

논문 2007-44TC-12-11

CRD를 이용한 전자파 잔향실 내 전기장 균일도 향상

(Improved Field Uniformity Characteristics in a Reverberation Chamber with a CRD)

손 용 호*, 이 중 근**, 김 정 훈*

(Yong-Ho Son, Joong-Geun Rhee, and Jung-Hoon Kim)

요 약

본 논문에서는 CRD(Cubical Residue Diffuser)를 이용하여 전자파 잔향실 내의 전기장 균일도를 향상시키고, 잔향실 내의 전기장 균일도가 최적화되는 CRD 면적비를 연구하였다. 1 ~ 3 GHz 주파수 대역에서 Schroeder 방식의 CRD를 설계하였고, 전자파 잔향실 내의 전기장 분포 해석을 위해 FDTD(Finite Difference Time Domain) 수치해석이 이루어졌다. 해석결과 2 GHz에서 CRD의 면적이 잔향실 한쪽 내벽의 약 40 ~ 80 %일 경우 전기장 강도 표준 편차가 낮고 균일하게 분포되었으며, 40 % 이하, 또는 80 % 이상의 면적에서는 표준 편차가 높게 나타났다. 특히 가장 나쁜 경우와 비교하여 44%일 때 전기장 균일도가 1 dB 향상됨을 알 수 있었다.

Abstract

This paper presents an improved field uniformity in a reverberation chamber, that can be alternatively used for the analysis and the measurement of electromagnetic interference and immunity, with a designed CRD(Cubical Residue Diffuser) that have various dimensions. The Schroeder type CRD is designed for 1 ~ 3 GHz band and the FDTD(Finite Difference Time Domain) method is used to analyze the field characteristics. At 2 GHz, the standard deviation of test volume in the reverberation chamber is the smallest and has a good field distribution with a CRD of 40 ~ 80 % dimension of one side of the reverberation chamber. The Electric field uniformity gets worse when the dimension of a CRD is either below 40 % or above 80 % of the side wall. The result shows that the standard deviation of the test volume in the reverberation chamber with a CRD of 44 % dimension is improved by 1 dB compared with that of the reverberation chamber with a CRD of 100 % dimension.

Keywords : Reverberation Chamber, QRD, CRD, FDTD, Field Uniformity

I. 서 론

최근 과학 기술의 발전으로 전기전자제품 및 통신기기의 사용 빈도가 증가함에 따라 가정, 사무실, 산업현장에서의 전자파 환경이 악화되고 있다. 불요 전자파로 인한 기기 상호간 장애 현상을 방지하기 위해 전기전자 통신 기기의 불요전자파 허용기준치와 측정방법을 규정하였으며, 이를 만족시키기 위해 설계 제작 단계부터 EMC(Electromagnetic Compatibility)를 고려해야하며,

제품이 판매되기 위해서는 EMC 테스트를 만족시켜야 한다^[1].

전자파 장애 및 복사 내성 측정을 위한 대응시험 시설로서 전자파 잔향실(Reverberation Chamber)이 미국 표준과학연구원 (NIST: National Institute of Standards and Technology)의 연구 결과로 발표되었으며^[2], 국제 전자파 장애 특별 위원회(CISPR: International Special Committee on Radio Interference)는 IEC 61000-4-21에서 전자파 잔향실에 대한 규격을 제정하였다^[3].

전자파 잔향실은 잔향실 내부의 전기장 균일도를 확보할 수 있는 모드(Mode)수에 의해 하한 주파수가 결정되며, 주파수가 증가함에 따라 모드 수도 증가하

* 학생회원, ** 평생회원, 한양대학교 전자전기 제어 계측공학과
(Department of Electronics, Electrical, Control & Instrumentation Engineering, Hanyang University)
접수일자: 2007년7월16일, 수정완료일: 2007년12월13일

로 최저 사용 주파수(LUF) 이상에서 잔향실로 사용 가능하다. 일반적으로 잔향실의 하한 주파수를 낮추기 위해 스테러(Stirrer) 또는 확산기를 사용하여 전기장의 균일도를 확보하였다^[4~6]. 전기장 균일도는 잔향실 내 발생 가능한 총 모드 수, 잔향실 제작을 위해 사용된 매질의 Q 인자, 스테러 및 확산기 효율 등에 의해 결정된다^[2].

현재까지 Schroeder 방식의 QRD(Quadratic Residue Diffuser)를 이용한 잔향실에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, QRD를 사용한 잔향실은 스테러를 사용한 잔향실에 비해 측정 소요시간이 짧은 장점이 있다. 또한 전자파 잔향실, 스테러, 확산기의 형태와 크기 변화에 따른 필드 균일도의 향상을 위한 연구가 다양한 형태로 이루어지고 있다^[4~6].

본 논문에서는 CRD를 설계하였고, 전자파 잔향실 한쪽 내벽에서 CRD가 차지하는 면적비를 변화시키면서 전기장 균일도 특성을 연구하였으며 이를 통해 면적 효율 대비 전기장 균일도가 가장 좋은 비율을 찾아내었다.

II. 전자파 잔향실 설계

전자파 잔향실은 전기장 균일성을 만족시키기 위해 하한 주파수 이상에서 다중 모드 전자기 환경을 만족시키는 적절한 크기를 가져야 한다.

1. 전자파 잔향실의 구조

본 논문에서는 기준 전자파 잔향실을 그림 1과 같이 설계하였으며, 이 때 잔향실 내부는 무손실 상태로 가

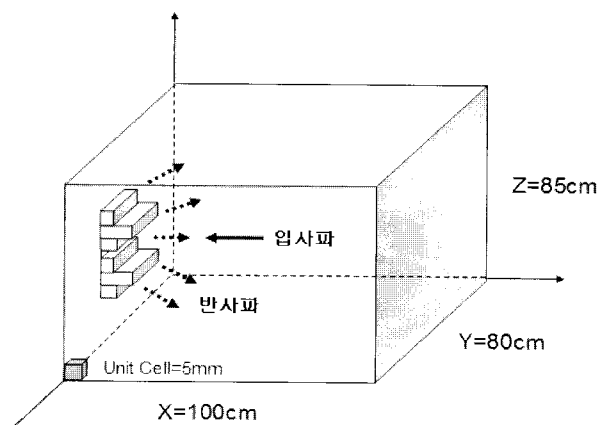


그림 1. 전자파 잔향실과 확산기의 구조
Fig. 1. Structure of the Reverberation Chamber and Diffuser.

정하였다. 전자파 잔향실은 3 dB 이내의 필드 균일도를 만족하기 위해 최소 60 모드 이상이 필요하다^[3]. 직육면체 형태의 전자파 잔향실 내부에서 발생 가능한 총 모드 수는 식 (1)과 같다^[2].

$$N(f) = \frac{\pi}{3}XYZ \left(\frac{f}{150}\right)^3 \quad (1)$$

여기서 f 의 단위는 [MHz], X, Y, Z 의 단위는 [m]이며 설계된 잔향실은 800 MHz의 최저 사용 주파수를 갖는다.

2. Schroeder 방식의 확산기 설계

Schroeder 방식의 확산기는 QRS(Quadratic Residue Sequence)를 이용하여 설계한 QRD이다^[7]. QRS의 Sequence S_n 은 식 (2)와 같다. 여기서 n 은 0부터 $(N-1)$ 까지의 정수이고 j 는 $0 \leq n^2 - jN$ 을 만족하는 최대 정수이며 N 은 소수이다. 이러한 Sequence는 N 주기로 N 개의 난수가 반복된다.

$$S_n = |n^2 - jN| \quad (2)$$

Schroeder 방식의 QRD는 항상 대칭 형태로 구성되지만, 더 많은 산란(Scattering) 효과를 얻기 위해서는 비대칭 형태의 확산기에 대한 연구가 요구된다. 따라서 본 논문에서는 CRS(Cubical Residue Sequence)를 이용하여 비대칭의 CRD를 설계하였으며, CRS는 식 (3)에 의해 결정된다^[8]. 그림 2는 QRD와 CRD의 구조를 보여준다.

$$S_c = |n^3 - jN| \quad (3)$$

CRD의 구조는 사용 주파수에 따라 결정되며, 각 Well의 폭 W 는 $\lambda_{f_{max}}$ 에 의해, 깊이 d_n 는 $\lambda_{f_{min}}$ 에 의해

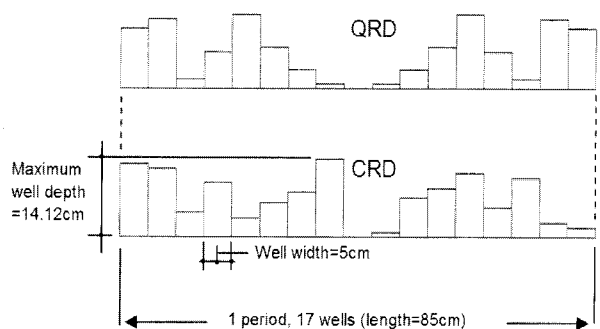


그림 2. QRD와 CRD의 구조
Fig. 2. Structure of a QRD and a CRD.

표 1. CRD와 잔향실의 면적비

Table 1. The Ratio of the CRD Area to the Reverberation Chamber Wall Area.

Type	Diffuser Size (H × L) [cm]	YZ 벽면에서 CRD가 차지하는 면적비
m = 2, N = 17	85 × 5	6 %
	85 × 10	12 %
	85 × 15	19 %
	85 × 20	25 %
	85 × 25	31 %
	85 × 35	44 %
	85 × 40	50 %
	85 × 45	56 %
	85 × 50	63 %
	85 × 60	75 %
	85 × 65	81 %
	85 × 70	88 %
85 × 75	94 %	
85 × 80	100 %	

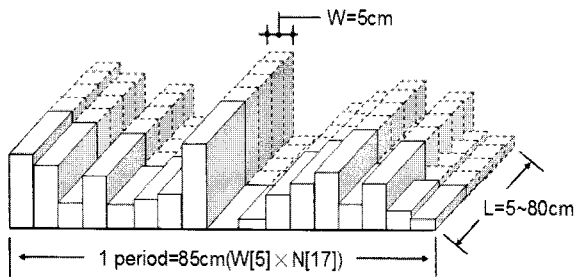


그림 3. 설계된 1 ~ 3 GHz 대역의 Schroeder CRD
Fig. 3. Designed Schroeder CRD for 1 ~ 3 GHz.

결정된다^[9].

$$W = \frac{\lambda_{f_{max}}}{2} \tag{4}$$

$$d_n = \frac{S_n \lambda_{f_{min}}}{N \cdot 2} \tag{5}$$

$$N = \frac{2mf_{max}}{f_{min}}, m=1, 2, 3, \dots \tag{6}$$

여기서 $\lambda_{f_{min}}$ 와 $\lambda_{f_{max}}$ 는 각각 사용 주파수인 1 GHz와 3 GHz의 파장이다. 본 논문에서는 CRD가 부착되는 잔향실 한쪽 내벽(YZ 면)의 크기를 고려하여 CRD를 $m = 2, N = 17$ 로 설계하였다. 표 1은 설계된 CRD와 전자파 잔향실 내부의 면적비를 보여주며, 그림 3은 설계된 CRD 모델을 보여준다.

III. 전자파 잔향실 내부의 전기장 분포 해석

1. 전자파 잔향실 시뮬레이션

설계된 CRD를 전자파 잔향실에 적용하였고, 잔향실 내부의 전기장 분포를 조사하기 위해 FDTD 수치 해석 방식을 사용하여 시뮬레이션 하였다. FDTD 수치 해석 방법은 시간과 공간에 대한 전기장 분포를 해석하기 위해 Yee 알고리즘과 유한 차분 방식이 적용되며^[10], 본 논문에서는 상용 소프트웨어인 Remcom사의 XFDTD 6.2를 시뮬레이션에 사용하였다. 그림 4는 전자파 잔향실의 구조와 확산기 및 전기장 소스의 위치, 시험 공간(Test Volume)을 보여주며, 기본 셀의 크기는 주파수를 고려하여 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z = 5[\text{mm}]$ 로 설정하였다.

Courant-Friedrick-Lewy (CFL) 안정성 조건^[11]을 만족시키기 위하여 이산 시간을 9.629 ps ($= \Delta t$) 간격으로 결정하였으며, 전체 시간 간격 수는 35,000, 잔향실의 크기는 $200 \Delta X \times 160 \Delta Y \times 170 \Delta Z$ 로 설정하였다.

전기장 발생을 위해 2 GHz, 1 V의 정현파 포인트 소스를 셀 (50, 80, 85)에 위치시켰으며, (-)X 방향으로 입사하였다. 전자파 잔향실 및 CRD의 매질은 PEC (Perfect Electric Conductor)로 하였다.

그림 4와 같이 CRD의 중심을 잔향실의 $X = 0$ 인 YZ 평면 중 셀(0, 80, 85)에 위치시켰으며, 전기장 분포를 조사하기 위하여 시험 공간 중 5 개의 시험 평면에서 각 평면 당 16 개씩 총 80 개의 시험 포인트를 설정하여 전기장 세기를 추출하였고, 시험 공간은 무반사실에 대한 정의를 고려하여 결정하였다^[12].

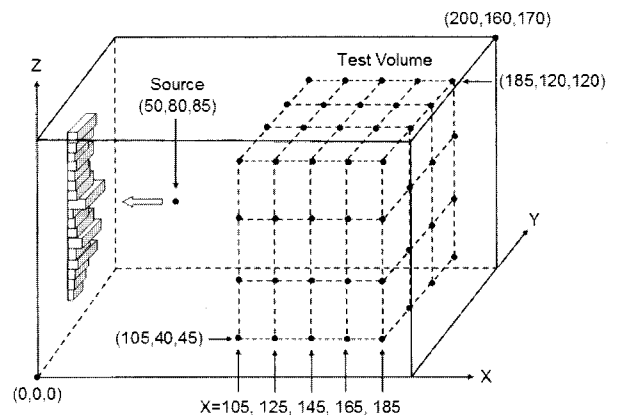


그림 4. 수치 해석을 위한 전자파 잔향실 모델링
Fig. 4. Modeling of a Reverberation Chamber for a Numerical Analysis.

2. 해석 결과

그림 4의 시험 공간에서 80 개의 전기장 강도 값들 중 75 %^[12]인 60 개의 샘플에 대한 평균값, 표준 편차, 최대값, 최소값은 표 2와 같다. 그림 5는 전자파 잔향실 내부에 CRD의 크기를 변화시켜가며 적절히 선정된 시험 공간^[3](YZ 평면 at X = 105, 125, 145, 165, 185) 의 표준 편차, 즉 전기장 균일도를 보여준다.

표준 편차는 CRD와 잔향실 내벽의 면적비가 증가함에 따라 20 %가 될 때까지 확연히 줄어들며, 40~80 % 까지 3.46~3.49 dB 의 일정치를 유지하다가, 80 % 이후부터 급격히 증가하여, 100 %에서는 4.49 dB로서 CRD를 부착하지 않았을 때보다 높은 수치를 나타내었다. EX, EY, EZ 각각에 대한 표준 편차와 평균은 표 3, 그림 6, 그리고 그림 7과 같다.

표 2. 시험 평면에서 전기장 강도 샘플 중 75 %의 특성
Table 2. 75 % of Sampled Electric Field Intensity at Test Plane.

E Diffuser	평균 (dBmV/m)	표준편차 (dB)	최대값 (dBmV/m)	최소값 (dBmV/m)
Non-diffuser	37.9	4.44	48.1	39.5
85×5(6%)	46.4	4.03	55.2	48.0
85×15(19%)	45.3	3.59	53.9	48.1
85×25(31%)	45.1	3.68	53.5	46.8
85×35(44%)	37.5	3.49	46.1	39.5
85×50(63%)	39.5	3.57	48.1	41.5
85×65(81%)	46.0	3.46	54.4	48.0
85×70(88%)	43.9	3.95	52.8	45.4
85×75(94%)	45.0	4.12	54.1	47.2
85×80(100%)	44.7	4.49	54.6	45.3

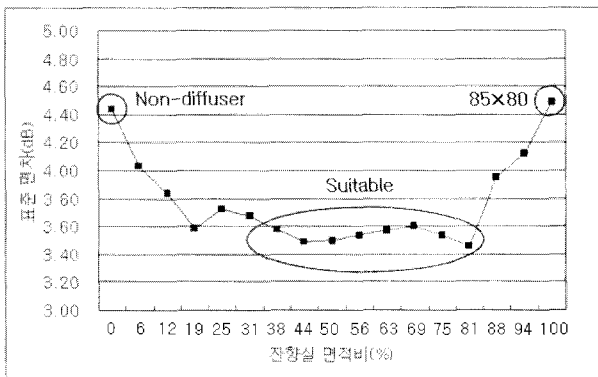


그림 5. 잔향실 면적비에 따른 전기장 표준 편차(dB)
Fig. 5. Standard Deviation of the E-field for the Ratio of Diffuser Area.

표 3. E_x, E_y, E_z 에 대한 평균(m)과 표준편차(σ)
Table 3. Mean and Standard Deviation of E_x, E_y, E_z Components.

E (dBmV/m)	E_x		E_y		E_z	
	m_x	σ_x (dB)	m_y	σ_y (dB)	m_z	σ_z (dB)
Non-diffuser	41.7	3.29	34.1	4.06	35.9	3.95
85×5(6%)	44.4	4.31	45.8	3.56	48.4	3.72
85×15(19%)	47.0	3.07	45.2	3.63	43.5	3.73
85×25(31%)	45.4	3.66	44.5	3.38	45.5	3.90
85×35(44%)	37.0	3.18	38.9	3.36	36.5	3.68
85×50(63%)	39.6	2.98	39.0	3.70	39.8	3.95
85×65(81%)	44.5	3.92	45.2	3.81	47.8	2.96
85×70(88%)	43.0	3.80	42.3	3.88	45.9	3.64
85×75(94%)	46.1	3.60	41.8	4.74	46.5	3.67
85×80(100%)	45.9	3.80	40.5	5.00	46.5	4.03

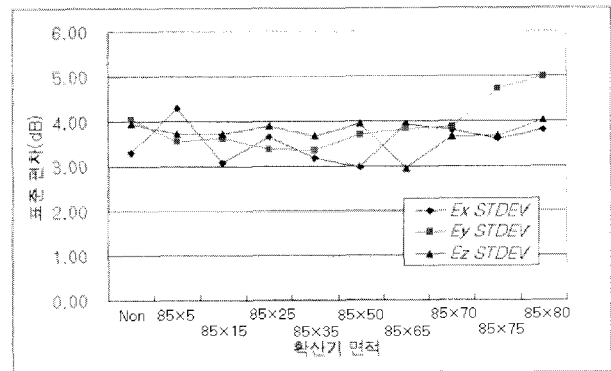


그림 6. CRD 면적에 따른 E 성분의 표준 편차(dB)
Fig. 6. The Standard Deviation of E-field Components for various CRD Dimensions.

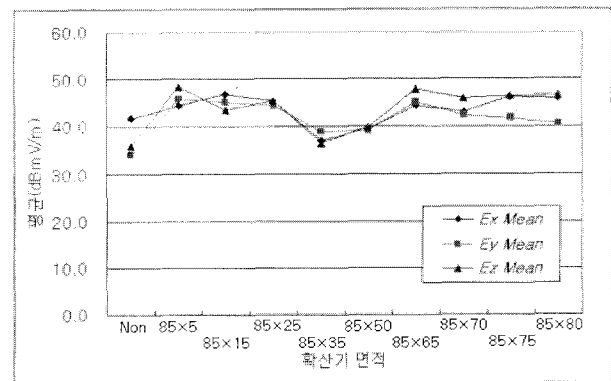
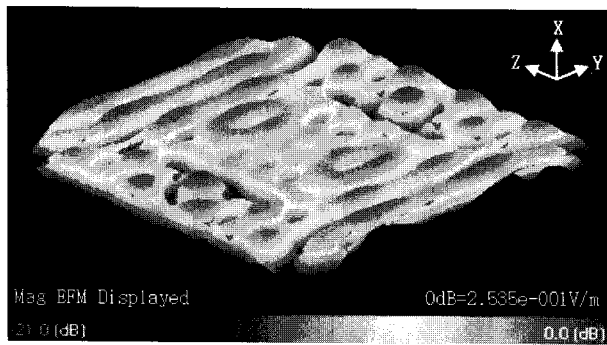


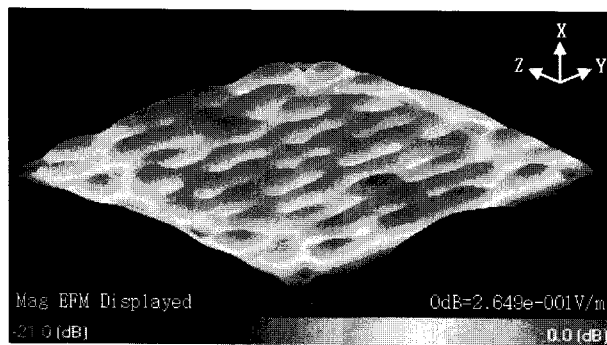
그림 7. CRD 면적에 따른 E 성분의 평균(dBmV/m)
Fig. 7. The Mean of E-field Components for various CRD Dimensions.

전기장 최대값에서 최소값을 뺀 공차의 경우 확산기가 없는 경우 8.6 dB였으며, 100 %인 경우 9.3 dB 였고, 40~80 %인 경우는 약 6.4 dB임을 알 수 있었다. 40~80 %인 경우 공차가 전기장 균일도의 조건인 6 dB^[12]를 만족하지는 못하였으나 그 차이가 약 0.4 dB로서 근소하였으며 나머지 경우보다 공차특성이 우수함을 알 수 있었다.

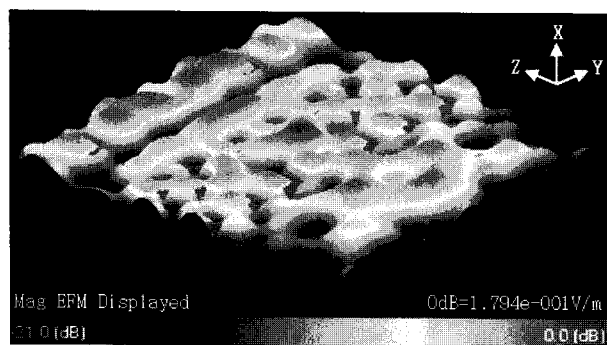
그림 6은 CRD 면적에 대한 각 성분 E_x , E_y , E_z 의 표준 편차를 나타내고 있으며, 각 성분들의 표준 편차



(a)



(b)



(c)

그림 8. X = 105인 YZ 평면에서 전기장 분포
(a) Non-Diffuser (b) 85 × 35 (c) 85 × 80

Fig. 8. Simulation Results of E-field at YZ Plane where X = 105.
(a) Non-Diffuser (b) 85 × 35 (c) 85 × 80

간 차이는 1 dB 이하임을 보여준다. 특히 CRD가 80 % 이상의 면적을 차지할 경우 각 E 성분의 표준 편차들 간 차이가 큰 것을 알 수 있다. 그림 7은 각 전기장 성분의 평균이 10 dBmV/m 이내의 편차를 가짐을 보여주며, 그림 8은 X = 105인 YZ 평면에서 전기장 분포 결과를 나타낸다. CRD가 부착되지 않은 잔향실과 CRD가 벽면 전체를 차지하는 잔향실은 전기장이 고르게 분포하지 않는 특성을 보였다. CRD가 전자파 잔향실 내 한쪽 벽면의 40~80 %를 차지하는 경우, 표준 편차가 3.46~3.57 dB로 확산기가 없는 경우 보다 약 1 dB 우수하였으며, 확산기가 100 %를 차지하는 경우는 확산기가 없는 잔향실의 표준 편차보다 높게 나옴을 알 수 있었다.

IV. 결 론

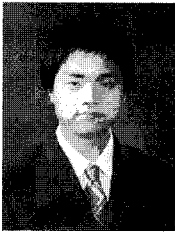
본 논문에서는 주파수 1~3 GHz 대역을 위한 Schroeder 방식의 CRD를 설계하고, 잔향실 벽면과 CRD 면적비 변화에 따른 전자파 잔향실 내부의 전기장 분포 특성 변화를 분석하였다. 분석 결과, 면적비가 40 ~80 %일 경우 표준 편차가 우수하였으며, CRD 면적이 내벽을 모두 차지할 경우의 표준 편차는 표준 편차가 가장 좋은 경우인 면적비 81 %보다 1.03 dB가 높아 전기장 균일도 특성이 좋지 않음을 보였다. 따라서 잔향실 내 CRD 설계 시, CRD 면적을 잔향실 한쪽 내벽의 44 %(85×35)로 설계하는 것이 면적 효율 대비 전기장 균일도가 가장 우수할 것으로 예상된다. 차후 공차 특성을 개선하면 CRD를 사용하여 소형 전자기기의 전자파 장애 및 복사 내성을 측정하기 위한 전자파 잔향실을 제작할 때 유용할 자료로 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] H. W. Ott, *Noise reduction techniques in electronic systems*, John Wiley & Sons, 2nd, 1988.
- [2] M. L. Crawford and G. H. Koepke, *Design, evaluation and use of a reverberation chamber for performing electromagnetic susceptibility/vulnerability measurements. NBS technical Note 1092*, National Bureau of Standards, Apr. 1986.
- [3] IEC 61000-4-21: *Testing and Measurement techniques - Reverberation chamber test methods*, 2003.

- [4] 이광순, 이중근, 정삼영, “전자파 확산방식을 이용한 잔향실 내부의 필드 분포 해석,” 한국 전자파 학회 논문지, vol. 11, no. 5, pp. 839-848, 2000년 8월
- [5] 이광순, 이중근, 정삼영, 김성철 “Schroeder Diffuser를 이용한 전자파 잔향실 내부의 필드 해석,” 춘계마이크로파 및 전파 학술대회 논문집, vol. 23, no. 1, pp. 497-500, 2000년 5월
- [6] 정삼영, 이광순, 이황재, 이중근, “전자파 장해 및 복사내성 측정용 전자파 잔향실 내부의 필드 특성,” 국방부 학술대회 논문집, pp. 58-62, 2000년 9월
- [7] M. Petirsch and A. J. Schwab, “Investigation of the Field Uniformity of a Mode-Stirred Chamber Using Diffusers Based on Acoustic Theory,” IEEE Trans. on EMC, vol 41, no. 4. pp. 446-451, Nov 1999.
- [8] 양욱, 이중근, “2D 확산기를 이용한 전자파 잔향실 내의 필드 분포 특성,” 한국 전자파 학회 논문지, vol. 16, no. 4, pp. 373-379, 2005년 4월
- [9] M. Mehta and J. Johnson, *Architectural Acoustics Principles and Design*, Prentice Hall, 1999.
- [10] K.S. Yee, “Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell’s equations in isotropic media,” IEEE Trans. on Antennas Propagation, vol. 14, pp. 302-307, May 1966.
- [11] G. M. Smith, *Numerical Solution of Partial Differential Equation: Finite Difference Method*, Oxford Clarendon Press, 1985.
- [12] IEC 61000-4-3: *Testing and measurement techniques - Radiated, radio - frequency, electromagnetic field immunity test*, 2006.

 저 자 소 개



손 용 호(학생회원)
 2006년 한양대학교 전자컴퓨터
 공학부 (공학사)
 2006년 3월~현재 한양대학교
 전자전기제어계측공학과
 석사 과정

<주관심분야 : EMI/EMC, 안테나 설계 및 해석>



김 정 훈(학생회원)
 1999년 한양대학교 전자공학과
 (공학사)
 2001년 한양대학교 전자통신전파
 공학과 (공학석사)
 2001년 8월~현재 한양대학교
 전자전기제어계측공학과
 박사 과정

<주관심분야 : EMI/EMC, MW 부품>



이 중 근(평생회원)
 1967년 서울대학교 전기공학과
 (공학사)
 1973년 미국 남플로리다 주립대학
 (공학석사)
 1979년 미국 남플로리다 주립대학
 (공학박사)

1979년~1988년 국방과학연구소 책임연구원
 1990년~1991년 한국전자파기술학회 회장
 1988년~현재 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수
 <주관심분야 : EMI/EMC, MW 부품, 칩 안테나>