

## 오스템퍼링처리한 구상흑연주철에서 인공결함에 대한 피로한도 민감도에 관한 연구

金敏健·金振鶴  
강원대학교 기계공학과

### A Study on the Artificial Defect Sensitivity of Fatigue Limit in Austempered Ductile Iron

M.G.Kim, 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 artificial defect sensitivity of fatigue limit in annealed and austempered ductile irons. Artificial defect(hole, diameter  $\leq 0.4\text{mm}$ ) machined on specimen surface did not bring about an obvious reduction of fatigue limit in austempered ductile iron as compared with annealed. As a result of investigation on  $\sqrt{\text{area}}$  c which is the critical artificial defect size,  $\sqrt{\text{area}}$  c of austempered ductile iron is larger than that of annealed. This means that the crack initiation at artificial defect in austempered ductile iron is more difficult in comparison with annealed. In case that the  $\sqrt{\text{area}}$  c of artificial defect and graphite nodule are same, the rate of crack initiation for graphite nodule is higher than that of artificial defect.

**Key Words :** Fatigue, Fatigue limit, Austempered Ductile iron, Internal defect, Artificial defect, defect sensitivity

#### 1. 서론

최근, 오스템퍼링한 구상흑연주철(Austempered Ductile Iron : ADI)은 종래의 구상흑연주철에 비해 고강도·고인성이기 때문에 각종 강도부재료의 사용이 확대되고 있다<sup>1)</sup>. 따라서, 이 재료를 강도부재로서 신뢰성있게 사용하기 위한 다양한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 특히, 기지조직 내의 흑연이나 주조결함이 피로강도에 미치는 영향에 대한 연구가 중심을 이루고 있다<sup>2)</sup>.

Endo<sup>3)</sup>는 페라이트 및 볼스 아이(Bull's eye) 조직의 구상흑연주철에서 흑연과 주조결함과 같은 내재결함에 대해 평가하고, 그 형상과 크기의 영향

을 통일할 수 있는 파라미터로써, Murakami<sup>4)</sup>가 제안한  $\sqrt{\text{area}}$ 가 유효하고, 극치통계법으로 결정한  $\sqrt{\text{area}}_{\text{max}}$ 에 의해 피로강도가 결정된다고 보고하였다. 또한, Kato<sup>5)</sup>는 베이나이트 기지조직을 가지는 구상흑연주철에서 피로강도는 결함에 의하여 크게 저하한다고 보고하였다. 따라서, 기지조직이 다른 공시재에 인공결함이 존재할 때 인공결함에 대한 피로한도의 민감도가 서로 다를 것으로 예상된다.

본 연구에서는 기지조직이 서로 다른 2종류의 공시재에 인공결함을 가공하여 각각의 피로한도에 대한 인공결함의 민감도를 고찰하였다. 구체적으로, 결함의 형상과 크기를 통일적으로 평가하는 파라미터로서 이미 그 실효성이 입증된  $\sqrt{\text{area}}$  파라미

터블 이용하여 피로균열의 발생원으로 선택되는 결함을 평가함으로써, 인공결합에 대한 피로한도의 민감도에 대하여 고찰하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

공시재는 GCD45이며 화학성분을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition(wt. %).

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

Table 2에 제시한 어닐링과 오스템퍼링처리를 행하여 각각 A재 및 B재라 칭하였으며, 그 기계적 성질을 Table 3에 나타내었다.

Table 2. Conditions of heat treatment.

	Annealing		Austenizing		Isothermal treating	
	T(°C)	H(hr)	A(°C)	H(hr)	T(°C)	H(hr)
Series A	600	1	-	-	-	-
Series B	-	-	900	1	500	2

Fig. 1에 양 시험편의 조직사진을 보이고 있다. A재는 페라이트와 펄라이트가 혼재하는 전형적인 불스아이(Bull's eye)조직이며, B재는 베이나이트 단상 기지조직이다.

시험편은 최소 직경부를  $\phi 9$ , R20으로 기계가공한 후 에머리 페이퍼와 알루미나 파우더로 경면으로 연마한 후, 시험편의 최소직경부에 마이크로 드릴링장치를 사용하여 4종류의 인공결합( $d=h=0.1, 0.2, 0.3, 0.4mm$ )을 가공하여 실험에 제공하였다. Fig. 2에 시험편 형상을 나타내었다. 실험은 실온 대기 중에서 실시하였고, 사용한 시험기는 회전굽힘형식( $R=-1.0, RPM:3500$ )이다.

Table 3. Mechanical properties.

	$\sigma_Y$	$\sigma_{TS}$	$\delta$	Hv
Series A	301	423	23	212
Series A	740	932	10	472

$\sigma_Y$  : Yield strength(MPa)  
 $\sigma_{TS}$  : Tensile strength(MPa)  
 $\delta$  : Elongation(%)  
 Hv : Vicker's hardness

Fig. 1 Microstructures of specimen.

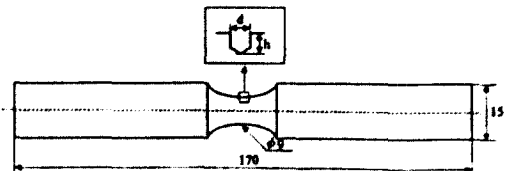


Fig. 2 Geometry of specimen.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 피로한도에 미치는 인공결합의 영향

평활재 및 4종류의 인공결합재에 대해 피로시험을 수행하여 A재의 결과를 Fig. 3, B재의 결과를 Fig. 4에 각각 나타내었다. A재에서는 0.1mm~0.2mm의 인공결합을 가공한 시험편에서는 평활재에 비하여 피로한도의 저하가 발생하지 않지만, 0.3mm 이상의 인공결합을 가공한 시험편에서는 피로한도가 저하하여 약 10% 정도의 인공결합에 대한 민감도를 보이고 있다. 따라서, 인공결합의 직경이 0.3mm 이상일 때부터 피로한도가 인공결합의 영향을 받기 시작한다는 것을 알 수 있다.

B재에서는 도입된 모든 인공결합재에서 유의할 만한 피로한도의 저하는 보이지 않고 평활재의 피로한도와 비슷한 값을 보이고 있다. 이러한 사실은 오스텝퍼링처리에 의하여 강화된 기지조직을 가지는 B재에서는 0.4mm범위내의 인공결합은 피로한도에 영향을 거의 미치지 않는 것을 의미하며, 강화된 기지조직에서 결함민감도의 증가로 인해 피로한도가 저하한다는 Kato<sup>11)</sup>의 주장과 일치하지 않는 대단히 흥미로운 결과이다.

Fig. 4의 결과는 피로균열이 시험편에 도입된 인공결합에서가 아니라 시험편 내부에 존재하여 응

력 집중원으로 작용하는 구상흑연이나 주조결합 등의 내재결합에서 발생하기 때문이라고 추측된다.

구상흑연주철의 피로한도가 표면에 존재하는 구상흑연의 크기에 지배된다는 보고<sup>9)</sup>를 참고하면, B재에서는 피로균열의 발생장소가 되는 흑연이 조대화되어 A재에 비하여 인공결합에 대해 낮은 민감도를 보이는 것으로 생각된다. 그래서, 피로균열 발생거동에 영향을 미칠 것으로 예상되는 평균흑연입경을 조사하여 Table 4에 나타내었다. Table 4를 참고하면 오스텝퍼링처리한 B재의 평균흑연입경(D<sub>90</sub>)이 어닐링재인 A재에 비해 거의 2배로 증가함을 알 수 있다.

여기서, B재에 0.5mm와 0.6mm의 인공결합을 가공하여 피로시험을 실시하고, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 참고로, Fig. 4의 결과도 병기하였다.

Fig. 5를 참고하면, 0.5mm의 인공결합의 경우, 피로한도의 민감도는 약 6% 정도 약간 증가하지만

Table 4. Average size of globular graphite on surface.

	D <sub>90</sub> ( $\mu$ m)
Series A	23
Series B	40

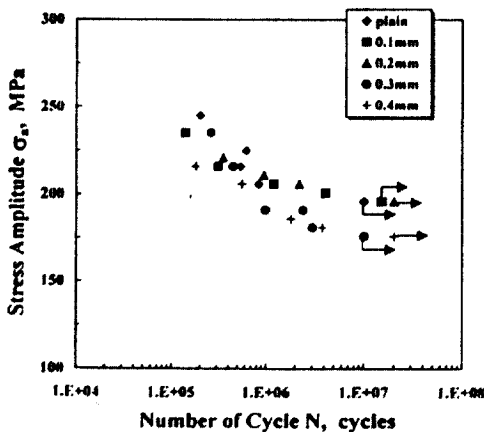


Fig. 3 S-N data of series A.

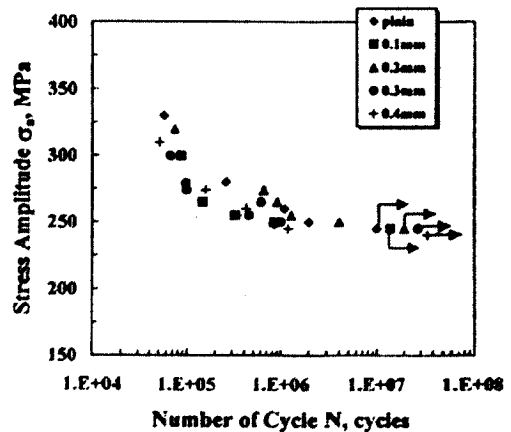


Fig. 4 S-N data of series B.

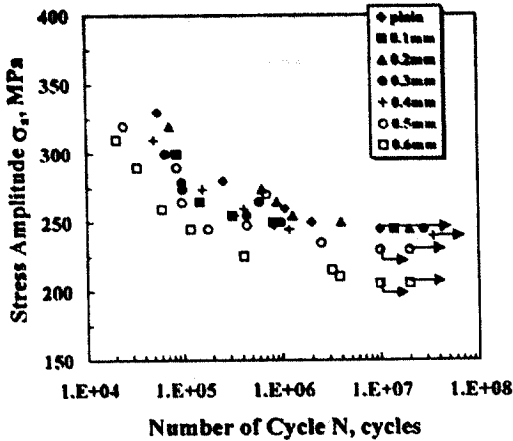


Fig. 5 S-N data of 0.5mm, 0.6mm artificial defect in series B.

0.6mm인 경우에는 그 민감도가 약 20% 정도이다. 따라서, B제의 경우에는 직경이 0.5mm부터 피로한도의 인공결함에 대한 민감도가 나타나기 시작하며, 0.6mm의 인공결함에서는 그 민감도가 현저하게 증가한다는 것을 의미한다.

구상흑연주철의 피로한도는 결함에서의 피로균열 발생에 의존한다는 보고<sup>12)</sup>에 따라, A제와 B제가 서로 다른 기지조직을 가지고 있으므로 인공결함에 대한 피로한도 민감도가 나타나는 인공결함의 크기가 서로 다를 것으로 예상된다. 다음 절에서는 양재에서 피로한도의 인공결함에 대한 민감도가 나타나기 시작하는 임계인공결함크기를 추정하였다.

3. 2 인공결함 민감도가 나타나는 임계인공결함크기  $\sqrt{area_c}$ 의 추정

Table 5와 Table 6은 Fig. 3와 Fig. 5를 참고하여, A제에서 직경(d)0.3mm와 0.4mm, B제에서는 0.5mm와 0.6mm의 마이크로드릴을 사용해, 깊이(h)를 0.1mm간격으로 조정함으로써  $\sqrt{area_{hole}}$ 를 달리하는 인공결함을 가공하여, 1.1  $\sigma_w$ (피로한도의 1.1배 응력)으로 피로 시험을 행한 결과이다.  $\sqrt{area_{hole}}$ 은 다음 식 (1)<sup>13,14)</sup>에 의하여 계산하였다.

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

A제인 Table 5에 주목하면,  $\sqrt{area_{hole}}$ 이 370 $\mu$ m인

시험편에서는 모든 피로균열이 인공결함에서 발생하여 인공결함 민감도가 100%이지만, 217 $\mu$ m인 경우에는 대부분의 피로균열이 내재결함에서 발생하여 약 20%정도의 낮은 인공결함 민감도를 보였다. 따라서, 양  $\sqrt{area_{hole}}$  사이에 피로균열의 발생이 내재결함에서 인공결함으로 천이하는 값의 존재를 예상할 수 있으며, 278 $\mu$ m의  $\sqrt{area_{hole}}$  값을 가지는 시험편의 파단기점을 조사한 결과, 절반 이상의 시험편에서 피로균열이 인공결함에서 발생한 것이 확인되었다. 여기서,  $\sqrt{area_{hole}}$ 의 값이 370 $\mu$ m와 278 $\mu$ m인 경우를 함께 고찰하면, 인공결함 민감도가 약 80% 정도이지만, 278 $\mu$ m와 217 $\mu$ m인 경우에는 40%정도밖에 되지 않는다. 한편, B제인 Table 6에서는 498 $\mu$ m인 경우에는 40%정도밖에 되지 않는다. 한편, B제인 Table 6에서는 498 $\mu$ m의  $\sqrt{area_{hole}}$  값이 그 경계가 되고 있다.

따라서, 인공결함 민감도가 80% 이상일 때의  $area_{hole}$ 를 피로한도의 인공결함에 대한 민감도가

Table 5. Estimation of  $\sqrt{area_c}$  on the specimen having different  $\sqrt{area_{hole}}$  in series A.

d	h (mm)	$\sqrt{area_{hole}}$ (mm)	Origin ( $\mu$ m)	$N_f$ (cycles)
0.30	0.20	217	hole	$3.5 \times 10^6$
			defect	$1.5 \times 10^6$
			defect	$2.2 \times 10^6$
			defect	$4.5 \times 10^6$
			defect	$1.4 \times 10^6$
	0.30	278	hole	$2.6 \times 10^6$
			defect	$1.0 \times 10^6$
			defect	$1.6 \times 10^6$
			hole	$1.8 \times 10^6$
			hole	$2.8 \times 10^6$
0.40	0.40	370	hole	$5.5 \times 10^6$
			hole	$6.2 \times 10^6$
			hole	$5.9 \times 10^6$
			hole	$4.8 \times 10^6$
			hole	$5.1 \times 10^6$

나타나기 시작하는 임계인공결합크기  $\sqrt{area_{hole}}$  라고 정의하면, A재는 278 $\mu$ m, B재는 498 $\mu$ m임을 알 수 있다. 그러므로  $\sqrt{area_{hole}}$  이 A재는 278 $\mu$ m의 이상일 때, B재에서는 498 $\mu$ m 이상일 때 내재결합보다 인공결합에서의 크랙발생이 우선하게 되며, 이에 의한 피로한도의 인공결합 민감도가 나타나게 되는 것이다. 이 사실에 근거하여 Fig. 2 Fig. 3의 결과는 다음과 같이 설명될 수 있다.

즉, A재에서 인공결합의 직경이 0.3mm부터 피로한도의 인공결합 민감도가 나타난 것은, 0.3mm의 인공결합( $d=h$ )의  $\sqrt{area_{hole}}$  가 278 $\mu$ m으로  $\sqrt{area_c}$  와 동일하기 때문에 피로균열은 이 인공결합에서 발생했다고 할 수 있다. 한편, B재에서는, Fig. 3에서 도입된 최대인공결합인 직경 0.4mm의  $\sqrt{area_{hole}}$  가 370 $\mu$ m으로  $\sqrt{area_c}$  보다 작기 때문에 피로한도의 인공결합에 대한 민감도가 나타나지 않은 것으로 볼 수 있다.

이러한 사실을 확인하기 위하여, 파단된 시험편을 대상으로 크랙발생기점을 SEM으로 관찰하여

Table 6. Estimation of  $\sqrt{area_c}$  on the specimen having different  $\sqrt{area_{hole}}$  in series B.

d (mm)	h (mm)	$\sqrt{area_{hole}}$ ( $\mu$ m)	Origin ( $\mu$ m)	N <sub>f</sub> (cycles)
0.50	0.50	462	hole	1.3 × 10 <sup>6</sup>
			defect	2.3 × 10 <sup>6</sup>
			defect	1.8 × 10 <sup>6</sup>
			defect	3.5 × 10 <sup>6</sup>
			defect	2.9 × 10 <sup>6</sup>
0.60	0.50	498	hole	1.1 × 10 <sup>6</sup>
			hole	9.1 × 10 <sup>5</sup>
			defect	2.1 × 10 <sup>6</sup>
			defect	1.8 × 10 <sup>6</sup>
	0.60	555	hole	7.6 × 10 <sup>5</sup>
			hole	8.7 × 10 <sup>5</sup>
			hole	8.0 × 10 <sup>5</sup>
			hole	1.0 × 10 <sup>6</sup>

기점이 된 인공결합과 내재결합과의 비율을 Table 7에 정리하였다. Table 7에서 인공결합에서의 피로균열 발생에 초점을 맞추어 보면, A재의 경우 인공결합의 직경이 0.1mm~0.2mm일 때는 크랙발생율이 20%정도이지만, 0.3mm~0.4mm일 때는 약 90%가 인공결합에서 크랙이 발생하였다. 한편, B재에서는 모든 인공결합으로부터의 크랙발생율이 30%이하이고 나머지는 내재결합에서 크랙이 발생하여 최종 파단에 이르고 있는 것이 확인되었다.

따라서, 본 절에서 추정한 피로한도의 인공결합에 대한 민감도가 나타나기 시작하는 임계인공결합크기  $\sqrt{area_c}$  는 인공결합 민감도를 추정하는 판단기준으로서 타당함을 알 수 있다.

한편,  $\sqrt{area_c}$  가 A재에 비하여 B재가 2배 정도 큼으로 해서 B재에서 인공결합에 대한 민감도가 오히려 저하한 것처럼 보이는 것은, 동일한 area값을 가지는 인공결합과 내재결합이 크랙의 발생원으로 서로 경합할 경우, 내재결합이 우선적으로 선택된 결과로 볼 수 있다. Fig. 6은 B재에서 0.3mm의 인공결합이 도입된 시험편 중 피로균열이 인공결합을 무시하고 흑연을 기점으로 발생한 예를 나타낸 것이다. 크랙의 발생기점을 화살표로 표시하였다.

Fig. 6으로부터 피로균열이 흑연집합체의 가장자리 요철부에서 다수 발생하여 전파하였음을 알 수 있다. 이 흑연집합체와 인공결합의  $\sqrt{area}$  를 비교하기 위하여 흑연집합체에 메조(Meso)파괴역학을 적

Table 7. Rate of hole and defect being origin of fatigue crack.

	Hole(%)		Defect(%)
	0.1mm	0.2mm	
Series A	0.1mm	20	80
	0.2mm	20	80
	0.3mm	83	17
	0.4mm	100	0
Series B	0.1mm	0	100
	0.2mm	0	100
	0.3mm	16	84
	0.4mm	36	67

용 15.16)하여  $\sqrt{\text{area}_{\text{graphite}}}$ 를 구한 결과, 그 값이 295 $\mu\text{m}$ 으로 0.3mm인공결함의  $\sqrt{\text{area}_{\text{art}}}$  (=278 $\mu\text{m}$ )보다 약간 크지만 양 값의 차는 그다지 크지 않다. 따라서, 비슷한  $\sqrt{\text{area}}$ 의 인공결함과 흑연집합체가 경합할 경우 크랙발생장소로서 흑연집합체가 선택됨으로써 인공결함에 대해 둔감한 것처럼 보이는 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

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

- 1) 오스템퍼링처리한 구상흑연주철에서는 어닐링재에 비하여 인공결함에 의한 현저한 피로한도의 저하가 초래되지 않았다.
- 2) 피로한도의 인공결함에 대한 민감도가 나타나기 시작하는 임계인공결함크기를 추정한 결과, 어닐링재와 오스템퍼링재에서 서로 다른 값이 얻어졌다.
- 3) 오스템퍼링재에서  $\sqrt{\text{area}_{\text{art}}}$ 이 498 $\mu\text{m}$ 이하일 때에는 인공결함보다 내재결함에서의 크랙발생이 우선

하게 되며, 이 범위까지는 인공결함에 대한 피로한도 민감도는 나타나지 않는다.

- 4) 오스템퍼링재에서 동일한  $\sqrt{\text{area}}$ 를 가지는 인공결함과 내재결함이 서로 경합할 경우, 인공결함이 무시되고 흑연에서의 크랙발생이 우선하게 된다.

#### 참고문헌

- 1) Steven R. Lampman : ASM Handbook, 19(1996), p. 665.
- 2) 최담천 : 大韓鑄造學會誌, 10-4(1990), p. 294.
- 3) 박홍식, 진동규 : 대한기계학회논문집, 17-6(1992), p. 1404.
- 4) 최석림, 윤기혁, 문원진, 강창룡, 김한군 : 한국열처리공학회지, 11-1(1998), p. 46.
- 5) 김석원, 우기도 : 한국열처리공학회지, 11-2(1998), p.121.
- 6) 土居滋, 永公一, 石本悟 : 日本機械學會論文集, 60-575A(1994), p. 1493.
- 7) 土居滋, 原田昭治, 高原正雄 : 日本機械學會論文集, 62-595A(1996), p. 589.
- 8) 片平和俊, 鈴木秀人 : 日本機械學會論文集, 63-612A(1997), p. 1607.
- 9) 遠藤正浩 : 日本材料學會論文集, 38-433A(1989), p. 1139.
- 10) 村上敬宣 : 微小缺陷と介在物の影響, 養賢堂(1993), p. 233.
- 11) 加藤容三, 高藤新三郎 : 日本機械學會論文集, 63-610A(1997), p. 1153.
- 12) Min-Gun Kim, Jin-Hak Kim : Proc. of IMEKO TC3/APMF '98(1998), p. 527.
- 13) 村上敬宣, 遠藤正浩 : 日本機械學會論文集, 49-438A(1983), p. 127.
- 14) 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A(1992), p. 479.
- 15) 김민건, 김진학 : 대한기계학회 1999년도 춘계 학술대회논문집(1999), p. 725.
- 16) 鈴木秀人, 國尾武 : 日本金屬學會會報(1988), p. 608.

Fig. 6 Comparison of  $\sqrt{\text{area}}$  of graphite and artificial defect in Series B. ( $\sigma_s = 250\text{MPa}$ ,  $N_r = 6.1 \times 10^5$ )