

# 신경망 기법을 이용한 다익 휠/스크롤 시스템의 컷오프 최적화

한석영\*·맹주성\*·유달현\*\*

## Shape Optimization of Cut-Off in Multiblade Fan/Scroll System Using CFD and Neural Network

S. Y. Han, J. S. Maeng, D. H. Yoo

**Key Words:** Multiblade Fan(다익 휠), Cut-Off(컷오프), Inactive Zone(유동차단 영역), Neural Network(신경망), Optimization(최적화)

### Abstract

In order to minimize unstable flow occurred at a multiblade fan/scroll system, optimal angle and shape of cut-off was determined by using two-dimensional turbulent fluid field analyses and neural network. The results of CFD analyses were used for learning as data of input and output of neural network. After learning neural network optimization process was accomplished for design variables, the angle and the shape of cut-off, in the design domain. As a result of optimization, the optimal angle and shape were obtained as 71 and 0.092 times the outer diameter of impeller, respectively, which are very similar values to previous studies. Finally, it was verified that the fluid field is very stable for optimal angle and shape of cut-off by two-dimensional CFD analysis.

	기호설명	$r_c$	: 설부 최소 간극
A	: 학습 결과 값	$r_{cut-off}$	: 설부 반경
b	: 로오터 폭 길이	$r_s$	: 스크롤 형상 함수
$C_1$	: 날개 코드 길이	T	: 목적 값
$D_1$	: 로오터 안쪽 지름	t	: 벨마우스와 임펠러간의 거리
$D_2$	: 로오터 바깥쪽 지름	$U_2$	: 임펠러 외주에서의 원주 속도
$I_z$	: 유동차단 영역의 크기	V	: 작교 속도 성분
n	: 휠 운전 속도[rpm]	Z	: 임펠러 날개 수
p	: 압력	$\theta$	: 임펠러 원주 방향 좌표
Q	: 유량[m <sup>3</sup> /min]	$\theta_{cut-off}$	: 원주 방향 설부 위치[deg.]
r	: 임펠러 반경 방향 좌표	$\mu$	: 점성계수
$r_1$	: 로오터 안쪽 반지름	$\Psi$	: 압력계수
$r_2$	: 로오터 바깥쪽 반지름		

### 1. 서 론

다익 휠/스크롤 시스템은 공조기기의 핵심부로서 기하학적 형상의 특성 때문에 매우 복잡한 유동장이 형성된다. 로오터의 축 방향으로 유입되

\* 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : jsmaeng@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0439 FAX : (02)2281-8201

\*\* 한양대학교 대학원 기계공학부

는 유체가 반경 방향의 임펠러를 통하여 스크롤로 유출되는 과정에서 유동차단 영역(inactive zone)이 발생되고 그 크기 또한 축 방향과 원주 방향으로 일정하지 않다.<sup>(1)</sup> 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 컷오프의 위치 및 곡률 등 여러 가지 설계인자 중에서도 컷오프에 관한 것이 대부분이다. Raj<sup>(2)</sup>는 컷오프의 각도가 72° 근방에 위치할 때 효율이 가장 좋다는 보고를 하였고, Morinushi<sup>(3)</sup>는 임펠러 외경의 0.08배 정도의 곡률을 갖는 것이 적합하다고 주장하였다. Maeng 등<sup>(4)</sup>은 다양한 컷오프의 형상변화에 따른 유동차단 영역의 크기와 유량 변화에 대한 고찰을 하였다.

본 연구에서는 컷오프의 각도 및 반경을 변화시켜가면서 실험 및 수치해석을 통하여 최적형상을 찾아내고자 하였다. 연구 방법으로는 3차원 해석 대신에 2차원 난류 유동의 수치해석을 통하여 컷오프 주위에서의 박리 현상을 정성적으로 예측한 다음, 신경망 최적화 이론을 도입하여 박리 현상이 최소화될 수 있는 컷오프의 위치와 형상을 정량적으로 계산하였다. 그리고 기존의 연구 결과들과 비교하여 타당성을 검증하였다.

## 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, 컷오프 각도 및 반경을 각각 3가지로 변형하여 그 제원을 Table 1에 나타내었다.

### 2.2 지배 방정식

2차원 비압축성 정상 유동의 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

$$V(\nabla \cdot V) = \nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla V) \quad (2)$$

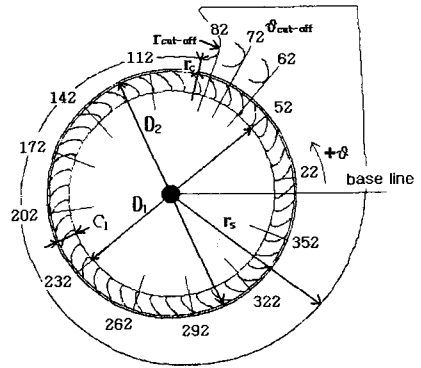


Fig. 1 Fan configuration

Table 1 Fan specification

Designation	Size
D <sub>2</sub> (mm)	326
D <sub>1</sub> (mm)	271
C <sub>1</sub> (mm)	55
b(mm)	65
Z(No. of Blades)	50
n(rpm)	700
r <sub>c</sub> (mm)	19
r <sub>cut-off</sub>	0.06D <sub>2</sub> , 0.09D <sub>2</sub> , 0.12D <sub>2</sub>
θ <sub>cut-off</sub>	62°, 72°, 82°
t	0.12b

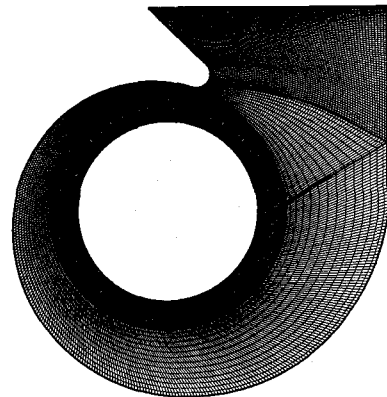


Fig. 2 Computational mesh

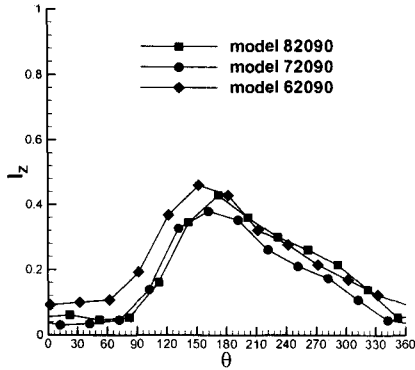


Fig. 3 Size of inactive zone

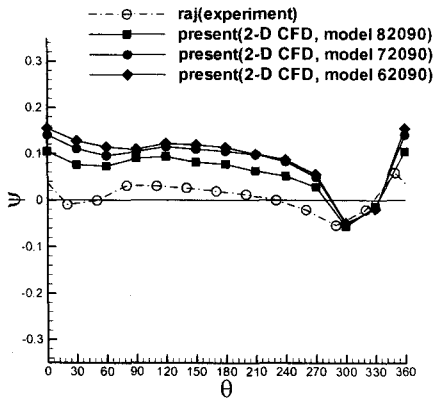


Fig. 4 Comparison of pressure distribution

Table 2 Volume flow rate analysis using CFD

$\theta_{cut-off}$ / $r_{cut-off}$	62	67	72	77	82
0.06D <sub>2</sub>	28.18	28.43	28.94	28.77	28.71
0.07D <sub>2</sub>	28.40	28.74	29.41	29.07	28.80
0.08D <sub>2</sub>	28.45	29.03	29.83	29.33	28.86
0.09D <sub>2</sub>	28.47	29.33	30.04	29.63	28.98
0.10D <sub>2</sub>	28.43	29.07	30.01	29.33	28.84
0.11D <sub>2</sub>	28.28	28.96	29.76	29.05	28.37
0.12D <sub>2</sub>	28.13	28.58	29.52	28.76	28.06

### 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 이용하였는데, Fig. 3에서와 같이 150°~180°에서 최대가 되는 유동차단 영역(inactive zone)이 웬 입구로부터 임펠러 폭의 50% 근방까지 영향을 미쳐 2차원 입력 조건으로는 적합하지 못하므로 임펠러 폭의 60% 되는 지점의 실험 값을 채택하였다. 그리고, 출구에서는 정압 조건을, 날개 열에 대해서는 회전 벽면 조건(rotating wall boundary condition)을 사용하였다.

### 2.5 수치해석 결과

Fig. 4는 웬 중심에서 반경 방향으로 1.13D<sub>2</sub>에 위치한 스크롤 내에서의 원주 방향 정압 분포를 raj의 실험결과<sup>(2)</sup>와 비교한 것으로 정량적으로 차이가 나는 주 원인은 모델의 기하학적 형상의 유사성과 2차원 유동장 계산 때문인 것으로 생각된다. 그러나, 정성적으로는 매우 잘 일치하는 결과를 보여주고 있어 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 부합되고 있다. 따라서 2차원 CFD 계산 값들을 컷오프 최적화 자료로 사용할 수가 있음을 확인하였다. 최적화에 사용될 계산 자료는 Table 2에 제시하였다.

### 3. 컷오프의 위치 및 형상 최적화

#### 3.1 신경망의 구성

2차원 난류유동장 해석을 통해 얻은 유량 값을 신경망 학습을 위한 목적 값으로 사용하였다. 설계 인자로는 기준선으로부터 컷오프까지의 각도와 컷오프의 반경을 설정하였고, 값의 범위는 각각  $67^\circ \sim 77^\circ$ ,  $0.06D_2 \sim 0.12D_2$ 를 사용하였다. 유량 값을 학습하기 위한 신경망은 MATLAB을 사용하여 프로그램을 작성하였다. 신경망은 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 보다 정확한 해를 계산하기 위해  $10^{-6}$ 까지 허용하였다.

#### 3.2 신경망의 학습 결과

위와 같은 신경망을 구성한 뒤 학습을 시키면, 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. 5에 두 값 사이의 관계를 나타내었다.

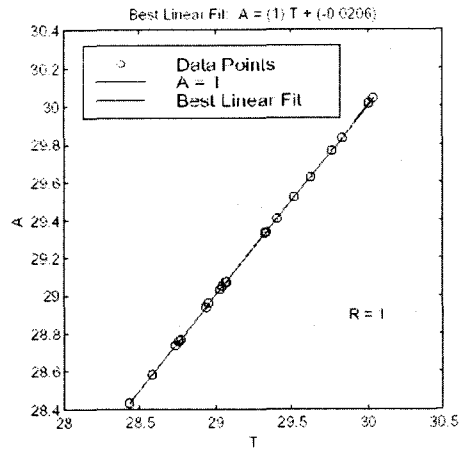
### 4. 결과 및 고찰

기준선으로부터 컷오프까지의 각도와 컷오프 반경의 값에 대한 학습 결과는 Fig. 6과 같다. 대략 기준선으로부터 컷오프까지의 각도는  $70^\circ \sim 74^\circ$ , 컷오프의 반경 값은  $0.088D_2 \sim 0.102D_2$  사이에서 높은 유량의 값이 얻어지며, 최적의 위치는  $71^\circ$ ,  $0.092D_2$  근방이고, 유량은 30.055이다. 이는 난류 유동장 해석을 통해 얻어진 값과 비슷한 결과를 보인다.

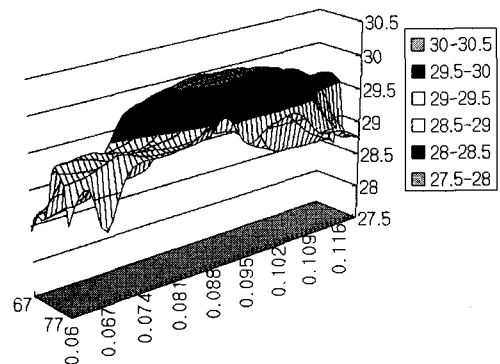
Fig. 7~9는 컷오프의 위치와 형상의 변화에 따른 유

**Table 3** Volume flow rate analysis using neural network

$\theta_{cut-off}$ / $r_{cut-off}$	67	72	77
$0.06D_2$	28.43	28.94	28.77
$0.07D_2$	28.73	29.41	29.07
$0.08D_2$	29.03	29.83	29.33
$0.09D_2$	29.33	30.04	29.63
$0.10D_2$	29.07	30.01	29.33
$0.11D_2$	28.96	29.76	29.05
$0.12D_2$	28.58	29.52	28.76



**Fig. 5** Correlation between object value and learning result value



**Fig. 6** Volume flow rate analysis

동장의 속도분포를 보여주고 있다. Fig. 7에서는 출구 주변에서의 박리가 크게 발생함을 알 수 있다. Fig. 8에서는 Fig. 7보다는 박리가 다소 감소함을 보이며, Fig. 9는 박리가 거의 없어짐을 알 수 있다. 컷오프의 위치  $62^\circ \sim 82^\circ$ 까지  $5^\circ$ 간격으로, 컷오프 반경  $0.06D_2 \sim 0.12D_2$ 까지  $0.01D_2$  간격으로 총 35개의 모델에 대한 위와 같은 유동장의 분포 결과로부터 두 설계 인자의 값이 각각  $71^\circ$ ,  $0.092D_2$  근방에서 출구에서 발생하는 박리의 크기가 최소가 됨을 확인할 수 있었다. 또한, 컷오프 각도가 최적 위치보다 커지면, 출구에서의 박리는 생기지 않으나 유동차단 영역이 증가하여 유동효율이 나빠지므로(Fig. 3), 최적 형상의 결과치는 유동차단 영역의 측정 결과와도 잘 부합되고 있다.

## 5. 결론

신경망 기법을 다익 휠/스크롤 시스템의 컷오프에 적용한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 컷오프의 최적의 위치는  $71^\circ$ , 최적의 형상은 로터 외경의 0.092배로 결정되었다.
- (2) 최적의 컷오프에 대한 2차원 난류 유동장 해석을 통하여 컷오프 입구와 출구부에서의 유동장이 원활함을 확인하였다.
- (3) 다익 휠/스크롤 시스템과 같은 복잡한 형상을 2차원 유동해석과 최적화 기법을 접목하는 신경망 기법으로 간단히 설계할 수 있음을 보여주었다.

## 참고문헌

- (1) 맹주성, 윤준용, 안대범, 윤종은, 한덕진, 1999, "다익휠/스크롤 시스템의 팬 내부 유동 특성에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제 23권 제 5호, pp. 646 ~ 652
- (2) 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
- (3) Morinushi, K., 1987, "The influence of Geometric Parameters on F.C. Centrifugal Fan Noise," *Transaction of the ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Feliability in*

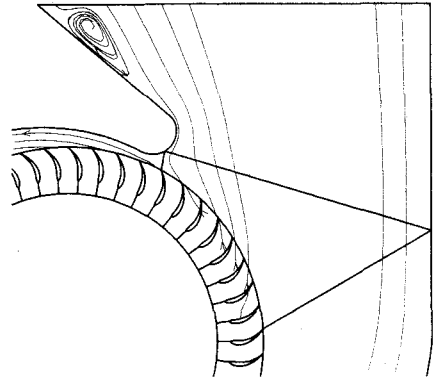


Fig. 7 Streamline distribution(model 62060)

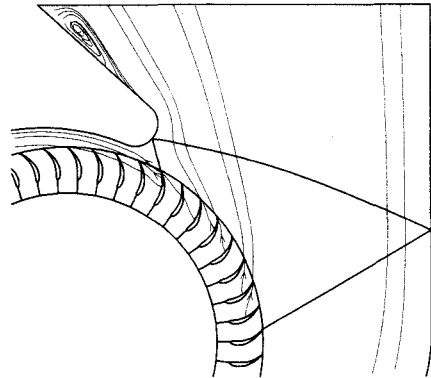


Fig. 8 Streamline distribution(model 67060)

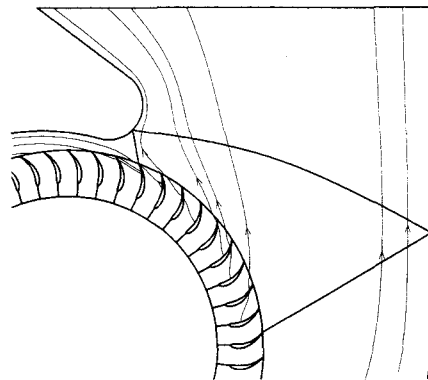


Fig. 9 Streamline distribution for optimized model

*Design*, Vol. 109, pp. 227 ~ 234

- (4) 맹주성, 유달현, 이광호, 박인규, 2000, "다익팬 스크롤 시스템의 형상변수와 내부 유동장 특성과의 관계," 대한기계학회논문집 B권, 제 24권 제9호, pp. 1139 ~ 1147
- (5) Yamazaki, S. and Satoh, R., 1986, "An Experimental Study on the Aerodynamic Performance of Multi Blade Blowers," *Transaction of the JSME*, Vol. 52, No. 484, pp. 3987 ~ 3991
- (6) 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
- (7) Kind, R. J. and Tobin, M. G., 1990, "Flow in a centrifugal Fan of the Squirrel Cage Type," *Transaction of the JSME*, Vol. 52, No. 484, pp. 3987 ~ 3991
- (8) Kiyoshi KAWAGUCHI, et al., 1994, "Experimental Study on Low-Noise Multiblade Fan," *Transaction of the JSME*, Vol. 60, No. 570, pp. 102 ~ 107
- (9) 김진권, 강신형, 1997, "스크롤이 시로코 팬의 성능에 미치는 영향," 대한기계학회 춘계학술대회논문집 B권, pp. 576 ~ 584
- (10) 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
- (11) Bruno Eck, 1973, FANS, p. 3 ~ 154
- (12) 류호선, 안철호, 1998, "Neural Network을 이용한 MWO용 축류팬 연구," 유체기계공업학회 '98강연회 및 연구개발발표회논문집, pp. 73 ~ 81
- (13) 김장권, 1999, "다구찌 방법을 이용한 시로코 팬의 최적설계에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제 23권 제 6호, pp. 761 ~ 768