

대용량 펌프 구동용 터빈의 로터다이나믹 설계 Rotordynamic Design of Turbine for Large Capacity Pump drive

김영춘* . 박철현** . 김경웅***

Yeong-Chun Kim, Chul-Hyun Park and Kyung-Woong Kim

Key Words : Rotor(로터), Rotordynamic Design(로터다이나믹 설계), FWPT(급수펌프터빈), Natural Frequency(고유진동수), Unbalance Response(불평형응답), Seismic Response(지진응답)

ABSTRACT

In general, industrial rotating machinery have been designed to have critical speed that is above operating speed. But nowadays, they should be operated more than the first critical speed as usual with the trend of high speed and high performance of rotating machinery. Therefore, it is important to predict the accuracy rotordynamic characteristics of the high speed rotating system in advance. In this paper, the results of rotordynamic analysis about FWPT(Feed Water Pump) drive turbine rotor are showed. Because the FWPT drive turbine analyzed is high speed machinery operated more than the operation speed of conventional FWPT drive turbine, Seismic response analysis as well as unbalance response analysis is done in order to improve the reliability of the new turbine rotor-bearing system.

1. 서 론

증기터빈(steam turbine)과 같이 고속으로 운전하는 대형 축계 설계에서 가장 중요하게 고려되는 것이 고속 안정성과 운전 효율이다. 안전성은 운전 중에 기계의 파손을 방지하고 오랜 시간 동안 수명을 유지하기 위해 필수 요건으로서 축의 기계적 특성, 재질, 베어링과 시일의 구조 및 형상 등이 안전성에 영향을 미치는 요소이다. 또한 석탄, 석유 등 연료의 매장이 한계에 도달하고 있는 현 시점에서 연료의 효과적인 활용과 더불어 증기터빈의 효율 향상은 발전 설비에서 매우 중요하다. 기본적으로 열역학적 특성 즉, 증기의 압력과 온도가 설비의 효율에 크게 영향을 미치고 있지만, 동일한 조건에서는 블레이드의 형상, 시일과 베어링의 구조 등이 효율에 미치는 영향이 매우 크다.

따라서 안전성과 효율이 우수한 증기터빈을 설계하기 위해서는 축계 설계 기술이 가장 중요한 핵심 기술이라고 할 수 있다. 특히 오늘날에는 터빈 효율 상승과 제작비 절감을 위한 경량화를 위해 증기터빈이 점차 고속, 고온, 고압, 고밀도화로 설계되고 있는 추세이므로 신뢰성 유지를 위한

축계 설계 기술이 더욱 중요시 되고 있다.

본 논문에서는 발전소에서 사용되는 보일러 혹은 원자로의 급수펌프(Feed Water Pump) 구동용 증기터빈의 축계 설계 개요에 대해 설명하고 축계 진동해석의 사례를 제시하고자 한다. 특히, 해석 대상의 터빈 로터는 사용자 측의 요구에 의해 용량 증대와 효율 향상을 위하여 정격 운전속도를 높이도록 재설계가 되었고 보다 높은 신뢰성을 확보하기 위해 내진해석까지 수행되었다.

2. 대용량펌프 구동용 증기터빈 개요

급수펌프는 발전 사이클 내에서 보일러 또는 원자로에서 요구하는 일정한 압력의 급수(Feed water)를 공급하는 원동기로써 그 구동원은 주로 터빈이나 모터를 사용한다. 그러나 주 터빈의 출력이 250 MW 이상인 경우에는 모터 구동보다 터빈 구동이 기계적 손실이 훨씬 적기 때문에 대형 발전 용량이 요구되는 곳에서는 주로 급수펌프의 구동원으로서 증기터빈을 사용하고 있는 실정이다. 급수펌프 터빈(Feed Water Pump Turbine)의 유입 증기는 발전 사이클의 효율을 위하여 발전용 증기터빈의 증기를 추가하여 사용하고 있고 비상시에 대비하여 고압 터빈에 유입되는 주증기도 사용 가능하도록 설계되어 있다.

급수펌프터빈의 작동 원리는 노즐을 통과한 고속의 증기가 회전익에 충돌하여 그 충동 작용과 반동 작용에 의해 회

* 두산중공업(주) 기술연구원
E-mail : yckim123@doosanheavy.com
Tel : (055) 278-3711, Fax : (055) 278-8593

** 두산중공업(주) 기술연구원

*** 한국과학기술원 기계공학과

전에너지를 얻는 메카니즘이기 때문에 기본적으로 발전용 증기터빈의 그것과 동일하지만 로터다이나믹 설계 측면에서 몇 가지 차이점이 있다. 먼저 펌프의 성능을 위해서 정격 속도가 주 터빈의 정격 속도인 1,800 rpm이나 3,600 rpm 보다 훨씬 높은 5,000 rpm 근처에 있을 뿐만 아니라 요구되는 펌프의 운전조건에 따라 운전속도가 가변적으로 바뀌어야 하기 때문에 펌프 구동용 터빈의 운전 속도도 일정하지 못하고 가변적이어야 한다는 것이다. 그러므로 펌프 구동용 터빈 로터는 넓은 범위의 공진 회피 영역을 가져야만 하고 이는 축계 설계의 큰 제약점으로 작용한다. 또한 그 사용 목적상 설계의 주안점은 효율 향상 보다 신뢰성의 확보에 있기 때문에 발전용 증기터빈보다 좀 더 엄격한 조건을 제시하고 있다.

Fig. 1 은 급수펌프터빈 로터의 사진을 보여주고 있으며 Table 1 은 급수펌프터빈과 발전용 증기터빈의 차이점을 정리한 것이다.

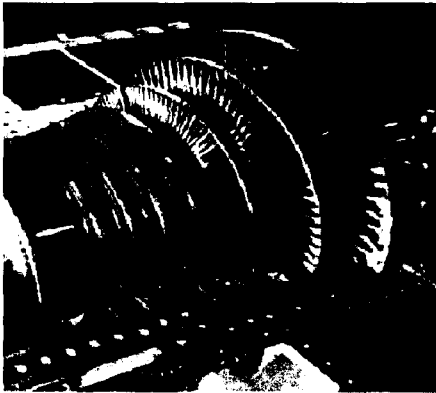


Fig. 1 A photograph of FWPT rotor

Table 1 Comparison of FWPT and main turbine

	FWPT	Main turbine
Purpose	Feed water pump drive	Generator drive
Design point	Reliability	Efficiency
Speed	Variable	Fixed
Rated output	3 ~ 35 MW	200 ~ 1,100 MW

3. 로터다이나믹 설계

3.1 해석 모델

당사는 기존의 FWPT 로터의 정격속도 보다 높은 6,000 rpm의 정격속도를 가진 FWPT의 제작을 위해 설계에 착수

하였다. 용량은 6.5 MW급으로서 모두 7개의 단(stage)으로 구성되어 있으며 2개의 베어링으로 지지되어 있는 단일 로터이다. 높은 속도와 보다 정도 높은 안정성의 요구 때문에 베어링의 재설계와 내진해석까지 수행하였다.

먼저 설계 로터의 수학적 모델을 유도하였다. 축요소는 회전관성과 전단변형을 고려한 Timoshenko보 이론을 이용한 유한요소모델로 운동방정식을 유도하였다[1,4,5]. 로터의 블레이드는 집중질량과 관성모멘트를 가지는 원판으로서 모델링 하였으며, 정확한 해석을 위하여 베어링 기초부의 유연성도 함께 고려하였다. Fig. 2는 해석 모델링 그림이며 총길이는 약 3 m 정도이고, 총중량은 약 3 tons이다.

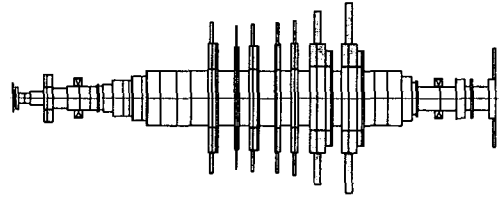


Fig. 2 Modeling of FWPT rotor

3.2 위험속도 선도

위험속도 선도는 로터 지지부의 강성 변화에 대한 고유진동수의 변화를 보여주는 선도로서 베어링의 강성 범위를 결정하기 위해서 주로 사용된다. Fig. 3은 본 해석 모델에 대한 위험속도 선도이다. 이 선도로부터 지지부의 적절한 강성 범위는 약 9×10^8 N/m이하로 가져가는 것이 바람직하다는 결론을 얻었다.

엄밀한 해석 과정을 거쳐 베어링은 4 pad LBP(Load Between Pad) 타입으로 선정하였고, Table 2에 운전속도 6,000 rpm에서의 베어링 동적계수를 나타내었다.

Table 2 Bearing stiffness & damping coefficients @6,000 rpm

Brg No.	Stiffness (MN/m)				Damping (kN.s/m)			
	K _{xx}	K _{yy}	K _{yx}	K _{yy}	C _{xx}	C _{yy}	C _{yx}	C _{yy}
1	257.0	0.753	0.753	257.0	224.0	-6.09	-6.09	224.0
2	312.0	-0.070	-0.070	312.0	282.0	-8.81	-8.81	282.0

(x : vertical direction, y : horizontal direction)

3.3 고유치 해석

유한요소법(FEM)을 이용하여 본 해석 모델의 고유진동수 및 감쇠비를 계산하였다. Fig. 4는 고유치 해석 결과 나타낸 캠벨 선도(Campbell diagram)를 나타내고 있으며 Table 3은 6,000 rpm 에서의 저차 6차까지의 시스템의 고유진동수 및 감쇠비를 나타낸다.

해석 결과를 고찰해 보면 위험속도는 3,000 rpm 부근에 존재함을 알 수 있고, 정격속도인 6,000 rpm 부근(3차와 4차 고유진동수)에 고유진동수가 존재하지만 감쇠비가 무척 큰 까닭에 진동은 없을 것으로 판단된다.

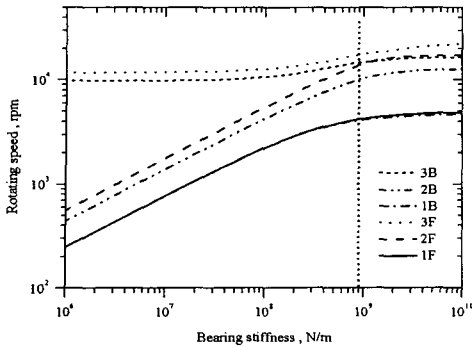


Fig. 3 Critical speed map of FWPT rotor

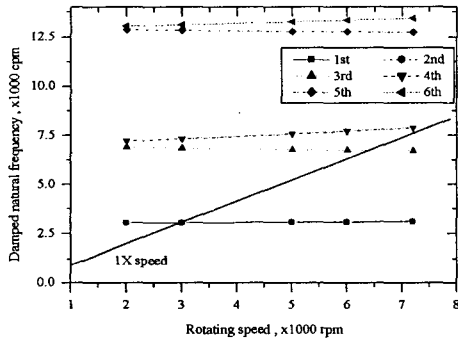


Fig. 4 Campbell diagram of FWPT rotor

Table 3 Natural frequency and damping ratio of FWPT rotor (rotating speed: 6,000 rpm)

Mode	Natural frequency (cpm)	Natural period (sec)	Damping ratio
1st	3,081	0.0195	0.065
2nd	3,100	0.0194	0.068
3rd	6,734	0.0089	0.226
4th	7,703	0.0078	0.234
5th	12,765	0.0047	0.129
6th	13,342	0.0045	0.124

3.4 불평형 응답 해석

API 잔류불평형 평가식 (1)에 의해서 불평형량을 평가하고 로터 중앙단에 부과하여 그 응답을 계산하여 보았다.

Fig. 5는 불평형 응답 해석 결과를 나타낸 그림이고 Table 4

는 최대 응답치를 나타낸 표이다. 고유치 해석에서 예측했듯이 3,000 rpm 근처에 최대 응답을 보이고 있지만 그 양은 매우 적을 뿐 아니라 6,000 rpm 근처의 최대치는 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

$$U = \frac{4W}{N} \quad (1)$$

여기서 U : 불평형량 (oz-inch)
W : 로터의 질량 (pound)
N : 운전속도 (rpm)

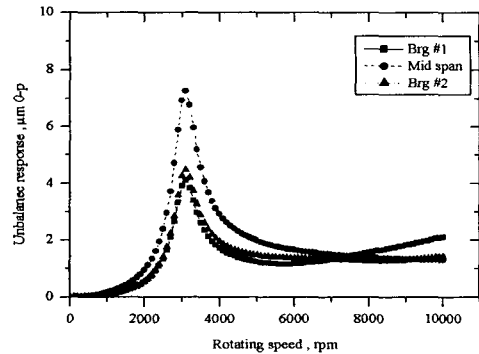


Fig. 5 Unbalance response of FWPT rotor

Table 4 Maximum unbalance response of FWPT rotor

Position	Rotating speed (rpm)	Max. response (μm)
No.1 bearing	3,100	4.11
Mid span	3,100	7.26
No.2 bearing	3,100	4.48

3.5 지진응답 해석

본 FWPT 로터는 정도 높은 안정성의 요구 때문에 내진 해석까지 수행하였다. 대부분의 경우, 가진대(shaking table) 위에 장치를 설치하고 요구되는 내진성능을 만족하는가를 시험하여야 하지만, 통상적으로 이들 장치는 대단히 무겁고 크기 때문에 내진시험이 불가능하고 따라서 이론적인 지진 응답해석에 의존할 수 밖에 없다.

(1) 입력 지진동

입력되는 지진파로는 El Centro(1940), Olympia(1949), Taft(1952), Hachinohe Habor(1968), Pacoima Dam(1971) 등이 널리 이용된다. 본 논문에서는 입력 지진파로서 비교적 최근 (95.1.17)에 일본 고베 해양기상대에서 계측된 고베 지진 가속도파형의 동서방향 성분(EW)을 이용하였으며, Fig. 6에 고

베지진(EW)의 시간과형과 푸리에 스펙트럼을 나타내었다[2]. 이 관측파는 샘플링간격 0.02초, 2048점(40.96초간)의 데이터로서, 이 데이터를 이용하여 해석하였다. 이 지진은 일본기상청(JMA) 진도 VII, 규모 7.2의 격진이었으며, 최대가속도가 NS 818 gal, EW 617 gal, UD 332 gal이었다.

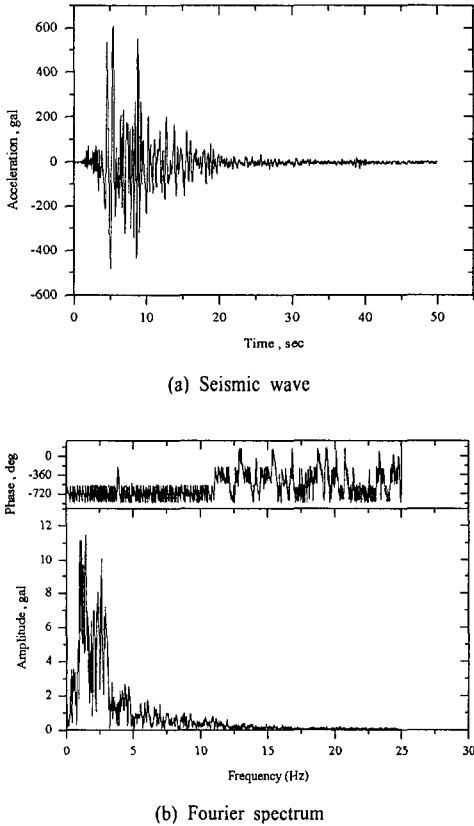


Fig. 6 KOBE earthquake(EW)

(2) 시간응답해석

지진 하중에 대한 회전기계의 동적 거동을 해석하는 방법으로는 직접 수치해석을 수행하는 직접 적분법(direct integration method), 각 모드별로 비연성화된(decoupled) 미분방정식으로 변환하고 각 모드별 해를 구하여 이를 중첩하는 모드 중첩법(mode superposition method) 등이 있다. 본 논문에서는 방대한 계산 시간이 소요되지만 지진응답을 구하는 가장 엄밀한 방법인 시간적분법을 채택하여 해석을 수행하였다.

그리고 가진력은 중력과 불평형력이 계속 작용하고 있는 상황임을 고려하였으며, 저널의 응답이 클 경우에는 베어링 내 유막에서 발생하는 유막 압력에 의한 유막 반력 사이에

강한 비선형 특성이 생기기 때문에 유막 압력의 변화를 매 시간 수치적으로 풀어서 구하는 비선형 해석을 통하여 축의 응답을 계산하였다[3].

Fig. 7은 고베지진과의 EW성분을 수평으로 가진했을 경우의 각 베어링 절점과 중앙단에서의 변위 응답을 구한 결과이다. 각 절점에서 수직방향 성분의 응답이 거의 나타나지 않은 것은 가진력이 수평으로만 작용했기 때문이다.

이 해석 결과로서 알 수 있는 것은 지진시에 회전성능이 유지될 수 있는가 하는 것이다. 이는 임펠러부, 블레이드부, 시일부 그리고 베어링 부분과 같은 회전체와 고정부가 마찰을 일으킬 가능성이 있는 부분에 대해서 최대 응답을 계산하여 틈새와 비교함으로써 그 신뢰성을 평가하는 것이다.

Table 5는 각 절점에서의 최대 변위와 불평형 응답의 최대 변위를 각 틈새와 비교하여 나타낸 표이다. 표에서 알 수 있듯이 전체 변위가 모두 틈새 이내에 들고 있고, 따라서 회전성능의 측면에서 안정하다고 할 수 있다.

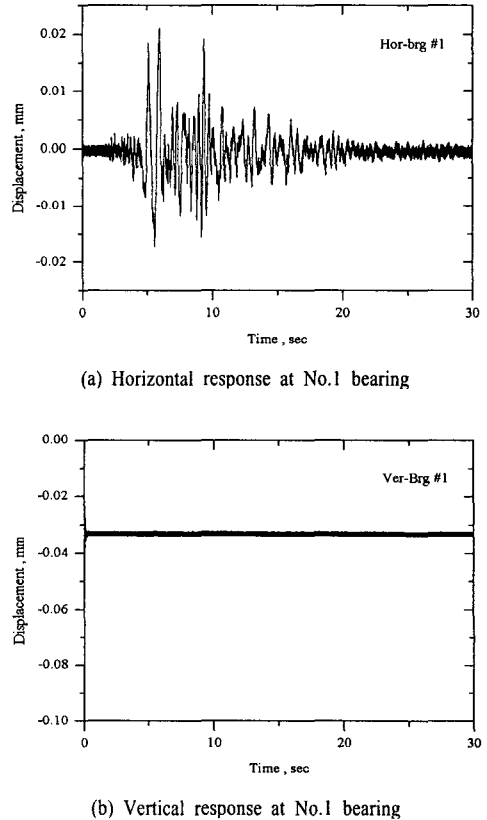
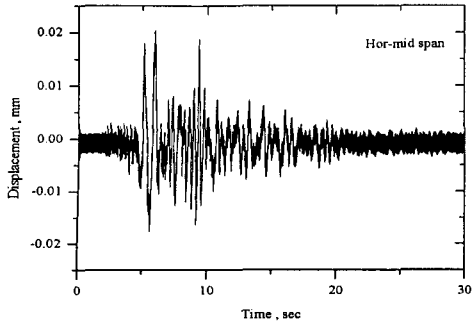
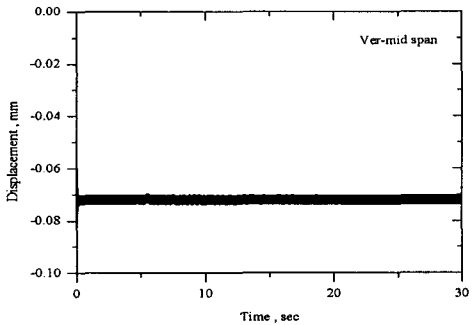


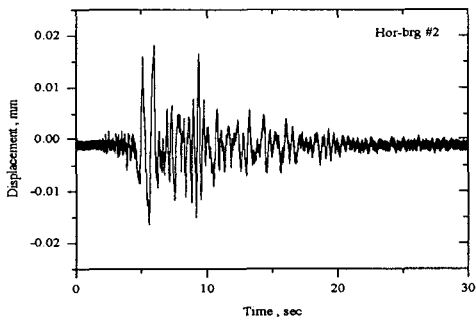
Fig. 7 Displacement response of FWPT rotor by seismic input



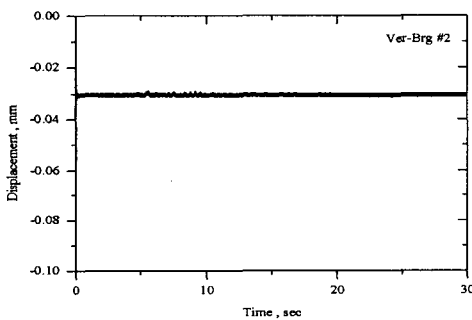
(c) Horizontal response at mid span



(d) Vertical response of mid span



(e) Horizontal response at No.2 bearing



(f) Vertical response at No.2 bearing

Fig. 7 Displacement response of FWPT rotor by seismic input

Table 5 Comparison of response and clearance (unit : μm)

Position	Clearance	Unbalance response	Seismic response
No.1 bearing	114.3	4.11	21.1
Mid span	635.0	7.26	20.5
No.2 bearing	114.3	4.48	18.3

4. 결론

본 논문에서는 FWPT 로터에 대한 로터다이나믹 설계의 사례를 보여주었다.

먼저 위험속도선도에서 베어링 강성의 범위를 결정하고 저널베어링을 설계하였고 고유치 해석과 불평형 응답 해석을 통해서 공진 회피와 저 진동 설계를 수행하였다. 또한 정도 높은 신뢰성의 확보를 위해 축계에 대한 지진응답을 계산하였다. 지진에 대한 회전성능을 평가하기 위해서 지진에 의한 각 베어링과 중양단에서의 변위응답의 최대치와 불평형 응답의 최대 진폭, 각 절점에서의 틈새를 비교하여 본 결과 모두 각 틈새보다 적었으며, 회전성능을 유지할 수 있음을 알 수 있었다.

따라서 본 논문에서 설계된 FWPT 로터의 로터다이나믹 성능은 우수한 것으로 판단되어 각 세부 설계를 거쳐 제작 과정을 거치고 있다.

참고 문헌

1. H. D. Nelson, 1980, "A Finite Rotating Shaft Element Using Timoshenko Beam Theory," Trans. of the ASME, Journal of Mechanical Design, Vol. 102, pp. 793~803.
2. 日本氣象廳, 1995, 平成7年(1995年) 兵庫縣南部地震の氣象廳87形電磁式強震計의.
3. 노병후, 2001, "축 베어링 시스템의 비선형 진동 해석 및 안정성 향상 방법에 관한 연구," 박사학위논문
4. B. S. Yang, Vibrations of Rotating Machinery, Interscience Publishing Co., 2002.
5. D. Childs, Turbomachinery Rotordynamics Phenomena, Modeling & Analysis, John Wiley & Sons, 1993.