

피로한도의 정량평가법과 구상흑연주철에 대한 적용 Quantitative Evaluation for Fatigue Limit and its Application to Spheroidal Graphite Cast Iron

김진학* 김민건**
Kim, Jin-Hak Kim, Min-Gun

ABSTRACT

Fatigue tests were performed to examine the 4 parameter method for specimens prepared by various heat treatment which resulted in different mechanical properties. Obtained main results are as follows.

(1) Samples treated by austempering did not show the expected improvement of fatigue limit although hardness and strength increased. This is attributed to the fact that defect sensitivities of materials increase as increasing of hardness and tensile strength, it is also shown that the graphites acting as a stress concentration place become larger by austempering heat treatment than by normal annealing.

(2) It is very reasonable to predict the fatigue limit of ductile irons with 4 parameter method based on σ_{TS} , H_v , ΔK_{th} and \sqrt{area}_{max} .

(3) The half-austempering treatment appeared to be more useful than the full-austempering method to improve the fatigue limit in the spheroidal graphite cast iron with multi defective material.

키워드 : 피로, 피로한도, 결함, 구상흑연주철

Keywords : Fatigue, Fatigue Limit, Defect, Ductile iron

1. 서론

최근 가공성과 경제성의 요구에 부응하기 위해 기계부품이나 강도부재에 대한 구상흑연주철의 적용이 점차 증가하고 있다[1],[2]. 그 중에서도 오스템퍼링처리한 구상흑연주철(Austempered Ductile Iron : ADI)은 고인성과 고강도를 두루 갖춘 우수한 주철로서 주목받고 있다. 이 ADI를 강도부재로 적용하기 위해서는 재료내부에 존재하는 구상흑연과 주조결함 등이 피로한도에 미치는 영향과 그에 따른 피로특성을 명확히 규명할 필요가 있지만 아직 이에 관한 연구가 미진한 실정이다[3].

본 연구에서는 Murakami 등이 탄소강 등에 적용하여 피로한도 예측식으로써 실효성이 증명된 4 파라미터법[4]을 다결함체인 구상흑연주철에 적용하여 그 적용 타당성을 검토하고자 한다.

2. 피로한도의 정량평가법

탄소강에 결함이 존재할 때, 피로한도 σ_w 는 Fig. 1에 보이는 것과 같이 결함길이 a 가 매우 작아서 피로한도에 영향을 미치지 않는 평활재의 피로한도 σ_w 와 비교적 큰 결함에 상당하는 크랙재의 피로크랙진전하한계치 ΔK_{th} 를 이용하는 2 파라미터법에 의하여 평가되어 왔다[5].

* 강원대학교 기계공학과 시간강사

** 강원대학교 기계공학과 교수

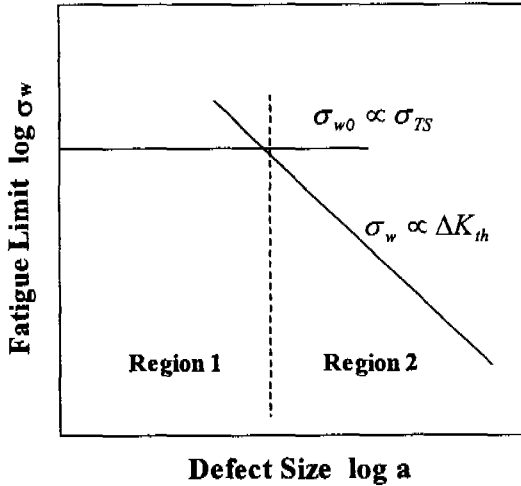


Fig. 1 Relation between fatigue limit and defect size expressed by 2-parameter criterion in carbon steels

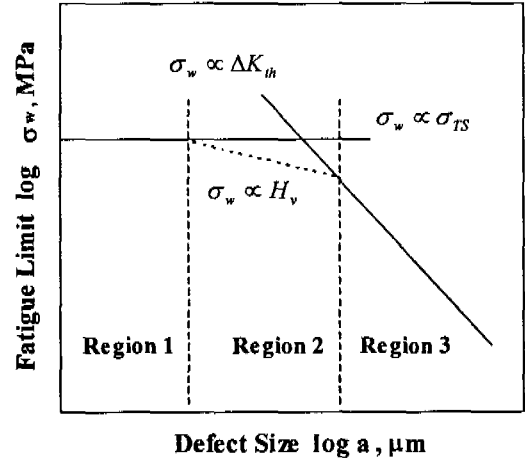


Fig. 2 Relation between fatigue limit and defect size using 4-parameter criterion

그러나, 피로한도와 결함길이의 관계는 Fig. 2과 같이 세영역으로 구분되는 것이 타당하며[6], 두 영역의 중간에 위치하는 영역 2에 존재하는 피로한도에 대한 정량평가법은 아직 명확히 밝혀지고 있지 않다.

Fig. 1에서 두영역 사이에 존재하는 영역 2에 Murakami[4] 등에 의해 제안된 미소결함재의 피로한도 평가법을 적용하면, 피로한도 σ_w 와 결함길이 a 와의 관계는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있고, 결함재의 피로한도는 영역 2나 영역 3에 위치하게 된다. 각 영역에 존재하는 피로한도 σ_w (MPa)는 아래의 식으로 각각 추정할 수 있다.

영역 1 :

$$\sigma_w = 0.5 \sigma_{TS} \quad (1)$$

영역 2 :

$$\sigma_w = A \times (H_v + 120) / (\sqrt{area})^{1/6} \quad (2)$$

여기서, A 는 결함의 위치계수로써, 표면에 존재하는 결함의 경우는 1.43, 내부에 존재하는 결함의 경우에는 1.56의 값을 가진다. H_v 는 비커스경도이고, \sqrt{area} 는 결함을 최대 주응력 방향으로 투영한 면적의 평방근(μm)이다:

영역 3 :

$$\sigma_w = \Delta K_{th} / [B \times (\pi \times \sqrt{area} \times 10^{-6})^{1/2}] \quad (3)$$

ΔK_{th} 는 피로크랙 진전하한계치이며, B 는 크랙의 위치계수로써 표면결함의 경우는 0.65, 내부결함의 경우는 0.52이다. \sqrt{area} 는 영역 2에서와 동일하다.

Fig. 2를 참조하면, 결함재의 피로한도는 식 (1)로 추정가능한 영역 1의 피로한도가 이상적인 것이 되지만 현실적으로는 불가능하며, 대부분의 실용재료의 피로한도는 영역 2와 영역 3 사이에 존재하게 된다. 결함재의 피로한도를 정량평가하기 위해서는 시험편에 존재하는 최소강도의 부분 즉 최대결함이 존재하는 부분의 강도에 의하여 피로한도가 결정되는 것이 예상된다. Murakami[8] 등에 의하면 이 평활재에 존재하는 최대결함크기는 극치통계를 이용해서 예측가능하다. 일반적으로 고강도강 평활재의 피로파괴는 비금속 개재물등이 포함되는 내재결함을 기점으로 하고 있다. 결함재의 피로한도를 정량적으로 평가하기 위해서는 인장강도 σ_{TS} , 비커스경도 H_v , 피로크랙 진전하한계치 ΔK_{th} 그리고 최대결함크기 \sqrt{area}_{max} 가 필요하게 되며 이들을 4 파라미터라 한다.

3. 실험재료 및 실험방법

실험재료는 GCD45을 사용하였으며 그 화학성분은 C 3.75%, Si 3.0%, Mn 0.15%, P 0.03%, S 0.015%, Mg 0.04%이다. 공시재는 기계적 특성과 흑연성상에 변화를 주기 위하여, Table 1에 나타낸 조건으로 열처리를 행하여 기지조직을 달리한 A재, B재 그리고 C재를 준비하였다.

Table 1 Conditions of heat treatment.

	Annealing		Austenizing		Isothermal Treating	
	T(°C)	H(hr)	T(°C)	H(hr)	T(°C)	H(hr)
Series A	600	1	-	-	-	-
Series B	-	-	850	1	500	2
Series C	-	-	950	3	500	6

Table 2 Characteristics of spheroidal graphite on surface.

	D _{sg} (μm)	H _{sg} (%)	V _{sg} (%)	N _{sg} (1/mm ²)
Series A	23	56	27	237
Series B	27	60	21	137
Series C	43	67	28	71

D_{sg} : Average size of graphite

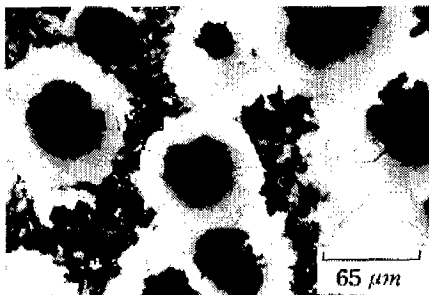
H_{sg} : Nodularity of graphite

V_{sg} : Volume fraction of graphite

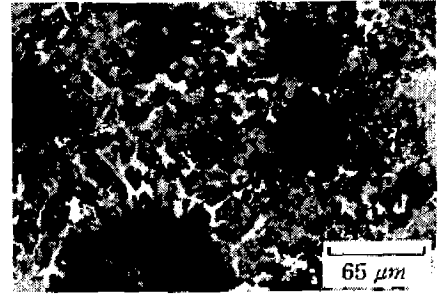
N_{sg} : Nodule count of graphite

Fig. 3에 각 공시재의 기지조직 사진을 보이고 있다. 또한, 각 공시재에서 결함으로 작용하는 흑연특성을 Table 2에 보이고 있다. 흑연의 구상화율은 A재만 60%이하이고 오스텝퍼링처리를 행한 B재와 C재는 60%이상의 구상화율을 보이고 있으며, 내재결함으로 작용하는 흑연의 평균직경은 A재와 B재가 비슷하며 C재가 가장 크다.

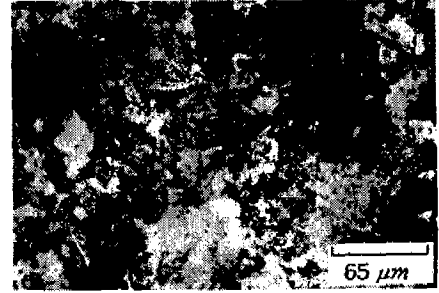
피로시험은 실은 대기 중에서 실시하였고, 사용한 시험기는 회전굽힘 피로시험기이다. 시험편은 시험부를 φ9, R20으로 기계가공하여 에머리페이퍼로 연마한 다음 알루미늄 파우더로 재차 연마하여 시험면 표면을 경면으로 가공한 후 실험에 제공하였다. 또한 파단후 피로파단한 시험편 기점부의 파면을 전자현미경(SEM)으로 관찰하여 기점이 된 결함의 크기를 구하였다.



(a) Series A



(b) Series B



(c) Series C

Fig. 3 Micro structures of specimens prepared by various heat treatment.

4. 실험결과 및 고찰

4. 1 점적특성

각 공시재의 점적특성을 Table 3에 보이고 있다. 인장강도 σ_{TS} 와 항복강도 σ_Y 는 오스텝퍼링처리한 B재와 C가 소둔재인 A재보다 높으며, 그 크기는 C재가 가장 높다. H_v 는 Sugiyama[6] 등이 정의한 것과 같이 각상의 경도와 체적율을 고려해 기지조직의 평균경도를 결정하였으며, 소둔재의 경우에 구한 방법은

$$H_v = (H_{vf} \times F_v + H_{vp} \times P_p) / (F_v + P_p) \quad (4)$$

H_{vf} : Vicker's hardness of ferrite

V_f : Volume fraction of ferrite

H_{vp} : Vicker's hardness of pearlite

V_p : Volume fraction of pearlite

Table 3 Mechanical properties.

	σ_Y (MPa)	σ_{TS} (MPa)	δ (%)	H_v
Series A	301	423	24	221
Series B	658	830	11	379
Series C	765	920	10	476

σ_Y : 0.2% proof stress

H_v : Average value of each phase

Table 4. Vicker's hardness of each phase.

	Ferrite		Pearlite		Bainite	
	H_v	V_f	H_v	V_p	H_v	V_b
Series A	206	58	235	42	-	-
Series B	206	10	-	-	399	90
Series C	206	2	-	-	491	95

식 (4)와 같다. Table 4에 그 값을 보이고 있다. 오스 템퍼링 처리재의 경도는 소둔재보다 높으며, 그 정도 는 C재가 가장 높다.

4. 2 피로시험

본 실험에서는 10^7 회의 응력반복을 견디는 응력진 폭을 취하여 각 공시재의 피로한도를 정의하였다. S-N선도는 Fig. 4에 보이고 있으며, 피로한도값과 피로한도비($\alpha = \sigma_w / \sigma_{TS}$)를 Table 5에 정리하였다.

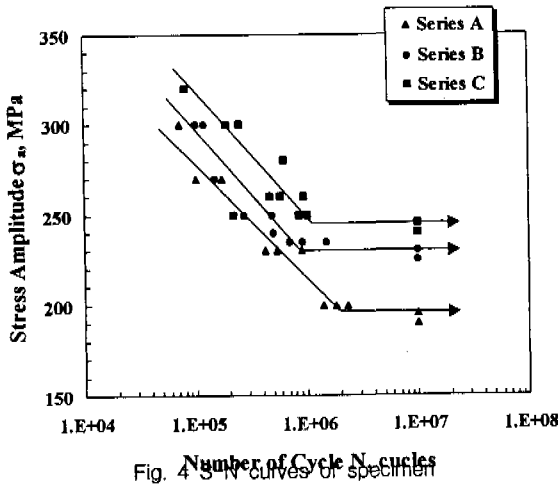


Fig. 4 S-N curves of specimen

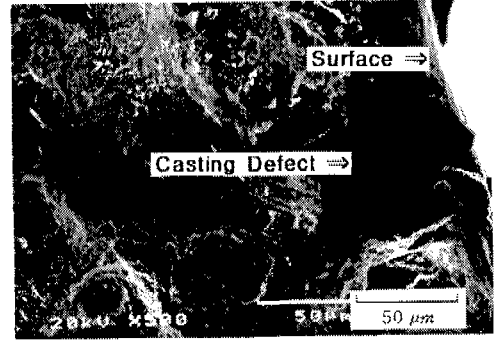
Table 5 Fatigue limit of each specimen series

	Fatigue limit σ_w (MPa)	Fatigue limit ratio α (%)
Series A	195	0.460
Series B	230	0.277
Series C	245	0.266

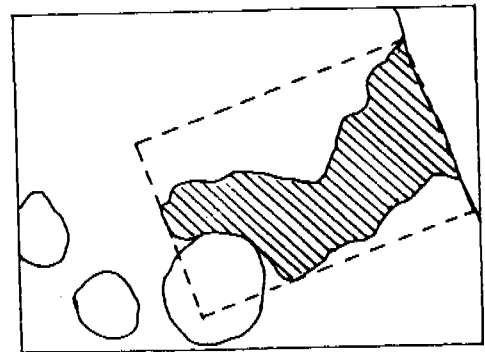
$(\alpha = \sigma_w / \sigma_{TS})$

Table 3와 Table 5에서 보면, 오스 템퍼링 처리에 의하여 강도와 경도가 상당히 상승하게 되지만 이에 동반하는 피로한도의 상승은 보이지 않는다. 이러한 현상은 저자[7] 등이 보고한 것과 같이 기지조직의

결함민감성이 크기 때문이며, 구상흑연주철에 존재하 는 다수의 흑연이나 주조결함 등의 내재결함을 기점 으로 해서 피로크랙이 발생 및 전파하여 파괴가 발 생하기 때문이다. 파면해석을 행한 결과 이와 같은 파괴기점이 되는 결함들은 대부분 표면이나 표면직 하에 존재하는 것이 확인되었다.



(a) Photo



(b) Trace

Fig. 5 Casting defect existing on the fracture surface. (SeriesA, $\sigma_a = 350\text{MPa}$, $N_f = 2.4 \times 10^4$)

4. 3 최대결함크기 $\sqrt{area_{max}}$ 의 예측과

4 파라미터법의 적용

4 파라미터법을 피로한도의 예측에 적용하기 위해 서는 각 공시재에 존재하는 최대결함크기를 예측하 는 것이 필요하다. 본 연구에서는 시험편 표면제 결 함크기의 분포가 극치통계를 따른다고 생각하였으며, 표면상에서 금속현미경의 한 시야내에서 관찰되는 최대결함과 파단된 시험편의 크랙 기점에 Murakami[8]의 수법을 적용하였다.

피로크랙의 기점이 된 Fig. 5(a)의 결함을 Fig. 5(b)에 보이는 형상으로 근사시켜 그 면적에서 구한 결과, A재가 $320 \mu\text{m}$, B재가 $340 \mu\text{m}$, C재는 $370 \mu\text{m}$ 이다.

피로크랙의 기점이 된 결함은 대부분 시험편의 표면에 존재한다. 따라서, 식(2)의 A 는 1.43이 되고, 식(3)의 B 는 0.65가 된다. 그리고 피로시험이 응력비 $R=-1.0$ 에서 실시되었기에 식(3)의 ΔK_{th} 는 $R \leq 0$ 에서의 $\Delta K_{th, max}$ 값[6],[9]을 사용하였으며, 본 실험에서는 직접 구하지 않았다. Table 7에 ΔK_{th} 를 보이고 있다.

Table 6 ΔK_{th} of each specimen series.

	ΔK_{th} ($R=-1.0$)
Series A	12.5
Series B	15.1
Series C	7.3

Table 3, 4, 6의 값들을 식(1)~식(3)에 적용하여 얻어진 각 공시재의 피로한도와 결함길이의 관계를 Fig. 6에 보이고 있다. Fig. 6에서 각재의 a_{max} 가 위치하는 영역에 주목하면, A재와 B재는 영역 2에, C재는 영역 2와 영역 3의 경계에 위치하고 있다. 여기서 먼저, 피로한도가 영역 2에 있는 경우를 가정해서, 식(2)를 사용하여 a_{max} 에서의 피로한도의 예측치를 구하고 실험치와 비교한 것을 Table 7에 보이고 있다. A재, B재, C재 모두 실험치와 추정치의 비가 1보다 작지만 A재의 경우는 거의 1에 가깝고 B재와 C재의 경우에도 그 비가 0.75이상인 것을 알 수 있다. 다음, 피로한도가 영역 3에 있는 경우를 가정해서, 식(3)을 사용하여 같은 절차를 거친 결과를 또한 Table 8에 보이고 있다. A재와 B재의 경우에는 실험치와 식(3)에 의한 추정치의 비가 매우 작지만, C재의 경우에는 실험치와 식(2), 식(3)에 의한 추정치의 비가 거의 같은 것을 알 수 있다. 이것은 a_{max} 에 있어서 C재의 피로한도가 영역 2와 영역 3의 경계에 위치하고 있기 때문이다.

따라서, A재와 B재의 피로한도는 영역 2에 위치한다고 할 수 있으며, 각각의 피로한도는 식(2)에 의하여 예측이 가능하다. 또한, C재의 경우는 피로한도가 영역 2와 영역 3의 경계에 위치하고 있으며 피로한도의 예측은 식(2)와 식(3)을 모두 사용하여 보다 안전한 수치를 예측치로 선택하여야 한다.

이상의 결과에 의해 구상흑연과 주조결함을 기점으로 피로파괴하는 구상흑연주철의 피로한도는 4 파

라미터법에 의한 정량평가가 가능하며 피로한도의 예

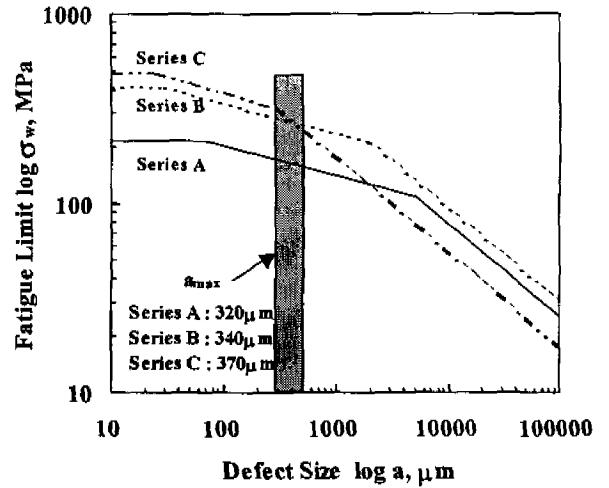


Fig. 7 The relation between fatigue limit and maximum defect size

Table 7 Comparisons of fatigue limit by experiment and prediction.

	$\sigma_{w, exp}$	$\sigma_{w, prel}$ (H_v)	$\frac{\sigma_{w, exp}}{\sigma_{w, prel}}$	$\sigma_{w, prel}$ (ΔK_{th})	$\frac{\sigma_{w, exp}}{\sigma_{w, prel}}$
Series A	195	182	1.07	607	0.32
Series B	230	264	0.87	711	0.32
Series C	245	318	0.77	329	0.74

측에도 이용가능하다고 판단된다. 따라서, 인장강도 σ_{TS} , 기지조직의 비커스경도 H_v , 피로크랙 진전하한 계치 ΔK_{th} 및 $\sqrt{area_{max}}$ 극치통계에 의해 예측된 최대 결함크기에 기초한 4 파라미터법은 구상흑연주철과 같은 다결함재의 피로한도 정량평가에 적용가능하다. 다만, 식(3)에 채용된 ΔK_{th} 는 어느 정도 오차를 가지기 때문에 식(3)에 의한 예측은 어느 정도 예측오차를 가질 수 있다는 것을 고려해야만 한다.

5. 결론

구상흑연주철을 이용하여 피로한도 정량평가법으로 제안되어 있는 4 파라미터법의 타당성을 검토하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 오스텝퍼링처리에 의하여 인장강도와 기지조직의 경도가 상승하지만, 이에 비례하여 반드시 피로한도가 상승하는 것은 아니다. 이 원인은 내재결함으로

존재하는 구상흑연과 구조결함에 대한 결함민감도가 상승하기 때문이다.

2) 인장강도, 비커스경도, 피로크랙 진전하한계치, 극치통계에 의하여 예측되는 최대결함크기에 기초한 4 파라미터법은 구상흑연주철의 피로한도 예측에 타당하다.

3) 오스템퍼링처리에 의하여 구상흑연주철의 피로한도는 개선되며, 내재하는 결함의 길이가 불분명할 때는 반 오스템퍼링에 의하여 피로한도를 개선시키는 것이 가장 바람직하다.

참 고 문 헌

- [1] Steven R. Lampman, *ASM Handbook*, Vol.19, 1996.
- [2] 최담천, "확대되는 球狀黑鉛鑄鐵의 用途", *大韓鑄造學會誌*, Vol.10, No.4, pp.294-298, 1990.
- [3] 박윤우, C.R.Loper, "오스템퍼드 구상흑연주철의 균열의 발생 및 전파에 관한 연구", *The Journal of the Korean Foundrymen's Society*, Vol.11, No.2, pp.148-155, 1991.
- [4] 村上敬宣, 宇宿尙史, "介在物寸法の統計的評價とそれに基づく高硬さの鋼疲勞限度の豫測", *日本機械學會論文集*, 제55A권, 제510호, pp.213-221, 1989.
- [5] 小林英男, 李宗炯, "疲勞に對する破壞評價線圖の試み", *日本機械學會論文集*, 제52A권, 제477호, pp.1204-1208, 1986.
- [6] 衫山好弘, 淺見克敏, 松岡忍, "($\alpha + \gamma$)域からのオーステンパ處理による球狀黑鉛鑄鐵の疲勞強度の改善", *日本機械學會論文集*, 제58A권, 제549호, pp.788-793, 1992.
- [7] Min-Gun Kim, Jin-Hak Kim, "EFFECTS OF MICRO STRUCTURAL AND MECHANICAL FACTORS ON FATIGUE LIMIT IN SGI", *Proc. of IMEKO TC3/APMF '98*, pp.527-534, 1998.
- [8] 村上敬宣, 微小缺陷と介在物の影響, 養賢堂 1993,
- [9] 村上敬宣, 清水眞佐男, "疲勞強度に及ぼす介在物, 微小缺陷, 微小き裂の影響", *日本機械學會論文集*, 제54A권, 제499호, pp.413-425, 1988.