論文 한국공작기계학회지 제8권 제5호 1999. 10.
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

구상화율에 의한 구상 흑연주철재의 피로강도의 정량적 평가

윤 명 진*

Quantitative Evaluation of Fatigue Strength by Spheroidal Ratio of Graphite in Ductile Cast Iron

Yoon Myung-Jin*

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 us to understand various fatigue phenomena caused by graphite of Ductile cast iron.

Therefore, in this study, different ferrite-pearlite matrix structure and spheroidal ratio of graphite of 70%, 80% and 90%, GCD40, GCD45-1 and GCD45-2 series, have been carried out rotary bending fatigue test, estimated the maximum size of graphite, investigated correlation.

It was concluded as follows; (1) in ductile cast iron which have various spheroidal ratio of graphite, the fatigue limit C series of 90% spheroidal ratio of graphite is the highest. While, A series of 70% spheroidal ratio of graphite is the lowest. (2) fatigue limit was predicted by vickers hardness(Hv) of matrix, $\sqrt{area}$ of maximum size graphite inputting Murakami and Endo's formula.

Key Words : ductile cast iron(구상흑연주철), variation of fatigue strength(피로강도변화), spheroidal ratio of graphite(구상화율), maximum size of graphite(흑연의 최대크기) ferrite-pearlite matrix structure(페라이트-펄라이트 기지조직)

1. 서 론

구상 흑연주철은 인성이 높고, 가공성이 좋으며 저 비용으로 복잡한 모양의 기계부품을 제작할 수 있는 장점이 있으나, 재료설계 방법에 따라서 강도의 변화가 큰 재료이므로 신뢰성이 낮은 재료로 알려져 있다. 주철의 강도의

* 경일대학교 기계공학부

변화는 기지조직과 흑연의 모양, 결함과 개재물, 핀홀 등 고유의 강도를 저하시키는 인자 외에 가공조건, 열처리 조건의 영향 등이 있다.[1~3]

구상 흑연주철재의 피로강도 평가법에는 구상흑연이 중요한 역할을 하고 있다. 구상흑연 주철재는 조직 중에 흑연을 내재 분산한 일종의 미시적 결함재이므로 피로크랙 발생의 기점이 되어 피로강도에 중요한 영향을 미치고 있음을 밝혔다.[4~5] 그러나 피로강도에 미치는 흑연의 모양과 치수, 분포상태 등 불명한 점이 많다. 흑연은 결함인 동시에 금속 조직을 불균질 하게 하고 그와 같은 불균질 조직과 관련한 피로파괴 과정을 충분히 파악하기 위하여 구상화율과 흑연입경의 크기에 대한 상세한 검토가 필요하다.

최근 철강재료의 피로강도 평가를 위하여 Murakami와 Endo[6~12]는 작은 표면결함과 다양한 형상을 가진 크랙들의 3차원 응력해석을 하여 크랙의 관찰을 기초로 하는 2차원과 3차원결함을 위한 새로운 기하학적인 변수 $\sqrt{area}$ 를 제안했다. 그들은 실험결과로부터 아래의 실험식을 유도하였다.

$$\sigma_w^n \sqrt{area} = C, \quad n \approx 6 \tag{1}$$

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

그러나, 이 방정식의 부정적인 면은 n과 C를 확정하기 위해서 피로시험을 필요로 한다. 1986년에 Murakami와 Endo[12]는 모델을 개정하고 다음의 방정식들을 제안했다.

$$\Delta K_{th} = 3.3 \times 10^{-3} (H_v + 120)(\sqrt{area})^{1/3} \tag{2}$$

$$\sigma_w = \frac{1.43(H_v + 120)}{(\sqrt{area})^{1/6}} \tag{3}$$

여기서, ΔK_{th} 는 응력비 $R = -1 (MPa\ m^{1/2})$ 하에서의 하한계응력확대계수범위이고, σ_w는 회전굽힘 또는 비틀림, 인장-압축 피로한도 (MPa)이며, H_v는 비커스경도 $(kgf\,m^{-2})$이고, $\sqrt{area}$ 의 단위는 (μm)이다.

상기의 방정식들은 피로시험을 하지 않고 ΔK_{th} 와 σ_w 를 예측할 수 있다. 그들은 1,000㎛이하의 $\sqrt{area}$ 와 70~720까지의 범위의 H_v 를 가지는 노치나 크랙이 있는 시험편들을 사용하여 100개 이상의 실험 데이터로부터 예측오차가 대개 10%보다 적은 것을 확인하였다.

Murakami와 Endo의 모델, 식 (1)과 식 (3)은 Frost의 모델 $\sigma w^3 l = C$ 와 유사하다. 식의 차이점은 l 을 대신해서 $\sqrt{area}$ 를 채택한 것이다. 그 이유는 Murakami와 Endo의 모델은 3차원적인 모델이기 때문이다. 주의할 것은 기하학적 변수로서 $\sqrt{area}$ 의 선택은 응력확대계수의 고려여부에 있다. 이와 같이 그것은 파괴역학적 접근으로부터 시작한 Murakami와 Endo의 모델은 Frost형 모델에 귀착됨을 알 수 있다.

따라서 본 연구는 구상 흑연주철재의 흑연의 최대크기를 평가하고 피로한도현상의 미시적 관찰에 기초한 식 (3)을 사용해서 구상화율 그리고 구상 흑연의 크기, 분포 등의 변수를 가진 구상 흑연주철재에 대한 통일적인 피로한도 예측법을 제시하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험방법

본 실험에 사용한 실험재료는 구상 흑연주철재인 GCD40, 45를 사용하였으며, 이 재료의 화학성분은 Table 1과 같다. 이 재료를 KS규격에 따라 분류하였고, 각 시험편의 명칭을 편의상 A, B, C Series로 칭하였다.

시험편은 샌드위치법으로 제작하였는데 이 방법은 자동차부품을 제작하는 생산공장 등 비교적 대량생산에 널리 사용되고 있는 방법중의 하나이다. Table 1과 같은 3가지 시험편과 동일한 성분으로 구성된 용탕을 샌드위치법의 Y형 블록에 주입하여 주조하였다. 이때 용탕은 KS규격에

Table 1 Chemical composition Wt(%)

KS Standards	C	Si	Mn	P	S	Mg
GCD 40	3.53	2.94	0.22	0.020	0.015	0.033
GCD 45-1	3.54	2.73	0.23	0.021	0.012	0.036
GCD 45-2	2.9	2.73	0.22	0.020	0.013	0.036

Table 2 Mechanical properties of specimens

Materials	Mechanical Properties					
	Sphe-roidal ratio	Tensile strength (MPa)	0.2% Proof Stress (MPa)	Elon-gation (%)	Brinell hardness (HB)	Micro-vickers hardness (Hv)
A Series	70%	408	374	5.5	156	168
B Series	80%	439	344	4.6	159	210
C Series	90%	456	432	9.3	165	232

의해 1500㎾, 50㎐ 중주파 염기성 큐폴라에서 승온에 맞추어서 1450℃에서 1차체크, 1480℃에서 2차체크를 실시한 후 1540℃까지 용탕온도로 맞춘 후 5분간 유지한 후 출탕과 동시에 구상화처리 하였다. 상기와 같은 용탕의 제조과정에 의하여 각 시험편의 구상화율은 A재는 70%이고, B재는 80%, C재는 90%이다.

주조된 원형재료는 크랙성장이 가장 용이하다고 판단되는 원주방향과 직각으로 절단하여 시험편을 채취하였다. 주조봉을 KS B 0801 4호에 의해 표점길이(gage length) 50㎜인 인장시험편을 가공하였으며, 회전굽힘 피로시험편은 JIS Z2274-1974-2호에 의해 가공하여 실험하였다.

이상과 같은 과정에 의하여 가공한 시험편의 기계적 성질은 Table 2와 같다.

최대결함크기를 결정하기 위해서 먼저 시험편에서 주응력방향으로 수직인 면을 절단하고, 검사표면을 샌드페이퍼로 #2,000까지 연마한 후, 버핑하여 표면을 경면으로 만든 후에 검사기준 면적 S_0(㎟)를 결정하여 측정한다. S_0는 현미경사진으로 1시야를 찍는데, 1시야는 1mm^2 크기로 한다. 검사는 S_0중에서 화상해석장치(BMI-PLUS, ESCAN4000)에서 촬영한 단면부 사진과 동일한 배율을 이용하여 측정하고, 20개의 흑연 중에서 최대의 크기를 가진 흑연을 선택하여 최대결함면적의 제곱근 $\sqrt{area}$ 를 계산한다. 이러한 측정을 측정부위가 중복되지 않게 20번 찍어서 $\sqrt{area}$ 를 결정하였다.

그리고 각각의 j(j =1~20)에 대하여 누적분포함수 F_j (Cumulative distribution function) 또는 누적빈도분포(Cumulative frequency)와 기준화변수 y_i (Reduced variable)를 계산하여 횡좌표 축에 $\sqrt{area}$ 를 잡고, 종축은 F와 y값 어느 것으로 선정하더라도 같은 결과이다. 도식화된 점들 중에서 최대의 $\sqrt{area}$ 를 가지는 값을 식 (3)에 대입해서 추정된 피로한도를 결정하고 실제의 피로한도와 비교하였다.

본 실험에 사용한 회전굽힘 피로시험기는 Ono's type(H-7, Shimadzu)으로서 수직 중추식 균일 굽힘모멘트형이고, 시험기 용량은 98N · m, 3400rpm이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3. 1 구상흑연주철재의 피로한도에 미치는 구상화율의 영향

구상흑연주철재의 흑연의 크기와 구상화율에 따른 평활재의 피로한도를 고찰하기 위하여 피로시험을 하였고 그 결과는 Fig. 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 구상 흑연주철재의 피로한도는 A재가 210 MPa, B재가 230 MPa, C재가 240 MPa이다. 본 실험에 사용한 시험편 중에서는 C재와 같이 구상화율이 높고 흑연이 완전한 원형이며 흑연의 입경이 작을수록 피로한도가 높고, 편상흑연이 혼존하면서 구상화율이 낮고 흑연의 입경이 클수록 피로한도가 낮음을 알 수 있다.

구상화율 70%인 A재는 편상과 구상으로 형성되어 있고, 80%인 B재도 편상과 구상, 90%인 C재는 완전한 구상이다. 흑연의 구상화율은 피로강도에 미치는 영향이 크며 구상화율이 높을수록 피로한도가 증가하여 90%의 경우가 가장 높고 70%재보다 14.3% 증가하였으며 동일 응력레벨의 피로수명의 분산폭도 적다. 각 재의 피로한도 부근에서 파단한 시험편에 대해서 SEM에 의한 파면을 조사한 결과 A재는 편상과 구상이 다소 함유되어 있으므로 크랙발생이 쉽고, C재는 흑연이 구상화되어 있으므로 크랙 발생이 어렵다고 생각된다.

Fig. 1에서와 같이 구상 흑연주철재에서도 피로한도보다 높은 응력을 반복할 경우 발생한 크랙은 전파 확대하여 파단에 이르지만 피로한도의 응력을 반복할 경우 흑연 및 표면직하의 미시적인 결함을 기점으로 해서 발생한 크랙은 일정길이로 성장하지만 각각의 S-N곡선의 변곡점을 나타내는 반복수 부분에서 정류한다. 따라서 본 재료의 피로한도는 크랙의 전파한계조건에 의해서 결정할 수 있다.[4]

흑연의 입경이 크고 구상화입수가 많으며 페라이트 체적분율이 비교적 높은 A, B재가 다른 시험편 보다 크랙의

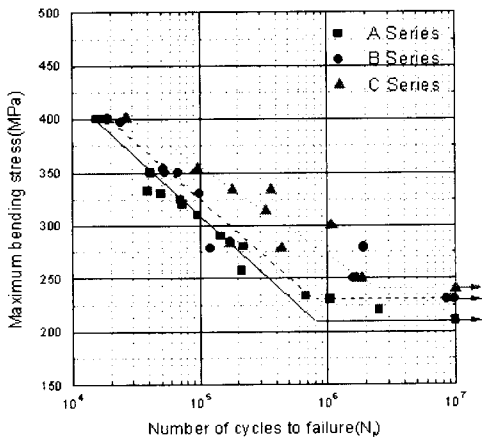

Fig. 1 S-N Curves for the sphcroidal graphite cast iron

발생이 시험편 표면의 여러 곳에서 발생하여 응력의 반복에 의하여 연결 합체할 수 있는 환경이기 때문에 크랙성장속도가 빠르고 피로한도를 저하시킨다.

따라서 구상 흑연주철의 피로한도에 영향을 미치는 여러 인자 중에서 구상화율과 흑연입경의 크기가 중요하며, 흑연에서 발생한 크랙이 상호 연결하여 크랙포화상태로 되었을 때 크랙전파속도는 크랙간의 합체로 인하여 빠르게 성장하며 피로한도 레벨을 결정하는 중요한 인자로 예측할 수 있다.[13]

3. 2 화상해석에 의한 흑연의 투영면적과 피로한도

각 시험편의 흑연의 크기를 화상해석장치(BMI-PLUS, ESCAN4000)에서 주응력 방향에 대한 흑연의 최대직경을 측정하였다. 각 재료에서 1시야 당 20개의 흑연중에서 최대크기를 결정하고, 이것을 20회 반복하여 극치분포에서 흑연의 최대투영면적의 평방근을 구하는 방법으로 피로강도를 예측하였다. Fig. 2는 C Series의 일예이며, 여기서 유효한 데이터는 가장 큰 69.34㎛이다. 결함의 치수가 조직내의 흑연의 치수보다 작으면 흑연에 의해서 피로한도가 결정될 것이 예상된다. 자연결함을 가진 시험편의 피로한도가 평활재의 피로한도와 같게 되는 것은 흑연의 $\sqrt{area}$ 의 값 이하의 크기를 가진 결함이기 때문이라고 생각된다.[14-15]

흑연사이의 간섭효과가 무시될 정도로 작다고 생각하면, 시험편 표면층에 존재하는 흑연 중에서 $\sqrt{area}_{max}$ 의 값을 가진 흑연이 평활재의 회전 굽힘 피로한도의 결정에 중요한 역할을 부여할 것이 예상된다. 조직 내에 존재하는 최대흑연의 치수 $\sqrt{area}_{max}$ 를 직접 측정하는 것은 불가능하지만, 대신에 극치통계를 사용해서 그 기대치를 간접적으로 예측하는 것이 가능하다. Fig. 3에 GCD40,

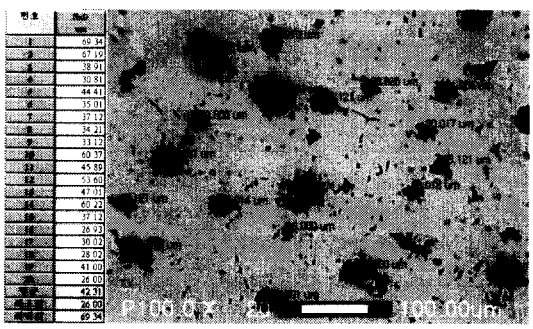

Fig. 2 Micro Struture of C Series(GCD45-2)

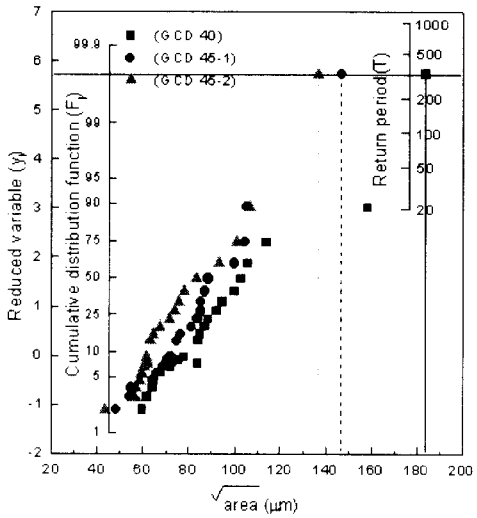

Fig. 3 Distributions of the maximum values $\sqrt{area}_{max}$ for single graphites, Probability graph of extreme values

GCD45-1 과 GCD45-2의 $\sqrt{area}$ 의 값의 누적 빈도분포를 나타냈다. 한 점의 면적 S0 = 1.00㎟이다. Fig. 3에 나타낸 점들은 누적분포함수의 증가에 따라 양호한 직선성을 나타내므로, 흑연의 $\sqrt{area}$ 의 최대치분포는 극치통계에 따른다고 생각된다. 본 실험에 사용한 3종류의 재료 표면의 흑연에 대해서 얻어진 $\sqrt{area}$ 의 분포에는 큰 오차가 없는 것을 알 수 있다.

$\sqrt{area}$ 의 기대치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 이 값은 A재에서 C재로 갈수록 점점 작아진다. 예측한 $\sqrt{area}$ 의 치수의 최대흑연이 자유표면직하에 존재하는 가장 유해한 경우를 예상하면, 평활재의 피로한도의 분포하한치가 $\sqrt{area}$ 대신 $\sqrt{area}_{max}$ 의 값을 식 (3)에 대입해서 예측할 수 있다. 여기서 식 (3)의 Hv에는 각 재료의 기지경도를 대입한다.

Toriyama등[16]은 상술한 평가기준을 1960년대에 생산한 구상흑연주철에 대해서 적용하여, 흑연의 간섭효과가 무시되지 않는 것을 나타냈다. 한편, 본 연구에서는 흑연의 분포상태가 일정하여 간섭효과에 대해서 고려하지 않고 $\sqrt{area}$ 의 값의 누적빈도분포를 나타냈다.

Fig. 3에서 각 재료의 $\sqrt{area}$ 의 분포가 직선적인 기울기를 나타낸다. 그 중에서 직선을 벗어나는 데이터가 있는데 그 이유는 흑연이 편상으로 존재함으로 흑연의 크기를 측정하는데 있어서 어려움이 있으며, 이에 따른 오차라고

Table 3 Comparison of predicted fatiguc limits with the expcrimental values

	A Series	B Series	C Series
$\sigma_{wo\ exp}$ (MPa)	210	230	240
$\sqrt{area}_{max}$ (μm)	184	147	137
σ_{wo} (MPa)	198	218	227
Error (%)	5.7	5.2	5.4

생각된다. 따라서 각 재료의 흑연에 대한 $\sqrt{area}$ 의 값의 분포가 크게 나타났고 피로한도의 예측치 σ_{wo} 가 낮게 된 원인의 하나라고 생각된다. 이와 같이 단독흑연의 분포와 흑연의 크기가 피로강도의 평가기준에 중요한 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Table 3은 예측한 피로한도의 하한치 σ_{wo} 와 실험치 $\sigma_{wo\ exp}$ 값의 비교를 나타낸다. σ_{wo} 의 값은 실험치 $\sigma_{wo\ exp}$ 와 근사한 값이고, 흑연의 간섭효과를 무시해서 가정한 피로한도의 모델을 사용하여 실제의 피로한도를 예측한 결과 근사한 값을 나타낸다. 즉, 본 연구에 사용한 바와 같은 최근의 양질의 구상흑연주철재는 흑연이 작고 서로 분리해 있으며, 피로한도는 흑연이나 미소결함을 단독결함으로 간주하여 측정한 $\sqrt{area}_{max}$ 의 값과 기지경도 H_v 의 값을 사용해서 식 (3)으로부터 예측된다. 따라서 피로한도의 실험치와 본 연구에 의한 예측치를 비교한 결과 그 오차는 0~11.4%이내이고, 피로한도의 예측치가 실험치 보다 작은 값이므로 피로한도를 과대 평가할 우려가 없으며 구상흑연주철재의 피로강도 설계 데이터를 간단히 예측하는 것이 가능하다.

또, 흑연의 $\sqrt{area}_{max}$ 는 구상흑연주철재의 피로한도를 예측하는 것에 이용될 수 있으며, $\sqrt{area}$ 의 통계학상의 분포는 재료를 제조하는 과정에서 흑연의 크기를 제어할 수 있는 지침으로 이용될 것이다.

4. 결 론

피로강도 평가에서 결함과 비금속개재물의 문제가 매우 복잡하더라도 실질적으로는 결함과 개재물은 미소크랙에 상당한다는 예상으로부터 이러한 문제들을 보는 것이 특히 중요하다. 이 개념은 구상 흑연주철재의 흑연에 의해 야기되는 다양한 피로현상을 이해할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 구상 흑연주철재의 흑연 구상화율이 70%, 80% 및 90%인 GCD40, GCD45-1 과 GCD45-2의 3종류의 시험편에 대한 회전굽힘피로시험을 하고, 피로한도에 미치는 흑연의 최대크기를 평가하고 피로강도와의 관련성에 대하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 구상화율이 높을수록 피로한도가 증가하였으며, 구상화율 90%인 C재의 피로한도가 가장 높고, 70% 재인 A재 보다 피로한도가 14.3% 증가하였으며 동일 응력레벨의 피로수명의 분산폭도 적었다.

(2) 본 연구에서 사용된 양질의 구상흑연주철은 흑연이 잘 분리해서 분포해 있고, 흑연의 간섭효과가 작은 시험편에서의 피로강도는 흑연의 크기와 분포로 부터 예측할 수 있다.

(3) 피로한도는 기지의 비커스경도 H_v 와 간섭효과를 무시해서 예측한 최대흑연의 $\sqrt{area}$ 의 값을 Murakami와 Endo가 제안한 식에 대입해서 예측할 수 있고, 실제의 피로한도보다 작은 값이므로 피로한도를 과대 평가할 우려가 없으므로 구상흑연주철재의 피로강도 설계 데이터로 이용할 수있다.

참 고 문 헌

(1) Edited by A. F. Spengler and H. K. Briggs, "The Ductile Process", Miller and Company, pp.7~18, 1972.

(2) Stephen I. Karsay, "Ductile Iron Ⅰ", 한국주조공학회, pp.5~39, 1976.

(3) Stephen I. Karsay, "Ductile Iron Ⅲ", 한국주조공학회, pp.57~62, 1981.

(4) 土居滋, "球狀黑鉛鑄鐵の疲勞破面解析と黑鉛の擧動", 日本機械學會論文集(A), 第 60 卷, 第 570 號, pp.331~336, 1994.

(5) 尹命辰, 李慶模, 구상흑연 주철재의 피로크랙 발생 및 피로강도에 미치는 기지조직의 영향, 한국공작기계학회지, 第 7 卷, 第 5 號, pp.66~71, 1998.

(6) Masahiro Endo, Yukitaka Murakami, Effects of an Artificial Small Defect on Torsional Fatigue Strength of Steels, ASME. Vol. 109, pp.124~129, 1987.

(7) Yukitaka Murakami, M. Endo, Effects of Defects, inclusions and inhomogeneities on Fatigue Strength, Fatigue, Vol. 16, pp.163~182, 1994.

(8) Yukitaka Murakami, Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions on The Fatigue Strength of Metals, JSME. Vol. 32, No. 2, pp.167~180, 1989.

(9) Y. Muraksmi, 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.

(10) 村上敬宣, 清水眞佐男, "疲勞强度に及ぼす介在物, 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.

(11) 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.

(12) 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.

(13) 加藤容三, 中野典彦, "回轉曲げを受ける球狀黑鉛鑄鐵の微小き裂發生および進展擧動", 日本機械學會論文集 (A), 第 50 卷, 第 457 號, pp.1565~1573, 1984.

(14) 遠藤正浩, 王羽兵, "最近の球狀黑鉛鑄鐵の疲勞强度におよぼす黑鉛と人工微小缺陷の影響", 材料, Vol. 43, No. 493, pp.1245~1250, 1994.

(15) 西谷弘信外 3人, "球狀黑鉛鑄鐵切缺材の疲勞强度", 日本機械學會論文集 第 58 卷, 第 556號, pp. 2280~2286, 1992.

(16) 烏山壽之, 村上敬宣, 各種人工微小缺陷および 微小缺陷の相互干涉效果が疲勞限度におよぼす影響の $\sqrt{area}$ パラメータモデルによる評價, 材料, 第 42 卷, 第 481 號, pp.1160~1166, 1993.