

터널 환기용 제트팬의 성능 향상을 위한 수치최적화

김준형* · 김진혁** · 김광용*** · 윤준용**** · 최영석*****† · 양상호*****

Numerical Optimization for Performance Improvement of a Tunnel Ventilation Jet fan

Joon-Hyung Kim*, Jin-Hyuk Kim**, Kwang-Yong Kim***, Joon-Yong Yoon****, Young-Seok Choi*****†, Sang-Ho Yang*****

Key Words : Jet Fan(제트팬), Numerical Optimization(수치최적화), Response Surface Approximation(반응면 기법), Performance Improvement(성능 향상), Efficiency(효율), Effective Outlet Velocity(유효 출구 속도).

ABSTRACT

This paper presents an optimization procedure for performance improvement of a tunnel ventilation jet fan. Optimization techniques based on response surface approximation (RSA) are employed to improve the aerodynamic performance of a tunnel ventilation jet fan. For numerical analysis, three-dimensional Reynolds- averaged Navier-Stokes (RANS) equations with shear stress transport turbulence model are discretized by using finite volume approximations and solved on hexahedral grids to evaluate the total efficiency at the operating condition as the objective function. Four geometric variables defining the meridional length and the thickness profile at the hub and shroud in the jet fan rotor are selected as design variables for the numerical optimization. The results of the numerical optimization show that the total efficiency of the optimized model is significantly improved in comparison with the base model.

1. 서 론

최근 들어 도로의 터널이 길어지고 통행 차량이 증가함에 따라 터널 내부의 환기 성능이 중요한 설계요소가 되고 있다. 터널 내부 환기의 본 목적은 운행하는 자동차에서 배출되는 일산화탄소(CO) 및 매연 등의 오염물질을 터널 외부로 방출시켜 쾌적하고 안전한 주행 환경을 유지하는 데 있고, 또한 화재 시 매연 효과와 함께 비상 시 인명의 안전 확보 및 유지 관리를 위하여 오염물질의 농도를 기준치 이하로 낮추는데 있다. 따라서 터널 계획 및 건설 시에는 반드시 적절한 환기 대책이 요구되어야 한다.

터널 내부 환기방식은 크게 자연 환기방식과 기계 환기방

식으로 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.⁽¹⁾

기계 환기방식은 크게 종류식(longitudinal), 반횡류식(semi-transverse) 및 횡류식(transverse) 등으로 구분되는데, 유럽, 일본 및 국내에서는 비용이 적게 들고 효율이 높은 제트팬(jet fan)을 이용한 종류식 환기방식을 사용하고 있다.

제트팬은 일반적으로 축류팬과 유사한 형태를 띠고 있다. 하지만 많은 양의 공기를 배출해야하기 때문에 회전속도가 큰 것이 특징이다. 또한 터널에 설치되어 터널 내부 환기를 목적으로 사용되어지는 특성상 장시간 가동되기 때문에 유지비용 절감을 위한 고효율 제트팬 기술이 필수적으로 요구되어진다.⁽²⁾ 그에 따라 유럽 및 일본 등의 선진국을 중심으로 제트팬의 고효율화를 위한 연구가 꾸준히 진행되고 있으며, 국내에서도 송풍기 개발 업체 및 연구 기관에서 제트팬에 대한 연구가 활발히 수행되어 지고 있는 추세이다.⁽³⁾

* 한양대학교 대학원 기계공학과/ 한국생산기술연구원
** 인하대학교 대학원 기계공학과
*** 인하대학교 기계공학과
**** 한양대학교 기계공학과
***** 한국생산기술연구원 그린에너지설비센터
***** (주)삼원이앤비
† 교신저자, E-mail : yschoi@kitech.re.kr

본 연구에서는 터널 환기용 제트팬의 성능을 향상시키고자 삼차원 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 해석과 최적화기법을 결합한 수치최적설계를 수행하였다. 수치최적설계에 앞서 제트팬의 수치해석결과를 실험결과와 비교함으로써 수치해석의 타당성을 검증하였고, 이를 바탕으로 제트팬 내 로터와 관련된 설계변수와 함께 목적함수로서 효율을 선정하여 이를 최대화 하고자 하였다.

2. 수치해석방법

본 연구에서는 상용 삼차원 점성유체 해석 프로그램인 ANSYS CFX-12.0을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 제트팬 내 유동장은 비압축성 난류유동장으로 가정하여 삼차원 평균 Navier-Stokes 방정식을 사용하였고, 수치 해석에 사용한 지배방정식은 유한체적법으로 이산화 되었다. 이산화 기법으로는 2차 이상의 정확도를 갖는 고해상도기법 (high resolution scheme)을 사용하였으며, 난류유동의 해석을 위한 난류모델은 유동박리현상 등에 적절한 전단이송 (shear stress transport)모델을 사용하였다.⁽⁴⁾

정확한 수치 해석 결과를 산출하기 위하여 해석대상 유동영역은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 실제 벨마우스(bell mouth)와 소음기(silencer) 형상을 적용한 입·출구 유동영역, 끝 틈새 (Tip clearance)를 고려한 로터(rotor) 영역 및 스테이터 (stator) 영역 전체를 대상으로 선정하여 로터와 허브 연결부를 제외한 모든 영역에서 실제유동과 일치하도록 고려하였다. 해석 대상인 제트팬은 로터와 스테이터 날개가 각각 6개 및 9개로 구성되어 있지만 해석 시간 단축 및 수렴성 향상을 위해 날개와 날개 사이의 인접면에 주기 조건을 적용하여 로터 및 스테이터 날개를 각각 1개 및 2개의 유로만을 대상으로 계산영역을 설정하였다. 회전하고 있는 로터 도메인과 회전하지 않는 입구 및 스테이터 사이의 경계면에는 Frozen Rotor 경계 조건을 부여하였다.

수치해석 격자계는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 로터 및 스

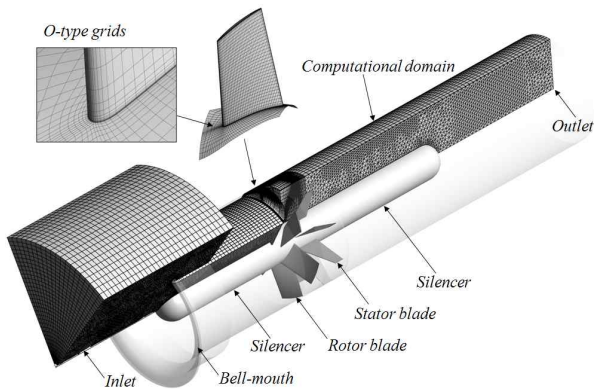


Fig. 1 Computational domain and grid system of the jet fan

테이터 유동 영역의 경우 ANSYS CFX-12.0 내 Turbo-Grid를 사용하여 육면체 격자계로 구성하였으며, $k-\omega$ 전단 이송 모델의 신뢰성을 확보하기 위하여 날개 표면 인근에는 O형 격자계를 구성하여 y+의 최대값을 10 미만으로 유지하도록 하였다. 입·출구 유동 영역에 대한 격자계는 CFX-ICEM을 사용하여 사면체 격자계로 격자를 생성하였으며, 전체 유동 영역에 대한 격자수는 약 32만 개로 구성하였다.

수치해석 시 작동유체로는 표준상태의 공기를 사용하였고, 입·출구영역의 경계조건은 각각 전압 및 정압으로 대기압 조건을 부여하였다. 일반적으로 제트팬은 일반 축류팬과는 달리 작동점이 정해져 있고, 다른 시스템과의 연결이 없기 때문에 제트팬 작동점을 예측하기 위하여 입·출구 압력비를 전압과 정압으로 하는 경계조건이 바람직하다.

3. 수치최적화기법을 이용한 제트팬 최적 설계

3.1 설계 사양 및 기본 모델 선정

수치최적화기법을 이용한 제트팬 최적 설계를 수행하기에 앞서 성능 비교 분석에 이용되어질 기본 모델을 선정하였다. 기본 모델은 선행 연구의 내용을 바탕으로 개발 대상 제트팬의 설계 사양을 만족시키는 모델로 선정하였으며, 주요 설계 변수들은 Table 1에 기술하였다.

선정 결과의 타당성을 검증하기 위하여 선정된 기본 모델을 Table 2에서 보는 바와 같이 수치해석 및 성능실험을 통해 개발 대상 제트팬의 설계 사양과 비교하였다.⁽⁵⁾ 동일 회전수 내 선정된 기본모델의 유효속도와 효율은 개발 대상 제트팬의 설계 사양을 만족하는 것을 확인할 수 있으며, 또한 수

Table 1 Design parameters of base model

Number of rotor blades [EA]	6
Number of stator blades [EA]	9
Rotor tip clearance [mm]	5
Blade angle of hub [degree]	46.8
Blade angle of shroud [degree]	22.1
Meridional Length of hub [mm]	94
Meridional Length of shroud [mm]	48.6
Maximum Thickness of hub [mm]	28
Maximum Thickness of shroud [mm]	10

Table 2 Comparison of the design specifications, numerical analysis results and experiment results

	specifications	numerical analysis	experiment
Rotational speed [rpm]	1780	1780	1780
V_{eff} [m/s]	36.4	37.9	36.5
Total Efficiency [%]	maximize	70.21	69.4

치해석결과와 실험결과를 비교하여 볼 때, 비교적 정확한 성능 예측이 된 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 수치해석을 수행 시 실제 형상과 거의 동일한 유동 영역을 선정하였기 때문으로 사료된다.

3.2 목적함수 선정

본 연구 대상인 터널 환기용 제트팬의 공력 성능 지표는 크게 유량을 표현하는 유효출구속도(V_{eff})와 효율(η)로 대표되어지며, 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V_{eff} = \frac{Q}{A_{eff}} \quad (1)$$

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

식 (1)에서 A_{eff} 는 유효출구면적을 뜻하며, Fig. 2에 나타난 바와 같이 ISO 13350⁽⁶⁾에서 명시한 면적들 중 (C)의 면적을 사용하였다. 식 (2)의 P 는 전압을 의미하고, 하첨자 in 과 out 은 각각 입구부와 출구부를 나타낸다. 또한 Q 는 체적유량을 나타내며, τ 와 ω 는 각각 토크와 각속도를 나타낸다.

위에서 언급한 두 가지 성능 지표들은 제트팬의 성능을 대표하는 값이지만 작동점이 고정되어 있는 제트팬의 특성 때문에 유효출구속도를 제외한 효율을 수치최적설계를 수행하기 위한 목적 함수로 선정하였다.

3.3 설계변수 및 범위 선정

제트팬의 주요 설계변수들은 앞서 Table 1을 통해서 언급한 바 있다. 이 설계변수들 중 허브와 쉬라우드에서의 날개 각도는 제트팬 로터 설치각에 따르는 값으로 제트팬의 유효출구속도 즉, 토출 유량에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 제트팬의 설계점 유량을 만족시키도록 하기 위하여 허브와 쉬라우드에서의 날개 각도에 대한 변수들을 수치최적설계를 위한 설계변수에서 제외하였다.

제트팬의 효율에 영향을 미치는 허브와 쉬라우드의 자오면 길이(Hub_m, Shr_m)는 수치최적화 작업을 위한 설계변수로 선정하였으며, 설계 제한 조건을 고려하여 기본 모델 값을 중심으로 $\pm 10\text{mm}$ 의 변수 변화 범위를 주었다.

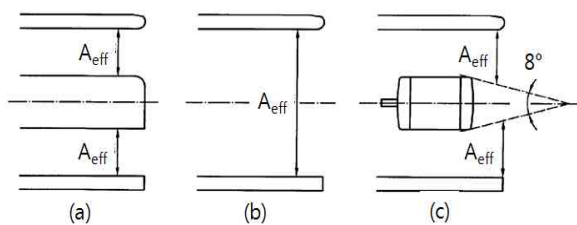
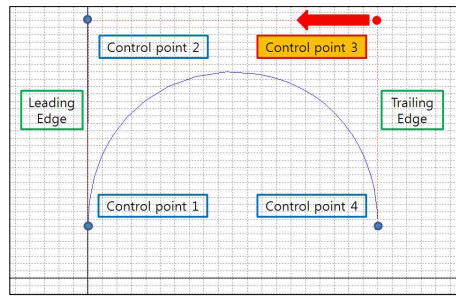
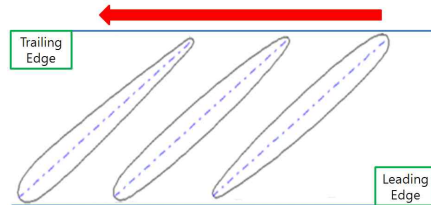


Fig. 2 Definition of the effective outlet area⁽⁴⁾



(a) Thickness profile by the Bezier-curve



(b) Changed thickness profile by variation of control point 3

Fig. 3 Definition of the thickness profile

Table 3 Design parameters for the numerical optimization

	Hub_m [mm]	Hub_th [mm]	Shr_m [mm]	Shr_th [mm]
min	84	10	38.6	10
base	94	55	48.6	55
max	104	100	58.6	100

제트팬의 두께 형상은 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 자오면 길이(수평축 방향)와 제트팬 두께값(수직축 방향)으로 한 평면 위에 4개의 제어점(control point)을 가진 베지어 곡선(Bezier curve)으로 표현이 가능하다. 이때, 다른 제어점들은 고정시킨 상태에서 3번 제어점의 수평축 위치를 (-)방향으로 이동시키면 Fig. 3(b)와 같이 최고 두께지점이 전면(leading edge)측으로 이동하여 에어포일 형태의 익형이 된다. 제트팬은 터널 내부의 환기 목적으로 사용되지만 터널 내부 화재 등의 위급 상황 시에는 배연 기능을 수행하기 위하여 역방향으로 작동해야 하는 경우가 있기 때문에 일반 축류팬과는 달리 가역성능이 요구 된다. 따라서 이전에 개발된 대부분의 제트팬의 경우에는 두께 형상을 대칭으로 설계하는 것이 일반적이었으나, 최근 들어 에너지 효율에 대한 관심이 증가함에 따라 대부분의 작동이 정방향으로 이루어지는 제트팬에 대하여 완전 가역이 아닌 일정 수준 이상의 가역 성능을 요구하는 방향으로 규제가 완화되고 있는 추세이다. 이러한 추세에 맞추어 정방향에서의 효율을 상승시키는 수치최적설계를 수행하기 위하여 두께 형상을 변화시키는 3번 제어점의 수평축 위치(Hub_th, Shr_th)를 설계변수로 선정하였다. 설계변수 범위는 완전 대칭 형태인 기본 모델의 3

번 제어점에 수평축 위치를 100%로 하여 10~100%의 변화 범위를 주었다. 위의 내용을 통해 선정된 수치최적설계를 수행하기 위한 4개의 설계 변수의 범위는 Table 3에 기술하였다.

3.4 수치최적화기법

본 연구에서는 최적점을 산출할 실험점을 구성하고자 실험계획법 중 라틴하이퍼큐브 샘플링(Latin hyper cube sampling)⁽⁷⁾을 사용하여 제한된 설계범위 내에서 35개의 실험점을 추출하였고, 삼차원 RANS 해석을 통해 각 실험점에서의 목적함수 값들을 평가하였다. 라틴하이퍼큐브 샘플링은 $m \times n$ 의 행렬을 구성하는데 여기서 m 은 각 변수에 대한 레벨의 수(샘플의 수)이고, n 은 설계변수의 수를 나타낸다. 즉, 1부터 m 까지의 레벨을 포함하는 행렬의 n 개 열 각각은 라틴하이퍼큐브를 구성하기 위해 임의로 짝지어지며, 결국 설계공간 내 모든 부분을 대표하는 실험점들을 얻을 수 있다.

수치최적화를 위한 대리모델로는 반응면 기법(response surface approximation)⁽⁸⁾을 사용하여 라틴하이퍼큐브 샘플링으로부터 얻어진 실험점 들을 통해 최적점을 산출할 반응면을 구성하였다. 반응면 기법은 실제 반응함수를 근사적인 다항 함수로 모델링하기 위해 물리적 또는 수치적인 결과로부터 얻어진 결과들을 이용하는 일련의 수리통계적인 기법이다. 즉, 실험계획법을 사용하여 얻어진 한정된 수의 실험점만으로도 임의의 공간 내 반응을 모델링함으로써 실험의 시행횟수를 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서 사용된 2차 다항식으로 구성된 반응면은 다음과 같이 표현할 수 있다.

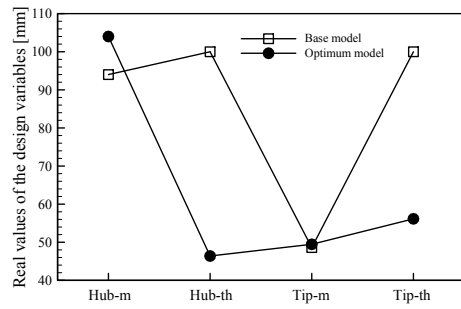
$$f(x) = \beta_0 + \sum_{j=1}^N \beta_j x_j + \sum_{j=1}^N \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j}^N \sum_{i=j}^N \beta_{ij} x_i x_j \quad (3)$$

여기서 β , N 및 x 는 각각 다항식의 계수, 설계변수의 개수 및 설계변수를 나타낸다.

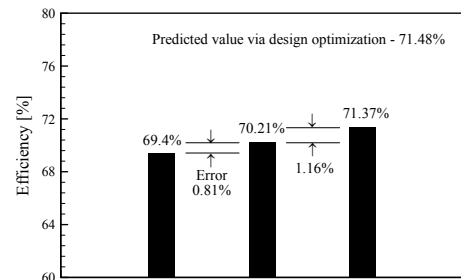
4. 결과 및 검토

4.1 수치최적설계 결과

기본모델과 수치최적화를 통하여 예측된 최적모델의 각 설계변수 값들을 비교해보면 Fig. 4(a)와 같이 최적모델의 경우, 날개의 허브와 쉬라우드의 자오면 길이(Hub_m, Shr_m)가 기본모델에 비해 늘어난 것을 볼 수 있다. 이는 날개의 허브 및 쉬라우드에서의 익형 길이가 늘어남에 따라 제트팬의 효율이 증가한다는 것을 의미한다. 날개의 허브와 쉬라우드 두께(Hub_th, Shr_th)의 경우에는 최적모델이 기본모델에 비해 다소 감소한 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 완전 대칭형인 날개형상을 갖는 기본모델에 비해 최대두께의 위치가 날개의 전면 측으로 이동한 에어포일형 날개형상을



(a) Design variables



(b) Objective functions

Fig. 4 Results of the design optimization

갖는 최적모델이 제트팬의 효율 면에서 우수한 성능을 갖는 것을 보여준다.

Fig. 4(b)는 기본모델 및 반응면 기법에 의한 수치최적설계로부터 도출된 최적모델의 RANS 해석결과를 보여주고 있다. 결과 데이터 비교 분석을 통하여 최적모델의 효율이 71.37%로 기본모델에 비해 1.16% 증가된 것을 확인할 수 있었다. 또한 반응면 기법에 의해 예측된 최적모델에 대한 효율은 71.48%로 RANS 해석결과와 약 0.1%의 낮은 오차를 보이는 것을 알 수 있으며, 이를 통해 반응면 기법에 대한 신뢰성을 확인할 수 있다.

4.2 기본 및 최적모델의 내부 유동장 분석

앞서 살펴본 바와 같이 수치최적설계로부터 도출된 결과들을 바탕으로 제트팬의 효율이 향상된 원인을 더욱 자세히 알아보려 기본모델과 최적모델에 대하여 내부 유동장 분석을 수행하였다.

Fig. 5는 제트팬 내 로터 및 스테이터부의 날개와 허브 영역에서의 유선 분포를 보여주고 있다. 기준모델의 유선 분포를 살펴보면 그림 내 원형 표시된 영역인 로터 날개 팁 부근 흡입부에서 박리를 수반하는 유동 영역을 볼 수 있으나, 최적모델에서는 유동 박리 영역이 사라진 것을 볼 수 있다. 이는 수치최적설계를 통해 팁 부근에서의 최대 두께 지점이 전면부로 이동함에 따라 입구에서의 유동 유입각이 변화했기 때문으로 사료된다.

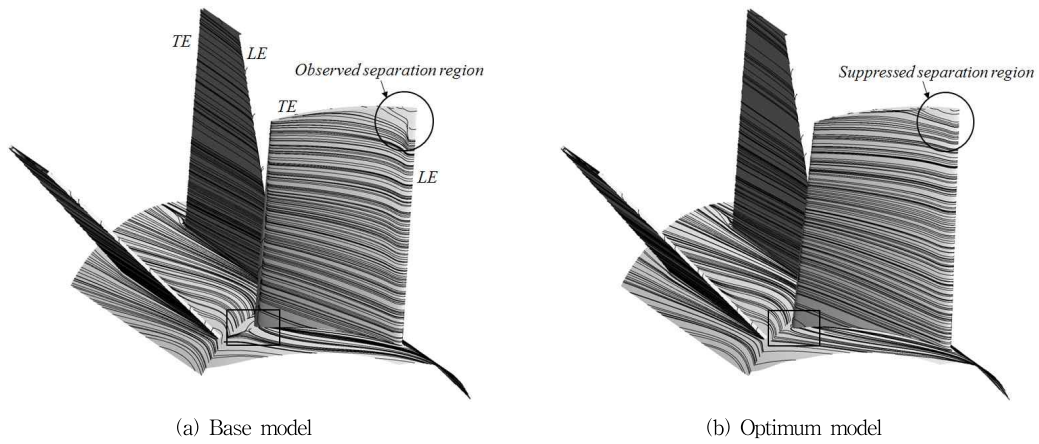


Fig. 5 Streamline distributions on near-hub and blade suction surface

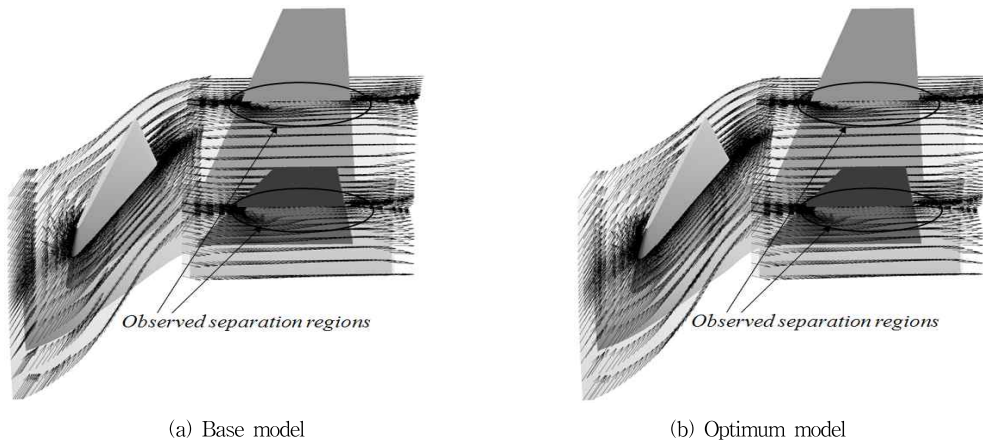


Fig. 6 Velocity vector contours on mid-span

또한 로터 날개 후반부에서의 유선 분포를 살펴보면 사각형 표시된 영역에서와 같이 최적모델에서는 기본모델에서 나타나는 유동 불안정성과는 달리 상대적으로 원활한 유동 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 로터 날개 익현길이가 증가함과 동시에 두께형상의 변형으로 인한 출구 측 도출 각도 변화에 따른 것으로 판단되어진다.

Fig. 6은 제트팬 내 로터 및 스테이터의 중간 스펠 지점에서의 속도 분포를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 기본 및 최적모델의 스테이터부에서 모두 날개 인근에 박리 영역이 존재하는 것을 볼 수 있다. 가역성능 유지를 위하여 제트팬의 스테이터는 그림과 같이 직선 형태로 설계되어진다. 하지만 이러한 스테이터부에서의 유동 박리영역은 제트팬의 효율저하를 가져오는 직접적인 원인으로 사료된다. 위 내용에서 언급했듯이 일정 수준 이상의 가역성능을 만족시키면서 정방향에서의 고효율 성능을 중시하는 최근 제트팬 개발 추세에 따라 추가적인 제트팬 정방향 효율 향상을 위해 최적화된 제트팬 로터 형상을 바탕으로 가역성능을 고려한 스테이터 보완설계 작업이 요구되어 진다.

6. 결 론

본 연구에서는 터널 환기용 제트팬의 성능을 향상시키고자 삼차원 RANS 해석과 최적화기법을 결합한 수치최적설계를 수행하였다.

연구 수행을 위하여 제트팬의 수치해석결과를 실험결과와 비교함으로써 수치해석의 타당성을 검증하였고, 이를 바탕으로 제트팬 로터와 관련된 설계변수들을 결정하였다. 마지막으로 목적함수로서 효율을 선정하여 이를 최대화 하는 수치최적화 작업을 수행하였다.

그 결과, 최적모델은 기본모델에 비해 효율이 1.16% 증가하였다. 이러한 효율 증가는 장시간 가동되어지는 제트팬 운행 비용 절감에 큰 기여를 할 것으로 판단된다.

추가적으로 효율 향상에 대한 원인을 규명하기 위하여 내부 유동장 분석을 수행하였다. 유동장 분석을 통하여 로터의 유동 박리영역이 감소한 것을 확인 하였다. 하지만 가역성능 유지를 위한 직선형태의 스테이터부에서 넓은 유동 박리영역이 확인되었다. 그에 따라 추가적인 제트팬 효율 향상을 위해 스테이터에 대하여 가역성능을 고려한 보완 설계 작업

이 요구되어진다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지정 고효율 저소음 송풍기 개발 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음을 밝힘(No. 10031962).

참고문헌

- (1) Ryu, J. H., Yoo, W. H. and Kim, J., 2003, "The Jet-fan Model Test for a Road Tunnel Ventilation," Journal of SAREK, Vol. 15, No. 8, pp. 630~640.
- (2) Schlaug, R. N., Carlin, T. J., 1979, "Aerodynamics and Air Quality Management of Highway Tunnels," Administration, USA, pp. 2.49~2.56.
- (3) Choi, Y. S., Kim, J. H., Lee, K. Y. and Yang, S. H., 2010, "Performance Improvement of High Speed Jet Fan," International Journal of Fluid Machinery and System, Vol. 3, No.1, pp. 39~49
- (4) P. A. Durbine and B. A. Petterson-Rief. 2001, Statical Theory and Modeling for Turbulent Flows, John Wiley & Sons, New York, USA.
- (5) Yang S. H. 2010, "Development of High Speed Compact Jet Fan," 2nd Annual report for MKE Strategic Technology Development Project
- (6) ISO 13350, 1999, Industrial fans-Performance testing of jet fans, INTERNATIONAL STANDARD, first edition, pp. 2~5.
- (7) JMP® 6.0.0, 2005, The Statistical Discovery Software, Version 6.0.0, SAS Institute, INC., Cary, North Carolina, USA.
- (8) Myers, R. H., and Montgomery, D. C., 1995, Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, John Wiley & Sons, New York, USA.