

원통형 구조 전자파 잔향실 내 모드 및 필드 분포 특성

The Characteristics of Field & Mode Distributions in a Cylindrical Reverberation Chamber

김 정 훈 · 이 중 근*

Jung-Hoon Kim · Joong-Geun Rhee*

요 약

본 논문에서는 전자파 장애 및 복사내성 측정에 사용되는 준전자파 무반사실의 대응 방법으로 활용될 수 있는 전자파 잔향실 중에서 원통형 구조 전자파 잔향실의 전자기장 특성과 모드 분포를 연구하여 원통형 구조 전자파 잔향실의 모드 수 계산법을 제시하였으며, 이것을 사용하여 체적이 동일한 원통형 전자파 잔향실의 모드수를 반지름과 높이 비에 따라 비교 분석하였다. 또한 각각의 체적이 동일한 직사각형, 직각 이등변 삼각형, 원통형의 전자파 잔향실의 필드 균일도를 FDTD(Finite-Difference Time-Domain)를 이용하여 비교 해석하였다.

Abstract

In this paper, simulation results of an electromagnetic field and mode distributions in a cylindrical reverberation chamber were presented. Reverberation chamber is an alternative test facility for a semi anechoic chamber, which is widely used for the analysis and measurement of electromagnetic interference and immunity tests. The method of computing the number of modes in a cylindrical reverberation chamber was presented and the number of modes in a cylindrical reverberation chamber with the same volume was compared with the different ratio of radius to height. The FDTD method was used to produce field characteristics inside of rectangular, right-angled isosceles triangular, and cylinder type reverberation chambers with the same test volume.

Key words : Reverberation Chamber, FDTD, Field Characteristics, Mode

I. 서 론

전자파 잔향실은 1968년 미국 Mendes에 의해 처음으로 제안되어 전자파장애 및 복사 내성 측정을 위한 대응시험 시설로서 사용될 수 있는 가능성을 보였다^[1]. 그 후 미국 표준연구소(NIST:National Institute of Standards and Technology)등에서 연구가 수행되고 있으나, 전자파 장애 및 내성시험을 위한 대응시설로서 이용하기 위한 국제 표준으로는 정립되어 있지 못하다가 최근 국제전자파장애특별위원

회(CISPR:International Special Committee on Radio Interference)에서 전자파 장애 및 내성 시험을 위한 대응시험 시설로써 활용하기 위한 규격 제정 단계에 있다. 또한 최근 전자파 장애 방지를 위한 규제 주파수가 1~18 GHz까지 확장됨에 따라 이 주파수 대역에서 시험장으로 활용할 수 있는 전자파 잔향실이 새롭게 부각되고 있다. 전자파 잔향실은 기본적으로 공진 모드를 활용하기 때문에 일정한 크기의 잔향실 내부에서 전자파 균일성을 확보할 수 있는 모드 수에 의해 하한 주파수가 결정된다^[2]. 주파

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 : 20021008-127

· 수정완료일자 : 2003년 2월 24일

수가 증가함에 따라 모드 수는 증가하기 때문에 하한 주파수 이상의 대역에 대한 시험시설로 활용할 수 있으며, 특히 GHz 대역에서 사용하기에 적합한 대용시험시설이라고 볼 수 있다^[3].

전자파 잔향실을 설계하는데 있어 우선적으로 고려되어야 할 사항이 잔향실 내에서 발생 가능한 총 모드 수이다. 이것은 잔향실의 체적에 따라서 변하게 되는데^[4], 일정한 체적에서 가급적 많은 수의 모드 수를 확보하기 위하여 비대칭적 구조의 잔향실, 표면의 비 균일성 유지 등 다양한 구조의 잔향실에 대한 연구의 진행이 있었으며^[2], 또한 잔향실 내부의 필드 균일성을 확보하기 위하여 교반기(Stirrer) 대신 음향학 분야에서 음향학적인 잔향을 위해 사용되는 확산기(Diffuser)를 사용하여 잔향실 내부 필드의 균일성을 개선하는 방식도 제안되었다^[5].

본 논문에서는 원통형 구조의 전자파 잔향실에서 발생 가능한 총 모드 수를 계산하는 방법과 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 원통형 구조와 비교하였으며, 전자파 잔향실 내부의 필드 분포는 유한 차분법(FDM:Finite Difference Method)을 기초로 하는 FDTD(Finite Difference Time Domain)방식을 적용하여 주파수 2-3 GHz 대역에서 결과를 추출하였다.

II. 원통형 구조 전자파 잔향실

2-1 개요

전자파 잔향실은 필드의 균일성을 만족시키기 위해 최저 시험 주파수에 대해서 다중 모드 전자기 환경을 유지하기 위한 적절한 크기를 가져야 한다. 그리고 일정 구조의 공간에서 균일한 필드를 확보하기 위해서는 최소 요구되는 모드 수를 만족하여야 한다. 현재까지 직사각형 구조와 삼각형 구조에 대한 모드 수 계산방법은 제시된 바 있으나 원통형 전자파 잔향실에 대한 모드 수 계산 방법은 제시된 바 없었다. 따라서 전자파 잔향실을 설계하는데 있어 우선적으로 고려되어야 할 사항인 잔향실 내에서 발생 가능한 총 모드 수를 원통형 구조에 대해서

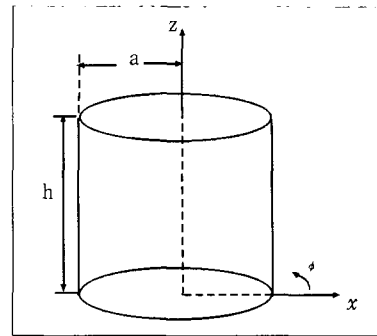


그림 1. 원통형 전자파 잔향실 모델
Fig. 1. Cylindrical reverberation chamber model.

해석하였다. 그림 1은 높이가 h , 반지름이 a 인 원통형 전자파 잔향실의 모델이다.

2-2 원통형 전자파 잔향실 모드 수 해석

TE 모드와 TM 모드에서의 파동 방정식을 풀고, TE_{nm} 와 TM_{nm} 모드의 차단 주파수를 식 (1), (2)에 나타내었다.

$$f_{nm1} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p'_{nm}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{h}\right)^2} \quad (1)$$

$$f_{nm2} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p_{nm}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{h}\right)^2} \quad (2)$$

여기서 p'_{nm} 은 $J'_n(x)$ 의 m 번째 근을, p_{nm} 은 $J_n(x)$ 의 m 번째 근을 나타내며, 그 결과를 표 1과 표 2에 나타내었다.

표 1. 원통형 도파관내 TE 모드에 대한 p'_{nm} 의 값
Table 1. Value of p'_{nm} for TE modes in a circular waveguide.

$\begin{matrix} p'_{nm} \\ m \\ n \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7
0	3.832	7.015	10.173	13.323	16.470	19.615	22.760
1	1.842	5.330	8.535	11.705	14.862	18.014	21.163
2	3.054	6.704	9.967	13.168	16.346	19.511	22.670
3	4.196	8.012	11.343	14.583	17.786	20.970	24.142
4	5.312	9.278	12.678	15.960	19.192	22.397	25.586
5	6.406	10.515	13.982	17.308	20.571	23.799	27.006
6	7.507	11.729	15.263	18.632	21.926	25.179	28.404
7	8.740	12.928	16.523	19.935	23.262	26.539	29.785

표 2. 원통형 도파관내 TM 모드에 대한 p_{nm} 의 값
Table 2. Value of p_{nm} for TM modes in a circular waveguide.

$n \backslash m$	p_{nm}					
	1	2	3	4	5	6
0	2.405	5.520	8.654	11.792	14.931	18.071
1	3.832	7.016	10.173	13.324	16.471	19.616
2	5.136	8.417	11.620	14.796	17.960	21.117
3	6.380	9.761	13.015	16.223	19.409	22.583
4	7.588	11.065	14.373	17.616	20.827	24.019
5	8.771	12.339	15.700	18.980	22.218	25.430
6	9.936	13.589	17.004	20.321	23.586	26.820
7	11.086	14.821	18.288	21.642	24.934	28.191

TM_{nm}에서의 공진 주파수를 나타내는 식 (2)을 잔향실의 내부가 Free Space 라고 가정하고 정리하면

$$\left(\frac{p_{nm}}{a\pi F}\right)^2 + \left(\frac{l}{hF}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

$F = \frac{f}{150}$ 이고 f 의 단위는 MHz이다. 식 (3)은 $a\pi F$ 와 hF 를 장축 및 단축의 길이를 나타내는 타원을 표현한다. p_{nm} 이 가질 수 있는 값은 $f_{nm} < f$ 이므로 $a\pi F$ 보다 작아야 한다. 즉 $p_{nm} < a\pi F$ 이어야 한다. 마찬가지로 l 이 존재할 수 있는 범위는 hF 보다 작다. $p_{nm} < a\pi F$ 를 만족하는 p_{nm} 의 개수를 표 2에서 찾아서 A 라고 하고 식 (3)을 다시 쓰면,

$$\left(\frac{x}{A}\right)^2 + \left(\frac{y}{hF}\right)^2 = 1 \quad (4)$$

이다. A 가 나타내는 것은 TM_{nm}이 가질 수 있는 모드 수와 같으며, y 가 가질 수 있는 양의 정수 값들은 TM_{nm}중에서 l 의 개수이다. 식 (5)은 TM_{nm}의 모드 수를 나타내며, 넓이를 4로 나누는 이유는 n, m, l 이 양의 정수이기 때문이다.

$$T_{TM} \approx \pi \cdot A \cdot hF \times \frac{1}{4} \quad (5)$$

T_{TM} 은 TM_{nm} 전체 모드 수를 나타낸다. 마찬가지로, 잔향실 내부가 Free Space라고 가정하고 식 (1)을 정리하면,

$$\left(\frac{p'_{nm}}{a\pi F}\right)^2 + \left(\frac{l}{hF}\right)^2 = 1 \quad (6)$$

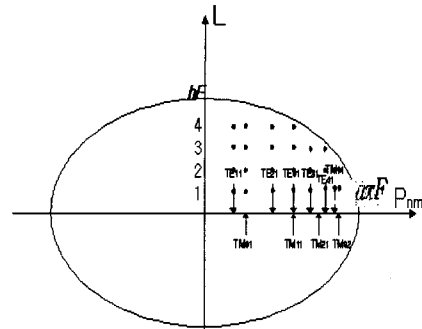


그림 2. TM_{nm}, TE_{nm} 모드를 나타내는 타원
Fig. 2. An ellipse including TM_{nm}, TE_{nm}.

$p'_{nm} < a\pi F$ 를 만족하는 p'_{nm} 의 개수를 표 2에서 찾아서 B 라고 놓고 식 (6)을 다시 쓰면,

$$\left(\frac{x}{B}\right)^2 + \left(\frac{y}{hF}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

$$T_{TE} \approx \pi \cdot B \cdot hF \times \frac{1}{4} \quad (8)$$

T_{TE} 은 TE_{nm}의 전체 모드 수를 나타낸다. 원통형 전자파 잔향실에 존재하는 전체 모드 수는 TE_{nm} + TM_{nm}의 모드 수와 같으므로

$$T_{TE+TM} \approx \pi \cdot (A + B) \cdot hF \times \frac{1}{4} \quad (9)$$

로 나타낼 수 있다. 그림 2는 TM_{nm} 모드와 TE_{nm}를 포함하는 장축의 길이가 $a\pi F$ 이고 단축의 길이가 hF 인 타원을 나타낸다.

표 3은 원통형 잔향실의 체적을 1.12 m³로 동일하게 유지하며 높이와 반경에 따른 모드를 계산한 것이다. 표로부터 $a/h=0.5$ 일 때 존재하는 모드수

표 3. 동일 체적에서 주파수와 반지름 변화에 따른 모드 수

Table 3. The number of modes compared with the ratio of radius to height and frequency in the same volume.

f (MHz)	$a=2h$	$a=h$	$a=h/2$	$a=h/4$
400	14	14	14	11
500	28	27	29	28
600	46	51	53	56
800	110	115	113	112
1000	205	211	229	233
1200	353	360	388	369

가 가장 많음을 알 수 있었고 0.5 미만이 되면 오히려 줄어드는 것을 볼 수 있었다.

Ⅲ. 체적이 동일한 잔향실 모델

3-1 전자파 잔향실의 외부 구조

그림 3은 원통형 구조 전자파 잔향실의 모드 분포와 필드 특성을 비교하기 위해 제시된 직각 이등변 삼각형 구조와 직사각형 구조의 전자파 잔향실을 나타낸다. 직각 이등변 삼각형, 직사각형, 원통형 구조의 체적은 1.12 m³ 으로 전부 같으며, 같은 체적일 때 필드 균일도를 보기 위한 것이다.

3-2 잔향실 내부에 발생하는 모드 해석

그림 3(a)의 직각삼각형 구조의 잔향실과 그림 3(b) 직사각형 구조에 대한 전체 모드 수를 식 (10), (11)에 나타내었다^{[2],[6]}.

$$N(f) = \frac{\pi}{3} a^2 c \left(\frac{f}{150}\right)^3 \times \frac{1}{2} = \frac{\pi}{6} a^2 c \left(\frac{f}{150}\right)^3 \quad (10)$$

$$N(f) = \frac{4\pi}{3} ABC \left(\frac{f}{150}\right)^3 \times \frac{1}{4} = \frac{\pi}{3} ABC \left(\frac{f}{150}\right)^3 \quad (11)$$

그림 3(a), (b), (c) 구조의 잔향실에 대하여 사용 가능한 하한 주파수를 결정하기 위해 주파수에 따른 잔향실 내부의 모드분포를 계산한 결과를 그림 4에 나타내었다. 1986년도에 발표된 미국 NBS(National Bureau of Standards) Technical Note 1092에 의하면 잔향실 내부에서 사용될 주파수에 대하여

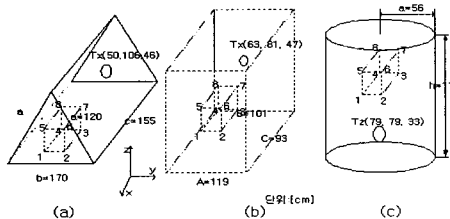


그림 3. 전자파 잔향실의 모델
(a) 직각 이등변 삼각형, (b) 직사각형,
(c) 원통형 구조

Fig. 3. Models of reverberation chamber.
(a) Right-angled isosceles triangular type,
(b) Rectangular type, (c) Cylindrical type

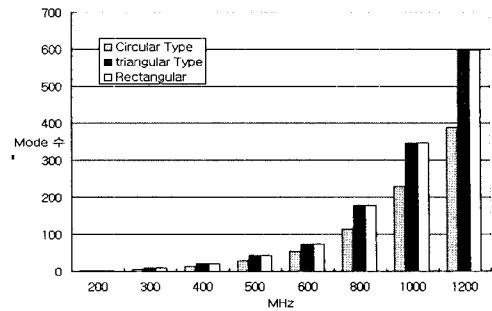


그림 4. 주파수에 따른 전자파 잔향실의 모드수
Fig. 4. The number of modes of reverberation chamber with different frequencies.

균일 필드 분포를 얻기 위해 최소 60 개 이상의 모드 수를 요구하고 있다^[2]. 그림 4는 제시된 모델에 대해 계산된 주파수에 따른 잔향실의 모드수를 나타내며, 하한 주파수는 그림 3(a), (b)는 800 MHz, (c)는 700 MHz이다.

Ⅳ. 잔향실 내부 필드 분포 시뮬레이션

4-1 전자파 잔향실의 모델링

설계된 전자파 잔향실의 내부 필드 분포를 조사하기 위해 FDTD 방식을 적용한 범용 시뮬레이터인 XFDTD를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 전자파 잔향실에 대한 구조는 다음과 같이 모델링 되었다. 제시된 3가지 모델 전부 직각 좌표계를 사용했으며, 주파수 3 GHz에 대해서 필드 분포를 얻기 위하여, 기본 셀의 크기를 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z = 1cm$ ($\because 1cell \leq \lambda/10$)로 설정하였다. 그리고 Courant 안정성 조건을 만족시키기 위하여 이산 시간을 19.25 ps ($=\Delta t$)의 이산시간 간격으로 20,000 번 수행하였다. 외부 도체면을 $\sigma = 9 \times 10^6$ [σ/m]로 구성하고, 내부공간은 자유 공간으로 설정했다.

‘균일 지역’의 정의는 유럽 표준 EN 61000-4-3에 설명되어진 무반사실에 대한 정의를 고려하여 결정했다^[7]. 무반사실의 경우는 전자파 잔향실과 달리 필드의 변화가 받아들일 수 있을 정도의 작은 가상 수직평면으로 균일 지역이 정의되는데, 정의된 영역에서 3 dB 균일 허용 오차 내에 있으면 필드가 균일하다고 정의한다. 삼각형 구조에서는 (50, 72, 61), 직사각형 구조에서는 (68, 81, 47), 원통형 구조에서

는 (79, 79, 33)에 소스를 위치시켰다. 전자파 잔향실 내부의 필드 균일도를 평가하기 위해 설정한 시험공간은 그림 3과 같으며, 전체공간을 고려하여 벽면으로부터 최소 1 파장 이상 떨어진 지점에서, 균일 지역으로 정의된 volume의 형태로 설정하였으며, Gaussian Derivative 포인트 소스를 사용할 때, 아래에 적힌 각 구조의 시험점(Test Point)에서 전계 강도 E_x , E_y , E_z 를 추출하였다. Test volume은 대각 모서리가 삼각형 구조에서 (166, 91, 31), (136, 121, 61), 직육면체 구조에서는 (75, 67, 32), (105, 97, 62), 원통형 구조체에선 (64, 64, 116), (94, 94, 86)에 위치하는 직육면체를 사용하였다.

4-2 시뮬레이션 해석 결과

Gaussian Derivative 포인트 소스를 사용하여, 주파수 2~3 GHz 사이에서 직사각형, 직각 이등변 삼각형, 원통형 구조의 전자파 잔향실에 대해 시험점 8개에서 각각의 E_x , E_y , E_z 를 구하였다. 직사각형 잔향실의 E-Field 표준 편차(그림 6)가 가장 좋게 나왔으며, 직각 이등변 삼각형 잔향실의 E-Field 표준 편차(그림 5)와 원통형 잔향실의 E-Field 표준 편차(그림 7)를 비교하면 삼각형의 경우 최대 표준 편차가 주파수 2.7 GHz에서 2.2 dB로 낮은 편이지만 전체 주파수 대역에서 1.6 dB 이상이 8개 나왔고 1.2 dB 이상은 25개였다. 하지만 원통형의 경우 최대 표준 편차가 주파수 2.6 GHz에서 2.6 dB로 삼각형에 비해 크지만, 전 주파수 대역에서 1.6 dB 이상은 3

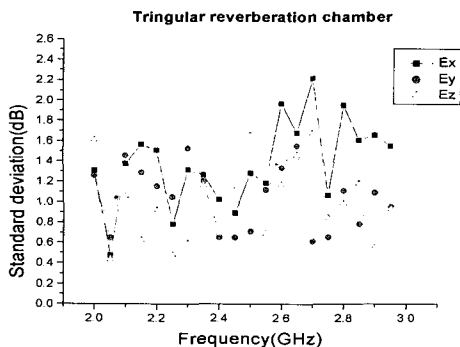


그림 5. 직각 이등변 삼각형 잔향실의 E-Field 표준 편차
Fig. 5. Standard deviation of E-Field inside right-angled isosceles triangular reverberation chamber.

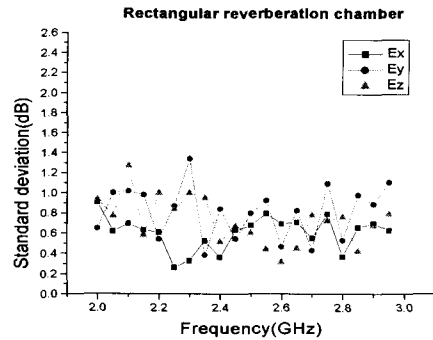


그림 6. 직사각형 잔향실에서의 E-Field 표준 편차
Fig. 6. Standard deviation of E-Field inside rectangular reverberation chamber.

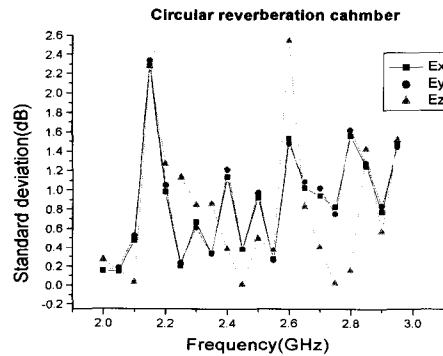


그림 7. 원통형 잔향실의 E-Field 표준 편차
Fig. 7. Standard deviation of E-Field inside cylindrical reverberation chamber.

개, 1.2 dB 이상은 15개에 불과했다.

또 원통형 구조에서 E_x , E_y 표준 편차크기는 같은 주파수에서 거의 일치했다. 이것은 전계 성분 각각의 표준 편차가 작다는 것을 의미하며, 잔향실내에서의 전체적인 전계 표준 편차는 원통형이 직각 이등변 삼각형보다 좋다는 것을 알 수 있다. Sinusoidal 포인트 소스를 사용하여 각 구조 형태의 전자파 잔향실의 시험평면의 균일도를 보았을 때는 직사각형의 필드 균일도가 가장 좋았으며, 다음은 원통형, 삼각형의 순서로 나타났다.

V. 결 론

본 논문에서는 원통형 전자파 잔향실의 구조 변화와 체적에 따른 모드 수 분포의 계산 방법을 제시하였다. 원통형 전자파 잔향실의 반지름과 높이의 비에 따른 모드수는 $a/h=0.5$ 일 때 가장 많은 모드

수를 가지며, 잔향실의 크기에 비례해서 내부의 모드수가 증가함을 알 수 있었다. 원통형 전자파 잔향실과 필드 균일도를 비교하기 위해 직사각형 및 직각 이등변 삼각형 구조의 전자파 잔향실을 사용하였고, 모든 구조에서 E-field 성분에 대한 균일 허용오차가 2~3 GHz 사이에서 3 dB 이내이므로 전자파 잔향실로서 고려될 수 있었다. 잔향실을 제작, 설계할 때 직사각형, 원통형, 직각 삼각형순서로 고려되어야 함을 알 수 있었다. 마지막으로 원통형 전자파 잔향실이 사용되기 위해 우선적으로 고려되어야 하는 잔향실 내 발생 가능한 총 모드 수를 만족하는 하한 주파수를 결정하기 위해서는 본 논문에서 제시된 모드 수 계산법이 이용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] H. A. Mendes, *A new approach to electromagnetic field-strength measurements in shielded enclosures*, Wescon Tech. Paper, CA, U. S. A., pp. 20-23, Aug. 1968.
 [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, April 1986.
 [3] IEC 61000-4-3: Annex XX: Alternative Method Reverberation Chamber Method (Draft document 77B/215/CD).
 [4] M. O. Hatfield, M. B. Slocum, "Frequency Characterization of Reverberation Chambers", *IEEE Symposium on EMC*, 1996.
 [5] Markus Petirsch, 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.
 [6] Yi Huang, "Conducting triangular chambers for EMC measurements", *Measurement Science & Technology*, vol. 10, no. 3, L21-L24, Mar. 1999.
 [7] EN 61000-4-3, *Electromagnetic Compatibility, Part 4. Testing and measurement techniques, Section 3. Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity*, 1997.

김 정 훈



1999년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
 2001년 8월: 한양대학교 전자통신전파공학과 (공학석사)
 2001년 8월~현재: 한양대학교 전자전기제어계측공학과 박사과정
 [주 관심분야] EMI/EMC, MW 부품

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 전자컴퓨터공학부 교수
 [주 관심분야] EMI/EMC, MW 부품, 칩 안테나