

정상 간섭 익렬 계산 모델을 사용한 1단 축류 송풍기의 성능 예측

손상범* · 주원구** · 조강래**

Performance Prediction of the 1-Stage Axial Fan using Steady Coupled Blade Row Calculation Model

Sang-Bum Sohn*, Won-Gu Joo**, Kang-Rae Cho**,

*Key Words: Performance Prediction(성능 예측), Interrow Mixing Model(익렬간 혼합 모델),
Steady Coupled Blade Row Calculation(정상 간섭 익렬 계산), Interaction Effects(간섭 효과)*

ABSTRACT

The flow inside an axial turbomachinery with multi-stage can be characterized as unsteady phenomena. In order to predict accurately these complex unsteady flow patterns including rotor-stator interaction effects, enormous computer resources are required. So it is not compatible in preliminary design process. In this study, steady coupled blade row flow with rotor-stator interaction solver is developed using interrow mixing model and used to predict the performance of the axial fan. To verify the computational method, the calculations are compared with experimental results and show satisfactory agreement with them. The interaction effects on the performance of the axial fan have also been studied by comparing the results of steady coupled blade row and steady single blade row flow calculation.

1. 서론

최근 터보기계의 공기역학적 효율을 높이기 위한 설계에 대하여 많은 노력이 진행되고 있다. 최대의 공기역학적 효율을 얻기 위해서는 터보기계 내부의 이차 유동과 경계층 발달 등에 대한 정확한 이해를 필요로 한다. 지금까지 익렬 내부의 유동 현상을 이해하고 이에 적합한 예측 모델을 개발하는데 많은 진보가 있어 왔다. 정상 삼차원 Reynolds 평균 Navier-Stokes 방정식을 기본으로 하는 여러 가지 수치 방법들이 개발되어 왔으며, 이러한 방법은 설계 단계에서 터보기계의 익렬을 최적화 시키기 위하여 사용되고 있다. 일반적으로 터보기계를 설계하는데 있어서 정상 단독 익렬 수

치계산이 주로 사용된다. 그러나 실제로 터보기계 내부 유동장은 익렬간의 상대운동으로 인하여 비정상 유동이다. 또한 최근 크기가 작은 터보기계를 개발하기 위하여 익렬간 거리가 줄어들어 따라, 유동장을 해석하는데 있어서 인접한 익렬 사이에서 일어나는 상호 간섭에 대한 영향이 점차 중요해지고 있다. 이러한 동익과 정익 유동장 사이에 일어나는 상호 간섭은 공력학적 효율, 열전달, 그리고 손실 생성 등에 영향을 미치고 있다고 알려져 있다. 동익과 정익 유동장 사이에 일어나는 비정상 상호 간섭은 다음과 같이 세 형태로 나누어 질 수 있다.⁽¹⁾⁽²⁾ 첫째, 두 익렬의 포텐셜(potential) 유동장이 익 표면의 압력 분포와 입·출구의 유동각에 영향을 미친다. 이는 인접한 익렬의 속도 포텐셜과 유동장의 변화에 기인한다. 이러한 종류의 상호 간섭은 익렬사이의 거리가 작을 때 매우 중요하게

* 연세대학교 대학원

** 연세대학교 기계·전자 공학부

된다. 둘째, 상류에 위치한 익렬에서 발생하는 비정상 후류가 하류에 위치한 익렬을 지나면서 유동과 열전달에 큰 영향을 미치게 된다. 포텐셜 유동장과 후류에 의한 상호 간섭은 현재 광범위한 실험과 분석을 통하여 연구되어지고 있다. 세 번째 형태는 상류에 위치한 익렬에서 발생한 이차 와류가 하류에 위치한 익렬 유동장으로 전파되면서 영향을 미치게 된다.

익렬 사이의 유동장 간섭의 영향을 정확히 예측하기 위해서는 비정상 3차원 점성 유동 계산이 필수적이다. 그러나 이러한 계산은 단독 익렬 또는 날개수가 같은 동익과 정익으로 구성된 한 단(one stage)에 대한 유동계산은 가능하지만 실제 압축기에서와 같이 익렬의 날개수의 비가 작은 정수비가 아닐 경우에는 익렬의 모든 익 통로에 대한 계산이나 어떤 종류의 모델이 필요하고 상당한 계산 시간과 비용이 필요하다. 또한 단이 하나 이상인 다단 익렬의 계산일 경우에도 아직은 실용적이지 못하다. 따라서 설계 단계에서는 가능하다면 비정상 유동계산보다는 비교적 적은 시간이 필요한 정상 유동계산 방법이 적절할 것이다. 이와 같은 이유로 인하여 다소 단순하기는 하지만 익렬간 혼합모델(interrow mixing model)을 사용한 정상 다단 익렬 수치계산이 인접한 익렬의 영향을 평가하기 위하여 사용될 수 있다. 이러한 다단 익렬 계산의 단순한 정상 접근은 그 동안의 적용 예에서 정상 그리고 비정상 계산 결과의 시간 평균된 유동장 예측에 좋은 결과를 보여 주었다.⁽²⁾ 따라서 설계 단계에서 다단 익렬의 최적화를 위하여 적절하다. 정상 다단 익렬 수치계산은 혼합면(mixing plane)을 사용하게 되는데 이것은 인접한 익렬의 정상 경계조건을 주게 된다. 따라서 실제에서 일어나는 비정상 상호 간섭 효과는 포함되지 않게 된다. 만약 비정상 영향이 작다면 이러한 방법을 이용한 수치계산은 공력학적 설계시 최적화를 위하여 쓰기에 충분히 적합할 것이다.

본 연구에서는 축류 송풍기 내의 유동장에서 상호 간섭에 대한 영향에 관하여 다루어 보려고 한다. 축류 송풍기를 설계하기 위하여 각 익렬의 입·출구에서 유동 조건(정압, 출구각 등)의 정확한 평가가 필수적이며, 이러한 유동 조건은 익렬간 상호 간섭에 의하여 영향을 받는다. 따라서 익렬간 상호 간섭을 평가하기 위하여 그 영향이 배제된 정상 단독 익렬 유동계산 방법(steady single blade row flow calculation) 과 그 영향을 포함한 정상 간섭 익렬 유동계산 방법(steady coupled blade row

flow calculation) 을 이용하여 유동장을 평가하고 실험 결과와 비교하여 보았다. 먼저 축류 압축기 단독 익렬 유동장 예측에서 많은 실험 결과와의 비교를 통해 어느 정도 정확성이 검증된 정상 단독 익렬 유동계산 방법⁽³⁾에 익렬간 혼합모델을 도입하여 다단 익렬내의 유동을 계산할 수 있는 정상 간섭 익렬 유동계산 방법으로 확장하였다. 다음으로 개발된 정상 간섭 익렬 유동계산 방법과 정상 단독 익렬 유동계산 방법을 대상 축류 송풍기에 적용하여 예측한 회전-정지 익렬의 성능을 성능 시험 결과와 비교, 평가하여 보았다. 이와 같은 과정을 통하여 동익과 정익의 유동장 간섭의 크기와 그에 따른 익렬의 성능 변화를 알아보았다.

2. 수치계산 방법

2.1 지배방정식

정상·난류유동에 대해, 연속식, Reynolds 평균 Navier-Stokes 방정식, 난류운동에너지(k) 및 난류소멸률(ϵ) 방정식은 직교좌표계상에서 종속변수(ϕ)를 사용하여 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi \quad (1)$$

각 방정식의 확산계수(Γ_ϕ)와 생성항(S_ϕ)의 정의는 Table 1에 제시되었다.

Table 1 Definition of ϕ , Γ_ϕ & S_ϕ

ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
I	0	0
u	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial b}{\partial x}$
v	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial b}{\partial y} + \rho \Omega (\Omega y + 2w)$
w	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial b}{\partial z} + \rho \Omega (\Omega z - 2v)$
k	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G - \rho \epsilon$
ϵ	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (C_1 G - \rho C_2 \epsilon)$

여기서 와점성계수(eddy viscosity)는 식(2)로 표현되고 각 계수들의 정의는 다음과 같다.

$$G = \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2)$$

$$C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

2.2 수치계산 기법

임의 형상의 유동공간에서 유동을 효과적으로 수치해석하기 위해서 보통 경계밀착좌표계(body-fitted coordinates)를 사용한다. 따라서 좌표계의 변환에 따라 변수와 지배방정식을 변환해야 하며, 또한 격자계의 선택도 중요하다. 본 연구에서는 격자계는 비엇갈림격자계가 사용되었고, 모든 종속변수들은 동일한 검사체적의 중심에서 평가되었다. 검사체적 중심에서의 직교속도에 대한 운동량방정식은 변환함수와 운동량보간법에 의해 검사체적면상의 반변속도에 대한 운동량방정식으로 변환된다.

수치해석 방법으로는 유한체적법(finite volume method)을 사용하는 SIMPLE 알고리즘⁽⁴⁾을 채택하였고, 검사체적면상에서의 대류-확산량의 평가에는 2차 정확도를 갖는 SOUCUP 도식을 사용하였다. 이산화된 지배방정식에 대한 해는 TDMA에 의해 구하였고, 주기경계면에서의 해는 cyclic TDMA에 의해 구하였다. 수렴판정은 질량유량의 잔류량이 10^{-5} 보다 작아질 경우로 하였다.

2.3 익렬간 혼합모델 (Interrow mixing model)

회전 익렬과 정지 익렬을 포함하는 유동은 필연적으로 비정상 유동이다. 만약 비정상의 영향이 작다고 가정할 수 있다면 Dawes⁽⁵⁾와 Denton⁽⁶⁾에 의해 다단 압축기 유동 계산을 위해 제안된 익렬간 혼합모델을 도입하여 계산할 수 있다. 익렬간 혼합모델이란 개념은 Fig. 1에서 보는 것과 같이 회전 익렬과 정지 익렬 사이에 혼합면을 설치하여 유동장을 분리하고 각 유동장은 각 익렬에 대한 상대좌표계에서 정상 유동 해로 구하며, 혼합면에서는 유동의 모든 양을 원주방향으로 평균한 후 서로 교환하여 유동장을 연결시켜주는 방법이다. 이와 같은 처리는 앞의 익렬에 의해 발생하는 후류등에 의한 원주방향의 불균일성이 후방 익렬에 미치는 영향을 계산할 수 없게 만드나 반경방향의 불균일성, 익렬간 포텐셜한 영향 등은 계산할 수 있게 한다. 이와 같은 처리는 많은 계산 시간과 저장 메모리를 요구하는 다단 익렬에서 익렬간 포텐셜 간섭을 고려하는 준정상 유동계산을 가능하게 한다.

본 연구의 수치계산에서 사용한 익렬간 혼합모델은 Fig. 1과 같다. 인접한 두 익렬 사이에 유동방향에 수직으로 설치된 세계의 격자면, ($imix-1$), ($imix$), ($imix+1$) 면들을 고려하였다. 정상상태의 유동장이라는 가정을 충족시키고 두 익렬간의 상

대적인 운동을 묘사하기 위해 ($imix-1$) 과 ($imix+1$) 면의 유동값들을 회전방향으로 평균한다. ($imix-2$) 면의 유동값 ϕ_{imix-2} 는 다음의 식(3)과 같이 회전방향으로 1피치사이에서 면적평균되고, 이 값이 ($imix+1$) 면의 값으로서 대입된다. 이렇게 함으로써 상류쪽의 정보가 하류쪽으로 전달된다. 다음에 하류쪽의 ($imix+2$) 면에 대해서도 똑같이 다음의 식(4)와 같이 평균하여 ($imix-1$) 면에 대입하여 하류쪽의 정보가 상류쪽으로 전달될 수 있게 한다. 식 (3)과 (4)의 평균과정은 ($imix-2$) 과 ($imix+2$) 면의 각 스펀위치에서 수행되므로, 회전방향 평균치들의 스펀방향으로의 구배는 보존되어 양 익렬로 전파된다. 이러한 방법으로 원주방향으로 평균된 값들은 반복계산할 때마다 수정되어 상하류의 유동정보를 혼합면가 가로질러 서로 교환됨으로써 혼합면 전방과 후방의 유동장이 서로 결합된다.

후방익렬의 입구경계($imix+1$)면에서의 유동값 :

$$\phi_{imix+1} = \frac{\sum \phi_{imix-2} \cdot S_{imix-2}}{\sum S_{imix-2}} \quad (3)$$

전방익렬의 출구경계($imix-1$)면에서의 유동값 :

$$\phi_{imix-1} = \frac{\sum \phi_{imix+2} \cdot S_{imix+2}}{\sum S_{imix+2}} \quad (4)$$

여기서 S 는 대응되는 계산 격자의 축방향 면적이며, ϕ 는 유동변수로서 축방향 상대속도, 반경방향 상대속도, 주방향 절대속도, 축방향 상대속도, 정압, 난류운동에너지, 난류운동에너지 소멸률을 등을 나타낸다.

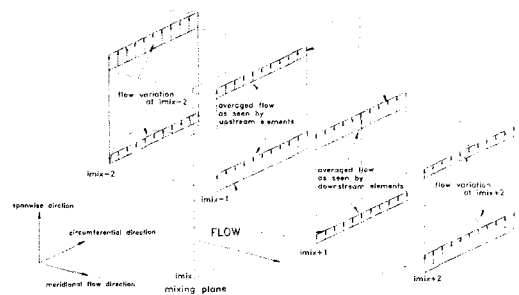


Fig. 1 Concept of interrow mixing model

3. 수치해석 대상 1단 축류 송풍기

3.1 축류 송풍기 제원

본 연구의 목적인 동익과 정익의 유동장 간섭의 크기와 그에 따른 익렬의 성능 변화 특성 규명을 위해 Fig. 2의 축류 송풍기를 대상으로 수치해석을 수행하였다. 대상 축류 송풍기⁽⁷⁾의 회전수는 1770 rpm이며, 허브비는 0.514 이다. 동익은 NACA 24 계열 익형으로 되어 있으며 익현장은 0.13m, 날개수는 10개이다. 정익은 두께가 일정한 원호형 판으로 되어있으며 익현장은 0.195m이며 개수는 8개이다.

3.2 수치해석 적용

Fig. 3에는 두 가지 유동해석 방법에 따른 격자계를 보여주고 있다. 계산영역은 동익과 정익의 1 피치이며, 격자형태는 H형을 사용하였다. 격자수는 계산 결과에 대한 격자의존성이 없도록 결정하였다. 스펜방향과 회전방향으로의 격자크기는 벽함수 적용을 위해 y^+ 가 30~50 사이가 되도록 하였다. 또한, 정상 단독 익렬 유동해석 방법에서는 하류에 위치한 익렬의 입구 경계조건을 쉽게 설정할 수 있고, 정상 간섭 익렬 유동해석 방법에서는 익렬간 혼합 모델을 쉽게 사용할 수 있도록 각 익렬의 스펜방향으로의 격자위치를 동일하게 하였다.

정상 단독 익렬 유동해석 방법

(steady single blade row flow calculation)

이 방법을 이용한 수치계산은 동익과 정익 두 부분으로 나누어 수행하였다. 경계조건을 적용하기 위하여 경계면의 위치를 각 익렬의 상류와 하류로 임의로 연장하였다. 먼저 동익의 입구 경계면에서의 유속 분포는 균일 유동으로 가정하였고 출구 경계면에서는 일반적으로 유동변수 값에 대한 정보를 알기가 어려우므로 모든 유동변수의 구배가 0이 되는 Neumann조건을 적용하였다. 정익의 입구경계조건은 동익의 출구 속도장을 각 반경위치에서 피치방향으로 면적 평균하여 적용하였다.

정상 간섭 익렬 유동해석 방법

(steady coupled blade row flow calculation)

익렬간 혼합 모델을 대상 축류 송풍기에 적용하기 위하여 Fig. 3(b)와 같이 동익 익렬과 정익 익렬의 사이에 혼합면이 설치되었다. 동익 익렬과 정

익 익렬 사이의 거리는 실제 거리와 일치하도록 하였고, 혼합면의 위치는 허브에서 동익의 후연과 정익의 전연의 중간 지점으로 설정하였다. 역시 입구 경계면에서의 유속 분포는 균일 유동으로 가정하고, 출구 경계면에서는 Neumann조건을 적용하였다.

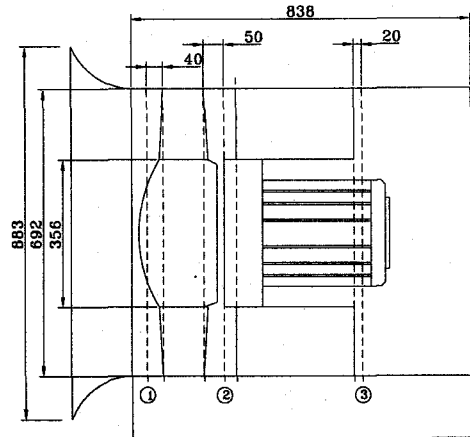


Fig. 2 Configuration of Axial Fan

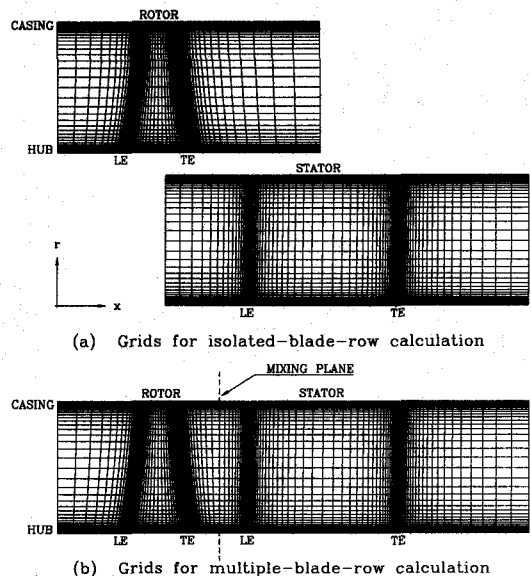


Fig. 3 Grid configuration

4. 축류 송풍기 성능 계산 결과

4.1 성능비교

수치계산과 성능시험⁽⁸⁾을 통해 산출된 축류 송풍기의 성능곡선을 Fig. 4에 제시하였다.

성능시험은 KS B6311-“송풍기의 시험 및 검사방법”에 따라 수행하였다. 성능시험에서는 송풍기 후방에 덕트를 연결하여 이 부분에서의 정압과 동압을 측정함으로써, 유량에 따른 총압 상승량을 측정할 수 있게 된다. 이와 같이 실제 성능시험에서는 hub cone, bell mouth, 전동기 후방의 확대부분, 송출관로 및 연결관 등을 모두 포함하고 있게 된다. 그러나 계산은 동익과 정익만을 포함하고 있으므로, 계산영역과 시험영역에 차이가 생기게 된다. 따라서 이 부분에서 발생한 총압 저하로 인하여 성능시험의 결과와 동익과 정익만을 포함한 수치계산의 결과에 차이가 나타날 수 있음을 밝혀둔다.

먼저 유량에 따른 총압 상승량을 살펴보면, 동익과 정익의 간섭에 대한 영향을 포함한 정상 간섭 익렬 유동해석의 결과가 정상 단독 익렬 유동해석 결과보다 낮게 예측하고 있다. 이러한 차이는 동익 후방에 있는 정익의 영향으로 동익에서의 총압 상승량이 정익의 영향이 없는 경우보다 적게 나타나고 있기 때문이다. 실제로 정익에서의 총압 손실은 두 수치계산 결과 거의 비슷하게 나타나고 있었다. 다음으로 정상 간섭 익렬 유동해석의 결과와 성능시험의 결과를 비교하여 보면 정성적으로는 같게 예측하나 정량적으로는 수치계산이 다소 높게 예측하고 있다. 이는 대상 앞에서 설명한 바와 같이 대상 영역의 차이 때문이다.

다음으로 유량에 따른 효율 면을 살펴보면, 두 수치계산의 결과는 거의 비슷하게 나타났다. 이는 비록 단독 익렬 수치계산이 총압 상승량을 더 높게 예측하고 있지만, 이에 따라 축동력(동익의 압력면과 부압면의 압력차)도 더 크게 예측하기 때문이다. 또한 수치계산의 결과와 성능시험의 결과를 비교하여 보면 정성적으로는 같게 예측하나 정량적으로는 수치계산이 10%이상 높게 예측하고 있다. 이는 앞에서 설명되었던 바와 같이 계산영역과 시험영역의 차이에 기인한다. 즉, 수치계산에서는 동익과 정익을 지나면서 총압 상승량을 이용하였고, 성능시험에서는 다른 모든 요소가 포함되었을 때의 총압 상승량을 이용하였기 때문이다.

따라서 정상 단독 익렬 유동해석에서 계산된 성능은 실제와 상당히 다르며, 두 익렬의 간섭을 고려한 정상 간섭 익렬 유동해석은 실험 값과 상당히 근사한 값을 예측해주고 있음을 알 수 있다.

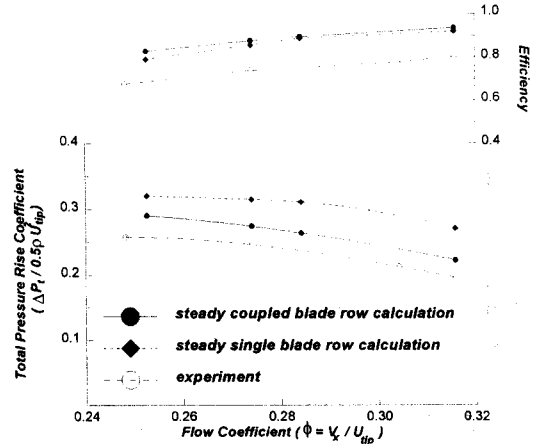


Fig. 4 Comparison of Performance curve between predictions and experiments

4.2 익렬 후방에서의 총압비교

정상 간섭 익렬 모델의 결과를 실험 값과 좀 더 정확히 비교하기 위하여 동익과 정익 후방에서 총압을 측정하였다.

Fig. 5, 6은 두 유량($V_x / U_{tip} = 0.316, 0.274$)에서 동익 전·후방 및 정익 후방의 반경방향으로의 총압 분포를 정상 단독 익렬 유동해석 결과 그리고 정상 간섭 익렬 수치계산 결과를 실험결과와 함께 보여주고 있다.

Fig. 5(a), 6(a)에서의 동익 전방의 총압 분포는 허브부분에서부터 반경의 약 80%까지는 수치계산에서 주어진 입구 경계조건 값과 실험결과가 잘 일치하고 있으나 케이싱 부분에서는 차이가 나타나고 있다. 이는 송풍기에서 bell mouth의 형상의 영향으로 벽면에서의 경계층에 의한 손실이 발생하여 대기압보다 낮게 나타나고 있으나 수치계산에서는 이를 고려하지 않았기 때문이다.

Fig. 5(b), (c)에서의 동익·정익 후방의 총압 분포는 정상 단독 익렬 유동해석의 경우에 측정값보다 크게 예측하고 있다. 그러나 동익과 정익의

간섭을 고려한 정상 간섭 익렬 유동해석에서는 허브부근을 제외하고는 대체로 측정값과 잘 맞고 있음을 알 수 있다. 허브 부근에 생기는 차이는 수치계산을 수행함에 있어서 허브형상을 단순화하여 원통형으로 하였지만, 실제 송풍기의 허브 형상은 동익과 정익 사이에 틈이 있으며 또한 약 1cm 높이의 턱이 있으므로 동익 후방 허브 부근에서 차이가 나타날 수 있다. 또한 정익의 허브는 전동기의 앞부분만 설치되어 있고 그 후는 전동기가 허브면을 대신하고 있으므로 정익 후방 허브 부근에서는 유로가 확대되면서 손실이 발생되어 차이가 나타나고 있다. Fig. 6(b), (c)에서의 동익·정익 후방의 총압 분포는 Fig. 5(b), (c)에서와 같이 정상 간섭 익렬 수치계산 모델이 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

이러한 수치계산 결과 비교를 통해, 축류 송풍기의 동익과 정익 사이에 간섭이 상당히 있으며 이는 성능에 크게 영향을 미치고 있음이 밝혀졌다. 따라서 두 익렬간의 거리가 가까운 다단 터보기계에 대하여 수치계산을 적용할 경우 정상 단독 익렬 유동해석 방법은 적합하지 않고, 익렬사이의 간섭 효과를 고려할 수 있는 익렬간 혼합 모델을 사용한 정상 간섭 익렬 유동해석 방법이 성능 예측에 적절함을 알 수 있다.

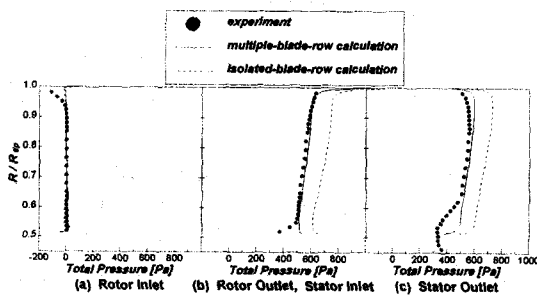


Fig. 5 Total pressure distributions at $V_x/U_{tip} = 0.316$

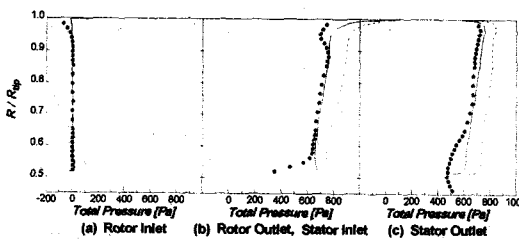


Fig. 6 Total pressure distributions at $V_x/U_{tip} = 0.274$

5. 결론

본 연구에서는 동익과 정익 두 익렬 사이의 유동장 간섭의 크기와 그에 따른 익렬의 성능 변화 특성을 알아보았다.

축류 송풍기의 총압 상승량은 정상 단독 익렬 유동해석의 경우 다소 과다하게 예측하고 있는 반면, 정상 간섭 익렬 유동해석의 경우에는 실험 결과와 잘 일치하고 있다. 이는 동익과 정익의 상호 간섭의 영향이 성능에 상당한 영향을 미치고 있음을 말한다. 따라서 서로 인접한 다단 익렬을 설계할 경우, 상호 간섭으로 인한 성능, 유동장 변화에 대하여 고려가 매우 중요하며, 정상 간섭 익렬 유동해석으로 비교적 정확히 성능을 예측할 수 있리라 생각된다.

참고문헌

- (1) D. J. Dorney, O. P. Sharma, 1997, "Evaluation of Flow Field Approximations for Transonic Compressor Stages", Journal of Turbomachinery, Vol.119
- (2) H. E. Gallus, J. Zeschky, C. Hah, 1995, "Endwall and Unsteady Flow Phenomena in an Axial Turbine Stage", Journal of Turbomachinery, Vol.117
- (3) 노수혁, 1996, "허브와 중앙스팬 사이의 회전익 후류 3차원 난류 유동해석에 관한 연구", 대한기계학회논문집(B), 제21권 제7호
- (4) S. V. Patankar, 1972, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, Washington, DC.
- (5) W. N. Dawes, 1990, "Towards Improved Throughflow Capability: The Use of 3D Viscous Flow Solvers in a Multistage Environment", ASME Paper 90-GT-18
- (6) J. D. Denton, 1992, "The Calculation of Three-dimensional Viscous Flow through Multistage Turbomachines", Trans. of the ASME, Vol.114
- (7) 안광협, 1997, "수치계산을 이용한 축류형 터보기계의 공력학적 설계와 성능 예측", 연세대학교 기계공학과 석사학위 논문
- (8) 공업진흥청, 1982, "송풍기의 시험 및 검사방법, KS B6311"