

구상흑연주철재의 화상해석에 의한 흑연의 극치통계 평가

윤명진[#]

Evaluation of Statistical distribution of extreme values of Graphite in Ductile Cast Iron by Image Analyzer

Myung-Jin Yoon[#]

(Received 25 October 2010; received in revised form 25 November 2010; accepted 2 December 2010)

ABSTRACT

Although the problems of defects and nonmetallic inclusion in metal fatigue are very complicated, it is particularly important to view these problems from the perspective that defects and inclusions are virtually equivalent to small cracks. This concept will help one to understand various fatigue phenomena caused by Ductile Cast Iron. For different ferrite-pearlite matrix structure, containing more than 90% spheroidal ratio of graphite, GCD 45-3, GCD 50, GCD 60 series and 70%, 80%, 90% spheroidal ratio of graphite, GCD 40, GCD 45-1, GCD 45-2 series, this paper has carried out image analyzer, estimated maximum and mean size of graphite, investigated correlation. It was concluded as follows. (1) A good quality of Ductile cast iron using in this experiment, the graphite was separated well. The effect of the interaction by graphite was verified by microscopic observation and by fracture mechanics investigation in surface, interior of the specimen. (2) \sqrt{area}_{max} of graphite can be used to predict fatigue limit of Ductile Cast Iron. The Statistical distribution of extreme values of \sqrt{area} may be used as a guide line for the control of inclusion size in the steel making processes.

Key Words : Statistical distribution of extreme values(극치통계), Ductile cast iron(구상흑연주철), Ferrite-pearlite matrix structure(페라이트-펄라이트 기지조직), Spheroidal ratio of graphite(구상화율), Maximum and mean size of graphite(흑연의 최대와 평균크기)

1. 서 론

구조재료의 피로강도의 분포가 큰 것은 개재물의 모양, 크기 및 분포위치가 다양하기 때문이다. 가장 큰 개재물이 응력구배가 가장 큰 곳에 위치

하면 피로강도는 최소치가 된다. 구조설계에서는 이러한 정보를 파악하여 피로강도의 하한치에 대한 안전율을 작게 하여 경량화 된 구조물의 설계가 바람직하다. 이러한 이유에서 개재물의 최대크기, 위치의 추정은 제강과 설계의 양면에서 유익하다고 볼 수 있다. 구상흑연주철의 조직 내에는 많은 흑연이 미소결함으로 존재해 있고, 그 피로강도는 같은 기지경도를 가지는 결함이 없는 철강 재

[#] 교신저자 : 경일대학교 기계자동차학부
E-mail : mjyoon@kiu.ac.kr

료의 피로강도 보다도 낮다. 흑연 이외에도 주조결함과 같은 미소결함이 자주 유해하게 작용하여 피로강도를 저하시킨다.

피로강도에 미치는 미소결함(Micro defect)이나 비금속 개재물(Non-metallic inclusion)의 영향은 오래전부터 지적되어온 문제이지만 문제의 영향인자가 너무 다양하기 때문에 한정된 조건하에서 그 영향을 평가하는 것은 어려운 실정이다.^[1-4]

최근 철강 재료의 피로강도 평가를 위하여 Murakami와 Endo^[5-10]는 작은 표면결함과 다양한 형상을 가진 크랙의 3차원 응력해석을 하여 크랙의 관찰을 기초로 하는 2차원과 3차원 결함을 위한 새로운 기하학적인 변수 \sqrt{area} 를 제안했다. 그들은 실험결과에서 아래의 실험식을 유도했다.

$$\sigma_w^n = C, \quad n \approx 6 \quad (1)$$

여기서, σ_w 는 회전 굽힘 또는 비틀림, 인장-압축 피로한도이고, \sqrt{area} 는 결함의 기하학적 변수이고, 최대인장응력에 수직한 면에 크랙이나 결함을 투영하는 것에 의해 얻어지는 면적의 제곱근으로서 정의된다. 그리고, n, C 는 상수이다.

따라서 본 연구는 다양한 기지조직과 구상화을 그리고 구상흑연의 크기, 분포 등의 변수를 가진 구상흑연주철재의 피로한도에 중요한 변수로 작용하는 것은 흑연이라고 할 수 있다. 화상해석 장치를 이용하여 극치통계에 의한 흑연의 결함투영면적의 예측 방법을 제시하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 사용한 실험재료는 구상흑연주철재인 GCD 40, 45, 50, 60을 사용하였으며, 이 재료의 화학성분은 Table 1과 같다. 이 재료를 KS규격에 따라 분류하였고, 각 시험편의 명칭을 편의상 A-F Series로 칭한다.

시험편은 샌드위치 법으로 제작하였는데 이 방법은 자동차부품을 제작하는 생산 공장 등 비교적 대량생산에 널리 사용되고 있는 방법 중의 하나이다.

Table 1 Chemical composition Wt. (%)

Materials	KS Standards	C	Si	Mn	P	S	Mg
A Series	GCD 40	3.53	2.94	0.22	0.020	0.015	0.033
B Series	GCD 45-1	3.54	2.73	0.23	0.021	0.012	0.036
C Series	GCD 45-2	2.94	2.73	0.22	0.020	0.013	0.036
D Series	GCD 45-3	3.37	2.74	0.03	0.019	0.019	0.042
E Series	GCD 50	3.70	2.75	0.39	0.018	0.017	0.042
F Series	GCD 60	3.72	2.75	0.34	0.016	0.018	0.041

Table 1과 같은 6가지 시험편과 동일한 성분으로 구성된 용탕을 샌드위치법의 Y형 블록에 주입하여 주조하였다. 이때 용탕은 KS규격에 의해 1,500kW, 50Hz 중주파 열기성 큐포라에서 승온에 맞추어서 1,450℃에서 1차 체크, 1,480℃에서 2차 체크를 실시한 후 1,540℃까지 용탕온도로 맞춘 후 5분간 유지한 후 출탕과 동시에 구상화처리 하였다. 상기와 같은 용탕의 제조과정에 의하여 각 시험편의 구상화율은 70%, 80%, 90%의 3가지 종류가 되도록 하였다. A재는 구상화율이 70%이고, B재는 80%, C~F재는 90%이다.

2.2 화상해석 장치에 의한 결함투영면적의 평가 방법

결함투영면적의 크기를 결정하기 위하여 시험편에 주응력방향으로 수직인면을 절단하고, 검사표면을 샌드페이퍼로 #2000까지 연마한 후, 버핑하여 표면을 경면으로 만든 후에 검사기준 면적 $S_0(\text{mm}^2)$ 를 결정한다. S_0 는 현미경사진이나 비디오카메라로 1시야를 찍는데, 1시야는 가로, 세로 1mm의 크기로 한다. 검사는 S_0 중에서 최대의 면적을 가진 결함을 선택하여 평균결함면적의 평방근 \sqrt{area} 를 측정한다. 이러한 측정을 측정부위가 중복되지 않게 n 번 찍어서 \sqrt{area} 를 결정하게 되는데, \sqrt{area} 는 주응력 방향에 투영한 면적의 평방근으로서, 시험편 단면 또는 압연방향에 수직인 면에서 결함의 모양에 따른 면적을 마이크로스케일로 측정하여 계산한다.

검사기준면적 S_0 와 결함의 크기는 화상해석 장치(BMI-PLUS, ESCAN4000)에서 촬영한 단면부 사진과 동일한 면적과 배율을 이용하여 측정하고 계산하였다.

흑연의 투영면적을 각 재료에 대하여 400개의 흑연의 크기를 화상해석 장치에서 측정하여 흑연의 최대투영면적의 평방근을 구하여 피로한도를 예측하면 실제 피로한도보다 매우 낮은 값이 되어 피로한도의 예측이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 한 화상 당 20개의 흑연크기의 평균값을 결정하고 이것을 20회 반복하여 평균구상흑연의 평방근을 구하는 것을 시도하였다.

그리고 각각의 $j(j=1\sim 20)$ 에 대하여 누적분포함수 F_j (cumulative distribution function) 또는 누적빈도(cumulative frequency)분포와 기준화변수(reduced variable) y_j 를 아래의 식 (2)와 (3)을 사용하여 계산한다.

$$F_j = \frac{j}{(n+1)} \times 100 \quad (2)$$

$$y_j = -\ln\left[-\ln\left\{\frac{j}{(n+1)}\right\}\right] \quad (3)$$

또, 극치확률 용지의 황좌표 축에 \sqrt{area} 를 잡고, 데이터를 플롯한다. 종축은 F와 y값 어느 것으로 플롯 하더라도 같은 결과이다.

\sqrt{area} 에 대한 평균결함분포 직선을 다음 식에 의해 계산한다.

$$\sqrt{area}_{mean} = a \cdot y + b \quad (4)$$

$$y = -\ln[-\ln(T-1)/T] \quad (5)$$

$$T = (S+S_0)/S_0 \quad (6)$$

여기에서 y 는 기준화변수, T 는 재귀기간(return period), S_0 는 검사기준면적, S 는 예측하는 위험에 직면한 표면적이다. $T=(S+S_0)/S_0=1/(1-F)$ 로서, 시험편수가 100개이면 $T=100$ 개이고, S 가 S_0 에 비해 극히 적은 경우는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$y = \ln T, \quad T = S/S_0 \quad (7)$$

$S = 1\text{mm}^2, 100\text{mm}^2$ 을 (4)~(7)식에 대입하여 T 와 \sqrt{area} 를 계산하고, S 가 다른 경우 각각의 \sqrt{area} 는 재질이 다른 경우, 검사기준면적 S_0 의 차이가

있더라도 개재물을 기준으로 한 재질의 우열을 비교할 수 있다.

얻어진 극치분포는 2중 지수분포에 따른 것을 확인하게 되는데, 극치확률 용지 상에서는 2중 지수분포는 직선성으로 분포하는 성질을 이용하여, 분포의 직선성에서 \sqrt{area} 의 극치분포가 2중 지수분포 여부를 판단할 수가 있다.

금속 중에 포함된 개재물의 분포는 지수분포에 가까운 것이 예상되지만, 명확하지는 않다. 그러나 그 극치분포가 2중 지수분포에 따른다면 극치통계를 사용하여 그 최대치를 추정할 수가 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화상해석에 의한 결함투영면적의 평가

각 시험편의 흑연의 크기를 화상해석 장치(BMI-PLUS, ESCAN4000)에서 측정하여 흑연의 투영면적의 평방근을 구하기 위하여 한 화상 당 20개의 흑연크기의 평균값과 최대값을 결정하고 이것을 20회 반복하여 흑연의 투영면적의 평방근을 구하는 방법으로 결함투영면적을 평가하고자 한다.

다른 결함의 치수(\sqrt{area})가 조직 내의 흑연의 치수보다 작으면, 피로한도는 흑연에 의해서 결정되는 것이 예상된다. 따라서 Fig. 1 ~ Fig. 6은 각 시험편의 구상흑연의 분포상태와 그 크기를 화상해석 장치에서 촬영한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 약 20개의 흑연의 크기를 측정하여 평균값과 최대값으로 계산하고 이 값으로 흑연의 \sqrt{area} 의 값을 결정하였다. 자연결함을 가진 시험편의 피로한도가 평활체의 피로한도와 같게 되는 것은 흑연의 \sqrt{area} 의 값 이하의 크기를 가진 결함으로 생각된다.^[11,12]

시험편 한 개 당의 고 응력을 받는 표면적은 시험편의 치수가 다소 다르더라도 응력집중계수가 거의 같고 직경이 같으므로 N개의 시험편에 대한 \sqrt{area} 의 기대치가 예측된다. 각 시험편에 대해서 계산한 평균값과 최대값은 Table 2와 Table 3과 같다.

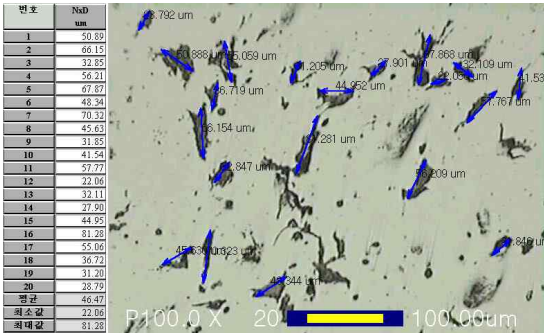


Fig. 1 Micro structure of A Series(GCD 40)

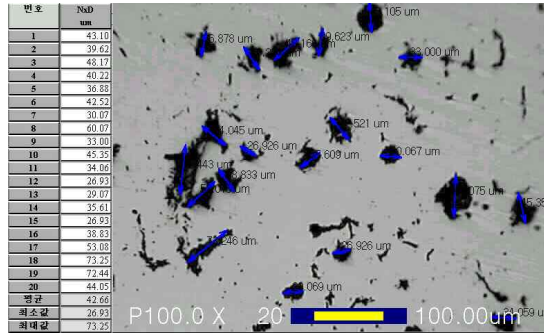


Fig. 4 Micro structure of D Series(GCD 45-3)

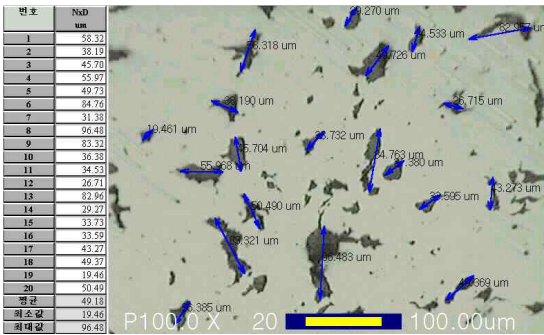


Fig. 2 Micro structure of B Series(GCD 45-1)

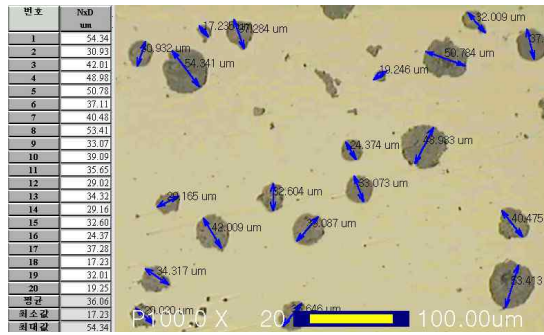


Fig. 5 Micro structure of E Series(GCD 50)

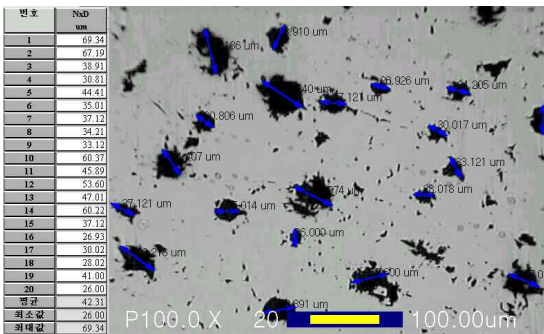


Fig. 3 Micro structure of C Series(GCD 45-2)

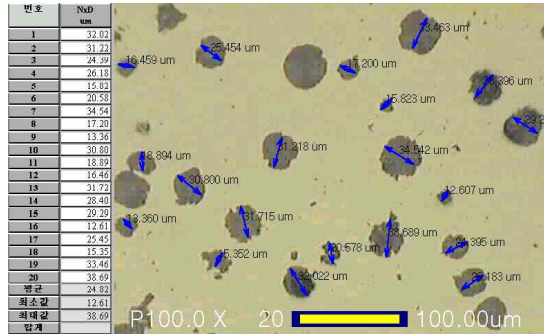


Fig. 6 Micro structure of F Series(GCD 60)

Table 2 Cumulative distribution function, Reduced variables and \sqrt{area} of mean size

No.	Cumulative distribution function (F _j %)	Reduced variable (y _i)	\sqrt{area}					
			A Series	B Series	C Series	D Series	E Series	F Series
1	4.76	-1.113	34.49	26.69	31.33	26.13	27.18	16.01
2	9.52	-0.855	37.52	33.80	33.22	26.31	27.40	16.67
3	14.29	-0.666	38.41	34.12	33.34	26.44	27.52	17.48
4	19.05	-0.506	39.43	34.57	34.41	27.40	28.08	18.47
5	23.81	-0.361	39.94	34.68	35.28	28.24	28.69	19.00
6	28.57	-0.225	40.00	34.99	35.42	28.50	28.90	20.16
7	33.33	-0.094	40.10	35.98	35.90	28.64	28.95	20.20
8	38.10	-0.166	41.15	37.18	36.03	28.78	29.77	20.37
9	42.86	0.298	41.18	38.49	36.35	29.38	29.94	21.60
10	47.62	0.436	41.63	39.07	36.50	30.40	30.28	21.80
11	52.38	0.581	41.87	39.40	36.83	30.44	30.45	22.00
12	57.14	0.735	41.92	39.92	37.50	31.11	31.85	22.10
13	61.90	0.903	41.99	40.06	37.60	31.36	32.24	22.63
14	66.66	1.903	42.65	40.41	37.64	31.66	32.44	24.64
15	71.43	1.09	45.07	40.62	38.43	32.60	32.45	25.00
16	76.19	1.302	45.16	43.24	38.50	33.35	32.67	26.53
17	80.95	1.554	45.49	43.58	39.62	35.18	32.99	26.80
18	85.71	1.87	45.84	44.36	39.73	35.85	33.45	27.00
19	90.47	2.302	46.95	47.94	40.76	37.81	35.38	30.20
20	95.24	3.02	47.36	53.40	44.35	38.21	35.73	30.45

Table 3 Cumulative distribution function, Reduced variables and \sqrt{area} of maximum size

No.	Cumulative distribution function (F _j %)	Reduced variable (y _i)	\sqrt{area}					
			A Series	B Series	C Series	D Series	E Series	F Series
1	4.76	-1.113	59.70	48.30	43.46	42.54	37.84	22.80
2	9.52	-0.855	61.75	54.16	56.53	46.46	40.62	23.40
3	14.29	-0.666	64.11	54.56	56.67	49.91	43.11	25.67
4	19.05	-0.506	64.97	63.91	58.69	50.55	45.20	26.28
5	23.81	-0.361	67.84	65.86	59.42	52.70	45.29	27.77
6	28.57	-0.225	72.03	68.78	60.03	52.74	46.15	28.75
7	33.33	-0.094	75.65	70.74	61.26	52.77	48.16	31.89
8	38.10	-0.166	78.09	72.01	61.45	53.88	48.59	32.20
9	42.86	0.298	83.80	73.18	62.34	53.91	49.39	32.40
10	47.62	0.436	84.07	74.63	62.95	57.47	49.42	32.81
11	52.38	0.581	85.16	76.63	64.57	60.25	49.89	33.28
12	57.14	0.735	86.97	81.30	67.18	61.26	54.29	33.91
13	61.90	0.903	88.53	83.82	71.34	62.12	54.90	34.29
14	66.66	1.903	92.31	85.47	74.02	64.92	56.51	34.49
15	71.43	1.09	94.53	85.50	75.37	65.37	57.91	35.95
16	76.19	1.302	100.13	87.18	78.00	71.36	62.10	37.18
17	80.95	1.554	102.97	88.54	83.31	71.43	62.67	38.35
18	85.71	1.87	105.90	100.0	93.16	73.18	64.46	46.65
19	90.47	2.302	114.17	104.73	101.03	80.39	67.56	49.69
20	95.24	3.02	158.54	105.14	106.80	87.75	71.07	50.63

3.2 화상해석에 의한 평균구상흑연크기와 결함투영면적의 관계

앞에서 상술한 피로한도의 모델에 따라서, 흑연 사이의 간섭효과가 무시될 정도로 적다고 생각하면, 시험편 표면층에 존재하는 흑연 중에서 평균의 \sqrt{area} 의 값을 가진 흑연이 평활재의 회전 굽힘 피로한도의 결정에 중요한 역할을 부여할 것이 예상된다^[13-15]. 조직내에 존재하는 평균구상흑연의 치수를 직접 측정하는 것은 불가능하지만, 대신에 극치통계를 사용해서 그 기대치를 간접적으로 예측하는 것이 가능하다. Fig. 7과 Fig. 8에 GCD40,

45-1, 45-2, 45-3, 50, 60의 \sqrt{area} 의 평균값과 최대값의 누적 빈도분포를 나타냈다. \sqrt{area} 는 시험편의 횡단면부에서 무작위로 선택한 20개의 각 점에 존재하는 흑연의 크기를 측정하여 평균치를 계산한 값이다. 한 점의 면적은 $S_0 = 1.00\text{mm}^2$ 이다.

Fig. 7과 Fig. 8에서의 경향은 양호한 직선성을 나타내고, 흑연의 \sqrt{area} 의 평균치분포는 직선성이 인정되며, 본 실험에 사용한 6종류의 재료 표면의 흑연에 대해서 얻어진 \sqrt{area} 의 분포에는 큰 오차가 없는 것을 알았다. \sqrt{area} 의 기대치는 Fig. 1~ Fig. 6에서 보는 바와 같이 흑연의 \sqrt{area} 는 한 점

에서 측정된 평균치보다 상당히 큰 것에 주의하여야 한다. 그리고 이 값은 A재에서 F재로 갈수록 점점 적어진다.

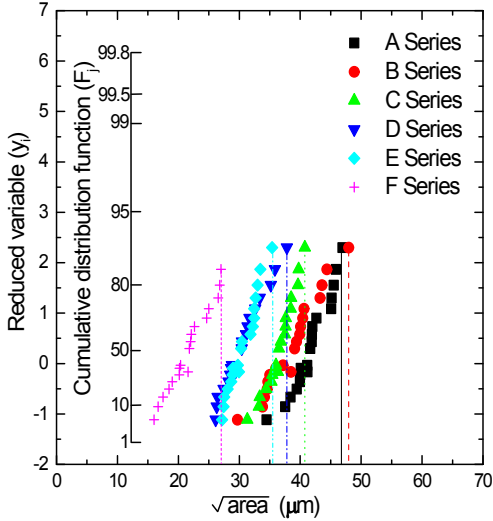


Fig. 7 Distributions of maximum values \sqrt{area}_{mean} for single graphites. Probability graph of extreme values

Fig. 7에서 B재의 \sqrt{area} 의 분포가 다른 것에 비해서 우측으로 기울어지고 그 값이 큰 것을 나타낸다. 그 이유는 B재인 GCD 45-1의 흑연을 Fig. 2에서 보는 바와 같이 흑연이 폭발 상으로 존재함으로써 흑연의 크기를 측정하는데 있어서 어려움이 있으며, 이에 따른 오차라고 생각된다. 따라서 B재의 흑연에 대한 \sqrt{area} 의 값의 분포가 크게 나타났다. 이와 같이 단독흑연의 분포와 흑연의 크기가 결합투영면적의 평가기준에 중요한 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Table 4는 예측한 최대구상흑연크기의 결합투영면적과 평균구상흑연크기의 결합투영면적을 비교하여 나타낸다. 결합투영면적의 값은 평가방법에 따라서 차이가 있는 것을 의미한다. 즉, 본 연구에 사용한 구상흑연주철재는 흑연이 작고 서로 분리해 있으며, 흑연이나 미소결함을 단독결합으로 간

주하여 측정된 \sqrt{area} 의 값을 극치통계에 의해서 평가할 수 있다.

Table 4 Comparison of maximum and mean size of graphite

	A Series	B Series	C Series	D Series	E Series	F Series
\sqrt{area}_{max}	158	105	106	87	71	50
\sqrt{area}_{mean} (μm)	46.5	48	41	37.5	35.5	27

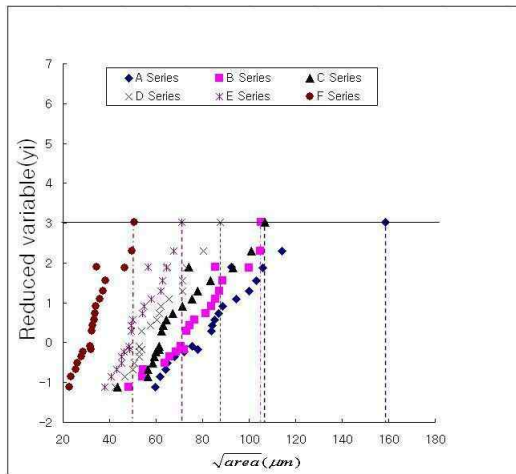


Fig. 8 Distributions of maximum values \sqrt{area}_{max} for single graphites. probability graph of extreme values

4. 결론

본 연구는 다양한 기지조직과 구상화율 그리고 구상흑연의 크기, 분포 등의 변수를 가진 구상흑연 주철재의 피로한도에 중요한 변수로 작용하는 흑연의 크기를 화상해석 장치에서 최대 및 평균구상흑연크기를 이용하여 극치통계에 의한 결합투영면적에 대하여 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 구상흑연주철은 흑연이 잘 분리해서 분포해 있고, 흑연에 대한 간섭효과가 적은 것이 시험편

- 표면과 내부의 미시적 관찰에 의하여 명확하다.
- (2) 구상흑연주철제는 흑연이 작고 서로 분리해 있으며, 흑연이나 미소결함을 단독결함으로 간주하여 측정된 \sqrt{area} 의 값을 극치통계에 의해서 평가할 수 있다.
 - (3) 최대 및 평균구상흑연크기는 구상흑연주철제의 기계적 특성을 예측하는 것에 이용될 수 있으며, \sqrt{area} 의 통계학상의 분포는 재료를 제조하는 과정에서 흑연의 크기를 제어할 수 있는 지침으로 이용될 것이다.

참고문헌

1. 윤명진, “저탄소강의 표면결함의 영향에 의한 피로강도의 정량적 평가”, 한국공작기계기술학회지, 제 4 권, 제 4 호, pp. 42-49, 1995.
2. 윤명진, “중탄소강의 피로크랙 개폐구의 특성 및 피로강도의 평가”, 한국공작기계기술학회지, 제 6 권, 제 1 호, pp. 45-50, 1997.
3. 村上敬宜, 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, 第 54卷, 第 499 號, pp. 413-425, 1988.
4. Smith R. A., Short Fatigue Cracks, Fatigue Mechanisms: Advances in Quantitative Measurement of Physical Damage, ASTM STP 811, J. Lankford, D. L. Davidson, W. L. Morris, and R. P. Wei, Eds., American Society for Testing and Materials, pp. 264-279, 1983.
5. Masahiro Endo, Yukitaka Murakami, Effects of an Artificial Small Defect on Torsional Fatigue Strength of Steels, ASME. Vol. 109, pp. 124-129, 1987.
6. Yukitaka Murakami, M. Endo, Effects of Defects, inclusions and inhomogeneities on Fatigue Strength, Fatigue, Vol. 16, pp. 163-182, 1994.
7. Yukitaka Murakami, Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions on The Fatigue Strength of Metals, JSME. Vol. 32, No. 2, pp. 167-180, 1989.
8. Y. Murakami, Inclusion Rating by Statistics of Extreme Values and Its Application to Fatigue Strength Prediction and Quality Control of Materials, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. Vol. 99, pp. 345-351, 1994.
9. Y. Murakami and S. Nemat-Nasser, Growth and Stability Of Interacting Surface Flaws Of Arbitrary Shape, EFM. Vol. 17, No .3-A, pp. 193-210, 1983.
10. Murakami Y., Endo M., Effects of Hardness and Crack Geometries on ΔK_{th} of Small Cracks Emanating from Small Defects, The Behaviour of Short Fatigue Cracks, EGF Pub. 1 (Edited by K. J. Miller and E. R. de los Rios), pp. 275-293, 1986.
11. 遠藤正浩, 王羽兵, “最近の球狀黒鉛鑄鐵の疲勞強度におよぼす黒鉛と人工微小缺陷の影響”, 材料, Vol. 43, No. 493, pp. 1245-1250, 1994.
12. 西谷弘信外 3人, “球狀黒鉛鑄鐵切缺材の疲勞強度”, 日本機械學會論文集 第 58 卷, 第 556 號, pp. 2280-2286, 1992.
13. 윤명진, 이경모, 구상흑연 주철제의 피로 크랙 발생 및 피로강도에 미치는 기지조직의 영향, 한국공작기계학회지, 제 7 권, 제 5 호, pp. 66~71, 1998.
14. 김민건, 김진학, 오스템퍼링처리한 구상흑연 주철의 피로한도에 미치는 기지조직인자와 역학인자의 영향, 대한기계학회논문집(A권), 제 23 권, 제 2 호, pp. 287~293, 1999.
15. 지정근, 김민건, 김진학, 김정두, 초급속열처리 구상흑연 주철 FCD500의 피로파괴 특성, 대한기계학회논문집(A권), 제 26 권, 제 4 호, pp. 596~601, 2002.