

반응표면법을 이용한 다익 팬/스크롤 시스템의 설부에 대한 형상 최적화

한 석 영¹⁾ · 맹 주 성¹⁾ · 황 영 민²⁾

한양대학교 기계공학부¹⁾ · 한양대학교 대학원 자동차공학과²⁾

Shape Optimization of Cut-Off in a Multi-blade Fan/Scroll System Using Response Surface Method

Seogyoung Han¹⁾ · Joosung Maeng¹⁾ · Youngmin Hwang²⁾

¹⁾School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang Graduate School, Seoul 133-791, Korea

(Received 24 April 2002 /Accepted 29 October 2002)

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 response surface method. 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. In order to examine the validity of the two-dimensional CFD 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 show qualitatively similarity. The results of two-dimensional CFD were used for constructing the objective function with design variables using response surface method. The optimal angle and radius of cut-off were determined as 72.4° and 0.092 times the outer diameter of impeller, respectively. It is quantified 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.

Key words : Multi-blade fan(다익 팬), Cut-off(설부), Inactive zone(유동차단 영역), Response surface method(반응표면법), Optimization(최적화)

Nomenclature

b : width of impeller
C₁ : cord length of blade
D₁ : inner diameter of impeller
D₂ : outer diameter of impeller
l_z : size of inactive zone
L : width of scroll
n : revolutions per minute of fan, rpm

p : pressure
Q : volume flowrate at the exit, m³/min.
r : coordinate of the radial direction of impeller
r₁ : inner radius of impeller
r₂ : outer radius of impeller
r_c : clearance between fan and cut-off
r_{cut-off} : curvature radius of cut-off
r_s : shape function of scroll
SSR : sum of square
SST : total variation

*To whom correspondence should be addressed.
syhan@hanyang.ac.kr

- t : distance between bell mouth and impeller
- $\overline{u_i u_i}$: Reynold's stress
- V : means of square
- θ : coordinate of the circumferential direction of impeller
- $\theta_{cut-off}$: angle of cut-off from the base line
- μ : coefficient of viscosity
- Ψ : coefficient of pressure
- ψ : degree of freedom

1. 서론

다익 웬/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 웬 및 스크롤의 형상, 그리고 설부(cut-off)의 위치 및 곡률 등 여러 가지 설계인자 중에서도 설부에 관한 것이 대부분이다. Raj³⁾는 설부의 각도가 기준선으로부터 72° 근방에 위치할 때 효율이 가장 좋다는 보고를 하였고, Morinushi⁴⁾는 임펠러 외경의 0.08배 정도의 곡률을 갖는 것이 적합하다고 주장하였다. 또한, Humbud⁵⁾ 등은 설부에서 발생하는 유동박리 현상이 소음의 주요 원인이라는 사실을 밝혀내었고, Maeng⁶⁾ 등은 다양한 설부의 형상변화에 따른 유동차단 영역의 크기와 유량 변화에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 다익 웬/스크롤 시스템의 효율을 최대화하기 위하여 최적의 설부의 각도 및 반경을 변화시켜가면서 실험 및 수치해석을 통해 최적 형상을 찾아내고자 하였다. 연구 방법으로는 최근 급속관 유동장과 같이 강한 3차원의 성격을 띠고 있는 형상에 있어서도 NASA를 중심으로 2차원 유동장

해석과 최적화 기법을 접목하여 설계를 하하고자 하는 노력이 진행되고 있는 바,⁷⁾ 이 방법에 착안하여 3차원 해석 대신에 2차원 난류 유동의 수치해석을 통하여 설부 주위에서의 박리 현상을 정성적으로 예측한 다음, 반응표면법을 이용하여 박리 현상이 최소화되는 설부의 각도와 반경을 정량적으로 계산하였다. 또한, 기존의 연구결과들과 비교하여 타당성을 검증하고 참고문헌 3)과 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.

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
$\theta_{cut-off}$	62°, 67°, 72°, 77°, 82°
t(mm)	0.12b

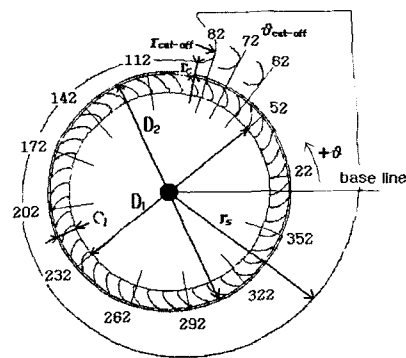


Fig. 1 Fan configuration

2.2 지배방정식

2차원 비압축성 정상 유동의 지배방정식은 다음과 같다.

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

$$\frac{DV_i}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 V_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} u_j u_i \quad (2)$$

2.3 수치해석

수치해석은 상용프로그램인 CFD-ACE++를 사용하였고, 유동해석을 위한 격자는 복잡한 형상에 다중영역법(multi-block approach)을 적용하여 Fig. 2와 같이 53개 영역으로 분할한 후, 모델 당 30,000~33,000개 정도의 정렬격자를 생성하였다. 지배방정식 (1)과 (2)는 유한체적법과 SIMPLEC 알고리즘을 사용하여 계산하였다. 대류항은 2차 풍상차분법(2nd-order upwind scheme)을 적용하였고, 난류방정식에 대해서는 1차 풍상차분법(1st-order upwind scheme)을 적용하였으며, 난류모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 적용하였다.

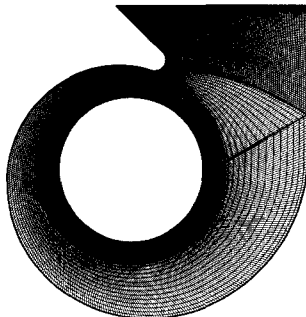


Fig. 2 Computational mesh

2.4 경계조건

입구에서의 경계조건은 사용 모델의 실험 결과를 이용하였다. 참고문헌 2)에서 보여준 바와 같이 Fig. 3은 유동차단 영역(inactive zone)을 Fig. 4와 같은 연기 발생장치를 이용한 유동 가시화 기법으로 측정하여 원주방향 분포 및 크기를 나타낸 것으로, I_z 는 임펠러의 폭 b 로 무차원화한 값이다. $150^\circ \sim 180^\circ$ 에서 최대가 되는 유동차단 영역이 웬 입구로부터 임펠러 폭의 50% 근방까지 영향을 미쳐 2차원 입력 조건으로는 적합하지 못하므로 축방향으

로 임펠러 폭의 60% 되는 단면에서 원주 방향으로 분포된 실험값을 채택하였다. 그림에서 주어진 모델 82090의 숫자에 대한 의미로서 82는 설부의 각도, 090은 설부의 반경이 $0.09D_2$ 임을 나타낸다. 또한, 출구에서는 정압조건을, 날개 옆에 대해서는 회전 벽면 조건(rotating wall boundary condition)을 사용하였다.

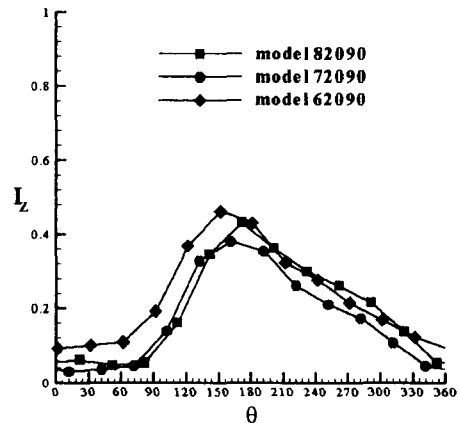


Fig. 3 Size of inactive zone

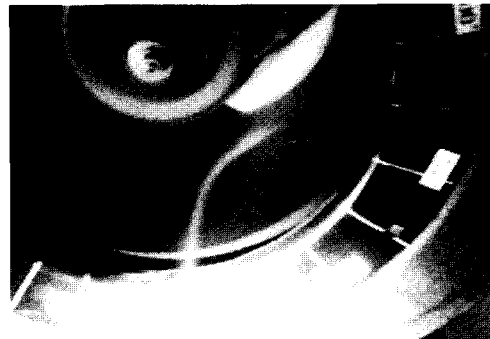


Fig. 4 Flow visualization using smoke generator

2.5 수치해석 결과

2차원 수치해석과 최적화 기법의 접목으로 3차원 성격을 갖는 문제를 설계할 수 있는가를 알아보기 위하여 첫째, 실험값과 2차원 계산값의 압력계수를 축방향으로 여러 단면에서 비교하였고, 둘째, 3차원 계산값과 압력분포를 정성적으로 비교하였다. Fig. 5는 웬 중심에서 반경 방향으로 $1.13D_2$ 에 위치한 스크롤 내에서의 각 모델에 대한 원주 방향의 정압 분포를 $R_{aj}^{(3)}$ 및 본 연구의 실험결과 즉, 스크롤 내

부의 축 방향 5개 단면(휨 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. Fig. 6은 3차원 유동 해석을 통해 얻은 모델 72090의 속도벡터 및 압력장을 나타낸 결과로^{8,9)} Fig. 7의 동일 모델에 대한 2차원 유동해석과 비교해 볼 때, 두 결과 모두 0°~60° 사이의 임펠러 출구와 설부 근방에서 가장 낮은 압력을 나타내고 있으며, 반경 및 원주 방향의 속도 벡터 또한 정량적인 크기는 다르나 거의 동일한 유동 형태를 보이고 있다. 이것은 참고문헌 10), 11)의 실험 결과에서도 확인된다.

따라서, CFD에서 2차원 계산만으로 운동학적인 유사성(kinematic similarity)을 규명한 후, 반응표면법을 통하여 형상을 최적화하고 다시 CFD 계산으로 유량 효율을 검증하고자 하는 본 연구 방향에 잘 부합되므로 2차원 CFD 계산 값을 설부 최적화 자

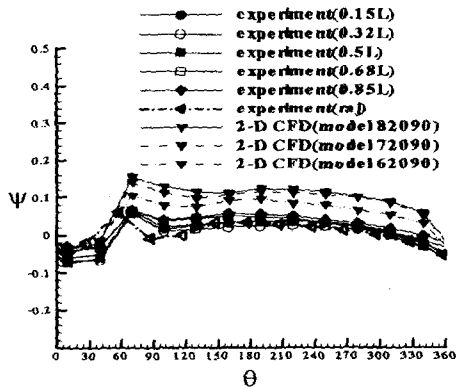


Fig. 5 Comparison of pressure coefficient at 1.13D₂

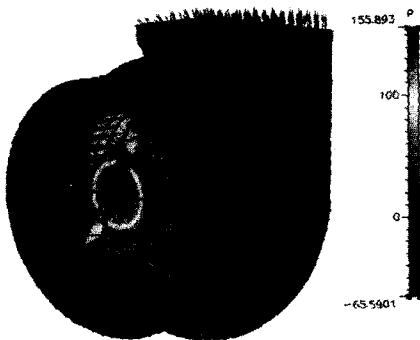


Fig. 6 Velocity vector and pressure contour(3D-CFD)

료로 사용할 수가 있음을 확인하였다. Table 1의 제원에 나타나 있는 설부의 각도와반경에 대한 2차원 CFD 계산에 의해 구해진 유량값들을 Table 2에 나타내었다. 각각의 유량 값들은 실험에서 측정된 로터 내부의 경계조건을 가지고 수치해석을 실행한 후 출구에서 계산된 평균속도를 출구 면적과 곱하여 구한 값이며, Fig. 8과 같이 각각의 모델별로 실험 값과 정성적으로 일치함을 보여주고 있다.

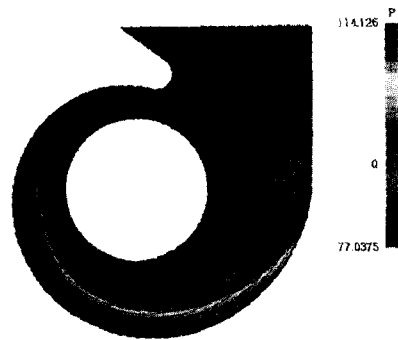


Fig. 7 Velocity vector and pressure contour(2D-CFD)

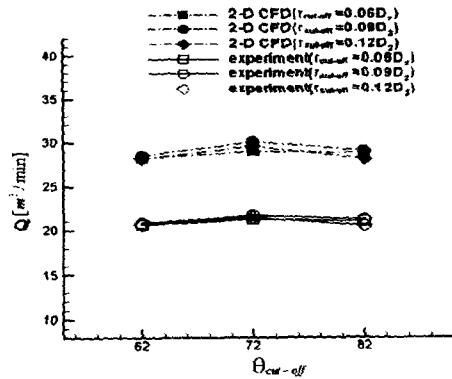


Fig. 8 Comparison of volume flow rate

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

r _{cut-off}	θ _{cut-off}				
	62°	67°	72°	77°	82°
0.06D ₂	28.18	28.43	28.94	28.77	28.71
0.07D ₂	28.40	28.74	29.41	29.07	28.80
0.08D ₂	28.45	29.03	29.83	29.33	28.26
0.09D ₂	28.48	29.33	30.04	29.63	28.98
0.10D ₂	28.43	29.07	30.01	29.33	28.84
0.11D ₂	28.29	28.96	29.76	29.05	28.37
0.12D ₂	28.13	28.58	29.52	28.76	28.06

3. 설부의 형상 최적화

3.1 반응표면법

반응표면법(Response Surface Method)은 Box와 Wilson¹²⁾에 의해 소개된 근사기법으로서 측정된 최소한의 실험데이터를 이용하여 원하는 목적함수를 근사화하는 방법이다. 본 연구에서는 반응표면을 근사화하기 위한 실험계획법¹³⁾으로서 일반적으로 많이 사용하는 중심합성계획법(CCD)을 사용하였으며 근사모델의 형태로 2차 함수를 가정하였다. 이는 2차 함수가 매우 유연하여 다양한 함수의 모양을 표현할 수 있고 근사 반응 함수의 계수를 구하기 쉬우며 많은 연구에 의해 그 신뢰성이 검증되었기 때문이다. 근사모델의 신뢰성 검증을 위해서 ANOVA 검증을 실시하였으며 반응표면법을 사용하여 구한 근사식을 목적함수로 하여 유량 효율이 최대가 되는 설부의 각도와 반경을 구하여 설부의 형상 최적화를 수행하였다.

3.2 형상 최적화

2차원 난류유동장 해석을 통해 얻은 Table 2의 유량 값을 계산자료로 하여 반응표면법을 적용하여 설부의 형상 최적화를 수행하였다. 근사함수를 추정하기 위한 실험계획법¹³⁾으로는 중심합성계획법(CCD)을 사용하였다. 중심합성계획법을 이용한 실험계획을 Table 3에 나타내었으며, 설계인자로는 설부의 각도(x_1)와 설부의 반경(x_2)을 설정하였다. 최소자승법을 이용한 목적함수의 근사식은 다음과 같이 구해진다.

$$y = f(x_1, x_2) = 30.072 + 0.119x_1 + 0.092x_2 - 0.606x_1^2 - 0.503x_2^2 - 0.060x_1x_2 \quad (3)$$

Table 3 Central composite design

Run	x_1	x_2	y_i
1	-1	-1	28.74
2	-1	1	28.96
3	1	-1	29.07
4	1	1	29.05
5	0	0	30.04
6	-1	0	29.33
7	1	0	29.63
8	0	-1	29.41
9	0	1	29.76

Table 4 Analysis of variance

Factors	S	ϕ	V	F_0	F(0.05)
SSR	1.3907	4	0.348	54.27	6.94
SSE	0.0256	4	0.006		
SST	1.4164	8			

식 (3)의 근사식에 대한 신뢰성을 검증하기 위해 ANOVA 검증을 수행하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다. Table 4로부터 유의수준 5%에서 F(=0.05)값보다 F_0 의 값이 크기 때문에 반응표면 모델이 유효하다고 볼 수 있으며, R^2 (coefficient of determination)을 계산하면 다음과 같다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 0.98 \quad (4)$$

여기서 결정계수의 값이 1에 가까우므로 이 근사식은 신뢰할 수 있음을 확인하였다. 따라서, 두 설계인자에 대한 최적화 문제는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } y = f(x_1, x_2) \\ & \text{Subject to } -1 \leq x_1 \leq 1, -1 \leq x_2 \leq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

4. 결과 및 고찰

목적함수의 최적해는 뉴턴법을 이용하여 구하였으며, 목적함수의 반응표면 곡면은 Fig. 9에 나타내었다. 각 설계인자의 최적값과 유량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_1(\text{설부각도}) &= 72.4^\circ \\ x_2(\text{설부반경}) &= 0.092D_2(\text{mm}) \\ Q(\text{유량}) &= 30.08 (\text{m}^3/\text{min.}) \end{aligned}$$

이는 유동장 해석으로부터 구해지는 유량(30.05 $\text{m}^3/\text{min.}$)과 비교해 볼때, 예측치와의 오차는 약 0.13%로 표면반응법이 매우 정확히 예측되었음을 알 수 있다. Fig. 10~12는 설부의 위치와 형상의 변화에 따른 유동장의 속도분포를 보여주고 있다. Fig. 10에서 설부 각도가 62° 근방일 때 출구 주변에서의 박리가 크게 발생함을 알 수 있다. Fig. 11에서는 Fig. 10에 비해 설부 각도가 67° 근방으로 증가했을 때 박리가 다소 감소함을 보이며, Fig. 12는 설부 각도가 72.4° 근방의 최적 위치에 있을 때 박리가 거의 없어짐을 알 수 있다. 또한, 설부 각도가 최적 위치보다 커지면, 출구에서의 박리는 생기지 않으나 앞서

Fig. 3에서 나타낸 것처럼 유동차단 영역이 증가하여 유동효율이 나빠져 유량을 감소시키므로,⁶⁾ 최적형상의 결과치는 유동차단 영역의 증감에 따른 유

량 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.

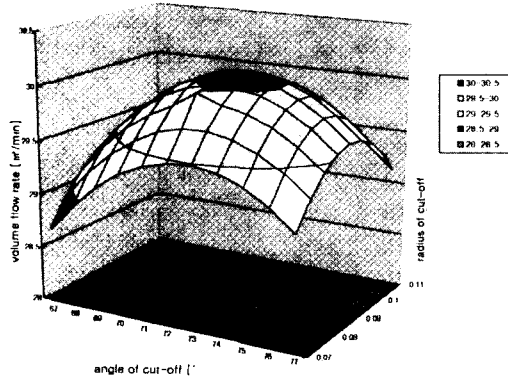


Fig. 9 Response Surface

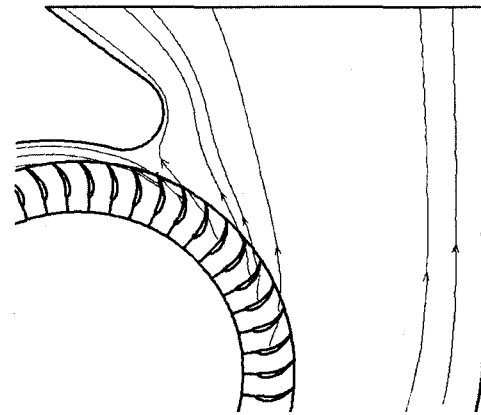


Fig. 12 Streamline distribution for optimized model

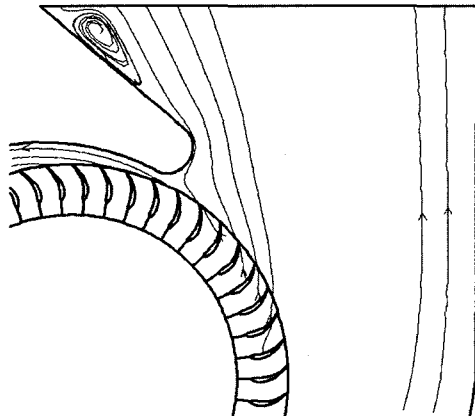


Fig. 10 Streamline distribution (model 62090)

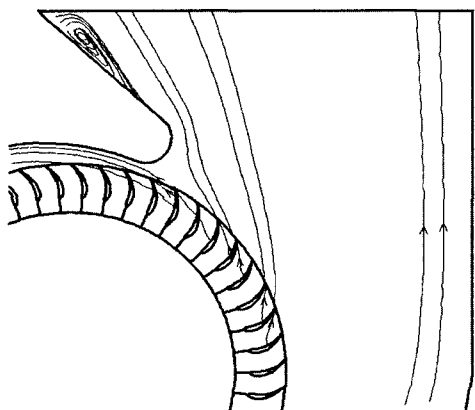


Fig. 11 Streamline distribution (model 67090)

5. 결론

2차원 유동장 해석과 표면 반응법을 접목하여 다익 휠/스크롤 시스템에 적용한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 설부의 최적의 위치는 72.4°, 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 유동장을 갖는 복잡한 형상을 2차원 유동해석과 최적화 기법을 접목하여 형상 최적화할 수 있음을 보여주었다.

References

- 1) R. J. Kind, M. G. Tobin, "Flow in a Centrifugal Fan of the Squirrel Cage Type," Transaction of the ASME, Vol.112, No.484, pp.84-90, 1990.
- 2) J. S. Maeng, J. Y. Yoon, T. B. Ahn, J. E. Yoon, D. J. Han, "An Experimental Study for Flow inside the Rotor of a Multi-blade Fan/Scroll System," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol.23, No.5, pp.646-652, 1999.

- 3) D. Raj, W. B. Swim, "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, 1981.
- 4) K. Morinushi, "The influence of Parameters on F.C. Centrifugal Fan Noise", Transaction of the ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, Vol.109, pp.227-234, 1987.
- 5) N. G. Humbad, T. J. Hall, J. Terry, G. Hess, R. C. Sohaney, "Case Study on Reducing Automotive Blower Rumble Noise," Proceeding of the ASME, Noise and Control Division, Nca-Vol.22, pp.233-242, 1996.
- 6) J. S. Maeng, D. H. Yoo, K. H. Lee, I. K. Park, "Some Relations between the Geometric Parameters and Internal Flow Field Characteristics in Multi-blade Fan/ Scroll System, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol.24, No.9, pp.1139-1147, 2000.
- 7) D. C. Choi, "Sensitivity Analysis with Computational Models for Internal Flows," Hanyang University Seminar, 2000.
- 8) J. Y. Yoon, J. S. Maeng, S. J. Byun, S. W. Lee, "Numerical Analysis of Three-Dimensional Flow in a Forward Curved Centrifugal Fan," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol.24, No.7, pp.916-923, 2000.
- 9) J. S. Maeng, D. H. Yoo, "Theoretical and Experimental Studies for Development of Low Noise High Efficiency Fan/Scroll," Technical Report HYCFEL 9707, Hanyang University, 1998.
- 10) G. R. Denger, M. W. McBride, G. C. Lauchle, "An Experimental Evaluation of the Internal Flow Field of an Automotive System", Technical Report No. TR 90-011, Pennsylvania State University, 1990.
- 11) S. Yamazaki, R. Satoh, "An Experimental Study on the Aerodynamic Performance of Multi Blade Blowers," Transaction of the JSME, Vol.52, No.484, pp.3987-3991, 1986.
- 12) G. E. P. Box, K. B. Wilson, "On the Experimental Attainment of Optimum Condition," Journal of the Royal Statistical Society, Series B., Vol.13, pp.1-14, 1951.
- 13) S. H. Park, Modern Method of Experiment, Minyoung Ltd., 1991.
- 14) H. C. Kim, Practical Regression Analysis, Kyungmoon Ltd., 2000.