

SA508 및 SS304 재료의 인장시험시 음향방출 발생 특성 평가

Generation Characteristics of Acoustic Emission during Tensile Test of SA508 and SS304 Materials

주영상, 임사회, 엄홍섭, 김재희
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

압력용기 및 배관과 같은 구조물의 건전성 감시에 음향방출(AE) 기술의 적용을 위해서는 균열 성장 및 파괴시 발생하는 AE신호의 특성에 대한 명확한 이해가 필요하다. 본 연구에서는 원전 1차 계통 구조물의 주요 재료인 SS304와 SA508의 인장시험시 발생하는 AE신호의 특성을 분석 평가 하였으며, 그 결과 각각의 재료에 대한 건전 시험편과 노치 시험편에서 AE신호의 발생 특성에 큰 차이가 있음을 알 수 있었다. SS304는 탄성변형영역과 균열과단영역에서 그리고 SA508은 탄성 및 소성영역에서 AE 신호가 주로 발생하는 특성을 보였다. 이는 재료의 결정구조와 파단 특성에 기인하는 것으로 평가된다.

Abstract

Acoustic emission signal from crack growth and fracture should be characterized for the application of structural integrity monitoring of pressure vessel and pipings. In this study, generation characteristics of acoustic emission signal during tensile test of SS508 and SS304 which compose of primary structure of nuclear power plant are evaluated. There is a great difference of AE characteristics between normal specimens and notched specimens of each SS508 and SS304 material. AE generations were mostly observed in the elastic and crack growing region for SS304 and in the elastic and plastic region for SA508. In contrast with SS304, anomalous lack of AE generation was observed during the crack growing region in SA508. This suggest that characteristics of AE generation be caused by crystal lattices and fracture patterns of each material.

1. 서론

음향방출(Acoustic Emission: AE)은 재료의 미시적 변형이나 파괴시 탄성에너지가 음향에너지로 전환되어 발생하는 탄성응력파(elastic stress wave)이다[1,2]. 음향방출시험법(AE법)은 재료

내부의 변형, 결함성장, 파괴 등에 의해 발생하는 탄성파를 수신하여 재료 내부의 동적 거동을 파악하고 결함 특성 및 상태를 평가하는 수동적(passive)인 비파괴검사 방법으로서, 초음파 신호를 재료 내부에 직접 입사시켜 재료내의 불균일 조직이나 결함 등에서 되돌아오는 수신파를 검출하는 능동적(active)인 초음파시험법(Ultrasonic Testing)과는 근본적으로 그 원리가 다르다. AE법은 재료나 구조물에서 발생하는 AE 신호를 수신하고 모니터링 함으로써 구조물에 존재하는 균열과 불연속부를 탐지하고 감시할 수 있게 해준다. 여러 개의 AE 센서를 설치한 경우에는 각 센서의 AE신호 도달 시간차에 의하여 균열발생 위치를 추정할 수 있으며, 수신된 AE신호의 파형해석을 통하여 균열의 특성과 정도에 대한 정보를 파악할 수 있다. AE 기술의 응용으로서는 재료시험 평가, 압력용기나 구조물의 수압시험 등을 비롯해 가동 중인 원자력 발전설비나 항공기 구조물의 연속감시 등 산업계에 널리 적용되고 있다.

원자력발전소(원전)의 1차계통 구조물과 냉각계통 기기들은 그 수명기간 동안 주기적으로 가동중검사를 수행하여 그 건전성 여부를 확인하게 된다. 원자로 냉각계통 구성 기기들은 출력운전 중 방사선 환경에 의한 접근불가로 인해 검사활동이 주로 핵연료재장전 기간 중에 이루어진다. 그러나 차기 가동중검사 이전에 고장, 가동중 검사대상에서 제외된 부분의 고장 등을 경험함으로써 압력경계 구조물 및 부품의 균열 또는 누설 등이 주요 감시대상 결함이 되었고 구조건전성을 출력운전 중에도 감시할 수 있는 기술의 필요성이 인식되고 있다. 원전의 1차 압력경계에서 구조적 건전성을 저해하는 결함이 발생하거나 진전할 때 AE 신호가 발생하게 되는데, 압력경계 내벽을 따라 전파하는 AE 파를 탐지하고 적절한 신호처리를 통해 분석함으로써 결함의 성장과 결함의 안전도를 평가할 수 있는 연속감시 기술의 적용이 가능하다. 원전 압력경계 구조물의 재료에서 발생하는 AE신호의 발생 메커니즘은 재료의 종류에 따라 달라지므로, AE 감시기술을 적용하기 전에 AE 발생특성이 먼저 파악되어야 한다. AE 신호 발생특성과 발생기구에 대한 분석이 이루어진 후에 구조물의 구조적 안정성평가와 연속감시에 AE 시험법을 적용할 수 있다. 원전의 1차계통의 압력용기와 배관의 재질은 주로 SA508 저합금 탄소강과 SS304 스테인리스강이다. 본 연구에서는 원전 압력용기와 배관의 건전성 연속감시에의 AE 시험법 적용을 위한 기초 연구를 수행하기 위해 SA508 및 SS304 재료의 인장파단 시험시 생성되는 AE 신호 발생 특성을 분석 평가한다.

2. 인장시험과 AE 실험

2.1 시편

본 연구에 사용된 시험편은 그림 1과 같다. 시험편은 두께가 4mm이고 폭이 12mm이며 게이지 길이가 40mm인 판상형 인장시험편이다. 시험편의 재료는 SA508 탄소강과 SS304 스테인리스강이고 건전 시험편과 노치 시험편을 준비하였으며, 노치의 유무에 따른 인장 파단시 AE 발생 특성을 분석하고자 한다. 노치 시험편은 시편의 중앙부에 폭이 0.1 mm이고 길이가 3mm 인 노치를 방전가공을 하였다.

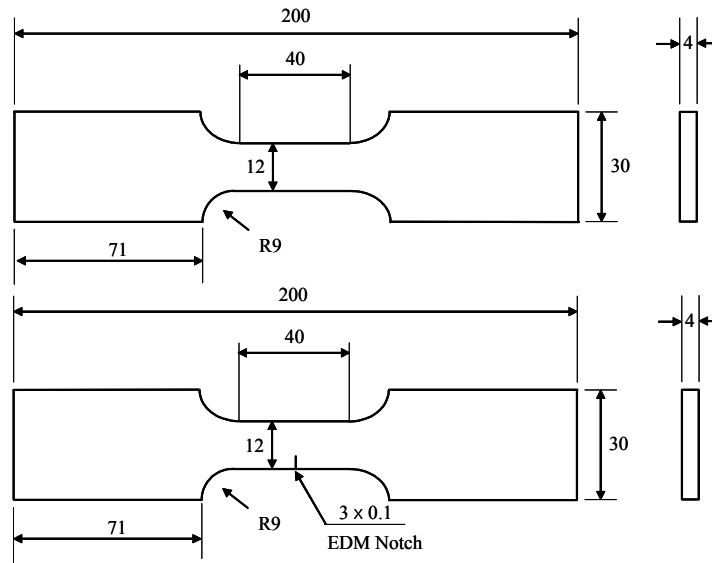


그림 1. 인장시험편 (건전 시험편과 노치 시험편)

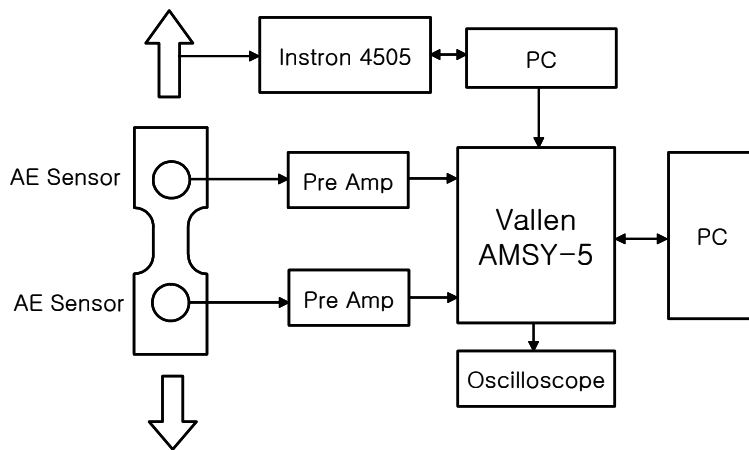


그림 2. 인장시험과 AE 시험의 Block Diagram

그림 3. 인장시험편과 AE센서 설치 사진

2.2 인장시험 및 AE 측정

그림 2는 본 실험의 전체적인 실험 개요를 나타내는 block diagram이고 그림 3은 AE센서가 장착된 시험편 설치 사진을 보여주고 있다. 인장시험은 기계식 인장시험기 Instron 4505를 사용하였으며 crosshead speed를 5mm/min로 설정하여 시험하였다. AE 신호 측정과 분석을 위해 다채널 상용 AE 시스템인 Vallen AMSY-5를 사용하였으며, 디지털 오실로스코프 LeCroy 9354A를 통해 AE 파형과 잡음레벨을 관찰하였다. AE 센서는 공진주파수가 150kHz 인 Vallen VS150-M을 사용하였으며 그림 3에서와 같이 센서 2개를 시험편의 상하부에 각각 설치하여 AE 신호를 수집하였다. AE 신호 수집 시 전치증폭기(AEP-4)에서 34dB가 증폭된다. 잡음제거를 위해 문턱값(threshold level)을 40dB로

설정하였다. 인장시험기의 인장 강도 및 크로스헤드 변위와 함께 AE 이벤트, 카운트, 진폭 및 에너지 등과 같은 AE 변수들이 AE 시스템에 저장된다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 3과 4는 네 종류의 시험편에서 얻어진 인장시험시의 하중변위곡선과 함께 각각의 AE 이벤트 발생률과 AE 에너지 발생률을 보여주고 있다. 각 하중변위곡선에서는 탄성영역, 소성영역, 파단영역이 나타나고 있다. 또한 인장시험 결과 얻어진 각 시험편의 항복강도와 최대인장강도(UTS) 및 총 변위는 표 1과 같다. 건전 시험편의 경우 SA508의 항복강도와 UTS는 각각 433.8MPa과 567.9MPa이었으며, SS304는 각각 393.4MPa, 752.9MPa이었다. SS304가 SA508보다 항복강도는 약간 작으나 UTS는 더 크게 나타났다. SA508과 SS304의 총 변위량은 각각 12mm와 30.89mm로 측정되어 SS304가 SA508에 비해서 약 2.5배 정도 더 연성이 좋은 것으로 나타났다. 노치 시험편은 건전 시험편보다 항복강도와 UTS 및 총 변위가 낮게 나타났다.

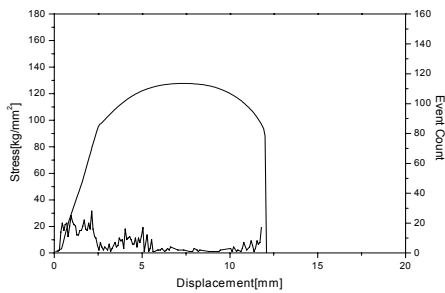
건전 시험편의 경우, 그림 3과 4의 (a)와 (c)에서 보는 바와 같이 SS304 시험편은 탄성영역에서 뚜렷한 AE 신호가 관찰되며 소성영역에서는 AE 발생률이 급격히 줄어드는 현상을 보이고 있다. SA508의 경우는 SS304 보다는 탄성영역에서 AE가 적게 발생하였지만 소성영역에서는 AE가 더 많이 발생하였다. 또한 노치 시험편의 경우에는, 그림 3과 4의 (b)와 (d)에서 보는 바와 같이 SS304 시험편은 노치 선단에서의 소성영역 확장시 AE가 적게 발생하다가 노치 균열이 진전하는 영역에서 AE 신호 발생률이 증가하는 현상을 보인 반면에, SA508은 노치 균열 선단의 초기 소성영역에서 AE가 관찰되며 노치 균열 진전 영역에서의 AE 신호는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

그림 5는 인장시험시 발생한 총 AE 신호의 누적 진폭분포도를 나타내며, 그림 6은 AE 진폭과 Duration의 분포도를 보여준다. 그림 5와 6에서 나타난 바와 같이 SS304에서 발생하는 AE 신호는 SA508의 AE 신호보다 신호 진폭(amplitude)과 신호 시간폭(duration)이 크게 나타나는 특성을 보이고 있다. 이렇게 재료의 종류와 노치의 유무에 따라 AE 신호 발생 특성이 변하는 것은 재료의 결정 구조와 파괴특성이 다르기 때문일 것이다. SS304 재료는 f.c.c 결정구조이나 상온에서 소성변형시 오스테나이트 조직이 일부 b.c.c. 구조인 마르텐사이트 조직으로 변하는 특성이 있다[3]. SA508의 경우에는 martensitic 변형이 발생하지 않는다. 균열 파단이 진전하기 시작하면 AE발생이 현저하게 증가한다. 이는 파단면에서 미세한 덩플들에 의한 균열성장과 결합되는 미세기공(microvoid)의 형성 때문이다. SA508의 경우에 파단시보다는 탄성영역과 소성영역에서 AE가 많이 발생한다. 따라서 AE 발생 원인은 균열성장 과정에서의 파단 원인보다는 재료내부의 물리적 특성 때문일 것으로 보인다[5]. Higgen등은 순수한 철의 탄성영역에서 AE 발생특성을 알아보았는데 철의 경우에 AE 발생은 비가역적 자구벽의 움직임과 같은 magnetomechanism에 기인하는 것으로 추정하고 있다[6]. 탄성영역에서 SA508의 AE 발생은 순수한 철과 같은 강자성체의 원인과 같게 평가된다. 탄소소성영역에서 관측된 AE는 파단에 의한 결함보다는 강자성체의 물리적 특성에 기인한다고 볼 수 있다. 노치가 있는 시험편의 경우, 균열 파단이 시작될 때는 SS304와 SA508 두 시험

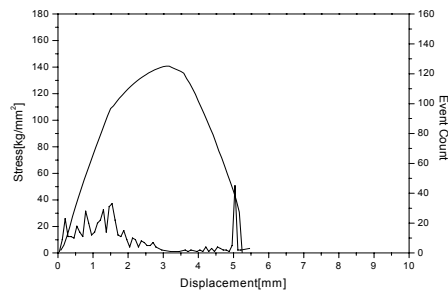
에 대한 거시적 파괴형태는 다르게 나타났다. SS304의 경우는 "double-cup faced" 파괴형태를 보이는 반면, SA508의 경우에는 "45°-shear" 파괴형태를 보였다. SS304의 경우, 균열이 파단되는 초반에 균열의 끝부분에서 인장력의 방향에 수직한 면에 대해 대칭적으로 표면변위가 나타나며, SA508의 경우는 비대칭적으로 나타났다. 균열 파단의 형태가 상이한 것은 결정구조 f.c.c.와 b.c.c.의 소성특성에 기인되는 것으로 판단된다.

표 1. 인장시험 결과

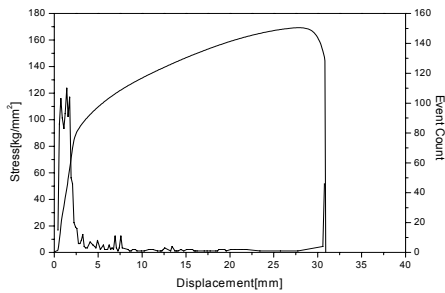
	SA508		SS304	
	건전 시편	노치 시편	건전 시편	노치 시편
Yield Strength [MPa]	433.8	289.1	393.4	258.2
Ultimate Tensile Strength [MPa]	567.9	443.9	752.9	449.2
총 변위 [mm]	12.0	5.17	30.89	8.0



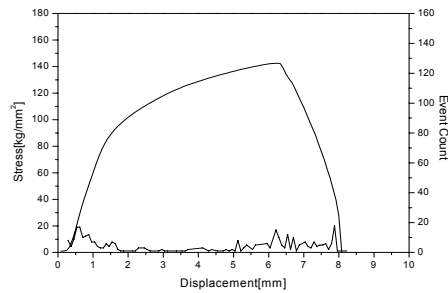
(a) SA508 건전시편



(b) SA508 노치시편

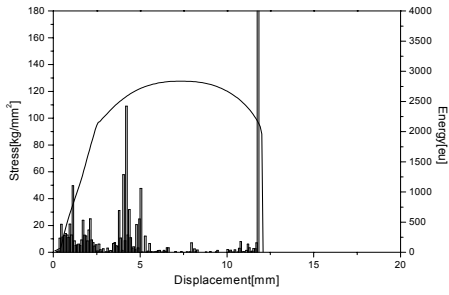


(c) SS304 건전시편

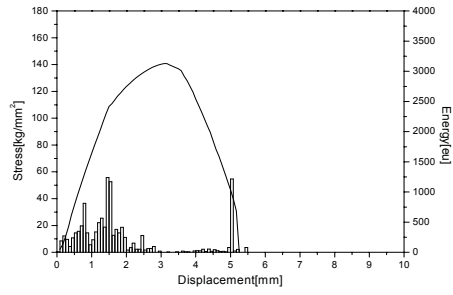


(d) SS304 노치시편

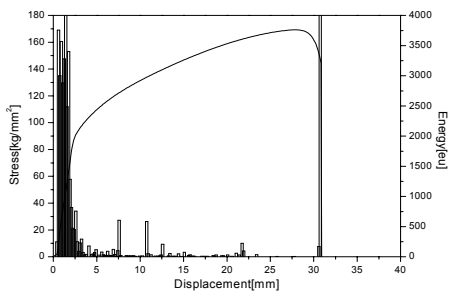
그림 3. 인장시험시 시편의 재료와 종류별 응력 변형 곡선과 AE 이벤트 발생률



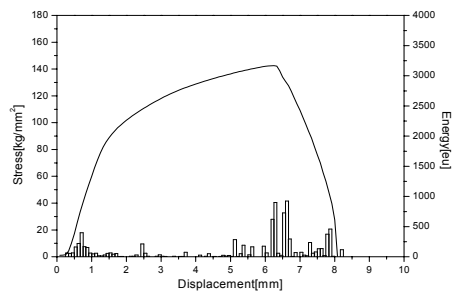
(a) SA508 건전시편



(b) SA508 노치시편

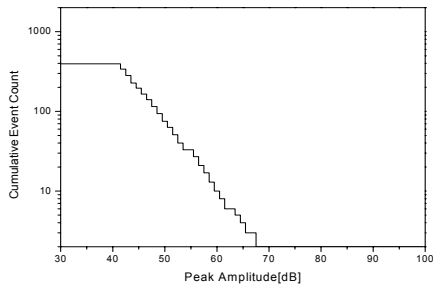


(c) SS304 건전시편

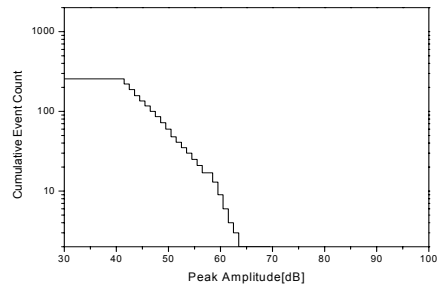


(d) SS304 노치시편

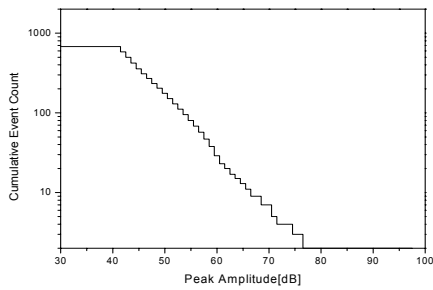
그림 4. 인장시험시 시편의 재료와 종류별 응력 변형 곡선과 AE 에너지 발생률



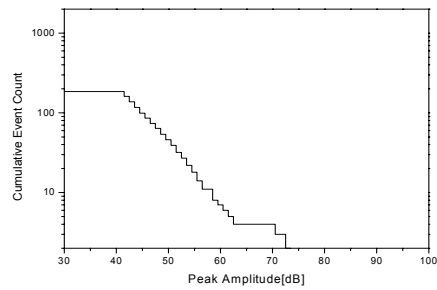
(a) SA508 건전시편



(b) SA508 노치시편

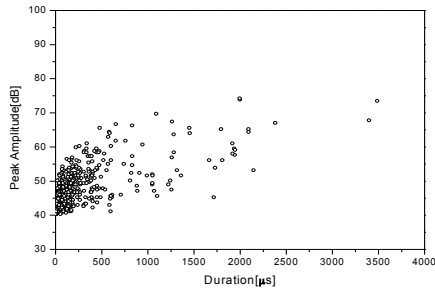


(c) SS304 건전시편

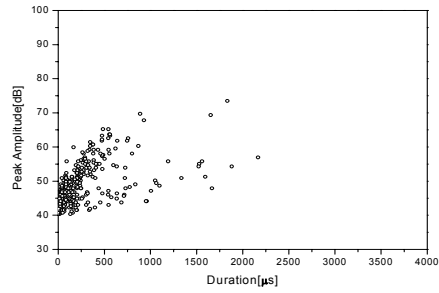


(d) SS304 노치시편

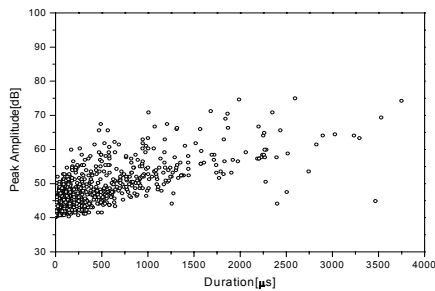
그림 5. 인장시험시 시편의 재료와 종류별 AE 진폭분포도



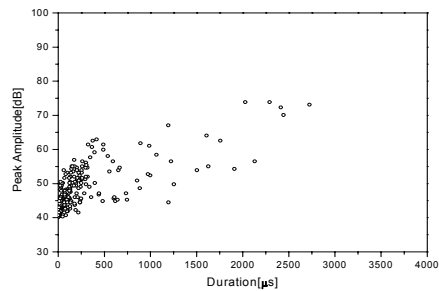
(a) SA508 건전시편



(b) SA508 노치시편



(c) SS304 건전시편



(d) SS304 노치시편

그림 6. 인장시험시 시편의 재료와 종류별 AE 진폭과 Duration 분포도

4. 결론

원전 압력용기와 배관의 주요재질인 SA508과 SS304 재료의 인장 파단시에 발생하는 AE신호의 발생 특성을 분석하였다. 노치가 없는 건전한 시편에 있어서, SS304 재료의 경우 탄성영역에서는 AE 신호가 많이 관측되는 반면 소성영역에서는 AE신호가 거의 발생하지 않았다. SA508 재료의 경우에는 탄성영역과 소성영역에서 동일한 수준으로 AE 신호가 발생하는 특성을 보였다. 노치가 있는 시험편에서는 SS304 재료의 경우 노치 균열이 파단될 때 AE발생률이 크게 나타났지만 SA508 재료에서는 AE가 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. SS304 재료의 AE 발생원은 균열성장의 미케니즘 관점에서 평가되어야 하며, 반면에 SA508의 경우에는 균열성장 시 적은 AE 발생으로 재료 특성의 관점에서 평가되어야 할 것이다. 원전의 구조건전성 연속감시에 AE 기술을 적용함에 있어 재료의 종류에 따라 파단패턴과 AE 발생특성이 다르므로 각기 다른 AE 신호 분석 평가 방법이 적용되어야 할 것이며, 향후 파괴인성시험과 피로시험시의 AE 발생 특성과 기구분석에 대한 연구가 수행 되어야 할 것이다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] J. Kaiser, "Untersuchungen uber das auftreten Gerauschen beim Zugversuch (An Investigation into the Occurrence of Noises in Tensile Tests)", Ph. D. Thesis, Technische Hochschule Munchen, Munich, Germany, 1950.
- [2] B. Schofield, R.A. Bareiss and A.A. Kyrala, "Acoustic Emission under Applied Stress", WADC Technical Report 58-194, Lessells and Associates, 1958.
- [3] C.A. Tatro, "Acoustic Emission from Crystalline Materials Subjected to External Loads", Michigan State Univ., 1960.
- [4] H.L. Dunegan, D.O. Harris and A.S. Tetelman, "Detection of Fatigue Crack Growth by Acoustic Emission Technique", Material Evaluation, Vol. 28, No. 1, pp.221-227, 1970.
- [5] D. Parry, "Nondestructive Flaw Detection by Use of Acoustic Emission", IDO-17230, Phillips Petroleum Co., 1967.
- [6] F. Higgins and S.H. Carpenter, ACTA Metallurgica, Vol.26, p 133, 1978.