

시로코팬의 3차원 유동 특성 및 성능에 대한 전산해석

하 재 홍, 문 영 준**

고려대학교 대학원 기계공학과, *고려대학교 기계공학과

Computational Analysis of the Three-Dimensional Flow Characteristics and the Performance of Sirocco Fan

Jae Hong Ha, Young J. Moon**†

Graduate School, Korea University, Seoul 136-701, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received February 22, 2000; revision received May 23, 2000)

ABSTRACT: The Sirocco fan performance and its three-dimensional flow characteristics were numerically predicted by STAR-CD software. Turbulent flow computations were performed using approximately 500,000 mesh points, and the performance results of two computational methods, transient analysis and quasi-static analysis were compared with experimental data. At present, our attention was focused on localizing the three-dimensional flow characteristics of the Sirocco fan, especially the structure of the secondary flow in the scroll and the through-flow characteristics of the Sirocco fan blades. Also, for an optimization, the scroll passage was tilted with 10 degrees to change the flow characteristics and improve the performance of the Sirocco fan.

Key words: Sirocco fan(시로코팬), Flow characteristics(유동 특성), Blade passage flow(익간 유동), Optimization(최적화), Secondary flow(이차 유동), Performance(성능)

기 호 설 명

- z : 팬 축방향
- θ : 스크롤 각방향

1. 서 론

시로코팬은 크기에 비해 압력 상승이 크고 유량이 많아 가정용에서부터 산업용까지 널리 사용되고 있다. 많은 블레이드로 이루어진 시로코팬은 복잡한 내부 유동으로 인하여 주로 실험적인

연구가 진행되어 왔다.

Raj와 Swim⁽¹⁾은 유입이 있는 블레이드 길이(active area)가 원주위치와 유량의 함수라는 사실을 밝혔고, Cau 등⁽²⁾은 이차 유동 현상에 단순화된 이차 유동 이론을 적용하여 블레이드 내의 이차 유동 현상을 규명하였다. 국내에서는 임 등⁽³⁾은 5공튜브를 이용해 시로코팬 내의 3차원적 유동 특성을 연구하였으며, 맹 등⁽⁴⁾은 로터 내부의 유동 특성과 허브의 영향에 관하여 실험을 하였다. 최근 Gronier와 Gilotte⁽⁵⁾은 STAR-CD를 사용하여 3차원 전산해석을 시도하였고, 신동신 등⁽⁶⁾은 2차원 비정상 유동 해석을 통하여 유동장 및 소음 특성을 예측하였다.

본 연구에서는 STAR-CD를 사용하여 시로코팬의 3차원 비정상 및 준정상 유동 해석을 수행

† Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3358; fax: +82-2-928-9763

E-mail address: yjmoon@korea.ac.kr

하여 성능 예측과 블레이드 위치에 따른 익간 유동의 변화를 관찰해 보았다. 그리고 설계 최적화 연구의 하나로 스크롤 형상을 변화시켜 보았으며 이를 통해 성능 향상을 이룰 수 있었다.

2. 배경 이론

2.1 수치해석 기법

지배방정식은 시간 종속 3차원 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 시로코팬은 빠른 속도로 회전하기 때문에 팬 내부에는 난류 유동의 특성이 나타난다. 회전 각속도 2500 rpm, 유량 5.0 CMM에서 국소 레이놀즈 수를 계산해 보면 익간에서는 약 2,700, 스크롤 관로에서는 38,000 정도가 되었다. 따라서 표준 $k-\epsilon$ 모델을 이용하여 난류 유동 해석을 하였으며, 격자수를 줄이기 위하여 벽근처에서는 벽함수를 적용하였다.

이산화 기법으로는 상류 차분법(upwind differencing scheme)을 사용하였으며, 경계 조건으로 입구에서는 균일한 속도를 주었고 출구에서는 압력을 0.0 Pa로 고정하였다. 따라서, 팬 입출구의 압력차는 입구 압력의 절대값으로 구할 수 있으며, 이것이 본 시로코팬의 성능을 나타낸다.

2.2 비정상 해석법과 준정상 해석법

본 연구에서 사용된 수치해석 방법은 크게 두 가지로 나누어진다. 하나는 비정상 해석법(transient analysis)이며, 다른 하나는 준정상 해석법(quasi-static analysis)이다. 이동격자계를 이용해서 격자를 직접 이동시키면서 푸는 방법이 비정상 해석법이고, 격자를 직접 이동시키지 않고 회전좌표계를 적용해서 푸는 방법이 준정상 해석법이다. 전산해석기법은 비정상 해석법에는 PISO 알고리즘을 사용하였고, 준정상 해석법에는 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다.

본 연구에서는 회전 각속도 2500 rpm, 유량 3.0 CMM 인 경우에 대하여, 위의 두 가지 해석법으로 전산 해석을 시도해 보았다. 그 결과를 실험 결과⁽⁷⁾와 비교한 것이 Fig. 1이다. 이 그림은 무차원화 된 변수를 사용하여 나타낸 것으로서, 가로축은 유량 계수를 나타내고 있으며 세로축은 압력 계수를 나타낸다. Fig. 1을 볼 때 두

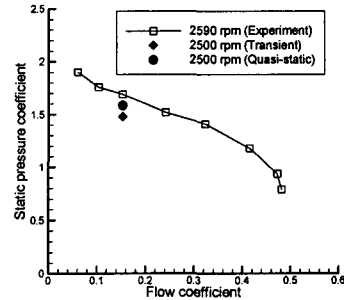


Fig. 1 Comparison of transient and quasi-static analyses on performance curve.

가지 해석법의 차이가 크게 없음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 계산시간이 훨씬 적게 소요되는 준정상 해석법을 적용하여 시로코팬의 유동 특성과 성능 특성을 고찰해 보았다.

2.3 제원

시로코팬은 전향익(forward-curved) 형상을 가진 44개의 블레이드로 구성되어 있다. 블레이드 두께는 1.5 mm이고, 블레이드 폭은 72.0 mm이다. 팬 외경은 147.0 mm이고 팬 내경은 121.0 mm이다. 그리고 블레이드의 입구 각 $\beta_1=80^\circ$, 출구 각 $\beta_2=140^\circ$ 이며, 블레이드 세팅각 $\theta_b=20^\circ$ 이고, 블레이드 전향각 $\delta=60^\circ$ ($\delta=\beta_2-\beta_1$)이다.

2.4 격자 생성

Fig. 2는 시로코팬의 격자 구성을 나타내고 있다. Fig. 2(a)는 전체 계산 영역을 나타내고 있다. 계산에 사용된 전체 격자수는 494,252개로 이중 305,184개가 팬 내부와 블레이드 주위에 분포되어 있다. Fig. 2(b)는 블레이드 주위의 격자를 확대하여 본 것이다. 이 그림에서 보듯이 블레이드 주변으로 격자를 집중시켰으며, 블레이드와 블레이드 사이에는 12×10 으로 격자를 구성하였다. 격자수는 계산 시간과 밀접한 관계가 있기 때문에, 그림에서와 같이 원주 방향으로 진행하면서 격자수를 반씩 줄이게 되었다. 격자수가 일치하지 않는 경계면에서는 arbitrary couple⁽⁸⁾을 이용하였다. Fig. 2(c)는 시로코팬 단면으로 아래 부분이 허브이며 윗부분이 입구이다. 허브를 따

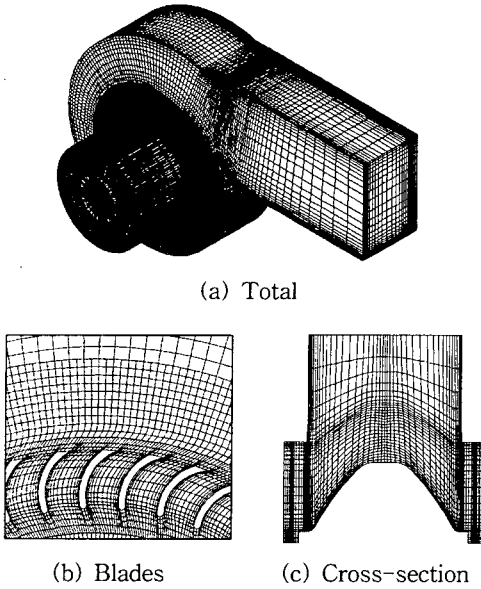


Fig. 2 Computational meshes.

라서 격자가 짜여져 있으며 양쪽에 블레이드가 위치하고 블레이드의 위와 아래가 스크롤 벽면과 연결되어 있다. 블레이드 아래 부분과 스크롤 벽면 사이에는 4개의 격자로 틱 간극을 구성하고 있으며, 블레이드 윗부분과 스크롤 벽면 사이에는 점착(no slip) 조건을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 성능 예측

Fig. 3은 회전 각속도 2500 rpm에서 유량 3.0 CMM, 7.0 CMM에 대한 계산 결과와 회전 각속도 2590 rpm에서의 실험 결과⁽⁷⁾를 비교한 것이다. 이를 통해서 전산해석 결과가 실험으로 구한 P-Q 성능 특성과 유사함을 볼 수 있다. 즉, 본 계산 결과가 실제 시로코펜의 성능을 잘 예측함을 알 수 있으며, 이로써 본 계산 결과의 신뢰성을 확인할 수 있다.

3.2 압력장과 이차 유동

Fig. 4는 회전 각속도 2500 rpm, 유량 7.0CMM 일때, 시로코펜 중간 단면의 압력장을 나타낸 것이다. 이 그림에서 압력 분포를 살펴보면 팬 내부에서 스크롤 벽면 쪽으로 점점 증가하는 것을

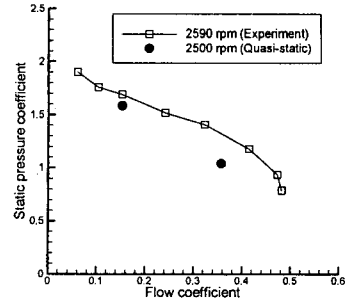


Fig. 3 Comparison of performance among experiment and computations.

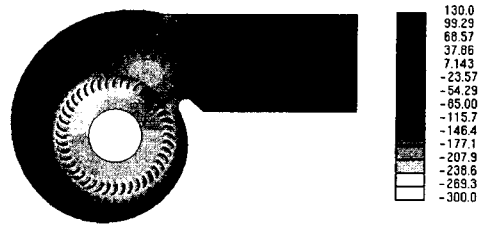


Fig. 4 Static pressure contours on mid-span plane.

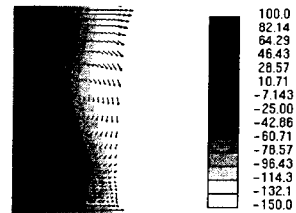


Fig. 5 Secondary flow vectors on a cross-section of the scroll at 135°.

관찰할 수 있으며, 스크롤 벽면을 따라 θ 방향으로도 압력장이 변함을 관찰할 수 있다. 또한, cut-off의 왼쪽 상단 부근에서 와류의 생성을 관찰할 수 있다.

Fig. 5는 스크롤 각 135도에서의 스크롤 관로의 이차 유동(secondary flow)과 압력을 함께 나타낸 것이다. 그림에서 오른쪽이 블레이드가 있는 방향이며, 왼쪽이 스크롤 벽면, 윗쪽이 쉬라우드쪽 스크롤 벽, 아래쪽이 허브쪽 스크롤 벽이다. 이 그림을 통하여 두 개의 와류가 이차 유동을 지배하고 있음을 볼 수 있다. 위의 큰 와류는 시계방향으로 돌면서 스크롤 관로 전체에 걸쳐서 나타나며, 아래의 작은 와류는 블레이드의 틱 간극으로 인하여 발생하는 것으로 반시계 방향으로

돌고 스크롤 각이 커지면서 점점 사라진다.

3.3 익간의 반경방향 속도분포

Fig. 6(a-c)은 회전 각속도 2500 rpm, 유량 7.0 CMM인 경우에 블레이드 입구, 중간, 출구에서의 반경 방향 속도를 팬 외경에서의 블레이드 팁속도로 무차원화하여 허브, 중간, 쉬라우드 단면에 대하여 각각 나타낸 것이다. 이를 통해서 볼 때, 허브 단면에서는 전체적으로 속도가 모두 0이상으로 허브 단면의 모든 유체는 블레이드를 통해 스크롤로 빠져나가는 것을 알 수 있다. 중간 단면에서도 θ 가 약 285도에서 315도 사이를 제외한 모든 위치에서 유량의 토출이 잘 이루어지고 있다. 그러나 285도에서 315도 사이에서는 와류의 영향으로 블레이드로의 역류가 발생한 것을 확인할 수 있다.

쉬라우드 단면에서는 시로코팬 입구에서 블레이드로의 유입 유량이 적기 때문에 블레이드 입구와 출구 부분에서 반경방향 절대 속도도 작은 값을 나타냄을 볼 수 있다. 블레이드 입구 부분에서는 적은 양이지만 유량이 들어오고, 출구 부분에서는 스크롤 각에 따라서 역류가 생기는 부분도 있음을 관찰할 수 있다. 그런데 블레이드 중간부분에서는 반경방향 속도가 양의 값에서 음의 값으로 큰 폭으로 변한다. 이는 쉬라우드 단면의 익간에서 큰 순환류를 형성함을 보여준다. 그리고 중간 단면과 쉬라우드 단면을 비교해 볼 때 스크롤 각도 270도 이후에 역류의 시작 위치가 쉬라우드 단면이 각도상으로 조금 더 큰 곳에 있음을 볼 수 있다. 이는 쉬라우드 단면에서 와류의 생성이 미약하기 때문에 나타나는 현상으로 보인다. 따라서 cut-off의 위치와 형상이 시로코팬의 유동 특성에 지대한 영향을 미침을 예상할 수 있다. 즉, Fig. 6(a-c)과 같은 자료를 기초로 cut-off의 최적설계 연구도 해 볼 수 있을 것이다.

Fig. 6(d)은 앞의 Fig. 6(a-c)과 같은 회전 각속도에서 유량만 3.0 CMM으로 줄였을 때 허브 단면의 반경방향 속도분포를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)의 7.0 CMM일 때와는 많은 차이가 있는 것으로 보인다. 유량이 많을 때는 허브면에서 역류가 발생하지 않은 것에 비해 유량이 적을 때는 스크롤 각 200도 이상에서 역류가 발생하는 것을

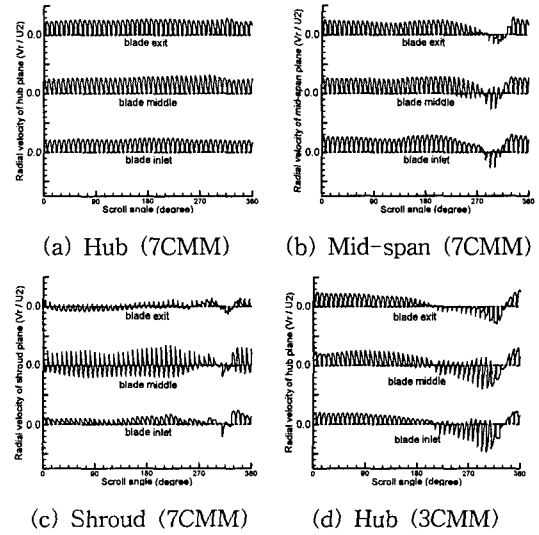


Fig. 6 Radial velocity profiles.

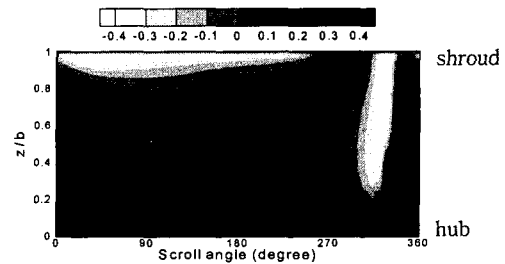


Fig. 7 Radial velocity contours at the rotor exit plane (7.0 CMM).

확인할 수 있다. 즉, 유량과 단면의 위치 그리고 스크롤 각도에 따라서 반경방향 속도분포가 크게 달라짐을 알 수 있다.

3.4 로터 출구에서의 반경방향 속도분포

Fig. 7은 로터 출구면($\theta-z$ plane, 블레이드 출구에서 6mm 바깥쪽)을 평면으로 펼쳐서 이 면에서의 반경방향 속도분포(유량 7.0 CMM)를 나타낸 것이다. Fig. 6에서와 같이 반경방향 속도를 팬 외경에서의 블레이드 팁속도로 무차원화하여 나타내었다. 그림이 줄무늬로 나타나는 것은 블레이드와 블레이드 사이에서 유속 분포가 균일하지 않기 때문이다. 또한, 적은 유량(3.0 CMM)과의 비교를 통해 많은 유량(7.0 CMM)일 때가 더 넓은 토출 영역을 가짐을 확인할 수 있었으며,

cut-off 부근에서의 역류 현상도 유량이 많을 때 훨씬 적어짐을 볼 수 있었다. 그런데 쉬라우드 쪽을 비교해 보면 유량이 많을 때 더 큰 역류가 발생함을 관찰할 수 있었다. 이는 유량이 많을 때 스크롤 관로에서의 이차 유동이 활발하여 쉬라우드 쪽에서 유동의 역류 현상이 강하게 나타난 것으로 추측된다.

따라서, cut-off의 형상과 위치의 선정, 그리고 스크롤 관로에서의 이차 유동의 크기를 줄이는 것이 시로코팬의 유동 특성을 향상시키는 방법이 될 수 있음을 알 수 있다. 이러한 이유로 3.5절에서는 설계 최적화의 한 요소인 스크롤의 형상을 변화시킴으로써 이로 인한 스크롤 관로에서의 이차 유동의 변화와 시로코팬의 성능 향상에 대한 연구를 시도해 보았다.

3.5 스크롤 형상 변화에 의한 설계최적화

Fig. 8은 경사화 된 스크롤을 가진 시로코팬의 단면 형상을 나타내고 있다. 스크롤의 경사각은 10도로 하였으며 로터 출구부에서부터 스크롤을 경사화 시켰다. 입구를 통해 유입된 유동은 허브면을 따라 비스듬히 내려간 후, 블레이드를 통과하고 스크롤 아래 벽면과 부딪히면서 이차 유동을 형성하게 된다. 따라서, 스크롤을 경사화 시킴으로써, 허브면을 타고 내려온 유동과 스크롤 아래 벽면의 충돌을 줄일 수 있을 것으로 예측된다. 이와 같은 예측을 통하여 스크롤을 경사화 시켰으며, 이로 인한 유동 특성과 성능 특성의 변화를 고찰해 보았다. Fig. 9는 회전 각속도 2500 rpm, 유량 7.0 CMM인 경우, 직사각형 모양의 스크롤을 가진 시로코팬과 경사진 스크롤을 가진 시로코팬의 성능 비교를 실험 결과와 함께 나타낸 것이다. 두 경우의 비교를 통하여 스크롤을 경사지게 하였을 때 약 8.1%의 성능 향상이 이루어짐을 관찰할 수 있었다. 이를 통해서 경사진 스크롤을 가진 시로코팬이 더 높은 성능 특성을 나타내는 것을 알 수 있었다. 그러나 본 연구에서는 경사각을 임의로 정해서 전산해석을 시도하였기 때문에 최적 경사각을 찾기 위해서는 좀 더 깊은 연구가 행해져야 할 것이다.

이와 같은 성능 향상의 결과를 얻을 수 있었던 요인에는 여러가지가 있을 수 있다. 시로코팬 출구와 cut-off 부근에 발생하는 와류 영역 사이의

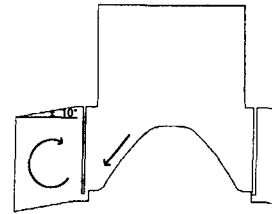


Fig. 8 Sirocco fan with tilted scroll.

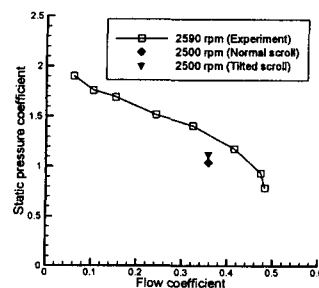


Fig. 9 Comparison of performance of Sirocco fans with normal and tilted scroll.

큰 압력 차이와 스크롤 관로에서의 약해진 이차 유동 등으로 인하여 시로코팬 입출구 압력차가 커지게 되고 이로써 성능 향상이 이루어짐을 확인할 수 있었다. 이 중에서 스크롤 관로에서의 이차 유동의 크기의 변화를 알아보기 위하여 와도를 계산해 보았다.

시계 방향으로 회전하면 음의 와도가 되고, 반시계 방향으로 회전하면 양의 와도가 된다. 직사각형 모양의 스크롤을 가진 시로코팬과 경사화된 스크롤을 가진 시로코팬의 스크롤 각도 135도 스크롤 단면에서의 와도를 구하여 비교한 것이 Fig. 10이다. 이 그림을 통해서 와도의 차이를 분명히 알 수 없지만 와도의 크기를 물리적으로 고찰해 보면 다음과 같음을 알 수 있다. 예를 들어, 와도 500 rad/s를 rpm으로 환산하면 약 4775 rpm이 된다. 그런데 와도는 회전 각속도의 두배이기 때문에 회전 각속도는 약 2387 rpm이 된다. 즉, 시로코팬의 회전 각속도(2500 rpm)와 거의 비슷한 크기로 이차 유동이 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 10에서는 그 차이를 구별해 내기가 힘들기 때문에 면적분을 취하여 순환(circulation, Γ)을 구해 보았다. 양의 순환을 Γ^+ , 음의 순환을 Γ^- 라 하여, Table 1에 스크롤 각도 135도와 180인 경우에 대하여 결과를 정리하였다. 이때

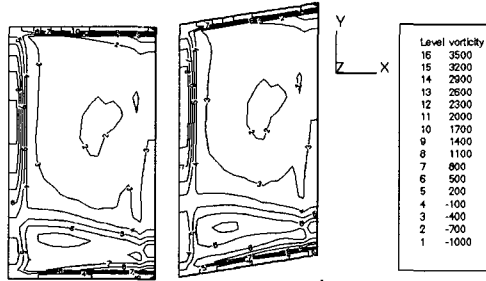


Fig. 10 Comparison of vorticity contours at the scroll cross-sections (135°).

Table 1 Comparison of circulations between normal and tilted scroll

Scroll angle		Normal (m ² /sec)	Tilted (m ² /sec)	Reduction (%)
135°	Γ^+	0.560	0.534	4.64%
	Γ^-	-1.002	-0.963	3.89%
180°	Γ^+	0.596	0.586	1.68%
	Γ^-	-1.043	-1.023	1.92%

reduction은 직사각형 모양의 스크롤과 경사화된 스크롤의 차이를 %로 나타낸 것이다. 스크롤 각도 135도에서 약 5.0% 정도의 순환 감소가 이루어졌다. 결국, 스크롤의 형상 변화가 이차 유동에 변화를 주게 되고 궁극적으로 와도를 줄여 주었기 때문에, 와도로 인한 내부 손실이 줄어들어 시로코팬의 성능이 향상된 것이다.

4. 결론

(1) 본 연구 결과 준정상 해석법과 비정상 해석법의 차이가 크게 없었으며, 따라서 시로코팬의 성능 특성과 유동 특성의 고찰에는 준정상 해석법으로도 가능함을 알 수 있었다.

(2) 전산해석 결과의 P-Q 성능 특성 결과가 실험과 유사함을 볼 수 있었고, 따라서 본 계산 결과의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

(3) 본 연구에서 사용한 팬의 경우 유량 7.0 CMM 일 때, 유량 대부분이 허브면으로는 잘 빠져나갔으나 중간 단면에서는 cut-off 부근에 발생하는 와류의 영향으로 역류가 발생하였으며, 쉬라우드 쪽에서는 유량이 거의 빠져나가지 않았음을 알 수 있었다.

(4) 스크롤 형상의 경사화를 통해 스크롤 내

이차 유동의 크기를 감소시킴으로써 전체적인 압력 상승과 성능 향상을 가져올 수 있었다. (약 8%의 성능 향상)

후 기

본 연구는 1999년도 학술진흥재단 중점연구소 지원과제(97-005-E00199) 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Raj, D. and Swim, W. B., 1981, Measurements of the mean flow velocity and velocity fluctuations at the exit of an FC centrifugal fan rotor, J. Engng for Power, Vol. 103, pp. 393-399.
2. Cau, G., Mandas, N., Manfrida, G., and Nurzia, F., 1987, Measurement of primary and secondary flows in an industrial forward-curved centrifugal fan, J. Fluids Engng, Vol. 109, pp. 353-358.
3. Im, J., Moon, Y. J., and Choi, Y., 1997, Experimental measurements of the three-dimensional flow field in Sirocco fan, Proc. of the 5th Asian Int. Conf. on Fluid Machinery, Vol. 3, pp. 803-808.
4. Maeng, J. S., Yoon, J. Y., Ahn, T. B., Yoon, J. E., and Hahn, D. J., 1999, An Experimental Study for Flow Characteristics Inside the Rotor of a Multiblade Fan/Scroll System, KSME Journal B, Vol. 23, No. 5, pp. 646-652.
5. Gronier, P. and Gilotte, P., 1996, Airflow simulation of an automotive blower for a HVAC unit, SAE, 960961.
6. Shin, D. S., Im, J. S., Kim, C. S., Rho, O. H., Lee, S. G., 1999, Flow Field Analysis of a Centrifugal Fan, Journal of Fluid Machinery, Vol. 2, No. 1, pp. 43-49.
7. Moo, Y. J., 1997, Thermal Flow Analysis of HVAC System; Experiment and Computation, Hyundai Motor Company Research Report.
8. 1996, STAR-CD Version 3.0 Manuals, Computational Dynamics.