

구상흑연 주철재의 피로크랙 발생 및 피로강도에 미치는 기지조직의 영향

윤명진*, 이경모**

Effect of a Matrix Structure on the Initiation of Fatigue Crack and Fatigue Strength in Nodular Graphite Cast Iron

Myung Jin Yoon*, Kyong Mo Lee**

Abstract

It is required the superior materials for the parts of machines or structures, which could be endurable in severe load and environment. According to advancement of casting technology, nodular graphite cast iron is used as suitable for such condition. But nodular graphite cast iron is scattering of fatigue strength and low reliability. Therefore in this study, the effect of matrix structure and number of nodular graphite on the initiation of fatigue crack and fatigue strength.

It was found that the material which has relatively high ferrite volume fraction was more easily cracked than other materials and fatigue limit was low. The material which has not found pinhole on the surface, the crack was initiated in graphite went through ferrite and propagated into pearlite. Investigating the surface and fracture face, the crack initiated in graphite, not went through graphite, but separated graphite and ferrite grain boundary and combined with other cracks to form large one.

Keyword : nodular graphite cast iron(구상흑연주철), scattering of fatigue strength(피로강도 변화), initiation of fatigue crack(피로크랙의 발생), fatigue strength(피로강도), ferrite-pearlite matrix structure(페라이트-펄라이트 기지조직)

1. 서론

* 경일대학교 기계공학부

** 거창기능대학 기계설계학과

최근의 기계는 고성능화, 고출력화에 따라서 가혹한 하중, 온도, 부식조건을 받는 경우가 많다. 따라서 내열, 내마모성, 내식성 그리고 강도와 인성이 뛰어난 재료가 요구된다. 구상흑연 주철은 주조기술의 진보와 함께 재료설계의 여부에 따라서 상조건을 만족하는 재료이며, 비교적 낮은 비용으로 복잡한 3차원 모양의 기계, 구조물을 경제적으로 조형할 수 있으므로 디젤 엔진용 크랭크 축의 주조품으로의 변환, 자동차부품, 주철판, 로울러 및 산업기계 등에 폭넓게 그 적용의 타당성이 검토되고 있다^(1~4). 그러나 구상흑연 주철은 재료설계 방법에 따라서 강도의 변화가 큰 재료이므로 신뢰성이 낮은 재료로 알려져 있다. 주철의 강도의 변화는 기지조직과 흑연의 모양, 크기, 결합과 개재물, 편출등 고유의 강도를 저하시키는 인자외에 가공조건, 열처리 조건의 영향 등이 있다^(5~7).

최근 구상흑연주철재의 강도평가법에는 조직 중에 흑연을 내재 분산한 일종의 미시적 결합재로 보아 선형파괴역학을 이용하는 해석이 시도되고 있고, 합금원소의 영향에 의한 기계적성질을 고찰한 연구가 보고되고 있다.^(8~9)

Kato에 의하면⁽¹⁰⁾ 구상흑연주철 GCD60에 대해서 회전 굽힘 시험을 하고 이때 피로한도 265MPa는 미소 크랙 성장의 한계치이고, 흑연이 정류크랙을 증가시켜 피로강도를 저하한다. FCD60의 크랙진전 저항은 기계구조용 탄소강 SM10C 및 SM45C의 그것과 차이가 없다고 보고하였다. 한편 흑연을 내재함으로써 기계구조용 탄소강에 비해 특히 고강도 주철재의 피로한도비(피로한도/인장강도)는 저하하여

0.4~0.55의 값이고, Nisitani⁽¹¹⁾에 의하면 GCD45는 0.44의 결과를 보고하였다. 피로한도에 대하여 Nisitani는 205MPa, Kato는 225MPa로서 전자가 8.9% 과소 평가하였다. 또, 펄라이트 기지조직을 가지는 구상흑연주철의 인장강도 900MPa인 GCD90급에 상당하는 재료에 대해서 파면해석으로부터 피로강도를 논하였다. 즉, 회전 굽힘 피로시험에 의한 파면의 주사형 전자현미경 해석에서는 피로크랙 기점부, 성장부 모두가 층상모양이 특징적으로 지배하고, 크랙의 성장에 따라 외벽계가 인정되는 명료한 스트라이에이션(striation)은 확인할 수 없다. 크랙은 반드시 흑연과 흑연의 사이를 최단거리로 성장하지 않고 정적 파괴에 비교해서 저응력으로 피로 파괴가 일어나기 때문에 기지조직의 영향을 받아서 피로한도는 300MPa이 되었다. 이상과 같이 구상흑연주철의 피로강도에 대해서 여러 가지 연구 동향이 있으나 흑연의 모양, 크기, 흑연입자수, 구상화율, 편출등과 같은 주조법

특유의 결합인자의 역할과 기지조직과의 관련에 의한 피로강도의 변화에 대해서는 명확하지 않다.^(12~14)

따라서 본 연구에서는 구상흑연 주철의 피로강도에 미치는 흑연과 페라이트, 펄라이트의 체적분율에 따른 피로크랙 발생 및 피로강도와의 관계를 고찰하고자 한다.

2. 실험방법

본 실험에 사용한 재료는 사용빈도가 높은 구상흑연주철인 GCD45, GCD50 및 GCD60을 사용하였으며, 이 시험편들의 명칭은 편의상 A, B, C Series 라 한다. 재료의 화학 성분은 Table 1과 같고 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical composition Wt. (%)

KS	Specimen	C	Si	Mn	P	S	Mg
GCD 45	A series	3.37	2.74	0.03	0.019	0.019	0.042
GCD 50	B serie	3.70	2.75	0.39	0.018	0.017	0.042
GCD 60	C series	3.72	2.75	0.34	0.016	0.018	0.041

Table 2 Mechanical properties

Mechanical Properlies	Tensile strength MPa(kgf/mm ²)	Elongation (%)	Brinnell hardness
A series	461 (47)	22	150
B series	510 (52)	16	174
C series	608 (62)	8	212

실험재료의 구상화율의 측정은 KS규격에⁽¹⁵⁾의하여 구상화의 형태가 잘 나타난 사진을 선택하여 흑연의 최대길이 이를 지름으로 하는 원에 대한 흑연의 면적율로 측정하여 계산하였으며 A, B 및 C재 모두 90% 이상이였다. 펄라이트-페라이트의 체적분율은 다음과 같이 측정하여 계산하였다.

$$\text{펄라이트의 체적분율} = \frac{AP}{AG + AF + AP} \times 100 \quad (1)$$

여기서 AG는 흑연의 면적이고, AF는 페라이트의 면적 그리고 AP는 펄라이트의 면적이다. 각각의 체적분율을 계산하기 위한 사진은 Fig. 1과 같고, 흑연의 면적은 페라이트 면적에 포함되어 있다고 보아 페라이트 면적에

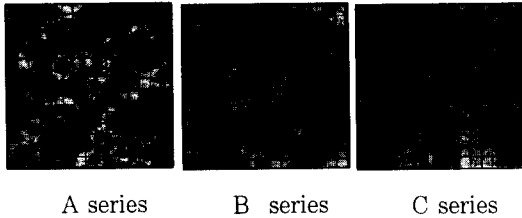


Fig.1 Photographs for calculation of ferrite and pearlite volume fraction

포함시켰다. 사진은 75×75mm로 하였으며, 각각 5mm 간격으로 등분하여 그 단면적의 비를 계산하고 참고로 비교 평균자료와 확인한 결과는 Table 3과 같다

Table 3 Ferrite and pearlite volume fraction Wt.(%)

Specimen NO.	Ferrite volume fraction	Pearlite volume fraction
A serie	64	36
B serie	46	54
C serie	27	73

실험체의 구상흑연 입자수는 100배의 광학 현미경에서 1mm²에 대한 입수로 나타내었으며 판독용 기준 사진은 100×100mm의 크기에서 측정하였고, 그 입자수는 A재가 100개, B재가 75개, C재가 50개 이다.

시험편의 표면은 기계가공 후 Sand paper를 사용하여 표면 연마하였다. 시험편의 모양과 치수는 전보와^(16,17) 같다. 본 실험에 사용한 회전 굽힘 피로 시험기는 균일 굽힘 모멘트형이고 시험기 용량은 98N-m, 3600rpm 이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3 - 1. 미시조직 인자와 피로한도의 관계

본 절에서는 피로수명에 영향을 미치는 구상흑연주철재의 미시조직 의존성을 고찰하기 위하여 구상화율은 90% 이상이고, Table 3과 같이 A재는 페라이트, 펄라이트의 체적분율이 64 : 36이고, B재는 46 : 54 그리고 C재는 27 : 73인 시험편을 준비하였다. 이상과 같은 다양한 조

직을 가진 시험편의 피로한도 선도를 결정하기 위한 피로 시험 결과는 Fig. 2와 같다. 평활재의 피로한도는 A재가 275 MPa, B재가 294 MPa, C재가 314 MPa 이다. 본 실험에 사용한 시험편 중에서는 73%의 펄라이트 조직

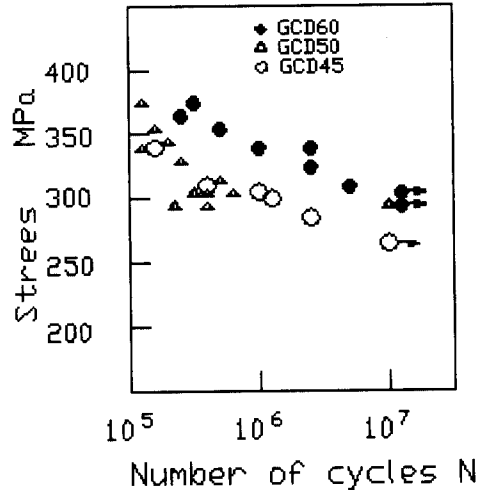


Fig. 2 S-N curve of fatigue specimen

을 가진 C재의 피로한도가 가장 높고, 그 다음은 54%의 펄라이트 조직인 B재의 피로한도가 높고, 36%의 펄라이트 조직인 A재의 피로한도가 가장 낮았다. 따라서 펄라이트의 체적분율이 높을수록 피로한도가 높고, 페라이트 체적분율이 높을수록 피로 한도는 낮다.

또, 각 시험편의 구상흑연 입자수는 A재가 100개, B재가 75개, C재가 50 개이다. 구상흑연 입자수에 따른 피로한도의 관계는 구상흑연 입자수가 작을수록 피로한도는 높아지고, 구상흑연 입자수가 많을수록 크랙의 상호 연결, 합체가 용이하여 피로한도는 저하한다. 따라서 구상흑연주철재의 피로한도에 영향을 미치는 여러 인자는 펄라이트 체적분율과 구상흑연 입자수가 중요하며, 페라이트 조직의 연결도와 체적분율 그리고 흑연의 분포와의 관계가 된다. 피로한도에 도달하여 정류크랙이 발생한 시험편의 표면크랙은 결함보다는 흑연에서 발생한 크랙이 많다. 피로크랙 발생기점은 표면의 흑연에서 발생한 것도 있지만, 표면직하의 흑연에서도 발생하였다. 이 정류크랙은 피로한도 레벨의 고, 저에 직접 관계가 있으므로 매우 중요한 의미를 가지고 있다. 평활재 표면의 정류크랙 중 최대

길이를 가진 한계 정류크랙길이는 피로한도의 응력레벨에서 한계에 도달한 크랙길이이므로 이에 대한 평가의 신중성이 요구되고 있다. 피로한도 레벨의 고, 저에 직접 관련이 있다고 생각되는 최대 정류크랙 길이는 동일 응력레벨에서 판단하지 않은 소수의 실험결과에서 추정하는 것은 어려운 상황이다. 그 이유는 본 실험에서 사용한 A, B 및 C재는 펄라이트, 페 라이트의 체적분율이 각각 다르고 각 재료의 흑연입경의 크기, 페라이트 결정입의 크기, 구상흑연의 입수에 따라서 다른 것으로 예상된다. 피로한도보다 높은 응력을 반복한 경우 발생한 균열은 성장확대하여 파단에 이르지만 피로한도의 응력을 반복한 경우 발생한 균열은 일정길이로 성장하지만 각각의 S-N곡선의 변곡점을 나타내는 반복수부분에서 정류한다. 그리고 환봉재의 피로크랙은 관통크랙이 존재할 수 없고, 내부결합선단의 크랙과 표면에서의 크랙의 발생 성장에 의해서 피로수명이 결정되고, 이때 성장하여 정류한 크랙에 의해서 피로한도가 결정된다. 따라서 피로강도의 하한계조건인 피로한도와 정류크랙은 밀접한 관계를 가진다. 따라서, 구상흑연 주철재도 피로한도는 균열의 전파 한계조건에 의해서 결정된다 고 할 수 있다.

3 - 2 구상흑연주철의 피로크랙 발생 거동

본 절에서는 구상흑연주철의 미시조직에 따른 피로크랙의 발생거동을 조사하고 이것을 토대로 피로크랙의 조직의존성을 고찰하고자 한다. 우선 페라이트와 펄라이트

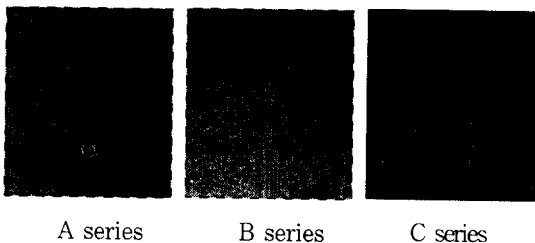


Fig. 3 Photographs of initiation of surface fatigue crack in ductile cast iron

체적분율의 차이로 인해 이들 사이에는 피로크랙 수명의 차이가 있을 것으로 예상된다. 따라서 구상흑연주철재 미시조직에 따른 피로한도를 기준으로 해서 피로크랙의 정량적 검토를 하기 위해서 다양한 응력레벨에서 실험하

였다. 피로크랙 발생 특성을 상세히 검토하기 위하여 표면



크랙과 피로파면 관찰을 동시에 하였다.

↓ axial direction

Fig. 4 Photograph of crack growth in ferrite

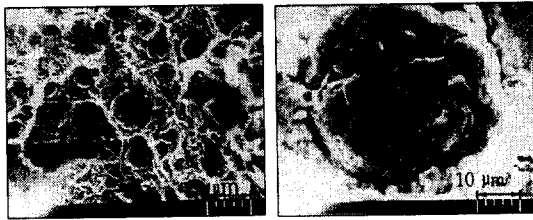
사용한 응력은 피로크랙의 수명분포가 큰 응력을 선정하였다. 즉 S-N 선도에서 피로한도 보다 20% 높은 응력인 A재는 330 MPa, B재는 353 MPa, C재는 377 MPa에서 피로크랙의 발생거동을 고찰하였다. 표면은 시험편 원주를 금속현미경으로 관찰하고, 파단면은 전자현미경으로 관찰하였으며 Fig. 3은 표면에서의 피로크랙 사진이다. 상세한 크랙발생 모델을 고찰하기 위하여 크랙 발생 기점을 관찰한 결과 본 연구에 사용한 시험편에서는 주로 흑연이 크랙발생 기점이 되었다.尹等의 연구결과⁽¹⁶⁻¹⁷⁾ 탄소강의 피로강도에서 재료에 존재하는 비금속 개재물과 같은 결합이 중요한 역할을 하는것과 같이 구상흑연주철 재에서는 흑연이 크랙발생 기점이 되고 결합의 역할을 하고 있다.

표면과 파단면의 관찰결과 크랙이 성장과정에 흑연과 만나면 흑연을 관통하지 않고 흑연을 둘러싸고 있는 페라이트 기지조직과의 결합부를 분리시키면서 성장한다. Fig. 4와 같이 3% 질산-알콜액으로 표면을 부식후 형광침투법으로 현상하여 확인한 결과이다. 또 Fig. 3과 같이 초기 크랙의 발생은 구상흑연을 기점으로 크랙이 많이 발생하였으며, 흑연이 집중적으로 밀집된 부분에서 많이 발생하는 경우가 많았다.⁽¹⁸⁻²⁰⁾ 또 구상흑연에서 발생하여 인접한 크랙과 합체하여 성장하는 크랙도 많이 관찰되었다. 이는 대체로 구상흑연이 표면직하에 존재하는 경우에도 크랙이 발생한 결과로 보여진다.

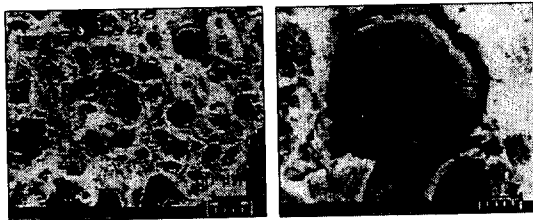
3 - 3. 피로과정에 있어서의 기지 조직의 역할

본 절에서는 SEM에 의해 A, B 및 C재의 균열 발생 부위에 대한 기지 조직의 영향에 대해 검토를 하였다. 각 재의 피로한도 부근에서 파단한 시험편에 대해 파면을 조사하기 위하여 균열발생부의 SEM 사진을 촬영하였으며

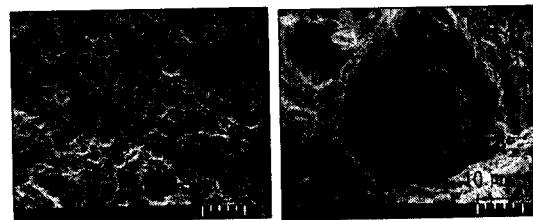
결과는 Fig. 5와 같다. 크랙성장은 SEM 사진 우측의 미시적 관찰에서 흑연과 페라이트부를 분리시키면서 발생하고, SEM 사진 좌측의 거시적 관찰에서 피로크랙성장은 A, B 및 C재 모두 구상흑연이나 페라이트부가 피로균열의 성장경로가 되어있는 것을 알 수 있고 파면의



A series



B series



C series

Fig 5 Photographs of SEM in A, B and C series

흑연은 페라이트부에서 분리 탈락되거나 페라이트부의 조직과 흑연이 결합되어 나타나기도 하였다. A재와 B재에서는 페라이트의 체적분율이 많기 때문에 C재보다 균열은 발생하기 쉽다고 생각된다. 따라서 피로한도가 C재와 비교해 비교적 낮은 것은 피로균열 발생 과정에서 일어나는 기지조직의 역할의 차이에 의한 것이라고 이해 할 수 있다.⁽²¹⁾

흑연의 입경이 작고 구상화 입자수가 많으며 페라이트 체적분율이 비교적 높은 A, B재가 C재보다 균열의 발생

이 시험편 표면의 여러 곳에서 발생하여 응력의 반복에 의하여 연결 합체할 수 있는 환경이기 때문에 균열성장속도가 빠르고 피로한도를 저하시킨다. 구상흑연주철은 모상의 기지조직이 제2상의 흑연을 둘러싼 조직을 구성하기 때문에 기지조직의 우열이 강도와 경도를 지배한다. 이것은 미시조직이 역학적으로 각각 다른 2상으로 구성되고, 더욱이 결정입경의 크기가 불균질성을 가지는 마르텐사이트-페라이트 복합 조직상의⁽¹⁶⁾ 특성과 같다. 구상 흑연주철의 강도가 편상흑연주철 보다 높은 것은 흑연의 응력집중 효과가 편상흑연주철의 그것 보다도 작기 때문이지만, 기지조직이 탄성상태에서는 흑연의 응력집중이 있는 경우 또는 흑연선단에서 부터 크랙발생이 있는 경우에도 소성 변형에 의해서 기지조직의 파괴는 완화되는 것이라고 생각된다.

4. 결론

흑연구상화율이 90%이상인 구상흑연주철을 페라이트-펄라이트 기지조직이 서로 각각 다른 3가지 시험편을 제조하여 그것에 대하여 회전 굽힘 시험을 행하고 피로크랙의 발생, 성장 및 피로한도를 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 페라이트-펄라이트조직 중 73%의 펄라이트 조직을 가진 C재의 피로한도가 가장 높았고, 36% 펄라이트 조직을 가진 A재의 피로한도가 가장 낮았다.
2. 피로크랙은 페라이트 체적분율이 비교적 높은 A, B재가 C재 보다 균열의 발생이 용이하고, 시험편 표면의 여러 곳에서 발생하여 응력의 반복에 의하여 연결·합체 할 수 있는 환경이기 때문에 성장속도가 빠르고 피로한도가 저하한다. 따라서, 본 재료의 피로한도는 기지조직의 체적분율에 따라 결정된다.
3. 피로크랙 발생기점을 확인한 결과 본 실험에 사용한 시험편의 경우 A, B, C재 모두 흑연에서부터 발생하여 페라이트 부를 관통하여 펄라이트 조직으로 진전하여 파단하였다.
4. 표면과 파단면의 관찰 결과 피로크랙이 발생과정에서 흑연을 만나면 흑연을 관통하지 않고 흑연을 감싸고 있는 페라이트부의 조직을 분리시키면서 발생하고 다른 흑연 주변에서 발생한 크랙들과 결합하여 파피에 이르므로 피로한도의 변화가 크다.

참 고 문 헌

- 1) 日本機械學會編, "機械構造物の破損事例と解析技術", 三美印刷株式會社, pp. 240 ~ 241, 1988
- 2) 金屬の割れ・破壊對策研究會, "金屬の割れ・破壊資料集", 經營開發センター出版部, pp. 347 ~ 351, 1980
- 3) 日本機械學會編, "腐食と破壊", 日本工業出版, pp. 98 ~ 143, 1985
- 4) American Society for Metals, "Failure Analysis and Prevention", Metal Handbook Vol. 10, Metal park, Ohio, pp. 445 ~ 456, 1975
- 5) Edited by A. F. Spengler and H. K. Briggs, "The Ductile Process", Miller and Company, pp. 7 ~ 18, 1972
- 6) Stephen I. Karsay, "Ductile Iron I", 한국주조공학회, pp. 5 ~ 39, 1976
- 7) Stephen I. Karsay, "Ductile Iron III", 한국주조공학회, pp. 57 ~ 62, 1981
- 8) 烏山壽之, 村上敬宣, 牧野泰三, "非金屬介在物のデータベース作成と高强度鋼の疲勞強度推定法の標準化", 材料, 第 40 卷, 第 458 號, pp. 1497 ~ 1503, 1991
- 9) 朴興日, "CV黑鉛鑄鐵의 組織과 機械的 性質에 미치는 合金元素의 影響", 울산대학교대학원, 박사학위 논문, pp. 47 ~ 51, 1989
- 10) 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舉動", 日本機械學會論文集(A), 第 50 卷, 第 457 號, pp. 1565 ~ 1573, 1984
- 11) H. Nisitani and I. Takeo, "Significance of Initiation, Propagation and Closure of Micro cracks in High Cycle Fatigue of Ductile Metals", Eng. Fract. Mech., Vol. 15, No. 3-4, pp. 445 ~ 456, 1981
- 12) 土居滋, "球狀黑鉛鑄鐵の疲勞破面解析と黑鉛の舉動", 日本機械學會論文集 (A), 第 60 卷 第 570 號, pp. 331 ~ 336, 1994
- 13) 田中哲志, 西谷弘信, 寺西高廣, "フェライト系球狀黑鉛鑄鐵の回轉曲げおよびねじり疲勞の微小龜裂伝ば舉動", 日本機械學會論文集 (A), 第 60 卷 第 571 號, pp. 23 ~ 28, 1994
- 14) 村上敬宣, 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
- 15) KSD 4302 球狀黑鉛鑄鐵의 韓國工業規格
- 16) 尹命辰, "低炭素鋼의 表面缺陷의 影響에 의한 疲勞強度의 定量的評價", 한국공작기계기술학회지, 제 4 권, 제 4 호, pp. 42 ~ 49, 1995
- 17) 尹命辰, "中炭素鋼의 피로크랙 開閉口の 특성 및 疲勞強度의 評價", 한국공작기계기술학회지, 제 6 권, 제 1 호, pp. 45 ~ 50, 1997
- 18) 鈴木 秀人, 大藪 優, 植木 忠司, 國尾 武, "高强度球狀黑鉛鑄鐵の疲勞強度に及ぼす基地組織の形響", 日本機械學會論文集(A), 第 51 卷 第 46号, pp. 12 ~ 24, 1985
- 19) 西谷弘信外 3人, "球狀黑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.
- 20) 遠藤正浩, 王羽兵, "最近の球狀黑鉛鑄鐵の疲勞強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
- 21) K. Tokaji, T. Ogawa, "Fatigue Life Distribution and Its Simulation in Spheroidal graphite cast iron", Material Science Research International, Vol. 2, No. 1, pp. 39 ~ 45, 1996