

# 펌프 장기손상 메커니즘 규명을 위한 진동영향 평가

The vibration impact assessment for long-term damage mechanism of a pump.

김태현†·김형석\*·김동건\*·김원태\*·한병섭\*

T. H. Kim, H. S. Kim, D. K. Kim, W. T. Kim and B. S. Han

**Key Words** : Vibration(진동), Cavitation(캐비테이션), Long-term damage(장기 손상), Frequency(진동수)

## ABSTRACT

The most of the goals of pump designers and users are efficient operation and productivity. But the safety-grade pumps in nuclear power plants are needed to operate continuously for an essential condition of system operation. Also, most of the rules and regulatory standards that have been prepared for nuclear pumps are dedicated to achieve public safety. The study examined pump vibration in a pump outlet flow and distinguished the regions of pump vibration frequency cause by cavitation and recirculation. The study made a counterproposal in determination of pump outlet flow so that the discharge flow will be able to minimize the long-term damage of the pump.

## 1. 서 론

원자력발전소 계통에는 유체를 이송하기 위해 많은 펌프가 사용되고 있다. 발전소 각 계통에 사용되는 펌프들이 항상 일정한 유량에서 운전된다면 문제가 없으나 대부분의 경우 계통운전시 유량이 변하게 된다. 일반적으로 펌프는 일정한 범위 내에서만 운전이 가능하도록 설계되며 이 범위를 벗어난 유량 및 양정에서는 유체의 온도 상승이나 펌프 하중의 과도한 증가로 인한 진동, 소음, 공동현상 등 펌프 손상 요인이 발생하게 된다.

발전소 안전기기에 연결된 펌프는 비상상황 발생 시에 신속한 대처를 위하여 계속 운전이 요구된다. 펌프가 토출량이 없는 상태에서 기동하여 압력이 최대인 점에서 운전(체절운전)될 경우, 유체의 온도가 상승하여 펌프 부속품 및 모터에 무리가 발생하여 손상되므로, 이를 예방하기 위해 우회유량 배관을 설치하여 운영하고 있다. 이는 일정유량을 펌프 흡입측(일반적으로 흡입수조)으로 우회시킴으로써 계통의 유량을 제어하는 방법으로, 보통 최소유량 부근에서 유량을 제어할 필요가 있을 때 최소유량 조건을 만족시켜 주기 위하여 사용된다. 이 유량제어방법은 계통운전유량을 제어할 목적보다는 최소유량으로부터 펌프를 보호할

목적으로 사용되는 경우가 일반적이다.

본 연구에서는 펌프의 장기손상 메커니즘 규명을 위하여 우회운전으로 인한 펌프 하중의 제한적 토출유량이 발생할 경우에 내부 재순환이나 캐비테이션 등으로 유발되는 진동을 측정하여 펌프의 장기간 우회운전으로 인한 단계적 손상 경향을 파악하고자 하였다. 우회유량을 조절하면서 진동을 측정하고 결과에 대하여 FFT(Fast Fourier Transform) 방법을 이용해 시간영역 신호와 주파수 영역신호를 분석하여 진동영향에 대한 평가를 수행하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

### 2.1 실험 장치

펌프의 토출량을 조절하여 유량에 따른 진동 특성을 파악하기 위해서 Fig. 1의 배관 계장도와 같이 배관 순환 계통을 구성하였다. 실험 장치는 Chempump사의 G-Series 펌프, 유량계, 재순환수 공급용 탱크, 벨브류와 연계 배관계통으로 구성하였다. Chempump 사의 G-Series 펌프는 현재 일부 발전소에서 현재 사용되고 있는 기종으로서 안전기기 관련 펌프이다. 연계 배관은 원자력 발전소 설계시 주로 사용되는 스테인레스 배관(SA312 TP304, Stainless pipe, schedule 40)을 사용하였으며, 재순환수 공급용 탱크는 높이 5.6 m, 내경 4.6 m, 저장용량 5 ton 규모로 펌프 흡입측까지의 수두차를 보정하기 위하여 시험장치 바닥으로부터 1 m 높이에 위치시키고 입구측과 출구측 배관을 물탱

† 김태현: 정회원, (주)에네시스  
E-mail : thkim@enesys.co.kr  
Tel : (042) 825-3861, Fax : (042) 825-3866

\* (주)에네시스

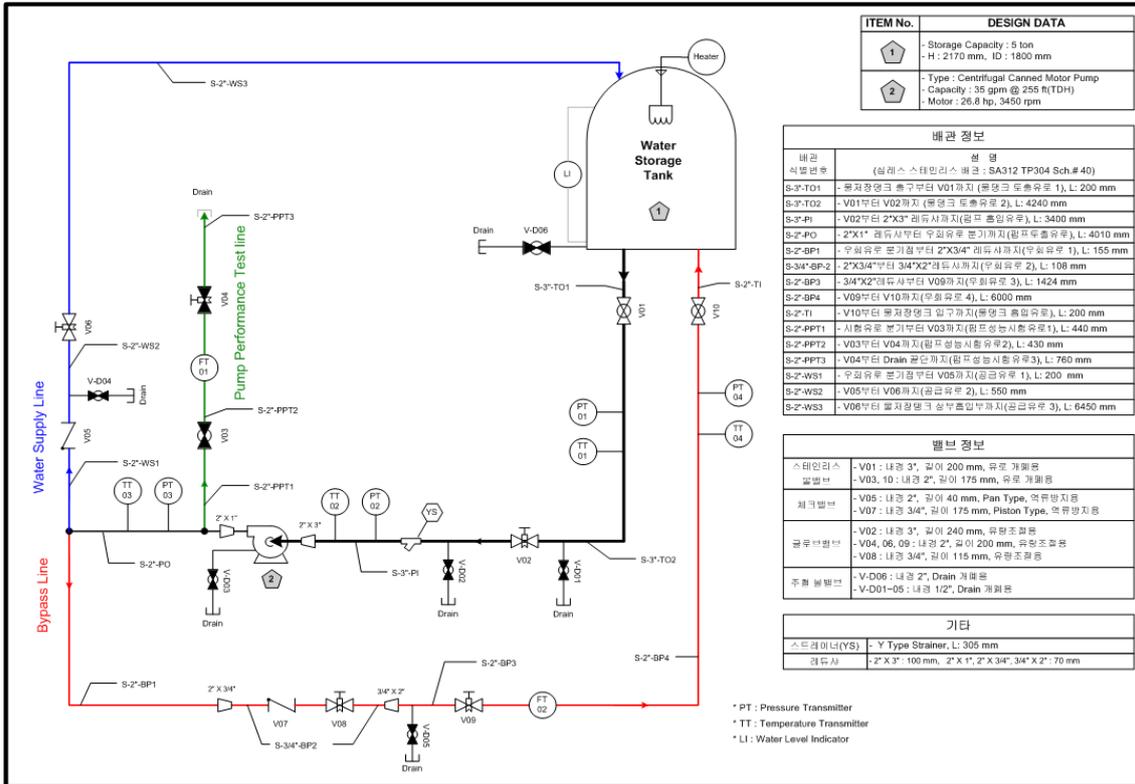


Fig. 1 Piping and Instrumentation Diagram for Vibration Test Loop

크 바닥으로 설치되도록 하므로 펌프 가동 및 계속 운전시 충분한 유량이 공급되도록 하였다. 펌프 후단과 유량 조절 밸브 사이에 체크 밸브를 설치하여 역유동 발생으로 인한 펌프 손상이 방지되도록 설계하였다.

## 2.2 측정 장치

펌프의 저유량 운전에 의해 발생하는 진동을 측정하기 위하여 계측 시스템을 구축하였다. 진동 측정 시스템은 진동 센서 ( Model 736, Acceleration 50g peak)와 NI 9233 (4ch,  $\pm 5V$ , 50kS/s, 24bit) 계측 장비 및 A/D 변환기를 사용하여 PC에 연결하였으며 그 결과를 5kHz 주기로 PC 데이터에 전송하였다. 진동 센서는 펌프 본체에 탭 방식으로 직접 장착하는 것이 가장 정확한 결과를 도출한다고 되어 있으나<sup>(1)</sup> 시험 시간 및 장비의 효율적 활용을 위하여 Fig. 2와 같이 회전축 대비 x, y, z의 3개축으로 변환 가능한 마운트 장비에 부착한 후 측정 방향별로 전환하여 사용하였다. 펌프 장착위치는 Fig. 3과 같이 모터와 하우징의 중간에 설치하였으며 회전축의 수직 상단 방향에 metal bond를 사용하여 고정하였다. 측정된 데이터를 PC에서 보정하고 저장하는 프로그램은 NI LabVIEW를 사용하여 자동으로 저장 및 분석하도록 프로그래밍하였으며(Fig. 4) 계측 결과를 FFT 분석을 통하여 주파수와 진폭에 대한 결과를 저장하였다.



Fig. 2 Acceleration type vibration sensor



Fig. 3 Pump and vibration sensor

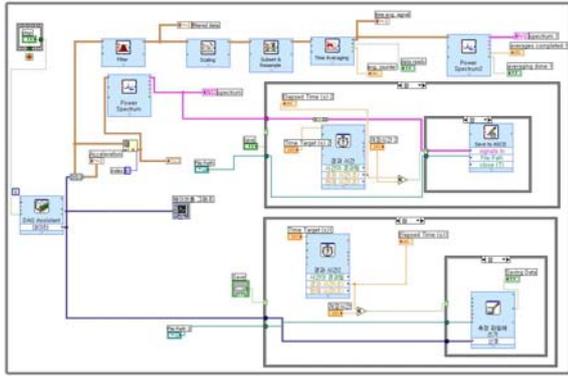


Fig. 4 Vibration transform and save program

### 2.3 실험 방법

펌프의 성능 저하는 일반적으로 진동적 요인, 수력학적 요인, 유지 보수 요인 및 모터로 인한 요인에 의하여 발생하는 것으로 알려져있다.<sup>(3)</sup> 이 중 진동적 요인은 부적절한 흡입 조건, 계통과 맞지 않거나 펌프 깃과 하우징 사이의 갭을 잘못 설계한 경우, 계통적 요인이나 펌프 내의 온도 상승에 의한 정렬 이탈, 밀봉이나 베어링의 손상 및 펌프 내 재순환 등에 의하여 발생한다. 진동적 요인을 발견하는 방법은 스펙트럼 분석, 음향 분석, 모드분석, 윤활 분석, 펌프 성능곡선 비교 등이 사용된다.<sup>(2,3)</sup>

본 연구에서는 펌프 후단의 밸브를 통해 유량을 조절하면서 펌프에 부착된 가속도계를 통한 축방향 진동 변화를 측정함으로써 진동적 요인을 분석하였다. 펌프의 유량은 우회 유로의 최대 유량인 60 lpm(L/min)에서 10~5%씩 줄여가며 유량에 따른 진동 변화를 측정하였다. 각 유량에 따른 진동의 추이를 확인하기 위하여 각각의 유량에서 20회의 진동 측정을 수행하였으며 그 값을 평균하여 그래프를 작성하고 3차 선형화를 통하여 그에 따른 기울기, 절편과 표준 오차를 표시하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 주 진동 방향 설정

회전축을 기준으로 축방향, 수평방향 및 수직방향에 대한 진동 측정을 수행하였다. 토출부 유량을 15.9gpm(60 lpm), 7.9gpm(29.9lpm), 5.3gpm(20.1lpm)과 1.6gpm(6.1 lpm)로 변화시켜 가면서 각 유량당 10분간 가동시켜 유동 패턴을 정상화 시킨 후 각각 10회 측정하여 평균하는 방법으로 진동 측정을 시작하였다. 모든 방향의 진동 데이터에서 공통적으로 60Hz와 270Hz 부근에서 유량의 감소에 따라 진폭이 증가하고 있다. 60Hz 주파수 영역에서의 진동은 모터 회전에 따른 주파수 영역이며, 270Hz 주파수 영역에서의 진동은 임펠러에 따른 주파수로서 유량 감소가 모터 회전 및 임펠러에 따른 주파수 영역의 진폭에 관여함을 나타낸다.<sup>(4)</sup> 축 방향 진동에서는 다양한 진동 유발 원인

에 의한 진동의 변화가 수직 및 수평 방향에 비하여 두드러지게 나타남으로 축 방향의 진동 측정이 전체 진동 측정을 대표하는 것으로 판단된다.

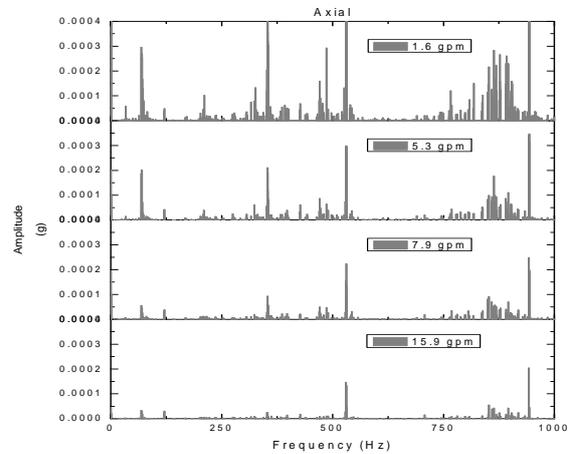


Fig. 5 Vibration graph in axial axis

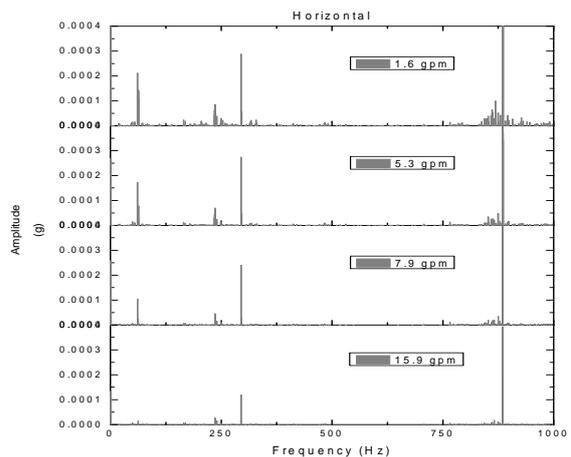


Fig. 6 Vibration graph in horizontal axis

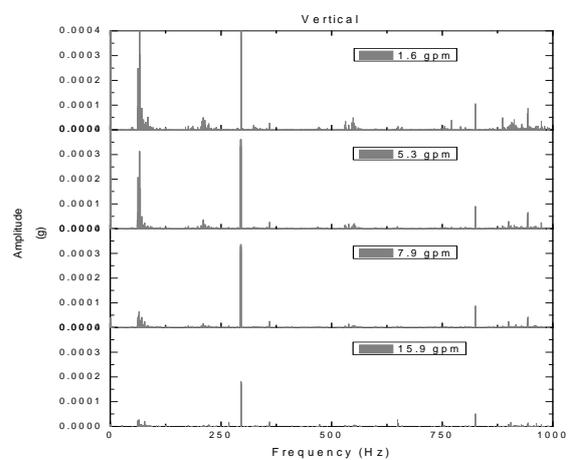
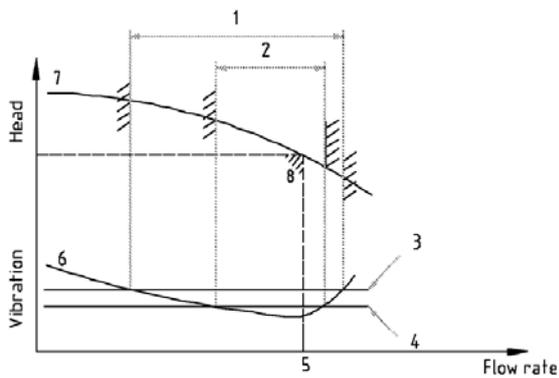


Fig. 7 Vibration graph in vertical axis

### 3.2 유량변화에 따른 진동 측정

축방향에 대한 진동 측정을 통하여 유량에 대한 진동 변화를 측정하였다. 유량과 진동의 전반적인 관계는 Fig. 8의 6번 커브와 같이 최적효율 운전점에서 최소의 진동을 보이며 유량이 최적효율점을 넘어서거나 줄어드는수록 진동이 커진다고 보고되어 있다.<sup>(1)</sup> 펌프의 허용유량 범위에서 최대 진동의 한계를 도출하기 위하여, 펌프 유량을 60 lpm에서 체절유량(0lpm)까지 줄여가면서 진폭을 측정하였으며 0~1kHz 범위와 3.5~5kHz 범위에서 FFT 변환을 통하여 그 값을 분석하였다.(Fig. 9) 0~1kHz 범위에서는 주요 주파수가 60Hz, 270Hz와 880Hz에서 관측되었으며, 60Hz의 주파수 범위는 모터 회전수에 의한 것으로 진동 측정이 원활함을 나타내며, 270Hz와 880Hz 영역은 깃 통과 영역 주파수로 판단된다. (Fig. 10)

펌프의 장기손상에 대한 주요 원인이 될 것으로 생각되는 cavitation에 의한 주파수 영역인 3~5kHz에 대한 진동 측정 결과는 다음 Fig. 11과 같다. 3.8~4.5kHz 영역의 피크가 주된 영역이며 유량 감소에 의해 그 값과 범위가 점차 증가함을 보이므로 이 영역이 cavitation에 의한 진동 영역임을 확인 가능하였다. Fig. 12는 3.8~4.5kHz 영역의 각 유량에서 평균 진폭을 한 표에 나타낸 결과이다. 토출부 유량 증가에 따른 진동의 변화는 두 개의 변곡점을 가지며 점차 감소하는 추세를 나타낸다. 진동의 경향을 분석하였을때 10 lpm 주변에서 현 시험 펌프의 진동이 급격하게 커지며 이는 펌프 토출부 유량을 10 lpm 이상으로 운전하는 것이 펌프 운전점으로 적정하며 최대 허용 가능한 진동 한계로 보는 것이 적절함을 나타낸다.



1. Allowable operating region of flow
2. Preferred operating region of flow
3. Maximum allowable vibration limit at flow limits
4. Basic vibration limit
5. Best efficiency point flowrate
6. Typical vibration vs. flowrate curve
7. Head-flowrate curve
8. Best efficiency point head and flowrate

Fig. 8 Relationship between flow and vibration

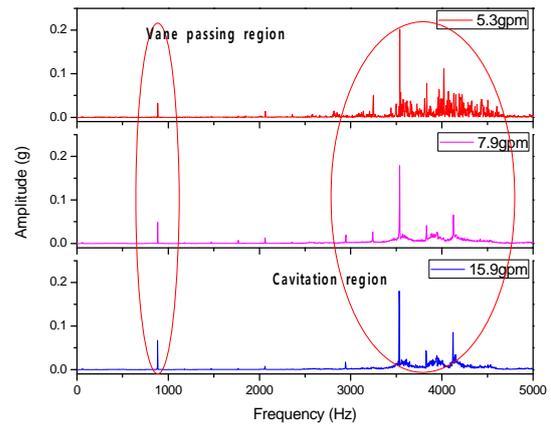


Fig. 9 Amplitude values at each flow rate

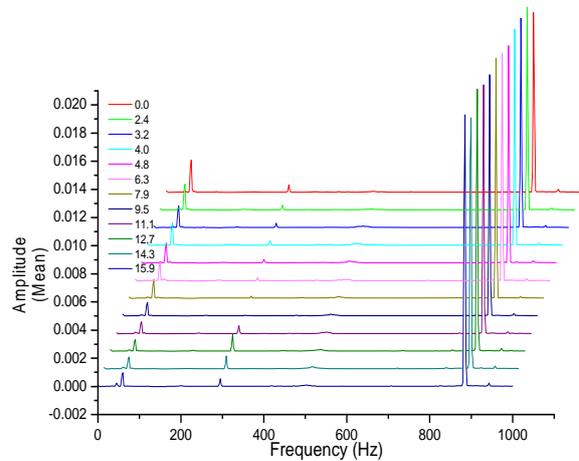


Fig. 10 Amplitude values in 0~1 kHz at each flow rate

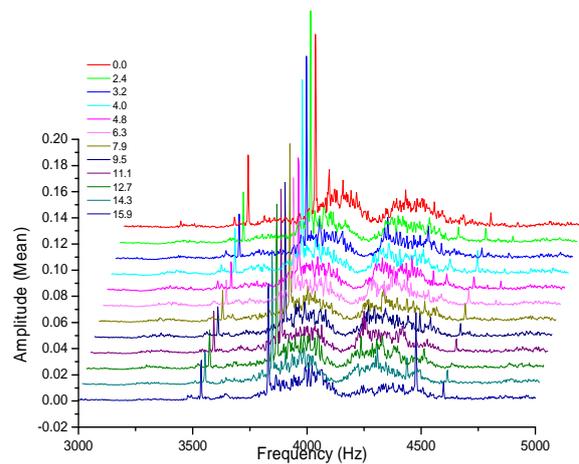


Fig. 11 Amplitude values in 3~5 kHz at each flow rate

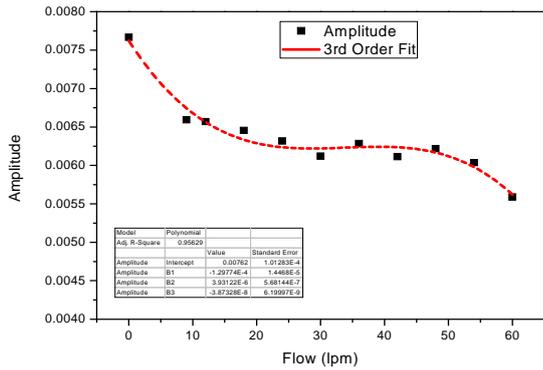


Fig. 12 Amplitude sum values in 3~5 kHz at each flow rate

#### 4. 결 론

본 연구에서는 펌프의 저 유량 운전시 진동의 발생과 진동이 펌프 손상에 미치는 영향을 평가하기 위하여 펌프 토출부에서 유량을 조절하면서 펌프 회전부에서의 진동을 관찰하였다.

(1) 펌프의 토출부 유량에 따른 진동 영향 측정은 모터 회전축을 기준으로 축방향, 수직방향, 수평방향 측정이 가능하나 유량 변화에 대하여 축방향 진동이 가장 민감하게 반응함을 보이고 있다.

(2) 저주파 영역의 진동(0~1kHz)은 모터 회전 및 기통과 영역을 나타내는 진동 영역으로써 토출부 유량 변화에 대한 영향이 비교적 적게 나타남을 보이고 있다.

(3) 고주파 영역의 진동(3~5kHz)은 cavitation 및 재순환 유동에 의해 나타나는 진동 영역으로써 토출부 유량에 민감하게 반응하며, 이 영역에 대한 진동을 측정함으로써 펌프 장기손상의 원인이 되는 계통의 기계적 최소 유량 결정이 가능하다.

펌프의 토출부 유량을 조절하며 진동 측정을 수행한 결과 시험에 사용한 펌프는 10 lpm이하에서 급격한 진동의 변화가 나타나며, 이 부근이 펌프의 장기손상을 예방할 수 있는 최소 유량임을 보여준다. 추후 펌프 진동 측정에 사용된 프로그램 및 최적 효율 유량을 넘어서는 경우에 대한 실험을 통해 보완하고 FEM을 통한 구조 응답 해석을 수행하여 펌프의 장기간 운전에 대한 경향을 분석한다면, 이를 통하여 펌프 장기손상에 대한 메커니즘 분석이 가능하며 원자력발전소의 안전등급 펌프나 소방 펌프등 계속 운전이 필요한 펌프들의 수명예측이 가능할 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- (1) API Standard 610, Ninth Edition, January 2003, "Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries"
- (2) PUMPS AND SYSTEMS, 1999, "Centrifugal Pumps Handbook"
- (3) Oak Ridge National Laboratory, 1995, "Detection of Pump Degradation." NUREG/CR-6089
- (4) D.A. Casada, and R.H. Greene, 1995, "Detection and Effects of Pump Low-Flow Operation", Oak Ridge National Lab, Oak Ridge, TN 37831-8038
- (5) 오광석 외, 1999, "펌프의 저 유량 운전특성에 관한 실험적 연구", 한국소음진동공학회지 Vol. 9, No. 1, pp.85~96.