

# 후드겸용 전자레인지 시로코팬의 유동 및 소음특성에 관한 연구

전완호 · 류호선 · 송성배 · 손상범

A study on the flow and aeroacoustic characteristics of the  
sirocco fan of OTR (Over The Range)

Wan-Ho Jeon, Ho Seon Rew, Sung-Bae Song, Sang-Bum Shon

*Key Words: Sirocco Fan (시로코 팬), Over The Range (OTR : 후드겸용 전자레인지), Noise Reduction (소음 저감), Computational Fluid Dynamics (전산유체역학), Aeroacoustics (공력음향학)*

## ABSTRACT

Aeroacoustic characteristics of sirocco fan used in Over-The-Range (OTR) has been analyzed in this paper. A microwave hood combination over the gas range is short for the OTR. The flow phenomena of the double-sided sirocco fan was analyzed numerically and experimentally by using commercial code and three dimensional PIV for flow visualization. Also, microphone array is used in order to understand acoustic characteristics of OTR. Two dimensional unsteady flow and acoustic simulation is tried to qualitatively estimate the effects of tonal noise and broadband noise on the overall sound pressure level. It is found that tonal sound is generated from the strong interaction between the impeller and cutoff while broadband sound is generated from the strong secondary flows along the scroll surface. To reduce the noise level, the V-shape cut-off was applied to improve the sound quality by reducing tonal noise. So the peak noise at BPF (Blade Passing Frequency) was almost reduced. The shape of flow-guide to suppress the secondary flow over the scroll surface was carefully checked. It is found that this affects flow pattern at the fan exit and reduces the broad band noise. Through this numerical and experimental study, the sound pressure level was lowered by 4dBA compared to that of the previous fan at the operating point.

## 1. 서론

후드와 전자레인지 기능을 모두 갖고 있는 후드 겸용 전자레인지 (OTR : Over The Range)는 가스오븐레인지 상부에 설치하여 공간활용도를 높인 것으로 주

로 미국 및 캐나다 지역의 중, 상류층 가정에서 많이 사용되고 있다. 최근 음식물 조리시 발생하는 연기 및 냄새를 주방에서 외부로 배출시키는 후드기능의 개선과 저소음화에 대한 요구가 점차 높아지고 있어서 후드로 사용되는 원심팬의 고품량, 저소음화의 필요성이 더욱 요구되었다<sup>(1)</sup>. 그러나, 최근 에너지 규제에 따라서 최고 풍량이 제한됨에 따라 저소음화가 가장 큰 이

\* LG전자 Digital Appliance연구소  
책임저자 E-mail : whjeon@chol.com

슈로 등장하고 있다.

본 논문에서는 후드 겸용 전자레인지의 저소음화를 위한 연구로, 후드 겸용 전자레인지의 소음원과 소음 특성을 파악하는데 목적이 있다. 근접 음향장 측정 결과 후드의 역할을 하는 양흡입 시로코팬이 가장 큰 소음원임을 확인했다. 시로코팬의 소음은 공력소음이므로<sup>(2)</sup>, 시로코팬의 유동장을 수치해석과 PIV (Particle Image Velocimetry)<sup>(3)</sup> 기법을 이용해서 해석하고 소음 발생 원인을 파악하였다. 비정상 유동장 해석은 수치해석인 CFD를 이용하여 수행하였고, 해석된 압력장을 이용해서 공력소음을 예측하여 유동장 특성의 어느 부분이 주요 소음원인가를 파악하였다. 양흡입 시로코팬이 삼차원 특성이 강하지만 중간 단면을 특성 단면으로 보고 간략화하여 이차원 모델로 해석하였다. 이 해석은 전반적인 공력소음의 특성을 파악하기 위한 것으로 정밀한 분석을 위해서는 삼차원 해석이 필요하다. 해석된 CFD자료를 입력자료로 이용하여 공력소음을 Ffowcs-Williams & Hawking방정식으로 해석하였다<sup>(2)</sup>. 이 결과를 바탕으로 시로코팬의 소음원인을 파악하였고, V형상의 cutoff과 유로가이드를 가진 새로운 형상의 저소음 시로코팬 및 후드 겸용 전자레인지가 개발되었다.

## 2. 후드겸용 전자레인지 소음특성

### 2.1 후드겸용 전자레인지

가정에 사용되는 OTR은 Fig. 1과 같이 가스오븐 상부에 장착되어 있다. OTR의 내부는 Fig. 2와 같이 전자레인지가 중앙에 있고 그 외곽으로 후드 역할을 하는 팬을 위한 유로가 작게 구성되어 있다. 사용된 팬은 양흡입 시로코팬으로 OTR의 상부 중앙에 위치하여 좌우로 흡입구가 있다.

OTR의 외곽 크기는 756(W)×390(D)×418(H)으로 제한되어 있다. OTR의 외곽크기가 제한되어 있는 상황에서 좀더 큰 전자레인지 공간을 만들기 위해서는 시로코 팬으로 통하는 유로를 상당부분 작게 만들어야 한다. 유로를 협소하고 복잡하게 만들면 압력손실이 증가하며, 국부적인 유동 교란으로 인한 소음증가를 유발시킨다. 이것은 OTR의 저소음화라는 목표와 상반된 결과이다. 결국, 큰 전자레인지 공간 확보와 더불어 고성능, 저소음 팬 개발이 동시에 진행되어야 한다. 또한, 체계적인 소음원 파악과 소음 특성 파악이 필수적이다.

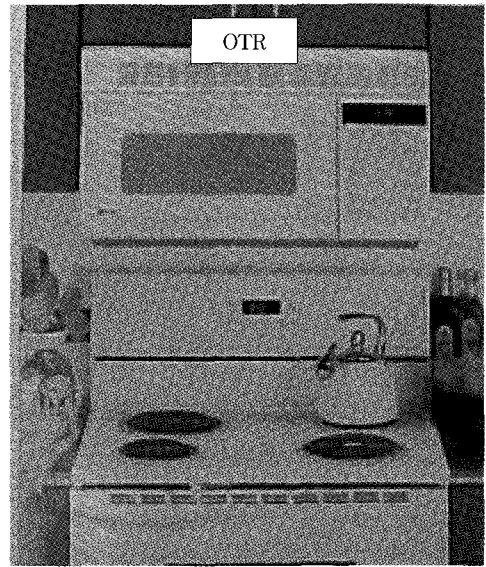


Fig. 1 Overview of OTR

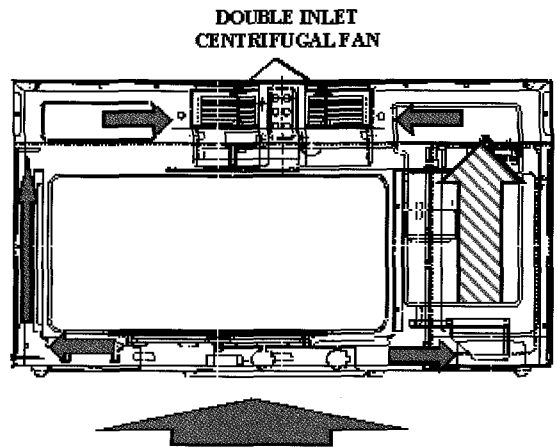


Fig. 2 Schematic view of flow path of OTR and sirocco fan

현재 OTR에 사용되고 있는 팬은 Fig. 3에서 보는 것과 같이 양흡입 시로코팬이다. 임펠러는 가운데부분에 중간판으로 막혀서 좌우가 구분되며, 유동은 좌우측의 입구부분과 모터와의 연결부분에 있는 틈새로 들어온다.

임펠러의 길은 42개이고, 직경은 83 mm이며 깃형상은 보치집 형상으로 설계하였다. 팬의 외곽은 108 mm 크기의 사각박스 형태로 고정되어 있기 때문에 스크롤의 확장각은 약 4.3도의 아주 작은 값을 가지고 있다. 스크롤의 확장각을 키우려면 임펠러의 직경을 줄여야만 한다.

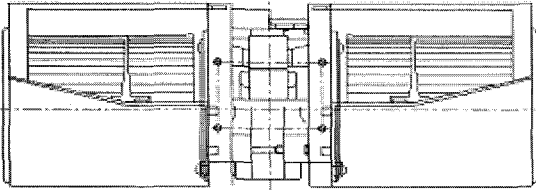


Fig. 3 Schematic diagram of double inlet sirocco fan used in OTR

## 2.2 실험장치

OTR에 사용되는 팬의 성능은 풍량과 소음으로 나타낼 수 있다. 풍량은 ASHARE 표준으로 설계, 제작된 팬테스터에서 수행되었다. 이 팬테스터의 측정범위는 10~500 CFM (Cubic Feet per Minute)이고 측정은 팬이 OTR에 장착된 상태에서 수행되었다.

소음은 차단주파수 (cut-off frequency)가 200Hz, 압소음이 11.7dB(A)인 완전무향실에서 송풍기가 장착된 OTR의 전방 중앙에서 1 m 떨어진 곳에 마이크로폰을 설치하여 측정하였다.

## 2.3 OTR의 소음특성 파악

OTR의 소음원 중 가장 우세한 소음원을 찾기 위하여

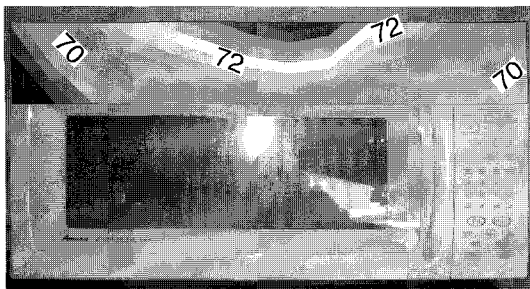
OTR표면에서 5 cm떨어진 위치에 마이크로폰을 5 cm씩 이동시키면서 근접음장을 측정하였다. OTR의 가장 큰 소음원으로 예상되는 팬이 상부에 존재하고, 측정 결과 OTR상부에서의 소음방사가 우세하였기 때문에 하부의 측정은 제외하였다. 측정은 OTR전방, 좌우측의 세 방향에서 수행되었다. 각각의 측정 결과가 Figs. 4와 5에 있다.

근접장의 측정 결과, OTR의 가장 우세한 소음은 양흡입 시로코팬이라는 것을 확인할 수 있었다. 특히 Fig. 4 (a)의 전방 소음분포를 보면 팬이 있는 위치가 가장 큰 음압분포를 나타내고 있다. 이것은 팬의 날개통과 주파수가 있는 2000 Hz대역에서도 극명하게 확인할 수 있다. 또한, Fig. 5에서도 팬과 유로부가 존재하는 상부에서 소음이 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

## 3. 시로코팬의 유동특성 및 공력소음 특성 파악

### 3.1. CFD를 이용한 시로코팬의 유동특성 해석

앞 절에서 확인했듯이 OTR의주된 소음원은 양흡입 시로코 팬이다. 팬의 모터에 의한 진동소음도 나타나지만 저유량이나 저 rpm같은 경우에만 우세하게 나타



(a) Contour plot of overall SPL in near field



(b) Contour plot of 500Hz band SPL in near field

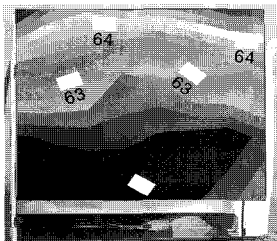


(c) Contour plot of 1000Hz band SPL in near field

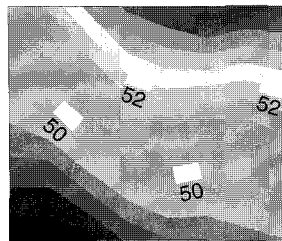


(d) Contour plot of 2000Hz band SPL in near field

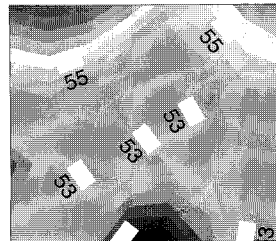
Fig. 4 Distribution of near-field acoustic pressure measured at 5cm from the front surface of the OTR



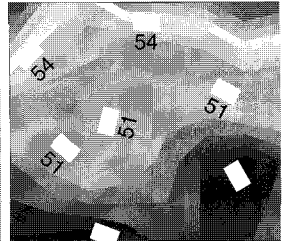
(a) Contour plot of overall SPL in near field



(b) Contour plot of 500Hz band SPL in near field



(c) Contour plot of 1000Hz band SPL in near field



(d) Contour plot of 2000Hz band SPL in near field

Fig. 5 Distribution of near-field acoustic pressure measured at 5cm from the right surface of the OTR

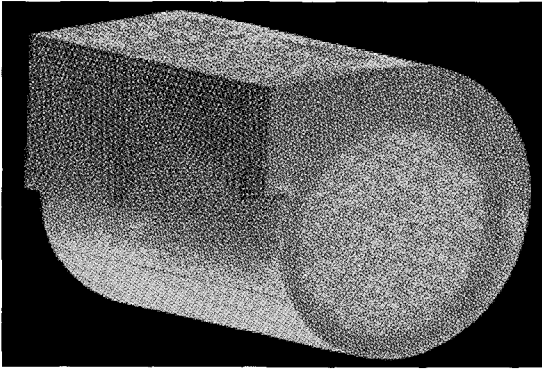


Fig. 6 Mesh of the sirocco fan used in OTR

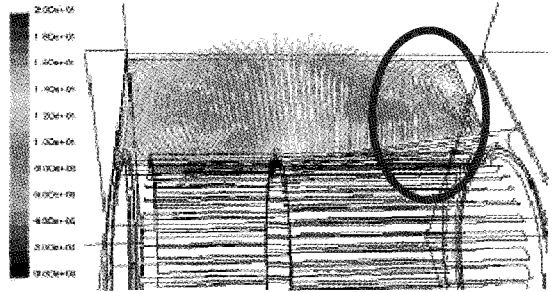


Fig. 8 Velocity vector of exit plane of sirocco fan

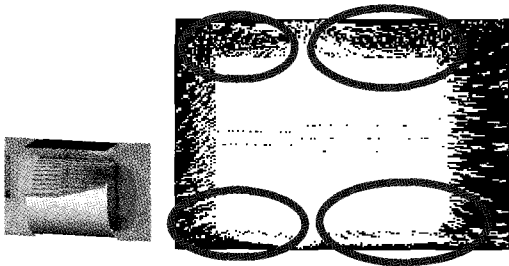


Fig. 7 Velocity vector of mid plane of impeller

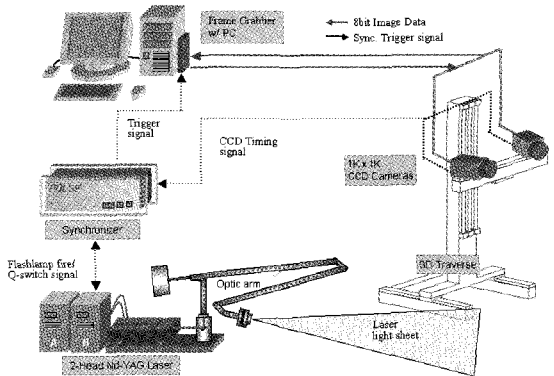


Fig. 9 Experimental setup for PIV measurement

나므로 본 연구에서는 고려하지 않았다. 시로코 팬의 소음은 공력소음이며, 저주파수의 광역소음영역과 날개통과주파수의 피크소음이 우세하게 나타난다. 본 논문에서는 이런 공력소음의 발생원인을 자세하게 파악하기 위해서 시로코 팬에 대한 유동해석을 상용CFD코드인 Fluent 6.0를 이용하여 수행하였다. 임펠러는 MRF (Multiple Reference Frame)으로 회전하는 효과를 모델하였고, 임펠러의 두께는 무시하였다. 또한, 팬은 모터를 중심으로 한쪽 팬만 고려하여 해석하였다.

해석에 사용된 격자는 120만개이고, 난류모델은 RNG k- $\epsilon$ 을 사용하였다. 해석에 사용된 조건은 회전수 3337 rpm, 유량 150 CFM이다<sup>(4)</sup>. 팬 모델에 대한 격자계는 Fig. 6에 있다. 해석한 결과를 보면 전체적으로 3차원 이차유동이 많이 존재함을 확인할 수 있었다. Fig. 7은 임펠러의 중앙을 지나는 단면에 대한 속도벡터를 나타낸 그림으로 왼쪽에 임펠러 중앙을 지르는 단면의 속도분포를 그린 것이다. Fig. 7에서 가운데 중앙판에 의한 유동의 분리현상이 나타나고 있으며, 팬 흡입구부터 강한 이차유동이 띠형태로 존재하고 있음을 확인할 수 있다. 이런 이차유동은 모터쪽 흡입구가 있는 부분 (왼쪽부분)보다 OTR유로에서 직접 흡입되는 부분에서 더 강하고 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

팬의 출구부분의 유동을 살펴보면 Fig. 8과 같다. 대부분의 유동이 임펠러의 중앙판이 있는 위치로 모여서 토출됨을 확인할 수 있다. 강한 이차유동이 존재하는 입구부쪽의 출구 (오른쪽 타원 부분)는 역류가 발생하면서 손실로 작용하고 있음을 확인할 수 있다.

### 3.2 PIV (Particle Image Velocimetry)를 이용한 시로코팬 출구 유동 측정

팬의 출구부분의 유동장을 확인하기 위해서 PIV (Particle Image Velocimetry)를 이용하여 유속을 측정하였다. PIV장비의 구성은 Fig. 9와 같이 2 Head의 ND-YAG Laser, 1개의 CCD 카메라와 PC로 이루어져 있으며, 유동장에 입자 (Particle 또는 Tracer)를 삽입하여 유체 유동에 의한 입자 거동을 카메라로 획득한 후, 디지털 화상처리와 해석 알고리즘을 통하여 순차적으로 변화하는 유동장의 특성을 정량적으로 측정하는 기법이다.

가시화에 사용한 입자는 윤활유 (Glycerin, SG-10)를 사용하였으며, 측정 지점은 시로코팬의 출구면 단면을 선택하였다. 측정된 결과가 Fig. 10에 있다. Fig. 10

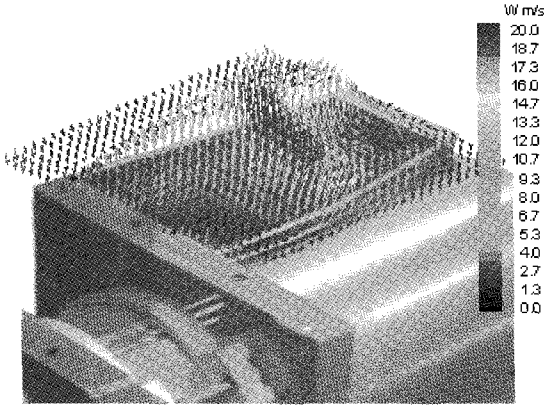


Fig. 10 Measured velocity vector for OTR sirocco fan exit

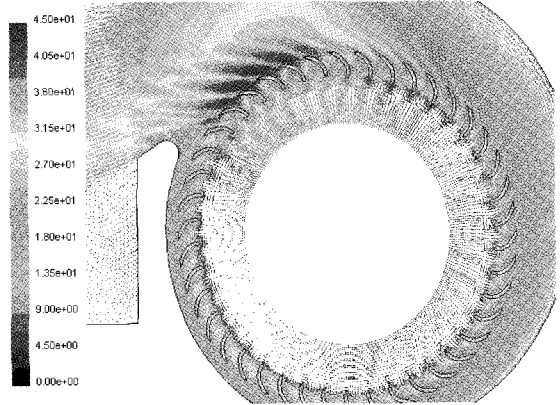


Fig. 11 Calculated CFD result : velocity vector of sirocco fan

을 해석결과와 비교해보면 전체적인 유동장 특성이 비슷함을 확인할 수 있다. 중앙판이 있는 가운데 출구 부분으로의 유동 집중현상과 우측 끝부분의 역류 및 이차유동 발생을 해석과 실험에 의한 결과로 확인할 수 있다 (Figs. 8과 10의 원으로 표시된 부분).

### 3.3 수치적 기법을 이용한 공력소음 해석

공력소음을 수치적으로 해석하기 위해서는 비정상 유동장에 대한 해석이 필수적으로 수행되어야 한다. 그러나 3.1절의 유동해석은 120만개의 격자로 정상유동을 해석하는 데만 3~4일이 소요되기 때문에 미끄럼 격자를 이용한 비정상 해석을 수행할 수 없다. 그래서 본 연구에서는 특정 단면을 선택하여 2차원 단면에 대한 비정상 유동해석을 수행하고 그 결과를 이용하여 소음해석을 수행하였다. 이 경우 전체적인 소음 특성을 모두 파악할 수는 없지만 상세한 소음 특성에 대한 해석은 가능하다<sup>(2)</sup>. 해석에 사용된 2차원 단면의 격자는 6만개이고, 임펠러는 미끄럼격자 (sliding mesh)를 사용하여 매시간 회전한다. 해석은 임펠러가 한 회전하는 동안 420번의 시간간격 ( $\Delta t = 3.567 \times 10^{-5}$ )으로 수행하였고, 10회전후의 안정된 자료를 이용해서 소음 해석을 수행하였다. 해석은 임펠러가 3337 rpm로 회전하고 유량이 150 CFM일 때를 기준으로 수행하였다. 이때 BPF는 2336 Hz에 존재한다.

해석된 유동장은 Fig. 11과 같다. 그림은 절대속도 분포를 나타낸 것으로 cutoff과의 상호작용이 잘 나타나고 있으며 cutoff이전에 큰 유속의 토출이 존재함을 확인할 수 있다. 2차원 해석의 경우 3차원 해석 시 확인할 수 있었던 입구 부근의 이차유동에 의한 와류현

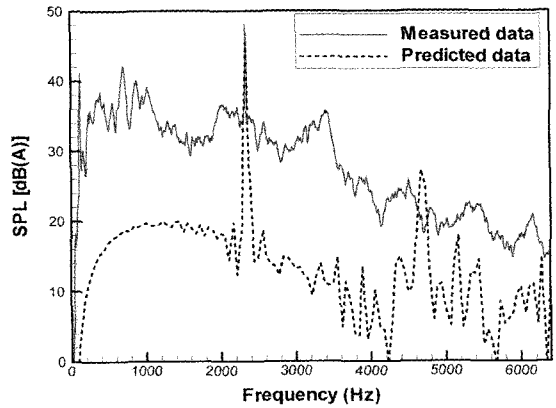


Fig. 12 Comparison of measured and predicted acoustic pressure

상은 보이지 않고 전체적으로 깨끗한 유동장을 확인할 수 있다.

해석된 유동장 자료를 이용하여 전방 1 m 떨어진 지점에서의 음압을 계산하였다. 계산에 사용된 방법은 Ffowcs-Williams & Hawking 방정식으로 이미 시로코 팬에 사용되어 좋은 소음 예측 결과를 보여준 수치방법이다<sup>(2)</sup>. 계산된 결과는 Fig. 12에 있다. 그림에서 날개통과 주파수에 해당하는 피크값은 어느 정도 예측할 수 있지만 저주파수쪽의 광역소음 값은 많은 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 이것은 이 주파수대역의 소음이 삼차원 시로코 팬의 입구부근에서 발생하는 이차유동에 의한 와류와 임펠러가 상호작용하면서 발생하는 광역소음이기 때문에 2차원 유동해석을 통한 소음 해석에서는 예측할 수 없다.

위 계산으로 피크소음은 임펠러 깃과 cutoff의 강한 상호작용에 의해 발생하는 것을 확인했다. 이 계산에서 차이를 보이는 광역소음은 2차원 해석으로 계산할

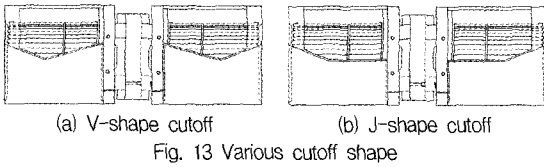


Fig. 13 Various cutoff shape

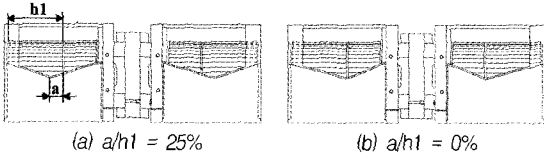


Fig. 14 V-position of V-shaped cutoff

수 없는 유동특성에 의해서 발생하며, 유로 내에 존재하는 이차 유동인 강한 와류띠와 깃과의 상호작용에 의해서 발생함을 예상할 수 있다. 피크소음을 줄이기 위해서는 깃과 cutoff사이의 상호작용을 감소시키거나 분산시키는 방법을 고려해야 하고, 광역소음은 이차유동을 억제하는 방법을 고려해야 함을 확인할 수 있다.

#### 4. 저소음 뺨 개발

##### 4.1 피크소음 저감

기존의 유동 및 소음 해석과 측정으로부터 뺨의 피크소음은 회전하는 깃과 cutoff과의 강한 상호작용에 의해서 발생한다는 것을 확인했다. 깃과 cutoff의 상호작용에 의한 토음소음의 발생을 억제하기 위해서 Fig. 13과 같이 다양한 형태의 cutoff을 가진 새로운 뺨 형상이 제안되었다. 이런 형상중 V형상의 cutoff이 소음에 가장 큰 효과가 있음을 확인하였다.

이 V자 형상의 cutoff은 Fig. 14와 같은 변수를 설계변수로 선정하여 그 변화에 따른 소음과 유량의 변화를 확인하였다. 선정된 인자는 임펠러에 존재하는 중간판의 위치 "h1"와 V형상 cutoff의 V자 위치 "a"의 비율이다. a/h1의 비율을 25%, 0%, -25%로 변경하였을 때, 같은 유량조건에서 25%의 경우가 가장 작은 소음을 발생하였다.

##### 4.2 광역소음 저감

앞절에서 유로내에 존재하는 강한 이차 유동인 와류띠를 억제하면 광역소음이 감소할 것이라는 결론을 얻었다. 이를 바탕으로 와류띠를 억제하기 위해서 케이싱 내부에 Fig. 15와 같이 유로 가이드를 장착하였다.

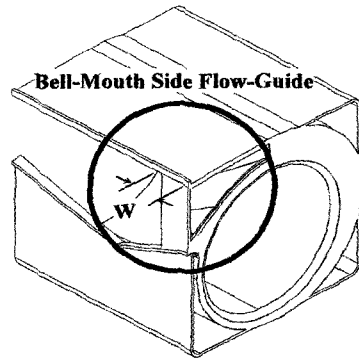


Fig. 15 Flow guide of bell-mouth and motor bracket

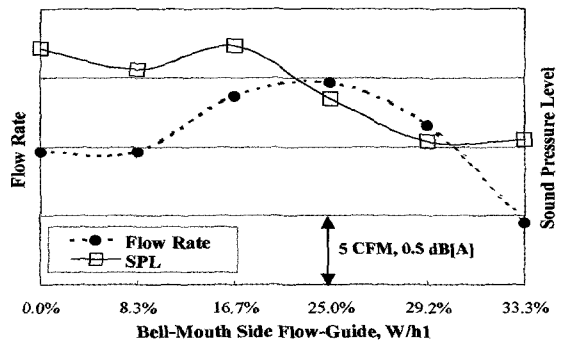


Fig. 16 Flow rates and SPLs for various flow guide widths

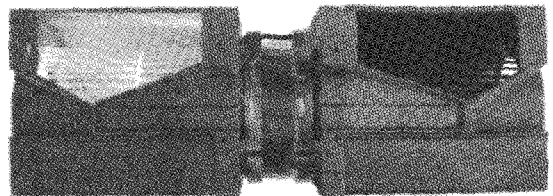


Fig. 17 New suggested sirocco fan that has "V" shaped cutoff

유로가이드의 변수는 그림과 같이 유로가이드의 폭인 "w"를 선정하였다. 우선, 유량과 소음의 변화를 확인하기 위해서 유로가이드 폭을 임펠러 깃 높이의 8.3, 16.7, 25.0, 29.2, 33.3%로 바뀌가면서 측정하였다. 이 결과가 Fig. 16에 있다. 소음은 유로가이드의 폭이 29.2%일 때 까지 감소하지만 그 이상의 값에서는 차이가 없었다. 유량은 25%까지 증가하였지만 그 이상에서는 감소하는 경향을 나타냈다. 결국 유로가이드 폭은 임펠러 깃 높이의 20~30%사이가 적당하다는 결론을 얻었다.

##### 4.3 새로 설계된 저소음 시로코뺨

위의 두가지 결과를 결합하여 Fig. 17과 같은 새로운

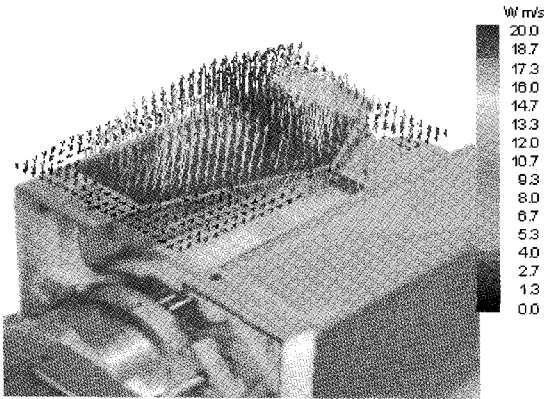


Fig. 18 Measured velocity vector for new sirocco fan exit

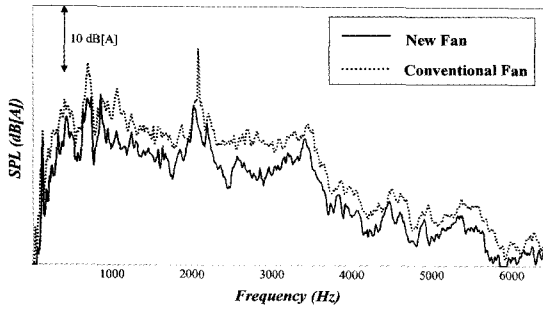


Fig. 19 Comparison of the measured SPL for old and new fan

형상의 OTR용 시로코팬을 개발하였다. 개발된 팬의 출구는 V자 형상의 cutoff을 가지고 있으며, 출구 좌우 측에 유로가이드가 붙어있는 것을 확인할 수 있다.

새롭게 개발된 팬의 출구 유동장을 PIV시스템을 이용하여 측정하였다. 측정결과가 Fig. 18에 있다. 그림에서 Fig. 10에 존재하던 역류 및 이차유동의 발생이 억제되었음을 확인할 수 있다(Fig. 18의 원으로 표시된 부분). 또한, 기존팬은 유동이 임펠러의 중앙판 부분에 집중되었으나, 새로운 팬은 전체 출구면에 걸쳐서 고루 분포함을 확인할 수 있다.

기존팬과 새로 개발된 팬의 소음을 OTR 전방 1 m에서 측정한 결과가 Fig. 16에 있다. 새로 개발한 팬을 사용하였을 경우, 기존팬과 비교하여 약 4dB(A) 감소함을 확인하였으며 특히 BPF 피크소음의 경우 많은 저감이 이루어졌다.

## 5. 결론

본 논문에서는 부엌에 사용되는 후드겸용 전자레인지의 소음특성을 파악하고, 저소음화를 위한 기본연구로

소음발생원인과 유동특성을 해석적인 기법과 실험적인 기법을 이용하여 파악하였다. 또한, 유동소음의 주요 원인을 제어하여 4dB(A)의 소음이 저감된 저소음 팬을 개발하였다.

- 1) 후드겸용 전자레인지의 근접 음향장 측정을 통해서 주된 소음원은 후드역할을 하는 양흡입 시로코 팬이며 주로 OTR의 윗 부분을 통해서 외부로 방사됨을 확인했다.
- 2) 시로코 팬의 소음은 대부분이 공력소음에 의한 것임을 확인했고, 공력소음의 주된 원인이 되는 유동장 특성을 파악하기 위해서 CFD해석과 PIV 실험을 한 결과 사용된 시로코 팬은 흡입구 부분에 강한 이차 유동인 와류가 존재함을 확인하였다. 또한, 출구부분에도 이차유동에 의한 역류영역이 존재함을 확인하였다.
- 3) 이차원 모델을 이용한 공력소음해석의 결과, 이차유동이 존재하지 않는 이차원 유동은 날개통과 주파수의 피크소음은 어느 정도 정확하게 예측하지만 저주파수의 광역소음은 예측할 수 없음을 확인하였다. 이것은 저주파수의 광역소음이 이차원 유동으로 해석할 수 없는 이차유동과 큰 관계가 있음을 나타내고 있다.
- 4) 이상의 연구결과를 바탕으로 이차유동을 억제할 수 있는 새로운 저소음팬이 설계되었으며 동일 성능에 4dB의 소음저감 효과가 있다.

## 참고문헌

- (1) 박성일, 송성배, 이준세, 1999, “배기용 Sirocco fan에 대한 연구 : OTR 적용 사례”, 공기조화 냉동공학회 하계학술발표회 논문집(1), pp. 390~394.
- (2) 전완호, 백승조, 김창준, 2002, “시로코 팬의 공력소음 발생에 관한 수치적 연구”, 한국소음진동공학회지, 제12권 1호, pp. 42~47.
- (3) Nam YoungSok, Cho Sung Ho, Choi Jayho and Lee In-Seop, 2002, “The Development of High-Efficiency Refrigerator using PIV and Numerical Analysis, The Fifth JSME-KSME Fluid Engineering Conference, Nagoya, Japan.
- (4) 전완호, 송성배, 손상범, 류호선, 2002, “후드겸용 전자레인지 시로코팬의 소음특성에 관한 연구”, 유체기계공업학회 논문발표회