

2D 확산기를 이용한 전자파 잔향실 내의 필드 분포 특성

Field Distribution Characteristics of a Reverberation Chamber with 2D Diffuser Sets

양 욱 · 이 중근*

Wook Yang · Joong-Geun Rhee*

요 약

Schroeder 방식의 1Dimension QRD(Quadratic Residue Diffuser)를 사용하여 잔향실 내부에서의 필드 균일성이 향상됨을 밝힌 연구는 이미 수 차례 발표된 바 있다. 본 연구에서는 2.3 GHz~3 GHz 대역에서, 전자파 잔향실의 전자기장 특성 및 필드의 균일도 향상을 위해 잔향실 내에 Schroeder 방식의 CRD(Cubical Residue Diffuser)가 설계 및 적용되었고 필드 분포 해석을 위해 FDTD(Finite-Difference Time-Domain) 방법의 수치해석이 이루어졌다. 잔향실 내부의 확산기는 cubical residue algorithm과 2D 배열을 사용함으로써 더욱더 random한 형태를 이루었으며 결과적으로 CRD를 사용함으로써 잔향실 내에서의 편파 특성, 표준 편차 및 tolerance 등의 성능이 좋아지는 것을 확인하였다. 또한 2D CRD의 경우, 전력 효율도 높아짐을 알 수 있었다.

Abstract

Papers on improvement of electromagnetic field uniformity in a reverberation chamber with 1D Quadratic Residue Diffuser of Schroeder method has been published several times. In this paper, to obtain improved electromagnetic field characteristics and field uniformity in a reverberation chamber, cubical residue diffuser sets of Schroeder type are designed for a chamber in 2.3 ~ 3 GHz. The FDTD(Finite-Difference Time-Domain) technique is used to analyze the field characteristics in a chamber. Cubical residue algorithm and 2D arrangement show more randomness than the previous study results. The characteristics of tolerance, polarity, deviations, as well as power efficiency, are improved with cubical residue diffuser sets in a chamber.

Key words : EMI, EMC, Reverberation Chamber, Diffuser, FDTD

I. 서 론

전자파 잔향실은 전자파 균일성을 확보할 수 있는 모드 수에 의해 하한 주파수가 결정되며, 주파수의 증가에 따라 모드 수가 증가하기 때문에 하한 주파수 이상의 대역에서 활용하는 방법에 대하여, 특히 GHz 대역에서 사용하기에 적합한 전자파 장해 및 복사 내성 대응 시험 시설¹⁾로 현재 많은 연구들이 진행 중에 있다.

잔향실 내부에 발생 가능한 총 모드 수, 스티러(stirrer) 또는 확산기의 효율, 그리고 잔향실 제작을 위해 사용된 매질(도체)의 Q 인자 등에 의해서 잔향실 내의 필드의 균일도가 결정된다²⁾. Schroeder 방식의 1D QRD를 사용하여 잔향실 내부에서의 필드 균일도가 향상되는 것은 증명되었다^{3),4)}.

본 논문에서는 잔향실 내부에서의 편파 특성, 표준편차, 유럽표준 EN 61000-4-3에서 규정하는 최대 최소값 차이인 tolerance⁹⁾(최대 6 dB) 등을 향상시키

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 : 20041210-161

· 수정완료일자 : 2005년 4월 11일

기 위해 cubical residue algorithm과 2D 배열을 사용한 Schroeder 방식의 2D 확산기가 설계되었으며, 설계된 2D 확산기와 2가지 형태의 1D 확산기에 대한 전자파 잔향실 내부에서의 필드 분포 분석을 위해 유한 차분법(finite difference method)을 기초로 하는 FDTD 방식이 적용되었다. 시험 주파수는 전자파 잔향실의 필드 균일도를 만족시키기 위한 하한 주파수(LUF: Lowest Useable Frequency)보다 높은 2.3 GHz로 시험되었다. 3 가지 형태의 확산기에 대해서 필드 분포 및 전자기적 특성^{[3]~[8]}을 조사하기 위하여 적절히 선정된 시험 평면(test plane)에서 추출한 전계 세기로 필드 변화 상태를 비교 분석하였고, 확률적 통계기법을 이용하여, 편파 특성을 조사하였다.

II. 전자파 잔향실 설계

연구를 위해 설계된 잔향실은 그림 1과 같은 크기를 갖는다.

2-1 Schroeder 방법의 확산기 설계

음향학의 Schroeder QRD는 전자파 잔향실에도 응용되어 전자기장의 균일도를 확보하기 위해 활용되어지고 있다^[10]. 식 (1)은 residue를 구하기 위한 quadratic residue 방법이다. 여기서 n 은 0부터 $(N-1)$ 까지의 정수이고 γ 는 $0 \leq n^2 - \gamma N$ 을 만족하는 최대 정수이며 N 은 소수이다. 이러한 sequence는 N 을 주기로 N 개의 난수가 반복된다^[15]. 이는 확산기가 항상 대칭 형태로 구성될 뿐 아니라 파장을 N 단계로 양자화 시킬 때 식 (1)에 의한 표 1에서와 같이 residue인 S_n 값이 3, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 14

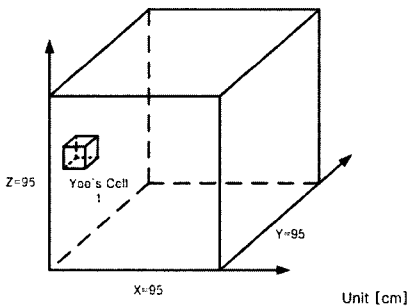


그림 1. 전자파 잔향실 구조
Fig. 1. Structure of the reverberation chamber.

와 같은 단계는 표현하지 않는다. 따라서 더욱 더 random한 형태를 구성하기 위해 본 논문에서는 cubical residue 방법인 식 (2)를 제안해 Pseudo random한 확산기를 설계하였다. 식 (2)의 결과는 비대칭 형태의 residue값을 만들어 식 (1)에 비하여 Pseudo random 형태를 이루게 된다. Residue 값에 따른 깊이의 비교는 표 1과 같다.

$$S_n = |n^2 - \gamma N| \quad (1)$$

$$S_c = |n^3 - \gamma N| \quad (2)$$

확산기의 구조는 사용될 주파수의 범위에 따라 크기가 정해지며, 본 연구에서는 수치해석되어질 시험 주파수를 고려하여, 주파수 범위 2.3~3 GHz의 확산기가 설계되었다. Schroeder 방식의 1D 확산기에서 well의 폭(width)은 $\lambda_{\max}(f_{\max})$ 에 의해, 깊이 d_n 는 $\lambda_{\min}(f_{\min})$ 에 의해 결정된다^{[4],[11]}. 확산기의 깊이에 대한 1 주기에 대해서 설계된 각각의 1D 확산기의 형태는 그림 2(a), (b)와 같다. 그림 3은 2D

표 1. QRD 방법과 CRD 방법의 확산기 깊이 비교
Table 1. Comparison of depths (d [cm]) between QRD and CRD method.

n	QRD		CRD	
	S_n	d_n	S_c	d_c
0	0	0	0	0
1	1	0.76	1	0.76
2	4	3.04	8	6.08
3	9	6.84	10	7.60
4	16	12.16	13	9.88
5	8	6.08	6	4.56
6	2	1.52	12	9.12
7	15	11.40	3	2.28
8	13	9.88	2	1.52
9	13	9.88	15	11.4
10	15	11.40	14	10.64
11	2	1.52	5	3.80
12	8	6.08	11	8.36
13	16	12.16	4	3.04
14	9	6.84	7	5.32
15	4	3.04	9	6.84
16	1	0.76	16	12.16

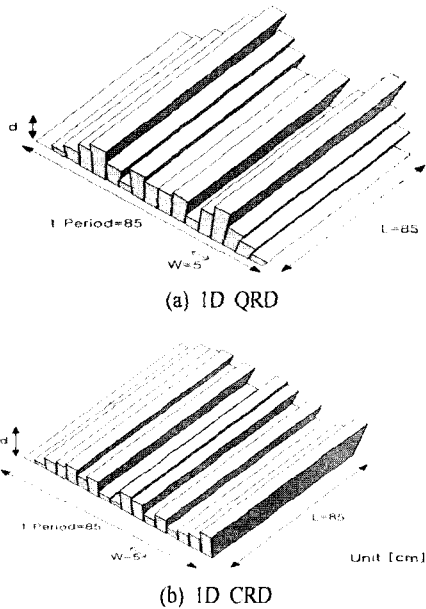


그림 2. 설계된 1D 확산기
Fig. 2. Designed 1D diffusers.

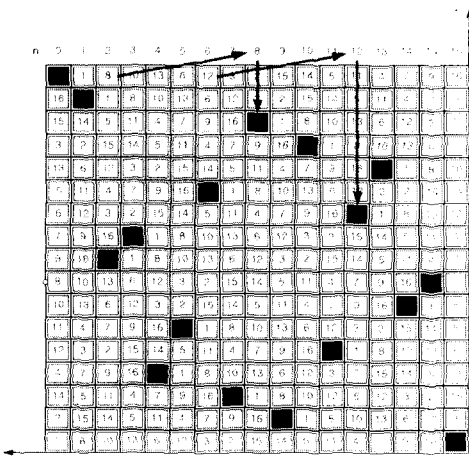


그림 3. 2D CRD 설계 방법
Fig. 3. Designing method of 2D CRD.

CRD의 설계방법을 그림 4는 설계된 2D CRD를 보여준다. 설계된 1D CRD에 더욱 더 random한 효과를 주기 위해서 2D 배열이 사용되었다. 그림 3에서 CRD의 S_c 값을 n 값에 대응하는 위치에 S_c 의 시작 값부터 배치해서 전체적으로 2D 배열을 유지하면서도 Pseudo random한 형태로 설계되었다.

III. 잔향실 내부 필드 분포 해석

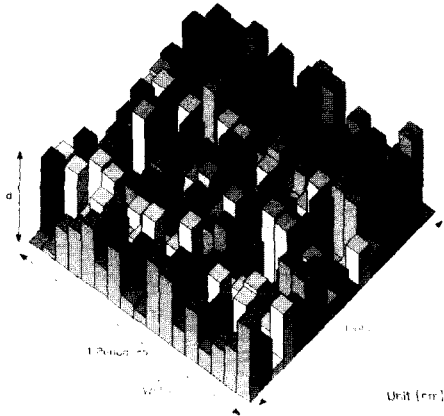


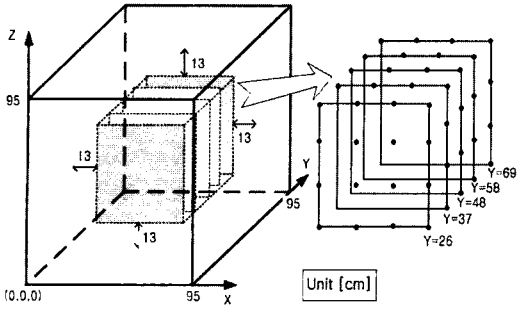
그림 4. 설계된 2D CRD
Fig. 4. Designed 2D CRD.

3-1 전자파 잔향실의 모델링

그림 2, 4와 같이 설계된 Schroeder 방식의 확산기를 적용한 잔향실의 내부 필드 분포를 조사하기 위하여 FDTD 수치 해석 방식을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 소프트웨어로 Remcom사의 XFDTD 5.1을 사용하여 해석하였고 이 방식은 Yee 알고리즘^[12]이 적용되는데, 시간과 공간에 대한 전자계 필드를 해석하기 위하여 유한 차분 방정식을 이용하는 것이다.

전자파 잔향실에 대한 구조는 그림 5(a)와 같이 모델링 되었으며, 전자파 잔향실은 다중모드 전자기 환경(multi-mode electromagnetic environment)을 유지하기 위해 적절한 크기를 가져야 하는데 이는 전자파 잔향실의 필드 균일도를 만족시키기 위한 최소 시험 주파수와 밀접한 관계가 있다. 따라서 시험주파수는 하한 주파수^[16]와 확산기 설계를 고려해 2.3 GHz로, Yee 셀의 크기는 주파수를 고려하여 ΔX , ΔY , $\Delta Z=1$ cm로 설정하였다.

CFL(Courant-Friedrick-Lewy) 안정성 조건^{[13],[14]}을 만족시키기 위하여 이산 시간을 19.25 ps ($=\Delta t$), 전체 시간 간격 수는 25,000으로 설정되었다. 본 논문에서 잔향실 크기는 $95 \Delta X \times 95 \Delta Y \times 95 \Delta Z$ 로 설정되었고 필드 발생을 위한 소스는 1V sinusoidal 포인트 소스로 셀 (48, 82, 48)에서 -y polarity로 설정되었다. 전자파 잔향실은 PEC(Perfect Electric Conductor) 셀로 모델링 되었고, 확산기 매질과 외부 경계조건 역시 PEC로 설정되었다.



(a) 시험 공간과 전자파 잔향실 모델링
(a) Test volume and chamber modeling
(b) 시험 평면과 시험 포인트
(b) Test planes and test points

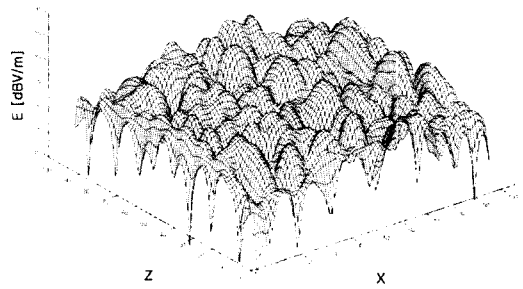
그림 5. 수치해석을 위한 전자파 잔향실 모델링
Fig. 5. Reverberation chamber modeling for numerical analysis.

확산기는 잔향실 내부 x-z 평면의 시작(y=0) 부분 중앙에 1D 확산기의 경우에만 수직으로 적용되었다. 필드 분포를 조사하기 위하여 그림 5(b)와 같이, 시험 공간(test volume)중 5개의 시험 평면에서 각 평면당 16개씩 총 80개의 시험 포인트를 설정하여 전계 세기를 추출하였고 시험 공간은 EN 61000-4-3에 설명되어진 무반사실에 대한 정의를 고려하여 결정하였다⁹⁾.

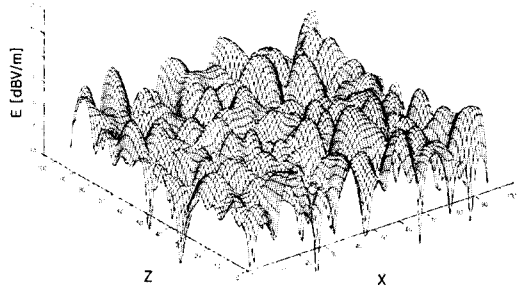
3-2 해석 결과

결과 해석을 위해 MATLAB 6.1을 사용하여 전계 세기에 대한 데이터를 추출하고 수치해석 및 통계적 접근을 하였다. 전자파 잔향실에 각각의 확산기를 사용하였을 경우, y=48에서의 x-z 평면에 대한 simulation 된 전계 세기 분포 결과는 그림 6과 같다. 각각의 확산기를 사용한 경우의 수치 해석 결과를 이용하여, 그림 5(b)의 시험 공간에서 80개 전계 세기 값 중 75%⁹⁾인 60개의 샘플에 대한 평균값, 표준편차, 최대값, 최소값, tolerance 결과는 표 2와 같다. 정의된 시험 평면에 대한 75%의 전계 세기 샘플을 그래프로 비교하면 그림 7과 같다.

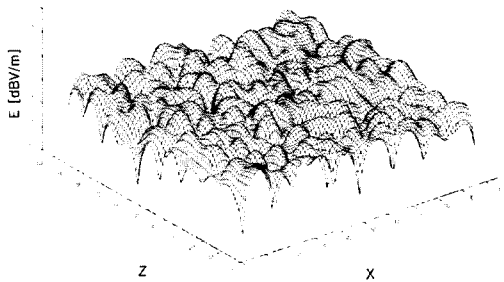
그림 7과 표 2에 의하면, 시뮬레이션 결과 동일한 소스에 대해서 1D QRD를 부착한 경우보다 1D CRD를 부착한 경우가 전력 효율은 감소되었지만, 필드의 균일성은 개선되었고 2D CRD를 부착한 경우 전력 효율이나 필드의 균일성이 모두 개선되었음을 알



(a) 1D QRD를 부착한 잔향실
(a) Reverberation chamber with 1D QRD



(b) 1D CRD를 부착한 잔향실
(b) Reverberation chamber with 1D CRD



(c) 2D CRD를 부착한 잔향실
(c) Reverberation chamber with 2D CRD

그림 6. y=48에서의 x-z 평면에서의 전계 크기 분포
Fig. 6. Time-averaged electric field magnitude distributions on x-z plane at y=48.

수 있다. 잔향실 내부에 편파 특성을 조사하기 위해, x-z 평면 y=48 단면의 11,263개 셀에 대한 E_x ,

표 2. 시험 평면 전계 세기의 샘플 값 중 75 %
Table 2. 75 % of sampled electric field intensity at test plane.

E (dBmV/m)	1D QRD	1D CRD	2D CRD
평균	66.06	58.36	68.62
표준편차	1.74	1.28	0.78
최대값	68.68	60.90	69.70
최소값	62.70	56.30	66.80
Tolerance[dB]	5.98	4.60	2.90

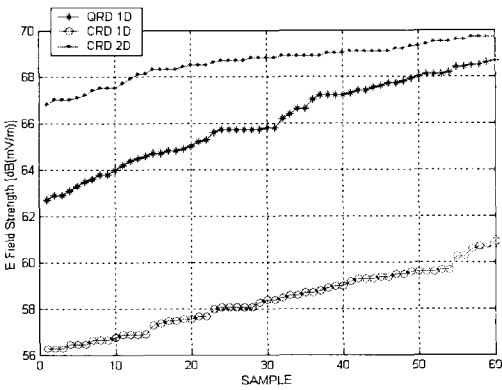
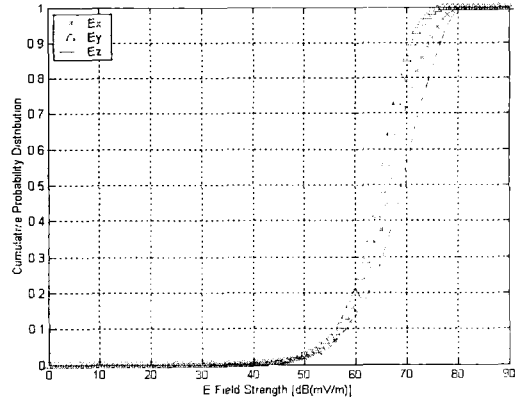


그림 7. 시험공간에서의 전계 분포(75 % of samples)
Fig. 7. Electric field distribution at test plane(75 % of samples).

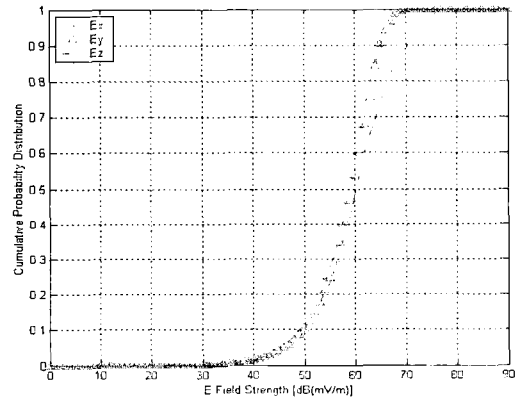
E_y , E_z 의 값을 추출한 후, 그 중 75 % 샘플에 대해서 누적분포 함수를 구하였다. 전체적인 분포는 그림 8과 같이 카이제곱(chi-squared) 분포를 따르고 있다. 이에 대한 E_x , E_y , E_z 성분에 대한 표준편차의 결과는 표 3과 같다. 그림 8과 표 3에 따르면 1D QRD의 경우보다 1D CRD의 경우가 E_x , E_y 편파 특성은 우수하나 E_z 에 대한 편향된 편파 특성을 보였다. 반면에, 2D CRD의 경우는 특정 편파의 영

표 3. E_x , E_y , E_z 에 대한 평균(m)과 표준편차(σ)
Table 3. Mean and standard deviations of E_x , E_y , E_z components.

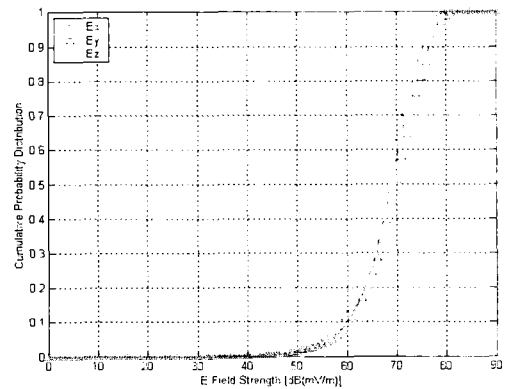
E (dBmV/m)	E_x		E_y		E_z	
	m_x	σ_x	m_y	σ_y	m_z	σ_z
1D QRD	66.26	6.62	64.2	6.08	68.00	7.45
1D CRD	57.60	6.56	58.27	6.38	59.9	7.91
2D CRD	67.28	6.53	69.03	6.72	68.1	6.19



(a) 1D QRD를 부착한 잔향실
(a) Reverberation chamber with 1D QRD



(b) 1D CRD를 부착한 잔향실
(b) Reverberation chamber with 1D CRD



(c) 2D CRD를 부착한 잔향실
(c) Reverberation chamber with 2D CRD

그림 8. $y=48$ 일 때 $x-z$ 평면에서 E_x , E_y , E_z 성분의 누적 분포

Fig. 8. Cumulative distributions of E_x , E_y , E_z components on $x-z$ plane at $y=48$.

향이 현저하게 감소되었다. 따라서 2D CRD의 경우가 가장 우수한 편파 특성을 가짐을 알 수 있다.

IV. 결 론

새롭게 상용화를 준비하는 DMB, 휴대 인터넷과 무선 LAN 등으로 전자파 환경이 악화될 것으로 예상되는 주파수 2.3~3 GHz 대역에 전자파 확산이 가능한 3가지 형태의 확산기를 설계하고 각각의 확산기를 전자파 잔향실에 부착하여 시뮬레이션 한 결과, Pseudo random하게 설계된 경우가 필드 균일도 측면에서도 우수하며 전력 효율 역시 향상되는 결론을 얻었다. 또한 적용된 3 가지 type의 확산기가 모두 tolerance가 최대 6 dB 이내의 필드 균일도를 나타내었으나, 3 가지 type 중 특히 2D CRD가 표준편차 특성이 1이하로 가장 우수하였다. 또한 전자파 잔향실의 동일한 평면에 대한 E_x , E_y , E_z 의 누적분포 함수를 통한 편파에 대해 조사한 결과 Pseudo random하게 설계된 확산기를 부착함으로써 특정 편파에 대한 영향이 감소되었고, 1D QRD, 1D CRD, 2D CRD 순서로 편파 특성이 개선됨을 알 수 있었다.

소형 전자기기의 전자파 장애 및 복사 내성 측정을 위한 대응시험 시설로 전자파 잔향실을 제작할 때, 기존의 1D QRD와 같은 대칭형 1D 확산기보다는 2D Pseudo random배열을 고려한 2D CRD를 설계하였을 때, 필드 균일성, 편파 및 전력효율 측면에 있어서 우수한 특성을 갖는 전자파 잔향실을 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

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] Sam-Young Chung, Joong-Geun Rhee, "Field uniformity analysis of reverberation chamber by FDTD simulation method", *IEC /CISPR St. Petersburg,*

Russia, May 2000.

[4] 이광순, 이중근, 정삼영, "전자파 확산방식을 이용한 잔향실 내부의 필드 분포 해석", *한국전자파학회논문지*, 11(5), pp. 839-848, 2000년 8월.
 [5] 이광순, 이중근, 정삼영, 김성철, "Schroeder Diffuser를 이용한 전자파 잔향실 내부의 필드 해석", *춘계마이크로파 및 전파학술대회논문지*, 23(1), pp. 497-500, 2000년 5월.
 [6] 이광순, 이중근, 정삼영, 김해광, "전자파 잔향실의 필드 균일성 확보를 위한 Schroeder 방식의 diffuser 설계", *2000년도 한국음향학회 학술대회 논문지*, 19(1), pp. 211-214, 2000년 7월.
 [7] 이광순, 이중근, 정삼영, 김성철, "Diffuser 배열에 따른 전자파 잔향실내 필드 편파 특성 향상", *춘계마이크로파 및 전파 학술대회논문지*, 23(2), pp. 263-266, 2000년 9월.
 [8] 정삼영, 이광순, 이황재, 이중근, "전자파 장애 및 복사 내성 측정용 전자파 잔향실 내부의 필드 특성", *국방부 학술대회 논문지*, pp. 58-62, 2000년 9월.
 [9] EN 61000-4-3, *Electromagnetic Compatibility, Part 4. Testing and Measurement Techniques, Section 3. Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity*, 2002.
 [10] Markus Petirsch, Adolf Josef Schwab, "Investigation of the field uniformity of a mode-stirred chamber using diffusers based on acoustic theory", *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 41, no. 4, Nov. 1999.
 [11] Madan Mehta, James Johnson, *Architectural Acoustics Principles and Design*, Prentice Hall, 1999.
 [12] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 14, pp. 302-307, 1966.
 [13] 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.*, vol. 23, no. 8, pp. 623-630, 1975.
 [14] G. M. Smith, *Numerical Solution of Partial Differential Equation: Finite Difference Method*, Ox-

ford Clarendon Press, 1985.

[15] M. R. Schroeder, *Number Theory in Science and Communication*, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1994.

[16] M. O. Hatfield, M. B. Slocum, "Frequency characterization of reverberation chambers", *IEEE Symposium on EMC*, 1996.

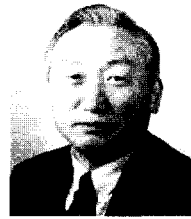
양 욱



2003년: 한양대학교 전자컴퓨터공학부 (공학사)
2005년: 한양대학교 전자전기제어계측공학 (공학석사)
2005년~현재: 삼성테크윈 DSC 개발센터 연구원
[주 관심분야] EMI/EMC, Micro-

wave, 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] EMI/EMC, MW 부품, 안테나 설계, *In-situ* Measurement