

# 송신 안테나에 의한 5 GHz 이차 잔류 디퓨저를 적용한 전자파 잔향실의 내부 필드 균일도 변화

이유진<sup>\*†</sup>

<sup>\*†</sup>상명대학교 전자공학과

## Electric Field Uniformity in Reverberation Chamber with 5 GHz Diffuser by Transmission Antenna

Eugene Rhee<sup>\*†</sup>

<sup>\*†</sup>Department of Electronic Engineering, Sangmyung University

### ABSTRACT

In this paper, electric fields in electromagnetic reverberation chambers, which are used as a substitute facility for EM-free anechoic chambers, are analyzed. This paper focused on the 4-5 GHz band, which is expected to adversely affect equipment. To analyze the field uniformity inside the electromagnetic reverberation chamber, electric field strengths are sampled and finite-difference time-domain method was used for numerical analysis. Moreover, Quadratic residue diffuser was used to improve the characteristics of the electromagnetic reverberation chamber and the uniformity of the internal field strength. Standard deviation, tolerance characteristics, and partiality characteristics were compared while varying the aiming point of transmission antenna.

**Key Words** : Electromagnetic compatibility, Reverberation chamber, Diffuser, Field uniformity

### 1. 서 론

전자파잔향실(Reverberation Chamber)은 전자파적합성(Electromagnetic Compatibility, EMC) 테스트 및 기타 전기자기 관련 측정을 위한 시설이다. 전자파잔향실은 모드 교반실(Mode-stirred Chamber)이라고도 하며 직육면체형, 삼각프리즘형, 원통형 등 다양한 형태를 가지고 있다[1-25]. 일반적으로 전자파적합성 테스트에서 직육면체형 전자파잔향실이 사용되므로 본 논문에서는 동일한 전자파잔향실 유형을 사용하였다. 현재 미국 국립표준 기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)가 된 국립표준국(National Bureau of Standards, NBS)은 전자파잔향실의 필드 균일성에 대해 최소 60개 모드를 요구하고 있으며, 전자파잔향실의 필드 균일성은  $\pm 6$  dB 허용 오차 및  $\pm 3$  dB 표

준 편차 이내여야 한다고 권고한다. 전자파잔향실에서 균일한 필드를 생성하기 위해 일반적으로 교반기(Stirrer)를 사용한다. 교반기는 구동 모터에 의해 다른 방향으로 회전할 수 있는 대형 금속 리플렉터(Reflector)를 가진 부품이다. 이 때문에 교반기는 전자파잔향실에서 부피가 너무 크고 교반기의 구동모터로 인해 유지보수가 어려운 등의 문제가 있다[7, 8]. 본 논문은 교반기의 크기와 유지보수 문제를 극복하기 위해 교반기에 비해 크기가 훨씬 작고 구조가 단순한 음향학 분야에서 흔히 사용되는 디퓨저(Diffuser)를 채택했다. 음향학에서의 디퓨저는 여러 종류가 있으며, 이차 잔류 시퀀스(Quadratic Residue Sequence)에 기초한 이차 잔류 디퓨저(Quadratic Residue Diffuser, QRD)를 채택하였다.

본 논문에서 교반기를 사용한 전자파잔향실 시뮬레이션의 설정은 IEC 61000-4-21 국제 표준을 따랐다. 특히 IEC 61000-4-21은 송신 안테나의 위치와 방향을 명시하고 있

<sup>†</sup>E-mail: eugenerhee@smu.ac.kr

대[7, 8]. 단, 교반기 용도이다. 앞서 언급한 바와 같이 교반기 자체는 움직이는 부품이며, 이 때문에 IEC 61000-4-3은 안테나가 교반기를 직접 조준하지 말 것을 권고하고 있다. 반면에 디퓨저는 고정된 부품이다. 따라서 디퓨저 어플리케이션의 송신 안테나의 최적의 위치와 방향을 연구해야 할 필요성이 있다. 이러한 동기로 송신 안테나의 위치와 방향을 변화시키는 2차 잔류 디퓨저로 전자파잔향실의 필드 균일성을 연구했다. 예비 연구로 전자파잔향실에서 필드 균일성을 갖는 교반기의 이차 잔류 디퓨저 대체 효과에 대한 인지도를 높일 것이며, 본 논문으로 교반기의 교반기 대체효과를 입증할 수 있는 충분한 관심을 끌게 될 것이다. 이를 위해, 이전 연구에 추가하여 다음 두 가지 질문에 답해야 한다: 1) 송신 안테나의 위치와 방향에 따른 전자파잔향실의 필드 균일성의 변화는 무엇인가? 2) 송신 안테나의 위치와 방향에 관계없이 이차 잔류 디퓨저는 국제 표준 IEC 61000-4-21의 전자파 시험 요건을 충족하는가?

## 2. 전자파잔향실

전자파잔향실을 설계할 때 총 공진 모드 수는 전자파잔향실 내에서 모드 분포와 필드 균일성을 특징짓는 매우 중요한 요소이다. 전자파잔향실의 매체가 공기일 때 공진 모드 총 수  $N(f)$ 는 식 (1)로 계산할 수 있다[1-5].

$$N(f) = \frac{\pi}{3}XYZ \left(\frac{f}{150}\right)^3 \quad (1)$$

여기서  $X, Y, Z$ 는 전자파잔향실의 각 변이며,  $f$ 는 MHz의 주파수이다. 본 논문에서 전자파잔향실은 60개의 모드를 갖도록 설계되었으며, 전자파 잔향실의 최저 사용 주파수 (Lowest useful high frequency, LUF)는 식 (1) 기준 354MHz이다.

시뮬레이션을 위해 유형 I) 이차 잔류 디퓨저가 있는 전자파잔향실 (송신안테나: 전자파잔향실 벽면 기준), 유형 II) 이차 잔류 디퓨저가 있는 전자파잔향실 (송신안테나: 이차 잔류 디퓨저 기준)을 제안한다.

## 3. 이차 잔류 디퓨저

서론에서 언급했듯이, 이차 잔류 디퓨저는 다음과 같이 정의된 이차 잔류 시퀀스( $S_n$ ) 기반의 디퓨저이다[6].

$$S_n = n^2 \bmod N \quad (2)$$

여기서  $n$ 은 양수이고,  $N$ 은 홀수인 소수이다. 식 (2)에서  $S_n$  은  $n^2/N$ 의 나머지며  $0 \leq S_n < N$ 의 양수이다. 따라서 이

시퀀스는  $N$ 의 주기로 반복된다[6].

본 논문에서 이차 잔류 디퓨저는 4-5 GHz용으로 설계되었으며, 이차 잔류 디퓨저 설계 시 핵심 요소는 다음과 같이 정의되는 우물(Well)의 폭( $W_{well}$ ), 깊이( $d_{well}$ ), 수( $N_{well}$ )이다.

$$W_{well} = \frac{\lambda_{max}}{2} \quad (3)$$

$$d_{well} = \left(\frac{S_n}{N_{well}}\right) \left(\frac{\lambda_{min}}{2}\right) \quad (4)$$

$$N_{well} = 2m \left(\frac{\lambda_{min}}{\lambda_{max}}\right) \quad (5)$$

여기서  $\lambda_{max}$ 는  $f_{max}$ 의 파장 길이,  $\lambda_{min}$ 은  $f_{min}$ 의 파장 길이, 그리고  $N_{well}$ 은 소수이다[7]. 식 (5)에서  $m$  값이 클수록 전자파잔향실의 필드 균일성이 좋아진다. 그러나  $m$  값이 너무 크면 이차 잔류 디퓨저도 너무 커져서 전자파잔향실에 부착할 수 없기에,  $m$ 은 2로 셋팅하였다.

## 4. 필드 균일도 분석

본 논문에서는 두 유형의 직육면체형 전자파잔향실 내부의 필드 균일성을 Yee 알고리즘과 유한차분법이 포함된 유한차분 시간영역법(Finite-difference time-domain, FDTD)의 XFDTD 프로그램으로 분석한다. XFDTD 시뮬레이션을 위해 전자파 잔향실 전체 크기, 테스트 볼륨, 그리고 전체 셀을 설정했으며, 필드 분포를 분석하는 파라미터 설정은 다음과 같다[9]. 이차 잔류 디퓨저의 우물과  $\lambda_{max}$ 를 고려하여 Yee의 셀 단위는  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z = 0.01$  [m]로 설정했다. Curant-Friedrick-Lewy(CFL) 조건을 만족하기 위해 이산형 시간 구간은 4.815 [ps]로 설정했다[12-14]. 전자파잔향실과 이차 잔류 디퓨저는 시뮬레이션을 위해 Fig. 1과 같이 모델링하였다.

총 셀 크기는  $180\Delta X \times 150\Delta Y \times 160\Delta Z$ 이다. 이차 잔류 디퓨저의 표면도 완벽한 전기 컨덕터(Perfect electric conductor, PEC)로 가정하고 전자파 잔향실의 내부 공간도 자유 공간으로 가정한다. 전기장을 발생시키기 위해 그림 1과 같이 4, 5 GHz에서 1 V의 사인파 점원을 사용하며, 송신 안테나는  $X = 40$  평면의 중심 셀(40, 75, 80)과  $X = 140$  평면의 중심 셀(140, 75, 80)에 각각 위치시킨다. 전자파잔향실의 필드 분포를 분석하기 위해 80개의 테스트 포인트(각 테스트 평면 5개의 테스트 평면당 16개의 테스트 포인트)에서 전기장 강도를 샘플링하였다. 테스트 볼륨, 이차 잔류 디퓨저, 소스 포인트 및 송신 안테나의 상세 위치는 Fig. 1과 같다.

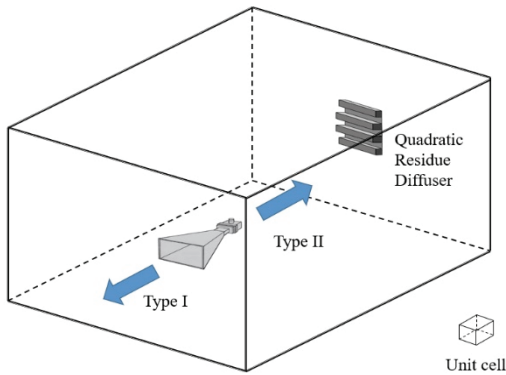


Fig. 1. Reverberation chamber modelling.

### 5. 분석 결과

전자파잔향실 유형 I, II 내부의 Y-Z 평면에서  $X=100$  (35,000 단계 이후, 5 GHz)에서의 전기장 분포는 Fig 2와 3과 같다. 전자파잔향실의 필드 균일성은 시간에 따라 다르기 때문에 IEC 61000-4-21은 필드 분석에 대해 75 % 샘플링의 누적 분배 함수를 권고한다[8, 9]. Fig 2보다 Fig 3에서 필드 분포가 좀더 고르고 평탄하게 분포되는 것을 확인할 수 있으며, 이 것은 전자파잔향실 내부 필드 균일도가 향상되었음을 의미한다. Fig 2와 3과 같이 전자파잔향실 유형 II에서  $E_x, E_y, E_z$  성분의 전기장 누적 분포는 다른 전자파잔향실에 있는 성분들 중에서 가장 일치하므로 전자

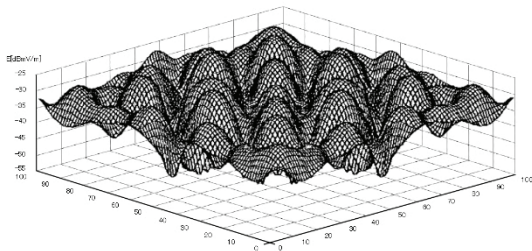


Fig. 2. Electric field distribution at 5 GHz (Type I).

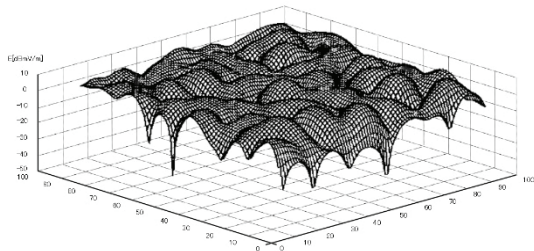


Fig. 3. Electric field distribution at 5 GHz (Type II).

Table 1. Electric field intensity (75 % sampling)

$E$ [dBmV/m]	Type I	Type II
Mean	58.08	59.30
Standard deviation	2.94	2.66
Maximum	61.02	61.96
Minimum	55.14	56.64
Tolerance [dB]	5.88	5.32

파잔향실 유형 II에서 필드 균일성의 공차 및 표준 편차가 가장 작음을 알 수 있다. 이전 연구에서 알 수 있듯이 송신 안테나(정현파 점원 A, B)의 편파특성은  $E_x, E_y, E_z$  성분의 전기장 누적 분포에는 영향을 미치지 않지만, 공차와 표준 편차에는 큰 영향을 미치지 않는다[10-20]. 이러한 이유로 본 논문은 대표적인 결과만 제시한다. 그러나 보고되지 않은 다른 평면, 주파수 및 시간의 결과는  $\pm 0.5$  dB의 차이를 가지고 제시된 결과와 크게 다르지 않다. Table 1은 이차 잔류 디퓨저의 영향을 숫자 값으로 입증하기 위한 전기장 강도의 최대, 최소 및 평균 값을 보여준다. 또한, 이차 잔류 디퓨저의 효과를 명확히 보여주기 위해 Table 1에 표본화된 60개의 전기장 강도에 대한 표준편차와 공차를 명시했다.

### 6. 결론

본 논문은 직육면체 전자파잔향실 내부의 필드 특성을 조사하기 위해 테스트 볼륨에서 샘플링된 데이터의 75 %를 분석했다. 시뮬레이션 결과 전자파잔향실의 필드 균일성과 편파 특성이 설계된 이차 잔류 디퓨저로 개선되는 것으로 나타났다. 그림 2와 3에서 볼 수 있듯이 송신 안테나의 편파특성은  $E_x, E_y, E_z$  성분의 전기장 누적 분포에는 영향을 미치지 않지만 공차 및 표준 편차에는 큰 영향을 미치지 않는다. 분석 결과에 따르면 유형 I과 II의 전자파잔향실은 필드 균일성 특성의  $\pm 6$  dB 공차 및  $\pm 3$  dB 표준 편차를 만족하며, 이는 IEC 기술 보고서에 의해 요구되는 4, 5 GHz에서의 필드 균일성 조건이 설계된 이차 잔류 디퓨저를 사용하여 얻어졌음을 의미한다.

### 감사의 글

This research was funded by a 2020 research grant from Sangmyung University.

### 참고문헌

- Mendes, H. A., "A new approach to electromagnetic field-strength measurements in shielded enclosures,"

- Wescon Tech: CA, USA, 1968.
2. Arnaut, L. R., "Statistics of the quality factor of a rectangular reverberation chamber," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 45, No. 61, pp.61-76, 2003.
  3. Huang, Y., "Conducting triangular chambers for EMC measurements," *Measurement Science and Technology*, Vol. 10, No. 3, pp.21-24, 1999.
  4. Davenport, E. M., McQuilton, D., and Bowly, T. R., "Development of a mode stirred EMC facility," in 1994 9th International Conference on Electromagnetic Compatibility, September, pp.266-273, 1994.
  5. Crawford, M. L. and Koepke, G. H., "Design, evaluation and use of a reverberation chamber for performing electromagnetic susceptibility/ vulnerability measurements," NBS technical Note 1092, National Bureau of Standards, 1986.
  6. Mehta, M. and Johnson, J., "Architectural acoustics principles and design," Prentice Hall, 1999.
  7. IEC 61000-4-21: Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-21, Testing and measurement techniques reverberation chamber test methods, 2011.
  8. IEC 61000-4-3: Testing and measurement techniques - Radiated, radio frequency, electromagnetic field immunity test, 3<sup>rd</sup>, 2020.
  9. XFDTD, Finite difference time domain graphic user interface for electromagnetic calculation, Remcom Inc., 2018.
  10. Kane, Y., "Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 14, No. 3, pp.302-307, 1966.
  11. Mur, G., "Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 23, pp.377-382, 1981.
  12. Taflove, A. and Brodwin, M. E., "Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 23, No. 8, pp.623-630, 1975.
  13. Cappetta, L., Feo, M., Fiumara, V., Pierro, V. and Pinto, M., "Electromagnetic chaos in mode-stirred reverberation enclosures," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 40, No. 3, pp.185-192, 1998.
  14. Fiumara, V., Fusco, A., Iadarola, G., Matta, V., and Pinto, I. M., "Free-space antenna pattern retrieval in nonideal reverberation chambers," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 58, No. 3, pp.673-677, 2016.
  15. Wanderlinder, L. F., Lemaire, D., Coccato, I., and Seetharamdoo, D., "Practical implementation of metamaterials in a reverberation chamber to reduce the LUF," in 2017 IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE, October, pp.465-467, 2017.
  16. Leo, A. D., Cerri, G., Russo, P., and Primiani, V. M., "A novel emission test method for multiple monopole source stirred reverberation chambers," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 62, No. 5, pp.2334-2337, 2020.
  17. Gifuni, A., Bastianelli, L., Migliaccio, Moglie, M., F., Primiani, V. M., and Gradoni, G., "On the estimated measurement uncertainty of the insertion loss in a reverberation chamber including frequency stirring," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 61, No. 5, pp.1414-1422, 2019.
  18. Garimella, R. M., Singh, R. P., and Chilamkurti, N., "Wide band time optimal spectrum sensing," *International Journal of Internet Technology and Secured Transactions*, Vol. 10, No. 4, pp.454-480, 2020.
  19. Rama, K. S. S. and Thangavelu, A., "An early prevention method for node failure in wireless sensor networks," *International Journal of Internet Technology and Secured Transactions*, Vol. 10, No. 5, pp.507-537, 2020.
  20. Ayeswarya, R. and Prabha, N. A., "Performance evaluation of ICI self-cancellation schemes in fractional wavelet-based OFDM system," *International Journal of Internet Technology and Secured Transactions*, Vol. 10, No. 5, pp.552-564, 2020.
  21. Lee, J. H., "A study of memory device based on tunneling mechanism," *Journal of the Korean Society of Semiconductor & Display Technology*, Vol. 5, pp. 17-20, 2006.
  22. Lee, J. H. and Lee, H. J., "Thermal diffusion process modeling with adaptive finite volume method," *Journal of the Korean Society of Semiconductor & Display Technology*, Vol. 3, pp. 19-21, 2004.
  23. Lee, J. H. and Lee, H. J., "Three-dimensional analysis of self-heating effects in SOI device," *Journal of the Korean Society of Semiconductor & Display Technology*, Vol. 3, pp. 29-32, 2004.
- 
- 접수일: 2021년 8월 28일, 심사일: 2021년 9월 13일,  
게재확정일: 2021년 9월 13일