

생산 전동기 로터 적층 코어의 동특성 조사

Dynamic Characteristics of Laminated Rotor Core of Electric Motor Products

김관영† · 문병윤* · 이수목**
Kwan-Young Kim, Byung-Yun Moon and Soo-Mok Lee

Key Words : Electric Motor, Rotor Core, Dynamic Stiffness, Modal Test, Frequency Response Function, Natural Frequency, Modal Damping, Average, Standard Deviation, Equivalent Diameter

ABSTRACT

The dynamic characteristics of rotor shafts for electric motors were investigated through the modal tests. The natural frequencies and modal dampings in each manufacturing stage of rotor core assembly were analyzed from the frequency response functions for all 6 motors of a product model. The deviation of the each individual modal feature was found dependent on the mode shapes as well as the rotor assembly stage. The core stacking itself is known to widen the deviation of modal properties but following processes of rotor bar insertion and swaging are confirmed to reduce the deviation. Finally the equivalent diameter of core part was estimated from the comparison of measured and calculated results to include the stiffness of core part.

1. 서론

산업의 발전에 따라 고출력 및 고속 회전의 전동기가 요구되어 왔으며 이러한 필요에 따라 개발된 전동기는 다양한 진동 문제를 수반하여 왔다. 고도로 발달된 컴퓨터 계산 기능과 계측기술에 힘입어 이러한 진동의 원인을 규명하고 방지하는 기술 또한 발전하여 왔으나 설계단계에 정밀하게 적용하는 데는 몇 가지 제약이 존재하여 왔다. 그 중 하나는 규소강판의 적층 구조로 이루어진 회전자 및 정지자 코어의 비선형성 및 비등방성 특성이며 또 다른 어려움은 동일한 설계하의 생산품이라 하더라도 필연적으로 가지게 되는 동특성의 산포 및 이로 인한 진동 응답의 예측할 수 없는 차이이다. 전자는 적절한 등가 물성치를 부여함으로써 극복하여야 하고 후자는 통계적 접근에 의해 어느 정도의 오차 범위를 허용해 주어야 하는 것이 현실이다.

본 연구에서는 생산중인 수대의 동일한 전동기에 대해 로터의 동특성을 실험적으로 조사함으로써 생산 공정에 따른 로터의 동특성 변화를 추적하면서 동시에 개별적 생산품이 가지는 동특성의 편차를 관찰하여 이러한 특성치의 통계적 산포를 파악하고자 하였다.

2. 대상 전동기 사양

생산하는 전동기 중 생산 일정을 고려하여 다수의 전동기를 실험할 수 있는 모델을 선정하였다. 대상 전동기의 외양 및 로터부 스케치를 Figure 1 과 Figure 2 에 나타내었고 간이 사양은 Table 1 과 같다.

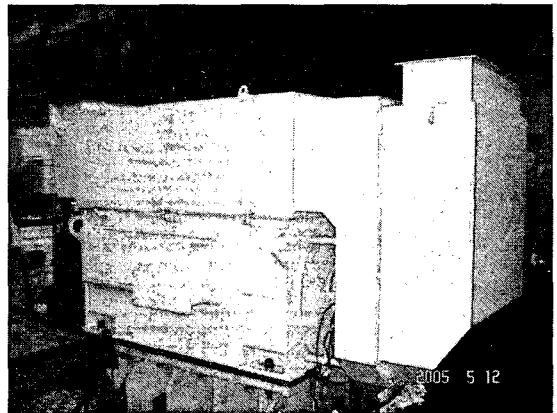


Figure 1 Electric motor model for experiment



Figure 2 Drawing for the rotor part

† 현대중공업 선박해양연구소 기계설계연구실
E-mail : kykim@hhi.co.kr
Tel : (052) 230-7404, Fax : (052) 234-5495

* 현대중공업 회전기생산부

** 현대중공업 선박해양연구소 기계설계연구실

Table 1 Specification of motor

출력 (kW)	1,089 kW
Pole 수	2P
정격전압 (V)	3,300V
정격주파수 (Hz)	50 Hz
정격회전수 (rpm)	3,000 rpm
Bearing type	Sleeve
Total Weight (kg)	5,700 kg
Rotor weight (kg)	1,027 kg

3. 공정별 회전자 부품의 동특성

3.1 주파수 응답함수

전동기의 회전자를 구성하는 부품은 크게 축, 회전자 코어, press ring, rotor bar, end ring, retainer ring 그리고 fan 등이다. 이러한 회전자의 조립 공정에 따라 축만의 경우 (shaft only, 1st stage)와 축과 코어가 press ring에 의하여 결합된 상태 (shaft with core, 2nd stage), 그리고 회전자의 최종 조립상태 (rotor assembly, 3rd stage)로 구분하였다.

기본적인 모드 시험의 조건은 크레인 권양상태에서 수평방향으로 축의 중앙지점을 가격하고 각 위치에서의 FRF를 취득하였다. 시험 시 사용한 실험장치로는 3축 가속도계 (PCB 356B18), 충격해머 (PCB 086D20) 및 ME'scopeVES modal test S/W이다. 이러한 회전자 실험모드의 전형적인 형태는 Figure 3에 나타낸 바와 같이 2절 모드, 3절 모드 그리고 4절 모드이며 본 논문에서는 이러한 기본적인 세 모드에 대해서 고찰하기로 한다.

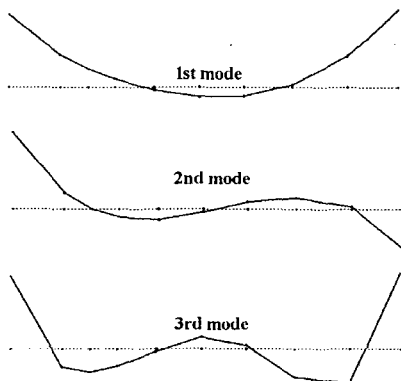


Figure 3 Typical mode shapes of rotor

총 6대의 전동기에 대한 모드실험을 수행하였으며 각 공정 상태에 따른 FRF 결과를 Figure 4~Figure 6에 나타내었다. 축만의 FRF는 주파수 성분 뿐만 아니라 그 크기까지 잘 일치하고 있으나 코어가 결합된 모델의 경우 비교적 결과의 산포가 큰 것을 알 수 있다. 이것은 회전자 코어 강판의 적층된 조건이 서로 상이함을 나타내는 것이며 다시 완전한 rotor assembly로 조립되면 산포가 줄어들음을 알 수 있다. 이는 rotor bar 삽입, swaging 등의 공정 작업에 의해 적층부의 강성이 안정됨을 의미한다.

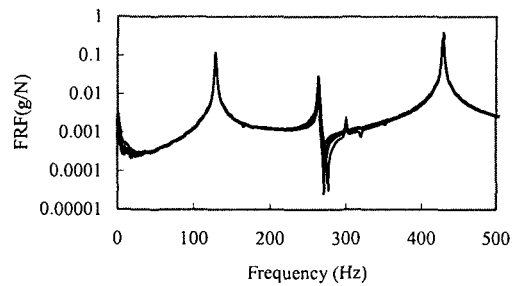


Figure 4 FRF's of shafts only

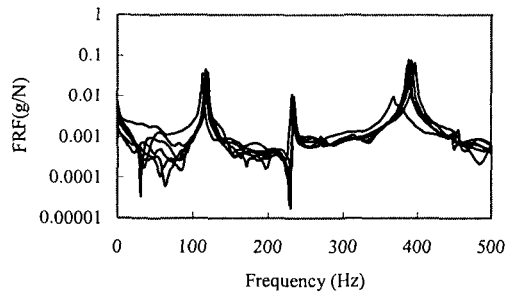


Figure 5 FRF's of shafts with core

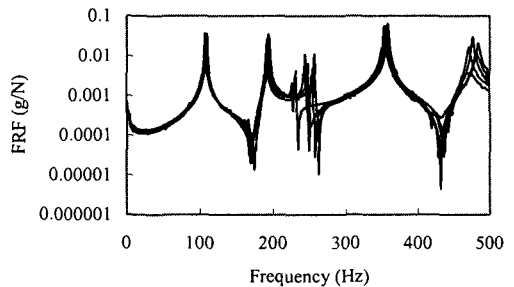


Figure 6 FRF's of rotor assembly

3.2 고유진동수 산포

회전자의 조립 공정에 따른 회전자 6 대의 고유진동수 산포를 Table 2 에 나타내었다. 축 자체의 고유진동수 편차는 0 에 가까우며 코어가 조립된 상태에서는 편차가 커지기 시작한다. 그러나 코어만 결합된 상태에서 2nd mode 의 고유진동수 편차는 비교적 작다는 사실에 주목할 필요가 있다. 이는 해당모드에서 코어의 강성이 상대적으로 영향이 적다는 것을 의미하며 실제 2 차 모드에서 중앙부가 절점이 되어 굽힘 변형을 거의 일으키지 않는다는 사실과도 일치한다. 또한 전술한 대로 코어의 강성 영향이 큰 1 차, 3 차 모드의 경우 3 단계의 로터가 2 단계 로터보다 산포가 훨씬 줄어들어 나타나므로 swaging 등 3 단계의 공정 작업이 품질 균질화에 도움을 줌을 알 수 있다.

Table 2 Statistical data of natural frequency

mode	Frequency (Hz)	1 st Stage	2 nd Stage	3 rd Stage
1 st mode	AVG.	128.1	117.3	107.8
	ST.DEV.	0.00	2.4	0.94
2 nd mode	AVG.	263.5	234.4	192.6
	ST.DEV.	0.32	1.1	1.54
3 rd mode	AVG.	428.9	386.1	356.2
	ST.DEV.	0.26	9.6	2.28

3.3 모드 감쇠 산포

회전자의 조립 공정 중 축에 회전자 코어가 결합되어진 상태에서 각 모드별 댐핑상수(ζ)를 6 대의 생산품에 대하여 비교하였다. 1st mode 와 3rd mode 의 경우는 댐핑의 산포가 큰 반면 2nd mode 의 경우 6 대 생산품에 대한 댐핑의 산포가 작음을 알 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 코어가 위치한 부분의 모드변위가 굽힘이 아닌 직선형태이며 이로 인해 회전자 코어가 해당 모드에서는 강제처림 움직임이기 때문이다. 모드 감쇠의 산포는 Table 3 에 정리하였다.

Table 3 Experimental modal damping

mode	Modal Damping (%)	1 st Stage	2 nd Stage	3 rd Stage
1 st mode	AVG.	0.391	0.389	0.345
	ST.DEV.	0.020	0.043	0.019

2 nd mode	AVG.	0.665	0.207	0.179
	ST.DEV.	0.389	0.011	0.044
3 rd mode	AVG.	0.258	0.325	0.215
	ST.DEV.	0.180	0.123	0.012

4. 등가 코어 강성

보다 일반적인 관심은 실제 전동기 회전체의 고유진동수 즉, 위험 속도 추정 등과 관련하여 이러한 적층 코어의 강성 효과에 있는데 이러한 강성의 추정은 해석 모델과 계측 결과를 비교함으로써 간접적으로 가능하다.

Figure 7 은 등가 강성 추정을 위한 로터 축의 유한 요소 보 모델이다. 기본적인 검증으로써 축만의 경우인 1 단계에 대한 해석 결과는 1 차~3 차 모드에 대해 모두 실험과의 오차가 1% 미만을 보임으로써 일반적인 단순 Timoshenko 보에 의한 모델링의 건전성을 충분히 입증하였다.

Table 4 와 Table 5 에 2 단계 공정 및 3 단계 공정 모델에 대해 적층 코어의 질량만을 고려한 모델의 고유진동수를 제시하였다. 코어의 강성 효과를 고려하지 않았을 경우 전 모드에 대해 오차가 매우 크며 코어 강성 효과의 고려가 필수적임을 보여준다.

코어 강성을 고려하는 일반적 방법의 한가지로서 해당 축경을 증가시키는 것인데 실험적인 결과와 같은 고유진동수를 주는 코어부의 직경을 취함으로써 등가 강성을 간접적으로 추정한다. 이 경우 모드에 따른 차이가 크게 되며 각각의 경우에 대하여 별도의 평가가 필요하다.

본 모델의 경우에 대한 각 모드별 등가 직경을 제시하면 Table 6 및 Table7 과 같다. 여기서 1 차 모드의 결과(+7.5%, +18%)는 어느 정도 자연스러운 결과로 보이나 2 차 모드의 결과 (+50%, +50%)는 여타의 이유로 발생한 실험적 오차를 별로 고유진동수 변화에 효과적이지 않은 코어의 축 강성에 모두 산입하여 등치한 경우로서 사실상 왜곡된 결과라고 볼 수 있다.

3 차 모드(+17%, +42.5%)의 결과는 2nd stage 에서 3rd stage 의 공정으로 가면서 추가된 rotor bar 의 swaging 작업 및 end ring, retainer ring 등의 결합에 의한 축 강성의 증가에 의해 3rd stage 의 등가 직

경 증가율이 더 큼을 알 수 있다. 여기서 흥미로운 사실은 2nd stage 에서 3rd stage 로 가면서 1st mode(+7.5%→+18%)와 3rd mode (+17%→+42.5%)의 등가 직경 증가율이 각각 2.3 배와 2.5 배로 유사한 수준이라는 사실이다.

일반적으로 1 차 모드에 대한 강성 기여분 혹은 등가 직경이 위험속도의 측면에서 실제적인 관심이다. 물론 본 실험과 같이 충격 해머로 시험한 경우 약소한 가진력에 의한 비선형적 효과에 의해 실물 운전 시와 발생하는 오차는 별도로 고려되어야 한다.

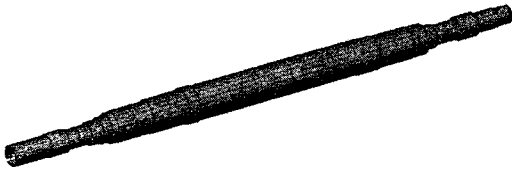


Figure 7 Finite element beam model for shaft

Table 4 Natural frequency in stage 2 under the original core shaft diameter (175 mm)

Mode	Analysis (Hz)	Test (Hz)	Error
1 st Mode	108.3	117.3	-7.7 %
2 nd Mode	218.0	234.4	-7.0%
3 rd Mode	347.5	386.1	-10.0%

Table 5 Natural frequency in stage 3 under the original core shaft diameter (175 mm)

Mode	Analysis (Hz)	Test (Hz)	Error
1 st Mode	90.7	107.8	-15.9%
2 nd Mode	174.2	192.6	-9.6%
3 rd Mode	264.0	356.2	-25.9%

Table 6 Equivalent diameter of core shaft to include the contribution of core stiffness (2nd stage)

Mode	Analysis (Hz)	Diameter (mm)	Increase
1 st Mode	117.8	188.1	+7.5%
2 nd Mode	234.5	262.5	+50.0%
3 rd Mode	388.6	204.7	+17.0%

Table 7 Equivalent diameter of core shaft to include the contribution of core stiffness (3rd stage)

Mode	Analysis (Hz)	Diameter (mm)	Increase
1 st Mode	107.7	206.5	+18.0%
2 nd Mode	192.5	262.5	+50.0%
3 rd Mode	356.6	249.4	+42.5%

5. 결론

생산 전동기의 모드시험을 수행하여 공정에 따른 회전자의 동특성 변화 및 총 6 대 회전자의 상호 간 동특성 분포를 통계적으로 고찰하였다. 그 결과 공정별 회전자의 동특성(고유진동수, 댄핑) 산포는 모드와 연관을 가짐을 알 수 있었으며 swaging 등의 3 단계 공정 작업이 품질 균질화에 도움을 주는 사실을 확인 할 수 있었다. 또한 회전자 코어가 축의 강성에 기여하는 정도를 파악하는 방법의 일환으로 코어의 해당 축 직경을 증가하여 등가직경을 찾아내었다. 이러한 결과는 유사한 전동기의 축계 해석 시 중요한 참고 자료가 될 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) ME'scopeVES user's manual
- (2) Janne Roivainen, Kari Kantola and Paul Kinge, "Structural Modelling of an Induction Machine Stator", Proceedings of ICSV, 2002.
- (3) R. S. Girgis and S. P. Verma, "Method for accurate determination of resonant frequencies and vibration behavior of Stators of electrical machines", IEEE Proceedings Part B : Electric Power Application 128 (1), Jan. 1981, pp. 1 ~ 11.
- (4) Maia, Silva "Theoretical and Experimental Modal Analysis", Research Studies Press, 1997