

교반기 매개변수에 따른 교반형 전자파 잔향실의 특성 및 유용성 평가

논 문
59-9-22

Mode-Stirred Reverberation Chamber Characteristic to Stirrer Parameter and Usefulness Evaluation

김 광 용* · 홍 주 일[†] · 허 창 수**
(Kwang-Yong Kim · Joo-Il Hong · Chang-Su Huh)

Abstract - This paper analyzes optimal stirrer parameter to improve field uniformity in a mode-stirred reverberation chamber. Stirrer parameter is varied about stirrer height and stirrer angle. Also we analyze quality factor, number of excited modes and stirrer efficiency that affect field uniformity. The results show good performance as higher as stirrer height. Isotropic field distribution is formed at 45° stirrer angle. When stirrer angle varies, scattering characteristic of incident wave are changed. So electric field distribution in a mode-stirred reverberation chamber is also changed. Therefore, it affect field uniformity. The results expect to help that designs stirrer for get better field uniformity. Immunity test performed designed mode-stirred reverberation chamber for semiconductor that categorized by technology. Test result shows that good recurrence compared wave-guide immunity test.

Key Words : Mode-stirred, Reverberation chamber, Stirrer, Field uniformity, Electric field distribution

1. 서 론

첨단기술의 발달로 전자장비가 소형화, 고집적화되고 제어신호의 크기가 점점 더 낮아지는 추세에 있으며 이로 인해 전자파 환경에 의한 피해가 점차 증가하고 있다 [1]. 이러한 피해로부터 전자장비를 사전에 보호하기 위해서는 전자장비의 전자파 내성 평가가 필수적으로 요구된다. 내성 평가를 수행하기 위해서는 전자파 시험시설이 필요하며, 전자파 무향실, TEM/GTEM CELL, EMP 시뮬레이터 등이 가장 널리 사용되고 있다. 이 시험시설들은 외부 환경과 완전히 단절된 상태에서 평가가 수행되므로 결과에 대한 신뢰성이 매우 높으나, 그에 비해 여러 가지 단점이 존재한다.

이들 시험시설은 단위면적당 설치비용이 비싸고 설치공간에 비해 시험가능 체적(WV : Working Volume)이 작기 때문에 부피가 큰 EUT(Equipment Under Test)에 대한 내성 평가를 수행하기 위해서는 시험시설이 매우 커지게 되므로 중소 규모의 산업체나 대학에서 이를 구축하는 데에는 비용적인 면에서 어려움이 있다. 또한 위 시험시설들은 한 방향으로부터의 평면파만을 형성시킨다. 편파 및 방향성을 모두 고려한 EUT의 취약성 평가를 수행하는 경우 측정에 소요되는 시간이 길어지게 된다. 반사파를 제거하기 위해 흡수체

를 사용하기 때문에 높은 시험 전계강도를 얻기 위해서는 매우 높은 출력의 신호 발생원이 필요하게 되므로 높은 시험 전계강도에 대한 평가가 어렵다.

이러한 단점을 보완하기 위해 1968년 Mendes에 의해 처음으로 전자파 잔향실(Reverberation Chamber)이 제안되었다. 전자파 잔향실은 차폐실 내부에 전자파의 경계조건을 변화시킬 수 있는 회전 가능한 금속형태의 교반기를 추가한 형태로 구성된다. 전자파 잔향실은 높은 도전을 가지는 차폐실 내벽과 회전하는 교반기의 반사를 이용하여 차폐실 내부의 전계를 뒤섞는 확률과정으로 표현할 수 있다 [2]. 이러한 확률과정에 의해 전자파 잔향실의 대부분의 공간을 WV로 활용할 수 있으며, 타 시험시설보다 저렴한 설치비용으로 시설구축이 가능하다. 또한 전자파 잔향실의 내부에서는 금속 내벽에 의해 전자파가 반사되는 과정에서 편파가 소실된다. 따라서 별도의 장치를 사용하여 EUT를 회전시키지 않아도 가장 취약한 부분에 전자파가 침투하므로 측정시간이 기존 시험시설에 비해 매우 단축되며, 높은 시험전계강도를 효율적으로 생성할 수 있다는 장점이 있다 [3].

이와 같이 다양한 장점을 가지는 전자파 잔향실을 사용하기 위해서는 전계균일도 조건을 만족시켜야 한다. 전계균일도는 교반기 효율, Quality Factor, 그리고 챔버 내부에 여기되는 모드의 수에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다 [2]. 규격 IEC 61000-4-21에 따르면 전자파 잔향실의 전계균일도가 80 ~ 100 MHz 일 때 4 dB, 100 MHz ~ 400 MHz 일 때 4 dB에서 3 dB로 선형적 감소, 400 MHz 이상 일 때 3 dB 로 전계균일도 허용 한계 조건을 정의하고 있다. 전계균일도 허용 한계 조건을 만족하는 경우 정의된

* 준 회원 : 인하대학교 공대 전기공학과 석사과정

** 시니어회원 : 인하대학교 공대 전기공학과 교수

† 교신저자, 정회원 : 인하대학교 공대 전기공학과 교수

E-mail : aqua0701@gmail.com

접수일자 : 2009년 12월 29일

최종완료 : 2010년 7월 21일

WV 내의 모든 위치에서 통계적으로 균일한 전계 환경을 형성한 것으로 간주될 수 있지만 이 논문에서는 보다 높은 정확도를 제공하는 시험시설을 설계하기 위해 전계균일도 허용 한계 조건을 대부분의 EMP 시뮬레이터에서 적용하고 있는 기준인 1 dB로 정의하였다.

전자파 잔향실의 내부 전계 분포에 대한 이론은 David A. Hill과 다른 연구자들에 의해 많이 연구되어 왔다 [4]. 차폐실의 에너지 보존능력을 나타내는 Quality Factor에 대한 이론적인 연구는 Arnaut에 의해 수행되었으며 [5], 교반기 효율에 대한 연구는 FOI에서 주로 수행되었다 [6]. 교반기의 형태에 대한 전계균일도 연구 또한 연구자들에 의해 연구되어 왔으며, J. Clegg에 의해 Genetic Algorithm을 이용한 교반기 형태의 최적화에 대한 논문이 발표되었다 [7]. 그러나 다양한 교반기 매개변수의 변화에 의한 전계균일도 경향에 대해서는 아직 연구된 바 없다.

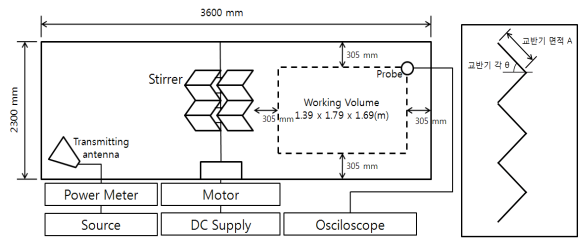
이 논문에서는 $2,450 \pm 50$ MHz의 주파수 대역에서 교반기의 형태에 따른 축별 전계강도 변화, 전계균일도 변화 및 Quality Factor, 여기 모드 수, 교반기 효율에 대하여 분석하였으며 이 데이터를 통하여 전계균일도 향상을 위한 최적의 교반기를 설계하였다. 그리고 교반형 전자파 잔향실에서 반도체 소자의 내성 평가를 수행하였으며, 기존에 수행되었던 반도체 소자의 내성 평가 결과와 비교하였다 [8].

2. 본 론

2.1 실험 구성

전자파 잔향실의 체적은 $3.60 \times 2.40 \times 2.30$ [m³]이며 구리를 사용하여 내벽을 구성하였다. 전자파의 경계조건을 변화시키기 위하여 전자파 잔향실 내부에 삽입되는 교반기는 가벼우면서도 가공이 쉬운 알루미늄으로 그림 1과 같이 제작하였다.

전자파 잔향실 내부에 전자파를 입사시키기 위한 신호 발생원은 마그네트론을 사용하였다. 마그네트론의 최대 출력은 1 kW이며, 출력 주파수 대역은 2450 ± 50 MHz의 협대역 스펙트럼으로 나타난다. 전자파 잔향실 내부에 입사되는 신호가 WV에 직접 입사되면 정확한 측정이 이루어지지 못하기 때문에 송신 안테나의 방향을 전자파 잔향실의 벽으로 향하도록 설치하였다. 전자파 잔향실에서 교반기를 회전시키기 위해 사용되는 모터는 스테핑 모터, 인코더가 설치된 서보 모터 등이 있으나 이들은 정밀한 각 제어가 필요한 동조형 전자파 잔향실(Mode-Tuned Reverberation Chamber)에 주로 사용되며, 교반형 전자파 잔향실에서는 교반기의 회전만을 고려하면 되므로 모터의 속도 조절이 간편한 직류 모터를 사용하여 구성하였다. 전자파 잔향실에서의 WV는 벽, 교반기, 안테나 등으로부터 일정 거리를 이격시킨 영역이다. 본 실험에 사용된 전자파 잔향실은 전자파 잔향실의 크기에 의해 결정되는 최저 시험가능 주파수 246 MHz에 대한 파장의 $\lambda/4$ 길이인 30.5 cm를 이격시킨 $1.39 \times 1.79 \times 1.69$ [m³]의 영역을 WV로 정하였다.



(a) 교반형 전자파 잔향실 구성 (b) 교반기 구성

그림 1 교반형 전자파 잔향실 및 교반기 구성도
Fig. 1 Mode-Stirred Reverberation Chamber and Stirrer Test set-up

2.2 측정 방법

WV에 대한 전계를 측정하기 위하여 x축, y축, z축의 직교 좌표축을 따라 3개의 다이폴 형태의 등방성 전계 프로브를 구성하였다. IEC 61000-4-21에 따르면 WV를 감싸는 8개 위치에 대하여 전계 데이터를 측정하도록 권고하고 있으나 본 실험에서는 측정에서 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위하여 그림 2와 같이 15개 위치에 대하여 전계 데이터를 측정하였다. 교반기의 1회전에 대하여 데이터를 취득하였으며 취득한 전계 데이터에 대한 최대값을 송신 전력에 대하여 정규화하였다 [2]. 교반기의 회전 속도는 모든 교반기 매개변수에 대하여 30 rpm의 일정한 속도로 유지하였다.

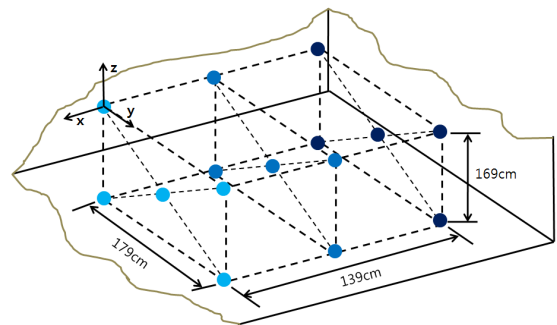


그림 2 전계 데이터 측정을 위한 전계 프로브 위치
Fig. 2 E-field Probe Location for Data Measurement

교반기 매개변수는 그림 1(b)와 같이 교반기 각(Stirrer Angle)과 교반기 면적(Stirrer Area)을 변화하였으며 교반기의 직경(Diameter)은 80 cm로 고정하였다. 각각의 교반기 각에 대하여 교반기 면적을 변화시켜 가면서 실험을 수행하였으며, 변화된 교반기 매개변수는 표 1과 같다.

표 1 교반기 매개변수 변화

Table 1 Stirrer Parameter List

교반기 각 변화(°)		30°	45°	60°	90°
교반기 면적 변화 (m ²)	A	0.23			
	B	0.46			
	C	0.69			
	D	0.92			
	E	1.15			

반도체 피해효과 실험은 표 2와 같이 TTL 계열 반도체 소자를 대상으로 수행하였다. 반도체 소자의 리드 프레임(Lead Frame)에만 커플링이 발생하도록 EUT는 리드 프레임 을 제외하고는 모두 차폐하였으며, 반도체 소자의 오동작 및 파괴현상을 육안으로 확인하기 위하여 LED를 사용하였다. 교반기의 회전 속도는 교반기 매개변수에 따른 전계균 일도를 측정할 때와 동일하게 30 rpm으로 고정하였으며 마그네트론의 방사시간은 5초로 결정하였다. 이 실험으로 얻 어진 결과를 도파관 내부에서 수행한 반도체 피해효과 실험 의 결과와 비교하였다 [8].

표 2 실험에 사용된 반도체 소자의 분류

Table 2 Semiconductor List

Process	Type	Logic	Technology
Bipolar IC	TTL	NAND	Fairchild advanced schottky(F) Advanced schottky(AS)
		AND	Advanced low power schottky(ALS) Schottky(S) Low power schottky(LS)

2.3 실험 결과 및 고찰

2.3.1 교반기 매개변수

표 1의 교반기 매개변수에 의한 전계균일도 변화 그래프 는 그림 3과 같다. 교반기 각이 30°인 경우, A일 때에는 1.36 dB로 45°, 60°, 90°인 경우에 비해 향상된 전계균일 도를 나타내었지만 교반기 면적 증가에 따른 전계균일도 향 상 폭은 크지 않았다. 교반기 각이 60°인 경우, B보다 작은 교반기 면적을 가질 때는 교반기 각이 30°일 때와 비슷한 전계균일도를 나타내었으나 교반기 면적이 증가할수록 전계 균일도의 향상 폭이 크게 감소하였다. 그에 비해 교반기 각 이 45°인 경우, A일 때는 약 1.6 dB로 교반기 각이 30°인 경우에 비해 저하된 전계균일도 특성을 나타내었다.

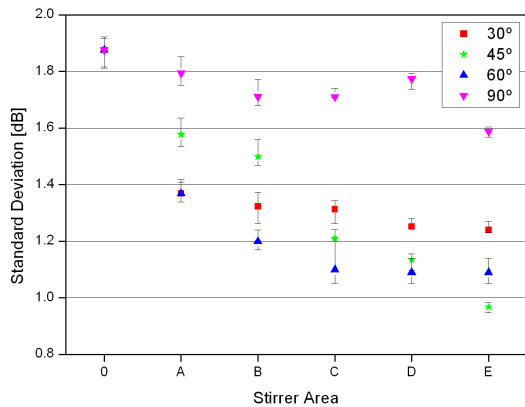


그림 3 교반기 매개변수 변화에 대한 전계균일도 변화

Fig. 3 Field Uniformity for Stirrer Parameters

그러나 교반기의 면적이 증가될수록 전계균일도의 향상 폭이 교반기 각이 30°인 경우에 비해 더 증가하였으며, C 이상의 교반기 면적을 가지는 경우는 교반기 각이 45°인 경 우가 다른 교반기 각에 비해 더 향상된 전계균일도 특성을 보였다. 교반기 각이 90°인 경우에는 교반기 면적이 증가하 여도 전계균일도 특성에 큰 변화가 없었으며, 다른 교반기 각에 비해 매우 저하된 전계균일도 특성을 보이는 것을 확 인할 수 있었다.

전계균일도를 분석한 결과, 교반기 면적의 증가에 의해 모든 교반기 각의 전계균일도가 향상되는 경향을 나타내며 교반기에 일정한 각을 주었을 때가 그렇지 않은 경우에 비 해 더 우수한 전계균일도를 형성하는 것으로 나타났다. 교 반기 각에 따라 전계균일도 변화 경향이 상이하게 나타나 는데, 어떠한 교반기 각이 가장 신뢰성 있는 전계균일도 조건 을 제공하는지를 x, y, z축에서 측정되는 전계강도 및 Quality Factor, 여기모드 수, 교반기 효율을 분석하여 찾 고자 하였다.

표 3은 측정된 전계강도의 최대값에 대하여 정규화한 x, y, z축별 전계강도와 편차치를 나타낸 것이다. 편차치가 크 다는 것은 각각의 축에서 측정되는 전계가 균일하지 않다는 것을 나타내며, 내성평가 수행시 측정오차가 증가한다는 것 을 의미한다. 교반기 각이 90°일 때에는 x, y축의 전계강도 와 z축의 전계강도가 최대 12.3%의 편차를 나타내었으며 교 반기 면적의 변화에 관계없이 큰 편차를 유지하였다. 교반 기 각이 30°, 60°인 경우에는 교반기 면적이 증가할수록 x, y, z축 전계강도의 편차가 감소하는 경향을 나타내었으나 z 축 전계강도의 크기가 x, y축에 비해 상대적으로 높게 나타 났다. 이는 해당 교반기 각을 가지는 교반기의 경우 전자파 잔향실 내부에서 형성되는 z축 전계를 효과적으로 변화시키 지 못하기 때문으로 판단된다. 이에 비해 교반기 각이 45° 인 경우 교반기 면적의 증가에 따라 큰 폭으로 편차가 감소 하여 교반기 면적이 E일 때는 편차가 3.2%로 가장 작은 값 을 나타내었다.

표 3 교반기 매개변수에 대한 정규화된 축별 전계강도 변화

Table 3 3-axis Average Field Strength for Stirrer Parameter

		A	B	C	D	E
30°	x축	0.525	0.566	0.554	0.566	0.556
	y축	0.520	0.506	0.560	0.570	0.573
	z축	0.669	0.685	0.695	0.708	0.665
	편차	8.5%	9.1%	7.9%	8.1%	5.9%
45°	x축	0.570	0.552	0.580	0.614	0.620
	y축	0.499	0.502	0.538	0.555	0.574
	z축	0.678	0.645	0.632	0.635	0.635
	편차	9.0%	7.2%	4.7%	4.1%	3.2%
60°	x축	0.538	0.533	0.535	0.583	0.576
	y축	0.530	0.536	0.554	0.546	0.556
	z축	0.682	0.675	0.688	0.642	0.651
	편차	8.6%	8.1%	8.3%	4.9%	5.0%
90°	x축	0.556	0.566	0.521	0.566	0.572
	y축	0.521	0.503	0.551	0.514	0.545
	z축	0.750	0.731	0.766	0.765	0.751
	편차	12.3%	11.8%	13.4%	12.3%	11.2%

따라서 45°의 교반기 각을 가질 때 전자파 잔향실 내부의 모든 방향에서 수신되는 전계의 크기가 유사한 크기를 가진다고 판단할 수 있다.

Quality Factor는 교반기 면적의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며 이로 인해 전자파 잔향실 내부에 여기되는 모드 수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 교반기 면적이 증가하면 교반기 표면에서의 표피 효과에 의한 에너지 손실이 증가하기 때문으로 사료된다. 교반기 효율은 독립적인 샘플을 생성하는 교반기의 성능을 나타내는 지표로, 교반기 각이 증가할수록 더 높은 효율을 가지는 것으로 나타났다.

Quality Factor 및 여기 모드의 수는 교반기 매개변수 중 교반기 각의 변화보다는 교반기 면적의 변화에 민감한 것으로 나타났다. 교반기 효율은 교반기 각이 증가할수록 향상되는 경향을 나타내었으며, 45°의 교반기 각을 가질 때 교반기 면적 변화에 따른 교반기 효율의 증가 폭이 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 x, y, z축 전계강도의 편차가 교반기 각의 변화에 따라 크게 변화하는 것을 관찰하였으며, 교반기 각이 45°일 때의 x, y, z축 전계강도 편차가 교반기 면적의 증가에 따라 크게 감소하는 것을 알 수 있었다.

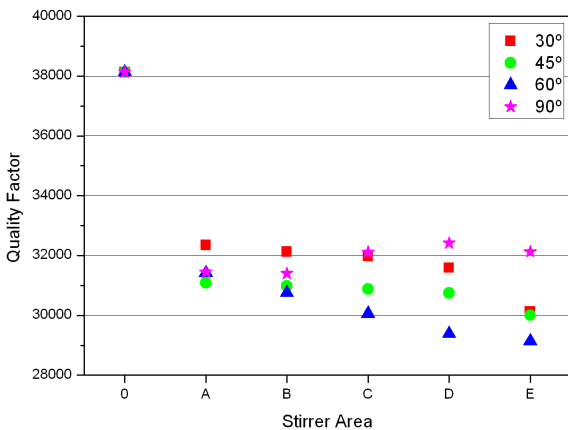


그림 4 교반기 매개변수 변화에 대한 Quality Factor

Fig. 4 Quality Factor for Stirrer Parameters

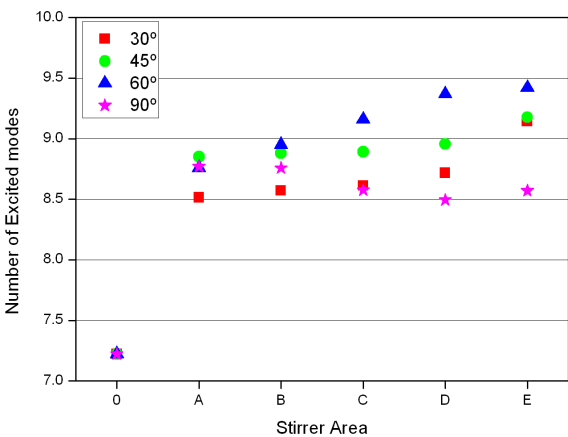


그림 5 교반기 매개변수 변화에 따른 여기 모드 수

Fig. 5 Number of Excited Modes for Stirrer Parameters

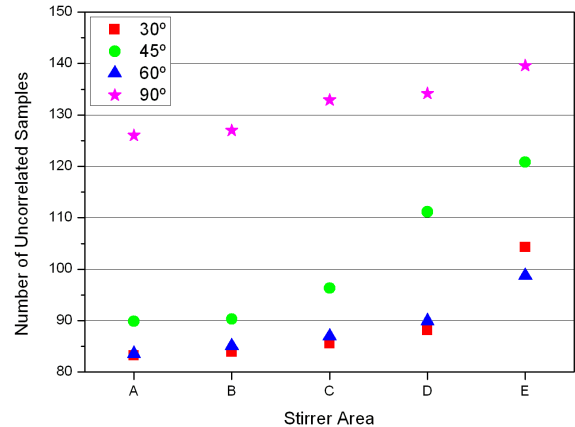


그림 6 교반기 매개변수에 따른 교반기 효율

Fig. 6 Stirrer Efficiency for Stirrer Parameters

교반기 각에 따라서 이러한 차이가 나는 원인은 교반기에 의한 전자파의 산란 때문으로 추정된다. 입사되는 전자파가 잔향실 내부에서 무수히 반사되면서 무작위로 산란되는데, 교반기가 없는 경우 단지 벽에서의 반사만이 존재하므로 내부 전계 분포가 하나로 결정되지만 교반기가 존재하는 경우 회전하는 교반기에 의해 전자파의 반사가 일어나게 되어 전자파 잔향실 내부 전계 분포가 지속적으로 변화하게 된다. 이 때, 무작위의 입사각을 가지는 전자파가 교반기에 도달하게 되는데 이때의 입사각과 교반기 각에 의해서 반사각이 결정된다. 따라서 보다 다양한 반사각을 발생시키는 교반기 각에서 더 향상된 전계균일도를 얻을 수 있기 때문으로 판단된다. 데이터 분석결과 교반기 각이 45°일 때 x축 및 y축 전계에 크게 기여하는 것으로 나타났으며, 교반기의 면적이 넓을수록 전계균일도 및 교반기 효율이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 45°의 교반기 각과 E의 교반기 면적을 가질 때 가장 향상된 전계균일도 특성을 나타내었다.

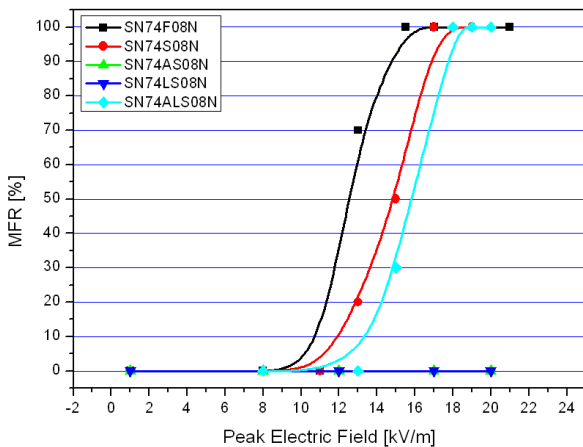
2.3.2 반도체 피해효과 분석

위에서 설계된 교반기를 사용한 교반형 전자파 잔향실에서 표 2에 의해 분류된 반도체 소자를 이용하여 수행한 피해효과 실험 결과와 도파관 내부에서의 피해효과 실험을 비교하였다. 각 반도체 소자에 대하여 10회 시험을 수행하여 오동작 또는 파괴가 발생하는 빈도를 확률로 나타내었다. 그림 7은 TTL AND 소자에 대하여 도파관 내부와 전자파 잔향실에서의 반도체 피해효과 결과를 비교한 그래프이다. 도파관 내부에서는 반도체 소자의 5% 오동작 발생 피크 전계강도 범위가 약 10 kV/m ~ 13 kV/m 으로 나타났다. 이에 비해 전자파 잔향실 내부에서는 반도체 소자의 5% 오동작 발생 피크 전계강도 범위가 약 7 kV/m ~ 11 kV/m 으로 나타났다.

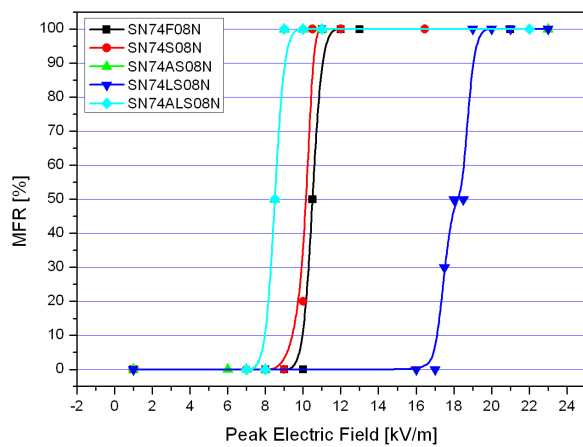
TTL NAND 소자의 피해효과 결과를 비교한 그래프는 그림 8과 같다. 도파관 내부에서의 5% 오동작 발생 피크 전계강도 범위는 약 9.5 kV/m ~ 16.5 kV/m 으로 나타났으며, 전자파 잔향실 내부에서의 5% 오동작 발생 피크 전계강

도 범위는 6 kV/m ~ 14 kV/m 로 전자과 잔향실에서의 오동작 발생 전계강도가 도파관 내부에서의 오동작 발생 전계강도에 비해 약 2.5 ~ 3.5 kV/m 정도 낮게 나타났다. 이는 전자과 잔향실이 수직 방향의 전계만이 커플링되는 도파관 내부와는 무작위의 전계 방향을 가지기 때문에 리드 프레임에 다양한 방향성을 가지는 전계가 커플링되는 과정에서 보다 더 큰 유기전압 및 전류를 발생시키게 되어 더 낮은 오동작 발생 전계강도를 가지는 것으로 사료된다.

도파관 내부에서는 소자의 오동작 확률이 넓은 전계강도 범위에 걸쳐 증가하는 경향을 보이나 전자과 잔향실 내부에서는 전계강도의 변화에 따라 급격하게 오동작 확률이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 도파관 내에서의 반도체 피해효과 실험은 피크 전계강도가 증가함에 따라 최소 및 최대 전계강도 사이에서 피해 현상이 불규칙하게 발생하여 정량적이고 재연성 높은 결과를 얻기 힘들기 때문이다. 전자과 잔향실의 경우 반도체의 오동작 현상이 피크 전계강도의 변화에 따라 일정한 경향성을 가지고 발생하므로 높은 재연성을 가지는 것으로 판단된다.



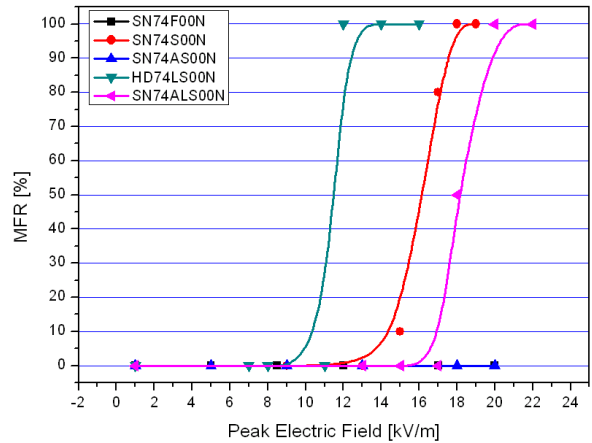
(a) 도파관 내부에서의 오동작 확률



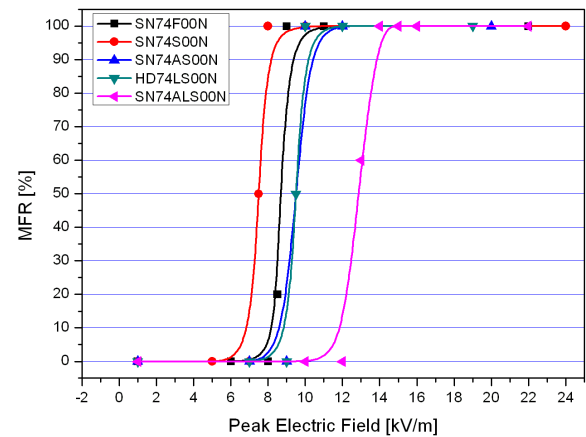
(b) 교반형 전자과 잔향실 내부에서의 오동작 확률

그림 7 TTL AND IC에 대한 피해효과 비교

Fig. 7 Malfunction Effect for TTL AND IC



(a) 도파관 내부에서의 오동작 확률



(b) 교반형 전자과 잔향실 내부에서의 오동작 확률

그림 8 TTL NAND IC에 대한 피해효과 비교

Fig. 8 Malfunction Effect for TTL NAND IC

3. 결 론

교반기의 매개변수 변화에 따른 전자과 잔향실의 전계균일도 경향 및 전계균일도에 영향을 미치는 것으로 알려진 Quality Factor, 여기 모드 수, 교반기 효율을 분석한 결과 교반기 높이가 증가함에 따라 특성이 향상되었으며, 45°의 교반기 각을 가질 때 축별 전계강도 편차가 가장 작게 나타나 전자과 잔향실 내부가 등방성에 가까운 전계분포를 형성한다는 것을 확인하였다. 따라서 교반기 각이 45°이면서 교반기 면적이 넓을수록 향상된 전계균일도를 확보할 수 있는 것으로 보이며, 이는 넓은 교반기 면적에 입사되는 전자파가 보다 다양한 산란각을 형성하게 되어 전계균일도 향상에 기여하기 때문으로 판단된다. 이렇게 설계된 교반기를 이용하여 반도체 소자에 대한 반도체 피해효과 실험을 수행한 결과, 기존에 수행된 반도체 소자에 대한 반도체 피해효과 실험결과에 비해 보다 정량적이고 재연성 높은 결과를 나타내었다. 따라서 교반형 전자과 잔향실이 전자과 내성평가를 위한 대체 시험시설로 사용할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소 지원에 의한 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] Radm R. J. Grich, USN, Electromagnetics Environment Engineering - A solution to EMI Pandemic, Naval Engineers Journal, pp.202-209, May 1987
- [2] IEC 61000-4-21, Electromagnetic compatibility(EMC) - Part 4-21: "Testing and measurement techniques - Reverberation chamber test methods", 2003.
- [3] M. L. Crawford, G. H. Koepke, "Design, Evaluation, and Use of a Reverberation Chamber for Performing Electromagnetic Susceptibility / Vulnerability Measurements", NBS Technical Note 1092, April 1986.
- [4] David A. Hill, "Electromagnetic Theory of Reverberation Chamber", NIST Technical Note 1506, December 1998.
- [5] Luk R. Arnaut, "Statistics of Quality Factor of a Rectangular Reverberation Chamber", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 45, No. 1, February 2003
- [6] Olof lunden, Mats Backstom, "A Factorial Designed Experiment for Evaluation of Mode-Stirrers in Reverberation Chambers", IEEE, 2003
- [7] Janet Clegg, Andrew C. Marvin, "Optimization of Stirrer Designs in a Reverberation Chamber", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 47, No. 4, November 2005
- [8] 홍주일, "반도체 소자의 오동작 및 파괴 특성에 미치는 협대역 고출력 전자기파의 커플링 효과", 인하대학교, 2009년 8월

저 자 소 개



김 광 용 (金光鏞)

1982년 9월 23일생. 2008년 인하대학교 전기공학과 학사 졸업, 2010년 인하대학교 전기공학과 석사 졸업, 현재 한국전기연구원 혁신소재연구센터 위촉연구원



홍 주 일 (洪 胄 壹)

1975년 10월 21일생. 2003년 세명대학교 전기공학과 학사 졸업, 2005년 인하대학교 전기공학과 석사 졸업, 2009년 인하대학교 전기공학과 박사 졸업, 현재 인하대학교 산학협력단 반도체 및 박막기술 연구소 박사후 연구원



허 창 수 (許 昌 洙)

1955년 1월 27일생. 1981년 인하대학교 전기공학과 학사 졸업, 1983년 인하대학교 전기공학과 석사 졸업, 1987년 인하대학교 전기공학과 박사 졸업, 1993년~현재 인하대학교 전자전기공학부 교수