AE 방법에 의한 球狀化黑鉛 주철재의 파괴기구 究明

김 상 철* 함 경 춘** 오 범 석***

1987년 3월 3일 접수

(An Investigation of Fracture Mechanism of Spheroidal Graphite Cast Iron by Acoustic Emission Method)

S. C. Kim, K. C. Ham, B. S. Oh

ABSTRACT

In this experimental research, fracture mechanisms of spheroidal graphite cast iron (As Cast, annealed and normalized) were investigated by using Acoustic Emission (AE) technique.

In this study, the data (AE signal) are digitized and processed with the 8 bits micro-computer (APPLE Ⅱ) connected to the AE measuring device without data processing unit. The source of AE signal was estimated by fractography analysis.

The results obtained in this experimental study are summarized as follows :

For the heterogeneous materials (spheroidal graphite cast iron) with inclusions which may be considered as cracks, it is found that both low and high AE amplitude appear simultaneously and the load is found to be fluctuated in the final stage of deformation. But the lad is not fluctuated in tension test with low AE amplitude only.

AE is measured within elastic region and it is confirmed that 0.2% offset yield load agrees approximately with the load point where AE counts decrease steeply after the point of maximum AE counts.

* 인하대학교 기계과
** 인하공전 정밀기계과
*** 인하대학교 대학원

1. 서 론

AE (Acoustic Emission)에 대한 최초의 연구는 독일의 J. Kaiser가 1950년 재료가 외력을 받아 변형할 때 재료에서 소리(Tin-Cry)를 방출한다고 보고하였다. (1)이것을 기점으로 반세기 동안에 이 현상을 재료시험 연구와 비파괴검사에 사용하기 위하여 많은 연구가 행하여졌다. (2)

예로서 원자력 압력용기의 내압시험(Proof test)을 통하여 결함 위치의 추적, (3 - 6) 항공기 운행중 정기적인 AE의 측정을 통하여취약부의 안전성 평가, (7 - 8) 용접구조물인 교량등의 정기적인 검사를 통해서 안전성을 판단하려는 연구가 프로젝트로 주어져 AE 기술을 실제의 산업분야에 적용하려는 연구 노력이 여러 연구단체에서 활발히 진행되고있다.(9-15)

그러나 이러한 유용적인 측면외에 아직도 어려운 점이 남아 있다. 예를 들어서 AE의 연구는 Digitizing 되는 전기신호에 의해서만 연구될 수 있으며, AE 신호는 발생되는 시간과 전기신호가 Digitizing 되는 시간 사이의 차이가 발생되며, 또한 Digitizing된 많은 정보를 처리할수 있는 기억용량이 큰 Data 처리장치가 필요하게 되어 고가의 컴퓨터를 필요로 한다. (16)

본 연구에서는 구상화 흑연주철에 대해서 기지조직을 3가지로 변화시켜 가면서 AE 기술(Acoustic Emission Technique)을 이용하여 평활재 시편의 인장시험을 하여 재료에 하중을 작용시켰을 때 발생하는 AE 발생량을 측정하여 재료의 파괴과정을 평가하였고, 실험 후 파면을 전자주사현미경 (SEM)으로 관찰하여서 AE 발생원을 추정하였다. 이러한 실험결과를 이용하면 사용조건 하에서 재료의 안전성을 평가하는데 도움이 될 것으로 생각된다.

2. 실험절차

2-1 실험장치

일반적으로 AE장비는 실험시 많은 Data를 읽고 저장하고 수행하기 위해서 컴퓨터를 병용한다.

본 연구에서는 국내 널리 보급된 8비트 마이크로 컴퓨터 (APPLE Ⅱ)의 기본 기구를 이용해서 AE Data를 처리하였다.

시험기로는 만능재료 시험기(Tensilon, Cap., 1020 N, Japan)와 Extensometer (ETM-50, Saginomiya Co., Japan)를 사용하여 분당 1mm의 인장속도로 실험을 실시하였다. AE 발생 감지기로는 소형 시편의 경우 실험실에서 많이 사용되는 Resonance 주파수가 1MHz인 MD-1160 (San Densi Co., Japan)으로 AE 발생을 감지하여 Pre-Amp로 40dB로 증폭하고 크래킹 모니터 (San Densi Co., MD-1100S Japan)에 내장된 Main-Amp로 40dB로 증폭시켜 전체의 Gain이 80dB로 10KHz~300KHz의 범위에서 발생한 AE를 검출하였다.

외부의 잡음을 최소화하기 위해서 시편을 시험기에 장착후 5N까지 하중을 작용시켜서 그립과 시편 사이의 잡음을 제거시켰으며, 이 때 발생된 잡음의 전압수준을 오실로스코우프(VC-6015, Hitachi, Max-cap, 1MHz, Japan)로 확인한 결과 0.03V수준이 되었으며, 따라서 하중을 제거후 Threshold 수준을 0.07V로 고정하여서 실험을 실시하였다.

검출된 AE의 진폭을 0.2~1.6V 전압수준을 0.2V 간격으로 8 등급하여 구분 개수하였고, 이 등급별로 1초 동안 누적 개수된 AE발생량을 GPIB 인터페이스를 통해서 컴퓨터로 전송하여 Date를 기록하였다.

인장시험중 변위와 하중은 제작한 OP-Amp로 증폭하고 A/D 변환기(Mountain Hardware, USA)로 변환하여 컴퓨터로 Data를 전송하였

다. 전송된 Date는 BASIC 언어와 기계어로 구성된 프로그램에 의해서 Data를 처리하였으며, 실험중 하중과 변위를 X-Y 기록계 (Watanabe, WX-4403, Japan) 로 자동 기록하였다.
실험장비의 개략도를 그림 1에 나타내었다.

2-2 시편재료와 형상

본 실험에 사용된 구상화 흑연주철은 500 KV A 153N 산성저주파 유도로에서 용해하여 1500℃에서 CaC_2로 탈황처리한 후 1.5Wt% OGRC-8 (46.3% Si, 3.75% Ca, 10.5%Mg, Rare earthmetal)과 1.5Wt% OGRC-30 (45.0%Si 1.15% Ca, 5.0% Mg, Rare earthmetal) 으로 흑연구상화 처리(샌드위치법)를 한 후 0.4% Si 량이 되도록 75% Fe-Si로 접종하여, 1350℃에서 CO_2 주형에 Y-block으로 주조하여 시편의 재료로 사용하였다.

주조 후 두께 8mm 길이 170mm로 각봉을 만든 다음 그림 2와 같이 1단 열처리(930℃에서 3시간 유지, 노르말라이징)와 2단 열처리(930℃에서 3시간 유지, 750℃에서 7시간 유지, 아니일링)로 퍼얼라이트와 훼라이트의 기지 조성을 바꾸었고 As Cast 한 것을 합하여 3종류의 시편을 제작하였다.

ASTM E 8-85(17)의 규정에 따라서 인장시편을 가공하였고, 시편의 형상은 그림 3에 나타내었으며, 본 연구에 채택한 재료의 기계적 성질과 화학적 성질을 표 1과 표 2에 각각 나타내었으며 조직사진을 사진 1, 2, 3에 각각 나타내었다.

Table 1. Mechanical properties

재 료	탄성계수 MPa	포아손비 ν	연 신 율 %	인장강도 MPa	항복강도 MPa
GCD-AC	1428	0.29	6.80	4.89	3.47
GCD-AN	1224	0.26	7.4	4.59	3.16
GCD-N	1835	0.23	0.5	10.40	9.38

GCD-AC : As Cast spheroidal graphite cast iron
GCD-AN : Annealed spheroidal graphite cast iron
GCD-N : Normalized spheroidal graphite cast iron

Table 2. Chemical compositions (Wt%)

재료	C	Si	Mn	P	S	Mg
GCD	2.99	2.00	0.30	0.08	0.05	0.02

GCD : Spheroidal graphite cast iron

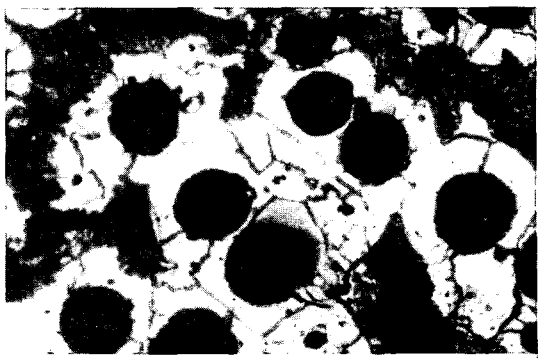

Photo 1. Micrograph of spheroidal graphite cast iron (As Cast, 150 X)

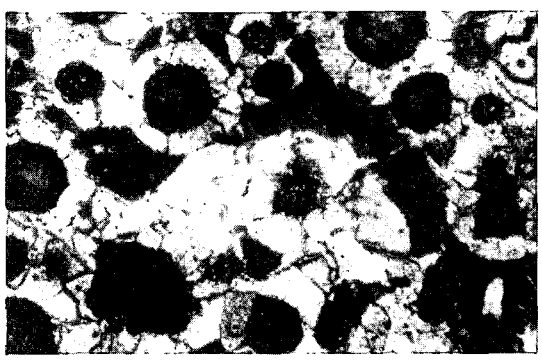

Photo 2. Micrograph of spheroidal graphite cast iron (Annealed, 150 X)

2-3 Data 처리

Date처리의 목표는 하중과 변형에 따른 AE Peak의 통계량의 결정이다. 각 Peak는 Pre-set Threshold를 넘는 양으로 매 초당 누적되어 GPIB 인터페이스를 통해서 컴퓨터로 전송된다. 그와 동시에 변위와 하중이 A/D 변환기를 통해서 Data가 컴퓨터로 전송된다.

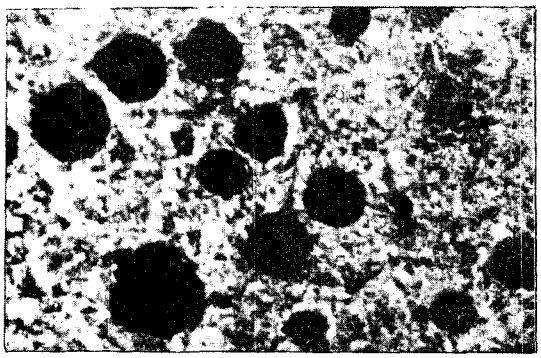

Photo 3. Micrograph of spheroidal graphite cast iron (Normalized, 150 X)

이 전송된 Date는 RAM에 저장되고 다시 컴퓨터는 Ready 상태가 되어서 Talker인 크래킹 모니터의 AE Data와 하중과 변위를 읽을 준비가 된다.

A/D 변환기는 channel 사이의 multiplexing time이 9μs이므로 111KHz의 주파수 범위까지 변환이 가능하며, quantization level이 256이므로 ±5V의 범위 내에서 39mV의 quantization level gap으로서 8bit로 동작된다.

Data 처리의 종료는 크래킹 모니터의 스위치를 내림으로서 GPIB의 동작을 멈추게 하고, B-ASIC 프로그램에 의해서 RAM의 Data를 디스크에 저장한다. 프로그램의 첫번째 단계는 GPIB를 구동하는 것이고 그와 동시에 A/D변환기에서 하중과 변위의 값을 읽고 읽혀진 Data를 RAM에 기록하는 단계이다.

두번째 단계는 GPIB의 Off 동작에 의해서 에러를 발생시켜 RAM에 저장된 Data를 읽어서 디스크에 순차화일(Sequential file)로 저장하는 단계이다.

세번째 단계에서는 저장된 Data를 출력할 수 있고, 또한 여러가지의 변수로 Date를 정리하여 선택적으로 Plot 하는 단계이다.

프로그램의 흐름도를 그림 4에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1 As Cast한 구상화 흑연주철

전 장에서 설명한 실험방법으로 Extensometer의 표점 길이를 50mm로 하여 인장시험을 실시하였으며, 실험결과는 다음과 같다.

그림 5는 실험중에 X-Y 기록계에 아나로그 신호에 의해서 그려진 하중-변위 곡선과 실험후 컴퓨터에 수록된 하중과 변위 Data에 의해서 그려진 곡선을 조합하여 나타낸 그림으로, 아나로그 신호에 의한 선도에서는 소성부의 곡선이 연속적이나 디지탈신호에 의한 그림에서는 변위가 1.75mm이상의 변형부에서 하중이 어떤 진폭을 갖는다. 이것은 상용 X-Y 기록계가 입력신호의 상한치가 5Hz 정도인 반면에 컴퓨터가 자료를 읽을 때 Digitizing 속도가 50KHz 정도로 자료를 읽음으로써 나타나는 현상이다. 또한 이 현상은 주철 등과 같이 비균질재가 외력을 받아 변형할 때 초기에는 안정된 변형을 하고, 어떤 일정한 변형을 한 후 구상흑연이 절단되면서 기지조직 내에 발생한 미시크랙과 빠른 속도로 연결되면서 파괴되는데 그 원인이 있다고 생각된다.

그림 5에서 0.2%Offset 방법으로 항복하중을 결정하면 260N이다.

그림 6은 작용하중의 증가에 따라 AE 발생량을 나타낸 것으로, AE 발생량은 초기 80개 정도에서 작용하중의 증가에 따라 점차 증가하여 항복하중(260N) 근방에서 최대가 된 후, 급격히 감소하다가 하중이 306N 이후에서 다시 증가하는 양상을 띄고 있다.

즉, 하중-변위 곡선의 직선부의 상한계점인 117N 이전에서도 AE가 발생이 되고 있으며, 순수 탄성부에서도 AE 발생량은 점차 증가된다.

그림 7은 작용하중의 증가에 따라 누적한 AE 발생량을 나타낸 것으로 곡선의 기울기가 하중

-변위 곡선의 직선부의 상한계점인 117N에서 변화되며, 이 점을 소성변형 시작점으로 보면 ASTM 규정에 따라 구한 항복값보다 대체적으로 55% 정도 낮다. 이것은 Mirable의 연구결과와 거의 일치한다.(19)

그림 8은 AE 발생량을 진폭을 8등급으로 나누어 변위의 증가에 따라 나타낸 그림으로 작은 진폭의 AE와 큰 진폭의 AE가 발생되고 있다.

한편 하중-변위 곡선인 그림 5에서 하중의 진폭을 동반하면서 변형거동이 시작되는 변위(1.75mm) 이후 0.2V와 1.2V 진폭 수준의 AE 발생량이 급격하게 증가됨을 알 수 있다.

그림 9는 변위의 증가에 따라 AE 발생량을 누적하여 나타낸 그림으로 변위 초기에서 누적한 AE 발생량은 급격히 증가하며, 항복하중 전후로 가공경화에 의해서 다소 발생량이 감소하다가 다시 증가하는 양상을 보여준다.

3-2 아니일링한 구상화 흑연주철

전장에서와 같은 방법으로 Extensometer의 표점길이를 25mm로 하여 인장시험을 실시하였으며 실험결과는 다음과 같다.

그림10은 아니일링한 재료의 하중-변위곡선으로 아나로그신호에 의한 X-Y 기록계의 그림과 컴퓨터에 입력된 Data에 의한 디지탈신호에 의해서 실험조합하여 그려진 그림이다.

아나로그와 디지탈신호로 그려진 하중-변위 곡선을 비교하여 보면 As Cast의 경우와 유사하게 작용하중이 1.2mm의 변위에서부터 어떤 진폭을 갖는다. 이 현상에 대해서는 후에 고찰하겠다.

그림10에서 ASTM에서 규정된 0.2% Offset 방법으로 항복하중을 추정하면 224 N이다.

그림11은 작용하중의 증가에 따라 AE발생량을 나타낸 것으로 As Cast한 재료인 그림 6과 다른 양상을 띄고 있다. 즉 AE 발생량이 초기에서부터 하중-변위 곡선의 직선부의 상한계점인 82N까지도 계속 발생하고 있으며 0.2%Offset 항복하중(224 N)까지 완만하게 증가하다가 이 점을 지나면서 다소 감소하여 하중이 280 N에서 최소가 되고, 이 후 AE 발생량의 증가량은 As Cast 한 것에 비하여 작게 된다. 또한 항복하중을 지난 후의 AE 발생량의 감소량은 As Cast 때에 비하여 작다. AE 발생량의 차이가 많지 않은 이유는 기지조직이 훼라이트로 변화되어서 연성을 갖게되며 AE 발생 수가 최소가 되는 하중까지 내부조직 상으로 큰 변화가 없는 까닭으로 판단된다.

그림12는 작용하중의 증가에 따라 누적된 AE 발생량을 나타낸 것으로 하중-변위 곡선의 직선부의 상한계점인 82N부터 기울기의 변화가 나타나며, 이 점을 소성변형 시작점으로 보면 0.2% Offset 항복하중에 비해서 67% 정도의 차이가 있으며, AE 발생량이 가장 적은 280N 근방에서 누적된 AE 발생량이 급상승함을 알 수 있다.

그림13은 변위의 증가에 따라 AE 진폭을 8등급으로 나누어 AE 발생량을 나타낸 것으로 대체적으로 As Cast의 경우와 유사한 경향을 띠고 있다. 즉, 작은 진폭의 AE와 함께 큰 진폭의 AE도 발생하고 있다.

그림14는 변위의 증가에 따라 누적된 AE 발생량을 나타낸 그림으로 초기 변형단계에서 급진적으로 AE가 발생되나 0.2% Offset 항복변위(0.24mm) 이후 AE 발생은 가공경화에 따라 다소 감소하며 하중이 진폭을 갖고 변형하는 변위 1.25mm 이후 점차 증가하나 As Cast 한 상태보다 작게 증가된다.

3-3 노르말라이징한 구상화 흑연주철

전 장에서 기술한 방법으로 Extensometer의

표점길이를 50㎜로 하여 인장시험을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

그림15는 컴퓨터에 수록된 디지탈신호에 의해서 그려진 하중-변위 곡선이다.

그림15를 그림5 및 10과 비교해 보면 노르말라이징한 재료가 As Cast나 아니일링한 재료에 비해 연신량이 매우 작음을 알 수 있으며, 따라서 취성이 큼을 알 수 있고, 0.2% Off-set 한 항복강도는 349N이다. 또한 그림15에서도 알 수 있는 바와 바와 같이 파단시까지 하중의 진폭은 나타나지 않는다.

그림16은 하중의 증가에 따라 AE 발생량을 나타낸 그림으로, 하중-변위 곡선의 직선부의 상한계점인 189N 정도까지 AE 발생량이 25정도로 거의 일정하다가 그 후 점차 증가하여 0.2% 항복하중인 349N 이후 가공경화에 의하여 급격히 감소하고, 367N 이후 다소 증가한다.

그러나 As Cast나 아니일링한 구상화 흑연주철은 작용하중 초기에 발생한 AE량 미만으로 AE 발생량은 감소한 반면에 노르말라이징한 구상화 흑연주철은 AE 발생량의 감소가 초기 발생량보다 크다.

이는 가공경화지수가 노르말라이징한 것이 작아서 나타나는 현상으로 판단된다.

그림17은 하중의 증가에 따라서 누적한 AE 발생량을 나타낸 그림으로서 하중-변위 곡선의 직선부의 상한계점인 189N 정도에서 직선의 기울기가 변화되고 다시 점차적으로 증가하다가 0.2% Offset 항복하중 349N 정도에서 다소 완만하게 증가하는 양상을 보여주고 있다. 이 두 점을 비교해 볼 때 소성변형이 시작되는 189N은 0.2% Offset 항복하중에 비하여 46% 정도 낮다.

그림18은 AE 발생량을 진폭의 크기에 따라서 8등분해서 변위증가에 따라서 나타낸 것이다. As Cast나 아니일링한 재료의 실험 결과인 그림8과 13을 본 결과와 비교하여 보면 노르말라이징한 재료는 As Cast와 아니일링한 재료의 AE 거동과 달리 1.2V 이상의 높은 수준의 AE 발생이 작고 0.2~0.6V 수준의 AE가 주로 발생하고 있다.

그림19는 변위의 증가에 따라서 AE 누적량을 나타낸 그림으로 같은 변위량에서 그림9와 14에 나타낸 Aa Cast나 아니일링한 구상화 흑연주철보다 누적된 AE 발생량이 많다.

3-4 실험결과에 대한 고찰

디지탈신호에 의해서 그려진 하중-변위 곡선 중에서 구상화 흑연주철 중 노르말라이징하여 기지조직이 비교적 인성이 큰 퍼얼라이트로 된 것을 제외하고는 파괴하중 가까이 도달하면서 하중이 진폭을 가지고 변동하는 양상을 확인하였다. 하중이 진폭을 갖고 증가하는 양상은 파단에 가까워질 때 재료 내의 미시크랙의 형성 및 합체에 따라 컴프라이언스의 변동이 있었음을 의미하고 있다.

하중 증가에 따른 AE 발생량은 As Cast, 아니일링한 것은 낮은 전압 수준과 높은 전압 수준의 AE가 발생하였으며, 기지조직이 퍼얼라이트로 되어있는 노르말라이징한 것은 주로 낮은 전압 수준의 AE가 발생하였다.

구상화 흑연주철에서는 앞에서 기술한 바 와 같이 As Cast 및 아니일링한 재료는 낮은 전압과 높은 전압 수준의 AE가 발생하였으며 이는 에너지방출이 작은 변형 내지 미시 크랙의 발생에 의한 AE와 에너지 방출이 큰 재료 내의 미시적인 파손이 동시에 일어난다고 생각된다.

즉, As Cast한 경우는 흑연의 파손외에 기지조직 내의 미시적인 크랙의 생성 및 합체에 의해서 흑연과 흑연이 연결되어 가면서 파괴에 이르는 것으로 생각되며, 아니일링한 것은 흑연과 기지조직 사이에 딤플이 생기고 기지조직 내

의 미시조직에서도 미소딤플이 발생하여 최종적으로 흑연과 흑연의 연결에 의해서 파손에 이른다. 그러나 노르말라이징한 것은 흑연의 파손과 기지조직인 퍼얼라이트 내의 미소크랙이 연속적으로 일어나 흑연과 흑연이 미시조직을 통해서 서서히 연결되어 나아간다고 볼 수 있다.

본 실험에서 실험한 재료에 대해서 AE 발생을 살펴보면 공통적으로 비례한도까지 일정 수준의 AE가 발생하거나 또는 AE 발생량이 약간 증가하는 것으로 나타났다.

시험후 파면을 전자현미경으로 관찰한 파면사진을 사진 4, 5, 6에 각각 나타내었다.

구상화 흑연주철중 아니일링한 구상화흑연주철의 파면사진 4에서 흑연은 파손이 안된 형상을 갖고 있고 이를 기점으로 큰 딤플을 형성하고 있으며 기지조직은 작은 딤플로 이루어져 있다. 이로부터 구상흑연을 기점으로 기지조직

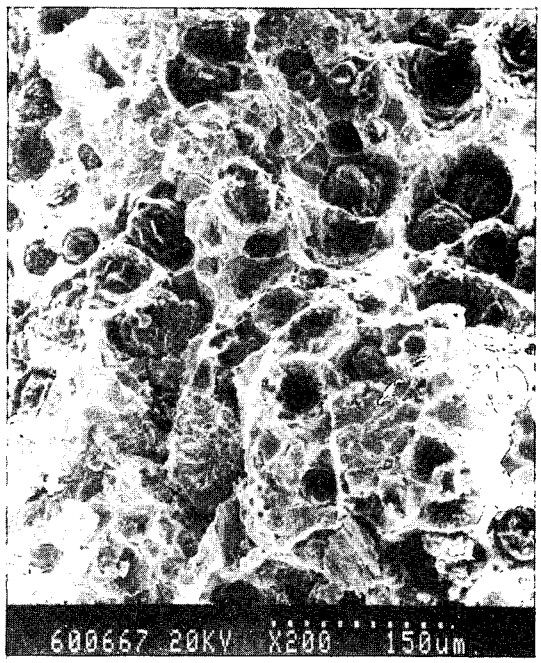

Photo 5. Scanning electron micrograph of fractured surface by tension test for spheroidal graphite cast iron (Annealed)

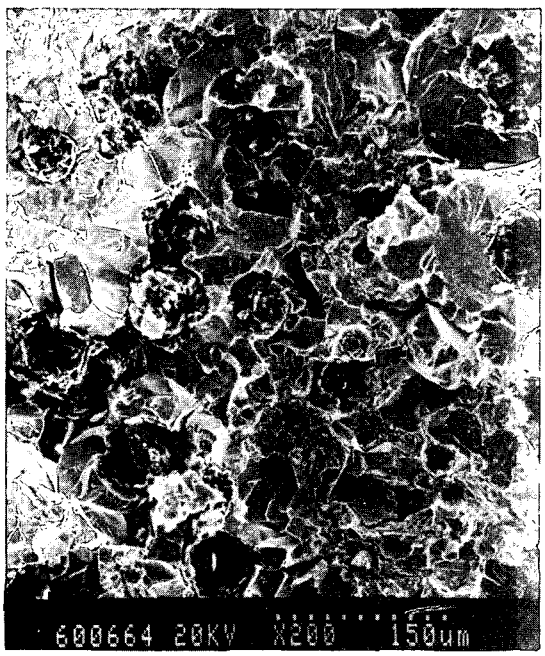

Photo 4. Scanning electron micrograph of fractured surface by tension test for spheroidal graphite cast iron (As Cast)

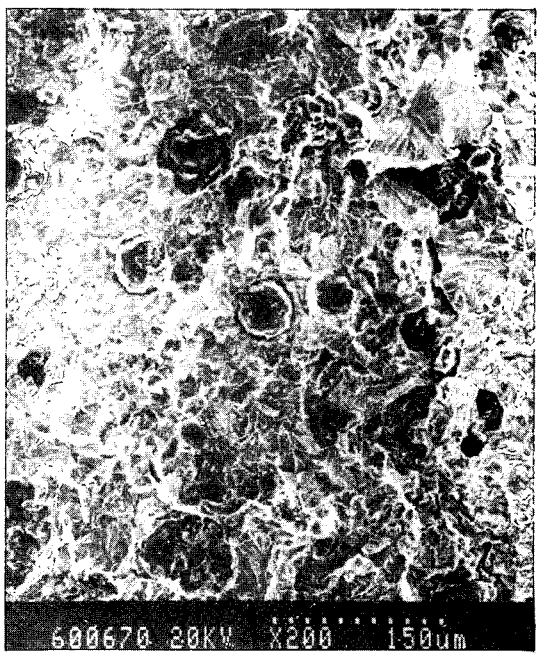

Photo 6. Scanning electron micrograph of fractured surface by tension test for spheroidal graphite cast iron (Normalized)

에서 발생한 미소딤플을 통하여 상호 연결되어서 파단에 이르렀음을 알 수 있으며, As Cast한 경우의 파면사진 5에서는 흑연은 다소 파손되어 있고 복잡한 단계를 이루는 미소벽개면과 흑연 주변의 비교적 넓고 평탄한 파면으로 되어있고, 노르말라이징한 사진 6에서 흑연은 절단되어 있으며 기지조직은 미시크랙에 의한 것으로 보이는 복잡한 아벽개파면을 형성하고 있다. 따라서 높은 AE가 발생하는 것은 아니일링이나 As Cast 한 구상화 흑연주철에서 흑연과 흑연 사이를 미시크랙이나 미소딤플의 연결에 의하여 합체할 때 발생되는 것이며, 낮은 진폭의 AE는 흑연과 주위의 기지조직과의 이격에 의한 기공의 형성 및 기지조직 내의 미시크랙과 미소딤플에 의한 것임을 파면사진을 통하여 확인하였다.

4. 결 론

본 실험적 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 인장시험시 구상화 흑연주철과 같이 결함으로 생각할 수 있는 이물질을 내포하고 있는 재료에서는 낮은 진폭의 AE와 높은 진폭의 AE가 동시에 발생하며, 하중-변위 곡선의 최종 부분에 가서는 하중이 진폭을 갖고 변형함 을 확인하였다. 반면 낮은 진폭 수준의 AE가 주로 발생할 때는 이러한 하중 진폭이 없음을 실험적으로 확인하였다.

2) 하중-변위 곡선의 비례한도 하중까지도 AE는 발생하며 AE 발생량이 최고치에 도달한 후 급격히 감소하는 점이 0.2% Offset 항복하중과 거의 일치함을 확인하였다.

3) As Cast 한 경우는 흑연의 파손외에 기지조직 내의 미시적인 크랙의 생성 및 합체에 의해서 흑연과 흑연이 연결되어 가면서 파괴에 이르며, 아니일링한 것은 흑연과 기지조직 사이에 딤플이 생기고 기지조직 내의 미시조직에서도 미소딤플이 발생하여 최종적으로 흑연과 흑연의 연결에 의해서 파손에 이른다. 그러나 노르말라이징한 것은 흑연의 파손과 기지조직인 퍼얼라이트 내의 미소크랙이 연속적으로 일어나 흑연과 흑연이 미시조직을 통해서 서서히 연결되어 파손에 이름을 AE 발생량과 파면해석을 통하여 확인하였다.

4) 이상과 같은 실험결과와 AE 발생양상에 대한 해석으로부터 Data 처리장치가 없는 기본 AE 계측장비에 국내에 널리 보급된 8비트 마이크로 컴퓨터 (APPLE Ⅱ)를 연결하여 실험중 발생하는 AE Data를 처리하는 본 연구에서의 방법은 큰 무리없이 실험실에서 AE 기술을 이용한 On-line 실험 연구에 적용할 수 있다고 본다.

참 고 문 헌

1) R. G. Liptai, D. O. Harkis and C. A. Tatro, "An introduction to acoustic emission," ASTM STP 505, 1971, pp. 3-8

2) J. C. Spanner, "Material research applications", Acoustic Emission Techniques and Applications, Index Publishing Company, 1974. pp. 37-74.

3) Bentley, "A review of acoustic emission for pressurized water reactor applications", NDT Intrn., DEC., 1981. pp. 329-335.

4) S. P. Ying "The use of acoustic emission for assessing the integrity of a nuclear reactor pressure vessel",

NDT Intrn., Aug., 1979, pp. 175-179.

5) M. P. Kelly and R. J. Schlamp, "Acoustic emission preservice inspection of Calvert Cliffs unit 2 nuclear power plant," Tech. Rept., DE 76-7, DUNEGAN/ENDEVCO, 1976.

6) A. A. Pollosic and J. R. Wadon. "Application of acoustic emission as an on-line monitoring system for neclear reactors", Tech. Rept, DE 77-4, DUNEGAN/ENDEVCO, 1977.

7) C. D. Bailey, "Acoustic emission for in flight monitoring on aircraft structures", Mater. Eval., 1976, pp. 165-171.

8) P. H. Hutton, J. R. Skorpik and R. U. Kurtz, "Acoustic emission for continuous surveillance of various commercial structures", PNL-SA-10191, Pacific Northwest Labor., Mar, 1982.

9) J. G. Rawlings, "ASME acoustic emission code status", Acoustic Emission, R. W. Nichols ed., Applied Science Pub. LTD, 1976. pp. 103-111.

10) D. L. Parry, "Industrial application of acoustic emission analysis technology", ASTM STP 571, 1975, pp. 150-183.

11) M. Arrington, "Some industrial application of acoustic emission monitoring", NDT Intrn., Jun., 1978, pp. 117-119.

12) A. A. Pollock, "Acoustic emission techniques as a means of preventing service failure", Tech. Rept., DE 78-3, 1978.

13) D. O. Harris and H. L. Dunegan, "Application of acoustic emission to industrial problems", NDT-Destr. Testing, Jun., 1974, pp. 134-144.

14) W. D. Feist, "Acoustic emission inspection of aircraft engine turbin blades for intergranular corrosion", NDT Intrn., Aug., 1982. pp. 197.

15) K. Umezawa. T. Ajma and H. Houjoh, "An acoustic methed to predict tooth surface failure of inservice gears," NDT Intrn., Vol. 16, No. 4, 1983., pp, 201-203.

16) C. A. Tatro, "Experimental considerations for acoustic emission testing," Mater. Research and Standards, 1971. pp. 17-20.

17) "Standard methods of tension testing of metallic materials," Annual Book ASTM Standards, E 8-85, 1985.

18) M. Mirabile, "Acoustic emission energy and mechanisms of plastic deformation and fracture," Nondestructive Testing, Apr., 1975, pp. 77-85.

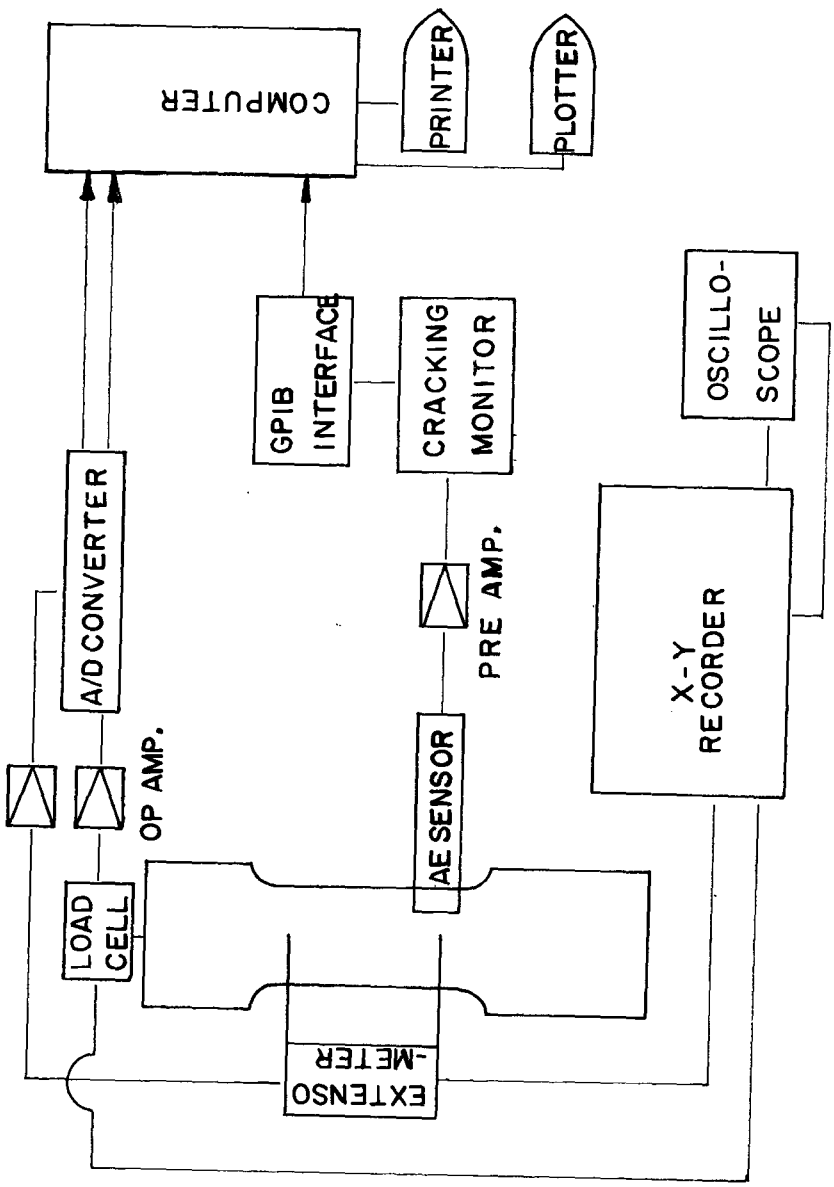

Fig. 1 Block diagram of instrumentation for acoustic emission analysis

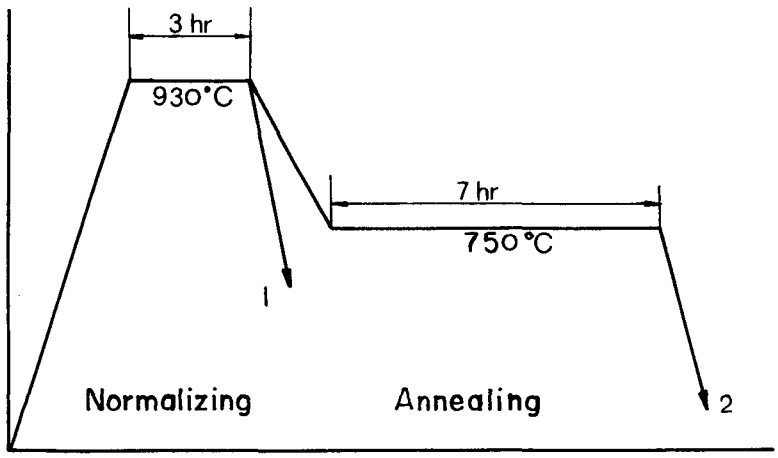

Fig. 2 Heat treatment process of specimen for spheroidal graphite cast iron

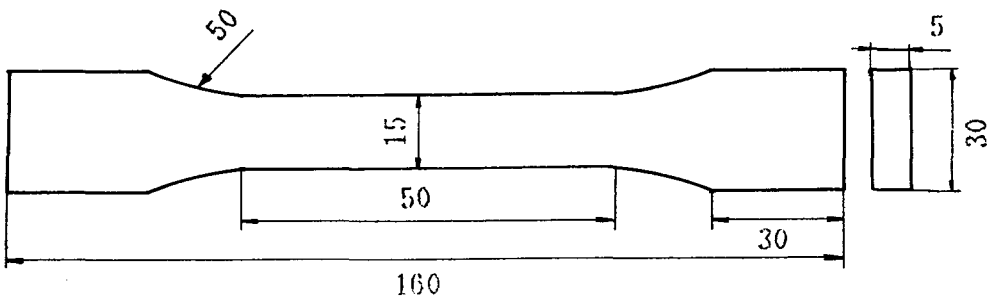

Fig. 3 Configuration of tension specimens (unit, mm)

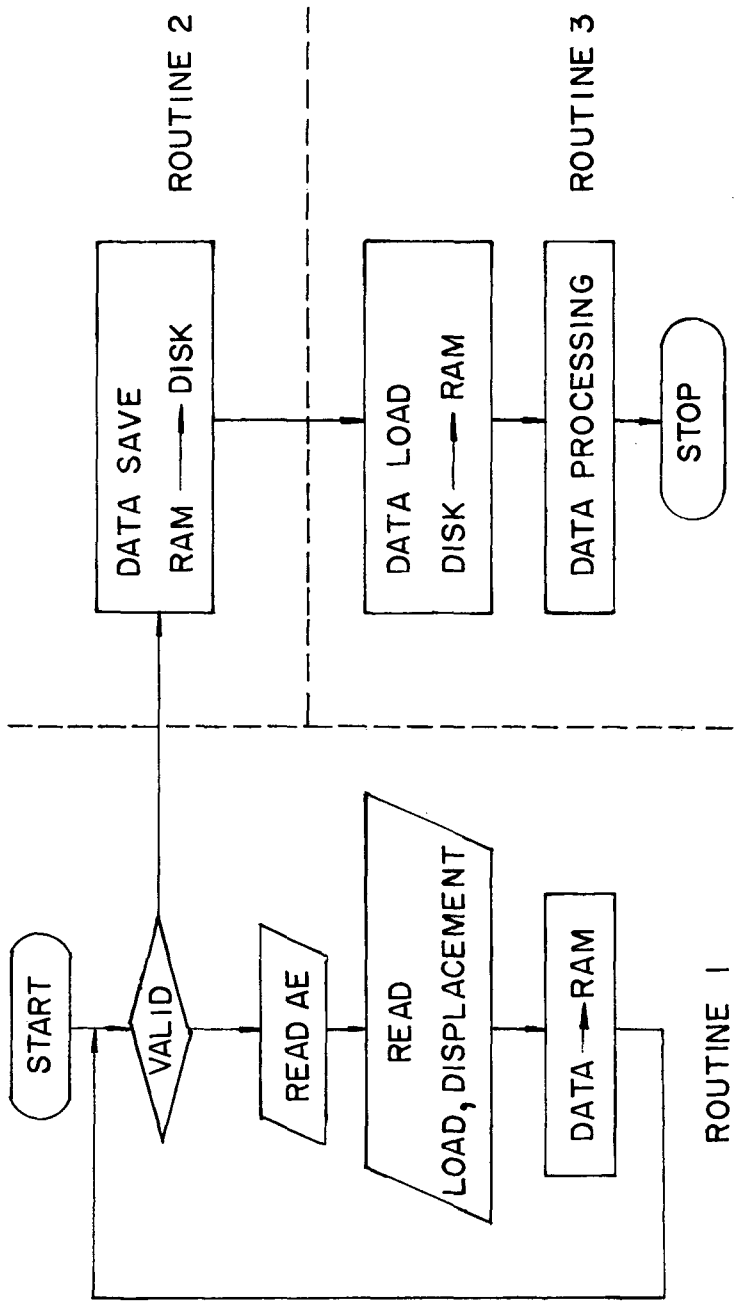

Fig. 4 Flow chart of the measuring program

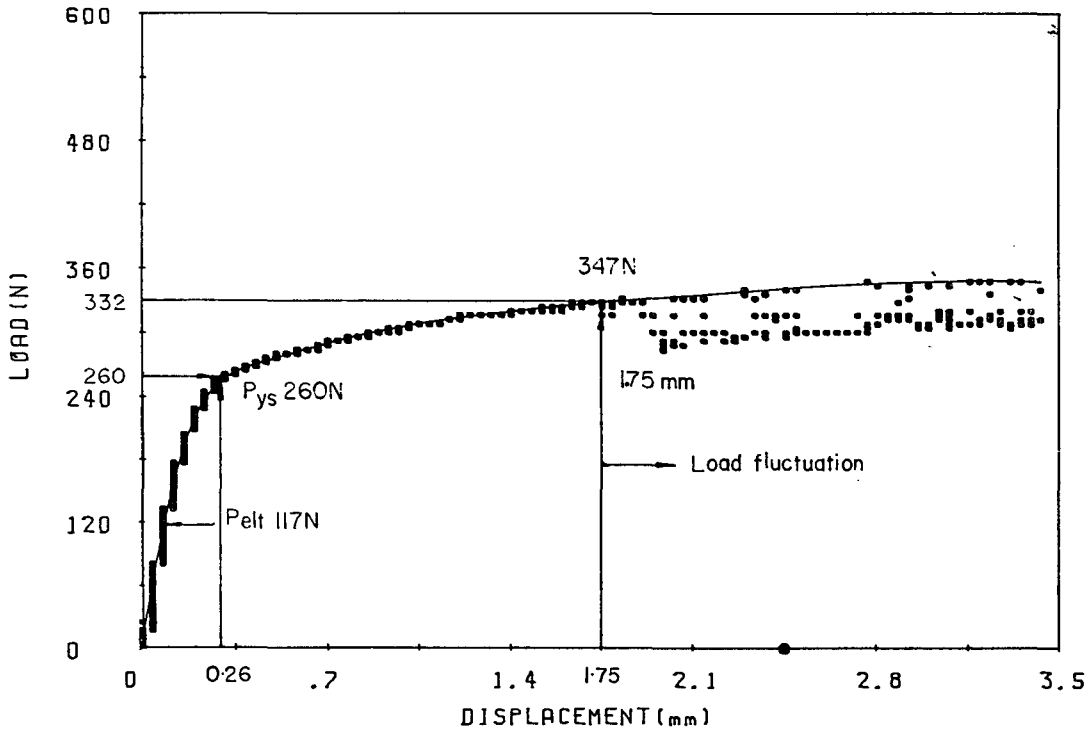

Fig. 5 Load vs. displacement by tension test for spheroidal graphite cast iron (As Cast)

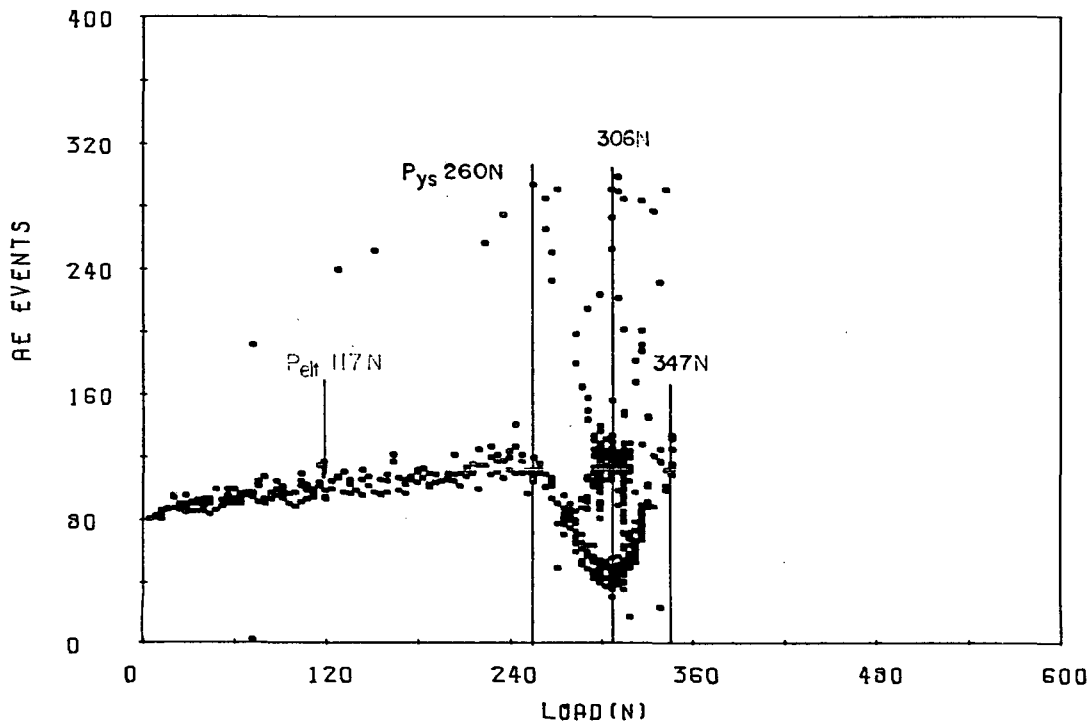

Fig. 6 Load vs. AE events by tension test for spheroidal graphite cast iron (As Cast)

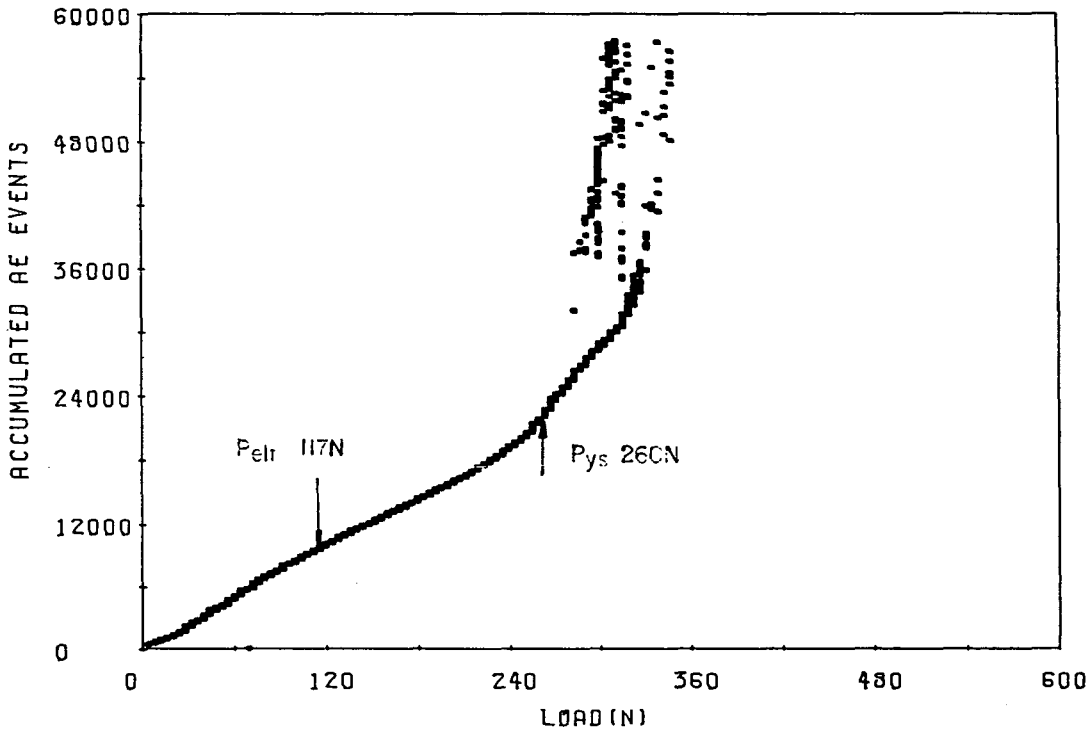

Fig. 7 Load vs. accumulated AE events by tension test for spheroidal graphite cast iron (As Cast)

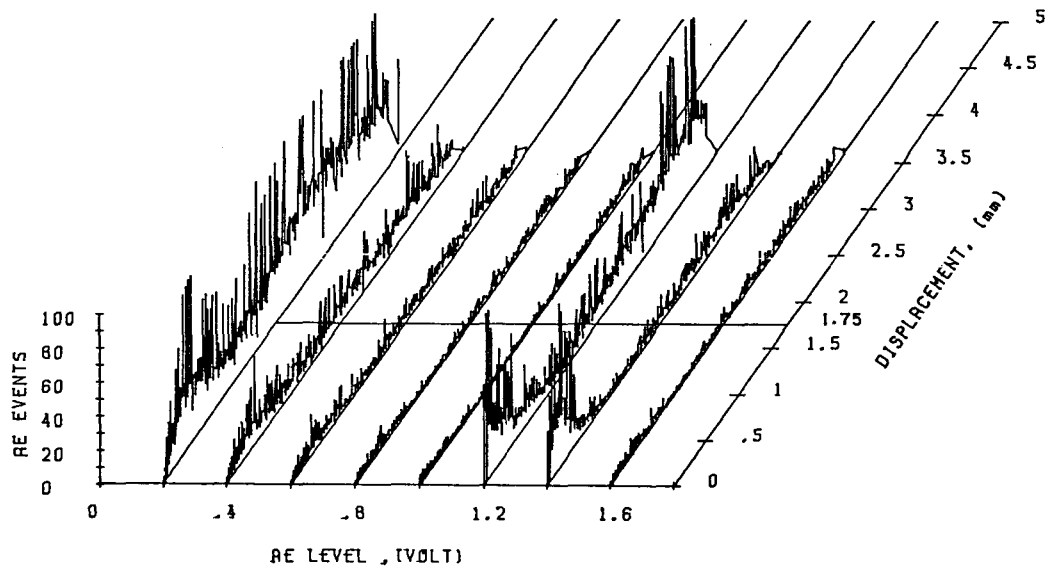

Fig. 8 Distribution of AE amplitude vs. displacement by tension test for spheroidal graphite cast iron (As Cast)

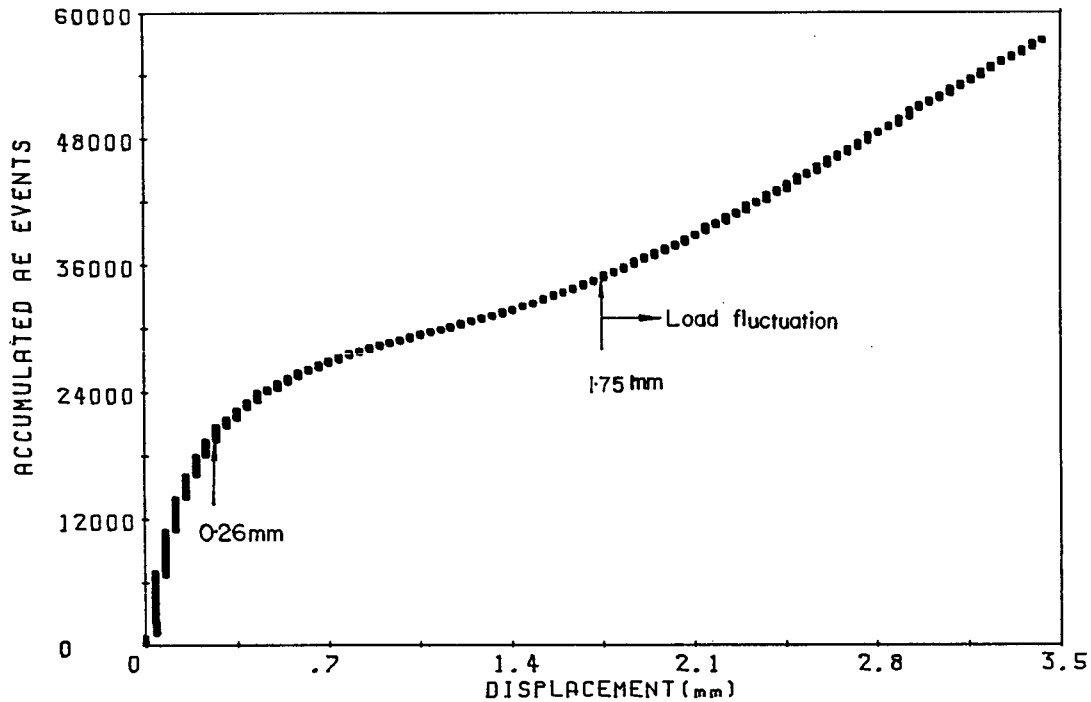

Fig. 9 Displacement vs. accumulated AE events by tension test for spheroidal graphite cast iron (As Cast)

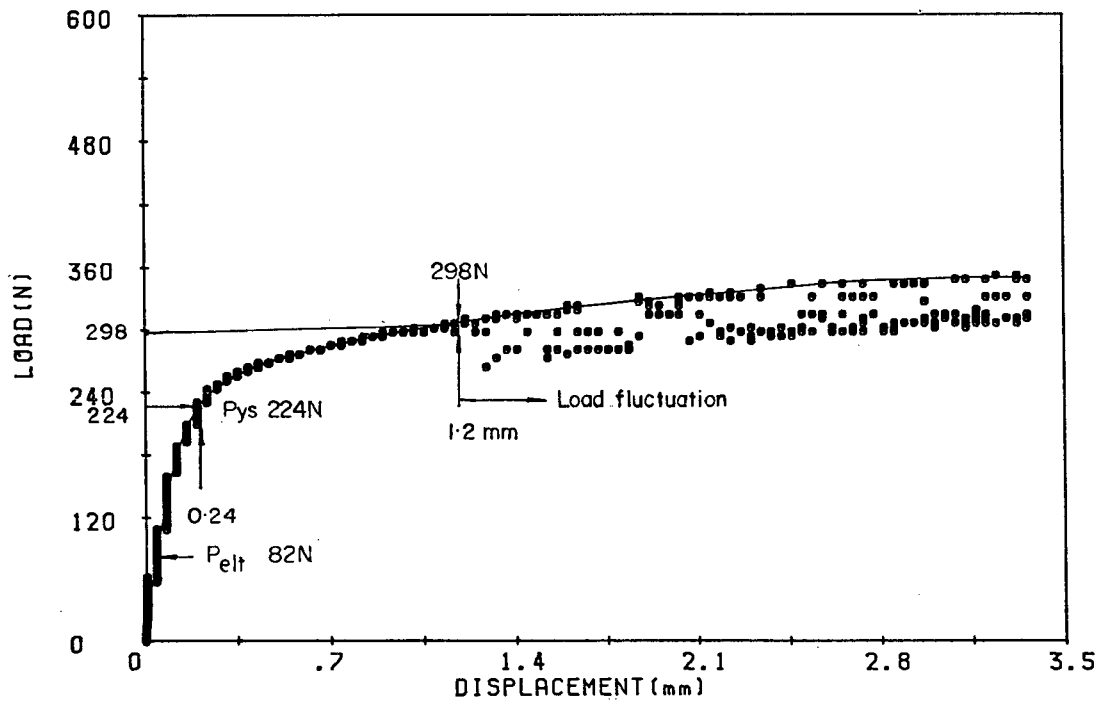

Fig. 10 Load vs. displacement by tension test for spheroidal graphite cast iron (Annealed)

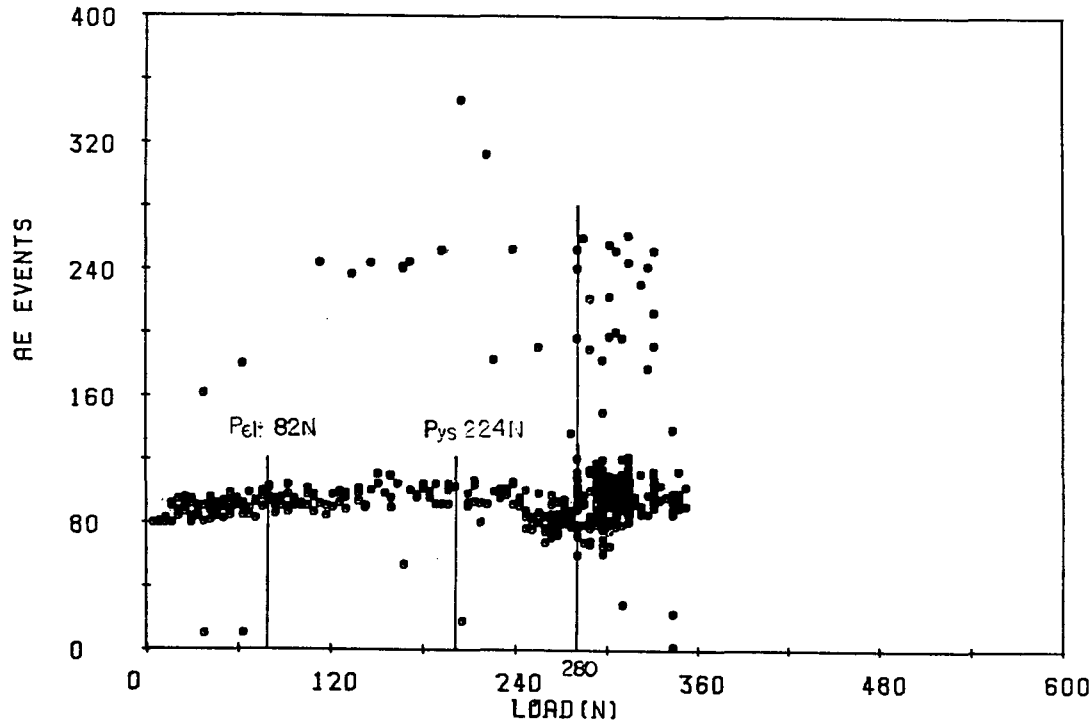

Fig. 11 Load vs. AE events by tension test for spheroidal graphite cast iron (Annealed)

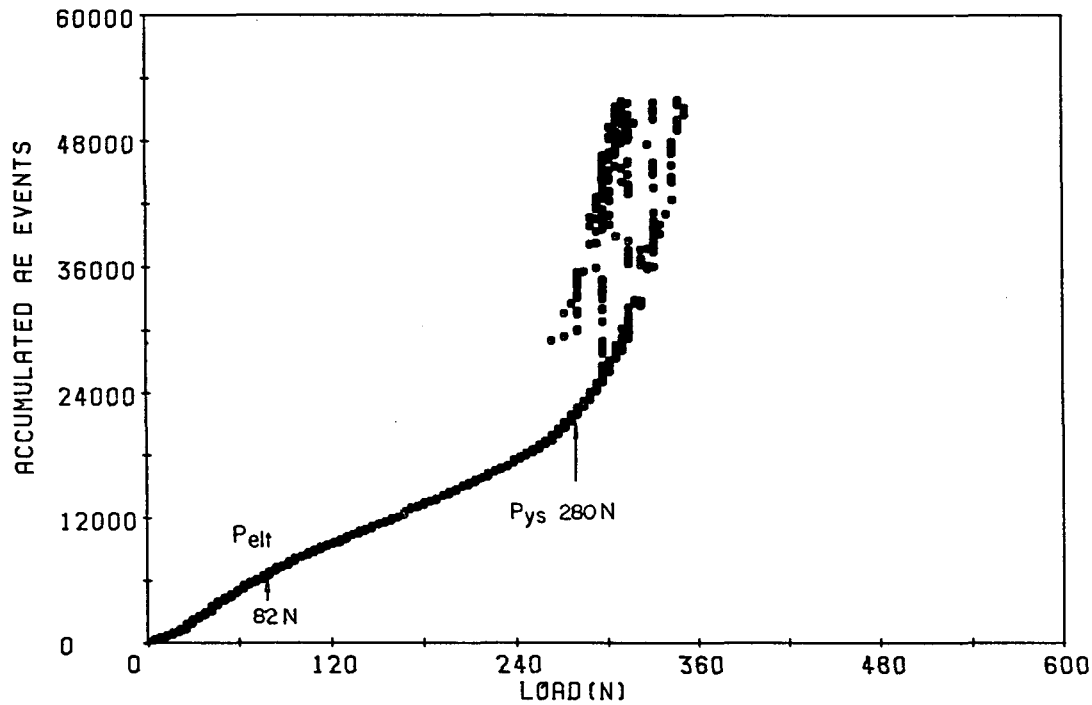

Fig. 12 Load vs. accumulated AE events by tension test for spheroidal graphite cast iron (Annealed)

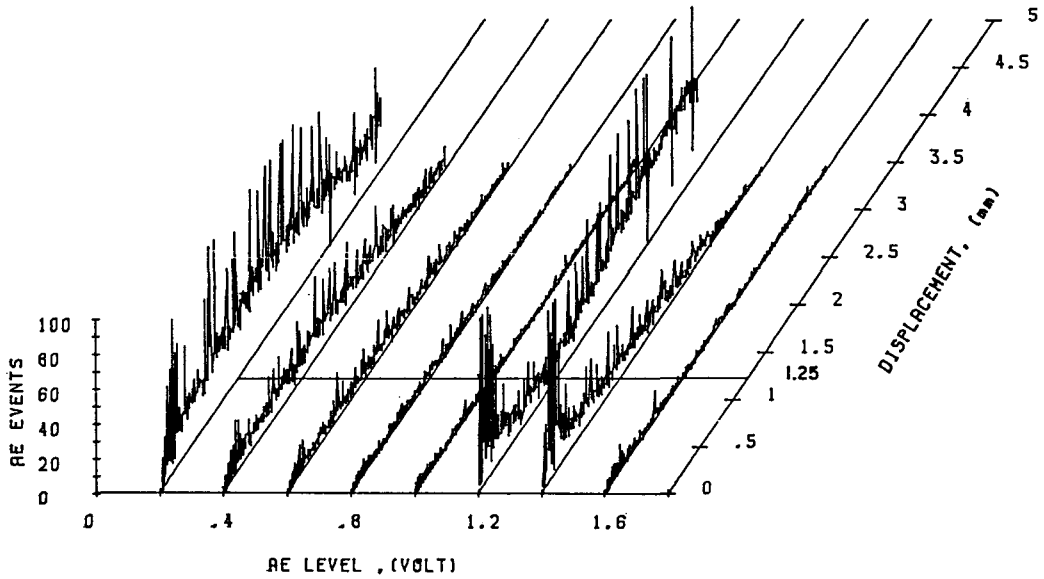

Fig. 13 Distribution of AE amplitude vs. displacement by tension test for spheroidal graphite cast iron (Annealed)

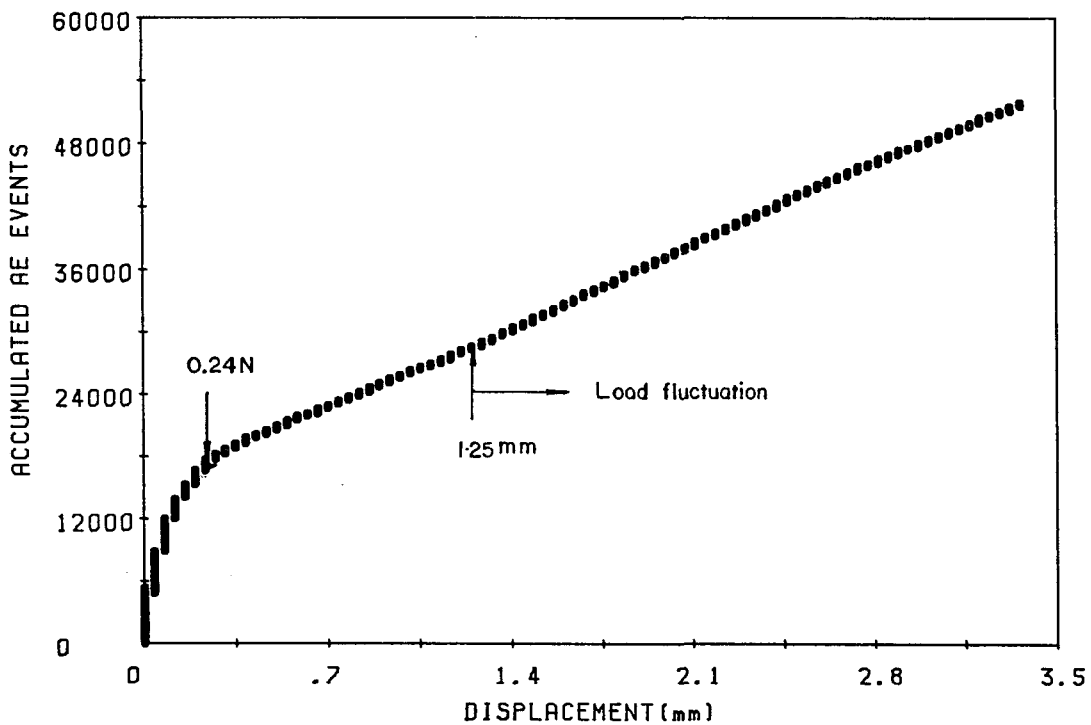

Fig. 14 Displacement vs. accumulated AE events by tension test for spheroidal graphite cast iron (Annealed)

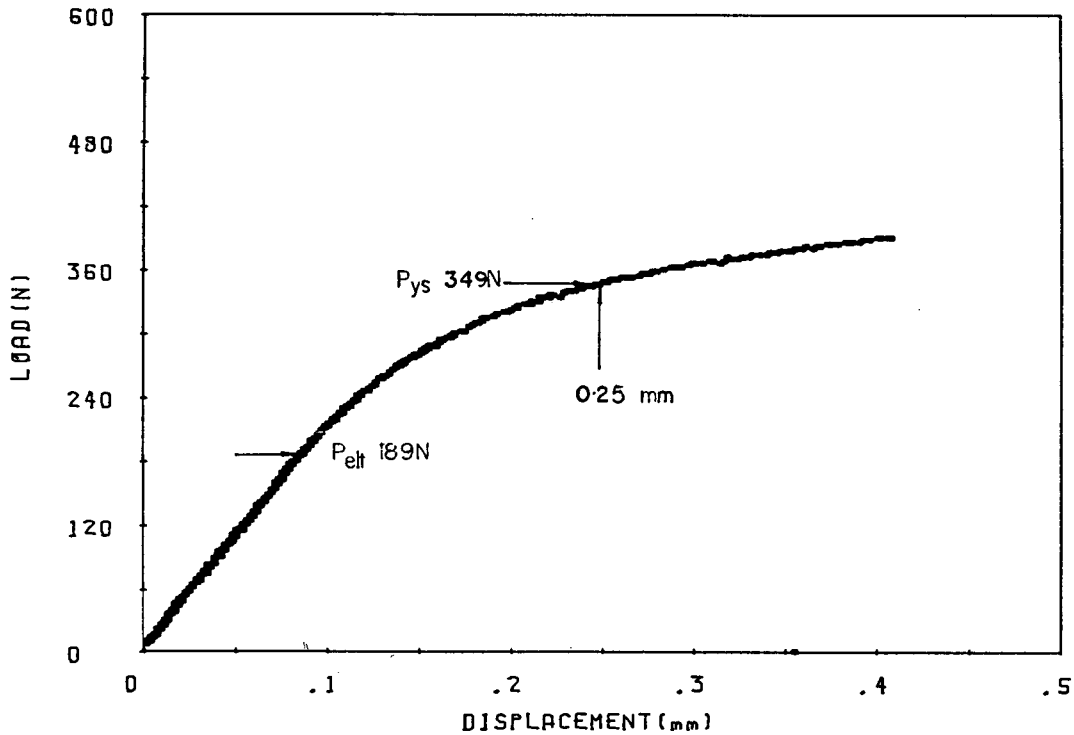

Fig. 15 Load vs. displacement by tension test for spheroidal graphite cast iron (Normalized)

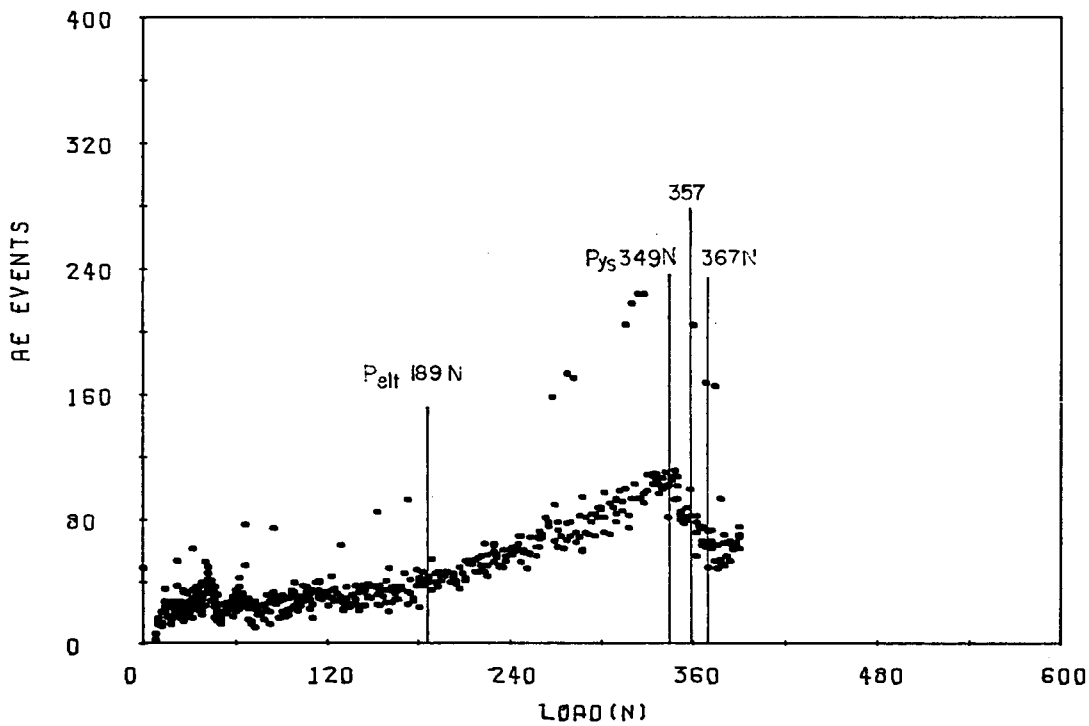

Fig. 16 Load vs. AE events by tension test for spheroidal graphite cast iron (Normalized)

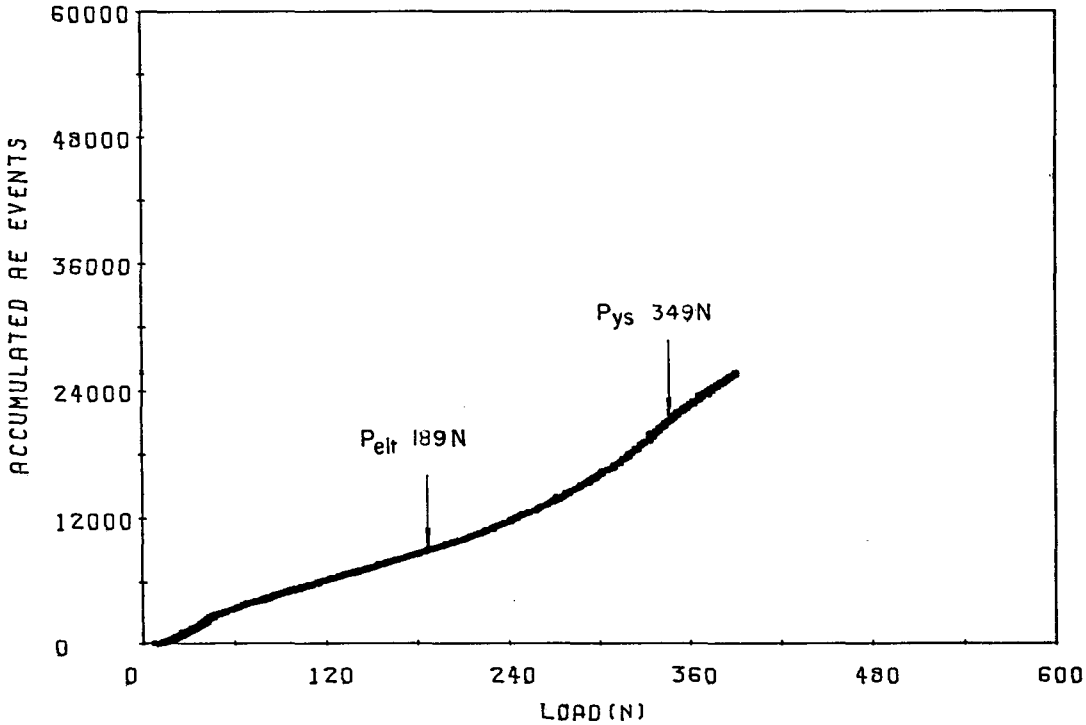

Fig. 17 Load vs. accumulated AE events by tension test for spheroidal graphite cast iron (Normalized)

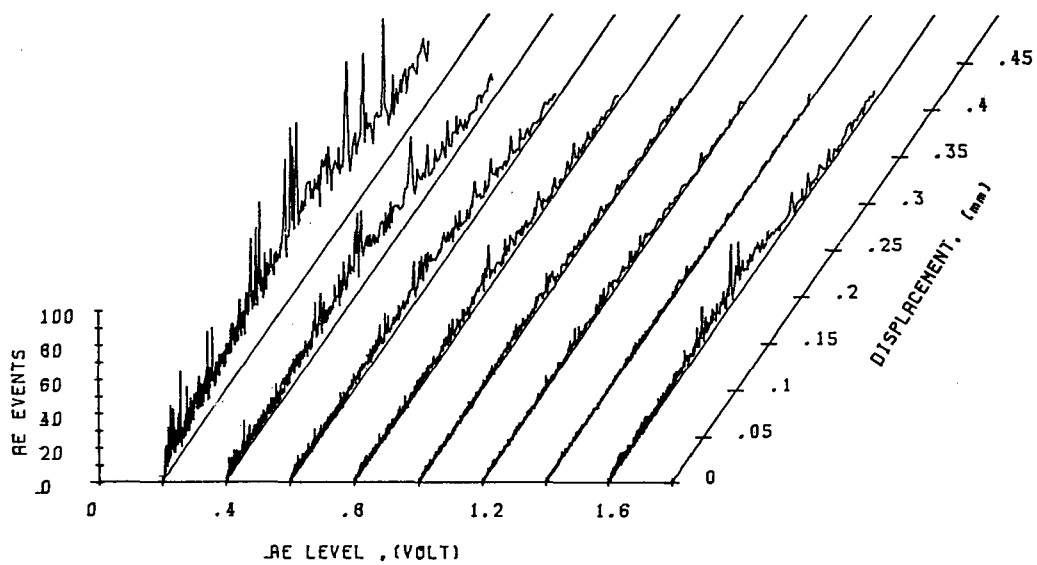

Fig. 18 Distribution of AE amplitude vs. displacement by tension test for spheroidal graphite cast iron (Normalized)

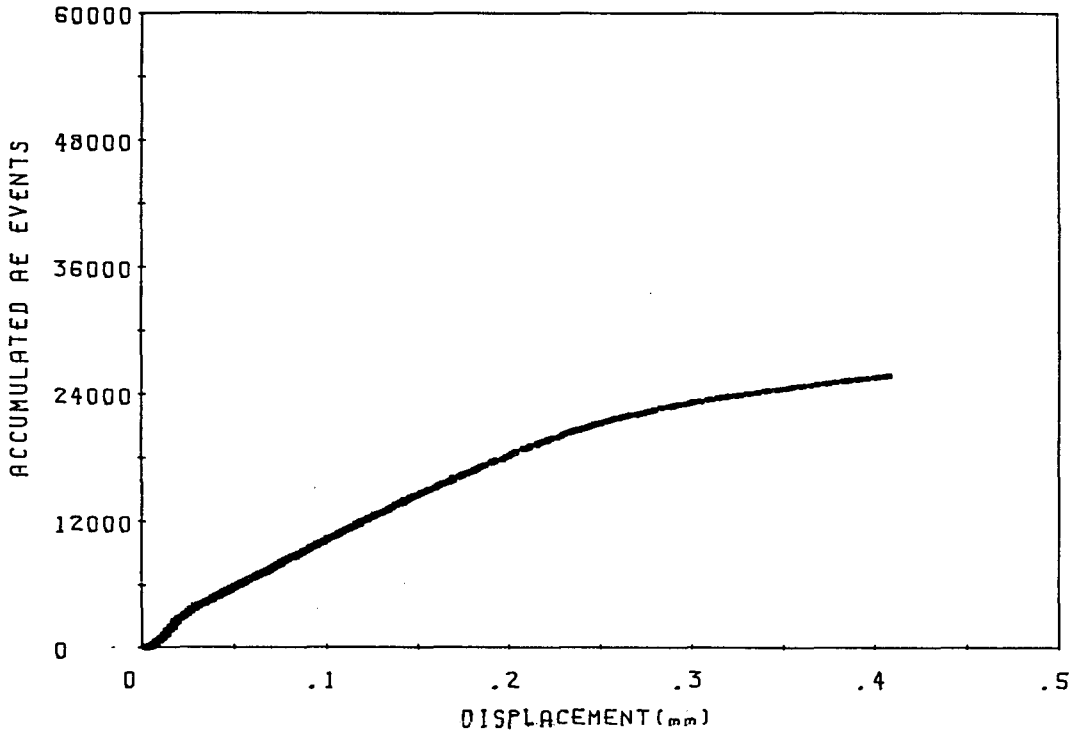

Fig. 19 Displacement vs. accumulated AE events by tension test for spheroidal graphite cast iron (Normalized)