

선박용 송풍기의 날개 끝 간격과 정익이 성능에 미치는 영향에 대한 전산 유체 해석

이승수^{†*}, 김학선*, 남광현*, 홍재익*, 천승현**

충북대학교 구조시스템공학과*
한국 하이프레스**

Computational and Experimental Study of Effects of Guide Vanes and Tip Clearances on Performances of Axial Flow Fans

Sungsu Lee^{†*}, Hak-Sun Kim*, Kwang Hyun Nam*,
Jae Ik Hong* and Seung Hyun Chun**

Dept of Structural Systems & CAE, Chungbuk National University*
Hi-Pres-Korea Co., Ltd.**

Abstract

The effects of guide vanes and tip clearances on the characteristics of axial flow fans are investigated both computationally and experimentally. Performance test of fans carried out in full scale shows considerable effects of tip clearance between rotor tip and duct on the characteristics of fans. The tested results are compared with the computation based on the finite volume method to solve the Navier-Stoke equations with $k-\varepsilon$ turbulence model. The comparison shows good agreements between experimental and computational results. In addition, the effects of shape of guide vanes are numerically studied. The results show that increased volume of separated region around the guide vane reduces the recovery of tangential component of kinetic energy in the wake, resulting in loss of efficiency

※Keywords: Tip clearance(날개 끝 간격), Guide vane(정익), Mixing plane(혼합면), Static pressure(정압), Flow rate(풍량)

1. 서론

약 30여 년의 국내 축류 송풍기 생산 역사에도 불구하고, 제반 기술수준은 선진국에 비해 뒤떨어져 있다. 그 동안 국내에서는 선진국의 전문 업체와 기술 제휴를 통한 모방 생산이 주종을 이루었

접수일: 2004년 5월 6일, 승인일: 2004년 10월 4일

† 주저자, E-mail: joshua@chungbuk.ac.kr

Tel:043-261-3344

으나, 최근 외국에의 시장 개방에 따른 외국의 전문 업체의 제품들과 직접 경쟁이라는 어려움에 직면하여, 일부 국내 송풍기 업체들은 90년대 후반 이후 자체 개발에 의한 기술 확보의 필요성을 인지하고 설계, 제작 및 시험 개발의 자체 연구 및 산학연을 통한 공동 연구를 수행하고 있다. 이런 국내 산업 환경적인 측면에서 송풍기의 공력학적 설계 기술은 고도의 유체역학적 지식을 필요로 하며, 에너지 절약의 측면에서 강조되는 고효율화와 환경 소음규제 강화에 따른 저소음화의 요구가 필요하게 되었다.

송풍기를 공력학적 측면에서 그 동안 많은 수치 해석적 연구가 있었는데 송풍기를 개발할 때 자체적으로 수치해석을 하는 경우는 드문 일이다. 송풍기에 관한 수치 해석적 연구들은 대부분 송풍기 날개주변의 유동특성과 날개 형상에 따른 유동특성에 대하여 중심으로 다루어져 왔다. 이런 연구들은 날개의 형상에 좀 더 현실적인 방법은 산학 연구를 통하여 보완을 하거나 상용프로그램을 이용하여 빠른 시간 내에 결과를 얻는 일일 것이다. 현재 송풍기의 수치해석이 개발 제품의 성능에 아주 근접한 결과를 주지는 않지만 개발 제품 설계에 대한 아이디어를 제공할 수 있다면 성공적이라 할 수 있다. 또한 송풍기에서 발생하는 소음은 송풍기의 정압과 풍량에 따라서 달라지기 때문에 소음도 수치해석의 결과에 영향을 받을 수밖에 없을 것이다.

최근 전산유체역학이 미국을 중심으로 하여 큰 발전을 거듭한 결과, Navier-Stokes 방정식을 통한 유동장의 해석법이 유체기계 내의 유동장 해석에 실용화되는 단계에 이르게 되었으며 Navier-Stokes 방정식의 수치해석기법을 송풍기의 유동해석에 적용한 연구들이 90년대 들어 활발하게 진행되었다. Rhie et al.(1994)은 격자계, 경계조건, 난류모델 등이 송풍기 유동해석에 미치는 영향을 검토했으며, 최근 국내에서도 가전제품용 Fan의 설계를 위한 해석적 연구(Kim et al 1994)와 날개의 형상과 난류 모델의 영향에 관한 축류 송풍기의 삼차원 유동장 해석(김광용 등 1993)을 한 바 있다. 선박 유체기계 분야에는 선미 후류와 추진기의 상호 작용해석 (김정중 등 2001), 선박

추진기의 단독성능 추정(김덕수/김형태 2002)에 정성유동의 전산 해석이 이용된 바 있다.

본 논문의 목적은 선박에 사용되는 축류송풍기를 개발하기 위하여 CFD 프로그램을 이용하여 송풍기내의 유동장을 해석하고 실험 결과와 비교분석을 통하여 송풍기의 성능과 효율을 추정하는데 있다. 특히 동익의 후류에 위치한 정익의 형상 변화와 동익의 날개 끝 간격이 성능에 미치는 영향에 대한 중점적인 분석이 수행되었다. 이를 위해 설계된 제품의 성능을 추정하기 위하여 유한체적법을 사용하는 FLUENT를 사용하여 수치해석을 하였다. 난류 유동에 대해서는 근사적 모델인 $k-\epsilon$ 모델을 선택하고, 연속방정식과 운동량 방정식, 난류운동에너지와 소실률에 관한 방정식으로 계산을 하였다. 송풍기의 동익(rotor) 영역과 정익(Guide vane) 영역을 Mixing plane으로 구분하여 경계조건을 적용하였다.

계산결과의 검증을 위해 풍량과 정압의 관계에 대하여 실험을 수행하고 이를 계산치와 비교 분석하였다.

2. 유동 해석 방법

2.1 지배방정식과 난류 모델

본 연구에서는 송풍기내의 3차원 유동해석을 비압축성, 정상유동에 대한 연속방정식, 운동량방정식(Navier-Stokes equation)과 난류 모델은 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j^2} \quad (2)$$

$k-\epsilon$ 모델에서 난류운동에너지(k)는
Turbulent Kinetic Energy
= Total Kinetic Energy
- Mean Flow Kinetic Energy
와 같이 정의 할 수 있다.

Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations

를 통하여 Turbulent Kinetic Energy의 최종형태는 다음과 같이 된다.

$$\rho \frac{\partial \rho k U_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

여기서 U_i 는 Mean flow를 나타내고 있고, G_k 는 Mean velocity의 구배에 의한 난류에너지 생성을 나타내며, μ_t 는 Velocity scale과 Length scale에 의해서 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ 으로 정의되며, C_μ 는 무차원 상수이다. σ_k 는 k 의 Gradient Diffusion으로 표현하기 위한 계수이며, $\rho \epsilon$ 는 k 의 점성에 의한 소실률을 나타내고 있다. 또한 ϵ 수송 방정식의 최종형태는 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial \rho U_i \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

$k-\epsilon$ 수송방정식에 나타나는 계수들은 기초 실험 데이터에 의해서 추천되어지는 값들을 사용하고 있으며, 본 연구에서는 $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.00$, $\sigma_\epsilon = 1.30$, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$ 와 같이 사용되었다.

2.2 축류 송풍기 모델링 및 격자생성

수치해석에 사용된 날개의 모델링은 유체기계이론에의해 요구된 성능에 맞는 날개 단면의 3차원 좌표점들을 3차원 CAD 솔루션인 Unigraphics를 이용 모델링을 하였다(이승수 등 2003).

수치해석과 유동장의 격자 생성은 범용 소프트웨어인 FLUENT를 이용하여 계산되었다. FLUENT는 유한체적법을 채택한 유체 해석프로그램으로 모델과 격자생성을 위한 전처리 과정인 Gambit과 해석과정인 FLUENT로 나뉘어져 있다. 이 유한체적법의 지배방정식들은 검사체적 안에서 적분되어

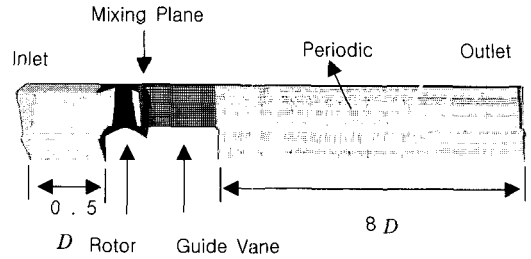


Fig. 1 Computational domain and grid

이산화 되어진다.

송풍기의 유동을 수치해석함에 있어 계산영역을 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 동익 영역과 정익 영역이 바로 그것이다. 동익 회전영역과 정익 영역 사이 Mixing plane을 사용하였다. 회전축을 중심으로 동익 영역은 '1 / 날개수' 만큼 모델링하였고 정익부분 역시 '1 / 정익수' 만큼 모델링하였다. 날개의 중심에서 유출구까지는 덕트 직경의 8배만큼 확장하였고, 유입구까지는 덕트 직경의 1/2을 확장하였다.

날개 끝 간격(Tip Clearance)은 실험제품의 평균값을 사용하였다.

그리고 격자의 생성에 있어 동익 영역은 날개의 형상이 복잡하기 때문에 사면체 요소와 5면체 요소로 생성하였고 정익 영역은 육면체 요소로 나누었다.

2.3 동익-정익 상호 작용

Mixing plane은 동익-정익의 각 유동장을 정상상태로 해결을 하게 된다. 반복연산을 수행할 때, Mixing plane의 인터페이스에서 동익과 정익 경계에서 원주방향으로 평균되어 지고, 연산은 면적-질량 평균을 사용하여 계산한다. 이때 유동 속성의 'profile'이 정의된다.

2.4 수치해석

동익과 정익 사이에 Mixing plane을 사용하기 때문에 시간에 대하여 정상상태로 계산을 하고, 이산화된 대수식은 Implicit방식을 사용하였다. 연속 방정식과 운동량 방정식으로부터 압력에 관한 유도는 압력과 속도의 결합으로 압력보정식을 만

드는 SIMPLE해법을 이용하였으며 운동량은 Second Order Upwind, 난류에너지와 소산률은 Power Law를 채택하였다.

2.5 경계 조건

송풍기를 성능을 나타내는데 있어 정압과 풍량의 관계와 효율을 중심으로 성능곡선을 그리게 된다. 수치해석도 실험과 같은 방식으로 계산을 하게 된다. 유출구에서 계기압력(Gauge pressure)을 일정한 상수 값을 가지게 하여 동익의 회전속도에 의한 유량을 계산하게 된다. 유입구에서 난류강도는 일정하고 매우 작은 것으로 가정하고 1%로 하였고, 특성길이(Characteristic length)로 주어지는 Hydraulic diameter는 덕트의 직경을 D 라고 할 때

$$\frac{\pi D^2}{4} \frac{1}{\pi D} = \frac{D}{4} \tag{5}$$

와 같이 주어지며, 유입구에서 유속은 축방향 유속만 있는 것으로 가정하고 경계층이 형성되지 않도록 하였다.

그리고 동익은 고정되어 있는 것으로 가정 동익 영역의 유체는 날개(blade) 회전방향으로 회전을 시켰으며, 동익 영역의 덕트는 회전체로 하였으나 회전속도를 "0"으로 하여 유입하는 회전 유체에 대하여 정지하고 있는 것처럼 하였다. 이 동익 영역을 지나 정익 영역으로 유체가 지나갈 때 동익 영역의 유출구 부분의 속도 분포(Profile)가 정익 영역의 유입구에 그대로 적용되도록 하는 Mixing plane을 사용하였다. 그러나 이면에서 유입구와 유출구 격자의 절점은 일치하지 않는다. 또한 유체 흐름 방향의 양쪽 측면은 중심축에 대하여 모두 주기적(periodic) 경계조건을 적용하였다.

3. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 전산유체역학적인 유동해석의 타당성을 검증하기 위하여 KS rule(한국표준협회 2001)에 준하여 실험을 수행하였으며 실험 장치 및 방법은 다음과 같다.

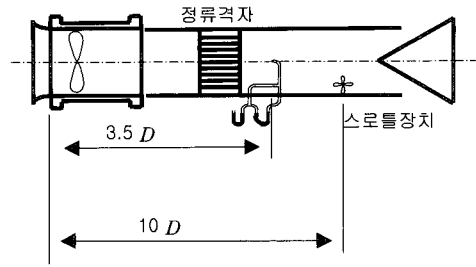


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

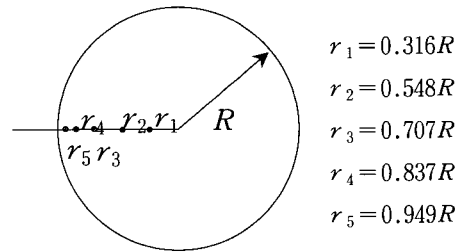


Fig. 3 Radial positions for velocity measurement

- $r_1 = 0.316R$
- $r_2 = 0.548R$
- $r_3 = 0.707R$
- $r_4 = 0.837R$
- $r_5 = 0.949R$

시험 장치를 구성은 Fig. 2와 같이 이루어져 있으며 스로틀 장치를 이동시켜 가면서 정압을 기준으로 하여 풍속과 소비전력을 측정하였으며, 해당 측정값들은 즉시 실험 보고서에 입력하였다.

덕트의 직경을 D 라 할 때, 송풍기로부터 $3.5D$ 인 지점에서 피토관을 이용하여 중심축과 덕트에 근접한 곳을 측정하였다. 이때 스로틀 장치를 이동시켜 가면서 원하는 정압에서 정지시켜 풍속과 전력을 측정한다. 풍속은 Fig. 2에서와 같이 송풍기로부터 $10D$ 되는 곳에서 측정을 하였다.

송풍기로부터 $10D$ 에서 풍속계를 이용하여 Fig. 3과 같이 모두 다섯 점을 15초 평균풍속을 2회 반복 측정하여 평균값을 취하였다.

4. 격자 테스트

수치해석에 사용된 모델의 격자는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 동익 영역과 정익 영역이 구분되어져 있으며, 격자 크기에 따른 두 가지 경우의

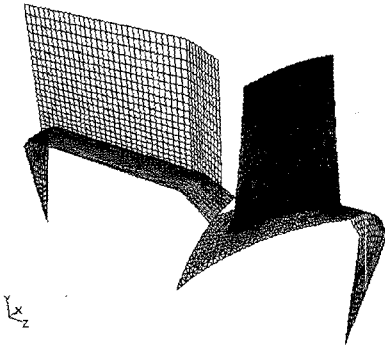


Fig. 4 Computational models of rotor and guide vane

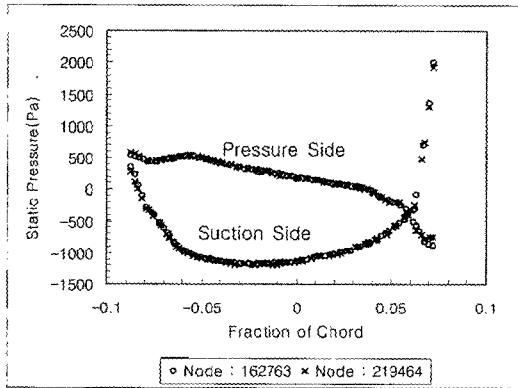


Fig. 5 Distribution of static pressure on rotor surface at 0.7R

모델을 수행한 결과 Fig. 5에서와 같이 송풍기 날개의 0.7 반경에서의 표면에 작용하는 정압을 나타내고 있다.

5. 결과 및 고찰

우선 시험 결과와 수치해석의 결과를 비교하는데 있어서 유량계수(flow coefficient) ϕ , 정압계수(static pressure coefficient) ψ_s , 동압계수(dynamic pressure coefficient) ψ_d , 전력계수(power coefficient) Λ , 송풍기 효율(fan efficiency) η 와 같은 무차원화 된 계수를 사용하였으며 이들 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi = \frac{Q}{ND_f^3} \quad (6)$$

$$\psi_s = \frac{\Delta p}{\rho N^2 D_f^2} \quad (7)$$

$$\psi_d = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{V_{out}}{ND_f} \right)^2 = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Q}{\pi D^2/4 ND_f} \right)^2 \quad (8)$$

$$\Lambda = \frac{P_c}{\rho N^3 D_f^5} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{\phi \cdot (\psi_s + \psi_d)}{\Lambda} \quad (10)$$

여기서 Q 는 유량, Δp 는 유출구의 정압, P_c 는 송풍기의 소비전력, N 은 동익의 초당 회전수, D_f 는 송풍기의 날개 유효 직경, D 는 덕트의 직경, ρ 는 공기의 밀도를 나타내고 있다.

수치해석에 사용된 송풍기는 덕트의 직경이 910mm이고 날개각도가 40°인 제품을 모델링하였으며, 날개 끝 간격은 1 mm, 3 mm, 5 mm인 3 가지 모델의 해석을 수행하였다. 그리고 동익의 회전속도는 1760rpm이며 허브의 직경은 410mm이다. 날개의 Chord는 180mm이다.

본 연구는 난류 모델에 사용한 $k-\epsilon$ 모델이 날개 끝 간격의 크기에 따라 실험치와 같은 성향을 보이고 있는지 그리고 그 값들이 정량적으로 일치하고 있는지를 알아보고, 정의의 형상에 따른 유동현상과 송풍기의 성능곡선과 효율을 추정하는데 목적을 두고 있다.

먼저 Fig. 6을 보면 날개 끝 간격에 따른 시험치와 수치해석 결과를 보여 주고 있다. 날개 끝 간격의 증가에 따라 전체적인 성능이 저하되는 현상을 보여주고 있다. 그러나 정압 상승에 따른 풍량과의 관계를 보면 세 가지 경우 모두 비교적 낮은 정압 영역에서는 정량적인 면에서는 큰 차이를 보이고 있지는 않지만 정압 상승에 따르는 풍량이 감소되는 정도가 시험결과와 다소의 차이를 보여 주고 있다.

Fig. 6의 정압과 풍량의 성능곡선을 보면 수치해석을 통하여 나온 결과를 실험치와 비교해보면 같은 정압에서 풍량이 3~5%정도 차이가 나는 :

을 볼 수 있다. 정압계수가 약 0.95 이하에서는 실험치와 수치해석의 결과가 좋은 일치를 보여준다. 또한 Fig. 7의 효율 곡선을 보게 되면 1%이내의 오차 내에서 곡선이 그려지게 된다.

Fig. 6에서 정압이 상승할수록 풍량의 차이가 크게 되는 것은 동익과 정익사이의 Mixing plane Model의 영향으로 판단된다. 통상 정압이 상승할수록 동익의 허브 근처에서 역류가 발생하게 된다. 그런데 Mixing plane은 반경을 따라서 원주방향으로 평균값을 정익으로 전달하므로, 이때에 정익과 동익사이의 유량의 정확한 전달이 이루어지지 않아서 발생하는 현상이다. 또한 수치해석에 사용한 난류 모델인 $k-\epsilon$ 은 날개 끝(tip)에서의 손실을 정성적으로는 추측할 수 있으나 정량적으로

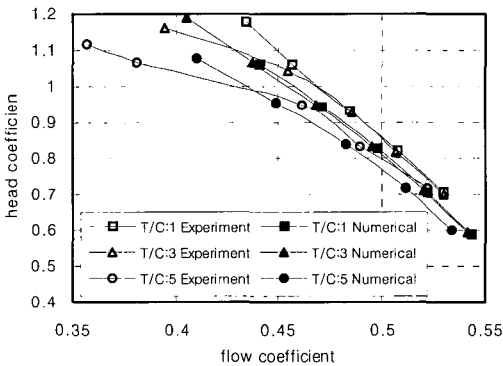


Fig. 6 Effects of tip clearance on static pressure head

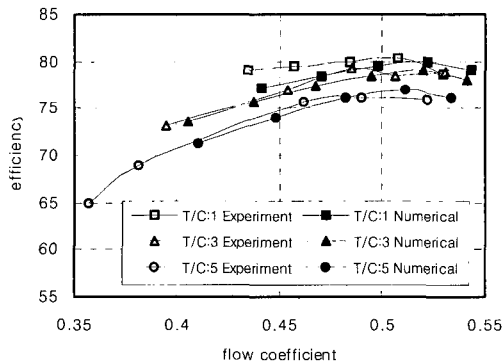


Fig. 7 Effects of tip clearance on efficiency

로 실험보다 적게 계산된다고 보고되었던 적이 있다(백제현/이공희 2003).

그리고 날개 끝 간격의 크기에 따라서 3 mm와 5 mm는 약 2%의 성능과 효율의 차이를 보이고 있으며, 정압의 상승에 따라서 날개 끝 간격의 크기는 성능과 효율 저하에 보다 많은 영향을 주고 있다.

Fig. 8은 본 모델의 정익과 동익의 형상을 나타낸 것이다. Fig. 8의 α 는 25° 로 고정시켜 놓고 A와 B의 길이를 Table 1과 같이 변화를 주어 수치해석을 수행하였다.

Table 1과 같은 정익의 길이에 따라서 성능과 효율에 어떠한 영향을 주는지 Fig. 9와 10은 각각 날개 끝 간격 3 mm인 경우의 A, B의 길이 변화에 따른 성능 변화를 보여준다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이 정익의 형상이 변하면서 1%의 성능의 차이를 보이고 있지만, Fig. 10의 효율곡선을 보면 최고 2.5%차이를 보이고 있다. 전체적인 효율을 고려해 볼 때, 정익 A의 길이가 긴 것이 효율이 감소하고 있다. 이러한 현상이 나타나는 이유를 알아보기 위하여 Fig. 11의 정익 유출면의 회전유속(tangential velocity)을 보면, 덕트 근처의 회전유속은 대부분 흡수가 되지

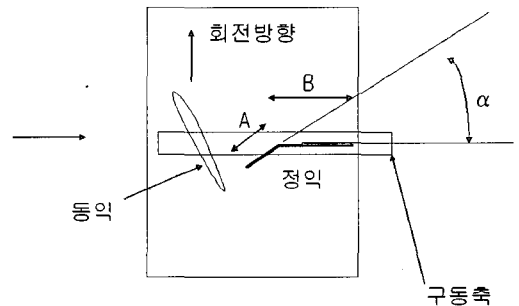


Fig. 8 Arrangement of rotor and guide vane

Table 1 Parameters for tested guide vane

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
A(mm)	100	100	50	50
B(mm)	355	177.5	355	177.5

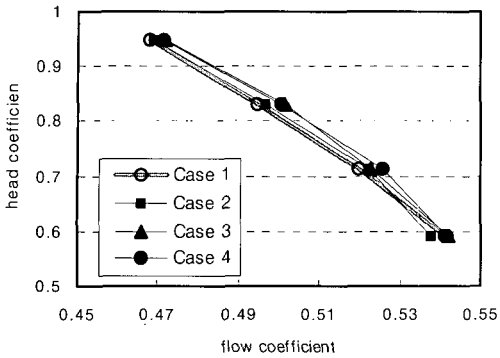


Fig. 9 Effects of guide vane length clearance on static pressure head

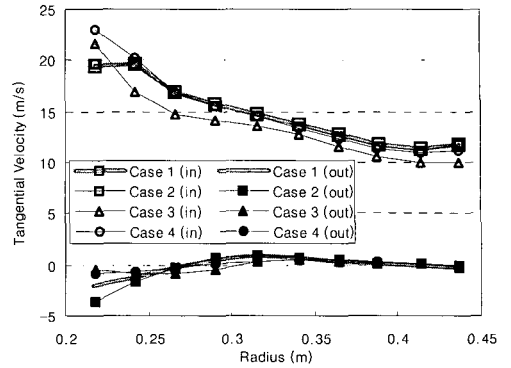


Fig. 11 Comparison of radial distributions of rotational velocity on outlet plane of guide vane

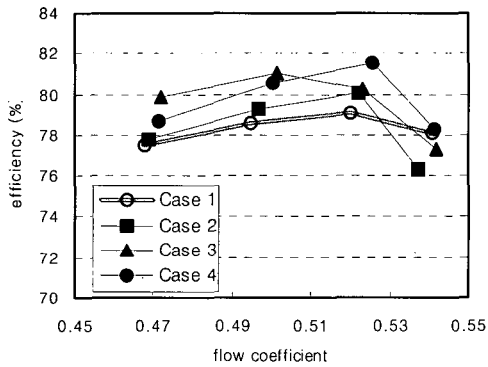


Fig. 10 Effects of guide vane length clearance on efficiency

만 허브 근처로 가면서 회전유속이 남아 있다가 허브 근처에서는 역회전하는 유속이 발생을 하였다. 그리고 A와 B의 길이가 짧은 경우인 Case 2 와 Case 4의 경우가 회전유속을 오히려 많이 흡수하는 현상을 볼 수가 있다.

정익이 회전유속을 흡수하지 못하는 이유는 Fig. 12~15를 보면 알 수가 있다. A의 길이가 보다 길 때 허브근처에서 축방향 역류 유속이 A의 길이가 작을 때보다 많이 발생하면서 유속의 흐름을 방해하고 있다. 정익의 유입면에서 덕트 근처의 회전유속이 크지만 허브 근처에서 역류현상이 보이는 이유는 허브 근처에서 Fig. 12~15의 Fig. 에서와 같이 정익에서 발생하는 역류 때문에 이곳

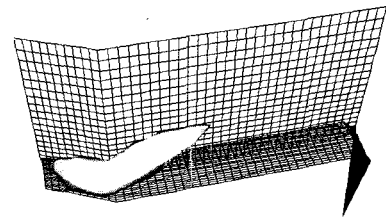


Fig. 12 Case 1: Volumetric representation of axial reverse flow region on guide vane

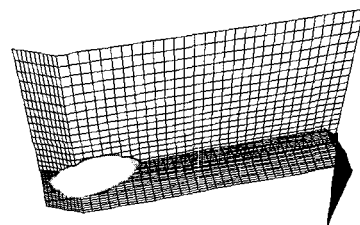


Fig. 13 Case 2 ; Volumetric representation of axial reverse flow region on guide vane

을 지나는 유속이 다시 정익 쪽으로 지나가면서 생기게 된다. 즉, B의 길이가 길더라도 A의 길이가 긴 것이 이러한 현상이 더 커지게 되면서 회전 유속이 정익을 지나면서 흡수하지 못하게 되고 역회전류를 보다 많이 발생시키게 된다.

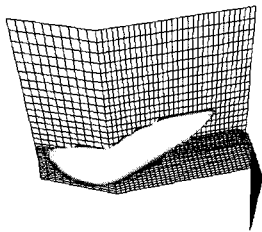


Fig. 14 Case 3 ; Volumetric representation of axial reverse flow region on guide vane

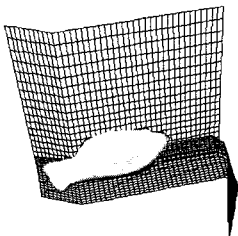


Fig. 15 Case 4 ; Volumetric representation of axial reverse flow region on guide vane

정익의 유입면 회전유속은 오히려 유입면 중심 부근에서 보다 빠르지만 허브 근처에서 발생하는 이유는 동익을 지나는 축방향 유속이 보다 많이 느리고 회전유속은 상대적으로 빠르기 때문에 발생하기 때문이고 정익의 시작위치에서 박리현상이 나타나지 않는 것은 Mixing plane을 정익의 유입면에 위치시켰기 때문에 나타난 것으로 본다.

6. 결론

본 논문에서는 선박용 축류 송풍기의 정익과 동익의 날개 끝 간격이 전체 송풍기 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 전산 유체 역학을 이용한 해석을 수행하였다. 범용 CFD 프로그램인 FLUENT를 이용하고, $k-\epsilon$ 난류 모델을 적용하였으며 정익의 형상과 동익의 날개 끝 간격을 변화시키며 전산해석 및 실험을 수행하였다. 날개 끝 간격의 크기를 3mm이하로 하는 것이 좋으며, 효율을 증대시키기 위해서는 동익을 지나는 유동

이 허브 근처에서 축방향 유속 성분이 빠르게 지나도록 정익 앞단을 설계하는 것이 좋다.

본 연구에 사용된 수치해석 공간은 정량적인 면에서 실험치와 다소의 차이를 보이고 있다. 이는 동익과 정익 사이에 Mixing Plane Model의 영향으로 판단되며, 보다 정확한 수치해를 얻기 위해서는 Mixing plane이 동익과 정익의 유동과 압력을 정확히 전달해줄 수 있도록 개선되어야 한다. 또한 날개 끝 간격에서 발생하는 역류의 양을 정량적으로 계산하기 위해서 Standard $k-\epsilon$ 모델보다는 동익에서의 유동 특성을 잘 나타내어 줄 수 있는 난류의 모델의 도입이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역전략산업 석박사 연구 인력 양성 사업의 연구결과로 수행되었으며, 실험 자료 취득에 협조해주신 한국 하이프레스(주) 기술연구소에 감사드립니다.

참 고 문 헌

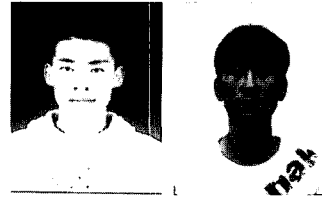
- 김광용, 김정엽, 정덕수, 1997, “축류송풍기의 삼차원 유동장 해석,” 대한기계학회 논문집(B) 제 21권, 제 4호, pp. 541~550.
- 김덕수, 김형태, 2002, “점성유동 수치해석법에 의한 선박용 추진기 단독성능 해석,” 대한조선학회 논문집, 제 39권, 제 3호, pp. 8~17.
- 김정중, 한재문, 공도성, 김형태, 박종우, 2001, “프로펠러-선체 상호작용의 점성유동 해석,” 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 205.
- 백제현, 박준영, 이공희, 2003, “축류형 유체 기계에서 팁 누설 유동 해석을 위한 난류 모델 성능 비교,” 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 2162~2167.
- 이승수, 김학선, 천승현, 2003, “3차원 CAD를 이용한 축류 송풍기 모델링 자동화 기술 개발,” 충북대학교 산업과학기술연구소 논문집, 제 17권, 제 1호, pp. 165~171.
- 한국표준협회, 2001, KS 송풍기의 시험 및 검사

방법, KS B 6311.

- Kim, K. Y., Kim, S.H., Kim, T. J., and Chang, C.M., 1994, "Three-Dimensional Viscous Flows Through An Axial Flow Fan," The 5th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics in Rotating Machinery (ISROMAC-5), Maui, Hawaii, Vol. 2, pp. 190~180.
- Rhee, C.M., Zacharias, R. M., Hobbs, D. E., and Sarathy, K. P., 1994, "Advanced Transonic Fan Design Procedure Based on a Navier-Stokes Method," ASME J. of Turbomachinery, Vol. 116, pp. 291~297.



< 이 승 수 > < 김 학 선 > < 남 광 현 >



< 홍 재 익 > < 천 승 현 >