

효율과 무게를 고려한 원심압축기 최적설계에 관한 연구[§]

이영환* · 하경구** · 강신형*†

* 서울대학교 기계항공공학부, ** 현대자동차

Study on Design Optimization of Centrifugal Compressors Considering Efficiency and Weight

Younghwan Lee*, Kyung Gu Ha** and Shin-Hyoung Kang*†

* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.,

** Hyundai Motor Group,

(Received February 21, 2014 ; Revised January 7, 2015 ; Accepted January 9, 2015)

Key Words: Centrifugal Compressor(원심압축기), Efficiency(효율), Weight(무게), Kriging(크리깅), Design Optimization(설계최적화)

초록: 여러 산업분야에서 다양한 원심압축기가 사용되고 있다. 따라서 사용자의 요구에 맞는 원심압축기의 설계가 복잡해졌고, 최적화된 설계점을 찾는 것은 더욱 어려워졌다. 전통적으로 효율은 최적화의 중요한 요소이다. 본 연구에서는 효율 외에도 압축기의 무게를 고려하여 설계하였다. 본 연구의 목적은 압축기의 효율과 무게를 고려할 때에 그 고려하는 가중치의 변화에 따라 설계의 경향성이 나타남을 확인하는 것에 있다. 또한, 이를 바탕으로 초기 설계 단계에서 객관적인 설계점을 선택할 수 있음을 보여주는 데 있다. 본 연구에서는 베인이 없는 디퓨저를 한정하여 연구하였다. 최적화를 위해서 크리깅을 사용하였고, 1차원 설계 프로그램의 표본을 적절히 이용하였다. 설계공간을 적절히 가정하였고, 설계공간 내에서 최적설계점을 계산하였다.

Abstract: Various centrifugal compressors are currently used extensively in industrial fields, where the design requirements are more complicated. This makes it more difficult to determine the optimal design point of a centrifugal compressor. Traditionally, the efficiency is an important factor for optimization. In this study, the weight of the compressor was also considered. The aim of this study was to present the design tendency considering the stage efficiency and weight. In addition, this study suggested possibility of a selection of compressor design objectives at an early design stage based on the optimization results. Only a vaneless diffuser was considered in this case. The Kriging method was used with sample points from 1D design program data. The optimal points were determined in a substitute design space.

- 기호설명 -

Mr : 상대마하수
 α : 유동각
 β_b : 날개각

η : 효율
 ν : 허브팁 반경비
 z : 특성값
 σ^2 : 분산, 공분산
 γ : 베리오그램
 λ : 크리깅 가중치
 ϕ : 유량계수
 ψ : 압력계수

[§] 이 논문은 대한기계학회 2013년도 학술대회(2013. 12. 18.-20., 강원랜드) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, kangsh@snu.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

첨자

- 1 : 임펠러 입구
- 2 : 임펠러 출구
- 3 : 디퓨저 입구 (=임펠러 출구)
- 4 : 디퓨저 출구
- 5 : 볼루트 입구 (=디퓨저 출구)
- 6 : 볼루트 내부
- 7 : 볼루트 출구

1. 서론

원심압축기는 일반적으로 흡입된 작동유체에 운동에너지를 가하는 임펠러와 운동에너지를 압력으로 변환하는 디퓨저, 그리고 다른 장치로 전달하는 볼루트로 구성되어 있다. 따라서 원심압축기의 성능을 예측하고, 적절한 설계하는데 많은 경험과 노력이 필요하다.^(1~6)

효율은 원심압축기의 성능을 평가하는 중요한 인자로, 복잡한 형상을 가지는 임펠러의 효율을 예측하는 것은 압축기 성능을 평가하는데 매우 중요한 부분이라 할 수 있다. 이를 위해서 많은 계산과 실험이 필요하다. 더불어 원심압축기를 구성하는 요소들의 관계에 따라 압축기의 효율이 결정된다. 따라서 일반적으로 임펠러 설계에 가장 큰 비중을 두고, 디퓨저와 볼루트는 주어진 공간에 맞도록 적절히 설계한다.

본 연구에서는 1차원적인 방법을 이용하여 압축기의 성능을 예측하고 설계하는 방법에 대하여 연구하였다. 임펠러의 성능은 Japikse⁽⁹⁾가 제안한 두 영역 모델과 직렬 두 요소 모델을 이용하여 예측하였다. 또한, 디퓨저는 베인리스 디퓨저로 한정하였고, 4차 Runge-Kutta법을 이용하여 반경비에 따라 지배방정식^(7~9)을 계산하였다. 볼루트의 손실은 반경방향 손실과 자오면방향 손실을 고려하여 성능을 예측하였다.⁽⁹⁾

설계 결과를 토대로 원심압축기 설계의 최적화를 진행하였다. 일반적으로 원심압축기의 최적화는 3차원 설계의 형상을 변화시켜 성능을 향상시키는데 목적이 있다.^(10,11) 본 연구에서는 초기 설계 단계에서 최적화를 진행하여, 객관적인 설계 변수를 얻을 수 있도록 하였다. 최적화의 변수로 임펠러의 형상을 결정하는 입구 상대마하수, 출구 유동각과 날개각을 이용하였고, 디퓨저의 반경비를 변수로 선택하여 적절한 디퓨저의 반경비

를 계산하였다.

최적화의 목적으로는 효율을 고려하였고, 최근 에 강조되고 있는 압축기의 크기와 무게를 고려하는 최적설계를 수행하였다. 압축기의 효율과 무게의 가중치를 다양하게 하여 계산된 최적설계 점의 설계 경향을 확인하였다.

2. 연구 방법

2.1 원심압축기 설계

원심압축기 설계는 1차원적인 설계기법을 활용하였다. 설계의 기본 상황은 다음과 같다.

- a. 입구 날개각은 55° , $\nu=0.33$ 으로 고정한다.
- b. 주어진 설계조건을 만족하면서 압축기의 효율과 무게를 고려한 설계가 되도록 한다.
- c. 원심압축기의 성능은 두 영역 모델과 직렬 두 요소 모델을 사용한다.
- d. 디퓨저는 4차 Runge-Kutta법을 이용하여 해석한다.
- e. 디퓨저 내부에서 전엔탈피 변화는 없다.
- f. 볼루트 설계 및 해석은 Japikse모델을 사용한다.

설계 프로그램의 흐름도는 Fig. 1에 나타내었으며 원하는 출구 전압력(P_{07ar})을 얻을 수 있도록 설계하였다. 각 변수에 따라 본 논문의 목적에 맞게 압축기의 효율과 압축기의 크기를 확인하였다.

설계 변수는 임펠러 입구 상대마하수, 임펠러 출구 유동각과 날개각, 그리고 디퓨저의 입출구 반경비와 볼루트 출구 마하수로 결정하였다. 각각 압축기를 구성하는 요소의 설계에 있어 중요한 설계 인자로, 상대마하수는 임펠러의 회전속도와 밀접한 관련이 있다. 따라서 상대마하수에 따라 임펠러의 비속도가 달라지고, 형상이 결정된다. 입구 유동각은 날개각을 따라 유동이 흐른다고 가정하였다. 임펠러 출구 유동각과 날개각은 임펠러의 일의 양과 관련이 깊다. 유동각과 날개각에 따라 임펠러가 작동유체에 전달하는 일의 양이 달라지며, 따라서 임펠러 출구의 반경이 결정된다. 또한, 디퓨저의 반경비는 디퓨저 내부의 압력회복과 손실과 관련이 깊으며, 반경비가 클수록 정압이 커지는 효과를 얻을 수 있다. 볼루트 출구 마하수는 볼루트의 출구 넓이를 결정하는 역할을 하므로 볼루트 출구 설계를 위한 중

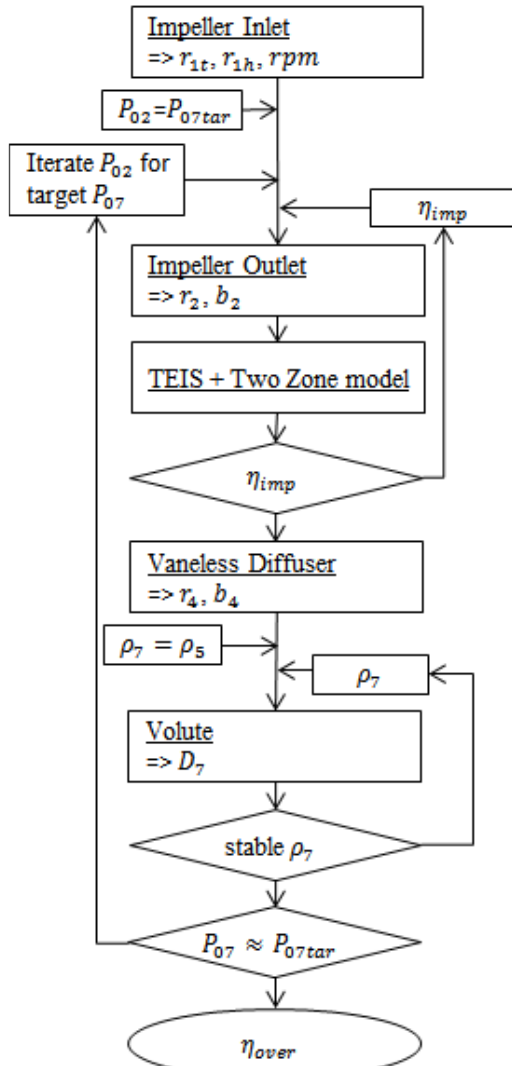


Fig. 1 Flowchart

요한 인자라고 할 수 있다.

1차원적인 설계 프로그램의 신뢰성을 확인하기 위해서 같은 압축기에 대해서 성능을 예측하였다.

2.2 설계 제한 조건

설계가 진행되는 동안 1차원 프로그램의 한계로 인하여, 기계적 혹은 유체역학적으로 의미없는 결과를 제시할 가능성이 있다. 따라서 최적화의 과정에서 제약조건을 설정하여 Table 1에 나타내었다.

임펠러의 회전속도는 베어링에 의해 제한되므로 일반적인 볼베어링의 회전속도 이하로 제한하였다. 원심압축기는 원심력을 이용하는 압축기이기 때문에 임펠러 입구의 최대 반경(r1t)을 임펠러 출구의 반경비로 나타내어 적절한 범위로 한

Table 1 Constraints for the optimization

r_{1t} / r_2	$0.3 < r_{1t}/r_2 < 0.8$
b_2 / r_2	$0.005 < b_2/r_2 < 0.5$
$N [rpm]$	$N < 60000$
b_2	$b_2 > 0.005$

Table 2 Design space and parameter samples

Mr	0.6, 0.75, 0.9
α_2 [degree]	60, 70, 80
β_{2b} [degree]	30, 50, 60
D_4/D_2	1.1, 1.9, 2.7

정하였고, 디퓨저는 제작이 가능하도록 충분히 큰 폭을 가지도록 제한하였다.

2.3 최적설계

최적설계의 방법으로는 크리깅법을 선택하였다. 크리깅은 공간자료의 처리기법으로, 관심이 있는 위치의 특성값을 예측하기 위해 이미 알고 있는 주위의 특성값을 이용하여 원하는 위치의 특성값을 예측하는 통계기법이다. 크리깅은 간략하게 다음 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad \text{with} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (1)$$

여기서 z^* 는 이미 아는 위치의 특성값을 의미하며, λ 는 이미 아는 각 위치와 원하는 위치의 거리에 대한 가중치를 의미하며 그 합이 1이다.

의미있는 최적화 결과를 도출하기 위해서 이미 아는 위치를 적절히 선택해야 하며, 그 위치에서의 값이 신뢰성이 있어야한다. 따라서 본 연구에서는 1차원 설계 프로그램의 결과를 토대로 표본을 정하였다. 설계프로그램의 결과를 바탕으로 최적설계의 변수는 임펠러 입구 상대마하수, 출구 유동각과 날개각, 그리고 디퓨저의 입출구 반경비로 결정하였다.

본 연구에서는 실험설계법의 Box-Behnken법에 따라 설계공간을 구성하였다. 많은 경우, 3가지 변수에 대한 설계공간 구성방법을 제시한다. 본 연구에서는 4개의 변수를 바탕으로 최적화를 진행하기 위해서 3가지 임펠러 입구 상대마하수에

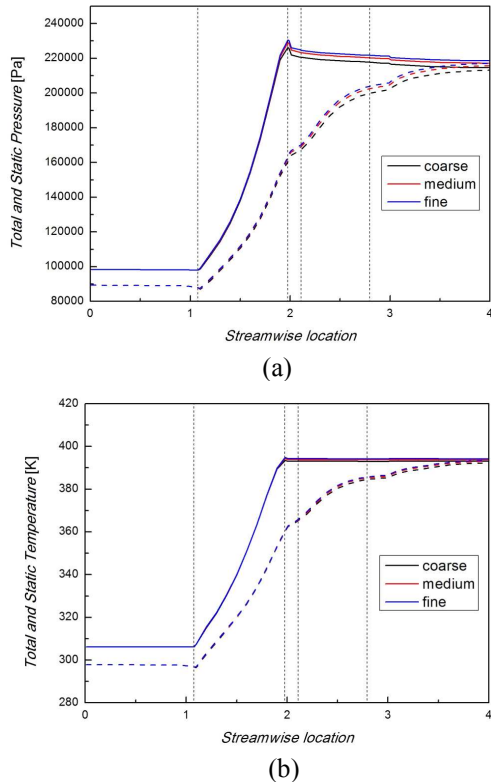


Fig. 2 Grid test (a)total/static pressure (b)total/static temperature

대하여 각각 설계 공간을 구성하였다. 따라서 임펠러 입구 상대마하수를 제외한 나머지 변수에 대해 각각 Box-Behnken법으로 설계공간을 구성하여 총 39의 표본을 선택하였다.(Table 2)

2.4 목적함수

설계 최적화에 있어 목적함수를 적절하게 결정하는 것이 매우 중요하다. 본 연구는 1차원 설계 결과를 바탕으로 압축기의 효율과 크기를 고려하는 최적설계를 하였다. 따라서 본 연구에서 사용한 목적함수는 1차원 설계 프로그램의 결과를 이용한 압축기의 효율과 크기의 함수로 나타내었다. 이를 다음 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$\text{Objective Func.} = a_1 \eta_{\text{grade}} + a_2 V_{\text{grade}} \quad (2)$$

$$\eta_{\text{grade}} = 1 - \left(\frac{\eta}{\eta_{\text{ref}}} \right)^2 \quad (3)$$

$$V_{\text{grade}} = h \times \frac{r_4^2}{r_{\text{ref}}^3} \quad (4)$$

여기서 h 는 임펠러의 축방향 높이를 의미하

Table 3 Reference compressor specifications

Design RPM	12,516
Design mass flow rate [kg/s]	12.8
Number of Impeller blades	16 (16 main, 0 splitter)
Impeller exit diameter [mm]	552
$b_{\text{imp.}} / r_{\text{imp.}}$	0.192
Diffuser type	Parallel wall, vaneless
$r_{\text{diff.}} / r_{\text{imp.}}$	1.52
Inlet blade angle @ shroud [degree]	55
Exit blade angle [degree]	35
Volute type	Symmetric
Volute exit diameter [mm]	550

며, a 는 고려하는 요인에 대한 가중치이다. 또한, η 는 원심압축기 전체의 효율을 의미한다. 고려하는 요인에 대한 가중치를 다양하게 변화시켜가면서 최적화를 진행하였고, 각 가중치에 따른 설계값이 변하는 경향성을 확인하였다.

3. 결과

3.1 설계 결과

설계프로그램을 검증하기 위해서 동일한 원심 압축기에 대하여 수치해석 계산과 1차원 해석을 수행하였다. 수치해석 계산의 신뢰성을 확인하기 위해서 격자 검증을 진행하였다(Fig. 2). 격자 검증을 위해서 각각 12만, 22만, 42만 개의 격자를 구성하여 계산을 진행하였고, 유동방향에 따라 전압, 정압, 전온, 정온 계산 결과를 비교하여 적절한 격자수를 결정하였다. 각각 실선은 전압과 전온을 나타내며 점선은 정압과 정온을 나타낸다. 본 연구에서는 $k-\epsilon$ 모델을 이용한 수치해석을 진행하였고, 볼루트를 포함하는 전체 유로 (Full-passage)계산과 볼루트를 제외한 단일 유로 (One-passage)계산 결과를 기존 실험결과와 비교하였다.(Fig. 3) $k-\epsilon$ 모델은 Choi⁽¹⁵⁾의 연구에서 벽법칙을 이용하여 경제적이며, 대체로 합리적인 결과를 보여준다고 하였다.

Table 4 CFD conditions

Grid / Solver	CFX Turbogrid 13 / CFX 13
y^+	< 200
Grid size (No. of Nodes)	220k
Turbulence model	$k-\epsilon$ model
Simulation type	Steady state
Inlet B.C.	Total pressure Total temperature Flow vector
Outlet B.C.	Mass flow rate
Interface	Frozen rotor

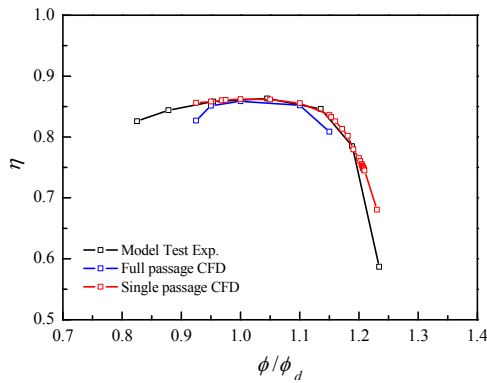


Fig. 3 CFD and experimental results

성능예측에 사용한 압축기의 제원은 Table 3에 정리하였다. 수치해석 계산은 Ansys 13 CFX를 이용하였으며, 계산조건은 Table 4에 정리하였다.

1차원 해석결과와 수치해석 해석의 결과를 임펠러 출구와 볼루트 출구를 중심으로 임펠러의 성능 및 압축기의 성능을 비교하였다. 1차원 해석과 수치해석 결과, 설계 유량점에 대하여 오차 범위 내에서 일치함을 확인하였다. 설계 유량에서 벗어난 지점에서 발생하는 손실에 대해서는 1차원 해석에서 고려하지 않았다. 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

임펠러 입구 상대마하수, 출구 유동각과 날개각, 그리고 디퓨저의 반경비에 따라 디퓨저 출구의 반경과 압축기의 효율을 확인하였다. 그 결과, Fig. 5에서 나타나는 바와 같이 압축기의 효

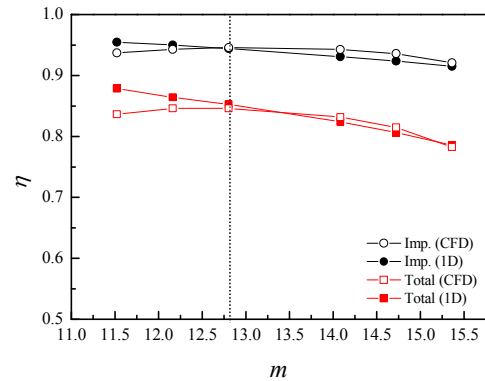


Fig. 4 Impeller and stage efficiency from 1D performance program and CFD analysis

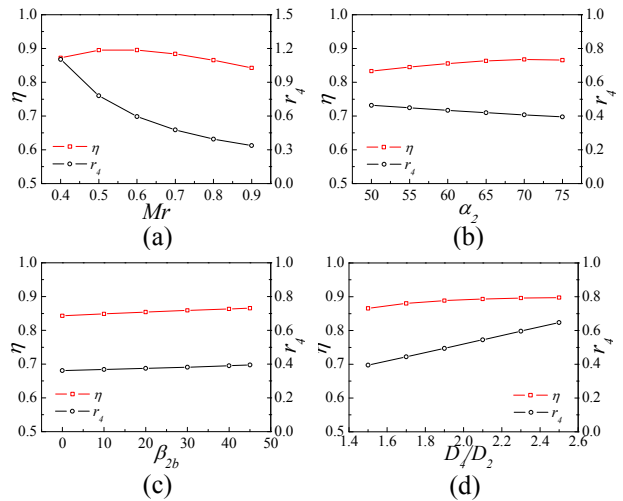


Fig. 5 Stage efficiency and impeller exit radius for the design variables; (a)the impeller inlet relative Mach number, (b)the impeller exit flow angle, (c)the impeller exit blade angle, and (d)the diffuser radius ratio

율이 높은 설계점과 작은 압축기를 만드는 설계점이 상반되게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

임펠러 입구 상대마하수가 커지는 경우, 임펠러의 회전 속도가 빨라져 임펠러 출구의 원주속도의 크기가 커지게 된다. 따라서 작은 반경에서 설계자가 원하는 압축기 출구 압력에 해당하는 일의 양이 전달된다. 즉, 임펠러의 회전속도는 빨라지고, 임펠러의 효율은 감소하지만 압축기의 크기는 줄어든다. 임펠러 출구 유동각이 커지는 경우, 작동유체에 전달하는 일의 양이 커지며 큰 유동각에 의해 디퓨저와 볼루트에서 손실이 줄어든다. 따라서 효율이 증가하는 것을 확인하였다. 임펠러 출구 날개각의 변화 또한 일의 양과 효율에 영향을 준다. 따라서 본 연구에서는 유동각과

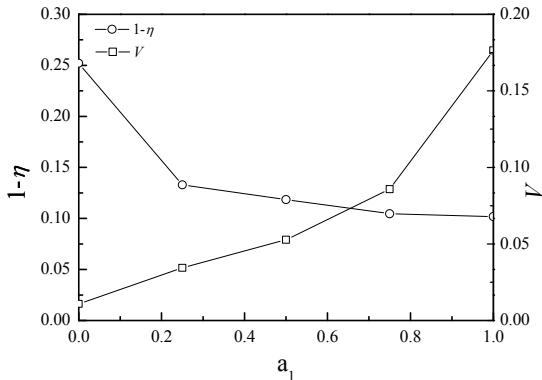


Fig. 6 Optimization results for the stage efficiency and the volume along the weight

날개각을 최적화의 변수로 설정하였다. 디퓨저의 반경비가 클수록 압력회복이 크다. 따라서 임펠러에서 전달하는 일의 양이 줄어든다. 또한, 디퓨저가 없이 불균일한 유동이 불루트로 전달되는 경우와 비교하여 불루트 효율이 감소한다. 따라서 압축기 전체의 크기는 커지지만 효율은 증가한다. 따라서 초기 설계 단계에서 적절한 크기와 성능에 대한 객관적인 접근이 필요하고, 이를 최적화를 이용하여 확인하였다.

3.2 최적 설계 결과

1차원 해석을 바탕으로 진행한 최적설계의 결과, 5가지 가중치 변화에 따라 압축기의 효율과 크기의 변화를 Fig. 6에 나타내었다.

최적설계의 결과, 효율을 고려하는 가중치가 클수록 효율을 높게 설계하고, 압축기의 크기는 줄어드는 결과를 나타내었다. 따라서 적절한 가중치를 선택함에 따라서 크리깅을 이용한 설계 초기단계의 최적화가 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다.

최적화의 결과를 바탕으로 각각의 최적화 변수에 대해 1차원 설계 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 효율에 대한 가중치가 높아짐에 따라서 임펠러 입구 상대마하수는 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는, 임펠러 출구의 반경을 크게 선택하여 입구의 상대마하수를 줄이고, 임펠러의 회전속도가 과도하게 빨라지지 않도록 설계하는 것이라 할 수 있다.

임펠러 출구 유동각은 압축기의 크기만을 고려한 경우에 80°로 계산되었으나 점차 효율을 고려함에 따라 유동각이 낮아지고, 그 가중치를 크게 할수록 다시 80°에 가까운 결과를 나타내었다. 이는 각각의 가중치에 따라 임펠러 입구 상대마

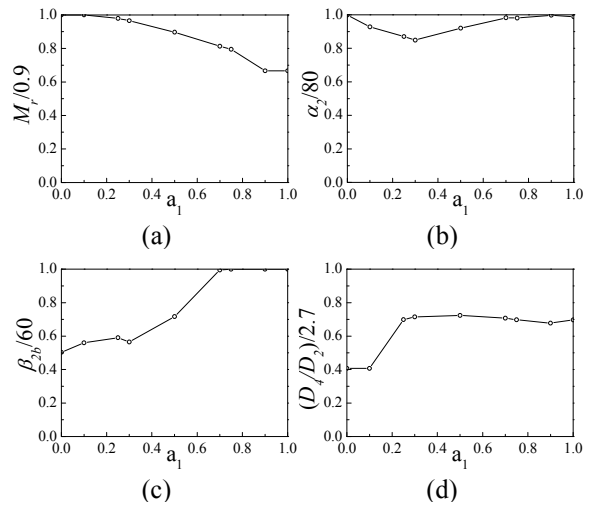


Fig. 7 Tendency of the optimization parameters along the weight(a_1); (a)the impeller inlet relative Mach number, (b)the impeller exit flow angle, (c)the impeller exit blade angle, and (d)the diffuser radius ratio

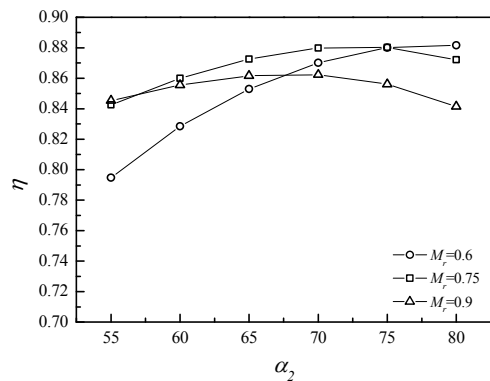


Fig. 8 Efficiency at the relative Mach numbers of 0.6, 0.75, and 0.9

하수가 다르게 선택되어 임펠러 형상이 달라지고, 따라서 각각의 임펠러 형상에 대한 유동각의 변화가 성능에 영향을 주는 정도가 달라졌기 때문이다.(Fig. 8) 임펠러 출구의 날개각은 크게 설계할수록 성능이 좋아지는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 임펠러 출구에서 일을 전달받은 작동 유체가 디퓨저로 전달되면서 회전에 의해 임펠러 날개의 뒤쪽으로 미끄러지는 현상이 나타나게 되는데, 날개각을 크게 설계함으로써 이 현상을 줄일 수 있기 때문이다.

베인리스 디퓨저의 반경비는 효율에 대한 가중치가 매우 작은 경우를 제외하고는 반경비 1.8~1.9 사이의 결과를 나타내었다. 이는 디퓨저의 반경비가 매우 작은 경우에 임펠러 출구의 불균일한 유

동이 블루트로 전달되어 블루트에서 손실이 과도하게 발생하기 때문이다. 따라서 적절한 디퓨저의 반경비는 1.8~1.9사이로 결정하는 것이 좋다.

4. 결론

본 연구에서는 원심압축기 최적설계와 관련하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

a. 1차원적인 방법을 이용하여 원심압축기 설계 프로그램을 만들고 이를 수치해석과 실험 결과를 통해 검증하였다.

b. 효율과 무게를 고려한 원심압축기 설계에 있어서 임펠러 입구 상대마하수, 임펠러 출구 날개각과 유동각, 디퓨저의 반경비 변화에 따른 최적설계를 진행하였다.

또한, 본 연구에서는 원심압축기의 효율과 무게를 고려한 설계를 위해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 효율이 높은 설계를 위해서 임펠러의 회전속도가 과도하지 않도록 유지하여 손실을 줄인다.

(2) 임펠러 출구 날개의 후퇴각을 60°에 가깝게 설계한다.

(3) 임펠러 출구의 유동각은 45° 이상의 값을 선택하되, 임펠러 설계에 따라 효율에 미치는 영향력이 달라진다.

(4) 디퓨저는 충분히 긴 유로를 선택하여 임펠러 출구의 불균일한 유동을 안정화시킨다.

후 기

본 연구는 삼성테크윈(주)의 지원을 받아 서울대학교 고속에너지기계센터에서 수행한 연구입니다.

참고문헌 (References)

(1) Colwill, W. H., 1980, "Impeller Performance Prediction Using Three-dimensional Flow Analysis," *Proc. of the 25th Annual International Gas Turbine Conference and 22nd Annual Fluids Engineering Conference*, pp.125~133.

(2) Aungier, R. H., 1995, "Mean Streamline Aerodynamic Performance Analysis of Centrifugal Compressors," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 117, No. 3, pp. 360~366.

(3) Whitfield, A. and Wallace, F. J., 1975, "Performance Prediction for Automotive Turbocharger Compressors," *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 189, No. 1, pp. 557~565.

(4) Oh, H. W., Yoon, E. S. and Chung, M. K., 1997, "Performance Prediction and Loss Analysis of Centrifugal Compressors," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 21, No. 6, pp. 804~812.

(5) Came, P. M. and Robinson, C. J., 1998, "Centrifugal Compressor Design," *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part C*, Vol. 213, No. 2, pp. 139~155.

(6) Jang, C. M., Park, J. Y. and Yang, S. H., 2009, "Design Program for Centrifugal Blower using the Program of Excel," *Proc. of the KFMA*, pp. 471~476.

(7) Johnston, J. P. and Dean, R. C. JR., 1966, "Losses in Vaneless Diffusers of Centrifugal Compressors and Pumps; Analysis Experiments, and Design," *Journal of Engineering for Power*, pp. 49~62.

(8) Dubitsky, O. and Japikse, D., 2008, "Vaneless Diffuser Advanced Model," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 130, pp. 11020.1~10.

(9) Japikse, D., 1996, *Centrifugal Compressor Design and Performance*, Concepts ETI Inc..

(10) Lee, K. S., Kim, K. Y. and Samad, A., 2007, "Multi-Objective Optimization of a Fan Blade using NSGA-II," *Proc. of the KSME*, pp. 1260~1265.

(11) Ha, K. K. and Kang, S. H., 2011, "An Optimization Method for Centrifugal Compressor Design Using the Surrogate Management Framework," *Proc. of AJK2011 Joint Fluids Engineering Conference*, Vol. 1, pp. 679~684.

(12) Dixon, S. L. and Hall, C. A., 2010, *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbo machinery* 6th E., Elsevier Inc..

(13) Choe, J. G., 2002, *Spatial Data Modeling*, Goomi.

(14) Park, G. J., 2010, *Analytic Methods for Design Practice*, Dongmyeoung.

(15) Choi, Y. S., 1996, *Through-flow Calculation for Design and Performance Prediction of Centrifugal Compressor*, Seoul National University Dr. Thesis.