

# 오스템퍼링 구상흑연주철의 피로한도 지배인자에 관한 연구

## A Study on the Governing Factor of Fatigue Limit in Austempered Ductile Iron

김민건\*, 김진학\*\*  
Mingun Kim, Jinhak Kim

### ABSTRACT

We examined the governing factors of fatigue limit in annealed and austempered ductile iron specimens machined micro hole(dia.<0.4 mm) in rotary bending fatigue test. Also, the quantitative relationship between fatigue limit and maximum defect size in specimens was investigated. Artificial defect(micro-pit type, dia.<0.4 mm) on specimen surface did not bring about an obvious reduction of fatigue limit in austempered ductile iron(ADI) as compared with annealed ductile iron. 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 was 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. Maximum defect size is one of the important parameters to predict fatigue limit. And, the quantitative relationship between the fatigue limit  $\sigma_w$  and the maximum defect size  $\sqrt{area}_{max}$  can be expressed to  $\sigma_w^n \cdot \sqrt{area}_{max} = C_2$ . where,  $n, C_2$  are constant. Moreover, it is possible to explain the difference in fatigue limit between austempered and annealed ductile iron by introducing the parameter  $\delta(= N_{sg} / N_{total})$  in a plain specimen.

주요기술용어 Fatigue Limit(피로한도), Austempered Ductile Iron(오스템퍼링 구상흑연 주철), Internal Defect(내재결함) Artificial Defect(인공결함), Governing Factor(지배인자)

### 1. 서론

구상흑연주철은 내마모성, 감쇠능, 저온충격특성 및 경제성, 가공성 등이 다른 재료보다 우수하여, 자동차용 부품 가운데에서 실

린더블럭, 실린더헤드, 토크로드(Torque rod), 브레이크 부품 등에 널리 사용되고 있다<sup>(1),(2),(3)</sup>. 최근, 오스템퍼링처리한 구상흑연주철(Austempered Ductile Iron ; ADI)은 고인성과 고강도를 겸비한 우수한 재료로 주목받고 있으며, 자동차의 너클스핀들(Knuckle spindle), 리어스핀들(Rear spindle), 크랭크샤프트, 이그조스트 매니폴드(Exhaust manifold)

\* 정회원, 강원대학교 기계공학과

\*\* 강원대학교 대학원

등에 그 사용이 점차 증가되고 있다<sup>(3),(4)</sup>. 따라서, 이 ADI를 신뢰성있게 사용하기 위한 다양한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>(5),(6),(7)</sup>. 특히, 기지조직 내에 존재하는 구상흑연이나 주조결함이 피로강도에 미치는 영향에 대한 연구가 중심을 이루고 있다<sup>(8),(9),(10)</sup>.

Endo<sup>(11)</sup>는 내재결함으로서 흑연과 주조결함에 주목하여 페라이트 기지 및 볼스 아이(bull's eye) 조직의 구상흑연주철을 사용하여 연구한 결과, 이와 같은 결함평가에 대해서 Murakami<sup>(12)</sup> 등이 제안한  $\sqrt{area}$  파라미터가 유력하며, 극치통계에서 구한 가장 큰 결함에 의해 피로강도가 결정된다고 보고하였다. 또한, Kato<sup>(13)</sup>는 베이나이트 기지조직을 가지는 오스템퍼링 구상흑연주철에서 피로강도는 결함에 의하여 크게 저하한다고 보고하였다. 따라서, 기지조직이 다른 공시재의 피로한도를 지배하는 인자의 영향이 서로 다를 것으로 예상된다.

본 연구에서는 기지조직이 서로 다른 2종류의 공시재에서 피로한도의 지배인자에 대한 고찰을 실시하였다. 구체적으로, 각 공시재에 인공결함을 가공하고 결함의 형상과 크기를 통일적으로 평가하는 파라미터인  $\sqrt{area}$ 를 이용하여 피로크랙의 발생원으로 선택되는 인공결함의 크기를 평가하였다. 또한, 최대결함길이를 추정하여 피로한도와 의 정량적 관계를 고찰하였다.

## 2. 실험재료 및 실험방법

공시재는 GCD45이며 화학성분은 C:3.75%, Si:3.0%, Mn:0.15%, P:0.03%, S:0.015%, Mg:0.04% 이다.

Table 1에 제시한 어니일링과 오스템퍼링 처리를 행하여 각각 A재 및 B재라 칭하였으며, 그 기계적 성질을 Table 2에 나타내었다. 또한, 피로거동에 영향을 미칠 것으로 예상

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	-	-	900	1	500	2

Table 2 Mechanical properties

	$\sigma_Y$	$\sigma_{TS}$	$\delta$	H <sub>v</sub>
Series A	301	423	23	212
Series B	740	932	10	472

$\sigma_Y$  : Yield strength(MPa)

$\sigma_{TS}$  : Tensile strength(MPa)

$\delta$  : Elongation(%)      H<sub>v</sub> : Vicker's hardness

Table 3 Characteristics of spheroidal graphite on surface

	D <sub>sg</sub> ( $\mu$ m)	H <sub>sg</sub> (%)	V <sub>sg</sub> (%)	N <sub>sg</sub> (1/mm <sup>2</sup> )
Series A	23	56	27	215
Series B	40	67	29	98

D<sub>sg</sub> : Average size of spheroidal graphite

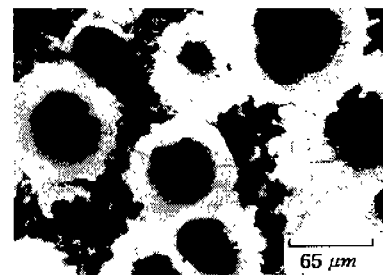
H<sub>sg</sub> : Nodularity of spheroidal graphite

V<sub>sg</sub> : Volume fraction of spheroidal graphite

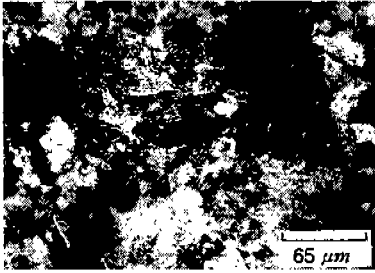
N<sub>sg</sub> : Nodule count of spheroidal graphite

되는 평균흑연입경, 구상화율 등의 흑연특성을 Table 3에 정리하였다.

Fig. 1에 양 시험편의 조직사진을 보이고 있다. A재는 페라이트와 펄라이트가 혼재하는 전형적인 볼스 아이(bull's eye)조직이며,



(a) Series A



(b) Series B

Fig. 1 Microstructures of specimen

B재는 소량의 잔류오스테나이트와 펄라이트를 포함하고 있지만 거의 배이나이트 단상 기지조직으로 볼 수 있다.

시험편은 최소 직경부를  $\phi 9$ , R20으로 기계가공한 후 에머리페이퍼(#100~#1200)와 알루미나과우더( $0.3 \mu m$ )로 경면으로 연마하였다. 시험편의 최소직경부에는 마이크로 드릴링장치를 사용하여 직경과 깊이가 동일한 인공결함을 가공하여 실험에 제공하였다. 사용한 시험기는 회전굽힘 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  $0.1 mm \sim 0.2 mm$ 의 인공결함을 가공한 시험편에서는 평활재에 비하여 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 평활

재와 비슷한 값을 보이고 있다. 즉, 오스템퍼링처리에 의하여 강화된 기지조직을 가지는 B재에서  $0.4 mm$  범위 내에서는 인공결함이 피로한도에 미치는 영향이 거의 없다는 것을 의미한다.

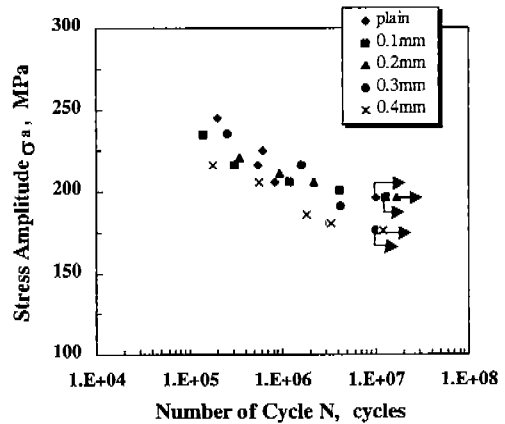


Fig. 2 S-N data of series A

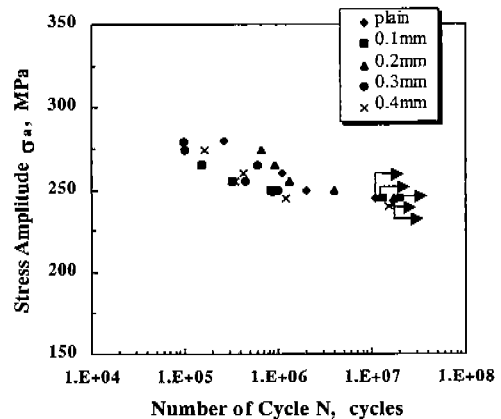


Fig. 3 S-N data of series B

Fig. 3의 결과는 피로크랙이 시험편에 도입된 인공결함에서가 아니라 시험편 내부에 존재하여 응력 집중원으로 작용하는 구상흑연이나 주조결함 등의 내재결함에서 발생하기 때문이라고 추측된다.

한편, Table 3을 참고하면 오스템퍼링처리한 B재의 평균흑연입경( $D_{50}$ )이 소둔재인 A재에 비해 거의 2배가 됨을 알 수 있다. 구상흑

연주철의 피로한도가 표면에 존재하는 구상 흑연의 크기에 지배된다는 보고<sup>(11)</sup>와 결함에서의 피로크랙 발생에 의존한다는 보고<sup>(14)</sup>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 인공결함에서의 크랙발생에 대한 임계결함크기  $\sqrt{area}_c$ 를 추정하였다.

### 3. 2 인공결함에서의 크랙발생에 대한 임계결함크기 $\sqrt{area}_c$ 의 추정

Table 4는 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 mm 간격으로 조정함으로써  $\sqrt{area}_{hole}$ 를 달리하는 인공결함을 가공하여 평활재 피로한도의 1.1배 응력으로 피로시험을 행한 결과이다.

$\sqrt{area}_{hole}$ 은 다음 식 (1)<sup>(15),(16)</sup>에 의하여 계산하였다.

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

Table 4의 A재에 주목하면,  $\sqrt{area}_{hole}$ 이 370  $\mu m$ 인 시험편에서는 모든 피로크랙이 인공결함에서 발생하였지만, 217  $\mu m$ 인 경우에는 대부분의 크랙이 내재결함에서 발생하였다. 그래서, 양  $\sqrt{area}_{hole}$  사이에 피로크랙의 발생이 내재결함에서 인공결함으로 천이하는 값의 존재를 예상할 수 있다. 따라서, 278  $\mu m$ 의  $\sqrt{area}_{hole}$  값을 가지는 시험편의 판단 기점을 조사하였더니, 절반 이상의 시험편에서 피로크랙이 인공결함에서 발생한 것이 확인되었다. 여기서,  $\sqrt{area}_{hole}$ 의 값이 370  $\mu m$ 와 278  $\mu m$ 인 경우를 함께 고찰하면, 인공결함에서의 크랙 발생율은 80%정도이지만,

Table 4 Estimation of  $\sqrt{area}_c$  in the specimen having different  $\sqrt{area}_{hole}$  ( $\sigma_a = 1.1\sigma_w$ )

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

278  $\mu m$ 와 217  $\mu m$ 인 경우에는 40%정도밖에 되지 않는다.

한편, B재의 경우에는 498  $\mu\text{m}$ 의  $\sqrt{\text{area}}_{\text{hole}}$  값이 그 경계가 되고 있다.

따라서, 인공결합에서의 크랙 발생율이 80% 이상일 때의  $\sqrt{\text{area}}$ 를 인공결합에서의 크랙발생에 대한 임계결합크기  $\sqrt{\text{area}}_c$ 라고 정의하면, A재는 278  $\mu\text{m}$ , B재는 498  $\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다. 그러므로  $\sqrt{\text{area}}_{\text{hole}}$ 이 A재는 278  $\mu\text{m}$  이상일 때, B재에서는 498  $\mu\text{m}$  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 피로한도의 저하가 발생한 것은, 0.3 mm의 인공결합( $d=h$ )의  $\sqrt{\text{area}}$ 가 278  $\mu\text{m}$ 으로  $\sqrt{\text{area}}_c$ 와 동일하기 때문에 피로크랙은 이 인공결합에서 발생했다고 할 수 있다. 한편 B재에서는, Fig. 3에서 도입된 최대인공결합인 0.4 mm의  $\sqrt{\text{area}}$ 가 370  $\mu\text{m}$ 으로  $\sqrt{\text{area}}_c$ 보다 작기 때문에, 피로크랙은 인공결합이 아닌 다른 내재결합에서 발생하여 파단에 이른 것으로 볼 수 있다. 이러한 사실을 확인하기 위하여  $10^7$ 회의 반복응력에 파단한 시험편의 피로크랙 발생부를 전자현미경(SEM)으로 관찰하였다. 사진상에서 크랙발생 기점을 조사하여 크랙발생 기점이 된 인공결합과 내재결합과의 비율을 Table 5에 정리하였다.

인공결합에서의 피로크랙 발생에 초점을 맞추어 보면, A재의 경우 인공결합의 직경이 0.1 mm~0.2 mm일 때는 크랙 발생율이 20% 정도이지만, 0.3 mm~0.4 mm일 때는 약 90%가 인공결합에서 크랙이 발생하였다. 또한 B재에서는, 모든 인공결합으로부터의 크랙발생율이 30% 이하이고, 나머지는 내재결합에서 크랙이 발생하여 최종 파단에 이르고 있다.

Table 5 Rate of hole and defect as initiating place of the fatigue crack

	Hole(%)		Defect(%)
	Series A	0.1 mm	20
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

따라서 본 절에서 추정된 인공결합에서의 크랙발생에 대한 임계결합크기  $\sqrt{\text{area}}_c$ 는, 피로크랙의 발생원으로 인공결합이 선택되느냐 않되느냐의 판단기준으로서 타당함을 알 수 있다.

### 3.3 ADI 평활재의 피로한도에 대한 평가

탄소강 평활재에 있어서 피로한도의 응력이  $10^7$ 회 이상 반복 부하된 시험편의 표면에는 100~500  $\mu\text{m}$  정도 크기의 미소크랙이 다수 발생해 있는 것이 관찰된다. 그런데, 이들은 모두 피로한도에서 더 이상 전파하지 않는 정류크랙(Non-propagating crack : NPC)들로서, 평활재의 피로한도는 바로 이 정류크랙의 전파한계응력이다<sup>(17),(18)</sup>. 따라서, 평활재의 피로한도는 시험편 표면에 발생해 있는 정류크랙 가운데에서도 가장 큰 길이를 가지는 정류크랙에 의해 지배당하며, 이 정류크랙을 한계정류크랙길이라고 한다. 즉, 피로한도( $\sigma_w$ )와 한계정류크랙길이( $L_c$ )는 다음 식(2)의 관계를 가진다<sup>(19)</sup>.

$$\sigma_w^m \cdot L_c = C_1(m, C_1 \text{는 상수}) \quad (2)$$

그런데 탄소강과는 달리 구상흑연주철과

같은 다결합재에서는, 구상흑연과 주조결합 등의 영향으로 정확한 한계정류크랙길이를 구하는 것은 매우 어렵다. Murakami<sup>(12)</sup>는 구상흑연주철 결합재의 피로한도 예측식으로서, 기지의 비커스경도 ( $H_V$ )와 극치통계법으로 추정된 최대결합길이 ( $\sqrt{area}_{max}$ )를 채용하여 다음 식(3)을 제안하였다<sup>(12),(13)</sup>.

$$\sigma_w = 1.41 \cdot (H_V + 120) / (\sqrt{area}_{max})^{1/6} \quad (3)$$

이 식은 피로한도 ( $\sigma_w$ )와 최대결합길이 ( $\sqrt{area}_{max}$ )의 사이에 상관관계가 있음을 보여주고 있으며, 결합재에서는  $\pm 10\%$ 이내의 예측오차를 가지고 있다.

평활재를 대상으로 하는 본 연구에서는 식(3)에 의한 피로한도 평가보다는 김<sup>(19)</sup>이 제안한  $L_c$  대신에  $\sqrt{area}_{max}$ 를 직접 대입함에 의한 평가를 시도하여 보았다.

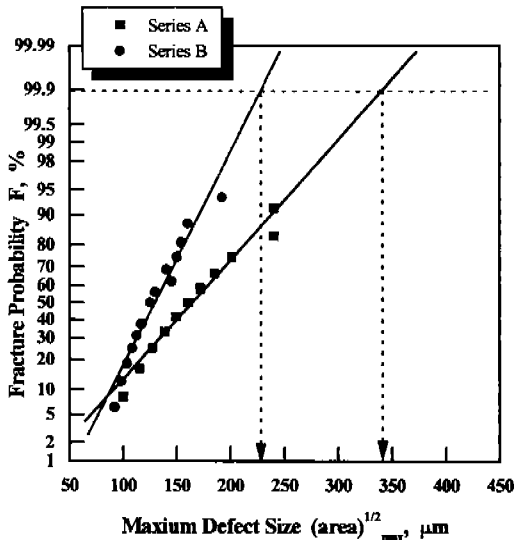


Fig. 4 Estimation of maximum defect size exist in critical surface layer in specimen series

먼저, 파단된 시험편의 크랙기점을 SEM으로 관찰하여 기점이 된 결함크기를 이용하여 시험편의 위험표면층 내에 존재하는 최대결

합길이를 극치통계법으로 추정하여 Fig. 4에 나타내었다. 그 결과 A재에서 최대결합길이는  $345 \mu m$ , B재에서는  $225 \mu m$ 로 나타났다. 최대결합길이는 Fig. 4의 회귀분석 직선과 재귀기간  $T (=617, F=99.85\%)$ 의 교점으로 추정된다. 재귀기간  $T$ 는  $S/S_0 (S \gg S_0)$ 이며, 본 실험에서 사용한 평활재의 검사표면적  $S$ 는  $55.422 mm^2$ 이고, 1회의 측정면적  $S_0$ 는  $0.083 mm^2$ 이다.

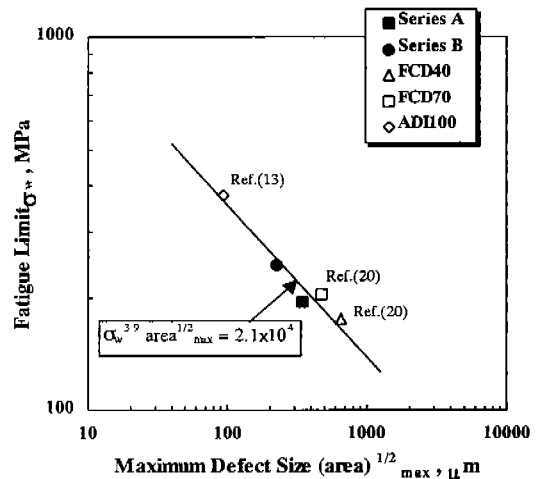


Fig. 5 Relationship between the fatigue limit and maximum defect size

Fig. 5는 위에서 추정된 최대결합길이를 각각의 피로한도에 대응시켜 나타낸 것이다. 또한, 오스템퍼링처리재인 ADI100<sup>(13)</sup>과 어닐링재인 FCD40, FCD70<sup>(20)</sup>의 결과도 같이 표기하였다. 그 결과, 둘 사이의 관계는 양대수 눈금상에서 직선으로 회귀할 수 있어서, 김이 제안했던 식(2)의 형태로 정리됨을 알 수 있다. 여기서,  $n$ 은 3.9이고  $C_2$ 는  $2.1 \times 10^4$ 의 값을 가진다. 따라서, 피로한도 ( $\sigma_w$ )와 최대결합길이 ( $\sqrt{area}_{max}$ )의 사이에는 다음과 같은 정량적인 관계가 있음을 알 수 있다.

$$\sigma_w^n \cdot \sqrt{area}_{max} = C_2 (n, C_2 \text{는 상수}) \quad (4)$$

이러한 사실은 구상흑연주철에서 최대결합길이가 탄소강에서의 한계정류크랙길이에 상당하다는 것을 의미하며, 피로한도의 예측에 중요한 파라미터라는 것을 보여주고 있다.

한편, Fig. 6은  $10^7$ 회의 반복응력에 전던 시험편의 표면을 관찰하여, 흑연에서 발생한 크랙이 인접하는 흑연을 연결한 채 정류하고 있는 정류크랙을 나타낸 것이다. Fig. 7은 시험편의 최소직경부(검사표면적:  $12.78\text{mm}^2$ )를 관찰하여, 흑연을 연결한 채로 정류하고 있는 크랙수 ( $N_{sg}$ )의 전체 정류크랙수 ( $N_{total}$ )에 대한 분율( $\delta$ )과 피로한도( $\sigma_w$ )와의 관계를 나타낸 것이다.

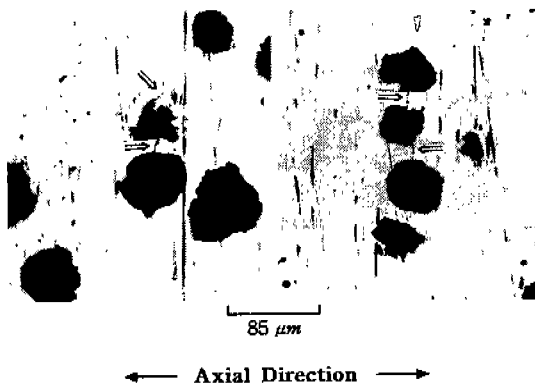


Fig. 6 Non propagating cracks connecting the adjacent graphite (Series A,  $\sigma_a = 196\text{MPa}$ ,  $N = 1.0 \times 10^7$ )

Fig. 7에 의하면, 인접하는 흑연을 연결한 채 정류하고 있는 크랙의 분율이 낮을수록 높은 피로한도를 보이고 있다. 구상흑연에서 일단 발생한 크랙이 전파하여 인접한 흑연과 합체하는 것과 강화된 기지조직을 만나서 더 이상 전파하지 못하고 정류하는 두가지의 정류크랙이 있다는 것을 고려할 수 있다. 전자의 경우는 긴 정류크랙으로 발전할 가능성이, 후자의 경우는 짧은 정류크랙으로 될 가

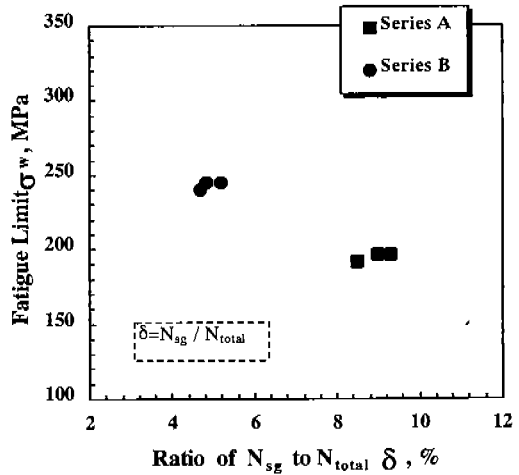


Fig. 7 Difference of fatigue limit depend on  $\delta$  in specimen series ( $N_{sg}$  : Number of NPC connecting the adjacent graphite,  $N_{total}$  : Number of total NPC)

능성이 높게 된다. 따라서, 정류크랙이 결합길이에 상당하다는 것을 고려하면 양재의 피로한도 차이는, 피로한도의 대소가 최대결합길이의 크기에 좌우되므로 흑연을 연결한 채 정류한 크랙분율로써 설명할 수 있다.

#### 4. 결론

오스템퍼링처리한 구상흑연주철에서 피로한도의 인공결함에 대한 민감성을 검토하기 위하여, 서로 다른 기지조직을 가지는 2종류의 공시체에 인공결함을 도입하여 피로시험을 행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

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

(2) 인공 결함에서의 크랙발생에 대한 임계결함 크기  $\sqrt{area}_c$ 을 추정된 결과, 소둔재는  $278\ \mu\text{m}$ , 오스템퍼링처리재는  $498\ \mu\text{m}$ 으로 서로 달랐다. 따라서, 오스템퍼링처리재에서  $\sqrt{area}_{hole}$ 이  $498\ \mu\text{m}$ 이하일 때에는 인공결

함보다 내재결함에서의 크랙발생이 우선하게 되며, 이 범위까지의 인공결함은 피로한도에 별다른 영향을 주지 못한다.

(3) 구상흑연주철 평활재에서 최대결함길이는 피로한도를 추정하기 위한 중요한 파라미터이고, 피로한도 ( $\sigma_w$ )와 최대결함길이 ( $\sqrt{area}_{max}$ ) 사이에는  $\sigma_w^n \cdot \sqrt{area}_{max} = C_2(n)$ 과  $C_2$ 는 상수인 관계가 성립한다.

(4) 평활재에서의 피로한도 차이는 인접한 흑연을 연결한 정류크랙수 ( $N_{sg}$ )의 전체 정류크랙수 ( $N_{total}$ )에 대한 비율( $\delta = N_{sg}/N_{total}$ )로써 설명할 수 있다.

## 참고문헌

1. Steven R. Lampman, "Fatigue and Fracture Properties of Cast Irons", *ASM Handbook*, Vol.19, pp.665~679, 1996.
2. 김재원, "기계재료학",喜重堂, pp.260~282, 1998.
3. 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.
4. Lyle R. Jenkins, "Ductile Irons", *ASM Handbook*, Vol.1, pp.33~55, 1990.
5. 박홍식, 진동규, "오스템퍼링 한 저합금 구상흑연주철의 부식마멸특성 및 그 기구에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제17권 제6호, pp.1404~1411, 1992.
6. 최석림, 윤기혁, 문원진, 강창룡, 김한근, "ADI의 조직특성에 미치는 2단 오스테나이트화 처리조건 의 영향", 한국열처리공학회지, 제11권 제1호, pp.46~53, 1998.
7. 김석원, 우기도, "ADI의 기계적성질에 미치는 합금원소 및 열처리의 영향", 한국열처리 공학회지, 제11권 제2호, pp.121~130, 1998.

8. 土居滋, 光永公一, 石本悟, "オ-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, 1994.
9. 土居滋, 原田昭治, 高原正雄, 廣安武, 池田秀男, "オ-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, 1996.
10. 片平和俊, 鈴木秀人, "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, 1997.
11. 遠藤正浩, "球狀黑鉛鑄鐵の疲労強度に及ぼす黑鉛の形状,寸法,分布の影響", 日本材料學會論文集, 38-433A, pp.1139~1144, 1989.
12. 村上敬宣, 微小缺陷と介在物の影響, 養賢堂, pp.233~258, 1989.
13. 加藤容三, 高藤新三郎, "オ-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, 1997.
14. 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.
15. 村上敬宣, 遠藤正浩, "疲労強度に及ぼす微小缺陷の影響の評價法", 日本機械學會論文集, 49-438A, pp.127~135, 1983.
16. 遠藤正浩, " $\sqrt{area}$  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, 1992.
17. Hempel, M., "Metallographic Observation on the Fatigue Metals", *Proc. Int. Conf. on Fatigue of Metals*, IME, pp.543~548, 1965.



18. 西谷, 西田, "疲れ強度の存在と微視的停留き裂の關係", 日本機械學會論文集, 39-312A, pp.1385~1393, 1973.
19. 김민건, "炭素鋼 微小疲勞 크랙전파의 下限界條件", 대한기계학회논문집, 제12권 제3호, pp.505~512, 1988.
20. 衫山好弘, 淺見克敏, 松岡忍, "球狀黑鉛鑄鐵川いた缺陷材の疲勞限度定量評價法とそ疲勞限度への適用", 日本機械學會第69期通常總會講演會講演論文集, Vol. A, pp.476~478, 1992.