

다중 유전체로 구성된 평탄형 Diffuser가 부착된 잔향실 내의 전자기장 분포에 관한 연구

Field Distribution of the Reverberation Chamber with Flat Diffusers Composed of Multiple Dielectric Materials

김 영 렬 · 김 혜 광 · 이 중 근*

Young Ryoul Kim · Hye-Kwang Kim · Joong-Geun Rhee*

요 약

본 논문은 전자파 장애 및 복사 내성 측정의 대응 시험 시설로서 활용될 수 있는, 다중 유전체로 구성된 평탄형 QRD(Quadratic Residue Diffuser)를 사용한 전자파 잔향실에 대한 연구이다. 잔향실은 2.5~3 GHz 대역에서 사용 가능하도록 설계되었으며, 기존 QRD의 특성을, 다양한 유전체를 이용하여 낮은 평탄형 구조물로 구현하였고, 이를 적용한 전자파 잔향실 내부에서의 전자기장 특성 변화 및 시험 공간 확장에 관해서 비교 분석하였다. 잔향실 내부의 전자기장 분포 해석을 위해서 FDTD(Finite-Difference Time-Domain) 수치 해석 방식을 이용하였다. 잔향실 내에 새로 제안된 확산기를 사용하면, 기존 확산기에 비해 물리적인 크기가 줄어들 뿐만 아니라 전자기장 균일도, 편파 특성 및 공차 등의 성능이 비슷하거나 우수해짐을 확인하였다. 따라서 다중 유전체로 구성된 평탄형 확산기를 사용한 잔향실이 기존의 QRD를 사용한 잔향실에 비해 전자기적 성능 및 공간 활용면에서 우수한 시험시설임을 확인하였다.

Abstract

This paper presents the characteristics of electromagnetic field uniformity in a reverberation chamber with flat diffusers composed of multiple dielectric materials that can be used as an alternative facility for the analysis, test and evaluation of electromagnetic interference and immunity. The field characteristics and the size of the test volume inside the reverberation chamber with the new diffuser of multiple dielectric materials are simulated and analyzed at 2.5~3 GHz band. The FDTD method is used to analyze the field characteristics. The field uniformity, polarization characteristics and tolerance are improved by the new diffuser with smaller physical size. The reverberation chamber with flat diffusers composed of multiple dielectric materials shows better electromagnetic performance and larger test volume than normal chamber.

Key words : Reverberation Chamber, Multiple Dielectric Materials, Field Uniformity

I. 서 론

전자파 잔향실은 전자파 장애 및 복사 내성 측정을 위한 대응시험 시설^[1]로서, 잔향실 내부의 전자기

장 균일도를 확보할 수 있는 모드(mode)수에 의해 하한 주파수가 결정되며, 주파수가 증가함에 따라 모드의 수도 증가하므로 하한 주파수 이상에서는 잔향실의 사용이 가능하다. 따라서, 하한 주파수를 낮

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 : 20061214-153

· 수정완료일자 : 2007년 5월 4일

추어 시험 가능 주파수를 확장하는 것에 대한 많은 연구들이 진행이 되고 있다. 본 논문에서는 잔향실 내부에서의 전자기장 균일성 및 편파 특성을 유지하면서 확산기의 물리적인 크기를 줄일 수 있는 다중 유전체로 구성된 확산기를 제안하였다. 기존의 QRD 방식의 확산기와 제안된 새로운 형태의 확산기가 적용된 잔향실 내부에서의 전자기장 분포 해석은 유한 차분법(finite difference method)을 기초로 하는 FD-TD(finite difference time domain) 방식을 적용하여 주파수 2.6 GHz 대역에서 해석되었다. 위와 같이, 두 가지 형태의 확산기가 적용된 잔향실의 전자기장 분포 및 특성을 분석하기 위하여, 시험 공간(test volume)과 시험 평면(test plane)에서 추출된 다양한 샘플(sample)에 대해 전자기장의 균일도와 더불어 확률적 통계기법을 이용하여 편파 특성을 비교 분석하였다.

II. 전자파 잔향실 설계

본 논문에서는 각각 다르게 설계된, 두 가지 형태의 확산기 구조물에 대한 전자파 잔향실 내의 전자기장 균일도와 편파 특성 분석을 위해, 그림 1과 같은 직육면체 구조의 잔향실을 설계 및 해석하였다.

2-1 Schroeder 방식의 확산기 설계

음향학에서 처음 소개되었던 Schroeder 방식의 QRD는 최근, 전자파 잔향실에도 응용되어 잔향실 내의 전자기장의 균일도를 확보하기 위하여 활용되

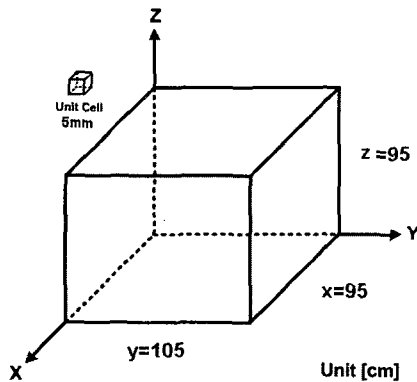


그림 1. 전자파 잔향실 구조
Fig. 1. Structure of the reverberation chamber.

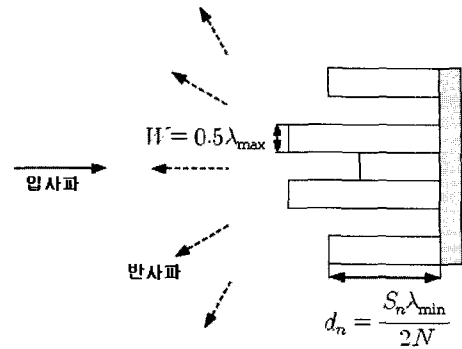


그림 2. 확산기의 원리
Fig. 2. Principle of diffuser.

고 있다. Schroeder 방식으로 설계된 확산기의 기본 구조는 그림 2와 같다.

확산기의 구조는 해석할 주파수의 범위에 따라서 전체적인 크기가 결정이 되며, 본 논문에서는 2.5~3 GHz에 적용되는 단일 대역 확산기가 설계되었다.

그림 3과 같은 Schroeder 방식의 확산기에서, W 의 폭(Width)은 $\lambda_{\max}(f_{\max})$ 에 의해, D 의 깊이(depth)는 $\lambda_{\min}(f_{\min})$ 에 의해 결정된다^{[3],[7]}. 확산기는 그림 3과 같은 1주기 구조로 설계하였다.

2-2 다중 유전체로 구성된 평탄형 확산기 설계

Schroeder 방식의 확산기는 낮은 주파수에서 설계될수록 D (확산기의 높이)가 높아지게 된다. 따라서, 한정된 크기의 잔향실에서 낮은 주파수에 대한 필드 해석을 위해 높은 D 를 갖는 확산기를 적용할 시에는, 물리적으로 시험 공간의 확보가 어렵게 된다. 따

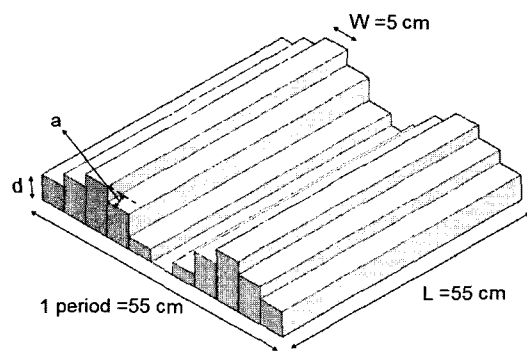


그림 3. 2.5~3 GHz 대역의 Schroeder 확산기
Fig. 3. Schroeder QRD for 2.5~3 GHz.

라서 본 논문에 대해 기존 확산기의 전자기장 균일도 및 편파 특성을 유지하면서도 유전체의 유전율을 이용하여 파장의 유전체내 크기를 조절, 확산기의 크기를 획기적으로 줄일 수 있는 다중 유전체로 구성된 평탄형 구조의 확산기에 대해 제안하였다.

그림 5와 같이 확산기 내의 전자파 진행 경로가 다른 각 셀마다 다른 유전율을 갖는 유전체로 확산기를 설계하였다. 그림 3의 D 와 그림 4의 h (다중 유전체 확산기의 높이), a (QRD 높이 차), λ_1 (해석하고자 하는 주파수에 대한 파장), λ_2 (유전체 내에서 변화된 파장)와 공기 중과 유전체 내부에서의 파장관계를 나타낸 식 (1)에 의해 기존 QRD와 다중 유전체 확산기와의 상관 관계를 해석하였으며^[8], 이는 기존 QRD내에서 파장의 진행에 의해 반사파의 위상이 달라지는 것과 동일한 위상차를 형성하기 위해, 유전체 디퓨저의 유전율을 조절하여 파장의 길이를 변화시켰으며, 짧아진 파장이 유전체 내에서 h 만큼 진행하여 반사되었을 때와 기존 QRD의 반사 위상이 같다는 조건에 의해 식 (2)를 유도하였다. 본 논문에서는 해석이 용이한 $n=0$ 인 경우에 대해, 확산기를 설계하였으며, 표 1에는 기존 방식의 각 확산기 깊이에 대응되는 다중 유전체의 유전율 값들을 식 (3)에 의해 나타내었다.

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

$$\frac{\lambda_1}{a} = \frac{\lambda_2}{h - n\lambda_2}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

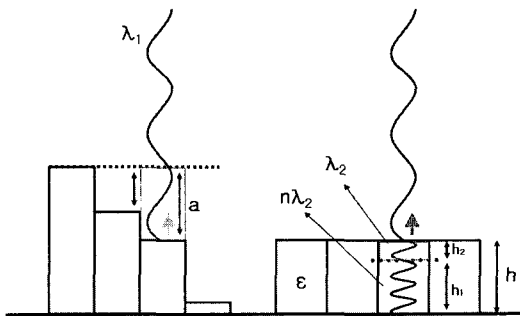


그림 4. 기존 확산기를 평탄형 다중 유전체 확산기로의 변환을 위한 상관 관계
Fig. 4. Relation with QRD and flat diffusers composed of multiple dielectric materials.

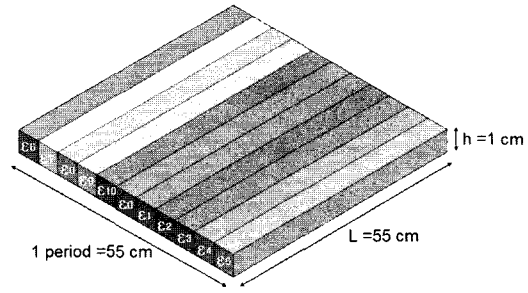


그림 5. 평탄형 다중 유전체 구조로 설계된 확산기
Fig. 5. Flat diffusers composed of multiple dielectric materials.

표 1. QR 확산기를 평탄형 다중 유전체 확산기로 변환

Table 1. Conversion of between QRD and flat diffusers composed of multiple dielectric materials.

n	QRD		Flat diffusers composed of multiple dielectric materials.	
	S_n	d_n (mm)	ϵ_n (비유전율)	
0	0	0	ϵ_0	24.11
1	1	5.5	ϵ_1	19.01
2	4	21.8	ϵ_2	7.45
3	9	49.1	ϵ_3	1
4	5	27.3	ϵ_4	4.75
5	3	16.4	ϵ_5	10.69
6	3	16.4	ϵ_6	10.69
7	5	27.3	ϵ_7	4.75
8	9	49.1	ϵ_8	1
9	4	21.8	ϵ_9	7.45
10	1	5.5	ϵ_{10}	19.01

$$\epsilon_n = \left(n + \frac{a}{h}\right)^2, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

Ⅲ. 잔향실 내부 전자기장 분포 해석

3-1 전자파 잔향실의 모델링

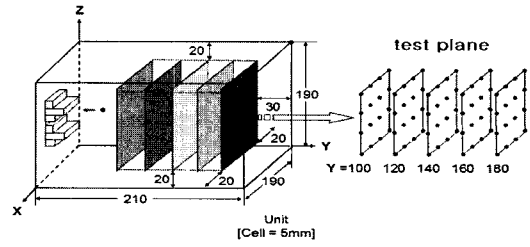
전자파 잔향실은 그림 3과 같이 설계된 Schroeder 방식의 확산기가 부착된 Type 1, 그리고 그림 5와 같

이 평탄형 다중 유전체로 구성된 확산기를 부착한 Type 2, 그리고 Type 2 형태와 동일한 확산기에 시험 공간(test volume)만을 확장한 Type 3 등, 3가지 형태로 해석을 하였다. 전자파 잔향실 내부의 전자기장 분포를 조사하기 위하여 FDTD 수치 해석 방식을 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 이 해석 방식은 Yee 알고리즘^[9]을 적용하였고, 시간과 공간에 대한 전자기장 분포를 해석하기 위하여 유한 차분법을 이용하였다. 주파수 2.6 GHz에 대한 전자기장 분포를 얻기 위해, 주파수를 고려하여 기본 셀을 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z=5$ mm로 설정하였다.

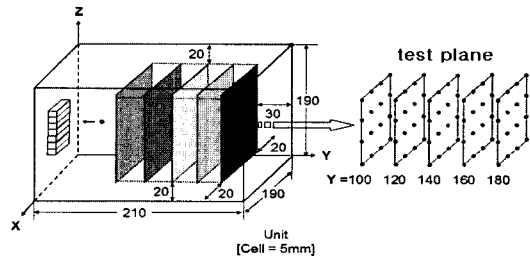
또한 CFL(Courant-Friedrick-Lewy) 안정성 조건^{[10],[11]}을 만족시키기 위하여 이산 시간을 9.629 ps ($= \Delta t$)로 하였고, 전체 시간 간격 수는 30,000으로 설정되었다. 본 논문에서 잔향실 크기는 $95 \Delta X \times 105 \Delta Y \times 95 \Delta Z$ 로 설정하였고, 전자기장 발생을 위한 소스는 1 V Sinusoidal 포인트 소스로, 그림 5의 Type 1에서는 셀 (95, 40, 95)에서, Type 2와 Type 3에서는 셀 (95, 32, 95) 위치에서 (+)Y 방향으로 설정하였다. 또한, 제안된 확산기의 물리적인 크기가 줄어들었기 때문에 Type 3의 시험 공간(test volume)은 Type 1과 Type 2에 비해서 (-)Y 방향으로 8셀만큼 확장을 하여 비교분석을 하였다. 전자파 잔향실과 Type 1에서의 확산기는 PEC(Perfect Electric Conductor)셀로 모델링 되었고, 제안된 확산기에 사용된 유전체는 도전을 $\sigma = 0$ 의 특성을 갖는 물질로 설정하였다. 두 가지 확산기 모두 잔향실 내부 x-z평면의 시작(y=0) 부분 중앙에 위치시켰다. 전자기장 분포를 조사하기 위하여 그림 5와 같이 시험 공간 중 5개의 시험 평면에서 각 평면 당 16개씩 총 80개의 시험 포인트(test point)를 설정하여 전자기장 세기를 추출하였다. 시험 공간은 EN 61000-4-3에 설명되어진 무반사실에 대한 정의를 고려하여 설정되었다^[12].

3-2 해석 결과

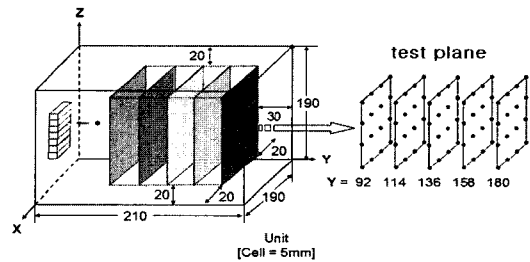
각각 모델링 된 전자파 잔향실에서 확산기가 미 부착된 형태, 그리고 Type 1, Type 2와 같은 형태는 y=140에서, Type 3와 같은 형태는 y=136에서 x-z 평면에 대해서 simulation 된 전계 세기 분포 결과는 그림 6과 같다. 각각의 다양한 형태로 모델링 된 잔향실의 수치 해석 결과를 이용하여, 그림 6의 시험 평면에서



(a) 전자파 잔향실 모델링(Type 1)
(a) Modeling of reverberation chamber(Type 1)



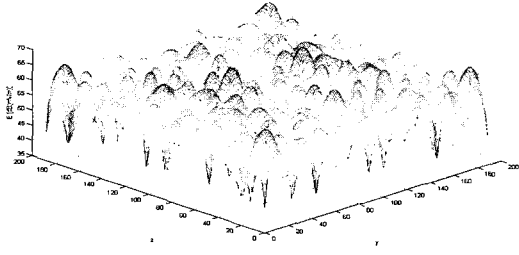
(b) 전자파 잔향실 모델링(Type 2)
(b) Modeling of reverberation chamber(Type 2)



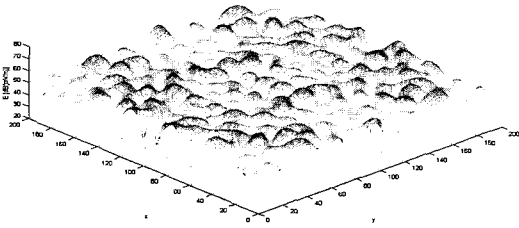
(c) 전자파 잔향실 모델링(Type 3)
(c) Modeling of reverberation chamber(Type 3)

그림 6. 수치 해석을 위한 전자파 잔향실 모델링
Fig. 6. Modeling of a reverberation chamber for numerical analysis.

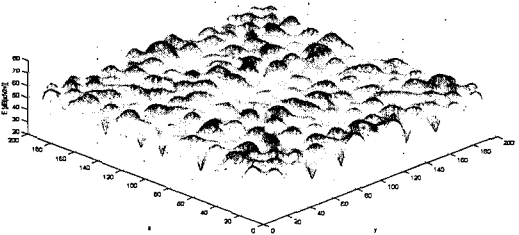
80개 전계 세기 값 중 75 %인 60개의 샘플에 대한 평균값, 최대값, 최소값, 표준편차, 공차 등의 결과는 표 2와 같다. 표 2와 그림 6에 의하면, 잔향실에 기존에 사용되어진 QRD 방식의 확산기를 부착하면 전자기장의 균일성이나 편파 특성이 모두 우수하다는 결과를 알 수 있다^{[4]~[6]}. 또한 제안된 다중 유전체로 구성된 평탄형 확산기를 부착하였을 경우, 기존 방식의 확산기를 부착한 잔향실과 비교해 확산기의 물리적인 크기가 작아져 더 큰 시험 공간을 확보하면서도 표준편차는 비슷한 성능을 보이고 있고, 공차 특성은 오히려 0.6~0.7 dB 정도 좋아짐을 알 수 있다.



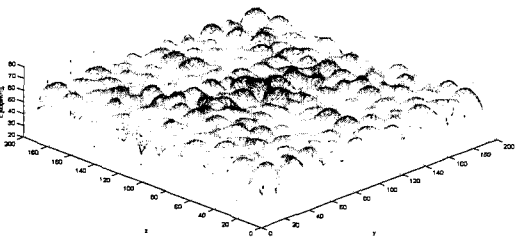
(a) 확산기가 미 부착된 잔향실(Y=140)
(a) Reverberation chamber without diffuser(Y=140)



(b) 전자파 잔향실 Type 1(Y=140)
(b) Reverberation chamber with Type 1(Y=140)



(c) 전자파 잔향실 Type 2(Y=140)
(c) Reverberation chamber with Type 2(Y=140)



(d) 전자파 잔향실 Type 1(Y=136)
(d) Reverberation chamber with Type 1(Y=136)

그림 7. x-z 평면에서의 전계 크기 분포
Fig. 7. Time-averaged electric field magnitude distributions on x-z plane.

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

E (dB μ V/m)	잔향실 (without diffuser)	Type 1	Type 2	Type 3
평균	41.10	46.86	46.49	46.78
최대값	50.97	55.77	55.17	55.53
최소값	42.54	50.23	50.43	50.59
표준편차	4.36	3.65	3.52	3.78
공차[dB]	8.43	5.54	4.74	4.94

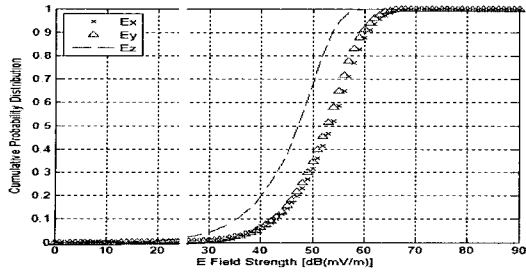
잔향실 내에 확산기를 부착했을 경우, 편파 특성을 조사하기 위해 x-z 평면 y=140, 136 단면의 29,241 개 셀에 대한 E_x , E_y , E_z 의 값을 추출한 후, 그 중 75 % 샘플에 대해서 누적분포 함수를 구하였고, 그림 8에 나타내었으며 카이제곱(Chi-squared) 분포를 따르고 있다. 이에 대한 E_x , E_y , E_z 성분에 대한 표준편차의 결과는 표 3과 같다. 그림 8과 표 3에 따르면, 잔향실 내에 제안된 다중 유전체 확산기가 적용된 경우, 각 편파의 평균들이 최대 3.20 [dBmV/m]가 차이 나며, 기존 QRD 적용시의 4.1 [dBmV/m]보다 편파 특성이 균일함을 알 수 있다. 이는 확산기 내 각 셀사이가 도체로 막혀 있지 않아, 경사파도 확산되어 시험 공간의 편파 균일도 향상에 도움이 되는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

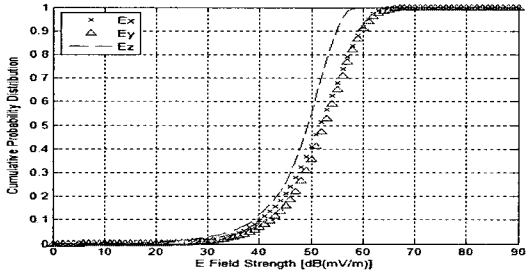
주파수 2.5~3 GHz 대역에서, Schroeder 방식의 확산기를 다중 유전체를 이용하여 평탄형으로 구현하

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.

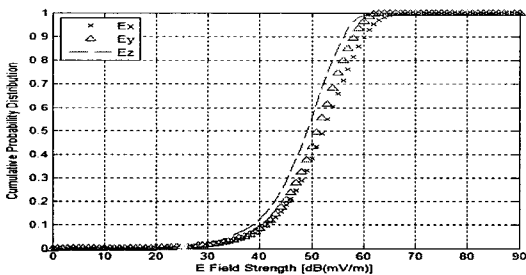
E (dB μ V/m)	E_x		E_y		E_z	
	m_x	σ_x	m_y	σ_y	m_z	σ_z
잔향실 (without diffuser)	43.56	4.14	41.74	4.11	36.61	3.16
Type 1	47.89	3.26	48.11	3.33	44.01	3.37
Type 2	46.12	3.55	46.93	3.53	43.91	3.52
Type 3	47.10	3.50	46.78	3.68	43.62	3.58



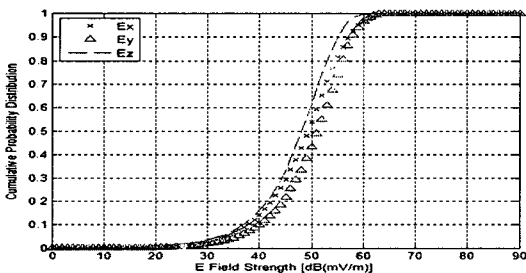
(a) 확산기가 무 부착된 잔향실(Y=140)
(a) Reverberation chamber without diffuser(Y=140)



(b) 전자파 잔향실 Type 1(Y=140)
(b) Reverberation chamber with Type 1(Y=140)



(c) 전자파 잔향실 Type 2(Y=140)
(c) Reverberation chamber with Type 2(Y=140)



(d) 전자파 잔향실 Type 3(Y=136)
(d) Reverberation chamber with Type 3(Y=136)

그림 8. x-z 평면에서의 E_x , E_y , E_z 성분의 누적 분포
Fig. 8. Cumulative Distribution of E_x , E_y , E_z Components on x-z Plane.

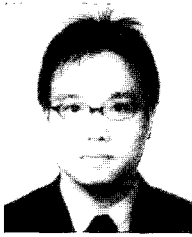
였고, 전파 진행 경로 내의 유전율을 변화시켜 파장의 길이를 변화시켰으며, 공기보다 높은 유전율을 갖는 유전체를 사용하여 파장의 길이가 짧아짐에 따라 확산기의 크기 또한 작아지는 효과를 가져왔다. 다중 평탄형 유전체 확산기는 그 크기가 기존 QRD에 비해 낮아 더 큰 시험공간 확보가 가능하면서도, 전자기장의 균일도나 편파 특성은 오히려 좋아짐을 표 2 및 표 3을 통해 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] IEC 61000-4-3, Annex XX: Alternative method Reverberation chamber method(Draft document 77B/215/CD).
- [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] 이광순, 이중근, 정삼영, "전자파 확산방식을 이용한 잔향실 내부의 필드 분포 해석", 한국전자과학회논문지, 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] 이광순, 이중근, 정삼영, 김혜광, "전자파 잔향실의 필드 균일성 확보를 위한 Schroeder 방식의 Diffuser 설계", 한국음향학회 학술대회논문집, 19(1(s)), pp. 211-214, 2000년 7월.
- [6] 정삼영, 이광순, 이황재, 이중근, "전자파 장애 및 복사 내성 측정용 전자파 잔향실 내부의 필드 특성", 국방부 학술대회 논문집, pp. 58-62, 2000년 9월.
- [7] Madan Mehta, James Johnson, *Architectural Acoustics Principles and Design*, Prentice Hall, 1999.
- [8] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [9] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE Trans. on Antennas and Pro-*

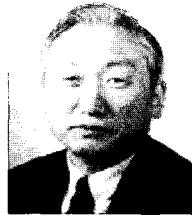
- pagation, vol. 14, pp. 302-307, 1966.
- [10] A. Taflove, M. E. Brodwin, "Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time dependent Maxwell's equation", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 23(8), pp. 623-630, 1975.
- [11] G. M. Smith, *Numerical Solution of Partial Differential Equation: Finite Difference Method*, 8th Edition, Oxford Clarendon Press, 1985.
- [12] EN 61000-4-3, Electromagnetic compatibility, Part 4. Testing and measurement techniques, Section 3. Radiated, Radio-Frequency, Electromagnetic Field Immunity, 2002.

김 영 렬



2005년 2월: 한양대학교 전자컴퓨터공학부 (공학사)
 2005년 3월: 한양대학교 전자전기 제어계측공학과 석사과정
 2007년 5월 현재: LG전자 MC 연구소 [주 관심분야] MW, Antenna, 수치 해석

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 전자전기 제어계측공학과 박사과정
 2005년 3월~현재: (주)엠씨네스 중앙연구소
 [주 관심분야] EMI/EMC, Antenna, Microwave, 수치해석
 Digital image sensor