

# 발전소 주급수 계통 감발 과정에서의 스윙체크밸브 닫힘 시점의 실험적 결정

## An Experimental Determination of a Swing Check Valve Closure Time in the Main Feed Water System of a Power Plant during Shut-down Process

서진성<sup>†</sup> · 김원민<sup>\*</sup>

Jin Sung Suh and Won Min Kim

(2009년 5월 26일 접수 ; 2009년 7월 20일 심사완료)

**Key Words** : Swing Check Valve(스윙체크밸브), Dynamic Pressure(다이나믹 압력), Pressure Pulsation(압력맥동), Pressure Difference(압력차), Order Tracking(차수분석)

### ABSTRACT

The reliable operation of a swing check valve in the main feed water system of a power plant is most essential for successful shut-down process. A failure to close the valve at proper time often leads to the instability of the main feed water system, or even to an emergency stop of the power plant. In reality it is a very difficult task to monitor the behavior of a swing check valve. Furthermore it is impossible to see the motion of the valve. In this work two measurements were carried out simultaneously to determine the precise valve closure time. The dynamic pressure measurements were made at the inlet and outlet regions of the swing check valve. The transient vibration of the valve housing in the direction of water flow was also measured, which enabled the measurement of the transient vibration of the valve housing near valve closure. By comparing the results produced from these measurements the precise valve closure time could be determined. By carrying out order tracking technique using the dynamic pressure signals and pump rpm signal, the complicated dynamic problems inside the main feed water system can be more easily dealt with. This measurement scheme might be implemented in a power plant on a real-time basis without much difficulty. If this could be implemented, valuable information essential for shut-down operations can readily be passed on to the main control room. The feasibility of this implementation was demonstrated by this experimental work.

### 기 호 설 명

$f_s$  : 샘플링 주파수

$\Delta p$  : 압력차

### 1. 서 론

스윙체크밸브는 지속적인 역류가 허용되지 않는 배관계(pipeline)에서 흔히 사용되는 밸브이다. 발전소에서는 정해진 기간 동안 정상 가동한 후, 계획에 방정비를 위하여 생산전력을 서서히 저하시키면서 완전한 정지상태에 이르도록 한다. 이 과정을 ‘감발’ 과정(shut-down process)이라 한다. 주급수펌프

<sup>†</sup> 교신저자; 정회원, 한국산업기술대학교 기계공학과  
E-mail : jssuh@kpu.ac.kr

Tel : (031)8041-0408

<sup>\*</sup> 한국전력기술주식회사 종합안전성평가 연구그룹

(main feed water pump)의 회전수 감소에 의해 펌프 토출유량(discharge flow rate)이 감소되면서 감발과정이 진행된다. 스윙체크밸브는 변화하는 유체의 흐름에 재빨리 반응하여야 한다. 특히 유체의 속도가 “영(zero)”으로 떨어질 때는 신속히 닫혀야 한다. Thorley와 Kruisbrink는<sup>(1,2)</sup> 스윙체크밸브의 동적 성능을 평가하기 위해 무차원화한 최대 역류 속도(non-dimensional maximum flow velocity)를 사용하였다. 닫힘 작용이 일어나지 않거나, 채터링(chattering) 등에 의해 닫힘과 열림 현상이 반복되면 주급수계통은 불안정해지며 감발과정을 제어하기가 매우 어렵게 된다. 때로는 발전소의 비상정지로 이어지기도 한다. 감발과정 진행 시, 스윙체크밸브 디스크의 각위치, 각속도 등 디스크의 변화하는 상태를 모니터링 하기에는 아직 많은 기술적 어려움이 존재한다. 특히, 디스크가 닫히는 시점을 정확하게 결정할 수 있다면 안전한 감발과정을 마치는 데 큰 도움을 줄 것이다.

과도상태 하에서 스윙체크밸브의 거동을 실험적으로 결정하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 대표적인 예를 들어 보면, Rahmeyer는<sup>(3)</sup> 투명 플라스틱 뷰포트(viewport)를, Kruisbrink는<sup>(4)</sup> 포텐시오미터(potentiometer)를 사용하여 각각 디스크 거동을 관찰하고, 디스크 각도를 측정하였다. 그러나 이러한 방법들을 발전소 현장에 직접 적용하기란 현실적으로 매우 어렵다. Au-Yang<sup>(5)</sup>은 스윙체크밸브 디스크의 변화하는 각도를 측정하기 위하여 초음파 신호를 사용하였으며, 이 방법을 흔히 UT-Scan이라고 한다. 밸브 하우징(valve housing)의 두께가 두껍고 디스크 주위에 기포가 많이 발생할 때에는 디스크 각도를 결정하는 데 어려움이 수반될 수 있다.

또한 이론적인 방법을 사용하여 디스크 거동을 시뮬레이션하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구들은 ‘디스크에 작용하는 모든 토크들의 합은 디스크 각운동량의 시간변화율과 같다’라고 하는 이론에 근거를 두고 있다. 디스크에 작용하는 모든 토크들과 디스크의 각운동량은 힌지(hinge)의 회전축에 대하여 취한다. 밸브 디스크 면에 작용하는 하이드로릭 토크(hydraulic torque)는 디스크 면에 작용하는 압력분포에 의해 결정된다. 밸브 디스크 거동을 결정하는 가장 중요한 요소가 하이드로릭 토크이므로 이 압력분포를 정확하게 계산하는 것이

중요하다. 그러나 디스크가 닫히면서 발생하는 과도상태 하에서, 디스크 면에 작용하는 압력분포는 빠르게 변한다. 이러한 압력분포를 이론과 실험을 통하여 정확하게 결정하는 작업은 거의 불가능하다. 디스크 주변 유체의 비정상 유동(unsteady flow)과 복잡한 유동 패턴을 측정하고 모델링하는 작업이 매우 어렵기 때문이다. 디스크 면에 작용하는 압력분포는 흐르는 유체의 유속분포, 디스크의 각위치와 각속도 등 복잡한 파라미터들의 함수이다<sup>(6)</sup>. 하이드로릭 토크를 근사적으로 구하기 위하여 다양한 모델링 방법들이 시도되어 왔다. Kane과 Cho는<sup>(7)</sup> 실험적으로 구한 토크계수(torque coefficient)를 구하여 하이드로릭 토크를 계산하였으나, 디스크와 디스크를 통과하는 유체사이의 상대속도가 “0”일 때 토크계수가 무한대가 되는 문제점을 가지고 있다. Ellis와 Muall은<sup>(8,9)</sup> 유동계수(flow coefficient)와 댐핑계수(damping coefficient)를 사용하여 하이드로릭 토크를 계산하였다. 그러나 유동계수의 결정 시, 디스크와 디스크를 통과하는 유체사이의 상대속도와 디스크의 회전을 고려하지 않았다. 그리고 댐핑계수는 디스크의 각속도에 영향을 받지 않는다고 가정하였다. Kruisbrink는<sup>(4)</sup> 하이드로릭 토크를 결정하는 많은 물리적 파라미터들을 무차원화하여 접근하는 방법을 소개하였다.

이 논문은 주급수계통에 있는 스윙체크밸브 디스크의 입구측 및 출구측의 압력(dynamic pressure)과 밸브 하우징(valve housing)의 유속방향 진동을 동시에 측정하여 디스크의 닫힘 시점을 실험적으로 결정하는 방법을 제시한다. 주급수계통 배관내부의 정압 성분과 압력맥동(pressure pulsation) 성분의 합인 다이내믹 압력(dynamic pressure)을 측정하기 위하여 압전소자(piezoelectric material)를 사용한 다이내믹 압력센서를 선택하였다. 왜냐하면, 주급수 펌프 샤프트와 베인(vane)의 회전에 의한 가진(excitation)과 배관의 구조진동에 의하여 배관 내부의 유체압력은 정압성분 뿐만 아니라 시간에 따라 빠르게 변화하는 압력맥동 성분으로 이루어지기 때문이다. 기존의 발전소, 화학 플랜트, 상수도 설비 등에 설치된 앰뉴바(annubar) 등의 압력센서로는 압력맥동 성분을 측정할 수 없다. 그리고 압력맥동 성분이 클 경우 대부분의 유량계는 오차를 수반하는 것으로 알려져 있다<sup>(10)</sup>. 다이내믹 압력은 주급수펌

프 입구측(inlet), 스윙체크밸브의 입구측과 출구측(outlet) 등 모두 세 곳에서 측정하였다. 그리고 펌프 샤프트의 회전수도 동시에 측정하였다. 디스크가 닫히는 시점 전후에서는 유체유동의 과도현상(transient phenomena)에 의해서 밸브 하우스의 과도진동(transient vibration)이 발생한다. 따라서 밸브 하우스 밀면에 가속도계를 부착하여 유체흐름방향의 진동을 측정하였다. 이렇게 측정한 다이내믹 압력과 진동을 분석, 비교함으로써 디스크 닫힘시점을 결정하였다. 그리고, 펌프 샤프트의 키페이지(key phasor)에서 발생하는 타코(tacho)신호와 다이내믹 압력신호를 이용하여 회전차수분석(order tracking)을 수행하여 디스크 닫힘 시점을 결정하는 데 필요한 자료로 활용하였다. 회전차수분석을 수행한 결과를 분석하면 복잡한 배관내부의 다이내믹 문제를 해결하는데 도움을 제공할 수 있음을 보여 주었다.

## 2. 주급수계통의 계측

### 2.1 실험의 셋업

주급수계통의 개략적인 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 주급수계통 배관의 내경은 45.72 cm이다. 주급수 펌프(main feed water pump)는 원심펌프이며 6개의 베인(vane)을 가진다. DP1, DP2, DP3는 다이내믹 압력센서를 설치한 위치를 나타낸다. DP1은 주급수 펌프의 입구측을 나타내며, DP2와 DP3는 스윙체크밸브의 입구측과 출구측을 각각 나타낸다. Fig. 2는 스윙체크밸브 디스크와 힌지(hinge) 부분의 실제모습을 보여 준다. 디스크 외경의 밝은색 림(rim) 부분은 디스크가 닫힐 때에 밸브하우스(valve housing) 내부에 있는 밸브시트(valve seat)와 접촉하는 부분이다. 림 내부의 짙은 회색부분의 직경은 배관의 내경과 같은 45.72 cm이다. 디스크의 질량은 약 48 kg 이다. Fig. 3은 가속도계(accelerometer)를 부착한 밸브하우스의 실제 모습을 보여준다. 가속도계는 밸브시트 바로 하단에 부착했다. 밸브하우스의 외부 표면온도는 섭씨 140도 정도이다. 내부에는 고온, 고압의 물이 흐르고 있기 때문이다. 섭씨 250도의 조건 하에서도 진동측정이 가능한 가속도계를 사용하였다.

가속도계를 밸브하우스 밀면에 고정시키기 위하여 이 둘 사이에 자석력이 530 Newton인 자석을

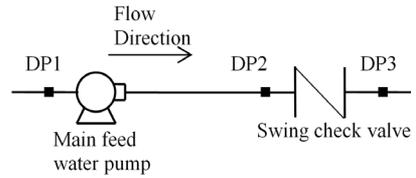


Fig. 1 Schematic of the test. DP1, DP2, DP3 represent the dynamic pressure sensor locations



Fig. 2 Swing check valve disk and hinge

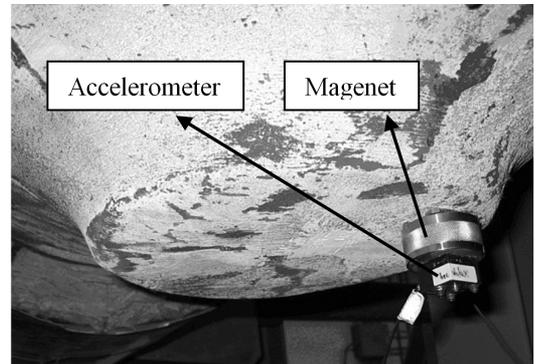
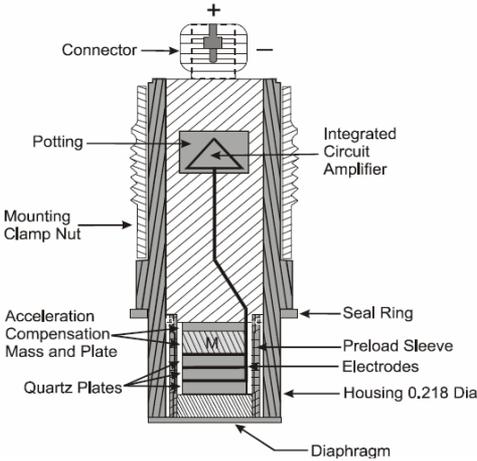


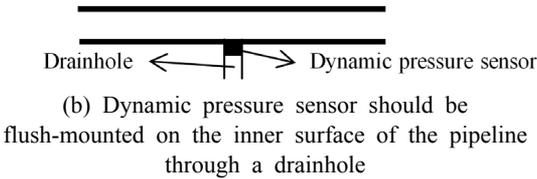
Fig. 3 Accelerometer is fixed on the underneath of the swing check valve housing by using a magnet

이용하였다. 가속도계로 유체흐름방향의 밸브하우스 진동을 측정하였다.

정압뿐만 아니라 빠르게 변화하는 압력맥동(pressure pulsation)을 측정하기 위하여 압전 소재인 수정(quartz)으로 제작한 다이내믹 압력센서를 사용하였다. Fig. 4는 압력센서의 상세구조와 장착방법에 대해 기술하였다.



(a) Detailed structure of dynamic pressure sensor (manufactured by PCB Piezotronics, Inc.)



(b) Dynamic pressure sensor should be flush-mounted on the inner surface of the pipeline through a drainhole

Fig. 4 The dynamic pressure sensor

Fig. 1에서 DP1은 펌프 입구측 플렌지(inlet flange)에서 유동 반대방향으로 1.5 미터 떨어진 지점에 설치하였다. DP2는 디스크 힌지축으로부터 유동 반대방향으로 1미터, DP3는 디스크 힌지축으로부터 유동방향으로 1.5 미터 떨어진 지점에 설치하였다. 주급수계통 감발과정에서 발생하는 이벤트의 기준을 펌프 회전수인 rpm으로 정하는 것이 타당하므로 펌프 샤프트에 설치한 키페이저(key phasor)로부터 발생하는 펄스 신호를 압력 및 진동 신호와 동시에 취득하였다. rpm은 1분당의 샤프트 회전수를 의미한다.

## 2.2 실험 결과

앞으로 제시하는 데이터는 감발 과정의 일부분으로서, 감발이 시작된 직후부터 20분(=1200초) 동안 신호를 수집하여 분석한 결과이다. 다이내믹 압력신호와 진동신호는 컷오프 주파수(cut-off frequency)가 5 kHz인 아날로그 저역통과 필터(low-pass filter)를 통과시킨 후 12.8 kHz의 샘플링 주파수  $f_s$  (sampling frequency)로 샘플링하였다. Fig. 5에는 600.00 ~ 600.11초 사이의 0.11초 구간 동안 수집한

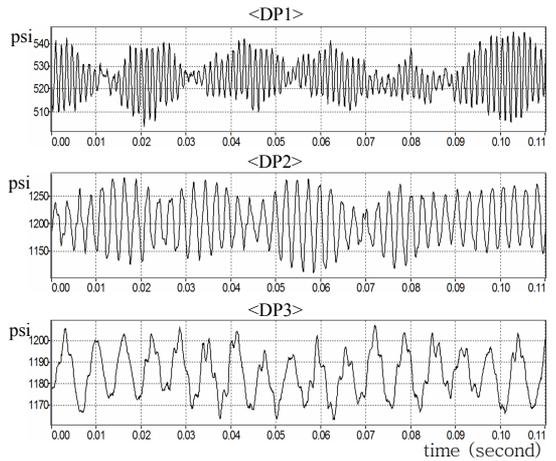


Fig. 5 Time data of dynamic pressure at DP1, DP2, DP3

DP1, DP2, DP3에서의 다이내믹 압력 변화를 나타내었다. DP1, DP2, DP3의 위치는 Fig. 1에 나타내었다. 펌프 입구측 압력(suction pressure)은 대체로 525 psi 정도되는 정압성분과 시간에 따라 변화하는 압력맥동 성분의 합이라는 것을 알 수 있다. 펌프 출구측 압력(discharge pressure)은 1200 psi 정도되는 정압성분과 시간에 따라 변화하는 압력맥동 성분의 합이라는 것을 알 수 있다. 다이내믹 압력센서를 사용함으로써 시간에 따라 빠르게 변화하는 압력맥동 성분을 측정할 수 있음을 확인할 수 있다. 주급수펌프는 평균 525 psi의 물을 평균 1200 psi의 물로 가압하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에는 600.00 ~ 600.11초 사이의 0.11초 구간 동안 밸브하우징 하단의 진동신호를 나타냈다. 압력신호보다 더 높은 주파수 성분을 포함하고 있음을 알 수 있다.

디스크 입구측과 출구측 사이의 다이내믹 압력차  $\Delta p$ (pressure difference)는 디스크의 닫힘 여부를 판단하는 데 매우 중요한 정보를 제공한다. Fig. 7은 DP2와 DP3 사이의 순간 압력차와 이것을 0.3초 동안 산술평균을 취한 평균 압력차를 보여준다. 평균 압력차가 감소하는 경향을 관찰하면 디스크가 닫히는 시점을 알 수 있다. 즉, 평균 압력차가 “0”이 되는 시점 근처에서 디스크가 닫힐 것이며 대체로 840초 되는 지점이다.

디스크가 닫히는 시점 부근에서는 급격한 유동상태의 변화가 일어날 것이며 이것은 밸브하우징의

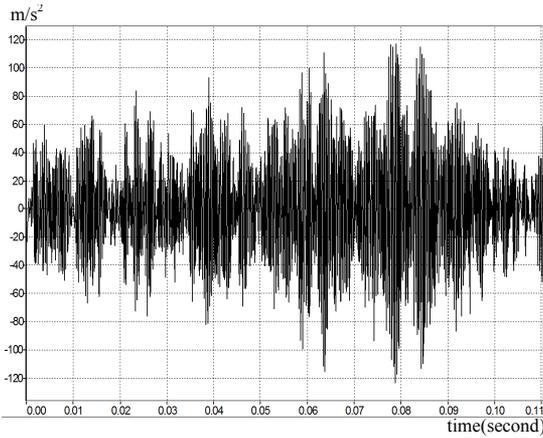
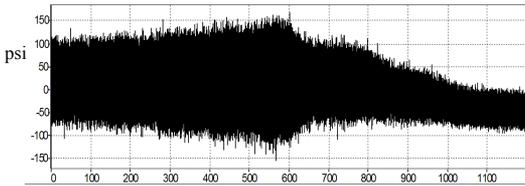
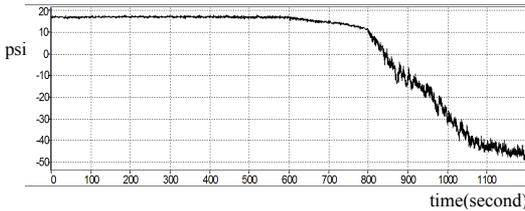


Fig. 6 Time data of valve housing vibration



(a)

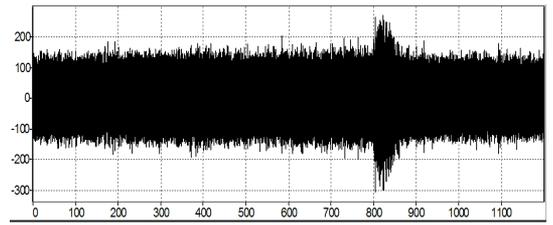


(b)

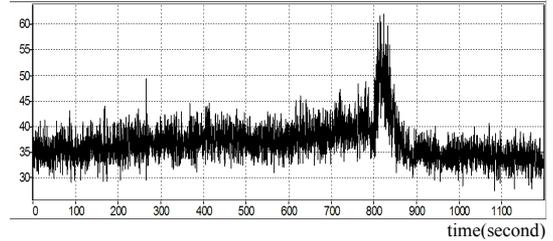
Fig. 7 Pressure difference(DP2-DP3) (a) instantaneous pressure difference (b) averaged pressure difference(0.3 sec arithmetically averaged)

과도 진동(transient vibration)을 유발할 것이다. 밸브하우징의 과도진동을 측정하여 압력차와 비교함으로써 더욱 확실한 디스크의 닫힘 시점을 결정할 수 있다. Fig. 8은 밸브하우징의 순간 진동과 0.3초 동안의 RMS(root mean square) 평균 진동을 구하여 나타낸 것이다. 800~850초 구간에서 하우징의 과도진동이 발생함을 확인할 수 있다.

1200초 동안의 펌프 rpm, 평균압력차, 평균진동의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 밸브 디스크는 감발을 시작한 후 약 840초 후, 펌프 회전수가 3908 rpm 정도에서 디스크가 닫혔다고 결론을 내릴 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 8 Valve housing vibration (a) instantaneous vibration (b) averaged vibration(0.3 sec rms averaged)

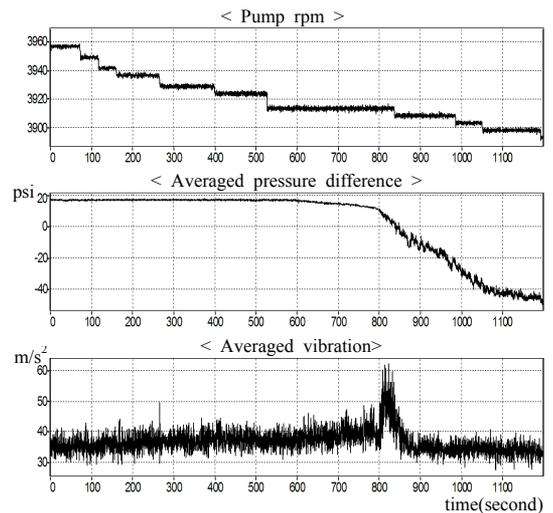


Fig. 9 Changes in pump rpm, averaged pressure difference, averaged vibration

### 2.3 다이내믹 압력의 회전차수 분석

다이내믹 압력신호와 펌프 키펀더 신호를 취득함으로써 얻을 수 있는 중요한 정보와 이점에 대하여 언급하고자 한다. 주급수계통의 주 가진원(primary excitation source)은 주급수 펌프이다. 주급수 펌프는 6개의 베인(vane)을 가지는 원심펌프(centrifugal pump)이다. 펌프의 회전수가 변화하면 가진



Fig. 10 Pump shaft with 6 vanes.(centrifugal type)

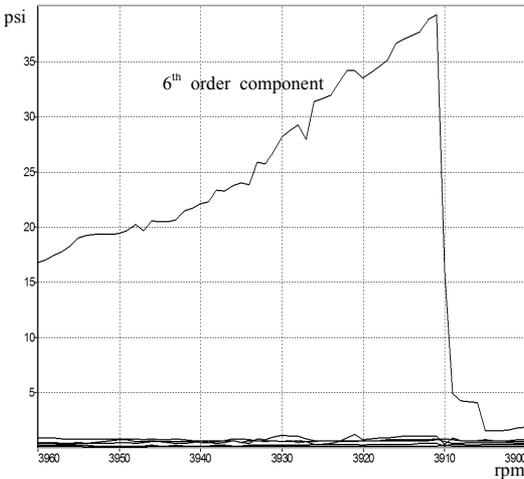


Fig. 11 Order tracking of pump discharge pressure (DP2)

주파수 성분들 또한 변화한다. 배관라인은 큰 구조체로서 구조진동을 하고 있다. 배관라인을 흐르는 유체는 펌프로부터 가진력을 받음과 동시에 배관 구조체와 상호작용을 함으로 복잡한 압력맥동 현상을 나타낸다<sup>(11)</sup>.

펌프 회전수가 감소하면서 나타나는 회전수의 여러가지 정수배에 해당하는 압력맥동 주파수 성분들의 변화를 분석함으로써 배관 내부에 일어나는 복잡한ダイナ믹 현상을 이해할 수 있다. 이 방법을 회전차수분석 또는 오더 트래킹(order tracking)이라고 한다. Fig. 10은 6개의 베인을 포함하는 펌프 샤프트의 실제 모습을 보여준다. Fig. 11에는 펌프 토출 압력인 DP2의 회전차수 분석 결과를 나타내었다. 샤프트의 회전수에 해당하는 압력맥동 성분을 1차 성분이라고 한다. 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 12, 18, 24, 30, 36차 성분들을 모두 구하여 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11의 세로축은 rms 진폭(=0.707×진폭)이며, 단위는 psi이다. 6차 성분 압력맥동이 다른 차수 성분들보다 월등히 높다는 것을 알 수 있다. 베인이 6개이므로, 펌프 토출 압력맥동은 대부분 펌프 베인에 의해 발생함을 알 수 있다. 펌프 회전수가 3960 rpm에서 3900 rpm으로 감소하면서 음향공진(acoustic resonance)이 발생하였다가 디스크가 닫히기 직전에 공진현상이 급격히 사라지는 현상을 관찰할 수 있다. 이는 디스크가 닫히면서 경계조건이 급격히 변화하기 때문이다. 이 현상 또한 디스크가 닫히는 시점에 대한 정보를 제공해 준다. 3908 rpm에서 디스크가 닫혔음을 시사해주고 있다.

### 3. 결 론

이 논문에서는 스윙체크밸브 디스크 입구측과 출구측의 다이내믹 압력 차이, 그리고 유체흐름방향의 밸브 하우징 진동을 동시에 측정함으로써 디스크의 닫힘 시점을 결정할 수 있음을 보여주었다. 디스크가 채터링을 반복한 후 디스크가 닫히는 경우에도 이 방법을 사용함으로써 채터링에 의한 일시적인 닫힘 시점과, 최종적으로 완전하게 닫히는 시점을 결정할 수 있었다. rpm신호와 다이내믹 압력신호를 취득하여 회전차수분석을 수행하면 복잡한 다이내믹 현상을 규명하는 데 필요한 정보를 얻을 수 있다. 다이내믹 압력센서와 진동센서를 주급수계통에 설치하여 스윙체크밸브 디스크 전후 평균차압과 밸브 하우징의 평균진동 신호를 실시간(real-time)으로 주관제실로 전송하면 감발과정을 제어하는 데 도움을 제공할 수 있다.

### 참 고 문 헌

- (1) Thorley, A. R. D., 2004, "Fluid Transients in Pipeline Systems," ASME Press, New York.
- (2) Kruisbrink, A. C. H., 1997, "The Dynamic Behavior of Check Valves," Delft University Press.
- (3) Rahmeyer, W. J., 1993, "Sizing Swing Check Valves for Stability and Minimum Velocity Limits," ASME J. Pressure Vessel Technol., Vol. 115, pp. 406~410.
- (4) Kruisbrink, A. C. H., 1996, "The Dynamic

Behavior of Check Valves in Pipeline Systems,” Ph.D. dissertation, City University of London.

(5) Au-Yang, M. K., 1993, “Acoustic and Ultrasonic Signals as Diagnostic Tools for Check Valves,” ASME J. Pressure Vessel Technol., Vol. 115, pp. 135~141.

(6) Wylie, E. B., 1993, “Fluid Transients in Systems,” Prentice-Hall, Inc., New York.

(7) Kane, R. S. and Cho, S. M., 1976, “Hydraulic Performance of Tilting-disk Check Valves,” J. of Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., HY1, pp. 57~72.

(8) Ellis, J., Mualla, W. M., 1983, “Hydraulic Performance of Tilting-disk Check Valves,” J. of Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., HY1, pp. 57~72.

(9) Ellis, J. and Mualla, W. M., 1986, “Numerical Modeling of Reflux Valve Closure,” ASME J. Pressure Vessel Technol, Vol. 108, No. 1, pp. 92~97.

(10) Akhavan, R., Kamm, R. D., Shapiro, A. H., 1991, “An Investigation of Transition to Turbulence in Bounded Oscillatory Stokes Flow, Part I,” Journal of Fluid Mechanics, Vol. 225, pp. 415~428.

(11) Bae, Y. C., Lee, Y. S. and Kim, Y. H., 2005, “Countermeasure on High Vibration of Branch Pipe with Pressure Pulsation Transmitted from Main Steam Header,” Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 8, pp. 988~995.