The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)
Vol. 19, No. 4, pp.105-111, Aug. 31, 2019. pISSN 2289-0238, eISSN 2289-0246

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2019.19.4.105
JIIBC 2019-4-16

근접전계 시험 기법을 활용한 Ka-대역 배열안테나 성능 검증

Performance verification of Ka-Band Array Antenna using Near-Field Test Method

김영완*, 권준범*, 강연덕*, 박종국*

Youngwan Kim*, Junbeom Kwon*, Yeonduk Kang*, Jongkuk Park*

요 약 본 논문에서는 근접전계 시험을 수행하여 Ka 대역 밀리미터파 탐색기용 도파관 광벽 슬롯 배열 안테나의 성능 검증을 수행하였다. 슬롯 배열 안테나의 측정은 원전계, 근접전계 시험을 모두 수행하고 비교하여 밀리미터파 대역의 근접전계 시험의 유효성을 확인하였다. 검증을 수행한 슬롯 배열 안테나의 빔폭 및 부엽 준위를 포함한 빔 패턴 특성이 동일함을 확인하였다. 방위각, 고각 빔패턴의 부엽준위 차이는 1dB 이내로 검증되었다. 추가로 back-projection 기법을 활용하여 근접전계 데이터를 가공한 후 안테나 개구면의 분포를 새롭게 추출하여 배열 안테나 성능 분석을 수행하는 방법에 대하여 소개하였다.

Abstract In this paper, a performance analysis of waveguide broad-wall slot array antenna for millimeter-wave seeker in Ka-band was performed as using near-field measurement. The measurement of slot array antenna was conducted in both far-field and near-field. And the validation of near-field test in millimeter band was confirmed. It was confirmed that the beam pattern characteristics including beam width and side lobe level of the slot array antenna that performed the verification were the same. Differenced in the side lobe level of azimuth and elevation beam pattern were verified to be less than 1dB. Additionally, the new antenna aperture distribution was extracted as using back-projection method modifying the near-field data and then introduced the method conducting performance analysis of array antenna.

Key Words : Ka-band Array Antenna, Near-field measurement

Ⅰ. 서 론

도파관 광벽 슬롯 배열 안테나는 고효율의 평면형 배열 안테나이며, 금속 재질로 제작되어 고출력 송신에 유리하며 구조적으로 견고하기 때문에 항공기 및 레이더, 미사일용 탐색기 등에 많이 사용되고 있다. 도파관 슬롯 배열 안테나 설계 기술은 예전부터 많이 연구되어 오고 있다.[1]~[9] 일반적으로 유도무기용 탐색기에 사용되는 도파관 광벽 슬롯 배열 안테나 조립체는 공간 효율을 위해 하나의 안테나를 이용하여 송수신을 할 수 있도록 하기

*정회원, ㈜ LIG넥스원
접수일자 2019년 5월 14일, 수정완료 2019년 7월 4일
게재확정일자 2019년 8월 2일

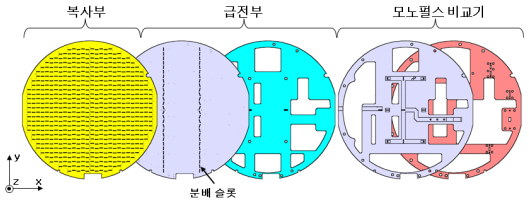
Received: 14 May, 2019 / Revised: 4 July, 2019 /
Accepted: 2 August, 2019
*Corresponding Author: kyoungwan@lignex1.com
Dept. of RF/Microwave R&D Lab, LIG Nex1 Co., Ltd. Korea.

위해 도파관 순환기가 조립되어 있으며 정확한 송수신 성능을 검증하기 위해 순환기가 포함된 상태에서 성능 검증을 수행한다. 밀리미터파 대역에서 운용되는 대부분의 도파관 광벽 슬롯 배열 안테나는 원전계 측정을 통해 성능을 검증한다. 원전계 시험은 실시간으로 측정 및 피측정 안테나간의 신호를 측정하는 가장 범용한 방법이다. 하지만, 한번의 측정을 통해 원하는 방향의 1D Cut 데이터만 측정되기 때문에 안테나의 2D 평면 특성을 검증하려면 많은 시간이 소요되며, 배열안테나 각 배열 소자의 특성을 검증하기가 불가능하다. 이러한 원전계 측정 방법의 단점을 보완하기 위해 근접전계 시험을 수행한다.[10][11] 원전계 및 근접전계는 측정 거리에 의해 구분되며, 근접전계 시험은 안테나의 근거리 영역의 전자파 에너지를 수집한 후 수학적인 변환을 통해 특정 거리 이상의 원거리 영역에서의 2D 평면 패턴을 예측하는 방법이다. 또한, 근접전계 시험을 할 경우 여러 주파수의 평면 패턴을 동시에 측정할 수 있기 때문에 측정 시간의 효율성 측면에서도 이점이 있다. 특히 배열안테나의 경우 back-projection 기법을 적용하여, 측정된 근접전계 전자파 에너지를 수학적인 변환으로 안테나 개구면에 투영시켜 개구면의 배열소자별 크기 및 위상 데이터를 추출함으로써 배열 소자 각각의 상태를 점검할 수 있다.[12]

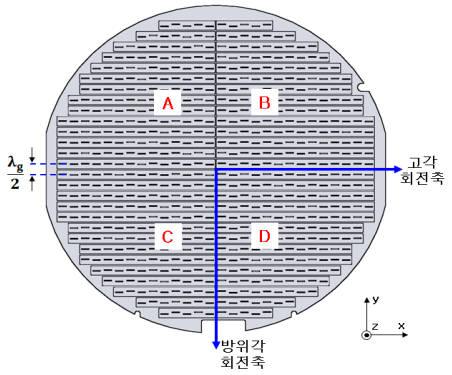
본 논문 II장에서 설계 후 제작한 도파관 광벽 슬롯 배열 안테나 구조의 설계에 관하여 간략히 설명하고, III장에서 실제 원전계 및 근접전계 측정 결과를 비교하여 근접전계 시험 결과의 유효성을 검증하였다. 추가로 back-projection 기법을 활용한 새로운 개구면 분포를 추출하는 수학적인 검증을 수행하고, 실제 측정 결과로 back-projection 된 개구면 결과를 추출하고 검증을 수행하였다.

II. 안테나 조립체 구조

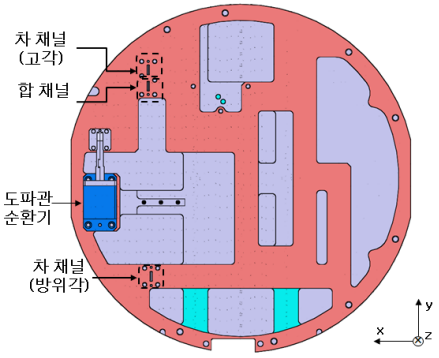
본 논문에서 측정을 수행한 안테나는 크게 복사부, 급전부, 모노펄스 비교기, 도파관 순환기로 구성되어 있다.[10]



(a) 안테나 구성도



(b) 안테나 정면도



(c) 안테나 후면도

그림 1. 안테나 조립체 구조
Fig. 1. The structure of antenna

그림 1 (a)의 복사부는 각 슬롯이 관내 반파장(λg/2) 간격으로 648개로 구성되어있다. 복사부에는 급전부의 분배 슬롯에 의해 설계된 파워량이 분배되며, 분배 슬롯에 신호 인가는 VSWR 특성에 유리한 프로브 급전 방식을 적용하였다. 그림1 (b)와 같이 2축 모노펄스를 구현하기 위하여 전기적으로 A, B, C, D 4분면이 나누어지도록 설계를 하는데, 십자형의 방위각, 고각 모노펄스 축을 기준으로 설계하였다. 안테나 조립체는 그림1 (c)와 같이 안테나 후면에 도파관 순환기가 조립되며, 하나의 합 채널(Sum port)과 두 개의 차 채널(Del Az/El port)로 구성하여 방위각 및 고각 방향에서 동시에 정밀 추적하는 시스템에 사용 할 수 있도록 하였다.

배열 안테나의 빔을 합성하기 위해서는 그림1 (b)에서 복사 슬롯 도파관 중심점 간의 거리를 λg/2를 유지하도록 설계하여야 한다. 이를 위해서는 수식 (1)을 만족하는 도파관로 폭(a)과 도파관 벽 두께(t)를 구하여 적용한다.

$$a+t=\frac{\lambda_g}{2} \quad (1)$$

도파관로의 크기는 운용 주파수에서 TE10 dominant 모드가 생성되도록 폭 $0.66\lambda_0$, 높이 $0.16\lambda_0$ 로 설계하였으며, 도파관 벽 두께는 수식 (1)을 통해 $0.09\lambda_0$로 설계하였다.

II. 안테나 성능 검증

본 논문에서 설계,제작 후 측정을 수행한 도파관 광벽 슬롯 배열 안테나는 그림 2의 실제 제작 사진을 통해 확인 할 수 있다.[13]

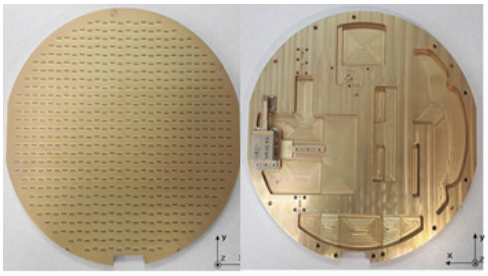


그림 2. 안테나 조립체 제작 사진
Fig. 2. Fabrication photo of antenna assembly

제작된 안테나는 근접전계 패턴 측정을 수행한 후 추가적으로 원전계 시험을 수행하여 두 개 결과들의 유사성을 확인하였다. 먼저 근접전계 시험 형상은 그림 3과 같으며 근접전계 시험장의 제원은 표 1과 같다.

근접전계 시험은 그림 3과 같이 프로브에서 안테나 전면의 근접전계 에너지를 수집한 후 수학적인 변환을 통해 원전계 패턴을 계산한다. 프로브와 안테나의 간격은 통상적으로 시험의 정확도 측면에서 3~5λ (λ:wavelength) 정도를 유지시킨다.[10] 측정을 수행한 근접전계 시험장은 최대 전력 100kW를 40GHz까지 측정가능하도록 고출력 흡수체를 설치하여 시험의 안정성을 확보하였다. 주파수 대역이 높아지면, 측정 경로의 상대적인 손실이 증가하여 최대한 측정 경로의 길이를 최소화하기 위해 PNA-X 계측기를 안테나와 프로브에 최대한 근접하게 위치하는 구성으로 측정을 수행하였다. 프로브는 안테나 개구며의 평면을 스캔하는 평면형 근접전계 방법으로 전자파 데이터를 수집하였다.

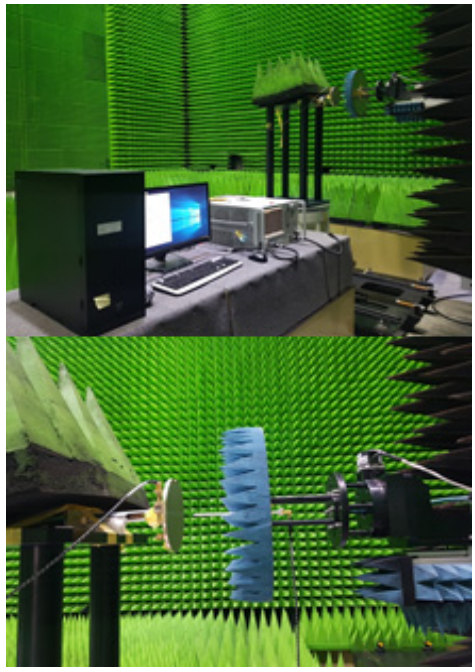
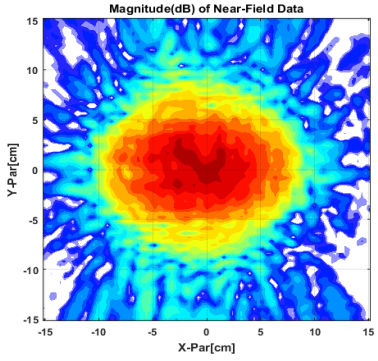


그림 3. 근접전계 시험 사진
Fig. 3. Photo of near-field test

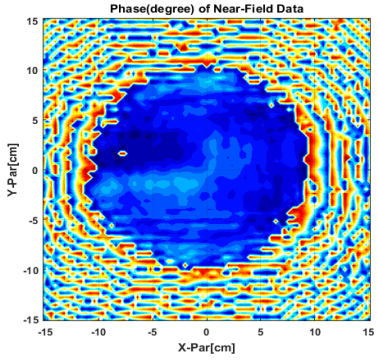
표 1. 근접전계 시험장 제원
Table 1. Near-field measurement facility data

Parameter	Design Objective
Frequency range	1~40GHz
Chamber size	8.8m(L)×9.7m(W)×9.1m(H)
Scan type	Planar, Cylindrical
Scan range	5m(Hor.) × 6m(Ver.)
Power handling	Max. 100kW

그림 4는 측정된 안테나의 근접전계 크기 및 위상 데이터를 보여준다. 4.(a)는 크기 데이터로 개구면에 대부분의 에너지가 집중되고 개구면 밖에서는 크기가 급격히 감소된다. 4.(b)의 위상 데이터는 이상적으로는 개구면에서 동일하게 설계하지만, 제작 오차 등에 의해 다소 오차가 발생할 수 밖에 없다. 근접전계 시험을 통하면 이러한 배열소자의 특성을 확인할 수 있다.



(a) Magnitude

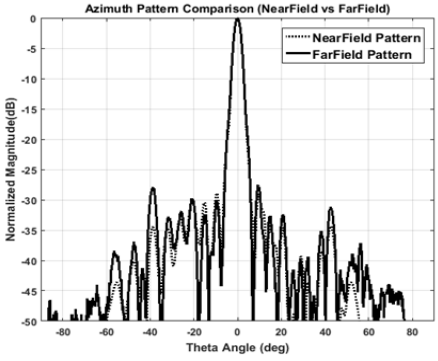


(b) Phase

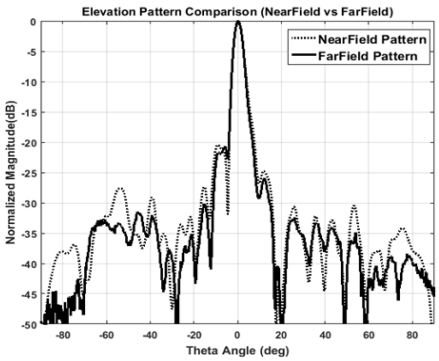
그림 4. 근접전계 측정 데이터
Fig. 4. Measurement data of near-field

근접전계 데이터의 수학적인 변환을 통해 확인한 근접전계 빔 패턴은 그림 5와 같다. 그림 5는 근접전계와 원전계로 측정한 패턴을 비교한 그림으로 방위각, 고각 패턴 비교 결과를 보여준다. 그림에서 보는 것처럼 빔폭 및 부엽준위 그리고 널 포지션 등의 빔 패턴 특성이 거의 유사함을 알 수 있다. 부엽 레벨에서의 약간의 차이가 발생하는 것은 두 시험간의 시험치구가 다르기 때문에 시험치구 반사에 의한 영향으로 측정 치구의 개선을 통해 해결 할 수 있다.

그림 6은 근접전계 시험으로 확인한 안테나의 2D 빔 패턴이다. 원전계 시험을 통해 확인할 수 있는 1D-cut데이터 보다 전체 빔패턴을 평면에서 검증할 수 있기 때문에 다양한 성능을 확인할 수 있다.



(a) Azimuth pattern



(b) Elevation pattern

그림 5. 빔패턴 비교 (근접전계vs원전계)
Fig. 5. Beam pattern comparison (Near-field vs Far-field)

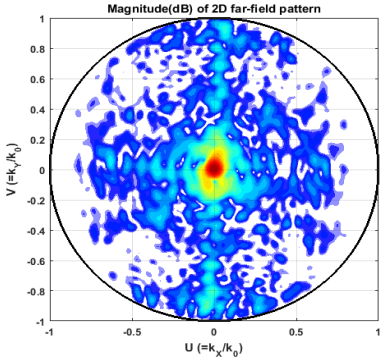


그림 6 2D 빔패턴 비교
Fig. 6. 2D Beam pattern comparison

다음으로 back-projection 기법을 통한 배열안테나 개구면 분포 특성에 대하여 검증을 수행하였다.

back-projection 기법은 실제 측정으로 수집된 근접전계 데이터를 이용하여 새로운 위치에서의 전자파 분포를 구하는 것이다. 이를 활용하면 개구면에서의 전자파 분포를 계산할 수 있게 되고, 실제 제작된 배열안테나의 개구면에서의 성능 검증을 수행할 수 있다. 이는 수학적인 공식으로 back-projection의 과정을 설명할 수 있다. 우선 프로브를 통해 측정된 전자파 측정 데이터($b(P)$)와 원전계 패턴($D(k_x,k_y)$)의 관계는 식 (1)과 같다.[14][15]

$$D(k_x,k_y)=\frac{e^{jk_zd}}{4\pi^2 \mathrm{F a_0}}\iint b(\mathbf{P})e^{j(\hat{x}k_x+\hat{y}k_y)\cdot \mathbf{P}}d\mathbf{P} \quad (1)$$

P : probe position

d : distance between probe and antenna plane

a_0 : input amplitude of antenna

F : mismatch correction term

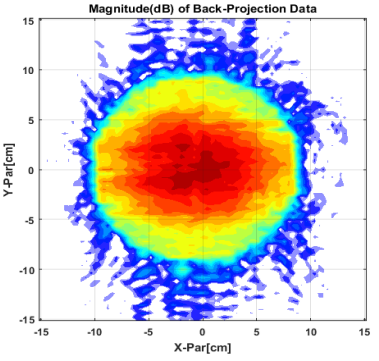
프로브를 이동시켜 가면서 수집된 전자파 에너지를 적분하여 원거리에서의 패턴을 구할 수 있다. 반대로 식 (1)에서 새로운 거리 d'에서 전자파 분포값을 구하고 싶다면 Fourier tansform 관계를 이용하여 식 (2)와 같이 구할 수 있다.[16]

$$\begin{aligned} b(\mathbf{P}') &= \iint Fa_0e^{-jk_zd'}D(k_x,k_y)e^{-j(\hat{x}k_x+\hat{y}k_y)\cdot \mathbf{P}'}d\mathbf{K} \\ &= \iint Fa_0e^{-jk_zd'}\left\{\frac{e^{jk_zd}}{4\pi^2 \mathrm{F a_0}}\iint b(\mathbf{P})e^{j(\hat{x}k_x+\hat{y}k_y)\cdot \mathbf{P}}d\mathbf{P}\right\} \\ &\quad e^{-j(\hat{x}k_x+\hat{y}k_y)\cdot \mathbf{P}'}d\mathbf{K} \end{aligned} \quad (2)$$

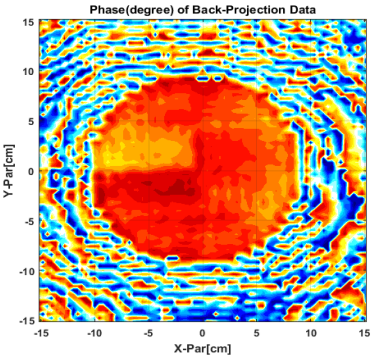
원하는 거리에서의 전자파 분포값 ($b(P')$) 는 식 (3)과 같이 정리될 수 있다.

$$b(\mathbf{P}')=\frac{1}{4\pi^2}\iint e^{jk_z(d-d')}\left\{\iint b(\mathbf{P})e^{j(\hat{x}k_x+\hat{y}k_y)\cdot \mathbf{P}}d\mathbf{P}\right\} e^{-j(\hat{x}k_x+\hat{y}k_y)\cdot \mathbf{P}'}d\mathbf{K} \quad (3)$$

식 (3)을 정리하면 back-projection 기법은 측정값을 기준으로 Spectral-domain의 전공간에서의 패턴을 구하고, 그 패턴을 이용하여 보고자 하는 다른 위치에서의 값을 Fourier transform을 이용하여 다시 구하는 방법이다. 본 논문에서 검증을 수행하는 도파관 광벽 슬롯 배열 안테나를 식 (1)~(3)을 이용하여 그림 7과 같은 back-projection 크기 및 위상 데이터를 얻을 수 있다.



(a) Magnitude



(b) Phase

그림 7 벡-프로젝션 결과
Fig. 7. Back-projection results

안테나와 프로브간의 거리에 의한 전파의 손실이 포함되는 근접전계 데이터와 다르게 back-projection된 개구면에서 전자파 데이터는 그림 7에서처럼 확인할 수 있는 것처럼 개구면 형상과 유사한 크기 및 위상 분포로 좀 더 명확하게 구분된다. 이러한 결과를 통해 좀 더 정확한 개구면 분포 상태를 확인 할 수 있으며, 면 배열 안테나 측정 시 배열 소자별 상태를 검증할 수 있게 된다. 또한 위상 배열안테나의 경우 송수신 경로에 포함된 위상 변위기 및 능동 소자에 의한 채널별 경로차를 back-projection 기법을 활용하여 얻은 결과를 역보상하여 채널간 정렬을 수행할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 Ka-대역에서 동작하는 도파관 광벽 슬롯 배열 안테나의 근접전계 측정을 수행하여 빔 패턴 성

능을 검증하였다. 일반적인 측정 방법인 원전계 측정 결과와 비교하여 근접전계 측정결과의 유효함을 확인하였다.

또한 근접전계 데이터를 활용한 back-projection 기법에 대해 수학적인 검증을 수행하였고, 실제 측정 결과를 바탕으로 back-projection 데이터를 추출하여 결과를 확인하였다.

Ka-대역의 특성상 측정 시 상대적으로 손실이 큰 환경에서 측정을 수행하기 위해 최대한 측정상의 경로 손실을 줄이기 위해 시험장을 구성하였으며, 최종 측정된 결과를 통해 Ka-대역 근접전계 측정 구성의 유효성을 확인할 수 있었다.

본 논문으로 향후 진행될 Ka-대역 위상배열안테나의 성능 검증 시 근접전계 측정을 활용하여 효율적으로 정확한 성능 검증을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

References

[1] R. S. Elliott, Antenna Theory and Design, Prentice-Hall, 1981.

[2] Lars G. Josefsson, "Analysis of longitudinal slots in rectangular waveguides", IEEE Trans. on AP, vol. AP-35, pp. 1351-1357, Dec. 1987.

[3] G. J. Stern and R. S. Elliott, "Resonant length of longitudinal slots and validity of circuit representation : theory and experiment", IEEE Trans. on AP, vol. AP-33, pp. 1264-1271, Nov. 1985.

[4] R. S. Elliott and L. A. Kurtz, "The design of small arrays", IEEE Trans. on AP, vol. AP-26, pp. 214-219, March. 1978.

[5] R. S. Elliott, "An improved design procedure for small arrays of shunt slots", IEEE Trans. on AP, vol. AP-31, pp. 48-53, Jan. 1983.

[6] Hyung-Gi Na, Kong-Mahn Park, Ik-Kyu Lee, Kwang-Hee Kang, "A Development of Waveguide Broad-wall Slot Array Monopulse Antennas", IEIE, pp. 301-304, May. 1998.

[7] Rashid Ahmad Bhatti, Byeong-Yong Park, Yun-Taek Im, Seong-Ook Park, "Design of a Planar Slotted Waveguide Array Antenna for X-band Radar Applications", KIEES, pp. 97-104, June. 2011.

[8] Kyeo-jae Lim, Jong-seo Park, "The Pattern Improvement of Leaky-wave Slot Array Antenna for Satellite Communications", The Journal of Korea Institute of Information Electronics and Communication Technology, Volume: 2, No 2, Pages : 69-77, June 2009.

[9] Seung-gag Lim, Daesu Kang, "Design of V-Band Waveguide Slot Sub-Array Antenna for Wireless Communication Back-haul", The Journal of The Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.17, no 7, Pages : 334-341, 7. 2016.
DOI: http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.7.334

[10] Balanis, C. A., Antenna Theory : Analysis and Design, 3rd Edition,Wiley, 2005.

[11] K.N. Yoon, J.H. Bang, B.C. An, S.K. Kim, "Implementation of a cylindrical near-field measurement system", The Journal of KIIT, Vol.10, No 1, Pages : 53-59, 2012.

[12] D. Garneski, "A new implementation of the planar near-field back projection technique for phased array testing and aperture imaging," in The 1990 Symposium Digest of the Antenna Measurement Technique Association, Philadelphia, 1990.

[13] Chae-Hyun Jung, Jong-Gyun Baek, Kook-Joo Lee, Chang-Hyun Park, "The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication", Vol 17, No5, pp. 209-215, 10. 2017.
DOI: http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2015.15.5

[14] D. M. Kerns, Plane-Wave Scattering-Matrix Theory of Antennas and Antenna-Antenna Interactions. Nat. Bur. Stand., Monograph 162; June 1981.

[15] A. G. Repjar, A. C. Newell, and M. H. Francis, "Accurate determination of planar near-field correction parameters for linearly polarized probes," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 36, pp.855-868, June. 1988.

[16] A. C. Newell, R. D. Ward, and E. J. Mcfarlane, "Gain and power parameter measurements using planar near-field techniques," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 36, pp.792-803, June. 1988.

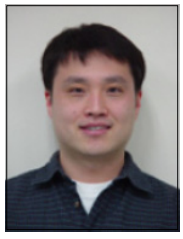
저 자 소 개

김 영 완(정회원)

- 2005년 2월 : 광운대학교 전자공학부 (공학사)
- 2007년 2월 : 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2007년 2월 ~ 현재: LIG넥스원 선임 연구원

- 주 관심분야 : 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이다 시스템, 초고주파 수동 회로 설계

권 준 범(정회원)



- 1997년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과(공학사)
- 1999년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과(공학석사)
- 1999년 2월 ~ 현재 : LIG 넥스원(주), 수석연구원

- 주 관심분야 : 마이크로파 신호처리, 마이크로파 탐색기

강 연 덕(정회원)

- 1993년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과(공학사)
- 1996년 2월 : 한국항공대학교 전자공학과(공학석사)
- 2000년 8월 : 한국항공대학교 전자공학과(공학박사)
- 2000년 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원

- 주 관심분야 : 능동 위상 배열 레이더

박 종 국(정회원)

- 1995년 2월 : 서울대학교 전자공학과(공학사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
- 2001년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
- 2001년 8월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원

- 주 관심분야 : 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이다 시스템, 초고주파 수동 회로 설계 및 전자파 수치 해석