

고효율 GaN을 적용한 TRM 및 레이더의 국내 개발현황

진형석·김정환

LIG넥스원 ISR연구센터

I. 개요

최근 레이더의 형태가 수동배열에서 능동배열 형태로 발전하면서 전력증폭기의 형태가 진공소자에서 반도체 소자로 바뀌고 있다. 기존의 수동배열에서는 TWTA, 마크네트론 등의 단일 송신기를 사용했다면, 능동배열에서는 위상과 이득이 함께 변할 수 있는 고출력증폭기인 SSPA(Solid State Power Amp)나 TRM(Transmitter Receiver Module)을 수십 개에서 수천 개를 배열하여 공간 합성을 통해 높은 출력 전력을 얻는다^[1].

이와 같이 반도체 소자 기술을 사용한 전력증폭기는 진공소자에 비해 낮은 동작 전압과 우수한 MTBF(Mean Time Between Failure), 소형화 및 경량화 등 많은 장점을 가지고 있다^[2]. 특히, 반도체 소자 중 GaN 기반의 고출력 전력증폭기에 대한 관심이 높아지고 있는데, GaN은 Wide Band Gap 특성으로 인해 높은 항복전압을 가지고 있어 높은 출력과 고효율의 장점을 가질 수 있으며, 또한 높은 열전달 계수를 가지고 있어 방열에 있어서도 유리한 점을 가지고 있어 GaN 소자를 이용하여 고출력과 고효율을 갖는 반도체 전력증폭기 구현이 가능하게 되었으며^{[3]~[5]}, 최근의 능동위상배열 레이더에서 고출력과 고효율을 갖는 반도체 전력증폭기에 대한 관심과 수요가 점차로 커지고 있다. 고출력은 레이더 탐지능력의 주요 요소이며, 고효율은 방열능력과 소모 전력에 큰 영향을 미치는 요소로서 레이더 무게를 경량화하는 결정 요소로 작용한다. 이와 같이 GaN 소자를 적용한 레이더 송신기는 진공관 송신기에 비해 출력전력 및 효율 개선을 통한 소형, 경량화, 고신뢰성의 제품 구현을 가능케 하였으며, 무기체계별 임무와 비용 등을 고려하여 적절한 형태로 개발되고 있는 상황을 [그림 1]에서 알 수 있다.

본 논문에서는 레이더의 일반 및 기술발전 추세를 먼저 살펴보고, 능동위상배열 레이더의 동작원리에서 최근에 GaN 소자를 널리 사용하게 되는 배경을 설명한 후, 능동위상배열



[그림 1] 레이더 무기체계와 송신기 개발 추세

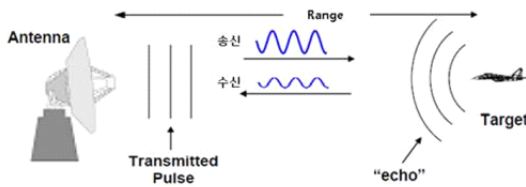
레이더의 국내 개발현황과 레이더 체계에 적용된 TR 모듈의 개발/생산현황을 소개하였다. 또한 현대전에 부합되는 레이더 개발동향에 대해 간략히 언급하고자 한다.

II. 레이더 일반 및 기술발전추세

레이더는 전자파를 방사한 후 표적에 반사되어 되돌아온 신호를 이용하여 표적을 탐지 및 추적하고, 표적의 거리, 방위각 및 고각 등의 정보를 획득하는 센서 체계이다.

레이더는 적외선 장비나 광학장비와는 달리 대기 중에서 전파손실이 상대적으로 적고 비, 안개 및 눈 등 여러 가지 기상조건에서도 상대적으로 원거리를 볼 수 있는 특징이 있기 때문에, 광범위한 영역을 감시할 수 있는 전천후 센서로 널리 활용되고 있다. 또한, 레이더 역할은 지상, 해상 및 공중 어디서나 적의 활동을 주·야간 실시간으로 감시함으로써 조기경보 및 전장 감시를 위한 정보를 수집하는 “전천후 고감도 전자눈”이라고도 한다.

레이더(RAdio Detection And Ranging)의 원리는 [그림 2]와 같이 전자파의 에너지를 방사한 후 표적으로부터 반사되어 되돌아온 신호의 지연시간을 측정하여 레이더와 표적과의 거리를 측정 ($R=(t_1-0) \times C/2$)하며, 안테나 빔의 방향으로



[그림 2] 레이더의 원리

부터 방위각과 고각의 정보를 획득한다⁶⁾.

레이더를 기능에 따라 분류하면 탐색레이더, 추적레이더 및 다기능레이더로 나누어지는데, 탐색레이더는 무기체계에 가장 기본적인 센서로, 주어진 탐지영역에 있는 표적을 탐지하여 각 표적의 위치(거리, 방위각, 고도) 및 속도정보 등을 획득한다. 탐색레이더의 주요 성능인 탐지영역은 표적의 레이더 반사단면적(RCS: Radar Cross Section)의 크기에 따라 탐지거리 및 고각의 범위가 달라지며, 방위각은 레이더의 회전으로 360도를 커버한다. 탐지레이더는 더 멀리 있는 적의 위협체 정보를 알아내기 위해서 장거리화를 추구하고 있다.

추적레이더는 미사일의 교전통제 관련 기능을 위한 레이더이며, 좁은 공간을 대상으로 지속적으로 표적 정보를 획득하여 교전통제에 활용하도록 하는 것이 목적이나, 단일 표적에 국한되기 때문에, 다중 표적과의 동시교전을 필요로 하는 전장상황에서는 다기능 레이더가 추적기능을 수행하게 되므로 추적레이더의 영역은 점차 감소할 것이다.

다기능레이더는 1대의 레이더로 탐지기능, 표적추적기능 및 미사일 유도기능 등을 통합하여 동시에 수행하는 레이더로 통용되나, 다수의 위협표적들과 동시교전을 수행할 수 있도록 빠른 주기로 표적들을 동시에 추적할 수 있으며, 필요할 때 에너지를 집중할 수 있도록 하기 위해서는 능동 위상배열 레이더 기술이 필수적이다.

왜냐하면 향후 레이더가 대처해야 할 미래 전장의 위협들은 레이더 반사면적(RCS: Radar Cross Section)이 적고, 고도가 극한으로 낮거나 높게 날며 빠르기 때문이다. 이런 미래의 대표적인 위협들은 초고속으로 비행하는 탄도탄과 스텔스 항공기라 할 수 있으며, 또한 위협들 중 유도탄들은 소형화 및 고속화뿐만 아니라, 기동력 증가 및 기동 패턴의 다양화 등 공격능력이 증대되고 있는 실정이다.

최근의 레이더들은 최신의 반도체 기술과 컴퓨터 기술의 발달로 진공관형 송신기를 반도체 송신기로 대체함으로

써 빠른 전자식 빔조향이 가능해졌으며, 다기능/다중임무 수행 및 다수 표적과의 동시교전을 수행할 수 있게 되었다. 최신의 반도체 소자를 사용한 능동위상배열 레이더는 빠른 빔조향, 빔운용의 융통성 및 다중모드 프로세싱(탐지, 추적, 유도탄 제어)의 고속화 등 많은 장점으로 현재 및 미래의 새로운 위협에 대처하는 데 필수적인 센서가 되었다.

반도체 송수신 모듈은 초고주파 집적회로(MMIC: Monolithic Microwave Integrated Circuit)화 되어 소형/경량화뿐만 아니라, 신뢰성이 높고 저전압으로 동작하며, 확장성이 용이하고, 수출통제가 완화되는 등 장점이 많아 능동위상배열 레이더의 기본이 되었다⁷⁾. 기계식이나 수동형의 전자식에 비하여 능동형 전자식은 수 백~수 천 배 이상의 기민한 빔조향 특성을 가지므로 다기능/다중임무 동시수행이 가능하며, 신뢰성 또한 우수하여 선진국들은 첨단 레이더 개발에 능동 위상배열 레이더를 적용하고 있다. 이와 같이 레이더의 개발방향은 2차원에서 3차원 레이더로, 수동위상배열에서 능동위상배열 레이더로 발전하고 있으며, 다중임무 및 다기능화로 발전하고 있다.

<표 1>에 레이더 기술발전 추세를 요약하였다.

Ⅲ. 능동위상배열 레이더 동작 원리

레이더에서 사용되는 위상배열은 [그림 3]과 같이 여러

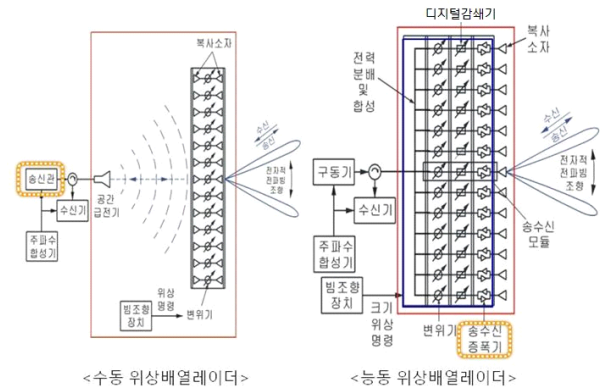
<표 1> 레이더의 기술발전 추세

분 야	레이더 주요 기술 변화
체계	<ul style="list-style-type: none"> · 2차원 레이더 → 3차원 레이더 · 수동위상배열 → 능동위상배열 · 단순기능 → 다기능/다목적 레이더
안테나	<ul style="list-style-type: none"> · 기계식 빔조향 → 전자식 빔조향 · 수동위상 선배열 → 능동위상 면배열 · 단일빔 → 디지털 빔 → 다중빔
송수신기	<ul style="list-style-type: none"> · 진공관형 → 반도체 소자형 · 소형화/모듈화(MMIC화) · 초광대역/고안정 주파수 합성기
신호처리기	<ul style="list-style-type: none"> · 고속/병렬 신호처리 및 고신뢰화 · 자원관리의 최적화 · 상용보드(COTS) 사용

개의 안테나 복사소자를 통하여 공간으로 방사되는 전자파의 위상을 변위기로 조정하여 방사 빔의 모양과 지향방향을 형성하는 기술로서, 원하는 방향으로 안테나 빔을 조향하고, 원하지 않는 방향으로 안테나 빔의 복사를 억제하는 기술이다. 즉, 각 복사소자로 방사되는 전자파의 위상을 동일하게 만들면, 안테나 면의 정면방향으로 빔이 조향되고, 각 위상의 값을 적절히 조정하면 원하는 방향으로 빔이 조향되는 원리를 이용하여 전자적으로 안테나의 빔 조향을 제어할 수 있도록 개발된 것이 위상배열 레이다이다.

위상배열 레이다는 다수의 표적을 빠른 주기로 동시에 추적할 수 있으며, 필요할 때 에너지를 집중할 수 있다. 전자적 빔조향을 이용하여 표적의 출현이 예상되는 방향으로 에너지를 송신할 수 있으며, 적의 재밍을 극복하기 위하여 재밍 방향으로 수신되는 에너지를 최소화할 수도 있다.

위상배열 레이다에는 [그림 4]와 같이 수동위상배열 레이다와 능동위상배열 레이다로 구분되어지며, 수동위상배열 레이다는 안테나 구성모듈 내에 신호증폭 기능이 없이 변위기와 복사소자 등으로 구성되어 있으며, 고출력의 진공관 형태(TWTA) 혹은 반도체 형태(SSPA)의 송신기로부터 전력분배 후 변위기를 통한 위상조정을 통해 전자파의 위상변화만으로 빔 조향 및 제한적인 빔폭의 변화가 가능한 레이다이다. 반면, 능동위상배열 레이다는 각각의 안테나 복사소자당 분산된 반도체 송수신 증폭기(TRM)들로 구성되어 복사소자별 자체 송신전력 증폭과 수신 처리기능을 갖고 있으며, TRM 내에 변위기와 디지털 감쇄기를 통해 전자파의 크기와 위상변화로 빔 조향 및 빔폭의 변화가 가능하다. 또한, 일부 소자의 고장에도 점진적 성능 저하(graceful degradation) 특



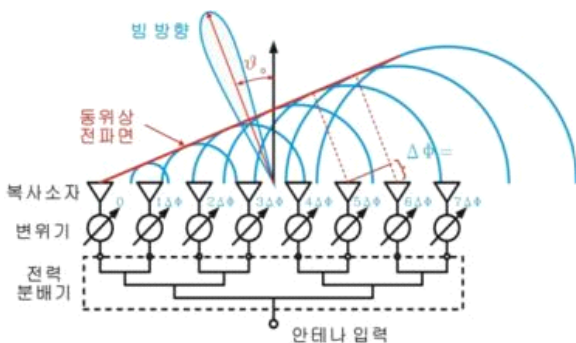
[그림 4] 수동 및 능동위상배열 레이다 구성

성을 가지므로 운용성과 가용성이 크게 증대된다.

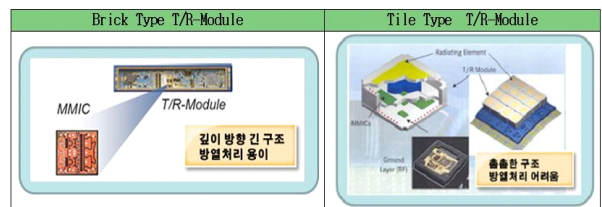
능동위상배열 레이다의 핵심 구성품인 반도체 송신기의 소자는 초창기에는 GaAs(갈륨-비소) 소자를 사용하였으나, GaN(갈륨-질소) 소자가 개발되면서 효율과 열적 신뢰성이 향상되고 있으며, GaN 기반의 칩은 GaAs 칩 대비 전력효율이 좋으므로 작은 크기에서 더 큰 출력을 낼 수 있고, 항복전압이 높아 고장율이 낮으므로 송신증폭기 등에서 폭 넓게 사용되고 있다.

반도체 송수신기(TR 모듈)는 [그림 5]와 같이 크게 브릭형과 타일형으로 분류되며, 브릭형은 각 기능별 MMIC 및 회로 등을 평면적으로 구현한 것으로 길이 방향으로 긴 구조이나 방열처리가 용이하다. 타일형은 여러 기능이 여러 층별로 나누어져 있어서 모듈의 크기를 대폭 감소시킨 촘촘한 구조이나 방열처리의 어려움이 있으므로 시스템 설계 시 체계 특성을 고려하여 적절한 방법을 선택하여야 한다¹⁸⁾.

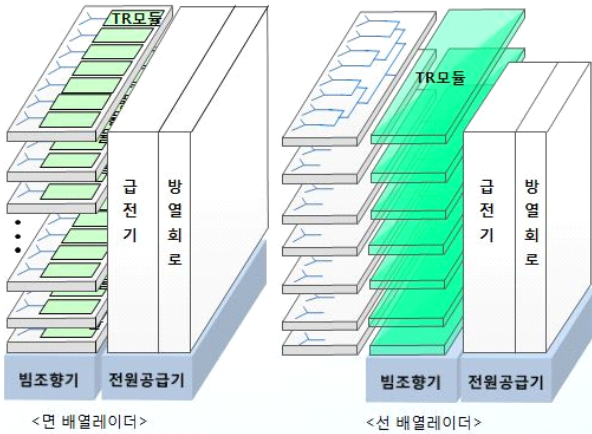
능동위상배열 레이다를 TR 모듈 장착 구성에 따라 [그림 6]과 같이 면배열 및 선배열 레이다로 구분할 수 있으며, 안테나의 복사소자마다 TR 모듈을 장착하여 복사소자별로 위



[그림 3] 위상배열 레이다의 기본원리



[그림 5] 브릭형과 타일형 T/R module 비교



[그림 6] 면배열 및 선배열 레이더 구성

상 및 이득을 조정하여 고각과 방위각 모두 자유롭게 전기적 빔조향이 가능하도록 한 것이 면배열 레이더이다. 면배열용 TR 모듈은 복사소자와 가까이 위치하고 있어 비교적 수십 W 정도의 소형화 모듈로 다수 개로 장착이 되고, 이에 반해 선배열은 N배열의 안테나 개수만큼 고각방향으로 고출력 TR 모듈이 장착되어 고각 방향으로만 빔조향이 가능하다. 선배열용 TR 모듈은 배열안테나의 각 복사소자마다 일정한 송신출력을 전달해야 하므로, 안테나의 급전회로에 대한 손실분을 감안하여 비교적 수백 W 정도의 고출력으로 설계하는 것이 면배열과 다른 점이다. 또한, 면배열은 2차원 배열구조로 방위각 및 고각의 전기적 빔조향이 가능하여 탐지 및 추적 등의 다양한 목적의 빔을 동시에 운용하는 다기능레이더에 적합한 반면에 선배열은 1차원 배열구조로 방위각 또는 고각 중 한 방향으로만 빔조향이 가능하여 보통 고각방향으로 위상배열을 하여 전기적으로 빔을 형성하고, 방위각은 회전하면서 공간을 탐색하는 탐색레이더에 적합하다.

IV. 능동위상배열 레이더 및 TRM의 국내 개발현황

1983년 민수용 항해용 레이더를 시초로 1990년대 후반까지 저고도레이더, 발칸 및 비호 레이더 등의 2차원 기계 구동식 레이더 개발을 LIG넥스원에서 개발하였으나, 10여 년 동안 국내 레이더 개발이 이루어지지 못했다. 2000년대 들어 유도탄 고속함의 탐색 레이더다로 3차원 수동위상배열 레

이더를 국과연 주관 사업으로 국내 독자개발로 시작하여 2008년에 개발 완료하였다. 2007년을 기점으로 울산 I급 탐색레이더 개발에서 처음으로 반도체 송수신기(TR 모듈)를 적용한 능동위상배열 레이더 기술을 적용하여 개발을 시작한 이후로 다양한 능동위상배열 레이더가 [그림 7]과 같이 개발되어 왔다. 국내 능동위상배열 레이더에서 사용한 주파수 대역은 <표 2>에서 보듯이 L-대역, S-대역, C-대역 및 X-대역에 이르기까지 레이더에 주로 운용되는 주파수 대역들로 개발되었으며, 초창기의 능동위상배열 레이더에서는 GaAs 소자를 적용한 TR 모듈로 개발하였고, 열적 안정성과 효율의 향상을 위하여 현재는 GaN 소자의 TR 모듈로 개발 진행되고 있다.



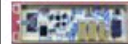



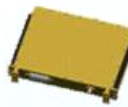
LIG넥스원에서 능동위상배열 레이더 개발을 위하여 현재까지 개발/생산된 TR 모듈은 8개 사업에서 약 8,000여개 이상이며, 탄도탄 탐지 레이더인 Green Pine 레이더에 장착된 TR모듈 약 5,000여개를 합치면 총 13,000여개 이상을 생산한 실적이 있고 TR모듈의 냉각방식은 수냉식과 공냉식이 능동위상배열 레이더 체계 특성에 따라 적절히 선택되었다.

공군저고도, 울산 I급 탐색 레이더는 실리콘 소자를 적용한 200 W 증폭기를 사용하여 개발하였고, 레이더용 반도체 송수신기와 다중모드 AESA 레이더는 GaAs/GaN 소자를 적용한 10 W 증폭기를 사용하여 개발하였다. 또한 장거리, 차극방, 항공관제, 차기 대포병 레이더 등 LIG넥스원에서 현재 업체 주관으로 개발하고 있는 레이더의 송신기는 모두 GaN 소자가 적용된 TR 모듈로서^{[9]~[11]} 출력전력을 높이기보다는 시스템 전체의 전력 효율을 극대화함으로써 시스템 구성 요소들(전원공급장치 및 방열장치)의 부담을 현저히 줄



[그림 7] LIG넥스원 레이더 개발동향

<표 2> TR 모듈 개발/생산/적용현황(LIG넥스원)

사업별 TRM 현황	공군저고도 레이더	울산 I급 탐색레이더	능동위상배열 레이더용 반도체 송수신기	다중모드 항공기용 AESA레이더	공군장거리 레이더	차기국지 방공 레이더	항공관제 레이더	차기대포병 탐지레이더
주파수	S-band	S-band	X-band	X-band	L-band	X-band	X-band	C-band
배열 형태	능동위상 선배열	능동위상 선배열	능동위상 면배열	능동위상 면배열	능동위상 선배열	능동위상 선배열	능동위상 선배열	능동위상 면배열
증폭 소자	Silicon	Silicon	GaAs	GaAs/GaN	GaN	GaN	GaN	GaN
냉각 방식	공냉	공냉	수냉	수냉	공냉	공냉	공냉	수냉
형상				 Dual 모듈				 Quad 모듈
소계 8,116개	160개	128개	256개	512개	84개	80개	432개	6,464개

이고, 소형, 경량화 및 고효율화로 개발되어 장비의 신뢰성 및 운용성을 높였다.

V. 현대전에 부합되는 레이더 개발동향

현대전에 요구되는 최신의 다기능 레이더는 표적의 탐지/추적 및 유도탄 유도 등 다기능을 수행할 뿐만 아니라, 대공방어 및 탄도탄 탐지 등의 다중임무를 수행하여야 한다. 따라서 레이더는 주어진 임무를 최적으로 수행하기 위하여 임무의 우선순위 결정, 파형 운용관리 및 할당 시간 배분 등 가진 자원을 효율적으로 관리해야 한다.

최신 레이더들의 요구사항이 레이더 운용환경 즉 전장 환경에 따라 최적화 하기 위한 자원관리 알고리즘이 유연하게 재구성되어야 함은 물론, 운용자에게 적시적으로 운용의 편의를 제공하여야 한다. 이와 같이 최신 레이더들의 임무 및 특징은 중거리 및 장거리급의 다기능 능동위상배열 레이더로 개발되고 있으며, 대공방어 및 탄도탄 방어 임무 수행은 물론, 다표적의 동시교전 수행 능력을 갖는다. 또한, 탄도

탄 방어용 다기능 능동위상배열 레이더의 운용개념은 조기경보 레이더로부터 탄도탄 표적의 큐잉정보를 받거나, 다기능 레이더가 자체적으로 위협체 방향으로 펜스를 쳐 탄도탄의 발사를 탐지하게 되면 다기능 능동위상배열 레이더로 하여금 표적을 탐지/추적 및 식별하여 지휘통제센터에 표적정보를 송신하며, 교전통제시스템에서 탄도탄의 비행궤적을 계산하여 요격용 유도탄을 발사한다. 발사된 유도탄이 비행 중에도 다기능 능동위상배열 레이더는 지속적으로 표적정보를 갱신하여 Up link를 통하여 요격 유도탄에 표적정보를 최신화 한다. 발사된 유도탄이 중고도의 대기권밖에도 도달하면 유도탄의 적외선 탐색기가 탄도탄 표적을 탐지하여 궤도를 수정하면서 운동에너지 요격기(DACS: Divert Attitude Control System)를 표적의 탄두부에 정면 충돌시켜 직격(Hit to Kill)하여 격파한다. 우리나라의 경우에는 북한의 탄도탄이 핵탄두를 탑재할 경우를 대비하여 요격 고도를 하층 방어에서 중층 혹은 고층 방어로 발전해야 되고, 요격 효과를 높이기 위해서는 탄도탄의 탄두부를 직격해야 하므로 레이더의 추적 정확도가 대단히 중요하기 때문에, 이를 위해서는 다기능 능

동위상배열 레이더가 필수적이다.

VI. 결 론

미래 전장에서 레이더의 역할은 주야간, 전천후 및 광범위한 영역에서 적의 위협정보획득 센서로서 적의 활동을 실시간으로 감시할 수 있도록 한다. 더욱이 한국이 처한 현재 및 미래 전장 환경은 최신 능동위상배열 레이더의 개발을 절실히 요구하고 있다.

북한의 탄도탄 및 장사정포 등의 위협들과 동북아 지역에 출현할 스텔스 항공기 등 무기체계의 변화에 대응하기 위해서는 미래형 반도체 소자인 GaN을 적용한 고효율 및 소형/경량화된 성능이 우수한 능동위상배열 레이더가 복합무기체계의 필수 센서이며, 다기능과 다중임무를 동시에 수행하게 될 것이다.

향후 능동위상배열 레이더는 디지털화 되고, 소프트웨어 형태로 개발되어지므로 레이더 자원(에너지, 주파수, 편파 및 파형)의 최적화 및 성능개량을 통한 확장성이 용이해질 것이다.

참 고 문 헌

[1] M. Hanczor, M. Kumar, "12-kW S-band solid state transmitter for modern radar system", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 41(12), pp. 2237-2242, 1993.
 [2] A. R. Barnes, M. T. Moore, M. B. Allenson and R. G. Davis, "A compact 6 to 18 GHz power amplifier module with 10 W output power", 1999 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Anaheim, USA, 3, pp. 959-962, Jun. 1999.

[3] U. K. Mishra, P. Parikh and Y.-F. Wu, "AlGaIn/GaN HEMTs-an overview of device operation applications", *Proc. of IEEE*, 90(6), pp. 1022-1031, Jun. 2002.
 [4] S. T. Allen, R. A. Sadler, T. S. Alcom, J. W. Palmour and C. H. Carter, "Silicon carbide MESFETs for high-power S-band application", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest 1997*, 1, pp. 57-60, Jun. 1997.
 [5] M. van Heijningen, G. C. Visser, J. Wurfl and F. E. van Vliet, "S-band AlGaIn/GaN power amplifier MMIC with 20 watt output power", *Microwave Integrated Circuit Conf.*, 2008, pp. 79-82, Oct. 2008.
 [6] I. S. Merrill, *Introduction to Radar Systems 3rd Edition*, McGraw-Hill, 2001.
 [7] C. C. Nicholas, E. B. Charles, *Principles and Applications of Millimeter-wave Radar*, Artech House, 1987.
 [8] J. Wooldridge, "Solderless interconnects for 3-D microwave packaging", *Electrical Performance of Electronic Packaging*, pp. 181-182, 1995.
 [9] 이유리, 김종필, "능동배열레이더 시스템 구현을 위한 반도체형 송수신기 설계", *한국전자과학회논문지*, 21(12), pp. 1335-1342, 2010년 12월.
 [10] 허진, 진형석, 장호기, 김보균, 조숙희, "선박 레이더용 X대역 300W급 GaN HEMT 반도체전력증폭장치 설계 및 제작", *한국전자과학회논문지*, 23(11), pp. 1239-1247, 2012년 11월.
 [11] 임재환, 진형석, 유성현, 박종선, 김태훈, 임덕희, "레이더용 X대역 GaN 반도체 송수신기 설계 및 제작", *한국전자과학회논문지*, 25(2), pp. 172-182, 2014년 2월.

≡ 필자소개 ≡

진 형 석



2000년 8월: 광운대학교 전파공학 (공학석사)
2000년 8월~현재: LIG넥스원 ISR연구센터 수
석연구원

[주 관심분야] 초고주파 능동 회로 및 송수신기
설계/ 능동 위상 배열 레이다 시스템 및 TRM

김 정 환



1976년 2월: 부산대학교 전자공학 (공학사)
1992년 8월: 충남대학교 전자공학(공학박사)
1976년 3월~2009년 9월: 국방과학연구소 책임
연구원 레이다 부장

2009년 9월~현재: LIG넥스원 ISR연구센터 연
구위원

[주 관심분야] 능동위상배열 레이다 시스템 및

TRM