

## 구상흑연주철의 피로수명을 지배하는 내재결함부 크기의 정량적 평가

김진학\* · 김민건\*\*  
(2000년 1월 8일 접수)

### Quantitative Evaluation for the Internal Defect Size Governing the Fatigue Life in Ductile Irons

Jinhak Kim and Mingun Kim

**Key Words:** Fatigue(피로), Fatigue Life(피로수명), Internal Defect(내재결함), Mesocrack(메조크랙), Austempering(오스템퍼링), Ductile Irons(구상흑연주철)

#### Abstract

In this study, the quantitative evaluation was performed by examination for fatigue crack origin in two prepared ductile irons specimens which have different microstructures using rotary bending fatigue tester. Series A has mixed microstructure, ferrite plus pearlite, and series B has bainitic microstructure. Obtained main results are as follows. The scatterings of fatigue strength were observed on  $\sigma_a - N$  diagram of both specimen series, and it is observed that scatterings of series A were more serious. It is reasonable to evaluate the size of mesocrack range by means of  $\sqrt{A}$ , where  $A$  means the area of mesocrack range including globular graphite nodule. As a result of reconsideration for the fatigue data by introduction of  $K_a - N$  diagram, the scatterings of fatigue life were, remarkably, reduced. Therefore, it is more reasonable to evaluate the effects of mesocrack range on fatigue life by parameter  $K_a$  rather than  $\sigma_a$ .

#### 1. 서론

구상흑연주철(Ductile Irons)은 강도와 인성을 고루 갖춘 고기능 구조재료로서 자동차 부품을 비롯하여 그 용도가 확대되고 있다.<sup>(1~5)</sup> 그러나, 구상흑연주철의 피로특성에 관한 연구는 아직 미진한 것이 현실이다. 특히, 피로강도의 분산(分散, Scattering)은 이러한 다양한 구상흑연주철의 용도 확대를 제한하는 주된 요인이 되고 있다. 이러한 관점에서 구상흑연주철의 피로강도에 미치는 흑연을 포함하는 내재결함부의 크기에 대한 정량적

인 평가는 중요한 연구과제로 대두되고 있으며 이에 관한 연구는 매우 부족하다.

Suzuki<sup>(6~8)</sup>는 메조구조(Mesostructure) 관점에서 기지조직이 피로크랙의 발생 및 전파에 미치는 영향에 대해 검토한 결과, 베이나이트 기지의 구상흑연주철의 피로강도가 펄라이트 기지재에 비해 높은 원인은 흑연에 대한 노치민감도가 비교적 낮기 때문이라고 하였다. 또한 주조기계부품의 피로설계 관점에서, 알루미늄합금 주물에서 피로수명의 분산 원인이 되는 결함의 크기효과에 대해서 정량적인 고찰을 실시하여, 개재물과 공동 등을 미소결함으로 간주하고 미소결함의 크기와 피로수명과의 관계를 정량화하여 미시와 거시의 파괴역학인 소위 메조파괴역학(Meso fracture mechanics : MFM)<sup>(9)</sup>을 도입하였다.

본 연구에서는 이상의 연구들을 참조하여 메조파괴역학의 관점에서 베이나이트 조직과 불스아

\* 회원, 북포대학교, 기계공학부  
E-mail : crgreen@orgio.net  
TEL : (061)450-6407

\*\* 회원, 강원대학교, 기계·메카트로닉스공학부

이(Bull's eye)형 조직을 가지는 구상흑연주철을 사용하여, 피로크랙의 주기점이 되어 피로강도를 지배하는 구상흑연을 포함하는 내재결합부의 크기에 대한 정량적인 평가를 시도하였다. 구체적으로 각 시험편의 파면을 주사형전자현미경(SEM)으로 관찰하여 피로크랙의 기점에 존재하는 흑연과 미소피로크랙부를 하나의 결합부로 간주하여 피로강도와의 관계를 고찰하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

실험재료의 화학성분을 Table 1에, 열처리조건은 Table 2에 각각 나타내었다. 시험편은 조직이 서로 다른 2종류를 사용하였다. A재는 응력제거 어닐링을 실시한 어닐링재이고, B재는 오스템퍼링처리를 행한 오스템퍼링처리재이다. A재 및 B재의 SEM 조직사진을 Fig. 1에 나타내었다. 기계적 성질과 피로거동에 영향을 미칠 것으로 예상되는 흑연특성(KS D 4302)을 Table 3과 Table 4에 각각 나타내었다.

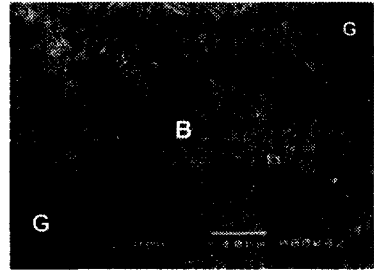
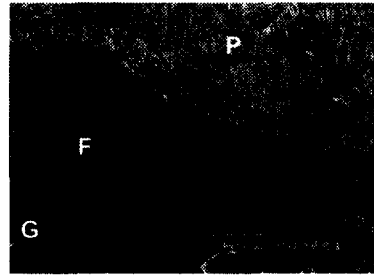
시험편은 Fig. 2에 나타낸 형상으로 기계가공한 후 에머리페이퍼(#80~#1200)와 알루미늄 파우더(0.3 μm)를 사용하여 경면(Mirror surface)으로 연마하여 실험에 제공하였다. 사용한 시험기는 회전굽힘 피로시험기(R=-1, 3500 rpm)이다. 또한, 파단한 시험편의 파면을 SEM으로 관찰하여 피로크랙의 기점이 되는 흑연부를 포함하는 메조크랙부의 크기를 측정하였다.

Table 1 Chemical composition(wt.%, balanced Fe)

	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		Austenitizing		Isothermal treatment	
	T(°C)	H(h)	T(°C)	H(h)	T(°C)	H(h)
Series A	600	1	-	-	-	-
Series B	-	-	900	1	500	2



(b) Series B

G : Graphite nodule F : Ferrite  
P : Pearlite B : Bainite

Fig. 1 Microstructures of specimen series

Table 3 Mechanical properties

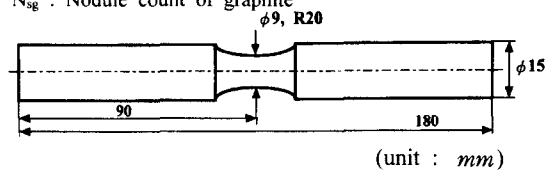
	$\sigma_Y$ (MPa)	$\sigma_{TS}$ (MPa)	$\delta$ (%)	H <sub>v</sub>
Series A	316	441	23	221
Series B	740	932	10	472

$\sigma_Y$  : Yield strength  $\sigma_{TS}$  : Tensile strength  
 $\delta$  : Elongation H<sub>v</sub> : Vickers hardness

Table 4 Characteristics of graphite

	D <sub>sg</sub> (μm)	H <sub>sg</sub> (%)	A <sub>sg</sub> (%)	N <sub>sg</sub> (1/mm <sup>2</sup> )
Series A	23	70	27	215
Series B	40	78	29	98

D<sub>sg</sub> : Average size of graphite  
H<sub>sg</sub> : Nodularity of graphite  
A<sub>sg</sub> : Area fraction of graphite  
N<sub>sg</sub> : Nodule count of graphite



(unit : mm)  
Fig. 2 Geometry of the specimens

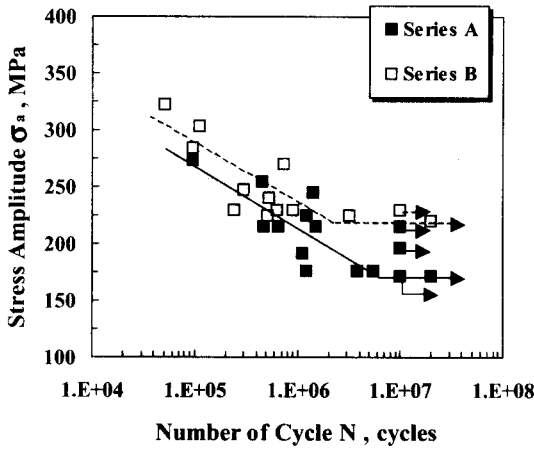


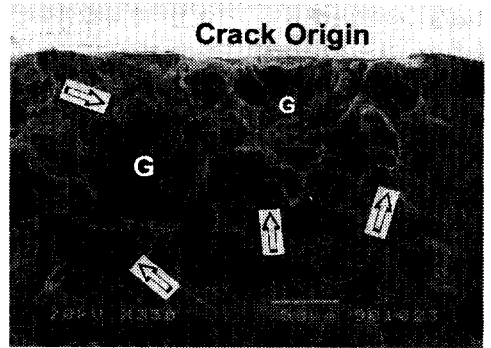
Fig. 3 S-N diagram of specimen series

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 피로강도의 분산(分散)

Fig. 3은 회전굽힘 피로시험 결과인 S-N 곡선이며, A재 및 B재의 피로특성에는 다음과 같은 특징이 확인되었다. 즉, A재와 B재 모두 피로강도의 분산(Scattering)폭이 크게 나타나고 있으며 그 정도는 A재가 B재에 비해 심하다. 또한, 양재의 피로한도에서도 약간의 분산 현상이 관찰된다. 이러한 A재와 B재의 차이는 서로 다른 결합 민감도를 가지는 매트릭스 조직의 차이에서 기인하는 것으로 이해된다.

한편, 구상흑연주철의 피로수명이 내재결합에서의 피로크랙 발생수명에 좌우된다는 보고<sup>(10)</sup>를 참고하면, Fig. 3에서 관찰되는 피로강도의 분산은 표면이나 표면직하에 존재하여 피로크랙의 발생기점이 되는 구상흑연을 포함한 내재결합부의 크기가 다르기 때문에 발생된다고 추정할 수 있다. 따라서, 내재결합부의 크기를 파악하는 것이 수명예측에 매우 중요하다고 생각되며 다음 절에서는 파면해석을 통한 피로크랙의 기점에 대한 고찰을 실시하였다.



G : Graphite Arrow : fatigue crack origin

Fig. 4 SEM photograph of graphite aggregate observed at crack origin in series A

( $\sigma_a = 215\text{MPa}$ ,  $N_f = 6.4 \times 10^5$ )

#### 3.2 크랙기점에 대한 파면해석과 결함부에 대한 정량적 평가

본 절에서는, Fig. 3에서 관찰된 피로특성을 밝히기 위하여 크랙발생기점에 대한 파면해석을 실시하였다. 그 결과 A재 및 B재의 파단된 모든 시험편의 피로크랙 기점에는 흑연 및 흑연집합체가 관찰되었다. Fig. 4는 A재 시험편의 파면해석용 SEM사진의 한 예(Example)이다. 크랙의 기점에 매우 큰 흑연집합체가 존재하는 것이 관찰되었다. Fig. 4를 참고하면 흑연주위에서 다수의 피로크랙이 발생하여 진파하는 것을 알 수 있다. 그래서, 피로크랙의 발생관점에서 피로수명과 결함부와의 관계를 명확히 하기 위해 피로크랙 기점에 존재하는 흑연을 포함하는 내재결합부의 크기에 대한 평가를 실시하였다.

철강재에 있어서 비금속 개재물(Non metallic inclusions) 등을 포함한 각종 결함의 크기에 대한 평가방법에는 Murakami<sup>(11,12)</sup>의  $\sqrt{area}$  파라미터가 가장 유효하며 이미 그 타당성은 이미 입증되어 있다. 따라서, 본 연구에서는  $\sqrt{area}$  파라미터와 메조구조 관점에서의 피로크랙의 발생기구에 기초해서, 크랙발생기점에서 확인된 흑연과 메조크랙을 포함해 내재결합부로 간주하여 그 크기에 대한 정량적 평가를 실시하였다.

Fig. 5의 모식도에서 보이는 것 같이, 흑연은 모재의 응고과정에서 고상(固狀)이 성장함에 따라 고상에 의해 침식되는 것 같이 형성된다.

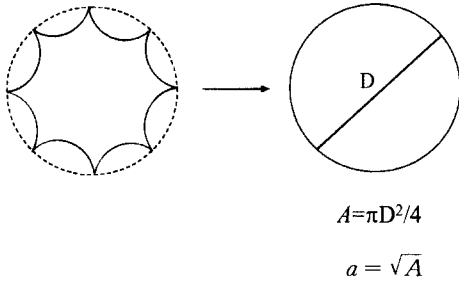


Fig. 5 Schematic diagram for the initiation of mesocrack at graphite nodule by meso fracture mechanics

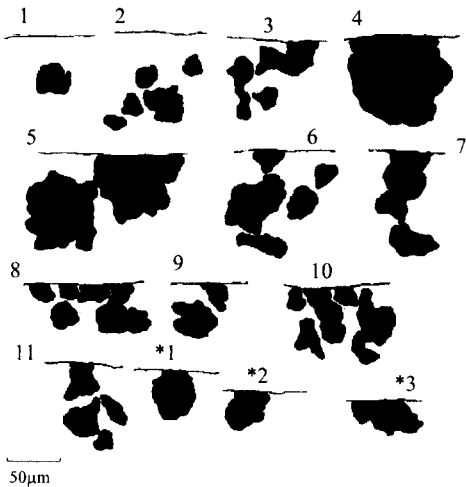


Fig. 6 Trace of graphite nodule observed on crack origin in series A

즉, 재료내에서 흑연의 형상은 완전한 구형이 아니고 다수의 요철부를 가지는 불규칙한 구형이 된다. 그 결과, 피로크랙은 흑연의 요철부에서 발생하여 점선과 같이 성장된 후 거시크랙으로 성장하게

된다. 따라서, 본 연구에서는 흑연의 요철부에서 발생한 미소 피로크랙이 점선과 같이 약간 성장한 상태를 내재결함부인 메조크랙부(Mesocrack range)로 평가하였다.

여기서, 결함길이( $a$ )는 결함을 최대주응력 방향으로 투영한 면적에 상당하는 것으로부터,<sup>(11,12)</sup> Fig. 5에서와 같이 피로크랙의 기점에 확인된 흑연과 메조크랙을 포함하는 메조크랙부의 면적

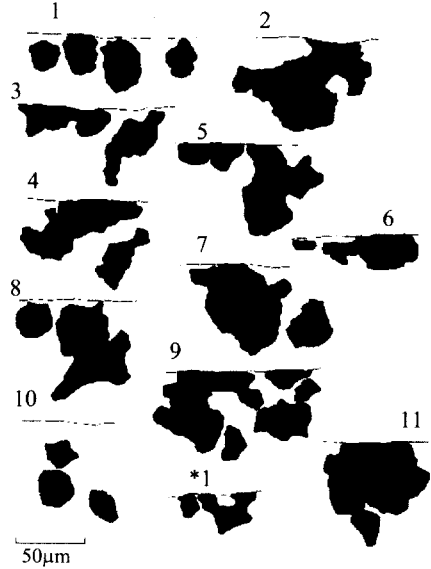


Fig. 7 Trace of graphite nodule observed on crack origin in series B

( $A$ )을 측정하여, 그  $\sqrt{A}$ 를 결함길이( $a$ )로 평가하였다.

다음, 파면해석에 의해 크랙발생부에 관찰되는 모든 흑연 및 흑연집합체를 SEM 사진위에서 트레이스(Trace)하고 부하응력이 높은 순서대로 번호를 붙였다. A재는 Fig. 6에 B재는 Fig. 7에 그 결과를 나타내었다. 또한, 양 그림에서 시험편 번호에 대응시킨 부하응력과 피로수명을 Table 5와 Table 6에 각각 정리하였다. Table 5와 Table 6에 의하면, 크랙기점에서 관찰되는 메조크랙부의 평균크기는 B재( $174 \mu m$ )가 A재( $164 \mu m$ )보다  $10 \mu m$  정도 더 큰 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 B재가 결함에 대해 더 둔감한 피로거동을 보인다는 보고<sup>(6)</sup>와 일치하는 것이다.

Fig. 6, Fig. 7 및 Table 5, Table 6에서 시험편 번호에 \*를 붙인 것은  $10^7$ 회의 반복응력에 견디지 못한 시험편에 응력을 높여서( $\sigma_a' = 1.2\sigma_a$ ) 강제 파단시킨후 크랙기점을 관찰한 것이다.

먼저, 부하응력과 메조크랙부의 크기에 대한 비교를 실시하였다. A재의 경우 Fig. 6와 Table 5를 참고하면,  $\sigma_a = 216 \text{ MPa}$ 의 응력레벨에서  $10^7$ 회 전에 파단한 5번( $262 \mu m$ ), 6번( $221 \mu m$ )

**Table 5** Evaluation of the mesocrack range including graphite nodule in series A

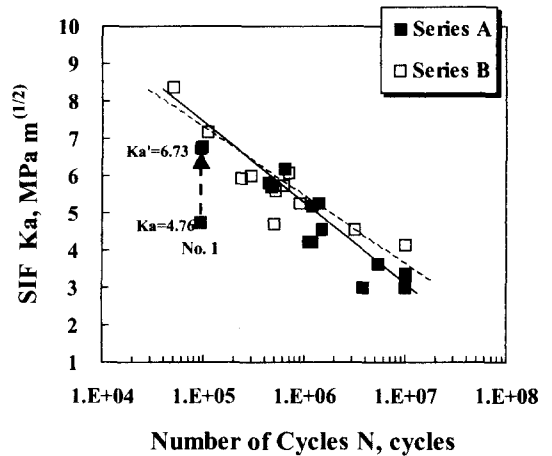
No.	$\sigma_a$ (MPa)	$a$ ( $\mu\text{m}$ )	$K_a$ ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )	$N_f$ (cycles)
1	274	96.0	4.76	$9.4 \times 10^4$
2	255	166.1	5.82	$4.5 \times 10^5$
3	245	147.7	5.28	$1.4 \times 10^6$
4	225	169.8	5.20	$1.2 \times 10^6$
5	216	262.1	6.20	$6.4 \times 10^5$
6	216	221.5	5.70	$4.7 \times 10^5$
7	191	155.1	4.21	$1.1 \times 10^6$
8	186	192.0	4.57	$1.5 \times 10^6$
9	176	92.3	3.00	$3.8 \times 10^6$
10	176	184.6	4.24	$1.2 \times 10^6$
11	176	136.6	3.64	$5.4 \times 10^6$
*1	216	77.5	3.37	$10^7 \rightarrow$
*2	196	73.8	2.98	$10^7 \rightarrow$
*3	172	114.4	3.26	$10^7 \rightarrow$

$\sigma_a$  : Stress amplitude                       $a$  : Mesocrack size  
 $K_a$  : Stress intensity factor             $N_f$  : Fatigue life

**Table 6** Evaluation of the mesocrack range including graphite nodule in series B

No.	$\sigma_a$ (MPa)	$a$ ( $\mu\text{m}$ )	$K_a$ ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )	$N_f$ (cycles)
1	323	213.9	8.37	$5.0 \times 10^4$
2	304	177.8	7.18	$1.1 \times 10^5$
3	284	180.6	6.76	$9.6 \times 10^4$
4	270	161.1	6.07	$7.2 \times 10^5$
5	248	186.1	6.00	$3.0 \times 10^5$
6	248	161.1	5.58	$5.2 \times 10^5$
7	230	197.2	5.72	$6.2 \times 10^5$
8	230	166.7	5.26	$9.0 \times 10^5$
9	230	211.1	5.92	$2.4 \times 10^5$
10	225	130.6	4.56	$3.2 \times 10^6$
11	225	138.9	4.70	$5.1 \times 10^5$
*1	230	102.8	4.13	$10^7 \rightarrow$

$\sigma_a$  : Stress amplitude                       $a$  : Mesocrack size  
 $K_a$  : Stress intensity factor             $N_f$  : Fatigue life



**Fig. 8**  $K_a - N$  diagram of specimen series

시험편과  $10^7$  회에서 건던 \*1번( $77 \mu\text{m}$ ) 시험편에서 관찰되는 메조크랙부의 크기를 비교하면, \*1번 시험편의 그것이 현저하게 작은 것을 알 수 있다. 또한, 5번과 6번 시험편 사이에서도 수명이 짧은 5번 시험편에서 약  $40 \mu\text{m}$  정도 더 큰 메조크랙부가 관찰되었다. 다음, B재에서도 Fig. 6와 Table 6를 참고하면,  $\sigma_a = 230 \text{ MPa}$ 의 응력 레벨에서의 수명이 거의 비슷한 7번( $197 \mu\text{m}$ ), 8번( $167 \mu\text{m}$ ), 9번( $211 \mu\text{m}$ ) 시험편 사이에는 메조크랙부의 크기가 서로 비슷하지만,  $10^7$  회 of 반복 응력에 건던 \*1번( $103 \mu\text{m}$ ) 시험편에서는 비교적 작은 메조크랙부가 관찰되었다. 따라서, A재 및 B재 모두 피로크랙의 발생기점에 존재하는 흑연에서 미소 피로크랙이 발생하여 메조크랙부를 형성한 후, 전파하여 파단에 이르게 되며 미소 피로크랙의 기점이 되는 흑연이 크고 불규칙한 요철부가 많아 메조크랙부의 크기가 커지는 경우에는 수명이 상당히 짧아짐을 알 수 있다.

다음, 메조크랙부의 크기와 피로수명의 관계에 대한 검토하였다. Fig. 8은 위에서 언급한 메조파괴역학(Meso fracture mechanics)의 개념에 기초해서  $K_a = \sigma_a \sqrt{\pi a} = \sigma_a \sqrt{\pi \sqrt{A}}$ 를 도입하여, A재 및 B재의 S-N곡선을  $K_a - N$ 곡선으로 재정리한 것이다. 그 결과, Fig. 3에 비해 피로강도의 분산폭이 현저히 감소하여 각 데이터들이 하나의 직선으로 정리되고, 직선의 기울기도 Fig. 3의 그것과 거의 동일한 것을 알 수 있다.

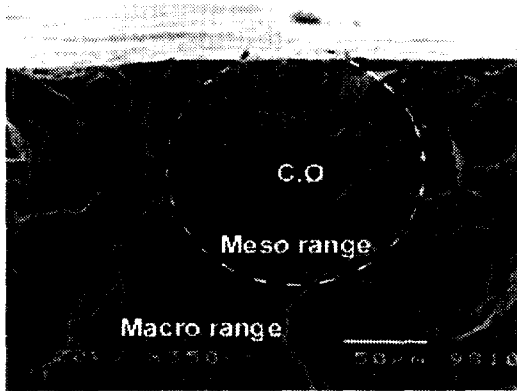


Fig. 9 Fish-eye type crack origin of specimen No. 1 of Series A

다만, A재의 경우, Fig. 8에서 보이는 것과 같이 1번 시험편이(그림에서 No.1로 표시) 직선에서 상당히 벗어나 있었다. 이 원인을 조사하기 위하여 피로크랙의 기점의 형상에 주목해서 검토하였다.

Fig. 9는 A재의 1번 시험편의 크랙기점에 대한 SEM 사진이다. Fig. 9에 보이는 것과 같이 크랙 기점에 흑연이 존재하는 피시아이(Fish-eye)가 관찰되었다. 흑연으로부터 미소 피로크랙이 발생하여 약 70~90  $\mu\text{m}$  정도 평탄한 형상을 형성하며 성장한 후 전형적인 거시크랙면을 나타내는 불규칙한 형상을 보이며 전환한 것을 알 수 있다. Table 5를 참고하면, 수명( $9.5 \times 10^4$ )이 짧은 것에 비해 결함길이인  $a (= 96 \mu\text{m})$ 가 매우 작게 평가되어 있는 것을 알 수 있다. 그 결과  $K_a$  값도 4.8로 작게 되어 직선에서 벗어나게 된 것이다. 여기서, 이 평탄한 형상까지 메조크랙으로 간주하여 그 크기를 재평가한 결과,  $K_a'$  값이 6.7로 상승하게 되어 직선상으로 회귀함을 알 수 있었다.

이러한 사실로부터, 메조크랙부의 크기가 피로수명에 미치는 영향에 대해서는 최대 주응력 방향으로 투영한 면적을 취해 결함으로 평가해야 하지만, 피시아이형의 크랙기점에 대해서는 평탄한 형상까지 메조크랙으로 간주하여 평가하는 것이 타당함을 알 수 있다. 따라서,  $K_a - N$ 곡선과 메조크랙부의 크기와와의 관계에 대해서 검토를 행

한 결과 A재와 B재 모두  $K_a$ 와  $N$ 사이에는 양호한 관계가 존재하는 것이 확인되었다.

#### 4. 결론

구상흑연주철의 피로수명을 지배하는 메조크랙부의 크기에 주목해 어닐링재인 A재와 오스템퍼링재인 B재를 사용하여 피로강도와 내재결함 크기의 정량적 관계에 대하여 검토한 결과, 아래의 결론을 얻었다.

(1) A재와 B재 모두  $S - N$ 곡선 상에서 피로강도와 피로한도의 분산이 나타나고 그 정도는 A재가 더 심하다.

(2) 피로크랙의 발생원으로 작용하여 피로수명을 지배하는 내재결함부의 크기( $a$ )는, 파단면에서 확인되는 크랙발생기점의 메조크랙부 면적( $A$ )을 취하여, 그  $\sqrt{A}$ 에 의해 평가할 수 있다.

(3)  $\sigma_a - N$ 곡선에 대해 메조크랙부의 크기를 고려하는  $K_a$ 와  $N$ 을 도입하여  $K_a - N$ 곡선으로 재정리한 결과 양자사이에 매우 양호한 상관성이 확인되었다. 따라서, A재 및 B재의 피로수명에 미치는 메조크랙부의 영향에 대해서는  $K_a$ 를 취해 평가하는 것이 보다 효율적인 방법이 될 수 있다.

#### 참고문헌

- (1) James, M. N. and Wenfong, L., 1999, "Fatigue Crack Growth in Austempered and Grey Cast Irons-Stress Ratio Effects in Air and Mine Water," *Materials Science and Engineering*, A265, pp. 129~139.
- (2) 박홍식, 진동규, 1993, "오스템퍼링 한 저합금 구상흑연주철의 부식마멸특성 및 그 기구에 관한 연구," *대한기계학회논문집 A권*, 제17권 제6호, pp. 1404~1411.
- (3) 최석림, 윤기혁, 문원진, 강창룡, 김한군, 1998, "ADI의 조직특성에 미치는 2단 오스테나이트화 처리조건의 영향," *한국열처리공학회지*, 제11권 제1호, pp. 46~53.
- (4) Lampman Steven R., 1996, "Fatigue and Fracture Properties of Cast Irons," ASM

Handbook, Vol. 19, pp. 665~679.

- (5) 강명순, 박홍식, 1988, "오스템퍼링한 저합금 환상흑연주철의 기계적 성질에 관한 연구," 대한기계학회논문집 A권, 제12권, 제6호, pp. 1296~1302.
- (6)鈴木秀人, 植木忠司, 福本昌宏, 1991, "FCD80材의高温疲労限度に及ぼすプラズマ溶射アルミナ被膜の影響," 日本機械學會論文集, 57-537A, pp. 1062~1066.
- (7)鈴木秀人, 大藪優, 植木忠司, 國尾武, 1985, "鑄造用アルミニウム合金AC4A材의片辰り引張疲労強度に及ぼす鑄物寸法, 熱處理の影響," 日本機械學會論文集, 51-468A, pp. 1977~1982.
- (8)中谷幸一郎, 鈴木秀人, 片平和俊, 齋藤一樹, 佐藤秀之, 1991, "表面改質Mg合金鑄物の輕量化設計法の構築と安全性保證," 日本機械學會論文集, 63-616A, pp. 2673~2678.
- (9)鈴木秀人, 國尾武, 1988, "ミクロとマクロの破壊力學," 日本機金屬會會報, 27-8, pp. 608~614.
- (10)김민건, 김진학, 1999, "오스템퍼링처리한 구상흑연주철의 피로한도에 미치는 기지조직인자와 역학인자의 영향," 대한기계학회논문집 A권, 제23권 제2호, pp. 287~293.
- (11)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價法," 日本機械學會論文集, 49-438A, pp. 127~135.
- (12)村上敬宣, 1989, "微小缺陷と介在物の影響," 養賢堂, pp. 233~258.