제 출 문

본 보고서를 「전자파 잔향실 내부의 전계분포 해석 및 최적의 Chamber 구조 도출 연구」과제의 최종보고서로 제출합니다.

2001 . 1 .

연구책임자 : 이황재

연 구 원 : 정삼영

요 약 문

1. **과제명** : **전자파 잔향실 내부의 전계분포 해석 및 최적의 Chamber 구조 도출**
2. **연구기간** : 2000년 2월 1일   2000년 12월 31일
3. **연구책임자** : **공업연구관 이황재**
4. **계획 대 진도**

가. 월별 추진내용

세부내용	연구자	월별 추진계획												비 고
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1.최신 국제규격 동향 조사(IEC/CISRP-A 및 TC77의 document)	이황재													
2. 전자파 잔향실 내부의 균일 전자기장 형성을 위한 수치 해석														
가. 외부 구조물 변화 (Rectangular구조⇒ Triangular구조)에 대한 전자기장uniformity 평가	정삼영													
나.고정된 Mode-Stirrer 의 개수 변화에 따른 균일 전자기장 형성과의 상관 관계 도출	정삼영													
다. Triangular 구조에 대하여 회전 stirrer를 부착하였을 경우 chamber 내부의 전자기장 분포 해석	정삼영													
3. 보고서 작성														
분기별 수행진도(%)		10			40			80			100			

나. 세부 과제별 추진사항

세부 사업	추진 계획	추진 실적
o 국제규격 활동	1.최신 국제규격 동향 조사(IEC/CISRP-A 및 TC77의 document)	o CISPR 및 TC 77 B 심의 활동 및 동향 조사
o 수치 해석	2.전자파 잔향실 내부의 균일 전자기장 형성을 위한 수치 해석	
	가.외부 구조물 변화 (Rectangular구조⇒Triangular구조)에 대한 전자기장의 uniformity 평가	o FDTD방식의 수치해석 툴을 활용하여 필드의 균일성 조사 및 최적 구조 도출
	나.고정된 Mode-Stirrer의 개수 변화에 따른 균일 전자기장 형성과의 상관관계 도출	o Stirrer를 사용하였을 경우 균일 전자기장 형성 시뮬레이션
	다.Triangular 구조에 대하여 회전 stirrer를 부착하였을 경우 chamber내부의 전자기장 분포 해석	o Triangular 구조에 확산기를 적용하였을 경우 수치해석 결과 균일성 확보에 보다 우수성 입증
	3. 보고서 작성	

5. 연구 결과

가. 국제규격 활동 :

o 2000년 러시아 CISPR 기고(논문)서 발표 : 1편

: Field Uniformity Analysis of Reverberation Chamber by FDTD simulation method, St.Petersburg, Russia, May, 2000

나. 전자파 잔향실 수치해석 :

o 논문발표 :

- 국외 : 1편
  - 2001년 IEEE International symposium on EMC

  : Field Uniformity Characteristics of an Asymmetric Structure Reverberation Chamber by using FDTD Method
- 국내 : 논문 2편, 학술대회 : 4편
  - 한국 전자파 학회지 (vol. 11, no. 5, Aug. 2000)

    : 전자파 확산방식을 이용한 잔향실 내부의 필드 분포 해석
  - 한국 전자파 학회지 (2000년 11월 제출 및 심사중)

    : 전자파 잔향실 내 Diffuser 배열조건에 따른 필드분포 특성
  - 2000년 춘계 마이크로파 및 전파학술대회 논문 (2000년 5월)

    : Schroeder Diffuser를 이용한 전자파 잔향실 내부의 필드 해석
  - 2000년 한국 음향학회 학술대회 논문(2000년 7월)

    : 전자파 잔향실의 필드 균일성 확보를 위한 Schroeder방식의 Diffuser설계
  - 추계 마이크로파 및 전파학술대회 논문 (2000년 9월)

    : Diffuser 배열에 따른 전자파 잔향실내 필드 편파 특성 향상
  - 2000년 제 4차 전파통신 국방부 학술대회 논문(2000년 9월)

    : 전자파장해 및 복사 내성 측정용 전자파 잔향실 내부의 필드 특성

6. 기대효과

o 향후 대용(대체)시험시설로서 활용될 전자파 잔향실의 필드 균일성 확보를 위한 기술 제공 및 응용

o 전자파 차폐효과(케이블 및 함체) 측정을 위한 시설개발에 활용

SUMMARY

This paper presents the results of an electromagnetic field analysis for a reverberation chamber that is an alternative method of a shielded anechoic chamber, which is widely used for the analysis and measurement of electromagnetic interference and immunity test. Inside the defined test volume of the rectangular and triangular type, the Schroeder Quadratic Residue Diffuser was employed. FDTD (Finite-Difference Time-Domain) simulation method was applied to produce the field characteristics inside those reverberation chambers. According to the results, field uniformities on the aforementioned two types of reverberation chambers were correlated within ±3 dB, and ± 4.4 dB tolerances, and rectangular type reverberation chamber shows an independent polarization result

목 차

제 1 장 서 론

전자파 잔향실은 1968년 미국 Mendes에 의해 처음으로 제안[1]되어 전자파장해 및 복사 내성 측정을 위한 시험 시설로서의 가능성과 이에 대한 지속적 연구로 많은 기술적 발전을 가져왔다[2]. 초기 전자파 잔향실은 케이블이나 인클로우저(enclosure)에 대한 차폐효과를 측정하기 위하여 개발되었다가 차츰 군수물품과 전자제품에 대한 전자파 감수성 및 복사 방해파의 측정을 위한 시설로 활용하기 위한 연구로 확장되었다. 또한 최근 전파 장해 특별 위원회 (International Special Committee on Radio Interference)에서 전자파 장해 및 내성 시험을 위한 시설로서의 활용성과 1 18 GHz 전자파 장해 방지 규제 주파수의 확장에 따라 이 주파수 대역에서 시험장으로 활용할 수 있는 전자파 잔향실이 많은 관심을 끌게되었다.

전자파 잔향실은 기본적으로 도전성이 높은 물질로 차폐된 인클로우저이며, 내부에 RF(Radio Frequency)에너지가 여기 되었을 때 형성된 다중 모드 전자기 환경을 균일하게 분포시키기 위하여 내부 필드 경계를 이동시키는 튜너 또는 stirrer를 사용하며, 이에 따라 잔향실 내부에 균일한 필드를 형성시킬 수 있다. 본 논문에서는 잔향실 내부 필드 균일성을 확보하기 위하여 mode-stirred 튜너 와 전자파 확산용 Schroeder 방식의 확산기[3],[4]를 설계하여 적용하였으며, 필드 균일성을 위한 최적 조건을 추출하기 위하여 튜너 와 stirrer의 조건을 변화시켜 가며 형성된 필드 특성을 조사하였다.

전자파 잔향실 내부 필드 해석은 유한 차분법을 이용하는 FDTD방식을 적용하여 주파수 1 GHz 대역에서의 결과를 추출하였다.

튜너 및 확산기의 조건변화에 따른 필드 특성을 조사하기 위하여 그림 4에서와 같이 DUT (Device Under Test) 시험공간 (test volume)에서 추출한 전계 세기로 비교 분석하였으며, 또한 필드의 등방성 특성을 조사하고자 시험공간 면에서 추출된 x, y, z 축 방향의 전계세기로 비교 분석하였다.

가(전자파 잔향실 설계)에서는 FDTD방식으로 수치해석을 하기 위하여 설계된 mode-stirred 튜너의 구조 및 Schroeder 방식의 확산기에 대하여 설명을 하였고, 나(잔향실 내부 필드 분포해석)에서는 stirrer와 확산기를 부착한 전자파 잔향실과 수치해석을 위한 modeling, 그리고 내부 필드 수신지점의 선정과 추출된 데이터의 분석 결과에 대하여 설명하였다.

Session 2에서는 잔향실의 구조적인 측면에서, 동일한 체적일 경우 보다 개선된 모드 분포와 필드 분포를 갖는 잔향실 구조를 도출하고자 일반적으로 많이 사용되는 직사각형 구조와 모드 수 측면에서 보다 나은 분포를 갖는 삼각형 구조를 사용하였으며, 잔향실 내부 필드의 균일성을 얻기 위하여 기존 Stirrer 방식 대신에 음향학 분야에서 사용되는 Schroeder Quadratic Residue Diffuser방식을 적용하였다

각각 잔향실 구조에 대해서 수식적 전개를 통하여 발생 가능한 총 모드 수를 추출하였으며, 잔향실 내부의 필드 균일성을 개선하기 위하여 사용될 diffuser를 설계하였다. 전자파 잔향실 내부의 필드 분포는 유한 차분법(Finite Difference Method)을 기초로 하는 FDTD방식을 적용하여 주파수 3 GHz 대역에서 결과를 추출하였다.

Schroeder diffusers 사용에 따른 필드 개선효과를 조사하기 위하여 적절히 선정한 시험공간(Test Volume) 내부에서 추출한 전계 세기로 잔향실의 구조적 변화에 따른 필드의 변화 상태를 비교 분석하였으며, 또한 잔향실 내부 임의의 지점에서 시간 변화상태에 따른 전계 세기의 정보를 추출한 후, 확률적 통계기법을 이용하여 편파특성을 조사하였다.

제 2장 본 론

1. Mode-Stirrer Tuner 방식을 적용한 전자파 잔향실 필드해석

가. 전자파 잔향실 설계

전자파 잔향실은 필드 균일성을 만족시키기 위해 최소 시험 주파수(LUF : Lowest Useable Frequency)에 대해서 다중모드 전자기 환경 (multi-mode electromagnetic environment)을 유지하기 위한 적절한 크기를 가져야 한다. 잔향실에서 이용 가능한 최소 시험 주파수의 결정 방법은 설정된 인클로우저 크기에서 60개 이상 모드 수가 형성 되도록 한다. 인클로우저에서 모드 수 및 최소 시험 주파수의 결정은 다음 식으로부터 가능하다.

$$N = \frac{8\pi}{3} abc \frac{f_3}{v^3} - (a + b + c)\frac{f}{v} + \frac{1}{2} \qquad (1)$$

a, b, c 는 cavity의 크기 (m)이며, v 는 체적(m^3), 그리고 f 는 주파수(Hz)이다.
본 연구에서 사용된 인클로우저는 a (= 1.97 m), b (= 1.99 m), c (= 2.99 m), v (= 11.72 m^3)의 크기이며 재질로는 PEC (Perfect Electric Conductor)를 사용하였다. 식 1 을 이용하여 60 모드에 대한 주파수를 구해보면 설계된 전자파 잔향실의 최소 시험 주파수는 265 MHz 임을 알 수 있다.
전자파 잔향실 내부에 발생되는 실제 모드 수는 인클로우저 크기뿐만 아니라 튜너나 확산기의 사용에 따른 전력효율에 따라 결정되어진다[5]. 따라서 튜너 및 확산기의 효율을 높여 줌으로서 유효 모드밀도를 높일 수 있고 아울러 최소 시험 주파수를 보다 낮출 수 있다고 볼 수 있다.

1) Mode-stirred 튜너 구조

잔향실 내부 형성된 필드의 경계조건을 변화시켜 주기 위해 사용되는 튜너는 최소 시험 주파수 파장의 1/4이상의 크기를 가져야 하며, 한번 회전하는 동안 반복적인 필드 형태가 발생하지 않도록 복잡한 구조의 튜너의 사용이 필요하다[1]. 본 연구에서는 수치해석을 위하여 PEC 재질을 사용, 길이 50 cm, 그리고 폭 20 cm의 튜너를 설계하였으며, 옆 벽면으로부터 15 cm, x-z 평면의 천장에서 20 cm 아래 (98, 179, 75)에 위치시켰다. 1 회전을 그림 1과 같이 각도에 따라 step을 나누어 회전하도록 하였으며, 2개의 튜너인 경우 다른 1개의 튜너를 그림 1과 동일한 구조로 x-z 평면 (98, 179, 224)에 위치시켰다.

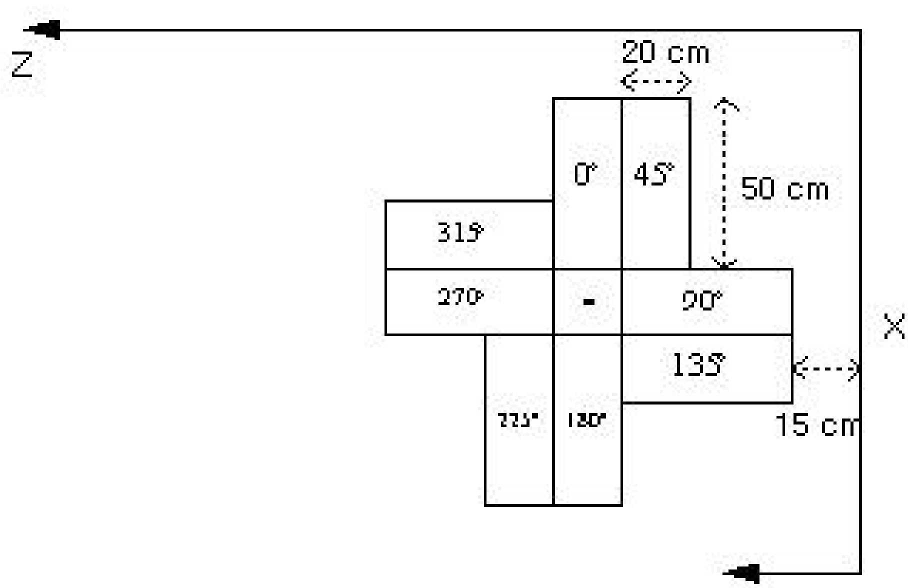


그림 1. 설계된 mode-stirred 튜너 구조

2) Schroeder 방식의 확산기 설계

콘서트(concert) 및 뮤직 홀(music hall)에서 음의 공진 문제를 해결하고자 벽으로부터의 음 반사를 최적상태로 확산시켜 주기 위해 사용되었던 Schroeder 확산기를 전자파 잔향실의 필드 균일성 개선을 위해 적용시키고

자 주파수 대역을 고려하여 다음과 같이 설계하였다.

확산기의 구조는 사용될 주파수의 범위에 따라 크기가 정해지므로 본 논문에서는 주파수 범위 1 3 GHz에서 적용될 PEC 재질의 확산기를 그림 2와 같이 설계하였다.

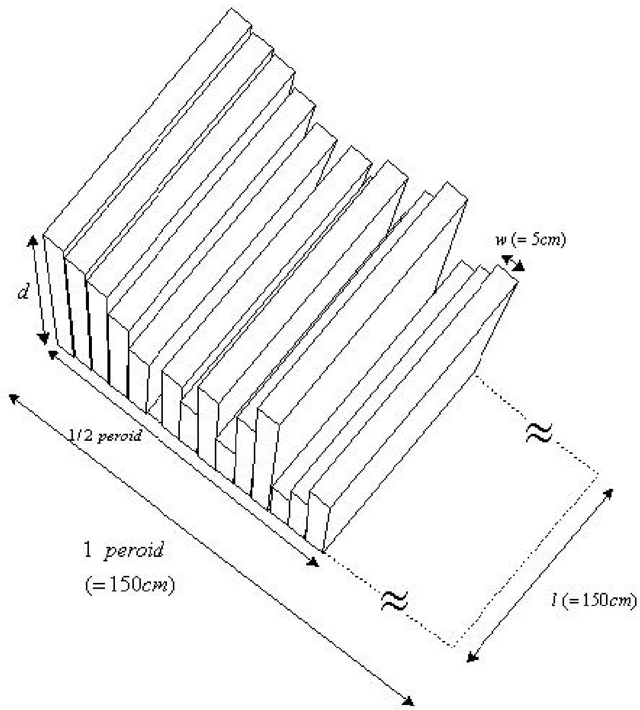


그림 2. 설계된 Shroeder 방식의 확산기 구조

Quadratic Residue 확산기에서 well의 폭(width)과 깊이(depth)는 각각 $\lambda_{max}(f_{max})$와 $\lambda_{min}(f_{min})$에 의해 결정되어진다. 확산기의 깊이(depth)에 따른 1 주기 길이에 대해서 설계된 확산기는 그림 2와 같다. 세로 길이 l 과 1 주기에 해당하는 확산기의 전체 폭이 크면 클수록 효율이 증가되지만, 본 논문에서는 제작된 전자파 잔향실의 크기를 고려해서 설계하였다[7].

나. 잔향실 내부 필드분포 해석

1) 전자파 잔향실의 모델링

전자파 잔향실에 그림 1**과** 2**에서 설계된 튜너와 확산기를 그림** 3**과 같은 위치에 표** 1**조건에 따라 위치 시켰으며**, **반파장 다이폴 송신 안테나를 이용하여 출력** 0.02 W**를 입력시켜 필드를 발생시켰다**. **잔향실 내부 필드 특성을 조사하기 위한 수신지점은 가상 시험공간으로 그림** 4**와 같이** z(115, 165, 215) **면을 선택하였다**. **전자파 잔향실 구조는 주파수** 1 GHz**에 대해서 해석하기 위하여**, Yee's cell ΔX , ΔY, ΔZ = 1 cm**로 하였으며**, **외부 경계조건은** PEC**로**, **내부공간은 자유공간으로 설정했다**.

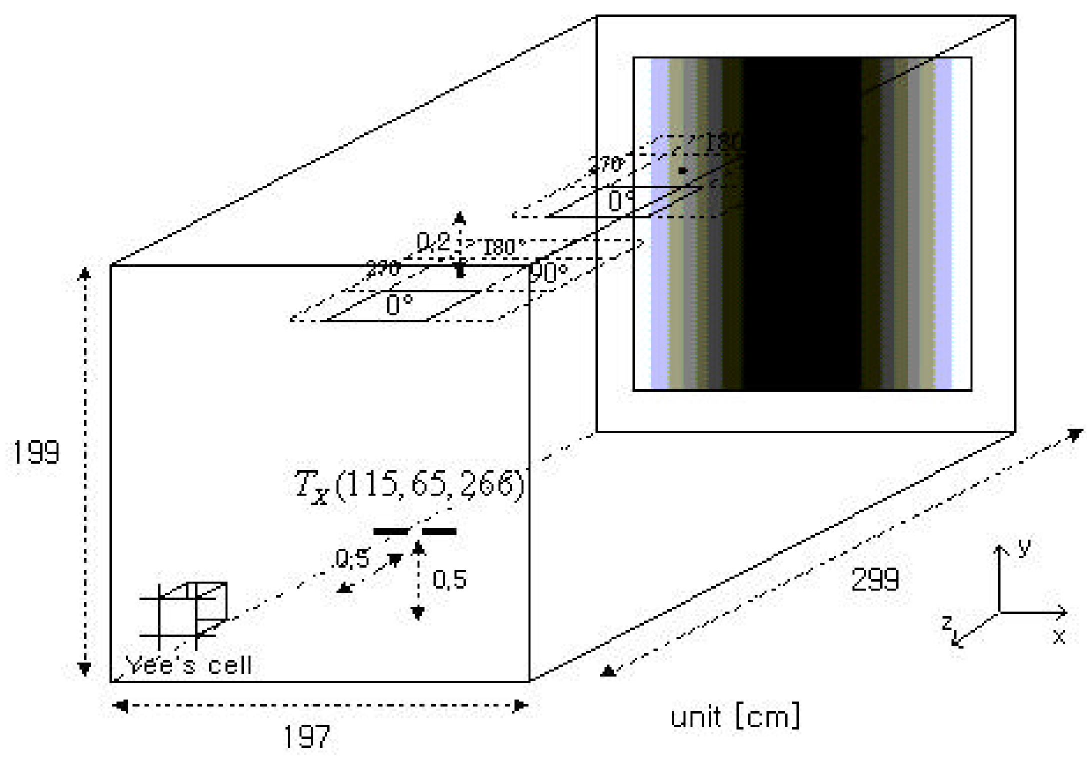


그림 3. **전자파 잔향실 구조 및 수치해석 모델링**

표 1. **튜너 및 확산기 설치 조건**

조건	**튜너** step **수**	**튜너 위치**	**확산기 위치**
튜너 1**개**	8	98, 179, 75	-
튜너 1**개**	16	"	-
튜너 2**개**	**각** 8	98, 179, 75 98, 179, 224	-
확산기 1**개**	-	-	99, 99, 1
튜너 2**개** + **확산기** 1**개**	**각** 8	-	"

또한 CFL(Courant-Friedrick-Lewy) **안정성 조건을 만족시키기 위하여 이산 시간을** 19.25 ps (= Δt), **전체 시간 간격 수를** 10,000 **회로 설정하였다**.

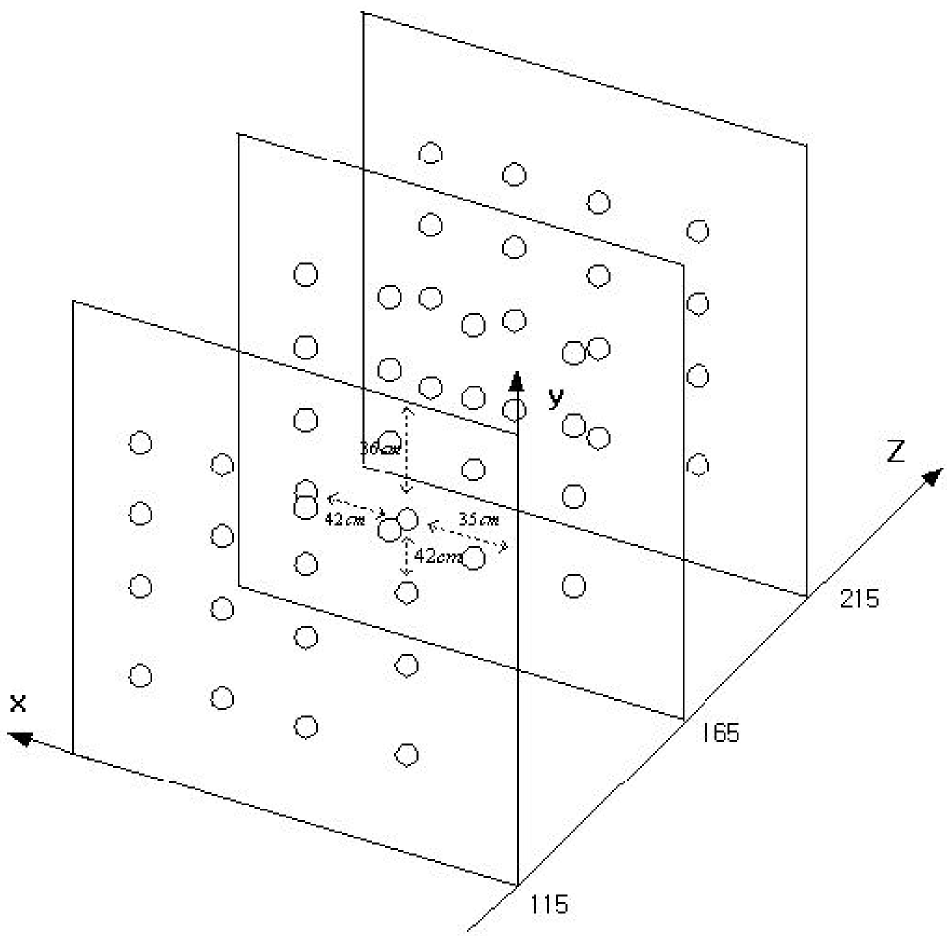


그림 4. **시험공간 내 설정된 시험 면**(test plane)

본 연구에서 잔향실 크기는 $197\Delta X \times 199\Delta Y \times 299\Delta Z$로 하였으며, 필드의 경계를 변화시키기 위한 조건으로 표 1과 같이 튜너를 1 개를 사용하여 1 회전하는 동안 8 step, 16 step 각각에 대한 해석과 stirrer를 2 개 사용하였을 경우, 확산기만을 사용한 경우, 그리고 2 개의 튜너에 확산기를 동시에 사용한 경우에 대하여 해석하였다.

DUT 공간의 필드 특성을 조사하기 위하여 그림 4의 각 시험 면에서 4 × 4 직사각형의 16개의 수신 지점, 총 3 개 면에서 48 개 데이터를 추출하여 필드의 균일도 특성을 조사하였으며,

필드의 등방성 특성을 분석하기 위하여 z=115 와 215 면 각각에 대한 x, y 위치 {(x, y) : (65, 65), (65, 165), (165, 65), (165, 165)}의 정 육면체 각 모서리 8 개 지점에서 Ex, Ey, Ez 성분, 총 24 개의 데이터를 추출하였다.

다. 해석결과

그림 4 시험 공간에서 추출된 48 개 전계 세기 값 의 75 %[8]인 36 개의 샘플에 대한 평균값, 표준편차, 및 tolerance 결과는 표 2와 같으며, 각 조건에 대한 샘플 들의 steady-state 조건의 시간 평균값들을 그래프로 비교하면 그림 5와 같다.

표 2. 시험 평면 전계 세기의 75 % 샘플 값

E (dBV/m)	튜너 1	튜너 1 (16스텝)	튜너 2	확산기	튜너 2 + 확산기
평균	5.29	5.53	5.14	4.63	5.93
표준편차	3.24	2.94	2.65	2.08	1.13
Tolerance [dB]	5.51	5.62	5.43	5.50	3.86

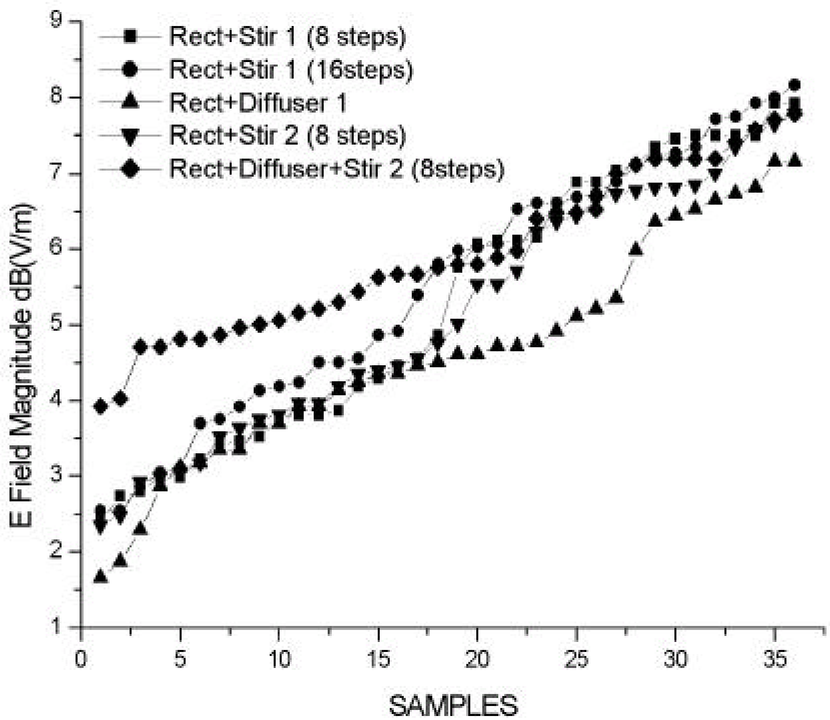


그림 5. E **시간 평균값에 대한** 75 % (of 48 samples) samples **분포**

그림 5**와 표** 2**에 따르면**, **튜너와 확산기를 동시에 사용하였을 경우** tolerance **가** 3.86 dB, **표준편차** 1.13**으로 필드의 균일성 측면에서 가장 우수하였으며**, **확산기만을 사용하였을 경우 필드의 균일성은** tolerance 5.50 dB**로** 6 dB**이내의 조건에 만족하나 전력 효율적 측면에서 평균값이** 4.63 dB(V/m)**로 튜너를 사용한 경우에 비해 다소 떨어지는 결과를 나타내었다**. **또한 튜너를 사용한 경우** step **수를 증가시킴에 따라 전력효율이 개선되는 결과를 보였다**.

표 3**과 그림** 6**에 따르면 수신 전계강도의** x, y, z **축 모든 성분에 대한 표준편차와** tolerance**가 확산기와** stirrer**를 동시에 사용하였을 경우 다소 양호한 결과를 보여주고 있다**.

표 3. E_x, E_y, E_z 성분에 대한 표준편차

Type \ E(dB)	Ex	EY	Ez	E(total)
확산기 2 (0.02 W)	1.28	1.83	1.74	4.93
확산기 2 (2 W)	3.22	4.41	4.24	4.93
확산기+stirrer2 (0.02 W)	1.84	1.20	1.76	3.39

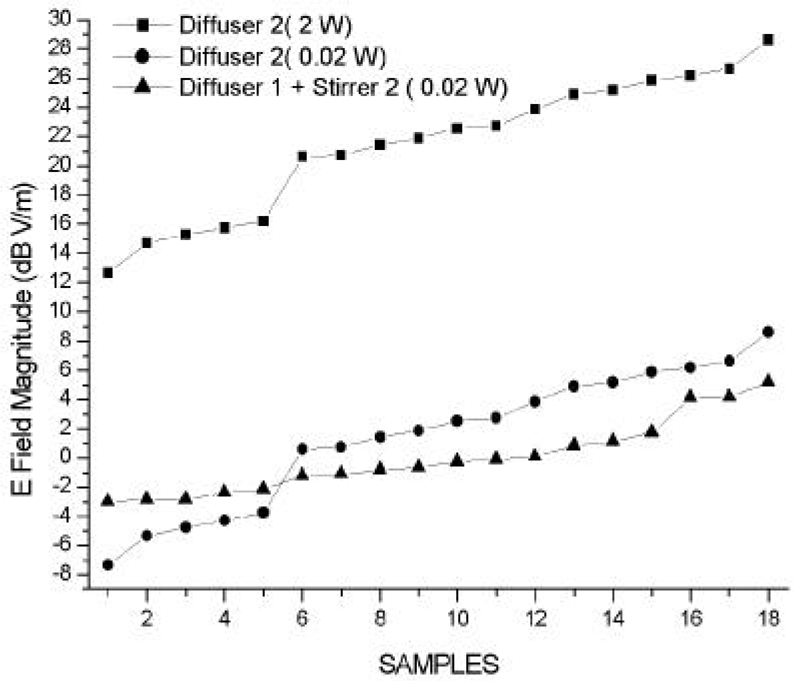


그림 6. E 성분(Ex, Ey, Ez)전체에 대한 75 % (of 24 samples) samples분포

2. 전자파 잔향실 외부구조 변화에 따른 필드 균일성 해석

잔향실의 구조적인 측면에서, 동일한 체적일 경우 보다 개선된 모드 분포와 필드 분포를 갖는 잔향실 구조를 도출하고자 일반적으로 많이 사용되는 직사각형 구조와 모드 수 측면에서 보다 나은 분포를 갖는 삼각형 구조를 사용하였으며, 잔향실 내부 필드의 균일성을 얻기 위하여 기존 Stirrer 방식 대신에 음향학 분야에서 사용되는 Schroeder Quadratic Residue Diffuser방식을 적용하였다
각각 잔향실 구조에 대해서 수식적 전개를 통하여 발생 가능한 총 모드 수를 추출하였으며, 잔향실 내부의 필드 균일성을 개선하기 위하여 사용될 diffuser를 설계하였다. 전자파 잔향실 내부의 필드 분포는 유한 차분법(Finite Difference Method)을 기초로 하는 FDTD방식을 적용하여 주파수 3 GHz 대역에서 결과를 추출하였다.
Schroeder diffusers 사용에 따른 필드 개선효과를 조사하기 위하여 적절히 선정한 시험공간(Test Volume) 내부에서 추출한 전계 세기로 잔향실의 구조적 변화에 따른 필드의 변화 상태를 비교 분석하였으며, 또한 잔향실 내부 임의의 지점에서 시간 변화상태에 따른 전계 세기의 정보를 추출한 후, 확률적 통계기법을 이용하여 편파특성을 조사하였다.

가. 전자파 잔향실 설계

전자파 잔향실은 일정 구조의 공간에서 균일한 필드를 확보하기 위하여 최소 요구되는 모드 수를 만족하여야 한다. 본 논문에서는 기존에 많이 이용되는 직사각형 구조와 모드 수에 있어 더욱 특성이 우수한 동일 체적의 삼각형 구조를 사용하였다.

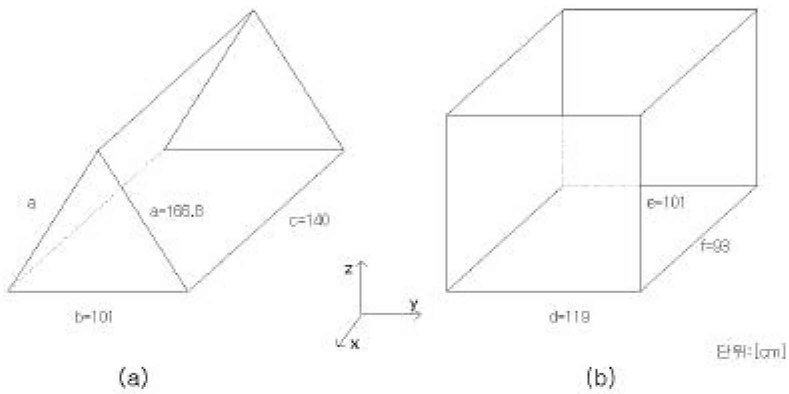


그림 7. **전자파 잔향실의 외부구조**

(a) **삼각형 구조**,

(b) **직사각형 구조**

Fig. 7. Outer structures of reverberation chamber.

(a) Triangular structure,

(b) Rectangular structure.

1) 잔향실 내부에 발생되는 모드 해석

잔향실로 사용될 두 구조에 대한 모드 분포를 조사하기 위해서, **우선 도파관 구조에 대한 공진 주파수**(Resonant frequency)**를 구한다**.

잔향실 내부의 매질을 공기로 가정할 경우, **삼각형 구조의 잔향실에 대한 공진 주파수는 다음과 같으며**,

$$f_{mnp} = 150\sqrt{\left(\frac{1}{a^2}\right)(m^2 + n^2) + \left(\frac{p}{c}\right)^2}\,MHz \qquad (1)$$

직사각형 구조에 대한 공진 주파수는 다음과 같다.

$$f_{mnp} = 150\sqrt{\left(\frac{m}{d}\right)^2 + \left(\frac{n}{e}\right)^2 + \left(\frac{p}{f}\right)^2}\,MHz \qquad (2)$$

공진 주파수를 이용하여 각각의 잔향실 내부에 존재하는 전체 모드 수를 구하면, **삼각형 구조에 대한 전체모드 수는 다음과 같으며**,

$$N(f) = \frac{\pi}{3} a^2 c(\frac{f}{150})^3 \times \frac{1}{2} = \frac{\pi}{6} a^2 c(\frac{f}{150})^3 \qquad (3)$$

직사각형 구조에 대한 전체모드 수는 다음과 같은 근사식으로 구해진다.

$$N(f) = \frac{4\pi}{3} \mathrm{def}(\frac{f}{150})^3 \times \frac{1}{8} \times 2 = \frac{\pi}{3} \mathrm{def}(\frac{f}{150})^3 \qquad (4)$$

그림 7 구조의 잔향실에 대하여 사용 가능한 하한 주파수를 결정하고자 주파수에 따른 잔향실 내부의 모드분포를 계산한 결과는 그림 8와 같다. 1986년도에 발표된 미국 NBS(National Bureau of Standards) Technical Note 1092에 의하면 잔향실 내부에서 사용될 주파수에 대하여 균일 필드 분포를 얻기 위해 최소 60개 이상의 모드 수를 요구하고 있다.

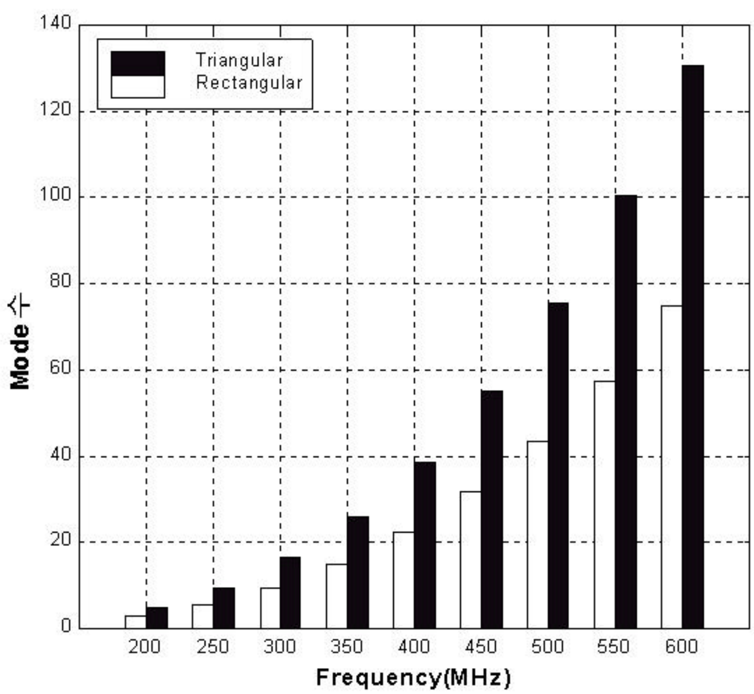


그림 8. 주파수에 따른 전자파 잔향실 내부의 모드분포

Fig. 8. Mode distribution of reverberation chamber varying as frequencies.

그림 8 결과에 의하면 본 연구에 사용한 삼각형 구조에 대해서는 500 MHz, 그리고 직사각형 구조에 대해서는 600 MHz이상의 주파수에서 전자파 잔향

실로 이용될 수 있음을 알 수 있다

2) Quadratic Residue Diffuser의 설계

1975년 독일 Schroeder에 의해 음향학 분야에서 처음 소개되었던 Quadratic Residue diffuser는 녹음실, 오페라 하우스, 공연장 등에서 음향효과의 극대화를 위해 이용되어 왔으며, 1999년 독일 Markus Petrisch and Adolf Josef Schwab에 의하면 직사각형 구조의 전자파 잔향실에서 Schroeder diffuser를 이용하여 모드를 주파수축에 대하여 균일하게 분포하도록 함으로써 전자기장의 균일도를 확보할 수 있다는 실험적 연구결과가 있었다.
본 연구에서는 전자파 잔향실에서 요구되는 필드의 균일성을 확보하기 위하여, 잔향실의 구조로 많이 활용되는 직사각형 구조의 잔향실과 모드 분포에서 더욱 좋은 결과를 나타내는 삼각형 구조의 잔향실에 Schroeder diffuser 방식을 적용하고자 그림 7의 구조에 응용될 Quadratic Residue diffuser를 설계하였다.

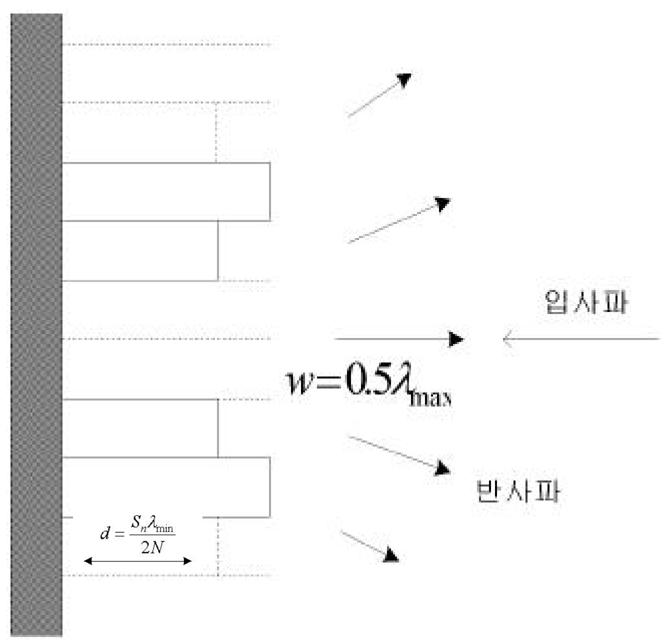


그림 9. Diffuser의 원리

Fig. 9. Principle of diffuser.

diffuser의 구조는 사용될 주파수의 범위에 따라 크기가 정해지며 여기에서는 주파수 범위 2 3 GHz에서 적용될 diffuser를 설계하였다.
Quadratic Residue diffuser에서 각 well의 폭(width)은 다음과 같이 결정된다.

$$w = 0.5\lambda_{max} \quad (5)$$
$$= 0.5 \times 10\,cm = 5\,cm$$

여기에서, λ_{max} $(= 10\,cm)$는 상한주파수 f_{max} (=3 GHz)에 의해서 결정된다.
Quadratic Residue diffuser의 1 주기를 나타내는 N(well의 수)은 다음 식에서 구해질 수 있다.

$$N = \frac{2mf_{max}}{f_{min}} \quad ,m = 1,2,3,\cdot\cdot\cdot \quad (6)$$

여기에서 m이 크면 클수록 성능이 우수한 diffuser를 얻을 수 있으나, 반면에 공간을 많이 차지하는 단점이 있어, 본 연구에서는 m=4인 경우에 대해서 설계하였다.

$$N = \frac{8f_{max}}{f_{min}} = 12 \quad ,\text{for} \quad m = 4 \quad (7)$$

여기에서 전체 폭(Total width)이 결정된다. 즉,

$$Total\ width = N \times W \quad (8)$$
$$= 60\,[cm]$$

Well의 깊이(Depth)는 하한주파수 f_{min} (=2 GHz)에 따라 결정된다.

$$d_n = \frac{S_n \lambda_{min}}{2N} \quad (9)$$

여기에서 $S_n = |n^2 - j\overline{N}|$은 n 번째 Sequence를 나타낸다. n 은 각각의 well을 나타내고, j 은 $0 \le n^2 - j\overline{N}$ 이 만족하는 최대 값을 선택하므로서 결정된다.

표 4. Diffuser의 깊이에 따른 1 주기에 대한 결과 값

Table 4. 1 period Result as diffuser depth.

n	S_n	$d_n(cm)$
0	0	0
1	1	0.625
2	4	2.5
3	9	5.625
4	4	2.5
5	1	0.625
6	0	0
7	1	0.625
8	4	2.5
9	9	5.625
10	4	2.5
11	1	0.625
12	0	0

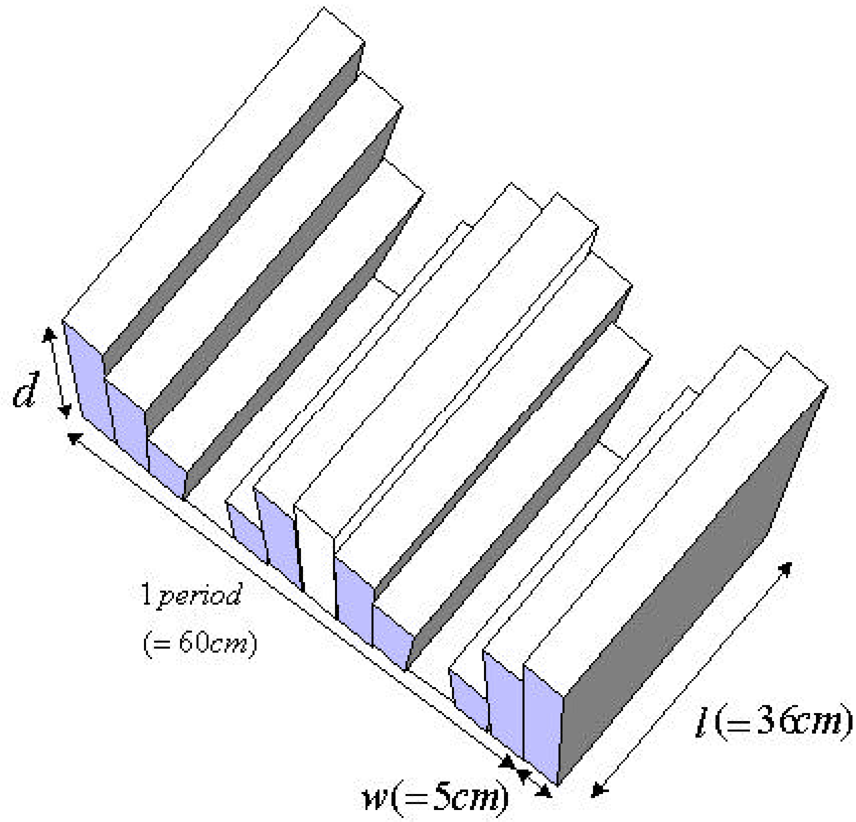


그림 10. 설계된 Quadratic Residue diffuser

Fig. 10. Designed Quadratic Residue diffuser.

diffuser 깊이(Depth)에 따른 1 주기에 해당되는 결과 값은 표 4과 같으며, 최종적으로 설계된 diffuser의 구조는 그림 10와 같다. 길이 l 과 1 주기에 해당하는 전체 폭이 크면 클수록 diffuser의 효율이 증가되지만, 본 논문에서는 그림 7의 전자파 잔향실 내부 공간을 고려해서 설계하였다.

나 잔향실 내부 필드분포 해석

1) 전자파 잔향실의 모델링

일정한 체적의 전자파 잔향실에 설계된 Quadratic Residue diffusers를 사용했을 때 각 구조는 그림 11과 같으며 잔향실 내부 필드분포를 조사하기 위

해 FDTD방식을 적용하여 시뮬레이션 하였다. 이 해석 방식은 Yee알고리즘이 적용되는데, 시간과 공간에 대한 전자계 필드를 해석하기 위하여 유한 차등 방정식을 이용하여 해석된다.

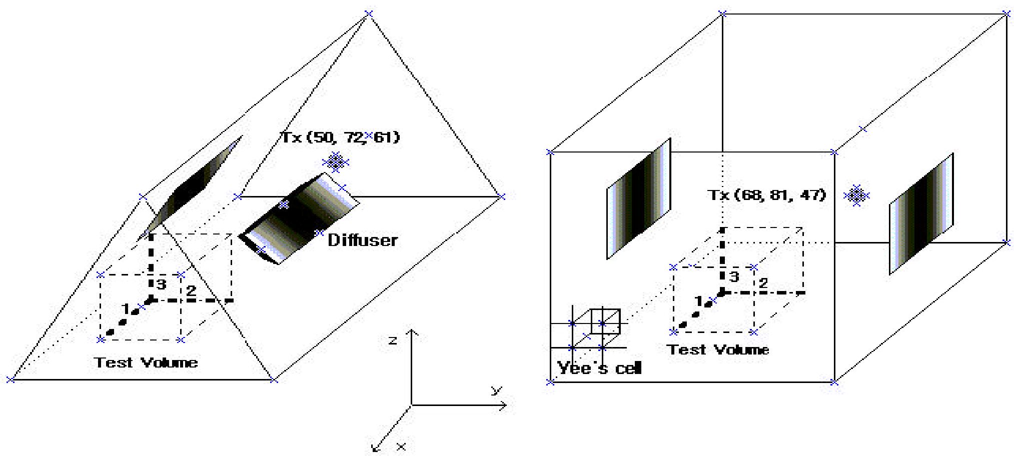


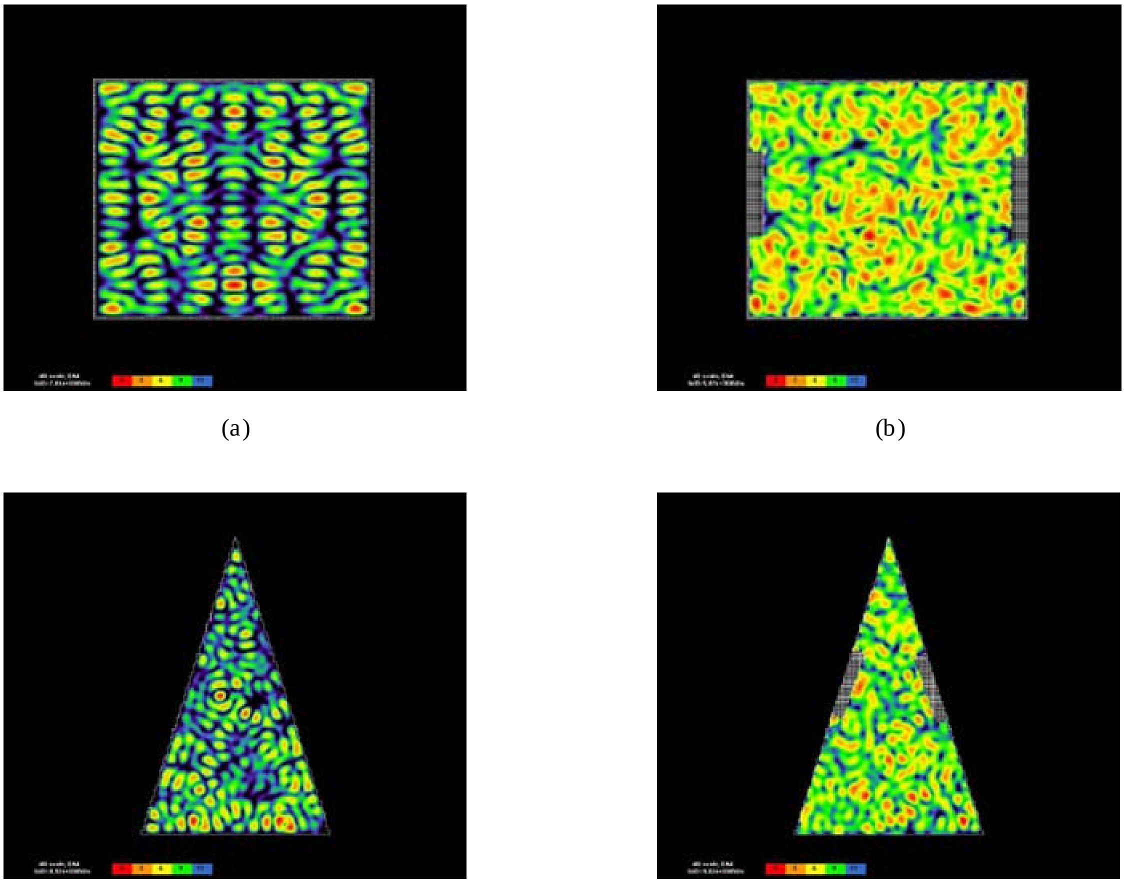
그림 11. 설계된 diffusers를 적용한 전자파 잔향실의 수치해석을 위한 모델링

Fig. 11. Modeling of reverberation chambers with diffusers for simulation.

전자파 잔향실에 대한 구조는 다음과 같이 모델링 되었다. 주파수 3 GHz에 대해서 필드 분포를 얻기 위하여, 주파수를 고려하여 기본 셀 ΔX, ΔY, ΔZ = $1cm$ 로 설정하였다. 그리고 Courant 안정성 조건을 만족시키기 위하여 이산 시간을 19.25 ps (= Δt), 전체 시간을 20,000으로 설정하였다.

전자파 잔향실을 해석하기 위해 경계조건을 고려한 전체 셀의 크기는 다음과 같다. 삼각형 구조에 대해서는 $183\Delta X \times 144\Delta Y \times 202\Delta Z$, 직사각형 구조에 대해서는 $136\Delta X \times 162\Delta Y \times 144\Delta Z$ 로 설정하였다. 경계조건은 Liao 흡수경계조건이 사용되어졌는데, 일반적으로 Liao 형태의 경계조건은 Radiating geometry와 바깥쪽(Outer) 경계사이에 충분한 공간이 있어야 된다. 따라서, Liao 경계조건을 고려해서 전자파 잔향실과 바깥쪽 경계사이에는 20셀 공간을 주었고, 매질은 자유공간(Free Space)으로 설정했다. 전계에 대한 차폐효과는 1 차 면에 대해서만 고려해 주면 되므로 전자파 잔향실 모델링은 1 개의 셀을 가지고 PEC(Perfect Electric Conductor)로 외부 도체 면

을 구성하였고, 전자파 잔향실에 장착된 diffuser에 대해서도 PEC로 구성, 그리고 내부공간은 자유공간으로 설정했다. diffusers는 잔향실 내부에 폭(w=60셀), 길이(l=36셀) 의 크기로 각각 2 개씩 장착 시켰으며, 잔향실 내 diffusers의 중심 셀 위치는 다음과 같다.



(a) (b) (c) (d)

그림 12. y-z 평면에 대한 시뮬레이션 결과
(a) 직사각형 구조, (b) 직사각형 구조+diffusers, (c) 삼각형 구조,
(d) 삼각형 구조+diffusers

Fig. 12. Results of simulation at y-z plane.
(a) Rectangular structure without diffusers, (b) Rectangular structure with diffusers, (c) Triangular structure without diffusers, (d) Triangular structure with diffusers.

삼각형 구조에서는 (94, 47, 101), (94, 97, 101), 직사각형 구조에서는 (68, 23, 72), (71, 141,72)로 설정하였다. 필드 발생을 위한 소스는 Sinusoidal 포인트 소스를 사용하였는데, 삼각형 구조에서는 (50, 72, 61), 직사각형 구조에서는 (68, 81, 47)에 위치시켰다.

전자파 잔향실 내부의 필드 균일도를 평가하기 위해 설정한 시험공간은 그림 5와 같이 전체공간을 고려하여 벽면으로부터 최소 1 파장 이상 떨어진 지점에서, 균일 지역으로 정의된 volume의 형태로 설정하였으며, 삼각형 구조에서 라인 1은 (122, 57, 32) (152, 57, 32), 라인 2는 (122, 57, 32) (122, 87, 32), 라인 3은 (122, 57, 32) (122, 57, 62)이다. 사각형 구조에서 라인 1은 (75, 67, 32) (105, 67, 32), 라인 2는 (75, 67,
32) (75, 97, 32), 라인 3은 (75, 67, 32) (75, 67, 62)이다. '균일 지역'의 정의는 유럽 표준 EN 61000-4-3에 설명되어진 무반사실에 대한 정의를 고려하여 결정했다. 무반사실의 경우는 전자파 잔향실과 달리 필드의 변화가 받아들일 수 있을 정도의 작은 가상 수직평면으로 균일 지역이 정의되는데, 정의된 영역에서 필드의 크기가 표면의 75%이상에서 측정값의 ±3 dB tolerance내에 있으면 필드가 균일하다고 정의한다. 그러나 전자파 잔향실의 경우 필드분포 특성상 '균일 체적'으로 고려될 수 있으므로, 본 논문에서는 적절하게 선택된 시험공간상의 라인에 대해서 이를 적용하여 분석 하였다. 또한 전자계 분포는 정상 상태(steady state)에 있는 전자계 세기들에 대한 모든 시간단계의 시 평균(time-averaged) 값으로 계산했다.

2) 해석결과

각각의 구조에 대하여 diffusers를 사용하였을 경우와 사용하지 않았을 경우, 삼각형 구조(122, y, z)와 직사각형 구조(75, y, z)에 대한 y-z평면에 대한 전계 세기 분포결과는 그림 12와 같았다. 시뮬레이션 결과 두 구조의 모든 경우, 설계된 diffuser를 사용하였을 때, 훨신 개선된 필드의 균일성을 확보할 수 있다는 결과를 나타내고 있다. 또한 두 구조의 해석 결과 동일한 소스에 대해서 삼각형 구조가 직사각형 구조에 비해 더 높은 전계 세기 분포를 보이고 있으나, 필드의 균일도 측면에서는 직사각형 구조가 보다 우수하다는 것을 알 수 있다. 그림 11의 라인 1, 2, 3에 대한 전계 세기의 75% 샘플 값으로 계산된 평균값, 표준편차, 최대 값, 최소 값, tolerance 결과는 표 5와 같다.

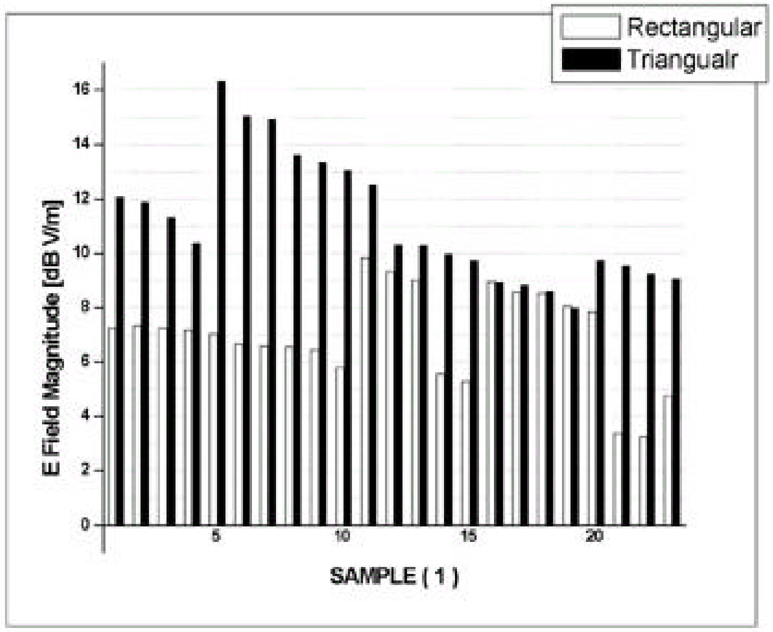
표 5. Line 1, 2, 3 전계 세기의 75% 샘플 값

Table 5. 75% Sampled electric field intensity for line 1, 2, 3.

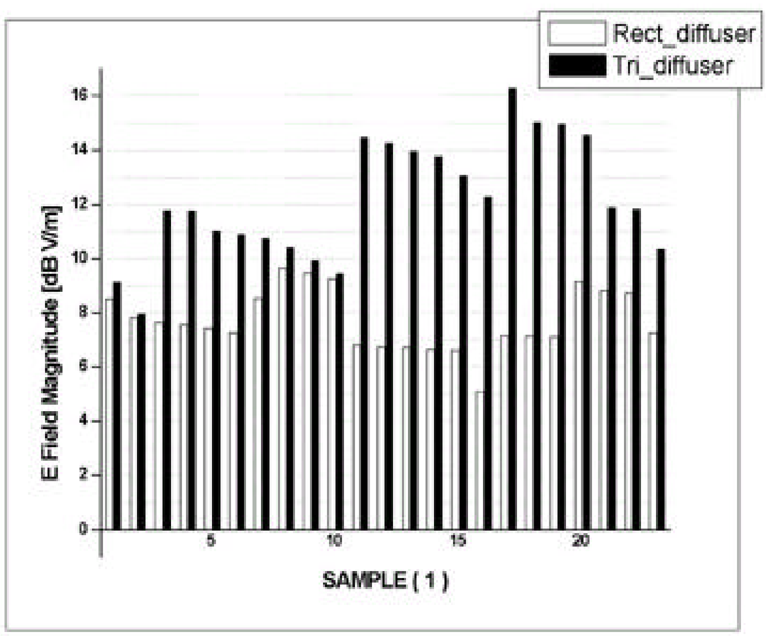
E (dBV/m)	Rect.	Rect. diffusers	Tri.	Tri. diffusers
평균	5.82	7.36	9.89	12.19
표준편차	3.40	1.32	2.64	1.77
최대 값	13.2	9.96	16.2	16.3
최소 값	0.3	4.43	4.8	7.96
tolerance[dB]	12.9	5.53	11.4	7.36

표 5의 결과에 따르면 diffuser를 사용함으로써 잔향실 내부에 형성되는 전계 세기는 평균적으로 2 3 dB 증가 할 뿐 아니라, 필드 균일도 측면에서도 개선된 것을 확인 할 수 있다.

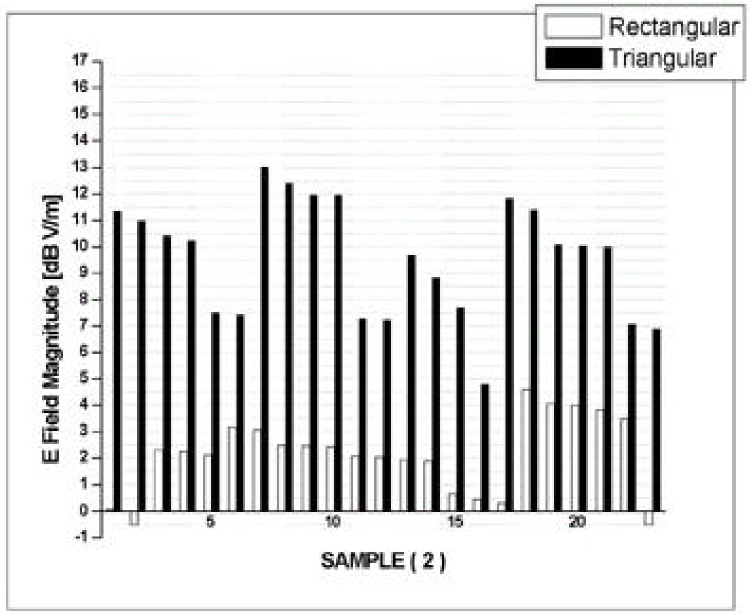
시험 공간(Test Volume)의 라인 1, 2, 3에 대해 추출한 75%셀에 대한 전계 세기를 막대 그래프로 비교한 결과는 그림 13과 같다.


Rectangular
Triangualr
E Field Magnitude [dB V/m]
SAMPLE (1)

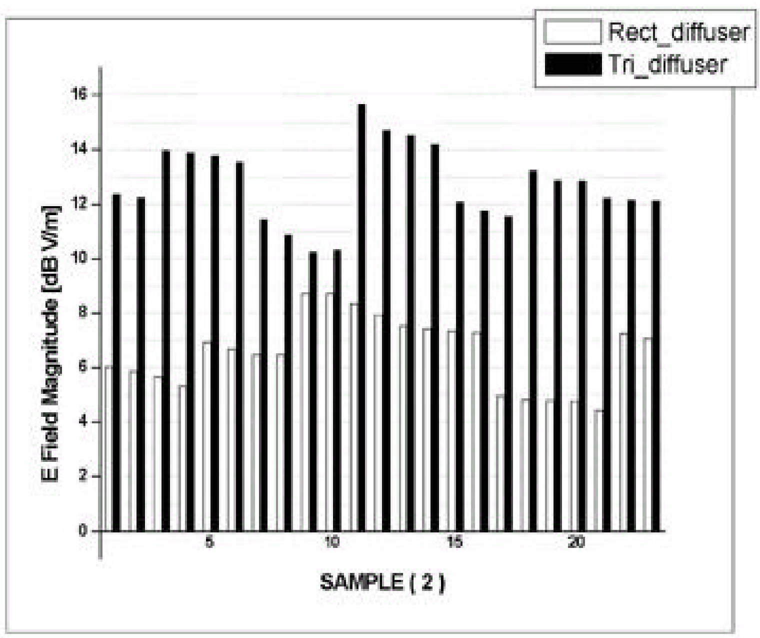
(a)


Rect_diffuser
Tri_diffuser
E Field Magnitude [dB V/m]
SAMPLE (1)

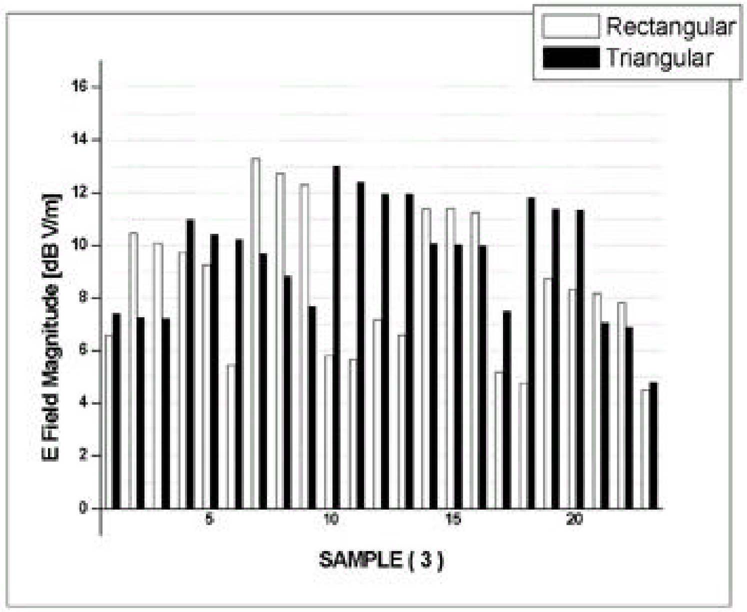
(b)


Rectangular
Triangular
E Field Magnitude [dB V/m]
SAMPLE (2)

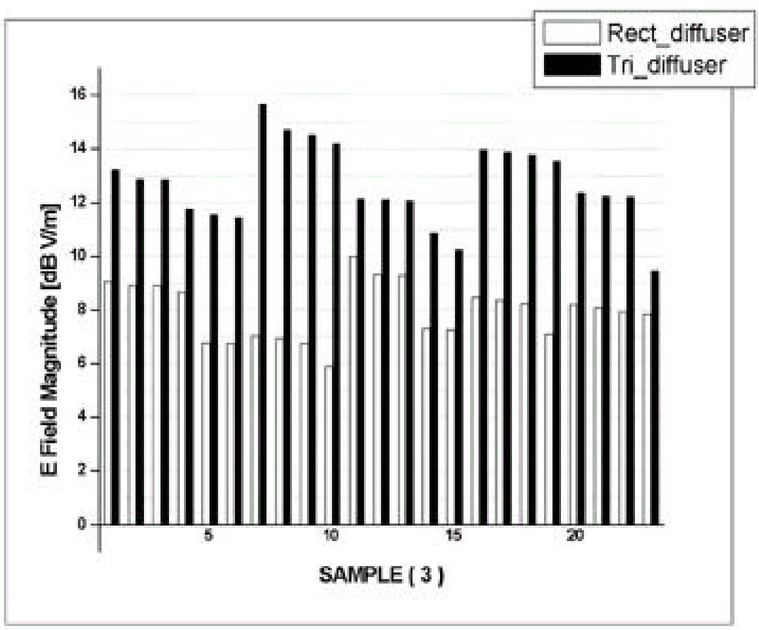
(c)


Rect_diffuser
Tri_diffuser
E Field Magnitude [dB V/m]
SAMPLE (2)

(d)



(e)



(f)

그림 13. **시험공간의** Line 1, 2, 3 **각각에 대한** 75 % **전계 세기 분포**

(a)diffusers**가 없을 때** (line 1 **샘플**),

(b)diffusers**가 있을 때** (line 1 **샘플**),

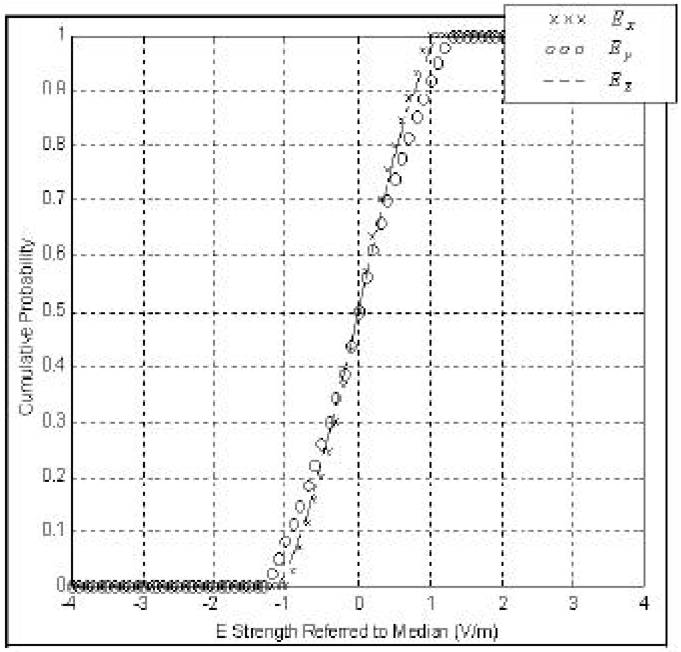
(c)diffusers**가 없을 때** (line 2 **샘플**),

(d)diffusers**가 있을 때** (line 2 **샘플**),

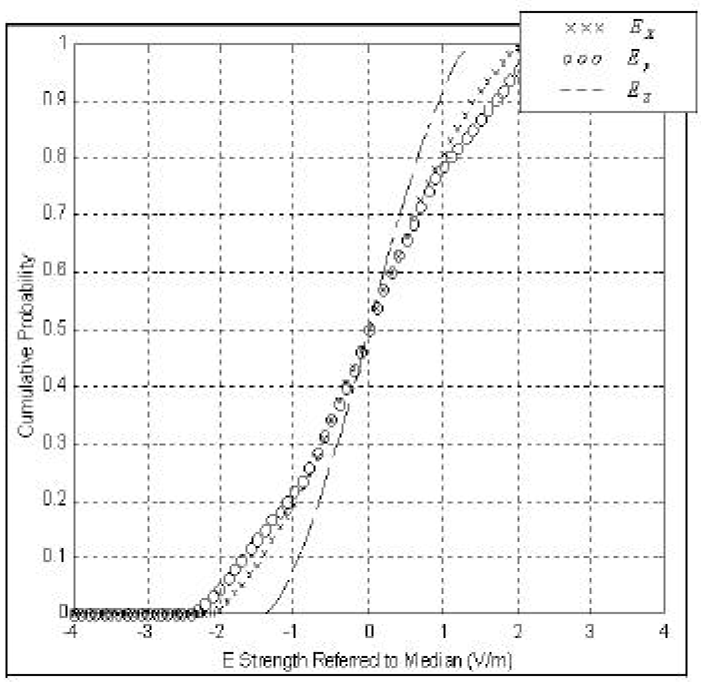
(e)diffusers가 없을 때 (line 3 샘플),
(f)diffusers가 있을 때 (line 4 샘플)

Fig. 13. 75 % electric field intensity distribution for each line 1, 2, 3 within test volume.
(a) Without diffusers (line 1 samples),
(b) With diffusers (line 1 samples),
(c) Without diffusers (line 2 samples),
(d) With diffusers (line 2 samples),
(e) Without diffusers (line 3 samples),
(f) With diffusers (line 3 samples).

그림 13 결과에 따르면 diffusers를 부착하였을 때, 삼각형 구조에서 최소 7.96, 최대 16.3 dB의 세기를 나타내며 최대 7.36 dB 의 tolerance를 가지며 분포하고, 직사각형 구조에서는 최소 4.43, 최대 9.96 dB의 세기를 나타내며 최대 6 dB 범위 내에 분포됨을 알 수 있다.
잔향실 내부에 diffusers를 부착했을 경우 임의의 셀에 대한 전계 세기의 시간변화 상태를 조사하고자, 시험 공간(Test Volume) 중앙에 위치한 셀의 E_x, E_y, E_z에 대한 각각의 20,000개 값들을 추출하였고, 그 중 75 % 샘플[19]에 대해서 누적분포 함수를 구하였다. 전체적인 분포는 그림 14와 같이 카이제곱(Chi-Squared)분포를 따르고 있다.



(a)



(b)

그림 14. E_x, E_y, E_z**성분에 대한 누적 분포함수**

(a) **직사각형**-diffusers**에서의 전계 성분**,

(b) **삼각형**-diffusers**에서의 전계 성분**

Fig. 14. Cumulative Distribution Function for E_x, E_y, E_z components.

(a) Rectangular configuration with diffusers,

(b) Triangular configuration with diffusers.

표 6. E_x, E_y, E_z**성분에 대한 표준편차**
Table 6. Standard deviation for E_x, E_y, E_z components.

E (V/m)	E_x	E_y	E_z
Rect. diffusers	0.51	0.67	0.55
Tri. diffusers	1.03	1.18	0.68

그림 14**와 표** 6**에 따르면 직사각형 구조에서 전계 성분** E_x, E_y, E_z **값들이 확률적으로 잘 일치하고 있음을 보여 주고 있는데**, **이로부터** x, y, z **방향에 대해서 특정한 편파가 존재하지 않음을 알 수 있다**.

제 3장 결　론

전자파 잔향실의 균일 필드 형성을 위하여 mode-stirred 튜너 방식과 확산기 방식 모두 적용될 수 있음을 알 수 있었으며, 전력의 효율 측면에서 튜너방식이 보다 나은 것으로 확인되었다. 또한 튜너의 step 수를 증가시켜 줌에 따라 전력 효율이 많이 개선된다고 볼 수 있었다.
확산기와 튜너를 동시에 적용한 경우 필드 균일성뿐만 아니라 전력효율 측면에 있어서 가장 우수한 결과를 보였으며, 필드의 등방성 특성 측면에서도 확산기와 튜너를 동시에 사용하였을 경우가 가장 좋은 결과를 나타내었으나 3.39 dB의 표준편차로 국제규격에서 요구되는 3 dB 허용범위를 만족시키지 않아 이 부분에 대한 추가적 연구의 수행이 필요하다고 판단된다.

또한 전자파 잔향실의 외부구조의 변화에 따른 해석연구에서 전자파 잔향실 두 구조에 대해 발생 가능한 모드 수를 계산해 본 결과 직사각형 보다 삼각형 구조가 많은 모드 분포를 가지고 있음을 알 수 있었다. 따라서 잔향실 내부의 필드 균일성 확보에 있어서 삼각형 구조가 보다 효율적으로 이용될 수 있다는 가능성을 확인하였다. 그러나 이들 두 구조에 대해 주파수 대역 2 3 GHz 대해 설계된 diffusers를 부착하여 시뮬레이션 한 결과 동일 소스에 대해서 전력의 효율 면에서는 삼각형 구조가 직사각형의 구조보다 우수하였으나, 필드의 균일도 면에서는 직사각형 구조에 비해 성능이 다소 떨어지는 결과를 보였으며, 직사각형 구조의 경우 최대 tolerance ±3 dB 이내의 필드 균일도를 나타내어 전자파 대용시험시설로서 충분히 사용될 수 있는 결과를 보였다. 삼각형 구조의 경우 균일도가 다소 떨어지나 모드 수 분석의 결과에 비추어 diffusers 크기에 비해 잔향실 공간의 협소함, 즉 실제 잔향실 공간의 축소로 인해 균일 필드의 확보에 문제점의 발생과 이로 인한 diffusers의 효율이 저하된 것으로 여겨지며, 따라서 보다 큰 체적의 삼각형 구조에 diffusers를 부착하였을 경우 요구되는 필드 균일성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.
전자파 잔향실 내 임의의 한 셀에 대해서 시간에 따른 E_x, E_y, E_z전계 세기들에 대한 누적분포를 분석한 결과 직사각형 잔향실의 경우 편파에 대해서

독립적이라는 것을 알 수 있었다. 필드 균일도 측면에서 비추어 볼 때, 삼각형 구조에 비해 직사각형 구조 잔향실의 경우 diffusers로 인해 모드들을 보다 안정적으로 확산시킴으로서 균일한 필드 분포를 얻을 수 있었으며, 이러한 결과로부터 안정적인 확산은 균일 필드뿐만 아니라 특정 편파에 무관한 필드특성을 확보할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] H. A. Mendes, 1968 A new approach to electromagnetic field-strength measure- ments in shielded enclosures wescon Tech. Paper, CA, USA, pp20-23, August, 1968.

[2] D. A. Hill, Electromagnetic Theory of Reverberation Chambers, National Institute of Standards and Technology (US) Technical Note 1508, January 1999.

[3] **이광순**, **이중근**, **정삼영**, "**전자파 확산방식을 이용한 잔향실 내부의 필드 분포 해석**", **한국전자파학회 논문집** xx. xx. 2000 (**발간 예정**).

[4] M. R. Schroeder, "Diffuse Sound Reflection by Maximum Length Sequences", J. Acoustic Soc. Am., vol. 57, pp. 149-150, Jan., 1975.

[5] Petirsch Markus and Adolf Josef Sch- wab, "Investigation of the Field Uniformity of a Mode-Stirred Chamber Using Diffusers Based on Acoustic Theory", IEEE Trans. on EMC., vol. 41, No. 4, November, 1999.

[6] DRAFT 61000-4-21, EMC., Part 4 : Testing and measurement techniques., Section 21 : Reverberation Chamber Test Methods., IEC. 2000.

[7] Mehta Madan and James Johnson, "Architectural Acoustics Principles and Design", Prentice Hall, 1999.

[8] EN 61000-4-3, Electromagnetic Compatibility, Part 4. Testing and measurement techniques, Section 3. Radiated, radio frequency, electromagnetic field immunity, 1997.