JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지(J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.) Vol. 18, No. 5 : 1243~1248 May. 2014

저피탐(LPI) 레이더 탑재 플랫폼의 피탐 확률 감소에 관한 연구

박태용[1*] · 김완주[2]

A Study on Detection Probability Reduction of LPI Radar's Platform

Tae-yong Park[1*] · Wan-Ju Kim[2]

[1*]Department of Defense & Science Technology, Howon University, 64 Howondae 3gil, Gunsan-si, Jeollabuk-do, Korea
[2]Department of NCW Engineering, Ajou University, 206 World cup-ro, Suwon-si, Gyeonggi-do, Korea

요 약

일반적으로 저피탐(Low Probability of Intercept, LPI) 레이더는 펄스레이더에 비해 매우 낮은 송신출력, 높은 안테나 이득 등으로 인해 상대방의 전자전 장비(Electronic Warfare Support, ES)에 탐지될 확률이 낮다. LPI 레이더는 RCS 감소 설계와 같이 전자파에 대한 스텔스 기법의 한 종류로, 궁극적인 목적은 상대방에게 탐지되는 거리를 줄이는 것이며 RCS 값, LPI 성능 중 한 가지라도 성능이 미흡하면 적보다 먼저 탐지되게 된다. 본 논문에서는 LPI 탑재 플랫폼의 피탐 확률 감소를 위해 고려해야할 사항을 제시하였다.

ABSTRACT

In General, LPI radar's detection probability by ES equipments is lower than that of conventional pulsed radar because of very low transmitting power and high antenna gain etc. LPI radar is a kind of RF stealth technique such as RCS reduction design. Therefore the ultimate goal of LPI radar is detection probability reduction by opponent. If one of the two, RCS value or LPI radar performance is not sufficient, own platform will be found first by opponent. In this paper, some considerations are suggested for detection probability reduction.

키워드 : 저피탐 레이더, 펄스레이더, LPI 레이더, FMCW레이더, 전자전 장비, 레이더 단면적

Key word : LPI Radar, FMCW Radar, Pulsed Radar, Electronic Warfare Support, Radar Cross Section, RCS

접수일자 : 2014. 02. 11 심사완료일자 : 2014. 03. 07 게재확정일자 : 2014. 03. 21

* **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.2014.18.5.1243 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/li-censes/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. 서 론

레이더는 송신된 전자파가 물체에 맞고 돌아오는 성질을 이용하여 표적을 탐지하는 체계이다. 레이더는 그 운용 목적에 따라 최대 탐지거리, 방위분해능, 거리분해능 등 성능이 결정되며, 요구되는 성능을 구현하기 위한 변수에는 펄스폭, 반송파의 주파수, 최대 출력, PRF, 빔폭 등이 있다. 일반적으로 레이더의 모든 변수가 동일할 경우 최대 출력을 높이면 탐지거리가 늘어나지만, 상대방의 전자전장비(Electronic Warfare Support, ES)에 의해 원거리에서 탐지될 확률 또한 높아진다. 현대전에서는 적보다 먼저 적을 발견하는 것도 중요하지만 적에게 먼저 발견되지 않는 것도 중요하며, 이러한 이유로 함정에 다양한 능동/수동 스텔스 기술이 적용되고 있다. 함정에서는 적에게 탐지될 수 있는 능동 신호를 방사하는데, 이러한 능동 신호에는 음향, 배기가스 등 화학물질, 통신신호, 레이더 전자파, 피아식별기(IFF) 전자파, 적외선(IR), 레이저, 자외선(UV) 등 플랫폼에서 방사되는 모든 신호가 포함된다[1]. 이 중 LPI 레이더는 전자파(RF) 스텔스의 한 형태로서, 방사하는 RF 출력을 매우 낮게 하고 특수한 파형을 사용함으로써 상대방에게 RF 신호가 감지되지 않도록 하는 방법이다[1]. 플랫폼의 RCS를 줄이는 것은 수동적인 방법의 RF 스텔스 기법이라면 LPI 레이더는 능동적인 방법의 RF 스텔스 기법이다. LPI 레이더는 그 목적상 주로 특수작전용 함정, 잠수함 등 은밀성이 최우선시 되는 플랫폼에 설치된다. 그런데 플랫폼의 RCS값이 커서 LPI 레이더가 ES 장비에 의해 피탐되는 것 보다 먼 곳에서 피탐되거나 RCS 값은 충분히 작으나 LPI 레이더가 ES 장비에 의해 멀리서 피탐되는 경우가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 LPI 레이더의 개념에 대해 기술하고, LPI 레이더를 탑재한 플랫폼의 피탐 확률을 줄이기 위해 고려해야하는 사항을 제시하였다.

본 논문에서 다루는 레이더 관련 용어의 약어는 다음과 같다.

- BW(Beam Width): (레이더 파의) 빔폭
- CW(Continuous Wave) 레이더: 연속파 레이더
- ES(Electronic warfare Support): 전자전 지원
- FMCW(Frequency Modulation Continuous Wave) 레이더: 주파수변조 연속파 레이더
- IFF(Identification Friend or Foe): 피아식별기
- LPI(Low Probability of Intercept) 레이더: 저피탐 레이더
- RCS(Radar Cross Section): 레이더 단면적
- RF(Radio Frequency): (레이더의) 반송파 주파수
- PRF(Pulse Repetition Frequency): 펄스 반복 주파수
- PW(Pulse Width): (레이더 파의) 펄스폭

Ⅱ. LPI 레이더 및 RCS 개념

2.1. 펄스레이더(Pulsed Radar)

펄스레이더는 일정기간 동안 전자파를 송신하고, 일정기간 동안 반사파를 수신하는 동작을 반복한다. 탐지 및 추적에 사용되는 레이더는 주로 펄스레이더이다. 펄스레이더의 성능을 결정하는 주요 변수(parameter)는 다음과 같다.

- 펄스폭(PW) : 거리 분해능, 최소 탐지거리
- 반송파 주파수(RF) : 전자파의 전파(propagation) 특성
- 펄스반복주파수(PRF) : 모호성 없는 최대 탐지 거리 (Maximum Unambiguous Range)
- 빔폭(BW) : 방위 분해능
- 최대 출력 : 최대 탐지거리

그 외 레이더의 탐지거리를 결정하는데 중요한 변수로 Duty Cycle이 있는데, 이는 펄스의 송수신 주기 동안 송신펄스가 차지하는 비율로 Duty Cycle이 크면 평균 전력이 높아진다. 장거리 탐지를 위해서는 Duty Cycle을 크게 하면 최대 출력을 높이지 않고 평균 출력을 높일 수 있으나 넓어진 펄스 폭 때문에 거리 분해능이 떨어지게 되고, 거리 분해능 향상을 위해 펄스폭을 작게 하면 Duty Cycle이 작아지므로 최대 출력을 높여야 하는 트레이드오프(trade off) 관계가 존재한다. 높은 Duty Cycle로 평균출력을 높이면서 거리 분해능을 높이기 위해 펄스 압축 기법을 사용하기도 한다.

2.2. LPI 레이더

레이더는 송신한 전파가 표적에 맞고 돌아오는 시간을 측정하는 반면 전자전장비는 상대 레이더에서 송신된 전파를 일방적으로 수신하기 때문에 일반적으로 레이더보다 전자전장비의 탐지 거리가 더 길다[2]. 레이더에 수신되는 전자파의 전력과 전자전장비에 수신되는 레이더 전자파의 전력은 식(1), 식(2)와 같다[1].

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

$$P_R^{ESM} = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 R_{ESM}^2} \quad (2)$$

여기서, P_T는 송신 출력, G_T는 레이더 안테나 이득, P_R^{RDR}은 레이더에서 수신되는 전력, P_R^{ESM}은 전자전장비에서 수신되는 전력, λ는 레이더 전자파의 파장, σ_t는 표적의 RCS, G_R은 전자전장비 안테나 이득, R_{RDR}은 레이더 탐지거리, R_{ESM}은 전자전장비의 탐지거리이다. 식 (1)과 (2)에서 레이더와 전자전장비의 경로 손실은 각각 $1/R_{RDR}^4$과 $1/R_{ESM}^2$로, 모든 조건이 동일하다면 전자전장비의 탐지거리가 길다는 것을 알 수 있다.

식(1), 식(2)를 이용하여 레이더 방정식 및 전자전장비 탐지거리를 구할 수 있다.

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

$$R_{ESM} = \sqrt{\frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 P_R^{ESM}}} \quad (4)$$

LPI 레이더는 전자전장비에 의해 피탐되는 확률을 줄이면서 탐지거리를 보장하기 위해 송신출력, 파형, 안테나 특성, 송신 주파수, 수신감도, 시스템 내 처리이득 등을 결정한다[1].

광대역의 CW파를 이용하여 낮은 출력으로도 펄스레이더가 수십 kW의 최대출력을 보내는 것과 같은 에너지를 송신하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다[3]. CW 레이더 자체로는 표적의 거리 측정을 할 수 없지만 CW 송신 주파수를 선형 또는 비선형으로 변조함으로써 표적의 거리와 속도를 파악할 수 있다[4]. FMCW 레이더 송·수신 파형은 그림 1과 같다[5].

펄스레이더의 경우 Duty Cycle이 매우 낮기 때문에 원거리 탐지를 위해 평균 출력을 높이기 위해서는 최대출력을 높여야 하지만 FMCW 레이더는 Duty Cycle이 100%, 즉 최대 출력과 평균 출력이 같으므로 출력을 매우 낮게 할 수 있다.

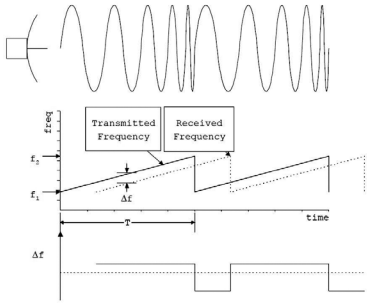

그림 1. FMCW 레이더의 송·수신 파형
Fig. 1 Transmitting/Receiving Waveform of FMCW Radar

일반적으로 마그네트론 발진기를 사용하는 레이더의 Duty Cycle은 1~10% 이다[6]. 예를 들어 최대출력이 20kW, Duty Cycle이 5%인 펄스레이더의 평균출력은 1kW에 불과하나 FMCW 레이더는 최대 출력이 곧 평균출력인 1kW가 된다. 이를 그림으로 간단히 표현하면 그림 2와 같다[7]. 실제 네덜란드 탈레스사에서 생산하는 수상함용 LPI 레이더인 SURFACE SCOUT 레이더의 송신출력은 10mW~5W에 불과하다[8].

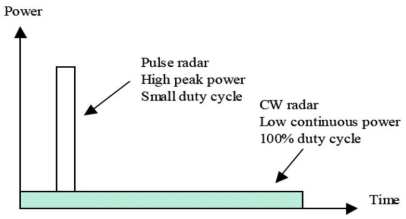

그림 2. FMCW 레이더와 펄스레이더의 출력 특성 비교
Fig. 2 Power Characteristic of FMCW vs. Pulse Radar

LPI 레이더 안테나는 좁은 메인빔폭과 낮은 사이드로브 특성을 갖도록 설계하고 고속으로 스캐닝함으로써 상대측 전자전장비에 메인빔이 머무르는 시간을 줄여 피탐확률을 줄인다[2].

근거리용 LPI 레이더의 경우 산소와 수분입자에 의한 감쇄가 매우 큰 주파수를 의도적으로 사용해서 상대방 전자전장비에 의한 피탐 확률을 줄이기도 한다. 주파수별 대기에 의한 감쇄율은 그림3과 같다[1].

또한 일반적인 전자전장비의 주파수 대역인 0.5~20GHz 대역을 피해서 LPI 레이더 주파수로 사용할 수도 있다[7].

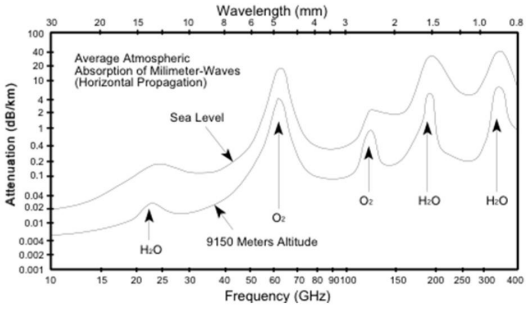

그림 3. 주파수별 대기에 의한 감쇄율
Fig. 3 Atmospheric Attenuation vs. Frequency

이 외에도 펄스레이더에 비해 높은 수신감도, 일정하지 않은 안테나 스캔 패턴 등 전자전장비에 의해 피탐되는 확률을 줄이기 위한 다양한 변수가 있다.

2.3. 레이더 탐지거리와 RCS

식(3)에서 수신되는 신호 전력 P_R^{RDR}이 레이더가 처리할 수 있는 임계치, 즉 레이더의 수신감도일 경우 R_{RDR}은 레이더 최대 탐지거리가 된다.

RCS란 상대방의 레이더에서 송신된 전자파가 플랫폼의해 재 방사 된 값인데, 플랫폼의 크기, 형상, 제질, 레이더 주파수, 편파 등에 의해 그 값이 변한다. 일반적으로 RF 스텔스는 플랫폼의 RCS 값을 줄이는 것을 뜻한다. RCS에 따른 레이더 탐지거리는 $[RCS]^{1/4}$의 비율로 변한다. 즉 플랫폼의 RCS를 1/16로 줄여야 피탐거리가 1/2로 줄어든다는 뜻이다. 플랫폼의 RCS를 줄이기 위해 다양한 스텔스 기술을 적용하고 있으며 가장 대표적이고 효율적인 방법은 형상 통제에 의한 것이다.RCS를 줄이는 대표적인 스텔스 기법은 다음과 같다[6].

- 형상변경 : 금속제질의 물체는 특정한 방향으로 전자파를 재 방사하므로 산란되는 에너지를 레이더와 다른 방향으로 방사되도록 변경하는 방법.
- 전파흡수체(RAM) 도포 : 전자파를 흡수하는 물질을 금속 표면에 도포하여 반사되는 에너지를 줄이는 방법.
- 비금속성 제질 사용 : 금속에 비해 전자파의 재 방사가 적은 비전도성 제질을 사용함으로써 반사되는 전자파를 줄이는 방법.

Ⅲ. 레이더와 ES에 의한 피탐거리 분석

PILOT MK2 레이더는 함정 탑재용 FMCW 방식의 LPI 레이더이다. PILOT MK2 레이더의 탐지거리와 ES에 의한 피탐거리는 표 1과 같다[7].

표 1에서 LPI 레이더는 탐지거리가 유사한 조건에서 전자전장비에 의해 피탐되는 거리가 펄스레이더보다 현저히 짧음을 알 수 있다. 상대 플랫폼의 RCS가 100m^{2}에 10kW 출력의 펄스 레이더를 사용하고, LPI 레이더를 운용하는 플랫폼의 RCS 또한 100m^2 로 동일할 경우 LPI 레이더를 운용하는 플랫폼은 항상 상대방을 먼저 탐지하면서 상대에게는 탐지되지 않는다. 그런데 모든 조건이 동일하고 LPI 레이더를 운용하는 플랫폼의 RCS가 160m^{2}로 커지면 식(4)에 따라 상대 레이더에 의해 피탐되는 거리가 약 28.1km가 되어 항상 상대에게 먼저 노출되는 상황이 발생하게 된다.

표 1. 레이더 탐지거리와 ES 피탐거리
Table. 1 Radar Detection and ES Receiver Ranges

레이더 출력	레이더 탐지거리	ES 피탐거리
	RCS 100m^2	수신감도 -60dBmi
PILOT MK2		
1W	28 km	2.5 km
0.1W	16 km	0.8 km
10mW	9 km	0.25 km
1mW	5 km	0 km
Conventional Pulsed 10kW Radar	25 km	250 km

LPI 레이더 탑재 플랫폼의 RCS를 일반적인 수상함의 RCS가 200~1,000m^{2}임을[6] 고려하고, 상대 플랫폼은 RCS가 500m^2 이고 10kW 펄스레이더를 운용할 경우를 임의로 가정하였을 때 LPI 레이더 탑재 플랫폼의 RCS 값과 LPI 레이더의 출력 변화에 따른 상대 레이더에 의한 피탐거리, 상대 전자전장비에 의한 피탐거리, LPI 레이더의 탐지거리를 식(3), 식(4)를 이용하여 구하면 표 2와 같다.

표 2. RCS와 출력에 따른 피탐거리와 탐지거리
Table. 2 Detected / Detection Ranges via RCS and Power

플랫폼 RCS (m^2)	레이더 피탐거리 (km)	LPI 레이더 출력 (W)	ES 피탐 거리 (km)	LPI레이더 탐지거리(km) ※RCS 500m^2
200	29.7	1	2.5	41.9
300	32.9	1.5	3.1	46.4
400	35.4	2	3.5	49.8
500	37.4	2.5	4.0	52.7
600	39.1	3	4.3	55.1
700	40.7	3.5	4.7	57.3
800	42.0	4	5.0	59.3
900	43.3	4.5	5.3	61.0
1,000	44.5	5	5.6	62.7

표 2에서 LPI 레이더 플랫폼의 RCS가 800m^2일 때 상대 레이더에 의한 피탐거리는 42km 이고, LPI 레이더 출력이 1W일 경우 상대 전자전장비에 의한 피탐거리는 2.5km에 불과하나 상대를 탐지할 수 있는 거리는 41.9km가 되어 상대 레이더에 의해 먼저 발견됨을 알 수 있다. 이러한 경우 플랫폼의 RCS를 800m^2 미만이 되도록 통제하거나 LPI 레이더의 출력을 더 높여서 탐지거리를 늘려야 상대에게 먼저 발견되지 않는다. 다만 LPI 레이더의 송신 신호가 상대측 전자전장비에 탐지되지 않도록 레이더 탐지거리와 송신출력을 복합적으로 고려하여야 한다.

그림 4의 왼쪽은 RCS 감소를 고려하지 않은 형상이고, 그림 4의 오른쪽은 RCS 감소를 위해 측면각을 10도 경사지게 만든 형상으로, 각각 길이 30미터, 폭 10미터, 높이 5미터의 단순화한 수상함으로 가정하였다.

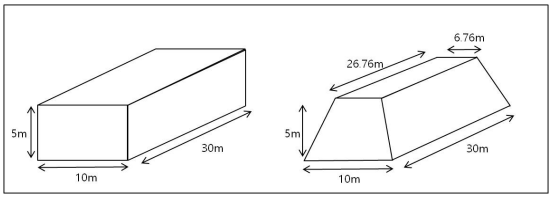

그림 4. 단순화한 수상함 모델
Fig. 4 Simplified Surface Ship Model

10GHz에서 두 형상의 RCS 패턴을 PO(Physical Optics, 물리광학) 기법으로 계산 및 비교한 결과는 그림 5와 같다.

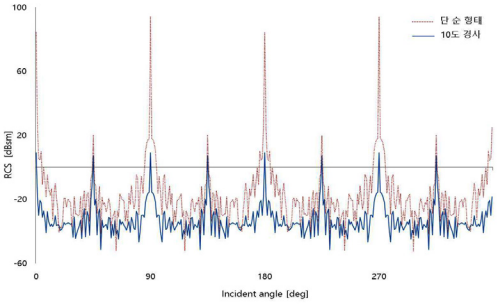

그림 5. 단순화한 수상함의 RCS 패턴
Fig. 5 RCS Patterns of Simplified Surface Ship

상기 두 형상에 대한 각각의 RCS 최대값, RCS 평균값 및 표 1에서 적용한 10kW 펄스레이더에 의한 피탐거리는 표 3과 같다. 이 때 레이더에 의한 피탐거리는 PRF에 의한 거리 모호성은 고려되지 않은, 식(3)에 의해 계산된 레이더 최대 탐지거리이다.

표 3. RCS에 따른 레이더 피탐거리
Table. 3 Detected Ranges via RCS

구 분		단순 형태	10도 경사
최대 RCS(m^2) ※양 현측(90도/180도)		314,050,869	7.956
평균 RCS(m^2)		36.3	0.00052
피탐거리 (km)	최대	1,052.4	13.3
	평균	19.4	1.2

표 3에서 RCS 감소를 고려하지 않은 모델의 경우 상대 레이더에 의해 원거리에서 피탐될 확률이 높고, 특히 양 현측에서는 레이더 최대 탐지거리에서 항상 피탐될 확률이 매우 높다는 것을 알 수 있다. 이는 LPI레이더를 탑재하는 것이 큰 의미가 없다는 것을 의미한다. 반면 동일한 크기의 형상이라도 측면각에 10도의 경사를 주는 스텔스 기법을 적용하여 RCS를 줄일 경우 레이더에 의한 피탐확률이 획기적으로 감소하여 평균 피탐거리가 1.2km에 불과하게 된다. 만일 본 플랫폼에 표 2에서 기술한 1W 출력의 LPI 레이더를 탑재하였다면 상대 레이더에 의한 피탐거리가 상대 ES에 의해 피탐되는 거리인 2.5km 보다 짧아지므로 매우 은밀한 작전을 수행할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 LPI 레이더를 탑재한 플랫폼이 “피탐거리 감소”라는 궁극적인 목적을 달성하기 위해서는 플랫폼의 RCS 값이 작아져야함을 알 수 있다.

Ⅳ. 결 론

군사작전을 수행함에 있어서 상대를 먼저 발견하는 것은 성공적인 작전을 위한 필수 조건이다. 해군 작전을 수행하는 함정은 상대에게 발견되는 확률을 줄이기 위해 설계단계에서부터 RCS, IR, 수중방사소음 등 다양한 특수성능을 고려하고 있다. LPI 레이더는 RF 스텔스의 일종으로, 상대측 전자전장비에 의한 피탐 확률을 줄이기 위해 사용되며 침투작전용 함정이나 잠수함 등 특수목적 함정에 사용되는 경우가 많다. 본문에서 기술한 데이터에서 LPI 레이더가 전자전장비에 의해 피탐되는 확률은 유사 성능의 펄스레이더에 비해 비약적으로 낮다는 것을 알 수 있다. 그러나 LPI 레이더가 탑재되었더라도 플랫폼의 RCS가 클 경우 상대 레이더에 의해 피탐될 확률이 커지며, 만일 자함의 LPI 레이더로 상대를 탐지하기 전에 상대의 레이더에 의해 탐지된다면 LPI 레이더를 탑재한 의미가 없게 된다. 따라서 LPI 레이더를 탑재하는 플랫폼은 자함의 RCS 특성은 물론 작전상황에서 조우해야하는 대상의 RCS 값, 레이더의 성능, 전자전장비의 성능 등을 종합적으로 고려하여 작전운용 개념을 정립하여야한다. 만일 자함의 RCS 값을 일정 수준 이하로 줄일 수 없어 상대 레이더에 의한 피탐거리를 줄일 수 없다면 LPI 레이더의 송신출력 향상 등 탐지거리를 확장하거나 전술데이터링크 등을 활용하여 항상 상대방의 존재를 먼저 파악할 수 있는 조치를 강구하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 호원대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

REFERENCES

[1] Charalampos Fougias, Charalampos Menychtas, *Netted LPI Radars, Monterey,* CA: Naval Postgraduate School, pp.7-8, pp.10-28, 2011.

[2] J.C. Toomay, Paul J. Hannen, *Radar Principles for the Non-Specialist*, 3rd ed. Edison, NJ: Scitech Publishing, p.155, p.157, 2004.

[3] Fernando L. Taboada, *Detection and Classification of Low Probability of Intercept Radar Signals Using Parallel Filter Arrays and Higher Order Statistics*, Monterey, CA: Naval Postgraduate School, pp.3-5, 2002.

[4] Merrill I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd ed. New York, NY: McGraw Hill, pp.193-197, 2001.

[5] David R. Frieden, *Principles of Naval Weapon Systems*, Annapolis, Maryland: Naval Institute Press, pp.104-105, 1985.

[6] G. Richard Curry, *Radar Essentials,* Raleigh, NC: Scitech Publishing, p.21, p.31, p.36, 2012.

[7] Aytug Denk, *Detection and Jamming Low Probability of Intercept(LPI) Radars*, Monterey, CA: Naval Postgraduate School, p.8, p.10, p.53, 2006.

[8] *SURFACE SCOUT Maritime LPI Surveillance Radar datasheet*, Thales Nederland, www.thalesgroup.com/surfacescout

박태용(Tae-Yong Park)

호원대학교 국방기술학부 교수
※관심분야 : 해군 무기체계, 지휘통제체계, 레이더

김완주(Wan-Ju Kim)

아주대학교 NCW공학과 박사과정
※관심분야 : 사이버전, 국방전술통신, 정보보호