

873~1273 K에서 열화된 강화흑연강의 기계적 특성 연구

The Study of Mechanical Properties of Degraded Compacted Graphite Iron(CGI) Under 873~1273 K

남기우*†, 이수철**

Ki Woo Nam*† and Soo Cheol Lee**

초 록 벌레 모양 흑연철로 알려진 강화흑연강(CGI)은 주철보다 더 강하고 더 가벼운 것이 요구되는 응용제품에서 인기를 얻고 있는 금속이다. 최근 강화흑연강 디젤엔진 블록에 사용되고 있다. 본 연구에서는 디젤엔진의 배기 매니폴드에 사용되는 것을 고려하여, 873~1273 K에서 1~96 시간 열처리를 실시하여 CGI340의 기계적 특성을 평가하였다. 열처리를 실시한 시험편의 인장강도는 모재에 비하여 전체적으로 낮은 인장강도를 나타내었다. 열처리 시간이 증가할수록 인장강도가 감소하였으며, 열처리 온도가 높고 시간이 길어질수록 더 많이 감소하였다. 초음파 피로시험에 의한 피로한도는 모재는 약 130 MPa, 1173 K(96 hrs) 시험편은 약 100 MPa를 나타내었다. 경도는 열처리 시간이 증가할수록 감소하였으며, 열처리 온도가 높을수록 경도의 분포가 낮아졌다. 그리고 CGI340에 분포하는 구상흑연의 평균경도는 120 Hv, 벌레 모양 흑연의 평균경도는 114 Hv로 기지조직인 페라이트보다 낮은 경도를 나타내었다. 열처리 온도 및 시간에 따라서 구상흑연 및 벌레 모양 흑연에 대한 변화는 일정하지 않지만, 열처리 시간이 길어짐에 따라 기지조직의 결정립이 커지는 것을 확인하였다.

주요용어: 강화흑연강, 열처리 조건, 인장강도, 피로한도, 경도

Abstract Compacted graphite iron(CGI), also known as vermicular graphite iron, is a metal which is gaining popularity in applications that require either greater strength, or lower weight than cast iron. Recently compacted graphite iron has been used for diesel engine blocks. Considering that using in exhaust manifold of the diesel engine, CGI340 was conducted the heat treatment during 1 hour to 96 hours from 873 to 1273 K. Mechanical characteristics were evaluated. The obtained results are as follows; The tensile strength of the heat treated specimens showed overall lower tensile strength than that of the base metal. Tensile strength decreases with increasing of heat treatment time, and the higher heat treatment temperature and the longer time, were more reduced. The fatigue limit by the ultrasonic fatigue test was approximately 130 MPa of base metal, 100 MPa of 1173 K (96 hrs) specimen, respectively. The hardness decreases with increasing heat treatment time, and the higher the heat treatment temperature was lowered hardness distribution. In CGI340, average hardness of nodular graphite was 120 Hv, average hardness of vermicular graphite was 114 Hv. This showed lower hardness than the base structure ferrite. The nodular graphite and vermicular graphite according to the heat treatment temperature and time didn't have a consistent change. However, the grain size of base structure grew with increasing of heat treatment time.

Keywords: Compacted Graphite Iron, Heat Treatment Condition, Tensile Strength, Fatigue Limit, Hardness

1. 서 론

수요 때문에, 엔진 설계자들은 더욱 강한 엔진 블록 재료를 개발하기 위하여 노력하고 있다. 특히, 이것은 실린더의 압력 증가에 의하여 충돌 고출력, 저 배출가스 및 연료 경제성에 대한

[접수일: 2013. 2. 27, 수정일: 2013. 4. 3, 게재확정일: 2013. 4. 12] *부경대학교 재료공학과, **부경대학교 대학원, †Corresponding Author: Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, 608-739, Korea (E-mail: namkw@pknu.ac.kr)

성능 목표의 해결이 목적인 디젤 섹터에서는 필수적이다. 오늘날 직접 분사 디젤에서 보어 압력은 약 135 bar이고, 차세대 DI 디젤은 160 bar 전후이다. 대용량 트럭의 피크 연소 압력은 이미 200 bar를 초과하고 있다. 회색 주철과 상용 알루미늄 합금의 강도, 강성 및 피로 특성은 이러한 사용 기준을 만족하기에 불충분하다. 그러므로 많은 자동차 하청업체들은 가솔린과 디젤엔진 실린더 블록 및 헤드 어플리케이션을 위하여 고온용 강화흑연강(compactd graphite iron, CGI)를 개발하였다.

CGI가 알려진 것이 40년 이상 되었으며, 많은 논문이 발표되었지만[1-9], CGI의 특성은 회색 주철과 상용 알루미늄 합금의 특성만큼 아직 잘 알려지지 않다. 흑연 침전물은 일반적으로 짧고, 뭉뚱하고 모서리가 둥글기 때문에, CGI는 회색과 연성주철 사이의 중간정도 우수한 기계적 및 물리적 특성을 가지고 있다. 내연기관 및 브레이크 시스템과 같은 자동차 부품은 상대적으로 높은 열전도성 때문에 사용한다[10-12]. CGI는 기계적 강도, 마모 특성 및 열전도율의 우수한 특성 때문에, 엔진 블록, 실린더 헤드, 브레이크 드럼 및 디스크 등에 사용되고 있다. 실린더 내의 연소 가스 온도는 엔진의 압축비 또는 운전조건(부하)에 따라서 다르다. 이러한 고온 가스는 엔진 각 부로 전달되어, 부품의 온도가 지나치게 상승하여 실린더 헤드의 변형을 일으킬 수 있다.

따라서 본 논문은 디젤엔진의 배기 매니폴드에 사용되는 것을 고려하여, 873~1273 K에서 1~96 시간 열처리를 실시하여 CGI340의 기계적 특성 및 피로한도를 평가하였다.

2. 엔진의 배기가스 온도

냉각장치는 엔진의 각 부를 냉각하여 엔진의 과열을 막는 것이다. 엔진 작동 중 실린더 내의 연소가스의 온도는 그 엔진의 압축비라든지 운전 조건(부하)에 따르지만, 보통 상사점 후 283~288° 부근에서 2273 K 이상으로 가장 높고, 그 후 팽창하면서 973~1173 K 부근에서 배기한다. 이러한 고온의 열은 엔진 각 부로 전달된다. 이들 부품의 온도가 지나치게 상승하면 실린더 헤드의 변형이나 피스톤이 손상을 일으킨다. Fig. 1은 엔진의 가스 온도를 크랭크 각으로 나타낸 것이다.

3. 재료 및 실험 방법

본 연구에 사용한 재료는 신명테크에서 제조한 CGI340을 사용하였다. CGI340의 화학적 성질 및 기계적 특성을 Table 1과 2에 나타낸다. 배기가스에 의한 열화 영향을 조사하기 위하여, 873, 973, 1073, 1173 및 1273 K에서 각각 1, 5, 10, 24, 48 및 96시간 열화처리를 실시하여 로냉하였다.

시험편의 형상과 치수는 Fig. 2에 나타낸다. (a)는 인장시험편이고, (b)는 피로시험편이다. 인장 실험은 인스트론의 모델 4204 인장시험기를 사용하였고, 크로스헤드 속도는 0.5 mm/min, 실온·대기 중에서 실시하였다. 피로실험은 메디소스플러스(주)의 UFT-20X의 초음파 피로시험기를 사용하여 Table 3과 같은 조건으로 실온·대기 중에서 실시하였다.

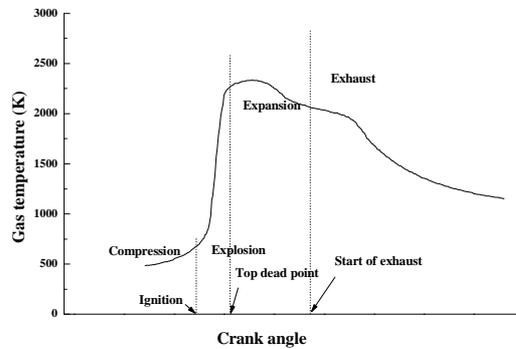


Fig. 1 Relationship of gas temperature and crank angle

Table 1 Chemical compositions of CGI340 (wt.%)

C	Si	Mn	Mg	Cr	Al	Cu	S	P
3.63	2.49	0.42	0.007	0.02	0.008	0.42	0.014	0.01

Table 2 Mechanical properties of CGI340

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
411.5	313.8	2.7

Table 3 Conditions of ultrasonic fatigue test

Heat treat	Loading frequency (kHz)	Stress ratio (R)	Displacement (μm)	Test
Base metal	20	-1	11~16	Room Temp.
1173 K-96 h			8~16	

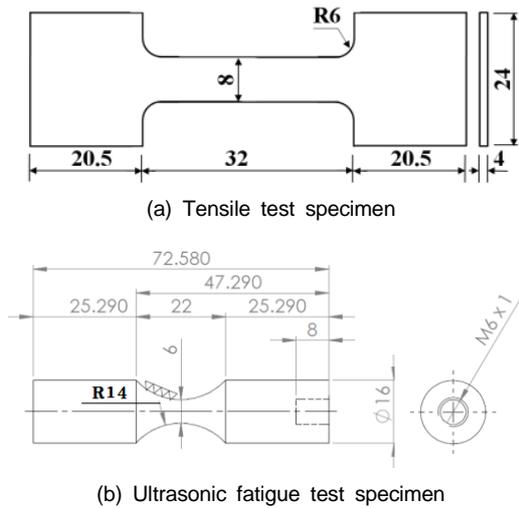


Fig. 2 Dimensions and shape of specimen (mm)

경도는 Mitutoyo사의 HM-124 마이크로비커스 경도기를 사용하여, 30g의 하중으로 10초간 유지하였다. 한 개의 시험편을 5회 측정하여, 최대값과 최소값을 제외하고 3개의 평균을 사용하였다.

조직은 경면연마하여 나이탈 3% 용액으로 예칭하여, Olympus사의 모델 PME3 금속현미경을 사용하여 촬영하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 인장강도

Fig. 3은 모재 3개에 대한 인장강도를 나타낸다. 본 연구에서 인장한 모재의 평균 기계적 강도는 Table 2와 비슷하게 나타났다. 평균인장강도는 401 MPa, 연신은 2.45%를 나타내었다. 이것은 페라이트 25%와 화학적 성분은 같으나, 기계적 특성은 훨씬 우수하게 나타났다[13].

Fig. 4(a)와 (b)는 1시간 및 96시간에서 열처리한 결과를 나타낸다. 이 그림에서 온도가 증가할수록 모재에 비하여 인장강도가 떨어지고, 연신률도 작아지는 것을 알 수 있다. 1273 K에서 96 h 시험편은 열처리 도중에 파손되어 실험을 수행할 수 없었다.

Fig. 5(a)와 (b)는 1073 K 및 1273 K에서 열처리한 결과를 나타낸다. 각 열처리 온도에서 시간이 증가할수록 모재에 비하여 인장강도가 떨어지고, 연신률도 작아지는 것을 알 수 있다.

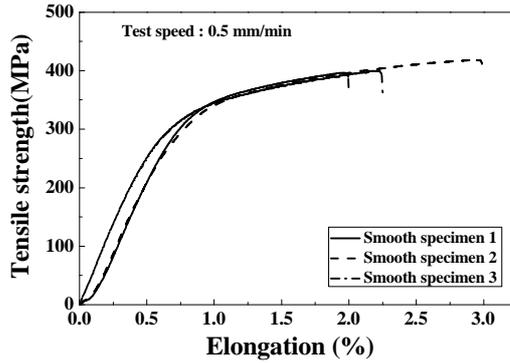
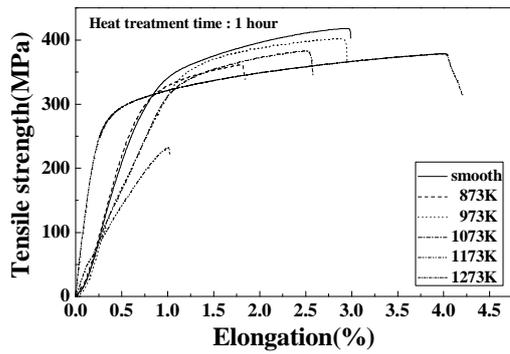
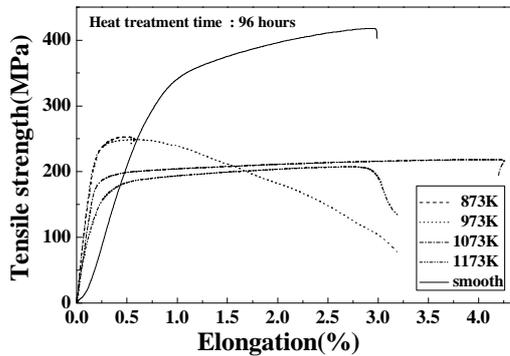


Fig. 3 Tensile strength - elongation curve from smooth specimen



(a)

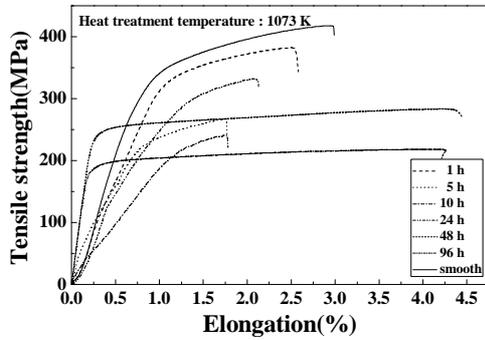


(b)

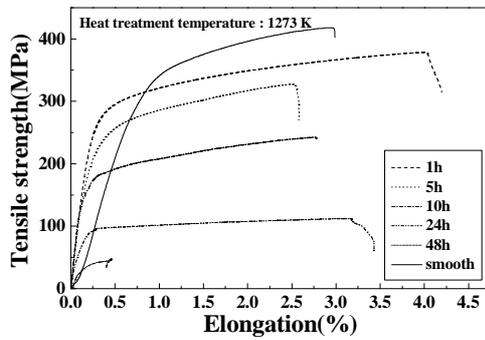
Fig. 4 Tensile strength - elongation curve according to temperature for heat treatment time. (a) 1 hour, (b) 96 hours

Fig. 6은 Fig. 4와 Fig. 5에서 얻어진 결과를 인장강도와 열처리 시간의 함수로 나타낸 것이다. 열처리를 실시한 시험편의 인장강도는 모재에 비하여 전체적으로 낮은 인장강도를 나타내고 있다. 또한, 열처리 시간이 증가할수록 인장강도가 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이는 열처리 온

도가 높고 시간이 길어질수록 더 많이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이것은 디젤엔진의 배기 매니폴드에 사용할 경우, 장시간의 사용에 따라서 강도가 현저하게 떨어지고, 연신률이 감소하는 결과를 초래하여 취성적인 성질을 가지게 된다는 것을 의미한다.



(a)



(b)

Fig. 5 Tensile strength - elongation curve according to time for heat treatment temperature. (a) 1073 K, (b) 1273 K

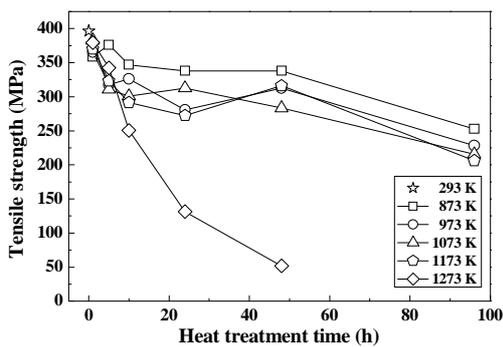


Fig. 6 Relationship between of tensile strength and heat treatment time according to heat treatment temperature

4.2. 피로한도

모재와 비교하기 위하여 대표적으로 1173 K에서 96시간 열처리한 시험편의 피로한도를 Fig. 7에 나타내었다. 일반적인 피로한도시험에서는 10^7 회에서 피로한도를 나타내지만, 본 연구에서는 10^8 회를 피로한도로 나타내었다. 모재의 피로한도는 약 130 MPa를 나타내고, 1173 K(96 hrs) 시험편은 약 100 MPa를 나타내었다. 이와 같이 열처리에 의하여 열화가 발생함에 따라 피로한도가 현저하게 저하하는 것을 알 수 있었다. 따라서 구조물에 적용하는 재료는 장시간 사용에 따라서 열화가 나타나고, 이로 인하여 구조물의 수명이 단축되는 현상이 발생할 수 있으므로 사용에 주의가 필요하다.

4.3. 경도

열처리 시간에 따른 온도별 마이크로비커스 경도를 Fig. 8에 나타내었다. 경도 측정은 하중 300 g으로 10 초간 압입하였으며, 5회 측정하여 평균

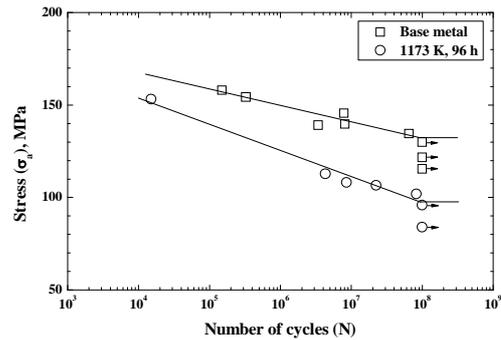


Fig. 7 Fatigue limit by ultrasonic fatigue test

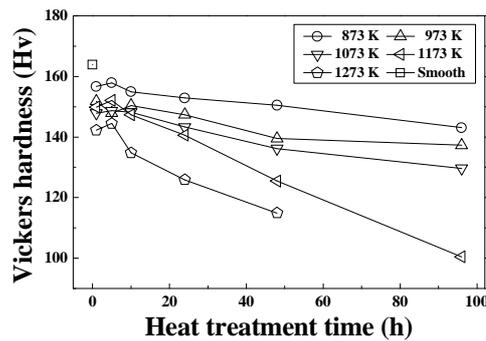


Fig. 8 Relationship between of Vickers hardness and heat treatment time according to heat treatment temperature

값을 사용하였다. 모재의 경도는 164 Hv로 나타났다. 그러나 인장강도 결과와 같이 열처리 시간이 증가할수록 경도가 감소하였으며, 열처리 온도가 높을수록 경도의 분포가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 CGI340에 분포하고 있는 구상흑연의 평균경도는 120 Hv, 벌레 모양 흑연의 평균경도는 114 Hv로 기지조직인 페라이트보다 낮은 경도를 나타내었다.

4.4. 조직

CGI340의 흑연은 Fig. 9(a)와 같이 각각 벌레 형상 또는 구불구불한 입자로 존재한다. 입자들은 회주철과 같이 길고 무질서하게 존재하지만, 흑연 입자는 더 짧고 더 길며, 모서리가 둥글다. 흑연 입자는 금속현미경으로 관찰하면 벌레 모양으로 보인다. Fig. 9(b)는 나이탈 용액으로 에칭을 많이 하여 SEM으로 관찰한 조직이다. 이 그림에서 흑연은 공정 셀 안에 서로 연결되어 있다[13]. 이와 같이 모서리가 둥글고 불규칙적인 표면을 가지는 복합 흑연 조직은 흑연과 철과의 사이에 강한 접착력을 가진다. 결국, CGI340 조직은 균열 발생과 진전을 억제하여, 회주철에 비하여 기계적 특성의 향상을 가져온다.

Fig. 10은 1073 K 열처리 온도에서 시간에 따른 미세조직을 나타낸다. 시간에 따른 구상흑연 및 벌레 모양 흑연의 변화는 일정하지 않지만, 열처리 시간이 길어짐에 따라 기지조직의 결정립의 성장 및 흑연 주위의 원형이 희미하게 사라지는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 결정립의 성장 및 흑연의 확산으로 기지조직이 열화되어 인장강도 및 경도가 감소한 것으로 판단된다.

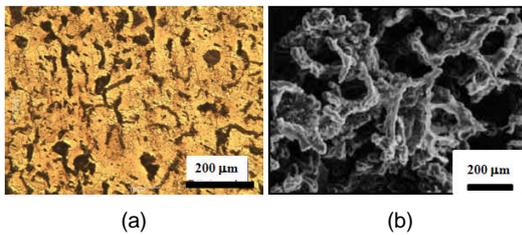


Fig. 9 (a) Micrographs of as-received material, (b) deep-etched SEM micrographs show the true three dimensional graphite morphology[15]

Fig. 11은 1273 K에서 48 h 열처리한 시험편이다. (a)는 과도한 열처리에 의하여 열화되어 중심부와 외곽부가 확실하게 구분되었다. 중심부 (b)는 조대한 기지조직인 페라이트에 구상흑연이 있으나, 외곽부 (c)는 미세한 조직으로 되었다.

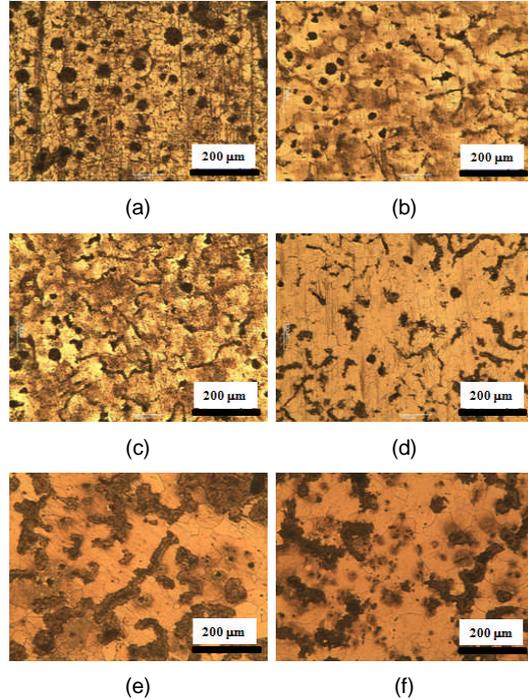


Fig. 10 Micrographs from heat treatment temperature 1073 K. (a) 1 h, (b) 5 hrs, (c) 10 hrs, (d) 24 hrs, (e) 48 hrs, (f) 96 hrs

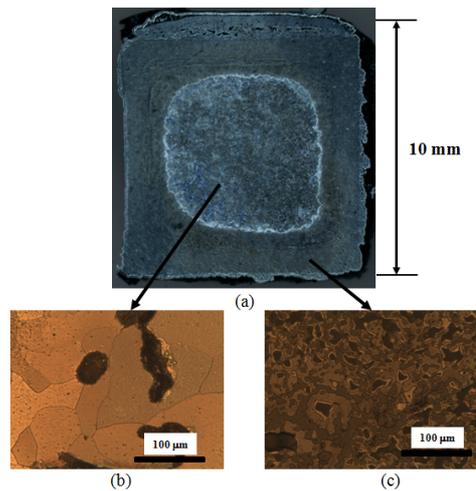
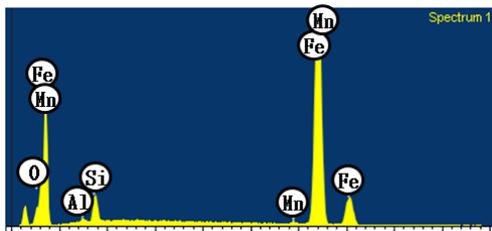


Fig. 11 Micrographs from heat treatment temperature of 1273 K during 48 hours

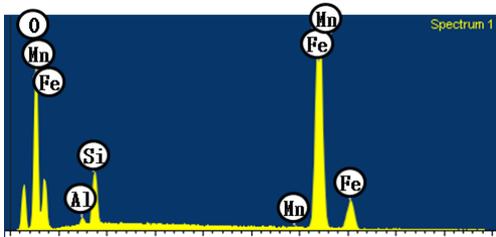
Fig. 12와 13은 Fig. 11의 (b)와 (c)를 EDS 분석한 것이다. (b)와 (c)에서 Al, Si 및 Mn의 성분 변화는 많지 않으나, O와 Fe의 성분 변화는 많이 발생하였다. Fig. 12에서 O는 3.81 wt.%, Fe는 91.13 wt.%이지만, Fig. 13에서 O는 26.93 wt.%, Fe는 66.63 wt.%이다. 따라서 Fig. 11(a)의 외곽부는 과도한 열처리에 의하여 산화된 것이라 판단된다.

Fig. 14와 15는 열처리 온도 및 시간에 따라서 구상흑연 및 벌레 모양 흑연이 어떠한 변화가 일어났는지 파악하기 위하여 에칭을 많이 실시하여 SEM으로 촬영한 것이다.



Element	Weight %	Atomic %
O K	3.81	11.66
Al K	0.49	0.89
Si K	3.95	6.89
Mn K	0.63	0.56
Fe K	91.13	80.00
Totals	100.00	100.00

Fig. 12 EDS analysis of (b) part of Fig. 11



Element	Weight %	Atomic %
O K	26.93	54.25
Al K	0.73	0.88
Si K	5.46	6.27
Mn K	0.25	0.15
Fe K	66.63	38.46
Totals	100.00	100.00

Fig. 13 EDS analysis of (c) part of Fig. 11

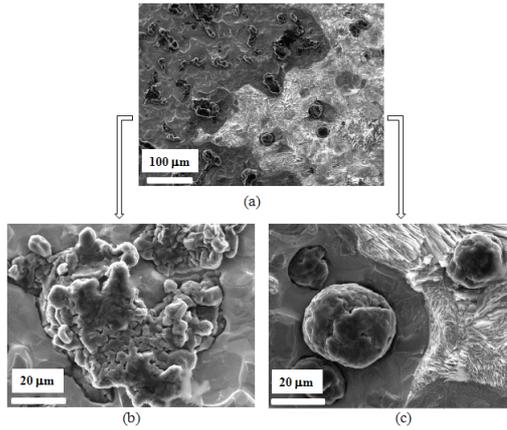


Fig. 14 Deep-etched SEM micrographs from as-received material

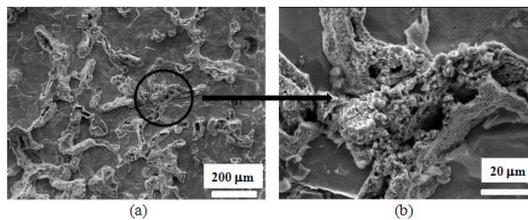


Fig. 15 Deep-etched SEM micrographs from heat treated specimen during 24 hrs at 1173 K

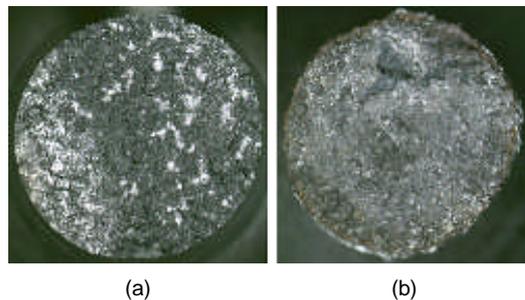


Fig. 16 Fracture surface from fatigue test. (a) base metal, (b) 1173 K (96 hrs) specimen

Fig. 14는 모재로서 (a)는 흑연, 페라이트 기지 및 펄라이트 박판 층으로 구성되어 있다. (a)의 좌우를 확대하여 (b)와 (c)에 나타내었다. (b)는 입계 형상이 나타나 있는 페라이트 기지에 벌레 모양 흑연이 형성되어 있고, (c)는 페라이트 기지에 벌레 모양 흑연 및 펄라이트 박판 층으로 구성되어 있다.

Fig. 15는 1173 K에서 24시간 열처리를 실시하여 재료의 열화 손상을 부여한 것이다. (a)는 Fig.

14와 다르게 열처리에 의하여 페라이트 기지에 벌레 모양 흑연이 길게 형성되어 있다. (a)를 확대하여 (b)에 나타내었다. (b)의 흑연은 길게 형성되면서, 기공이 많이 존재한다.

Fig. 16은 모재와 1173 K에서 96시간 열처리한 시험편의 피로시험 후 파단면을 나타낸 것이다. (a)는 모재시험편, (b)는 1173 K(96 h)시험편이다. 모재(a)는 표면부에서 균열이 발생하여 전단면으로 전파하여 파단된 양상을 나타내고 있다. 1173 K(96 h)시험편(b)는 열처리에 의하여 표면부에 산화물이 남아 있으며, 파면도 열화되어 모재와 확연하게 다른 조직을 나타내고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 디젤엔진의 배기 매니폴드에 사용되는 것을 고려하여, 873~1273 K에서 1~96 시간 열처리를 실시하여 CGI340의 인장강도, 피로한도, 경도 및 조직적 특성을 평가하였다.

- 1) 열처리를 실시한 시험편의 인장강도는 모재에 비하여 전체적으로 낮은 인장강도를 나타내었다. 열처리 시간이 증가할수록 인장강도가 감소하였으며, 열처리 온도가 높고 시간이 길어질수록 더 많이 감소하였다.
- 2) 초음파 피로시험에 의한 피로한도는 모재는 약 130 MPa, 1173 K(96 h)시험편은 약 100 MPa를 나타내었다.
- 3) 경도는 열처리 시간이 증가할수록 감소하였으며, 열처리 온도가 높을수록 경도의 분포가 낮아졌다. 그리고 CGI340에 분포하는 구상흑연의 평균경도는 120 Hv, 벌레 모양 흑연의 평균경도는 114 Hv로 기지조직인 페라이트보다 낮은 경도를 나타내었다.
- 4) 열처리 온도 및 시간에 따라서 구상흑연 및 벌레 모양 흑연에 대한 변화는 일정하지 않지만, 열처리 시간이 길어짐에 따라 기지조직의 결정립이 커지는 것을 확인하였다.
- 5) 흑연, 페라이트 기지 및 펄라이트 박판 층으로 이루어진 모재는 열처리에 의하여 페라이트 기지에 벌레 모양 흑연이 길게 형성되었다.

참고문헌

- [1] I. C. Hughes and J. Powell, "Compacted

graphite irons - high quality engineering materials in the cast iron family," *SAE Paper*, 840772 (1984)

- [2] S. Dawson, "Compacted graphite iron: Cast iron makes a comeback," *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 46, pp 44-47 (1994)
- [3] C. R. Loper, M. J. Lulich, H. K. Park and A. M. Gyarmaty, "The relationship of microstructure to mechanical properties in compacted graphite irons," *AFS Transactions* 80-160, pp. 313-330 (1980)
- [4] E. Nechtelberger, "The Properties of Cast Iron up to 500°C," English edition published in 1980 by Technicopy Ltd, England; German edition published in 1977 by Fachverlag Schiele und Schön GmbH, Germany (1977)
- [5] K. Röhig, "Gusseisen mit vermicular graphit-herstellung, eigenschaften, anwendug," *Konstruieren + Giessen*, Vol. 16, pp. 7-27 (1991)
- [6] D. M. Stefanescu, R. Hummer and E. Nechtelberger, "Compacted graphite irons," *Metals Handbook*, Ninth Edition, Vol. 15, pp. 667-677 (1988)
- [7] T. Okamoto, A. Kagawa, K. Kamei and H. Matsumoto, "Effect of graphite shape on thermal conductivity, electrical resistivity, damping capacity and Young's modulus of cast iron below 500°C," *Journal of Japan Foundrymen's Society*, Vol. 55, pp. 597-602 (1983)
- [8] B. I. Imasogie and U. Wendt, "Characterization of graphite particle shape in spheroidal graphite iron using a computer-based image analyzer," *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, Vol. 3, pp. 1-12 (2004)
- [9] Y. H. Shy, C. H. Hsu, S. C. Lee and C. Y. Hou, "Effects of titanium addition and section size on microstructure and mechanical properties of compacted graphite cast iron", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 278, pp. 54-60 (2000)

- [10] G. F. Geier, W. Bauer, B. J. McKay and P. Schumacher, "Microstructure transition from lamellar to compacted graphite using different modification agents," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 413-414, pp. 339-345 (2005)
- [11] M. Chen and R. Wan, "Properties and application of compacted vermicular graphite cast iron in vehicle component," *6th International Pacific Conference on Automotive Engineering*, Korean Society of Automotive Engineers, Seoul, South Korea, pp. 713-718 (1991)
- [12] D. Steve, "Compacted graphite iron: mechanical and physical properties for engine design," *Sintercast*, pp. 1-20 (1999)
- [13] D. Steve, "Compacted graphite iron - A material solution for modern diesel engine cylinder blocks and heads," *68th World Foundry Congress 7th-10th*, pp. 93-99 (2008)