

펌프-터빈에서 안내 베어링의 예압이 온도 및 축 진동에 미치는 영향

하 현 천, 양 승 현, 최 성 필, 김 호 종
한국중공업(주) 기술연구원

Preload Effects on the Metal Temperature and Shaft Vibration in a Guide Bearing for Hydraulic Pump-Turbines

Hyun Cheon Ha, Seong Heon Yang, Seong Pil Choi, and Ho Jong Kim
R&D Center, HANJUNG/Korea Heavy Industries & Construction Co.

Abstract- In-situ bearing metal temperature and shaft vibration are measured for an unload type and a preload type, $m=0.87$, of vertical guide bearing for hydraulic pump-turbines. Guide bearing is a tilting-pad type journal bearing consisting of eight pads whose diameter is 1,450 mm. Rotational speed is 450 rpm. Both the bearing metal temperature and the shaft vibration are very high in the unload type but are slight in the preload type, comparatively. The bearing metal temperature is decreased due to the increase of cooling effect by the increase of preload and the shaft vibration is decreased due to the increase of bearing stiffness. It is concluded that the preload effect of a guide bearing for hydraulic pump-turbines has a large influence on the bearing metal temperature and the shaft vibration.

Key words - Tilting-Pad Type Guide Bearing, Preload Effect, Bearing Metal Temperature, Shaft Vibration, Pump-Turbine

1. 개 요

펌프-터빈은 야간의 잉여 전력을 이용하여 하부 저수지의 물을 상부 저수지로 양수(pumping)하여 주간에 전력을 생산하는 양수 발전소의 핵심 설비이다. 최근에는 양수 발전소의 운전 효율과 경제성을 향상시키기 위해서 고낙차, 대용량의 펌프-터빈이 설치되고 있다.

펌프-터빈에서는 축계의 불평형 질량(Unbalance), 정익과 동익의 간섭에 의한 유체가진력(Vane passing excitation), 런너 출구부(Down stream)의 와류(Vortex flow) 등에 의해 진동이 발생하여 발전 설비의 안정 운전에 막대한 지장을 초래한다. 특히, 고낙차의 펌프-터빈에서는 유체 가진력이 더욱 커지기 때문에 진동 문제가 더욱 심각해진다 [1-4].

펌프-터빈용 수직형 안내 베어링(Guide bearing)은 운전 중에 발생하는 축 진동에 대응하여 축을 구속 지지함으로써 안정 운전을 도모키 위한 목적으로 사용되고 있다. 즉, 안내 베어링의 동특성이 펌프-터빈의 축 진동에 미치는 영향이 매우 크다. 그리고, 안내 베어링은 직경이 크고, 고속으로 운전되기 때문에 유막의 점성 마찰력에 의해 많은 열이 발생하고 이것에 의해 베어링 메탈의 온도가 상승된다. 따라서 안내 베어링은 축 진동을 최대한 줄일 수 있도록 적절한 유막 강성을 가져야 함은 물론이고, 윤활유의 냉각 효과가 우수한 구조로 설계되어야 한다. 다시 말하면, 안내 베어링이 잘못 설계되면, 운전 중에 과대한 축 진동이 발생하고 베어링 메탈의 온도가 높아져서 펌프-터빈의 연속 운전에 막대한 지장을 초래할 뿐만 아니라, 심한 경우에는 더 이상 운전이 불가능하게 된다.

대부분의 안내 베어링은 운전 중에 베어링이 적절한 강성과 안정성을 유지할 수 있도록 틸팅 패드 형상 또는 Lobe 형상의 베어링으로 설계되어 있다. 틸팅 패드 형상의 안내 베어링에서는 예압(Preload)이 유막 강성과 윤활유의 냉각 효과에 지배적으로 영향을 미친다 [5-6].

본 연구에서는 실제 운전 중인 펌프-터빈에서 서로 다른 예압을 가지는 틸팅 패드형 안내 베어링의 축 진동과 베어링 메탈 온도를 측정, 분석함으로써 이들과 예압과의 관계를 제시하고자 한다.

2. 실험 장치

Fig.1은 양수발전소의 터빈발전기 (또는 모터 펌프)의 개략도이다. 이 그림에서 보듯이, 펌프-터빈과 발전기-모터 축계에는 3개의 수직형 안내 베어링이 있다. 본 연구에서 사용된 베어링은 가장 하부에 있는 펌프-터빈 안내 베어링이다. 이 베어링은 직경이 1,450 mm이고, 8개의 패드로 구성되어 있으며, 각 패드의 원호 각은 26° 이다. 양수(펌프 운전)와 발전(터빈 운전) 시에 축의 회전 방향이 서로 반대이기 때문에 양 방향 운전이 가능하도록 패드의 중앙이 피봇으로 되어있다. Fig.2는 안내 베어링이 축에 조립되어 있는 사진이다. 축의 회전수는 450 rpm이며, 사용 윤활유는 ISOVG 32이다.

운전 중에 축 진동을 측정하기 위해 각각의 안내 베어링의 Head cover에 서로 직각으로 2개의 변위 센서가 설치되어 있다. 축 진동은, Fig.3에서와 같이, 변위 센서의 신호를 FFT Analyzer로 분석하였다. 그리고, 안내 베어링의 메탈 온도를 측정하기 위해 각각의 베어링에 Thermocouple이 설치되어 있다.

3. 결과 및 검토

본 연구에서는 예압의 변화에 대한 축 진동과 베어링 메탈 온도와의 관계를 확인하기 위하여 예압이 없는 경우와 예압이 있는 경우 즉, 2가지 경우의 안내 베어링에 대해 실험을 수행하여 분석하였다. 특히, 예압이 없는 경우는 헐거운 끼워 맞춤 공차로 조립하였으며, 엄밀하게 말하면, 예압이 거의 -1.0이다. 예압이 있는 경우는 예압이 약 0.87 정도이다. Fig.4와 5는 이들 2가지 형상의 안내 베어링의 조립 상태를 개략도로서 나타낸 그림이다.

3.1 예압이 없는 경우 (Unload type)

Fig.6은, 예압이 없는 안내 베어링에 대해서, 발전 부하가 각각 40 %, 100 %인 경우의 축 진동에 대한 X방향과 Y방향의 스펙트럼이다. 축 진동은 부하에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 낮은 부하 (40 % 부하)에서는 비동기 성분인 진동(Subsynchronous whirl, 0.4x)이 동기 성분인 진동(Synchronous whirl, 1x)보다 더 크다. 그러나, 큰 부하 (100 % 부하)에서는 회전속도 성분(1x)이 지배적으로 나타나며, Subsynchronous whirl 성분의 진동은 거의 나타나지 않는다. 100 % 부하 영역에서는 Overall 진동치가 약 $223 \mu\text{m(p-p)}$ 이고, 40 % 부하 영역에서는 Overall 진동치가 약 $330 \mu\text{m(p-p)}$ 이다. 이와 같이 작은 부하 영역에서 Overall 진동치가 큰 부하에서 보다 크게 나타나는 원인은, 이 그림에서 보듯이, 비동기 성분의 진동에 의한 것임을 알 수 있다.

비동기 성분인 진동인 Subsynchronous whirl (0.4x) 성분의 진동은 Francis 형의 터빈에서 나타나는 일반적인 현상으로서 런너(Runner)

의 Downstream에서 유체의 반경 방향 유동에 의해 발생하는 와류가 주 원인인 것으로 밝혀져 있다. 이 현상은 일반적으로 Wicket Gate가 30 ~ 60% 정도 열렸을 때 반경 방향의 유동이 런너의 회전 방향과 일치할 때 발생한다. 이 현상은 운전 중에 항상 발생하는 현상이므로, 이러한 부하 영역에서는 가능한 한 운전이 되지 않도록 해야 한다[4].

그리고, 부하가 큰 영역에서는 회전속도 성분이 Overall 진동치의 약 90%를 차지하고 있다. 일반적으로 이 성분은 불평형(unbalance) 질량, 축정렬 불량(misalignment), 그리고 베어링의 강성 부족 등에 의해 크게 나타난다.

예압이 없는 안내 베어링에 대한 진동치는 펌프-터빈의 허용 진동치 $200 \mu\text{m(p-p)}$ 를 초과하므로 과대 진동 현상이라고 볼 수 있다.

과대 축 진동 현상에 대한 원인을 분석코자 측정결과 불평형 질량 상태 등을 검토하였으나, 이들은 정상적으로 판정이었다. 그러나, 안내 베어링이, Fig.4에서와 같이, 예압이 없는 무부하 형이기 때문에 베어링의 유막 강성이 매우 부족하여 축 진동이 크게 나타난 것으로 판단된다. 다시 말하면, 예압이 없는 경우의 무부하 패드 베어링에서는 운전 중에 패드 면이 축 표면과 거의 평행하게 유지된다[5]. 따라서 유막의 쉼기 효과에 의해 발생하는 베어링의 강성이 매우 작다.

그리고, 예압이 없는 무부하 패드 베어링에서는 앞의 패드에서 흘러나오는 가열된 윤활유가 거의 대부분이 다음 패드로 재순환되기 때문에 냉각 효과가 떨어지게 되어 베어링 면의 온도가 높아지게 된다[5]. 그리고, 축 진동이 커지면, 축 표면과 베어링과의 국부적인 금속 마찰에 의해서도 베어링 면의 온도가 높아질 우려가 있다.

베어링 메탈의 온도가 높아지면, Metal creep 현상에 의한 베어링 파손의 우려가 있다. 그러므로 온도 상승에 의한 베어링의 파손을 방지하기 위해서는 베어링이 항상 허용 온도 이내에서 운전되도록 유지해야 한다. 본 측정에서 베어링 메탈의 온도는 약 54°C 로 측정되어 그다지 높은 편은 아니다. 그러나, 운전 초기에 허용 온도 보다 높게 되어 과대 온도에 대한 우려가 있어서 베어링 간극을 조정하여 온도를 줄였다.

그리고, 일정 시간이 경과한 후, 안내 베어링의 패드 면의 양 Edge 부위가 심하게 마모된 현상이 발견되었다. 이는, 앞에서 언급한 바와 같이, 운전 중에 발생한 과대한 축 진동에 의해 축 표면과 베어링 면이 서로 고체 마찰이 일어났음을 알 수 있었다.

결론적으로 본 측정에서 펌프-터빈의 예압이 없는 무부하 패드형의 안내 베어링에서 축 진동과 베어링 메탈의 온도가 높게 나타난다고 판단된다.

3.2 예압이 있는 경우 (Preload type)

Fig.7은, 예압이 있는 안내 베어링에 대해서, 발전 부하가 각각 60 %, 100 % 인 경우의 축 진동에 대한 X방향과 Y방향의 스펙트럼이다. 축 진동은, 예압이 없는 경우에서와 마찬가지로, 부하에 따라 큰 차이를 보이며, 같은 주파수 성분의 진동이 발생함을 알 수 있다. 그러나, 각각의 주파수 성분에 대한 진동 진폭은 매우 줄어들었음을 알 수 있다. 특히, 100 % 부하에서는 축 진동이 최대 $223 \mu\text{m(p-p)}$ 에서 $40 \mu\text{m(p-p)}$ 로 현저하게 감소되었음을 알 수 있다. 이는 예압에 의해 안내 베어링의 지지 강성이 크게 증가되었기 때문으로 판단된다.

베어링 메탈의 온도는 약 45 °C로 측정되어 예압이 있는 경우가 약 10 °C 정도 낮아졌다. 이처럼 베어링 메탈의 온도가 줄어든 이유는 예압의 증가에 의해 윤활유의 냉각 효과가 증가되었기 때문이다. 다시 말하면, 예압이 증가되면, 유막의 켜기 형상이 더욱 급격해져서 입구부의 유량에 비해 출구부의 유량이 훨씬 작아지게 된다. 그래서 외부에서 공급되는 차가운 윤활유가 베어링 내부로 유입되는 양이 많아지기 때문에 냉각 효과가 증가하게 된다. 그리고, 베어링의 강성 증가로 인한 축 진동이 작아지게 되어 베어링과 축의 직접적인 금속 마찰도 적게 발생되었기 때문으로 판단된다.

결론적으로 펌프-터빈에서 안내 베어링에 예압을 가함으로써 축 진동과 베어링 메탈의 온도를 효과적으로 줄일 수 있음을 알 수 있다.

4. 맺음말

양수발전소용 펌프-터빈의 수직형 틸팅 패드형 안내 베어링에 대해서 예압이 축 진동과 베어링 메탈의 온도에 미치는 영향을 분석코자 예압이 없는 경우와 있는 안내 베어링에 대해 현장 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 안내 베어링의 예압을 가함으로써 베어링의 유막의 지지 강성이 증가시켜 축 진동이 현저하게 줄일 수 있다.
2. 안내 베어링에 예압을 가하면 베어링의 냉각 효과가 증가 되므로 베어링 메탈의 온도를 효과적으로 줄일 수 있다.
3. 펌프-터빈용 안내 베어링에서 예압은 베어링의 강성을 증가시키고, 윤활유의 냉

각 효과를 증대는 중요한 요소이므로 설계 시에 반드시 고려되어야 한다.

참 고 문 헌

1. Miyagawa, et al., "Design Technology for High Head Pump-Turbine Runner", Proc. of 16th IAHR Symp., pp.929-942, 1992.
2. Kanki, et al., "An Experimental Investigation of Fluid Exciting Force on a High Head Pump-Turbine Runner", Proc. of 4th ISROMAC, pp.133-142, 1992.
3. Shiraki, et al., "Estimate for the Barrel Vibration of Large Capacity and High Pressure Head Pump Turbine", Proc. of ICVE, pp.210-215, 1994.
4. Ha, et al., "Vortex Induced Vibration of a High Head Pump-Turbine", Proc. of 5th Asian Int. Conf. On Fluid Machinery, 1997.
5. Ha, H.C. and Kim, K.W., "Experimental Investigation on Thermohydrodynamic Performance of Large Tilting-Pad Journal Bearing Including the Inlet Pressure Effect", JSME International Journal, Series C, Vol. 38, pp. 160-166, 1995.
6. Jones, G.J. and Martin, F.A., "Geometry Effects in Tilting-Pad Journal Bearing", ASLE Trans., Vol.22, pp.227-244, 1979.

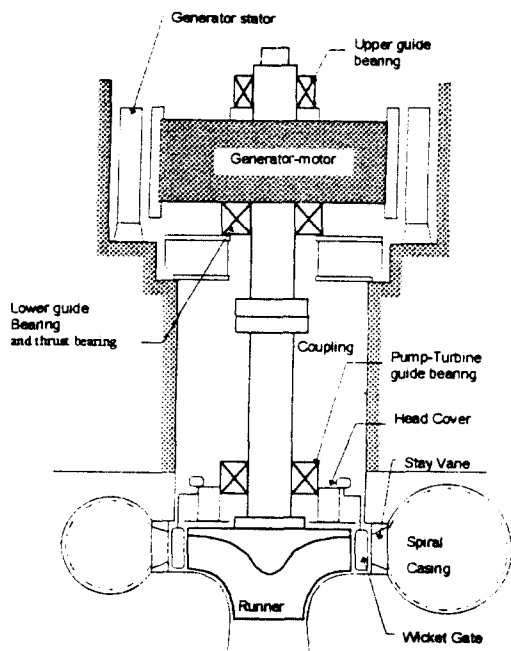


Fig. 1 Schematics of the hydraulic pump-turbine

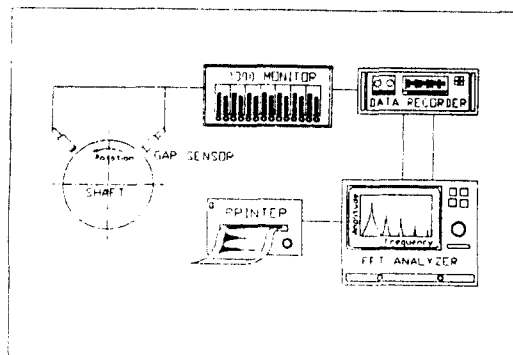


Fig. 3 Schematics of measurements

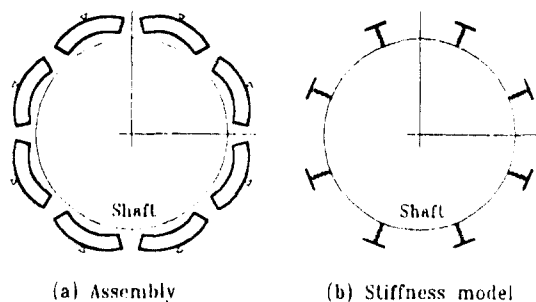


Fig. 4 Schematics of unload type bearing

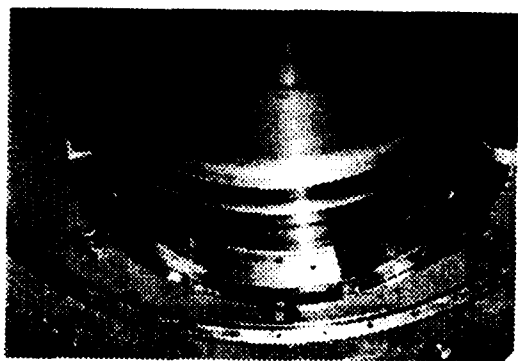


Fig. 2 Photography of an assembled guide bearing

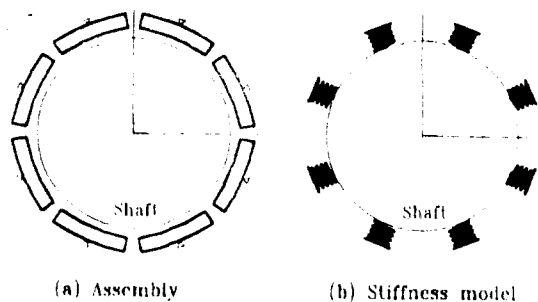
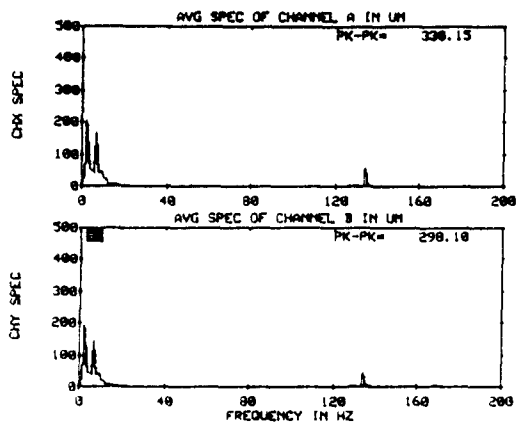
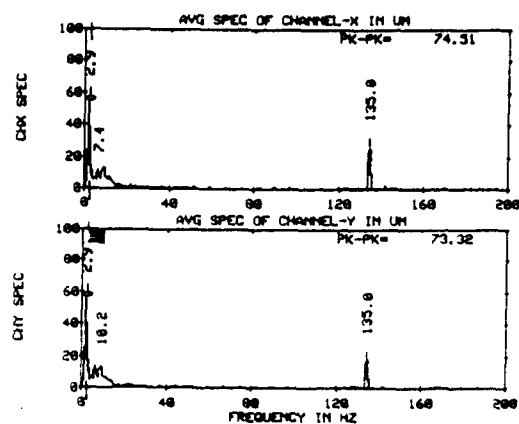


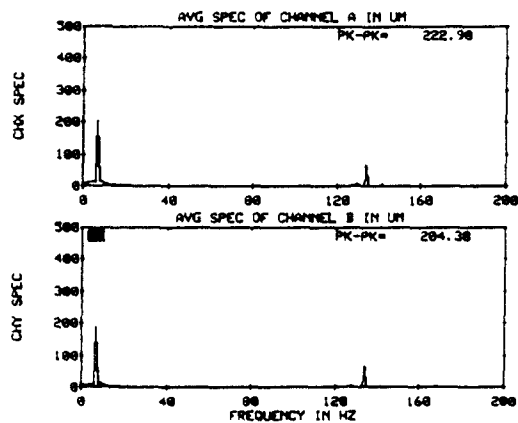
Fig. 5 Schematics of preload type bearing



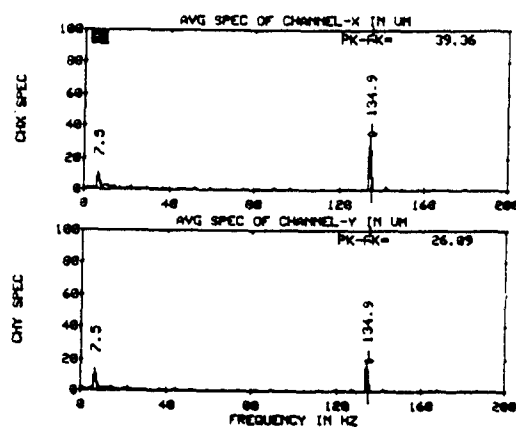
(a) Load = 40 %



(a) Load = 60 %



(b) Load = 100 %



(b) Load = 100 %

Fig.6 Spectrum of shaft vibration (Unload type)

Fig.7 Spectrum of shaft vibration (Preload type)