

## 제트팬 소음기 형상이 성능에 미치는 영향

오인규\* · 최영석\*\*\*† · 김준형\*\* · 양상호\*\*\* · 권오명\*\*\*\*

### Effects of Silencer Design on the Performance of Jet-fan

In-Gyu Oh\*, Young-Seok Choi\*\*\*†, Joon-Hyung Kim\*\*,  
Sang-Ho Yang\*\*\*, Oh-Myoung Kwon\*\*\*\*

Key Words : Jet fan(제트팬), Silencer(소음기), Cap(반구형 뚜껑), Effective Velocity(유효출구 속도), Roughness(조도), DOE(실험계획법)

#### ABSTRACT

In this paper, a numerical study has been carried out to investigate the influence of silencer design variables on the performance of a jet fan. In order to achieve an optimum jet fan design and to explain the interactions between the different geometric configurations in the jet fan, three-dimensional computational fluid dynamics and the Design of Experiments method have been applied. Two geometric variables, i.e., cap size and silencer length, were employed to improve the performance of the jet fan. The objective functions of the jet fan are defined as the effective velocity and total efficiency at the operating condition. Based on the results of computational analyses, the flow characteristics were discussed. The effect of silencer with a specific roughness on the performance was also discussed.

#### 1. 서 론

도로의 터널이 길어지고 통행 차량이 증가함에 따라 터널 내부 환기의 중요성도 매우 증가하였다. 터널 내부 환기 목적은 자동차에서 배출되는 일산화탄소(CO), 매연 등의 오염 물질을 터널 외부로 방출시켜 쾌적하고 안전한 주행 환경을 유지하는데 있다. 또한 화재 시 배연 효과와 함께 비상시 인명의 안전 확보 및 유지 관리를 위하여 오염물질의 농도를 기준치 이하로 낮추는 것이다. 따라서 터널 계획 및 건설 시에는 반드시 적절한 환기 대책이 요구되어 진다.

터널 내부 환기방식은 크게 자연 환기방식과 기계환기방식으로 구분된다. 일반적으로 터널 내를 주행하는 자동차의 피스톤 효과(piston effect)등에 자연 환기가 가능한 터널은 약 500m 정도로 볼 수 있으나 최근에 건설되고 있는 터널들의 길이는 500m 이상인 장대 터널이므로 기계 환기방식으로 터널 내 환경을 일정수준 이상으로 유지시켜 주어야 한다.

제트팬은 일반 축류팬과 유사한 형태를 띠고 있다. 하지만 많은 양의 공기를 배출해야하기 때문에 회전속도가 큰 것이 특징이다. 제트팬을 구성하는 요소로는 크게 회전자인 로터(rotor)와 구동원인 모터(motor), 이를 고정시켜주는 스테이터(stator)로 구성되어진다.(Fig. 1) 또한 유동의 손실을 최소화하기 위한 벨 마우스(bell-mouth)가 입·출구에 존재하며, 소음을 줄이기 위하여 로터 전·후로 소음기(silencer)가 장착되어있다. 이 중 제트팬 성능에 가장 핵심이라고 할 수 있는 로터로 유입되는 유동의 흐름이 중요한데, 이를 담당하는 것이 벨 마우스와 소음기이다.

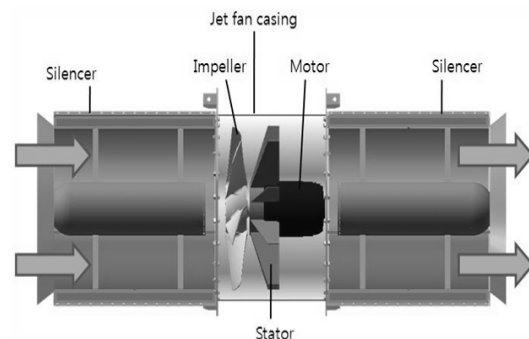


Fig. 1 Components of jet fan

\* 고려대학교 대학원 / 한국생산기술연구원

\*\* 한국생산기술연구원 / 에너지설비센터

\*\*\* 삼원 이앤비

\*\*\*\* 고려대학교 / 기계공학과

† 교신저자, E-mail : yschoi@kitech.re.kr

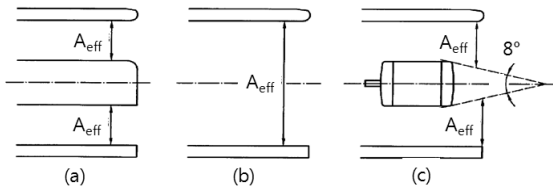


Fig. 3 Effective fan outlet area

소음기는 소음을 줄이는 역할이 가장 중요하지만, 제트팬 로터로 유입되는 유로를 형성하고 있어 공력성능과도 연계되어 있다. 또한, 소음특성과 공력특성을 고려하여 다양한 형태의 소음기 형상이 설계되어 질 수 있다. Fig. 1과 같이 동일한 단면적을 유지하는 원기동형태의 소음기가 일반적이거나, 경우에 따라서 유동의 흐름방향을 따라서 단면적 변화가 있는 원뿔형태의 소음기도 장착되고 있다.

본 연구에는 소음기의 소음특성은 배제하고, 제트팬 공력성능 관점에서 원뿔형태의 소음기 설계 변수를 정립하고 소음기 형상이 제트팬 공력 성능에 미치는 영향에 대하여 알아보았다. 연구 수행을 위하여 실험계획법을 사용하였으며, 생성된 실험 set에 대하여 수치 해석을 이용한 성능평가를 수행하였다. 수치해석은 상용 소프트웨어인 ANSYS-CFX 11.0을 사용하였다.

## 2. 수치해석 기법 및 목적 함수

### 2.1 수치해석 방법

수치해석 시 난류 모델은 유동 박리 현상 등의 예측에 적절한 전단이송(shear stress transport)  $k-\omega$ 모델<sup>(1)</sup>을 사용하였다. 표면 거칠기가 있는 경우는 조도 영향을 고려한  $k-\epsilon$  난류 모델을 사용하였다. 수치해석 경계조건은 Fig. 2와 같이 입구에는 전압으로 대기압 조건을, 출구에서는 정압으로 대기압 조건을 설정하였다. 제트팬은 일반 축류팬과 달리 작동점이 정해져 있으며, 다른 시스템과의 연결이 없는 것이 특징이다. 따라서 제트팬 작동점을 예측하기 위하여 입·출구 압력비를 전압과 정압으로 하는 경계조건이 바람직하다. 로터의 회전 속도는 1780 rpm을 적용하였고, 작동유체는 공기를 사용하였다.

해석시간을 줄이기 위하여 Fig. 2와 같이 주기 조건을 이용해 총 6개의 로터 날개 중 1개의 날개 영역과 총 9개의 스

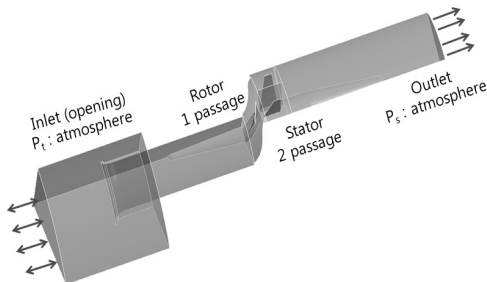


Fig. 2 Flow field & boundary condition of jet fan.

테이터 날개 중 2개의 날개 유동 영역만을 대상으로 계산영역을 설정하였다.

### 2.2 목적 함수

목적 함수를 위한 측정위치는 출구부의 벨 마우스 부분이 시작하는 부분으로 설정하였으며, 유효면적은 ISO 13350에서 명시한 제트팬의 유효출구면적( $A_{eff}$ )을 사용하였다. 이에 따른 형상은 Fig. 3에 나타냈으며, 이 중 Fig. 3(c)에 나와 있는 유효출구면적을 기준으로 하였다. 이를 바탕으로 제트팬의 성능을 최적화하기 위한 목적함수로서 제트팬의 유효출구속도( $V_{eff}$ )와 효율( $\eta$ )을 다음과 같이 정의하였다.

$$V_{eff} = \frac{Q}{A_{eff}} \tag{1}$$

$$\eta = \frac{(P_{t,out} - P_{t,in}) \cdot Q}{\tau \cdot \omega} \tag{2}$$

여기서  $P_t$ 는 전압을 의미하며 하첨자 out 과 in 은 각각 출구와 입구를 나타낸다.  $Q$ 는 체적유량을 나타내며,  $\tau$ 와  $\omega$ 는 각각 토크와 각속도를 나타낸다.

## 3. 소음기 형상에 따른 성능변화

### 3.1. 소음기의 공력기능

소음기 형상에 따른 제트팬의 성능을 분석하기 전에 소음기의 유무에 따른 제트팬의 성능을 수치해석을 통하여 분석해 보았다. 소음기는 일반적인 원기동형태를 가지고 있는 제트팬을 사용하였고, 그에 따른 결과는 table 1에 나타내었다. Table 1을 보게 되면, 본 연구에 사용되어진 제트팬은 약 36.3 m/s의 유효출구속도와 약 70.5%의 효율을 가진 모델인 것을 알 수 있는데, 소음기가 없는 제트팬이 일반적인 원기동형태의 소음기를 가지고 있는 제트팬에 비해 유효출구속도에서 약 3.67%, 효율에서 6.05% 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 제트팬의 소음기가 소음특성을 배제하더라도 제트팬의 공력성능에도 크게 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 소음기가 없는 제트팬의 경우에는 로터로 유입되는 자연스러운 유로를 형성하지 못하여 성능의 감소가 생긴 것인데, 이러한 유동특성은 3.3절에서 다시 언급할 것이다.

Table 1 Performance of the jet fan with or without silencer

	$V_{eff}$ (m/s)	$\eta$ (%)
With silencer	36.35	70.51
Without silencer	35.19	64.46

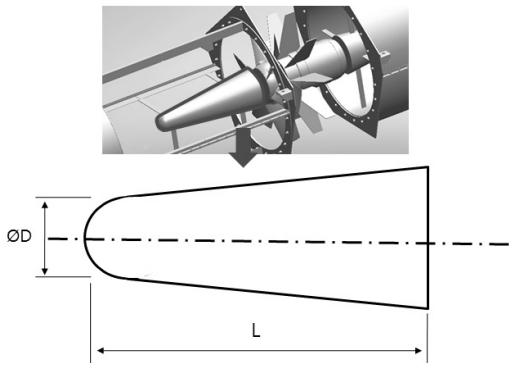


Fig. 4 Design variables of jet fan silencer

Table 2 Numerical analysis set of 2<sup>k</sup> factorial design

Set	L (mm)	ØD (mm)
1	650	100
2	1350	100
3	1000	250
4	650	400
5	1350	400

### 3.2. 소음기 형상 설계변수

실험계획법(DOE)<sup>(2,3)</sup>을 이용한 설계변수의 영향성 분석을 위하여 Fig. 4 와 같이 제트팬 소음기 설계 변수를 두 가지로 정의하였다. 여기서 L은 소음기의 길이로써 로터를 기준으로 캡(cap)의 최외각까지의 길이를, ØD는 소음기 캡의 직경을 나타낸다. 캡에서 로터까지 연결되는 허브 라인은 로터의 보스의 직경에 맞추어 설계되었다. 앞서 정의한 제트팬 소음기 설계변수의 영향성을 분석을 위하여 실험계획법의 2<sup>k</sup>요인실험(factorial design)을 사용하였고, Minitab 14 를 이용하여 결과를 분석하였다. 2<sup>k</sup>요인실험을 위한 변수 변화 범위는 다음과 같다. 소음기의 길이는 1000 mm를 기준으로 ±350 mm, cap의 직경의 크기는 250 mm를 기준으로 ±150 mm로 설정하였다. 그 외의 변수들은 기본 모델과 동일하게 고정하여 Table 2 과 같이 인자수(가변 변수) 2개로 5개의 요인 실험 set을 생성하였다.

### 3.3 매끄러운 벽면의 소음기

실제 소음기는 표면이 타공판으로 되어있어 거칠기를 가지고 있으나, 본 절에서는 매끄러운 표면으로 가정하고 소음기 형상에 따른 성능에의 영향성을 살펴보고자 한다.

먼저 소음기의 형상이 유동특성에 주는 영향성을 알아보기 위해 로터의 L.E.(leading edge)에서의 속도 프로파일을 Fig. 5 에 나타내었다. 이 때 소음기가 없는 경우도 해석을 수행하여 2<sup>k</sup>요인실험 set 결과와 비교 분석하였다. 5개의 실험 set 은 모두 비슷한 경향을 가진 속도 프로파일이 그려졌으나, 소음기가 없는 극단적인 경우에는 날개의 중간 스펀

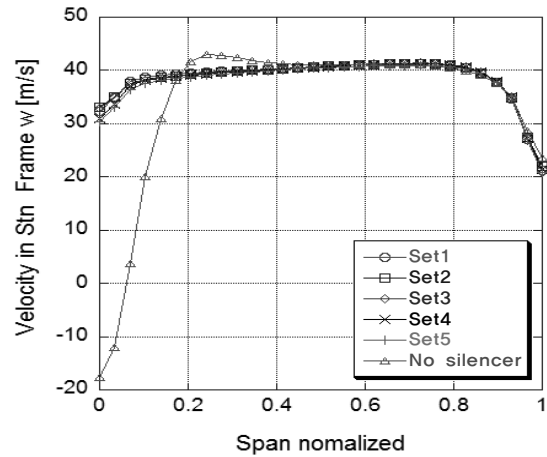
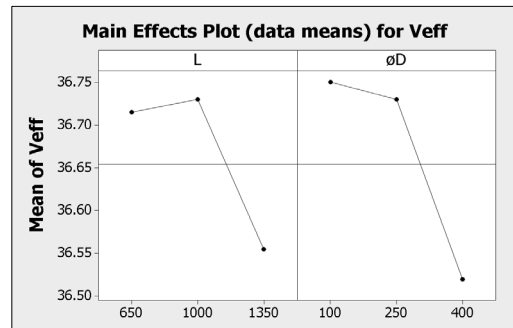


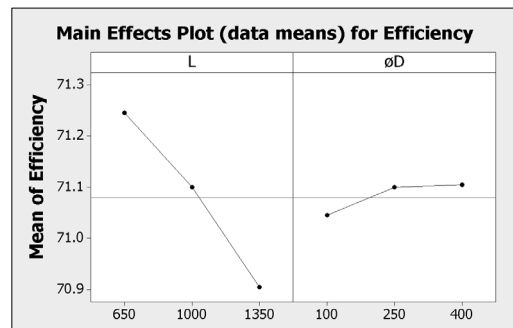
Fig. 5 Velocity profiles in axial direction at leading edge of rotor

(span)까지 실험 set과 상이한 속도 프로파일을 보이고 있다. 날개의 허브(hub)근처에 마이너스 속도, 즉 유동박리 현상(flow separation)이 발생하였고, 스펀방향으로 약 0.2에서 0.5까지는 속도가 증가하여 전체적으로 축방향 유동이 스펀에 따라 매우 비균일한 특성을 나타내고 있다. 이러한 축방향 유동특성은 로터입구부의 유동각을 변화시켜 결과적으로 제트팬의 성능저하를 초래하게 된다. 하지만 Set 1~5의 경우, 본 2<sup>k</sup>요인실험 변수변화범위 내에서는 로터입구의 유동장은 크게 영향을 받지 않는다고 할 수 있다.

설계변수의 영향성을 알아보기 위해서 Fig. 6 에 제트팬



(a) Veff



(b) Efficiency

Fig. 6 Main effect plots for design variables(smooth wall)

의 유효출구속도와 효율을 목적값으로 하여 주 효과 도표로 분석하였다. Fig. 6(a)는 유효출구속도에 대한 소음기 길이와 캡의 크기 두 인자의 영향력을 분석한 결과이고, Fig. 6(b)는 효율에 대한 두 인자의 영향력을 분석한 결과이다. 먼저 유효출구속도에 대한 두 인자의 영향성을 살펴보면, 설계변수의 변화범위 내에서 약 0.2 m/s 정도의 차이를 보이고 있어서 유효출구속도에 미치는 영향은 그리 크지 않다는 것을 확인할 수 있다. 효율의 경우는 소음기 길이가 증가하면 효율이 감소하지만, 캡의 크기에 따라서는 거의 변화가 없으며, 전체적으로 효율은 변수변화범위 내에서 약 0.3% 정도의 차이를 보이고 있다.

### 3.4 거친 벽면의 소음기

#### 3.4.1 조도(roughness)

소음기 형상은 Fig. 7에 나타난 바와 같이 내부는 흡음재로 채워져 있고 표면은 일정한 구멍을 가지고 있는 타공판 형식으로 되어 있다. 하지만 이러한 타공판의 형태를 그대로 모델링하여 수치해석하기에는 어려운 점이 많기 때문에 소음기 벽면에 타공판의 영향에 상응하는 거칠기를 적용하여 수치해석을 수행하였다.

타공율은 전체면적과 타공되어진 면적의 비율을 의미하는 것으로, 타공률 공식은 다음과 같다.

$$\text{타공율} = \frac{P^2}{D^2} \cdot 90 \quad (3)$$

여기서 P는 개공구간 피치이며, D는 개공직경이다. (Fig. 8) 본 연구대상 제트팬의 소음기의 경우 타공율이 48.04%로 10.95 mm의 개공구간 피치와 8 mm의 개공직경을 가지고 있다. 하지만 위 타공율에 상응하는 정확한 조도를 찾아내는 것은 매우 힘들다. 따라서 거친 벽면을 가진 소음기의 영향성은 일반적인 스플리트형 소음기에 사용되는 조도인 3 mm를 등가모래조도(equivalent sand roughness)<sup>(4,5)</sup>로 사용하여 수치해석을 수행하였다.<sup>(6)</sup>

조도에 따른 무차원 수는 다음과 같이 정의된다.

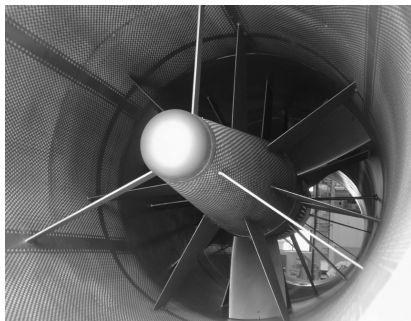


Fig. 7 Shape of silencer with punched plate

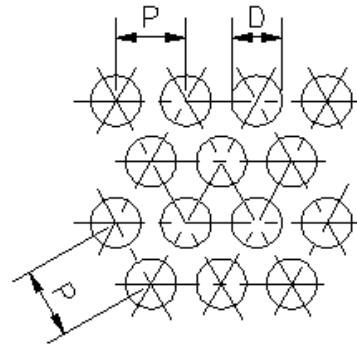


Fig. 8 Sketch of punched plate

$$\epsilon^+ = \frac{\epsilon u^*}{\nu} \quad (4)$$

$$u^* = \left(\frac{\tau_w}{\rho}\right)^{1/2}$$

여기서  $\epsilon$ 는 Ni-kuradse의 실험에 따른 등가모래조도이고,  $\tau_w$ 는 벽에서의 전단응력을 나타낸다. 이러한 벽면조도는 다음과 같이 세 가지로 나뉘게 된다.

$\epsilon^+ < 5$  수력학적으로 매끄러운 벽면, 마찰에서 조도에 의한 효과 없음.

$5 \leq \epsilon^+ \leq 70$  천이조도 영역.

$\epsilon^+ > 70$  완전히 거친 벽면, 점성저층이 완전히 파괴됨.

여기서 3 mm의 등가모래조도를 생각했을 때,  $\epsilon^+$ 의 값은 약 391.72으로 본 연구의 소음기가 완전히 거친 벽면임을 생각할 수 있다.

#### 3.4.2 거칠기가 고려된 소음기

매끄러운 면에 적용된 전단이송  $k-\omega$  난류모델은 벽면 근처에서 no slip 또는 free slip 조건을 사용하기 때문에 특정한 조도를 줄 수가 없다. 때문에  $k-\epsilon$  난류모델로 새롭게 적용시켜 해석을 수행하였다. 이에 두 난류 모델에 대한 비교가 불가피했으며, 두 난류모델에 대한 결과는 각각의 경우에 따른 유효출구속도와 효율을 도표로 fig. 9에 나타내었다. 5개의 실험 set에 대해 평균적인 값을 보았을 때,  $k-\epsilon$  모델이 전단이송  $k-\omega$  모델에 비해 유효출구속도에서 0.04 m/s의 감소가 있었고, 효율에서는 1.26% 증가되었다. 효율의 증가는 벽면근처의 유동 박리현상을 잘 예측하지 못하여 나타난 결과라고 사료된다. 결과에서 미미한 차이가 있지만  $V_{eff}$ 와 효율 모두 같은 경향을 가지고 있기 때문에  $k-\epsilon$  모델에 거칠기를 적용하여 소음기형태에 의한 영향성을 판단하기에 무리가 없다고 판단하였다.

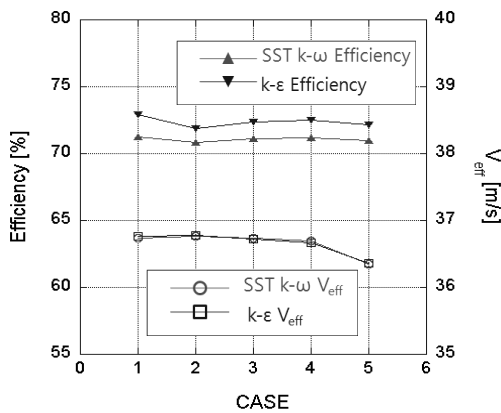
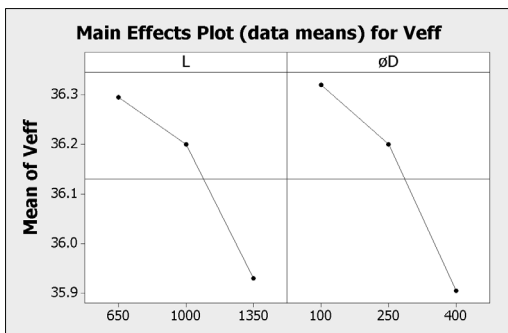
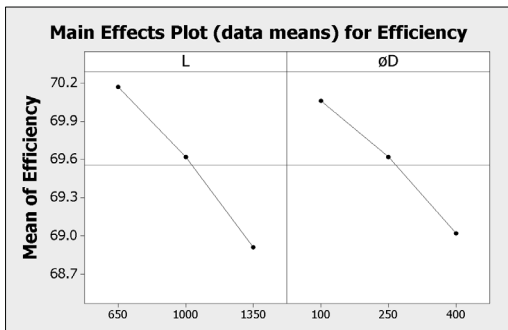


Fig. 9 Comparison of SST k- $\omega$  with k- $\epsilon$  model



(a)  $V_{eff}$



(b) Efficiency

Fig. 10 Main effect plots for design variables (rough wall)

거친 표면을 가진 소음기의 영향성 판단은 벽면에 조도 입력이 가능한 k- $\epsilon$  모델을 사용한 수치해석으로부터 결과를 도출하였다. 조도 이외의 다른 경계조건은 매끄러운 벽면의 경우와 동일하게 적용하였다. 해석 결과 역시 2\*요인실험에 의해 분석되었으며, 주 효과 도표를 Fig. 10에 나타내었다. 매끄러운 벽면을 적용시킨 모델과 유효출구속도에서는 거의 비슷한 경향성을 보이지만 Fig. 10(b)에서 캡의 직경에 따른 효율을 보면, 매끄러운 벽면을 적용시킨 결과와 상이한 것을 알 수 있다. 또한, 목적값의 변화 범위도 큰 것을 알 수 있다. 이는 캡의 직경에 따른 유동의 흐름보다 소음기의 거친 벽면의 증가로 인한 마찰 손실(friction loss) 효과가 크다는 것이

다. 즉, 소음기의 길이가 길어질수록, 캡의 직경이 커질수록 타공판의 표면적증가로 인한 마찰력 증대의 효과가 발생한다고 볼 수 있다. 거친 벽면을 가진 소음기의 변수 변화 범위 내에서 공력성능의 최대 범위를 보면 유효출구속도는 약 0.4 m/s, 효율은 1.4% 정도로 제트팬 성능에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서 소음저감을 위해서 소음기의 표면적을 크게 가져가는 설계의 경우 공력성능의 감소를 동반하므로 이를 고려하여 설계하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구를 통하여 제트팬 소음기 형상 설계변수가 제트팬 성능에 미치는 영향에 대하여 알아보았으며, 결과는 다음과 같다.

1) 유효출구속도( $V_{eff}$ )와 효율은 캡의 크기와 소음기의 길이가 커질수록 감소하며, 조도가 고려된 경우 그 영향성은 더욱 커지게 된다.

2) 소음기 타공판에 상응하는 조도를 가정하여 해석을 수행하였으나, 보다 정확한 해석을 수행하기 위해 타공율에 따른 조도 정립과 이에 대한 실험적 연구가 필요하다.

3) 제트팬의 소음기는 제트팬 내의 자연스러운 유로형성에 도움을 주며, 실제 사용되어지고 있는 원기동 형태의 소음기보다 원뿔 형태의 소음기 형상이 제트팬의 공력성능 향상을 가지고 올 수 있다.

#### 후기

본 연구는 지식경제부지정 고효율 저소음 송풍기 개발 사업의 일환으로 수행됨.

#### 참고문헌

- (1) P. A. Durbine and B. A. Petterson-Rief. Wiley, 2001, Statical Theory and Modeling for Turbulent Flows.
- (2) Myers, R. H., Montgomery, D. C., 2002, "Response Surface Methodology : Process and Process and Product Optimization Using Designed Experiments, Second Edition," AWiley-Interscience Publication, United States of America.
- (3) Hicks, C. R., Turner Jr, K. V., 1999, "Fundamental Concepts in the Design of Experiments, Fifth Edition," Oxford University Press, New York.
- (4) Nikuradse, J., 1933, "Laws for Flows in Rough Pipes," VDI-Forschungsheft 361, Series B, Vol. 4, p. 361
- (5) Frank, M. White., 1999, Fluid Mechanics, pp. 346~349
- (6) 윤계원, 김준호, 김영찬, 김두훈, 1998, "스프리트형 소음기의 압력손실 평가방법," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 223~228.