

[Research Paper]

흡음재 두께가 소화노즐 소음도 저감에 미치는 영향

김학선 · 황인주* · 김윤제**†

성균관대학교 기계공학과 대학원생, *한국건설기술연구원 연구원, **성균관대학교 기계공학부 교수

Effect of Absorbent Thickness on the Noise Level Reduction of Fire-Extinguishing Nozzle

Hak-Sun Kim · In-Ju Hwang* · Youn-Jea Kim**†

Graduate Student, Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University,

*Researcher, Department of Future Technology and Convergence Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology,

**Professor, School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

(Received November 5, 2018; Revised January 23, 2019; Accepted January 28, 2019)

요 약

신속한 화재 진압을 목표로 가스계 소화 시스템에서 소화약제는 일반적으로 섭씨 21 °C에서 약 28 MPa의 고압으로 저장되며, 방출시 감압밸브와 오리피스를 지나면서 약 8 MPa의 압력으로 방출한다. 때문에 방출시 약 140 dB 이상의 소음이 발생하게 되는데, 이로 인하여 hard disk drive (HDD)와 같은 전자 부품들이 손상되기도 한다. 따라서 소음문제는 가스계 소화 시스템에 있어서 중요한 문제점으로 대두되고 있다. 소음문제 해결방안으로는 일반적으로 흡음재를 부착하여 소음을 저감시키는 방안이 있으며, 본 연구에서는 흡음재의 두께를 설계 변수로 선정하여 유동소음을 저감하는 방안을 고찰하였다. 관측점에서의 소음도와 노즐내부 유로에 나타나는 유동특성은 상용 코드인 ANSYS CFX ver. 18.1을 이용하여 수치적으로 계산하여 분석하였다.

ABSTRACT

In a gas system fire extinguishing system, extinguishing agents are usually stored with approximately 280 bar at 21 °C and are released at approximately 8 MPa through the decompression valve and orifice to quickly suppress the fire. When extinguishing agents are discharged, they cause a loud noise (approximately 140 dB), which can damage electronics, such as hard disk drives (HDDs). Therefore, the noise is becoming a serious issue in the gas extinguishing system. The method of the noise reduction by adding an absorbent is most general and in this study, the thickness of the absorbent was as a selected design variable. The noise level at the observation point and the flow characteristics inside the nozzle were numerically calculated and analyzed using the commercial code ANSYS CFX ver. 18.1.

Keywords : Fire suppression, Gaseous extinguishing nozzle, Absorbent, Sound pressure level (SPL), Computational fluid dynamics (CFD)

1. 서 론

전기실, 발전실, 변전실 등에 신속한 화재 진압을 위한 가스계 소화시스템에서 소화약제는 약 28 MPa의 고압으로 저장되며(섭씨 21 °C 기준), 감압밸브와 오리피스를 지나면서 약 8 MPa의 압력으로 방출된다. 이에 따라, 화재 진압시 소화노즐에서는 약 140 dB이상의 높은 소음이 발생되며⁽¹⁾,

음압레벨(Sound pressure level)이 130 dB를 초과하게 되면 hard disk drive (HDD)와 같은 전자부품이나 기기가 손상되어 복구 불능한 상태가 된다. 이는 소음에 의해 발생하는 진동이 디스크 표면의 자기층(Magnetic layer)에서 헤드 충격을 일으킬 수 있기 때문인데, 헤드 충돌이 발생하는 과정에서 입자들은 빠르게 부딪혀 저장 장치의 세시(Chassis) 구조에 균열을 야기한다^(2,3). 이런 문제점으로 고압상태의

† Corresponding Author, E-Mail: yjkim@skku.edu, TEL: +82-31-290-7495, FAX: +82-31-290-5889

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

소화약제를 이용하는 화재 진압은 방출하는 과정에서 매우 큰 유동 소음을 수반하기 때문에, 소음을 줄이기 위한 연구가 필요하다.

Jeon 등⁽⁴⁾은 소화성능 향상을 위한 소화설비 단계 중 노즐 개구부의 질량 유량과 면적을 조절하여 약제 방출의 복합적인 현상을 연구하였다. Jang⁽⁵⁾은 에어 노즐의 형상과 방출구의 배열을 설계변수로 선택하여, 다공성 에어노즐에서 발생하는 소음을 줄일 수 있는 최적의 설계조건과 노즐에서 방출된 약제는 다공성 흡음재를 통과할 때 압력이 분산되면서 소음이 저감된다는 연구결과를 도출하였다. Kweon 등⁽⁶⁾은 다공성 흡음재를 통과할 때 초음속 제트 유동으로 인해 발생하는 소음 특성을 연구하였다. 형상 변수로 흡음재의 직경비를 선정하였고, 무향실 천장에서 생성된 작동 유체의 압력과 노즐 방출구 영역에서 음파에 의해 생성된 스크리치 세기가 감소함을 실험적으로 고찰하였다. 또한, Lee⁽⁷⁾는 다공성 초음속 배기노즐의 공력소음에 대하여 실험적으로 고찰하였다. 공극률을 조절함에 따라 각 다공성 노즐은 난류혼합으로 인해 발생하는 충격소음이 다양하게 측정되었는데, 선정된 공극률에 대한 결과 값은 평균 5 dB정도의 소음저감 효과가 나타났다. Suh⁽⁸⁾는 흡음재 길이와 공극률을 설계 변수로 선정하여, 흡음재를 통과하면서 발생하는 작동유체의 유입손실과 소음특성을 분석하였다.

지금까지 다공성 흡음재를 적용한 많은 연구에서는 성능특성에 대한 기초연구가 대부분이었으며, 본 연구에서는 computational fluid dynamics (CFD)를 이용하여 흡음재 두께가 유동소음에 미치는 영향을 고찰하였다. 음압레벨은 소화노즐에서 일정한 거리의 관측점에서 각각 측정되었으며, 국내 J사가 제공한 소화노즐을 참조하여 유동특성을 수치적으로 계산하였다. 설계변수로는 가스계 소화노즐 내부의 흡음재 두께로 설정하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

수치해석에서 사용한 삼차원, 비정상상태에 관한 지배방정식은 다음과 같다.

- 연속방정식:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \tag{1}$$

- 운동량방정식:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = \nabla \cdot \tau - \nabla \cdot p \tag{2}$$

- 에너지방정식:

$$\frac{\partial(\rho h_t)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u h_t) = -\nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + \nabla \cdot (u \cdot \tau) \tag{3}$$

$$h_t = h + \frac{1}{2} u^2 \tag{4}$$

여기서, ρ 는 작동유체의 밀도, u 는 작동유체의 속도, p 는 압력, h_t 는 총 엔탈피, h 는 정적엔탈피, τ 는 점성 응력 텐서 (Viscous stress tensor)이다.

2.2 해석모델 및 방법

본 연구에서 사용된 소화노즐은 Figure 1에 도시하였으며, 크게 네 가지 영역으로 나눌 수 있다. 각각 유입로, 내부유로, 흡음재, 방출구로 이루어져있는 소화노즐은 총 8개의 방출구로 구성하였고, 방출구 직경의 크기는 40 mm로 각각의 방출구간 거리는 20 mm이다. 알루미늄 재질의 공극률 70%인 흡음재는 노즐 내부유로 벽면에 부착하여 설계하였고, 흡음재를 통과하면서 저감하는 음압레벨을 측정하기 위해 설계변수는 흡음재의 두께로 선정하였다. 흡음재 외경(D₁)직경은 93 mm으로 고정하고, 흡음재 내경(D₂)을 88 mm부터 1 mm씩 변화시켜 설계한 총 5가지의 Case는 Table 1에 도시하였다.

수치해석은 ANSYS CFX ver. 18.1을 사용하여 진행하였다. 해석공간으로 외부 유동장은 소화노즐을 기준으로 가로 620 mm, 세로 100 mm, 높이 350 mm로 설정하였고, 작동 유체가 대기(Opening)로 방출되는 5초경과 시점부터 과도상태(Transient) 계산을 수행하였다. 작동유체는 소화약제로서 질소(N₂)를 사용하였으며, 입구 조건은 유입구인 오리피스 관에서 1 kg/s의 질량유량 조건으로 설정하였다.

소음해석은 매우 작은 압력변화에도 민감하게 변하며, 고밀도의 수치해석이 요구되기 때문에 본 연구에서는 Reynolds Average Navier-Stokes (RANS)모델 보다 정밀하고 큰 와류의 난류를 직접 계산해 낼 수 있는 Large Eddy Simulation (LES)을 이용하여 수치해석을 수행하였다^(9,10).

Table 1. Parameters of the Extinguishing Nozzle

Case	D ₁ (Outer Diameter, [mm])	D ₂ (Internal Diameter, [mm])	t (Thickness of Absorbent, [mm])
1	93	88	2.5
2		87	3.0
3		86	3.5
4		85	4.0
5		84	4.5

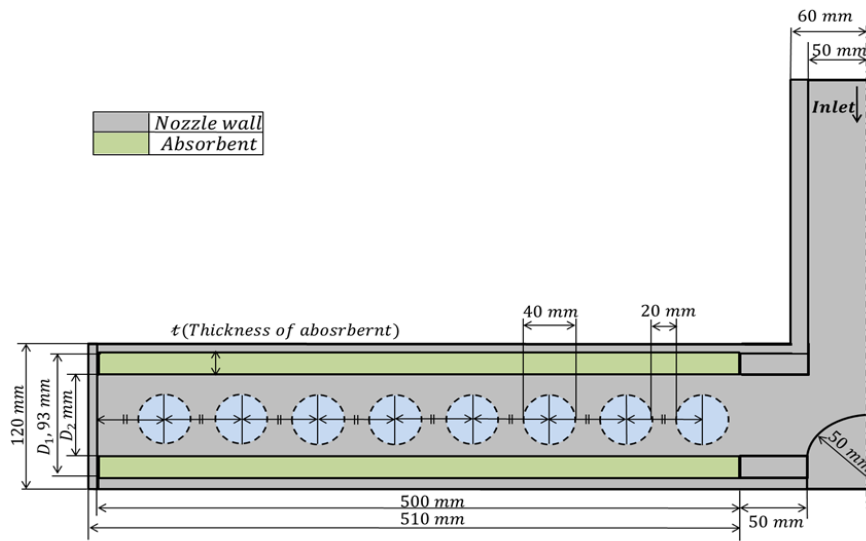


Figure 1. Schematic of the extinguishing nozzle.

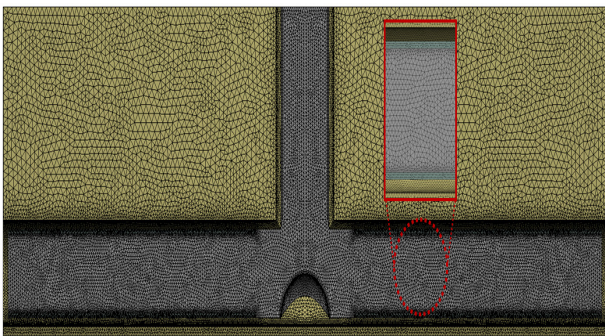


Figure 2. Grid systems.

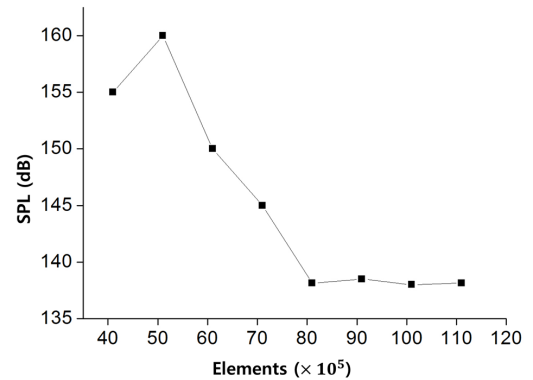


Figure 3. The grid dependency test.

2.3 격자계 구성

흡음재 두께가 유동장에 미치는 영향을 해석하기 위한 격자계 구성은 주로 사면체로 구성하였다(Figure 2 참조). 벽면 경계층에 대한 수치해석의 정밀도를 높이기 위해 5겹의 경계층을 모사하였으며, 첫 번째 층 높이는 벽으로부터 $y^+ < 1$ 수준으로 적용하였다. 여기서 y^+ 는 마찰속도와 경계층 모사를 위한 격자의 크기 비를 무차원화 한 것으로 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$y^+ = \frac{u \cdot y}{\nu} \quad (5)$$

위 식에서, u 는 벽면에서의 마찰속도, y 는 첫 번째 셀 중심까지의 수직거리, ν 는 유체의 동점성계수(Kinematic viscosity)를 의미한다.

Figure 3은 격자의존성 시험 결과를 도시한 것으로 평균 음압레벨을 기준으로 격자를 100만개씩 늘려 410만개의 격자부터 1,100만개까지의 결과를 비교하였다. 그 결과, 평균 음압레벨은 격자수가 810만개 이상일 때부터, 약 138.13 dB

로 수렴되는 경향을 보였다.

3. 결과 및 분석

3.1 음압레벨

음파는 공기를 매질로 진동에 의해 전달되며, 음압은 매질 속을 지나는 음파에 의해 발생된 압력이다. 상온에서 약 334 m/s 속도로 전파되는 음파는 표준대기에서 양적음향에너지로 표현할 수 있으며, 1초 동안 수직으로 1 m²의 평면에 힘을 가하는 것으로 표기할 수 있다⁽¹¹⁾. 음압레벨(Sound pressure level)은 음파에 의해 발생된 음압과 기준음압 비를 나타내는데 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

• 음압레벨:

$$\text{Sound Pressure Level} = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (6)$$

여기서, p_0 는 기준 음압($2 \times 10^{-5} Pa$)을 나타내며, p 는 음압이다.

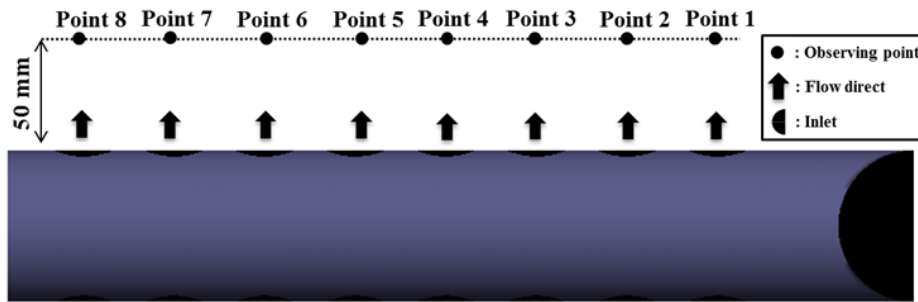


Figure 4. The monitoring points of the sound pressure level nearby the nozzle.

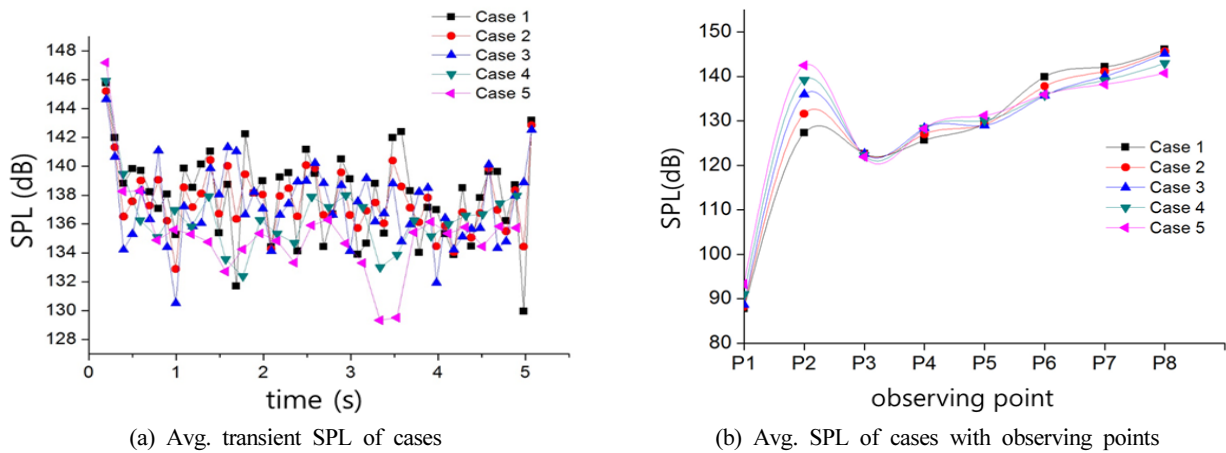


Figure 5. The distribution of sound pressure level with the cases.

Figure 4는 음압레벨을 측정하기 위한 측정 점을 도시한 것이다. 이는 노즐 방출구로부터 수직으로 각각 50 mm 떨어진 지점이며, 유동해석을 통해 얻어진 데이터와 식(6)을 이용하여 음압레벨을 계산하였다. 8개의 측정 점에서 얻어진 음압레벨의 평균으로 각 Case별 소음도 성능을 비교하였으며, 그 결과 Case 5에서 약 137.23 dB의 평균 음압레벨이 계산되었다. 이 값은 본 연구에서 고려한 5가지 모델 형상의 결과인 Case 4의 137.7 dB, Case 3의 138.1 dB, Case 2의 138.7 dB, 그리고 Case 1의 약 139.31 dB 등가소음도 중에 가장 작은 값이며, Case 1대비 약 2.1 dB 감소한 값이다. 각 Case별 음압레벨 평균값은 시간과 관측점을 기준으로 Figure 5에 도시하였다. Figure 5(a)에서는 전체 평균값으로 흡음재가 두꺼워 질수록 소음이 작게 발생하는 경향을 보였지만, Figure 5(b)에서는 흡음재가 두꺼워짐에 따라 P3 이전 값들은 소음이 증가하고 P3 이후로 서서히 낮아지는 경향을 보였다. 이는 P3 이후 낮아진 소음에너지의 양이 P3 이전의 상승된 에너지까지 상쇄시킬 만큼 작은 것을 알 수 있다.

3.2 내부 유동 특성

작동유체 방출 5초경과 시점에서 노즐 내부의 유동특성을 Figure 6과 Figure 7에 도시하였다. 지면 절약을 위하여 Case 2 & 4는 생략하였다. 유체의 난류강도(Turbulence intensity)⁽¹²⁾

와 와류(Vortex flow)⁽¹³⁾는 소음의 원인이며, 난류강도는 Figure 6의 와동(Swirl)구조로 에디(Eddy)의 크기를 짐작할 수 있다. 또한 와류는 Figure 7의 유선(Streamline)을 통해 확인할 수 있다. Case 1은 다른 Case들 보다 더 큰 와동을 형성하였다. 정량적인 값으로부터 유추할 수 있듯이, Case 1은 12402.6 s⁻¹의 와동강도(Swirling strength)를 가지며, Case 3과 Case 5은 각각 11682.2 s⁻¹와 10063.3 s⁻¹의 값을 나타내었다. 또한 Case 1에서 소음도가 가장 높게 측정된 P8 부분에 가장 큰 와류장이 형성됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 가스 화재 소화 노즐의 흡음재 두께변화에 따른 소음저감 및 유동특성을 고찰하였다. 그 결과 흡음재 두께가 증가함에 따라 소화약제의 유동을 균일하게 만들어 주는 것을 확인하였으며, 소화약제 방출시 발생하는 소음을 저감시키는 것을 확인하였다. 하지만 유입구로부터 가까운 P3 방출구까지에서는 오히려 소음이 증가하는 현상을 확인하였으며, 이는 빠른 속도의 소화약제가 갑자기 만나게 되는 흡음재로 인한 급격한 압력변화 때문에 생성되는 비정상유동영역(Unsteady)으로 인한 것임을 유추할 수 있다.

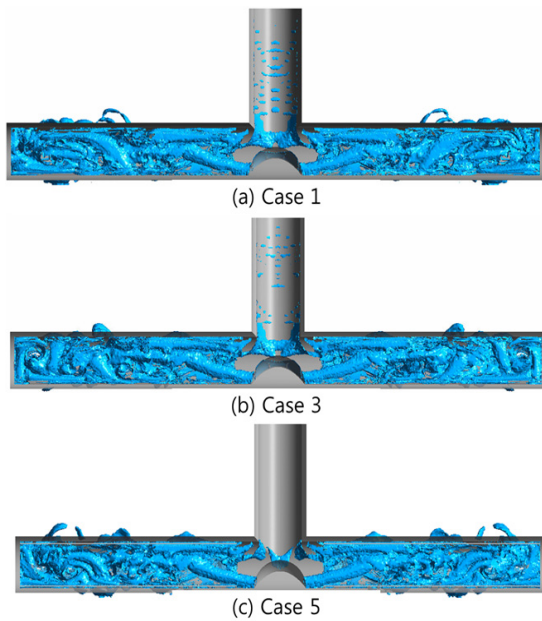


Figure 6. Comparison results of the swirling structures.

따라서 흡음재 두께가 두꺼울수록 압력변화의 폭은 커지게 되고 앞부분 방출구에선 더 큰 소음을 생성하게 되지만 그 이후 방출구에서의 소음은 더 감소되며 결과적으로 전체 소음수준은 작아지게 되는 것을 확인하였다. 하지만 흡음재 두께가 충분하지 않은 경우, 완충작용이 충분하지 않게 되고 그에 따라 노즐 길이가 충분하지 않은 경우 노즐 내부에 심한 와류와 난류를 형성시켜 큰 소음이 발생할 수 있기 때문에 노즐 길이와 흡음재 두께에 대한 최적 설계에 관한 연구가 필요함을 알 수 있다.

본 연구 결과를 통해 흡음재가 설치된 소화노즐 내부 유동특성과 소음도에 대한 이해를 증진하였으며, 이는 가스계 소화노즐의 소음문제 해결을 위한 향후 연구에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 국토교통기술사업화지원사업의 연구비 지원 (18TBIP-C127226-02)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Siemens, "Intelligent Extinguishing Solutions from Siemens. Sinorix CDT-Innovative, Sustainable, and Safe", <https://www.siemens.com/download?A6V10082135> (2011).
2. Siemens, "Silent Extinguishing Disruptions to Hard disk Drives Caused by Inert Gas Extinguishing Systems-analysis and Measures for the Safe Operation of Storage Systems",

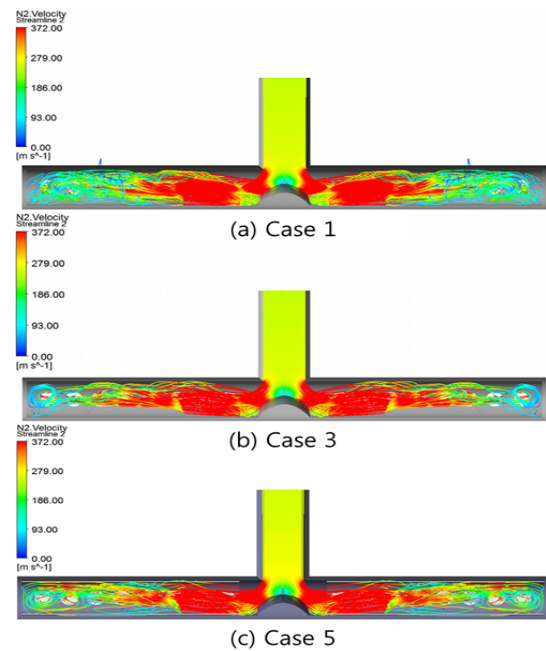


Figure 7. Comparison results of the streamlines.

- <https://www.siemens.com/download?A6V10699087> (2015).
3. T. Dutta and A. R. Barnard, "Performance of Hard Disk Drives in High Noise Environments", *Noise Control Engineering*, Vol. 65, No. 5, pp. 386-395 (2017).
4. H. K. Jeon, Y. S. Choi and J. T. Park, "The Effects of the Area of Openings on the Performance of a CO₂ Extinguishing System - The CFD Simulations of the Oil Surface Fire in a Machine Room", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-9 (2008).
5. S. W. Jang, "An Experimental Study on Noise Characteristics of Multi Hole Air Nozzle", Ph.D. Diss., Seoul National University of Science and Technology, Korea (2003).
6. Y. H. Kweon, M. Tsuchida, Y. Miyazato, T. Aoki, H. D. Kim and T. Setoguchi, "The Effect of Reflector with Sound-absorbing Material on Supersonic Jet Noise", *Journal of Thermal Science*, Vol. 14, No. 1, pp. 22-27 (2005).
7. D. H. Lee, "A Study on the Aerodynamic Noise of a Supersonic Exhaust Nozzle of Perforated Tube", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 113-120 (1999).
8. G. W. Suh, "A Study on the Acoustic Characteristics of Jet Noise from Orifices and the Performance of Diffuser Silencer", Ph.D. Diss., University of Soongsil, Korea (1993).
9. J. Nichols, S. Lele, P. Moin, F. Ham, G. Brès and J. Bridges, "Large-Eddy Simulation for Supersonic Rectangular Jet Noise Prediction: Effects of Chevrons", In 18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (33rd AIAA Aeroacoustics

- Conference), p. 2212 (2012).
10. C. Bogey and C. Bailly, "LES of a High Reynolds, High Subsonic Jet: Effects of the Subgrid Modellings on Flow and Noise", 16th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference. p. 3557 (2003).
 11. M. P. Norton and D. G. Karczub, "Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers", Cambridge, Vol. 10, No. 2, pp. 282-289 (2003).
 12. J. F. Williams and D. L. Hawkings, "Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion," *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, Vol. 264, No. 1151, pp. 321-342 (1969).
 13. D. Shin, S. Y. Ryu, C. Cheong, T. H. Kim and J. W. Jung, "Development of High-performance/low-noise Centrifugal Fan Circulating Cold Air Inside a Household Refrigerator by Reduction of Vortex Flow", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 428-435 (2016).