

저사이클 피로수명에 영향을 미치는 구상흑연주철의 흑연입자수의 영향

Effect of the Number of Nodular Grains on Low Cycle Fatigue Life in Spheroidal Graphite Cast Iron

김민건* 이병현** 유병호***
Kim, Min-Gun Lee, Byeong-Hyeon Yoo, Byung-Ho

Abstract

Low cycle fatigue life of spheroidal graphite cast iron is determined by the morphological parameters of internal graphite. The aim of this study is to clarify the effect of the number of nodular grains of spheroidal graphite cast iron on low cycle fatigue life.

Two specimens that have identical average nodular grain size by changing nodular grain volume fraction and different number of nodular grain count was tested. In this paper, the parameter governing fatigue life through fatigue test, the number of nodular grain seriously affect fatigue life and nodular grain size is no longer governing parameter of it.

키워드 : 저사이클피로, 흑연입자수, 피로수명, 평균흑연입경, 구상흑연주철

Keywords : low cycle fatigue, number of nodular grain, fatigue life, average nodular grain size, spheroidal graphite cast iron

1. 서론

최근 기계·구조물의 대형화, 경량화, 재료의 사용조건 및 환경의 가혹화에 따라 재료의 신뢰성 및 내구성을 향상시키기 위한 저사이클피로[1,2]에 대한 연구는 파괴안전성 확보와 관련하여 그 중요성이 날로 증대되고 있다.

경제성과 더불어 실용상, 제조상의 기술이 발달해있는 구상흑연주철은 각종 자동차 부품과 산업 기계에 널리 사용되고 있는 추세이다.[3~6] 그러므로 구상흑연주철은 다종다양한 방면으로 그 연구가 활발히 이루어지고 있다.

일반적으로 구상흑연주철의 저사이클 피로수명은, 크랙의 발생과 진전과정의 관찰과 주크랙의 크랙기점을 관찰한 결과로부터 재료중에서 최대크기의 흑연에 의해 지배된다는 것이다.[7~9]

그러나 실제의 피로파괴 과정에서는, 상당히 많은 분포크랙이 연결을 반복하여 주크랙을 형성하기에 크랙연결로 인한 피로수명의 영향을 무시할 수 없다. 또한 본 연구에서 사용한 2종류의 재료는, 흑연입자수가 다르고 흑연입경도 다르기에 흑연입도의 영향을 순수하게 얻어내기 불가능하다.

따라서, 본 연구에서는, 가능한 한 순수한 흑연입자수의 차이에 의한 피로수명의 차이를 비교하기 위해서, 흑연체적률을 변화시켜 평균흑연입경은 같고, 흑연입자수만을 변화시킨 2종류의 시험편을 준비하고, 그 시험편에서 크랙의 발생·진전·연결을 통한 주크랙의 형성과정을 관찰하고, 피로수명을 지배하는 인자에 대하여 검토·비교하였다.

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수, 공학박사
** 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학부, 박사과정
***강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학부, 박사과정

2. 실험재료 및 실험방법

시험편으로는 탄소를 3.6% 함유한 구상흑연주철(F3.6C-L재)과 탄소를 2.2% 포함한 구상흑연주철(F2.2C-L재)을 준비하고 $\phi 14$ R20의 모래시계형으로 가공한 후, 가공한 시험편의 R부를 에머리 페이퍼와 알루미나 분말을 사용하여 경면으로 연마하였다. Table 1은 본 실험에서 사용된 구상흑연주철의 화학성분을 보여주고, Table 2는 구상흑연주철의 조직인자 및 기계적 성질을 보여주고 있다. Fig. 1은 두 재료의 조직사진을 보여주고 있으며, Fig. 2는 두 재료에서의 흑연길이 분포를 보여주고 있다. 피로시험은 유압제어인장 압축피로 시험기를 사용하고, 실온, 대기중에서 실험하였으며, 이 때 최소조직경부의 직경변화량을 미소변위계(diastrain)을 장착하여 검출하고, 시험편에 부하되는 소성변형폭 제어를 하였다. 피로시험의 변형속도는 전체 소성변형폭에 대해 $0.4 \times 10^2 / \text{sec}$ 로 하였다.

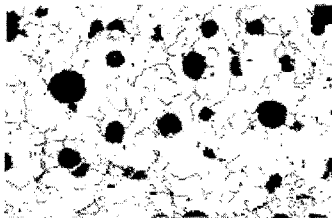
Table 1. Chemical composition(wt.%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni	Mg
C3.6%	3.6	2.28	0.14	0.058	0.01	0.05	tr.	0.04	0.03	0.04
C2.2%	2.2	2.10	0.17	0.043	0.009	0.03	tr.	0.04	0.03	0.04

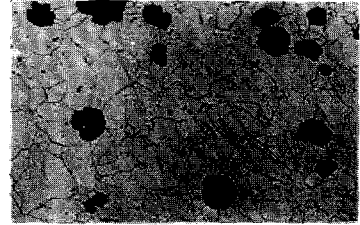
Table 2. Mechanical properties and characteristics of surface graphite

Material	Grain size(μm)		Nodularity (%)	Vf (%)
	ferrite	graphite		
F3.6C-L	22	37	76	12
F2.2C-L	30	38	62	8
	N.C.	Y.s.	T.S	ϵf
	(mm^{-2})	(MPa)	(MPa)	(%)
	82.5	272	415	30
	52.5	272	483	38

Vf : Volume Fraction, Y.S. : Yield stress
T.S. : Tnsile stress, ϵf : Ductility

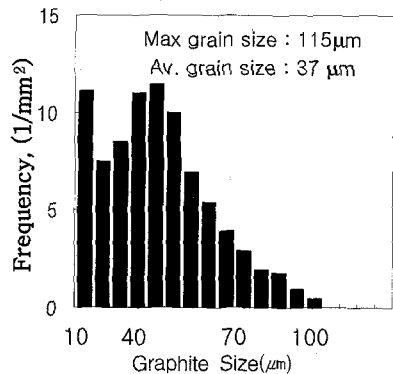


(a) F3.6C-L

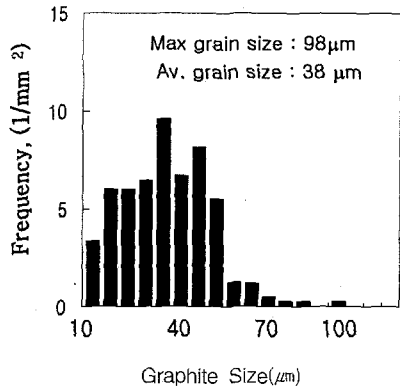


(b) F2.2C-L

Fig. 1 Micro-structure of specimen



(a) F3.6C-L



(b) F2.2C-L

Fig. 2 Distribution of graphite size for optional section area

3. 실험결과 및 고찰

3.1 저사이클 피로수명의 비교

Fig. 3에서, 흑연체적률이 다른 2종류의 구상흑연주철의 피로시험결과를 도시하였다. ○부분은

F3.6C-L재의 수명을, △부분은 F2.2C-L재의 수명을 보여주고 있다. 또한 실선은 F3.6C-S재의 수명 곡선이다. Fig. 3을 통해 다음의 내용이 분명해진다.

F2.2C-L재는 흑연체적률은 다르고, 평균흑연입경이 같은 F3.6C-L재에 비교해서 장수명이며, 따라서 최대흑연길이가 절반정도인 F3.6C-S재와 같은 수명을 보이고 있다. 피로수명을 지배하는 인자는 최대 흑연길이의 영향으로는 이 실험 결과를 설명할 수는 없다. 따라서, 이 3종류의 시험편의 수명레벨을 비교하는 것을 통해 흑연길이의 영향이 수명의 지배인자가 아니라는 것을 확인할 수 있다.

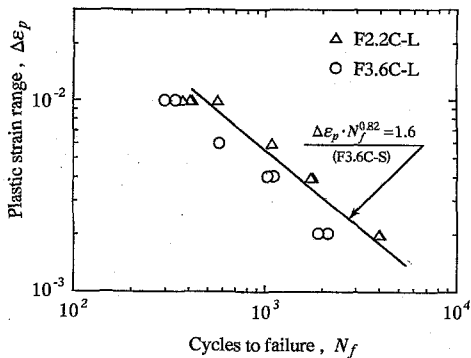


Fig. 3 Fatigue life curves

3.2 크랙발생 수명의 비교

크랙발생에 영향을 미치는 흑연입자수의 영향을 조사하였다. 주크랙상에서, 크랙발생수명(크랙이 발생하기까지의 반복사이클 수)과 크랙발생밀도(Fig. 4 설명도 참조)와의 관계를 Fig. 5에서 보여준다. Fig. 5에서 ○부분은 F3.6C-L재의 경우이다. 이 두 가지 재료를 비교한 결과, (1) 두 재료 모두 반복사이클 극초기의 단계에서는 모두 크랙이 발생하고 있으며, (2) F3.6C-L재의 경우는 F2.2C-L재와 비교하여 크랙발생밀도 값이 커지고 있는 것이 분명하다. 그 이유는 F3.6C-L재의 경우가 흑연입자수가 많기 때문으로 추측된다.

실제 관찰된 크랙발생밀도의 비교값을 반복초기와, 각각의 수명비 $n/N_f=0.5$ 의 시기에서 비교하여 다음의 결과를 얻었다.

우선 반복초기의 단계인 Fig. 6에서 $n=100$ 까지의 크랙밀도는,

$$F3.6C-L재 : \frac{53(\text{個})}{5.40(\text{mm})} = 9.81(\text{個}/\text{mm}) \quad (1)$$

$$F2.2C-L재 : \frac{39(\text{個})}{5.99(\text{mm})} = 6.51(\text{個}/\text{mm}) \quad (2)$$

이 때, 두 재료의 크랙발생밀도의 비는,

$$\frac{(F3.6C-L)}{(F2.2C-L)} = \frac{9.81}{6.51} = 1.51 \quad (3)$$

또한, 다음으로 수명비 $n/N_f=0.5$ 의 단계에서는,

$$F3.6C-L재 : \frac{57(\text{個})}{5.40(\text{mm})} = 10.6(\text{個}/\text{mm}) \quad (4)$$

$$F2.2C-L재 : \frac{52(\text{個})}{5.99(\text{mm})} = 8.68(\text{個}/\text{mm}) \quad (5)$$

$$\frac{(F3.6C-L)}{(F2.2C-L)} = \frac{10.6}{8.68} = 1.22 \quad (6)$$

식 3과 식 6의 값을 보면, 반복사이클의 초기단계에서는 흑연입자수의 비율은 $82.5/52.5=1.57$ 로 거의 같으며, 수명비 $n/N_f=0.5$ 의 단계에서는, 그 값은 1.22로 저하되고 있는 것이 분명하다. 또한 그림에서 비교가 가능하도록 F2.2C-L재의 실험값에 흑연입자수의 비를 표현하는 1.57을 곱한 값을 Fig. 5에서 보여주고 있다.

Fig. 5에서 ○부분과 ▲부분을 비교하면 $n=100 \sim 200$ 을 경계로 ▲부분의 값의 경우가 서서히 증가한다는 것이 알 수 있다.

이상으로부터 같은 형태의 흑연크기 분포를 가지는 재료의 경우, 크랙발생수의 비는, 반복초기에서는 흑연입자수에 의해 지배된다고 생각할 수 있다.

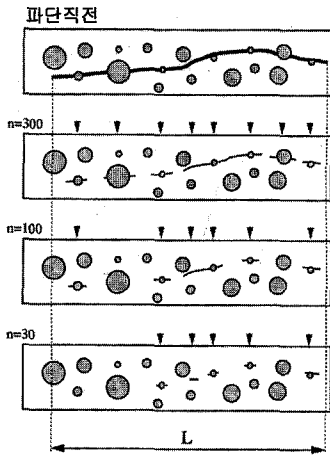
그리고, 그 후, F3.6C-L재에서는 크랙발생수가 극히 작지만, F2.2C-L재에서는 서서히 크랙발생수가 증가하고 있으며, 이 원인은 다음과 같이 생각되어진다.

우선, 표면에 노출되어 있는 흑연(Fig. 6 참조)에서, 흑연입자수가 많은 경우 크랙의 발생이 용이하지 않은 흑연(A)는, 크랙발생전에서 인접한 크랙에 흡수되어질 가능성이 비교적 크다. 한편으로, 흑연입자수가 작은 경우, 평균 입자간 거리가 비교적 길기에 크랙발생이 용이하지 않은 흑연(B)에서도 인접한 크랙이 흡수되기 전에 크랙을 발생시킬 수 있다. 또한 극초기에서 발생한 크랙만으로 주크랙을 형성하는 것은 비교적 어렵게 된다.

다음으로, 표면하에 존재하는 흑연에 대해서, 우선 표면으로부터 어느 깊이까지의 범위내에서, 표면근방에 묻혀있는 흑연으로부터도 크랙발생이 확인되어지지만, 표면으로부터의 깊이가 깊으면 깊을 수록 표면에 나타나는 것이 늦어지게 된다.

따라서, 흑연입자수가 큰 경우(Fig. 7 참조) 비교적 깊은 위치에 존재하는 흑연(C)로부터의 크랙이 표면으로 나타나기 전에, 표면하에 이미 존재하고 있는 표면크랙과 연결될 가능성이 비교적 크게 된다. 따라서, 흑연(C)으로부터의 크랙발생은 표면 관찰로는 확인할 수 없다. 한편, 흑연입자수가 작

은 경우, 비교적 깊은 위치에 존재하는 흑연(D)으로부터도, 크랙발생으로서 표면상에서의 확인이 비교적 용이해진다.



(크랙발생밀도)=(크랙발생개수)/(주크랙길이 L)
Fig. 4 Diagram of crack occurrence density

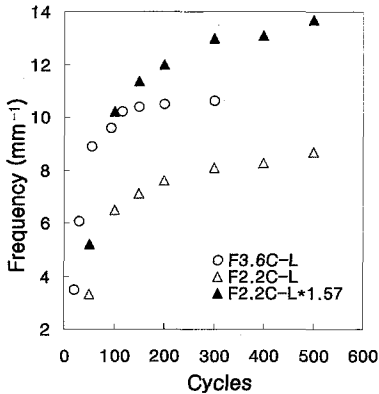


Fig. 5 Relation of between crack occurrence life and cack density

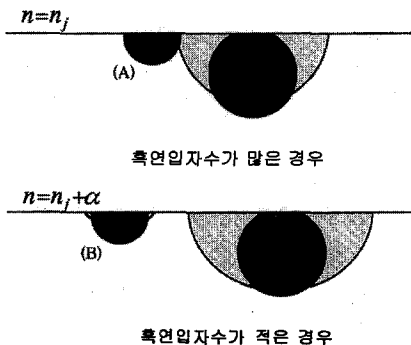


Fig. 6 Graphite on surface

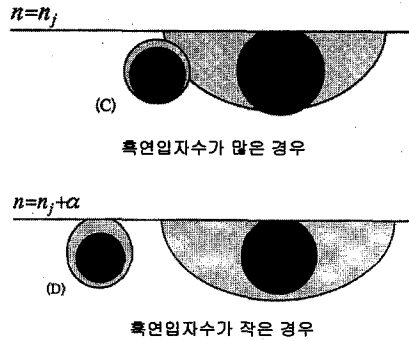


Fig. 7 Graphite on underground surface

3.3 크랙연결거동의 비교

주크랙에 있어서, 크랙연결수명(연결을 일으키기까지의 반복사이클 수)와 연결밀도(Fig. 8 설명도 참조)의 관계를 Fig. 9에서 보여주고 있다.

(a)는 횡축의 연결수명을 수명비로 나타내고, (b)는 횡축의 연결수명을 반복사이클 수로 나타내었다. 그림중의 ▲부분은, F2.2C-L재의 값으로 두 재료의 크랙발생 밀도비 1.51을 곱한 값이다.

(a)에서는 수명비에 대한 크랙연결 모양을 나타내고 있다. 같은 그림으로부터 ○부분과 ▲부분을 비교하면, 수명의 초기에서는 두 재료 모두 같은 값을 갖고 있지만, 파단직전에서는 F3.6C-L재 쪽이 연결횟수가 많아지고 있음을 알 수 있다.

다음으로, 크랙발생밀도에 대한 연결밀도의 비율을 비교하기 위해, 그림중 ○부분과 ▲부분을 비교하면, 수명의 전반에서는 차이가 생기고, 후반에서는 같은 값을 나타내고 있다.

따라서, 수명초기부터 파단까지의 과정에서, 크랙연결동작이 서서히 증가해가는 모양은 같으며, 주크랙의 형성에 관여하는 연결의 횟수는 흑연입자수 또는 크랙발생밀도에 지배되고 있다고 생각되어진다.

(b)에서는 반복 사이클수에 대한 크랙연결의 모양을 보여주고 있다. 그림에서 ○부분과 ▲부분을 비교하면 반복 사이클 수의 증가에 따라서 F2.2C-L재와 F3.6C-L재와의 차이가 벌어지고 있다는 것을 알 수 있다. 다음으로 (a)와 같은 형태로, ○부분과 ▲부분을 비교하면, F2.2C-L재에서 1.51을 곱한 값에 대해서도 F3.6C-L재와의 차이가 벌어진다는 것을 알 수 있다. 이는 크랙연결에 따르는 크랙의 진전이 가속되어 그에 따른 다음의 연결을 보다 조기에 발생시키고 있다는 것을 나타내고 있다. 그 결과, 피로수명에 큰 차이가 생기는 것으로 생각되어진다.

따라서, 피로수명에 미치는 영향은, 흑연입도의 차이에 의해 크랙발생밀도의 영향을 크랙연결이

더욱더 크게 하고 있음을 알 수 있다.

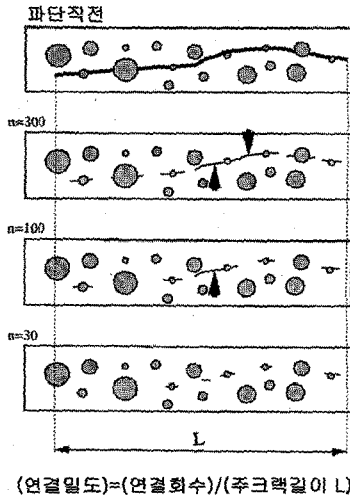
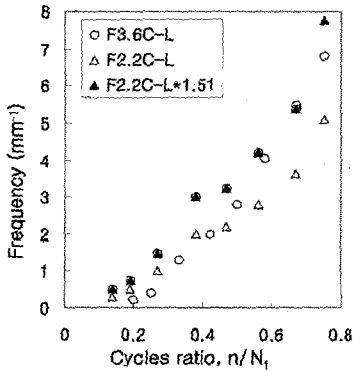
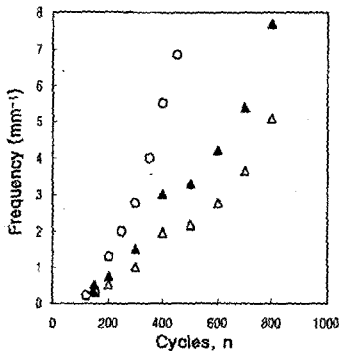


Fig. 8 Diagram of coupling density



(a) Relation of between cycle ratio and coupling density



(b) Relation of between cycles and coupling life

Fig. 9 Relation of between coupling life and coupling density in principal crack

4. 결론

흑연체적률을 변화시켜서, 평균 흑연입경은 같고, 흑연입자수를 다르게 변화시킨 2종류의 구상흑연주철을 준비하고, 각각의 크랙연결에 의한 주크랙의 형성과정을 관찰하고, 피로수명을 지배하는 인자에 대하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 평균 흑연입경이 같아도 흑연체적률이 낮은 구상흑연주철의 수명과 비교하여, 흑연체적률이 비교적 큰 재료의 수명은 저하한다. 이는 흑연길이가 피로수명의 지배인자는 아니며, 재료중의 흑연입자수가 수명에 영향을 미친다는 것을 보여주고 있다.
- (2) 평균 흑연입경이 같은 경우, 크랙발생수의 비는, 반복초기에 있어서 흑연입자수의 비와 같게 된다.
- (3) 피로수명의 차이는 크랙연결이 용이해지는 크랙진전의 가속의 차이에서 기인한다. 크랙연결의 용이한 흑연길이와 흑연입자수가 복잡한 관계를 포함하기 때문이며, 피로수명의 지배인자로서도 중요하다.

참고 문헌

- [1] L. F. Coffin, 1984, "Low Cycle Fatigue - A Thirty Year Perspective", *Fatigue 84*, Vol. III, pp. 1213~1234.
- [2] 김창주, 윤환상, "어닐링 및 노멀라이징 처리한 구상흑연주철의 저주기 피로특성", *대한금속학회지*, pp. 1231~1240, 1985.
- [3] 최담천, 1990, "확대되는 球狀黑鉛鑄鐵의 用途", *大韓鑄造學會誌*, Vol.10 No.4, pp.294~298.
- [4] 김수영, 1979, "球狀黑鉛鑄鐵의 材質의 特性", *大韓金屬學會誌*, Vol.17 No.1, pp.55~67.
- [5] 김창주, "구상흑연주철의 저주기, 고주기 피로특성과 균열성장예 관한 연구", 부산대학교 박사학위논문, 1986.
- [6] H. O. Fuchs, R. I. Stephens, 1980, "Metal Fatigue in Engineering", *A Wiley Interscience Publication*, pp.235~249.
- [7] 森野數傳, 西谷弘信, 西村太志, 1997, "低サイクル支配因子の検討", *日本機械學會論文集*, 63-608A, pp.657~664.
- [8] 백승호, 성광원, 1981, "球狀黑鉛鑄鐵의 疲勞特性과 黑鉛의 影響", *울산대병철 공업전문대학 논문집*, pp.51~56.
- [9] 방찬규, 이해창, 김수영, 이철원, "球狀黑鉛鑄鐵에서의 黑鉛의 크기에 대한 연구", *한양산업과학 연구소 논문집*, pp.87~93.
- [10] 遠藤正浩, "球狀黑鉛鑄鐵の疲勞強度に及黑鉛

- の形状, 寸法, 分布の影響”, 日本機械學會論文集,(A編), pp.1139~1144
- [11] 土居滋, 1994, “球狀黒鉛鑄鐵の疲勞破面解釋と黒鉛の舉動”, 日本機械學會論文集, 60-507A, pp.331~336.
- [12] 原田昭治, “球狀黒鉛鑄鐵の低サイクル疲勞強度および機構に及ぼす基地組織の影響”, 日本機械學會論文集(A編), 58-552, pp.1306~1312, 1992.
- [13] 松岡 敬, “球狀黒鉛鑄鐵における疲勞き裂進展舉動およびき裂長さ分布に及ぼす黒鉛の影響について”, 日本機械學會論文集,(A編), 56-526, pp. 1371~1377, 1990.