
슬롯깊이 변화에 따른 도파관 슬롯 안테나의 설계

김규철*

Design of slotted waveguide antenna with slot depth variation

Gue-Chol Kim*

요 약

본 논문에서는 슬롯의 깊이를 변화시켜 X-밴드에서 동작하는 1.4m길이의 도파관 슬롯배열 안테나를 설계하였다. 54개의 슬롯배열이 모델링되어 CST로 시뮬레이션 되었으며 부엽레벨은 주어진 주파수 범위에서 효과적으로 억압되었다. 안테나의 측정 결과 이득은 21.8dB, 최대 부엽레벨은 -31dB, 반전력빔폭은 2.0°의 결과를 얻을 수 있었다.

ABSTRACT

We design a slotted waveguide antenna for X-band which a 1.4m length with slot depth variation. A 54 slot array is modeled and simulated by CST, and the side lobe level is suppressed effectively in a certain range of frequency. The experimental results of the antenna show that its gain, maximum sidelobe level and half power beam-width are 21.8dB, -31dB and 2.0deg, respectively.

키워드

안테나, 도파관, 빔폭, 레이더
Antenna, Waveguide, Beam-width, Radar

1. 서 론

항해용 레이더 안테나는 도파관의 협벽에 슬롯을 낸 슬롯배열 안테나와 패치를 적절히 배열하여 이득을 높인 마이크로스트립안테나가 주로 사용되고 있다. 마이크로스트립안테나는 제작이 간단하고 소형, 경량으로 구현이 가능하다는 장점이 있으나 대역폭이 좁고 방사 전력의 적다[1,2]. 이에 반해 도파관 슬롯배열안테나는 급전부가 따로 필요하지 않고 효율이 좋으며 도파관자체를 지지구조로 사용할 수 있어 고효율의 방사전력이

필요한 레이더에 적합하다. 이러한 슬롯배열안테나의 성능을 높이기 위해서는 주빔의 빔 폭은 좁아야 하고 부엽의 크기는 낮추어야 하지만 두 조건을 동시에 만족하기는 어려우므로 상호절충이 필요하다[3,4,5,6]. 배열안테나의 방사패턴은 각 소자에서 나오는 방사양의 크기에 의존하므로 각 슬롯의 기울임 각도를 조절하여 배열 안테나가 테일러 분포가 되도록 하면 도파관의 중간부근에서 가장 큰 에너지가 복사되는 안테나가 설계된다[5,6]. 또한 슬롯의 기울기와 위치는 정규화된 어드미턴스의 분포를 산출하고 이 분포와 동일한 컨덕턴

* 목포해양대학교 해양전자통신공학부(gckim@mmu.ac.kr)

접수일자 : 2013. 01. 05

심사(수정)일자 : 2013. 03. 25

게재확정일자 : 2013. 04. 22

스를 갖도록 하여 결정한다. 모멘트법 또는 유한 요소 경계적분법등의 시뮬레이션이나 측정을 통해 정확한 슬롯의 어드미턴스를 제공하는 많은 연구가 진행되어 왔으나 슬롯간에 강하게 발생하는 상호결합효과를 고려하지 않기 때문에 설계시 오차가 크다[7,8]. 본 논문에서는 전자계 해석프로그램을 이용하여 안테나를 모델링하고 각 슬롯에 의한 전자계 복사패턴을 구하는 방법으로 최소의 부엽크기를 갖는 안테나를 설계하였으며 슬롯의 기울기에 변화를 주고 슬롯의 깊이를 조정하는 방법으로 안테나를 최적화하는 설계법을 제시한다.

II. 도파관 슬롯안테나

2.1. 도파관 슬롯의 구조

도파관내 진행파의 전류분포는 도파관의 가로와 세로 길이에 의존하기 때문에 슬롯배열안테나 설계를 위해서는 먼저 사용주파수대역에 맞는 구형 도파관을 선택해야 한다. 그림 1은 도파관 슬롯배열안테나의 구조이다.

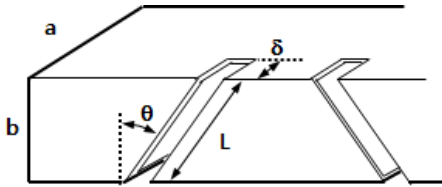


그림 1. 도파관 안테나의 슬롯구조
Fig. 1 Slot construction of slotted waveguide antenna

안테나의 배열은 완벽하게 접지된 사각도파관의 협벽에 슬롯을 절삭하여 구성한다. 슬롯간의 간격이 $\lambda/2$ 로 균일한 공진형 슬롯배열은 특정한 주파수에 대해 정합이 되어있으므로 상당히 좁은 주파수 대역을 갖는다. 따라서 슬롯간의 간격이 불균형한 비공진형 슬롯배열안테나가 많이 사용되어진다[7,8]. 도파관속의 관벽 전류는 반파장마다 역위상이 되므로 인접한 슬롯의 기울기를 서로 반대로 하면 복사되는 전파의 합성진계는 수평성분은 동위상이 되어 관벽과 직각인 방향으로 날카로운 빔이 얻어진다[6]. 슬롯의 폭은 수직편파성분을 줄여 방사효율을 좋게 하기 위해 일반적으로 $\lambda/20$ 보다 작게 구성한다.

슬롯 안테나를 설계할 때 가장 중요한 요소 중 하나는 슬롯의 컨덕턴스 또는 저항이다. 각 슬롯간의 간격을 다르게 하고 기울기를 조정하면 슬롯의 컨덕턴스를 조절할 수 있으며 각 슬롯에서 방사되는 빔의 방향과 크기를 변화시킨다. 슬롯의 공진 임피던스와 컨덕턴스의 값은 다음의 식을 이용해서 예측할 수 있다[10,11].

$$g(x) = g_1 \sin^2 \frac{\pi x}{a} \quad (1)$$

여기에서 g_1 은

$$g_1 = 2.09 \frac{\lambda_g a}{\lambda b} \cos^2 \frac{\pi \lambda}{2 \lambda_g} \quad (2)$$

x 는 도파관 넓은 면의 중앙에서부터 슬롯의 위치를 나타내며, a 와 b 는 도파관의 크기를 나타낸다. λ 와 λ_g 는 파장과 관내파장을 나타낸다.

그리고 슬롯이 협벽을 따라서 θ 의 각도로 기울어져 있으면 컨덕턴스는 다음 식으로 정규화 될 수 있다.

$$g(\theta) = g_0 \sin^2 \theta \quad (3)$$

여기서 g_0 는 a, b, λ 와 λ_g 에 의한 함수이다[12]. 구형슬롯이 없을 때 도파관내의 TE_{10} mode의 자장은

$$H_z = H_1 \cos \frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z} \quad (4)$$

$$H_x = \frac{j\beta a}{\pi} H_1 \sin \frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z} \quad (5)$$

$$H_y = 0 \quad (6)$$

단 여기서 $\beta = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - (\pi/a)^2}$ 이다.

따라서 슬롯을 따라 발생하는 자장의 크기는

$$\begin{aligned} H_z &= H_z \sin \theta - H_y \cos \theta \\ &= H_1 \sin \theta e^{-j\beta z \sin \theta} \end{aligned} \quad (7)$$

이다. 이 식에서 도파관 외부로 복사되는 전력은 슬롯의 기울임 각도 θ 에 비례함을 알 수 있다. 기울임 각도를 조절하게 되면 결국 슬롯의 절삭 깊이 δ 가 변화한다.

2.2. 슬롯안테나의 설계

본 논문에서 제안한 방법을 이용하여 비공진형 도파관 슬롯 안테나를 설계하였다. 안테나의 요구사항은 표 1과 같다.

표 1. 안테나 요구사항
Table 1. Antenna specifications

중심주파수	9.41GHz
이득	20dB 이상
수평빔폭	2°이하
정재파비	1.5이하
부엽크기 20°내	-20dB 이하
부엽크기 20°외	-30dB 이하
도파관	WR-30

급전부로부터 도파관을 따라 전달되는 신호의 전력 분포는 각 슬롯의 형태에 따라서 결정되며 S파라미터 관점에서 보면 다음과 같은 관계를 가진다[5].

$$G = \frac{1 - |S_{21}|^2 - |S_{11}|^2}{|S_{21}|^2} \quad (8)$$

여기서 분자는 포트1에서부터 전력이 전달되었을 때 슬롯에서 방사되는 총 전력을 나타내고 분모는 포트2로 전달된 총 전력을 나타낸다.

슬롯 배열안테나의 슬롯개수는 설계하고자 하는 안테나의 빔 폭 사양에 의해 결정된다. 또한 슬롯의 기울임 각도에 따라 복사되는 에너지가 결정되기 때문에 원하는 SLL(side lobe level)과 이득이 나오도록 슬롯의 기울임 각도를 조정하였다. 모든 슬롯의 기울임 각도를 동일하게 하면 급전부와 가까운 쪽 슬롯에 에너지가 집중되므로 작은 SLL을 갖기 위한 테일러 분포가 되도록 슬롯의 기울기를 조절할 필요가 있다. 그림 2는 도파관 슬롯의 깊이를 일정하게 했을 때의 슬롯의 기울기와 원거리 복사패턴을 나타낸다. 초기치는 부엽의 크기를 최소로 하기 위한 테일러 분포가 아니기 때문에 부엽의 크기가 크며 찌그러진 형태의 모양을 형성한다. 테일러 분포가 되기 위해서는 슬롯 도파관 중간 부근에서 최대의 에너지를 복사하도록 슬롯의 기울기를 조정하여야 한다. 슬롯의 각도는 전자계 해석 프로

그램을 이용하여 모델링한 후 필드분포를 계산함으로써 확인할 수 있다.

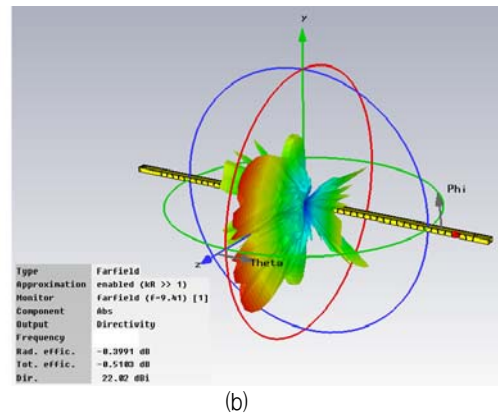
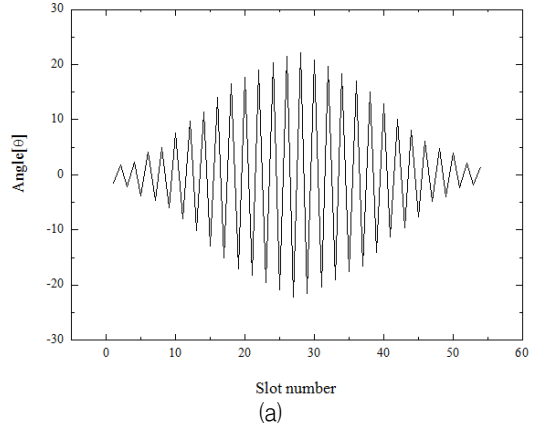


그림 2. (a) 슬롯의 초기각도 (b) 원거리 복사패턴
Fig. 2 (a) Initial angle of slots (b) Far-field pattern

그림 3은 최적화된 슬롯의 기울기와 원거리 복사패턴을 나타낸다. 슬롯의 기울기가 계산이 되면 슬롯의 길이를 반 파장으로 맞추기 위하여 슬롯의 깊이를 조절하여야 한다. 최적화된 슬롯의 기울기를 살펴보면 기울기가 최대치인 지점이 도파관의 가운데 부분이 아닌 도파관의 종단 쪽으로 치우쳐져 있음을 알 수 있다. 이는 도파관의 급전선으로부터 방사된 신호가 슬롯에 의한 영향으로 종단으로 갈수록 적은 에너지가 전달되는 영향을 고려하여 도파관의 중앙에서 최대에너지를 복사하도록 슬롯의 기울기를 최적화한 결과이다. 최적화된 슬롯의 기울기와 깊이를 갖는 안테나의 원거리 복사패턴은 부엽의 크기가 작고 예리한 팬빔 모양을 나타낸다.

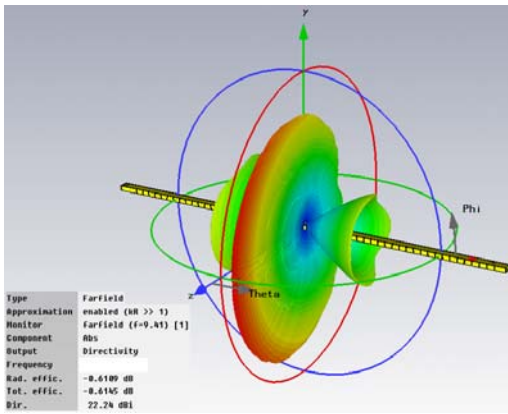
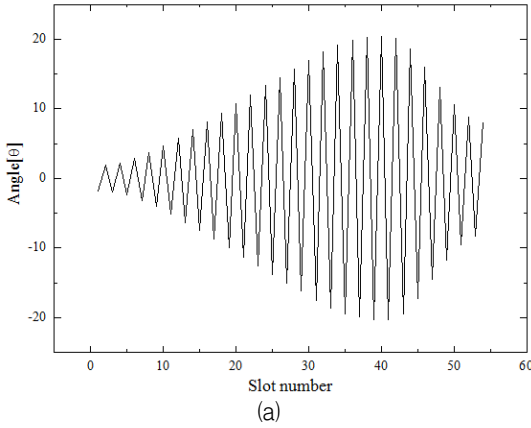


그림 3. (a) 슬롯의 최적화된 각도
(b) 원거리 복사패턴

Fig. 3 (a) Optimized angle of slots
(b) Far-field pattern

최적화된 슬롯 기울기를 이용하여 설계한 안테나를 모델링하고 전자계 해석 프로그램으로 안테나의 복사 패턴을 시뮬레이션 하였다. 그림 4는 슬롯의 깊이가 일정한 경우와 슬롯의 깊이를 조정하였을 때의 복사패턴을 시뮬레이션 하여 비교한 결과이다. 두가지 경우 모두 이득은 약 22dB, 빔 폭은 2도로 거의 유사한 결과를 얻었으나 부엽의 크기는 슬롯의 깊이를 조정한 안테나가 깊이가 일정한 안테나 보다 10°내에서 -7dB 낮은 결과를 얻었으며 전반적으로 낮은 부엽 레벨을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

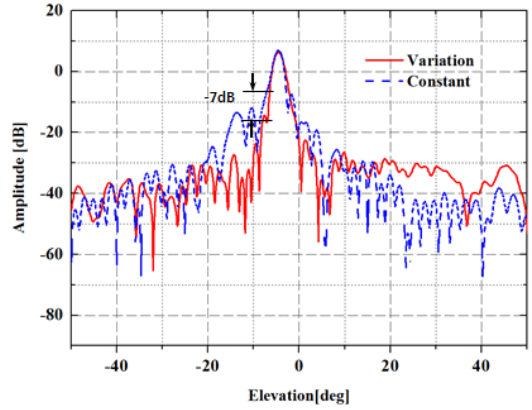


그림 4. 슬롯깊이변화에 따른 복사패턴
Fig. 4 Radiation pattern versus slot depth variation

2.3. 제작 및 측정

슬롯배열안테나는 급전방식에 따라 중앙급전식과 종단 급전식으로 나뉘는데 중앙 급전식은 배열의 좌우로 분배되는 전력의 균형을 맞추는 것과 주엽의 형상을 좌우대칭으로 만들기 어렵다는 단점이 있다.

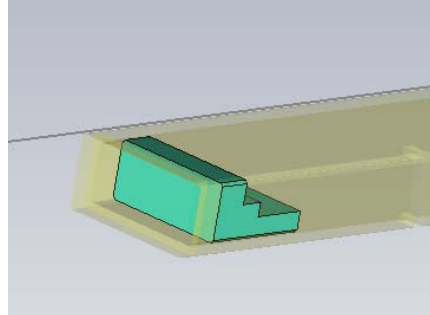


그림 5. 종단에서의 페라이트 흡수체
Fig. 5 Ferrite observer of the termination side

종단 급전식은 안테나의 한쪽 면에서 급전을 하고 다른 쪽면에 계단모양의 페라이트 흡수체를 설치하여 전력반사에 의해 위상분포가 달라지는 것을 방지한다. 그림 5는 종단에 설치한 페라이트 흡수체의 모양을 나타낸다. 그림 6에서 페라이트 흡수체의 영향을 알아보기 위해 흡수체를 종단에 부착시켰을 때와 금속 종단기를 부착시켰을 때의 반사계수를 측정하여 비교하였다. 측정결과 페라이트 종단기를 사용한 안테나는 사용하지 않은 안테나보다 중심주파수에서 약 -11dB 낮은 반사특성을 나타냈다. 종단에서의 전력반사의 영향으

로 리플이 발생하는 것을 알 수 있으나 9GHz대역내에서 -20dB이하의 결과를 나타내므로 리플의 영향은 무시할 수 있다.

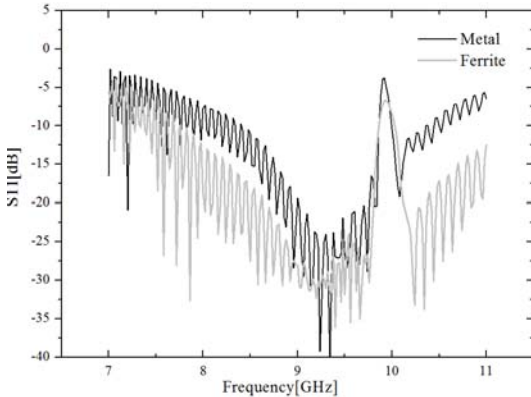


그림 6. 페라이트 종단을 이용한 안테나의 반사계수
Fig. 6 Reflection Coefficient of antenna using the ferrite termination

그림 7은 제작된 슬롯배열안테나의 실물사진이다. 최적화된 파라미터를 이용하여 설계된 도파관 슬롯배열 안테나는 알루미늄 재질의 구형 도파관을 이용하여 제작하였으며 전체길이는 1.4m이다.



그림 7. 제작된 슬롯배열안테나
Fig. 7 Fabricated slot array antenna

그림 8은 측정하기 위해서 지그에 장착한 안테나와 전자파차폐실의 모습을 나타낸다. 보다 정확한 안테나의 측정을 위해서 원거리 측정방식을 사용하여야 하나, 원거리측정을 하기에는 안테나의 길이가 길어 근거리 측정방식을 사용하여 측정하였다. 근거리측정방식에는 측정안테나와 피측정 안테나의 측정위치를 어디에 두느냐에 따라 Planar, Cylindrical, Spherical방식으로 나뉘지는데 본 논문에서는 측정안테나 중심축을 기준으로 피측정 안테나를 회전시키는 Cylindrical방식을 사용하여 측정하였다. Cylindrical측정방식은 높은 주파수와 높은 이득을 갖는 안테나측정에 유리하며 부엽레벨

을 보다 정확하게 측정한다. 그림 9는 측정된 안테나의 방사패턴을 나타낸다. 중심주파수 9.41GHz에서 측정된 결과 슬롯의 깊이를 일정한 경우와 변화를 주었을 경우 이득은 각각21.18dB, 21.03dB로 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었고 수평빔폭도 2.03°, 2.05°로 오차 범위내 거의 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 슬롯깊이가 일정한 경우 부엽레벨은 -21.8dB가 측정된 반면, 슬롯 깊이를 변화준 경우 -31dB의 결과를 얻을 수 있어 약 -8dB의 개선효과를 얻게 되었음을 확인하였다.

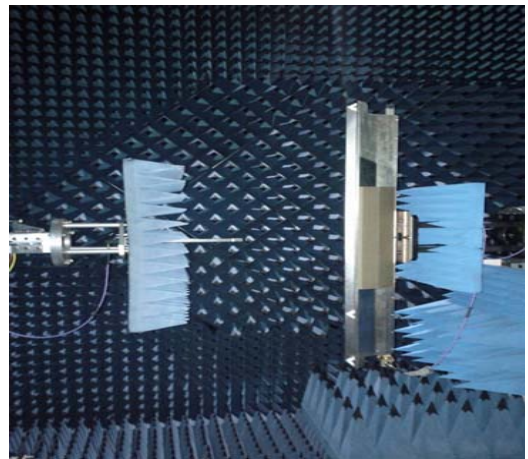
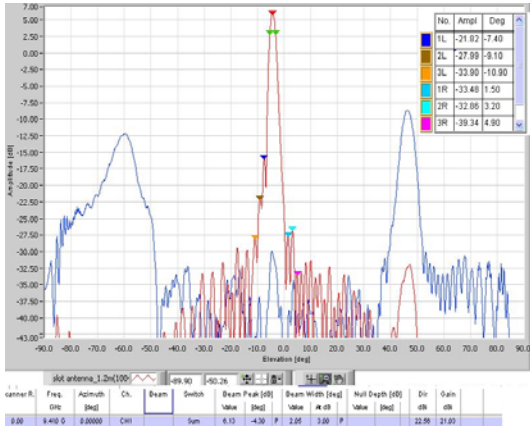


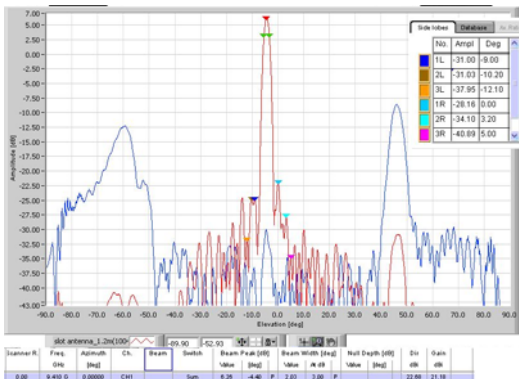
그림 8. 제작된 안테나의 측정
Fig. 8 Measurement of fabricated antenna

III. 결론

논문에서는 비공진 슬롯배열안테나의 최적설계법을 제시하였다. 안테나 종단의 전력반사에 의한 위상분포의 변화를 줄이기 위해 계단모양의 페라이트 흡수체를 사용하였으며 원하는 부엽크기를 만족하는 테일러분포를 갖도록 슬롯의 기울기와 슬롯의 깊이를 조정하였다. 슬롯의 깊이를 조정함에 따라 슬롯의 깊이를 일정하게 한 안테나에 비해 SLL이 -7dB 개선되었음을 시뮬레이션으로 확인하였으며 최적화된 파라미터를 이용하여 안테나를 설계 제작하고 측정한 결과 21.8dB의 이득과 2.0°의수평빔폭, -31dB이하의 SLL을 얻을 수 있었다.



(a) 슬롯의 깊이가 일정



(b) 슬롯의 깊이가 변화

그림 9. 측정된 슬롯배열안테나의 복사패턴
Fig. 9 Radiation pattern of measured slotted array waveguide antenna (a) constant (b) variation

참고 문헌

- [1] 김민수, 장연길, 이영철, "선박 레이더용 60W X-band Cascade SSPA 구현", 한국전자통신학회 논문지, 7권, 1호, pp. 1-7, 2011.
- [2] 황운택 "해상 데이터통신 시스템의 설계 및 구현: GMDSS를 중심으로", 한국전자통신학회논문지, 6권, 7호, pp. 816-822, 2011.
- [3] 고민호, 표승철, 박효달, "차량용 통합 안테나 모듈용 증폭단에 관한 연구", 한국전자통신학회논문지, 4권, 2호, pp. 87-92, 2009.
- [4] 박용욱, "WLAN용 패치 안테나 특성", 한국전자통신학회논문지, 6권, 6호, pp. 803-808, 2011.
- [5] 구용서, 윤중환, "무선랜과 와이맥스 시스템에

적용 가능한 브랜치 라인과 사각 슬릿 접지를 갖는 모노폴 안테나 설계와 제작", 한국전자통신학회논문지, 6권, 5호, pp. 611-620, 2011.

- [6] D. M. Pozar, "Microwave Engineering, 3rdEd", Wiley, Newyork, pp. 120-130, 1993.
- [7] D. Dogan, O. A. Civil, "A Novel Edge Wall waveguide Slot Antenna,," 2010 IEEE international Symposium on Phased Array Systems & Technology, pp. 453-456, 2010.
- [8] D. C. Chang, C. I. Hung, C. C. Lin, J. W. Lin, K. T. Ho, and T. M. Lee. "Suppression of second order beam for traveling wave slot arrays," Asia-Pacific Microwave conference Proc. APMC-1993, pp. 63-66, 1993.
- [9] K. L. Hung, H. T. Chou, "A Design of Slotted Waveguide Antenna Array Operated at X-band," 2010 IEEE international Conference on Wireless Information Technology and Systems, pp. 1-4, 2010.
- [10] L. P. Oliveira, A. M. P. Alves, H. E. Hernandez-Figueroa, "A Novel vertically Design of Slotted Waveguide Antenna Array Operated at X-band," 2007 The Second European Conference on Antennas and Propagation, pp. 1-5, 2007.
- [11] R. J. Stevenson, "Theory of Slots in Rectangular Waveguide," J.App.Phyl, Vol. 19, pp. 4-20, 1948.
- [12] Milligan, T. A, "Modern antenna Design", McGrawHil, 1986.

저자 소개



김규철(Gue-Chol Kim)

2000년 2월 목포해양대학교 해양전
자통신공학과(공학사)
2003년 8월 목포해양대학교 해양전
자통신공학과(공학석사)
2007년 3월 오사카대학 전자정보에너지공학과(공학박사)
2006년 11월~2008년 2월 Matushita Electric Works 중앙연
구소 연구원
2008년 3월~현재 목포해양대학교 해양전자통신공학부 조
교수

※ 관심분야 : 고주파 소자 모델링, 고주파회로설계, 안테
나설계