

원심압축기 임펠러의 형상 설계 최적화에 관한 수치적 연구

서정민* · 박준영* · 최범석*

A Numerical Study on Shape Design Optimization for an Impeller of a Centrifugal Compressor

JeongMin Seo*, Jun Young Park*, Bum Seok Choi*

Key Words : Centrifugal compressor(원심압축기), Impeller(임펠러), Optimization(최적화), DOE(실험계획법), RSM(반응면기법)

ABSTRACT

This paper presents a design optimization for meridional profile and blade angle θ of a centrifugal compressor with DOE (design of experiments) and RSM (response surface method). Control points of the 3rd order Bezier curve are used for design parameters and specific overall efficiency is used as object function. The response surface function shows good agreement with the 3D computational results. Three different optimized designs are proposed and compared with reference design at design point and off-design point. Contours of relative Mach number, static entropy, and total pressure are analyzed for improvement of performance by optimization. Off-design performance analysis is conducted by total pressure and efficiency.

1. 서론

원심압축기는 일반적으로 고속으로 회전하며 유체에 압력 에너지와 속도에너지를 전달하는 기계이다. 원심압축기는 축류압축기에 비해 효율이 다소 떨어지는 단점이 있지만, 단당 압축비가 높고, 같은 회전수에 있어서 축류형에 비하여 공기유량의 변화폭이 넓은 장점이 있으며, 제작이 축류형에 비하여 간단하여 소형엔진, 터보차저, 산업용 압축기 등에 많이 사용되고 있다.

일반적으로 원심압축기는 유체의 흐름을 따라 임펠러(impeller), 디퓨저(diffuser) 및 벌류트(volute)로 구성된다. 이 중 임펠러는 원심압축기의 설계에 있어 핵심이 되는 부분으로 압축기의 효율에 큰 영향을 미친다. 그러나 원심압축기의 임펠러는 매우 복잡한 3차원 형상을 가지고 있어서 설계를 위한 다양한 설계 변수들이 존재한다. 따라서 최적화된 형상을 찾기 위해서는 많은 양의 계산이 필요하며, 효율적인 최적화기법이 필요하다.

최적설계 기법은 일반적으로 최적해를 도출하기까지 많은 수의 해석을 수행해야 하기 때문에 수렴된 최적해를 도출하

기 위해 많은 자원이 필요하다. 특히 압축기의 경우 설계 변수가 많기 때문에 실제해석을 통한 최적해를 도출하기가 매우 어렵다. 따라서 유체기계 최적설계를 위해서는 실제해석 대신 해석모델에 대한 근사모델을 이용하는 근사모델기반 최적설계(metamodel-based design optimization) 기법을 많이 사용한다. 대표적인 근사모델기반 최적설계 기법으로는 반응면기법(RSM: response surface method), 인공신경망(artificial neural network), 크리깅(kriging) 등이 있다⁽¹⁾.

반응면기법을 사용하여 Bonaiuti and Zangeneh⁽²⁾은 역설계법(inverse design)과 다중목적 진화 알고리즘(multi-objective evolutionary algorithm)과 연계하여 축길이, 전연후퇴각(leading edge sweep angle), 허브(hub) 및 쉬라우드(shroud) 형상을 설계 변수로 하여 최적화를 수행하였고, Kim 등⁽³⁾은 블레이드 각도(blade angle) θ , 자오면 형상 및 디퓨저 형상을 설계 변수로 하여 최적화를 수행하였다. 인공신경망을 사용하여 Cho 등⁽⁴⁾은 블레이드 각도 β 와 자오면 형상을 설계 변수로 하여 최적화를 수행하였고, Ma 등⁽⁵⁾은 블레이드 각도 β 와 자오면 형상을 설계 변수로 하여, 방사기저함수망(RBFN: radial basis function network), 주성분

* 한국기계연구원 극한기계연구본부 (Department of Extreme Energy Systems, Korea Institute of Machinery & Materials)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : jmseo@kimm.re.kr

분석(PCA: principal component analysis)을 사용한 방사기 저함수망 기법과 독립요소분석(ICA: independent component analysis)을 사용한 방사기저함수망 기법을 사용하여 최적화한 결과값을 비교하였다. 크리깅 기법을 사용하여 Whang 등⁽⁶⁾은 블레이드 각도 β 를 설계 변수로 하여 최적화를 하였다.

본 연구에서는 반응면기법을 사용하여 기존 원심압축기 임펠러 모델의 자오면 형상 및 블레이드 각도 θ 에 대해 최적화 설계를 수행하였다.

2. 유동해석

2.1. 설계사양

본 연구에서 공기를 작동유체로 하는 원심압축기를 대상으로 최적화를 수행하였다. 대상 원심압축기는 입구부와 임펠러 및 폭까지 줄어드는 구간(pinched)을 포함하는 디퓨저를 가진다. Table 1은 유동조건 및 기존 압축기 임펠러 모델의 세부 설계 사양을 나타낸다.

최적화는 압축기 입구부와 디퓨저의 설계값을 고정하고 임펠러의 자오면 형상과 블레이드 각도 θ 를 대상으로 한다.

2.2. 수치해석

압축기 기존 모델의 경우, Concepts NREC사의 원심압축기 설계 프로그램인 COMPAL ver. 8.0.1.0 및 AxCent ver. 8.0.1.0 프로그램을 사용하여 설계되었다. 이를 ANSYS사의 유체기계 설계 프로그램인 BladeGen의 포맷으로 전환하여 사용하였다. 실험계획법을 위한 설계변경도 BladeGen ver. 14.5에서 진행하였다.

Table 1 Flow conditions and design specification

Item	Unit	Value
Flow conditions		
Inlet total temperature	K	308.15
Inlet total pressure	kPa	99.0
Mass flow rate	kg/s	0.988
Total density	kg/m ³	1.1190
Design specification		
Pressure ratio		1.412
Rotating speed	rpm	23,253
Number of blades		16
Impeller diameter	mm	203.2
Impeller type		shrouded
Diffuser type		pinched
Diffuser vane type		vaneless

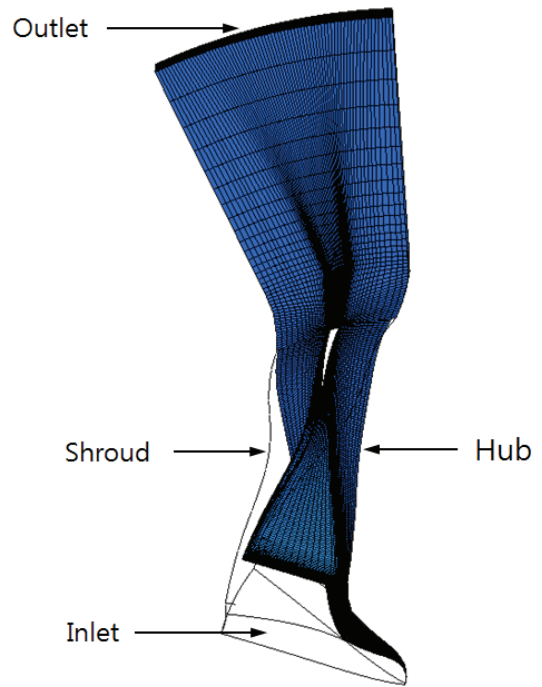


Fig. 1 Computational boundaries and mesh of impeller

3D 수치해석을 위한 격자계 생성은 ANSYS사의 TurboGrid ver. 14.5를 이용하였다. 블레이드 표면 인근에는 O형 격자계, 그 외의 영역에는 H/J/C/L형 격자계를 사용하였으며, 모두 육면체 격자계로 구성하였다. 특히 허브, 쉬라우드 및 블레이드(blade) 벽면에서 y^+ 가 1을 넘지 않도록 하였다. 격자계 테스트를 통해서 약 60만개의 격자를 사용하기로 결정하였다.

유동해석은 3차원 압축성 난류유동 해석 상용프로그램인 ANSYS사의 CFX ver. 14.5를 사용하였으며, 정상상태(steady state)로 가정하여 수행하였다. 난류유동을 계산하기 위해 $k-\omega$ SST 모델을 사용하였다. 경계조건으로는 압축기 입구에서 전압력(total pressure) 및 전온도(total temperature)를 고정하였으며, 출구에서는 질량 유량을 고정하였다. Fig. 1은 기존 임펠러 모형에 대해 수치해석을 위한 경계 및 격자계를 나타낸다.

3. 최적화기법

3.1. 목적함수 및 설계변수

최적화를 위해서는 목적함수와 설계변수의 선정이 중요하다. 본 연구에서는 원심압축기 효율향상을 위해 목적함수를 비총효율(specific overall efficiency) η 로 선정하였고, 다음과 같이 정의된다⁽⁷⁾.

$$\eta = \frac{\dot{m} c_p T_1 \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right\}}{\dot{W}_{shaft}} \quad (1)$$

여기서 c_p 와 k 는 각각 정압비열(constant pressure specific heat)과 비열비(specific heat ratio)를 나타내고, 본 연구에서는 그 값이 각각 1,0082 kJ/kg · K과 1,3981이다. P 와 T 는 각각 전압력과 전온도를 나타내며, 하첨자 1과 2는 각각 입구부와 출구부를 나타낸다. \dot{m} 과 \dot{W}_{shaft} 는 각각 질량유량(mass flow rate)과 축일(shaft work)을 나타낸다.

임펠러에는 압축기의 효율에 영향을 미치는 다양한 설계 변수들이 있다. 하지만 압축기의 성능을 향상시키기 위한 적절한 형상변수를 선택하여야 한다. 그 중 대표적인 것이 임펠러 자오면(meridional plane) 상의 유로와 허브와 쉬라우드의 블레이드 각도 θ 이며 본 연구에서도 이들을 형상변수로 선정하였다. 최적화에서는 설계변수의 개수에 의해 실험점의 개수가 정해지므로, 최적화 시간을 줄이기 위해 설계변수의 개수를 줄이는 것과 적절한 설계변수를 선정하는 것이 매우 중요하다. 허브와 쉬라우드에서 자오면 유로 형상과 블레이드 각도를 각각 변수화(parameterization)하기 위해서 각각 3차 베지어 곡선(Bezier curve)로 표현하였고, 이 때 경계점인 입구부와 출구부에서의 값을 고정할 경우 각각 2개의 통제점(control point)을 가진다. Fig. 2는 임펠러 허브 및 쉬라우드에서의 자오면 형상과 이를 표현하는 베지어 곡선의 통제점을 나타낸다. Fig. 3은 허브에서의 블레이드 각도 θ 의 분포와 이를 표현하는 베지어 곡선의 통제점을 나타내며, 쉬라우드에서의 블레이드 각도 θ 도 동일한 방식으로 3차 베지어 곡선으로 나타낸다.

3.2. 반응면기법

본 연구에서는 최적설계를 위해 근사모델기반 최적설계 기법 중 일반적으로 널리 사용되는 반응면기법을 이용하였다. 반응면기법은 설계변수의 집합에 대한 3차원 CFD를 수행한 후 나온 목적함수의 값으로 근사적으로 반응면 함수를 구하는 기법이다. 반응면 함수는 일반적으로 다음과 같은 2차 다항식(quadratic polynomial)으로 나타낼 수 있다.

$$z = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

여기서 z 는 반응면 함수이며, x_i, x_j 는 설계변수, $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ 는 미정계수들이며 이 미정계수들은 3차원 CFD 결과로부터 최소자승법(least square method)을 이용하여 구한다.

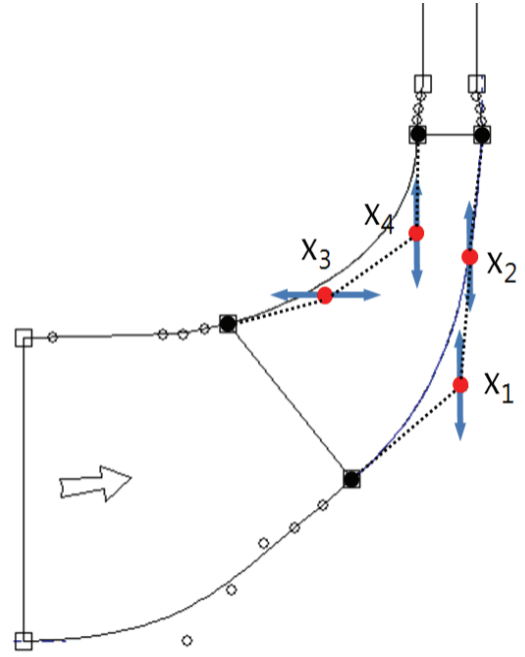


Fig. 2 Control points at the meridional plane

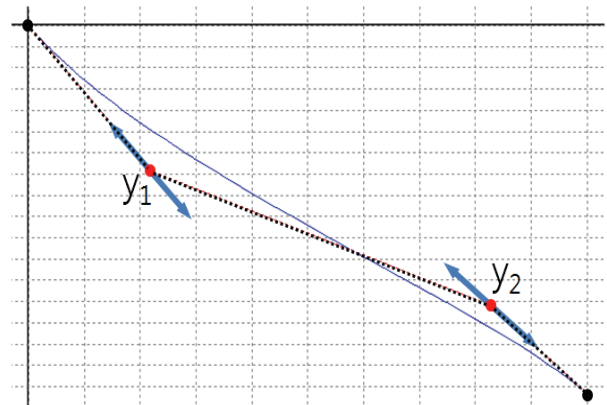


Fig. 3 Control points of the blade angle θ at hub

반응면기법에서 반응면 함수의 신뢰성을 확인하고 유의하지 않는 미정계수를 제거하여 반응면 함수의 신뢰도를 높일 수 있는데 이를 반응면 모형 축소(pooling)라고 한다. 반응면 모형 축소는 분산분석(ANOVA: analysis of variance)과 회귀분석(regression analysis)을 통해 이루어진다. 분산분석을 통해 반응면 함수의 각 항에 대해 유의한지를 파악하는데 유의성의 확인은 유의확률 p 가 $p < 0.05$ 인 조건으로 확인한다. 유의하지 않은 항들은 블록, 교호항, 제곱항 순으로 제거를 하면서 분산분석을 진행한다. 분산분석이 끝나면 회귀분석을 수행한다. 회귀분석은 반응면 함수가 실제값을 얼마나 잘 나타내는지 적합도를 측정하는 분석 방법이며, 반응면 함수의 R^2_{adj} (수정결정계수)로 판단한다. 즉 $R^2_{adj} > 0.9$ 면 반응면 함수가 매우 정확하고, $0.9 > R^2_{adj} > 0.7$ 면 반응면 함수가 비교적 정확하다고 판단할 수 있다^(8,9).

3.3. 실험계획법

주어진 조건에서 최소의 실험 회수로 정확도가 높은 반응면 함수를 구하기 위해 다양한 실험계획법(DOE: design of experiments)이 사용된다. 본 연구에서는 그 중 2차 회귀방정식을 도출할 수 있고, 직교블록(orthogonal block)을 만들기 용이하며, 3k 요인배치법이나 중심합성법(central composite design)에 비해 실험점(design point)의 수가 많지 않은 Box-Behnken 계획법⁽¹⁰⁾을 사용하였다. 범위를 무차원화하여 기준 형상값을 0으로 정하고, 설계 변수의 최대 변경 범위를 ±1로 설정한다. 임펠러 자오면 형상과 블레이드 각도 θ의 4개의 설계변수에 대해 각각 2개는 기준점에 고정시키고, 나머지 2개의 변수는 ±1점으로 형상을 변경한다. 이 때 기준 모델점(reference point)를 포함하여 각각 25개의 설계점이 나오며 각각의 경우에 대해 3D CFD를 수행한다.

4. 결 과

4.1. 자오면 형상 최적설계

자오면 형상 최적화를 위해 BladeGen에서 허브 및 쉬라우드의 베지어 곡선 통제점의 위치를 변경하여 Box-Behnken 계획법에 따라 25개의 각기 다른 형상을 만들고, TurboGrid로 격자를 생성한 후 CFX를 통해 25개의 해석 결과를 얻었다. 이 해석 결과로 얻은 효율값에 대해 다음과 같은 반응면 함수를 구하였다.

$$z = 88.5598 + 0.0579881x_1 - 0.198549x_2 - 0.243950x_3 + 0.294892x_4 + 0.00370204x_1x_1 - 0.0351933x_2x_2 - 0.0614011x_3x_3 + 0.0486267x_4x_4 - 0.0186494x_1x_2 + 0.0679196x_1x_3 - 0.00947596x_1x_4 + 0.00791276x_2x_3 + 0.0727265x_2x_4 - 0.0501529x_3x_4 \quad (3)$$

이 반응면 함수의 회귀분석 결과는 $R^2_{adj} = 86.9\%$ 이다. 이 반응면 함수의 정확도 향상을 위해 반응면 모형 축소를 수행하였다. 분산분석을 통해 유의확률 p가 $p < 0.05$ 인 항들을 블록, 교호항, 제곱항 순으로 제거를 하면서 분산분석을 진행하였다. 그 결과 다음과 같은 축소된 반응면 함수를 구하였다.

$$z = 88.5385 + 0.0579881x_1 - 0.198549x_2 - 0.24395x_3 + 0.294892x_4 \quad (4)$$

축소된 반응면 함수의 회귀분석 결과는 $R^2_{adj} = 88.3\%$ 로 축소되기 전 반응면 함수에 비해 신뢰도가 일부 향상되었음을 알 수 있다. 또한 R^2_{adj} 값이 90%에 근접한 값으로 반응면 모델을 상당히 신뢰할 수 있는 것으로 판단된다. 도출된 반응면 함수로 목적함수가 설계변수에 대해 선형적으로 변함

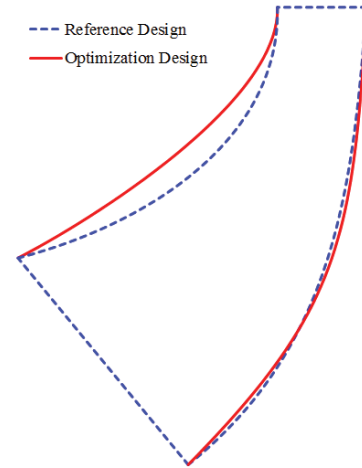


Fig. 4 Comparison of geometry by meridional shape optimization

을 알 수 있다. 따라서 설계변수 x_1, x_2, x_3, x_4 가 각각 1, -1, -1, 1일 때 반응면 함수가 최대값을 가지는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 자오면 형상 최적 설계에 따른 형상 변화를 나타낸 그림이다.

4.2. 블레이드 각도 최적설계

블레이드 각도 θ에 대해서도 자오면 형상 최적화와 동일한 방식으로 진행하였다. 그 결과 다음과 같은 반응면 함수를 구하였다.

$$z = 88.5598 + 0.266647y_1 - 0.0901037y_2 + 0.180453y_3 + 0.116894y_4 - 0.176534y_1y_1 - 0.00998235y_2y_2 + 0.0796787y_3y_3 - 0.0252255y_4y_4 - 0.0528602y_1y_2 + 0.0149031y_1y_3 + 0.00163989y_1y_4 - 0.218178y_2y_3 + 0.0198826y_2y_4 + 0.0155278y_3y_4 \quad (5)$$

이 반응면 함수의 회귀분석 결과는 $R^2_{adj} = 94.4\%$ 이다. 이 반응면 함수의 정확도를 향상을 위해 반응면 모형 축소를 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 축소된 반응면 함수를 구하였다.

$$z = 88.5296 + 0.266647y_1 - 0.0901037y_2 + 0.180453y_3 + 0.116894y_4 - 0.162703y_1y_1 + 0.0935103y_3y_3 - 0.218178y_2y_3 \quad (6)$$

축소된 반응면 함수의 회귀분석 결과는 $R^2_{adj} = 95.5\%$ 로 축소되기 전 반응면 함수에 비해 신뢰도가 일부 향상되었음을 알 수 있다. 또한 R^2_{adj} 값이 90% 이상으로 반응면 모델을 매우 신뢰할 수 있는 것으로 판단된다. 반응면 함수의 최적점을 구해보면, 설계변수 y_1, y_2, y_3, y_4 가 각각 0.9559, -1, 1, 1일 때, 최대값을 가지는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 블레이드 각도 최적 설계에 대한 형상 변화를 나타낸다.

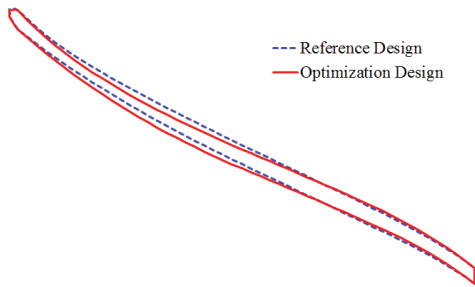


Fig. 5 Comparison of geometry by blade angle optimization

4.3. 설계점 성능 분석

형상 최적 설계를 통해 도출된 형상들을 설계점(design point)에서의 성능 비교를 진행하였다. 성능 비교를 위해 Table 2와 같이 형상을 정의하였다. 특히 design 4의 경우 별도의 형상 최적화를 수행하지 않고 자오면 형상과 블레이드 각도를 앞서 수행한 최적 설계를 동시에 반영한 설계이다. 즉 자오면 형상은 design 2에 적용된 자오면 형상의 최적 설계 결과를 적용하고, 블레이드 각도 θ 는 design 3에 적용된 블레이드 각도의 최적 설계 결과를 적용하였다.

이 4가지 형상에 대해 설계점에서 성능해석을 수행한 결과를 Table 3에 나타내었다. 반응면기법에 의한 최적설계의 결과는 기존 모델(design 1)에 비해 자오면 형상 최적화에 의한 모델(design 2)과 블레이드 각도 형상 최적화에 의한 모델(design 3) 모두 각각 0.80% 및 0.81% 효율 상승을 보였다.

실제 3D 수치해석에 의한 효율 값의 상승은 각각 0.62%, 0.78%로 반응면기법에 의한 예측값보다 조금씩 낮아진 결과를 보여주었다. 특히 블레이드 각도 최적 설계의 경우 거의 정확한 성능 예측값을 나타내었는데 이는 회귀분석에 의한

Table 2 Definition and description of design

item	description
design 1	기준 모델(reference model)
design 2	자오면 형상 최적 모델
design 3	블레이드 각도 최적 모델
design 4	자오면 최적화 + 블레이드 각도 최적화 모델

Table 3 Comparison of efficiency and pressure ratio by response surface method and 3D CFD at design point

item	efficiency(T-T) (%)		PR(T-T)
	RSM	3D CFD	3D CFD
design 1	88.53	88.56	1.402
design 2	89.33	89.18	1.413
design 3	89.34	89.34	1.416
design 4	-	89.47	1.423

수정결정계수 R^2_{adj} 의 값이 95.5%로 R^2_{adj} 값이 100%에 근접할수록 반응면 함수의 정확도가 높아진다는 사실과 부합한다. 이와 관련하여 수정결정계수 R^2_{adj} 의 값이 88.3%인 자오면 형상 최적화의 경우 반응면 함수의 예측 값과 3D CFD 결과 값이 다소 차이가 나는 것을 알 수 있다.

design 4의 경우 효율 상승은 0.91%로 자오면 형상 최적 설계에 의한 결과 0.62% 및 블레이드 형상 최적 설계에 의한 결과 0.78%보다 높은 값을 나타내었다. 이는 자오면 형상 최적화와 블레이드 각도 형상 최적화가 각기 다른 형태로 효율 향상에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6에서 자오면에서의 상대마하수 분포를 살펴보면 임펠러 유로(impeller passage)에서 최적 설계 후 스펠(span) 방향으로의 분포가 균일해졌음을 나타낸다. 특히 자오면 형

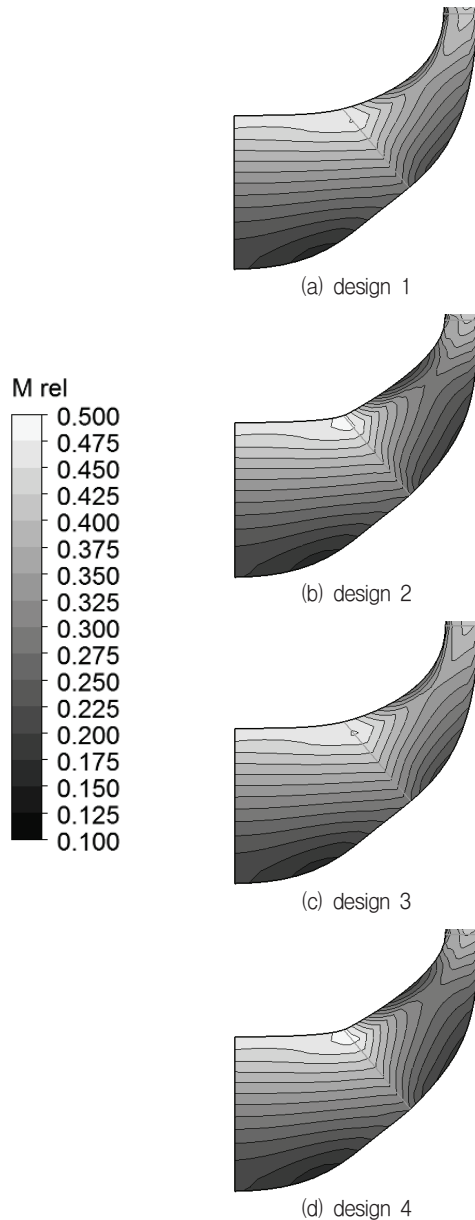


Fig. 6 Contours of relative Mach number at meridional surface

상 최적화가 적용된 design 2와 design 4에서 마하수 분포 균일도의 향상이 높음을 알 수 있다. Fig. 7은 날개 뒷전에 위치한 출구(outlet)에서의 엔트로피 분포를 나타낸다. 엔트로피 분포를 보면 형상 최적화가 적용될 경우 쉬라우드에 인접하여 나타나는 높은 엔트로피 영역이 얇아지고, 흡입면(suction side) 부근에서 국부적으로 나타나는 높은 엔트로피의 값이 낮아진다. 이 경우에도 자오면 형상 최적화가 적용된 design 2와 design 4에서 엔트로피가 많이 낮아진다.

Fig. 8은 미드스팬(mid-span)에서 전압력의 분포를 나타낸다. 형상 설계 최적화가 적용될 경우 출구에서의 전압력이 높게 나온다. 특히 블레이드 각도 최적화가 적용된 design 3과 design 4의 경우 그 값이 높게 나타난다.

4.4. 탈설계점 성능 분석

압축기의 형상 최적화는 설계점을 기준으로 수행하였다. 하지만 압축기는 항상 설계점에서만 작동하는 것이 아니며,

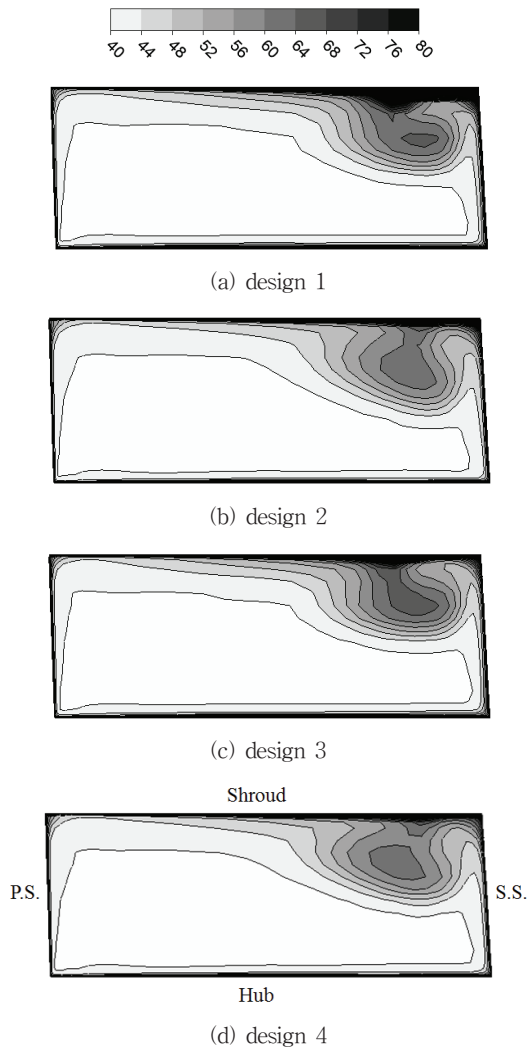


Fig. 7 Contours of static entropy at trailing edge(unit: J/kgK)

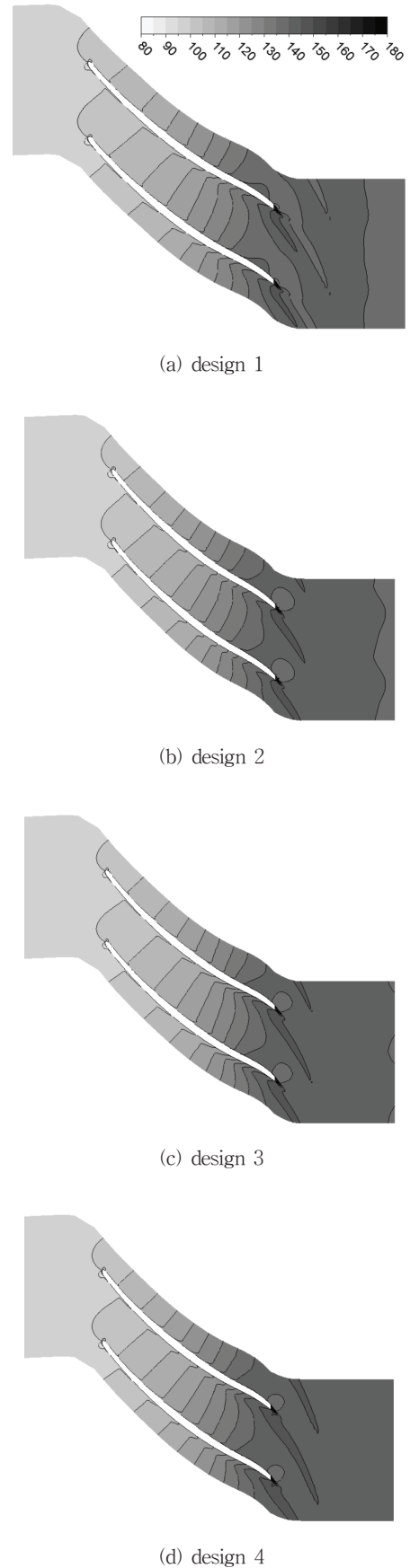


Fig. 8 Contours of total pressure at mid-span(unit: kPa)

탈설계점에서의 성능 변화도 비교해 보아야한다. 설계점에서의 성능 향상 정도에 비해 운전영역 전반의 성능이 현격히 저하된다면 최적 설계의 의미가 없는 것이다. 따라서 탈설계점에서의 성능 분석을 수행하였다. 정격 회전수에 대해 스톨(stall)과 초크(choke) 사이의 범위에서 유량을 변화시키면서 효율 및 전압력비를 구하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 각각 탈설계점에서의 효율과 전압력비를 나타낸다. 효율 그래프를 보면 design 3의 경우 설계점인 1kg/s 부근을 기준으로 저유량 영역에서 design 2와 design 4는 고유량 영역에서 기준 모델인 design 1에 비해 효율이 우수하게 나타난다. 전압력비의 경우에도 최적 설계된 모델이 기준 모델과 비교할 때 저유량 영역에서는 유사하게, 고유량 영역에서는 높거나 유사하게 나타난다. 탈설계점 영역의 효율 및 전압력비를 살펴보면 기준 모델과 유사 또는 일부 개선된 것으로 나타나 탈설계점에서의 성능에 문제가 없는 것으로 판단된다.

5. 결 론

원심압축기를 대상으로 효율 최적화를 위해 자오면 형상

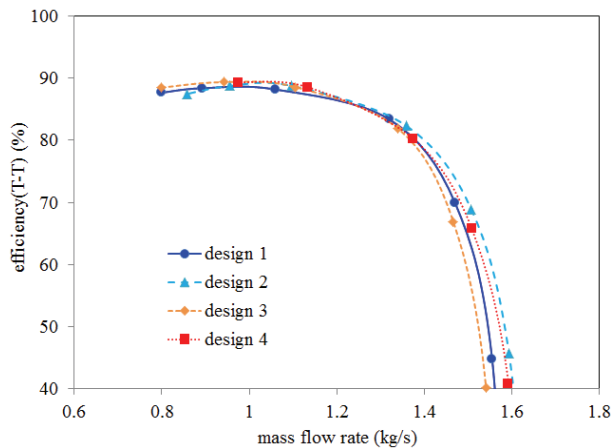


Fig. 9 Efficiency curves under off-design conditions

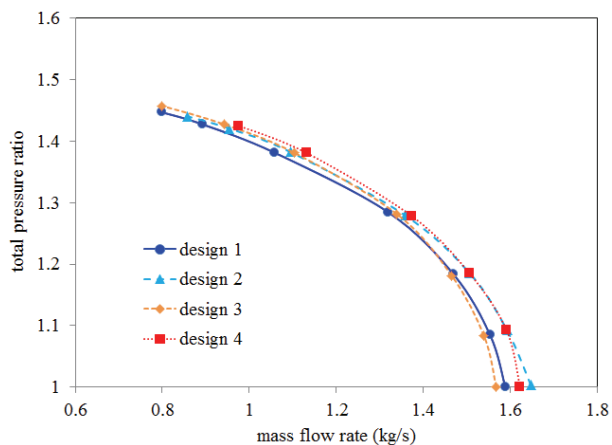


Fig. 10 Total pressure ratio curves under off-design conditions

과 블레이드 각도 θ 를 대상으로 설계 최적화를 수행하였다. 실험설계법을 사용하여 자오면 형상과 블레이드 각도를 3차 베지어 곡선 통제점을 설계변수로 하여 각각 4개의 설계 변수와 25개의 실험점에 대해 수치해석을 수행하였다. 3D 수치해석 결과를 사용하여 반응면 함수를 도출하였고, 반응면 모형 축소를 통해 반응면 함수의 정확도 향상시켰다.

도출된 반응면 함수를 바탕으로 4가지 설계(기준 설계, 자오면 형상 최적 설계, 블레이드 각도 최적 설계, 자오면 및 블레이드 각도 최적화를 동시에 적용한 설계)를 대상으로 설계점 및 탈설계점에서의 성능 해석을 수행하였다. 본 연구에서 적용한 설계 최적화를 통해 설계점에서 각각 0.62%, 0.78%, 0.91%의 효율 성능 향상을 보였다. 또한 탈설계점 성능해석을 통해 다양한 유량 영역에서도 기준 설계와 유사 또는 일부 개선된 성능을 확인하였다.

후 기

본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소 지원으로 수행되는 차세대 군용전원특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- (1) Knowles, J., Nakayama, H., 2008, "Meta-Modeling in Multiobjective Optimization," J. Branke et al. (Eds.), Multiobjective Optimization, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, LNCS 5252, pp. 245~284.
- (2) Bonaiuti, D., Zangeneh, M., 2009, "On the coupling of inverse design and optimization techniques for the multiobjective, multipoint design of turbomachinery blades," Journal of Turbomachinery, Vol. 131, Issues 2, art. no. 021014.
- (3) Kim, S., Park, J., Ahn, K., Baek, J., 2010, "Numerical investigation and validation of the optimization of a centrifugal compressor using a response surface method," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, Vol. 224, Issues 2, pp. 251~259.
- (4) Cho, S.-Y., Ahn, K.-Y., Lee, Y.-D., Kim, Y.-C., 2012, "Optimal design of a centrifugal compressor impeller using evolutionary algorithms," Mathematical Problems in Engineering, volume 2012, art. no. 752931.
- (5) Ma, Y., Engeda, A., Cave, M., Di Liberti, J.-L., 2010, "Improved centrifugal compressor impeller optimization with a radial basis function network and principle component analysis," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 224, Issues 4, pp. 935~945.

- (6) Wang, X.-F., Xi, G., Wang, Z.-H., "Aerodynamic optimization design of centrifugal compressor's impeller with Kriging model," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, Vol. 220, Issues 6, pp. 589~597.
- (7) Ueno, K., Bye, R .E., Hunter, K. S., 2003, "Compressor Efficiency Definitions," University of Colorado, <http://www.vairex.com/resources/Efficiency-0514-2.pdf>
- (8) Greenfield, T., Metcalfe, A. V., 2010, Design and Analyse Your Experiment with MINITAB, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, U.K.
- (9) Montgomery, D. C., 2005, Introduction to Statistical Quality Control, John Wiley & Sons Inc., U.S..
- (10) 박성현, 2003, 현대실험계획법, 민영사.