

# 정적 및 반복굽힘하중을 받는 감육된 탄소강배관의 AE 특성 평가

김진환\* · 안석환\*\* · 남기우\*\*\* · 박인덕\*\*\* · 김용운\*

\*부경대학교 대학원 재료공학과

\*\*부경대학교 기계공학부

\*\*\*부경대학교 재료공학부

## Acoustic Emission Characteristic with Local Wall Thinning under Static and Cyclic Bending Load

JIN-HWAN KIM\*\*, SEOK-HWAN AHN\*, KI-WOO NAM\*\*, IN-DUCK PARK AND YONG-UN KIM\*\*

\*Graduate School of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

\*\*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

\*\*\*Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

**KEY WORDS** : Local Wall Thinning 국부감육, Bending Load 굽힘하중, Fracture Mode 파괴양식, Acoustic Emission 음향방출, Time-Frequency Analysis 시간-주파수분석, Pipe 배관

**ABSTRACT** : Fracture behaviors of pipes with local wall thinning are very important for the integrity of nuclear power plant. However, effects of local wall thinning on strength and fracture behaviors of piping system were not well studied. Acoustic emission(AE) has been widely used in various fields because of its extreme sensitivity, dynamic detection ability and location of growing defects. In this study, we investigated failure modes of locally wall thinned pipes and AE signals by bending test. From test results, we could be divided four types of failure modes of ovalization, crack initiation after ovalization, local buckling and crack initiation after local buckling. 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. It is expected to be basic data that can protect a risk according to local wall thinning of pipes, as a real time test of AE.

### 1. 서 론

발전시설 등의 에너지 관련 플랜트에 사용되는 배관은 성능이나 안전성유지에 있어서 중요한 설비의 일부이다. 그러나, 이러한 에너지 관련 플랜트의 배관은 사용기간 중에 여러 가지 종류의 열화손상을 받을 우려가 있고, Erosion-Corrosion(E/C)에 의해 발생하는 국부적인 손상인 감육(local wall thinning)도 그 중에 하나이다. 이러한 국부적인 감육은 안전과 성능유지를 위해 중요하며, 세계 각 국에서 심각한 문제로 대두되고 있다 (リライズ社, 1994; ASME Boiler and Pressure Vess. Code Sec. XI, 1998). 그러나 배관에 국부적인 감육이 발생하였을 때의 배관의 강도, 파괴기구를 설명하기 위한 계통적인 실험 연구의 예는 극히 적은 실정이다 (日本原子力研究所機器信頼性研究室, 1993; Miyazaki et al, 1999; 2002).

어떤 재료가 외부의 응력에 의해 파괴 또는 변형되면 작용 응력의 형태, 물체의 특성, 파괴 또는 변형 기구에 따라 독특한 탄성파가 발생하는데 이러한 탄성파를 음향방출(Acoustic Emission: 이하 AE라 칭함)이라 한다. AE의 연구방향은 크게

두 가지로 나눌 수 있다. 재료의 평가법으로서 재료의 미시적 인변형과 파괴 과정을 실험적으로 해석함으로써 재료의 개발이나 기존 재료의 재질 개선에 이용하려는 연구 방향이다. 또 하나의 AE연구 방향은 비파괴검사법(NDT: Non-destructive Testing)으로서 구조물의 현상태를 진단하고 안전도를 평가하는 수단으로 사용하려는 연구 방향이다. 통상의 비파괴 검사법들이 결함의 위치와 크기만을 검출하는데 비해서, AE는 결함의 위해도 그리고 균열 진전과 같은 동적인 거동을 감시하여 대형 사고를 미연에 방지할 수 있다는 측면에서 유용시되고 있다 (정희동, 1994; Ahn and Nam, 2001). 따라서, 본 연구에서는 고압탄소강배관에 인위적으로 감육부를 가공하여 감육부의 형상이나 감육의 정도에 따른 배관의 파괴양식을 분류하였고, 동시에 AE실험을 실시하여 AE실험으로부터 나오는 여러 파라미터들과 배관의 파괴양식과의 연관성을 규명하고자 하였다.

### 2. 재료 및 실험방법

#### 2.1 재료

본 실험에 사용된 재료는 직경 48.6mm인 Schedule 80 SP38 고압탄소강배관(Carbon Steel Pipes for High Pressure Service; KS standard K-3564)이다. 그 기계적 성질 및 화학 조

제1저자 안석환 연락처: 부산시 남구 용당동 산 100

051-620-1617 shahn@mail1.pknu.ac.kr

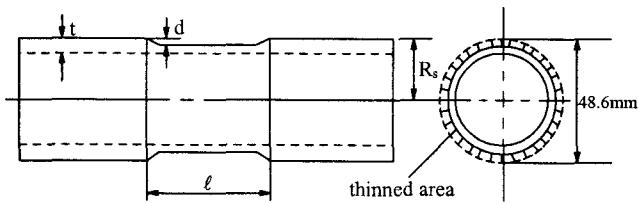
성은 각각 Table 1과 2에 나타낸다. 또한 배관의 감육에 따른 굽힘 및 AE실험에 사용된 시험편의 형상을 Fig. 1(a), (b)에 나타낸다. Fig. 1(a)는 360° 전주에 걸쳐서 감육가공을, Fig. 1(b)는 길이방향으로 감육의 깊이가 다르도록 가공하였고, 중심부에서의 감육의 깊이가  $d_{max}$ 가 되게 하였다. 실험에 사용된 시험편의 치수는 Table 3에 나타낸다.

**Table 1** Mechanical properties

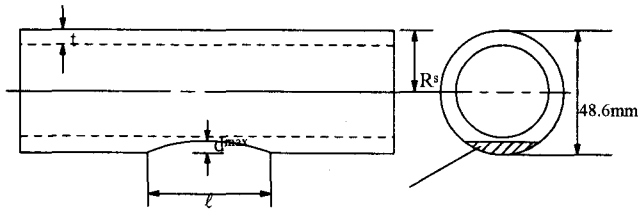
Material	Tensile strength ( $\sigma_u$ )	Yield strength ( $\sigma_v$ )	Elongation
SPPH38	373 MPa	216 MPa	27 %

**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

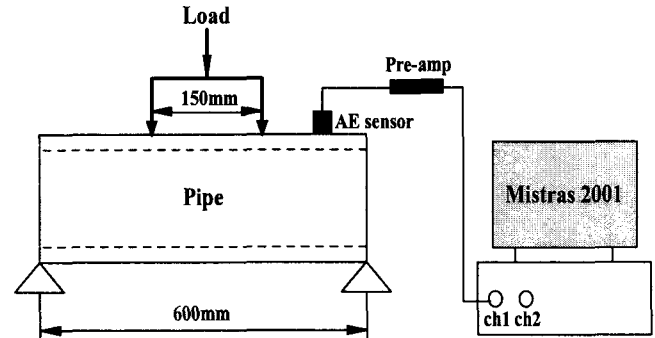
**Fig. 1** Pipe specimens with local wall thinning

## 2.2 실험 방법

Fig. 1과 같은 시험편을 이용하여 Fig. 2에 나타낸 것처럼 4점 굽힘 실험을 실시하면서, 동시에 실시간적으로 AE실험을 행하였다. 굽힘실험시 부하 스패ん 길이는 150mm, 지지 span 길이는 600mm로 하였고 크로스헤드 변위 속도는 1mm/min의 변위 제어에 의해 실온 대기 중에서 실시하였다. 지지용 지그는 하중이 동일 위치에 부하될 수 있도록 하기 위하여 롤러형태로 제작하였다. 단 배관내의 내압은 고려하지 않았다.

AE실험은 굽힘 시험을 실시하면서 실시간적으로 AE신호를 수신하였다. 굽힘실험 중 발생하는 AE신호의 검출을 위한 AE센서로 1MHz의 광대역 센서를 사용하였고, AE장비는 RAC社

의 Mistras 2001을 사용하였다. 배관에서 검출한 미세한 AE신호를 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 AE신호를 검출하였다 (남기우 등, 2001; Nam and Kim, 1999; 남과 안, 2001).



**Fig. 2** Schematic of four-point bending and AE test

## 3. 결과 및 고찰

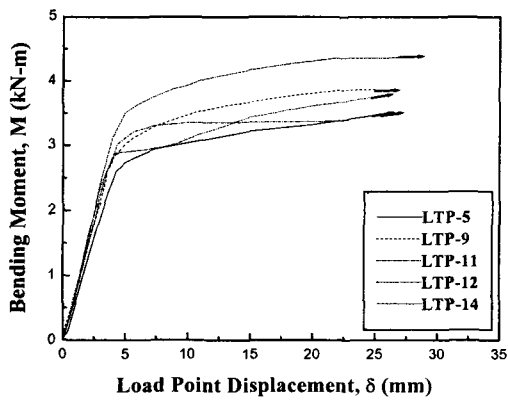
### 3.1 감육배관의 파괴양식

Fig. 3(a)에는 배관의 감육부에 단조굽힘하중을 부하한 결과, 본 연구에서는 편평화, 편평화후 균열발생, 국부좌굴 및 국부좌굴후 균열발생의 4종류의 파괴양식에 대한 모우멘트(M)-하중점변위( $\delta$ )선도를 나타낸다.

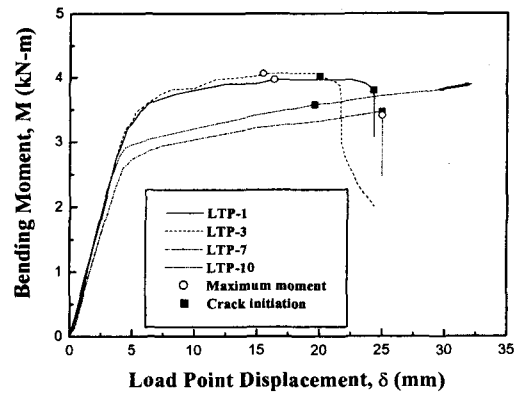
Fig. 3(a)는 편평화가 발생하여 파괴된 경우이다. 그림 속의 화살표는 부하되는 하중이 계속 증가하고 있음을 나타낸다. 파괴양식으로서 편평화가 나타난 경우는  $d/t=0.196$ 인 경우로서 감육결함을 상정하지 않은 건전한 배관재인 LPT-11의 경우와 유사한 결과를 나타내었다. LPT-9는 다른 감육시험편과는 달리 원주방향으로 부분적으로 감육결함을 상정한 경우이며  $d/t=0.784$ 로서, 하중부하방향에 대해서 인장측에 감육부를 놓이게 한 경우이다. 최대하중은 편평화에 의하여 결정되어졌다. Fig. 3(b)는 편평화 발생 후 균열이 발생하여 파괴된 경우로서, 또한 최대하중은 편평화에 의하여 결정되었다. Fig. 3(c)는 국부좌굴이 발생하여 파괴된 경우이다. 최대하중은 국부좌굴에 의해서 결정되어졌다. 최대하중 이후 하중이 감소하지만, 급격한 하중의 감소는 보이지 않고 어느 정도 소성변형을 수반하고 있음을 알 수 있다. Fig. 3(d)는 국부좌굴 발생 후에 균열이 발생하여 파괴된 경우이다. 이 경우의 시험편들은 모두 감육깊이가 4mm인  $d/t=0.784$ 의 경우로서 최대하중은 좌굴에 의하여 결정된 다음 약간의 소성변형을 나타낸후 균열이 발생되고 있음을 알 수 있고, 균열은 은 모두 하중 부하방향에 대하여 인장측에서 발생하였다.

Table 3 Specimen geometries

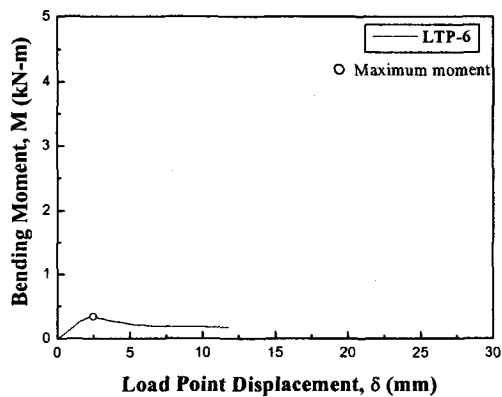
Specimen no.	Half Outer Diameter	Wall Thickness	Thinned Depth	Axially Thinned Length	Thinned Angle
	$R_s$ (mm)	$t$ (mm)	$d$ (mm)	$l$ (mm)	$2\theta$ (°)
LTP-1	24.3	5.1	1.0	10	360
LTP-2	"	"	4.0	"	"
LTP-3	"	"	1.0	"	"
LTP-4	"	"	4.0	"	"
LTP-5	"	"	1.0	100	"
LTP-6	"	"	4.0	"	"
LTP-7	"	"	1.0	"	"
LTP-8	"	"	4.0	"	"
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
LTP-13	"	"	4.0	"	"
LTP-14	"	"	1.0	"	"
LTP-15	"	"	4.0	"	"



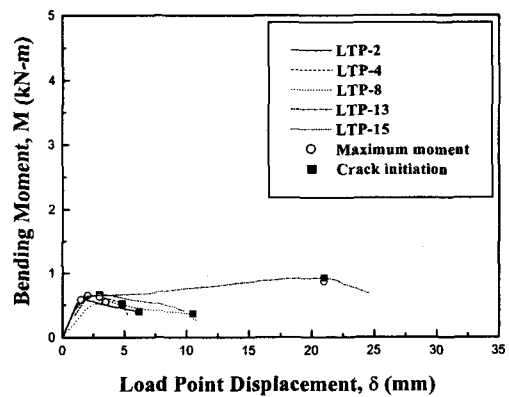
(a) The case of ovalization



(b) The case of crack initiation after ovalization



(c) The case of local buckling



(d) The case of crack initiation after local buckling

Fig. 3 Moment-displacement curves for locally thinned pipes

이상의 결과로부터, 360° 전주에 걸쳐 감육이 형성되었을 경우에는 주로  $d/t$ 의 비에 의해 감육부의 파괴 양식이 결정된다고 생각된다. 특히 감육부가 인장축에 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 동일한 감육의 형태일지라도 모서리 부분이 둥글수록 균열의 발생은 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 감육의 깊이가 동일한 경우 감육의 길이가 짧을수록 균열의 발생 가능성이 높아졌고, 동일한 감육길이라면 감육의 깊이가 깊을수록 좌굴 혹은 균열이 발생할 가능성이 높음을 알 수 있었다. Fig. 4에는 각 감육배관 시험편에 굽힘하중을 부하하였을 때, Fig. 3(a)~(d)에 나타내어진  $M-\delta$ 의 거동을 보이면서 감육배관에 나타난 파괴 양상을 나타내고 있다 (안석환 등, 2001).

### 3.2 굽힘하중하에서 감육배관의 AE특성

감육배관의 굽힘실험 후 검출된 AE신호의 count 및 누적 count를 Fig. 5(a)~(d)에 나타낸다. 3.1절에서 파괴양식을 편평화, 편평화 후 균열, 국부 좌굴, 국부 좌굴 후 균열 등으로 구

별하였는데 AE평가에서는 균열 유무에 대한 AE신호와 그리고 좌굴과 편평화 등의 변형 형상에 따라 AE 파라미터를 평가하였다. Fig. 5는 굽힘하중하에서 발생하는 AE count값과 누적 count값 및 모우멘트를 변위에 대하여 겹쳐서 나타낸 그림이다. 파괴양식에 관계없이 AE count값의 변화량을 보면 시험편이 굽힘하중하에서 탄성영역을 벗어나 항복이 발생하는 영역에서의 AE count값이 급격히 증가함을 볼 수 있다. 이는 시험편이 탄성영역을 벗어나 항복에 이르게 되면 전위 이동의 증가와 소성변형이 발생하기 때문인 것으로 생각된다. 전위의 이동에 의한 AE신호는 항복점 부근에서 최대가 되고 항복점 이후에는 점차 감소된다고 Scruby (Scruby et al, 1981)등이 정량적으로 분석한 바 있다. 본 연구에서도 탄성영역의 경우는 전위의 이동에 의한 AE신호가 거의 발생하지 않았고 전위의 이동이 급격히 증가하는 항복점 부근에서 AE 신호가 급격히 증가한 것으로 보아 위의 연구결과와도 일치한다고 생각한다. 항복이 발생했을 때 AE count값이 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. 5(a), (b)의 파괴양식

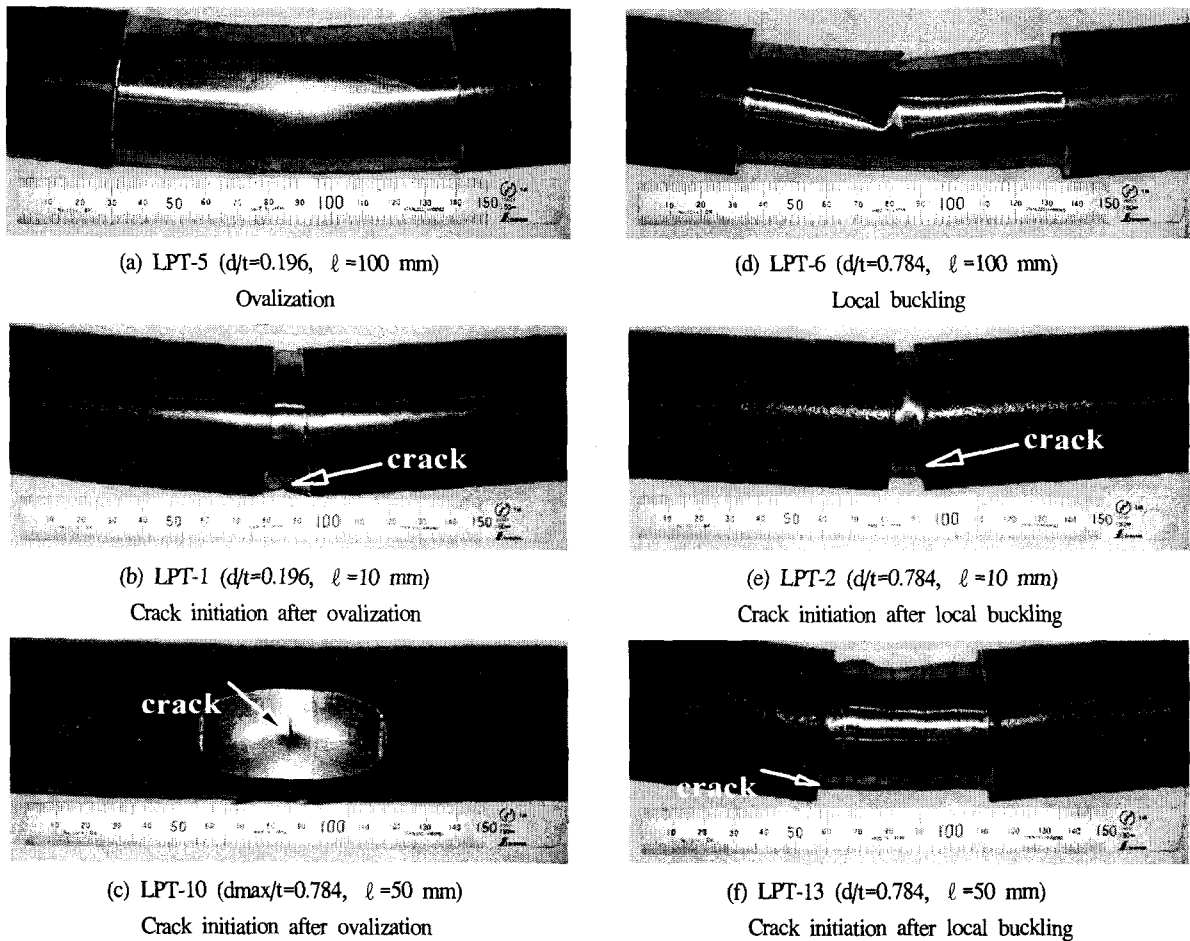
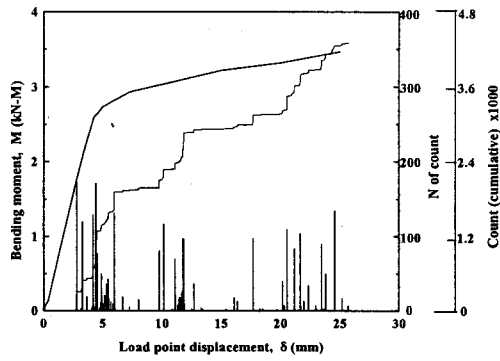
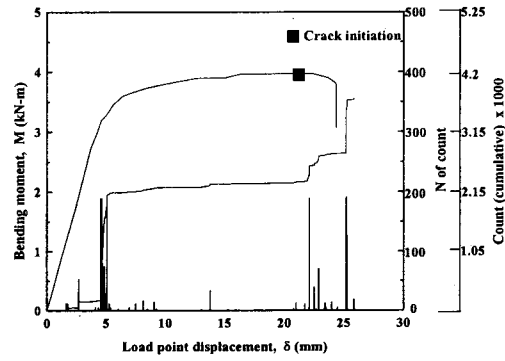


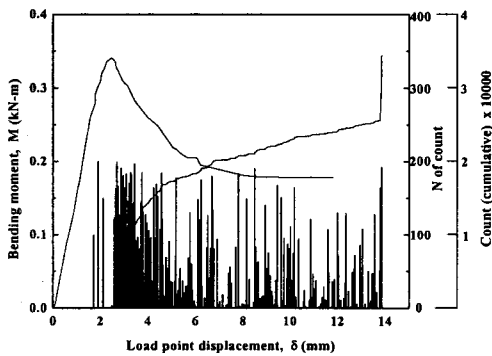
Fig. 4 Fracture mode occurred in pipes with locally thinned area



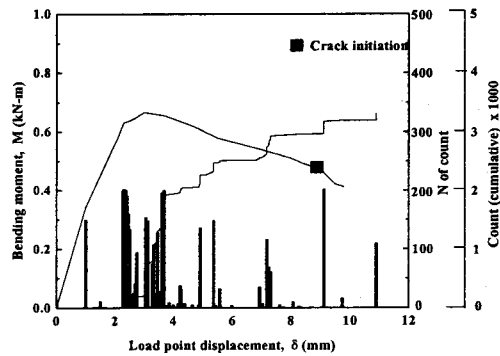
(a) The case of ovalization



(b) The case of cracking initiation after ovalization



(c) The case of local buckling



(d) The case of cracking initiation after local buckling

Fig. 5 Relationship of AE count and stress according to load point displacement

을 비교하면, 편평화만 일어났을 때의 AE신호는 누적 count값이 변형에 대해 지속적으로 증가하는 반면 편평화 후 균열이 발생했을 때는 변형이 일어날 때 AE신호는 거의 관찰되지 않았고 균열이 발생 진전됨과 동시에 AE count값이 증가하고 누적 count의 기울기가 급격해졌다. 이러한 결과는 재료 내부의 에너지 방출로 발생하는 AE신호가 변형에 대해서는 지속적으로 발생하는 반면 균열이 발생한 경우는 변형에 의하여 재료 내부의 에너지가 축적되고 균열로 인하여 축적된 에너지가 급격히 방출됨으로서 변형으로 인한 AE신호는 적고 균열이 발생, 진전함과 동시에 AE신호가 증가한 것으로 판단된다. Fig. 5(c), (d)는 국부 좌굴 및 국부 좌굴 후 균열의 파괴양식에 대한 AE신호를 분석하여 나타낸 것이다. 좌굴만 발생했을 경우에 AE count값이 전 영역에 걸쳐 높이 나타났지만, 균열이 발생한 파괴양식에서는 좌굴과 균열에 의해 AE신호가 나타났고 AE count값이 일부분에서 나타났다. 누적 count의 기울기를 보면 국부 좌굴만 발생했을 때의 변형에 대한 에너지의 방출이 편평화보다 더욱 지속적으로 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 5(b)와 (d)를 비교하면 편평화에서는 변형으로 인한 AE신호가 거의 나타나지 않고 균열에 대한 신호만이 주를 이루었으나 좌굴이 발생한 경우에 있어서의 AE신호는 좌굴과 균열에 대해

여 모두 나타난 것으로 보아 편평화 보다는 좌굴에 의한 에너지 방출이 자주 발생한다고 판단된다 (김현수 등, 2000; 2001).

### 3.3 AE신호의 시간-주파수 분석

굽힘하중하의 감육배관에서 검출된 AE신호를 이용하여 감육배관의 파괴 거동을 규명하고자 시간-주파수 분석 프로그램인 JTFA프로그램으로 AE신호의 주파수 대역을 분석하였다.

Fig. 6은 굽힘하중하에서의 파괴거동에 따라서 방출되는 AE신호의 양상을 모멘트-변형 곡선 속에서 나타낸 것이다. 3.2절에서 설명한 바와 같이 AE신호는 크게 1) 시험편의 항복이 발생할 경우, 2) 전위의 이동과 항복 이후의 소성변형(좌굴, 편평화 등) 및 3) 균열의 발생 및 진전될 경우 나타났다. 각각의 신호를 시간-주파수 분석법으로 분석한 결과를 Fig. 7에 나타낸다.

Fig. 7(a)는 탄성영역에서 전위를 둘러싸고 있는 탄성응력장에서의 탄성변형률에너지의 방출에 의해 발생하는 AE신호로서 항복점에 가까운 탄성영역에서의 전위의 이동 중에 발생한 신호로 생각된다. 중심주파수 대역은 200kHz~250kHz 영역으로 나타났다. Fig. 7(b)는 항복점 부근에서 나타난 AE신호로서 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 판단된다. 항복 이후에는 Fig. 7(c)와 같이 소성변형에 의한 AE 신호가 단독으로 나타나는 경향이 많았는데, 이것은 항복이 일어난 때 전위의 이동에 의한 신호가 많이 발생하는 반면, 항복 이후 전위의 이동에 의한 AE신호는 급격히 감소하고 주로 편평화 및 좌굴과 같은 소성변형에 의한 AE신호가 증가하기 때문이라 여겨진다. Fig. 7(d)는 복합적인 신호를 나타내고 있고, 이는 항복점 부근에서 나타난 전위의 이동 및 소성변형과 같은 중심주파수 대역이 나타났음을 의미한다. 200kHz이하의 신호들은 잡음으로 생각된다. Fig. 7(e)는 균열 발생 이후, 주로 균열에 의하여 나타난 AE신호로 중심주파수 대역은 350kHz~450kHz 대역으로 나타났다. Fig. 7(f)는 전위의 이동, 소성변형 및 균열에 의한 복합적인 신호를 나타내고 있다. 본 연구에서는 배관의 파괴거동에 따라 4개의 영역으로 나누어 탄성영역, 항복점 부근의 전위의 이동, 소성변형, 균열발생/진전으로 나타나는 주파수 대역을 분류하였다. 본 연구에서는 감속결함을 가지는 배관의 파괴시에 나타나는 거시적 파괴의 형태만을 고려하였지만, 재료내부에서 발생하는 미시적인 파괴기구에 대한 연구가 병행되어 검토된다면 더욱 정밀한 주파수대역도 구별이 가능하다고 판단된다.

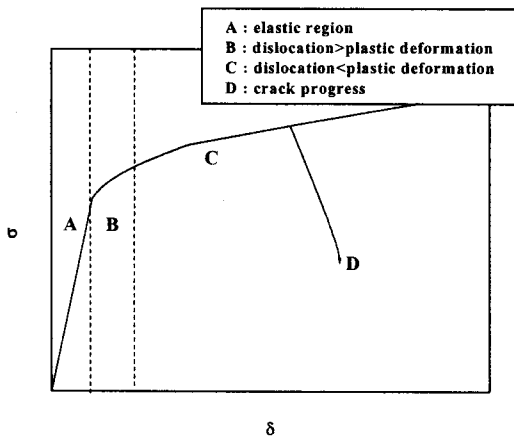


Fig. 6 Acoustic emission mode in stress-displacement curve under bending loads

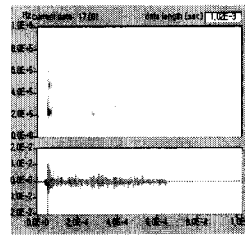
#### 4. 결론

(1) 배관 감속부의 형상 및 정도에 따라 편평화 파괴, 편평화 후 균열 파괴, 국부좌굴 파괴, 국부좌굴 후 균열 파괴의 4 종류의 파괴양식이 나타났다.

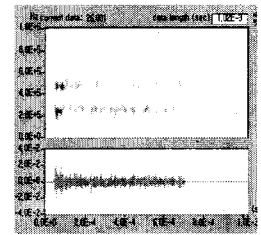
(2) 굽힘시험과 동시에 AE실험을 실시하여 검출한 AE count, 누적 count와 모우멘트를 비교한 결과, 파괴양식에 관계 없이 탄성영역을 지나 항복이 시작되면, 전위의 이동에 의해

AE신호가 급격히 증가했다. 항복 이후 시험편에서 소성변형 및 균열이 발생하는 영역의 AE count값과 누적 count값의 기울기를 비교하여 4종류의 파괴양식을 구별하는 것이 가능하였다.

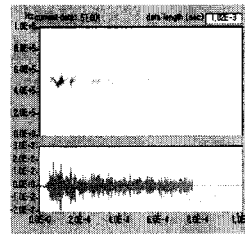
(3) 검출한 AE신호를 시간-주파수 분석한 결과, 배관의 파괴 거동 즉 탄성영역, 항복영역, 소성변형영역, 균열발생의 4가지 영역에서의 주파수대역을 구별할 수 있었다. 이로서, 본 연구를 통하여 파괴양식에 따른 AE신호를 구별하는 것이 가능하며, 현재 사용 중인 에너지 관련 플랜트의 성능 및 안전성을 실시간적으로 점검할 수 있는 기초적 자료가 될 것으로 생각된다.



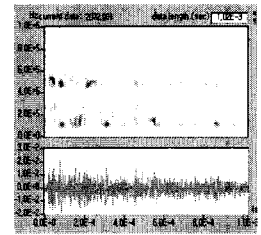
(a) Elastic region



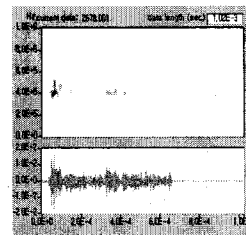
(b) Dislocation and plastic deformation  
(Dislocation > plastic deformation)



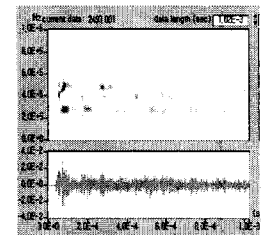
(c) Plastic deformation



(d) Dislocation and plastic deformation  
(Dislocation < plastic deformation)



(e) Crack progress



(f) All mode

Fig. 7 Time-frequency analysis according to acoustic emission mode

#### 참고 문헌

생략