

단 축적법을 이용한 다단 축류 압축기 탈설계 성능예측

박태진* · 백제현** · 윤성호*

Off-Design Performance Prediction of Multi-Stage Axial-Compressor by Stage-Stacking Method

Tae Jin Park, Je Hyun Baek and Sungho Yoon

Key Words: Multi-Stage Axial Compressor(다단 축류 압축기), Off-Design Performance Prediction (탈설계 성능해석), Stage-Stacking Method(단 축적법), Mean-line Analysis(평균 유속법), Stage Performance Curve(단 성능곡선)

Abstract

In this study, a program for the off-design performance prediction of multi-stage axial-compressors is developed based on stage-stacking method. To account for the increased losses at off-design conditions, generalized performance curve is applied. The purpose of this study is to investigate the influence of the choice of generalized performance curve and stator exit angle. For this purpose, we tested various generalized performance curves and stator exit angles. In conclusion, Muir's pressure coefficient curve gives a good prediction results regardless of the efficiency curve for a low-stage compressors. On the other hand, for high-stage compressors, The combination of Muir's pressure coefficient curve and Stone's efficiency curve gives a optimistic results. Stator exit angle has a small effect on overall performance curve.

	기호설명		
c_p	정압비열	ϕ	유량계수
k	비열비	ψ	압력계수
\dot{m}	질량유량	ζ	온도상승계수
N	회전수	η	효율
PR	전압력비		하첨자
PR_s	단압력비	0	정체점
p	압력	1	단 입구
r	블레이드 반경	2	단 출구
T	온도	m	평균반경값
U	블레이드 속도	x	축방향
V	유체 속도		

1. 서론

* 회원, 포항공대 기계공학과 대학원

** 회원, 포항공대 기계공학과

축류 압축기 설계에 있어서 가장 중요한 기술 중의 하나가 유량과 회전수의 변화에 따른 압력

비, 효율 등의 성능곡선이 어떻게 변화하는지를 예측하는 탈설계 성능예측 기술이다. 이러한 탈설계 성능예측을 위해 사용되는 방법으로는 손실 모델 등을 통하여 세부 유동현상을 고려하는 blade-element 방법, 전체 성능곡선(overall performance map)을 이용하는 방법, 각 단의 성능을 계산하여 축방향으로 축적하는 단 축적법(stage stacking method)이 있다. 이 중 단 축적법은 그 사용방법이 용이하고 계산시간이 빠르며 실속영역 근처를 포함한 전 운전영역에 대하여 타당한 성능해석을 해 주는 방법으로 가장 많이 사용되고 있다. Stone⁽¹⁾, Doyle 와 Dixon⁽²⁾, Howell 와 Bonham⁽³⁾, Muir⁽⁴⁾, 강동진^(5,6), Cryus⁽⁷⁾, 송 등⁽⁸⁾ 등이 단 축적법을 체계적으로 연구했다. 이러한 단 축적법에서 가장 중요한 요소로는 각 단의 성능을 결정하는 단 성능곡선을 어떠한 것으로 사용하는가와 각 단 정익의 출구각(α_1)을 어떻게 결정할 것인가이다. 단 축적법에 대한 오랜 연구에도 불구하고 단 성능곡선과 정익의 출구각에 따른 탈설계 성능예측의 영향에 대한 연구가 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 여러 가지 단 성능곡선들에 따라 또한 정익 출구각의 변화에 따른 성능해석 예측의 변화에 대하여 살펴보았다.

2. 단 축적법

2.1 단 성능곡선을 이용한 단 축적법

단 성능곡선은 압축기의 압력계수와 효율을 유량계수의 함수로 표현해 주는 곡선으로 주로 기존 압축기의 실험자료들을 토대로 작성된 곡선이다. Muir과 Stone과 Robbinson⁽⁹⁾ 그리고 Benser⁽¹⁰⁾는 각각 Fig. 1 과 Fig. 2 같은 곡선을 제안하였다. 이러한 단 성능곡선과 각 단의 입구조건을 알면 각 단 출구에서의 압력, 온도, 속도 등을 알 수 있다. 또한 이렇게 구한 출구에서의 조건들은 단 축적법에 의해서 다음 단의 입구조건으로 사용된다. 단 출구에서의 유동 및 열역학적 상태를 결정할 때 중요한 또 하나의 요소로는 정익 출구각이 있다. 이 정익 출구각은 각 단 유체속도 및 유량계수에 영향을 주게 된다. 그러나 이 정익 출구각을 정확하게 예측하는 것은 어렵기에 몇가지 이론들이 제안되었다. Johnson⁽¹¹⁾은 설계점에서의 각 단 정익 출구각을 $10^\circ \sim 15^\circ$ 로 제

안하였고, Haq 와 Saravanamutto⁽¹²⁾는 설계점에서 각 단 정익 출구각을 10° 를 사용하였다. 그러나 탈설계점에서는 정익 출구각을 더욱 예측하기 어렵다. 이는 압축기 형상자료를 알기 어렵고 정익 출구각의 변화 관계를 정확히 알지 못하기 때문이다. 그래서 현재까지도 탈설계점의 정익 출구각을 설계점의 출구각과 같은 상수값으로 두고 있으며 본 연구에서도 이와 같은 방법을 사용하였다.

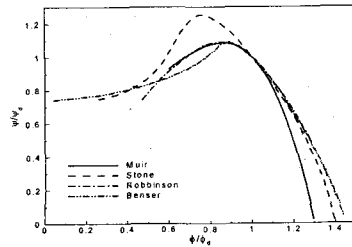


Fig. 1 Pressure coefficient curves

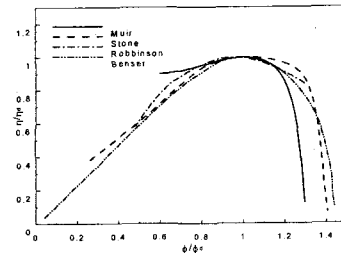


Fig. 2 Efficiency curves

2.2 계산 과정

단축적 방법 계산을 위해 사용되는 순서는 다음과 같다.

- (1) 주어진 질량유량과 회전수에서 입구에서의 정압력(p_1), 정온도(T_1), 정밀도(ρ_1), 그리고 축방향 속도를(V_{x1})를 다음의 식들을 반복계산하여 구한다.

$$T_1 = T_{01} - \frac{1}{2c_p} \left(\frac{V_{x1}}{\cos \alpha_1} \right)^2 \quad (1)$$

$$p_1 = p_{01} \left(\frac{T_1}{T_{01}} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2)$$

$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1} \quad (3)$$

$$\dot{m} = \rho_1 A_1 V_x \quad (4)$$

이 때 α_1 는 상수 값을 사용한다.

- (2) 주어진 회전수에서 평균반경의 블레이드 속도를 다음과 같이 구한다.

$$U_m = r_m \frac{2\pi N}{60} \quad (5)$$

위의 (1)에서 구한 축방향 속도를 블레이드 속도로 나누어 유량계수를 구하고 Figs. 1 ~ 2에서 효율과 압력계수를 구하고 첫 단 입구에서의 전 온도와 전 압력 값을 이용하여 첫 단 출구의 전 온도 (T_{o2})와 전 압력 (p_{o2})을 구한다.

$$p_{o2} = p_{o1} \left(1 + \frac{\psi U_m^2}{C_p T_{o1}}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (6)$$

$$T_{o2} = T_{o1} \left(1 + \frac{\psi U_m^2}{\eta C_p T_{o1}}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (7)$$

- (3) 두 번째 단부터는 앞단의 출구조건을 입구조건으로 두고 각 단의 성능곡선을 이용하여 다시 식(1)~(7)을 계산하여 각 단의 출구 값들을 구한다. 이를 마지막 단까지 반복하여 마지막 단의 출구에서의 전 온도와 전 압력을 구한다.

- (4) 첫 단에서 구한 입력 값과 마지막 단에서 구한 출구 값을 이용하여 전체 압축기의 압력비(PR)와 효율을 구한다.

$$PR = \frac{p_{o2,n}}{p_{o1,1}} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{PR^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\frac{T_{o2,n}}{T_{o1,1}} - 1} \quad (9)$$

여기서 하첨자 n 과 1은 각각 마지막 단과 첫 단을 의미한다.

- (5) 질량유량과 회전수 값들을 변화시키면서 위

의 (1)~(4)의 과정을 반복 수행한다.

Table 1 Design specifications of compressors

Specification of compressor	number of stage	\dot{m} (kg/s)	N (rpm)	PR
Bammert and Woelk(1980)	3	10.82	17000	2.0
Ginder et al. (1991)	5	48.963	6894	5.97
Carchedi and Wood(1982)	12	18.072	10000	6.581

3. 연구방법

본 연구에서는 Bammert and Woelk⁽¹³⁾, Ginder et al.⁽¹⁴⁾, Carchedi and Wood⁽¹⁵⁾ 등이 각각 실험한 압축기에 대하여 성능해석을 하였다. 압축기 설계점 사양은 Table 1 과 같다. 먼저 효율곡선의 변화에 따른 성능예측 곡선이 어떻게 변화하는지를 살펴보기 위하여 압력계수 곡선을 Muir의 곡선으로 고정된 후 4가지 다른 효율곡선에 따른 성능곡선을 계산하였다. 그리고 압력계수 곡선에 따른 성능예측 곡선이 어떻게 변화하는지를 살펴보기 위하여 효율 곡선을 Muir의 곡선으로 고정시킨 후 4가지 압력계수 곡선으로 성능해석을 하였다. 또한 각 단 정의 출구값의 변화에 따른 성능예측 곡선을 살펴보기 위하여 정의 출구각을 0° , 10° , 20° , 30° 변화시켜 가며 성능예측 곡선의 변화를 살펴보았다.

4. 결과

Figs. 3 ~ 5 는 가장 많이 사용되는 Muir 압력계수 곡선과 Muir 효율 곡선을 이용하여 성능예측을 한 결과와 실험 데이터를 도시한 그림이다. 이 때 정의의 출구각은 10° 로 고정하였다. 회전수비가 1 일 때 실험결과와 보다 잘 일치하는 것을 알 수 있으며 회전수 비가 작어지거나 유량계수가 서지점 근처로 접근함에 따라 실험결과와의 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 전반적인 성능예측 곡선의 결과는 실험결과와 일치한다. Figs. 6 ~ 8 은 회전수비가 1인 곡선들에 대하여 Muir 압력계수 곡선을 기준으로 두고 4개의

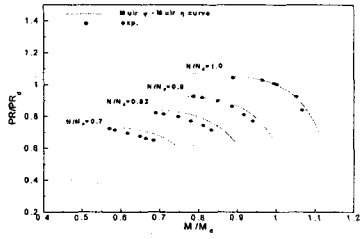


Fig. 3 Performance prediction of 3 stage compressor

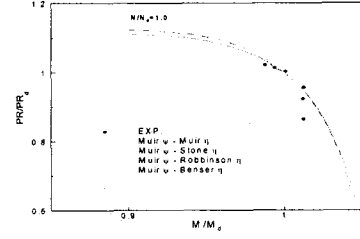


Fig. 7 Efficiency curve's variation in 5 stage compressor

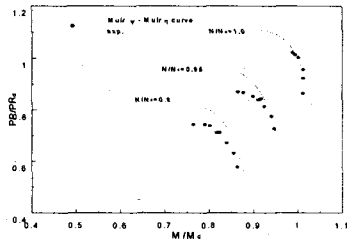


Fig. 4 Performance prediction of 5 stage compressor

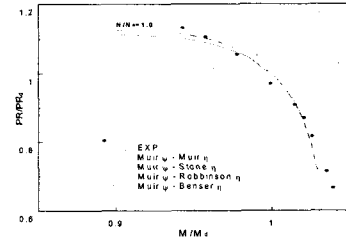


Fig. 8 Efficiency curve's variation in 12 stage compressor

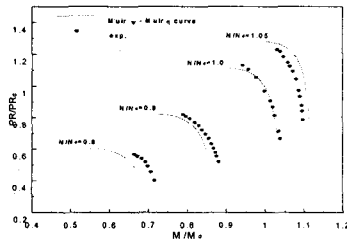


Fig. 5 Performance prediction of 12 stage compressor

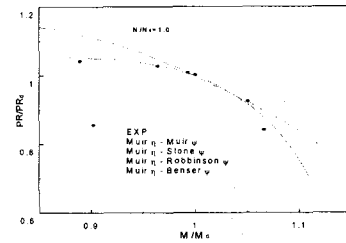


Fig. 9 Pressure coefficient's variation in 3 stage compressor

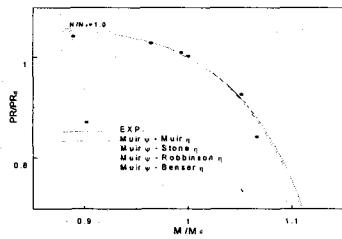


Fig. 6 Efficiency curve's variation in 3 stage compressor

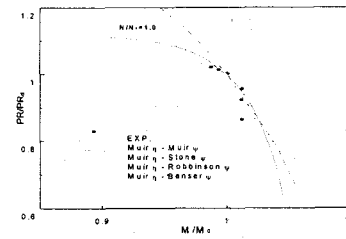


Fig. 10 Pressure coefficient's variation in 5 stage compressor

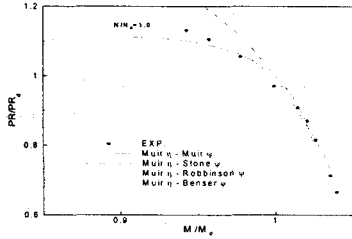


Fig. 11 Pressure coefficient's variation in 12 stage compressor

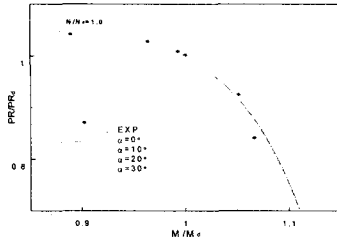


Fig. 12 Stator exit angle's variation in 3 stage compressor

다른 효율 곡선을 각각 선택하며 수행한 결과이다. 저단(3단) 압축기에서는 Fig.6 에서 보는 바와 같이 효율 곡선의 변화에 따른 성능예측 곡선의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 5단 압축기인 Fig. 7 에서는 효율 곡선의 변화에 따른 영향이 조금 증가하였음을 알 수 있다. 고단(12단) 압축기인 Fig. 8 에서는 효율 곡선의 변화에 따른 영향이 Fig. 6 과 Fig. 7 에 비하여 매우 커짐을 알 수 있다. 서지점 근처에서는 Stone 효율 곡선과 Robinson 효율 곡선이 실험결과와 잘 맞고 초크점에서는 Muir 효율 곡선이 실험결과에 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 전반적으로 고단 압축기에서는 Stone의 효율 곡선이 실험결과와 가장 잘 일치하고 있다. Figs. 9~11 은 Muir 효율 곡선을 고정하고 4개의 압력계수 곡선을 바꾸어 해석한 결과이다. 앞에서 살펴본 효율곡선에 비하여 압력계수 곡선이 전체 성능에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다. 특히 Stone 압력계수 곡선은 모든 압축기에 대하여 설계점을 기준으로 저유량에서 실험결과에 비하여 지나치게 크게 성능을 예측하는 경향을 나타내고 있다. 또한 서지점 예측도

잘 못하고 있다. 저유량에서는 Muir, Robinson, Benser 의 압력계수 곡선이 유사한 결과를 나타내고 있으나 고유량에서는 Muir 효율 곡선이 실험결과와 더 타당한 결과를 보이고 있다. 전반적으로 단수에 상관없이 Muir 곡선이 가장 타당한 성능예측 결과를 보이고 있다. Fig. 12는 Bammert and Woelk가 실험한 3단 압축기에서 Muir의 압력계수 곡선과 효율 곡선을 사용해 정의 출력각을 0°, 10°, 20°, 30° 로 변화시켜 얻은 성능해석이다. 서지점에서는 정의 출력각의 변화와 상관없이 일정한 값을 나타내며 초크점으로 갈수록 값의 변화가 생기는 것을 볼 수 있다. 회전수비가 1 일 때 정의 출력각이 증가 할수록 질량유량비가 줄어든다는 것을 알 수 있다. 즉 곡선이 점점 경사가 커지는 형태를 가진다. 그러나 전체적인 형상을 본다면 정의 출력각의 변화에 따른 전체 성능예측 곡선의 영향은 없다고 할 수 있다.

5. 결론

단 축적법을 이용한 탈설계 성능해석에서 가장 큰 영향을 미치는 요소인 단 성능곡선과 단의 정의 출력각에 대한 영향에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 단 성능곡선에서 압력계수 곡선이 효율 곡선보다 큰 영향을 준다.
- (2) 정의 출력각은 전체 성능에 큰 영향을 주지 못한다.
- (3) Muir 압력계수 곡선을 고정한 경우, 효율 곡선의 변화에 따라 저단 압축기에서는 큰 영향이 없으며 고단으로 갈수록 Stone 효율 곡선이 가장 근사하였다.
- (4) 효율 곡선을 Muir의 곡선으로 고정하였을 경우, Stone의 압력계수 곡선은 설계점을 중심으로 저유량에서 지나치게 큰 성능예측 결과를 나타내었으며 서지점 예측도 매우 부정확하였다. 다른 압력계수 곡선들을 비교한 결과 Muir의 압력계수 곡선이 가장 근사한 예측을 해주었다.
- (5) 저단 압축기에서는 효율 곡선의 선택에 상관없이 Muir의 압력계수 곡선을 사용하면 타당한 성능예측을 할 수 있으며 고단 압축기에서는 Muir의 압력계수 곡선과 Stone의 효율 곡

선을 사용하면 가장 타당한 성능예측을 해 줄 수 있다.

후기

본 연구는 '에너지기술 학술진흥 사업'의 연구 과제로 수행되었습니다. 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Stone, A., 1958, "Effects of Stage Characteristics and Matching on Axial-Flow-Compressor Performance," *Trans. ASME*, Vol. 80, pp. 1273-1293.
- (2) Doyle, M. D. C. and Dixon, S. L., 1961, "The Stacking of Compressor Stage Characteristics to Give an Overall Compressor Performance Map," *The Aeronautical Quarterly*, November 1962.
- (3) Howell, A. R. and Bonham, R. P., 1950, "Overall and Stage Characteristics of Axial Flow Compressors," *Proc., ImechE.*, Vol., 163, pp.235~248.
- (4) Muir, D. E., Saravanamuttoo, H. I. H. and Marshall, D. J., "Health Monitoring of Variable Geometry Gas Turbines for the Canadian Navy," *ASME J. of Eng. for Gas turbiens and Power*, Vol. 111, pp. 244~250.
- (5) 강동진, 류제욱, 정평석, 1993, "가스터빈 기관의 탈설계점 해석," *대한기계학회 논문집*, 제17권, 제 7 호, pp.1851~1863.
- (6) 강동진, 1994, "단축적 방법을 이용한 다단 축류 압축기의 설계," *대한기계학회논문집*, 제 18권, 제6호, pp. 1598~1603.
- (7) Cryus, V., 1994, "Separated Flows in Axial Flow Compressor with Variable Stator Vanes at Positive Incidence Angles," *ASME Paper* 94-GT-480.
- (8) 송태원, 김재환, 김동섭, 노승탁, 2000, "단축적법의 개선에 의한 축류 압축기의 효과적인 성능예측," *대한기계학회 논문집 B권*, 제 24권, 제 8호, pp. 1077~1084.
- (9) Robbinson, W. H. and Dugan, J. F., 1965, "Prediction of Off-Design Performance of Multi-Stage Compressor," *NASA SP-36*, pp. 279-310.
- (10) Benser, W. A., 1953, "Analysis of Part-speed Operation for High-pressure-ratio Multistage Axial-flow Compressors," *Naca RM E53I15*.
- (11) Johnson, M. S., 1991, "One-Dimensional Stage-By-Stage Axial Compressor Model," *ASME Paper* 91-GT-192.
- (12) Haq, I. and Saravanamuttoo, H. I. H., 1993, "Axial Compressor Fouling Evaluation at High Speed Settings Using an Aerothermodynamic Model," *ASME Paper* 93-GT-407.
- (13) Bammert, K. and Woelk, G. U., 1982, "The Influence of the Blading Surface Roughness on the Aerodynamic Behavior and Characteristic of an Axial Compressor," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 102, pp. 283-287.
- (14) Ginder, R. B., Britton, A. J., Calvert, W. J., Mckenzie, I. R. I. and Rarker, J. M., 1991, "Design of Advanced Blading for a High Speed HP Compressor Using an S1-S2 Flow Calculation System," *IMEchE. Conference on Turbomachinery*, paper C423/007.
- (15) Carchedi, F. and Wood, G. R., 1982, "Design and Development of a 12:1 Pressure Ratio Compressor for the Ruston 6-MW Gas Turbine," *ASME J. of Eng. for Gas Turbines and Power*, Vol. 104, pp. 823-831.
- (16) Howell, A. R. and Calvert, W. J., 1978, "A New Stage Stacking Technique for Axial-Flow Compressor Performance Prediction," *ASME J. of Eng. for Gas Turbines and Power*, Vol. 100, pp. 698~703.
- (17) Cohen, H., Rogers, G. F. C. and Saravanamuttoo, H. I. H., 1996, "Gas Turbine Theory," 4th ed., Longman Group Limited, U.K.