Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering
Vol. 29, No. 7(2017), pp.366-372
ISSN 1229-6422(Print), 2465-7611(Online)
http://dx.doi.org/10.6110/KJACR.2017.29.7.366

도파관 배열에 의한 국부저항계수 산정

Evaluation of Local Loss Coefficients for Different Waveguide-Below-Cutoff (WBC) Arrays of Electromagnetic Pulse (EMP) Shied in Buildings

방승기(Seung Ki Pang)[1], **채영태**(Young Tae Chae)[2†]
[1]경민대학교 건축과, [2]청주대학교 건축공학과
[1]*Department of Architecture, Kyungmin University, Uijeongbusi, 11618, Korea*
[2]*Department of Architectural Engineering, Cheongju University, CheonjuSi, 28503, Korea*

(Received April 17, 2017; revision received May 1, 2017; Accepted: May 11, 2017)

Abstract The objective of this study was to characterize Waveguide-Blow-Cutoff (WBC) array for Electromagnetic Pulse (EMP) shield in air duct or water pipe, the typical pathway of pulse in indoor space with critical electronic device. A numerical investigation with three different WBC designs (circular, rectangular, and hexagonal or honeycomb) was conducted to satisfy recommended shielding effectiveness (SE) levels from 80 dB to 140 dB. Pressure drop between upstream and downstream of EMP shields based on WBC arrays was also investigated to understand air flow feature in air duct of HVAC system. Results showed that honeycomb geometry outperformed other shapes in terms of reducing the depth of EMP shield, thus providing better air flow in duct path with lower local loss coefficient in HVAC system under SE requirements.

Key words Waveguide below cutoff arrays(도파관), EMP shield(전자기파차폐), Pressure drop(압력변동), Local loss coefficient(국부저항계수), Computational fluid dynamics(전산유체역학)

† Corresponding author, E-mail: *ychae@cju.ac.kr*

기호설명

A : 도파관 형태계수 [-]
B : 도파관 형태계수 [-]
a : 도파관 단면 지수 [-]
l : 도파관 셀의 길이 [m]
f : 주파수 [Hz]
N : 도파관의 수 [EA]
$\triangle p_t$: 전압차 [Pa]
$\triangle p_{se}$: 배관내 유체의 부력압 [Pa]
ρ : 배관내 유체밀도 [kg/m^3]
V : 배관내 유체속도 [m/s]
C : 국부저항계수 [-]
d : 도파관 길이 [m]
SE : EMP 차폐효과 [dB]
WBC : Waveguide Below cutoff(도파관)

1. 연구배경 및 목적

최근 북한의 수차례에 걸친 핵실험으로 인해 핵에 의한 긴장이 증가하고 있다. 냉전 시대에서부터 핵폭발과 이에 따른 고고도 전자기파(High-altitude electromagnetic pluse : HEMP)의 공격양상은 군 작전 시설물이나 주요 공공시설물의 물리적 타격에 국한되었지만, 최근 전력네트워크, 유무선 통신 네트워크와 같은 소프트 타켓을 중심으로 생활기반 시설의 기능정지로 전환되고 있다.[(1)] 예를 들면, 전력망, 은행시설, 교통관제 및 응급구난 시설은 단순히 핵폭발 등과 같은 재래식 무기에 대해 취약할 뿐만 아니라, 주파수교란(Radio frequency weapon :

 ⓒ SAREK

RFW), 전자파 공격(Intentional electromagnetic inference : IEMI) 등의 현대무기에 대해 더욱 취약한 실정이다.[2] 이에 따라, 주요 국가기관 및 금융업, 전자통신업의 민간 시설물에 대한 전자파 차폐막(EMP Shield)의 설치가 확산되고 있으며, 이를 통해 핵폭발, 전자파 테러 등의 유사시 주요한 공공 및 민간 시설물의 기능을 유지에 대한 관심이 증가하고 있다.

기본적인 전자파 차폐는 금속체의 특성인 전파복사에 대한 반사특성를 이용하여 구현하고 있으며, 건물 내 전자장비를 전자파 침입으로부터 방호하는 방법은, 금속체로부터 건물전체를 감싸는 방법, 주요 장비가 설치된 건물을 일반 공간과 분리하여 전자파 차폐막을 형성하는 방법, 주요 장비자체가 외부의 전자파로부터 보호되는 장치를 구비하는 방법으로 크게 나눌 수 있다.[3] 공간 내 주요장비에 대한 전자파 침입형태와 방호전략, 건물의 EMP 차폐성능 측정과 대비, 전자기파방호에 대한 금속체나 일반 건축부재에 대한 효과 산정방법 등이 연구되어 왔지만,[4]~[11] 외부에서 발생하는 전자파의 주요 전파 통로인 덕트 및 파이프 관통부에 대한 적절한 차폐대책에 대한 연구는 다소 미흡한 실정이다. 건물의 외부 관통부위는 실내에 필요한 적절한 신선공기나 급수를 외부로부터 인입해야하기 때문에, 중공층(Air cavity)을 가지는 금속파이프로 구성되는 도파관(Waveguide Below Cutoff : WBC)이라는 특수한 장치가 필요하며, 이를 종횡으로 연결한 도파관 배열을 형성하여 전자파의 감쇄효과를 유도한다. 도파관 배열은 유체의 이동경로 중에 설치되어야 하므로 팬, 펌프 등의 반송동력 설계시 도파관에 대한 영향을 추가적으로 고려해야한다. 본 연구는 건축설비에 의한 관통부에 설치되는 전자기파 차폐물에 대한 형상특성을 파악하고 공조 시스템에 설치되는 도파관 배열 인근의 유체거동에 대한 특성을 분석하고자 한다.

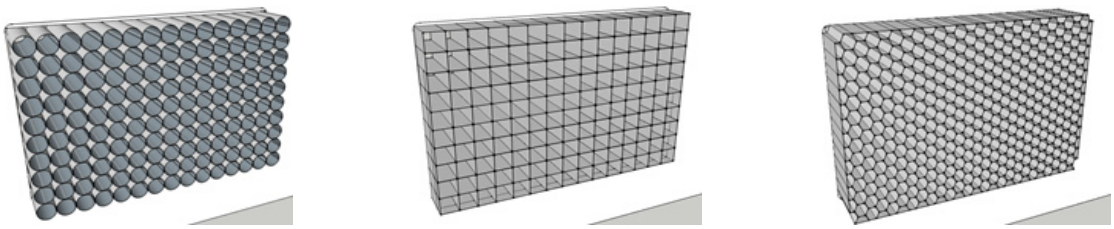
2. 연구방법

2.1 건물관통부에 대한 전자파 차폐조건

일반적으로 건물의 벽체 관통부 및 덕트에 적용하는 전자파 차폐막은 도파관 배열의 형태로 구현되며, 차폐 목적의 주파수 이하로 감쇠하도록 유도주파수를 생성하는 금속체의 형태로 구성된다.[12] 도파관의 단위 셀에 대한 형태는 다양하지만, Fig. 1과 같이 원형, 각형, 또는 육각형 형태의 도파관이 유체관통부에 적용되며, 도파관을 연결하여 사용하거나, 각 단위 셀의 벽체를 공유하여 전자파 차폐를 수행하게 된다. 단위형태에 대한 도파관 배열 설계는 목적하고자 하는 전자파 감쇠효과(Shielding Effectiveness : SE)에 따라서 도파관의 형상이 결정되는데, 건물용의 경우 10 MHz에서 1.5 GHz 구간에 대한 80 dB의 감쇄를 최소기준으로 사용하고 있다.[12] 도파관의 셀 구조와 길이는 목표하는 전자파 감쇄효과에 따라서 다음 식(1)과 같이 Ott의 정리를 변형한 식을 활용한다.

$$SE = A\left(\frac{l}{a}\right)\sqrt{1-\left(a\frac{f}{B}\right)^2} - 20\log(N) \tag{1}$$

일반적으로 사용되는 단위형태인 원형, 각형, 육각형 단위 셀 구조에 있어서 사용계수는 Table 1과 같고, 해당 주파수 구간에서 목표 SE를 80 dB에서 140 dB까지 20 dB씩 강화하는 경우 도파관의 단위 셀 형태에 따른 필요 길이(d)를 산정하였다.



(a) Circular (b) Square (c) Hexagonal

Fig. 1 Different sectional geometries of WBC array.

Table 1 Coefficients in SE equation[13)-14)]

Sectional geometry	A	B	l
Circular	31.95	175,800	Diameter
Rectangular	27.30	150,000	Side length
Hexagonal	17.50	96,659	Diagonal length

2.2 유체이동 통로내의 국부저항계수산정

공조 시스템 및 배관 시스템 내에서 흐르는 유체가 공기덕트 및 유체파이프의 내의 유로변경과 추가적인 연결장치가 설치되는 부분을 통과하는 경우 추가적인 국부 압력손실이 발생하게 된다. 단일 도파관 및 도파관 배열의 양 단면에 발생하는 압력손실은 베르누이의 정리에 기초한 압력 변동식을 활용하여 다음 식(2)와 같이 정리하여 구할 수 있으며,

$$\triangle p_t = \triangle p_{t,1-2} - \triangle p_{se} \tag{2}$$

이를 일반화하면, 다음 식(3)과 같이 관내 유체흐름의 속도와 유체의 밀도를 이용하는 국부저항계수식으로 나타낼 수 있다.[15)]

$$\triangle p_{t,1-2} = C\frac{\rho V^2}{2} \tag{3}$$

SE에 대한 목표값을 충족시키기 위한 도파관의 형상과 배열의 길이에 따라 상용전산 유체역학(CFD)을 활용하여 도파관 설치에 따른 국부 저항계수(C)를 산정한다.

3. 기준 분석 및 비교 결과

3.1 단위형상에 따른 도파관 두께산정

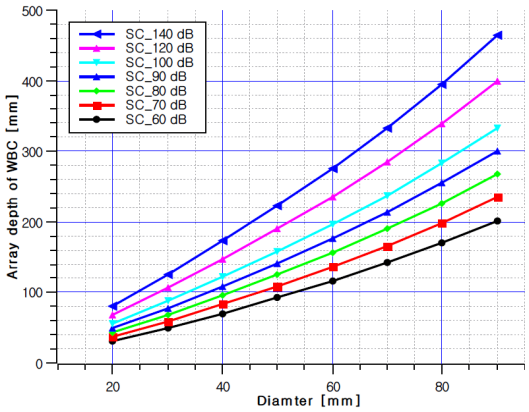
건물관통부에 설치되는 덕트 및 유체의 도파관의 길이는 실제 단위형상의 종류와 목표 SE 값에 따라 달라진다. 다음 Fig. 2는 목표 SE을 충족시키기 위해 필요한 길이를 단위 형상의 조건에 따라 비교하고 있다. 원형의 경우 단면지름, 각형의 경우 한 변의 길이, 육각형 구조는 대각선길이를 기준으로 하였으며, Fig. 2에 제시된 바와 같이 유사한 단면 길이를 갖는 조건이라도 단면형상의 도파관 형태에 따라 다른 길이가 필요하다.

예를 들면, SE 80 dB를 충족하기 위해 단면지름 30 mm인 원형 단위셀을 사용하는 경우 필요한 도파관 전체의 경로 길이는 59.12 mm이고, 한 변의 지름이 30 mm인 각형을 사용하는 경우 69.57 mm의 경로 길이가 필요하다. 아울러 대각선의 길이가 30 mm인 육각형 형태의 단위 형상으로 도파관을 구성하는 경우 필요 길이는 55.76 mm이다. 동일한 SE 목표 조건에서 육각형 형태가 도파관의 전체 경로 길이를 줄이는데 효과적이며, 목표 SE 값이 높아질수록 유사한 단위 형상에서 도파관의 필요 길이는 각형 > 원형 > 육각형 순으로 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 공조용 덕트 및 유체배관에 사용되는 도파관은 육각형 형태로 구성하는 것이 다른 단위형상보다는 유리한 것으로 판단된다.

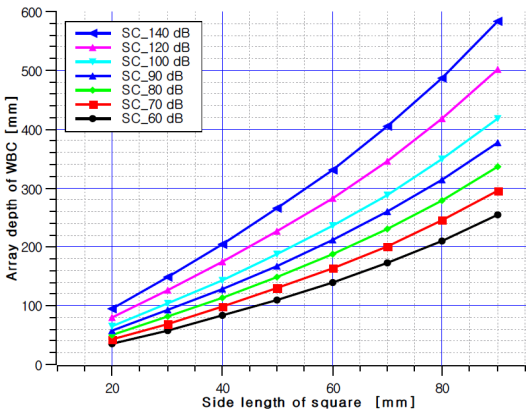
3.2 도파관 인근의 유체거동 특성

덕트 또는 파이프에 도파관을 설치하게 되는 경우 유체의 속도와 방향은 변화하고 도파관과 덕트 및 파이프 접합부의 연결 부위에 의한 유동분리와 교란이 발생하게 된다. 도파관 인근의 유동특성을 파악하기 위하여 유한체적법에 기반한 상용 전산유체해석(Computation Fluid Dynamics : CFD) 코드인 ANSYS CFX 17.0을 사용하여 분석하였다.[16)]

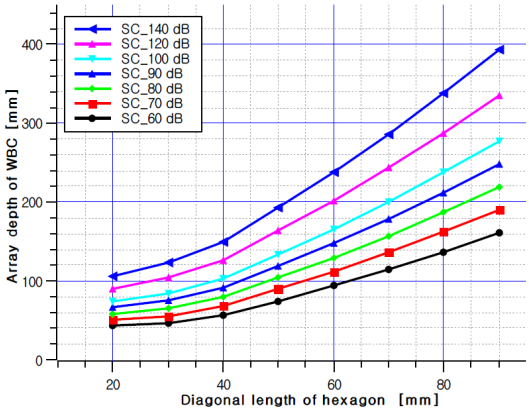
ⓒ SAREK



(a) Circular

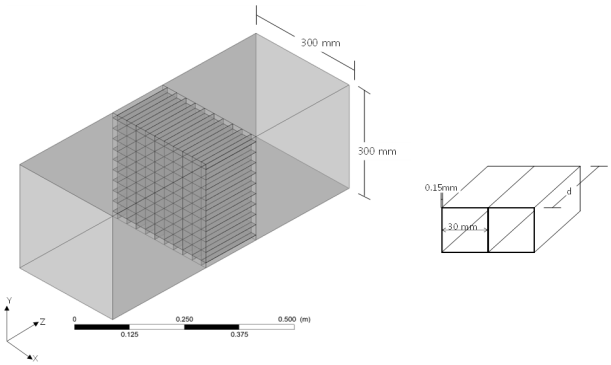


(b) Square

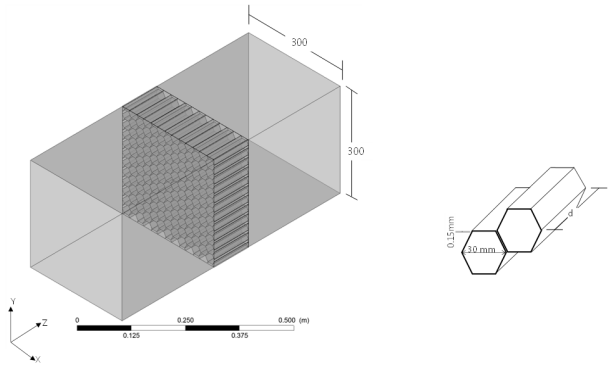


(c) Hexagonal

Fig. 2 Minimum depth of WBC array with different WBC unit shapes.



(a) Square WBC arrays



(b) Hexagonal WBC arrays

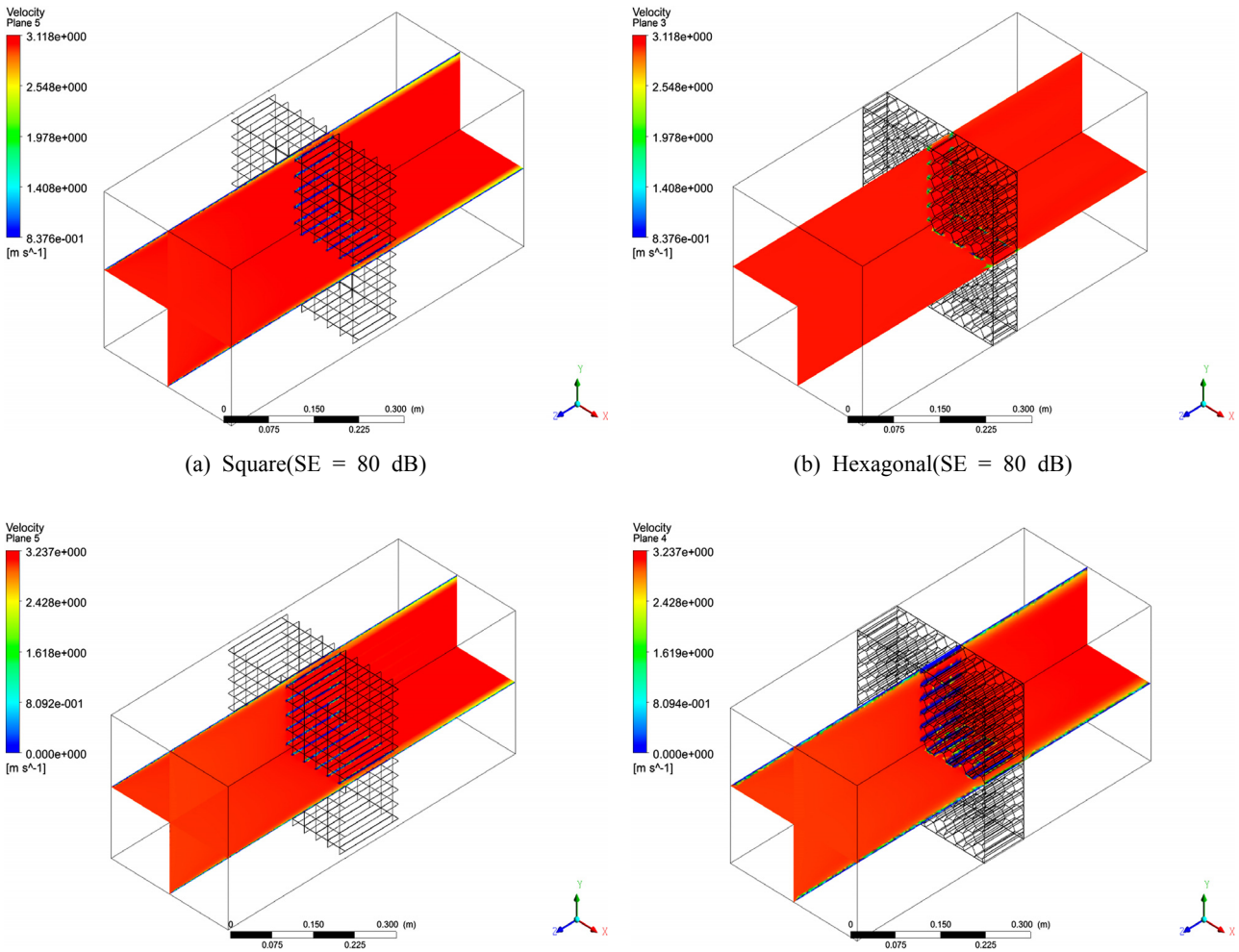
Fig. 3 CFD modeling for air duct with WBC arrays.

도파관의 특성별 분석을 위해 다음 Fig. 3과 같은 각형 및 육각형 형태의 단위형상체계를 사용하였으며, 사각 공기 덕트(300 mm×300 mm) 내에 SE 80, 100, 120, 그리고 140 dB를 달성할 수 있는 길이의 도파관 배열을 적용하였다. 각형의 경우 한 변의 길이가 30 mm, 육각형의 경우 대각선의 길이가 30 mm인 단위형상체계를 가지며, 각 단위형상은 두께 1.5 mm의 격벽을 공유하게 된다.

격자수 민감도 분석을 통해 약 590,000개의 격자수를 중심으로 격자수 증가에 따른 결과변이가 발생하지 않음을 확인하였다. 유체는 표준상태(1기압, 25℃)의 공기로 산정하였으며, 해석체적내의 열 교환이 일어나지 않는 조건이므로 공기부력의 효과는 무시될 수 있다고 가정하였다. 난류해석은 Standard k-ε 모델을 활용하였으며 연속, 모멘텀, 난류 해석에 있어서의 수렴조건은 각각 10^{-6}으로 설정하였다. SE, 80 dB에서 120 dB까지 20 dB씩 증가하는 조건하에서 유체의 속도를 1, 3, 5, 7, 9 m/s까지 증가시킬 때 도파관 인근의 속도와 압력을 해석하였다.

Fig. 4는 해석된 총 36개의 결과 중 SE 80 dB와 SE 120 dB의 조건하에서 각형과 육각형 형태의 도파관에 의한 기류의 거동 특성을 나타낸다.

초기 기류속도를 3 m/s로 설정하는 경우, 각형 및 육각형 도파관에 도달한 공기는 도파관 격벽에 의한 유동분리가 발생하고, 주관에 비해 매우 좁은 유로를 통과하는 공기는 격벽 내부에서의 기류속도는 극히 낮으나, 단위형상의 중심부 속도는 각형의 경우 평균 3.45 m/s(80dB), 육각형의 경우 3.18 m/s(80 dB)로 입력속도 대비 10~15% 가량 기류속도가 증가하는 것으로 나타났다. SE 120 dB의 경우 중심부 속도는 평균 3.23 m/s(육각형)에서 3.45 m/s로 기류속도의 상승폭이 크게 나타났다. 이는 공기가 통과하는 도파관 길이이가 길어져서 유동분리현상 증가가 원인으로 판단된다. 주관에 합류하는 경우 육각형 도파관의 경우 일부속도는 증가하지만 비교적 균일한 속도분포를 가지는 반면, 각형 도파관의 경우 유동분리가 지속적으로 유지되며, 이러한 현상은 SE 목표값이 증가할수록 더욱 명확하게 나타났다(Fig. 4(d)).



(a) Square(SE = 80 dB)　(b) Hexagonal(SE = 80 dB)

(c) Square(SE = 120 dB)　(d) Hexagona(SE = 120 dB)

Fig. 4 Distributions of air flow in HVAC system with different WBC arrays.

ⓒ SAREK

3.3 도파관에 따른 전압차이와 국부저항계수

도파관의 설치에 따른 도파관 전후에서 발생하는 기류거동의 변화는 결국 도파관 전후 압력차를 발생하게 된다. Fig. 5는 SE 목표 조건에 따른 각형과 육각형 도파관 전, 후단에 대한 기류속도와 전압차의 상관관계를 나타낸 것이다. 저속덕트의 경우 압력차이는 작게 나타났지만, 기류속도가 5 m/s 이상이 형성되는 경우 도파관에 의한 압력차이가 비교적 크게 나타났다. SE 80 dB의 도파관 배열에 기류속도가 15 m/s의 공기가 이동하는 경우, 전압손실은 각형 및 육각형 도파관이 각각 19.68 Pa, 15.35 Pa로, 각형 도파관이 육각형 도파관에 의해 약 23% 큰 압력차이가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 반송장치의 용량산정 시 추가적인 고려가 필요할 것으로 판단된다.

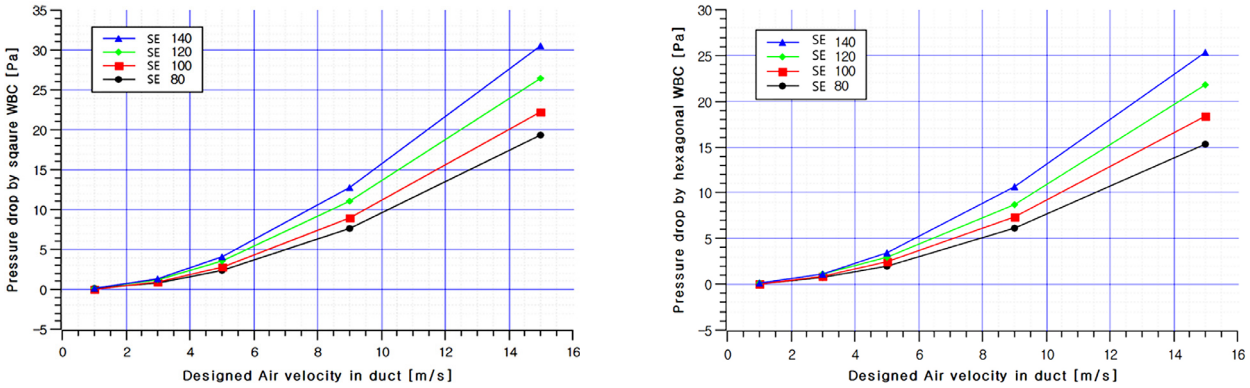
유체의 속도변화와 계산된 전압손실을 이용하여 앞서 설명한 국부저항계수(C)를 Table 2에 나타내었다. 각형에 비하여 육각형 도파관 배열은 약 12~16% 낮은 국부저항계수 가지는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

최근 주요 국가시설 뿐만 아니라 민간시설에서도 비상 상황시에 사회기간망의 운영에 필수적인 전력 및 데이터 보호의 기능 확보를 위해 EMP 차폐에 대한 관심이 증가하고 있지만, 외부의 공기나 물의 유입에 필요한 환기구 및 배관에 대한 EMP 방호 관련 연구는 미진한 실정이다. 본 연구에서는 덕트를 중심으로 다양한 단위 형상의 도파관 배열의 특성을 파악하고 실제 유체가 이동하는 조건하에서 반송동력의 산정에 필요한 국부저항계수를 산출하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 도파관의 형태가 육각형 구조인 경우가 동일 SE하에서 도파관 배열의 길이를 최소화 할 수 있다.
(2) 도파관 배열의 전후단의 기류속도는 SE가 높아질수록, 길이가 증가할수록 유동분리 및 교란이 크게 나타났으며 이에 따른 압력의 차이가 크게 발생한다.
(3) 동일한 EMP 차폐성능을 갖는 경우 육각형 도파관이 각형에 비해 약 15% 낮은 국부저항계수로 나타났다.

본 연구의 해석사례는 기본적인 공기 덕트에 도파관 배열을 설치하는 경우를 대상으로 해석을 수행한 내용으로 향후 다양한 공기 덕트 형태에 대한 분석을 추가적으로 실행하여 해석결과의 일반화에 대한 연구가



(a) Square (b) Hexagonal

Fig. 5 Total pressure differences between up and down stream of WBC Arrays.

Table 2 Local loss coefficients of WBC arrays in air duct(300 mm×300 mm)

Sectional geometry	SE = 80 dB	SE = 100 dB	SE = 120 dB	SE = 140 dB
Hexagonal	0.121	0.150	0.177	0.207
Square	0.144	0.168	0.210	0.239

실행될 것이며, 일반적인 건물에서 주요한 외부관통부위 중의 하나인 급배수 배관에 대한 해석이 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호 15CTAP-C098186-02)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Hoad, R. and Radasky, W. A., 2013, Progress in high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) standardization, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 55, No. 3, pp. 532-538.
2. Matin, W. D., 2009, Mitigation of EMP effects using shielded rooms and enclosures, Interference Technology EMC Directory & Design Guide.
3. White, Donald R. J., 2013, EMP Protect Family, Homes & Community, Renewable energy creations, LLC, FL, USA.
4. Jha, K. K., 2006, EMP generation mechanism and its destructive effect on C 3 I network, Electro Magnetic Interference and Compatibility (INCEMIC), 2006 Proceedings of the 9th International Conference on. IEEE.
5. Wilson, P. F., Ma, M. T., and Adams, J. W., 1988, Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials. I. Far-field source simulation, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 30, No. 3, pp. 239-250.
6. D'Amore, M. and Sarto, M. S., 2000, Theoretical and experimental characterization of the EMP-interaction with composite-metallic enclosures, IEEE transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 42, No. 2, pp. 152-163.
7. Bihua et al., 2000, Experimental investigation of EMP shielding effectiveness of reinforced-concrete cell model, Environmental Electromagnetics, CEEM 2000. Proceedings, Asia-Pacific Conference on, IEEE, 2000.
8. Yang et al., 2005, Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon nanofiber/LCP composites, Composites Part A : applied science and manufacturing, Vol. 36, No. 5, pp. 691-697.
9. Wen, S. and Chung, D. D. L., 2004, Electromagnetic interference shielding reaching 70 dB in steel fiber cement, Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 2, pp. 329-332.
10. Rahaman, M., Chaki, T. K., and Khastgir, D., 2011, Development of high performance EMI shielding material from EVA, NBR, and their blends : effect of carbon black structure, Journal of Materials Science, Vol. 46, No. 11, pp. 3989-3999.
11. Mazov et al., 2009, Electromagnetic shielding properties of MWCNT/PMMA composites in Ka-band, physica status solidi(b), Vol. 246, No. 11-12, pp. 2662-2666.
12. Standard, M., 2005, High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) protection for ground-based C4I facilities performing critical, tine-urgent missions, Part 1 fixed facilities, Vol. 1, MIL-STD-188-125.
13. Perez, R., 2013, Handbook of electromagnetic compatibility, Academic Press.
14. Bereuter, W. A. and Chang, D. C., 1982, Shielding effectiveness of metallic honeycombs, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-24, No. 1, pp. 58-61.
15. Handbook, A. S. H. R. A. E., 1996, HVAC systems and equipment, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA (1996).
16. ANSYS CFX-17.1 User Manual, 2016.

 ⓒ SAREK