

M&S 기법을 통한 레이더 고도에 따른 탐지성능 변화에 관한 연구

Research on Variation of Detection Performance according to Altitude of Radar by Using Modeling and Simulation Method

박명훈 · 전우중 · 김현승 · 권세웅

Myung-Hoon Park · Woo-Joong Jeon · Hyun-Seung Kim · Se-Woong Kwon

요 약

레이더 성능은 제원뿐만 아니라, 운용되는 환경에도 큰 영향을 받는다. 운용 환경에는 대표적으로 대기 굴절도 및 지형이 있다. 이는 레이더 운용 장소에 좌우되며, 특히 레이더 고도에 따라 탐지 성능 변화에 영향을 준다. 레이더 고도가 높을수록 지형에 의한 다중 경로 손실 영향이 줄어 원거리에서 좀 더 원활한 전파환경을 가질 수 있으며 이는 향상된 레이더 성능을 발휘할 수 있음을 뜻한다. 또한 레이더 고도가 높은 상태에서 빔 조향각을 변경함으로써 더 향상된 레이더 성능을 가질 수 있다. 본 논문에서는 레이더 고도 및 빔 조향각과 탐지성능 변화의 상호 관계를 연구하였다. 이를 위해 레이더 성능과 환경을 모의하는 모델을 개발하고 M&S 기법을 이용해 분석하였다.

Abstract

The performance of a radar is affected by the operating conditions as well as radar systems(radar specifications). Atmospheric refraction and terrain are typical conditions of operation. The operating conditions depend on radar location. In particular, the detection performance of a radar is greatly affected by altitude. If the radar altitude gets higher, the radar can have good environment of radio wave at far range. Radar performance can also improve when the beam steering angle is properly adjusted. In this paper, we conducted research on the relationship between radar altitude and the beam steering angle, and variations in the detection performance of the radar. By using modeling and simulation methods, we developed a model by considering the external environment and radar systems to analyze the detection performance of the radar.

Key words: Modeling and Simulation, Radar Altitude, Radar Performance Prediction, Beam Steering

I. 서 론

레이더는 목적과 상황에 맞게 다양한 위치와 고도에 설치된다. 이때 레이더의 주변 지형은 전파 환경을 구성하여 차폐구역 발생 및 원거리 탐지 성능 저하와 같은 레이더 성능에 영향을 준다. 때문에 이미 설치된 레이더의

경우, 철탑과 같은 구조물을 통해 레이더 고도를 높이기 위한 노력을 하며, 새롭게 설치할 레이더는 위치 선정 시 고도가 높은 곳을 선택한다. 높은 위치의 레이더는 가시 거리 확보가 좋으며, 다중경로 손실도 줄어들기 때문에 좀 더 좋은 전파 환경을 구성할 수 있다. 좋은 전파 환경에서 레이더는 좀 더 향상된 원거리 탐지 능력을 가질 수

(주) LIG 넥스원(LIG Nex1 Co., Ltd.)

· Manuscript received September 26, 2019 ; Revised November 19, 2019 ; Accepted November 29, 2019. (ID No. 20190926-093)

· Corresponding Author: Myung-Hoon Park (e-mail: myunghoon.park@lignex1.com)

있다. 이러한 이유로 레이더 위치 선정 시 설치 고도는 중요한 고려사항이다. 또한 높은 고도에서 원활한 전파 환경이 구성된 레이더의 경우 낮은 고도의 레이더보다 더 넓은 빔 운용의 선택폭을 가질 수 있다. 설치된 레이더의 조향각을 변경함으로써 원거리 탐지 성능에 변화를 줄 수 있으며, 이에 대한 분석이 필요하다.

레이더의 성능을 확인하기 위해 여러 장소에서 성능을 시험하는 것은 현실적으로 불가능하다. 또한 작전 운용 중인 레이더의 빔 조향각 변경을 위해 기계적으로나 전자식으로 빔 조향각을 변경하는 방법은 현실적으로 어렵다. 레이더와 같은 큰 체계 성능에 변화를 주어 결과를 예측하고 분석하기 위해 M&S(Modeling and Simulation)기법을 활용할 수 있다. 기존 연구에서는 복잡한 레이더 운용 및 환경의 주요 기능과 역할을 하는 부체계를 모의하는 M&S 모델을 구성하여 레이더 성능을 분석하는 연구가 진행되었다^{[1][2]}. 이를 통해 기존 레이더 성능 대비 변화된 성능에 따른 탐지 성능 변화를 예측 및 비교 분석할 수 있다.

본 논문에서는 M&S 기법을 통해 레이더 빔 운용과 지형 및 대기 상태에 따른 전파 환경을 반영한 레이더 성능 예측을 통해 높은 레이더 고도일수록 유리한 전파 환경임을 분석하고, 고도별 조향각에 따른 전파 특성을 분석하였다.

II. 고도에 따른 전파환경 분석을 위한 M&S 기법

구성된 레이더 M&S 도구는 위상배열 안테나를 사용한 탐색 레이더로 펜슬 빔을 다양한 고각으로 방사하며, 회전을 모의한다. 이때 반사되어 들어오는 수신 크기는 식 (1)을 통해 계산된다. 들어온 신호 크기에서 전파손실은 대기 및 지형과 같은 운용 환경을 반영하여 손실 값을 계산하는 APM(Advanced Propagation Model)을 사용하였다. 레이더 특성상 한 지점에서 여러 빔에 탐지되며, 각각 임계치를 통해 수신 여부가 결정된다^{[2][3]}.

$$SNR = \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \tau_p N_p \sigma_t}{(4\pi)^3 R^4 k T L_p L_{sys}} \right) \times G_{sp} \quad (1)$$

P_t : 송신전력(W) N_p : 펄스 수
 G_t : 송신이득(W/W) σ_t : RCS(m²)

G_r : 수신이득(W/W) R : 표적 거리(m)
 λ : 파장(m) L_{sys} : 시스템손실(W/W)
 τ_p : 펄스폭(sec) L_p : 대기손실(W/W)
 κ : Boltzman's constant [W/(Hz K)]
 T : 시스템 잡음 온도(K) G_{sp} : 신호처리 이득(W/W)

운용 환경 중 레이더 주변 지형의 경우 DTED(Digital Terrain Elevation Data)정보를 사용하였고, 대기 상태의 경우 기상청 데이터를 통해 전파 굴절도를 계산하였다. 이 정보들을 이용하여 APM을 통해 레이더 고도, 위치, 빔 패턴, 빔 조향 각도 등의 운용 환경을 반영하여 전파 환경을 구성하였다. APM을 통해 최종 Propagation factor(F)를 구할 수 있으며, 식 (3)을 통해 레이더 방정식에 필요한 전파 손실을 계산할 수 있다^{[2][4]}.

$$F = \left| \frac{E}{E_0} \right| \quad (2)$$

$$L_p = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) - 20 \log(F) \quad (3)$$

E : 안테나 패턴이 포함된 수신점에서의 필드 크기
 E_0 : 등방성 안테나 패턴 수신점에서의 필드 크기
 λ : 파장 (m) R : 표적거리 (m)

전파손실까지 반영된 최종 신호 대 잡음비(signal to noise ratio: SNR)를 활용하여 아래 식 (4)와 식 (5)를 통해 탐지 확률(%)을 계산할 수 있다^{[5]-[7]}.

$$A = \ln \left(\frac{0.62}{P_{fa}} \right), \quad Z = \frac{SNR + 5 \log_{10} N}{6.2 + \frac{4.54}{\sqrt{N + 0.44}}} \quad (4)$$

$$B = \frac{10^Z - A}{1.7 + 0.12A}, \quad P_D = \frac{1}{1 + e^{-B}} \quad (5)$$

P_{fa} : Probability of detection
 N : Non-coherent integration number

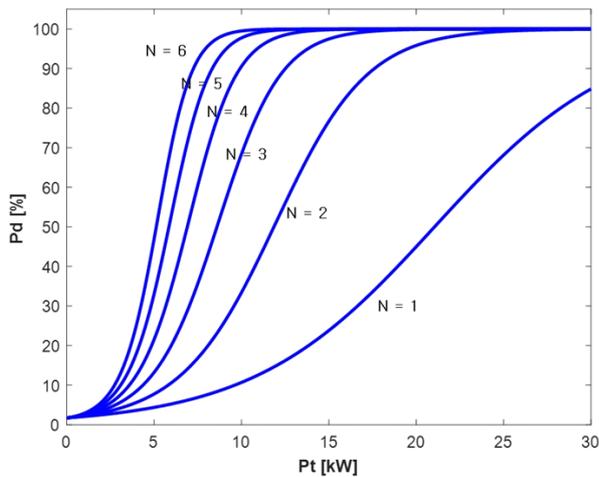
식 (1) 우변의 변수들은 레이더 성능에 영향을 주는 변수들이며, 그 중 송신 파워 및 안테나 이득, 펄스 수가 대표적이다. 파형을 송신하는 크기와 이를 공간으로 전달하

는 안테나의 이득에 따라 수신되는 표적의 반사 신호가 달라지며, 비례 관계를 가진다. 또한 한 표적에 대해 여러 펄스를 송신할 경우, 반사되어 돌아오는 신호의 크기는 커진다. 이러한 변수들의 변화에 따른 탐지확률 변화를 보면 그림 1과 같다.

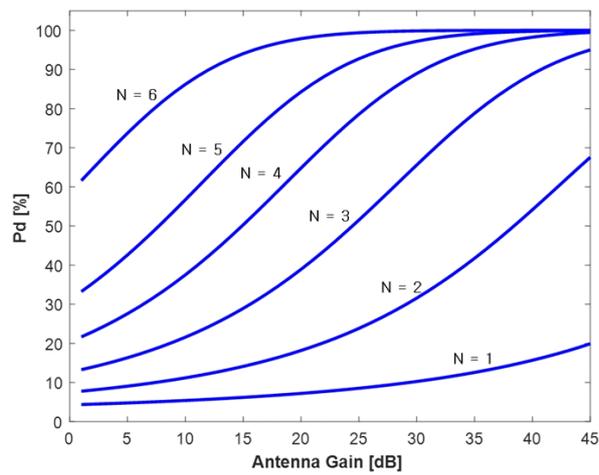
송신 출력 및 안테나 이득, 펄스 수 모두 크기가 증가할수록 표적의 반사 신호가 커져 탐지확률이 증가한다. M&S에 사용되는 값의 경우 실제 운용되는 레이더의 성

능 값으로 고정하여 사용하였다.

표적 모델의 경우, 분석 목표에 맞게 일정 크기의 RCS (Radar Cross Section)를 가진 표적이 분석 구간에 분포해 있는 상태로 구성하였다. 이렇게 구성된 모델을 통합하여 그림 2(a)와 같은 흐름에 의해 실행되며, 전체 구성된 모델 화면은 그림 2(b)와 같다. 개발된 M&S 모델을 이용하여 그림 3과 같은 개념으로 분석을 진행하였다. 분석을 위해 레이더 고도 및 빔 조향각을 제외한 모든 레이더 성능을

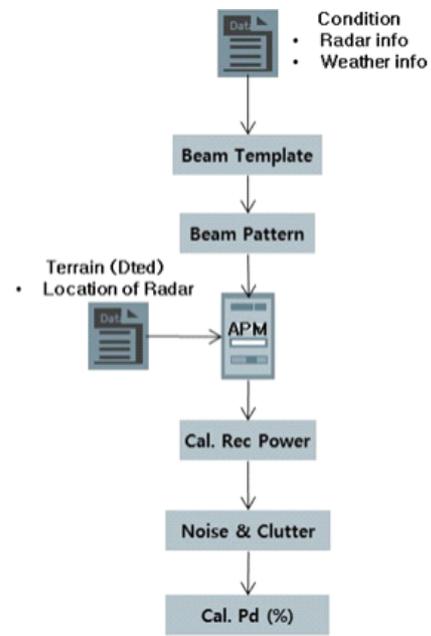


(a) 송신 출력
(a) Power of transmission

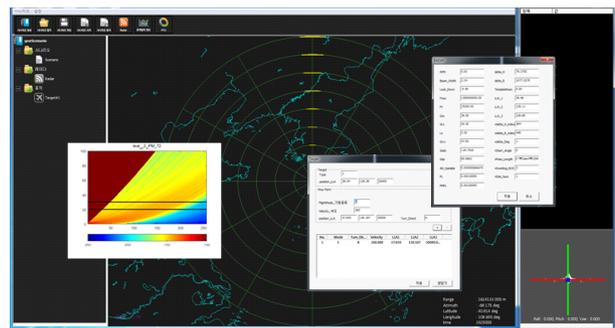


(b) 안테나 이득
(b) Antenna gain

그림 1. 변수에 따른 탐지확률 결과
Fig. 1. Result of detection probability as variables.



(a) M&S 모델 흐름도
(a) Flow diagram of M&S model



(b) 화면
(b) Screen

그림 2. M&S 모델 흐름도 및 화면
Fig. 2. The flow diagram and screen of M&S model.

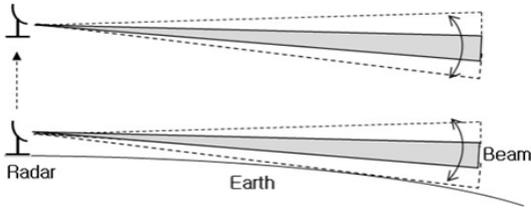


그림 3. 분석 개념
Fig. 3. The concept of analysis.

고정으로 하여 전파 손실과 탐지확률을 분석 지표로 하였다. 이를 통해 다양한 대기 조건에서 레이더 고도가 높을수록 안정된 전파 환경을 가진 것을 분석하였고, 표준 대기에서 조향각에 따른 탐지 성능 변화를 분석하였다.

그림 4는 분석에 사용된 각 특정 대기의 전파 굴절도 결과이다. 전파 굴절도는 측정 고도의 특성에 따라 서로 다른 값을 가진다. 그림 4(a)의 표준대기를 기준으로 그림 4(b)의 경우 표준보다 작은 굴절률(sub)과 큰 굴절률(super)을 가지는 층이 형성되었으며, 그림 4(c)의 경우 super 층을 가진 대기를 나타낸다. 각각의 대기는 서로 다른 굴절률로 구성되고, 이로 인해 전파는 다른 특성을 가지고 전파된다. 이는 서로 다른 전파환경을 구성하게 되며, 레이더 성능에 영향을 미친다^{8),9)}.

III. 시뮬레이션 결과

그림 5 및 그림 6은 대기별 고도에 따라 레이더 빔 조향각을 변화시킨 전파환경 결과이다. z축에 해당되는 값은 거리(x축)와 빔 조향각(y축)에 따라 해당 위치 표적의 전파 손실을 의미한다. 값이 클수록 전파 손실이 많이 발생하며, 이는 레이더 성능의 저하를 뜻한다. 그림 5의 경우, 낮은 고도에 설치된 레이더 결과로 그림 5(a)~그림 5(c)는 각 대기에 따른 거리를 포함한 단방향의 전파 손실 분포 결과이다. 전파 손실은 분석 위치에 고정 크기의 표적이 정지해 있는 것으로 가정하여 계산된다. 각 빔의 성능과 패턴을 이용하여 전파 손실을 계산하고, 최종 수신 크기를 구하여 그 중 최댓값의 전파손실을 선택하였다. 레이더 고도가 낮을 경우의 대기별 조향각에 따른 전파 손실 결과를 보면 어떠한 경향성을 찾아보기 힘들다. 그림 5(a)의 표준 대기 시 조향각에 따라 전파 손실의 큰 변화

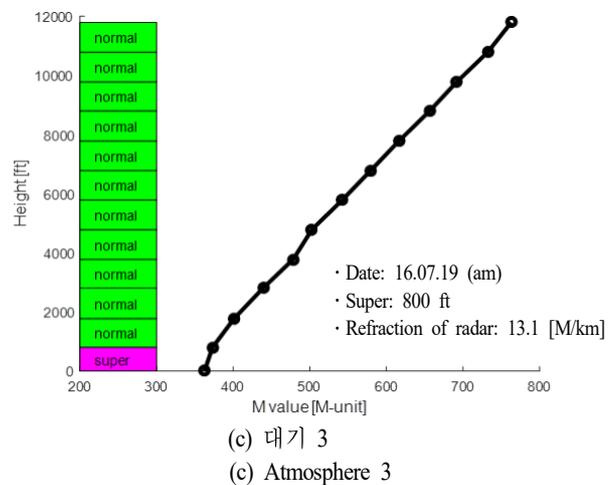
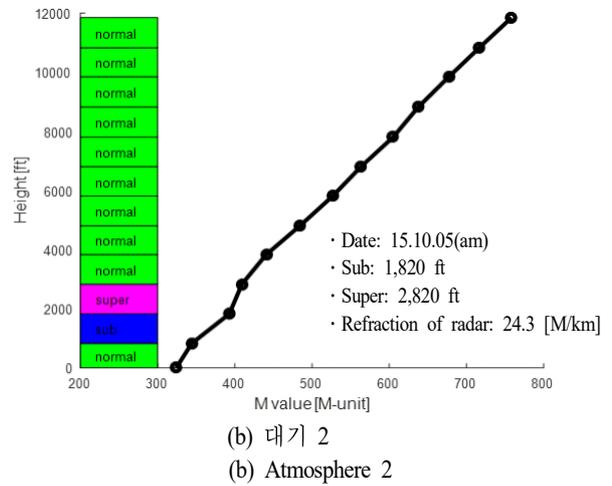
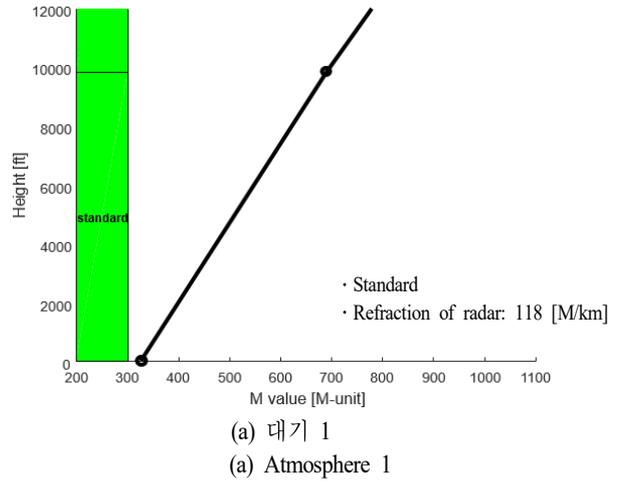
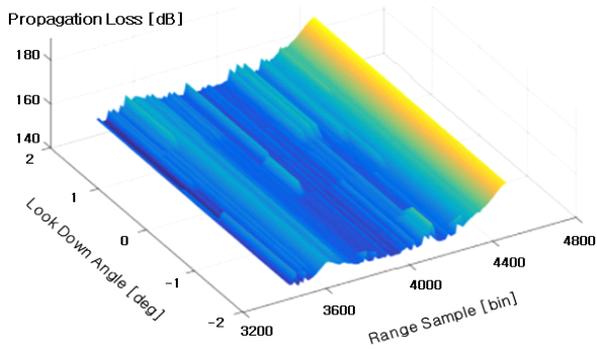


그림 4. 대기별 굴절률
Fig. 4. Refraction according to atmosphere.

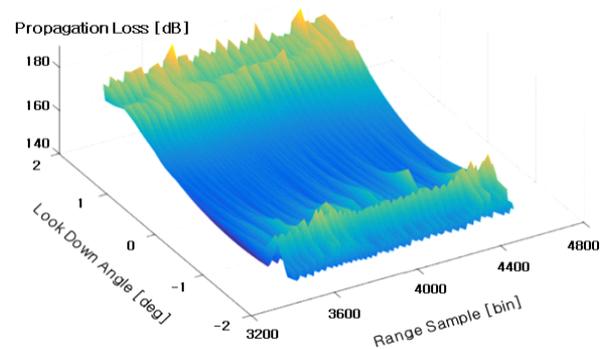
를 찾아보기 힘들지만, 일정 부분 안정된 상태임을 볼 수 있다. 하지만 그림 5(b) 및 그림 5(c)와 같이 이상기후 시 조향각별 전파 손실 변화는 매우 임의적으로 급변하는

것을 볼 수 있다.

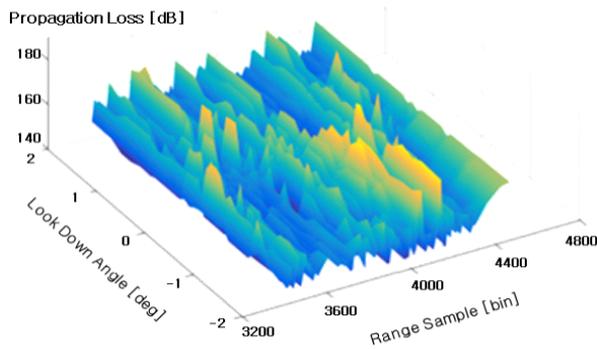
그림 6의 경우, 그림 5의 레이다 고도보다 좀 더 높은 고도에 설치된 레이다의 결과이다. 그림 5의 결과와 달리



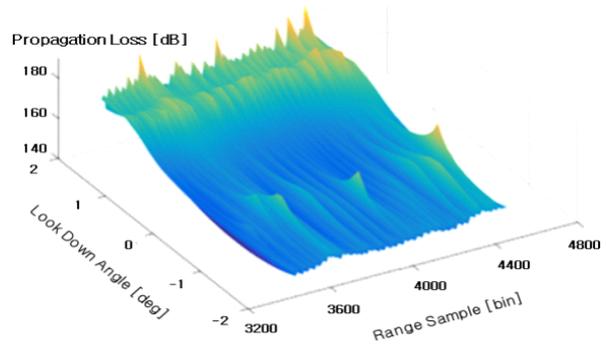
(a) 대기 3
(a) Atmosphere 3



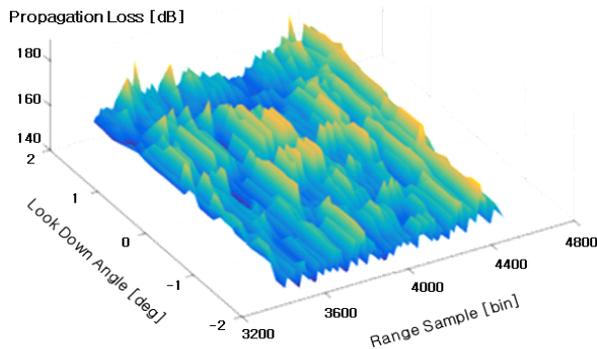
(a) 대기 3
(a) Atmosphere 3



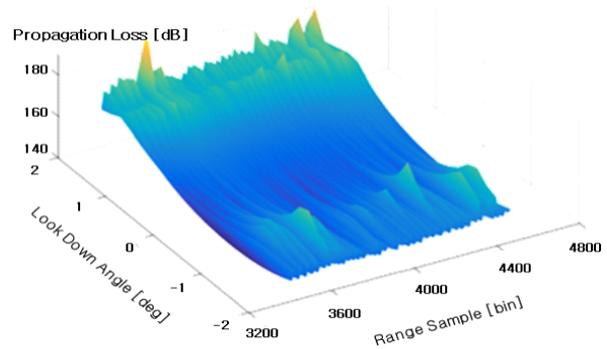
(b) 대기 3
(b) Atmosphere 3



(b) 대기 3
(b) Atmosphere 3



(c) 대기 3
(c) Atmosphere 3



(c) 대기 3
(c) Atmosphere 3

그림 5. 원거리 전파 손실 분포(기준고도)
Fig. 5. Distribution of propagation loss at far range(standard altitude).

그림 6. 원거리 전파 손실 분포(기준고도 $\times 2$)
Fig. 6. Distribution of propagation loss at far range(standard altitude $\times 2$).

표준 대기 시 조향각의 따른 전파 손실 변화의 경향성이 보이며, 이상 기후 또한 비슷한 결과를 가진다. 이는 레이더 고도가 높아짐에 따라 대기 환경의 영향성이 줄어든 것을 뜻하며, 또한 조향각의 변화로 탐지성능을 향상시킬 수 있음을 뜻한다.

그림 5 및 그림 6의 결과로 레이더 고도가 낮으면 대기 환경에 큰 영향을 받아 조향각에 따라 탐지성능 변화의 경향성이 없는 것을 보았다. 이는 레이더 고도가 높을수록 안정된 전파환경을 구성하는데 있어서 유리함을 보여준다. 이를 근거로 레이더 설치 시 보다 높은 고도를 선택하게 되는데, 이때 조향각에 따라 탐지 성능을 향상시킬 수 있다. 그림 6과 같이 고도가 높아지면 기존 조향각에 비해 좀 더 낮은 손실 값을 가지는 각도를 가질 수 있다. 본 논문에서 모의한 레이더는 전파식 빔 조향 방식인 위상배열 안테나를 사용한다. 빔 조향 각도를 위해 위상을 조절하여 원하는 방향으로 안테나 빔을 송수신할 수 있다. 빔 조향에 대한 안테나 손실을 반영 빔 패턴을 사용하여 APM을 통해 전파 손실을 구하고, 최종 신호 대 잡음비를 통해 탐지확률을 구할 수 있다. 그 결과는 그림 7 및 표 1과 같다.

그림 7은 표준대기에서 기존 레이더 고도와 2배와 4배에 해당되는 고도에서 조향각에 따른 탐지확률 분포를 그린 것이며, 표 1은 원거리에 해당되는 대표 위치의 탐지확률 값이다. 탐지확률을 보면 조향각을 유지해도 고도가 높아짐에 따라 3,600 bin에서는 약 3 %, 4,120 bin에서는 약 0.8 %가 증가했으며, 4,480 bin에서는 80 % 이하에서 93 % 이상으로 증가한 것을 볼 수 있다.

또한 그림 7에서와 같이 고도가 높아짐에 따라 조향각을 좀 더 내릴 경우, 탐지확률이 증가한 것을 볼 수 있다. 2배 고도에 해당되는 레이더의 경우 기존 조향각에서 약 0.4°, 4배에 해당되는 레이더는 약 0.7° 하향 조정할 시 각각 고도의 원거리에서 최대 탐지확률을 가지는 것을 확인하였다. M&S 기법을 통해 도출한 위 결과는 레이더 사이트 선정 및 조향각 수정에 따른 탐지성능 변화 예측에 활용할 수 있다.

IV. 결 론

레이더의 성능은 시스템 성능과 운용되는 환경에 의해

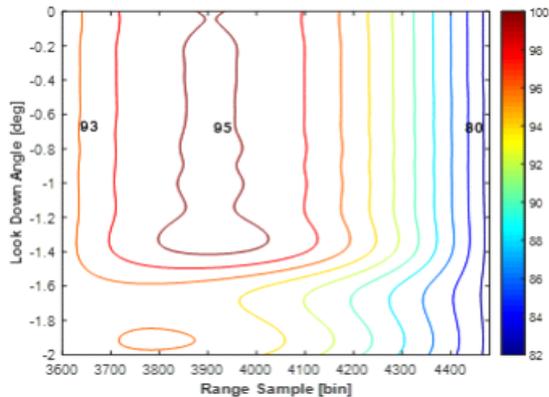
표 1. 탐지확률 결과 요약

Table 1. Summary of result of detection probability.

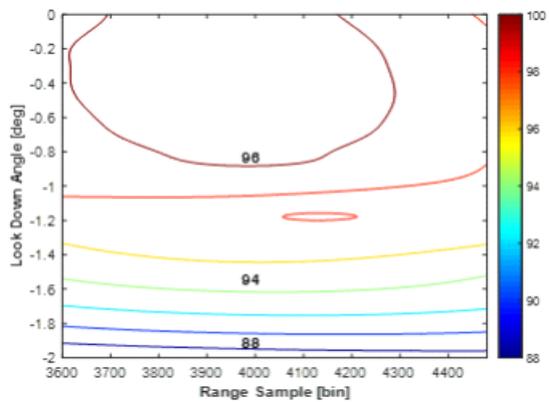
Look down angle [deg]	Pd [%]								
	Altitude [ft]			Altitude ×2 [ft]			Altitude ×4 [ft]		
	3,600 [bin]	4,120 [bin]	4,480 [bin]	3,600 [bin]	4,120 [bin]	4,480 [bin]	3,600 [bin]	4,120 [bin]	4,480 [bin]
0	92.7	95.4	79.1	95.5	96.2	93.7	98.1	97	93.8
-0.1	92.7	95.4	79.1	95.7	96.4	94.1	98.6	97.5	94.2
-0.2	92.8	95.5	79.1	95.9	96.6	94.3	99	97.8	94.6
-0.3	92.8	95.5	79.1	95.9	96.7	94.4	99.4	98.1	94.9
-0.4	92.8	95.5	79.1	95.9	96.7	94.6	99.7	98.3	95.1
-0.5	92.8	95.5	79.2	95.8	96.7	94.6	99.9	98.5	95.3
-0.6	92.8	95.5	79.2	95.6	96.6	94.5	100	98.5	95.4
-0.7	92.9	95.5	79.2	95.4	96.4	94.4	100	98.6	95.4
-0.8	92.8	95.6	79.2	95.1	96.1	94.2	100	98.5	95.3
-0.9	92.9	95.5	79.2	94.7	95.7	93.9	99.9	98.4	95.2
-1.0	92.9	95.6	79.2	94.3	94.3	93.6	99.7	98.2	94.4
-1.2	92.9	95.6	79.3	93.1	94	93.6	99.2	97.6	94.4
-1.4	93	95.6	79.3	91.4	92.4	91.2	98.3	96.7	93.5
-1.6	93	90.3	79.3	89.3	90.2	89.3	97.1	95.4	92.3
-1.8	93	90.2	79.4	86.3	87.2	86.8	95.4	93.8	90.7
-2.0	93	90.2	79.4	82	82.9	83.2	93.3	91.6	88.2

결정된다. 특히 운용환경에 해당하는 레이더 고도는 원거리 탐지성능에 영향을 준다. 고도가 높을수록 대기 환경에 의한 영향성과 주변 지형에 의한 다중경로 손실이 줄어 좀 더 원활한 전파환경을 가진다. 또한 높은 고도에서 레이더를 운용하면 빔의 조향각을 변경하여 원거리 탐지 성능을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 위상 배열 안테나를 사용하는 레이더와 운용 환경을 반영한 APM 모델을 이용하여 레이더 고도 및 빔 조향각에 따른 탐지 성능 변화에 관하여 분석하였다. 그 결과, 높은 고도일수록 원거리에서 탐지확률이 약 3~14 % 증가하였다. 또한 조향각 변경에 따라 탐지확률이 약 0.4~2 % 증가한 것을 볼 수 있었다. 이를 통해 레이더 위치 선정 시 고도가 높을수록 레이더 성능에 있어서 유리한 환경을 증명하였다.

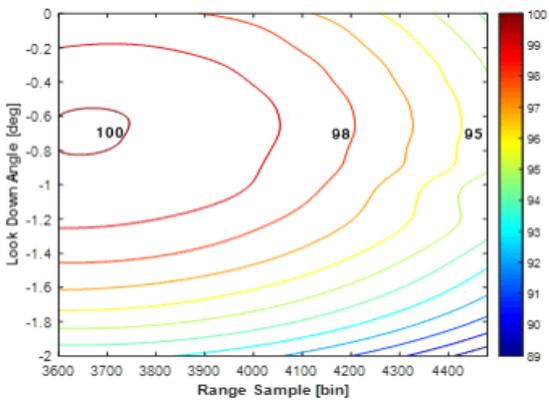
M&S 기법을 통해 개발 전 레이더 설계 변수에 따른 성능 예측뿐만 아니라, 설치 장소에 따른 예측으로 위험요소를 감소할 수 있다. 또한 기존 설치된 레이더의 변화에



(a) 기준 고도
(a) Standard altitude



(b) 기준 고도 $\times 2$
(b) Standard altitude $\times 2$



(c) 기준 고도 $\times 4$
(c) Standard altitude $\times 4$

그림 7. 고도별 탐지확률 분포
Fig. 7. Distribution of detection probability as altitude of radar.

따라 탐지성능을 예측하여 비용과 성능 변화량을 비교 분석하여 변경에 대한 타당성 분석에 참고할 수 있다.

References

- [1] I. S. Jeon, H. S. Yoo, and S. T. Chung, "Performance analysis and improvement of TWTA for surveillance radar using modeling & simulation," *Journal of Korean Institute of Information Technology*, vol. 14, no. 4, pp. 25-35, Apr. 2016.
- [2] M. H. Park, H. S. Kim, W. J. Jeon, S. K. You, S. W. Kwon, and K. W. Lee, et al., "Development of modeling & simulation tool for long range radar considering operational environment in time domain," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 7, pp. 591-602, Jul. 2019.
- [3] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed. New York, NY, McGraw-Hill, 2008.
- [4] H. W. Moon, M. H. Jeon, W. J. Kim, S. K. Oh, J. H. Lee, and S. W. Kwon, et al., "Development of exponential model of Korea for improved altitude estimation performance of high-altitude target at radar system," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 7, pp. 831-839, Jul. 2012.
- [5] M. A. Richards, J. A. Scheer, and W. A. Holm, *Principle of Modern Radar: Basic Principles*, Raleigh, NC, SciTECH, 2010.
- [6] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, New York, NY, McGraw-Hill, 2014.
- [7] J. V. DiFranco, W. L. Rubin, *Radar Detection*, Dedham, MA, Artech House, 1994.
- [8] A. E. Barrios, W. L. Patterson, "Advanced Propagation Model(APM) Ver. 1.3.1 Computer Software Configuration Item(CSCI) documents," Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego, CA, Tech. Doc. 3145, Aug. 2002.
- [9] A. E. Barrios, "Considerations in the development of the advanced propagation model(APM) for U.S Navy Appli-

cations," in *2003 Proceedings of the International Conference on Radar(IEEE Cat. No.03EX695)*, Adelaide, SA,

2003, pp. 77-82.

박 명 훈 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5217-0365>



2014년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
2016년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학석사)
2016년 1월~현재: LIG넥스원 SW연구소 선임연구원
[주 관심분야] 레이더, M&S, 안테나 등

김 현 승 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4021-5914>



2014년 2월: 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
2016년 2월: 인하대학교 항공우주공학과 (공학석사)
2016년 1월~현재: LIG넥스원 SW연구소 선임연구원
[주 관심분야] 항공제어, M&S, 추적 알고리즘 등

전 우 중 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3974-0631>



2010년 7월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
2016년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
2016년 1월~현재: LIG넥스원 SW연구소 선임연구원
[주 관심분야] M&S, 레이더, 제어 등

권 세 응 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8959-4452>



1999년 2월: 연세대학교 전파공학과 (공학사)
2002년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
2009년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2009년 7월~현재: LIG넥스원 레이더연구소 수석연구원

[주 관심분야] 능동위상배열레이더, 전파전파 등