

# 가속도계를 이용한 배관 변위 진동 계측에 관한 연구

## A Study on the Measurement of the Pipeline Displacement Vibration Using Accelerometers

서진성<sup>†</sup>  
Jin Sung Suh

(Received April 15, 2013 ; Revised May 12, 2014 ; Accepted May 15, 2014)

**Key Words** : Pipe Displacement Vibration(배관 변위 진동), Accelerometer(가속도계), Non-contact Displacement Sensor(비접촉 변위센서), Fourier Transform(푸리에변환), Downsampling(다운샘플링)

### ABSTRACT

The stress analysis of the pipeline is required in any kind of plant for its safe operation. For this, the displacement vibration data measured at many locations of the pipeline should be provided. In reality, the installation of the non-contact type displacement sensors such as laser displacement sensors or eddy current type proximity sensors in a narrow and confined region in the vicinity of the pipeline is almost impracticable. In this work, the general purpose piezo-ceramic accelerometers were attached on the measuring points on the pipeline and the acceleration vibration signal was acquired. The measured acceleration signal was low pass filtered and then downsampled. The resulting acceleration signal was transformed into both the time-domain and frequency-domain displacement signal utilizing the fast Fourier transform techniques. All the procedures are presented in detail. It is demonstrated that the measurement of the pipeline acceleration by using contact type accelerometers can be made for the purpose of providing the required displacement data for the stress analysis of the pipeline.

### 1. 서론

플랜트 배관시스템의 안전성을 평가하기 위하여 배관 응력해석을 수행하게 되며 배관 응력해석의 입력 데이터로 저주파 영역에서의 배관 변위진동 데이터가 제공되어야 한다. 변위진동 데이터는 시간영역뿐만 아니라 주파수 영역 모두에서 제공되는 것이 좋다. 특히 플랜트의 정지 및 기동 시에는 배관시스템에 큰 레벨의 과도 진동이 발생한다. 이러한 과도

상태 하에서 취득한 변위진동 데이터를 사용하여 배관의 응력해석을 수행할 필요가 있다.

배관 진동은 수많은 원인들에 의해 발생한다. 배관 진동은 발생 원인에 따라 구조진동(structural vibration)과 유체유발 진동(flow-induced vibration)으로 분류할 수 있다. 배관 진동 계측과 관련하여 현재까지 보고된 연구결과 중 대표적인 몇 가지 연구 사례를 소개하고자 한다.

수격현상(water hammer)으로 인한 배관시스템의 과도 진동 응답을 측정하고 유한요소 해석 결과와

<sup>†</sup> Corresponding Author ; Member, Dept. of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic University  
E-mail : jssuh@kpu.ac.kr  
Tel : +82-31-8041-0408, Fax : +82-31-8041-0419

<sup>‡</sup> Recommended by Editor Hyung-Jo Jung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

비교한 연구가 있다<sup>(1,2)</sup>. 배관 분기 등 유체유발 진동<sup>(3-6)</sup>을 초래하는 요소들에 의해 발생하는 배관 진동을 측정하고 배관의 손상원인을 규명한 연구가 있다<sup>(7,8)</sup>. 측정된 배관 압력과 배관 진동 데이터를 이용하여 배관계의 진동저감을 위한 마운트 설계 기법을 제시한 연구결과도 있다<sup>(9)</sup>. 그리고 체크밸브(check valve)의 개폐로 발생한 배관의 과도진동을 측정한 연구사례들이 있다<sup>(10-13)</sup>.

지금까지 보고된 연구 결과를 검토해 보면, 배관 진동 측정 시 변위센서를 사용하여 변위진동을 측정한 사례는 거의 없으며 대부분 접촉식 센서인 가속도계와 속도계를 사용하였다. 이 사실은 플랜트 현장에서 여러 개의 비접촉 변위센서들을 배관 표면의 측정 위치에 동시에 설치하기가 어려움을 반증해 준다. 플랜트에서는 배관의 가속도 진동과 속도 진동뿐만 아니라 변위 진동 데이터가 필요한 경우도 많으며, 배관 응력 해석을 수행할 때는 변위 진동이 입력데이터로 제공되어야 한다. 변위 진동을 측정하기 위해서는 비접촉 센서인 레이저 변위센서와 와류(eddy current)타입의 근접센서 등을 사용해야 한다. 그러나 비접촉식 변위센서들을 배관계의 여러 측정 위치에 동시에 설치하는 것은 큰 어려움을 수반하며 현실적으로 불가능한 경우가 대부분이다. 왜냐하면 플랜트 배관계통 주위의 협소한 공간적 제약 조건 때문에 비접촉 변위센서를 고정하기 위한 지그(jig) 설치 공간이 거의 없기 때문이다. 비접촉 변위센서를 쓰기 힘든 다른 현실적인 이유는 설치공간의 문제뿐만 아니라 변위센서를 지지하는 지그의 진동도 상대변위로 측정되어 순수한 배관 진동만 측정하기 어렵기 때문이다. 그러므로 여러 가지 제약 조건이 있는 환경에서 배관의 진동 측정지점에 쉽게 부착할 수 있는 접촉식 센서를 사용하여 가속도 데이터를 취득한 후 이를 두 번 적분하여 변위 데이터를 얻을 수 있다면 매우 편리할 것이다.

이 연구에서는 배관계통의 응력해석에 필요한 변위진동 데이터를 얻기 위해서 사용이 간편한 피에조 세라믹(piezo ceramic) 가속도 센서들을 배관 표면의 측정지점에 부착하여 가속도진동을 취득하였다. 그리고 가속도진동 데이터에 신호분석 기술을 적용하여 배관 측정지점의 시간 영역과 주파수 영역에서의 변위진동을 얻는 과정을 기술하였다.

## 2. 가속도 진동 측정

### 2.1 측정을 위한 셋업

Fig. 1에 배관계통의 일부분에 2개의 가속도를 부착한 모습을 나타내었다. 각각의 가속도계는 수평방향과 상하방향의 가속도 진동을 측정한다. Fig. 2는 곡면인 배관 표면에 네오디뮴(neodymium) 자석을 이용하여 가속도계를 부착한 모습을 보여 준다. 배관 표면 바로 가까이 비접촉 변위센서를 고정하기가 매우 어려운 환경임을 알 수 있다.

Table 1에 사용한 가속도계의 사양을 표시하였다. 배관 표면 온도가 120 °C 이므로 고온용 가속도계를 사용하였다. Table 2에 진동신호분석기의 가속도 신호 취득조건을 나타내었다.



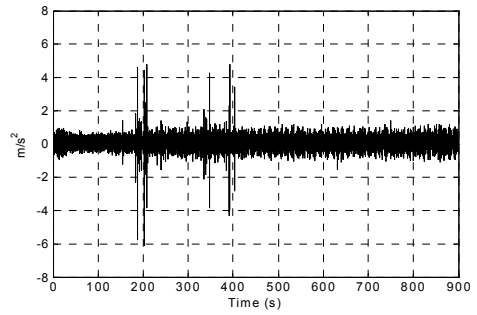
Fig. 1 Two accelerometers attached on the pipe for measuring pipe accelerations in vertical and to-and-fro directions



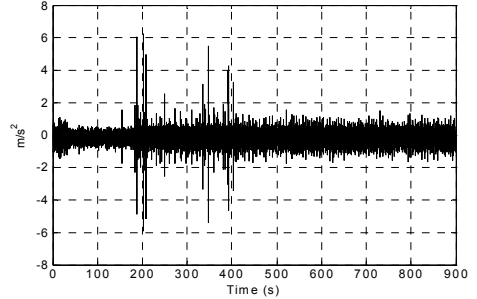
Fig. 2 Attachment of an accelerometer on the pipe using a neodymium magnet having 530 Newton of magnetic force

### 2.2 가속도 진동 측정 결과

가속도 진동 데이터는 0 Hz~5000 Hz 주파수 영역에서 90초 동안 취득하였다. 대부분의 플랜트 배관 변위 진동은 저주파 영역에서 높은 레벨을 나타낸다. 다음 절(section)에서 제시하였듯이, 이번 연구에서 측정된 배관의 변위 진동은 20 Hz 이하의 주파수 영역에서 높은 진동레벨을 나타냈으며, 20 Hz 이상의 성분은 매우 미약하였다. 가속도 측정지점은 Fig. 1에 나타내었다. 5000 Hz 성분까지 가속도 신호를 취득한 이유는 20 Hz 이상의 주파수 영역에서 진동현상을 분석하려면 가속도 신호가 필요하기 때문이다. 취득한 가속도 데이터에 Butterworth 로우패스 필터를 적용하여 0 Hz~30 Hz 영역의 가속도 진동 데이터를 얻었으며, 그 결과를 Fig. 3에 제시하였다. 높은 레벨의 과도진동이 나타나는 180초~220초 구간의 가속도 데이터에 푸리에변환(Fourier transform)을 취하여 구한 주파수 스펙트럼은 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보듯이 0 Hz~1 Hz 영역에서 비교적 작은 가속도 성분이 나타나는 이유는 측정센서의 주파수 응답 특성에 따른 낮은 감도와 분석기의 필터 특성 때문인 것으로 판단된다. Table 1에서



(a) Acceleration in vertical direction



(b) Acceleration in to-and-fro direction

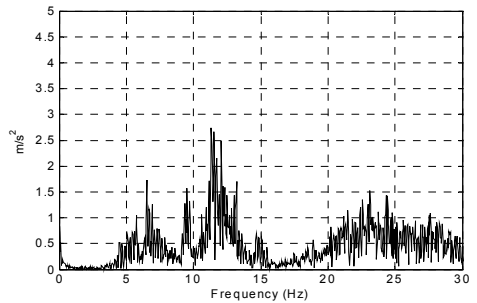
Fig. 3 Time-domain accelerations in the 0 Hz~30 Hz range at the locations shown in Fig. 1

Table 1 Accelerometer specifications

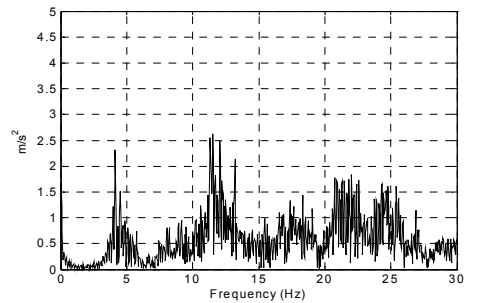
Specifications	Values
Sensitivity	10.2 mv/m/s <sup>2</sup>
Measurement uncertainty	±5 %
Measurement range	±490 m/s <sup>2</sup>
Sensing material	Piezo ceramic
Frequency range	0.58 Hz~5000 Hz
Resonant frequency	20 kHz
Transverse sensitivity	≤5 %
Temperature range	-54 °C~160 °C

Table 2 Data acquisition conditions of the vibration analyzer

Acquisition conditions	Values
Sampling frequency	12800 samples/s
Measurement frequency range	0 Hz~5000 Hz
AD converter	24 bit
High pass filter cutoff frequency	0.5 Hz
Low pass filter cutoff frequency	6400 Hz



(a) Acceleration in vertical direction



(b) Acceleration in to-and-fro direction

Fig. 4 Frequency spectrum of accelerations between 180 second and 220 second shown in Fig. 3

제시하였듯이 사용한 가속도계는 0.58 Hz 이하에서 낮은 감도를 가진다. 또한 Table 2에서 제시한 진동 신호분석기의 하이패스 필터의 컷오프(cutoff) 주파수는 0.5 Hz이다.

### 3. 변위 진동 신호의 취득

#### 3.1 신호 처리 과정

측정한 가속도 진동 신호는 5000 Hz 이하의 주파수 성분을 포함한다. Table 1과 Table 2에서 제시한 가속도계의 측정 가능한 최저 주파수와 진동신호분석기의 하이패스 필터 컷오프 주파수에 의한 영향을 고려하여 0 Hz~1 Hz 영역의 가속도 성분은 제거하였다. 이렇게 함으로써 가속도 신호를 두 번 적분하면서 변위 신호를 얻는 과정에서 발생할 수 있는 에러를 제거할 수 있다. 시간 영역의 가속도 데이터로부터 1 Hz~30 Hz 범위의 변위진동 데이터를 얻는 과정을 기술한다.

시간 영역에서의 가속도  $a(t)$ 의 디스크리트 푸리에 변환(discrete Fourier transform)  $A_n$ 은 다음과 같이 표현된다<sup>(14,15)</sup>.

$$A_n = \sum_{k=0}^{N-1} a_k e^{-\frac{j2\pi kn}{N}}, j = \sqrt{-1} \quad (1)$$

여기서,  $a_k$ 는 샘플링(sampling)한  $a(t)$ 의 값이고  $N$ 은  $a_k$ 의 개수이다. 가속도  $a_k$ 의 푸리에변환(Fourier transform)  $A(f_n)$ 은 다음과 같다.

$$A(f_n) = \Delta A_n = \Delta \cdot \sum_{k=0}^{N-1} a_k e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (2)$$

여기서,  $\Delta$ 는 샘플링시간(sampling time)이고  $f_n$ 은 주파수(Hz)이다.

$A_n$ 의 역 디스크리트 푸리에변환(inverse discrete Fourier transform)은  $A_n$ 으로부터  $a_k$ 를 복원하며 아래 식으로 표현된다.

$$a_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (3)$$

$a(t)$ 를 시간에 대하여 적분하면 속도  $v(t)$ 가 산출된다.  $v_k$ 의 푸리에변환  $V(f_n)$ 과  $a_k$ 의 푸리에변

환  $A(f_n)$  사이에는 아래의 관계가 성립한다.

$$V(f_n) = \frac{1}{j2\pi f_n} \cdot A(f_n) \quad (4)$$

$v(t)$ 를 시간에 대하여 적분하면 변위  $x(t)$ 가 산출된다. 변위  $x_k$ 의 푸리에변환  $X(f_n)$ 과  $a_k$ 의 푸리에변환  $A(f_n)$  사이에는 아래의 관계가 성립한다.

$$X(f_n) = \frac{1}{j2\pi f_n} \cdot V(f_n) = \frac{1}{-(j2\pi f_n)^2} \cdot A(f_n) \quad (5)$$

가속도 측정 시 1초당 12,800개의 데이터를 취득하였다. 1 Hz~30 Hz 영역의 변위 진동 데이터 취득이 주된 목적이므로 Butterworth 로우패스 필터<sup>(16-18)</sup>를

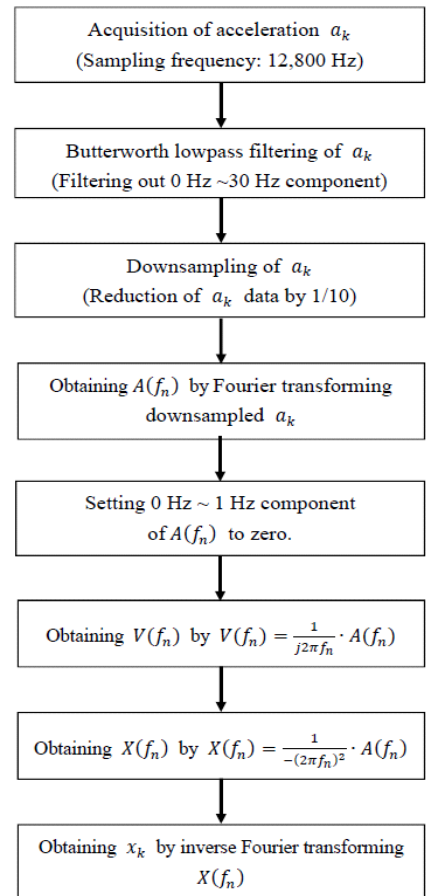
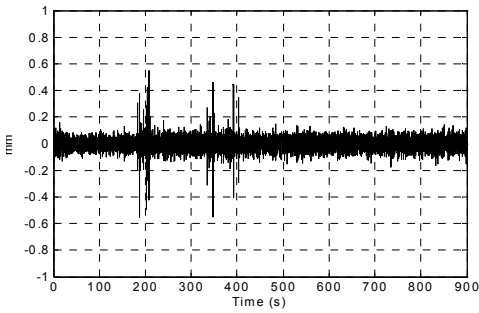
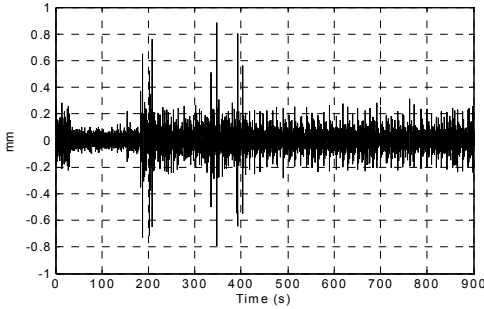


Fig. 5 Signal processing procedures for obtaining displacement  $x_k$  and  $X(f_n)$  from acceleration

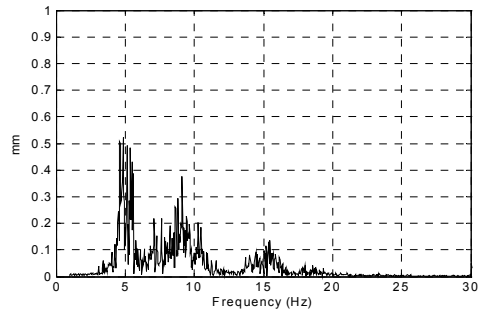


(a) Displacement in vertical direction

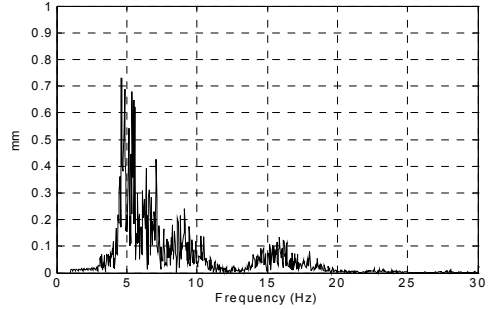


(b) Displacement in to-and-fro direction

**Fig. 6** Time-domain displacements in the 1 Hz~30 Hz range at the locations shown in Fig. 1



(a) Displacement in vertical direction



(b) Displacement in to-and-fro direction

**Fig. 7** Frequency spectrum of displacements between 180 second and 220 second shown in Fig. 6

사용하여 30 Hz 이상의 가속도 성분은 제거한다. Butterworth 로우패스 필터를 통과한 0 Hz~30 Hz 영역의 가속도 신호는 여전히 1초당 12800개의 데이터를 보유하므로 과도하게 샘플링(oversampled)된 상태이다. 1초 당 1280개의 데이터만 있어도 충분하므로 다운샘플링(downsampling)<sup>(19)</sup>을 수행하여 취득 데이터 개수를 1/10로 줄인다. 1초당 1280개의 데이터를 보유함으로써 데이터 처리시간과 컴퓨터 메모리(memory)공간을 1/10로 줄일 수 있다. 30 Hz 순수 사인파 신호의 경우 한 주기(1/30초)당 42개의 데이터를 보유하게 되므로 자세한 변위 정보를 유지할 수 있다. Fig. 5에는 취득한 가속도 신호  $a_k$ 로부터 변위 신호  $x_k$ 와  $X(f_n)$ 을 얻는 신호처리 과정을 도식화 하였다.

**3.2 취득한 변위 진동 신호**

Fig. 5의 신호처리 과정을 적용한 후 취득한 변위 진동 신호를 Fig. 6에 제시하였다. 1 Hz~30 Hz 주파수 성분을 포함하는 변위 진동 신호를 0초~900초 시간 구간에서 제시하였다. 가속도 진동을 나타내는

**Table 3** Peak displacement amplitudes and frequencies

Measurement directions	Peak amplitudes(frequencies)
Vertical	0.52 mm(4.84 Hz), 0.48 mm(5.12 Hz), 0.38 mm(9.11 Hz)
To-and-fro	0.73 mm(4.70 Hz), 0.68 mm(5.40 Hz), 0.45 mm(7.12 Hz)

Fig. 3과 변위 진동을 나타내는 Fig. 6을 서로 비교할 때, 높은 레벨의 과도진동이 일어나는 시간 구간이 매우 비슷하다는 것을 알 수 있다.

배관 응력해석을 위해 변위 진동의 시간 영역 데이터와 주파수 영역의 데이터가 필요하다. 즉, 시간 영역에서의 피크(peak) 변위뿐만 아니라 주파수 영역에서의 피크 변위 진폭과 해당 주파수 등이 필요하다. Fig. 6에서 진동레벨이 높은 과도 진동이 발생하는 180초~220초 구간의 변위 진동 신호에 푸리에 변환을 취하여 구한 주파수 스펙트럼은 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 나타나는 대표적인 피크 진폭 값들과 해당 주파수들을 Table 3에 제시하였다. 이

변 연구에서 측정된 배관 계통은 20 Hz 이상의 주파수 대역에서 변위 진동 응답이 거의 없다는 사실을 확인하였다.

#### 4. 결 론

여러 개의 비접촉 변위센서들을 동시에 설치하기 까다로우며 협소한 공간 환경 하에 있는 플랜트 배관 계통의 변위진동을 접촉식 가속도계를 사용하여 측정하였다. 이번 연구에서는 과도진동이 발생하는 시간 구간에서 배관의 가속도 신호를 취득한 후 신호분석 기술을 사용하여 변위 진동 신호를 취득할 수 있었다. 배관계통의 안전성을 평가하는 배관 응력해석을 수행하기 위해서는 배관의 변위 진동이 입력 데이터로 제공되어야 한다. 배관 응력해석을 수행하기 위해서는 시간 영역의 변위 데이터뿐만 아니라 주파수 영역에서의 변위 데이터도 필요하므로, 이 연구에서는 이러한 데이터를 얻기 위한 방법을 소개하였다. 사용한 가속도계의 측정가능 최저 주파수와 진동신호분석기에 내장된 하이패스 필터의 컷오프 주파수 요인 등에 의해 0 Hz~1 Hz 영역의 가속도 진동은 취득한 가속도 신호에서 제거하였다. 이 주파수 영역에서는 가속도 신호를 취득하기 어려우며 진동 측정 시스템에 내재된 노이즈(noise)를 취득할 가능성이 높아진다. 따라서 변위 신호를 얻기 위해 가속도 신호를 두 번 적분할 때 에러 발생 가능성이 높아진다. 이러한 측정 상의 한계점은 어떠한 진동계측시스템을 사용하더라도 피하기 어려운 상황이라 판단된다. 현재 DC 성분(0 Hz)을 포함한 1 Hz 이하의 초저주파 대역까지 측정할 수 있는 접촉식 가속도계가 개발되어 있으나 측정 가능 저주파 영역은 여전히 진동신호분석기에 내장된 하이패스 필터의 컷오프 주파수 요인 등에 의해 제한되어 있는 실정이다. 이에 대한 주된 원인은 진동신호분석기에 내장된 파워 서플라이(power supply)의 영향으로 알려져 있다.

이 연구의 측정 대상인 배관 계통에 대한 변위 진동 주파수 분석을 수행한 결과 지배적인 주파수 대역은 20 Hz 이하임이 밝혀졌다. 플랜트 배관계통의 변위진동은 저주파 대역에서 발생함을 확인하였다.

#### References

- (1) Zaruba, J., 1993, Water Hammer in Pipe-line Systems, Elsevier Science.
- (2) Jo, S. M., Seo, Y. S., Jeong, W. B. and Jeong, H. K., 2004, Analysis of a Transient Vibration Response caused by Water Hammer in a Pipe-line System, Proceedings of KSNVE Annual Spring Conference, pp. 119~343.
- (3) Thorley, A. R. D., 2004, Fluid Transients in Pipeline Systems, ASME Press, NewYork.
- (4) Wylie, E. B., 1993, Fluid Transients in Systems, Prentice-Hall, Inc., New York.
- (5) Nakamura, T. and Kaneko, S., 2008, Flow Induced Vibrations: Classifications and Lessons from Practical Experiences, Elsevier Science.
- (6) Akhavan, R., Kamm, R. D. and 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.
- (7) 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.
- (8) Kim, Y. H., 2010, Examination on High Vibration and Branch Vent Pipe's Failure of Complex Piping System Supplying Condensate-water in Power Site, Proceedings of KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 380~384.
- (9) Lee, S. H., Jeong, W. B., Jeong, C. U. and Ham, I. B., 2007, Mount Design to Reduce the Vibration of Pipe System Conveying Fluid, Proceedings of KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 1437~1441.
- (10) Suh, J. S. and Kim, W. M., 2009, An Experimental Determination of a Swing Check Valve Closure Time in the Main Feed Water System of a Power Plant during Shut-down Process, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 8, pp. 988~995.
- (11) Kruisbrink, A. C. H., 1996, The Dynamic Behavior of Check Valves in Pipeline Systems, Ph.D. Dissertation, City University of London.

(12) Thorley, A. R. D., 1989, Check Valve behavior under Transient Flow Conditions – A State of the Art Review, *Trans. ASME, J. Fluids Engng*, Vol. 111, pp. 178~183.

(13) 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.

(14) Brigham, E. O., 1988, *The Fast Fourier Transform and Its Applications*, Prentice Hall.

(15) Press, H. P., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P., 1992, *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press.

(16) Lutovac, M. D., Tomic, D. V. and Evans, B. L., 2001, *Filter Design for Signal Processing*, Prentice Hall.

(17) Isen, F. W., 2009, *DSP for MATLAB and LabVIEW III: Digital Filter Design(Synthesis Lectures on Signal Processing)*, Morgan and Claypool Publishers.

(18) Diniz, P. S. R., Silva, E. A. B. and Netto, S. L., 2010, *Digital Signal Processing: System Analysis*

and Design, Cambridge University Press.

(19) Oppenheim, A. V., 1989, *Discrete-time Signal Processing*, Prentice Hall.



**Jin Sung Suh** worked as an NVH engineer for several years at the Technical Research Center of Daewoo Motor Co.. He completed his Ph.D. on sound field modeling of enclosures in 1998 at the Institute of Sound and Vibration

Research in University of Southampton, U.K.. In 2000, he started his academic professional career in the Dept. of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic University. His main research interests include noise control, vibration measurement technique, vibration isolation, and dynamic analysis of machinery.