

## 다목적 최적화 기법을 이용한 고출력 원심압축기 형상 최적설계<sup>§</sup>

강현수\* · 이정민\* · 김운제\*<sup>†</sup>

\* 성균관대학교 기계공학부

### Shape Optimization of High Power Centrifugal Compressor Using Multi-Objective Optimal Method

Hyun Su Kang<sup>\*</sup>, Jeong Min Lee<sup>\*</sup> and Youn Jea Kim<sup>\*†</sup>

<sup>\*</sup> School of Mechanical Engineering, SungKyunKwan Univ.

(Received January 22, 2015 ; Revised February 27, 2015 ; Accepted February 28, 2015)

**Key Words:** Centrifugal Compressor(원심 압축기), Shape Optimization(형상 최적화), Response Surface Method (반응 표면법), Isentropic Efficiency(등 엔트로피 효율), Pressure Recovery Coefficient(압력회복계수)

**초록:** 본 연구에서는 원심압축기 임펠러와 디퓨저 블레이드 형상을 반응표면법과 다목적 유전알고리즘 기법을 사용하여 최적설계 연구를 수행하였다. 임펠러와 디퓨저의 블레이드 선단과 후단의 각도와 두께를 3 구간으로 나누어 설계변수로 적용하였으며 수치해석은 상용코드인 ANSYS CFX 를 사용하였다. 실험 계획법 중 많이 사용되는 중심합성계획을 이용하여 총 45 개의 설계점에 대한 값을 계산하였다. 계산된 결과를 바탕으로 반응표면을 생성하였으며 반응표면은 최적형상의 임펠러와 디퓨저를 선정하는데 이용하였다. 최적설계의 전 과정은 ANSYS DX 를 사용하였으며, 최적화의 결과로 원심압축기의 주요 성능변수인 등엔트로피 효율과 압력회복계수가 각각 0.3%, 5% 향상된 임펠러와 디퓨저 블레이드 형상을 제시하였다.

**Abstract:** In this study, a method for optimal design of impeller and diffuser blades in the centrifugal compressor using response surface method (RSM) and multi-objective genetic algorithm (MOGA) was evaluated. A numerical simulation was conducted using ANSYS CFX with various values of impeller and diffuser parameters, which consist of leading edge (LE) angle, trailing edge (TE) angle, and blade thickness. Each of the parameters was divided into three levels. A total of 45 design points were planned using central composite design (CCD), which is one of the design of experiment (DOE) techniques. Response surfaces that were generated on the basis of the results of DOE were used to determine the optimal shape of impeller and diffuser blade. The entire process of optimization was conducted using ANSYS Design Xplorer (DX). Through the optimization, isentropic efficiency and pressure recovery coefficient, which are the main performance parameters of the centrifugal compressor, were increased by 0.3 and 5, respectively.

#### - 기호설명 -

- P : 정 압력 [kPa]
- P<sub>0</sub> : 전 압력 [kPa]
- η : 등엔트로피 효율
- C<sub>p</sub> : 압력회복계수
- K : 압력손실계수

#### 1. 서론

산업현장에서 다양하게 사용되는 원심압축기는 고속으로 회전하여 유체에 압력에너지와 속도에너지를 전달하는 유체기계이다. 일반적으로 원심압축기는 인두서, 임펠러, 디퓨저 그리고 볼류트로 구성되어 있다. 특히, 임펠러와 디퓨저 형상은 원심압축기의 성능을 향상시키기 위한 중요한 요소이다. 원심압축기 형상은 다양한 변수들로 이루어져 있으며, 이 변수들과 원심압축기 공력 성능간의 복잡한 상관관계를 분석하고 최적형상 도출을

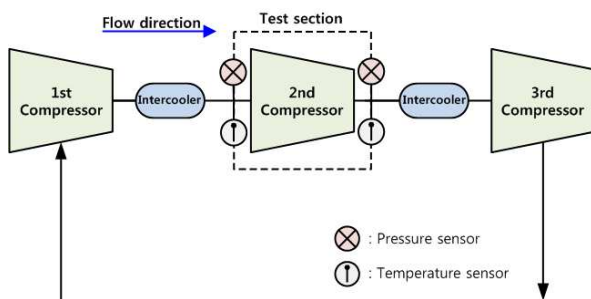
<sup>§</sup> 이 논문은 대한기계학회 2014년도 추계학술대회(2014. 11. 11.-14, 김대중컨벤션센터) 발표논문임.

<sup>†</sup> Corresponding Author, yjkim@skku.edu

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

**Table 1** Design parameters of the modeled compressor

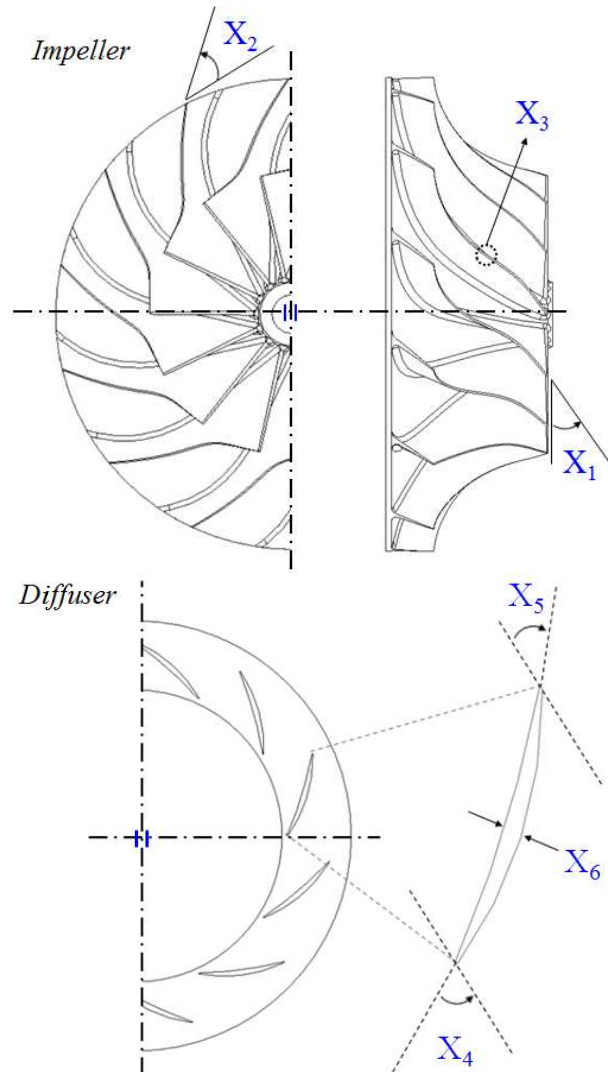
Design parameters	Description	Level 1	Level 2 (Ref.)	Level 3
$X_1$	Impeller LE angle [°]	45	50	55
$X_2$	Impeller TE angle [°]	32.4	36	39.6
$X_3$	Impeller blade thickness [mm]	2.08	2.6	3.12
$X_4$	Diffuser LE angle [°]	54	60	66
$X_5$	Diffuser TE angle [°]	54	60	66
$X_6$	Diffuser blade thickness [mm]	12	15	18

**Fig. 1** Schematic of the multi-stage compressor

위해 최적화에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

Kim 등<sup>(1~2)</sup>은 신경회로망 기법을 이용하여 임펠러 형상 치수를 최적설계 하였으며, Kim 등<sup>(3)</sup>은 실험계획법과 반응표면기법을 이용하여 임펠러 자오면 치수와 입, 출구각 변화에 따른 성능을 분석하고, 이를 최적설계 하였다. Kim 등<sup>(4)</sup>은 압축기 효율 향상을 위해 임펠러 각도와 디퓨저 깃 수, 각도를 반응표면법과 회귀 식을 통하여 최적설계 하였다. 그 외 많은 연구자들에 의해 원심압축기 최적설계가 진행되고 있다.<sup>(5~7)</sup> 하지만 고효율 다단 원심압축기에 대한 최적설계 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

본 연구에서는 15,000 HP 급 다단 원심압축기의 2 단 압축기 임펠러와 디퓨저 블레이드 형상에 대한 최적설계를 수행하였다. 먼저, 기본모델의 CFD 결과와 실험값과의 결과를 비교하여 타당성을 입증하였고, 원심압축기 임펠러와 디퓨저 형상에 대해서 실험계획법과 반응표면법을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 최종적으로 기본모델보다 높은 공력성능을 갖는 임펠러와 디퓨저 블레이드에 대한 최적 형상을 선정하였다.

**Fig. 2** Reference model and description of design parameters

## 2. 수치해석

### 2.1 기본모델

본 연구에 사용된 기본 모델은 총 3 단 원심압축기의 2 단 압축기이며(Fig. 1 참고) 3 차원 모델과 설계변수를 Fig. 2 에 나타내었다.

원심압축기의 직경은 약 800 mm 이며, 임펠러와 디퓨저 날개는 각각 14 개, 11 개로 구성되어 있다. 3 차원 형상은 ANSYS Blade editor 를 이용하여 설계하였다. 임펠러와 디퓨저의 최적화 과정과, 형상 치수의 설계변수화는 매우 중요한 과정인데, Table 1 에 블레이드 형상 최적화를 위해 선정된 기본적인 변수들에 대한 변수화를 나타내었다. 또한 설계변수의 수는 실험계획법에서의 시간절약을 위해 6 개로 제한하였다. 해석에 사용된 원심압

**Table 2** Boundary conditions applied in this study

Rotational velocity [RPM]		12,000
Working fluid		Air (ideal gas)
Turbulence model		Shear stress transport
Inlet	Pressure [kPa]	237.3
Outlet	Temperature [K]	318
	Mass flow rate [kg/s]	29.7
Interface		Frozen rotor, Periodic
Convergence criteria		1e-4

**Table 3** Comparison results of pressure ratio and total temperature

	Exp.	CFD
Pressure ratio	2.23	2.20
Exit total temperature [K]	392	390

축기의 작동유체는 공기이며, 출구 유량은 29.7 kg/s, 회전 속도는 약 12,000 Rpm 이다.

2.2 격자계 구성 및 경계조건

수치해석에 사용된 격자계는 ANSYS Turbogrid 를 사용하여 블레이드 주변에는 O-형, 그 외의 영역에는 H-형 격자를 사용하였으며, 임펠러와 케이싱의 팁 간극에서 15 겹의 격자를 생성하였다. Fig. 3 은 격자계를 나타내고 있으며, 격자 개수는 임펠러 904,000 개, 디퓨저 354,000 개 이다.

수치해석은 ANSYS CFX 14.5 를 이용하였으며, 해석영역은 임펠러 입구부터 디퓨저 출구까지 설정하였다. 작동유체는 이상기체를 사용하여 정상상태해석(steady-state analysis)을 수행하였으며, 난류모델은 유체기계 해석에서 비교적 정확히 예측하는 k- $\omega$  기반의 SST(shear stress transport)모델을 사용하였다.<sup>(8)</sup> 경계조건으로 입구에는 전압력을 설정하였고, 출구에는 전온도와 질량유량 조건을 적용하였다. 그 외의 벽면에는 점착조건(no-slip condition)을 적용하였고, 임펠러와 디퓨저 경계에는 frozen rotor 조건을 사용하였다. 자세한 경계조건은 Table 2 에 나타내었다.

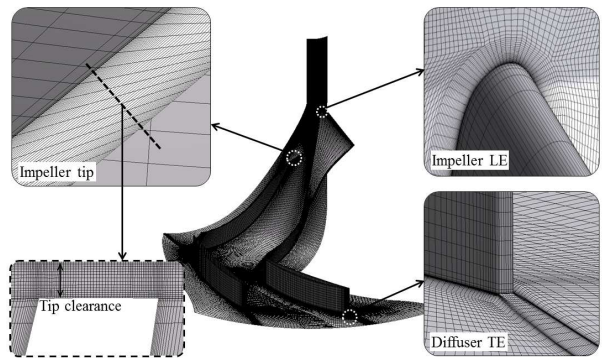
원심압축기 전체 성능을 평가하기 위해서 다음식을 이용하여 등엔트로피 효율과 압력비를 분석하였다.

$$\text{isentropic efficiency, } \eta = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (1)$$

$$\text{pressure ratio, } p_r = \frac{\text{outlet pressure}}{\text{inlet pressure}} \quad (2)$$

**Table 4** Parameters of DOE

	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	$\eta$	C <sub>p</sub>	K	P <sub>R</sub>
1	46.00	38.88	2.99	57.87	60.27	14.73	87.48	0.4224	0.2137	2.1605
2	50.44	32.48	2.62	58.67	62.93	17.40	86.04	0.4446	0.1928	2.2333
3	51.11	35.52	2.92	54.13	62.67	13.13	86.44	0.4870	0.1286	2.2121
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
43	45.11	33.12	2.60	61.87	58.13	16.60	86.18	0.4198	0.2079	2.1800
44	50.89	32.96	2.16	60.27	55.73	15.67	86.10	0.4349	0.2205	2.2166
45	48.67	37.12	3.02	62.40	65.07	16.33	87.01	0.4198	0.2115	2.1989



**Fig. 3** Grid systems

디퓨저 성능을 나타내는 변수 중 많이 사용되는 것이 압력회복계수와 압력손실계수이다. 압력회복계수란 디퓨저 입구에서의 동압(dynamic pressure)이 디퓨저를 지난후에 얼마나 정압으로 변환되었는지를 나타내는 지표이고, 전압력손실계수란 디퓨저 입구에서의 동압에 대한 디퓨저 입출구 전압력 손실의 비율을 나타낸다.

$$\text{pressure recovery coefficient, } C_p = \frac{P_2 - P_1}{P_{01} - P_1} \quad (3)$$

$$\text{total pressure loss coefficient, } K = \frac{P_{01} - P_2}{P_{01} - P_1} \quad (4)$$

기본모델에 대한 수치해석 결과를 검증하기 위하여 압력비와 출구 온도를 실제 데이터와 비교하였으며 높은 적합도를 보였다(Table 3 참고).

3. 최적설계

3.1 실험계획법

실험계획법은 정해진 설계점을 바탕으로 설계영역을 선택하고 빈틈없이 탐색하며 성능변수의 분석을 용이하게 한다. 본 연구에서는 전산 수치 실

험에서 많이 사용되고 있는 중심합성계획법(central composite design, CCD)을 사용하였는데, 이 방법은 최소의 수치해석 결과로 최대의 정보를 획득할 수 있는 장점이 있다. 중심합성계획은 다음 식과 같이 구성되어 있다.

$$y = 2^{k-1} + 2k + 1 \quad (5)$$

여기서  $y$ 는 실험의 개수,  $k$ 는 설계변수의 수이다. 설계변수의 수는 6개 이므로 총 45개의 실험 개수가 도출되며, 실험값과 수치해석의 결과를 Table 4에 나타내었다.

### 3.2 반응표면법

Non-parametric regression (이하 NPR) 방법은 다른 반응표면법과는 달리 실험값을 통하지 않고 자료로부터 알고자 하는 설계점의 결과값을 추정한다. 이러한 회귀분석은 주어진 자료의 특성으로부터 잡음(noise)를 제거 또는 감소시킬 수 있으며, 그렇기 때문에 자료 해석에 있어 보다 원자료에 근접하는 회귀모형을 구할 수 있다는 장점을 지닌다.<sup>(9)</sup> 본 연구에서 사용한 반응표면의 적합도 평가는 실제 추출 점에서의 값과 반응표면에서 계산한 값의 오차에 대한 평균값인 RMSE(root mean square error)를 사용하였다.<sup>(10)</sup>

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (6)$$

여기서,  $y_i$ 는 실험점  $i$ 에서의 응답변수 함수이고,  $\hat{y}_i$ 는 근사모델(반응표면)의 함수 값이며,  $N$ 은 근사모델 평가를 위한 실험개체 수를 나타낸다.

### 3.3 최적설계

최적설계 방법으로는 다목적 유전 알고리즘(multi-

objective genetic algorithm)을 사용하였는데, 이 방법은 두 가지의 목적함수를 갖는 장점이 있다. 먼저, 목적함수로 원심압축기 전체 성능변수인 등엔트로피 효율과 디퓨저의 성능변수인 압력회복계수를 본 연구의 두 가지 목적 함수로 정의하였다.

목적함수가 선정된 다음 단계로 제한조건을 선정하였다. 현재 수준의 압력비를 갖되, 발생하는 손실은 현재수준 보다 낮게 하는 조건을 정의하였다. 최적화는 다음 식으로 정의되는 정식화 과정을 갖게 된다.

Find	$X_i$ ( $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ )
To maximize	Isentropic efficiency, $\eta$ Pressure recovery coefficient, $C_p$
Subject to	$2.2034 \leq$ Total pressure ratio, $P_r$ $0.2094 \geq$ Total pressure loss coefficient, $K$
	$45 \leq X_1 \leq 55$
	$32.4 \leq X_2 \leq 39.6$
	$2.08 \leq X_3 \leq 3.12$
	$54 \leq X_4 \leq 66$
	$54 \leq X_5 \leq 66$
	$12 \leq X_6 \leq 18$

(7)

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 기본모델

먼저, 원심압축기 성능변수를 계산하였는데, 등엔트로피 효율은 86.72%, 압력비는 2.20를 얻었다. 그리고, 디퓨저 성능변수인 압력회복계수와 압력손실계수는 각각 0.43, 0.2이 나왔다.

Fig. 4에 임펠러와 디퓨저 자오면에서의 압력 분포를 나타내었다. 임펠러 입구에서부터 디퓨저 출구까지 압력이 점차 상승하는 것을 확인할 수 있으며, 임펠러 고속회전에 의하여 압축이 잘 일어나고 있는 것을 알 수 있다.

### 4.2 민감도 분석

Fig. 5는 NPR 방법의 설계변수 변화에 따른 응답변수의 민감도를 나타낸다.  $X$  축은 입력변수로 그 범위를 0에서 1까지 무차원화 하였으며, 기본모델의 설계변수 값은 0.5를 의미한다. 첫째, 등엔트로피 효율에 대한 응답표면 결과를 보면,  $X_5$ 는 출력변수와 양의 관계를 보이며 입력변수 값이 0.8 부근에서 최대값을 나타내었다. 반면  $X_4$ 는 음의 관계를 가지며 입력변수 값이 0.2 부근에서 최대값을 나타내었다. 그 외의 변수( $X_1, X_2, X_3, X_6$ )들의 효과는 상대적으로 낮았다. 두번째 압력회복계수에 관한 응답표면 결과에서  $X_1, X_3, X_5$ 는 출력변

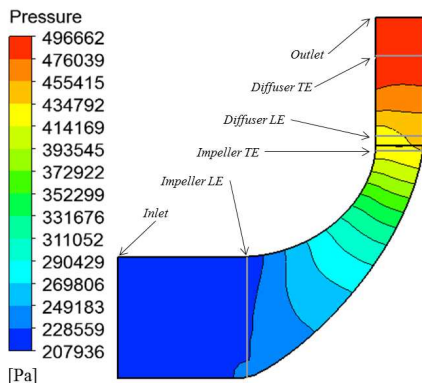


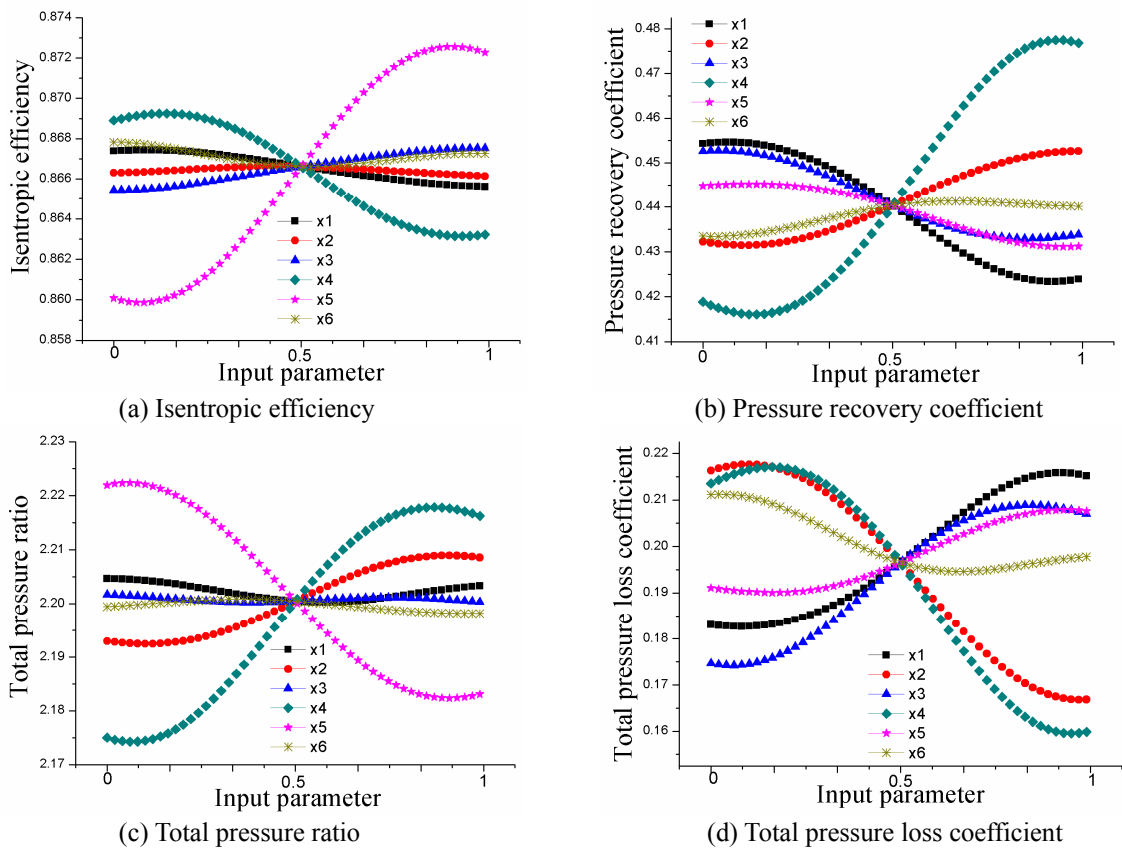
Fig. 4 Pressure distribution on the meridional plane

**Table 5** Comparison results between RSM and CFD analyses

Optimal model	$X_1$ [°]	$X_2$ [°]	$X_3$ [mm]	$X_4$ [°]	$X_5$ [°]	$X_6$ [mm]	$\eta$	$C_p$	K	$P_R$
RSM	52.57	38.25	2.41	55.70	61.25	14.80	87.006	0.4583	0.1841	2.2043
CFD							87.008	0.4553	0.1912	2.2061

**Table 6** Comparison results between Ref. model and newly designed model

Results	$X_1$ [°]	$X_2$ [°]	$X_3$ [mm]	$X_4$ [°]	$X_5$ [°]	$X_6$ [mm]	$\eta$	$C_p$	K	$P_R$
Ref. model	50	36	2.6	60	60	15	86.719	0.4321	0.2094	2.2034
New model	52.57	38.25	2.41	55.70	61.25	14.80	87.008	0.4553	0.1912	2.2061



**Fig. 5** Results of sensitivity with various design parameters

수와 음의 관계,  $X_2$ ,  $X_4$ 는 양의 관계를 보였다. 세 번째 압력비에 관한 응답표면 결과에서는  $X_2$ 와  $X_4$ 가 출력변수와 양의 관계를 보였으며  $X_5$ 는 음의 관계를 보였다. 하지만  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_6$ 가 출력변수에 미치는 영향은 상대적으로 낮았다. 마지막, 압력손실계수의 응답표면에서는  $X_1$ ,  $X_3$ ,  $X_5$ 는 출력변수와 양의 관계를 보였고  $X_2$ ,  $X_4$ ,  $X_6$ 은 음의 관계를 보였다. 이 결과를 통해 등엔트로피 효율, 압력회복계수, 압력비에서 양의 관계를 갖는 변수와

압력손실계수에서 음의 관계를 갖는 변수들은 원심압축기의 공력성능에 긍정적인 영향을 미치는 중요한 설계 변수들임을 알 수 있다.

### 4.3 최적화 결과

반응표면법과 수치해석의 최적화 결과를 Table 5에 나타내었다. 등엔트로피 효율에 대한 근사모델과 CFD 결과의 상대오차는 0.002%가 발생하였고, 압력회복계수는 0.6%, 압력손실계수는 3.8%, 압력

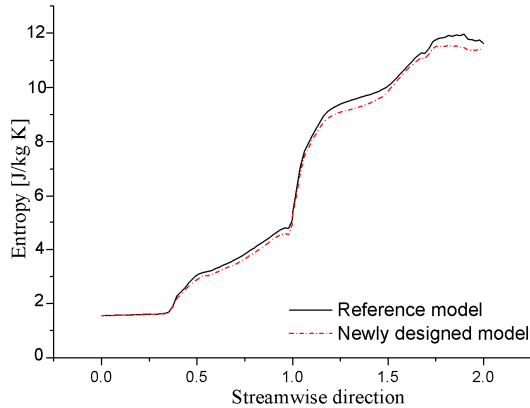


Fig. 6 Comparison results of entropy distribution between the reference model and the newly designed model

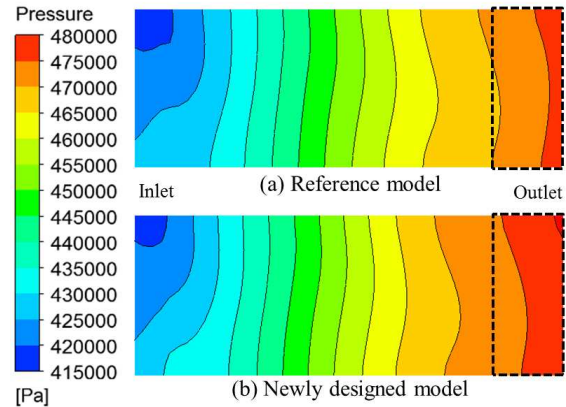


Fig. 7 Pressure distributions at the diffuser meridional plane

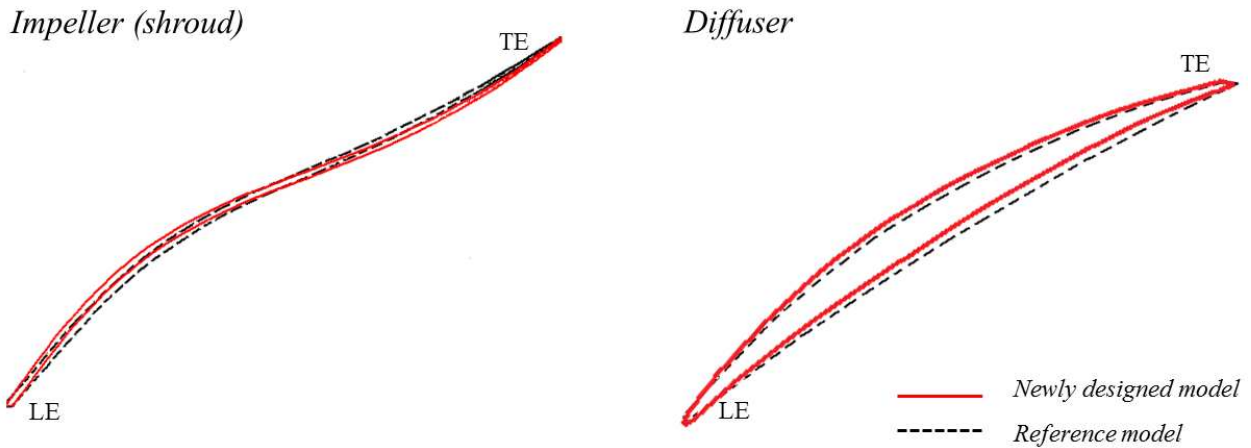


Fig. 8 Comparison of geometry between the ref. model and newly designed model

비는 0.08%의 차이를 보였다. 특히 등엔트로피 효율과 압력비의 근사모델은 다른 출력변수에 비해 정확히 예측하였다. 결과적으로 등엔트로피 효율과 압력비의 근사모델 적합도는 아주 높다는 것을 유추할 수 있다.

Table 6 에 기본모델과 최적모델의 결과를 비교하였다. 최적설계 결과로 목적함수이자 원심압축기의 주요 성능 변수인 등엔트로피 효율은 약 0.3% 증가하였고, 디퓨저 성능변수인 압력회복계수는 5.4% 증가하였다. 제한조건인 압력손실계수는 3.8% 감소하였으며, 압력비는 현재의 수준을 유지하였다.

Fig. 6 에는 원심압축기 유로 내 엔트로피 분포를 나타내었다. 그래프 X 축의 0 은 임펠러 입구, 1 은 임펠러와 디퓨저 경계, 2 는 디퓨저 출구를 각각 의미한다. 전체적으로 최적모델의 엔트로피가 기본모델에 비해 낮으며, 출구에서 역시 낮은 경향을 보였다. 출구에서의 엔트로피는 유로내에서

축적된 손실을 나타내므로 초기모델 보다 최적모델의 효율 상승과 압력손실계수 감소의 이유를 도식적으로 알 수 있다.

Fig. 7 에 디퓨저 자오면에서의 압력상승 분포를 나타내었다. 최적모델이 기본모델에 비해 높은 압력상승 분포를 나타내고 있는데, 이는 최적화를 통한 결과임을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 원심압축기 임펠러와 디퓨저 블레이드에 대한 형상 최적설계를 수행하였다. 최적설계 과정에서 실험계획법과 반응표면법의 사용으로 다수의 설계변수와 성능간의 상관관계를 분석하여 원심압축기의 주요한 설계변수들을 선정하였다.

형상 최적설계의 결과로 최적 모델은 초기모델과 같은 수준의 압력비를 갖되 등엔트로피 효율은 0.3% 증가, 압력회복계수는 5.3% 증가하며 압력손

실계수는 3.8% 감소하는 임펠러와 블레이드 형상을 도출하였다(Fig. 8 참고).

### 참고문헌

#### (References)

- (1) Kim, J. H., Choi, J. H., Husain and Kim, K. Y., 2010, "Multi-objective Optimization of a Centrifugal Compressor Impeller through Evolutionary Algorithms," *J. Power and Energy*, Vol. 224, pp. 711~721.
- (2) Kim, J. H., Choi, J. H. and Kim, K. Y., 2009, "Design Optimization of a Centrifugal Compressor Impeller using Radial Basis Neural Network Method," *Proceeding of ASME Turbo Expo*, Vol. 7, pp. 443~451.
- (3) Kim, S., Choi, Y. S., Yoon, J. Y. and Kim, D. S., 2008, "Design Optimization of a Centrifugal Pump Impeller Using DOE," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 11, No.3, pp.36~42.
- (4) Kim, S. M., Park, J. Y., Ahn, K. Y. and Baek, J. H., 2009, "Numerical Investigation and Validation of the Optimization of a Centrifugal Compressor using a Response Surface Method," *J. Power and Energy*, Vol. 224, pp. 251~259.
- (5) Benni, E. and Pediroda, V., 2001, "Aerodynamic Optimization of an Industrial Centrifugal Compressor Impeller using Genetic Algorithm," *Proceedings of Eurogen*, Athens, pp.467~472.
- (6) Benni, E. and Tourlidakis, A., 2001, "Design Optimization of vaned Diffusers for Centrifugal Compressors using Genetic Algorithms," *American Institute Aeronautics and Astronautics Paper*, pp. 2001~2583.
- (7) Wang, X. F., Xi, G. and Wang, Z. H., 2006, "Aerodynamic Optimization Design of Centrifugal Compressor's Impeller with Kriging Model," *J. Power and Energy*, Vol. 220, pp. 589~597.
- (8) Bardina, J. E., Huang, P. G. and Coakley, T., 1997, "Turbulence Modeling Validation," *28th AIAA Fluid Dynamics Conference*, pp. 1997~2121.
- (9) Moon, Y. L., Cho, T. M. and Kim, D. K., 2000, "Nonparametric Regression Estimation for Hydrologic Application," *Proceeding of KSCE*, Vol. 3, pp. 111~114.
- (10) Ju, B. H., Cho, T. M., Jung, D. H. and Lee, B. C., 2006, "An Error Assessment of the Kriging based Approximation Model using a Mean Square Error," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 30, No. 8, pp. 923~930.