

Schroeder 확산기를 적용한 삼각형 전자파 잔향실의 필드 균일도 특성

Electromagnetic Field Uniformity Characteristics of a Triangular Reverberation Chamber with Schroeder Diffusers

김 성 철 · 이 중 근*

Sung-Chul Kim · Joong-Geun Rhee*

요 약

본 논문은 전자파 장애 및 복사 내성 측정의 대응시설로 사용될 수 있는 삼각형 구조의 전자파 잔향실내 필드 균일도 특성에 관한 연구이다. 체적이 동일한 두 삼각형 구조의 전자파 잔향실내 필드 균일도를 개선시키기 위하여 Schroeder 확산기를 설계하여 적용하였으며, 잔향실 내부의 필드 특성을 해석하기 위해 FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 방법을 사용하여 시험공간의 한 면에서 전계 세기를 추출한 후, 필드 분포를 분석하였다. 또한 정삼각형 구조의 전자파 잔향실과 Schroeder 확산기를 설계, 시뮬레이션 및 제작하여, 실험을 통한 시험 평가를 한 결과, Schroeder 확산기를 적용한 삼각형 구조의 전자파 잔향실내 필드 균일도가 확산기를 적용하지 않은 경우와 비교하여 1~4 dB 개선됨을 알 수 있었다.

Abstract

This paper presents the results of an electromagnetic field uniformity of a triangular reverberation chamber that can be used alternatively for analysis and measurement of electromagnetic interference and immunity test. Equilateral triangular reverberation chamber and Schroeder diffusers were designed and fabricated for this purpose. FDTD simulation method was applied to analyze the field distribution inside of two different types of reverberation chambers. As a result, the electromagnetic field uniformity was improved inside of triangular reverberation chambers, and the measured field uniformity was improved by 1~4 dB compared to the ones without diffusers.

Key words : reverberation chamber, FDTD, triangular structure, uniformity

I. 서 론

전자파 잔향실은 전자파 장애 및 복사 내성 측정을 위한 대응시험 시설로서 최근 미국 표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology) 등에서 연구 결과가 발표되었으며^[1] 전파 장애 특별위원회(International Special Committee on Radio

Interference)에서 전자파 잔향실에 대한 규격을 제정하고 있다. 또한 규제 주파수가 일부 GHz대역 이상으로 확장되어 GHz대역에서 효과적으로 활용될 수 있는 시험 시설이 될 것이다.

잔향실 내부에서 발생 가능한 총 모드 수는 전자파 잔향실의 특성을 결정하는 중요한 요소가 된다^[2]. 잔향실의 체적과 구조에 따라 모드 수가 변하므로

한양대학교 전자통신전파공학과(Department of Electronic, Communication and Microwave Engineering, Hanyang University)

*한양대학교 전자컴퓨터공학부(Division of Electronic and Computer Engineering, Hanyang University)

· 논문 번호 : 20011127-168

· 수정완료일자 : 2002년 3월 11일

로 일정한 체적에서 모드 수를 더 많이 얻기 위해 비대칭적 구조의 잔향실^[2], 표면의 비균일성 형태^[3] 등에 대한 연구가 있었으며, 모드 산란기(Stirrer)와 확산기(Diffuser)를 사용하는 방식도 제안되었다^[4].

또한 확산기만을 사용하여 잔향실 내부의 균일도 개선을 위한 연구가 있었으며^[5], 확산기의 배열과 체적 비에 따른 필드 분포 변화와 균일도에 대한 연구도 있었다^{[6][7]}.

확산기를 적용한 직사각형 전자파 잔향실에 대한 연구는^{[5][6]}, 확산기가 필드 균일도를 개선시킬 수 있다는 가능성을 보였지만 당시 연구가 시뮬레이션 결과이었다.

본 논문에서는 직사각형 잔향실에 비해 발생 가능한 총 모드 수의 분포가 우수하고 낮은 주파수에서도 많은 분포를 나타내는 삼각형 구조에 대해 Schroeder 확산기^[8]를 적용하여 필드 분포를 해석하였다. 잔향실 구조들에 대하여 발생 가능한 총 모드 수를 계산하였으며, 전자파 잔향실 내부의 필드 분포는 FDTD방식으로 분석하였다. 필드 균일도를 해석하기 위하여 시험공간(test volume) 내부의 한 면에서 추출한 전계 세기로 잔향실의 형태 변화에 따른 필드 변화 상태를 비교 분석하였다. 정삼각형 구조의 전자파 잔향실과 Schroeder 확산기를 설계 제작한 후 주파수별 전계 세기를 측정하여 필드 균일도를 평가하였다.

II. 전자파 잔향실 설계

삼각형의 형태에 따라 발생 가능한 모드 수의 분

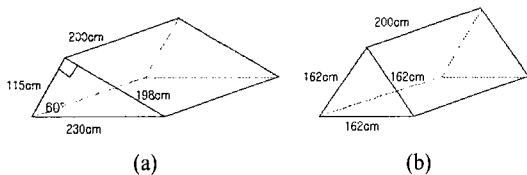


그림 1. 전자파 잔향실의 외부구조

- (a) Type I : 직각삼각형 구조
- (b) Type II : 정삼각형 구조

Fig. 1. Dimensions of reverberation chambers.

- (a) Type I : Right triangular structure
- (b) Type II : Equilateral triangular structure

포가 달라지므로 본 논문에서는 두 가지 형태에 대해 동일한 체적으로 설계한 삼각형 형태의 전자파 잔향실내 필드특성을 연구하였다.

2-1 발생 가능한 모드 수 분포 해석

1~3 GHz대의 전자파 잔향실로 사용하기 위하여 두 가지 형태의 삼각형 구조와 직사각형 구조에 대한 모드 분포를 조사하였다.

잔향실 내부의 매질을 공기로 가정하면, Type I에 대한 총 모드 수는 다음과 같으며,

$$N_I(f) = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} a^2 c \left(\frac{f}{150} \right)^3 \quad (1)$$

Type II에 대한 총 모드 수는 다음과 같다.

$$N_{II}(f) = \frac{3\pi}{2\sqrt{3}} a^2 c \left(\frac{f}{150} \right)^3 \quad (2)$$

또한 직사각형 구조에 대한 총 모드 수는 다음과 같다.

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

여기서 a, b, c 는 체적에 대한 변수이므로 형태와 크기에 따라 다른 값을 갖게 된다^[9].

그림 2는 동일한 체적 조건에서 각각의 잔향실에 대한 주파수별 모드 분포를 나타낸 것이다. 그림 2에서 Type I, II가 직사각형 구조보다 발생하는 모드 수가 더 많은 것을 알 수 있다. 또한 사용 가능한

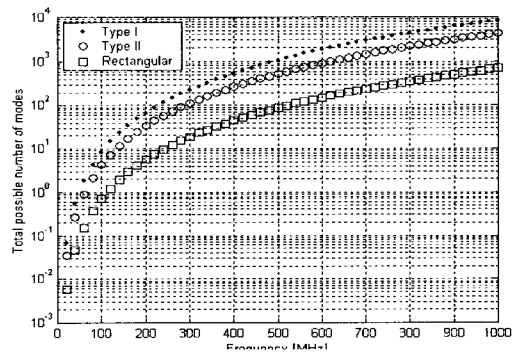


그림 2. 주파수에 따른 전자파 잔향실 내부의 모드 분포

Fig. 2. Mode distribution of reverberation chamber with respect to frequency.

하한주파수가 직사각형 구조보다 더 낮아질 수 있고 1 GHz 이상에서 잔향실로 사용하기에 충분할 만큼 모드 수가 많이 발생하는 것을 알 수 있다.

2-2 Schroeder 확산기의 설계

Schroeder 확산기는 기본적으로 Quadratic Residue Sequence를 이용하여 설계한 Quadratic Residue 확산기이다^[8].

Quadratic Residue Sequence, S_n 은 다음과 같다.

$$S_n = n^2 \cdot \text{modulo}(N) \quad (4)$$

여기서 n 은 정수이고, N 은 홀수인 소수이다.

S_n 은 n^2 을 N 으로 나눈 나머지며 $0 \leq S_n < N$ 의 정수가 된다. 이러한 Sequence는 N 을 주기로 N 개의 난수가 반복된다.

본 논문에서는 주파수 범위 1 GHz~3 GHz에서 적용될 Schroeder 확산기를 설계하였는데, Well의 폭, w_n 은 다음과 같다^[8].

$$w_n = \frac{\lambda_H}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ [cm]} \quad (5)$$

여기서 λ_H 는 상한주파수, f_H 에 대한 파장이고 λ_L 은 하한주파수, f_L 에 대한 파장이며, Well의 수, N 은 다음과 같다.

$$N = 2m \frac{\lambda_L}{\lambda_H}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

잔향실의 체적과 주파수 대역을 고려하여 $m = 2$

표 1. 확산기의 깊이에 따른 한 주기에 대한 계산값
Table 1. Depths of one period diffuser.

n	S_n	d_n (cm)
0	0	0
1, 12	1	1.2
2, 11	4	4.6
3, 10	9	10.4
4, 9	3	3.5
5, 8	12	13.9
6, 7	10	11.5

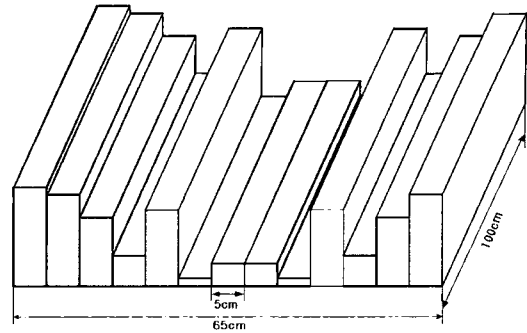


그림 3. 설계된 한 주기의 Schroeder 확산기 모습
Fig. 3. Designed one period Schroeder diffuser.

로 정하면, $N = 12$ 가 되지만 N 은 홀수인 소수이고 계산된 값보다 커야하므로 $N = 13$ 으로 정하였으며, 그 결과 Well의 깊이, d_n 은 다음과 같다.

$$d_n = \frac{S_n}{N} \frac{\lambda_L}{2} \quad (7)$$

한 주기에 해당하는 확산기의 Well 깊이에 따른 결과 값은 표 1과 같으며, 최종적으로 설계된 Diffuser의 구조는 그림 3과 같다. 확산기의 길이는 잔향실의 체적을 고려하여 110 cm로 하였고 2 주기의 Schroeder 확산기를 설계하였다.

Ⅲ. 잔향실 내부 필드분포 해석

3-1 전자파 잔향실의 모델링

동일한 체적으로 설계한 전자파 잔향실의 바닥 면 끝 부분에 Schroeder 확산기를 부착하였으며 잔향실 내부 필드 분포를 조사하기 위해 FDTD방식을 적용하여 시뮬레이션을 하였다.

전자파 잔향실에 대한 구조는 다음과 같이 모델링 하였다. 주파수 2 GHz에 대해서 필드 분포를 얻기 위해 주파수를 고려하여 기본 셀을 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z = 1 \text{ cm}$ 로 설정하였다. 그리고 CFL(Courant-Friedrick-Lewy) 안정성 조건^{[10],[11]}을 만족시키기 위해 19.25 ps ($= \Delta t$)의 이산시간 간격으로 5,000번 수행하였다.

경계 조건을 고려한 전체 셀의 크기는 Type I의 경우 $290 \Delta X \times 159 \Delta Y \times 260 \Delta Z$ 로 설정하였고, Type

표 2. $x=61$ 인 평면에 대한 전계 시뮬레이션 결과
Table 2. Simulation results on $x=61$ plane.

E [dBmV/m]	평균	표준 편차	75 % 샘플		
			최대값	최소값	Tolerance [dB]
Type I	61.45	2.58	64.43	58.72	5.71
Type II	62.72	2.88	66.12	59.38	6.74

II의 경우 $222\Delta X \times 203\Delta Y \times 260\Delta Z$ 로 설정하였다. 전자파 잔향실과 바깥쪽 경계사이에는 30셀 이상의 공간을 주었고^[12], 매질은 자유공간(Free Space)으로 설정했다. 각각의 벽면의 두께는 한 셀을 가지며 벽면의 재질은 PEC (Perfect Electric Conductor)로 설정하였고^{[13][14]} 전자파 잔향실에 장착된 확산기에 대해서도 PEC로 설정하였다. 그리고 내부공간은 자유공간으로 설정하였다. 필드 발생을 위한 소스는 Sinusoidal 포인트 소스로 설정하였으며, 소스의 위치는 Type I의 경우 (103, 75, 200), Type II의 경우 (112, 75, 200) 이었다.

전자파 잔향실 내부의 필드 균일도를 평가하기 위해 모든 벽면으로부터 한 파장 이상 떨어진 지점에 시험공간을 설정하였고^[15] 시험공간의 크기는 한 변의 길이가 30 cm인 정육면체로 하였다.

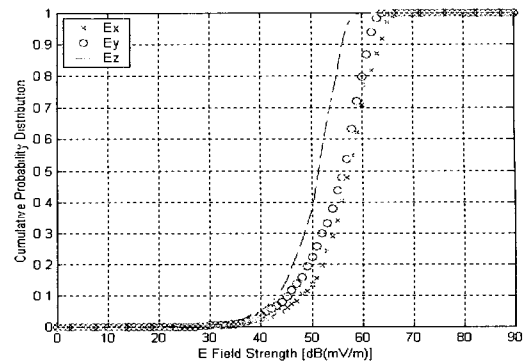
3-2 해석결과

각각의 구조에서 시험공간 중의 y - z 평면 (61, y , z)에 대해 전계 세기를 추출하여 평균값, 표준편차와 추출한 샘플의 75%에 대한 Tolerance를 구한 결과는 표 2와 같다^[1]. Type I, Type II 모두 3 dB 이내의 표준편차를 가지므로 잔향실 내부의 필드 균일도가 우수하다는 것을 나타낸다.

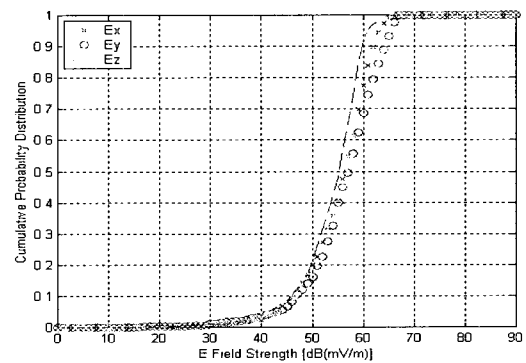
그림 4는 E_x, E_y, E_z 성분에 대한 누적분포 함수를 나타낸 것이다. 전체적인 분포는 카이제곱의 분포를 따르고 있다. 그림 4에 따르면 두 구조 모두 편파 특성이 좋지만 Type II의 편파 특성이 더 우수한 것으로 나타났다.

3-3 제작 및 측정 결과

Type I의 필드 균일도가 Type II에 비하여 더 좋



(a)



(b)

그림 4. E_x, E_y, E_z 성분에 대한 누적분포 함수 전체 세기 분포. (a) Type I, (b) Type II

Fig. 4. Cumulative distribution function of E_x, E_y, E_z components. (a) Type I, (b) Type II

지만, Type II가 편파특성과 공간효율 면에서 우수하므로 Type II와 구조 및 크기가 동일한 삼각형 전자파 잔향실을 제작하였으며 그림 3과 동일한 두 주기 Schroeder 확산기를 제작하였다. 전자파 잔향실 내부와 Schroeder 확산기 표면의 재질은 주석 도금된 철판을 사용하였다. 그림 5는 Schroeder 확산기를 적용한 삼각형 구조의 전자파 잔향실의 전경이다.

신호발생기를 사용하여 1 GHz, 2 GHz, 3 GHz의 신호를 발생시켰으며, 등방성 프르브를 사용하여 그림 6의 시험 공간 내부 8개 지점에서 각각의 주파수에 대한 전계 세기를 측정하고 평균값과 표준편차를 구하였다. 측정 방법은 IEC 61000-4- 21(Draft)에 규정된 대로 시행하였다.

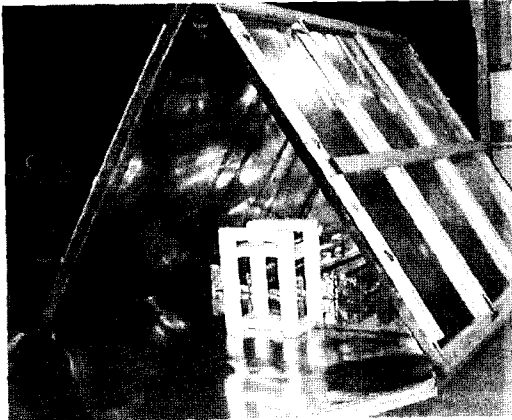


그림 5. 제작된 삼각형 구조의 전자파 잔향실
Fig. 5. Triangular reverberation chamber.

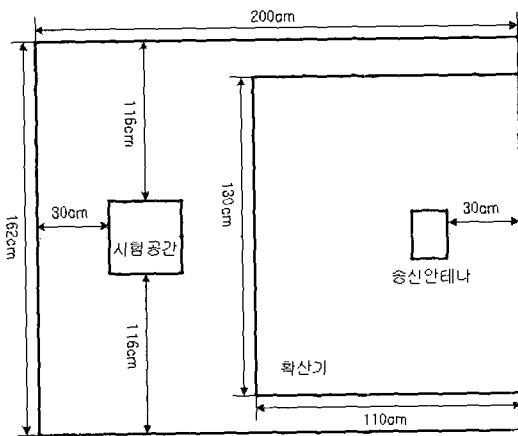


그림 6. 위에서 바라본 삼각형 전자파 잔향실
Fig. 6. Top view of triangular reverberation chamber.

표 3. 8개 시험 지점에 대한 전계 측정결과
Table 3. Test results of field strengths at 8 test points.

	Schroeder 확산기 적용 경우		Schroeder 확산기 미적용 경우	
	평균값 [dBmV/m]	표준편차	평균값 [dBmV/m]	표준편차
1 GHz	76.5	1.84	73.0	2.73
2 GHz	75.1	3.66	78.2	4.24
3 GHz	87.0	2.28	86.4	6.48

측정한 전계 세기의 평균값과 표준편차는 표 3과 같다. Schroeder 확산기를 적용 할 경우, 표준편차가 약 1~4 dB 정도 낮아지므로 전자파 잔향실 내의 필드 균일도가 개선되는 것을 알 수 있다. 또한 본 논문의 결과를 통해 시뮬레이션을 이용한 연구 결과^{[5],[6]}를 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

발생 가능한 모드 수가 직사각형 구조보다 많은 두 가지 형태의 삼각형 구조에 대해 필드 분포를 분석하였으며, 필드 균일도가 국제규격에 만족됨을 알 수 있었다.

두 가지 형태 중 필드 균일도와 편파 특성 면에서도 좋은 특성을 가지고 시험공간 확보에 있어서 또한 보다 효율적인 정삼각형 구조의 전자파 잔향실을 제작하여 필드 균일도를 조사한 결과, 1~3 GHz에 대해 설계된 Schroeder 확산기를 적용하였을 때, 확산기를 미적용한 전자파 잔향실보다 필드 균일도가 약 1~4 dB 정도 개선되는 효과를 얻을 수 있었다. 이것은 삼각형 전자파 잔향실에서 모드 산란기와 확산기를 동시에 사용할 경우 균일도 확보를 위한 시간이 단축되므로 보다 효율적으로 전자파 잔향실 내부의 필드 균일도를 확보할 수 있을 것이라고 판단된다.

또한 1 GHz 이하에서도 직사각형 구조에 비해 발생 가능한 총 모드 수가 많기 때문에 하한주파수가 더욱 낮아질 가능성도 보이고 있다.

참 고 문 헌

- [1] IEC 61000-4-21(Draft): Annex XX: Alternative method Reverberation Chamber Method (Draft document 77B/215/CD).
- [2] M. L. Crawford and 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, April 1986.
- [3] Frank B. J. Leferink, "High Field Strength in a

- Large Volume: The Intrinsic Reverberation Chamber", *IEEE Symposium on EMC*, pp. 24-27, 1998.
- [4] Markus Petirsch, and Adolf Josef 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, Nov. 1999.
- [5] 이광순, 이중근, 정삼영, 김성철, "Schroeder Diffuser를 이용한 전자파 잔향실 내부의 필드 해석", 춘계 마이크로파 및 전파 학술 대회 논문집, 제23권, 1호, pp. 497-500, 2000. 5.
- [6] 이광순, 이중근, 정삼영, 김성철, "Diffuser 배열에 따른 전자파 잔향실 내 필드 편파 특성 향상", 추계 마이크로파 및 전파 학술대회 논문집, 제 23권 2호, pp. 263-266, 2000. 9.
- [7] Jong Chel Yun, Joong Geun Rhee, & Sam Young Chung, "An Improvement of Field Uniformity of Reverberation Chamber by Variance of Diffuser Volume Ratio", to be published at *APMC 2001*, Taipei, Taiwan, Dec. 2001.
- [8] M. R. Schroeder, *Number Theory in Science and Communication*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1994.
- [9] Yi Huang, "Conducting Triangular Chambers for EMC Measurements", *Measurement Science & Technology*, vol. 10 no. 3, L21-L24, March 1999.
- [10] A. Taflove, and 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] G. Mur, "Absorbing boundary condition for the finite-difference approximation of the time-domain electro-magnetic field equation", *IEEE Trans. Electro-magn. Compat.*, vol. EMC-23, no. 4, pp. 377-382, Nov. 1981.
- [13] K. Harima, "FDTD analysis of electro-magnetic fields in a reverberation chamber", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E81-B, no. 10, Oct. 1998.
- [14] K. Chamberlin, and L. Gordon, "Modeling Good Conductors Using the Finite-Difference, Time-Domain Technique", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* vol. 37, no. 2, May 1995.
- [15] Lizhou Bai, Lin Wang, Baikuan Wang, Jianjian Song, "Reverberation Chamber Modelng Using FDTD", *IEEE Symposium on EMC*, 1999.

김 성 철



측정 및 수치해석

2000년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
 2002년 2월: 한양대학교 전자통신 전파공학과 (공학석사)
 2001년 12월~현재: LG전자 DDM 규격그룹 연구원

[주 관심분야] EMI/EMC, 전자파

이 중 근



책임연구원

1967년: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1973년: 미국 남플로리다 주립대학 (공학석사)
 1979년: 미국 남플로리다 주립대학 (공학박사)
 1979년~1988년: 국방과학연구소

1990년~1991년: 한국전자과학회 초대회장
 1988년~현재: 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수
 [주 관심분야] EMI/EMC, Microwave 부품