

## 고정압 축류팬의 형상 변수가 공력학적 성능에 미치는 영향

양상호\* · 김경엽\*\* · 허만웅\*\*\*†

### Effects of Geometric Parameters on Aerodynamic Performance of a High Pressure Axial Flow Fan

Sang-Ho Yang<sup>\*†</sup>, Kyung-Yup Kim<sup>\*\*</sup>, Man-Woong Heo<sup>\*\*\*</sup>

Key Words : Axial flow fan(축류팬), Pitch angle(피치각도), Hub ratio(허브 비), Number of blades(날개 수), Efficiency(효율), RANS equations(레이놀즈 평균 나비에-스톡스 방정식)

#### ABSTRACT

This study was carried out to investigate the effects of the number of rotors and stators as well as hub ratio of the rotor on the aerodynamic characteristics of a high-pressure axial flow fan using three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations. The shear stress transport turbulence model was used for the analysis of turbulence. Finite volume method and unstructured hexahedral grids were used in the numerical analysis. An optimal grid system was selected in the computational domain through a grid-dependency test. Performance tests for the axial flow fan were conducted, and its results were compared with those of the numerical analysis. From the results of the flow analysis, it was determined that the number and hub ratio of rotor have more significant effects on the performance of high-pressure axial flow fans than the number of stator.

#### 1. 서론

최근 세계 각국에서는 고속화 철도 및 도로 등의 고속운송 개발 수요가 증가함에 따라 해협을 횡단하는 해저터널의 수요가 빠르게 증가하고 있으며, 초장대 터널의 내부 환기 성능에 대한 중요성이 대두되고 있다. 고속철도 터널의 경우 전동열차에서 발생하는 열부하의 환기는 물론이고 터널에서 화재 발생 시 배연 및 제연을 통해 인명피해를 줄이기 위한 공익설비로서 축류팬의 역할은 매우 중요하다. 현재 세계 최장 해저터널은 영국-프랑스를 연결하는 유로터널로 해저구간의 총 길이는 38 km이다. 2014년 2월 14일 차이나 데일리 등 중국의 언론에 따르면 라오닝성 다롄시와 산둥성 옌타이를 연결하는 123 km의 터널 건설계획이 발표되었다. 2015~2016년 공사를 시작해서 총 10년 이내 완공을 목표로 해저터널은 총 3개의 노선으로 되어있으며 고속철도로 2개 노선, 나머지는 예비 및 비상선로로 이용될 예정이다.<sup>(1)</sup> 이와 같이 터널이 초장대화 됨에 따라 환기 및 배연을 위한 고정압 축

류팬의 성능특성에 대한 이해가 요구되고 이를 위한 다양한 연구들이 수행되고 있다.

양상호 등<sup>(2)</sup>은 일방향 제트팬의 공력학적 특성에 대한 동의 피치각 및 디퓨저 각도의 영향성을 분석하기 위한 연구를 수행하였으며, 양상호 등<sup>(3)</sup>은 고정압 축류팬의 풍량 및 압력을 평가하기 위하여 상사법칙을 이용한 설계 방법을 검토하였다. Chun 등<sup>(4)</sup>은 터널 내에 다수의 축류팬을 설치할 경우 상호간 미치는 영향성을 분석하기 위해 평행하게 위치한 축류팬들의 서지(surge)와 실속(stall)에 대한 연구를 수행하였고, Karki 등<sup>(5)</sup>은 터널 내 화재발생 상황에서 제트팬에 의한 터널 내부 유동특성을 분석하기 위해 수치해석을 수행하고 실험 결과와 비교하였다. 그리고 Se 등<sup>(6)</sup>은 수치해석을 통해 제트팬의 설치위치 변화가 터널 내 화재의 구조에 미치는 영향을 조사하였다. Betta 등<sup>(7)</sup>은 터널 천정에 설치한 제트팬의 출구 각도 변화가 터널 내 환기에 미치는 영향을 분석하기 위한 수치해석을 수행하였으며, Mutama와 Hall<sup>(8)</sup>은 터널 내부에 설치된 제트팬의 벽으로

\* 한국산업기술대학교 지식기반기술·에너지대학원, (주)삼원이앤비 기술연구소(Graduate School of Knowledge-based Technology and Energy, Korea Polytechnic University, Institute of Technology Samwon E & B Co., Ltd.)

\*\* 한국산업기술대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic University)

\*\*\* 건설기계부품연구원(Korea Construction Equipment Technology Institute)

† 교신저자, E-mail : heomanwoong@gmail.com, mwheo@koceti.re.kr

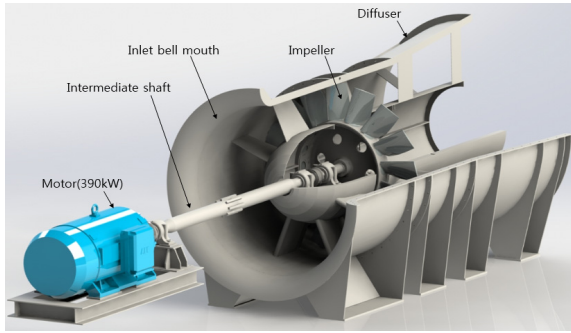


Fig. 1  $\phi 2000 \times 390$  kW prototype axial flow fan

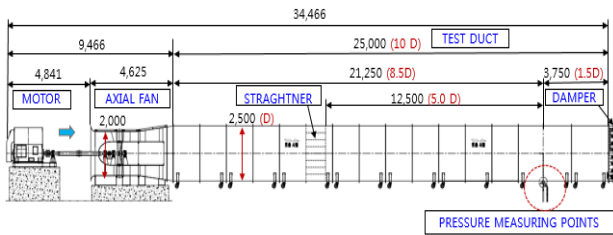


Fig. 2 Axial flow fan performance test duct (by KS B 6311)



Fig. 3  $\phi 2000 \times 390$  kW prototype axial flow fan actual test scene

부터의 거리 변화에 따른 터널 내의 유동 특성을 분석하였다. 또한, 서준원 등<sup>(9)</sup>은 2단 고정압 축류팬에 대해 수치해석을 통해 성능평가 및 내부 유동장 분석을 수행하였다.

이와 같이 터널 내 환기 및 배연을 위해 사용되는 축류팬에 대한 다양한 연구들이 수행되고 있지만, 국내에서는 30 km 이상 초장대 해저터널의 환기 및 제연기능을 수행 할 수 있는 4.0 kPa 이상 고정압 축류팬의 성능특성을 이해하기 위한 체계적인 연구는 미미한 실정이다. 4.0 kPa 이상 고성능 고정압 축류팬을 설계하기 위해서는 체계적인 분석이 이루어져야 한다.

본 연구에서는 축소 모델 축류팬 시제품의 성능시험 결과를 바탕으로 유동해석을 실시하여 공력성능을 확인하였고, 고정압 축류팬의 동익(rotor) 및 정익(stator)의 날개 수, 그리고 허브 비(hub ratio) 변화가 공력학적 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 유동특성을 분석하기 위하여 삼차원 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 해석을 수행하였다.

Table 1 Design specifications and test results of the prototype axial flow fan

Descriptions	Design specifications	Test results
Diameter of impeller, mm	1992	1992
Tip clearance, mm	4	4
Blade tip angle, deg.	23	23
Hub ratio, %	56	56
Air volume, m <sup>3</sup> /min	5,220	5,251
Total pressure, mmAq	287	292
Rotational speed, r/min	1,185	1,185
Shaft power, kW	302	301.5
Total pressure efficiency, %	>81	>83.1
Motor power, kW(Poles)	390(6)	390(6)
Number of blades, EA	16	16
Number of stator, EA	17	17

## 2. 축소 모델 축류팬의 제원 및 성능시험

본 연구에서는 4.0 kPa 이상 전압력 성능을 갖는 실 송풍기(full scale actual fan)의 직경  $\phi 3,200$  대비 62.5%의 축소 모델로 고정압 축류팬을 설계하였다. 축소 모델 축류팬은  $\phi 2,000$ , 팁 각도 23°, 동력 390 kW, 날개 매수 16, 그리고 회전수 1185 rpm이며 토출 측에 직경 2500 mm의 확산관을 부착한 형상이며, KS B 6311 송풍기 시험방법 규정의 토출덕트 시험방법에 의해 성능시험을 수행하였다. 성능시험 결과 풍량 5,251 m<sup>3</sup>/min, 전압력(total pressure) 292 mmAq, 축동력 301.5 kW, 전압효율(total pressure efficiency)은 83.1%이며, 베어링 진동은 2.5 mm/s~3.1 mm/s(rms)의 결과를 얻었고 자세한 사항은 Table 1에 정리하였다. Fig. 1에 축소모델 축류팬 시제품 외관 형상을 나타내었고, 축류팬의 공력성능 성능시험 장치는 Fig. 2와 같은 형상으로 KS B 6311 규정에 따라 제작하였다.

Fig. 3은  $\phi 2,000 \times 390$  kW 축소 모델 축류팬 시제품의 실부하 성능시험 광경을 보여준다.

축소 모델 축류팬의 성능시험에서 얻어진 성능은 AMCA 802 규정에 따라 실 송풍기의 성능으로 환산 할 수 있다. 축류팬의 직경을  $\phi 3,200$ , 회전수 885 r/min으로 하여 성능을 환산 할 경우 풍량 16,063 m<sup>3</sup>/min, 전압(total pressure) 417 mmAq, 축동력 1,317 kW, 전압효율(total pressure efficiency)은 83.1% 이상의 성능을 얻을 수 있다.

## 3. 유동해석방법

본 연구에서는 해저터널용 고정압 축류팬의 동익 및 정익의 개수 그리고 허브 비의 변화가 공력학적 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 유동장을 비압축성 삼차원 정상 상

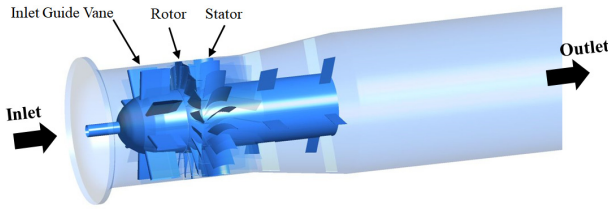


Fig. 4 Computational domain of an axial flow fan

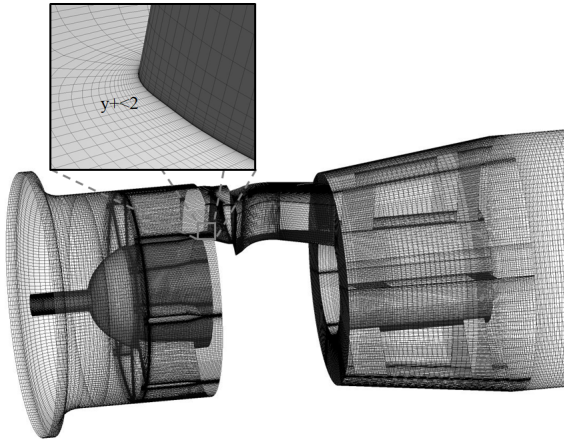


Fig. 5 Structure of grid system

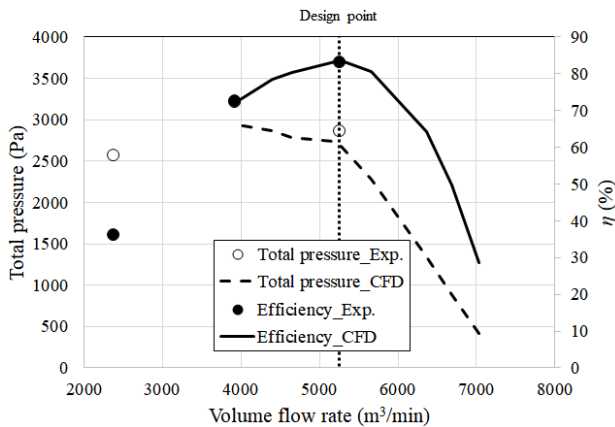


Fig. 6 Comparison between experimental data and CFD results

테로 가정하고 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX 17.0<sup>10</sup>을 사용하여 정밀 유동해석을 수행하였다. 본 연구 대상인 고정압 축류팬의 유동해석을 위한 계산영역은 Fig. 4에 나타내었다.

고정압 축류팬은 입구 안내 깃(Inlet guide vane), 동익, 그리고 정익으로 구성되며, 계산영역은 회전영역(동익)과 정지영역(입구부 벨마우스, 입구 안내 깃, 정익, 그리고 토출 확산관)을 구분하여 정의하였다. 기준형상의 축류팬은 16개의 동익과 17개의 정익을 가지며, 임펠러의 직경은 1,992 mm, 팁 간극(tip clearance)은 4 mm이다.

동익은 1,185 r/min의 속도로 회전하며, 허브 비는 0.56이다. 고정압 축류팬에 대한 자세한 설계사양 및 시험결과는 Table 1에 나타내었다.

유동해석을 위해 작동유체는 표준상태의 25 °C 공기로 가정하였으며, 계산 영역의 입구와 출구에는 각각 전압력(total pressure)과 유량 경계조건을 적용하였다. 회전영역과 고정영역 사이의 경계면 처리는 stage interface 기법을 적용하였고, 모든 벽면에는 점착조건(no-slip condition)을 적용하였다. 난류해석을 위해서는 SST(shear stress transport) k- $\omega$  난류모델을 사용하였다. SST 모델은 k- $\omega$  모델과 k- $\epsilon$  모델의 장점을 결합한 것으로 벽 근처 영역에는 k- $\omega$  모델을 사용하고 벽 근처를 제외한 영역에서는 k- $\epsilon$  모델을 사용하게 된다.

본 연구의 수치해석을 위한 계산영역에 대한 격자계는 Fig. 5에 나타내었다. 계산의 경제성을 고려하여 동익과 정익은 단일 유로(single passage)만을 고려하여 격자를 생성하고 회전방향으로 주기조건(rotational periodicity interface method)을 주어 계산하였다. 계산영역은 육면체 격자를 사용하여 구성하였으며, 벽면 첫 번째 격자점에서의 y+값이 2 이하로 유지되도록 하였다. 또한, 계산 결과에 대한 격자의 의존성을 배제시키기 위하여 수행한 격자의존성시험을 격자 수 1,000,000~25,000,000 개 범위에서 변화시켜 비교하였으며, 약 2,200,000 개의 격자 수 이상에서 계산 결과의 차이를 보이지 않아 수치해석을 위한 최적의 격자크기로 결정하였다. 모든 해석은 질량보존방식의 RMS(root mean square) 잉여값(residual)이 10E-6 이하가 되었을 때 만족스러운 수렴 값을 도출할 수 있었다.

## 4. 결과 및 검토

### 4.1 성능시험 결과 비교

고정압 축류팬에 대한 수치해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 유동해석 결과와 성능시험 결과를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다.

설계점에서의 효율 값을 비교하면 수치해석 결과와 실험 값은 약 0.5%의 오차를 보이며 잘 일치하였다. 또한 수치해석 결과는 약 5.8% 감소한 전압력 값을 예측하였으며, 성능 곡선에서 정성적으로 잘 일치하는 경향을 보였다.

### 4.2 동익 날개 수의 영향성 분석

본 연구에서는 고정압 축류팬의 공력학적 특성에 대한 동익 날개 수( $N_f$ )의 영향성을 조사하기 위하여 삼차원 정밀 유동해석을 수행하였다.  $N_f$ 를 7~16 매로 변경시켜 식(1)과 같이 성능함수로서 정의한 축류팬의 효율(efficiency,  $\eta$ ) 및 전압력을 비교하였다.

$$\eta = \frac{(P_{out} - P_{in}) \cdot Q}{\tau \cdot \omega} \quad (1)$$

여기서,  $P$ ,  $Q$ ,  $\tau$  그리고  $\omega$ 는 각각 전압력, 유량, 토크, 각속도를 의미한다.

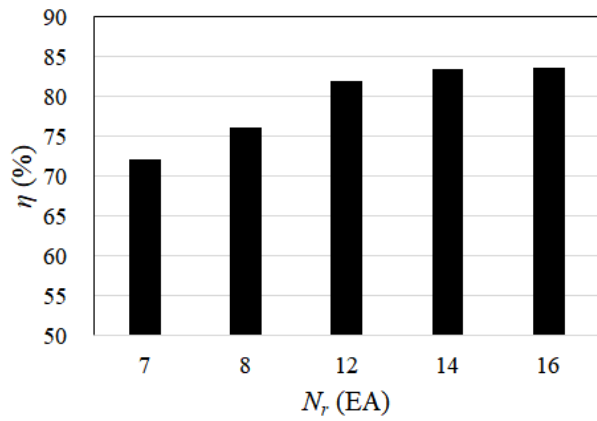


Fig. 7 Efficiency for the different number of rotor blades

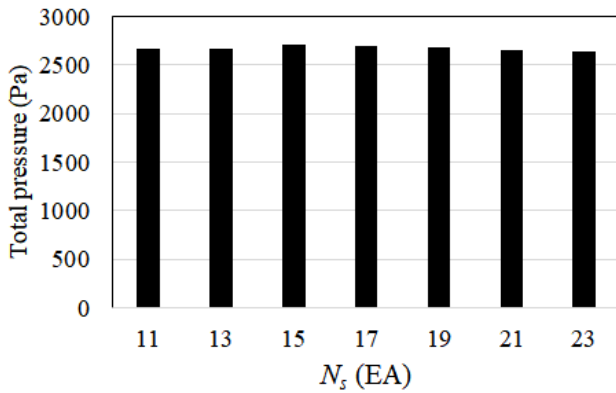
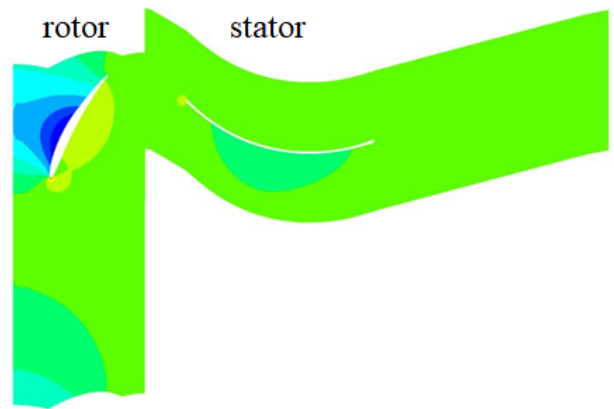


Fig. 8 Total pressure for the different number of rotor blades

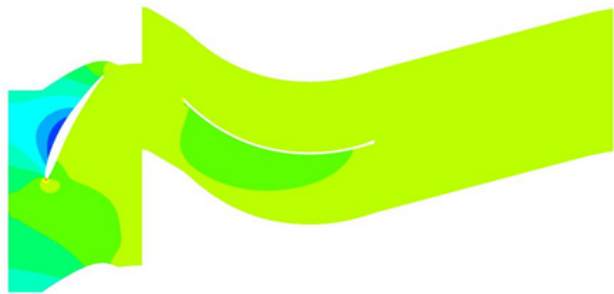
$N_r$ 의 변화에 따른 축류팬 효율 값의 변화를 Fig. 7에 나타내었다.  $N_r$ 이 증가함에 따라 효율은 증가하는 경향을 보이며,  $N_r$ 이 14 매 이상에서는 효율이 비슷한 값을 보였다. 전압력의 경우, Fig. 8에 나타난 것과 같이  $N_r$ 이 7 매에서 16 매로 증가함에 따라 전압력도 증가하는 경향을 보였다. Fig. 9는  $N_r$ 의 변화에 따른 동익과 정익의 50% span에서의 압력분포를 비교해 보여준다.  $N_r$ 가 7 매일 경우에는 동익의 흡입면(suction surface)에서 매우 낮은 압력분포가 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 낮은 압력분포는  $N_r$ 이 증가함에 따라 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한, 정익의 압력면(pressure surface)에서도  $N_r$ 이 증가함에 따라 정압이 증가하는 경향을 보인다. 이에 따라 축류팬의 전압력이 증가하고 효율 값이 증가하는 것을 알 수 있다.

#### 4.3 정익 날개 수의 영향성 분석

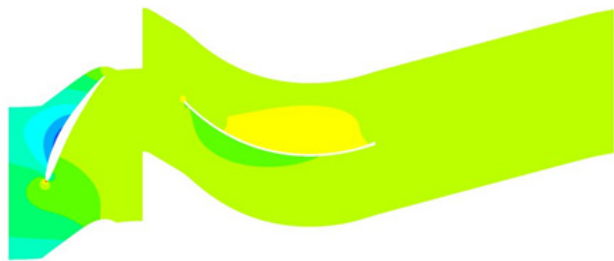
고정압 축류팬의 정익 날개 수( $N_s$ )의 변화에 따른 효율 및 전압력의 변화를 Figs. 10과 11에 각각 나타내었다. 효율의 경우,  $N_s$ 가 15 매에서 가장 높은 효율 값을 보였으며,  $N_s$ 가 15 매 이상일 때는 증가함에 따라 효율 값이 감소하는 경향을 보였다. 전압력도  $N_s$ 가 15 매에서 가장 큰 값을 보였으며, 15 매 이상에서 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다.



(a)  $N_r=7$



(b)  $N_r=12$



(c)  $N_r=16$

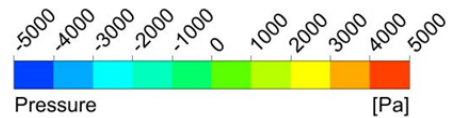


Fig. 9 Pressure contours on 50% span for the different  $N_r$

그러나  $N_s$ 의 변화에 따라 효율과 전압력의 변화는  $N_r$ 의 변화에 비교하면 크지 않은 것을 알 수 있다. 이에 따라 고정압 축류팬의 성능은  $N_s$ 와 비교하여  $N_r$ 에 대해 더욱 민감하게 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다.

$N_s$ 의 변화가 속도장에 미치는 영향을 분석하기 위하여 50% span에서의 속도장을 Fig. 12에 표시하였다.  $N_s$ 가 11 매일 경우, 정익의 후단에 낮은 속도를 갖는 영역이 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있다.  $N_s$ 가 증가함에 따라 이러한 낮은 속도 분포 영역은 줄어드는 경향을 보였지만 정익의 압력면에 낮은 속도 영역이 분포하는 것을 확인하였다.  $N_s$ 의 변화가 정익 후단 및 압력면의 유동장에 동시에 영향을 미치게



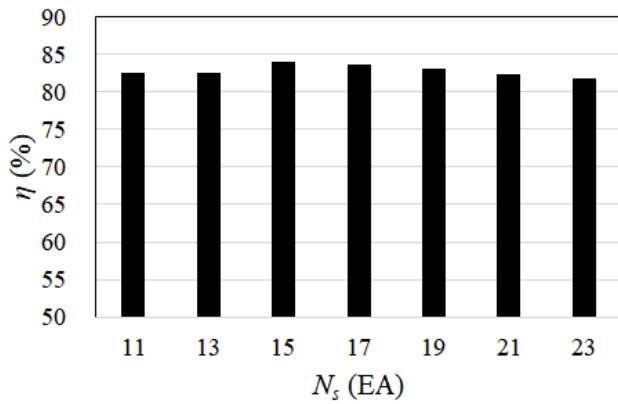


Fig. 10 Efficiency for the different number of stator blades

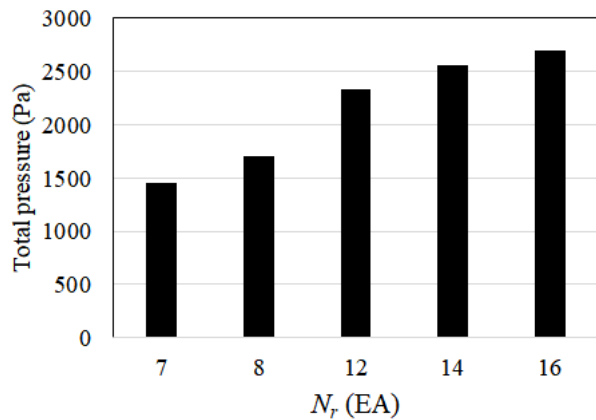


Fig. 11 Total pressure for the different number of stator blades

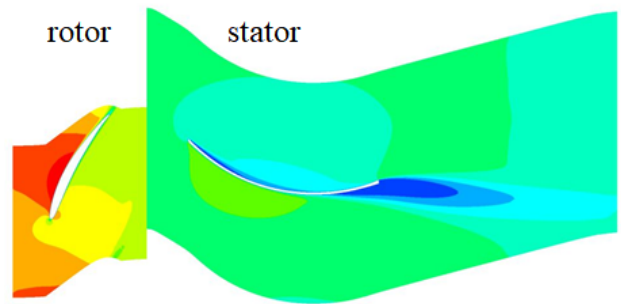
되어 효율 및 전압력의 변화에 크게 기여하지 않은 것을 알 수 있었다.

#### 4.4 허브 비의 영향성 분석

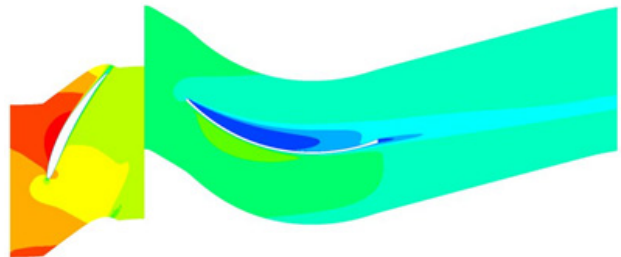
고정압 축류팬의 허브 비의 영향성을 분석하기 위하여 허브 비(HR)를 62%와 65%로 증가시켜 이에 따른 성능을 비교하였다. 기준 형상의 HR은 56%이다. 동익의 HR을 변화시킬 경우 입구 벨마우스, 입구 안내 깃 및 정익의 허브 직경도 동익의 허브 직경 변화에 맞춰 같이 변화시켰다. HR의 변화가 고정압 축류팬의 성능함수들에 대한 영향성을 Fig. 13에 나타내었다. 동일 회전수와 설계유량에서 비교한 것으로 전압력과 효율은 HR이 56~65%의 범위에서 HR이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 14는 동익과 정익의 자오면(meridional plane) 상에서 HR의 증가에 따른 전압력 분포의 변화를 비교하여 보여 준다. 동익의 영향으로 후류에서 전압력이 잘 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 대체적으로 동익 후연(trailing edge)의 hub에서 shroud와 비교하여 큰 전압력 분포를 보이는 것을 알 수 있다. 또한, HR가 작을수록 전압력이 잘 상승하는 것을 알 수 있으며, 이러한 경향은 Fig. 15에 보이는 것과 같이 정압 분포에서도 확인할 수 있다.

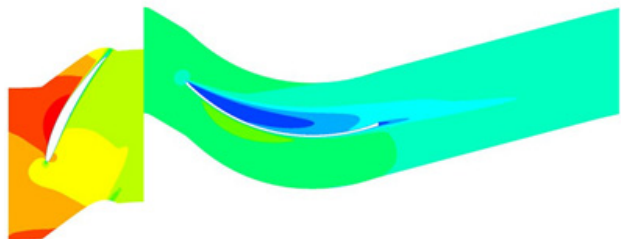
HR의 감소에 의한 정압의 증가가 전압력의 상승에 영향을



(a)  $N_s=11$



(b)  $N_s=17$



(c)  $N_s=23$

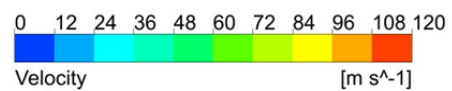


Fig. 12 Velocity contours on 50% span for the different  $N_s$

미치는 것을 확인할 수 있었다. 정압 분포의 경우, 동익 전연(leading edge)의 hub 부근에 낮은 정압 분포를 보이며, 이 낮은 정압 영역은 HR가 클수록 커지는 경향을 보였다.

그리고 자오면 상의 속도 분포 변화 비교를 Fig. 16에 나타내었다. HR이 커질수록 자오면 상의 속도 분포는 상대적으로 높은 속도 분포를 보이며, 이는 HR의 증가에 따른 유로가 좁아져 유속이 증가하는 것임을 알 수 있다.

고정압 축류팬의 허브 비의 변화가 성능곡선 변화에 미치는 영향을 확인하기 위하여 Fig. 17과 같이 비교하였다.

전체적으로 HR이 증가할수록 유량에 따른 효율 값이 감소하는 경향을 보였으며, 최대유량이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 또한 최대효율점이 HR의 증가에 따라 저유량점으로 이동하는 것을 알 수 있었다.

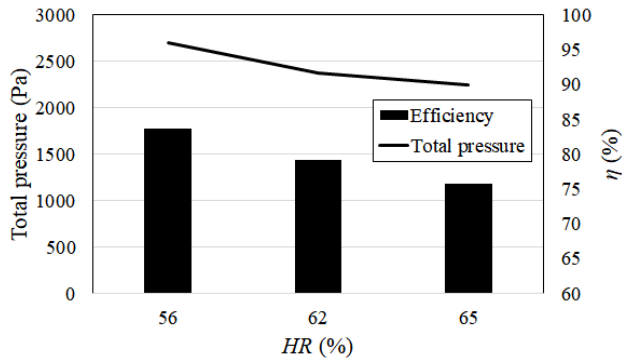


Fig. 13 Performance parameters for the different HR

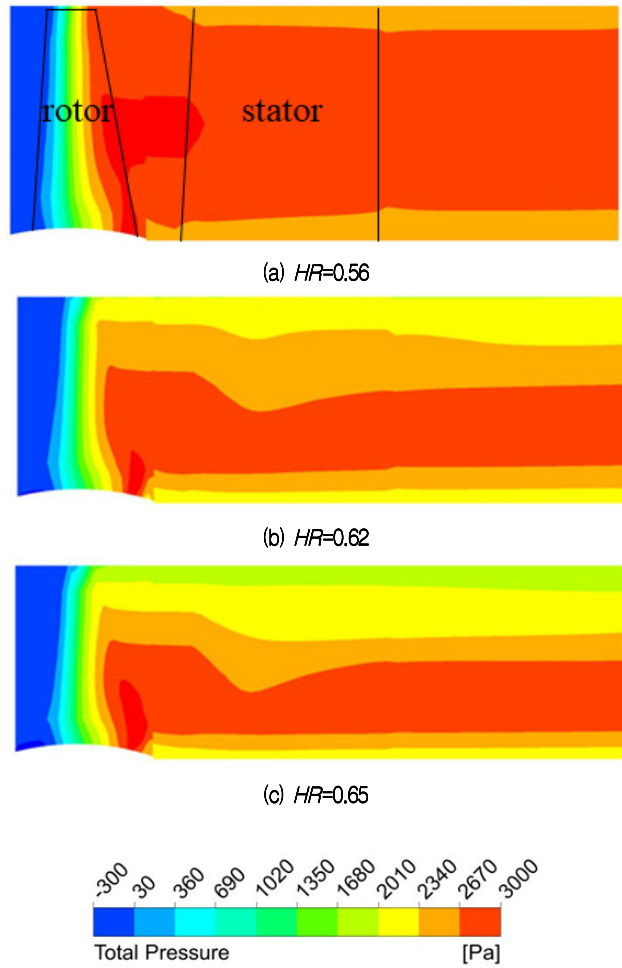


Fig. 14 Total pressure contours on meridional plane with the variance of HR

## 5. 결론

본 연구에서는 30 km 이상 초장대 해저터널에서 장거리 배연을 위한 환기 및 제연용으로 사용되어지는 4.0 kPa 급 고정압 고효율 축류팬을 개발하였으며 실 송풍기 대비 62.5% 축소 모델 시제품을 제작하여 공력성능시험을 실시하였다. 또한 삼차원 RANS 해석을 통해 동익과 정익의 날개 수와 허브 비를 형상변수로 고려하여 고정압 축류팬의 공력

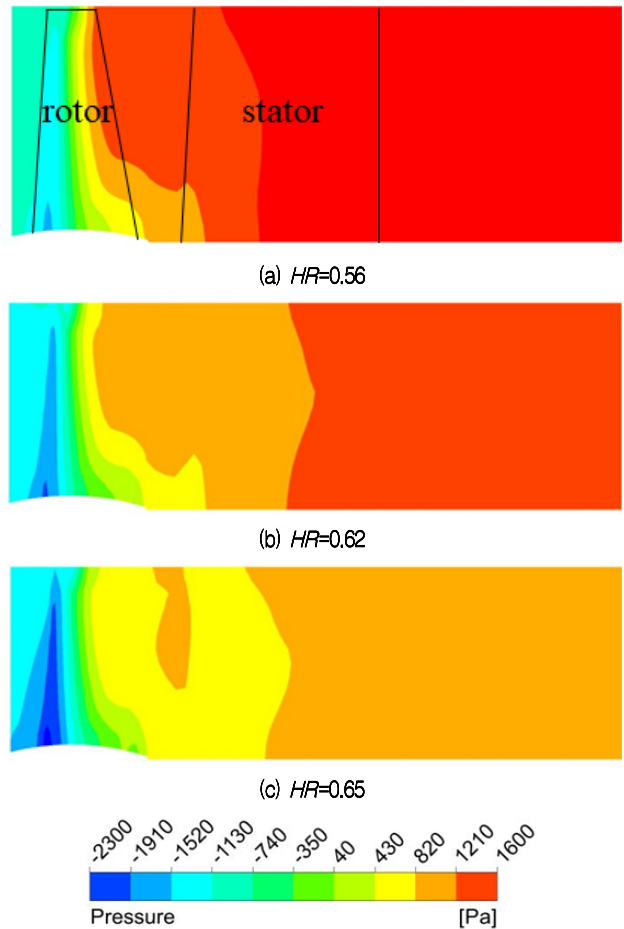


Fig. 15 Pressure contours on meridional plane with the variance of HR

성능에 대한 영향성을 평가하였다. 이를 바탕으로 다음과 같은 결과를 확인하였다.

- 1) 실 송풍기 대비 62.5%의 축소 모델 축류팬으로 성능시험 한 결과를 바탕으로 AMCA 802 규정에 의해 성능을 환산하면 직경  $\phi 2350 \times 1,185$  r/min과  $\phi 3,200 \times 885$  r/min 크기의 축류팬에서 각각 4 kPa (408 mmAq) 이상의 압력과 83.1% 이상 고효율 성능을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 고정압 축류팬에 대한 RANS해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 축소 모델 축류팬의 성능시험 결과 값과 수치해석 결과를 비교하였으며, 효율 및 전압력은 설계점에서 각각 0.5% 및 5.8%의 오차를 보였다. 성능곡선 결과는 전체적으로 잘 일치하는 경향을 보여 수치해석 결과의 신뢰성을 검증하였다.
- 3) 동익의 날개 수를 7~16 매로 변화시켜 고정압 축류팬의 효율 및 전압력을 비교하였다. 효율의 경우 날개 수가 14 매 이상에서는 큰 변화가 없었으며, 전압력은 동익의 날개 수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다.
- 4) 정익의 날개 수 변화의 영향성을 파악하기 위하여 11~23 매로 변화시켜 축류팬의 효율 및 전압력을 비교하였으며, 이를 바탕으로 정익의 날개 수 변화는 축류

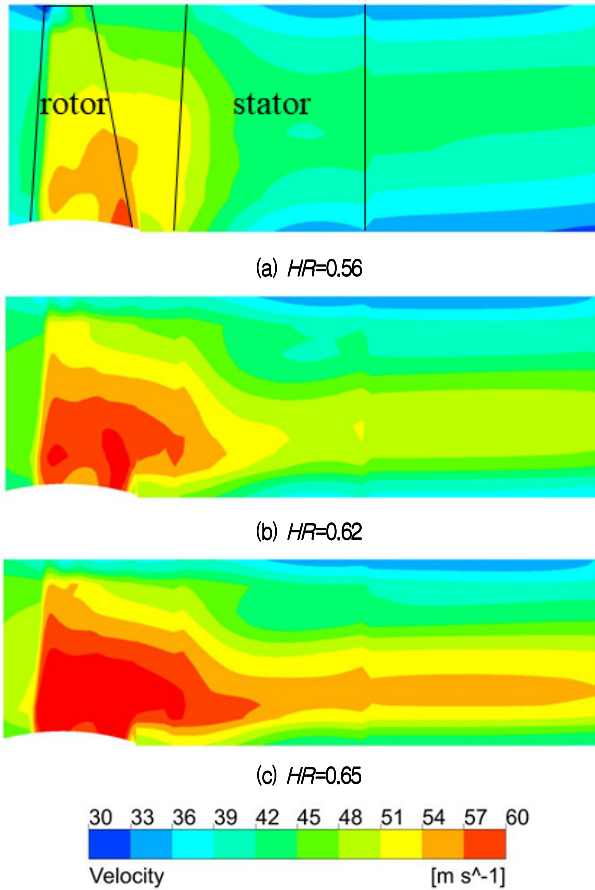


Fig. 16 Velocity contours on meridional plane with the variance of  $HR$

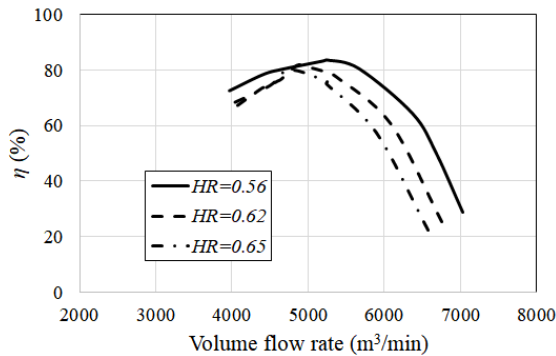


Fig. 17 Comparison of performance curves for different  $HR$

의 공력성능에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다.

- 허브 비를 56~65%로 변화시켜 축류팬의 효율 및 전압력을 비교하였으며, 허브 비를 증가시킬수록 효율 및 전압력의 감소를 확인하였다.

이상의 연구결과를 바탕으로 추후에 30 km 이상의 초장대 해저터널이나 육상터널, 철도터널, 지하철도 등의 환기 및 제연용 송풍기로서 4.0 kPa 이상의 고정압 축류팬으로 사용이 가능하며, 고효율 최적설계 및 시리즈화 설계로 광산이나 산업용 축류팬으로 점차 사용 용도를 넓힐 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13건설연구T01)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- (1) Yang, S. H., Kim, K. Y. and Heo, M. W., 2018, "A Study on Practical Application of High Pressure Axial Flow Fan," 2018 SAREK Summer Annual Conference, Pyeongchang, Korea, pp. 385~389.
- (2) Yang, S. H., Kim, K. Y., and Heo, M. W., 2018, "Effects of Rotor Blade Pitch Angle and Diffuser Angle on the Aerodynamic Performance of an Axial Flow Fan," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 21, No. 2, pp. 27~34.
- (3) Yang, S. H., Kim, K. Y., Choi, Y. S. and Kim, J. H., 2016, "A Development on High-pressure Axial-flow Fan Used for the Ventilation in Long Subsea Tunnel," 2016 KSFM Summer Annual Conference, Pusan, Korea, pp. 99~100.
- (4) Chun, G., Mingnian, W. and Zhaozhi, T., 2011, "A Study on Surge and Stall under the Interaction of parallel Axial Flow Fan in Tunnel," Noise & Vibration Worldwide, Vol. 42, Issue 11, pp. 9~14.
- (5) Karki, K. C., Patankar, S. V., Rosenbluth, E. M. and Levy, S. S., 2000, "CFD Model for Jet Fan Ventilation Systems," Proceedings of the 10th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels Principles, Analysis and Design, Boston, USA, 29 Pages.
- (6) Se, C. M. K., Lee, E. W. M. and Lai, A. C. K., 2012, "Impact of Location of Jet Fan on Airflow Structure in Tunnel Fire," Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 27, pp. 30~40.
- (7) Betta, V., Cascetta, F., Musto, M. and Rotondo, G., 2009, "Numerical Study of the Optimization of the Pitch Angle of an Alternative Jet Fan in a Longitudinal Tunnel Ventilation System," Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 24, pp. 164~172.
- (8) Mutatma, K. R. and Hall, A. E., 1996, "The Experimental Investigation of Jet Fan Aerodynamics Using Wind Tunnel Modeling," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 118, pp. 322~328.
- (9) Suh, J. W., Kim, Y. I., Kim, J. H., Joo, W. G., Choi, Y. S. and Yang, S. H., 2016, "A Study on Performance Evaluation and Analysis of High-pressure Axial-flow Fan for Long Subsea Tunnel," 2016 KSFM Winter Annual Conference, Busan, Korea, pp. 175~176.
- (10) ANSYS CFX 17.0, ANSYS CFX Tutorials, 2016, ANSYS Inc.