

반경류 터보기계 회전차 내의 비점성 유동해석 및 성능예측

Calculation of Inviscid Flows and Performance Prediction of Radial Turbomachine

강 신 형*, 김 영 호**, 최 명 렬**
S. H. Kang, Y. H. Kim, M. R. Choi

ABSTRACT

Inviscid flows in a radial turbomachine and its performance are predicted by using a pannel method. Possibility of the method to be used for design purpose is investigated. The flows in a radial turbomachine are reasonably simulated with several off-design flow rates. The diameter ratio of the rotor and inlet and outlet vane angles are systematically changed so that performance of the machine in various designs are predicted. All the predictions are shown to be in the range of Cordier curve. On the other hand, calculated slip factors are also in good agreement with values given by an empirical formula.

부 호 설 명

<로마문자>

B_i : 식(18)과 식(22)에서 계수
 C_{ij} : 식(18)과 식(22)에서 계수
 g : 중력가속도
 H : 회전차의 양정
 J : 회전차의 깃 수
 l : 패널 요소의 길이
 M : 유량에 해당되는 균일속도
 m : 소스의 강도
 N : 회전수 또는 분할된 패널의 수효
 Q : 유량
 Q_0 : 설계 유량
 R : 동가 반경

r_1 : 회전차의 내경
 r_2 : 회전차의 외경
 (r, θ) : 극좌표계
 s : 깃을 따른 거리
 T : 회전차의 토크
 (t, n) : 깃의 접선 및 법선 방향
 u, v : ζ 평면에서의 속도성분
 V_n : z 평면에서 깃표면의 수직 속도성분
 v_n : ζ 평면에서 깃표면의 수직 속도성분
 W : 복소 포텐셜 함수
 $z = x + iy$: 복소수 함수

<희랍문자>

β : 깃의 각도
 δ : 회전차의 비회전수
 Φ : 포텐셜 함수
 ϕ : 유량계수

* 정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

** 서울대학교 대학원 기계공학과

- μ : 미끄럼 계수
- γ : 보티시티 강도
- ρ : 유체의 밀도
- σ : 회전차의 비직경
- ω : 회전차의 각속도
- Ψ : 압력계수
- $\zeta = \xi + i\eta$: 평면에서의 복소수함수
 (상첨자)
- * : 패널요소의 국소좌표계에서의 값
 (하첨자)
- 1, 2 : 회전차의 입구와 출구
- i, j : 패널 요소의 번호
- M : 유량에 의한 양
- m : 소스에 의한 양
- γ : 보티시티에 의한 양

1. 서 론

압축기의 설계 및 성능해석을 위해서 2차원 선형 캐스케이드 또는 반경류 캐스케이드 내의 비점성 유동해석은 매우 유용하게 이용된다. 비점성 비압축성 유동해석은 점성의 효과와 압축성의 효과를 고려하기 이전에 회전차 내의 기본유동을 이해하는데 필요하다. 이러한 2차원 포텐셜유동을 해석하기 위해서는 주로 등각사상을 이용한다든지, 특이점의 분포에 의한 적분방정식을 사용한다. 이러한 방법은 주로 항공분야의 익형 설계를 위해서 많이 연구 개발되어 있으며, 각 방법마다 각기 장·단점이 있다.

본 논문에서는 캐스케이드 표면을 직선 패널로 분할하고 여기에 균일한 강도의 소스에 보티시티를 분포시키는 패널방법을 도입하여 필요한 프로그램을 작성하였고, 이를 이용하여 반경류 터보기계의 회전차 내의 유동을 수치해석 하였다. 이 방법은 관련된 방법 중 현재 가장 잘 정립되어 있는 방법¹⁾이며 다목적 으로 활용할 수 있다는 점에서 본 연구에서 채택하였다. 더구나 앞으로 캐스케이드 내의 비정상 유동을 해석하기 위해서는 이 방법이 가장 보편적이라고 할 수 있다. 단순한 익형

의 경우에도 비정상 운동을 하면 익형 주위의 순환량이 시간에 따라서 변하게 되고, 따라서 뒷날 (trailing edge)에서 보티시티가 쉐딩된다. 이를 합리적으로 고려하기 위한 연구는 최근에도 활발히 이루어지고 있다.^{2,3)}

본 논문에서는 이러한 점을 고려하여 우선 반경류 터보기계 회전차 내의 포텐셜 유동을 수치해석하기 위한 패널방법을 정리하고, 이를 이용하여 수치해석하는 프로그램을 작성하였다. 이를 이용하여 비점성 유동해석을 회전차 설계에 이용할 수 있는 가능성을 연구하였다.

2. 지배 방정식

실제 원심 터보기계의 회전차는 그 내부가 3차원 형상이고, 축류 기계인 경우에도 마찬가지로이다. 그러나 설계 단계에서는 이러한 회전차를 반경류 캐스케이드 또는 2차원 선형 캐스케이드로 가정하고 그 내부 유동을 분석하여도 유용한 설계자료를 도출할 수 있다.

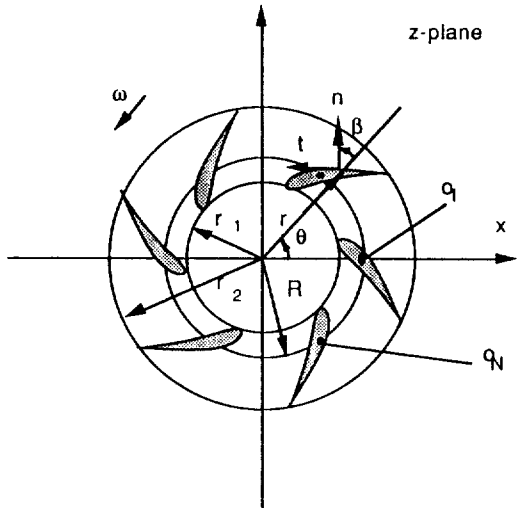


Fig.1 Definition sketch of a two-dimensional impeller

여기서는 Fig.1에 나타난 대로 임의의 형상을 갖는 반경류 회전차를 생각한다. 이때 점성의 영향과 압축성의 영향을 일단 무시하고 회전차 내의 유동을 비점성 비압축성 유동,

즉 포텐셜유동이라고 가정한다. 그러면 유동을 나타내는 포텐셜함수 Φ 가 존재하고 이는 다음의 Laplace 방정식을 만족시킨다.

$$\nabla^2 \Phi = 0 \dots\dots\dots (1)$$

이때 경계조건으로 회전차의 회전축에서는 속도가 균일하고 예선회에 의한 유동 방향이 주어진다. 이때 속도의 크기는 유량과 예선회 양에 따라서 정해진다. 한편 회전차에서 멀리 떨어진 바깥 경계에서는 마찬가지로 속도의 크기와 방향이 균일하고 주어진 유량에 대한 연속관계를 만족시켜야 한다. 동시에 회전축과 바깥 경계로 이루어지는 캐스케이드의 입구와 출구면을 포함하고 캐스케이드 사이의 임의의 경계로 이루어지는 유동 경계에서 순환량은 캐스케이드 내의 순환량과 같아야 한다. 이는 전체 유동이 비회전 유동이기 때문이다. 한편 캐스케이드 표면에서 수직방향 유동속도는 캐스케이드의 회전속도의 수직방향 속도성분과 같아야 한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$V_n = \omega \cdot r(\theta) \sin(\beta) \dots\dots\dots (2)$$

여기서 ω 는 회전차의 회전 각속도이고, $r(\theta)$ 는 깃의 표면 형상을 나타낸다. 그리고 β 는 표면에서 반경방향과 수직벡터 n 이 이루는 각도이다. 한편 날개의 뒷날에서는 Kutta 조건이 만족되어야 하고, 이에 관해서는 뒤에서 설명한다.

실제로 유동해석은 2차원 공간에서 수행되므로 여기서는 복소수 포텐셜함수를 도입하고 복소수 평면에서 해석을 한다. Fig.1의 유동영역을 다음의 등각사상 함수를 도입하면, Fig.2의 선형 캐스케이드가 구해진다.

$$\zeta = iR \ln\left(\frac{z}{R}\right) = -R\theta + iR \ln\left(\frac{r}{R}\right) \dots\dots (3)$$

여기서 $R = \sqrt{r_1 r_2}$ 이고, r_1 및 r_2 는 각각 회전차의 내경과 외경이다. z 평면에서 $r=0$ 은 ζ 평면에서 $\eta = -\infty$ 가 되고 $r=\infty$ 는 $\eta = \infty$ 로 사상된다. 한편 θ 가 일정한 반경선들은 ζ 평면에서 ξ 가 일정한 직선으로 사상된다. 이에 따라서 반경류 캐스케이드의 입구와 출구

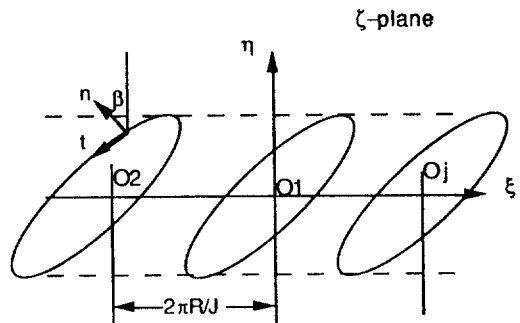


Fig.2 Conformal mapped plane of the radial cascade

조건에 해당하는, 즉 $r=0$ 또는 $r=\infty$ 에서 균일한 r 방향의 속도분포는 사상된 평면에서는 각각 η 방향으로 균일한 속도 분포가 된다. 이러한 등각사상은 2차원 선형 캐스케이드 주위의 유동을 해석하는 경우에는 필요가 없다. 따라서 본 연구에서의 방법은 반경류 또는 선형 캐스케이드에 관계없이 적용된다고 하겠다.

이때 포텐셜 유동은 Fig.2에서 η 방향으로 균일 유동과 날개의 표면에 분포된 소스와 보타시타에 의한 복소수 포텐셜 W_M, W_m, W_γ 의 합으로 구해진다고 하자. 그러면 복소수 포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_T = W_M + W_m + W_\gamma \dots\dots\dots (4)$$

W_M, W_m, W_γ 은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_M = -i \frac{M}{R} \zeta \dots\dots\dots (5)$$

$$W_m = \int_{n=-\infty}^{n=\infty} m(s) \ln[\zeta - \zeta_s + 2n\pi R/J] ds \dots\dots (6)$$

$$W_\gamma = - \int_{n=-\infty}^{n=\infty} i\gamma_n \ln[\zeta - \zeta_s + 2n\pi R/J] ds \dots\dots (7)$$

여기서 M 은 단위폭당 유량을 2π 로 나눈 값으로 등각사상된 평면에서는 균일한 유동속도에 해당하는 양이다. 그리고 소스의 강도는 캐스케이드의 표면에서 위치에 따라서 그 강도가 변하지만 보타시타의 강도는 균일하게 하였다. 이는 단순히 Kutta 조건을 만족시키고 양력에 필요한 순환량을 발생시키기 위한 목적이기 때문에 관계가 없다. 또한 식 (6)과

(7)에서 파라메터 n 에 대한 합은 기준 값에 인접한 많은 것의 영향을 모두 합한 결과이다. 식 (4)로 주어진 포텐셜이 사상된 평면에서 경계조건을 만족하도록 소스와 보티시티의 크기를 결정하면 해를 구하게 된다. 두 평면 사이에서 속도 보정 계수는 $|dz/d\zeta| = r|R$ 이므로 사상된 평면에서 경계조건은 다음과 같이 된다.

$$v_n = \frac{\omega r^2}{R} \sin \beta \dots\dots\dots (8)$$

그리고 Kutta 조건으로는 압력면과 흡입면에서 상대속도의 크기가 동일하다는 조건을 사용하였다. 이는 뒷날에서 압력이 연속적이라는 개념과 동일하다.

3. 패널법에 의한 수치해석

패널법은 캐스케이드 표면을 Fig. 3과 같이 작은 패널로 분할하고 여기에 특이점, 즉 소스와 보티시티를 적절히 분포시키는 방법으로 잘 알려져 있다. 물론 계산의 정도를 향상시키고, 안정된 답을 구하기 위해서 여러가지 연구가 수행되었으나 여기서 자세히 설명하지는 않는다. 본 논문에서는 깃 표면을 분할한 각 패널 위에서는 균일한 강도의 소스와 보티시티를 분포시키는 가장 기본적인 방식을 선택하였다.

패널법에 의하면 각 패널에 분포된 특이점에 의해서 공간 상의 한 점에서 유도되는 속도를 모두 합하면 그곳에서 속도가 된다. 따라서 캐스케이드 표면 위에서 균일 유동을 포함하여 유도되는 속도가 경계조건을 만족하고, Kutta 조건도 만족하도록 각 패널면에서의 소스와 보티시티의 강도를 정하면 된다. 그러나 경계조건은 깃의 모든 표면에서 만족되도록 할 수는 없고, 각 패널면 위의 특정한 점에서 만족되도록 한다. 이와 같이 경계조건이 만족되도록 하는 패널 위의 점을 노드점이라고 한다. 이를 위해서 먼저 특정한 j 번째 패널에 의해서 유도되는 속도를 구해야 한다. 그러나 패널의 공간상의 위치가 모두 다르므로 Fig.4에서와 같이 특정한 패널에 고정된 국부 좌표계

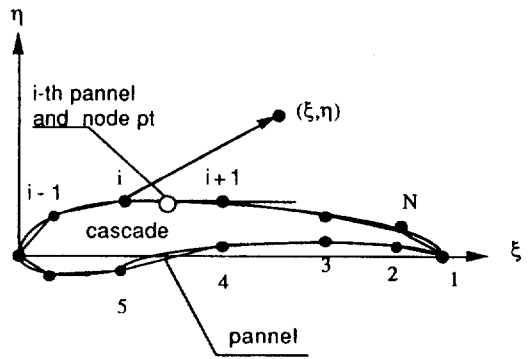


Fig.3 Alignment of panels on the cascade surface

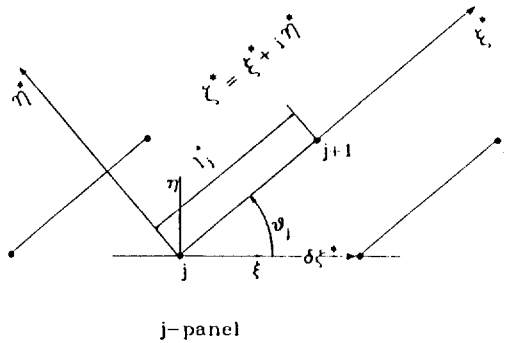


Fig.4 J-th panel and local coordinate fixed on the panel

를 선정하고, 해당 패널에 분포된 특이점이 임의의 위치에서 유도되는 속도를 구한 다음, 실제 적용시 속도를 전체 좌표계에 맞도록 변환하면 편리하다. Fig.4에는 j 번째 패널과 무한히 많은 인접한 익형의 패널의 국소좌표계(ξ^* , η^*)를 나타내었다. 여기서 패널에 분포된 단위 소스와 보티시티에 의해서 유도되는 속도는 다음과 같이 나타난다.

$$u_{mj}^* - iv_{mj}^* = \frac{d}{d\zeta^*} \int_0^{l_j^*} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \ln[\zeta^* - \xi^* + n\delta\zeta^*] d\xi^* \dots\dots\dots (9)$$

$$u_{rj}^* - iv_{rj}^* = -i \frac{d}{d\zeta^*} \int_0^{l_j^*} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \ln[\zeta^* - \xi^* + n\delta\zeta^*] d\xi^* \dots\dots\dots (10)$$

여기서 $\delta\zeta^* = 2\pi R \cdot \exp(-i\theta_j)/J$ 는 기준 깃

의 특정한 패널과 인접한 것의 해당하는 패널 사이의 거리이고, l_j^* 는 패널의 길이이다. 그리고 θ_j 는 해당 패널이 전체 좌표계에서 각도이다. 한편 국소좌표계에서의 속도성분과 전체 좌표계에서 속도성분은 다음의 관계가 있다.

$$u = u^* \cos(\theta_j) - v^* \sin(\theta_j) \dots\dots\dots (11)$$

$$v = u^* \sin(\theta_j) + v^* \cos(\theta_j) \dots\dots\dots (12)$$

식 (9)와 (10)을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$u_{mj}^* - i v_{mj}^* = \frac{d}{d\zeta^*} \int_0^{l_j^*} \ln \left[\sin \frac{\pi}{\delta\zeta^*} (\zeta^* - \xi^*) \right] d\xi^* \dots\dots\dots (13)$$

$$u_{rj}^* - i v_{rj}^* = -i \frac{d}{d\zeta^*} \int_0^{l_j^*} \ln \left[\sin \frac{\pi}{\delta\zeta^*} (\zeta^* - \xi^*) \right] d\xi^* \dots\dots\dots (14)$$

이를 정리하면 다음과 같다.

$$u_{mj}^* - i v_{mj}^* = -F \dots\dots\dots (15)$$

$$u_{rj}^* - i v_{rj}^* = iF \dots\dots\dots (16)$$

$$F = \ln \left[\frac{\sin \{ \pi(\zeta^* - l_j^*) / \delta\zeta^* \}}{\sin \{ \pi\zeta^* / \delta\zeta^* \}} \right] \dots\dots\dots (17)$$

Fig. 3의 i 번째 패널의 노드에서 유도되는 수직 속도성분은 균일 유동과 j 번째 패널의 소스와 보티시타에 의한 양을 모두 합하면 된다. i 번째 패널 자체에 의한 기여는 패널에서 수직속도 성분이 $1/2\pi$ 로 하였다. 인접한 익형의 영향은 서로 상쇄된다. 이때 유도되는 속도는 식 (8)의 경계조건을 만족시켜야 한다. 노드점은 각 패널의 중앙점으로 택하였다. 이와 같은 과정으로 다음과 같은 소스와 보티시타에 대한 연립 대수방정식이 구해진다.

$$\sum_{j=1}^N C_{i,j} m_j + C_{i,N+1} \gamma = B_i \dots\dots\dots (18)$$

여기서,

$$C_{i,j} = v_{mij}^* \cos \theta_i - u_{mij}^* \sin \theta_i \dots\dots\dots (19)$$

$$C_{i,N+1} = \sum_{j=1}^N (v_{rj}^* \cos \theta_i - u_{rj}^* \sin \theta_i) \dots\dots\dots (20)$$

$$B_i = \frac{\omega r_i^2}{R} \sin \theta_i - \frac{M}{R} \cos \theta_i + \frac{M_{ext}}{R} \sin \theta_i \quad (21)$$

이다. 캐스케이드의 상류와 하류에는 전체 순환량이 영이 되기 위해서, 캐스케이드에 분포된 보티시타에 의해서 균일 속도가 유도된다. 이를 상류에서 보상시키기 위해서 ξ 방향의 균일 유동이 필요하다. 식 (21)의 오른쪽 마지막 항은 이를 나타낸다. 이 항의 크기는 반경류 회전차에서 주어진 예선회량이 구해지도록 결정된다.

같은 방법으로 Kutta 조건에서 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{j=1}^N C_{N+1,j} m_j + C_{N+1,N+1} \gamma = B_{N+1} \dots\dots\dots (22)$$

$$C_{N+1,j} = \sum_{i=1}^N (u_{mij}^* \cos \theta_i + v_{mij}^* \sin \theta_i) \dots\dots\dots (23)$$

$$C_{N+1,N+1} = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N (u_{rij}^* \cos \theta_i + v_{rij}^* \sin \theta_i) \quad (24)$$

$$B_{N+1} = \frac{\omega}{R} (r_{i=1}^2 \cos \theta_1 + r_{i=N}^2 \cos \theta_N) - \frac{M}{R}$$

$$(\sin \theta_1 + \sin \theta_N) + \frac{M_{ext}}{R} (\cos \theta_1 + \cos \theta_N) \quad (25)$$

식 (18)과 식(22)를 $N+1$ 개의 미지수, 즉 N 개의 패널에서의 소스강도와 보티시타를 얻을 수 있는 $N+1$ 개의 연립 대수 방정식이다. 실제로 이들 방정식은 ω , M , M_{ext} 에 대하여 선형 방정식이므로 위 파라미터의 값이 각각 1.0일 때에 대하여 해를 구해두면 임의의 값에 대한 결과는 중첩원리를 이용하여 구할 수 있다.

4. 원심압축기에 응용

이상의 방법을 이용하면 원심압축기 등 반경류 터보기계의 회전차 내에서 유동의 상태, 캐스케이드 위에서의 압력의 분포 등을 계산할 수 있다. 이들은 회전차의 형상을 개발하고 설계하는 과정에서 활용된다. 본 논문에서는 집성의 영향이 무시된 유동해석이 이루어지고 있으나 회전차의 성능을 예측하여 보았다.

압축기나 송풍기의 회전차가 이루는 압력상승(헤드, H)은 회전차가 유체로부터 받는 토

크 T 로부터 다음의 관계로 나타낼 수 있다.

$$H = \frac{T\omega}{\rho g Q} \dots\dots\dots (26)$$

$$T = \rho \int_0^{2\pi} [2rV_r V_\theta]_{r_1}^{r_2} d\theta \dots\dots\dots (27)$$

여기서 V_r, V_θ 는 회전차 내에서 각각 r 및 θ 방향의 절대속도 성분이다. 식 (27)에서 토크를 구할 때 날개 위의 압력을 적분하는 방법 보다는 회전차의 입구와 출구 검사표면에서 운동량을 적분하는 것이 보다 정확하리라 생각된다. 압력과 유량을 보통 다음과 같이 유량계수 ϕ 와 압력계수 Ψ 로 나타낸다.

$$\phi = \frac{Q}{ND^3}, \Psi = \frac{gH}{N^2 D^2} \dots\dots\dots (28)$$

이들은 경우에 따라서는 다음과 같은 비회전수 δ 와 비직경수 σ 로 나타낸다.

$$\delta = \phi^{1/2} / \Psi^{3/4}, \sigma = \Psi^{1/4} / \phi^{1/2} \dots\dots\dots (29)$$

터보기계의 비회전수 δ 와 비직경수 σ 의 경험적 그래프를 Cordier Curve⁴⁾라고 부른다. 본 연구에서는 수치해석적 계산으로 예측된 회전차의 성능이 경험적인 Corder Curve에 비교하여 얼마나 근사한 예측이 가능한지에 관심을 두었다. 실제로 Cordier Curve에는 이미 점성에 의한 여러가지 손실이 포함되어 있음에 유의해야 한다.

한편 회전차의 성능을 예측하는 관점에서 계산되는 미끄럼계수를 관찰함은 흥미롭다. 보통 회전차를 설계하는 과정에서 날개의 수효가 무한히 많다고 가정하고 이에 따라서 1차원적인 속도삼각형 개념으로 회전차의 이론 성능을 예측한 후, 실제 유한한 갯수의 날개 효과와 점성손실을 고려한 미끄럼계수의 경험식을 사용하여 회전차의 성능을 예측한다.

터보기계의 형식과 종류에 따라서 여러가지 경험식이 연구 발표되어 있다. 그중 본 연구에서와 같이 반경류 터보기계에 적합한 Wiesner⁵⁾의 경험식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_1/r_2 < (r_1/r)_{cr} \text{ 일때} \\ \mu = 1 - \sqrt{\sin \beta_2 / J^{0.7}} \\ r_1/r_2 > (r_1/r)_{cr} \text{ 일때} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu = \left\{ 1 - \sqrt{\sin \beta_2 / J^{0.7}} \right\} \\ \left\{ 1 - \left(\frac{r_1/r_2 - (r_1/r)_{cr}}{1 - (r_1/r)_{cr}} \right)^3 \right\} \dots\dots\dots (30) \end{aligned}$$

여기서 미끄럼계수는 주로 회전차의 내외경비 r_1/r_2 , 회전차 출구에서 날개각도 β_2 , 회전차의 날개수 J 에 영향을 받는다고 생각하였다. 특히 반경비가 임계치보다 크면 미끄럼계수가 반경비에 영향을 많이 받는다고 하였고, 이때 임계치는 다음 식으로 주어진다.

$$(r_1/r_2)_{cr} = 1 / \exp(8.16 \sin \beta_2 / J) \dots\dots (31)$$

한편 회전차의 날개수를 결정하는 경험식으로 다음과 같은 식을 사용할 수 있다.⁶⁾

$$J_{opt} = \frac{2\pi \sin((\beta_1 + \beta_2)/2)}{(0.35 - 0.45) \ln(r_2/r_1)} \dots\dots\dots (32)$$

5. 계산결과 및 검토

이상 설명한 방법에 따라서 실제 원심 또는 반경류 압축기의 회전차의 내부유동 및 전체 성능을 예측하고 결과의 합리성을 검토하여 본 연구에서 채택한 방법이 실제 설계과정에서 활용될 수 있음을 보이고자 한다.

익형으로 임의의 형상이 가능하겠으나 여기서는 Joukowski 익형을 선택하였다. 익형의 형상은 파라미터의 변화에 따라서 다양하게 변화시킬 수가 있겠으나 여기서는 한가지에 대해서만 고려하였다. 주어진 익형에서 회전차의 반경비 r_1/r_2 , 회전차 출구에서 각의 각도 β_2 , 입구에서 각도 β_1 를 기본 변수로 보고 이들의 변화에 따른 계산 결과를 검토하였다. 회전차의 날개수 J 는 식 (32)에 의해서 정하였다.

한편 설계 유량 Q_0 는 회전차의 입구에서 속도삼각형 개념으로 영각이 없는 상태가 되도록 정하였다. 이 때를 기준으로 r_1/r_2 는 0.4 ~ 0.8, β_1 은 15° ~ 40°, β_2 는 15° ~ 70°의 범위에서 변화시켰다. 세가지 변수를 변화시킬때 다른 두 변수의 값은 고정시켰다. 이때 기준치로 r_1/r_2 는 0.5, β_1 은 20°, β_2 는 20° 및 40°로 하였다.

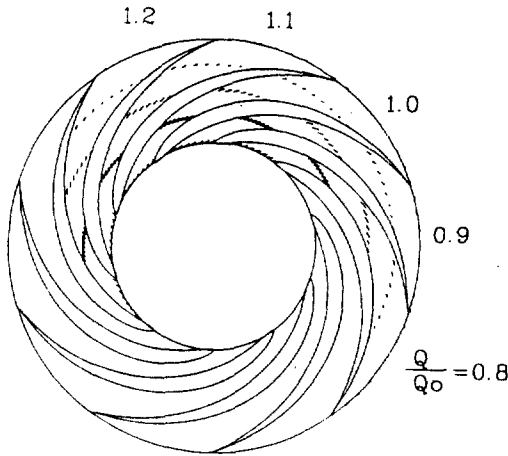


Fig. 5 Flow patterns in a rotor at off-design conditions ($J=10$, $\beta_2=20^\circ$)

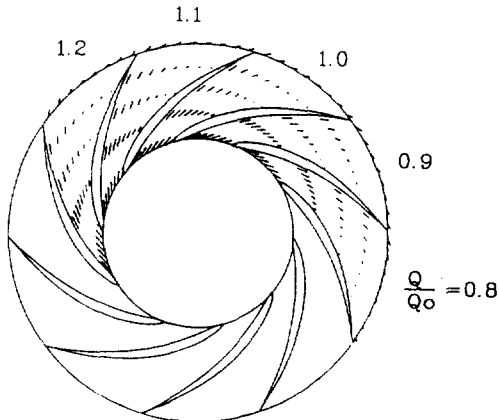


Fig. 6 Flow patterns in a rotor at off-design conditions ($J=10$, $\beta_2=40^\circ$)

먼저 Fig. 5와 Fig. 6에는 이러한 기준치에서 유량이 설계유량에서 벗어나면서, 즉 $Q/Q_0=0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2$ 에 대하여 회전차 내의 유동이 변하는 상태를 나타내었다. 압력면에서 상대 속도가 감소하고 흡입면에서는 상대적으로 속도가 크다. 베르누이 방정식에서 압력면의 압력이 흡입면에 비하여 크고, 이 결과 회전차는 토크를 받는다. 한편 회전차의 입구에서 유량이 설계치보다 커지면 날개에 대한 상대적 영각은 증가하는 상태를 잘 시뮬레이션하고 있다. 깃의 설계에서 깃을 다른 상대속도의 변화는 깃 표면에서 경계층의 박리와 매우 밀접한 관계가 있기 때문에 설계과정에서 중요하다.

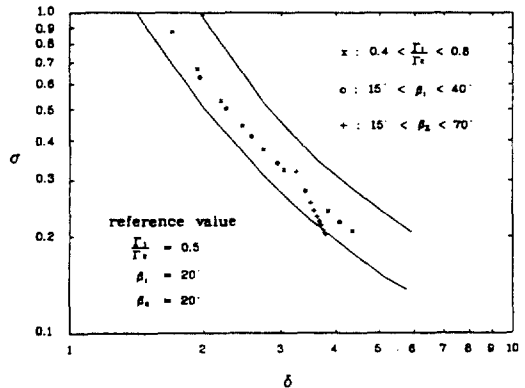


Fig. 7 Calculated specific speeds and diameters (solid lines; Cordier curve: $\beta_2=20^\circ$)

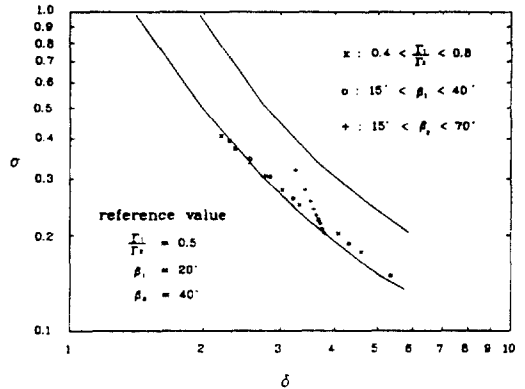


Fig. 8 Calculated specific speeds and diameters (solid lines; Cordier curve: $\beta_2=40^\circ$)

한편 β_2 가 20° 및 40° 일때 변수의 변화에 따른 $\delta-\sigma$ 의 관계를 Fig. 7과 Fig. 8에 각각 나타내었다. 그림에서 r_1/r_2 의 변화는 회전차식의 형식과 직접관계가 있으며, r_1/r_2 이 감소하면 비회전수가 감소한다. 한편 다른 변수들의 값이 고정된 상태로 β_1 이 감소하면 상대적으로 설계 유량이 감소함을 의미하며, 이때 비회전수가 증가하는 양상을 보인다. 또한 β_2 의 증가는 출구에서 선회속도를 감소시키고 따라서 양정이 감소하고 비회전수가 증가한다. 이러한 계산 결과는 속도삼각형에 의한 정상적인 개념과 일치한다. Fig. 7과 Fig. 8에는 각 계산된 점에 해당하는 변수의 값은 나타내지 않았고, 그 변하는 양상만을 나타내었다.

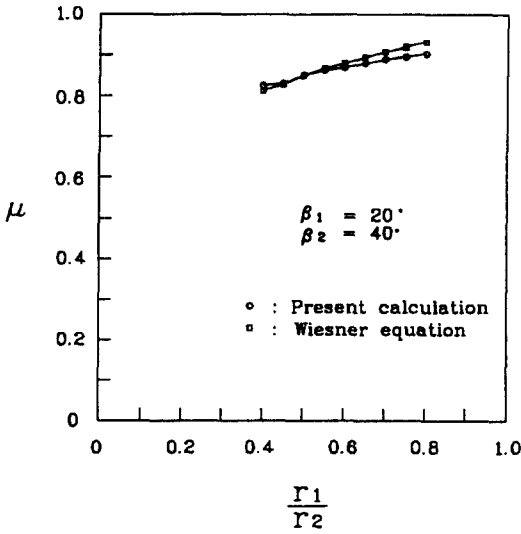


Fig. 9 Calculated slip factors and estimated values by an empirical formula($\beta_2 = 20^\circ$)

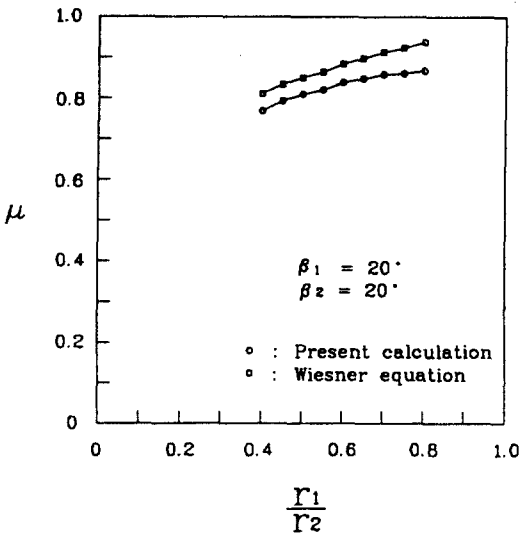


Fig. 10 Calculated slip factors and estimated values by an empirical formula($\beta_2 = 20^\circ$)

또한 그림에서는 실선으로 Cordier curve의 상한선과 하한선을 나타내어 시뮬레이션된 결과와 비교하였다. 모든 계산이 이 범위에 포함되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10에는 β_2 가 20° 및 40° 일때 계산된 회전차의 성능으로부터 구한 미끄럼계

수와 경험식에 의한 결과를 비교함으로써, 비점성유동 수치해석에 의해서 얼마 만큼 실제에 가까운 예측이 이루어지는가를 직접적으로 검토하였다. 두 경우 모두 경험식과 매우 가까운 결과를 보이고 있다. 본 수치해석은 점성을 고려하지 않았을 뿐만 아니라, 여기서 선택한 회전차의 형상이 반경방향으로 폭이 일정하며, 파라미터에 따라서는 실제 사용되지 않는 형상도 포함된다고 하겠다. 이러한 여러 가지들을 고려하더라도 예측 결과는 매우 양호하며, 실제 설계과정에서 충분히 활용할 수 있다고 생각된다.

6. 결 론

본 연구에서는 반경류 터보기계 회전차 내의 포텐셜 유동을 수치해석하는 프로그램을 작성하고 이를 회전차 설계에 이용할 수 있는 가능성을 연구하였다. 연구 결과를 다음과 같이 요약한다.

(1) 반경류 캐스케이드에 대하여 여러가지 조건에서 내부유동을 수치해석한 결과, 본 논문에서 채택한 패널방법은 본 연구 목적에 적합하다고 생각된다.

(2) 비점성 유동해석에 의해서 예측된 회전차의 성능은 실제와 매우 가깝다. 또한 수치 계산에 의해서 회전차 내부 유동을 다양하고 쉽게 예측할 수 있기 때문에 이러한 방법은 반경류 압축기나 송풍기 등의 회전차 설계과정에서 충분히 활용될 수 있다고 생각된다.

후 기

본 연구는 1989년도 한국과학재단 목적기초연구의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분에게 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. J. Moran, An Introduction to Theoretical and Computational Aerodynamics, Hhon Wiley and Sons, 1984.

2. M.J. Kim and D.T. Mook, "Application of Continuous Vorticity Pannels to General Unsteady Incompressible Two-Dimensional Lifting Flows," J. of Aircraft, Vol. 23, No. 6, 1986.
3. D.H. Choi, and L. Landweber, "Inviscid Analysis of Two-Dimensional Airfoils in Unsteady Motion Using Conformal Mapping," AIAA (to be published).
4. B. Eck, Fan, Pergamon, 1976.
5. 강신형 역(H. Ohashi 원저), 유체기계, 회중당, 1989.