

유전체로 충전된 확산기를 이용한 전자파 잔향실 내의 전자기장 균일도 향상 연구

Improvement of Field Uniformity in the Reverberation Chamber Using Diffusers Filled with Dielectric Material

김 혜 광 · 이 중 근 · 임 욱 채

Hye-Kwang Kim · Joong-Geun Rhee · Wook-Chae Lim

요 약

본 논문은 MWO(Microwave Oven)의 동작 주파수로 사용되는 2.45 GHz 대역에서, 전자파 잔향실 내의 전기장 특성 향상 및 시험 공간 확장에 관한 연구이다. 잔향실 내부에서의 전자기장 균일성을 확보하기 위하여, Schroeder 방식의 Quadratic Residue 확산기(diffuser)를 사용하였고, 전자기장 분포 해석을 위해 FDTD(Finite Difference Time Domain) 수치 해석 방식을 이용하였다. 잔향실 내부의 확산기는 도체로만 설계된 것(Type 1)과 유전체 및 도체를 같이 사용한 것(Type 2, 3)으로 설계하였다. 해석 결과 유전체를 사용한 확산기는, 유전체 없는 확산기의 전기장 특성을 유지하면서 확산기의 물리적 크기를 줄일 수 있었고, 특히 Type 3 확산기에서는 동일한 물리적 공간에 더 많은 주기의 확산기를 설계할 수 있어, 시험 공간 확장, 잔향실의 편파 특성, 편차 및 공차 등의 성능이 가장 좋은 것을 확인하였다.

Abstract

Analysis on the field uniformity inside of a reverberation chamber was done at 2.45 GHz which is an operating frequency of MWO(Microwave Oven). The Schroeder's Quadratic Residue Diffuser was designed for the chamber, and 3 different types of diffusers have been investigated using the finite-difference time-domain(FDTD) method for the field characteristics of each type. Type 2 and 3 diffusers were filled with dielectric material, and the size of these could be designed smaller than Type 1, without degradation of field characteristic. Type 3 diffuser shows better results among the three types of diffusers in view of increased test region and better field uniformity.

Key words : Reverberation Chamber, Quadratic Residue Diffuser, Dielectric Material, FDTD, Field Uniformity

I. 서 론

전자파 잔향실은 일정한 크기의 잔향실 내부에서 전자기장 균일도를 확보할 수 있는 모드 수^[1]에 의해 하한 주파수가 결정되며, 주파수의 증가에 따라 모드 수가 증가하기 때문에 하한 주파수 이상의 대역에서 활용하는 방법에 대하여 많은 연구들이 진행 중에 있고, 특히 GHz 대역에서 사용하기에 적합한

전자파 장애 및 복사 내성 대응 시험 시설이라고 볼 수 있다^[2].

일반적으로 잔향실 내의 시험 공간에서 균일한 전자기장 분포는, 잔향실 내부에 발생 가능한 총 모드 수, 스테러(stirrer) 또는 확산기의 효율, 그리고 잔향실 제작을 위해 사용된 매질의 Q 인자 등에 의해 결정된다^[1].

본 논문에서는 잔향실 내부의 전자기장 균일성을

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

· 논문 번호 : 20051019-118

· 수정완료일자 : 2005년 11월 21일

유지하면서 보다 넓은 시험공간의 확보를 위해 유전체를 이용한 Schroeder 방식의 확산기를 설계하였으며, 각 설계된 3가지 형태의 확산기에 대한 전자파 잔향실 내부의 전자기장 분포는 유한 차분법(finite difference method)을 기초로 하는 FDTD(Finite Difference Time Domain) 방식을 적용하여 주파수 2.45 GHz 대역에서 수치해석을 하였다. 3가지 형태의 확산기에 대해서 전자기장 분포 및 특성^{[3]~[8]}을 조사하기 위하여 적절히 선정한 공간(test volume)에서^[9] 추출한 전자기장의 세기로 전자기장 변화 상태를 비교 분석하였고, 확률적 통계기법을 이용하여, 편파 특성을 조사하였다.

II. 전자파 잔향실 설계

본 논문에서는 그림 1과 같은 크기를 갖는 잔향실에 대해서 연구하였다.

2-1 Schroeder 방식의 유전체 확산기 설계

음향학 분야에서 처음 소개되었던 Schroeder Quadratic Residue 확산기는 최근에는 전자파 잔향실에 응용되어 전자기장의 균일도를 확보하기 위해 활용되고 있다^[10]. 확산기의 구조는 그림 2와 같다.

확산기의 구조는 사용될 주파수의 범위에 따라 크기가 정해지며, 본 연구에서는 해석할 주파수를 고려하여, 주파수 범위 2.15 GHz~3 GHz에서 적용될 확산기를 설계하였다^{[4],[11]}.

설계된 Schroeder 방식의 확산기에서 W (Well 폭, Width)은 $\lambda_{\max}(f_{\max})$ 에 의해, D (깊이, Depth)는 λ_{\min}

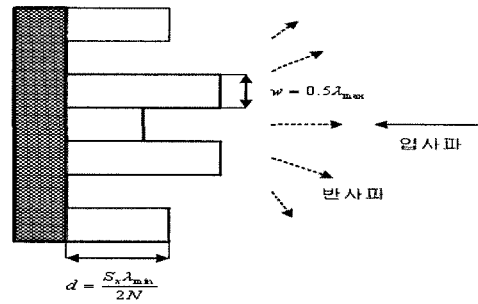


그림 2. 확산기의 구조
Fig. 2. Geometry of a diffuser.

(f_{\min})에 의해 결정된다. 본 논문의 주된 관심 주파수인 2.45 GHz의 파장(λ) 12.2 cm를 기준으로 확산기를 설계하였고, 설계된 전체 확산기 중 1주기에 대한 구조는 그림 3과 같다.

L (세로 길이, Length)과 P (1주기에 해당하는 확산기의 전체 폭)는 크면 클수록 효율이 증가되지만, 잔향실 크기의 제약 때문에 무한히 크게 하는 것은 불가능하다. 또한, 확산기의 D 는 클수록 시험공간의 물리적 축소를 야기시키므로 작을수록 좋다. 확산기 설계시에 물리적 크기를 결정하는 것이 파장이므로^[12], 동일 주파수에서 파장의 크기를 작게 하기 위해, 확산기 내의 전자파 진행 경로인 D 부분에 유전체($\epsilon_r=4$)를 채웠고, 이는 그림 4에서 Type 2와 Type 3으로 나타내었다. 유전체 부분에서의 파장은 식 (1)에 의해^[12] 공기($\epsilon_r=1$)에서 보다 1/2로 되고, 확산기의 모든 물리적 크기는 자유공간에서의 설계 값에 비해

$$\lambda \propto \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1)$$

1/2의 크기로 줄일 수 있게 된다. 이러한 특성을 이용하여 Type 2 확산기는 D 의 크기를 줄여 잔향실 내의 공간을 보다 넓게 확보할 수 있었고(y축 방향으로 최대 6 [cm]), Type 3 확산기는 D 와 P 를 줄여 유전체 없이 설계된 Type 1 확산기와 동일 크기에 16 주기의 확산기를 설계하여 그림 6에 나타내었다.

III. 잔향실 내부의 전자기장 분포 해석

3-1 전자파 잔향실의 모델링

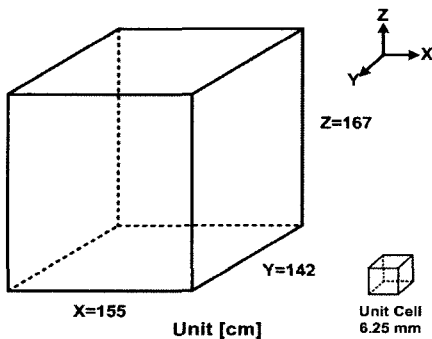
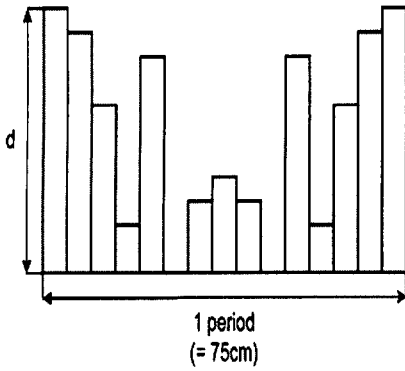
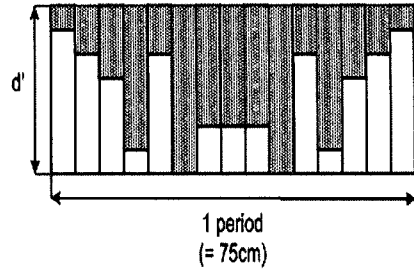


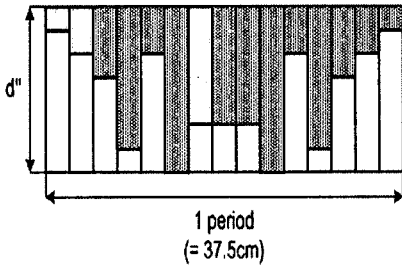
그림 1. 전자파 잔향실 구조
Fig. 1. Structure of reverberation chamber.



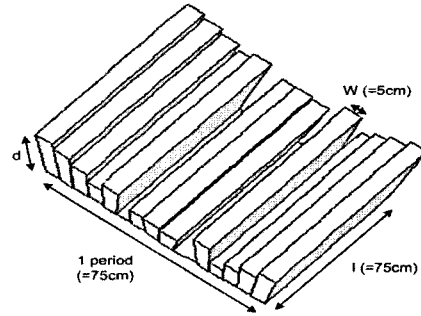
(a) 유전체 없는 4주기 확산기(Type 1)
(a) 4 periods diffusers without dielectric material



(b) 유전체 있는 4주기 확산기(Type 2)
(b) 4 periods diffusers with dielectric material



(c) 유전체 있는 16주기 확산기(Type 3)
(c) 16 periods diffusers with dielectric material



(d) 유전체 없는 확산기의 입체 모양
(d) Geometry of diffusers without dielectric material

그림 3. 설계된 확산기의 1주기 구조
Fig. 3. Geometry of designed Schroeder diffusers.

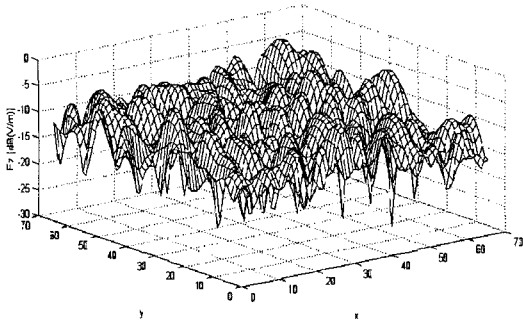
전자파 잔향실에 그림 3과 같이 설계된 Schroeder 방식의 확산기를 1주기로 하여 그림 6과 같이, 유전체 없는 4주기 확산기, 유전체 있는 4주기 확산기, 유전체 있는 16주기 확산기의 3가지 형태로 설계하였다. 또한 잔향실 내부의 전자기장 분포 해석을 FDTD 수치 해석 방식을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 이 해석은 Yee 알고리즘^[13]을 적용하였고, 시간과 공간에 대한 전자계 전자기장을 해석은 유한 차분법을 이용하였다. 전자파 잔향실에 대한 구조는 그림 5(a)와 같이 모델링 하였으며, 주파수 2.45 GHz에 대해서 전자기장 분포를 얻기 위해, 주파수를 고려하여 기본 셀을 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z = 6.25 \text{ mm}$ 로 설정하였다. 그리고 CFL(Courant-Friedrick-Lewy) 안정성 조건^{[14],[15]}을 만족시키기 위하여 이산 시간을 12.02 ps ($= \Delta t$) 전체 시간 간격 수를 20,000으로 설정하였다. 본 논문에서 잔향실 크기는 $264 \Delta X \times 244 \Delta Y$

$\times 284 \Delta Z$ 로 설정하였다.

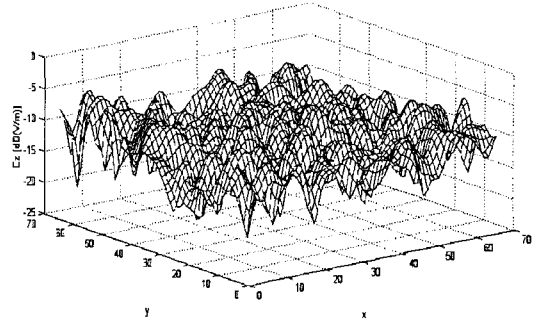
전자기장 발생을 위한 소스로는 정현파 포인트 소스를 사용하였고, 131, 199, 143 좌표 위치의 셀에 위치시켰다. 전자파 잔향실은 PEC(Perfect Electric Conductor)로 모델링 하였고, 확산기에 사용된 유전체는 $\epsilon_r = 4$, 도전을 $\sigma_r = 0$ 의 특성을 갖는 물질로 설정하였고, 확산기는 그림 6과 같이 각 3가지 형태에 대해서 잔향실 내부 x-z 평면 끝($y=1$ 의 위치) 부분 중앙에 위치시켰다. 전자기장 분포를 조사하기 위하여 그림 5(b)와 같이, 시험 공간 중 4개의 시험면(test plane)에서 각 면당 16개씩 총 64개의 test point를 설정하여 전기장 세기를 추출하였다.

3-2 해석 결과

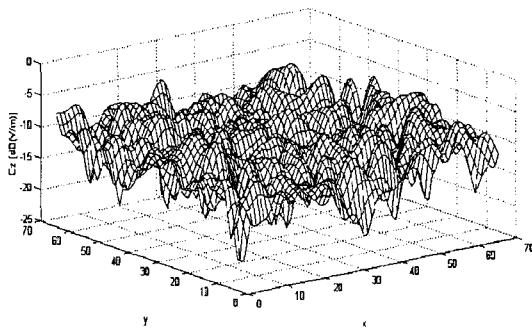
전자파 잔향실에 확산기를 사용하지 않았을 경우,



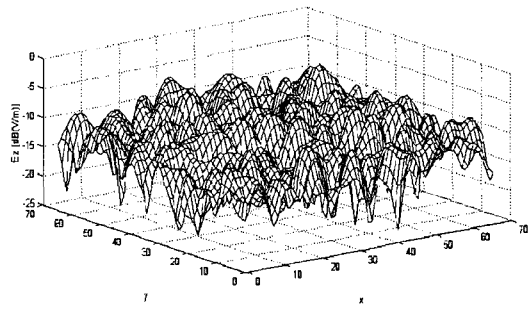
(a) 확산기를 부착하지 않은 잔향실
(a) Reverberation chamber without diffuser



(b) Type 1의 확산기를 부착한 잔향실
(b) Reverberation chamber with type 1 diffuser



(c) Type 2의 확산기를 부착한 잔향실
(c) Reverberation chamber with type 2 diffuser



(d) Type 3의 확산기를 부착한 잔향실
(d) Reverberation chamber with type 3 diffuser

그림 4. $z=170$ 에서의 x - y 평면에서의 전기장 세기 분포
Fig. 4. Time-averaged electric field magnitude distributions on x - y plane at $z=170$.

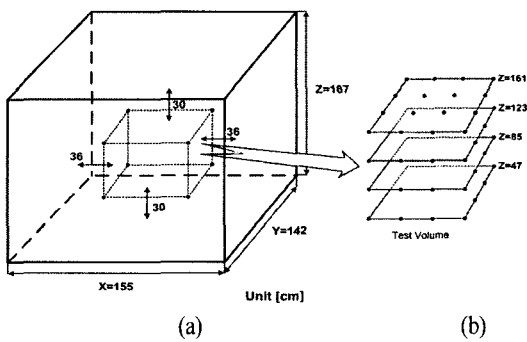
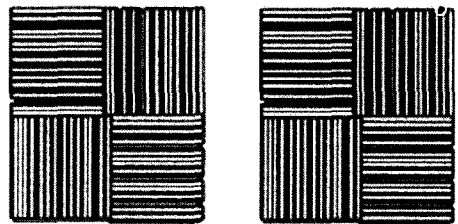
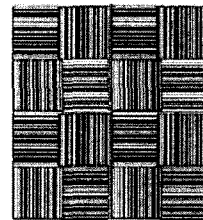


그림 5. (a) 수치해석을 위한 전자파 잔향실 모델링,
(b) 시험 공간내의 64개 test point
Fig. 5. (a) Modeling of a reverberation chamber for numerical analysis, (b) 64 test points in a test volume.

사용하였을 경우 및 유전체 확산기를 사용한 각 경우에 대해, $z=170$ 에서 x - y 평면에 대한 시뮬레이션된 전기장 세기 분포 결과는 그림 4와 같다. 위의 각 경



(a) Type 1 (b) Type 2



(c) Type 3

그림 6. 전자파 잔향실 내부에 부착한 3가지 형태의 확산기 구조
Fig. 6. 3 different diffuser structures attached to a reverberation chamber.

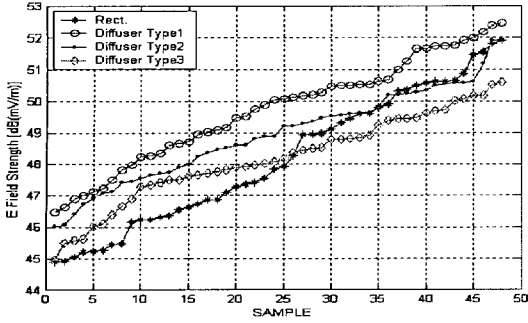


그림 7. 시험 공간 내의 전기장 분포(75 % of samples)
Fig. 7. Electric field distribution at test volume(75 % of samples).

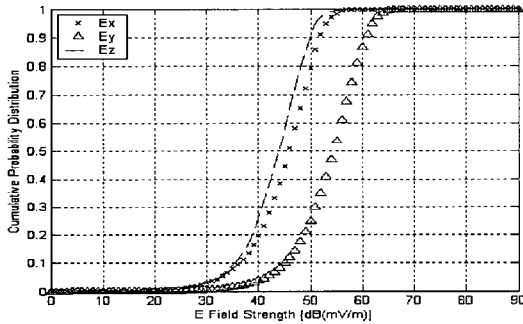
위에 대한 수치 해석 결과를 이용하여, 그림 5(b)의 시험 공간에서 64개 전기장 세기 값 중 75 %^[9]인 48개의 샘플에 대해, 평균값, 표준편차, 최대값, 최소값, 공차의 크기를 표 1에 나타내었고, Type 3 확산기가 가장 균일한 특성을 가짐을 알 수 있다. 정의

된 시험 공간에 대한 75 %의 전기장 세기 샘플을 그래프로 비교하면 그림 7과 같다.

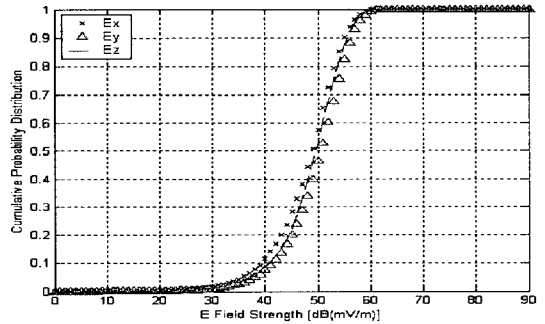
동일한 소스에 대해서 확산기를 부착한 경우가 확산기 없는 잔향실보다 전자기장의 균일성이 향상되는 것은, 이전의 많은 연구들뿐만 아니라^{[3]~[8]}, 그림 7과 표 1에 의하여 확인할 수 있다.

표 1. 시험 평면 전기장 세기의 샘플 중 75 %의 특성
Table 1. 75 % of sampled electric field intensities in a test volume.

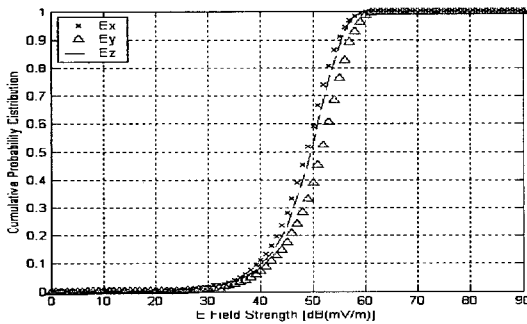
E(dBmV/m)	잔향실	확산기+ Type 1	확산기+ Type 2	확산기+ Type 3
평균	48.16	49.71	48.92	48.18
표준편차	2.12	1.69	1.48	1.02
최대값	51.91	52.45	51.95	49.58
최소값	44.89	46.46	46.00	45.97
공차 [dB]	7.02	5.99	5.95	3.61



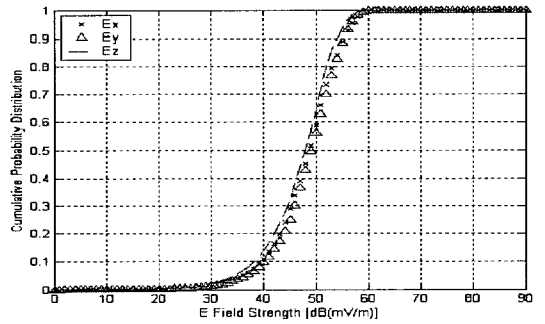
(a) 확산기를 부착하지 않은 잔향실
(a) Reverberation chamber without diffusers



(b) Type 1의 확산기를 부착한 잔향실
(b) Reverberation chamber with type 1 diffusers



(c) Type 2의 확산기를 부착한 잔향실
(c) Reverberation chamber with type 2 diffusers



(d) Type 3의 확산기를 부착한 잔향실
(d) Reverberation chamber with type 3 diffusers

그림 8. z=170일 때 x-y 평면에서 E_x , E_y , E_z 성분의 누적 분포

Fig. 8. Cumulative distributions of E_x , E_y , E_z components on x-y plane at z=170 of test volume.

표 2. E_x, E_y, E_z 에 대한 평균(m)과 표준편차(σ)
Table 2. 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	m_y	σ_y	m_z	σ_z
잔향실	44.7	6.48	53.4	6.55	43.1	6.00
확산기 +Type 1	47.8	6.54	49.5	6.16	48.7	6.13
확산기 +Type 2	47.7	6.41	50.3	6.40	48.5	6.34
확산기 +Type 3	47.8	6.44	48.2	6.28	46.8	6.55

또한, 유전체를 사용하여 설계된 Type 2의 확산기는 Type 1보다 확산기의 물리적 크기가 작아 잔향실 내의 더 많은 공간을 확보하면서도 전기장 분포의 공차 특성은 7.02 dB에서 3.61 dB로 오히려 좋아지는 것(전자기 분포가 균일해 짐)을 알 수 있다. 유전체를 이용한 또 다른 형태의 확산기인 Type 3은 확산기의 1주기 크기를 최대한 작게 하여 16주기를 가능하게 하였고, 따라서 전기장 특성이 가장 좋아짐을 위의 결과로부터 알 수 있다.

잔향실 내에 확산기를 부착했을 경우 편파 특성을 조사하기 위해, x-y 평면 $z=170$ 단면의 17,424개 셀에 대한 E_x, E_y, E_z 의 값을 추출한 후, 그 중 75% 샘플에 대해서 누적분포 함수를 구하였다. 전체적인 분포는 그림 8과 같이 카이제곱(Chi-squared) 분포를 따르고 있다. 이에 대한 E_x, E_y, E_z 성분에 대한 평균 및 표준편차의 결과는 표 2와 같다.

그림 8과 표 2에 따르면 확산기를 부착하지 않은 경우에 대해서는 E_y 에 대한 편파가 상대적으로 가장 크게 나타나는 반면, 확산기를 부착함으로써 특정 편파의 영향이 현저하게 감소되는 것을 알 수 있다. 특히 Type 3 확산기의 편파특성이 가장 우수함을 알 수 있다.

IV. 결 론

주파수 2.15~3 GHz 대역에 맞는 확산기를 유전체를 이용하여 설계하였고, 유전체 내에서는 전자기파의 파장이 짧아지는 성질을 이용하여 확산기의 크

기를 줄일 수 있었다. 이는 잔향실 벽면의 동일 면적에 Type 3과 같이 보다 많은 주기(본 논문에서는 16 주기)의 확산기를 설계 장착함으로써, 시험 공간 내의 전자기적 특성 또한 매우 향상됨을 보여줄 뿐만 아니라, 확산기의 높이를 크게 줄임으로써 시험 공간의 확장 또한 가능하다. 적용된 3가지 Type 중 Type 3의 확산기의 효율이 가장 우수하였다. 또한 전자파 잔향실의 동일한 평면에 대한 E_x, E_y, E_z 의 누적분포 함수를 통한 편파 특성 분석 결과, 확산기를 부착함으로써 특정 편파에 대한 영향이 그림 8과 표 2에서 나타난 바와 같이 감소되었고, Type 1과 Type 2의 편파 특성이 비슷한 반면 Type 3의 확산기가 가장 좋은 편파 특성을 보였다.

전자파 잔향실에 적용될 확산기 설계시, Type 1과 같은 단순한 확산기보다는 유전체를 사용하여 작은 크기의 확산기를 여러 가지 모양, 크기 및 배열 등을 고려하여 설계하였을 때, 더 큰 측정 공간의 확보뿐 아니라 전자기장 균일성 및 편파 특성 측면에 있어서 우수한 전자파 잔향실을 설계할 수 있을 것이다.

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] IEC 61000-4-3: Annex XX: Alternative method reverberation chamber method(Doc77B/215/CD).
- [3] Sam-Young Chung, Joong-Geun Rhee, "Field uniformity analysis of reverberation chamber by FDTD simulation method", *IEC/CISPR*, St. Petersburg, Russia, May 2000.
- [4] 이광순, 이중근, 정삼영, "전자파 확산방식을 이용한 잔향실 내부의 필드 분포 해석", 한국전자파학회논문지, 11(5), pp. 839-848, 2000년 8월.
- [5] 이광순, 이중근, 정삼영, 김성철 "Schroeder Diffuser를 이용한 전자파 잔향실 내부의 필드 해석", 춘계마이크로파 및 전파학술대회 논문집, 23(1), pp. 497-500, 2000년 5월.

- [6] 이광순, 이중근, 정삼영, 김혜광, "전자파 잔향실의 필드 균일성 확보를 위한 Schroeder 방식의 Diffuser 설계", 한국음향학회 학술대회 논문집, 19(1(s)), pp. 211-214, 2000년 7월.
- [7] 이광순, 이중근, 정삼영, 김성철, "Diffuser 배열에 따른 전자파 잔향실내 필드 편파 특성 향상", 춘계마이크로파 및 전파 학술대회 논문집, 23(2), pp. 263-266, 2000년 9월.
- [8] 정삼영, 이광순, 이황재, 이중근, "전자파 장해 및 복사 내성 측정용 전자파 잔향실 내부의 필드 특성", 국방부 학술대회 논문집, pp. 58-62, 2000년 9월.
- [9] EN 61000-4-3, EMC, Part 4. Testing and measurement techniques, Section 3. Radiated RF, electromagnetic field immunity, 1997.
- [10] 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, Nov. 1999.
- [11] Madan Mehta, James Johnson, *Architectural Acoustics Principles and Design*, Prentice Hall, 1999.
- [12] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [13] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 14, pp. 302-307, 1966.
- [14] A. Taflov, 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.
- [15] G. M. Smith, *Numerical Solution of Partial Differential Equation: Finite Difference Method*, 8th Edition, Oxford Clarendon Press, 1985.

김 혜 광



1998년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
 2000년 2월: 한양대학교 전자컴퓨터공학부 (공학석사)
 2000년 3월~현재: 한양대학교 전자전기제어계측공학과 박사과정
 [주 관심분야] EMC, MW, 수치해석

임 옥 채



2004년 2월: 한양대학교 전자컴퓨터공학부 (공학사)
 2004년 3월~현재: 한양대학교 전자전기제어계측공학과 석사과정
 [주 관심분야] EMC, MW, Antenna design

이 중 근



1967년: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1973년: Univ. of South Florida 전자공학과 (공학석사)
 1979년: Univ. of South Florida 전자공학과 (공학박사)
 1990년: 한국전자파학회 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, 안테나