

전자파 잔향실의 필드 균일도 향상을 위한 가변형 스테러 특성 연구

김민혁^{*1)} · 홍현귀¹⁾ · 김준원²⁾ · 윤현복³⁾ · 조한슬³⁾ · 주영준³⁾

한국자동차연구원 전파환경기술부문¹⁾ · 한국자동차연구원 신뢰성 · 인증기술연구소²⁾ · 이레테크 전자파솔루션사업부³⁾

Study on the Characteristics of Adjustable Stirrer for Improving Field Uniformity in an Electromagnetic Reverberation Chamber

Minhyuk Kim^{*1)} · Hyun-Gwi Hong¹⁾ · JunWon Kim²⁾ · Hyunbok Yun³⁾ · Hanseul Cho³⁾ · Youngjun Ju³⁾

¹⁾EM Environment R&D Department, Korea Automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 31214, Korea

²⁾Reliability · Certification Research Laboratory, Korea Automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 31214, Korea

³⁾Electromagnetic Solution Department, Eletec Incorporated, 77 Gunpocheomdansaneop 2-ro, Gunpo-si, Gyeonggi 15880, Korea
(Received 25 July 2023 / Revised 23 August 2023 / Accepted 24 August 2023)

Abstract : This paper studies the electromagnetic characteristics inside an electromagnetic reverberation chamber by producing an adjustable stirrer designed to change the shape of the reflectors so as to affect the internal electromagnetic boundary conditions in the chamber. Once the stirrers are installed in a conventional electromagnetic reverberation chamber, the design variables that can affect electromagnetic field distribution are limited to tilting or the changing of the position of the antenna. In this paper, the uniformity results by varying the reflector of the adjustable stirrer were compared with the commonly used Z-shaped stirrer, confirming that the adjustable stirrer can easily improve field uniformity in an electromagnetic reverberation chamber.

Key words : Electromagnetic compatibility(전자기 적합성), Electromagnetic reverberation chamber(전자파 잔향실), Stirrer(교반기), Field uniformity(필드 균일도), Reflector(반사판)

Nomenclature

A	: area, m ²
E	: electric field, V/m
\ddot{E}	: normalized electric field, $\frac{V/m}{W^{0.5}}$
P	: average input power, W
σ	: standard deviation

1. 서론

전기 · 전자 기기들의 상호 간 원활한 사용을 위하여 제품의 상용화 전에는 반드시 Electromagnetic Compatibility (EMC)와 관련한 인증을 통과해야만 한다. 안전에 민감

한 자동차 산업에서도 EMC 문제는 부품에서 완성차까지 제품의 상용화를 위하여 반드시 해결해야 하기에 많은 연구가 진행되고 있다.^{1,2)} 현재 자동차 산업은 내연기관에서 전기, 수소 등의 친환경 자동차로의 거대한 플랫폼 변화 속에 있다. 또한, 5G, V2X, 자율주행 등 신기술의 도입을 위하여 많은 연구개발이 진행되고 있다. 따라서 기계장치에서 전자제품으로 변화하고 있는 자동차 산업에서 EMC 문제는 기존보다 훨씬 중요해지고 있다. 자동차 관련 국제 표준에서는 EMC 평가를 기준 시험 시설인 전자파 Semi-anechoic chamber(SAC)에서 진행한다.^{3,5)} 그러나 복사 내성 시험의 경우 악화된 전파 환경을 고려하기 위하여 전자파 잔향실을 이용한 시험법이 검토 및 도입되고 있다. 2010년 ISO는 부품 단위의 국제

*Corresponding author, E-mail: mhkim@katech.re.kr

[†]This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

표준을 제정하였고, 2023년에는 완성차 단위의 국제 표준을 공표하였다.^{6,7)} 이에 따라 국내의 많은 자동차 제조사에서도 이 시험법의 도입을 검토하거나 사용 중이다.

전자파 잔향실은 1960년대부터 연구가 시작되었다.⁸⁾ 기존 시험시설인 SAC와 다르게 흡수체를 사용하지 않기에 시험을 위한 장비의 구성이 간단하고 화재의 위험이 없다. 또한 시험을 위하여 교정하는 시간이 상대적으로 길지만, 평가 시간을 단축할 수 있다는 장점이 있다. 무엇보다도 특정 방향의 특정 편파만 고려할 수 있는 SAC 시험법과 다르게 모든 방향에서 임의의 편파에 대한 복사 내성 시험을 할 수 있기에 보다 현실적인 평가를 할 수 있다. 전자파 잔향실 측정·평가에 대한 기본 규격인 IEC 61000-4-21⁹⁾에서는 전기장의 균일도를 보장하는 영역인 작업 공간에서 Equipment under test(EUT)에 대한 EMC 평가를 하게 되어있는데 균일도의 확보가 쉬운 고주파 대역과 다르게 상대적으로 낮은 주파수에서는 균일도의 확보가 어렵다. 일반적으로 전자파 잔향실의 설계는 같은 크기일 때 높은 균일도와 큰 작업 공간, Lowest usable frequency(LUF)를 갖는 것을 목표로 한다. 이러한 설계 목표를 위하여 전자파 잔향실에서는 스테러를 사용한다.

스터러는 구조가 정해지면 발생하는 모드가 정해진 공동 공진기 형태의 전자파 잔향실에 임의의 편파가 발생할 수 있도록 전기장을 뒤섞어 주는 장치이다. 일반적으로 Z-형태가 주로 사용되지만, 프로펠러나 유전 알고리즘을 활용하여 설계된 복잡한 구조¹⁰⁾ 등 다양한 형태의 스테러도 확인할 수 있다. 기존의 연구에서는 스테러가 설치되면 전자파 잔향실 내에서 균일도에 변화를 줄 수 있는 변수가 극히 제한되었다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 스테러가 설치된 후에도 간단하게 구조를 변경할 수 있는 내용의 특허가 있다.^{11,12)}

본 논문에서는 가변형 스테러의 구조 변화에 따른 전자파 잔향실의 내부 전기장의 특성 변화에 대하여 연구하였다. 특허¹²⁾를 기반으로 전자파 잔향실 및 가변형 스테러를 제작하여 주파수에 따른 균일도의 변화를 확인하였다. 그리고 상용화되어 있는 전자파 잔향실과 스테러를 벤치마킹하여 제작한 결과와 비교하여 가변형 스테러의 활용 가능성을 확인하였다.

2. Field Uniformity

규격⁹⁾에서 전자파 잔향실 내의 균일도 산출을 위한 전계 측정의 일반적인 실험 구성은 Fig. 1과 같다. 작업 공간은 전자파 잔향실의 벽을 포함한 모든 금속 물질로부터 최소 λ/4 이상 떨어져야 한다. 여기서 λ는 LUF에서의 파장이다. 균일도는 작업 공간의 8개 모서리에서

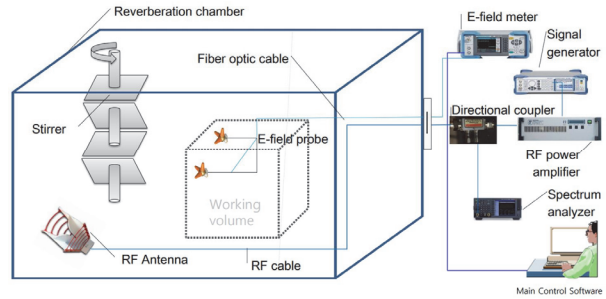


Fig. 1 Field uniformity measurements setup

Table 1 Field uniformity tolerance requirements⁹⁾

Frequency range (MHz)	Tolerance requirements for standard deviation
80 to 100	4 dB
100 to 400	4 dB at 100 MHz decreasing linearly to 3 dB at 400 MHz
above 400	3 dB

전기장 성분 E_x , E_y , E_z 의 각 측정값을 이용하여 계산한다. 각 지점에서 최대 전기장 측정값은 식 (1)을 사용하여 정규화한다.

$$\ddot{E}_{x,y,z} = \frac{E_{MAXx,y,z}}{\sqrt{P_i}} \quad (1)$$

여기서 $E_{MAXx,y,z}$ 는 스테러가 회전하며 프로브의 축별로 측정된 모든 결과 중 최댓값을 의미하고, P_i 는 스테러가 전자파 잔향실에서 회전하는 동안의 평균 입력 파워를 나타낸다. 그리고 $\ddot{E}_{x,y,z}$ 는 축별로 정규화한 최대 전기장을 의미한다.

주파수에 따른 균일도의 허용 한계는 Table 1과 같고, 여기서 표준 편차는 식 (2)로 계산된다.

$$\sigma_{x,y,z} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^8 (\ddot{E}_{i,(x,y,z)} - \langle \ddot{E}_{x,y,z} \rangle_8)^2}{8-1}} \quad (2-1)$$

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^8 \sum_{n=1}^3 (\ddot{E}_{m,n} - \langle \ddot{E}_t \rangle_{24})^2}{24-1}} \quad (2-2)$$

여기서 $\langle \ddot{E}_{x,y,z} \rangle_8$ 는 각 성분 에 대한 8개 모서리에서 측정된 정규화된 최대 전기장의 산술 평균이고, $\langle \ddot{E}_t \rangle_{24}$ 는 모든 성분에 대한 산술 평균이다. 최종적으로 표준

편차는 식 (3)과 같이 평균을 기준으로 표시하며 dB 단위로 변환해서 사용한다.

$$\sigma_{x,y,z,t}(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_{x,y,z,t} + \langle \ddot{E}_{x,y,z,t} \rangle}{\langle \ddot{E}_{x,y,z,t} \rangle} \right) \quad (3)$$

전계 균일도의 표준 편차는 Table 1의 허용 한계를 1 dB 초과하지 않는 범위 내에서 옥타브당 최대 세 개의 주파수까지 초과할 수 있다.⁹⁾

3. 실험 및 토의

Fig. 2는 보편적으로 사용하는 Z-형태의 스테러(ST_A)로 상용화된 제품을 벤치마킹하여 제작하여 결과 비교를 위하여 사용하였다. 각 반사판의 크기는 550 × 500 mm²이고 알루미늄 재질을 사용하였다. 가변형 스테러(ST_B)는 Fig. 3(a)와 같은 Fig. 2의 형태에서 각 반사판을 Fig. 3(b)와 같이 원형을 이용하여 변화할 수 있게 제작하였다. 반사판은 소프트웨어로 제어하며 1° 단위로 움직인다. 회전을 위하여 반사판의 크기는 550 ×



Fig. 2 Z-shape stirrer(ST_A)

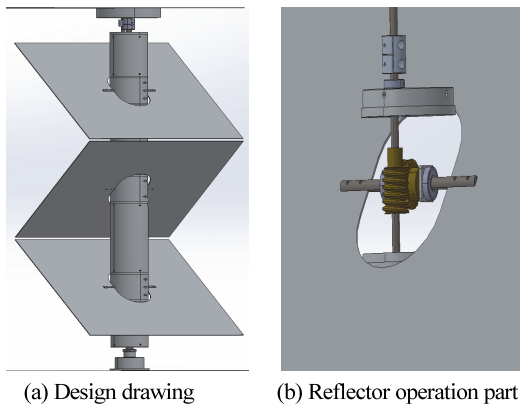


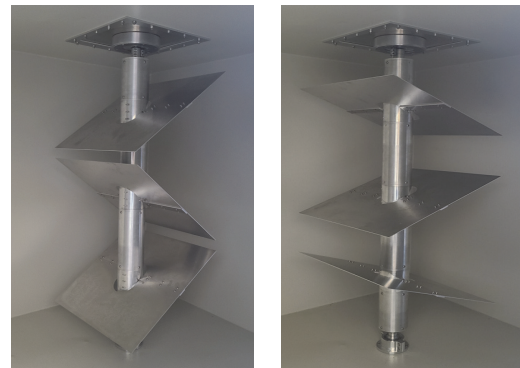
Fig. 3 Drawing of adjustable stirrer

485 mm²으로 ST_A와 대비해서 약간 작게 제작하였으며 같은 재질을 사용하였다. 실제 스테러가 제작된 형태는 Fig. 4에서 확인할 수 있다. Fig. 4(a)는 일반적인 Z-형태이고 Fig. 4(b)는 반사판의 형태를 변경한 스테러의 한 예이다. 스테러의 형상 변화에 따른 내부 전자기장의 변화를 확인하기 위하여 제작한 전자파 잔향실의 내부 크기는 2.7 × 1.5 × 1.3 m³으로 상용화 제품과 동일하게 제작하였다. 이 크기에서 잔향실의 LUF는 상용화 제품의 데이터시트에 500 MHz로 기재되어 있다. 본 연구에서는 LUF의 근처인 500 ~ 800 MHz의 전계를 50 MHz 단위로 측정하였다. 시험에 사용한 장비는 Table 2와 같으며 Fig. 1의 표준 시험 방법을 이용하여 장비를 배치하였다.

전자파 잔향실 내부의 공간 크기, 스테러의 이동 체적

Table 2 Test equipment list

Equipment	Manufacturer	Model number
Signal generator	Keysight	E8257D
Field probe	ETS Lindgren	HI-6053
Laser probe interface	ETS Lindgren	7000-011
Log-periodic antenna	ETS Lindgren	3148B
Spectrum analyzer	Keysight	N9040B



(a) Typical shape (b) Variation example

Fig. 4 Adjustable stirrer(ST_B)

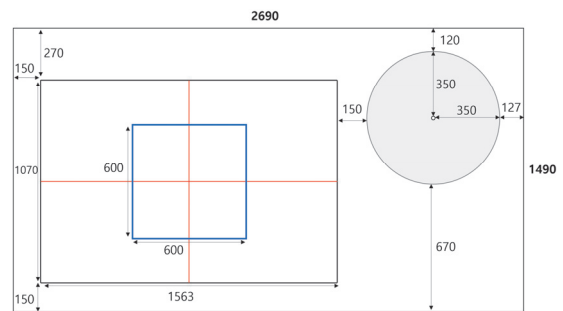


Fig. 5 Plan view in the z-axis of reverberation chamber

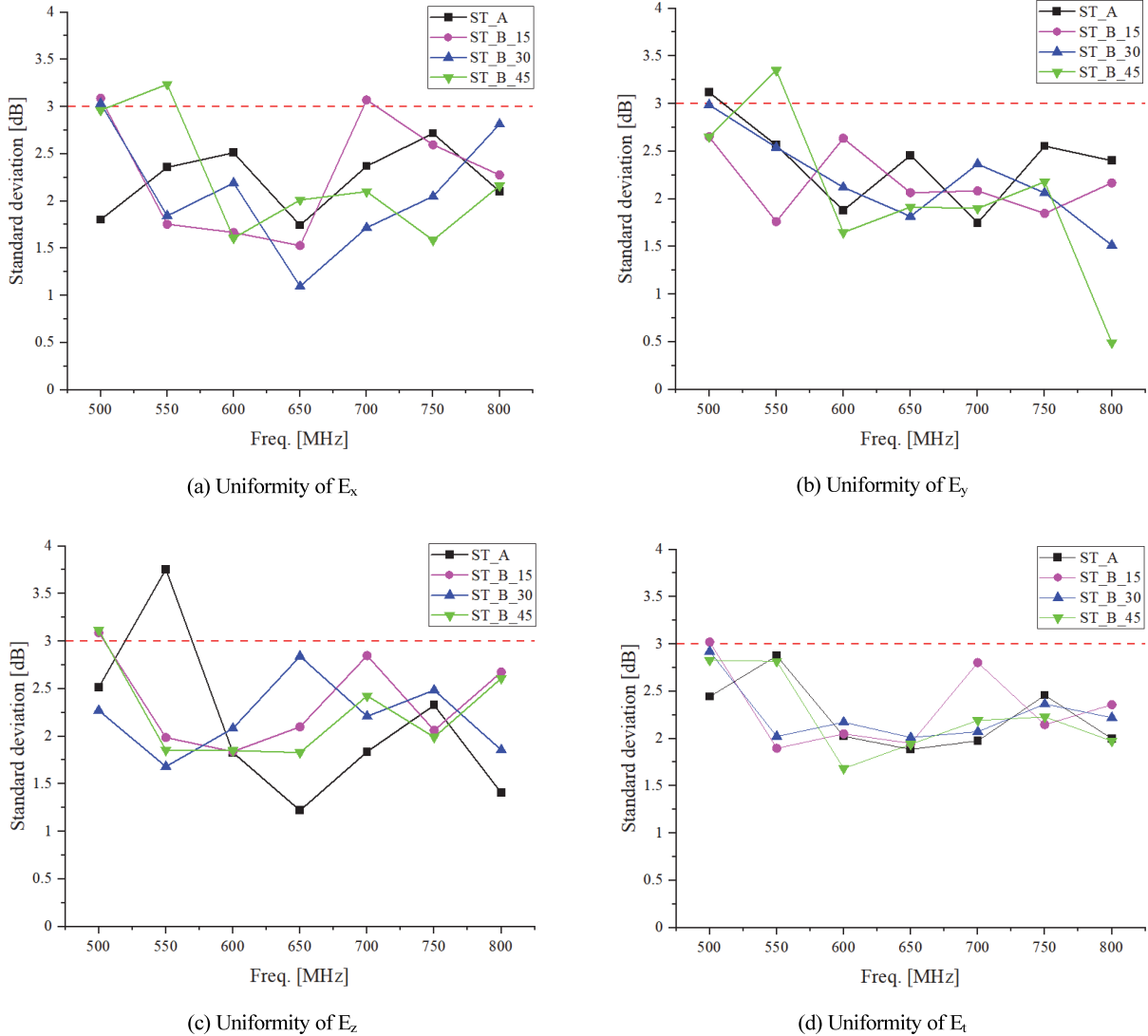


Fig. 6 Field uniformity comparisons

및 위치, 작업 공간의 크기 및 위치를 나타내기 위하여 제작한 잔향실의 z축 방향 평면도를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 모든 단위는 mm이고, 원은 스테러가 회전할 때의 넓이, 청색 정사각형은 작업 공간을 나타낸다.

실험에서 ST_A와 ST_B는 회전축을 기준으로 30° 단위로 회전하여 총 12번의 스테러 회전에 대한 전체 측정을 하였다. 추가로 ST_B의 반사판의 회전축을 기준으로 15° 단위로 변경하며 측정하였다. Fig. 6은 두 스테러를 이용한 전체의 각 성분 E_x , E_y , E_z 와 전체 성분을 고려한 E_t 의 표준편차를 나타낸다.

Fig. 6에서 빨간 점선은 표준의 허용 한도이다.⁹⁾ Fig. 6(a)-(d)의 결과와 같이 적어도 하나 이상의 주파수에서 표준의 허용 한도를 벗어나는 결과를 확인하였다. 특히 ST_A는 Fig. 6(b)과 Fig. 6(c)에서 표준의 허용 한도를

500 MHz와 550 MHz에서 넘었는데 ST_A를 사용하여 전자파 잔향실을 교정하기 위해서는 안테나의 위치나 조향 각도를 수정한 후 모든 주파수에서 새롭게 교정을 진행해야 한다. 그와 반대로 ST_B를 이용한 실험에서는 특정 주파수에서 실험한 모든 각도가 허용 한도를 넘는 경우가 없었다. 따라서 전자파 잔향실의 교정 시 반사판의 각도를 조절하는 것만으로도 표준의 요구치를 만족할 수 있어 ST_A에 비하여 교정 시간을 단축할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 전자파 잔향실의 하한 주파수를 낮추고, 교정 시간을 단축하기 위하여 내부 전자기 경계 조건에 영향을 줄 수 있도록 제안된 가변형 스테러 특허의

효용성을 확인하였다. 검증을 위하여 상용화 제품을 벤치마킹한 전자파 잔향실과 가장 많이 활용하는 Z-형태의 스테리를 벤치마킹하여 제작하였고, 제작한 스테리와 유사한 크기를 갖는 가변형 스테리를 설계 및 제작하여 전계를 측정하였다. 표준편차를 계산한 전계 균일도 비교 결과에서 가변형 스테리는 모든 주파수에서 규격의 허용 한도를 만족하지 못해 다시 교정해야 하는 기존의 스테리와는 다르게 반사판의 각도 조절만으로 규격⁹⁾에서 요구하는 전계 균일도를 만족하였다. 본 논문의 연구 결과는 연구에 사용한 Z-형태의 스테리뿐만 아니라 다른 형태의 스테리의 활용에도 적용할 수 있다.

후 기

본 연구는 대한민국 정부(산업통상자원부 및 방위사업청) 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다(협약 번호 21-SF-EC-02).

References

- 1) S. Yun, C. Park, C. Lee, S. Kim, M. Yang, D. Kim and J. Yoo, "The Effect of EMC by Metal Cover and Noise Reduction Method," Transactions of KSAE, Vol.22, No.3, pp.143-147, 2014.
- 2) Y. Kim, Y. Yoon, H. Jung, J. Gohng and S. Lee, "Study of EMI Suppression Method Applied on DC Motor Driver of Power Tail Gate," Transactions of KSAE, Vol.16, No.1, pp.1-7, 2008.
- 3) CISPR 16-1-4 Ed.4.0, Specification for Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus and Methods - Part 1-4: Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus - Antennas and Test Sites for Radiated Disturbance Measurements, International Electrotechnical Commission, 2019.
- 4) CISPR 16-2-3 Ed.4.0, Specification for Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus and Methods - Part 2-3: Methods of Measurement of Disturbances and Immunity - Radiated Disturbance Measurements, International Electrotechnical Commission, 2016.
- 5) CISPR 16-2-4 Ed.1.0, Specification for Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus and Methods Part 2-4: Methods of Measurement of Disturbances and Immunity Measurements, International Electrotechnical Commission, 2003.
- 6) ISO 11451-5, Road Vehicles — Vehicle Test Methods for Electrical Disturbances from Narrowband Radiated Electromagnetic Energy — Part 5: Reverberation Chamber, International Organization for Standardization, 2023.
- 7) ISO 11452-11, Road Vehicles — Component Test Methods for Electrical Disturbances from Narrowband Radiated Electromagnetic Energy — Part 11: Reverberation Chamber, International Organization for Standardization, 2010.
- 8) J. Yousaf, W. Nah, M. I. Hussein, J. G. Yang, A. ALTAF and M. Elahi, "Characterization of Reverberation Chamber - A Comprehensive Review," IEEE Access, Vol.8, pp.226591-226608, 2020.
- 9) IEC 61000-4-21 Ed.2.0, Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-21: Testing and Measurement Techniques - Reverberation Chamber Test Methods, International Electrotechnical Commission, 2011.
- 10) J. Tang, F. Li, J. Zheng, X. Chen, Y. Li and J. Chen, "A New Mode Stirrer Design for the Reverberation Chamber," The Applied Computational Electromagnetics Society Journal, Vol.36, No.9, pp.1182-1188, 2021.
- 11) J. Kim, K. Lee and J. Kim, Stirrer System in Reverberation Chamber, 2014.
- 12) H. Yun, Y. Ju and Y. Han, Stirrer System in Reverberation Chamber, 2023.