

〈技術論文〉

## 가변안내깃이 존재하거나 없는 구심터빈의 탈설계 성능해석

한기수\* · 김광호\*\*

(1991년 3월 27일 접수)

### Off-Design Performance Analysis of Radial Inflow Turbines with or without Variable Area Guide Vane

Kee Soo Han and Kwang Ho Kim

**Key Words :** Radial Inflow Turbine(구심터빈), Scroll Casing(스크롤), Vaneless Space(깃 없는 공간), Variable Area Guide Vane(가변안내깃), Rotor(회전익), Off-Design Performance(탈설계성능), Total Efficiency(전효율), Static Efficiency(정효율), Total Pressure Ratio(전압력비), Rotor Loss Coefficient(회전익 손실계수)

#### Abstract

An analysis model for off-design performance of radial inflow turbines with or without variable area guide vane is developed, where two important factors in loss models, total pressure ratio between variable area guide vane exit and scroll casing inlet and rotor loss coefficient are determined without experimental data. The analysis results show that the predicted trends with or without variable area guide vane are consistent with the experimental observations. The comparison of present method with the well-known NASA off-design performance analysis program shows that the mass flow rate and static efficiency by present analysis are in good agreement with those by the NASA program. Therefore, this method can be used to predict off-design performance of radial inflow turbines with validity of the loss models used by present analysis.

#### 기호설명

<p><math>A</math> : 단면적</p> <p><math>AR</math> : 안내깃과 회전익 출구의 단면적비</p> <p><math>C_p</math> : 정압비열</p> <p><math>D</math> : 직경</p> <p><math>D_n</math> : 수력직경</p> <p><math>E</math> : 에너지계수</p> <p><math>e</math> : 3차원 운동에너지 손실계수</p> <p><math>f</math> : Fanning 마찰계수</p>	<p><math>H</math> : 형상계수</p> <p><math>h_c</math> : 회전익 끝간격</p> <p><math>i</math> : 입사각도로 Fig. 2와 Fig. 3에서 정의됨</p> <p><math>K</math> : 회전익 손실계수</p> <p><math>L</math> : 운동에너지 손실</p> <p><math>l</math> : 유동길이</p> <p><math>\dot{m}</math> : 질량유량</p> <p><math>\dot{m}_s</math> : 안내깃과 회전익의 입사 손실이 모두 영이 되는 질량유량</p> <p><math>N</math> : 회전수 (rpm)</p> <p><math>N_s</math> : 비속도, <math>N(\dot{m}/\rho_s)^{1/2}/(\Delta h_T)^{0.75}</math></p>
---	--

\*정회원, 한국원자력연구소 계통안전해석실

\*\*정회원, 한국과학기술연구원 터보기계연구실

$n$	: 입사지수
$p$	: 전압력
$PR$	: 전압력비
$Q$	: 임계 속도비 함수
$R$	: 반경
$Re$	: 레이놀즈 수
$r_c$	: 곡률 반경
$S$	: 스크롤
$ST$	: 스크롤 목
$s$	: 깃 간격
$T$	: 전온도
$t$	: 깃 후미 두께
$U$	: 회전익 접선 방향속도
$V$	: 절대속도
$W$	: 상대속도
$\alpha$	: 절대유동각
$\beta$	: 상대유동각
$\gamma$	: 비열비
$\Delta h_s$	: $C_p(T_o - T_{5s})$
$\Delta h_r$	: $C_p(T_o - T_s)$
$\Delta p$	: 전압력차이
$\eta$	: 효율
$\theta$	: 운동량 두께
$\nu$	: Blade-Jet 속도비, $U_3/(2\Delta h_s)^{0.5}$
$\rho$	: 밀도

#### 하첨자

$c$	: 곡률효과
$cl$	: 끝 간격
$cr$	: 임계
$df$	: 원판 마찰
$f$	: 점성 마찰
$GVE$	: 안내깃 출구
$h$	: 허브
$o$	: 곡률효과 없음
$opt$	: 최적
$R$	: 회전익
$r$	: 반경방향
$ref$	: 참고
$S$	: 안내깃 또는 정
$SC$	: 스크롤
$T$	: 전
$t$	: 끝
$u$	: 접선 방향

$VS$	: 깃 없는 공간
$x$	: 축 방향
0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	: Fig.1의 각 지점들
$2d$	: 2차원
$3d$	: 3차원

## 1. 서 론

구심터빈은 축류터빈에 비하여 그 사용 범위가 넓지는 않으나 소형이며, 구조가 간단하고 큰 압력비에서 작동되는 등의 장점으로 인하여 근래 내연기관의 출력증대를 위한 과급기(turbocharger)의 구동원으로 많이 사용되고 있다. 그리고 과급기에서는 엔진 회전수에 따라 배기가스 유량이 크게 변화하게 되며, 이러한 유동조건에서의 효율적인 작동을 위하여 스크롤과 회전익사이에 가변 안내깃을 설치하는 예가 많이 있다<sup>(1,2)</sup>.

가변 안내깃이 없는 구심 터빈의 탈설계 성능에 측에 관한 연구는 거의 없는 반면, 가변안내깃이 있는 구심터빈의 탈설계 성능예측은 비교적 많이 되어 있으나, 대부분 안내깃 각도에 따른 성능 실험으로 탈설계 성능 예측에 필요한 정보를 얻어야 한다<sup>(3,4,5)</sup>.

구심터빈에 대한 국내의 연구로는 가변안내깃이 없는 과급기용 구심터빈이 시험제작된 바 있고<sup>(6)</sup>, 스크롤에 대한 기초적인 연구<sup>(7)</sup>가 수행되었다. 한편 가변안내깃이 있는 경우의 탈설계 성능예측이 수행된 바가 있으나<sup>(8)</sup>, 그 탈설계 성능해석 결과는 실험과 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다.

구심터빈의 성능해석시 안내깃 각도가 어떤 각도로 고정된 상태에서 회전익의 회전수와 스크롤 입구와 터빈 출구의 압력비 변화에 따라 안내깃 출구에 대한 스크롤 입구의 전압력비  $PR$ 과 회전익 손실계수  $K$ 를 일정하게 놓고 탈설계 성능예측을 수행한다<sup>(3,4,5)</sup>. 그리고 구심터빈의 탈설계 성능해석시 중요한  $PR$ 과  $K$ 는 일반적으로 설계점(즉 입사 손실이 영이되는 조건) 근처의 성능실험으로부터 구하므로, 구심터빈의 탈설계 성능해석을 하기 위해서는 항상 실험에 의존해야 한다<sup>(4,5)</sup>.

본 연구에서는 이러한 사실에 입각하여 일반적으로 구심터어빈의 설계시 많이 사용되고 있는 NASA의 안내깃 및 회전익 손실모델들을 이용하여  $PR$ 과  $K$ 를 실험에 의존하지 않고 구하는 방법을 제시하고자 한다. 그리고 이 방법을 가변 안내

깃이 존재하거나 없는 가상의 구심터빈에 대하여 탈설계 성능해석을 하여, 본 방법이 기존에 알려진 실험 현상과 유사한 경향을 보이는지를 알아보기로 한다. 또한 안내깃이 있는 경우에 대하여 기존의 알려진 탈설계 성능 예측용 프로그램과의 비교를 통하여 본 연구의 해석방법을 간접적으로 검증하기로 한다.

## 2. 구심터빈의 손실모델

구심터빈은 Fig. 1과 같이 스크롤(scroll casing), 깃 없는 공간(vaneless space), 안내깃(guide vane)과 회전익(rotor)으로 구성되어 있다. 안내깃은 고정익 또는 가변안내깃(variable area guide vane)의 형태를 갖으며, 경우에 따라서는 안내깃을 생략하여 깃 없는 공간의 형태를 취할 수 있다<sup>(1,2)</sup>. 따라서 구심터빈의 성능 해석을 하기 위해서는 이 4가지 구성요소에 대한 전압력 손실의 예측이 필요하다.

### 2.1 스크롤(Scroll Casing)의 손실 모델

스크롤은 Fig. 1에서 보논바와 같이 일종의 곡관(curved duct) 형태로 주유동(main flow)에 2차유

동(secondary flow)이 나타나게 된다.

스크롤(구간 0~6)내에서의 유로마찰손실에 의한 전압력 손실은 다음과 같이 모델화하였다.

$$\Delta p_{sc} = 4f_c \frac{l}{D_h} \frac{\rho V^2}{2} \quad (1)$$

$$f_c = f_o [1 + 0.075 Re^{0.25} \sqrt{\frac{D_h}{2r_c}}] \quad (2)$$

여기서  $f_o$ 는 곡률효과가 없는 Fanning 마찰계수이며,  $f_c$ 는 곡률효과가 첨가된 마찰계수이고<sup>(9)</sup>,  $l$ 은 스크롤의 평균유동길이,  $D_h$ 는 수력직경,  $V$ 는 스크롤을 대표하는 평균속도이며,  $r_c$ 는 유동의 곡률반경을 나타낸다.

본 연구에서는 Balje<sup>(10)</sup>의 제안에 따라  $l = \pi D_6$ 로 구했으며,  $D_h$ ,  $V$ ,  $r_c$ 는 Fig. 1에서 S 지점의 값을 스크롤을 대표하는 값으로 보아 전압력 손실을 계산하였다. 스크롤 출구(지점 6)에서 유동의 접선방향의 속도는 자유와류(free vortex)가정에 따라 얻었고, 반경방향의 속도는 연속방정식에 의하여 계산하였다.

### 2.2 깃 없는 공간(Vaneless Space)의 손실 모델

깃 없는 공간(구간 6~7과 구간 2~3)에서의 전

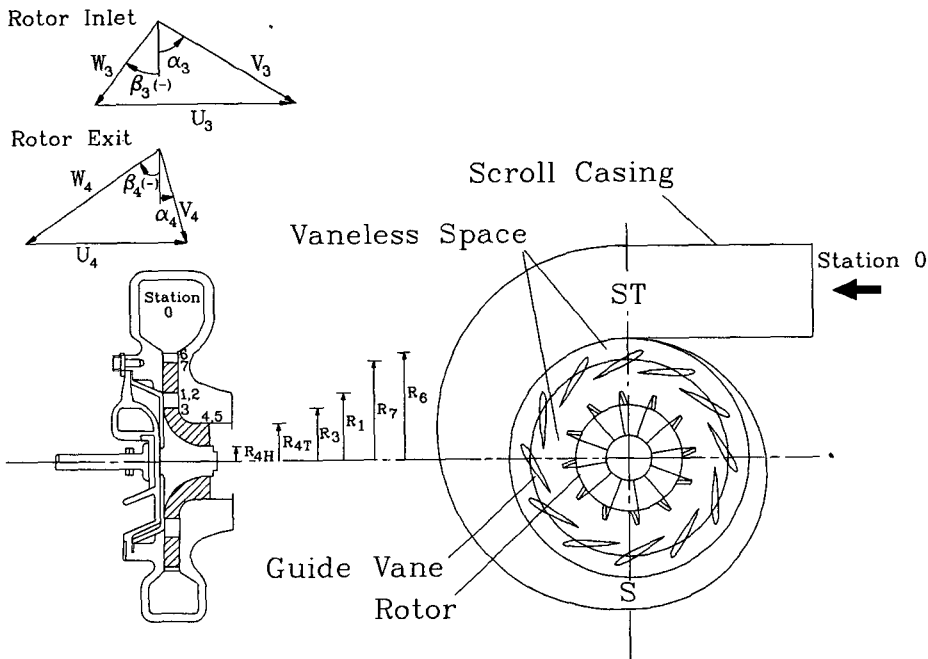


Fig. 1 Schematic representation of radial inflow turbine with variable area guide vane

압력 손실을 다음과 같이 모델화하였다.

$$\Delta p_{vs} = 4f_o \frac{l}{D_h} \frac{\rho V^2}{2} \quad (3)$$

위 식에서  $f_o$ 는 곡률효과가 없는 Fanning 마찰 계수이고  $l$ 과  $D_h$ 는 구간 6~7에서의 평균유로길이와 수력반경을 나타내며, 대표속도  $V$ 는 지점 6에서의 유동절대 속도이다. 구간 6~7에서 점선방향의 속도 변화는 자유와류(free vortex)의 가정이 적용된다고 보았다. 반경방향의 속도는 연속방정식에 의하여 계산되며 벽면과의 마찰에 의한 효과를 고려하였다. 그러나 보통 갖없는 공간에서의 마찰 손실이 다른 손실들에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 구간 6~7사이의 전압력 손실효과를 무시하여 계산한 성능과 이 효과를 고려한 성능과의 차이는 거의 없다. 구간 2~3도 위와 같은 방법을 사용하여 전압력 손실을 구하였다.

### 2.3 가변안내깃(Variable Area Guide Vane)의 손실 모델

가변 안내깃의 전압력 손실은 안내깃 3차원 손실(guide vane three-dimensional loss)과 입사 손실(incidence loss) 및 끝간격 손실(clearance loss)로 나뉘어 질 수 있다. 본 연구에서는 가변 안내깃의 끝간격이 없다고 보아, 끝간격손실은 무시하였고, 안내깃 3차원 손실에는 익렬형상 손실(blade profile loss), 벽면손실(end wall loss)과 2차 손실(secondary loss)이 포함되어 있다<sup>(11)</sup>.

입사손실이 존재하지 않는 설계점에서의 안내깃 3차원 손실은 Stewart등<sup>(11)</sup>에 의해 제안된 안내깃 3차원 손실계수  $e_s$ 로 부터 구할 수 있다.

$$e_s = \frac{EZRe^{-0.2} \left( \frac{l}{s} \right) \left( \frac{A_{3d}}{A_{2d}} \right)}{\cos(\alpha_1) - \left( \frac{t}{s} \right) - HZRe^{-0.2} \left( \frac{l}{s} \right)} \quad (4)$$

where

$$E = \frac{2 \left( \frac{1}{1.92} + \frac{Q}{3.2} + \frac{Q^2}{4.8} + \frac{Q^3}{6.72} \right)}{\frac{1}{1.68} + \frac{Q}{2.88} + \frac{Q^2}{4.4} + \frac{Q^3}{6.24}} \quad (5)$$

$$H = \frac{1.2 + \frac{3Q}{1.6} + \frac{5Q^2}{2.0} + \frac{7Q^3}{2.4} + \frac{9Q^4}{2.8}}{\frac{1}{1.68} + \frac{Q}{2.88} + \frac{Q^2}{4.4} + \frac{Q^3}{6.24}} \quad (6)$$

$$Q = \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \left( \frac{V}{V_{cr}} \right)^2 \quad (7)$$

$$Z = (\theta Re^{0.2} / l)_{ref} = 0.03734 \quad (8)$$

방정식 (4)에서 계산된 입사손실이 없을 때의 안내깃 3차원 손실계수  $e_s$ 로 부터 가변 안내깃을 지나는 전압력비  $p_1/p_7$ 은 다음과 같은 관계식을 이용하여 계산된다<sup>(6)</sup>.

$$\frac{p_1}{p_7} = \left[ \frac{1 - e_s - Q_1}{(1 - e_s)(1 - Q_1)} \right]^{7(\gamma - 1)} \quad (9)$$

방정식 (9)에서  $Q_1$ 은 방정식 (7)의  $Q$ 와 같고 위의 전압력비 계산은 설계점의 안내깃 각도(여기서 안내깃과 회전익의 입사 손실이 모두 영이 되는 경우가 존재)에서만 사용될 수가 있다.

설계점의 안내깃 각도와 다른 경우에는 Meitner와 Glassman<sup>(6)</sup>이 제시한 방법을 사용하여 3차원 손실계수를 구한다. 그들은 안내깃과 회전익의 입사 손실이 모두 영이 되는 설계점의 안내깃 각도에서 질량유량  $\dot{m}_s$ 와 그때의 안내깃 출구에서의 유동절대속도  $V_{1s}$ 를 구하여, 이 질량유량과 속도를 이용하여 방정식 (5)~(7)의  $E, H, Q$ 를 구하였다. 그리고 가변안내깃의 각도가 설계점의 안내깃 각도와 다른 경우에 발생하는 추가 손실효과(여기에 입사 손실이 포함됨)는 방정식 (4)에서  $Re, l/s, A_{3d}/A_{2d}, t/s$  및  $\cos(\alpha_1)$ 에만 영향을 미친다고 보아  $e_s$ 를 구하였다. 따라서 이렇게 하여 계산된  $e_s$ 는 설계점의 안내깃 각도를 벗어난 경우의 안내깃 전손실계수(total loss coefficient)가 되며, 여기에는 안내깃의 입사 손실도 포함되어 있다<sup>(6)</sup>.

안내깃 출구의 급격한 단면적 변화에 의한 전압력 손실은 다음과 같이 고려하였다.

$$\Delta p_{cve} = \left( 1 - \frac{V_{r,2}}{V_{r,1}} \right)^2 \left( \frac{\rho_1 V_1^2}{2} \right) \quad (10)$$

여기서 지점 2는 안내깃의 출구 바로 다음 지점으로 지점 1과 같은 반경을 갖는다.

### 2.4 회전익(Rotor)의 손실 모델

회전익 손실은 회전익 3차원 손실(rotor three dimensional loss), 입사손실(incidence loss), 끝간격 손실(clearance loss) 및 원판 마찰 손실(disk friction loss)로 나뉘어 질 수 있다. 회전익 3차원 손실에는 익렬형상손실, 벽면손실과 2차유동손실이 포함되어 있다<sup>(11)</sup>.

먼저 입사 손실이 없는 경우의 회전익 3차원 손실계수  $e_R$ 은 안내깃 3차원 손실 계수  $e_s$ 와 비슷한 형태를 갖는다<sup>(11)</sup>.

$$e_R = \frac{EZR e^{-0.2} \left( \frac{l}{s} \right) \left( \frac{A_{3d}}{A_{2d}} \right)}{\cos(\beta_4) - \left( \frac{l}{s} \right) - HZR e^{-0.2} \left( \frac{l}{s} \right)} \quad (11)$$

where

$$Q = \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \left( \frac{W}{W_{cr}} \right)^2 \quad (12)$$

$$Z = (\theta R e^{0.2} / l)_{ref} = 0.11595 \quad (13)$$

방정식 (11)에서  $E$ 와  $H$ 는 방정식 (5), (6)과 같으며, 이 두 식에서  $Q$ 는 식(12)로 부터 계산된다.

구심터빈의 경우 회전익 3차원 손실은 입사 각도에 의해 영향을 받으며, 입사각도가 존재하는 경우의 회전익 3차원 손실은 다음과 같다<sup>(4,5)</sup>.

$$L_f = \frac{K [W_3^2 \cos^2(i_3) + W_4^2]}{2} \quad (14)$$

여기서  $K$ 는 회전익 손실계수이고 회전익 입사각도  $i_3$ 는  $\beta_3 - \beta_{3,opt}$ 로 정의된다.

다음은 회전익의 입사 손실이 영이 될때 회전익 손실계수  $K$ 와 회전익 3차원 손실계수  $e_R$ 과의 관계를 보여준다.

$$K = \left[ \frac{e_R W_4^2}{(1 - e_R)(W_3^2 + W_4^2)} \right]_{i_3=0} \quad (15)$$

회전익에 입사 각도가 존재할 때 회전익의 입사 손실은 다음과 같다<sup>(5)</sup>.

$$L_i = \frac{W_3^2 [1 - \cos^n(i_3)]}{2} \quad (16)$$

여기서  $n$ 은 입사 지수로 음의 입사인 경우는 2.5이고 양의 입사인 경우는 1.75의 값을 갖는다<sup>(5)</sup>. 이렇게 입사 방향의 변화에 따라 입사 지수를 다르게 한 이유는 NASA에서 만든 구심터빈의 회전익과 형태가 유사할 경우, 실험효율과 예측된 효율이 잘 일치하기 때문이다<sup>(5)</sup>.

회전익의 원판 마찰손실과 끝간격 손실은 다음과 같다<sup>(12)</sup>.

$$L_{df} = \frac{0.02125 \rho_3 U_3^2 R_3^2}{\left( \frac{\rho U R}{\mu} \right)_3^{0.2} \dot{m}} \quad (17)$$

$$L_{cl} = \frac{(U_3 V_{u,3} - U_4 V_{u,4}) h_c}{R_{4,i} - R_{4,n}} \quad (18)$$

또한 회전익 출구에서의 단면적 변화로 인한 전압력 손실은 다음과 같이 고려하였다.

$$\Delta p_{RE} = \left( 1 - \frac{V_{x,5}}{V_{x,4}} \right)^2 \left( \frac{\rho_4 V_4^2}{2} \right) \quad (19)$$

여기서 지점 5는 회전익 출구 바로 다음 지점으로 지점 4와 같은 반경을 갖는다.

### 3. 수치해석 방법

구심터빈의 탈설계 성능해석은 Wasserbauer와 Glassman<sup>(4)</sup>의 프로그램을 기본으로 하여 본 연구에서 사용된 전압력손실에 관한 모델들을 첨가하여 수정하였다.

먼저 가변안내깃이 없는 구심터빈의 경우 전압력비는  $PR = p_6/p_0$ 로 정의되며, 이  $PR$ 과 회전익 손실계수  $K$ 는 Fig. 2와 같이 회전익의 입사 손실이 영이 될때 구했으며, 회전익의 회전수 및 질량유량이 변함에 따라 항상 일정한 값으로 사용하여 구심터빈의 성능을 해석하였다.

Fig. 3은 가변안내깃이 있는 구심터빈의 전압력비  $PR$ 과  $K$ 를 구하는 방법을 나타낸다. 스크롤, 가변안내깃과 회전익이 있는 구심터빈의 경우  $PR = p_1/p_0$ 로 정의된다. 이  $PR$ 을 구하는 방법은 다음과 같다. 먼저 pivoting 지점의 가변 안내깃

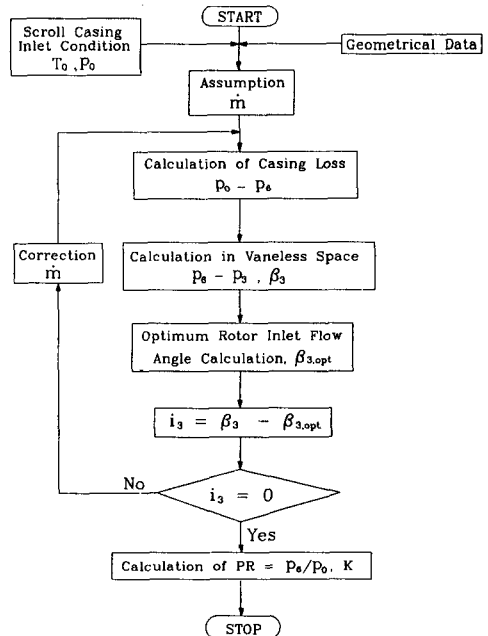


Fig. 2 Flow chart for the calculation of total pressure ratio  $PR$  and rotor viscous coefficient  $K$  in radial inflow turbine without guide vane

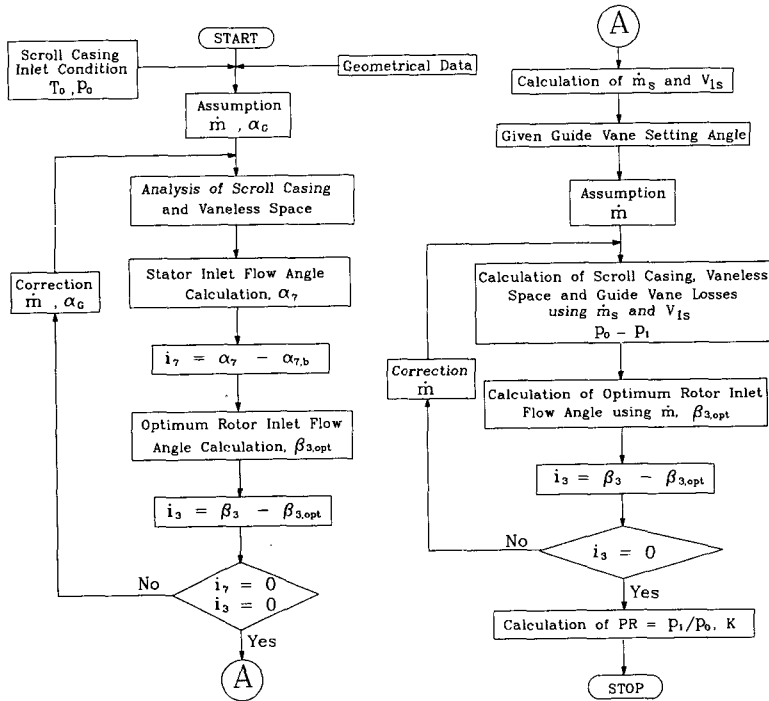


Fig. 3 Flow chart for the calculation of total pressure ratio  $PR$  and rotor viscous coefficient  $K$  in radial inflow turbine with variable area guide vane

각도( $\delta_c$ )를 바꾸어 가면서 안내깃과 회전익의 입사 손실이 모두 영이 되는 안내깃 각도(설계점의 안내깃각도)에서 질량유량  $\dot{m}_s$ 와 그때의 안내깃 출구의 절대유동 속도  $V_{1s}$ 를 구한다. 그 다음 안내깃의 각도가 설계점의 안내깃 각도와 다른 값으로 주어질 경우, 구간 0-1에서의 전압력비  $PR$ 은 이  $\dot{m}_s$ 와  $V_{1s}$ 를 사용하여 2,3절에 언급된 방식으로 구한다. 그리고  $K$ 는 질량유량  $\dot{m}$ 를 변화시키면서 회전익의 입사 손실이 영이 될때 구한다. 이렇게하여 구해진  $PR$ 과  $K$ 를 안내깃의 각도가 어떤 값으로 주어졌을 때 회전익의 회전수와 질량유량이 변함에 따라 항상 일정한 값으로 놓고 구심터빈의 성능해석을 수행하였다.

#### 4. 계산결과 및 고찰

본 연구에서는 가변 안내깃이 있거나 없는 가상의 구심터빈의 성능해석을 통하여 구심터빈의 성능 실험에서 나타나는 성능경향과 본 연구의 성능해석 결과가 비슷한 경향을 나타나는지를 알아보기 위하여 가상의 스크롤, 안내깃 및 회전익을 사용하였

다.

계산에 사용된 입구조건은 전온도가  $950K$ 이고 입구 전압력은  $1.326$  기압이며 설계점에서 회전익의 회전수는  $55,000rpm$ 이라고 가정하였다. 그리고 안내깃 출구의 절대 유동각( $\alpha$ )은 sine rule에 의하여 구하였다.

##### 4.1 안내깃이 없는 경우의 성능해석

Fig. 4는 스크롤과 회전익만 갖는 가상의 구심터빈에서 회전수가 변함에 따라 압력비 변화에 대한 유량변화가 어떻게 나타나는지를 무차원화한 그림이다. 압력비가 일정할때 회전익의 회전수가 증가함에 따라 터빈을 지나는 질량유량이 미소하게 감소함을 알 수가 있다.

Fig. 5는 Fig. 4와 같은 조건하에서 회전수 변화에 따른 비속도와 전효율의 변화관계를 보여준다. 계산된 최대 전효율은 회전수가  $55,000rpm$ 이고 비속도가 1.0에서 약 85%가 됨을 알 수가 있다. 또한 그림에서 회전수가 증가함에 따라 전효율이 최대가 되는 비속도가 커짐을 알 수가 있다.

4.2 가변 안내깃이 있는 경우의 성능해석

Fig.6은 가변 안내깃을 갖는 가상의 구심터빈의 성능해석 결과를 보여주고 있다. 여기서 회전수는 55,000rpm이다. 가변 안내깃이 있는 구심터빈에 있어서 가장 중요한 인자는 안내깃 출구와 회전익 출구의 단면적비인  $AR$ 이며<sup>(2)</sup> 다음과 같이 정의된다.

$$AR = \frac{A_1 \cos(\alpha_1)}{A_4 \cos(\beta_4)} \quad (20)$$

그림에서  $AR$ 이 커질수록 같은 압력비에서 구심

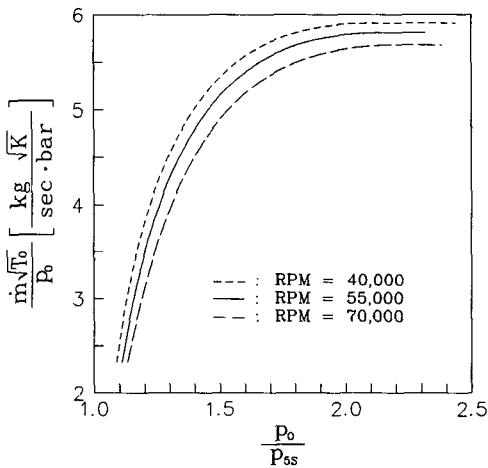


Fig. 4 Estimation of mass flow rates of radial inflow turbine without guide vane for various rotor speeds

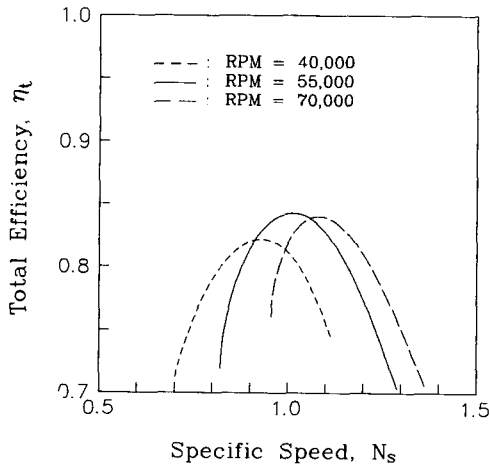


Fig. 5 Estimation of total efficiencies of radial inflow turbine without guide vane for various rotor speeds

터빈을 지나는 질량유량이 증가함을 알 수가 있으며, 이런 경향은 기존의 알려진 실험 결과의 경향과 일치한다. 압력비가 1.3에서  $AR$ 이 0.728 일때에 비하여  $AR$ 이 46%에서 -22%로 변함에 따라 유량은 대략 +33%에서 -17%정도 변화함을 알 수가 있다. 즉, 유량이 크게 변화하는 조건에서는 가변안내깃을 설치하는 것이 유용함을 알 수가 있다.

Table 1은 Fig. 6에서 계산된 가변 안내깃 출구의 각도변화에 따른  $AR$  및  $PR$ 과  $K$ 의 변화를 보여준다. 표에서  $AR=0.728$  일때 안내깃과 회전익의 입사 손실이 모두 영이 되는 경우(설계점)가 존재한다. 본 연구의 방법으로  $PR$ 과  $K$ 를 구하여 성능해석을 수행한 결과,  $AR$ 이 증가할수록(안내깃 출구의 절대유동 각도가 감소할수록)  $PR$ 은 증가하고  $K$ 는 감소하는 것으로 나타났다. 이런 경향은 Meitner와 Glassman<sup>(6)</sup>의 실험 및 해석 경향과 일치한다. 그러나 Meitner와 Glassman<sup>(5)</sup>의 성능해석

Table 1 Relations between  $AR$ ,  $PR$  and  $K$  by the change of variable area guide vane exit angle

$\alpha_1$	$AR$	$PR$	$K$
64.2°	1.067	0.9969	0.1823
73.5°	0.728	0.9962	0.1931
77.4°	0.567	0.9955	0.1957

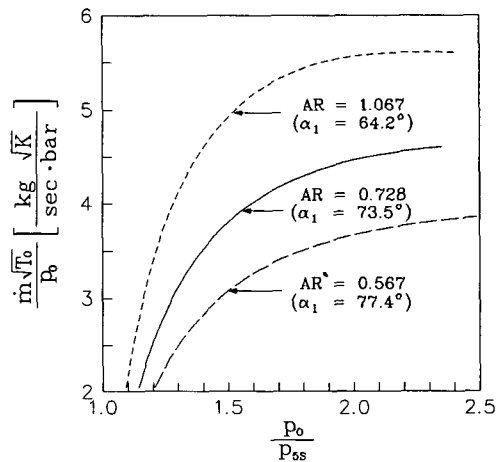


Fig. 6 Predicted mass flow rates as function of pressure ratio of radial inflow turbine for various guide vane exit angles

은 실험측정자료의 입력이 필요한 반면, 본 연구의 방법은 실험측정자료의 입력이 없어도 주어진 터빈의 기하학적 변수로부터 이런 대략적인 경향을 얻을 수가 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 같은 조건하에서 비속도에 따른 전효율의 변화를 보여주고 있다. 그림에서  $AR=0.728$ 인 경우에 전효율이 최대가 됨을 알 수가 있고,  $AR$ 이 증가함에 따라 전효율이 최대가 되는 비속도가 커짐을 알 수가 있다. Fig. 6과 Fig. 7에서 유량이 적을 때는  $AR$ 을 줄이고 유량이 많을 때는  $AR$ 을 늘이는 것이 효율적임을 알 수 있다. 즉 본 연구대상으로 삼은 가상의 구심터빈의 경우,

비속도가 0.6에서 1.3까지는  $AR$ 을 변화시키에 따라 부분부하 및 과부하에서 전효율을 80% 이상 유지시킬 수 있다.

Fig. 8은  $AR=0.728$ 인 경우 회전익의 회전수 변화가 구심터빈의 정효율에 미치는 영향을 알 수가 있다. 회전수가 증가할수록 최대 정효율이 약간 더 증가하며, 정효율이 최대가 되는 Blade-Jet 속도비는 점점 더 커진다. 그러나 이 속도비는 0.7 근방에 존재함을 알 수가 있다. 구심터빈의 실험에 의하면, 입사손실이 영이 될 때 Blade-Jet 속도비는 0.6에서 0.8 사이에 존재하며, 회전익의 회전수가 커질수록 입사손실이 영이 되는 Blade-Jet 속도비

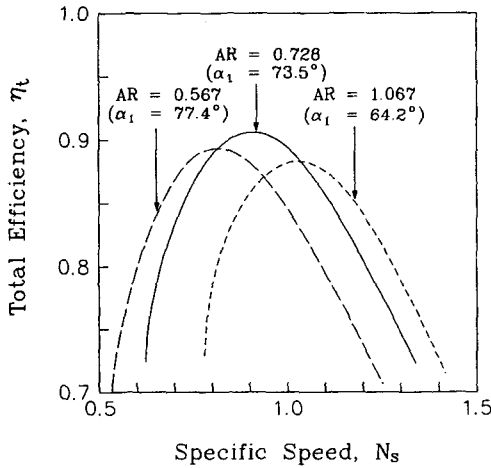


Fig. 7 Predicted total efficiencies as function of specific speed of radial inflow turbine for various guide vane exit angles

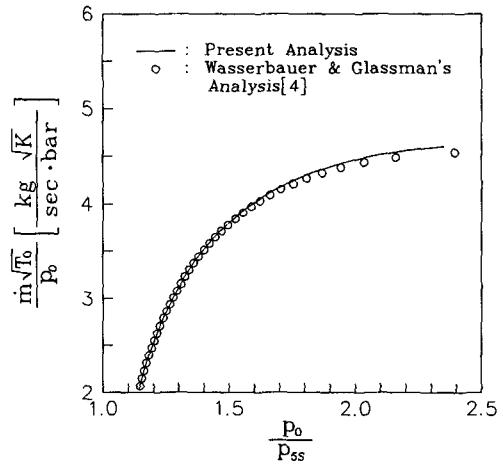


Fig. 9 Comparison of present and NASA's mass flow rates

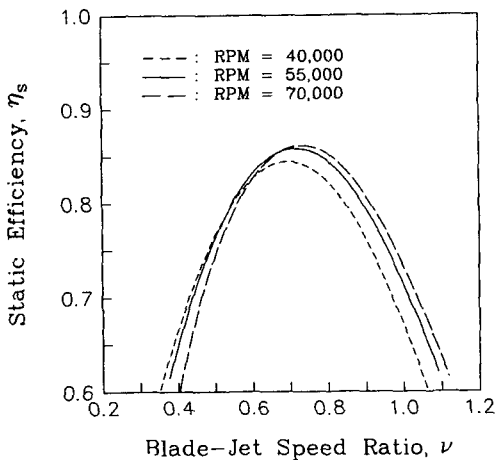


Fig. 8 Predicted static efficiencies as function of blade-jet speed ratio by change of rotor speed

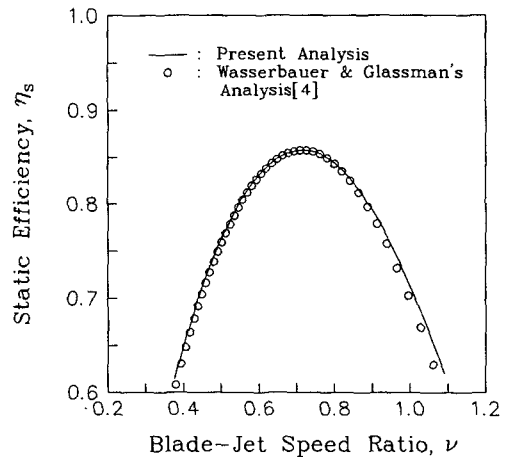


Fig. 10 Comparison of present and NASA's static efficiencies



는 증가하는 것으로 나타났는데<sup>(1)</sup>, 본 연구의 해석 결과에서도 이런 실험적 경향을 보여주고 있다.

#### 4.3 본 연구의 해석 방법과 Wasserbauer와 Glassman<sup>(4)</sup>의 해석 방법의 비교

본 연구의 해석결과를 실험과 직접 비교하여 보지 못한 관계로 기존의 알려진 탈설계 성능해석 방법<sup>(4)</sup>을 사용하여 본 연구의 해석 방법의 타당성을 간접적으로 검토하였다.

Wasserbauer와 Glassman<sup>(4)</sup>의 입력 조건은 본 연구에서 입사손실이 없는 경우에 계산되는 압력비와 그때의 질량유량 및 효율을 사용하여 얻었다. Fig. 9에서 Wasserbauer와 Glassman<sup>(4)</sup>의 해석 결과에 비하여 본 연구의 방법이 choking 질량유량 근처에서 질량유량을 좀 더 크게 예측하는 것을 볼 수가 있는데, Wasserbauer와 Glassman<sup>(4)</sup>의 성능 예측은 choking 질량유량 근처에서 질량유량을 실험보다 낮게 예측하기 때문에(참고문헌<sup>(4)</sup>의 Fig. 6 참고) 본 연구의 방법이 실험현상과 좀 더 일치할 것으로 생각된다.

Fig. 10은 Blade-Jet 속도비에 따른 정효율을 비교하여 본 것이다. 이 속도비가 커질때 본 연구의 해석이 Wasserbauer와 Glassman<sup>(4)</sup>의 방법에 비하여 정효율을 약간 크게 예측함을 알 수가 있다. 그러나 Wasserbauer와 Glassman<sup>(4)</sup>의 방법은 Balde-Jet 속도비가 클때 정효율을 실험보다 낮게 예측하므로(참고문헌<sup>(4)</sup>의 Fig. 8 참고), 본 연구의 해석 방법이 그들의 해석 방법보다 실험현상과 좀 더 일치하는 것을 추론할 수가 있다.

끝으로 본 연구에서는 NASA에서 개발된 손실 모델들을 주로 사용하여, 안내깃의 각도가 변화하는 구심터빈의 성능해석을 수행하여 실험에서 나타난 성능경향과 유사한 결과를 얻었다. 그러나 본 연구의 해석방법을 사용하여 실험에 크게 의존하지 않고 타당한 탈설계 성능을 예측하려면 NASA에서 만든 구심터빈과 형태가 유사하여야 한다. 만약 해석대상의 구심터빈이 NASA에서 만든 구심터빈과 형태가 다르면, 방정식 (8)과 (13)의  $Z$ 를 최소한 실험으로부터 직접 구하여 본 해석방법을 적용하면 가변안내깃이 존재하는 구심터빈의 성능경향을 근사적으로 예측할 수가 있을 것이다. 그러나 보다 정확한 성능예측을 하려면  $PR$ 과  $K$ 는 실험을 통하여 직접 얻어야 한다.

## 5. 결 론

가변 안내깃이 존재하거나 또는 없는 구심터빈의 탈설계 성능해석을 실험에 의존하지 않고 예측하는 방법을 제시하였다.

이런 해석 방법으로 부터 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

(1) 전압력비  $PR$ 과 회전익 손실계수  $K$ 를 본 연구의 방법으로 구하여 가상의 구심 터빈에 대해 탈설계 성능해석을 수행한 결과, 본 연구의 해석 결과가 실험과 일치된 경향을 보이는 것으로 나타났다.

(2) 해석대상으로 삼은 가상의 가변익 구심터빈의 경우  $AR$ 이 감소함에 따라 터빈을 통과하는 질량유량이 감소한다.

(3) 또한 해석대상으로 삼은 가변익 구심터빈의 경우  $AR$ 을 변화시킴에 따라 부분부하 및 과부하에서 전효율을 80% 이상 유지시킬 수가 있다.

(4) 본 연구의 해석방법은 기존의 NASA 탈설계 성능해석 프로그램과 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

(5) 본 방법은 모든 경우의 구심터빈에 일반적인 방법으로 정확도를 갖고 적용될 수는 없으나, 본 해석에서 사용된 손실모델들의 적용이 타당성을 갖는 구심터빈의 성능해석에는 본 방법이 유용하게 사용될 수가 있다.

## 참고문헌

- (1) Harman, R.T.C., 1981, Gas Turbine Engineering, The MacMillan Press LTD.
- (2) Turton, R.K., 1984, Principles of Turbomachinery, E. and F. N. Spon LTD.
- (3) Benson, R.S., 1970, "A Review of Methods for Accessing Loss Coefficients in Radial Gas Turbines," Int. J. Mech. Sci., Vol.12, pp. 905~932.
- (4) Wasserbauer, C.A. and Glassman, A.J., 1975, "Fortran Program for Predicting Off-Design Performance of Radial-Inflow Turbines," NASA TN D 8063.
- (5) Meitner, P.L. and Glassman, A.J., 1980, "Off-Design Performance Loss Model for Radial Turbines with Pivoting, Variable-Area Stators,"

NASA TP 1708.

- (6) 최동환외, 1987, "Turbocharger의 설계 및 제작 기술 개발(Ⅲ)," 과학기술처 보고서.
- (7) 김광호외, "터빈 Spiral Casing 설계기술 개발에 관한 연구", 한국과학기술원 보고서.
- (8) 김광호외, 1989, "가변익 터빈 개발에 관한 연구", 과학기술처 보고서.
- (9) Schlichting, H., 1979, Boundary Layer Theory, 7th ed., McGraw-Hill, New York.
- (10) Balje, O.E., 1981, Turbomachines, John Wiley and Sons Inc.
- (11) Stewart, W.L., Whitney, W.J. and Wong, R. Y., 1960, "A Study of Bounary Layer Characteristics of Turbomachine Blade Rows and Their Relation to Over-All Blade Loss," Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, pp. 588~592.
- (12) Glassman, A.J., 1976, "Computer Program for Design Analysis of Radial-Inflow Turbines", NASA TN D 8164.