

〈論 文〉

## 원심압축기 회전차 내부의 3차원 유동해석

강신형\* · 최영석\*\* · 전상규\*\*\*

(1994년 11월 28일 접수)

### Calculation of 3-Dimensional Flow through an Impeller of Centrifugal Compressor

S. H. Kang, Y. S. Choi and S. G. Jeon

**Key Words** : Turbomachinery(터보기계), Numerical Analysis(수치해석), Centrifugal Compressor(원심압축기), Quasi-3-Dimensional Analysis(준3차원 해석), 3-Dimensional Analysis(3차원 해석)

#### Abstract

The flow through a centrifugal compressor rotor was calculated using the quasi-3-dimensional and fully 3-dimensional Navier-Stokes solution methods. The calculated results, obtained during the development of the computer codes for both methods are discussed. In the inviscid quasi-3-dimensional analysis, stream function formulation was used for the blade to blade (B-B) plane calculations, and the streamline curvature method was used for the meridional (H-S) plane calculations. In the viscous 3-dimensional flow analysis, a control volume method based on a general rotating curvilinear coordinate system was used to solve the time-averaged Navier-Stokes equations, and a standard  $k-\epsilon$  model was used to obtain eddy viscosity. The quasi-3-dimensional analysis reasonably predicts the pressure distributions and requires much less computation time in the region where viscous effects are not strong; however, it fails to predict velocity field and loss mechanism through the impeller passage. The viscous 3-dimensional flow analysis shows reasonable pressure distributions and typical jet-wake flow field through the impeller passage. Secondary flow and total pressure distributions on cross-sectional planes explain the loss mechanisms through the impeller.

#### 기 호 설 명

$C_\mu, C_1, C_2$  : 표준  $k-\epsilon$  모델의 상수  
 $G$  : 난류운동에너지의 생성항  
 $G^1, G^2, G^3$  : 점사표면에서의 유량  
 $g$  : 메트릭텐서  
 $h$  : 엔탈피  
 $J$  : 자코비안

$m/m_0$  : 자오면을 따른 무차원거리

$p$  : 압력

$p^*$  : 회전좌표계에서의 전압 ( $p + 1/2\rho W^2 - 1/2\rho\omega^2 r^2$ )

$P^*$  : 무차원 압력 ( $P^* = \frac{P^* - P_{\min}^*}{P_{\max}^* - P_{\min}^*}$ )

$s$  : 자오면에서 임의의 준수선을 따른 거리

$S$  : 지배방정식의 소스항

$U, V, W$  : 회전속도, 절대속도, 상대속도

$y/y_0$  : 압력면에서 흡입면을 따른 무차원거리

\*정회원, 서울대학교 기계공학과

\*\*서울대학교 대학원

\*\*\*효성중공업(주)

$z/z_0$  : 쉬라우드에서 허브를 따른 무차원거리

$x, y, z$  : Cartesian 좌표계

$Z$  : 날개수

#### 그리스문자

$\alpha$  :  $z$  축과 자오면 유선이 이루는 각  
 $\beta$  : 자오면과 상대속도가 이루는 각  
 $\Gamma_\phi$  :  $\phi$ 의 확산계수  
 $\delta_{ij}$  : Kronecker 델타  
 $\phi$  : 지배방정식의 일반적인 종속변수, 또는 유동계수  
 $x$  : Von Karman 상수  
 $\lambda$  : 예회전  
 $\mu_t$  : 와점성계수  
 $\xi, \eta, \zeta$  : 일반 곡선좌표계  
 $\theta$  : 상대 각좌표  
 $\sigma$  : 미끄럼계수  
 $\sigma_k, \sigma_\epsilon$  : 표준 k- $\epsilon$  모델의 상수  
 $\omega, \Omega$  : 각속도  
 $\Psi$  : 유선함수

#### 상첨자

1,2,3 :  $\xi, \eta, \zeta$ 방향의 성분

' : 섭동성분

o : 정체조건

#### 하첨자

$a$  : 대기  
 $b$  : 날개  
 $i$  : 입구  
 $m$  : 자오면성분  
 $\phi$  : 미지변수  
 2 : 임펠러 출구

## 1. 서 론

터보기계 회전차 내부의 3차원 유동해석은 회전차의 익형 설계과정과 탈설계점 성능특성의 예측을 위해 매우 유용하게 사용되고 있다. 터보기계의 내부 유동에 관한 수치계산 방법은 1985년 McNally와 Sockol<sup>(1)</sup>이 요약한 바 있으며, 크게 비점성유동 해석방법과 점성유동 해석방법으로 분류된다. 비점성유동 해석방법은 포텐셜유동의 해석방법, 유동함수를 이용한 해석방법 그리고 오일러방정식의 해석

방법으로 구분된다. 비점성유동 해석방법은 경계층의 영향이 적은 경우에는 날개표면의 압력분포를 합리적으로 구할 수 있으나, 탈설계점 근처에서 유동 박리 등이 수반되는 복잡한 유동에서는 많은 제한을 받는다. 점성유동 해석방법은 Navier-Stokes 방정식의 형태에 따라 완전 포물선형의 해석방법, 부분 포물선형의 해석방법 그리고 완전 타원형의 해석방법으로 나누어진다. 포물선형의 해석방법은 터보기계가 설계점 가까이에서 운전되고 있을 때 비교적 경제적으로 점성유동을 계산할 수 있는 수치해석 방법이다. 그러나 운전 범위가 넓은 경우나 탈설계점에서 운전되는 터보기계의 내부유동은 유동현상이 복잡하기 때문에 타원형 해석방법을 채택해야 한다. 그간 여러가지 방법이 연구되었고 또 실제로 응용되고 있으며, 최근에는 컴퓨터의 기억용량과 처리속도 향상에 의해 완전 타원형의 해석방법을 적용하기가 원활해지고 있다.

본 연구에서는 회전차 베인의 3차원 설계과정에서 널리 이용되는 비점성 준3차원 유동해석과 회전차 내부 3차원 난류유동을 해석하기 위한 전산프로그램을 개발하고, 실제 압축기에 적용하여 계산을 수행한 후 이들의 결과를 비교 검토하였다. 이러한 방법들은 이미 잘 알려져 있는 방법이고 그 특성들이 알려져있기는 하지만 아직 국내에서는 다양하게 검토된 바가 없기에, 앞으로 관련 연구를 수행하기 위한 기초연구로서 또 국내에서 개발한 프로그램을 보급한다는 차원에서 그 의의가 있다고 하겠다. 준3차원 해석방법은 회전차 내부유동을 비점성유동으로 가정하고  $S_1$ 으로 정의된 B-B(Blade to Blade) 유면과  $S_2$ 면으로 정의된 H-S(Hub to Shroud) 유면으로 나누어 계산하는 해석방법으로 Wu<sup>(2)</sup>에 의해 처음 제안되었다. Wu는 서로 교차하는 면인  $S_1$ 면과  $S_2$ 유면을 사용하여 각 면을 서로 반복계산하여 3차원 해를 구하는 방법을 제안하였는데 이 제안은 현재에도 이용되고 있다. 1960년대에는 Wu의 제안식이 아니라 오일러방정식을  $S_1$ 면과  $S_2$ 면에 대해 풀기 시작했다. 또한  $S_2$ 면의 해석 대신에  $S_2$ 면의 투사면인 자오면에 대해 해석하기 시작했다. 오일러방정식을 푸는데는 두가지 방법이 있는데 유선곡률법과 원시변수를 이용한 방법, 유선함수를 이용한 방법이 있다. 60년대부터 유선곡률법을 이용한 연구<sup>(3,4)</sup>가 발표되었다. 70년대 후반부터 80년대 초까지  $S_1$ 면과  $S_2$ 면을 서로 반복계산하여 3차원 해를 구하는 논문들이 발표되었다.<sup>(5)</sup> 80년대 후반부터

여러개의 S<sub>1</sub>면, S<sub>2</sub>면을 반복계산하는 방법이 시도되었고,<sup>(6)</sup> 국내에서는 80년대 이후부터 조강래<sup>(7)</sup> 등에 의해 축류압축기에 대한 준3차원 유동해석결과가 다수 발표되었으며 강신형<sup>(8)</sup> 등은 유선곡률법을 원심압축기에 적용하여 준3차원 해석을 수행한 바 있다. 본 논문에서는 자오면에서의 해석은 유선곡률법을 이용하였고, B-B면에서의 해석은 유선함수를 사용하여 두 유면 사이를 반복계산하여 회전차내의 3차원유동을 해석하였다.

이러한 준3차원 유동해석은 임펠러 내부 유로에서의 유동박리, 2차유동, 블로키지(blockage) 등의 성능에 큰 영향을 주는 인자들의 해석에 있어 큰 어려움이 따르며 이를 해석하기 위해서는 3차원 점성 유동해석을 수행하여야만 한다. 회전차 내부 유동에 대한 3차원 점성유동해석은 날개 끝의 누설 유동, 원심력과 코리올리스힘에 의한 경계층의 변화, 2차유동 등을 포함한 손실 매카니즘을 해석할

수 있다는 장점때문에 최근에도 관심있는 분야 중의 하나이다. 원심압축기 회전차에 관한 3차원 점성유동의 수치해석적 연구는 최근 컴퓨터와 수치해석 방법의 발달에 의해서 많이 연구되고 있으며, Moore,<sup>(9)</sup> Prince,<sup>(10)</sup> Hah,<sup>(11)</sup> Flagan,<sup>(12)</sup> Casey and Delbert,<sup>(13)</sup> Hathaway<sup>(14)</sup> 등에 의해 수행된 바 있다. 이들에 대하여 Table 1에 요약하였다. 회전차내의 난류유동은 유선의 곡률이 심하고, 박리를 동반하며 압축성효과가 크기 때문에 적당한 난류모델이 아직 정립되지 못하였다. 많은 경우 혼합거리 모델이나 2방정식 모델인 표준 k-ε 모델 또는 저레이놀즈수(Low-Reynolds number) k-ε 모델 등을 사용하고 있다. 본 연구에서의 3차원 난류유동해석은 벽함수를 사용한 표준 k-ε 모델을 사용하였으며 일반 곡선좌표계에서 유도된 완전타원형 Navier-Stokes 방정식에 대하여 유한 체적법을 사용하여 수치해석하였다. 운동량방정식의 종속변수로서 물

**Table 1** List of previous work for various centrifugal compressor impeller.

Author	Equation type	Numerical method	Turbulence model	Grid system	Tip clearance	Applicated impeller
J. Moore & J. G. Moore	PPNS (1980)	Pressure-correction	ML	H-type 17×14×14	No	Ghost impeller
T. C. Prince	EULER (1984)	Quasi-time-dependent	-	7,000 control vol.	No	Eckardt impeller A
C. Hah & A. C. Bryans	NS (1988)	Pressure-correction	LRN k-ε (Chien)	H-type 56×31×26	Yes	Eckardt impeller
C. Hah & H. Krain	NS (1990)	Pressure-correction	LRN k-ε (Chien)	H-type 48×23×26	Yes	DFVDR impeller
J. R. Flagan & S. Fleeter	PPNS (1991)	Pressure-correction	Standard k-ε	H-type 50×19×15	No	PRCC impeller
M. V. Casey & P. Dalbert	NS (1991)	TM, Explicit/implicit	LOSS3D : ML BTOB3D : BL	H-type 73×19×19	Yes	Eckardt impeller
S. Mizuki & H. Tsujita	NS (1992)	Pressure-correction	Standard k-ε	H-type 61×19×19	No	rotating duct
M. D. Hathaway & R. M. Chriss	NS (1992)	Implicit TM	BL	H-type 137×71×41	Yes	NASA LSCC

Note)

NS : Full Navier-Stokes equation, PPNS : Partially Parabolic Navier-Stokes equation,  
 TM : Time-Marching, ML : Mixing-length Model,  
 LRN : Low Reynolds number,  
 BL : Baldwin and Lomax algebraic eddy viscosity model

리적 공변속도 성분을 채택하였고, SIMPLER 알고리즘을 사용하였다.<sup>(15)</sup>

### 2. 비점성 준3차원 유동해석방법

#### 2.1 자오면에서의 지배방정식 및 경계조건

본 연구에서는 유선곡률법을 사용하여 자오면 유동해석을 하였다. 유선곡률법은 유면을 자오면에 투영하였을때 나타나는 자오면 유선에 대하여 임의의 준수선(quasi-orthogonal line)을 따라 속도구배방정식을 푸는 방법이다. 준수선은 보통의 경우 허브와 쉬라우드를 연결하는 직선으로 하고, 입구와 출구에서는 회전차 날개의 앞날과 뒷날에 일치 되도록 한다. 준수선은 계산과정에서 유선이 바뀌어도 변하지않고 고정된다. 자오면 상의 준수선을 따른 속도구배방정식은 다음과 같다. 사용된 좌표계와 변수는 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다.

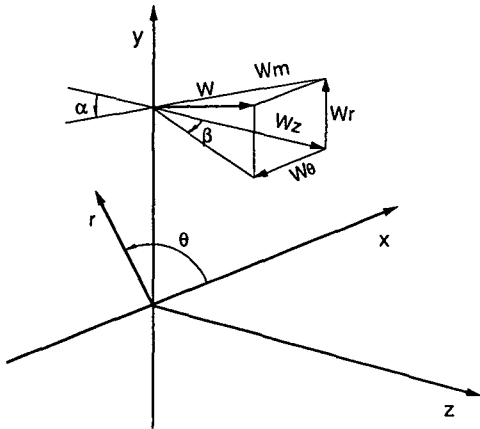


Fig. 1 Coordinate system and velocity components for Q-3D calculation

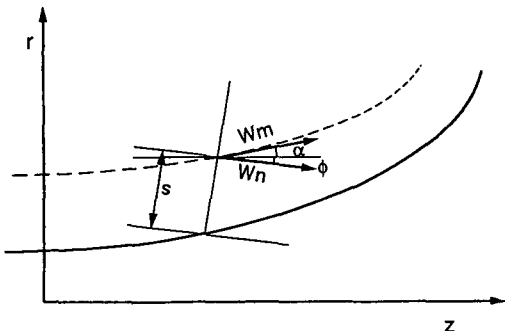


Fig. 2 Components of relative velocity normal to arbitrary quasi orthogonal line

$$\frac{dW}{ds} = \left[ A \frac{dr}{ds} + B \frac{dz}{ds} \right] W + C \frac{dr}{ds} + D \frac{dz}{ds} + \frac{1}{W} \left[ \frac{dh_i^2}{ds} - \omega \frac{d\lambda}{ds} \right] \quad (1)$$

여기서,

$$A = \frac{\cos\alpha \cos^2\beta}{r_c} - \frac{\sin^2\beta}{r} + \sin\alpha \sin\beta \cos\beta \frac{\partial\theta}{\partial r}$$

$$B = -\frac{\sin\alpha \cos^2\beta}{r_c} + \sin\alpha \sin\beta \cos\beta \frac{\partial\theta}{\partial z}$$

$$C = \sin\alpha \cos\beta \frac{dW_m}{dm} - 2\omega \sin\beta + r \cos\beta \left[ \frac{dW_\theta}{dm} + 2\omega \sin\alpha \right] \frac{\partial\theta}{\partial r}$$

$$D = \cos\alpha \cos\beta \frac{dW_m}{dm} + r \cos\beta \left[ \frac{dW_\theta}{dm} + 2\omega \sin\alpha \right] \frac{\partial\theta}{\partial z}$$

이다. 위의 식은

$$\frac{dW}{ds} = f(W, s) \quad (2)$$

의 형태가 되어 Runge-Kutta 방법에 의해 속도분포를 구한 후, 연속 방정식을 만족하도록 한다. 연속속방정식은 허브와 쉬라우드 사이를 통과하는 질량유량이 일정하도록 하여 만족시킨다.

#### 2.2 B-B면에서의 지배방정식 및 경계조건

유체기계내에서의 비회전성(irrotationality)과 연속방정식을 고려하면 다음의 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial m^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial(\ln|b\rho|)}{\partial \theta} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} + \left\{ \frac{1}{r} \sin\alpha - \frac{\partial(\ln|b\rho|)}{\partial m} \right\} \frac{\partial \Psi}{\partial m} = \frac{2b\rho\omega}{M} \sin\alpha \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial m} = -\frac{b\rho}{M} W_\theta, \quad \frac{\partial \Psi}{r\partial \theta} = \frac{b\rho}{M} W_m \quad (4)$$

위에서 M은 단위길당 유선관로(stream channel)를 지나는 질량유량을, b는 유선관로(stream channel)의 두께를 나타낸다. 위의 식 (3)은 직교좌표계로 되어있기 때문에 날개표면에서의 계산시 적절한 보간을 해주어야 한다. 따라서 실제 계산에서는 위식을 일반좌표계로 변환한 후 유한차분화하여 수치 계산하였다. 후연에서의 Kutta조건을 만족시키기 위해 본 연구에서는 출구유동각을 변화시키며 반복계산하였다.

2.3 계산과정

이상의 경계조건을 만족하는 지배방정식에 대한 계산과정은 아래와 같다.

단계 1 : Input data를 읽는다. (허브와 쉬라우드의 형상, 깃수, 각속도, 깃형상 등)

단계 2 : 허브와 쉬라우드를 연결하는 몇개의 준수선을 선정한다.

단계 3 : 몇개의 B-B면과 위치를 가정한다.

단계 4 : 각각의 B-B면을 해석하여 평균유면에서의 유동각( $\beta$ )을 계산한다.

단계 5 : 자오면을 해석하여 유선의 위치를 보정한다.

단계 6 : B-B면과 자오면 사이의 유선보정량이 허용오차안에 들면 계산을 끝나치고 그렇지 않으면 단계4로 가서 위의과정을 반복한다.

수렴의 판정은 유선보정량이 1%보다 작은 경우로 하였다.

였으며,  $k$ 와  $\epsilon$ 에 대한 수송방정식은 다음과 같다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \tag{8}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left[ \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right] \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \rho \epsilon \tag{9}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left[ \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right] \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \mu_t \frac{\epsilon}{k} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - C_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k} \tag{10}$$

여기서, 사용된 상수는 각각 다음과 같다.

$$C_\mu = 0.09, C_1 = 1.44, C_2 = 1.92 \\ \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3 \tag{11}$$

3. 점성 3차원 유동해석방법

3.1 지배방정식 및 경계조건

3.1.1 지배방정식

정상상태 난류유동에 대한 지배방정식을 임펠러에 고정된 회전 직교좌표계로 나타내었다. 이때 x축은 임펠러의 회전축과 일치시켰다. 이때 정상상태 점성유동에 대한 연속방정식과 시간평균 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] - \rho \overline{u_i' u_j'} \\ - 2 \rho \epsilon_{ijk} \Omega_j u_k \\ - \rho (\Omega_m x_m \Omega_i - \Omega_n \Omega_n x_i) \tag{6}$$

여기서,  $u_i$ 는 평균상대속도,  $\Omega_j$ 는 각속도이다. 운동량방정식에서 우변의 마지막 두 항은 각각 원심력과 코리올리스힘을 나타낸다. 레이놀즈 응력은 Boussinesq 가정을 채택하면, 평균유동의 변형률과 와점성계수에 의해서 다음과 같이 주어진다.

$$- \rho u_i' u_j' = \mu_t \left[ \mu \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] \tag{7}$$

와점성계수  $\mu_t$ 는 표준 k- $\epsilon$  모델을 사용하여 계산하

3.1.2 경계조건

원심압축기 회전자 내부의 3차원 점성유동 계산 영역은 날개와 이웃한 날개로 구성되는 영역이다. 이러한 유동영역에 대한 경계조건은 입구, 출구 경계조건, 벽 경계조건 그리고 주기 경계조건으로 구성된다. 날개에서 적당히 떨어진 상류 입구에서는 축방향과 점선방향 상대속도 및 난류강도 및 소산율이 가정된다. 계산의 편의상 입구조건은 인류서의 상류쪽으로 같은 반경으로 연장하여 유량조건을 만족하게끔 균일한 축방향 속도분포를 주었다. 디퓨저 부분인 출구에서는 모든 종속변수를 외삽하여 주었다. 날개표면의 흡입면과 압력면에서는 점착조건이 적용된다. 좌표계를 회전자에 고정시켰으므로, 케이싱의 벽은 점선방향으로 일정한 속도로 회전한다고 생각하였다. 허브의 회전부위와 고정 부위에서도 각각 점착조건과 회전하는 벽조건을 적용시켰다. 회전차의 상류와 하류의 날개가 없는 영역에서 주기적인 경계면이 형성되는데, 주기선의 같은 곳에 대응하는 위치에서 모든 변수값들은 연속적이어야 된다. 해의 수렴성을 향상시키기 위하여 주기조건은 암시적 방법으로 처리하였다.

3.2 수치해석방법

실제 수치해석은 비직교 좌표계 ( $\xi, \eta, \zeta$ )에서 수행되었다. 일반적인 변수  $\phi$ 에 대한 수송방정식은 좌표변환에 의해서 다음의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (\rho G^1 \phi) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (\rho G^2 \phi) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \zeta} (\rho G^3 \phi) \\ &= \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[ \Gamma_\phi J \left[ g^{11} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + g^{12} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} + g^{13} \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \right] \right] \\ &+ \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ \Gamma_\phi J \left[ g^{21} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + g^{22} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} + g^{23} \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \right] \right] \\ &+ \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ \Gamma_\phi J \left[ g^{31} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + g^{32} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} + g^{33} \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \right] \right] \\ &+ S_\phi (\xi, \eta, \zeta) \end{aligned} \quad (12)$$

이산화된 방정식은 유한체적법을 사용하여 유도하였다. 엇갈린격자계를 사용하여 스칼라 변수는 검사체적의 중심에, 속도성분  $u_\xi, u_\eta, u_\zeta$ 는 검사표면의 가운데에 위치시켰다. 검사표면에서 대류와 확산에 의한 플럭스는 멱승법(power law scheme)을 사용하여 구하였다.

격자선을 따르는 물리적 공변속도 성분이 운동량 방정식에서 종속변수로 사용되었다. 운동량방정식의 이산화는 격자점  $P$ 에 고정된 국소 고정좌표계에서 직교 좌표계의 속도성분을 사용하여 대수적 처리방법으로 수행되었다(Karki and Patankar).<sup>(16)</sup> 이 방법은 방정식을 일반 좌표계로 완전히 변환하는 경우 나타나는 복잡한 곡률 소스항을 피할 수 있는 장점이 있다.

압력수정 방정식은 SIMPLER 알고리즘을 사용하여 구하였고, 여기서 구한 압력수정량은 속도를 수정하여 연속방정식이 만족되도록 한다. 각 변수에 대한 이산화방정식의 해는 일반적인 TDMA와 주기(cyclic) TDMA(Ramamurti et al.)<sup>(17)</sup>를 사용하여 구하였다. 수렴여부는 압력장의 최고 압력과 최저 압력의 차이에 대한 최대 압력수정량의 비가  $10^{-4}$  보다 작은 경우로 판정하였다.

#### 4. 결과 및 검토

본 연구에서는 비교적 실험결과가 상세히 보고되어 있는 Mizuki<sup>(18)</sup> 등이 실험한 임펠러에 대해 계산을 수행하였다. 이 임펠러는 A형 B형 C형의 3가지가 있는데 본 연구에서는 B형 임펠러에 대해 계산을 수행하였으며 그 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 이 임펠러는 출구 직경이 270 mm, 입구외경이 157 mm, 회전속도가 6000 rpm인 후향경사가 없는 반경형 날개를 가진 임펠러로서 압축비가 그리 크지 않은 것이 특징이다. 이 임펠러는 포물선형의 인듀서가 있으며, 끝간극이 0.7 mm, 날개수가 12개이며 출구에서의 반경방향 절대속도 성분과 주속

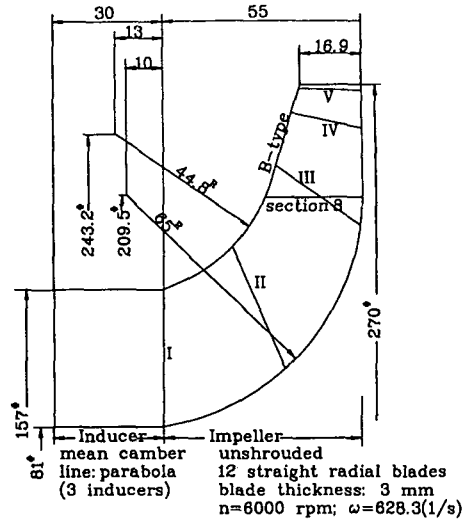


Fig. 3 Meridional configuration of impeller and inducers

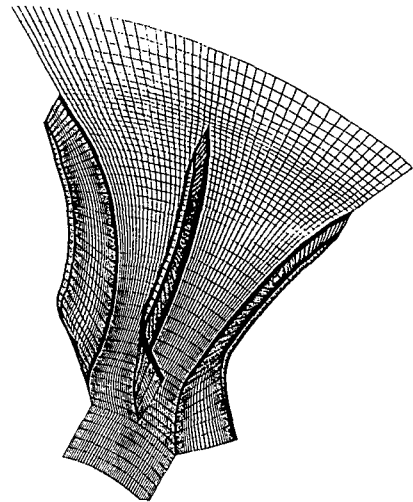


Fig. 4 Hidden line plot of the 3-D grid for the Mizuki impeller type B

도와의 비로 정의되는 유동계수 ( $\phi = V_{2r}/U_2$ )  $\phi = 0.4$ 가 설계점이다. Mizuki 등은 이 임펠러에 대해 압력면과 흡입면의 압력분포, 쉬라우드에서의 정압분포, 특정위치에서의 자오면을 따르는 속도분포 등을 3% 내의 오차범위에서 측정하였다. 이 임펠러의 형상은 3차원 점성유동의 계산에 사용된 H형태의 격자계를 나타낸 Fig. 4에 잘 나타나 있다.

##### 4.1 계산 격자수의 결정

계산 격자수는 준 3차원 계산의 경우 유동방향으

로 40, 날개와 날개 사이에 11, 허브와 쉬라우드 사이에 11개의 격자를 사용하였고, 3차원 점성유동 계산의 경우 유동방향으로 53, 날개와 날개 사이에 22, 허브와 쉬라우드 사이에 26개의 격자를 사용하였다. 3차원 점성유동 계산의 경우 격자계의 선정은 다음의 격자수의 검증을 통하여 결정하였다. 설계점 유량에서 격자계를 53×22×26, 53×28×32,

53×32×36의 3가지 경우에 대하여 계산을 수행하였다. 격자계의 선정은 표준 k-ε 난류모델에서 벽에서 떨어진 첫번째 격자의 무차원거리와 관련이 있다. 표준 k-ε 난류모델에서는 무차원거리( $y^+ = yu_\tau/\nu$ )가 30~300의 영역에 첫번째 격자가 위치하도록 격자계를 구성하여야 한다. 따라서 본 계산의 격자수에 대한 검증도 이러한 범위내에서 격자 생성시 공비를 조정하였다. 여기서 그림으로 나타내지 않았지만 날개를 따른 압력분포는 3가지 격자수에 따라 거의 변화가 없었다. Fig. 5에는 단면 8의 중간스팬에서 날개와 날개 사이의 유동방향 속도분포를 나타내었는데 격자계의 수가 증가함에 따라 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 탈설계점에서의 계산은 53×22×26 격자계로 수행하였다. 계산의 편의를 위해 모든 날개에 인듀서가 부착되어 있는 것으로 생각하였으며, 인듀서의 입구부분에서 날개두께를 무시하고 점차 증가해서 날개두께 3mm인 임펠러에 연결된 것으로 가정하였고, 임펠러의 끝단과 끝간극에서도 선형적인 날개두께 변화를 주어 계산격자를 구성하였다. 계산시간은 준 3차원의 경우는 자오면과 B-B면을 3회 반복계산할 경우 HP9000/735 Work station으로 3분정도 소요되었으며, 3차원 계산의 경우 HP9000/735 Work station으로 계산시간이 98 sec/iter이 소요되었고 약 1000번의 반복된 계산에 수렴된 결과를 얻을 수 있었다.

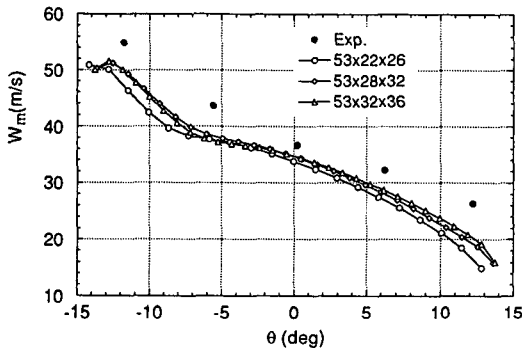
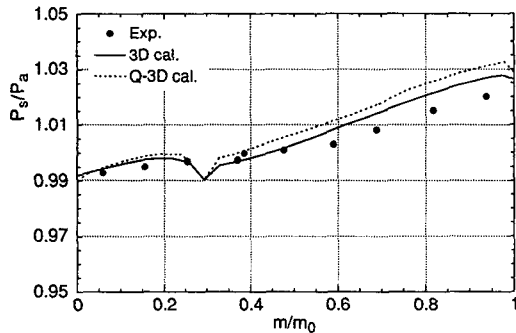
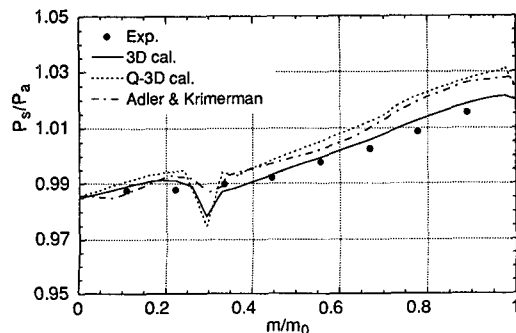


Fig. 5 Grid test for 3D calculation. (Meridional velocity distribution on the mean B-B stream surface for  $\phi=0.4$  at section No. 8).



(a)  $\phi=0.4$



(b)  $\phi=0.5$

Fig. 6 Static pressure distribution along the shroud

#### 4.2 회전차 내의 압력 분포

유량계수  $\phi$ 가 0.4와 0.5일때 날개 사이 중간면의 쉬라우드에서 유선을 따르는 정압분포를 Fig. 6 (a), (b)에 나타내었다. 실험치는 정지해 있는 케이싱의 정압탭에서 측정된 것이므로 회전방향으로 평균된 압력을 나타내며 계산값은 흡입면과 압력면의 중간에서 쉬라우드면의 압력을 나타내고 있다. 3차원 점성유동의 계산결과가 실험치와 가장 잘 일치하고 있다. 인듀서와 임펠러가 연결되는 곳에서 위글이 나타나고 있는 데 이는 쉬라우드의 급격한 곡률변화에 의한 것으로 생각된다. 여기서 Adler & Krimerman<sup>(19)</sup>의 계산은 유한요소법을 이용하여 H-S면과 B-B면을 반복계산한 결과이다.

설계점인  $\phi=0.4$ 일때 허브 근처, 중간스팬, 쉬라우드 근처에 해당하는 유동면에서의 압력면과 흡입면에서의 정압분포를 Fig. 7(a), (b), (c)에 각각 나타내었다. 전반적으로 준3차원 계산 및 3차원

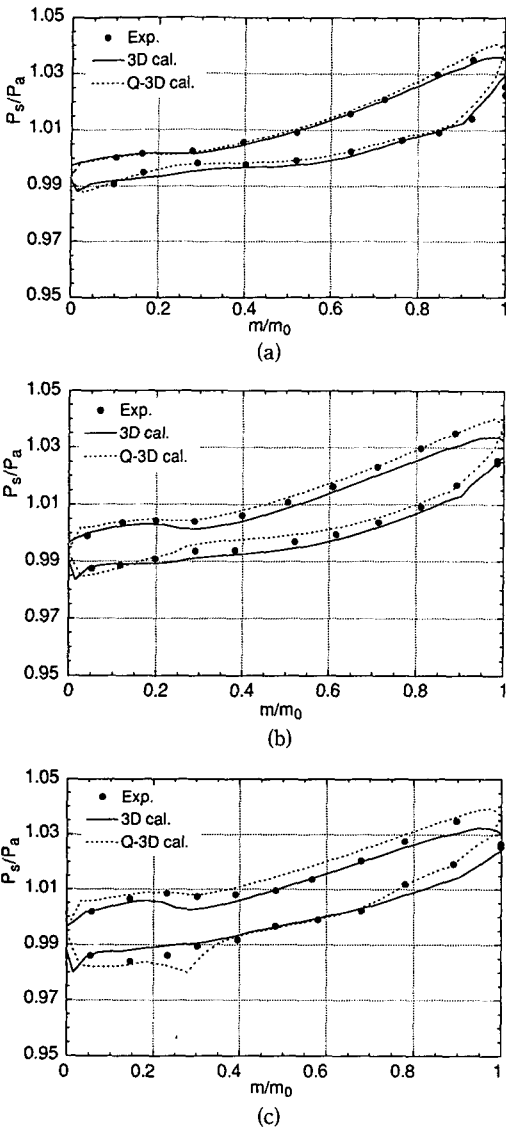


Fig. 7 Static pressure distribution on the blade stream surface for  $\phi=0.4$  (a) (1/8), (b) (4/8), (c) (7/8) stream surface

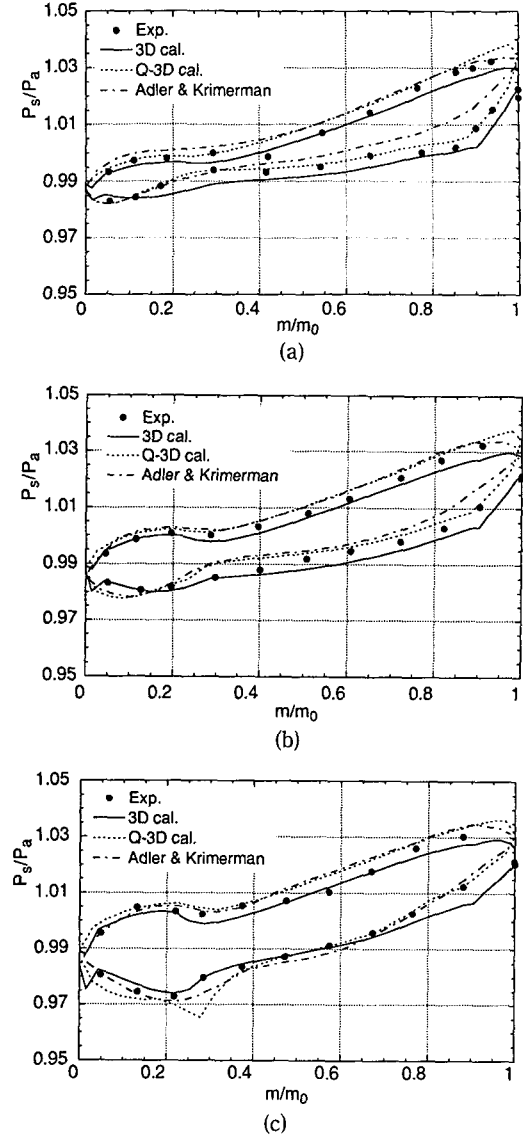


Fig. 8 Static pressure distribution on the blade stream surface for  $\phi=0.5$  (a) (1/8), (b) (4/8), (c) (7/8) stream surface

점성계산 결과들이 실험치와 잘 일치하고 있으며 특히 곡률이 크고 점성의 영향이 심한 쉬라우드 근처에서는 점성효과가 고려된 3차원 점성계산이 실험치에 가까움을 알 수 있다. 유량계수  $\phi$ 가 0.5일 때 압력면과 흡입면에서의 정압분포를 Fig. 8(a), (b), (c)에 나타내었다. 실험치와 비교적 잘 일치하고 있으며 쉬라우드 근처에서의 경향은  $\phi=0.4$  일때와 마찬가지로 준 3차원 계산결과가 약간 작은 값을 나타내고 있다. 이러한 차이는 점성효과에 의

한 유동특성의 변화에 따른 것으로, Fig. 9에 나타난 유량계수  $\phi=0.4$ 일때의 쉬라우드 근처의 B-B 면 유동속도벡터를 보면 잘 알 수 있다. 이 그림은 점성 3차원 계산결과이며 인두서 부근의 흡입면에서 유동박리를 포함한 복잡한 유동형태를 볼 수 있다.

#### 4.3 속도분포

Fig. 10은 설계점 유량계수인  $\phi=0.4$ 일때 Mizuki



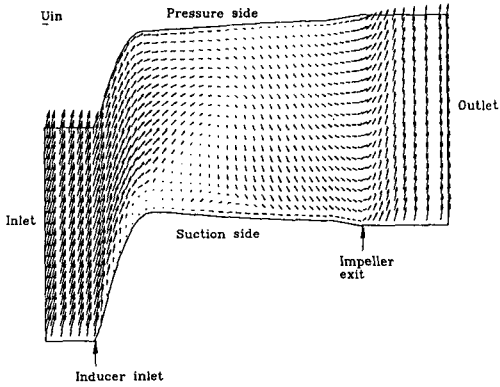


Fig. 9 Velocity vectors at near shroud surface for 3-D calculation

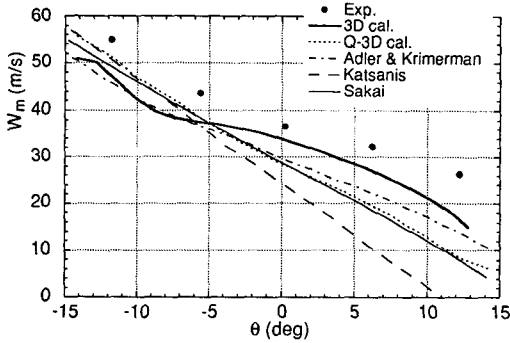
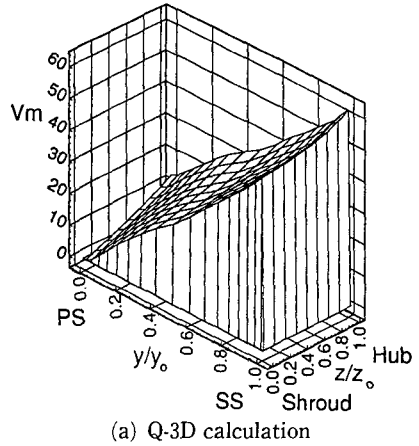
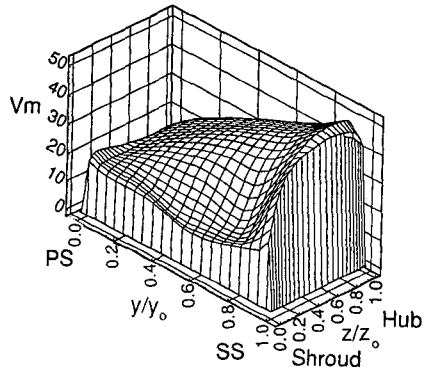


Fig. 10 Predicted and measured meridional velocity distribution on the mean B-B stream surface for  $\phi=0.4$  at section No. 8



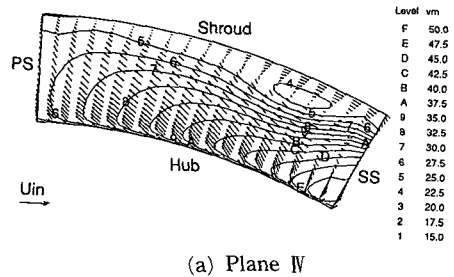
(a) Q-3D calculation



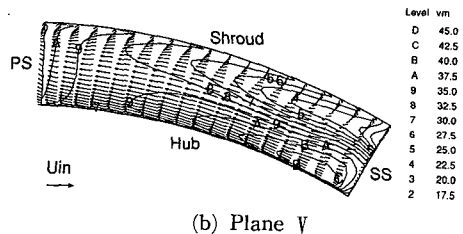
(b) 3D calculation

Fig. 11 Meridional velocity profile for  $\phi=0.4$  at section No. 8

등의 실험에서 단면 8(Fig. 3 참조)에서의 중간 유선면을 따르는 압력면과 흡입면 사이에서의 상대 자오면 속도분포를 나타내고 있다. 여기서 유한요소법을 이용한 Adler & Krimerman의 계산결과와 유선곡률법을 사용하여 계산한 Katsanis와 Sakai<sup>(20)</sup>의 준 3차원 계산결과를 함께 나타내었다. H-S 면과 B-B 면을 반복계산 하지않는 Katsanis의 결과가 속도구배가 크며 압력면에서 음의 속도를 보이고 있어 실제로 존재하지 않는 역류현상을 나타내고 있는데 비하여 본 연구에서 사용한 준3차원 계산에서는 B-B면에서 계산된 평균 유동각을 이용하여 자오면과 B-B면을 반복계산하였기 때문에 Katsanis의 결과보다는 개선된 결과를 보여주고 있다. 하지만 무엇보다도 회전차 통로 내의 점성효과가 고려되고 2차유동이나 유동박리를 포함한 유동장의 계산에 적합한 3차원 점성계산의 경우가 가



(a) Plane W



(b) Plane Y

Fig. 12 Secondary velocity vectors and contours of meridional velocity components

장 실험치에 근접하고 있음을 알 수 있다.

단면 8에서의 유동형태를 3차원 점성계산 결과와 준3차원 계산결과를 비교해서 살펴보면 Fig. 11 (a), (b)에 나타내었듯이 3차원 점성계산의 경우 흡입면의 쉬라우드 근처에서 운동량이 다른 곳에 비해 작은 영역(일반적으로 jet-wake 형태의 유동이라고 한다)이 존재하며 이러한 jet-wake 형태의 유동은 준3차원 계산에서는 나타나지 않으나 Eckardt<sup>(21)</sup> 등의 실험에서도 확인된 유동형태이며 회전차 출구를 지나 혼합되어 손실로 작용하게 된다.

4.4 2차유동 속도분포 및 상대 전압분포

위에서 언급한 jet-wake 유동형태는 회전차 내부의 2차유동에 기인한 것으로 Fig. 12(a), (b)의 점성유동 계산결과에 잘 나타나 있다. Fig. 12(a)는 Fig. 3의 단면 IV에 해당되는 곳으로서 허브면의 쉬라우드 근처에서 상대 자오면 속도의 크기가 작은 영역이 나타나며 이러한 영역은 위에서 언급한

wake 유동영역이며 2차유동의 중심과 일치하고 있다. Fig. 12(b)는 단면 V에 해당되는 지점으로서 회전차 출구에 가까운 곳이다. 회전차가 반경방향 날개 형상인 것을 생각하면 미끄럼속도의 존재를 확인할 수 있다.

Fig. 13에는 Fig. 3에 정의된 단면 I, II, III, IV, V에서 회전좌표계에서의 전압분포(rotary stagnation pressure)를 다음과 같이 무차원화하여 나타내었다.

$$P^* = \frac{P^* - P_{min}^*}{P_{max}^* - P_{min}^*} \tag{13}$$

여기서,  $p^* = (P + 1/2\rho W^2 - 1/2\rho\omega^2 r^2)$ 로 정의되며 비점성 포텐셜 유동영역에서는 1의 값을 가진다. 단면 I은 인듀서를 지나서 임펠러의 입구에 해당하는 곳으로 쉬라우드 근처에서 인듀서와 임펠러가 연결되는 곳의 급격한 곡률변화로 인한 유동박리로 인해 주로 손실이 발생함을 알 수 있다. 이러한 특

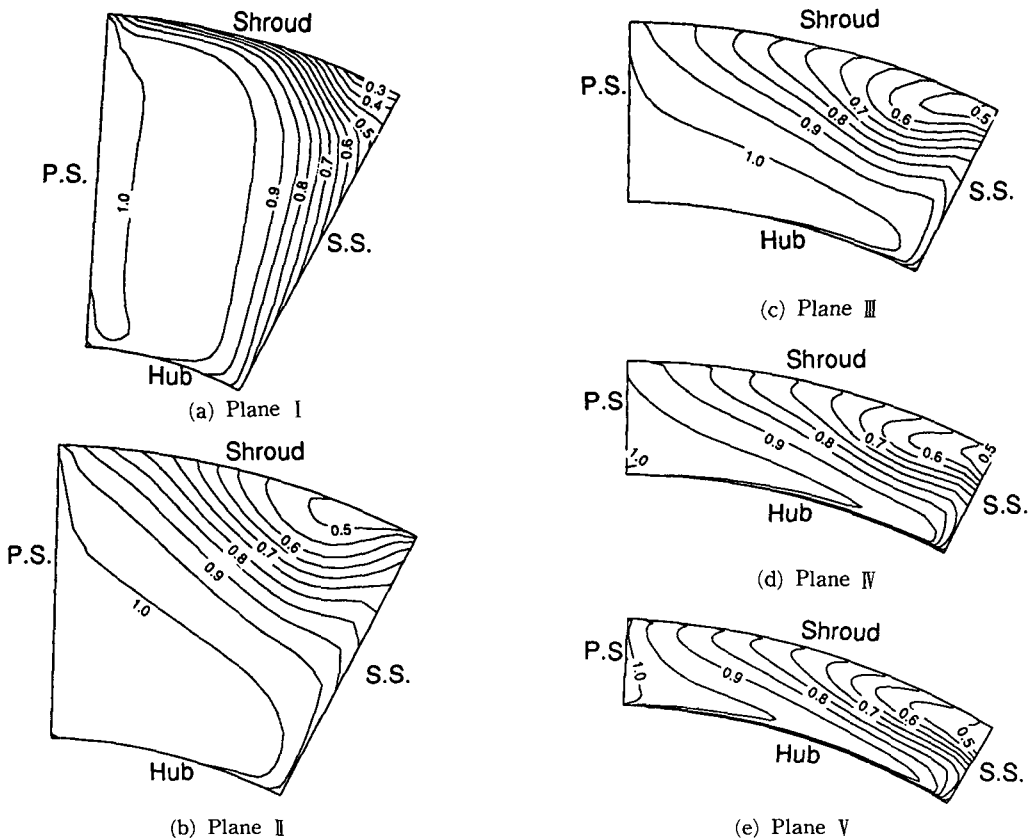


Fig. 13 Dimensionless rotary stagnation pressure  $P^*$

**Table 2** Comparison of space averaged slip factors with various formula.

	$\phi = 0.3$	$\phi = 0.4$	$\phi = 0.5$	
3D cal.	0.840	0.831	0.831	
Q-3D cal.	0.804	0.804	0.800	
Wiesner	0.824	0.824	0.824	$1 - \frac{\sqrt{\cos \beta_{2b}}}{Z^{0.7}}$
Stanitz's	0.835	0.835	0.835	$1 - \frac{0.63\pi/Z}{1 - \phi \tan \beta_{2b}}$

성은 회전차를 통과해 임펠러 출구 근처로 감에 따라 유동손실은 주로 쉬라우드의 흡입면 근처에서 발생하여 그 범위는 넓어지고 있다. 이러한 경향은 위에서 고찰한 2차유동이나 jet-wake형태의 유동특성과도 일치하며 Johnson & Moore<sup>(22)</sup>의 실험에서도 같은 경향을 보이고 있다.

4.5 미끄럼계수

회전차 출구에서 계산결과를 평균하여 구한 미끄럼계수를 Table 2에 나타내었으며 Fig. 14(a), (b)에 준3차원 계산과 3차원 점성계산을 비교하여 출구유동각의 분포를 나타내었다. 여기서 미끄럼계수는 다음과 같이 정의 되었다.

$$\sigma = 1 - \frac{V_s}{U_2} \tag{14}$$

준3차원 계산의 경우 유량계수의 변화에 따라 거의 차이가 없었으며 3차원 계산의 경우  $\phi = 0.3$ 에서 약간 큰 값을 가지며 전반적으로 다른 경험식과도

비교적 잘 일치하고 있다. 출구 유동각의 분포를 보면 준3차원 계산결과가 허브와 쉬라우드에서 거의 같은 출구 유동각 분포를 보이는 반면에 3차원 점성계산의 경우 2차유동으로 인한 wake 영역인 쉬라우드의 흡입면에서 심한 변화를 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 원심압축기 회전자 내부유동을 해석하기 위해 그동안 널리 사용되어진 비점성 준3차원 해석과 최근에 컴퓨터의 발달과 더불어 해석이 가능해진 3차원 점성해석방법을 적용하여 결과를 비교 검토하였다. 이에 따른 결론은 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 사용한 준3차원 유동해석의 경우 B-B면과 H-S면의 반복계산에 의해 점성효과가 그리 크지 않은 유동장의 해석에 있어서는 빠른 시간 내에 비교적 합리적인 압력분포를 얻을 수 있었다. 그러나 회전자 내부의 점성효과가 고려되어 있지 않고 회전이나 곡률변화에 의한 유동방향의 보텍스의 발생메카니즘을 고려할 수 없으므로 유동박리나 2차유동에 의한 유동특성 및 임펠러 내부의 손실 메카니즘을 예측할 수 없다. 그러나 설계단계에서 회전차의 깃설계에 충분히 활용할 수 있음이 확인되었다.

(2) 3차원 점성유동해석방법을 적용하여 회전자 내의 2차유동이나 jet-wake 유동형태로 인한 손실 등의 회전자 내부유동 특성을 확인하였으며 실험값과 비교할때 합리적인 유동장 해석결과를 나타냄을 확인하였다. 보다 엄밀한 검토를 위해서는 회전자 내부유동의 체계적인 계측이 필요하고 다양한 난류 모델에 대한 검토가 요망된다.

(3) 3차원 해석을 통한 임펠러 내부의 유동계산

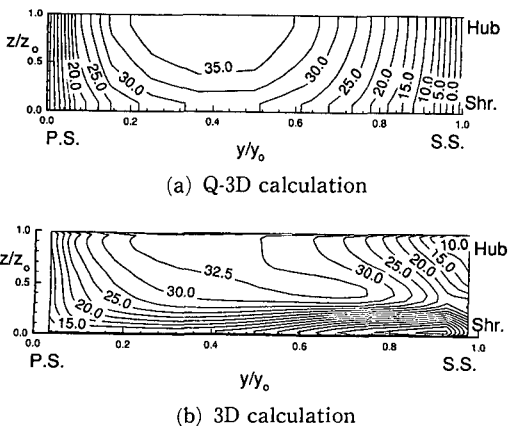


Fig. 14 Contours of deviation angle at impeller exit

은 임펠러 내부의 유동특성을 밝혀 내는데 크게 유용하며 이러한 계산 결과는 준3차원 계산시 손실반영의 기본자료로 활용할 수 있고 이를 통해 임펠러의 설계 및 성능예측에 적용할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 서울대학교 터보·동력기계 연구센터의 연구지원과 효성중공업(주)의 산학협동으로 수행되었다. 이에 저자들은 관계자 여러분께 깊은 감사를 드린다.

## 참고문헌

- (1) McNally, W. D. and Sockol, P. M., 1985, "REVIEW-Computational Methods for Internal Flows With Emphasis on Turbomachinery," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 6~22.
- (2) Wu Chung-Hua, 1952, "A General Theory of Three-Dimensional Flow in Subsonic and Supersonic Turbomachines of Axial, Radial and Mixed Flow Types," *NACA TN 2604*.
- (3) Katsanis, T., 1964, "Use of Arbitrary Quasi-Orthogonals for Calculating Flow Distribution in the Meridional Plane of a Turbomachine," *NASA TN D-2546*.
- (4) Katsanis, T., 1964, "Use of Arbitrary Quasi-Orthogonals for Calculating Flow Distribution on a Blade-to-Blade Surface in a Turbomachine," *NASA TN D-2209*.
- (5) Wang Qinghuan, Zhu Genxing and Wu Chung-Hua, 1985, "Quasi-Three-Dimensional and Full Three-Dimensional Rotational Flow Calculations in Turbomachines," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 107, pp. 277~285.
- (6) Wu Chung-Hua, Zhao Xiaolu and Qin Lisen, 1992, "Three-Dimensional Rotational Flow in Transonic Turbomachines: Part II-Full Three-Dimensional Flow in CAS Rotor Obtained by Using a Number of  $S_1$  and  $S_2$  Stream Filaments," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 114, pp. 50~60.
- (7) 조강래, 1983, "축류 터보기계의 H-S면과 B-B면상의 유동의 수치해석," 대한기계학회논문집, 제7권, 제2호, pp. 153~160.
- (8) 강신형, 신영섭, 1989, "유선곡률법에 의한 원심압축기 회전차 내부유동의 수치해석," 공기조화냉동공학논문집, 제1권, 제1호, pp. 87~96.
- (9) Moore, J., Moore, J.G. and Timmis, P. H., 1984, "Performance Evaluation of centrifugal Compressor Impellers Using Three-Dimensional Viscous Flow Calculations," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 106, pp. 475~481.
- (10) Prince, T. C. and Bryans, A. C., 1984, "Three-Dimensional Inviscid computation of an Impeller Flow," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 106, pp. 523~528.
- (11) Hah, C., Bryans, A. C., Moussa, Z. and Tomsho, M. E., 1988, "Application of Viscous Flow Computations for the Aerodynamic Performance of a Backswept Impeller at Various Operating Conditions," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 110, pp. 303~311.
- (12) Fagan, J. R. and Fleeter, S., 1991, "Impeller Flow Field Measurement and Analysis," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 670~679.
- (13) Casey, M. V., Dalbert, P. and Roth, P., 1992, "The Use of 3D Viscous Flow Calculations in the Design and Analysis of Industrial Centrifugal Compressors," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 114, pp. 27~37.
- (14) Hathaway, M. D., Chriss, R. M., Wood, J. R. and Strazisar, A. J., 1992, "Experimental and Computational Investigation of the NASA Low-Speed Centrifugal Compressor Flow Field," *ASME Paper*, No. 92-GT-213.
- (15) 김경엽, 1993, "압축기용 선형 캐스케이드내의 3차원 난류유동의 수치해석적 연구," 박사학위논문, 서울대학교, 서울.
- (16) Karki, K. C. and Patankar, S. V., 1988, "Calculation Procedure for Viscous Incompressible Flows in Complex Geometries," *Numerical Heat Transfer*, Vol. 14, pp. 295~307.
- (17) Ramamurti, R., Ghia, U. and Ghia, K. N., 1988, "Simulation of Two-Dimensional Viscous Flow Through Cascade Using a Semi-Elliptic

- Analysis and Hybrid C-H Grids," *NASA CR 4180*.
- (18) Mizuki, S., Ariga, I. and Watanabe, I., 1975, "A Study of the Flow Mechanism Within Centrifugal Impeller Channels," *ASME Paper No. 75-GT-14*.
- (19) Adler, D. and Krimerman, Y., 1980, "Comparison Between the Calculated Subsonic Inviscid Three-Dimensional Flow in a Centrifugal Impeller and Measurements," *The 25th Annual International Gas Turbine Conference*, New Orleans, Louisiana, March 9~13., pp. 19~26.
- (20) Sakai, T., 1971, "A Study on the Flow Pattern Within the Centrifugal and Mixed-Flow Impellers," *ASME Paper No. 71-GT-41*.
- (21) Eckardt, D., 1976, "Detailed Flow Investigations Within a High Speed Centrifugal Compressor Impeller," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 98, pp. 390~402.
- (22) Johnson, M. W., and Moore, J., 1983, "The Influence of Flow Rate on the Wake in a Centrifugal Impeller," *Journal of Engineering for Power*, Vol. 105, pp. 33~39.