

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.5.433

원심압축기 최적화를 위한 연구(II): 인공지능망과 유전자 알고리즘

최형준*, 박영하*, 김재실**, 조수용***

Optimization of a Centrifugal Compressor Impeller(II): Artificial Neural Network and Genetic Algorithm

Hyoung-Jun Choi*, Young-Ha Park*, Chaesil Kim** and Soo-Yong Cho***

ABSTRACT

The optimization of a centrifugal compressor was conducted. The ANN (Artificial Neural Network) was adopted as an optimization algorithm, and it was learned and trained with the DOE (Design of Experiment). In the DOE, it was predicted the main effect and the interaction effect of design variables to the objective function. The ANN was improved in the optimization process using the GA (Genetic Algorithm). When any output at each generation was reached a standard level, it was re-calculated by the CFD (Computational Fluid Dynamics) and it was applied to develop a new ANN. After 6th generation, the prediction difference between ANN and CFD was less than 1%. A pareto of the efficiency versus the pressure ratio was obtained through the 21th generation. Using this method, the computational time for the optimization was equivalent to the time consumed by the gradient method, and the optimized results of multi-objective function were obtained.

초 록

원심압축기 임펠러의 최적화연구를 수행하였다. 최적화를 위한 알고리즘은 ANN를 기본으로 하였으며, 초기의 ANN 학습은 DOE를 사용하여 ANN을 효과적으로 형성하였다. DOE에서는 설계변수가 목적함수에 미치는 주효과와 상호 교호작용에 대한 예측을 할 수 있었다. 최적화과정에서 ANN의 향상을 위하여 GA를 사용하여 각 세대에서의 설계변수에 따른 목적함수가 일정값 이하가 되는 경우에는 수치해석을 통하여 ANN을 세대별로 향상시켰다. 6세대 이 후에는 ANN에 의한 예측값과 CFD의 예측값과의 차이가 1% 미만에 도달하였다. 총 21세대를 거쳐서 압축비와 효율과의 pareto를 형성할 수 있었다. 본 연구에서는 최적화를 위한 계산시간을 기울기 기반의 최적화시간 정도로 단축하면서도 다목적함수의 최적화의 결과를 얻을 수 있었다.

Key Words : Centrifugal Compressor(원심압축기), ANN(인공지능망), GA(유전자알고리즘), DOE(실험계획법), Impeller Optimization(임펠러 최적화)

I. 서 론

† 2010년 12월 13일 접수 ~ 2011년 4월 20일 심사완료

* 정희원, 경상대학교 항공공학과 대학원

** 정희원, 창원대학교 기계공학과

*** 정희원, 경상대학교 항공기부품기술연구센터

교신저자, E-mail : sycho@gnu.kr

경남 진주시 가좌동 900번지

원심압축기는 단당 압축비가 축류형 압축기에 비하여 높고, 같은 회전수에 있어서 축류형에 비하여 공기유량의 변화폭이 넓은 장점이 있다. 또한 제작이 축류형에 비하여 간단

하므로 소형엔진, 터보차저, 산업용 압축기 등에 많이 사용되고 있다. 원심압축기는 케이싱 안에 장착된 임펠러와 디퓨저로 구성되어 있다. 일반적으로 임펠러의 회전운동으로 흡입 공기에 운동에너지를 가하고 디퓨저에서 운동 에너지를 압력으로 변환한다. 디퓨저를 나온 고압의 공기는 스크롤을 통하여 다른 장치로 고압의 공기를 전달하도록 되어 있으며, 작동 조건의 변화가 많은 경우에는 디퓨저를 설치하지 않고 사용하기도 한다.

압축기의 작동안정성을 높이기 위하여 임펠러의 익형을 단순히 반경방향으로 설계하지 않고 임펠러 출구에서 익형방향을 회전방향에 대하여 뒤쪽으로 향하도록 설계하기도 한다. 아울러 공력효율을 향상하기 위하여 임펠러의 익형을 3차원 형상으로 설계한다. 압축기에서의 효율이나 압축비는 원심압축기의 부분품 형상과 작동조건에 직접적인 관련이 있다. 특히 주어진 작동조건에서는 임펠러의 익형형상과 임펠러에서의 허브와 쉬라우드 부분의 유로(passage)형상에 의하여 많은 영향을 받게 된다. 임펠러의 익형형상이나 유로의 형상설계를 위한 여러가지 방법[1-3]이 제시되어 있으나 대부분 설계자의 경험과 직관에 의하여 형상이 결정된다. 이렇게 결정된 형상은 추가적으로 전산유동해석을 수행하여 얻어진 내부유동장의 결과를 이용하여 부분적인 보완이 이루어진다.

이러한 설계방식에 대응하여 형상설계와 관련된 설계변수를 설정하고 최적화 기법으로 임펠러의 형상과 유로를 구하는 연구[4-9]들이 수행되고 있다. 하지만 이들의 연구에서는 수치적인 연구만 수행되었으며 실험적으로 이를 규명하지 않았다. 일반적으로 원심압축기에서의 성능실험을 수행하기가 상당한 어렵다. 원심압축기에서의 회전수가 고속화됨에 따라서 드라이브와 원심압축기 축 사이에 토오크메터를 설치하는데 어려움이 있으며, 아울러 높은 회전수를 갖는 토오크메터를 구하기가 쉽지 않다. 또한 등엔트로피 효율을 측정하는데 있어서도 장치에 충분한 단열조치가 쉽지 않으며, 측정하는 온도의 불확도에 따라서 결과값에 많은 영향을 받는다.

최적화의 연구에 있어서 효율이나 압축비를 예측하는 계산기법은 실험결과와 비교하여 검증하는 것이 상당히 중요한 과정이나 실험의 어려움으로 인하여 이러한 과정을 거치지 못하는 점이 있다. 따라서 최적화를 위한 초기

형상은 최적화를 위하여 설정한 설계변수를 기준으로 설계된다. 이 후 초기형상으로부터 초기의 목적함수를 계산하고, 최적화기법을 적용하여 얻어진 최종 형상에서 얻어진 목적함수와 초기의 차이로부터 최적화 기법의 적용으로 향상된 목적함수의 폭을 제시하였다.

본 연구에서는 원심압축기를 설계하는데 있어서, 정확한 설계변수의 설정에 대한 연구결과[10]를 바탕으로 이미 실험된 Eckardt 임펠러[11-13]를 기준으로 최적화연구를 수행하였다. 따라서 초기형상의 실험결과로부터 성능 예측을 위한 수치해석 기법에 대한 과정을 검증하고, 초기 형상에 대한 목적함수를 설정하였다. 아울러 본 연구는 기존에 사용되고 있는 임펠러일지라도 형상을 3차원 측정기를 통하여 얻으면, 수치데이터로부터 적절한 설계변수를 설정하여 최적화할 수 있음을 보여주고자 한다.

II. 설계변수

원심압축기의 효율이나 압축비에 영향을 미치는 인자는 단순히 임펠러의 익형 형상뿐만 아니라 임펠러의 유로형상도 영향을 미치게 된다[9]. 따라서 원심압축기의 최적화를 위하여서는 임펠러의 형상을 변경할 수 있는 설계변수와 유로의 형상을 조정할 수 있는 설계변수를 선정하였다. 따라서 두 형상이 동시에 최적화 과정에서 조정되도록 하였다. Fig. 1은 유로를 베지어곡선으로 형상화하는 조정점

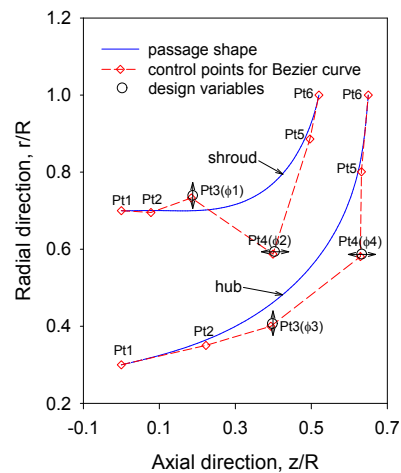


Fig. 1. Control points of Bezier curves for the meridional passage and design variables

Table 1. Location of control points for meridional passage and design variables

Points	Hub		Shroud	
	z/R	r/R	z/R	r/R
Pt1	0.0	0.300	0.0	0.700
Pt2	0.223	0.350	0.078	0.695
Pt3	0.394	0.400(ϕ_3)	0.184	0.733(ϕ_1)
Pt4	0.629(ϕ_4)	0.581	0.399(ϕ_2)	0.587
Pt5	0.632	0.801	0.496	0.886
Pt6	0.650	1.0	0.520	1.0

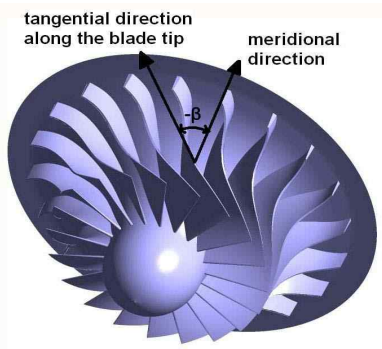
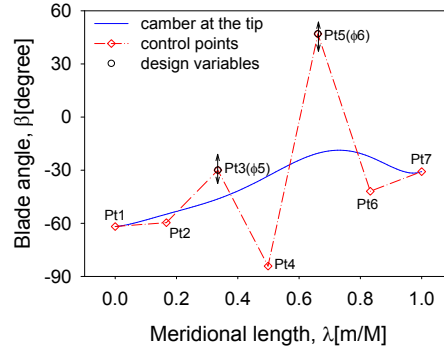


Fig. 2. Geometric definition of impeller blade angle at the tip

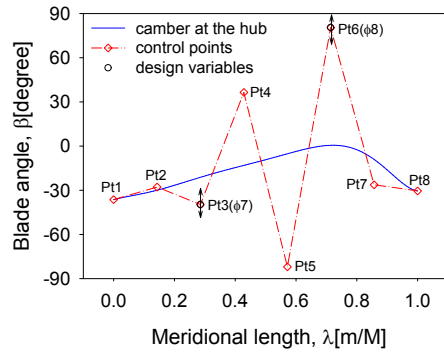
(control points)과 유로의 형상을 변경하기 위한 설계변수를 보여주고 있다. Fig. 1에서의 z와 r은 축방향과 반경방향을 의미하며, R은 임펠러 출구에서의 반경을 나타낸다.

Table 1은 허브와 쉬라우드에서의 조정점 값과 초기형상에서의 설계변수의 값을 보여주고 있다. 쉬라우드에서는 Pt3과 Pt4가 설계변수 ϕ_1 과 ϕ_2 로 선정되며, ϕ_1 은 r 방향으로만 변경되고 ϕ_2 는 z 방향으로만 변경되어진다. 마찬가지로 허브에서는 Pt3과 Pt4가 설계변수 ϕ_3 과 ϕ_4 로 선정되며 ϕ_3 은 r 방향으로만 변경되고 ϕ_4 는 z 방향으로만 변경된다. 따라서 유로형상을 변경하기 위한 설계변수는 총 4개가 된다.

임펠러 익형의 형상을 변경하기 위하여서는 허브와 팁에서의 익형 캠버선을 기준으로 익형각을 조정하여 형상을 변경하였다. Fig. 2는 팁에서의 익형각의 정의를 보여주고 있는데 익형각은 자오선의 방향과 익형의 접선방향이 이루는 사이각으로 나타내며 접선방향이 회전 방향으로 향하면 익형각을 양으로 나타내었



(a) at the tip



(b) at the hub

Fig. 3. Control points for changing the impeller blade angles and design variables

Table 2. Control points for blade angle

Points	Tip		Hub	
	λ	β [angle]	λ	β [angle]
Pt1	0.0	-61.845	0.0	-36.399
Pt2	0.167	-59.627	0.143	-27.859
Pt3	0.335	-30.022(ϕ_5)	0.286	-39.754(ϕ_7)
Pt4	0.499	-84.158	0.429	36.429
Pt5	0.661	46.949(ϕ_6)	0.572	-82.025
Pt6	0.833	-41.912	0.714	80.409(ϕ_8)
Pt7	1.0	-30.853	0.857	-26.313
Pt8	-	-	1.0	-30.514

다. Fig. 3은 임펠러의 팁과 허브에서의 익형각의 분포를 나타내며 익형각의 형성을 위한 베지어곡선의 조정점과 설계변수를 나타내고 있다. Fig. 3에서 m은 자오선의 길이를 나타내며 M은 최대거리를 나타낸다. 따라서 λ 는 normalized 된 거리를 나타낸다.

Table 2는 허브와 팁에서의 조정점의 각도와 익형각의 변경을 위한 설계변수의 값을 보

Table 3. Limit of design variables

design variables	minimum	initial	maximum
ϕ_1	0.733	0.733	0.808
ϕ_2	0.224	0.399	0.494
ϕ_3	0.275	0.400	0.525
ϕ_4	0.504	0.629	0.679
ϕ_5	-40.0	-30.022	-5.0
ϕ_6	15.0	46.949	70.0
ϕ_7	-50.0	-39.754	-28.0
ϕ_8	50.0	80.409	90.0

여주고 있다. 팀에서는 Pt3과 Pt5가 설계변수 ϕ_5 과 ϕ_6 으로 선정되며, 자오선에서의 위치는 자오면에서의 유로형상이 변경되어도 자오선의 길이를 기준으로 동일한 분포의 위치에 고정되도록 하여, 각도의 변화만 발생되도록 하였다. 마찬가지로 허브에서는 Pt3과 Pt6이 설계변수 ϕ_7 과 ϕ_8 로 선정되고 팀에서와 같이 자오면의 위치는 자동적으로 얻어지도록 하고 각도의 변화만 있도록 하여 익형의 형상조정을 하였다. 따라서 익형형상을 조정하기 위한 설계변수는 4개가 되어 본 연구에서는 총 8개의 설계변수를 선정하였다.

선정된 8개의 설계변수로부터 설계변수의 값을 변경하게 되면 임펠러의 유로형상과 익형의 형상변화가 동시에 이루어진다. 설계변수의 값을 초기 형상의 설계변수값으로 부터 변화폭을 크게 증가하면 익형이 뒤틀려져 사용이 불가능한 형상으로 된다. 따라서 이러한 변화의 발생을 방지하기 위하여서는 각각의 설계변수를 동시에 변경하여 한계값(최대, 최소)을 설정하여야 한다. 본 연구에서는 설계변수의 값을 점차적으로 변경하면서 이에 대한 임펠러의 3차원 형상을 획득하여 설계변수의 변화에 대한 한계값을 설정하였으며 Table 3에서는 각 설계변수에 대한 최대, 최소값들을 보여주고 있다.

III. 목적함수

압축기의 최적화를 위한 목적함수는 사용자의 요구나 적용에 따라서 달라질 수 있다. 예를 들어서 고효율을 원하는 경우와 압축비가 높은 것을 원하는 경우가 있을 수 있다. 본 연구에서는 식(1)과 같이 효율의 영향(P_η)과 압축비의 영향(P_Π)을 동시에 고려한 목적함수(Obj)를 설정하였다.

$$Obj = \omega_\eta P_\eta + \omega_\Pi P_\Pi \quad (1)$$

식(1)에서 ω 는 가중치(weighting function)이다. P_η 은 계산에서 얻어지는 전효율(η_{t-t})과 이상적인 최대효율(100%)과의 차이를 식(2)와 같이 효율에 대한 목적함수로 설정하였다. 따라서 효율의 증대를 얻기 위하여서는 P_η 은 최소화되도록 하였다.

$$P_\eta = 1 - \eta_{t-t} \quad (2)$$

압축기의 성능을 나타내는데 있어서 효율과 마찬가지로 중요한 인자로는 압축비가 있다. 압축비는 사용목적에 맞도록 초기에 설정되는데 사용목적에 따라 요구되는 압축비보다 낮아도 문제가 되지만 또한 필요하는 압축비보다 높아도 동력의 손실만 증가하게 된다. 따라서 압축비는 요구하는 압축비(Π_{rq})의 일정 범위를 벗어나는 경우를 회피하여야 한다. 본 연구에서는 이 범위를 식(3)과 같이 초기 형상에서 설정한 압축비의 1%이내로 설정하였다. 만일 이 범위를 벗어나면 목적함수의 값이 증대하게 된다.

$$P_\Pi = \max\left[\left(\frac{|\Pi - \Pi_{rq}|}{\Pi_{rq}} - 0.01\right), 0.0\right] \quad (3)$$

본 연구에서는 목적함수를 최소화하는 것이 요구하는 압축비를 만족하면서 효율을 최대화하게 된다. 최적화를 위한 연구에서는 가중치는 둘 다 1.0으로 설정하였다.

임펠러 익형의 익형각이 최적화과정에서 설계변수의 변화에 따라서 변경되므로 임펠러 익형에서 발생하는 기계적인 응력도 변경된다. 익형이 심하게 휘어지게 되면 응력이 증가하게 되어 허용응력을 초과하게 된다. 따라서 이러한 경우는 사용상에 문제가 발생되므로 제한조건으로 임펠러에 가해지는 응력이 허용응력을 초과되지 않도록 하는 제한조건을 식(4)와 같이 설정하였다.

$$P_\sigma = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{allowable}}{\sigma_{allowable}} < 0 \quad (4)$$

IV. 최적화

식(1)의 목적함수가 최소가 되도록 하는 값을 찾기 위하여서는 여러 가지 방법이 있다. 간단한 방법으로 기울기 기반의 방법을 적용할 수 있다. 팬과 같이 형상의 변화에 대하여 목

적함수의 비선형적인 변화가 미미하다면 최대한 양호한 초기값을 설정[14]하여 기울기기반의 방법을 적용하면 된다. 하지만 원심압축기의 경우에는 설계변수의 변화에 대하여 목적함수의 변화에 비선형적인 요소가 강하므로 기울기기반의 적용은 지엽적인 최적화의 결과를 얻게 될 수 있다. 따라서 이를 피하기 위하여서는 반응표면법[7,15-16]이나 유전자알고리즘[17-20]과 같은 방법을 적용하여야 한다. 하지만 이들 방법의 적용은 설계변수의 개수에 따라서 많은 계산시간을 요하기 때문에 두 방법을 혼합한 방법[6,8]을 적용하기도 하며 인공지능(ANN)과 유전자알고리즘(GA)을 혼합한 방법[5,9,21]을 사용하기도 한다.

본 연구에서는 원심압축기의 최적화에서 계산결과와 비선형성으로 인한 지엽적인 최적화 결과를 피하면서 최적화에 달성되는 계산시간의 단축을 위하여, 실험계획법(DOE)과 GA 및 ANN방법을 혼합하여 최적화를 수행하였다. 이를 위하여 Fig. 4에서 보여주는 계산과정처럼, 우선 설정된 설계변수를 기준으로 DOE를 적용하여 설계변수의 분포를 구한다. 그리고, 각각의 설계변수에 대하여 목적함수들의 값을 구한 후에, 이를 바탕으로 ANN을 형성한다. 다음으로 적용가능한 설계변수의 범위를 기준으로 GA를 적용하여 구한 설계변수들을 ANN에 적용하였을 때 계산된 목적함수가 전 단계에서 획득한 최소의 목적함수에 가까운 값을 나타내는 경우의 값들에 대하여서는 실

제계산을 수행한다. 이 때 얻어진 값들을 이용하여 보다 향상된 ANN을 형성한다. 따라서 단계를 진행하면서 지속적으로 향상된 ANN을 형성하여 최적화를 가속하면서 정확도를 향상하는 방법으로 진행하였다.

초기의 ANN을 형성하기 위한 DOE는 2^{8-2} 의 일부실험(Fractional factorial design)을 사용하였으며 중간점을 포함하게 되면 65개의 설계변수에 대한 수치해석결과가 필요하게 된다. 본 연구에서 초기 ANN의 정밀성을 향상하기 위하여 DOE를 위한 범위를 설계변수의 초기값을 기준으로 최대값과 최소값과의 폭에서 75%를 적용하여 데이터범위를 선정하였다. 하지만 최적화에 있어서는 형성된 ANN을 바탕으로 새로운 설계점의 형성은 GA를 사용하는데, 이 때는 설계변수가 가용한 전체 범위 내에서 새로운 값을 찾았다.

DOE[22]로도 최적화를 수행할 수 있지만 결과가 비선형성이 강한 경우에는 DOE로 얻은 최종결과와 실제결과 사이에 차이가 발생할 수 있다. 하지만 이 방법에서는 설계변수의 주효과나 설계변수간의 교호작용 등에 대한 정보를 미리 확인할 수 있는 장점이 있다. DOE에 의하여 설정된 65개의 점에서 얻어진 수치해석의 결과로부터 목적함수에 대한 설계변수의 주효과를 Fig. 5에서 보여주고 있다. 8개의 설계변수 중에서 hub pt6(ϕ 8)에서의 익형각(β) 변화에 대한 평균목적함수의 변화가 가장 크게 나타나고 있으며, 반면에 쉬라우드 pt3(ϕ 1)에서의 r 방향의 변화에 대한 평균목적함수의 변화가 가장 적게 나타나고 있음을 보여주고 있다. 하지만 모든 경우에 대하여 중심점에서의 평균목적함수가 가장 적게 나타남으로 곡면의 영향을 고려하여야 함을 알 수 있다.

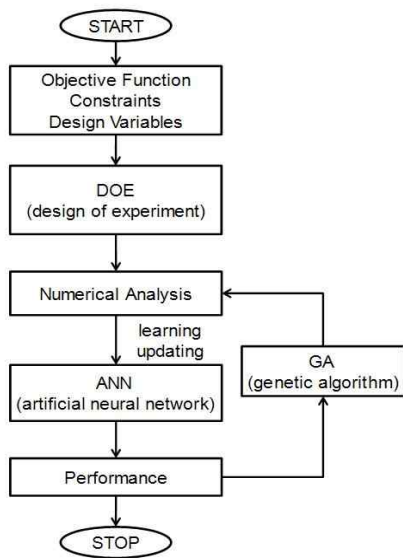


Fig. 4. Flow chart of optimization

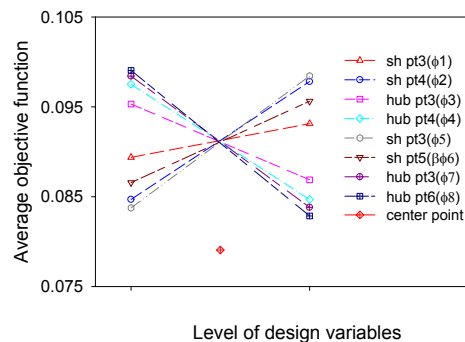


Fig. 5. Main effect of design variables

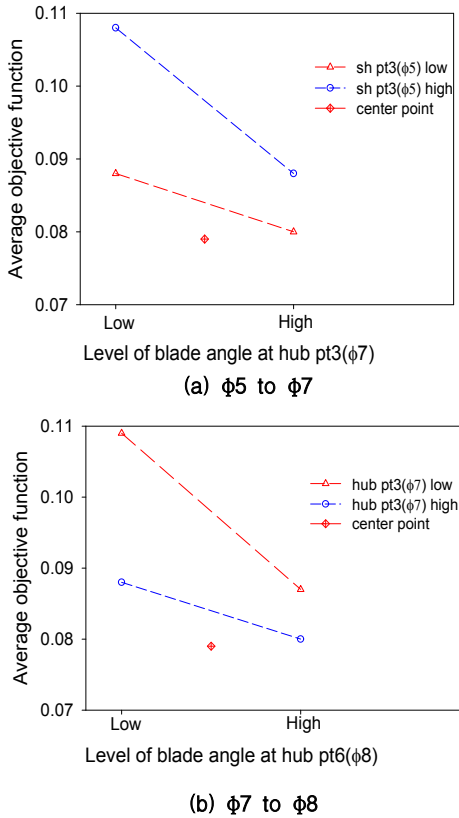


Fig. 6. Interaction effect of design variables

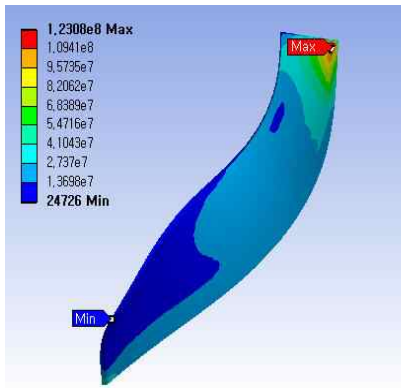


Fig. 7. Von Mises stresses due to the centrifugal loading

설계변수간의 2차교호작용에 의한 평균목적 함수에 미치는 영향은 ($\phi 5, \phi 7$), ($\phi 7, \phi 8$), ($\phi 5, \phi 8$), ($\phi 2, \phi 4$)에 의한 영향이 크게 나타남을 알 수 있는데, ($\phi 5, \phi 7$)의 경우는 $\phi 5$ 가 높은 레벨

에서 교호작용의 효과 크게 나타남을 알 수 있으며, ($\phi 7, \phi 8$)의 경우는 $\phi 7$ 가 낮은 레벨에서 큰 교호작용의 영향이 있음을 보여주고 있다. 하지만 중심점에서의 곡면효과가 모두 크게 나타났었다.

65개의 설계변수에 대하여 목적함수를 구하면서, 임펠러의 재질을 7075 알루미늄 합금으로 하는 경우에 인장응력과 변위를 계산하였으며, 이 때 회전하는 경우와 임펠러에 형성되는 압력도 포함하여 계산을 수행하였다. Fig. 7의 경우는 65개 중에서 휘어짐이 많은 경우의 응력분포를 보여주고 있으며 가장 큰 응력은 출구의 허브측에서 발생됨을 알 수 있다. 초기 ANN의 형성을 위한 65개의 경우에 대하여 모두 안전한 결과를 보여주었다. 따라서 65개의 경우를 바탕으로 초기의 ANN을 형성하였다.

ANN은 역전파알고리즘(back propagation algorithm)을 적용하였으며 은닉층과 출력층의 뉴런은 각각 10개와 3개를 사용하였다. 전달함수는 은닉층에는 hyperbolic tangent 함수를 사용하였으며, 출력층은 직선함수를 적용하였다. ANN을 주어진 결과와 일치하도록 하기 위하여 가중치와 바이어스는 Levenberg-Marquardt[23,24] 알고리즘을 적용하여 얻었으며, ANN의 형성은 MATLAB[25]의 nntool을 사용하였다.

ANN의 향상을 위하여 Table 3의 설계변수 영역에서 GA를 적용하여 새로운 설계변수에 대하여 목적함수를 탐색하는데, 이 때 100개의 개체를 한 세대(generation)당 얻었다. 이들 값을 형성하였던 ANN에 적용하여 식(5)와 같이 그전의 최소 목적함수의 4~5% 범위(α)내의 값이 얻어지면 이 설계변수에 대하여 수치해석(CFD)을 실행하여 이를 다시 ANN을 학습하는데 사용하였다.

$$Obj_{new} \leq Obj_{\min(oid)} + 0.05(\alpha) * Obj_{\min(oid)} \quad (5)$$

Table 4는 세대수를 증가하면서 ANN을 향상하기 위하여 적용하였던 새로운 설계변수의 개수를 보여주고 있으며, 이 때 ANN에 의하여 예측된 결과와 CFD를 수행하여 얻었던 결과와의 차이를 보여주고 있다. 6세대 이후에는 두 방식의 결과 차이가 1% 이내에 형성되어 지는 정확한 ANN을 형성하였음을 알 수 있다. 따라서 초기 ANN의 형성을 위한 65번의 CFD 계산과 세대를 진행하면서 ANN의 향상을 위하여 수행한 65번의 계산과 함께 총

Table 4. Accuracy of ANN with the increased generation

generations	No. of new obj	Accuracy [%]	α [%]
1st	12	8.23	5
2nd	9	3.50	5
3rd	14	3.67	5
4th	8	1.57	5
5th	11	1.60	4
6th	11	0.92	4

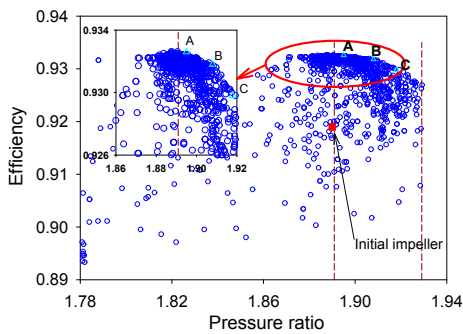


Fig. 8. Pareto of objective functions

130번의 계산이 수행되었으므로 다른 알고리즘에 비하여 적은 계산이 필요하였다.

Fig 8은 21세대까지 진행하여 얻어진 결과로써, 압력비와 효율과의 관계를 보여준다. 식 (1)의 목적함수 최저값은 Fig. 8에서 A의 위치를 나타내었다. 초기 임펠러에서 얻어지는 압력비의 감소가 없이 공력효율은 1.4% 향상되었음을 알 수 있다. 아울러 pareto상에 있는 결과값들은 압력비와 효율과의 상호 보완관계를 형성하고 있는데 압력비의 증가에 따라 효율의 감소를 요구하고 반면에 효율의 증가는 압력비의 감소를 요구하고 있다. 따라서 사용자의 선택에 따라서 어느 작동점을 선정하게된다.

Fig. 9는 pareto 상에 있는 작동점과 초기 임펠러에서 형성되는 전압력선도를 비교한 것이다. C의 위치에서 압력비가 가장 높게 형성되었음을 보여주고 있다. 자오면에서 슈라우드가 초기형상에 비하여 케이싱쪽으로 이동하여 출구로 향하는 유로가 증가하였음을 보여주고 있으며 이로 인하여 압력의 증가가 이루어졌음을 알 수 있다. 아울러 전압력선도에서 Fig. 8의 pareto와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

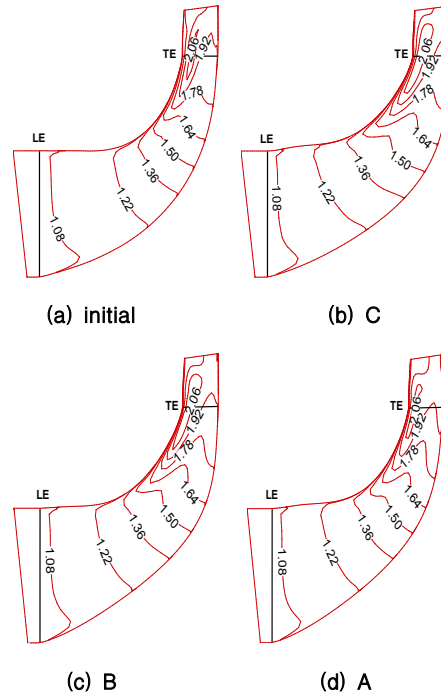


Fig. 9. Comparison of total pressure in the meridional plane

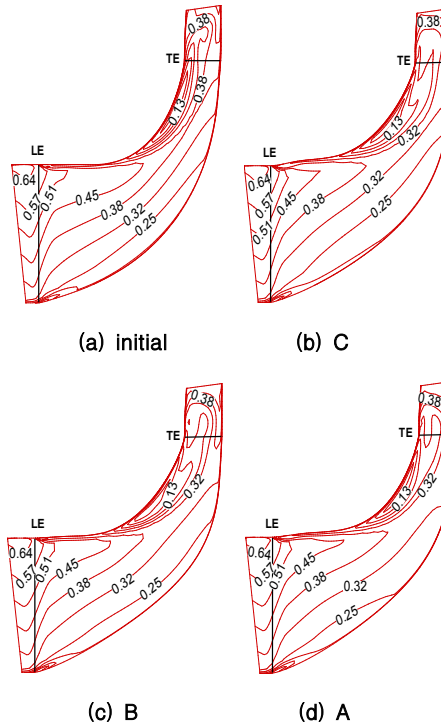


Fig. 10. Comparison of relative Mach number in the meridional plane

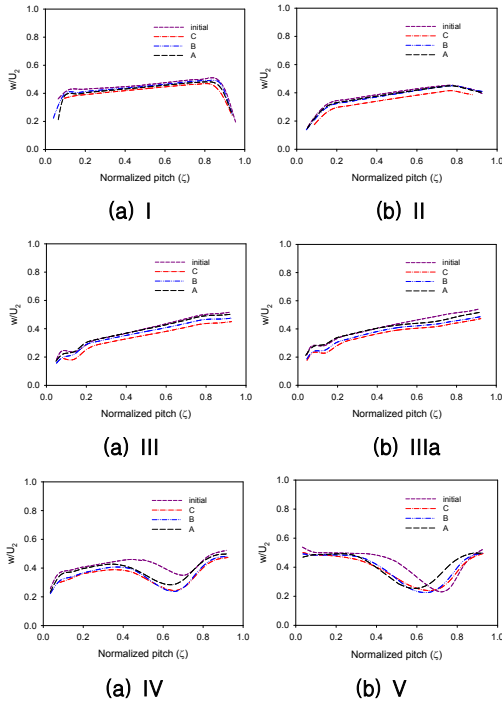


Fig. 11. Comparison of relative velocities in the blade-to-blade plane at the mid span

임펠러의 자오면에서의 상대적인 마하수의 선도를 Fig. 10에서 비교하여 보여주고 있다. C의 작동점에서 임펠러 허브측에 낮은 상대속도를 형성하고 있으며 작동점이 압력비가 낮은 쪽을 이동하게 되면 허브측에서의 낮은 상대속도가 점차적으로 증대하고 있음을 보여주고 있다. 하지만 pareto 상에서 작동되는 임펠러 A,B,C의 경우 초기형상의 임펠러에서 보다는 임펠러 출구에서의 상대속도가 낮음을 알 수 있다.

임펠러 내부에서의 유동장 비교를 Fig. 11에서 보여주고 있다. 중간스팬에서 익형과 익형과의 사이에서 형성되는 상대속도의 크기를 비교한 것으로 작동점에 따라서 내부유동장의 변화를 볼 수 있다. 비교를 위한 위치는 실험에서 적용된 위치[13]와 동일한 위치를 선정하였다. 내부유동의 변화에서도 높은 압축비를 나타내었던 작동점이 C인 경우가 상대적으로 낮은 속도를 형성하고 있음을 보여주고 있으며, 임펠러의 출구쪽으로 향하게 되는 경우는 익형의 형상변경으로 인하여 초기의 형상에서 얻어진 상대속도와는 중간 피치에서 차이를 보여주고 있다.

V. 결 론

원심압축기의 임펠러를 최적화하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 기존의 임펠러를 바탕으로 임펠러에 대한 수치데이터를 이용하여 설계변수를 설정하였다. 목적함수는 효율과 압축비를 동시에 고려할 수 있도록 설정하였으며, 인장응력을 제한조건으로 설정하였다. 최적화를 위하여서는 ANN를 기본으로 하였으며, 초기의 ANN 형성은 DOE를 사용하였다. 아울러 DOE에서는 설계변수가 목적함수에 미치는 주효과와 상호 교호작용에 대한 예측을 할 수 있었다. 최적화를 위한 ANN의 향상을 위하여 GA를 사용하여 각 세대에서의 설계변수에 따른 목적함수가 일정값 이하의 값을 나타내는 경우에는 수치해석을 통하여 ANN을 세대별로 향상을 시켜서 6세대 이후에는 ANN에 의한 예측과 CFD의 예측값과의 차이가 1% 미만에 도달하였다. 총 21세대를 거쳐서 압축비와 효율과의 pareto를 형성할 수 있었다. 본 연구에서는 최적화를 위한 계산시간을 단축하면서 정밀한 최적화의 결과를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 지원하는 지방기술혁신사업[RTI04-0103]에 의하여 이루어졌으므로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Cumpsty, N. A., "Compressor Aerodynamics", Longman Group UK, 1989.
- 2) Whitfield, A. and Baines, N. C., "Design of Radial Turbomachines", Longman Group UK, 1990.
- 3) Aungier, R. H., "Centrifugal Compressor", ASME Press, 2000.
- 4) Bonaiuti, D. and Pediroda, V., "Aerodynamic Optimization of an Industrial Centrifugal Compressor Impeller Using Genetic Algorithms", Proceedings of Eurogen 2001.
- 5) Cosentino, R., Alsalihi, Z., and Braembussche, V.R.A., "Expert System for Radial Impeller Optimization", 2001

Proceedings of Euroturbo4 ATI-CST-039/01.

6) Bonaiuti, D, Arnone, A., Ermini, M. Baldassarre, L., "Analysis and Optimization of Transonic Centrifugal Compressor Impellers Using the Design of Experimental Technique", 2002, GT-2002-30619.

7) 김세미, 박준영, 안국영, 백제현, "반응면 기법을 이용한 원심압축기 최적설계", 한국전산유체공학 추계학술대회, 2007, pp. 92~99.

8) Bonaiuti, D. and Zangeneh, M., "On the Coupling of Inverse Design and Optimization Techniques for the Multi-objective, Multipoint Design of Turbomachinery Blades", J. of Turbomachinery, 2009, Vol. 131, 021014-1.

9) Verstraete, T., Alsalihi, Z. and Braembussche, R.A.V., "Multidisciplinary Optimization of a Radial Compressor for Microgas Turbine Applications", J. of Turbomachinery, 2010, Vol. 132, 031004-1.

10) 최형준, 박영하, 안국영, 조수용, "원심 압축기 최적화를 위한 연구 I-형상변수 및 설계변수에 관한연구", 2011, 항공우주학회지, 39권 5호.

11) Eckardt, D., "Instantaneous Measurements in the Jet-Wake Discharge Flow of a Centrifugal Compressor Impeller", J. of Engineering and Power, 1975, pp. 337~346.

12) Eckardt, D., "Detailed Flow Investigations Within a High-Speed Centrifugal Compressor Impeller", J. of Fluid Engineering, 1976, pp. 390~402.

13) Eckardt, D., "Flowfield Analysis of Radial and Backswept Centrifugal Compressor Impellers Part 1: Flow Measurements Using a Laser Velocimeter", In Performance Prediction of Centrifugal Pumps and Compressor edited by Gopalskrishnan, S. and Cooper, P., 1980, ASME.

14) Cho, C. H., Cho, S. Y., Ahn, K. Y. and Kim, Y. C., "Study of an Axial-Type Fan Design Technique Using an Optimization Method", Proc. IMechE Vol.223, Part E:J. Process Mechanical Engineering, 2009, pp. 101-111.

15) Wang, Z., Xi, G. and Wang, X., "Aerodynamics Design Optimization of Vaned Diffuser for Centrifugal Compressors

Using Kriging Model", Proc. Asian Joint Conf. on Propul. and Power, China, Beijing, 2006, AJCPP2006-22023.

16) Shu, X., Gu, C., Xiao, J. and Gao C., "Centrifugal Compressor Blade Optimization Based on Uniform Design and Genetic Algorithms" Frontier Energy Power Eng. China, Vol. 2(4), 2008, pp. 454-456.

17) Bonaiuti, D. and Pediroda, V., "Aerodynamic Optimization of an Industrial Centrifugal Compressor Impeller using Genetic Algorithms", Proceedings of Eurogen 2001.

18) Fan, H. Y., "An Inverse Design Method of Diffuser Blades by Genetic Algorithms", Proceedings Institutes Mech. Engineering(A), 1998, Vol. 212, pp. 261-268.

19) Pierret, S. and Braembussche, R. A., "Turbomachinery Blade Design Using a Navier-Stokes Solver and Artificial Neural Network", J. of Turbomachinery, 1999, Vol. 121, pp. 326-332.

20) Fan, H. Y., "A Neural Network Approach for Centrifugal Impeller Inverse Design", Proceedings Institutes Mech. Engineering(A), 2000, Vol. 214, pp. 183-186.

21) Kim, J. H., Choi, J. H., Husain, A. and Kim, K. Y., "Multi-Objective Optimization of a Centrifugal Compressor Impeller Through Evolutionary Algorithms", Proc. IMechE Vol. 224, Part A:J. Power and Energy, 2010, pp. 711-721.

22) Bonaiuti, D., Arone, A., Ermini, M. and Baldassarre, L., "Analysis and Optimization of Transonic Centrifugal Compressor Impellers Using the Design of Experiments Technique", J. of Turbomachinery, 2006, Vol. 128, pp. 786-797.

23) Hagan, M. T., and Menhaj, M. "Training Feed-Forward Networks with the Marquardt Algorithm", IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, Vol. 5, No. 6, pp. 989-993.

24) Hagan, M. T., Demuth, H. B. and Beale, M. H. "Neural Network Design", Boston, MA: PWS Publishing, 1996.

25) Demuth, H., Beale, M. and Hagan, M., "Neural Network Toolbox 6, User's Guide", 2007. Matlab R2007b.