

극저사이클 하중을 받는 구상흑연주철의  
초기균열성장에 관한 연구  
A Study on the Initial Crack Growth in Spheroidal  
Graphite Cast Iron under Extremely Low Cycle  
Loading

김민건\*      임복규\*\*      김동열\*\*\*  
Kim, Min-Gun      Lim, Bok-Kyu      Kim, Dong-Youl

Abstract

In this study, extremely low cycle fatigue tests were carried out under push-pull loading conditions using graphite cast iron (GCD). In order to clarify the fatigue fracture mechanism of GCD in an extremely low cycle fatigue regime successive observations of internal fatigue damage were performed.

The results obtained are as follows. (1) The process of extremely low cycle fatigue can be classified into three stages which are composed of the generation, growth and coalescence of microvoids inside materials. (2) In an extremely low cycle fatigue regime, microvoids originate from debonding of graphite-matrix interface

키워드 : 극저사이클피로, 균열, 피로파괴, 미소공동

Keywords : *extremely low cycle fatigue, crack, fatigue fracture, micro-void*

1. 서론

구상흑연주철은 저온 충격특성과 경제성, 내마모성, 감쇠능, 기계적 성질이 다른 재료보다 우수하여 주요한 기계구조용 부재로서 수요가 증가하고 있지만[1-5], 그 피로 특성에 관한 연구는 탄소강에 비교하면 매우 불충분하다.

최근 지진과와 같이 극소수회의 과대하중을 발생시키는 이른바 극저사이클 피로(Extremely Low Cycle Fatigue ; ELCF)[6-7]의 문제가 관심의 대상이 되고 있다. 소수회의 과대하중은 비록 지진과 같은 현상이 아니더라도 구조물에 가해질 요인은

많다. 구조물이 과대하중을 받게 되면 응력집중부에 대변형을 일으키게 되고, 이것이 반복되게 되면 극저사이클 피로의 독특한 파괴 양상을 보이게 된다. 그러나 이부분의 연구는 거의 이루어지지 않았으며, 특히 극저사이클 내에서 일어나는 파괴의 진행상황을 정량적으로 다룬 연구는 발견되지 않는다.

역사적으로 볼 때, 피로에 관한 연구는 주로  $10^4$  사이클 이상의 반복 응력을 받는 고사이클 파괴에 대한 연구였으나, 최근에는 비교적 높은 반복 응력 아래에서 짧은 수명을 나타내는 극저사이클 피로 파괴에 대한 관심도가 갈수록 증가하고 있다.[8] 이러한 극저사이클 파괴현상은 특히 핵발전소의 압력용기, 증기터빈과 발전소의 여러 형태의 구조물 내진설계 시 반드시 고려되어야 할 것이다.

1954년 콩코드 여객기가 취항되고 동년 1월과 4월에 걸쳐서 2대가 지중해 상공에서 추락하는 사고가 일어났다. 막대한 비용과 많은 연구진이 그

\* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수, 공학박사

\*\* 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과

\*\*\* 삼척대학교 정밀기계공학과 교수, 공학박사

원인을 조사한 결과, 비행기가 고공으로 승강이나 하강할 때 객실에 압력을 가하거나 제거함에 따라 생긴 응력의 반복 때문에 창문의 리벳 구멍에서 피로균열이 발생되고 그것이 진전하여 파괴된다는 것을 알았다. 이와 같이 반복수가 적은 영역에서 피로 파괴가 발생할 수 있다는 사실이 확인됨에 따라 갑자기 저사이클 및 극저사이클 피로가 주목받기 시작하였다.

그러나 표면에서 크랙이 발생하는 고사이클과는 달리 극저사이클 영역에서 발생하는 내부 크랙형 파괴는 피로손상부가 내부에서 진행되기 때문에 피로손상부분의 진행과정을 명확히 관찰하기가 상당히 곤란하다. 때문에 극저사이클 파괴기구에 관한 불명확한 부분은 아직도 많이 남겨져 있다.

본 연구에서는 극저사이클 영역에서 구상흑연주철의 내부크랙형 파괴과정을 정량적으로 검토하기로 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 구상흑연주철은 GCD 45제로서 화학성분은 Table 1에 나타내었으며, Table 2와 Table 3은 구상흑연주철의 기계적 성질과 재료 내부 흑연의 특성을 나타내주고 있다. Fig. 1은 시험편의 조직사진으로, 펄라이트와 페라이트가 혼재하는 조직이다. 시험편의 형상은 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이, 선반에서  $\phi 10\text{mm}$ , R20으로 가공한 후, 기계가공으로 인한 잔류응력을 제거하기 위해서,  $600^\circ\text{C}$ 에서 2시간 동안 풀림(Annealing) 처리하였다.

그 후에 가공한 시험편의 R부를 Emery-paper #80, #100, #220, #400, #600, #800, #1000, #1200을 사용하여 순차적으로 연마한 후,  $0.3\mu\text{m}$ 의 알루미늄분말가루 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )를 알코올에 혼합한 액체를 사용하여 경면(鏡面)상태로 연마하였다.

Table 1 Chemical composition (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Mg
GCD 45	3.75	3.0	0.15	0.03	0.015	0.04

Table 2 Conditions of heat treatment

Treatment Condition	$\sigma_Y$ (MPa)	$\sigma_{TS}$ (MPa)	$\delta$	$H_v$
Annealing, $600^\circ\text{C}$ , 2hr	316	443	23.8	221

Table 3 Characteristics of surface graphite

Treatment Condition	$D_{sg}(\mu\text{m})$	$H_{sg}(\%)$	$A_{sg}(\%)$	$N_{sg}(1/\text{mm}^2)$
Annealing, $600^\circ\text{C}$ , 2hr	23	56	27	237

$D_{sg}$  : Average size of graphite  
 $H_{sg}$  : Nodularity of graphite  
 $A_{sg}$  : Area fraction of graphite  
 $N_{sg}$  : Nodule count of graphite

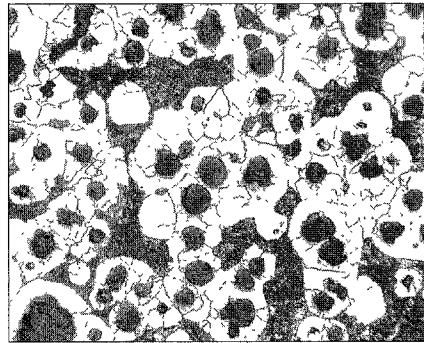


Fig. 1 Microstructure of spheroidal graphite cast iron

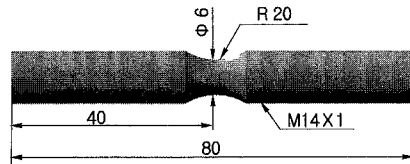


Fig. 2 Specimen configuration

### 2.2 실험방법

피로시험에 사용된 시험기는 Fig. 3에 나타난 것으로 일본 SHIMADZU社의 유압제어식 만능피로시험기 (Servo Pluser Fatigue Testing Machine, Type : EHF - EG10KN - 20L, CAP. :  $10\text{tf} \pm 50\text{mm}$ )로서 피로 최대용량은 10Ton이고, 극저사이클 피로 시험방법은 소성변형률폭 ( $\Delta\epsilon_p$ ) 제어로  $N_f < 10^2$ 사이클의 수명 범위 내에서 실온·대기 중에서 실험하였다

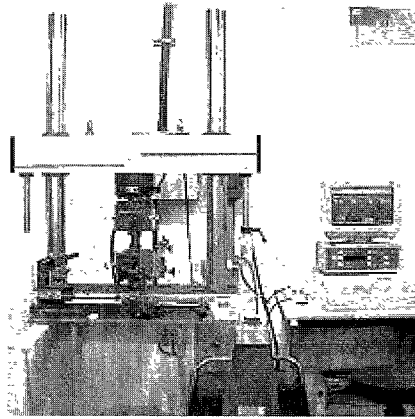
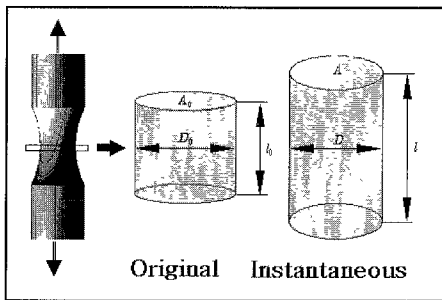


Fig. 3 Servo pluser fatigue testing machine



- $l_0$  = Original Length
- $D_0$  = Original Diameter
- $A_0$  = Original Area
- $l$  = Instantaneous Length
- $D$  = Instantaneous Diameter
- $A$  = Instantaneous Area

Fig. 4 Original and deformed (instantaneous) configuration of test specimen.

실험조건은 완전양진으로 응력비  $R=-1$ 에서 주파수는 1Cycle 당  $10\sim 20\text{sec}$ 로 인장과 압축이 같은 정현파형으로 실시하였으며, 실험시의 최소 직경부의 변형량과 변형률의 측정에는 시험편 중앙에 게이지(Displacement Meter)를 부착하여 발생된 신호를 A/D변환기(Converter)를 통하여 컨트롤러

용 컴퓨터에 연결하여 소성변형률폭( $\Delta\varepsilon_p$ )을 일정하게 제어해 갔다. 여기에서 소성변형률폭( $\Delta\varepsilon_p$ )은 Fig 4에 도시한 체적일정의 관계식에 의한 방법으로 하였다

### 2.3 시험편의 내부 손상량 측정

극저사이클 피로영역에서의 내부크랙형 파괴모드는 고사이클에서 나타나는 표면크랙형 파괴모드와는 달리 시험편 내부의 피로손상이 누적되기 때문에 연속적으로 직접적인 관찰이 곤란하다. 그러한 문제점으로 내부크랙형 파괴모드에서 피로파괴 과정의 내부 손상량을 관찰하기 위해서는 다양한 연구가 필요하다. 일단, 소정의 반복수까지 극저사이클 피로시험을 하면서 시험편 내부에 피로 손상부분을 형성한 다음, 그 부위에 액체질소(LN<sub>2</sub>)에 의한 극저온(-196℃)으로 시험편을 취화시켜서 피로손상을 받지 않는 부분을 벽개파괴 시킨 후 파괴된 파면형태의 차이를 주사형전자현미경(SEM)으로 관찰했다.

### 3. 결과 및 고찰

소정의 반복부하를 가한 후, 시험편을 액체질소에 의한 극저온(-196℃)으로 취화시킨 상태에서 인장파괴를 한 후, 파면관찰을 했다. Fig. 5에서 그 결과를 나타낸다.

그림 중에서 검게 나타나는 부분은 소정의 사이클에 의해 누적된 피로손상부이며, 광택이 있는 부분은 액체질소에 의한 극저온 상태에서 인장 파괴된 부분이다. 반복수비( $n/N_f=0.40$ )의 단계(Fig. 5(a))에서 파면전체가 취성적으로 파괴된 형태가 관찰된다 그것에 비해, ( $n/N_f=0.90$ )의 단계(Fig. 5(c))에서는 파면의 거의 중앙부분으로 피로손상부가 관찰되었다. 이러한 관찰 결과로부터 극저사이클 피로파괴는 파단 직전에 크랙이 급속하게 성장하는 것으로 판단된다.

다음은 내부 크랙의 성장거동을 더욱 상세하게 검토할 목적으로 일정한 반복 사이클을 가한 후 파단되기 전 시험을 중지하고 시험편 내부를 현미경을 이용해서 관찰한다.

#### 3.1 펄라이트에서 라멜라 분리현상

Otani, Kikugawa은 펄라이트-페라이트 기지조직의 강에 대해서, 파단까지의 반복사이클수가 수회에서 수백회 이하의 극저사이클 영역의 파괴기구에 대해서 미시조직학적 관점으로 연구한 결과, 각각의 재료에서는 소성변형률폭의 증가에 따라, 파괴에 이르는 형태가 동상의 피로파괴기구에서 표면균열형으로부터 재료 내부의 펄라이트 분열을

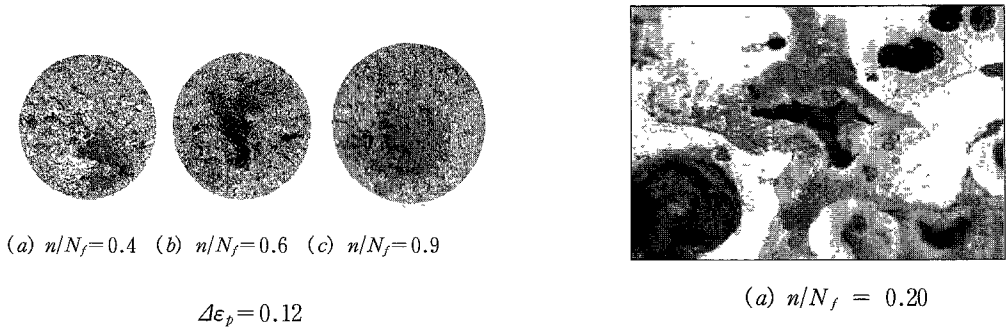


Fig. 5 Macroscopic observation of fracture

기점으로 한 연성파괴기구가 개입된 내부크랙형으로 천이 한다는 것을 보고하였다.[8-9]

필라이트-페라이트 기지조직이 극저사이클 피로 파괴에 미치는 영향을 명확히 밝힐 목적으로  $\Delta\epsilon_p=0.12$ 의 소성변형률폭에 대하여 피로시험을 하고, 반복부하에 따라 미시적 파괴과정을 시험편 중단면에서 관찰하였다. 그 때, 재료내부에서 필라이트 분열 발생기구에 관한 사실적 관찰을 위해서 조직의 형태와 필라이트 분열의 발생상황에 주목하여 관찰하였다. Fig. 6의 (a)와(b)에 시험편 중단면에서 관찰하였다. 이 때, 재료내부에서 필라이트 분열 발생기구에 관한 사실적 관찰을 위해서 조직의 형태와 필라이트 분열의 발생상황을 관찰하였다. Fig. 6의 (a)와(b)에서는 비교적 초기 단계에서 관찰된 필라이트 분열의 형태를 보여주고 있다. 필라이트 분열발생은 필라이트 조직이 극부적으로 조밀한 부분에서 분열이 우선적으로 발생하는 경우와 라멜라 방향에서 수직방향으로 분열이 발생하는 경우, 혹은 라멜라 간격이 조밀한 부분에서 우선적으로 분열이 발생하는 경우 등으로 나타났다. 따라서 필라이트에서 형성된 보이드는 반복부하에 의해 증가한 다음, 하중방향(Axial Direction, A.D)에 개구된 인접한 흑연의 보이드와 연결을 시도하고, 파단 직전에는 흑연과 기지조직에서 분리된 보이드와 급격한 합체로 내부 거시균열을 형성하는 것이 명확해졌다.

### 3.2 흑연주위에서 내부크랙 관찰

실험결과 Fig. 7(a)을 보면 시험편 내부의 흑연과 기지조직이 인장과 압축의 반복 사이클에 의해 완전히 분리되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 즉 하나의 보이드가 형성된 것이다. 그리고 Fig. 7(b)을 보게 되면 인접한 흑연사이에서 더욱 큰 보이드를 관찰할 수 있다.

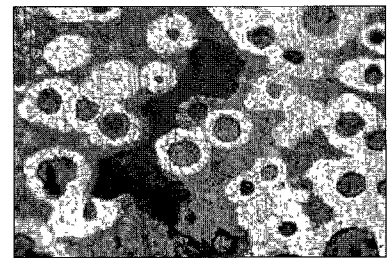
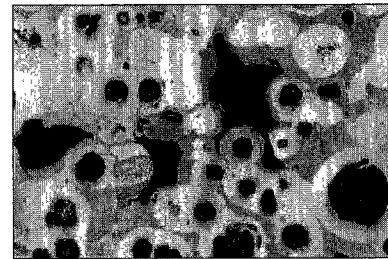
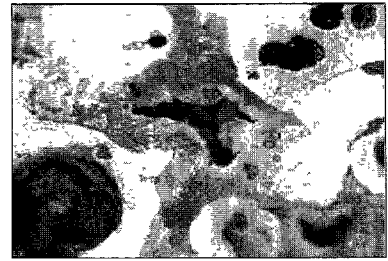


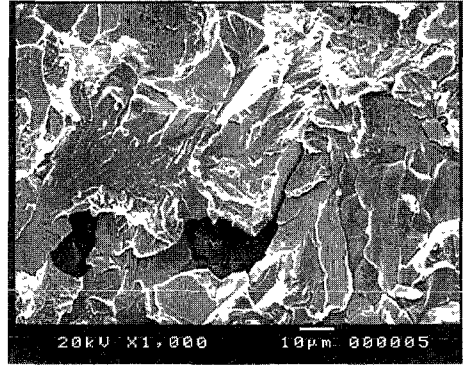
Fig. 6 Pearlite crack growth

즉 지진파와 같은 극저사이클 하중하에서 구상 흑연철의 초기 보이드 발생은 반복되는 인장과 압축에 의해 내부에서 흑연의 표면과 기지조직이 분리되어 발생되며 흑연이 밀집되어 있는 부분에서는 밀집된 흑연부위 전체가 하나의 거시적인 보이드로 형성된다는 것을 명백하게 알 수 있었다.

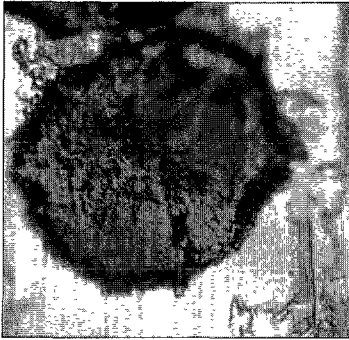
Fig. 8(a)은 소성변형률폭( $\Delta\epsilon_p$ )=0.10, 반복수  $n=7$ 회에서 시험을 정지 후 액체질소에 의한 저온 인장파단 후 파단면을 주사형전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과이다. 이 사진은 흑연주위에서 미소한 피로크랙이 성장하고 있는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 인접한 흑연사이의 기지조직이 연성적으로 파괴된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8(b)는 소성변형률폭( $\Delta\epsilon_p$ )=0.08, 반복수  $n=10$ 회에서 관찰한 균열이다. 이것은 극저사이클 시험 초기에 흑연주위가 인장 압축의 반복 사이클에 의해 기지조직과 흑연이 분리되면서 증가되는 반복 사이클에 의해 보이드에서 균열이 진전해 가는 것을 관찰한 것이다

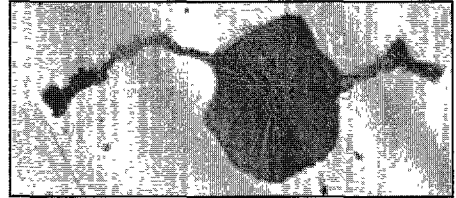
Fig. 8(c)는 소성변형률폭( $\Delta\epsilon_p$ )=0.10, 반복수  $n=41$ 회에서 관찰한 균열이다. 이것은 흑연에서 발생된 크랙이 인접한 균열과 연결을 완료한 것이다. 즉 각각의 흑연에서 발생된 크랙은 반복 사이클의 증가에 비례해서 인접한 크랙과 연결하여 거시적인 크랙을 형성하여 결국 파괴된다는 것을 알 수 있다.



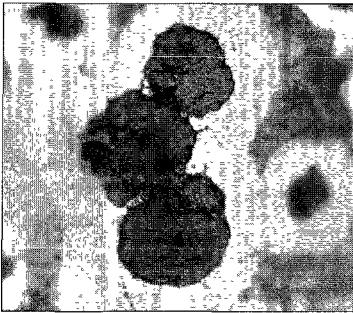
(a)  $\Delta\epsilon_p=0.10, n=7$



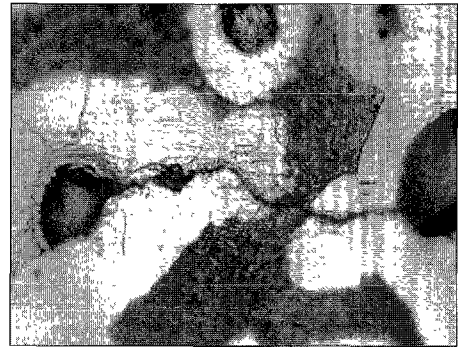
(a)  $\Delta\epsilon_p=0.10, n=8$



(b)  $\Delta\epsilon_p=0.08, n=10$



(b)  $\Delta\epsilon_p=0.10, n=5$



(c)  $\Delta\epsilon_p=0.10, n=41$

Fig. 7 Observation of coalescence of microvoid in static tension

Fig. 8 Observation of crack growth in graphite

#### 4. 결론

구조물이 과대하중을 받게 되면 응력집중부에 대변형을 일으키게 되고, 이것이 반복하게 되면 극저사이클 피로의 독특한 파괴 양상을 보이며 구조물이 파괴된다. 그러나 내부 균열은 직접적인 관찰이 불가능한 어려움으로 인하여 내부에서 균열이 어떻게 발생되는지에 대한 연구 자료는 거의 찾아보기 어려운 실정이다. 특히 극저사이클 내에서 일어나는 독특한 파괴기구의 진행상황을 정량적으로 다룬 연구는 발견되지 않는다.

그래서 본 연구에서는 과대하중을 받는 극저사이클 피로에서 초기의 크랙발생이 어떻게 생성되는가에 집중해서 연구한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 구상흑연 주철이 과대하중을 반복적으로 받게 되면 시험편 내부의 필라이트조직에서는 라멜라가 분리되어 미소한 보이드가 형성된다. 그 후 반복되는 사이클수의 증가에 따라 보이드가 더욱 성장하게 된다.

2. 인접한 흑연과 흑연사이에서는 반복 사이클의 초기 단계에서 고응력으로 작용하는 인장과 압축과정에 의해 흑연의 표면과 접촉한 기지조직표면이 붕괴되어 흑연입자 크기의 보이드를 형성하게 된다. 또한, 흑연의 입자가 밀집되어있는 부분에서는 인접한 흑연전체가 합체하여 하나의 거시적인 보이드를 형성하게 된다.

그 후 흑연에서 발생된 보이드는 반복사이클에 의해 균열로 성장하게 된다. 이러한 균열은 인접한 반복되는 과대하중에 의해 초기의 미소한 균열과 균열사이가 급격하게 연결하여 결국 파괴된다.

구상흑연주철의 극저사이클 하중하에서의 피로 파괴과정은 필라이트와 흑연에서 보이드가 거의 동시에 발생하고 반복되는 과대하중에 의해 급속히 성장 후 인접한 균열과 연결하여 파괴된다.

#### 참 고 문 헌

[1] Steven R. Lampman, *ASM Handbook*, Vol.19, 1996  
 [2] 김재원, *기계재료학*, 喜重堂, 1998  
 [3] 최담천, *大韓鑄造學會誌*, 제10권, 제4호, pp.294-298, 1990  
 [4] Lyle R. Jenkins, *ASM Handbook*, Vol. 1, 1990  
 [5] 박홍식, 진동규, "오스텝퍼링 한 저합금구상 흑연주철의 부식마멸특성 및 그 기구에 관한

연구", *대한기계학회논문집A*, 제17권 제6호, pp.1404-1411, 1993  
 [6] 김민건, 임복규, 이병현, "지진파와 같은 극저사이클 피로의 시뮬레이션 기법 개발", *대한기계학회 2001년도 제2차 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집*, pp.272-278, 2001  
 [7] 김민건, 임복규, "구상흑연주철의 극저사이클 피로과정의 모델링", *대한기계학회 강원지부 학술대회 논문집*, pp.1-7, 2001  
 [8] 安達 卓外 3人, "球狀黑鉛鑄鐵の極低サイクル疲労損傷とその評價", *日本機械學會論文集(A編)*, 59-558, pp.291~296, 1993  
 [9] 김민건, 김진학, "오스텝퍼링처리한 구상흑연주철의 피로한도에 미치는 기지조직인자와 역학인자의 영향", *대한기계학회논문집 A권*, 23권, 2호, pp.287-293, 1999