

초급속열처리 구상흑연주철 FCD500의 피로파괴특성

지정근[†] · 김민건* · 김진학* · 김정두**
(2000년 11월 8일 접수, 2002년 1월 30일 심사완료)

Fatigue Fracture Behavior of Spheroidal Graphite Cast Iron FCD500 by Super-Rapid induction Quenching ·

Jueng Keun Ji, Min Gun Kim, jin Hak Kim and Jeong Du Kim

Key Words: Fatigue Limit(피로한도), Super Rapid Treatments(초·급속열처리), Graphite Nodule
(구상흑연), Residual Stress(잔류응력)

Abstract

Rotary bending fatigue tests were carried out to investigate the fatigue characteristics of high performance ductile cast iron experienced super rapid induction treatment. The influence of super rapid induction treatment on fatigue limit was experimentally examined with the special focus on the variation of surface microstructure and the fatigue crack initiation and propagation through fractography. Main results obtained are as follows. By super rapid induction treatment in FCD500, the martensite structure obtained through conventional heat treatment was confirmed on the specimen surface. The fatigue crack initiation in the hardened surface layer was restricted by the martensite structure and compressive residual stress. Thus, it could be interpreted that the initiation stress would be increased by improved structure in the surface. The fatigue crack propagation in the hardened layer was retarded by the presence of the globular shape martensite around the graphite nodule and compressive residual stress and the crack propagation behavior has zigzag pattern in the hardened surface layer.

1. 서론

최근, 기계의 고성능 고능률화에 따라, 각종 기계요소에는 강도뿐만 아니라, 내열성, 내마멸성내 피로성과 같은 다수의 기능이 요구되고 있다.

이러한 관점으로부터 기존의 기계재료에 제품의 고기능성을 목적으로한 표면개질처리가 시행되고 있으며 이에 따른 피로신뢰성의 개선과 보증에 관하여 실증적인 연구가 행하여지고 있다.⁽¹⁻³⁾

한편, 구상흑연주철(FCD)이 구조용 재료로 그 용도가 넓어지고 있다. 구상흑연주철은 내마모성, 감쇠능, 저온충격특성 및 경제성, 가공성 등이 다른 재료보다 우수하여, 자동차용 부품가운데에서 실린더 블록, 실린더헤드, 커넥팅로드, 브레이크 부품등에 널리 이용되고 있으며,⁽⁴⁾ 이러한 구상흑연주철의 고기능성을 향상시키려는 연구가 여러

[†] 책임저자, 회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

E-mail : jjk2517@hanmail.net

TEL : (033)252-2517 FAX : (033)252-2517

* 회원, 강원대학교 기계메카트로닉스공학부

** 회원, 세종대학교 기계공학과

분야에서 수행되고 있다.^(5~10) 그러나 기존의 고주파열처리법은 구상흑연주철의 표면을 강화시키는 효과는 매우 크나, 표면상태에 따른 고주파 흡수 차이로 불균일 가열층이 얻어질 가능성이 크고, 경화층이 필요이상 두꺼워져 재료의 인성을 저하시키는 경향이 있다.⁽¹¹⁾ 이에 반해 초급속열처리법은 매우 짧은 시간 안에 열처리를 수행할 수 있으며 그에 따라 열처리부가 표면에 국한됨으로 내마모성과 표면강도를 향상시키면서도 재료의 인성을 저하시키지 않아, 종래 고주파열처리의 단점인 취성 증가에 의한 내피로성의 저하를 방지하고, 오히려 증가시키는 이상적인 표면처리를 할 수 있고 경제적인 면에서도 유리한 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서는 구상흑연주철의 고기능화를 목표로 초급속열처리를 행하고, 이것이 구상흑연주철의 피로특성에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

2. 시험편의 준비 및 실험방법

시험재는 필라이트 면적율이 30%인 구상흑연주철 FCD500로 Table 1에 기계적 성질을 Table 2에 화학적 성질을 나타내었다. 이 시험재를 Fig. 1과 같은 형태로 기계가공한후 초급속열처리를 행하였다.

초급속열처리는 600kw, 153kHz의 출력으로 고주파 유도로를 이용하여 처리하였으며 처리과정은 Fig. 2에 실선으로 표시하였다. 그림중의 점선은 보통의 고주파담금질에 따른 열처리의 과정을 표시하였다. 초급속열처리는 단 0.18초의 열처리과정중에 표면온도 950°C 달하는 담금질 과정을 끝마친다. 냉각은 일반적인 유도로서 사용하는 물분수를 이용하였으나, 가열시간이 매우 짧아 가열부가 표면에 한정되므로 유도가열전원이 정지하는 동시에 가열부는 내부조직과 주위공기로 매우빠르게 열전달이 이루어져 냉각이 가속된다.

이 초급속열처리한 평활환봉시험편에 대하여 상온, 대기 중에서 회전굽힘피로시험기를 사용하여 피로실험을 행하였다. 파단후의 파면관찰은 주사형전자현미경(SEM)을 사용하였으며 잔류응

력의 측정은 직경 0.15mm까지 측정이 가능한 미소X선 잔류응력측정기를 사용하였다.

Table 1 Mechanical properties

	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	El.(%)
FCD500	360	520	9

$\sigma_{0.2}$:Yield strength El.:Elongation
 σ_B :Tensile strength

Table 2 Chemical composition(wt.%)

	C	Si	Mn	P	Cr	Mg	Cu	Ni
FCD500	3.76	2.27	0.30	0.016	0.02	0.044	0.30	0.02

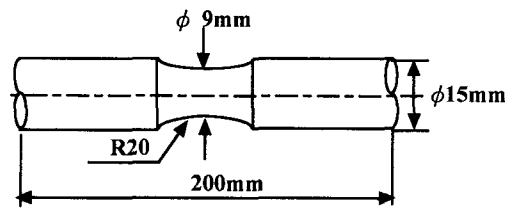


Fig. 1 Specimen geometry

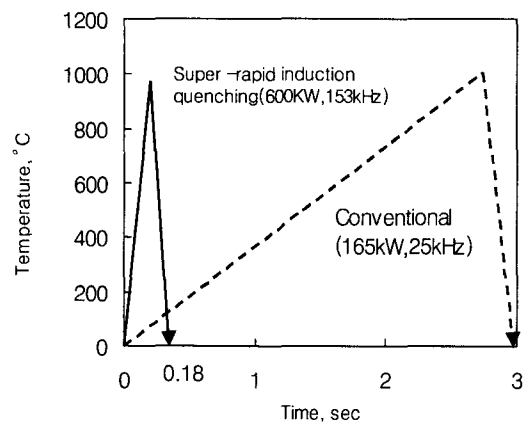
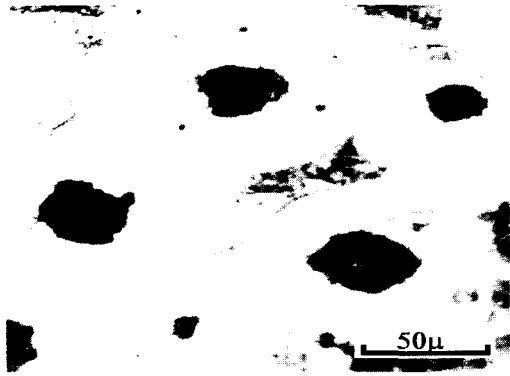
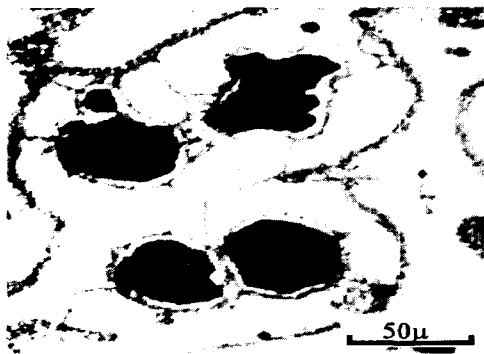


Fig. 2 Super-rapid induction quenching



(a) Virgin layer



(b) Hardened layer

Fig. 3 Microstructure of specimens

3. 실험결과 및 고찰

3.1 초급속처리재에서 미시조직 변화와 경도 분포

초급속열처리한 시험편의 미시조직의 변화를 조사하기 위하여 표면부의 미시조직의 관찰을 행하였다. Fig. 3의 (a)에서 보면 미처리재의 조직은 구상흑연과 그 주위의 페라이트조직, 펄라이트조직의 3가지로 구성되어있다. 페라이트 면적율은 약 56%정도이다. Fig. 3의 (b)는 초급속 가열처리한 시험편의 표면담금질층부의 현미경 조직을 보여주고 있다. 구상흑연의 주위는 미처리재와는 다르게 10~15µm 정도의 얇은 막의 형태가 보여진다. 이것은 표면의 급속가열에 의해 구상흑연 주위의 페라이트 조직으로 구상흑연으로부터 탄

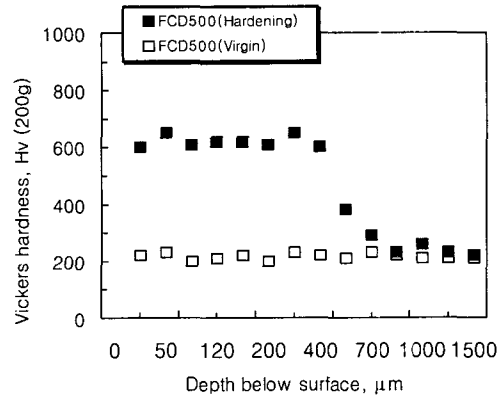


Fig. 4 Hardness distribution

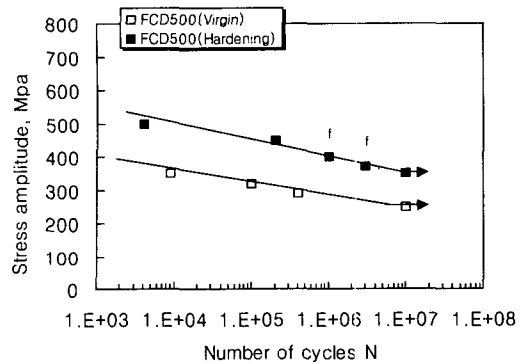


Fig. 5 S-N Curves

소원자가 균일하게 확산하여, 흑연을 포함하는 영역이 고탄소의 오스테나이트가 되고, 이것이 초급속열처리의 담금질효과에 의하여 얇은 마르텐사이트막의 형태로 변태 된다. 이 조직을 환형 마르텐사이트라고 부르기로 한다.

초급속열처리한 시험편의 경도분포는 두 종류의 시험편 공히 펄라이트부에서 각5회씩 측정하여 평균한 값을 Fig. 4에 나타내었다. 측정결과 초급속가열재에서는 약 500µm 정도의 깊이에 걸쳐 최고경도 700Hv 정도의 경화조직이 얻어진다는 것을 알 수 있다. 이것은 표면으로부터 깊이 약 500µm까지의 펄라이트부가 초급속열처리에 의해 마르텐사이트로 변화된 것으로 보여진다.

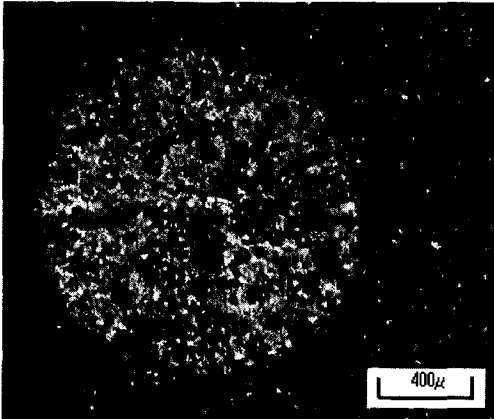


Fig. 6 Morphology of crack initiation site

3.2 초급속열처리로 인한 피로한도의 변화

Fig. 5는 초급속열처리한 FCD500과 미처리재의 피로시험 결과를 S-N 선도로 나타낸 것이다. 이 그림으로부터, 초급속열처리에 의해서 피로강도가 약 40% 정도 향상되는 것을 볼 수 있다. 초급속열처리에 의해서 피로강도가 증가하는 원인으로서는, 담금질 효과에 의하여 표면조직이 경화되므로 크랙발생을 억제하여 피로한도의 상승을 초래한다고 볼 수 있다. 또한 초급속가열처리의 담금질효과에 의하여 구상흑연의 주위에는 얇은 환형의 마르텐사이트조직이 생겨나는데, 이 환형 마르텐사이트조직이 피로크랙의 전파를 저지하여 피로한도를 높이는 데 기여한다고 추측된다. Fig. 5에서 f는 파면상에 피시아이(fish eye)형의 내부 파괴를 보여주는 시편을 표시한다. 초급속열처리재는 단수명 영역에서는 표면형 파괴의 형태를, 장수명 영역에서는 내부형 파괴의 형태를 보이고, 미처리재는 표면형 파괴만을 보인다.

3.3 초급속열처리재의 피로크랙 발생거동

초급속가열 처리재의 피로크랙 발생거동의 특징은, 단수명 영역에서는 표면형 파괴, 장수명 영역에서는 Fig. 6과 같은 표면직하에서의 내부형 파괴(Fish eye형)를 보인다는 점이다.

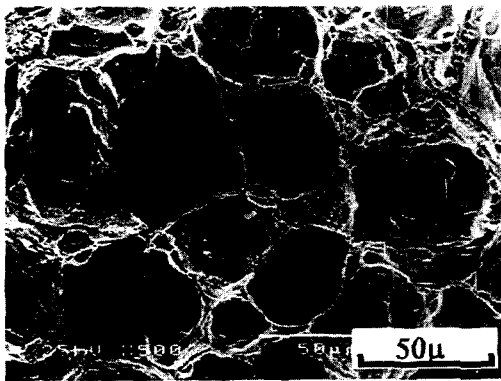
단수명 영역의 높은 응력에서는 표면 경화층의 흑연이 모재로부터 분리되면서 피로크랙이 생성

되는 것으로 보여진다. 그러나 장수명 영역의 낮은 응력에서는, 환형 마르텐사이트로 둘러싸인 흑연의 분리가 어려워져서, 크랙은 경화층 직하의 조대 흑연이나 주조 결함에서 발생하는 것으로 추측된다.

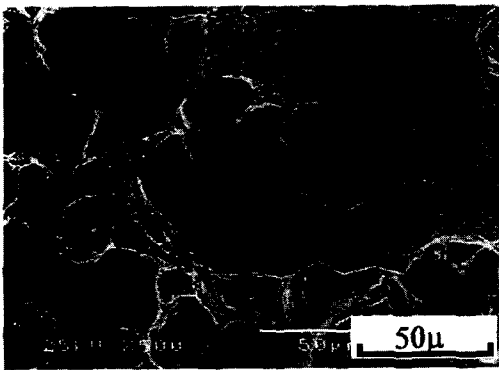
Fig. 7의 (a), (b)는 바로 이러한 사실을 보여주고 있다. (a)는 초급속 가열 처리를 행하지 않은 처리재의 표면층 파면 사진이고, (b)는 초급속 가열 처리에 의하여 경화된 표면층의 파면이다. (a)는 흑연이 모재로부터 분리되면서 주위에 보이드(void)가 형성되고, 그 보이드가 확장하면서 미세 크랙이 형성되는 구상흑연주철의 일반적인 크랙 발생형태⁽¹²⁾를 보여주고 있다. 반면에 (b)에서는, 흑연주위를 감싸고 있는 환형 마르텐사이트의 취성 파면이 뚜렷하고, 그 마르텐사이트에 의하여 모재로부터 흑연의 분리가 억제 당하고, 따라서 흑연 주위에는 (a)에서와 같은 큰 보이드의 형성이 억제되고 있다.

위와 같은 사실은 다음과 같은 관찰결과에 의해서도 뒷받침된다. Fig. 8은 초급속 가열 처리재의 피로파면으로, 표면으로부터 일정깊이까지 경화층이 존재하고 있다. 파면상에 나타난 흑연 입자수를 조사한 결과, 경화층에는 모재부에 비하여 그 수가 약 60%나 적은 것으로 조사되었다. 이 사실은 경화층 또는 경화층 직하에서 발생한 크랙이 흑연을 둘러싸고 있는 환형 마르텐사이트를 돌파하지 못하고 우회하여 전파했기 때문이라고 판단된다. 즉, Fig. 9에 모식적으로 보인바와 같이, 미처리재의 피로 크랙발생이 흑연을 기점으로 한다는 점을 감안한다면, 이러한 우회 현상은 곧 피로크랙의 발생이 표면 경화층에서는 용이하지 않다는 사실을 보여주고 있다. 따라서, 장수명 영역에서는 경화층 직하를 기점으로 하는 피시아이형 크랙발생 형태를 주로 보이며(Fig. 5의 f 마크시편), 또한 표면 층에서의 크랙발생 억제 효과가 피로한도의 증가로도 이어졌다고 할 수 있다. 다음은 초급속열처리로 인한 표면잔류응력을 조사하였다. Fig. 10은 미소잔류응력 측정장치에 의한 잔류응력의 크기를 보여준다. 모재의 피로한도가 250MPa 정도임을 감안할 때 600MPa 정도의 표면잔류응력은 충분히 표면부근의 흑연이나 주조결함으로부터의 크랙발생을 억

제할 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 모재의 피로한도보다 현저히 큰 압축성잔류응력하에서 피로한도의 증가가 40% 정도에 그친 것은 잔류응력층이 얇기 때문에 표면에서 억제된 크랙발생이 잔류응력이 소실되는 경화층 직하에서 피시아이(fish eye)형의 내부파괴형으로 발생되기 때문이다.



(a) Virgin layer



(b) Hardened layer

Fig. 7 Morpholpgy of the fracture surface

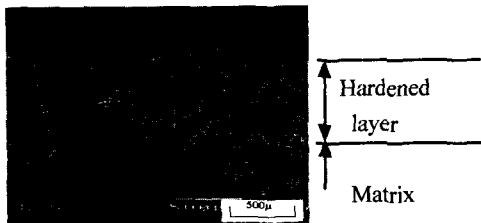
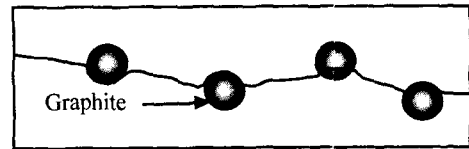


Fig. 8 Microscopic fractured surface

4. 결 론

초급속열처리를 행한 구상흑연주철FCD500에 대하여 회전굽힘피로시험을 실시한 후, 초급속열처리가 피로한도에 미치는 영향을 표면조직의 변화, 피로크랙의 발생거동을 통하여 검토한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 초급속열처리를 행한 FCD500의 표면조직은 통상의 가열처리와는 달리 구상흑연주위에서 환형의 마르텐사이트조직을 얻을 수 있고, 경도 700Hv, 깊이 500 μm정도의 경화조직이 얻어진다.



(a) FCD500 (Virgin)



(b) FCD500 (Hardening)

Fig. 9 Schematic illustration of fracture mechanism

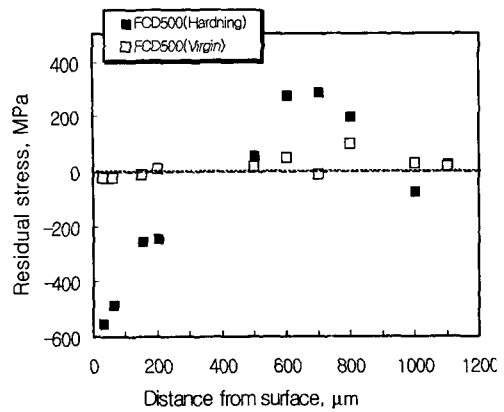


Fig. 10 Residual stress distribution

(2) 초급속열처리에 의해 FCD500의 피로한도가 40%정도 증가한 이유는, 구상흑연주철에서 변태된 환형마르텐사이트가 기지조직으로부터 흑연의 분리를 억제함으로써 크랙의 발생과 전파를 지연시키고, 표면의 압축성 잔류응력이 크랙발생을 억제했기 때문이다.

참고문헌

- (1)鈴木秀人, 1992, 日本機械學會論文集, 58-555, A, pp. 2028~2033.
- (2)鈴木秀人, 1995, 日本機械學會論文集, 61-585, A, pp. 906~912.
- (3)鈴木秀人外 2人, 1991, 日本機械學會論文集, 57-537, A, pp. 1062~1066.
- (4)김재원, 1998, "機械材料學," 喜重堂, pp. 260~282.
- (5)土居滋, 1994, 日本機械學會論文集, 60-570, A, pp. 331~336.
- (6)越智保雄, 1991, 日本機械學會論文集, 57-539, A, pp. 1448~1494.
- (7)田中哲志 外1人, 1994, 日本機械學會論文集, 60-578, A, pp. 2169~2173.
- (8)Blackmore, P.A. and Morton, K., 1982, *Int. J. Fatigue*, pp. 149~155.
- (9)Krasowsky, A.J., Kramarenko, I.V. and Kalaida, V.V., 1987, *Fatigue, Fract. Eng. Mater. Struct.*, 10-3, pp. 223~237.
- (10)Spies, H.J., 1993, *Steel Res.*, 64-8, pp. 441~448.
- (11)Quesada, J., Monthavon, G., Cornet, A., Freneaux, O., Jacura, O. and Blanc, M., 1990, *Key Eng. Mater.*, 46&47, p. 245.
- (12)김민건, 김진학, 1999, "오스텝퍼링처리한 구상흑연주철의 피로한도에 미치는 기지조직인자와 역학인자의 영향," 大韓機械學會論文集, A권 제23권 제2호, pp. 287~293.