

## 수정된 차폐효과 방정식을 이용한 다층 구조 도파관의 EMP 차폐 분석

### Analysis of EMP Shielding with Multi-Layered Waveguide-Below-Cutoff Array Using Modified Shielding Effectiveness Equation

김 상 인 · 김 유 나 · 육 종 관

Sangin Kim · Yuna Kim · Jong-Gwan Yook

#### 요 약

배기관 및 급수관에 사용되는 다층 구조 도파관은 공정의 이점 및 유속 손실을 줄이는 장점을 가진다. 또한, 겹치는 층의 수를 증가시켜 차폐효과를 보상할 수 있다. 하지만 다층 구조 도파관의 차폐효과를 기존의 차폐효과 방정식으로는 예측할 수 없음에서 발생하는 적용 한계를 극복하기 위해, 수정된 차폐효과 방정식을 제안하였다. 수정된 차폐효과 방정식은 다층 구조 도파관 내부가 공기로 채워진 경우와 특정 매질이 채워졌을 경우로 나누어서 2층 구조에서부터 64층 구조까지 증가시켜 결과를 얻어냈다. 또한, 결과의 타당성을 증명하기 위하여 시뮬레이션 결과와 비교하여 제안된 차폐효과 방정식이 일치하는 것을 확인하였다.

#### Abstract

Multi-layered Waveguide-Below-Cutoff Array(WBCA) used in air duct and water pipe has advantages in manufacturing process as well as flow characteristics. In addition, it is possible to increase the Shielding Effectiveness(SE) by increasing the number of layers. However, since the SE of the multi-layered WBCA can not be predicted by the conventional SE equation, we propose the modified SE equation. The modified SE equation is obtained for both air and arbitrary fluid flowing in a multi-layered WBCA by increasing the number of layers from 2 to 64. In order to confirm the validity, the results of the proposed SE equations are compared with the EM simulation results.

Key words: EMP, Shielding Effectiveness, Shielding Equation, Waveguide, Multilayer, Honeycomb

#### I. 서 론

현재 사회는 Electromagnetic Pulse (EMP) 공격에 대한 위협이 증가함에 따라 방호기술이 대두되고 있으며, 특히 군사 및 정보통신 건축물에 대한 방호설계가 필수로 자

리잡고 있다<sup>[1]</sup>. EMP 공격에 노출된 부분에 대해서 차폐물을 설계하여 피해를 예방하며, 차폐물의 차폐정도를 나타내는 척도로 차폐효과(Shielding Effectiveness: SE)가 쓰인다. 대부분 건축물의 이음새나 결함부 및 개구부를 통해서 전자기파가 투과되므로 각 부분에 대해서 차폐 벽

「본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(과제번호 15CTAP - C098186-01)에 의해 수행되었습니다.」

연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

· Manuscript received April 19, 2017 ; Revised June 6, 2017 ; Accepted June 9, 2017. (ID No. 20170419-038)

· Corresponding Author: Jong-Gwan Yook (e-mail: jgyook@yonsei.ac.kr)

이나 차폐구조물을 인입하여 피해를 차단한다<sup>[2]</sup>. 기존에 사용되는 차폐방법으로 도파관 창문이나 단일 도파관 배열 및 허니컴 도파관을 이용하여 차폐효과를 높이는 방법이 제시되었다<sup>[3]~[7]</sup>. 하지만 이러한 차폐방법들이 배기관이나 급수관과 같은 유속을 고려해야 되는 부분에 사용될 경우, 본래의 배기 및 급수역할을 방해하는 요소가 되기도 한다. 따라서 새로운 구조의 차폐물을 사용해야 하며, 그 방법 중 하나로 다층 구조 도파관이 사용된다<sup>[8]</sup>. 다층 구조 도파관은 기존의 단일 도파관 배열에 비해 공정의 이점을 가지며 유속 손실을 줄이는 장점을 가지고 있다. 또한, 겹치는 층을 증가시켜 차폐효과를 일정 수준으로 보상할 수 있으므로 건축방호시설에서 유용하게 쓰이게 된다. 하지만 이러한 다층 구조 도파관을 설계할 때, 다층 구조 도파관의 차폐효과를 예측하기 위해서는 EM 시뮬레이션 도구를 이용한 시뮬레이션을 통해 오랜 시간이 걸린 후 결과 값을 얻어낼 수 있으므로 건축 및 전기전자 분야에서 적용하는데 한계로 작용한다.

따라서 본 논문에서는 차폐방법으로 사용되는 다층 구조 도파관을 고려함으로써 시뮬레이션 없이 수정된 차폐효과 방정식을 통하여 차폐효과를 예측하는 방법을 제시하였다. 또한, 다층 구조 도파관 내부에 상태에 따라서 공기가 채워졌을 경우와 다른 유체가 채워졌을 경우를 고려하여 시뮬레이션과의 비교 분석을 통해 방정식의 타당함을 증명하였다.

## II. 다층 구조 도파관의 차폐 방정식

### 2.1 단일 사각형 도파관 배열 차폐 방정식

외부에서 발생된 전자기파는 그림 1과 같은 단일 사각형 도파관 배열을 통과하게 되면서 감쇠 하게 된다. 전자기파가 통과되는 영역에 따라서 그림 2와 같이 정의할 수 있으며, 차폐효과는 입사되는 전자기파와 투과되는 전자기파의 비율로 나타낼 수 있다. 식 (1)은 차폐효과의 정의가 된다.

$$SE = 10 \log \frac{P_i}{P_t} = 20 \log \frac{E_i}{E_t} \quad (1)$$

이때, 단일 사각형 도파관 배열에 입사되는 전자기파

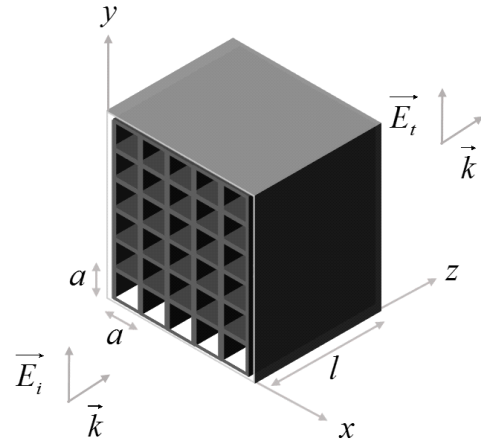


그림 1. 단일 사각형 도파관 배열

Fig. 1. Unit rectangular WBCA.

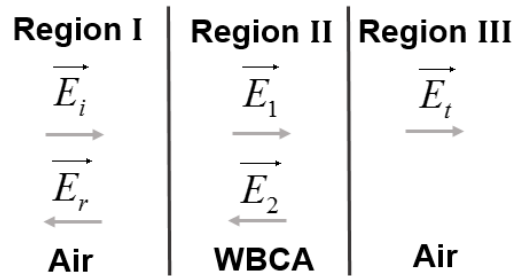


그림 2. 영역에 따른 전기장 정의

Fig. 2. Definition of E-field with region.

가 평면파로 입사된다고 정의하게 되면, 각 영역에서의 전자기파는 경계조건을 만족해야 한다. 즉, 영역 I과 영역 II가 만나는 지점 및 영역 II와 영역 III이 만나는 지점에서의 전기장과 자기장이 연속적이어야 되며, 이를 다음 식 (2)~식 (5)와 같이 표현한다. 이때, 단일 사각형 도파관 배열 내부는 공기로 채워진 경우이다<sup>[9]</sup>.

$$E_i + E_r = E_1 + E_2 \quad (2)$$

$$\frac{E_i}{\eta_0} - \frac{E_r}{\eta_0} = \frac{E_1}{\eta_0} - \frac{E_2}{\eta_0} \quad (3)$$

$$E_1 + E_2 = E_t \quad (4)$$

$$\frac{E_1}{\eta_0} - \frac{E_2}{\eta_0} = \frac{E_t}{\eta_0} \quad (5)$$

위에서 나열된 식을 연립하여 입사되는 전자기파와 투과되는 전자기파의 비율을 나타낼 수 있으며, 단일 사각형 도파관 배열의 차폐효과는 다음과 같이 방정식으로 정의된다<sup>[9],[10]</sup>.

$$SE = R + A = 20 \log \left| \frac{(\eta_0 + \eta_0)^2}{4\eta_0\eta_0} \right| + 20 \log e^{\alpha l} + 20 \log \frac{2ka}{\pi} \quad (6)$$

식 (6)에서  $R$ 은 Reflection loss에 의해 발생한 차폐효과이며,  $A$ 는 Absorption loss에 의해 발생한 차폐효과를 나타낸다. 또한,  $a$ 는 단일 사각형의 한 변의 길이이고,  $l$ 은 도파관 전체길이를 나타내며,  $k$ 는 파수이다.  $\alpha$ 는 도파관 배열의 감쇠상수로 도파관이 금속일 경우  $\alpha$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \omega \sqrt{\epsilon \mu} \sqrt{\left( \frac{f_c}{f} \right)^2 - 1} \quad (7)$$

여기서  $f_c$ 는 단일 사각형의 차단 주파수를 의미한다. 따라서 단일 사각형 도파관 배열의 차폐효과 방정식은 식 (7)을 식 (6)에 대입하여 얻게 된다. 높은 차폐효과를 얻기 위해서는 한 변의 길이  $a$ 를 줄이거나, 도파관 전체 길이인  $l$ 을 늘려서 만족시킬 수 있다.

## 2-2 공기로 채워진 다층 구조 차폐효과 방정식

다층 구조 차폐 방정식은 2-1에서 구한 차폐효과 방정식에서부터 얻을 수 있다. 먼저 다층 구조 차폐 방정식은 도파관 내부의 물질에 따라서 변할 수 있으므로, 크게 공기인 경우와 다른 매질로 채워진 경우로 나눌 수 있으며, 먼저 공기로 채워진 경우에 대한 차폐효과 방정식을 유도할 수 있다.

다층 구조 도파관은 평행한 판들을 연결하여 설계할 수 있으며, 평행한 판의 방향에 따라서 세로형 직사각형 도파관과 가로형 직사각형 도파관으로 나누어진다. 그림 3은 2층 구조 도파관을 나타내고 있으며, 세로형 직사각형 도파관과 가로형 직사각형 도파관을 연결하여 설계된다. 단일 사각형 도파관 배열은 도파관 전체 길이  $l$ 을 통과하는 동안 전자기파의  $x$ 성분 및  $y$ 성분이 계속해서 감쇠되지만, 다층 구조 도파관일 경우, 통과되는 층 방향에

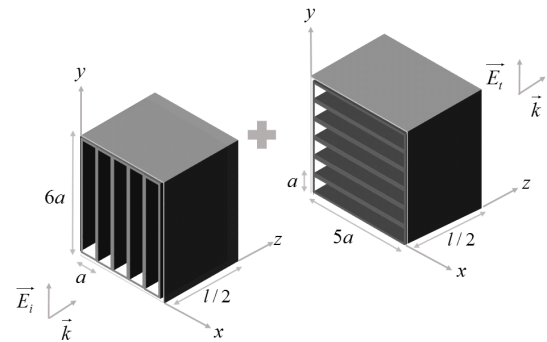


그림 3. 2층 구조 도파관  
Fig. 3. 2-layered WBCA.

따라서 동일한 방향에 대한 전자기파의 성분만이 감쇠되므로 단일 사각형 도파관 배열에 비해서 차폐효과가 상대적으로 낮아져서 더 긴 도파관 길이가 필요하다. 즉, 단일 사각형 도파관 배열을 2층 구조 도파관으로 등가화 하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있으며,  $l_2$ 는 항상  $l_1$ 에 비해서 길어야 된다. 따라서 다층 구조 도파관의 전체 길이를 다층화로 인한 감소 효과를 고려하여  $l_{eff}$ 로 표현하면 표1

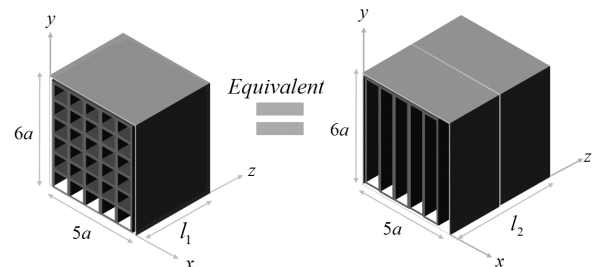


그림 4. 2층 구조 도파관의 등가화 모델  
Fig. 4. Equivalent model of 2-layered WBCA.

표 1. 다층에 따른  $C$  상수

Table 1.  $C$  coefficient with number of layers.

Number of layers	$C$
2	0.55
4	0.70
8	0.85
16	0.95
32	0.99
64	1.00

에 주어진  $C$ 와  $l$ 값의 곱으로 나타낼 수 있으며,  $C$ 는 curve fitting 방법을 통해 구하였으며, 겹치는 층이 증가할수록 1에 수렴하는 것으로 확인할 수 있다.

앞서 구한 단일 사각형 도파관 배열의 차폐효과 방정식의  $l$ 값을  $l_{eff}$ 으로 치환해주어 차폐효과 방정식을 수정한다. 식 (8)은 다층 구조 도파관의 차폐 방정식을 나타낸다.

$$SE = R + A = 20\log \left| \frac{(\eta_0 + \eta_0)^2}{4\eta_0\eta_0} \right| + 20\log e^{\alpha l_{eff}} + 20\log \frac{2ka}{\pi} \quad (8)$$

### 2.3 다른 매질로 채워진 다층 구조 차폐효과 방정식

다층 구조 도파관 내부가 비유전율이 1이 아닌 특정 매질로 채워지게 되면, 차폐효과 방정식은 변하게 된다. 기존에 내부가 공기였을 경우, 입사되는 영역과 투과되는 영역 또한 공기이므로 다중 반사효과가 나타나지 않게 된다. 본래의 차폐효과 방정식은 Reflection loss와 Absorption loss 및 Multiple-reflection loss로 나타내어진다. 그림 2와 같이 각각의 영역이 공기일 경우, Multiple-reflection loss는 0에 가까워지게 되어 생략된다. 하지만, 도파관 내부가 특정 매질로 채워지게 되면, 매질이 변하는 경계지점에서 다중 반사효과가 발생하여 차폐효과 방정식이 변하게 된다. 그림 5는 2층 구조 도파관 내부에 매질이 가득 채워진 상태를 나타낸다.

그림 6은 다층 구조 도파관 내부에 매질이 채워졌을 때를 도식화한 그림이다. 매질이 변하는 부분에서 다중 반

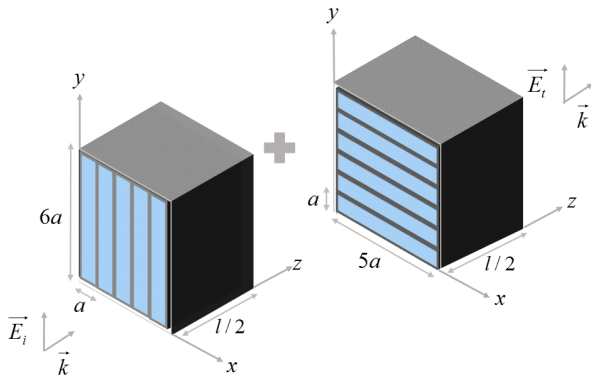


그림 5. 매질이 채워진 2층 구조 도파관  
Fig. 5. 2-layered WBCA filled medium.

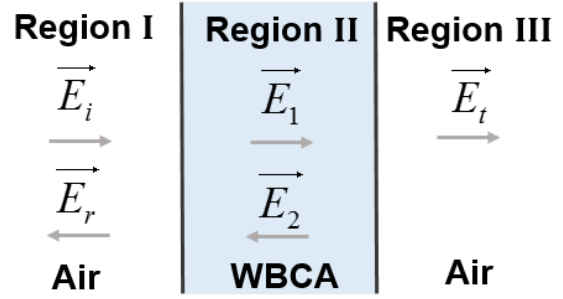


그림 6. 영역에 따른 전기장 정의  
Fig. 6. Definition of E-field with region.

사효과가 일어나는 것을 인지할 수 있으며, 각 영역에서의 전자기파의 경계 조건을 적용하면 아래와 같이 연립 방정식이 나오게 된다.

$$E_i + E_r = E_1 + E_2 \quad (9)$$

$$\frac{E_i}{\eta_0} - \frac{E_r}{\eta_0} = \frac{E_1}{\eta} - \frac{E_2}{\eta} \quad (10)$$

$$E_1 + E_2 = E_t \quad (11)$$

$$\frac{E_1}{\eta} - \frac{E_2}{\eta} = \frac{E_t}{\eta_0} \quad (12)$$

여기서  $\eta$ 는 매질에서의 임피던스를 나타낸다. 즉, 매질이 차 있는 부분에서의 임피던스가 변하게 되며, 입사되는 전자기파와 투과되는 전자기파의 비율로 나타내어 연립 방정식을 풀면, 차폐효과 방정식은 아래와 같이 표현된다. 이 경우 다중 반사효과만 추가 적용되므로 표 1의 다층에 따른  $C$  상수는 유효하게 적용된다.

$$SE = R + A + M = 20\log \left| \frac{(\eta_0 + \eta)^2}{4\eta_0\eta} \right| + 20\log e^{\alpha l_{eff}} + 20\log \frac{2ka}{\pi} + 20\log(1 - R^2 e^{-2\alpha_w l_{eff}} e^{-2\beta_w l_{eff}}) \quad (13)$$

$\alpha_w$ 와  $\beta_w$ 는 매질에서의 감쇠상수와 위상상수를 나타낸다. 식 (6)에서 추가된  $M$  부분이 다중 반사효과로 인한 차폐효과를 나타낸다. 다중 반사효과는 다층 구조 도파관의 차단 주파수 이하, 이상에 따라서 그 효과가 변하게 된다. 또한, 차단 주파수 전에서는 다층에 따라서 다중

표 2. 다층에 따른  $\beta$  상수Table 2.  $\beta$  coefficient with number of layers.

N(Number of layers)	$\beta$
2	$\omega \sqrt{\epsilon \mu}$
4	$\omega \sqrt{\epsilon \mu} / 2$
8	$\omega \sqrt{\epsilon \mu} / 4$
16	$\omega \sqrt{\epsilon \mu} / 8$
32	$\omega \sqrt{\epsilon \mu} / 16$
64	$\omega \sqrt{\epsilon \mu} / 32$

반사효과 정도가 변하게 된다. 이러한 이유는  $\beta$  값이 다층에 따라서 변하기 때문이다. 다층이 적을수록 내부 도체 평판 효과가 줄어들어 차단 주파수 전에서의 다중 반사 효과가 커지며, 다층이 증가할수록 차단 주파수 전에서의 다중 반사 효과가 줄어들게 된다. 이러한  $\beta$ 의 변화는 다층 개수에 반비례하며, 2층의  $\beta$  값을 기준으로  $N$ 에 반비례하게 감소함을 표 2에서 정의할 수 있다.

즉, 표 2의  $\beta$  상수를 식 (6)에 대입하면 다층 구조 도파관 내부에 매질이 채워졌을 경우에 대한 차폐효과 방정식이 정의된다.

### III. 다층 구조 도파관의 시뮬레이션 및 차폐방정식 결과 비교

다층 구조 도파관에 대한 차폐효과 방정식의 결과 값은 FEM 시뮬레이션과의 비교를 통하여 타당함을 확인하였다. 시뮬레이션 조건으로는 세로형 및 가로형 직사각형 도파관의 각각의 가로길이를 세로길이인  $a$ 를 10 mm로 지정하였으며, 도파관의 전체길이는  $l$ 을 35 mm로 지정하였다. 시뮬레이션 결과는 도파관 내부가 공기로 채워졌을 경우와 물로 채워졌을 경우로 나누어서 진행하였다.

#### 3-1 공기에서의 차폐효과

공기에서의 다층 구조 도파관은 2층 구조부터 64층 구조까지 진행되었으며, 주파수는 2 GHz까지로 진행되었다. 그림 7은 시뮬레이션과 수정된 차폐효과 방정식을 통해 비교한 그래프이다.

그래프의 선들은 시뮬레이션을 통한 결과이며, 도형들

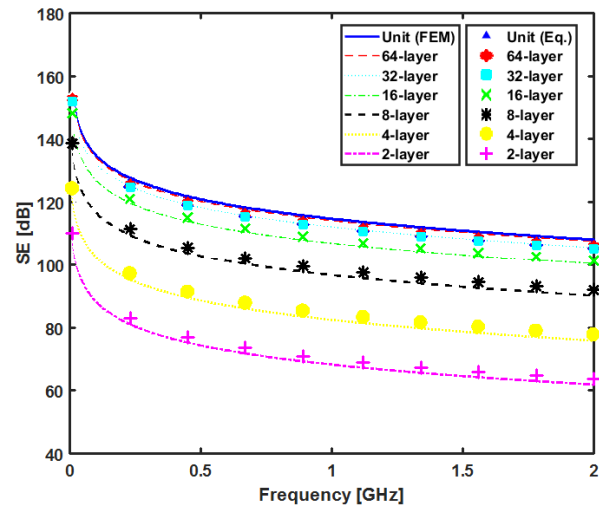


그림 7. 단일 및 다층 구조 도파관의 시뮬레이션 및 수정된 차폐 방정식 결과 비교

Fig. 7. Comparison of results between simulation and modified SE equation with unit and multi-layered WBCA.

은 수정된 차폐효과 방정식을 통하여 얻은 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 결과 값이 일치하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 다층이 증가할수록 차폐효과가 증가하게 되며, 일정 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이 경우, 다층 구조 도파관의 차단 주파수를 구하게 되면  $f_c = \frac{c}{2a} = 15$  GHz로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

#### 3-2 물에서의 차폐효과

다음으로는 도파관 내부가 매질로 채워졌을 경우에 대한 차폐효과에 대한 비교이다. 이때, 매질은 순수한 물로 설정하였으며,  $\epsilon_r = 81$ 로 주어진다.  $\epsilon_r$  값이 변하므로, 차폐효과에서는 차단 주파수가 1/9로 줄어들게 되며, 다중 반사효과가 추가되게 된다. 이 경우에도 다층 구조 도파관은 2층 구조부터 64층 구조까지 진행되었으며, 주파수는 2 GHz까지로 진행되었다. 그림 8은 도파관 내부에 물이 채워졌을 경우에 대한 시뮬레이션과 수정된 차폐효과 방정식을 통해 비교한 그래프이다.

결과에서 볼 수 있듯이, 다층 구조 도파관의 차단 주파수가  $f_c = \frac{v}{2a} \approx 1.7$  GHz으로 감소한 것을 확인할 수 있다. 또한, 차단 주파수 이하에서 다중 반사효과가 나타

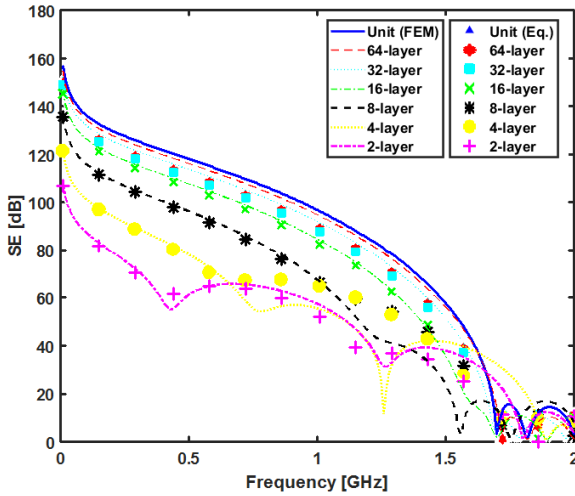


그림 8. 물에서의 단일 및 다층 구조 도파관의 시뮬레이션 및 수정된 차폐 방정식 결과 비교

Fig. 8. Comparison of results between simulation and modified SE equation with unit and multi-layered WBCA in water.

나는 것을 확인할 수 있는데, 다층 구조가 적은 2층 구조 일 경우 효과가 많이 반영이 되었으며, 64층 구조로 증가할수록 효과가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 차폐효과 방정식에 추가된  $M = 20 \log(1 - R^2 e^{-2\alpha_w l_{eff}} e^{-2\beta_w l_{eff}})$  효과에 의해서 시뮬레이션 결과와 차폐효과 방정식 결과가 일치하는 것을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 EMP 차폐에 사용되는 다층 구조 도파관의 차폐효과를 예측하기 위해 수정된 차폐효과 방정식을 정의하였다. 기존에 사용되는 단일 사각형 도파관 배열의 차폐효과 방정식을 기반으로 수정하여 2층 구조부터 64층 구조까지의 방정식을 구할 수 있었다. 또한, 도파관 내부에 비유전율이 1이 아닌 매질이 채워졌을 경우, 다중 반사효과 및 차단 주파수에 대한 변화를 고려하여 더 넓은 범위에서 사용될 수 있도록 방정식을 수정하였다. FEM 시뮬레이션 결과와 비교하였을 때, 수정된 차폐효과 방정식의 결과 값이 일치하는 것을 확인하였다.

건축설계 상황을 고려하여 적절한 다층 구조 도파관을 제작할 경우, 제안된 수정된 차폐효과 방정식을 사용하면

시뮬레이션 없이 결과 값을 예측할 수 있으므로, 전기전자 분야뿐 아니라, EMP 건축 설비분야에서도 많은 이점을 얻게 될 것이다.

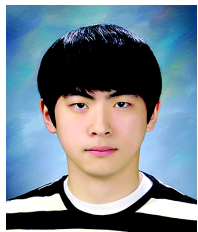
#### References

- [1] 서만중, 지서원, 김영진, 박우철, 강호재, 허창수, "EMP 방호시설의 전자파 차폐효과 측정 방법", 한국전자파 학회논문지, 25(5), pp. 548-558, 2014년 5월.
- [2] 허창수, "EMP 방호시설의 전기 설계 주요 사항", 전자파기술, 23(4), pp. 16-23, 2012년 7월.
- [3] X. Jin-shi, L. Wen-hua, Z. Shi-Ying, and Z. Jin-Hua, "Simulation of high power EMP effects on a cylinder object with openings using FDTD method", *IEEE Microwave and Millimeter Wave Technology(ICMMT)*, pp. 1865-1858, May 2010.
- [4] C. Fang, Q. Zhang, H. Tan, D. Wen, D. E Wen, and D. Xie, "Computation of shielding effectiveness of a rectangular case with MLFMM between 0~5 GHz", *IEEE Microwave and Millimeter Wave Technology(ICMMT)*, pp. 1817-1820, May 2010.
- [5] C. Fang, Q. Zhang, and D. Xie, "Simulation of shielding characteristic of a typical decay waveguide window for EMP." *IEEE Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, pp. 780-783, Sep. 2010.
- [6] 현세영, 이경원, 김민석, 육종관, "철근 콘크리트에 의한 전자기파 차폐 효과 모델링", 한국전자파학회논문지, 23(3), pp. 384-391, 2012년 3월.
- [7] 방승기, 김재훈, "EMP 방호시설의 덕트 및 배관최적 설계 방안", 한국지열에너지학회논문집, 10(4), pp. 15-24, 2014년 12월.
- [8] 김상인, 김유나, 방승기, 김석봉, 육종관, "다층 구조를 이용한 도파관 배열의 EMP 차폐성능과 유동 분석", 한국전자파학회논문지, 27(8), pp. 735-741, 2016년 8월.
- [9] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, John Wiley and Sons, Inc., 1992.
- [10] W. A. Bereuter, D. Chang, "Shielding effectiveness of metallic honeycombs", *IEEE Transactions on EMC*, Feb. 1982.



- [11] D. M. Pozar, *Microwave Engineering* Reading, MA: Addison-Wesley, pp. 106-116, 1990.
- [12] 이경원, 정영철, 홍익표, 육종관, "수정된 설계 방정식을 이용한 허니컴 구조의 차폐 효과 예측", 한국전자과학회논문지, 16(9), pp. 862-871, 2005년 9월.
- [13] 방승기, 김재훈, 육종관, 김유나, 김상인, 김석봉, "도파관 배열이 설치된 비상발전기 연도의 유속 예측 및 EMP 차폐평가", 한국지열에너지학회논문집, 12(1), pp. 1-6, 2016년 2월.
- [14] 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.
- [15] Donald R. J. White, Michel Mardiguian, "A handbook series on electromagnetic interference and compatibility, electromagnetic shielding", *Interference Control Technologies Inc.*, Gainesville, Virginia, vol. 3, 1988.
- [16] Leland H. Hemming, "Applying the waveguide below cut-off principle to shielded enclosure design", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Aug. 1992.

#### 김 상 인



2015년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)  
 2015년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석박사 통합과정  
 [주 관심분야] HEMP, 전자파 차폐, 생체 신호 측정 센서, RF System, RF Component

#### 육 종 관



2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수  
 2012년~2013년: IEEE Distinguished Lecturer (EMC Society)  
 [주 관심분야] 수치해석, 마이크로파 구조 해석 및 설계, EMI/EMC, HEMP, RF 바이오/가스센서 등

#### 김 유 나



2012년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)  
 2012년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석박사 통합과정  
 [주 관심분야] 수치해석, 전자파 차폐, 열 해석, 다중물리해석, 플라즈마, 레이더