

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.6.83>

IIBC 2017-6-11

밀리미터파대역(Ka-대역)탐색기용 고 전력 저 손실 도파관 순환기 개발에 관한 연구

A Study on Development of the High-Power Low-Loss Waveguide Circulator for Ka-band Millimeter-Wave Seeker

정채현*, 한성민**, 백종균***, 이국주***, 박창현***, 권준범***

Chae-Hyun Jung*, Sung-Min Han**, Jong-Gyun Baek***,
Kook-Joo Lee***, Chang-Hyun Park***, Jun-Beom Kwon***

요 약 본 논문에서는 유도무기용 탐색기의 송신 시 고 전력 송수신 신호 분리를 위한 Ka-대역 밀리미터파 3-포트 도파관 순환기를 설계, 제작하였으며 상온에서의 S-parameter 시험, 고 전력 시험, 운용 온도 시험을 통해 성능을 검증하였다. 탐색기 안테나와의 인터페이스 설계 및 소형, 경량화를 위한 표준 도파관 높이의 half-size 설계를 적용하였다. 전기적 성능 구현을 위해 시뮬레이션을 통한 구성 부품인 영구자석, 페라이트 최적 형상 설계 및 포트 별 튜닝 유전체 적용을 통해 성능을 최적화 하였다. 설계된 도파관 순환기는 중심 주파수 Fc 기준 $\pm 1000\text{MHz}$ 의 대역에서 -20 dB 이하 반사 손실, 0.5 dB 이하 삽입 손실, -23 dB 이하 분리도 특성을 가지며, 측정 결과는 설계 결과와 유사함을 확인하였다.

Abstract In this paper, a 3-port waveguide circulator of Ka-band millimeter-wave for isolation between transmit channel and receive channel at high power transmit mode is designed and fabricated for the seeker of the guided missile and circulator performance is verified through the S-parameter, high power and operation temperature test. At the configuration design, interface design between a seeker antenna and the circulator is considered and half-height of standard waveguide is applied for minimum and light weight body. The shape of permanent magnet and ferrite is optimized by simulation and tuning dielectrics at each port are placed for the best performance. In Fc(center frequency) $\pm 1000\text{MHz}$, designed waveguide circulator has below -20 dB return loss, below 0.5 dB insertion loss and below -23 dB isolation. It is found that circulator characteristics is similar to design results.

Key Words : Waveguide circulator, Ferrite, Millimeter-wave seeker

1. 서 론

레이다 시스템에서 전자파 신호의 송수신을 하나의 안테나로 구현하려면 송신 신호와 수신 신호를 분리하여

주는 수동소자인 순환기가 필요하다. 순환기는 송수신 신호 분리를 통해 송신 시 수신 채널로 유입되는 전력을 최소화하여 수신기를 보호하는 역할을 한다. 저 전력의 마이크로스트립 선로를 활용하는 이동 통신 시스템^{[1][2]}

*정회원, LIG 넥스원(주)

**임시회원, 글로벌엔지니어링(주)

***임시회원, LIG 넥스원(주)

접수일자: 2017년 9월 21일, 수정완료: 2017년 10월 21일

게재확정일자: 2017년 12월 8일

Received: 21 September, 2017 / Revised: 21 October, 2017 /

Accepted: 8 December, 2017

*Corresponding Author: chaehyun.jung@lignex1.com

Dept. of Seeker R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd. Korea.

의 경우 마이크로스트립 선로를 활용하여 순환기 구현이 가능하지만 표적 탐지를 위해 수백 W 급 이상의 고 전력을 사용하는 레이더 및 유도탄의 탐색기에서는 고 전력에 유리한 도파관 형태의 순환기를 구현하여 적용한다.^[3] 특히 유도탄 탐색기에 적용되는 도파관 순환기는 안테나와의 인터페이스 및 소형, 경량화를 위한 최적 형상 설계가 필수적이다. 이런 탐색기용 순환기는 기술적 난이도가 높아서 대부분 해외에서 도입하여 왔지만 밀리미터파 대역은 해외기술 통제가 심한 분야로 국내 개발 기술 확보가 필요하다. 일반적으로 유도탄 탐색기용 순환기는 대역폭 특성 확보와 형상을 최소화하기 위해 표준 도파관 높이의 half-size를 적용한다.^[4] 순환기 설계는 각 포트별 임피던스 정합을 위해 내부 구조 설계, 운용 전력에서 견딜 수 있는 페라이트 재질 선정 및 형상 설계, 특정 세기의 영구자석 선정 및 형상 설계, 저 손실의 튜닝 유전체^[5] 형상 및 위치 설계로 이루어진다. 탐색기용 순환기 설계 시 가장 중요 요소는 고 전력 송신 시 수신 포트에 유입되는 전력 즉 분리도 특성을 최대화하는 것이다. 이를 검증하기 위해서는 저 전력 S-parameter 시험 후 고출력 송신기를 활용한 검증 및 온도 환경시험이 필수적이다.

본 논문에서는 밀리미터파 탐색기에 적용 가능한 Ka-대역의 3-포트 도파관 순환기를 설계하였으며, 고 전력에서의 전기적 성능 구현 설계에 중점을 두었다. 도파관 크기는 Ka-대역에서 동작하는 WR-22을 선정하였으며, 페라이트 및 영구 자석은 원형 형상을 적용하였다.^[6] 설계된 형상은 3D EM 시뮬레이터(CST MWS)를 활용하여 각 포트별 반사손실, 삽입 손실, 분리도 특성을 시뮬레이션 검증 후 정밀 제작하였다. 제작된 제품은 키사이트사의 N5244A 회로망 분석기 및 WR-28 도파관 Cal-kit을 사용하여 S-parameter를 측정하여 분석하였다. 또한 Ka-대역의 수백 W 급 침투전력을 가지는 송신기를 활용하여 고 전력 시험을 하였으며, 운용 온도 범위에서 순환기 전기적 특성 변화 확인 시험도 진행하였다. 최종적으로 고 전력 및 해당 운용 온도 조건에서 정상 동작함을 확인하여 탐색기 적용성을 검증하였다.

II. 본 론

1. 도파관 순환기 설계

본 연구의 Ka-대역 도파관 순환기는 그림 1과 같이 안테나와 조립 및 타 구성품과의 연결 인터페이스를 고려하여 세 포트가 90° 간격으로 구성하고 있다. 크기는 $3.85\lambda_0 \times 2.50\lambda_0 \times 2.22\lambda_0$ 로 소형, 경량화 설계하였다. 순환기는 크게 몸체, 페라이트, 영구자석, 튜닝 유전체로 구성되며, 순환기 내부 페라이트의 물리적 성질을 이용하여 특성 포트에서 입력된 신호를 한쪽 방향으로만 전달 되도록 설계한다.

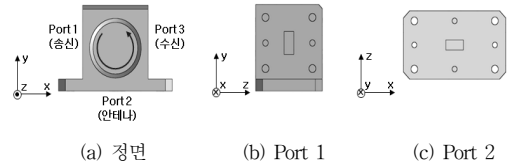


그림 1. 도파관 순환기 구조

Fig. 1. The structure of waveguide circulator

이때 페라이트에 외부 DC 바이어스 자계가 입력되면 내부에서 전체 자화량이 한계에 도달하는 포화 자화를 발생시켜 식 (1) 과 같은 텐서 투자율을 가지는 비 가역 소자인 순환기로 동작하는 원리이다.^{[7][8]}

$$[\mu] = \mu_0 ([U] + [\chi]) = \begin{pmatrix} \mu & jk & 0 \\ -jk & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

순환기 구성품목은 운용 대역폭 내에서 성능을 확보하기 위해 3D EM 시뮬레이터를 활용하여 최적 형상을 설계하였으며, 각 포트별로 신호 인가 시 그림 2와 같은 동작 상태를 확인 할 수 있다.

그림 3, 4, 5를 통해 각각 설계된 도파관 순환기의 각 포트별 반사손실, 포트 간 삽입 손실, 포트 간 분리도 특성을 설계하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 중심주파수 Fc 기준 $\pm 1000\text{MHz}$ 의 대역에서 -20 dB 이하 반사 손실, 0.5 dB 이하 삽입 손실, -23 dB 이하 분리도 특성을 확인하였다.

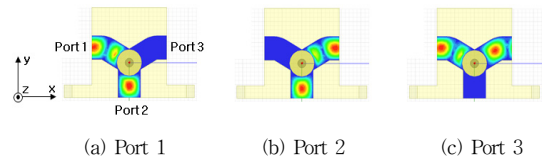


그림 2. 입력포트 변화에 따른 신호 흐름도

Fig. 2. Signal flow at each input port

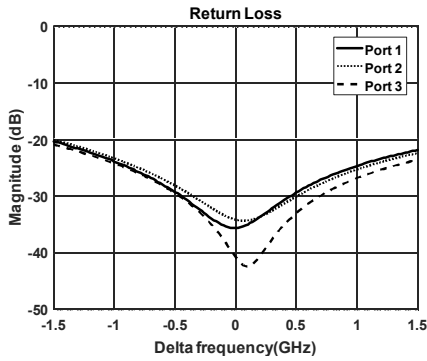


그림 3. 포트별 반사손실 시뮬레이션 결과
Fig. 3. Return loss of each port at simulation

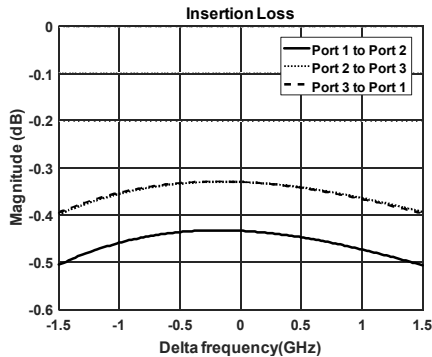


그림 4. 포트 간 삽입 손실 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Insertion loss between each port at simulation

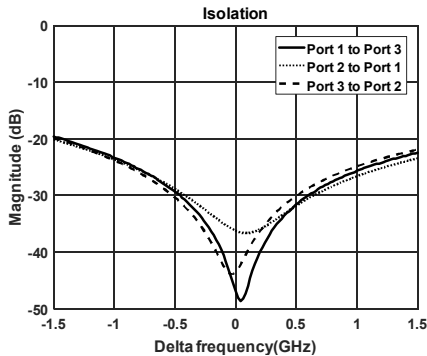


그림 5. 포트 간 분리도 시뮬레이션 결과
Fig. 5. Isolation between each port at simulation

2. 제작 및 상온 S-parameter 시험

그림 6과 같이 도파관 순환기를 정밀 제작하여 N5244A 회로망 분석기 및 WR-28 도파관 Cal-kit을 통해 최종 성능을 그림 7과 같이 각 포트 별로 구성하여 측정하였다.

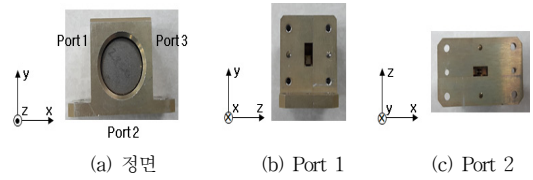


그림 6. 제작된 도파관 순환기
Fig. 6. Fabricated waveguide circulator

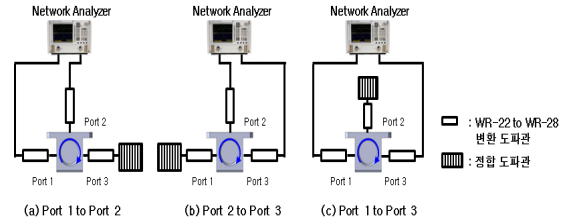


그림 7. 회로망 분석기 측정 연결도
Fig. 7. Measurement setup of network analyzer

3-포트 순환기 측정 시 정확한 측정을 위해서는 회로망 분석기 포트가 연결되지 않는 순환기 포트의 정합 부분이 가장 중요하다. 특히 분리도 성능이 정합 포트의 반사손실 특성에 따라 민감하게 변한다. 정합 포트의 반사된 신호가 순환 방향의 다음 포트에 그대로 전달되기 때문이다. 본 연구에서는 -23 dB 이하 분리도 성능을 가지는 순환기를 정밀 측정하기 위해 WR-22 to WR-28 변환 도파관 및 정합 도파관의 반사 손실 성능이 -40dB 이하가 되는 조건에서 진행하였다. 그림 8, 9, 10을 통해 측정된 도파관 순환기의 각 포트별 반사 손실, 포트 간 삽입 손실, 포트 간 분리도 특성을 확인 하였다. 측정 결과를 통해 -20 dB 이하 반사 손실, 0.5 dB 이하 경로 손실, -23 dB 이하 분리도 특성을 $F_c \pm 1000\text{MHz}$ 의 대역에서 충분히 만족하는 것을 확인 할 수 있다.

3. 고 전력 성능 시험

탐색기용 도파관 순환기의 경우 설계 시 저 전력의 회로망 분석기를 통해 전기적 성능이 검증된다 하더라도 실제 운용되는 수백 W 급의 고 전력 환경에서 만족 여부는 불확실하다.

고 전력 송신 시 순환기 내부의 온도는 순간적으로 급격히 올라감으로 인해 환경이 변화되어 전기적 특성이 변화한다. 이러한 이유로 고 전력용 순환기는 운용 전력 크기 및 온도 조건을 고려하여 설계하여야하며 고 전력 시험을 통한 최종 검증이 필요하다.

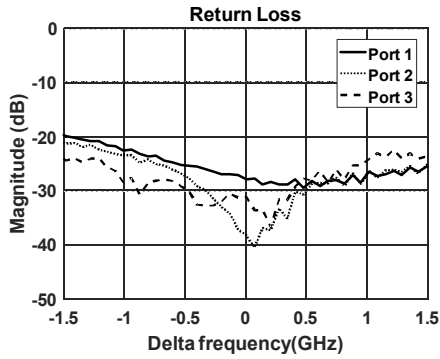


그림 8. 포트별 반사손실 측정 결과
Fig. 8. Return loss of each port at measurement

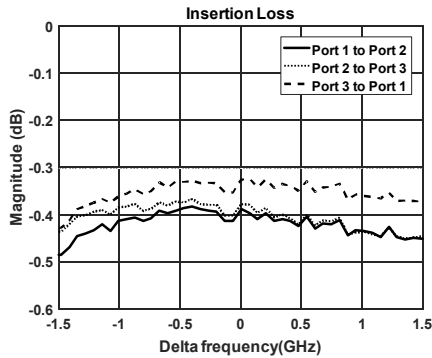


그림 9. 포트 간 삽입 손실 측정 결과
Fig. 9. Insertion loss between each port at measurement

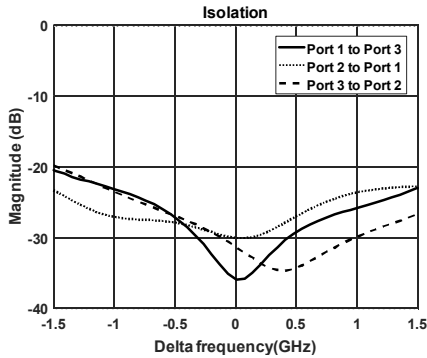


그림 10. 포트 간 분리도 측정 결과
Fig. 10. Isolation between each port at measurement

고 전력 시험은 탐색기 안테나에 조립 시 실제 송신 경로에 해당하는 그림 7(c)의 경우에 대해 삽입 손실 및 분리도 특성을 확인하였다. 그림 11과 같이 순환기를 연결하지 않는 상황에서의 송신 시 송신기 출력 크기 확인과 동시에 운용 대역폭내의 주파수에서 전력 값을 측정

한다. 그리고 그림 12와 같이 순환기를 연결하여 포트 1과 포트 2간의 삽입 손실 전력 값을 측정하며, 그림 13과 같이 연결하여 포트 1과 포트 3의 분리도 전력값을 측정하였다.

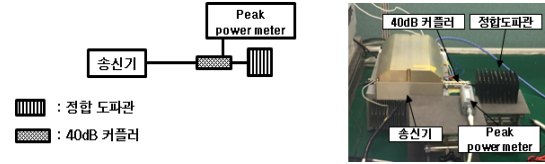


그림 11. 기준 전력 측정
Fig. 11. Reference power measurement

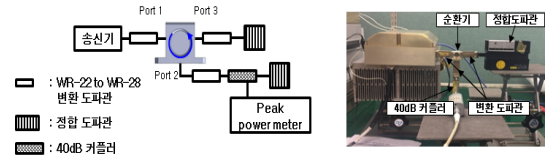


그림 12. 포트 1 to 포트 2 고 전력 삽입손실 측정
Fig. 12. Insertion loss measurement between port 1 and port 2 at high power

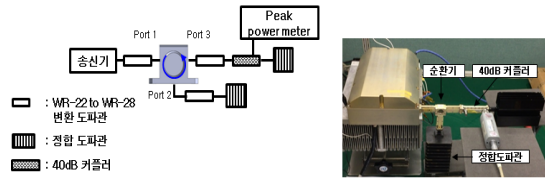


그림 13. 포트 1 to 포트 3 고 전력 분리도 측정
Fig. 13. Isolation measurement between port 1 and port 3 at high power

그림 12, 13 측정 결과에서 그림 11의 결과를 동일 주파수에서 차를 구함으로써 각각 삽입손실 및 분리도 결과 성능을 확인하였다. 표 1은 중심주파수 기준 운용 대역폭에서 최저 주파수(Fmin), 중심 주파수(Fc), 최고 주파수(Fmax) 측정 결과를 정리하였으며, 결과는 삽입 손실 0.5 dB 이하 및 분리도 -23 dB 이하를 만족함을 확인하였다.

표 1. 고 전력 측정 결과

Table 1. High power measurement results

	Fmin	Fc	Fmax
삽입 손실 (port 1 to port 2, dB)	0.47	0.48	0.44
분리도 (port 1 to port 3, dB)	-26.5	-32.5	-33.0

4. 온도 환경 시험

온도 환경에 따른 전기적 특성 변화 확인을 위해 온도 챔버를 활용하여 -30°C , -15°C , 0°C , $+25^{\circ}\text{C}$, $+70^{\circ}\text{C}$, $+80^{\circ}\text{C}$ 에서 순환기 성능을 확인 하였다. 고 전력 시험과 동일하게 송신 경로인 포트 1과 포트 2의 삽입 손실 및 포트 1과 포트 3의 분리도 성능을 확인하였으며, 각 단계의 온도에서 순환기 내부에 설정 온도가 전달될 수 있도록 충분한 안정화 시간을 가졌다. 표 2는 각 온도 단계에서 삽입 손실 측정값이며, 표 3은 분리도 결과를 나타낸다. 시험 결과를 통해 운용 온도 내에서도 순환기 전기적 성능이 설계 범위 안에 들어감을 확인 하였다. 온도 환경시험을 통해 도파관 순환기는 고온에서는 높은 주파수 대역, 저온에서는 낮은 주파수 대역에서 점차 분리도 성능이 열화 되는 것을 확인할 수 있다. 설계 시 이 점을 고려하여 충분한 대역폭 특성을 가지도록 순환기를 설계하여야 한다.

표 2. 삽입 손실 온도 시험(포트 1 to 포트 2)

Table 2. Temperature test of insertion loss(Port 1 to Port 2)

	Fmin	Fc	Fmax
-30°C	0.41	0.42	0.36
-15°C	0.33	0.36	0.31
0°C	0.36	0.38	0.33
$+25^{\circ}\text{C}$	0.37	0.37	0.32
$+70^{\circ}\text{C}$	0.41	0.39	0.37
$+80^{\circ}\text{C}$	0.37	0.40	0.35

표 3. 분리도 온도 시험(포트 1 to 포트 3)

Table 3. Temperature test of isolation(Port 1 to Port 3)

	Fmin	Fc	Fmax
-30°C	-25.5	-33.4	-37.4
-15°C	-25.6	-33.8	-35.1
0°C	-26.6	-36.9	-31.4
$+25^{\circ}\text{C}$	-26.8	-33.1	-27.8
$+70^{\circ}\text{C}$	-25.9	-28.9	-24.2
$+80^{\circ}\text{C}$	-26.1	-26.6	-23.5

III. 결 론

본 논문에서는 Ka-대역 밀리미터파 탐색기에 적용 가능한 도파관 순환기에 대해서 설계 후 실제 운용 환경에

서 사용 가능 여부 검증시험을 진행하였다. 일반적으로 페라이트가 적용된 탐색기용 도파관 순환기는 고 전력 입력 시 혹은 특정 온도 환경에서 상온 S-parameter 측정 결과와 다른 경향을 보인다. 이런 특이점을 고려하여 도파관 순환기를 설계하여야 한다. 설계된 순환기는 상온에서 -20 dB 이하 반사 손실, 0.5 dB 이하 경로 손실, -23 dB 이하 분리도 특성을 $F_c \pm 1000\text{MHz}$ 의 대역에서 충분히 만족하는 것을 측정을 통하여 확인 하였으며, 실제 운용 환경을 고려하여 고 전력 시험 및 온도 시험도 병행 진행하였다. 송신 시 주요 경로 경우에 대해 경로 손실 및 분리도 특성을 확인 하였으며, 시험을 통해 설계된 도파관 순환기는 운용 대역에서 수백 W 급 첨두 전력과 운용 온도에서 정상 동작함을 확인 하였다.

References

- [1] Hyeon-Cheol Ki, "A Study on Spatial Combining power Amplifiers for Backhaul of 5G cellular systems", JIIBC, pp. 21-26, Aug. 2016.
<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.4.21>
- [2] Kab-Ki Kim, "Design of Dual-band Microstrip Array Antenna for WLAN/WiFi", JIIBC, pp. 27-30, Aug. 2016.
<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.4.27>
- [3] Sung-Hyun Yoon, "3-Port Circulator for X-Band Radar", KICS, pp. 355-362, Jan. 2015.
<http://dx.doi.org/10.7840/kics.2015.40.2.355>
- [4] Sung-Min Han, Dea-Soo Im, Kuang-Soo Jung, Chae-Hyun Jung, Chang-Hyun Park, "Development of the high-power waveguide circulator for small Radar", KIMST, pp. 901-902, Nov. 2015.
- [5] Juan Castro, Eduardo Rojas, Thomas Weller, Jing Wang, "High-k and low-loss polymer composites with co-fired Nd and Mg-Ca titanates for 3D RF and microwave printed devices: Fabrication and characterization", IEEE WAMICON, pp. 1-5, April. 2015.
- [6] M. E. El-Shandwily, A. A. Kamal, E. A. F. Abdallah, "General field theory treatment of H-plane waveguide junction circulators", IEEE

Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-21, pp. 392-403, June. 1973.

- [7] D. S. Jun, C. H. Lee, S. S. Lee, T. G., Choy, "Technology trend of circulator," Electronics and Telecommun. Trends, vol. 10, no. 3, pp. 183-189, 1995.
- [8] E. K. N. Yung, D. X. Wang, R. S. Chen, "Encyclopedia of RF and Microwave Engineering", NY: Wiley, pp. 1448-1457, 2005.

저자 소개

정 채 현(정회원)



- 2008년 2월: 충남대학교 전기정보통신 공학과 (공학사)
 - 2010년 2월: 한국과학기술원 전자전기 공학과 (공학석사)
 - 2010년 1월~현재: LIG넥스원 선임 연구원
- <주 관심분야> : 안테나 설계 및 수치 해석

한 성 민(임시회원)



- 2008년 2월: 경일대학교 전자제어계측 공학과 (공학사)
- 2010년 2월: 경북대학교 전파통신공학과 (공학석사)
- 2015년 2월: 한국해양과학기술원 연구원
- 2015년 3월~현재: (주)글로벌엔지니어링 선임연구원

<주 관심분야> : RF 소자 설계, 전파전파 모델링

백 중 균(임시회원)



- 2011년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학사)
 - 2013년 8월: 동국대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 - 2013년 4월~현재: LIG넥스원 선임 연구원
- <주 관심분야> : 안테나 설계 및 수치 해석

이 국 주(임시회원)



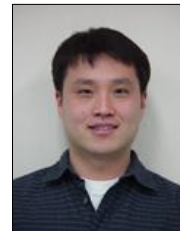
- 2005년 2월: 고려대학교 전기전자전파 공학과 (공학사)
 - 2008년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
 - 2012년 2월: 고려대학교 전자전기공학과 (공학박사)
 - 2013년 3월: 고려대학교 전기전자전파 공학과 박사후과정
 - 2013년 4월~현재: LIG넥스원 수석 연구원
- <주 관심분야> : 안테나 설계 및 수치해석

박 창 현(임시회원)



- 1997년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학사)
 - 1999년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학석사)
 - 1999년 3월~현재: LIG넥스원 수석 연구원
- <주 관심분야> : 안테나 설계 및 수치 해석, RF 탐색기 시스템

권 준 범(임시회원)



- 1997년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
 - 1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 - 1999년 2월~현재: LIG넥스원(주) 수석연구원
- <주 관심분야> : 마이크로파 신호처리 기, 마이크로파 탐색기 등