

오스템퍼링처리한 구상흑연주철의 피로한도에 미치는 인공결함의 영향

김민건* · 김진학**
(1998년 10월 29일 접수)

Influence of Artificial Defect on Fatigue Limit in Austempered Ductile Iron

Mingun Kim and Jinhak Kim

Key Words: Fatigue(피로), Fatigue Limit(피로한도), Austempered Ductile Iron(오스템퍼링처리한 구상흑연주철), Internal Defect(내재결함), Artificial Defect(인공결함)

Abstract

Rotary bending fatigue tests were carried out to investigate the influence of artificial defects on fatigue limit in annealed and austempered ductile iron. Obtained main results are as follows : (1) Artificial defect(micro hole type, dia.<0.4 mm) on specimen surface did not bring about a obvious reduction of fatigue limit in austempered ductile iron(ADI) as compared with annealed ductile iron. (2) According to the investigation of \sqrt{area}_c which is the critical defect size to crack initiation at artificial defect, \sqrt{area}_c of ADI is larger than that of annealed ductile iron. This shows that the situation of crack initiation at artificial defect in ADI is more difficult in comparison with annealed ductile iron. (3) One of the reasons for the low rate of crack initiation from artificial defect in ADI is that the resistance of matrix to crack initiation is higher than that of annealed ductile iron. (4) In case that the \sqrt{area} of artificial defect and graphite nodule is the same, the rate of crack initiation from graphite nodule is higher than that from artificial defect. This reason is that the serious ruggedness around graphite nodule is formed by austempering treatment.

1. 서론

구상흑연주철은 경제성과 더불어 그 실용상의 기술적 배경이 충분히 정리되어 있어 자동차 부품, 건설기계, 산업기계를 비롯한 각종 강도부재에 광범위하게 사용되고 있다.^(1~3) 최근, 오스템퍼링처리한 구상흑연주철(Austempered Ductile Iron ; ADI)은 고인성과 고강도를 겸비한 우수한 재료로 주목받고 있으며, 이 재료를 강도부재로서 신뢰성있게 사용하기 위한 다양한 연구가 활발히 이루어지고

있다.^(4,5) 특히, 기지조직 내에 존재하는 구상흑연이나 주조결함이 피로강도에 미치는 영향에 대한 연구가 중심을 이루고 있다.^(6~8)

Endo⁽⁹⁾는 내재결함으로서 흑연과 주조결함에 주목하여 페라이트 기지 및 볼스 아이(bull's eye) 조직의 구상흑연주철을 사용하여 연구한 결과, 이와 같은 결함평가에 대해서 Murakami⁽¹⁰⁾ 등이 제안한 \sqrt{area} 파라미터가 유력하며, 극치통계에서 구한 가장 큰 결함에 의해 피로강도가 결정된다고 보고하였다. 또한, Kato⁽¹¹⁾는 베이나이트 기지조직을 가지는 오스템퍼링 구상흑연주철에서 피로강도는 결함에 의하여 크게 저하한다고 보고하였다. 따라서, 기지조직이 다른 공시체에 인공결함이 존재할 때 인공결함이 피로한도에 미치는 영향이 서로 다

* 회원, 강원대학교 기계공학과

** 회원, 강원대학교 기계공학과 대학원

를 것으로 예상된다.

본 연구에서는 기지조직이 서로 다른 2종류의 공시재에 인공결함을 가공하여, 각각의 피로한도에 미치는 인공결함의 영향을 고찰하였다. 구체적으로, 결함의 형상과 크기를 통일적으로 평가하는 파라미터로서 이미 그 실효성이 입증된 \sqrt{area} 파라미터를 이용하여 피로크랙의 발생원으로 선택되는 결함의 크기를 평가함으로써, 인공결함이 오스템퍼링처리한 구상흑연주철의 피로한도에 미치는 영향에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 실험재료 및 실험방법

공시재는 GCD45이며 화학성분을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition(wt%).

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

Table 2 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	-	-	900	1	500	2

Table 3 Mechanical properties.

	σ_Y	σ_{TS}	δ	H _v
Series A	301	423	23	212
Series B	740	932	10	472

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

Table 4 Characteristics of spheroidal graphite on surface.

	D _{sg} (μ m)	H _{sg} (%)	V _{sg} (%)	N _{sg} (1/mm ²)
Series A	23	70	27	215
Series B	40	78	29	98

D_{sg} : Average size of spheroidal graphite
 H_{sg} : Nodularity of spheroidal graphite
 V_{sg} : Volume fraction of spheroidal graphite
 N_{sg} : Nodule count of spheroidal graphite

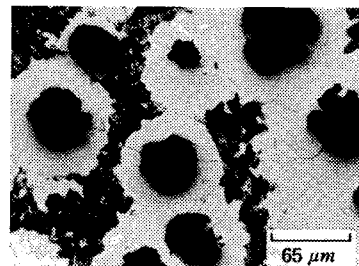
Table 2에 제시한 어니일링과 오스템퍼링처리를 행하여 각각 A재 및 B재라 칭하였으며, 그 기계적 성질을 Table 3에 나타내었다. 또한, 피로거동에 영향을 미칠 것으로 예상되는 평균흑연입경, 구상화율 등의 흑연특성을 Table 4에 정리하였다.

Fig. 1에 양 시험편의 조직사진을 보이고 있다. A재는 페라이트와 펄라이트가 혼재하는 전형적인 불스 아이(bull's eye)조직이며, B재는 소량의 잔류 오스테나이트와 펄라이트를 포함하고 있지만 거의 배이나이트 단상 기지조직으로 볼 수 있다.

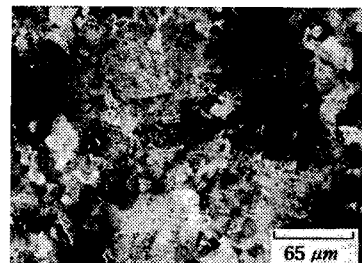
시험편은 최소 직경부를 $\phi 9$, R20으로 기계가공한 후 에머리 페이퍼와 알루미늄 파우더로 경면으로 연마하였다. 시험편의 최소직경부에는 마이크로 드릴링장치를 사용하여 직경과 깊이가 동일한 인공결함을 가공하여 실험에 제공하였다. 사용한 시험기는 회전급힘 피로시험기(RPM 3500)이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 ADI의 피로한도에 미치는 인공결함의 영향
 평활재 및 4종류의 인공결함재에 대하여 피로시험을 수행하여 A재의 결과를 Fig. 2, B재의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. A재에서는 0.1 mm~0.2 mm의 인공결함을 가공한 시험편에서는 평활재에 비하여



(a) Series A



(b) Series B

Fig. 1 Micro structure of specimen.

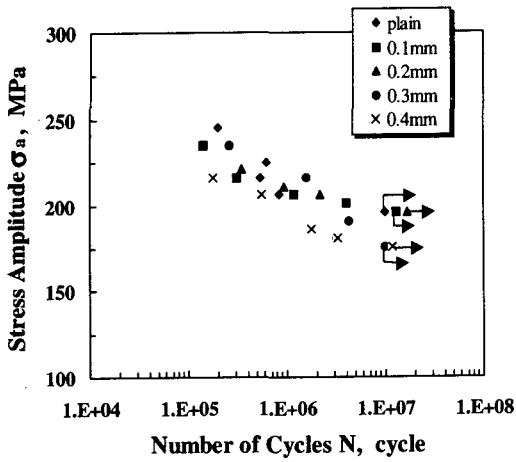


Fig. 2 S-N data of Series A.

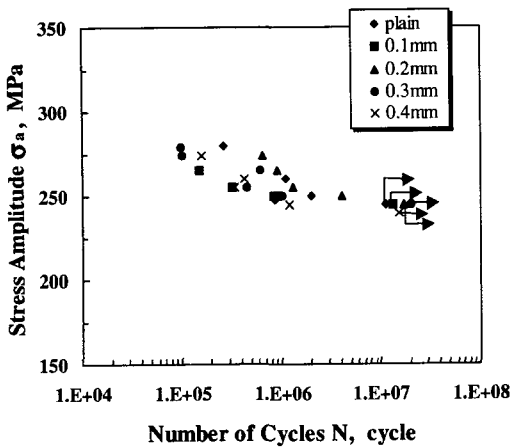


Fig. 3 S-N data of Series B.

피로한도의 저하가 발생하지 않으며, 0.3 mm 이상의 인공결함을 가공한 시험편에서는 피로한도가 저하하고 있다. 따라서, 인공결함의 직경이 0.3 mm 이상일 때 피로한도가 인공결함의 영향을 받기 시작한다는 사실을 알 수 있다.

한편, B재에서는 모든 인공결함에서 유의할만한 피로한도의 저하는 보이지 않고 평활재와 비슷한 값을 보이고 있다. 즉, 오스템퍼링처리에 의하여 강화된 기지조직을 가지는 B재에서 0.4 mm 범위 내에서는 인공결함이 피로한도에 미치는 영향이 거의 없다는 것을 의미한다.

이러한 사실은 오스템퍼링처리한 구상흑연주철의 피로거동이 상당한 크기의 인공결함에 둔감하며, 강화된 기지조직의 결함에 대한 민감성증대의

결과로 피로한도가 저하한다는 Kato⁽¹¹⁾의 주장과 상반되는 대단히 흥미로운 결과이다.

Fig. 3의 결과는 피로크랙이 시험편에 도입된 인공결합에서가 아니라 시험편 내부에 존재하여 응력 집중원으로 작용하는 구상흑연이나 주조결합 등의 내재결합에서 발생하기 때문이라고 추측된다.

한편, Table 4를 참고하면 오스템퍼링처리한 B재의 평균흑연입경(D_{90})이 소둔재인 A재에 비해 거의 2배가 됨을 알 수 있다. 구상흑연주철의 피로한도가 표면에 존재하는 구상흑연의 크기에 지배된다는 보고⁽⁹⁾와 결합에서의 피로크랙 발생에 의존한다는 보고⁽¹²⁾에 따라, A재와 B재에서는 서로 다른 기지조직을 가지고 있으므로 피로크랙의 발생원이 되는 인공결함의 임계크기도 서로 다를 것으로 예상된다. 따라서, 다음 절에서는 Murakami의 수법을 이용하여 양재에서 인공결합에서의 크랙발생에 대한 임계결합크기 \sqrt{area}_c 를 추정하였다.

3.2 인공결합에서의 크랙발생에 대한 임계결합 크기 \sqrt{area}_c 의 추정

Table 5는 A재에서 직경 (d) 0.3 mm와 0.4 mm, B재에서는 직경 0.5 mm와 0.6 mm의 마이크로 드릴을 사용하여, 깊이 (h)를 0.1 mm간격으로 조정함으로써 \sqrt{area}_{hole} 를 달리하는 인공결합을 가공하여 평활재 피로한도의 1.1배 응력으로 피로시험을 행한 결과이다. \sqrt{area}_{hole} 은 다음 식 (1)^(13,14)에 의하여 계산하였다.

$$\sqrt{area}_{hole} = \sqrt{hd - d^2/4\sqrt{3}} \quad (1)$$

Table 5의 A재에 주목하면, \sqrt{area}_{hole} 이 370 μm 인 시험편에서는 모든 피로크랙이 인공결합에서 발생하였지만, 217 μm 인 경우에는 대부분의 피로크랙이 내재결합에서 발생하였다. 그래서, 양 \sqrt{area}_{hole} 사이에 피로크랙의 발생이 내재결합에서 인공결합으로 천이하는 값의 존재를 예상할 수 있다. 따라서, 278 μm 의 \sqrt{area}_{hole} 값을 가지는 시험편의 파단기점을 조사하였더니, 절반 이상의 시험편에서 피로크랙이 인공결합에서 발생한 것이 확인되었다. 여기서, \sqrt{area}_{hole} 의 값이 370 μm 와 278 μm 인 경우를 함께 고찰하면, 인공결합에서의 크랙 발생율은 80%정도이지만, 278 μm 와 217 μm 인

Table 5 Estimation of \sqrt{area}_c on the specimen having different \sqrt{area}_{hole} .
($\sigma_a = 1.1\sigma_w$)

	d (mm)	h (mm)	\sqrt{area}_{hole} (μm)	Initiating Point	N_f (cycles)			
Series A	0.30	0.20	217	hole	3.5×10^6			
				defect	1.5×10^6			
				defect	2.2×10^6			
				defect	4.5×10^6			
				defect	1.4×10^6			
	0.30	0.30	278	hole	2.6×10^6			
				defect	1.0×10^6			
				defect	1.6×10^6			
				hole	1.8×10^6			
				hole	2.8×10^6			
	0.40	0.40	370	hole	5.5×10^5			
				hole	6.2×10^5			
hole				5.9×10^5				
hole				4.8×10^5				
hole				5.1×10^5				
Series B	0.50	0.50	462	hole	1.3×10^6			
				defect	2.3×10^6			
				defect	1.8×10^6			
				defect	3.5×10^6			
				defect	2.9×10^6			
	0.60	0.50	498	hole	1.1×10^6			
				hole	9.1×10^5			
				defect	2.1×10^6			
				hole	5.7×10^5			
				defect	1.8×10^6			
				0.60	0.60	555	hole	7.6×10^5
							hole	8.7×10^5
hole	8.0×10^5							
hole	9.8×10^5							
				hole	1.0×10^6			

인 경우에는 40%정도밖에 되지 않는다.

한편, B재의 경우에는 498 μm 의 \sqrt{area}_{hole} 값이 그 경계가 되고 있다.

따라서, 인공결합에서의 크랙 발생율이 80%이상일 때의 \sqrt{area} 를 인공결합에서의 크랙발생에 대한 임계결합크기 \sqrt{area}_c 라고 정의하면, A재는 278 μm , B재는 498 μm 임을 알 수 있다. 그러므로

\sqrt{area}_{hole} 이 A재는 278 μm 이상일 때, B재에서는 498 μm 이상일 때 내재결합보다 인공결합에서의 크랙발생이 우선하게 되며, 이에 의한 피로한도의 저하가 나타나게 되는 것이다. 이 사실에 근거하여 Fig. 2, Fig. 3의 결과는 다음과 같이 설명될 수 있다.

A재에서 인공결합의 직경이 0.3 mm부터 피로한

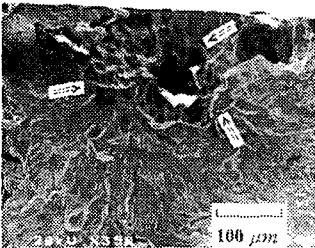
도의 저하가 발생한 것은, 0.3 mm의 인공결함 ($d=h$)의 \sqrt{area} 가 278 μm 으로 \sqrt{area}_c 와 동일하기 때문에 피로크랙은 이 인공결함에서 발생했다고 할 수 있다. 한편 B재에서는, Fig. 3에서 도입된 최대인공결함인 0.4 mm의 \sqrt{area} 가 370 μm 으로 \sqrt{area}_c 보다 작기 때문에, 피로크랙은 인공결함이 아닌 다른 내재결함에서 발생하여 파단에 이른

것으로 볼 수 있다. 이러한 사실을 확인하기 위하여 10^7 회의 반복응력을 견디지 못하고 파단한 시험편의 피로크랙 발생부를 전자현미경(SEM)으로 관찰하였다. Fig. 4는 피로크랙의 발생기점에 대한 SEM사진이다. (a)는 인공결함에서, (b)는 흑연부에서 피로크랙이 발생하였음을 알 수 있다(\Rightarrow 표시). 사진상에서 크랙발생 기점을 조사하여 크랙발생 기점이 된 인공결함과 내재결함과의 비율을 Table 6에 정리하였다.

인공결함에서의 피로크랙 발생에 초점을 맞추어 보면, A재의 경우 인공결함의 직경이 0.1 mm~0.2 mm일때는 크랙 발생율이 20%정도이지만, 0.3 mm~0.4 mm일때는 약 90%가 인공결함에서 크랙이 발생하였다. 또한 B재에서는, 모든 인공결함으로부터의 크랙발생율이 30%이하이고, 나머지는 내재결함에서 크랙이 발생하여 최종 파단에 이르고 있다. 따라서 본 절에서 추정한 인공결함에서의 크랙발생에 대한 임계결함크기 \sqrt{area}_c 는, 피로크랙

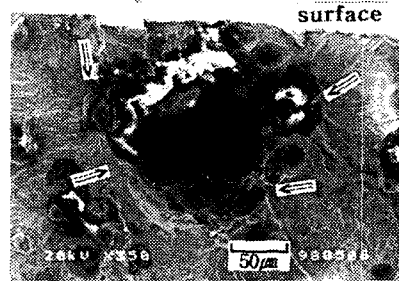


(a)Hole ($d=h=0.3\text{mm}$)
($\sigma_a = 215\text{MPa}$, $N_f = 6.1 \times 10^6$)

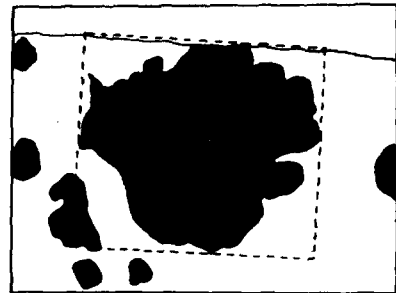


(b)Internal defects
($\sigma_a = 250\text{MPa}$, $N_f = 6.1 \times 10^5$)

Fig. 4 Fatigue crack origin in series B.



<Photo>



<Trace>

$\sqrt{area} = 182 \mu\text{m}$ (graphite)

$\sqrt{area}_{\text{hole}} = 185 \mu\text{m}$ (0.2 mm hole)

Fig. 5 Comparison of \sqrt{area} of graphite and artificial defect in Series B.

($\sigma_a = 255\text{MPa}$, $N_f = 1.3 \times 10^6$)

Table 6 Rate of hole and defect being initiated place of the fatigue crack.

	Hole(%)		Defect(%)
Series A	0.1 mm	20	80
	0.2 mm	20	80
	0.3 mm	83	17
	0.4 mm	100	0
Series B	0.1 mm	0	100
	0.2 mm	0	100
	0.3 mm	16	84
	0.4 mm	33	67

의 발생원으로 인공결합이 선택되느냐 않되느냐의 판단기준으로서 타당함을 알 수 있다.

또 한가지는 어닐링한 A재보다 강화된 기지조직을 가지는 B재에서는 결함으로부터의 크랙발생에 대한 저항이 A재보다 높을 것으로 생각된다. 즉, 인공결합에서의 크랙발생율의 차이는 크랙의 발생에 대한 저항성에서도 기인한다고 생각하여, 인공결합에서의 초기크랙 발생수명을 조사하여 보았다. 양재에 직경과 깊이가 동일한 0.6mm의 인공결합을 도입하여 각각의 $1.1\sigma_w$ 의 응력으로 피로시험을 행한 결과, A재는 1.5×10^4 회에서, B재는 7.2×10^5 회에서 약 80 μm 정도의 초기크랙이 발생하였다. 따라서, B재가 인공결합으로부터 크랙 발생율이 낮은 원인중의 하나로서 크랙발생에 대한 저항성이 A재보다 높기 때문이며, 이 점도 Fig. 3의 결과를 뒷받침해 주고 있다.

한편, $\sqrt{\text{area}}_c$ 가 A재에 비하여 B재가 2배 가까이 큼으로 해서 B재에서 인공결합에 대한 민감성이 오히려 저하한 것처럼 보이는 것은, 동일한 $\sqrt{\text{area}}$ 의 인공결합과 내재결합이 크랙의 발생원으로 서로 경합할 경우 내재결합을 우선적으로 선택한 결과로 볼 수 있다. 또한, 오스템퍼링처리에 의하여 구상흑연입경(D_{sg})이 소둔재에 비하여 크게 조대화된 것도 이러한 현상을 조장하고 있다고 볼 수 있다. 이러한 사실은 다음과 같은 관찰결과가 뒷받침해 주고 있다.

Fig. 5는 B재에서 0.2mm의 인공결합이 도입된 시험편 중 피로크랙이 인공결합을 무시하고 흑연을 기점으로 발생한 예를 보이고 있다. 크랙의 발생기점을 화살표로 표시하였다. 그림으로부터 피로크랙이 흑연의 가장자리 요철부에서 다수 발생하여 전파하였음을 알 수 있다. 이 흑연과 인공결합의 $\sqrt{\text{area}}$ 를 비교하기 위하여 흑연을 직사각형으로 근사⁽¹⁵⁾하여 $\sqrt{\text{area}}$ 를 구한 결과, 그 값이 182 μm 으로 0.2 mm의 인공결합의 값과 별 차이가 없음이 확인되었다. 따라서, 비슷한 $\sqrt{\text{area}}$ 의 인공결합과 흑연이 경합할 경우 크랙발생장소로서 흑연이 선택됨으로 해서, 일견 인공결합에 대한 둔감한 것처럼 보이는 것으로 생각된다.

4. 결 론

오스템퍼링처리한 구상흑연주철의 피로한도에 미치는 인공결합의 영향을 검토하기 위하여, 서로 다른 기지조직을 가지는 2종류의 공시재에 인공결합을 도입하여 피로시험을 행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 오스템퍼링처리한 구상흑연주철에서는 소둔재에 비하여 인공결합에 의한 현저한 피로한도의 저하가 초래되지 않는다.

(2) 인공 결합에서의 크랙발생에 대한 임계결합 크기 $\sqrt{\text{area}}_c$ 을 추정한 결과, 소둔재에서는 278 μm 오스템퍼링처리재에서는 498 μm 으로 서로 달랐다. 따라서, 오스템퍼링처리재에서 $\sqrt{\text{area}}_{\text{hole}}$ 이 498 μm 이하일 때에는 인공결합보다 내재결합에서의 크랙발생이 우선하게 되며, 이 범위까지의 인공결합은 피로한도에 별다른 영향을 주지 못한다.

(3) 오스템퍼링처리한 재료에서 같은 크기의 인공결합으로부터의 크랙 발생율이 소둔재보다 낮은 원인중의 하나는, 기지조직의 크랙발생에 대한 저항성이 소둔재보다 높기 때문이다.

(4) 오스템퍼링처리한 재료에서 동일한 $\sqrt{\text{area}}$ 를 가지는 인공결합과 내재결합이 서로 경합할 경우, 인공결합이 무시되고 흑연에서의 크랙발생이 우선된다. 이 원인은 오스템퍼링처리에 의하여 흑연 주위에 심한 요철부가 형성되기 때문이다.

참고문헌

- (1) Steven R. Lampman, 1996, "Fatigue and Fracture Properties of Cast Irons," *ASM Handbook*, Vol. 19, pp. 665~679.
- (2) 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.
- (3) 박홍식, 진동규, 1992, "오스템퍼링 한 저합금 구상흑연주철의 부식마멸특성 및 그 기구에 관한 연구," *대한기계학회논문집*, 제17권 제6호, pp. 1404~1411.
- (4) 최석림, 윤기혁, 문원진, 강창룡, 김한군, 1998, "ADI의 조직특성에 미치는 2단 오스테나이트화 처리조건의 영향," *한국열처리공학회지*, 제11권 제1호, pp. 46~53.

- (5) 김석원, 우기도, 1998, "ADI의 기계적성질에 미치는 합금원소 및 열처리의 영향," 한국열처리공학회지, 제11권 제2호, pp. 121~130.
- (6) 土居滋, 光永公一, 石本悟, 1994, "オーステンパ 球狀黑鉛鑄鐵の高サイクル疲労特性," 日本機械學會論文集, 60-575A, pp. 1493~1497.
- (7) 土居滋, 原田昭治, 高原正雄, 廣安武, 池田秀男, 1996, "オーステンパ 球狀黑鉛鑄鐵の高サイクル疲労に及ぼす表面硬さの影響," 日本機械學會論文集, 62-595A, pp. 589~593.
- (8) 片平和俊, 鈴木秀人, 1997, "P-S-N 球儀に基づく表面改質部品の疲労信頼性設計法の構築," 日本機械學會論文集, 63-612A, pp. 1607~1611.
- (9) 遠藤正浩, 1989, "球狀黑鉛鑄鐵の疲労強度に及ぼす黒鉛の形状,寸法,分布の影響," 日本材料學會論文集, 38-433A, pp. 1139~1144.
- (10) 村上敬宣, 1989, "微小缺陷と介在物の影響," 養賢堂, pp. 233~258.
- (11) 加藤容三, 高藤新三郎, 1997, "オーステンパ處理球狀黑鉛鑄鐵の長壽命域における疲労強度," 日本機械學會論文集, 63-610A, pp. 1153~1158.
- (12) Min-Gun Kim, Jin-Hak Kim, 1998, "Effects of Micro Structural and Mechanical Factors on Fatigue Limit in SGI," *Proc. of IMEKO TC3/APMF '98*, pp. 527~534.
- (13) 村上敬宣, 遠藤正浩, 1983, "疲労強度に及ぼす微小缺陷の影響の評価法," 日本機械學會論文集, 49-438A, pp. 127~135.
- (14) 遠藤正浩, 1992, " \sqrt{area} パラメータモデルに基づく球狀黑鉛鑄鐵の疲労強度豫測," 日本機械學會第69期通常總會講演會講演論文集, Vol. A, pp. 479~481.
- (15) 杉山好弘, 淺見克敏, 松岡忍, 1992, "缺陷材の疲労限度の定量評價法と球狀黑鉛鑄鐵によるその檢證," 日本機械學會論文集, 58-556A, pp. 2287~2292.