

자오면 형상을 고려한 원심압축기 임펠러 최적설계

김진혁* · 최재호** · 김광용***†

Design Optimization of a Centrifugal Compressor Impeller Considering the Meridional Plane

Jin-Hyuk Kim*, Jae-Ho Choi**, Kwang-Yong Kim***†

Key Words : Centrifugal compressor(원심압축기), Meridional plane(자오면), Bezier curve(베지어 커브), Design optimization(최적설계), Latin hypercube sampling(라틴하이퍼큐브샘플링)

ABSTRACT

In this paper, shape optimization based on three-dimensional flow analysis has been performed for impeller design of centrifugal compressor. To evaluate the objective function of an isentropic efficiency, Reynolds-averaged Navier-Stokes equations are solved with SST (Shear Stress Transport) turbulence model. The governing equations are discretized by finite volume approximations. The optimization techniques based on the radial basis neural network method are used for the optimization. Latin hypercube sampling as design of experiments is used to generate thirty design points within design space. Sequential quadratic programming is used to search the optimal point based on the radial basis neural network model. Four geometrical variables concerning impeller shape are selected as design variables. The results show that the isentropic efficiency is enhanced effectively from the shape optimization by the radial basis neural network method.

1. 서론

전산유체역학(CFD)은 실험적으로 측정하기 힘든 터보기계 내의 유동속도 및 압력분포 등을 예측할 수 있어 터보기계 내의 복잡한 삼차원 유동구조를 파악하는 데 큰 도움을 주고 있다. 아울러, 전산유체역학을 바탕으로 하는 수치최적화기법은 터보기계의 효율, 압력 및 서지마진(surge margin) 등의 성능을 효과적으로 증진시킬 수 있는 수단으로 최근 많은 관심을 모으고 있다.

지난 십여 년간, 컴퓨터 성능의 발전에 힘입어 삼차원 전산 유체역학을 바탕으로 한 수치최적화기법이 고효율을 목적으로 하는 터보기계 블레이드의 공력설계에 적용된 사례가 Ahn과

Kim⁽¹⁾, Jang과 Kim⁽²⁾ 및 Trigg 등⁽³⁾ 많은 연구자들에 의해 제시되었다.

터보기계 중, 터보 차저와 산업용 가스터빈에 많이 사용되는 원심압축기의 성능을 개선시키려는 연구도 활발히 진행되고 있다. Bonaiuti 등⁽⁴⁾은 실험계획법을 이용한 최적화기법을 수행하여 천음속 원심압축기의 성능을 향상시킨 바 있다. 그들은 설계변수로 임펠러의 각과 자오면 상에서 베지어(Bezier) 커브를 이용하여 임펠러의 형상을 자유로이 변화시켰다. Bonaiuti와 Pediroda⁽⁵⁾는 CFD 코드를 이용한 최적화를 수행하여 원심압축기의 성능을 향상시켰으며, Cosentino⁽⁶⁾ 등은 신경회로망기법과 유전 알고리즘을 결합하고, 15개의 설계변수를 이용하여 원심압축기의 효율을 향상시켰다.

본 연구에서는 터보 차저에 적용되는 원심압축기 임펠러의 효율을 향상시키고자 삼차원 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 해석과 신경회로망기법(radial basis neural network)을 이용한 수치최적설계를 수행하였다. 최적설계 수

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 삼성테크윈 파워시스템연구소

*** 인하대학교 기계공학부

† 교신저자, E-mail : kykim@inha.ac.kr

행에 앞서 원심압축기의 내부 유동에 대한 RANS 해석결과를 실험결과와 비교함으로써 수치해석의 타당성을 검증하였다. 설계변수는 Bonaiuti 등⁽⁴⁾이 사용한 임펠러 자오면 상에서 베지어 곡선을 구성하는 변수를 사용하였으며, 목적함수는 효율로 정의하고 이를 최대화하고자 하였다.

2. 유동해석방법

본 연구에서는 원심압축기 내부 유동장을 비압축성 삼차원 정상상태로 가정하고, ANSYS사의 상용 CFD 소프트웨어인 ANSYS CFX-11.0⁽⁷⁾을 사용하여 임펠러를 대상으로 해석을 수행하였다. 본 연구 대상인 임펠러에 대한 자세한 사양은 Table 1에 기술하였으며, 자오면 상에서 허브(hub), 쉬라우드(shroud), 블레이드 및 주 유동 영역 등은 Fig. 1에 도식화하였다.

해석 대상의 원심압축기 임펠러는 블레이드와 스플리터가 각각 6개씩 구성이 되어 있으나, 계산시간의 단축과 수렴성의 향상을 위해 인접하는 두 블레이드 사이의 유동장이 회전방향에 대해 주기적으로 형성되어 있다고 가정하여 하나의 유로에 대해서만 해석을 수행하였다. 블레이드 표면 인근에는 O형 격자계, 그 외의 영역에는 H/J/C/L형 격자계를 사용하였으며, 모두 육면체 격자계로 구성하였고, 격자의존성을 제거하기 위한 테스트는 블레이드 하나의 유로에 대하여 총 18만개에서 50만개의 격자 수 사이에서 이루어졌으며, 계산에 사용될 최적격자수는 총 26만개로 결정되었다.

원심압축기를 통과하는 유체는 표준상태의 공기로 하였고, 지배방정식은 유한체적법으로 이산화 되었다. 각 경계조건에 대한 사항은 Table 2에 상세히 기술하였다.

3. 목적함수 및 설계변수

수치최적화를 위해서는 기본적으로 설계변수와 목적함수의 선정이 중요시 되어야 하며, 본 연구에서는 원심압축기 임펠러의 효율을 향상시키고자 목적함수를 다음과 같이 정의되는 등 엔트로피 효율로 선정하였다.

$$\eta = \frac{T_{t.in} \left(\left(\frac{P_{t.out}}{P_{t.in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)}{T_{t.out} - T_{t.in}} \quad (1)$$

여기서 P_t 와 T_t 는 각각 전압력과 전온도를 나타내고, 하첨자 in 과 out 은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 각각 임펠러 입구

(Station 1)와 임펠러 출구(Station 1)를 나타낸다.

Table 1 Design specifications of the centrifugal impeller

Design mass flow rate, kg/s	0.45
Rotational speed, rpm	65,550
Total pressure ratio	1.96
Tip clearance, mm	0.50
Number of blade (splitter)	6 (6)
Impeller outlet diameter, mm	102.37

Table 2 Condition for numerical calculation

Working fluid	Air (Ideal gas)
Inlet	Total pressure Total temperature
Outlet	Mass flow rate
Turbulent closure	SST model
Interface area	Frozen-rotor

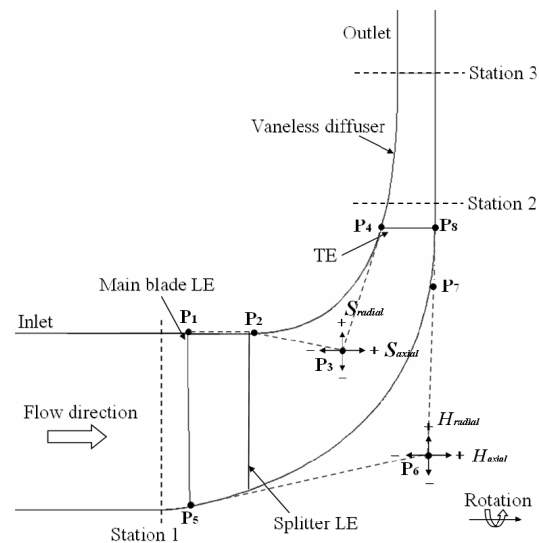


Fig. 1 Meridional view of the centrifugal compressor passage

γ 는 비열비로 1.4를 사용하였다. 실험점들에서 목적함수는 RANS 해석에 의해 평가되며, 공간 내에서의 분포는 신경회로망기법에 의해 모델링 된다.

본 연구에서는 임펠러의 자오면 상의 유로를 최적화하고자 이 유로를 제어할 수 있도록 하는 변수를 설계변수로 사용하고자 하였다. 일반적으로 베지어 곡선은 임의의 면에 대한 기하학적 정의가 간단하고 체계적인 형상변화가 가능하다는 장점이 있는데,⁽⁸⁾ 여기에서는 최적설계시 유로를 자유로이 변경하기 위해 3차 베지어 곡선으로 표현하였다. Fig. 1에 도시한 바와 같이 허브와

쉬라우드를 구성하는 각 4개의 제어점 중 각 3개의 제어점은 고정시킨 상태에서 각 1개의 제어점을 축방향 및 반경방향으로 이동시켜 유로형상을 변경할 수 있도록 하였다. 쉬라우드 유로를 형성하는 제어점 중의 하나인 P3의 축방향 및 반경방향 움직임을 각각 Saxial, Sradial로 정의하고, 허브 유로를 형성하는 제어점 중의 하나인 P6의 축방향 및 반경방향 움직임을 각각 Haxial, Hradial로 정의하여 본 최적설계에서 설계변수로서 사용하였다.

4. 최적화기법

본 연구에서는 대리모델(surrogate model)의 일종인 신경회로망⁽⁹⁾을 모델에 사용한 최적화기법을 적용하여 원심압축기 임펠러의 성능향상을 위한 형상최적화를 수행하였다.

신경회로망은 경험으로부터 배우고 기존 자료로부터 예측하는 인간의 기능을 알고리즘으로 모사한 것으로, 뉴런(neuron)이라는 기본 요소에 의해 망의 예측능력을 통하여 가중치들을 반영한다. 신경회로망은 래디얼베이스 전달함수와 선형출력으로 구성되는 두 겹의 망을 통하여 구성된다.⁽¹⁰⁾

대리모델을 구성하기 위해서는 설계공간 내에서 실험점 혹은 설계점을 설정할 필요가 있는데, 이 점들을 얻기 위하여 실험계획법(design of experiment)으로 라틴하이퍼큐브샘플링(LHS)⁽¹¹⁾을 사용하여 30개의 실험점을 얻었다. 그 뒤, RANS 해석을 통하여 실험점들에 대한 목적함수를 평가하고, 평가된 목적함수들을 바탕으로 신경회로망 모델이 구성되어 최적점이 산출된다. 최적화 과정의 순서도를 Fig. 2에 나타내었다.

신경회로망모델을 구성한 후 SQP(Sequential Quadratic Programming)⁽¹⁰⁾를 사용하여 신경회로망기법으로부터 최적점을 탐색하였다. 그러나 구배기반의 탐색알고리즘인 SQP는 초기값에 따라서 최적점이 변경될 수 있으므로 초기값을 여러 번 변경해가며 신경회로망모델의 최종 최적점을 구하였다.

5. 결과 및 검토

앞에서 기술된 원심압축기에 대한 수치계산의 검증을 위하여 최적설계의 대상이 되는 기준 원심압축기에 대해 RANS 해석을 수행하고 그 결과를 시험결과와 비교하였다. Fig. 3의 특성곡선에서 볼 수 있는 바와 같이 각 유량점에서 예측한 압력비 및 효율은 대부분 시험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

최적설계과정에서 변경될 4가지 설계변수들의 상한과 하한은 설계점 및 그 인근에서의 각 변수별 민감도와 자오면 유로의 이상적 변화 등을 고려한 예비 계산결과를 통해 결정하였다.

Table 3은 기준형상과 최적화 문제로부터 도출된 최적형상

의 각 설계변수 값을 나타내고 있다. Table 3과 Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 최적형상에서는 유로의 곡률 반경이 증가하여 자오면 상에서 유동 방향이 더 원만하게 변경될 수 있는 형상이 도출되었으며, 설계변수 중에는 허브 유로의 반경방향 변화(Hradial)가 가장 크게 나타났다.

Table 4는 기준형상과 신경회로망기법에 의한 최적형상의 예측된 목적함수 값과 수치해석을 통해 얻어진 목적함수 값을 비교하고 있다. 최적설계 결과, 신경회로망기법을 통한 목적함수는 87.20%의 효율을 예측하였고, 이를 바탕으로 RANS 해석을 통해 얻어진 목적함수는 86.98%의 효율을 예측함으로써 신경회로망기법을 통한 예측값이 타당함을 알 수 있다. 한편 본 최적화 과정을 통해 목적함수인 효율을 1% 향상시켰으며, 압력비도 0.01 증가하였다.

자오면 방향에 따른 블레이드 각 분포는 동일한 각이 유지되도록 하였고, 반경방향에 따른 블레이드 각 분포는 Fig. 5

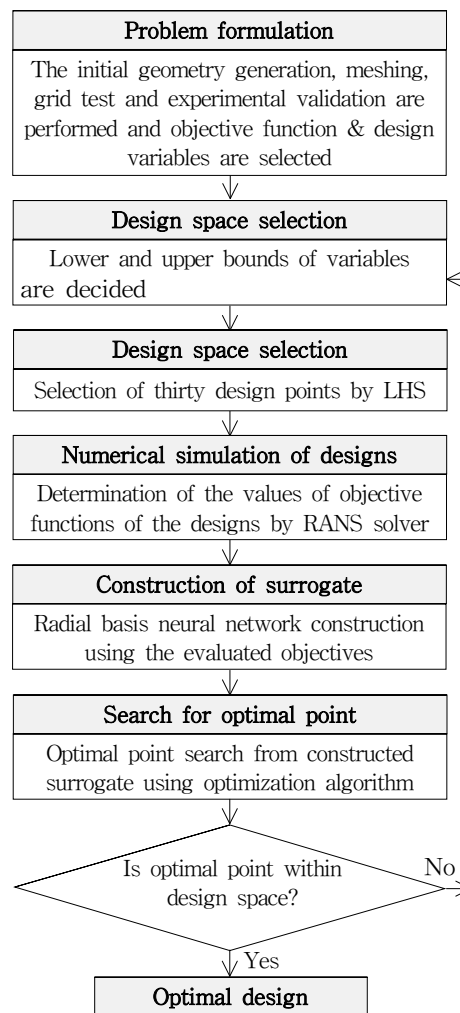


Fig. 2 Optimization procedure

에 나타내었다. 여기서 반경은 날개 선단(LE)의 허브에서 0가 되고 후단(TE)에서 1이 되도록 무차원화 하였다. 반경방향에 따라 최적형상이 기준형상에 비해 블레이드 각이 미소하게 변경된 모습을 볼 수 있는데, 이는 Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 자오면 상에서 최적형상 유로의 곡률 반경이 증가함에 따라 동일한 축방향 길이에서 허브와 쉬라우드의 유로가 다소 상승하였고, 이로 인해 반경에 따른 블레이드 각도 미소하게 변경된 것으로 볼 수 있다. 따라서 출구에서 허브와 팁 사이의 거리는 동일하지만 중간경로의 반경이 증가해서 압력 상승에 기여한 것으로 생각할 수 있다.

Fig. 6은 기준형상과 최적형상의 블레이드 흡입면(suction surface)에 대한 유선분포를 보여주고 있다. 기준 블레이드의 경우 앞전(leading edge) 부분에서 박리가 발생하는 불안정한 유동을 보여주고 있으나 최적 블레이드의 경우 그 현상이 현저히 감소된 모습을 볼 수 있다. 이는 최적화된 형상에서는 블레이드 중간영역에서의 유로가 좁아짐에 따라 현 설계점에서 최적의 유로가 도출됨으로서 상대적으로 정압상승이 원만하게 이루어져서 유동박리가 줄어든 것으로 생각된다.

Table 3 Optimim design variables

Design	Saxial(mm)	Sradial(mm)	Haxial(mm)	Hradial(mm)
Reference	-27.32	34.09	-15.44	19.72
Optimum	-27.76	34.66	-15.55	21.32

Table 4 Results of Optimization

Design	Pressure ratio	Objective (efficiency, %)	
		Surrogate	RANS
Reference	1.96	-	85.98
Optimum	1.97	87.20	86.98

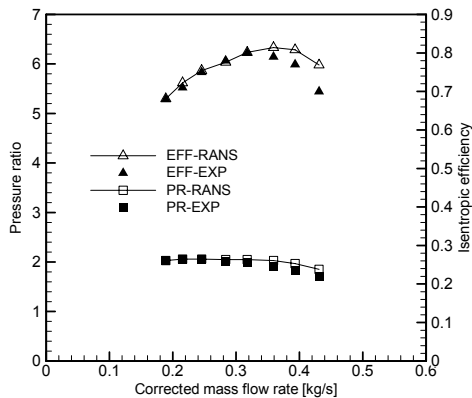


Fig. 3 CFD Results validation with experimental data

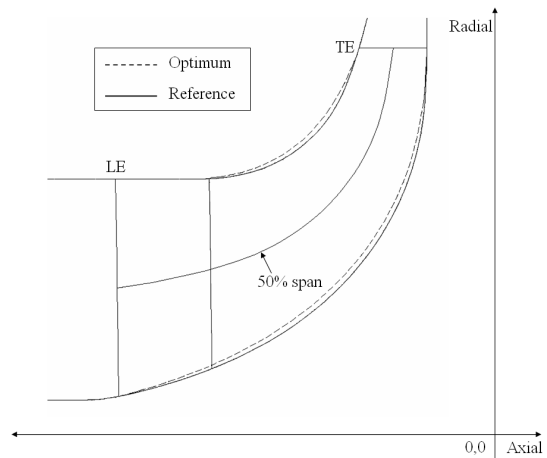


Fig. 4 Comparison of reference and optimum blades

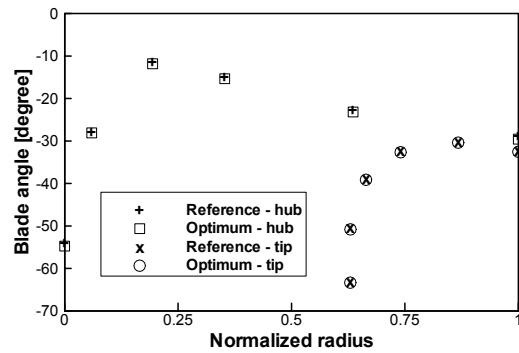


Fig. 5 Blade angle distributions

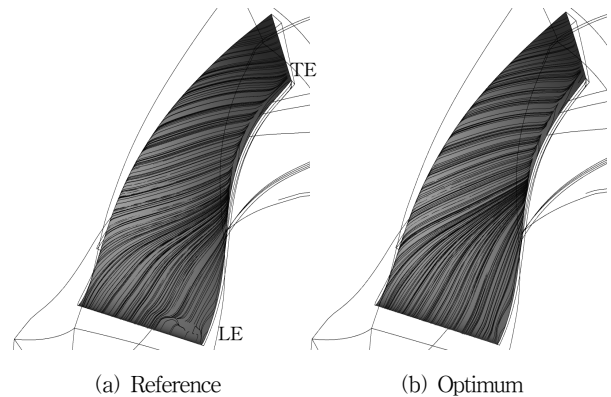
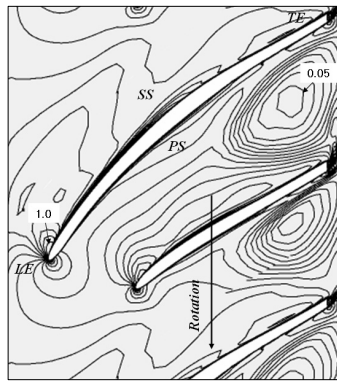
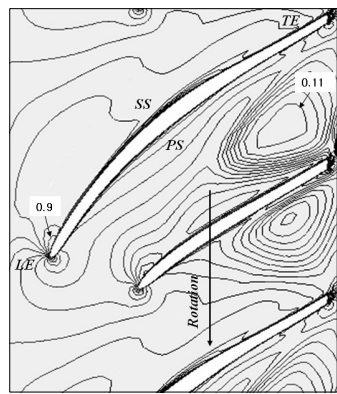


Fig. 6 Comparison of streamline at blade suction surface

기준형상과 최적형상에서의 블레이드 내 상대 마하수를 비교하기 위해 Fig. 7에 각 블레이드의 80% 스펠에서의 분포를 나타내었다. 블레이드 앞전 흡입면에서의 상대 마하수는 기준형상의 것이 약 1로서 더 높게 나타나고 있어 이로 인한 압력



(a) Reference



(b) Optimum

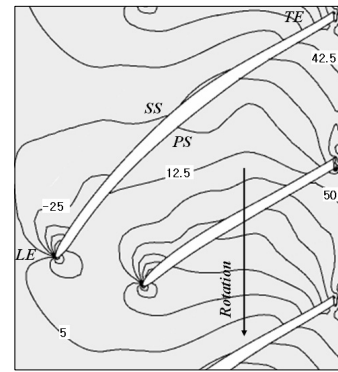
Fig. 7 Relative mach number contours at 80% span

손실이 최적형상에 비해 더 크며, 블레이드 후방 영역에서는 기준형상에서의 상대마하수가 0.05로서 최적형상의 것에 비해 더 낮게 나타나서 유동 박리로 인한 손실이 더 증가되는 것으로 생각된다.

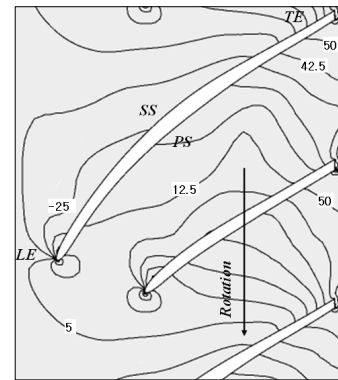
Fig. 8은 각 블레이드의 80% 스패에서의 압력분포를 보여 주고 있다. 기준형상에 비해 최적형상의 블레이드 중간영역에서 정압상승이 더욱 원만히 상승되는 모습을 볼 수 있다. 이는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 최적형상의 자오면 유로의 곡률 반경이 증가함에 따라 동일한 축방향 길이에서의 유로가 미소하게 상승함으로써 블레이드 앞전 흡입면에서 최적형상의 상대마하수가 기준형상에 비해 감소하여 정압상승이 더욱 원만히 상승되는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 9는 기준형상과 최적형상에 대한 블레이드 출구면에서의 압력분포를 비교하고 있다. 주 블레이드와 스플리터 블레이드의 압력면 부근에서 최적형상의 압력변화가 더 높은 것을 보이고 있으며, 특히 블레이드의 허브 인근에서 최적형상의 압력이 기준형상에 비해 높은 변화를 보이고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 최적형상에서 유동장이 더 안정되어 효율과 압력

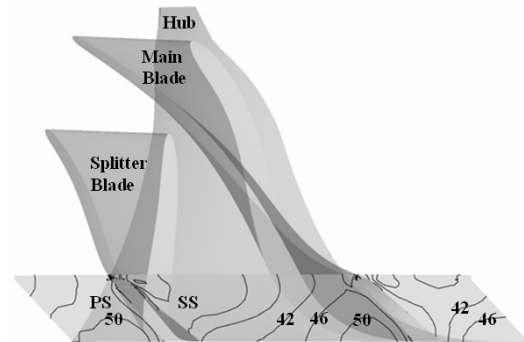


(a) Reference

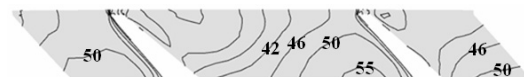


(b) Optimum

Fig. 8 Static pressure contours at 80% span(unit: KPa)



(a) Reference



(b) Optimum

Fig. 9 Static pressure contours at trailing edge(unit: KPa)

비가 상승한 것은 자오면 상의 유로가 최적화 과정을 통해 현실계점 유량에 더 적합하게 설계되었기 때문으로 생각된다.

6. 결론

본 연구에서는 터보 차저에 사용되는 원심압축기의 성능을 향상시키고자 삼차원 RANS 해석과 신경회로망기법을 결합한 수치최적화로 임펠러의 형상을 최적화하였다. 수치계산의 검증은 위하여 RANS 해석결과와 기존 원심압축기의 시험결과를 비교하여 타당성을 검증하였다. 임펠러 자오면 상의 허브와 쉬라우드에서 베지어 커브와 관련된 4개의 변수를 사용하여 얻은 30개의 실험점을 바탕으로 신경회로망기법에 의한 최적화 과정을 수행한 결과, 목적함수인 등엔트로피 효율을 1% 향상시키는 결과를 얻었고, 아울러 압력비도 기준형상에 비해 향상된 결과를 얻었다. 또한 최적형상에서 성능이 향상된 주요원인을 유동 분석을 통하여 고찰하였다.

본 연구의 결과를 토대로 RANS 해석과 신경회로망기법을 결합한 수치최적설계는 향후 원심압축기의 성능을 향상시킬 수 있는 유용한 최적설계 방법이 될 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Ahn, C. S., and Kim, K. Y., 2003, "Aerodynamic Design Optimization of a Compressor Rotor with Navier-Stokes Analysis," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A, Journal of Power and Energy, Vol. 217, No. 2, pp. 179~184.
- (2) Jang, C. M., and Kim, K. Y., 2005, "Optimization of a Stator Blade Using Response Surface Method in a Single-Stage Transonic Axial Compressor," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part A, Journal of Power and Energy, Vol. 219, No. 8, pp. 595~603.
- (3) Trigg, M. A., Tubby, G. R., and Sheard, A. G., 1999, "Automatic Genetic Optimization Approach to Two-Dimensional Blade Profile Design for Steam Turbines," Journal of Turbomachinery, Vol. 121, pp. 11~17.
- (4) Bonaiuti, D., Arnone, A., Ermini, M., 2006, "Analysis and Optimization of Transonic Centrifugal Compressor Impellers Using the Design of Experiments Technique," Journal of Turbomachinery, Vol. 128, October, pp. 786~797.
- (5) Bonaiuti, D., and Pediroda, V., 2001, "Aerodynamic Optimization of an Industrial Centrifugal Compressor Impeller Using Genetic Algorithms," Proc., Eurogen 2001.
- (6) Cosentino, R., Alsalihi, Z., and Van den Braembussche, R., A., "Expert System for Radial Impeller Optimization," Proc., Fourth European Conference on Turbomachinery, Paper No. ATI-CST-039/01.
- (7) ANSYS CFX-11.0, 2006, Ansys Inc.
- (8) Benini, E., 2004, "Three-Dimensional Multi-Objective Design Optimization of a Transonic Compressor Rotor," Journal of Propulsion and Power, Vol. 20, No. 3.
- (9) M. J. L. Orr., 1996, "Introduction to radial basis neural network," Center for cognitive science, Edinburgh University, Scotland, UK.
- (10) MATLAB®, 2004, The Language of Technical Computing, Release 14, The Math Works Inc.
- (11) JMP® 5.1, 2004, SAS Institute, Inc.