

## 시로코 팬의 3차원 유동해석 및 소음원에 관한 연구

강정석<sup>1</sup>, 김진택<sup>1</sup>, 이철형<sup>2</sup>, 백병준<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>전북대학교 기계시스템공학부, <sup>2</sup>(주)대륜산업

### A Study on Three-Dimensional Flow Analysis and Noise Source of Sirocco Fan

Jeong-Seok Kang<sup>1</sup>, Jin-Taek Kim<sup>1</sup>, Cheol-Hyung Lee<sup>2</sup>, Byung-Joon Baek<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Mechanical Engineering, Chonbuk National University

<sup>2</sup>Corp. Dae Ryun

**요약** 본 논문에서는 환기를 위한 시로코 팬의 내부에서 유동 및 소음을 해석하기 위해 상용프로그램으로 해석하였다. 소음원의 위치와 크기만을 확인하기 위해 유동해석은 정상 상태 유동 해석을 진행하였다. 유동 해석을 통해 시로코 팬의 내부에서 발생하는 유동의 속도와 속도 벡터로 유동의 흐름을 보았다. 내부의 압력 분포는 contour로 결과를 보았다. 정상 상태 유동 해석 결과에서 Curle surface acoustic power와 Proudman acoustic power를 활용하여 해석결과로부터 소음원의 위치와 크기를 볼 수 있다. Curle surface acoustic power으로 표면에서 발생하는 소음을 볼 수 있다. Proudman acoustic power으로 유동영역에서 발생하는 소음을 볼 수 있다. 정상 상태에서 시로코 팬의 내부에서 발생하는 소음원의 위치와 크기만 볼 수 있기 때문에 발생하는 소음의 주파수를 확인하기 위해서는 추가적으로 비정상 상태 해석을 진행할 필요가 있다. 본 연구를 통해 시로코 팬의 성능을 향상시키고 소음을 저감하기 위한 연구의 기초 자료가 될 것으로 기대된다.

**Abstract** This study examined the flow and noise inside a sirocco fan for ventilation as a commercial program. To confirm only the location and power of the noise source, flow analysis was performed with steady state flow analysis. Through flow analysis, the flow was observed in the sirocco fan and the velocity vector. The pressure distribution inside was observed with contours. From the results of steady analysis, the position and size of the noise source could be seen using the 'Curle surface acoustic power' and 'Proudman acoustic power'. The Curle surface acoustic power can be used to observe the noise from the surface. The Proudman acoustic power can be used to detect noise generated in the flow region because the position and size of the noise source generated inside the sirocco fan can be seen only in the steady state. Therefore it is necessary to further analyze the unsteady state to check the frequency of the noise generated. This study provides basic data for improving the performance of the Sirocco fan and reducing the noise.

**Keywords** : Flow, Noise source, Pressure, Sirocco fan, Sound power level, Velocity

### 1. 서론

시로코 팬은 원심팬의 한 종류이다. 시로코 팬의 특징

은 회전하는 것의 형상이 전곡형을 띄고 짧은 것이다. 또한, 다른 원심팬에 비해 작은 크기를 가지고 있고, 저양용으로 사용되지만 배출유량이 많은 특징이 있다. 현재

본 논문은 전북대학교 연구과제로 수행되었음.

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2017년도 산학협력력 기술개발사업(산학협력력 기술개발사업(연구마을), 과제번호:C0541403)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

\*Corresponding Author : Byung-Joon Baek(Chonbuk National Univ.)

Tel: +82-63-270-2373 email: baekbj@jbnu.ac.kr

Received October 1, 2018

Revised November 9, 2018

Accepted December 7, 2018

Published December 31, 2018

시중의 시로코 팬은 일반 환기용으로 주로 사용되고 있다. 환기용 팬은 실생활에 매우 밀접하며, 사람들의 생활 환경에 들어와 있다. 생활환경에 밀접한 만큼 팬에서 발생하는 유동소음의 문제가 야기된다. 따라서 고성능, 고효율을 유지 및 개선하면서 소음을 저감할 필요가 있다.

시로코 팬의 유동과 소음에 관한 연구가 되어 오고 있다. Tsutomu Adachi[1]등은 시로코 팬의 다양한 블레이드 형상을 동일한 형상의 케이스에서 실험을 진행하였다. 팬 성능과 출구 속도 사이의 관계가 고려되었고, 블레이드 형상과 성능사이의 관계를 실험하였다. 이 실험을 통하여 블레이드의 입, 출구의 각도와 블레이드의 경사각을 고려한 시로코 팬의 설계를 할 수 있는 기반이 되었다. Kwang-Yong Kim[2]등은 난류 모델을 활용하여 시로코 팬 내부에서 발생하는 유동을 해석하였고, 블레이드와 임펠러 형상을 설계 변수로 선택하여 효율과의 관계를 해석하였다. 최적 유량을 얻을 수 있는 설계변수들에 대해서 연구하였다. Mohand Younsi[3]등은 비정상 RANS 기반으로 해석을 수행하여 공기역학적으로 음향 압력을 예측하였다. 또한 ISO 표준에 따라 공력 성능을 테스트하였습니다. 측정 실험 결과를 같은 조건의 CFD 해석을 통하여 얻은 SPL(Sound Pressure Level, dB)와 비교하였다. Yilmaz Dogan[4]등은 LES를 활용하여 시로코 팬 내부의 유동을 해석하고 압력과 음향 소스를 계산하였습니다. 협대역 주파수 스펙트럼의 음압 레벨 분포, 음향 파의 지향성 및 전체 음향 파워 레벨을 수치적으로 계산하였고, 이러한 LES 결과는 난류 및 소음 발생 메카니즘을 이해하는데 제공될 수 있음을 보여주었습니다. Souichi Sasaki[5]등은 시로코 팬 내부에서 발생하는 소음의 광대역 소음을 연구하였다. 팬의 최대 효율점 부근에서 500 Hz에서 1250 Hz까지 다양한 영역에서 소음이 발생하는 것을 확인하였다. 이와 같이 기존의 실험은 대부분 유동해석을 Unsteady로 하여 SPL을 비교하였다. 그러나 Unsteady로 해석을 진행할 경우 주파수의 정보를 얻을 수는 있지만 계산 비용이 커지게 된다. 단시간에 시로코 팬 내부의 소음원의 위치와 크기만을 확인하기 위해서는 많은 시간이 필요한 unsteady 해석이 불필요하다. 따라서 본 연구에서는 빠른 시간에 소음원의 위치 및 크기 파악을 위하여 Steady 유동해석과 Broadband Noise Source 모델을 활용하여 소음을 해석하였다.

상용프로그램인 Star-CCM+[6]의 user guide를 통해

Star-CCM+에서 활용하는 유동, 소음 해석 모델을 적용하였다. 유동은 fan과 같은 회전체에 적용되는 SST(Menter) K-Omega를 활용하였다.

본 연구에서는 시로코 팬의 유동과 시로코 팬의 내부에서 발생하는 소음을 상용프로그램을 활용하여 해석하였다.

## 2. 시로코 팬 모델

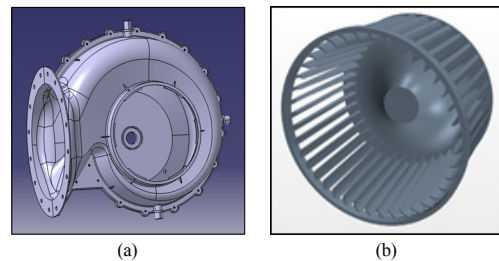


Fig. 1. Shape of sirocco fan  
(a) Shape of case (b) Shape of impeller

시로코 팬의 내부에서 발생하는 유동을 분석하는 것은 시로코 팬의 성능 향상 및 설계 변경에 필요하다. 임펠러를 형성하는 블레이드에 의해 발생하는 유동이 케이스의 형상을 따라 토출되면서 발생하는 난류에 의해 국부적으로 소음이 발생하고 이는 팬의 떨림에 영향을 미쳐서 구조적으로 문제를 발생하게 된다. 따라서 팬의 효율 향상과 안정적인 유동을 유지하기 위해서는 내부에서 발생하는 유동을 분석하고 이에 대한 소음원의 파악이 필요하다. 시로코 팬의 내부 유동을 해석하기 위해 상용프로그램인 Star-CCM+[6]을 활용하여 팬 내부의 유동, 소음원을 해석하였다.

시로코 팬은 외형인 케이스와 팬 내부에서 회전을 하는 임펠러로 구성이 되어있다. Fig. 1는 본 해석 모델인 시로코 팬의 형상이다. Fig. 1(a)는 케이스 형상으로 중앙의 원으로부터 유동이 유입되고, 좌측의 토출구로 유동이 빠져 나가는 형상이다. 유동을 이끌어서 토출시키는 케이스는 비선형 곡선으로 설계가 되어 있고, 효율 향상과 소음원 분석을 위해 케이스 형상에 대한 유동의 변화에 대해서 분석이 필요하다. Fig. 1(b)는 블레이드로 이루어진 임펠러 형상이다. 임펠러의 블레이드의 형상은

회전반경으로 굽혀진 전곡형이며, 깃은 짧은 것이 특징이다. 블레이드는 40개로 구성되어 있으며, 회전을 통해 축으로부터 유동을 유입시켜 반경방향으로 유동을 발생시킨다.

유입구의 반대 벽면은 임펠러의 회전을 위해 임펠러가 케이스와 축으로 이어져 있다. 임펠러와 케이스 유입구는 동심원이다.

### 3. 경계조건 및 해석 모델

시로코팬의 내부 유동해석을 위해 경계조건과 해석 모델을 설정하여야 한다. 시로코 팬의 정상상태와 벽면의 유동, 난류유동해석을 하기 위해 Steady, SST (Menter) K-Omega, All y+ Treatment를 모델로 설정하였다. 소음원의 크기와 위치를 해석하기 위해 Ffowcs Williams-Hwakings Steady, Noise Source Model, Curle, Proudman 모델을 설정하였다. 소음은 음속에 영향을 받으며, 소음원의 크기를 계산할 때 반드시 고려하여야 한다. 음속을 계산하기 위한 식은 다음과 같다.

$$a_0 = \sqrt{(\gamma RT_0)} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서  $R$ 은 기체상수,  $T_0$ 는 절대온도(K),  $C_p$ 는 정압비열,  $C_v$ 는 정적비열이다. 293(K)의 건조한 공기에서 음속은 343.2 m/s이다.

Curle Surface Acoustics Power 모델은 등방성 난류와 낮은 마하수를 가정하여 고체 표면에 흐르는 난류 경계층 유동에서 발생하는 소음을 계산한다. 소음원의 크기인 acoustic power를 계산하기 위해 식 (3)을 통해 acoustic pressure를 계산하여야 한다.

$$\rho'(x,t) = \frac{1}{(4\pi a_0^3)} \int_S \left[ \frac{(x-y)}{r^2} \frac{\partial p}{\partial t} \left( y, t - \frac{r}{a_0} \right) \right] \cdot n dS(y) \quad (3)$$

식 (3)에서  $\rho'$ 은 acoustic pressure,  $a_0$ 는 음속,  $t-r/a_0$ 는 emission time,  $p$ 는 표면 압력,  $x$ 는 far field의 위치,  $y$ 는 far field에서 소음이 측정되는 위치,  $r$ 은  $|x-y|$ ,  $n$ 은 벽의 수직 방향이다.

$$p' = a_0^2 \rho' \quad (4)$$

$$p'(x,t) = \frac{1}{(4\pi a_0)} \int_S \left[ \frac{(x-y)}{r^2} \frac{\partial p}{\partial t} \left( y, t - \frac{r}{a_0} \right) \right] \cdot n dS(y) \quad (5)$$

식 (4)은 acoustic pressure와 far-field sound speed에 대한 관계식으로 식 (5)는 식 (3)에서 식 (4)를 대입하여 작은 변화와 단일 조건에서 음압에 대한 식으로 나타낸다.

고체 표면에서 발생하는 소음원의 크기는 단위 표면당 Acoustic Power [ $W/m^3$ ]로 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \int \frac{A_c(\vec{y})}{(12\rho_0\pi\alpha_0^3)} \overline{\left( \frac{\partial p}{\partial t} \right)^2} dS(\vec{y}) \quad (6)$$

식 (6)에서  $A_c$ 는 상관영역,  $\alpha_0$ 는 음속이다.  $\overline{(\partial p/\partial t)^2}$ 를 계산하여 turbulence time scale, turbulence length scale, wall shear stress를 구한다. 식 (6)에서 계산된 Acoustic Power를 식 (7)을 통해 Sound Power Level [dB]로 변경할 수 있다.

$$C_{AP}(dB) = 10 \log \frac{P}{P_{ref}} \quad (7)$$

Proudman Acoustics Power 모델은 등방성 난류를 가정하며, 단위 부피 당 Acoustic Power(AP) [ $W/m^3$ ]를 계산한다. 비압축성 등방성 난류유동의 높은 Reynolds 모델에서 단위 부피 당 sound power는 다음과 같이 나타낸다.

$$AP = \alpha \rho_0 \frac{u^3}{l} \frac{u^5}{c_0^5} \quad (8)$$

식 (8)에서  $\alpha$ 는 종방향 속도 형태와 관련된 상수,  $u$ 는 속도 성분에서 하나의 RMS,  $l$ 은 종방향의 integral length scale,  $\rho_0$ 는 far field에서의 밀도,  $c_0$ 는 far field에서의 음속이다.

식 (7)과 같이 Proud Acoustic Power를 식 (9)을 통해 Sound Power Level[dB] 단위로 변경할 수 있다.

$$P_{AP}(dB) = 10 \log \frac{P}{P_{ref}} \quad (9)$$

식 (7)와 (9)에서 Curl Surface Acoustics Power와 Proudman Acoustics Power의 reference acoustic power는  $P_{ref} = 1.0E-12 W/m^2$ 이다.

### 4. 해석 결과

상용프로그램으로 시로코 팬의 내부 유동 및 소음 해석을 진행하였다.

Fig. 3과 4는 시로코 팬 내부 단면에서 발생하는 유동의 분포와 벡터이다. 시로코 팬 내부 유동은 임펠러가 회전함에 따라 중심으로부터 유입되어 벽면을 타고 좌측 토출구로 나가는 것을 볼 수 있다. Fig. 3에서 블레이드의 표면과 유동이 토출되는 구간의 턱 부분에서 속도가 큰 것으로 나타난다. Fig. 4에서는 유동의 방향과 크기를 볼 수 있다. 전반적으로 블레이드의 바깥쪽 끝부분에서 속도가 컸으며, 속도가 가장 끝부분은 토출되는 구간의 턱 부분으로 나타났다. Fig. 3과 4에서 토출구의 하단에서는 유동이 거의 없는 것과 유입구의 중심보다 유입되는 유동의 중심이 우측 하단으로 치우친 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 시로코 팬 내부 단면의 압력분포이다. 압력은 블레이드의 상부 표면에서 가장 높게 발생하였으며, 턱 뒤 벽면에서 유동에 의해 압력이 높은 것을 볼 수 있다. 시로코 팬 내부에서 발생하는 소음원의 크기와 위치를 확인하기 위해 Proudman Acoustic Power와 Curle Surface Acoustic Power를 활용하였다. 내부 유동 구간에서 발생하는 소음은 Proudman Acoustic Power으로 볼 수 있고, 시로코 팬의 벽면에서 발생하는 소음은 Curle Surface Acoustic Power로 볼 수 있다. Fig. 6과 7은 시로코 팬 내부에서 발생하는 소음을 나타낸다. 각 그림은 시로코 팬의 수직 단면과 수평 단면이다. 유동구간에서 발생하는 소음의 크기는 Proudman Acoustic Power이며, 이는 SWL(Sound Power Level, dB)로 나타낸다. SWL의 분포와 크기를 통해 소음원의 위치와 크기를 볼 수 있다. Fig. 6에서 블레이드의 표면에서 소음이 발생하는 것을 볼 수 있으며, 전반적으로 팬의 내부에서 약한 소음이 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7에서 수평 단면에서 소음원의 크기와 위치를 볼 수 있다. 블레이드 표면 뿐만 아니라 시로코 팬의 유입구 반대편의 벽면에서 소음이 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig. 6과 7에서 유동 영역의 본 결과 내부 전반에서 유동에 의해 약한 소음이 발생하며, 블레이드의 주위에서 큰 소음이 발생하는 것으로 나타났다.

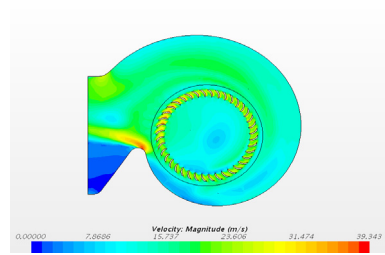


Fig. 3. Contour of pressure on the vertical plane section of sirocco fan

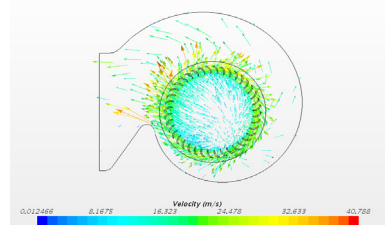


Fig. 4. Vector of velocity on the plane section of sirocco fan

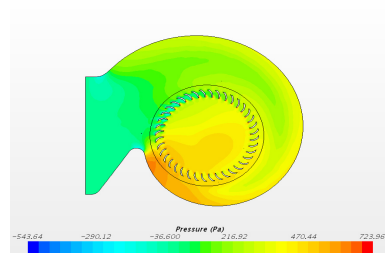


Fig. 5. Contour of velocity on the plane section of sirocco fan

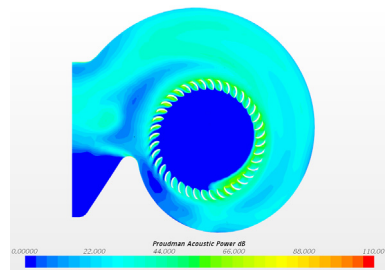


Fig. 6. Contour of Proudman Acoustic Power on the vertical plane section of sirocco fan

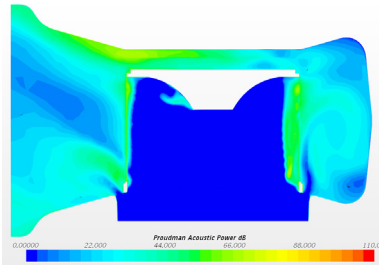


Fig. 7. Contour of Proudman Acoustic Power on the horizontal plane section of sirocco fan

Fig. 8과 9에서는 벽면에서 발생하는 소음원의 크기와 위치를 볼 수 있다. 벽면에서 발생하는 소음은 Curle Surface Acoustic Power로 볼 수 있으며, 이 또한 SWL로 나타낸다. Fig. 8 (a)에서 시로코 팬 내부 벽면에서 발생하는 소음원의 크기와 위치를 확인할 수 있다. 내부 벽면에서 발생하는 소음은 토출구에 가까워질수록 상대적으로 더 커졌으며, 토출구 하부 벽면에서는 소음이 거의 발생하지 않았다. 토출구 턱 부분에서 소음의 발생이 시로코 팬 벽면에서 가장 큰 것을 볼 수 있다. 임펠러의 표면에서 발생하는 소음원의 크기와 위치는 Fig. 8 (b)에서 볼 수 있다. 임펠러 블레이드의 상부 표면에서 소음이 가장 큰 것을 볼 수 있다. 블레이드의 하부 표면에서는 유입구부터 임펠러 벽면으로 갈수록 소음의 크기가 작아지는 것도 볼 수 있다. Fig. 8에서 전반적으로 임펠러의 표면에서 발생하는 소음이 시로코 팬의 벽면에서 발생하는 소음보다 크게 발생하였다.

Fig. 9와 10은 blade의 전면과 후면에 가상의 선을 작성하여 Curl Surface Acoustic Power를 나타내었다. 그림의 좌측이 임펠러의 연결부이며, 우측이 유입구 방향이다. 블레이드 1은 Curl Surface Acoustic Power가 가장 높은 블레이드이며, 블레이드 2는 가장 낮은 블레이드이다. Fig. 9에서 소음의 최고값은 유사하나 블레이드 2의 중심부에서 소음의 발생이 상대적으로 낮은 것을 볼 수 있다. 블레이드의 전면인 Fig. 9에서 블레이드의 후면인 Fig. 10보다 전반적으로 값이 높은 것을 볼 수 있다.

Fig. 11에서는 sirocco fan에서 유동영역에서 토출구를 중심으로 Center Line, 유입구측인 Right Line, 임펠러 연결부측인 Left Line, 상부인 Top Line, 하부 Bottom Line의 가상선을 작성하였다. 각 Line의 방향은 토출구로부터 시작한다.

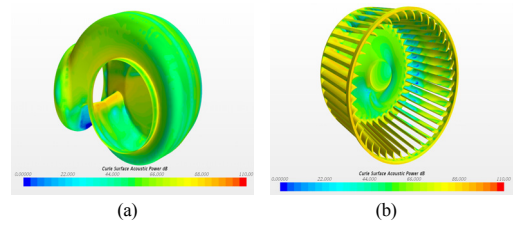


Fig. 8. Contour of Curl Surface Acoustic Power (a) the surface of sirocco fan case (b) the surface of impeller

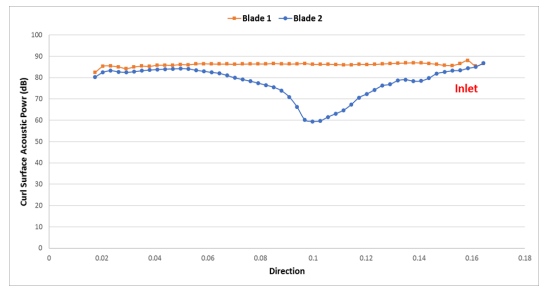


Fig. 9. Plot of Curl Surface Acoustic Power on the Line of blade Front Side

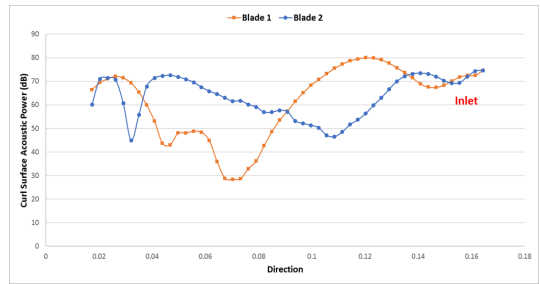


Fig. 10. Plot of Curl Surface Acoustic Power on the Line of blade Back Side

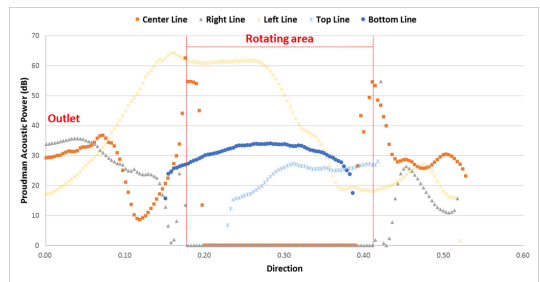


Fig. 11. Plot of Proudman Acoustic Power on the Line in the sirocco fan

Fig. 11에서는 Proudman Acoustic Power를 통해 각 Line에서 발생하는 소음의 크기를 확인할 수 있다. Center Line에서는 임펠러에서 발생하는 소음이 가장 컸으며, 유입구 중심에서는 소음이 발생하지 않았다. Right Line과 Left Line에서는 전반적으로 Left가 더 높았으며, 임펠러의 끝에 근접한 유동영역에서 전체적으로 가장 큰 소음이 발생하였다. Top과 Bottom Line에서는 Bottom에서 상대적으로 더 큰 소음을 발생시키나 다른 영역에 비해 낮은 것을 볼 수 있다.

Proudman과 Curle Surface Acoustic Power를 비교한 결과 전반적으로 표면에서 발생하는 소음이 유동영역에서 발생한 소음보다 더 큰 것을 볼 수 있었다. 또한, 어느 위치에서 소음이 발생하는 것도 볼 수 있었다.

본 시로코 팬의 유동 및 소음해석은 Steady로 진행되었다. Proudman Acoustic Power과 Curle Surface Acoustic Power는 시로코 팬의 유동영역과 벽면에서 발생하는 소음원의 크기와 위치만을 보여준다. 소음의 종류와 주파수는 확인할 수 없다.

## 5. 결론

본 해석에서는 시로코 팬의 유동을 Steady로 해석을 진행하였다. 시로코 팬의 해석 결과는 기존의 유사한 형상의 유동해석 결과와 유사하게 분포하였다.

우선 유동해석 결과 시로코 팬 내부에서 임펠러의 blade의 표면에서 큰 변화가 발생하는 것으로 나타났다. 유동에 의한 소음원은 유동의 속도와 압력에 상관관계가 있어 해당 영역에서 소음이 크게 발생하게 된다.

Proudman Acoustic Power를 통해 유동영역에서 발생하는 소음원이 blade의 표면 주위와 유입구 반대 벽면 출구 주변에서 크며, Curl Surface Acoustic Power로 blade 표면에서 소음이 크게 발생하는 것도 볼 수 있다.

시로코 팬에서 발생하는 소음을 저감하기 위해서는 소음원의 위치와 크기를 알아보는 것만 아니라 소음의 종류와 주파수를 알아야 할 필요가 있다.

그러나 본 해석은 Steady 유동해석을 통한 소음 해석을 진행하여 소음의 종류와 주파수를 볼 수 없었다. 따라서 이후에 Unsteady 유동해석을 통해 시로코 팬 내부에서 발생하는 소음이 Broad band 소음인지 Narrow band 소음인지를 확인하여야 하며, 소음의 주파수를 FFT 변

환을 통해 얻어야 한다.

## References

- [1] Tsutomu Adachi, Naohiro Sugita, and Yousuke Yamada, "Study on the Performance of a Sirocco Fan(Optimum Design of blade Shape)", International Journal of Rotating Machinery, 7(6) pp. 405-414, 2001. DOI: <https://dx.doi.org/10.1155/S1023621X01000355>
- [2] Kwang-Yong Kim, Seoung-Jin Seo, "Appiacation of Numerical Optimization Technique to Design of Forward-Curved Blades Centrifugal Fan", JSME International Journal, Series B, 49(1) pp. 152-158, 2006.
- [3] Mohand Younsi, Farid Bakir, Smaïne Koudri, Robert Rey, "Influence of Impeller Geometry on the Unsteady Flow in a Centrifugal Fan: Numerical and Experimental Analyses", International Journal of Rotating Machinery, 2007(1), 2007. DOI: <https://dx.doi.org/10.1155/2007/34901>
- [4] Yimaz Dogan, Esra Sorguven, Faruk Bayraktar, Kenan Y. Sanliturk "Numerical noise prediction: application to radial fans", Inter-Noise 2007, Istanbul, Turkey, 28-31, August, 2007.
- [5] Souichi Sasaki, Yoshida Koadma, Makoto Hatakeyama, "Influence of Karman vortex street on broadband frequency noise generated from a multiblade fan", JSME International Journal, Series B, Vol.49(3) 678-685, 2006. DOI: <https://dx.doi.org/10.1299/jsmeb.49.678>
- [6] STAR-CCM+ Documentation, Version 12.06, Siemens PLM Software, 2017.

강 정 석(Kil-Seo Hong)

[준회원]



• 2018년 2월 : 전북대학교 기계시스템공학과 (공학석사)

<관심분야>  
환기용 팬 열 유동

**김 진 택**(Jin-Taek Kim)

[정회원]



- 1994년 2월 : 전북대학교 정밀기계 공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 전북대학교 정밀기계 공학과 (공학박사)

<관심분야>

풍력발전기 공력향상, 전자장비 냉각

---

**이 철 형**(Cheol-Hyung Lee)

[정회원]



- 현재 : (주)대륜산업 상무이사

<관심분야>

환기용 팬, 산업용 팬

---

**백 병 준**(Byung-Joon Baek)

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1990년 12월 : Univ. of Missouri-Rolla (공학박사)
- 2003년 3월 ~ 2006년 2월 : 한국 연구소 책임연구원
- 1983년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 기계시스템공학부 교수

<관심분야>

마이크로유동 열제어, LED 열제어, 반도체장비 최적설계 위한 CFD 기법, 반도체장비 냉각