

수정된 설계 방정식을 이용한 허니컴 구조의 차폐 효과 예측

Prediction of Shielding Effectiveness in Honeycomb Structure Using the Modified Design Equation

이경원 · 정영철* · 홍익표** · 육종관

Kyung-Won Lee · Yeong-Chul Cheong* · Ic-Pyo Hong** · Jong-Gwan Yook

요 약

본 논문에서는 전자기 차폐 구조로 널리 알려진 육각형 도파관 구조를 갖는 허니컴 구조의 차폐 효과를 정확하게 예측하기 위하여 기존의 차폐 효과 설계식을 수정하여 새로운 차폐 효과 설계식을 제안하였다. 허니컴의 차폐 효과 설계 방정식은 단일 격자의 차폐 효과와 무수히 많은 격자 구조의 차폐 효과의 합으로 표현되는데, 본 논문에서는 허니컴 구조를 이루고 있는 육각형 기본 격자를 해석하고, 기본격자가 다수의 배열로 이루어진 해석을 통해 일반화 된 차폐 효과 설계 방정식을 제안하였다. 제안한 차폐 효과 설계 방정식의 유효함을 입증하기 위하여 상용 소프트웨어의 3D EM 시뮬레이션과 비교하였다. 또한, 측정 결과와 비교하여 본 논문에서 제안한 수정된 차폐 효과 설계 방정식이 기존의 설계 방정식보다 더 정확하다는 것을 보여주었다.

Abstract

In this paper, the modified design equation of shielding effectiveness was presented to predict more accurately the shielding effectiveness of honeycomb structure with hexagonal waveguide. The design equation of shielding effectiveness in honeycomb was represented from adding shielding effectiveness of single lattice to shielding effectiveness of infinite array of single lattice. This paper proposed the generalized design equation of shielding effectiveness by analyzing basis lattice of hexagonal waveguide which composes honeycomb structure and infinite array structure of basis lattice. To provide the validity of the modified design equation of shielding effectiveness in this paper, comparison with other available data using 3D EM commercial software is made.

Key words : Honeycomb Structure, Shielding Equation, Shielding Effectiveness, Hexagonal Waveguide, Infinite Waveguide Array

I. 서 론

전자파는 21세기 최고의 공해로 간주되어 제 4의 공해로 일컬어지고 있으며 전자파가 인체 및 전자 장비에 미치는 전자파 장애(EMI: Electro-Magnetic Interference) 문제가 최근 심각하게 제기되고 있다.

군수 산업 측면에서 현대전은 전자 정보 장비를 활용하여 방해 전파를 능동 방사함으로써 적의 통신이나 전자 장비를 교란시키는 등의 치명적인 타격을 주는 새로운 전자전(electronic warfare)의 양상으로 전개되고 있다^[1]. 따라서, 전시에 전자전에 대비하기 위해 전자 기기 및 자동화 기기들을 외부의 전파 탐지로부터

연세대학교 전기전자공학과(Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Yonsei University)

*국방품질관리소(Defence Quality Assurance Agency)

**공주대학교 정보통신공학부(Dept. of Information and Communication Engineering, Kongju University)

· 논문 번호 : 20050506-051

· 수정완료일자 : 2005년 8월 17일

터 완벽히 차폐할 수 있는 셸터(shelter) 등의 차폐설 운용 및 기기 자체의 차폐 필요성이 요구되고 있다. 그러나 아무리 완벽한 차폐 시설이라 하더라도 내·외부를 연결하는 전원선, 통신선, 환기구 등이 필수적이기 때문에 이런 내·외부를 연결하는 통로를 통하여 유출입될 수 있는 다양한 형태의 유해 전자파에 대한 대책은 더욱 중요하게 된다^[2]. 이러한 전자파를 차폐하기 위해 오래 전부터 EMI 차폐 기술로 사용된 것이 허니컴(Honeycomb) 구조이다. 허니컴 구조는 다른 구조에 비해 전자파 차폐 성능이 높을 뿐만 아니라, 공기의 흐름이 원활하고 외부의 물리적인 압력에도 강하다는 장점을 갖는다^[3]. 허니컴 구조는 금속 도파관의 매트릭스로 구성되어 있으며 허니컴 구조의 차폐 성능은 도파관의 횡단면 크기와 길이에 따라 달라진다. 그러나, 허니컴 구조는 육각형 도파관 구조를 기본적으로 가지고 있기 때문에 정확한 수치적 해를 구하기 어려워, 허니컴 구조의 제작이나 사용은 대부분 경험적인 근거에 바탕을 두고 있다.

전자기 차폐 구조의 성능으로서는 차폐 정도를 나타내는 차폐 효과(Shielding Effectiveness: SE)가 중요한 파라미터이고, 따라서 허니컴 구조의 차폐 효과를 정확하게 얻을 수 있는 설계 방정식에 대한 연구가 이루어지고 있다^[4].

본 논문에서는 허니컴 구조의 차폐 효과를 정확하게 구하기 위해서 기존의 설계 방정식을 수정한 차폐 효과 설계 방정식을 제안하고, 상용 EM 소프트웨어인 HFSS와 측정 결과와 비교하여, 본 논문에서 제안한 수정된 차폐 효과 설계 방정식의 타당성을 입증하였다.

II. 허니컴의 차폐 효과

2-1 차폐 효과의 정의

전자파 에너지를 줄이는 차폐 물질의 성능을 나타내는 중요한 파라미터로서 차폐 효과는 다음 식 (1)과 같이 정의된다^{[4],[5]}.

$$SE_{dB} = 10 \log \frac{\text{incident power density}}{\text{transmitted power density}} \quad (1)$$

여기서, *incident power density*는 입사 전력 밀도로 차폐 전의 입사된 전력 밀도를 의미하며, *transmitted*

*power density*는 전송 전력 밀도로 차폐 후의 전송된 전력 밀도를 나타낸다. 전력 밀도(W/m^2)는 $E(V/m)$ 와 $H(A/m)$ 의 곱으로 표현되기 때문에 식 (1)의 차폐 효과 설계 방정식은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$SE_{dB} = 10 \log \frac{E_b H_b}{E_a H_a} \quad (2)$$

여기서, H_b, E_b 는 차폐 전의 전기장과 자기장의 값이며, E_a, H_a 는 차폐 후의 전기장과 자기장의 값이다. 파동 임피던스($Z_w = E/H$)가 차폐 전과 차폐 후가 서로 같다고 가정하면, $H_b = E_b/Z_w$ 와 $H_a = E_a/Z_w$ 로 표현되고 차폐 효과 설계 방정식은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$SE_{dB} = 20 \log \left(\frac{E_b}{E_a} \right) : \text{전기장에 대한 식} \quad (3a)$$

$$SE_{dB} = 20 \log \left(\frac{H_b}{H_a} \right) : \text{자기장에 대한 식} \quad (3b)$$

2-2 단일 도파관의 차폐 성능

임의의 도파관 내의 감쇠상수는 다음의 식으로 표현된다^[5].

$$\alpha = w(\mu\epsilon)^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{f_c}{f} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

식 (4)에 주어진 도파관의 차단 주파수(f_c , cutoff frequency)를 대입하고 앞에서 언급한 식 (3)을 이용해서 차폐 효과 방정식을 구하면 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다.

$$SE_{dB} = 0.018df \sqrt{\left(\frac{f_c}{f} \right)^2 - 1} \quad (5)$$

여기서, d 는 도파관 경로의 길이를 나타내며 이때 단위는 mm이다.

표 1에 사각형^[7], 원^[4], 육각형 도파관의 차폐 효과 방정식을 나타내었다. 사각형이나 원 도파관은 기본 좌표계를 이용하여 각 도파관의 해를 구할 수 있으며 차단 주파수 역시 쉽게 구할 수 있다. 하지만 육각형 도파관의 경우 적당한 좌표계가 없기 때문에 기존 연구에서는 사각형과 원의 차폐 효과 방정식에 곱해지는 각각의 상수 값 27.3과 31.95의 평균 값을 사용하여 육각형의 차폐 효과 방정식을 예측하였다.

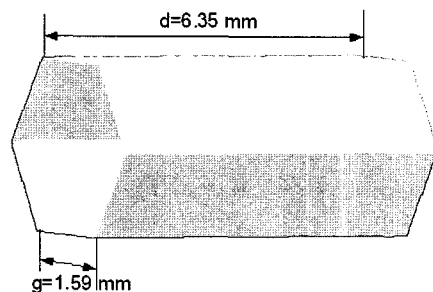
표 1. 각 도파관의 차폐 효과 설계 방정식

Table 1. Shielding effectiveness design equation of each waveguide.

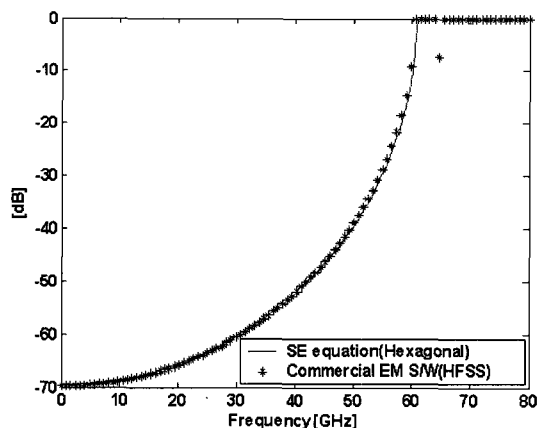
	SE_{dB}	$SE_{dB}(f, d/f > 3)$
사각형	$SE_{dB} = 27.3 \frac{d}{g} \sqrt{1 - \left(\frac{gf}{150000}\right)^2}$	$SE_{dB} = 27.3 \frac{d}{g}$
원	$SE_{dB} = 31.95 \frac{d}{g} \sqrt{1 - \left(\frac{gf}{175800}\right)^2}$	$SE_{dB} = 31.95 \frac{d}{g}$
육각형	$SE_{dB} = 17.5 \frac{d}{g} \sqrt{1 - \left(\frac{gf}{96659}\right)^2}$	$SE_{dB} = 17.5 \frac{d}{g}$

본 논문에서는 육각형을 원으로 근사화 시켜서 차단 주파수와 감쇠 상수^{[8]~[11]}를 구하는 방법으로 육각형에 대한 차폐 효과 설계식을 구하였다. 즉, 임의의 육각형의 면적과 동일한 원의 반지름을 결정하여 차단 주파수와 감쇠 상수를 구하여 식 (5)에 대입함으로써 육각형의 차폐 효과 방정식을 구하였으며, 표 1에 본 논문에서 새롭게 구한 육각형 차폐 효과 방정식을 나타내었다. 각각의 차폐 효과 설계식에서 d 는 도파관 경로의 길이이며 g 는 도파관 횡단면의 크기이다. 즉, 사각형의 경우 두 변의 길이에서 가장 긴 한 변의 길이, 원의 경우 횡단면의 지름을 g 로 한다. 그리고 육각형의 g 는 육각형의 한 변의 길이로 한다. 만약 도파관의 차단 주파수와 동작 주파수의 관계가 $f_c/f > 3$ 인 조건을 만족하면 차폐 효과 방정식은 도파관의 g, d 의 비의 값으로 표현할 수 있다. 여기서 d 와 g 의 단위는 mm이고 f 는 MHz이다.

표 1의 차폐 효과 설계 방정식들의 타당성을 증명하기 위해서 육각형에 대한 차폐 효과 식과 상용 EM 소프트웨어인 FEM 방법을 사용한 HFSS 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 그림 1에 육각형 도파관의 차폐 효과 설계 방정식과 HFSS 시뮬레이션 결과를 비교하였다. HFSS 시뮬레이션에서는 도파관의 크기에 따른 시뮬레이션에서 사용하는 격자의 크기와 주파수 범위에 따라서 해의 불연속한 점이 발생할 수도 있다는 사실을 확인하였지만, 대체적인 해의 경향을 비교 확인하는 것이 가능하다고 판단하였다. 시뮬레이션에서 사용한 동작 주파수는 0.01 GHz에서 70 GHz이며, 이때 육각형 도파관의 단면적 지름은 3.18 mm($g=1.59$ mm)이며 도파관 경로의 길이는 6.35 mm이다. 시뮬레이션에서 얻어진 0.01 GHz에서의 차폐 효과 값은 70 dB이고 차단 주파수는 60 GHz



(a)



(b)

그림 1. 차폐 효과 설계 방정식과 HFSS 결과의 비교
Fig. 1. Comparison between SE design equation and HFSS simulation.

로 표 1에서 주어진 방정식의 결과와 일치하는 것을 확인할 수 있다. 표 1에서 확인할 수 있듯이 차폐 효과의 값은 도파관 단면적의 크기, 경로의 길이, 동작 주파수의 변화에 따라 달라짐을 그림 1(b)에서 확인할 수 있다. 차폐 효과의 정의에서 차폐 효과 값은 양의 값으로 주어지지만 본 논문에서는 시뮬레이션 결과의 비교를 용이하게 하기 위해서 차폐 효과 값을 반전시켜 음의 값으로 나타내었다.

2-3 무한 배열 도파관의 차폐 성능

일반적으로 허니컴 구조의 차폐 효과 값은 도파관 횡단면의 길이, 경로의 길이, 도파관의 수에 따라 변하는 것으로 알려져 있다. 그래서 허니컴의 차폐 효과 값을 계산할 때 단일 도파관의 차폐 효과 설계식에 도파관 수를 나타내는 식 (6)을 더하여 계산하게 된다^[4].

$$SE_{dB} = 10 \log N \quad (6)$$

그러나, 식 (6)은 100 mm의 aperture가 존재한다고 할 때 이 aperture를 여러 개의 aperture로 나누어서 차폐 효과 값을 계산해 보면 aperture와 aperture 사이의 길이와 aperture의 길이가 일정하게 정할 수 없으므로 정확한 차폐 효과 값을 구하는 것이 어렵다는 문제점을 가지고 있다. 본 논문에서 차폐 효과 값이 도파관 수(N)의 값에 상관없이 일정하다는 것을 증명하기 위하여 HFSS 시뮬레이션을 이용하였다. 그림 2(a)에서 도파관의 수에 따라 디자인된 각각의 허니컴은 10 mm×10 mm, 14 mm×14 mm, 20 mm×20 mm의 크기를 갖는다. 각각의 허니컴의 g (육각형 도파관의 한 변의 길이)=1.59 mm이고, d (도파관 경로의 길이)=6.35 mm로 동일하다. 그림 2(b)의 그래프에서 확인할 수 있듯이 각각의 허니컴은 가장 낮은 동

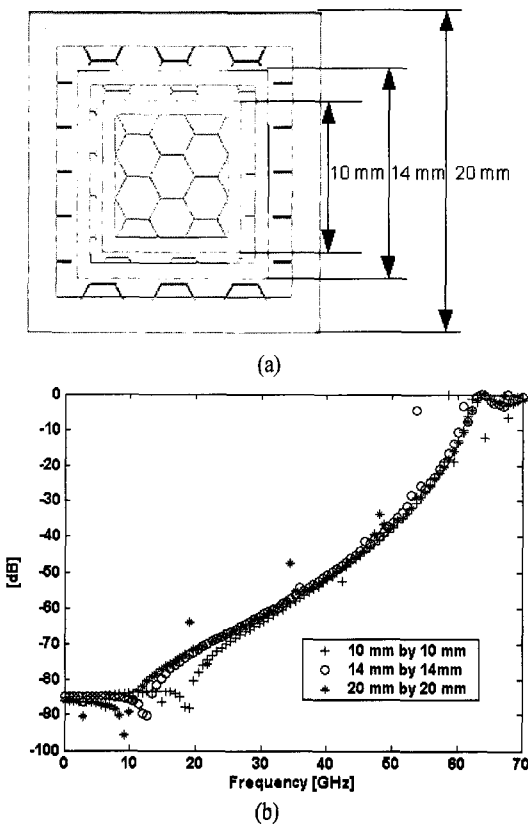


그림 2. 육각형 도파관 수 N 의 변화에 따른 차폐 효과 값

Fig. 2. Shielding effectiveness with the variation of the number of waveguide N .

작 주파수인 0.01 GHz일 때 86 dB이고, 차단 주파수는 63 GHz로 일정함을 알 수 있다.

사각형 도파관을 단위 셀로 가진 무한한 배열 도파관에 대한 기존의 차폐 효과 설계 방정식은 그림 3으로부터 식 (7)과 같이 구할 수 있다^[12]. 그림 3(a)는 단일 도파관을 평행판 도파관(parallel-plate waveguide)으로 나누고, 각 도파관에 TE 모드를 가지는 파가 입사되는 것을 나타낸 것이며, 그림 3(b)는 무한 배열 평행판 도파관인 경우를 나타낸 것으로, 무한 배열 도파관의 정확한 해를 구하기 어렵기 때문에 그림 3과 같이 무한 배열 도파관을 평면판 도파관으로 근사화한 후 Wiener-Hopf 방법을 이용하여^[12] 차폐 효과 식을 구할 수 있다. 이러한 방법을 통하여 얻어진 사각형 허니컴의 차폐 효과 값을 식 (7)에 나타내었다. 첫 번째 항은 사각형 도파관의 단위 셀의 차폐 효과 설계 값이고 두 번째 항은 평행판 무한 배열의 차폐 효과 값을 나타낸 것으로 본 논문에서는 육각형 허니컴 구조에 대한 정확한 차폐 효과 설계식을 얻기 위하여 식 (6)을 대신하여 식 (7)의 두 번째 항을 사용하였다^{[12],[13]}.

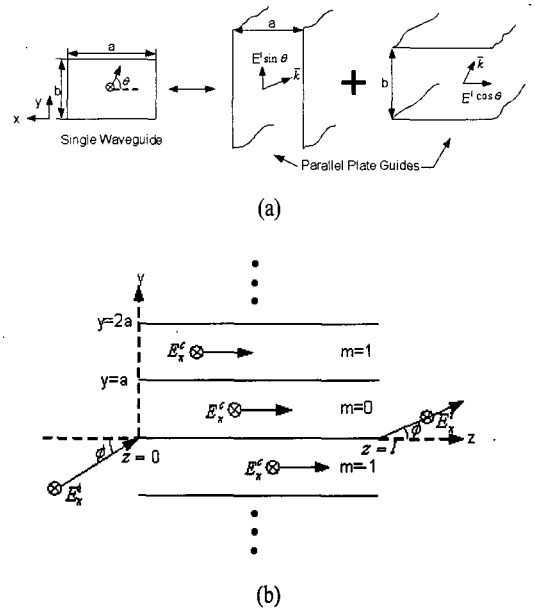


그림 3. 단일 도파관의 평행판 도파관으로의 변환과 무한 배열 도파관에 입사된 TE 모드의 평면파
Fig. 3. Parallel-plate equivalence and infinite array of parallel-plate waveguides excited by an incident plane wave with TE polarization.

$$SE = 27.3 \frac{d}{g} - 20 \log_{10} \frac{2kg}{\pi} \cos \phi \text{ [dB]} \quad (7)$$

표 1의 단위 셀의 차폐 효과 값과 식 (7)의 두 번째 항의 차폐 효과 값을 서로 결합함으로써 허니컴 차폐 효과 값을 예측할 수 있다. 따라서 육각형 도파관 구조를 갖는 허니컴의 차폐 효과 값은 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$SE = 17.5 \frac{d}{g} \sqrt{1 - \left(\frac{gf}{9665.9} \right)^2} - 20 \log_{10} \frac{2kg}{\pi} \cos \phi \text{ [dB]} \quad (8)$$

k = 파수

g = 도파관의 횡단면의 크기(mm)

d = 도파관 경로의 길이(mm)

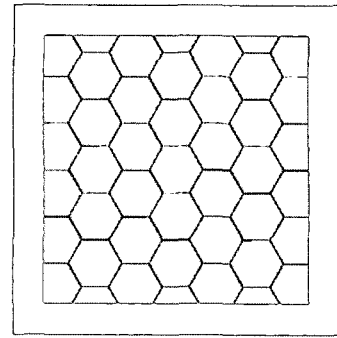
f = 동작주파수(MHz)

ϕ = 입사파의 각도

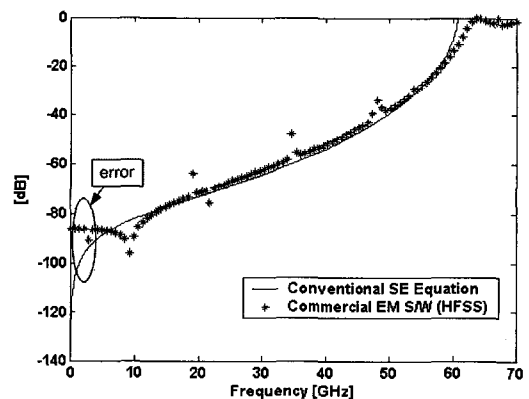
그림 4(a)는 HFSS 시뮬레이션을 하기 위해 설계된 허니컴이고 그림 4(b)는 허니컴의 시뮬레이션과 식 (8)을 비교한 그래프이다. 그림 4(b)에서 확인할 수 있듯이 두 값이 주파수가 10 GHz 이상인 부분에서는 거의 잘 일치하지만 저주파수 대역인 주파수가 0.01 GHz에서 10 GHz 사이의 부분에서는 일치하지 않음을 알 수 있다. 이것은 10 GHz 아래 부분에서 식 (8)은 로그 스케일로 감소하고 시뮬레이션은 일정한 값을 가지기 때문이다.

III. 수정된 허니컴 차폐 효과 설계 방정식

그림 4에서 주파수 10 GHz 아래에서 발생하는 차폐 효과 설계 방정식의 오차를 수정하기 위해서 임의의 항이 10 GHz 이하 부분에서 식 (8)에 더해져야 함을 알 수 있다. 새로운 항을 유도하기 위하여 HFSS 시뮬레이션의 값을 기준으로 식 (8)을 이용하여 curve-fitting 방법을 사용하여 도파관의 한 변의 길이와 주파수의 비로 나타내는 새로운 항을 얻었다. 임의의 항이 더해진 차폐 효과 설계식은 식 (9)와 같다. 여기서 더해진 식은 로그 스케일로 감소하는 그래프를 일정한 값으로 만드는 항으로 식 (9a)는 주파수가 10 GHz 이상 되는 영역에 해당되고, 식 (9b)는 0.01 GHz에서 10 GHz까지의 저 주파수 부분에 해당되는 식이다. 그림 5는 식 (9)와 시뮬레이션의 차폐 효과 값을 비교한 것으로 여러 보정항이 추가된 식 (9)



(a)



(b)

($g=1.59$ mm, $d=6.35$ mm, $\phi=90^\circ$,
허니컴 크기: 20 mm by 20 mm)

그림 4. 허니컴 구조 차폐 효과 설계 방정식과 HFSS 시뮬레이션 차폐 효과 값의 비교
Fig. 4. Comparison between Honeycomb SE equation and HFSS simulation.

와 시뮬레이션 값이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

$$SE = 17.5 \frac{d}{g} \sqrt{1 - \left(\frac{gf}{9665.9} \right)^2} - 20 \log_{10} \frac{2kg}{\pi} \cos \phi \quad (9a)$$

$$\frac{f_c}{f} < 10$$

$$SE = 17.5 \frac{d}{g} \sqrt{1 - \left(\frac{gf}{9665.9} \right)^2} - 20 \log_{10} \frac{2kg}{\pi} \cos \phi - 20 \log_{10} \frac{4g}{f} \quad (9b)$$

$$\frac{f_c}{f} > 10$$

본 논문에서는 식 (9)를 일반화시키기 위해서는 다양한 g 의 값을 3.18 mm, 1.59 mm, 1.25 mm, 1 mm로 설정하고 HFSS 시뮬레이션을 이용하여 수행하였으며, 이 결과로부터 식 (9)를 일반화하여 정규화된

표 2. R 의 비율Table 2. Ratio of R .

$g(\text{mm})$	R
3.18	1
1.59	2
1.25	2.544
1	3.18

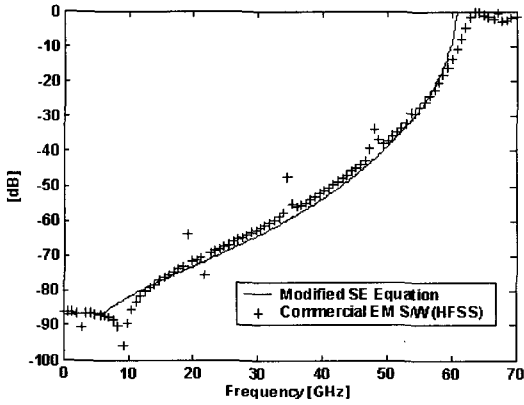
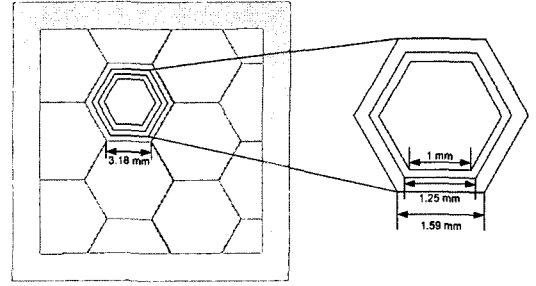


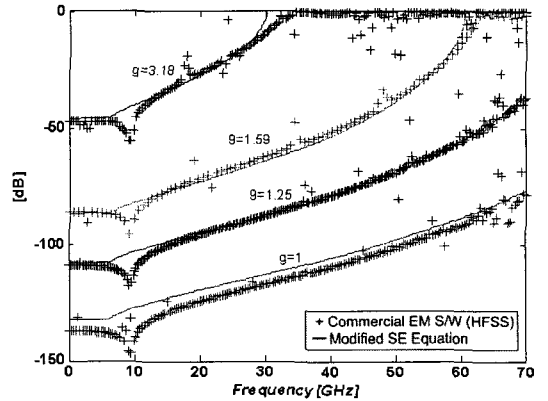
그림 5. 수정된 허니컴 차폐 효과 설계식과 HFSS 시뮬레이션의 비교

Fig. 5. Comparison between modified SE equation and HFSS simulation.

주파수 값이 R 의 5배보다 큰 값이 되는 지점에서 여러 보정 항인 세 번째 항이 더해지게 되는 수정된 허니컴 차폐 효과 설계 방정식 식 (10)으로 나타내었다. 여기서 $R(3.18/g)$ 은 3.18 mm와 g 의 비율의 값으로 표 2에 나타내었다. R 값에 따라 주파수 0.01 GHz에서 10 GHz 되는 부분에서 세 번째 항이 더해지는 주파수 지점과 더해지는 세 번째 항이 결정되게 된다. 10 GHz 아래 부분에서 새로운 항을 더함에 따라 시뮬레이션 값이나 차폐 효과 설계 방정식이 일치하게 된다^[4]. 그림 6은 각각의 g 에 대한 HFSS 시뮬레이션 결과와 수정된 허니컴 차폐 효과 설계 방정식을 비교하여 나타낸 것으로, 그림 6(a)와 같이 HFSS 시뮬레이션을 하기 위해 허니컴의 전체 크기는 동일하고 g 의 값만 달리하여 디자인하였다. 그림 6(b)의 결과로부터 서로 다른 각각의 g 값에 대한 차단 주파수와 차폐 효과 값이 본 논문에서 제안한 수정된 허니컴 차폐 효과 방정식을 사용하여 잘 예측할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 각각의 HFSS 시뮬레



(a)



(b)

그림 6. g 의 값의 변화에 따른 HFSS 시뮬레이션과 수정된 차폐 효과 방정식의 비교Fig. 6. Comparison between modified SE equation and HFSS simulation for different g .

션 그래프에서 10 GHz 되는 지점에서 차폐 효과 값이 갑자기 좋아지는 것은 시뮬레이션에서 입사파가 사각형의 가스켓면과 부착되어 입사되고, 무한한 배열로 가정할 수 없기 때문에 입사면과 가스켓 사이에서 공진 주파수가 발생하기 때문으로, 계산 값으로 약 9.375 GHz의 공진이 발생하게 되며, 시뮬레이션 결과에서 발생하는 공진 주파수와 일치하고 있다.

$$SE = 17.5 \frac{d}{g} \sqrt{1 - \left(\frac{gf}{9665.9} \right)^2} - 20 \log_{10} \frac{2kg}{\pi} \cos \phi$$

$$\frac{f_c}{f} < 5R \quad (10a)$$

$$SE = 17.5 \frac{d}{g} \sqrt{1 - \left(\frac{gf}{9665.9} \right)^2} - 20 \log_{10} \frac{2kg}{\pi} \cos \phi$$

$$- 10 \log_{10} \frac{2Rg}{f}$$

$$\frac{f_c}{f} > 5R \quad (10b)$$

IV. 측정 및 실험

수정된 허니컴의 차폐 효과 설계 방정식과 HFSS 시뮬레이션의 검증을 위해서 측정을 수행하였다. 실험에 사용한 허니컴의 구조는 $g=1.59$ mm이고 $d=6.35$ mm이다. 여기서 허니컴의 둘레를 이루고 있는 가스켓은 고려하지 않았으며 허니컴의 특성은 네트 워크 분석기와 피라미드형 혼 안테나를 사용하여 측정하였다. 측정은 IEEE STD 299-1997^[15]와 MIL-STD-285^[16]를 기본으로 하여 한국표준과학연구소에서 정리한 차폐 시설물에 대한 전자파 차폐 효과 시험 절차를 참고하여 그림 7과 같은 블록도를 바탕으로 하였다. 그림 7에서 TX는 셀터 외부에서 입사되는 소스를 나타내며 RX는 차폐체를 통과한 전자파를 측정하는 셀터 내부를 나타낸다. 그림 8은 그림 7을 바탕으로 셋팅된 측정 장치들의 셀터 외부와 내부의 모습이다. 입사파의 각도는 90도이고 소스와 셀터의 거리는 약 72 인치로 구성하였으며 셀터 내부와 전자파 측정 장치와의 거리는 2 인치로 하였다. 허니컴의 측정은 소스의 가용 주파수 범위인 1 GHz 부터 11 GHz까지 이루어졌다.

표 3에 기존의 차폐 효과 설계 방정식, FEM 방식의 HFSS 시뮬레이션, 수정된 허니컴 차폐 효과 설계 방정식, 측정된 값을 비교하여 나타내었다. 표 3에서 기존의 차폐 효과 설계 방정식의 값은 다른 세 가지의 값들과 큰 차이가 남을 알 수 있다. 그림 9에 측정치를 기준 값으로 하여 나머지 값들이 어느 정도의 편차를 보이는데에 대한 상대 오차를 나타내었다. HFSS 시뮬레이션 값의 약 9 GHz 지점에서 앞 절에

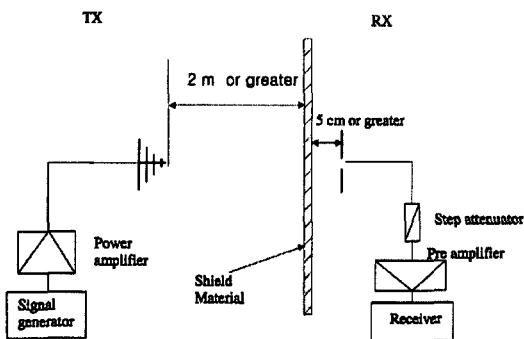
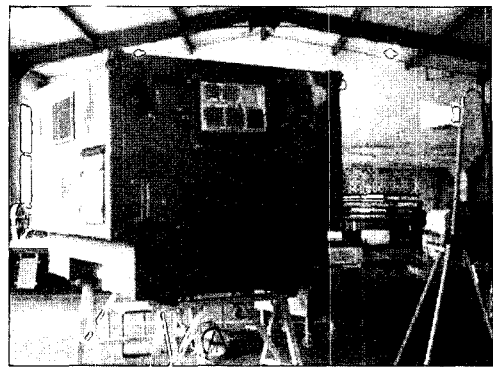
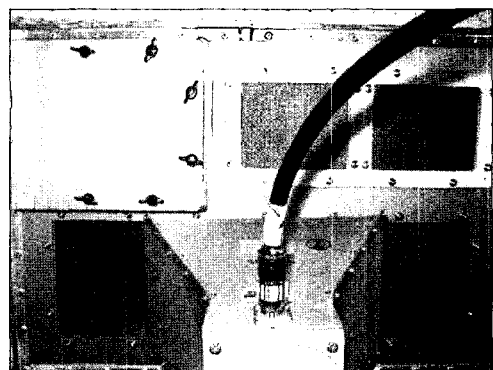


그림 7. 차폐 효과 측정 블록도
Fig. 7. Measurement setup of shielding effectiveness.



(a)



(b)

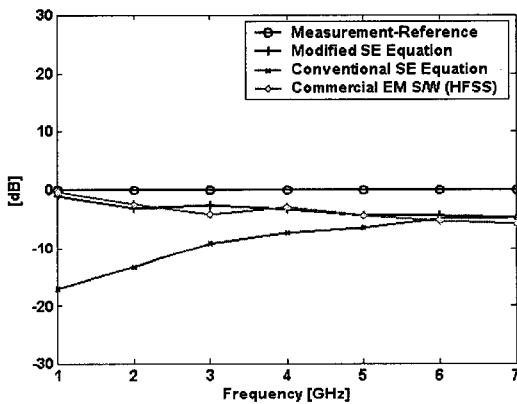
그림 8. 측정된 허니컴 셀터 외부와 내부
Fig. 8. Inner and outer view of honeycomb shelter in measurement.

서 설명한 것과 같이 허니컴의 가스켓에 의한 시뮬레이션상 공진 주파수가 생기기 때문에, 시뮬레이션 값을 측정 값과 차폐 효과 방정식의 값에 비교하는 것은 부정확하기 때문에, 상대적으로 비교가 가능한 값으로 측정된 1~11 GHz의 값 중에서 공진 주파수에 대한 영향이 없다고 판단되는 1~7 GHz 값의 비교로 한정하였다. 그림 9에서 1 GHz에서 7 GHz까지 HFSS 시뮬레이션과 수정된 차폐 효과 설계 방정식은 거의 일치하며 측정 값과 차이가 작음을 알 수 있으며 기존의 차폐 효과 방정식은 측정 값에 비해 6 GHz까지 큰 차이가 생기고 6 GHz 이후부터 수정된 허니컴 차폐 효과 설계 방정식과 일치됨을 볼 수 있다. 1 GHz에서 7 GHz 사이에서 기존의 차폐 효과 설계 방정식과 측정 값의 평균 상대 오차는 약 9.6 %, HFSS 시뮬레이션과 측정값의 평균오차는 4.3 %, 수정된 차폐 효과 설계 방정식과 측정 값간의 오차는

표 3. 측정 값과 각각 시뮬레이션의 차폐 효과값 비교($g=1.59$ mm, $d=6.35$ mm)

Table 3. SE comparisons between measurements and each simulations.

주파수	Conventional SE Equation	Commercial EM S/W, HFSS	Modified SE Equation	측정 값
1 GHz	102.95 dB	86.22 dB	86.88 dB	85.81 dB
2 GHz	96.90 dB	86.26 dB	86.85 dB	83.63 dB
3 GHz	93.33 dB	88.46 dB	86.80 dB	84.13 dB
4 GHz	90.77 dB	86.48 dB	86.74 dB	83.38 dB
5 GHz	88.74 dB	86.63 dB	86.65 dB	82.17 dB
6 GHz	87.06 dB	87.34 dB	86.55 dB	81.99 dB
7 GHz	85.59 dB	86.65 dB	85.60 dB	80.74 dB

그림 9. 측정된 차폐 효과 값에 대한 상대 오차
Fig. 9. Relative error for the measurement SE.

3.99 %이다. 이로부터, 본 논문에서 제안한 수정된 차폐 효과 설계 방정식이 허니컴 구조의 차폐 효과를 비교적 정확하고 예측할 수 있다는 사실을 알 수 있다. 또한 본 논문에서 제안한 수정된 차폐 효과 설계 방정식은 기존의 설계 방정식에 비하여 정확한 차폐 효과를 예측할 수 있고, 값은 정확하지만 시뮬레이션 시간이 오래 걸리는 상용 소프트웨어 HFSS 시뮬레이션에 비하여, 비교적 간단한 계산으로 허니컴 구조의 정확한 차폐 효과를 예측하는데 사용될 수 있음을 보여준다.

V. 결 론

차폐에 대한 높은 관심과 허니컴의 많은 사용으로 허니컴 구조에 대한 전자기 수치 해석 연구가 많이 이루어졌지만 구조적인 특성 때문에 정확한 해를

구하기가 어려워 근사적인 해석만 이루어졌다. 본 논문에서는 우선 육각형 구조를 임의의 원으로 근사화 하여 단일 육각형 도파관에 대한 차폐 효과 값을 구하고, 육각형 도파관 구조가 무한하게 있다고 가정하는 허니컴 구조에 대한 차폐 효과 설계 방정식을 구하였다. 기존의 허니컴 차폐 효과 설계 방정식을 상용 소프트웨어 FEM 시뮬레이션과 비교하여 주파수 10 GHz 이하 부분에 새로운 항을 더하여 좀 더 정확하게 차폐 효과 값을 예측할 수 있는 설계식을 제안하였고 측정 및 실험을 통해, 본 논문에서 제안한 차폐 효과 설계 방정식의 유효함을 증명하였다. 본 논문의 결과로부터 기존의 로그 스케일로 감소하는 허니컴 차폐 효과 설계 방정식과 디자인과 시뮬레이션의 시간이 오래 걸리는 상용 소프트웨어인 FEM 시뮬레이션보다 본 논문에서 제안된 수정된 허니컴 차폐 효과 설계 방정식이 정확하고 빠르게 차폐 효과 값을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 최태인, 이응주, 간중만, "무기체계 EMI 대책", 대한전자공학회지, 23(10), pp. 103-111, Aug. 1996.
- [2] M. Angeli, E. Cardeli, "Numerical analysis of diffracting perforated shields", *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 33, no. 2, Mar. 1997.
- [3] B. M. Rakshit, "Radio frequency shielding with aluminium honeycomb", *Electromagnetic Interference and Compatibility*, International Conference,

- pp. 413-415, Dec. 1995.
- [4] Donald R. J. White, Michel Mardiguian, "A hand-book series on electromagnetic interference and compatibility, electromagnetic shielding", *Interference Control Technologies, Inc.*, Gainesville, Virginia., vol. 3, 1988.
 - [5] Richard B. Schulz, V. C. Plantz, and D. R. Brush, "Shielding theory and practice", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 30, no. 3, Aug. 1988.
 - [6] Leland H. Hemming, "Applying the waveguide below cut-off principle to shielded enclosure design", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Aug. 1992.
 - [7] C. R. Paul, *Incrodution to Electromagnetic Compatibility*, John Wiley and Sons, Inc., 1992.
 - [8] X. Zhou, Y. Wang, "Approximate formula for cutoff wavenumber of lowest-order TM mode of a hollow metallic waveguide of arbitrary cross-section", *IEE Proceeding Microwaves Antenna and Propagation*, vol. 143, Issue 5, pp. 454-456, Oct. 1996.
 - [9] Qinhong Zheng, Li Ma, Fuyao Xie, and Jingtian Li, "A simple estimate for cut-off wavenumber of lowest-order TM mode of a hollow metallic waveguide of arbitrary cross-section", John Wiley & Sons, Inc., *Int J RF and Microwave CAE*, vol. 10, pp. 159-163, 2000.
 - [10] Fook Loy Ng, "Tabulation of method for numerical solution of the hollow", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*, vol. 22, pp. 322-329, Mar. 1974.
 - [11] Arvind K. Sharma, Wolfgang J. R. Hoefer, "Spectral domain analysis of a hexagonal micro-strip resonator", *IEEE Transactions on Microwave and Technique*, vol. MTT-30, no. 5, pp. 825-828, May 1982.
 - [12] W. A. Bereuter, D. Chang, "Shielding effectiveness of metallic honeycombs", *IEEE Transactions on EMC*, Feb. 1982.
 - [13] R. Mittra, S. W. Lee, *Analytical Techniques in the Theory of Guided Waves*, New York: MacMillan, 1971.
 - [14] D. C. Love, E. J. Rothwell, "The impact of increasing thickness on the shielding effectiveness of a doubly-periodic conducting screen evaluated using a mode-matching technique", *IEEE AP-S International Symposium and URSI Radio Science Meeting*, Monterey, California, Jun. 2004.
 - [15] Standards Committee of the IEEE Electromagnetic Compatibility Society, "IEEE standard method for measuring the effectiveness of electromagnetic shielding enclosure", *IEEE STD 299*, 1997.
 - [16] "Method of attenuation measurement for enclosure, electromagnetic shielding, for electronic test purpose", *MIL-STD-285*.

이 경 원



2003년 2월: 대전대학교 전자공학과 (공학사)
 2005년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 2005년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] EMI/EMC, 마이크로

파 해석, SAR

정 영 철



1993년 4월~현재: 국방품질관리소 선임연구원
 2001년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 2002년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] EMI/EMC, 마이크로

파 수치해석

홍 익 표



1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1996년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

2000년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)

2000년 3월~2003년 2월: 삼성전자

정보통신연구소 책임연구원

2003년 3월~현재: 공주대학교 정보통신공학부 전임강사
[주 관심분야] 전자기 수치 해석, 무선통신

육 종 관



1987년: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1989년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1998년: University of Michigan 전기전자공학과 (공학박사)

1997년 1월~1998년 10월: University of Michigan Research Fellow

1998년 11월~1999년 2월: Qualcomm Inc. Senior Engineer

1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수

2000년 3월~2003년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 조교수

2003년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 부교수
[주 관심분야] 마이크로파 구조 해석 및 설계, RF MEMS, 박막공진 구조