

감육배관의 손상모드에 따른 음향방출 특성

안석환* · 남기우** · 김선진* · 김진환*** · 김현수** · 박인덕**

*부경대학교 기계공학부

**부경대학교 재료공학부

***부경대학교 대학원 재료공학과

Acoustic Emmission Characteristics according to Failure Modes of Pipes with Local Wall Thinning

SEOK-HWAN AHN*, KI-WOO NAM**, SEON-JIN KIM*, JIN-HWAN KIM***, HYUN-SOO KIM** AND IN-DUCK PARK**

*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan,, Korea

**Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

***Graduate School of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS : Local Wall Thinning 국부감육, Bending Load 굽힘하중, Failure Mode 손상모드, Acoustic Emmission 음향방출, Time-Frequency Anlysis 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 region, plastic deformation region and crack progress region could be evaluated by AE counts, accumulative counts and time-frequency analysis during bending test. The result of the frequency range is expected to be basic data that can inspect plants in real-time.

1. 서 론

발전시설 등의 에너지 관련 플랜트 및 해양구조물 등에 사용되는 배관은 성능이나 안전성유지에 있어서 중요한 설비의 일부이다. 그러나, 이러한 에너지 관련 플랜트의 배관은 사용 기간 중에 여러 가지 종류의 열화손상을 받을 우려가 있고, 침식-부식(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(Ando *et al.* 1999; ASME Boiler and Pressure Vess. Code Sec. XI, 1998). 그러나 배관에 국부적인 감육이 발생하였을 때의 배관의 강도, 파괴기구를 해명하기 위한 계통적인 실험 연구의 예는 극히 적은 실정이다 (Ando *et al.* 1999; Miyazaki *et al.* 1999; 안석환 등, 2001).

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 미시적인 변형과 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 전진과 같은 동적인 거동을 감시하여 대형 사고를 미연에 방지할 수 있다는 측면에서 유용시되고 있다 (정희돈, 1994; Ahn and Nam, 2001).

따라서, 본 연구에서는 고압탄소강배관에 기계적으로 감육부를 가공하여 감육부의 형상이나 감육의 정도에 따른 배관의 손상모드를 분류하였고, 동시에 실시간적으로 AE실험을 실시하여 AE실험으로부터 나오는 여러 파라미터들과 배관에 발생한 손상모드와의 연관성을 규명하고자 하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료

본 실험에 사용된 재료는 직경 48.6mm인 Schedule 80

제1저자 남기우 연락처: 부산광역시 남구 용당동 산 100

051-620-1640 namkw@pknu.ac.kr

SPPH38 고압탄소강배관(Carbon Steel Pipes for High Pressure Service; KS standard K-3564)이다. 그 기계적 성질 및 화학 조성은 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 (σ_u) | Yield strength (σ_y) | 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 |

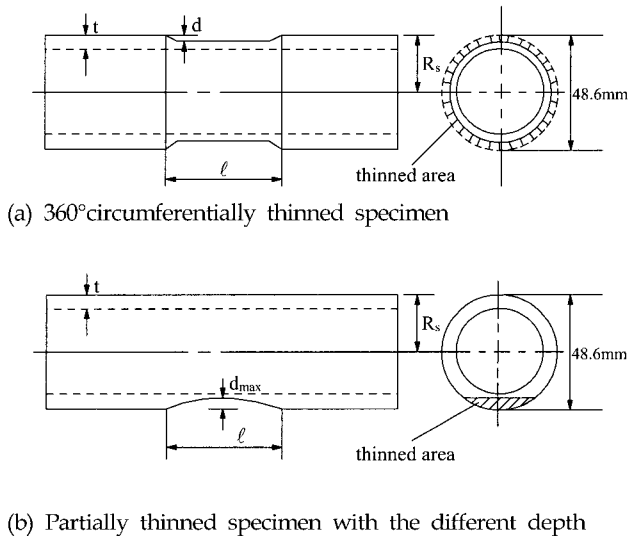


Fig. 1 Pipe specimens with local wall thinning

2.2 실험 방법

Fig. 1과 같은 시험편을 이용하여 Fig. 2에 나타낸 것처럼 4점 굽힘 실험을 실시하면서, 동시에 실시간적으로 AE실험을 행하였다. 굽힘시험시 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. 굽힘시험 중 발생하는 AE신호의 검출을 위한 AE 센서로는 1MHz의 광대역 센서를 사용하였고, AE장비는 RAC

사의 Mistras 2001을 사용하였다. 배관에서 검출한 미세한 AE 신호를 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; 남기우와 안석환, 2001).

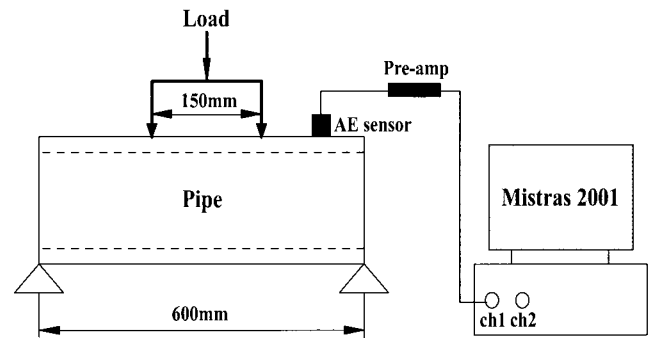


Fig. 2 Schematic diagram of four-point bending and AE test

3. 결과 및 고찰

3.1 감육배관에 발생한 손상모드의 분류

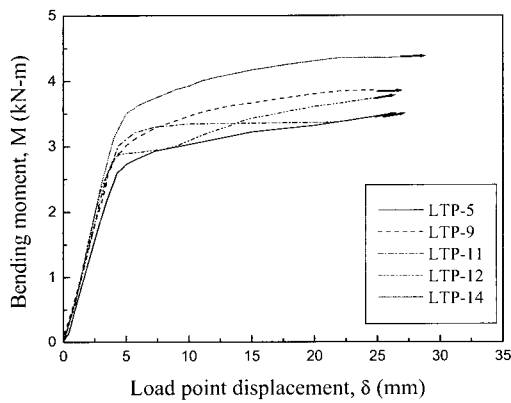
Fig. 3(a)에는 배관의 감육부에 단조굽힘하중을 부하한 결과 나타난 편평화, 편평화후 균열발생, 국부 좌굴 및 국부 좌굴후 균열발생의 4종류의 손상모드에 대한 모우멘트(M)-하중점변위(δ)선도를 나타낸다.

Fig. 3(a)는 편평화가 발생하여 파괴된 경우이다. 그림 속의 화살표는 부하되는 하중이 계속 증가하고 있음을 나타낸다. 손상모드로서 편평화가 나타난 경우는 $d/t=0.196$ 인 경우로서 감육결함을 상정하지 않은 건전한 배관제인 LPT-11의 경우와 유사한 결과를 나타내었다. LPT-9는 다른 감육시험편과는 달리 원주방향으로 부분적으로 감육결함을 상정한 경우이며 $d_{max}/t=0.784$ 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 국부 좌굴이 발생하여 파괴된 경우이다. 최대하중은 국부좌굴에 의하여 결정되어졌다. 최대하중 이후 하중이 감소하지만, 급격한 하중의 감소는 보이지 않고 어느 정도 소성변형을 수반하고 있음을 알 수 있다. Fig. 3(d)는 국부 좌굴 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 나타낸 후 균열이 발생되고 있음을 알 수 있고, 균열은 모두 하중 부하방향에 대하여 인장측에서 발생하였다.

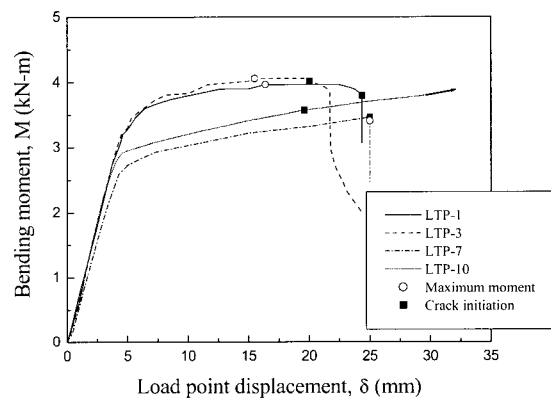
이상의 결과로부터, 360°전주에 걸쳐 감육이 형성되었을 경

Table 3 Specimen geometries

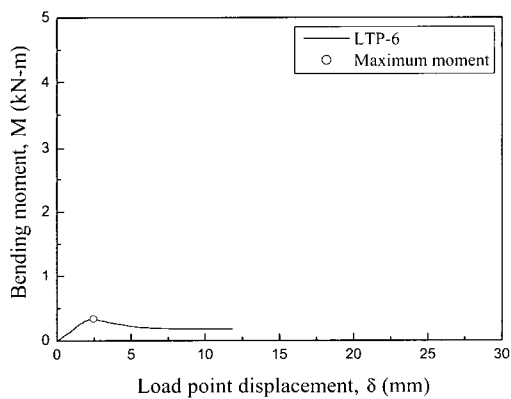
| Specimen no. | Half Outer Diameter | Wall Thickness | Thinned Depth | Axially Thinned Length | Thinned Angle |
|--------------|---------------------|----------------|---------------|------------------------|---------------|
| | Rs (mm) | t (mm) | d (mm) | l (mm) | 2θ (°) |
| LTP-1 | 24.3 | 5.1 | 1.0 | 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 | ∥ | ∥ |



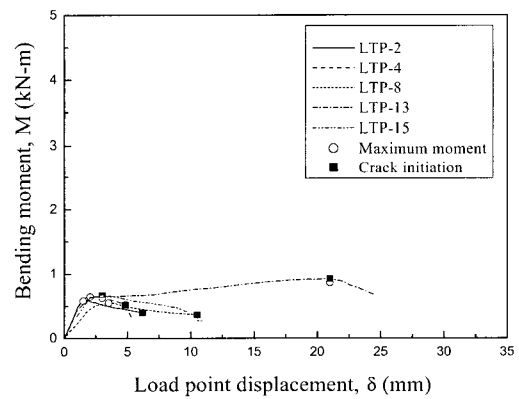
(a) The case of ovalization



(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

우에는 주로 d/t 의 비에 의해 감육부의 손상모드가 결정되어 진다고 생각된다. 특히 감육부가 인장축에 형성되었을 때는 균열발생이 용이해짐을 알 수 있다. 또한, 감육부의 모서리를 직각이 되도록 가공한 시험편의 경우에는 1가지를 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-8의 거동을 보이면서 감육배관에 나타난 파괴 양상을 나타내고 있다 (안석환 등, 2001).

3.2 굽힘하중하에서 감육배관의 AE특성

감육배관의 굽힘실험 후 검출된 AE신호의 카운트(count) 및 누적 카운트(cumulative count)를 Fig. 5(a)~(d)에 나타낸다. 3.1절에서 손상모드를 편평화, 편평화 후 균열, 국부 좌굴, 국부 좌굴 후 균열 등으로 구별하였는데 AE평가에서는 균열 유

무에 대한 AE신호와 그리고 좌굴과 편평화 등의 변형 형상에 따라 AE 파라미터를 평가하였다.

Fig. 5는 굽힘하중하에서 발생하는 AE 카운트값과 누적 카운트값 및 모우멘트를 변위에 대하여 함께 나타낸 그림이다. 손상모드에 관계없이 AE 카운트값의 변화량을 보면 시험편이 굽힘하중하에서 탄성영역을 벗어나 항복이 발생하는 영역에서의 AE 카운트값이 급격히 증가함을 볼 수 있다. 이것은 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 분석한 바 있다. 본 연구에서도 탄성 영역의 경우는 전위의 이동에 의한 AE신호가 거의 발생하지 않았고 전위의 이동이 급격히 증가하는 항복점 부근에서 AE신호가 급격히 증가한 것으로 보아 위의 연구결과와도 일치한다고 생각한다. 항복이 발생했을 때 AE 카운트값이 증가하고 누적 카운트 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)와 (b)의 손상모드를 비교하면, 편평화만 일어

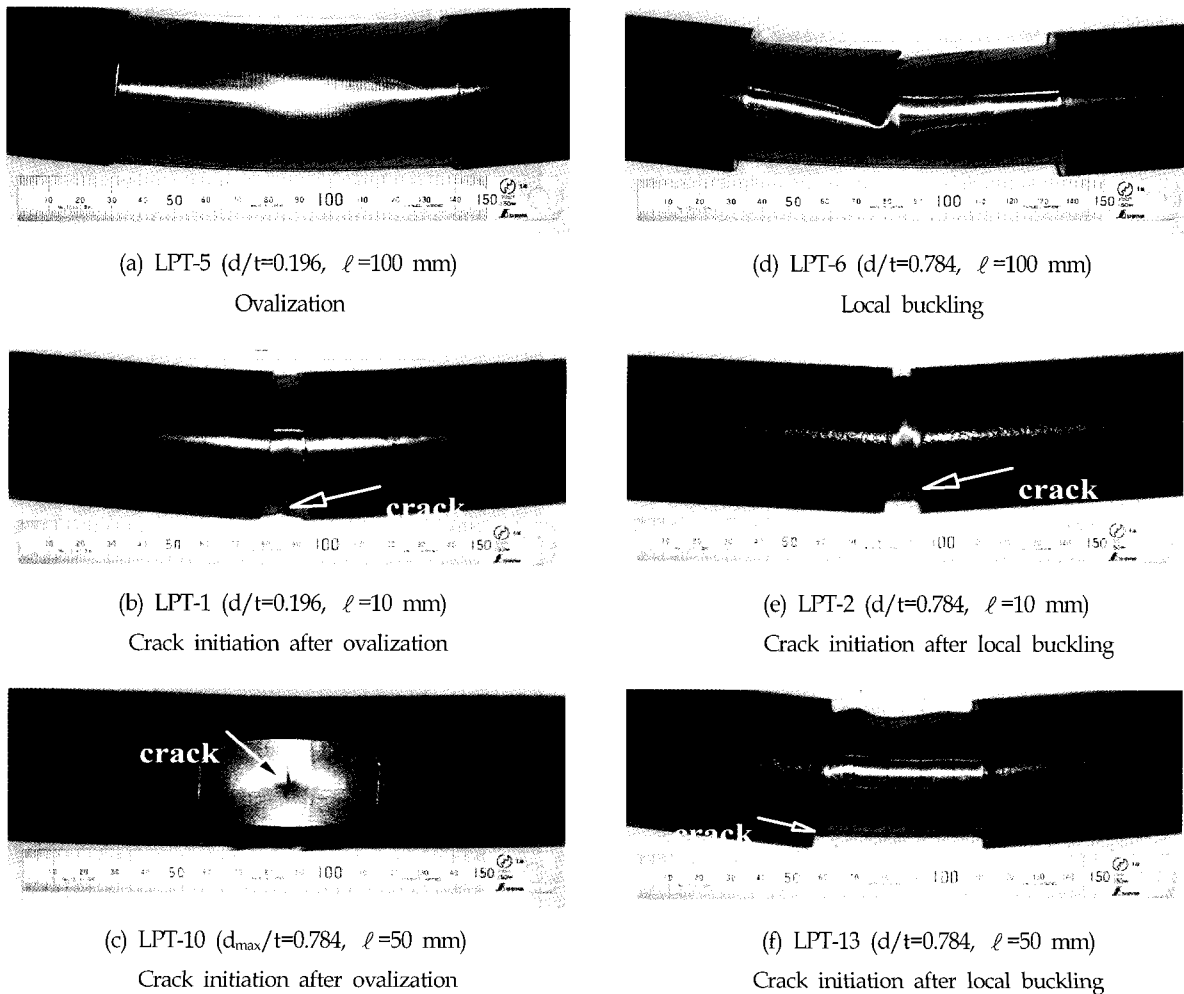
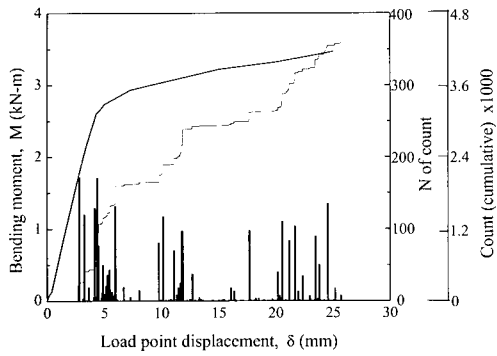
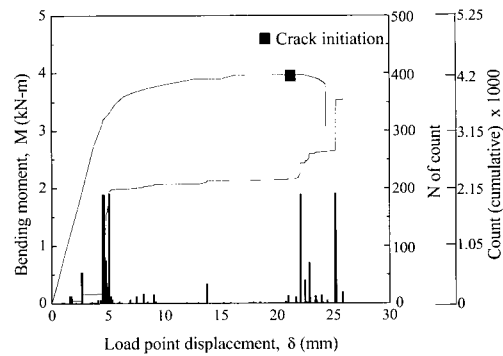


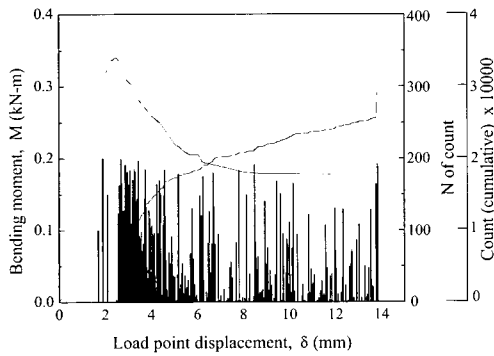
Fig. 4 Failure modes occurred in pipes with locally thinned area



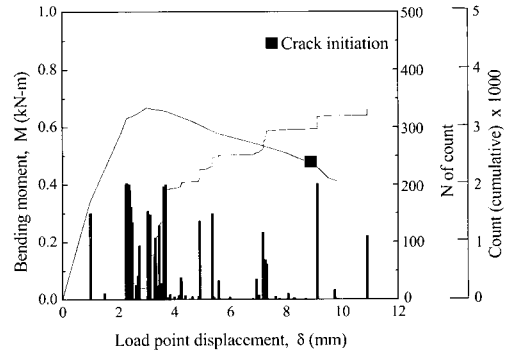
(a) The case of ovalization



(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 between AE count and stress according to load point displacement

났을 때의 AE신호는 누적 카운트값이 변형에 대해 지속적으로 증가하는 반면 편평화 후 균열이 발생했을 때는 변형이 일어날 때 AE신호는 거의 관찰되지 않았고 균열이 발생 진전됨과 동시에 AE 카운트값이 증가하고 누적 카운트의 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. 또한, 모우멘트-변위 곡선을 비교하여 보더라도 편평화 발생만의 경우에는 변형이 하중의 증가와 함께 지속적으로 증가하고 있는 반면, 편평화 후 균열이 발생한 경우에 있어서는 변형의 증가에 따른 하중의 증가는 거의 없이 일정하게 나타나고 있으므로 해서 항복 이후에 AE신호가 상당히 미약하게 발생되어진 것으로 생각된다. Fig. 5(c)와 (d)는 국부 좌굴 및 국부 좌굴 후 균열의 손상모드에 대한 AE신호를 분석하여 나타낸 것이다. 좌굴만 발생했을 경우에 AE 카운트값이 전 영역에 걸쳐 높게 나타났지만, 균열이 발생한 손상모드에서는 좌굴과 균열에 의해 AE신호가 나타났고 AE 카운트값이 일부분에서 나타났다. 누적 카운트의 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 대하여 모두 나타난 것으로 보아 편평화 보다는 좌굴에 의한 에너지 방출이 자주 발생한다고 판단된다 (김현수 등, 2000).

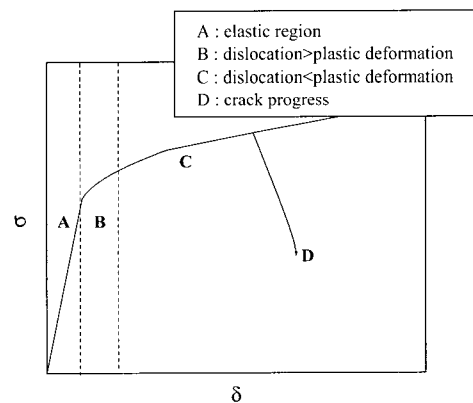


Fig. 6 Acoustic emission modes in stress-displacement curve under bending load

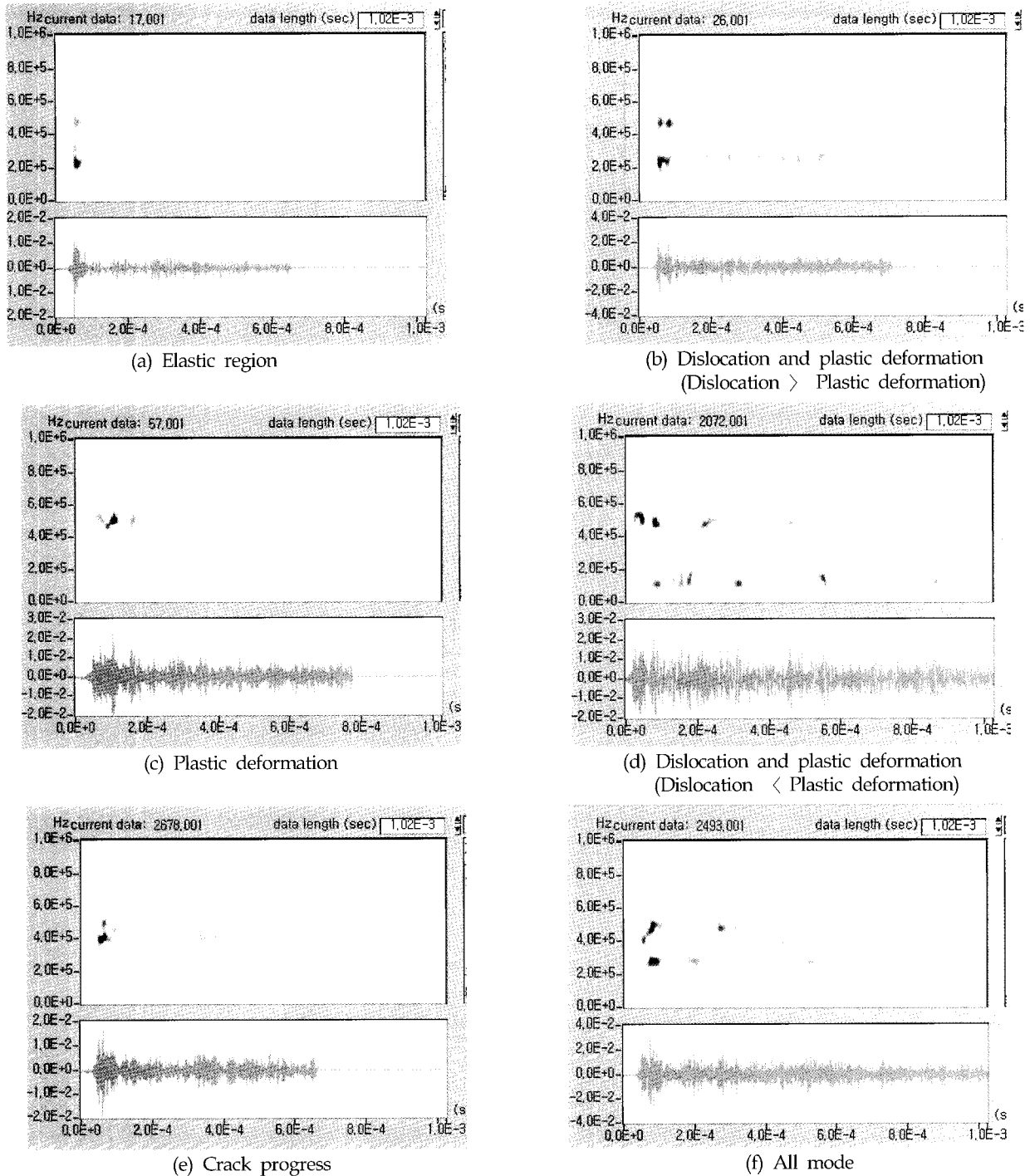


Fig. 7 Time-frequency analysis according to acoustic emission mode

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 경

우, 2) 전위의 이동과 항복 이후의 소성변형(좌굴, 편평화 등) 및 3) 균열의 발생 및 진전될 경우에 나타났다.

각각의 신호를 시간-주파수 분석법으로 분석한 결과를 Fig. 7에 나타냈다.

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 AE신호가 단독으로 나타나는 경향이 많았는데, 이것은 항복이 일어날 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 AE신호로서 중심주파수 대역은 350kHz~450kHz 대역으로 나타났다. Fig. 7(f)는 전위의 이동, 소성변형 및 균열에 의한 복합적인 신호를 나타내고 있다. 따라서, Fig. 7 (a)~(f)에서 나타난 주파수대역이 각기 다르게 나타나고 있음은 각 영역에서의 특징적인 주파수가 있다는 것을 나타내고 있는 것으로서, 이와 같은 주파수대역을 파악함으로써 배관에 발생하고 있는 파괴거동을 점진적으로 평가 가능하다고 생각한다.

본 연구에서는 배관의 파괴거동에 따라 4개의 영역으로 나누어 탄성영역, 항복점 부근의 전위의 이동, 소성변형, 균열발생/진전으로 나타나는 주파수 대역을 분류함으로써, 위에서 언급한 내용으로부터 기존의 여러 연구들에서는 나타나고 있지 않은 파괴의 양상을 AE신호로서 고찰 가능함을 나타내었다. 현시점에서는 감육결함을 가지는 배관의 파괴시에 나타나는 거시적 파괴의 형태만을 고려하였지만, 재료내부에서 발생하는 미시적인 파괴기구에 대한 연구가 병행되어 검토되어진다면 더욱 정밀한 주파수대역도 구별이 가능하다고 판단된다.

4. 결 론

- (1) 배관 감육부의 형상 및 정도에 따라 편평화 파괴, 편평화 후 균열 파괴, 국부 좌굴 파괴, 국부 좌굴 후 균열 파괴의 4종류의 손상모드가 나타났다.
- (2) 굽힘시험과 동시에 AE실험을 실시하여 검출한 AE 카운트, 누적 카운트와 모우멘트를 비교한 결과, 손상모드에 관계없이 탄성영역을 지나 항복이 시작되면, 전위의 이동에 의해 AE신호가 급격히 증가했다. 항복 이후 시험편에서 소성 변형 및 균열이 발생하는 영역의 AE 카운트값과 누적 카운트값의 기울기를 비교하여 4종류의 손상모드를 구별하는 것이 가능하였다.

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

참 고 문 헌

- 김현수, 남기우, 강창룡 (2000). "음향방출에 의한 고강도 구조용 내화강의 열화특성에 관한 연구", 열처리공학회지, 제13권, 제5호, pp 309 - 317.
- 김현수, 심규현, 안석환, 남기우 (2000). "시간-주파수 해석법을 이용한 선박용 디젤엔진 배기밸브의 열화도 평가에 관한 기초적 연구(II)", 한국해양공학회지, 제14권, 제4호, pp 68 - 72.
- 남기우, 안석환, 이상기, 김현수, 문창권 (2001). "시간-주파수 해석법에 의한 CFRP의 파괴 거동", 비파괴검사학회지, 제21권, 제1호, pp 39 - 45.
- 남기우, 안석환 (2001). "리벳구멍을 갖는 2024 알루미늄 합금의 피로 균열 진전 동안에 발생한 음향방출 파형 특성", 한국해양공학회지, 제15권, 제1호, pp 52 - 56.
- 안석환, 남기우, 김선진, 김현수, 김진환, 도재윤 (2001). "감육배관의 파괴거동 평가", 대한기계학회 2001년도 추계학술대회 논문집, pp 61 - 66.
- 정희돈 (1994). "음향방출법의 공학적 이용을 위한 기초", 대한기계학회지, 제34권, 제1호, pp 20 - 32.
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI. (1998)
- Ando, K., Ahn, S. H., Ishiwata, M. and Hasegawa, K. (1999). "Plastic collapse behavior of pipe with local wall thinning subjected to bending moment", SMIRT-15, G07/1.V- 257 ~ V-264.
- Ahn, S.H., and Nam, K.W. (2001). "Characteristics of AE signals from fatigue propagation and penetration of a surface crack in 6061 aluminum plate", Int. J. Ocean Engineering and Technology, Vol 4, No 1, pp 44 - 50.
- Miyazaki, K., Kanno, S., Ishiwata, M. and 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, Vol 191, pp 195 - 204.
- Nam, K.W. and Kim. S.J. (1999). "Life prediction by retardation behavior of fatigue crack and its nondestructive evaluation." Int. J. Ocean Engineering and Technology, Vol 13, No 3, pp 36 - 48.

2002년 3월 6일 원고 접수

2002년 7월 5일 최종 수정본 채택