

하이브리드 타입 진공펌프의 동특성 및 최적화

Optimization and dynamic characteristics of the hybrid type vacuum pump

김용휘[‡] · 이종명* · 안병현* · 하정민* · 최병근[†]

Yong-Hwi Kim, Jong-Myeong Lee, Byeong-Hyun Ahn, Jeong-Min Ha and Byeong-Keun Choi

Key Words : Vacuum(진공), Natural frequency(고유진동수), Rotor dynamics(회전체동역학)

ABSTRACT

The purpose of this study is the stability evaluation of a vacuum pump through modal test and rotor dynamics. Eigenvalue was solved by the finite-element method(FEM) using 2D and 3D models, then the modal test result was compared with the FEM result.

According to the comparison, the analysis result using the 2D was more accurate than the 3D model. Therefore, rotor dynamics was performed by the 2D model. Campbell diagram and root-locus maps, which were calculated by complex-eigenvalue analysis, were used to evaluate the stability of the rotors of the vacuum pump. And displacement solved by unbalance response analysis was compared with the minimum clearance between two rotors of the vacuum pump. Thus, the vacuum pump is assumed operated under steady state through the evaluation of the rotor dynamics.

1. 서 론

진공기술은 반도체소자, 디스플레이, 우주항공 분야 등의 청정상태의 공정을 요구하는 첨단사업 분야와 정보, 나노, 바이오, 환경 등 많은 사업 분야에서 활용되어지고 있다.

진공은 대기압-1Torr 범위의 저진공(Rough Vacuum), 1Torr-10⁻³Torr 범위의 중진공(Fine Vacuum), 10⁻³Torr-10⁻⁷Torr 범위의 고진공(High Vacuum), 10⁻⁷Torr이하 범위의 초고진동(Ultrahigh Vacuum)으로 분류된다.

본 연구에서 다루는 펌프(하이브리드타입)는 주로 반도체 및 디스플레이 제조장치의 공정 챔버의 진공화와 공정 챔버에서 발생된 기체 상태의 물질 및 부산물을 외부로 배출시키기 위한 건식중진공펌프이다.

국내 한 기업에서 개발하였으며 Roots, Lobe, Screw의 세 가지 타입이 하나의 Rotor에 존재하는 형태이다.

일반적으로 회전체는 설계과정에서 다양한 수학적 해석이 필요하며, 동특성 형가가 이루어져야한다. 따라서 수학적 동특성을 통하여 위험속도, 안전성평가, 불평형 응답 등을 확인한다.

본 연구에서는 개발된 하이브리드타입 진공펌프의 고유치 및 동특성 해석을 통하여 문제점을 발견하고 최적설계를 하고자 한다.

† 교신저자; 정회원, 경상대학교 에너지기계공학과
E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr
Tel :055)772-9110 , Fax :055)772-9119

‡ 공동저자2의 소속

* 정회원

2. 해석 모델 및 재료 물성치

본 연구에서 사용된 진공펌프는 Roots, Lobe, Screw type이 하나의 로터에 존재하는 복합식 진공 펌프(이하 하이브리드 타입 진공펌프)로 6000rpm의 운전 영역을 가지고 있다.

Fig. 1 (a)과 같이 모터와 두 개의 로터, 각기 다른 두 가지 베어링, 기어로 구성되어 있으며 (b)와 같은 케이싱으로 되어있다. 구동방법은 모터의 구동으로 구동측 Rotor의 기어를 통하여 피구동측 Rotor의 기어와 동기화 되어 운전되며, 1회전시 Roots:4회, Lobe:2회, Screw:2회 토출된다. 각 구성요소의 재료 물성치는 Table 1과 같다.

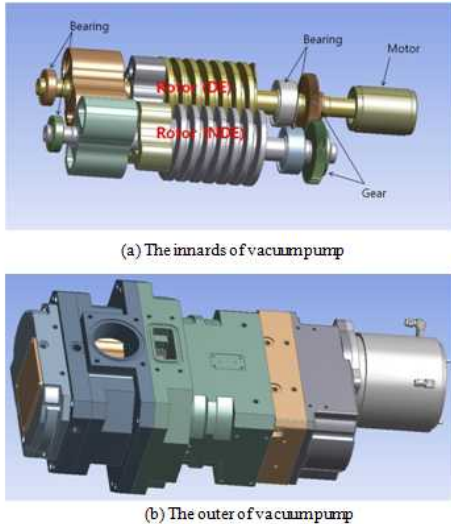


Fig. 1 Rotor of vacuum pump

Table 1 Material properties

Rotor (Ductile Iron ASTM)	
Density(g/cm^3)	7.18
Elastic Module(GPa)	172
Poisson's Ratio	0.275
Tensile Yield Strength(MPa)	600
Housing (FCD450)	
Density(g/cm^3)	7.85
Elastic Module(GPa)	190-210
Poisson's Ratio	0.27-0.30
Tensile Yield Strength(MPa)	448

3. Modal Test 및 고유진동수 해석

3.1 Modal Test 방법

아래의 Fig. 2에서와 같이 구동측(Case 1-1, 1-2)의 경우, 3개의 가속도 센서()를 이용하여 측정하였고, z방향(Case 1-1)과 y방향(Case 1-2)으로 Impact Hammer를 이용하여 타격()하였으며, 이는 로터부의 비대칭성을 고려하여 두 방향(z, y방향)에 대하여 주파응답함수(Frequency Response Function), 위상(Phase), 상관함수(Coherence)를 구하였다.

또한 피구동측(Case 2-1, 2-2)의 경우, 2개의 가속도 센서를 이용하여 측정하였고, z방향(case 2-1)과 y방향(Case 2-2)에 대하여 구하였다.

Fig. 3은 위의 방법으로 진행된 Modal test 과정을 보여준다.

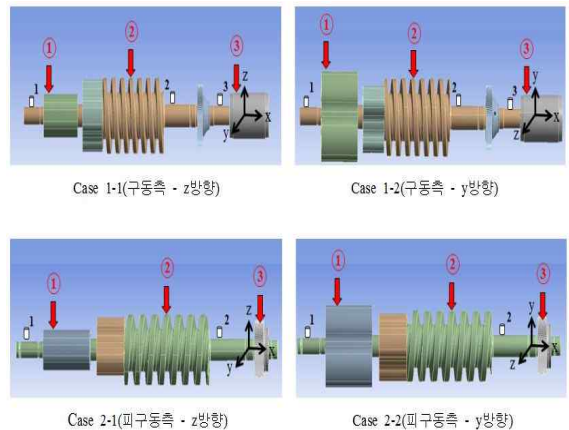


Fig. 2 가속도센서 및 타격 위치



Fig. 3 Modal Test 과정

3.2 Modal Test 결과

구동측 과 피구동측 Roots에 대한 진동특성을 Modal test를 통하여 분석한 결과, Roots의 비대칭 형상에 의해서 방향(z, y방향)에 따라 강성의 변화로 인해 서로 다른 고유진동수를 가지는 것을 확인하였으며, 4가지의 Case에 대한 실험결과는 Table 2에 정리하였다. 구동측(Case1-1, 1-2)의 1차 고유진동수는 각 방향에 대하여 298.5Hz와 294.5Hz에 존재하였고, 피구동측(Case2-1, 2-2)은 550.5Hz와 498.0Hz에 존재하였다.

Fig. 4은 Case1-1과 Case2-2의 위상과 주파수응답함수를 나타낸다.

Table 2 Modal test 결과

Mode	Natural Frequency [Hz]			
	Case1-1	Case1-2	Case2-1	Case2-2
1	298.5	294.5	550.5	498.0

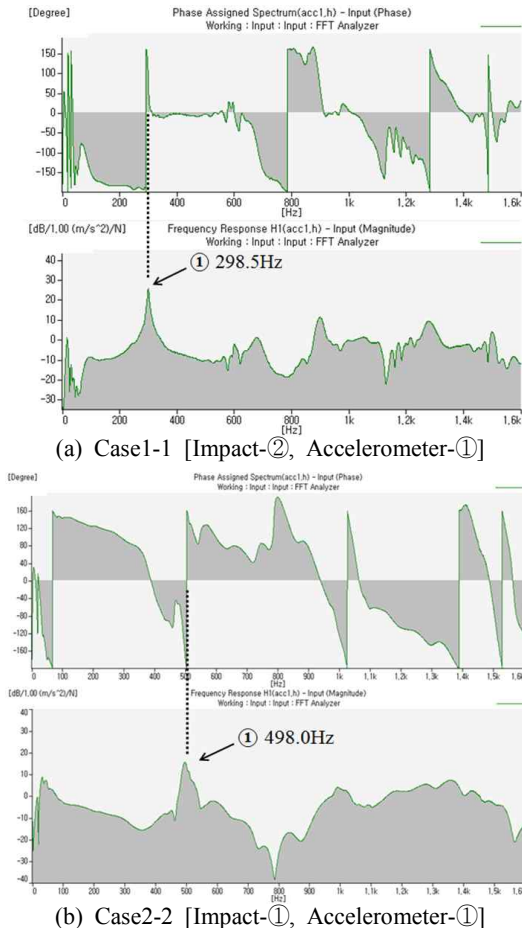


Fig. 4 위상 및 주파수응답함수

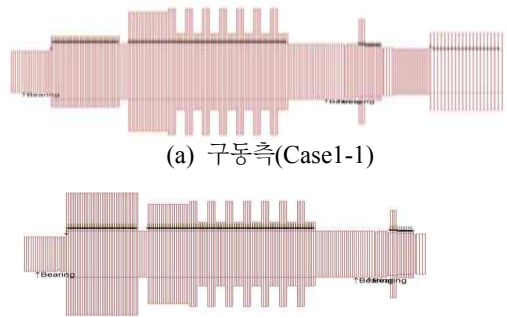
①은 1차 고유진동수를 나타내며, 0Hz에 인접한 Peak는 실험조건에 의해 발생하는 강체모드(Rigid mode)이기 때문에 고려하지 않았다.

3.2 Modal Test 와 수치해석 결과비교

실험(Modal test)을 통하여 구한 고유치결과와 2D모형을 이용한 해석 결과를 비교하였다. 2D모형 해석프로그램은 논문(루츠타입 진공펌프 동특성의 해석적 평가. 한국소음진동공학회논문집. v21, no.12, pp.1112-1119)을 통하여 신뢰성을 검증받은 것이다.

아래의 Fig. 5에서와 같이 2D해석의 경우, 구동측 258개, 피구동측 186개의 요소(Element)로 나누어 집중질량의 디스크 형태로 가정하여 질량 및 관성모멘트를 분할 입력하였다. 2D 해석프로그램의 수치해석을 통하여 고유진동수의 모드(Mode)형상 또한 확인하였으며, 이는 실험을 통하여 확인 할 수 없는 모드가 해석으로 나타남으로써 숨겨진 모드에 대한 정보를 구할 수 있었다.

Table 3과 같이 수치해석을 통하여 산출된 고유진동수는 실제 실험 결과와 10% 이내의 오차를 가지므로 결과에 대한 신뢰성을 확보하였다.



(b) 피구동측(Case2-2)

Fig. 5 2D Model

Table 3 Comparison between modal test and numerical analysis

Case	Modal Test(Hz)	2D analysis(Hz)	오차율(%)
1-1	298.5	273.6	8.35
2-2	498.0	525.7	5.27

4. 2D 해석 결과

4.1 Campbell Diagram

Fig. 6은 구동축 로터의 Campbell Diagram을 나타낸 것이다. 모델의 운전속도는 6000rpm이며 1000rpm에서 10000rpm까지 변화되는 베어링 강성을 각 rpm마다 적용하여 해석을 수행하였다. Fig. 6에서 1X 성분은 1차 고유진동수와 교차하지 않는 것을 볼 수 있지만 2X 성분이 운전영역의 14%에 존재하는 것을 볼 수 있다. Q-factor 확인 결과 최소 공진분리여유 15.9%를 요구하며 이는 공진 발생 가능성이 있음을 나타낸다.

하지만 기어부에 유입되는 오일의 감쇠를 고려할 경우 분리여유는 변경될 수 있으며, 실제 운전 중에 2X성분이 존재하더라도 가진 모드와 고유진동수 모드의 상호관계에 의해 공진은 발생하지 않을 수도 있으므로 2X에 의한 공진 발생 시 차후에 고려할 문제이다.

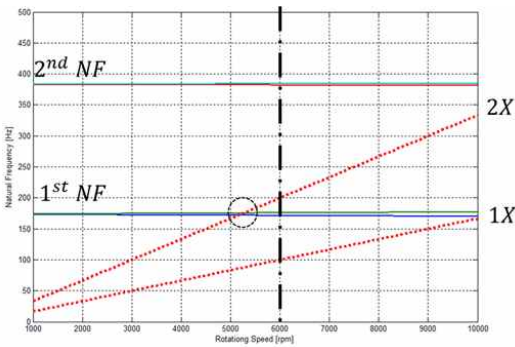


Fig. 6 구동축 로터의 Campbell Diagram

4.2 불평형 응답

불평형 응답은 ISO 1940의 G6.3등급에 의거한 허용 불평형량을 적용하였으며 구동축 로터와 피구동축 로터에 각각 238.8mm·g, 202.3mm·g를 적용하였다. 두 로터의 간극은 0.3mm이고 Fig. 7의 결과를 보면 구동축 로터의 변형량은 0.00861mm, 피구동축 로터의 변형량은 0.0021mm로 간극보다 매우 작은값이 나타났으며 이는 운전시 불평형에 의한 두로터간의 간섭은 일어나지 않을것으로 사료된다.

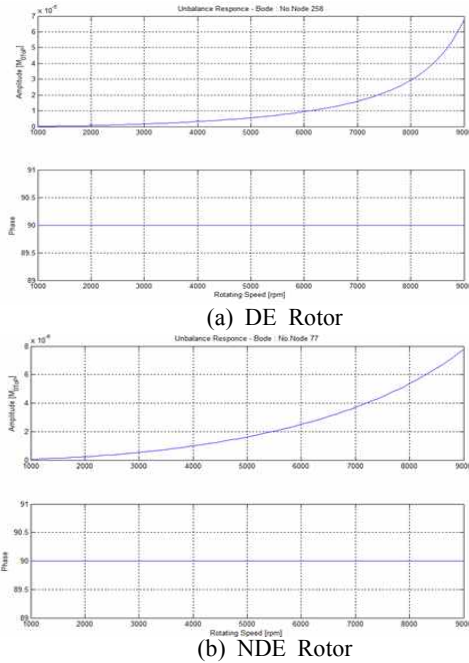


Fig. 7 Unbalance response

5. 결론

실제 모델의 Modal Test결과와 2D Modal 해석 결과가 10%이내에 존재하므로 2D 모델의 신뢰성을 확보하였으며 수치해석 결과 2X 성분이 1차 고유진동수와와의 공진분리여유가 부족한 것으로 나타났다 불평형 해석 결과 두 로터의 간극에 비하여 매우 작은 값을 가짐으로 불평형에 의한 두 로터간의 간섭은 일어나지 않을 것으로 사료된다.

위의 해석 결과 값을 바탕으로 2X 성분의 공진분리여유를 확보하고자 최적설계를 수행하였으며 최적화에 사용된 프로그램은 Ansys workbench 프로그램을 사용하였다.

후 기

본 연구는 연구용역(HD-T-PUMP 및 MK Vacuum booster) 및 해양산업연구소의 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Lee, S. Y., Kim, B. O., Lee, A. S. and No, M. G., 2010, "Development of Dry Vacuum Pump for Semiconductor/Display Process" Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 265~274.

(2) Yang, B. S., 2003, Vibration of rotating machinery, Interscience, Seoul.

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

(4) Lee, A. S., No, M. G., and Kim, B. O., 2007, "A Rotor dynamics Analysis of High Efficiency and Hybrid Type Vacuum Pump" Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 967~975.

(5) Song, J. D., Kim, Y. C., Yang, B. S., and Lee, S. J., 2000, "Building Database for stiffness of Rolling Element Bearing", Korea Fluid Machinery Association Annual, pp. 387~391.

(6) Chaari, F., Baccar, W., Abbes, M. S., and Haddar, M., 2008, "Effect of spalling or tooth breakage on gearmesh stiffness and dynamic response of a one-stage spur gear transmission" European Journal of Mechanics A/Solids, Vol.27 pp. 691~705.