

유한 요소법을 이용한 차량용 팬 DC 모터 소음 저감에 관한 연구

정 일 호^{*1)} · 서 종 휘¹⁾ · 박 태 원²⁾ · 김 주 용³⁾

아주대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 아주대학교 기계공학부²⁾ · 동양기전³⁾

A Study on Noise Reduction of a Fan DC Motor in a Vehicle using FEM

Ilho Jung^{*1)} · Jonghwi Seo¹⁾ · Taewon Park²⁾ · Jooyong Kim³⁾

¹⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

³⁾Dongyang Mechatronics Co., Incheon 405-846, Korea

(Received 22 July 2004 / Accepted 7 October 2004)

Abstract : The DC motor in a vehicle may cause noise and vibration because of high speed revolution, which can make a driver feel uncomfortable. There have been various studies attempting to solve these problems, focusing mostly on the causes of and ways to reduce noise and vibration. It is suggested that the noise in a DC motor may be primarily due to interaction between a brush and a commutator. Brush noise, the most common noise in a DC motor, results from a brush bounced from the surface of the commutator, fluctuation of the friction between the brush and the commutator, and the impact on the brush when passing over slots of the commutator. Based on the noise test, one of the most important design parameters was shown to be the roundness of the commutator. As the DC motor is used, the roundness of the commutator gets bigger with subsequent increase of the level of brush noise and vibration. There must be a threshold in order to prevent the brush noise from getting worse. Using the method of CAE is more efficient than the real test for purposes of looking for various design parameters to maintain the roundness of the commutator. In this study, the design process to reduce the brush noise is presented with the use of a computer model. The design parameters to reduce the brush noise and vibration are proposed by using FEM. The design parameters are used to reduce the noise and vibration of a DC motor and it is verified with the test results on a fan DC motor in a vehicle. This method may be applicable to various DC motor

Key words : Fan motor(팬 모터), Brush noise(브러쉬 소음), Brush vibration(브러쉬 진동), CAE(전산지원공학), FEM(유한요소법), DC motor(직류 모터)

1. 서론

DC 모터는 고속으로 회전하기 때문에 시스템에 따라 작동 중에 소음/진동 문제를 발생시킬 수 있다. 특히 자동차용 구동 장치나 가전제품 등에 사용되는 DC 모터는 제품 특성상 소음/진동이 있을 경우

사용자에게 불쾌감을 유발할 수 있다. 따라서 설계 단계부터 이 부분에 대한 적극적인 대처가 필요하다.

DC 모터의 소음/진동은 크게 전자기적인 원인과 기계적인 원인 그리고 공기 역학적인 원인 등으로 나뉘어지는데 영구자석을 사용하는 DC 모터는 기계적인 원인에 의한 영향이 상대적으로 가장 크다고 알려져 있다.¹⁾ 연구 동향을 살펴보면 초기에는

*To whom correspondence should be addressed.
ilhojung@hanmail.net

위와 같은 소음/진동을 야기하는 발생 원인을 파악하는 연구가 주로 수행되었다.²⁾

기 진행된 연구를 통해 브러쉬(Brush)와 정류자(Commutator) 사이의 동적 상호작용이 DC 모터의 가장 주요한 소음/진동 원인임을 알 수 있었다.^{2,3)} DC 모터는 구조상 브러쉬와 정류자 사이에 기계적 접점으로 마찰이 발생한다. 이 마찰이 DC 모터의 가장 주된 소음/진동원이 되며, 이로 인한 소음을 통상 브러쉬 소음이라 부른다. 이외에도 아마추어(Armature)의 불평형, 아마추어 축과 베어링 사이의 상호 작용 등의 소음/진동 발생 요인이 존재한다.^{2,4)}

본 연구에서는 먼저 기 확보된 내구 전, 후 소음 측정 결과를 토대로 DC모터의 소음/진동 전달 경로와 특징을 파악하였다. 다음으로 전달 경로에 위치한 관련 부품들의 공진 여부를 파악하기 위하여 전체 DC 모터 시스템에 대한 유한요소 모델을 구성하여 고유모드해석을 수행하였다. 고유모드해석 결과를 바탕으로 DC 모터 부품의 진동 특성을 파악하고, DC 모터의 작동 환경과 각각의 부품 사이의 연관성에 대한 연구를 진행하였으며, 브러쉬 소음을 저감할 수 있는 설계 개선안을 제시하였으며, 최종적으로 시험을 통해 설계 개선안을 검증하였다.

2. DC 모터 소음 특징과 3차원 모델

2.1 소음 전달 경로와 특징

기존 자동차용 라디에이터 팬에 사용되는 DC 모터 단품의 브러쉬 소음과 관련된 내구시험 전후의 자료(Table 1)를 분석한 결과, 가장 큰 영향을 미치는 설계 요소는 정류자의 진원도(Fig. 1)임을 알 수 있다. 시험 자료에 의하면 DC 모터가 작동함에 따라 정류자의 진원도가 점점 불량해지고, 이로 인하여 브러쉬의 소음이 증가되고 있다. 따라서, DC 모터의 내구 수명까지 브러쉬의 소음을 일정 수준으로 유지하기 위해서는 정류자의 진원도를 유지해야 한다는 것을 알 수 있다. 내구시험이 끝난 DC 모터를 분해하여 정류자를 외삭하여 진원도를 복원한 후 다시 조립하여 음압 레벨을 측정한 결과, 내구 시험 전의 음압 레벨까지 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

참고로 Table 1의 6개 DC 모터 시험은 소음을 제

Table 1 Relation of roundness and noise before/after durability test

No.	Before		After	
	Roundness <μm>	Noise <dB(A)>	Roundness <μm>	Noise <dB(A)>
#1	Max. 3	61.4	146	78.8
#2	Max. 3	58.8	140	78.6
#3	Max. 3	60.3	137	78.9
#4	Max. 3	59	148	79.5
#5	Max. 3	60.3	78	74.1
#6	Max. 3	56.8	42	73.6

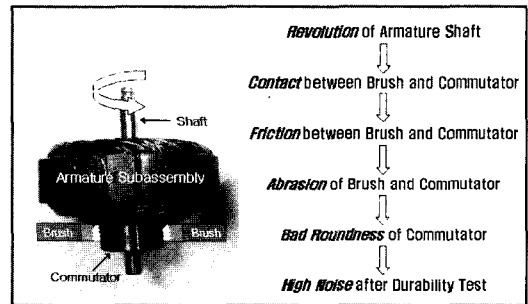


Fig. 1 The main cause of DC motor's noise and vibration

외한 내구 성능을 모두 만족하였다.

정류자의 진원도는 브러쉬와 정류자 사이의 상호 작용으로 발생하는 마찰에 의한 마모로부터 기인하지만 브러쉬와 정류자는 스테이(Stay)와 아마추어 축에 장착되어 케이스 안에 조립되므로 상호 부품들이 진동의 전달경로 역할을 하게 되고 불행한 경우에는 공진 등으로 인하여 진동이 증폭될 수 있다. 증폭된 진동은 브러쉬와 정류자 사이의 마모를 불규칙하게 가속시켜 정류자의 진원도가 더 커지는 원인이 될 것이다. 이는 DC 모터 시스템 전체를 고려하여 설계가 진행되어야만 설계 단계에서 브러쉬 소음 문제를 줄일 수 있음을 의미한다.

2.2 3차원 모델 및 유한 요소 모델 개요

해석 대상은 자동차 라디에이터 팬에 사용되는 DC 브러쉬 모터로 개발 초기 단계의 모델이다. 기본 사양은 Table 2와 같다. 유한 요소 해석을 위하여 우선 Fig. 2와 같이 3차원 형상 모델러로 DC 모터 구성 부품들의 모델링을 수행 하였다. 모든 부품은 도면을 근거로 모델링 되었으며, 물론 형상이 복잡한 부분은 정밀하게 모델링 하였다.

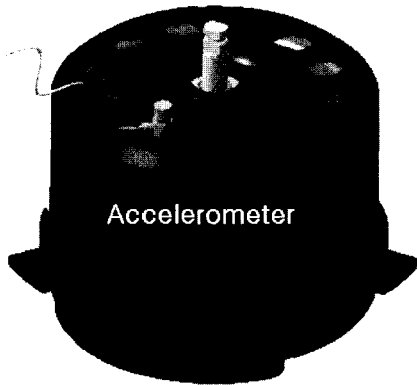


Fig. 2 3D CAD model of DC motor assembly

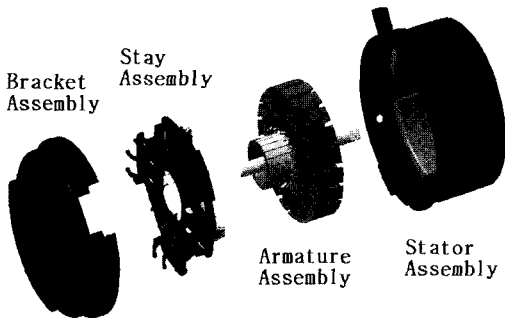


Fig. 3 3D CAD model of DC motor parts

Table 2 Specification of DC motor assembly

Items		Options
Test voltage(v)		12
No-load	RPM	2700±200
	Current(A)	Max. 3.5
Rated load	Torque(kgf·cm)	5.2
	RPM	2180±170
	Current(A)	Max. 15±1.2

DC 모터는 Fig. 3과 같이 왼쪽부터 브라켓 어셈블리(Bracket Assembly), 스테이 어셈블리, 아마추어 어셈블리, 스테이터(Stator) 어셈블리 이상 4부분으로 구성되어 있다. 아마추어는 스테이터와 브라켓 중심에 위치한 베어링과 오일리스 메탈(Oilless metal) 베어링에 의해 연결되어 있고, 정류자는 4개의 브러쉬에 접촉된다. 브러쉬를 포함하는 스테이는 스테이터와 브라켓이 코킹(Caulking)되면서 그 사이에 고정된다. 스테이터 내부에는 4개의 영구자석이 장착되며, 외부 3 곳에는 고정단이 연결되어

있는데, 이는 볼트를 이용하여 고정하기 위해 사용된다. 브라켓은 물 등의 흡입을 막기 위해 커버가 장착되었다. 와이어와 브러쉬는 상대적으로 작은 질량 때문에 각각 고유주파수에 미치는 영향이 미미할 것으로 판단되고, 구조상 강체 모드의 특성을 보이므로 생략하였다.

3. 유한 요소 모델과 고유 모드 해석

3차원 형상 모델을 기초로 유한요소 모델러를 이용하여 DC 모터 구성부품들의 유한요소 모델을 구성하였다. 형상이 복잡한 부분은 작은 요소로 세밀하게 모델링 하였다.

아마추어에 감겨있는 코일은 아마추어의 밀도를 조절하여 질량으로 고려하였다. 각 부품의 유한요소 모델은 Fig. 4와 같다. Fig. 4의 유한요소 모델들이 조립되면 Fig. 5와 같다. 경계 조건은 부품간 실제 결합 방법을 모사하였다. 첫째로 아마추어 축이 스테이터와 브라켓 중심에 위치한 베어링과 오일리스 메탈 베어링에 결합되어 축회전이 가능하므로 강체빔(Rigid Beam) 요소로 해당 부위들을 연결하여 축회전만 가능하도록 구속하였다. 두 번째로 스테이가 스테이터와 브라켓 사이에 삽입되어 코킹으로 고정되므로 먼저 스테이터 하부와 브라켓 상부가 스테이의 가장자리(Fig. 4의 ①~③)와 접촉하는 부위의 노드(Node)를 공유시켜 스테이를 고정시켰으며 스테이터 하부의 외륜과 브라켓 상부 내륜의 노드를 공유시켜 코킹으로 인하여 스테이터와 브라켓이 고정되는 결합 형태를 구현하였다. 마지막으로

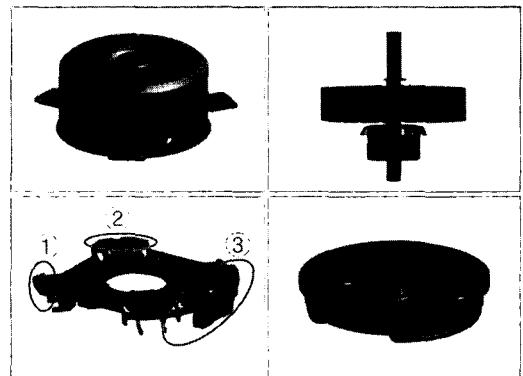


Fig. 4 FE model of DC motor parts

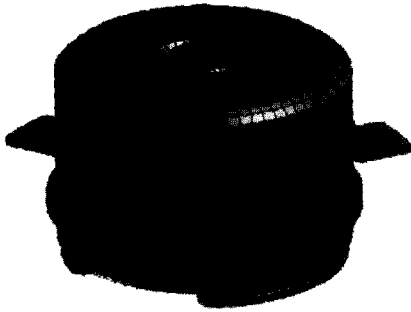


Fig. 5 FE model of DC motor assembly

Table 3 Result of normal mode analysis

Part name	Natural frequency (Hz)		
	1st	2nd	3rd
Armature	886	2062	3274
Stay	776	1173	1275
Cover	771	1005	1019

플라스틱 커버는 지지대(Fig. 17참조)가 브라켓 하부 홈(Hole)에 삽입되어 열로 녹여 고정되므로 이를 구현하기 위하여 지지대와 구멍 내륜의 노드를 공유시켰다. 범용 유한요소 해석기(FE Solver)를 사용하여 DC 모터 부품의 고유주파수를 계산한 결과는 Table 3과 같다.

DC 모터의 주된 소음/진동원은 서론에서 밝힌 바와 같이 브러쉬와 정류자 사이의 상호작용이다.

구체적으로 정류자가 회전할 때 접촉 중인 브러쉬가 정류자를 구성하고 있는 막대 (Bar)와 막대 사이의 틈(Slot)을 지나면서 소음/진동을 발생 시킨다. 이는 DC 모터가 작동 중일 때 가진원의 역할을 하게 된다. 고유 모드 해석 결과의 검토를 위해 DC 모터의 가진 주파수를 구해보았다. DC 모터는 정격 부하에서 2180 rpm의 속도로 회전한다. 또한 정류자를 구성하는 막대 수가 20개 이므로, DC 모터의 가진 주파수는 다음 식 (1)과 같다.

$$\text{가진 주파수} = (2180\text{rpm}/60\text{sec}) \times 20(\text{막대수}) \quad (1)$$

$$= 727\text{Hz}$$

실험 결과(Fig. 14, 16, 20 참조)에서 1차 피크 값이 760 Hz 부근에서 발생되었다. Table 2의 RPM 공차율을 감안할 때, 이는 식 (1)에서 계산된 기본 가진 주파수임을 알 수 있다. 각각 부품의 1차 모드형상은

Mode 1 : Freq = 886.02Hz

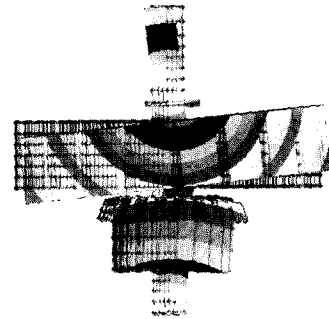


Fig. 6 Armature assembly 1st mode shape

Mode 1 : Freq = 766.21Hz

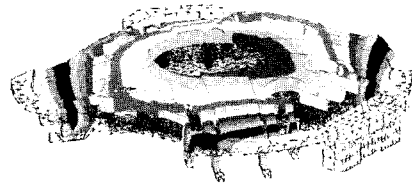


Fig. 7 Stay 1st mode shape

Mode 1 : Freq = 770.74 Hz

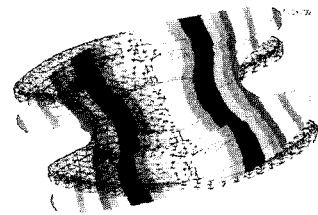


Fig. 8 Cover 1st mode shape (2 points support)

Fig. 6~8과 같다.

Table 3에서 스테이의 1차 고유주파수가 가진 주파수에 근접함을 알 수 있다. 이는 브러쉬 소음과 직접 관련된 스테이가 공진될 가능성이 있음을 나타낸다. Fig. 7은 스테이의 1차 모드형상이 상하 굽힘 모드이고, 브러쉬가 장착되는 스테이의 중앙 원주

부의 변형량이 일정하지 않음을 보여준다. 따라서 이를 감안할 때 공진이 발생할 경우, 브러쉬와 정류자의 불규칙 마모가 더욱 가속될 것으로 예상되며, 서론에서 언급한 것과 같이 내구시험 후 브러쉬 소음을 증가시키는 주 원인이 될 것이다. 또한, 커버의 1차 고유 주파수가 가진 주파수에 근접하고, 모드 형상을 고려할 때, 공진이 발생할 경우 플라스틱 커버가 브라켓과 접촉하여 원치 않는 소음을 발생시킬 소지가 있을 것으로 판단된다. 실제 시험 중 커버의 공진으로 불쾌한 소음이 발생되었다. 이에 상기 진행된 해석 결과를 바탕으로 다음과 같은 개선안을 제시하였다.

4. DC 모터 소음 저감 개선안과 검증

4.1 가진 주파수 변경

현재 DC 모터는 정류자의 막대 수가 20개이다. 2장에서 알아본 바와 같이 정류자의 막대 수를 조절하여 가진 주파수 자체를 바꿈으로써 부품과의 공진을 피할 수 있다. 만약 정류자의 막대 수를 16개로 바꾸고 같은 속도로 회전한다면, 식 (1)에 의해 약 581Hz의 가진 주파수가 예상된다. 즉 현재의 제품에서 막대 수를 줄여서 공진을 피하는 방법이 있다. 하지만 이 방법은 출력 효율 등, 연관되어 있는 설계 변수가 많아 실질적으로 실효성이 부족하다.

4.2 스테이 고유주파수 변경과 방진

다음 방안은 현재 가장자리만 고정되어 있는 스테이 내부의 적절한 부위를 브라켓과 강철 (Steel) 등으로 고정시키면 강성증가로 인하여 스테이의 고유 주파수가 증가되어, 가진 주파수와의 공진을 근본적으로 피할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 10 세 부위의 고무 대신 지름 5 mm의 강철로 고정할 경우, Fig. 9와 같이 고유 주파수가 1354 Hz로 변경됨을 확인할 수 있었다. 설계변경이 어려운 상황이라면 Fig. 10과 11과 같이 스테이와 브라켓 사이에 방진 고무 등을 이용하여 직접적으로 방진하는 방안이 있다.

적절한 방진 고무를 적용하면 감쇠의 영향으로 스테이의 진동 폭을 저감시킬 수 있을 것으로 예상된다. 브러쉬 소음의 주 원인 부품인 정류자와 브러쉬 중 현실적으로 정류자가 장착되어 있는 아마추

Mode 1 : Freq = 1354.2Hz

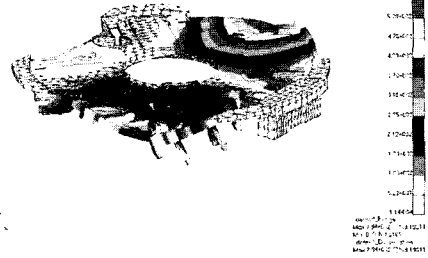


Fig. 9 Stay 1st mode shape (3 points support with D5 steel)

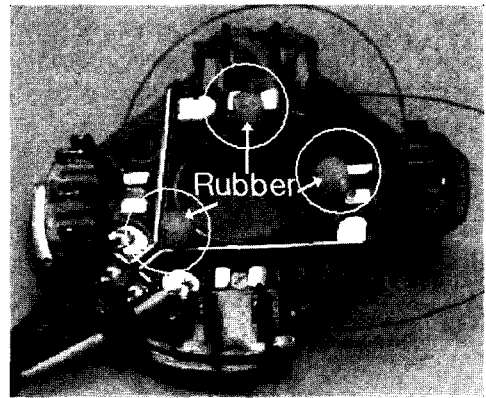


Fig. 10 Stay assembly added rubbers at inner 3 points

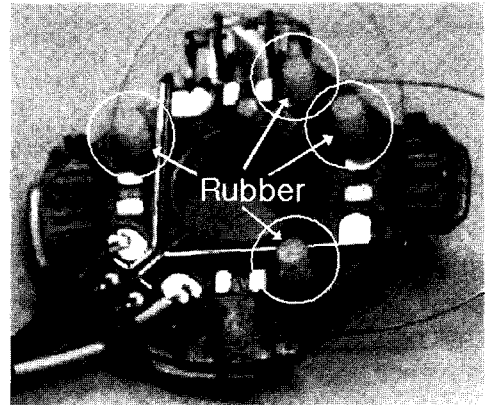


Fig. 11 Stay assembly added rubbers at outer 4 points

어 축을 직접 방진할 수 없으므로 브러쉬가 장착되어 있는 스테이를 방진하는 것이 가장 효과적으로 진동을 방진할 수 있는 방법으로 판단된다. 그 효과는 시험을 통하여 검증하였다. 현재 설계 사양과 Fig. 10과 11의 각각 내부 3지점과 외부 4지점의 여

유한 요소법을 이용한 차량용 팬 DC 모터 소음 저감에 관한 연구

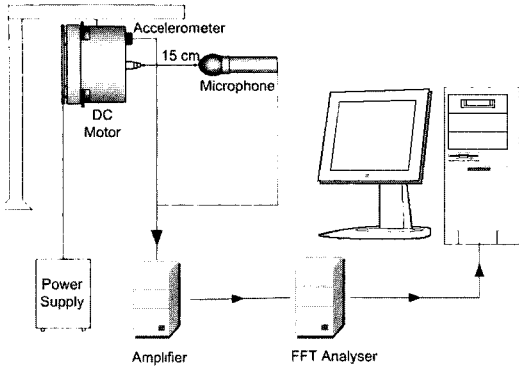


Fig. 12 Experiment setup for a DC motor noise and vibration

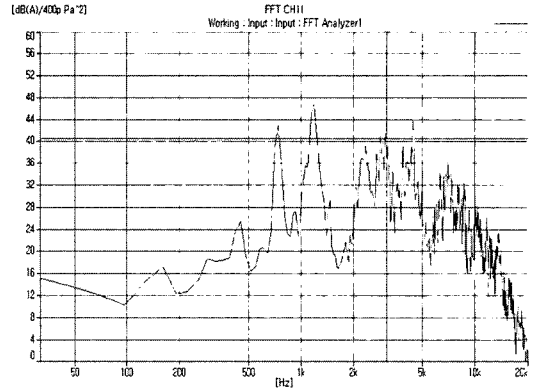


Fig. 15 Result of noise test (Stay with 4 rubbers)

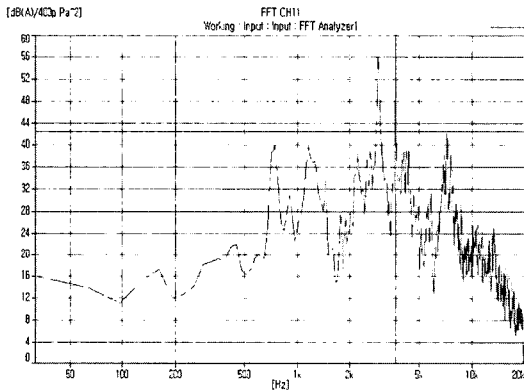


Fig. 13 Result of noise test (The existing model)

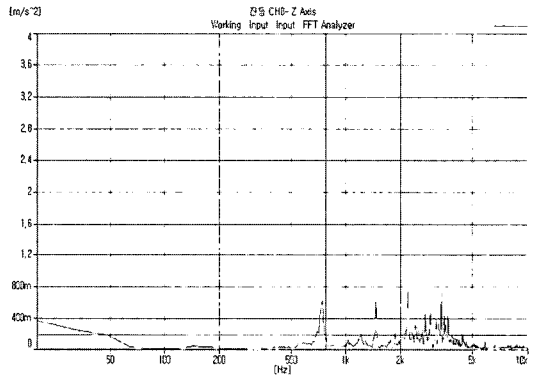


Fig. 16 Result of vibration test (Stay with 4 rubbers)

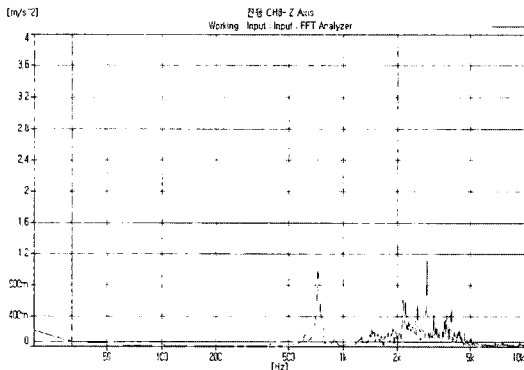


Fig. 14 Result of vibration test (The existing model)

유 공간에 방진 고무를 적용한 경우에 대해 무향실에서 부하시 DC 모터 단품의 소음/진동을 측정하였다. 소음/진동 측정 장치의 구성은 Fig. 12와 같고, 마이크론과 가속도계의 장착 위치는 Fig. 12와 Fig. 2와 같다. 각각 흡압 레벨(소음)과 가속도(진동)

를 주파수에 대해 측정하였다.

그 결과는 Fig. 13~16과 같고, 각각의 Overall 값을 Table 4에 결과를 정리하였다. 방진 결과, 가진 주파수인 760 Hz 부근의 가속도 값이 저감 되었으며 이것이 3 KHz대의 소음 피크를 감소시켜 전체적인 소음 저감 효과를 나타냈다. 3 KHz의 소음 피크는 가진 주파수인 760 Hz의 4차 고조파에 해당된다. 이는 4개의 브러쉬와 정류자의 상호작용으로 발생된 고조파로 판단된다. 내부 3점 지지의 경우 1.3 dB, 외부 4점 지지의 경우 3.5 dB의 소음 저감 효과가 있었다. 시험의 일관성을 위하여 스테이와 브라켓을 제외한 모든 부품은 동일 부품을 사용하였다.

4.3 커버 고유 주파수 변경

브러쉬의 소음과는 직접적으로 관련은 없으나 브러쉬 소음과 공진되어 불쾌한 소음을 발생시킨 커버는 지지 점을 추가하거나, 지지 점 위치를 변경하

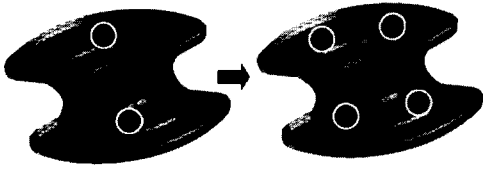


Fig. 17 2 points support cover (The existing model) and 4 points support cover

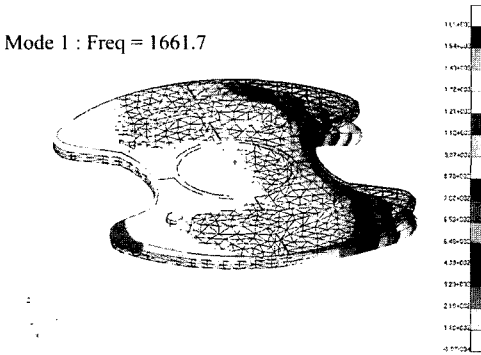


Fig. 18 Cover 1st mode shape (4 points support cover)

Table 4 Result of the noise and vibration test
(Location of measurement : Refer to Fig. 2, 12)

List	Noise (dB[A])	Vibration (m/s ²)
Existing model	59.5	3.0
Stay added rubbers at inner 3 points	57.7	2.7
Stay added rubbers at outer 4 points	56.0	2.5
4 points support Cover	58.7	2.5

여 커버 고유 주파수를 바꾸어 쉽게 공진 문제를 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 그 효과는 해석과 실험을 통해 검증 하였다. Fig. 17은 현재 설계 사양으로 2점 지지 방식과 설계 개선안으로 제시한 4점 지지 방식 커버의 지지점을 보여준다. Fig. 18은 개선안의 고유모드 해석 결과이고, Fig. 19~20은 시험을 통하여 개선안의 음압 레벨과 가속도를 주파수에 대해 측정한 결과이며, Overall값을 Table 4에 정리 하였다. 해석 결과 고유 주파수가 1650 Hz로 증가되어 공진을 피할 수 있을 것으로 예상되었고, 시험결과, 공진으로 인하여 커버와 브라켓이 접촉하는 불쾌한 소리가 완전히 사라졌다.

이로 인하여 Fig 19 ~ 20과 같이 760Hz 부근의 가

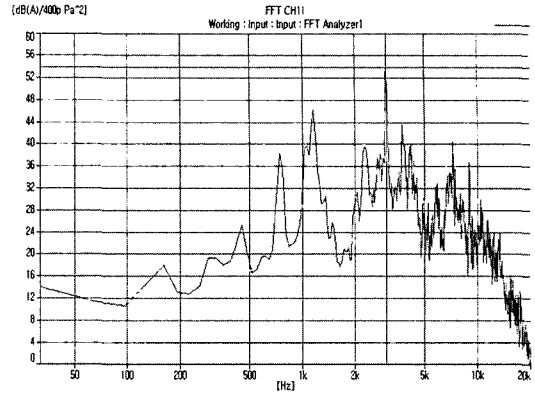


Fig. 19 Result of noise test (4 points support cover)

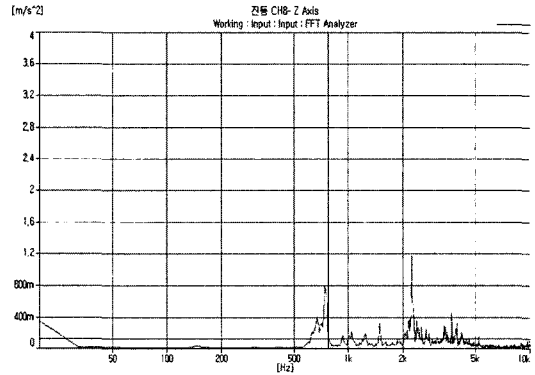


Fig. 20 Result of vibration test (4 points support cover)

속도 값이 저감되었으며 또한 같은 주파수(760Hz)의 소음 피크를 감쇠시켜 소음 레벨을 0.8dB 가량 저감시켰다. 시험의 일관성을 위하여 커버와 브라켓을 제외한 모든 부품은 동일 부품을 사용하였다.

5. 결론

- 1) 내구시험 후 소음 시험 자료를 통해 브러쉬와 정류자 사이의 상호 작용이 DC 모터 브러쉬 소음에 가장 큰 영향을 갖고 있음을 확인하였으며, 특별히 정류자의 진원도가 불량해지면 소음이 점점 더 커졌다. 즉, 진원도의 유지가 내구시험 후 소음을 개선할 수 있음을 알 수 있었다.
- 2) 유한 요소 해석을 이용하여 모터 부품의 고유주파수를 예측하였고, DC 모터 설계자들의 경험과 기존 시험 및 문헌 자료를 고려하여 공진 가능성이 있는 부품들의 개선안을 제안하였다. 작동 시험 결과, 스테이와 커버의 경우, 제안된 개선안은

소음 저감에 효과가 있었으며, 특별히 스테이를 4점 방진하는 경우는 소음 측정 결과 3.5dB[A]가 저감되는 효과가 있었다.

- 3) 가속도도 저감 효과가 있었으며, 특별히 스테이를 4점 방진하는 경우, Fig. 2의 측정 위치에서 760Hz의 피크값이 0.5 m/s²가 줄어들어 기존대비 17%의 저감 효과가 있었다. 가속도 저감은 브러쉬와 정류자 사이의 마모를 안정화시켜 진원도가 불량해지는 것을 일정 부분 막아주어 내구 시험 후 소음 저감에 도움이 될 것으로 판단된다.
- 4) 브러쉬 소음 발생원과는 직접적인 관련이 없지만 해당 주파수와 공진이 발생했던 Cover의 지지점을 증가시키고 위치를 재배치하여 해당 소음 문제를 해결하였다.

개발 초기 단계에서 본 연구에서 제시한 방법들을 이용하여 DC 모터 부품의 특성을 파악하여 설계 변경을 통해 공진 부품의 고유 주파수를 변경하고, 필요한 곳을 적절히 방진한다면 브러쉬 소음 저감에 능동적으로 대처할 수 있는 설계가 가능할 것이다.

후 기

본 연구는 동양기전 주식회사의 위탁과제 연구비로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) P. L. Timer, A. Fazekas, J. Kiss, A. Miklos and S. J. Yang, "Noise and Vibration of Electrical Machines," Edited by Timer, P. L., Elsevier, 1989.
- 2) H. Kang, "The Study of DC Motor Noise and Vibration," SAE 951350, pp.2461-2467, 1995.
- 3) C. H. Choi and S. G. Lim, "A Study of Interior Noise Reduction through In-Vehicle Measurement Test to the Windshield Wiper Motor System," Journal of the KSNVE, Vol.8, No.5, pp.862-869, 1998.
- 4) K. W. Kim and T. K. Ahn, "A Study on the Vibration Reduction of Small DC Motor," Proceeding of the KSNVE 2000 Autumn Annual Meeting, pp.88-93, 2000.
- 5) S. M. Hwang, "Design Techniques for Reduction of Cogging Torque in Brushless DC Motors used for Electric Power Steering," Transactions of KSAE, Vol.6, No.3, pp.106-114, 1988.