

모드해석을 통한 마운트 공진회피 설계

Design for Resonance Avoidance of Mount Through the Modal Analysis

이 종 명* · 유 현 탁* · 박 규 진** · 최 현 철** · 최 병 근†
Jong-Myeong Lee, Hyeon-Tak Yu, Gyu-Jin Park, Hyeon-Cheol Choi
and Byeong-Keun Choi

(Received April 30, 2015 ; Revised June 17, 2015 ; Accepted June 25, 2015)

Key Words : Mount(마운트), Resonance(공진), Natural Frequency(고유진동수), Mode Analysis(모드해석), Mode Participation(모드 기여도)

ABSTRACT

This paper provides how to solve the problems analytically and experimentally that occur for testing the water injection pump under development. First of all, water injection pump, based on shaft system dynamic analysis, is verified by measuring the behavior of the shaft system. After the water injection pump is measured, the structural resonances which can cause excessive noise, degradation the equipment life and malfunction are found. Therefore, by changing the structural design, the resonance should be avoided. Application of the design variables to the experimentally resonance avoidance is difficult. So analytically, with application of the design variables, the design will be changed with mode analysis using FEM.

1. 서 론

물 분사 펌프란 해양플랜트에서 심해 유정의 시추 작업 후 유정 내 높은 압력으로 인하여 원유를 1차 생산하고 이후 관내 압력이 낮아져 지상으로의 생산이 불가능할 때 고압의 해수를 주입하여 회수율을 높임으로써 원유의 생산량을 극대화 하는 장비이다. 현재 국내 조선사가 부유식 해양플랜트 건조를 사실상 독점하고 있지만, 물 분사 펌프는 해외 일부 선진업체가 독점하고 있어 전량 고가로 수입되고 있다. 이를 국산화 펌프로 대체한다면 국내 해양플랜트 산업의 경쟁력 강화, 수입 대체로 인한 경제적

과급 효과가 클 것으로 예상된다.

이 연구는 물 분사 펌프를 개발하고 있는 기업에서 제품의 시 운전 중 발생한 문제를 해결하기 위하여 해석 및 실험으로 접근하여 문제해결에 대한 방안을 제안하였다. 축계의 동특성해석을 근거로 설계된 축계의 거동에 대해서 측정을 통해 검증을 하였으며 측정 시 발생되었던 문제를 해석적으로 접근하여 설계변수를 제안하였다.

2. 연구 모델의 동특성 분석

연구 모델은 Fig. 1의 (a)와 같이 모터의 동력이 증속기를 거쳐 Fig. 1(b)의 축으로 전달되며 6000 rpm

† Corresponding Author ; Member, Department of Energy and Mechanical Engineering at Gyeongsang National University
E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr

* Department of Energy and Mechanical Engineering at Gyeongsang National University

** Research and Development 1 Team at Hyosung Goodspings Inc.

A part of this paper was presented at the KSNVE 2015 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Il Kwon Oh

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

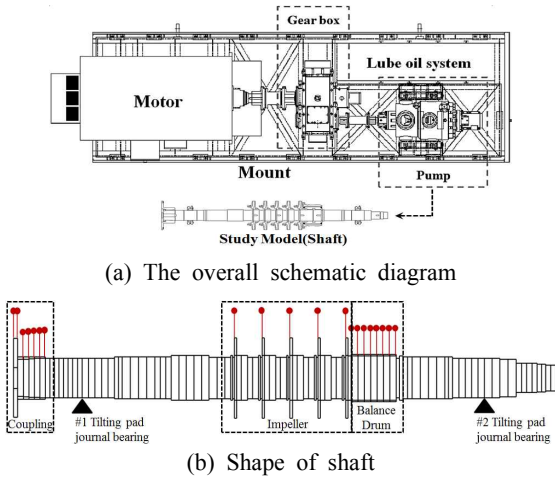


Fig. 1 Study model

(100 Hz)으로 구동된다. 펌프의 토출은 5개의 임펠러에 의하여 토출되며 각 임펠러에는 7개의 가이드 베인이 존재한다. 따라서 가진 성분은 운전속도(100 Hz)뿐만 아니라 임펠러 성분인 7X(700 Hz)또한 고려되어야 한다.

Fig. 2의 Campbell diagram⁽¹⁾은 가진 성분과 고유진동수와의 상관관계를 분석하여 공진발생 가능성⁽²⁾을 예측하는 도표이다. 가진성분 1X는 약 3250 rpm에서 1차 고유진동수를 통과하여 6000 rpm에 도달한다. 이 때 발생하는 위험속도는 고려하지 않아도 무방한 것으로 사료된다. 왜냐하면 6000 rpm까지의 동력전달 속도는 약 3초로써 위험속도에서 진동이 성장할 시간적 여유가 없기 때문이다. 그리고 이 연구모델의 운전속도인 6000 rpm에서 공진분리여유⁽³⁾(±20%)는 충분한 것으로 나타났다.

임펠러에 의한 가진성분 7X는 1X와 유사하게 3500 rpm에서 위험속도가 발생이 되지만 고려하지 않아도 무방하다고 사료된다. 하지만 5551 rpm에서의 위험속도는 공진분리여유가 충분치 못하므로 분석을 수행하였다.

5551 rpm에서의 위험속도는 분리여유가 약 8%이며 Table 1의 API684규격에 의거한 분리여유기준으로 11.56% 부족한 것으로 나타났고 Q-factor 역시 3.55보다 큰 3.932로 허용 기준치보다 높은 것으로 나타났으므로 공진에 대한 회피가 요구되는 상황이다. 따라서 설계변경이 가장 용이한 베어링 특성을 변경하였다. 동일한 capacity를 가지는 베어링의

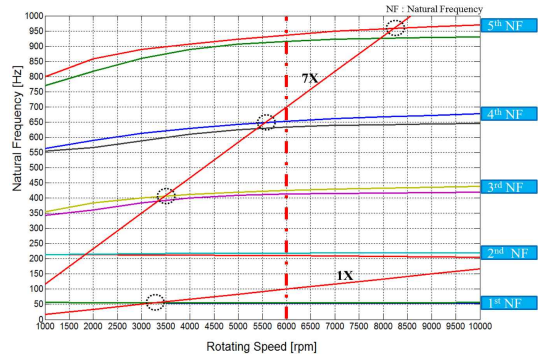


Fig. 2 Campbell diagram

Table 1 API 684 separation margin standard

Q-factor(QF)	Separation margin
QF<2.5	Separation margin do not required
2.5≤QF≤3.55	Requires the separation of at least 5%
3.55<QF	Driving below the critical speed minimum(%) = {126-6/(QF-3)}-100
	Driving more than the critical speed maximum(%) = 100- {84+6/(QF-3)}

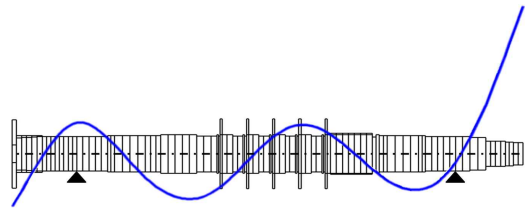


Fig. 3 Mode shape of 4th natural frequency

강성 오더를 10⁸ N/m에서 10⁷ N/m로 낮추어 공진분리여유를 증가시키고 감쇠의 오더를 10⁵ N.s/m에서 10⁶ N.s/m로 변경하여 Q-factor를 증가시키면 분리여유를 20.5%를 가지는 안정적인 축계가 설계됨을 확인하였다. 하지만 베어링 설계의 특성상 강성을 낮추고 감쇠를 올리는 방법은 현실적으로 불가능하며 특성변경을 할 경우 베어링의 사이즈가 반드시 변경되어야 한다. 따라서 베어링 하우징 및 관련부품 모두 베어링에 맞게 설계변경이 되어야 하는 문제점이 있다.

설계변경 전 최종적으로 공진발생가능성에 대해 판단하기 위하여 모드형상을 확인하였다. 모드형상

은 유체가 토출되는 임펠러 부분이 아닌 축의 우측인 thrust 부분의 모드 기여도가 큰 것으로 나타났다. 따라서 공진에 대한 정확한 판단을 위하여 측정이 불가피한 상황으로 판단된다.

3. 측 정

측정에 사용된 센서는 displacement sensor를 사용하였다. 왜냐하면 이 연구모델에 사용된 베어링은 저널베어링을 사용하기 때문이다. 일반적으로 저널베어링이 설치되어 있는 축계는 편심을 이루고 있으며 회전 시 유막이 형성되어 유막력에 의한 쉐기 효과로 인하여 축이 정렬을 이루게 된다. 이러한 과정에서 편심에 의한 틈새에 빠르게 오일이 공급되어 저널 베어링 틈새 내에서 오일에 의한 진동이 발생되기 때문에 베어링 하우징에서의 신호취득은 신뢰성이 떨어진다. 따라서 Fig. 4와 같이 coupling side⁽¹⁾과 thrust side⁽²⁾에 각각 자중 방향을 기준으로 +45°의 x, -45°의 y방향에 센서를 설치하였다. 데이터는 수집은 rpm에 따른 주파수의 정보를 보기위한 FFT spectrum과 각 rpm의 overall value를 수집한 bode plot 그리고 고유진동수를 구하기 위한 impact hammering test를 수행하였다. 측정은 공장의 전력 여건을 고려하여 구간(2980 rpm, 3973 rpm, 4470 rpm, 4967 rpm, 5463 rpm, 5960 rpm, 6000 rpm)을 선정하여 각각 취득하여 분석하였다.

Fig. 5의 (a)와 같이 5500 rpm에서 7X의 진폭이 발생함을 확인하였으며 Fig. 5의 (b)에서는 7X의 진폭이 급격히 하락하며 1X의 진폭이 다시 성장하는 것을 확인했다. Fig. 6의 bode plot 또한 5500 rpm 부근에서 7X에 의해 발생한 진폭은 약 5700 rpm에서 급격히 하락하며 1X에 의해 다시 급진폭이 상승한 것을 볼 수 있다. 따라서 7X에 의한 공진 발생 가능성은 배제하여도 무방할 것으로 사료되며 1X 진폭상승 원인을 분석하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

따라서 1X의 진폭발생 원인을 찾기 위해 Fig. 7과 같이 casing의 impact hammering test를 수행하였으며 1차 고유진동수가 107 Hz에 존재함을 알 수 있었다. 그리고 test signal의 신뢰성을 확인하기 위하여 1차 고유진동수가 발생한 위치의 위상이 out of phase됨을 확인하고 가진의 응답을 보기위한 coherence를

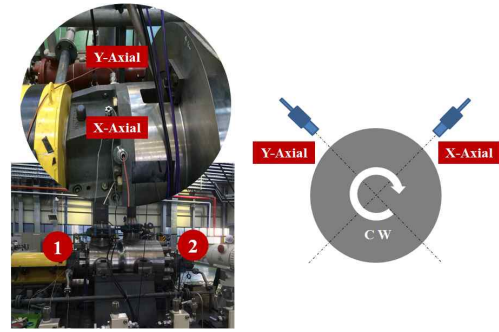
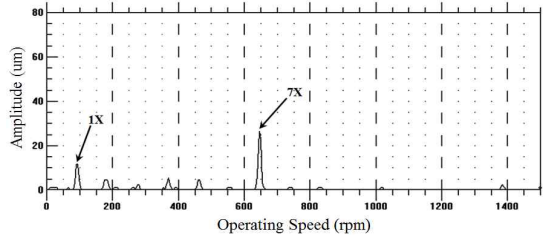
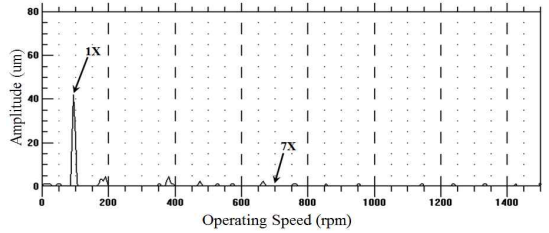


Fig. 4 Measurement point of sensor



(a) FFT Spectrum of 5500 rpm



(b) FFT Spectrum of 6000 rpm

Fig. 5 Cut-off frequency band

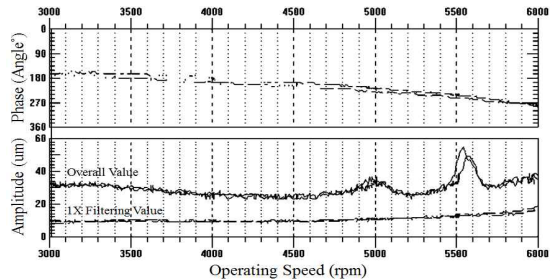


Fig. 6 Bode plot

확인하였다. 따라서 운전성분 1X에 의한 casing 공진으로 판단되며 설계변경은 불가피 한 것으로 사료된다.

공진회피를 하기 위해 실험적으로 설계변수 적용의



Fig. 7 Impact hammering test

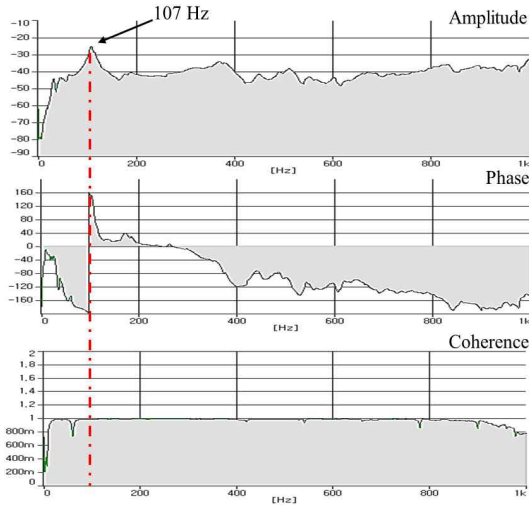


Fig. 8 First natural frequency

어려움이 있기 때문에 해석적으로 설계변수를 적용하여 방안을 제안하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 왜냐하면 아무런 근거 없이 고유치 변화를 위하여 질량이나 강성을 변화시킬 경우 다른 주파수에 의한 영향 또한 고려해야 되기 때문이다.

4. 공진회피

4.1 공진회피를 위한 접근 방법

구조공진을 회피하기 위하여 축이나 베어링의 설계변경이 이루어지는 것 보다 마운트를 설계변경하여 구조공진을 회피하는 것이 타당할 것으로 사료된다. 왜냐하면 마운트를 설계변경 하는 것이 제작성이나 비용측면에서 효율적이기 때문이다. 따라서 3D 해석 프로그램인 Ansys Workbench⁽⁴⁾를 사용하여 펌프 부분에 영향을 주는 모드를 보기 위하여

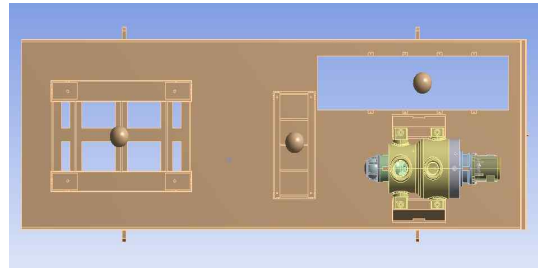


Fig. 9 3D model of measurement model

Table 2 Mode shape of measurement model

Hz	Top view	Rear view
90.4		
108.2		
127.3		

modal analysis를 수행하였다. 해석은 전체 part를 모두 고려하여 수행하였으며 Fig. 9와 같이 motor, gear box, lube oil 부분은 형상이 복잡하므로 무게 중심점에 집중질량을 추가하여 해석을 수행하였다.

해석 수행결과 casing의 impact hammering test 결과인 107 Hz와 유사하게 108.2 Hz에 펌프가 거동하는 모드 형상이 conical mode로 존재함을 확인하였다. Table 2의 mode shape을 확인하였을 때 회피가 요구되는 주파수 108.2 Hz이외에 127.3 Hz에도 펌프가 거동하는 모드가 있음을 확인하였다. 따라서 강성을 변경⁽⁵⁾하여 고유치 회피가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 왜냐하면 modal analysis 결과 100 Hz 이하의 주파수에서는 펌프가 거동하는 모드는 나타나지 않았고 127.3 Hz에서 펌프가 영향을 받는 모드가 나타남을 확인하였으므로 강성을 낮추어 회피하게 되면 127.3 Hz의 모드가 1X와 근접해지므로 강성을 높여 회피하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

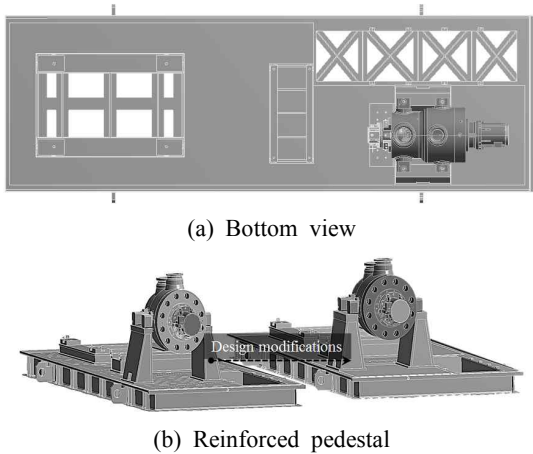


Fig. 10 Improved mount

Table 3 Mode shape of reinforced mount

Hz	Top view	Rear view
90.8		
135.2		

펌프부에 conical mode가 발생하는 원인은지지 강성이 약해서 발생된 것으로 사료된다. 따라서 펌프를 지지하고 있는 pedestal의 지지강성과 base plate의 보강이 이루어 져야 효과적인 강성상승 효과를 볼 수 있을 것으로 사료된다.

4.2 공진회피 설계

공진회피를 하기 위하여 Fig. 10과 같이 pedestal 부분의 두께를 두껍게 보강 하였으며 lube oil system부분에 X형태의 보강재를 부착하여 해석을 수행 하였다.

해석 결과 Table 3과 같이 강성 상승효과로 인해 위험주파수 108.2 Hz의 모드가 135.2 Hz로 변경되어 해석적으로 공진회피 설계가 되었음을 확인 할 수 있었다. 그 밖의 강성의 영향을 받은 모드는 고 유치가 증가 하였으며 강성의 영향을 받지 않은 모

드는 Table 3의 90.8 Hz와 같이 변화가 없음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

축계 동특성해석 결과 임펠러의 7X 성분에서 공진 발생 가능성이 있음을 판단하였고 공진 발생 가능성의 정확한 판단을 위하여 측정을 수행하였다. 축계의 측정 결과 7X 성분에 의한 공진 발생 가능성은 배제하여도 무방할 것으로 사료되었지만 1X성분의 진폭이 지속적으로 성장하는 것이 확인되었다. 1X의 진폭상승원인을 분석하기 위해 casing의 impact hammering test가 수행되었으며 1차 고유진동수가 conical mode로 107 Hz에 존재함을 확인하였다. 따라서 운전성분 1X에 의한 casing 공진으로 판단되며 설계변경은 불가피 한 것으로 사료된다.

공진회피를 하기위해 실험적으로 설계변수 적용의 어려움이 있기 때문에 해석적으로 설계변수를 적용하여 modal analysis를 수행하였다. 측정 모델의 해석결과 casing의 impact hammering test 결과와 유사하게 108.2 Hz에 모드 형상이 존재함을 알 수 있었다. 100 Hz이하의 주파수에서는 펌프가 거동하는 모드는 나타나지 않았고 127.3 Hz에서 펌프가 영향을 받는 모드가 나타남을 확인하였으므로 강성을 낮추어 회피하게 되면 127.3 Hz의 모드가 1X와 근접해지므로 강성을 높여 회피 하는 것이 타당 할 것으로 사료된다. 따라서 강성을 높이기 위하여 취약부분인 pedestal과 lube oil system 부분의 보강을 수행하였으며 강성 상승효과로 인해 해석적으로 공진회피 설계가 이루어 졌다. 그리고 추후에 시제품에 해석적으로 제안된 설계변경이 적용이 되었을 때 해석에 대한 신뢰성 확인과 ISO 7919⁽⁶⁾가 제시한 허용기준의 만족 여부를 확인할 예정이다.

결론적으로 축계가 공진영역에 속해있고 Q-factor가 기준치 보다 높으며 실질적으로 가진을 하는 부분의 모드 기여도가 높아야 공진이 발생할 수 있는 조건임을 확인하였다.

후 기

이 연구는 “산업통상자원부”, “한국산업기술진흥원”, “동남지역사업평가원”의 “광역경제권 선도산업 육성사

업(R0001974)”과 한국가스기술공사(KOGAS-Tech) 및 경상대학교 산학협력단의 지원으로 수행된 연구결과입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

(1) Son, C.-Y., Lee, K.-S. and Ryu, Y.-H., 2008, A Study on the Vibration Characteristics of Critical Speed for Rotor Shaft, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18. No. 9, pp. 961~971.

(2) Yang, B. S., 2003, Vibration of Rotating Machinery, Interscience, Seoul.

(3) API Standard 684, 2005, Rotor Dynamic Tutorials : Lateral Critical Speeds Unbalance Response Stability Train Torsional and Rotor Balancing.

(4) Lee, H. H., 2010, Finite Element Simulations with Ansys Workbench v12 SDC Publication, PA.

(5) Park, Y. H., Kim, J. H., Lee J. H., Hwang, D. J. and Kwun, H., 2012, Resonance Avoidance Design of Cargo Oil Pump & Ballast Water Pump, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 881~882.

(6) ISO 7919-1:1996(en), Mechanical Vibration of Non-reciprocating Machines — Measurements on Rotating Shafts and Evaluation Criteria — Part 1: General Guidelines.



Jong-Myeong Lee is unified master's and doctor's course degrees at the Department of Energy Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea. Areas of research is dynamic analysis of the shaft through FEM analysis and measurement for diagnosis.



Hyeon-Tak Yu is unified master's and doctor's course degrees at the Department of Energy Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea. Areas of research is dynamic analysis of the shaft through FEM analysis and measurement for diagnosis.



Gyu-Jin Park is a head of department at the Research and Development 1 Team at Hyosung Goodsprings Inc. in Korea. He received his bachelor degree in arts in Mechanical Engineering from Yeungnam University.



Hyeon-Cheol Choi is a Senior Researcher at the Research and Development 1 Team at Hyosung Goodsprings Inc. in Korea. He received his master's degree in Mechanical Engineering from Suncheon National University, Korea, in 2007.



Byeong-Keun Choi is an Associate Professor at the Department of Energy Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea. He received his Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Pukyong National University, Korea, in 1999. Dr. Choi worked at Arizona State University as an Academic Professional from 1999 to 2002. Dr. Choi's research interests include vibration analysis and optimum design of rotating machinery, machine diagnosis and prognosis and acoustic emission. He is listed in Who's Who in the World, among others.