

고주파유도로를 이용한 초급속열처리 구상흑연주철의 피로파괴특성

Fatigue Fracture Behavior in Super-Rapid induction Quenched Spheroidal Graphite Cast Iron

지정근* 김진학* 김민건**
Ji, Jueng-Keun Kim, Jin-Hak Kim, Min-Gun

Abatract

Rotary bending fatigue tests were carried out to investigate the fatigue behavior of high performance ductile cast iron experienced super rapid induction heat treatment. The effect 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 quenching 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 the improvement of surface structure. 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. The crack propagation path has shown zigzag pattern in the hardened surface layer.

키워드 : 피로한도, 초급속열처리, 구상흑연, 잔류응력

Keyword : *Fatigue Limit, Super Rapid Treatment, Graphite Nodule, Residual Stress*

1. 서론

최근, 기계의 고성능 고능률화에 따라, 각종기계요소에는 강도뿐만 아니라, 내열성, 내마멸성, 내피로성과 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, 가공성등이 다른재료보

다 우수하여, 자동차용 부품가운데에서 실린더 블록, 실린더헤드, 커넥팅로드, 브레이크부품등에 널리 이용되고 있으며[4] 또한 이러한 구상흑연주철의 기능성을 향상시키려는 연구가 여러 분야에서 수행되고 있다[5-10]. 그 중에서도 마이크로 펄스를 이용한 초급속열처리법이 매우 유용한 수단으로 평가받고 있다. 초급속열처리는 매우 짧은 시간안에 열처리를 수행할 수 있으며 그에 따라 열처리부가 표면에 국한됨으로 내마모성과 표면강도를 향상시키면서도 재료의 인성을 저하시키지 않아 내피로성도 증가되는 이상적인 표면처리를 할 수 있고 경제적인 면에서도 유리한 결과를 얻을 수 있다.

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

* 강원대학교 기계공학과 시간강사, 공학박사

** 강원대학교 기계공학과 교수, 공학박사

2. 시험편의 준비 및 실험방법

시험재는 펄라이트 면적율이 30%인 구상흑연주철 FCD500로 표1에 기계적 성질을 표2에 화학적 성질을 나타내었다. 이 시험재를 그림1과 같은 형태로 기계가공한후 초급속가열처리를 행하였다.

초급속가열처리는 600kw, 153kHz의 출력으로 고주파 유도로를 이용하여 처리하였으며 처리과정은 그림2에 실선으로 표시하였다. 그림중의 점선은 보통의 고주파담금질에 따른 열처리의 과정을 표시하였다. 초급속가열처리는 단 0.18초로 950°C에 달하고, 보통의 담금질에 비하여 매우 짧은 시간안에 처리를 종료할수 있다.

이 초급속가열처리한 평활환봉시험편에 대하여 상온, 대기중에서 회전급힘피로시험기를 사용하여 피로실험을 행하였다. 파단후의 파면관찰은 주사형전자현미경(SEM)을 사용하였으며 잔류응력의 측정에는 직경0.15mm까지 측정이 가능한 미소X선 잔류응력 측정기를 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

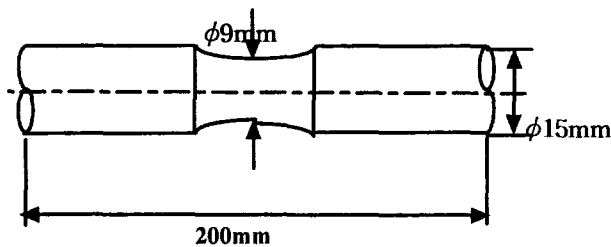


Fig. 1 Specimen geometry

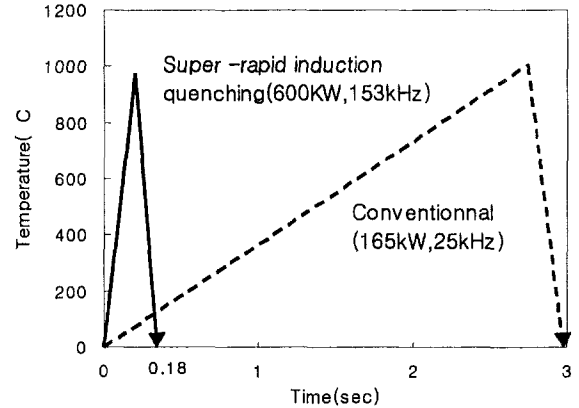


Fig. 2 Super-rapid induction quenching

3. 실험결과 및 고찰

3.1 초급속처리재의 미시조직의 변화와 경도 분포

초급속가열처리한 시험편의 미시조직의 변화를 조사하기 위하여 표면 근처의 미시조직의 관찰을 행하였다. 그림3의 (a)에서 보면 미처리재의 조직은 구상흑연과 그 주위의 페라이트조직, 펄라이트조직의 3가지로 구성되어있다. 페라이트 면적율은 약56%정도이다. 그림3의 (b)는 초급속 가열처리한 시험편의 표면담금질층부의 현미경 조직을 보여주고 있다. 구상흑연의 주위는 미처리재와는 다르게 10~15 μ m 정도의 얇은 막의 형태가 보여진다. 이것은 표면의 급속가열에 의해 구상흑연주위의 페라이트 조직으로 구상흑연으로부터 탄소원자가 균일하게 확산하여 흑연을 포함하는 영역이 고탄소의 오스테나이트가 되고 이것이 초급속가열처리의 담금질효과에 의하여 얇은 마르텐사이트막의 형태로 변형된다. 이 조직을 환형 마르텐사이트라고 부르기로 한다.

초급속가열처리한 시험편의 경도분포 측정결과를 그림4에 나타내었다. 경도측정결과 모재의 펄라이트부는 초급속가열과 냉각에 의해 마르텐사이트로 변화된 것으로 보여진다. 마르텐사이트부에서 측정된 경도시험의 결과 초급속가열처리에 의하여 약 500 μ m 정도의 깊이와 최고경도 700Hv정도의 담금질 경화조직이 얻어진다는 것을 알 수 있다.

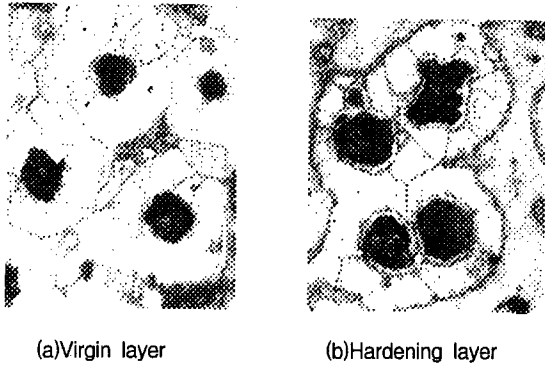


Fig.3 Microstructure of specimens

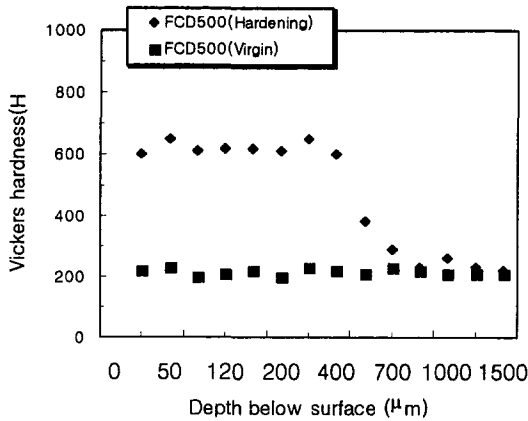


Fig. 4 Hardness distribution

3. 2 초급속가열처리로 인한 피로한도의 변화

그림5는 초급속가열처리한 FCD500과 미처리재의 피로시험 결과를 S-N 선도로 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 초급속가열처리에 의해서 피로강도가 약 40%정도 향상되는 것을 볼 수 있다. 초급속가열처리에 의해서 피로강도가 증가하는 원인으로는 급속한 가열과 냉각의 담금질 효과에 의하여 표면으로부터 700 μm에 있는 펄라이트 조직이 마르텐사이트 조직으로 변화하고 이것으로 인해 표면조직이 경화되므로 표면에서의 크랙발생을 억제하여 피로한도의 상승을 초래한다고 볼 수 있다. 또한 구상흑연의 주위에는 급속한 가열에 의해 구상흑연으로부터 페라이트 조직으로 탄소원자가 균일하게 확산하여 흑연을 포함하는 영역이 고탄소의 오스테나이트가 되고 이것이 초급속가열처리의 담금질효과에 의하여 얇은 환형의 마르텐사이트조직이 생겨난다. 보고에 의하면 이 환형 마르텐사이트조직은 피로크랙의 진전을

저지하므로 피로한도를 높이는데 기여한다고 밝히고 있다. 그림 5에서 f는 파면상에 피시아이(fish eye)형의 내부파괴를 보여주는 시편을 표시한다. 초급속가열처리재는 단수명 영역에서는 표면파괴의 형태를 장수명 영역에서는 내부파괴의 형태를 보여준다.

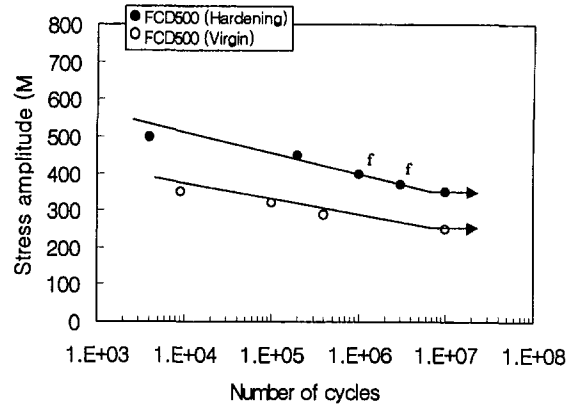


Fig. 5 S-N Curves

3. 3 초급속가열처리재의 피로크랙 발생거동

초급속가열처리재의 피로크랙 발생거동을 이해하기 위하여 피로한도 시험을 행한 모든 시험편의 파면에 초점을 맞춰 관찰을 행하였다. 관찰결과 크랙 발생부는 모든 시험편에서 400~600 μm에 걸쳐 분포하고 있으며 피로크랙의 발생인자는 그림6에서 보는 바와같이 흑연과 주조결함으로 보여진다. 이처럼 내부파괴를 일으키는 원인으로서는 첫째로 모재의 경화를 들수있다. 그림7을 보면 표면으로부터 약600 μm부근의 파면 조직은 모재의 펄라이트가 초급속가열처리에 의해 변화된 마르텐사이트의 취성파면을 보여주고 있다. 또한 구상흑연을 관찰하여보면 마르텐사이트의 취성파면부에서는 모재부에 비해 그 갯수가 30%밖에 되지않는 것을 알 수 있다. 이원인은 앞절에서 언급했던 구상흑연주위의 환형마르텐사이트에 의하여 구상흑연과 모재의 분리가 억제되기 때문인 것으로 보여지며 그림8에서 (a)는 표면경화부에서의 구상흑연주위의 파면을 (b)는 모재의 그것을 보여주고 있다. 여기에서 보면 초급속가열처리부의 구상흑연 주위조직에서는 환형마르텐사이트에 의한 취성파면을 명확히 보여주고 있으며 이 환형마르텐사이트가 모재와 구상흑연의 분리를 억제함으로 표면부근에서 피로크랙의 발생을 억제하여 크랙의 발생부를 따라서 피로한도의 증가를 가져온다고 생각된다. 둘째는 초급속가열처리로 인한 표면잔류응력

의 존재로 보여진다. 그림9는 미소잔류응력 측정장치에 의한 잔류응력의 크기를 보여준다. 모재의 파괴한도가 250MPa정도임을 감안할 때 500MPa정도의 표면잔류응력은 충분히 표면부근의 흑연이나 주조결함으로부터의 크랙발생을 억제할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 압축잔류응력의 효과가 소실되는 내부에서 크랙의 발생이 조장 된다고 생각된다. 그림10에 이 사실에 기초한 크랙의 거동을 모식적으로 나타내었다. 그림10의 (a)는 모재부에서는 크랙은 상대적으로 결합력이 약한 구상흑연과 모재의 사이를 거치며 빠르게 전파하고, 그림(b)에 보는 바와 같이 초급속가열처리재는 구상흑연의 주위에 생성된 환형마르텐사이트에 의해 진전지연현상을 일으키며 모재보다 느리게 전파한다.

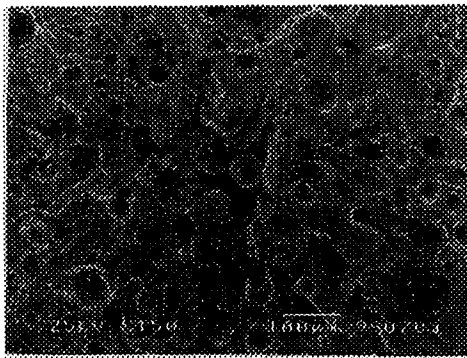


Fig. 6 Morphology of crack initiation site

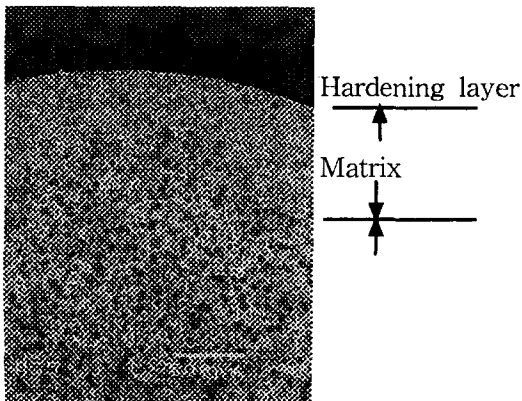


Fig. 7 Microscopic fractured surface

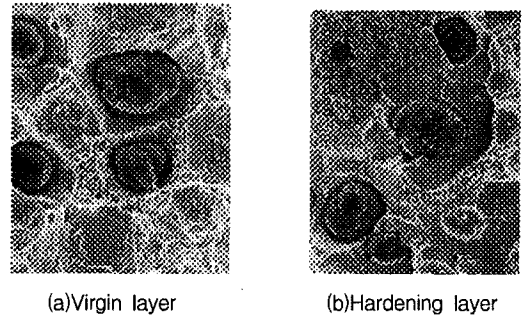


Fig. 8 Morphology of the fracture surface

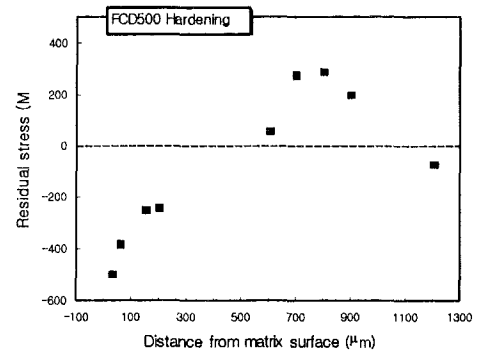
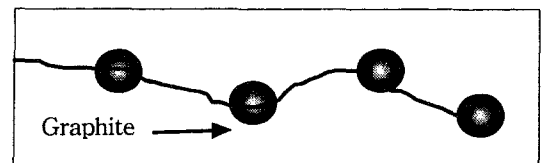
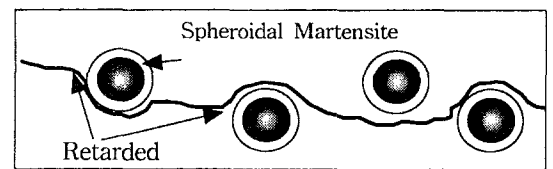


Fig. 9 Residual Stress Distribution



(a) FCD500 (Virgin)



(b) FCD500 (Hardening)

Fig. 10 Schematic illustration of fracture mechanism

4. 결 론

초급속가열처리를 행한 구상흑연주철FCD500에 대하여 회전굽힘피로시험을 실시한후, 초급속가열처리가 피로한도에 미치는 영향을 표면조직의 변화, 피로크랙의 발생, 성장기구를 통하여 실증적인 검토를 행한결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 초급속가열처리를 행한 FCD500의 표면조직에서도 통상의 가열처리에서 얻어지는 담금질 조직을 얻을수 있다.

(2) 초급속가열처리에 의해 FCD500의 피로한도가 증가한 이유는 표면경화층과 표면의 압축잔류응력에 의해 표면에서의 크랙의 발생이 억제되고 구상흑연주위에서 생성된 구상마르텐사이트가 크랙의 진행을 지연시키기 때문이다.

참고문헌

- [1] 鈴木秀人, 日本機械學會論文集, 58A-555, pp.2028-2033, 1992..
- [2] 鈴木秀人, 日本機械學會論文集, 61A-585, pp.906-912, 1995.
- [3] 鈴木秀人 外 2人, 日本機械學會論文集, 57A-537, pp.1062-1066, 1991.
- [4] 김재원, “機械材料學”, 喜重堂, pp.260-282, 1998.
- [5] 土居滋, 日本機械學會論文集, 60A-570, pp.331-336, 1994.
- [6] 越智保雄, 日本機械學會論文集, 57A-539, pp.1448-1494, 1991.
- [7] 田中哲志 外1人, 日本機械學會論文集, 60A-578, pp.2169-2173, 1994.
- [8] Blackmore, P.A. and Morton, K., *Int. J. Fatigue*, pp.149-155, 1982.
- [9] Krasowsky, A.J., Kramarenko, I.V. and Kalaida, V.V., *Fatigue, Fract. Eng. Mater. Struct.*, 10-3 pp.223-237, 1987.
- [10] Spies,H.J., *Steel Res.*, 64-8, pp.441-448, 1993.