

# Schroeder 확산기를 이용한 전자파 잔향실내의 필드 균일도 향상 및 최적화에 관한 연구

## Optimization and Improvements of Field Uniformity in a Reverberation Chamber with Schroeder Diffusers

김 정 훈 · 이 중 근\*

Jung-Hoon Kim · Joong-Geun Rhee\*

### 요 약

본 논문에서는 Schroeder 방식의 QRD(Quadratic Residue Diffuser)를 사용하여 전자파 잔향실 내부의 필드 균일도를 향상시키고, 전자파 잔향실 내벽 전체 면적 대비 QRD가 차지하는 면적비를 변화시키면서 필드 균일도를 향상시키는 최적의 면적비에 대하여 연구하였다. 1~3 GHz의 주파수 대역에서 QRD를 설계하였고, 전자파 잔향실의 전계 특성 및 필드 균일도 향상을 조사하기 위해 FDTD(Finite-Difference Time-Domain) 방법의 수치 해석이 이루어졌다. 2 GHz에서 QRD 크기가 잔향실 한쪽 내벽의 약 30~60 %일 경우 표준 편차가 가장 작았으며, 20 % 이하, 70 % 이상에서는 점차로 필드 균일도가 나빠짐을 알 수 있었다. 특히 QRD의 면적이 30 %일 때와 적용되지 않은 경우를 비교한 결과, 전자의 경우 표준 편차가 후자의 경우에 비하여 1.53 dB가 향상되는 것을 확인하였다.

### Abstract

This paper presents an improvement of field uniformity in a reverberation chamber with QRDs(Quadratic Residue Diffuser) and also shows the optimal dimension of the QRDs. The QRD is designed for 1~3 GHz frequency 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 when the QRD has 30~60 % coverage of one side of the reverberation chamber and the field uniformity is worsened when the coverage of the QRD is either below 20 % or above 70 % of the area of the side wall. Particularly, the standard deviation of test volume in the reverberation chamber with 30 % coverage of QRD is improved by 1.53 dB compared to that of the reference chamber with no QRDs.

Key words : Reverberation Chamber, FDTD, Field Uniformity, Schroeder Diffuser

### I. 서 론

최근 통신, 컴퓨터, 자동화, 그리고 그 밖의 목적으로 사용되는 전자회로가 폭넓게 보급됨에 따라 다양한 회로가 근접한 위치에서 동작하게 되었다. 따

라서 시스템 설계자들은 장비가 외부 노이즈(noise) 원에 의해 영향을 받지 않고 그 자체가 주위 환경에 영향을 미치는 노이즈 원이 되지 않도록 설계해야 하며, EMC(Electromagnetic Compatibility(전자파 적합성)) 시험을 만족시켜야 한다<sup>[1]</sup>. 기존의 EMC 시험은

한양대학교 전자전기제어계측공학과(Dept. of Electronic, Electrical, Control and Instrumentation Engineering, Hanyang University)

\*한양대학교 전자컴퓨터공학부(School of Electrical Engineering and Computer Science, Hanyang University)

· 논문 번호 : 20061214-152

· 수정완료일자 : 2007년 2월 14일

전자파 무반사실(anechoic chamber)에서 측정되어 왔지만, 전자파 무반사실은 제작 비용이 많이 들고, 유지 및 보수 비용과 균일 전개면이 좁은 단점이 있으며, 무엇보다 기존의 시설로는 1 GHz 이상 높은 주파수 대역의 측정이 불가능하다.

이에 대한 대책으로, 전자파 잔향실(reverberation chamber)이 전자파 장애 및 복사 내성 측정을 위한 대응 시험 시설로서 사용 가능하다는 연구 결과가 미국 국립표준기술연구원(NIST: National Institute of Standards and Technology)에서 발표되었고<sup>[2]</sup>, 국제무선장해특별위원회(CISPR: International Special Committee on Radio Interference)에서 전자파 잔향실에 대한 규격을 IEC 61000-4-21에 소개하고 있다. 전자파 내성 시험의 주파수 범위를 80 MHz~6 GHz로 확장됨에 따라 이 주파수 대역에서 시험장으로 활용할 수 있는 전자파 잔향실은 이에 대한 효과적인 대책이라 할 수 있겠다.

전자파 잔향실의 체적과 구조가 결정되면 잔향실 내부의 필드 균일도를 확보할 수 있는 하한 주파수를 계산할 수 있으며, 필드 균일도를 향상시키기 위해 일반적으로 스테러(stirrer)<sup>[3]</sup> 또는 확산기(diffuser)<sup>[3],[4]</sup>를 이용하여 전자계의 균일도를 확보하고 있다. 스테러를 사용할 경우, 측정 소요시간이 긴 단점이 있으며<sup>[5]</sup>, 확산기를 사용할 경우, 설계 주파수 대역이 너무 넓으면 확산기의 물리적 크기가 커져<sup>[4]</sup> 현실적으로 구현이 불가능한 단점이 있다.

일정한 체적에서 필드 균일도의 향상을 위해 삼각형 구조<sup>[6]</sup> 및 비대칭적 구조의 잔향실 형태에 관한 연구<sup>[7]</sup>가 있었으며, 확산기의 배열, 적용 주파수, 모양에 따른 필드 분포 변화와 균일도에 대한 연구가 진행되었다<sup>[8]~[10]</sup>.

본 논문에서는 QRD가 잔향실의 한 쪽 내벽에서 차지하는 면적비를 변화시켜가면서 필드 균일도의 특성을 조사하였다.

## II. 전자파 잔향실 설계

본 논문에서는 필드 균일도 향상에 관한 QRD 효율을 평가하기 위해 기준 전자파 잔향실을 그림 1과 같이 설계하였다.

### 2-1 전자파 잔향실의 구조

잔향실 내부의 균일한 전자계 분포는 잔향실 내부의 발생 가능한 총 모드 수, 스테러 또는 확산기의 효율, 그리고 전자파 잔향실 제작을 위해 사용된 매질의 Q인자 등에 의해서 결정된다<sup>[5]</sup>. 그림 1의 기준 전자파 잔향실은 식 (1)에 의해<sup>[2]</sup> 하한 주파수 800 MHz에서 최소 60모드 이상을 갖도록 설계되었다.

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

여기서  $f$ 의 단위는 [MHz]이다.

### 2-2 Schroeder 방식의 확산기 설계

Schroeder 확산기는 Quadratic Residue Sequence(이차 나머지 행렬(QRS))를 이용하여 설계되는 Quadratic Residue Diffuser(QRD)<sup>[3]</sup>로서 기본 구조는 그림 2와 같다. 본 논문에서는 1~3 GHz에 적용되는 QRD가 설계되었다.

Quadratic residue sequence,  $S_n$ 은 식 (2)와 같다.

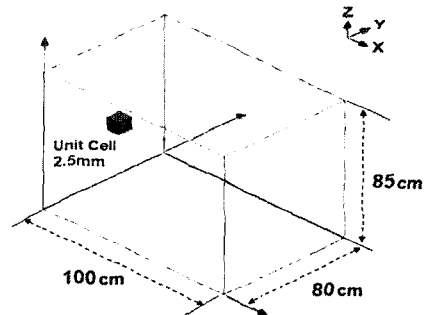


그림 1. 전자파 잔향실 구조

Fig. 1. Structure of the reverberation chamber.

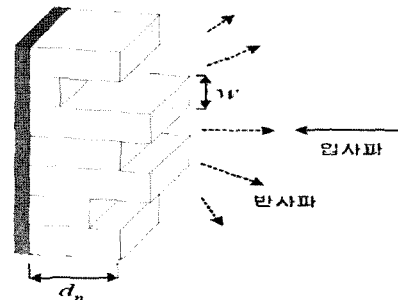


그림 2. 확산기의 구조

Fig. 2. Structure of a diffuser.

$$S_n = n^2 \bmod N \quad (2)$$

여기서  $n$ 은 정수이고,  $N$ 은 3 이상의 소수이다.  $S_n$ 은  $n^2$ 을  $N$ 으로 나눈 나머지며, sequence는  $N$ 을 주기로 난수가 반복된다.

QRD에서 Well의 폭(width)과 깊이(depth)는 식 (3), (4)에 의해 결정되며, 세로 길이( $L$ )와 주기는 커질수록 잔향실의 효율을 증가시킨다<sup>[11]</sup>.

$$w = \frac{\lambda_{f_{max}}}{2} \quad (3)$$

$$d_n = \frac{S_n}{N} \frac{\lambda_{f_{min}}}{2} \quad (4)$$

$$N = 2m \frac{\lambda_{f_{min}}}{\lambda_{f_{max}}}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

여기서  $\lambda_{f_{min}}$ 와  $\lambda_{f_{max}}$ 은 QRD의 적용 주파수인 1 GHz와 3 GHz에서의 파장이다.

일반적으로  $m, N$ 은 클수록 좋으나<sup>[11]</sup>, 본 논문에서는 잔향실에 QRD가 부착되는 한 쪽 내벽(YZ)의 크기를 고려하여 QRD를  $m=2, N=17$ 로 설계하였다. 표 1은 설계된 QRD와 잔향실의 면적비를 나타내며, 그림 3은 설계된 QRD를 보여준다.

표 1. QRD와 잔향실의 면적비  
Table 1. The ratio of the QRD to the reverberation chamber wall area.

Type	Diffuser size (H×L) [cm]	YZ 벽면에서 QRD가 차지하는 면적비
m=2, N=17	85×5	6 %
	85×10	12 %
	85×15	19 %
	85×20	25 %
	85×25	31 %
	85×30	38 %
	85×40	50 %
	85×45	56 %
	85×50	63 %
	85×60	75 %
	85×65	81 %
	85×70	88 %
	85×75	94 %
85×80	100 %	

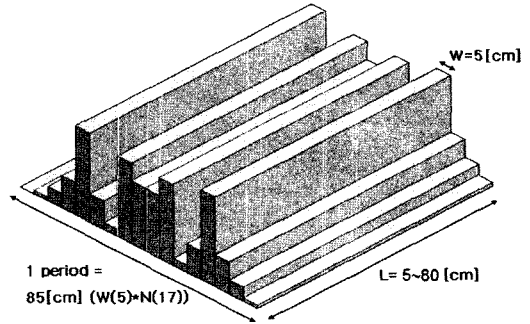


그림 3. 설계된 Schroeder QRD( $m=2, N=17$ )  
Fig. 3. Geometry of the designed Schroeder QRD( $m=2, N=17$ ).

그림 3과 같이 설계된 QRD의 크기를 85×5(6%)~85×80(100%)으로 증가시키면서 필드 균일도의 표준 편차, 전계 강도 및 평균, 공차를 분석하였다.

### III. 전자파 잔향실 내부의 전계 분포 해석

#### 3-1 전자파 잔향실의 모델링

그림 3과 같이 설계된 QRD를 적용한 잔향실 내부의 전계 분포를 조사하기 위해 FDTD 수치 해석 방식을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션을 위해 사용된 상용 소프트웨어는 Remcom사의 XFDTD 5.1이며, 시간과 공간에 대한 전자계 분포를 해석하기 위해 Yee 알고리즘<sup>[12]</sup>이 적용되며 유한 차분 방정식이 사용된다. 전자파 잔향실에 대한 구조는 그림 4와 같이 모델링하였으며, 2 GHz에서 전자계 특성을 파악하기 위해 기본 셀의 크기는 QRD의  $d_n$  및  $\lambda_{f_{max}}$ 를 고려하여  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z=2.5$ [mm]로 설정하였다.

Courant-Friedrick-Lewy(CFL) 안정성 조건<sup>[13]</sup>을 만족시키기 위하여 이산 시간을 4.815 ps(=  $\Delta t$ ) 간격으로 결정하였으며, 전체 시간 간격 수는 35,000으로 설정하였다. 전자계 발생을 위한 소스는 2 GHz, 1 V 정현파 포인트 소스를 사용하여 셀(110, 170, 180)에서 (-)X 방향으로 전계( $E_x$ ) 직선 편파를 입사하였다. 전자파 잔향실 및 확산기의 매질은 PEC(Perfect Electric Conductor) 셀로 모델링하였고, 외부 경계조건은 Liao의 ABC(Absorbing Boundary Condition)로 하였다.

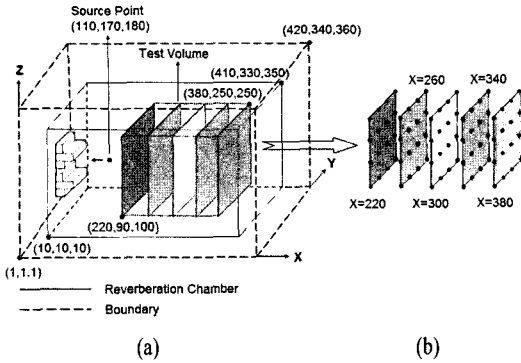


그림 4. (a) 수치 해석을 위한 전자파 잔향실 모델링, (b) 시험 평면 및 평면내의 80개 시험 points  
 Fig. 4. (a) Modeling of a reverberation chamber for numerical analysis, (b) Test planes and 80 test points.

그림 4에서 QRD의 중심을 잔향실의  $x=10$  평면의 중심(10, 170, 180)에 위치시켰으며, 전계 분포를 조사하기 위하여 그림 4(b)와 같이 시험 공간(test volume) 중 5개의 시험 평면에서 각 평면 당 16개씩 총 80개의 시험 포인트를 설정하여 전계 강도를 추출하였고<sup>[14]</sup>, 시험 공간은 EN 61000-4-21에 설명된 무반사실에 대한 정의를 고려하여 결정하였다<sup>[5]</sup>.

### 3-2 해석 결과

표 2는 그림 4(b)의 시험공간에서 80 개의 전계 강도 값 중 75 %<sup>[14]</sup>인 60개의 샘플에 대한 평균값, 표준 편차, 전계( $E$ )의 최대값, 최소값의 결과를 나타내며, 그림 5는 전자파 잔향실 내부에 QRD의 크기를 변화 시켜가며 적절히 선정된 test volume<sup>[5]</sup>(yz 평면 at  $x=220, 260, 300, 340, 380$ )의 표준 편차(필드 균일도)를 보여준다.

표 2와 그림 5에 의하면, 확산기와 전자파 잔향실 내벽의 면적비가 6~30 % 증가함에 따라 표준 편차가 줄어들며, 31~60 %까지 3.25~3.31 dB의 일정한 표준 편차를 유지하다가, 60~95 %까지 표준 편차가 완만히 증가하며, 100 %에서는 오히려 표준 편차가 4.25로 나빠짐을 알 수 있었다.

전자파 잔향실의 특성중 하나인 전계 강도는 QRD의 면적비가 100 %일 때 오히려 평균, 최대, 최소값이 전부 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 최대값에서 최소값을 뺀 공차(tolerance)의 경우, 약 95 %

표 2. 시험 평면 전계 강도의 샘플 중 75 %의 특성  
 Table 2. 75 % of sampled electric field intensity at test plane.

Diffuser	$E$	평균 (dBmV /m)	표준 편차 (dB)	최대값 (dBmV /m)	최소값 (dBmV /m)	공차 (dB)
Non-diffuser		31.6	4.81	42.6	33.9	8.77
85×5		28.4	3.75	35.3	28.7	6.58
85×15		26.5	3.60	34.5	28.5	6.07
85×25		32.8	3.28	40.9	34.9	5.97
85×35		26.8	3.31	34.8	28.9	5.91
85×50		28.8	3.25	36.6	30.4	6.11
85×65		28.2	3.37	36.4	30.9	5.55
85×70		28.0	3.42	36.5	30.9	5.64
85×75		28.2	3.40	36.1	30.5	5.60
85×80		26.0	4.25	35.7	28.4	7.34

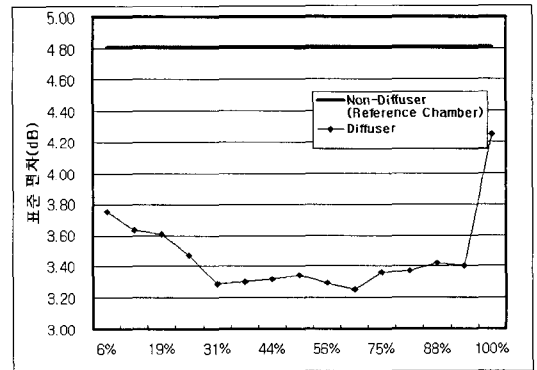


그림 5. 잔향실 면적비에 따른 전계 표준 편차(dB)  
 Fig. 5. The E-field standard deviation for the ratio of diffuser area(dB).

가 될 때까지 점차로 감소하며 좋은 특성을 나타내었으며, 100 %일 때는 공차가 7.34 dB로서 필드 균일도의 조건인 6 dB<sup>[14]</sup>를 만족시키지 못하였다. 표 3과 그림 6, 7은  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$  각각에 대한 표준 편차와 평균을 보여준다.

그림 6은 확산기 면적에 대한  $E$  성분들의 표준 편차(dB)가 거의 일정하며, 각 성분  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ 의 편차가 1 dB 이하임을 나타내고 있다.

그림 7은 85×80인 경우를 제외하고 각  $E$  성분의

표 3.  $E_x, E_y, E_z$ 에 대한 평균 ( $m$ )과 표준편차 ( $\sigma$ )  
Table 3. Mean and standard deviation of  $E_x, E_y, E_z$  components.

E(dBmV/m)	$E_x$		$E_y$		$E_z$	
	$m_x$	$\sigma_x$ (dB)	$m_y$	$\sigma_y$ (dB)	$m_z$	$\sigma_z$ (dB)
Non-diffuser	36.2	2.83	21.2	3.43	31.6	3.35
85×5	29.8	2.87	26.0	3.45	25.8	3.30
85×15	28.8	2.9	25.3	3.83	25	3.49
85×25	32.2	3.78	33.2	2.95	32.9	3.13
85×35	28.5	2.59	25.6	3.73	26	3.36
85×50	27.7	3.71	30.2	2.82	28.4	3.03
85×65	28.3	3.73	28.1	3.02	28.0	3.33
85×70	29.3	3.55	28.0	3.42	27.3	3.39
85×75	29.6	3.28	28.3	2.9	26.6	3.71
85×80	28.8	3.55	20.6	3.2	26.8	3.52

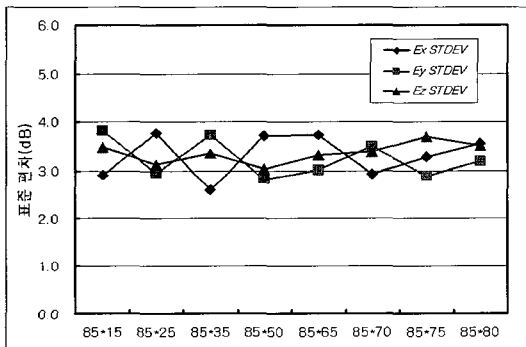


그림 6. 확산기 면적에 대한  $E$  성분의 표준 편차 (dB)

Fig. 6. The standard deviation of  $E$ -field components for diffuser area(dB).

평균에 대한 편차가 5 dBmV/m 이내에 있음을 보여 준다. 특히 85×80인 경우, 각 성분  $E_x, E_y, E_z$ 의 평균 값의 편차가 크며  $E_y$  편파에 대해 영향을 갖는다는 것을 알 수 있었다.

그림 8은 QRD가 0%, 31%, 100%인 경우에 대한 잔향실 내부의 편파 특성을 알아보기 쉽게 test point 80개에서 중간 75%를 추출하여<sup>[14]</sup>,  $E_x, E_y, E_z$ 의 전계 강도를 나타낸 것이다. QRD를 부착하지 않는 기본 잔향실을 살펴보면, 최대와 최소값의 차이가  $\Delta E_x=0.11$  V/m,  $\Delta E_y=0.02$  V/m,  $\Delta E_z=0.07$  V/m로 나타

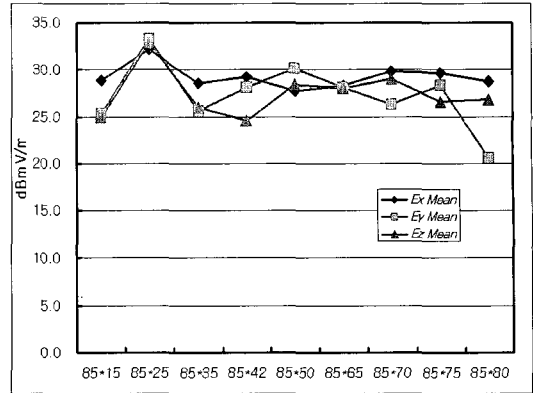


그림 7. 확산기 면적에 대한  $E$  성분의 평균(dBmV/m)

Fig. 7. The means of  $E$ -field components for diffuser area(dBmV/m).

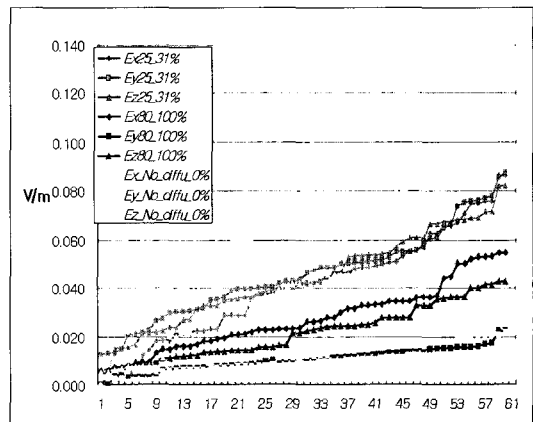


그림 8. 시험 공간에서 전계 분포(75% of samples)  
Fig. 8.  $E$ -field distribution at test planes(75% of samples).

났으나, QRD 크기가 잔향실의 한쪽 내벽에 31%를 차지할 경우  $\Delta E_x=0.08$  V/m,  $\Delta E_y=0.07$  V/m,  $\Delta E_z=0.08$  V/m로 고르게 나타났고, 100%인 경우  $\Delta E_x=0.05$  V/m,  $\Delta E_y=0.02$  V/m,  $\Delta E_z=0.04$  V/m로 비교적 작으나 전계 강도가 가장 낮음을 알 수 있다.

그림 9는  $x=220$  yz 평면에서 최대 전계 강도( $E_t$ )를 0 dB로 하여 계산한 전계 분포 모양과 시험 포인트 16개의 위치를 보여준다. 최대 전계 강도( $E_t$ )와 필드 균일도면에서 85×25인 diffuser를 부착한 전자파 잔향실이 우수했으며, QRD가 부착되지 않거나 전체의 벽면을 차지할 때는 오히려 나빠짐을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

DMB와 무선 LAN 등으로 전자파 환경이 악화될 것으로 예상되는 주파수 1~3 GHz 대역의 전자파 확산기를 설계하고, 확산기 크기를 변화시켜가며 전자파 잔향실에 적용하였다. 확산기가 부착된 전자파 잔향실에 대해 FDTD 방법으로 시뮬레이션을 한 결과, 확산기 면적 변화에 따른  $E$  성분의 평균은 25~30 dBmV/m 사이에 분포하여 거의 일정하였고, 시험 공간에서의 전계 분포를 살펴보았을 때 QRD가 장착되지 않은 경우와 잔향실 내벽의 100%를 차지하는 경우  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$  성분의 크기 분포가 고르지 못함을 알 수 있었다. 특히, 확산기 면적이 31%(85×25)와 100%(85×80)를 비교하였을 때, 100%인 경우 오히려 평균값의 크기도 작고 필드 분포도 고르지 못하였고, 표준 편차에서는 QRD 크기가 30~65%일 때 가장 좋은 필드 균일도를 나타내었다.

공차(tolerance)는 25~95%일 때 6 dB 이하<sup>[14]</sup>를 만족시켜 QRD의 효율을 입증하였고, 100%일 때는 공차가 7.34 dB로 크게 나왔다.

따라서 소형 전자기기의 전자파 장애 및 복사 내성 측정을 위한 대응 시험 시설로 전자파 잔향실을 제작할 때, QRD를 전자파 잔향실 한쪽 내벽의 약 30%로 설계하는 것이 표준 편차, 전계 성분의 평균(전력 효율), 전계 분포(편파) 및 공차 측면에서 우수한 특성을 가질 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] H. W. Ott, *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*, John Wiley & Sons, 2nd, pp. 1-4, 1988.
- [2] M. L. Crawford, 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] M. Petirsch, 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.
- [4] 이광순, 이중근, 정삼영, "전자파 확산방식을 이

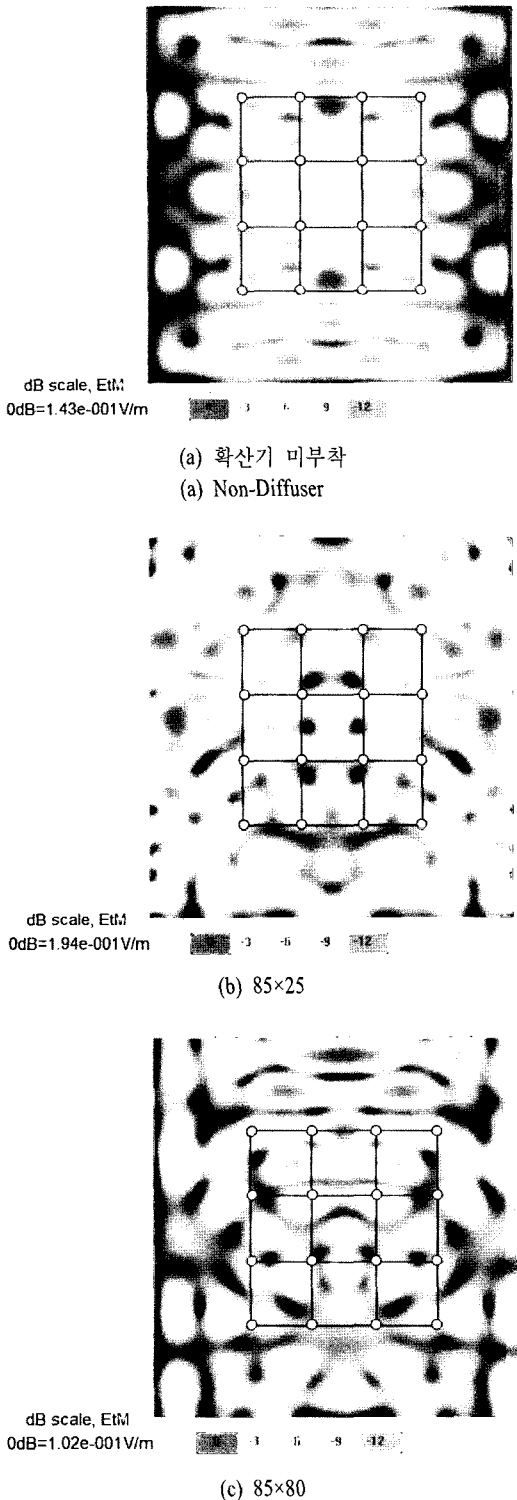


그림 9.  $x=220$ 인  $yz$  평면에서 전계 분포  
Fig. 9. Simulation results of  $E$ -field magnitude at  $yz$  plane of  $x=220$ .

용한 잔향실 내부의 필드 분포 해석", 한국전자  
 과학회논문지, 11(5), pp. 839-848, 2000년 8월.

[5] IEC 61000-4-21: *Testing and Measurement Techniques-Reverberation Chamber Test Methods*, 2003.

[6] 김성철, 이중근, "Schroeder 확산기를 적용한 삼각  
 형 전자파 잔향실의 필드 균일도 특성", 한국전  
 자과학회논문지, 13(4), pp. 373-378, 2002년 4월.

[7] 정삼영, 이중근, 이황재, "비대칭적 구조 전자파  
 잔향실 전자기장 균일도 해석", 한국전자과학회  
 논문지, 12(5), pp. 837-843, 2001년 8월.

[8] 이광순, 이중근, 정삼영, "전자파 잔향실 내 확산  
 기 배열 조건에 따른 필드분포 특성", 한국전자  
 과학회논문지, 21(2), pp. 227-233, 2001년 2월.

[9] 임옥채, 이중근, "이중 대역 확산기를 이용한 전  
 자파 잔향실 시험 주파수 대역 확장 및 전자기장  
 균일도 향상에 관한 연구", 한국전자과학회논문

지, 17(1), pp. 74-80, 2006년 1월.

[10] 양욱, 이중근, "2D 확산기를 이용한 전자파 잔향  
 실 내의 필드 분포 특성", 한국전자과학회논문  
 지, 16(4), pp. 373-379, 2005년 4월.

[11] M. Mehta, J. Johnson, *Architectural Acoustics  
 Principles and Design*, Prentice Hall, 1999.

[12] K. S. Yee, "Numerical solution of steady-state  
 electromagnetic scattering problems using the time  
 dependent Maxwell's equation", *IEEE Trans. An-  
 tennas Propagat.*, vol. 14, pp. 302-307, 1966.

[13] G. M. Smith, *Numerical Solution of Partial Diffe-  
 rential Equation: Finite Difference Method*, Ox-  
 ford Clarendon Press, 1985.

[14] IEC 61000-4-3: *Testing and Measurement Techni-  
 ques-Radiated, Radio-Frequency, Electromagnetic  
 Field Immunity test*, 3rd, 2006.

김 정 훈



Antenna, CISPR

1999년 2월: 한양대학교 전자공학  
 과 (공학사)  
 2001년 8월: 한양대학교 전자통신전  
 파공학과 (공학석사)  
 2001년 8월~현재: 한양대학교 전자  
 전기제어계측공학 박사과정  
 [주 관심분야] EMI/EMC, MW 부품,

이 중 근



1967년: 서울대학교 전기공학과 (공  
 학사)  
 1973년: Univ. of South Florida 전자  
 공학과 (공학석사)  
 1979년: Univ. of South Florida 전자  
 공학과 (공학박사)  
 1990년: 한국전자과학회 초대 회장  
 1993년~1997년: 한국 아마추어 무선연맹 이사장  
 1998년~현재: 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수  
 2004년~현재: IEC/CISPR/SC-H/WG4 Convener  
 [주 관심분야] EMC, MW 부품, Antenna, CISPR, ITU-R