

고압 다단펌프 축계 진동 특성 고찰

Rotordynamic Characteristics of High Pressure Multistage Pump

송애희† · 송진대* · 임우섭* · 양보석**
Song Ae Hee, Song Jin Dae, Lim Woo Seop and Yang Bo Suk

Key Words : Rotordynamic, Vibration(진동), Pump(펌프)

ABSTRACT

This paper presents numerical analysis result of rotor-bearing system of a multi-stage high pressure pump. Especially resonance possibility, stability and damping factor are estimated for a selected commercial multi-stage high pressure pump. The result shows that it is not easy to avoid resonance of rotor-bearing system against main excitation forces which are residual unbalance force and pressure pulsation. This makes damping effect be more important.

1. 서 론

고압다단펌프는 흔히 보일러 급수펌프로 많이 사용된다. 이 경우 통상 150 ℃ 이상의 물이 작동유체가 되며, 펌프에서 70 bar 이상의 승압이 이루어진다. 누수가 발생할 경우 순간적으로 기화되어 치명적인 사고로 이어질 수 있다. 따라서 고압펌프의 경우 높은 신뢰성이 요구된다. 이러한 배경으로 축계의 정적 및 동적 상태에서의 위험요소들이 평가되어야 한다.

본 논문은 고압다단펌프 축계의 정적 상태 및 동적 상태를 수치해석하고, 해석결과로부터 정적상태의 위험요소와 동적상태의 위험요소를 평가한다. 대상기는 현재 상업적으로 판매되는 고압다단펌프를 그 대상으로 한다.

2. 해석 모델

2.1 로터 모델링

해석 대상 펌프의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 본 펌프의 유량과 양정은 각각 364m³/h와 750m이며, 단수는 4단, 정격속도는 2970rpm이다. 축계 해석을 위한 유한요소(Finite Element) 모델은 축(shaft), 회전질량부(impeller, sleeve, coupling), 지지부로 구성되어 있다. 축은 Timoshenko beam 모델로 절점당 4 자유도를 갖는 beam 요소로 모델링하였고, 회전질량부는 집중질량(Lumped mass)과 관성모멘트(inertia moment)를 고려한 rigid disk로 모델링 하였으며, 지지부인 베어링과 시일은 절점에 집중된 강성 및 감쇠로 모델링하였다.

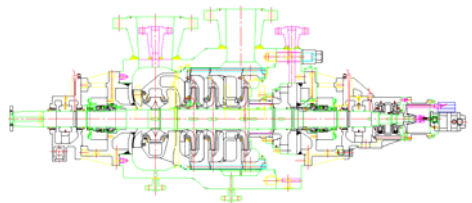


Fig. 1 Sectional drawing of the 4 stage high pressure pump

† 교신저자; 정회원, 효성굿스프링스(주)

E-mail : ahsong@hyosung.com

Tel : (055)279-7819, Fax : (055)279-7947

* 효성굿스프링스(주)

** 부경대학교 기계공학과

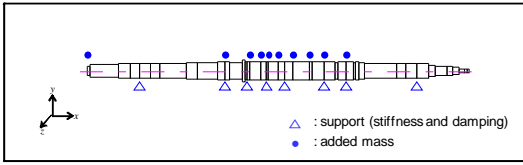
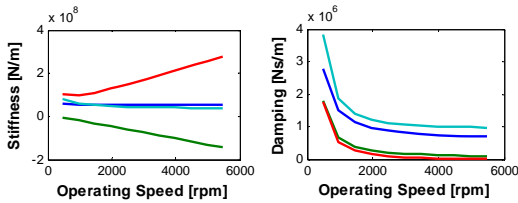


Fig. 2 FE model of pump rotor system

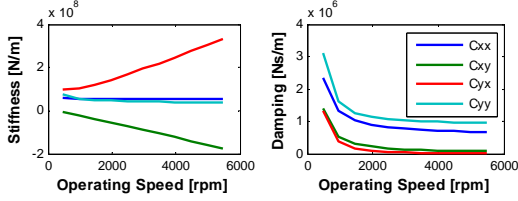
2.2 베어링 모델링

이 펌프는 양단이 plan journal bearing으로 지지되어 있다. 베어링 틈새의 유막에 대해 Navier-Stokes equation에 섭동법을 적용, 정상 상태에서 틈새 내의 압력분포를 산출 후 원주 방향 및 축 방향으로 적분을 통해 유체력을 산출하고 이로부터 동특성 계수를 유도하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각 구동측(Drive Side)과 피구동측(Non Drive Side) Journal Bearing의 운전속도에 따른 동특성 계수를 나타낸다.



(a) Stiffness Coefficients (b) Damping Coefficients

Fig. 3 Dynamic Coefficient of DE Side Bearing



(a) Stiffness Coefficients (b) Damping Coefficients

Fig. 4 Dynamic Coefficient of NDE Side Bearing

2.3 시일 모델링

다단펌프에는 각 회전차 사이에 Interstage Ring, 케이싱과 회전차 사이에 Impeller Ring, 펌프의 Thrust를 잡기 위한 Balance Drum과 Balance Disk가 사용된다. 시일 또한 베어링과 유사한 과정을 통해 동특성 계수가 산출되었으며, 이를 위한 시일 데이터는 Table 1에 제시하였다.

Fig.5 는 시일의 동특성 중 일부를 제시하였다. 베어링은 $1e8$ 의 차원을 갖는 것에 비해 시일은 $1e5 \sim 1e6$ 정도의 차원을 갖는다.

Table 1 Seal Parameter

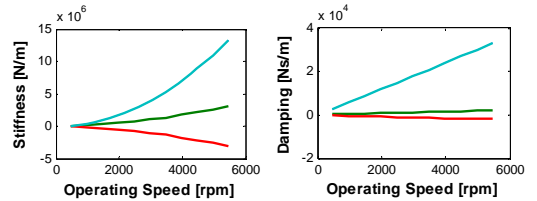
Item	L/D	C/D
Interstage Ring	0.3333	0.0020
Impeller Ring	0.1155	0.0014
Balance Drum	0.7846	0.0010
Balance Disk	0.1455	0.0011

Fluid properties (at 42°C)

Density : 1029.7 kg/m³

Viscosity : 4.23 cP

L/D : Length/Diameter, C/D : Clearance/Diameter



(a) Stiffness Coefficients (b) Damping Coefficients
of interstage ring of interstage ring

Fig. 5 Dynamic coefficient of seals

3. 정적 해석 (Static Analysis)

3.1 정적 처짐 해석 (Static Deflection)

다단 펌프의 경우 긴 축에 여러개의 회전차 및 슬리브가 조립되어 처짐량이 비교적 크다. 따라서 이러한 펌프를 설계할 때에는 처짐량이 시일의 틈새보다 크지 않도록 하기 위해 처짐량을 평가하는 것이 필수적이다.

Fig. 6은 펌프 축의 정적 처짐량을 나타낸다. 최대 처짐은 축의 중심에서 발생하고 있으며, 이 양은 틈새부의 50% 수준으로 정적처짐이 직접적으로 마찰 등의 위험을 초래할 가능성은 없다.

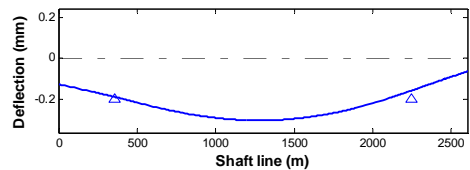


Fig. 6 Shaft static deflection

3.2 굽힘 및 전단 응력 해석 (Shear and bending Stress)

축의 건정성을 평가하기 위해 축에 작용하는 굽힘 및 전단 응력을 평가한다. Fig.7에 그 결과를 제시하였다. 해석결과 정적상태의 전단응력과 굽힘모멘트는 매우 낮은 수준을 유지하고 있다.

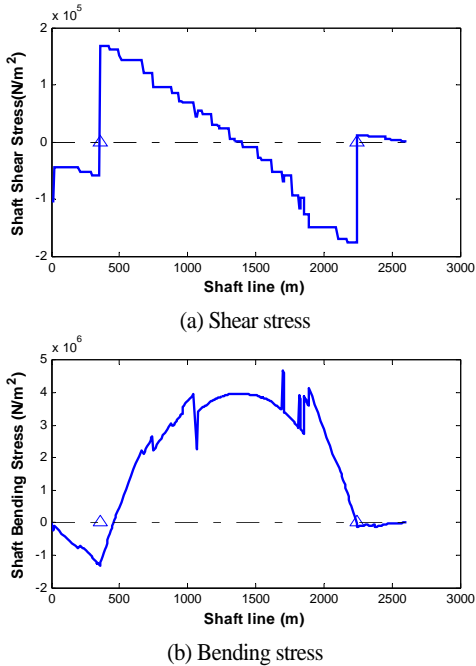


Fig. 7 Shear and bending stress

4. 동적 해석 (Dynamic Analysis)

4.1 고유치 해석

펌프의 고유치 해석은 유체에 의한 효과를 무시하고 무한 강성을 가지는 베어링에 의해서만 지지된다고 가정하고 해석하는 Dry 조건과 운전 때 따른 시일부에 의한 강성 및 감쇠와 베어링의 지지 강성 및 감쇠를 모두 고려하여 해석하는 Wet 조건으로 나눌 수 있다.

대상 펌프 축계의 Dry 및 Wet 고유진동수에 Table 2에 정리하였으며, Wet 고유진동수에 대한 각 모드 형상을 Fig. 8에 나타내었다.

일반적으로 펌프 축계의 고유진동수는 Wet Run이 Dry Run에 비해 낮으며, 이는 시일의 강성과 감쇠에 의한 효과이다.

Table 2 Natural frequency of pump rotor system

Order		Natural Frequency (cpm)	
		Dry	Wet
1st	Backward	1817	1191
	Forward	1822	1437
2nd	Backward	2920	6485
	Forward	2953	6687
3rd	Backward	5378	10717
	Forward	5513	10883
4th	Backward	10652	24897
	Forward	10833	25606

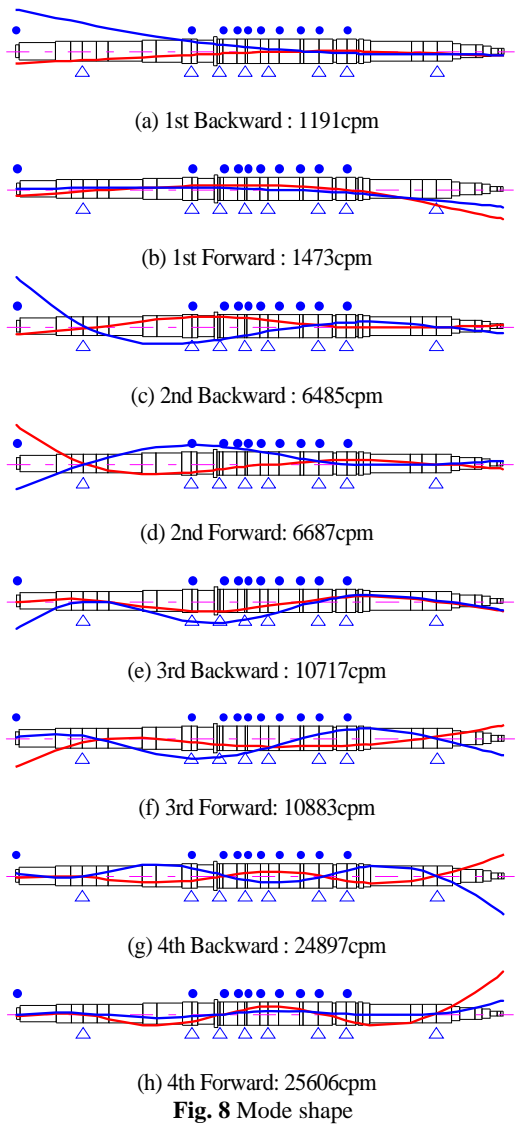


Fig. 8 Mode shape

4.2 캠벨 선도(Campbell diagram)

축계 공진 가능성을 평가하기 위해 대상 펌프의 주요 가진력을 정리하면,

- Un(1X): 운전속도에 대응하는 주파수(1X)를 가지는 회전불평형력.
- VPF(5X): 5배의 갯을 갖는 1단 회전차에서 발생하는 운전속도의 5배 주파수(5X)를 가지는 압력맥동
- VPF(7X): 7배의 갯이 있는 시리즈 회전차에서 발생하는 7X 주파수를 가지는 압력맥동

등이다.

위 주요가진력을 반영하여 Campbell diagram 을 평가하였고 Fig. 9에 제시하였다. Un(1X), VFP(5X) 및 VFP(7X) 등에 대한 가진성분과 축계 고유진동수가 모두 20% 이상의 분리여유를 가짐을 알 수 있다. 따라서 상기 주요가진력들에 의한 축계공진 가능성은 없는 것으로 평가된다.

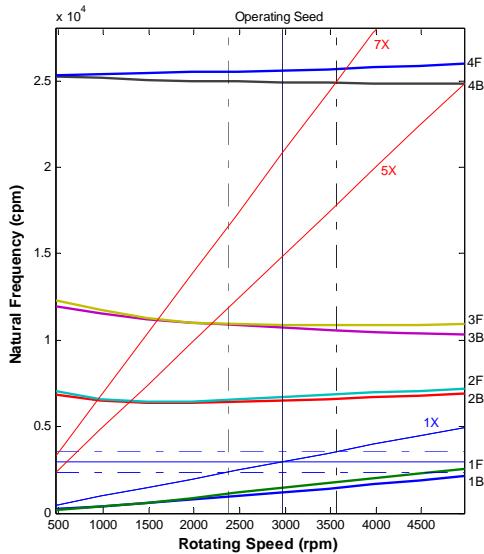


Fig. 9 Campbell Diagram

4.3 Damping factor

분리여유(separation margin)에 대한 각 고유치에 대한 damping factor를 Fig. 10에 나타내었으며, ISO 13709에서 제시하고 있는 최소 권장치를 함께 표시하였다. 대상 펌프의 모든 모드에 대한 damping factor는 ISO 13709의 권장치 이상을 만족한다.

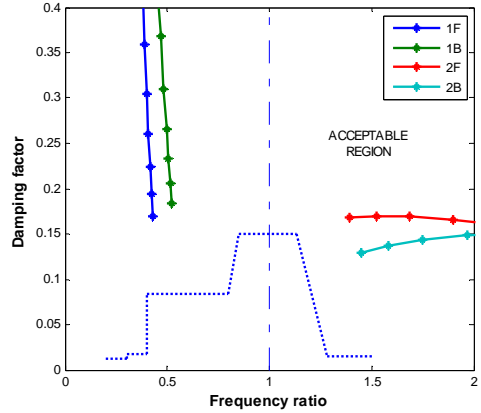


Fig. 10 Damping factor versus frequency ratio

4.3 안정성 평가

공진가능성과 감쇠에 의한 진동억제 외에 기본적으로 고유치의 실수부를 통해 축계 안정성을 평가하였고, 그 결과를 Fig.11에 제시하였다. 해석은 Campbell diagram에 제시된 결과와 동일하게 5000 rpm 까지 4차 전향(F) 및 후향(B) 모드까지를 평가하였다. 고려된 모든 모드에 대해서 불안정성은 존재하지 않음을 확인할 수 있다.

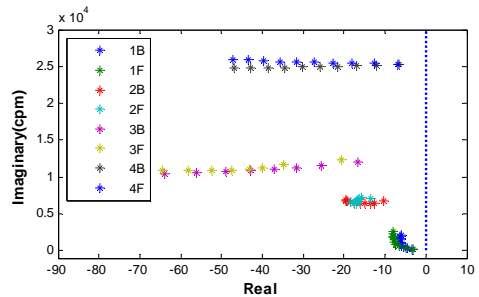


Fig. 11 Stability chart

5. 고찰

축계의 정적 해석 결과 응력수준은 매우 낮다. 이의 배경으로 고압펌프는 D/L 를 낮게 가져갔을 때, 공진이나 불안정성 등의 특정한 설계적 결함이 없어도 고진동 현상이 발생할 가능성이 높음이 알려져 있다. 따라서 해석상 요구되는 최소조건보다 지름을 크게 가져가는 경향이 있어 정적 해석으로 얻어지는 응력이 문제가 될 가능성은 통상 낮다.

Dry 조건과 Wet 조건에서의 고유치 해석 결과는 상당한 차이를 보이고 있다. 특히 1차 위험속도는 wet 상태가 되면서 34% 감소하였다. 따라서 dry 해석만으로 rigid rotor 가 되더라도 충분한 여유가 있지 않다면 wet 해석이 필수적임을 알 수 있다.

회전불평형 가진력에 의한 공진위험성을 판단할 때, 가진 특성상 후향모드는 공진조건이 되지 않는다. 그러나 깃통과성분으로(VPF(5X), VPF(7X)) 나타나는 압력맥동은 전향모드는 물론 후향모드 역시 가진되는 점을 유의하여야 한다. 따라서 축계해석시 압력맥동에 의한 가진력에 대한 분리여유는 전향모드 뿐만 아니라 후향모드 모두 검토되어야 한다. 특히 본 논문의 해석대상과 같이 1단과 시리즈 단의 회전차의 압력맥동 주파수가 다른 경우 그 회피 범위가 매우 넓어지게 되는 특성이 있어 축계공진영역을 완전히 회피하는 것은 매우 어려운 일이다.

공진회피 어려움을 극복하는 방안으로 고려되어야 할 것이 감쇠의 효과이다. 특히 대상 펌프는 공진영역을 효과적으로 회피하고 있으나, 실제로 이와 같이 회피하는 것은 어려운 일이다. 따라서 이러한 경우 감쇠의 역할은 더욱 중요하다. 고압다단펌프는 다수의 시일에 의해 다수의 주요한 모드에 대해 비교적 높은 감쇠효과를 가지는 것이 특징적이다. 대상 펌프의 경우 고려한 전 모드에 대해서 ISO 권장치 이상의 감쇠값을 가지고 있음이 확인되었다.

6. 결 론

본 논문은 현재 상업판매되는 고압다단펌프의 축계해석을 수행하였다. 해석모델은 축 및 물의 효과를 반영한 회전차, 지지베어링 그리고 각 시일부 등이 반영되었다. 해석내용으로 정적해석을 통한 처짐에 의한 rubbing 위험성 평가, 전단응력 및 굽힘응력에 대한 구조적 건전성 평가, 공진위험성 그리고 안정성 해석 등을 수행되었다.

Dry 조건과 Wet 조건에 따른 1차 위험속도의 차이는 본 대상의 경우 34% 감소하며, 고차모드는 그 특성이 완전히 달라지는 것을 확인하였다.

서로 다른 깃 수를 가지는 회전차를 사용하는 경우 깃통과주파수를 가지는 압력맥동에 대한 공진영역을 완전히 회피하는 것은 매우 어려운 것임을 확인하였다.

본 해석의 결과로부터 고압 다단 펌프의 경우 회

전불평형에 의한 가진력과 특히 깃통과주파수로 나타나는 압력맥동에 의한 가진력에 의한 공진을 회피하기 위하여 Wet 조건의 해석을 필히 수행하는 것이 타당하며, 공진회피를 위한 노력과 함께 감쇠에 의한 진동억제 효과를 검토하는 것이 필요함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Kim, B. O., Lee, A. S. and Kim, S. K., 2011, Rotordynamic Characteristics Analysis for API 610 BB5 Pump Development, Journal of Fluid Machinery, Vol. 14, No. 4, pp. 38~44.
- (2) Lee, J. M., Kim, Y. H., Ha, J. M., Gu, D. S., Hwang, H. j. and Choi, B. G., 2011, Evaluation of Rotor Dynamic Characteristic of Roots Type Vacuum Pump, proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference., pp. 264~270.
- (3) Yang, B. S., Choi, B. G., Kim, Y. H. and Ha, H. C., 1999, Journal of Fluid Machinery, Vol. 14, No. 4, pp. 38~44.