

## 컴프레서용 모터 120Hz 공진 저감을 위한 연구

신 현 장<sup>\*†</sup>

\*연암공과대학교 기계공학과

### Modal Analysis and FEA of a Compressor Motor for 120Hz Resonance Reducing

Hyun-Jang Shin<sup>\*†</sup>

\* Dept. of Mechanical Engineering, Yonam Institute of Technology

(Received December 29 2015 ; Revised November 16, 2016 ; Accepted November 17, 2016)

**Key Words:** Compressor Motor(컴프레서용 모터), Line Frequency(2fl 진동), 2X Vibration(2X 진동), Modal Impact Test(모드실험), FEA(유한 요소 해석)

**초록:** 315Fr 컴프레서용 모터가 진동 기준을 초과하는 문제가 발생하였고 이를 해결하기 위한 FEM해석과 모드실험을 수행하였다. 먼저 자유단 조건하의 해석과 실험을 수행하여 해석을 위한 조건을 확인하였다. 해석을 위한 Mesh, 재질, 경계 조건을 검토하였다. 여기서 얻은 결과를 바탕으로 볼트가 고정된 상태의 FEM 해석과 모드 실험을 수행하여 진동의 원인을 확인하였다. 모드실험 결과 121.7Hz에 Rolling 모드가 있음을 확인하였고 해석을 통해서도 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 진동 기준을 초과하는 원인은 120Hz에 존재하는 Rolling 운동과 2X, 2fl 가진 주파수의 공진에 의한 것임을 알게 되었다. 여기서 얻은 결과를 바탕으로 추후 시리즈 설계에 있어서는 시험 모델 제작이나 실험 없이 해석만으로 문제점을 예측하고 해결할 수 있는 기술을 보유하게 되었다.

**Abstract:** 315Fr compressor motor exceeds vibration specifications. To find the reason, first a modal impact test with free-free condition is done. Second a modal test with fixed condition is done. Thereafter the test results are compared with FEM simulation results. Using free-free condition modal impact test, FEM simulation conditions (boundary, mesh..) are modified. The motor has rolling motion around 120Hz. FEM simulation also shows same result. FEM simulation will be used to develop other series compressor motors. Using this, manufacturing test model and doing test will be useless.

## 1. 서론

컴프레서 구동에는 다양한 크기와 용량의 모터가 사용된다. 컴프레서를 가동시키기 위한 용도로 모터가 사용되는데 주로 사용되는 모터 형식은 유도 전동기 타입의 모터가 사용된다. 컴프레서용 모터는 높은 진동에 견뎌야하는 고내구성과 일정 수준이하의 진동특성을 요구하게 된다. 모터 납품업체는 고객사가 요구하는 조건을 만족시켜야 한다. 본 논문은 315Fr 모터에 관한 내용이며 여기서 Fr(프레임)이 의미하는 것은 모터의 바닥에서 회전축 중심까지의 거리를 의미하는 것으로 통상적으로 업계에서 통용되는 기준을 의미한다.

실험에 사용된 315Fr 유도 전동기의 규격은 900마력 460V 2극 전동기이며 무게는 1775kg, 1789.5×1172.5×712.5mm의 크기를 가지고 있다. 작동 회전수는 60Hz, 3600rpm에서 구동이 되는 제품이다. 회전축의 밸런싱을 비롯한 기계적인 기준은 국제 규격과 회사 자체 규격에 의해서 조립되고 테스트 되

† Corresponding Author, [shin7@yc.ac.kr](mailto:shin7@yc.ac.kr)

었다. 모터에서 발생하는 진동은 기계적인 부분과 전기적인 부분으로 나눌 수 있다. 기계적인 진동은 모터의 실제 회전에 의해서 발생하는 부분으로 1X, 2X 진동으로 표현을 한다. 1X 진동은 모터의 실제 회전에 기인하는 진동으로 유도 전동기의 경우 슬립이 존재하기 때문에 60Hz을 인가해도 유도전동기는 정확히 60Hz 회전하지 못하기 때문에 60Hz 근방의 진동 성분을 나타내게 된다. 2X진동 성분 역시 기계적인 요소에 의해서 발생하는 진동으로 강성 비대칭이나 회전자편심에 의해서 발생되며 슬립에 의해서 정확히 120Hz가 아닌 120Hz근처의 진동을 나타낸다. 전기적인 진동은 인가된 전류에 의해서 발생하는 진동으로 정확히 인가된 만큼의 주파수 성분을 나타내게 된다. 이중 2f은 인가된 전류에 의한 고정자 변형에 의한 진동 성분으로 2극기의 경우 진동의 가장 큰 요인으로 작용한다.

2f 주파수 성분은 2극기의 경우에는 인가 주파수의 2배에 해당하는 주파수의 추가 진동이 존재하는 것을 의미한다. Fig. 1에서 이를 설명하였다. 4극기의 경우에는 회전 주파수의 4배에서 2f 진동이 발생하게 된다. 컴프레서용 모터는 60Hz 회전을 하고 있기 때문에 2X, 2f은 120Hz에서 발생한다. 전자기력과 고정자의 상호 작용에 의해서 회전수의 2배 주파수를 2f 진동이라 한다.

공진이 발생하는 경우 그렇지 않은 경우보다 진동이 훨씬 커지기 때문에 고객사의 진동기준을 만족시키지 못하게 되는 경우가 발생하게 된다. 초기 제품 설계 시 진동 규격은 ISO 규격에 맞도록 설계를 진행하였으나 컴프레서 모터의 특성상 고객사(고객사 자체 기준)의 요구로 좀 더 엄격한 진동 기준을 만족시켜야 했다. 이 과정에서 진동 기준이 초과하게 되었으며 이에 대한 원인 분석을 위해서 본 연구를 진행하였다. 진동기준은 제품마다 다르며 본 제품에 대해서는 업체 기준이 1mm/s 이내 이다. 진동 측정 결과 120Hz에서 과도한 진동 성분이 측정 되었으며 120Hz에서 공진모드가 존재하고 있다고 판단하였다. 공진 모드의 발생 원인을 찾고 이를 해결하기 위해서 본 연구를 진행하였다.

## 2. FEM 해석

FEM해석<sup>(2)</sup>을 위해서 Fig. 2와 같은 모델링을 사용하였다. FEM에 필요 없는 부분은 생략하였지만 모터 코어와 코일 회전축은 원형 부분을 최대한 살려서 해석을 진행하였다. 이 부분의 과도한 단순화는 해석 오차를 증대시키기 때문이다. 재질은 실제 사용되는 재질의 물성치를 입력하였다. 주물 FC250, 구리, SCM430 등이 대표적으로 사용되었다. 해석을 위해서 10node 사면체 요소를 사용하였으며 노드수 657,844, 요소수 375,721개이다.

### 2.1 자유단 해석

모달 실험을 수행하기 전에 자유단 조건의 모드 해석을 수행하였다. 자유단 조건으로 해석과 실험을 수행한 이유는 315Fr 유도 전동기에 대한 제작이 처음이었기 때문에 기존 해석 및 실험 결과에 대한 자료가 부족하여 자유단 조건에서 먼저 실험을 한 후에 FEM 해석에 필요한 재질 및 해석 조건을 잡기 위해서 실험을 실시하였다. Fig. 2, Fig. 3 해석을 위한 모델링을 나타내며 각각의 재질을 입력한 후에 해석을 수행하였다. Table 1 은 해석 결과를 나타낸다. 자유단 해석<sup>(3)</sup>을 실제 조건과 최대한 유사하게하기 위해서 실제 체인과 동일한 위치에 스프링 요소를 첨부하였다. Table 1에 해석결과를 나타내었으며 강제모드는 생략하였다.

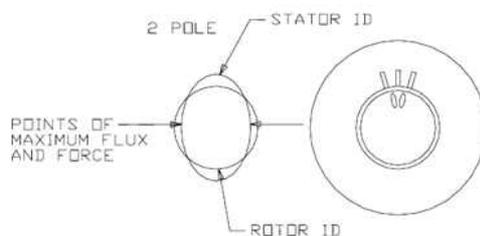


Fig. 1 2x vibration

Mode	Free-Free (HZ)	Fixed (Hz)
1	94.041	86.647
2	98.85	91.304
3	118.67	105.45
4	121.98	118.28
5	130.88	135.51
6	246.69	158.51
7	276.48	174.52
8	282.02	215.77
9	289.98	249.21
10	291.69	283.27
11	305.14	287.56

Table 1 Free-Free, Fixed FEA result

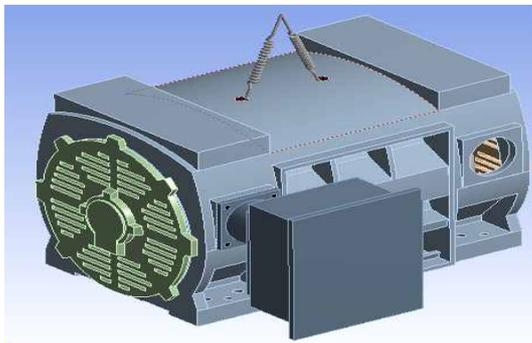


Fig. 2 FEA modelling for Free-Free model

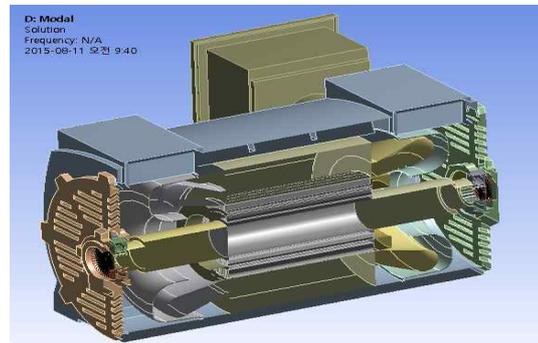


Fig. 3 Section View for FEA model

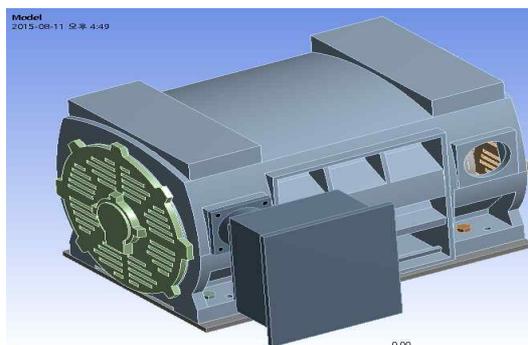


Fig.4 Fixed FEA simulation model

## 2.2 고정단 해석

자유단 조건의 모드 해석이 모드 실험<sup>(4)</sup>과의 Correlation도 용이하고 모터 자체의 특성을 이해하는데 좋은 방법은 맞다. 그러나 실제로 모터는 볼트가 체결된 상태에서 사용하게 되고 볼트가 체결된 상태에서는 모터의 모드가 변화하기 때문에 실제 사용 조건을 고려하기 위해서는 볼트가 체결된 상태에서 모드해석을 수행하는 것이 적절하다고 생각된다. 고정 조건 해석을 수행하기 위한 조건은 Fig. 4와 같다. Fig. 4 붉은 점선과 같이 볼트를 4개 모델링해서 해석 모델에 삽입하였으며 바닥 부분을 추가하여 모터가 지면에 볼트로 고정되는 조건을 모사하였다.



Fig. 5 Free-Free model for Modal Impact Test

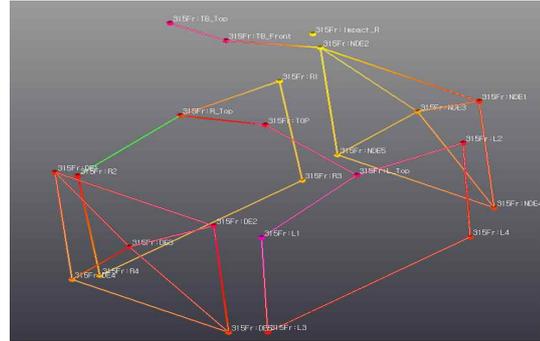


Fig. 6 Sensors position for Modal Test

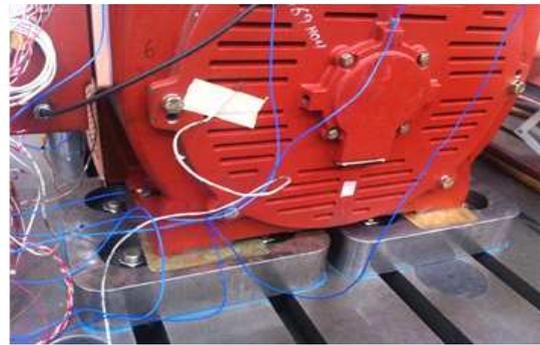


Fig. 7 Fixed model test setup for modal test

볼트는 모드 실험 시 사용되는 실제 볼트를 모델링하여 사용하였다. 해석결과 4차 모드가 118.28Hz에 있음을 알 수 있다. Table 1의 결과를 보면 1차 모드는 두 모델 모두 터미널 박스 쪽의 진동에 해당한다. 매다는 조건을 모사하기 사용한 스프링 요소의 강성과 위치에 따라서 고유진동수가 변화하기 때문에 최대한 실험 조건과 유사하게 스프링의 위치와 강성을 선정하였다. 스프링 요소의 위치와 강성을 조정하면 결과 실험 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

### 3. 모드 실험

Fig. 5는 모드 실험<sup>(4)</sup>을 위해 모터를 공중에 크레인으로 띄운 상태를 나타낸다. 크레인으로 띄운 상태에서 임팩트 해머를 이용하여 가진을 하고 모드 파라미터를 추출하였다. 가속도는 3축 가속도계를 사용하였으며 가속도계를 옮겨가며 측정을 진행하였다. Fig. 6은 모터의 측정점들을 나타낸다. 가속도계는 PCB사의 100mV/g의 감도를 가지고 있는 356A15, 임팩트 해머는 0.23mV/V 감도를 가진 086D20을 사용하였다.

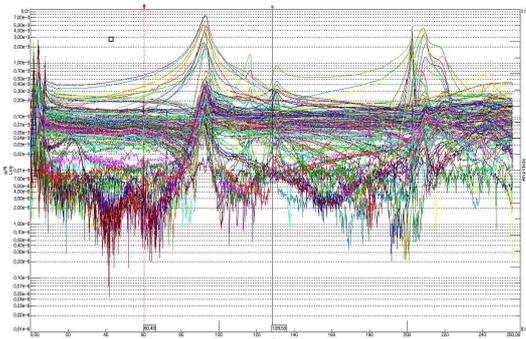
Fig. 7은 모터를 고정된 상태의 모드 실험을 위해서 센서를 장착한 모습을 나타낸다. Fig. 8은 각 점에서 측정된 자유단 상태의 FRF(Frequency Response Function) 선들을 나타내었다. Fig. 9는 고정된 상태의 각 점에서 측정된 FRF 선들 나타내었다. 이 선들을 바탕으로 모드 파라미터를 추출 하였다. 모드 파라미터 추출을 위해서 Time MDOF<sup>(1,6)</sup>(Multi Degree of Freedom)기법을 사용하였으며 모드 파라미터 추출은 Fig. 10, Fig. 11을 사용하였다. 이 방법을 이용해서 추출한 모드 파라미터는 Table 2, 3에 나타냈다.

**Table 2** Free-Free condition Mode parameters

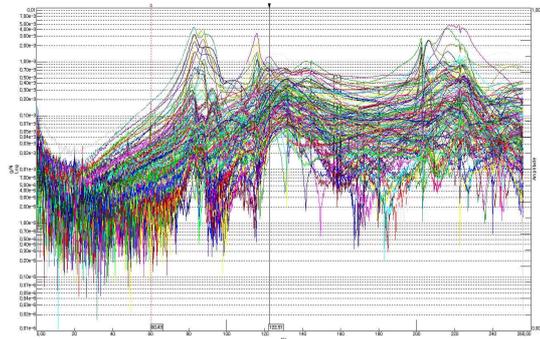
	Free_Free
1	92.205 Hz, 3.15 %
2	93.710 Hz, 1.40 %
3	106.489 Hz, 1.60 %
4	115.053 Hz, 0.70 %
5	129.578 Hz, 1.13 %
6	202.642 Hz, 0.10 %
7	207.679 Hz, 1.87 %
8	209.852 Hz, 0.71 %

**Table 3** Fixed condition Mode parameters

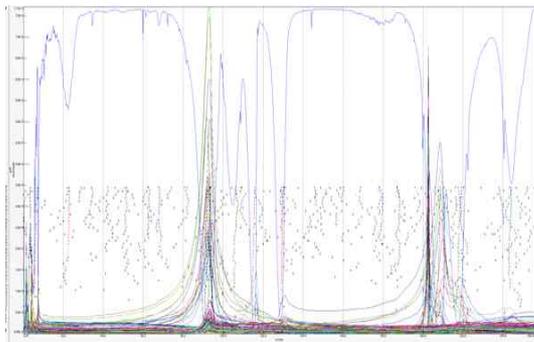
	Fix
1	82.436 Hz, 2.49 %
2	87.423 Hz, 2.15 %
3	115.112 Hz, 1.27 %
4	121.685 Hz, 2.95 %
5	130.247 Hz, 4.51 %
6	141.385 Hz, 5.43 %
7	204.550 Hz, 0.94 %
8	215.560 Hz, 1.68 %



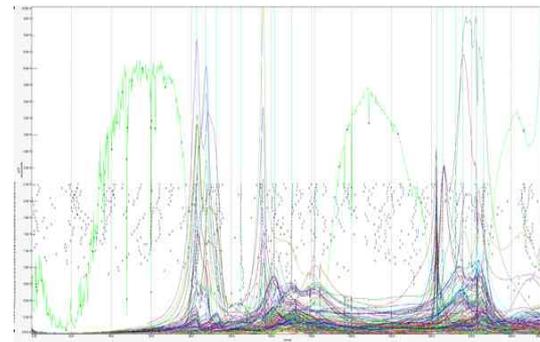
**Fig. 8** Free-Free Modal Test



**Fig. 9** Fixed Modal Test



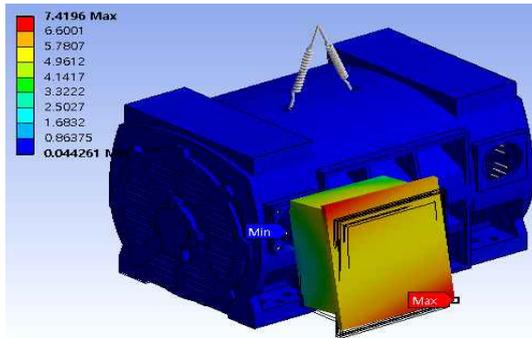
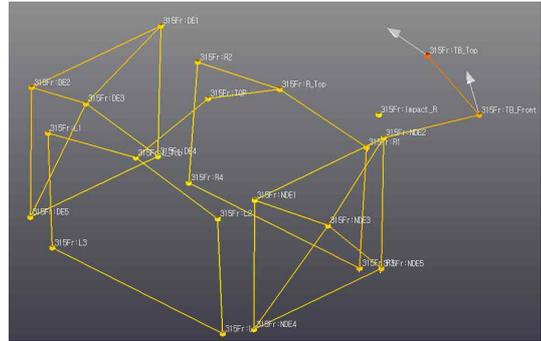
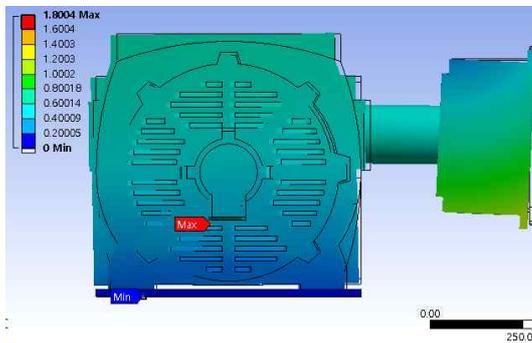
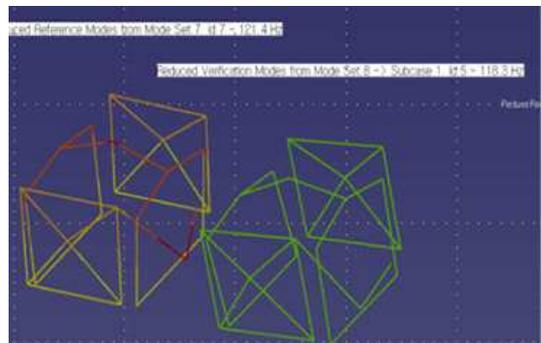
**Fig. 10** Free-Free Mode Parameter(Time MDOF)



**Fig. 11** Fixed Mode Parameter(Time MDOF)

#### 4. 해석결과 실험결과 비교분석

먼저 자유단 조건을 해석과 실험 결과를 비교하였다. FEM과 모드실험<sup>(4,5)</sup>의 1차 모드형상을 비교하였다. Fig. 12와 Fig. 13은 각각의 결과를 나타낸다. 1차 모드는 두 개 모두 터미널 박스의 움직임을 나타낸다. 두 결과를 비교했을 때 해석상 경계조건과 재질이 정상적으로 입력되었음을 알 수 있었다. 메쉬의 정도도 타당하다고 판단된다. 이를 바탕으로 고정조건에 대한 해석과 모드 실험 결과를 비교하였다. Fig. 14와 Fig. 15는 FEM 결과와 실험 결과를 나타낸다. 해석결과 좌우 Rolling 모드형상은 118.28Hz로 계산되었으며 모드실험 결과의 Rolling 모드형상은 121.685Hz는 측정 되었다. 이는 해석결과와 실험결과가 거

Fig. 12 FEM Free-Free 1<sup>st</sup> Mode ShapeFig. 13 Modal Test Free-Free 1<sup>st</sup> Mode ShapeFig. 14 FEM Fixed 4<sup>th</sup> Mode ShapeFig. 15 Comparison of 4<sup>th</sup> Test and FEA Mode Shape

의 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 이를 통해서 컴프레서용 모터에 120Hz 근처에 모드가 존재하고 있다는 것을 확인하였다. Fig. 12와 Fig. 13의 MAC(Mac Assurance Criterion)는 0.8 계산되었으며 Fig. 14, Fig. 15의 MAC값도 0.8로 계산되었다.

## 5. 결론

해석결과와 모드실험 결과 120Hz 근처에서 모터 하우징의 Rolling 운동이 존재함을 알 수 있었다. 이는 60Hz, 3600rpm으로 회전 하는 유도 전동기의 2X, 2fl 진동수에 해당되는 주파수이다. 모터 하우징의 Rolling 모드와 2X, 2fl 의 공진 때문에 모터의 진동이 증폭되었고 진동기준을 만족하지 못 한다는 사실을 실험과 해석으로 증명하였다. 진동의 원인이 규명되었고 해석을 통해서도 이를 입증하였으므로 추후 다른 시리즈 모터 개발에는 실험 없이 진동을 예측하고 시작 모델 제작 없이 컴퓨터 시뮬레이션만으로 미리 대처를 할 수 있을 것이라 예상된다. 모터 하우징 공진에 대처하기 위해 설계 변경을 통해서 공진을 회피하는 설계 및 최적화 해석을 진행하고 이를 실험을 통해서 증명할 예정이다.

## 참고문헌 (References)

- (1) LMS User Manual, LMS Korea
- (2) ANSYS User Manual, Taesung S&E
- (3) Daniel J. I., 2007, Vibration

- (4) Ewins, D. J., 2005, Modal Testing Theory Practise And Application, RSP
- (5) Hwang, J. Y., Mok, H. S. and Kim, C. W., 2012, "Vibration and Noise Analysis of Electric Vehicle Induction Motor," 대한기계학회 춘추학술대회, pp. 913~914.
- (6) Park, Y.-S., Lee, S.-K., Choi, H.-Y. and Kim, J., 2009, "Radiated Noise Prediction of Permanent Magnet Motor by Structural Vibration." 대한기계학회 춘추학술대회, pp. 1033~1038.