

## EMP 차폐 도파관의 형상 결정 가이드라인 작성

방승기<sup>†</sup> · 김재훈 · 육종관\* · 김유나\* · 김상인\*

경민대학교 건축과, \*연세대학교 전기전자공학과

(2016년 2월 23일 접수, 2016년 3월 17일 수정, 2016년 3월 18일 채택)

## Design Guideline of Waveguide-Below-Cutoff Array for Electromagnetic Pulse Shielding

Seung-Ki Pang<sup>†</sup>, Jae-Hun Kim, Jong-Gwan Yook\*, Yuna Kim\*, Sangin Kim\*

Department of Architecture, KyungMin College, Uijeongbu

\*Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul

(Received 23 February 2016, Revised 17 March 2016, Accepted 18 March 2016)

### 요 약

본 논문에서는 건축 관련 기술자들이 쉽게 사용할 수 있는 도파관 배열의 길이를 계산하는 가이드라인을 제시하였으며, 대상은 원형, 사각형 및 육각형 도파관을 단위 유닛으로 하는 배열이다. 본 가이드라인은 원형 도파관의 지름, 사각형 도파관의 가장 긴 변의 길이 및 육각형 도파관의 장축의 길이를 기준으로 간단하게 각 도파관 배열의 길이를 결정할 수 있는 그래프와 Table을 제시하는 것을 목표로 하였다. 연구결과, 지름 및 가장 긴 변의 길이, 장축의 길이를 30 mm로 기준으로 하면, 차폐성능이 80 dB의 효과를 목표로 하면 육각형 도파관 배열의 길이가 사각형 도파관보다 5 mm 정도 짧아지게 된다. 또한 100 dB 차폐 성능을 목표로 할 경우 30 mm정도 짧은 것으로 나타났다. 원형 도파관을 비교하면 80 dB와 100 dB 모두 육각형 형태의 도파관을 사용하는 것이 도파관 배열의 길이를 13 mm 정도 단축시킬 수 있다. 따라서 동일한 차폐성능을 가지는 경우 압력손실을 고려하면 육각형 도파관을 사용하는 것이 가장 효율적 일것으로 판단된다.

**주요어** : 전자기파, 덕트, 도파관, 도파관 배열, 전산유체역학, 차폐효과

**Abstract** - Convenient design guideline for Waveguide-below-cutoff (WBC) array is proposed to obtain the minimum waveguide length for electromagnetic pulse (EMP) shielding. The analysis includes circular, rectangular, and hexagonal WBC, determine the total length of the waveguide. When the unit side of rectangular WBC and the diagonal line of hexagonal WBC are given as 30 mm, the length of hexagonal WBC is 5 mm shorter than rectangular case with shielding effectiveness (SE) 80 dB. The length difference is deepened with SE of 100 dB, which shows approximately 30 mm shorter length for hexagonal case than others. In addition, hexagonal WBC requires much shorter length than circular WBC. In conclusion, hexagonal case is the most effective with respect to flow velocity and pressure loss for equivalent SE.

**Key words** : EMP, Duct, Waveguide-Below-Cutoff, WBC Array, CFD, Shielding effectiveness

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
Department of Architecture, Kyungmin College, Uijeongbu,  
11618, Korea  
Tel : +82-31-828-7322 E-mail : skpang@kyungmin.ac.kr

## 1. 서론

EMP 차폐를 위한 보호시설은 외부에 직접 면하는 외기도입구 또는 외기도입 덕트에 EMP 차폐용 도파관배열(Waveguide-Below-Cutoff array, WBCA)을 설치하는 것이 권장 된다.

도파관의 형태는 일반적으로 사각형, 육각형 및 원형이 일반적이다. 그러나 외기를 도입하는 경우 원형 도파관을 사용하면 원형 도파관 사이에 격벽이 육각형 형태의 도파관과 사각형 형태의 도파관에 비해 크게 된다. 따라서 원형 도파관을 사각형 덕트와 외기도입구에 사용하게 되면 사각형이나 육각형 형태의 도파관에 비해 압력손실에 따른 속도저하가 발생할 가능성이 크다.

차폐효과 (Shielding Effectiveness, SE)는 원형도파관의 경우는 도파관의 지름, 도파관 배열의 길이와 주파수 등 여러 변수가 사용되고, 사각형 도파관과 육각형 형태의 도파관은 가장 긴 한 변의 길이, 장축의 길이 및 도파관 배열의 길이 등의 값을 고려한다. 이러한 차폐효과를 구하는 방정식은 수식이 복잡하여 전기 및 전자분야의 전문가가 아닌 현장의 건축 기술자들이 사용하기에는 다소 무리가 있다.

따라서 본 연구에서는 현장에서 근무하는 건축 관련 기술자들이 쉽게 접근할 수 있는 원형 도파관의 지름, 사각형 도파관의 가장 긴 한 변의 길이 및 육각형 도파관의 장축의 길이를 이용하여 차폐효과에 따른 각 형태의 도파관 배열의 길이를 간단히 결정할 수 있는 가이드라인을 제시하는 것을 목표로 한다.

## 2. EMP 차폐

EMP 차폐가 필요한 시설의 차폐성능 기준에 대한 국내 기준이 전무하기 때문에 미국의 국방기준인 MIL-STD-188-125-1을 사용 한다. EMP 차폐성능은 투과되는 전자기파와 입사된 전자기파와의 크기를 이용하여 표기하며 차폐성능의 정도를 나타내기 위해서 차

**Table 1.** Constants for SE equation

Pattern	A	B	a
Circular	31.95	175800	Diameter
Rectangular	27.3	150000	Unit side
Hexagonal	17.5	96659	Diagonal line

폐효과를 사용한다.

도파관의 형태에 따라 사용하는 차폐효과방정식의 값이 달라지며 (식1)에는 원형도파관, 사각형 도파관 [1] 및 육각형 도파관의 방정식[2]을 나타내었다. Table 1은 각각의 도파관 형태에 따른 변수를 나타낸다.

$$SE = A \frac{l}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{af}{B}\right)^2} - 20 \log N \quad (\text{식1})$$

여기서,  $l$  : 도파관 배열의 전체길이

$f$  : 주파수  $N$  : 도파관의 개수

(식1)에서 도파관의 개수가 증가하게 되면,  $N$ 과 무관한 형태로 방정식이 변하게 되며, (식2)와 같은 형태로 계산할 수 있다.[3]

$$SE = A \frac{l}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{af}{B}\right)^2} - 20 \log \frac{2ka}{\pi} \quad (\text{식2})$$

여기서,  $k$ : 파수 (wave number)

(식1)과 (식2)에서 도파관의 길이  $l$ 이 커지면 차폐효과는 커지게 되며 도파관의  $a$ 가 커지면 차폐효과가 감소한다.[4]

## 3. 도파관의 크기에 따른 차폐효과

Fig. 1은 원형 도파관 배열의 경우 차폐효과 당 도파관 배열의 최소 필요 길이를 나타낸 것으로 x축은 원형 도파관의 지름, y축은 도파관 배열의 최소 필요 길이(mm)를 나타낸 것이다. Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 원형 도파관의 경우 지름이 커지게 되면 도파관 배열의 필요길이가 증가하게 되며, 차폐효과 값이 커지게 되면 배열의 필요길이가 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 2에는 실용적으로 많이 사용하는 지름 50 mm 이하의 원형 도파관 배열의 경우, 차폐효과 값과 도파관 지름에 따른 결과를 나타내었다. 원의 지름이 30 mm인 경우, 도파관 배열의 길이는 80 dB의 차폐효과를 얻으려면 70 mm 정도의 도파관 배열의 길이가 필요하게 되며, 100 dB의 차폐효과를 얻으려면 88 mm의 길이가 필요한 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 사각형 도파관 배열을 사용하는 경우 가장 긴 한 변의 길이와 원하는 차폐효과를 선택하여 도파

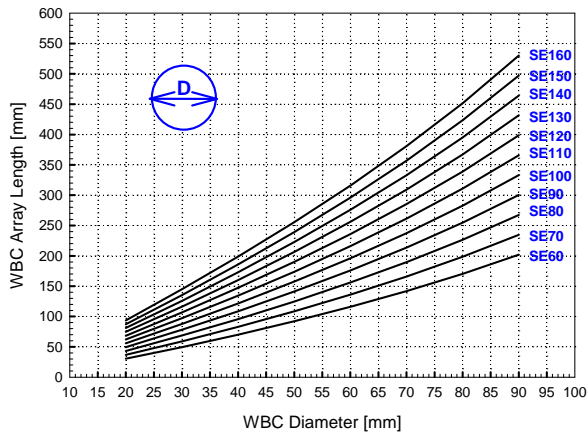


Fig. 1. Minimum length for various SE in circular WBCA

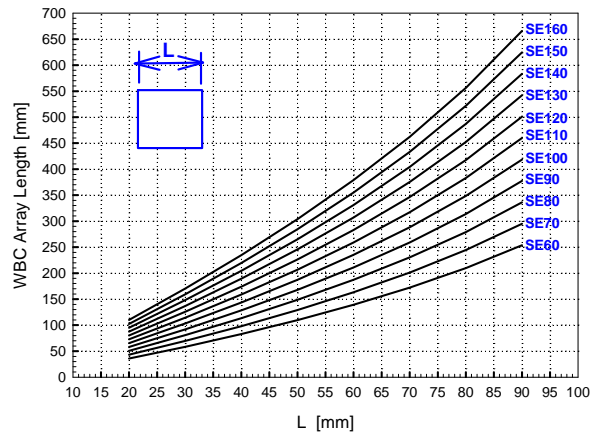


Fig. 3. Minimum length for various SE in rectangular WBCA

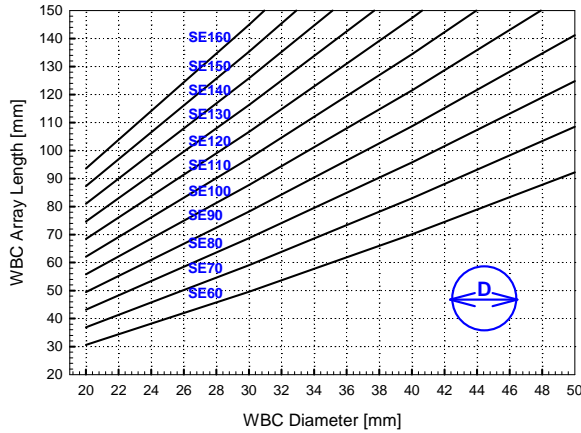


Fig. 2. Zoom in the Fig. 1

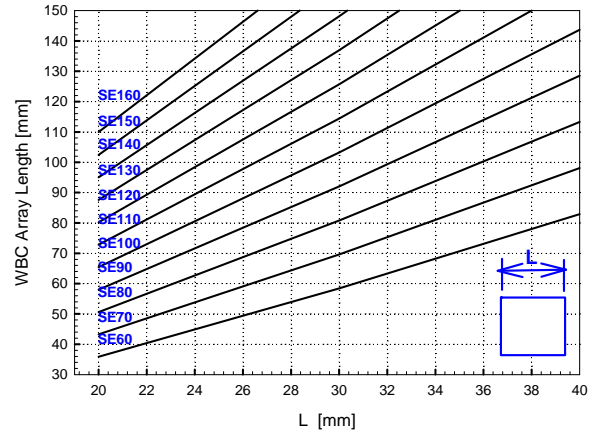


Fig. 4. Zoom in the Fig. 3

관 배열의 최소 필요길이를 구하는 것을 나타낸 것이다. Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 x축에서 사각형의 가장 긴 한 변의 길이를 선택하고 차폐효과 값을 선택하면 y축에서 도파관 배열의 최소 필요길이를 구할 수 있다.

Fig. 4는 가장 긴 한 변의 길이가 40 mm이하인 경우를 확대해서 나타낸 것으로 사각형의 가장 긴 한 변의 길이가 30 mm인 경우, 차폐효과 값을 100 dB로 선택하면 도파관 배열의 최소 필요길이는 103 mm 이상이며, 차폐효과 값을 80 dB로 선택하면 도파관 배열의 최소 필요길이는 80 mm 정도인 것을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 육각형 도파관 배열의 최소 필요 길이를 구하는 것을 나타낸 것으로 Fig. 1과 Fig. 3의 원형, 사각형 도파관 배열의 길이를 구하는 방법과 동일하게 표현할 수 있다. Fig. 6에서 육각형의 장축의

길이가 30 mm 일 때, 80 dB의 차폐효과를 얻으려면 도파관 배열의 최소 길이는 57 mm이며, 100 dB의 차폐효과를 얻으려면 도파관 배열의 길이는 75 mm의 길이가 필요한 것을 알 수 있다.

따라서 사각형 도파관의 경우와 비교하면 80 dB의 차폐효과를 얻는 경우에는 육각형 도파관을 사용하면 5 mm 정도 도파관 배열의 길이가 짧아지게 되며, 100 dB의 차폐효과를 얻는 경우에는 육각형 도파관을 사용하는 것이 30 mm 정도 짧게 나타나는 것을 알 수 있다. 원형과 육각형의 경우 80 dB와 100 dB 모두 육각형 도파관을 사용하는 것이 도파관 배열의 길이가 13 mm 짧아지는 것을 알 수 있다.

따라서 형태와 제작의 용이성 및 압력손실 등을 제외하고 도파관 배열의 길이만을 단순히 비교하면 육각형 형태의 도파관 배열을 사용하는 것이 공간의 절

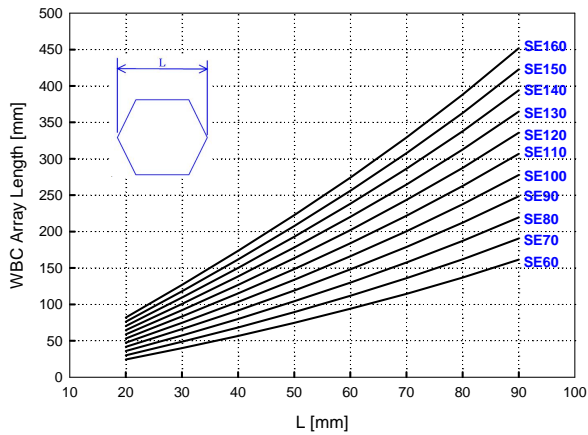


Fig. 5. Minimum length for various SE in hexagonal WBCA

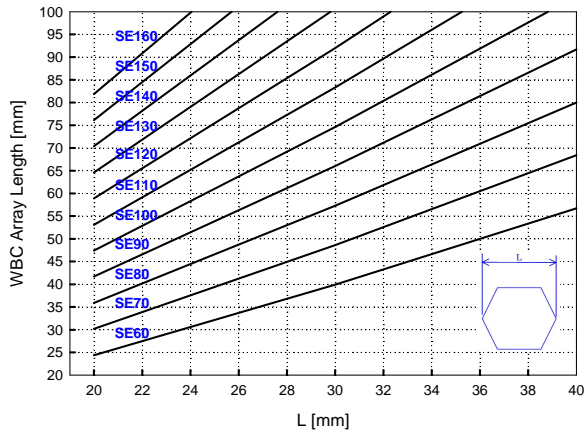


Fig. 6. Zoom in the Fig. 5

약측면에서 가장 효율이 좋을 것으로 판단된다.

#### 4. 차폐효과에 따른 형상 결정

##### 4-1. 차폐효과에 따른 도파관배열 길이

Table 2-Table 4는 원형, 사각형 및 육각형 도파관의 도파관 배열의 길이를 구하는 식을 나타낸 것이다. 앞에서 나타낸 식(1)~식(3)은 변수의 입력 등이 복잡하여 사용하기 어려운 측면이 있어 간단하게 1차원 수식으로 나타내었다.

Table 2에서 지름이 50 mm인 경우는 “도파관 배열의 길이 = -5.7509 + 1.6324 × SE값”으로 계산할 수 있으며, 원하는 차폐효과 값을 수식에 적용하여 간단하게 도파관 배열의 길이를 구할 수 있다.

원형 도파관을 사용할 경우와 육각형 도파관을 사용할 경우에도 동일한 방법으로 도파관 배열의 길이

Table 2. Minimum length required in circular WBCA with diameter

Diameter [mm]	Length of WBCA[mm]	R <sup>2</sup>
90	$y = 5.1000 + 3.2800x$	0.99
80	$y = 1.5809 + 2.8119x$	
70	$y = -1.3882 + 2.3879x$	
60	$y = -3.8600 + 1.9978x$	
50	$y = -5.7509 + 1.6324x$	
40	$y = -7.0400 + 1.2858x$	
30	$y = -7.5527 + 0.9525x$	
20	$y = -7.200 + 0.6300x$	

Table 3. Minimum length required in rectangular WBCA with unit side

Unit side [mm]	Length of WBCA[mm]	R <sup>2</sup>
90	$y = 6.5282 + 4.1208x$	0.99
80	$y = 1.9400 + 3.4642x$	
70	$y = -1.7073 + 2.8989x$	
60	$y = -4.6636 + 2.3982x$	
50	$y = -6.8536 + 1.9426x$	
40	$y = -8.3000 + 1.5200x$	
30	$y = -8.9045 + 1.1214x$	
20	$y = -8.5736 + 0.7401x$	

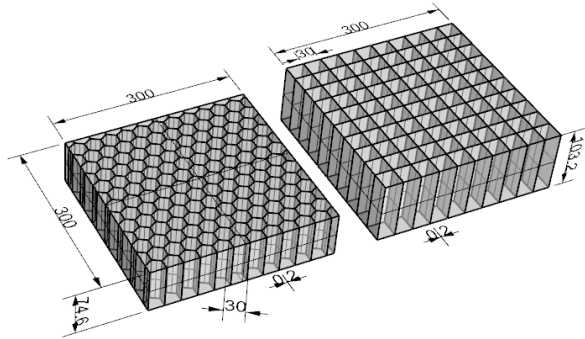
를 구할 수 있으며 수식에서 “x”는 차폐효과를 의미한다.

##### 4-2. 유동해석

Table 4과 Fig. 6에서 차폐효과 성능 100 dB인 육각형 도파관의 장축의 길이가 30 mm이면, 도파관 배열의 길이는 74.6 mm이다(Fig. 7). 동일한 차폐효과 성능을 갖는 100 dB급 사각형 도파관 배열의 길이는 103.2 mm가 된다. 또한 도파관 1개당의 공기유동 통로의 면적은 육각형 도파관의 경우는 584.6 mm<sup>2</sup>이며, 사각형 도파관은 900 mm<sup>2</sup>이다. 도파관 배열의 크기가 300×300 mm일 때 공기유동의 통로가 되는 총 입

**Table 4.** Minimum length required in honeycomb WBCA with diagonal line

Diagonal line[mm]	Length of WBCA[mm]	R <sup>2</sup>
90	$y = -12.9209 + 2.9057x$	0.99
80	$y = -13.7082 + 2.5108x$	
70	$y = -14.2209 + 2.1457x$	
60	$y = -14.3209 + 1.8030x$	
50	$y = -14.0964 + 1.4787x$	
40	$y = -13.3882 + 1.1679x$	
30	$y = -12.1309 + 0.8676x$	
20	$y = -3.3808 + 0.7760x$	

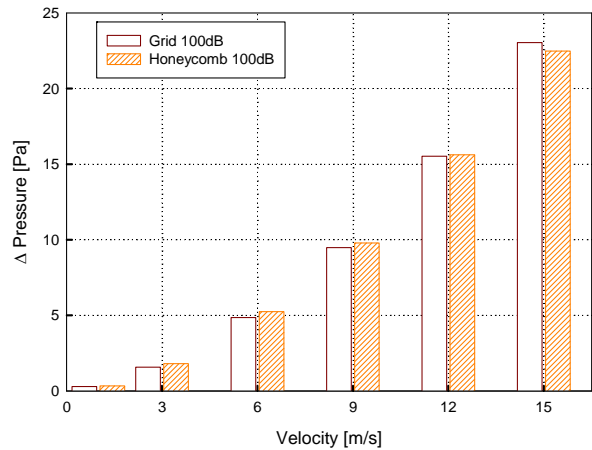


**Fig. 7.** Modeling of WBCA

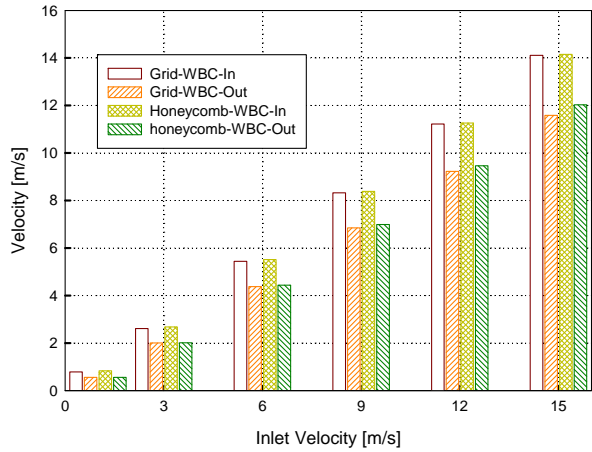
구면적인 육각형의 도파관 배열은 88,867.9 mm<sup>2</sup>, 사각형 도파관 배열은 88,950.27 mm<sup>2</sup>이다.

평가를 위한 CFD 시뮬레이션은 외부로부터 유입되는 공기의 속도를 1, 3, 6, 9, 12 m/s 및 15 m/s인 경우를 대상으로 하였으며 2가지 모델에 대해서 각각 6case씩 총 12case를 해석하였다. 해석 항목은 도파관 배열에서의 압력손실과 도파관 배열 입구 및 출구에서의 평균 유속이다.

Fig. 8은 WBC 입구와 출구에서의 평균 압력손실을 비교한 것이며 Fig. 9는 WBC 입구와 출구에서의 평균유속을 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 평균 압력손실은 육각형의 도파관을 사용한 경우가 저속에서는 평균압력손실이 사각형 형태의 도파관을 사용한 경우보다 다소 크게 나타났다. 하지만 입구의 유속이 9 m/s를 넘게 되면 육각형의 도파관의 압력손실이 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 평균유속은 WBC의 입구에서 도파관의 형태에 따라 거



**Fig. 8.** Averaging pressure loss in entrance and exit of WBCA



**Fig. 9.** Averaging velocity of flow loss in entrance and exit of WBCA

의 차이가 없으며 출구에서는 육각형 형태의 도파관을 사용한 경우가 더 큰 값을 보였다. 따라서 동일한 차폐효과 성능을 갖는 육각형과 사각형 형태의 도파관인 경우 육각형의 도파관을 사용하는 것이 평균유속 및 평균 압력손실을 고려한다면 유리한 것으로 판단할 수 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는 건축분야의 기술자들이 사용할 수 있는 원형 도파관의 지름, 사각형 도파관의 가장 긴 변의 길이 및 육각형 도파관의 장축의 길이를 이용하여 간단하게 각 도파관 배열의 길이를 결정할 수 있는 가이드라인을 제시하는 것을 목표로 연구를 진행

한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) EMP 차폐를 위한 원형 도파관의 배열의 크기는 각 지름별로 차폐효과 값을 이용하여 표현할 수 있으며, 도파관 지름이 50 mm 이면 “배열의 길이 =  $-5.7509 + 1.6324 \times SE$  값”으로 나타낼 수 있다.
- (2) 사각형, 육각형 도파관의 경우도 원형 도파관과 동일한 형태로 배열의 길이를 차폐효과 값에 의한 1차원 함수로 표현할 수 있으며 이때 결정계수는 0.99로 매우 높게 나타났다.
- (3) 30 mm를 기준으로 하면, 육각형 도파관 배열을 사용하여 80 dB의 차폐효과를 얻는 경우, 사각형 도파관 배열보다 5 mm 정도 도파관 배열의 길이가 짧아지게 되며, 100 dB의 차폐효과를 얻는 경우에는 30 mm 정도 짧게 나타난다. 원형 도파관 배열의 경우와 비교하면 80 dB와 100 dB 모두 육각형 도파관 배열을 사용하는 것이 도파관 배열의 길이가 13 mm 가량 짧아지는 것을 알 수 있다.
- (4) 동일한 차폐효과 성능을 갖는 육각형과 사각형 형태의 도파관 배열인 경우 육각형 형태의 도파관 배열을 사용하는 것이 평균유속 및 평균 압력손실을 고려한다면 유리한 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호 15CTAP-C098186-01)에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Richard B. Schulz, V. C. Plantz, and D. R. Brush, (1988) Shielding theory and practice, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 30, no. 3.
2. Yi-Ru Jeong, Ic-Pyo Hong, Hueng-Jae Chun, Yong Bae Park, Youn-Jae Kim, Jong-Gwan Yook, (2014), Scattering analysis of curved FSS using Floquet harmonics and asymptotic wave-form evaluation technique, Steel and composite

structures.

3. W. A. Bereuter, D. Chang, (1982), Shielding effectiveness of metallic honeycombs, IEEE Transactions on EMC.
4. S.K.Pang, Y.T.Chae, J.G.Yook, Yuna Kim, Sangin Kim, (2015), Air Stream around EMP Protective Device for Emergency Power System, Proceedings of the Geothermal Energy Engineers, Vol. 1, Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Daejeon, Korea, pp.41-44.