

# 비대칭적 구조 전자파 잔향실 전자기장 균일도 해석

## Field Uniformity Analysis of Reverberation Chamber with Asymmetric Structure

정삼영\* · 이종근\*\* · 이황재\*

Sam-Young Chung\* · Joong-Geun Rhee\*\* · Hwang-Jae Rhee\*

### 요약

전자파 잔향실은 일반적으로 직사각형 구조의 차폐실에 전자기장 균일도를 향상시키기 위한 모드 스티러 또는 모드-튜너로 구성된다. 본 논문은 기존에 많이 사용되는 직사각형의 잔향실 구조 대신 두 종류의 비대칭 구조를 사용하였을 경우의 전자기장 균일도 개선효과에 관하여 검토한 것이다. 하나는 Quadratic Residue Diffuser (QRD)를 사용한 비대칭 구조, 그리고 다른 하나는 Randomly Made Diffuser (RMD)를 사용한 비대칭 구조의 전자파 잔향실이다. Finite-Difference Time-Domain (FDTD) 수치해석 방법을 사용하여 두 종류의 전자파 잔향실에 관한 전자기장 균일도 특성을 조사하였다.

### Abstract

Conventional reverberation chamber has a rectangular structure including mode stirrers or mode-tuned stirrers to obtain the field uniformity inside the chamber. This paper explained the way to improve the field uniformity in an asymmetric structure instead of conventional rectangular structure with right-angled planes. Two types of asymmetric structure were considered. One was an asymmetric reverberation chamber using Quadratic Residue Diffuser and the other was an asymmetric chamber with oblique enclosure including fixed Randomly Made Diffusers. The FDTD simulation method was used to analyze the field homogeneous characteristics of these asymmetric reverberation chambers.

### I. 서론

전자파 잔향실은 전자파 차폐실 구조에서 스티러 (Stirrer)나 튜너 (Tuner)를 사용하여 내부 형성되는 전자기장 분포를 시간 확률적으로 균일하게 형성시키는 전자파 장애 및 복사 내성 시험시설이다<sup>[1]</sup>. 전자파 차폐실의 고유 모드 분포로 형성되는 전자계 에너지는 그 차이가 심하므로 전자기장의 경계를 이동시키기 위하여 고 효율의 튜너 특성을 요구한다. 최근까지 전자파 잔향실의 전자기장 균일도 개

선을 위해서 튜너의 효율 개선에 관한 연구가 많이 진행되어왔다<sup>[2],[3]</sup>. 그러나 EMC 측정에 필요한 전자기장 균일도를 만족시키기 위해서 약 100 회 이상의 튜너 스텝 수가 요구되어<sup>[1]</sup>, 이에 따른 시험 시간도 많이 소요된다. 본 논문에서는 전자파 잔향실 전자기장의 균일도를 위하여 스티러 또는 튜너의 효율 개선에 중점을 두었던 기존 방법 대신 잔향실 외부 구조 변화에 따른 시험시간 단축과 균일도 개선 효과에 대하여 조사하였다. 전자파 잔향실의 외부 구조로 많이 사용되는 균일 표면의 직사각형 구조

\*정보통신부 전파연구소(EMC Lab., RRL)

\*\*한양대학교 전자통신전파공학과(Dept. of Electronic Communication Radio Science and Engineering, Hanyang Univ.)

· 논문 번호 : 20010614-077

· 수정완료일자 : 2001년 7월 16일

를 표면이 불균일한 비대칭적 구조로 변화시켜 벽면에 의한 전자기장 산란효과 및 특정 공진 발생 억제 효과로 인해 형성되는 전자기장 특성을 FDTD 시뮬레이션 방식을 통하여 조사하였다. 비대칭 구조 차폐실은 직사각형 구조 차폐실과는 달리 구조적으로 파의 경로 길이 (path length)를 길게 함으로서 특정 공진의 발생을 어렵게 하는 효과가 있으며<sup>[4],[5]</sup>, 이로 인해 차폐실 내부 모드 분포를 보다 균일하게 할 수 있다. 본 논문에서는 비대칭적 구조의 차폐실로 두 가지 형태를 고려하였으며, 첫 번째 구조는 차폐실 내부에 QRD<sup>[6],[7]</sup>를 부착한 구조이며, 두 번째 구조는 차폐실 구조를 비대칭적으로 하여 RMD를 부착한 구조를 사용하였다.

## II. 전자파 잔향실 모델링

### 2-1 비대칭 구조의 모드 분포

전자파 차폐실에서 형성되는 모드 분포는 소스의 여기 방법, 차폐 벽면의 크기 및 구조에 따라 정해진다. 직사각형 차폐실에서 형성될 수 있는 모드 분포는 일반적으로 세 가지 형태로, 한 축에 대해 일정한 분포를 갖는 축 모드 (axial mode), 두 면에 대해 대칭적인 분포를 갖는 기울기 모드 (tangential mode) 및 어느 축에도 대칭 되지 않는 하이브리드

모드 (hybrid mode)로 나누어진다. 공진 상태를 이용하는 전자파 잔향실의 경우 하이브리드 형태의 모드 분포가 내부 전자기장 균일도 확보를 위해 가장 좋은 모드 상태이다<sup>[4]</sup>. 직사각형 구조는 벽면이 상호 직각과 평행을 이루고 있어 특정 주파수의 공진 발생과 특정 모드의 발생 가능성이 아주 높다. 따라서 차폐실의 구조를 파의 경로 길이와 비례되지 않는 비대칭 구조로 설계하여 하이브리드 모드 상태를 이용하는 것이 전자기장 균일도 개선에 더욱 효과적인 방법이 될 것이다.

### 2-2 QRD 부착 구조 전자파 잔향실

QRD 부착 구조 전자파 잔향실은 직사각형 구조의 차폐실 내부 벽면에 음향학 분야에서 음의 잔향 효과를 높이기 위해 사용되었던 QRD<sup>[8]~[10]</sup>를 부착

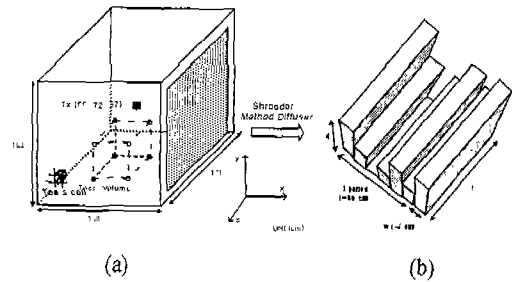


그림 1. QRD 부착 구조 전자파 잔향실과 부착된 QRD

(a) QRD 부착 구조 전자파 잔향실

(b) 1주기 Quadratic residue diffuser

Fig. 1. Reverberation chamber with QRD and geometry of QRD.

(a) Reverberation chamber with QRD.

(b) one period Quadratic residue diffuser.

한 구조이다. QRD는 입사되는 파를 회절 현상을 이용하여 모든 방향으로 균일하게 확산시켜 주는 원리를 가지고 있다<sup>[6]</sup>.

최대 사용주파수 3 GHz에 대하여 설계된 QRD<sup>[11],[12]</sup>를 그림 1 (a)의 크기를 갖는 직사각형 구조 전자파 잔향실 내부 모든 면에 적용하였다.

### 2-3 RMD 부착 구조 전자파 잔향실

그림 2의 RMD 부착 구조는 음향학 분야에서 음의 잔향 효과를 높이기 위하여 이용되고 있는 구조<sup>[4]</sup>로서 비대칭적 구조로 인해 파의 경로길이를 길게 하여 상대적으로 에너지가 높은 주 모드 (Dominant mode) 발생을 억제<sup>[5]</sup>할 수 있고, 따라서 공간상의 에너지 분포를 더욱 균일하게 제어하는 특성을 가지고 있다.

필드의 균일성을 높이기 위해 내부에 QRD 대신 그림 2 (b)와 같은 RMD를 사용하였다. 그림 2 (a)에서 처럼 RMD 부착구조 전자파 잔향실의 모든 마주하는 벽면을 비평형의 비대칭적 구조로 설계하였으며, 내부 총 체적은 3,519,417 cm<sup>3</sup>이다. RMD는 그림 2 (b) 처럼 크기 21×21×10 cm<sup>3</sup>의 직사각형 블록 한쪽면에 7×7×7 cm<sup>3</sup> 크기의 홈을 포함하도록 설계하였으며, 챔버의 시험공간에 영향을 주지 않도록 상단에 위치시켰다. RMD 부착 구조 전자파 잔

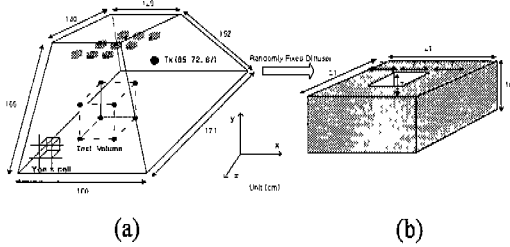


그림 2. RMD 부착구조 전자파 잔향실 및 RMD의 구조

- (a) RMD 부착구조 전자파 잔향실
- (b) Randomly made diffuser

Fig. 2. Reverberation chamber with RMD and geometry of RMD.

- (a) Reverberation chamber with RMD.
- (b) Randomly made diffuser.

향실의 내부 공간 체적은 해석 결과의 객관적 비교를 위하여 QRD 부착 구조의 체적과 거의 동일하게 하였다.

### 2.4 해석 조건

차폐벽, QRD 및 RMD 물질의 전기적 특성은 전도도  $9 \times 10^6 \text{ } \Omega/\text{m}$ , 비투자율은 1.0  $H/m$ 로 사용하였고, FDTD 해석을 위한 최소 셀 단위는  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 로 하였으며, Mur 흡수 경계조건을 사용하였다<sup>[13]</sup>. 단위 시간 간격은 19.25 ps이며 각 주파수에 대한 총 계산시간은 96 ns로 하였다. 필드를 발생시키기 위한 급전점은 챔버 (Chamber) 내부 (65, 72, 67) 위치에 인가하였으며, 소스 (Source) 파형으로는 1.5 GHz의 정현파를 사용하여 steady state 전계강도 분포를 조사하였으며, 가우스 펄스 파형을 사용하여 푸리에 변환을 통한 주파수 축상의 결과 값을 추출하였다.

### 2.5 전자기장 균일도 평가

International Electrotechnical Committee (IEC)의 전자파 잔향실 기술보고서 (Draft IEC Technical Report 61000-4-21)<sup>[14]</sup>에 의하면 전자파 잔향실 전자기장 균일도 조건은 시험공간 (Test volume)의 개념

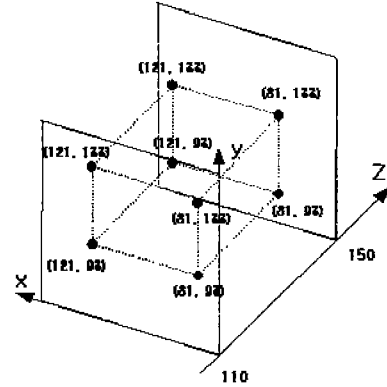


그림 3. 시험공간 및 8개 수신점

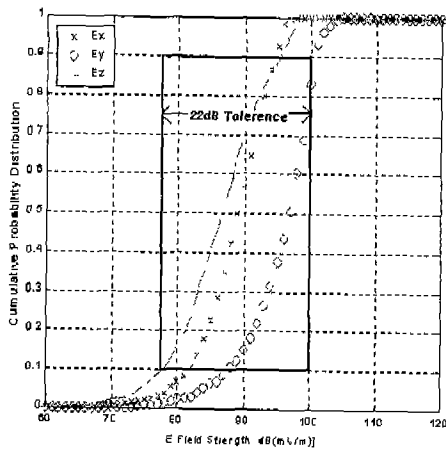
Fig. 3. Eight receiving points inside of test volume.

을 도입하고 있으며, 그림 3와 같이 전자파 잔향실 내부에 설정된 시험 공간의 8개 수신점 (Test point)에서 추출된  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$  값, 즉 24개의 값의 표준편차가 주파수 400 MHz 이상의 범위에서 3 dB이내 일 경우 필드의 균일도 조건을 만족하게 된다. 본 연구에서는 그림 2와 같이 시험공간, 정육면체의 각 수신점을 차폐실 구조의 벽면으로부터 40 cm, 바닥으로부터 70 cm 떨어진 공간에 위치하도록 하였으며, 수신점 각각을 40 cm 떨어지도록 하였다. 그림 3의 시험공간에서  $z=110, 150$ 인  $x-y$  평면에서 시간 평균 전계강도 값을 추출하였으며, 각 8개 수신점에 대하여  $E_x, E_y, E_z$ 의 시간 축상의 변화값을 추출하여 푸리에 변환을 통해 주파수 축상의 값을 계산하였다.

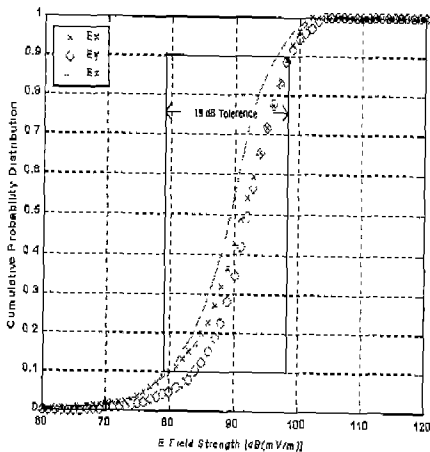
## III. 수치해석 결과

시험공간  $z=110, x-y$  평면 상에서 해석된 전계강도  $E_x, E_y, E_z$  성분의 분포 값을 이용하여 각 성분의 레벨 분포에 대한 발생 빈도를 확률값으로 파악할 수 있는 누적 확률 분포도 (CPD ; Cumulative Probability Distribution)를 추출하였다. 공간상에서 균일도를 위하여 일정 모드 이상이 형성되면 CPD의 형태는 카이제곱(Chi square)의 분포를 갖게 되며<sup>[14]</sup>, 전계강도 각 성분에 대한 CPD 분포를 가지고, 전자파 잔향실 내부에 형성된 필드의 등방성 특성을 평가할 수 있다. 그림 4는 QRD 및 RMD 부착구조 전

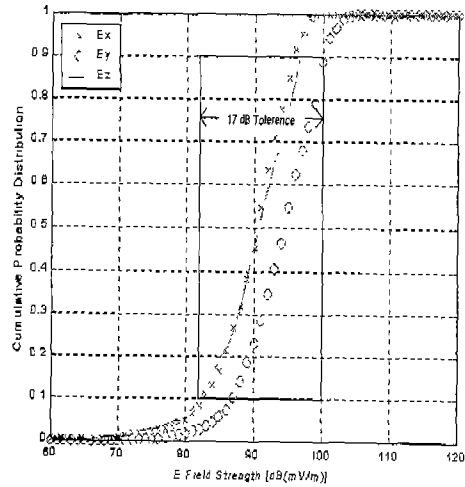
자와 잔향실의 CPD 분포이며 동일체적의 직사각형 구조의 챔버의 CPD 결과와 비교하였다. 그림 4 (a)는 직사각형 전자파 잔향실에 QRD를 부착하지 않은 상태에서의 CPD 분포이며, 그림 4 (b)는 직사각형 전자파 잔향실에 QRD 부착 구조 전자파 잔향실의 CPD 분포, 그리고 그림 4 (c)는 RMD 부착 구조 전자파 잔향실의 CPD 분포이다. 각 결과를 비교해 볼 때 직사각형 구조의 CPD 분포는 전계강도 각 성분의 분포가 서로 잘 일치되지 않음을 확인할 수 있으며, QRD 부착 구조와 RMD 부착 구조 전자파 잔향실은 각 성분의 CPD가 3 dB이내에 분포하고 있



(a) 직사각형 구조 챔버의 경우  
(a) Rectangular reference chamber.



(b) QRD 부착 구조 전자파 잔향실의 경우  
(b) Reverberation chamber with QRD.



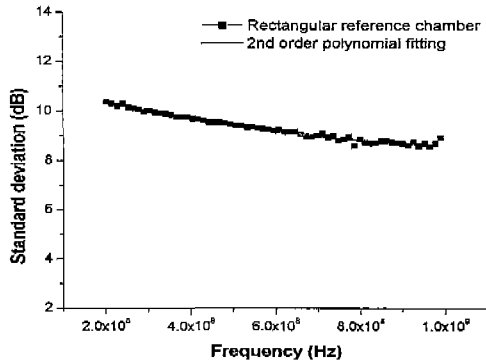
(c) RMD 부착 구조 전자파 잔향실의 경우  
(c) Reverberation chamber with RMD.

그림 4.  $z=110$ ,  $x$ - $y$  평면에서  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ 에 대한 누적 확률분포도

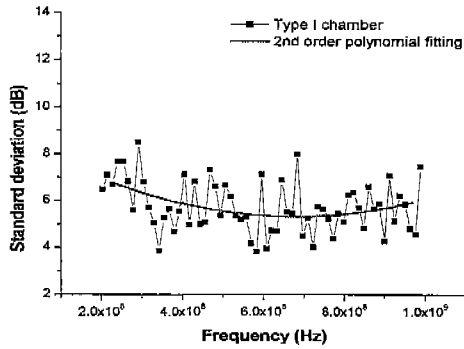
Fig. 4. Cumulative probability distributions of  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$  at  $z=110$  of  $x$ - $y$  plane.

으며 카이제곱 분포를 잘 따르고 있어 필드의 동방성 특성이 양호함을 알 수 있다. CPD 분포의 80%에 대한 레벨 차이로부터 QRD 부착 구조 전자파 잔향실의 경우 직사각형 구조에 비해 약 3 dB, RMD 부착 구조 전자파 잔향실의 경우 약 5 dB의 전자기장 균일도 개선 효과를 확인할 수 있다.

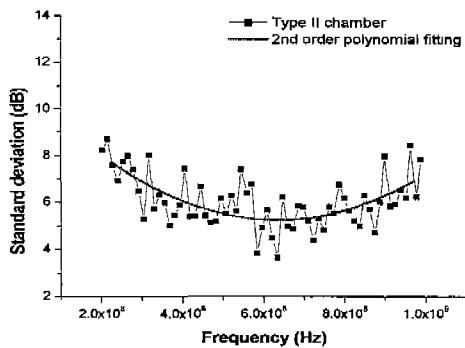
그림 5와 6은 각각의 구조에 대한 주파수 대역별 표준편차 분포이며, 그림 2의 시험공간에서 정한 8개 수신점 각각의  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$  성분 등 총 24개 값에 대한 결과이다. 그림 5의 주파수 200 MHz~1 GHz 대역에서 표준편차 분포의 2차 다항식 fitting 결과를 비교하였을 때 직사각형 챔버는 평균적으로 9~10.5 dB의 높은 표준편차 분포를 가지고 있으며, QRD 부착 구조 전자파 잔향실은 약 5.5~7 dB, 그리고 RMD 부착 구조 전자파 잔향실은 5.5~8 dB의 표준편차 분포를 보임으로서 전체적으로 약 3 dB 이상 개선되었음을 알 수 있다. 그림 6의 주파수 1~3 GHz 대역에서 표준편차 분포의 2차 다항식 fitting 결과를 비교하였을 때 직사각형 챔버는 약 8 dB의 분포를 가지고 있으며, QRD 부착 구조 및



(a) 직사각형 구조 챔버의 경우  
(a) Rectangular reference chamber.



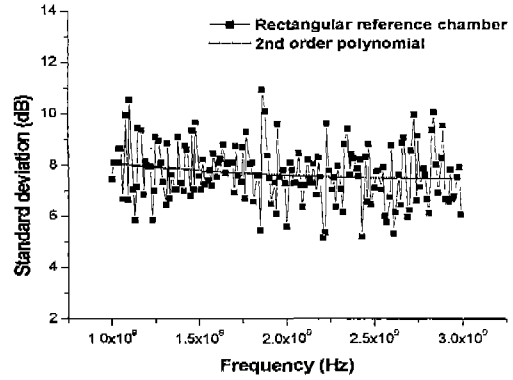
(b) QRD 부착 구조 챔버의 경우  
(b) Reverberation chamber with QRD.



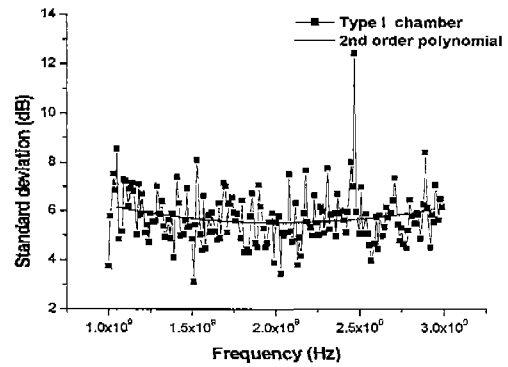
(c) RMD 부착 구조 챔버의 경우  
(c) Reverberation chamber with RMD.

그림 5. 주파수 200 MHz~1 GHz 대역에 대한 표준편차 분포

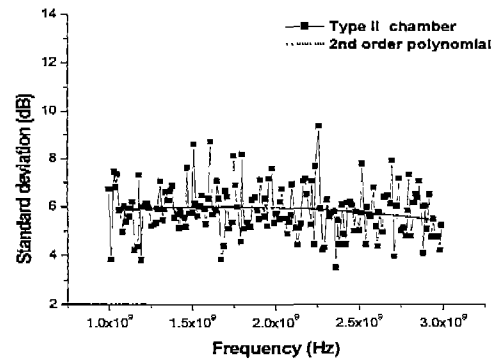
Fig. 5. Standard deviations for the frequency range of 200 MHz~1 GHz.



(a) 직사각형 구조 챔버의 경우  
(a) Rectangular reference chamber.



(b) QRD 부착 구조 챔버의 경우  
(b) Reverberation chamber with QRD.



(c) RMD 부착 구조 챔버의 경우  
(c) Reverberation chamber with RMD.

그림 6. 주파수 1~3 GHz 대역에 대한 표준편차 분포

Fig. 6. Standard deviations for the frequency range of 1 GHz~3 GHz.

RMD 부착 구조 전자파 잔향실의 결과는 약 6 dB의 분포로 전자기장 균일도가 2 dB 정도 개선되었다. 따라서 직사각형 구조 챔버 대신에 QRD 부착 구조 챔버 또는 RMD 부착 구조 챔버를 사용할 경우 전체 주파수 대역에서 전자기장 균일도가 2~3 dB 이상 개선 됨을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

전자파 잔향실의 총 모드 수는 차폐실 구조로부터 주파수에 대한 특성으로 정해지며, 전자기장 균일도는 일정 모드 이상에서 튜너의 사용으로 확보 된다. 그러나 전자기장 균일도 개선 및 하한 주파수의 확장을 위한 튜너 효율 개선의 문제는 결국 스텝 수 증가로 인한 시험시간의 증가 문제로 귀결되어 한정적일 수 밖에 없다. 본 논문에서는 전자기장 균일도를 향상시키면서 하한 주파수 확장에 따른 시험시간의 증가를 피하기 위하여 불균일 비대칭적 구조를 가지는 QRD 부착 구조 및 RMD 부착 구조의 전자파 잔향실을 제시하였으며 각각의 전자기장 특성은 FDTD 시뮬레이션 방식으로 조사하였다. 시뮬레이션 결과에 따르면 일반적인 직사각형 구조에 비해 약 2~3 dB의 전자기장 균일도 개선 효과가 있었으며 낮은 주파수 영역에서도 전자기장 균일도 개선 효과를 확인하였다. 따라서 직사각형 구조 대신 비대칭적 구조를 사용한 전자파 잔향실에 튜너의 기능이 적용될 경우 전자기장 균일도 확보를 위한 시간 단축은 물론 하한 주파수의 확장에도 기여할 것이다.

#### 참 고 문 헌

[1] M. L. Crawford and G. H. Koepke, Design, evaluation, and use of a reverberation chamber for performing electromagnetic susceptibility/vulnerability measurements, *NBS Tech. Note* 1092, April 1986.  
 [2] M. T. Ma, M. Kanda, M. L. Crawford and E. B. Larsen, "A review of electromagnetic compatibility/interference measurement methodologies", *Proc. of the IEEE*, vol. 73, no. 3, pp.

388-411, March 1985.  
 [3] K. Harima, "FDTD Analysis of Electromagnetic Fields in a Reverberation Chamber", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E81-B, no. 10, pp.1946-1950, Oct. 1998.  
 [4] F. B. J. Leferink, "High field strength in a large volume :The intrinsic reverberation chamber", *IEEE Symposium on EMC*, pp. 24-27, 1998.  
 [5] D. J. Edwards, "An experimental investigation of asymmetric screened chambers", *Proc. of 7th Int. EMC Conf.*, UK, pp. 114-118, 1990.  
 [6] M. R. Schroeder, *Number Theory in Science and Communication*, Springer Verlag, / Heidelberg, 1994.  
 [7] 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.  
 [8] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, 2nd edition, Applied Science Publishers LTD, London, 1979.  
 [9] M. R. Schroeder, "Binaural Dissimilarity and Optimum Ceilings for Concert Halls: More Lateral Sound Diffusion", *J. of Acoust. Soc. Am.*, vol. 65, pp. 958-963, 1979.  
 [10] D. S. Jones, *Acoustic and Electromagnetic Waves*, Oxford, U.K., Oxford Univ. press, 1986.  
 [11] 이광순, 이중근, 정삼영, "전자파 확산방식을 이용한 잔향실 내부의 필드 분포 해석", 한국전자과학회 논문지, 제 11권, 5호, pp. 839-848, 2000년 8월.  
 [12] 이광순, 이중근, 정삼영, "전자파 잔향실내 확산기 배열 조건에 따른 필드 분포 특성", 한국전자과학회 논문지, 제 12권, 2호, 2001년 2월.  
 [13] G. Mur, "Absorbing boundary condition for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equation", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-23, no. 4, pp.377-382, November 1981.  
 [14] IEC 61000-4-21(Draft): Annex XX: Alternative method Reverberation chamber method (Draft document 77B/215/CD).

정 삼 영



1988년 8월: 연세대학교 물리학과 (이학석사)  
2001년 8월: 한양대학교 (공학박사)  
1991년 6월~현재: 전파연구소 EMC 연구실 근무  
[주 관심분야] EMI/EMC 국제표준, 전자파 측정 및 수치해석

이 황 재



1986년~1995년: 한국과학기술원 시스템공학연구소 (연구원)  
1996년: 유타주립대학교 물리학과 (이학박사)  
1998년~현재: 정보통신부 전파연구소 (공업연구관)  
[주 관심분야] EMC 국제표준, 위성체 EMI/EMS, 전자파 이론

이 중 근



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

책임연구원  
1990년~1991년: 한국전자파기술학회 회장  
1988년~현재: 한양대학교 전자통신전파공학과 교수  
[주 관심분야] EMI/EMC, Ant., Filter 및 IMT-2000 Micro wave 부품