

747
1000
7
22

공학석사 학위논문

감육을 갖는 고압탄소강배관의
강도 특성



이 논문을 재료공학부에서 제출함

2003년 2 월

부경대학교 대학원

재료공학과

김진환

김진환의 공학석사 학위논문을 인준함

2002년 12월 26일

주 심 공학박사 안 용 식



위 원 공학박사 문 창 권



위 원 공학박사 남 기 우

(인)

목 차

Abstract

1. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 이론적 배경	3
1.2.1 굽힘 모멘트	3
1.2.2 음향방출	4
2. 본론	5
2.1 재료 및 실험 방법	5
2.1.1 재료	5
2.1.2 실험 방법	8
2.2 실험 결과 및 고찰	10
2.2.1 감육배관의 파괴양식 및 파괴강도	10
2.2.2 감육배관의 굽힘하중하에서의 음향방출특성	26
2.2.3 배관재의 인장시험시의 음향방출특성	34
2.2.4 미세조직 관찰	39
3. 결론	41
참고 문헌	43

*Characteristics of Strength in the High Vessel Pipe
with Local Wall Thinning*

Jin-Hwan Kim

*Department of Materials Science & Engineering
Graduate School of
Pukyong National University*

Abstract

Fracture behavior of pipes with local wall thinning is very important for the integrity of nuclear power plant. In the pipes of energy plants, sometimes, the local wall thinning may result from severe erosion-corrosion (E/C) damage. However, the effects of local wall thinning on strength and fracture behaviors of piping system were not well studied yet. In this study, the monotonic bending tests were performed of the full-scale carbon steel pipes with local wall thinning. A monotonic bending load was applied to straight pipe specimens by four-point loading at ambient temperature without internal pressure. Acoustic emission(AE) has been widely used in various fields because of its extreme sensitivity, dynamic detection ability and location of growing defects. We investigated failure modes and AE signals by bending test for locally wall thinned pipes. And we investigated a relationship failure mode and AE signals by tensile test. As the results of bending test, fracture behavior and fracture strength of locally thinned pipe were manifested systematically. The observed failure modes were

divided into four types; ovalization, ovalization+cracking, local buckling and local buckling+cracking. Also, the strength and the allowable limit of piping system with local wall thinning were evaluated. And fracture behaviors such as elastic region, yielding range, plastic deformation range and crack progress could be evaluated by AE counts, accumulative counts and time-frequency analysis during bending test.

From the tensile test, we could divide into four ranges of the failure modes of elastic range, yield range, plastic range before σ_u , plastic range after σ_u . And failure behaviors of elastic range, yield range, plastic range before σ_u , plastic range after σ_u could be evaluated in tensile test by AE counts, accumulation counts and time frequency analysis. It is expected to be basic data that can protect a risk according to tensile test and bending of pipe material for pressure vessel, as a real time test of AE.

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

발전시설 등의 에너지 관련 플랜트에 사용되는 배관은 플랜트의 성능이나 안전성유지에 있어서 중요한 설비의 일부이다. 이와 같은 이유 때문에 배관의 건전성유지에 대해서는 예방 및 보전을 위한 기술 등에 의한 특별한 배려가 행하여져 왔다. 그러나, 에너지 관련 플랜트의 배관은 사용기간 중에 피로, 부식 등 여러 가지 종류의 열화손상을 받을 우려가 있고, Erosion-Corrosion(E/C)에 의해 발생하는 국부적인 손상인 감육(local wall thinning)도 그 중 하나이다¹⁾. 이와 같은 국부적인 감육 현상은 배관의 안전과 성능유지를 위해 매우 중요하다. 대표적인 사례로서는 국외적으로는 미국 Surry 원전의 배관 파단사고²⁾ 등이 보고 되어있고, 국내에서도 1998년 고리 2호기, 1999년 고리 3, 4호기 외에 영광 1, 2호기 등 국내 원전의 전반에 걸쳐서도 배관 감육 손상이 발생되고 있는 실정이다³⁾. 이상과 같이 배관의 감육문제는 세계 각 국에서 심각한 문제로 대두되고 있고 감육의 허용기준 등이 검토되고 있다⁴⁻⁶⁾.

그러나, 배관에 국부적인 감육부가 발생하였을 때의 배관의 강도와 파괴기구를 해명하기 위한 계통적인 실험 연구의 예는 극히 적고, 또한 그 특성의 해명이 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다⁷⁻⁹⁾.

어떤 재료가 외부의 응력에 의해 파괴 또는 변형되면 작용 응력의 형태, 물체의 특성, 파괴 또는 변형 기구에 따라 독특한 탄성파가 발생하는데 이러한 탄성파를 음향방출이라 한다. 음향방출의 연구방향은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 재료의 평가법으로서 재료의 미시적인 변형과 파괴 과정을 실험적으로 해석함으로써 재료의 개발이나 기존 재료의 재질 개선에 이용하려는 연구 방향이다. 또 하나의 음향방출연구 방향은 비파괴검사법(NDT: Non-destructive Testing)으로서 구조물의 현 상태를 진단하고 안전도를 평가하는 수단으로 사용하려는 연구 방향이다. 통상의 비파괴 검사법들이 결함의 위치와 크기만을 검출하는데 비해서, 음향방출은 결함의 위해도 그리고 균열 진전과 같은 동적

인 거동을 감시하여 대형 사고를 미연에 방지할 수 있다는 측면에서 유용시되고 있다¹⁰⁾.

본 연구에서는 고압 탄소강 배관에 기계적으로 감육부를 가공하여 배관 감육부의 형상이나 감육의 정도가 배관의 강도 및 파괴기구에 어떠한 영향을 미치는 가를 정량적으로 해명하기 위하여, 계통적인 실험 연구를 실시하였으며, 감육부를 가지는 배관의 허용한계를 조사하였다. 또한 비파괴 검사법으로서 실시간적인 배관의 변형 및 파괴를 규명하고자 굽힘 시험과 동시에 음향방출을 검출하여 음향방출의 여러 파라미터들과 배관 파괴양식과의 연관성을 규명하고자 하였다. 그리고 고압탄소강 배관의 변형 및 파괴에 대한 음향방출 기초 자료를 얻기 위하여 실제 사용 중인 압력용기용 배관재를 기계가공하여 인장시험편을 만든 후, 인장시험을 실시하여 항복, 소성변형, 파괴에 이르기까지의 음향방출신호 분석하였다.

1.2 이론적 배경

1.2.1 굽힘 모멘트

이론적 실단면 응력 기준(net-section stress criterion)을 사용하여 감육한 고압 탄소강 배관의 소성붕괴모멘트(M_{pc})는 아래 식 (1.1)을 사용하여 구하였다.

$$M_{PC} = 2 R^2 t \sigma_{fs} [2 \sin \beta + (\pi - 2\beta) \cos \beta] - [A r \sigma_{fs}] \quad (1.1)$$

여기서,

$$\beta = \left(\frac{\pi}{2} \right) - \left(\frac{A}{4Rt} \right)$$

$$A = R_s^2 \theta - R_s^2 \cos \theta \sin \theta$$

$$r = R \cos \beta + \left(\frac{2 R_s}{3} \right) \left[\frac{\sin^3 \theta}{\theta - \sin \theta \cos \theta} \right]$$

$$R = R_s - \left(\frac{t}{2} \right)$$

여기서, β 는 중립축 반각, A 는 감육된 면적, R 은 평균반경, R_s 는 외측반경, θ 는 감육된 반각(radian), r 은 모멘트 암(arm), t 는 배관 두께를 각각 나타낸다. 그리고, σ_{fs} 는 유동응력으로서 아래의 식으로 나타낸다.

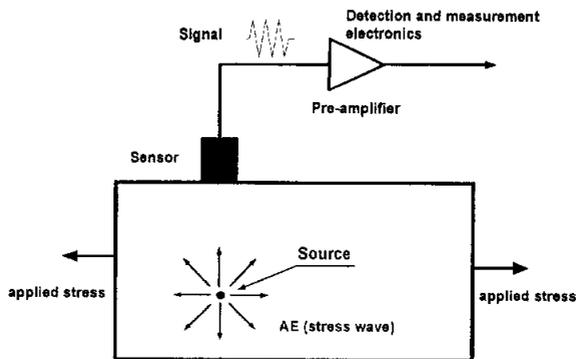
$$\sigma_{fs} = \left(\frac{\sigma_u + \sigma_y}{2} \right) \quad (1.2)$$

여기서, σ_u 는 인장강도를 σ_y 는 항복강도를 각각 나타낸다.

1.2.2 음향방출 (Acoustic Emission: 음향방출)

어떤 물체가 외력 또는 내부의 힘에 의해 변형이나 파괴가 일어나게 되면 재료 내부에 축적되어 있던 변형에너지(strain energy)는 파면형성 에너지, 열 에너지, 격자변형 에너지 그리고 탄성파와 같은 여러 형태의 에너지로 변환된다. 이때 외부에서의 계측장치에 의하여 가시적으로 검출된 탄성파를 음향방출신호라 하며 탄성파 자체 그리고 탄성파를 검출하는 수단 및 해석을 통틀어 음향방출법 또는 음향방출기법이라 한다¹¹⁾. 탄성파는 본질적으로 물체의 구성입자들이 사방으로 진동해 가는 현상이며, 방출된 탄성파는 표면에서 압전 센서를 이용하여 전기적 신호로 변환 후 처리하게 된다.

이와 같은 음향방출 신호는 고체 내의 전위의 이동이나 미소 균열의 생성과 성장 등이 대표적인 발생원으로 알려져 있으며, 재료의 특성에 따라서도 크게 달라질 수 있다.



Basic principle of Acoustic Emission

2. 본 론

2.1 재료 및 실험 방법

2.1.1 재료

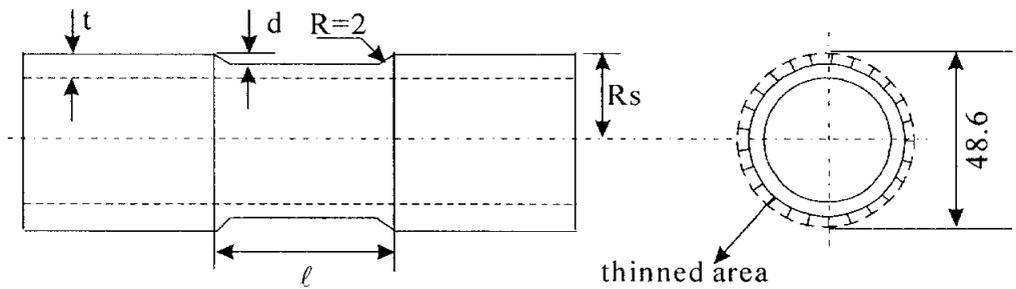
본 연구에 사용된 재료는 직경 48.6mm인 Schedule 80 SPPH38 고압탄소강배관(Carbon Steel Pipes for High Pressure Service; KS K-3564)이다. 기계적 성질 및 화학 조성은 각각 Table 1과 2에 나타낸다. 굽힘 시험에 사용된 감육배관 시험편의 형상은 Fig. 1(a), (b)에 나타내고, 압력용기용 배관재의 인장시험시 음향방출을 검출하기 위하여 배관에서 채취한 인장시험편을 Fig.1(c)에 나타낸다. Fig. 1(a)는 360° 전주에 걸쳐서 감육가공을, Fig. 1(b)는 감육부의 길이방향과 깊이가 다르도록 가공하였고, 중심부의 깊이가 d 가 되게 하였다. 실험에 사용된 시험편의 치수는 Table 3에 나타낸다.

Table 1 Mechanical properties

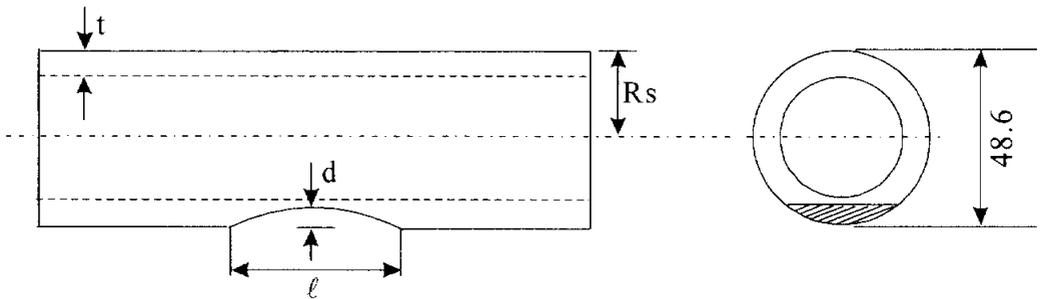
Material	Tensile strength (σ_u , MPa)	Yield strength (σ_y , MPa)	Elongation (%)
SPPH38	373	216	27 %

Table 2 Chemical compositions [wt%]

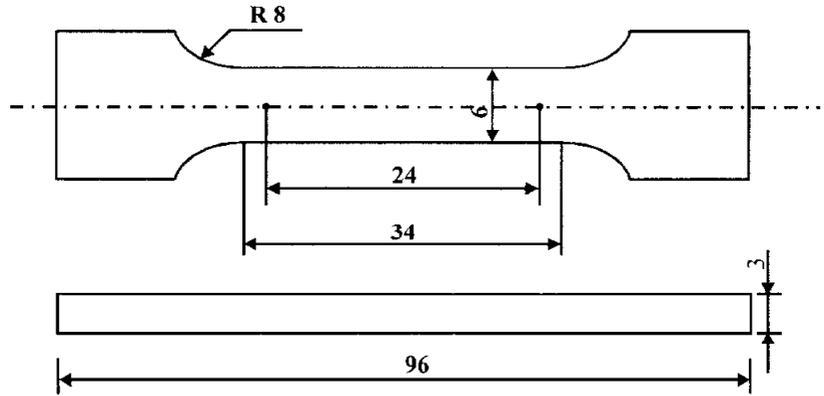
Material	C	Si	Mn	P	S
SPPH38	0.25	0.25	0.43	0.035	0.035



(a) 360° circumferentially thinned specimen



(b) Partially thinned specimen with the different depth and length



(c) Tensile specimen

Fig. 1 Tested specimens (unit: mm)

Table 3 The geometries of specimens

Specimen no.	Half outer	Wall	Thinned	Axially	Thinned	Radius
	diameter	thickness	depth	thinned length	angle	
	Rs (mm)	t (mm)	d _{max} (mm)	l (mm)	2 θ (°)	R (mm)
LTP-1	24.3	5.1	1.0	10	360	2
LTP-2	"	"	4.0	"	"	2
LTP-3	"	"	1.0	"	"	×
LTP-4	"	"	4.0	"	"	×
LTP-5	"	"	1.0	100	"	2
LTP-6	"	"	4.0	"	"	2
LTP-7	"	"	1.0	"	"	×
LTP-8	"	"	4.0	"	"	×
LTP-9	"	"	4.0	"	63.3	
LTP-10	"	"	4.0	50	"	
LTP-11	"	"	0.0	0.0	0.0	
LTP-12	"	"	1.0	50	360	2
LTP-13	"	"	4.0	"	"	2
LTP-14	"	"	1.0	"	"	×
LTP-15	"	"	4.0	"	"	×

2.1.2 실험 방법

배관시험편은 Fig. 1(a), (b)와 같은 시험편을 사용하여 4점 굽힘시험을 실시하면서 동시에 실시간적으로 음향방출실험을 행하였으며, 그 모식도는 Fig. 2에 나타낸다. 굽힘시험시 부하 스펙 길이는 150mm, 지지 스펙 길이는 600mm로 하였고, 크로스헤드 변위 속도는 1mm/min의 변위 제어에 의하여 실온 대기 중에서 실시하였다. 지지용 지그는 하중이 동일 위치에 부하될 수 있도록 하기 위하여 롤러형태로 제작하였다. 단 배관내의 내압은 고려하지 않았다.

음향방출실험은 굽힘 및 인장시험을 실시하면서 실시간적으로 음향방출신호를 수신하였다. 시험 중 발생하는 음향방출신호의 검출을 위한 음향방출센서로 1MHz의 광대역 센서를 사용하였고, 음향방출장비는 PAC사의 Mistras 2001을 사용하였다. 시험편에서 검출한 미세한 음향방출신호를 증폭시키기 위해서 100~1200kHz 아날로그필터가 내장된 Pre-amp에서 40dB 증폭시킨 후 Mistras 2001 Board 내부에 포함된 A/D변환기로 디지털 변환시킨 다음 최종적으로 시간-주파수 분석 프로그램인 JTFA(Joint Time-Frequency Analysis)를 사용하여 분석하였다. 이때 전기적 및 기계적 잡음 제거를 위해 Threshold를 40dB로 설정한 후 음향방출신호를 검출하였다¹²⁾.

인장시험은 Fig. 1(c)와 같은 인장시험편으로 Instron사의 모델 4204 인장시험기를 사용하였고, Cross Head speed는 1mm/min, 대기 중의 실온에서 실시하였다.

조직관찰용 시험시의 모식도는 Fig. 3에 나타낸다. 시험편은 SiC 연마지를 이용하여 연마하였고, 0.3 μ m Al₂O₃로 최종적으로 경면연마한 후에 0.2% 나이탈 용액으로 에칭하여 광학현미경 관찰을 하였다. 그리고 인장시험을 실시한 후의 파단면을 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다.

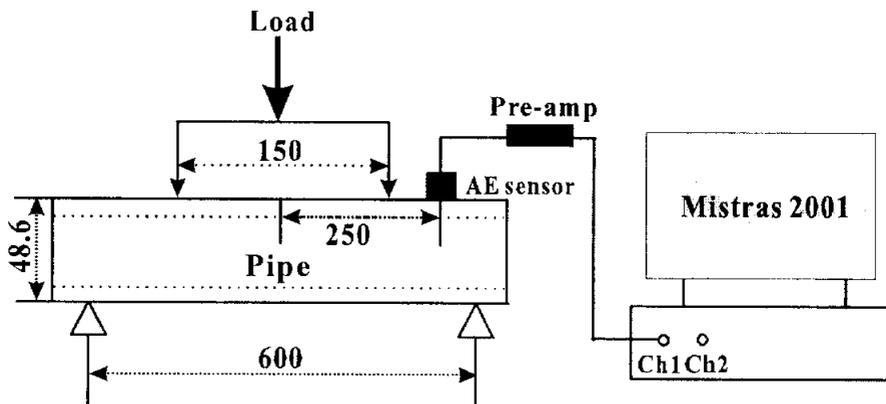


Fig. 2 Schematic diagram of four-point bending test

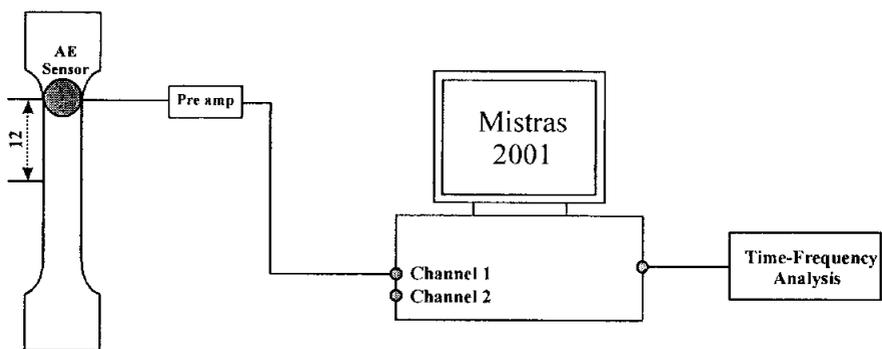


Fig. 3 Schematic diagram of tensile test

2.2 실험 결과 및 고찰

2.2.1 감육배관의 파괴양식 및 파괴강도

배관의 감육부에 4점굽힘하중을 부하한 후 그 결과는 Table 4에 나타낸다. 본 연구에서는 편평화(ovalization), 편평화 후 균열발생(crack initiation after ovalization), 국부좌굴(local buckling) 및 국부좌굴 후 균열발생(crack initiation after local buckling)과 같은 4종류의 파괴 양식이 나타났다. Fig. 4(a)~(d)는 4점굽힘시험에 의한 모멘트(M)-하중점변위(δ)선도를 나타낸다.

편평화가 발생하여 파괴된 LTP-5, 9, 12 및 14의 결과를 Fig. 4(a)에 나타낸다. 그림 속의 화살표는 부하되는 하중이 계속 증가하고 있음을 나타낸다. LTP-5, 12, 14는 $d/t=0.196$ 인 전주감육시험편으로 감육결함을 갖지않는 건전한 배관재인 LTP-11의 경우와 유사한 결과를 나타내었다. LTP-9는 $d/t=0.784$ 인 부분감육시험편으로 하중부하방향에 대하여 인장측에 감육부를 놓이게 한 경우이다. 동일한 형상의 시험편 2개를 시험하였다. 균열발생이 예상되었으나 균열이 발생하지 않고, 반면에 편평화 현상이 지속되었다. 시험 후 시험편 표면을 조사해 본 결과 감육된 길이방향으로 국부적인 함몰이 미세하게 관찰되었다.

편평화 발생 후 균열이 발생하여 파괴된 LTP-1, 3, 7 및 10의 결과를 Fig. 4(b)에 나타낸다. 이 시험편들은 최대하중을 나타낸 후 편평화가 발생하였다. 특히, LTP-1과 10은 감육가공한 불연속부의 모서리를 둥글게 가공한 경우이며, LTP-3과 7은 모서리를 직각이 되게 가공한 경우이다. LTP-3과 7 시험편에서는 감육의 모서리 부분에 응력이 집중되어 균열이 발생하였다고 판단된다. 그러나, $d/t=0.196$ 으로서 비교적 감육의 정도가 얇은 LTP-1은 모서리부분을 둥글게 처리하여 응력 집중을 완하시켰음에도 불구하고 감육부에 네킹현상을 수반하면서 균열이 발생하였다. LTP-10은 $d/t=0.784$ 로서 감육이 깊지만 LTP-1보다 길이방향으로 감육이 더 큰 경우이다. LTP-10은 감육의 정도가 깊었기 때문에 균열이 발생한 것 같고, LTP-1은 감육깊이가 얇지만 길이방향으로 짧기 때문에 노치효과에 의해 균열이 발생한 것이라 판단된다. 단, LTP-1과

LTP-10은 그 감육의 각(원주방향의 감육의 폭)이 360° 및 63.4° 로서 다르므로 원주방향의 폭의 영향도 무시할 수 없다고 판단된다. 균열은 모두 하중부하방향에 대하여 인장측에서 발생하였고, LTP-1, 3 및 7은 균열발생 후 하중이 급격히 저하되었다. 그러나 길이방향으로 감육의 깊이가 다른 LTP-10의 경우는 균열발생 이후 급격한 하중의 저하는 보이지 않고, LTP-9와 비교하였을 때 감육의 깊이가 달라짐에 따라 나타나는 손상의 양상이 다르다. 이후 감육의 정도를 여러 가지 길이 및 깊이에 있어서 다르게 하여 검토하여 연구할 여지가 있다. 특히, 인용한 문헌⁸⁾의 STS370의 결과와 비교하면, 균열이 발생한 점에서는 동일하지만 STS370에서는 하중의 급속한 저하를 가져왔다. STS370의 d/t 는 0.740과 0.860으로 l 은 각각 41, 44mm이고, 본 연구의 d/t 는 0.784이며 $l=50$ mm이다. 물론, 두 경우에 있어서는 d/t 의 비율은 다르다. 따라서, 현 단계에 있어서는 하중의 증감의 원인이 무엇에 있는가에 대해서는 명확히 결론 내리기가 힘들다. 금후, 앞에서 언급한 내용에 있어서의 추가적인 검토를 할 필요가 있다.

Fig. 4(c)는 국부좌굴이 발생하여 파괴된 경우이다. 최대하중을 나타낸 후 국부좌굴이 발생하였다. 최대하중 이후 하중이 감소하지만, 급격한 하중의 감소는 보이지 않고 어느 정도 소성변형을 수반하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4(d)는 국부좌굴 발생 후에 균열이 발생하여 파괴된 경우이다. 이 경우의 시험편들은 모두 $d/t=0.784$ 인 전주감육의 것으로 최대하중을 나타낸 후 좌굴이 발생하였고, 이후 약간의 소성변형을 동반하면서 균열이 발생되었다. LTP-13과 15는 감육길이가 $l=50$ mm로서 최대하중시 균열이 발생하였으나, 하중의 급격한 저하는 보이지 않고 다소 소성변형을 나타내고 있다. 특히, LTP-13은 곡율처리를 한 경우로서 다른 시험편들과 비교하였을 때, 소성변형이 2.5~5배 정도 더 연장되고 있음을 알 수 있다. 이것은 감육길이가 어느 범위의 영역에서는 소성능력이 증가되고 있음을 보여준다고 판단된다. 균열은 모두 하중부하방향에 대하여 인장측에서 발생하였다.

이상의 결과로부터, 360° 전주에 걸쳐 감육이 형성되었을 경우에는 주로 d/t 의 비에 의하여 감육부의 손상모드가 결정되어진다고 생각된다. 특히 감육부가 인장측에 형성되었을 때는 균열발생이 용이해짐을 알 수 있다. 또한, 감육부의 모서리를 직각이 되도록 가공한 시험편의 경우에는 1례를 제외하고는 모두 균열이 발생하여 응력집중의 효과가 나타났다. 전반적인 경향으로서는 동일한감육의 형태일지라도 모서리 부분이 둥글수록 균열의 발생은 감소하는 경향을 나타내었다. 실험의 결과를 종합하여 보면, 동일한 감육길이 및 동일한 감육각(원주방향의 감육된 폭)이라면 감육깊이가 깊을수록 좌굴 혹은 균열 발생의 가능성이 높아진다. 또한, 동일한 감육깊이 및 동일한 감육각이라면 감육길이가 짧을수록 균열의 발생 가능성이 높아진다. 그리고, 동일한 감육깊이 및 동일한 감육길이를 가지는 경우라면 감육된 각이 클수록 좌굴 혹은 균열의 발생 가능성이 높아진다. 이상과 같은 결과들은 다른 연구자의 결과⁸⁾와도 거의 일치함을 알 수 있다.

Fig. 5는 각 감육배관 시험편에 굽힘하중을 부하하였을 때, Fig. 4(a)~(d)에 나타내어진 $M-\delta$ 의 거동을 보이면서 감육배관에 나타난 파괴 양상을 보여준다.

최대하중시의 모멘트 M_{max} 와 식(1.1)을 이용하여 구한 소성붕괴모멘트 M_{PC} 와의 관계를 Fig. 6에 나타낸다. 국부좌굴만이 발생하고 있는 것을 제외하고는 계산값이 보수적으로 평가되고 있음을 알 수 있다. 그 결과는 편평화가 발생하였을때의 경우들에 있어서 더욱 보수적인 경향을 나타내고 있다. 그림 속의 M_Y 는 감육결합이 없는 건전한 배관의 전소성모멘트의 계산값을 나타내고 있고, 항복강도를 소성단면계수로 나눈 값이다. 따라서, 건전배관의 전소성모멘트보다도 상당히 보수적으로 평가되고 있는 $M_{max} \geq M_Y$ 만 검토하여보자. $M_{max}=1.5M_{PC}$ 로 설정한 경우 아직도 보수적인 평가를 나타내고 있지만 새롭게 설정된 유동응력의 값이 본 배관재의 인장강도를 상회하기 때문에 적용이 곤란하다고 생각된다. 이에 반해 $M_{max}=1.25M_{PC}$ 로 설정한 경우는 $M_{max}=1.25M_{PC}$ 를

만족하더라도 아직도 보수적임을 알 수 있다. 그러므로, 국부감육재의 경우에 있어서는 종래의 유동응력 σ_{fs} 대신에 $1.25\sigma_{fs}$ 를 이용하더라도 충분히 평가가능하다는 것을 나타낸다. 단, 새롭게 제안된 유동응력 값의 타당성은 다양한 감육부 결함에 대하여 더 조사·검토할 필요가 있다. 또한, Net-section stress criterion이 상당히 보수적이고 균열을 가지는 실단면을 적용한 평가이므로 본 실험과 같은 감육재에 대해서는 길이방향의 감육결함을 함께 parameter로 고려한 이론식의 적용이 필요하다고 생각된다.

Fig. 7은 배관 감육부의 소성변형능력의 기준으로부터 구한 허용한계를 나타낸다. 실제 발전플랜트의 구성요소로서 사용되고 있는 배관은 정적인 구조보다는 거의 부정정계로서 이루어져 있다. 따라서, 본 연구에서는 이와 같이 배관을 부정정계로 간주하여 배관의 소성회전능력을 평가하였다. 횡축의 소성회전각 ϕ_{max} 는 최대하중시의 하중점에서의 소성변위 δ_{max} 를 이용하여 식(2.1)으로부터 구하였다.

$$\phi_{max} = \frac{4 \delta_{max}}{L_o - L_f} \quad (2.1)$$

여기서, L_o 는 지지 스패 길이, L_f 는 부하 스패 길이를 각각 나타낸다. 그리고, 종축의 M_{NP} 는 유동응력 $1.25\sigma_{fs}$ 를 이용하여 구한 계산값이다. 그림속의 기호들은 유동응력 $1.25\sigma_{fs}$ 를 적용한 M_{NP} 를, 그리고 점선은 유동응력 $1.5\sigma_{fs}$ 를 적용한 M_{NP} 를 각각 나타낸다. 그림 속에 나타낸 실선 M_{3S_m} 과 $M_{1.5S_m}$ 은 식(2.2) 및 (2.3)으로 구한 설계응력치이다.

$$M_{3S_m} = 3 S_m Z_e \quad (2.2)$$

$$M_{1.5S_m} = 1.5 S_m Z_e \quad (2.3)$$

여기서, S_m 은 본 실험에 이용한 재료의 기계적 특성치를 사용하여 구한 건전 배관재의 설계응력을 나타내며, 그 값은 $1.243 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ 이다. Z_e 는 단면계수를 나타낸다.

LIU¹³⁾ 등은 원자로 1차계 배관에서 필요한 ϕ_{\max} 를 약 0.1radian 정도로 제안하고 있다. 단, ϕ_{\max} 는 배관계에 따라 그 값이 다를 수 있다. 따라서, 본 실험에서는 $\phi_{\max} = 0.1 \text{ radian}$ 을 기준으로 실험결과로부터 허용한계를 검토하였다. 실험으로부터 구한 값이 $M_{NP} \geq M_{3S_m}$ 의 조건하에 있으면 강도가 충분히 높기 때문에 조건 없이 허용 가능하고, $M_{NP} \leq M_{1.5S_m}$ 의 조건하에서는 허용할 수 없다. $M_{1.5S_m} \leq M_{NP} \leq M_{3S_m}$ 의 경우에 있어서는 조건적으로 허용 가능한 것으로 즉, $\phi_{\max} \geq 0.1 \text{ radian}$ 인 경우에 한하여 허용 가능함을 나타낸다. 본 실험의 결과 중에서 ○ 및 ▼의 기호로 표시된 시험편의 경우는 편평화 이후 균열이 발생한 경우로서 모두 $\phi_{\max} = 0.1 \text{ radian}$ 이상을 나타내고 있으나, ○의 경우에는 균열발생 후 하중의 급격한 저하가 나타났다. 또한 ▼의 경우에는 균열발생 후 하중의 증가와 더불어 오히려 소성능력이 향상되고 있다. 따라서, $M_{NP} \geq M_{3S_m}$ 및 $\phi_{\max} = 0.1 \text{ radian}$ 이상의 영역에 있으므로 조건없이 허용 가능한 경우의 범주에 속하고 강도적으로 충분하여 급격한 파괴는 발생되지 않으리라고 예상되지만, 균열이 발생하였기에 교환 혹은 보수가 필요하다고 생각된다. 또한, 360° 전주 감육결합 중 $d/t = 0.784$ 인 경우는 모두 $M_{NP} \leq M_{1.5S_m}$ 의 영역에 있으므로 교환이 필요함을 알 수 있다. 이때의 파괴양식은 국부좌굴 및 국부좌굴 후의 균열발생의 경우들과 $\phi_{\max} \geq 0.1$ 이지만 $M_{NP} \leq M_{1.5S_m}$ 로서 허용할 수 없는 편평화 후 균열발생인 1례의 경우였다.

굽힘하중을 받는 배관의 파괴를 유한요소법으로 해석하여 실험에서 얻어진 결과와 비교하였다. 해석에 사용한 유한요소 프로그램은 Ansys 5.0이며, Fig. 8은 배관의 대칭성을 고려하여 1/4로 모델링한 것을 나타낸다. Fig. 9는 유한요소해석 후의 LTP-6배관 형상을 나타낸 것으로, 파괴는 좌굴이 되었다. 이것은

실험에서 얻어진 결과와 일치하였다. Fig. 10은 유한요소해석에서 얻은 모멘트-변위선도이며, Fig. 10(a), (b), (c)는 각각 건전한 배관과 감속배관의 결과를 비교하여 나타내었다. 해석에서 얻은 결과는 굽힘시험에서 얻은 Fig. 4의 모멘트-변위선도와 유사하게 나타났다. Fig. 11은 굽힘시험에서 얻은 모멘트와 유한요소해석에서 얻은 모멘트를 비교하여 나타내었다. Fig. 11(a)는 실험의 변위 25mm에 대응하는 실험값과 해석값을 비교한 것이고, Fig. 11(b)는 항복점에서 실험값과 해석값을 비교한 것이다. Fig. 11(a), (b)에서 해석이 실험보다 안전측으로 평가되었지만, 전체적으로는 좋은 일치를 나타낸다. 따라서 유한요소해석값이 앞에서 제안된 $1.25M_{pc}$ 를 만족한다면, 허용여부를 판단할 수 있다고 사료된다¹⁴⁻¹⁶).

Table 4 Test results

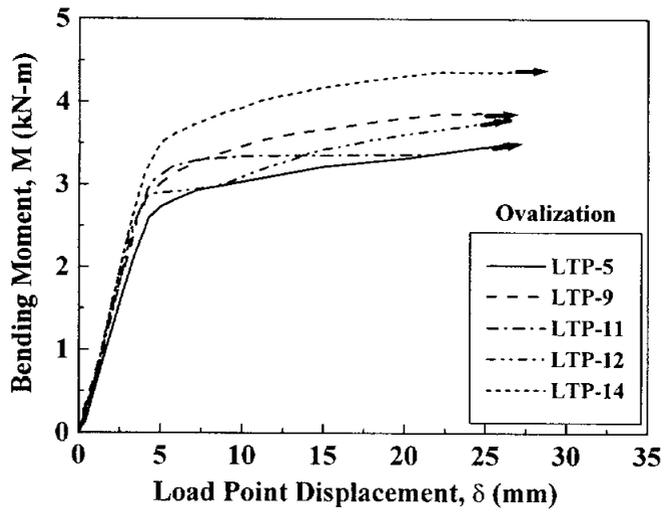
Specimen No.	Maximum Moment by Exp.	Plastic Collapse Moment by Cal.	Plastic Collapse Moment Ratio	Failure Mode
	M_{max} (kN · m)	M_{PC} (kN · m)	$\frac{M_{max}(Exp)}{M_{PC}(Cal)}$	
LTP-1	3.966	2.181	1.818	OC
LTP-2	0.582	0.505	1.153	BC
LTP-3	4.059	2.181	1.861	OC
LTP-4	0.649	0.505	1.285	BC
LTP-5	3.466 ↑	2.181	1.589 ↑	O
LTP-6	0.341	0.505	0.675	B
LTP-7	3.466	2.181	1.589	OC
LTP-8	0.550	0.505	1.089	BC
LTP-9	3.866 ↑	2.404	1.608 ↑	O
LTP-10	3.817 ↑	2.404	1.588 ↑	OC
LTP-11	3.466 ↑	2.842	1.220 ↑	O
LTP-12	3.749 ↑	2.181	1.719 ↑	O
LTP-13	0.922	0.505	1.856	BC
LTP-14	4.367	2.181	2.002	O
LTP-15	0.667	0.505	1.321	BC

Note: OC = Crack initiation after ovalization

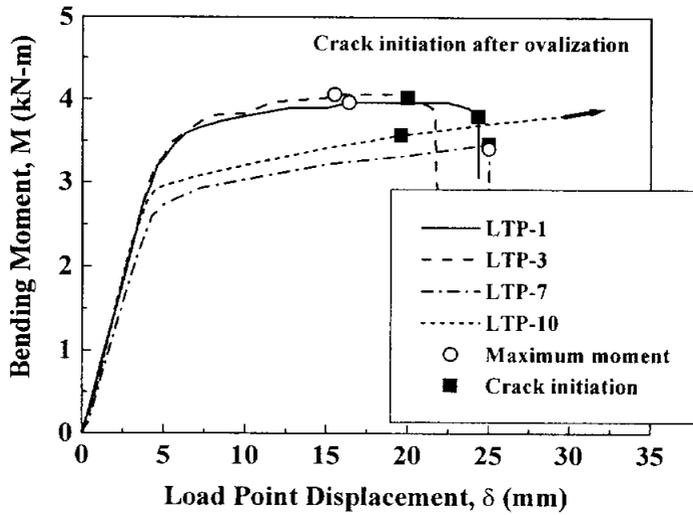
BC = Crack initiation after local buckling

O = Ovalization

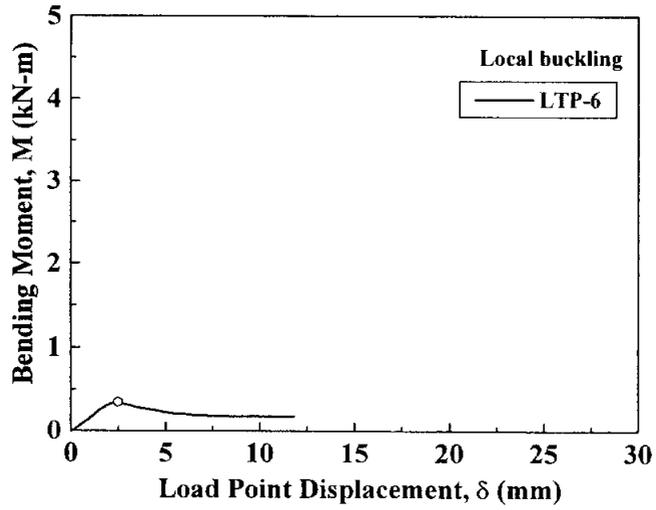
B = Local buckling



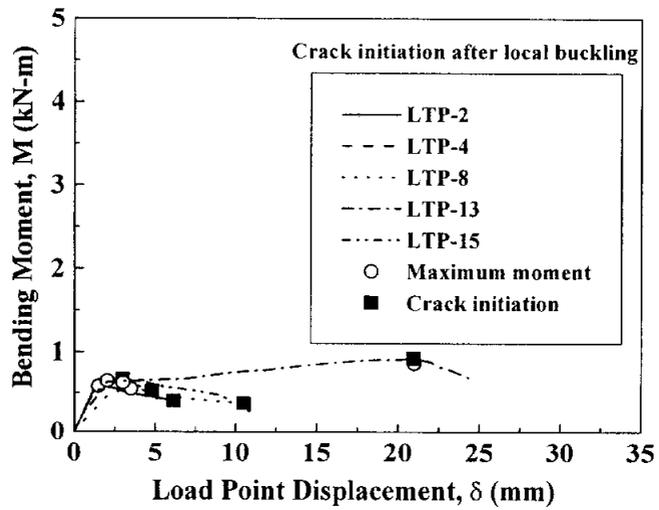
(a) The case of ovalization



(b) The case of crack initiation after ovalization

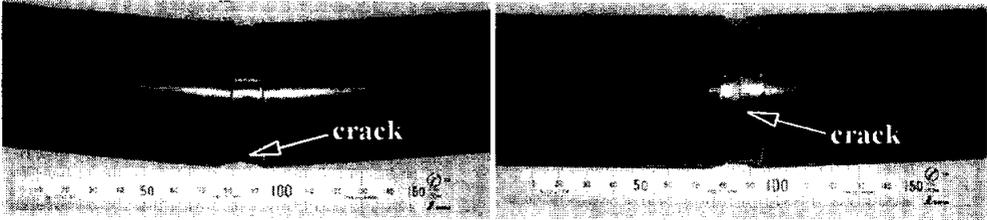


(c) The case of local buckling

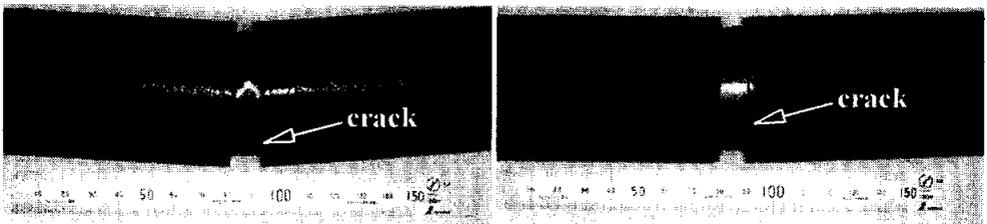


(d) The case of crack initiation after local buckling

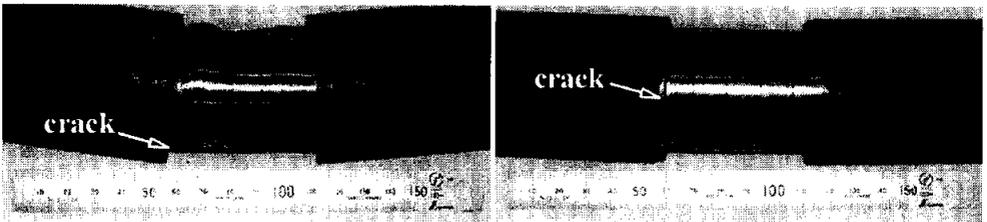
Fig. 4 Moment-displacement curves for locally thinned pipes



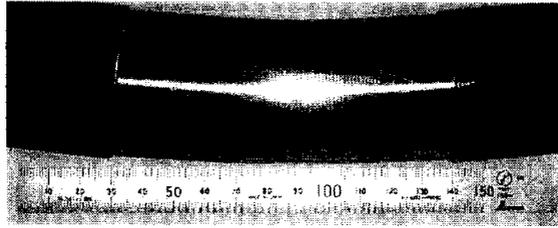
(a) Crack initiation after ovalization (LTP-1: $d/t=0.196$, $\ell = 10$ mm)



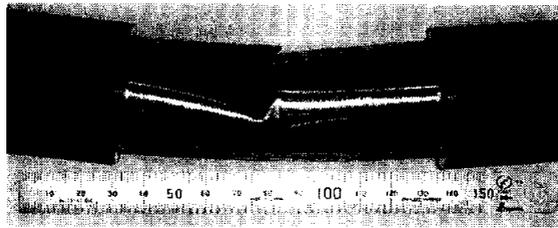
(b) Crack initiation after local buckling (LTP-2: $d/t=0.784$, $\ell = 10$ mm)



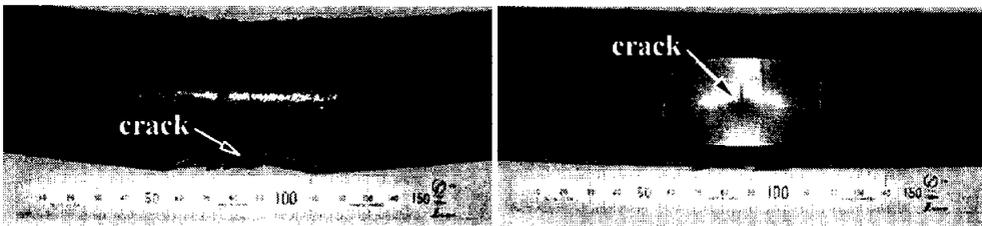
(c) Crack initiation after local buckling (LTP-13: $d/t=0.784$, $\ell = 50$ mm)



(d) Ovalization (LTP-5: $d/t=0.196$, $\ell=100$ mm)



(e) Local buckling (LTP-6: $d/t=0.784$, $\ell=100$ mm)



(f) Crack initiation after ovalization (LTP-10: $d/t=0.784$, $\ell=50$ mm)

Fig. 5 Fracture mode occurred in pipes with locally thinned area

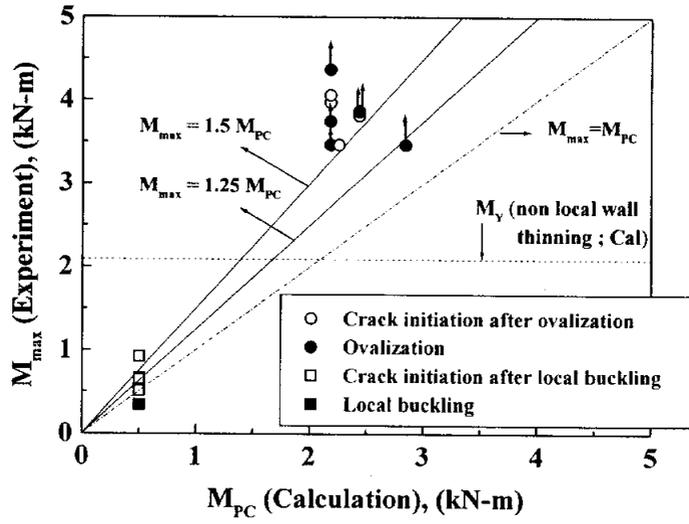


Fig. 6 Comparison between calculated and experimental plastic collapse moment of locally wall thinned pipes

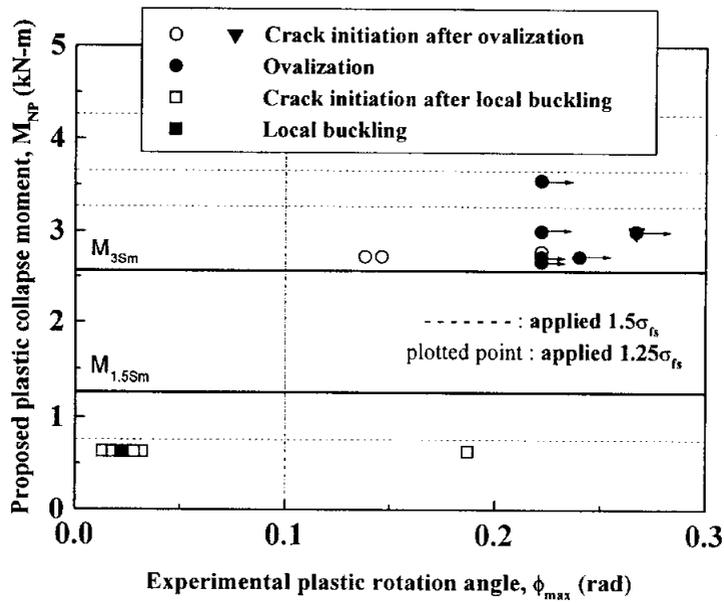


Fig. 7 Allowable limit of locally thinned pipes

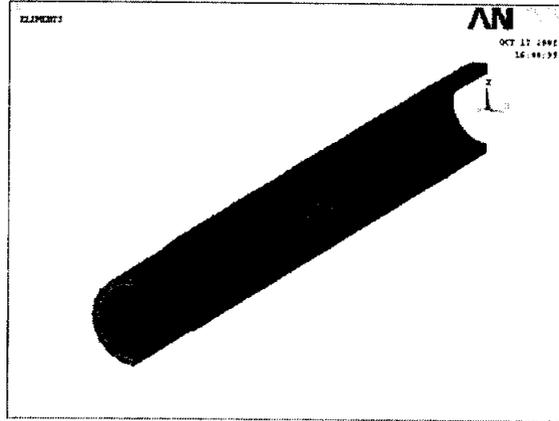


Fig. 8 The element of FEM

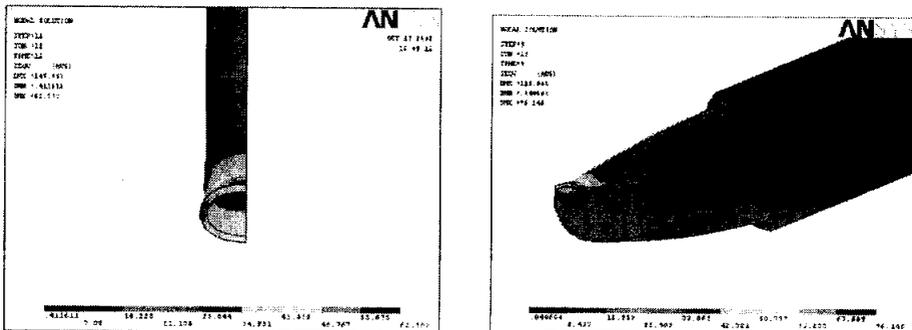
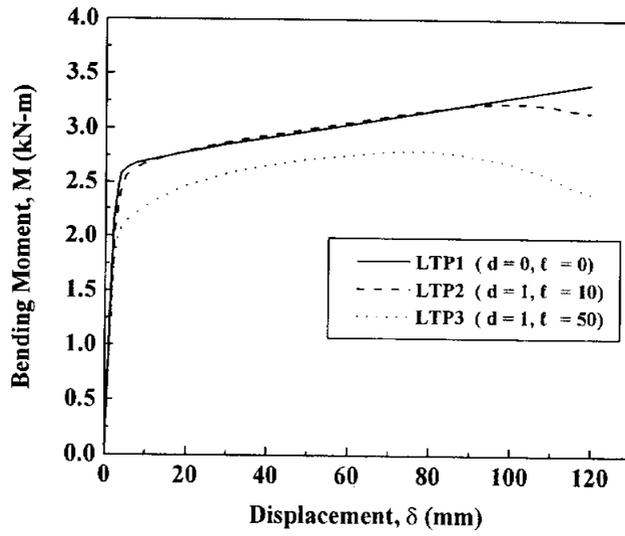
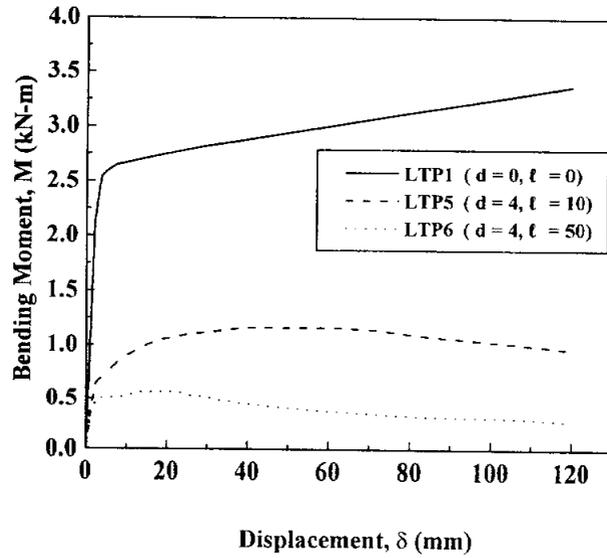


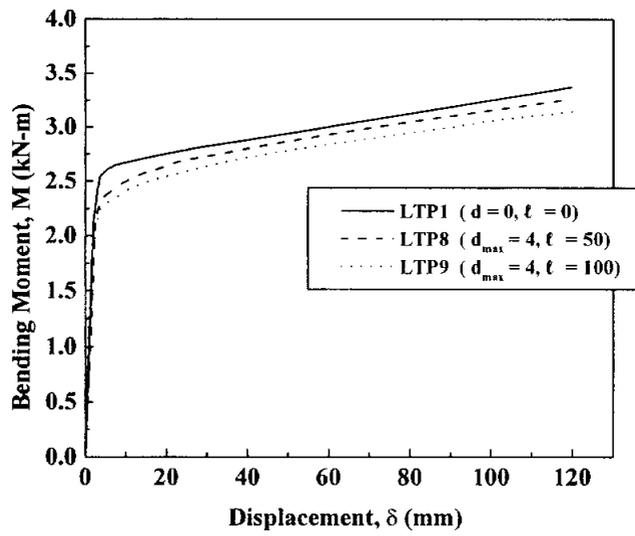
Fig. 9 The shape of pipe after FEM analysis



(a) 360° circumferentially thinned pipes (d=1)

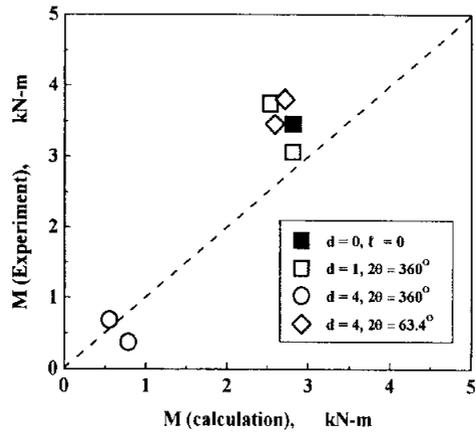


(b) 360° circumferentially thinned pipes (d=4)

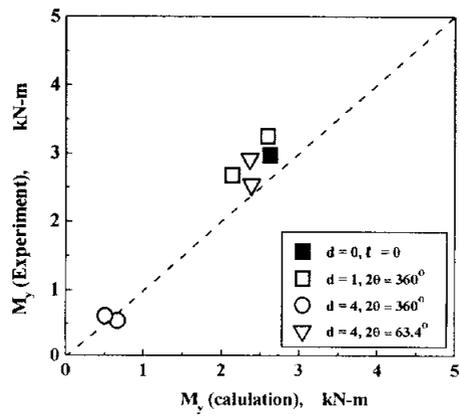


(c) partially thinned pipes

Fig. 10 Moment-displacement curves from FEM analysis



(a) Comparison of Moment obtained from displacement of 25mm



(a) Comparison of Moment obtained from yield point

Fig. 11 Comparison of experiment and calculation

2.2.2 감육배관의 굽힘하중하에서의 음향방출특성

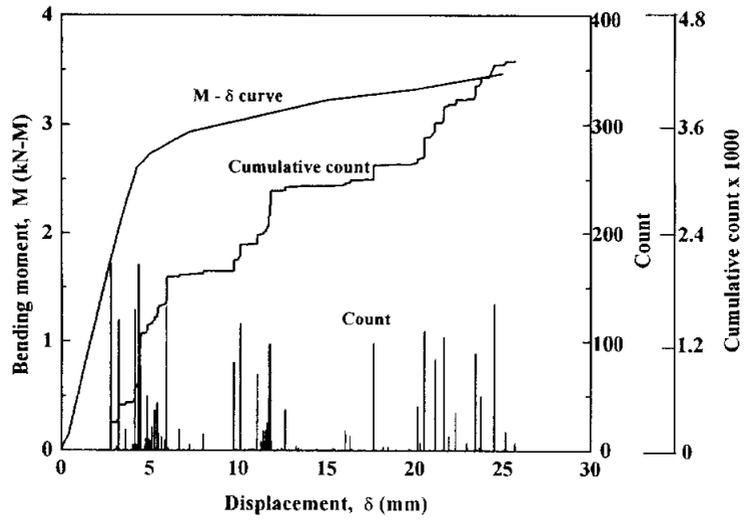
감육배관의 굽힘실험에서 검출된 음향방출신호의 count 및 누적 count를 Fig. 12(a)~(d)에 나타낸다. 2.2.1절에서 파괴양식을 편평화, 편평화 후 균열, 국부 좌굴, 국부 좌굴 후 균열 등으로 구별하였다. 음향방출평가에서는 균열 유무에 대한 음향방출신호와 좌굴, 편평화 등의 변형 형상에 따라 음향방출 파라미터를 평가하였다. Fig. 12은 굽힘하중하에서 발생하는 음향방출 count, 누적 count 및 모멘트를 변위에 대하여 나타낸 그림이다. 파괴양식에 관계없이 음향방출 count는 시험편이 굽힘하중하에서 탄성영역을 벗어나 항복이 발생하는 영역에서 급격히 증가함을 볼 수 있다. 이는 시험편이 탄성영역을 벗어나 항복에 이르게 되면 전위 이동의 증가와 소성변형이 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 전위의 이동에 의한 음향방출신호는 항복점 부근에서 최대가 되고 항복점 이후에는 점차 감소된다고 Scruby¹⁷⁾ 등이 정량적으로 분석한 바 있다. 본 연구에서도 탄성영역의 경우는 전위의 이동에 의한 음향방출신호가 거의 발생하지 않았고, 전위의 이동이 급격히 증가하는 항복점 부근에서 음향방출 신호가 급격히 증가한 것으로 보아 위의 연구결과와도 일치한다고 판단된다. 항복이 발생하였을 때 음향방출 count가 증가하고 누적 count 곡선의 기울기가 급격히 증가하는 경향이 나타났으며, 이러한 결과가 실제 사용 중인 배관의 안전성 유무를 판단할 수 있는 근거를 제시할 수 있다고 사료된다. 항복이 일어난 후, Fig. 12(a), (b)의 파괴양식을 비교하면, 편평화된 (a)에서 음향방출신호는 누적 count가 변형에 대하여 지속적으로 증가하는 반면 편평화 후 균열이 발생했을 때는 변형이 일어날 때 음향방출신호는 거의 관찰되지 않았고 균열이 발생 진전됨과 동시에 음향방출 count가 증가하고 누적 count의 기울기가 급격해졌다. 이러한 결과는 재료 내부의 에너지 방출로 발생하는 음향방출신호가 변형에 대해서는 지속적으로 발생하는 반면 균열이 발생한 경우는 변형에 의하여 재료 내부의 에너지가 축적되고 균열로 인하여 축적된 에너지가 급격히 방출됨으로서 변형으로 인한 음향방출신호는 적고 균열이 발생, 진전함과 동시에 음

향방출신호가 증가한 것으로 판단된다. Fig. 12(c), (d)는 국부 좌굴 및 국부 좌굴 후 균열의 파괴양식에 대한 음향방출신호를 분석하여 나타낸 것이다. 좌굴만 발생했을 경우에 음향방출 count가 전 영역에 걸쳐 높이 나타났지만, 균열이 발생한 파괴양식에서는 좌굴과 균열에 의해 음향방출신호가 나타났고 음향방출 count가 일부분에서 나타났다. 누적 count는 보면 국부 좌굴이 발생했을 때의 에너지의 방출이 편평화보다 더욱 지속적으로 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 12(b)와 (d)를 비교하면, (b)는 편평화로 인한 음향방출신호가 거의 나타나지 않고 균열에 대한 신호만이 주를 이루었으나, (d)는 좌굴과 균열에 대하여 음향방출신호가 나타난 것으로 보아 편평화 보다는 좌굴에 의한 에너지 방출이 많이 발생한다고 판단된다¹⁷⁻¹⁹).

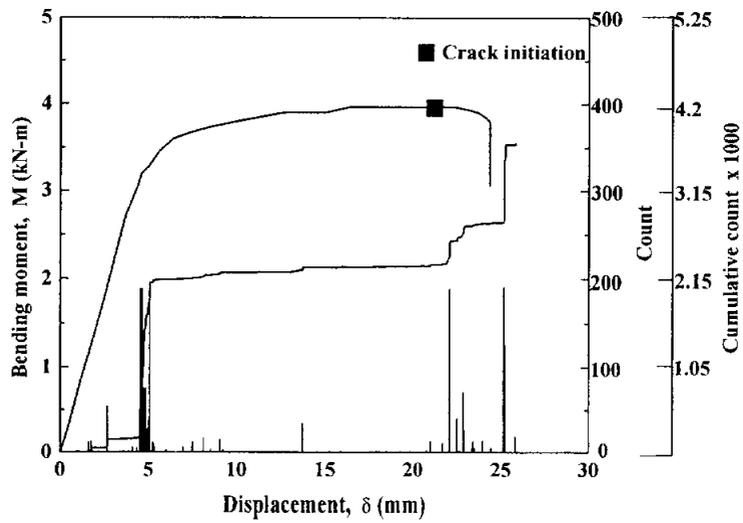
굽힘하중하의 감육배관에서 검출된 음향방출신호를 이용하여 감육배관의 파괴 거동을 규명하고자 시간-주파수 분석 프로그램으로 음향방출신호의 주파수 대역을 분석하였다. Fig. 13는 굽힘하중하에서 파괴거동에 따라 방출되는 음향방출신호의 양상을 분류하기 위하여 모멘트-변형 곡선을 4개 영역으로 구분하여 나타낸 것이다. 음향방출신호는 크게 1) 시험편의 항복이 발생할 경우, 2) 전위의 이동과 항복 이후의 소성변형(좌굴, 편평화 등), 3) 균열의 발생 및 진전될 경우 나타났다. 각각의 신호를 시간-주파수 분석법으로 분석한 결과를 Fig. 13에 나타낸다.

Fig. 14(a)는 탄성영역에서 전위를 둘러싸고 있는 탄성응력장에서 탄성변형률에너지의 방출에 의해 발생하는 음향방출신호로서 항복점에 가까운 탄성영역에서의 전위의 이동 중에 발생한 신호로 생각된다. 중심주파수 대역은 200kHz~250kHz 영역으로 나타났으며, 미세하게 400kHz~500kHz영역에서도 나타났다. Fig. 14(b)는 항복영역에서 나타난 음향방출신호로서 중심주파수 영역은 400kHz~500kHz의 영역과 200kHz~250kHz 영역이 동시에 나타났다. 이는 항복이 발생하기 전의 전위의 이동에 의한 200kHz~250kHz 대역 및 항복 발생 후 소성변형에 의한 400kHz~500kHz의 대역이 복합적으로 나타난 것으로

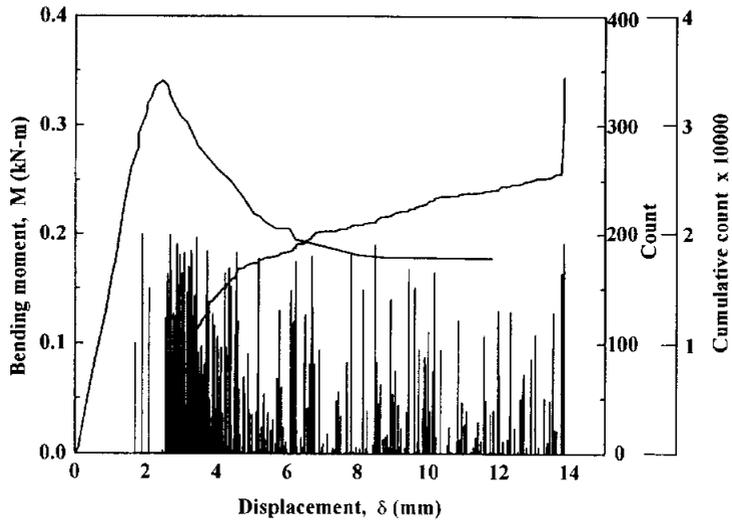
로 판단된다. 항복 이후에는 소성영역에서는 Fig. 14(c)와 같이 소성변형에 의한 음향방출신호가 단독으로 나타나는 경향이 많았다. 이것은 항복이 일어날 때 전위의 이동에 의한 신호가 많이 발생하는 반면, 항복 이후 전위의 이동에 의한 음향방출신호도 발생하지만 그에 비하여 편평화 및 좌굴과 같은 소성변형에 의한 음향방출신호가 증가하기 때문이라 여겨진다. Fig. 14(d)는 소성영역에서 복합적인 신호를 나타내고 있으며, 이는 항복점 부근에서 나타난 전위의 이동 및 소성변형과 같은 중심주파수 대역이 나타났다. 다만 200kHz이하의 신호들은 잡음으로 생각된다. Fig. 14(e)는 균열 발생 이후, 주로 균열에 의하여 나타난 음향방출신호로 중심주파수 대역은 350kHz~450kHz 대역으로 나타났다. 본 연구에서는 배관의 파괴거동에 따라 4개의 영역으로 나누어 탄성영역, 항복영역, 소성영역, 균열발생/진전으로 나타나는 주파수 대역을 분류하였다. 본 연구에서는 감육결함을 가지는 배관의 파괴시에 나타나는 거시적 파괴의 형태만을 고려하였지만, 재료내부에서 발생하는 미시적인 파괴기구에 대한 연구가 병행되어 검토되어진다면 더욱 정밀한 주파수대역도 구별이 가능하다고 판단된다.



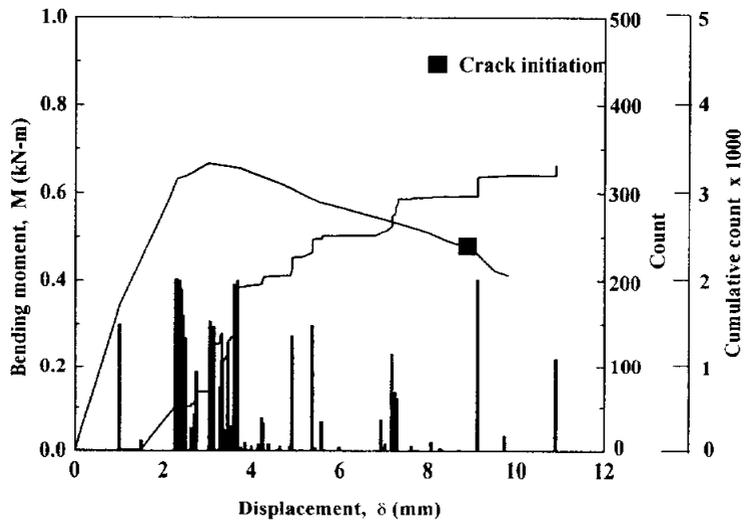
(a) The case of ovalization



(b) The case of cracking initiation after ovalization



(c) The case of local buckling



(d) The case of cracking initiation after local buckling

Fig. 12 Relationship of AE count and stress according to load point displacement

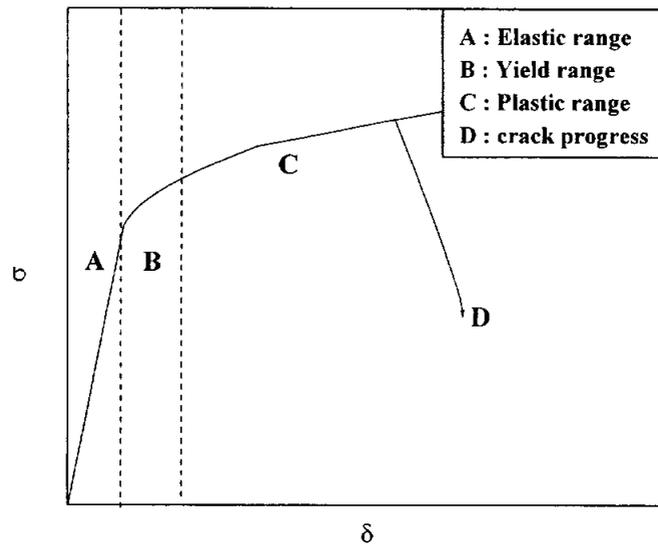
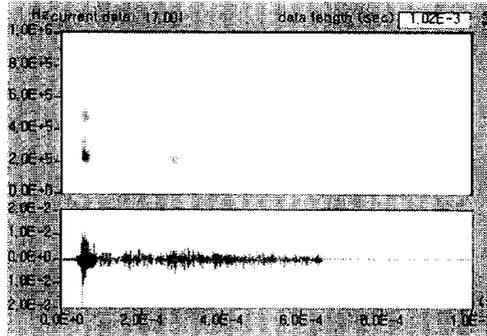
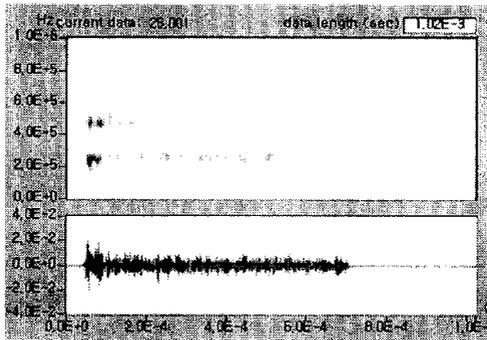


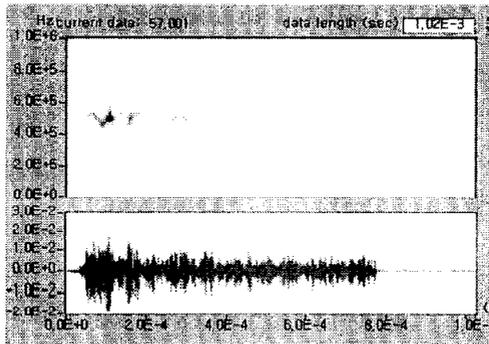
Fig. 13 The range of stress-displacement curve to analyze AE signals from pipe under bending loads



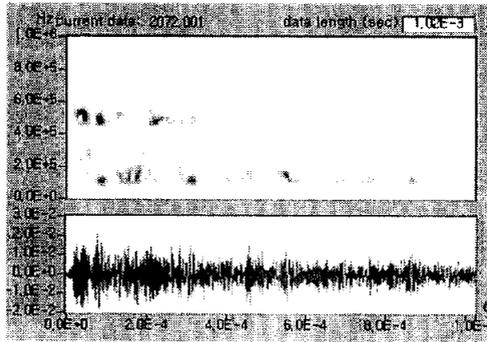
(a) Elastic range



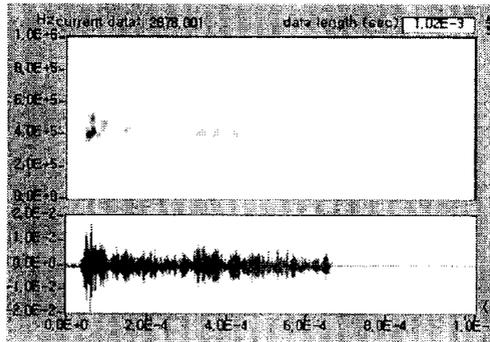
(b) Yield range



(c) Plastic range (Type I)



(d) Plastic range (Type II)



(e) Crack progress

Fig. 14 Time-frequency analysis according to acoustic emission mode

2.2.3 고압탄소강배관재의 인장시험시의 음향방출특성

고압탄소강배관에서 Fig. 1(c)와 같은 인장시험편을 만든 후 인장시험시 나타나는 음향방출신호를 분석하였다. Fig. 15는 압력용기용 탄소강 배관재의 인장시험에서 시간에 따른 하중, 음향방출 count 및 누적 count를 나타내었다. 인장시험 초기의 탄성영역에서는 음향방출 count가 거의 검출되지 않았으며, 상항복점에서 하항복점까지의 항복영역에서 많은 음향방출 count가 검출되었다. 그리고 항복영역 이후 소성변형영역에서도 많은 음향방출 count가 검출되었으나, 동일 시간에서 그 수가 항복영역보다는 적었다. 음향방출 count가 항복영역에서 급격히 증가함으로 인하여 음향방출 누적 count도 항복영역에서 급격한 기울기를 나타내고, 이후 소성영역에서는 일정한 기울기를 나타내고 있다. 지나 항복영역에서는 전위의 지속적인 이동에 의한 음향방출 신호로 판단되며, 다른 영역에 비하여 많은 수의 음향방출 count가 검출되었다. 항복영역 이후의 소성영역에서 하중이 증가하는 것은 일반적으로 전위의 집적에 의한 것으로 알려져 있고, 본 연구에서도 동일하게 하중이 증가하였다. 이러한 소성영역이 항복영역보다 음향방출 count가 적은 것은 결정입계, 개재물 등이 전위의 이동을 방해하여 집적되기 때문에 동일한 시간대에서 음향방출 count가 적은 것으로 판단된다¹⁷⁻¹⁹⁾.

Fig. 16는 인장시험에서 시간에 따른 하중과 음향방출 amplitude의 관계를 나타낸다. 음향방출 amplitude는 35dB에서 55dB 사이에서 주를 이루고 있다. 이는 항복영역 및 소성영역의 전 영역에 걸쳐서 전위의 이동이 발생하므로 35dB에서 60dB사이의 음향방출 신호는 전위의 이동에 의한 신호로 판단된다. 60dB이상의 음향방출 신호는 항복영역 및 최대인장강도 앞의 소성영역에서는 이동 중인 전위 및 집적된 전위들이 Fig. 20(c)와 같은 개재물이나 결정입계를 통과하기 위해서는 전위가 이동할 때보다는 상대적으로 큰 에너지를 필요로 하고 이러한 에너지들이 방출되면서 높은 amplitude를 나타낸다고 판단된다. 그리고 최대인장강도 이후의 60dB이상의 음향방출신호는 위와 동일한 경우도

있으나, 단면감소에 의하여 하중이 감소하는 것으로 보아 재료 내부에서 Fig. 20(a), (b)와 같은 미소공동의 발생, 성장 및 합체에 의하여 높은 amplitude를 가지는 것으로 판단된다. 이는 낮은 에너지의 음향방출 신호는 주로 전위들의 이동에 의한 소성변형의 결과이며 높은 에너지의 음향방출 신호들은 주로 microcracking 혹은 intergranular delamination에 의한 결과로 보고되어진바 있는 타 연구 유사한 결과라 생각된다²⁰⁾.

Fig. 17은 항복영역 (a) 및 소성영역 (b), (c), (d)에서 수신한 음향방출 신호를 시간-주파수 분석한 것이다. 소성영역은 Type I, Type II 및 Type III로 분류하였다.

Fig. 18과 같은 시간-주파수 분석에서 중심주파수와 하중과의 관계를 Fig. 18에 나타낸다. 항복영역에서는 250~350kHz의 주파수 대역이 주를 이루었고 항복 이후 소성영역에서는 250~350kHz외에도 500kHz의 고주파수가 나타났다. 이는 항복영역과 소성영역의 전 영역에 걸쳐 발생하는 전위의 이동에 의하여 250~350kHz의 중심주파수 대역이 나타난 것으로 판단된다. 항복영역에서 500kHz의 고주파수가 나타나지 않고 소성영역에서 고주파수가 나타난 것은 항복영역보다 소성영역에서 집적된 많은 전위들이 개재물이나 결정입계 등을 통과하기 위하여 큰 에너지가 필요하다. 이러한 큰 에너지가 방출됨으로서 500kHz이상의 고주파수가 나타난다고 판단되며, 250~350kHz 대역에서는 보다 많은 검토가 이루어져야 된다고 판단된다.

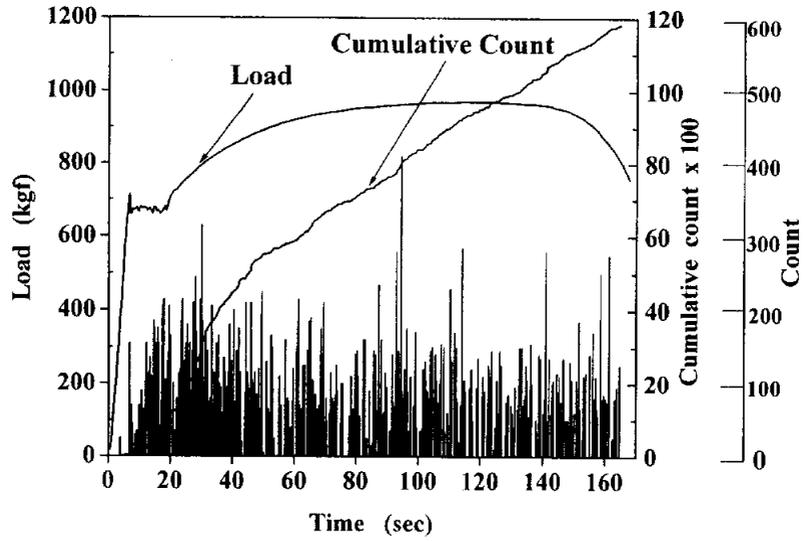


Fig. 15 Relationship between load and AE count by tensile test

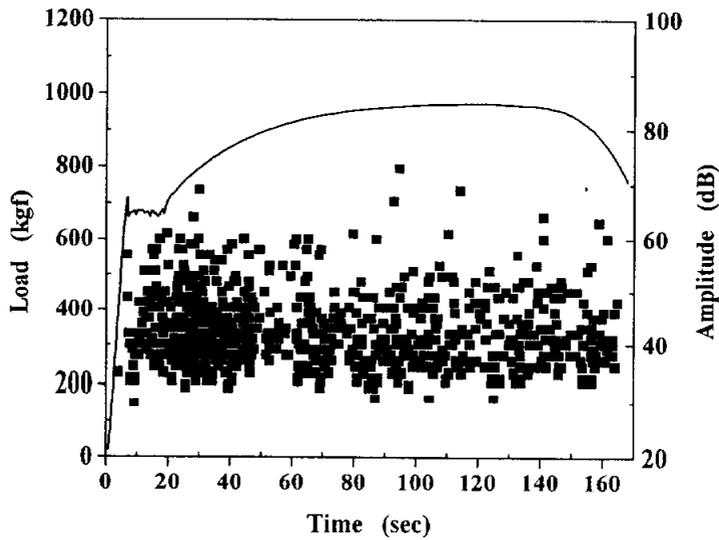
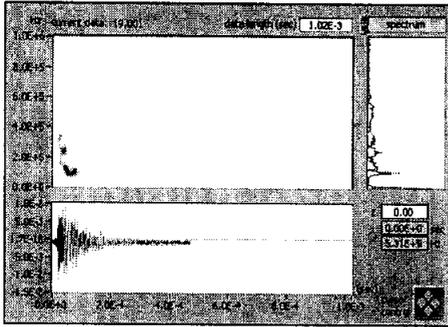
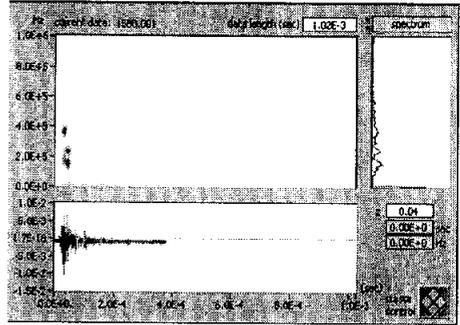


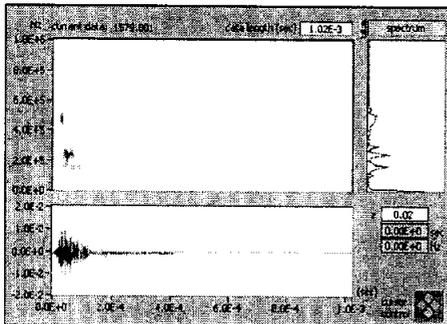
Fig. 16 Relationship between load and AE amplitude by tensile test



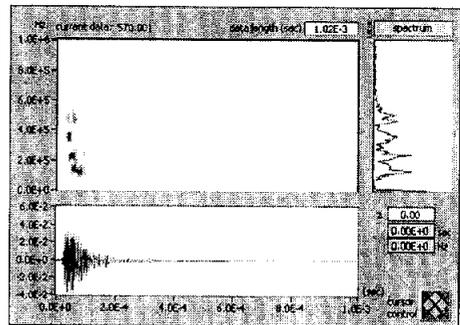
(a) Yield range



(b) Plastic range (Type I)



(c) Plastic range (Type II)



(d) Plastic range (Type III)

Fig. 17 Time-frequency analysis of yield and plastic range after tensile test

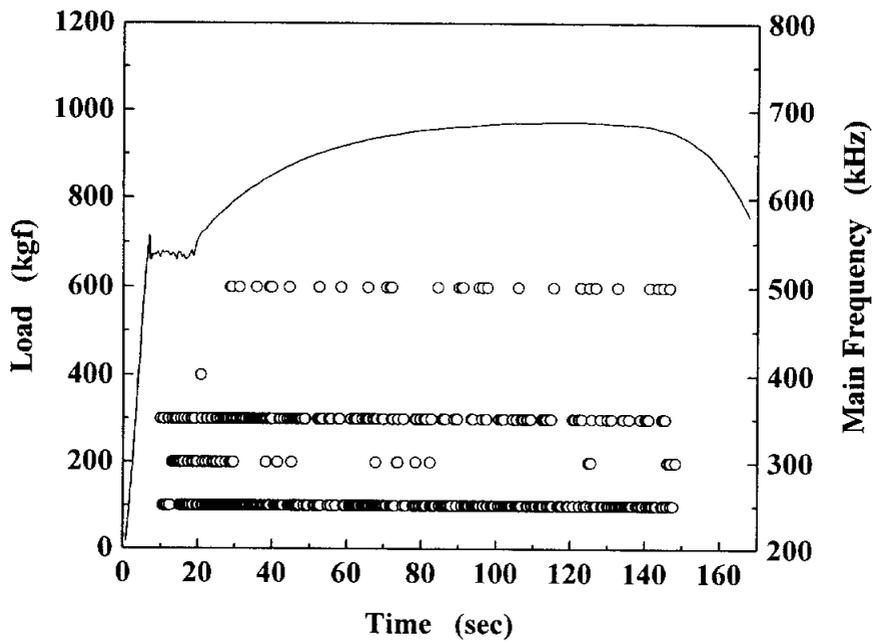


Fig. 18 Relationship between load and main frequency by tensile test

2.2.4 미세조직 관찰

Fig. 19은 본 실험에 사용한 압력용기용 배관재의 조직 사진을 나타낸 것이다. 일반적인 탄소강의 조직을 나타내고 있다. 즉, 검은 부분은 페어라이트, 흰 부분은 페라이트이며, 페라이트가 주를 이루고 있음을 관찰할 수 있었고, 약 20~30 μm 의 결정립 크기를 나타내었다.

Fig. 20은 인장시험 후의 시험편의 파단면을 주사전자현미경으로 관찰한 것이다. 파단면 전 영역에서 덩플(a)이 관찰되었으며, 이러한 덩플 주위에 미소공동(b)이 같이 관찰되었다. 이러한 덩플, 미소공동뿐만 아니라 개재물(c)도 관찰되었다. 이러한 덩플, 미소공동 및 개재물은 인장시험과 동시에 실시한 음향방출실험에서의 음향방출신호에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

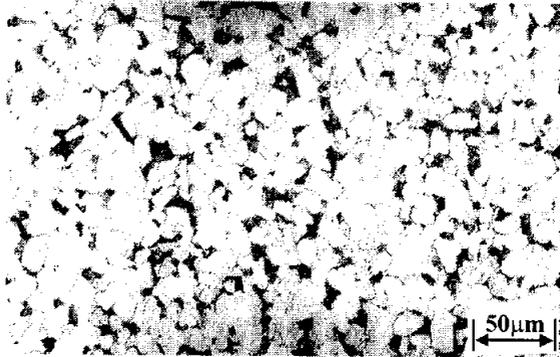


Fig. 19 The microstructure of carbon steel pipe for high pressure service

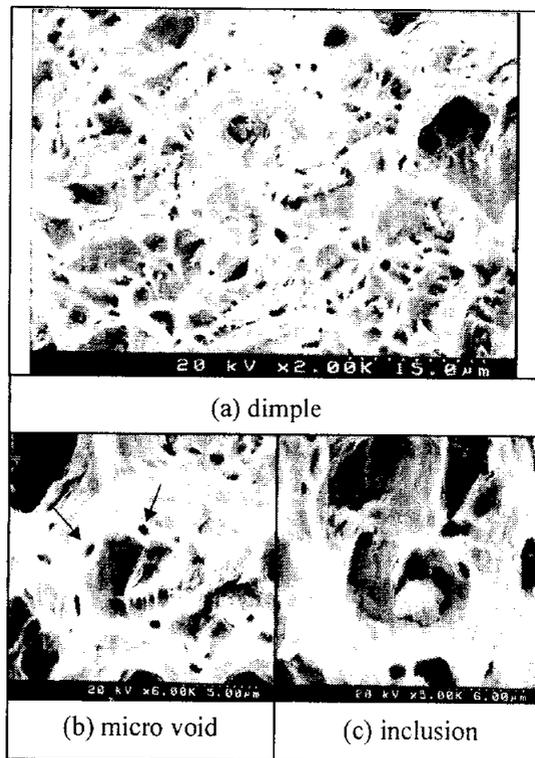


Fig. 20 Fractographics after tensile test

3. 결 론

본 연구에서는 고압탄소강배관에 기계적으로 감육부를 가공하여 배관 감육부의 형상이나 감육의 정도가 배관의 굽힘강도 및 파괴양식에 미치는 영향을 실험과 해석을 통하여 조사하였다. 그리고 고압탄소강배관재의 굽힘 및 인장 시험에서 얻어진 음향방출을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 감육배관의 파괴양식은 편평화, 편평화 후 균열, 국부좌굴 및 국부좌굴 후 균열의 4종류로 분류하였다. 이것은 국부적인 감육부를 가지는 배관에 있어서는 감육부의 형상 차이에 의해서 파괴양식이 다르게 나타남을 의미한다. $M_{max} \geq M_Y$ 인 즉, 건전배관의 전소성모멘트보다 감육부에서 나타난 소성붕괴모멘트가 큰 경우 종래의 유동응력을 적용한 경우 보수적인 평가를 하고 있다는 것을 알았다. 이것에 대해, 수정된 유동응력($1.25 \sigma_{fs}$)을 적용하더라도 보수적으로 평가 가능함을 보였다.

2) 파괴양식이 균열의 형태로 발생하였을 때에는 대개의 경우 충분한 소성변형의 능력을 보이지 않고 하중이 저하하였다. 따라서, 누설의 관점으로 보아서 파괴의 시점을 균열의 발생점으로 보아도 괜찮다고 판단된다. 이에 반해 좌굴 혹은 편평화에 의한 파괴의 형태는 최대하중 이후에도 어느 정도의 소성능력을 나타내었다.

3) 감육의 깊이가 동일한 경우 감육의 길이가 짧을수록 균열의 발생 가능성이 높아졌고, 동일한 감육길이라면 감육의 깊이가 깊을수록 좌굴 혹은 균열이 발생할 가능성이 높게 나타났다.

4) 유한요소해석 결과 유한요소해석값이 제안된 $1.25M_{pc}$ 를 만족한다면, 허용 여부를 판단할 수 있다고 사료된다.

5) 굽힘시험에서 검출한 음향방출 count, 누적 count와 모멘트를 비교한 결과, 파괴양식에 관계없이 탄성영역을 지나 항복이 시작되면, 전위의 이동에 의해 음향방출신호가 급격히 증가했다. 항복 이후 시험편에서 소성변형 및 균열이

발생하는 영역의 음향방출 count와 누적 count의 기울기를 비교하여 4종류의 파괴양식을 구별하는 것이 가능하였다.

6) 검출한 음향방출신호를 시간-주파수 분석한 결과, 배관의 파괴거동 즉 탄성영역, 항복영역, 소성영역, 균열발생의 4가지 영역에서의 주파수대역을 구별할 수 있었다. 이로서, 본 연구를 통하여 파괴양식에 따른 음향방출신호를 구별하는 것이 가능하였다.

7) 인장시험시 발생하는 탄성영역, 최대인장강도 이전의 소성영역 및 최대인장강도 이후의 소성영역을 음향방출 amplitude 및 각 영역의 중심 주파수 대역에 의하여 구분이 가능하였다.

8) 각 영역에서의 시간-주파수 분석 결과로 탄성영역에서 항복영역까지는 비교적 낮은 저주파수 대역(250~350kHz)이 나타났으며, 소성영역에서는 저주파수뿐만 아니라 고주파수 대역(500kHz)도 나타났다.

9) 인장시험 후, 이러한 각 영역의 구별이 가능하였던 원인은 항복영역에서의 전위의 이동, 집적에 따른 신호와 최대인장강도 이전의 소성영역에서의 전위들이 개재물이나 결정입계를 통과했을 때 나타나는 신호, 최대인장강도 이후에는 미소공동의 발생, 성장 및 합체에 의하여 나타나는 신호로 분류가 가능하였기 때문인 것으로 판단된다.

위와 같은 결론을 통하여 실제 사용 중인 배관의 감육 정도에 따른 파괴기구 및 파괴강도를 해명함으로써 배관의 안전성을 확보할 수 있으리라 판단되며 또한 음향방출실험을 통하여 배관의 파괴기구에 따른 음향방출거동 및 주파수 특성을 확보함으로써 이후에 일어날 수 있는 실제 사용 중인 배관의 사고에 대하여 비파괴적 안전성 평가를 위한 기초적인 데이터를 확보할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) " 火力・原子力及び化学プラント機器・構造部材の経年劣化と寿命豫測" , 1994, 리아라이즈社.
- (2) 矢川 元基, 1987, " 米國Surry原子力發電所2號爐2次系配管破斷事故の報告" ,日本原子力學會誌, Vol. 29, No. 7, pp. 621.
- (3) 심상훈, 송정수, 윤기봉, 황경모, 진태은, 이성호, 김위수, 2000, " 월성 원전 1호기 2차계통 배관감육 해석을 위한 전산코드의 적용" , 대한기계학회 2000년도 제2차 압력기기 기술대회, pp. 59~64.
- (4) Deardorff, A.F. and Bush, S.H., 1990, " Development of ASME Section Criteria for Erosion-Corrosion Thinning of Carbon Steel Piping" , ASME PVP, PVP-Vol. 186, NDE-Vol. 7, pp. 71~75.
- (5) Mathonet, J.F., Cherasse, J.M., Leblois, C.L. and Guyette, M.A., 1995, " Belgian Methodology for Evaluation of Erosion Corrosion phenomena in Unit 1; 2; 3 & 4 of the DOEL Nuclear Power Plant(NPP)" , ASME PVP, PVP-Vol. 303, pp. 393~399.
- (6) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. X I, 1998.
- (7) 日本原子力研究所機器信賴性研究室, 1993, " 配管信賴性實證實驗技術報告書" ,JAERI-M93-076, pp. 104~228.
- (8) Miyazaki, K., Kanno, S., Ishiwata, M., Hasegawa, K., Ahn, S.H. and Ando, K., 1999, " Fracture Behavior of Carbon Steel pipe with Local Wall Thinning Subjected to Bending Load" , Nuclear Engineering and Design 191, pp. 195~204.
- (9) 김진원, 박치용, 김범년, 1999, " 감육부위 길이가 감육배관의 허용두께 평가에 미치는 영향" , 대한기계학회 추계학술대회논문집 A, pp. 597~602.
- (10) 정희동, 1994, "음향방출법의 공학적 이용을 위한 기초", 대한기계학회지 vol 34, no. 1, pp. 20~32.

- (11) ASNT., 1987, "Nondestructive Testing Handbook - Volumn 5 Acoustion Emission Testing", 2nd Edition, American Society for Nondestructive Testing.
- (12) 남기우 등, 2000, " " 시간-주파수 해석법에 의한 CFRP의 파괴 거동", 비파괴검사학회지 vol. 21, no. 1, pp. 39-45.
- (13) Liu, S.P. and Ando, K., 2000, " Leak-before-break and plastic collapse behavior of statically with circumferential crack" , Nuclear Engineering and Design 195, pp. 261 ~270.
- (14) 류주현 , 홍재일 , 1998, " " 유한요소법과 ANSYS 프로그램 " ", 한국전기전자재료학회지, vol. 11, no. 11, pp. 86-91.
- (15) J. Okada, K. Iwata, K. Tsukimori and T. Nagata., 1995, " An evaluation method for elastic-plastic buckling of cylindrical shells under shear forces" , Nuclear Engineering and Design 157, pp. 65 ~79.
- (16) Fuang-Yuan Huang and Gao-Liang Shi., 1998, " Finite element analysis of pressure vessel using beam on elastic foundation analysis" , Finite Elements in Analysis and Design, vol. 28, no. 4, pp. 293 ~302.
- (17) C. Scruby, H. Wadley and J. E. Sinclari, Phil. Mag. A, 1981, vol. 44, pp. 249.
- (18) 김현수, 남기우, 강창룡, 김부안, 2000, " 음향방출에 의한 고강도 구조용 내화강의 열화특성에 관한 연구" , 한국열처리공학회지, vol. 13, no. 5, pp. 309-317.
- (19) 김현수, 남기우, 강창룡, 2001, " " 저항복비 고강도 구조용 내화강의 피로 특성 및 비파괴평가" , 한국열처리공학회지, vol. 14, no. 4, pp. 212-219.
- (20) 허종희, 이종수, 1997, " " 강 용접부의 소성변형시 음향방출 거동" , 대한금속학회지, vol. 35, no. 12, pp. 1660 ~1667.