이중 대역 확산기를 이용한 전자파 잔향실 시험 주파수 대역 확장 및 전자기장 균일도 향상에 관한 연구

Expansion of Test Frequency Band and Improvements of Field Uniformity in a Reverberation Chamber by Using Dual-Band Diffusers

임 욱 채 · 이 중 근

Wook-Chae Lim · Joong-Geun Rhee

요 약

본 논문은 전자파 장해 및 복사 내성 측정의 대용 시험 시설로서 활용될 수 있는 전자파 잔향실의 전자기장 특성에 관한 연구이다. 잔향실 내에는 서로 다른 두 주파수 대역에서도 사용 가능한 이중 대역 확산기(diffuser)가 적용되었고, 이중 대역 확산기는 서로 다른 단일 대역 Schroeder 방식의 QRD(Quadratic Residue Diffuser)로 합성되었다. 잔향실 내부의 전자기장 분포 해석을 위해서는 FDTD(Finite-Difference Time-Domain) 수치 해석 방식이 이용되었다. 잔향실에 사용된 이중 대역 확산기는 단일 대역 확산기에 비해 시험할 수 있는 주파수 대역 확장 뿐 아니라, 잔향실의 전자기장 균일도, 편파 특성, 전력 효율 및 공차 등의 성능을 향상시켰다. 따라서 이중 대역 확산기를 사용한 잔향실이 단일 대역 확산기를 사용한 잔향실보다 효율적인 시험시설로서 활용될 수 있음을 확인하였다.

Abstract

This paper presents the characteristics of electromagnetic field uniformity in a reverberation chamber that can be used alternatively for the analysis, test and evaluation of electromagnetic interference and immunity. The dual-band diffuser, which can be used at two different frequency bands in a reverberation chamber, is applied, and it is made of two different single-band Schroeder's Quadratic Residue Diffusers. The FDTD method is used to analyze the field characteristics. Compared with single-band diffuser, the dual-band diffuser shows the improvement in not only expansion of test frequency band but also in characteristics of the field uniformity, polarity, power efficiency, and tolerance. Therefore, the reverberation chamber with the dual-band diffuser is a better facility, for the analysis and measurement of electromagnetic interference and immunity, than the reverberation chamber with a single-band diffuser.

Key words : Reverberation Chamber, Quadratic Residue Diffuser, Dual-Band Diffuser, Field Uniformity

Ⅰ. 서 론

전자파 잔향실은 일정한 크기의 잔향실 내부에서 전자기장 균일도를 확보할 수 있는 모드 수에 의해 최저 사용 가능 주파수가 결정되며, 이 주파수 이상에서는 일반적으로 교반기(stirrer) 또는 확산기를 이용하여 전자기장의 균일도를 확보하고 있다. 잔향실 내부의 균일한 전자기장 분포는 잔향실 내부의 발생 가능한 총 모드 수, 교반기 또는 확산기의 효율, 그리고 잔향실 제작을 위해 사용된 매질의 Q인자 등에 의해서 결정된다[1].

현재 Schroeder 방식의 확산기를 적용한 전자파 잔

한양대학교 전자전기제어계측공학과 대학원(Graduate School of Electronic, Electrical, Control and Instrumentation Engineering, Hanyang University)

· 논 문 번 호 : 20051207-141

· 수정완료일자 : 2005년 12월 30일

향실 연구가 한양대학교 EMC 연구실에서 활발히 진행 중에 있으며[2]~[7], 이는 교반기를 사용한 잔향실에 비해 측정 시간의 단축과 설계 및 유지 비용을 절감할 수 있는 장점이 있다. 그러나 교반기를 이용한 잔향실은 잔향실의 최저 사용 가능 주파수 이상의 모든 주파수 대역에서 시험 가능한 반면, 확산기를 이용한 잔향실은 확산기의 설계 주파수 외에서는 전자기장의 균일도를 확보하기 어려운 단점이 있다. Schroeder 방식을 적용하여, 특정 주파수 이상의 모든 대역에서 동작하는 확산기를 이론적으로 설계할 수 있으나, 확산기의 설계 주파수 대역이 넓을수록 확산기의 물리적 크기가 무한히 늘어나므로, 현실적으로 구현하기 어렵다. 따라서 확산기를 적용한 잔향실의 시험 평가 주파수 대역의 확장에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 본 논문에서도 잔향실 내부의 전자기장 균일도를 유지하면서 보다 넓은 주파수 대역에서 시험 평가가 가능한 이중 대역 확산기에 대해 설계 및 제안하였다. 서로 다른 두 가지 단일 대역 확산기와 이중 대역 확산기가 적용된 전자파 잔향실 내부의 전자기장 분포는 유한 차분법(finite difference method)을 기초로 하는 FDTD 방식을 적용하여 주파수 2.25 GHz와 4.75 GHz에서 해석되었다. 위와 같은 세 가지 형태의 확산기가 적용된 잔향실 내부 전자기장 분포 및 특성을 조사하기 위하여, 적절히 선정된 시험 평면(test plane)에서[8] 추출된 전기장의 세기로 전자기장 변화 상태를 비교 분석하였고, 확률적 통계기법을 이용하여 편파 특성을 조사하였다.

Ⅱ. 전자파 잔향실 설계

전자파 잔향실은 전자기장의 균일도를 위해, 최저 사용 가능 주파수에서 다중 모드 전자기 환경(multi-mode electromagnetic environment)을 만족시켜야 하며, 이를 위해 적절한 크기 이상의 시험 평가 공간을 확보하여야 한다. 본 논문에서는 그림 1과 같은 직육면체 구조의 잔향실에 대해서 연구하였다.

2-1 Schroeder 방식의 이중 대역 확산기 설계

1975년 독일 Schroeder에 의해 음향학 분야에서 처음 소개되었던 QRD는 현재 전자파 잔향실에도

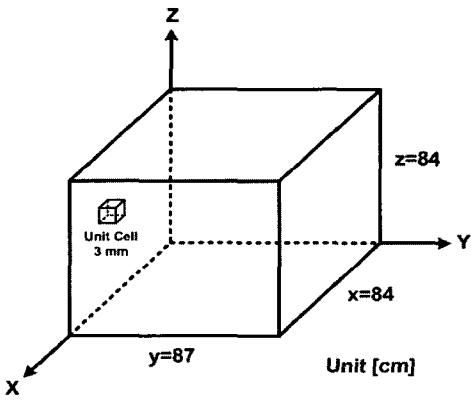


그림 1. 전자파 잔향실 구조
Fig. 1. Structure of reverberation chamber.

응용되어 전자기장의 균일도 확보를 위해 활용되고 있다[9]. 확산기의 기본 구조는 그림 2와 같다.

본 논문에서는 해석할 주파수를 고려하여, 주파수 범위 2~2.5 GHz와 4.5~5 GHz에 적용되는 단일 대역 확산기와 두 확산기를 합성한 이중 대역 확산기가 설계되었다.

Schroeder 방식의 1D QRD에서 Well의 폭(width)은 $\lambda_{f_{max}}$에 의해, 깊이(depth)는 $\lambda_{f_{min}}$에 의해 결정된다[10]. 세로 길이(length)와 주기는 커질수록 잔향실의 효율을 증가시키지만, 본 논문에서는 잔향실의 크기를 고려하여 그림 3(a), (b)와 같이 1주기 구조로 설계하였다.

그림 4의 이중 대역 확산기는 Type 1 확산기에 Type 2 확산기의 두 주기가 합성된 형태로서, 2.25 GHz 전자기파가 산란될 때 Type 2에 의한 반사파들

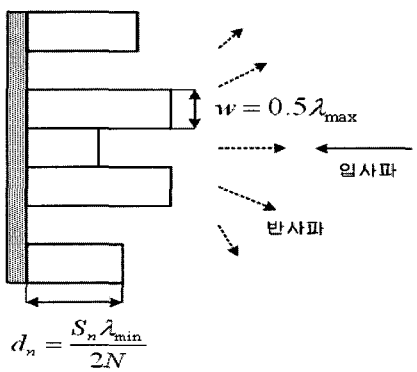
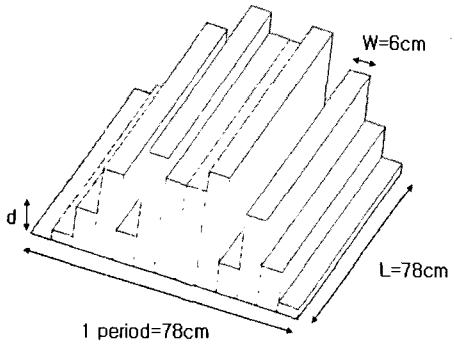
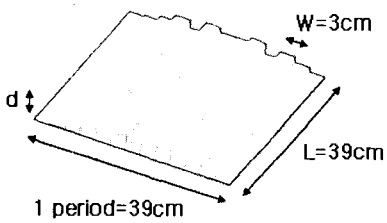


그림 2. 확산기의 기본 구조
Fig. 2. Schematic of diffuser.



(a) 2 GHz~2.5 GHz 대역 1D QRD(Type 1)
(a) 1D QRD for 2 GHz~2.5 GHz(Type 1)



(b) 4.5 GHz~5 GHz 대역 1D QRD(Type 2)
(b) 1D QRD for 4.5 GHz~5 GHz(Type 2)

그림 3. 설계된 단일 대역 Schroeder 1D QRD
Fig. 3. Geometry of a designed Schroeder 1D QRD.

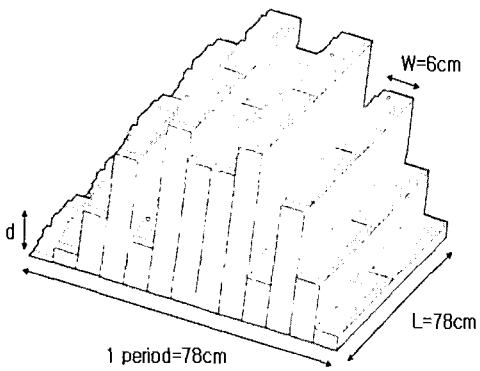


그림 4. 설계된 이중 대역 확산기(Type 3)
Fig. 4. Geometry of a designed dual-band diffuser.

은 위상차가 크지 않으므로, Type 2 확산기에 의한 2.25 GHz 전자기파의 위상차는 무시할만하다. 이는 Type 1의 확산기만 존재하는 것과 유사한 특성을 갖게 된다. 또한 4.75 GHz 전자기파가 산란될 때, Type 2 만으로도 확산이 충분히 이루어질 수 있으나, Type 1에 의한 위상차와 Type 2에 의한 위상차가 합성되어 단일 확산기보다도 더 좋은 확산 효과를 얻을 수 있다.

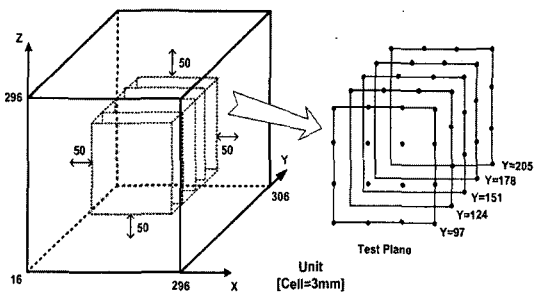
Ⅲ. 잔향실 내부 전자기장 분포 해석

3-1 전자파 잔향실의 모델링

전자파 잔향실에 그림 3, 4와 같이 설계된 Schroeder 방식의 확산기를 적용하였고, 잔향실 내부의 전자기장 분포를 조사하기 위하여 FDTD 수치 해석 방식을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 이 해석은 Yee 알고리즘[11]이 적용되는데, 시간과 공간에 대한 전자계 분포를 해석하기 위하여 유한 차분 방정식을 이용하였다.

전자파 잔향실에 대한 구조는 그림 5(a)와 같이 모델링 하였으며, 주파수 2.25 GHz와 4.75 GHz에 대한 전자기장 분포를 얻기 위해, 주파수를 고려하여 기본 셀을 ΔX, ΔY, ΔZ=3 [mm]로 설정하였다.

CFL(Courant-Friedrick-Lewy) 안정성 조건[12],[13]을 만족시키기 위하여 이산 시간을 19.25 ps ($=\Delta t$), 전체 시간 간격 수는 20,000으로 설정하였다. 본 논문에서 잔향실 크기는 280 ΔX×290 ΔY×280 ΔZ로 설정하였다. 전자기장 발생을 위한 소스는 1 V Sinusoidal 포인트 소스를 사용하였고, 셀(156, 256, 156) 위치에서 (−)Y 방향으로 설정하였다. 전자파 잔향실과 내부의 확산기 및 외부 경계 조건은 모두 PEC(Perfect Electric Conductor)로 설정하였다.



(a) (b)

그림 5. (a) 수치해석을 위한 전자파 잔향실 모델링, (b) 시험 평면 및 평면내의 80개 시험 points
Fig. 5. (a) Modeling of a reverberation chamber for numerical analysis, (b) Test planes and 80 test points.

확산기는 그림 3, 4와 같이 세 가지 형태에 대해서 잔향실 내부 x-z 평면 끝(y=16) 중앙에 위치시켰다. 전자기장 분포를 조사하기 위하여 그림 5(b)와 같이 시험 공간(test volume) 중 5개의 시험 평면에서 각 평면 당 16개씩 총 80개의 시험 포인트를 설정하여 전기장 세기를 추출하였고, 시험 공간은 EN 61000-4-3에 설명되어진 무반사실에 대한 정의를 고려하여 결정하였다[8].

3-2 해석 결과

전자파 잔향실에 두 가지 단일 대역 확산기와 이중 대역 확산기를 사용한 경우, y=151에서의 x-z 평면에 대한 시뮬레이션된 전기장 세기 분포 결과는 그림 6과 같다. 각각의 확산기를 사용한 경우의 수치해석 결과를 이용하여, 그림 5(b)의 시험 공간에서 80개의 전기장 세기 값 중 75 %[8]인 60개의 샘플에 대한 평균값, 표준편차, 최대값, 최소값, 공차의 결과는 표 1과 같다.

표 1과 그림 6에 의하면, 각각의 주파수 대역을 고려하여 설계된 단일 대역 확산기는 설계된 시험 주파수 경우에만 전력 효율 및 전자기장의 균일도가 우수하였으며, 설계 영역 밖의 시험 주파수인 경우, 전력 효율 및 전자기장의 균일도가 상당히 저하됨을 알 수 있다. 반면, 이중 대역 확산기의 경우, 양쪽 시험 주파수 대역 모두에서 전력 효율 및 전자기장의 균일도가 단일 대역 확산기에 비해 상당히 개선되었음을 확인할 수 있다. 특히 이중 대역 확산기의 공차가 양쪽 주파수 대역 모두에서 3.5 dB 이내로 높은 전자기장 균일도를 나타내었다.

잔향실 내에 확산기를 부착했을 경우, 편파 특성을 조사하기 위해, x-z 평면 y=151 단면의 32,041개 셀에 대한 E_x, E_y, E_z의 값을 추출한 후, 그 중 75 % 샘플에 대해서 누적분포 함수를 구하였다. 전체적인 분포는 그림 7과 같이 카이제곱(Chi-squared) 분포를 따르고 있다. 이에 대한 E_x, E_y, E_z 성분에 대한 표준편차의 결과는 표 2와 같다.

표 2와 그림 7에 의하면, 각각의 주파수 대역을 고려하여 설계된 단일 대역 확산기는, 설계된 시험 주파수 경우에만 편파 특성이 우수하고, 설계 영역 밖의 시험 주파수인 경우 특정 편파의 편향된 특성을 보인다. 반면, 이중 대역 확산기의 경우, 양쪽 시험 주파수 대역 모두에서 편파 특성이 가장 좋았으며, 특히 2~2.5 GHz 대역에서 그림 7(c)와 같이 특정 편파에 대한 영향이 매우 감소함을 확인하였다.

그림 7은 시험 평면에서 추출된 종합 전기장 E_t에서 E_x, E_y, E_z 방향 성분을 분리·추출하여, 각각의 성분을 누적분포 함수로 나타낸 것이다.

표 1. 시험 평면 전기장 세기의 샘플 중 75 %의 특성

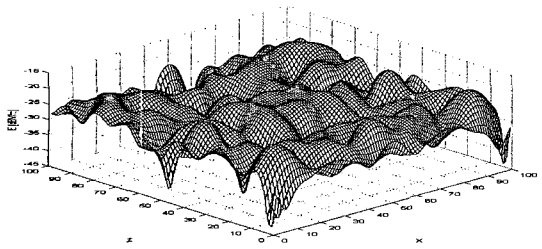
Table 1. 75 % of sampled electric field intensity at test plane.

E (dBmV/m)	Type 1 Diffuser		Type 2 Diffuser		Dual-band Diffuser	
	Source 2.25 GHz	Source 4.75 GHz	Source 2.25 GHz	Source 4.75 GHz	Source 2.25 GHz	Source 4.75 GHz
평균	36.21	56.23	24.7	58.31	36.79	60.88
표준편차	1.48	1.94	2.12	1.26	1.02	0.87
최대값	39.51	58.48	28.83	59.55	38.29	62.64
최소값	35.06	52.35	21.69	55.94	35.14	59.89
공차[dB]	4.45	6.13	7.14	3.61	3.15	2.75

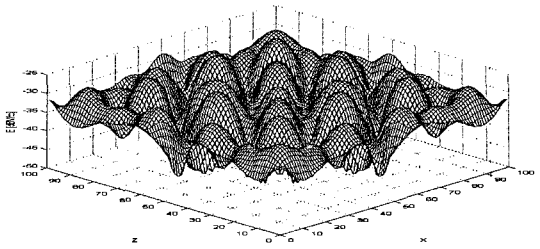
표 2. E_x, E_y, E_z에 대한 평균(m)과 표준편차(σ)

Table 2. Mean and standard deviation of E_x, E_y E_z components.

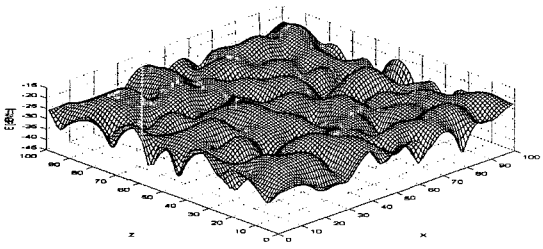
E (dBmV/m)		E_x		E_y		E_z	
		m_x	σ_x	m_y	σ_y	m_z	σ_z
Type 1 Diffuser	Source 2.25 GHz	40.0	6.89	37.4	7.02	35.5	6.94
	Source 4.75 GHz	59.8	6.57	65.2	6.33	53.1	6.49
Type 2 Diffuser	Source 2.25 GHz	19.8	7.91	34.2	7.42	19.8	7.55
	Source 4.75 GHz	56.5	6.48	63.4	6.55	56.4	6.20
Dual-band Diffuser	Source 2.25 GHz	37.2	6.44	36.5	6.28	35.8	6.52
	Source 4.75 GHz	56.2	6.23	61.5	6.19	55.9	6.31



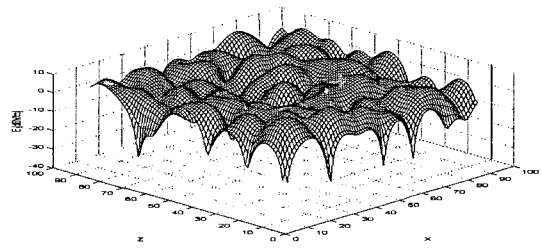
(a) Type 1 확산기를 부착한 잔향실(source-2.25 GHz)
(a) Reverberation chamber with Type 1(source-2.25 GHz)



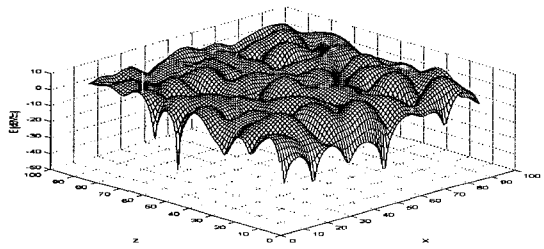
(b) Type 2 확산기를 부착한 잔향실(source-2.25 GHz)
(b) Reverberation chamber with Type 2(source-2.25 GHz)



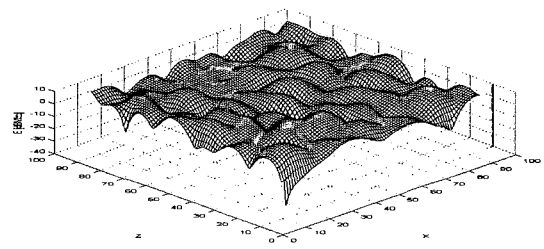
(c) Type 3 확산기를 부착한 잔향실(source-2.25 GHz)
(c) Reverberation chamber with Type 3(source-2.25 GHz)



(d) Type 1 확산기를 부착한 잔향실(source-4.75 GHz)
(d) Reverberation chamber with Type 1(source-4.75 GHz)



(e) Type 2 확산기를 부착한 잔향실(source-4.75 GHz)
(e) Reverberation chamber with Type 2(source-4.75 GHz)



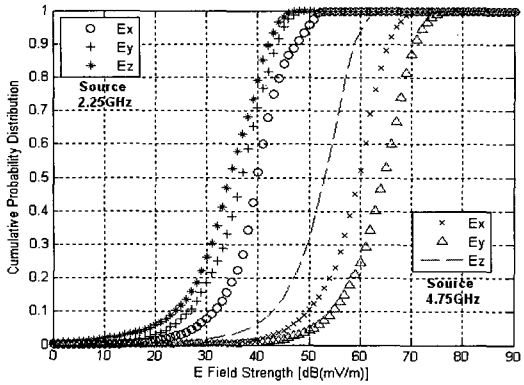
(f) Type 3 확산기를 부착한 잔향실(source-4.75 GHz)
(f) Reverberation chamber with Type 3(source-4.75 GHz)

그림 6. y=151에서 x-z 평면의 전기장 크기 분포
Fig. 6. Time-averaged electric field magnitude distributions on x-z plane at y=151.

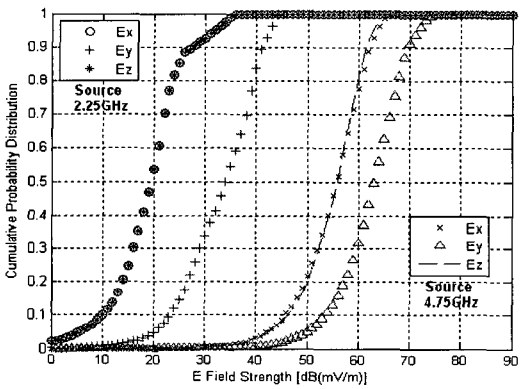
Ⅳ. 결 론

주파수 2~2.5 GHz와 4.5~5 GHz 대역에서 전자기파 확산이 가능한 각각의 단일 대역 확산기와 시험 주파수 대역 확장이 가능한 이중 대역 확산기를 설계하였다. 위와 같은 세 가지 형태의 확산기가 적용된 각각의 잔향실에 대해 FDTD 방식으로 전자기장 분포 특성을 분석한 결과, 이중 대역 확산기가 각각의 단일 대역 확산기에 비해, 편파 및 전자기장 균일도 측면에서 우수할 뿐만 아니라, 전력 효율 또한 향상됨을 알 수 있었다. 특히 이중 대역 확산기의 전자기파의 크기에 대한 공차가 설계된 두 가지 시험 주파수 대역에서 모두 3.5 dB 이내로 나타났고, 이로부터 전자기장 균일도가 매우 높은 것을 확인하였다. 전자파 잔향실 내의 동일 평면에 대한 누적분포 함수를 통하여 편파 특성을 분석한 결과, 이중 대역 확산기를 부착한 잔향실이 양쪽 주파수 대역 모두 에서 편파 특성이 가장 우수하였으며, 특히 2~2.5 GHz 대역에서 특정 편파에 대한 영향이 매우 감소함을 확인하였다.

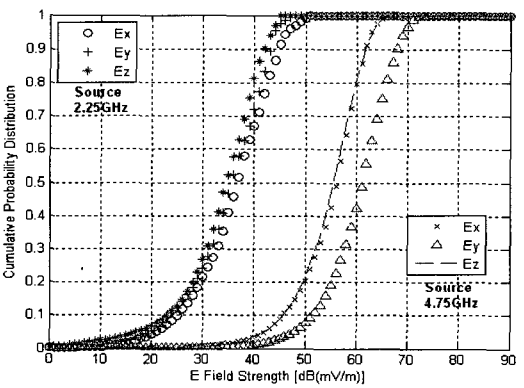
전자기기의 전자파 장해 및 복사 내성 측정의 대용시험 시설로 확산기를 사용한 전자파 잔향실은 시험 주파수 대역의 확장을 위해 이중 대역 확산기를 적용하는 것이 Type 1과 Type 2 같은 단일 대역 확산기를 사용하는 것보다 설계 비용, 전력 효율, 전자기장의 균일도 및 편파 특성 등 여러 측면에서 매우



(a) Type 1 확산기를 부착한 잔향실
(a) Reverberation chamber with Type 1 diffuser



(b) Type 2 확산기를 부착한 잔향실
(b) Reverberation chamber with Type 2 diffuser



(c) Type 3 확산기를 부착한 잔향실
(c) Reverberation chamber with Type 3 diffuser

그림 7. y=151에서 x-z 평면의 E_x, E_y, E_z 성분의 누적 분포

Fig. 7. Cumulative distributions of E_x, E_y, E_z components on x-z plane at y=151.

효율적임을 알 수 있었다.

본 논문에서 확인된 결과는 추후 다중 대역(multi-band) 확산기 설계에도 응용될 것으로 판단된다.

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] Sam-Young Chung, Joong-Geun Rhee, "Field uniformity analysis of reverberation chamber by FDTD simulation method", *International Electrotechnical Commission/CISPR*, Petersburg, Russia, May 2000.

[3] 이광순, 이중근, 정삼영, "전자파 확산방식을 이용한 잔향실 내부의 필드 분포 해석", 한국전자파학회논문지, 11(5), pp. 839-848, 2000년 8월.

[4] 이광순, 이중근, 정삼영, 김성철, "Schroeder Diffuser를 이용한 전자파 잔향실 내부의 필드 해석", 춘계마이크로파 및 전파 학술대회 논문집, 23(1), pp. 497-500, 2000년 5월.

[5] 정삼영, 이광순, 이황재, 이중근, "전자파 장해 및 복사내성 측정용 전자파 잔향실 내부의 필드 특성", 국방부 학술대회 논문집, pp. 58-62, 2000년 9월.

[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] Eugene Rhee, Joong-Geun Rhee, "Field uniformity characteristics of a reverberation chamber with dispositions of diffuser sets", *EMC '04 Sendai, Japan*, vol. 1, 1C2, pp. 125-128, Jun. 2004.

[8] EN 61000-4-3, Electromagnetic compatibility, Part 4. Testing and measurement techniques, Section 3. Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity, 2002.

[9] 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.

[10] Madan Mehta, James Johnson, *Architectural Acoustics Principles and Design*, Prentice Hall, pp. 393-394, 1999.

[11] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 14, pp. 302-307, 1966.

[12] 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.

[13] G. M. Smith, *Numerical Solution of Partial Differential Equation: Finite Difference Method*, 8th Edition, Oxford Clarendon Press, 1985.

임 욱 채

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

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, Antenna, CISPR, ITU-R