873~1173 K에서 열처리된 강화흑연강(Compacted Graphite Iron, CGI)의 음향방출 특성

Acoustic Emission of Heat Treated Compacted Graphite Iron under 873~1173 K

남기우*[†], 안병건**, 이수철***,

Ki-Woo Nam*[†], Byung-Kun Ahn** and Soo-Chul Lee***

초 록 CGI는 주철보다 큰 강도 또는 작은 무게가 요구되는 응용에서 인기를 얻고 있다. 최근, 강화흑연강은 디젤 엔진 블록, 터보 하우징 및 배기 매니폴드에 사용된다. 이 논문은 873~1173 K에서 1~24 시간 동안 열화된 CGI340의 기계적 성질의 변화에 따른 음향방출 특성을 평가하였다. 연필심 파괴시험 결과에서, 탁월주파수 및 모재의 속도는 각각 97 kHz와 5,490 m/s이었다. 인장시험에서 모재는 상대적으로 높은 탁월주파수를 얻었다. 그러나 열처리된 재료, 열처리 시간이 길고, 열처리 온도가 높을수록, 낮은 주파수의 영역에서 얻어졌다. 이러한 현상은 장기간의 사용에 의해 나타난다.

주요용어: 강화흑연강, 음향방출, 연필심 파괴시험, 인장시험, 탁월주파수

Abstract CGI 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, turbo housings and exhaust manifolds. This paper were assessed acoustic emission characteristics according to the mechanical properties change of degraded CGI340 during 1-24 hours at 873~1173 K. In results of pencil lead fracture test, the dominant frequency and the velocity of base metal were 97 kHz and 5490 m/sec, respectively. The base metal in a tensile test was obtained relatively high dominant frequency. However, the heat treated materials, the longer the heat treatment time, the higher the heat treatment temperature, were obtained in the area of lower frequencies. This phenomenon appears by long-term use.

Keywords: Compacted Graphite Iron, Acoustic Emission, Pencil Lead Break Test, Tensile Test, Dominant Frequency

1. 서 론

고 출력, 저 배출가스 및 연료 경제성에 대한 수요 때문에, 엔진 설계자들은 더욱 강한 엔진 블록 재료를 개발하기 위하여 노력하고 있다. 많은 연구자는 고온용 CGI(compact graphite iron)를 개발하여 가솔린 엔진과 디젤 엔진의 실린더 블록 및 헤드 등에 적용하기 위하여 연구하였다 [1-3].

CGI가 알려진 것은 40년 이상 되었으며, 많은 논문이 발표되었지만[4-11], CGI의 특성은 회색 주철과 상용 알루미늄 합금의 특성만큼 아직 잘 알려지지 않았다. 흑연 침전물은 일반적으로 짧고, 뭉툭하고 모서리가 둥글기 때문에, CGI는 회색과 연성 주철 사이의 중간 정도의 기계적 성질 및 물리적 특성을 가지고 있다. 내연기관 및 브레이크 시스템과 같은 자동차 부품에는 상대적으로 높은 열전도성 때문에 CGI를 사용한다[12,13].

[접수일: 2013. 8. 14, 수정일: 2013. 10. 8, 게재확정일: 2013. 10. 23] *부경대학교 재료공학과, **한국폴리텍대학 부산캠퍼스, ***부경대학교 대학원 학연협동기계공학, [†]Corresponding Author: Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea (E-mail: namkw@pknu.ac.kr)

주철은 기계적 강도, 마모 특성 및 열전도율이 우수하기 때문에, 엔진 블록, 실린더 헤드, 브레이크 드럼 및 디스크 등에 사용되고 있다. 실린더 내의 연소가스 온도는 엔진 압축비 또는 운전 조건(부하)에 따라서 다르다. 즉, 연소 가스는 보통 상사점 후, 283~288° 근처에서 2273 K 이상으로 가장 높고, 그 후 팽창하면서 973~1173 K 정도에서 배기한다. 이러한 고온은 엔진 각부로 전달되어, 부품의 온도가 지나치게 상승하여 실린더 헤드의 변형을 일으킬 수 있다[14].

따라서 본 논문은 CGI340 재료가 디젤 엔진 실린더 헤드의 배기 매니폴드에 적용되어, 장시간 사용에 따르는 열화에 의하여 기계적 특성이 변하는 것을 검토하였다. 즉, 873~1173 K에서 1~24시간 열화한 CGI340 열화재의 기계적 특성 및 음향방출을 평가하였다.

2. 재료 및 실험방법

본 연구에 사용한 재료는 신명테크에서 제조한 CGI340을 사용하였다. CGI340의 화학적 성질 및 기계적 특성을 Table 1과 2에 나타낸다. 배기 가스에 의한 열화 영향을 조사하기 위하여, 873, 973, 1073 및 1173 K에서 각각 1, 5, 10 및 24시간 열화 처리를 실시하여 로냉하였다. 이렇게 열화 처리한 시험편을 사용하여 열화 온도와 시간에 따르는 AE(acoustic emission)특성을 평가하기 위하여, 연필심 파괴(pencil lead fracture; Hsu-Neilsen source)시험을 실시하였다.

인장시험은 Fig. 1과 같은 인장시험편으로 인스트론의 모델 4204 인장시험기를 사용하였고, 크로스헤드 속도는 0.5 mm/min, 대기 중의 실온에서 실시하였다. 연필심 파괴시험 및 인장시험에 의한 음향방출에 의한 진폭 분포를 얻기 위한 AE시스템은 문턱값(threshold) 10 mV, 각 채널에 대해 1024 point gate length로서 12.5 MHz의 디지털화 속도를 가지는 fracture wave detector (FWD)를 사용하였다. 센서(transducer, DWCB1025)는 1~1.5 MHz의 광대역 센서를 사용하였다. 샘플링 속도와 포인트 수는 10 MHz와 1024 point로 각각 설정하였고, 지속시간은 102.4 μ s로 설정하였다. 검출된 신호들은 40 dB로 증폭시켰다. 연필심 파괴시험에서 센서는 Fig. 1과 같이 연필심 파괴 지점에서 각각 28.5 mm에 부착시켰다.

Table 1 Chemical compositions (wt.%) of CGI340

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

Fig. 1 Dimensions and shape of specimen, schematic diagram of pencil lead test (mm)

Fig. 2 Schematic diagram of typical signal from pencil lead fracture

조직 관찰용 시험편은 SiC 연마지를 이용하여 연마하였고, 0.3 μ m Al_2O_3 로 최종적으로 경면연마한 후에 0.2% 나이탈 용액으로 에칭(etching)하여 광학현미경으로 관찰하였다.

연필심 파괴는 Fig. 1와 같이 시험편의 표면위에 직접 하중을 부하하는 기법이다(ASM Standard E1067-85, ASTM Standard E976-84). 이것은 대칭형(extensional mode)과 비대칭형(flexural mode) 신호가 발생한다. 연필심 파괴에 의하여 얻어진 신호를 대표적으로 Fig. 2에 나타낸다.

이 그림에서 신호의 첫 부분은 저진폭, 고주파수를 나타내며, 뒷부분은 고진폭, 저주파수를 나

타낸다. 신호의 첫 부분은 신호원에서 발생하는 파가 먼저 수신 센서에 도착하므로 뒷부분보다 더 높은 속도를 갖는 파이다[15].

대칭형과 비대칭형 사이는 신호원과 센서 사이의 거리가 증가함에 따라서 멀어지고, 쉽게 구별된다. 따라서 이동 거리가 클수록, 속도 차는 빠른 대칭형과 느린 비대칭형 사이에 더 큰 지연이 나타난다.

음속은 일정한 거리로 떨어진 두 개의 센서에 의하여 얻어진 대칭형 파형의 시간차를 이용하여 계산할 수 있다.

$$c_i = d / (t_{i2} - t_{i1}) \quad (1)$$

여기서, d 는 두 센서 사이의 거리이고, i 는 대칭형 또는 비대칭형을 나타낸다. 그리고, t_{i1} 과 t_{i2} 는 파가 각각 첫 번째 센서와 두 번째 센서에 도착한 시간이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 연필심 파괴시험

실험에서 얻어진 대칭형의 속도를 Fig. 3에 나타낸다. 모재의 속도는 5490 m/s이고, 열화시험편의 속도는 1시간에서 거의 변화가 없지만, 5시간에서 속도가 작아지고, 10시간은 거의 비슷하거나 약간 작게 나타났다. 그러나 24시간은 속도가 빨라졌다. 이것은 48시간 열화재[14]에 나타내듯이 시간이 길어짐에 따라서 시험편의 중앙부 조직이 미세하여 음속이 빠르게 나타났다고 판단된다.

연필심 파괴시험에서 얻어진 신호에 대하여 열화 시간에 따른 주파수 분석을 실시하였다. Fig. 4는 873 K에서 1시간 열화시킨 시험편의 AE 신호(a)와 주파수 분석(b), 그리고 이산화 웨이브릿(wavlet) 해석법에 의한 결과(c)를 나타내고 있다. 97 kHz 주파수가 Fig. 4(c)의 종축 78 kHz에 표시되는 이유는, 웨이브릿 해석법은 종축의 각 레벨 중간 값으로 나타나기 때문이다. 즉, 58 kHz 이상과 117 kHz 이하의 성분은 78 kHz, 117 kHz 이상과 234 kHz 이하의 성분은 156 kHz, 234 kHz 이상과 468 kHz 이하의 성분은 312 kHz, 468 kHz 이상과 937 kHz 이하의 성분은 625 kHz를 기준

Fig. 3 Relationship between of heat treatment time and velocity according to heat treatment temperature

Fig. 4 (a) Time response of AE signal, (b) frequency spectrum, and (c) contour map of WT analysis for CGI340 from pencil lead fracture test

Fig. 5 Dominant frequency according to heat treatment temperature and time of AE signal from pencil lead break

으로 하여 주파수 스펙트럼 밀도가 등고선 형태로 표시되어 나타나기 때문이다. Fig. 4(b)의 97 kHz는 Fig. 4(c)의 주파수 스펙트럼 밀도에서 화살 표시한 가장 높은 탁월주파수 성분으로 나타나있다. 대개의 경우, 이러한 주파수 성분이 돌발형 AE 신호의 발생 초기에 나타난다. 웨이브릿 해석 결과를 열처리 온도 및 시간에 따라 이러한 특성 성분을 조사한 것이 Fig. 5이다.

Fig. 5는 열처리 온도 및 시간에 대하여 대표적인 탁월주파수 대역인 88 kHz, 97 kHz를 나타내었다. 연필심 파괴에 의한 탁월주파수는 모재, 873 K 및 973 K의 시험편은 97 kHz 대역에 나타났지만, 열처리 온도가 높은 1073 K 및 1173 K의 시험편은 약간 낮은 88 kHz 대역에 나타났다.

3.2. 인장시험 및 비커스 경도시험

Fig. 6은 각각 다른 열처리 온도 및 시간에서 열화시킨 시험편의 인장 시험한 결과를 나타낸다 [16]. 열처리를 시행한 후의 인장 시험 결과는 모재 인장강도에 비하여 전체적으로 낮은 인장강도를 나타내고 있다. 또한, 열처리 시간이 증가할수록 인장강도가 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이는 열처리 온도가 높고 시간이 길어질수록 더 많이 감소하는 것을 알 수 있었다.

열처리 온도 및 시간에 따른 마이크로 비커스 경도를 Fig. 7에 나타내었다. 경도 측정은 하중 300 g으로 10초간 압입하였으며, 5회 측정하여 평균값을 사용하였다. 인장강도 결과와 같이 열처리 시간이 증가할수록 경도가 감소하였으며, 열처리 온도가 높을수록 경도의 분포가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 조직에서 구상흑연의 평균 경도값은 120 Hv, 편심흑연의 평균경도값은 114.6 Hv로 기지 조직보다 낮은 경도값을 가지고 있었다.

3.3. 인장시험의 음향방출

인장시험편에 AE 센서를 설치하여, 인장시험 중의 변형에 따른 AE 신호를 검출하였다. 873 K에서 1시간 열화시킨 시험편의 AE 신호를 대표적으로 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서 탁월한 주파수 성분을 구하여 Fig. 9에 나타내었다. 이것은 모재와 열처리 시험편의

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

Fig. 7 Relationship between of heat treatment time and Vickers hardness according to heat treatment temperature

Fig. 8 (a) Time response of AE signal, (b) frequency spectrum, and (c) contour map of wavelet analysis for CGI340 from tensile test

Fig. 9 Relationship of dominant frequencies and heat treatment time for heat treatment temperature. (a) 873 K, (b) 973 K, (c) 1073 K, (d) 1173 K

Fig. 10 Microstructure of CGI340

인장시험에서 얻어진 탄성과 신호에 대하여 시간-주파수 해석을 수행한 결과이다. 모재와 열처리 시험편의 탁월주파수를 구하기 위하여 사용된 유효 데이터는 각각 20~50개 정도였다.

그림에서 모재의 탁월주파수 응답 특성의 분포는 열처리한 시험편보다 분산이 많이 나타나고 있다. 이것은 미세한 페라이트에 존재하는 흑연이 분산되어 파괴되는 과정에서 많은 주파수가 발생하였다. 낮은 주파수는 페라이트와 흑연의 인력이 상대적으로 작은 것을 나타내며, 높은 주

파수는 강한 인력을 의미한다. 따라서 모재의 경우는 비교적 높은 주파수 영역에서 탁월주파수가 많이 발생하였다. 그러나 열처리재는 열처리 시간이 길수록, 열처리 온도가 높을수록 낮은 주파수 영역에서 많이 발생하였다. 이것은 조직이 조대화하고, 페라이트와 흑연의 인력이 약해지면서 나타나는 현상이라 판단된다. 즉, 열처리로 인하여 흑연이 페라이트로 확산하고 재료가 취화되어, 강도가 저하된 것이 원인이다.

3.4. 미세조직 관찰

Fig. 10은 CGI340 모재의 조직을 나타낸다. CGI340은 구상흑연①과 편심흑연②가 동시에 존재하는 것을 확인할 수 있었으며, 이로 인하여 473 K 이하 온도에서 치수안정성이 높은 소재로 알려져 있다.

각 열처리 온도 및 유지 시간에 따른 미세조직을 Table 3에 나타내었다. 열처리 온도 및 시간에 따른 구상흑연 및 편심흑연에 대한 변화는 일정하지 않지만, 유지 시간이 길어짐에 따라 기지

Table 3 Microstructure of CGI340 according to heat treatment temperature and time

	1 h	5 h	10 h	24 h
873 K
973 K
1073 K
1173 K

조직의 결정립의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 결정립의 성장으로 인하여 인장강도 및 경도가 감소하였으며, 구상흑연과 편심흑연의 변화 및 벌레 모양의 조직에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 CGI340 흑연주철을 이용하여 873~1173 K의 온도에서 1~24 시간 열화시킨 재료의 기계적 특성 및 음향방출을 평가하였다.

- (1) 연필심 파괴시험을 실시한 결과, 탁월주파수는 97 kHz 영역에서 나타났으며, 모재의 속도는 5490 m/s로 나타났다.
- (2) 열처리 온도가 증가할수록, 열처리 시간이 길어질수록 인장강도 및 비커스 경도가 감소하였다.
- (3) 음향방출은 모재의 인장에서 비교적 높은 주파수의 탁월주파수가 많이 발생하였다. 그러나 열처리재는 열처리 시간이 길수록, 열처리 온도가 높을수록 낮은 주파수에서 탁월주파수가 발생하였다. 이러한 현상은 열처리에 의하여 재료가 열화된 것이 원인이다.

- (4) 이러한 결과는 CGI340 소재 구조물의 장시간 사용에 따르는 열화 특성 평가 및 감시에 적용할 수 있을 것이라 판단된다.

후 기

“이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비 (2013년)”에 의하여 연구되었음“

참고문헌

- [1] R. J. Warrick, G. G. Ellis, C. C. Grupke, A. R. Khamseh, T. H. McLachlan and C. Gerkits, "Development and application of enhanced compacted graphite iron for the bedplate of the new chrysler 4.7 liter V-8 engine," *SAE Paper*, pp. 99-144 (1999)
- [2] AFS Iron Castings Engineering Handbook, *AFS, Chapter 6D*, pp. 171-193 (2003)
- [3] S. Dawson and T. Schroeder, "Practical applications for compacted graphite iron," *American Foundry Society*, Vol. 4, pp. 1-9 (2004)
- [4] I. C. H. Hughes and J. Powell, "Compacted

- graphite irons: high quality engineering materials in the cast iron family," *SAE Paper* 840772 (1984)
- [5] J. D. Altstetter and R. M. Nowicki, "Compacted graphite iron - its properties and automotive applications," *AFS Transactions*, Vol. 82, pp. 959-970 (1982)
- [6] 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*, Vol. 80, pp. 313-330 (1980)
- [7] K. Röhig, "Gusseisen mit vermicular graphit- herstellung, eigenschaften, anwendug," *Konstruieren + Giessen*, Vol. 16, pp. 7-27 (1991)
- [8] D. M. Stefanescu, R. Hummer and E. Nechtelberger, "Compacted graphite irons," *Metals Handbook, Ninth Edition*, Vol. 15, pp. 667-677 (1988)
- [9] S. Shao, Dr. Steve Dawson and M. Lampic, "The mechanical and physical properties of compacted graphite iron," *Materials Science and Engineering Technology*, Vol. 29, pp. 397-411 (1998)
- [10] 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)
- [11] M. Bazdar, H. R. Abbasi, A. H. Yaghtin and J. Rassizadehghani, "Effect of sulfur on graphite aspect ratio and tensile properties in compacted graphite irons," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 1701- 1705 (2009)
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] S. C. Lee and K. W. Nam, "Ultrasonic characteristics of degraded compacted graphite iron from 873 to 1,273 K," *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 17, pp. 72-78 (2013)
- [15] W. H. Prosser, "Advanced AE Techniques in Composite Materials Research," *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 14(3-4), pp. S1-S11 (1996)
- [16] K. W. Nam and S. C. Lee, "The Study of Mechanical Properties of Degraded Compacted Graphite Iron(CGI) Under 873~1273 K," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 33, pp. 173-180 (2013)