

극치통계에 의한 구상흑연주철재의 피로강도의 정량적 평가

윤명진*

Quantitative Evaluation of Fatigue Strength in Ductile Cast Iron by Extreme Value Distribution

Myung-Jin Yoon*

Abstract

In this study, fatigue limit of ductile cast iron is evaluated based on phenomena of the microscopic observation, such as matrix structure, spheroidal ratio, size of graphite and distribution. Three different ferrite-pearlite matrix structure, GCD 45-3, GCD 50, GCD 60 series, all of which contain more than 90% spheroidal ratio of graphite, were used to obtain the correlation between maximum size of graphite and fatigue strength.

It was concluded as follows.

- (1) In Ductile cast iron of ferrite-pearlite matrix, the fatigue limit of GCD 60 series with 73% pearlite structure was the highest.
- (2) From observation of the starting point of crack of all specimens, it is noted that the crack initiates, in graphite, goes through ferrite and propagates into pearlite.
- (3) A good quality of Ductile cast iron used in this experiment can be checked from uniformly distributed graphite. The negligible interaction effect between graphites was verified by microscopic observation and fracture mechanics investigation in surface and interior of the specimen.

Key Words :

1. 서 론

최근 구조용 부품에 구상흑연주철을 합리적으로 사용하

고자 하는 시도가 검토되고 있으나, 주조품의 피로강도 설계를 위한 기조직, 흑연의 입경, 모양, 주조방법에 따른 편향 등 결함의 영향을 고려한 피로시험 데이터는 극히

* 경일대학교 기계공학부
(mjyoon@kyungil.ac.kr)

적다. 또, 실물과 시험편을 주조할 때의 제품의 치수의 크기에 따라 응고 속도에 기인한 주조조직의 현저한 차이가 발생된다. 따라서 흑연의 구상화율의 감소, 기지조직의 조대화, 표면과 내부의 경도의 불균일, 두께 효과 등에 의해서 피로강도의 저하를 초래할 수가 있다.⁽¹⁻³⁾

구상흑연주철의 조직내에는 많은 흑연이 미소결함으로 존재해있고, 피로강도는 같은 기지경도를 가지는 결합이 없는 철강재료의 피로강도 보다도 낮다. 흑연 이외에도 주조결함과 같은 미소결함이 유해하게 작용하여 피로강도를 저하시키고 피로강도의 분포(scattering)는 크게 된다.

설계 자료의 필요성에 따라 피로강도를 예측하기 위해서 미소결함의 영향을 정량적으로 평가할 필요가 있다. 본 연구에 사용한 구상흑연주철체의 흑연의 크기는 철강재료의 결합보다는 매우 크다. 동일한 기지조직을 가진 시험편에서 흑연의 크기가 크면 클수록 피로한도의 저하율이 커지는데 구상흑연 주철재 특유의 고인성과 기지조직이 다른 경우의 피로시험 결과에서는 반드시 그런 것은 아니다.⁽⁴⁾

따라서 본 연구는 구상화율이 90% 이상이고 다양한 기지조직과 구상흑연의 크기, 분포 등의 변수를 가진 구상흑연주철체의 흑연의 최대 크기를 극치통계에 의하여 평가하고 피로한도를 예측하고 실험치와 비교하여 피로한도 예측법을 제시하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 사용한 재료는 구상흑연주철체인 GCD 45-3, GCD 50 및 GCD 60을 사용하였으며, 이 재료의 화학성분은 Table 1과 같다.

시험편은 샌드위치법으로 제작하였는데, 이 방법은 자동차 부품을 제작하는 생산공장 등 비교적 대량생산에 널리 사용되고 있는 방법중의 하나이다. Table 1과 같은 동일한 성분으로 구성된 용탕을 샌드위치법의 Y형 블록에 주입하여 주조하였다. 이때 용탕은 KS규격에 의해 1500 kW, 50Hz 중주파 용기성 쿠포라에서 승온에 맞추어 1450℃에서 1차 체크, 1480℃에서 2차 체크를 실시한 후 1540℃까지 용탕온도로 맞춘 후 5분간 유지한 후 출탕과 동시에 구상화처리 하였다. 상기와 같은 용탕의 제조과정에 의하여 각 시험편의 구상화율은 90% 이상이 되도록 하였다.

주조된 원형재료는 크랙성장이 가장 용이하다고 판단되는 원주방향과 직각으로 절단하여 시험편을 채취하였다.

Table 1 Chemical composition Wt. (%)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Mg
GCD 45-3	3.37	2.74	0.03	0.019	0.019	0.042
GCD 50	3.70	2.75	0.39	0.018	0.017	0.042
GCD 60	3.72	2.75	0.34	0.016	0.018	0.041

Table 2 Mechanical properties of specimens

Materials	Mechanical Properties				
	Spheroidal ratio	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Brinell hardness (H _B)	Micro-vickers hardness (H _v)
GCD 45-3	90%	461	22	150	232
GCD 50	90%	510	16	174	232
GCD 60	90%	608	8	212	257

주조봉을 KS B 0801 4호에 의해 표점길이 50mm인 인장시험편을 가공하였으며, 회전굽힘 피로시험편은 JIS Z2274-1974 2호와 같이 가공하여 실험하였다.

이상과 같은 과정에 의하여 가공한 시험편의 기계적 성질은 Table 2와 같다.

2.2 피로강도의 평가방법

표면결함을 가진 재료의 피로강도를 평가하기 위하여 Murakami와 Endo⁽⁵⁻⁸⁾는 다음의 방정식을 제안하였다.

$$\Delta K_{th} = 3.3 \times 10^{-3} (H_v + 120) (\sqrt{area})^{1/3} \quad (1)$$

$$\sigma_w = \frac{1.43(H_v + 120)}{(\sqrt{area}) \max^{1/6}} \quad (2)$$

여기서, ΔK_{th} 는 응력비 $R = -1$ 에서의 하한계응력확대계수범위 ($MPa m^{1/2}$)이고, σ_w 는 회전굽힘 또는 비틀림, 인장-압축 피로한도 (MPa)이며, H_v 는 비커스경도 ($kgf m^{-2}$)이고, \sqrt{area} 의 단위는 (μm)이다. \sqrt{area} 변수 모델의 적용은 미소원공과 미소크랙들 뿐만 아니라, 스크래치나, 표면 거칠기, 비금속 개재물, 부식 피트, 2상 Al-Si 공용합금에도 적용하였다.⁽⁶⁾

따라서 본 연구에서는 식 (2)를 사용하여 피로한도를 평가하였다.

2.3 최대결합크기의 평가방법

최대결합크기를 결정하기 위해서 먼저 시험편에서 주응력방향에 수직인 면을 절단하고, 검사표면을 사포로 #2,000까지 연마하여 표면을 경면으로 만든 후에 검사기준 면적 $S_0(\text{mm}^2)$ 를 결정한다. S_0 는 현미경사진이나 비디오카메라로 1시야를 찍는데, 1시야는 가로, 세로 1mm의 크기로 한다. 검사는 S_0 중에서 최대의 면적을 가진 결함을 선택하여 최대결합면적의 평방근 $\sqrt{\text{area}}(\mu\text{m})$ 을 측정한다. 이러한 측정을 측정부위가 중복되지 않게 n 번 찍어서 $\sqrt{\text{area}_{\text{max}}}$ 를 결정하게 되는데, $\sqrt{\text{area}}$ 는 주응력 방향에 투영한 면적의 평방근으로서, 시험편 단면 또는 압연방향에 수직인 면에서 결함의 모양에 따른 면적을 마이크로 스케일로 측정하여 계산한다. 검사기준면적 S_0 와 결함의 크기는 화상해석장치(BMI-PLUS, ESCAN4000)에서 촬영한 단면부 사진과 동일한 면적과 배율을 이용하여 측정하고 계산하였다.

본 연구에서는 한 화상 당 20개의 흑연크기의 평균값을 결정하고 이 값을 사용하여 흑연의 최대투영면적의 평방근을 식 (3)으로 구하였다. 여기서 구상의 흑연은 원형이라고 가정하여 원의 면적을 투영면적과 같다고 가정하였다.

$$\sqrt{\text{area}} = \sqrt{\frac{\pi d^2}{4}} \quad (3)$$

이것을 20회 반복하여 각 재료의 $\sqrt{\text{area}}$ 를 구하였다. 측정된 20개의 $\sqrt{\text{area}}$ 를 작은 것부터 순서대로 배열하고 각각 $\sqrt{\text{area}}_{(j)}$ ($j = 1 \sim 20$)로 한다.

그리고 각각의 $j(j = 1 \sim 20)$ 에 대하여 누적분포함수 F_j (Cumulative distribution function) 또는 누적빈도(Cumulative frequency)분포와 기준화변수 (Reduced variable) y_j 를 아래의 식 (4)와 (5)를 사용하여 계산한다.⁷⁾

$$F_j = \frac{j}{(n+1)} \times 100 \quad (4)$$

$$y_j = -1n \left[-1n \left\{ \frac{j}{(n+1)} \right\} \right] \quad (5)$$

그리고, 극치확률용지의 평균표 측에 $\sqrt{\text{area}}$ 를 잡고, 데이터를 도식화한다.

2.4 피로시험 방법

피로시험편은 기계가공한 후 표면은 사포를 이용하여 #1,500까지 연마한 다음 산화알루미늄으로 최종 비평한 후

아세톤으로 세척하였다.

회전굽힘 피로시험시 크랙의 발생 거동을 관찰하기 위하여 나이탈(질산-알콜액) 3% 용액으로 표면을 부식 후 형광침투법으로 현상하여 표면의 크랙 발생을 레프리카로 채취하였고, 전자현미경으로 파단면을 촬영하여 관찰하였다.

본 실험에 사용한 회전굽힘 피로시험기는 Ono's type(H-7, Shimadzu)이고, 시험기 용량은 98N·m, 3400rpm이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 구상흑연주철재의 피로한도에 미치는 피로크랙 발생의 영향

구상흑연주철재의 피로강도를 평가하고 흑연 입경의 크기에 따른 평활재의 피로한도를 고찰하기 위하여 피로시험을 하였으며 그 결과는 Fig. 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 구상흑연주철재의 피로한도는 GCD 45-3재가 275MPa이며 GCD 50재가 294MPa, GCD 60재가 314MPa이다. 본 실험에 사용한 시험편 중에서는 구상화율이 높고 흑연이 완전한 원형이며 흑연의 입경이 작을수록 피로한도가 높고, 흑연의 입경이 클수록 피로한도가 낮음을 알 수 있다. 그리고 구상흑연주철의 기지조직을 고려하면 페라이트-펄라이트조직 중 73%의 펄라이트 조직을 가진 GCD 60재의 피로한도가 가장 높고, 그 다음은 54%의 펄라이트 조직인 GCD 50재의 피로한도가 높고, 36%펄라이트 조직인 GCD 45-3재의 피로한도가 가장 낮았다.

따라서 구상흑연주철의 피로한도에 영향을 미치는 여러 인자 중에서 흑연 입경의 크기, 그리고 펄라이트 체적분율이 가장 중요하며, 페라이트 입경에 대한 피로한도 레벨의 높낮이는 단순히 입경만으로 평가할 수 없고, 페라이트 조직의 체적분율과의 문제가 된다. 흑연에서 발생한 크랙이 상호 연결하여 크랙포화상태로 되었을 때 크랙전파속도는 크랙간의 합체로 인하여 빠르게 성장하며 피로한도의 크기를 결정하는 중요한 인자로 예측할 수 있다.

또, 구상흑연주철의 미시조직에 따른 피로크랙의 발생 거동을 조사하고 이것을 토대로 피로크랙의 기지조직 의존성을 고찰하고자 한다. 구상흑연주철재의 미시조직에 따른 피로한도를 기준으로 해서 피로크랙의 정량적 검토를 하기 위해서 다양한 응력레벨에서 실험하였다. 본 실험에서 사용한 응력은 피로크랙의 수명분포가 큰 응력을 선

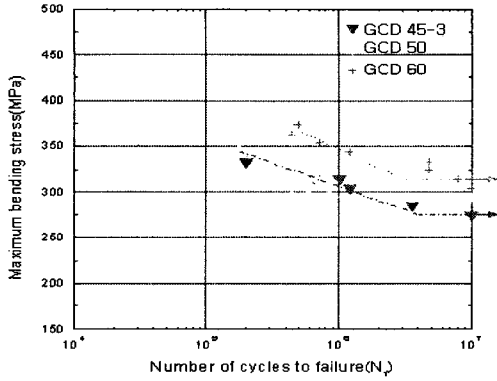


Fig. 1 S-N curves for the spheroidal graphite cast iron

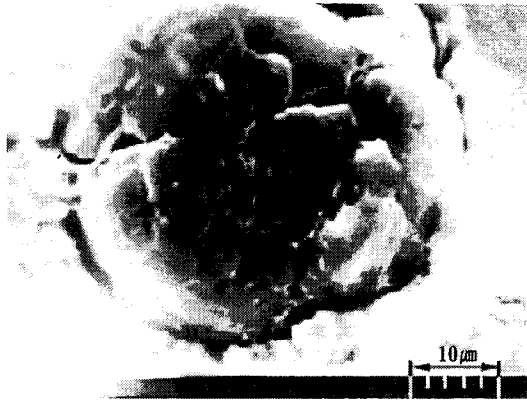


Fig. 2 SEM fractograph on fracture surface of specimen

정하였다. 즉 S-N선도에서 피로한도 보다 20% 높은 응력인 GCD 45-3계는 330MPa, GCD 50계는 353MPa, GCD 60계는 377MPa에서 피로크랙의 발생거동을 고찰하기 위하여 표면관찰은 시험편 원주를 금속현미경으로 관찰하고, 파단면은 전자현미경으로 관찰하였다.

Fig. 2와 같이 초기크랙의 발생은 구상흑연을 기점으로 크랙이 발생하였으며, 흑연이 집중적으로 밀집된 부분에서 많이 발생하는 경우가 많았다. 상세한 크랙발생모델을 고찰하기 위하여 크랙 발생기점을 관찰한 결과 시험편 표면에 미세적 편홀이 존재하지 않는 경우는 흑연이 크랙 발생기점이 되었다.

피로크랙 발생과정에 있어서 페라이트와 펄라이트 기지조직의 역할에 대하여 검토를 행하였다. 대부분의 시험편

에서는 구상흑연과 페라이트부가 피로크랙의 기점으로 되어있는 것을 알 수 있다. 표면과 파단면의 관찰결과 크랙이 성장과정에서 흑연과 만나면 흑연을 관통하지 않고 흑연을 둘러싸고 있는 페라이트 기지조직과의 결합부를 분리시키면서 성장한다. 그림과 같이 피로수명의 20~30%에서 주 크랙이 발생하여 천천히 성장하다가 피로수명의 약 80% 이후에는 인접된 다른 크랙과 합체하면서 급격히 성장, 파단하였다.

3.2 극치통계에 의한 흑연의 투영면적과 피로한도

결합의 치수 \sqrt{area} 가 조직내의 흑연의 치수보다 작으면, 피로한도는 흑연에 의해서 결정되는 것이 예상된다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 GCD 60 시험편의 구상흑연의 분포상태와 그 크기를 화상해석장치에서 촬영하고, 그림에서 보는 바와 같이 약 20개의 흑연의 크기를 측정하여 최대값을 계산하고 이 값으로 흑연의 $\sqrt{area_{max}}$ 의 값을 결정하였다. 자연결합을 가진 시험편의 피로한도가 평활재의 피로한도와 같게 되는 것은 흑연의 \sqrt{area} 의 값 이하의 크기를 가진 결함이기 때문이라고 생각된다.⁽⁹⁻¹¹⁾

피로한도의 모델에 따라서 흑연사이의 간섭효과가 무시될 정도로 작다고 생각하면, 시험편 $\sqrt{area_{max}}$ 표면층에 존재하는 흑연 중에서 의 값을 가진 흑연이 평활재의 회전 굽힘 피로한도의 결정에 중요한 역할을 부여할 것이 예상된다. 조직 내에 존재하는 최대흑연의 치수($\sqrt{area_{max}}$)를 직접 측정하는 것은 불가능하지만, 대신에 극치통계를 사용해서 그 기대치를 간접적으로 예측하는 것이 가

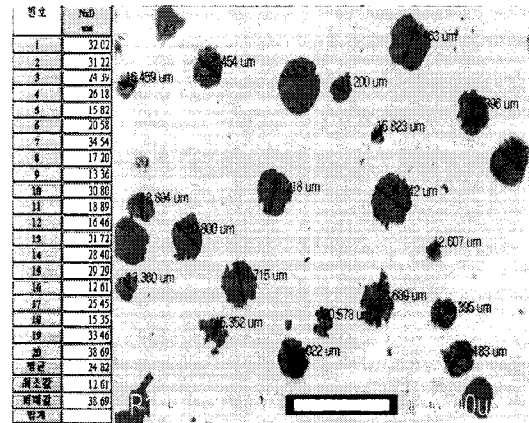


Fig. 3 Micro structure of GCD 60 Series

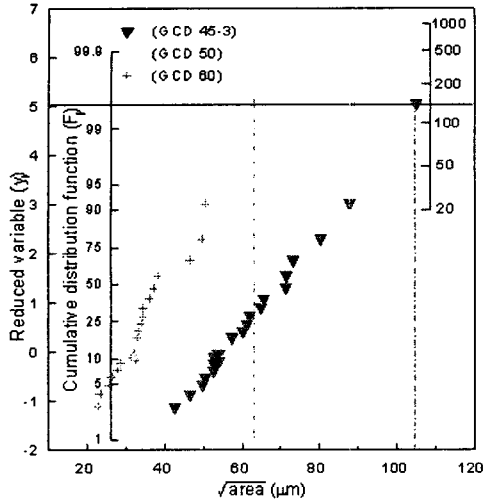


Fig. 4 Statistical distributions of the maximum size \sqrt{area}_{max} for ductile cast iron

Table 3 Comparison of predicted fatigue limits with the experimental values

	GCD 45-3	GCD 50	GCD 60
$\sigma_{w0 exp}$ (MPa)	275	294	314
\sqrt{area}_{max} (μm)	105	88	63
σ_{w0} (MPa)	260	281	311
Error (%)	5.5	4.4	0.96

능하다. Fig. 4에 GCD 45-3, GCD 50 및 GCD 60의 \sqrt{area} 의 값의 누적 빈도분포를 나타냈다. Fig. 4에서의 점들은 누적분포함수의 증가에 따라 양호한 직선성을 나타내므로, 흑연의 \sqrt{area} 의 최대치분포는 극치통계에 따른다고 생각된다. 본 실험에 사용한 3종류의 재료 표면의 흑연에 대해서 얻어진 \sqrt{area} 의 분포에는 큰 오차가 없는 것을 알았다.

Table 3에 \sqrt{area}_{max} 의 기대치를 식 (2)에 대입해서 계산한 피로한도의 하한치의 기대치 σ_{w0} 와 실험치 $\sigma_{w0 exp}$ 의 값의 비교를 나타냈다. σ_{w0} 의 값은 실험치 $\sigma_{w0 exp}$ 와 근사한 값이고, 흑연의 간섭효과를 무시해서 가정한 피로한도의 모델을 사용하여 실제의 피로한도를 예측한 결과 근사한

값을 나타낸다. 즉, 본 연구에 사용한 바와 같은 최근에 생산된 양질의 구상흑연주철재는 흑연이 작고 서로 분리해 있으며, 피로한도는 흑연이나 미소결함을 단독결함으로 간주하여 측정된 \sqrt{area}_{max} 의 값과 기지경도 Hv의 값을 사용해서 식 (2)로부터 예측된다. 따라서 피로한도의 실험치와 본 연구에 의한 예측치를 비교한 결과 그 오차는 0.96~5.5% 이내이고, 피로한도의 예측치가 실험치보다 작은 값이므로 피로한도를 과대 평가할 우려가 없으며 구상흑연주철재의 피로한도를 간단히 예측하는 것이 가능하다.

또, 흑연의 \sqrt{area}_{max} 는 구상흑연주철재의 피로강도 설계에 이용될 수 있으며, \sqrt{area} 의 통계학상의 분포는 재료를 제조하는 과정에서 흑연의 크기를 제어할 수 있는 지침으로 이용될 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 기지조직이 다르고, 구상흑연의 크기, 분포와 기지조직 등의 변수를 가진 구상흑연주철재에 대한 통일적인 피로한도 예측법을 제시하는 것을 목적으로 한다.

따라서 본 연구에서는 구상흑연주철재의 구상화율이 90% 이상이고 페라이트-펄라이트 기지조직이 각각 다른 GCD45, GCD50, GCD60의 3종류의 시험편에 대한 회전굽힘피로시험을 행하고, 피로한도에 미치는 흑연의 최대 크기를 평가하고 피로강도와와의 관련성에 대하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 페라이트-펄라이트조직 중 73%의 펄라이트 조직을 가진 GCD 60재의 피로한도가 가장 높았고 동일 응력레벨의 피로수명의 분산폭도 적었으며, 36%펄라이트 조직인 GCD 45재의 피로한도가 가장 낮았다.
- (2) 모든 시험편의 피로크랙 발생기점을 확인한 결과 시험편 표면의 흑연에서부터 발생하여 페라이트부를 관통하여 펄라이트 조직으로 진전하여 파단하였다.
- (3) 본 연구에서 사용된 양질의 구상흑연주철은 흑연이 잘 분리해서 분포해 있고, 흑연의 간섭효과는 작은 것이 시험편 표면과 내부의 미시적 관찰과 파괴역학적 고찰에 기인하여 명확하다.

참 고 문 헌

- (1) Edited by Spengler A. F. and Briggs H. K., "The Ductile Iron Process", Miller and Company, pp. 7~

- 18, 1972.
- (2) Stephen I. Karsay, "Ductile Iron III", 한국주조공학회, pp. 57~62, 1981.
 - (3) 土居滋, "球狀黑鉛鑄鐵の疲勞破面解析と黒鉛の舉動", 日本機械學會論文集(A), 第60卷, 第570號, pp. 331~336, 1994
 - (4) 윤명진, 이경모, 구상흑연 주철재의 피로크랙 발생 및 피로강도에 미치는 기조직의 영향, 한국공작기계학회지, 제7권, 제5호, pp. 66~71, 1998
 - (5) Yukitaka Murakami, Masahiro Endo, "Effects of Hardness and Crack Geometries on ΔK_{th} of Small Cracks Emanating from Small Defects", The Behaviour of Short Fatigue Cracks, EGF Pub. 1(Edited by K. J. Miller and E. R. de los Rios), pp. 275~293, 1986.
 - (6) Yukitaka Murakami, Masahiro Endo, "Effects of Defects, inclusions and inhomogeneities on Fatigue Strength", Fatigue, Vol. 16, pp. 163~182, 1994.
 - (7) Yukitaka Murakami, "Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions on The Fatigue Strength of Metals", JSME. Vol.32, No.2, pp. 167~180, 1989.
 - (8) Yukitaka Murakami, "Inclusion Rating by Statistics of Extreme Values and Its Application to Fatigue Strength Prediction and Quality Control of Materials", J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. Vol. 99, pp. 345~351, 1994.
 - (9) K, Tokaji, T, Ogawa, "Fatigue Life Distribution and Its Simulation in Spheroidal graphite cast iron", Material Science Research International, Vol. 2, No. 1, pp. 39~45, 1996.
 - (10) 遠藤正浩, 王羽兵, "最近の球狀黑鉛鑄鐵の疲勞強度におよぼす黒鉛と人工微小缺陷の影響", 材料, Vol. 43, No. 493, pp. 1245~1250, 1994
 - (11) 西谷弘信外 3人, "球狀黑鉛鑄鐵切缺材の疲勞強度", 日本機械學會論文集, 第58卷, 第556號, pp. 2280~2286, 1992