



감육을 가지는 고압배관에 대한 탄성파의 Wavelet 해석

김진욱 · 안석환* · 이시윤** · †남기우* · 도재윤***

한국기계연구원, *부경대학교 공과대학, **한국소방안전협회 부산지부, ***부산기능대학
(2005년 4월 2일 접수, 2005년 6월 22일 채택)

Wavelet Analysis of Elastic Wave for Wall Thinned High-Pressure Service Pipes

Jin Wook Kim · Seok Hwan Ahn* · Si Yoon Lee** · †Ki Woo Nam* · Jae Yoon Do***

Korea Institute of Machinery & Materials, Changwon, Kyungnam 641-010, Korea

*College of Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

**Busan Branch, Korea Fire Safety Association, Busan 607-012, Korea

***Pusan Polytechnic College, Busan 616-101, Korea

(Received 2 April 2005, Accepted 22 June 2005)

요 약

배관은 사용기간 중에 여러 가지 열화에 의해 손상을 받으며, 그 중 감육(두께감소)이 발생하게 되면 심각한 결과를 초래할 수 있다. 따라서, 배관시스템의 보전유지를 위해서는 감육되어진 배관의 강도를 평가하는 것이 중요하다. 어떤 재료가 외부 응력 등에 의해 파괴 혹은 변형된다면 그 특징적인 탄성파가 변형메카니즘에 따라 여러 가지로 다르게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 감육을 가지는 배관에서 감육결함의 길이 및 깊이를 다르게 상정하였을 때 나타나는 AE신호들에 대해 Wavelet Transform 시스템을 이용하여 평가하였다. 또한, 실배관의 굽힘시험을 통하여 기계적인 강도를 평가하였다. 결과로부터, 감육의 깊이비(d/t)의 정도에 따라 주파수 성분을 구별하는 것이 가능하였다.

Abstract – We studied on the nondestructive evaluation of the elastic wave signals of locally wall thinned straight pipe. Wavelet transform was applied for the time-frequency analysis of waveforms obtained by fracture wave detector due to the dropping steel ball. The time-frequency analysis provides time variation of each frequency component involved in a waveform, which makes it possible to evaluate the shape of local wall thinning at each frequency. In this study, comparison by wavelet transform of the AE signals and monotonic bending tests without internal pressure are conducted on 1.91 inch diameter full-scale carbon steel pipe specimens. As the results of tests, fracture behaviors could be shown by the characteristic of mechanical strength of locally wall thinned pipes and the waveforms could be evaluated for the integrity insurance of the piping system according to the length and depth range of the defected shape pipes in the real field.

Key words : Wavelet transform, Local wall thinning, Carbon steel pipe, Waveform, Time-frequency analysis, Acoustic emission

I 서 론

배관시스템의 보전을 유지하기 위해서 배관 Code의 기준을 정하고자 많은 연구들이 행하여져 왔다. ASME B & PV Codes 등에서는 이미 설계단계에서부터 배관시스템의 보전을 위해 기준을 마련 중이다. 그러나, 건조 후에는 고속의 유체유동과 열화 등에 의해 설계단

계와 사용기간 중의 상태가 동일하지 않게 된다. 즉, 사용기간 중의 배관시스템의 상태는 초기설계조건보다도 더욱 엄격히 요구되는 작동조건에 대해 견딜 수 있어야만 한다. 배관의 두께감소(이하, 감육이라고 함)에 관련된 조사에 의하면 마모결함 등이 곡관 형상에서 많이 발생된다고 보고되어지고 있다. 그러므로 배관시스템의 보전을 유지하기 위해서 감육된 배관의 강도를 평가하는 것은 중요하지만, 감육에 대해 적용할 수 있는 기준은 아직 잘 알려져 있지 않다[1].

†주저자: namkw@pknu.ac.kr

만약, 어떤 재료가 외부 응력 혹은 마모 등에 의해 파괴되거나 변형된다면 그 특징적인 탄성파는 여러 종류의 변형메카니즘에 따라서 다르게 발생되어질 수 있다. 그러므로 이들 탄성파 특성들에 대한 평가를 위하여 단순한 비파괴평가법이 필요하다[2,3]. 재료 및 구조적 특성을 가지는 AE신호들의 해석에 있어서는, 시간-주파수 조합에서의 웨이블릿 계수가 개략적으로 나타내어질 수 있기 때문에 wavelet transform(WT)이 종종 긍정적인 시스템으로서 사용되어지고 있다. AE신호 분류를 위한 WT의 유용성을 조사하기 위해서 유리섬유 강화 복합재를 사용하여 AE신호에 적용시킨 연구들이 있다[4,5]. WT는 시간함수로서 AE신호의 주파수 구성요소를 분석하기 위해서 또한, 노이즈로부터 타당한 신호를 분리하기 위해서 유용하다.

따라서, 본 연구에서는 배관시스템의 여러 가지 감육형상에 따른 탄성파의 조사를 위하여 공진형 AE센서에 의해 얻어진 AE신호들에 대해 wavelet transform 시스템을 사용했다. 강구(steel ball)의 낙하에 의해 감육배관의 표면에 발생한 AE신호들과 굽힘시험으로부터 얻어진 변형률을 조사했다. 감육배관의 파괴거동은 기계적강도의 특성으로서 나타내어질 수 있고, 파형은 감육배관의 길이와 깊이에 따른 보전예방을 위해 평가되어질 수 있다.

II. 시험편 및 실험 방법

2.1. 시험편

본 연구에 사용한 재료는 STS370(JIS standard) 탄소강배관이며 그 기계적특성과 화학성분을 Table 1 및 2에 각각 나타낸다. Full-scale 실험이 감육결함을 가지는 외경 48.6 mm Schedule 80 STS370 탄소강배관에서 수행되었다. 파괴거동에 미치는 감육의 위치의 영향은 외부감육과 내부감육에서의 결과가 파괴거동에 대해 유사하다는 보고로부터 고려되지 않았다[6]. 따라서 감육결함의 형상을 배관 외측에 기계적으로 가공하였

Table 1. Mechanical properties of STS370 carbon steel pipe.

Material	Tensile strength σ_u (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Elongation (%)
STS370	402	273	28

Table 2. Chemical composition of STS370 carbon steel pipe [wt%].

Material	C	Si	Mn	P	S
STS370	0.25	0.17	0.5	0.035	0.035

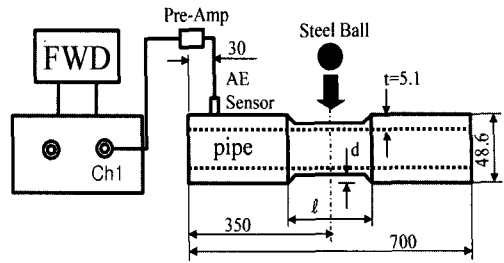


Fig. 1. Experimental setup for the measurement of AE test of a pipe specimen with all-circumferential wall thinning (unit: mm).

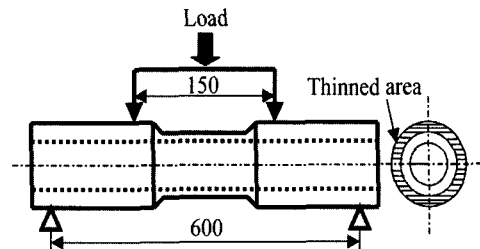


Fig. 2. Schematic of four-point bending test (unit: mm).

다. 감육의 형상은 결함크기 등에 따라 배관에 여러 형태로 나타날 수 있는데, 그 중에서 유체의 유동 등을 고려하여 발생 가능한 감육 형상을 감육길이 및 감육깊이를 달리하여 제작하였다. Fig. 1에는 감육배관시험편에 대한 AE시험의 개략도를, Fig. 2에는 4점 굽힘시험의 개략도를 각각 나타내었다.

2.2. AE시험 및 굽힘시험

여러 가지 형상의 감육배관에 대한 AE 신호들의 특성을 조사하기 위한 AE측정평가설과 기계적강도 평가를 위한 굽힘시험을 행하였다.

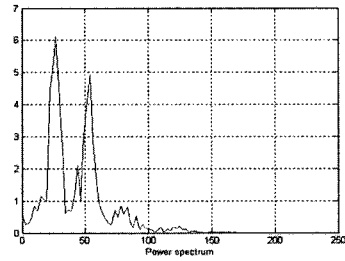
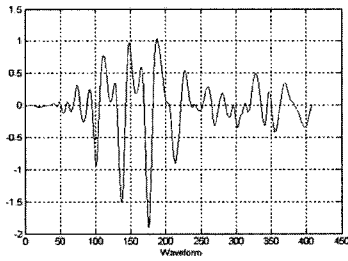
탄성파를 발생시키기 위하여 steel ball을 높이 50 mm에서 배관시험편의 중앙 표면 위에 낙하시켰다. 강구(steel ball)의 직경은 6.5 mm를 사용하였다. AE센서로는 감육배관의 표면 위에 낙하된 강구(steel ball)의 충격에 의한 주 주파수영역으로서 10~260 kHz의 주파수영역을 가지는 AE신호들을 검출하기 위하여 선택되어졌다. AE시험 및 굽힘시험에 사용된 시험편들에는 감육깊이(d) 1.2, 2.8, 3.5 및 4.5 mm, 감육길이(l) 10, 15, 20, 25, 120 mm의 결함을 기계적으로 가공하였고, 배관시험편의 전장은 700 mm를 사용하였다. 감육깊이 1.2 mm에 대하여 감육길이를 10, 15, 20, 25, 120 mm로 달리하여 동일한 감육깊이에 대한 감육길이의 변화에 대한 AE신호와 감육길이를 20과 120 mm로 고정하고 감육깊이를 2.8, 3.5 및 4.5 mm로 달리하여 동일한

감육을 가지는 고압배관에 대한 탄성파의 Wavelet 해석

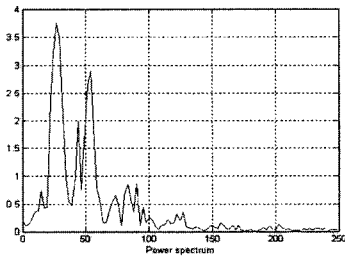
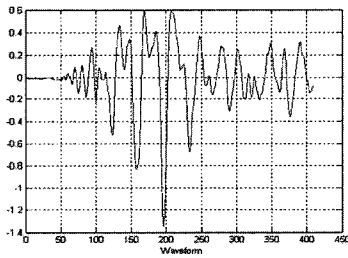
감육깊이에 대한 감육깊이의 변화에 대한 AE신호를 각각 검출하였다.

부하시간에 의한 진폭분포를 얻기 위한 AE시스템은 문턱값(threshold) 10 mV, 각 채널에 대해 1024 point gate length로서 12.5 MHz의 디지털화속도를 가지는 Fracture Wave Detector(FWD)를 사용하였다. 변환자(transducer, DWCB1025)는 1 kHz~1.5 MHz의 광대역센

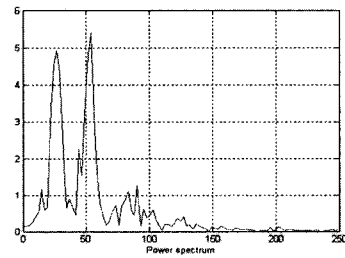
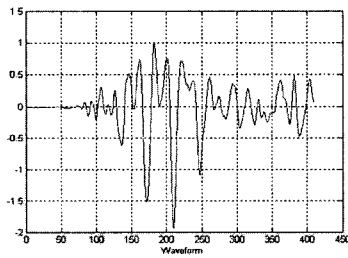
서를 사용하였다. 샘플링속도와 포인트수는 5 MHz와 2048 point로 각각 설정하였고, 지속시간은 409.6 μ s로 설정하였다. 지속시간의 설정은 steel ball의 충격에 의한 응력파의 전파가 센서를 지나 시험편의 자유단으로부터 반사되어 되돌아오는 반사파의 영향을 받지 않게 하기 위해서였다. 검출된 신호들은 40 dB로 증폭시켰다. Fig. 1에 나타내었듯이 단지 한 개의 센서를 감육



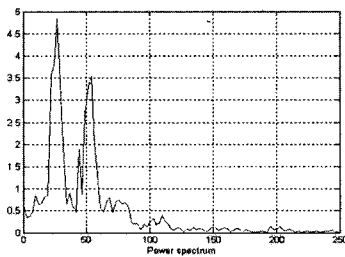
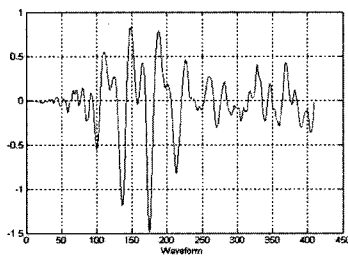
(a) $d=0$ mm and $l=0$ mm



(b) $d=1.2$ mm and $l=10$ mm



(c) $d=1.2$ mm and $l=15$ mm



(d) $d=1.2$ mm and $l=20$ mm

Fig. 3. Time response and frequency spectrum of elastic wave signals for the wall thinned pipes.

부 중앙의 steel ball 낙하점으로부터 약 300 mm 떨어진 부분에 부착시켰다. trig과 사상(event) 지속시간은 각각 50 μ s 및 200 μ s였다. 총 데이터수룩시간은 409.4 μ s로 결정하였다.

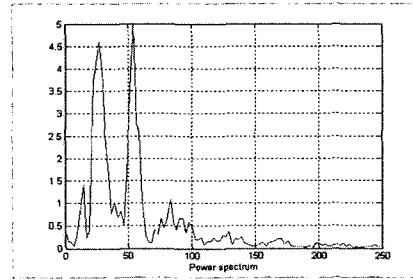
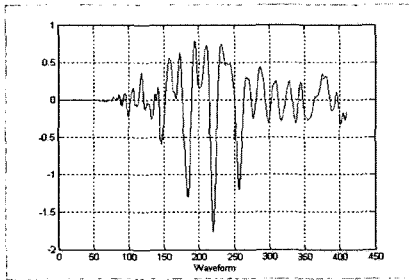
4점 굽힘시험은 상온에서 내부응력 없이 행하였다. 부하스팬은 150 mm, 지지스팬은 600 mm로 하였다. 시험은 정격용량 100 ton의 만능시험기(UH-F100A;

Shimadzu Co.)를 이용하여 크로스헤드 변위속도 0.1 mm/s의 변위제어로 하였다.

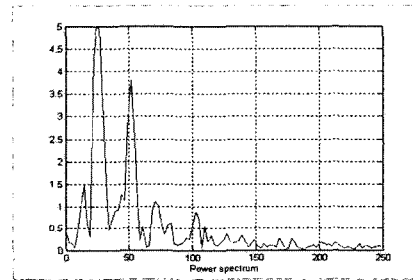
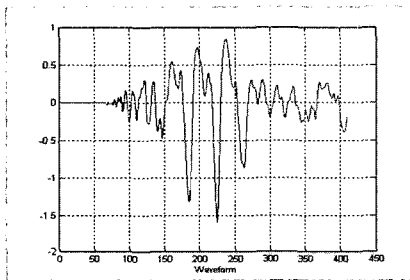
III. 결과 및 고찰

3.1. 감육배관의 AE 특성

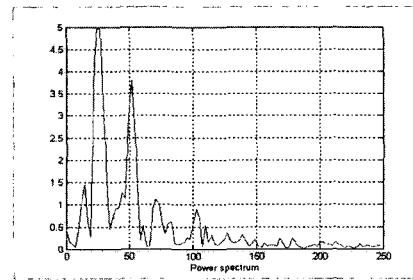
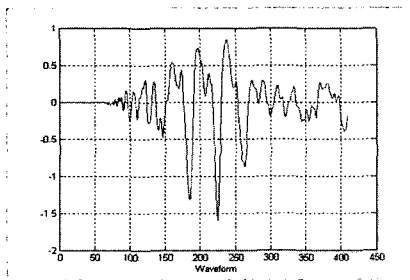
강구(Steel ball)의 낙하로부터 발생한 탄성파에 의한



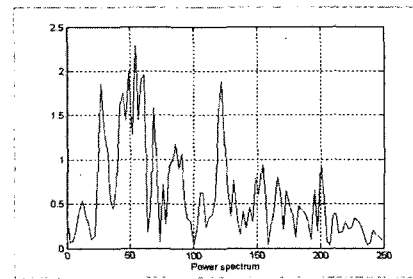
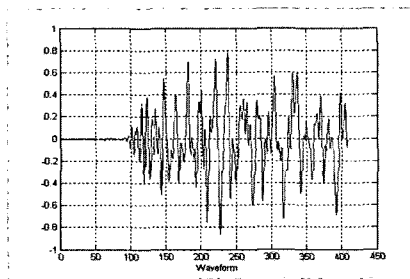
(e) $d=1.2$ mm and $l=25$ mm



(f) $d=1.2$ mm and $l=120$ mm



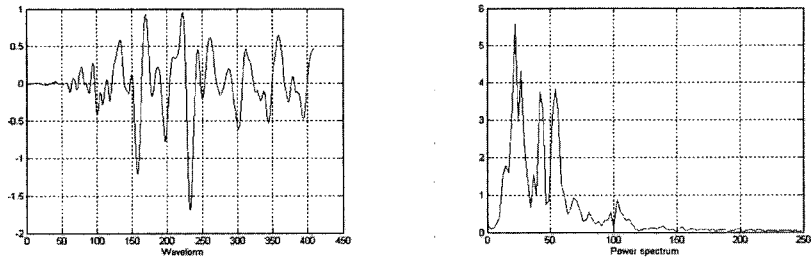
(g) $d=2.8$ mm and $l=20$ mm



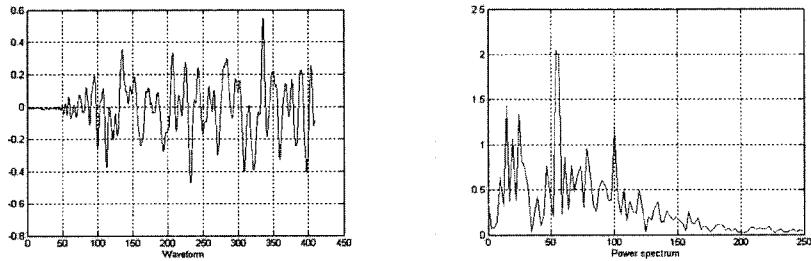
(h) $d=4.5$ mm and $l=20$ mm

Fig. 3. Continued.

감육을 가지는 고압배관에 대한 탄성파의 Wavelet 해석



(i) $d=2.8$ mm and $l=120$ mm



(j) $d=4.5$ mm and $l=120$ mm

Left: horizontal; time(μ s), Vertical; voltage(V)
 Right: horizontal; frequency(kHz), Vertical; voltage(mV)

Fig. 3. Continued.

AE신호는 Fig. 3에 나타난 것처럼 동일한 감육깊이를 가지는 경우에는 유사한 경향을 나타내고 있다. 3가지 종류의 신호에 대한 주파수 스펙트럼을 Fig. 3에 함께 나타내었다. 주파수 스펙트럼의 모든 주파수들은 최대 진폭에서 26.8 kHz와 53.7 kHz의 중심주파수를 각각 뚜렷하게 나타내었다. 감육깊이가 더 깊을수록 시편의 전체에 걸쳐 좁은 결합깊이를 통해 전달된 AE신호들은 비교적 더 약하다는 것을 나타낸다. 감육결합이 없는 건전한 부분으로부터 감육 깊이비, d/l 가 55% ($d=2.8$ mm, $l=20$ mm)까지는, 이들 신호들에 대한 주파수 스펙트럼과 그것의 시간응답은 이 연구의 모든 시험에 있어서 나타나는 특징에 거의 유사하다는 것을 나타낸다. 감육깊이와 감육깊이가 더 커질 경우 주파수 스펙트럼들에 의해 중심주파수 성분을 구별하기가 어렵다.

감육깊이에 따라서 주파수 스펙트럼에 대해서는 약간의 차이가 발생했지만, 중심주파수에 미치는 감육깊이의 뚜렷한 영향은 나타나지 않는다고 생각된다. 결합깊이에 대한 리가먼트(ligament) 두께가 충분히 작더라도 탄성파에너지가 용이하게 전달되었다. 그러나 전형적인 스펙트럼분석만으로 감육깊이의 차이를 분류하는 것은 명확하지 않다.

3.2. 감육배관의 wavelet 분석

3.1절과 같은 이유로, 동일한 시험편에 대해서 AE신호의 특성을 조사하기 위한 wavelet transform(WT)을 Fig. 4에 나타내었다. 일반적으로 WT는 웨이블릿 함수가 시간과 주파수에 관해서 집중되어지는 유효성을 가지기 때문에 신호에 대한 국부적인 특성들의 평가에 유용하다. 파의 동일 시간응답에 일치하는 Fig. 3에서 중심주파수의 두 성분은 사상(event) 지속시간 중 200 μ s 근처에서 발생되어졌다는 것을 나타내었다. 그리고 또한 그것은 사상(event) 지속시간 중, 53.7 kHz의 주파수 성분은 Fig. 3에 나타내어진 전형적인 주파수분석 및 wavelet transform에 의해 나타낸 Fig. 4의 중심주파수 26.8 kHz에 앞서 나타나고 있다는 것이 명확해진다. Fig. 4에서는 유사한 패턴의 결과를 보이고 있고, 각각의 결과에서 최대 피크의 중심주파수들은 감육깊이와 사상(event) 지속시간이 서로 다르지만 26.8 kHz를 나타내었다.

감육깊이의 비 d/l 가 55%를 넘어서면, 26.8 kHz의 주파수 성분은 더 작아지고, 53.7 kHz의 중심주파수 성분이 현저히 관찰되어진다. Fig. 4에서 감육깊이 d 가 2.8 mm보다 더 깊은 경우에는 신호들에 대해 더 큰 주파수 영역을 나타낸다. 비록 시간진폭이 더 짧음에도 불

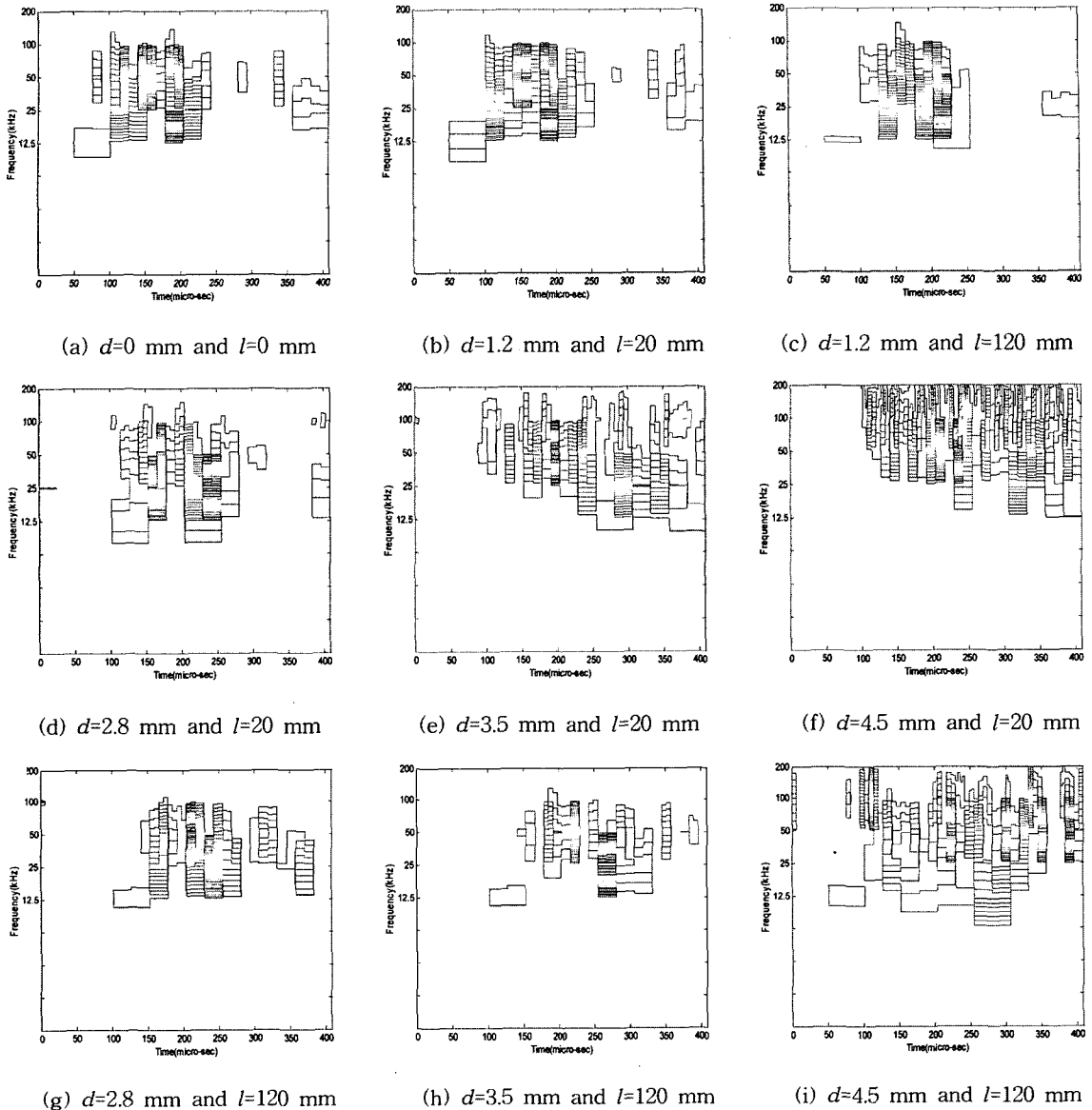


Fig. 4. Contour map of the time-frequency.

구하고 주파수분포는 감육깊이 $d=2.8$ mm의 경우보다도 더 크다.

wavelet transform의 결과로부터 신호의 특성을 확인하는 것이 더 명료하다. 그것은 중심주파수가 약 53.7 kHz라는 것을 나타낸다. 감육깊이 2.8 mm와 3.5 mm 사이에서의 신호들의 주파수 스펙트럼은 강구(steel ball) 낙하의 조건 혹은 감육길이와 감육깊이의 형상 조건에 의해 몇몇의 경우들에 있어서 다소 다르다. 확실히, 그것은 배관의 감육깊이가 더 깊어짐에 따라 중심

주파수는 더 크고 광대역 주파수와 고주파수 특성을 가졌다. 이들은 AE신호들을 측정하고 wavelet transform 해석을 이용함으로써 옮겨가는 주파수를 확인하는 것을 가능하게 만든다.

3.3. 굽힘모멘트(M)-변위(δ) 선도와 손상모드

Fig. 5에는 굽힘시험에 의한 감육배관의 굽힘모멘트와 하중점변위 사이의 관계를 나타내었다. 실험으로부터 편평화, 좌굴 및 균열발생의 3종류의 손상모드가 분

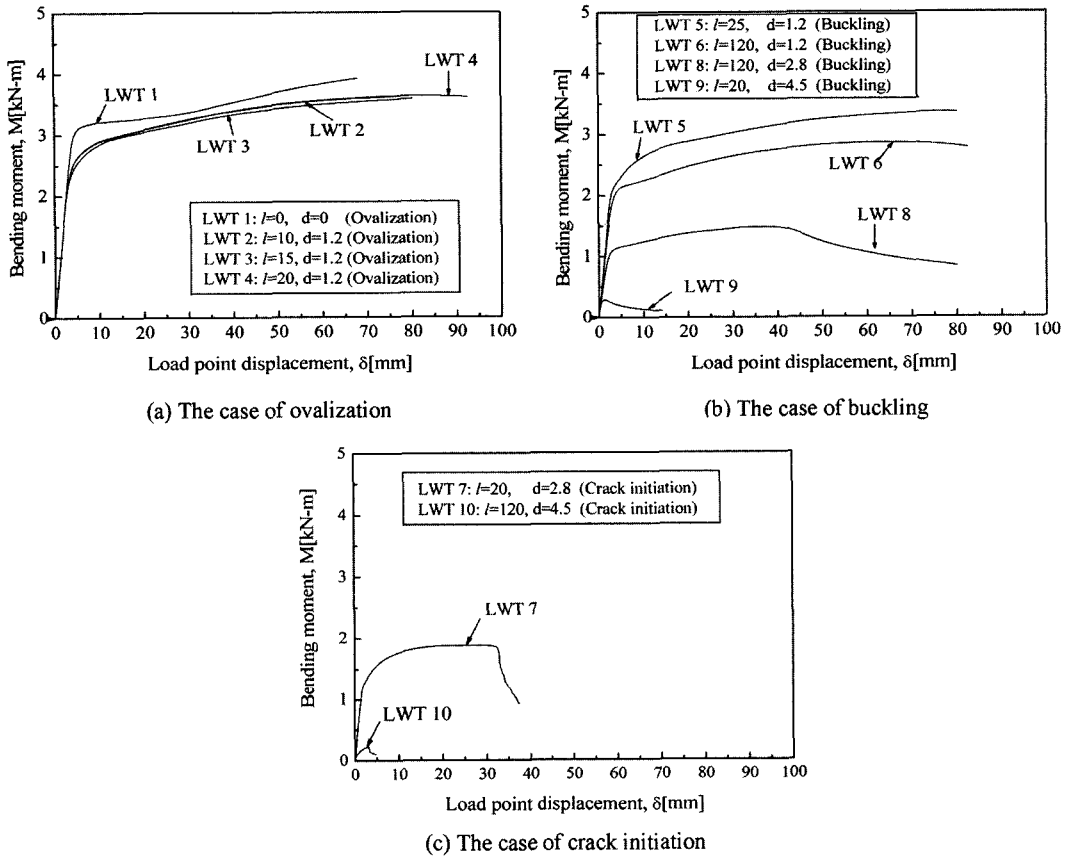


Fig. 5. Bending moment(M)-displacement(δ) curves for wall thinned pipes.

류되어졌다. 기계적강도에 있어서는 굽힘모멘트에 대한 설계강도를 유지하는 가에 관해 평가하였다. Fig. 4는 중심주파수에 대한 사상(event) 지속시간이 비교적 협소하다는 것을 나타낸다. LWT 7과 LWT 8은 굽힘모멘트가 Fig. 5(a)의 결과들에 비교해서 매우 낮기 때문에 신호분석의 결과들이 26.8 kHz과 53.7 kHz의 각기 다른 중심주파수를 가지는 차이를 구별하는 것이 분명해졌다.

IV. 결 론

본 연구에서는 각기 다른 크기의 감육깊이와 감육깊이를 가지는 배관의 탄성과 신호와 굽힘모멘트의 비교, 분석을 수행하였다. 감육 형상에 따라 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 배관의 감육된 깊이가 55% 정도까지는, 건전한 배관에서 나타나는 주파수특성과 차이가 거의 없었다.
- 2) 감육깊이비가 $dt=0.55$ 로서 일정함에도 불구하고,

만약 감육깊이가 비교적 더 길면 중심주파수성분은 고주파수영역으로 옮겨진다.

3) 감육깊이비, dt 가 69% 이상인 경우에는 기계적강도가 매우 낮고, 중심주파수 영역은 wavelet transform 해석의 등고선지도(contour map) 상에서 높은 곳으로 옮겨지고 넓어졌다.

참고문헌

- [1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI. (1998)
- [2] 안석환, 남기우, 김선진, 김진환, 김현수, 박인덕, "감육배관의 손상모드에 따른 음향방출 특성", 한국해양공학회지, 16(5), 66-72, (2002)
- [3] 이시윤, 남기우, "고압배관용 탄소강의 인장시 음향방출 특성", 한국가스학회지, 7(2), 48-53, (2003)
- [4] H. Suzuki *et al.*, "Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals", *J. of Acoustic Emission*, 14(2), 69-84

- [5] Khan, M.A., T. Shoji and T. Takahashi, 5th Int'l AE Symposium, 395, (1980)
- [6] Miyazaki, K., S. Kanno, M. Ishiwata, K. Hasegawa, S.H. Ahn and K. Ando, "Fracture behavior of Carbon

Steel Pipe with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load", *Nuclear Engineering and Design*, **191**, 195-204, (1999)