

원심/사류압축기의 공력설계 프로그램 개발 - 제1부 : 평균유선 설계/성능해석 -

오종식*

Aerodynamic Design Program for Centrifugal/Mixed-flow Compressors - Part I : Meanline Design and Performance Prediction -

Jong-Sik Oh*

Key Words : Centrifugal/Mixed-flow compressor(원심/사류압축기), Performance prediction(성능예측)

ABSTRACT

A general program of meanline design and/or performance prediction for centrifugal/mixed-flow compressors is successfully commercialized using various empirical loss models. 4 types of diffusers, 3 types of exit elements, shrouded/unshrouded impellers and real gas option are included in the program capabilities. Total 16 cases of benchmark test results proved its reliability to be effectively utilized in the development processes.

1. 서론

평균유선 설계법과 탈설계점 성능해석법 (meanline design and off-design performance prediction)은 원심압축기뿐만 아니라 모든 유형의 터보기계를 설계하는 데에 있어서 첫 단계이면서도 가장 중요한 단계에 속한다. 따라서 상용 프로그램을 포함하여 여러 방법이 꾸준히 소개되고 있으나, 해외에서는 보다 정확하고 세밀한 성능을 얻기 위해 주로 가스터빈 엔진업체나 산업용 터보기계 제작업체를 중심으로 자신만의 경험데이터를 활용한 In-house 프로그램을 개발하여 운용하고 있다.

지금까지 수행된 국내의 대학/연구소의 관련 연구들은 대부분이 부분적인 연구들로 제한되기 때문에, 관련 업체에서 실제로 설계시에 활용하기 위해서는 해외의 상용 프로그램에 의존할 수 밖에 없는 것이 현실이다. 현재 원심압축기용으로 구매 가능한 상용 프로그램으로는 미국 Concepts NREC사의 COMPAL™과 PREDIG™, 영국 PCA Engineers사의 CAPRICE™, 러시

아 CIAM 연구소의 HARBOG™ 등이다. 이 중에서 가장 일반적인 경우의 다양한 옵션을 제공하는 프로그램은 COMPAL™로서 현재 국내에서도 많이 보급되어 있는 것으로 보인다. 하지만 기본적인 개념에 있어서 다른 프로그램들이 전형적인 손실경험모델을 이용하는 반면에 COMPAL™은 two-zone과 TEIS(Two Element In Series)라는 독특한 개념을 도입하였으나 이는 실험 과정을 병행해가는 압축기의 개발과정에서 사용되어야 하는 일종의 tuning tool에 가깝다고 볼 수 있다. 따라서 정확한 탈설계점 성능곡선을 예측하기 위해서는 전문적이고 반복적인 tuning 과정이 요구되는데 이러한 특징이 일반 사용자들에게는 무리가 따르는 것이 사실이다.

본 연구에서는 일반적인 터보기계 개발업체에서 효과적으로 사용할 수 있는 원심/사류압축기의 공력설계 프로그램을 개발하되, 전형적인 손실경험모델을 적용하여 사용자가 임의로 정해주어야 하는 입력변수들의 개수를 최소화하는 데에 역점을 두었다.

2. 평균유선 설계와 성능해석

2.1. Flow Chart

평균유선 설계과정은 성능해석 과정을 하나의 단위

모듈로 이용하여 초기에 임의로 가정한 형상으로 성능 해석을 수행한 후 설계사양인 압력비와 효율 등이 만족할 때까지 형상의 일부를 수정해가면서 반복한다.

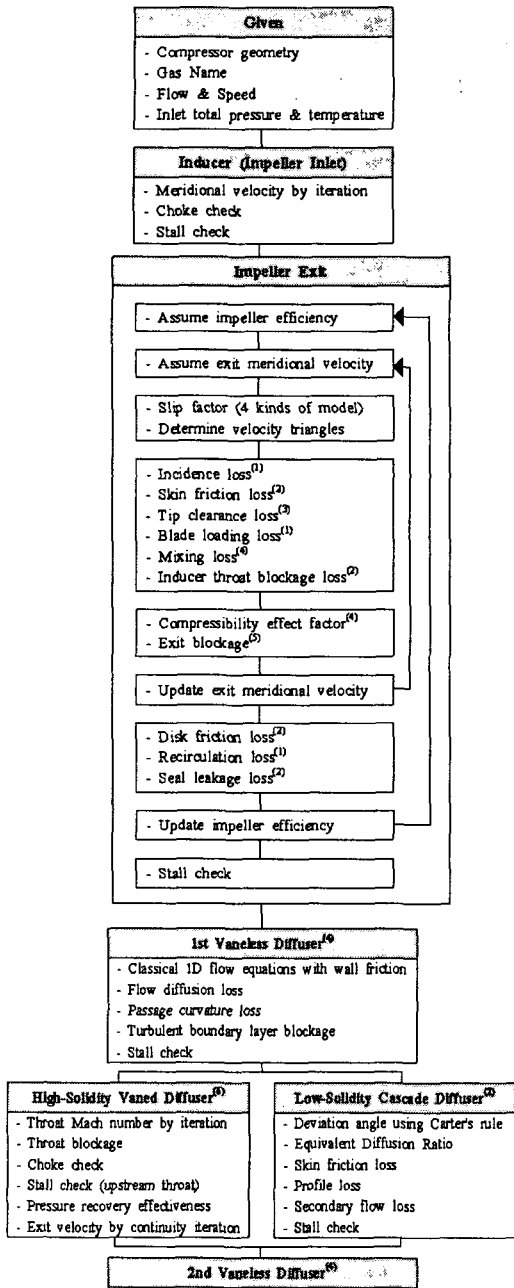


Fig.1 Flow chart of performance prediction

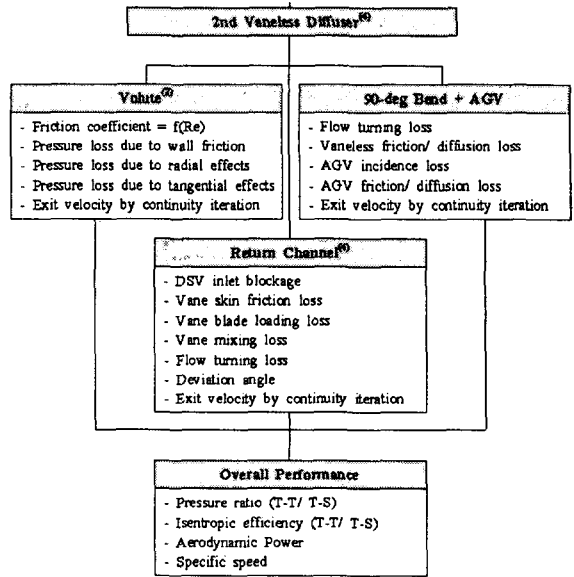


Fig.1 Continued

Fig.1은 성능해석 과정을 나타내는 순서도로서 임펠러와 베인없는 디퓨저, 베인디퓨저, 다시 베인없는 디퓨저, 그리고 출구부 등의 순서로 해석한다. 베인디퓨저는 솔리디티(solidity)가 큰 경우와 작은 경우의 2가지로 구분하며, channel wedge 디퓨저나 curved vane diffuser 등은 모두 솔리디티가 큰 경우에 해당한다. 출구부는 산업용 압축기에서 흔히 사용하는 볼류트와 단단형 압축기에서 사용하는 return channel, 그리고 가스터빈용 압축기에서 사용하는 90도 곡관과 AGV(Axial Guide Vane)의 3가지 형태로 제시된다. 내용중의 상첨자 번호는 참고문헌 번호를 의미하며 해당 알고리즘을 각각 부분적으로 인용하였음을 나타낸다.

Fig.2에서는 평균유선 설계과정에 대한 전체 순서도를 보여주고 있다. Fig.1의 성능해석 과정을 단위 모듈화하여 내부에 포함하고 있으며, 임펠러의 반경과 출구폭을 동시에 변경함으로써 설계의 반복과정을 수행한다. 요구되는 압축기의 압력비와 임펠러 출구에서의 swirl factor가 주어진 사양에 수렴하도록 Newton-Rapson method를 사용하여 임펠러의 반경과 출구폭을 동시에 변경하게 된다. 임펠러의 입구(인두서) 설계는 주어진 유량과 회전수에 대하여 다른 요소부와는 관계 없이 독립적으로 최적화될 수 있으며, 압축기 효율저하를 방지하기 위하여 tip에서의 상대마하수 크기를 최소화하는 것이 주요 목표가 된다. 설계가 완료되면 성능해석의 입력파일을 자동으로 생성해주어 탈설계점

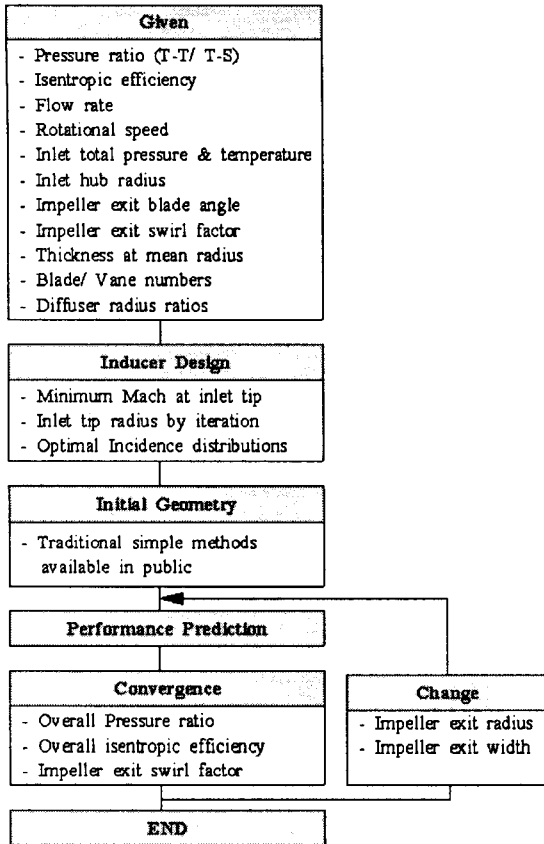


Fig.2 Flow chart of meanline design

성능해석을 통해 압축기의 성능곡선도(map)를 얻을 수 있도록 한다.

2.2 Program Capability

본 연구에서 개발된 평균유선 설계 및 성능해석 프로그램은 RCOM1DRTM (Radial Compressor 1D Real gas)로 명명되었는데, 취급하는 모든 영역을 나타내면 다음과 같다.

1) Centrifugal Compressor	5) Unshrouded Impeller
Mixed-flow Compressor	Shrouded Impeller
2) Ideal Gas	6) Full-bladed Impeller
Real Gas	Splitter-bladed Impeller
3) Vaneless Diffuser	7) Volute
High-solidity Vaned Diffuser	Collector
Low-solidity Cascade Diffuser (Single-row)	90-deg Bend with AGV
Low-solidity Cascade Diffuser (Double-row)	Return Channel
4) Rotational Speed Variations	8) Radial L.E. Impeller
Inlet Preshirl Variations	Slanted L.E. Impeller
9) Surge to Choke-Line Calculation	

2.3 Mixed-flow Option

사류형 압축기인 경우에는 임펠러의 출구측 단면적 계산이 달라지게 되고, 베인없는 디퓨저부터 유로 경사각의 차이만큼 유동의 turning에 의한 전압손실을 해당 요소부에 대해 다음과 같이 추가로 반영해준다.

$$p_o = p_o - \xi(p_o - p) \quad (1)$$

where $\xi = f(\text{turning angle, area ratio})$

2.4 Real Gas Option

공기와 같은 이상기체가 아닌 경우 (예 : 냉매, 수소화합물)에는 실제기체의 물성치를 적용해야 한다. 보통 Martin-Hou 방정식을 이용하거나 Mollier Table을 읽어들이는 방법이 있는데, 본 연구에서는 기체의 종류에 제약없이 사용자가 원하는 기체에 대해 물성치 데이터베이스 파일을 마련할 수 있는 Mollier Table 방법을 적용하였다. 특정기체에 대해 다음과 같은 내용의 물성치들을 미리 정해진 양식에 따라 준비하게 되며, 이러한 방법은 혼합냉매와 같이 여러 종류의 기체가 혼합되어 있는 경우에도 효과적이다.

P = P ₁					
T = T ₁	density	enthalpy	entropy	sound speed	dynamic viscosity
∞					
T = T _n					
P = P _m					
T = T ₁					
∞					
T = T _n					

이러한 데이터파일을 읽어들이는 후에 임의의 2개 물성치를 알고 있을 때 나머지를 구하게 되며 적절한 보간법을 사용한다. 실제기체 계산이 필요한 경우는 예를 들면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Static Properties} &= \text{STATIC}(p_o, T_o, C) \\ p_o &= \text{RealGas}(h_o, s_o) \\ T_o &= \text{RealGas}(h_o, p_o) \end{aligned} \quad (2)$$

2.5 Off-design Map Generation

본 저자의 경험상 서론에서 언급하였던 다른 프로그램의 대부분은 성능곡선을 예측할 경우에 각각의 회전수별로 최소유량과 최대유량 크기를 사용자가 지정 해주어야만 하고, surge 점을 예측하는 일이나 choke line을 따르는 해석이 부족하다. 본 프로그램에서는 유량의 입력값을 0으로 줄 경우 탈설계점 성능곡선을 예측하는 명령으로 인식하게 되고 각각의 회전수별 로 스

스로 surge 유량과 choke 유량을 찾도록 하였다. surge점은 Fig.1의 요소별로 체크하게 되는 stall 여부에 따라 2개 이상의 요소에서 동시에 stall이 예측되었을 때로 정하였다. 또한 choke 이후의 choke line을 따라서는 다음과 같은 관계식에 의해 효율과 동력 등을 예측하게 된다.

$$\psi = \frac{\Delta h_o}{\eta U_2^2} \quad \text{at choke} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\Delta h_o}{\psi_{choke} U_2^2} \quad \text{along choke line}$$

가스터빈 엔진용 압축기나 인버터를 사용하는 가변속 압축기, 혹은 터보차저용 압축기인 경우에는 회전수의 크기별로 성능곡선도를 얻게 되지만, 일반 유도전동기에 증속기어를 적용하여 회전수가 고정되는 경우에는 탈설계점 성능을 IGV(Inlet Guide Vane)의 개폐율(%)에 따라 확인해야 한다. 이 경우에는 임펠러 입구유동의 선회각(prewhirl)의 크기를 변경하면서 성능해석을 수행한다.

3. 벤치마크 적용결과

개발된 프로그램의 신뢰성을 확인하기 위하여 실험결과와 형상이 알려진 총 16개의 원심압축기를 대상으로 benchmark test를 수행하였으며, 그 결과가 Fig.3부터 Fig.18까지 제시되어 있다. 실험결과가 기호로 표시되어 있고 성능해석 결과는 실선으로 표현되어 있다.

사류형 압축기인 경우에는 알려진 데이터를 입수하지 못 하여 해석결과를 비교할 수는 없었다.

Fig.3과 Fig.5의 경우에서 choke 유량 근처에서의 급격한 구배를 표현하지 못하는 경우를 제외하고는 전반적으로 상당히 근접한 예측결과를 주고 있으며, 최대 압력비 10 근처까지의 고압 압축기인 경우와 공기가 아닌 실제기체인 경우(Fig.17과 Fig.18)까지도 성공적으로 예측하고 있음을 확인하였다. 특히 Fig.5의 실험결과는 제한된 압축기 시험결과로부터 임펠러의 성능을 이론적으로 유추한 불완전한 실험 데이터임을 감안하여야 한다.

Fig.17과 Fig.18은 압축기가 포함되어 있는 해당 시스템의 운전시험중에 운전점들을 측정한 결과이기에 압축기의 탈설계점 전체의 성능을 측정하지 못한 것이며, 특히 Fig.18의 효율 측정치가 상당히 높은 것은 시스템이 단열되지 않아 발생한 오류인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 평균유선을 따라 원심/사류형 압축기를 설계하고 탈설계점 성능도 예측하여 성능곡선도를 미리 얻을 수 있는 범용 프로그램을 성공적으로 개발하였다. 실제기체인 경우를 포함하여 거의 모든 사용자의 요구사항을 반영할 수 있도록 개발되었으며, 현재 구매 가능한 해외 상용 프로그램보다도 더 우수한 성능을 확보하고 있다고 판단된다.

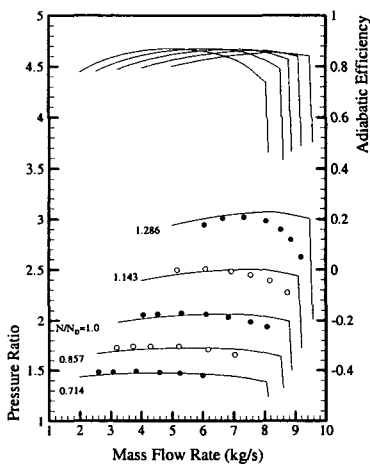


Fig.3 Eckardt-O radial impeller⁽⁷⁾

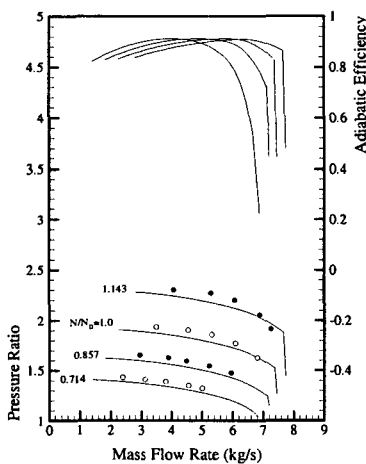


Fig.4 Eckardt-A backswept impeller⁽⁷⁾

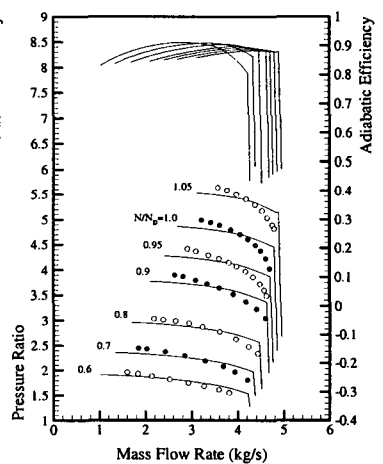


Fig.5 Krain backswept impeller⁽⁸⁾

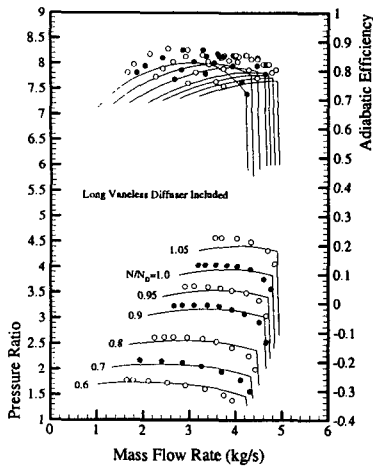


Fig.6 Krain backswept compressor⁽⁸⁾

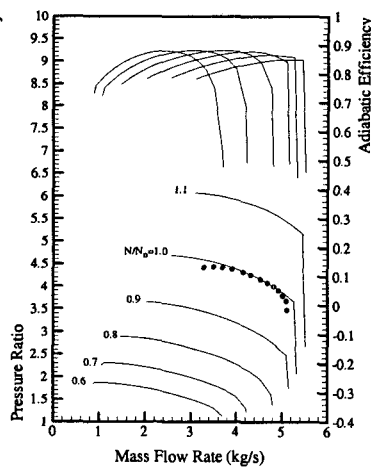


Fig.7 404-III scaled impeller⁽⁹⁾

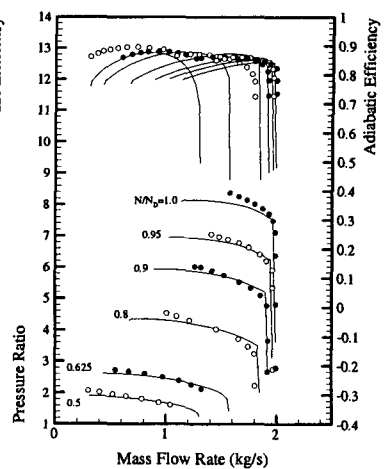


Fig.8 NGTE impeller⁽¹⁰⁾

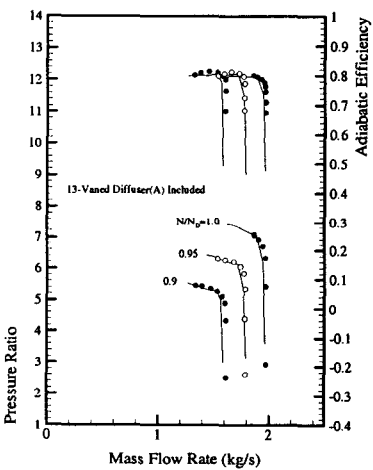


Fig.9 NGTE V13 compressor⁽¹⁰⁾

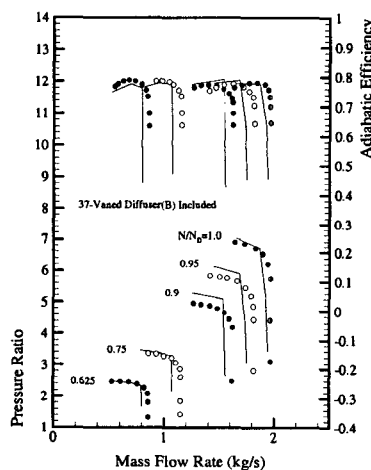


Fig.10 NGTE V37 compressor⁽¹⁰⁾

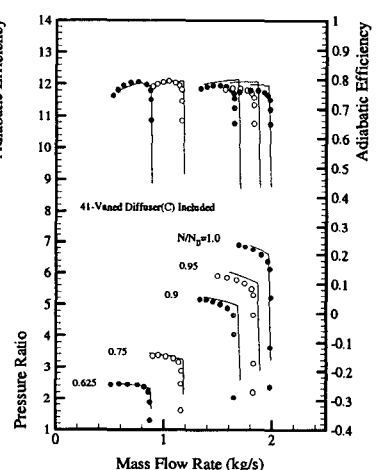


Fig.11 NGTE V41 compressor⁽¹⁰⁾

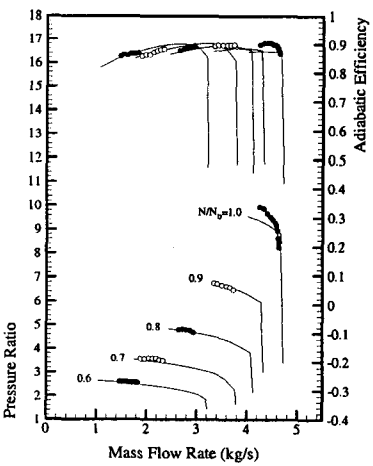


Fig.12 NASA scaled impeller⁽¹¹⁾

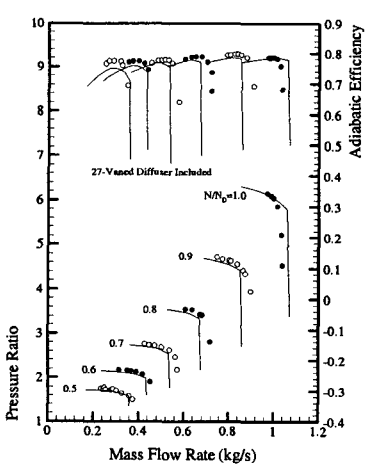


Fig.13 NASA Klassen compressor⁽¹²⁾

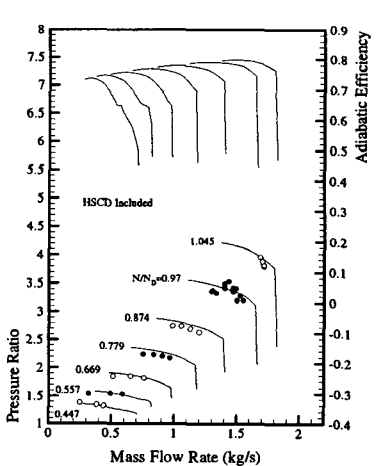


Fig.14 NR15R151 compressor⁽¹³⁾

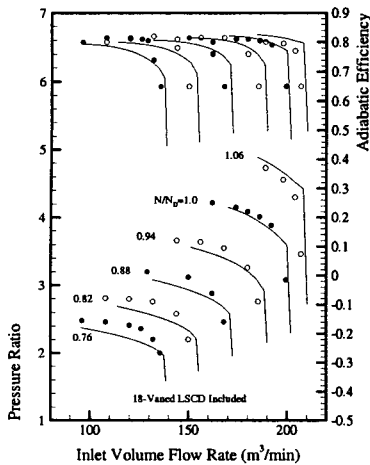


Fig.15 TPS57 compressor⁽¹⁴⁾

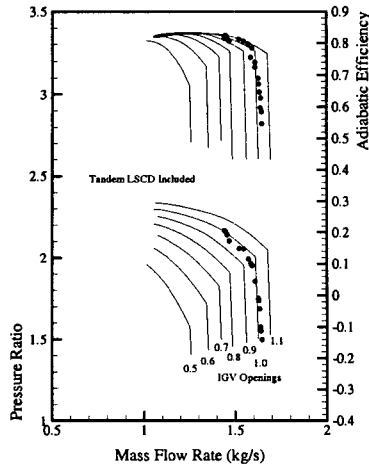


Fig.16 600hp turbocompressor 1st-stage⁽¹⁵⁾

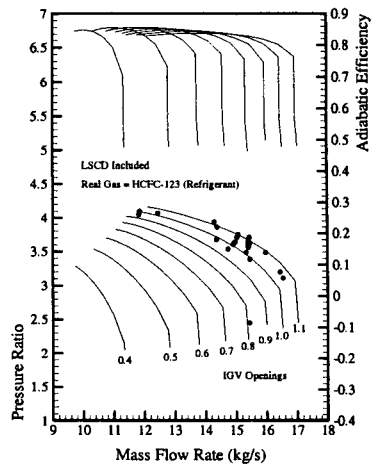


Fig.17 630RT chiller compressor⁽¹⁶⁾

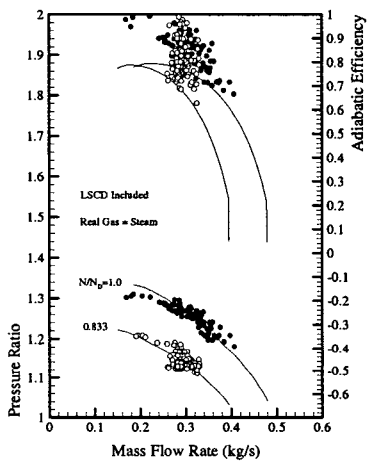


Fig.18 24ton MVR steam compressor⁽¹⁷⁾

참고문헌

- (1) Galvas, M.R., 1973, "FORTRAN program for predicting off-design performance of centrifugal compressors," NASA TN D-7487
- (2) An Interactive Graphics System for the Performance Prediction of Centrifugal Compressors, PREDIGTM version 4.1.1, NREC Report No.1450, 1997
- (3) Jansen, W., 1967, "A method for calculating the flow in a centrifugal compressor impeller when entropy gradients are present," Royal Society Conference on Internal Aerodynamics, IME, pp.133-146
- (4) Aungier, R.H., 2000, Centrifugal Compressors - A strategy for aerodynamic design and analysis,

ASME

- (5) JongSik Oh, 2001, "Analysis of 8 centrifugal compress-or impellers using two different CFD methods-Part I : Blockage and slip characteristics, ASME 2001-GT -327
- (6) Herbert, M.V., 1980, "A method of performance prediction for centrifugal compressors - Part I : Analysis, NGTE R&M 3843
- (7) Eckardt, D., 1980, "Flow field analysis of radial and backswept centrifugal compressor impellers," *Performance Prediction of Centrifugal Pumps and Compressors*, ASME Publication
- (8) Krain, H. and Hoffman, W., 1989, "Verification of an impeller design by laser measurements and 3D-viscous flow calculations," ASME Paper 89-GT-159
- (9) Larosiliere, L.M. and Skoch, G.J., 1997, "Aerodynamic Synthesis of a Centrifugal Impeller Using CFD and Measurements," Army Research Laboratory Technical Report ARL-TR-1461
- (10) Came, P.M., 1978, "The development, application and experimental evaluation of a design procedure for centrifugal compressors," Proc. I. Mech. E. Vol.192
- (11) G. J. Skoch and R. D. Moore, 1987, "Performance of two 10-lb/sec centrifugal compressors with different blade and shroud thickness operating over a range of Reynolds numbers," AVSCOM TR 87-C-21
- (12) Klassen, H. A., Wood, J. R. and Schumann, L.F., 1977, "Experimental performance of a 16.10-centimeter-tip-diameter sweptback centrifugal

compressor designed for a 6:1 pressure ratio,"
NASA TM X-3552

(13) 독일 MAN사의 선박용 터보차저 NR15R151

(14) 스위스 ABB사의 선박용 터보차저 TPS57

(15) 국내 K사의 600마력 3단형 터보압축기의 제1단

(16) 국내 B사의 630RT급 R123 터보냉동기용 원심압
축기

(17) 국내 S사의 24톤급 MVR용 steam 원심압축기