

# 진공청소기용 팬 모터의 비정상 유동 해석 및 공력소음 해석

김재열<sup>+</sup>, 심재기<sup>+</sup>, 송경석<sup>\*</sup>, 오성민<sup>++</sup>, 양동조<sup>++</sup>, 김우진<sup>++</sup>

## The Analysis of the Unsteady Flow Field and Aerodynamic Sound of

## Fan Motor in a Vacuum Cleaner

Jeal-Yel Kim, Jeal-Gi, Sim, Kyung-Seok, Song, Sung-Min Oh, Dong-Jo Yang, Wo-Jin Kim

### Abstract

The vacuum cleaner motor runs on very high speed for the suction power. Specially, the motive power is provided by the impeller being rotate on very high speed. And centrifugal fan consists of the impeller, the diffuser, and the circular casing. Due to the high rotating speed of the impeller and small gap distance between the impeller and diffuser, the centrifugal fan makes very high noise level at BPF and harmonic frequencies. In order to calculate the sound pressure of centrifugal fan, the unsteady flow data is needed. And Noise cause is dividing to fluid noise by exhaust flow of fan and vibration noise by rotational vibration of vacuum cleaner fan motor. Until now, measuring method has been used to measure vibration by the accelerometer; this method has been not measured for the vibration in some parts of brush and commutator because of motor construction and 3-D vibrating mode. This paper was purposed on the accurate analysis, using laser vibration analyzer,. By using this measured data of noise cause against the difficult part in old times, we would like to use for the design of silent fan motor.

**Key Words :** Turbo Fan Motor in Vacuum Cleaner, Unsteady Flow-Field, Laser Vibration Measurement, Aerodynamic Sound

## 1. 서론

최근 가전제품의 기술개발은 고효율화, 다기능화와 더불어 환경문제를 고려하는 방향으로 진행되고 있다. 여러가지 거론되고 있는 환경문제 중 제품의 소음에 대한 문제도

이제는 성능의 관점과 더불어 환경문제로 인식 되어야 한다. 진공청소기는 가전 제품 중에서 인간의 일상생활에서 꼭 필요한 가전제품의 하나이다. 그러나, 성능향상을 위한 과도한 회전 속도 때문에 큰 소음을 유발하며 그로 인하여 사용자에게 소음으로 인한 큰 불편을 초래하고 있다.

\* 발표자, 조선대학교 광응용공학과 (witman75@hanmail.net)

주소: 501-759 광주시 동구 서석동 375

+ 조선대 기전공학과

++ 조선대 대학원 정밀기계공학과

이것은 진공청소기 내에 있는 팬모터가 30000 ~ 35000 rpm의 고속회전을 통해서 축에 연결되어 있는 임펠러를 회전시켜 공기를 흡입, 배출시키는 일련의 작동을 하면서 여러 가지 진동 및 유체소음을 일으키기 때문이다. 이러한 진공청소기용 팬모터의 소음 저감 연구는 국내외 관련회사 및 연구소에서 활발히 진행되고 있다. 그러나 유동해석을 통한 이론적인 방법과 진동 및 소음 측정을 통한 실험적인 방법을 병행하는 연구는 극히 드물게 이루어지고 있다 또한 이러한 두 가지 방법을 통해 얻어진 주요소음 데이터의 정확한 비교는 다루어 지지 않고 있다.

본 연구에서는 진공청소기 팬 모터의 주요 소음 원인을 규명하기 위해서 아래의 3가지 실험적, 이론적 방법을 병행하여 수행한다.

- (1) 3차원 레이저 측정기를 이용하여 모터 케이싱부의 진동모드 측정하다
- (2) 마이크로폰을 이용하여 팬모터의 소음측정 한다.
- (3) 디퓨저와 임펠러간의 압력 및 속도변화에 따른 공력소음 예측을 위한 유동해석을 수행한다.

이러한 방법을 통하여 측정한 진동 및 소음의 주파수특성과 공력소음 예측 데이터를 비교분석 하여 주요 소음원인을 규명 하고자 한다.

## 2. 진동소음과 공력소음

### 2.1 진동소음

진동소음은 고속으로 회전하는 진공청소기 팬 모터 자체 케이싱 부에서 발생하는 것으로 모터 제작 시 공차 등에 의해 모터가 고속으로 회전할 때 주로 정류자와 브러쉬간의 마찰에 의해 발생된 진동에 의해서 발생되고 이 진동은 회전축과 케이싱을 타고 위로 전파하는 것이다. 그러나 자체 케이싱 부에서의 진동 소음은 진공청소기에서 발생하는 소음 중 작은 비율을 차지하기 때문에 소음에 대한 피해가 극히 작을 것으로 생각된다.

### 2.2 공력소음

공력 소음은 원심팬 내의 임펠러와 디퓨저의 상호 작용에 의한 발생하는 소음으로 이것은 원심팬 내에서 더 많은 압력차이를 발생하기 위해서 임펠러와 디퓨저 간극을 점차 작아지게 하여 발생하는 소음으로 진공청소기의 팬 모터에서 발생하는 주된 소음이 바로 공력 소음이라고 판단된다.

## 3. 진동 및 소음 해석

### 3.1 3차원 레이저를 이용한 진동 측정

모터는 케이싱, 임펠러, 디퓨저, 축 및 베어링 등 기구 부와 아마츄어, 필드, 정류자, 브러쉬, 및 전기 부로 이루어져 있다. 모터 자체에서 발생하는 진동소음은 모터진동이 안내 벽을 통하여 위의 모터 여러 구성물들을 진동시켜 발생하는 것이다.

본 논문에서 측정하고자 하는 모터의 재원은 임펠러 (Impeller) 것이 9 개, 디퓨저(Diffuser) 것이 15개이다.

진동을 측정하기 위해 10분 이상 모터를 회전시켜 모터를 안정화 시켰으며, 모터의 앞쪽으로부터 1m 떨어진 위치에서 진동을 측정하였다.

측정한 모터의 회전수는 35,000 rpm 의 고속 회전을 하며, 구동전원은 220V, 60kHz 의 교류전원으로 작동시켰다. 외부로부터의 진동유입을 방지하기 위해 방진 테이블과 우레탄 패드를 사용하였고, 진동 측정 장비로는 3차원 레이저 진동측정기(PSV300) 와 Reference 진동 측정용 접촉식 가속도계를 사용하였다. 모터의 진동 측정 부위는 4개의 파트로 나누어서 Fig. 2와 같이 전체 케이스, 베어링, 정류자, 브러쉬 등을 측정하였다.

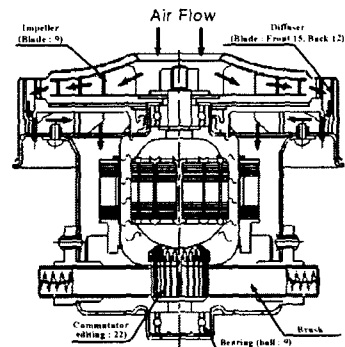
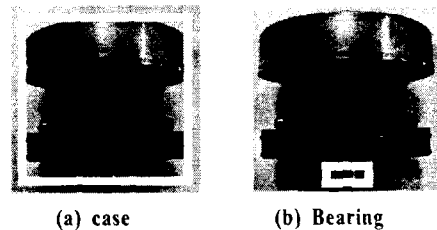


Fig. 1 Structure of fan motor in a vacuum cleaner



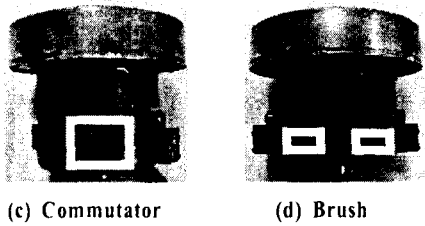


Fig. 2 Measurement area of fan motor in a vacuum cleaner

먼저 케이스 전체영역의 진동모드를 관찰함으로써 각 성분의 주파수가 어디 부위에 존재 하는가를 살펴보았다. 또한 30개의 포인트를 선택하여 특정 포인트에서의 주파수 성분을 관찰 하였다.

먼저 전체영역에 대한 진동 스펙트럼을 관찰하여 피크가 일어나는 주파수 대역을 찾아내었다.

Fig. 3에서 보는 것처럼 120Hz, 240Hz, 360Hz, 480Hz, 570Hz, 1.710kHz, 2.510kHz, 4.000kHz, 4.572kHz, 5.130kHz, 6.270kHz, 10.26kHz, 12.54kHz, 15.39kHz에서 피크값이 관찰되었다.

Fig. 4를 보면 각 주파수 성분별로 어느 영역에서 주로 발생되는가를 관찰 할 수 있었다. 여기서 전원 주파수를 제외한 대부분의 높은 피크값의 진동이 임펠러 케이스부에서 발생되는 것을 알 수 있으며, 이는 공기의 유동에 의한 것으로 사료되어진다.

30개의 포인트는 Fig. 5(a)와 같이 설정 하였으며, 특정 포인트에 대한 주파수 특성은 Fig.5(b)~(d)와 같이 측정되었다. 여기서 전원 주파수를 제외한 문제시되는 피크 주파수는 2.51kHz, 4.572kHz, 5.13kHz, 10.26kHz, 12.54kHz, 15.39kHz 이며, 특히 5.13kHz, 10.26kHz,와 15.39kHz 대역의 진동이 소음과 연관되는 것으로 사료된다. 저주파 영역에서의 진동 측정결과 중 120Hz, 240Hz, 360Hz, 480Hz의 피크는 220V, 60Hz 교류의 구동전원에 따른 진동임을 알 수 있다. 또한 570Hz의 진동은 35,000 rpm 의 회전속도에 의한 구조진동이며, 이것의 하모닉 진동은 관찰되지 않았다. 따라서 모터의 발란스는 양호 한 것으로 사료된다.

고주파 영역에서의 진동 측정 결과에서 5kHz, 10kHz, 15kHz 의 진동은 9개의 임펠러의 출구로부터 분출되는 유동이 디퓨저 날개 전면부와와의 간섭에 의해서 발생하는 BPF(Blade Passing Frequency)소음에 의한 진동과 하모닉 주파수에 의한 진동이다. 이것은 임펠러 및 디퓨저의 날개 면에서의 박리와 후류에 의한 와류에 의해서 발생된다. 5kHz의 진동을 각 측정 포인트에서 비교하면 모터 상부 케

이스 쪽에서 멀어 질수록 진동의 크기가 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 디퓨저로부터 멀어질수록 유체의 난류 유동이 감소함으로써 BPF 의 고주파 소음은 감소되고 저주파 성분의 소음이 필터링 되고 있기 때문이다. 그리고 발생하는 진동의 2차 하모닉 진동은 2.510kHz, 4.000kHz, 4.572kHz, 6.270kHz 등이 관찰되었다.

또한 12.54kHz는 정류자의 편심 22개와 브러시의 접촉에 의한 진동이며 모터 상부까지 전파된 것으로 사료된다. 이상의 진동측정 실험결과 고속회전 모터의 기계적인 진동과 유체 소음에 의한 진동을 모두 관찰할 수 있었으며, 특히 유체 소음 중 임펠러로부터 분출되는 유동이 디퓨저 날개와의 간섭으로 발생하는 BPF 소음과 임펠러로부터 분출되는 유동이 디퓨저 날개와 부딪히고 날개를 통과하면서 1kHz 이상의 주파수 대역에서 발생하는 난류소음에 의한 진동을 정확히 구별할 수 있었다.

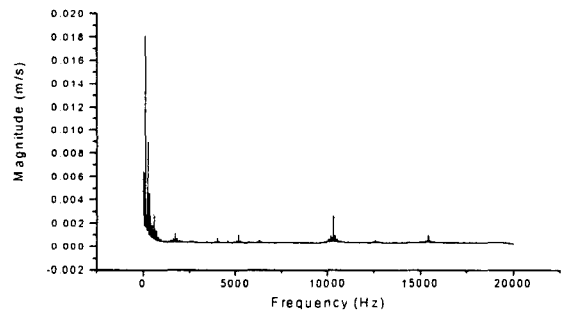


Fig. 3 The Spectrum of fan motor case in a vacuum cleaner

### 3.2 마이크로폰을 이용한 소음측정

모터와 1.5m 떨어진 지점에서 마이크로폰(Cirrus-Ze901)을 이용하여 측정한 소음측정 데이터를 분석해 보면 Fig. 6에서 나타난 바와 같이 579Hz, 1.14kHz, 5kHz, 10kHz, 15kHz의 주파수 영역에서 큰 소음을 보이고 있다. 소음 측정 데이터와 모터의 전체케이스 진동측정 데이터를 비교해 보면 비슷한 주파수 영역에서 공진이 발생하고 있는 것을 알 수가 있다. 570Hz, 1.14kHz의 주파수는 정류자와 브러쉬간의 주기적인 접촉으로 인한 것이다. 소음 값은 크지만 청소기 외부 케이스에 의해 충분히 방음되는 주파수이다. 여기서 가장 문제시되는 소음은 5kHz, 10kHz, 15kHz 대역의 소음이다. 가장 인간의 귀에 거슬리며, 청소기 외부 케이스를 덮은 후에도 크게 존재하는 소음이기 때문에 반드시 이 소음을 줄이는 대책이 필요할 것이다.

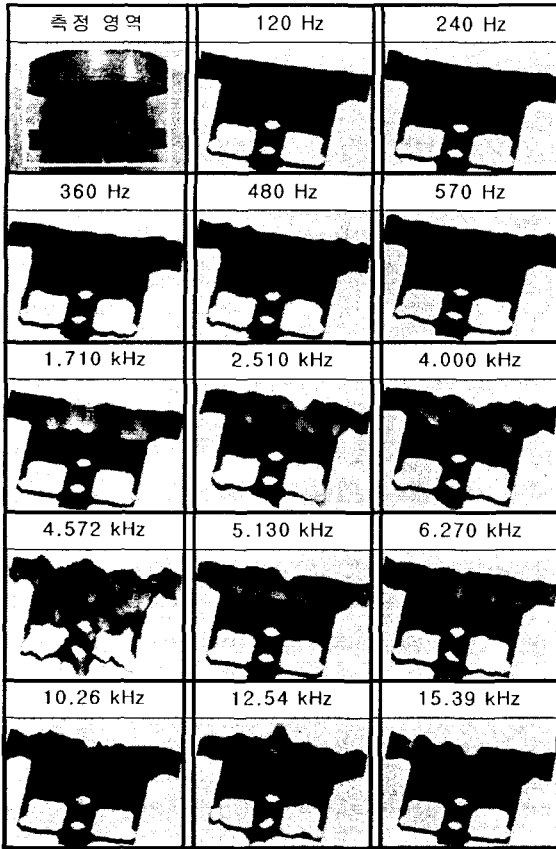
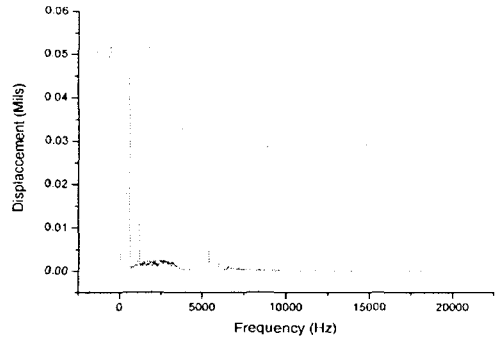


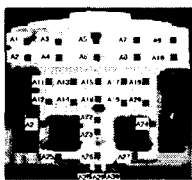
Fig. 4 3D Vibrating mode of fan motor case in a vacuum cleaner



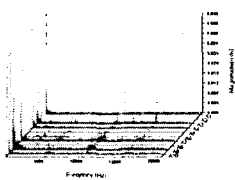
3.3 임펠러와 디퓨저의 유동 해석 및 공력소음 해석  
유동 해석을 위해 사용된 pre-processor는 Gambit, Tgrid를 이용하였다. Solver 및 post-processor는 Fluent를 이용하였다.

3.3.1 팬 모터의 모델링 형상 Meshing 및 경계조건  
진공청소기용 팬 모터의 유동장을 해석하기 위해 유동장 영역의 meshing 작업을 수행하였다.

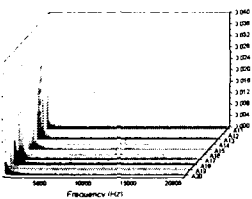
meshing작업은 먼저 임펠러와 디퓨저의 깃 부분의 wall을 세밀하게 나누었으며, 또한 wall 과 wall이 근접한 부분도 세밀하게 나누었다. 그리고, rotational fluid인 임펠러와 stationary fluid인 디퓨저를 분리하여 처리하였다. 임펠러와 디퓨저의 meshing algorithm은 quad-pave를 이용하였으며 외부 유동장을 살펴보기 위한 케이싱 바깥 부분은 tri-pave를 이용하였다.



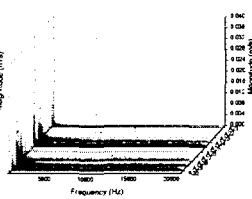
(a) Point Number



(b) FFT of Point A1~A10



(c) FFT of Point A11~A20



(d) FFT of Point A21~A30

Fig. 5 The Spectrum of specification point (Case)

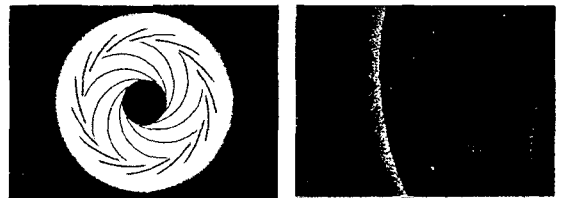


Fig. 7 Flow analysis lattice

pre-processor에서의 모델링 경계조건은 Solver에서 구체적으로 주어질 항목을 설정해 주는 것이다. 즉, 유동의 입구와 출구, rotational fluid 및 stationary fluid의 분리 설정 및 경계 설정을 하는 것이다. 여기서, 입구(Inlet)는 임펠러의 안쪽을 설정하였으며, 출구(Outlet)는 모터 바깥쪽의

1.5m 떨어진 부분으로 설정하였다. 이것은 출구의 압력 조건을 0으로 하기 위한 것이다. 또한, rotational fluid는 임펠러로, stational fluid는 디퓨저로 설정하였으며, 그 경계는 각각의 wall에 대해 interface 조건으로 설정하였다.

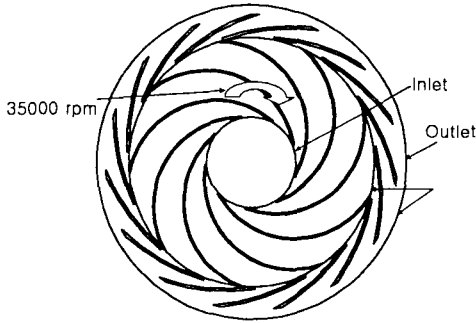


Fig. 8 Boundary condition

### 3.3.2 속도장(Velocity Field) 해석

Fig. 9는 속도장에서의 속도의 변화를 나타내어 주고 있다. 내부 유동장의 속도는 그림과 같이 35,000 rpm로 회전하는 임펠러와 흡입구로 들어와 임펠러의 날개 바깥쪽으로 배출되어 감으로써 속도가 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 임펠러의 회전 속도와 임펠러와 디퓨저 사이의 높은 압력 발생 때문인 것으로 사료된다.

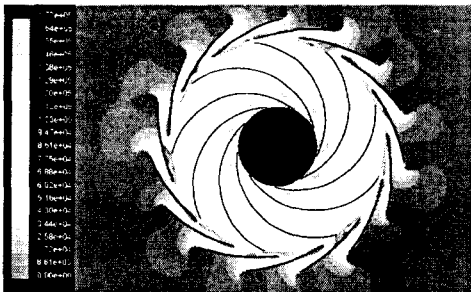


Fig. 9 Velocity Field



Fig. 10 Velocity field-vector of blade

### 3.3.2 입력장(Pressure Field) 해석

Fig. 11는 전체의 유동장에 걸쳐 압력의 변화를 보여주고

있다. 보이는 바와 같이 전체 유동장 내에서 임펠러와 디퓨저 깃 사이의 압력이 가장 큰 것으로 나타났다. 큰 압력을 생성하기 위해 둘 사이의 간극을 줄임에 따라 이와 같은 현상이 나타난다. 속도장과같이 임펠러와 디퓨저에서 흘러지는 후류 와류의 세기가 모든 깃의 값이 다를 수 있다. 또한 임펠러에서 흘러지는 후류 와류가 디퓨저에서 흘러지는 후류 와류의 세기보다 더 큰 교란을 받음을 알 수 있다. 이러한 교란은 깃의 비정상 힘의 교란을 가져오고 결국 원형 케이싱의 원심팬에서 공력 소음으로 나타난다.

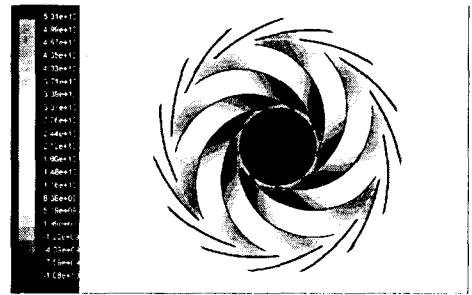


Fig. 11 Total pressure field



Fig. 12 Total pressure field of blade

### 3.3.2 디퓨저에 가해지는 Force 변동

Fig. 13~14의 그림은 디퓨저에 가해지는 force 변동을 보여주고 있다. 이 그림과 그래프를 살펴보면 디퓨저의 force 변동이 5kHz, 10kHz, 15kHz 등으로 고주파수 대역에서 5kHz의 간격으로 변동하는 것을 볼 수 있다. 이렇게 5kHz의 간격으로 주파수의 변동이 높은 피크 값을 나타내는데 이는 진공청소기 팬 모터의 소음 중에서 이산주파수 소음인 BPF(Blade Passing Frequency) 소음이다. BPF 소음은 디퓨저와 임펠러 사이에서 일어나는 주파수로 임펠러가 회전하면서 디퓨저 깃과 만나는 지점에서 일종의 공명을 일으켜서 나는 소음으로 보인다. 이런 소음이 일어나는 원인은 진공청소기 팬 모터의 흡입력을 높이기 위해서 디퓨저와 임펠러 사이의 간극을 작게 하는 데에서 비롯되는데, 이러한 광역소음의 특성은 매 시간 임펠러 깃이 디퓨저나 출구와 상호작용하면서 비정상상태의 교란을 많이 받고 이것

이 임펠러 깃의 비정상 힘의 교란을 가져오게 된다. 또한, 임펠러의 후류가 디퓨저와 부딪히면서 디퓨저 깃에 비정상 교란을 가져오는 것도 원인이 된다.

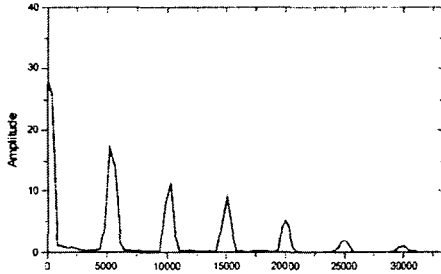


Fig. 13 Force change that is imposed to diffuser-X axis

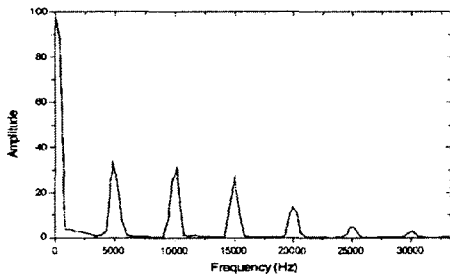


Fig. 14 Force change that is imposed to diffuser-Y axis

#### 4. 결론

본 연구에서는 35000 rpm으로 회전하는 진공청소기용 팬 모터의 3차원레이저 진동 측정기를 이용한 Motor Casing 진동 측정과 마이크로폰을 이용한 소음 측정, 유동장 해석을 통한 공력 소음 예측 등을 수행하여 유체의 유동에 따른 소음과 진동의 연관성을 분석하였고, 소음의 원인을 규명하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 3차원레이저 진동측정기(PSV300)를 이용하여 측정된 전체 케이싱의 진동 데이터를 분석한 결과 교류전원 주파수를 제외하고 문제시되는 주파수는 12.4kHz, 5kHz, 10kHz, 15kHz로 확인되었으며 12.4kHz는 정류자와 브러쉬간의 접촉에 의한 주파수이며, 5kHz, 10kHz, 15kHz의 주파수는 임펠러의 디퓨저간의 BPF 소음으로 확인되었다.
2. 2차원으로 모델링한 진공청소기 팬 모터를 FLUENT

를 이용하여 유동장을 해석하고 속도장, 압력장, 그리고 디퓨저의 force 변동을 고찰 해 본 결과 디퓨저와 임펠러 사이에서 가장 큰 속도의 변화와 높은 압력 등을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과를 토대로 디퓨저의 force 변동 그래프를 PSV 300으로 측정된 진동데이터와 비교해보면 두 측정치에서 5kHz 주기로 고주파수 영역에서 높은 피크 값을 확인 할 수 있었고, 이는 임펠러와 디퓨저 사이에서 각 깃이 접할 때마다 일종의 공명을 일으켜서 발생하는 주파수임을 확인하였다.

4. 이상의 실험 및 고찰로 보았을 때 진공청소기의 소음의 원인은 모터 내부의 임펠러와 디퓨저간의 상호작용에 의한 공명으로부터 발생한다는 것을 알았고, 이는 모터의 흡입력을 높이기 위해 임펠러와 디퓨저간의 간극을 작게 하여 소음이 더욱 커졌다는 것을 확인 할 수 있었다.

#### 참고 문헌

1. Jeon Wan-Ho, An Analysis of Unsteady Flow Fields in a Centrifugal Turbomachine Using a Discrete Vortex Method, KAIST Master Thesis, 1994.
2. Jeon Wan-Ho, An Analysis of Noise Generation and Radiation from Centrifugal Fans with a Casing, KAIST Ph. D. Thesis, 1998.
3. Kim Kyeong-Ho, Incompressible Flow Simulation of Impeller for Vacuum Cleaner Motor, Pusan National University Master Thesis, 1998.
4. Jeon Wan-Ho, Lee Duck-Joo, Ryu Ki-Wahn, An Analysis of Flow and Noise for Cleaner Centrifugal Fan, The Korean Society for Noise and Vibration Engineering Fall Conference, pp.130~135, 1995.
5. L. Mongeau, D. E. Thomson and D. K. McLaughlin, "Sound Generation by Rotating Stall in Centrifugal Turbomachines," Journal of Sound and Vibration, Vol. 163, No. 1, 1993, pp. 1-30.
6. Choi In-Hwan, Chae Hee-Kwon, The Study of Noise Reduction Method for Vacuum Cleaner Fan Motor, The Korean Society for Noise and Vibration Engineering Fall Conference, pp. 67~72, 1994.
7. G. Lauchle, T.Brungart, 2000, "Modifications of a vacuum cleaner for noise control," The 29<sup>th</sup> international congress on noise control engineering.