

< 논문 >

제트송풍기 노즐의 형상최적설계

서성진[†] · 김광용^{*}

(2004년 10월 7일 접수, 2006년 6월 19일 심사완료)

Design Optimization of Nozzle Shape for a Jet Fan

Seoung-Jin Seo and Kwang-Yong Kim

Key Words : Jet Fan(제트송풍기), Nozzle(노즐), Numerical Optimization(수치최적화), Throw Distance(도달거리), Response Surface Method(반응면 기법)

Abstract

In the present work, nozzle shape of a jet fan is optimized numerically using three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes analysis. Standard k-ε model is used as a turbulence closure. Response surface method is employed as an optimization technique. The objective function is defined as maximum throw distance. Three geometric variables, i.e., length and angle of nozzle, and interval between two nozzles, are selected as design variables. As the main result of the optimization, the throw distance has been improved effectively.

기호설명

- A : 노즐 면적
- Dz : 도달 거리
- f : 목적함수
- I : 송풍기 토출구 사이의 거리
- L : 노즐의 길이
- n : 설계변수의 수
- P : 압력
- R^2_{adj} : 수정된 결정계수
- U : 속도
- x_i : 설계변수 또는 직교좌표
- α : 노즐 안내면의 경사각
- β : 회귀계수
- ρ : 밀도
- k : 난류 운동에너지
- ϵ : 난류 운동에너지의 소멸율
- μ_{eff} : 난류유효점성계수

1. 서론

최근 차량의 보급이 급격히 증가함에 따라 부족한 주차공간을 확보하기 위한 수단으로 대부분의 건축물 지하에 주차시설을 건설하고 있다. 이러한 지하공간의 환기를 위한 몇 가지 방법 중 오염된 공기를 제트송풍기에 의해 유입되는 외부 공기로 희석시키는 무덕트 환기시스템이 적은 설비투자과 높은 환기효율로 인해 큰 관심을 끌고 있다.

무덕트 환기시스템에 사용되는 제트송풍기는 종류에 따라 다소 차이는 있으나 입구소음기-임펠러-출구소음기-노즐의 형태로 구성되어 있으며 이 시스템의 환기 성능은 임펠러와 노즐에 의해 결정된다. 그간 덕트 송풍기에 대해서는 상당한 설계기술이 축적되었으며, 일반적인 제트 기류에 관해서도 많은 연구⁽¹⁻³⁾가 이루어져 왔으나, 제트 송풍기의 환기성능에 직접적인 영향을 미치는 노즐 형상에 대해서는 많은 연구가 이루어지지 못하였다.

제트송풍기의 경우 노즐 출구에서 분출된 제트 기류의 특성에 의해 중심선속도(centerline velocity), 도달거리(maximum throw), 유도비(entrainment ratio)

[†] 책임저자, 회원, 인하대학교 전산유체공학연구소

^{*} 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : kykim@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7317 FAX : (032)868-1716

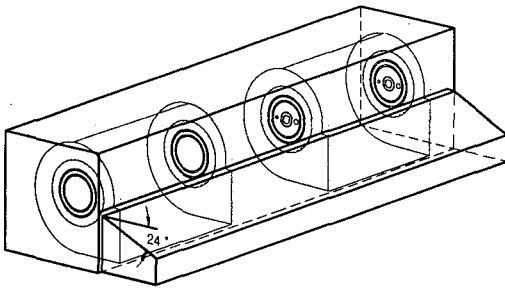


Fig. 1 Shape of reference fan

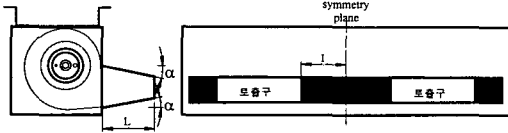


Fig. 2 Geometry of nozzle shape and design variables

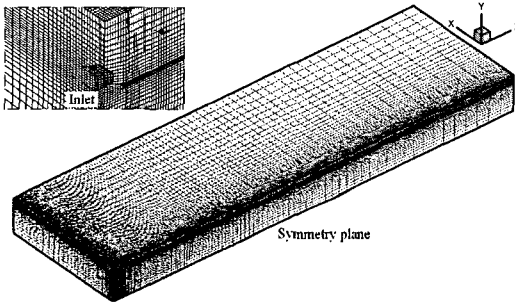
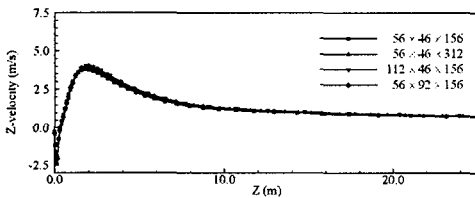
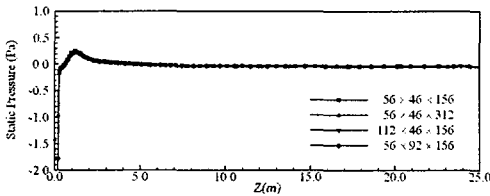


Fig. 3 Grid system



(a) Velocity



(b) Static pressure

Fig. 4 Grid dependency test

및 노즐 출구에서의 확산각(angle of divergence) 등의 환기 성능이 결정된다. 따라서 그간 환기

성능을 예측하고 향상시키기 위한 연구는 주로 실험(4-7)에 의존해 왔으나 실험적인 방법은 공간 및 시간 상의 제약으로 인해 많은 어려움이 있다 그러나, 최근에는 컴퓨터 성능의 향상에 힘입어 삼차원 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) 해석을 이용한 전산유체역학적 수치모사기법이 환기문제에 대해서도 활발히 적용되고 있다.

아울러, 각종 유체기기의 설계에 있어서는 유동해석이 유동장에 관한 단순한 참고자료를 제공해 주는 수준을 넘어 수치최적화기법과 결합하여 설계의 직접적인 수단으로 사용되기 시작하였다. 예를 들어 Lee와 Kim,⁽⁸⁾ Ahn과 Kim,⁽⁹⁾ 및 Kim과 Seo⁽¹⁰⁾는 축류압축기와 원심다익송풍기의 설계에 삼차원 RANS 해석을 바탕으로 한 수치최적설계기법을 적용하여 기존 설계기법이 갖는 한계를 뛰어 넘는 성과를 거두었다.

본 연구에서는 삼차원 RANS 해석과 수치최적화기법인 반응면기법(response surface method)을 이용하여 제트송풍기의 환기 성능을 향상시키기 위한 최적 노즐 형상을 도출하고, 아울러 제트송풍기의 노즐 형상이 기류와 환기성능에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 유동해석

본 연구에서는 비압축성 삼차원 정상상태의 유동해석을 위해 상용 소프트웨어인 CFX-5.6⁽¹¹⁾을 사용하였으며, 계산에 사용된 지배방정식들은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j U_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) \tag{2}$$

여기서, x_i 는 직교좌표이고, U_i 는 난류평균속도성분이며, P 는 평균압력, μ_{eff} 는 난류유효점성계수이다. 각각의 지배방정식은 유한체적법을 이용하여 이산화하였으며 난류유동의 해석을 위해서는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

노즐로부터 분출된 제트 기류가 벽면으로부터 받는 영향을 최소화 하고자 유동장의 폭과 길이를 각각 60m와 70m로 설정하였으며 높이를 4.25m로 설정한 후 바닥으로부터 3.5m 높이에

Table 1 Ranges of design variables for selection of the points for response evaluation

Variable	Lower Bounds	Upper Bounds
Length, L(mm)	100	300
Angle, α ($^\circ$)	-6 $^\circ$	2 $^\circ$
Interval, I (mm)	90	170

Table 2 The quality of the 2nd order response surface for the objective function and static pressure

Model	R^2	R^2_{adj}	Std. error of the estimate
Objective function	0.880	0.817	1.2466

Table 3 Results of optimization

	Reference	Optimum
Objective value	47.0 m	61.6 m

제트송풍기를 위치시켰다. 송풍기와 노즐의 형상 (Fig. 1 과 2)이 좌우 대칭이므로 Fig. 3 와 같이 대칭면을 중심으로 반쪽 영역만을 계산영역으로 정하고, 노즐 내 송풍기 토출구가 위치한 면을 입구면으로 설정하였다.

경계조건으로 입구면에서 속도는 과거 Kim 과 Seo⁽¹⁰⁾의 연구에서 계산된 바 있는 원심다익송풍기 출구에서의 속도분포를 2 차 다항식으로 근사시켜 사용하였고, 출구면에서는 대기압의 압력 조건을 사용하였다. 벽면에서는 속도 및 k 와 ϵ 의 경계조건을 처리하기 위해 난류 벽함수를 사용하였다.

해의 격자 의존성을 제거하기 위해 격자 테스트 (Fig. 4)를 거친 후 노즐 내에 6×6×11 개의 격자를 갖는 56×46×156 개의 격자계를 선택하였다.(Fig. 3)

3. 수치최적화

반응면 기법⁽¹²⁾은 최적화에 필요한 일련의 통계학적 및 수학적 기법의 적용과정으로 수치해석 (혹은 실험)에 의해 자료를 취득하고 이 자료를 바탕으로 한 반응면을 구성한 후 반응면 상에서 목적함수를 최적화 하는 방법이다. 실험 계획법으로 개발된 이 방법은 실험의 횟수를 단축할 수 있는 이점이 있어 최근에는 최적화 문제에 폭 넓게 적용되고 있다.⁽¹³⁾ 보편적으로 다음과 같이 2 차 다항식형태의 반응면이 사용되고 있다.

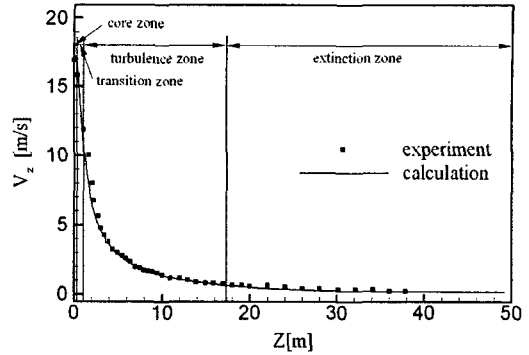


Fig. 5 Comparison of centerline velocity for single round jet

$$f = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j + \sum_{j=1}^n \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (3)$$

여기서 n 은 설계 변수의 수를 나타내고, β_0, β_1, \dots 등은 다항식의 계수이다. 이 계수들을 구하기 위해 표준 최소자승법(least square method)을 사용하였다.

반응면을 구성하는 데 필요한 물리적, 수치적 실험의 횟수를 최소한으로 줄이는 동시에 제한된 설계 공간에서 높은 신뢰도를 갖는 반응모델을 합리적으로 결정하기 위해 실험 설계 이론(design of experiment theory)을 적용하였다. 본 연구에서는 실험 설계 이론으로 설계 공간 내에서 각 설계 변수들의 최소값과 최대값을 설정하고, 이를 [-1, +1]의 값을 갖는 무차원 값으로 변환한 후, 여기에 중심점을 추가해 모든 설계 변수의 [-1, 0, +1] 조합에 대해 수치 실험을 시행하는 3^k-완전 계승법(3^k-full factorial method)을 사용하였다.

수치최적설계를 위해서는 기본적으로 환기 성능을 나타낼 수 있는 목적함수와 설계변수의 선정이 우선되어야 한다. 제트 기류의 유동특성에 관한 연구로부터 환기 성능에 영향을 미칠 수 있는 인자를 살펴보면 노즐 출구에서 분출된 제트 기류의 중심선속도(centerline velocity), 도달거리(maximum throw), 유도비(entrainment ratio) 및 노즐 출구에서의 확산각(angle of divergence) 등이 환기 성능에 영향을 줄 것으로 판단된다. 하지만 이들 인자간에는 매우 큰 상관관계가 존재하고 있어 이들 인자를 모두 고려하여 제트팬의 노즐 형상을 설계하기에는 현단계에서는 큰 무리가 따를 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 도달거리만을 목적함수로 사용하였다. ASHRE⁽¹⁴⁾에 의하면 송풍기에 의해 분출된 기류의 중심선속도가 0.25m/s 이하로 감소될 때까지의 거리를 기류의

Table 4 The optimum values of design variables

Variables	Reference	Optimum
Length, L(mm)	250.0	100.6
Angle, $\alpha(^{\circ})$	-24° (single side only)	-4.36°
Interval, I (mm)	130.0	130.7

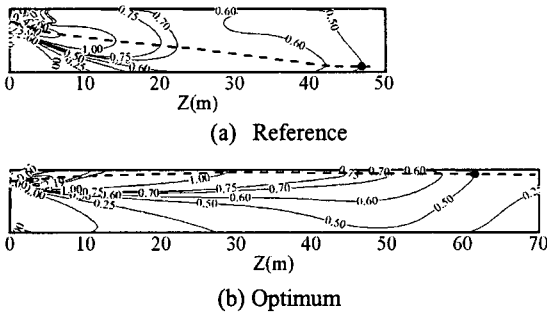


Fig. 6 Velocity contours on symmetric plane(---: max. velocity line, •: maximum throw)

최대도달거리로 정의하고 있다. 본 연구에서 대상이 된 원심다익송풍기의 출구 평균 분출속도로 자유제트 이론에 의해 도달거리를 계산해 본 결과 59.1m 에 도달하였다. 그러나, 이 거리까지 수치계산을 수행 할 경우 많은 격자수로 인해 계산 시간영역이 과다하여 최적설계가 곤란을 겪게 될 것이므로 본 연구에서는 최소 중심선 속도를 0.50m/s 하여 이 속도 이하로 제트의 중심선 속도가 감소될 때까지의 거리를 도달거리(D_2)로 정의한 후 이를 최대화하기 위해 목적함수를 다음과 같이 설정하였다.

$$f = D_2 \tag{4}$$

노즐 형상에 관련된 기하학적 변수들 중 설계 변수로써 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 기류분사 방향에 대한 노즐의 길이(L)와 안내면의 경사각(α), 그리고 송풍기 토출구 사이의 거리(I) 등 세가지를 선택하였다. 각 설계변수들에 대한 실험점의 영역은 Table 1 에 나타내었다. 3 개의 설계변수를 사용하여 반응면을 구성할 경우 $n_r = (n+1)(n+2)/2$ 개, 즉 10 개의 미지 상수를 결정하여야 하는 데 이를 위해 본 연구에서는 완전계승법에 의해 총 27 개의 수치 실험점을 선택하였다.

반응면 다항식 (3)에서 각각의 미지상수는 통계학 상용 소프트웨어인 SPSS 를 사용하여 구하였다. 완성된 반응함수는 T-검정과 ADJUST R^2 법을 사

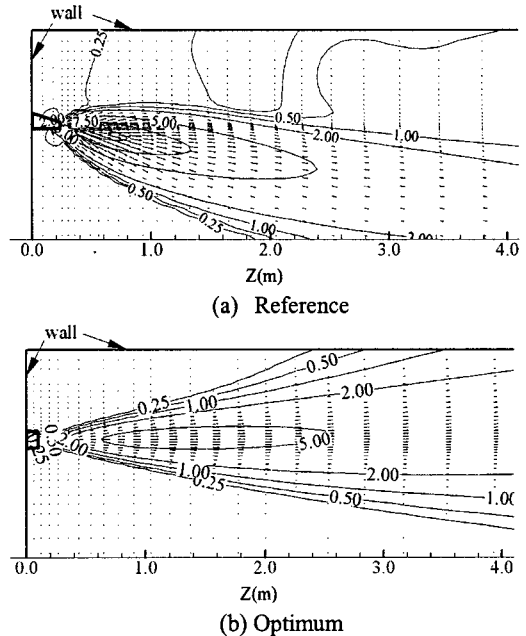


Fig. 7 Distributions of velocity on symmetric plane near the nozzle (velocity contour: m/s)

용하여 신뢰도를 높였다. ANOVA 와 회귀분석의 결과는 Table 2 에 나타내었다. 형성된 반응면으로부터 최적점을 찾기 위한 최적화 기법으로 선형 계획법(linear programming)이 사용되었다.

4. 결과 및 검토

본 연구에서 수치최적화를 위해 사용된 유동해석의 타당성을 검증하고자 김경환 등⁽¹⁵⁾에 의해 수행된 원형 제트에 관한 실험 결과와 유동해석의 결과를 Fig. 5 에서 비교하였다. 횡축에 노즐출구를 기점으로 한 거리를, 종축에 중심선속도를 나타내었다. 전 영역에서 중심선속도가 실험 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

본 연구에서 환기 성능을 향상시키기 위해 선택된 기준(reference) 형상은 H 사에서 제작되고 있는 지하주차장의 무덕트 환기시스템에 사용되고 있는 송풍기로서 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 양흡입의 원심다익송풍기가 모터를 중심으로 양쪽으로 위치해 있으며 송풍기 출구에 아래쪽 안내면은 수평이고, 위쪽 안내면의 경사각이 24° 인 노즐이 부착되어있다. 이 기준 형상과 대칭형상의 노즐에 대해 예비 유동해석을 수행한 결과 대칭형상이 기준형상에 비해 도달거리가 크게 증가함을 확인할 수 있었다. 따라서, 설계변수의 선

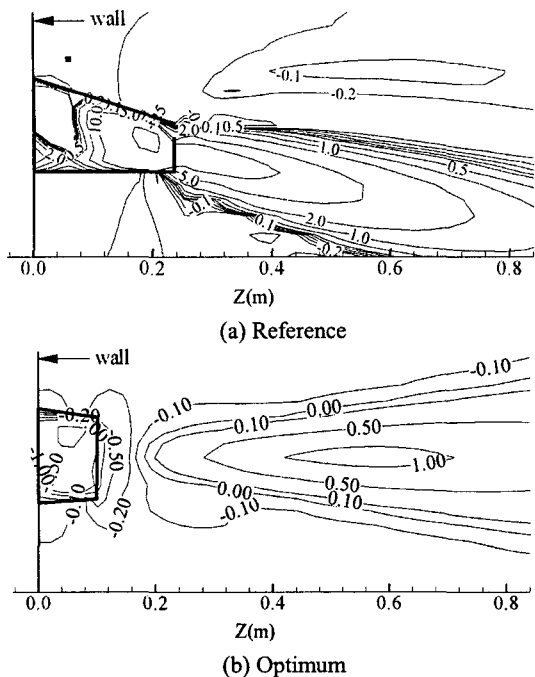


Fig. 8 Distributions of pressure on symmetric plane near the nozzle (pressure contour : Pa)

정 단계에서 대칭형상 노즐을 최적화 대상으로 삼았다. 계산시간을 고려한 설계변수 개수의 축소를 위해 양쪽 안내면의 경사도가 다른 경우는 고려 대상에서 제외하였다.

목적함수의 반응면 상에서 얻어진 최적화의 결과를 Table 3 에 나타내었고 최적점에서의 각 설계변수의 값을 Table 4 에 나타내었다. 최적화의 결과로 분출된 기류의 도달거리는 기준 노즐에 비해 무려 31%가 증가하였음을 알 수 있다. 탐색된 최적점에서 각 설계변수의 최적값을 살펴보면 최적 노즐은 기준 노즐에 비해 두 노즐 사이의 간격(l)은 큰 변화를 보이지 않았다. 그러나 노즐의 길이가 기준 형상보다 60 %나 감소하였고 안내면의 경사각, α 는 -4.36° 로 기준 형상에 비해 크게 감소함으로써, 노즐의 입구에 대한 출구 단면적(A_{exit}/A_{in})의 비가 1.68 에서 2.50 으로 크게 증가하는 결과를 가져왔다.

기준 형상과 최적화된 노즐 형상에 대한 유동장을 비교하기 위해 Fig. 6 에 대칭면에서의 등속선도 및 최대속도선(점선)을 나타내었다. 여기서 최대 속도선은 각 단면(x-y 평면)에서의 최대 속도점을 이은 선을 의미한다. 이 그림에서 유동장을 보다 분명히 나타내기 위해 수직축의 스케일은 실제 보다 2 배 크게 나타내었다. 이 그림을 통해 알 수 있는 것은 기준 노즐의 경우 기류를

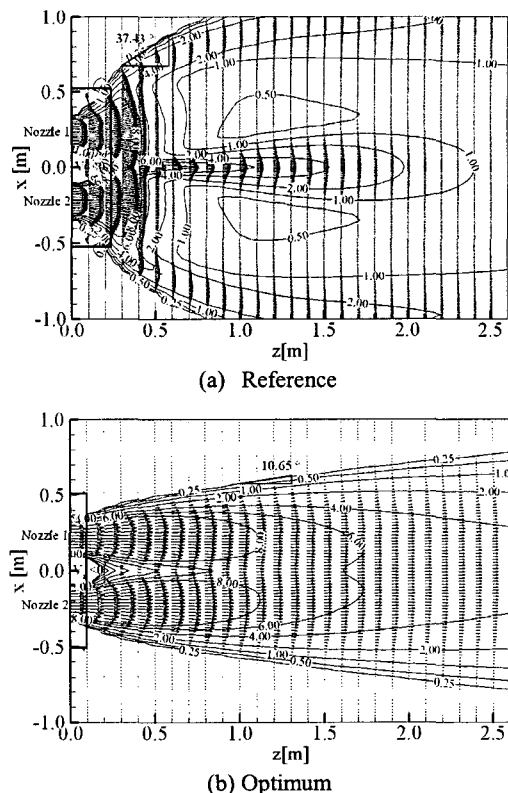


Fig. 9 Velocity contours on a x-z plane

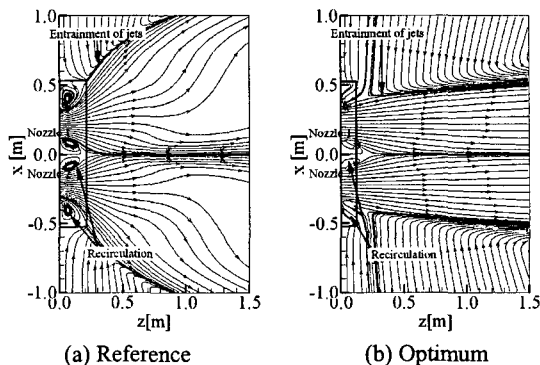


Fig. 10 Streamlines near the nozzle exit on a x-z plane

하향 분사하는데 반해 최적 노즐에서는 수평분사가 이루어져 중심선이 위 벽면과 평행하게 형성되고 유속의 감쇄가 지연되어 도달거리가 향상됨을 알 수 있다.

노즐 출구 근처의 유동장을 보다 자세히 파악하고자 대칭면에서의 속도 및 압력 분포를 각각 Fig. 7 과 Fig. 8 에 나타내었다. 최적 노즐이 기준 노즐 보다 노즐 출구단면적이 크기 때문에 노즐

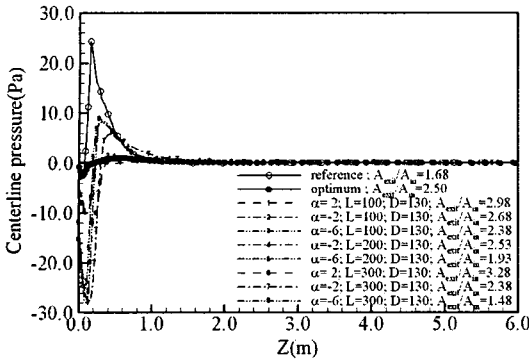


Fig. 11 Pressure distributions on maximum velocity line

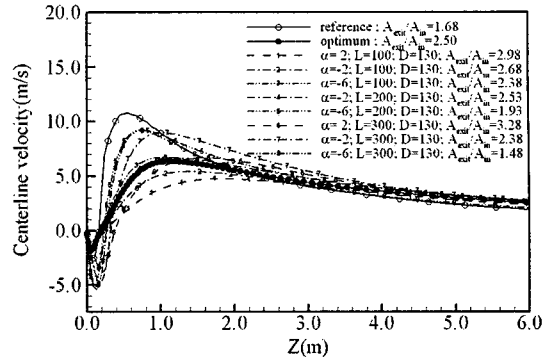


Fig. 12 Velocity distributions on maximum velocity line

출구에서의 분출 속도가 상대적으로 작게 나타나고 있음을 Fig. 7을 통해 확인할 수 있다. 그러나, 5 m/s의 등속도선을 비교해 볼 때, 하향 분사되는 기준 노즐의 기류에서 주 유동에 수직인 방향으로 제트의 확산이 최적노즐에 비해 빠르게 진행되어 주 유동 방향 속도의 감쇄가 빨리 일어남을 알 수 있다. 그리고 Fig. 8의 압력분포를 살펴보면 기준형상과 최적형상 모두 노즐 내부에서 압력이 대기압보다 낮은 영역이 존재한다. 이것은 두 개의 송풍기 출구로부터 제트 기류가 빠르게 분출됨에 따라 이 그림이 나타내는 두 기류 사이의 영역에서 역류가 발생할 수 있음을 의미한다.

노즐 출구의 중심선을 지나는 x-z 평면에서 두 개의 평행한 제트 기류가 주 유동방향(z 방향)으로 진행하면서 혼합되는 과정을 Fig. 9에 나타내었다. 이 그림에서 기준형상의 경우 z=0.4m를 지나면서 속도 분포의 형태가 크게 변하는 데 이는 Fig. 6(a)에 나타난 바와 같이 제트의 최대속도선, 즉 중심선이 x-z 평면과 일치하지 않기 때문이다. 두 개의 평행한 사각 노즐에 대한 실험을 수행한 Tanaka^(16,17)에 의해 언급된 바와 같이 두 개의 제트 사이에 재순환 영역이 두 형상 모두 존재함을 확인할 수 있으며 최적형상의 경우 기준형상보다 약해진 것을 알 수 있다. 아울러, 노즐의 x 방향 양 끝 내부를 보면 노즐의 길이가 상대적으로 짧은 최적형상의 경우에는 외부 공기가 일부 노즐내부로 유입되고 있음을 알 수 있다. (Fig. 10)

반응면을 구성하기 위해 직접 계산된 27개의 수치실험결과들 중에서 두 노즐 사이의 간격이 최적형상과 비슷한 130mm인 형상들만을 선택한 후 최대속도선, 즉 제트의 중심선 상의 압력 분포 및 속도분포를 각각 Fig. 11과 Fig. 12에 나

타내었다. 모든 형상에서 노즐 내부에서는 압력과 속도가 음의 크기를 가지나 이 위치를 지나면서 증가하기 시작하고 두 개의 제트가 하나로 합쳐지는 영역에 이르러 속도는 서서히 감소하는 경향을 보이고 있다.

x-z 평면상에서 기류의 확산각은 기준형상의 경우에 약 37.4°이며, 수치최적설계로 얻어진 최적형상의 경우 10.6°로 크게 감소되었다(Fig. 9). 이러한 결과는 Fig. 11에 나타난 바와 같이 기준형상의 경우 노즐 출구근처에서 큰 압력구배가 발생함으로써 유동의 확산을 촉진시킨 것으로 보인다. 각각의 실험점에 대한 분포를 살펴보면 출구 면적비가 작아질수록 노즐 출구에서의 속도가 증가할 뿐 아니라 압력구배도 증가하는 것을 알 수 있다. 이 경우, 기류의 속도가 증가함으로써 도달거리가 증가할 것으로 기대되지만, 압력구배의 증가로 인해 유동의 확산이 빠르게 진행되어 오히려 도달거리가 감소하는 것으로 보인다

5. 결론

제트송풍기 노즐의 기하학적 변수들을 체계적으로 최적화하여 노즐의 성능을 개선하기 위해 본 연구에서는 삼차원 유동해석과 수치최적화기법인 반응면기법을 사용한 최적설계를 적용하였다. 설계변수로는 노즐의 길이와 안내판의 경사각 및 두 원심 팬 출구간의 거리 등 세가지 기하학적 변수가 사용되었으며, 최적화에 27개의 수치실험점이 사용되었다.

최적설계의 결과로 노즐에서 분출된 제트의 도달거리가 기존 노즐형상에 비해 31% 정도 향상되었다. 도달거리가 늘어남에도 불구하고 노즐의 길이는 60%나 감소된 것이 주목할만하다.

참고문헌

- (1) Ture, G. L. and Ohio, C., 1993, "Air Velocities in Ventilation Jets," *Transactions American Society of Heating Ventilation Engineers, ASHVE Research Report*, No. 1479, pp. 216~279.
- (2) Tanaka, E., 1970, "The Interference of Two-Dimensional Parallel Jets (1st Report.)," *Bulletin of the JSME*, Vol. 13, No. 56, pp. 272~280.
- (3) Tanaka, E., 1974, "The Interference of Two-Dimensional Parallel Jets(2nd Report)," *Bulletin of JSME*, Vol. 17, No. 109, pp. 920~927.
- (4) Anderson, E. A. and Spall, R. E., 2001, "Experimental and Numerical Investigation of Two-Dimensional Parallel Jets," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 123, pp. 401~406.
- (5) Sandberg, M. and Sjoberg, M., "The Use of Moments for Assessing Air Quality in Ventilated Rooms," *Building and Environment*, Vol. 18, No. 4, pp. 181~197.
- (6) Sandberg, M. and Sjoberg, M., 1983, "Ventilation Efficiency as a Guide to Design," *ASHRAE Trans.*, Vol. 89, Pt. 2B, pp. 455~479.
- (7) Kondo, Y., Tadokoro, Yoshino, H. and Imai, T., 2000, "Study on Ventilation Efficiency in Underground Car Parks," *Proceedings of Ventilation 2000*, Vol. 2, pp. 213~221.
- (8) Lee, S-Y. and Kim, K-Y., 2000, "Design Optimization of Axial Flow Compressor Blades with Three-Dimensional Navier-Stokes Solver," *KSME International Journal*, Vol. 14, pp. 1005~1012.
- (9) Ahn, C-S. and Kim, K-Y., 2003, "Aerodynamic Design Optimization of an Axial Flow Compressor Rotor," *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part A- Journal of Power and Energy*, Vol. 217, pp. 179~184.
- (10) Kim, K-Y and Seo, S-J, 2004, "Shape Optimization of Forward-Curved Blades Centrifugal Fan with Navier-Stokes Analysis," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 126, No. 5, pp. 735~742.
- (11) CFX-TASCFLOW : solver, Computational Fluid Dynamics Software, *AEA Technology Engineering Software Ltd*,(1999).
- (12) Myers, R. H., 1999, "Response Surface Methodology-Current Status and Future Direction," *Journal of Quality Technology*, Vol. 31, No. 1, pp. 30~44.
- (13) Shyy, W., Papila, N., Vaidyanathan, R. and Tucker, K., 2001, "Global Design Optimization for Aerodynamics and Rocket Propulsion Components," *Progress in Aerospace Science*, Vol. 37, pp. 59~118.
- (14) ASHRAE, 1997, Fundamentals, *ASHRAE Handbook*, Ch. 31.1~31.18.
- (15) Kim, K. H., Liu, J., Lee, J. H., Iim, Y. C., Oh, M. D. and Kim, J. P., 2002, "Prediction of the Flow Characteristics of Jet Fan in a Confined Space," *TRAN. SAREK*, Vol. 14, No. 3, pp. 206~213.
- (16) Tanaka, E., 1970, "The Interference of Two-dimensional Parallel Jets (1st Report, Experiments on Dual Jet)," *Bulletin of JSME*, 13, No. 56, pp. 272~280.
- (17) Tanaka, E., 1974, "The Interference of Two-dimensional Parallel Jets (2nd Report, Experiments on the Combined Flow of Dual Jet)," *Bulletin of JSME*, 17, No. 109, July, pp. 920~927.