

고강도 · 고인성 구상흑연주철의 피로한도의 개선

金敏健, 金振鶴

강원대학교 기계공학과

Improvement of Fatigue Limit in Spheroidal Graphite Cast Iron with High Strength and Toughness

M.G.Kim and J.H.Kim

Dept. of Mechanical Engineering, Kangwon National University
 192-1, Hyoja, Chuncheon, Kangwon, Korea, 200-701

ABSTRACT Rotary bending fatigue tests were carried out to investigate the improvement of fatigue limit in annealed and austempered spheroidal graphite cast iron. Main results obtained are as follows. (1) The tensile strength(hardness) of Series C is higher than that of Series B, and fatigue limits are 245MPa in Series C, 230MPa in Series B and 195MPa in Series A, respectively. (2) The fatigue limits of Series B and Series A are mainly governed by the resistance to fatigue crack initiation. Whereas, the fatigue limit of Series C is governed by the resistance to fatigue crack initiation and growth. The defect size and the resistance to crack initiation and growth should be considered to clarify the fatigue properties in spheroidal graphite cast iron. (3) Improvement of fatigue limit by half-austempering is more reasonable than that of full-austempering treatment in multi defective materials as spheroidal graphite cast iron.

Kew words : Fatigue Limit, Spheroidal Graphite Cast Iron, Defect Size, Full Austempering, Half Austempering

1. 서론

구상흑연주철은 가공성과 경제성으로 인하여 그 유용성이 돋보이는 재료이며, 자동차 등의 기계부품이나 강도부재에 대한 그 적용이 점차 증가하고 있어^{1,2,3)} 열처리에 의한 강도특성의 개선에 많은 노력이 집중되고 있다. 응력집중부를 가지는 부재의 피로한도는 크랙의 발생저항과 더불어 진전저항에 강하게 의존하고 있으며, 흑연과 주조결

함의 존재를 피할 수 없는 구상흑연주철에서는 이러한 결함들이 피로한도에 큰 영향을 미친다. 따라서, 흑연과 주조결함으로 된 응력집중부를 가지는 구상흑연주철의 피로한도 개선에는 양 저항을 동시에 개선 가능한 열처리가 유효하다고 생각된다.

완전 오스템퍼링처리는 피로크랙의 발생저항과 비례적 관계에 있는 인장강도를 현저하게 개선하지만, 피로크랙의 진전저항을 저하시키기 때문에 피로강도 개선의 효과가

기대에 미치지 못한다는 보고⁴⁾가 있다.

이상의 연구를 참고하여, 본 연구에서는 인장강도와 피로크랙 진전저항을 동시에 향상 가능한 부분 오스템퍼링처리⁵⁾에 주목하여, 부분 오스템퍼링재의 피로강도 특성을 완전 오스템퍼링처리재 및 어닐링재와 비교하고, 또한 얻어진 결과를 피로한도와 결함 크기에 주목해서 검토를 행하여 부분 오스템퍼링처리를 채용할 때의 유의점을 밝히고자 한다.

2. 실험재료 및 실험방법

실험에 사용한 구상흑연주철은 시판되고 있는 GCD45를 사용했다. Table 1에 화학성분을 보이고 있다. 열처리는 Table 2에 보이는 조건으로 실시하여 각각 A재, B재 그리고 C재로 하였다. Table 3에 각 공시재의 기계적성질을 보이고 있다. B재와 C재의 경도와 인장강도는 어닐링재보다 크게 되며, 향상의 정도는 C재가 현저하다. 여기서, B재의 인장강도는 C재와 큰 차이를 보이지는 않지만, 연신율이 높은 것이 주목된다. 또한, 금

Table 1. Chemical composition of the specimen(wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Mg
GCD45	3.75	3.0	0.15	0.03	0.015	0.04

속조직 사진을 Fig. 1에 보이고 있다. 어닐링재는 페라이트 면적율이 48%인 전형적인 불스아이(bull's eye) 조직, B재는 펄라이트 면적율이 90%이상인 2상(펄라이트와 페라이트) 기지조직, C재는 약간의 잔류 오스테나이트가 확인되는 펄라이트 기지조직이다.

Table 3에 기지를 비커스 경도계로 측정 한 경도를 나타내었다. 경도는 각상에서 50g에서 30점의 평균값을 구하고 체적율을 고려하여 결정하였으며, 상의 체적율이 매우 작은 것은 측정하지 않았다.

피로 시험편은 최소 직경부를 $\phi 9\text{mm}$ 로 기계가공한 후 에머리페이퍼와 알루미나 파우더로 연마하여 경면으로 한 다음 실험에 제공하였다. 피로시험은 완전진폭($R=-1.0$)을 가지는 회전굽힘 피로시험기를 이용하여 실온 대기 중에서 실시하였다. 또한, 피로파괴된 기점부의 파면을 주사형 전자현미경(SEM)에서 관찰하고 기점이 된 결함을 조사했다.

Table 3. Mechanical properties

	σ_Y (MPa)	σ_{TS} (MPa)	δ (%)	H_v
Series A	301	423	24	212
Series B	658	830	14	378
Series C	765	920	9	491

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

Table 2. Conditions of heat treatments using fluidized bed furnace

	Condition	Annealing		Austenizing		Isothermal Treating	
		Temp.($^{\circ}\text{C}$)	Time(Hr)	Temp.($^{\circ}\text{C}$)	Time(Hr)	Temp.($^{\circ}\text{C}$)	Time(Hr)
Series A	Annealing	600	1	-	-	-	-
Series B	Half Austempering	-	-	850	1	400	2
Series C	Full Austempering	-	-	950	1	400	2

3. 실험결과

3. 1 S-N 곡선

각 재의 회전굽힘 피로시험 결과를 Fig. 2에 보이고 있다. 10^7 회의 피로강도를 피로한도로 정의하여 그 결과를 Table 4에 정리하였다. Fig. 2에 의하면, 피로한도는 오스템퍼링처리에 의하여 전 영역에서 개선되고, 어닐링재보다 오스템퍼링처리재의 피로한도가 높아지며 그 정도는 완전 오스템퍼링처리한 C재가 가장 크지만, B재와의 차이는 크지 않다.

3. 2 파괴기점의 관찰

파단으로 이어지는 피로크랙의 발생기점에는 주조결함이나 흑연이 존재하며, 흑연의 집합체가 존재하는 것도 관찰되었다. 파괴기점이 된 대부분의 결함은 표면이나 표면적

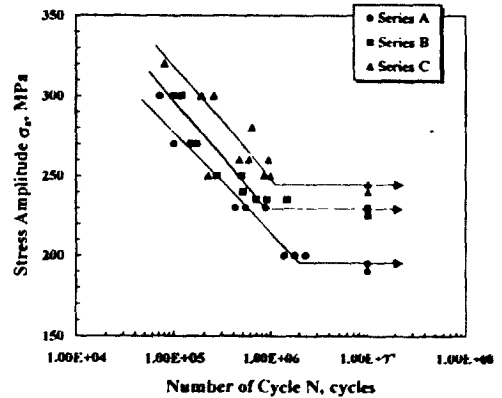


Fig. 2 S-N curves of specimens

Table 4 Comparisons of fatigue limit by experiment and prediction (MPa)

	σ_{ult}	$\frac{\Delta K_{th}}{(R=-1)}$	σ_{th}	$\frac{\sigma_{th}}{\sigma_{ult}}$	σ_{ult}	$\frac{\sigma_{th}}{\sigma_{ult}}$
Series A	195	12.5	868	0.35	177	1.10
Series B	230	15.1	874	0.34	295	0.87
Series C	245	7.3	828	0.75	325	0.75

σ_{ult} : Experimental fatigue limit

Fig. 1 Microstructures of speelmens

하에 위치하고 있고, 크랙의 발생은 이러한 내재결합의 가장자리에서 발생하고 있다. 파단된 시험편의 파면을 주사형 전자현미경(SEM)을 사용하여 파괴기점에 존재하는 내재결합의 관찰 예를 Fig. 3(a)에 보이고 있다.

4. 고찰

Table 3과 Table 4를 참조하면 각 공시재에서 인장강도와 피로한도의 대소관계는 일치하고 있지만, 열처리재인 B재와 C재에서 인장강도와 비커스경도의 상승율에 비하여 피로한도의 상승율은 매우 적다. 이러한 결과는 탄소강에서 열처리에 의한 인장강도(비

커스경도)의 상승에 동반하여 피로한도가 상승하는 일반적인 경향⁶⁾과는 약간 다르다.

Sugiyama⁷⁾에 의하면, 결함을 가지는 재료의 피로한도 σ_w 와 결함길이 a 의 관계는 Fig. 4에 보이는 것과 같이, 크랙발생저항(인장강도 σ_{TS})에 강하게 지배받는 영역 1, 크랙전파저항(하한계치 ΔK_{th})에 강하게 지배받는 영역3 그리고 양자의 지배(주로 비커스경도 H_V)를 받는 영역 2로 구분가능하다. 이와 같은 고찰방법에 기초해, Table 3에 보인 σ_{TS} 와 Table 4에 보인 ΔK_{th} 를 참조하여, 실험결과를 정리하면 Fig. 5과 같이 모식화가 가능하다. 또한, 파괴기점이 된 결함이 비교적 커서 Fig. 5의 a 에 상당하다고 생각하면, 각 재의 피로한도의 대소관계와 그 상승률

이 일반적인 탄소강의 경우와 다른 것이 이해된다. 아래에서 이 고찰방법의 타당성에 대해서 검토한다.

4. 1 극치통계에 의한 최대결함길이의 결정

Fig. 4와 Fig. 5의 타당성을 검토하기 위해서는 먼저 시험편에 존재하는 최대 결함길이를 추정할 필요가 있다. 여기서, 결함의 형상은 응고과정에서 고상의 성장에 동반하여 침식되는 것 같이 성장하게 된다. 즉, 결함은 불룩한 모양이 아니고 오목한 모양이 된다. 그 결과 크랙은 응력집중부인 결함에서 발생하여 Fig. 6에 보이듯이 점선과 같이 형성된 후, 거시크랙으로 성장하게 된다⁸⁾. 본 연구에서도 Murakami⁹⁾, Endo¹⁰⁾ 등의 연구와 동일하게 결함에서 발생한 매우 미소한 크랙까지 결함으로 간주해서, Fig. 3(b)에 보이는 것과 같이 직사각형으로 근사하여 구한 면적의 평방근(\sqrt{area})을 크랙길이(a)로 결정하였다.

Fig. 7은 파괴기점이 된 결함길이의 분포를 극치통계법에 따라 나타낸 것이다. Fig. 7에서 결함길이의 분포를 선형 회귀분석하여

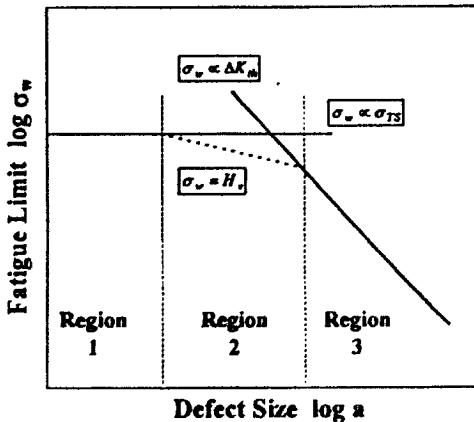


Fig. 4 Relation between fatigue limit and defect size in defective materials

나타낸 직선과 재귀기간 T(시험편수 23개)=417와의 교점에서 추정한 (\sqrt{area})=378 μm를 본 재료에 있어서 최대결함길이라고 간주하였다.

4. 2 크랙진전 하한계치를 이용한 피로한도의 예측

먼저, 각 재의 피로한도와 결함길이의 관계가 Fig. 4의 영역 III에 존재하는 경우를 가정한다. 이 경우, 파괴기점이 된 결함이 표면부근에 존재하는 것을 고려하면 피로한도는 피로크랙 진전 하한계치를 이용한 다음 식으로 추정 가능하다.

$$\sigma_{wK} = \Delta K_{th} / [(0.65 \times (\pi \times \sqrt{area} \times 10^{-6})^{1/2})] \quad (1)$$

여기서, ΔK_{th} 는 $R \leq 0$ 에 있어서의 $K_{th,max}$

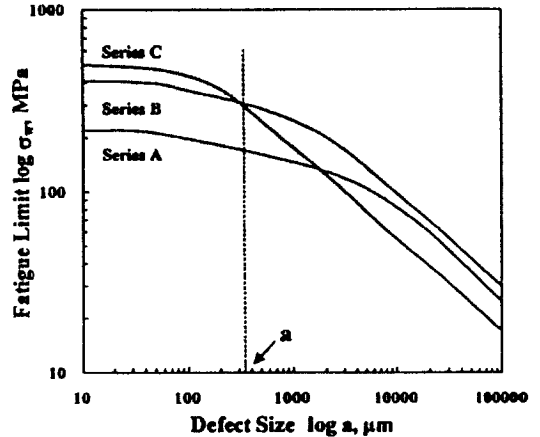


Fig. 5 Estimated relation between fatigue limit and defect size in spheroidal graphite cast iron

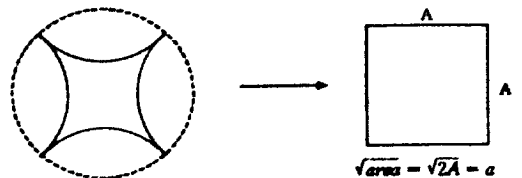


Fig. 6 Simplification the irregular defect size to quadrangle

를 사용하여야 하지만, 본 피로시험을 응력비 $R=-1.0$ 에서 실시하였기에 본 실험에서 직접 구하지 않고 이미 보고되어 있는 $R=0.1$ 의 $K_{th, max}^{(5)}$ 를 식(1)에서의 ΔK_{th} 로 채용하였으며, 식(1)에 의해 얻어진 피로한도의 추정치를 Table 4에 정리하였다.

완전 오스템퍼링처리재인 C재에서는 실험치와 예측치의 비(σ_{eE}/σ_{eK})가 약 75%를 보이고 있지만 어닐링재인 A재와 부분 오스템퍼링처리재인 B재의 σ_{eE}/σ_{eK} 는 약 오스템퍼링처리재인 B재의 σ_{eE}/σ_{eK} 는 약 35%정도의 낮은 값을 보이고 있다. 이러한 사실은 C재의 경우에는 피로한도가 크를 보이고 있지만 어닐링재인 A재와 부분 오스템퍼링처리재인 B재의 σ_{eE}/σ_{eK} 는 약 35%정도의 낮은 값을 보이고 있다. 이러한 사실은 C재의 경우에는 피로한도가 크랙전파저항(ΔK_{th})의 지배를 받고 있지만, A재와 B재의 경우에는 그렇지 않다는 것을 시사해 준다.

4.3 경도와 결함을 고려한 피로한도의 예측
다음, 각 재의 피로한도와 결함길이의 관

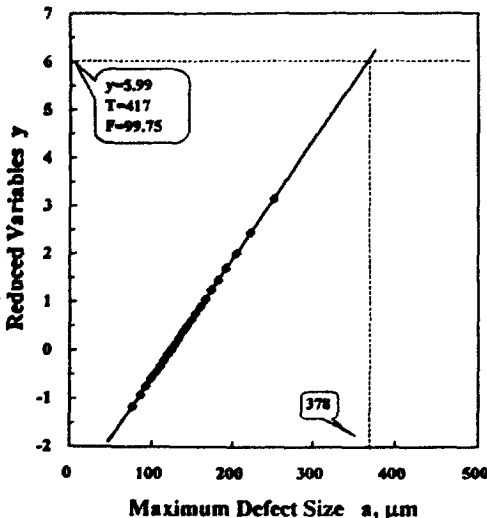


Fig. 7 The estimation of maximum defect size in specimen series

계가 Fig. 4의 영역 II에 있는 경우를 가정한다.

이 경우, 파괴기점이 된 결함이 표면근방에 있는 것을 고려하면, 피로한도는 Murakami⁽¹¹⁾ 등이 제안한 비커스경도와 미소 표면결함 크기를 이용하는 다음 식(2)로 추정 가능하다.

$$\sigma_{eH} = 1.43(Hv+120)/\sqrt{area}^{1/6} \quad (2)$$

여기서, 비커스경도는 Table 3의 값을 이용했다. 한편, 어닐링재와 B재의 기지조직은 2상이기 때문에 비커스 경도는 각상의 경도를 체적율에서 평균화한 것을 채용했다. 어닐링재의 경우에 구한 방법은 아래와 같다.

$$H_V = H_{Vf} \times F_V + H_{VP} \times P_V / (F_V + P_V) \quad (3)$$

H_{Vf} : vicker's hardness of ferrite

H_{VP} : vicker's hardness of pearlite

F_V : volume fraction of ferrite(%)

P_V : volume fraction of pearlite(%)

또한, B재의 페라이트 경도는 그 체적율이 낮아 측정할 수 없기에 어닐링재의 수치를 이용했다. 식(2)에 의해 얻어진 피로한도의 추정치를 Table 4에 정리하였다. Table 4를 참조하면, 어닐링재인 A재의 경우에는 실험치와 예측치의 비(σ_{eE}/σ_{eK})가 약 110%이고 부분 오스템퍼링처리재인 B재에서는 σ_{eE}/σ_{eH} 가 약 87%로 높은 값이 얻어졌다.

이러한 결과로부터 A재와 B재의 피로한도는 비커스경도(Hv)의 지배를 받는다는 것이 이해된다.

한편, 완전 오스템퍼링처리재인 C재에서는 식(1)과 식(2)에 의한 예측치와 실험치의 비가 거의 비슷한 것으로부터 피로한도가 크랙전파저항 ΔK_{th} 과 비커스경도(Hv)양자의 지배를 받는다는 것을 알 수 있다.

4.4 피로한도의 개선과 결함길이의와의 관계

피로한도의 실험치와 예측치의 결과(Table 4 참조)에 의해 C재의 피로한도는 Fig. 4의

영역Ⅱ와 영역Ⅲ의 경계부에, 그리고 A재와 B재의 피로한도는 Fig. 4의 영역Ⅱ에 위치한다고 할 수 있고 Fig. 4와 Fig. 5에 보인 고찰방법은 타당하다고 판단된다.

한편, Fig. 5를 참조하면 완전 오스템퍼링 처리는 결합길이가 400~500 μm 이하의 경우에는 구상흑연주철의 피로한도 개선효과가 있다. 또한, 결합길이를 약 20~30 μm 이하로 하면 피로한도는 결합길이에 무관하게 일정하게 되고, 완전 오스템퍼링처리에 의한 개선효과가 가장 크게 된다. 그러나, 흑연이나 주조결합 등이 모두 내재결합으로 작용하는 구상흑연주철에서 결합길이를 20~30 μm 이하로 제어하는 것은 사실상 어렵다.

한편, 부분 오스템퍼링처리재인 B재에 주목하면 전반적으로 어닐링재인 A재의 피로한도 보다 큰 값을 보이며, 결합길이가 500 μm 이하에서는 C재의 피로한도와 거의 차이가 크지 않고, 결합길이가 그 이상이 되면 B재의 피로한도가 더 우수한 것을 알 수 있다. 따라서, 결합길이가 이상인 경우에는 완전 오스템퍼링보다 부분 오스템퍼링처리에 의하여 피로한도를 상승시키는 것이 타당하며, 또한 결합길이가 명확하지 않은 경우에는 결합길이에 무관하게 피로한도의 개선이 가능한 부분 오스템퍼링처리를 하여 피로한도를 개선시키는 것이 가장 유효하다고 판단된다.

5. 결론

오스템퍼링처리 조건을 달리하여 고강도 고인성을 가지는 구상흑연주철을 공시재로 채용하여 회전굽힘 피로시험을 행하였다. 피로한도의 평가와 개선에 초점을 맞추어 검토를 행한 결과 아래의 사실이 얻어졌다.

1. 완전 오스템퍼링처리한 C재의 인장강도(경도)는 부분 오스템퍼링처리한 B재 보다

높고, 피로한도는 완전 오스템퍼링처리한 C재가 245MPa, 부분 오스템퍼링처리한 B재가 230MPa, 어닐링한 A재가 195MPa이다.

2. B재 및 A재의 피로한도는 주로 크랙의 발생저항에 의해, 완전 오스템퍼링처리재의 피로한도는 크랙전파저항에 지배되고 있으며, 구상흑연주철의 피로특성을 파악하기 위해서는 피로크랙의 발생저항, 진전저항 및 결합길이를 고려해야 한다.

3. 결합의 크기가 불분명한 재료나 구상흑연주철과 같은 다결합재에서는 완전 오스템퍼링처리보다 부분 오스템퍼링처리에 의한 피로한도의 개선이 타당하다.

참고문헌

1. Lyle R. Jenkins : ASM Handbook, Vol. (1990), 33.
2. Steven R. Lampman : ASM Handbook, Vol.19(1996), 665.
3. 최담천 : 대한주조학회지, 10권 4호 (1990), 294.
4. 砂田 : 日本材料學會論文集, 39-444 (1990), 1278.
5. 杉山, 淺見, 松岡 : 日本材料學會論文集, 40-453(1991), 669.
6. 村上敬宜, 清水眞佐男 : 日本材料學會論文集, 54-499(1988), 413.
7. 杉山好弘, 淺見克敏, 松岡忍 : 日本機械學會論文集, 58-556A(1992), 2287.
8. 鈴木秀人 : 日本機械學會論文集, 61-556A(1995), 906.
9. 村上敬宜 : 微小缺陷と介在物の影響, 養賢堂(1993), 233.
10. 遠藤正浩 : 日本機械學會第69期通常總會講演會講演論文集, Vol. A(1992), 479.
11. 村上敬宜, 宇宿尙史 : 日本機械學會論文集, 55-510A(1989), 213.