

신경망 최적화 기법을 이용한 다익 헨/스크롤 시스템의 설부에 대한 형상 최적화

한석영[†] · 맹주성^{*} · 유달현^{**} · 진경욱^{***}
(2001년 10월 15일 접수, 2002년 7월 31일 심사완료)

Shape Optimization of Cut-Off in a Multi-blade Fan/Scroll System Using Neural Network

Seog Young Han, Joo Sung Maeng, Dal Hyun Yoo and Kyong Uk Jin

Key Words: Multi-blade Fan(다익 헨), Cut-Off(설부), Inactive Zone(유동차단 영역), Neural Network(신경망), Optimization(최적화)

Abstract

In order to improve efficiency of a system with three-dimensional flow characteristics, this paper presents a new method that overcomes three-dimensional effects by using two-dimensional CFD and neural network. The method was applied to shape optimization of cut-off in a multi-blade fan/scroll system. As the entrance conditions of two-dimensional CFD, the experimental values at the positions out of the inactive zone were used. The distributions of velocity and pressure obtained by two-dimensional CFD were compared with those of three-dimensional CFD and experimental results. It was found that the distributions of velocity and pressure have qualitative similarity. The results of two-dimensional CFD were used for learning as target values of neural network. The optimal angle and radius of cut-off were determined as 71° and 0.092 times the outer diameter of impeller, respectively. It is quantified in the previous report that the optimal angle and radius of cut-off are approximately 72° and 0.08 times the outer diameter of impeller, respectively.

기호설명	
A	: 학습 결과 값
b	: 임펠러 폭 길이
C ₁	: 날개 코드 길이
D ₁	: 임펠러 안쪽 지름
D ₂	: 임펠러 바깥쪽 지름
L _z	: 유동차단 영역의 크기
L	: 스크롤 폭 길이
n	: 헨 운전 속도[rpm]
p	: 압력
r	: 임펠러 반경 방향 좌표
r ₁	: 임펠러 안쪽 반지름
r ₂	: 임펠러 바깥쪽 반지름
r _c	: 설부 간극
r _{cut-off}	: 설부 반경
r _s	: 스크롤 형상 함수
T	: 목적 값
t	: 벨마우스와 임펠러간의 거리
V	: 직교 속도 성분
θ	: 임펠러 원주 방향 좌표
θ _{cut-off}	: 원주 방향 설부 위치[deg.]
μ	: 점성계수
ψ	: 압력계수

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : syhan@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2290-0456 FAX : (02)2298-4634
^{*} 회원, 한양대학교 기계공학부
^{**} 한양대학교 대학원 기계공학과
^{***} 한양대학교 대학원 자동차공학과

1. 서론

다익 팬/스크롤 시스템은 공조기기의 핵심부로서 기하학적 형상의 특성 때문에 매우 복잡한 유동장이 형성된다. 로터의 축 방향으로 유입되는 유체가 반경 방향의 임펠러를 통하여 스크롤로 유출되는 과정에서 유동차단 영역(inactive zone)이 발생되고 그 크기 또한 축 방향과 원주 방향으로 일정하지 않다.^(1,2) 유동차단 영역은 임펠러 입구에서 유체가 회전하여 원활한 유동이 이루어지지 않는 영역을 의미하는 것으로 유동 효율을 떨어뜨리는 원인일 뿐만 아니라 경우에 따라서는 유동 소음 및 진동 소음을 야기시킬 수 있다.

효율을 증가시키기 위한 연구로는 팬 및 스크롤의 형상, 그리고 설부(cut-off)의 위치 및 곡률 등 여러 가지 설계인자 중에서도 설부에 관한 것이 대부분이다. Raj⁽³⁾는 설부의 각도가 72° 근방에 위치할 때 효율이 가장 좋다는 보고를 하였고, Morinushi⁽⁴⁾는 임펠러 외경의 0.08배 정도의 곡률을 갖는 것이 적합하다고 주장하였다. 또한, Humbud 등⁽⁵⁾은 설부에서 발생하는 유동박리 현상이 소음의 주요 원인이라는 사실을 밝혀내었고, Maeng 등⁽⁶⁾은 다양한 설부의 형상변화에 따른 유동차단 영역의 크기와 유량 변화에 대한 고찰을 하였다.

본 연구에서는 설부의 각도 및 반경을 변화시켜가면서 실험 및 수치해석을 통하여 최적형상을 찾아내고자 하였다. 연구 방법으로는 최근 NASA를 중심으로 급곡관 유동장과 같이 강한 3차원의 성격을 띄고 있는 형상도 2차원 유동장 해석과 최적화 기법을 접목하여 설계하고자 하고 있으며,⁽⁷⁾ 2차원과 3차원 계산 사이에서의 비례 관계를 통해 보다 효율적인 계산방법을 도출해내려는 노력이 진행되고 있는 바,^(8,9) 이 방법에 착안하여 3차원 해석 대신에 2차원 난류 유동의 수치해석을 통하여 설부 주위에서의 박리 현상을 정성적으로 예측한 다음, 신경망 최적화 이론을 도입하여 박리 현상이 최소화될 수 있는 설부의 위치와 형상을 정량적으로 계산하였다. 또한, 기존의 연구 결과들과 비교하여 타당성을 검증하고 참고문헌 (3)와 (4)에서 주장한 대략적인 값들을 구체화하였다.

2. 유동 해석

2.1 기하학적 형상

본 연구에서 사용된 모델의 기하학적 형상은 Fig. 1과 같고 스크롤은 외형곡선이 $r=179 \times e^{(0.114\theta)}$ 로 표현되는 지수함수형이며, 설부 각도 및 반경을 임의로 변형하여 그 제원을 Table 1에 나타내었다.

2.2 지배 방정식

2차원 비압축성 정상 유동의 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot V = 0 \tag{1}$$

$$V(\nabla \cdot V) = \nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla V) \tag{2}$$

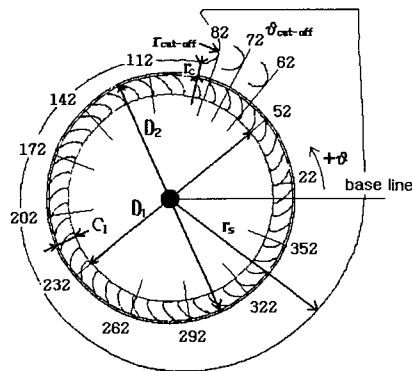


Fig. 1 Fan configuration

Table 1 Fan specification

Designation	Size
D ₂ (mm)	326
D ₁ (mm)	271
C ₁ (mm)	55
b(mm)	65
Z(No. of Blades)	50
n(rpm)	700
r _{cut-off}	0.06D ₂ ~0.12D ₂
θ _{cut-off}	62°, 67°, 72°, 77°, 82°
t	0.12b

2.3 수치해석

유동해석을 위한 격자는 복잡한 형상에 다중영역법(multi-block approach)을 적용하여 53개 영역으로 분할한 후, 모델 당 30,000~33,000개 정도의 정렬격자를 생성하였다(Fig. 2). 지배 방정식 (1)과 (2)는 유한 체적법과 SIMPLEC 알고리즘을 사용하여 계산하였다. 대류항은 2차 풍상차분법(2nd-order upwind scheme)을 적용하였고, 난류방정식에 대해서는 1차 풍상차분법(1st-order upwind scheme)을 적용하였으며, 난류모델은 Standard $k-\epsilon$ 모델을 적용하였다.

2.4 경계조건

입구에서의 경계조건은 사용 모델의 실험 결과를 이용하였다. Ref. (2)에서 보여준 바와 같이 Fig. 3은 유동차단 영역(inactive zone)을 연기 발생 장치를 이용한 유동 가시화 기법(Fig. 4)으로 측정하여 원주 방향 분포 및 크기를 나타낸 것으로, I_z 는 임펠러의 폭 b 로 무차원화한 값이다. $150^\circ \sim 180^\circ$ 에서 최대가 되는 유동차단 영역이 팬 입구로부터 임펠러 폭의 50% 근방까지 영향을 미쳐 2차원 입력 조건으로는 적합하지 못하므로 측방향으로 임펠러 폭의 60% 되는 단면에서 원주 방향으로 분포된 실험 값을 채택하였다. 그림에서 모델 82090의 82는 설부의 각도, 090은 설부의 반경이 $0.09D_2$ 임을 나타낸다. 또한, 출구에서는 정압 조건을, 날개 열에 대해서는 회전 벽면 조건(rotating wall boundary condition)을 사용하였다.

2.5 수치해석 결과

2차원 수치해석과 최적화 기법의 접목으로 3차원 성격을 갖는 문제를 설계할 수 있는가를 알아보기 위하여 첫째, 실험값과 2차원 계산값의 압력계수를 측 방향 여러 단면에서 비교하였고, 둘째, 3차원 계산값과 압력분포를 정성적으로 비교하였다. Fig. 5는 팬 중심에서 반경 반향으로 $1.13D_2$ 에 위치한 스크롤 내에서의 각 모델에 대한 원주 방향 정압 분포를 $raj^{(3)}$ 및 본 연구의 실험결과 즉, 스크롤 내부의 측 방향 5개 단면(팬 입구로부터 $0.15L, 0.32L, 0.5L, 0.68L, 0.85L$)에서 5-hole pitot tube로 측정된 정압 분포와 2차원 계산값을 비교한 것으로 정성적으로 매우 유사함을 보이고 있다. 또한, 3차원 측정값과 2차원 계

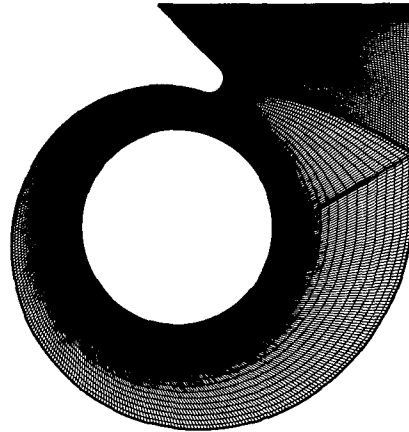


Fig. 2 Computational mesh

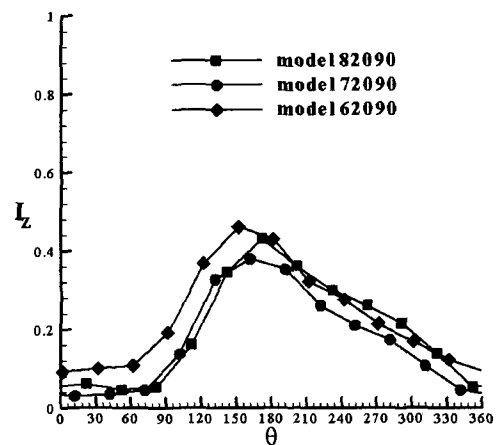


Fig. 3 Size of inactive zone

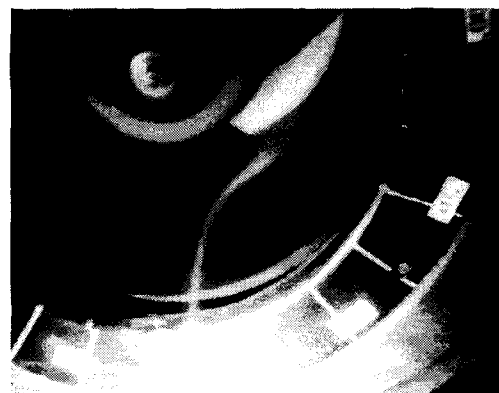


Fig. 4 Flow visualization using smoke

산값 사이에 완벽한 비례관계가 이루어짐을 알 수 있으므로 이는 서론에서 언급한 효율적인 계산방법을 도출해 낼 수 있는 충분한 자료가 된다.^(8,9) Fig. 6은 3차원 유동해석을 통해 얻은 모델 72090의 속도벡터 및 압력장을 나타낸 결과로^(10,11) Fig. 7의 동일 모델에 대한 2차원 유동해석과 비교해볼 때, 두 결과 모두 0°~60° 사이의 임펠러 출구와 설부 근방에서 가장 낮은 압력을 나타내고 있으며, 반경 방향 및 원주 방향의 속도벡터 또한 정량적인 크기는 다르나 거의 동일한 유동형태를 보이고 있다. 이것은 참고문헌 (12), (13)의 실험 결과에서도 확인된다. 따라서, CFD에서 2차원 계산만으로 운동학적인 유사성(kinematic similarity)을 규명한 후, 신경회로망 기법을 통하여 형상을 최적화하고 다시 CFD 계산으로 유량 효율을 검증하고자 하는 본 연구 방향에 잘 부합되므로 2차원 CFD 계산 값들을 설부 최적화 자료로 사용할 수가 있음을 확인하였다. 최적화에 사용될 계산 자료는 Table 2에 제시하였다. 각각의 유량 값들은 실험에서 측정된 로터 내부의 경계조건을 가지고 수치해석을 실행한 후 출구에서 계산된 평균속도를 출구면적과 곱하여 구한 값이며, Fig. 8과 같이 각각의 모델별로 실험 값과 정성적으로 일치함을 보여주고 있다.

3. 설부의 위치 및 형상 최적화

3.1 신경망의 구성

2차원 난류유동장 해석을 통해 얻은 유량 값을 신경망 학습을 위한 목적 값(target value)으로 사용하였다. 설계 인자로는 기준선으로부터 설부까지의 각도와 설부의 반경을 설정하였고, 값의 범위는 각각 67°~77°, 0.06D₂~0.12D₂를 사용하였다. 유량 값을 학습하기 위한 신경망은 MATLAB을 사용하여 프로그램을 작성하였다. 신경망은 Fig. 9에서와 같이 입력층, 출력층, 그리고 2개의 은닉층으로 구성되었으며, 은닉층의 뉴런 수는 각각 60과 30으로 구성되었다. 그리고 학습 방법으로는 오류 역전파 규칙(error backpropagation rule)을 적용하였다. 입력층과 은닉층, 은닉층 사이의 연결기 함수로는 하이퍼볼릭 탄젠트 시그모이드 함수(hyperbolic tangent sigmoid transfer function)를 사용하였으며 은닉층과 결과층 사이의 함수로는 하드 리미트 전이 함수(hard limit transfer function)를 사용하였다. 오차의 값은

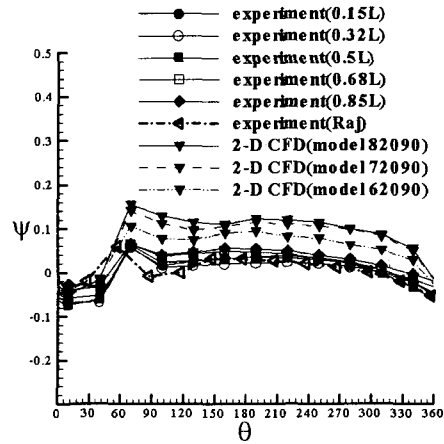


Fig. 5 Comparison of pressure coefficient at 1.13D₂

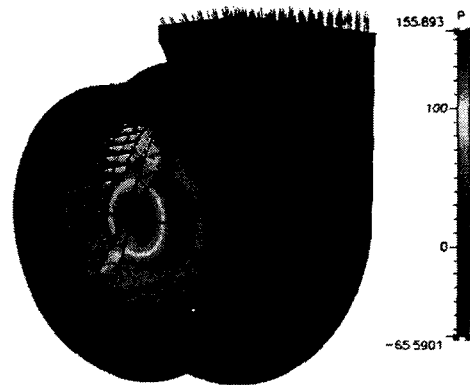


Fig. 6 Velocity vector and pressure contour (3D-CFD)

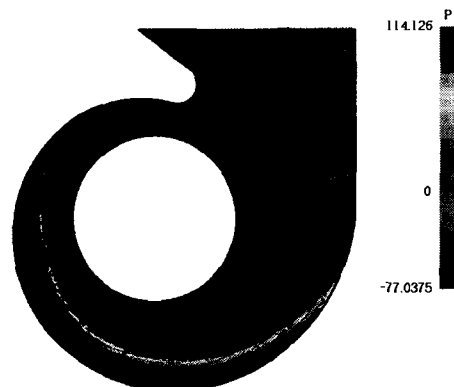


Fig. 7 Velocity vector and pressure contour (2D-CFD)

Table 2 Volume flow rate analysis using CFD (m³/min)

$\theta_{cut-off}$ / $r_{cut-off}$	62°	67°	72°	77°	82°
0.06D ₂	28.184	28.433	28.936	28.768	28.714
0.07D ₂	28.401	28.737	29.406	29.070	28.802
0.08D ₂	28.448	29.031	29.833	29.334	28.863
0.09D ₂	28.475	29.333	30.040	29.627	28.977
0.10D ₂	28.426	29.074	30.011	29.333	28.836
0.11D ₂	28.285	28.958	29.764	29.045	28.373
0.12D ₂	28.129	28.581	29.519	28.759	28.055

Table 3 Volume flow rate analysis using neural network (m³/min)

$\theta_{cut-off}$ / $r_{cut-off}$	67°	72°	77°
0.06D ₂	28.433	28.937	28.768
0.07D ₂	28.735	29.406	29.070
0.08D ₂	29.032	29.833	29.335
0.09D ₂	29.333	30.040	29.627
0.10D ₂	29.071	30.013	29.333
0.11D ₂	28.959	29.764	29.045
0.12D ₂	28.581	29.520	28.759

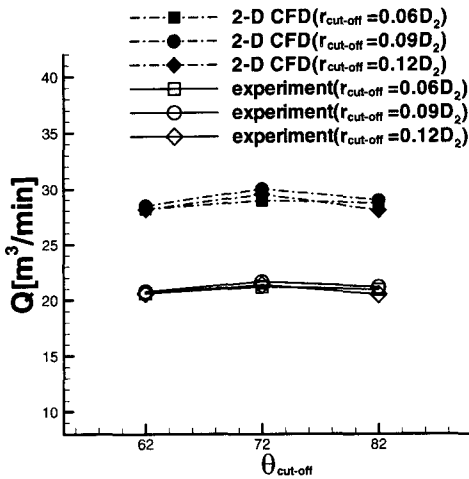


Fig. 8 Comparison of volume flow rate

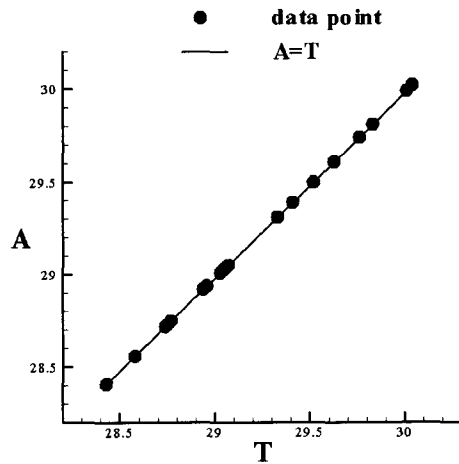


Fig. 10 Correlation between object value and learning result value

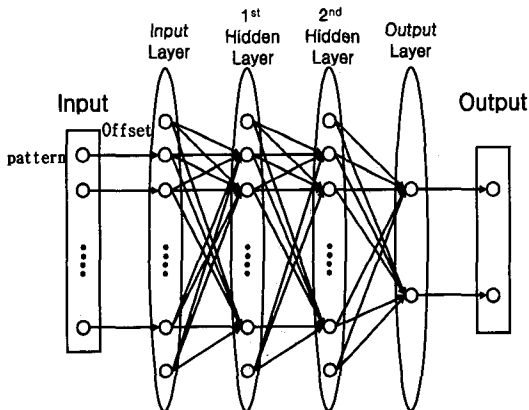


Fig. 9 Structure of neural network

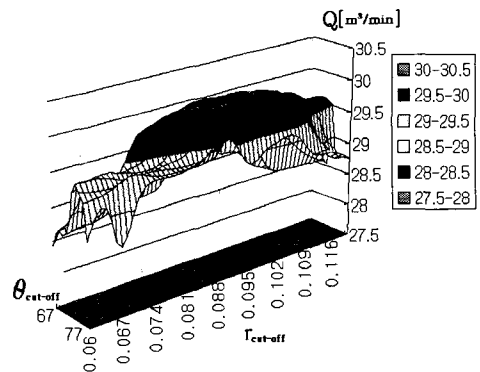


Fig. 11 Volume flow rate analysis(m³/min)

보다 정확한 해를 계산하기 위해 10^{-6} 까지 허용하였다.

3.2 신경망의 학습 결과

위와 같은 신경망을 구성한 뒤 학습시키면, Table 3의 학습 결과 값과 Table 2의 수치해석으로 계산된 값이 식 (3)처럼 거의 일치하는 선형 상관관계를 나타내므로 해석 결과에 대한 신뢰도는 상당히 높다는 것을 알 수 있다.

$$A = T - 0.0206 \quad (3)$$

여기서, A 는 학습 결과 값을 의미하고, T 는 목적 값을 의미하며, Fig. 10에 두 값 사이의 관계를 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

기준선으로부터 설부까지의 각도와 설부 반경의 값에 대한 학습 결과는 Fig. 11과 같다. 대략 기준선으로부터 설부까지의 각도는 $70^\circ \sim 74^\circ$, 설부의 반경 값은 $0.088D_2 \sim 0.102D_2$ 사이에서 높은 유량 값이 얻어지며, 최적의 위치는 71° , $0.092D_2$ 근방이고, 유량은 $30.055 \text{ m}^3/\text{min}$ 이다. 이는 난류 유동장 해석을 통해 얻어진 값과 비슷한 결과를 보인다. Fig. 12~14는 설부의 위치와 형상의 변화에 따른 유동장의 속도분포를 보여주고 있다. Fig. 12에서 설부 각도가 62° 근방일 때 출구 주변에서의 박리가 크게 발생함을 알 수 있다. Fig. 13에서는 Fig. 12에 비해 설부 각도가 67° 근방으로 증가했을 때 박리가 다소 감소함을 보이며, Fig. 14는 설부 각도가 71° 근방의 최적 위치에 있을 때 박리가 거의 없어짐을 알 수 있다. 또한, 설부 각도가 최적 위치보다 커지면, 출구에서의 박리는 생기지 않으나 앞서 Fig. 3에서 나타난 것처럼 유동차단 영역이 증가하여 유동효율이 나빠져 유량을 감소시키므로,⁽⁶⁾ 최적 형상의 결과치는 유동차단 영역의 증감에 따른 유량 변화의 측정 결과와도 잘 부합되고 있다.(Fig. 8) 또한, 효율에 큰 영향을 미치는 설부 간극은 설부 각도와 반경의 함수이므로 최적의 설부 각도와 반경이 결정되면 자동적으로 정해진다.

5. 결 론

본 논문에서는 여러 가지 모델의 다익 휠/스크

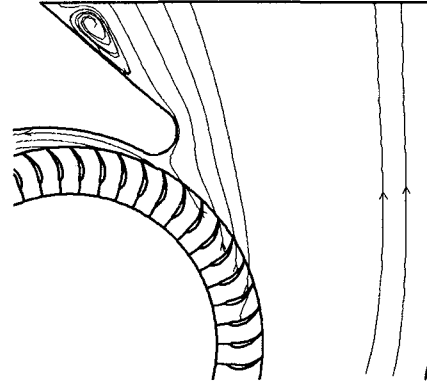


Fig. 12 Streamline distribution(model 62090)

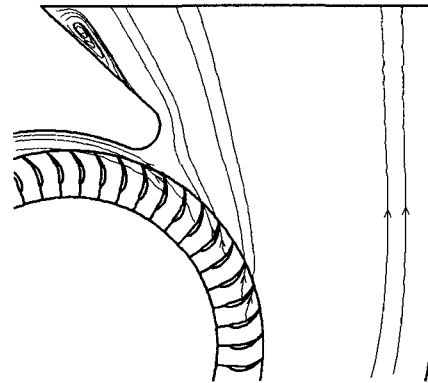


Fig. 13 Streamline distribution(model 67090)

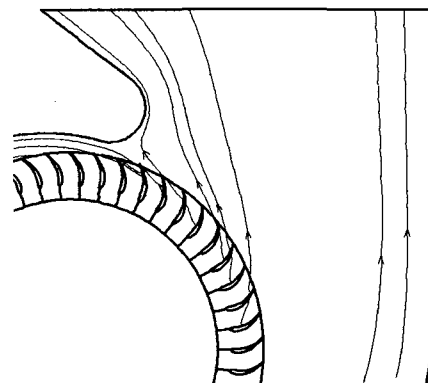


Fig. 14 Streamline distribution for optimized model

를 시스템에 대한 3차원 유동장과 임의 단면에서 2차원 유동장과의 운동학적 유사성을 실험과 3차원 CFD 계산을 통하여 보여주었으며, 이를 바탕으로 2차원 유동장 해석과 신경망 기법을 접목하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 설부의 최적의 위치는 71°, 최적의 형상은 임펠러 외경의 0.092배로 결정되었다.
- (2) 최적의 형상에 대한 2차원 난류 유동장 해석 결과, 박리 현상이 완전히 제거되면서 최대 유량이 얻어짐을 확인하였다.
- (3) 3차원 유동장이 모든 단면에서 2차원 유동장과 운동학적인 유사성을 갖는 경우, 2차원 유동 해석과 최적화 기법을 접목하여 형상 최적화할 수 있음을 보여주었다.

참고문헌

- (1) Kind, R. J. and Tobin, M. G., 1990, "Flow in a Centrifugal Fan of the Squirrel Cage Type," *Transactions of the ASME*, Vol. 112, pp. 84 ~ 90.
- (2) Maeng, J. S., Yoon, J. Y., Ahn, T. B., Yoon, J. E., Hahn, D. J., 1999, "An Experimental Study for Flow Characteristics Inside the Rotor of a Multiblade Fan/Scroll System," *Transactions of the KSME, B*, Vol. 23, No. 5, pp. 646 ~ 652.
- (3) Raj, D. and Swim, W. B., 1981, "Measurements of the Mean Flow Velocity and Velocity Fluctuations at the Exit of a FC Centrifugal Fan Rotor," *Journal of Engineering for Power*, Vol. 103, pp. 393 ~ 399.
- (4) Morinushi, K., 1987, "The Influence of Parameters on F.C. Centrifugal Fan Noise," *Transactions of the ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Feliability in Design*, Vol. 109, pp. 227 ~ 234.
- (5) Humbad, N. G., et al., 1996, "Case Study on Reducing Automotive Blower Rumble Noise,"

Proceeding of the ASME, Noise and control division, Nca-Vol. 22, pp. 233 ~ 242.

- (6) Maeng, J. S., Yoo, D. H., Lee, K. H., Park, I. G., 2000, "Some Relations Between the Geometric Parameters and Internal Flow Field Characteristics in Multiblade Fan/Scroll System," *Transactions of the KSME, B*, Vol. 24, No. 9, pp. 1139 ~ 1147.
- (7) Choi, D. C., 2000, "Sensitivity Analysis with Computational Models for Internal Flows," Hanyang University Seminar.
- (8) N. M. Alexandrov and R. M. Lewis, 2000, "Optimization with Variable-Fidelity Models Applied to Wing Design," *AIAA paper 2000-0841*.
- (9) M. G. Hutchison and E. R. Unger, 1994, "Variable-Complexity Aerodynamics Optimization of a High-Speed Civil Transport Wing," *Journal of the Aircraft*, Vol. 31, No. 1, pp. 110 ~ 116.
- (10) Yoon, J. Y., Maeng, J. S., Byun, S. J., Lee, S. H., 2000, "Numerical Analysis of Three-Dimensional Flow in a Forward Curved Centrifugal Fan," *Transactions of the KSME, B*, Vol. 24, No. 7, pp. 916 ~ 923.
- (11) Maeng, J. S., et al., 1998, "Theoretical and Experimental Studies for Development of Low Noise High Efficiency Fan/Scroll," *Technical Report HYCFEL 9707*, Hanyang University.
- (12) G. R. Denger, M. W. Mcbride and G. C. Lauchle, 1990, "An Experimental Evaluation of the Internal Flow Field of an Automotive Heating, Ventilating and Air Conditioning System," *Technical Report No. TR 90-011*, Pennsylvania State University.
- (13) Yamazaki, S. and Satoh, R., 1986, "An Experimental Study on the Aerodynamic Performance of Multi Blade Blowers," *Transactions of the JSME*, Vol. 52, No. 484, pp. 3987 ~ 3991.