

고압배관용 탄소강의 인장시 음향방출 특성

이 시 윤 · † 남 기 우*

한국소방안전협회 대구·경북지부, *부경대학교 신소재공학부
(2003년 5월 30일 접수, 2003년 6월 18일 채택)

AE Characteristic under Tensile of Carbon Steel for High-Pressure Pipe

Siyoon Lee and Kiwoo Nam*

Daegu · Kyungpook Branch, Korea Fire Safety Association, Daegu 700-719, Korea
*Dept. of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

(Received 30 May 2003 ; Accepted 18 June 2003)

요 약

에너지 관련 플랜트에 사용되는 배관은 플랜트의 성능이나 안전성유지에 있어서 중요한 설비의 일부이다. 본 연구에서는 고압탄소강 배관의 변형 및 파괴에 대한 음향방출 기초 자료를 얻기 위하여 압력용기용 배관재를 기계가공하여 인장시험편을 만든 후, 인장시험을 실시하여 항복, 소성변형 및 파괴에 이르기까지의 음향방출 신호를 분석하였다. 탄성영역, 최대인장강도 이전의 소성영역 및 최대인장강도 이후의 소성영역에서 검출된 음향방출의 시간-주파수 분석 결과는 탄성영역에서 항복영역까지는 비교적 낮은 저주파수 대역(250~350kHz)이 나타났으며, 소성영역에서는 저주파수뿐만 아니라 고주파수 대역(500kHz)도 나타났다. 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.

Abstract - This study is to look at the effect for deformation of carbon steel for high-pressure pipe, on the AE signals produced by tensile test. 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 a relationship failure mode and AE signals by tensile 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.

Key words : High-pressure pipe, Carbon steel, Acoustic emission, Time-frequency analysis

1. 서 론

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 하나이다⁽¹⁾. 이와 같은 열화손상의 특성 평가는 압력 배관의 안전과 성능유지를 위해 매우 중요하다.

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 비파괴평가법 (NDE : nondestructive evaluation)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 동적인 거동을 감시하여 대형 사고를 미연에 방지할 수 있다는 측면에서 유용시하게 사용되고 있다⁽²⁻⁷⁾.

따라서 본 연구에서는 고압탄소강 배관의 변형 및 파괴에 대한 음향방출 기초 자료를 얻기 위하여 압력용기용 배관재를 기계가공하여 인장시험편을 만든 후, 인장시험을 실시하여 항복, 소성변형 및 파괴에 이르기까지의 음향방출 신호를 분석하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1. 시험편

본 연구에 사용된 재료는 직경 48.6 mm인 Schedule 80 SPPH38 고압탄소강배관(Carbon Steel Pipes for High Pressure Service; KS

K-3564)이다. 기계적 성질 및 화학 조성은 각각 Table 1과 2에 나타난다. 압력용기용 배관재의 인장시험시 음향방출을 검출하기 위하여 배관에서 채취한 인장시험편을 Fig. 1에 나타낸다.

Table 1. Mechanical properties.

Tensile strength (σ_u , MPa)	Yield strength (σ_v , MPa)	Elongation (%)
373	216	27 %

Table 2. Chemical compositions [wt%].

C	Si	Mn	P	S
0.25	0.25	0.43	0.035	0.035

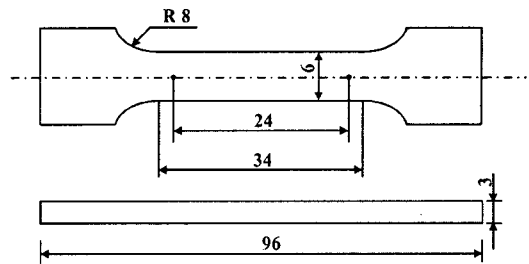


Fig. 1 Test specimen (unit: mm).

2.2. 실험 방법

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

인장시험 중 발생하는 음향방출 신호의 측정 시스템을 Fig. 2에 나타낸다. 음향방출실험은 인장시험을 실시하면서 실시간적으로 음향방출신호를 수신하였다. 시험 중 발생하는 음향방출신호의 검출을 위한 음향방출센서로 1 MHz의 광대역 센서를 사용하였고, 음향방출장비는 PAC사의 Mistras 2001을 사용하였다. 시험편에서 검출한 미세한 음향방출신호를 증폭시키기 위해서 100~1200 kHz 아날로그필터가 내장된 Pre-amp에서 40 dB 증폭시킨 후 Mistras 2001 Board 내부에 포함된 A/D변환기로 디지털 변환시킨 다음 최종적으로 시간-주파수 분석 프로그램을 사용하여 분석하였다. 이때 전기적 및 기계적 잡음 제거를 위해

Threshold를 40 dB로 설정한 후 음향방출신호를 검출하였다⁽⁶⁾.

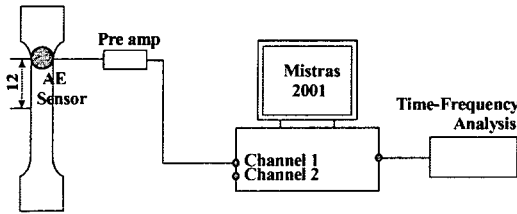


Fig. 2 Schematic diagram of AE system.

조각관찰용 시험편은 SiC 연마지를 이용하여 연마하였고, 0.3 μ m Al₂O₃로 최종적으로 경면연마한 후에 0.2%나이트랄용액으로 에칭하여 광학현미경 관찰을 하였다. 그리고 인장시험을 실시한 후의 파단면을 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

고압탄소강배관에서 Fig. 1과 같은 인장시험편을 만든 후 인장시험시 나타나는 음향방출신호를 분석하였다. 압력용기용 탄소강 배관재의 인장시험에서 시간에 따른 하중, 음향방출 count 및 누적 count를 Fig. 3에 나타내었다.

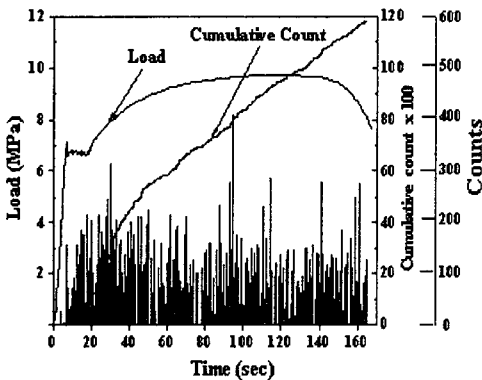


Fig. 3 Relationship between load and AE count by tensile test.

인장시험 초기의 탄성영역에서는 음향방출 count가 거의 검출되지 않았으며, 상항복점에서 하항복점까지의 항복영역에서 많은 음향방

출 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. 상항복점을 지난 가공경화영역에서는 전위의 지속적인 이동에 의한 음향방출 신호로 판단되며, 다른 영역에 비하여 많은 수의 음향방출 count가 검출되었다. 항복영역 이후의 소성영역에서 하중이 증가하는 것은 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 판단된다⁽⁵⁾.

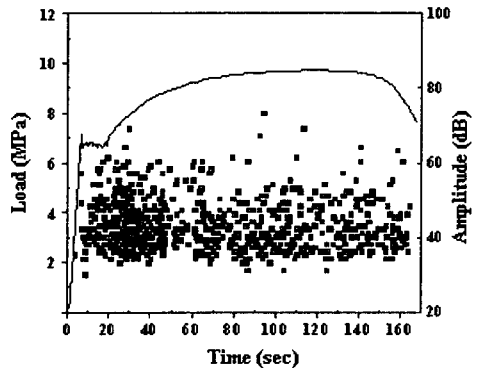


Fig. 4 Relationship between load and AE amplitude by tensile test.

인장시험에서 시간에 따른 하중과 음향방출 amplitude의 관계를 Fig. 4에 나타낸다. 음향방출 amplitude는 35 dB에서 55 dB 사이에서 주를 이루고 있다. 이는 항복영역 및 소성영역의 전 영역에 걸쳐서 전위의 이동이 발생하므로 35 dB에서 60 dB사이의 음향방출 신호는 전위의 이동에 의한 신호로 판단된다. 60 dB 이상의 음향방출 신호는 항복영역 및 최대인장강도 앞의 소성영역에서는 이동 중인 전위 및 집적된 전위들이 Fig. 8(c)와 같은 개재물이나 결정입계를 통과하기 위해서는 전위가 이동할 때보다는 상대적으로 큰 에너지를 필요로 하

고압배관용 탄소강의 인장시 음향방출 특성

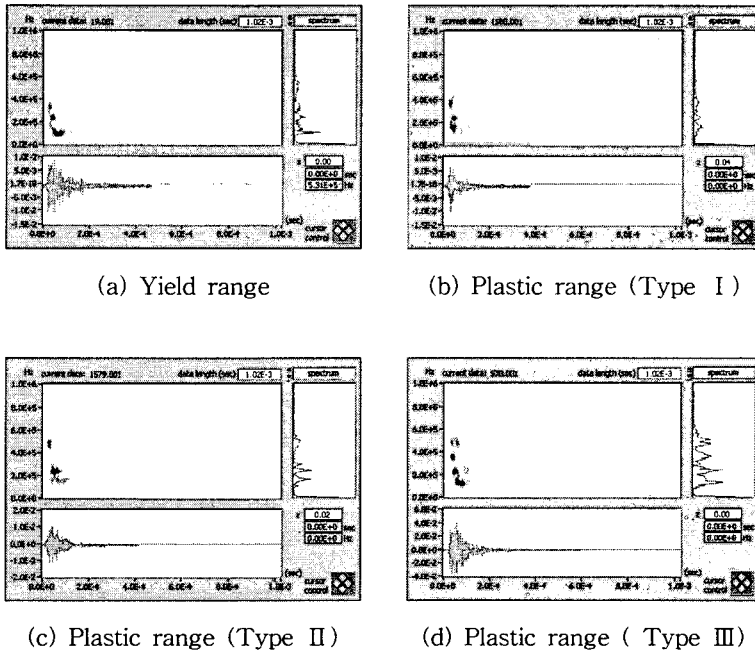


Fig. 5 Time-frequency analysis of yield and plastic range after tensile test.

고 이러한 에너지들이 방출되면서 높은 amplitude를 나타낸다고 판단된다. 그리고 최대인장강도 이후의 60 dB이상의 음향방출신호는 위와 동일한 경우도 있으나, 단면감소에 의하여 하중이 감소하는 것으로 보아 재료 내부에서 Fig. 8(a), (b)와 같은 미소공동의 발생, 성장 및 합체에 의하여 높은 amplitude를 가지는 것으로 판단된다. 이는 낮은 에너지의 음향방출 신호는 주로 전위들의 이동에 의한 소성변형 음향방출 신호들은 주로 microcracking 혹은 intergranular delamination에 의한 결과로 보고 되어진바 있는 타 연구 유사한 결과라 판단된다 (4).

Fig. 5는 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. 5와 같은 시간-주파수 분석에서 중심 주파수와 하중과의 관계를 Fig. 6에 나타낸다. 항복영역에서는 250~350 kHz의 주파수 대역이 주를 이루었고 항복 이후 소성영역에서는 250~350 kHz의에도 500 kHz의 고주파수가 나타났다. 이는 항복영역과 소성영역의 전 영

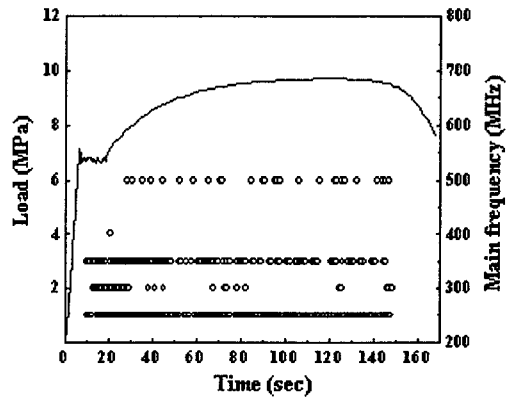


Fig. 6 Relationship between load and main frequency by tensile test.

역에 걸쳐 발생하는 전위의 이동에 의하여 250~350 kHz의 중심주파수 대역이 나타난 것으로 판단된다. 항복영역에서 500 kHz의 고주파수가 나타나지 않고 소성영역에서 고주파수가 나타난 것은 항복영역보다 소성영역에서 집적된 많은 전위들이 개재물이나 결정입계 등을 통과하기 위하여 큰 에너지가 필요하다.

이러한 큰 에너지가 방출됨으로서 500 kHz 이상의 고주파수가 나타난다고 판단되며, 250~350 kHz 대역에서는 보다 많은 검토가 이루어져야 된다고 판단된다.

Fig. 7은 본 실험에 사용한 압력용기용 배관재의 조직 사진을 나타낸 것이다. 일반적인 탄소강의 조직을 나타내고 있다. 즉, 검은 부분은 퍼얼라이트, 흰 부분은 페라이트이며, 페라이트가 주를 이루고 있음을 관찰할 수 있었고, 약 20~30 μ m의 결정립 크기를 나타내었다.

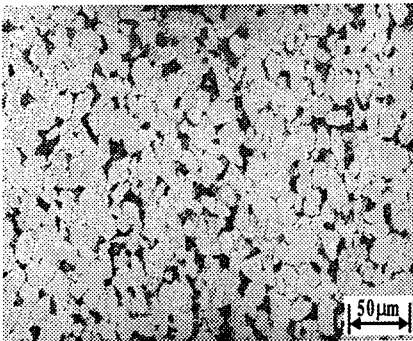


Fig. 7 The microstructure of carbon steel pipe for high pressure service.

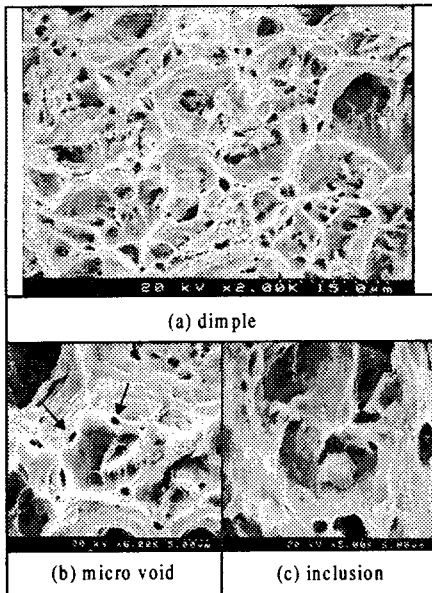


Fig. 8 Fractographics after tensile test.

Fig. 8은 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.

4. 결 론

본 연구에서는 고압탄소강배관의 변형 및 파괴에 대한 음향방출의 기초적인 데이터 베이스를 작성하기 위하여, 배관재에서 작성한 인장시험에서 얻어진 음향방출을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 인장시험시 발생하는 탄성영역, 최대인장강도 이전의 소성영역 및 최대인장강도 이후의 소성영역을 음향방출 amplitude 및 각 영역의 중심 주파수 대역에 의하여 구분이 가능하였다.
- 2) 각 영역에서의 시간-주파수 분석 결과로 탄성영역에서 항복영역까지는 비교적 낮은 저주파수 대역(250~350kHz)이 나타났으며, 소성영역에서는 저주파수뿐만 아니라 고주파수 대역(500kHz)도 나타났다.
- 3) 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.
- 4) 상기와 같은 결론을 통하여 실제 사용 중인 배관의 감육 정도에 따른 파괴기구 및 파괴강도를 해명함으로써 배관의 안전성을 확보할 수 있으리라 판단된다. 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.

참 고 문 헌

- [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, リアライズ社, (1994)
- [2] ASNT, "Nondestructive Testing Handbook - Volumn 5 Acoustion Emission Testing", 2nd Edition, *American Society for Nondestructive Testing*, (1987)
- [3] 정희동, "음향방출법의 공학적 이용을 위한 기초", 대한기계학회지, 34(1), 20~32, (1994)
- [4] 허중희, 이종수, "강 용접부의 소성변형시 음향방출 거동", 대한금속학회지, 35(12), 1660~1667, (1997)
- [5] 김현수, 남기우, 강창룡, 김부안, "음향방출에 의한 고강도 구조용 내화강의 열화특성에 관한 연구", 한국열처리공학회지, 13(5), 309-317, (2000)
- [6] 남기우, 안석환, 이상기, 김현수, 문창권, "시간-주파수 해석법에 의한 CFRP의 파괴 거동", 비파괴검사학회지, 21(1), 39~45, (2001)
- [7] 김현수, 남기우, 강창룡, "저항복비 고강도 구조용 내화강의 피로 특성 및 비파괴평가", 한국열처리공학회지, 14(4), 212-219, (2001)