

논문 2011-48TC-11-12

유한요소 시간차분법을 이용한 레버베이션 챔버내에서의 스터링 효과의 분석

(Spectral Evaluation of Stirring Performance in a Reverberation Chamber using the FDTD Method)

김 종 성*

(Jong-Sung Kim)

요 약

FDTD 수치해석법을 이용하여 모드가 변화하는 레버베이션 챔버(RC) 내의 관측 평면내에서 파수 영역에서의 필드값의 계산이 가능하다. 이 필드 값은 RC 내의 모든 여기되는 모드의 방향성을 나타내어 준다. 스테링 효과를 계산하기 위하여 코릴레이션 계수를 구하였으며, 이를 3개의 상이한 스테러의 구조에 적용하여 그 결과를 상호 비교하였다. 이 결과를 통계적인 분석에 의한 표준편차와 비교하여 그 정당성을 입증하였다.

Abstract

The spectral field data on the observation planes inside a mode stirred chamber have been computed by using the FDTD method. They can describe the directional dependence of all supported modes in the reverberation chamber (RC). Correlation coefficients have been found to evaluate the stirring effects. The correlation coefficients were obtained and compared for three different sizes of stirrers and statistical uniformity was investigated.

Keywords : Spectral analysis, correlation coefficient, reverberation chamber

I. 서 론

RC 는 통상적으로 금속성 캐비티와 그 내부의 경계 조건을 바꿀 수 있는 회전하는 스테러가 내부에 위치한다. RC 내에 공간적인 필드 분포는 스테러의 회전에 의해서 변화하며 이는 통계적으로 균일하고 등방성의 필드를 제공한다. 균일성과 등방성은 모든 스테러의 위치에 대해서 평균을 취할때 동일한 전력의 신호가 모든 편파 성분에 대해서 모든 방향으로부터 입사하는 것을 의미한다. 여러개의 금속성의 패들(paddle)로 만들어진 스테러는 통계적으로 균일한 환경을 만들기 위하여 챔

버의 경계조건을 바꿀 수 있다. 수년간 여러 형태의 모드 스테러가 사용되어 왔지만 이의 성능을 계량화하는 노력은 상대적으로 부족하다. [1]에서는 스테러가 최소 가용 주파수(LUF)에서 파장에서 챔버의 크기에 대해서 적당한 영역을 차지하는 크기를 가져야 한다는 것을 나타낸다. 그러나 고효율의 스테러를 설계하기 위한 중요한 지침은 [1]에서 제시하지 않는다. 이에 반하여 실제적인 RC 응용에서 스테링 효과에서 많은 반대의 예가 있다. 어떠한 경우에는 복잡도가 큰 RC내에 단순하고 소형의 스테러가 있는 경우가 단순한 캐비티내에 있는 대형이고 복잡 구조의 스테러 보다 통계적으로 더 균일한 특성을 생성할 수 있다.

[2]에서는 스테러의 설계를 최적화하기 위하여 유전 알고리즘을 이용하여 4개의 다른 구조에 대한 스테링 효과를 검토하였다. 그러나 이는 최적화를 이용한 것으로 직관성이 부족하여 실제적인 응용에서는 제한을 갖

* 정회원, 정회원, 경성대학교
(KyungSung University)

※ 이 논문은 2011학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.

접수일자: 2011년9월2일, 수정완료일: 2011년11월15일

는다. [3]에서는 스테링 효과가 스테링 과정에서 생성되는 코히어런스 셀의 수와 모드 수에 의해서 계량화되었다. 그러나 이는 스테러의 구조가 복잡할 경우에는 제한이 된다. [4]에서는 LUF에 의하여 스테링 효과를 나타내었는데 이는 통계적인 균일도의 기준을 나타내지 않았다.

이 논문에서는 RC 내에서의 공간적인 필드 분포의 스펙트럼을 구하고 이를 스테링 효과에 대한 검증하는데 이용한다. 회전하는 모드 스테러의 임의의 2개의 각도에서의 관측면에서의 스펙트럼 필드 분포간의 코릴레이션 지수를 구하여 섭동 효과를 추정하는 것이 가능하다. 3개의 다른 스테러 구조에 대하여 이를 적용한다. 최종적으로는 RC 내의 워킹 공간(working volume)내의 필드 균일도와 등방성에 대하여 모든 스테링 각도에 대해서 코릴레이션 지수에 의하여 추정이 가능하다.

II. 스펙트럼 영역에서의 필드분포

RC의 구조는 그림 1에 나타내었다. RC는 2.0 (W) x 1.6(L) x 1.4 (H) m³의 크기를 가지며 수직 방향으로 접혀진 스테러가 내장되어 있다. 이 구조의 기저 모드는 120 MHz 이고 최저 가용 주파수는 500 MHz 이다. 그림 2에는 여기 안테나, 모드 스테러 그리고 워킹 볼륨등의 모든 크기와 위치를 나타내었다.

RC 내부에 필드를 여기하는 안테나는 그림 1 및 2에 나타난 바와 같이 50°의 원추각과 120 mm의 수직 길이를 갖는 바이코니컬 안테나를 이용하였다. 그림 1 및 2에 나타난 모드 스테러는 0.17 (W) x 0.48 (L) x 1.02 (H) m³의 크기를 가지며 중심점을 회전축으로하여 회전한다. 스테링 효과를 정량적으로 분석하기 위하여 워킹 볼륨의 2개의 평면인 S0와 S1을 필드의 관측면으로 사용한다. 워킹 볼륨은 RC의 바닥으로부터 0.3 m의 높이의 위치에 0.75 (W) x 0.75 (L) x 0.28 (H) m³의 크기를 갖는다. 일반적으로 챔버를 설계할 때 RC의 사용 가능한 최저 주파수(LUF)를 구해야 한다. RC는 0.5-5.0 GHz의 주파수 범위에서 해석하였다. 최소 셀의 크기를 5.0 mm로 설정하고 비선형으로 셀을 분할하여 399 x 320 x 274개의 3차원적인 셀 분할을 하였다. FDTD 해석에서 모드 스테러는 15도의 간격으로 단계적으로 각도가 증가하여 회전하는 형태를 고려하였다. 회전하는 스테러의 효과를 그림 1의 S0, S1 2개의 관측면에서의 필드값의 변화로서 관측이 가능하

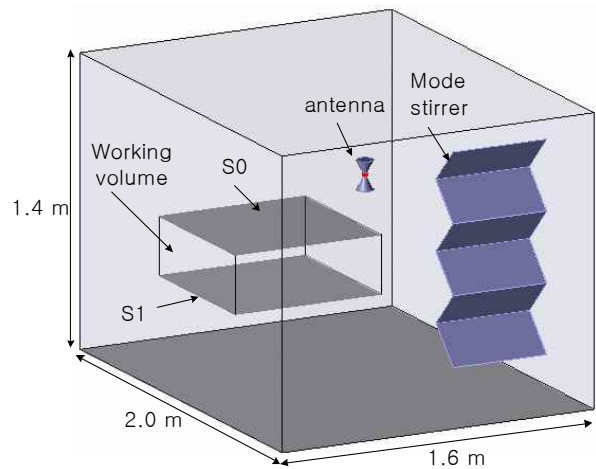


그림 1. 레버베이션 챔버의 구성
Fig. 1. The geometry of the reverberation chamber with a biconical antenna, a mode stirrer, a working volume, and two observation planes.

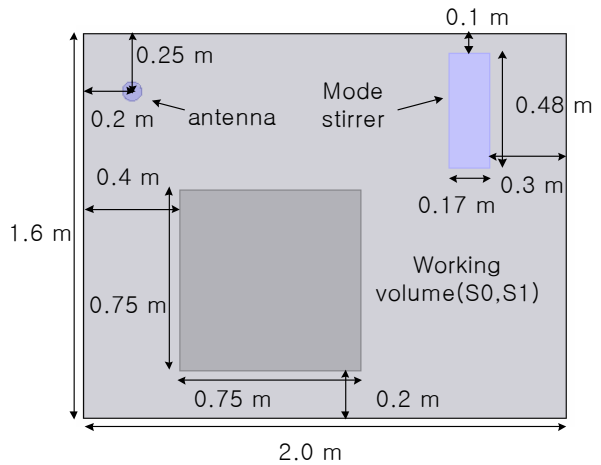


그림 2. 레버베이션 챔버의 단면 구조
Fig. 2. The cross section of the chamber. The dimensional data of two observation planes and a mode stirrer with its rotation area are shown.

다. 스테러의 1회 회전으로 전계의 변화가 커서 스테러의 효과를 비교적 낮은 주파수에서 검증하였다. 3개의 직교성분의 전계를 2개의 관측면에서 100 MHz의 간격으로 46개의 주파수에서 저장하였다. S0와 S1의 2개의 관측면의 평면 셀의 크기는 xy면에 대하여 150x150의 크기를 갖는다.

그림 3은 0.5 GHz의 주파수에서 S0면에서 0, 15 및 45도의 3개의 스테러 각도에서 구한 Ez 필드의 스펙트럼 분포를 나타낸 것으로 이는 FDTD를 이용하여 구한 공간적인 필드 분포를 푸리에 변환으로 구한 것이다. Ez 필드의 크기는 색상으로 구분하였으며 kx, ky를 k0

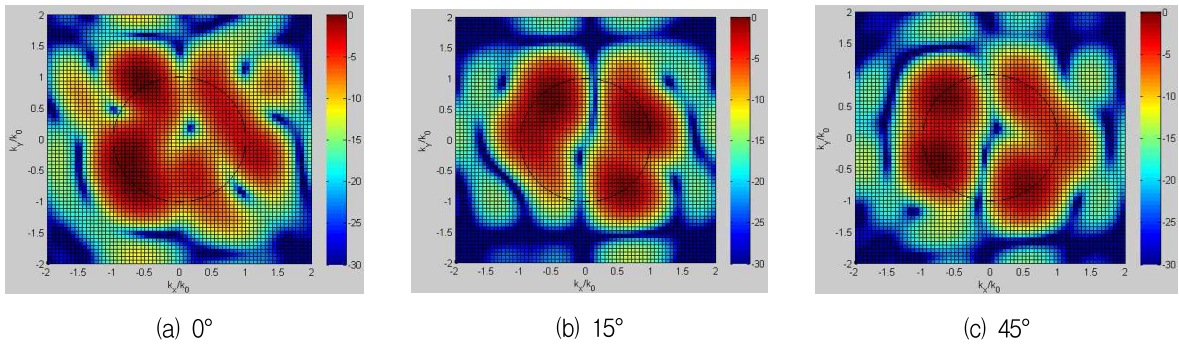


그림 3. 0.5 GHz 의 주파수에서 회전하는 모드 스테러의 특정 각도에서의 스펙트럼 영역의 필드 분포
 Fig. 3. Spectral distribution of Ez field component on S1 plane over a rotating mode stirrer at 0.5 GHz.

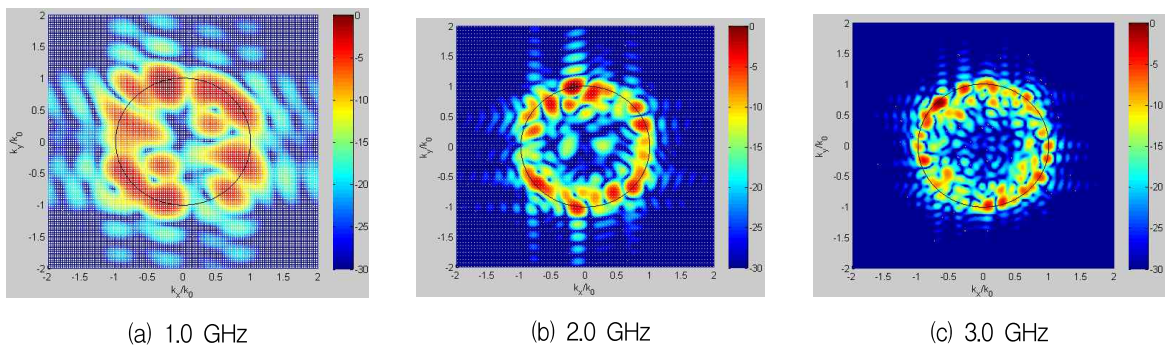


그림 4. 1.0, 2.0 및 3.0 GHz 의 주파수에서 회전하는 모드 스테러의 특정 각도에서의 스펙트럼 영역의 필드 분포
 Fig. 4. Spectral distribution of Ez field component on S1 plane over a rotating mode stirrer at 1.0, 2.0 and 3.0 GHz.

의 값으로 정규화한 값을 각각 x 와 y 방향의 축으로 사용한다. 그림 3의 스펙트럼 분포내에 단위원을 삽입하여 도파 모드의 경계를 구분하기 쉽게 표현하였다. 각각의 각도에 대하여 전파의 진행각 방향을 알 수 있다. 회전하는 스테러에 의한 섭동 효과는 스펙트럼 분포를 구해봄으로써 분명하게 관측이 가능하다. 그림 4에는 1.0, 2.0 및 3.0 GHz 의 3개의 주파수에서 Ez 필드의 스펙트럼 분포를 나타내었다. 관측 주파수가 높을수록 전파되는 모드의 수가 증가하는 것을 볼 수 있다.

그림 3과 4에는 원점 주변에는 0 근처의 값을 갖는데 이는 RC의 기저모드 이하의 주파수에서는 전파되는 모드가 없는것을 나타낸다. 모든 스펙트럼 분포에서 kx, ky 축에 대해서 비대칭적인 분포를 나타내는 것은 RC 내부에서 스테러와 여기 안테나가 존재하기 때문이다.

이 논문에서 고려하는 모드 스테러는 그림 5에 나타낸 바와 같이 6개의 금속성 완전도체 패들을 90도로 상호 접합한 것이다. 3가지 종류의 모드 스테러를 고려한다. 동일한 비교를 위하여 수평 구조만 가변하였고 수직 구조와 스테러의 위치는 변경하지 않았다. 2번 스테

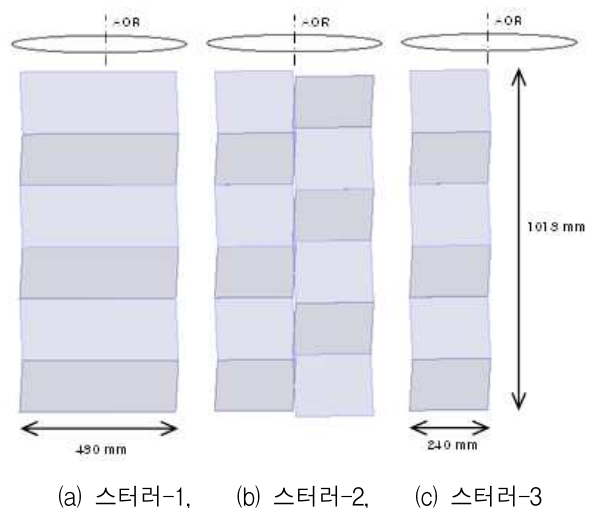


그림 5. 3가지 종류의 스테러
 Fig. 5. Geometry of 3 kinds of stirrers.

러는 1번 스테러의 오른쪽의 절반을 180도 회전 시킨 것이다. 3번 스테러는 1번 스테러의 오른쪽 절반을 제거시켜서 구현하였다. 3번 스테러는 1번이나 2번 스테러의 단면적의 1/2 의 크기를 갖는다. 그러나 회전에 의

한 점유하는 체적(Swept Volume)의 크기는 그림 5에 나타낸 것과 같이 다른 것과 동일하다. 1번 스테러의 높이는 1.02 m 이고 지름은 0.48 m 이다. 스테러 2번과 3번의 높이는 1.02m 이며 이는 스테러 1번과 같은 크기이며, 그러나 길이에 있어서는 다르다. 스테러 3번의 길이는 스테러 1번과 2번의 절반이다. 그러나 3가지 경우에 있어서 움직이는 영역의 체적의 크기는 모두 동일하다. 그림 2 에는 1번 스테러의 움직이는 영역의 크기를 나타내었다.

다음은 스테러의 회전에 의한 필드 분포의 독립성을 체크하기 위하여 코릴레이션 지수를 계산하였다. 코릴레이션 지수가 0 인 경우는 완전히 독립적인 경우이다. 이 경우에 스테러의 각도에 대한 필드 분포의 상관성을 검토한다. 코릴레이션 지수는 아래의 식으로 계산한다.

$$\rho = \frac{\sum_m \sum_n (E_{mn}^{\theta_1} - \bar{E}^{\theta_1})(E_{mn}^{\theta_2} - \bar{E}^{\theta_2})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (E_{mn}^{\theta_1} - \bar{E}^{\theta_1})^2)(\sum_m \sum_n (E_{mn}^{\theta_2} - \bar{E}^{\theta_2})^2)}}$$

여기에서 E^{θ_1} 과 E^{θ_2} 는 계산에 적용되는 2개의 스펙트럼 영역의 전체의 크기이고 \bar{E}^{θ_1} 과 \bar{E}^{θ_2} 는 이들의 평균값을 나타낸다. 스펙트럼 영역의 전체는 0 도에서 345 도까지 24개의 스테러 각도에 대해서 그 값을 구한다. 코릴레이션 지수는 하나의 회전하는 스테러의 2개의 각기 다른 각도에 대한 모든 가능한 조합에 대해서 구하였다. 그림 6은 3개의 주파수, 즉 0.5, 1.0 그리고 3.0 GHz에서 RC 내에서 스테러 1 의 24개의 회전 각도

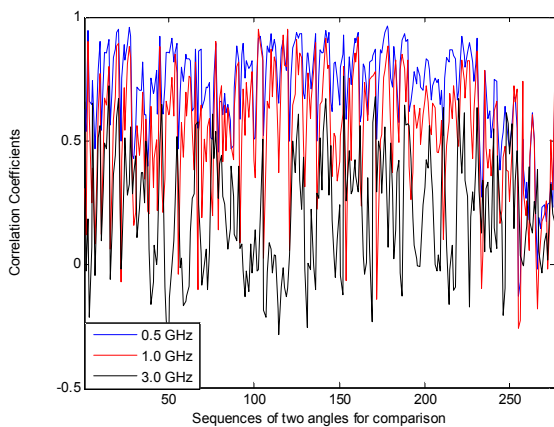


그림 6. 스테러의 회전각의 조합수에 대한 코릴레이션 지수의 분포
 Fig. 6. Statistical distribution of all correlation coefficients for 24 moving angles of a rotating stirrer.

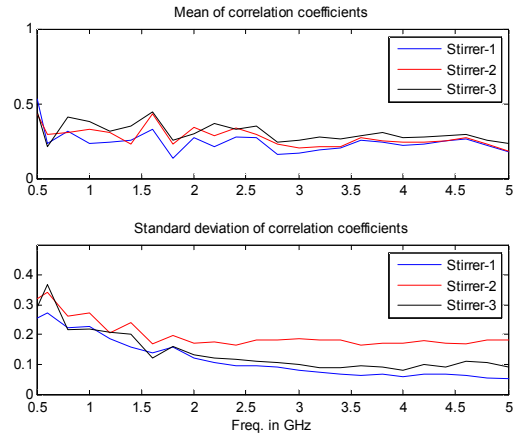


그림 7. 주파수 변화에 따른 코릴레이션 지수의 평균 및 표준편차
 Fig. 7. Mean and standard deviation values of all combinations of correlation coefficients for the spectral fields in the observation planes for 24 rotation angles of three stirrers in the frequency range of 0.5-5.0 GHz.

에서 스펙트럼 영역의 전체 사이의 코릴레이션 지수의 모든 조합을 나타내었다. 스테러 1 의 24개의 각도 상태에 대해서 276개의 코릴레이션 지수의 조합이 존재한다. 고주파에서는 독립성, 즉 낮은 코릴레이션 지수가 저주파 보다 강하다. 이는 RC 에 관한 많은 이전의 연구에 의하여 예측되었다.

그림 7은 3가지 형태의 스테러에 대해서 0.5-5.0 GHz의 주파수 밴드에 대해서 코릴레이션 지수의 평균과 표준편차를 나타내었다.

3개의 스테러의 특성에 있어서 확실한 차이를 알 수 있다. 낮은 주파수에서 코릴레이션 지수의 평균과 표준편차가 모두 높고, 이는 그 영역에서 여기모드 수가 작고 회전하는 스테러에 의한 필드분포의 변화가 작기 때문이다. 고주파에서는 스테러가 회전함에 따라서 필드 분포가 많이 변화하는데 이는 도파모드 수의 증가 때문이다. 스테러 1의 독립성이 가장 강한 반면, 스테러 2와 3의 특성은 이에 못미치는 수준이다. 스테러 2의 평균은 스테러 3의 평균보다 낮지만 스테러 2의 표준편차는 스테러 3의 표준편차보다 모든 주파수에 있어서 낮은 결과를 얻었다. 이는 스테러 2의 좌측과 우측의 영역의 대칭성으로 인한 것이다. 여기 주파수가 높을수록 RC 내의 필드의 균일도가 증가한다. 고주파 영역에서 코릴레이션 지수가 낮은 것은 높은 스테어링 효과를 나타낸다.

III. 통계적분석과의 비교

직관적으로 좋은 스테러는 필드를 크게 변화시키는 것이다. 그러나 이 변화가 필드의 크기인지, 방향인지 또는 이들 모두인지에 대해서는 명백한 결론이 나지 않았다. 여러개의 스테러의 효과를 나타내는 한 방법은 강한 스테러와 약한 스테러를 비교분석하는 것이다. 스테러의 움직이는 면적은 가능한한 서로 동일하게 유지하여 이 비교가 주로 스테러의 구조에 관한 것으로 나타나도록 한다.

스테러가 회전하는 동안 FDTD 시뮬레이션 으로부터 전계값을 구할 수 있다. 공간적인 변화를 고려하기 위하여 Ex, Ey, 그리고 Ez 의 3개의 성분을 스테러의 각 위치에 대해서 워킹 공간에서의 2개의 평면에서 구하였다. 공간 영역에서의 필드분포는 0.5-5.0 GHz 의 주파수 범위에서 결정된다. 전체적인 전계의 표준편차는 x, y, z 방향에 대해서 스테러의 각각의 위치에 대해서 150x150 셀의 2개의 관측면에서 모든 필드를 저장함으로써 얻어진다.

그림 8에 나타난 바와 같이 낮은 주파수에서는 큰 값을 갖지만 1 GHz 이상에서는 균일도가 만족되었다. 2 번 스테러의 성능 저하는 예견되었다. 이는 운동체가 절반 크기의 비대칭형의 스테러 3에 비해서 더 대칭적이기 때문이다. 참고문헌 [7]에서 스테러의 크기와 비대칭성을 증가시키면 그 성능이 향상된다고 발표되었으며, 이 개념이 검증된 것이다.

3가지 종류의 스테러에 대해서 3 dB 의 표준편차 기준과 최저 가용주파수를 관측하고 이를 비교하는 것도 가능하다.

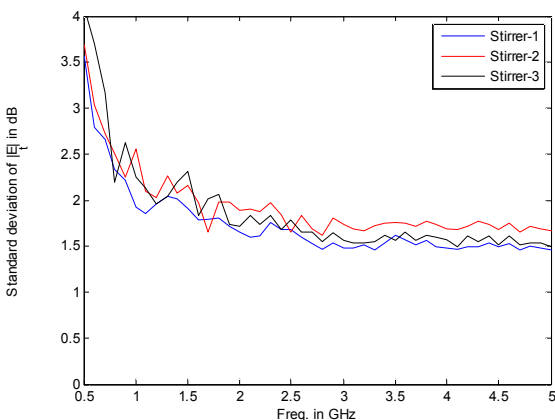


그림 8. 3가지 종류의 스테러에 의한 필드의 표준편차 분포

Fig. 8. Standard deviation of total electric fields.

IV. 결 론

RC 내에서 워킹공간의 2개의 평면에서의 스펙트럼 영역에서의 필드를 구하고 이를 그 다음에 스테링 효과를 관측하기 위해 사용 한다. 회전하는 스테러의 임의의 2개의 각도에서의 스펙트럼 영역에서의 필드간의 모든 코릴레이션 지수를 구하여 회전하는 모드 스테러의 섭동 효과를 추정하는 것이 가능하다.

3가지 종류의 지그재그 모양의 스테러를 고려하였다. RC 내에서의 워킹 공간내에서의 필드 균일도와 등방성이 스펙트럼 영역의 필드분포간의 코릴레이션 지수를 구하여 검증이 되었다.

회전하는 모드 스테러에 의한 필드 균일도와 코릴레이션 지수간의 추정이 가능하다.

RC 내에서 기계적, 전기적 및 플랫폼 스테링등의 방법에 상관없이 스테러의 설계와 스테러 위치의 결정에 이용이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] "Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4: Testing and Measurement Techniques Section 21: Reverberation Chamber Test Methods" International Electrotechnical commission, IFC61000-4-21 Draft, 2003.
- [2] J. C. 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.
- [3] Luk R. Arnaut, "Effect of size, orientation, and eccentricity of mode stirrers on their performance in reverberation chambers," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 48, no. 3, pp. 600-602, Aug. 2006.
- [4] N. Wellander, O. Lunden, and M. Backstrom, "Experimental investigation and mathematical modeling of desihn parameters for efficient stirrers in mode-stirrerred reverberation chambers," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 49, no. 1, pp. 94-103, Feb. 2007.
- [5] J. S. Kim, Bringuier J. and R. Mittra, "Spectral evaluation of stirring effect in a reverberation chamber," *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, pp. 3144-3147, May 1989.
- [6] D. I. Wu and D. C. Chang, "The effect of an

electrically large stirrer in a mode-stirred chamber," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 31, no. 2, pp. 164 - 169, May 1989.

저 자 소 개



김 종 성(정회원)

1988년 2월 경북대학교
전자공학과 학사졸업

1990년 2월 한국과학기술원 전기
및 전자공학과 석사졸업

2001년 8월 포항공과대학교 전자
전기공학과 박사졸업

1990년~2002년 KT 연구개발 본부 선임연구원

2004년 9월~현재 경성대학교 정보통신공학과
부교수

<주관심분야: 초고주파공학, 전자파 수치해석>