

# 고장식별 기능을 갖는 추적레이다용 고주파 전환스위치 국산화 개발

안경표  
국방기술품질원

## Localization Development of RF Converting Switch with Fault Identification for Tracking Radar

Kyoung-Pyo Ahn  
Defense Agency for Technology and Quality

**요약** 본 논문은 Ku 대역 추적레이다에서 2 kW급 송신출력을 주안테나와 보조안테나 간에 전환하는 고주파 전환스위치의 국산화 개발에 관해 기술한다. 고주파 전환스위치는 저손실로 고속 스위칭을 위해 페라이트 위상변위기와 H-Plane 폴디드 Hybrid-Tee, 90° 하이브리드 커플러를 이용하여 설계했다. 고주파 전환스위치의 동작온도 범위인 -40°C~+71°C에서 페라이트 위상변위기의 성능을 일정하기 유지하기 위해 온도 보상 기능을 갖는 구동 회로카드조립체를 적용했다. 또한 기존의 수입품 고주파 전환스위치는 고장식별 기능이 없어 야전에서 고장 여부 식별이 어려웠으나, 국산화 고주파 전환스위치에는 합선, 단선에 대한 식별 기능을 추가하였고, LED 점등 여부를 통해 현장에서 동작 상태를 손쉽게 확인할 수 있도록 개선했다. 제작된 고주파 전환스위치 측정결과 Ku 대역에서 0.55 dB 이하의 삽입손실, 25.4 dB 이상의 반사손실, 32.3 dB 이상의 격리도를 얻었다. 또한 고온, 저온, 습도, 강우, 진동, 충격 등의 환경시험과 전자기적합성 시험, 2 kW Power Handling 시험결과 기준을 충족했다. 마지막으로 추적레이다 체계적합성시험 결과 기준을 충족하여 수입품 대비 동등 이상 성능임을 확인하였다.

**Abstract** This study describes a localization development of an RF converting switch, which rapidly switches a 2 kW-transmitting-power between the main and auxiliary antennas of a tracking radar. The RF converting switch is designed with a ferrite phase shifter, H-plane folded Hybrid-Tee, and a 90-degree hybrid coupler for high speed switching with low loss. To maintain the constant performance of the ferrite phase shifter in the operating temperatures of -40 to +71 degrees Celsius, a drive printed circuit assembly is adopted to the switch. It was difficult to identify the status of success or failure in the previous imported switch in the field due to the lack of a Built-In Test function. The localization development switch adds identifications of short or open circuits, and it has improved the operation of easy checking of the status of the switch in the field through an LED. The measured results show that the insertion loss is below 0.55 dB, return loss is above 25.4 dB, and the isolation is above 32.3 dB. Also, the switch passed various environmental tests, electromagnetic compatibility tests, and 2 kW-power handling tests. Finally, the performance of the switch is demonstrated by clearing the tracking radar system tests.

**Keywords** : Built In Test, Ferrite, Localization Development, Phase Shifter, RF Switch, Tracking Radar

본 논문은 방위사업청 “무기체계 핵심부품국산화 개발지원사업”의 지원을 받아 수행되었음.

\*Corresponding Author : Kyoung-Pyo Ahn(Defense Agency for Technology and Quality)

email: kpahn@dtaq.re.kr

Received September 7, 2021

Revised September 29, 2021

Accepted October 1, 2021

Published October 31, 2021

## 1. 서론

신호의 전송경로를 전환하는 RF 스위치는 주파수 대역, 취급전력, 스위칭 속도, 포트의 수 등에 따라 종류가 다양하며, 구현 방식도 PCB에 실장 하거나, 동축케이블 또는 도파관 등으로 제작이 가능하다. 사용 전력에 따라 저출력용으로는 PIN 다이오드 스위치, FET 기반 스위치, MEMS 스위치 등이 주로 사용되고, 고출력용으로는 릴레이 스위치, 솔레노이드 스위치, 그리고 페라이트 스위치 등이 사용된다. 페라이트 위상변위기는 레이더나 통신시스템의 위상배열 안테나에서 빔의 방향을 원하는 방향으로 조향하는 역할을 하며, RF 스위치로도 사용되고 있다[1-5].

추적레이더는 표적의 상황에 따라 송신출력을 빔폭이 넓은 안테나와 좁은 안테나로 번갈아가며 송신하는 경우도 있는데, 이를 위해서는 고출력 송신 중에 고속으로 동작하면서 삽입손실이 우수하고 무접점 방식으로 동작하는 고주파 전환스위치가 요구된다. 페라이트 위상변위기는 RF 대역에서 스위칭 시간이 빠르며 구조도 간단하여 제작이 용이하다는 장점이 있어 비교적 고출력인 고주파 전환스위치에 적합하다.

추적레이더용 고주파 전환스witch는 그동안 해외 수입품에 의존하여 단가 상승 및 납기 장기간 소요, 단종 우려, 기술지원의 어려움이 존재해 왔다. 본 연구에서는 첨두전력 2 kW 급의 Ku 대역 고주파 전환스위치를 페라이트 변위기를 이용해 국산화 개발함으로써(개발업체 : (주)극동통신) 조달기간 단축과 단종 및 가격상승 등의 문제점에 대비하고 신속한 정비 및 현장 기술지원이 가능하도록 하였다. 또한 수입품 고주파 전환스위치의 경우 정상 동작 여부를 단독으로 확인하는 기능이 없어 야전 부대에서 고장 여부 식별에 어려움이 있었으나, 본 연구에서는 고장식별 기능을 추가하여 이러한 문제점을 해결하고자 하였다.

고주파 전환스위치의 연구방법은 시제품 제작까지는 체계공학(System Engineering) 절차에 따라 요구도 분석(SRR)-기본설계(PDR)-상세설계(CDR)-시험평가 준비 검토(TRR) 순으로 진행하고, 이후에는 국방분야 부품국산화 개발절차에 따라 개발시험평가-체계적합성시험 완료 후 후속 조치의 순으로 진행되었다.

본 논문의 구성은 제1장 서론에 이어 제2장에서 고주파 전환스위치 각 구성품을 설계하고, 제3장에서 기존 수입품의 문제점을 해결하기 위한 고장식별 기능을 설계하였다. 제4장에서는 고주파 전환스위치의 시험평가 결

과를 제시하고, 제5장에서 결론을 맺었다.

## 2. 고주파 전환스위치 설계

### 2.1 고주파 전환스위치의 구조 및 동작개념

고주파 전환스witch는 추적레이더 송신기로부터 전달된 RF신호(Port 1)를 주안테나(Port 3)와 보조안테나(Port 2)로 경로를 전환시키는 장치로 그 운용 개념을 Fig. 1(a)에 나타냈다. 고주파 전환스위치의 구조는 Fig. 1(b)와 같이 H-Plane 폴디드 Hybrid-Tee, 페라이트 위상변위기, 90° 하이브리드 커플러로 구성되며, 그 외 구동 회로카드조립체와 방열판, 하우징 등이 포함된다.

고주파 전환스witch는 입력된 RF 신호의 감쇠가 거의 없이 위상만을 변화시키는 위상변위기의 특성을 이용한다. 입력단의 RF신호를 Magic-T에 의해 2개의 경로로 분리시키고, 분리된 신호의 경로에 위상변위기를 삽입하여 PWM(Pulse Width Modulation) 방식으로 펄스의 폭을 컨트롤하는 주기 제어 방법을 통해 위상값을 0°와 90° 또는 90°와 0°도로 변화시키면, 90° 하이브리드 커플러에 의해 보조안테나와 주안테나로 경로가 변화한다.

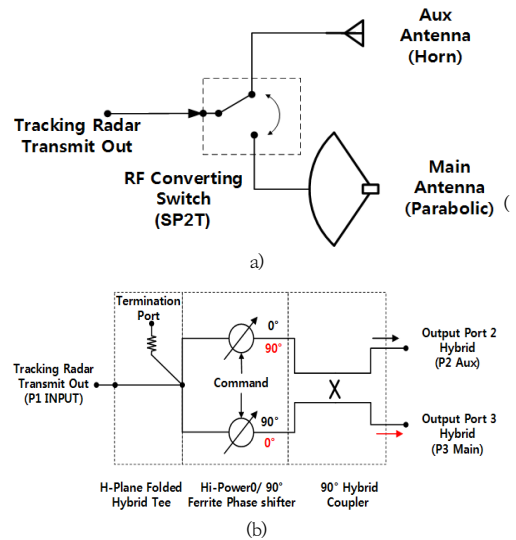


Fig. 1. (a)Operation Diagram and (b)Structure of the RF Converting Switch

### 2.2 페라이트 위상변위기

페라이트의 재질은 첨두전력과 관련된 파라미터로, 단면적이  $a \times b$ 인 페라이트 도파관 내부에 임계자계강도

(hc)가 가해졌을 때의 전력은 Eq. (1)과 같다[6].

$$P = 60ab(hc)^2, \text{ Watts} \quad (1)$$

여기서 a와 b는 각각 인치 단위의 도파관 넓이와 높이를 나타내고, hc는 Oe 단위의 임계 RF 자계강도를 나타낸다. Eq. (1)에서 2 kW 이상을 만족하면서 온도 변화에 따른 특성변화가 적은 리튬 계열의 페라이트 소재를 선정하였다. 페라이트 변위기는 소형, 경량이며 단위 길이 당 큰 변위차를 얻을 수 있고 대역 내에서 위상 변위차가 일정한 장점이 있는 트윈 페라이트 토로이드 구조를 적용했다. Fig. 2와 같이 2개의 토로이드 페라이트 사이에는 유전체 스페이서를 삽입하고, 양끝 단에는 2단 임피던스 변환기를 삽입하여 도파관과 변위기 사이의 불연속면을 정합시켰다. 0°와 90°의 경로에 Fig. 2와 같은 페라이트 위상변위기가 각각 1개씩 삽입된다.

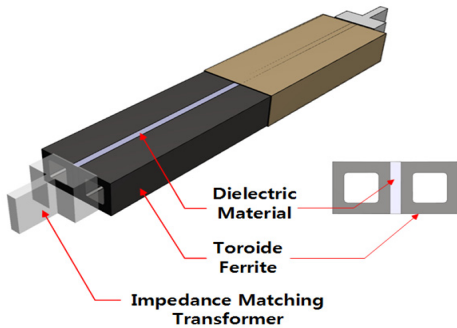


Fig. 2. Picture of Twin Toroid Ferrite Phase Shifter

### 2.3 구동 회로카드조립체

페라이트 위상변위기 설계에서 다른 중요한 고려사항은 온도 변화에 따른 위상변위기의 위상차를 제어하는 것이다. 고주파 전환스위치의 넓은 동작온도 범위(-40℃~+71℃)에서도 스위치의 분리도가 유지되어야 하는데, 구동 회로카드조립체를 통해 페라이트 위상변위기의 온도 보상을 디지털 방식으로 제어하였다. Fig. 3은 구동 회로카드조립체의 블록도이다.

서미스터 및 전류 피드백, 스위칭 피드백은 F28335의 ADC 단자로 들어오고, GPIO(General Purpose Input/ Output)를 통해서 스위칭 Command 및 Test Report를 받는다. SCI-A는 RS-422 통신을 위해 사용하며 PC와 연결한다. JTAG(Joint Test Action Group)을 통해 F28335를 프로그래밍/디버깅 할 수 있다. 구동 회로카드조립체에는 온도 보상 기능 외에도 과전류 보호를 위한 전류 피드백 센서와 고장식별(Built In Test) 기능도 포함된다.

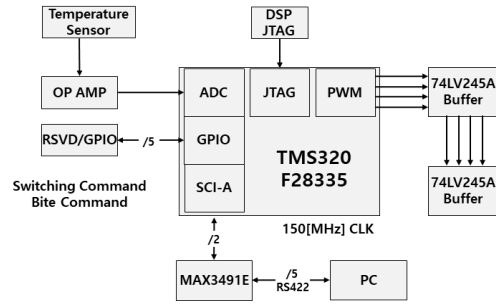


Fig. 3. Block Diagram of Drive Printed Circuit Assembly

### 2.4 FPGA 코드 설계

구동 회로카드조립체의 주요 기능에는 체제 인터페이스 연동, 펄스폭 제어기능, 온도 보상 기능, 과전류 보호 기능, 고장식별 기능이 있으며 FPGA 코드로 구현했다. Fig. 4에 FPGA 코드의 블록도를 나타냈으며, 개별 블록의 기능은 다음과 같다.

- 1) ClkGen : Xilinx에서 제공하는 IP코어(PLL)를 적용하여 내부 클럭을 생성
- 2) 위상변위기 드라이버 : 체제(추적레이다)에서 인가되는 SwitchingCmd와 LIM1, LIM2, 펄스폭을 입력으로 하여 위상변위기를 구동하기 위한 펄스(Reset1, Reset2, Set1, Set2)를 출력
- 3) 펄스폭 데이터 생성 : 전원인가와 동시에 EEPROM에 저장되어 있는 펄스폭 데이터를 FPGA 내의 RAM에 저장 후, ADC를 통해 센싱된 온도 데이터를 주사로 하여 펄스폭(Reset1, Reset2, Set1, Set2)을 출력

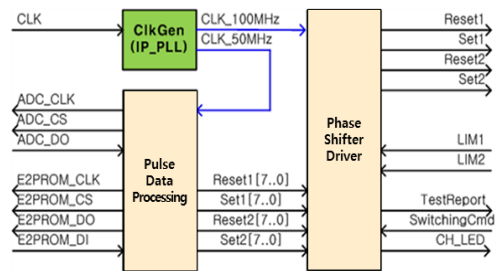


Fig. 4. Block Diagram of FPGA Code

### 2.5 도파관 구성품 및 부속 기구물

고주파 전환스위치의 도파관 구성품 및 부속 기구물의 사진을 Fig. 5에 나타냈다. H-Plane 플리드 Hybrid-Tee는 도파관으로 제작하여 입력된 신호를 동일 세기 및 동

일 위상을 갖는 2개의 신호로 분리시킨다. 전자계 Simulator Tool(CST Studio Suite[7])을 통해 삽입손실과 반사손실이 최적화되도록 설계하였고, 도파관 소자를 가공 및 브레이징 공정을 통해 제작하였다. 90° 하이브리드 커플러도 전자계 Simulator Tool을 통해 90°의 위상차, 반사손실, 삽입손실을 최적화하여 같은 방법으로 제작하였다.

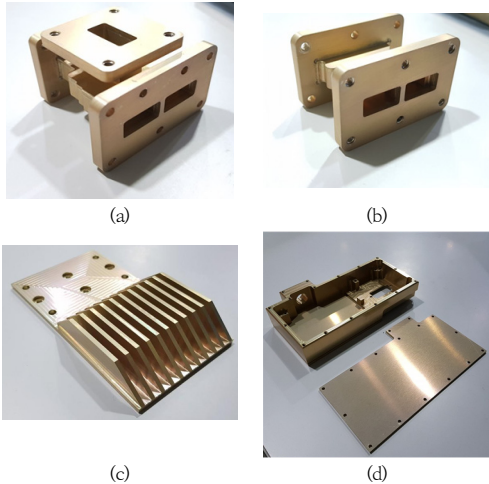


Fig. 5. Photographs of the (a)H-Plane Folded Hybrid-Tee, (b)90° Hybrid Coupler, (c)Heat Sink, (d)Housing

고주파 전환스위치의 고출력(첨두전력 2 kW, 평균전력 100 W) 동작시 발생하는 열을 외부로 방출하기 위해 방열판을 적용하였다. 또한 온도, 습도, 방수, 방습, 기계적 충격 등 외부 환경으로부터 구동 회로카드조립체를 보호하기 위해 하우징을 제작했다.

### 3. 고장식별 기능 구현

#### 3.1 기존 수입품의 문제점

기존의 수입품 고주파 전환스위치에는 정상 동작여부를 확인하는 기능이 미포함되어, 추적레이다 외에도 별도의 비콘을 준비해서 시험을 통해 확인이 가능했다. 비콘에서 펄스 신호를 발사하여 추적레이다의 주안테나와 보조안테나에서 수신되는 신호를 통해 정상 동작 여부를 확인할 수 있는데, 이동형 비콘은 소수의 정비 부대에서만 보유하고 있는 장비로 그동안 야전에서의 원활한 정비가 제한되었다.

#### 3.2 고장식별 기능 설계

고주파 전환스witch는 대부분 도파관과 같은 금속 기구물이나 페라이트로 구성되어 구동 회로카드조립체에서 가장 많은 고장이 발생한다. 고주파 전환스위치의 자체 고장식별 기능은 신호선의 단선 또는 합선이 발생했을 때 고장을 판별하는 기능으로 하우징에 LED 창을 만들어 정상 동작시에는 LED가 점등되고, Reset1/Set1/Reset2/Set2 중에서 어느 하나라도 단선 또는 합선시 LED가 소등되어 고장 여부를 손쉽게 확인할 수 있도록 하였다.

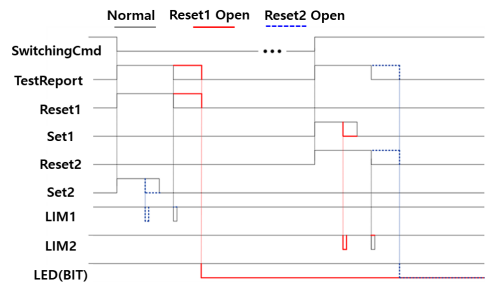


Fig. 6. Timing Diagram of Fault Indication

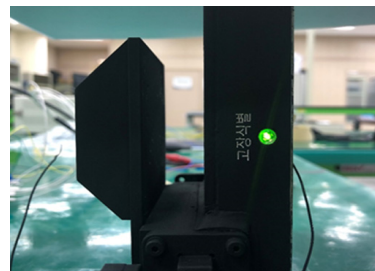


Fig. 7. Status of Fault Indication(LED : ON)

Fig. 6에 Reset1 또는 Reset2 단선시의 타이밍도 다이어그램을, Fig. 7에 정상 동작시의 LED 점등 상태를 나타냈다. 최종 시제품에는 흑색 폴리우레탄 페인트를 도포했다.

### 4. 고주파 전환스위치 시험평가

#### 4.1 개발시험평가

국산화 개발된 고주파 전환스위치 시제품의 기술적 개발 목표의 충족 여부를 확인하기 위해 시험평가를 수행

했다. 개발시험평가는 개발품 자체에 대한 시험으로 기본성능시험, 환경시험, 전자기적합성시험, 취급전력 시험으로 구분된다. 기계적·전기적 성능을 확인하는 기본성능시험의 대표적인 결과를 Table 1에 나타냈다.

Table 1. Measured Results of the RF Converting Switch

Item	Specifications	Results
Size(mm)	154.4×156.0×82.0	Pass
Weight	Below 1.1 kg	963 g
Frequency	Ku band	Pass
Insertion Loss	Ports 2-1	0.55 dB
	Ports 3-1	0.54 dB
Return Loss	Port 2	25.4 dB
	Port 3	26.6 dB
Isolation	Ports 2-1	32.3 dB
	Ports 3-1	36.2 dB
Switching Time	Maximum 5.0 us	Pass
Operation Temperature	-40℃ ~ +71℃	Pass
BIT	LED ON	Pass

체계 운용환경에서의 정상 동작 여부를 확인하기 위해 고주파 전환스위치는 추적레이다 환경시험 규격인 MIL-STD-810E[8]와 수입품 환경 규격에 따라 고온저장, 고온작동, 저온저장, 저온작동, 습도, 강우, 충격, 진동, 염수분무 시험을 Table 2와 같이 수행하여 기준을 충족했다. 고온작동, 저온작동, 습도시험의 시험 중에는 BIT(Built In Test)를 수행하고, 염수분무 시험 후에는 외관검사를 수행했다. 각 환경시험 후에는 삼입손실, 반사손실, 격리도, 스위칭 시간, BIT를 수행하여 Table 1의 기준치를 충족했다.

Table 2. Conditions and Results of the Environmental Tests

Item	Test Condition
High Temperature Storage/operation	+23℃ ~ +71℃ for 24 hours(3 cycles/total 72 hours), BIT at +71℃ per cycle
Low Temperature Storage/operation	-40℃ ~ +23℃ for 24 hours(1 cycles), BIT at -40℃
Humidity	85% ~ 95% of relative humidity for 24 hours(10 cycles/total 240 hours), BIT at 5th cycle and 10th cycle
Rain	200 mm/hour for 40 minutes(switch off), 100 mm/hour 30 minutes(switch on)
Shock	Half sinewave shock of duration 15 ms, amplitude 25 g (18 shocks per each axis/total 54 shocks)
Vibration	5~1000 Hz of vibration with 1 grms (one hour per each axis)
Salt Fog	Exposure of 5% NaCl(24 hours) and drying(24 hours) for 2 cycles(total 96 hours), examine the corrosion

전자기적합성시험은 MIL-STD-461C[9]의 RE02, RS03 시험을 수행하여 기준을 충족했다. Power Handling 시험은 최대 침투전력 2 kW(최대 평균전력 100 W)를 고주파 전환스위치에 인가한 상태에서 정상 동작 여부를 확인하여 기준을 충족했다. Fig. 8에 이들의 시험 장면을 나타냈다.

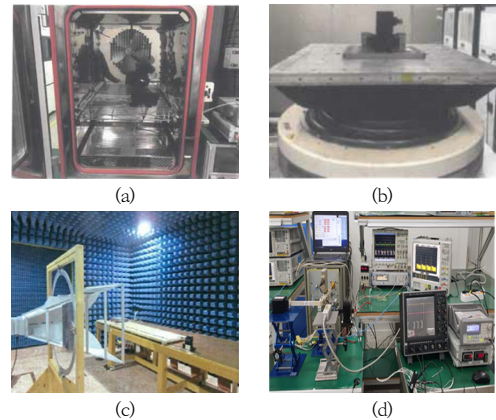


Fig. 8. Pictures of Tests (a)High/Low Temperature Tests (b)Vibration Test (c)EMC Test (d)Power Handling Test

#### 4.2 체계적합성시험

개발시험평가 완료 후 추적레이다의 고주파 전환스위치를 국산품으로 교체 장착하여 최종적으로 체계적합성시험을 통해 성능을 확인하고자 하였다. 비콘 타워와 추적레이다를 이용하여 Table 3과 같이 보조안테나 시험, 비콘 신호 사격 운용성능시험, 발전기 세트를 이용한 운용시험 등을 수행한 결과 기준을 충족하여 국산품 장착 시에도 추적레이다가 정상 동작함을 확인했다.

Table 3. Typical Test Results of the System

Item	Test condition	Results
Aux Antenna Test	Generation and inspection of remote control signals	Normal
Beacon Signal Operation Test	Display and data analysis with beacon signal discharge	Normal
	Inspection of turret control	Normal
Operation Test with Generator Set	BIT with servomechanism	Normal

## 5. 결론

본 연구에서는 그동안 해외 수입품에 의존해 왔던 고주파 전환스위치를 국산화 개발을 통해 가격상승, 단종, 납기 장기간 소요, 기술지원 애로 등의 문제점을 해결하고자 하였다. Ku 대역에서 추적레이다의 2 kW급 송신 출력을 주안테나와 보조안테나 간에 전환시키는 고주파 전환스위치의 국산화 개발을 완료했다. 저손실로 위상을 변화시킬 수 있는 페라이트 위상변위기와 H-Plane 플리드 Hybrid-Tee, 90° 하이브리드 커플러로 고주파 전환스위치를 설계했다. 또한 구동 회로카드조립체로 온도 보상 기능을 구현하여 -40℃~+71℃에서 페라이트 위상 변위기의 특성을 일정하게 유지하였고, 신호선의 합선, 단선으로 인한 고장 여부를 LED 점등 여부로 쉽게 식별할 수 있게 하였다.

제작된 고주파 전환스위치 측정결과 Ku 대역에서 삽입손실 0.55 dB 이하, 반사손실 25.4 dB 이상, 격리도 32.3 dB 이상이였으며, 환경시험, 전자기적합성 시험, Power Handling시험, 추적레이다 체계적합성 시험결과 기준을 충족했다.

본 연구의 기대효과로는 수입품과 동등 이상의 성능을 국내 기술로 확보하여 외화 지출 절감, 조달기간 단축 및 정비성을 향상시켰으며, 무엇보다도 야전부대에서 고장을 용이하게 식별할 수 있도록 BIT 기능의 고장식별 LED를 추가하여 고장 발생시 신속하게 대응할 수 있도록 개선사항을 반영했다. 또한 본 연구를 통해 확보한 기술들은 국내 Passive 방식의 위상변위기를 사용하고 있는 다기능 레이더 부품의 국산화개발 및 국내 정비능력 향상에도 활용될 것으로 기대된다.

## References

- [1] D. M. Pozar, Microwave Engineering, 2nd Ed. pp. 351-543, John Wiley & Sons, 1998.
- [2] D. S. Kim, D. C. Park, Y. H. Lee, Y. M. Kim, "Design and Implementation of Flux-Driven Waveguide Ferrite Phase Shifters", *The Proceedings of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, Vol.3, No.1, pp.3-10, June 1992.
- [3] K. O. Lee, Y. B. Kim, D. C. Park, Y. S. Shin, Y. M. Kim, "Design of Nonreciprocal Twin Toroidal Ferrite phase Shifter", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol.7, No.3, pp.43-52, March 1996.

- [4] M. G. Yun, J. D. Byun, H. Y. Lee, "Analog Ferrite Phase Shifter Using Substrate Integrated Waveguide", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol.24, No.4, pp.470-480, April 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2011.22.4.470>
- [5] Y. G. Kim, S. K. Woo, J. B. Kwon, Y. D. Kang, J. K. Park, "Development of Phase Shifter for Ka-band Passive Phase Array Seeker and Seeker Performance Analysis Due to the Phase Error of Phase Shifter", *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol.19, No.3, pp.149-155, June, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2019.19.3.149>
- [6] R. R. Kinsey, "A Peak Power Threshold Approximation for Remanent Ferrite Phase Shifters", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, p.790, Oct. 1969.
- [7] Dassault Systems, "CST Studio suite 2014," 2014. Available From: <https://www.3ds.com/ko/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [8] MIL-STD-810E Military Standard Environmental Test Method and Engineering Guidelines, Department of Defense, July 1989.
- [9] MIL-STD-461C Military Standard Electromagnetic Emission and Susceptibility Requirements for the Control of Electromagnetic Interference, Aug. 1986.

## 안 경 표(Kyoung-Pyo Ahn)

[정회원]



- 2005년 2월 : 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2009년 9월 : 일본 전기통신대학교 정보통신공학과 (공학박사)
- 2010년 9월 ~ 2012년 7월 : 한국 전자통신연구원 선임연구원
- 2012년 7월 ~ 현재 : 국방기술품질원 선임연구원

<관심분야>

초고주파공학, 전력반도체, 유도무기체계