

소형 직류 모터의 동특성 예측

김국원^{1*}, 안태길²

Prediction of Dynamic Characteristics of Small DC Motor

Kug-Weon Kim^{1*} and Tae-Kil Ahn²

요약 본 연구에서는 설계단계에서 소형 직류 모터의 동특성을 파악할 수 있는 유한요소 해석모델을 개발하였다. 유한요소해석 결과의 검증을 위하여 충격실험을 실시하였으며 모터의 고유진동수와 모드형상을 추출하여 비교하였다. 개발된 유한요소 해석모델을 이용하여 모터의 형상변화가 동특성에 미치는 영향을 분석할 수 있었으며 이는 향후 고품위 저진동 직류모터를 개발하는 데 효과적으로 이용될 수 있다.

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 evaluate the usefulness of the finite element analysis model. From the study, we show that this finite element analysis model can be applicable for designing a new motor with improvement in vibration characteristics. As an example, a shape modification of DC motor is performed and its vibration characteristics is discussed in comparison with those of original shape.

Key Words : DC motor, Dynamic characteristics, Finite Element Method

1. 서론

소형 직류 모터는 구조와 작동원리가 비교적 간단하고, 저렴한 가격으로 생산이 가능하며, 회전자제가 쉬워 제어용 모터로서 아주 우수한 특성을 가지고 있으므로 우리 생활 주변 여러 분야에서 널리 사용되고 있다. 특히 자동차의 와이퍼, 윈도우, 안테나, 좌석, 선루프 등의 구동에는 대부분 직류 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 나누어 지는데, 이들 중 전자기적에 의한 것과 기계적인 원인에 의한 것은 모터의 작동원리에 기인한 것으로 근본적으로 피할 수 없는 현상이다. 영구자석을 사용하는 직류 브러쉬 모터에서는 전자기적인 원인에 의한 영향이 기계적인

원인에 의한 것보다 상대적으로 작다[1]. 또한 연구대상인 자동차용 직류 브러쉬 모터의 경우 강제냉각장치가 없으므로 공기역학적인 소음원 역시 고려하지 않는다. 따라서 모터의 진동 및 소음 저감 설계는 기계적인 진동, 소음을 대상으로 한다.

직류 모터의 소음, 진동과 관련된 연구동향을 살펴보면 다음과 같다. 자동차에 많이 사용되는 소형 직류 모터의 소음, 진동을 감소시키기 위하여 초기에는 소음, 진동을 야기하는 발생원을 파악하는 연구에서 출발하였다[2]. 소형 직류 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,

¹순천향대학교 기계공학과

²호서대학교 자동차공학과

*교신저자: 김국원(kimkug1@sch.ac.kr)

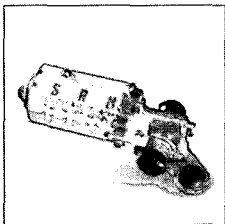
진동의 전달경로를 규명하여 이를 차단, 혹은 감소시킴으로써 소음, 진동을 줄이고자 하는 노력이 시작되어 왔다 [3]. 그 과정에서 모터에서 발생하는 소음, 진동이 구조적인 특성에 의하여 시간적으로 균일하지 않은 성질이 발견되어 최근에는 주파수 영역에서의 분석뿐만 아니라 시간-주파수 분석이 광범위하게 시도되고 있는 실정이다 [4]. 지금까지의 연구들을 살펴보면 모터의 설계 및 생산 후 품질관리의 측면이 주로 강조되어 왔다. 즉 모터의 생산 공정 상 품질관리의 목적으로 구동 시 기준치 이상의 소음, 진동을 배출하는 모터의 원인 분석 및 개선이 주요 관심사였으며 소음, 진동원으로 예상되는 각 부품을 단계별로 확인하는 실험적 방법이 주로 사용되었다고 할 수 있다. 그러나 최근의 경량화, 고 효율화, 저소음, 저진동의 요구에 신속하고 경제적으로 대응하기 위해서는 생산 후 품질관리의 관점이 아닌 설계단계에서 고성능을 보장하는 적극적인 설계개념이 필요한 시기이다.

본 연구에서는 설계단계에서 소형 직류 모터의 동특성을 파악할 수 있는 유한요소 해석모델을 개발하였으며, 동특성 실험으로 유용성을 검증하였다. 개발된 유한요소 해석모델을 이용하여 모터의 형상변화가 동특성에 미치는 영향을 분석할 수 있었으며 이는 향후 고품위 저진동 직류모터를 개발하는 데 효과적으로 이용될 수 있다.

2. 유한요소 모델링

2.1 형상모델링

해석 대상은 그림 1에 보인 바와 같이 자동차 좌석조절용으로 사용되고 있는 소형 직류 브러쉬 모터이다.



사양	
• 전압:	12V
• 토크:	1.0NM
• 속도:	175~390rpm
• 전류:	14.4A MAX
• 출력:	30W
• 무부하속도:	650rpm
• 최대토크:	2.0NM
• 최대전류:	28A
• 중량:	400g

그림 1. 해석 대상인 DC 모터의 상세 사양

모터를 구성하는 3가지 주요부분(테일커버(Tailcover), 요크(Yoke), 하우징(Housing))에 대해 도면형상에 근거하

여 3차원 모델링을 수행하였으며, 특히 복잡한 접합부위를 가지는 요크 부분을 정밀히 모델링 하였다. 또한 모터 내부 구성품 중 동특성에 비교적 큰 영향을 미칠 것이라 예상되는 자석 부분과 회전자를 모델링하여 해석의 정확성을 높였다. 해석에 사용된 프로그램은 상용 3차원 CAD 및 유한요소해석 프로그램인 SolidWorks 와 CosmosWorks이다. 그림 2는 모델링된 테일커버, 요크, 하우징 및 회전자를 나타낸다.

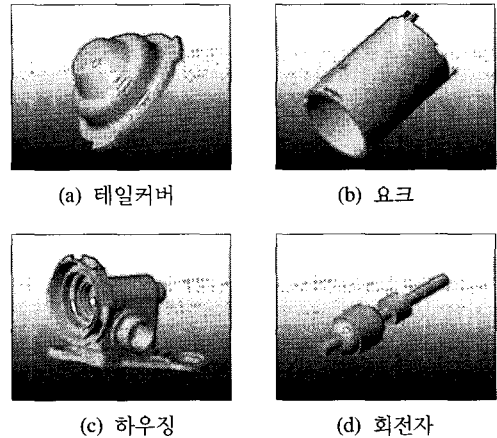


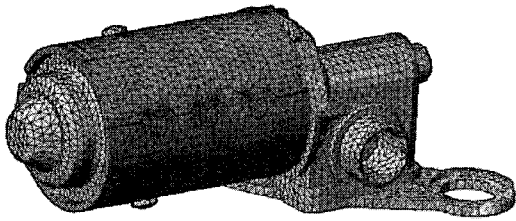
그림 2. DC 모터 구성품 모델링

2.2 유한요소모델

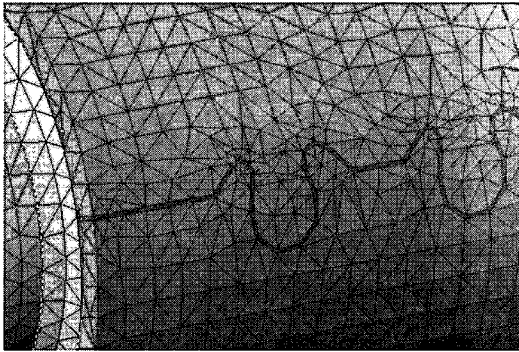
유한요소해석을 수행하기 위해서는 공간상에 해석 대상의 형상을 결정하는 절점과 각 절점들을 연결하는 요소를 생성시켜야 한다. 본 연구에서 사용한 CosmosWorks는 SolidWorks에서 작업한 형상모델을 그대로 사용하여 형상모델을 기준으로 절점과 요소를 자동적으로 생성시켜 주므로 사용하기가 매우 편리하다. 자동 생성 시 만들어지는 요소는 사면체 요소이다.

해석에 사용된 프로그램이 유한요소 모델간의 결합 기능을 제공하지 않으므로 각 부품들의 형상모델링 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.

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



(a) 유한요소모델

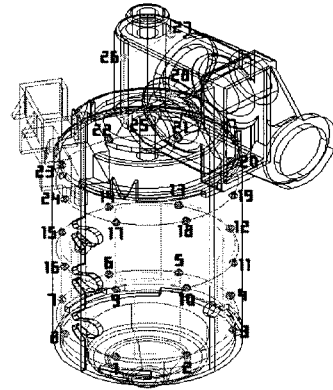


(b) 요크의 접합부

그림 3. DC 모터의 유한요소모델링

3. 동특성 실험

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



(b) 측정지점

그림 4. DC모터 동특성 측정 셋업

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 정지상태의 동특성만 측정하였다.

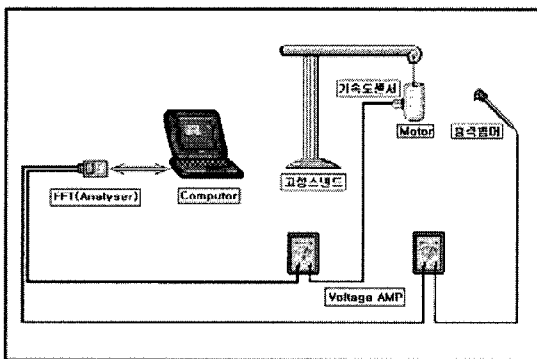
4. 해석결과 및 검토

해석 대상인 직류 모터는 여러 개의 단품들이 결합된 구조이므로, 순차적으로 단품들을 결합시켜 유한요소 해석모델을 개발하였다. 이 때 경계조건의 설정이 모호한 경우 동특성 실험을 수행하여 해석모델을 수립하였다.

4.1 요크부 동특성

모터의 요크부에는 요크 자체와 내부에 자석 그리고 이를 고정하는 리벳으로 이루어져 있다. 자석은 요크 내부에 고정되어 있는데, 실제로 고정된 상태를 근거로 자석의 끝부분만 요크와 붙어있다고 가정하였다. 또한 경계조건의 영향을 살펴보기 위해 자석이 완전히 붙어 있다고 가정하여 계산해 보았다.

표 1은 고유진동수에 대한 실험과 해석 결과를 비교한



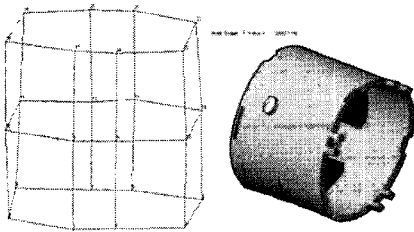
(a) 실험장치

것이다. 표에서 FEM1은 자석 끝부분만 요크와 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, 경계조건의 설정이 매우 중요함을 알 수 있다.

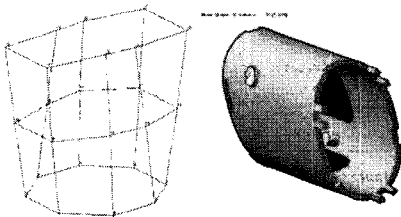
그림 5는 각 주파수에서의 모드형상에 대해 실험과 계산(FEM1)의 결과를 비교한 그림이다. 1, 2차 모드에서는 요크부가 전체적으로 타원형상을 보이고 있으며, 3, 4차 모드에서는 타원형 형상이 양 끝단에서 서로 직각으로 엇갈리는 변형을 보이고 있다. 실험과 계산에 의한 결과는 매우 잘 일치하고 있다.

표 1. 요크부의 고유진동수 해석 및 실험 [단위 : Hz]

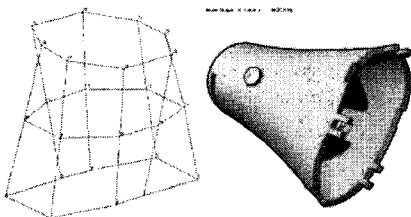
	1	2	3	4	5	6
FEM1	2893.1	3125.3	3420.3	3616.6	7728.3	7774.6
FEM2	3506.2	3571.1	4245.0	4334.6	8884.0	9398.3
Exp.	2500	3230	3670	3860	6520	7840



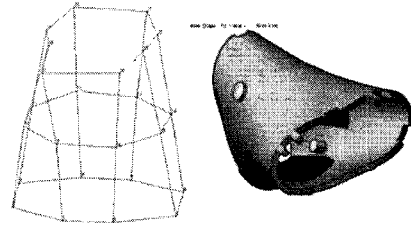
(a) 1차 모드 형상 (실험 및 해석)



(b) 2차 모드 형상 (실험 및 해석)



(c) 3차 모드 형상 (실험 및 해석)



(d) 4차 모드 형상 (실험 및 해석)

그림 5. 요크부의 모드 형상

4.2 모터 구조물 동특성

모터 구조물은 요크부를 중심으로 하여 테일커버, 하우징과 각각 결합되어 있으며, 회전자가 모터 내부에서 베어링으로 지지되어 있으므로 해석하기가 까다로운 결합체이다. 본 연구에서는 요크와 실제 결합되는 부분은 완전히 붙었다고 가정하고 나머지 접촉되는 부분은 전혀 연결되지 않았다고 가정하였다. 또한 회전자는 모터 내부와 적절한 강성을 가지는 스프링으로 연결되었다고 가정하였다. 본 연구에서 고려된 각 부품들의 결합조건에 대해 표 2에 정리하였다.

표 2. 각 부품들의 결합시 경계조건

부품	결합조건
요크와 리벳	완전 결합
요크와 자석	자석의 상하 모서리 부 완전 결합
요크와 테일커버	접촉되는 부분만 완전 결합
요크와 회전자	스프링으로 연결

고유진동수에 대한 실험과의 비교를 표 3에 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 회전자와의 결합이 매우 약하기 때문에 표에서와 같이 2000 Hz 영역의 저주파에서 고유진동수가 많이 모여 있음을 알 수 있다.

표 3. DC모터의 고유진동수 해석 및 실험 [단위 : 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	-

그림 6은 실험으로 얻어진 모드형상과 계산에 의한 모드형상을 비교한 그림이다. 1차모드의 경우 외관상 모드변형이 거의 없는 듯하지만, Housing과의 결합부분을 중심으로 약간의 굽힘모드를 보이며 4차모드에서는 요크와 하우징이 연결되는 부분에서의 변형이 뚜렷이 나타난다. 11차모드에서는 요크가 균일하게 타원형으로 변형되는 양상을 알 수 있으며, 13차모드에서는 11차모드와 비슷한, 요크의 반경방향 변형을 나타내고 있다. 해석결과와 실험으로 얻어진 모드형상을 매우 잘 나타내고 있으며 따라서 직류 모터의 동특성 해석에 대한 타당성이 검증되었다.

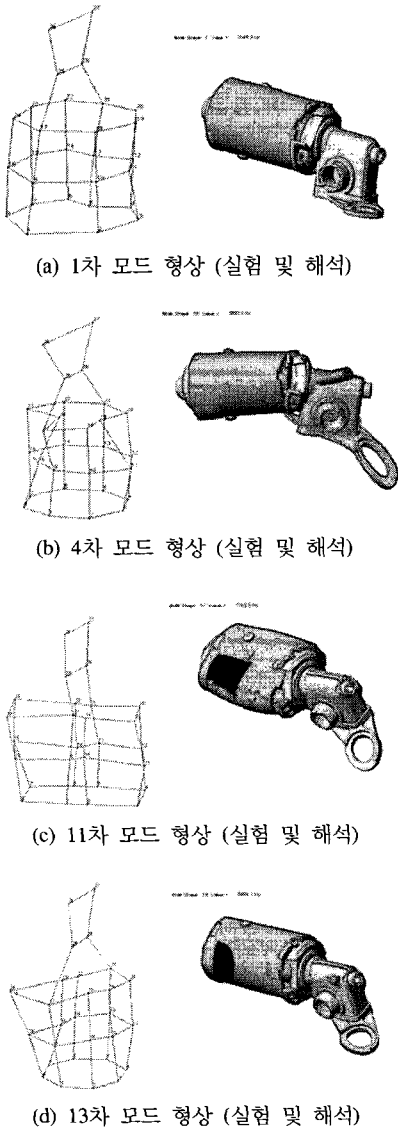


그림 6. DC모터의 모드 형상

5. 형상변경

기존 직류 모터의 구조해석결과 Housing 바닥 부분이 매우 취약한 구조라 판단되므로 이부분의 두께를 1.2mm에서 2.5mm로 증가시킬 때 동특성 변화를 살펴보았다. 그림 7은 하우징 바닥 부분의 두께를 증가시킨 모터 형상을 나타낸다.

기존 직류 모터의 고유진동수 해석결과와 두께를 증가시킨 경우 고유진동수 계산값을 표 4에서 비교하였다. 14차까지의 고유진동수를 살펴보면 1차에서 7차까지는 두께를 증가시킨 모터의 고유진동수가 약간 감소하였고, 8차 이상에서는 증가하였다. 또한 8차에서 12차까지의 고유진동수는 비교적 큰 차이를 보이고 있음에 반해 그 외의 고유진동수는 거의 변화가 없다. 이는 1차에서 7차모드의 경우 두께가 변화된 부분과 크게 상관없는 모드형상을 나타내므로 두께변화가 주로 질량증가의 효과를 나타내었고, 8차부터 12차까지의 모드형상이 두께를 증가시킨 부분과 밀접한 관련이 있어서 질량증가보다는 강성증가의 효과가 두드러진 결과로 사료된다. 계산된 모드형상을 살펴보면(그림 8), 8차모드에서 하우징 바닥 부분의 변형이 극심하게 발생되는데, 이 부분의 두께를 증가시키므로써 강성이 증가되어 변형도 상대적으로 감소되는 결과를 나타내었다.

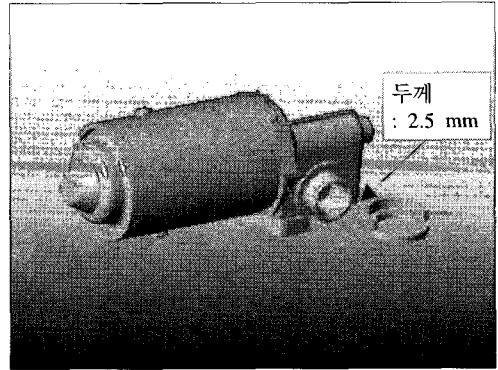
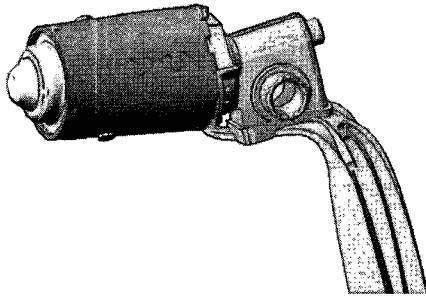


그림 7. 개선된 모터 형상

표 4. 개선전(M1) 및 개선된(M2) 모터의 고유진동수 [단위 : Hz]

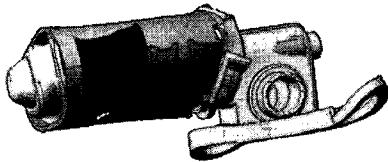
	1	2	3	4	5	6	7
M1	2049.2	2098.4	2113.6	2883.8	3147.3	3313.9	3471.4
M2	2046.7	2099.0	2107.6	2789.1	3060.7	3311.9	3433.6
	8	9	10	11	12	13	14
M1	4126.3	4889.6	5092.1	5362.5	5935.6	6994.1	7019.6
M2	4970.2	5306.3	5737.1	5929.8	6780.4	7011.7	7021.0

Model Shape: 14 Scale: 4:26.5 Hz



(a) 개선전 모터

Model Shape: 14 Scale: 4:27.12 Hz



(b) 개선된 모터

그림 8. 8차 모드 형상

6. 결론

본 연구에서는 소형 직류 모터의 저진동 설계를 위한 기초연구로써 모터 구조물의 동특성을 파악할 수 있는 유한요소 해석모델을 개발하였다. 직류 모터에는 많은 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 가정하였다. 동특성 실험으로 해석의 신뢰성을 확보하였으며, 해석결과를 바탕으로 모터 하우징 바닥 부분의 두께를 증가시키는 구조를 검토하였다. 이 부분의 두께증가는 강성을 증가시키므로 하우징 바닥 부분의 변형을 초래하는 고유진동수를 증가시키며 또한 모드형상에도 큰 변화가 발생함을 알 수 있다.

본 연구에서 개발한 유한요소 해석모델은 설계단계에서 모터의 동특성을 예측할 수 있으므로 개선 설계 혹은 새로운 구조의 모터설계에 효과적으로 이용될 수 있을 것이다.

참고문헌

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

김 국 원(Kug Weon Kim)

[정회원]



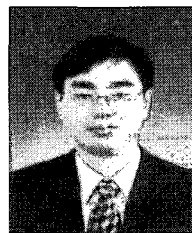
- 1988년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1990년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학석사)
- 1995년 2월 : 서울대학교 기계설계학과(공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 순천대학교 기계공학과 조교수

<관심분야>

정밀가공, 전산역학, 제품설계

안 태 길(Tae Kil Ahn)

[정회원]



- 1985년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1987년 2월 : KAIST 생산공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : KAIST 기계공학과(공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 자동차공학과 부교수

<관심분야>

소음/진동, 메카트로닉스