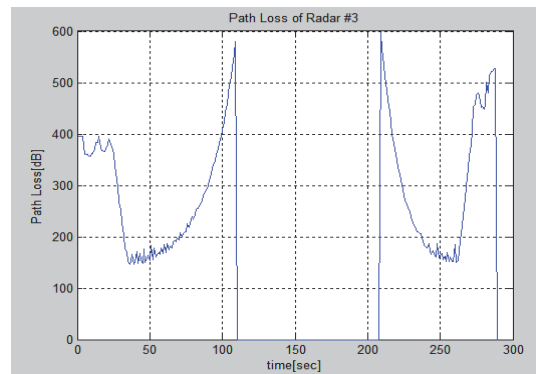


Fig. 12. Propagation Loss due to Flight Time

초간 소실가능성이 매우 높으며, 그 이후 지속적으로 탐지되다가 210초에서 240초까지 소실되며, 240초 이후 270초 까지 재 탐지 후 탄착지점까지 소실할 가능성이 높다.

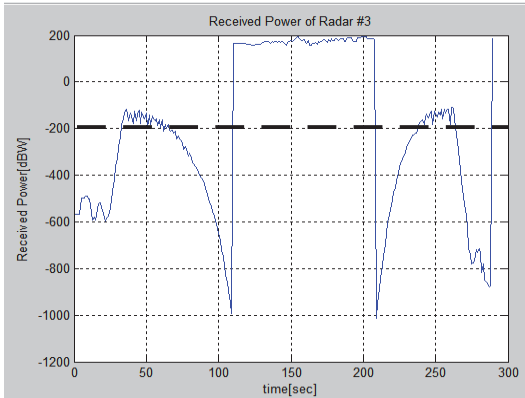


Fig. 13. Received Power due to Flight Time

### 3. 결론 및 향후연구과제

SLBM은 잠수함에서 발사한다는 점에서 은밀성과 기습성을 갖고 있는 무기체계이다. 따라서 신속하고 연속적인 탐지는 대응에 있어서 가장 중요한 요소가 된다. 본 논문에서 도출된 다양한 시물레이션의 결과를 종합하여 판단하면 SLBM에 대한 탐지특성 예측이 가능하다. 또한 본 논문의 기술적인 분석자료는 SLBM에 대응하기 위한 방어체계의 제한사항과 요구조건을 도출할 수 있으며, 해상 레이더 뿐만 아니라 육상레이더의 최적의 배치위치 등을 선정하기 위한 기초자료로 활용이 가능하다.

본 논문의 제한사항으로는 모델의 한계와 보안상의 제한사항으로 인해 다양한 방향으로 주엽이 변하는 위상배열레이더에 대한 정확한 전파모델링을 수행하지 못한 점이다. 하지만 실제와 유사한 입력파라미터를 활용한 방어체계 탐지특성을 예측한 것으로 의사결정과 정책에 반영될 수 있는 기반자료로는 충분히 활용될 수 있다. 향후 연구과제로는 발사위치의 불확정성을 고려한 확률적(stochastic) 시물레이션의 수행이 요구된다.

### References

1. Ministry of National Defense (2016), Defense White Paper, pp.28.
2. George P. Sutton, Oscar Biblarz, Rocket Propulsion Elements, John Wiley&Sons, 2001, p. 29.
3. J.I. Ahn, Y.S. Kwon (2013), "Analysis of the Flight Trajectory Characteristics of Ballistic Missiles Depending on the Operational Parameters", *Journal of Korea Association of Defense Industry Studies*, Vol. 20, No. 2, pp. 127-134.  
(안준일, 권용수 (2013) "운용 파라미터 변화에 따른 탄도미사일 비행궤적 특성 해석" 한국방위산업학회, 제20권, 제2호, 127-134.)
4. K.H. Lee, H.P. Seo, Y.S. K, J.W. Kim (2015), "Analysis of Flight Trajectory Characteristics of North Korea SLBM", *Journal of the Korea Society for Simulation*, Vol. 24, No. 3, pp. 9-16.  
(이경형, 서형필, 권용수, 김지원 (2015) "북한 SLBM의 비행특성 해석" 한국시물레이션학회논문지, 제24권, 제3호, 9-16.)
5. K.H. Lee, H.P. Seo (2016), "Analysis of the flight trajectory characteristics of North Korea SLBM due to launching mode" *International Journal of Modeling, Simulation and Scientific Computing*, Vol. 7, No. 4, pp. 1-13.
6. Barrios, A. E., Patterson, W. L.(2002), Advanced Propagation Model (APM) Ver. 1.3.1 Computer Software Configuration Item(CSCI) Documents, SPACE AND NAVAL WARFARE SYSTEMS CENTER SAN DIEGO CA.
7. Rec. ITU-R P.453-9, The Radio Refractive Index: its Formula and Refractivity Data, 2003.
8. Merrill I. Skolnik, Radar Handbook, 3rd Ed., McGraw-Hill, 2008, pp.14.4, 14.5, 26.17.
9. Garrido, Elmo E., Jr., Jenn, David C. (2000), "A Matlab Physical Optics RCS Prediction Code" *ACES Newsletter*, Vol 15, No. 3, pp. 7-12.



**서형필** (orlando5574@gmail.com)

2003 해군사관학교 전자공학과 학사  
2013 연세대학교 전기전자공학부 석사  
2014 해군사관학교 무기체계공학과 조교수  
2015~ 현재 국방기술품질원 선임연구원

관심분야 : RCS 감소, 위상배열, M&S

---



**박형훈** (parkhdt@naver.com)

2013 경상대학교 산업시스템공학과 석사  
1992~ 현재 국방기술품질원 선임연구원

관심분야 : 함정 및 항공기 품질보증, 시스템엔지니어링, M&S

---



**이경행** (onego778888@gmail.com)

2002 서울대학교 수학과 학사  
2007 국방대학교 무기체계 석사  
2010 George Mason University C4I센터 박사연수  
2014 국방대학교 무기체계 박사  
2015 해군사관학교 무기체계공학과 교수  
2017~ 현재 방위사업청 전자전사업팀

관심분야 : 유도무기체계, M&S, 시스템엔지니어링