

수력발전소 수차 캐비테이션 특성 및 최적급기량에 대한 연구

김기원, 김영규  
한국수자원공사 발전사업처

The cavitation property on Chungju hydro-turbine and the optimum quantity of aeration

Kim, Ki-Won, Kim Young Gui  
Hydropower utilities dept. Korea Water Resources Corporation

Abstract - This test was performed to improve the cavitation property on hydro-turbine and the optimum quantity of aeration. Vibration and noise change according to hydro-turbine load. The results of aeration tests applied to chungju hydro-turbine.

1. 서론

불안부하영역(rough load zone)은 수직형의 프란시스 수차, 특히 펌프-수차에서 많이 나타나는 현상으로 부분 부하 영역에서 과도한 진동이 나타나게 되는데, 이를 Rheingans Influence라고 말하기도 한다. 부하 영역은 수차마다 다르지만 통상 40-70%의 부하 영역에서 발생한다. 통상적으로 프란시스 수차의 출구 축 흐름은 수직 방향으로 되어야 정상적이지만 이 부하영역에서는 원주 방향의 유속 성분의 영향으로 수차 출구 부위에 강한 와류와 함께 중심부에 캐비테이션이 발생한다. 이 와류는 강한 압력 변동을 유발하여 수차의 진동을 유발한다. 통상적으로 이 진동의 크기는 아주 크며 이 부하영역에서의 운전을 회피하도록 하고 있다. 이러한 진동을 감소시키는 방안으로는 수차 하부의 방출관 내부에 수직 기동을 설치하여 와류의 발생을 억제하거나 런너 상부와 헤드카버(head cover)사이에 공기를 주입하여 수차 내부의 물이 포화증기압 이하로 내려가는 것을 방지시키는 방법이 있다.

본 논문에서는 1985년에 건설되어 운영중인 국내 수력발전소 중 최대규모인 충주수력발전소 급기설비의 적정성 및 효과분석을 통해 최적의 급기량을 산정함으로써 수차날개의 침식을 최소화하여 수차의 수명을 연장하고 수차의 효율저하 방지 및 안정적인 수차발전기 운전이 가능하도록 하는데 그 목적을 두고 있다.

2. 수차 급기량 재검토 및 시험

2.1 개요

프란시스수차의 런너로부터 유출하는 물의 방향을 보면 (그림 1) 정격운전 상태에서는 출구유속  $v_2$ 는 대개 축방향으로 향하나, 이보다 부하가 클때(또는 낙차가 높을 때)에는 회전과 역방향으로 유출하며( $v_2'$ ), 부하가 작을 때(또는 낙차가 낮을 때)는 회전방향으로 유출한다( $v_2''$ ). 이와같은 출구속도는 정격상태에서는 런너 출구의 위치에 따라 변하지 않지만 정격이외의 상태에서는 위치에 따라 변하고, 원주방향의 분속도를 가지고 런너에서 유출되는 유동은 잠시동안 유출속도가 가까운 속도로서 유동하나 곧 자유회전운동(free vortex motion)을 시작한다. 자유회전운동에서는 관중심에서 거리  $r$ 에 있는 물의 유속의 원주 방향 분속도 ( $v_u$ )는  $C$ 를 정수로 하여

$$v_u = \frac{C}{r}$$

이다. 관중심에 가까울수록  $v_u$ 는 커지나  $v_u$ 가 어느 정도 이상이면, 그 이내의 물은 강제회전운동 (forced vortex motion)을 하여 강체와 같이 일체로서 회전운동

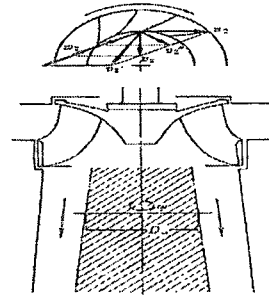


그림 1 흡출관내의 회전유동

을 하게 된다. 따라서 바깥쪽의 자유회전영역과 안쪽의 강제회전영역사이에는 원추상의 경계면이 있다. 이 내부영역을 와동심이라 하며 물은 축방향으로 흐르지 않으나 와동심 바깥은 대개 축방향으로 일정한 속도로 흘러내린다.

와동심의 직경을  $D_w$ , 그의 회전각속도를  $\omega$ 라 하면, 그림 1과 같이 런너 출구로부터 멀어저감에 따라  $D_w$ 가 커지고,  $\omega$ 는 작아진다. 그 때문에 와동(渦動心, 또는 와심)에서는 상부가 하부보다 저압이 되고, 중심부에서는 밑에서 위로 역류하기도 한다. 수차의 설치높이가 높을 때는 와동심 내부의 저압이 깊어지게 되고, 내부의 물은 증발하며, 증기와 유리공기(遊離空氣)로 채워지는 수도 있다.

2.2 추진방향

수차급기의 다양한 방법에 대한 문헌조사, 충주수력과 유사한 설비에 대한 조사, 현 설비에 대한 보고서 검토, 기타 연구발표논문등을 참고하고, 급기량 변화에 따른 소음, 진동등의 변화를 분석하는 시험을 통하여 최적의 급기량을 산출하여 콤프레서의 용량 및 형식을 결정하여 교체 시행 후 기존설비와 교체설비의 효과분석을 실시하였다.

2.3 관련자료 검토

충주댐 수차와 같은 형식인 대청댐 수차의 현장시험결과 콤프레서 용량은 수차부분부하 운전시 사용수량의 약 0.1%로 결정한 것을 충주수력에 적용하였다. 급기형식은 자연급기와 강제급기를 혼용하는 경우가 많으며 자연급기보다는 강제급기가 훨씬 진동 저감효과가 좋다는 시험결과를 본 시험을 통하여 입증하였으며, 또 다른 문헌에서는 급기의 역할이 공동발생을 억제하는 역할보다는 공동 붕괴 시 내파력을 약화시키고 급기된 공기방울이 공동에 의하여 전파되는 소음과 변동압력을 감쇄시켜 수차의 진동을 감소시킨다는 역할도 한다는 사실을 알 수 있었다.

**2.4 시험대상 및 시험방법**

수차급기시험 대상 발전기는 충주수력 제3호 수차발전기로서 설비사양은 표1과 같다.

표 1. 시험대상 수차발전기 사양

형식	입축 프란시스 수차	
정격낙차	57.5 m	
사용수량	197 m <sup>3</sup> /s	정격낙차
출력	103.1 MW	정격낙차
비속도	245.2 rpm	정격낙차
회전속도	128.5 rpm	
무구속속도	275 rpm	
수차재질	13Cr - 3.8Ni	
수차날개	11개	
수차출구지름	4,880 mm	

수차에 발생하는 캐비테이션 특성 측정 실험을 위해 충주 제1수력에 설치된 4대의 프란시스 수차 중 제3호기를 대상 수차로 선정하고 시험을 수행하였다.

자료 취득은 출력변경과 강제급기를 변경시킬 때 발생하는 진동가속도값의 변화량을 취득하여 대상 수차의 캐비테이션 발생 정도가 강제급기량을 변경 할 경우 상관관계를 파악하고자 하였다. 측정장비는 진동, 측정열, 평형 종합진단 장비인 Vibro CX-II를 사용하였으며 가속도센서를 부착하여 측정한 위치는 수직방향이 guide vane stem부 상단이고 수평방향은 turbine shaft packing box에 부착하였다.

대상 수차에 대한 캐비테이션 특성 파악을 위하여 부착된 센서의 출력 신호는 소프트웨어가 설치된 노트북 PC를 이용하여 신호를 취득, 분석하였다

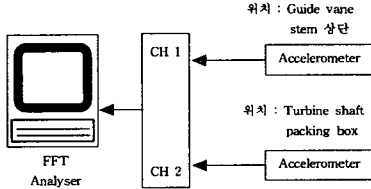


그림 2 센서와 데이터 취득장치 개략도

**2.5 시험결과 및 분석**

본 실험을 위하여 대상 수차의 운전상태를 발전기 출력을 기준으로 7점의 측정 대상점과 급기량 기준으로 3점의 대상점을 선정하여 총21점의 대상점을 선정하였으며 그 작동조건에서의 수차 캐비테이션과 관련된 진동값을 취득, 분석 하였다. 실험 대상수차의 경우 일반적인 수차에서와 같이 흡출관(draft tube) 내부에 급기(aeration)를 통하여 캐비테이션을 억제시키고 있는데 이를 위하여 draft tube와 대기압과의 압력차에 의하여 공기를 공급시키는 자연급기와 압축공기를 이용한 강제급기의 두 가지 방법이 사용되고 있다. 본 실험에서는 이러한 급기에 의한 캐비테이션의 영향을 살펴보기 위하여 인위적으로 강제급기량을 조절한 상태에 대한 실험을 수행하였다. 그림3, 그림4는 출력 40MW에서의 0m<sup>3</sup>/min 급기와 20m<sup>3</sup>/min 급기 시 발생하는 진동가속도 스펙트럼이다.

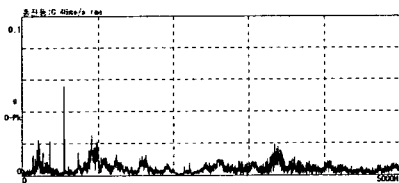


그림 3. 진동가속도 스펙트럼 (45MW, 0m<sup>3</sup>/min 급기시)

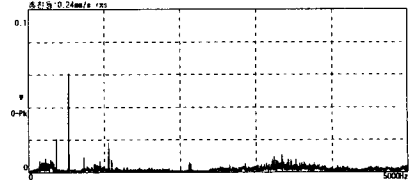


그림 4. 진동가속도 스펙트럼 (45MW, 10m<sup>3</sup>/min 급기시)

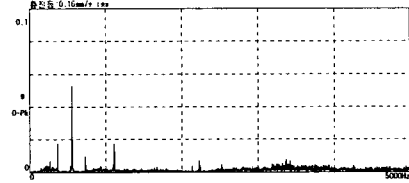


그림 5. 진동가속도 스펙트럼 (45MW, 20m<sup>3</sup>/min 급기시)

그림3,4,5의 각 스펙트럼을 보면 진동 성분은 수차회전수 128.5rpm 일 때 365.63Hz가 모든 측정점에서 발생하고 있으며, 1100Hz이하에서 몇 개의 특정 주파수 성분이 나타나고 있는데 이는 이는 회전기계의 전형적인 진동 양상으로서 각각의 성분을 규명하려면 특별한 노력이 필요한 부분이며, 수차에 미치는 영향이 미미한 것으로 판단된다.

1100 ~ 3000Hz 구간의 모든 측정점에서 진동가속도의 크기는 거의 변화하지 않고 있으며 3500Hz 부근에서 최대 발생하고 있다. 캐비테이션의 발생으로 인하여 진동이 유발되는 주파수 영역대는 대략 3000~4500Hz에서

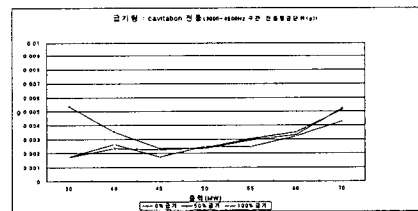


그림 6. g값 변화(출력 및 급기량 변경시)

나타나게 되는데 출력별 급기량에 따른 3000~4500Hz대의 총진동값을 비교함으로써 캐비테이션의 발생량과 크기를 측정하고 스펙트럼 분석결과를 요약한 것이 그림 6에 나타나 있다.

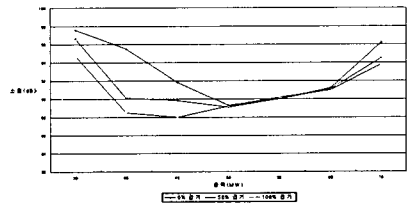


그림 7. 소음 변화(출력 및 급기량 변경시)

대상 수차 진동과 소음은 그림6, 그림7에서 나타난 것과 같이 전체적인 진동 평균가속도값과 소음은 부하의 특정 영역에서 증가함을 알 수 있다. 부하와 급기량에 따른 진동 변화를 스펙트럼의 분석으로 알 수 있는데 발생 스펙트럼을 분석한 결과 50MW 이상의 출력에서는 급기에 따른 진동감소효과는 크게 나타나지 않았으며 출력 증가에 따른 수류에 의한 영향으로 진동이 증가하는 현상을 보였다. 그러나 45MW 이하의 출력에서는 급기의 영

항이 확실히 나타나고 있었으나 급기량을 100%에서 50%로 변경시켰을 때의 진동변화(증가)는 미미하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 위의 결과는 수차의 모형시험에서 취득한 자연급기영역( $H_s=4.8m$ ) 이하에서는 급기의 영향이 확인되었으며 또한 자연급기가 이루어짐에 따라 현 콤프레셔 급기량의 50%만 공급해도 캐비테이션 발생을 감소시키는 효과가 있어 진동감소효과를 확인할 수 있다. 출력 60MW 이상에서 발생하는 진동값은 캐비테이션 발생에 의한 진동이라기 보다 출력 증가에 따른 수류의 영향에 의한 진동값 증가라고 판단된다. 그 이유는 급기량 변화가 진동값에 영향을 미치지 않고 있으며, 거의 비슷한 모드(mode)로 증가하고 있기 때문이다. 강제급기에 의하여 진동과 소음을 억제하기 위한 효과적인 공기주입량은 수차 부분부하의 현장시험결과 수차발전기 사용수량의 약0.04%로 확인되었으며 콤프레셔의 용량은 수차 부분부하 운전시 130m<sup>3</sup>/sec 방류량의 0.1%에 해당하는 공기량 보다 훨씬 많은량의 급기(7kg/cm<sup>2</sup>, 13.8m<sup>3</sup>/min)가 가능하도록 선정하였다.

### 3. 급기량 변경 후 진동분석 및 성능평가

출력 및 급기량 변화에 따른 총진동값을 분석한 결과 정격낙차에서 출력 50MW 이상에서는 급기에 따른 총진동값의 영향이 없으며, 45MW 이하에서의 급기 유무에 따른 진동값의 영향은 있으나 급기를 100%(20m<sup>3</sup>/min)에서 50%(10m<sup>3</sup>/min) 로 변경시 진동값 차이는 미소하게 발생된 것을 확인할 수 있었다. 또한 충주발전소의 급기 최종설계 제안서에서 제시한 급기량은 부분부하 운전시 130m<sup>3</sup>/sec 방류량의 0.1%에 해당하는 공기량( $Q_a=8.1m^3/min$ )을 발생하는 콤프레셔 용량(7kg/cm<sup>2</sup>, 12m<sup>3</sup>/min)으로 여유를 주었다. 따라서 콤프레셔의 용량은 당초 7kg/cm<sup>2</sup>, 20m<sup>3</sup>/min.에서 7kg/cm<sup>2</sup>, 13.8m<sup>3</sup>/min로 변경시켜도 수차의 캐비테이션에 대한 성능유지에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 많은 양의 공기를 고압으로 압축하는 경우 screw type의 콤프레셔를 일반적으로 사용한다.

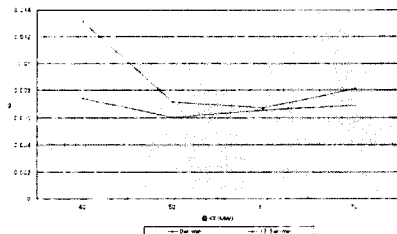


그림 8. g값 변화(출력 및 급기량 변경시)

그림 8은 수차 급기용 콤프레셔 교체 후 40, 50, 60, 70 MW의 출력에서 급기(13.8m<sup>3</sup>/min)와 미급기(0m<sup>3</sup>/min)시의 캐비테이션에 발생에 의한 진동값을 보여주고 있는데 콤프레셔의 용량을 감소시켜 급기량을 13.8m<sup>3</sup>/min로 변경한 결과 무급기 때와 비교할 때 진동값 감소량이 20.0m<sup>3</sup>/min 급기시와 같은 결과를 나타내었다.

## 4. 결 론

충주수력발전소에 설치된 강제 급기설비의 문제점 분석, 급기량 변화에 따른 캐비테이션 진동특성시험 실시와 분석 그리고 각종 연구보고서를 종합검토하여 개선조치한 결과와 결론을 요약하면 다음과 같다.

i) 자연급기장치와 강제급기장치의 가동과 출력 변화에 따라 소음과 진동을 측정한 결과 자연급기장치보다는 강제급기장치가 진동저감 효과가 훨씬 좋았음을 알 수 있었다.

ii) 급기는 캐비테이션 발생을 억제하는 역할 외에 발생 캐비테이션 붕괴 시에 내파력을 약화시키고, 급기된 공기방울이 캐비테이션에 의하여 전파된 소음과 변동압력을 감쇄시킨다는 점을 실험결과를 통하여 알 수 있었다.

iii) 당초 수차 급기량인 20m<sup>3</sup>/min에서 감소시켜 시험한 결과, 캐비테이션에 의한 소음, 진동 영향은 기존 용량의 약 70%인 13.8 m<sup>3</sup>/min까지 줄여도 안전 영역에서 운전되고 있음을 확인하였고 콤프레셔의 용량을 최적량으로 감소시켰으로써 연간 약28,500천원의 전력비를 절감할 수 있었다.

### [참고문헌]

- [1] 한국수자원공사. "수차 캐비테이션 감시장치 개발". 2000.
- [2] Roger E. A. Arndt. "Hydraulic Turbines" in "Hydropower Engineering Handbook" edited by John S. Gulliver and Roger E. A. Arndt, McGraw-Hill, New York, 1990.
- [3] Jack J. Fritz and Jean F. Henry, "Introduction" In "Small and Mini Hydropower Systems Resource Assessment and Project Feasibility" by Jack J. Fritz, McGraw-Hill, New York, 1984.
- [4] Carlyle Esser and James H. Sun, "Hydraulic Turbines" in "Standard Handbook of Powerplant Engineering" edited by Thomas C. Elliot, McGraw-Hill, New York.
- [5] C. C. Warnick, "Cavitation and Turbine Setting" In Hydropower Engineering, "Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.
- [6] Robert T. Knapp, James W. Daily, and Frederick G. Hammit, "Cavitation," McGraw-Hill, New York, 1984.
- [7] 한국수자원공사. "수차 캐비테이션 저감방안에 대한 연구". 1997.