

원공결함을 갖는 SM45C 인장시험편의 강도해석과 음향방출에 관한 사례연구

우창기*, 이장규⁺

(논문접수일 2007. 8. 6, 심사완료일 2007. 10. 10)

Case Study on the Load-Deflection and Acoustic Emission Analysis of SM45C Coupons with a Circular Hole Defect under Tensile Loading

Chang-Ki Woo*, Zhang-Kyu Rhee⁺

Abstract

The SM45C metallic coupons have been tested under static tensile loading with acoustic emission (AE) as the load-deflection curve mainly. In this study, we used AE to detect the yielding of material and AE techniques was applied to rapidly estimate the mechanical characteristics of a material. First, coupons without an artificial defect were tested at different cross-head speed. For all cases in this analysis, yielding point of SM45C coupons did not appear definitely compared to mild steel, whereas coupons start to generate AE counts upon yielding. So all cases are normalized to know the possibility of accelerated life test of a material. And next, coupons with different from sizes of circular hole defects were tested at the same cross-head speed of 5 mm/min. Results were classified into 3 classes and analyzed by AE amplitude & signal strength as a function of time. Summarizing the specific conclusions, we need to additional research considering plate with width-ratio in order to estimate the fracture mechanism.

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Load-Deflection Curve(하중-변형 곡선), SM45C Metallic Coupon(SM45C 금속시험편), Normalization(정규화), Accelerated Life Test(가속수명시험), Circular Hole Defect(원공결함), Signal Strength(신호강도)

1. 서론

산업이 발달함에 따라 복잡한 기계나 대형 구조물에서 예상치 못한 파괴로 인하여 종종 많은 피해를 입고 있다. 특히 원자력 산업이나 항공우주 산업 등 안전성이 요구되는 산업

분야에서는 재료의 파괴에 관한 연구가 한층 더 관심의 대상이 되고 있다. 이처럼 구조물들의 안전성을 검사하기 위해 등장한 새로운 비파괴시험 및 검사기술이 바로 음향방출법(AE, acoustic emission)이다. AE 시험은 그 연륜이 비교적 짧은 비파괴시험 및 평가기술임에도 불구하고 재료 내부의

* 인천대학교 기계공학과 (woerwck@incheon.ac.kr)
주소: 402-749 인천시 남구 도화동 177
+ 인천대학교 기계공학과

미시적 변형이나 파괴거동의 규명에서부터 대형 압력용기나 구조물의 수압시험 및 보증시험, 그리고 가동 중에 있는 원자력 발전설비나 운항 중인 항공기에서의 연속감시체제에 이르기까지 매우 다양한 응용사례를 보이고 있다⁽¹⁾. 이것은 첫째로 AE의 발생과정이 극히 미세한 비가역적인 변형에 기인하기 때문이며, 둘째로 초음파시험이나 방사선투과시험 등의 방법과는 달리 피시험체에 어떤 에너지를 주입하기 위하여 인공적인 환경 하에 두지 않아도 되기 때문이다.

AE 기술을 보다 실제적인 시험검사에 적용함에 있어서 가장 큰 문제점은 현재까지 개발된 기술로는 AE의 발생원이 되는 여러 가지 현상이 재료 내에서 동시에 일어날 경우 이들을 서로 분명하게 구별할 수 없다는 점이다. 그럼에도 불구하고 AE 시험이 재료의 특성평가에서부터 대형 구조물의 진단에 이르기까지 무한한 잠재력을 가진 것은 극도로 높은 감도 때문이다. 즉 원리상으로는 원자의 이동이나 전위(dislocation)의 움직임까지도 포착이 가능하므로 재료나 구조물에서 결합이 관측되기 훨씬 전부터 AE 신호가 포착된다^(2~4).

직접적으로 본 연구와 관련하여 1998년 Huang 등⁽⁵⁾은 하중-변위 곡선에서 AE 카운트율(AE counts rate), 누적 AE 카운트 수(cumulative AE counts) 및 AE 이벤트(AE events) 간의 관련성으로부터 AE 활성도(AE activity)가 선형탄성 구역의 초기부분에서 매우 조용하며, 변형이 발생하기 바로 전 두 번째 단계에서 최고치에 도달함을 보고하였고, 2003년 Singh 등⁽⁶⁾은 인공적으로 중앙원공결함을 도입한 연강시험편에 단순인장시험으로부터 얻은 하중-변위 곡선과 AE 파라미터의 상관성을 분석하여 크랙의 시작을 아는 것뿐만 아니라 그러한 결함의 존재를 예측하는 것이 구조요소의 파괴예방에 중요한 역할을 할 수 있음을 실험적으로 입증하였다. 그러나 이들은 단순한 실험적 보고일 뿐 이렇다 할 내용을 포함하고 있지는 않다.

본 연구에서는 기계구조용 강으로 널리 사용되고 있는 SM45C에 대하여 인장시험으로부터 획득한 AE 신호분석을 통해 재료의 파괴특성과 그에 따른 재료의 가속수명시험 등 재료평가의 유용성에 대해 제시해보고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험재료 및 시험편

본 연구에서 사용한 시험편은 POSCO에서 생산한 두께 6mm의 기계구조용 강인 SM45C로 KS B 0801 「금속재료 인장시험편」⁽⁷⁾의 5호 시험편 규격을 적용하였으며, 시험편의 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Tables 1, 2와 같다.

Table 1 Chemical composition of SM45C(wt.%)

C	Si	Mn	P	S
0.439	0.2	0.69	0.018	0.007

Table 2 Mechanical properties of SM45C⁽⁸⁾

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
343	569	20

2.2 실험방법

우선 제작된 시험편 중에서 원공결함이 없는 시험편은 Autograph 25-TG(Shimadzu, Japan) 만능재료시험기의 크로스헤드(cross-head)를 2, 3, 5 및 10mm/min으로 각각 속도를 달리하여 인장시험을 하여 가속수명시험의 가능성을 확인한다. 그리고 1.0, 2.5, 5.0, 7.5 및 10.0mm로 직경을 달리하여 원공결함을 부여한 시험편은 앞서 실험한 결과의 해석으로부터 적절한 단일조건으로 인장시험을 한다.

인장시험 중에 발생하는 AE 원신호(AE raw signal)는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 AE 시스템(PAC, USA)의 DAQ 모듈을 이용하여 획득하였고, 이 경우 1220A(대역필터 100~300kHz, 게인 40dB) 전치증폭기와 R15(공진주파수 150kHz) 공진역 센서를 각각 2개씩 사용하였다. 그리고 만능재료시험기의 아날로그 출력단자로부터 읽어 들인 하중값이 AE 시스템의 계속 데이터와 함께 저장되도록 별도의 데이터 커넥터^(9,10)를 만들어 사용하였으며, 각 시험편에 대하여 오실로스코프로 모니터링을 실시하였다.

또한 고진공 그리스를 사용하여 시험편에 각각의 센서를 압착한 후, 샤프심 압착법으로 캘리브레이션(calibration)을 실시하여 센서의 압착여부를 확인하고, 이렇게 해서 검출된 AE 신호를 주증폭기에서 2차 증폭하여 디지털 데이터로 저장시킨 후 신호분석을 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연강의 경우

Fig. 2는 연강을 인장시험 했을 경우 얻어지는 일반적인 결과로 (a)는 오실로스코프 상에서 모니터링한 신호이며, (b)는 AE 시스템에서 얻은 신호이다. 그림에서 구간 I는 AE 카운트가 1차 피크를 보이는 초기탄성영역이며, 구간 IIa는 AE 카운트가 2차 피크를 보이는 영역으로 구간 I에서의 1차 피크에 해당하는 AE 카운트 수를 초과하는 시점부터 2차 피크값을 초과하지 않는 범위의 영역이고, 구간 IIb는 AE

카운트가 3차 피크를 보이는 영역으로 구간 IIa에서의 2차 피크에 해당하는 AE 카운트 수를 초과하는 시점부터 구간 I에서의 1차 피크에 해당하는 AE 카운트 수를 초과하는 시점까지의 영역이다. 그리고 구간 III은 시험편 전반에 걸쳐 소성 변형이 일어나는 영역이며, 구간 IV는 시험편 파단영역이다.

Fig. 2의 (a)와 (b)를 연계하여 살펴보면, (a)의 파형으로부터 30~85s의 구간 II에서는 하향복점 도달 직후부터 일정한 응력을 유지하는 영역 IIa는 소성변형의 시작으로 가정하면, 빗금친 뒤편(Lüder's band)에서 파고치가 높고 아주 밀집한 분포를 보이고 있는데, 이는 (b)에서 인장초기

부터 상향복점(*)을 지나 소성이 일어나는 비교적 소성변형의 초기구간 IIb로 AE 카운트 수가 상당히 높은 것을 볼 수 있다. 또 (a)의 85s 초과(>85s) 구간에서는 간헐적으로 높은 파고치를 보이고 있는데 이는 그 부분에서 돌발형 AE가 발생함을 의미한다. 보편적으로 강재에서는 인장초기 탄성구간에서 AE가 발생하지 않는 것으로 알려져 있으며, 이는 신호처리를 위한 잡음제거와 threshold 값이 관계되기 때문이다. 따라서 여기에서의 1차 피크값은 재료의 소성영역 진입상태를 판가름하는 기준으로 사용할 수 있으며, 특히 SM45C 강과 같이 항복점이 뚜렷하게 나타나지 않는 강재에 대한 재료평가에 있어서 매우 유용하다.

한편 (b)의 상향복점 부근에서 2차 피크가 나타나고 하향복점 부근에서 AE 카운트 수가 감소하며, 다시 하중의 증가와 더불어 소성변형이 일어나면서 3차 피크가 나타나는 것은 카이저 효과(Kaiser effect) 때문이다. 또한 소성변형이 어느 정도 진행되면 간헐적으로 그리고 비교적 적은 양의 AE 카운트 수가 발생됨을 알 수 있다.

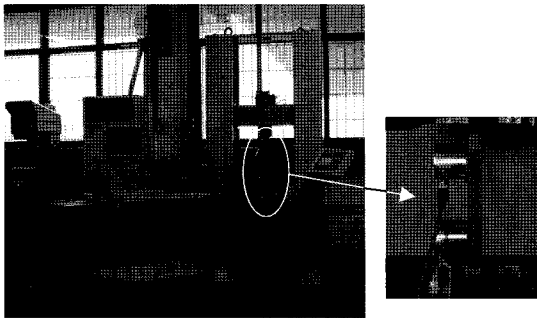
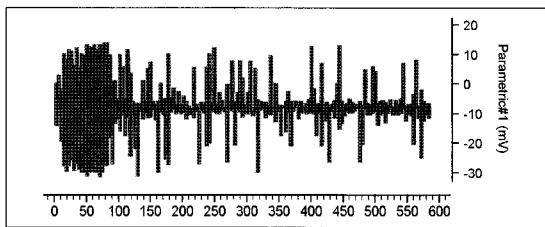
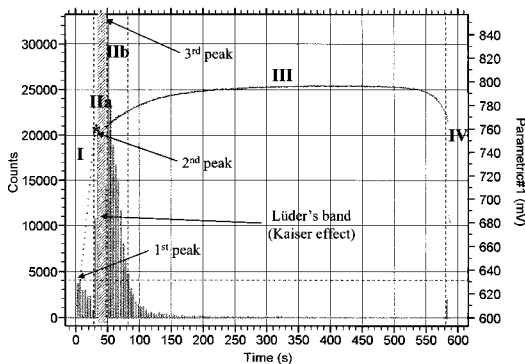


Fig. 1 Experimental apparatus and sensors mounting



(a) Detected signal from oscilloscope

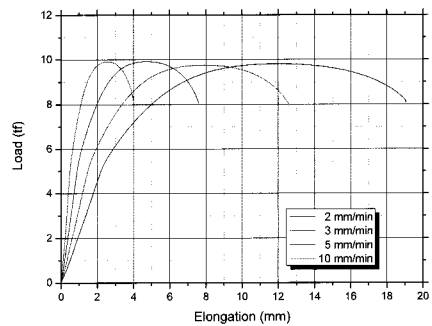


(b) Detected signals from AE system

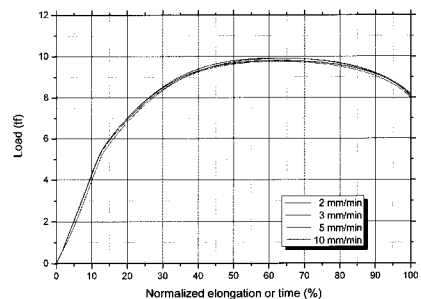
Fig. 2 AE examples of mild steel(low carbon steel)

3.2 결함이 없는 SM45C 강의 경우

Fig. 3(a)는 각 실험조건에 대한 하중-변형 곡선이고, Fig. 3(b)



(a) Original load-deflection curves



(b) Normalized load-deflection curves

Fig. 3 Load-deflection curves

는 이를 시간 축에 대하여 정규화한 그래프이다. 여기서 정규화한 가속수명시험의 가능성을 알아보기 위해 만능재료시험기의 크로스헤드 속도인 10mm/min 조건의 변형량을 100%로 하여 나머지 2, 3 및 5mm/min 조건의 변형량을 시간(또는 변위) 축으로 표현한 것을 의미한다. Fig. 3(b)의 정규화한 결과로부터 각 조건에 대해 하중-변형 곡선의 양상이 양호한 일치를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

이를 바탕으로 Fig. 4(a)는 하중-변형 곡선과 AE 카운트 수를 중첩시켜 Fig. 3(b)에서와 같이 시간 축을 정규화한 그래프이다. Fig. 4(a)의 SM45C 강은 Fig. 2(b)의 연강에서와 달리 뚜렷한 항복점이 나타나지는 않았지만, 구간 I은 AE 카운트가 1차 피크를 보이는 초기탄성영역이고, 구간 II는 AE 카운트가 2차 피크를 보이는 영역으로 구간 I에서의 1차 피크에 해당하는 AE 카운트 수를 초과하는 시점부터 2차 피크값을 초과하지 않는 범위의 영역이며, 구간 III은 시험편 전반에 걸쳐 소성변형이 일어나는 영역이다. 그리고 구간 IV는 시험편 파단영역으로 구분하였다.

2mm/min인 경우, 약 90s(15.5 time%)에서 AE 카운트 수는 3.5×10^4 회이며, AE 카운트 값만으로도 소성영역 진입 여부를 알 수 있다. AE 카운트 피크값 3.5×10^4 회를 적용하면 재료의 물리적 상태를 판가름하는 기준이 되며, 이때 약 90~152s(15.5~26.1 time%), AE 카운트 수 3.5×10^4 회 이상으로 분포되어 있는 영역을 워더스대 및 초기 소성영역으로 생각할 수 있다. 마찬가지로 3mm/min인 경우, 약 62s(16.2 time%)에서 AE 카운트 수는 3.3×10^4 회이며 이때 약 62~108s(16.2~28.3 time%), AE 카운트 수 3.3×10^4 회 이상으로 분포되어 있는 영역, 5mm/min인 경우, 약 40s(17.2 time%)에서 AE 카운트 수는 7.0×10^4 회이며 이때 약 40~66s(17.2~28.4 time%), AE 카운트 수 7.0×10^4 회 이상 분포되어 있는 영역, 10 mm/min인 경우, 약 26s(20.8 time%)에서 AE 카운트 수는 10.2×10^4 회이며, 이때 약 26~41s(20.8~32.8 time%), AE 카운트 수 10.2×10^4 회 이상 분포되어 있는 영역을 워더스대 및 초기 소성영역으로 생각할 수 있다.

그리고 Fig. 4(b)는 두 개의 R15 센서에서 감지한 AE 진폭(AE amplitude)을 시간의 흐름에 따라 나타낸 것으로 2 mm/min인 경우 20s 미만(<20s) 구간에서 최대 75dB, 90s 초과(>90s) 구간에서 최대 100dB의 진폭분포를 보이고 있으며, (a) 그래프에 적용할 경우 75dB 이상의 진폭이 발생하게 되면 재료는 소성영역에 진입했음을 의미한다. 마찬가지로 3mm/min인 경우 15s 미만(<15s) 구간에서 최대 80dB, 70s 초과(>70s) 구간에서 최대 100dB, 5mm/min인 경우

10s 미만(<10s) 구간에서 최대 80dB, 45s 초과(>45s) 구간에서 최대 100dB의 진폭분포를 보이고 있으며, 이는 80dB 이상의 진폭이 발생하게 되면 재료는 소성영역에 진입했음을 의미한다. 끝으로 10mm/min인 경우 5s 미만(<5s) 구간에서 최대 90dB, 30s 초과(>30s) 구간에서 최대 100dB의 진폭분포를 나타내므로 이 경우에는 90dB 이상의 진폭이 발생하게 되면 재료가 소성영역에 진입했음을 의미한다고 할 수 있다.

결국 각 조건에 대해 정규화한 그래프에서는 하중-변형 곡선의 경우에는 커다란 차이를 보이지 않았지만, AE 신호에 대한 그래프에서는 시간에 따른 AE 카운트 값이 크로스헤드의 이송속도가 빨라질수록 점차 그 값도 증가하는 것으로 나타났고, 특히 진폭분포에 있어서 2, 3 및 5mm/min의 경우에는 비슷했지만, 10mm/min의 경우에는 다소 다른 경향을 보임을 알았다. 따라서 이로부터 AE가 재료시험에 있어서 매우 유용한 평가수단임을 확인할 수 있었다.

3.3 원공결함을 가진 SM45C 강의 경우

3.2절의 결함이 없는 경우에 대한 Fig. 4(b)의 진폭분포 고찰로부터 원공결함이 있는 시험편은 판폭에 따른 결함의 크기(존재)가 부재에 미치는 영향이 있을 것으로 판단하여 만능재료시험기의 크로스헤드 속도를 5mm/min으로 통일하여 실험을 하였다.

Fig. 5(a)는 Fig. 4(a)와 달리 인장속도가 일정하여 원공결함의 크기에 따른 시험편의 파단 시간을 쉽게 파악하기 위해 시간과 AE 카운트 수에 해당하는 축을 모두 동일한 축적으로 고정하였으며, Fig. 5(b)는 AE 진폭과 에너지의 관계를 시간의 함수로 표현한 2차원 등치선도(2D contour plot)이다.

앞 절에서와 비슷하지만 이미 시험편 자체에 원공결함을 있기 때문에 구간 I은 1차 피크가 존재하는 초기탄성영역(Ia)과 초기소성영역(Ib)이고, 구간 II는 대체적으로 2차 피크가 존재하는 소성영역이며, 구간 III은 시험편이 파단되는 영역으로 설정하였다. 그림에서 원공결함의 크기가 증가할수록 하중을 분담하는 부재의 단면적이 작아져 파단이 빨리 일어나며, 그때 부재에 작용하는 하중 또한 작기 때문에 AE 카운트 값도 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 반면 앞 절의 경우와 달리 결함이 존재하는 경우, AE 카운트 수가 소성영역을 지난 후에도 계속해서 발생하였는데, 이는 원공결함에서 파생된 크랙이 지속적으로 부재에 영향을 미치기 때문인 것으로 보인다. 또한 시험편이 파단될 때 발생하는 AE 카운트 수도 원공결함의 크기가 클수록 상대적으로 더 높은 값을 보임을 확인할 수 있었다.

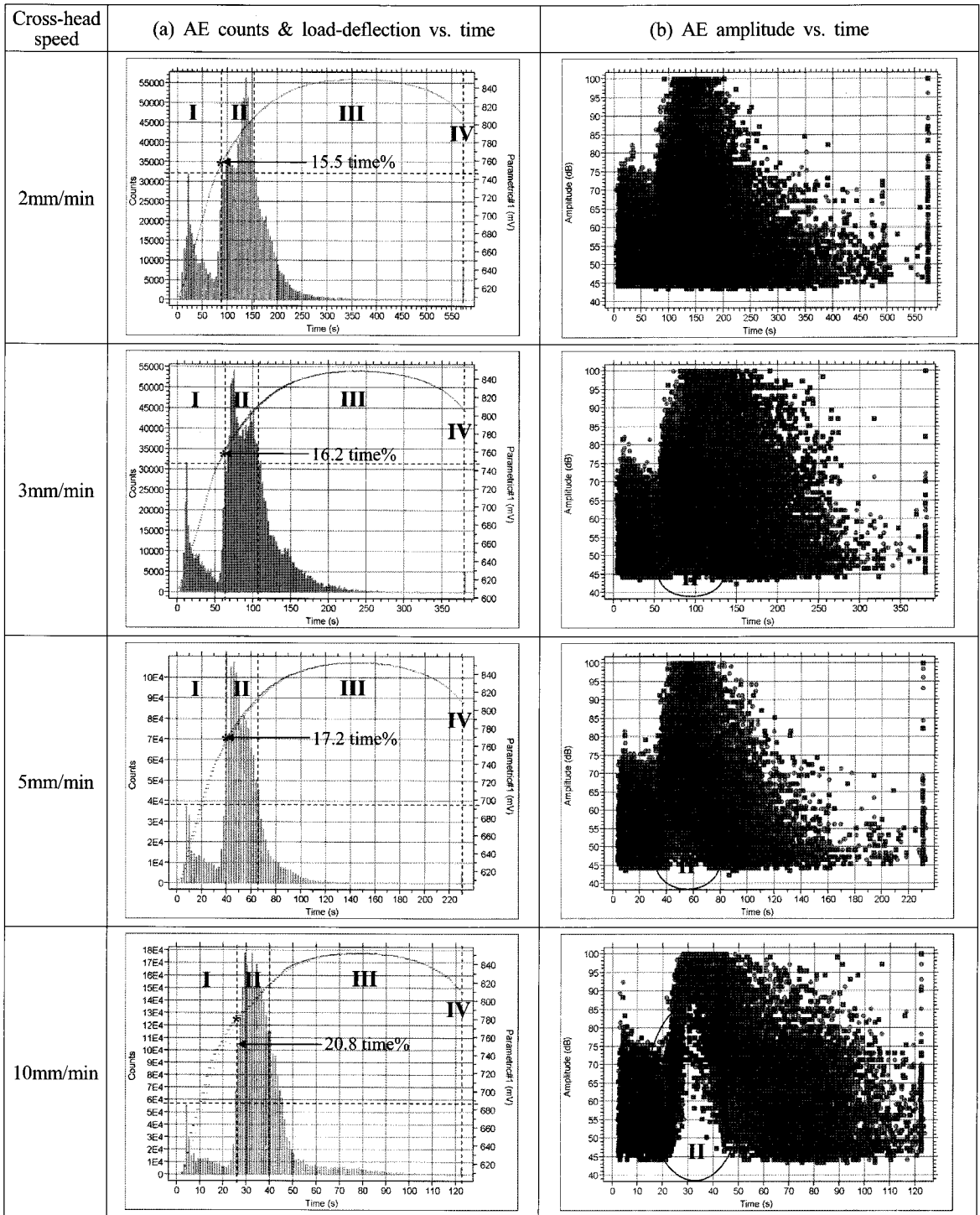


Fig. 4 Normalized plots of SM45C coupon does not exist artificial defect

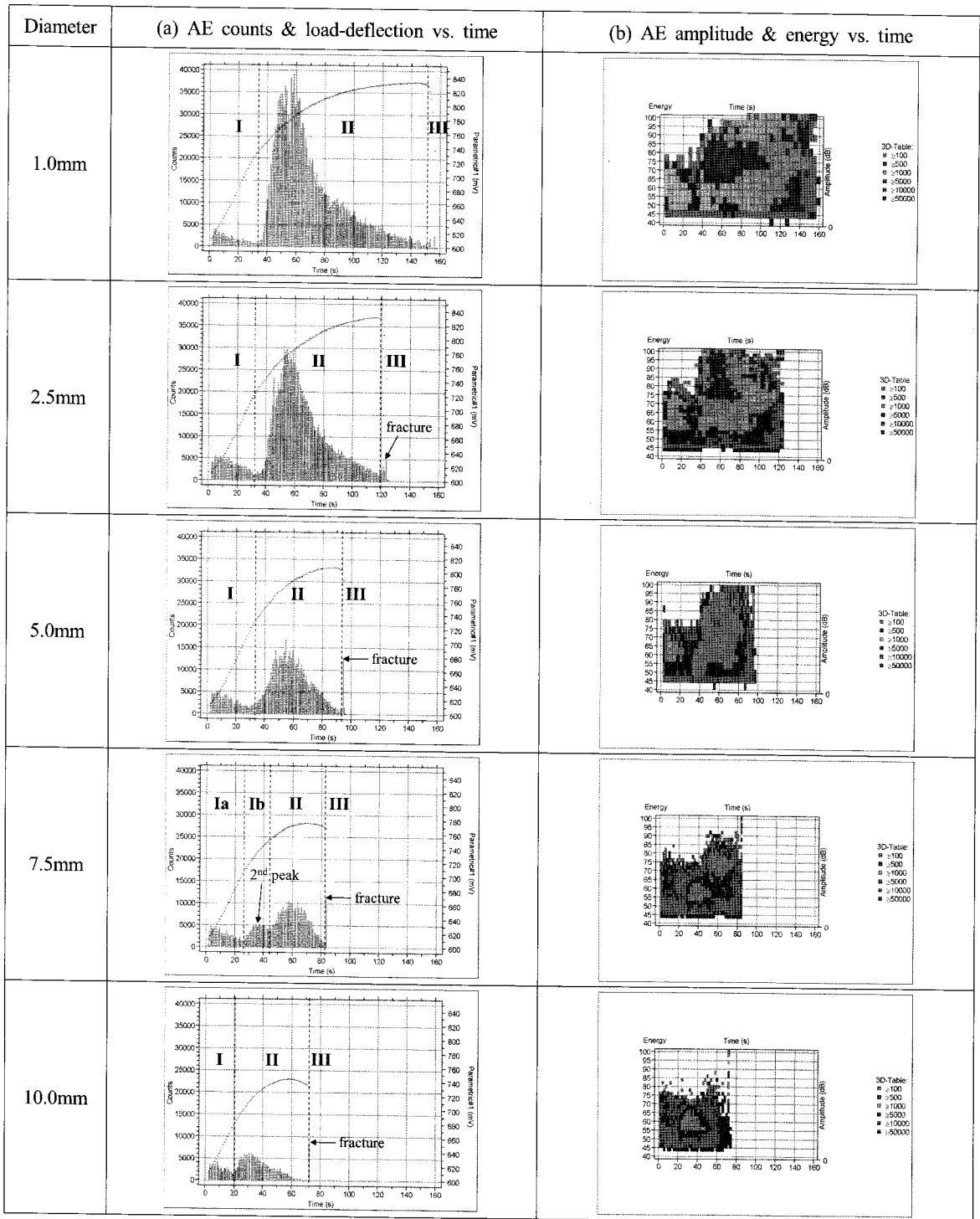


Fig. 5 Detected AE signals of SM45C coupon with a circular hole defect at 5mm/min

한편 원공결함이 7.5mm인 경우에는 모든 실험결과에 있어서 타 조건에 비해 파단 직전까지 3개의 피크가 나타나는 경향을 보이고 있으며, 특히 Fig. 5(b)도 (a)에서와 마찬가지로 타 조건에 비해 진폭분포와 에너지 밀집도가 다른 양상을 보이고 있는데, 마치 5.0mm에서 10.0mm로 넘어가는 과도기적인 형태를 나타내고 있다. 그래서 이 부분에 대한 추가적인 고찰을 하기 위해 시간에 따른 AE 진폭과 신호강도(signal strength)에 대하여 패턴인식을 실시하였고, 그 결과 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 0, 1, 2 및 3의 4개의 Class로 분류되었다. 그림에서처럼 Class 0과 2는 그 전체에서 차지하는 비중이 0.0%대로 미미하며, Class 1은 1.4% 그리고 Class 3은 98.5%로 나타났다. 또한 Fig. 6에서 보는 바와 같이 3번째 피크값을 포함한 중·후반부 영역에서 모든 Class의 신호강도가 높게 나타나고 있으며, 이를 바탕으로 각 센서에서 계속된 전체 신호에 대한 시간데이터 연결(time driven match) 처리를 통하여 최종적으로 Fig. 7의 결과를 얻었다.

우선 Fig. 6에서 Class 2는 시험편의 파단, 즉 거시적 파괴에 의한 신호로 Fig. 7(a)에서의 파형(waveform)은 전형적인 돌발형 AE 형태를 보이고 있다. 또한, Fig. 7(b)의 FFT 처리결과 진폭의 크기(magnitude)가 상당히 높고 560kHz 부근에서 최대 피크값을 보이는 것으로 나타났다. 한편 Class 0은 후처리 시 시간데이터가 연결되지 않아 본 고찰에서는 제외하였으나, 그 성격이 Class 2와 유사하여 시험편이 파단에 이르기 전에 나타나는 비교적 작은 규모의 간헐적인 거시적 파괴로 추측된다.

그리고 Fig. 6의 3번째 피크값을 포함한 중·후반부 영역에서 나타나는 Class 1은 Fig. 7(a)의 파형에서 전형적인 돌

발형 AE 형태를 보이고 있으며, Fig. 7(b)의 FFT 처리결과 진폭의 크기가 높고 100~300kHz에서 1차 피크를 보이며, 500~600kHz에서 2차 피크를 보여 중심주파수가 폭넓게 분포하는 것으로 나타났는데, 이는 시험편에서 발생하는 미시적 파괴 때문인 것으로 생각된다.

끝으로 Fig. 6의 시험시간 전체에 걸쳐 나타나는 Class 3은 신호강도의 차이로부터 시험 초·중반 영역(1차 및 2차 피크값 포함)과 중·후반 영역(3차 피크값 포함)으로 구분하였다. Fig. 7(a)의 파형은 전체영역에 걸쳐 전형적인 연속형 AE 형태를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 7(b)의 FFT 결과에서는 Fig. 8과 같이 1차, 2차 및 3차 피크값을 지나는 영역에서 각각 중심주파수가 100~200kHz, 200~300kHz 및 300~600kHz로 점차 변화하는 것으로 나타났는데, 이는 시험 초기에는 주로 탄성변형, 중반부에서는 탄·소성변형 그리고 중·후반부 영역에서는 활발한 크랙의 진전과 더불어 소성변형이 동시다발적으로 발생하기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 SM45C 강에 대하여 인장속도를 2, 3, 5 및 10mm/min으로 달리하여 인장시험을 한 결과, 하중-변형 곡선으로부터 등방성 재료의 가속수명시험 가능성을 시사하였고, AE 카운트 수 및 진폭분포에 의해 재료의 탄성 및 소성 영역을 구분할 수 있었다. 그 결과 인장속도가 빨라질수록 AE 카운트 값이 점차 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 진폭분포에 있어서 10mm/min의 경우에는 타 조건과는 다른 경향을 보였는데, 이로부터 AE법이 재료시험에 있어서

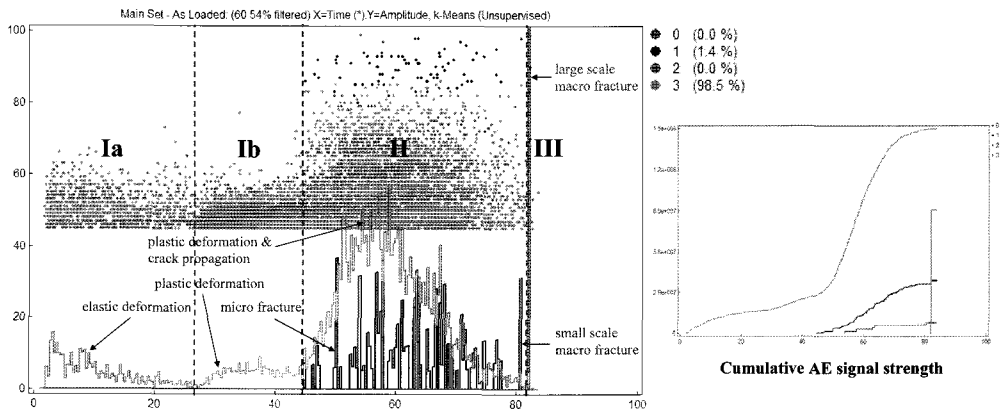


Fig. 6 AE amplitude & signal strength vs. time of a circular hole defect 7.5mm

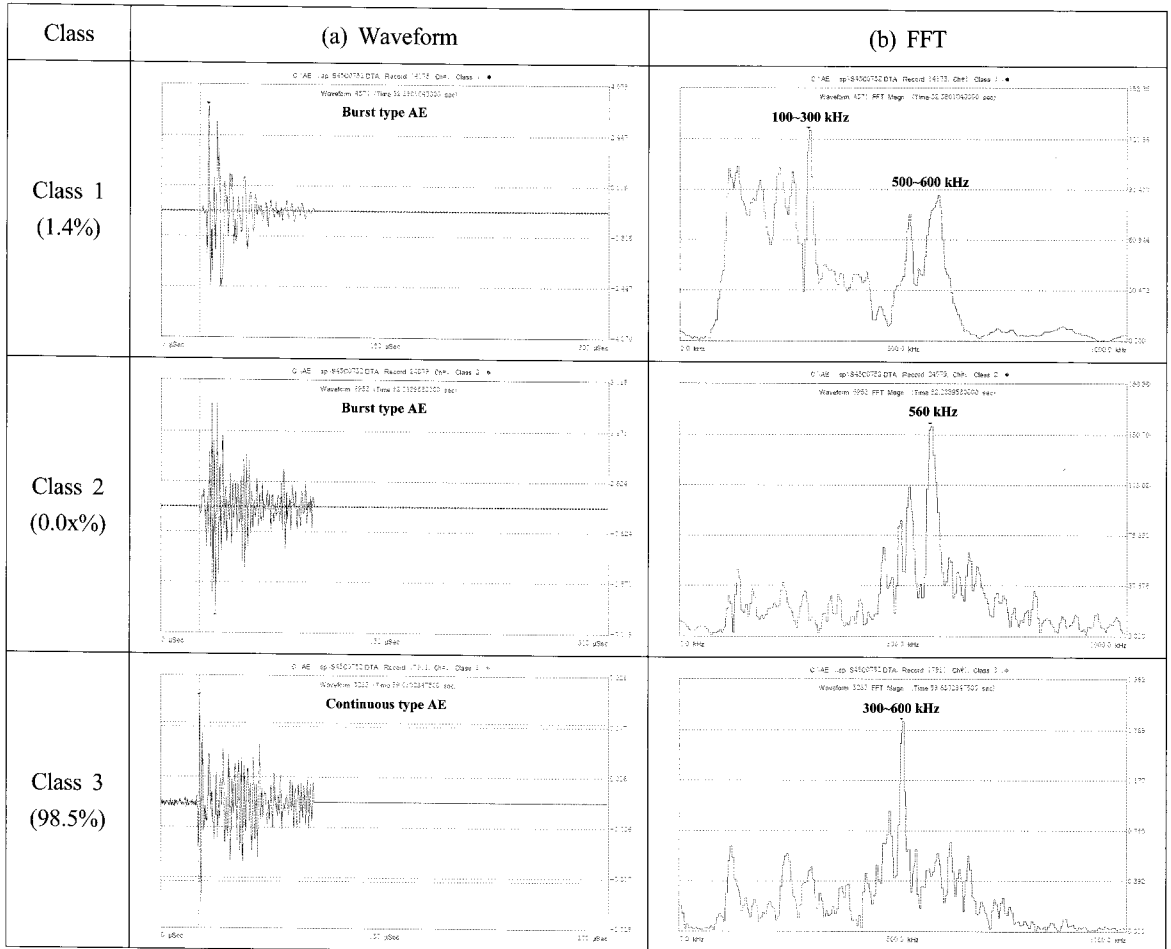


Fig. 7 Frequency analysis results of Fig. 6

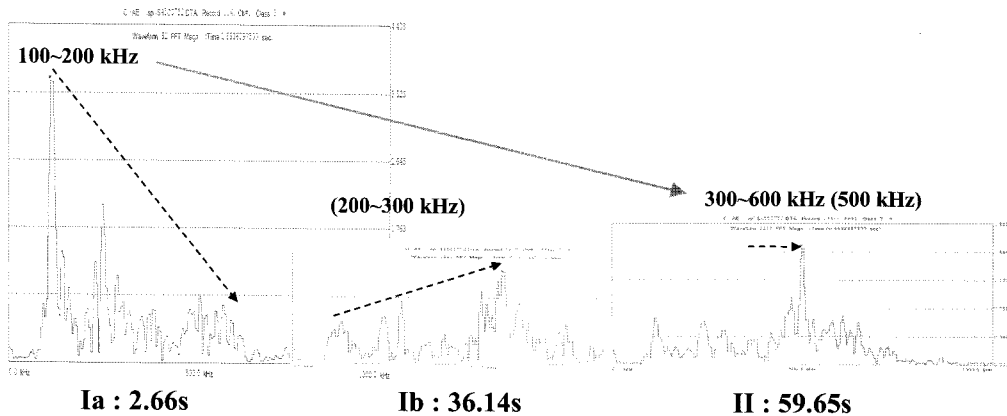


Fig. 8 FFT trend of the Class 3

매우 유용한 방법임과 동시에 등방성 재료의 가속수명시험 가능성에 대해 확인하였다.

또한 원공결함의 존재는 하중-변형 곡선에 대한 AE 카운트 수의 발생양상을 다르게 만들며, 결함의 크기가 클수록 부재의 하중분담율이 떨어져 그 값이 작아지지만, 시험편이 파단될 때 발생하는 AE 카운트 수와 AE 진폭 값은 원공결함의 크기가 클수록 더 높게 나타남을 확인하였다. 한편 원공결함이 7.5mm인 경우에는 모든 실험결과가 타 조건에 비해 다소 다른 경향을 보였는데, 이 부분에 대한 정확한 파괴 기구의 규명을 위해 차후 판폭비를 고려한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2006년도 인천대학교 자체연구비 지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Miller, R. K., and McIntire, P., 1987, *Nondestructive Testing Handbook(2nd ed.)*, Vol. 5, *Acoustic Emission Testing*, ASNT.
- (2) Tensi, H. M., 2004, "The Kaiser-effect and its Scientific Background," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 22, pp. s145~s16.
- (3) Yoshimura, T., and Kano, S., 1987, "A Method of Rapidly Estimating the Fatigue Limits by Acoustic Emission," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 6, No. 3, pp. 145~149.
- (4) Mukhopadhyay, C. K., Jayakumar, T., Raj, B., and Ray, K. K., 2000, "Acoustic Emission-Stress Intensity Factor Relations for Tensile Deformation of Notched Specimens of AISI Type 304 Stainless Steel," *Materials Science and Engineering*, A293, pp. 137~145.
- (5) Huang, M., Jiang, L., Liaw, P. K., Brooks, C. R., Seeley, R., and Klarstrom, D. L., 1998, "Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research," *Journal of Metals*, Vol. 50, No. 11.
- (6) Singh, S. K., Srinivasan, K., and Chakraborty, D., 2003, "Acoustic Emission Studies on Metallic Specimen under Tensile Loading," *Materials and Design*, 24, pp. 471~481.
- (7) Korean Standards Association, 2002, *Test pieces for tensile test for metallics materials.*, KS B 0801.
- (8) <http://www.matweb.com>, MatWeb, The Online Materials Database JIS S45C Steel, Normalized.
- (9) Rhee, Z. K., and Woo, C. K., 2005, "Experimental Studies on Joinability of SWS 490A High Tension Steel using Acoustic Emission Signals," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 87~85.
- (10) Rhee, Z. K., 2007, "A Study on the Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals Generated from Fusion-Welded Butt Joints in Steel during Tensile Test and its Applications," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 16, No. 1, pp. 26~32.