

논문 2010-47TC-4-3

2D CRD 수에 따른 전자파 잔향실 내의 필드 균일성 개선

(Improvement of Field Uniformity in a Reverberation Chamber with Various Numbers of a 2D CRD)

김진복*, 이종근**, 김정훈*, 이유헌*

(Jin-Bok Kim, Joong-Geun Rhee, Jung-Hoon Kim, and Eugene Rhee)

요약

본 논문은 전자파장해 및 복사 내성 측정에 사용되는 전자파 무반사실의 대응 방법으로 사용되는 전자파 잔향실 내의 필드 균일성에 관한 연구이다. 최근 Wireless LAN 이나 DMB 및 휴대 인터넷 사용량의 증가로 인해 전자기파 노이즈가 다른 기기나 장비에 악영향을 미칠 것으로 예상되는 2.3 GHz 대역에 초점을 맞추었다. 본 논문에서는 전자파 잔향실 내부의 전계강도 수치해석을 위하여 시간영역 유한 차분법이 사용되었으며, 전자파 잔향실의 특성과 내부 전계강도의 균일성 개선을 위하여 2D CRD의 배치와 개수를 변화시키면서 표준 편차, 공차 특성, 편파 특성을 비교분석하였다. 전자파 잔향실의 두 면에 확산기를 부착하였을 때 확산기를 사용하지 않은 전자파 잔향실에 비하여 표준 편차는 1.98 dB, 공차 특성은 3.6 dB 만큼 개선되었다.

Abstract

This paper presents the improvement of the field uniformity in a reverberation chamber which can be substitute an anechoic chamber for the electromagnetic interference (EMI) and immunity test. Nowadays, there are many EMI issues due to the increasing use of wireless local area network (LAN), digital multimedia broadcasting (DMB), and mobile internet. With this reason, this paper studied the field characteristics in a reverberation chamber for 2.3 GHz band. In this paper, the finite difference time domain (FDTD) method is used to analyze the field characteristics in a reverberation chamber. To improve the field uniformity in the reverberation chamber, this paper adopted a 2D cubical residue diffuser (CRD) with varying the disposition and number of CRD. For each case, the tolerance and standard deviation of the electric field strength are evaluated. In comparison with the reverberation chamber without any CRD, the reverberation chamber with two CRDs showed improved results; 1.98 dB improvement in standard deviation and 3.6 dB improvement in tolerance.

Keywords : Reverberation chamber, Field uniformity, CRD(Cubical Residue Diffuser), QRD(Quadratic Residue Diffuser)

I. 서론

전자파장해(EMI: Electromagnetic Interference) 및 복사 내성(Radiation immunity) 측정은 대부분 큰 공간을 차지하며 제작 시 많은 비용이 소요되는 전자파 무반사실(Anechoic chamber)에서 이루어진다.

여러 전자기기나 장비들의 사용 주파수가 수 GHz 이상으로 확장됨에 따라, 제작 및 유지보수 비용이 저렴하고 상한주파수 제약이 없는 전자파 잔향실(Reverberation chamber)이 전자파 무반사실의 대응시설로 고려중에 있다. 전자파 잔향실에 관한 연구결과는 미국 표준과학 연구원(NIST: National Institute of Standards and Technology)에서 1986년에 발표 되었으며^[1-2], 국제 전자파 장해 특별 위원회(CISPR: International Special Committee on Radio Interference)에서 전자파 잔향실의 규격에 관한 가이드라인과 표준을 제공하고 있다. 전자파 잔향실

* 학생회원, ** 평생회원, 한양대학교 전자전기제어계측 공학과

(Department of Electronics Electrical Control & Instrumentation Engineering, Hanyang University)

접수일자: 2009년12월9일, 수정완료일: 2010년4월13일

내의 전계강도 균일성을 결정하는 요소에는 내부에서 발생 할 수 있는 모드 수, 교반기 (Stirrer) 또는 확산기 (Diffuser)의 효율 그리고 제작 시 사용된 금속의 Q factor 등이 있다^[2].

현재까지 Schroeder 방식의 QRD(Quadratic Residue Diffuser)와 교반기를 전자파 잔향실 내부에서 동시에 사용하는 방식이 제안되었^[3], 교반기 모터부분의 노이즈 때문에 발생하는 오차를 줄이기 위하여 확산기만을 사용하여 전자파 잔향실 내부의 전계강도 균일성의 개선에 관한 연구가 활발히 진행되었다^[4]. 전자파 잔향실 내의 전계강도 균일성을 만족시키기 위해서는 하한 사용가능 주파수(LUF: Lowest Useable Frequency)를 고려해야 한다. 또한 전자파 잔향실 내의 전계강도 특성을 파악하기 위하여 적절히 선정된 시험 공간(Test volume)^[5]에서 전계강도를 추출하고 이를 이용하여 전자파 잔향실의 균일성을 조사하였다.

본 논문에서는 전자파 잔향실 내부 전계강도의 표준 편차, 공차(Tolerance) 특성, 편파 특성 등을 개선시키기 위하여 2D CRD(Cubical Residue Diffuser)를 설계하여 전자파 잔향실 내부에 부착하였으며, 그 수에 따른 내부 전계강도 특성을 연구 하였다. 또한 전자파 잔향실 내의 전계강도 해석을 위하여 시간영역 유한차분법(FDTD: Finite Difference Time Domain) 방식을 적용하였으며, XFDTD version 6.3 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 사용된 시험 주파수는 Wireless LAN(Local Area Network), DMB(Digital Multimedia Broadcasting) 및 휴대 인터넷 사용량의 증가로 인해 전자기파 노이즈가 다른 기기나 장비에 악영향을 미칠 것으로 예상되는 2.3 GHz 대역에 초점을 맞추었다.

II. 전자파 잔향실 설계

1. 전자파 잔향실 설계

그림 1은 설계된 전자파 잔향실의 크기를 나타낸다. 전자파 잔향실은 내부 특의 전계강도 균일성이 가장 중요하므로 사용가능 주파수 2.3 GHz 대역에서의 다중모드 전자기 환경(Multi mode electromagnetic environment)을 만족하기 위하여 적절한 크기를 가져야만 한다. 전자파 잔향실로 사용되기 위해서 3 dB 이내의 필드 균일성을 만족하기 위해 최소 60개 이상의 모드 수가 필요하다^[2]. 전자파 잔향실 내부를 무 손실 상태로 가정한다면, 직육면체 형태의 전자파 잔향실

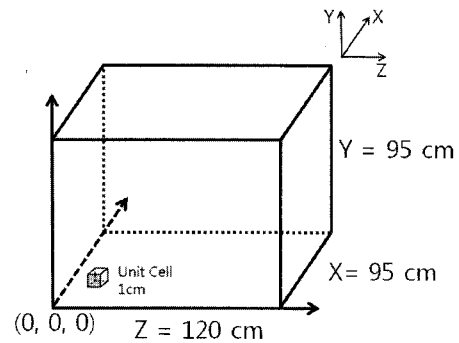


그림 1. 전자파 잔향실의 크기
Fig. 1. Size of reverberation chamber.

내부에서 발생 가능한 모드 수는 식 (1)과 같다^[8].

$$Mode(f) = \frac{8\pi}{300}XYZ\left(\frac{f}{c}\right)^3 - \frac{1}{100}(X+Y+Z)\left(\frac{f}{c}\right) + \frac{1}{2} \quad (1)$$

하한 주파수는 625 MHz, f 의 단위는 [MHz], X , Y , Z 는 전자파 잔향실의 길이이며 단위는 [cm]이다.

2. 2D CRD 설계

그림 2는 2D CRD의 단면을 보여주며, 표 1은 그에 따른 난수표와 높이를 나타낸 것이다. 전자파 잔향실에서 요구되는 전계강도의 균일성을 확보하기 위하여 확산기 설계는 Schroeder 방식의 QRD^[3]을 응용하였다. 응용된 QRS(Quadratic Residue Sequence)의 S_n 은 식 (2)와 같다^[6].

$$S_n = |n^3 - jN| \quad (2)$$



그림 2. 2D CRD의 단면
Fig. 2. Side view of 2D CRD.

표 1. 2D CRD의 난수표와 그 높이
Table 1. n and height of 2D CRD.

n	S_c	높이[cm]	n	S_c	높이[cm]
0	0	0.1	9	15	11.4
1	1	0.76	10	14	10.64
2	8	6.08	11	5	3.80
3	10	7.60	12	11	8.36
4	13	9.88	13	4	3.04
5	6	4.56	14	7	5.32
6	12	9.12	15	9	6.84
7	3	2.28	16	16	12.16
8	2	1.52	총 17번 반복		

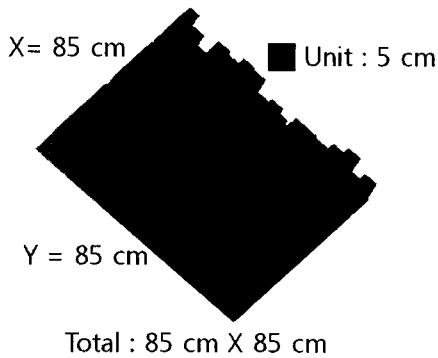


그림 3. 설계된 2D CRD
Fig. 3. Designed 2D CRD.

여기서 n 은 0부터 $(N-1)$ 까지 정수이며 j 는 $0 \leq n^3 - jN$ 을 만족하는 최대 정수이다. N 은 소수로 표현되며 이 Sequence는 N 을 주기로 갖으며 N 개의 난수가 반복된다. 그림 3의 한 면을 정해진 높이에 따라 17번 반복하여 85 cm × 85 cm의 크기를 가지는 그림 3의 완성된 2D CRD를 만든다. 랜덤함수^[9]를 사용하여 기존의 QRD보다 더 많은 비대칭을 가지게 되며 산란 효과는 더욱 극대화 된다.

3. FDTD 수치해석 방법

본 논문에서 사용된 FDTD 수치해석 방법은 1966년 Yee에 의해 처음 소개^[7]되었으며, 수많은 연구에 의하여 수정 보완된 후 안테나와 전자파 잔향실을 비롯한 거의 모든 전자파문제의 수치 해석방법으로 폭 넓게 사용되고 있다^[8]. 정현파(Sinusoidal wave)를 매질에 바로 입사하면 초기 시간 동안 입사파와 반사파가 중첩되어 과도현상이 발생하므로, 정현파의 크기를 서서히 증가시켜 과도현상을 최소화시키는 식 (3)을 사용하여 입사파(V_i)를 구현했다. k 는 주기의 횟수이며 임의의 자연수이다. 본 논문에서 $k=2$ 이며, T 는 정현파의 한 주기를 나타낸다^[9].

$$V_i(t) = \begin{cases} \frac{t}{kT} \sin(\frac{2\pi t}{T}), & t < kT \\ \sin(\frac{2\pi t}{T}), & t \geq kT \end{cases} \quad (3)$$

전계 발생을 위하여 2.3 GHz 대역의 1 V 정현파를 포인트 소스로 설정하였으며, 전자파 잔향실 모델의 Cell(47.5, 47.5, 30)에서 -Z방향으로 설정하였다.

3차원에서 FDTD 수치해석 방법은 기본 Cell의 단위를 전자기파 최단파장의 1/10 이하로 설정한 뒤 망

(Mesh) 형태로 표현해야 한다^[11]. 설계된 전자파 잔향실의 전체 크기는 95 × 95 × 120 cm³이므로 Caurant-Friedrick Lexy 안정성 조건에 의해 $\Delta t=19.25$ ps, 1회 시뮬레이션 동안의 시간 간격 수는 25,000 번으로 결정하였다^[7, 11].

FDTD 방법의 정확한 결과를 나타내기 위해서, 실제 시뮬레이션에 적용할 때는 정확한 망의 크기, 입사파 소스(Source)의 정확한 위치와 설계된 잔향실의 적절한 전체크기 등이 반드시 필요하다.

4. 전계분포 해석 방법

그림 4는 수치해석을 위한 전자파 잔향실 모델링을 보여준다. 전자파 잔향실의 재질은 완전도체(PEC: Perfect Electric Conductor)로 설계 되었으며 시험 공간(Test volume)은 IEC 61000-4-3에 설명된 전자파 무반사실에 대한 정의를 준수하여, 전자파 잔향실 내의 전계강도 균일성을 평가하기 위하여 모든 벽면으로부터 한 파장 이상 떨어진 지점들을 연결하여 시험 공간을 결정하였다^[10]. 또한 소스 포인트는 XY평면 Z=0에서 30 cm 떨어진 중앙에 설정 하였다.

그림 5는 시험 공간의 전계강도 추출 포인트를 보여 준다. Z방향으로 각각 50 - 90 cm 까지 5개의 평면으로 설정한 뒤, 각각의 평면에 16개의 포인트를 규칙성 있게 적용시켜 총 80개의 테스트 포인트를 설정하였다. IEC 61000-4-3에 설명된 전자파 무반사실에 대한 정의를 고려하여 80개의 전계강도 추출 포인트를 결정한 뒤, 이중 75 %인 60개를 본 논문에 사용하여 전자파 잔향실 내부 특성을 연구하였다^[10].

전자파 무반사실은 전계의 변화가 발생할 수 있을 정도의 작은 수직평면으로 균일 지역이 정의되고 정의된

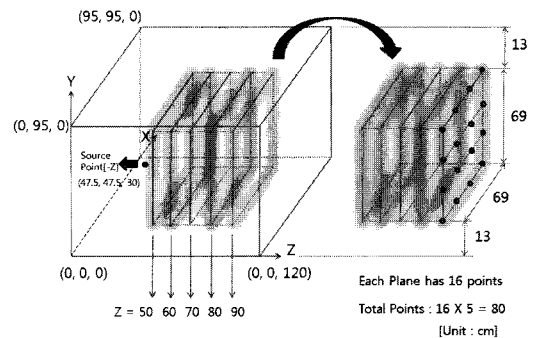


그림 4. 수치해석을 위한 전자파 잔향실 모델링
Fig. 4. Reverberation chamber modeling for field analysis.

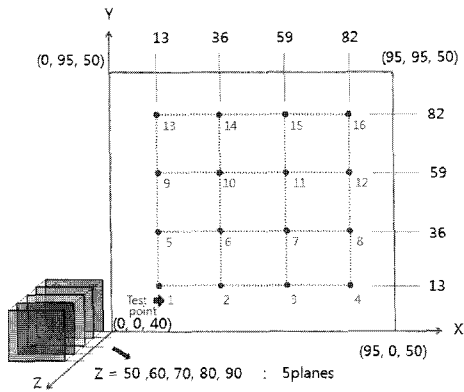


그림 5. 시험 공간의 전계강도 추출 포인트
Fig. 5. Test point in test volume for electric field strength.

영역에서 전계의 크기가 표면의 75 % 이상에서 측정값의 ± 3 dB 내에 있으면 균일하다고 정의하며, 전자파 잔향실은 전계 분포 특성상 균일 체적으로 고려할 수 있다. 이것이 전자파 무반사실과 전자파 잔향실의 해석 방법 차이이다.

III. 해석 결과

1. 추출된 전계강도의 분석

그림 6은 3 가지 형태의 전자파 잔향실 시뮬레이션을 나타낸다. 본 논문에서는 확산기가 없을 때, XY평면 Z=0의 한 면에 확산기를 부착하였을 때, 그리고 XY평면 Z=0, Z=120의 두 면에 확산기를 부착하였을 때의 전자파 잔향실을 시뮬레이션 하였다. 각각의 경우 확산기의 수를 제외한 모든 조건을 동일하게 결정하여 논문의 신뢰성을 높였다.

표 2는 시험 공간내의 전계강도 샘플값 중 75 %의

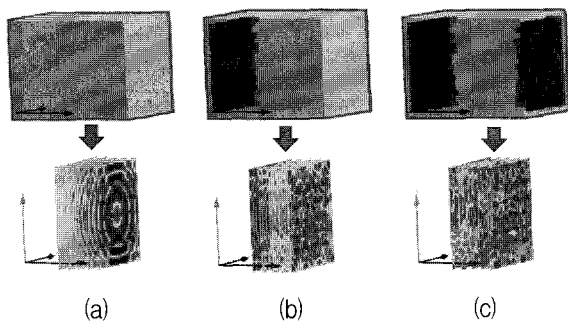


그림 6. 3 가지 형태의 전자파 잔향실 시뮬레이션
Fig. 6. 3 Types of reverberation chamber.
(a) No diffuser (b) Diffuser 1EA (c) Diffuser 2EA

표 2. 시험 공간내의 전계강도 샘플 값 중 75 %의 통계

Table 2. Electric field strength in test volume : 75 % sampling.

전계강도	Type (a)	Type (b)	Type (c)
최대값[dB]	55.27	56.65	57.72
최소값[dB]	48.56	52.90	54.61
평균 [dBmV/m]	52.03	54.70	56.29
표준 편차 [dB]	4.74	4.07	2.76
공차 특성 [dB]	6.71	3.75	3.11

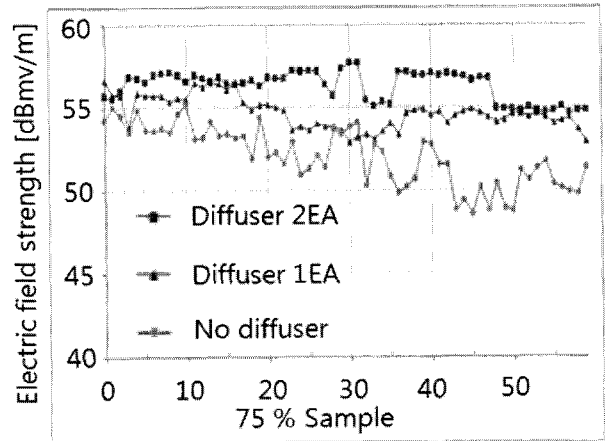


그림 7. 75 % 샘플의 전계강도 분포
Fig. 7. Electric field strength distribution of 75 % sampling.

통계를 나타내며 그림 7은 측정된 75 % 샘플의 평균 전계강도 분포를 나타낸 것이다. 평균 전계강도는 6(b)의 경우 6(a)에 비해 2.67 dBmV/m 만큼 높아졌으며, 6(c)의 경우 6(a)에 비해 4.26 dBmV/m 만큼 높아진 것을 확인하였다. 전자파 잔향실 내의 전계강도 균일성을 나타내는 표준 편차의 6(b)의 경우 6(a)에 비해 0.7 dB 만큼 개선되었으며, 6(c)의 경우 6(a)에 비해 1.98 dB 만큼 개선된 것을 확인하였다. 공차 특성의 경우 6(b)의 경우 6(a)에 비해 2.96 dB 만큼 개선되었으며, 6(c)의 경우 6(a)에 비해 3.6 dB 만큼 개선된 것을 확인하였다.

2. E_x, E_y, E_z 편파 특성

그림 8, 9, 10은 각각의 시험 방법에 대한 전계강도의 상세한 E_x, E_y, E_z 편파 특성 분포를 보여준다.

확산기를 미부착한 그림 9의 경우 E_x, E_y, E_z 분포가 상당히 고르지 못한 것을 알 수 있다. XY평면 Z=0의

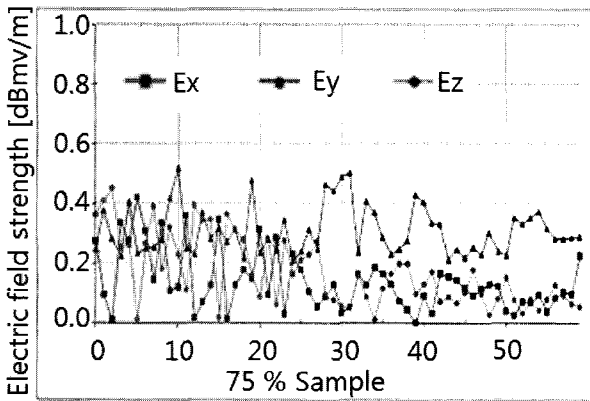


그림 8. 확산기 미부착시 잔향실의 E_x, E_y, E_z 편파 특성
 Fig. 8. E_x, E_y, E_z polarization characteristic of reverberation chamber : No diffuser.

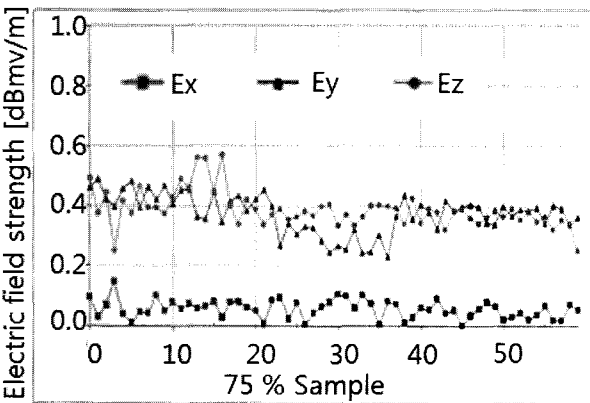


그림 9. XY평면 Z=0의 한 면 확산기를 부착한 잔향실의 E_x, E_y, E_z 편파 특성
 Fig. 9. E_x, E_y, E_z polarization characteristic of reverberation chamber : XY plane Z=0, Diffuser 1EA.

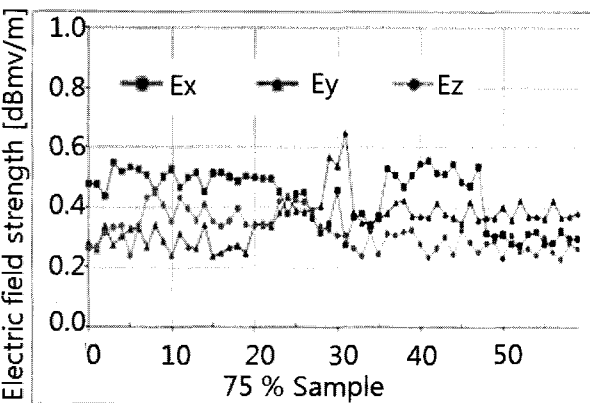


그림 10. XY평면 Z=0, Z=120의 두 면에 확산기를 부착한 잔향실의 E_x, E_y, E_z 편파 특성
 Fig. 10. E_x, E_y, E_z polarization characteristic of reverberation chamber : XY plane Z=0, Z=120, Diffuser 2EA.

표 3. 확산기 수에 따른 시험 공간내의 전계강도 샘플 값 중 75 % 통계

Table 3. Electric field strength in test volume with various diffusers: 75 % sampling.

전계강도	Diffuser 2EA	Diffuser 3EA	Diffuser 4EA	Diffuser 5EA
최대값[dB]	57.72	57.80	58.23	58.31
최소값[dB]	54.61	54.70	55.15	55.23
평균 [dBmV/m]	56.29	56.57	56.68	56.72
표준 편차 [dB]	2.76	2.74	2.73	2.71
공차 특성 [dB]	3.11	3.10	3.08	3.08

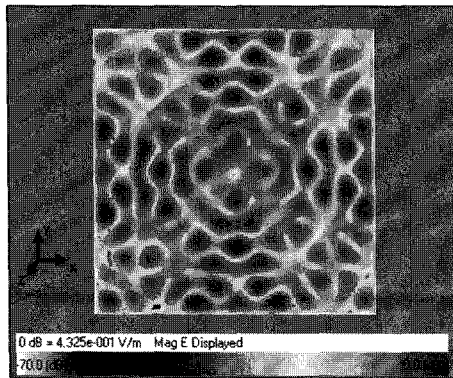
한 면에 확산기를 부착한 그림 10은 전체적인 평균값이 높아지고 전계강도의 균일성은 개선되었지만, E_x 의 값이 E_y, E_z 에 비해 작게 나타났으며 XY평면 Z=0, Z=120의 두 면에 확산기를 부착한 그림 E_x, E_y, E_z 모두 고르게 분포한 것을 확인할 수 있다.

표 3은 확산기수에 따른 시험 공간 내 전계강도 샘플 값 중 75 % 통계를 보여준다. 그 결과 전자파 잔향실 내부에 확산기의 수를 세 개 이상 부착할 시에는 시험 공간은 작아지는 반면에 표준 편차, 공차 특성이 확산기를 두 면에 부착했을 때보다는 우수하지만 그 값이 크게 다르지 않기 때문에 세 개 이상의 확산기는 불필요하다.

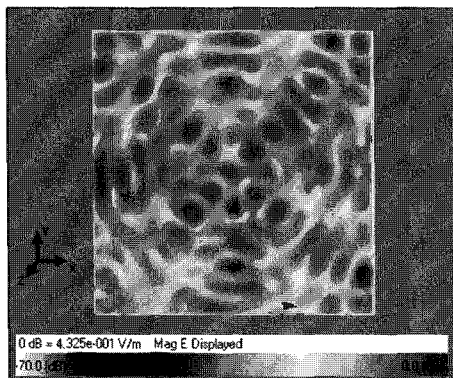
3. 전자파 잔향실 내부의 필드 균일성

설계된 Schroeder 방식의 확산기를 적용한 전자파 잔향실 내의 전계강도를 조사하기 위하여 Yee 알고리즘^[7]이 적용된 XFDTD version 6.3 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 하였다.

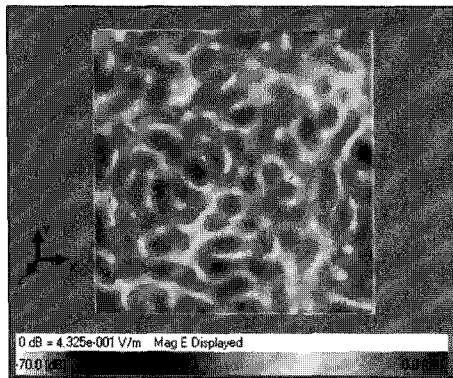
그림 11은 3가지 형태의 잔향실 시뮬레이션 결과를 보여준다. XY평면 Z=70에서 E_x, E_y, E_z 의 전체 합, $E_t = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$ 를 dB Scale로 나타낸 것이며, 색깔을 이용하여 구분하였다. 확산기를 부착하지 않은 그림 11(a)처럼 중앙의 물결모양에 비하여, 그림 11(b)과 그림 11(c)는 상대적으로 균일한 전계강도 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. XY평면 Z=0, Z=120의 두 면에 확산기를 부착한 그림 15(c)의 경우 가장 좋은 특성을 나타낸다.



(a)



(b)



(c)

그림 11. 3가지 형태의 전자파 잔향실 시뮬레이션 결과
 (a) No diffuser (b) Diffuser 1EA (c) Diffuser 2EA
 Fig. 11. Simulation results for 3 types of a reverberation chamber.
 (a) No diffuser (b) Diffuser 1EA (c) Diffuser 2EA

IV. 결 론

본 논문은 전자파 잔향실의 특성과 전계강도의 균일성 개선을 위하여 2.3 GHz 대역에 초점을 맞춰 설계된 2D CRD의 배치와 개수에 따른 비교분석을 통하여 효과적인 방법을 제시하였다. 분석 결과, 두 면에 확산기

를 부착하면 설계하면, 확산기를 부착하지 않은 전자파 잔향실 비하여 표준 편차는 1.98 dB, 공차 특성은 3.6 dB 만큼 개선되었다. 또한 설계된 전자파 잔향실에서 2D CRD의 수를 증가시키면 시험 공간은 줄어들고, 전자파 잔향실 내부의 전계강도 균일성은 두 면에 2D CRD를 부착 했을 때와 유사하기 때문에, 두 면에 2D CRD를 부착하여 설계하는 것이 가장 효과적이라 판단 된다.

참 고 문 헌

- [1] IEC 61000-4-21: Electromagnetic Compatibility, Part 4-21. Testing and measurement techniques Reverberation chamber test method, 2003.
- [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, Apr. 1986.
- [3] M. Petirsch and A. J. 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.
- [4] 이광순, 이중근, 정삼영, 김성철, "Schroeder Diffuser를 이용한 전자파 잔향실 내부의 필드 해석," 한국 춘계 마이크로파 및 전파 학술대회 논문집, 제23권, 제1호, 497-500쪽, 2000년 5월.
- [5] S. Y. Chung and J. G. Rhee, "Field Uniformity Analysis of Reverberation Chamber by FDTD Simulation Method," International Electrotechnical Commission/CISPR, St. Petersburg, Russia, May. 2000.
- [6] M. Mehta and J. Johnson, "Architectural Acoustics Principles and Design," Prentice Hall, 1999.
- [7] K. S. Yee, "Numerical solution of steady state electromagnetic scattering problems using the time dependent Maxwell's equation," IEEE Trans. on Antennas Propagate, vol. 14, pp. 302-307, 1966.
- [8] L. V. Venter and D. C. Baker, "EMC: Radiated immunity testing an overview of the reverberation chamber," IEEE Trans. on EMC, vol. 7, no. 5, pp. 471-474, 1998.
- [9] 양욱, 이중근, "2D 확산기를 이용한 전자파 잔향실 내의 필드 분포 특성," 한국 전자파학회 논문지, 제16권, 제4호, 373-379쪽, 2005년 4월.
- [10] IEC 61000-4-3: Testing and measurement techniques - Radiated, radio - frequency,

electromagnetic field immunity test, 2006.

[11] XFDTD, Finite Difference Time Domain Graphic User Interface for Electromagnetic Calculation, IEEE Press, 1999.

저 자 소 개

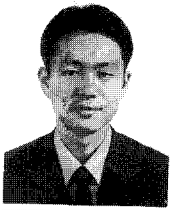


김진복(학생회원)
2008년 한양대학교 전자컴퓨터 공학부 (공학사)
2010년 한양대학교 전자전기제어 계측공학과 (공학석사)
<주관심분야 : EMC, Antenna, Touch window, 수치해석>



이중근(평생회원)
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 전자컴퓨터공학부교수
2004년~현재 IEC/CISPR/SC-H/WG4 Convener
<주관심분야 : EMC, MW 부품, Antenna, CISPR, ITU-R>



김정훈(학생회원)
1999년 한양대학교 전자공학과 (공학사)
2001년 한양대학교 전자통신전파 공학과 (공학석사)
2001년 8월~현재 한양대학교 전자전기제어계측공학과 박사 과정

<주관심분야 : EMC, MW 부품, 수치해석>



이유진(학생회원)
2001년 한양대학교 전자공학과 (공학사)
2003년 한양대학교 전자전기제어 계측공학과 (공학석사)
2010년 한양대학교 전자전기제어 계측공학과 (공학박사)

<주관심분야 : EMC, MW 부품, 수치해석>