

소형 DC 모터의 저진동 기술에 관한 연구

김 국 원*, 0안 태 길**

A Study on the Vibration Reduction of Small DC Motor

K. W. Kim and T.-K. Ahn

ABSTRACT

In this paper, described is a research on the modal analysis of small dc motor by finite element method for the vibration reduction. An impact test is performed to obtain the natural frequencies and modal shapes of dc motor, which valuate the usefulness of the finite element analysis. From the study, we show that this finite element model can be applicable for designing a new motor with improvement in vibration characteristics. As an example, a new motor shape is suggested and its vibration characteristics is discussed in comparison with those of original shape.

1. 서 론

DC 모터란, 고정자로 영구자석을 사용하고, 회전자(전기자)로 코일을 사용하여 구성한 것으로, 전기자에 흐르는 전류의 방향을 전환함으로써 자력의 반발, 흡인력으로 회전력을 생성시키는 모터이다. 구조와 작동원리가 비교적 간단하고, 저렴한 가격으로 생산이 가능하며, 회전제어가 쉬워 제어용 모터로서 아주 우수한 특성을 가지고 있으므로 우리 생활 주변 여러 방면에서 널리 사용되고 있다. 특히 자동차의 와이퍼, 윈도우, 안테나, 좌석, 선루프 등의 구동에는 대부분 DC 브러쉬 모터가 사용되고 있다. 그러나 이 모터는 구조상 브러쉬와 정류자에 의한 기계적 접점이 발생하며, 이에 따르는 소음이 다른 종류의 모터에 비해 상대적으로 큰 결점이 있다.

모터의 진동 및 소음은 크게 전자기적인 원인과 기계적인 원인 그리고 공기 역학적인 원인 등으로 나뉘어 지는데, 이들 중 전자기적에 의한 것과 기계적인 원인에 의한 것은 모터의 작동원리에 기인한 것으로 근본적으로 피할 수 없는 현상이다. 영구자석을 사용하는 DC 브러쉬 모터에서는 전자기적인 원인에 의한 영향이 기계적인 원인에 의한 것보다 상대적으로 작다[1]. 또한 연구대상인 자동차용 DC 브러쉬 모터의 경우 강제냉각장치가 없으므로 공기역학적인 소음원 역시 고려하지 않는

다. 따라서 모터의 진동 및 소음 저감 설계는 기계적인 진동, 소음을 대상으로 한다.

DC 모터의 소음, 진동과 관련된 연구동향을 살펴보면 다음과 같다. 자동차에 많이 사용되는 소형 DC 모터의 소음, 진동을 감소시키기 위하여 초기에는 소음, 진동을 야기하는 발생원을 파악하는 연구에서 출발하였다[2]. 소형 DC 모터의 구조상 가장 큰 소음, 진동원은 브러쉬와 커뮤테이터 상호간의 마찰에 의한 것으로 알려져 있으며 그 외에도 아마추어의 불평형, 아마추어 축과 베어링과의 상호작용, 감속기어 등의 기계적인 것들과 전자기력의 불균형 등이 주요 소음, 진동원으로 규명되어 왔다. 그 후로 이러한 소음, 진동원의 영향을 감소시키기 위한 연구가 진행되어 왔으며 각 부품의 정밀도를 향상시키고, 재료의 특성을 개선하는 등의 연구개발이 이루어져 왔다. 또한 이러한 소음, 진동원은 정도의 차이는 있을지라도 구조적으로 피할 수 없는 것이므로 전달경로 상에서 구조물과 공진을 일으켜 증폭되는 현상을 피하는 것이 부가적으로 필요하게 된다. 따라서 모터에서 발생한 소음, 진동의 전달경로를 규명하여 이를 차단, 혹은 감소시킴으로써 소음, 진동을 줄이고자 하는 노력이 시작되어 왔다[3]. 그 과정에서 모터에서 발생하는 소음, 진동이 구조적인 특성에 의하여 시간적으로 균일하지 않은 성질이 발견되어 최근에는 주파수 영역에서의 분석뿐만 아니라 시간-주파수 분석이 광범위하게 시도되고 있는 실정이다[4]. 지금

* 천안공업대학 용접기술과

** 호서대학교 기계공학부 기계설계전공

까지의 연구들을 살펴보면 모터의 설계 및 생산 후 품질관리의 측면이 주로 강조되어 왔다. 즉 모터의 생산공정 상 품질관리의 목적으로 구동시 기준치 이상의 소음, 진동을 배출하는 모터의 원인 분석 및 개선이 주요 관심사였으며 소음, 진동원으로 예상되는 각 부품을 단계별로 확인하는 실험적 방법이 주로 사용되었다고 할 수 있다. 그러나 최근의 경량화, 고효율화, 저소음, 저진동의 요구에 신속하고 경제적으로 대응하기 위해서는 생산 후 품질관리의 관점이 아닌 설계단계에서 고성능을 보장하는 적극적인 설계개념이 필요한 시기이다.

본 연구에서는 설계단계에서 모터의 동특성을 파악할 수 있는 유한요소모델을 완성하여, 소형 DC 모터의 저진동 설계기술을 개발하고자 한다. 개발된 유한요소모델은 모터의 동특성 실험으로 유용성을 검증하였으며, 모터의 형상변화가 동특성에 미치는 영향을 예측함으로써 저진동 모터를 설계할 수 있는 기틀을 마련하였다.

2. 유한요소모델링

2.1 형상모델링

해석 대상은 자동차 좌석조절용으로 사용되고 있는 소형 DC 브러쉬 모터이다.

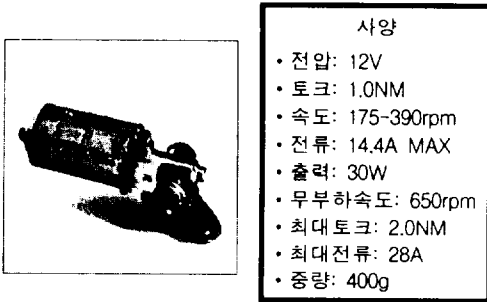


Fig. 1 Specification of a DC brush motor for analysis

모터를 구성하는 3가지 주요부분(Tailcover, Yoke, Housing)에 대해 도면형상에 근거하여 3차원 모델링을 수행하였으며, 특히 복잡한 접합부위를 가지는 Yoke부분과 구조자체가 난해한 형상을 보이는 Housing부분을 정밀히 모델링 하였다. 또한 모터 내부 구성품 중 동특성에 비교적 큰 영향을 미칠 것이라 예상되는 Magnet 부분과 회전하는 Armature 결합부를 모델링하여 해석의 정확성을 높였다. 해석에 사용된 프로그램 및 모델링된 부품들 Table 1과 2에 나타내었다.

Table 1. Analysis environment

CAD Software	CAE Software	Computer Spec.
SOLID WORKS 2000	COSMOS/WORKS	IBM PC - Pentium III 700MHz - RAM : 256 MB - OS : Window 2000 Professional

Table 2. Modeling components of a DC brush motor

No.	Name	Material	Number
1	Yoke	SECC	1
2	Tailcover	SECC	1
3	Housing	SBHG	1
4	Magnet	PMF-2B	2
5	Ribet	MSW-B	2
6	Armature assembly	-	1

Fig. 2는 모델링된 Tailcover, Yoke, Housing 및 Armature assembly를 나타낸다.

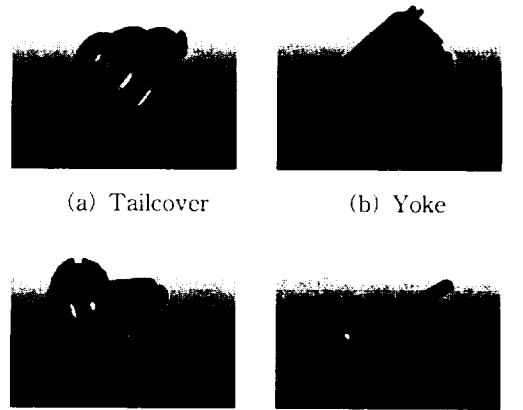


Fig. 2 Components modeling of a DC motor

2.2 유한요소모델

유한요소해석을 수행하기 위해서는 공간상에 해석 대상의 형상을 결정하는 절점과 각 절점들을 연결하는 요소를 생성시켜야 한다. 본 연구에서 사용한 COSMOS/WORKS는 SOLIDWORKS에서 작업한 형상모델을 그대로 사용하여 형상모델을 기준으로 절점과 요소를 자동적으로 생성시켜 주므로 사용하기가 매우 편리하다. 자동생성시 만들어지는 요소는 사면체 요소이다.

해석에 사용된 프로그램이 유한요소 모델간의

결합 기능을 제공하지 않으므로 각 부품들의 형상 모델링 후 이를 Assembly 모드에서 결합시키고 그 후 절점과 요소를 생성시켜야 한다. 이 경우 각 부품들이 서로 접하는 부분에서는 같은 절점을 공유하여 완전히 붙어있는 것으로 계산될 수 있는데, 실제 접촉하는 두 부분이 완전히 결합되어 있지 않고 단순히 접촉만 할 경우 전혀 다른 결과가 나올 수 있으므로 경계조건의 설정에 주의하여야 한다.

Fig. 3은 DC 모터에 대한 유한요소 모델을 나타낸다. Yoke의 접합부분에서의 생성된 요소를 보면 형상이 급격히 변하는 부분에서 적절히 요소의 크기가 변하고 있음을 알 수 있다. 생성된 요소는 51,697개이며 해석대상의 자유도는 280,134이다.

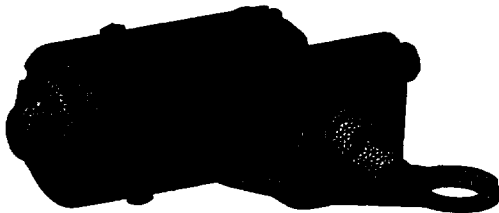


Fig. 3 Finite element model of a DC motor

3. 동특성 실험

해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 DC 모터의 동특성 실험을 수행하였다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 자유경계조건에서의 충격해머에 의한 가진 실험을 수행하였으며 그 과정을 간단히 설명하면 다음과 같다.

구속이 없는 자유경계조건을 구현하기 위해 모터를 가는 유연한 끈으로 고정스탠드에 매달고 1~10kHz의 주파수 범위를 가진 가속도계를 요크부에 왁스로 부착한 후 충격해머로 모터의 여러 위치를 가격한다. 이 때 측정된 가속도 신호와 충격 해머에서의 가진력 신호를 각각 전압증폭기(Voltage Amp.)로 증폭하여 FFT Analyzer에서 전달함수를 얻었다. 모터의 공진모드는 모드해석 전용 프로그램인 SMS STAR Modal을 이용하였다. 원칙적으로 모터는 회전의 영향에 의하여 동특성이 변하게 되는데 일반적으로 원심력, 자이로스코프 효과 등의 원인에 의해 달라진다. 하지만 비교적 중, 저속으로 구동하는 산업용 모터에서는 이 효과가 큰 영향을 미치지 못하기 때문에 정상상태의 동특성만 측정하였다.

4. 해석결과 검토

해석 대상인 DC 모터의 구조가 비교적 복잡하기 때문에, 본 연구에서는 간단한 Yoke부와 전체 모터 구조물에 대해 해석을 수행하고 각각 동특성 실험과 비교하였다.

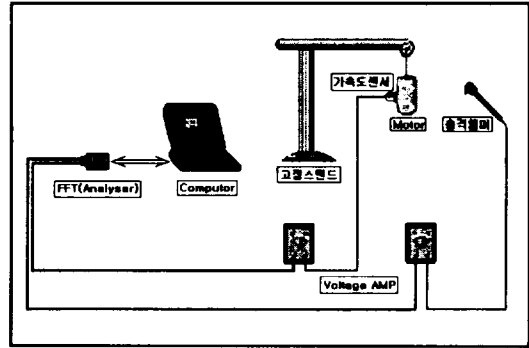


Fig. 4 Experimental setup for a DC motor vibration

4.1 Yoke부 동특성

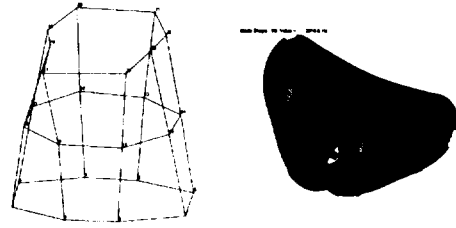
모터의 Yoke부에는 Yoke 자체와 내부에 마그네트 그리고 이를 고정하는 리벳으로 이루어져 있다. 마그네트는 Yoke 내부에 고정되어 있는데, 실제로 고정된 상태를 근거로 마그네트의 끝부분만 Yoke와 붙어있다고 가정하였다. 또한 경계조건의 영향을 살펴보기 위해 마그네트가 완전히 붙어있다고 가정하여 계산해 보았다.

Table 3은 고유진동수에 대한 실험과 해석 결과를 비교한 것이다. 표에서 FEM1은 마그네트 끝부분만 Yoke와 결합된 경우이고 FEM2는 완전히 붙어있다고 가정한 계산 결과이다. 6차 모드까지 비교한 결과 FEM2의 결과가 실제보다 훨씬 높은 주파수를 보이고 있으며 FEM1의 해석결과는 실험결과와 비교적 잘 일치한다. 즉, 적절한 경계조건의 설정이 매우 중요함을 알 수 있다.

Fig. 5는 각 주파수에서의 모드형상에 대해 실험과 계산의 결과를 비교한 그림이다. 1, 2차 모드에서는 Yoke부가 전체적으로 타원형상을 보이고 있으며, 3, 4차 모드에서는 타원형 형상이 양 끝단에서 서로 직각으로 엇갈리는 변형을 보이고 있다. 실험과 계산에 의한 결과는 매우 잘 일치하고 있다.

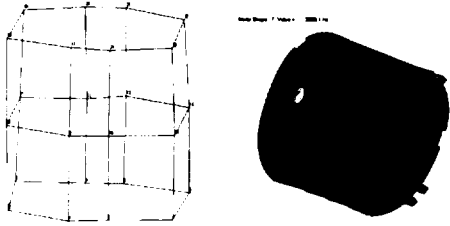
Table 3 Natural frequencies of Yoke part by FEM and experiment [Unit : Hz]

	1	2	3	4	5	6
FEM1	2893.1	3125.3	3420.3	3616.6	7728.3	7774.6
FEM2	3506.2	3571.1	4245.0	4334.6	8884.0	9398.3
Exp.	2500	3230	3670	3860	6520	7840

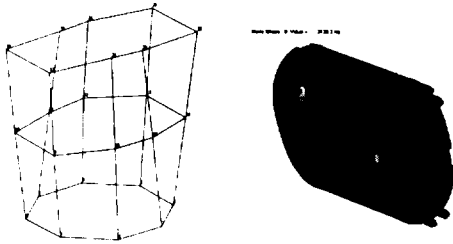


(d) mode shape 4 (experiment; simulation)

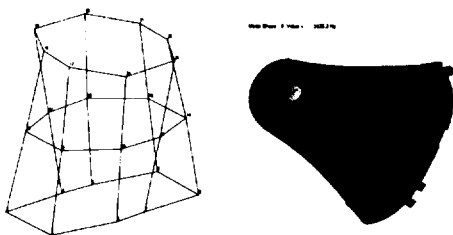
Fig. 5 Mode shapes of Yoke part by experiment and simulation



(a) mode shape 1 (experiment; simulation)



(b) mode shape 2 (experiment; simulation)



(c) mode shape 3 (experiment; simulation)

4.2 모터 구조물 동특성

모터 구조물은 Yoke부를 중심으로 하여 Tailcover, Housing과 각각 결합되어 있으며, Armature assembly가 모터 내부에서 베어링으로 지지되어 있으므로 해석하기가 까다로운 결합체이다. 본 연구에서는 Yoke와 실제 결합되는 부분은 완전히 붙었다고 가정하고 나머지 접촉되는 부분은 전혀 연결되지 않았다고 가정하였다. 또한 Armature assembly는 모터 내부와 적절한 강성을 가지는 스프링으로 연결되었다고 가정하였다.

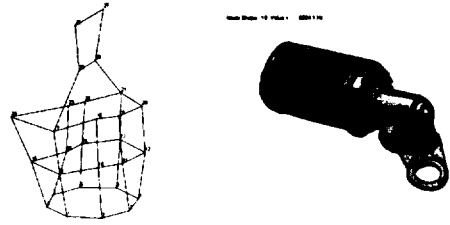
고유진동수에 대한 실험과의 비교를 Table 4에 나타내었다. 일반적으로 복잡한 구조물의 경우 모든 모드 형상을 실험적으로 얻기가 매우 힘들기 때문에 본 실험에서도 이론적으로 계산되는 고유진동수를 모두 나타내지 못하고 있다. 또한 모터의 구조상 Armature assembly와의 결합이 매우 약하기 때문에 Table에서와 같이 2000 Hz 영역의 저주파에서 고유진동수가 많이 모여있는 결과를 보인다.

Table 4 Natural frequencies of a DC motor by FEM and experiment [Unit : Hz]

	1	2	3	4	5	6	7
FEM	2049.2	2098.4	2113.6	2883.8	3147.3	3313.9	3471.4
Exp.	1860	-	-	2540	-	-	-
	8	9	10	11	12	13	14
FEM	4126.3	4889.6	5092.1	5362.5	5935.6	6994.1	7019.6
Exp.	-	-	-	5190	-	6770	-

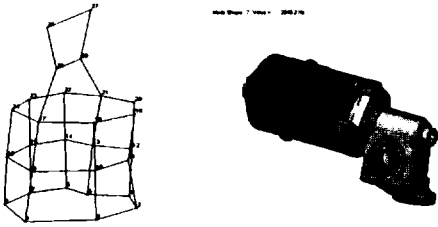
Fig. 6은 실험으로 얻어진 모드형상과 계산에 의한 모드형상을 비교한 그림이다. 1차모드의 경우 외관상 모드변형이 거의 없는 듯하지만, Housing

과의 결합부분을 중심으로 약간의 굽힘모드를 보이며 4차모드에서는 Yoke와 Housing 연결되는 부분에서의 변형이 뚜렷이 나타난다. 11차모드에서는 Yoke가 균일하게 타원형으로 변형되는 양상을 알 수 있으며, 13차모드에서는 11차모드와 비슷한, Yoke의 반경방향 변형을 나타내고 있다. 해석결과는 실험으로 얻어진 모드형상을 매우 잘 나타내고 있으며 따라서 DC 모터의 동특성 해석에 대한 타당성이 검증되었다.

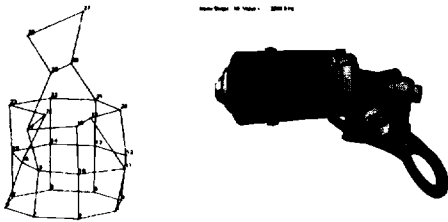


(d) mode shape 13 (experiment; simulation)

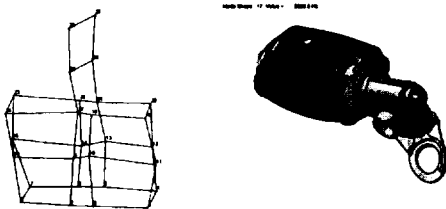
Fig. 6 Mode shapes of a DC motor by experiment and simulation



(a) mode shape 1 (experiment; simulation)



(b) mode shape 4 (experiment; simulation)



(c) mode shape 11 (experiment; simulation)

5. 모터 형상 변경

기존 DC 모터의 구조해석결과 Housing 밀부분이 매우 취약한 구조라 판단되므로 이부분의 두께를 1.2mm에서 2.5mm로 증가시킬 때 동특성 변화를 살펴보았다. Fig. 7은 Housing 밀부분의 두께를 증가시킨 모터 형상을 나타낸다.

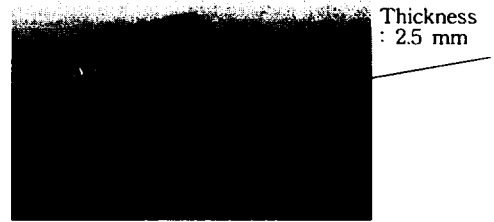


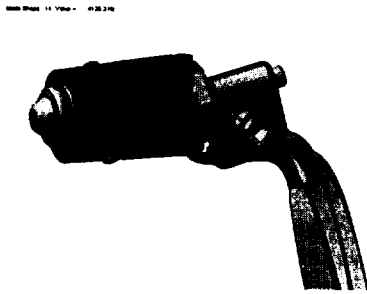
Fig. 7 Modified motor shape

기존 DC 모터의 고유진동수 해석결과와 두께를 증가시킨 경우 고유진동수 계산값을 Table 5에 비교하였다. 14차까지의 고유진동수를 살펴보면 대부분 큰 차이를 보이지 않지만 8차에서 12차까지의 고유진동수에는 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 변경안의 구조가 이 모드에서는 기존구조에 비해 강성이 증가였는데, 이 8차에서 12차까지의 모드형상을 살펴보면 대부분 두께를 증가시킨 부분의 모드변형이 비교적 큰 변형을 보인다. 즉, 8차모드에서 Housing 밀부분의 변형이 극심하게 발생되는데, 이 부분의 두께를 증가시킴으로써 8차모드의 고유진동수를 증가시키게 되고 변형도 상대적으로 감소시키는 효과를 보게 되는 것이다.

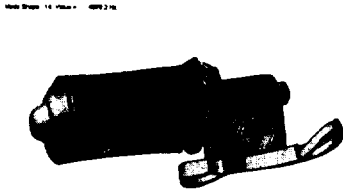
Fig. 8에 두께 증가전과 후의 8차모드형상을 나타내었다. 두께를 증가시켜 상대적으로 적은 변형모드를 나타냄을 알 수 있다.

Table 4 Natural frequencies of a DC motor by original(M1) and modified(M2) motor [Unit : Hz]

	1	2	3	4	5	6	7
M1	2049.2	2098.4	2113.6	2883.8	3147.3	3313.9	3471.4
M2	2046.7	2099.0	2107.6	2789.1	3060.7	3311.9	3433.6
	8	9	10	11	12	13	14
M1	4126.3	4889.6	5092.1	5362.5	5935.6	6994.1	7019.6
M2	4970.2	5306.3	5737.1	5929.8	6780.4	7011.7	7021.0



(a) original motor



(b) modified motor

Fig. 8 Mode shape (8th) variation with configuration modification

6. 결론

본 연구에서는 소형 DC 모터의 저진동 설계를 위한 기초연구로써 모터 구조물의 동특성을 파악할 수 있는 유한요소모델을 완성하였다. 소형 DC 모터라 하더라도 수많은 부품들이 존재하므로 부품간의 결합상태에 대한 면밀한 검토가 선행되어야 하며 여러 가지 검토결과 각 부품간 연결되는 부분만 완전 결합으로 가정하고 나머지 면접촉 혹은 선접촉되는 부분은 완전히 별개의 파트로 가정

하였다. 동특성 실험으로 해석의 신뢰성을 확보하였으며, 해석결과를 바탕으로 모터 바닥부분의 두께를 증가시키는 개선안을 도출하였다. 이러한 두께증가는 그 부분의 강성을 증가시켜서 바닥부분의 변형을 초래하는 고유진동수를 증가시키며 또한 모드형상에도 큰 변화가 발생함을 알 수 있다. 따라서 본 연구내용은 소형 DC 모터의 저진동 설계에 효과적으로 이용될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- (1) Timar, P. L., Fazekas, A., Kiss, J., Miklos, A. and Yang, S. J., 1989, *Noise and Vibration of Electrical Machines*, Edited by Timar, P. L., Elsevier.
- (2) H. Kang, 1995, 'The Study of DC Motor Noise and Vibration', SAE 951350, pp. 2461-2467.
- (3) 최창환, 임상규, 1998, '차량용 윈드실드 와이퍼 모터의 단품 및 실차시험을 통한 소음저감 연구', 한국소음진동공학회지 제8권, 제5호, pp. 862-869.
- (4) 임상규, 최창환, 1999, 'DC 모터계의 소음 품질 관리를 위한 시간-주파수 분석의 적용', 한국소음진동공학회지 제9권, 제4호, pp. 841-848.