

가전제품 팬 공력소음 특성 및 해석

A Characteristics and Analysis of Aeroacoustic Noise for Appliance Fans

전완호*· 김창준**

Wan-Ho Jeon, Chang-Joon Kim

Key Words : Axial fans(축류팬), Cross-flow fan(횡류팬), Sirocco fans(시로코 팬), Computational Fluid Dynamics(전산 유체역학), Unsteady Flow Field(비정상 유동장), Acoustic Pressure(음압)

ABSTRACT

In this paper, some dominant aeroacoustic characteristics of fans used in appliances are reviewed. The numerical attempts to analyze the aeroacoustic noise of fans are briefly reviewed for various fans. Axial fans for refrigerator, cross flow fans for air-conditioner, sirocco fans and turbo fans are analyzed. The unsteady flow field, which is essential data for aeroacoustic analysis, is calculated by commercial CFD code. Acoustic pressure is calculated by Ffowcs Williams and Hawkings equation and Lowson's equation. During the analysis, dominant noise sources are identified.

1. 서론

가전제품의 소음에 대한 연구는 90년대 들어서면서 가속화되기 시작하여, 지금 현재까지 활발한 연구가 이루어지는 분야 중 하나이다. 가전제품의 소음원 중 특히 팬소음은 전체 가전제품 소음의 가장 큰 기여도를 차지하고, 소비자에게 직접 전달되는 경로에 존재하기 때문에 실험적 방법으로 소음을 줄이는 많은 방법들이 연구되어 오고 있다. 팬 소음은 팬의 주된 역할인 유동 유발에 의해서 필연적으로 발생하는 특징이 있기 때문에 소음을 줄이는 방법의 대부분은 성능 저하와 관련이 있다. 저소음 방법으로 알려져 있는 회전수를 줄이고, 직경을 크게 하는 등등의 전통적인 방법들은 현재의 요구에 부합되지 않기 때문에 저소음화를 위한 더 새로운 방법의 필요성이 점차 증대되고 있다.

가전제품에 사용되는 팬은 크게 축류형 팬과 원심형 팬으로 나눌 수 있다. 이중 축류형 팬은 저소음에 목표를 두고 개발이 수년간 진행되어서 기존의 프로펠러 팬과는 다른 독특한 형상의 팬으로 발전되어 왔다. 이런 팬은 큰 스윙각과 끝단 말림 등의 독특한 특징이 있다. 원심형 팬은 깃의 개수가 많은 시로코팬이나 횡류팬 그리고 깃의 개

수가 적은 터보팬으로 나눌 수 있는데, 시로코 팬의 경우는 깃의 피치각을 다르게 하는 부등피치 임펠러가 일반적으로 사용되고 있다.

저소음화의 필요성 때문에 대두된 공력소음에 대한 수치해석은 90년대 후반부터 많은 연구가 있었다. 본 논문은 지난 5년여간 저자에 의해 수행된 팬 소음 연구의 특징과 내용을 간략하게 정리한 논문이다.

공력소음 수치해석을 위해서 비정상 유동장 해석이 필요하며, 비정상 유동장은 상용 CFD 코드를 이용하여 계산하였다. 유동장에서 계산된 임펠러 깃의 압력 변동으로 임펠러 깃에서 비정상 압력의 교란에 의한 소음을 예측한다. 이것을 위해서 매시간 임펠러 깃의 각 요소에서 힘을 구하고, 움직이는 점 힘에 의한 먼 거리(far field) 음향장을 Ffowcs Williams and Hawkings 와 Lowson 방정식으로 예측한다. 또한, 각 팬의 주요한 소음 발생 부위를 확인할 수 있다.

2. 다양한 팬 및 소음 특성

2.1 냉장고용 축류팬 소음 특성 및 공력소음 해석

냉장고에는 2개의 축류팬이 사용된다. 하나는 냉장고내에 설치되어 냉기를 냉장실과 냉동실로 순환시키는 역할을 수행하고 다른 하나는 냉장고 하부의 기계실에 설치되어 압축기와 콘덴서를 냉각한다. 일반적으로 냉장고내에 장착되는 축류팬은 냉기를 폐유로로 순환시켜야 하며, 유로가 복

* LG 전자 DA 연구소
E-mail : whjeon@lge.com, whjeon@chol.com
Tel : (02) 818-7993, Fax : (02) 867-9629

** LG 전자 DA 연구소

잡하고 길이가 길기 때문에 고압에 유리한 형상을 사용하고 기계실에 사용하는 팬은 유로가 거의 없는 개방형으로 사용되기 때문에 저압에 유리한 형상을 사용한다.

냉장고용 축류팬에서 발생하는 공력소음을 감소하기 위한 노력이 많이 수행되어 소음 수준이 저감 됨에 따라 새롭게 공진에 의한 소음이 증가하고 있는 추세이다.



Fig. 1. Typical axial fan for freezer

축류팬에 대한 유동 해석과 소음해석은 와류법과 Lawson방정식을 이용해서 수행되었다.¹⁾ 이 방법은 세세한 깃의 형상변화나 작동점의 변화를 예측할 수 없는 단점이 있지만, 전체적인 소음 특성을 빠르게 파악할 수 있는 장점으로 많이 사용되고 있다.¹⁾

위 형상의 팬에 대해서 팬의 회전수를 변화시키면서 소음변화에 대한 공력소음 해석을 수행하였다. Fig. 2는 모델 팬에 대해서 회전수를 1000rpm부터 2000rpm까지 500rpm씩 올려가면서 해석을 수행하였을 때 예측된 소음 신호의 변화를 나타낸다. 전체적인 경향은 회전수 증가에 따라서 음압이 rpm의 2.3 승에 비례하는 것을 확인하였다.²⁾ 이것은 기존 연구자들이 제시한 기준에 일치하는 결과이다.

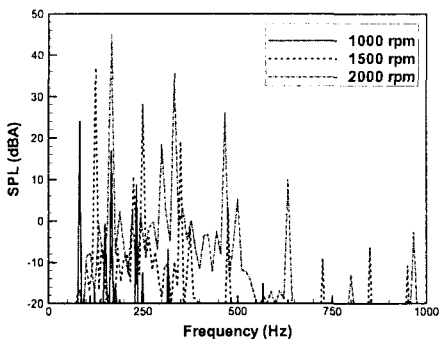


Fig. 2. Predicted sound spectrum for 1000, 1500, 2000 rpm cases

가전제품용 축류팬은 저소음화를 위해서 스위프각이 많이 준다. 이런 스위프에 의한 소음의 변화를 확인하기 위해서 스위프각이 없는 팬과 37°의 각을 가진 경우에 대해서 공력소음 해석을 수행하였다. Fig. 3을 보면 스위프각이 없는 경우의 전체음압레벨은 39.3dB(A)에서 스위프각을 주면 37.5dB(A)로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

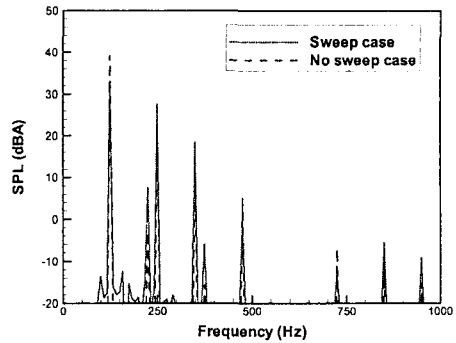


Fig. 3. Predicted acoustic spectrum for swept and no swept fan cases

2.2 에어컨에 사용되는 횡류팬의 소음 특성 및 공력소음 해석

횡류팬은 유체가 임펠러 깃을 두번-한번은 안쪽으로 다음은 바깥쪽으로- 통과하는 독특한 특성을 가진다. 횡류팬의 장점은 축방향으로 어떤 쪽으로든 제작이 가능하고 일반적인 원심팬보다 유량을 많이 발생시킬 수 있다는 것이다. 이런 이유로 횡류팬은 에어컨, 에어컨튼, 자동차 recirculation unit 등에서 많이 사용되고 있다.

에어컨에 사용되는 횡류팬의 경우, 사용자와 가까운 거리에서 작동되기 때문에 소음이 중요한 문제 중 하나가 되고 있으며, 이런 소음을 저감시키기 위하여 여러 방법이 제안되고 있다. 깃을 불균일하게 부착하는 부등피치 임펠러와 임펠러가 나뉘어진 블록의 불임각을 바꾸는 방법들이 이런 저소음 방법에 속한다.

횡류팬은 내부에 편심와(eccentric vortex)가 존재하는 매우 복잡한 유동 특성을 보인다. 이 편심와는 팬의 유동특성을 지배하며, 크기와 위치가 팬의 성능 및 소음과 밀접한 관련이 있다. 횡류팬의 경우, 팬의 날개통과주파수의 피크소음 이외에 편심와와 깃의 상호작용에 의한 광역소음 등도 나타난다. Fig. 4에 전형적인 횡류팬의 소음 스펙트럼이 있다. 그림에서 BPF의 피크가 29.8dBA로 나타나고 있으며 전반적으로 광역소음도 많이 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

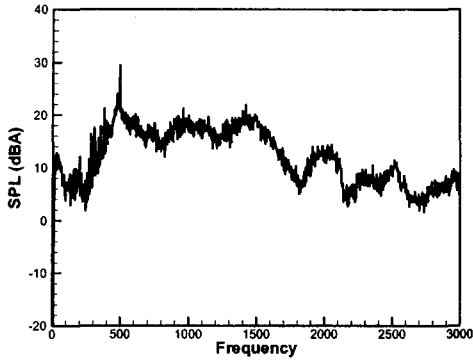


Fig. 4 Typical acoustic spectrum of cross flow fan

연구에 사용된 횡류팬은 Fig. 5와 같이 에어컨 실내기에 사용되는 헨으로 내부의 열교환기를 제거한 모델이다. 소음과 관련이 있는 출구의 안내깃은 제거하였으며, 입구의 안내깃은 해석에서 고려하였다.

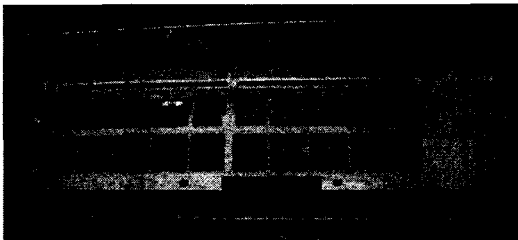


Fig. 5. Picture of cross-flow fan of air-conditioner.

이 모델을 해석하기 위해서 Fig. 6과 같은 격자계를 구성하였다. 팬 테스트를 모델링한 챔버는 팬의 출구에 구성하였다. 유동은 팬 입구의 좌측과 상부에서 유입되며, 팬 출구를 지나서 챔버의 출구로 유출된다. 비정상 유동해석은 상용 CFD코드인 Fluent를 이용하였으며, sliding mesh기법이 사용되었다. 전체 에어컨을 팬 테스트에 넣고 측정하였기 때문에, 작동점 한 점에 대한 해석이 수행되었다. 유량은 13.7CMM이고, 회전속도는 846.8rpm이다. 측정된 압력은 0mmAq이고 계산에 의한 압력은 0.7mmAq로 비슷한 결과를 얻었다.

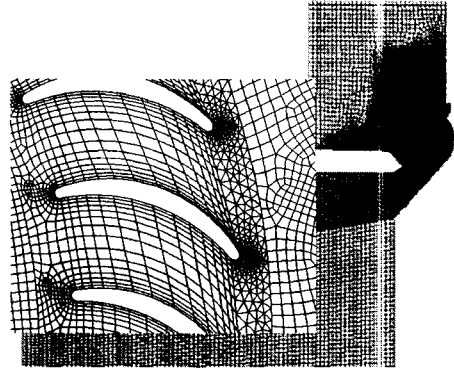


Fig. 6 The mesh of cross flow fan and air-conditioner

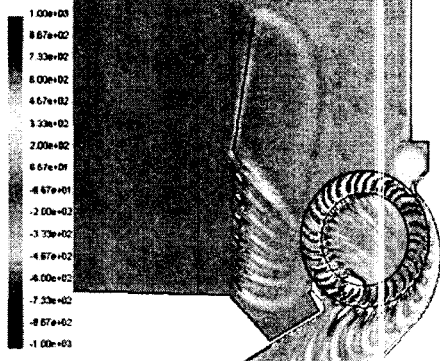


Fig. 7 Vorticity contour plot of cross flow fan

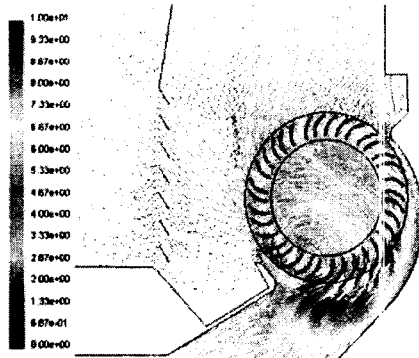


Fig. 8 Instantaneous velocity vector plot of cross flow fan

Fig. 7과 8에 순간적인 와류분포와 속도 벡터가 있다. 임펠러의 상부에 강한 편심와가 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 임펠러 각 깃에서 발생한 후류와류가 편심와로 합쳐지는 것을 확인할 수 있다.

공력소음은 Ffowcs Williams and Hawkings 방정식을 이용하여 계산하였으며, 측정 및 계산 위치는 에어컨 전방 1m, 하방 0.8m 위치이다. Fig. 9에 예측된 음압과 측정된 음압의 비교가 있다. 494Hz의 BPF 크기 뿐만 아니라 광역소음의 스펙트럼 크기

도 비슷한 값을 나타냄을 확인할 수 있다. 본 계산에 의한 음압이 사극음원(quadrupole)을 계산하지는 않지만 편심와와 깃의 상호작용에 의한 광역소음을 계산하고, 이 값이 횡류팬 광역소음의 대부분을 차지함을 확인할 수 있다.

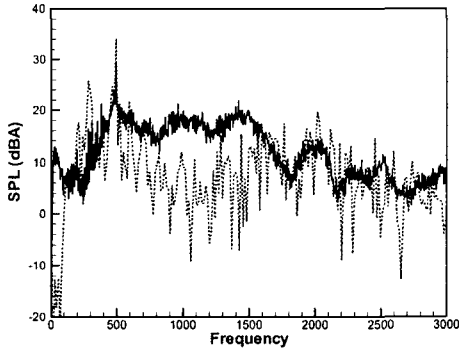


Fig. 9 Comparison of the predicted acoustic pressure with the measured one

깃의 앞전과 뒷전의 기여도를 분석한 결과 깃의 뒷전에서 더 많은 소음이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

2.3 시로코 팬의 소음 특성 및 공력소음 해석

시로코 팬의 소음은 공력소음이며, 저주파수의 광역소음영역과 날개통과주파수의 피크소음이 우세하게 나타난다. 공력소음의 발생원인을 자세하게 파악하기 위해서 시로코 팬에 대한 유동해석을 상용 CFD 코드인 Fluent 를 이용하여 수행하였다. 임펠러는 MRF(Multiple Reference Frame)으로 회전하는 효과를 모델하였고, 임펠러의 두께는 무시하였다.

해석에 사용된 격자는 120 만개이고, 난류모델은 RNG k- ϵ 을 사용하였다. 해석에 사용된 조건은 회전수 3337rpm, 유량 150CFM(cubic feet per minute)이다. 팬 모델에 대한 격자계는 Fig. 10 에 있다. 해석한 결과를 보면 전체적으로 3 차원 이차 유동이 많이 존재함을 확인할 수 있었다. Fig. 11 은 임펠러의 중앙을 지나는 단면에 대한 속도벡터를 나타낸 그림으로 가운데 중앙판에 의한 유동의 분리현상이 나타나고 있으며, 팬 흡입구부터 강한 이차유동이 띠형태로 존재하고 있음을 확인할 수 있다.

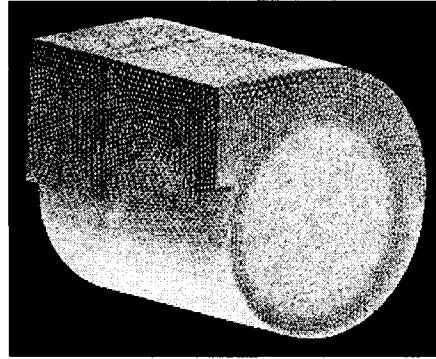


Fig. 10 Mesh of the sirocco fan used in OTR

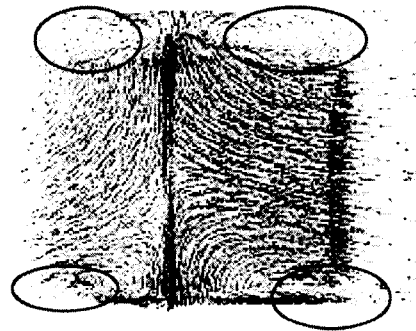


Fig. 11 Velocity vector of mid plane of impeller.

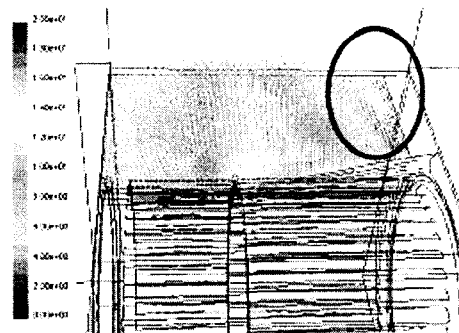


Fig. 12 Velocity vector of exit plane of sirocco fan

팬의 출구부분의 유동을 살펴보면 Fig. 12와 같다. 대부분의 유동이 임펠러의 중앙판이 있는 위치로 모여서 토출됨을 확인할 수 있다. 강한 이차 유동이 존재하는 입구부쪽의 출구(오른쪽 타원 부분)는 역류가 발생하면서 손실로 작용하고 있음을 확인할 수 있다. 이 역류발생 부위는 PIV(Particle Image Velocimetry)를 이용한 실험에서 확인하였다.

공력소음을 수치적으로 해석하기 위해서는 비정상 유동장에 대한 해석이 필수적으로 수행되어야 한다. 그러나 위의 유동해석은 120 만개의 격자로 정상유동을 해석하는 데만 3~4 일이 소요되기

때문에 미끄럼 격자를 이용한 비정상 해석을 수행할 수 없다. 그래서 특정 단면을 선택하여 2차원 단면에 대한 비정상 유동해석을 수행하고 그 결과를 이용하여 소음해석을 수행하였다. 해석에 사용된 2차원 단면의 격자는 6만개이고, 임펠러는 미끄럼격자(sliding mesh)를 사용하여 매시간 회전한다. 임펠러 주위의 격자는 Fig. 13 과 같이 사각격자를 사용하였다. 해석은 임펠러가 한 회전을 하는 동안 420 번의 시간간격($dt = 3.567 \times 10^{-5}$)으로 수행하였고, 10 회전후의 안정된 자료를 이용해서 소음해석을 수행하였다. 해석은 임펠러가 3337rpm 로 회전하고 유량이 150CFM 일 때를 기준으로 수행하였다. 난류모델은 RNG k- ϵ 을 사용하였다.³⁾

해석된 유동장은 Fig. 14 와 같다, 그림은 절대속도 분포를 나타낸 것으로 cutoff 과의 상호작용이 잘 나타나고 있으며 cutoff 이전에 큰 유속의 토출이 존재함을 확인할 수 있다. 2차원 해석의 경우 3차원 해석 시 확인할 수 있었던 입구 부근의 이차유동에 의한 와류현상은 보이지 않고 전체적으로 깨끗한 유동장을 확인할 수 있다.

해석된 유동장 자료를 이용하여 전방 1m 떨어진 지점에서의 음압을 계산하였다. 계산에 사용된 방법은 Ffowcs-Williams & Hawking 방정식으로 이미 시로코 팬에 사용되어 좋은 소음 예측 결과를 보여준 수치방법이다.²⁾ 계산된 결과는 Fig.15 에 있다. 그림에서 날개통과 주파수에 해당하는 피크값은 어느 정도 예측할 수 있지만 저주파수쪽의 광역소음값은 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 소음해석에서는 예측할 수 없다.

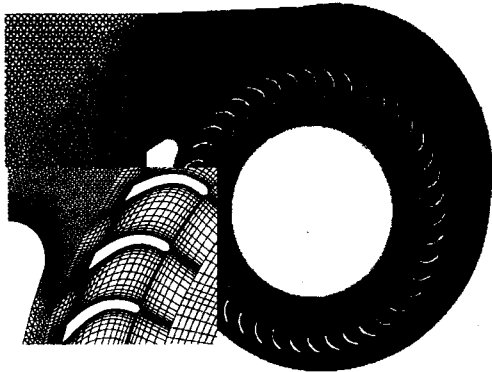


Fig. 13 Mesh of the 2D model of sirocco fan

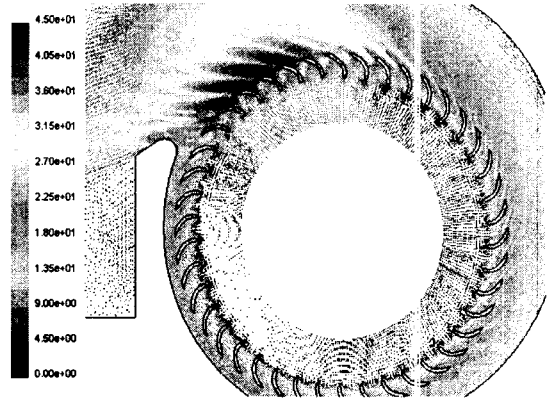


Fig. 14 Calculated CFD results : velocity vector of sirocco fan.

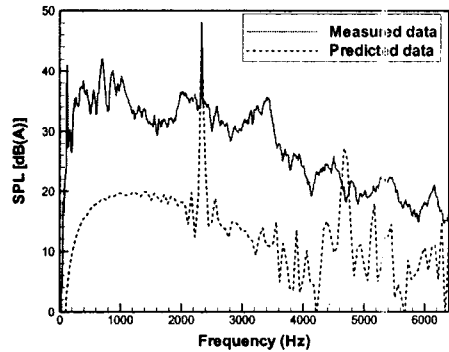


Fig. 15 Comparison of measured and predicted acoustic pressure.

위 계산으로 피크소음은 임펠러 깃과 cutoff의 강한 상호작용에 의해 발생하며, 광역소음은 유로 내에 존재하는 이차 유동인 강한 와류띠와 깃과의 상호작용에 의해서 발생함을 확인했다. 피크소음을 줄이기 위해서는 깃과 cutoff사이의 상호작용을 감소시키거나 분산시키는 방법을 고려해야 하고, 광역소음은 이차유동을 억제하는 방법을 고려해야 함을 확인할 수 있다.

2.4 청소기용 터보팬의 소음 특성 및 해석

청소기용 원심팬은 30000rpm 이상의 고속으로 회전하기 때문에 대부분의 소음은 유동에 의한 공력소음이다. 이러한 소음을 수치적으로 예측하기 위해서는 비정상 유동장에 대한 정보가 필요하며 이런 정보는 비정상 수치해석을 통해서 얻을 수 있다.

사용된 원심팬은 임펠러 깃이 9개이며, 출구 직경이 0.109m 이다. 이 임펠러와 디퓨저, 가이드 베인의 자세한 형상이 Fig. 16 에 있다. 디퓨저 깃의

개수는 16 개이다. 임펠러와 디퓨저가 결합되어서 원심팬이 되고 이것이 모터와 결합된 단품형태가 Fig. 2 에 있다. 이 단품형태로 작동되어 소음이 측정된다.⁴⁾

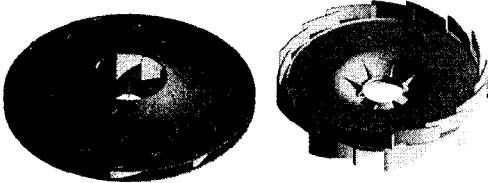
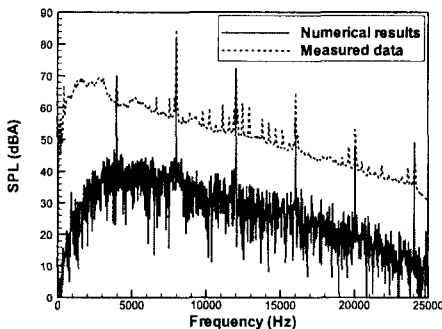
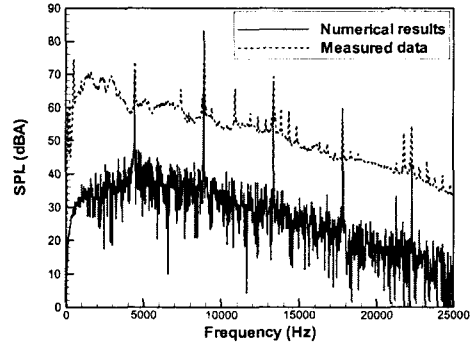


Fig. 16 The designed shapes of impeller and diffuser

이 임펠러가 26760rpm 으로 회전할 경우 측정된 소음 신호가 Fig. 17 (a)에 있다. 측정은 Fig. 16 과 같은 상태에서 측면과 위쪽으로 1m 떨어진 지점에서 측정된 것이다. 임펠러와 디퓨저의 상호작용에 의한 피크들이 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 BPF(4014 Hz)보다는 그 조화주파수의 피크들이 더 큰 값을 가짐을 확인할 수 있다. 또한, 디퓨저와의 상호작용에 의한 피크(7138 Hz)도 아주 작게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 1~3kHz 사이에 존재하는 소음은 입구 유동의 박리나 깃 사이의 박리에 의한 광역소음으로 추정된다. 측정된 것과 동일 rpm 으로 해석한 결과가 Fig. 17 (a)에 있다. 그림에서 광역소음은 본 유동해석 방법이 난류나 박리를 해석할 수 없는 방법이기 때문에 실험치와 큰 차이를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 만약 광역소음을 정확하게 예측하려면 LES나 DNS를 이용한 유동해석이 수행되어야 한다. 원래 연구 목적이었던 토온소음은 거의 비슷한 값을 보여주고 있다. 29730rpm 으로 회전할 때의 실험값과 계산 결과의 비교가 Fig. 17 (b)에 있다. 토온소음의 경우는 거의 비슷한 값으로 예측됨을 다시 한번 확인할 수 있다.



(a) at 26760 rpm case



(b) at 29730 rpm case

Fig. 17 Comparison of the measured SPL with the numerical result

3. 결론

다양한 가전제품에 사용되는 팬의 소음에 대한 수치적인 해석이 수행되었다. 해석된 팬은 냉장고용 축류팬, 에어컨용 횡류팬, OTR 용 시로코팬과 청소기용 터보팬이다. 팬의 주요한 특성을 나타내는 소음 레벨은 측정치와 비교하여 충분히 좋은 정확도로 예측할 수 있었고, 와류와 깃이 상호작용하여 발생하는 광역소음의 경우도 예측이 가능하였다. 또한, 팬의 주요 소음 발생 부위는 대부분 깃의 뒷전임을 확인하였다.

참고문헌

- (1) 전완호, 정기훈, 이덕주, “덕트가 있는 축류팬의 유동 및 음향장 해석,” 유체기계저널, 제 3 권 2 호, pp.15~23, 2000.
- (2) 전완호, 백승조, 김창준, “축류팬 설계, 성능 및 소음 해석 프로그램 개발,” 유체기계저널, 제 6 권 1 호, pp.66~71, 2003.
- (3) 전완호, 송성배, 손상범, 류호선, “후드겸용 전자레인지 시로코팬의 소음특성에 관한 연구,” 유체기계공업학회 연구논문발표회, 2002.
- (4) Wan-Ho Jeon, Seung-Jo Baek, Chang-Joon Kim, “Analysis of the aeroacoustic characteristics of the centrifugal fan in a vacuum cleaner,” Journal of Sound and Vibration, Will be published soon. 2003.