공기압축기 로터의 고유진동수 검사시스템

Natural Frequency Inspection System for Rotor of Air compressure

*이성철[1], #박찬희[2], 김성진[2], 최광훈[3], 양수진[2]

*S.C. Lee[1], #C.H. Park(chpark@camtic.or.kr)[2], S.J. Kim[2], K.H. Choi[3], S.J. Yang[2]

[1] 전북대학교 기계공학과, [2](사)전북대학교 자동차부품·금형기술혁신센터, [3](주)앤틀

Key words : Natural Frequency, Frequency Response Function, Rotor

1. 서론

산업용 송풍기를 제조하는 국내 송풍기 업체는 200여 곳에 이르나, 그 중 십여 개를 제외하면 그 규모가 매우 영세하여 송풍기의 질적 향상을 위한 연구개발보다는 해외에서 개발된 모델을 국내에서 모방하거나 치수 수정만으로 생산하는 등 핵심 원천기술 개발 없이 제조 기술에만 그치고 있는 실정이다. 최근 에너지절약 측면에서의 고효율화 및 환경소음규제 강화에 따른 저소음화의 요구는 과거보다 진보된 설계기술을 필요로 하고 있으며, 동시에 영세한 제조업체들의 기술수준 향상 및 품질 향상을 필요로 하고 있다. 기존 방식의 산업용 공기 압축기/블로워를 생산하고 있는 업체들도 고속 전동기를 채용한 터보기기의 개발에 뛰어들고 있는 상황이나 정밀가공 및 제작, 생산기술의 부족으로 고속회전기에 대한 연구개발 사례가 미비하여 고속회전기의 생산이 활발하지 못하고, 품질경쟁력이 떨어지는 약점이 있다. 특히 공기베어링과 고속모터를 적용한 터보블로워 개발에 외국의 많은 업체들도 시장진출을 모색하고 있는 상황이다[1][2].

한편, 고속회전체 제작 시 주물상태, 가공 및 조립과정에서 발생되는 여러 가지 원인으로 동일한 고유진동수를 만족하기 어려우며, 고유진동수의 차이는 고속회전 시 회전체의 동특성에 많은 영향을 주어 베어링 파손 등의 문제점이 발생하고 있다. 완성품 제작 전 수입검사에서도 불량상태를 파악하기 어려운 실정이고, 생산공정에서 회전체의 불량으로 발생되는 생산손실과 출하전 성능시험 시 불량요인으로 작용하고 있다. 따라서 회전체의 불량을 판별할 수 있는 검사공정의 도입이 필요하며 작업자에 따른 오차를 줄이기 위한 검사장비가 필요한 상태이다. 하지만, 대부분의 상용화된 검사 시스템의 경우, 고속회전체용 로터의 FEM 해석, Modal Analysis 등에 치우친 기능들을 제공하였으며, 공기압축기 로터의 고유진동수 및 모드해석, 특히 저가의 특정기능 전용 검사장비 개발은 거의 소개되지 않고 있다.

본 논문은 제품 입고 시 품질검사공정의 제품 테스트를 통하여 조립공정전에 불량 부품의 사용을 사전에 방지하는데 목적이 있으며, 고속회전체의 불량을 판별하기 위한 방법으로 제품을 측정지그에 올려놓은 후 정적인 상태에서 임펙트 해머와 가속도 센서를 이용하여 응답주파수를 측정하고 측정된 응답주파수는 FFT 연산 절차를 거쳐 회전체 자체의 고유진동수와 진동모드를 측정하도록 개발 하였다.

2. 고유진동수와 모드 해석

로터의 고유 진동수(Natural frequency of rotor) 의 첫 번째 고유진동수는

$$w = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{J_t}} \tag{1}$$

이고, 이때 J는 로터의 고속회전체에 대한 회전 관성모멘트를 말하며, k는 로터 탄성계수를 의미한다[3]. 위 식(1)을 이용하여, 본 논문은 2가닥의 wire로 매달린 로터의 고유진동수와 모드를 측정하였다. 실험은 정확한 측정을 위하여 일반적인 방법인 정반(원판)을 사용하지 않았으며, 로터의 재질별 해당부위를 총 5번의 실험을 통하여 평균을 취하였다. 실험에 사용된 관성모멘트 연산 수식은 식(2)와 같으며, J는 로터의 질량 관성모멘트, g는 중력가속도, T는 로터 회전 진동주기(평균), m은 피측물의 질량, L은 wire 길이를 의미한다[3].

$$J = \frac{g T^2 m}{4\pi^2 L} \tag{2}$$

로터의 모드해석은 기계적 구조물의 구조해석분야에서 검증된 FRF(Frequency Response Function)를 이용하였으며, 실험적인 고유진동수, Damping, 모드해석(Mode Shape), FRF를 통하여 계산하였다. FRF의 측정결과 $H(w)$는 Fig.1과 같이 응답 Fourier Transform $X(w)$과 입력 Fourier Transform $F(w)$의 연산을 통하여 얻어진다[4].

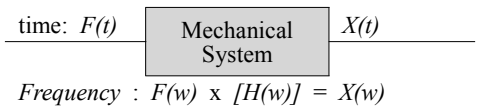

Fig. 1 Block diagram of FRF

3. 검사 시스템 개발

3.1 검사시스템 설계

공기압축기 로터의 고유진동수 검사시스템은 로터를 줄에 매달거나 정반위에 Isolator를 올려놓은 상태에서 검사하도록 설계 하였다.

본 검사시스템에 사용한 재원으로는 표 1과 같다. 센서는 PCB사의 가력용 임팩트해머(Impact Hammer)와 측정용 가속도센서(Accelerometer)를 사용하였으며, 데이터 수집은 NI사의 24Bit 5채널 장비를 사용하였다.

Table 1. List of configuration for inspection system

Item	*Specification*
Test Stand	1000×400×515㎜
Sensor	Impact Hammer, Accelerometer
DAQ Board	USB-4432
Computer	CPU:DualCore E6300 2.6GHz, RAM:DDR2 2GB

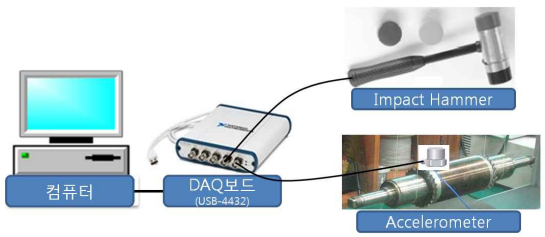

Fig. 2 Layout of Natural frequency inspection system

3.2 검사프로그램

본 논문에서 사용한 모드해석은 FRF 함수를 이용하였으며, Vector&RMS averaging과 Linear weight mode를 선택하였으며, FIR filter coefficient와 raw 데이터를 Convolution을 취하여 필터링 하였으며, 최대 3차 모드 해석까지 분석가능하도록 하였다.

본 논문에서 개발된 시스템의 구동 방법은 Fig. 2와 같이 데이터 수집 장비를 컴퓨터와 연결하고 가력계인 Impact Hammer와 응답계인 가속도계를 데이터 수집보드에 연결한 후, 가속도계를 고속회전체의 원하는 응답 위치에 왁스를 이용하여 부착하고, Impact Hammer로 가력한다. 결과는 그림 3와 같이 모니터를 통하여 확인할 수 있을 뿐만 아니라, 선택적으로 파일로 저장되도록 하였다.

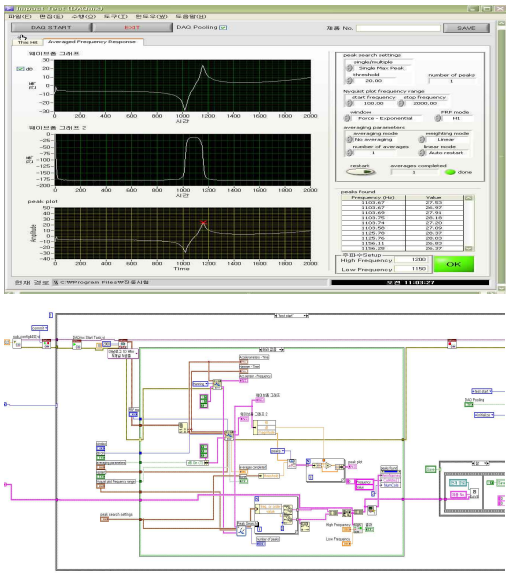

Fig.3 Main panel and code of inspection program

4. 성능검증

로터의 고유진동수 검사의 성능검증에 사용된 제품은 Fig.4와 은 형상으로 L= 442.8mm, a=31.5mm, b=48.95mm, c=68.8mm 이다. 동적인 FRF 데이터를 얻기 위하여 Impact Hammer를 이용하여 로터에 가력하였으며, 1개의 가속도계를 로터의 중앙(c)에서 10cm 간격에 부착하였다.

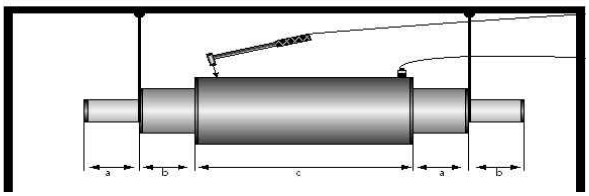

Fig.4 schematic for inspection system

데이터 수집 시 사용한 샘플링 속도(Sampling Rate)는 양산되는 제품별 로터의 최대 고유진동수는 3kHz를 초과하지 않으므로, Nyquist 샘플링 이론에 근거하여 2배 이상인 10kHz로 설정하였다. 또한, 한 지점에서 1번 가력한 결과 값을 획득하였으며, 결과값은 최소 지정한 응답 특성 값 이상에서만 평균값을 취하도록 하였다. FRF 입력신호 전 IR filter coefficient와 raw 데이터를 Convolution을 취하여 필터링하였으며, FRF 모드는 H1, Weighting mode는 Linear로 하였다.

출력된 가력 및 응답신호 결과 그래프와 응답 특성곡선은 Fig.4와 같이 출력되며, 찾아진 Peak 값은 해당 고유진동수와 진폭값이 선택적으로 저장된다.

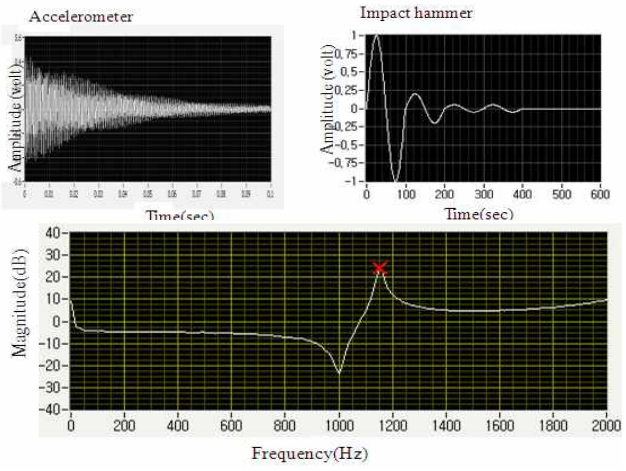

Fig. 5 Impact force and response signal

본 논문은 양품 3개와 불량품 3개를 이용하여 시스템의 성능검사 실험을 하였으며, 로터당 총 5번의 동일 지점(c)을 선택하여 가력한 뒤, 평균을 취한 값을 선택하였다. 양품 및 불량품의 고유진동수 측정 결과는 Fig.6과 같으며, 제품별 해당 고유진동수 및 표준편차는 표2와 같다.

Table 2. Result of performance test(Hz)

	Good Rotor(Std.)	NG Rotor(Std.)
Exp.1	1154.912(0.44)	1125.662(0.11)
Exp.2	1154.661(0.31)	1125.362(0.15)
Exp.3	1154.568(0.06)	1125.314(0.78)

본 실험결과는 양품과 불량품의 고유진동수 차이를 유의 수준 내에서 검사할 수 있었다.

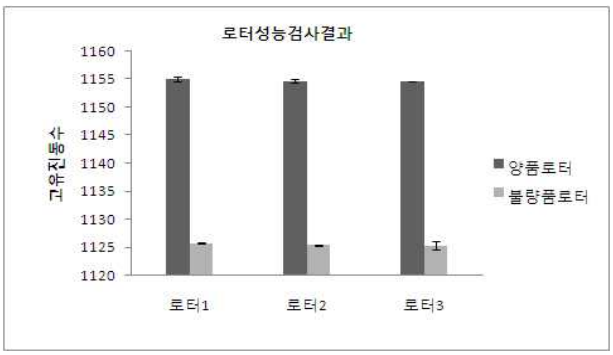

Fig. 6 Natural Frequency of performance test

5. 결론

본 논문에서는 공기압축기 로터의 임펄스 응답 특성을 통해 고유진동수를 측정하고 이를 이용하여 양품판별 유무를 판별하는 검사시스템을 개발하였다. 양불판정을 위한 정량적인 결과값을 도출하였으며, 실험군(양품)과 대조군(불량품)의 차가 유의 수준 내 판별 가능함을 확인하였다.

로터에 대한 고유진동수 검사를 통해 공기압축기 조립공정이전에서 불량을 판별해냄으로서 제품품질에 대한 문제를 해결할 수 있었다.

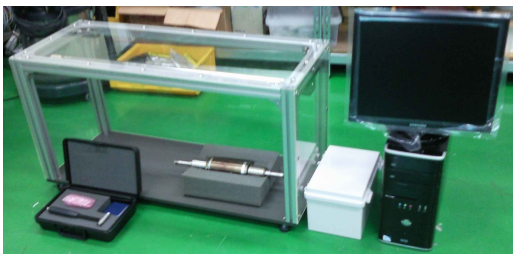

Fig 6. Result image of development

참고문헌

1. 강정식, 임병준, 차봉준, 양수석, “원심압축기의 기술동향,” 항공우주산업기술동향 2월 1호, 64-69, 2004.
2. 홍성철, “터보 공기 압축기 기술동향,” 기술뉴스브리프 KISTI, 1-3, 2002.
3. 최진욱, 차수덕, 김용기, 이태화, “고속전철액슬기어박스현가계의 고유진동수 측정,” 한국철도학회 학술발표대회, 2001.
4. Brian J. Schwarz & Mark H. Richardson, "Experimental modal analysis," CSI Reliability Week, Orlando, FL, October 1999.