

평면파 차폐효과 시험용 평판형 로그 스파이럴 안테나 설계

Design of a Planar Log-Spiral Antenna for Testing Plane-Wave Shielding Effectiveness

정연춘^{*★}

Yeon-Choon Chung^{*★}

Abstract

The plane-wave shielding effectiveness is typically measured for horizontal and vertical polarizations using a linearly polarized antenna. However, this typical measurement method results in big evaluation fees due to very long measurement time as well as huge idle space for maintenance, these problems is more severe especially in large shielded enclosures such as EMP protection facilities to be built in indoor buildings and underground. This paper describes the design and fabrication process and results of a planar log-spiral antenna applicable to the evaluation of the electromagnetic shielding effectiveness of a large EMP protection facility. Since the proposed antenna has a circular polarization, there is no need to separately measure the horizontal and vertical polarizations. Therefore, the measurement time can be shortened by more than 1/2, and further, its small volume with a planar structure can reduce greatly idle space required for the maintenance.

요약

평면파 차폐효과는 전형적으로 선형편파 안테나를 사용하여 수평 및 수직 선형 편파에 대해 각각 측정한다. 그러나 이러한 전형적인 측정방법은 실내 건축물 및 지하 공간에 건설되는 고출력 전자기파 방호시설과 같은 대형 차폐구조물의 경우 매우 긴 측정시간에 따른 시험평가 비용과 사후관리 평가를 위한 큰 유휴 공간으로 인한 손실 등을 초래한다. 본 논문에서는 대형 고출력 전자기파 방호시설의 전자파 차폐효과 평가에 적용 가능한 평면형 로그-스파이럴 안테나의 설계 및 제작 과정 및 결과를 기술한다. 이 안테나는 원 편파를 가지므로 수평 및 수직편파를 따로 측정할 필요가 없으므로 측정시간을 1/2 이상 단축할 수 있고, 나아가서 평면형 구조를 가지므로 시험에 필요한 유휴공간을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다.

Key words : EMP, Shielded Enclosure, SE Measurement, Circular Polarization, Planar Spiral Antenna

* Department of Electronics, Seokyeong University

★ Corresponding Author

E-mail : ychung@skuniv.ac.kr, Tel : +82-2-940-7738

Manuscript received Jul. 24, 2019; revised Sep. 7, 2019; accepted Sep. 9, 2019.

※ Acknowledgment

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

국내외적으로 고출력 전자기파(이하 EMP라 한다) 위협이 크게 증가하고 있으며, 따라서 이에 대한 국가중요시설의 보호가 시급히 대두되고 있다. 국내에서도 다양한 형태의 대규모 EMP 방호시설이 구축되고 있으며, 구축된 방호시설의 성능 평가를 위해 전자파 차폐효과와 펄스전류 차단 성능 등에 대한 측정 등이 전형적으로 요구되고 있다[1, 2].

특히, 평면파 차폐효과는 100 MHz~1 GHz의 주파수대역에서 수평편파 및 수직편파에 대해 150개 이상의 주파수를 대수적으로 샘플링 하고, 시험구역을 3.05 m × 3.05 m 이하의 간격으로 나누어 측정토록 규정하고 있다. 예를 들어, 18.3 m (L) × 9.15 m (W) × 6.1 m (H) 크기의 EMP 방호시설에 대해 평면파 차폐효과를 평가하고자 할 때, 54개소의 시험지점에 대해 150개 이상의 주파수를 수평편파 및 수직편파로 시험해야 하므로 동일 시험셋업으로 16,200회 반복해야 한다. 주파수 소인(swept frequency) 방법으로 시험하더라도, 1개소에서 20분의 시험시간을 추정한다면 총 36시간의 시험시간이 소요된다. 대부분의 EMP 방호시설은 앞에서 가정한 크기보다 크므로 실제 시험시간은 크게 증가되며, 따라서 시험비용에 대한 부담이 가중되어 어려움을 겪고 있는 실정이다.

또한 시험셋업에서 송신안테나는 차폐 벽면으로부터 2.05 m 떨어져야 하며, 전형적인 대수주기형 안테나의 길이를 케이블의 늘어진 길이를 포함하여 1 m로 가정할 경우, 안테나의 끝으로부터 규정된 30 cm의 이격거리를 확보하기 위해서는 차폐벽면으로부터 3.35 m 정도의 시험공간이 요구된다. 따라서 EMP 방호시설의 주기적 성능평가를 위해 이러한 시험 공간을 미리 확보하기 위해서는 여분의 공간이 필요하고, 결과적으로 과대한 체적의 건축공간이 요구되어 막대한 건설비용을 초래하고 있다. 이러한 문제의 한 해결책으로 송, 수신안테나의 위치를 바꾸는 방법이 제안되기도 하였다[3].

본 논문에서는 전형적인 사용되는 선형 편파 대수주기형 안테나 대신에 평면형 스파이럴 안테나를 설계, 제작하여 사용함으로써 수직편파 및 수평편파 각각에 대해 시험할 필요 없이 한 번에 시험할 수 있도록 함으로써 시험시간을 적어도 1/2로 단축할 수 있고, 또한 확보되어야 하는 시험 공간

을 최소화 할 수 있음을 설명한다. 특히, 우리나라의 EMP 방호시설이 대개 콘크리트 구조 건물 내부 및 지하 공간에 대형 구조물로 구축되고 있으므로 본 시험방법은 시험비용의 절감은 물론, 건설비용의 획기적인 절감에 크게 기여할 것으로 기대한다.

II. 안테나의 설계 및 제작

2.1. 안테나 구조

200 MHz~1 GHz의 주파수대역에서 동작하는 원편파 안테나로서 원추형(conical type)과 평면형(planar type)의 두 종류의 형태를 생각할 수 있으나 전자파 차폐효과(SE : shielding effectiveness) 시험에서 송, 수신안테나가 차지하는 공간의 효율성을 고려하여 평면형 로그 스파이럴(Planar Log-Spiral) 안테나를 측정용 안테나로 선택하였다. 또한 각 암의 끝을 원형으로 자르는 것이 암의 길이를 가장 길게 하므로 낮은 주파수 특성이 개선되도록 하였다.

스파이럴 안테나를 구성하는 두 개의 암(arm)은 서로 180° 천이되어 구성되며, 각각 전체 스파이럴 암은 식 (1)로 표현되는 하나의 곡선이 90° 간격으로 4단계로 회전시켜 얻을 수 있다[4].

$$r = r_0 e^{a(\phi + \delta)} \quad (1)$$

여기에서, 그림 1에 보인 제작된 스파이럴 안테나의 경우, $r_0 = 50 \text{ mm}$ ($\delta = 0^\circ$ 에서의 초기 거리), $a = 2.5$ (반경 r 의 증가율), δ 는 움셋 각도이다. 외부 곡선은 $\delta = 0^\circ$, 내부 곡선은 $\delta = 90^\circ$ 에 대해 구성된다.

또한 CST-MWS 소프트웨어를 사용하여 안테나 급전부의 사각형 패드의 세로방향 길이를 늘려가며 안테나의 입력 임피던스를 시뮬레이션 하였으며, 200 MHz~1 GHz의 주파수대역에서 입력 임피던스의 변화가 가장 적은 100 Ω에 맞춰 사각형 패드의 크기를 결정하였다. 따라서 설계된 안테나의 입력 임피던스는 약 100 Ω이다.

설계에 사용된 기판은 유전체 손실이 0.02, 유전율이 4.4, 두께가 2 mm인 FR4이고, 크기는 시중에서 용이하게 제작 가능한 최대 크기로서 500 × 600 mm 이고, 안테나를 삼각대에 쉽게 설치 가능하도록 110 mm 폭의 아크릴 재질의 케이스에 설치하였다. 밸런(balun)이 설치된 상태에서의 제작된 스파이럴 안테나의 모습을 그림 1에 보였다. 본 안테나의 스

파이럴 형태에 근거하여 좌현 원형 편파(LHCP) 특성을 갖는다.

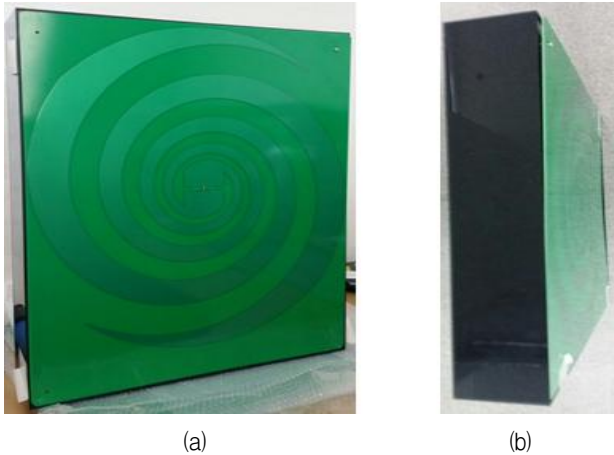


Fig. 1. The pictorial view of the fabricated spiral antenna: (a) top view, (b) side view.

그림 1. 설계, 제작된 스파이럴 안테나의 모습: (a) 앞면, (b) 옆면

2.2. 광대역 임피던스 변환기

특성 임피던스 50 Ω의 SMA 동축 케이블을 이용하여 입력 임피던스 100 Ω의 스파이럴 안테나를 급전하기 위해서는 적절한 임피던스 변환기가 필요하다. 이러한 목적으로 전형적인 클롭펜스타인(Klopfenstein) 테이퍼를 적용한 마이크로스트립 선로 변환기와 트랜스포머를 이용한 임피던스 변환기를 각각 제작하였다. 임피던스 변환기의 길이는 안테나의 고

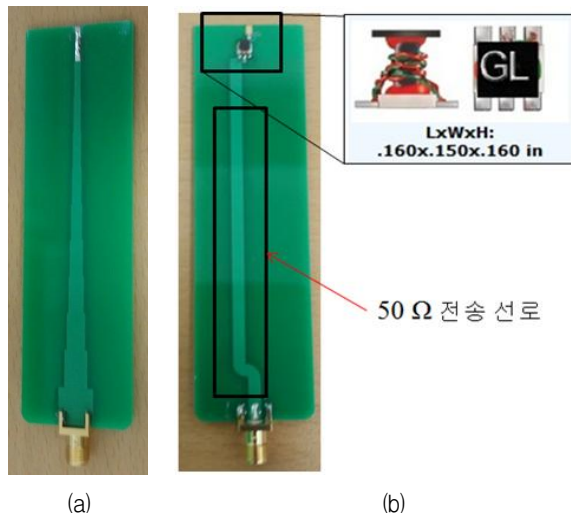


Fig. 2. Pictorial view of the fabricated impedance transformers using (a) Klopfenstein taper and (b) transformer coil.

그림 2. 제작된 50 Ω-100 Ω 임피던스 변환기의 모습: (a) 클롭펜스타인 테이퍼 응용, (b) 변압기 코일 적용

정 케이스의 폭을 고려하여 100 mm로 정하였다. 클롭펜스타인 테이퍼 임피던스 변환기는 10단계 스텝 임피던스 변환을 갖도록 설계하였고, 트랜스포머를 이용한 임피던스 변환기는 권선비 2:1의 Mini-Circuits사의 TCM2-33WX 트랜스포머를 활용하여 설계하였다. 제작에 사용한 기판은 앞에서의 평면형 스파이럴 안테나 제작 시에 사용한 FR4 기판을 사용하였다. 제작된 두 가지의 50 Ω-100 Ω 임피던스 변환기를 그림 2에 보였다.

그림 3에 클로펜스타인 테이퍼를 적용한 경우와 트랜스포머 코일을 적용한 경우의 전체 평면형 스파이럴 안테나의 반사손실을 측정된 결과를 비교하였다. 두 가지 방법 모두 200 MHz~1 GHz의 주파수대역에서 -10 dB 이하의 반사손실을 가짐을 알 수 있다. 그러나 트랜스포머 코일(TCM2-33WX)을 사용한 임피던스 변환기를 결합한 스파이럴 안테나가 클로펜스타인 테이퍼를 적용한 경우보다 저주파수 대역에서 보다 우수한 반사손실 특성을 보였다. 본 연구에서는 트랜스포머 코일을 이용한 임피던스 변환기를 선택하였다.

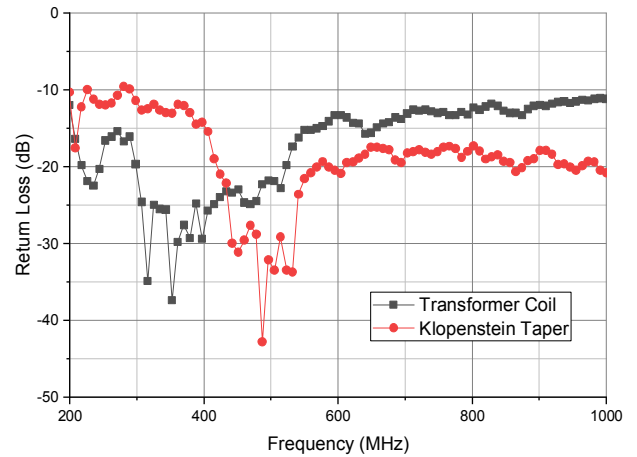


Fig. 3. The return loss of the fabricated antenna using two types of impedance transformer.

그림 3. 두 가지 형태의 임피던스 변환기에 대한 제작된 안테나의 반사손실

III. 제작된 안테나의 특성

시뮬레이션 결과는 Ansoft HFSS를 이용하여 계산하였으며, 측정은 표준 시험방법[5]에 따라 한국 전파진흥협회 전자과학기술원 안테나 챔버에서 수행하였다.

3.1. 안테나 이득

그림 4는 동작 주파수 대역에서 안테나의 최대이득을 측정된 결과와 시뮬레이션으로 계산한 결과를 비교한 그림이다. 동작 대역 내에서 안테나의 최대이득은 1.63~5.27 dBi로 측정되었으며, 시뮬레이션 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

3.2. 축비

원형 편파 안테나에서 축비는 매우 중요하다. 이를 측정하기 위해 안테나의 동작 주파수 대역 내의 9개 주파수에서 동일편파와 교차편파 방사패턴을 각각 측정된 후 그 결과를 이용하여 축비를 계산하였다. 측정결과와 시뮬레이션 결과를 그림 5에 보였다. 제작된 안테나가 400 MHz~900 MHz의 주파수대역 내에서 3 dB 이내의 축비를 갖지만 그 외

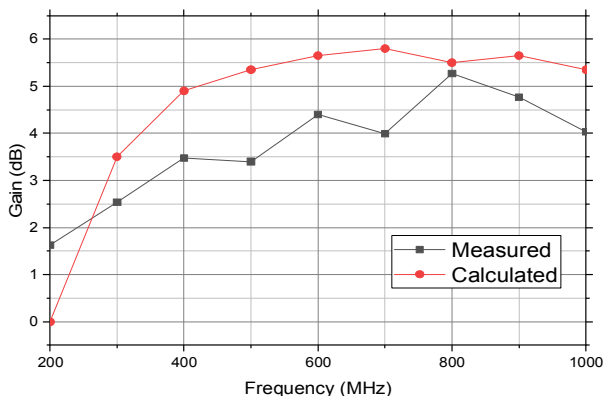


Fig. 4. The measured and computed results for peak gains of the fabricated antenna.

그림 4. 제작된 안테나의 최대이득에 대한 측정 결과와 시뮬레이션 결과

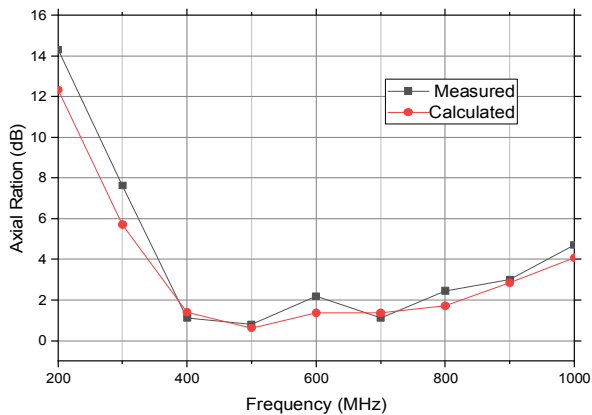


Fig. 5. The measured and computed results for axial ratios of the fabricated antenna.

그림 5. 제작된 안테나의 축비에 대한 측정 결과와 시뮬레이션 결과

의 주파수대역에서는 비교적 큰 축비로 가짐을 확인하였으며, 향후 안테나의 정방형 크기와 스파이럴 구조의 개선이 필요할 것으로 판단한다.

3.3. 방사 패턴

동작 주파수 대역 내에서 시뮬레이션을 통해 표면전류의 분포를 관찰하였는데, 주파수가 증가함에 따라 방사에 기여하는 활성영역이 안테나의 바깥쪽에서 중심에 가깝게 이동함을 확인할 수 있었다. 그림 6은 제작된 안테나의 방사패턴에 대한 측정결과와 시뮬레이션 결과를 몇 개의 주파수에서 비교한 결과의 예이다. 두 결과가 서로 잘 일치함을 볼 수 있다. 여기에서, 방사패턴은 고도 각(elevation angle) 평면, 즉 평면형 스파이럴 안테나를 그림 1과 같이 세웠을 때, 평면에 수직한 방향을 z-축으로 잡고 고도 각 θ 에 따른 수신 전기장의 세기 차이를 의미한다. 그림 6으로부터 주파수가 증가함에 따라 사이드 로브와 후방 로브가 증가함을 알 수 있다.

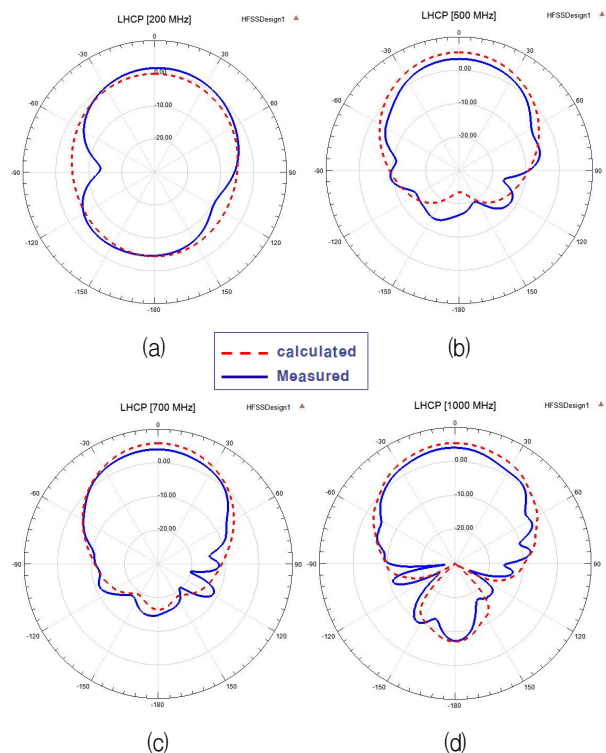


Fig. 6. The measured and computed results for radiation patterns of the fabricated antenna: (a) 200 MHz, (b) 500 MHz, (c) 700 MHz, (d) 1 GHz.

그림 6. 제작된 안테나의 최대이득에 대한 측정 결과와 시뮬레이션 결과: (a) 200 MHz, (b) 500 MHz, (c) 700 MHz, (d) 1 GHz

3.4. 빔 폭 및 측정너비

대형 전자파 차폐구조물의 전자파차폐 성능을 평가할 때 송신 안테나의 빔 폭은 매우 중요하다. 이는 동시에 비교적 균일한 크기의 전자파를 측정너비의 피시험체(차폐 벽)에 노출시킬 수 있음을 보장하기 때문이다. 전자파 차폐효과 측정방법을 규정한 대표적인 규격에서는 노출 면적에 대해 6 dB 이내에서 균일한 전기장의 세기를 요구한다. 따라서 대형 구조물의 경우, 측정너비를 간격으로 송신안테나의 위치를 옮겨가면서 시험하도록 요구한다. 측정너비는 식 (2)에 의해 간단하게 결정될 수 있다.

$$W = 2 \times L_{tx} \times \tan\left(\frac{\theta_{3dB}}{2}\right) \quad (2)$$

여기에서, L_{tx} 는 송신 안테나와 차폐 벽면까지의 거리이다. 전형적인 평면파 차폐효과 측정셋업에 대해서 IEEE-Std-299 규격[6]에서는 1.7 m, Mil-Std-188-125-1/2 규격[7]에서는 2.05 m로 규정하고 있다. 또한 θ_{3dB} 는 3 dB 빔 폭이며, 앞의 그림 6과 같은 방사 패턴으로부터 쉽게 결정된다.

그림 7에 제작된 스파이럴 안테나의 3-dB 빔 폭과 6-dB 전기장의 세기 노출 레인지를 보였다. 주파수가 증가함에 따라 빔 폭이 좁아지며, 따라서 레인지도 좁아진다. 차폐 벽면으로부터 송신 안테나의 거리가 커지면 당연히 레인지도 커지고, 따라서 한 번에 시험할 수 있는 구역도 넓어지지만 요구되는 동작영역을 확보하기 위해서는 보다 큰 송

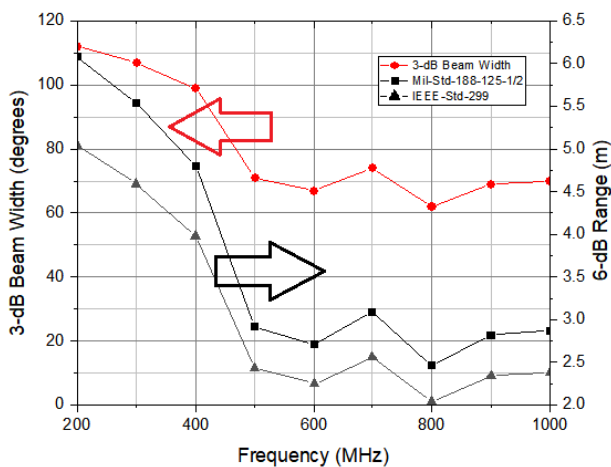


Fig. 7. Beam-width and 6-dB exposure range of the fabricated antenna.

그림 7. 제작된 안테나의 빔 폭과 6-dB 노출 구역의 크기

신출력이 요구된다. 그림 7로부터 Mil-Std-188-125-1/2 규격으로 시험할 경우는 최소 레인지로 확인된 2.46 m 간격, IEEE-Std-299 규격의 경우에는 2.04 m 간격으로 시험위치를 옮겨가면서 동작 주파수 대역에서 주파수를 소인하면서 시험할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

현행 규정에 따라 대규모의 EMP 방호시설의 전자파 차폐효과를 평가하는 경우, 많은 측정시간과 큰 시험셋업 공간의 제약이 따른다. 따라서 본 연구에서는 수직편파 및 수평편파 각각에 대해 시험할 필요 없이 한 번에 시험할 수 있는 원형 편파의 평면형 스파이럴 안테나를 설계·제작하였다. 이러한 원형 편파 안테나를 이용한 시험 방법을 검증하기 위해 크기가 다른 두 개의 인위적인 수평 및 수직방향 슬롯에 대해 기존의 시험방법[6, 7]과 비교 실험을 수행하였으며, 동일한 시험결과를 얻을 수 있음이 확인되었다[8].

이러한 평판형 원 편파 스파이럴 안테나를 활용하여 측정시간을 1/2 이상 단축할 수 있을 뿐만 아니라, 안테나의 가로길이가 기존의 전형적인 대수주기형 안테나에 비해 매우 짧으므로 시험셋업을 위한 확보해야 하는 공간도 획기적으로 줄일 수 있다. 따라서 이러한 결과는 지하공간이나 건축물 내에 EMP 방호시설을 많이 건설하는 우리나라의 경우, 과도한 시험비용의 절감은 물론, 막대한 구축비용을 크게 줄일 수 있어 효과적인 EMP 방호시설 구축에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] National Cyber Security Center, National Radio Research Agency, National Security Research Institute, "EMP Protection Guidelines," 2017.
- [2] Ministry of National Defence, "the national defense and military facilities criteria: EMP Protection Facility Design Specifications," 2014.
- [3] Manjung Seo, Seongwon Chi, Youngjin Kim, Woochul Park, Hojae Kang, Changsu Huh, "Electromagnetic Wave Shielding Effectiveness

- Measurement Method of EMP Protection Facility,” *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol.25, No.5, pp.548–558, 2014. DOI: 10.5515/KJKIEES.2014.25.5.548
- [4] Petr Piksa, Milos Mazanek, “A Self-Complementary 1.2 to 40 GHz Spiral Antenna with Impedance Matching,” *Radio Engineering*, Vol.15, No.3, pp.15–19, 2006.
- [5] KS X 3261:2017, “The antenna parameter measurement standard in the far-field antenna range,” *Korea Broadcast-Communications Standards Council*, 2017.
- [6] IEEE-Std-299, “IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures,” *IEEE*, 2006.
- [7] Mil-Std-188-125-1/2, Interface Standard “High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection for Ground-Based C⁴I facilities Performing Critical, Time-Urgent Missions,” *Dept. of Defence*, 1998.
- [8] Y. C. Chung, “SE Measurements using circularly polarized antennas,” 2016 EMSEC Workshop, pp.39–52, KIEES, 2016.

BIOGRAPHY

Yeon-Choon Chung (Member)



1984. 2. : B.S. degree in Kyungpook National University.
 1986. 2. : M.S. degree in Kyungpook National University.
 1999. 8. : Ph.D. degree in Chungnam National University.

1985. 12. ~2001. 5. : Group Leader of EMC Group in Korea Research Institute of Standards and Sciences (Principal Researcher).
 2000. 3. ~2001. 2. : Univ. of York, Visiting Academics.
 2001. 6. ~2002. 2. : Research Director of Expan Electronics Co. Ltd.
 2002. 2. ~present : Professor, Dept. of Electronics, Seokyeong University.