

구상흑연주철재의 흑연에 의한 피로강도의 평가

이경모*, 윤명진**, 이종형***

Evaluation of Fatigue Strength by Graphite in Ductile Cast Iron

Kyung Mo Lee*, Myung Jin Yoon** and Jong Hyung Lee***

ABSTRACT

In this study, based on the effect of the interaction of fracture mechanics by graphite and fatigue limit phenomena of the microscopic observation various matrix structure, spheroidal ratio, size of graphite and distribution etc. parameters contained with 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 and three different ferrite-pearlite matrix structure, GCD 45-3, GCD 50, GCD 60 series, all of which contain more than 90% spheroidal ratio of graphite, were used to obtain the correlation between mean size of spheroidal graphite and fatigue strength. (1) 73% pearlite structure had the highest fatigue limitation while 36% pearlite structure had the lowest fatigue limitation among ferrite-pearlite matrix. the increase in spheroidal ratio with increasing fatigue limitation, 90% had the highest, 14.3% increasing more than 70%, distribution range of fatigue life was small in same stress level. (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 guideline for the control of inclusion size in the steelmaking processes.

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

1. 서론

피로강도에 미치는 결함의 영향을 정량적으로 평가하기 위한 중요한 영향인자는 '결함의 기하학적인자'와 '기지조직과 재질인자'라는 것은 많은 피로강도 데이터에서 발표된바 있다. 따라서 결함의 기하학적인자를 평가하기 위한 시도도 많이 연구되고있다⁽¹⁻⁴⁾.

기계재료에 미소크랙이 발생하거나 결함이 준

재하여 이것들이 성장하고 피로파괴를 일으키는 경우 피로강도의 평가방법으로 R. A. Smith model^(5,6), Tanaka model⁽⁷⁾ 등이 있다.

피로강도를 지배하는 결함의 모양인자를 결정하고, 여러 가지 결함에 따른 피로강도를 추정하는 방법을 제안한 Murakami의 연구^(8,9), 피로크랙의 발생, 성장, 정류거동이 재료의 미시조직인자와 밀접한 관계의 성질 규명을 하였다.^(10,11)

Fractography analysis와 피로한도레벨에서의 한

** 20002년 11월 4일 접수
* 거창기능대학 기계설계학과
** 경일대학교 기계공학부
*** 금오공과대학교 기계공학부

계결합크기와 한계크랙길이를 결정하여 피로한도를 저하시키지 않는 허용결합크기 평가를 시도한 Kunio 등의 연구⁽¹²⁾, 그리고 Crack의 성장속도를 결합의 크기, 크랙의 길이로써 평가하여 노치재의 피로강도 해석과 평가를 한 Nisitani의 연구가 있다⁽¹³⁾.

피로파괴의 핵심은 크랙의 발생과 성장이다. 특히, 크랙의 발생은 기지조직이 연약한 부분에서 발생하며, 반면에 기지조직이 경질인 경우는 비금속 개재물이나 결합에서 크랙이 발생된다. 따라서 결합이나 개재물이 피로강도에 미치는 영향을 고찰하는 것은 피로강도를 이해하는데 있어서 중요한 방법중의 하나이다. 피로강도에 미치는 미소결합(Micro defect)이나 비금속 개재물(Non-metallic inclusion)의 영향은 오래 전부터 지적되어온 문제이지만 문제의 영향인자가 너무 다양하기 때문에 한정된 조건하에서 그 영향을 평가하는 것은 어려운 실정이다. 기계나 구조물에서 발견되는 결합은 모양과 크기가 다양하고, 재료의 표면과 내부 또는 표면근방등 존재하는 위치도 다양하다. 또, 결합의 모양은 시험편에 도입한 프리크랙과 항상 같은 조건을 가진다고 볼 수는 없다.

따라서 본 연구는 구상흑연주철재의 흑연의 최대크기를 평가하고 피로한도현상의 미시적 관찰에 기초한 식을 사용해서 다양한 기지조직과 구상화율 그리고 구상흑연의 크기, 분포 등의 변수를 가진 구상흑연주철재에 대한 피로한도 평가법을 제시하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 사용한 실험재료는 구상흑연주철재인 GCD 40, 45, 50, 60을 사용하였으며, 이 재료의 화학성분은 Table 2-1과 같다. 이 재료를 KS규격에 따라 분류하였고, 각 시험편의 명칭을 편의상 A-F Series로 칭한다. 시험편은 샌드위치법으로 제작하였는데 이 방법은 자동차부품을 제작하는 생산공장 등 비교적 대량생산에 널리 사용되고 있는 방법중의 하나이다.

Table 2-1과 같은 6가지 시험편과 동일한 성분으로 구성된 용탕을 샌드위치법의 Y형 블록에 주입하여 주조하였다. 이때 용탕은 KS규격에 의해 1,500kW, 50Hz 중주파 열기성 큐포라에서 승온에

Table 2-1 Chemical composition Wt. (%)

| KS Standard | 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 | 2.94 | 2.73 | 0.22 | 0.020 | 0.013 | 0.036 |
| GCD 45-3 | 3.37 | 2.74 | 0.03 | 0.019 | 0.019 | 0.042 |
| GCD 50 | 3.70 | 2.75 | 0.39 | 0.018 | 0.017 | 0.042 |
| GCD 60 | 3.72 | 2.75 | 0.34 | 0.016 | 0.018 | 0.041 |

맞추어서 1,450℃에서 1,480℃로 상승시킨 후에 1,540℃까지 용탕온도로 맞춘 후 5분간 유지한 후 출탕과 동시에 구상화처리 하였다. 상기와 같은 용탕의 제조과정에 의하여 각 시험편의 구상화율은 70%, 80% 및 90%의 3가지 종류가 되도록 하였다. A재는 구상화율이 70%이고, B재는 80%, C~F재는 90%이다. 주조된 원형재료는 크랙성장이 가장 용이하다고 판단되는 원주방향과 직각으로 절단하여 시험편을 채취하였다. 주조봉을 KS B 0801 4호에 의해 표점길이(gage length) 50mm인 인장시험편을 가공하였으며, 회전굽힘과 피로 시험편은 JIS Z2274-1974 2호에 의거하여 가공하여 실험하였다. 이상과 같은 과정에 의하여 가공한 시험편의 기계적 성질은 Table 2-2와 같다.

2.2 실험방법

회전굽힘 피로시험편은 기계가공한 후 표면은 에머리지(emery paper)를 이용하여 1,500번까지 연마한 다음 산화알루미늄으로 최종 버핑한 후 아세톤으로 세척하였다. 회전굽힘 피로시험시 표면 크랙의

Table 2-2 Mechanical properties of specimens

| Materials | Mechanical Properties | | | | | |
|-----------|-----------------------|------------------------|-------------------------|----------------|-----------------------|-----------------------------|
| | Spheroidal ratio | Tensile strength (MPa) | 0.2% Proof Stress (MPa) | Elongation (%) | 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 |
| D Series | 90% | 461 | 434 | 22 | 150 | 232 |
| E Series | 90% | 510 | 484 | 16 | 174 | 232 |
| F Series | 90% | 608 | 547 | 8 | 212 | 257 |

발생, 성장 거동을 쉽게 관찰하기 위하여 나이탈(질산-알콜액) 3%으로 표면을 부식 후 형광침투법으로 현상하여 표면의 크랙 발생 및 성장을 레프리카로 채취하였다.

본 실험에 사용한 회전굽힘 피로시험기는 Ono's type(H-7, 98N·m, Shimadzu)으로서 부하방법은 2점 지지 1점 수직 중추식 균일 굽힘 모멘트형이고, 시험기 용량은 10kgf·m, 3400rpm이다.

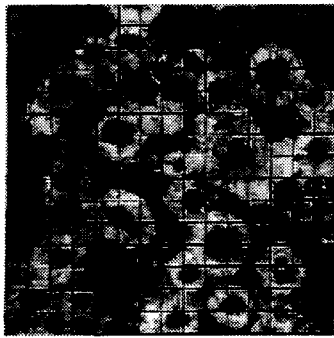


Fig. 2-1 Photograph for calculation of ferrite and pearlite volume fraction

또 펄라이트의 체적분율과 페라이트의 체적분율은

$$P(\%) = \frac{AP}{AF + AP} \times 100 \quad (1)$$

$$F(\%) = \frac{AF}{AF + AP} \times 100 \quad (2)$$

의 식으로 계산하였다. 체적분율을 계산하기 위해 75×75mm의 금속조직 사진상에 각각 5mm 간격으로 등분하여 단면적 비로 계산하였다. 그 그림은 Fig. 2-1과 같다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 구상흑연주철재의 피로한도에 미치는 흑연의 영향

구상흑연주철재의 피로강도를 평가하고 흑연의 입경의 크기에 따른 평활재의 피로한도를 고찰하기 위하여 피로시험을 하였고 그 결과는 Fig. 3-1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 구상흑연주철재의 피로한도는 A재가 210 MPa, B재가 230 MPa, C재가

240 MPa이고 D재가 275MPa이며 E재가 294MPa, F재가 314MPa이다. 본 실험에 사용한 시험편 중에서는 구상화율이 높고 흑연이 완전한 원형이며 흑연의 입경이 작을수록 피로한도가 높고, 편상흑연이 혼존하면서 구상화율이 낮고 흑연의 입경이 클수록 피로한도가 낮음을 알 수 있다. 그리고 구상흑연주철의 기지조직을 고려하면 73%의 펄라이트 조직을 가진 F재의 피로한도가 가장 높고, 그 다음은 54%의 펄라이트 조직인 E재의 피로한도가 높고, 다소의 편상과 구상의 혼합의 조직인 A재의 피로한도가 가장 낮았다.

Table 3-1에 페라이트와 펄라이트의 체적분율을 나타내었다.

Table 3-1 Ferrite and pearlite volume fraction

| Materials | Ferrite volume(%) | Pearlite volume(%) |
|-----------|-------------------|--------------------|
| A Series | 64 | 36 |
| B Series | 62 | 38 |
| C Series | 60 | 40 |
| D Series | 64 | 36 |
| E Series | 46 | 54 |
| F Series | 27 | 73 |

Table 3-2 Spheroidal ratio and fatigue limit

| Materials | Spheroidal ratio(%) | Fatigue limit(Mpa) |
|-----------|---------------------|--------------------|
| A Series | 70 | 252 |
| B Series | 80 | 276 |
| C Series | 90 | 288 |
| D Series | 90 | 330 |
| E Series | 90 | 353 |
| F Series | 90 | 377 |

흑연의 구상화율과 피로한도는 Table 3-2에 나타내었는데 표와 같이 흑연의 구상화율은 피로강도에 미치는 영향이 크다.

즉 구상화율 70%인 A재는 편상과 구상으로 형성되어 있고, 80%인 B재는 폭발상과 구상, 90%인 C, D, E, F재는 완전한 구상이다. Fig. 3-2는 1mm²당에 관찰되는 구상화된 흑연수와 Fig. 3-1에서 구한 10⁷회 피로한도와와의 관계를 나타내고 있다. 즉 1mm²당에 관찰된 흑연수가 많은 A재의 피로한도가

210MPa로 가장 낮고 흑연수가 가장 적은 구상화율이 90%인 F재가 314MPa로 가장 높다. 이 그림에서 피로한도와 구상화율 사이에는 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다. 피로한도레벨의 고, 저에 직접 관련이 있다고 생각되는 구상흑연입수와 기지조직의 분포상태는 소수의 실험결과에서 피로강도와 관련성을 추정하는 것은 어려운 상황이다. 그 이유는 본 실험에서 사용한 구상흑연주철재의 시험편은 구상화율과 흑연의 입경의 형태가 각각 다르고, 각

재료의 펠라이트-페라이트체적분율이 다르기 때문이다^(14,15).

Fig. 3-1에서와 같이 구상흑연주철에서도 피로한도보다 높은 응력을 반복할 경우 발생한 크랙은 전파 확대하여 파단에 이르지만 피로한도의 응력을 반복할 경우 발생한 크랙은 일정길이로 성장하지만 각각의 S-N곡선의 변곡점을 나타내는 반복수 부분에서 정류한다. 따라서, 본 재료에 피로한도는 크랙의 전파관계조건에 의해서 결정되고 있다. 본 재료에 대해서 크랙의 발생점을 관찰한 결과 크랙은 흑연 및 표면적하의 미시적인 결함을 기점으로 해서 발생하고 있다⁽¹⁶⁾.

따라서 구상흑연주철의 피로한도에 영향을 미치는 여러인자 중에서 구상화율과 흑연입경의 크기, 그리고 펠라이트 체적분율이 가장 중요하며, 페라이트 입경에 대한 피로한도 레벨의 고, 저는 단순히 입경만으로 평가할 수 없고, 페라이트 조직의 연결도와 체적분율과의 문제가 된다⁽¹⁰⁾. 또, 구상흑연주철재의 구상화율이 높을수록 피로한도가 높아지고, 구상흑연입수가 많을수록 크랙의 상호연결·크랙간의 합체에 의해 피로한도는 저하한다. 흑연에서 발생한 크랙이 상호 연결하여 크랙포화상태로 되었을 때 크랙전파속도는 크랙간의 합체로 인하여 빠르게 성장하며 피로한도 레벨을 결정하는 중요한 인자로 예측할 수 있고, 구상흑연주철의 피로강도와 크랙의 발생과 성장거동의 관련성을 고찰하기 위해 다음과 같은 시험을 수행하였다.

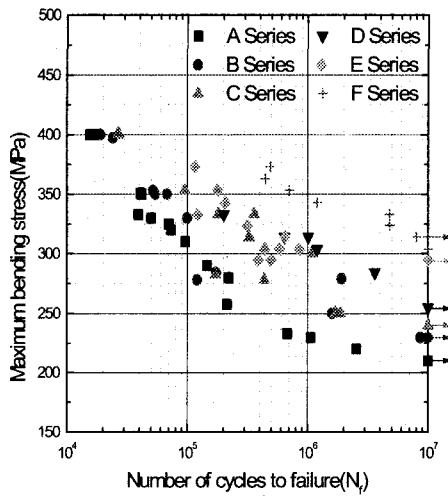


Fig. 3-1 S-N Curves for the six of spheroidal graphite cast iron

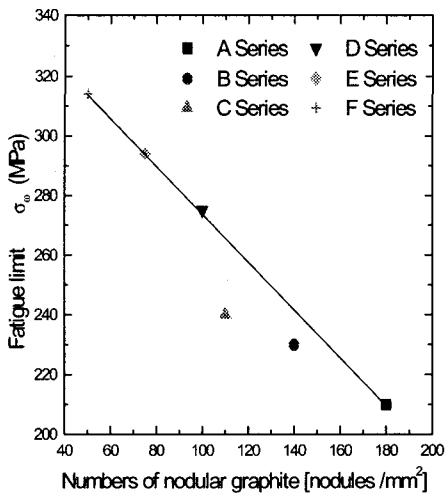


Fig. 3-2 Relation of fatigue limits and numbers of spheroidal graphite per area

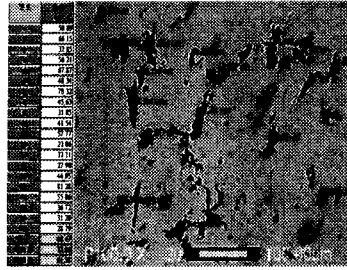
3.2 구상흑연주철재의 흑연의 크기와 피로 크랙 발생

본 절에서는 구상흑연주철의 미시조직에 따른 피로크랙의 발생거동을 조사하고 이것을 토대로 피로크랙의 기지조직 의존성을 고찰하고자 한다.

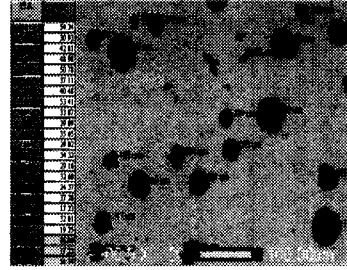
우선 구상화율과 구상화입경의 크기의 차이로 인해 이들 사이에는 피로크랙수명의 차이가 있을 것으로 예상된다

Fig. 3-3은 화상해석장치로 평균 구상흑연의 크기를 나타낸 사진이다.

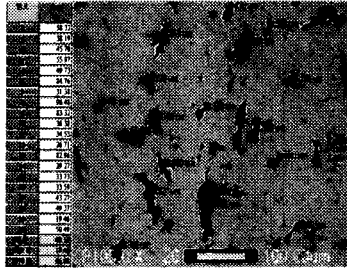
이에 구상흑연주철재의 미조직에 따른 피로한도를 기준으로 해서 피로크랙의 정량적 검토를 하기 위해서 다양한 응력레벨에서 실험하였다. 피로크랙 발생 특성을 상세히 검토하기 위하여 표면크랙을 관찰하고, 파면관찰을 동시에 하였다. 본 실험에서 사용한 응력은 피로크랙의 수명분포가 큰 응



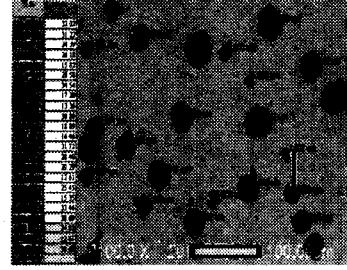
A Series



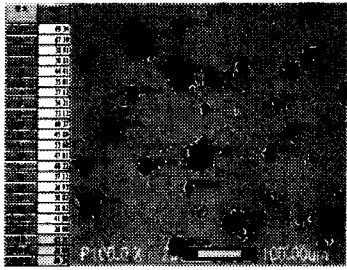
E Series



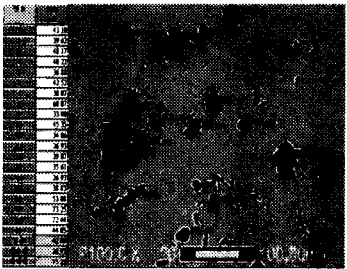
B Series



F Series



C Series



D Series

Fig. 3-3 Micro structure of A~F series

력을 선정하였다. 즉 S-N 선도에서 피로한도 보다 20%높은 응력인 A재는 252MPa, B재는 276MPa, C재는 288MPa, D재는 330MPa, E재는 353MPa, F재는 377MPa에서 피로크랙의 발생거동을 관찰하였다. 표면관찰은 시험편 원주를 금속현미경으로 관찰하고, 파단면은 전자현미경으로 관찰하였으며 피로시험 도중 채취한 레프리카를 통해 많은 피로크랙중 가장 길이가 길고 피로 수명을 좌우한 주크랙의 거동을 화상해석장치로 관찰하여 사진을 촬영하고 크랙길이를 측정하였다. 이러한 사진으로부터 구상흑연주철재의 미세조직에 따른 피로크랙의 발생거동을 비교, 검토하고 이것을 토대로 피로크랙의 조직 의존성을 연구하였다. 우선 구상화율의 차이로 인해 이들 사이에는 피로크랙 전파수명의 차이가 있을 것으로 예상된다^(17,18,19). 구상흑연주철재의 피로크랙의 발생은 표면상에서 관찰되는 피로크랙을 관찰하고, 피로파단면상을 SEM으로 동시에 관찰하였다.

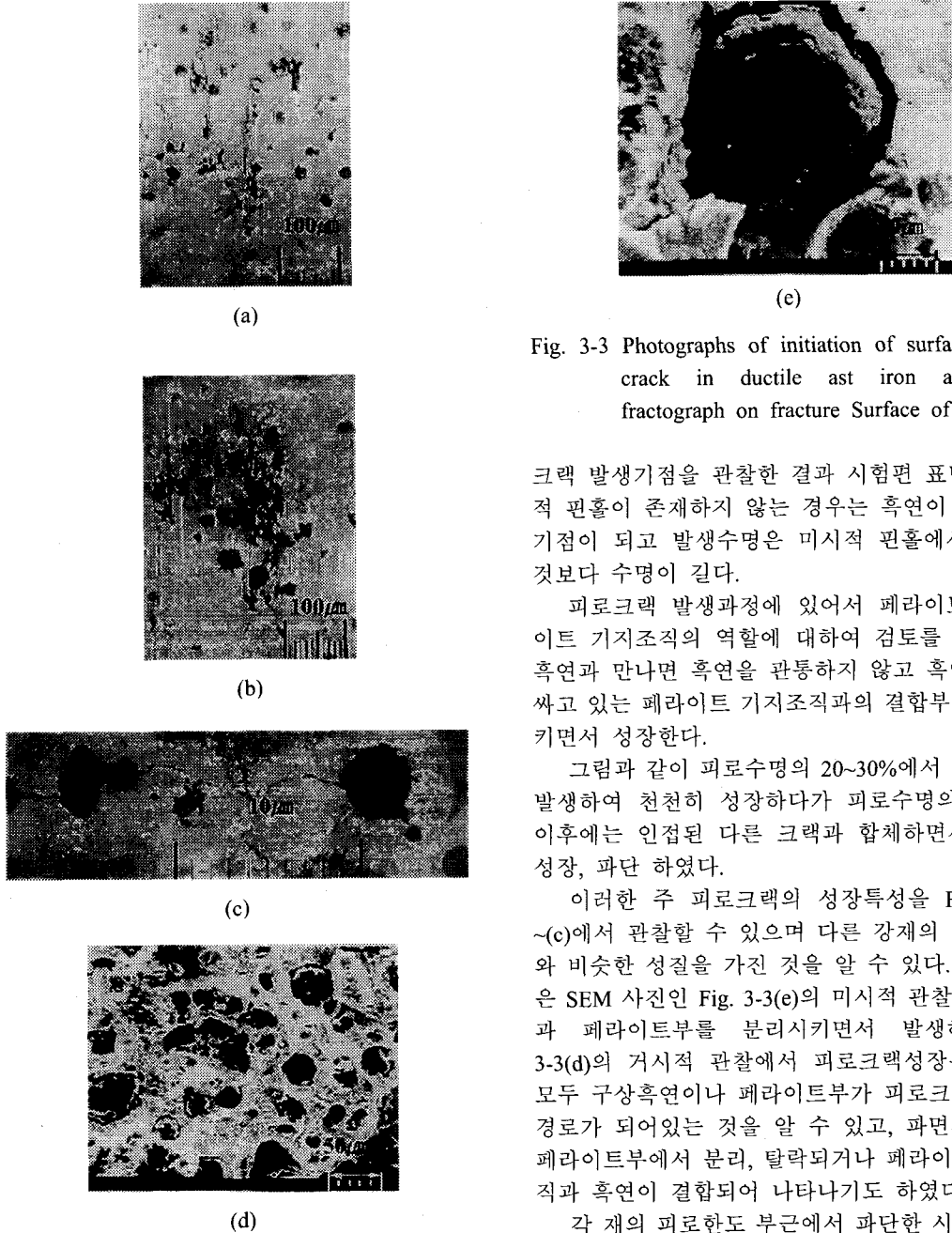


Fig. 3-3 Photographs of initiation of surface fatigue crack in ductile cast iron and SEM fractograph on fracture surface of specimen

크랙 발생기점을 관찰한 결과 시험편 표면에 미세적 편홀이 존재하지 않는 경우는 흑연이 크랙발생 기점이 되고 발생수명은 미세적 편홀에서 발생한 것보다 수명이 길다.

피로크랙 발생과정에 있어서 페라이트와 펄라이트 기지조직의 역할에 대하여 검토를 행하였다. 흑연과 만나면 흑연을 관통하지 않고 흑연을 둘러싸고 있는 페라이트 기지조직과의 결합부를 분리시키면서 성장한다.

그림과 같이 피로수명의 20~30%에서 주 크랙이 발생하여 천천히 성장하다가 피로수명의 약 80% 이후에는 인접된 다른 크랙과 합체하면서 급격히 성장, 파단 하였다.

이러한 주 피로크랙의 성장특성을 Fig. 3-3(a)~(c)에서 관찰할 수 있으며 다른 강재의 연구 결과와 비슷한 성질을 가진 것을 알 수 있다. 크랙성장은 SEM 사진인 Fig. 3-3(e)의 미세적 관찰에서 흑연과 페라이트부를 분리시키면서 발생하고 Fig. 3-3(d)의 거시적 관찰에서 피로크랙성장은 시험편 모두 구상흑연이나 페라이트부가 피로크랙의 성장경로가 되어있는 것을 알 수 있고, 파면의 흑연은 페라이트부에서 분리, 탈락되거나 페라이트부의 조직과 흑연이 결합되어 나타나기도 하였다⁽²⁰⁾.

각 재의 피로한도 부근에서 파단한 시험편에 대해서 SEM에 의한 파면을 조사한 결과 A재는 편상과 구상이 다소 함유되어 있으므로 크랙발생이 쉽고, 그 다음으로 B재가 폭발상과 구상인 재료이므로 쉽고, C, D, E, F재는 흑연이 구상화되어 있으므로 크랙 발생이 어렵다고 생각된다⁽²¹⁾.

Fig. 3-3의(a)~(c)는 표면크랙을 관찰한 것이다. Fig. 3-3(a)~(c)와 같이 초기크랙의 발생은 구상흑연을 기점으로 크랙이 많이 발생하였으며, 흑연이 집중적으로 밀집된 부분에서 많이 발생하는 경우가 많았다. 상세한 크랙발생모델을 고찰하기 위하여

흑연의 입경이 작고 구상화입수가 많으며 페라이트 체적분율이 비교적 높은 A, B재가 다른 시험편 보다 크랙의 발생이 시험편 표면의 여러 곳에서 발생하여 응력의 반복에 의하여 연결 합체 할 수 있는 환경이기 때문에 크랙성장속도가 빠르고 피로한도를 저하 시킨다고 볼 수 있다⁽¹⁴⁾.

4. 결론

본 연구는 흑연에 의한 간섭효과의 파괴역학적 고찰과 피로한도현상의 미시적 관찰을 기초로 하여 다양한 기지조직과 구상화율 그리고 구상흑연의 크기, 분포 등의 변수를 가진 구상흑연주철재에 대한 통일적인 피로한도 예측법을 제시하는 것을 목적으로 한다.

비록 결함과 비금속개재물의 문제는 본 연구에서 논의되지 않았지만, 금속피로에서 결함과 비금속개재물의 문제가 매우 복잡하더라도, 실질적으로는 결함과 개재물은 미소크랙에 상당하다는 예상으로부터 이러한 문제들을 보는 것이 특히 중요하다. 이 개념은 구상흑연주철재의 흑연에 의해 야기되는 다양한 피로현상을 이해할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 구상흑연주철재의 흑연 구상화율이 70%인 A재, 80%인 B재, 90%인 C재, D재, E재 그리고 F재이고, 페라이트-펄라이트 기지조직이 각각 다른 6종류의 시험편에 대한 회전굽힘피로시험을 행하고, 피로한도에 미치는 흑연의 최대 크기를 평가하여 피로강도와와의 관련성에 대하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 구상화율이 높을수록 피로한도가 증가하였다. 구상화율이 90%의 경우가 가장 높고, 70% 재보다 14.3% 증가하였으며 동일 응력레벨의 피로수명의 분산폭도 적었다. 기지조직에 따라서는 펄라이트 체적분율이 높을수록 피로한도가 높다.

(2) 1mm당에 관찰되는 구상화된 흑연수와 10^7 회 피로한도 사이에는 선형적인 관계가 성립하며 1mm당 관찰된 흑연수가 적을수록 피로한도가 증가하였다.

(3) 모든 시험편의 피로크랙 발생기점을 확인한

결과 시험편 표면의 흑연에서부터 발생하여 페라이트 부를 관통하여 펄라이트 조직으로 진전하여 파단 하였다.

후 기

본 연구는 2002년도 금오공과대학교 학술 연구비 지원에 의하여 연구된 논문으로 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Masahiro Endo, Yukitaka Murakami, Effects of an Artificial Small Defect on Torsional Fatigue Strength of Steels, ASME. Vol. 109, pp. 124-129, 1987.
2. Yukitaka Murakami, M. Endo, Effects of Defects, inclusions and inhomogeneities on Fatigue Strength, Fatigue, Vol. 16, pp. 163-182, 1994.
3. Yukitaka Murakami, Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions on The Fatigue Strength of Metals, JSME. Vol. 32, No. 2, pp. 167-180, 1989.
4. 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.
5. 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.
6. Smith R. A., On The Short Crack Limitations of Fracture Mechanics, Int. J. of Fracture 13, pp. 717-721, 1977.
7. Tsuneshichi Tanaka, Hideak Nakayama, Akiyoshi Sakaida, Takashi Imamichi, Evaluation of Weibull Parameters For Static Strengths of Ceramics Monte Carlo Simulation, MSRI. Vol. 1, No. 1, pp. 51-58, 1995.
8. 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.

9. 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.
10. Kendall, J. M., James, M. N., and Knott, J. F., The Behaviour of Physically Short Fatigue Cracks in Steels, The Behaviour of Short Fatigue Cracks, EGF Pub. 1 (Edited by K. J. Miller and E. R. de los Rios), pp. 241-258, 1986.
11. Hideo, Kitagawa, Yuji Nakasone, and Satoru Miyashita, Measurement of Fatigue Damage by Randomly Distributed Small Cracks Data, ASTM STP 811, pp. 233-263, 1983.
12. T. Kunio, M. Shimizu, K. Yamada, K. Sakura, T. Yamamoto, "The Early Stage of Fatigue Crack Growth in Martensitic Steel," Int. J. of Fracture, Vol. 17, No. 2, pp. 111-119, 1981.
13. Nisitani, H. and Goto, M., A Small-Crack Growth Law and its Application to the Evaluation of Fatigue Life, The Behaviour of Short Fatigue Cracks, EGF Pub. 1 (Edited by K. J. Miller and E. R. de los Rios), pp. 461-478, 1986.
14. 加藤容三, 中野典彦, "回轉曲げを受ける球狀黒鉛鑄鐵の微小き裂發生および進展挙動," 日本機械學會論文集 (A), 第 50 卷, 第 457 號, pp. 1565-1573, 1984.
15. 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.
16. 土居滋, "狀黒鉛鑄鐵の疲勞破面解析と黒鉛の舉動," 日本機械學會論文集(A), 제 60 卷, 第570 號, pp. 331-336, 1994.
17. 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.
18. 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.
19. 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," 한국공작기계학회지, 第 4 卷, 第 4 號, pp. 42-49, 1995.
20. Jong hyung Lee, Kyung Mo Lee, and Sung Hung Yoon "A study on the Fatigue Properties of Boron Steel(AISI 51B20)," Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 11, pp. 174-178, 2001.
21. 尹命辰, "中炭素鋼의 피로크랙 開閉口의 특성 및 疲勞強度의 評價," 한국공작기계학회지, 第 6 卷, 第 1 號, pp. 45-50, 1997.