

두 개의 가속도계를 이용한 배관 감속 감시 Monitoring Pipe Thinning using Two Accelerometers

최영철† · 박진호* · 윤두병*

Young-Chul Choi, Jin-Ho Park and Doo-Byung Yoon

Key Words : Pipe Thinning(배관 감속), Accelerometer(가속도계), Group Velocity(군속도), Time-Frequency analysis(시간 주파수 분석)

ABSTRACT

In this paper, we estimated the degree of pipe thinning by using two accelerometers. It uses measured velocity of flexural wave traveling along the pipes. If the thickness of the wall decreases because of pipe thinning, flexural stiffness of the pipes decreases and accordingly, traveling velocity of flexural wave decreases. Thus, if we install two vibration sensors outside of the pipes and measures traveling velocity of flexural waves regularly, we can estimate and monitor the degree of pipe thinning quickly. In order to test the method we experimented with pipes, and get the result that group velocity varies according to the degree of pipe thinning. It verified this method can be used to monitor the pipe thinning.

기 호 설 명

- C_g = group velocity
- Δt^g = arrival time difference between two sensors.
- h = thickness
- ρ = density
- E = Young's modulus
- f = frequency
- ω = angular frequency ($= 2\pi f$)

1. 서 론

원자력 발전 설비를 고온 고압에서 장시간 가동 하게 되면서 재료의 경년열화 (aging degradation) 현상이 심화되고, 이에 대한 효과적인 대책을 수립 하지 못하였을 경우, 안전성, 국민수용성과 경제성을 저해하는 사태가 발생한다. 경년열화란 큰 하중이나 기계적인 충격에 의해서 짧은 시간에 발생하는 손상과는 대비되는 개념으로 오랜 시간동안 물리적 화학적 환경의 영향 하에서 재료의 특성이 변하면서 유발되는 건전성의 악화를 의미한다. 고온, 고압, 그리고 방사선 조사 등의 환경에서 운영되는 원전 재료는 응력부식균열(SCC, Stress Corrosion Cracking), 피로(Fatigue), 마모(Wear), 열 취화 (Thermal Embrittlement), 중성자 조사 취화(Neutron Embrittlement), 유체가속부식 (FAC, Flow Accelerated Corrosion) 등의 다양한 경년열화 현상

을 겪게 된다.

최근 가압 경수로 (PWR) 이차측의 탄소강 또는 저합금강 배관이나 CANDU 일차측 배관에서 장기간에 걸친 두께 감속 현상이 보고되고 있다 [1-4]. 미국의 Westinghouse 822 MWe 급 PWR 인 Surry 발전소 2 호기에서 1986 년 배관 파단 사고가 발생하여 네 명의 작업자가 사망하고 원자력 발전소 배관에 대한 두께 감속 현상 문제가 활발하게 제기 되는 계기가 되었다. 원자력 발전소 뿐 아니라 화력 발전소에서도 발생하는 배관 두께 감속 현상은 Flow-Accelerated Corrosion (FAC)로 설명되고 있다 [1].

이렇듯 배관의 감속에 의한 피해는 금전 및 시간뿐만 아니라, 인명 피해까지 일어날 가능성이 있으므로 배관 감속을 감시, 진단하는 것은 매우 중요한 일이다.

배관 감속을 감시하는 방법으로 초음파를 이용한 방법, 유도 초음파를 이용한 방법[5], 스위칭 DCPD 방법[6], 그리고 가속도계를 이용한 방법[7] 등이 있다. 여기서 가속도계를 이용한 방법은 두께에 따라 군속도가 달라진다는 아이디어를 이용한 것으로 2 개의 가속도계를 사용하기 때문에 두께 검사 부위 및 시간을 단축할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 가속도계를 이용하여 두께를 예측하는 방법을 두께가 다른 배관에 적용해 보았다. 그리고 이 방법에 대한 주요인자를 추출하여 두께 예측에 어떠한 영향을 미치는지 알아 본다. 최종적으로 배관 감속 테스트 루프에서 배관을 실제 감속 시키면서 배관 두께 예측 실험을 수행하였다.

† 교신저자; 한국원자력연구원

E-mail : cyc@kaeri.re.kr

Tel : (042) 868-4870, Fax : (042) 868-8313

· 한국원자력연구원

2. 배관 두께 예측 방법

배관을 전파하는 굽힘파는 두께에 따라서 다른 군속도를 가지고 전파하게 된다. 따라서 군속도를 알고 있다면 역으로 두께를 예측할 수 있다는 것을 의미한다. 평판에서 군속도와 두께에 대한 관계식은 다음과 같다.[7]

$$h = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{C_g^2}{\omega} \cdot \sqrt{\frac{\rho(1-\nu^2)}{E}} \quad (1)$$

식 (1)에서 볼 수 있듯이 군속도 C_g 를 실험으로 측정할 수 있다면 두께 h 를 예측할 수 있다는 것을 의미한다.

$$C_g = \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (2)$$

이때 군속도는 Fig. 1 과 같이 두 센서 사이의 시간 지연 차이만을 측정하여 식(2)를 통해 구할 수 있다.

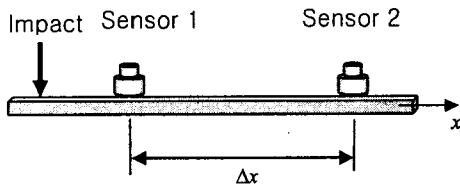


Fig. 1 The method for estimating group velocity which can be obtained by $C_g = \frac{\Delta t}{\Delta x}$, where Δt is arrival time difference between two sensors. [7]

3. 배관 두께에 따른 실험

가속계를 이용한 배관 두께 검사 방법의 타당성을 검증하기 위해 Fig. 2 와 같이 배관 외경 (75mm)은 같고 두께가 각각 9.5mm, 7.0mm, 5.2mm 및 3.6mm 인 4 개의 배관에 대하여 검증 실험을 수행하였다.

Fig. 3 은 실험장치 구성도를 보여주고 있다. 가속도계는 ICP type 이며 두 센서 사이는 50mm 간격을 두고 부착하였다. 신호는 NI 4462 보드를 사용하여 200kHz 샘플링으로 취득하였다.

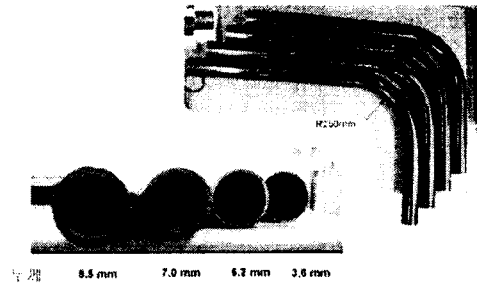


Fig. 2 Test pipes. Outer radiuses are 75mm and inner radiuses are 9.5mm, 7.0mm, 5.2mm and 3.6mm respectively.

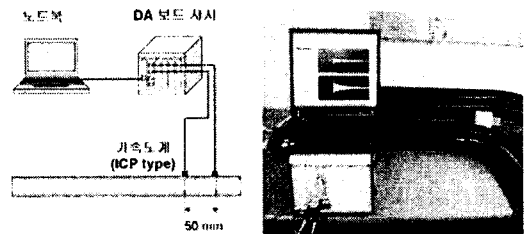


Fig. 3 Experimental setup

3.1 실험결과

두 개의 가속도계를 내경이 9.5mm 인 배관 표면에 50mm 간격을 두고 부착한 후 임팩트 해머로 배관 표면을 가진함으로써 충격파를 발생시켰다. 이때 두 센서부터 계측된 진동 신호를 Fig. 4 에서 보여주고 있다. 그래프의 아래는 가속도 신호를 보여주고 있고, 위는 시간-주파수 분석 중 Wigner-Ville 분포를 나타낸다. 그래프에서 볼 수 있듯이 시간-주파수 영역에서 두 개의 분산 커브 (dispersive curve)를 관찰할 수 있다. 이 두 개의 분산 커브를 이용하여 식 (2)에 대입하면 Fig. 5 와 같이 주파수별 군속도(group velocity)를 계산할 수 있다.

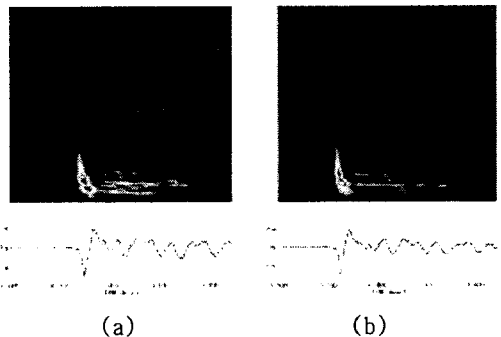


Fig. 4 Result of time-frequency analysis for (a) accelerometer 1 and (b) accelerometer 2.

행한 후 계산한 두께에 따른 군속도를 보여주고 있다.

Fig. 4 에서 관찰할 수 있듯이 충격 에너지가 15~20kHz 의 주파수 대역에 집중되어져 있다. 따라서 Fig. 5 에서 신호대 잡음비(Signal to noise ratio) 가 좋은 15~20kHz 대역을 관찰하여 보면 배관의 두께가 9.5mm, 7.0mm, 5.2mm, 3.6mm 일때, 군속도는 각각 2100m/sec, 1750m/sec, 1450m/sec 그리고 1200m/sec 임을 알 수 있다. 즉 배관의 두께가 얇아 질수록 군속도가 작아짐을 관찰할 수 있다.

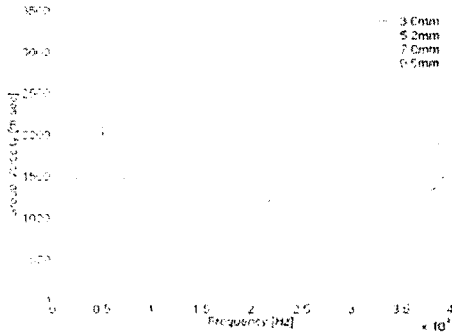


Fig. 5 Experimental result of estimating group velocity at 4 pipes whose thicknesses are 9.5mm, 7.0mm, 5.2mm, 3.6mm.

4. 주요인자의 영향

가속도계를 이용한 배관 감속 감시 방법은 배관에 두 개의 가속도계를 일정거리를 띄우고 부착시킨 후, 임팩트 해머를 사용하여 충격파를 발생시켜 배관의 두께를 감시한다. 따라서 진동 측정결과에 영향을 미치는 여러 인자들이 있으며, 가장 대표적인 것으로 충격을 주는 임팩트해머(impact hammer)의 종류, 접촉 시간, 충격지점과의 거리, 그리고 센서간의 거리 등이 있다. 본 연구에서는 다음과 같이 각각의 인자들이 측정결과에 어떤 영향을 미치는지에 대해 알아본다.

4.1 충격 해머

임팩트 해머의 종류에 가장 많은 영향을 미치는 것이 해머의 무게이다. 충격이 발생할 경우 물체의 질량에 대한 영향을 잘 설명하는 것이 Fig. 6 에서 설명하는 Hertz 의 충격이론이다.

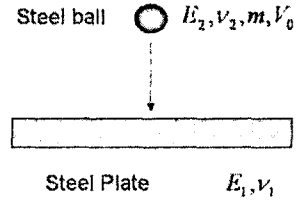


Fig. 6. Hertz's impact theory

충격 시 접촉 지속 시간은

$$T_d = 2.94 \cdot D_{\max} / V_0 \quad (3)$$

이고, 이때 강판의 최대변형 변위가

$$D_{\max} = k_h \cdot (mV_0^2)^{0.4} \cdot R^{-0.2} \quad (4)$$

이기 때문에 질량이 커질수록 접촉시간이 길어짐을 알 수 있다. 따라서 접촉시간이 길기 때문에 주파수 영역에서 살펴본다면, 중심주파수가 작아짐을 쉽게 알 수 있다.

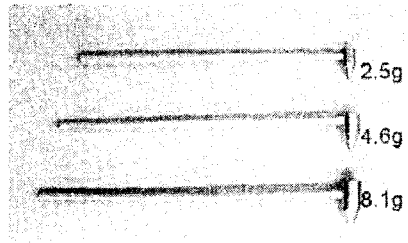
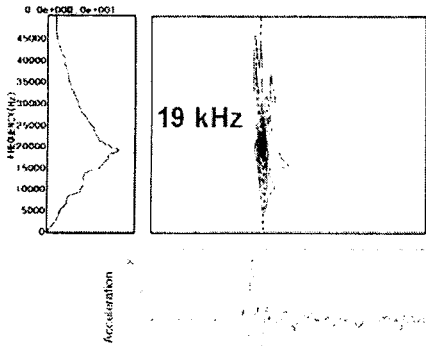


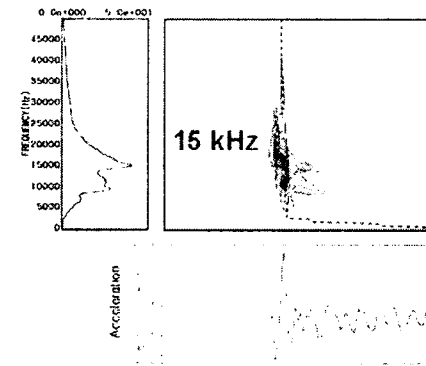
Fig. 7 Picture of impact hammers

이러한 해머의 질량에 대한 영향을 관찰하기 위해 Fig.7 과 같이 무게가 다른 3 개의 해머를 사용하여 실험을 수행하였다.

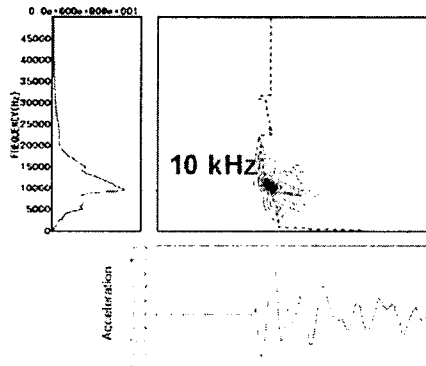
Fig. 8 은 같은 실험 조건에서 단지 무게만 2.5g, 4.6g, 그리고 8.1g 인 임팩트해머를 사용하여 실험한 결과를 보여주고 있다. Fig. 8 을 관찰해보면 Hertz 의 충격이론에서 설명한 것과 같이 임팩트해머의 무게가 커질수록 접촉시간이 길어지고, 중심주파수가 낮아짐을 관찰할 수 있다. 또한 이 실험을 통하여 임팩트해머의 무게는 충격파의 중심주파수만 변화시키고 군속도계산에 필요한 분산커브에는 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Experimental result for the effect of impact hammer whose mass are (a) 2.5g, (b) 4.6g, and (c) 8.1 g respectively.

4.2 거리에 따른 영향

배관은 평판이 아닌 실린더 형상을 하고 있기 때문에 충격지점에서 멀어질수록 충격파의 전파가 복잡하게 일어난다. 따라서 충격지점으로부터 측정점의 위치가 중요한 인자로 작용한다. 측정점의 거리에 따른 영향을 관찰하기 위해 Fig.9 와 같이 4 개의 가속도계를 50mm 간격으로

부착하고 1 번 센서로부터 10mm 떨어진 곳에 임팩트 해머를 사용하여 배관을 가진 하였다.

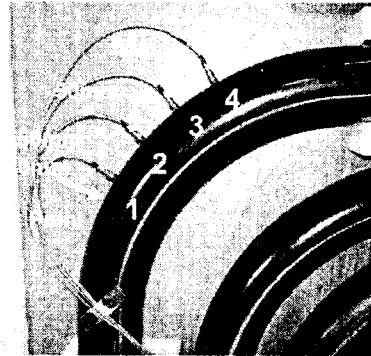
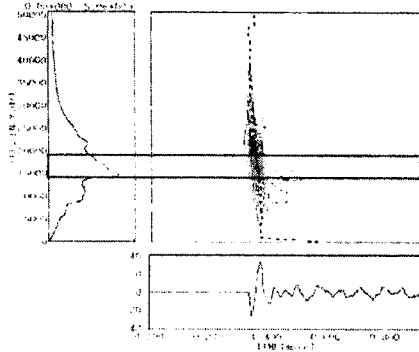


Fig. 9 Position of 4 accelerometers and impact point

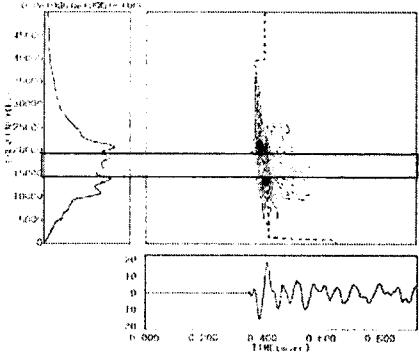
Fig. 10 은 거리에 따른 충격 신호의 시간-주파수 분석 결과를 보여주고 있다. 이때 주황색 부분은 충격에너지가 집중되어 있는 주파수 대역을 나타낸다. Fig. 10 의 그래프에서 볼 수 있듯이 거리에 따라 시간지연을 가지고 있지만, 중심주파수는 변하지 않는 것을 관찰할 수 있다. 하지만, 거리가 멀어질수록 분산 커브가 복잡해지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 배관이 실린더 형상이기 때문에 멀어질수록 되돌아오는 파와 겹쳐져서 복잡해지기 때문이다. 따라서 충격파가 원주방향으로 되돌아와 겹치는 지역 이내에 센서를 부착해야 된다. 충격파가 겹치는 곳이 충격지점에서 이므로 가속도계 센서는 최소 $\pi \cdot D$ 이내에 설치되어져 있어야 한다.

5. 유동에 의한 배관 감속 실험

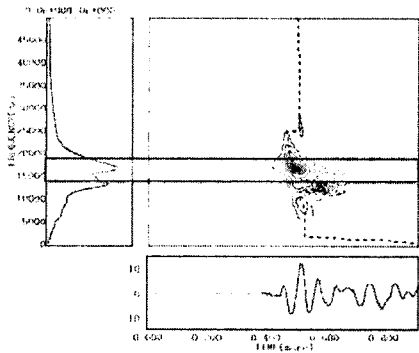
가속도계를 이용하여 배관 두께를 예측하는 방법을 실험을 통해 가능성을 살펴보았다. 이 장에서는 현장과 유사한 Wet test loop (Fig. 11 참조)에서 배관을 실제 감속 시키면서 배관 두께를 예측하는 실험에 대해 살펴 본다.



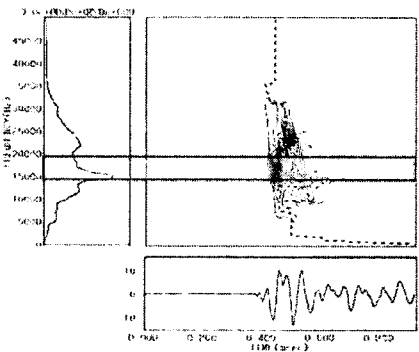
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 10 Result of time-frequency analysis. The signals are measured at (a) 10mm, (b) 60mm, (c) 110mm, (d) 160 mm from impact point.

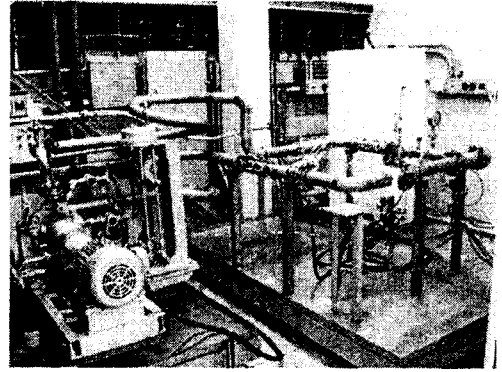


Fig. 11 Picture of Wet Test Loop.

배관의 곡률 부분에서 감속이 가장 많이 발생하기 때문에 Fig. 12 와 같이 가속도계를 50mm 간격으로 곡률 부분에 부착하였다.

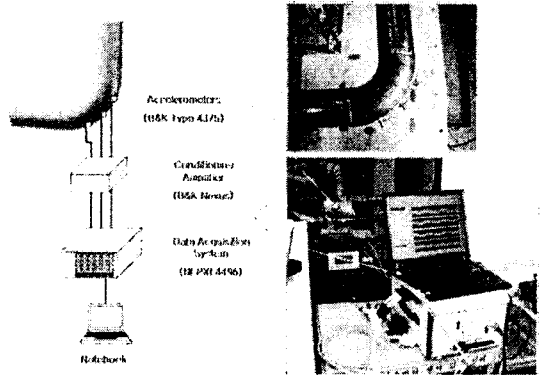


Fig. 12 Experimental setup. Where sampling frequency is 200kHz

Wet test loop 은 150°C의 고온 유체가 흐르기 때문에 가속도계는 자석 이용하여 마운팅하였다. Wet test loop 을 가동 직후 감속이 되지 않은 상태에서 한번, 그리고 배관을 2주 동안 감속 시킨 후 같은 실험조건에서 다시 실험을 수행하였다.

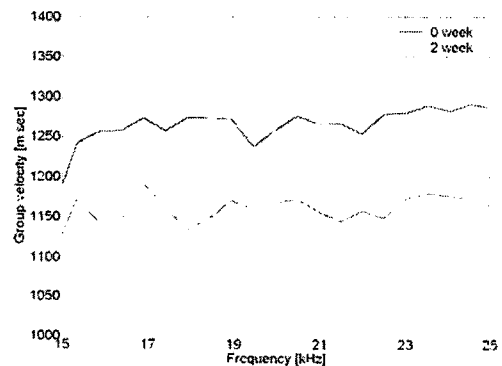


Fig. 13 Experimental result. After 2 week, group velocity is reduced about 100m/sec.

Fig. 13 은 두 실험에 대한 균속도 측정결과를 보여주고 있다. 처음에는 균속도가 약 1250m/sec 였지만, 2 주 동안 배관을 감육 시킨 후에는 약 1150m/sec 로 100m/sec 가 감소하였다.

감육 실험을 마친 후 실험 배관의 단면을 잘라 본 결과 Fig. 14 와 같이 약 0.2mm 의 두께 감소가 발생함을 관찰 할 수 있었다. 즉, 두께가 0.2mm 감소함에도 불구하고 균속도가 100m/sec 나 감소했기 때문에 매우 정밀하게 두께예측이 가능함을 알 수 있다.



Fig. 14 Picture of test pipe section

6. 결론

감육 현상에 의해 배관의 두께가 감소하면 배관의 굽힘 강성이 감소하며, 이에 따라 굽힘파의 전파속도가 감소한다는 점에 착안하여 배관 외부에 설치된 2 개의 진동 센서를 이용하여 배관 두께를 감시하는 방법에 대해 살펴 보았다.

이 방법을 사용하여 두께를 감시할 때 임팩트의 종류, 충격지점과 센서간의 거리가 주요인자이다. 실험을 통해 임팩트의 종류는 단지 중심 주파수만 바뀌게 할 뿐 두께 예측에는 영향을 주지 않지만, 충격지점과 센서간의 거리가 멀어지면 파의 중첩으로 두께 예측이 어려워 짐을 알 수 있었다.

실제 현장 조건의 배관에서도 적용가능한지를 검증하기 위해 Wet test loop 에서 배관을 감육 시키면서 실험을 수행한 결과, 두께가 매우 작게 감육 되더라도 매우 민감하게 배관의 감육 정도를 감시할 수 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

실험에 도움을 주신 서울대학교 원자핵공학과 황일순 교수님과 황경하 연구원님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Bindi Chexal et al., "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants", EPRI TR-106611, Electric Power

Research Institute, (1996).

- (2) G. Cragnolino, C. Czajkowski, and W. J. Shack, "Review of Erosion-Corrosion in Single-Phase Flows", NUREG/CR-5156, U.S. Nuclear Regulatory Commission, April 1988.
- (3) K. Ting and Y. P. Ma, "The evaluation of erosion/corrosion problems of carbon steel piping in Taiwan PWR nuclear power plant", Nuc. Eng. Design, Vol. 191, (1999), pp.231-243.
- (4) D. H. Lister and L. C. Lang, "A Mechanistic Model for Predicting Flow-assisted and General Corrosion of Carbon Steel in Reactor Primary Coolants", Proc. Int. Conf. Water Chemistry in Nuclear Reactors Systems, SFEN, Avignon, France, April 2002.
- (5) Keun J. Sun and Dorron Kishoni, 1993, "Feasibility of using lamb waves for corrosion detection in layered aluminum aircraft structures", IEEE Ultrasonic Symposium.
- (6) Kyung Ha Ryu, Na Young Lee, and Il Soon Hwang, "A Study on the Equipotent Switching Direct Current Potential Drop Method for the Monitoring of Piping Thinning", Key Engineering Materials Vols. 345-346 (2007) pp1331-1334
- (7) C.H. Sohn, Y.-C. Choi, J.H. Park, and U.P. Chong, 2006, "Monitoring Pipe Thinning using Time-Frequency Analysis," The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.6, No. 12, pp.747-756.
- (8) C.H. Sohn, Y.-C. Choi, J.H. Park, and U.P. Chong, 2006, "Measuring Young's Modulus of Materials by using accelerometers," The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.6, No. 11, pp.1142-1164.
- (9) L. Cremer and M.Heckl, 1998, *Structure-Borne Sound*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo, pp.101.
- (10) I.A. Viktorov, 1967, *Rayleigh and lamb waves*, Plenum press, pp.67-102.
- (11) Donald Ross, 1987, *Mechanics of underwater noise*, Peninsula Publishing Los Altos, California, pp.159.
- (12) J. M. Combes, A. Grossman, and P. Tchamitchian, Eds. 1989, *Wavelets, Time-Frequency methods, and phase space*, Berlin: Springer,.
- (13) T.-G. Jeong, 2006, "Study on the nonstationary behavior of slider air bearing using reassigned time-frequency analysis", The Korean Society for Noise and Vibration Engineering,, Vol 16, No. 3, pp.255-262.
- (14) Y.-K. Park and Y.-H. Kim, 1997, "A method to reduce the cross-talk of Wigner-Ville distribution; Rotating window," The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.7, No. 2, pp.319-329.
- (15) Y.-K. Park and Y.-H. Kim, 1997, "Wigner-Ville distribution applying the rotating window and its characteristics," The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.7, No. 5, pp.747-756.