

CAE/CAT 를 이용한 BLDC 스피들 모터 설계

°왕 세명*, 기 성현**, 정 성천***

Design of BLDC Spindle Motor using CAE/CAT

°S. M. Wang*, S. H. Ki** and S.C. Jung***

ABSTRACT

In this paper, BLDC spindle motor is designed using CAE/CAT to reduce structural vibration. Motor is modeled and analyzed using a finite element analysis (FEA) program and correlated to the results of modal test. Design sensitivity analysis (DSA) of frequency is carried out and validated by the modal test of modified motor manufactured. This study shows that simulation-based design can improve quality with reduced development time.

1. 서 론

하드 디스크는 정보 기록용 디스크에 헤드가 작은 간격을 유지하면서 정보를 읽고 기록하는 장치이다. 하드 디스크는 크게 두 부분으로 구성되어 있는데, 반도체 칩, 마이크로 프로세서, 기타 전기적 부품이 조립되어있는 프린터 기관과 주로 기계 장치로 구성되어 있는 헤드와 디스크, 스피들 모터의 조립동체가 그것이다.

하드 디스크에 있어 진동의 주된 진원지는 BLDC (Blushless DC) 스피들 모터와 VCM (voice coil motor) 이다. 특히 BLDC 스피들 모터의 성능은 하드 디스크의 읽기/쓰기 작동에 있어 신뢰도를 결정적으로 좌우한다. 스피들 모터의 진동 문제가 발생하면 디스크가 떨리기 때문에 디스크에 정보를 읽고 기록하지 못하는 헤드 input/output error 가 발생하게 되는데 이 현상이 하드 디스크의 비정상

작동의 가장 대표적인 예이다. 따라서 하드 디스크 설계 시 구동 스피들 모터의 진동특성을 예측하고 이를 설계에 반영하는 것이 안정된 시스템을 구현하기 위해 필수적이다[1-2].

본 연구에서는 현재 양산되는 BLDC 스피들 모터의 유한 요소 모델링과 고유치 해석, 고유치 실험을 수행하였고 이 모델에 대해 설계 민감도 해석을 수행하여 실제 설계 변경하여 제작한 스피들 모터의 실험 결과와 비교함으로써 CAE 에 의한 설계 방법을 CAT 를 통하여 검증하였다.

2. 고유치 실험

유한 요소 모델을 만들기 위해서는 먼저 실험을 통하여 대상체의 특성을 파악하여야 한다. 스피들 모터는 자유단 조건에서 충격 해머로 고유치 실험을 수행하였다. 실험 장치는 Fig. 1 과 같이 구성하였다. 스피들 모터의 고유치 실험에 의한 FRF 는 Fig. 2 와 같다.

* 광주과학기술원 기전공학과

** 광주과학기술원 기전공학과 박사과정

*** 삼성전기 중앙연구소

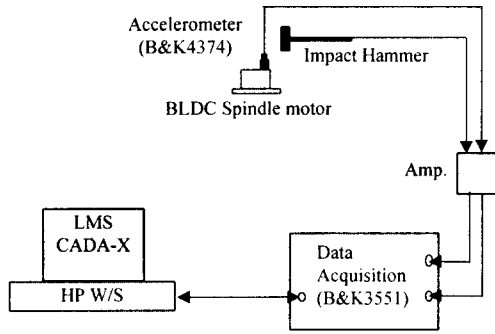


Fig. 1 Experimental test set up

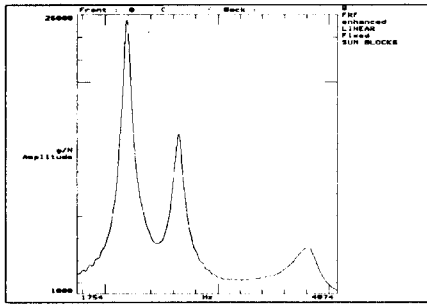


Fig. 2 FRF of base model

실험에서 스피들 모터의 고유치는 실험 오차를 고려하여 두 모터의 평균치를 사용하였다. 1차와 2차 모드는 rocking 모드로 각각 2285 Hz와 2781 Hz에서 발생하였고, 3차 모드는 axial 모드로 3832 Hz이다.

3. 유한 요소 모델링과 고유치 해석

실제 스피들 모터의 각 부품의 결합은 대부분 본드로 접착한 후 압입되어 있는 부분이 많다. 본드에 의해 결합이 되면 어느 정도의 탄성과 비선형성이 존재하게 된다. 그런데, 본드에 의한 결합을 세세하게 표현하여 모델링하면 모델이 복잡하게 되고 해석 시간이 길어지게 된다. 그래서, 각 부분의 결합은 완전 결합, 즉, 결합부의 절점을 각 부분이 공유하는 방법을 채택하였다[3]. 이 결과 어느 정도의 오차는 발생하지만 유한 요소 모델이 단순해진다는 장점이 있다. 다음의 Fig. 3은 실제

BLDC 스피들 모터의 사진이다.

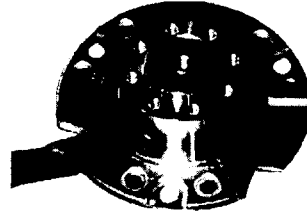


Fig. 3 BLDC spindle motor

다음은 스피들 모터의 각 부분의 모델링이다.

3. 1. 베어링

베어링의 모델링은 감쇠를 무시한 스프링 요소를 사용하였다. 베어링의 볼은 베어링 한 개당 8개로 이루어져 있다. 하나의 볼에 대해 두개의 스프링 요소로 모델링하고, 그 중에서 하나는 반경 방향으로, 다른 하나는 축 방향으로 각각 스프링 상수를 주었다. 즉, 상/하 베어링에 대해 총 16개의 볼이 존재하므로 32개의 스프링 요소가 사용되었다. 각각의 볼의 모델은 다음의 Fig. 4와 같다.

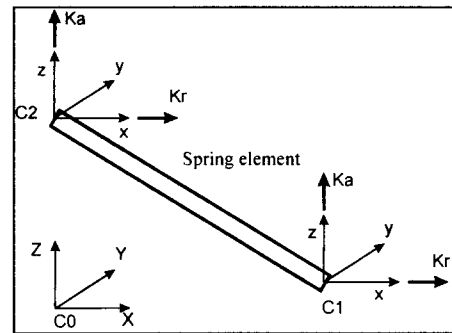


Fig. 4 Modeling of bearing and spring constant

Fig. 4에서 C0는 절대 좌표계이고, C1과 C2는 각각 볼 요소의 절점에서의 상대 좌표계이다. 각각의 상대 좌표계의 x 방향은 절대 좌표의 반경

방향이고 z 방향은 절대 좌표계의 Z 방향과 같다. 여기서, K_r 은 반경 방향의 스프링 상수이고, K_a 는 축 방향의 스프링 상수이다.

3. 2. 스테이터

스테이터의 경우, 코일은 질량면에서 전체적으로 큰 영향을 주지 않기 때문에 모델링하지 않았다[3].

3. 3. 기타 부분의 모델링

flange 부의 모델은 Fig. 5 와 같다. 축이 압입되는 부분은 solid 요소를 사용하여 모델링 하였고, 나머지 부분은 평판 요소를 사용하였다. 허브, 축, 자석, 요크(yoke) 부분은 solid 요소를 사용하여 모델링 하였다. 전체 BLDC 스펀들 모터의 유한 요소 모델은 Fig. 5 와 같다.

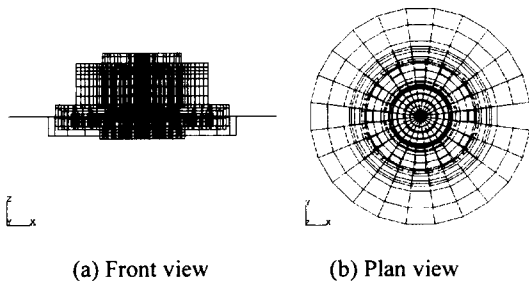


Fig. 5 Finite element model of BLDC motor

3. 4. 고유치 해석

스핀들 모터의 유한 요소 모델은 실험 조건과 마찬가지로 자유단 상태에서 MSC/NASTRAN 을 사용하여 고유치 해석을 하였다. 1 차와 2 차 모드는 실험과 마찬가지로 rocking 모드로 2427 Hz 와 2690 Hz 이고, 3 차 모드는 3828 Hz 이다.

4. 실험 결과를 통한 해석 결과의 검증

스핀들 모터의 유한 요소 모델의 검증을 위하여 실험의 결과와 비교하여 보았다. Fig. 6 은 실험

결과 해석에 의한 모드 형상과 고유치이다.

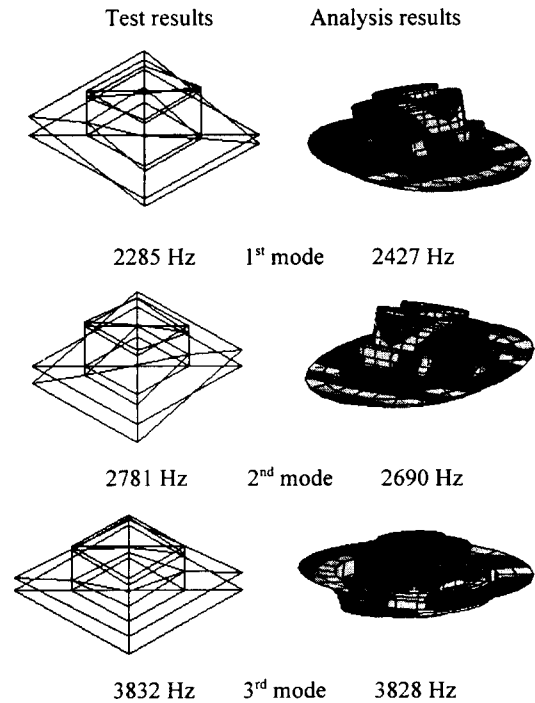


Fig. 6 Comparison of test results with analysis results

모드 형상을 비교하여 보면 실험과 해석 결과가 같음을 알 수 있다. 그리고, 고유치 역시 유사함을 알 수 있다. 위에서 검증된 기본 스펀들 모터에 대해 설계 민감도 해석을 수행하였다.

5. 고유치 설계 민감도 해석

설계 변수에는 일반적으로 크기 설계 변수(두께, 단면적 등)와 형상 설계 변수가 있다. 크기 최적 설계는 유한 요소 모델에서 절점의 위치는 변하지 않고 두께, 면적 등이 변하고, 형상 최적 설계에서는 절점의 위치가 변하게 된다.

BLDC 스펀들 모터에서의 설계 변수는 Fig. 7 과 같이 세가지를 선택하였다.

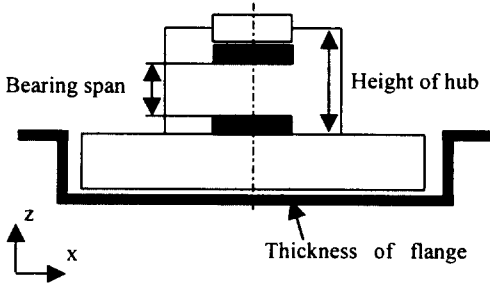


Fig. 7 Design variables of BLDC motor

설계 민감도 계수는 MSC/NASTRAN 에서 중간 유한 차분법(central finite difference method)을 사용하여 구하였다.

5. 1. flange 의 두께

flange 부의 두께 변화에 대한 설계 민감도 계수는 Table 1 과 같다. 여기서, δb 는 +z 방향으로의 변화를 뜻한다. 즉, +0.1mm 는 두께를 0.1mm 줄인다는 뜻이다.

Table 1 Design sensitivity of eigenvalue with respect to thickness of flange ($\delta b = 0.1mm$)

	Backward $\psi(b - \delta b)$	Forward $\psi(b + \delta b)$	CFDM $\Delta\psi$
1 st mode (Hz)	2528	2331	-985
2 nd mode (Hz)	2827	2690	-1370
3 rd mode (Hz)	4104	3828	-2810

여기서, $\Delta\psi = (\psi(b + \delta b) - \psi(b - \delta b)) / 2\delta b$ 는 중간 유한 차분법에 의한 설계 민감도 계수이다.

5. 2. 허브의 높이

다음은 허브의 높이를 설계 변수로 선택하였을 때의 설계 민감도 계수이다. 마찬가지로, δb 는 +z 방향으로의 변화를 뜻한다. 즉, 0.5mm 는 높이를 0.5mm 올린다는 뜻이다.

Table 2 Design sensitivity of eigenvalue with respect to height of hub ($\delta b = 0.5mm$)

	Backward $\psi(b - \delta b)$	Forward $\psi(b + \delta b)$	CFDM $\Delta\psi$
1 st mode (Hz)	2562	2517	-45
2 nd mode (Hz)	2848	2794	-54
3 rd mode (Hz)	3897	3873	-24

5. 3. 베어링의 간격

다음은 베어링의 간격을 설계 변수로 선택하였을 때의 설계 민감도 계수이다. 베어링은 위쪽 베어링만을 이동시키고, 아래쪽 베어링은 고정시켰다.

Table 3 Design sensitivity of eigenvalue with respect to span of bearing ($\delta b = 0.2mm$)

	Backward $\psi(b - \delta b)$	Forward $\psi(b + \delta b)$	CFDM $\Delta\psi$
1 st mode (Hz)	2537	2542	12.5
2 nd mode (Hz)	2820	2822	5
3 rd mode (Hz)	3886	3884	-5

6. 설계 민감도 해석 결과와 실험 결과의 비교

각 경우에 대한 설계 민감도 계수에 대해 각각 다음과 같은 설계 변경을 하여 해석하고, 또한 BLDC 스피들 모터를 설계 변경하여 두개씩 제작한 후 이를 실험하였다. flange 부는 두께를 0.1, 0.2, 0.3mm 씩 줄이고, 허브의 높이는 1.5mm 줄였다. 그리고, 베어링의 간격은 1mm 줄였다.

flange 두께 변경의 경우, 설계 민감도를 이용하여 유한 요소 모델을 설계 변경한 후의 예측치는 Table 4 와 같다. 그리고, Fig. 8 은 해석을 통한 예측치와 설계 변경 후 제작된 스피들 모터의 실험치의 비교이다.

Table 4 Predictions of modes with flange thickness

changed model			
	$\delta b = 0.1\text{mm}$	$\delta b = 0.2\text{mm}$	$\delta b = 0.3\text{mm}$
1 st (Hz)	2328.5	2230	2131.5
2 nd (Hz)	2553	2416	2279
3 rd (Hz)	3547	3266	2985

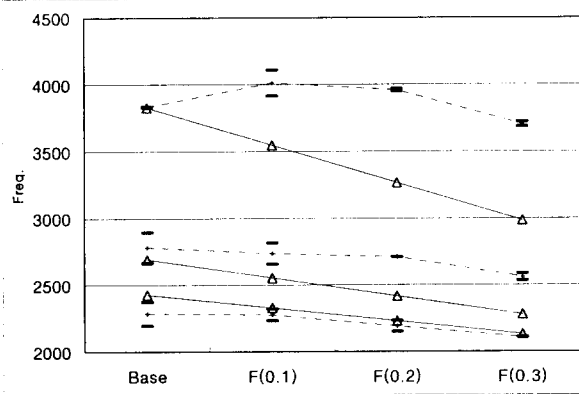


Fig. 8 Test and prediction results of flange change

Fig. 8 에서 ‘-’는 각각의 설계 변경후 제작된 스핀들 모터의 실험치이고, ‘+’를 갖는 점선은 평균치이다. 그리고, 삼각형으로 표시된 실선은 민감도에 의해 예측된 값이다. 여기에서 특히 3차 모드의 값이 크게 차이가 나는 이유는 기본 모델은 실제 양산되는 스핀들 모터이고, 설계 변경된 스핀들 모터는 따로 제작되었기 때문에 제작 환경에 따른 오차로 판단된다. 따라서, 모델링은 기본 스핀들 모터를 기준으로 생성하였기 때문에 설계 변경 예측치는 변경된 스핀들 모터의 실험치와 차이를 보이고 있다. 하지만, 설계 변경에 따른 기율기 즉, 설계 민감도는 거의 비슷하게 나옴을 알 수 있다.

허브의 높이 변경과 베어링의 간격 변경에 대한 예측치와 변경된 스핀들 모터의 실험치는 다음의 Table 5 와 Fig. 9 와 같다. 예측치가 실험치와 가까움을 볼 수 있다.

Table 5 Predictions of modes with design changed

model		
	Hub height $\delta b = -1.5\text{mm}$	Bearing span $\delta b = -1.0\text{mm}$
1 st (Hz)	2606.5	2526.5
2 nd (Hz)	2902	2816
3 rd (Hz)	3921	3890

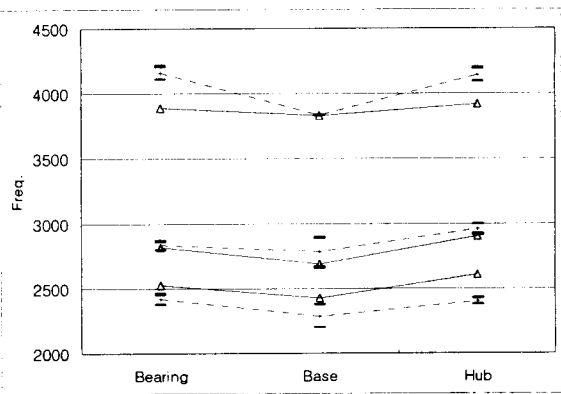


Fig. 9 Test and prediction results of hub and bearing change

7. 결론 및 검토

본 연구에서는 하드 디스크에 장착되는 BLDC 스핀들 모터의 기계적 구조물의 유한 요소 모델을 만들고, 이 유한 요소 모델의 해석 결과는 실험을 통하여 검증하였다. BLDC 스핀들 모터의 여러 가지 설계 변수에 대해 설계 민감도 해석이 이루어졌고, 실제 스핀들 모터의 설계 변수를 변화하여 제작한 후 실험 결과와 비교하였다.

본 연구 결과 BLDC 스핀들 모터의 설계 시 해석을 통하여 각 설계 변경에 대한 스핀들 모터의 고유치를 예측할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 고유치 문제에 대해서만 수행되었는데, 앞으로 주파수 응답에 대한 문제와 전자기적인 영향[4]을 고려한 문제를 동시에 수행할 수 있도록 고려해야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 이 호성, “하드 디스크 드라이브 개발에 관련된 기계기술의 현황,” *한국소음진동공학회지*, 제 7 권, 제 3 호, pp. 354-361, 1997.

- [2] 장 건희, 한 재혁, “하드 디스크 구동 스피들 모터의 진동 특성에 관한 연구,” *한국소음진동 공학회 춘계학술대회*, pp. 160-166, 1997.

- [3] G. M. Frees, “Disk Drive Spindle Dynamics-Analysis and Measurement,” *Advances in Information Storage Systems*, Vol. 6, pp. 237-262, 1995.

- [4] 왕 세명, 정순규, “유한요소법을 이용한 정자기 장의 연속 형상설계 민감도 해석,” *대한기계학회 춘계학술대회*, 1998.