

# 주거환기용 시로코팬의 공력 및 소음 특성 연구

김진혁\* · 송우석\*\* · 이승배\*\*\* · 김광용\*\*\*\*

## A Study on Aerodynamic and Noise Characteristics of a Sirocco Fan for Residential Ventilation

Jin-Hyuk Kim\*, Woo-Seog Song\*\*, SeungBae Lee\*\*\*, Kwang-Yong Kim\*\*\*\*

Key Words : Sirocco Fan(시로코팬), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Aerodynamics(공력), Aeroacoustics(공력음향학), Blade Passing Frequency(날개통과주파수), Sound Pressure Level(음압수준)

### ABSTRACT

This paper presents a procedure for the aerodynamic and aeroacoustic characteristics of a sirocco fan. For the aerodynamic and aeroacoustic analyses of the sirocco fan, three-dimensional steady and unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations are solved with a shear stress transport turbulence model for turbulence closure. The flow analyses were performed on a hexahedral grid using a finite-volume solver. The validation of the numerical results is performed by comparing with experimental data for the pressure, efficiency and power. The internal flow analyses of the sirocco fan are performed to understand the unstable flow phenomenon on the casing for the wall pressure and internal flow characteristics at each position. It was found that fluctuation of pressure and locally concentrated noise source are observed near the cut-off and expansion regions of the casing.

### 1. 서 론

가정용 공조기기로 널리 사용되고 있는 시로코팬(Sirocco fan)은 다른 원심송풍기에 비해 많은 수의 전향 날개 및 임펠러의 반경비와 폭이 큰 특징을 가지고 있다. 이러한 형상에 기인하여 입구 유동 단면적의 급격한 확대는 임펠러 내의 재순환 유동을 발생시키며, 확장되는 스크롤을 통과하면서 복잡한 삼차원 유동구조 및 불필요한 소음원을 야기한다.

최근 컴퓨터 성능의 발전에 힘입어 전산유체역학(CFD)을 기초로 하는 삼차원 수치해석은 위에서 언급한 시로코팬 내의 삼차원 유동구조를 파악하고, 유동 속도 및 그에 따른 소음 분포 등을 예측할 수 있는 유용한 수단으로서 그 실용성이 증가하고 있다<sup>(1~4)</sup>.

Guo와 Kim<sup>(5)</sup>은 시로코팬에 대하여 정상 및 비정상 삼차원 RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용

한 수치해석을 통해 내부 유동 특성을 규명하였고, Younsi 등<sup>(6)</sup>은 비정상 삼차원 RANS 해석을 통해 시로코팬의 임펠러 및 스크롤의 상호작용으로 인해 발생하는 유동 및 소음 특성을 파악하였다. Choi 등<sup>(7)</sup>은 시로코팬의 스크롤과 관계되는 변수들에 대하여 실험계획법을 사용한 정상상태의 수치해석을 수행하여 최적의 스크롤 설계를 통해 성능을 향상시켰으며, Kim과 Seo<sup>(8)</sup>는 반응면기법과 RANS 해석을 접목한 수치최적설계를 통하여 시로코팬의 기준형상 대비 효율을 향상시켰다.

본 연구에서는 시로코팬의 스크롤 내 삼차원 유동 및 소음 특성을 파악하고자 정상 및 비정상 삼차원 RANS 해석을 수행하였다. 성능시험을 토대로 수치해석의 타당성을 검증하기 위하여 정상상태의 RANS 해석결과를 실험결과와 비교하였고, 수치해석을 통한 시로코팬 내 스크롤 내부 유동 및 소음원을 파악하여 내부 유동 특성을 규명하고자 하겠다.

### 2. 시로코팬 사양

본 연구에서는 주거환기용으로 사용되는 시로코팬을 대상으로 삼차원 수치해석을 수행하였으며, Fig. 1에 임펠러 및 스

\* 인하대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 삼성전자 DAS 사업팀 개발팀  
\*\*\* 인하대학교 기계공학과  
† 교신저자, E-mail : kykim@inha.ac.kr

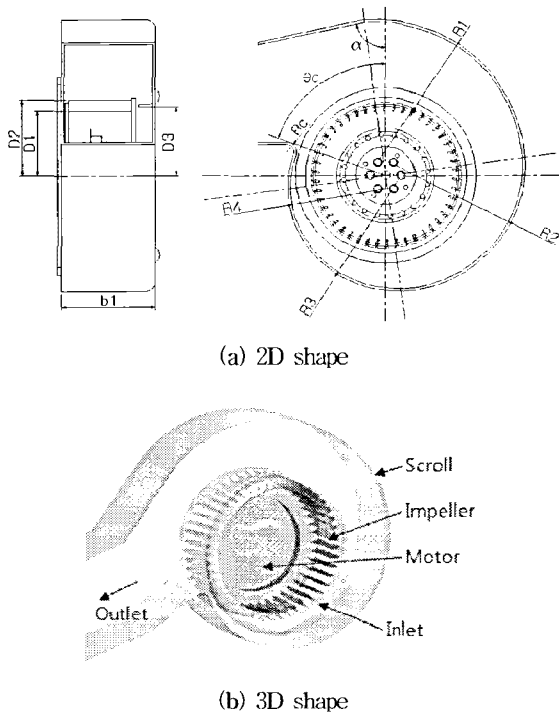


Fig. 1 Schematic diagram and geometry of Sirocco fan

Table 1 Design specifications of sirocco fan

Impeller		Blade	
$D_i/D_s$ , mm	0.851	$\beta_1, \beta_2$ , deg.	58, 141
$b_i$ , mm	60	Thickness, mm	1.4
Number of blades	45	Shape	Cir. arc
Scroll		Design point (Ref.)	
$\theta_c$ , deg.	70	Flow rate, CMH	216.3
$R_c$ , mm	9	Pressure, mmAq	21.6
Outlet area	0.007	Power, W	24.6
$\alpha$ , deg	78	Rotational speed, rpm	2,048

크롤 등 주유동 영역에 대하여 2차원 및 3차원 형상을 도시하였다. 본 연구대상인 시로코팬은 토출부의 스크롤 형상이 일반적인 스크롤 형상과는 다르게 축소되는 형상을 가지고 있는데, 이는 기존 설계 시 Kim 등<sup>(9)</sup>의 연구결과를 반영하여 설계되었다. Kim 등<sup>(9)</sup>은 토출 확장각이 축소관 형태의 토출목을 가져야 역류 등의 성능저감요소를 제거할 수 있고, 유속분포가 균일해지며, 특히 스크롤 토출 확장각이 75도일 때 출구의 전영역에서 유속분포가 균일하다는 것을 실험을 통해 입증한 바 있다. 설계점에서의 유량과 출구압력은 각각 216.3 CMH 및 21.6mmAq이며, 주요제원은 Table 1에 기술하였고, 현 설계점을 토대로 내부 유동 및 소음 특성을 분석하였다.

### 3. 수치해석방법

본 연구에서는 ANSYS사의 상용 소프트웨어인 ANSYS

CFX-11.0<sup>(10)</sup>을 사용하여 시로코팬의 내부 유동장을 비압축성 삼차원 정상 및 비정상 상태로 가정하여 해석을 수행하였다. 시로코팬의 임펠러 및 임펠러를 제외한 스크롤 등 형상 정의는 각각 Blade-Gen 및 Design-Modeler를 사용하여 수행하였고, 격자생성을 위해 임펠러 및 그 외 영역에서 각각 Turbo-Grid 및 CFX-ICEM을 사용하였다. 또한 경계조건의 정의, 유동해석 및 결과정리는 각각 CFX-Pre, CFX-Solver 및 CFX-Post를 사용하여 수행하였다.

정상 및 비정상상태의 수치해석 시 사용된 지배방정식들은 유한체적법으로 이산화 되었으며, 시로코팬을 통과하는 작동유체는 표준상태의 25℃ 공기로 하였다. 입구의 경계조건은 균일한 상태의 전압력을 주었으며, 출구조건으로는 질량유량을 주었다.

삼차원 수치해석을 위해 해석대상인 시로코팬 내부 영역을 3가지 영역 즉, 스크롤, 임펠러 및 흡입부(모터포함) 영역으로 나누어 해석을 수행하였으며, 임펠러 및 흡입부 내 모터는 회전속도를 부여하여 해석을 수행하였다. 대부분의 유체계는 해석 시 계산시간의 단축과 수렴성 향상을 위해 인접하는 두 블레이드 사이의 유동장이 회전방향에 대해 주기적으로 형성되어 있다고 가정하여 하나의 유로에 대해서 주기조건을 적용하여 해석을 수행하지만 본 시로코팬은 임펠러와 확장되어지는 스크롤 사이에서 발생하는 내부 유동의 상호작용에 의해 유동장이 축대칭이고 주기적이라고 가정될 수 없기 때문에 임펠러 내 블레이드 45개를 포함한 전 영역에 대하여 해석을 수행하였다.

정상상태의 수치해석 시 회전하는 임펠러와 정지상태의 스크롤 및 흡입부 사이의 경계면은 격자면에서 계산값을 그대로 정지좌표계에 입력값으로 사용하는 방식인 Frozen-Rotor 방식을 적용하였다. 비정상상태의 수치해석 시에는 Transient-Rotor-Stator 방식을 적용하여 모든 유동영역에 대해 매 시간간격에 대해서 격자를 회전시켜 해석을 수행하였으며, 해석 시 임펠러가 1회전하는 동안 450번의 시간간격( $\Delta t = 6.29228 \times 10^{-5}$ )으로 수행하였고, 각 시간전진에 필요한 수렴성 향상을 위한 반복횟수는 10회로 설정하였다<sup>(10)</sup>.

해석 시 난류모델로는 SST(shear stress transport)모델을

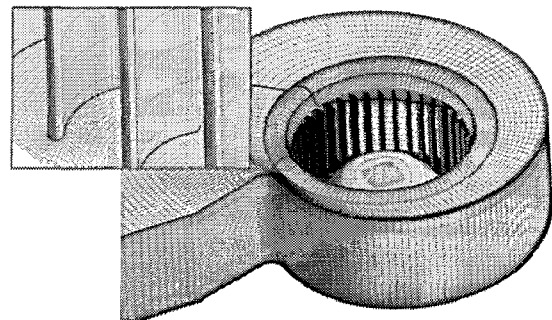


Fig. 2 Computational grids

사용하였다. 일반적으로 SST모델은 역압력구배로 인한 유동 박리현상을 예측하는데 있어 다른 2-방정식 난류모델들에 비해 성능이 우수하다고 Bardina 등<sup>(11)</sup>에 의해 보고된 바 있다.

회전하는 임펠러 블레이드 표면 인근에는 O형 격자계를 사용하였고, 그 외의 스크롤 및 흡입부를 포함한 전 영역에는 H형 격자계를 사용하였다. 전 영역에 대하여 육면체 격자계로 구성하였으며, 격자계의 구성은 Fig. 2에 나타난 바와 같다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 수치해석결과의 검증

앞에서 기술된 시로코팬의 삼차원 수치해석을 수행하기 전 단계로서 해석을 위한 최적의 격자계를 구성하고자 격자의존성시험을 수행하였다. 이 시험은 총 80만개에서 250만개 사이의 격자수들에 대해 수행하였으며, 그 결과 계산에

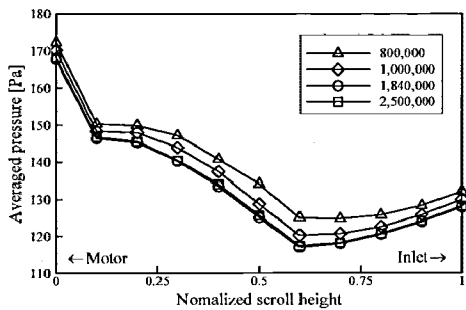


Fig. 3 Grid dependency test results

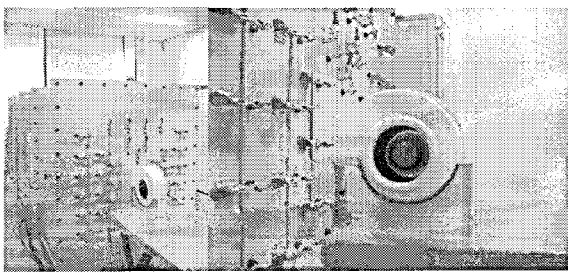


Fig. 4 Performance test of sirocco fan

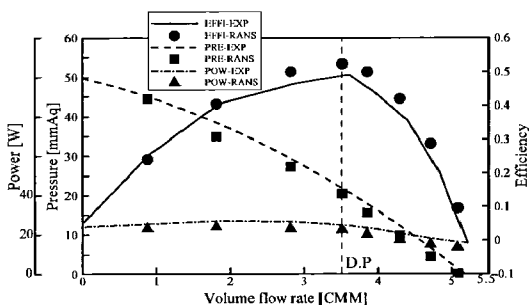


Fig. 5 Validation of CFD results with experimental data

사용될 최적의 격자수는 총 184만개로 결정되었다. Fig. 3은 무차원화 된 스크롤 높이에 따른 각 평면에서의 압력 분포에 대한 격자의존성 시험 결과를 보여주고 있다.

본 연구에서의 성능시험은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 챔버형(chamber type) 테스트 장치에서 수행되었으며, 시로코팬의 유량에 따른 정압력 등 유동 파라미터들의 측정은 ISO 5801 규격<sup>(12)</sup>에 명기된 방법으로 측정되었다. 회전속도는 회전수 속도계(tachometer) 측정 장치를 통하여 측정되었으며, 동력은 입력전력과 사전에 시험된 모터의 효율에 의하여 측정되었다.

수치해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 정상상태의 RANS 해석결과와 성능시험의 결과를 비교하였다. Fig. 5의 특성곡선에서 볼 수 있는 바와 같이 각 유량점에서 예측한 효율은 시험결과보다 약간 높게 예측을 하고 있고, 압력 및 동력은 다소 낮게 예측을 하고 있으나 전반적으로 압력, 효율 및 동력은 시험결과와 잘 일치함을 보여주고 있다. 특히, 시험결과에서의 최대효율지점과 그 이상의 유량범위에서 예측한 성능의 경향이 비교적 정확하기 때문에 본 연구의 수치계산은 타당성이 있다고 볼 수 있다. 또한 최대효율지점에서의 측정된 효율은 약 49%로 최근 많은 연구자들<sup>(13~15)</sup>로부터 제시된 시로코팬의 성능(약 40~60%)과 견주어 보았을 때 비교적 일반적인 성능을 갖는 것으로 사료된다.

### 4.2 정상상태 수치해석을 통한 유동 특성 분석

현 설계점에서 정상상태의 삼차원 해석을 수행하여 Fig. 6과 같이 스크롤 각 단면에서의 속도벡터분포를 통하여 스크롤 내부의 유동 특성에 대하여 살펴보았다. Fig. 6(a)의 단면 A-A'에서는 스크롤 내부의 공간이 좁기 때문에 상당 흡입구에 미소하게 치우쳐 형성된 순환유동이 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig. 6(b)의 단면 B-B'에서는 상당의 순환유동이 점점 증가하는 것을 볼 수 있으며, 특히 하단에서 미소한 제 2의 순환유동이 발생하는 것이 관찰되었다. 이 순환유동들은 Fig. 6(c)에서 나타난 바와 같이 단면 C-C'를 지나면서 점차 증가되는 것을 볼 수 있으며, Fig. 6(d)의 단면 D-D'에서는 상당 흡입구에서 발생한 순환유동의 중심이 블레이드 상당의 뒷전 부근으로 이동한 것을 볼 수 있다. 하류로 가면서 Fig. 6(e)의 단면 E-E'에서는 순환유동의 중심이 상당의 블레이드 뒷전 부근을 벗어나 스크롤 단면의 중심부 부근으로 이동하는 것이 관찰되었으며, 특히 하단부의 제 2의 순환유동의 중심도 스크롤 하단의 중심부로 이동한 것을 볼 수 있다. 이를 통해 하류로 가면서 순환유동의 중심부가 스크롤의 중심부로 이동하여 임펠러 내부로 역류되는 구역이 작아지는 것을 추측해 볼 수 있다. Fig. 6(f)의 단면 F-F'에서는 상부 순환유동의 중심이 스크롤의 중심으로 이동한 것을 볼 수 있으며, Fig. 6(g)의 단면 G-G'를 지나 스크롤 출구 부근인 Fig. 6(h)의 단면 H-H'에서는 상부 및 하부 즉, 2개의 순환유동

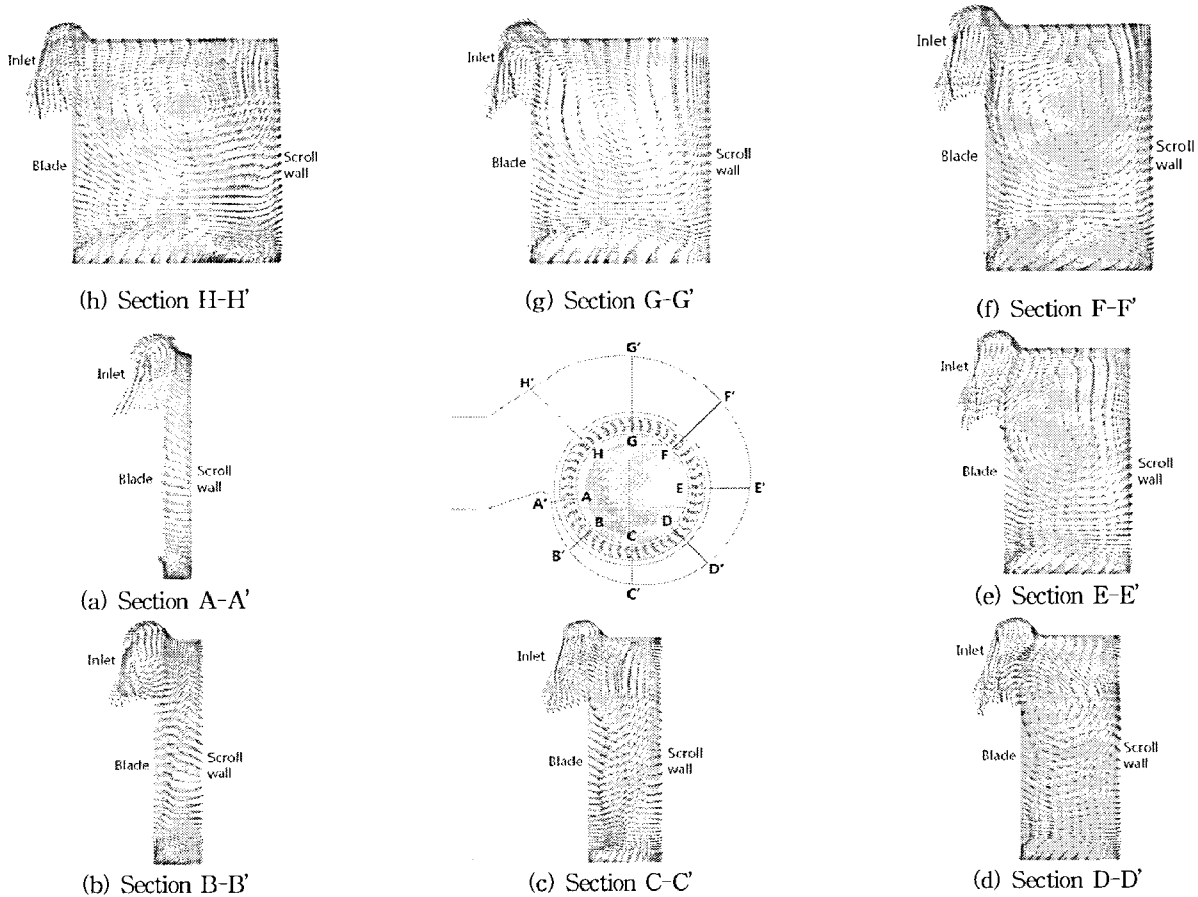


Fig. 6 Velocity vectors at scroll sections

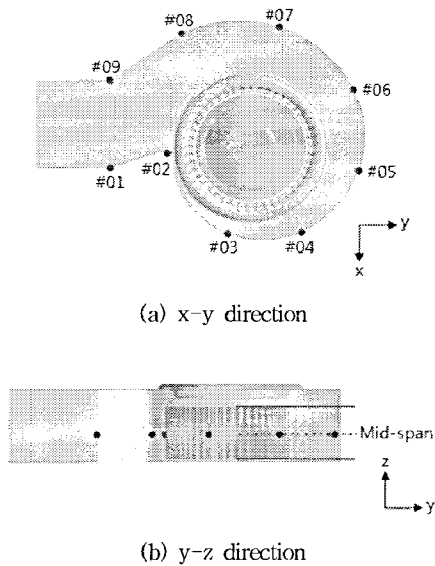


Fig. 7 Geometry of position on casing surface for wall-pressure prediction

이 형성되어 출구로 빠져나가는 것을 볼 수 있다.

### 4.3 비정상상태 수치해석을 통한 소음 특성 분석

본 연구에서는 시로코환 내 임펠러 및 스크롤의 상호작용

으로 인해 발생하는 소음 특성을 분석하기 위해 현 설계점에 서의 비정상 삼차원 RANS 해석을 수행하였다.

본 연구의 대상인 시로코환의 경우 축류환과 달리 Fig. 6 에서 나타난 바와 같이 스크롤과의 상호작용에 의해 임펠러 각 출구 면에서의 유동특성이 원주방향으로 각각 영향을 나타나게 된다. 상기와 같은 유동특성이 반영된 시로코환의 소음해석을 수치적으로 수행하기 위해서는 모든 유동영역에서의 비정상 유동장에 대한 수치해석이 반드시 필요하며, 특히 본 연구에서는 각 원주방향에 따른 스크롤 벽면에서의 국부적인 압력섭동값을 이용하여 소음해석을 수행하였다. Fig. 7(a)와 (b)는 각각 x-y 및 y-z 방향에 대한 각 측정점의 위치를 보여주고 있다.

Fig. 8은 Fig. 7에 도시된 각 측정점 중 2, 5번 위치에서 시간영역에 따라 예측된 벽압력 값을 각각 나타내고 있으며, 이는 소음적인 영향이 설부(Cut-off)영역에서 가장 중요하게 나타나고 있음을 나타내고 있다.

Fig. 9는 상기의 각 측정점 2, 5번의 위치에서 예측된 벽압력 값을 이용하여 주파수 분석을 수행한 결과로서 그림에서 보는 바와 같이 회전수와 날개깃 수에 의해 기인되는 날개 통과주파수(blade passing frequency)(1589Hz)와 더불어 그의 두 번째(3178Hz) 또는 세 번째 하모닉 주파수(4967Hz)

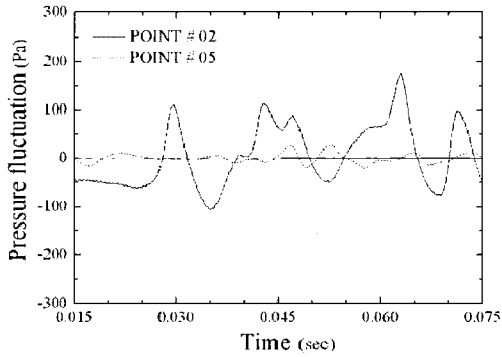


Fig. 8 Comparison of predicted wall-pressure at point 2, 5

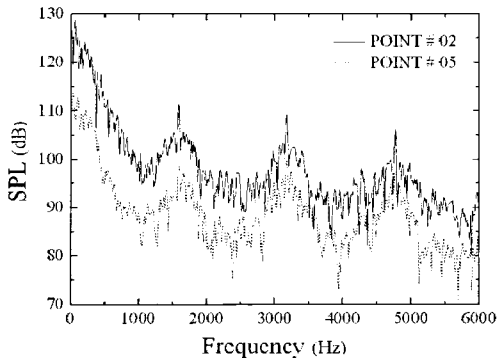


Fig. 9 Comparison of Spectra of predicted wall-pressure at point 2, 5

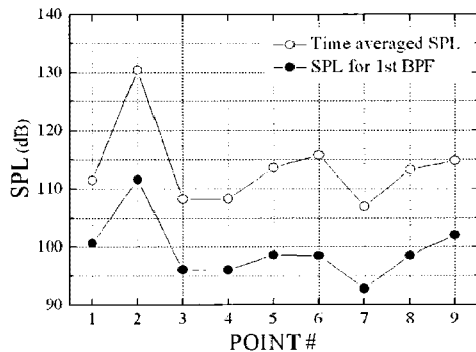


Fig. 10 Comparison of 1st BPF and time-averaged SPL's at test positions on the casing wall

의 이산화된 특성을 나타냄을 확인할 수 있다. 1kHz이하의 저 주파수 영역에서의 광대역 소음특성은 스크롤의 형상변화에 의해 입구부근에서부터 발생하는 이차 와류와 임펠러가 상호작용하면서 발생하는 소음임을 추측해볼 수 있다.

Fig. 10은 비정상 계산된 케이싱 각 위치에서의 시간영역에서의 평균음압수준(sound pressure level)과 날개통과주파수에서의 소음수준 크기를 함께 비교한 결과이다. 시로코헨의 경우 소음적으로 가장 중요한 영향을 미치는 영역이 설부영역에 국부적으로 집중되어 있는 것으로 알려져 있는데

상기의 결과에서는 이와 같은 경향을 비정상 계산을 통해 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있다. 상기의 계산으로 피크소음은 임펠러 깃과 설부의 강한 상호작용에 의해 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 그 외 저주파 영역에서의 광역소음은 정상상태 유동해석결과를 통해 확인된 케이싱을 따라 흐르는 유로 내에 존재하는 이차순환유동과 깃과의 상호작용에 의해 발생된 것으로 추측된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 시로코헨의 스크롤 내 삼차원 유동 및 소음 특성을 파악하고자 정상 및 비정상 삼차원 RANS 해석을 수행하였다. 성능시험을 토대로 수치해석의 타당성을 검증하기 위하여 정상상태의 RANS 해석결과를 실험결과와 비교하였다. 현 설계점에서 정상상태의 삼차원 해석을 수행하여 스크롤 각 단면에서의 속도분포를 통해 내부 유동 특성을 살펴 본 결과, 스크롤 내에서 하류로 갈수록 2개의 순환유동이 형성되는 것을 관찰할 수 있었다. 임펠러 및 스크롤의 상호작용으로 인해 발생하는 소음 특성을 분석하기 위해 비정상상태의 삼차원 해석을 수행하였으며, 원주방향으로 선택된 케이싱에서의 벽 압력 소음수준과 스펙트럼을 분석한 결과, 피크소음은 설부영역과 임펠러 깃의 강한 상호작용에 의해 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 그 외 저주파 영역에서의 광역소음은 케이싱을 따라 흐르는 유로 내에 존재하는 이차순환유동과 깃과의 상호작용에 의해 발생할 수 있음을 확인하였다. 본 연구의 결과를 토대로 시로코헨의 스크롤 내 설부영역은 향후 RANS 해석과 대리모델을 결합한 수치최적설계를 수행할 시 성능 향상을 도모할 수 있는 주요설계인자로 보여진다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 전략산업기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음을 밝힘. (No. 10031771)

## 참고문헌

- (1) Fukutomi, J., Shigemitsu, T., and Yasunobu, T., 2008, "Performance and Internal Flow of Sirocco Fan Using Contra-Rotating Rotors," *Journal of Thermal Science*, Vol. 17, No. 1, pp. 35~41.
- (2) Cho, Y., and Moon, Y. J., 2003, "Discrete Noise Prediction of Variable Pitch Cross-Flow Fans by Unsteady Navier-Stokes Computations," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 125, No. 3, pp. 543~550.
- (3) Han, S. Y., Maeng, J. S., and Yoo, D. H., 2003, "Shape Optimization of Cutoff in a Multiblade Fan/Scroll System

- using Response Surface Methodology,” Numerical Heat Transfer-Part B, Vol. 43, No. 1, 87~98.
- (4) Hah, J. H., Moon, Y. J., and Park, J. M., 2001, “Computational Analysis of the Three-Dimensional Flow Fields of Sirocco Fan,” International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 9, No. 2, pp. 44~50.
- (5) Guo, E. M., and Kim, K. Y., 2003, “Three-Dimensional Flow Analysis and Improvement of Slip Factor Model for Forward-Curved Blades Centrifugal Fan,” KSME International Journal, Vol. 18, No. 2, pp. 309~319.
- (6) Younsi, M., Bakir, F., Kouidri, S., and Rey, R., 2007, “3D Unsteady Flow in a Centrifugal Fan: Impeller-Volute Interaction,” Journal of Computational and Applied Mechanics, Vol. 8, No. 2, pp. 211~223.
- (7) Choi, Y. S., Jung, U. H., Kwon, O. M., and Lee, K. Y., 2007, “Optimum Design of Volute Configuration in a Sirocco Fan using CFD and DOE,” The 9th Asian International Conference on Fluid Machinery, NO. AICFM9-153.
- (8) Kim, K. Y., and Seo, S. J., 2004, “Shape Optimization of Forward-Curved-Blade Centrifugal Fan with Navier-Stokes Analysis,” Journal of Fluids Engineering, Vol. 126, No. 5, pp. 735~742.
- (9) 김제원, 김진민, 이국도, 2004, “토출구 형상에 따른 원심 송풍기의 성능특성,” 2004 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 70~77.
- (10) ANSYS CFX-11.0 Solver Theory, 2006, Ansys Inc.
- (11) Bardina, J. E., Huang, P. G., and Coakley, T., 1997, “Turbulence Modeling Validation,” 28th AIAA Fluid Dynamics Conference, AIAA-1997- 2121.
- (12) ISO 5801, 1997, Industrial Fans-Performance Testing Using Standardized Airways.
- (13) 김진권, 강신형, 1997, “스크롤이 시로코 팬의 성능 특성에 미치는 영향,” 대한기계학회 춘계학술대회논문집 B, pp. 576~581.
- (14) 박광진, 이상환, 손병진, 1999, “저소음 고효율 시로코 팬 개발에 관한 연구,” 유체기계저널, 제2권, 제2호, pp. 46~56.
- (15) 유성연, 이대웅, 2002, “자동차용 시로코팬의 성능 및 유동특성에 관한 실험적 연구,” 설비공학논문집, 제14권, 제11호, pp. 954~963.