

경사진 QRD를 이용한 전자파 잔향실 내 전자기장 균일도 향상을 위한 연구

An Improvement of the Field Uniformity inside the Reverberation Chamber with Inclined QRD Set

이 병 준 · 김 혜 광 · 이 중 근*

Byoung-Jun Lee · Hye-Kwang Kim · Joong-Geun Rhee*

요 약

Schroeder 방식의 QRD(Quadratic Residue Diffuser) 구조에서 더욱 진화한 경사진 QRD를 사용하여 전자파 잔향실(reverberation chamber) 내의 전자기장 균일도를 향상시켰다. FDTD(Finite-Difference Time-Domain) 수치 해석 방식을 이용하여 2~3 GHz 대역에서의 전자파 잔향실 내의 전자기장의 분포를 해석하였다. QRD 경사 각도의 조절과 경사 방향을 전환하여 전자파 잔향실 내부의 시험 공간에서의 E_x , E_y , E_z 샘플의 표준편차 및 공차가 각각 0.3 dB, 2.5 dB 향상되고 전체적으로 전자기장 분포의 균일성이 확보되었다.

Abstract

The field uniformity inside the reverberation chamber has been improved using sets of quadratic residue diffuser (QRD). The electromagnetic field inside the reverberation chamber with the dimension of 100×80×80 cm has been analyzed by the finite-difference time-domain(FDTD) method. The calculated fields in a 40×30×30 cm test volume have been sampled to obtain a standard deviation and field uniformity. Results show that the standard deviation of the calculated field and uniformity have been improved by varying angles and orientation of the inclined surfaces of the QRDs installed inside the reverberation chamber.

Key words : Reverberation Chamber, Diffuser, Gyration QRD, Tolerance, FDTD

I. 서 론

무선 주파수의 사용이 더욱 활발해짐에 따라 전자파 장애 및 내성에 대한 전자 제품의 시험이 중요해지고 있고, 그 주파수의 규제 범위도 1~18 GHz까지 확장되었다. 다양한 서비스에 맞게 진화하고 있는 전자 제품에 대한 적절한 복사성 전자파 내성 시험 방법으로, 전자파 잔향실을 이용하고 있으며, 잔향실 내에는 전자파 균일도 향상을 위한 전자파 교반기(stirrer)와 전자파 확산기(diffuser)가 주로 사용되

고 있다^[1]. 간단한 구조, 제작의 용이, 시뮬레이션 시간 단축, 잔향실 내부의 넓은 시험 공간 확보에 있어 전자파 확산기가 교반기보다 효율적이다. 따라서 본 논문에서는 잔향실 내의 전자파 균일도 향상을 위해 확산기를 이용하였다. 특히 일정한 체적 내에서 전자기장 균일도의 향상을 위해 비대칭적 구조의 잔향실 형태에 관한 연구가 진행된 바 있었으며, 확산기의 배열, 적용 주파수, 모양에 따른 전자기장 분포 변화와 균일도에 대한 연구가 진행되었다^[2]. 잔향실 내의 전자기장 균일도는, 사용 주파수에 맞추어 설

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 : 20061222-159

· 수정완료일자 : 2007년 5월 4일

계된 확산기의 효율과 잔향실의 크기에 의해 좌우되는 모드 수로 결정된다^[1]. 잔향실 내의 전자파를 균일하게 확산시키면서, 특히 좋은 편파 특성을 갖도록 하기 위해, 확산기 상단의 반사면이 기울어지도록 설계하여, 확산되는 전자파의 방향을 전환하였다. 잔향실 내의 시험 공간에 대한 전자기장 분포의 균일도를 해석하기 위해 유한 차분법(finite-difference method)을 기초로 하는 FDTD를 이용하였으며, 2~3 GHz(중심 주파수 2.5 GHz)에 맞추어 수치 해석을 수행하였다^[3]. 잔향실 내의 전자기장 균일도 향상을 확인하기 위해, 시험 공간을 9개로 분할한 후, 그 중 5개의 면을 골라 전자기장 세기를 추출하였고, 이에 대한 표준편차를 구하여 전자기장 분포를 비교하고 편파의 특성을 분석하였다.

II. 전자파 잔향실 설계

현재 블루투스(bluetooth), 무선 랜(WLAN), 무선 가입자 회선(WLL), 위성 DMB 등으로 사용되고 있는 2~3 GHz 대역을 시험하기 위해 2.5 GHz를 기준으로 확산기를 설계하였다. 전자파 잔향실은 국제 무선 장애 특별 위원회(CISPR: International Special Committee on Radio Interference)에서 규정한 IEC 61000-4-21 규격에 준하여 설계하였다^[4].

2-1 전자파 잔향실 내부의 모드 분포

잔향실과 같은 일정한 체적 내에서 전자기장의 균일도를 확보하기 위해서는, NBS(National Bureau of Standards) Technical Note 1092에 규정된 바와 같이 최소 60모드 이상을 가져야 하며^[3], 이는 체적의 구조에 대한 공진 주파수(resonant frequency)에 의해 결정된다. 잔향실 내부가 비유전율 1일 경우(air), 직사각형 구조($x=100, y=80, z=80(\text{cm})$)에 대한 공진 주파수는 식 (1)과 같다^[4].

$$f_{mnp} = 150 \sqrt{\left(\frac{m}{x}\right)^2 + \left(\frac{n}{y}\right)^2 + \left(\frac{p}{z}\right)^2} \text{ MHz} \quad (1)$$

이 공진 주파수를 이용하여 직사각형 구조에 대한 전체 모드 수는 다음과 같이 구할 수 있다^[4].

$$N_m(f) = \frac{4\pi}{3} xyz \left(\frac{f}{150}\right)^3 \times \frac{1}{8} \times 2 = \frac{\pi}{3} xyz \left(\frac{f}{150}\right)^3 \quad (2)$$

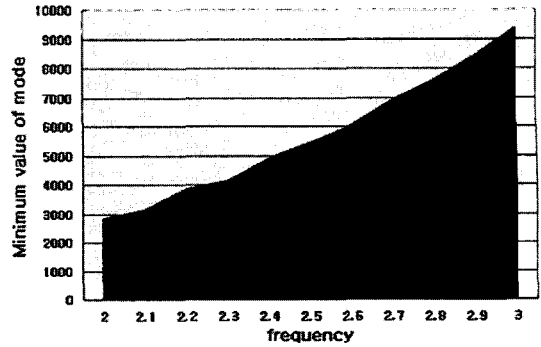


그림 1. 전자파 잔향실 내의 모드 수 분포
Fig. 1. Number of modes inside the reverberation chamber.

잔향실 내에서 시험 가능한 하한 주파수를 결정하기 위하여 2~3 GHz 대역의 주파수에 따른 잔향실 내부의 모드 개수는 그림 1에 나타나 있다^[4].

2-2 Deflected QRD Set의 설계

2-2-1 기본 구조의 QRD 설계

QRD는 음향 효과를 극대화하기 위해 1975년 독일 Schroeder에 의해 처음 소개되었고, 1999년 독일 Markus Petrisch와 Adolf Josef Schwab에 의해 직사각형 구조의 전자파 잔향실내에서 주파수축에 대해 모드가 균일하게 분포하도록 하는 전자기장 균일도 실험이 이루어졌다^[5]. 활발하게 이용되고 있는 2~3 GHz 주파수 범위에 대한 시험을 하기 위해 확산기의 구조를 설계하였다. QRD는 여러 개의 골(well)로 구성된 모습을 하고 있는데, 이 골의 폭은 다음과 같이 구한다^[3].

$$f_{\max} = 3 \text{ GHz}, \quad \lambda_{f_{\max}} = \frac{c}{f_{\max}}$$

$$w = 0.5 \lambda_{f_{\max}} \text{ cm} = 0.5 \times 10 \text{ cm} = 5 \text{ cm} \quad (3)$$

QRD의 벽의 개수는 N 으로 나타내며, m 이 크면 잔향실 내의 전자기장 균일도는 향상되지만, 각각 다른 방향으로 전자파를 반사시키기 위하여 동일한 크기의 확산기를 총 4개 붙인 확산기 세트를 만들고 자 잔향실의 크기에 비례하여 $m=2$ 로 설계하였다.

$$N_w = \frac{2m\lambda_{f_{\min}}}{\lambda_{f_{\max}}}, \quad m=2 \quad (4)$$

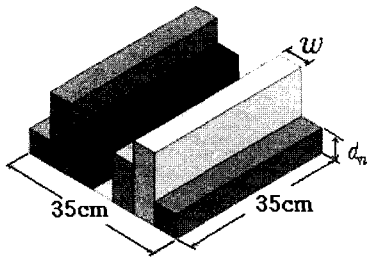


그림 2. Schroeder 확산기 설계
Fig. 2. Design of Schroeder's diffuser.

표 1. 1주기 확산기의 골의 깊이(\$d_n\$)

Table 1. The depth of a diffuser of one period.

\$n\$	\$S_n\$	\$d_n(\text{cm})\$
0	0	0
1	1	1.07
2	4	4.29
3	2	2.14
4	2	2.14
5	4	4.29
6	1	1.07

여기서 확산기의 기본 크기가 결정되는데, \$N\$값보다 큰 가장 가까운 소수가 골의 개수 \$n\$이 된다. \$N=6\$이므로 \$n=7\$이다. 골의 깊이(depth)는 하한 주파수 (\$f_{\min}\$)에 의해 결정되며, \$n\$번째 수열은 \$S_n = |n^2 - jN|\$이다.

$$\text{골의 깊이} : d_n = \frac{S_n \lambda_{f_{\min}}}{2N} \quad (5)$$

여기서 \$j\$는 \$0 \leq n^2 - jN\$을 만족하는 최대값을 선택하여 결정된다^[3].

2-2-2 선회형(Gyration) 및 Inclined QRD 세트 설계

같은 모양의 확산기를 각기 다른 4개 방향으로 구

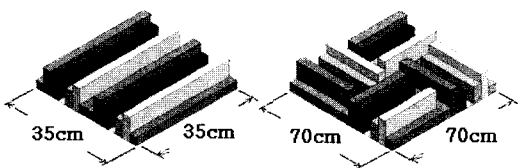


그림 3. 선회형 QRD Set의 설계
Fig. 3. Design of the gyration QRD Set.

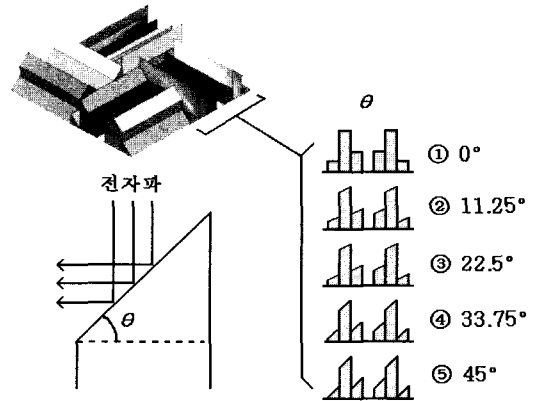


그림 4. 각도에 따른 확산기의 종류
Fig. 4. Reflected QRD set with various gradients.

표 2. 각도에 따른 반사면의 종류

Table 2. Reflected planes with various gradients.

종류	①	②	③	④	⑤
각도(\$\theta\$)	\$0^\circ\$	\$11.25^\circ\$	\$22.5^\circ\$	\$33.75^\circ\$	\$45^\circ\$
길이차이	0	5	10	15	20

성하여 편파 특성이 더욱 향상되도록 하였다.

선회형(gyration) QRD의 효과를 더욱 극대화하기 위하여 QRD의 상단 반사면의 각도 \$\theta\$를 각각 11.25, 22.5, 33.75, 45로 변화시켜 설계하였다.

확산기의 반사 각도를 조절하지 않은 기본형(\$0^\circ\$)과 11.25~45°까지 4단계로 반사각을 구분하여 총 5개의 확산기를 설계하였으며, 시뮬레이션 툴의 편파 상골의 마주 보는 두 번의 높이에 차이를 두어 확산기의 상단 면이 기울어지도록 설계하였다.

III. 전자파 잔향실 내부의 전자기장 분포 해석

3-1 전자파 잔향실의 모델링

정해진 시험 공간의 내부를 시간에 따른 전자기장 분포를 해석하기 위해서 FDTD 방법을 자주 이용한다. 본 논문에서도 또한 확산기가 부착된 전자파 잔향실의 내부 전자기장 분포도 Yee 알고리즘이 적용된 FDTD 방법을 이용하였으며, 유한 차분방정식을 이용하여 전자기장 분포를 시간과 공간에 대해 해석하였다^[6]. 최대 주파수인 3 GHz에서의 전자파 잔향실의 구조 해석과 확산기 상단면의 기울어짐 구현을

고려하여 기본 셀의 사이즈를 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z=2.5$ mm로 설정하였다.

Courant 안정성 조건을 만족하기 위하여 $\Delta t=4.815$ ps의 이산 시간과, 45,000번의 이산 시간 간격으로 시뮬레이션을 진행하였다^[2]. 45,000번의 이산 시간 간격은 같은 주파수, 같은 크기의 잔향실에서 비슷한 전자기장 세기가 나와야 신뢰도를 입증할 수 있다. 따라서, 30,000~55,000번에 걸쳐 다양하게 시뮬레이션한 결과, 45,000번의 이산 시간 간격부터 전자기장 분포 특성이 일정해지는 것을 확인하였고 이것을 기준으로 모든 시뮬레이션을 진행하였다. 전자파 잔향실의 크기는 그림 5에서 나타낸 바와 같이 $410 \Delta X \times 330 \Delta Y \times 330 \Delta Z$ 의 직육면체 구조로 설계하였다. 경계조건으로 Liao 흡수 경계 조건이 사용되었고, 전자파 복사 구조(radiation geometry)와 잔향실의 외부 경계면 사이에 10셀의 공간을 두어 해석을 위한 충분한 공간을 확보하였다. 최종적으로 해석에 필요한 전체 크기는 $421 \Delta X \times 341 \Delta Y \times 341 \Delta Z$ 로 설정하였다^[7]. 전자파 잔향실의 적절한 해석을 위해, FDTD 방법의 시뮬레이션 틀의 특성상 직각 좌표계를 고려하여, 잔향실의 경계와 확산기의 끝에 대해 xy, yz, zx 의 순서를 기준으로 시계 방향으로 설정하였다.

전자파 잔향실내 도체는 모두 PEC(Perfect Electric Conductor)로 가정하였고, 따라서 도체면 및 전자파 잔향실 내부의 확산기도 PEC로 가정하여 해석하였다. 그 외의 경계면 외부와 내부는 자유 공간으로 설정하였다. 확산기는 육면체 형태의 잔향실의 $x=11$ 인 yz 면에 부착하였고, 전자기장 형성을 위한 소스

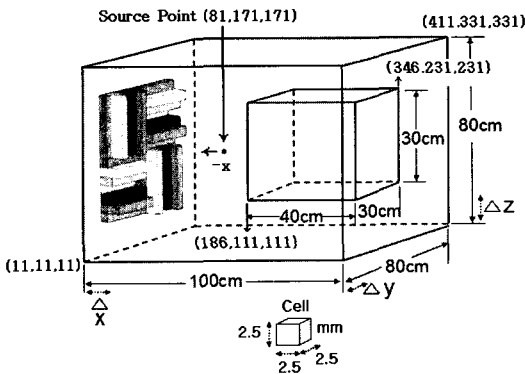


그림 5. 전자파 잔향실과 측정 공간의 크기
Fig. 5. Size of the reverberation chamber and a test volume inside the chamber.

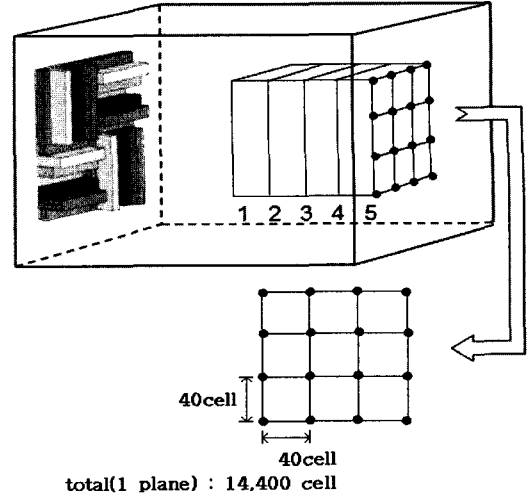


그림 6. 시험 공간 내의 분석 위치
Fig. 6. Analysis points inside the test volume.

는 정현파 포인트 소스로 (81, 171, 171)에 위치시켰다. 이것은 $-x$ 방향으로 전자파를 복사하여 확산기의 기울어진 반사면에 바로 입사되도록 하기 위함이다.

전자파 균일도를 분석하기 위한 시험 공간은 전체 잔향실의 구조에서 최소 $\lambda_{f_{\min}}/4$ 의 거리를 이격하여 균일한 공간을 지정하였다. $\lambda_{f_{\min}}=30$ cm이므로 최소 40셀 이상 이격해야 하는데, 본 논문에서는 설계된 잔향실의 크기를 고려하여 80셀 이상의 충분한 크기를 확보하여 신뢰도를 유지하였다. 경계조건이 변화하지 않는 고정된 환경에서의 균일한 시험 공간에 대한 정의는 국제 규격인 IEC 61000-4-3을 고려하여 결정하였다^[2]. 전자기장 분포는 정상 상태의 전자기장 세기 평균값으로 계산하였다^[6]. 시험 공간 내의 일정한 거리를 가진 총 5개의 면을 선택하고 한 면당 16개의 포인트를 지정하여 전자기장 세기 분포의 데이터 추출 및 전자기장 세기의 균일도 분석을 실시하였다. 한 개의 면당 14,400개의 셀 중 16개 포인트를 추출하여, 5개면의 총 80개의 포인트에서 E_x, E_y, E_z 의 전자기장 세기를 추출하였고, 한 면의 총 전자기장 세기인 E_r 를 얻을 수 있었다^[2].

3-2 다섯 가지 확산기가 부착된 전자파 잔향실의 전자기장 분포 해석

표 3은 확산기 반사면의 각도가 커질수록 표준편

표 3. 시험 공간 내의 균일도 향상에 대한 표준편차와 공차

Table 3. Standard deviation and tolerance of the field uniformity at the test volume.

확산기 형태	전체평균 (dBuV/m)	표준편차 (dBuV/m)	공차 (dB)
①	80.41	3.47	7.83
②	81.63	3.73	7.73
③	54.61	3.70	7.81
④	61.35	3.17	5.32
⑤	40.85	3.60	5.52

차 값이 줄어드는 것을 보여 주고 있다. 표 4는 공차 (최고값과 최저값의 차이)가 줄어들고 있음을 나타내고 있다.

이것은 각도가 0°인 ①에서 45°인 ⑤로 갈수록 E_x, E_y, E_z, E_t 의 모든 인자에 대한 표준편차와 공차가 일정하게 값이 줄어들며, 이는 디퓨저에 의

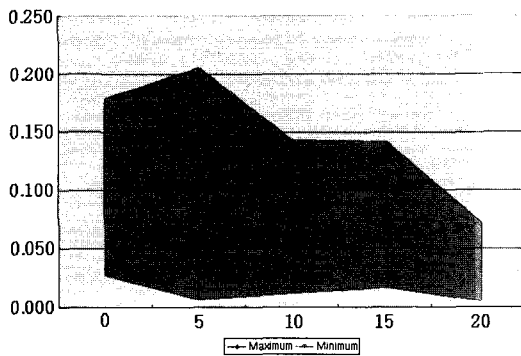
표 4. 다섯 가지 확산기가 설치된 전자파 잔향실 내 시험 공간의 E_x, E_y, E_z 성분 및 E_t 의 최고값과 최저값의 차이

Table 4. Differences between maximum and minimum values of E_x, E_y, E_z, E_t of electromagnetic field intensities with 5 diffusers.

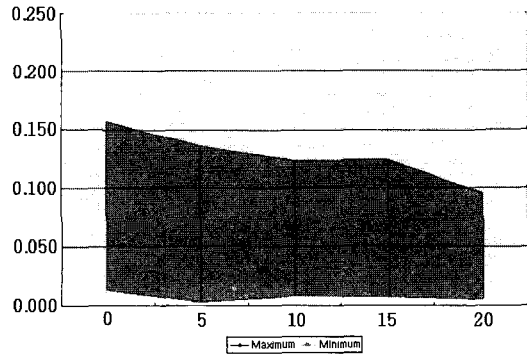
확산기 Type	E_x	E_y	E_z	E_t
①	152.55	143.87	149.28	124.85
②	199.38	133.73	149.04	130.87
③	131.33	115.80	106.42	90.65
④	126.22	117.66	109.58	69.26
⑤	68.22	90.71	93.99	51.76

한 확산이 x 방향 이외에도 y, z 방향으로도 적절히 이루어지고 있음을 보여준다.

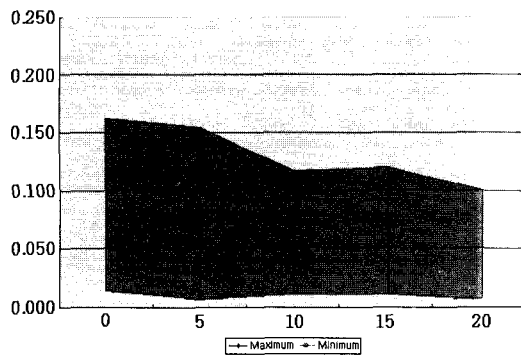
전자기장 균일 공간으로 지정된 시험 공간의 신뢰



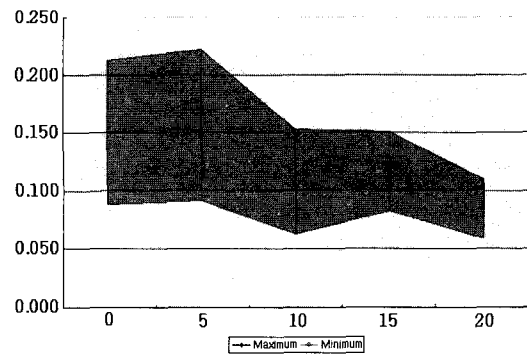
(a) E_x



(b) E_y



(c) E_z



(d) E_t

그림 7. 디퓨저 각도 변화에 따른 전자기장의 변화
Fig. 7. Calculated fields versus the angle of diffusers.

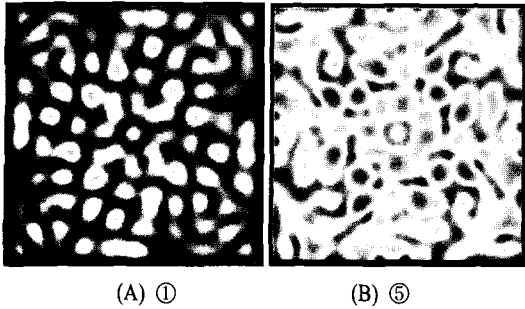


그림 8. 반사면이 0°와 20°일 때의 y-z 평면의 시뮬레이션 결과
 Fig. 8. Simulation results of ① and ⑤ at y-z plane.

도는 시험 공간의 선택된 5개의 면 중 하나의 면을 골라 이 면의 전체 전자기장 세기의 75 %를 추출하여 공차(최고값과 최저값의 차이) 값이 6 dB(±3 dB) 이내일 때를 만족해야 하며, 시험 결과 이를 만족하였다. 33.75°에 해당하는 확산기의 표준편차 값이 가장 낮은 것이 특이한 점이다. 최고값과 최저값의 차이에서도 더욱 줄어든 것을 볼 수 있다.

3-3 E_x, E_y, E_z, E_t 의 균일도 향상에 대한 각각의 확산기 간의 비교

각각의 확산기의 종류에 따라 시험 공간 내의 E_x, E_y, E_z, E_t 의 전자기장 세기 분포를 분석하였다. 그림 7은 전체 데이터 중 75 %를 추출하여 그 전자기장 세기를 나타낸 결과로 각도가 커질수록 차가 줄어들었음을 보여준다.

IV. 결 론

잔향실 내부에 설치된 확산기의 반사면 각도의 변화에 따라 전자파 잔향실 내부의 전자기장 균일도는 향상되었다. E_x, E_y, E_z, E_t 중 어느 한 요소에서 특정하게 전자기장 균일도가 향상되기보다는 전체적으로 고르게 향상되었다는 점을 확인할 수 있었다. 또한 0°에서 45°로 확산기의 반사면의 각도가 변화함에 따라 E_x, E_y, E_z, E_t 의 모든 전자기장 세기의 최고값과 최저값의 차이가 일정하게 줄어드는 것을 데이터를 분석에 의해 확인하였다. 공차(tolerance)의 경우에도 반사면의 각도가 33.75°부터 6 dB(±3 dB) 이내의 특성을 보여지고 있으며, 따라서

전자파 대응 시험 시설로서 충분히 사용될 수 있음을 보여준다. 이것은 선회형 확산기의 구조와 확산기를 구성하는 골의 각도 변화가, 전자파의 진행 방향을 고르게 확산시켜, 전자파 잔향실의 내부의 전자기장 분포를 고르게 형성시키는 것으로 판단된다.

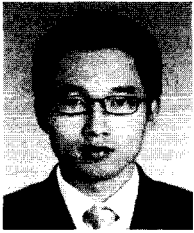
반사면의 각도가 증가할수록, 전체 전자기장 및 각 편파간 전자기장 균일도가 향상되는 것과 함께 전자기장 세기는 약간씩 줄어드는 것도 확인할 수 있다. 이것은 시험 공간 내에 집중되어 있던 전자기장의 분포가 잔향실 전체 공간으로 균일하게 확산됨에 따라, 시험 공간내의 전자기장 세기가 일부 감소되는 것으로 판단된다. 특이한 점은 22.5°에서 표준편차와 공차 값이 가장 좋게 나타난다는 것이며, 확산기 반사면의 각도를 변화시킴으로써 잔향실내의 전자기장 균일도 향상을 확인할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] 이광순, 이중근, 정삼영, "전자파 잔향실 내 확산기 배열 조건에 따른 필드 분포 특성", 한국전자파학회논문지, 12(2), pp. 227-233, 2001년 12월.
- [3] 이광순, 이중근, 정삼영, "전자파 확산방식을 이용한 잔향실 내부의 필드 분포 해석", 한국전자파학회논문지, 11(5), pp. 839-848, 2000년 8월.
- [4] *IEC 61000-4-21*: "Testing and measurement techniques - reverberation chamber test methods", 2003.
- [5] Markus Petirsch, Adolf Josef Schwab, "Investigation of the field uniformity of a mode-stirred chamber using diffusers based on acoustic theory", *IEEE Trans. EMC.*, vol. 41, no. 4, pp. 446-451, Nov. 1999.
- [6] A. Taflove, M. E. Brodwin, "Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time dependent Maxwell's equation", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 23(8), pp. 623-630, 1975.

- [7] Z. P. Liao, H. L. Wong, B. P. Yang, and Y. F. Yuan, "A transmitting boundary for transient wave analyses", *Scientia Sinica (series A)*, vol. X X VII, pp. 1063-1076, 1984.
- [8] Sam-Young Chung, Joong-Geun Rhee, "Field uniformity analysis of reverberation chamber by FDTD simulation method", *International Electrotechnical Commission /CISPR*, Petersburg, Russia, May 2000.
- [9] Remcom XFDTD ver. 5.1. 1999.
- [10] Kane S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 14, no. 3, pp. 301-307, May 1966.
- [11] G. M. Smith, *Numerical Solution of Partial Differential Equation: Finite Difference Method*, 8th Edition, Oxford Clarendon Press, 1985.
- [12] IEC 61000-4-3, "Electromagnetic compatibility, Part 4. testing and measurement techniques, Section 3. radiated", radio-frequency, electromagnetic field immunity, 2002.

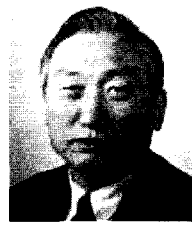
이 병 준



2004년: 건양대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2007년 2월: 한양대학교 전자전자 전기제어계측 (공학석사)
 2007년 2월~현재: (주)LS전선 전자 부품 개발팀
 [주 관심분야] EMI/EMC, MW 부품,

Antenna, CISPR

이 중 근



1967년: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1973년: Univ. of South Florida 전자공학과 (공학석사)
 1979년: Univ. of South Florida 전자공학과 (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

김 혜 광



1998년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
 2000년 2월: 한양대학교 전자컴퓨터공학부 (공학석사)
 2000년 3월~현재: 한양대학교 전자전기제어계측공학과 박사과정
 2005년 3월~현재: (주)엠씨넥스 중

양연구소

[주 관심분야] EMI/EMC, Antenna, Microwave, 수치해석
 Digital image sensor