



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

광원추적법 기반 전자파 잔향실의
전자기장 균일도 해석

Electromagnetic Field Uniformity Analysis in
Reverberation Chamber based on Ray Tracing Method

2021년 2월

서울대학교 대학원

전기·정보공학부

이재중

광원추적법 기반 전자파 잔향실의 전자기장 균일도 해석






Electromagnetic Field Uniformity Analysis in
Reverberation Chamber based on Ray Tracing Method

지도 교수 한 승 용

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함
2021년 2월

서울대학교 대학원
전기·정보공학부
이 재 중

이재중의 박사 학위논문을 인준함
2021년 2월

| | | |
|------|-------|--|
| 위원장 | 오 정 석 |  |
| 부위원장 | 한 승 용 |  |
| 위원 | 정 현 교 |  |
| 위원 | 정 용 식 |  |
| 위원 | 강 노 원 |  |

국문 초록

본 논문에서는 전자파 잔향실 (RC: Reverberation Chamber) 내부 시험 영역 (WV: Working Volume)에 대하여 전자기장 균일도를 잔향실의 구조, 소스 안테나의 위치 및 방향에 대해 광원 추적법을 기반으로 해석하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 기존의 모멘트법 (MOM: Method of Moment)이나 유한요소법 (FEM: Finite Element Method)과 같은 수치해석기법 보다 월등하게 빠른 속도로 내부 전자기장 균일도를 계산할 수 있다. 이 방법에 대한 검증을 위해 상용 해석 프로그램을 이용하여 전자파 잔향실의 시험 영역에서 전자기장 균일도 (FU: Field Uniformity)를 시뮬레이션 하였고, 이 결과와 제안된 방법을 통해 계산된 전자기장 균일도를 비교하였다. 그 후 시뮬레이션 및 계산에 사용된 실제 전자파 잔향실에서 전자기장 균일도를 측정하여 결과를 검증하였다.

전자파 잔향실은 금속 공진기 형태로 이루어져 있으며, 내부에 모드(mode)를 섞어 전자파의 분포가 통계적으로 균일한 상태를 만드는 것이 목적이다. 이를 위해 기계적 혹은 전기적으로 모드를 섞어주는데, 일반적으로 금속 판을 여러 개 조합하여 만들어진 교반기(Stirrer)가 내부에 배치된다. 또한 내부에서 전자파를 발생시키는 안테나가 배치되며 안테나에서 전자파를 방사할 때 안테나의 방향을 정하는 기준은 없다. 현재까지는 대부분 반사가 많이 될 수 있는 쪽으로, 즉 공진기의 모서리 방향으로 전자파를 방사할 수 있게끔 시험자가 임의로 안테나의 방향을 정하는 상황이다.

전자파 잔향실 내부에 전자기장이 균일하게 형성되기 위한 방법으로 광원 추적법의 경로 추적 알고리즘을 적용하였다. 전자파는 직진하며 금속에 부딪혔을 때 호이겐스의 원리(Huygens' principle)에 따라 그 점을 기반으로 새롭게 방사하지만, 그 중 주요 진행방향에 대해 반사된 주요 선로만을 선택하여 계산시간을 단축시켰다. 이 방법을 기반으로 시험 영역에서 전자기장 균일도를 측정하는 위치(육면체 체적인

시험영역의 8개의 모서리)를 지나가는 빔을 파악할 수 있으며, 이렇게 파악된 경로의 정보를 통해 금속 평면에 대한 경계조건을 적용하여 대략적인 전자기장의 분포와 전자기장 균일도를 계산하였다.

일반적으로 전자파 잔향실의 크기는 피시험기기 (EUT: Equipment Under Test)가 들어가야 하기 때문에 수 미터(m)단위의 크기를 갖는다. 이 크기는 1GHz아래 대역에서도 파장대비 상당한 크기이며, 이런 환경을 해석하기 위해서는 사용 가능한 최저 주파수(LUF: Lowest Usable Frequency)가 300MHz인 환경에서도 상당한 계산량을 요구한다. 더욱이 CAD(Computer Aided Design) 데이터를 이용하여 시간에 따라 교반기가 움직이는 현상을 해석해야 하기 때문에 매 단계마다 다른 요소를 분할하여 분석해야 한다. 이런 상황에 수치해석 기법을 적용하면 단계별로 상당량의 요소를 할당해야 하기 때문에 모든 단계를 해석하려면 상당한 계산시간을 요구하게 된다. 반면, 광원 추적법을 기반으로 한 제안된 방법을 이용하면 해석영역 내에서 오직 우리가 관심있는 영역을 지나는 광원만을 추적하면 되기 때문에 내부 전자기장의 균일도를 빠르게 파악할 수 있다. 이 방법을 기반으로 설계된 전자파 잔향실에 안테나 소스를 어떤 위치에 어떤 방향으로 배치해야 전자기장의 균일도가 향상되는지 알아 낼 수 있다.

광원추적법에 기반한 제안된 알고리즘의 신뢰성은 그린함수 (Green's function)를 알고 있는 구조의 계산결과와의 비교를 통하여 확보되었고, 실제 3차원 모델의 교반기가 포함된 전자파 잔향실에 적용하여 전자기장 균일도를 해석하였다. 이 계산된 결과와 잔향실에 대한 측정 결과를 비교하여 논문에 제시하였으며, 제안된 알고리즘으로 전자기장 균일도를 기존의 방법 대비 최소 3배이상 빠르게 얻어 낼 수 있음을 확인하였다.

주요어 : 전자파 잔향실(Reverberation Chamber), 전자기장 균일도(Field Uniformity), 시험 영역(Working Volume), 광원 추적법(Ray Tracing). 전자파 시뮬레이션(Electromagnetic simulation)

학 번 : 2014-30313

목 차

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 국문 초록 | i |
| 목 차 | iii |
| 그림 목차 | iv |
| 표 목차 | vi |
| 기호 및 약어 설명..... | vii |
| | |
| 제 1 장 서 론..... | 1 |
| 1.1 연구의 배경 및 필요성 | 1 |
| 1.2 논문 구성 | 10 |
| | |
| 제 2 장 전파 잔향실..... | 12 |
| 2.1 전파 잔향실의 개요 | 12 |
| 2.2 기계적 /전기적 모드 교반 기법 | 26 |
| 2.2.1 기계적 모드 교반 기법 | 26 |
| 2.2.2 전기적 모드 교반 기법 | 34 |
| | |
| 제 3 장 광원추적법 기반 전자파 잔향실의 균일도 해석..... | 43 |
| 3.1 광원 추적법 개요 및 적용범위 | 43 |
| 3.1.1 광원 추적법 개요..... | 43 |
| 3.1.2 광원 추적법 적용 범위..... | 47 |
| 3.2 광원 추적법을 적용한 균일도 해석기법 | 56 |
| 3.2.1 편파 | 57 |
| 3.2.2 전자기장 균일도 측정방식 및 계산방식 | 64 |
| 3.2.3 빔의 밀도..... | 70 |
| 3.3 전자파 잔향실의 전자기장 균일도 해석 | 73 |
| 3.3.1 광원 추적법 기반 해석 방법의 1차원 적용 | 73 |
| 3.3.2 광원 추적법 기반 해석 방법의 2차원 적용 | 77 |
| 3.3.3 전자파 잔향실의 3차원 광원 추적법 기반 해석 | 82 |
| | |
| 제 4 장 실험 및 시뮬레이션 결과 | 87 |
| 4.1 전파 잔향실의 제원 | 87 |
| 4.2 전파 잔향실 실험 결과 및 시뮬레이션 결과 비교..... | 91 |
| 4.3 시험 영역의 전자기장 균일도 해석 결과 | 96 |
| | |
| 제 5 장 결론 및 향후 연구 계획 | 101 |
| 5.1 결론 | 101 |
| 5.2 향후 연구계획 | 103 |
| | |
| 참고문헌 | 104 |
| Abstract | 115 |

그림 목차

| | |
|--|----|
| 그림 1.1. 일반적인 야외 시험장의 구조 | 3 |
| 그림 1.2. 실제 야외 시험장의 예시 | 3 |
| 그림 1.3. 상용되고 있는 TEM셀 | 4 |
| 그림 1.4. 다양한 형태의 흡수체 및 전자파 무반사실 | 5 |
| 그림 1.5. 전자파 잔향실과 교반기 | 6 |
| 그림 2.1. 일반적인 전자파 잔향실 구조 | 12 |
| 그림 2.2. 주파수 교반법을 이용한 잔향실 내부 전기장 | 14 |
| 그림 2.3. 고정된 선의 고유 진동 | 17 |
| 그림 2.4. 전자기장 균일도의 제한치 | 19 |
| 그림 2.5. 군사 규격에서 처음 소개된 전자파 잔향실 개념 | 25 |
| 그림 2.6. Z-fold형태의 교반기 사진 | 27 |
| 그림 2.7. Bent-plates 교반기 사진 | 28 |
| 그림 2.8. 불규칙성 패턴을 갖는 교반기 | 30 |
| 그림 2.9. 줄에 걸려 있는 VIRC | 32 |
| 그림 2.10. 2차원 전자파 잔향실과 안테나 및 시험 영역 | 35 |
| 그림 2.11. 대역폭 (a) 1MHz (b) 5MHz (c) 10MHz의 교반된 전기장 | 37 |
| 그림 2.12. 여러 개의 안테나로 여기된 전자파 잔향실 | 39 |
| 그림 2.13. 임의의 가중치가 적용된 다중 안테나의 전기장 | 39 |
| 그림 2.14. 조정된 가중치가 적용된 다중 안테나의 전기장 | 40 |
| 그림 3.1. 광원 추적법 알고리즘의 개념도 | 44 |
| 그림 3.2. 광원 추적법 알고리즘의 수도코드 | 45 |
| 그림 3.3. 광원추적법이 적용된 그림 | 46 |
| 그림 3.4. 특정 벽면에 대한 입사파와 반사파 | 49 |
| 그림 3.5. 3차원 구 좌표계 | 51 |
| 그림 3.6. 특정 방향의 전자파와 잔향실이 만나는 점 | 53 |
| 그림 3.7. 전자파 잔향실에서 반복적으로 반사되는 빔 | 54 |
| 그림 3.8. 횡방향 전개 모드 | 58 |
| 그림 3.9. 고각과 방위각에 따른 진행 방향과 그 편파 | 59 |
| 그림 3.10. 금속 평면에 입사하는 전자파 | 60 |
| 그림 3.11. 수평편파의 반사 | 62 |
| 그림 3.12. 전자파 잔향실과 시험영역, 그리고 계산을 위한 구 영역 | 65 |
| 그림 3.13. 3차원에서 점과 직선사이의 관계 | 66 |
| 그림 3.14. 시험영역의 모서리에 형성된 구 영역을 지나는 직선 | 68 |
| 그림 3.15. 한 점에서 방사한 두 개의 빔 | 71 |

| | |
|---|----|
| 그림 3.16. 1차원 공진기에서 양 쪽으로 진행하는 파..... | 74 |
| 그림 3.17. 1차원 공진기의 1번째 모드 | 75 |
| 그림 3.18. 안테나 위치에 따른 내부 전기장 분포 변화 | 76 |
| 그림 3.19. 처음 9개 모드에 대한 전자기장 분포 | 78 |
| 그림 3.20. 광원 추적법을 이용한 2차원 공진기 해석 | 79 |
| 그림 3.21. 광원 추적법을 이용한 2차원 공진기 해석 결과 (1차원) | 80 |
| 그림 3.22. 광원 추적법을 이용한 2차원 공진기 해석 결과..... | 81 |
| 그림 3.23. 3차원 전자파 잔향실과 내부 교반기의 모델링 | 82 |
| 그림 3.24. 광원 추적법을 이용한 전파의 경로 예측 | 83 |
| 그림 3.25. 여러 각도에 대한 추적 해석 | 84 |
| 그림 3.26. 일반적인 Log periodic 안테나의 빔패턴 | 85 |
| 그림 4.1. 실험에 사용된 전자파 잔향실 | 87 |
| 그림 4.2. 전자기장 균일도 측정 테스트 셋업 | 88 |
| 그림 4.3. 상용 프로그램을 이용한 전자파 잔향실 모델..... | 91 |
| 그림 4.4. 전자파 잔향실의 시험 영역..... | 92 |
| 그림 4.5. 시험영역의 특정 평면에서 계산한 전기장 분포 | 93 |
| 그림 4.6. 전자기장 균일도 측정결과 | 94 |
| 그림 4.7. 전자기장 균일도의 비교, 측정 vs 시뮬레이션 | 95 |
| 그림 4.8. 전자기장 균일도. 측정, 시뮬레이션, 제안된 방법 | 99 |

표 목차

| | |
|---|-----|
| 표 2.1. 다른 위치에서 측정된 전기장의 통계적 특성 | 15 |
| 표 2.2. 그림 2.13과 2.14에서 적용된 안테나 가중치 | 41 |
| 표 3.1. 길이 $a = 3.4$ 인 1차원 공진기에서 공진주파수 | 74 |
| 표 3.2. 길이 $a = 3.4$, $b = 4$ 인 2차원 공진기에서 공진주파수 | 77 |
| 표 4.1. 시험 장비 제원 | 89 |
| 표 4.2. 광원 추적법을 사용하여 얻은 점 데이터 구조 | 96 |
| 표 4.3. 광원 추적법을 사용하여 얻은 선 데이터 구조 | 97 |
| 표 4.4. 광원 추적법을 사용하여 얻은 편파 데이터 구조 | 98 |
| 표 4.5. 시뮬레이션과 제안된 방법의 계산 시간 | 100 |

기호 및 약어 설명

| | |
|--------------------------|-------------------------|
| \bar{E}_{\max} | 최대 전기장 벡터 |
| \bar{E} | 정규화 된 전기장 벡터 |
| P_{in} | 평균 입력 전력 |
| E_x | 정규화된 전기장벡터의 x 축 방향 성분 |
| E_y | 정규화된 전기장벡터의 y 축 방향 성분 |
| E_z | 정규화된 전기장벡터의 z 축 방향 성분 |
| $E_{\max,x}$ | 최대 전기장 벡터의 x 축 방향 성분 |
| $E_{\max,y}$ | 최대 전기장 벡터의 y 축 방향 성분 |
| $E_{\max,z}$ | 최대 전기장 벡터의 z 축 방향 성분 |
| σ_x | x 축 방향의 정규화 된 표준편차 |
| σ_y | y 축 방향의 정규화 된 표준편차 |
| σ_z | z 축 방향의 정규화 된 표준편차 |
| $\langle E \rangle_8$ | 8개 위치에 대한 전기장의 평균값 |
| P | 시험영역의 모서리 개수 |
| σ_{all} | 정규화된 표준편차 |
| $\langle E \rangle_{24}$ | 24개 전계의 평균값 |
| $\sigma_{all}(dB)$ | 데시벨 형태의 정규화된 표준편차 |
| $\sigma_x(dB)$ | 데시벨 형태의 x 축 방향 정규표준편차 |
| $\sigma_y(dB)$ | 데시벨 형태의 y 축 방향 정규표준편차 |
| $\sigma_z(dB)$ | 데시벨 형태의 z 축 방향 정규표준편차 |
| r | 상관 계수 |
| μ | 상관계수 계산 시 측정된 데이터의 평균 |
| A | 평면의 방정식의 변수 x 의 계수 |
| B | 평면의 방정식의 변수 y 의 계수 |
| C | 평면의 방정식의 변수 z 의 계수 |
| D | 평면의 방정식의 상수 |
| $ \cdot $ | 행렬식 계산 연산자 |
| $\hat{d}_{vec.1}$ | 반사면에 입사하는 방향의 방향 벡터 |
| $\hat{d}_{vec.2}$ | 반사된 빔의 방향 벡터 |
| θ_i | 입사각 |
| \hat{n} | 평면의 법선 벡터 |
| θ | 고각 |
| ϕ | 방위각 |
| P | 3차원 직선의 방정식 벡터 |

| | |
|---|-----------------------------|
| P_I | 직선상의 한 점 |
| $u_{\text{intersect}}$ | 직선과 평면의 교점에 대한 매개 변수 |
| $P_{\text{intersect}}$ | 교점의 점 벡터 |
| ϵ_{rc} | 계산 오차를 방지하기 위한 상수 |
| \mathbf{r} | 벡터의 진행 방향 |
| \mathbf{E}_p | 편파 벡터 |
| \mathbf{k} | 파수 벡터 |
| \mathbf{E} | 전기장의 벡터 방정식 |
| $\hat{\mathbf{n}}_{\text{plane}}$ | 평면의 법선 벡터 |
| $\hat{\mathbf{n}}_{\text{perpendicular}}$ | 입사 평면에 수직한 단위 벡터 |
| $\mathbf{E} _i$ | i 번째 반사되어 진행하는 전기장 벡터 |
| $\mathbf{E}_p _i$ | i 번째 반사되어 진행하는 전기장의 편파 벡터 |
| $\hat{\mathbf{a}}_d$ | i 번째 전자파의 진행 방향 |
| Γ | 반사 계수 |
| f_m | m 번째 공진 주파수 |

| | |
|-------|---|
| RC | Reverberation Chamber |
| WV | Working Volume |
| MoM | Method of Moment |
| FEM | Finite Element Method |
| FU | Field Uniformity |
| EUT | Equipment Under Test |
| LUF | Lowest Usable Frequency |
| CAD | Computer Aided Design |
| EMC | Electromagnetic Compatibility |
| EMI | Electromagnetic Interfere |
| EMS | Electromagnetic Susceptibility |
| RE | Radiated Emission |
| CE | Conducted Emission |
| RS | Radiated Susceptibility |
| CS | Conducted Susceptibility |
| IEC | International Electrotechnical Commission |
| CISPR | International Special Committee on Radio Interference |
| TEM | Transverse Electromagnetic |
| AC | Anechoic Chamber |
| NIST | National Institute of Standards and Technology |
| FDTD | Finite Difference Time Domain |
| PO | Physical Optics |
| GO | Geometrical Optics |

| | |
|---------|-----------------------------------|
| UTD | Uniform Theory of Diffraction |
| SE | Shielding Effectiveness |
| MIL-STD | Military Standard |
| GA | Genetic Algorithm |
| VIRC | Vibrating Intrinsic RC |
| CW | Continuous Wave |
| BLWGN | Band limited White Gaussian Noise |
| MAS | Multi-Antenna Stirring |
| RT | Ray Tracing |
| TE | Transverse Electric |
| TM | Transverse Magnetic |
| FP | Field Probe |
| FPM | Field Probe Mast |
| FPMJ | Jig for FPM |
| Src | Rf source |
| PC | Personal Computer |
| PS | Power Sensor |
| PM | Power Meter |
| Tx Ant | Transmit Antenna |
| Rx Ant | Receive Antenna |
| DC | Directional Coupler |
| Amp | Amplifier |
| T | Terminal |

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 필요성

현대 사회에서는 수많은 전자제품이 공존하는 환경이 빈번하게 발생한다. 유무선 통신기기, 전기제어기기, 무인 비행체, 재머 등과 같은 대부분의 최첨단 기기들은 밀집도가 높은 반도체 부품들이 조합되어 만들어 지고 있으며 이들 간의 상호 간섭으로 인해 원래 목적에 맞지 않는 오동작을 일으키기도 한다. 이렇게 전자파환경이 악화되는 상황에서 각각의 기기들이 정상적으로 동작하기 위한 최소한의 환경을 갖추기 위해 많은 국제 표준에서 가이드 라인을 제시하고 있다[1] - [11]. 같은 전자파 환경에 노출되었을 때 해당 전자기기가 다른 전자기기에 영향을 주는 노이즈원(noise source)이 되어서는 안되며, 다른 전자기기에서 방출되는 전자파에 영향을 받아 오작동을 일으키지 않아야 한다. 이런 전자파 양립성(EMC: Electromagnetic Compatibility)을 만족하기 위해서는 해당 장비 및 기기가 전자파 장해(EMI: Electromagnetic Interfere)를 일으키지 않으며, 이 전자파 장해로부터 견딜 수 있는 전자파 내성(EMS: Electromagnetic Susceptibility)을 확보해야 한다[8] - [16].

아무리 잘 동작하고 최신기능을 갖추고 있는 전자 제품이라고 해도 전자파 규격을 만족시키지 않는다면 다른 기기들과 혼용이 불가능하며, 특정 상황에서 전자적으로 매우 취약 해 질 수 있기 때문에 설계 단계에서부터 EMC를 고려 해야 한다. 이런 이유로 많은 회사 및 연구소에서도 설계 단계에서부터 전자파 적합성을 고려하고 제품이 완성된 후에도 EMC 실험을 진행하여 EMI 및 EMS 확보를 위한 노력을 하고 있다.

국제 표준에서 제시하는 EMC 측정방법은 크게 두 가지로 분류된다. 먼저 해당 전자기기가 노이즈원이 되지 않도록 전자파 방출량을

측정하는 EMI실험이 있다. EMI는 간섭을 일으키는 경로에 따라 또 다시 두가지로 구분할 수 있는데 전자파 형태로 방사하는 복사성 방출(RE: Radiated Emission)과 전원선 혹은 신호선과 같은 금속을 타고 방사하는 전도성 방출(CE: Conducted Emission) 측정이 있다. 두 번째 측정방법은 의도적으로 전자기기를 전자적으로 나쁜 환경에서 얼마나 견딜 수 있는지를 측정하는 EMS실험이 있다. EMI실험과 유사하게 각각 복사성 내성(RS: Radiated Susceptibility)와 전도성 내성(CS: Conducted Susceptibility) 측정으로 구분된다. 각각의 분야에 해당하는 국제 표준은 IEC61000 시리즈나, CISPR-11~23 등에서 용어의 설명, 기초 개념 및 실험방법들을 제시하고 있다[2][3][6]. EMC 측정을 방법은 시험 장비의 크기, 시험 주파수의 범위 및 장비의 사용 목적 외에도 다양한 조건에 따라 결정된다. 이 중 본 논문에 해당하는 연구는 복사성 방출 측정 및 복사성 내성 측정에서 사용되는 전자파 잔향실에 대한 연구이다. 복사성 방출 측정과 복사성 내성을 측정하는 방법은 여러가지가 있는데 다음과 같이 정리할 수 있다.

1) 야외 시험장 (Open Area Test Site)

먼저 야외 시험장은 한적한 장소에 측정 안테나와 노이즈원을 배치하여 구성하며 여러 복사성 방출 측정 방법 들 중 가장 저렴하고 단순하게 시험장을 구성할 수 있다. 하지만 외부에서 측정을 진행하여 날씨에 매우 민감하며, 주변에 송전선로와 같은 전자파 환경에 영향을 받기 때문에 이 시험장에서 사용하는 안테나의 경우 보정 시험(calibration test) 역시 민감하게 진행되어야 한다. 이상적인 야외시험장은 완벽하게 전도된 평면상에서 진행되어야 한다. 아래 그림은 야외시험장의 개략도와 실제 야외 시험장에 대한 사진이다. 구성이 쉬운 대신 날씨, 측정 안테나의 교정 등을 확실하게 진행해야 시험의 재현성을 확보할 수 있다[17] - [20].

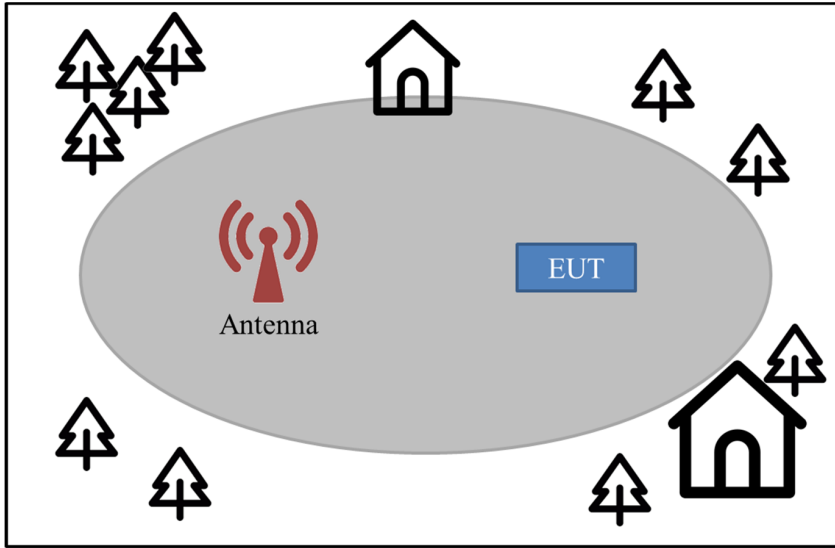


그림 1.1. 일반적인 야외 시험장의 구조

Fig 1.1. A sketch of typical open area test site



그림 1.2. 실제 야외 시험장의 예시[21]

Fig 1.2. Example of open area test site [21]

2) TEM (Transverse Electromagnetic) 셀

TEM셀은 광대역 표준 전자기장을 생성하고 복사 전력을 측정하는 장치로, 1970년대에 미국 NBS 연구실에서 개발되었으며 현재까지 EMI 및 EMS시험에 널리 사용되고 있다. 기본적으로 도체로 만들어진 공진기 구조이며, 내부에 평면파를 만들기가 쉽고 이동 가능하며 비교적 제작비용도 적게 드는 편이다. 하지만 피시험장비(EUT: Equipment Under Test)를 TEM셀에 넣어서 측정하는 형태이다 보니 TEM셀의 크기보다 큰 시험장비는 측정이 불가능하다는 단점이 있다. 그림 1.3은 보통 사용되는 상용의 TEM셀의 실제 사진과 내부에 발생하는 전자기장의 패턴을 보여주고 있다[22] - [27].

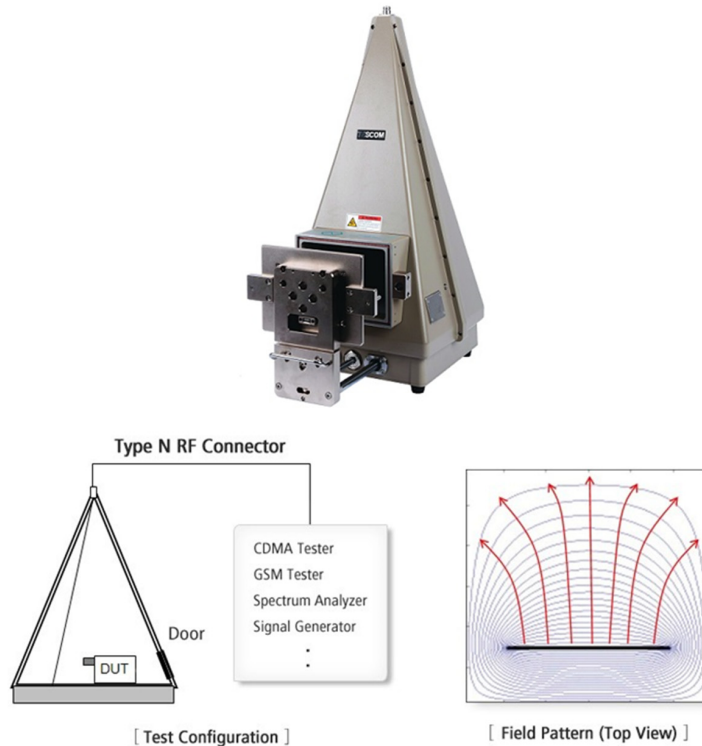


그림 1.3. 상용되고 있는 TEM셀 [24]

Fig 1.3 Commercially available TEM cells [24]

3) 전자파 무반사실 (AC: Anechoic Chamber)

전자파 무반사실은 야외시험장의 단점을 개선하고자 나온 방법으로, 육면체 구조의 공간의 각 벽면에 전자파 흡수체를 설치하여 각 경계에서 열린 경계조건(open boundary condition)을 만족시키는 공간이다. 비교적 측정결과가 정확하고 재현성이 좋으며, 외부와 차폐된 공간이기 때문에 외부 전자파 영향을 받지 않는다. 하지만 무반사실은 벽면의 전자파 흡수체 때문에 제작 비용이 많이 들며 유지보수비용 또한 많이 소요된다. 더욱이 전자기장의 균일공간이 좁아서 큰 장비에 대한 실험에 있어서는 장비의 크기 대비 더 큰 무반사실을 요구한다. 실제 환경에서 동작하는 장비들은 아무런 방해가 없는 공간이 아닌 다양한 전자파 상태가 공존하는 상황에서 동작한다. 따라서 최근 연구에서도 무반사실에서의 측정이 현실적인 측정이 아니라는 비판이 많이 나오고 있는 추세이다[28] - [31]. 다음 그림 1.4는 다양한 형태의 흡수체의 사진과 국립전파연구원 전파인증센터의 전자파 무반사실의 사진이다[32].

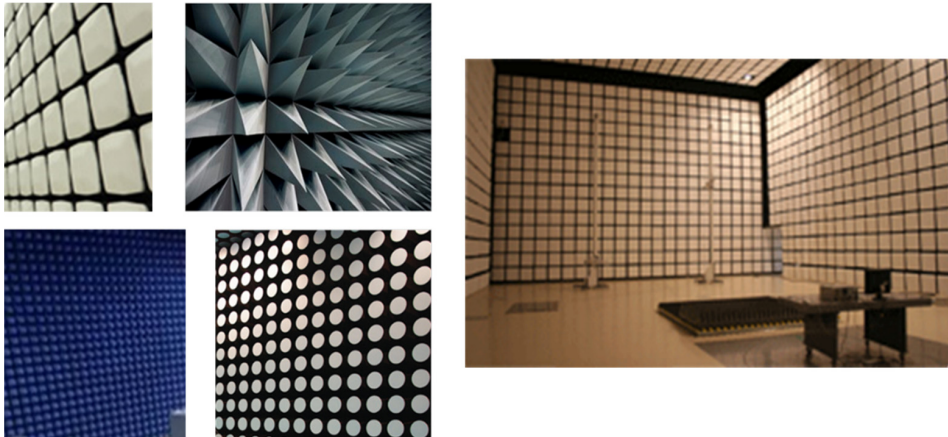


그림 1.4. 다양한 형태의 흡수체 및 전자파 무반사실[32]

Fig 1.4 Various types of absorbers and anechoic chamber [32]

4) 전자파 잔향실 (RC: Reverberation Chamber)

전자파 무반사실을 대체하기 위한 방법으로 전자파 반향실이 활용되고 있다. 이는 미국 국립표준기술연구소(NIST: National Institute of Standards and Technology)에서도 전자파 장애 및 복사성 내성 측정의 대응 시설로 사용 가능하다고 발표되었다. 전자파 잔향실은 기존의 전자파 무반사실에 비해 가격이 저렴하며 유지 보수가 비교적 쉽고, 상한 주파수의 제한이 없다는 장점이 있다[34] [35]. 아래 그림 1.5는 일반적인 전자파 잔향실의 구조와 내부에 존재하는 교반기(Stirrer)의 모습이다. 사진에서는 수평 교반기와 수직 교반기를 이용하였으며, 보통은 제어의 편의성을 위해 두 개의 교반기를 동시에 조정한다. 더 좋은 전자기장 균일도를 위해서 두 교반기의 회전하는 단계를 일정하게 하지 않는 경우도 존재한다[36].

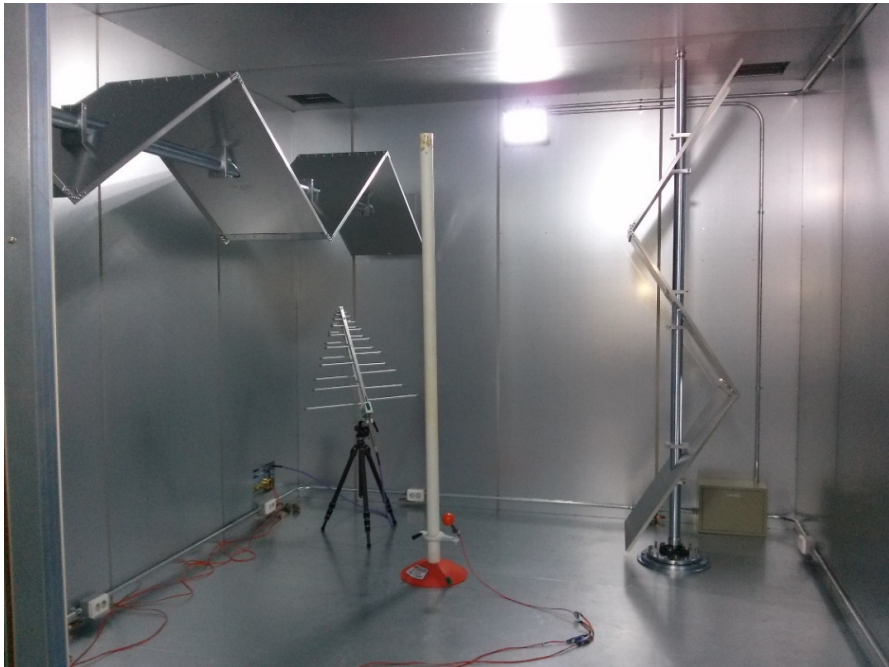


그림 1.5. 전자파 잔향실과 교반기

Fig 1.5 Reverberation chamber and stirrer

전자파 적합성 시험을 진행할 때 앞서 설명한 4가지 방식들이 주로 이용되는데, 이중 전자파 잔향실은 1968년 미국의 H.A Mendes가 처음 제안된 이래로[29] 전자파 적합성 시험 시설의 대용품으로 사용될 수 있는 가능성을 보였다. 또한 다양한 형태의 유무선 통신장비가 많이 혼재되어 있는 상황에서 안테나를 통해 직접 수신되는 경우보다 주변의 여러 종류의 채널이 혼재되어 있는 상황에서 신호를 받는 경우가 많기 때문에, 야외시험장이나 TEM셀 그리고 전자파 무반사실 에서의 시험은 실제 특성과는 다를 수 있다. 실제 환경에서는 주변 산란체에 의한 다중반사 및 다중경로 효과가 종종 발생된다. 전자파 잔향실은 기계적으로 회전하는 교반기나 전기적으로 조향된 안테나를 이용하여 임의의 방향에서 전자파가 입사하는 환경을 만들기에 적합하고, 이런 특성 때문에 다른 전자파 적합성 시험들 보다 현실에 가까운 시험이라고 평가받는다[28] [31].

이러한 이유들 때문에 최근 많은 연구에서도 전자파 반향실을 사용하는 연구가 많이 보인다. 5G시장에 적용되는 전자기기들에 대한 시험부터 전자파 잔향실의 성능 향상을 위한 연구까지 다양한 연구들이 국내외에서 진행되고 있다[37] - [44]. 특히 전자파 관련 시험에서 광범위하게 사용되는 만큼 그에 대한 연구도 많이 진행되고 있는데, 전자파 잔향실 내부의 전자기장 균일도에 관한 연구는 교반기를 설계한 뒤 측정을 통해서 가장 좋은 성능을 보여주는 교반기를 선택하고 있는 상황이다[45] - [48]. 또한 내부 안테나를 배치할 때도 특정한 기준 없이 전자파 잔향실의 구석과 같이 가능한 반사가 많이 될 수 있는 쪽을 향해 전자파를 방사하고 있다.

전자파 잔향실의 주 목표인 내부에 통계적으로 균일한 전자기장을 만드는 작업은 내부에 설치되는 교반기의 형태, 안테나의 배치 및 개수에 따라 달라진다. 또한 일반적으로 사용되는 물리적 교반기는 일정한 주기를 두고 회전하기 때문에 이렇게 시간적으로 변화하는 공간에 대한 해석이 쉽지 않은 상황이다.

더욱이 최근 전자파 장애 방지를 위한 규제 주파수가 1-18 GHz까지 확장됨에 따라 전자파 잔향실을 수치해석적으로 분석하기에도 어려워졌는데, 일반적으로 수 미터(m) 단위의 크기를 갖는 공간에서 GHz대역을 수치해석 하려면 파장 대비 10배 내외의 크기를 해석하게 된다. 수치해석을 진행할 때 정확한 결과를 얻기 위해서는 해석 주파수에 해당하는 파장에 대해서 약 10번정도의 샘플링 과정을 수행한다[51]. 더 많은 샘플링을 수행할수록 더 정확한 결과가 나오지만 그에 따른 전체적인 계산량이 증가하기 때문에 이 둘은 서로 상충하는 관계에 있다.

또한 교반기가 회전을 하면서 시간 평균적으로 균일한 전자기장을 형성하는데, 이런 환경을 실시간 시뮬레이션을 진행할 수 없기 때문에 교반기가 회전하는 각도에 따라 해석 모델을 나누어 해석한다. 일반적으로 기계적 모드 스티어링 기법은 교반기가 한 바퀴 돌 때를 한주기로 하여 모드를 섞기 때문에 이에 대한 해석도 교반기가 한 바퀴를 도는 동안 일정한 각도에 따라 CAD데이터를 만들어 해석을 진행한다.

국제무선장해 특별위원회(CISPR: International Special Committee on Radio Interference)에서 전자파 잔향실에 관한 규격을 IEC 61000-4-21에 소개하고 있다[49]. 이 규격에서는 전자파 잔향실에서 주로 사용되는 용어에 대한 정리와, 평가 기준이 되는 전자기장 균일도(field uniformity)등의 개념을 정리해 놓았다. 또한 각 주파수 별로 전자파 잔향실 내부 시험영역(WV: Working Volume)에서의 제한치를 제시하고 있다.

현재 전자파 잔향실에 대한 많은 연구들은 대부분 국제무선장해 특별위원회에서 제시한 제한치를 만족하는 구조를 실험적으로 설계하여 발표하고 있다. 특히 제시한 교반기의 성능을 보여주는 연구가 많은데[50] - [57], 전자파 잔향실 자체의 전자기장을 분석하는 방법은 주로 수치해석기법을 통해 계산하고 있다. 앞서 설명했듯이 이러한 크기의 잔향실을 해석하기에는 시간도 많이 소요될 뿐만 아니라

주파수가 올라 갈수록 요소수가 급격하게 증가하여 하나의 교반기 각도에 대해 수 일에서 수십일 정도의 해석 시간을 요구하게 된다.

때문에 수치해석을 이용한 전자파 잔향실 해석 연구에서는 크기가 작은 전자파 잔향실에 대한 해석 연구가 많이 존재한다. 물리적인 크기가 작기 때문에 유한 차분 시간영역 해석(FDTD: Finite Difference Time Domain)과 같은 full-wave 해석이 가능하다. 하지만 실제 전자파 적합성 시험에 사용되는 비교적 큰 전자파 잔향실에 대해서는 적용하기 어려운 상황이다. 전기적으로 큰 구조에 대한 수치해석은 이런 한계가 존재하기 때문에 해결하기 위해 다양한 하이브리드 수치해석 기법들이 개발되었는데, 물리 광학법(PO: Physical Optics)이나 기하 광학법(GO: Geometrical Optics), 그리고 균일 회절이론(UTD: Uniform Theory of Diffraction)등이 기존의 수치해석 기법과 함께 혼용되어 사용되고 있다[58] - [62]. 즉, full-wave 해석기법에 광학 기법들이 조합되어 사용되며 이때 전자파가 직진하는 성질이 이용된다.

전자파 잔향실에 대한 수치해석은 계속해서 연구되고 있으며 전기적으로 큰 구조에 대해서 빠르게 예측할 수 있는 기술이 필요하다. 내부 필드 분포를 정확하게 알 수는 없지만, 통계적으로 균일한 필드를 빠르게 계산 해 낼 수 있다면 전자파 잔향실 내부에 교반기의 위치, 모양, 그리고 안테나의 위치에 대해 다양하게 모의 해 볼 수 있으며 보다 좋은 전자기장 균일도를 설계단계에서부터 확보할 수 있다.

본 논문에서 제시하는 광원 추적법 기반 전자파 잔향실 전자기장 균일도 해석법은 내부 시험영역에서의 전자기장 균일도를 빠르게 계산해 낼 수 있다. 광원 추적법의 경로를 계산하는 방법과 도체 표면의 경계조건에서 전자파가 일어나는 물리적 행동양식을 기반으로 계산을 하며, 경로를 계산하는 단계에서는 주파수에 관계없이 동일한 시간에 해석이 가능하다. 따라서 한번 빔의 경로를 계산하면 다른 주파수에 대해 그 구조를 해석할 때 추가적인 계산이 필요 하지 않다.

1.2 논문의 구성

본 논문은 총 5장으로 구성되어 있으며, 각 장의 연구 내용은 다음과 같다.

제 1장에서는 전자파 적합성 시험에서 사용되는 방법들과 그 중 최근 많은 연구가 진행되고 있는 전자파 잔향실에서의 연구를 소개하였고, 본 논문의 연구 배경과 구성에 대하여 서술하였다.

제 2장에서는 전자파 잔향실에 대한 내용을 서술하였으며 잔향실에서 확보해야 하는 전자기장 균일도에 대한 설명과 그 계산방법을 소개한다. 이는 국제 표준에서도 제시되어 있으며 주파수에 따라 그 전자파 균일도의 제한값이 달라진다. 또한 현재까지 사용되고 있는 전자파 잔향실에서의 모드 스티어링 기법을 소개하며 교반기의 형태, 위치 그리고 안테나의 위치에 따라 전자파 잔향실의 성능이 변하는 것을 확인하였다.

제 3장에서는 전자기장 균일도 향상 연구를 진행하였다. 광원 추적법을 적용한 전자기장 균일도 해석 방법은 내부 필드를 전부 계산하지 않고 해석할 수 있다. 그리고 기존에 사용되는 방법을 소개하며 본 논문에서 제시하는 알고리즘이 어떻게 균일도를 빠르게 계산해 낼 수 있는지를 설명하였다. 기존에 그린함수를 알고 있는 문제에 대해서 본 논문에서 제시하는 기법을 검증하였고 상용 소프트웨어의 결과 및 측정결과와 교차 검증하였다.

제 4장에서는 앞서 제안한 알고리즘을 이용한 실험 및 시뮬레이션 결과를 보여주었다. 기존에 검증되어 사용되고 있는 전자파 잔향실에서 측정하였으며, 교반기가 5도 간격으로 360도를 회전하였을 때 내부 시험영역에서의 전자기장 균일도를 분석하였다. 사용가능한 최저

주파수인 200MHz부터 1GHz까지 해석을 진행하였고 상용 소프트웨어의 결과 및 측정결과와 교차하여 검증하였다. 또한 더 좋은 균일도를 확보하기 위해서 교반기의 형태를 바꾸거나 안테나의 위치, 방향, 또는 개수를 변경하여 제안된 알고리즘을 적용한 결과를 제시하였다.

제 5장에서는 본 논문의 결론을 정리하고 향후 연구에 대하여 논의하였다.

제 2 장 전자파 잔향실

본 장에서는 현재까지 전자파 잔향실에 관련된 연구에 대해서 소개를 하고 전자기장 균일도에 대한 설명을 한다. 또한 전기적 및 기계적 모드 스티어링에 대해 소개를 하며, 교반기에 따라서 전자기장 균일도가 어떻게 변화하는지 확인한다.

2.1 전자파 잔향실의 개요

전자파 잔향실은 mode-stirred 또는 mode-tuned 챔버 라고도 불린다. 기본적으로는 금속으로 만들어진 육면체 구조의 차폐된 방이며 공진기 형태의 구조를 갖는다. 내부에 적절한 교반기를 설치하여 잔향실 내부의 전자기장이 통계적으로 일정하게 만드는 것이 목표이다. 아래 그림 2.1은 전형적인 전자파 잔향실의 구조를 보여주고 있다.

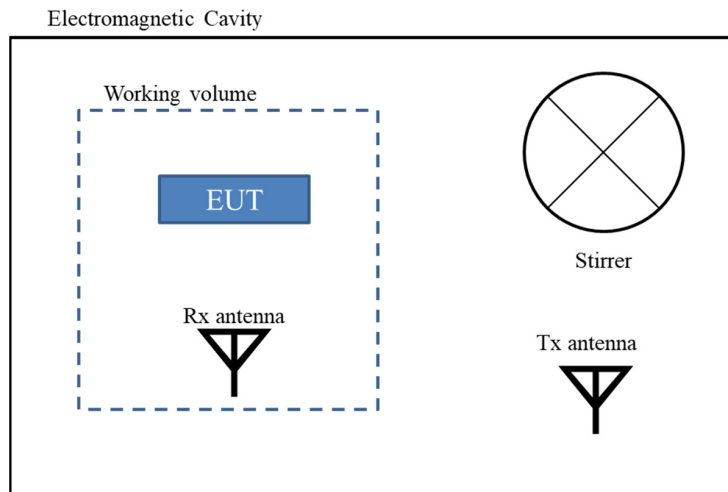


그림 2.1. 일반적인 전자파 잔향실 구조

Fig 2.1. Typical RC facility

일반적인 전자파 잔향실의 구조는 내부에 회전하는 교반기가 있고, 전자파를 방사하는 안테나가 존재하며 이 안테나는 잔향실 내부에 전자기적 에너지를 주입한다. 그와 동시에 수신 안테나가 내부 전자기장을 모니터링을 한다. 그림 2.1에서 보이는 시험 영역(working volume)은 균일 전자기장영역(volume of uniform field)으로도 불리며 전자파 잔향실에서 내부에 통계적으로 일정한 전자기장을 만들어낼 영역을 말한다. 통계적으로 일정한 전자기장은 다음 두가지 성질을 만족해야 한다.

첫 번째로 잔향실 내부 시험 영역 어느 위치에서나 공간적으로 전자기장이 균일해야 하는 균질성(Homogeneity)을 만족해야 하며, 두 번째로 어느 방향에서나 균일해야 하는 등방성(Isotropy)을 만족해야 한다. 특정 교반 메커니즘을 통해 전자기장 균일도를 확보했다면 앞서 설명한 전자파 잔향실 내에 시험영역에서 균질성과 등방성을 만족하게 된다.

전자파 잔향실에 대한 통계적 필드 균일성 개념은 야외 시험장, 전자파 무반사실 혹은 TEM cell 과 같은 다른 시험 환경에서 일반적으로 사용되는 전자기장 균일성 개념과 다르다. 다른 시험 환경에서 전자기장 균일성의 의미는 모든 곳에서 전계 및 자계값이 동일할 때 균일하다고 말하는 반면, 전자파 잔향실에서 말하는 ‘통계적으로 균일 한 전자기장’은 평균적으로 허용 가능한 불확실성 내에서 교반(stirred) 된 벡터 전자기장이다. 따라서 서로 다른 위치라도 허용 가능한 불확실성 내에 전자기장이 분포한다면 균일하다고 정의한다. 시험 영역으로부터 충분히 떨어진 위치에서는 내부 교반기의 고정 각도나 위치에 대해 크게 다를 수 있으며, 그 곳에서의 전자계 값은 평균값이나 표준편차와 같은 통계적 값도 다르다. 하지만 교반기가 고유의 교반 메커니즘을 통해 전체 사이클을 완료하면, 시험영역 모든 곳에서 전자기장 균일도가 보장될 수 있다.

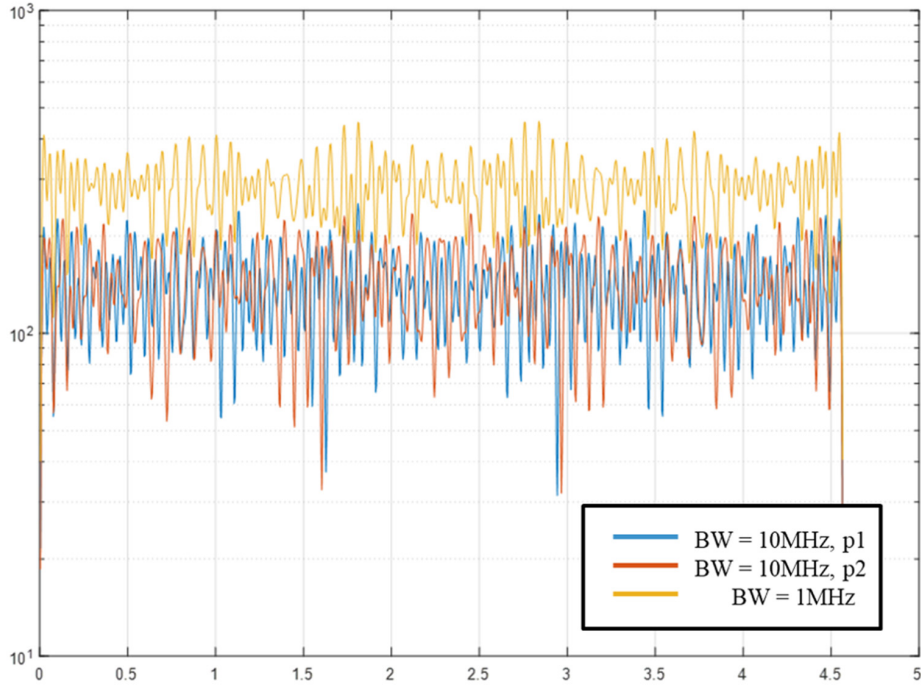


그림 2.2. 주파수 교반법을 이용한 잔향실 내부 전기장

Fig 2.2. Electric field in the RC by using frequency stirring

그림 2.2는 주파수 교반법을 이용하여 잔향실 내부의 서로 다른 위치에서 전기장을 계산한 것이며, 주파수 교반법에서 대역폭을 다르게 하여 계산한 결과이다. 범례에 있는 처음 두 개의 결과는 대역폭은 같으나 소스의 위치가 다른 곳에서의 결과이고, 노란색으로 표시된 그래프는 주파수 대역폭이 다른 상황에서 계산한 전기장이다. 주파수 교반법이 적용되어 해석된 결과는 전자파 잔향실 시험영역의 위치에 따라 전기장의 세각기 다르게 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이 방법은 물리적 교반법과 유사하며 송신 안테나를 통해 잔향실 내부에 필드가 생성될 때 안테나가 수신하는 전기장의 변화는 잔향실 내부의 교반기 회전으로 인해 발생한다. 주파수 교반법은 물리적으로 회전하는 교반기 대신 대역폭을 설정함으로 이를 조절한다. 교반기의 위치나 각도가 변경될 때마다 혹은 주파수 대역폭이 달라질 때마다 잔향실 내부의

전기장 분포가 변경된다. 이런 현상은 교반기가 잔향실 내부의 경계조건을 변형시키기 때문이다.

그림 2.2에서의 전기장은 시험영역 내부의 서로 다른 위치에 대해서 기록한 값이다. 기본적으로 주파수 대역폭이 다르면 전기장 균일도가 달라지지만, 파란색 선과 빨간색 선과 같이 같은 주파수 대역폭에 대해서도 계산되는 전기장이 위치에 따라 제각각 인 것처럼 보인다. 하지만 그림에도 불구하고 표 2.1에 요약된 바와 같이 전체 교반 메커니즘이 끝난 후 두 위치에서 통계적 특성을 비교하면 두 전기장이 통계적으로 서로 매우 유사하게 보이는 것을 알 수 있다.

표 2.1. 다른 위치에서 측정된 전기장의 통계적 특성

Table 2.1. Statistical properties measured at different locations

| | Position 1 | Position 2 |
|--------------------|------------|------------|
| Maximum | 252.63 | 235.06 |
| Mean | 140.78 | 142.75 |
| Band width | 10MHz | 10MHz |
| Standard deviation | 39.48 | 40.72 |
| Field uniformity | 2.15 | 2.17 |

이 통계적 균일성은 잔향실 내부의 어느 곳에서나 발생하는 특성은 아니며, 잔향실 벽과 송신 안테나에서 충분히 멀리 떨어져 있는 곳에 정의 되어있는 시험 영역에서 전자기장이 균일해야 한다. 여기서 충분히 멀리 떨어진 거리는 일반적으로 최저 동작 주파수 파장의 1/4정도 거리를 의미한다[48].

전자파 내성 시험에서 이러한 통계적으로 균일한 필드는 매우 유용하다. 피시험장비(EUT: Equipment Under Test)는 잔향실 내부의 위치와 방향에 관계없이 통계적으로 동일한 전자기장에 영향을 받게 된다. 통계적으로 균일한 전자기장의 이런 측면은 전자파 적합성 시험에서 매우 적절한 환경을 만들어준다.

전자파 잔향실은 기본적으로 공진기 형태로 만들어지며, 이것은 직육면체 모양의 금속 벽면으로 둘러싸여진 방의 형태이다. 전자기 에너지가 이러한 공진기 내부에 주입되면, 내부에서 무한 공진 모드가 형성된다. 각 주파수에서 한정된 수의 지배 모드가 공진기 내부의 전체 필드에 가장 크게 기여한다. 주파수가 높을수록 기여하는 모드의 수가 많아지며, 전체 전자기장의 분포는 공진기 내부에 크게 기여하는 모드를 비롯한 다른 공진 모드가 중첩되면서 형성된다.

이와 비슷한 현상은 음향학(Acoustics)분야에서도 찾아볼 수 있다. 모든 물체는 고유한 공진(resonance) 주파수를 가지고 있다. 이 공진 주파수는 보통 크기가 크면 공진 주파수가 낮아지고, 고정된 현의 경우 두꺼울수록 기본 공진 주파수가 낮아지며 장력이 높을수록 공진 주파수가 높아진다. 이러한 공진 주파수는 물리적으로 음파에 대한 파동방정식을 풀어내서 찾을 수 있다. 이 파동방정식은 원천이 없을 때 계산되는 전자파의 파동방정식과 유사하다. 따라서 전자파에서 원천이 존재할 때 파동이 계산되듯, 음향학에서도 소리의 원천의 정보를 알고 있다면, 그 원천에 대한 소리를 수식적으로 계산할 수 있다. 모든 현재 모드의 가중 합으로 해를 표현하는 수학적 절차는 "modal expression"으로 알려져 있는데[63], 양쪽 끝이 고정된 현에 대하여 처음 4 개의 지배적인 공진 모드는 아래 그림처럼 형성된다.

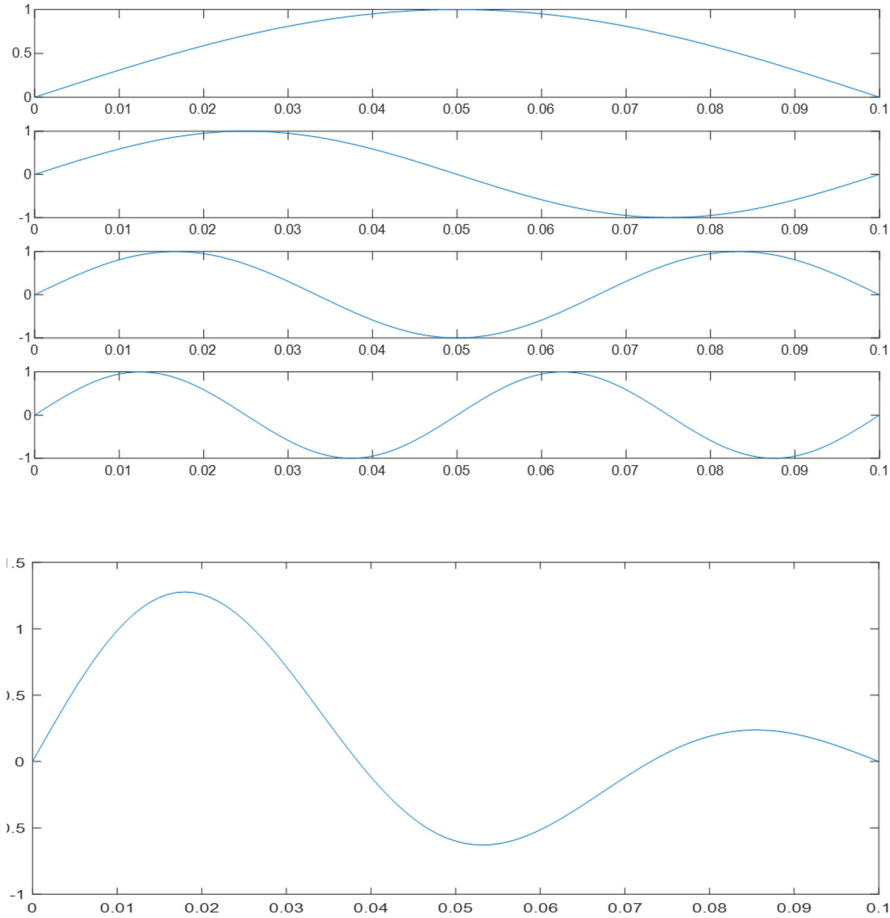


그림 2.3. 고정된 선의 고유 진동

Fig 2.3. The vibration of fixed string

이 줄을 튕길 때 나는 소리를 계산하려면, 이 각 모드에 해당하는 가중치와 다른 모든 여기 모드(원천이 존재하는 경우)를 합산하여 계산할 수 있다. 위에 설명한 음향에 대한 예시처럼, 전자파 공진 모드는 특정 구조에 대해 적용된 전자기파 파동 방정식의 해를 구함으로써 모드를 계산할 수 있다.

전자기파의 공진을 이해하는 것은 전자파 잔향실을 이해하기 위한 가장 기본적이고 중요한 단계이다. 전자파 잔향실이 공진기를 기반으로 제작하기 때문이며, 추가적으로 이 공진기에 교반기가 포함되어야 한다.

캐비티라고도 불리는 공진기는 모드를 만들고 이 모드로 인해 발견되는 정재파(standing wave) 패턴은 내부 전자기장이 특정한 곳에 집중된다는 것을 의미한다. 이는 앞서 설명했던 전자파 잔향실이 확보해야 하는 통계적 전자파 균일성과는 상반되는 내용이다. 그렇기 때문에 모드 스티어링 과정은 전자파 잔향실을 구성하는데 필수적이다[64] [65].

모드 스티어링은 지속적으로 공진기의 경계 조건을 변경하여 현재 기여하는 공진 모드를 바꾸는 과정이다. 이런 모드 스티어링의 예로써 원천이 되는 안테나의 위치를 변경하거나, 회전하는 금속 판을 삽입하거나, 유연한 전도성 재료로 공진기를 만들고 진동하게 만들어서 모드를 교반 할 수 있다. 이런 모든 교반 기법을 통해 우리가 원하는 시험 영역 내의 전자기장 분포를 변경시킬 수 있으며, 궁극적으로는 통계적으로 균일한 분포를 만들어 내는 것이 목표이다.

전자파 잔향실의 전자기장 균일도를 평가하는 가장 널리 퍼진 방법은 국제 표준 IEC 61000-4-21에 지정된 방법이다. 많은 연구들이 이 표준에서 제정된 방법을 사용하며 전자파 잔향실에서 전자기장 균일도를 계산한다면 거의 모든 연구에서 이 방법을 통해 계산하여 제시하고 있다[66] - [71].

이 방법에서 전자파 잔향실내부에서 안테나를 이용해서 잔향실 구석 쪽으로 방사하고 3 축 전기장 검침기를 사용하여 시험영역의 8 개 모서리에서 전기장이 측정되는 동안 물리적 회전 방식 등의 교반 과정이 수행된다. 각기 다른 8개의 위치에 대해서 교반기의 주기가 모두 끝났을 때 최대 전기장의 표준 편차는 각 축에 대해서 계산될 수도 있고, 전체 크기로 계산될 수도 있다. 전자기장의 균일성에 대하여 IEC에서 제시하는 한계 값은 400MHz 이상의 주파수에 대해 3dB이며, 400MHz에서 100MHz로 감소하는 동안 선형적으로 4dB까지 증가한다. 아래 그림 2.4는 이 제한치를 그래프로 나타낸 것이며, 이 전자기장 균일도는 다음과 같이 계산한다.

Field Uniformity limitation(IEC 61000-4-21)

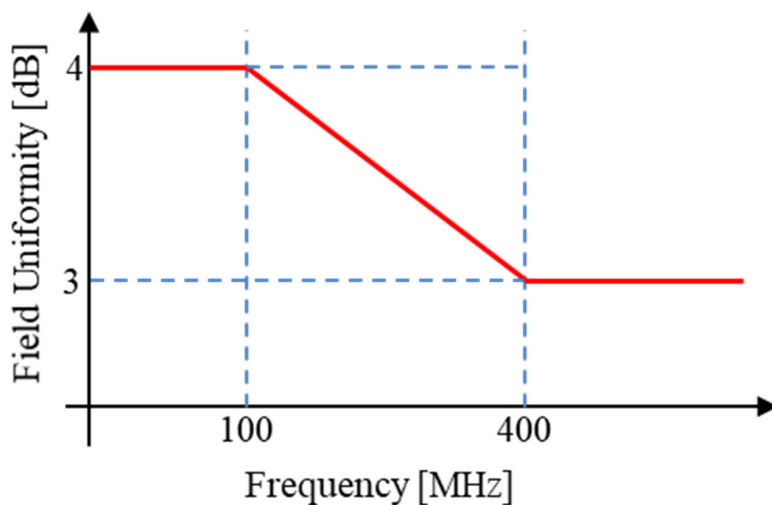


그림 2.4. 전자기장 균일도의 제한치 [49]

Fig 2.4. Field uniformity limitation [49]

시험 영역 내에 공간적으로 분포하는 전자기장을 통해 얻어진 균일성은 전자파 잔향실의 가장 중요한 파라미터 중 하나이다. 잔향실은 각각 고유의 사용 가능한 최저 주파수(LUF: Lowest Usable Frequency)를 가지고 있는데, 이 최저 주파수는 전자파 균일도에 의해 결정된다. 앞서 설명한 것처럼 모든 교반기 주기에 대해서 6면체로 구성되어 있는 시험영역의 8개의 꼭짓점에 대해서 최대 전기장을 측정한다. 물리적 교반 기법을 사용하는 상황을 예를 들면, 교반기가 한 바퀴 돌아갈 때 각 회전 각도에 대해서 8개 점의 전기장 측정을 진행한 뒤, 한바퀴가 모두 돌아 갔을 때 최대값을 이용한다.

각 점에서 전기장의 최대값을 획득한 뒤 정규화 과정을 거치게 된다. 이때 정규화 된 전기장 벡터는 다음 수식 (2.1)처럼 표현할 수 있다.

$$\bar{E} = \frac{\bar{E}_{\max}}{\sqrt{P_{in}}} \quad (2.1)$$

여기서 \bar{E} 는 정규화 된 전기장 벡터를 의미하며, \bar{E}_{\max} 는 모든 교반 과정에 대한 최대 값이다. 그리고 P_{in} 은 교반 과정이 일어나는 과정에서의 평균 입력 전력이며 단위는 [W]이다. 이 측정은 각 축 방향에 대해 동일하게 적용되며 x, y, z 성분은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_x = \frac{E_{\max,x}}{\sqrt{P_{in}}} \quad (2.1a)$$

$$E_y = \frac{E_{\max,y}}{\sqrt{P_{in}}} \quad (2.1b)$$

$$E_z = \frac{E_{\max,z}}{\sqrt{P_{in}}} \quad (2.1c)$$

전자기장 균일도를 계산하기 위해서는 각 축에 대해서 측정한 정규화 된 전기장의 표준편차가 필요하다. 각 축에 대한 표준편차는 아래 수식으로 계산할 수 있다.

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^P (E_x^i - \langle E \rangle_P)^2}{P-1}} \quad (2.2a)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^P (E_y^i - \langle E \rangle_P)^2}{P-1}} \quad (2.2b)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^P (E_z^i - \langle E \rangle_P)^2}{P-1}} \quad (2.2c)$$

여기서 P 는 측정점의 개수이며, 6면체 구조의 시험영역에 대해서는 8개의 꼭짓점이 측정점이고 이 경우 8이 된다. 또한 E_x^i, E_y^i, E_z^i 는 각각 i 번째 측정점에서의 각 축에 대한 전기장이며, $\langle E \rangle_P$ 은 8개의 위치에 대한 평균값을 의미한다. 전체 전기장에 대한 표준편차는 다음과 같이 계산한다.

$$\sigma_{all} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^3 (E_j^i - \langle E \rangle_Q)^2}{Q-1}} \quad (2.3)$$

여기서 Q 는 측정점의 개수이며, 6면체 구조의 시험영역에 대해서 8개의 꼭짓점과 모든 축을 고려하기 때문에 24가 된다. 마찬가지로 $\langle E \rangle_Q$ 도 8개의 위치에서 각각의 축에 대한 24가지 전계의 평균값을 의미한다. E_j^i 는 i 번째 측정점의 j 번째 축에서 측정된 정규화 전기장을 의미한다.

이렇게 각각 축방향의 성분과 전체 성분에 대해서 평균값, 표준편차 값을 이용하여 전자기장 균일도를 다음과 같이 정의한다. 전자기장 균일도는 데시벨 형태로 표현되며, 각 축에 대해서 정의할 수도 있고 전체에 대해 정의할 수 있다. 아래 식 (2.4) 부터 (2.4c)까지는 전체 전자기장 균일도와 각 축의 균일도를 나타내는 수식이다.

$$\sigma_{all} (dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_{all} + \langle E \rangle_{24}}{\langle E \rangle_{24}} \right) \quad (2.4)$$

$$\sigma_x (dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_x + \langle E_x \rangle_8}{\langle E \rangle_8} \right) \quad (2.4a)$$

$$\sigma_y (dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_y + \langle E_y \rangle_8}{\langle E \rangle_8} \right) \quad (2.4b)$$

$$\sigma_z (dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_z + \langle E_z \rangle_8}{\langle E \rangle_8} \right) \quad (2.4c)$$

국제 표준인 IEC 61000-4-21에 따른 제한치는 그림 2.4에 표현되어 있으며, 주파수가 낮을수록 보다 덜 엄격한 기준이 적용된다. 대부분의 전자파 잔향실을 보유한 시설에서는 사용가능한 최저 주파수를 가능한 낮추려고 하는데 그 이유는 더 다양한 피시험장비를 테스트할 수 있는 환경을 갖추기 위함이다.

일반적으로 사용가능한 최저 주파수에서 전자기장 균일도를 만족시키면 그 이상의 주파수에서는 보통 제한치 내로 들어오게 된다. 그 이유는 같은 크기에 대해서 주파수가 증가하면 더 많은 모드가 발생할 수 있고 더 많은 모드에 대해 교반을 진행한다면 더 다양한 패턴이 나올 수 있어서 보통 전자기장 균일도를 만족시킬 수 있게 된다. 수 미터의 단위를 갖는 크기에서는 보통 200~300MHz의 사용가능한 최저 주파수를 만족시키며, 5G가 적용되는 수 GHz대역에서는 보다 작은 전자파 잔향실을 만들어서 사용한다[72] - [76].

전자기장 균일도와 더불어 전자파 잔향실에서 사용하는 중요한 파라미터로는 상관계수가 있다. 이는 주로 물리적 교반기가 있는 경우에

고려하는 파라미터로 교반기의 상관관계를 나타내는 파라미터이다. 교반기의 주 목적은 잔향실 내부의 전자파를 섞어주는 것인데, 좋은 성능을 가지고 있는 교반기는 낮은 상관계수를 갖아야 한다. 교반기가 여러 개 존재하는 경우는 자기 상관관계 함수를 함께 사용하여 파악하며 아래 수식 (2.5)를 통해서 계산할 수 있다.

$$r = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (A_i - \mu_A)(B_i - \mu_B)}{\sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \mu_A)^2}{n-1} \right) \left(\frac{\sum_{i=1}^n (B_i - \mu_B)^2}{n-1} \right)}} \quad (2.5)$$

여기서 r 은 상관계수이며, n 은 하나의 교반기가 회전을 할 때 얼마나 많은 단계로 나누었는가를 나타내는 숫자이다. μ 는 측정된 데이터의 평균값이며 A_i 와 B_i 값은 같은 값이지만 모든 교반기 단계에 대해서 이동된 데이터이다. 상관되지 않은, 즉 이상적인 교반기의 경우 상관계수가 교반기의 단계가 변함에 따라 특정 제한값을 넘기지 말아야 한다.

전자파 잔향실은 통계적 특성을 이용하는 전자기적 측정 시설이며, 이는 통계물리학에서 개발된 에르고딕 가설(Ergodic Hypothesis)을 통해 발전할 수 있었다. 이는 어느 열역학계에 대해서 긴 시간에 대한 시간평균(time average)이 곧 공간평균(space average)과 같을 것이라는 가설이다. 이 가설이 성립하는 경우를 단순히 말할 때 에르고딕성이 성립한다고 표현하는데, 확률 관점에서 어떤 확률 변수가 장기적인 평균이 결국 무조건부(unconditional) 평균, 즉 앙상블 평균과 같아지면 이를 “에르고딕 하다” 라고 표현한다[77] - [85].

전자파 잔향실에 대해서는 교반기가 특정 주기의 교반 알고리즘을 갖고 있을 때 전체 시간 동안의 평균값은 실시간으로 측정을 해야

하지만 에르고딕 가설에 따르면 모든 경우에 대한 합을 계산하는데 있어서 시간 평균값을 이용하여 추정할 수 있음을 암시한다. 즉 교반기의 다양한 단계에 따라서 시간적 평균을 이용해 교반기의 앙상블 평균을 구할 수 있다는 말이 된다.

에르고딕 가설이 많은 물리학 현상에 대해 잘 적용되어 왔고, 이 가설을 증명하기가 어려웠기 때문에 별 의심없이 이용되고 있었다. 통계물리학이라는 학문 자체가 에르고딕 가설을 기반으로 세워져 있다고 봐도 과언이 아니었다. 하지만 하워드 리(Howard Lee) 교수가 에르고딕 가설이 성립하지 않음을 에르고미터(ergometer)를 정의하여 에르고미터가 0과 무한대가 아닌 경우에서만 가설이 성립한다고 주장하였다[86]. 하지만 적어도 전자파 잔향실의 연구에 대해서는 이 에르고딕 가설이 잘 적용되어왔으며, 많은 논문 및 연구에서 측정을 통해 검증이 되어 있다. 그 중 참고문헌 [87]에서 전자파 잔향실에 에르고딕 가설이 적용된다는 것을 단순하면서도 직관적인 방법으로 검증하였다. 공진기가 오버모드(overmoded)되어 있고 각각 모드가 대략적으로 동일한 레벨로 여기 된다고 가정했을 때, 주어진 주파수에서 중첩된 많은 공진 모드는 잘 교반된 단일 공진에서 시간상으로 합쳐진 모드와 같다.

공진기 내부의 전체 전자기장은 금속 벽과 공진기내부에 존재하는 매체의 모양, 크기, 손실 및 유전율의 함수 인 자연 공진 모드의 무한한 합으로 확장될 수 있다. 이러한 영향들에 각각 가중치가 부여되어 공진기에 기여하는 모드가 계산된다. 이때 이 전자기장은 앞서 부여된 가중치에 따라 변화될 수 있으며, 이런 가중치를 갖는 요인들이 전자파 잔향실의 내부 모드를 교반 할 수 있는 후보가 된다. 대표적인 예로, 수신 안테나의 공간적 위치 변화, 교반기 회전 또는 주파수 편이가 있다.

이렇게 모드를 섞는 전자파 적합성 측정 시설을 “전자파 잔향실” 이라고 부르기 전에 주로 EMC 시험이라고 불리는 차폐 효율(SE: Shielding Effectiveness)을 시험하는 환경에 대한 보고서에서 이런 시설이 언급되었고, 1971년 처음으로 군사 표준인 MIL-STD

1377에서 전자파 잔향실(reverberation chamber)이 발견되었다[88]. 그림 2.5는 위의 군사표준에서 무기에 사용되는 케이블의 전자파적합성 시험을 나타낸 그림이다. 이 그림은 표준 문서에서 발췌하였다.

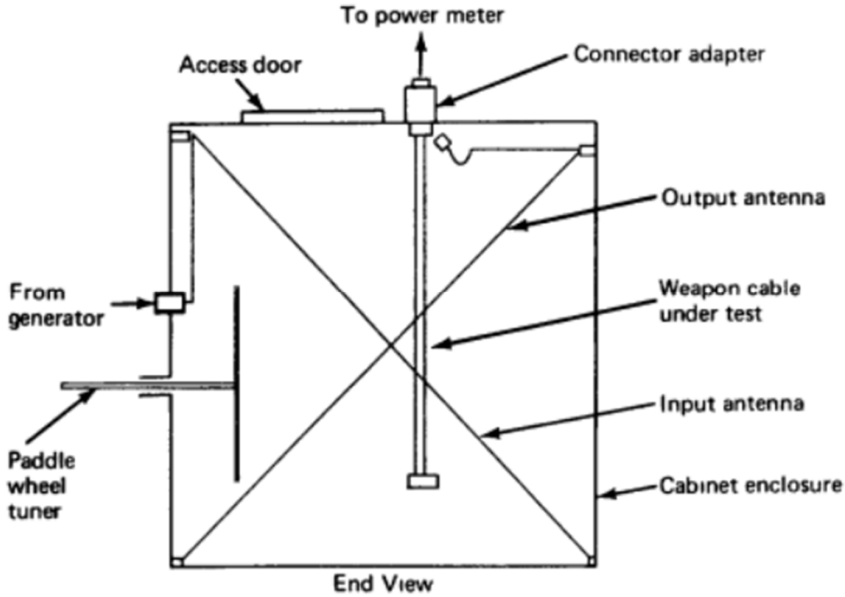


그림 2.5. 군사 규격에서 처음 소개된 전자파 잔향실 개념 [88]

Fig 2.5. The concept of RC first reported in military standards [88]

이 측정시설이 가지고 있는 ‘paddle wheel tuner’는 지금에 사용하고 있는 교반기와 같은 역할을 하며 전자파 잔향실과 같은 목적을 가지고 동작한다. 1973년에는 E. Paolini 와 L. Piccioli 가 전자파 잔향실에서 간섭 시험에 대한 연구를 발표하였다[89]. 하지만 1976년 P. Corona와 G. Latmiral 이 발표한 논문에서 보다 넓은 전자기 스펙트럼에 대해서 차폐 효율 시험 뿐만 아니라 내성 및 방사 시험을 할 수 있다는 주장을 하였고, 이 때를 기점으로 전자파 잔향실에 대한 관심이 증가하기 시작하였다[90] [91]. 이 논문에서도 두 벽에 금속 패들을 설치하여 회전시킴으로써 내부 전자파를 교반 하였고, 전자파 적합성 시험에서도 이 시험시설을 사용하기 시작하였다.

2.2 기계적 / 전기적 모드 교반 기법

이번 장에서는 전자과 잔향실에서 사용하는 다양한 교반 기법에 대해서 정리한다. 초창기에 나온 방법이 지금까지도 사용되며 계속해서 진화하고 있다. 교반 기법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 기계적 교반 기법이며, 다른 한 가지 방법은 전기적 교반 기법이다.

2.2.1 기계적 모드 교반 기법

기계적 모드 교반 기법은 교반기를 어떤 형태로든 움직여서 경계조건을 변경하는 기법이다. 따라서 회전, 진동 혹은 이동 등의 모든 움직임들을 적용하여 모드를 교반할 수 있으며 움직이는 대상은 전자과 잔향실 내부에 설치하는 금속 판들이 될 수도 있고 심지어 잔향실의 벽을 움직일 수도 있다.

- 회전하는 패들

회전하는 패들은 가장 대표적이며 유명한 방법으로 모드를 섞는 방법이다. 영문상으로 ‘mode stirrer’ 라고 표현하며 ‘mode tuner’, ‘mode mixer’, ‘paddle wheel’ 또는 ‘fan’ 등등 다양하게 사용된다. 금속 판을 특정한 형태로 만들어서 회전시키는 방법이기 때문에 지금까지 수많은 방법들이 연구되어 왔다. 거의 모든 연구는 경험적으로 실험을 통해 특정 형상이 모드 교반에 효과적이라는 주장을 하는데, 실시간으로 회전하는 교반기를 고려한 해석이 쉽지 않기 때문이다. 다양한 형태의 회전하는 패들에 대해서 가장 널리 사용되고 유명한 형태는 Z-fold 형 교반기이며, 아래 그림 2.6에 있는 지그재그 형태의 구조물이 Z-fold 형 교반기이다.



그림 2.6. Z-fold 형태의 교반기

Fig 2.6. Z-fold type stirrer

이 형태의 교반기는 Lindgren RF Enclosures와 Naval Surface Warfare Center간의 공동 연구를 통해 개발되었다. 초기 Z-fold형 교반기를 연구할 당시 목표는 국제전기표준회의에서 제정한 IEC 1000-4-3의 제한을 만족시키기 위해 최저 80MHz까지 동작 가능한 전자파 잔향실을 설계하는 것이었다. 여러 번의 구조 개선을 통해 지금과 같은 Z-fold형태가 최종적으로 선택되었으며 이 형태는 전자기파를 잘 흩뿌리고 단순한 형태 이기 때문에 쉽게 조정할 수 있는 장점이 있다. 이 형태의 교반기는 가장 고전적이며 널리 사용되고 있다[92].

그림 2.7은 University of York의 전자파 잔향실 시설에서 사용되는 "bent-plates"형 교반기이다[93] [94]. 이 교반기에는 4 개의 막대에 대해 각각 두 개씩 총 8 개의 동일한 금속 패널을 이용해 만들었다. 각 패널은 수직이 아닌 각도로 설정되며, 이 각각의 각도는 사용자의

의도대로 변경될 수 있다. 이를 통해 어떤 각도에서 전자기장의 균일도가 가장 잘 형성되는지를 최적화 기법 등을 통해 추정할 수 있다.



그림 2.7. Bent-plates 교반기 [93]

Fig 2.7. Bent-plates stirrer [93]

여러 연구에서 이런 bent-plates형 교반기를 이용해 모드를 교반 하였으며, 약 133도씩 구부러서 만든 교반기로 전자파 잔향실을 구성하거나, 위의 사진 에서처럼 꺾이는 각도를 유전 알고리즘(GA: Genetic Algorithm)을 통해 최적화하여 내부 시험영역에 대하여

전자기장 균일도를 확보하려는 시도도 있었다[70], [95] - [96].

이 때 수치해석적 기법으로 내부 필드를 해석하는데 약 4일간의 시간이 걸렸는데 이는 공진기 내부의 에너지가 바로 빠져나가지 않아 수렴하는데 시간이 오래 걸리기 때문이다. 때문에 자유공간에서의 시간영역 전송선로 행렬을 적용하여 수분 내외로 계산시간을 줄였다. 자유공간에서 해석은 공진기와는 다르게 에너지가 빠르게 빠져나가 수렴조건을 금방 만족하기 때문이다. 최종적으로 교반기의 성능은 교반기와 동일한 부피의 반사체에 반사되는 Poynting 벡터 방향으로의 산란파를 비교하여 그 평균 변화를 최대화함으로써 최적화한다.

이렇게 최적화 과정을 거친 교반기와 덜 최적화 되어있는 교반기에 대해서 IEC 61000-4-21에서 제시하는 방법으로 전자기장 균일도를 측정하였을 때 최적화된 교반기의 성능이 우수하다고 주장하였다. 또한 이 연구에서는 최적화되어 설계된 교반기를 잔향실의 크기에 따라 스케일을 조정하여 사용할 수 있음을 보여주었다.

또 다른 형태의 회전하는 패들형 교반기로는 불규칙적으로 배열한 교반기가 있다. 교반기의 크기와 모양이 전자파 잔향실 내부에 균일한 전자기장을 만들어 내는데 큰 역할을 한다는 것은 자명한 사실이다. 그러나 기본적으로 해석하는 과정에 비해 잔향실이 커야 하는 점을 제외하고도 복잡성을 늘리게 하기 위한 교반기의 설계는 매우 어려웠다. 최적화 알고리즘에 의해 생성된 설계도 직관적이지 않으며, 적용된 잔향실의 규모에 따라 달라질 수 있기 때문이다. 일부 수치 최적화 결과를 통해 대략적인 설계 규칙이 공식화되었지만, 공칭 최저 사용 가능 주파수(LUF) 근처에서 효율적인 교반을 가능하게 설계는 여전히 어려운 문제로 남아 있다.

2000 년대 이전에는 교반기의 형태에 따른 결과가 거의 알려지지 않았으며 높은 주파수에 대해서 실제 잔향실의 3D 전자파 수치 해석 시뮬레이션은 거의 불가능했다. 최근 컴퓨팅 파워가 급속하게 발전함에 따라 이러한 시뮬레이션이 가능해졌고, 이 때 시뮬레이션 그리드에 비스듬한 표면 모델링을 할 때 생기는 계단 식의 근사 시뮬레이션

결과가 회절 등을 통해서 상당히 좋은 결과를 얻어냈다[97] [98].

그 결과로 쉽게 재 조립할 수 있고 재 구성할 수 있는 형태의 교반기가 개발되었다. 이 교반기는 벨크로 선을 이용하여 쉽게 교반기 패들을 탈 부착할 수 있었고, 실험하는 중에도 쉽게 변경이 가능해서 모드 교반 기법에 대한 새로운 통찰력을 제시하였다. 그림 2.8은 참고문헌에서 말하는 불규칙 한 형태의 교반기이다.



그림 2.8. 불규칙성 패턴을 갖는 교반기 [99]

Fig 2.8 Irregular reconfigurable stirrer [99]

이런 불규칙한 패턴을 갖는 교반기가 생각보다 좋은 성능을 보여주자 불규칙 적으로, 즉 랜덤으로 배치하는 형태에 대한 관심이 많아 지고 그에 해당하는 연구가 증가하였다. 하지만 랜덤으로 배열하는 구조에 대해 실험적으로 가장 좋은 구조를 찾기는 어려웠고, 특정 주파수에서 IEC규격을 만족하지 못하는 현상이 나오기도 했다. 쉽게 탈부착이 가능한 패들의 사용은 [99]에서와 같이 교반기 성능을 확인하기 위한 기본적인 연구에서도 사용할 수 있게 되었다. 교반기의 형상 최적화가 주요 초점 목적 이었지만 교반기가 추적하는 경로의 역할도 마찬가지로 중요하며, 이 측면은 최근에도 지속적으로 연구되고 있다[100].

- 공진기 벽 교반 기법

전자파 잔향실 내부에 존재하는 교반기를 움직여서 교반시키는 방법이 아닌 전혀 다르게 내부 모드를 교반 하는 방법으로 잔향실 벽을 교반하는 방법이 있다. 육면체 구조의 벽 중 한 개 혹은 그 이상의 벽을 이동시킨다. 이를 ‘wall-stirring’ 기법이라고 부르며 참고문헌 [101]에서 처음으로 이론과 함께 제시하였다. 벽이 움직이는 전자파 잔향실에서 좋은 전자기장 균일도 특성을 보여주었다. 실제 상황에서는 움직이는 벽에서 실험을 진행한다는 것은 불가능 하지만 기존의 방법과 다른 모드 교반법을 제시하여 발전 가능성을 보여주었다.

음향학 분야에서도 잔향실을 사용하는데, 이 잔향실은 천장이 바닥과 평행하지 않고 두 개의 벽이 인접한 벽에 대해 수직인 각도로 배치된다. [102]에서는 벽을 금속으로 덮음으로써 음향 잔향실을 전자파 잔향실로 사용할 수 있음을 제안했다. 첫 번째 챔버는 그림 2.9와 같이 약 $2\text{ m} \times 1.8\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 의 "텐트"에 금속 천을 재봉하여 제작되었다.



그림 2.9. 줄에 걸려 있는 VIRC [105]

Fig 2.9. The VIRC hanging on strings [105]

금속 천이 내부에 모드를 잘 교반 시켜줄 것처럼 보였지만 실제로는 기대만큼 좋은 전자파 균일도가 형성되지 않았다. 음향에서는 느린 속도(음속)로 움직이는 파동에 대한 해석이었기 때문에 매우 빠른속도(광속)로 행동하는 전자파에서는 그 필드의 해석이 원하는 대로 나오지 않았다. 하지만 바닥과 천장의 각도를 조정하여 텐트처럼 보이는 구조를 흔들어서 통계적으로 균일한 필드를 만들 수 있었다. 이 교반 메커니즘을 통해 임의의 편파를 갖는 공간적으로 균일한 전기장이 형성되었다. 이런 형태의 잔향실은 VIRC(Vibrating Intrinsic

Reverberation Chamber)라고 불린다[103] - [105]. 본질적으로 VIRC는 벽이 유연한 전도성 재료로 만들어지고 내부 교반기가 없는 전자파 잔향실이다. 하나 이상의 벽을 이동하면 잔향실 내부 필드의 모드 동작이 변경되어 공진 주파수가 변경된다.

이 교반 기술은 클래식한 회전하는 모드 교반기로 가능한 것보다 훨씬 더 큰 구조에서 주파수 편이를 발생시킨다. 이는 같은 크기의 잔향실에 대해서 VIRC의 동작 주파수 범위가 더 낮은 주파수까지 확장할 수 있다는 것을 의미한다.

종종 VIRC는 움직이는 벽이 있는 전자파 잔향실과 비교되는데, 움직이는 벽은 실제로 모드를 변경할 수 있도록 구조를 변경하지만 상대적으로 낮은 주파수에서의 영향은 미비하다. 따라서 일각에서는 이 특정 잔향실을 비슷한 크기의 일반적인 전자파 잔향실에 비해서 훨씬 낮은 주파수에서 사용할 수 있다고 주장한다.

VIRC는 상당수의 연구 기관 및 업계에서 사용 중이며, 주요 이점 중 하나는 테스트 장비를 실험실로 가져오는 대신 VIRC를 테스트 장비 쪽으로 가져가서 설치할 수 있다는 점이다.

일반적으로 육면체 구조의 잔향실과 원천 구조적으로 다른 형태의 잔향실도 존재한다. 이 형태는 원형 구조로 제작되며 경기장과 같이 생겨서 ‘stadium chamber’ 라고 불린다. 곡면의 평면뿐만 아니라 확산 및 집중이 될 수 있도록 내부에 다양한 형태를 구성한다.

2.2.2 전기적 모드 교반 기법

시간이 변함에 따라 경계 조건이 기계적으로 변하는 것이 아니라, 전자적 수단에 의해 변하는 기술을 전기적모드 교반이라고 정의한다. 기계적 교반과는 다르게 잔향실의 어떤 부분도 움직이지 않는다. 전기적 모드 교반 기술은 공진 주파수를 이동시키는 방법에서부터 여러 소스를 사용하는 방법에 이르기까지 다양한 방법을 사용한다.

전기적 모드 교반 기법은 기존에 사용하는 기계적 모드 교반 기법의 약점을 보완하고자 개발되었다. 기계적 모드 교반법의 약점은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 전자파 잔향실의 크기에 비해 회전하는 교반기가 너무 많은 자리를 차지한다.
- 2) 교반기를 회전시키거나 잔향실의 벽을 움직이는데 어느 정도의 시간이 필요하다.
- 3) 교반기가 원하는 위치에 도달했을 때, 안정화되는 시간이 필요하다. 빠른 시간내에 안정화되는 교반기도 존재하지만 더 비싸고 무겁다.
- 4) 기계적인 움직임을 위해 회전 모터와 같은 외부 동력이 필요하며 이런 기기들의 유지가 필수적이다.

전기적 모드 교반 기법은 위에 열거한 기계적 교반 기법에 대한 해결이 되지만 실제로는 기계적 교반 기법 보다 많이 사용되지는 않는다.

- 주파수 교반 기법

에르고딕 가설이 유효하다고 가정하면, 정상적으로 잘 작동하는 전자파 잔향실의 통계적 속성은 변하지 않는다. 만약 연속파(CW: Continuous Wave)신호로 잔향실을 여기하면 협대역이기 때문에 더

많은 모드가 필요할 수 있다. 대신 큰 대역의 주파수 변조 신호를 사용하면 모드 교반 효과를 얻을 수 있다. 이것이 기본적인 주파수 교반 기법의 원리이며 대역폭을 넓게 사용하면 할수록 더 좋은 전자기장 균일도를 확보할 수 있다.

주파수 교반법의 초기에는 더 높은 대역폭을 활용하기 위해 광대역 가우시안 노이즈를 사용하였었다[34]. 좁은 대역폭의 백색 가우시안 노이즈를 사용하는 주파수 교반법은 전자파 내성 시험을 수행하는 데 사용하기 위해 제어된 백색 가우시안 노이즈의 대역폭을 분석한 [35]에서 처음보고 되었다. 이 Loughry에 의해 개발된 프로세스는 협대역 필터 (5, 10, 25 및 50MHz)를 사용하여 백색 가우시안 노이즈를 대역폭 10, 20, 50 및 100MHz에 대해서 생성했다.

그림 2.10은 주파수 교반법이 사용된 2차원의 단순한 공진기의 모습을 보여주고 있다.

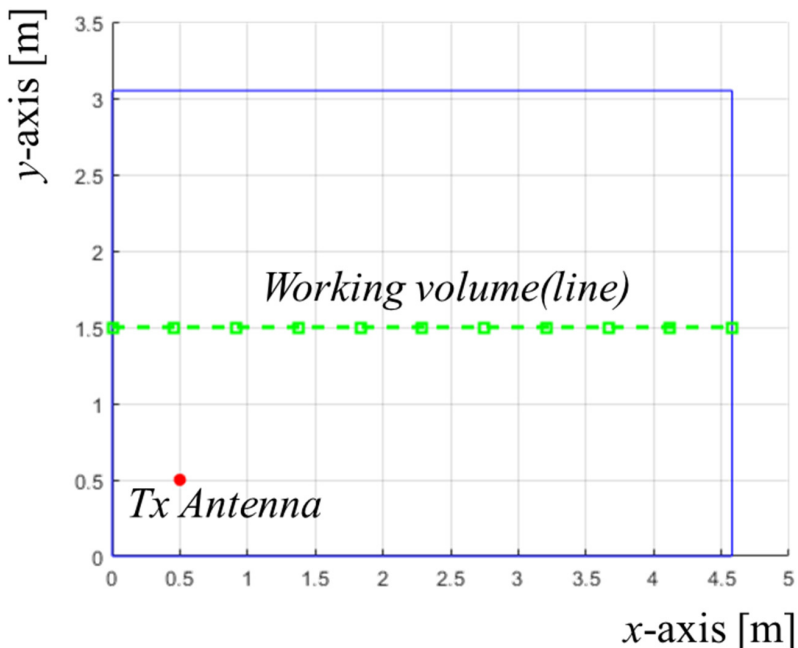
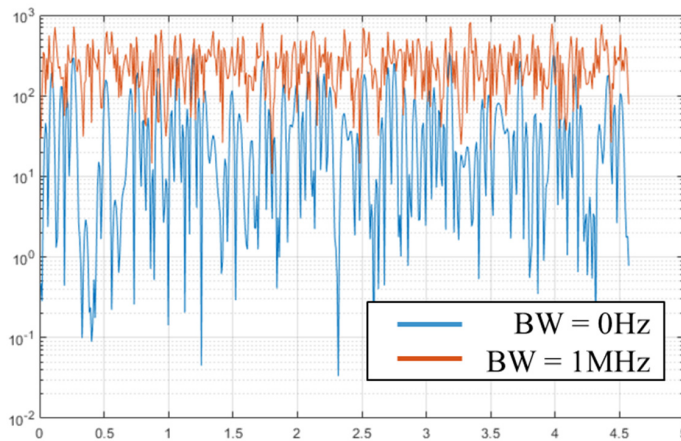


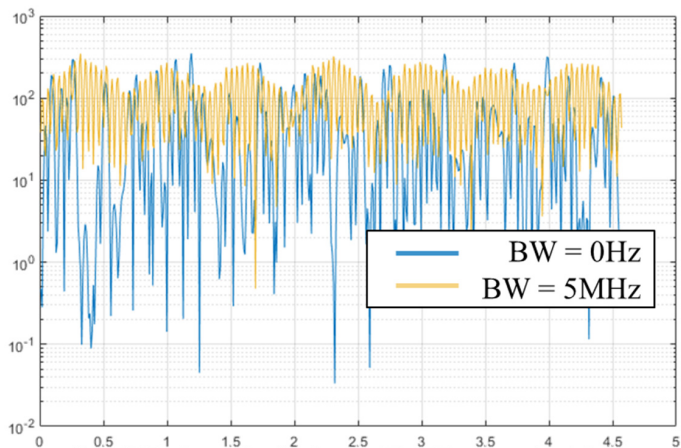
그림 2.10. 2차원 전자파 잔향실과 안테나 및 시험 영역

Fig 2.10. Two dimensional RC and working volume

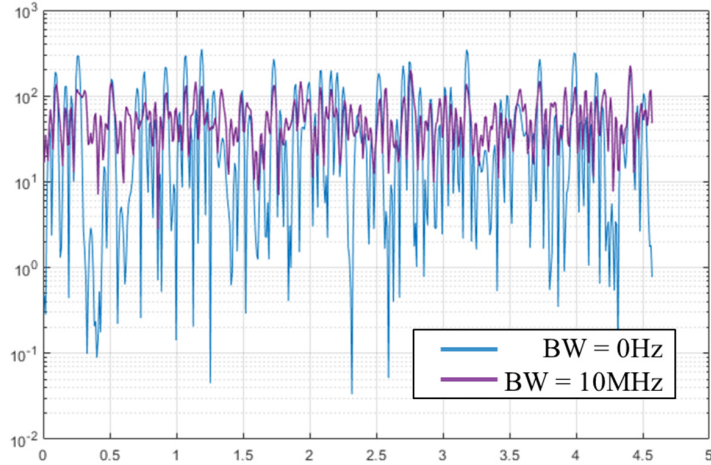
여기서 파란색 경계가 잔향실의 경계이며, 빨간색 점 위치에 선형태의 이상적인 소스가 존재한다. 그리고 초록색 점선으로 표현된 점이 전기장을 관측하는 시험 영역이 된다. David A. Hill이 제시하는 방법으로 주파수 교반을 시행하면 대역폭이 넓어짐에 따라 시험영역에서의 전기장이 안정화 되는 것을 확인 할 수 있다[34] [106] [107]. 아래 그림 2.11의 (a)부터 (c)까지 대역폭을 사용하지 않은 신호에 대해서 각각 1MHz, 5MHz 그리고 10MHz의 대역폭을 사용한 경우 전자파 분포를 확인할 수 있다.



(a) 0Hz bandwidth vs 1MHz bandwidth



(b) 0Hz bandwidth vs 5MHz bandwidth



(c) 0Hz bandwidth vs 10MHz bandwidth

그림 2.11. 대역폭 (a) 1MHz (b) 5MHz (c) 10MHz의 교반된 전기장

Fig 2.11. Frequency stirred E-field with BW(a) 1MHz (b) 5MHz (c) 10MHz

대역 제한 백색 가우시안 노이즈 (BLWGN: Band Limited White Gaussian Noise)를 이용해 실제 측정에 활용한 사례가 [108]에서 발표되었다. 이 논문에서 제안된 측정 시스템은 전자파 내성시험에 활용 가능하다. 이런 사례에서 사용되는 주파수 모드 교반 기법의 장점은 실시간으로 전자기장 균일도가 형성된다는 점이다. 기존의 기계적 모드 교반 기법은 교반기가 회전하는 동안 기다려야 전자기장 균일도를 확보할 수 있었다. 이 논문에서는 기계적 교반 기법에 비해 200배 이상 시간을 줄일 수 있다고 주장하며, 잔향실을 여기 시킬 대역폭을 선택하는데 있어서 시험 장비의 대역폭에 대한 반응을 반드시 고려해야 한다고 강조하였다.

- 임의의 다중 안테나 교반법

전자파 잔향실의 저주파 영역에는 제한된 수의 중첩된 공진 모드를 특징으로 한다[109]. 일반적으로 잔향실 전체의 전자기장 분포가 가장 지배적인 공진 모드에 의해 영향을 받는다. 이런 공진모드는 필드를

강하게 집중시키며 전자파 잔향실의 목적인 전자기장을 균일하게 분포하는데 있어서는 도움이 되질 않는다.

지배 모드로 인한 전자파 불균형에 대한 해결책은 여러 안테나를 통해 전자파 잔향실을 여기 시키는 것이다. 여러 개의 안테나에서 각각 독립적인 모드를 형성할 수 있고 이 모드들이 각기 다르게, 혹은 동시에 형성되면서 내부의 전자기장을 교반시킨다. 즉, 잔향실의 사용 가능한 모든 모드들의 평균적인 기여도를 동일하게 하는 것이다.

무작위로 안테나에 독립적인 신호를 가하는 경우에는 비교적 좋은 결과가 나타나지 않았다[106]. 그러나 다중 안테나를 사용하여 모드를 교반하는 방법은 ‘다중 안테나 스티어링 기술(MAS: Multi-Antenna Stirling)’ 이라고 불리는 방법을 통해 좋은 균일성을 확보하였다[110]. 여러 개의 안테나 세트에 의해 여기 되는 전자파 잔향실을 생각해 보면 각 안테나는 특정 진폭의 고조파 신호에 의해 동작한다. 이 때 다른 조합의 안테나를 선택하여 여기 시키면 마치 기계적 교반기가 각기 다른 위치에 있는 것과 같은 효과를 낸다. 이때 안테나의 조합은 서로 독립적일수록 전자기장 균일도가 좋을 것이라고 생각되지만, [110]에서 입증하였듯이 일부 안테나끼리 상관관계가 있을 때 최적의 모드 교반이 이루어진다. 다중 안테나로 여기 되는 경우에 중첩의 원리에 따라서 각각 단일 안테나가 발생하는 전자파 분포를 합상해서 전체 전자기장을 계산할 수 있다. 그래서 만약 시험영역 내의 특정 위치에서 각각의 안테나의 세기를 조정하여 전자기장을 제어할 수 있다면, 전자기장 균일도를 쉽게 확보할 수 있을 것이다. 공간적으로 이상적인 균일성은 시험 영역 내의 한 지점에서 최대 필드가 시험영역 내의 다른 위치 및 방향에서 최대값에 비해 많이 벗어나지 않을 때 확보된다. 이상적인 균일성을 확보하기 위해서는 각 안테나에 여기 되는 신호가 부분적으로 상관되어야 한다. 이 부분 상관관계는 모든 여기된 안테나와 수신점 간의 전달함수에 따라 달라지게 된다. 아래 그림 2.12는 앞서 진행하였던 2차원 전자파 잔향실에서 안테나의 개수를 바꿔 가면서 전자기장을 계산하였다.

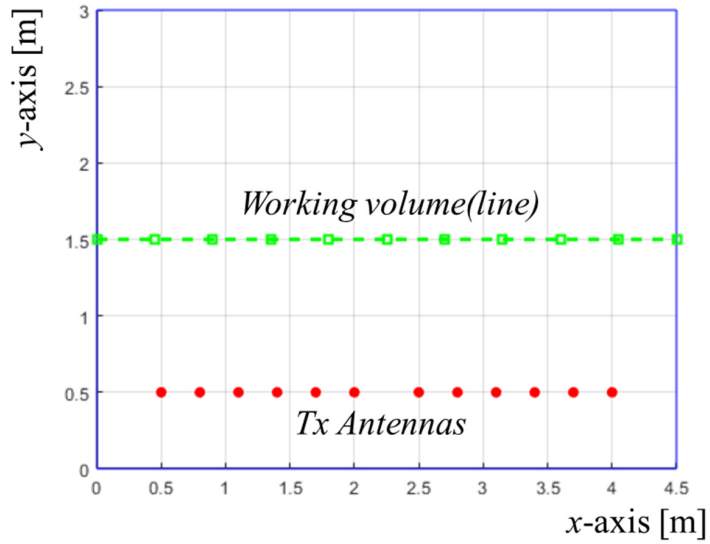


그림 2.12. 여러 개의 안테나로 여기된 전자파 잔향실

Fig 2.12. Electromagnetic RC excited by multiple antennas

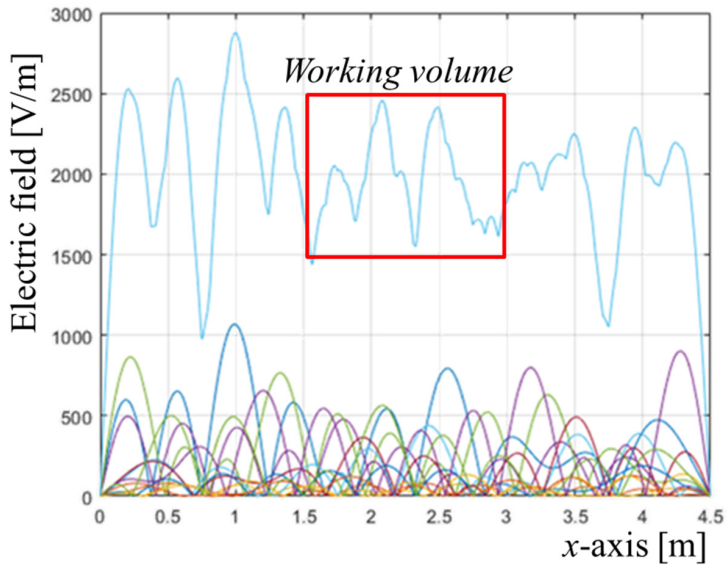


그림 2.13. 임의의 가중치가 적용된 다중 안테나의 전기장

Fig 2.13. Electric field of multiple antennas with random weight

이때 12개의 안테나에 의해서 여기된 필드를 모두 중첩하여 그린 결과가 그림 2.13에 도식화되어 있다. 그림 2.13 내에 빨간색 박스로 지정된 영역이 전자기장 균일도를 목표로 하는 시험 영역이다. 임의의 숫자로 각각의 안테나에 가중치를 주는 경우 그림에 보이듯 균일한 전자기장이 형성되지 않는다. 하지만 12개의 안테나에 적절하게 가중치를 부여한다면 아래 그림 2.14처럼 시험 영역 내에서 전기장이 비교적 균일하게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

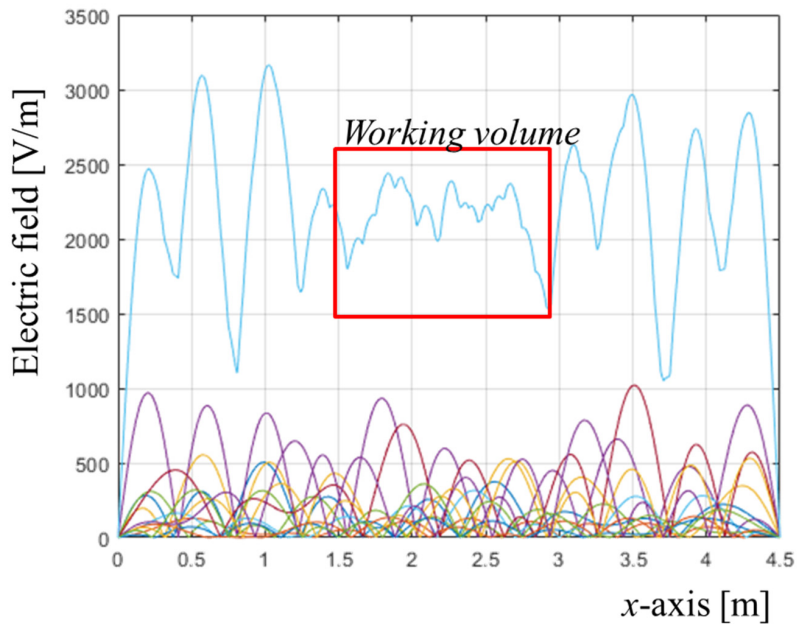


그림 2.14. 조정된 가중치가 적용된 다중 안테나의 전기장

Fig 2.14. Electric field of multiple antennas with selected weight

이 때 그림 2.13과 그림 2.14에서 사용된 12개에 안테나에 해당하는 가중치는 아래 표 2.2에서 확인할 수 있다.

표 2.2. 그림 2.13과 2.14에서 적용된 안테나 가중치

Table 2.2. Antenna weights applied in Figures 2.13 and 2.14

| No. of Antenna | | Fig 2.13 | | Fig.2.14 | |
|----------------|----|----------|--------|----------|--------|
| 1 | 2 | 0.4241 | 0.3411 | 0.1681 | 0.2224 |
| 3 | 4 | 0.5414 | 0.9262 | 0.2649 | 0.3429 |
| 5 | 6 | 0.2985 | 0.3381 | 0.3730 | 0.2233 |
| 7 | 8 | 0.8595 | 0.3405 | 0.2625 | 0.3914 |
| 9 | 10 | 0.1381 | 0.5078 | 0.3166 | 0.3293 |
| 11 | 12 | 0.8567 | 0.3843 | 0.5299 | 0.3612 |

- 소스 포지셔닝 교반법

전자파 잔향실의 원천에 대한 교반기법은 1992년 처음으로 [111]에서 소개되었다. 이 잔향실에서 내부에 안테나의 위치가 모드를 섞는 과정에서 변한다. 실제로 이 논문에서 보여주듯 사각 공진기 내부에의 모드는 공진기모드와 소스에 의해서 결정된다. 일반적인 기계적 교반기는 소스를 고정시키고 교반기를 회전하거나 움직임으로써 모드를 섞는다면, 소스 포지셔닝 교반법은 잔향실을 고정하고 안테나를 변경해 가면서 모드를 섞는다. 잔향실은 그대로 두고 소스를 변경하여도 시간 평균적으로 균일한 전기장이 형성된다[35] [101] [111].

소스 교반 잔향실의 도입 이후, 이러한 잔향실을 구현하고 통계적인 전기장을 연구하는 많은 연구들이 등장하였다. [112]에서는 이론에 기반하여 실험적인 연구가 수행되었고 통계적 특성에 초점을 맞추었다. 특히 소스 교반기법에 사용되는 안테나를 제어함으로써 필드의 통계적 특성을 제어할 수 있는 가능성을 보여주었다. 그들의 추가 연구에서는 잔향실 내부의 전자기장을 교반 할 수 있는 실제 가능성을 입증하는 결과를 제공했다.

소스를 교반하는 방법의 가장 큰 장점은 기계적 교반기가 없다는 점이다. 그래서 보다 더 넓은 시험영역이 확보가 가능하며 효율적으로

전자파 잔향실을 운영 할 수 있다. 소스 스티어링 기법을 실제로 구현하는 것이 이 연구분야의 가장 큰 도전이었다. 기계적으로 소스의 위치를 변경하면 케이블이 꼬여버리는 문제 등의 또다른 문제를 발생시킬 수도 있으며, 복잡한 이동이 불가능하다. 따라서 단일 안테나를 여러 위치에서 움직이는 것 보다 배열 안테나를 잔향실 벽면에 장착하여 이 안테나를 조정하는 방법 등으로 소스 스티어링을 진행해야 한다. 또는 이런 어레이 안테나를 설치하고, 안테나 제어를 스위칭 해 가며 특정 안테나만 동작 시켜서 제어할 수도 있다. 결국 기계적 교반 기법은 주파수 교반기법으로 대체될 수 있음을 암시한다. 아직 주파수 교반기의 문제점이 있고 직관적이지 않기 때문에 기계적 교반기법을 많이 사용하지만, 주파수 교반기법은 기계적 교반기법에 비해 더 큰 잠재력을 가지고 있다고 평가받는다.

지금까지 개발된 여러 기계적, 전기적 교반 기술들은 결국 전자파 잔향실 내부에 모드가 생기지 않고 최대한 교반 시켜서 통계적으로 균일하게 만들고자 하는 동일한 목적을 가지고 있다. 여러 시도에서 확인하였듯, 전자파 잔향실 내부에 안테나를 여러 개 배치하거나 교반기의 형태를 변경하면 내부 전자기장의 분포가 변하게 되고, 최대한 그 변화가 많이 이루어 질 수 있도록 하는 것이 좋은 전자파 잔향실의 기준이 된다. 앞서 소개한 여러 기술 외에도 벽면을 금속이 아닌 메타표면(Metasurface)을 이용해 교반하는 연구들도 진행되고 있다 [66] [67] [69] [113] [114].

앞서 설명한 교반기들 중에서 본 논문에서는 Z-fold형태의 교반기를 패널의 개수에 따라서 분석한다. 교반기는 앞서 설명한 것처럼 금속 평면을 지그재그 형태로 이어 붙여서 제작한다. 내부에 교반기를 여러 개 두기도 하는데 표준과학연구원에서 보유하고 있는 전자파 잔향실은 3개의 패널로 만들어진 수직 교반기와 5개의 패널로 만들어진 수평 교반기가 함께 있다. 수직 교반기는 벽에서 파장대비 1/4만큼 떨어지게 유지하였다. 이때 파장은 전자파 잔향실의 사용가능한 최저 주파수에 대한 파장을 의미한다.

제 3 장 광원추적법 기반 전자파 잔향실의 균일도 해석

본 장에서는 전자파 잔향실을 해석하는 방법 중, 가장 중요한 파라미터인 전자기장 균일도를 해석하는 방법에 대해서 소개한다. 수치해석기법을 적용하는 것이 아닌 광원 추적법(ray tracing)을 적용하여 계산을 진행하고 주파수에 관계없이 광원을 통해 안테나에서 진행가능한 모든 방향을 먼저 찾은 뒤, 해석하는 주파수에 따라 시험영역의 전자기장 균일도를 계산한다. 해당 방법들에 대한 소개를 진행한 뒤 그린함수를 알고 있는 구조에 대한 결과를 이용하여 검증할 예정이다.

3.1 광원 추적법 개요 및 적용범위

광원 추적법은 주로 컴퓨터 그래픽스 분야에서 적용되고 있는 렌더링 기법으로 광원과 특정 대상을 설정하고, 광원에서 나온 빛이 대상에 반사되는 모습을 시뮬레이션으로 해석하여 표현하는 방법이다 [115][116]. 간단하게 광원 추적법에 대해서 서술한 후, 본 논문에서 제안하는 전자파 잔향실에 적용하는 내용을 진행할 것이다.

3.1.1 광원 추적법 개요

Ray tracing은 광선 추적법, 광원 추적법 등으로 불리우는데 가상 현실속에서 특정 물체에 들어오는 빛은 그 공간에 존재하는 여러 개의 광원이 주변 환경에 의해 반사 및 회절 되어 들어오게 된다. 이를 광원에서부터 추적하여 반사를 통해 들어온 빛인지, 투과를 해서 들어온 빛인지를 계산한다.

광선이 물체의 표면에 반사되어 다시 돌아오는 경로를 계산하여

나타나는 빛의 세기를 픽셀별로 나타내야 하는데, 모든 광원으로 시작하여 물체까지 도달하는 경로를 계산하면 실제 보이지 않는 곳까지 계산을 해야 하기 때문에 엄청나게 많은 양의 계산을 필요로 한다. 따라서 물체가 보여지는 곳, 즉 가상의 공간상에서 사용자가 바라보는 화각을 기준으로 광원까지 역으로 추적하게 된다. 이렇게 되면 실제 카메라에 의해 보여지는 부분에 대한 모든 빛의 세기가 계산이 되며 불필요한 계산을 할 필요가 없게 된다. 아래 그림 3.1은 광원 추적법의 개념도를 나타내고 있다.

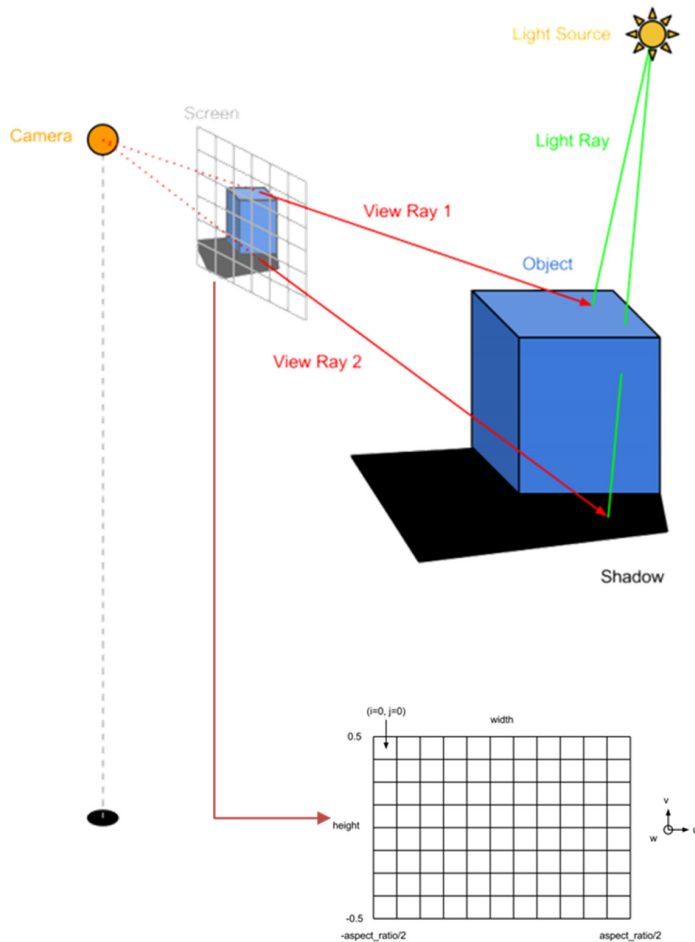


그림 3.1. 광원 추적법의 개념도

Fig 3.1. Concept of ray tracing

다양한 광원이 존재할 때 정확하게 그 빛의 효과에 대해 시뮬레이션을 할 수 있다. 이 때 필요한 3가지 정보는 다음과 같다.

- 1) 광원 (Light source)
- 2) 지형 데이터 (Geometric data)
- 3) 카메라의 위치 (Position of the camera)

이 세개의 정보가 있을 때 광원 추적법으로 상호작용하는 이미지를 생성해 낼 수 있다. 아래 그림 3.2는 일반적인 광원 추적법의 알고리즘 수도 코드이다[115].

```
For each pixel
  calculate view ray
  if ray intersects with object
    calculate lighting for intersection point
    set pixel color from lighting equation
  else
    set pixel color to background
```

그림 3.2. 광원 추적법 알고리즘의 수도 코드

Fig 3. 2. Pseudo-code of general ray tracing algorithm

모니터에 비춰지는 각 셀에 대해서 대상까지의 벡터가 존재하고 그 벡터가 반사되는 각도를 대상의 정보를 통해 알아 낼 수 있다. 모든 픽셀에 대해서 이런 계산이 진행되며 여러 번의 반사를 통해 들어온 빛이 어떤 광원을 기점으로 시작되었는지를 추적하게 된다. 어떤 광원에서 어떤 물체를 투과 혹은 반사되어 모니터 픽셀에 도달했는지가 계산이 되면, 그 광원의 세기를 기준으로 진행 거리만큼 감쇄가 일어나고 투과 및 반사를 통해 줄어드는 빛의 세기를 계산할 수 있다.

만약 광원이 여러 개 존재한다면 한 픽셀에 대해서 여러 광원들의 감쇄가 고려된 빛의 세기를 모두 중첩하여 더하게 된다. 이는 전자기학에서 말하는 중첩의 원리와 유사하며 빛을 세기만을 고려하여 계산한다. 이렇게 모든 픽셀에서 광원 추적법을 적용하면 실제와 유사한 이미지를 컴퓨터 상에서 재현해 낼 수 있다. 아래 그림 3.3은 광원 추적법을 적용하여 그린 그림의 예시이다. 아래 그림에서 확인할 수 있듯이 매우 사실적으로 재현되는 것을 볼 수 있다.

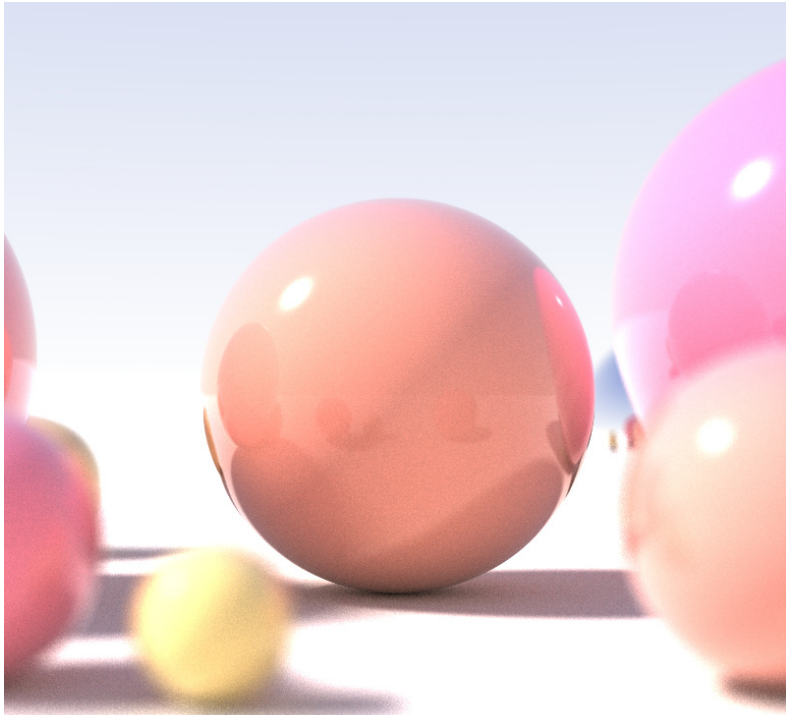


그림 3.3. 광원추적법이 적용된 그림 [공개 자료]

Fig 3.3. The image with ray tracing method applied

3.1.2 광원 추적법의 적용 범위

앞서 설명한 광원 추적법은 컴퓨터 그래픽스에서 개발되어 사용되어 진 것이기 때문에 시점에서 광원까지 역 추적하게 된다. 전자파 잔향실에서 적용될 때는 경로를 추적하는 알고리즘은 그대로 이용하되, 전자파 소스에서 출발을 한다. 전자파 잔향실은 공진기 형태로 닫혀 있는 면이며 내부에 교반기 등의 물체가 존재한다.

본 연구에서 적용되는 광원 추적법은 물체로부터 출발하는 것이 아닌 원천으로부터 출발한다. 전자기장을 형성하는 원천은 보통 내부에 안테나에서 시작하며, 추후 모든 안테나를 고려할 수 있도록 전방향으로 무 지향성(omni-directional)안테나를 가정한다.

현재 많은 연구에서도 전자파 잔향실 내부에 안테나 배치에 대해서는 시험자의 직관에 따라 가능한 많이 반사될 수 있는 곳을 향하게 하는 것이 보통의 방법이다. 때문에 교반기가 설치된 곳이나 전자파 잔향실의 구석을 향해 안테나를 향하게 되는데 이런 경우 안테나의 빔 패턴에 따라서 각각 가중치를 주어 해석한다.

가시광선의 주파수가 아닌 수백 MHz ~ 수 GHz대역의 전자파를 사용하므로 해당 전자파의 편파(polarization)를 고려한다. 전자파의 진행방향에 대해 수직하게 전기장이 있다고 가정하며 반사되는 벽면에 대해 수직한 성분과 수평 한 성분을 나누어서 계산한다. 이에 대한 자세한 설명은 뒤에서 진행한다.

기존의 광원 추적법은 본 연구의 대상처럼 닫힌 공간보다 열린 공간에서 해석을 한다. 배경이나 주변 지형 지물에서 반사되는 특정 환경을 시뮬레이션 하기 때문에 반사된 빛이 수십 번 이상 반복적으로 결과에 영향을 미치지 않는다. 그렇게 영향을 끼치는 특정한 상황에서도 빔 깊이(ray depth)에 따라 그 영향이 작아진다. 빔의 깊이가 깊을수록 (많이 반사할 수록) 렌더링 되는 이미지의 품질은 좋아지지만, 그에 대한 계산 횟수가 증가한다. 일반적으로 10번 이내의 횟수를 반사하여 계산한다.

기존에 적용되는 것과는 다르게 본 연구는 폐쇄된 공간에서의 해석이기 때문에 몇 가지 조건이 들어가게 된다. 먼저 전자파가 몇 번까지 반사되었을 때 소멸하는지에 대한 정의를 해야 한다. 이는 전자파 잔향실이 대부분 금속 도체로 이루어져 있고 나머지 공간은 비어 있기 때문에, 공간상을 전파할 때는 감쇄가 일어나지 않으며 금속을 반사할 때마다 1%씩 감쇄가 일어난다는 가정으로 진행하였다. 이 경우 229회 반사되는 경우 원래 신호의 0.10배까지 줄어들게 된다.

3차원 해석 공간에 대해서 해석을 진행하려면 3차원 CAD데이터가 필요하며 각 전자파 잔향실을 이루고 있는 평면을 구성해야 한다. 평면의 정보는 3개의 점을 알면 아래 수식으로 방정식을 계산할 수 있다.

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (3.1)$$

이 때 변수 x , y , z 의 계수는 임의의 3개의 점 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) 에 대해서 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$A = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} \quad (3.2)$$

$$B = \begin{vmatrix} x_1 & 1 & z_1 \\ x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \end{vmatrix} \quad (3.3)$$

$$C = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.4)$$

$$D = - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} \quad (3.5)$$

식(3.2)에서 (3.5)까지에 표현되어 있는 $|\cdot|$ 기호는 행렬식(Determinant)의 기호이다.

직육면체 공진기만 존재하는 경우 총 6개의 평면이 존재하고 이 평면에 대한 A, B, C, D 값을 알 수 있다. 이 때 각 평면의 법선 벡터는 방정식의 계수인 A, B, C 를 통해 알 수 있다. 이후 광원 추적법을 통해 안테나에서 출발한 전자파가 어느 점에서 만나고 어느 방향으로 향하는지를 계산할 수 있다. 그림 3.4에서처럼 어떤 벽면으로 벡터가 들어올 때, 반사되는 벡터는 다음 수식 (3.6)과 같이 계산할 수 있다.

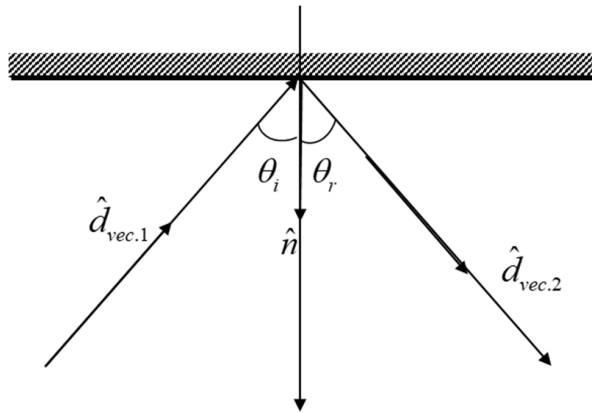


그림 3.4. 특정 벽면에 대한 입사파와 반사파

Fig 3.4. Incident and reflected waves on the wall

$$\hat{d}_{vec.2} = \hat{d}_{vec.1} + 2 \left(\left| \hat{d}_{vec.1} \right| \cos \theta_i \right) \hat{n} \quad (3.6)$$

여기에서 $\hat{d}_{vec.1}$ 는 입사하는 방향으로의 방향 벡터이며 $\hat{d}_{vec.2}$ 반사된 선로의 방향 벡터이다. \hat{n} 은 부딪친 벽면의 법선 벡터이고 θ_i 는 입사각이다. 실제 계산에 있어서는 입사각을 구하는 것 보다 벡터 연산을 하는 것이 편하기 때문에 $\cos \theta_i$ 항을 변형하여 다음과 같은 수식으로 정리할 수 있다.

$$\cos \theta_i = \frac{(-\hat{d}_{vec.1} \cdot \hat{n})}{|\hat{d}_{vec.1}| |\hat{n}|} \quad (3.7)$$

이제 수식 (3.7)을 (3.6)에 대입하여 정리하면,

$$\hat{d}_{vec.2} = \hat{d}_{vec.1} + 2 \left(\frac{\hat{d}_{vec.1} \cdot \hat{n}}{|\hat{d}_{vec.1}| |\hat{n}|} \right) \hat{n} \quad (3.8)$$

평면의 법선 벡터는 단위 벡터이기 때문에 식 (3.8)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\hat{d}_{vec.2} = \hat{d}_{vec.1} - 2(\hat{d}_{vec.1} \cdot \hat{n})\hat{n} \quad (3.9)$$

식 (3.9)를 사용하면 각각의 방향으로 방사한 전자파에 대해서 방향벡터만 알고 있으면 반사된 벡터를 계산해 낼 수 있다.

초기에 설정한 안테나의 위치에서 시작하여 모든 방향으로 전자파를 방사하게 된다. 이때 처음 방향벡터의 설정은 구좌표계에서 표현되는 θ 와 ϕ 를 통해 계산해 낼 수 있다. 아래 그림 3.5는 3차원 상에서 구좌표계를 보여주고 있다.

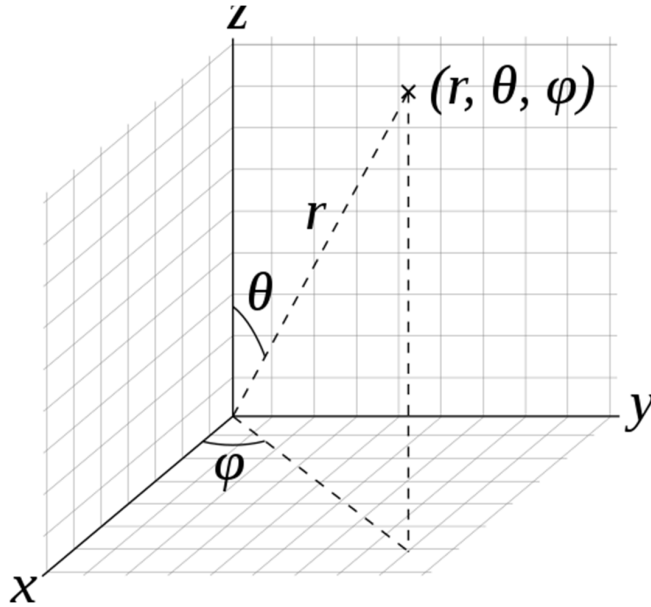


그림 3.5. 3차원 구 좌표계

Fig 3.5. Three-dimensional spherical coordinate system

이 좌표계에서 고각과 방위각에 따라서 안테나의 초기 방향벡터를 설정할 수 있다. 초기 방향벡터를 기반으로 앞서 구했던 6개 면에 대한 교점을 계산한다. 교점을 계산하기 위해서는 직선의 방정식이 추가로 필요한데, 3차원에서 직선의 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P = P_1 + u(P_2 - P_1) \quad (3.10)$$

여기서 P 는 직선의 방정식을 나타내는 벡터이며, P_1 과 P_2 는 직선상의 두 점, 그리고 u 는 매개변수이다. 한 점은 시작점으로 잡고 다른 한 점은 방향벡터를 알고 있기 때문에 적당한 상수를 곱해서 더하면 다른 한 점을 쉽게 구할 수 있다. 이 직선과 특정 평면의 방정식과의 교점을 구하려면 식 (3.1)과 (3.10)을 연립하여 계산할 수 있다. 식

(3.10)의 각 성분들을 식 (3.1)에 대입하면 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} & A(x_1 - u(x_2 - x_1)) \\ & + B(y_1 - u(y_2 - y_1)) \\ & + C(z_1 - u(z_2 - z_1)) + D = 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

이제 이 식을 u 에 대해 정리하면 식 (3.12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_{\text{intersect}} = \frac{Ax_1 + By_1 + Cz_1 + D}{A(x_1 - x_2) + B(y_1 - y_2) + C(z_1 - z_2)} \quad (3.12)$$

식 (3.12)에 표현된 매개변수는 직선과 평면이 만났을 때를 나타내는 값이다. 따라서 그 점을 계산하기 위해서 식 (3.12)를 직선의 방정식 (3.10)에 대입하여 구할 수 있다.

$$P_{\text{intersect}} = P_1 + u_{\text{intersect}} (P_2 - P_1) \quad (3.13)$$

이렇게 직선과 평면의 교점을 계산하고 나면 우리의 전자파 잔향실에 해당하는 영역에 있는 점을 탐색해야 한다. 식 (3.13)을 통해 교점을 계산하면 총 6개의 점이 구해진다. 이론적인 직선과 평면의 방정식을 통해 구한 교점으로 무한 직선과 무한 평면에 대한 값을 구해지기 때문이다. 이렇게 계산된 점들 중에 다음 조건을 만족하는 점을 추려낸다.

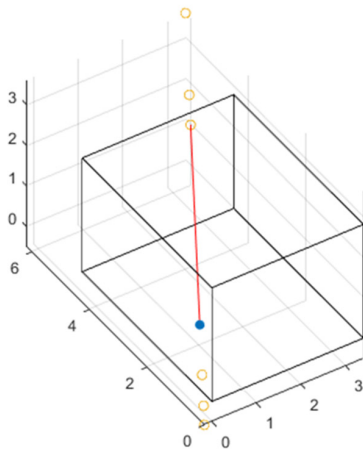
$$x_{\min} - \varepsilon_{rc} < x_p < x_{\max} + \varepsilon_{rc} \quad (3.14)$$

$$y_{\min} - \varepsilon_{rc} < y_p < y_{\max} + \varepsilon_{rc} \quad (3.15)$$

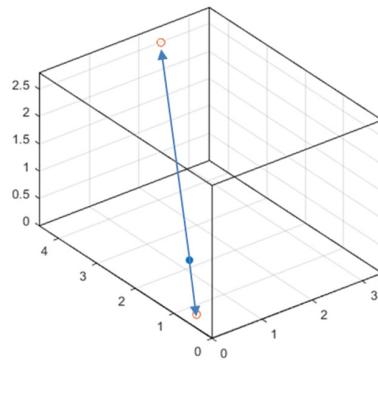
$$z_{\min} - \varepsilon_{rc} < z_p < z_{\max} + \varepsilon_{rc} \quad (3.16)$$

위의 수식 (3.14)부터 (3.16)까지에 있는 $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}, z_{\min}, z_{\max}$ 값은 각각 해석하고자 하는 전자파 잔향실의 x 좌표, y 좌표, z 좌표의 하한과 상한 값이다. ε_{rc} 로 표현된 값은 매우 작은 값으로 실제 교점을 구할 때 계산에 의한 오차를 방지하고자 대입한 상수이다. 여러 번의 반사를 통한 계산에서 생길 수 있는 수치오차를 고려한 값이며, 일반적으로 10^{-10} 정도의 값으로 설정한다.

위의 과정을 지나고 나면 일반적으로 2개의 점이 탐색이 된다. 그 두개의 점 중 다음 방향으로의 점을 판별해야 한다. 아래 그림 3.6에서는 특정 공진기에서 특정 진행방향으로의 교점을 구하고 전자파 잔향실의 범위 내에 있는 점을 찾은 결과이다.



(a) 직선과 평면의 모든 교점



(b) 잔향실 내부의 점

그림 3.6. 특정 방향의 전자파와 잔향실이 만나는 점

Fig 3.6. Intersection point where ray meets the RC

그림 3.6의 (a)에서는 모든 평면과의 교점을 구했기 때문에 총 6개의 교점이 계산되었고, 식 (3.14)부터 (3.16)을 이용해서 내부의 전자과 잔향실의 경계에 있는 점 만을 그림 3.6 (b)에 표현하였다.

이 두개의 점 중 진행방향으로 점을 찾기 위해서 입사파의 방향벡터와 안테나의 시작점에서 벽면으로 벡터가 같은 것을 찾으려면 된다. 추후 여러 번의 반복을 통해 100번 이상의 반사점을 찾기 위한 점화식 형태로 표현하려면 n 번째 진행방향의 방향벡터와 n 번째 점에서 $n+1$ 번째 점까지의 방향벡터가 일치하는 것을 찾아준다. 방향벡터가 일치하는 것은 두 벡터의 내적을 통해 계산할 수 있으며 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\hat{d}_{vec,n} \cdot (p_{n+1} - p_n) > 0 \quad (3.17)$$

위와 같은 방법으로 원하는 횟수만큼 반복하면 전자과 잔향실에서 직선으로 방사하는 선에 대하여 모든 반사점을 찾을 수 있다. 아래 그림 3.7은 전자과 잔향실에서 각각 10번, 100번까지 반사하는 점들을 모두 찾아 선으로 이은 결과이다.

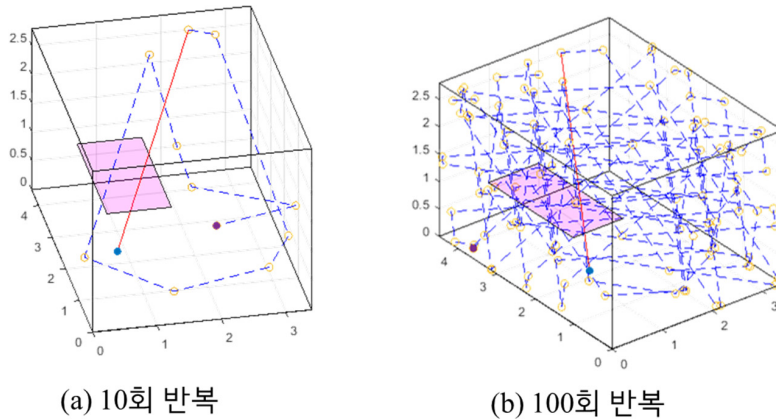


그림 3.7. 전자과 잔향실에서 반복적으로 반사되는 빔

Fig 3.7. Rays repeatedly reflected in the RC

그림상에서 보이는 분홍색 영역은 시험영역 중 하나의 평면이고 파란색 점에서 송신 안테나가 전자파를 빨간색 화살표 방향으로 방사하는 상황이다. n 번 반복 후 마지막에 도착한 지점은 빨간색 점으로 표시하였다.

3.2 광원 추적법을 적용한 균일도 해석기법

앞절에서 설명한 광원 추적법의 성질을 이용하여 전자파 잔향실 내부에 모든 각도로 방사하는 전자파에 대해 데이터베이스를 구축할 수 있다. 모든 고각과 방위각에 대해서 데이터베이스를 가지고 있어야 하며 전자파 성질을 만족시키기 위해 다음과 같은 고려가 필요하다.

- 1) 편파(Polarization)
- 2) 전자기장 균일도의 측정방식 및 계산방식
- 3) 빔의 밀도

수백 THz에 해당하는 가시광선을 구하는 것이 아닌 전자기파를 해석하기 때문에 직진성만 고려하는 기존의 광원 추적법에서 추가적으로 편파를 고려해 줘야 한다. 광원 추적법에서도 편파를 고려하는 방법이 있지만 여기서는 모든 반사 점들에 대한 데이터 베이스를 확보할 수 있기 때문에 각 진행방향의 편파에 대하여 벽면에 반사될 때 각각 수직 편파 성분과 수평 편파 성분을 나누어서 계산하였다.

본 논문에서 측정한 전자파 잔향실은 한국표준과학연구원에서 제공하는 잔향실을 사용하였으며, 이 때 내부 전자기장 균일도를 계산할 때는 IEC 61000-4-21에서 나온 가이드 라인대로 진행하였다. 따라서 실험 환경과 가장 유사하게 시뮬레이션을 돌리기 위해 전자파 잔향실 내부에 시험영역의 8개 위치에 대해서 x, y, z 성분을 고려하여 계산하였다. 검증을 위한 상용 툴에서는 모멘트법(MoM: Method of Moment)법을 이용하여 수치해석을 진행하였는데 마찬가지로 시험영역을 설정한 뒤 8개의 꼭짓점 부분에서 전기장의 크기를 이용하였다. 모든 시뮬레이션에서 얻어낸 전기장 데이터는 식 (2.4)를 이용하여 데시벨 형태로 나타내었다.

다음으로 고려해야 할 사항으로는 전방향으로 방사하는 빔의 간격이다. 유사한 예로 수치해석에서 요소를 나눌 때 요소의 크기가

해석하는 주파수의 파장의 1/10보다는 작아야 정확 해석을 할 수 있듯, 광원 추적법을 사용하여 내부 전자기장을 추정한 상황에서도 너무 드문드문 광원을 방사하면 정확한 결과를 기대하기 어렵다. 이에 대한 고찰을 서술하였고 본 연구에서 진행하는 전자파 잔향실에 대하여 대략적인 계산을 통해 빔의 밀도를 정의하였다.

3.2.1 편파

전자기파는 전기장과 자기장이 상호작용을 하며 공간을 이동한다. 시간에 따라 변화하는 전기장과 자기장은 맥스웰 방정식에 따라 각각 서로를 유도하는데, 이 전기장과 자기장이 서로 90도를 이루면서 소멸되지 않고 공간을 전파해 나갈 수 있게 된다. 이 편파는 시간이 변화함에 따라 선형적으로 변하거나 원형으로 변할 수 있는데 그에 따라 각각 선형 편파 혹은 원형(타원)편파라고 불린다[64][65].

본 연구에서는 모든 방향으로 방사하는 선로에 대해 수직한 방향으로 편파를 지정하여 해석하였다. 보통 송신 안테나의 구조, 자세에 따라 편파가 결정되므로 필요한 경우 편파를 고려할 수 있도록 가장 단순한 편파를 사용하였다.

진행방향에 수직한 방향으로 모든 빔에 대해 일정한 편파를 만들기 위해서는 수직한 벡터를 찾아야 한다. 일반적으로 3차원 공간에서 하나의 벡터에 수직하는 벡터는 무수히 많다. 따라서 수직 벡터를 선택하는데 있어 자유도가 존재하는데 TE(Transverse Electric)모드에 대해서 다음과 같이 정의하였다.

먼저 아래 그림 3.8은 임의의 방향으로 진행하는 파에 대하여 수직인 전계를 보여주고 있다.

$$\hat{r} \cdot \hat{p} = 0$$

$$\mathbf{r} = r_x \hat{x} + r_y \hat{y} + r_z \hat{z}$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_p e^{j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}}$$

$$\mathbf{E}_p = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} + E_z \hat{z}$$

그림 3.8. 횡방향 전기 모드

Fig 3.8. Transverse electric mode

전자파의 진행방향은 편파 방향은 다음의 수식으로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{r} = r_x \hat{x} + r_y \hat{y} + r_z \hat{z} \quad (3.18)$$

$$\mathbf{E}_p = E_x \hat{x} + E_y \hat{y} + E_z \hat{z} \quad (3.19)$$

여기서 \mathbf{r} 벡터는 진행 방향이며, 편파의 방향은 \mathbf{E}_p 벡터이다. 이 때 전기장의 파동방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_p e^{j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} \quad (3.20)$$

이 때 j 는 허수단위이며, \mathbf{k} 벡터는 파수 벡터이다.

광원 추적법을 적용하여 풀 때는 전자파의 진행방향, 즉 \mathbf{r} 벡터를 알고 있다. 이 벡터에 수직인 벡터는 내적이 0이 되는 벡터를 찾으려면 되는데 그 중 아래와 같이 편파 벡터를 정의하면 모든 경우에서 두 벡터의 내적이 0이 되는 것을 확인 할 수 있다.

$$E_x = -r_y \quad (3.21a)$$

$$E_y = r_x - r_y \quad (3.21b)$$

$$E_z = r_y \quad (3.21c)$$

위의 식 (3.21)의 a부터 c까지를 이용하여 편파를 설정하면 모든 방향에 대해서 일정한 편파를 부여할 수 있다. 아래 그림 3.9는 이를 이용하여 편파를 도식화한 것이며, 구분하기 쉽도록 같은 색에 대하여 긴 화살표를 전파의 진행방향, 짧은 화살표를 편파의 방향으로 설정하였다.

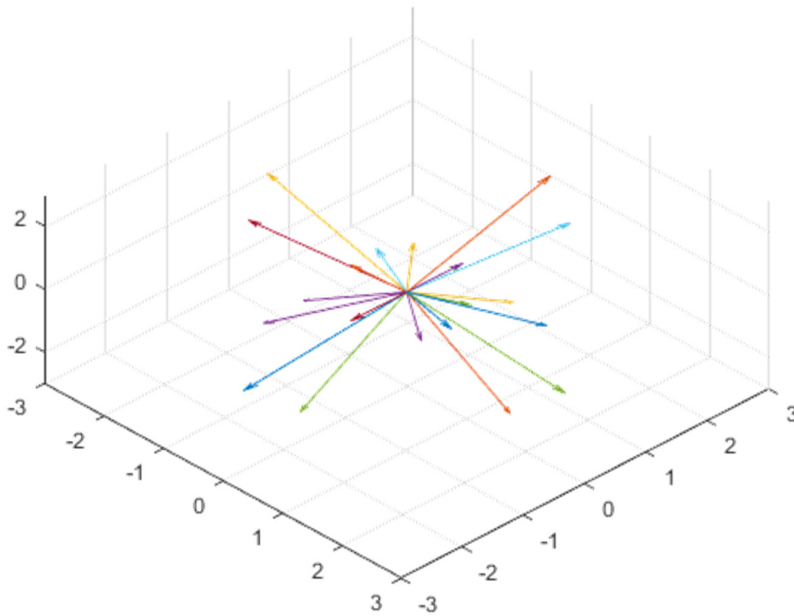


그림 3.9. 고각과 방위각에 따른 진행 방향과 그 편파

Fig 3.9. Beam direction and its polarization according to elevation and azimuth angle

이렇게 정의된 편파를 가지고 진행하는 전자파에 대해서 금속
 벽면에 반사했을 때의 변화를 살펴본다. 먼저 입사평면에 대해서 수직인
 성분은 그 방향이 바뀌지 않으며 입사 평면에 대한 수평 성분은 편파가
 변하게 된다. 그림 3.10는 특정 편파를 가지고 평면에 입사하는
 전자파를 모식하고 있다.

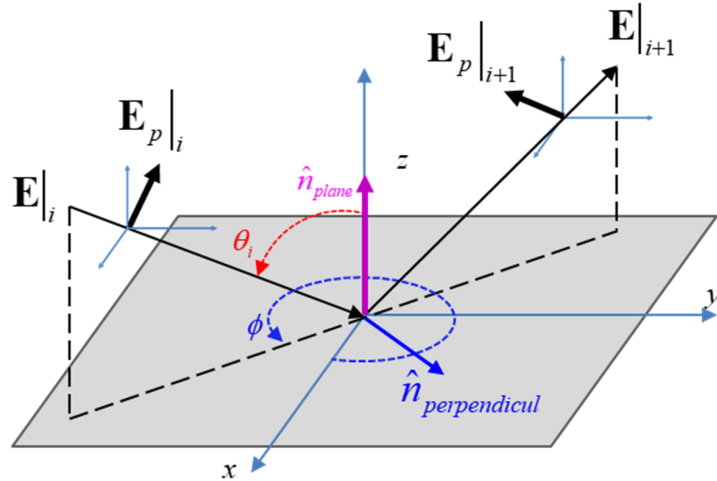


그림 3.10. 금속 평면에 입사하는 전자파

Fig 3.10. Electromagnetic waves incident on the metal plane

수식 (3.20)으로 표현된 전자파가 어떤 편파를 가지고 입사했을 때,
 그 평면에 대하여 수직인 방향의 성분과 수평 성분을 각각 추출해야
 한다. 먼저 평면의 법선벡터는 \hat{n}_{plane} 으로 나타내고, 입사 평면에 대해
 수직인 벡터를 $\hat{n}_{perpendicular}$ 이라고 정한다. 이 평면에 i 번째 벽면에
 반사되어 진행하는 전자파 \mathbf{E}_i 가 있고 이 전자파는 $\mathbf{E}_p|_i$ 라는 폴을 갖고
 있다.

먼저 $\mathbf{E}_p|_i$ 의 $\hat{n}_{perpendicular}$ 성분을 계산하기 위해서는 전자파가 진행하는
 방향벡터와 벡터 외적을 통해 구할 수 있다. $\mathbf{E}_p|_i$ 의 입사평면에 대한
 수직 성분은 아래 수식으로 구할 수 있다.

$$\hat{n}_{perpendicular} = \hat{n}_{plane} \times (-\hat{a}_d) \quad (3.22)$$

여기서 \hat{a}_d 벡터는 i 번째 전자파의 진행방향이다. 편파벡터의 식 (3.22)로의 방향은 내적을 적절하게 적용하여 계산할 수 있고 식 (3.23)으로 표현된다.

$$\mathbf{E}_p \Big|_i^{perpendicular} = \left(\mathbf{E}_p \Big|_i \cdot \hat{n}_{perpendicular} \right) \hat{n}_{perpendicular} \quad (3.23)$$

수직한 성분을 구했기 때문에 입사 평면에 대한 수평 성분은 원래 편파 벡터에서 수직 편파성분을 빼 주면 된다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{E}_p \Big|_i^{parallel} = \mathbf{E}_p \Big|_i - \mathbf{E}_p \Big|_i^{perpendicular} \quad (3.24)$$

이렇게 입사 평면에 대해 수직한 성분과 수평한 성분을 분류할 수 있고 반사가 되고 난 뒤, 즉 $i+1$ 번째 전자파에 대해서 편파를 계산해야 한다. 먼저 수직인 벡터는 변화가 없기 때문에 $i+1$ 번째 편파는 i 번째 편파와 같다.

$$\mathbf{E}_p \Big|_{i+1}^{perpendicular} = \mathbf{E}_p \Big|_i^{perpendicular} \quad (3.25)$$

수평 성분은 그림 3.11을 통해서 설명할 수 있다.

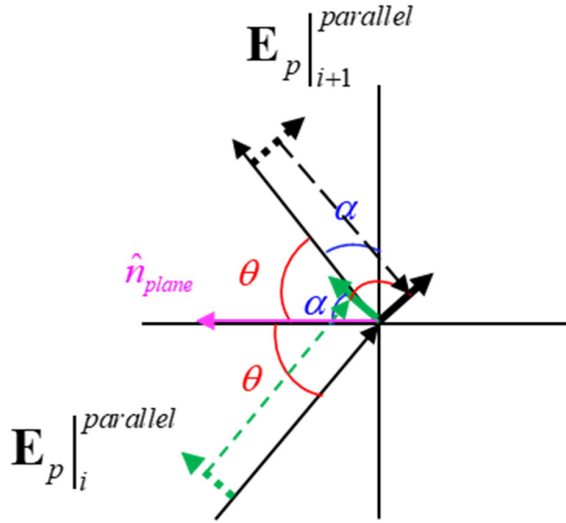


그림 3.11. 수평편파의 반사

Fig 3.11. Reflection of parallel polarization

그림 3.11에서 $i+1$ 번째 성분을 구하기 위해 i 번째 성분과 평면의 법선 벡터의 관계를 확인해야 한다. i 번째 전자파의 진행방향과 평면의 법선 벡터 사이의 각을 θ 라고 하면 입사각과 반사각의 관계에 따라서 $i+1$ 번째 전자파와 평면의 법선 벡터도 θ 의 각을 갖게 된다. 이 때 i 번째 전자파의 편파(그림 3.11에서 초록색 점선 화살표)를 반사가 되는 점으로 옮겨다고 가정을 했을 때(초록색 실선 화살표), 그 벡터와 평면의 법선 벡터가 이루는 각을 α 라고 하자. 이때 반사되는 점으로 옮겨진 편파 벡터와 i 번째 진행방향은 수직하기 때문에 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\alpha + \theta = \frac{\pi}{2} \quad (3.26)$$

같은 원리로 $i+1$ 번째 법선 벡터(검정색 점선 화살표)를 반사하는 점으로 이동시키면(검정색 실선 화살표) 벽면과 이루는 각이 θ 가 되게 된다. 따라서 i 번째 편파에서 평면의 법선 벡터 성분의 크기의 2배를 빼

주면 $i+1$ 번째 편파 벡터를 구할 수 있다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{E}_p \Big|_{i+1}^{parallel} = \mathbf{E}_p \Big|_i^{parallel} - 2 \left| \mathbf{E}_p \Big|_i^{parallel} \right| \cos \theta \hat{\mathbf{n}}_{plane} \quad (3.27)$$

식 3.27에 있는 θ 는 그림 3.11에 서 표기된 θ 와 같다. 이 수식 역시 광원 추적법을 통해 얻은 데이터 베이스를 활용하기에는 벡터 연산이 편하기 때문에 $\cos \theta$ 항을 벡터 표현으로 바꿔준다. 이 값은 평면의 법선 벡터와 i 번째 편파 벡터의 내적으로 표현할 수 있으며 식 (3.28)로 작성할 수 있다.

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{E}_p \Big|_i^{parallel} \cdot \hat{\mathbf{n}}_{plane}}{\left| \mathbf{E}_p \Big|_i^{parallel} \right| \left| \hat{\mathbf{n}}_{plane} \right|} \quad (3.28)$$

이제 이 수식을 3.27에 대입하고 평면의 법선 벡터가 단위 벡터임을 이용하면 $i+1$ 번째 수평 편파는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\mathbf{E}_p \Big|_{i+1}^{parallel} = \mathbf{E}_p \Big|_i^{parallel} - 2 \left(\mathbf{E}_p \Big|_i^{parallel} \cdot \hat{\mathbf{n}}_{plane} \right) \hat{\mathbf{n}}_{plane} \quad (3.29)$$

따라서 $i+1$ 번째에 편파 된 전기장의 벡터 형태는 수직으로 편파 된 전기장과 수평으로 편파 된 전기장의 합으로 구할 수 있으며, 이에 대한 점화식 형태는 아래 식 (3.30)으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{E}_p \Big|_{i+1} = \mathbf{E}_p \Big|_i^{perpendicular} + \left(\mathbf{E}_p \Big|_i^{parallel} - 2 \left(\mathbf{E}_p \Big|_i^{parallel} \cdot \hat{\mathbf{n}}_{plane} \right) \hat{\mathbf{n}}_{plane} \right) \quad (3.30)$$

3.2.2 전자기장 균일도의 측정방식 및 계산방식

전자파 잔향실의 전자기장 균일도를 측정하기 위해서는 교반기가 회전함에 따라 발생하는 전기장을 시험영역의 각 모서리에서 x 축 y 축 z 축의 전기장 검침기를 놓고 측정한다. 실제 측정은 2장에서 소개했던 IEC 61000-4-21에서 제시하는 방법을 따라 측정을 진행하였고, 시뮬레이션에서는 이와 유사하게 해석하기 위하여 시험영역 8개의 점을 지나는 빔에 대해서 중첩의 원리를 적용하여 계산하였다.

단 해당 점을 지나는 선로를 찾는 것은 전체 체적에서 특정 점을 지나는 것이기 때문에 확률적으로는 존재하지 않는다. 따라서 시험영역의 모서리 점에서 반지름 d 를 갖는 구를 생성한다. 이렇게 생성된 구를 통과하는 선로를 모두 찾아서 그에 해당하는 감쇄를 적용한다. 그렇게 계산된 모든 전기장을 더하여 교반기 하나의 단계에 대한 값을 계산해 낼 수 있다.

그림 3.12은 전자파 잔향실과 내부에 있는 시험 영역, 그리고 그 시험영역의 모서리에서 반지름 d 를 갖는 구 영역을 보여주는 그림이다.

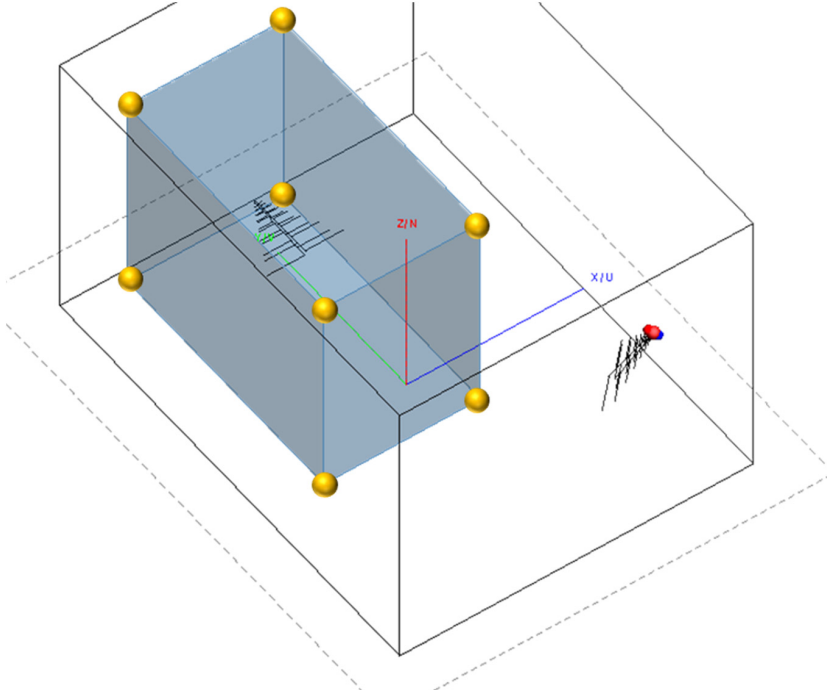


그림 3.12. 전자파 잔향실과 시험영역, 그리고 계산을 위한 구 영역

Fig 3.12. Reverberation chamber, working volume and sphere region for calculation of field uniformity

그림 3.12에서 최외각에 검정색 선으로 표시된 육면체가 전자파 잔향실을 나타내며, 내부에 파란색 육면체로 표현된 영역이 시험 영역이다. 이곳의 전자기장 균일도를 계산하기 위해서 각 꼭짓점에 노란색 구형태로 영역을 만들고, 이 영역을 지나는 모든 빔을 계산한다. 이 빔을 계산할 때는 점과 직선사이의 거리를 이용한다. 편의상 직선 밖에 한점 $A(a,b,c)$ 가 있고, 방향벡터가 $u=(x_1,y_1,z_1)$ 인 직선 L 이 있다고 가정한다. 이때 점 A 에서 직선 L 에 내린 수선의 발을 H 라고 하고 직선 위에 있지만 H 가 아닌 점을 $P(x_2,y_2,z_2)$ 라고 하자. 이를 그림으로 나타내면 그림 3.13과 같이 나타낼 수 있다.

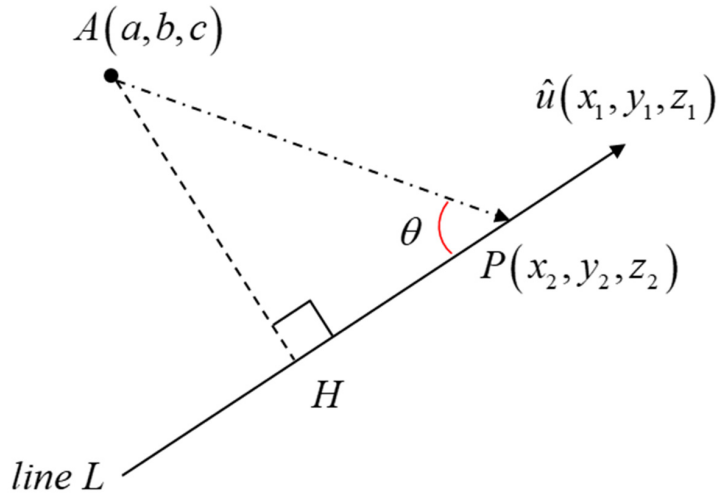


그림 3.13. 3차원에서 점과 직선사이의 관계

Fig 3.13. Relationship between point and line in 3D

이때 점 A 에서 H 까지의 거리가 점과 직선사이의 거리가 된다. 이 거리는 삼각형 APH 에 대해서 다음이 성립한다.

$$|\overline{AH}| = |\overline{AP}| \sin \theta \quad (3.31)$$

또한 벡터 외적의 성질로 인해 두 벡터 \hat{u} 와 \overline{AP} 벡터의 외적의 크기는 식 (3.32)로 표현된다.

$$|\hat{u} \times \overline{AP}| = |\hat{u}| |\overline{AP}| \sin \theta \quad (3.32)$$

식 (3.31)과 (3.32)를 연립하여 $\sin \theta$ 를 제거하면 점과 직선사이의 거리 $|\overline{AH}|$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$|\overline{AH}| = \frac{|\hat{u} \times \overline{AP}|}{|\hat{u}| \sin \theta} \sin \theta \quad (3.33)$$

직선의 방향벡터가 단위 벡터라면 점과 직선사이의 거리인 식 (3.33)은 아래와 같이 단순하게 표현할 수 있다.

$$|\overline{AH}| = |\hat{u} \times \overline{AP}| \quad (3.34)$$

식 (3.34)를 이용하여 초기에 계산한 모든 경로와 시험영역의 꼭짓점과의 거리를 계산할 수 있고 이때 특정 값보다 작은 경로만 선택한다. 이 때 구 영역은 그 꼭짓점의 전자기장을 대표하기 위해 선택된 것이기 때문에 그 공간에서 파장이 너무 많이 변하면 의미가 없다. 따라서 해석하는 주파수 파장의 약 1/10로 설정한다.

만약 n 번째 직선이 구의 내부를 지나가면, 즉 n 번째 직선과 하나의 모서리의 점과 직선사이의 거리가 특정 값(ex, 파장의 1/10) 작다면 그 선로는 $n-1$ 번째까지 벽면을 반사하고 마지막으로 $n-1$ 번째 점에서부터 구와 만나는 곳까지 진행을 한 것이 된다. 이를 그림으로 나타내면 아래 그림 3.14로 나타낼 수 있다.

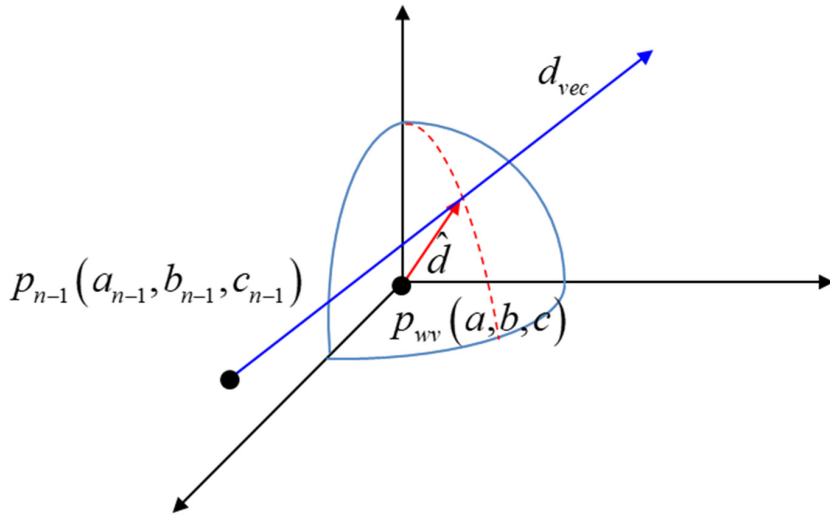


그림 3.14. 시험영역의 모서리에 형성된 구 영역을 지나는 직선

Fig 3.14. The line passing through the sphere area formed at the edge of the working volume

점 $p_{n-1}(a_{n-1}, b_{n-1}, c_{n-1})$ 은 $n-1$ 번째 반사를 통해 도달한 점이며 벡터 \hat{d}_{vec} 는 $n-1$ 번째 점에서 n 번째 점으로 향하는 단위 방향 벡터이다. 이때 구와 접하는 경우 빔의 총 이동거리는 최초 안테나에서 출발하여 $n-1$ 번째 점까지의 거리에 점 p_{n-1} 과 접점까지의 거리를 합하여 계산할 수 있다.

만약 접하지 않고 관통하는 경우는 모서리 점 $p_{wv}(a, b, c)$ 에서 진행되는 직선에 수선을 내렸을 때 만나는 점까지 더 이동한다. 이 거리를 l_{seg} 라고 정의하고, 앞서 계산한 데이터 베이스에서 $n-1$ 번째 벽면의 좌표와, $n-1$ 번째 벽면의 법선 벡터를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$l_{seg} = \left| \overline{p_{n-1}p_{wv}} \right| \cos \theta \quad (3.35)$$

이때 θ 는 $\overline{p_{n-1}p_{wv}}$ 벡터와 n 번째 선의 방향벡터 $\overline{d_{vec}}$ 사이의 각도이다. 앞서 진행했던 여러 계산처럼 $\cos\theta$ 를 식 (3.36)과 같이 벡터 연산으로 변경하고 n 번째 선로의 방향 벡터가 단위 벡터라면 l_{seg} 는 두 벡터의 내적으로 간단하게 표현될 수 있다.

$$\cos\theta = \frac{\overline{d_{vec}} \cdot \overline{p_{n-1}p_{wv}}}{\left| \overline{p_{n-1}p_{wv}} \right| \left| \overline{d_{vec}} \right|} \quad (3.36)$$

$$l_{seg} = \overline{d_{vec}} \cdot \overline{p_{n-1}p_{wv}} \quad (3.37)$$

따라서 n 번째 선이 시험영역의 구영역을 지날 때 그 점을 대표하는 전기장은 다음과 같이 계산한다. 먼저 안테나에서 출발하여 n 번째 벽면까지 도달하였을 때 전기장은 아래 수식과 같이 표현된다.

$$\mathbf{E}_n = \mathbf{E}_n^p E_0 \exp\left(-jk \sum_{i=1}^{n-1} l_i\right) \Gamma^{n-1} \quad (3.38)$$

여기서 \mathbf{E}_n 은 n 번째 벽에 도달했을 때의 전기장 벡터이고, \mathbf{E}_n^p 는 그때의 편파 벡터이다. E_0 는 처음 안테나에서 방사한 전계의 세기이고 k 는 전파상수, l_i 는 i 번째 선로의 길이이다. 마지막으로 Γ 는 금속 벽면에 반사되면서 발생하는 손실 값이다. n 번째 선로는 $n-1$ 번의 반사가 일어났으므로 손실의 $n-1$ 승이 적용된다.

구 영역을 지나는 선로가 n 번째 선이었다면, $n-1$ 번째점에서의 위치까지의 이동한 경로에 식 (3.37)에서 계산한 거리를 더해주어야 한다. 따라서 총 이동거리가 반영된 전기장 벡터는 다음과 같이 표현할

수 있다.

$$\mathbf{E}_n = \mathbf{E}_p E_0 \exp\left(-jk\left(l_{seg} + \sum_{i=1}^{n-1} l_i\right)\right) \Gamma^{n-1} \quad (3.39)$$

시험영역의 꼭짓점에서 설정한 구 영역을 지나는 모든 선로에 대한 합을 구하면 그 점에서의 전계 값을 계산할 수 있다.

3.2.3 빔의 밀도

전자파 잔향실의 안테나를 고각과 방위각을 나누어 모든 방향으로 전자파를 방사한다. 이 때 방사하는 빔을 추적하여 전자파 잔향실 내부에 어떻게 분포할 것인가를 추정하는 것이 본 논문에서 제안하는 방법이다. 실제 전자파를 잔향실 내부에서 방사하였을 때 안테나를 중심으로 안테나가 가지고 있는 고유 빔 패턴을 따라 모든 각도로 방사하게 된다. 이 물리적 현상을 이산적인 빔을 선택하여 모의하는 과정인데, 이 때 빔을 너무 드물게 선택된다면 그만큼 실제 현상을 모의하기 어렵다.

따라서 적절한 빔의 간격을 선택해야 하는데, 이는 수치해석 기법에서 파장대비 요소를 나누는 것과 같은 원리로 적용한다. 여러 수치해석 기법들은 대상을 요소로 나누는데 해석하고자 하는 주파수를 기준으로 하나의 요소 내에서 위상이 많이 변하지 않게 하도록 설정한다. 보통 해석 주파수의 파장 대비 1/10 보다 작은 크기로 요소를 설정한다.

특정 안테나에서 직선으로 빔을 선택하여 방사하는 경우를 생각해 보자. 아래 그림 3.15는 한 점에서 특정 각도를 가지고 방사한 두 개의 빔을 나타낸다.

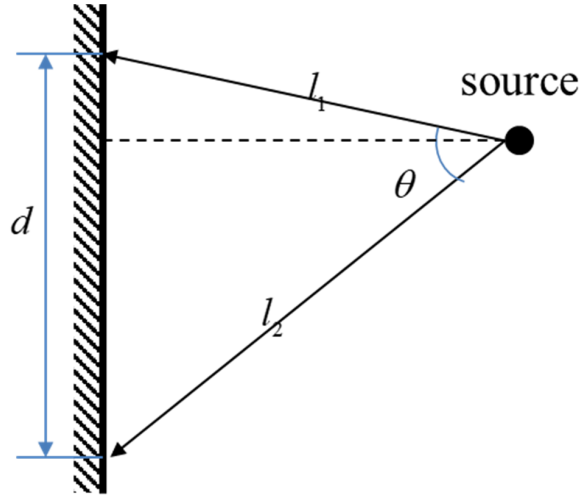


그림 3.15. 한 점에서 방사한 두 개의 빔

Fig 3.15. Two beams radiating from one point

이 빔은 특정 각 θ 를 가지고 방사하고 있으며 벽면까지 도달하는 길이는 각각 l_1 과 l_2 이다. 이때 벽면에 도달한 점은 d 만큼의 차이를 갖게 되고, 이 차이 내에 해석하고자 하는 주파수의 위상이 많이 변한다면 충분히 빔을 나누지 못한 것이 된다. 벽면에서의 거리차이 d 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$d = l_1 \sin \alpha + l_2 \sin \beta \quad (3.40)$$

이때 새로운 각도 α 와 β 는 각각 안테나의 위치(소스)에서부터 벽면에 그림 3.15에 점선으로 표시된 것처럼 수직으로 직선을 그었을 때 l_1 과 수선, l_2 와 수선이 이루는 각도이다. 즉 α 와 β 의 합은 θ 가 된다. θ 가 작을 때 작은 각도 근사(small-angle approximation)를 통해 삼각함수는 단순화될 수 있으며, 이 때 $\sin x$ 는 단순히 x 로 근사될 수 있다. 따라서 식 (3.40)은 다음과 같이 간략화 된다.

$$d \approx l_1\alpha + l_2\beta \quad (3.41)$$

또한 θ 가 매우 작으면 l_1 과 l_2 의 길이 역시 비슷하게 된다. 따라서 식 (3.41)은

$$d \approx l_1(\alpha + \beta) = l_1\theta \quad (3.42)$$

로 단순화할 수 있다.

본 논문에서 해석하는 전자파 잔향실의 크기는 다음장에서 자세하게 설명하겠지만 가로 3.4m, 세로 4.5m, 높이 2.8m의 크기이다. 대부분의 전자파 잔향실은 이렇게 수 미터 정도의 사이즈를 갖으며 이 경우 내부에서 생길 수 있는 가장 먼 두 점은 양 끝 모서리가 된다. 이때 두 점 사이의 거리는 약 6.3m가 된다. 즉 위의 그림 3.15에서 l_1 과 l_2 가 가질 수 있는 최대 값은 6.3이 되며 실제로 안테나를 꼭짓점에 배치하지도 않으며 빔을 특정 각도로 갈라서 방사해야 하기 때문에 l_1 과 l_2 는 최대 6m내외의 값을 가질 수 있다. 이 길이에 대하여 식 3.42를 적용시키면 분리 각 1° 에 대해서 약 0.1m의 거리차이가 생긴다. 즉 1도의 분리 각 마다 최대 10cm 길이에 해당하는 위상차이가 발생할 수 있음을 의미한다.

전자파 잔향실의 사용가능한 최저 주파수는 수백 MHz의 정도의 값이다. 이때 파장은 100MHz에서 3m이므로 이 주파수에 대해서는 파장당 30번의 샘플링을 한 효과가 나온다. 위의 식 (3.42)를 이용하여 해석하는 주파수에 따라 분리각을 설정한다.

3.3 전자파 잔향실의 전자기장 균일도 해석

앞절에서 설명한 광원 추적법의 성질을 이용하여 전자파 잔향실 내부에 모든 각도로 방사하는 전자파에 대해 데이터베이스를 구축할 수 있으며, 편파를 고려하여 공진기 형태의 잔향실에서 전자기장을 계산할 수 있다. 이번 절에서는 그린함수를 알고 있는 육면체 구조의 공진기에 대하여 해당 기법을 검증한다. 그 뒤 실제 실험에 사용했던 전자파 잔향실에 대해서 교반기와 함께 해석을 진행한다.

먼저 제안된 알고리즘의 검증을 위하여 낮은 차원에서부터 검증을 진행한다.

3.3.1 광원 추적법 기반 해석 방법의 1차원 적용

1차원 공진기는 단순한 선을 생각하면 된다. 양 쪽이 막혀 있는 선의 영역에 대해서 그 선 중간의 임의의 점에서 전자파가 여기 된다. 1차원의 경우 모든 방향이 선을 기준으로 양 옆이기 때문에 3.2절에서 언급했던 빔 밀도를 고려할 필요가 없다.

특정 길이를 갖는 1차원 공진기에 대한 공진주파수는 아래 수식으로 계산할 수 있다.

$$f_m = \frac{1}{2\sqrt{\mu\varepsilon}} \left(\frac{m}{a} \right) \quad (3.43)$$

이 때 f_m 은 m 번째 모드의 공진 주파수이며, μ 와 ε 은 각각 투자율(permeability)과 유전율(permittivity)이다. m 은 1부터 시작하는 정수이며 몇 번째 모드인가를 의미한다. 마지막으로 a 는 1차원 공진기(직선)의 길이이다. 공진 주파수들은 1차원의 경우 기본 공진주파수의 정수배로 증가한다. 길이 3.4m인 선에 대하여 몇 개의 모드에 대해서 공진 주파수를 계산 한 결과가 표 3.1에 있다.

표 3.1. 길이 $a = 3.4$ 인 1차원 공진기에서 공진주파수

Table 3.1. Resonant frequency at 1D cavity with $a = 1$

| m | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Frequency [MHz] | 44.12 | 88.24 | 132.35 | 180.41 | 223.75 |

내부의 임의의 위치에 소스를 배치하였고 모든 방향, 즉 오른쪽과 왼쪽으로 진행하는 전자파를 나타낸 것이 아래 그림 3.16에 있다.

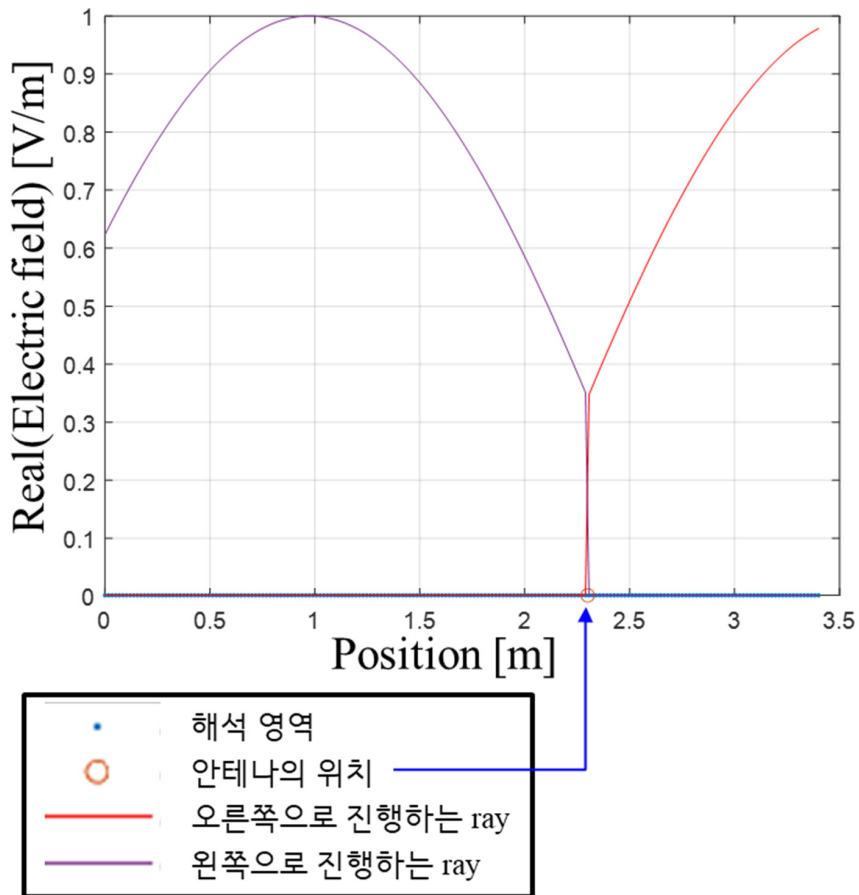


그림 3.16. 1차원 공진기에서 양 쪽으로 진행하는 파

Fig 3.16. Waves traveling in both directions in a 1D cavity

1차원에서는 빔이 2개 밖에 없고 반사되는 면이 양쪽 밖에 없기 때문에 각각 전기장을 계산하여 합산하면 된다. 기본 모드에 대한 합산된 전기장의 결과가 그림 3.17에 도식화 되어있다.

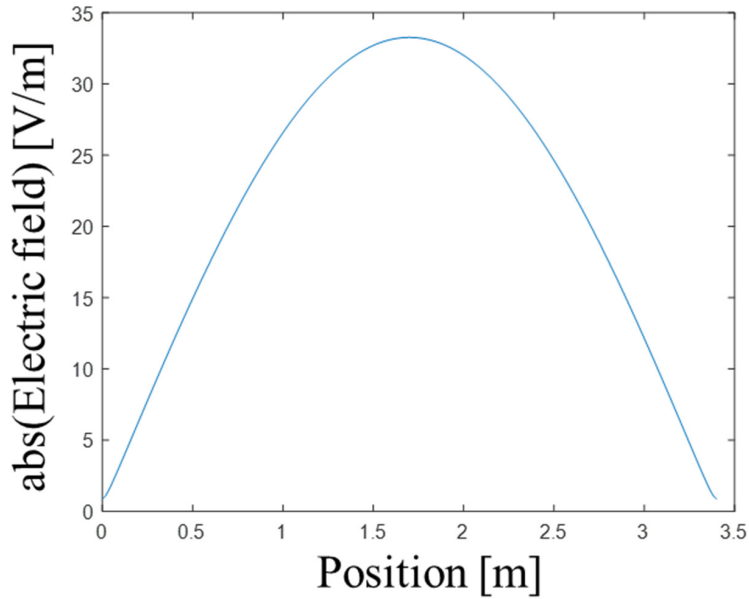


그림 3.17. 1차원 공진기의 1번째 모드

Fig 3.17. 1st resonant mode in the 1D cavity

이 때 안테나의 위치를 변화시켜 가면서 내부 필드 분포를 확인해 보면 모드의 개형은 같으나 그 크기가 달라지는 것을 확인 할 수 있다. 아래 그림 3.18에서는 다양한 위치에 안테나를 배치하였을 때 변하는 내부의 전기장의 크기 변화를 보여준다. 안테나의 위치에 따른 결과를 안테나 위치와 그에 해당하는 전기장을 같은 색으로 표기하였다. 안테나 위치는 x축 상의 동그라미로 표시하였고, 실선으로 되어있는 그래프가 전기장의 크기이다. 데이터 세트별로 안테나의 위치는 0.3m 위치부터 0.3m 단위로 1.8m까지 총 6개의 셋트를 이용하여 전기장을

도식화하였다. 2장에서 소개하였던 소스 스티어링 기법처럼 위치를 조정함으로써 내부의 필드를 변화시킬 수 있음을 암시한다.

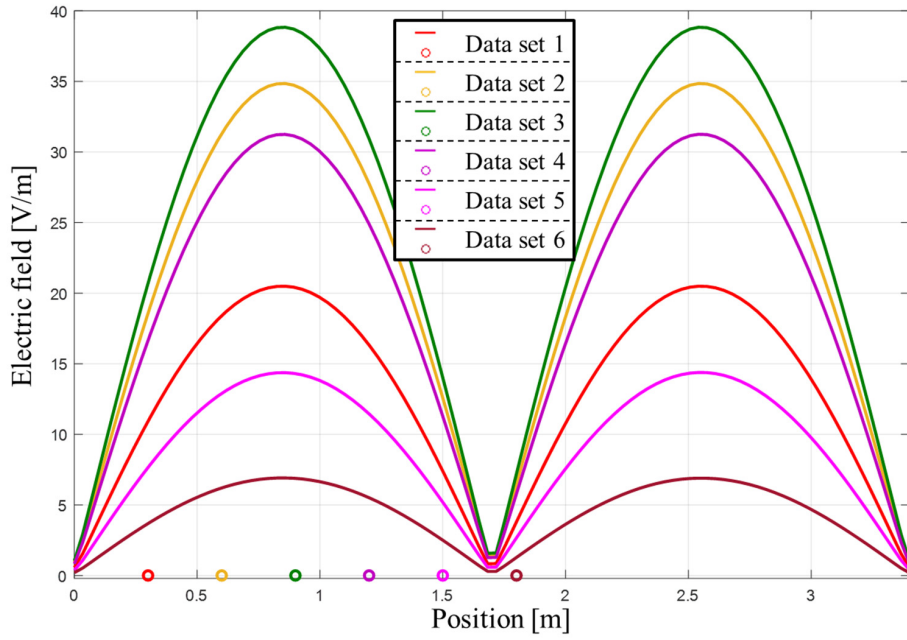


그림 3.18. 안테나 위치에 따른 내부 전기장 분포 변화

Fig 3.18. Electric field distribution change according to antenna location

3.3.2 광원 추적법 기반 해석 방법의 2차원 적용

2차원 공진기는 전자파 잔향실 연구에서도 지속적으로 연구해 왔었던 분야이다. 이 때는 내부 한 점에서 모든 방향으로 빔을 방사해야 한다. 2차원 공진기의 공진 주파수는 역시 공진기 크기에 의해 변화하며 아래 수식으로 계산할 수 있다.

$$f_{mn} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (3.44)$$

식 (3.44)에서 사용한 파라미터는 식 (3.43)에서의 경우와 같으며 추가적으로 n 은 b 축에 대한 모드 숫자이다. 0이상의 정수를 갖으며, b 는 공진기의 세로 길이 이다. 가로 길이 3.4m, 세로 길이 4.5m인 2차원 공진기에 대해서 몇 개의 공진 주파수를 계산하면 다음과 같다.

표 3.2. 길이 $a = 3.4$, $b = 4$ 인 2차원 공진기에서 공진주파수

Table 3.2. Resonant frequency at 2D cavity with $a = 3.4$, $b = 4$

| | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| m | 1 | 0 | 1 | 1 | 2 |
| n | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| Frequency [MHz] | 44.12 | 37.50 | 57.90 | 87.01 | 142.97 |

2차원 공진기부터는 가로축에 대한 모드와 세로축에 대한 모드의 조합이 존재한다. 또한 진행방향에 대해 TE모드이거나 TM(Transverse Magnetic) 모드가 형성되며 이는 기존의 연구에서 잘 정리되어 있다. 아래 그림 3.19은 가로와 세로의 길이가 2:1인 공진기의 처음 9개 모드에 대하여 전자기장의 분포가 어떻게 형성되는지를 보여주고 있다[65].

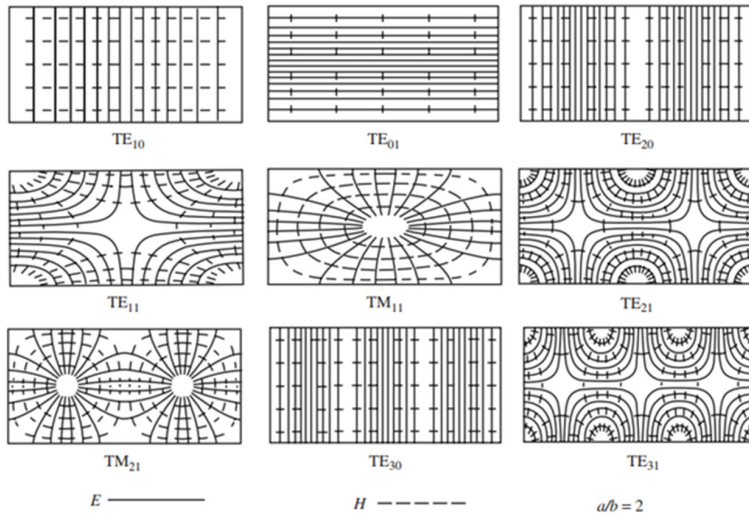


그림 3.19. 처음 9개 모드에 대한 전자기장 분포[65]

Fig 3.19. field patterns for the first [65]

2차원 공진기에서 광원 추적법을 적용하면 먼저 각 면에 대한 법선 벡터가 필요하다. 또한 전자기장 분포를 보기 위해 요소를 나누었을 때 해당 요소를 지나는 빔을 판별해야 한다. 앞 절에서 설명했던 방식으로 2차원 공진기에 대해 해석을 진행하면 아래 그림 3.20과 같이 빔의 분포를 파악할 수 있다.

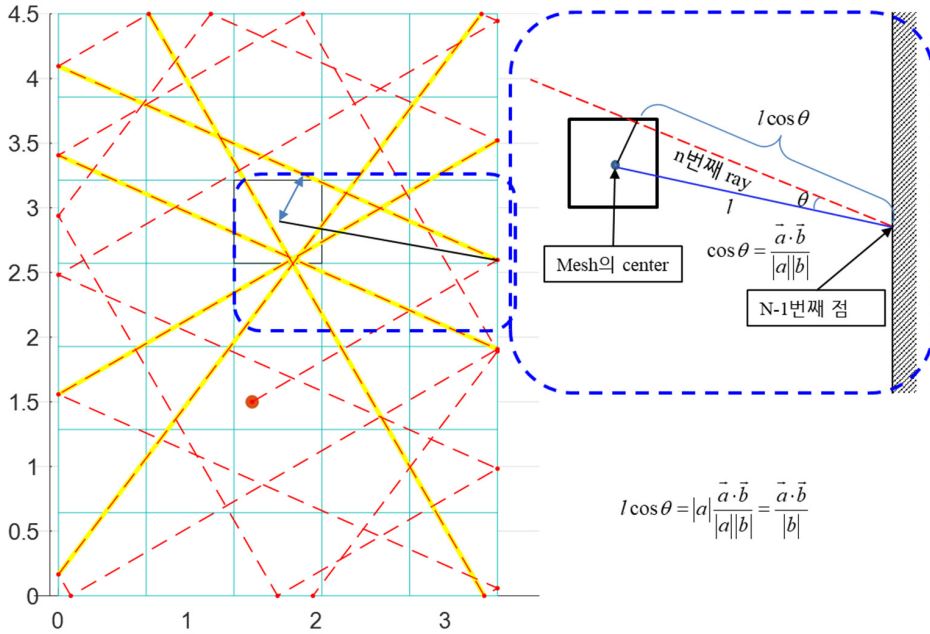


그림 3.20. 광원 추적법을 이용한 2차원 공진기 해석

Fig 3.20. 2D RC analysis by using ray tracing

빨간색 점은 공진기 내부에 안테나가 위치한 점이고 그 점에서 빨간색 점선방향으로 빔을 쏜 경우의 그림이다. 안테나를 출발 한 빔은 여러 번 벽에 반사되어 지나가고 그 자취를 점선으로 계속 표기하였다. 가운데 검은 색 네모로 표기된 부분에서 전기장을 계산할 때, 그 요소를 지나는 선을 파악해야 한다. 2차원에서는 직선과 직선과의 관계가 비교적 쉽기 때문에 3차원에서 진행했던 수식보다 훨씬 더 간단한 수식으로 진행하였다.

이 때 노란색으로 하이라이트 된 선분이 중앙의 요소를 지나는 선분들이며 그 요소까지 이동한 거리를 계산하기 위하여 요소 중앙의 점을 기준으로 3차원 해석과 유사한 방법을 채택하였다. 파란색 점선으로 영역은 중앙의 요소와 n번째 선만을 확대한 그림인데 3차원 구에서 적용했던 것과 같이 점과 직선사이의 거리를 활용하여 계산한다.

필드 분포를 보기위한 요소는 가로 세로 각각 파장대비 1/30개로

나누어서 해석하였으며 전기장의 분포를 볼 때 사용한 공진기는 가로 세로 모두 4m인 공진기에 대하여 진행하였다. 2차원 해석을 통하여 1차원의 해석결과를 확인하였다.

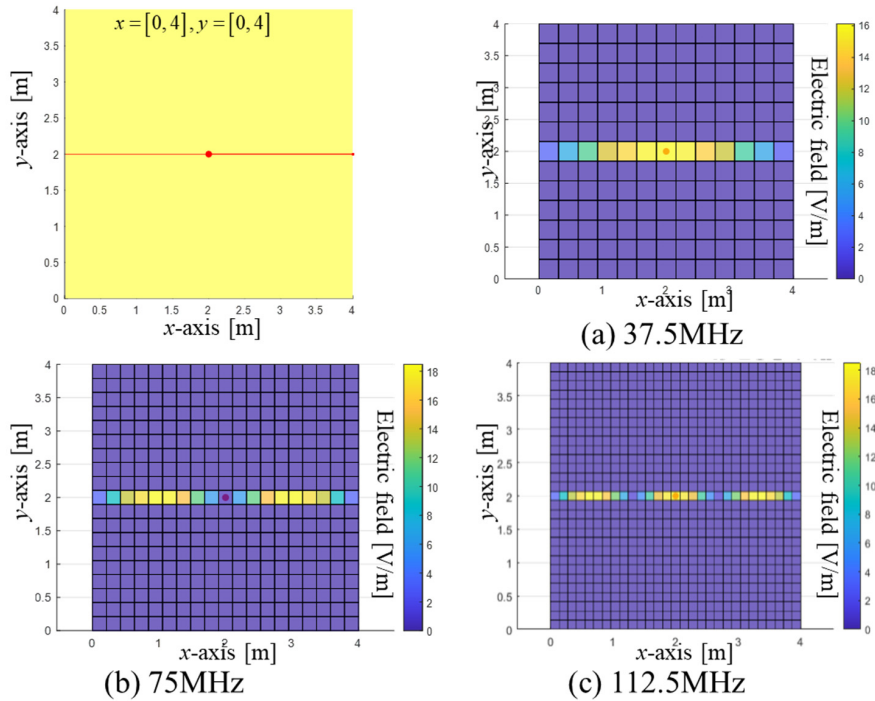


그림 3.21. 광원 추적법을 이용한 2차원 공진기 해석 결과 (1차원)

Fig 3.21. Results of 2D RC analysis by using ray tracing

그림 3.21에서 왼쪽 상단에 있는 그림은 공진기중앙에서 오른쪽으로 전자파를 방사하였을 때를 나타낸다. 기본 공진 모드인 37.5MHz 및 고차 모드에서 1차원 결과와 같이 모드가 잘 형성되는 것을 확인하였다.

다음으로는 모든 방향으로 빔을 방사하여 해석하였다. 2차원이기 때문에 360도 방향으로 빔을 방사하였고 2도 간격으로 빔을 방사하였는데, 이는 최대 약 0.2m의 거리차이를 만들어 내지만,

100MHz에서의 파장은 3m로 큰 문제없이 전기장을 계산 해 낼 수 있다. 아래 그림은 2차원 모든 방향으로 방사하였을 때 전기장의 분포를 보여주고 있다.

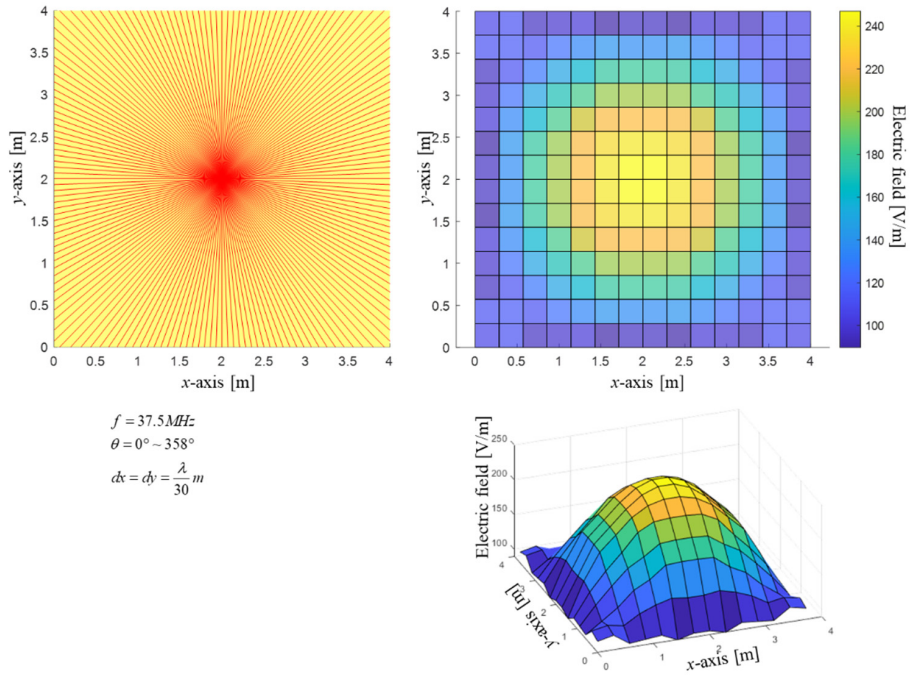


그림 3.22. 광원 추적법을 이용한 2차원 공진기 해석 결과

Fig 3.22. Results of 2D RC analysis by using ray tracing

그림 3.22에서 왼쪽 상단에 있는 그림이 공진기와 중앙에서 전 방향으로 방사하는 첫 번째 빔들을 나타낸다. 오른쪽 위와 아래 그림이 모든 영역에서 해석한 전기장의 결과인데, 기본 모드에 대하여 정확하게 모드가 생성되었음을 확인할 수 있다.

3.3.3 전자파 잔향실의 3차원 광원 추적법 기반 해석

낮은 차원에서 검증된 코드를 3차원으로 확장하여 해석을 진행한다. 3차원으로 가면서 모든 공간에 요소를 만들어 해석하면 너무 오랜 시간이 걸리기 때문에 필요한 곳의 정보만을 수집하여 해석한다. 교반기의 모델은 3차원 시뮬레이션터에서 데이터를 가져와 구성하였다. 기본 교반기의 각 점에 대하여 회전 행렬을 적용하여 교반기의 회전을 재현하였다. 아래 그림 3.23은 전자파 잔향실과 내부에 위치한 수직 및 수평 교반기의 모델링이다. 또한 교반기가 회전하였을 때의 정보도 함께 표현하였다.

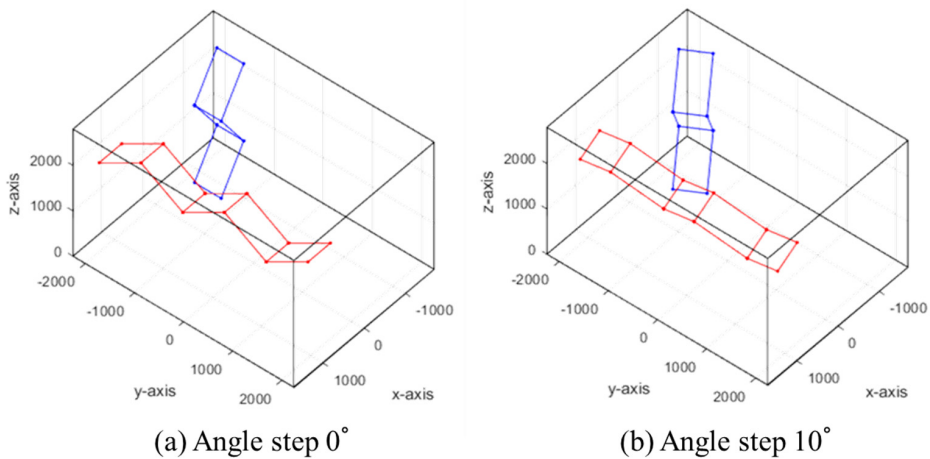


그림 3.23. 3차원 전자파 잔향실과 내부 교반기의 모델링

Fig 3.23. RC and horizontal/vertical stirrer modelling

위의 그림의 (a)는 교반기가 회전하지 않은 상태, 즉 angle step이 0인 경우에서 모델이며, (b)는 두 교반기가 각각 10도씩 회전한 모델이다.

3차원으로 모델링 된 전자파 잔향실은 기존의 공진기에서 교반기가 추가되었기 때문에 교반기의 정보를 추가 해 주어야 한다. 안테나에서

방사된 빔은 잔향실 벽 뿐만 아니라 교반기에서도 일어난다. 교반기 패널에 부딪치게 되면 그 교반기의 법선 벡터에 대하여 반사하기 때문에 모든 교반기 패널의 법선 벡터가 필요하다. 또한 n 번째 빔이 교반기 패널에 반사할 때 잔향실의 벽과는 다르게 반사된 빔이 어느 방향으로 진행해야 하는지도 설정해 주어야 한다. 기존의 소개한 방법에서 약간의 벡터 연산이 추가된다. 아래 그림은 광원 추적법을 적용하여 전자파 잔향실 내부에 전파가 진행하는 경로를 추적한 결과이다.

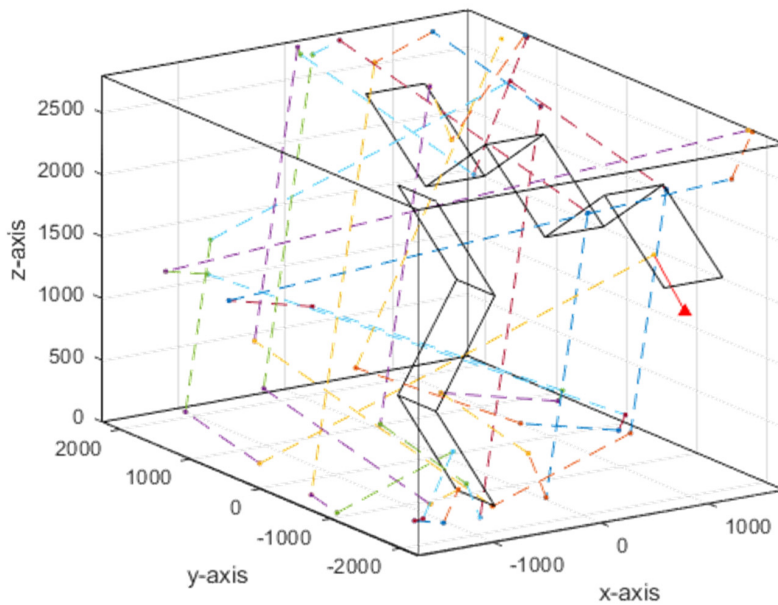


그림 3.24. 광원 추적법을 이용한 전파의 경로 예측

Fig 3.24. Path prediction using ray tracing

가시성을 확보하기 위해 특정 각도에 대하여 50번의 반사만 일어난 경우를 진행하였다. 실제 해석에서는 이보다 더 많은 횟수의 반사를 고려해서 진행하였다.

위의 그림 3.24에서 빨간색 세모점에 안테나가 위치한다. 이 때 빨간색 실선방향으로 방사하였다는 가정에서 추가적인 반사를 점선으로

표기하였다. 그림에서 볼 수 있듯 사용자가 원하는 각도에 대하여 원하는 횟만큼 반사된 경로를 잘 추적하는 것을 확인하였다.

2차원에서처럼 여러 개의 각도에 대해서, 3차원의 경우 고각과 방위각에 따라서 빔의 개수는 많아진다. 그림 3.25는 여러 개의 고각과 방위각에 대하여 방사한 경우를 그린 결과이다. 반사되는 경로까지 모두 도시하게 되면 결과를 알아볼 수 없기 때문에 최초 진행하는 선로만을 도식화 하였다.

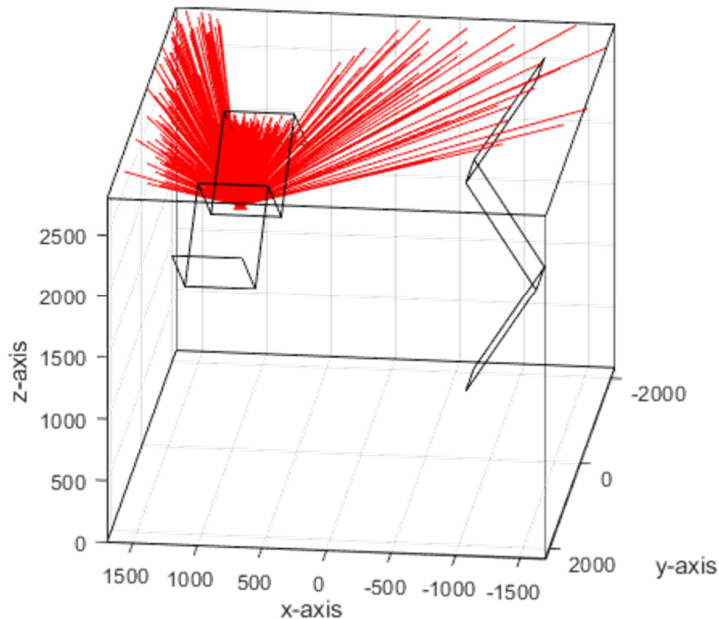


그림 3.25. 여러 각도에 대한 추적 해석

Fig 3.25. Path prediction using ray tracing for multi angle

본 논문에서 제시하는 알고리즘은 각각의 고각, 방위각에 대하여 전자파 잔향실내부에서 반사되는 모든 점을 계산한다. 그 후 편파를 고려하여 원하는 위치에서 전자기장을 계산한다.

이렇게 모든 고각 및 방위각에 대하여 경로를 추적 해 놓은 뒤,

안테나의 패턴에 따라 가중치를 줘야하는 빔을 선택한다. 본 연구에서 사용되었던 log periodic 안테나는 일반적으로 아래 그림 3.26과 같은 빔패턴을 갖는다[116][117][118].

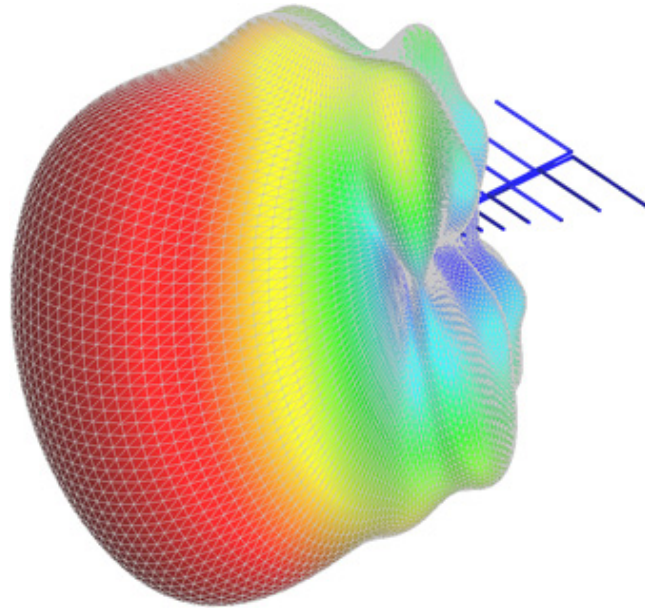


그림 3.26. 일반적인 Log periodic 안테나의 빔패턴 [118]

Fig 3.26. General Beam pattern shape of log-periodic antenna [118]

이 안테나의 경우 광대역 특성이 좋으며 제작이 용이하다. 전자파 잔향실 내부에 설치된 이 안테나의 방향에 대해서 정규화 된 빔패턴을 이용하여 각각의 빔에 가중치를 0에서 1까지 설정하여 안테나의 특성을 반영할 수 있다.

실제 주파수를 적용하는 범위가 200MHz에서 1GHz까지 꽤 넓은 대역을 사용하기 때문에 정확한 시뮬레이션을 위해서는 각 주파수마다 안테나의 패턴을 적용해야 한다. 하지만 안테나의 빔패턴은 파필드(far field)조건에서 계산된 결과이며, 공진기 형태인 전자파 잔향실 내부에서는 빔패턴이 달라질 수 있다. Log periodic안테나와 같이

주파수 대역에 대하여 빔패턴이 많이 변하지 않는 형태에 대해서는 안테나의 주파수 영역에 대해 같은 가중치를 사용해도 되지만, 어레이 안테나와 같이 주파수에 민감하게 변하는 안테나에 대해서는 주파수 별로 각각 다른 빔패턴을 사용해야 정확한 해석을 할 수 있다.

제 4 장 실험 및 시뮬레이션 결과

앞서 연구한 광원 추적법 기반 전자파 잔향실에서 전자기장 분포 계산법을 이용하여 잔향실의 전자기장 균일도를 계산할 수 있다. 이 결과와 표준과학연구원에서 보유하고 있는 전자파 잔향실에서의 측정결과를 비교하였다. 전자파 잔향실에서 전자기장 균일도를 비교하였으며 제안된 방법으로 실험결과와 유사한 결과를 추정하는 것을 확인하였다. 또한 시뮬레이션 해석 결과를 비교하였고 제안된 방법이 시간적인 입장에서 해석에 매우 유리함을 확인하였다.

4.1 전자파 잔향실의 제원

표준과학 연구원에서 제공하는 전자파 잔향실의 제원은 다음과 같다. 육면체 구조의 잔향실이며 크기는 3400mm (W) × 4500mm (L) × 2800mm (H)이다. 이 잔향실의 사용가능한 최저 주파수는 잔향실의 모드 개수와 모드밀도에 의해 결정되며 200MHz에서 해당 잔향실은 100개 이상의 모드가 존재하고 MHz당 1.5개의 모드 밀도를 갖는다. 아래 그림 4.1은 실제 측정한 전자파 잔향실의 사진이다.



그림 4.1. 실험에 사용된 전자파 잔향실

Fig 4.1. Reverberation chamber used in the experiment

이 잔향실에서는 수직 교반기와 수평 교반기가 존재하며, 수직 교반기는 3개의 패들로 이루어져 있고 수평 교반기는 5개의 패들로 이루어져 있다. 교반기와 잔향실은 같은 금속으로 만들어져 있으며 이때 금속의 도전율(conductivity)은 1.1×10^6 S/m이다. 수직 교반기의 길이는 2554mm이고 수평 교반기의 길이는 4250mm이다. 실험에서 사용한 안테나는 log periodic 안테나를 송수신 안테나로 사용했다. 아래 그림 4.2는 전자기장 균일도를 측정하기 위한 테스트 셋업이다.

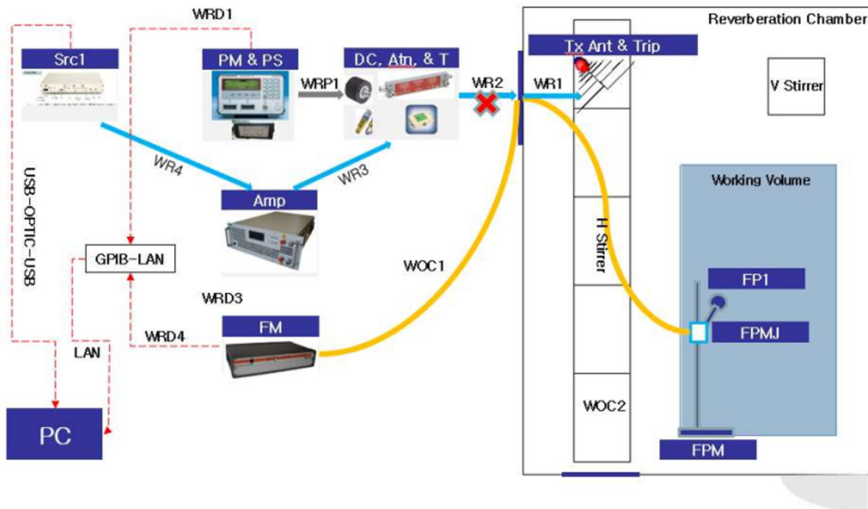


그림 4.2. 전자기장 균일도 측정 테스트 셋업

Fig 4.2. Field uniformity test setup

그림 4.2에 있는 테스트 장비들의 제원은 표 4.1에 정리하였다.

표 4.1. 시험 장비 제원

Table 4.1. Specifications of equipment for test

| Identity | Item | Manufacturer | Model | Serial No. |
|----------|--------------------------|---------------------|----------------|--------------|
| FP1 | Field Probe | Amplifier Research | FL7040 | 0423334 |
| FL1 | Laser Interface | Amplifier Research | FL7000 | 0464254 |
| FPM | Field Probe Mast | Amplifier Research | PS2000 | |
| FPMJ | Jig for FPM | Amplifier Research | PS2000 | |
| Src1 | RF source | National Instrument | FSW0020 | 13301-00830 |
| PC | Computer | | | |
| Trip | Antenna Tripod | | | |
| PS | Power Sensor | Rohde & Schwarz | NRV-Z51 | 101810 |
| PM | Power Meter | Rohde & Schwarz | NRVD | 840023/013 |
| Tx Ant | Tx Antenna | Schwarzbeck | 9118A | 364 |
| Rx Ant | Rx Antenna | Schwarzbeck | 9118A | |
| DC1 | Directional Coupler | Wellatone | C7734-10 | 108992 |
| Amp2 | RF Amplifier | KRISS | | ASU2-1504001 |
| Amp 1 | RF Amplifier | Amplifier Research | 10W1000c | 0341362 |
| T1 | Termination | Narda | 374BNM | 9901 |
| - | High Precision Connector | | N(m) - N(m) | |
| | High Precision Connector | | N(f) - 2.4N(m) | |
| | High Precision | | 2.4N(m) - | |

| | | | | |
|---------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|----------|
| | Connector | | 2.4N(m)) | |
| WR1 | N(m) – N(m) 2m | GORE OPQ01Q01078. 7 | MFR 541Q2 | 14439527 |
| WR3 | N(m) – N(m) 1.2m | GORE OPQ01Q01048. 0 | MFR 541Q2 | 14439526 |
| WR4 | N(m) – N(m) 1.2m | GORE OPQ01Q01048. 0 | MFR 541Q2 | 14439526 |
| WRP1 | Power sensor cable | RS | | |
| WOC1,2 | Optic Cable | – | | |
| WRD1,4 | GPIB, Data cable | | | |
| | Motion Controller | KRISS | | |
| | Laser Level | Sincon | | |
| | Laser distance | Leica | DISTO A5 | |
| | Angle Measureme nt | Wyler | Cintroni cplus | |
| | USB– Optical– USB | | | |
| | GPIB–LAN | National Instrument | GPIB– ENET/1 000 | 16BD03D |
| | Ruler | | | |

4.2 전자파 잔향실의 실험 결과 및 시뮬레이션 결과비교

전자기장 균일도를 측정은 국제 표준 IEC61000-4-21의 지침대로 진행하였으며, 측정된 주파수 영역은 200MHz에서 1000MHz까지이다. 시뮬레이션에 사용된 모델은 3차원 수치해석 프로그램을 이용하였고, 도체가 많은 특성상 모멘트법을 적용하는 수치해석 프로그램인 Altair Engineering사의 FEKO를 통하여 진행하였다. 수평 교반기와 수직 교반기는 동시에 회전하며, 각각 5도 간격으로 총 72단계에 걸쳐 회전하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션은 각 각도에 대하여 시험영역에서의 전자기장을 계산하고 측정 예서와 같이 전자기장 균일도를 계산한다.

아래 그림 4.3은 상용 프로그램인 FEKO를 이용해서 3차원 모델링한 전자파 잔향실의 그림이다.

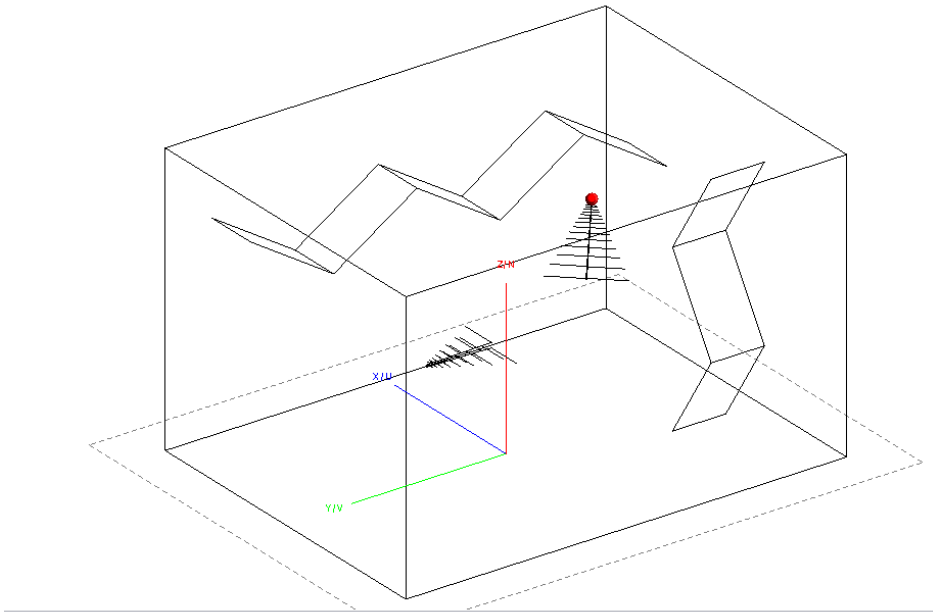


그림 4.3. 상용 프로그램을 이용한 전자파 잔향실 모델

Fig 4.3. RC modeling using software

해당 그림에서도 수직 교반기와 수평 교반기가 정확하게 모델링 되어 있음을 확인 할 수 있다. 이때 시뮬레이션은 앞서 언급했듯이 한바퀴를 돌면서 진행하였고 step angle은 5도 간격으로 총 72회의 모델링에 대하여 해석을 진행한다. 이 때 각 단계의 각도 마다 시험 영역의 전기장을 저장한다. 시험 영역은 아래 그림 4.4로 표현된 영역이다.

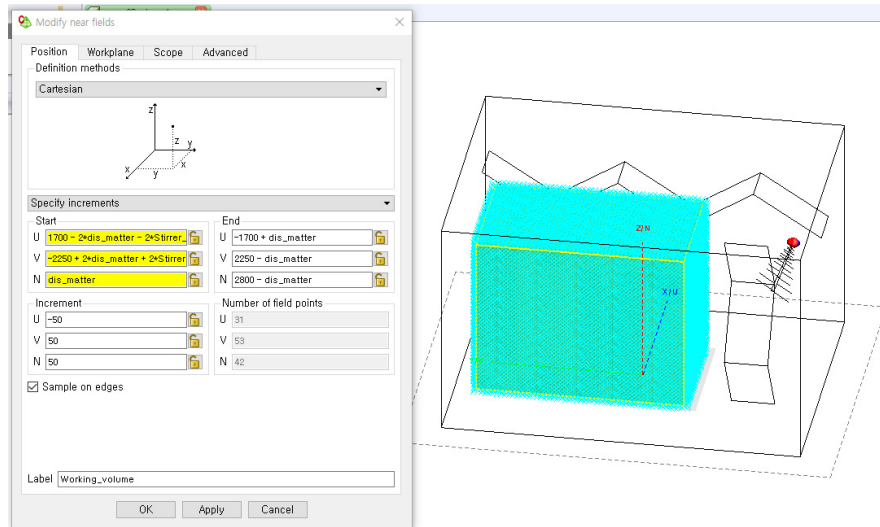


그림 4.4. 전자과 잔향실의 시험 영역

Fig 4.4. Working volume of the RC

그림 4.4에서 파란색 부분으로 표시된 부분이 실제 시뮬레이션에서 데이터를 저장하는 영역이며, 전자과 잔향실의 시험영역에 해당한다. 모든 단계의 각도에 대하여 전기장 데이터를 저장하고, 그 데이터를 후 처리해서 전기장의 균일도를 계산할 수 있다. 수치해석 기법의 장점은 원하는 시험영역에서 전자기장의 분포를 정확하게 계산할 수 있다는 점이다. 하지만 주파수가 증가할수록 필요한 요소수가 급격하게 증가하게 되고, 하나의 각도에 대한 해석만으로도 하루 이상의 시간이 소요된다. 아래 그림은 300MHz에서 시험영역의 몇 개의 z평면에 대한 전기장 분포 결과이다.

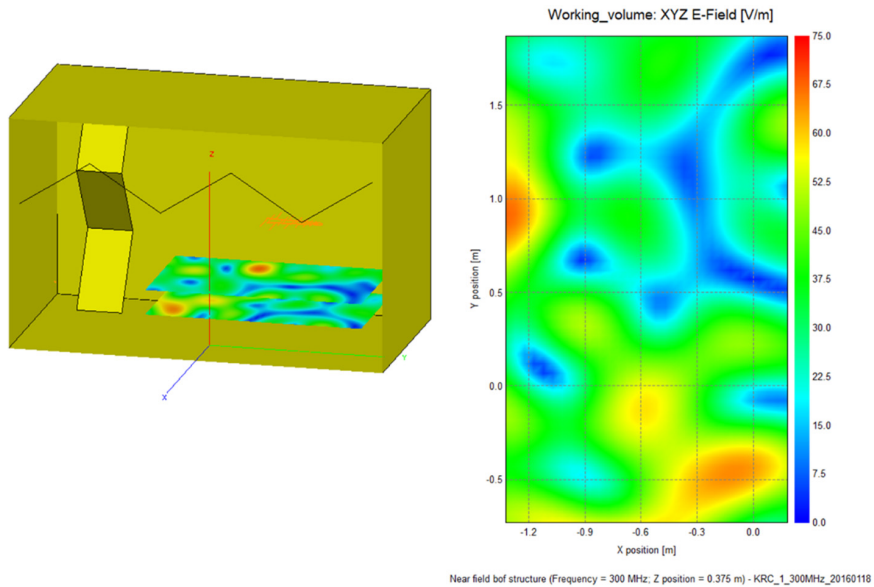


그림 4.5. 시험영역의 특정 평면에서 계산한 전기장 분포

Fig 4.5. Electric field distribution at the working volume plane

그림 4.5는 특정 주파수 300MHz에서 특정 단계의 각도 0도 회전한 교반기의 시험영역 일부 결과이다. 전기장 균일도를 측정하기 위해서는 시험영역의 최 하단 평면과 최 상단 평면의 필드를 저장하고, 각도를 0도부터 360도까지 각각 돌려서 마찬가지로 시험영역의 최 하단 및 최 상단 평면의 데이터를 저장한다. 이렇게 수집한 데이터를 추가적으로 가공하면 300MHz에서의 전자기장 균일도를 계산할 수 있다.

이 과정을 실험을 진행한 200MHz에서부터 1GHz까지 진행하기에는 시간적인 문제가 발생한다. 앞서 설명한 주파수에 따른 요소 수 증가 때문인데, 400MHz인 경우에도 특정 각도에 대한 한번의 해석만으로도 수 시간이 소요된다. 3차원 모델의 특성상 주파수가 2배 증가하면, 즉 파장이 반으로 짧아지면 그에 따른 요소가 2^3 배 증가하기 때문에 그만큼에 해당하는 메모리가 필요하며 해석하는 시간 역시

길어지게 된다. 본 시뮬레이션에서는 메모리의 한계로 200MHz, 252MHz, 300MHz, 357MHz, 400MHz, 500MHz, 600MHz에 대해서만 시뮬레이션을 진행하였고 그 결과를 측정결과와 비교하였다.

먼저 사용가능한 최저 주파수인 200MHz에서부터 1GHz까지 식 (2.2a), (2.2b), (2.2c)에서 표현된 x 축, y 축, z 축에 대한 전자기장 균일도의 결과와 식 (2.3)으로 계산할 수 있는 전체 필드에 대한 균일도 결과는 아래 그림 4.6과 같이 나타난다. 아래 그림에서 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 는 각각 x 축, y 축, z 축의 전기장에 대한 균일도 측정 결과이다. σ_{all} 은 2장에서 설명한 방법을 따라 모든 측정결과를 이용해 전자기장 균일도를 계산한 결과이며 Limit로 표현된 빨간색 선은 IEC 61000-4-21에서 제시하는 제한값이다.

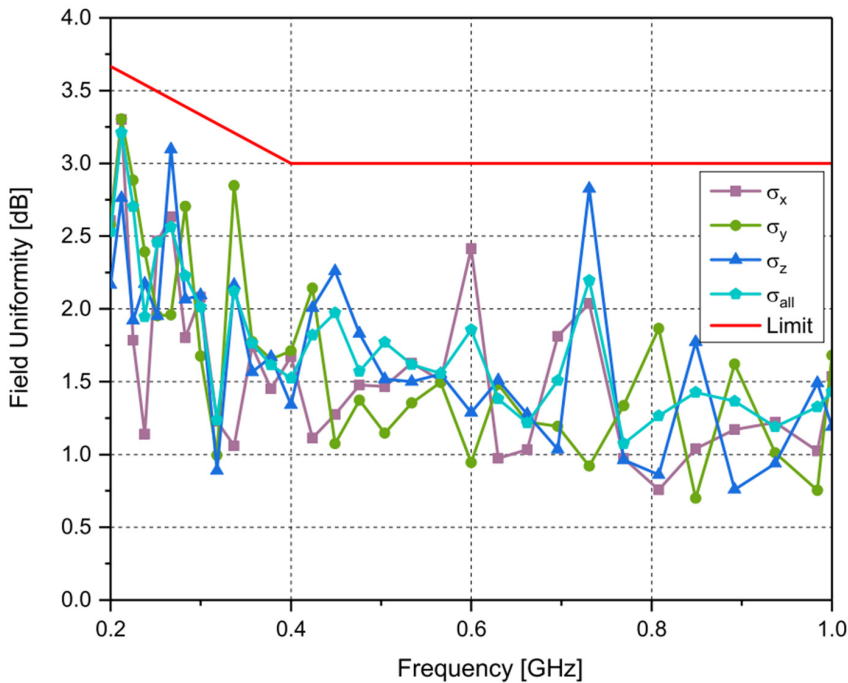


그림 4.6. 전자기장 균일도 측정결과

Fig 4.6. Field uniformity measurement result

교반기가 전자파 잔향실을 잘 교반 시켜주었기 때문에 모든 주파수 영역에서 균일도의 값이 IEC 61000-4-21에서 제시하는 제한 값 아래로 측정되었다. 즉 이 전자파 잔향실의 시험영역에서는 필드 균일도가 모두 국제 표준을 만족시킨다는 의미가 된다.

위의 측정 결과에서 200MHz에서 600MHz까지의 결과만을 가져와서 시뮬레이션 결과와 비교하면 다음 그림과 같다. 제한된 주파수에서만 전자기장 균일도를 계산하였지만 측정 결과를 잘 따라가는 모습을 보여주고 있다.

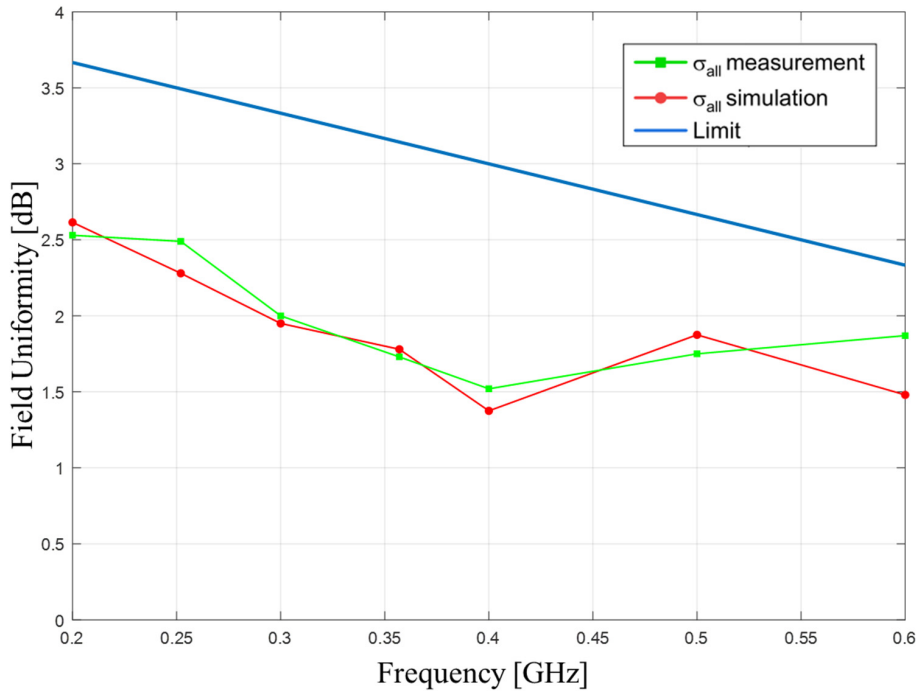


그림 4.7. 전자기장 균일도의 비교, 측정 vs 시뮬레이션

Fig 4.7. Field uniformity measurement result versus simulation result

4.3 시험 영역에서의 전자기장 균일도 해석 결과

앞 절에서 설명한 광원 추적법 기반 해석 방법으로 전자파 잔향실과 그 교반기들을 해석하기 위해 두 단계의 과정을 거친다. 먼저 안테나에서 방사한 전자파를 고각과 방위각에 따라 추적하여 전자파가 도달하는 모든 전자파 잔향실 내부의 점을 찾는다. 이점을 찾을 때는 주파수에 관계없이 교반기의 상태가 변할 때마다 계산해 주면 된다. 이 첫번째 단계를 통해서 모든 점의 데이터를 얻을 수 있고, 이 점을 이용해서 각 선분의 정보를 파악한다. 아래 표 4.2와 4.3은 추적한 점을 통해 얻어낸 데이터의 구조를 보여주고 있다.

표 4.2. 광원 추적법을 사용하여 얻은 점 데이터 구조

Table 4.2. Points data structure calculated by ray tracing

| | | 첫 번째 조향각(θ, ϕ) | | | 두 번째 조향각(θ, ϕ) | | | ... | $N_{\theta}N_{\phi}$ 번째 조향각(θ, ϕ) | | |
|------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|-----|-----|-------------------------------|-----|-----|-----|--|-----|-----|
| Points Data | | x | y | z | x | y | z | ... | x | y | z |
| 첫 번째 교반기 각도 | 시작점 | | | | | | | ... | | | |
| | 1번째 산란점 | | | | | | | ... | | | |
| | 2번째 산란점 | | | | | | | ... | | | |
| | ⋮ | | | | | | | ... | | | |
| | N_{refl} 번째 산란점 | | | | | | | ... | | | |
| 두 번째 교반기 각도 | 시작점 | | | | | | | ... | | | |
| | 1번째 산란점 | | | | | | | ... | | | |
| | 2번째 산란점 | | | | | | | ... | | | |
| | ⋮ | | | | | | | ... | | | |
| | N_{refl} 번째 산란점 | | | | | | | ... | | | |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | | ⋮ | ⋮ | ⋮ | |
| N_{dirAngle} 번째 교반기 각도 | 시작점 | | | | | | | ... | | | |
| | 1번째 산란점 | | | | | | | ... | | | |
| | 2번째 산란점 | | | | | | | ... | | | |
| | ⋮ | | | | | | | ... | | | |
| | N_{refl} 번째 산란점 | | | | | | | ... | | | |


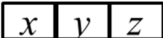
 : 데이터 영역  : 점의 좌표

표 4.3. 광원 추적법을 사용하여 얻은 선 데이터 구조

Table 4.3. Lines data structure calculated by ray tracing

| | | 첫 번째 조향각 (θ_1, ϕ_1) | | | | | 두 번째 조향각 (θ_2, ϕ_2) | | | | | ... | 마지막 조향각 ($\theta_{N\theta}, \phi_{N\phi}$) | | | | |
|---------------------------|-----------------|------------------------------------|---|---|---|---|------------------------------------|---|---|---|---|-----|---|---|---|---|---|
| Line Data | | x | y | z | n | l | x | y | z | n | l | ... | x | y | z | n | l |
| 첫 번째 교반기 각도 | 1번째 선 | | | | | | | | | | | ... | | | | | |
| | 2번째 선 | | | | | | | | | | | ... | | | | | |
| | ⋮ | | | | | | | | | | | ... | | | | | |
| | N_{refl} 번째 선 | | | | | | | | | | | ... | | | | | |
| 두 번째 교반기 각도 | 1번째 선 | | | | | | | | | | | ... | | | | | |
| | 2번째 선 | | | | | | | | | | | ... | | | | | |
| | ⋮ | | | | | | | | | | | ... | | | | | |
| | N_{refl} 번째 선 | | | | | | | | | | | ... | | | | | |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | |
| $N_{stirAngle}$ 교반기 각도 | 1번째 선 | | | | | | | | | | | ... | | | | | |
| | 2번째 선 | | | | | | | | | | | ... | | | | | |
| | ⋮ | | | | | | | | | | | ... | | | | | |
| | N_{refl} 번째 선 | | | | | | | | | | | ... | | | | | |

x

y

z

n

l

: 데이터 영역
: 점의 좌표
: 만나는 평면 번호
: 선분 길이

위의 두 표에서 회색으로 음영 처리된 영역은 데이터가 존재하는 영역을 의미한다.

광원 추적법으로 계산을 할 때 적당한 빔 밀도를 갖고 고각과 방위각에 대해서 방사한다. 이 때 방사한 빔은 시작점 (안테나의 위치)으로부터 총 N_{refl} 번의 반사를 한다. 따라서 한 번의 고각 및 방위각에 대해서 $N_{refl} + 1$ 개의 데이터가 형성된다. 이때 교반기의 상태도 최초의 상태에서 한바퀴를 돌 때까지 $N_{stirAngle}$ 번 나누어서 해석하기 때문에 하나의 고각 및 방위각에 대하여 한 가지의 교반기 상태에 따라 총 $(N_{refl} + 1) \times 3$ 개의 데이터가 형성된다. 고각을 나누는 개수를 N_{theta} , 방위각을 나누는 개수를 N_{phi} 라고 했을 때 전자기장 균일도를 계산하는데 필요한 점 데이터는 $\left[N_{stirAngle} (N_{refl} + 1) \right] \times \left[3N_{theta} N_{phi} \right]$ 크기를 갖는 행렬이 된다.


이 데이터를 가공하여 선정보를 만들 수 있다. 선은 표 4.3에서 처럼 총 N_{refl} 개 생성이 되며 각각의 선분에 대해 방향벡터를 저장한다. 또한 n 번째 선이 만나는 면의 법선 벡터를 위해 만나는 면이 몇 번째인지를 저장하고, 그 선분의 길이도 저장한다. 이렇게 하면 하나의 고각 및 방위각에 대해 $5N_{refl}$ 개가 저장되며, 이렇게 만들어진 선 데이터는 $[N_{stirAngle} N_{refl}] \times [5N_{theta} N_{phi}]$ 크기의 행렬이 된다.

이렇게 데이터를 모두 저장하면 원하는 영역 (주로 시험영역)에서 전기장을 계산하기 위해 3장에서 소개한 방법으로 편파를 계산한다. 초기 편파의 벡터에 대해서 벽면에 반사할 때마다 변하는 편파를 모두 저장하면 아래 표 4.4와 같은 데이터 구조를 갖는다.

표 4.4. 광원 추적법을 사용하여 얻은 편파 데이터 구조

Table 4.4. Polarization data structure calculated by ray tracing

| | Polarization Vector Data | 첫 번째 조향각(θ, ϕ) | | | 두 번째 조향각(θ, ϕ) | | | ... | $N_{theta} N_{phi}$ 번째 조향각(θ, ϕ) | | |
|------------------------|--------------------------|----------------------------|-----|-----|----------------------------|-----|-----|-----|--|-----|-----|
| | | x | y | z | x | y | z | ... | x | y | z |
| 첫 번째 교반기 고각 | 첫 번째 편파 | | | | | | | ... | | | |
| | 두 번째 편파 | | | | | | | ... | | | |
| | ⋮ | | | | | | | ... | | | |
| | N_{refl} 번째 편파 | | | | | | | ... | | | |
| 두 번째 교반기 고각 | 첫 번째 편파 | | | | | | | ... | | | |
| | 두 번째 편파 | | | | | | | ... | | | |
| | ⋮ | | | | | | | ... | | | |
| | N_{refl} 번째 편파 | | | | | | | ... | | | |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | | ⋮ | ⋮ | ⋮ | |
| $N_{stirAngle}$ 번째 교반기 | 첫 번째 편파 | | | | | | | ... | | | |
| | 두 번째 편파 | | | | | | | ... | | | |
| | ⋮ | | | | | | | ... | | | |
| | N_{refl} 번째 편파 | | | | | | | ... | | | |

 : 데이터 영역  : 벡터

점 데이터와 유사하게 회색 음영으로 표시된 영역은 데이터가 존재하는 영역이며, 하나의 고각 및 방위각에 대하여 교반기의 상태에

벡터 데이터가 저장되지만 개수는 선분의 개수와 같게 된다. 편파 데이터는 $[N_{\text{stirAngle}} N_{\text{refl}}] \times [3N_{\text{theta}} N_{\text{phi}}]$ 크기의 행렬이 생성된다.

주파수에 관계없이 교반기의 상태에 따라서 위의 데이터를 추출할 수 있다. 이렇게 추출된 데이터를 이용하여 원하는 주파수에서 전기장을 계산할 수 있다. 식 (3.39)를 이용해서 전자파 잔향실의 시험영역 8개의 모서리에 대하여 전기장을 계산한다. 그렇게 얻어진 결과를 식 (2.3)의 균일도 계산식을 이용하여 주파수 별로 전기장 균일도를 계산한다. 이렇게 계산된 결과와 시뮬레이션 결과 그리고 측정결과를 나타낸 그래프가 그림 4.8에 도식화되어 있다.

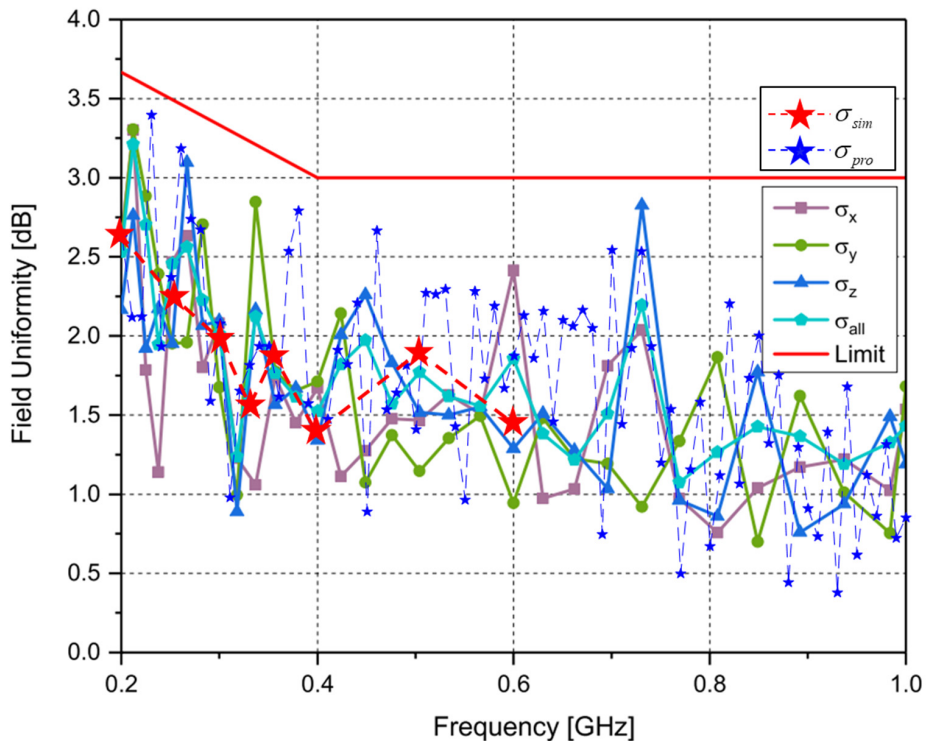


그림 4.8. 전자기장 균일도. 측정, 시뮬레이션, 제안된 방법

Fig 4.8. Field uniformity result. Measurement, simulation, and proposed method result

위의 그림 4.8는 앞서 측정했던 결과와 시뮬레이션 결과 위에 제안된 방법으로 얻은 전기장 균일도를 추가적으로 도식화하였다. 여기에서 σ_{sim} 은 시뮬레이션을 통해 얻은 전자기장 균일도 결과이며, σ_{pro} 는 제안된 방법을 이용하여 얻은 균일도의 결과이다. $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 와 σ_{all} 은 그림 4.6에서와 같은 결과를 나타내며, 각각 x 축, y 축, z 축 그리고 전체를 이용하여 계산한 전자기장 균일도를 의미한다. 제안된 방법으로 얻은 전자기장 균일도는 전체적으로 그 추세를 잘 따라가는 것을 확인하였다. 측정결과와 정확하게 일치하지는 않지만 시뮬레이션과 비교해 보았을 때 시간을 상당히 단축시킬 수 있다.

단순히 비교하기는 어렵지만 특정 주파수에 대하여 교반기가 특정 각도로 고정되어 있을 때 해석 시간을 비교했을 때 동일한 컴퓨터에서 제안된 방법이 상용 프로그램에 비해 약 3배 이상 빠른 것을 확인할 수 있었다. 아래 표 4.5에서는 시뮬레이션을 통해 계산한 결과와 제안된 방법의 시간을 보여주고 있다.

표 4.5. 시뮬레이션과 제안된 방법의 계산 시간 비교

Table 4.5. Comparison of calculation time between simulation and proposed method

| | Simulation | Proposed method | |
|------------------|------------|-------------------|-------|
| Frequency | 300 MHz | 300 MHz | |
| Stirrer angle | 0° | 0° | |
| Calculation time | 588 s | Time | Ratio |
| | | Path trace: 171s | 91.4% |
| | | Polarization: 12s | 6.4% |
| | | Uniformity: 4s | 2.14% |
| | | Total: 187s | 100% |

Intel Core i7-3770 @ 3.40GHz CPU, 16GB of RAM, operated on a 64-bit operating system

제 5 장 결론 및 향후 연구 계획

5.1 결론

본 논문에서는 전자파 잔향실을 평가하는 가장 중요한 파라미터인 전자기장 균일도를 빠르게 계산하는 방식을 기존의 전자기장 이론에 광원 추적법을 결합하여 제안하였다. 일반적인 수치해석들과는 다르게 전자파 잔향실에서의 측정은 교반기 시간에 따른 변화를 그 상태에 따라 측정을 해야 하는 어려움이 존재한다. 전자파 잔향실의 정확한 해석 기법이 정착되지 않은 상황에서 이러한 어려움을 극복하고자 다양한 측정 방법에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있는 상황이다. 또한 전자기장 균일도에 대한 대부분의 발표된 논문들에서도 전자파 잔향실의 균일도를 국제 표준에 맞추기 위한 방법으로 다양한 교반기를 제작하여 실험적으로 가장 좋은 교반기를 찾고 있는 실정이다.

이에 본 논문에서는 기존에 수치해석들과는 다르게 광원 추적법을 적용하여 전자파 잔향실에 전자파가 어떻게 분포하는지를 예측하여 전자기장 균일도를 기존의 방법 대비 3배이상 빠르게 계산하였고 실험결과와 비교를 통해 그 정확성을 입증하였다. 기본적으로 전자파가 직진하는 성질을 이용하여 평면파의 진행상태를 내부 금속 벽면 및 금속 교반기에 대하여 반사될 때마다 반사 위치에서의 경계조건을 만족하도록 계산하였다. 전자파 잔향실에서의 균일도 측정이 모든 공간에 대한 해석이 필요한 것이 아닌 시험영역이라는 한정된 영역에 대해서만 계산하기 때문에 전자파 잔향실 내부 전체에 분포하는 전자기장을 확인하기는 어렵지만, 전자파 잔향실을 대표하는 전자기장 균일도에 대해서는 빠르게 추정이 가능하다. 제안된 알고리즘을 적용하여 해석을 하면 기존에 full wave 해석을 통한 결과보다 최소 3배의 시간을 단축할 수 있음을 확인하였다. 특히 이 결과는 특정한 주파수와 특정 교반기의 각도에 대해 진행한 것인데, 주파수에 관계없이 구조에 따라 경로를

찾는 본 논문에서 제시하는 방법의 특성상, 여러 주파수에서 전자기장 균일도를 계산하는 상황에서는 더 높은 효율을 보여줄 것으로 보인다.

기본적으로 수 미터 단위의 구조물에서 주파수까지 높아진다면 단기간 내에 해석하기에 full-wave 해석은 적합하지 않다. 기존의 사용되는 상용 툴을 이용한다면 각 주파수별로 요소를 다르게 나누고, 교반기의 상태에 따라서 요소를 다르게 나눠야 해서 많은 상태를 고려하면 할수록 기하급수적으로 많은 계산량을 요구하게 된다. 이에 반해 광원 추적법으로 데이터를 선 처리할 때는 주파수에 영향을 받지 않기 때문에 한 번 데이터 베이스를 구축해 놓고 다른 주파수에 대하여 바로 해석을 돌려 볼 수 있는 장점이 있다.

이 방법을 이용하여 다양한 환경에서 전자기장 균일도를 예측할 수 있으며, 예측 결과에 기반하여 전자파 잔향실을 건설할 때 설계단계에서 안테나의 위치, 방향, 개수 등의 다양한 요건들을 고려하여 균일도를 제어할 수 있다.

실제 실험은 표준과학연구원에서 제공하는 전자파 잔향실에서 진행되었으며, 수직 교반기와 수평 교반기가 설치되어 있는 환경에서 내부 시험 영역의 전기장을 측정하여 균일도를 계산하였다. 주파수는 사용가능한 최저 주파수인 200MHz부터 1GHz까지 진행하였고 비교군인 상용툴로는 FEKO를 이용하여 200MHz에서 600MHz까지 7개의 주파수에 대해 해석하여 비교하였다. 제안된 방법과 상용 툴 모두 측정 결과와 유사한 결과를 보여주었으며 IEC61000-4-21에서 제시하는 규격에도 모두 만족하는 결과를 확인 하였다.

5.2 향후 연구 계획

현재 전자기장 균일도를 계산하기 위하여 시험영역의 모서리에 파장대비 대략 1/10에 해당하는 반지름의 구형대의 영역을 선택하여 그 점을 지나는 선로에 대해서 전기장을 계산하고 있다. 광원 추적법을 적용한 해석으로 특정 점에서의 계산뿐만 아니라 특정 면에 대하여 계산할 수 있으면 시험영역의 전자기장 분포를 확인할 수 있다. 하지만 그에 따른 계산량이 증가하게 되고, 그 시간이 기존의 상용 소프트웨어와 비교했을 때 별 차이가 없다면 본 연구에서 제안하는 해석 기법의 장점이 사라지게 된다. 데이터를 처리하는 방식에 대한 연구를 진행하여 알고리즘을 백터화 시키는 추가 연구가 필요하다.

또한 실제 측정에서 안테나가 존재할 때, 안테나의 형상이 내부 전자기장 해석에 영향을 줄 수도 있다. 안테나 역시 금속의 구조물로 내부 전자기장을 반사시킬 수 있기 때문이다. 이러한 효과를 반영하는 연구와, 여러 개 존재할 때 다중 안테나로 인한 전자기장 균일성이 어떻게 변화하는지 알아보는 균일성에 대한 확장연구를 기대할 수 있다. 이로 인해 안테나의 위치뿐만 아니라 개수를 조정함으로써 내부 전자기장 균일도를 조정할 수 있다.

또한 특정 교반기가 설치된 전자파 잔향실에서 최적의 전자기장 균일도를 갖는 시험영역을 찾는 기법에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 해당 기법은 현재 가지고 있는 교반기에 대해서 균일도가 가장 좋은 영역을 찾게 해 줄 것이고, 전자파 적합성 시험에서 통계적으로 균일하게 분포된 전자기장 내에서 EUT를 시험할 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] CISPR 11, Industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment – Electromagnetic disturbance characteristics – Limits and methods of measurement.
- [2] CISPR 14-1, Electromagnetic compatibility – Requirements for household appliances, electric tools and similar apparatus – Part 1: Emission.
- [3] CISPR 14-2, Electromagnetic compatibility – Requirements for household appliances, electric tools and similar apparatus – Part 2: Immunity – Product family standard
- [4] CISPR 16-1, Specification for radio disturbance and immunity measurement apparatus and methods – Part 1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus.
- [5] IEC/TR EN 61000-1-series, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1: General
- [6] IEC EN 61000-4-series, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques
- [7] IEC EN 61000-6-series, TC 77, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-1: Generic standards
- [8] ISO 11452, Road vehicles – Electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy – Component test methods
- [9] J1113/12, Electrical Interference by Conduction and Coupling— Capacitive and Inductive Coupling via Lines Other than Supply Lines
- [10] J1812, Function Performance Status Classification for EMC Immunity Testing
- [11] MIL-STD 461, US Military Standard, EMC for subsystem and components: Conducted and Radiated/ Emissions and Susceptibility.
- [12] Anasori, Babak, Maria R. Lukatskaya, and Yury Gogotsi. "2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage." *Nature Reviews Materials* 2.2 (2017): 1-17.
- [13] C. Christopoulos and J. L. Herring, "The application of transmission-line modeling (TLM) to electromagnetic compatibility problems," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 35, no. 2, pp. 185-191, May 1993
- [14] Dhia, Sonia Ben, Mohamed Ramdani, and Etienne Sicard, eds. "Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits: Techniques for

- low emission and susceptibility". Springer Science & Business Media, 2006.
- [15] Poljak, Dragan. "Advanced modeling in computational electromagnetic compatibility". John Wiley & Sons, 2007.
- [16] Wang, Xiaochuan. "A Domain Decomposition Method for Analysis of Three-Dimensional Large-Scale Electromagnetic Compatibility Problems." Electronic Thesis or Dissertation. Ohio State University, 2012.
- [17] S. Eser and L. Sevgi, "Open-Area Test Site (OATS) Calibration," in IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 52, no. 3, pp. 204–212, June 2010,
- [18] P. Wilson, D. Hansen and D. Koenigstein, "Simulating open area test site emission measurements based on data obtained in a novel broadband TEM cell," National Symposium on Electromagnetic Compatibility, Denver, CO, USA, 1989, pp. 171–177,
- [19] A. Tsaliovich, "Absorber lined open area test site—a new type of EMC test facility," IEEE 1988 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Seattle, WA, USA, 1988, pp. 106–111,
- [20] Sevgi, Levent. "A Practical Guide to EMC Engineering". Artech House, 2017.
- [21] dB Technology EMC –cambridge, "<https://www.dbtechnology.co.uk/open-area-test-site/>", Registered in England, No.: 3452992
- [22] P. F. Wilson and M. T. Ma, "Shielding-Effectiveness Measurements with a Dual TEM Cell," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-27, no. 3, pp. 137–142, Aug. 1985
- [23] Crawford, Myron L., and Jerry L. Workman. "Using a TEM cell for EMC measurements of electronic equipment". Vol. 1013. Department of Commerce, Office of the Assistant Secretary of Commerce for Science and Technology, National Bureau of Standards, 1979.
- [24] TESCOM Co.,LTD, "TC-5063C", Pneumatic 6 GHz TEM Cell, <http://en.tescom.co.kr/>
- [25] T. Mandic, R. Gillon, B. Nauwelaers and A. Baric, "Characterizing the TEM Cell Electric and Magnetic Field Coupling to PCB Transmission Lines," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 54, no. 5, pp. 976–985, Oct. 2012,
- [26] M. Stojanovic, F. Lafon, S. Op't Land, R. Perdriau and M. Ramdani, "Determination of Equivalent Coupling Surface of Passive Components Using the TEM Cell," in IEEE Transactions on Electromagnetic

- Compatibility, vol. 60, no. 2, pp. 298–309, April 2018,
- [27] A. Al Takach, F. Ndagijimana, J. Jomaah and M. Al-Husseini, "3D-Printed Low-Cost and Lightweight TEM Cell," 2018 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS), Orleans, 2018, pp. 47–50
- [28] Crawford, Myron L., and Galen H. Koepke. Design, "evaluation, and use of a reverberation chamber for performing electromagnetic susceptibility/vulnerability measurements". No. NBS technical note 1092. United States. Government Printing Office., 1986.
- [29] Mendes, Horacio A. "A new approach to electromagnetic field-strength measurements in shield enclosures." Wescon Technical Papers (1968): 20–23.
- [30] X. Chen, P. Kildal, J. Carlsson and J. Yang, "MRC Diversity and MIMO Capacity Evaluations of Multi-Port Antennas Using Reverberation Chamber and Anechoic Chamber," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, no. 2, pp. 917–926, Feb. 2013,
- [31] G. Gradoni, F. Moglie, A. P. Pastore and V. M. Primiani, "Numerical and experimental analysis of the field to enclosure coupling in reverberation chamber and comparison with anechoic chamber," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 48, no. 1, pp. 203–211, Feb. 2006
- [32] 국립 전파원 전파 인증센터, https://ccac.rra.go.kr/electron/emi_test.do
- [33] 권종화, 곽상일. (2019). "전자파 잔향실 기반 EMC 측정 연구 개발 동향.", 전자파기술, 30(1), 58–66.
- [34] Hill, David A. "Electromagnetic theory of reverberation chambers." Technical Note (NIST TN)–1506 1506. Technical Note (NIST TN)–1506 (1998).
- [35] S. Boyes and Y. Huang, Reverberation Chambers – theory and applications to EMC and Antenna Measurements, John Wiley & Sons, London, 2016
- [36] Song, Jian, Hang Wang, and Yong Xin Guo. "Investigation of field uniformity and uncertainties in reverberation chamber using nonequidistant tuner position." Microwave and Optical Technology Letters 59.5 (2017): 1190–1194.
- [37] P. Kildal and A. A. Glazunov, "OTA testing of 3G–5G devices with MIMO: From anechoic chambers to reverberation chambers and ... back again?," 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego, CA, 2017, pp. 1697–1698

- [38] M. Gustafsson, T. Jämsä and M. Högberg, "OTA methods for 5G BTS testing — Survey of potential approaches," 2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), Montreal, QC, 2017, pp. 1–4
- [39] E. V. P. Anjos, M. SalarRahimi, R. Rehammar, D. M. M. –. Schreurs, G. A. E. Vandenbosch and M. Geurts, "A 5G Active Antenna Tile and its Characterization in a Reverberation Chamber," 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 2020, pp. 1–4
- [40] R. Rehammar and J. Kvarnstrand, "Using Reverberation Chambers to Test 5G-enabled Devices," 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Krakow, Poland, 2019, pp. 1–5.
- [41] V. M. Primiani et al., "Reverberation chambers for testing wireless devices and systems," in *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 9, no. 2, pp. 45–55, 2nd Quarter 2020
- [42] T. Jia, Y. Huang, Q. Xu, Z. Tian, J. Jiang and Q. Hua, "Frequency Domain Method for Scattering Damping Time Extraction of a Reverberation Chamber Based on Autocorrelation Functions," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*
- [43] W. Xue, X. Chen, M. Zhang, L. Zhao, A. Zhang and Y. Huang, "Statistical Analysis of Antenna Efficiency Measurements With Non-Reference Antenna Methods in a Reverberation Chamber," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 113967–113980, 2020
- [44] D. Senic et al., "Improved Antenna Efficiency Measurement Uncertainty in a Reverberation Chamber at Millimeter-Wave Frequencies," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 8, pp. 4209–4219, Aug. 2017
- [45] X. Chen, W. Xue, H. Shi, L. Wang, S. Zhu and A. Zhang, "Improving Field Uniformity Using Source Stirring With Orbital Angular Momentum Modes in a Reverberation Chamber," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 29, no. 8, pp. 560–562, Aug. 2019
- [46] B. Urul, I. B. Başığit, T. Göksu and S. Helhel, "CST simulation of reverberation chamber for improved field uniformity," 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, 2017, pp. 1070–1074.
- [47] H. –. Asander, G. Eriksson, L. Jansson and H. Akermark, "Field uniformity analysis of a mode stirred reverberation chamber using high resolution computational modeling," *2002 IEEE International*

- Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Minneapolis, MN, USA, 2002, pp. 285–290 vol.1.
- [48] Bakti, Aditia Nur, No–Weon Kang, and Jae–Yong Kwon. "Field Uniformity and Correlation Coefficient Analysis of KRISS Reverberation Chamber." *IEICE Transactions on Communications* (2018): 2017EBP3460.
- [49] IEC Criteria for Electromagnetic compatibility (EMC) – part 4–21: Testing and measurement techniques – Reverberation chamber test method, IEC 61000–4–21, 2011.
- [50] Václav Sebera, Andrea Nasswetrová & Květoslav Nikl (2012) Finite Element Analysis of Mode Stirrer Impact on Electric Field Uniformity in a Microwave Applicator, *Drying Technology*, 30:13, 1388–1396
- [51] J.–I. Hong and C.–S. Huh, "Optimization of Stirrer with Various Parameters in Reverberation Chamber," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 104, 15–30, 2010.
- [52] L. Xiaoqiang, W. Guanghui, Z. Yongqiang and Z. Chenghuai, "Effects of Stirrer on the Field Uniformity at Low Frequency in a Reverberation Chamber and its Simulation," 2008 International Symposium on Computer Science and Computational Technology, Shanghai, 2008, pp. 517–519
- [53] F. Moglie and V. M. Primiani, "Numerical Analysis of a New Location for the Working Volume Inside a Reverberation Chamber," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 54, no. 2, pp. 238–245, April 2012, doi: 10.1109/TEMC.2012.2186303.
- [54] Y. Huang, N. Abumustafa, Q. G. Wang and X. Zhu, "Comparison of Two Stirrer Designs for a New Reverberation Chamber," *The 2006 4th Asia–Pacific Conference on Environmental Electromagnetics*, Dalian, 2006, pp. 450–453
- [55] J. Yousaf et al., "Analysis of Effect of Stirrer Type on Field Uniformity in RRA Reverberation Chamber," 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Busan, Korea (South), 2018, pp. 1–2.
- [56] J. Tang, Z. Zhang, X. Chen, M. Zhao, S. Zhu and A. Zhang, "Comparison of Three Types of Stirrers in Terms of Field Uniformity in a Reverberation Chamber," 2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), Hangzhou, China, 2018, pp. 1–4
- [57] T. Hui et al., "Numerical simulation of field uniformity of reverberation

- chamber," 2016 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), Guilin, 2016, pp. 481–484
- [58] Z. Liu and C. Wang, "Efficient Iterative Method of Moments—Physical Optics Hybrid Technique for Electrically Large Objects," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 7, pp. 3520–3525, July 2012
- [59] P. Usai, M. Borgese, F. Costa and A. Monorchio, "Hybrid Physical Optics—MoM—Ray Tracing Method for the RCS Calculation of Electrically Large Objects Covered with Radar Absorbing Materials," 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Boston, MA, 2018, pp. 145–146
- [60] J. Budhu and Y. Rahmat—Samii, "Synthesizing thin dielectric lenses for conical scanning beams: A hybrid numerical algorithm," 2017 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC—URSI NRSM), Boulder, CO, 2017, pp. 1–2, doi: 10.1109/USNC—URSI—NRSM.2017
- [61] F. Puggelli, P. Pathak, M. Albani and P. Janpugdee, "A hybrid numerical—composite UTD ray analysis of the radiation by large locally convex conformal arrays on large platforms," 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory, Hiroshima, 2013, pp. 1064–1065.
- [62] R. Fernandez—Recio, L. Garcia—Castillo, I. Gomez—Revuelto and M. Salazar—Palma, "Fully Coupled Hybrid FEM—UTD Method Using NURBS for the Analysis of Radiation Problems," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 3, pp. 774–783, March 2008
- [63] P. M. Morse, H. Feshbach: *Methods of theoretical physics, Parts I and II*, NewYork: McGraw—Hill, 1953.
- [64] Pozar, David M. *Microwave engineering*. John wiley & sons, 2011.
- [65] Balanis, Constantine A. *Advanced engineering electromagnetics*. John Wiley & Sons, 1999.
- [66] Sun, H.; Gu, C.; Li, Z.; Xu, Q.; Song, J.; Xu, B.; Dong, X.; Wang, K.; Martín, F. Enhancing the Number of Modes in Metasurfaced Reverberation Chambers for Field Uniformity Improvement. *Sensors* 2018, 18, 3301.
- [67] J. Song, Z. Li, H. Sun, J. Shi, C. Gu and K. Wang, "Field uniformity improvement at lower frequencies in a reverberation chamber using metasurfaces," 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic

- Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC), Singapore, 2018, pp. 1156–1159,
- [68] J. Yousaf et al., "EM Field Uniformity Analysis of RRA Reverberation Chamber," 2020 International Conference on UK–China Emerging Technologies (UCET), Glasgow, United Kingdom, 2020, pp. 1–4
- [69] Gros, Jean-Baptiste, et al. "Uncorrelated Configurations and Field Uniformity in Reverberation Chambers Stirred by Tunable Metasurfaces." arXiv preprint arXiv:1905.12757 (2019).
- [70] C. Jia, W. Wang, Y. Wu and J. Yu, "Using genetic algorithm to optimize double transmitting antenna on field uniformity in reverberation chambers," 2017 IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC–Beijing), Beijing, 2017, pp. 1–3,
- [71] H. Huang, X. Chen, M. Li, J. Chen and Q. Li, "Characterization of Stirrer Performance in Reverberation Chamber Using Characteristic Modes," 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 2020, pp. 1–4
- [72] P. -. Kildal and K. Rosengren, "Correlation and capacity of MIMO systems and mutual coupling, radiation efficiency, and diversity gain of their antennas: simulations and measurements in a reverberation chamber," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 12, pp. 104–112, Dec. 2004.
- [73] A. V. Demakov and M. E. Komnatnov, "Algorithm for an Estimation of the Electromagnetic Field Uniformity in the Working Volume of a Reverberation Chamber," 2019 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol (Altai Republic), Russia, 2019, pp. 65–69
- [74] J. Shi, J. Chakarothai, J. Wang, O. Fujiwara, K. Wake and S. Watanabe, "Improvement of SAR Accuracy by Combining Two SAR Quantification Methods for Small Animals in Reverberation Chamber Above 10 GHz," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 138170–138178, 2020
- [75] A. K. Fall, P. Besnier, C. Lemoine, M. Zhadobov and R. Sauleau, "Experimental Dosimetry in a Mode–Stirred Reverberation Chamber in the 60–GHz Band," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 58, no. 4, pp. 981–992, Aug. 2016
- [76] Pastore, R., Delfini, A., Micheli, D., Vricella, A., Marchetti, M., Santoni, F., & Piergentili, F. (2019). Carbon foam electromagnetic mm–wave absorption in reverberation chamber. *Carbon*, 144, 63–71.

- [77] Hernandez, Hugo. "Ergodic–Stochastic Transformations." *ForsChem Research Reports* 12 (2017).
- [78] Grushko, Vladimir. "Ergodic Hypothesis of Consciousness." *NeuroQuantology* 17.5 (2019).
- [79] Mitkowski, Paweł J. "Chaos and Ergodic Theory." *Mathematical Structures of Ergodicity and Chaos in Population Dynamics*. Springer, Cham 19–40.
- [80] Neumann, J. V. "Proof of the quasi–ergodic hypothesis." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 18.1 (1932): 70–82.
- [81] Neumann, J. V. "Physical applications of the ergodic hypothesis." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 18.3 (1932): 263.
- [82] Zakharevich, M. I. "On the behaviour of trajectories and the ergodic hypothesis for quadratic mappings of a simplex." *Russian Math. Surveys* 33.6 (1978): 265–266.
- [83] Moore, Calvin C. "Ergodic theorem, ergodic theory, and statistical mechanics." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112.7 (2015): 1907–1911.
- [84] Patrascioiu, Adrian. "The ergodic hypothesis." *Proceedings of Los Alamos Science Special issue* (1987): 263–279.
- [85] Oliveira, César R. de, and Thiago Werlang. "Ergodic hypothesis in classical statistical mechanics." *Revista Brasileira de Ensino de Física* 29.2 (2007): 189–201.
- [86] Lee, M. Howard. "BIRKHOFF THEOREM AND ERGOMETER: RELATIONSHIP BY AN EXISTENCE ASSUMPTION." *Acta Physica Polonica B* 39.5 (2008).
- [87] F. Monsef, A. Cozza, "Average Number of Significant Modes Excited in a Mode–Stirred Reverberation Chamber", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 56(2):259–265, April 2014
- [88] Test method standard MIL–STD–1377: "Measurement of effectiveness of cable, connector, and weapon enclosure shielding and filters in precluding hazards of electromagnetic radiation to ordnance (HERO)", *U. S. Department of Defense*, 20 August 1971.
- [89] Paolini, E. and Piccioli, L., "Measuring technique for assessing interference radiation produced from industrial, scientific and medical (I.S.M.) apparatus at microwaves," in *Proc. IEEE Symp. Electromagn. Compat.*, New York, NY, USA, 1973, pp. 279–287
- [90] P. Corona and G. Latmiral: "Valutazione ed impegno normativo della

- camera reverberante dell'Istituto Universitario Navale", in *Atti I Riunione Nazionale di Elettromagnetismo Applicato*, L'Aquila, Rome, Italy, pp. 103–108, 1976
- [91] P. Corona, G. Latmiral, E. Paolini and L. Piccioli, "Use of reverberating enclosure for measurement of radiated power in the microwave range," *IEEE Trans. on EMC.*, vol. 18, no. 2, pp. 54–59, May 1976
- [92] M. Bäckström and O. Lundén, "Transmission cross sections of apertures measured by use of nested mode-stirred chambers," *FOA Report, FOA-R-96-00359-3.2-SE*, ISSN 1104-9154, Dec. 1996.
- [93] J. Clegg, A. C. Marvin, J. F. Dawson, and S. J. Porter, "Optimization of stirrer designs in a reverberation chamber," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 47, no. 4, pp. 824–832, Nov. 2005.
- [94] A. C. Marvin, J. F. Dawson, and J. Clegg, "Stirrer optimization for reverberation chambers," in *Proc. Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility*. Eindhoven, The Netherlands: Technische Universiteit Eindhoven, 2004, pp. 330–335
- [95] Moglie, Franco, and Valter Mariani Primiani. "Analysis of the independent positions of reverberation chamber stirrers as a function of their operating conditions." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 53.2 (2011): 288–295.
- [96] J. W. Wallace, R. Mehmood and M. A. Jensen, "Electronically reconfigurable reverberation chambers," *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, The Hague, 2014, pp. 3669–3673, doi: 10.1109/EuCAP.2014.6902626.
- [97] Arnaut, L. R., "Operation of electromagnetic reverberation chambers and wave diffractors at relatively low frequencies"; *IEEE Trans. on EMC*, vo. 43 no 4 (Nov 2001), pp 637–653.
- [98] Arnaut, L. R.; "Compound exponential distributions for undermoded reverberation chambers"; *IEEE Trans EMC*, vol 44 no 3 (Aug 2002), pp 442–457.
- [99] Arnaut, L. R.; "Effect of size, orientation, and eccentricity of mode stirrers on their performance in reverberation chambers," *IEEE Trans EMC*, vol 48 no 3 (Aug 2006), pp 600–602
- [100] L. R. Arnaut, F. Moglie, L. Bastianelli, and V. Mariani Primiani, "Helical stirring for enhanced performance of reverberation chambers," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 59 (2017),
- [101] Y. Huang, "The Investigation of Chambers for Electromagnetic Systems," D. Phil Thesis, University of Oxford, UK, 1993

- [102] Frank B.J. Leferink, "High field strength in a large volume: the intrinsic reverberation chamber," IEEE Symposium on EMC, 1998, pp. 24–27
- [103] Frank Leferink, Patent NL1010745, Test Chamber, 7–12–1998
- [104] Frank Leferink, W.C. van Etten, "Optimal Utilization of a Reverberation Chamber", Euro EMC 2000, Symposium on EMC, Bruges, 2000, pp. 201–206, ISBN 90–76019–14–2
- [105] Frank Leferink, W.C. van Etten, "Generating an EMC test field using a Vibrating Intrinsic Reverberation Chamber", EMC Society Newsletter, Spring 2001, page. 19–25, ISSN 1089–0788
- [106] D. A. Hill, "Electronic mode stirring for reverberation chambers," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 36, no. 4, pp. 294–299, Nov. 1994.
- [106] D. A. Hill, "Boundary fields in reverberation chambers," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 47, no. 2, pp. 281–290, May 2005
- [107] M. L. Crawford, T. A. Loughry, M. O. Hatfield, G. J. Freyer, "Bandlimited, White Gaussian Noise Excitation for Reverberation Chambers and Applications to Radiated Susceptibility Testing", *National Institute of Standards and Technology (NIST), Technical Note 1375*, 1996
- [108] A. Cozza, "Probability Distributions of Local Modal-Density Fluctuations in an Electromagnetic Cavity", *IEEE Trans. on EMC* (2012), Vol. 54, no. 5, pp. 954–967
- [109] A. Cozza, W.J. Koh, Y.S. Ng, Y.Y. Tan, "Controlling the state of a reverberation chamber by means of a random multiple-antenna stirring", *2012 AsiaPacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*
- [110] Y. Huang and D. J. Edwards, "A novel reverberating chamber: source-stirred chamber," IEE 8th International Conference on Electromagnetic Compatibility, pp.120–124, Edinburgh, UK, September 1992
- [111] G. Cerri, V. Primiani, S. Pennesi, and P. Russo, "Source stirring mode for reverberation chambers," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 47, no. 4, pp. 815 – 823, Nov. 2005.
- [112] L. F. Wanderlinder, D. Lemaire and D. Seetharamdoo, "Experimental analysis for metamaterials used to lower the LUF of a reverberation chamber," 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE, Wroclaw, 2016, pp. 240–244, doi:

10.1109/EMCEurope.2016.7739279.

- [113] D. Seetharamdoo and I. M. Coccato, "Investigation on the use of metamaterials to lower the operating frequency of reverberation chamber," 10th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, York, 2011, pp. 680–685.
- [114] Kulowski, Andrzej. "Algorithmic representation of the ray tracing technique." Applied Acoustics 18.6 (1985): 449–469.
- [115] Barré-Brisebois, Colin, et al. "Hybrid rendering for real-time ray tracing." Ray Tracing Gems. Apress, Berkeley, CA, 2019. 437–473.
- [116] Balanis, Constantine A. "*Antenna theory: analysis and design.*" John Wiley & Sons, 2016.
- [117] Stutzman, Warren L., and Gary A. Thiele. "*Antenna theory and design.*" John Wiley & Sons, 2012.
- [118] EMCoS LLC consulting and Software, "Log-periodic Antenna simulation result", <https://www.emcos.com/?products=emcos-studio/examples-emc/log-periodic-antenna>

Abstract

Electromagnetic Field Uniformity Analysis in Reverberation Chamber based on Ray Tracing Method

Jaejoong Lee

Dept. of Electrical and Computer Engineering

The Graduate School

Seoul National University

This paper proposes a method to analyze the electromagnetic field uniformity for the internal working volume (WV) of the reverberation chamber (RC) based on the ray tracing method for the structure of the reverberation chamber and the location/direction of the source antenna. The proposed method can calculate the internal electromagnetic field uniformity at least 3 times faster than conventional numerical analysis techniques such as the Method of Moment (MoM) or Finite Element Method (FEM). To verify this method, field uniformity was simulated in the WV of the reverberation chamber using a commercial numerical analysis software, and the results were compared with the field uniformity calculated by the proposed method. After that, the field uniformity was measured in an actual reverberation chamber used for simulation and calculation, and the results were verified.

The reverberation chamber is made of a metal resonator, and its purpose is to create a state in which the distribution of electromagnetic field is statistically uniform by mixing modes inside. For this, the modes are mechanically or electrically mixed, and

generally, stirrers made by combining several metal plates is placed inside. In addition, there is no standard for determining the direction of the antenna when the antenna radiates electromagnetic waves. Until now, the tester decides the direction of the antenna so that electromagnetic waves can be radiated toward the side where most reflections can occur, that is, toward the edge of the resonance chamber.

The path tracking algorithm of the ray tracing method was applied as a method for uniformly forming the electromagnetic field inside the reverberation chamber. Electromagnetic waves travel straight ahead and radiate newly based on the point according to Huygens' principle when hitting a metal, but among them, the calculation time is shortened by selecting only the main lines reflected in the main traveling direction. Based on this method, the approximate electromagnetic field distribution and field uniformity can be calculated by identifying the beams passing through the position (8 corners of the hexahedral test area) where the field uniformity is measured in the working volume.

In general, the size of the reverberation chamber has a size of several meters because the equipment under test (EUT) must be inserted. This size is quite large compared to the wavelength even in the environment where the lowest usable frequency (LUF) is 300MHz, and in order to analyze this environment, a considerable amount of calculation is required. In addition, since the computer aided design (CAD) data must be used to analyze the movement of the stirrer over time, elements must be repetitively divided and analyzed at each step. Applying the numerical analysis technique in such a situation requires a considerable amount of computation time to analyze every step because significant amount of element must be

allocated for each step. On the other hand, if the proposed method based on the ray tracing method is used, the uniformity of the internal electromagnetic field can be quickly grasped because only the light source passing through the area of interest needs to be tracked. In the reverberation chamber designed based on this method, it is possible to find out whether the field uniformity is improved when the state of antenna source is modified without solving entire region repeatedly.

The reliability of the proposed algorithm was secured through comparison with the calculation result of a structure that known the Green's function, and applied to the reverberation chamber including the stirrer of the actual three-dimensional model to determine the field uniformity. The calculated and measured result for the reverberation chamber were compared and presented in the paper, and it was confirmed that the field uniformity can be obtained quickly and accurately with the proposed algorithm.

Keywords : Reverberation Chamber, Field Uniformity, Working Volume, Ray Tracing, Electromagnetic simulation

Student Number : 2014-30313