

고강도 구상흑연주철의 피로한도에 미치는 2상 기지조직의 영향

Effects of 2-Phase Matrix Structure on Fatigue Limit of High Strength Ductile Iron

김진학* 지정근* 김민건**

Kim, Jin-Hak Ji, Jueng-Keun Kim, Min-Gun

Abstract

Rotary bending fatigue tests were performed to investigate the effects of 2-phase matrix structure on fatigue limit with prepared specimens in high strength ductile irons. Two types of the specimens with different microstructures have been used. Series A has sorbite and series B has bainite. Fatigue limits of both specimens are improved comparing with as cast specimen. The fatigue limit is higher in series B than in series A. The reason why the fatigue limit of series A shows inferiority to that of series B is due to the transition of micro fatigue cracks to mesocrack occurs very rapidly, so increased stress intensity factor drives the fatigue crack growth. The higher fatigue limit of series B which has bainite is caused by that the γ layer contained in microstructure impede the rapid growth of micro fatigue crack to mesocrack and α layer around graphite has the higher capacity for the absorption of plastic deformation energy than sorbite.

키워드 : 피로, 피로한도, 베이나이트, 2상 기지조직, 구상흑연주철

Keyword : Fatigue, Fatigue Limit, Bainite, 2-Phase Matrix Structure, Ductile iron

1. 서론

구상흑연주철은 내마모성, 감쇠능, 저온충격특성 및 경제성, 가공성 등이 다른 재료보다 우수하여 주요한 기계구조용 부재로서의 증가하고 있지만[1-5], 그 피로특성에 관한 연구는 탄소강과 비교하면 매우 불충분한 것이 사실이다.

구상흑연주철의 조직은 비교적 간단한 열처리 조작으로 다양한 특성을 가지는 조직으로 조정할 수 있기에 그에 따른 피로특성의 변화에 관한 지식의 체계화를 도모하는 것은 중요한 과제이다.

한편, 중요한 구조용 부재로서 사용되는 구상흑연주철 제품은 비교적 중량이 크더라도 높은 피로신뢰성이 요구되는 경우가 많다. 그러나, 구상흑연주철은

응고속도가 느리고 조직이 거칠게 되기 때문에 피로신뢰성을 향상시키려면 반드시 적당한 열처리가 필요하게 된다. 최근에는 열처리를 이용한 구상흑연주철의 용도확대가 도모되고 있으며, 원자로 내부용기를 비롯하여 가혹한 환경하에서의 사용도 꾸준히 시도되고 있다[6]. 따라서, 각종 열처리 조직의 피로특성을 밝히는 것은 구상흑연주철 제품의 용도확대의 기초가 되는 중요한 과제이다.

본 연구에서는 서로 다른 열처리에 의해 인장강도를 850MPa 이상으로 조정한 고강도 구상흑연주철의 피로한도에 미치는 미시조직의 영향에 대해, 소르바이트(Sorbite)와 베이나이트(Bainite) 조직을 가지는 구상흑연주철을 사용하여 파면해석의 결과에 기초한 검토를 행하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

실험재료는 구상흑연주철 2종(GCD45)이며, 화학성분은

* 강원대학교 기계공학과 시간강사, 공학박사

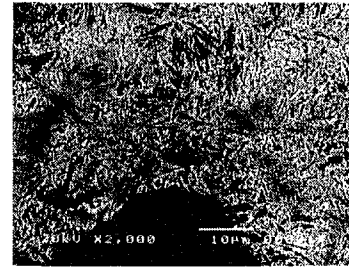
** 강원대학교 기계공학과 교수, 공학박사

C:3.75%, Si:3.0%, Mn:0.15%, P:0.03%, S:0.015%, Mg:0.04% 이다.

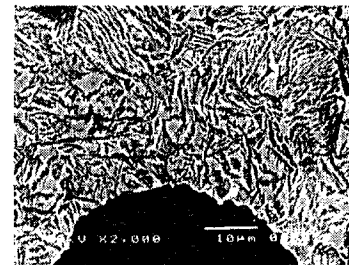
Table 1에 열처리 과정을 나타내었다. 열처리에 의해 기조직을 각기 다르게 조정하여 각각 A재 및 B재로 하였다. 각 공시재의 기계적 성질을 Table 2에 나타내었다. 또한, 미소피로크랙의 발생과 메조크랙의 전파에 영향을 미칠 것으로 예상되는 평균흑연입경, 구상화율 등의 흑연특성(KS D 4302에 의해 측정)을 Table 3에 정리하였다.

Fig. 1에 각 공시재의 조직사진을 보이고 있다. A재는 소르바이트 조직이고 B재는 베이나이트(Bainite)[6] 조직이다.

시험편은 최소 직경부를 $\phi 9$, R30으로 기계가공하여, 에머리페이퍼(#100~#1200)와 알루미나파우더($0.3 \mu m$)를 사용하여 경면으로 연마한 후 실험에 제공하였다. 사용한 시험기는 회전굽힘 피로시험기(60Hz, 3500rpm)이다. 또한, 파단한 시험편을 대상으로 미소피로크랙의 발생기점과 메조크랙의 전파영역에 대해 전자현미경(SEM)으로 파면해석을 실시하였다.



(a) Series A



(b) Series B

Fig. 1 Matrix Structures of specimen series.

Table 1. Details of heat treatment and matrix structures of specimen series.

	Process of heat treatment	Matrix
Series A	900°C, 1hr → W.C. → 600°C, 1hr → F.C	Sorbite
Series B	900°C, 1hr → S.C. → 380°C, 2hr → A.C	Bainite

F.C. : Furnace cooling

W.C. : Water cooling

S.C. : Salt bath cooling

A.C. : Air cooling

Table 2 Mechanical properties of specimen series.

	σ_Y	σ_{TS}	δ	Hv
Series A	507	869	7	480
Series B	799	1065	9	512

σ_Y : Yield strength(MPa), 0.2% proof stress

σ_{TS} : Tensile strength(MPa)

δ : Elongation(%)

H_v : Vicker's hardness

Table 4. Characteristics of surface graphite.

	D _{sg} (μm)	H _{sg} (%)	A _{sg} (%)	N _{sg} (1/mm ²)
Series A	23	56	27	215
Series B	40	67	29	98

D_{sg} : Average size of graphite

H_{sg} : Nodularity of graphite

A_{sg} : Area fraction of graphite

N_{sg} : Nodule count of graphite

3. 실험결과 및 고찰

3.1 S-N곡선과 크랙의 발생기점

각 시험편의 S-N곡선을 Fig. 2에 나타내었다. 참고로 전형적인 불스아이(Bull's eye)조직을 가지는 모재(As cast)의 피로곡선도 병기[7]하였다. Fig. 2를 참고하면, 모재에 비하여 A재와 B재의 피로한도는 상승하며, 그 상승률이 소르바이트조직인 A재가 약 13%인 반면 베이나이트조직인 B재는 약35%로 현저하게 높고, A재와의 차이도 약 18%나 된다. Fig. 2로 부터, 고강도 구상흑연주철의 피로수명이 미소피로크랙의 발생거동에 지배[8]될 뿐만 아니라, 결함에서 발생한 미소피로크랙이 메조크랙으로의 성장거동에도 지배된다는 것을 추정할 수 있다.

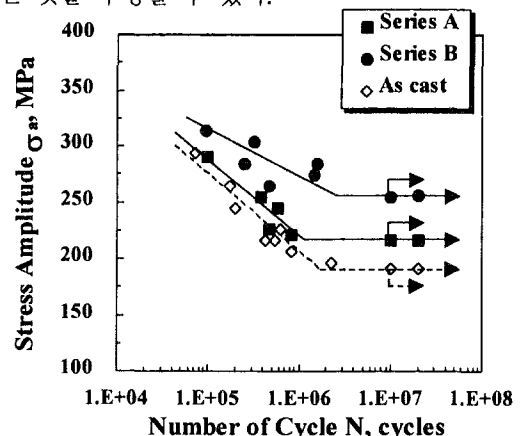


Fig. 2 S-N data of the specimens.

따라서, 본 연구에서는 파면해석에 의한 양재에서의 미소 피로크랙의 발생과 메조크랙의 전파기구에 대한 상세한 고찰을 실시하였다.

먼저, 10^7 회의 반복응력을 견디지 못하고 파단한 시험편에 대하여 SEM에 의한 크랙발생부를 관찰한 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3(a)와 Fig. 4(a)를 참고하면, 양재 모두 모든 시험편의 크랙발생 기점에 내재결합인 흑연이 관찰되었고, 열처리에 의해 야기[9]되는 흑연의 요철부에서 미소피로크랙이 발생하여 전파한 것을 알 수 있다.

3. 2절에서는 메조(Meso)크랙부에 대한 파면해석을 실시하여 결합부에서 응력집중으로 발생한 미소피로크랙이 메조크랙으로의 성장기구에 대한 해석을 실시하였다.

3. 2 메조크랙부에 대한 파면해석

먼저, A재의 피로크랙 발생기점에 대한 파면해석을 실시한 결과 파단한 시험편 가운데 약 80%에서 Fig. 3(a)에 보이는 것과 같이 크랙기점 및 기점에 인접한 흑연주위에 벽개파면(Cleavage facet)이 관찰되었다. Fig. 3(b)는 Fig. 3(a)에서 「A」 표시한 부분을 고배율로 관찰한 것이며, 약 $10 \mu m$ 정도의 벽개면이 생성되어 메조크랙부가 형성된 후 전형적인 피로파면으로 천이한 것이 관찰되었다.

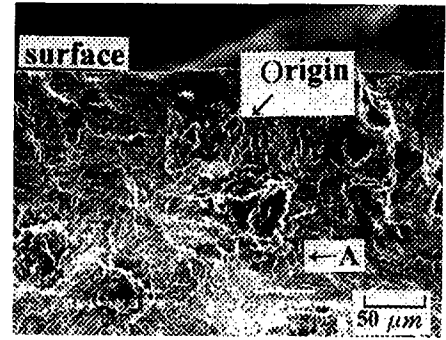
응력진폭 (σ_a)이 그다지 크지 않음에도 불구하고, 흑연 주위에 벽개면(Cleavage facet)이 발생하는 것은 Table 2의 연신율 (δ)이 크게 감소하는 것으로부터 열처리에 의해 흑연주위의 기조직이 국부적으로 취화(Embrittlement) 되는 것이 한 원인이라고 할 수 있다.

한편, 메조크랙부의 크기와 응력확대계수 사이에 아래 식 (1)의 관계가 성립[10]되는 것으로부터, 흑연에서의 응력집중으로 발생한 미소피로크랙이 메조크랙으로 급속한 성장함으로 인해 메조크랙부 선단에서의 응력확대계수 (K_a)가 현격히 증가되어 피로크랙의 성장을 가속시킨다는 것을 알 수 있다. 따라서, 소르바이트조직의 구상흑연주철은 조직의 부분적 취화와 메조크랙의 발생이 용이하여 피로한도의 상승률이 베이나이트조직을 가지는 B재에 비하여 크지 않다고 이해할 수 있다.

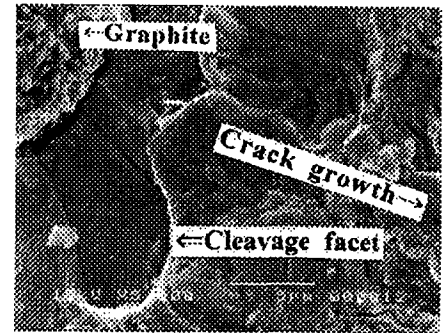
$$K_a = \sigma_a \sqrt{\pi \sqrt{A}} \quad (1)$$

σ_a : Stress amplitude (MPa)
 \sqrt{A} : Size of mesocrack range (m)

다음, Fig. 4는 베이나이트조직인 B재에서 피로크랙의 발생기점에 대한 파면해석을 실시한 결과이다. Fig. 4(a)에 나타낸 것과 같이, 피로크랙의 기점은 표면 직하(直下)에

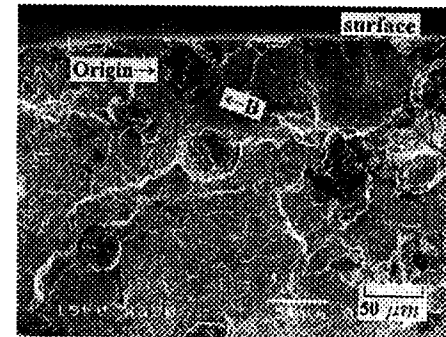


(a) Macroscopic observation

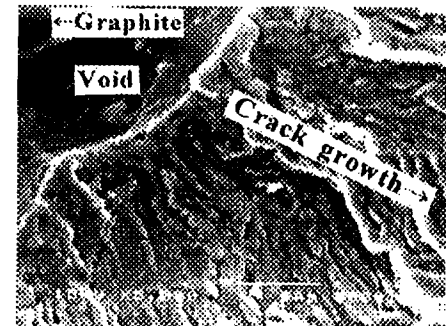


(b) Enlarged photograph of A in (a)

Fig. 3 Example of cleavage facet observed at crack origin and adjacent graphite in series A ($\sigma_a = (255MPa, N_f = 3.8 \times 10^5)$).



(a) Macroscopic observation



(b) Enlarged photograph of B in (a)

Fig. 4 Example of cleavage facet observed at crack origin and adjacent graphite in series B ($\sigma_a = 265MPa, N_f = 4.7 \times 10^5$).

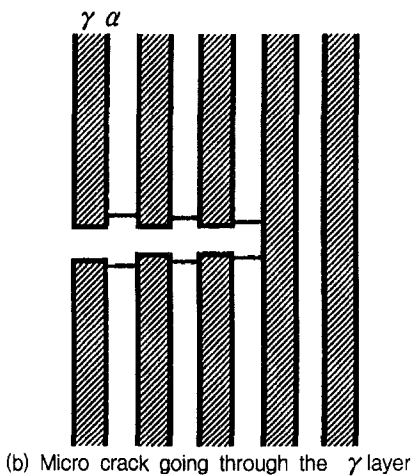
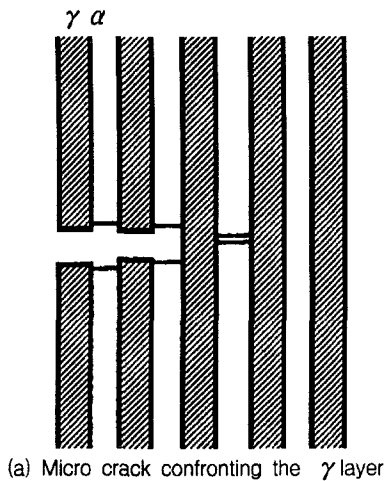


Fig. 5 Schematic illustration for the processes of fatigue crack growth in series B.

존재하는 흑연이었다. 시험편의 크랙기점에 존재하는 흑연 주위에 A재와는 달리 벽개파면은 관찰되지 않고, 대부분의 피로크랙의 기점에 Fig. 4(b)에 보이는 것 같은 보이드(Void)가 존재하는 것이 확인되었다. 이러한 보이드는 흑연 주위의 기지조직이 가지는 변형에너지의 흡수능력이 우수하여 응력집중부인 흑연에서 피로크랙이 발생하기 전에 기지조직이 흑연과의 분리가 먼저 발생하는 것에 기인된다. 이러한 사실로부터, B재는 A재보다 변형에너지 흡수성이 우수하여 피로크랙의 발생에 대한 저항이 크다는 것을 알 수 있다.

뿐만 아니라, Fig. 4(b)에서 보이는 것과 같이 흑연에서 발생한 미소피로크랙이 물결무늬 형식의 뚜렷한 요철(凹凸)을 형성하며 전파한 것이 관찰되었다. 이러한 파면형상은 피로크랙의 성장이 α 층과 γ 층의 혼합조직인 미시조직에 매우 민감하다는 것을 나타내고 있는 것으로서, 흑연부에서 응력집중으로 발생한 피로크랙의 성장이 Fig. 5와 같

은 과정으로 이루어진다고 생각할 수 있다. 즉, γ 층보다 분리되기 쉬운 α 층의 변형이 커 상대적으로 골(凹)을 형성하며 반대로 γ 층은 마루(凸)를 형성하며 성장하는 것이다. 또한, α 층을 통과한 크랙이 γ 층을 통과하기 전에 먼저 인접한 α 층이 분리되어 변형되는 것도 이러한 특이한 파면상이 나타나는 원인이라고 할 수 있다. 이러한 사실은 베이나이트조직내에 존재하는 γ 층이 미소피로크랙이 메조크랙으로 성장하는 것을 방해하여 급속한 메조크랙부의 확장을 억제한다는 것을 알 수 있다. 결국, 베이나이트조직을 가지는 B재의 피로한도가 우수한 것은 피로크랙의 발생과 메조크랙의 성장이 기지조직내의 γ 층의 영향임을 알 수 있다.

4. 결 론

소르바이트조직(A재)과 베이나이트조직(B재)을 가지는 구상흑연주철의 피로신뢰성에 미치는 미시조직의 영향에 주목하여 검토한 결과, 아래의 결론을 얻었다.

- (1) A재와 B재 모두 피로한도는 모재보다 증가하며, 그 정도는 베이나이트조직을 가지는 B재가 더 크다.
- (2) A재의 피로한도가 B재보다 낮은 것은 미소피로크랙에서 메조크랙으로의 천이가 급속히 발생하여, 응력확대계수가 급격히 증가하여 크랙의 전파속도가 증가하기 때문이다.
- (3) 베이나이트조직을 가지는 B재의 피로한도가 높은 것은, 조직내의 γ 층이 미소피로크랙의 메조크랙으로의 성장을 억제하고, 또한 흑연주위의 α 층이 가지는 소성변형 에너지의 흡수성이 크기 때문이다.

참고문헌

- [1] Steven R. Lampman, *ASM Handbook*, Vol.19, 1996.
- [2] 김재원, *機械材料學*, 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, *대한기계학회논문집A*, 제17권 제6호, pp.1404-1411, 1992.
- [6] M.N.James, Li Wenfong, *Materials Science and Engineering A(265)*, pp. 129-139, 1999.
- [7] 김민건, 김진학, *한국자동차공학회논문집*, 제7권, 제5호, pp.221-229, 1999.
- [8] 김민건, 김진학, *대한기계학회논문집A*, 제23권, 제2호, pp.287-293, 1999.
- [9] 中寸孝, 金子眞, 田邊智明, 神保勝久, 永井文雄, *日本機械學會論文集*, 61A-582, pp.231-236, 1995.

산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제19집, 1999.

Research Report. The Institute of Industrial Technology, Kangwon Nat'l Univ., Korea, No. 19, 1999.

- [10] 김민건, 김진학, *대한기계학회 '99년춘계 학술대회논문
집 A 권*, pp.725-730, 1999.