대한기계학회 2000년도 춘계학술대회논문집 B pp. 580~585 KSME 00S251

직렬 두요소 모델, 두 영역 모델, Stanitz 방정식에 대한 변수 연구

윤성호* · 백제현**

Parameter Study of TEIS Model, Two-zone Model, and Stanitz's Equations

Sungho Yoon and Je Hyun Baek

Key Words : Off-design Performance Prediction(탈설계 성능 예측), Two-zone Model(두영역 모델), TEIS Model(직렬 두요소 모델), Loss Model(손실 모델), Vaneless Diffuser(베인 없는 디퓨저), Parameter Study(변수 연구)

Abstract

Recently TEIS model, Two-zone model, and Stanitz equations are often used for off-design performance prediction of centrifugal compressor and pump. The prediction results often agree well with experimental data. However these models and equations have some important variables which have a great influence on overall performance prediction curve. But no systematic study about these variables has been performed. So, in this paper, a systematic study about these variables' influence on overall performance prediction curve is peformed. Finally the meaning of the variables and the research to be undertaken are discussed.

기호설명

C	Absolute velocity
C_p	Pressure recovery coefficient
c_f	Skin friction coefficient in vaneless diffuser
DR	Diffusion ratio
U	Blade speed
W	Relative velocity
α	Absolute flow angle
η	Efficiency ; Effectiveness
x	Secondary flow mass fraction

하첨자

a	직렬두요소 모델의 첫 번째 요소
b	직렬두요소 모델의 두 번째 요소
p	두영역 모델의 주영역 부분
s	두영역 모델의 부영역 부분

* 회원, 포항공대 기계공학과 대학원
** 회원, 포항공대 기계공학과

1. 서 론

최근 원심 압축기 및 펌프 성능예측을 위하여 직렬 두요소 모델과 두영역 모델, 그리고 Stanitz 방정식을 사용하는 예[1-5]가 늘어나고 있다. 그러나 이러한 모델과 방정식들은 몇 가지 중요한 변수들을 포함하고 있는데 이러한 변수들의 값을 바르게 결정해 주는 것은 매우 중요하다. 주요 변수로는 두영역 모델에서 부영역 질량비를 나타내는 x, 직렬 두요소 모델에서 각 요소에 해당하는 효율 η_a와 η_b, 그리고 Stanitz 방정식에서 벽면 마찰 손실을 나타내는 c_f(혹은 k) 값을 들 수 있다. 이러한 변수들의 값은 일반적으로 실

험식에 의존하거나 경험으로부터의 추천 값들을 이용하게 되는데 현재까지 이러한 변수들이 전체 성능 예측에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 체계적인 연구가 이루어 지고 있지 않다. 최근 최[2]등에 의해서 직렬 두요소 모델과 두영역 모델의 변수들이 전체 성능 예측 곡선에 미치는 영향에 대한 연구가 이루어 졌으나 두 영역 모델의 주요 변수 χ 가 미치는 영향에 대하여 잘 못 기술하였다. 본 연구에서는 기존의 윤과 백[1]의 연구를 바탕으로 주요 변수들의 값이 변함에 따라 전체 성능 예측 곡선이 어떻게 변하는지에 대한 체계적인 연구를 수행한 후 각 변수들의 의미와 앞으로의 연구방향에 대하여 토의하였다.

2. 회전차 모델

Japikse[6] 에 의해 개발된 직렬 두요소 모델은 회전차를 지나는 유동의 확산 정도를 나타내기 위하여 회전차를 두 개의 연속된 디퓨저[**Fig.** (1.a)]로 본다. 첫 번째 요소는 **Fig.** (1.b)에서 보는 바와 같이 회전차 입구에서 목까지의 가변 기하 요소에 해당하는 부분으로서 유동의 각도 또는 입사각에 따라 가속되기도 하고 확산되기도 한다. 두 번째 요소는 **Fig.** (1.c)에 나타나 있듯이 회전차 목에서 출구까지의 영역으로 일정한 형상을 가지는 회전차 유로에 해당하며 대부분 디퓨저의 역할을 한다.

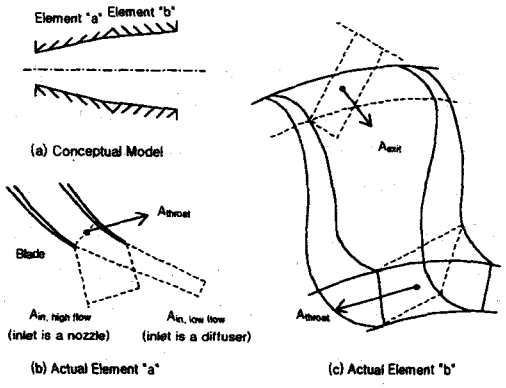


Fig. 1 TEIS conceptual model

이 때 회전차를 통과하며 입구에서 출구 주영역 부분까지의 확산비는 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$DR_2^2 = \frac{1}{1-\eta_a C_{pa,i}} \times \frac{1}{1-\eta_b C_{pb,i}} \qquad (1)$$

두 영역 모델은 회전차 내부의 유동을 **Fig.** 2와 같이 제트 영역과 웨이크 영역으로 나누는 데 있다. 이 때 몇 가지의 가정에 대하여서는 윤과 백[1]에 의해 기술되어졌으며 이 때 특히 중요한 변수로는 부영역 질량비를 나타내는 χ의 값이 있다.

Japikse[7]는 η_a, η_b, χ의 값을 압축기의 직경에 따라 제안하였는데 이는 **Table** 1과 같다.

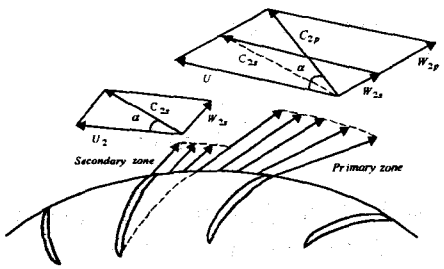


Fig. 2 Schematic representation of two-zone model

Table 1 Recommended values for TEIS model and Two-zone model (Japikse[7])

Case	η_a	η_b	χ
Large, well-designed rotors	0.9-1.1	0.4 to 0.6	0.1-0.2
(>10'' to 12''D or smaller if well-designed)			
Medium size, well-designed	0.8-0.9	0.3 to 0.5	0.15-0.25
(4'' to 10''D)			
Medium size, ordinary design	0.6-0.8	0.0 to 0.4	0.20-0.30
(4'' to 10'' D)			
small or poorly designed	0.4-0.6	-0.3 to 0.3	0.25-0.35
(<4''D)			

3. Stanitz 방정식

윤과 백[1]은 Stanitz[8]의 방법을 기준으로 단열 조건, 원심 압축기라는 조건을 사용하여 반지름의 증가에 따른 압축성 미분방정식을 얻었고 이것을 4-stage Runge-Kutta method를 사용하여 풀어주었다. 이 때 벽면에서의 마찰 손실을 나타내는 c_f는 Japikse에 의해 제안된 다음과 같은 식을 사용한다.

$$c_f = k\left(\frac{180,000}{Re}\right)^{0.2} \qquad (2)$$

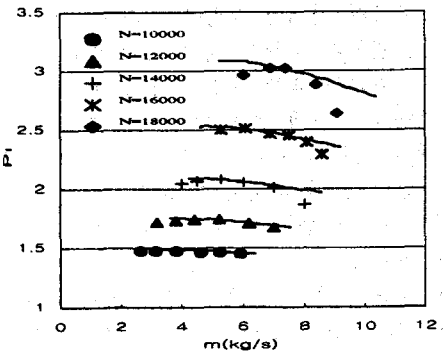
이 때 Japikse[7]에 의하면 k의 값이 0.1을 기준으로 0.05에서 0.15까지 다양한 값을 가질 수 있다고 하였다. 뒤의 결과 부근에서 k의 값의 변화에 따른 성능예측 곡선이 어떻게 변화는지를 보였다.

4. 결과

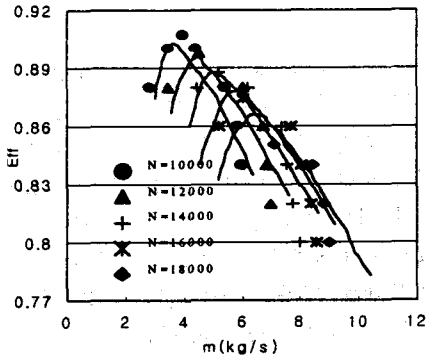
윤과 백[1]의 연구에서는 위의 모델들과 방정식을 사용하여 성능 예측 프로그램을 작성하였으며 Eckardt O, A 압축기[9,10]에 대하여 실험 결과와 비교하여 잘 일치하는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 이것을 바탕으로 몇 가지 주요 변수들의 변화에 따른 $N=14000$에서의 Eckardt O 압축기의 성능 곡선의 변화를 살펴보았다. **Table 2** 는 Eckardt O 압축기의 회전수를 $N=14000$로 고정시켰을 때 주요 변수의 기준 값들과 변화 값들을 나타낸 것이다. 각 변수에 대하여 case 1, case 2의 변화 값을 주었고 이 때 다른 변수 값들은 기본 값으로 고정시켰다. **Fig.3**은 주요 변수들을 기본 값으로 설정하였을 때 Eckardt O 압축기에 대한 성능 곡선과 실험 값들을 비교한 것이다.

Table 2 Variations of important empirical parameters

	Reference	Case 1	Case 2
(η_a η_b)	(1.0, 0.5)	(0.8, 0.5)	(1.0, 0.25)
χ	0.15	0.1	0.2
k	0.008	0.005	0.012



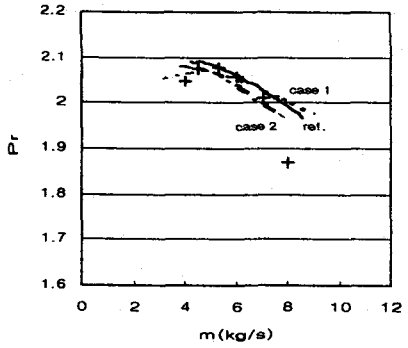
(a) Pressure ratio



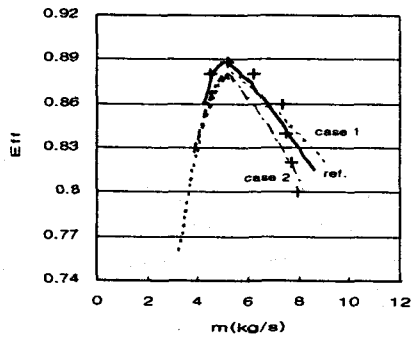
(b) Efficiency

Fig. 3 Performance prediction for Eckardt O

Fig. 4는 χ, k를 기준값으로 고정시킨 후 직렬 두요소 모델의 η_a, η_b 의 값의 변화에 따른 성능 곡선의 민감도를 나타낸 것이다. Case 1 처럼 η_a를 감소시킨 경우 어떤 점을 중심으로 저유량에서는 압력비와 효율이 감소하고 고유량에서는 압력비와 효율이 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉 η_a는 성능 곡선의 기울기를 변화시키고 있다. 또한 η_a가 감소함에 따라 스톨(stall)과 초크(choke) 사이의 안전 운전 영역(stable operation range)이 넓어졌는데 이는 η_a 의 감소에 따라 속도의 확산비가 감소함으로 스톨이 보다 낮은 유량에서 생기게 된 것이다. Case 2처럼 η_b가 감

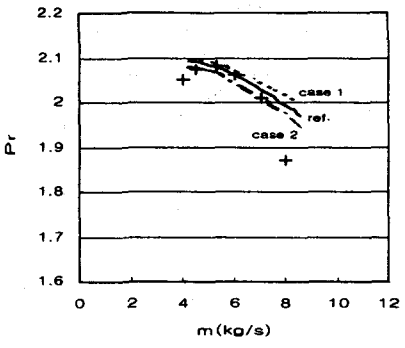


(a) Pressure ratio

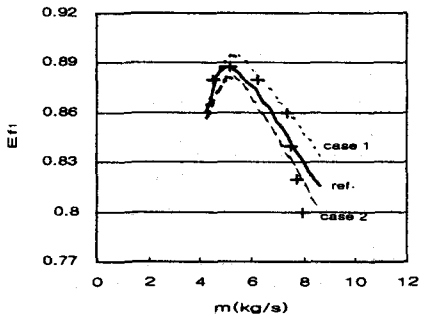


(b) Efficiency

Fig. 4 TEIS model's effect on performance analysis at 14000 rpm



(a) Pressure ratio

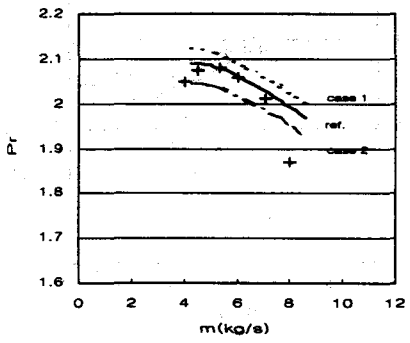


(b) Efficiency

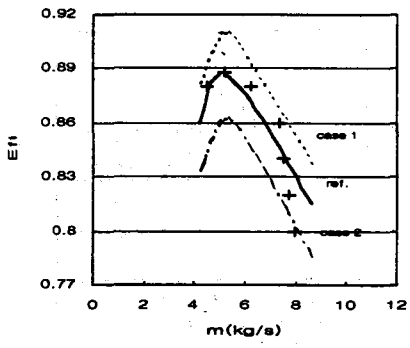
Fig. 5 Secondary mass flow rate ratio's effect on performance analysis at 14000 rpm

소함에 따라 압력비와 효율이 조금 감소하는 것을 볼 수 있다. 즉 η_b의 증감에 따라 압력비 및 효율의 성능 곡선이 일정량 상하 이동하게 된다. η_b는 안전운전 영역에 큰 영향을 미치지 못하는데 이는 TEIS model에서 두 번째 요소(element b)는 첫 번째 요소에 비해 전체 확산비에 큰 영향을 못 미치는 것에 기인한다. 원래 η_a, η_b를 결정하기 위하여서는 입·출구에서의 속도 비를 측정하여 이것에 가장 잘 일치하는 값으로 결정해주어야 하지만 이러한 실험 데이타가 없는 경우에는 Table 1에서 제시한 값의 평균값을 사용할 수밖에 없다. 그러나 **Fig.** 4에서 보는 바와 같이 η_a, η_b 에 따라 전체 성능 곡선이 많은 영향을 받으므로 이것을 좀더 정확한 실험식으로 나타내는 것이 필요할 것이다.

두영역 모델의 변수들에 대한 영향을 평가하기 위하여 **Fig.** 5는 부영역 부분의 질량비 χ를 변화시킴에 따른 성능 곡선 변화를 나타내었다. Case 1처럼 χ가 감소함에 따라 압력비 및 효율이 기준 값에 비하여 크게 예측되었고 Case 2처럼 χ가 증가함에 따라 낮게 예측되었다. 최[2] 등은 원심펌프 성능해석 예측 곡선에 대하여 η_a, η_b, χ 의 영향이 중요하다는 것을 지적하였으며 그 중 η_a, η_b를 비속도 N_s 에 대한 실험식을



(a) Pressure ratio



(b) Efficiency

Fig. 6 k's effect on performance analysis at 14000 rpm

제시하였으나 χ 에 대하여서는 실험식을 제안하지 못하였다. 그리고 χ 가 증가함에 따라 펌프의 수두가 증가한다고 하였으나 **Fig. 5**에서는 압축기의 압력비가 감소하는 결과를 나타내었다. 물리적으로 부영역 질량 비가 커짐에 따라 압력비, 수두가 감소하는 것이 타당할 것이다. 제시하지는 않았지만 테스트 결과 부영역 부분의 후류에서의 편차각 δ_{2s} 의 변화에 대하여 전체 성능 곡선은 거의 영향을 받지 않는 것으로 밝혀졌다. 이 외에도 두영역 모델에서는 출구 주영역 부분과 부영역 부분에서의 정압이 같다고 가정하였는데 최근 조 와 강[11]에 의해서도 지적되고 있듯이 회전차 출구 단면에서의 정압의 변화가 무시할 수 없으므로 주영역 부분과 부영역 부분의 정압이 같다는 가정은 보완이 되어야 할 것이다.

두영역 모델과 직렬두요소 모델을 제외하고 성능에 큰 영향을 미치는 요소로는 디퓨저에서의 표면 마찰 계수 k와 외부손실 중 재 순환 손실을 들 수 있다. Japikse[7]에 의하면 k 가 0.01을 중심으로 유동 조건에 따라 0.005-0.02 정도까지 변할 수 있다고 하였다. **Fig. 6**은 깃 없는 디퓨저에서의 표면마찰상수 k 값의 변화에 따른 전체 성능해석 곡선의 변화를 나타낸 것으로 k 값의 변화에 따라 성능 곡선이 매우 민감하게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 k 값의 중요성에 반하여서 k 값에 대한 연구는 별로 이루어지지 않고 있으므로 이 부분에 대한 정량적인 해석이 이루어지고 적합한 실험식이 개발되야 한다.

5. 결 론

직렬두요소 모델, 두영역 모델, Stanitz 방정의 주요 변수들이 전체 성능 예측 곡선에 어떠한 영향을 미치는 지에 대하여 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 직렬두요소 모델의 η_a, η_b에 대한 전체 성능의 민감도를 조사해본 결과 η_a는 성능곡선의 기울기에 영향을 미치며 안전 운전 영역의 범위에 크게 영향을 미치는 한편 η_b는 전체 성능 곡선의 상하로 이동시키는 역할을 하며 안전 운전 영역의 범위에는 크게 영향을 미치지 못하였다.

(2) 두영역 모델의 부영역 비 χ 에 대한 전체 성능 곡선의 민감도를 조사해 본 결과 χ 값이 클수록 전체 성능곡선이 낮게 예측되었고 작을수록 크게 예측되었다.

(3) 깃 없는 디퓨저에서의 표변마찰계수의 변화에 따라서 성능곡선이 민감하게 작용하였으며 k 값에 대한 전체 성능 곡선의 민감도를 조사한 결과 k 값이 클수록 전체 성능곡선이 낮게 예측되었고 작을수록 크게 예측되었다.

앞으로 위에서 언급한 변수들에 대한 정량적인 연구가 수행되어야 할 것이며 이를 기반으로 형

상 및 유동 조건에 따른 실험식 개발이 요구된다.

후기

본 연구는 BK21 사업에 일부 지원을 받았습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) 윤성호, 백제현, 1999, "깃 없는 디퓨저를 포함한 원심압축기의 탈설계 해석", *대한기계학회 추계학술대회*, pp. 494-499.

(2) 최영석, 심재혁, 강신형, 1998, "두영역 모델을 사용한 원심펌프의 성능예측", *1998 유체기계 연구개발 발표회 논문집*, pp. 33-41.

(3) 오형우, 정명균, 김재원, 1999, "원심형 임펠러에 대한 이구역 모델링", *대한기계학회 논문집* 제 23권 제 9호, pp. 1129-1138.

(4) 오종식, 윤의수, 조수용, 오군섭, 1998 "40 kW급 터보제네레이터용 원심압축기의 공력설계 및 유동해석", *1999 유체기계 연구개발 발표회 논문집*, pp. 128-135.

(5) 윤인호, 2000, "원심펌프 설계 및 탈설계 성능예측을 위한 프로그램 개발", 포항공과대학교 석사논문.

(6) Japikse D, 1985, "Assessment of Single & Two Zone Modeling of Centrifugal Compressors Studies in Component Performance:Part 3," ASME 85-GT-73,

(7) Japikse D., 1996, "Centrifugal Compressor Design and Performance," Concepts ETI.

(8) Stanitz J. D., 1952, "One-dimensional Compressible Flow in Vaneless Diffusers of Radial and Mixed Flow Centrifugal Compressors Including Effects of Friction, Heat Transfer and Area Change," NASA TN-2610.

(9) Eckardt D., 1976, "Detailed Flow Investigation Within a High Speed Centrifugal Compressor Impeller," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 98, pp. 390-402.

(10) Eckardt D, 1980, "Flow Field Analysis of Radial and Backswept Centrifugal Compressor Impellers - Part 2 : Flow Measurements using a Laser Velocitimeters," *25th ASME Gas Turbine Conference*, pp. 77-86.

(11) 조성국, 강신형, 1998, "소형 원심압축기의 성능평가에 대한 실험적 연구", *대한기계학회 논문집*, 제 22권 8호, pp. 1052-1063.