

대형승용차 디스크 브레이크용 회주철의 피로균열 전파 거동

김호경[†] · 박진호^{*} · 양경탁^{*} · 최덕호^{*}

서울산업대학교 자동차공학과 · *서울산업대학교 산업대학원 자동차공학과
(2006. 2. 6. 접수 / 2006. 7. 14. 채택)

Fatigue Crack Growth Behavior of Gray Cast Iron for Brake Disc of a Passenger Car

Ho-Kyung Kim[†] · Jin-Ho Park^{*} · Kyoung-Tak Yang^{*} · Deok-Ho Choi^{*}

Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Technology

^{*}Department of Automotive Engineering, Graduate School, Seoul National University of Technology

(Received February 6, 2006 / Accepted July 14, 2006)

Abstract : Fatigue crack propagation tests for the brake disc cast iron were conducted for investigating fatigue crack propagation rate(da/dN), crack propagation path and fracture toughness(K_{Ic}) of the material. The threshold stress intensity factor range, ΔK_{th} , was found to be about $6 MPa\sqrt{m}$ at the stress ratio of $R=0.1$. Also, fracture toughness value was determined to be $24.7 MPa\sqrt{m}$. Irregular fatigue fracture surfaces were observed, indicating that fatigue crack growth occurred at the interface between randomly scattered flak graphite and ferrite, where the interfacial strength was relatively weak.

Key Words : cast iron, brake disc, fatigue crack growth rate, crack growth path, fracture toughness, threshold stress intensity factor

1. 서 론

최근의 차량은 엔진의 고출력화, 고속화 및 경량화 등으로 인하여 차량의 평균주행속도가 증가하고 있는 추세이다. 이에 따라 차량의 제동조건은 더욱 더 열악해지며, 제동시 발생하는 열은 제동 표면과 외부에 발생하는 온도차에 의해 수축과 팽창을 야기시켜, 브레이크 제동 표면에 미세한 크랙과 열변형을 발생시키게 된다¹⁻⁴. 이것이 성장하게 되면 차량에 진동과 소음을 발생시킴은 물론, 결국에는 브레이크의 파손에 이르는 등 자동차의 안전 주행에 중요하다.

자동차의 브레이크 시스템은 자동차 안전성 관점에서 조향 장치와 더불어 가장 중요한 시스템이다⁵. 제동시스템의 설계에 관련된 인자로는 차량의 사양, 제동조건, 주행조건, 환경조건, 브레이크의 형상 및 물질치, 냉각 조건등이 복합적으로 영향을 미친다.

승용차의 경우 정상적인 제동시 디스크의 측정 온도는 $150\sim 370^{\circ}C$ 이며, 경주용 자동차의 경우는 $800^{\circ}C$ 이상을 나타낸다^{6,7}). 이러한 마찰 계면의 온도 상승은 마찰특성으로 평가되는 마찰계수, 진동, 소음, 마모량의 변화에 중요한 원인이 된다. 예를 들면, 장시간의 끌기로 인한 마찰 계면에서의 급격한 온도 상승은 마찰계수가 급격히 감소하는 페이드(fade) 현상을 발생시키며, 제동 토크를 증가시킨다. 제동토크의 증가는 디스크의 마모를 증대시켜 DTV(disk thickness variation)를 크게 하며, 이것은 다시 토크를 증가시키는 역할을 한다. 이러한 DTV와 토크의 증가는 제동시 차체가 진동하는 현상인 저더(judder)를 발생시키는 원인으로 알려져 있다⁸). 제동시의 안락한 승차감과 안정성을 위해서는 페이드와 저더 등의 발생이 없어야 하며, 일정한 마찰계수가 유지되어야 한다.

또한, 과격한 제동시 디스크의 열변형은 디스크와 패드간의 마찰에 의해 형성된 디스크내의 온도 구배에 의해 발생되며, 고속 주행시 반복 급제동이 적

[†] To whom correspondence should be addressed.
kimhk@snut.ac.kr

용되는 극한 상황인 경우 급열/급냉에 의한 열팽창/수축의 결과로서 디스크 표면에 열균열을 발생할 수 있다⁹⁾. 이와 같이 디스크 표면에 발생하는 열균열은 자동차의 제동 안정에 중대한 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 자동차용 브레이크 디스크는 마찰열을 신속하게 마찰표면으로부터 제거함과 동시에 저더를 방지하도록 감쇄능력이 우수해야 하고 마모량이 적어야 한다. 이러한 측면에서 회주철이 디스크의 재료로 사용되고 있다¹⁰⁾.

본 연구에서는 디스크 브레이크 재료의 개발 및 설계시 중요한 정보를 제공하고자 디스크 재료로 사용되는 회주철에 발생된 균열의 피로 균열전파거동을 연구하였다. 이를 위하여 실차 디스크 브레이크에서 채취한 시험편을 이용하여 피로균열전파속도를 응력비의 영향을 고려하여 응력확대계수의 함수로 표현하였으며 파괴 인성치 및 피로균열의 하한치를 측정하였다.

2. 실험

2.1. 재료 및 시험편

본 실험에서 사용한 재료는 국내 A사의 대형 승용차에 사용되는 벤틸레이티드 브레이크 디스크(ventilated brake disc)에 사용된 재료로 소재는 회주철이며, 화학적 성분을 분석하기 위하여 직경 30mm, 두께 6.5mm의 시험편을 이용하여 무기 원소 분석기인 XRF로 정량적으로 분석한 화학성분은 Table 1 과 같다. 실험에서 사용된 시험편의 미세조직은 Fig. 1 로서 굵은 검은 선으로 나타난 것이 편상 흑연이며 밝은 부분이 페라이트, 어두운 부분이 펄라이트이다.

인장 및 피로시험편은 신차 벤틸레이티드 브레이크에서 채취한 디스크 재료로 Fig. 2와 같이 시험편을 채취하였다. Fig. 3은 인장시험편의 치수와 형상으로 인장 시험편의 경우 CT(compact tension) 시험편의 균열진행방향과 수직인 방향의 인장 물성치를 결정하기 위하여 모든 시험편을 Fig. 2와 같이 반경 방향으로 채취하였다. 시험편의 치수는 브레이크 디스크의 크기를 고려하여 기존의 시험편과 형상이 유사한 상태로 두께 6.5mm로 가공하였으며, 이때 어깨(shoulder) 부위의 반경에 의한 응력집중계수는 유한요소해석으로 1.0이 되도록 결정하였다. 또한 피로 균열전파속도 및 파괴 인성치를 측정하는데 사용된 CT 시험편은 ASTM E399¹¹⁾에 의거하여 Fig. 4와 같이 치수 및 형상으로 가공하였다.

Table 1. Chemical compositions of the gray cast iron(wt.%)

Element	C	Mn	Cr	Cu	Mo
%	3.7	0.99	0.71	0.79	0.02
Element	P	Ni	Si	S	Fe
%	0.04	0.41	2.13	0.12	bal

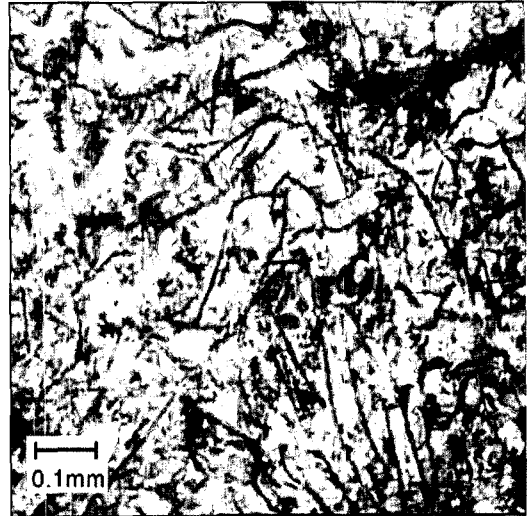


Fig. 1. Microstructure of gray cast iron.

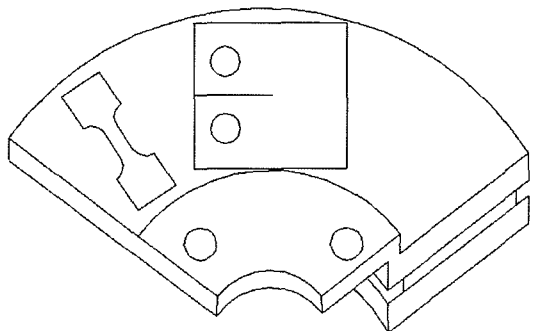


Fig. 2. Orientation of tensile and compact tension specimens in a ventilated brake disc.

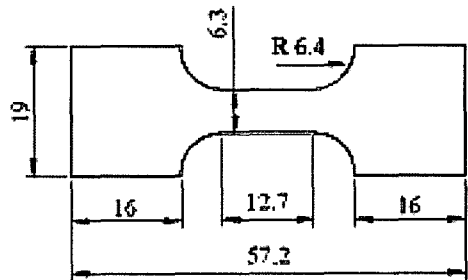


Fig. 3. Configuration of tensile test specimen.

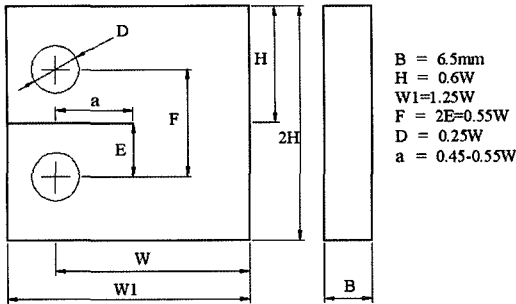


Fig. 4. Configuration of the compact tension(CT) specimen.

2.2. 실험방법

인장시험은 10ton용 유압 서보식 피로 시험기(In-stron 8516)를 사용하였으며 크로스 헤드(cross-head)의 속도는 1mm/min으로 시행하였다. 변형률의 측정에는 표점 거리(gauge length) 12.5mm의 변위 신장계(extensometer)를 이용하여 연속적으로 측정하였다. 브레이크 디스크용 회주철의 피로 균열전파속도 시험은 상온의 대기 중에서 인장시험에서 사용한 시험기를 사용하였으며, 하중제어 방식으로 응력비($R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$)가 0.1 및 0.3으로 10Hz의 정현파형(sine wave form) 반복하중을 일정하게 가하여 수행하였다. 균열의 측정에는 배율이 25배인 상하로 이동할 수 있는 수동식 미소위치 조정측정기(Mitutoyo, NRM-D2XY)를 사용하여 균열길이를 측정하였다. 한편 본 CT 시험편에 대한 응력확대계수 범위 ΔK 의 계산식은 다음과 같다¹²⁾.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{w}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} \times (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (1)$$

여기서 $\alpha = a/w$ 이며 B는 시험편 두께 ΔP 는 작용하중 범위($P_{max}-P_{min}$)이다.

파괴인성치 실험은 ASTM E399¹¹⁾에 의거하여 하중제어상태에서 9kN/min의 속도로 실시하였다. 한편 파단된 파면과 경로를 관찰하기 위하여 주사전자 현미경(SEM, scanning electronic microscope, Joel Co. Model JSM 6400)을 사용 균열 파단면을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1. 인장 실험

Fig. 5는 상온의 인장실험 결과로, 측정된 최대인

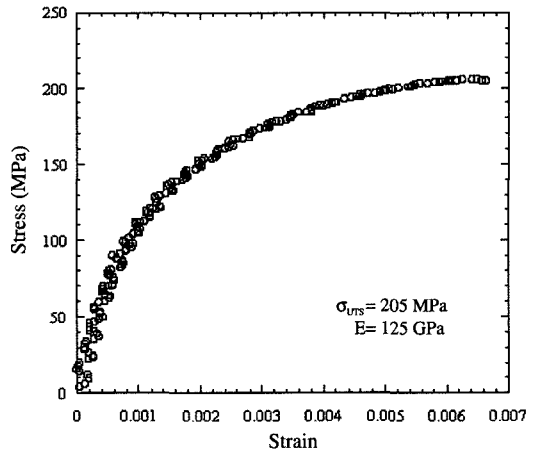


Fig. 5. Stress-strain curve for tensile test.

장강도(σ_{UTS})는 약 205MPa이고 0.2% 율셋 변형률을 적용한 항복강도는 185MPa, 탄성계수는 125GPa이며 연신율은 0.65%로 매우 취성인 것으로 나타났다. 일반적으로 디스크 브레이크에 사용되는 회주철은 주로 GC250 정도의 극 인장강도가 최소 250MPa이상인 회주철을 사용하는 것으로 알려져 있으나 본 실험재료의 경우 GC200으로 나타났다.

3.2. 피로균열전파 거동

디스크용 회주철의 응력비를 고려한 피로균열 전파속도를 측정하기 위하여 응력비 $R=0.1$ 과 0.3 에서 동일한 일정하중 진폭에서 피로실험을 실시하였다. Fig. 6에서 응력비 $R=0.1$ ($\Delta P = P_{max} - P_{min} = 950 - 95kN$) 상태에서 브레이크 디스크로 제작한 CT시험편을 이용한 반복하중(N)에 대한 균열길이(a) 증가를 나타내는 a-N 선도로서 1.38×10^6 의 반복하중 수에서 균열길이가 38.98mm인 상태에서 파단되었다. 균열길이는 하중 반복수가 증가하면서 지속적으로 증가하는 사실을 알 수 있으며 특히, 균열길이가 약 28.5mm인 근방에서는 균열전파가 지연되는 것을 알 수 있다. 그 후 균열길이가 약 31mm 이후에는 전파속도가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 한편, $R=0.3$ ($\Delta P = P_{max} - P_{min} = 1220 - 366kN$)에서의 a-N곡선은 균열길이가 약 25.5mm근방에서 균열전파가 약간 지연되는 현상을 보였으며 균열길이가 41.1mm인 2.23×10^5 의 반복하중 수에서 파단되었다.

응력비 $R=0.1$ 과 0.3 에서의 동일한 하중진폭상태의 균열전파에서 보듯이 응력비의 영향에 따라 균열전파가 응력비 $R=0.1$ 보다 $R=0.3$ 일 경우 빠르게

전파함을 알 수 있다. 또한, 응력비 $R=0.1$ 에서는 대체적으로 1.2×10^6 의 반복하중 수에서 균열이 급속히 진전됨을 알 수 있으며, 응력비 $R=0.3$ 에서는 1.19×10^5 의 반복하중 수에서부터 급격한 균열이 진행되었다.

본 데이터를 이용하여 $R=0.1$ 과 $R=0.3$ 에서의 피로균열 전파 데이터를 응력확대계수 범위(ΔK)에 대한 피로균열 전파속도를 나타내는 그래프는 Fig. 7로 $R=0.1$ 의 경우 ΔK 가 $7 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 인 부분에서 균열전파속도가 지연되었으며, 이는 균열이 주로 상대적으로 강도가 낮은 편상 흑연 내지는 편상 흑연과 모재인 페라이트와의 계면을 따라 전파한다고 추정하면, 불규칙하게 분포하는 편상 흑연의 영향으로 균열전파방향이 하중방향과 직선이 아닌 다른 방향으로 심하게 빗나감으로서 균열선단에서의 모드 I에 대한 응력확대계수를 감소시켜 결과적으로 균열전파를 지연한 것으로 판단된다. 한편 하한 응력확대계수 하한값 ΔK_{th} 은 약 $6 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 로 응력확대계수 범위가 이 이하 값일 경우 균열은 전파되지 않는다고 판단된다. 응력확대계수가 $R=0.1$ 일 경우 약 $20.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $R=0.3$ 일 경우 약 $22.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 까지 진행된 후 파단에 이른 것을 알 수 있었다. 이는 본 재료의 실험재료 두께에 대한 파괴인성치가 약 $22.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 접근하여 즉 피로균열전파 중에 균열선단에서의 응력확대계수가 파괴 인성치에 접근하여 파단되었음을 알 수 있다. 따라서 본 재료의 파괴 인성치는 $22.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 혹은 이 값을 약간 상회함을 추측할 수 있다. Paris 식을 만족하는 II영역에서는 균열전파속도가 거의 선형적으로 증가하는 영역이나 II영역이 뚜렷이 구분이 되지 않으며 비선형으로 나타났다. 이를 크게 ΔK 가 약 $10 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 를 기준으로 두 영역으로 나누어서 첫번째 부분과 두 번째 부분의 정상상태 II영역에서의 응력비 $R=0.1$ 일 때 피로균열 전파속도는 첫 번째 구간에서 $da/dN = 5.69 \times 10^{-14} \Delta K^{6.1}$ 이며 두 번째 구간에서 $da/dN = 1.64 \times 10^{-8} \Delta K^{1.0}$ 으로 각각 나타났다. 한편, 응력비 $R=0.3$ 일 때는 첫 번째 구간에서 $da/dN = 4.07 \times 10^{-10} \Delta K^{2.8}$ 이며 두 번째 구간에서 $da/dN = 3.7 \times 10^{-8} \Delta K^{0.9}$ 로 나타났다.

Fig. 7은 $R=0.1$ 과 0.3 에서의 응력확대계수 범위 ΔK 에 대한 균열전파속도 da/dN 을 나타낸 것으로 응력비가 증가하면서 동일한 응력확대계수 범위에서 균열전파속도가 증가함을 알 수 있다. 또한 하한 응력 확대계수 K_{th} 는 응력비가 증가하면서 약간 감소함을 알 수 있다.

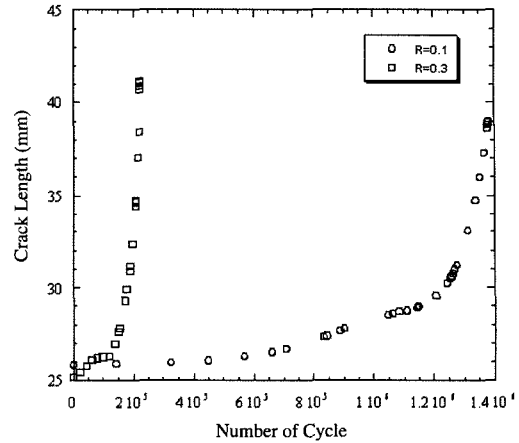


Fig. 6. a-N curves of gray cast iron at R=0.1 and 0.3.

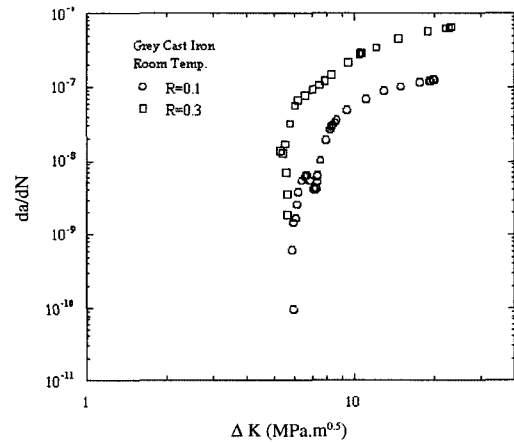


Fig. 7. Fatigue crack growth rates of gray cast iron at R=0.1 and 0.3.

3.3. 파괴 인성치

브레이크 디스크용 회주철의 균열전파의 저항성을 나타내는 파괴 인성치를 측정하기 위하여 피로 균열전파속도 실험에 사용했던 시험편과 동일한 CT 시험편을 사용하였다. 초기균열길이 $a_0 = 25.3 \text{ mm}$ 로 가공하여 COD(crack opening displacement) gage를 장착하여 하중제어 방식으로 9 kN/min 의 속도로 실험하였다. Fig. 8은 실험 결과에 대한 하중과 균열 개구변위 δ 를 나타낸 것으로 최대하중 $P_{max} = 46111 \text{ N}$ 으로 나타났다. 일반적으로 하중 P와 균열개구변위 δ 와의 곡선은 하중-변위 곡선의 기본적 형식 I형, II형, III형 가운데 하나로 분류된다¹²⁾. 본 회주철의 경우 형식 I형으로 K_Q 를 결정하는데 필요한 P_Q 를 구하기 위하여 초기의 선형 기울기의 5% 감소시켜 만나는 점에 해당한다. 선형 기울기의 95%에 해당하

는 직선과 교차하는 점 P를 이용하여 K_Q 를 결정하면 $K_Q = 24.7 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 로 나타났다. 한편, 본 실험에서 결정된 K_Q 가 평면변형률 파괴인성치(KIC)를 만족하기 위해서는 시험편 두께 B, 초기균열길이 a_0 , 시험편 너비 W는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$B, a_0 \geq 2.5(K_Q / \sigma_y) \quad (2)$$

$$W \geq 5(K_Q / \sigma_y) \quad (3)$$

여기서 σ_y 는 항복강도로 본 재료의 항복강도로 185 MPa를 이용하면 두 식을 만족할 수 없으므로 본 실험 결과에서 구한 파괴 인성치 K_Q 는 단순히 본 실험에 사용한 두께 6.5mm의 시험편에 대한 파괴 인성치 K_c 에 해당된다. 따라서 본 재료의 평면변형률 파괴 인성치를 결정하기 위해서는 본 시험편보다 두께가 두꺼운 시험편을 이용해야 한다고 판단된다. 본 실험에서 구한 $K_Q = 24.7 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 는 Fig. 7에서의 응력확대계수가 약 $20.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 까지 진행된 후 갑작스러운 파단에 이르는 사실을 고려하면 응력비의 영향을 감안하면 타당한 결과라고 할 수 있다. 본 재료와 유사한 회주철의 파괴 인성치에 대한 연구¹³⁾에 의하면 두께 20mm의 CT 시험편의 경우 $K_c = 15.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 로 보고된 바 있다. 두께에 대한 차이로 인해 비교하기가 다소 곤란하나, 두께가 두꺼울수록 파괴 인성치가 감소함을 고려할 때 본 실험에서 사용된 얇은 시험편(=6.5mm)은 평면응력 상태가 주도되어 파괴 인성치가 유사 재료의 파괴 인성치에 대한 결과¹³⁾에 비해 다소 크게 측정된 것이라 추측할 수 있다. 혹은 금속 성분이나 주조시의 미세조직의 차이로 기인한다고 할 수 있다.

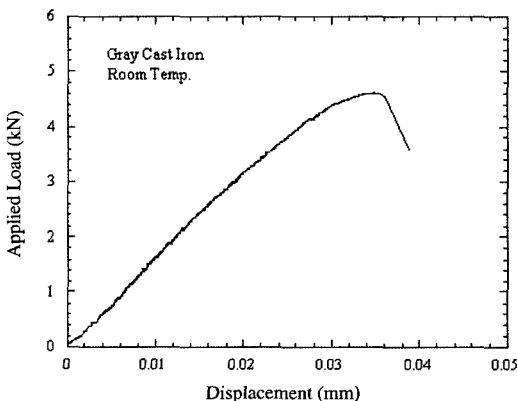


Fig. 8. Load vs. COD curve of gray cast iron.

3.4. 피로균열 경로 및 파단면 해석

피로실험 후 피로 파단된 파면과 균열전파 경로를 관찰하기 위하여 광학 현미경과 주사 전자 현미경으로 파면을 관찰하였다. Fig. 9는 균열의 전파 경로를 나타내는 사진으로 화살표 방향으로 균열이 전파된 상태에서 전반적으로 상대적으로 강도가 약한 모재인 철과 흑연의 계면을 따라 진행했음을 나타내고 있다. 이는 흑연의 분포가 본 재료의 피로균열전파 거동에 영향을 미치는 결과로 흑연의 산재의 정도에 따라 균열전파 경로를 변경하여 균열전파 속도를 지연하는 결과를 얻을 수 있다고 판단된다. Fig. 10은 피로파면을 나타내는 것으로 전반적으로 거칠(rough)은 양상을 띠고 있으나 미시적으로는 Fig.



Fig. 9. Fatigue crack propagation path of gray cast iron.

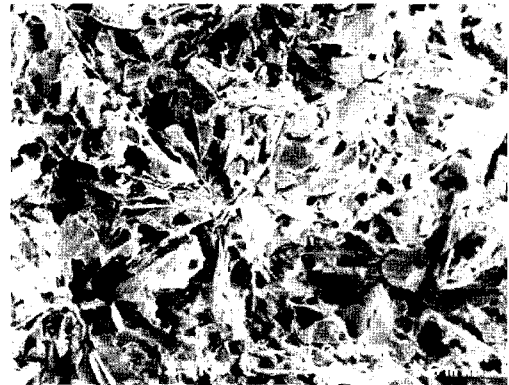


Fig. 10. Fatigue fracture surface of gray cast iron.



Fig. 11. Cleavage fracture surface of the fatigued gray cast iron.

11과 같이 벽개파면(cleavage fracture surfaces)을 나타내고 있다. 이는 균열이 전반적으로 강도가 상대적으로 약한 흑연과 철의 입계면을 따라 진행하는데 흑연의 분포가 대단히 불규칙하여 거칠거칠하게 진행되거나 일단 균열이 지나가는 곳은 회주철 자체의 취성으로 미시적으로는 벽개파면을 형성한다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 브레이크 디스크 재질인 회주철의 균열에 대해 응력비를 달리한 모드 I에서의 피로균열 전파시험을 실시하여 회주철의 파괴 인성치, 하한 피로 응력 확대계수 값 ΔK_{th} 및 균열 전파속도 등을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 균열전파속도는 II영역에서 곡선으로 나타났으며 이를 크게 두 구간으로 구분하여 응력확대계수 범위로 표현하면 응력비 $R=0.1$ 인 경우, 첫 번째 구간 및 두 번째 구간은 각각 $da/dN=5.69 \times 10^{-14} \Delta K^{6.1}$ 과 $da/dN=1.64 \times 10^{-8} \Delta K^{1.0}$ 로 나타낼 수 있다.

2) 응력비를 증가시키면 ΔK_{th} 는 감소하고 균열전파속도는 증가하는 것으로 나타났으며 응력비 $R=0.1$ 에서의 하한 응력확대계수 값 ΔK_{th} 는 약 $6 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 로 나타났다.

3) 본 브레이크 디스크에 사용된 회주철의 파괴 인성치 K_{Ic} 는 $24.7 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 로 결정되었으며 인장 및 항복강도는 각각 205, 185MPa로 나타났으며, 연신율이 0.65%임을 볼 때 매우 취성인 재료로 GC200인 회주철로 판단된다.

4) 회주철의 피로균열은 강도가 상대적으로 약한 불규칙하게 분포된 흑연과 철의 입계면을 따라 진행되는 관계로 디스크 재료를 설계시에는 동일한 인장강도 조건에서 흑연의 분산 정도에 따라 균열전파 경로를 변경하여 균열저항성의 증가가 가능하다.

참고문헌

- 1) C. K. Kim, "The effect of thermoelastic and wear on the leakage of compressible gases in shaft seals," KSME J., Vol. 2, No. 2, pp. 33~139, 1988.
- 2) T. Lui, S. K. Rhee, "High temperature wear of semimetallic disk brake pads", Proc. of the Conf. on Wear of Mat., pp. 552~554, 1977.
- 3) K. Seong, et al., "The role of friction film in friction, wear, and noise of automotive brakes", SAE 90004, pp. 29~38, 1990.
- 4) T. J. Mackin et al., "Thermal cracking in disc brakes", Eng. Failure Analysis, Vol. 9, pp. 63~76, 2002.
- 5) 조종두, "자동차 브레이크의 설계요소", 대한기계학회지, 제39권, 제7호, pp. 49~57, 1997.
- 6) M. G. Jacko, S. K. Rhee, "Encyclopedia of Composite Materials and Components, Wiley, pp. 144~154, 1983.
- 7) B. J. Briscoe, I. Ramirez I. P. J. Tweedle, Friction of aramid fiber composites, proc. Int. Conf. On Disc Brakes for Commercial Vehicles, London, I. Mech. Eng., London, Vol. pp. 15~29, 1988.
- 8) M. J. Haigh, H. Smales, M. Abe, "Vehicle judder under dynamic braking caused by disk thickness variation," Proc. Inst. Mech. Eng. Conf., Vol.C444/022, pp. 247~258, 1993.
- 9) Y. Jimbo, T. Mibe, K. Akiyama, H. Matsui, M. Yoshida, A. Ozowa. SAE-Tech. Paper. 900002. 1990.
- 10) Metal Handbook, 10th Edition, Vol. 1, pp. 12~32, ASM, 1990.
- 11) ASTM E399-83 "Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials".
- 12) ASTM E647-93 "Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates".
- 13) J. H. Bulloch, "Near threshold fatigue behaviour of flake graphite cast irons microstructures", Theor. Appl. Fract. Mech. Vol. 24, pp. 65~78. 1995.