

오스템퍼링처리한 구상흑연주철의 오스테나이트화 조건에 따른 기계적 성질 및 피로한도에 관한 연구

A Study on the Mechanical Properties and Fatigue Limit of the Austenitizing Treatment Conditions in Austempered Ductile Iron

김민건* 임복규**
Kim, Min-Gun Lim, Bok-Kyu

Abstract

This study was performed to investigate the effect of two step austenitized treatment on the mechanical properties and fracture characteristic of the ductile cast iron and austempered ductile cast iron(ADI). The obtained results of this study were as follows.

The matrix structures of specimens were changed differently by austenitizing heat treatment. Microstructure of austempered ductile cast iron obtained by two step austenitized treatment was bainitic ferrite and retained austenite. With two step austenitized treatment, yield strength, tensile strength and hardness decreased, while the elongation increased.

키워드 피로한도, 오스템퍼드구상흑연주철, 잔류오스테나이트, 베이나이틱 페라이트

Keywords Fatigue Limit, Austempered ductile cast iron, Retained Austenite, Bainitic Ferrite

1. 서론

오스템퍼링처리한 구상흑연주철(Austempered Ductile Cast Iron, 이하 ADI로 약칭)은 항온열처리온도와 베이나이틱 형성의 차이에 의해 상부 베이나이틱주철과 하부 베이나이틱주철로 크게 나눌 수 있다. ADI는 적당한 강도와 인성을 가지며 기계적 성질 및 물리적 성질 등이 우수하기 때문에 이에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다[1-4]. 오스템퍼링처리하여 얻은 ADI는 기지조직이 하부 베

이나이트인 것은 인장강도 130-160kgf/mm², 연신율을 2-4%로서 대단히 높은 강도를 갖지만, 상부 베이나이틱인 경우에는 인장강도 90-120kgf/mm², 연신율 6-13%로서 인성이 비교적 높고[5-6], 피로강도 역시 단조강과 거의 동등한 30-40kgf/mm² 수준이다[7]. 이러한 고강도, 고인성 및 내마모성을 겸비한 고품질 ADI는 지금까지의 자동차부품 제조에 많이 이용되었던 주강, 단조강 및 고장력강에 필적할만한 우수한 특성을 지니고 있다[7]. 최근 제품의 고급화 및 피로강도 신뢰성을 요구하는 자동차산업에서는 ADI를 자동차용 링기어, 피니언기어, 크랭크샤프트제조에 채택하고 있으며 그 수효는 더욱더 증가할 것으로 예상된다[3].

기계적 성질이 우수한 베이나이틱 페라이트(Bainitic Ferrite)와 잔류오스테나이트(Retained Austenite)조직을 갖는 우수한 ADI는 1) 오스템퍼

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수, 공학박사

** 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과 박사과정

링 처리조건, 2) 오스테나이트 처리시의 시간과 온도, 3) 오스테나이트 영역에서 베이나이트 변태영역까지 급랭속도, 4) 베이나이트화를 위한 등온유지온도 및 시간, 5) 등온유지 후 냉각방법 등에 따라 ADI의 내부조직은 변한다[8].

최근 발표된 자료에 의하면 구상흑연주철을 오스템퍼링 처리할 때 900°C의 오스테나이트 상태에서 1hr 동안 등온유지 시킨 후 변태온도인 800°C까지의 냉각속도를 0.05°C/sec로 제어하면 펄라이트 핵생성을 억제하여 우수한 성질의 ADI 조직을 얻을 수 있다는, 2단 오스테나이트화 열처리기술이 보고되고 있다[8].

따라서 본 연구에서는 특수한 합금원소가 첨가되지 않은 KS GCD 45를 사용하여, 일반적인 오스템퍼링처리에 의한 ADI와 2단 오스테나이트화 처리에 의한 ADI의 기계적 성질과 피로수명에 관한 영향을 연구 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 제작 및 열처리

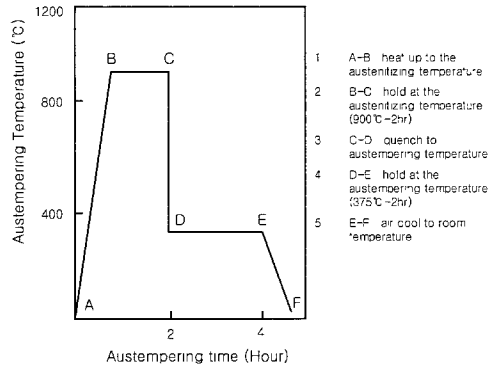
본 실험에 사용된 시험편의 화학성분을 Table 1에 나타내었다. 시험편 제작은 정적강도 시험과 피로한도 시험을 위해 두 가지 형상으로 제작하였다. 먼저 정적강도시험을 위한 인장시험편은 KS B 0801 4호 시험편으로 가공하였다. 그리고 피로한도 시험편은 Fig. 1과 같이 최소직경부를 $\phi 9$, R20으로 기계가공한 후 에머리페이퍼(#100~#1200)와 알루미나파우더(0.3 μ m)로 경면연마 한 다음 실험에 제공하였다.

열처리 방법은 Fig. 1과 같이 2가지 방법으로 실시하였다. 첫 번째 방법은 Fig. 1(a)와 같이 1) 오스테나이트화 처리시 탈탄을 방지하기 위해 920°C로 유지된 유동상조에 N₂가스 분위기에서 1시간 동안 오스테나이트화 시킨다. 2) 375°C까지 급랭한다. 3) 375°C에서 2시간 동안 등온유지 시킨다. 4) 대기 중에서 공랭한다. 두 번째 방법은 Fig. 1(b)와 같이 1) 탈탄을 방지하기 위해 920°C로 유지된 유동상조에 N₂가스 분위기에서 1시간 동안 오스테나이트화 시킨다. 2) 변태과정에서 펄라이트 핵생성을 억제하기 위해서 920°C에서 820°C까지 0.05°C/sec의 속도로 냉각한다. 3) 820°C에서 375°C까지 급랭한다. 4) 375°C에서 2시간 등온유지 시킨다. 5) 대기 중에서 공랭한다. 이와 같이 열처리과정을 모두 마친 시험편의 내부조직을 광학현미경으로 촬영하여 Fig. 3에 제시하였다.

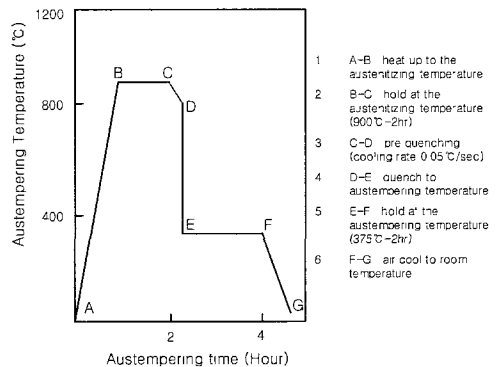
2.2 실험방법

구상흑연주철의 주조상태 및 오스템퍼링처리 후의 기계적 특성을 조사하기 위해 인장시험은

Shimadzu사의 유압서보식 인장압축 피로시험기에서 2mm/min의 변형속도로 인장시험하여 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도계를 사용하였으며 각 상에서 200g으로 30점의 평균값으로 구하였다. 피로시험은 완전역전 진폭(R=-1.0)을 가지는 회전굽힘형 피로시험기를 이용하여 실온 대기 중에서 실시하였다.



(a) single step



(b) Two step

Fig. 1 Heat treatment cycle for austenitizing and austempering of ductile cast iron.

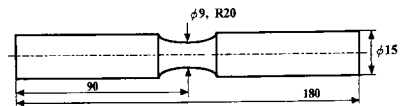


Fig. 2 Configuration and dimensions of rotary bending fatigue specimen (mm).

Table 1 Chemical composition of casting(wt%)

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 오스템퍼링처리 후 내부조직 관찰

구상흑연주철의 주방상태의 조직과 Fig. 1과 같이 2가지 형태로 오스템퍼링하였을 때 얻어지는 미세조직을 광학현미경과 주사형전자현미경(SEM)으로 관찰하여 그 조직을 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 3(a)는 KS GCD 45의 주방상태의 전형적인 형상으로 3가지 조직을 관찰할 수 있다. 검고 둥근 모양의 흑연과 백색의 페라이트 및 검은색의 펄라이트로 구성되어있다.

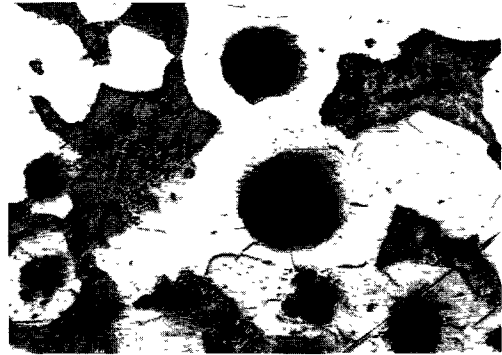
Fig. 3(b)는 주방상태의 구상흑연주철을 920℃에서 1시간 동안 오스테나이트화 처리 후 급냉처리를 거쳐 375℃에서 2시간 오스템퍼링한 후 대기중에 공랭한 조직이다. 오스테나이트화 처리 후 빠른 속도로 급냉으로 인해 조직이 매우 치밀하고 섬세한 침상의 페라이트와 잔류오스테나이트 조직으로 나타났다.

Fig. 3(c)는 주방상태의 구상흑연주철을 920℃에서 1시간 오스테나이트화 처리 후 920℃에서 820℃까지 0.05℃/sec의 속도로 예비 냉각한 다음, 급랭하여 375℃에서 120분 동안 오스템퍼링처리한 후 대기 중에서 공랭처리한 조직이다. 검고 둥근 모양의 흑연과 Fig. 3(b)보다 비교적 부드러운 베이나이티드 페라이트와 잔류 오스테나이트가 관찰되었다.

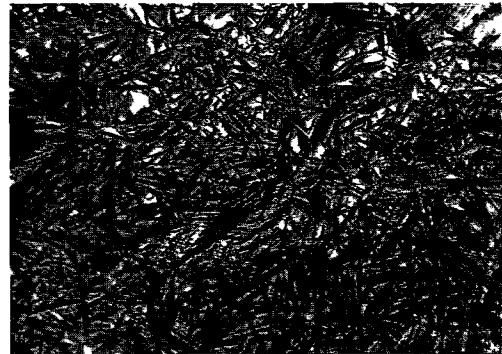
Fig. 3(b)와 (c)의 조직을 더욱 명확히 관찰하기 위해서 고 배율의 주사형전자현미경(SEM)으로 다시 촬영한 결과, Fig. 4와 같은 베이나이티드 페라이트와 잔류오스테나이트로 구성된 2상 혼합 기지조직인 오스페라이트를 관찰할 수 있다.

Fig. 4(a)와 (b)를 비교하면 두 재료 모두 베이나이티드 페라이트와 잔류오스테나이트가 존재하지만, 0.05℃/sec의 2단 오스테나이트화에 의한 Fig. 4 (b)가 베이나이티드 페라이트의 간격이 더욱더 넓고 길어진 형상과 잔류오스테나이트조직으로 구성되어 있음을 관찰할 수 있다.

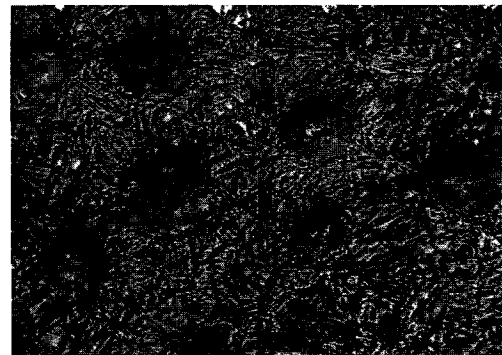
이와 같이 오스테나이트화 처리에 따라서 구상흑연주철의 기지조직이 변태되는 것을 관찰할 수 있었다. 그리고 이러한 변태의 원인이 기계적 성질도 변화시킬 것으로 판단되어 강도, 경도, 연신율 등의 기계적 성질을 조사하였다.



(a) Series A

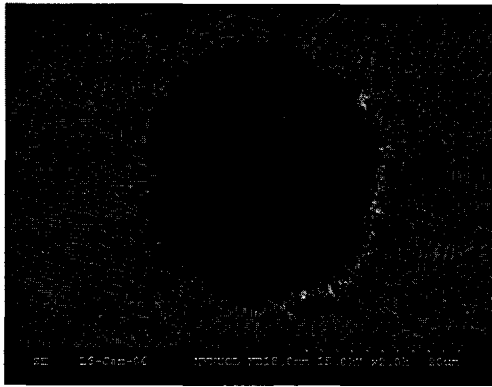


(b) Series B

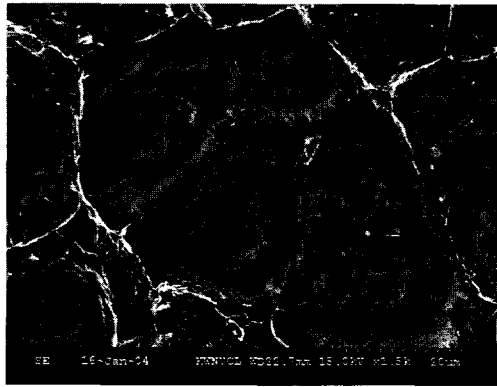


(c) Series C

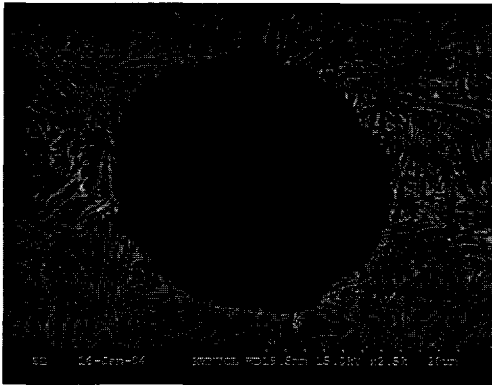
Fig. 3 Microstructure of (a) as cast ductile iron showing ferrite and islands of pearlite.×100 (b) ductile iron austenitized at 920℃ for 1h and austempered at 375℃ for 2h. (c) ductile iron austenitized at 920℃ for 1h and pre quenching (cooling rate of 0.05℃/sec from 920℃ to 820℃) and austempered at 375℃ for 2h. nital 2%. Magnification 500×.



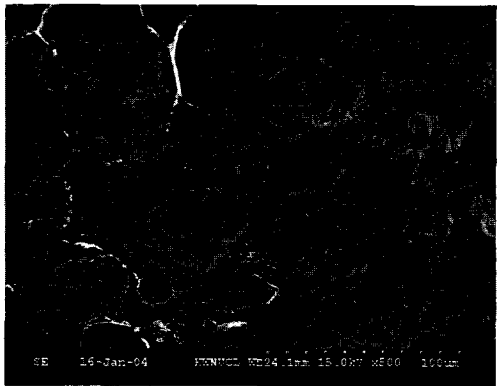
(a) Series B



(a) Series A



(b) Series C



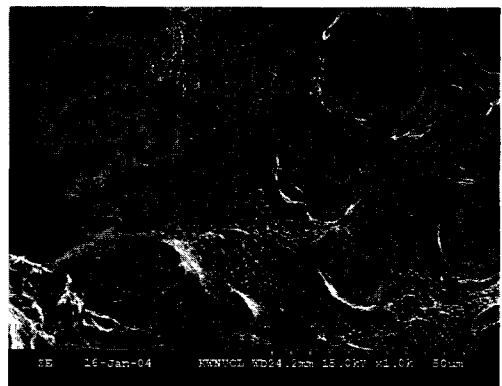
(b) Series B

Fig. 4 SEM Microstructure of ADI processed by (a) single step (b) two step.

3.2 기계적 성질 및 피로한도

구상흑연주철의 오스테나이트화 처리에 따라 다르게 변태된 내부조직을 관찰할 수 있었다. 이렇게 조직의 변화에 따라 기계적 성질과 피로특성에도 영향을 미칠 것으로 예상하여 인장시험과 경도시험 그리고 피로시험을 통해 기계적 성질과 피로특성에 관한 영향을 조사하였다.

먼저 인장시험과 경도시험결과를 Table 2에 나타내었고 인장시험에서 나타난 인장강도와 항복강도는 Series B가 가장 높게 나타났으며, 그 다음이 Series C, Series A순으로 나타났다. 그리고 경도시험 결과를 보면 역시 Series B가 가장 높게 나타났고, 그 다음이 Series C, Series A순으로 나타났다. 그러나 Series B와 C의 정적강도 평가 결과를 종합해 보면 두 재료 모두 인장강도와 항복강도는 큰 차이 없이 높았지만, 연신율은 1.74배, 경도는 1.72배로 인장강도에 비해 상대적인 큰 차이



(c) Series C

Fig. 5 SEM Micrographs of fracture surface in ductil cast iron. (a) as cast (b) single step (ADI) (c) two step (ADI).

ADI의 오스테나이트화 조건에 따른 기계적 성질 및 피로한도에 관한 연구

를 나타낸 결과를 볼 수 있다. 이와 같이 구상흑연 주철을 오스테퍼링처리를 행하게 되면 인장강도, 항복강도, 경도가 높아지는 이유는 오스테퍼링처리에 의해 기지조직이 베이나이트로 변태되어 강도와 연성의 조합이 적절히 개선되어지기 때문이다. 특히 2단 오스테나이트화에 의한 연신율의 증가는 1단 오스테나이트화보다 베이나이트 페라이트가 길기기고 잔류오스테나이트의 간격이 더욱더 넓어져 잔류오스테나이트의 양이 많이 생성된 이유로 연성이 더욱 증가된 것으로 판단한다

Fig. 5는 각각의 시험편을 인장시험 후 파단된 단면을 주사형전자현미경(SEM)으로 촬영한 것이다. Fig 5(a)는 구상흑연주철을 주방상태에서 인장시험한 결과로 파단된 단면이 전형적인 연성과면의 형상을 나타내고 있다

Table 2 Mechanical properties of specimen.

	σ_Y	σ_{TS}	δ	H _v
Series A (As cast)	316	443	16.2	184
Series B (Single step)	987	1246	4.2	598
Series C (Two step)	913	1143	7.3	347

σ_Y Yield strength(MPa) δ : Elongation(%)
 σ_{TS} Tensile strength(MPa) H_v Vicker's hardness

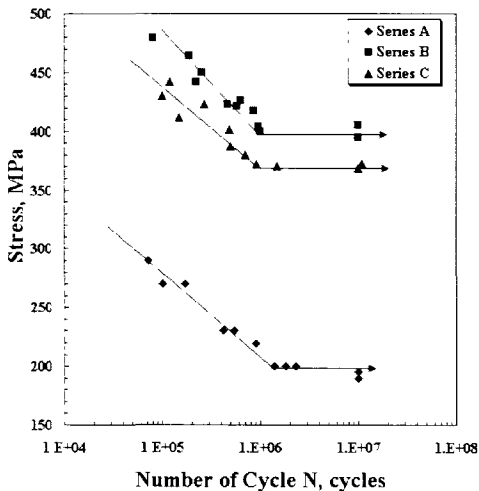


Fig. 3 Effects of heat treatments of the S-N curve of ADI

그리고 Fig. 5(b)은 고강도강에서 나타나는 전형적인 취성과파괴로 벽개(cleavage)파면의 형상이 관찰되었다 Fig 5(c)은 흑연주변에 약간의 섬유상과 딤플(dimple)상이 혼합된 연성과면 형상이 관찰되었다.

Fig 6은 회전굽힘형 피로시험기를 이용하여 완전역전진폭(R=-1.0)하의 실온 대기 중에서 피로시험 결과를 나타낸 것이다. KS GCD 45 주방상태의 Series A는 200MPa로 낮은 피로한도를 갖지만, 오스테퍼링 후의 Series B, C재는 401MPa, 380MPa로 높은 피로한도를 나타내고 있다 그리고 Series B, C재는 경도가 1.72배의 큰 차이에 불구하고 피로한도는 상대적으로 비슷한 결과를 나타내고 있다 이것은 Series C재의 2단 오스테나이트화처리로 기지조직 내의 잔류오스테나이트의 양이 증가되어 균열전파속도를 지연시킨 것으로 판단된다.

4. 결론

KS GCD 45의 구상흑연주철을 오스테퍼링 하기 위해 본 연구에서는 심각한 공해의 원인이 되는 염욕로 대신 구조가 간단하고 저렴한 진공로와 전기로를 이용하여 오스테퍼링처리 하였다 주방상태의 구상흑연주철을 920℃에서 오스테나이트화 처리 후 375℃에서 오스테퍼링 처리하였을 때와 920℃에서 오스테나이트화 처리 후 820℃까지 0.05℃/sec의 속도로 냉각시킨 후 375℃에서 오스테퍼링 처리 하였을 때의 2단 오스테나이트화에 따른 재료의 내부조직을 관찰하고 기계적 성질 및 피로수명을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 1단 오스테나이트와 2단 오스테나이트에 의해 오스테퍼링한 결과, 인장강도와 항복강도는 비슷했지만, 경도에서 1단 오스테나이트는 Hv 598 그리고 2단 오스테나이트는 Hv 347로 1.72배의 차이가 나타났다. 연신율은 1단 오스테나이트가 4.2%, 2단 오스테나이트는 7.3%로 1.74배의 차이를 나타내었다 즉, 2단 오스테나이트 후 오스테퍼링한 결과, 강도와 연성이 우수한 기계적 성질을 얻을 수 있었다

2) 구상흑연주철을 오스테퍼링처리 시 1단보다 2단 오스테나이트에 의해 베이나이트 페라이트와 잔류오스테나이트의 양이 증가하였다 그리고 정적 강도 시험후 파단면 관찰결과 대부분 섬유상과 딤플상이 혼합된 연성과면을 나타내었다.

3) 피로한도는 오스테퍼링하기 전 KS GCD 45

에서 200MPa, 1단 오스테나이트는 401MPa. 1단 오스테나이트는 380MPa로 2단 오스테나이트에서 가장 높은 피로한도를 나타내었다. 그러나 종합적인 평가를 보면 경도와 연신율의 상대적인 큰 차이에도 불구하고 피로한도는 1, 2단 오스테나이트 모두 근사한 결과를 나타내었다 결론적으로 2단 오스테나이트를 수행한 것이 1단 오스테나이트 보다 피로특성이 우수하였다.

참 고 문 헌

- [1] P. Prasad Rao, Susil K. Putatunda, "Investigations on the fracture toughness of austempered ductile irons austenitized at different temperatures", *Materials Science and Engineering A*, Vol.349 No.1-2, pp 136-149, 2003.
- [2] Susil K Putatunda, "Development of austempered ductile cast iron (ADI) with simultaneous high yield strength and fracture toughness by a novel two-step austempering process", *Materials Science and Engineering A*, Vol.315 No.1-2, pp.70-80, 2001.
- [3] P. Q. Dai, Z. R. He, C. M. Zheng, Z. Y. Mao, "In-situ SEM observation on the fracture of austempered ductile iron", *Materials Science and Engineering A*, Vol.319-321, pp.531-534, 2001.
- [4] R. C. Dommarco, P. C. Bastias, H. A. Dall'O, G. T. Hahn, C. A. Rubin, "Rolling Contact Fatigue RCF resistance of Austempered Ductile Iron(ADI)". *Wear*, Vol.221 No.1, pp.69-74, 1998.
- [5] K. Horunung, W. Hauke, 1st Int.l Conf. "on Austempered Ductile Iron", pp.201, 1984.
- [6] J. F. Janowalk and R. B. Gundlach, "AFS Trans", Vol.91, pp377, 1983
- [7] F. S. Rossi, B. K. Gupta, "Metal Progress", Vol.119 No.4, pp.25, 1981.
- [8] S. L. Choi, K. H. Yun, W. J. Kang, H. G. Kim. "Effect of Two Step Austenitizing Treatment Conditions on the Microstructural Characteristics of ADI", *J. of the Korean Society for Heat Treatment*, Vol.11, No.1, pp.46-53, 1998.