

자동차용 커넥팅로드 소재의 피로특성에 관한 연구

김현수¹ · 박인덕² · 김창훈³ · 김태규^{1†}

¹부산대학교 나노시스템공정공학과

²부산시청 공업과

³한국부품소재산업진흥원

A Study on Fatigue Characteristic of Connecting Rod Material for Automobile

Hyun-Soo Kim¹, In-Duck Park², Chang-Hoon Kim³, Tae-Gyu Kim^{1†}

¹Dept. of Nano System & Process Engineering, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea

²Industry & Technology Div. Busan Metropolitan City Hall, Busan 611-735, Korea

³Korea Materials & Components Industry Agency, Seoul 137-070, Korea

Abstract Fretting is a kind of surface degradation mechanism observed in mechanical components and structures. The fretting damage decreases into 50-70% of the plain fatigue strength. The connecting rod for automobile has been used in special environments and various loading conditions. Failure of connecting rod in automotive engine may cause catastrophic situation. In this study, we investigated the fatigue characteristic of connecting rod material for an automobile. Fatigue life is defined as the number of cyclic stress to failure by regular cyclic stress. Fatigue life of C70S6 specimen was obtained from 134,000 to 147,000 cycles. Fatigue limit showed 432MPa by normal fatigue test. The other hands, it was 96MPa in the case of fretting fatigue test. It was extremely lower than that of a normal fatigue test. From observation of fracture surface, it was confirmed that the fatigue crack was initiated at the boundary of a specimen and bridge pad.

(Received May 1, 2006; accepted May 25, 2006)

Key words: Connecting rod, Fretting fatigue, Fatigue limit, Bridge pad

1. 서 론

자동차 엔진에 사용되는 커넥팅로드(Connecting Rod)는 연료의 폭발로 피스톤의 직선운동을 크랭크 축의 회전운동에 전달(피스톤에 작용하는 가스압력과 관성력을 소단부로부터 샤프트를 거쳐 대단부를 통하여 크랭크샤프트에 전달)하는 중요한 부품이다[1].

커넥팅로드에는 연소가스의 폭발력으로 인한 압축 응력, 인장응력, 굽힘응력 및 비틀림 응력이계속적으로 반복하여 작용하기 때문에, 변형이나 피로균열이 발생하는 경우가 많다. 엔진의 사용 중에 즉, 자동차의 주행 중에 커넥팅로드의 일부 또는 전체가 파손되는 것은 해당 실린더의 기능상실로 이어지면서 엔진 자체에 대한 신뢰성에 큰 문제점을 주게 된다. 커넥팅로드가 파단되는 많은 경우는 대단부측의 파단

으로 보고되고 있지만, 일부는 소단부측의 목 부위에서 파단되는 경우도 있다[2-4].

프레팅이란 접촉하고 있는 두 표면 사이의 상대적인 미끄럼 현상을 말하며, 일반적으로 강하게 체결되어진 기계 구조물들의 접촉면들이 미소한 진폭의 반복 상대운동을 일으킬 때 발생한다. 프레팅 작용에 의해서 구조부재의 피로 강도는 현저하게 저하하며, 이 현상을 프레팅 피로라고 한다. 프레팅 피로손상이 발생하는 부재에서는 일반 피로수명의 20-50% 정도로 피로수명이 감소하며, 접촉부 내면에서 초기 균열이 발생하기 때문에 균열의 검출이 초기에 거의 불가능한 점을 고려하면, 환경이 열악한 상황(고온, 고압, 화학적 환경 등)에서 운용되는 구조물의 접촉부를 고려한 수명평가 기법에 관한 연구는 신뢰성 확보, 적합한 정기검사 및 보수주기 설정 등의 면에서도 절

[†]E-mail : tgkim@pusan.ac.kr

실하고 시급한 과제라고 할 수 있다[5-10].

현재 S사에서 사용 중인 커넥팅로드 재료는 CK45로써 여러 종류의 차종에 적용되고 있다. CK45는 조질강으로서 필요한 강도를 얻기 위해서는 열처리를 실시하고 있다. 앞으로 자동차의 추세가 고 출력화 및 고기능화의 방향으로 나아감에 따라 비조 질강을 사용함으로써 열처리 공정 감소, 단가절약 차원, 또 기존 차종의 간헐적인 커넥팅로드의 파손 등으로 인하여 커넥팅로드의 재질을 C70S6로 대체하려고 한다.

따라서, 본 연구에서는 곧 자동차용 커넥팅로드에 적용될 재료의 피로특성(일반 피로 및 프레팅 피로시험, 균열 발생시기 및 발생 후 진전특성 등)을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 실험 재료

본 실험에 사용한 재료는 S사 자동차 엔진의 커넥팅로드에 사용되는 C70S6이다. 단조 후 673 K에서 90 min간 유지 후 공랭하는 열처리를 실시하였다. 시험편에 대한 화학조성을 Table 1에 나타내었다. C70S6는 일반 강에 C를 0.7% 함유되어 있으며, 절삭성 향상을 위하여 미량의 S를 첨가한 강재이다.

2.2 조직관찰/경도측정

조직관찰은 시험편을 경면 연마 후, 3% 나이탈 용액을 사용하여 5초 동안 애칭 후 광학현미경을 통하여 관찰하였다.

경도 측정은 비커스 경도기(Future Tech. 社, Model FM-7)를 이용하여 총 20회 측정한 후, 최대 및 최소값을 제외한 나머지 값들의 평균값을 구하여 사용하였다. 시험편의 기계적 성질을 Table 2에 나타내었다.

2.3 균열진전시험

피로균열 진전특성을 평가하기 위한 피로시험은 최대용량 100kN의 만능피로시험기(Model : 8516, INSTRON)를 사용하였다. 실험은 실온대기 중에서 응력반복속도 10 HZ, 응력비(R) 0.1의 정현파(sine wave)로 하였다. 본 실험에 앞서 모든 시험편에 2

Table 1. Chemical compositions of C70S6

Spec.	C	Si	Mn	P	S	Ni
C70S6	0.67	0.18	0.54	0.020	0.055	0.060

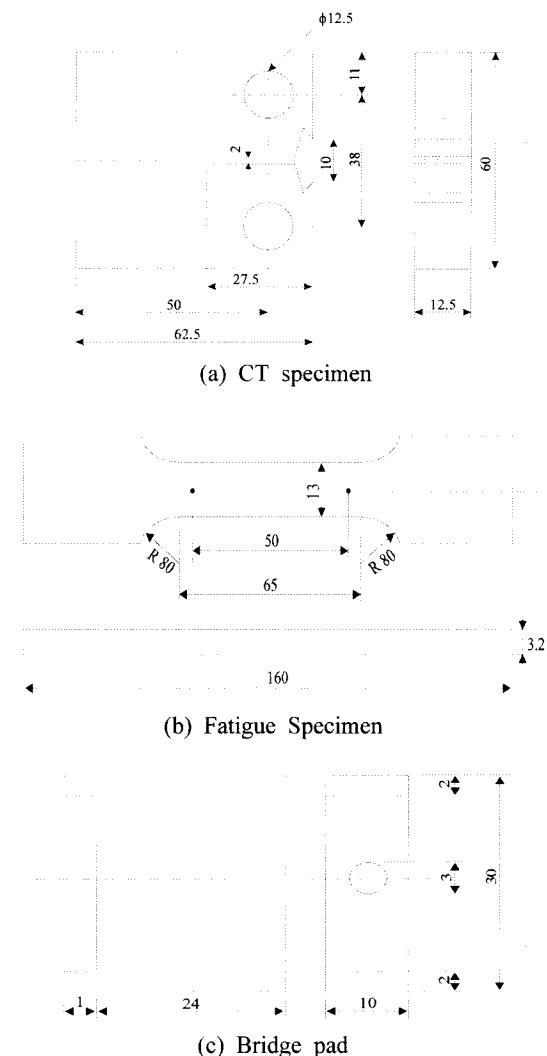


Fig. 1. Schematic dimension of (a) CT specimen, (b) fatigue specimen and (c) bridge pad (Unit : mm).

mm의 예비균열을 삽입하였다. 본 실험에 적용한 시험하중은 $P_{max} = 8.82 \text{ kN}$ 이다. 균열길이는 COD gage를 이용한 컴플리언스 법을 사용해서 측정하였으며, 응력화대계수는 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 피로균열진전속도(da/dN)는 얻어진 a-N선도에서 증분다항식법을 사용하여 구하였다. 균열길이가 0.2 mm증가할 때마다 균열길이 a, 응력반복수 N, 응력

Table 2. Mechanical properties of C70S6

Spec.	Y. S. (MPa)	T. S. (MPa)	ε (%)	Matrix (Hv)	Pad (Hv)
C70S6	585	960	13.5	260	650

확대계수 변동폭 ΔK 등을 기록하였다. 본 실험에 사용한 CT 시험편은 ASTM E 647 규격에 의하여 제작하였으며, 그 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

$$K = \left[\frac{P}{(B \cdot W^{1/2})} \right] \cdot f(X) \quad (1)$$

$$f(X) = \frac{(2+X)(0.886 - 4.64 \cdot X - 13.32 \cdot X^2 + 14.72 \cdot X^3 - 5.6 \cdot X^4)}{(1-X)^{3/2}} \quad (X = a/W)$$

2.4 일반 및 프레팅 피로시험

피로시험용 시험편은 KS B 0801 7호 규격에 의하여 폭 13 mm, 평행부 65 mm, 모서리반경 80 mm, 두께 3.2 mm로 동일하게 가공하였다. 프레팅 피로시험편의 규격 및 시험방법은 최근 JSME S 015에 지금까지의 프레팅 시험방법들을 토대로 소개하고 있는 정도일 뿐 현재까지 명확하게 규정되어진 것은 없다[11]. 따라서 프레팅 피로시험에서는 단순 피로시험에서와 동일한 시험편을 사용하였다.

프레팅 피로시험에 사용할 패드는 양단에 2 mm의 평행부가 있으며, 접촉면을 대칭으로 배치하여 안정된 접촉상태에서 시험을 할 수 있는 브릿지 패드를 사용하였다. 브릿지 패드 재료는 시험편과 브릿지 패드의 경도 차이를 부여하기 위하여 피로시험용 소재에 침탄처리 하여 사용하였다. 침탄처리는 삼천리사의 Batch로를 사용하여 1203 K에서 4시간, 1143 K에서 0.5시간 유지 후 363 K로 오일 냉각시킨 후 다시 443 K에서 2시간 유지 후 공랭하였다. 시험편의 평행부와 패드 접촉부는 표면 거칠기가 피로수명에 미치는 효과를 최소화하기 위하여 에머리 페이퍼로 #2000까지 단계적으로 연마 후 사용하였다. 시험편 및 브릿지 패드의 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

피로시험기는 최대용량 100 kN의 만능피로시험기를 사용하였으며, 시험조건은 단순 및 프레팅 시험편 모두에 대하여 응력비 $R = 0.1$ 의 정현파로 인장·인장 형태를 채택하였으며, 주파수는 10 Hz로 일정하게 유지하였다. 단순 피로실험시 부하응력을 동일 시



Fig. 2. Photograph of fatigue test machine (INSTRON 8516).

험편으로 정적인장시험 실시 후 인장데이터를 이용하여 23.5, 22.0, 20.0, 19.0 및 18.0 kN으로 결정하였고, 프레팅 피로시험의 경우는 23.5, 20.0, 16.0, 12.0, 8.0 및 4.0 kN으로 실험을 실시하였다. 시험편과 브릿지 패드사이의 접촉면압은 30 MPa로 실험 시작에서 종료시까지 일정하게 유지하였다. 피로시험 후 파단면은 SEM을 통하여 관찰하였으며, 피로시험 기 사진을 Fig. 2에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직 관찰

시험편의 미세조직을 3% 나이탈 용액으로 애칭하여 광학현미경으로 관찰한 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 조직은 Fig. 3에서 나타나는 바와 같이 전체적으로 펄라이트위주로 나타났으며, 미량의 페라이트가 혼합되어 있는 것으로 나타났다.

3.2 균열진전 시험

본 실험에 사용한 시험편은 CT형태로써, 초기 균열은 15 mm이고, 모든 시험편에 대해서 예비균열을 2 mm삽입하였다. 균열길이 $a = 17$ mm에서 30 mm까지의 하중반복수를 피로수명($N_a = 30$ mm)으로 나타내었다. Fig. 4는 피로실험 후 얻어진 피로균열 진전길이(a)와 하중반복수(N)파의 관계를 나타낸 a-N 선도이다. Fig. 4에서 나타나는 바와 같이 규칙적인 반복응력을 가했을 때 파괴가 발생하기까지의 응력반

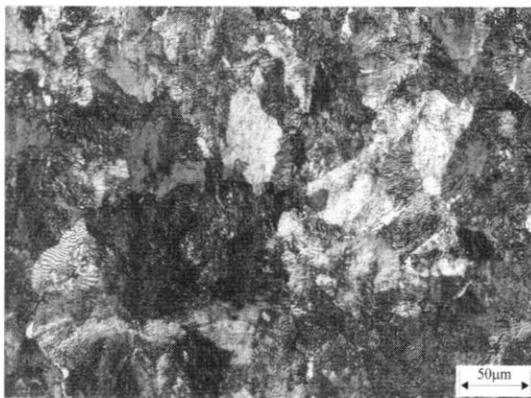


Fig. 3. Optical micrograph of as heat treated material.

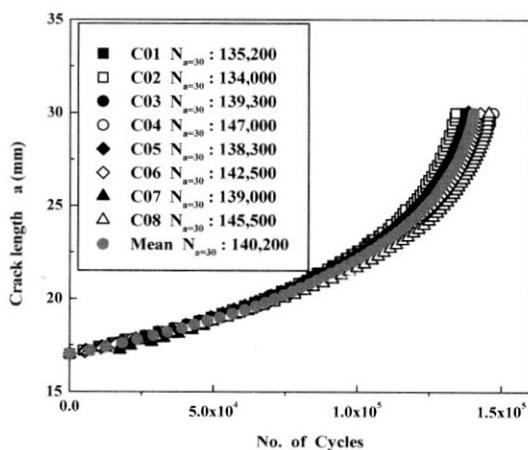


Fig. 4. a-N curves of C70S6 material.

복수로 정의되는 피로수명은 시험편 8개(C01 ~ C08)를 반복 실험한 결과 134,000 ~ 147,000 cycles 정도로 나타났으며, 평균치는 140,200 cycles로 나타났다. 동일 하중에서 실험을 실시하였지만 이와 같은 피로수명의 차이를 타나내는 것은 시험편 가공시 가공경화의 영향으로 균열선단 응력장의 상태가 시험편마다 다소 상이했기 때문이라고 판단된다.

Fig. 5는 일정 하중하에서 파단까지 시험편에서 얻어진 응력학대계수변동폭(ΔK)과 피로균열진전속도(da/dN)와의 관계를 8개의 시험편을 반복시험한 결과를 나타낸 것이다. 그래프상에 Paris법칙에 의한 응력학대계수와 피로균열진전속도와의 관계식도 함께 나타내었다. ΔK 와 da/dN 그래프의 II_b단계에서 직선의 기울기로 정의 되는 m 값은 3.96 ~ 4.57 정도로 나타났으며, $\log C$ 값은 -9.5045 ~ -10.3249 정도로

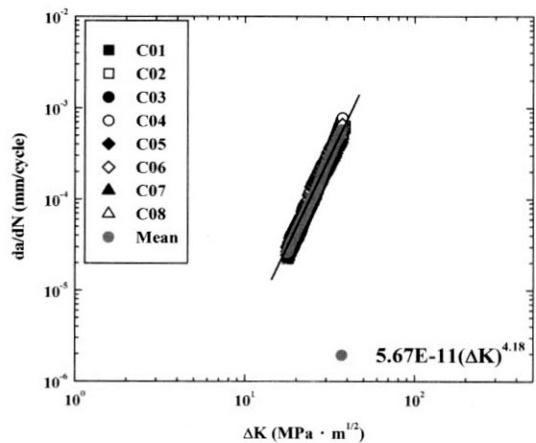


Fig. 5. Fatigue crack growth rate versus stress intensity factor range.

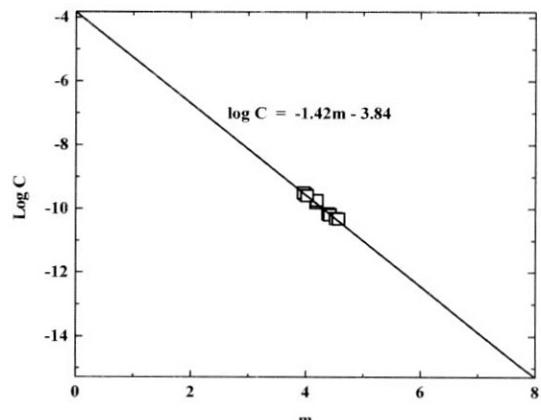


Fig. 6. Relationship of m and C in the Paris-equation.

나타났다.

Fig. 5에서 얻어진 m 과 C 와의 사이에는 Fig. 6과 같이 매우 안정된 관계가 있다. 즉, m 과 C 사이에는 반비례 관계가 성립하며 m 이 클수록 C 가 적어지는 경향을 보이고 있다. m 이 작다는 것은 고연성 또는 연질의 재료를 의미하며, C 값은 재질의 존성을 나타낸다¹²⁾. 본 실험에서 얻어진데이터로 정리한 결과 $\log C = -1.42m - 3.84$ 의 관계를 유지하고 있음을 알 수 있었다.

3.3 단순 및 프레팅 피로시험

Fig. 7은 단순 및 프레팅 피로시험 결과를 나타낸 것이다. Fig. 7에 나타나는 바와 같이 재료의 허용한도라고 할 수 있는 피로한도는 432 MPa로 비교

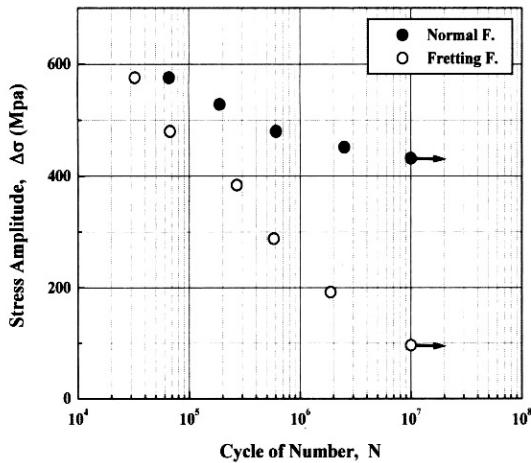


Fig. 7. S-N curves of normal and fretting fatigue.

적 높게 나타났다. 허용한도가 높다는 것은 사용할 수 있는 응력이 높다는 것을 나타내고, 또한 같은 하중에서 사용할 때 보다 더 안전하다는 것을 의미한다.

단순 및 프레팅 피로시험을 비교해 보면, 프레팅 피로시험의 피로한도(96 MPa)가 단순 피로시험에서 보다 현저하게 낮게 나타났다. 이와 같은 이유는 피로 초기에 프레팅 현상에 의해서 많은 미소 균열이 발생하였기 때문이라고 판단된다.

피로파괴에 있어서 프레팅의 영향은 고 응력진폭 영역에서는 프레팅 피로와 단순 피로 수명의 차이가 크게 나타나지 않지만, 저 응력진폭 영역으로 갈수록 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

피로수명의 감소는 약 77.8% 정도로 나타났다. 이것으로 볼 때, 자동차용 커넥팅로드에 사용되고 있는 재료는 프레팅 손상을 받았을 경우, 단순피로에 비하여 현저하게 피로수명의 감소를 나타내었다. 현실적으로 모든 기계·구조물의 결합부를 없애는 것은 불가능하다는 점을 미루어 볼 때, 프레팅 피로는 많은 위험성이 내재되어 있다고 할 수 있다. 따라서 프레팅 손상에 의한 프레팅 피로수명평가는 기계·구조물의 안전성이라는 견지에서 본다면, 보수뿐만 아니라 설계단계에서부터 반드시 고려되어야 할 사항이라고 생각된다.

3.4 파면관찰

Fig. 8은 균열진전 시험편의 파단면을 주사전자현

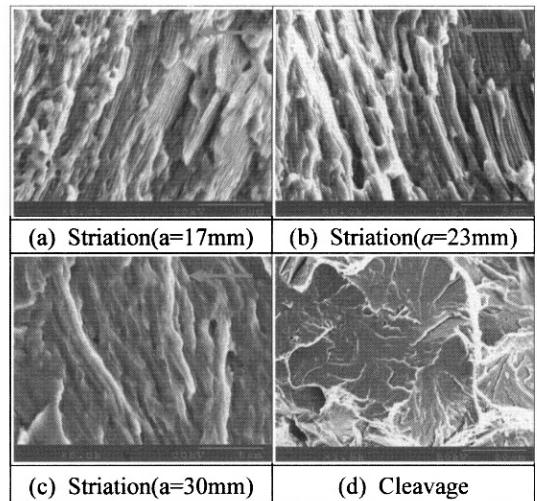
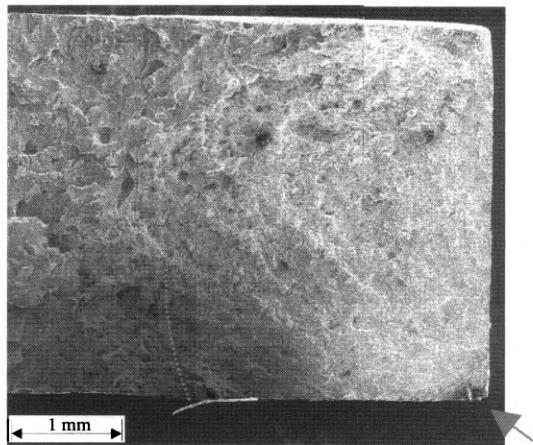


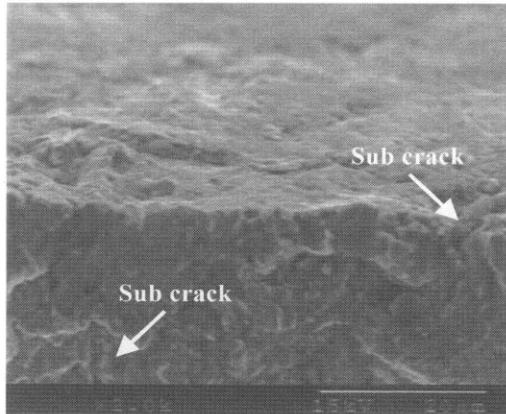
Fig. 8. SEM micrographs of fracture surface by crack growth test.

미경(SEM)으로 관찰한 것이다. 사진에서 화살표 방향은 피로균열의 진전 방향을 나타내고 있고, 균열길이는 하중선에서부터의 길이를 의미한다. Fig. 8(a)는 피로균열 초기($a = 17 \text{ mm}$), (b)는 균열 중기($a = 23 \text{ mm}$), (c)는 균열 말기부분($a = 30 \text{ mm}$)을 관찰한 것이다. 각각의 3부분 모두 피로파면 특유의 스트라이에이션이 모두 관찰되었다. 사진에서 나타나듯이 균열 길이가 증가할수록 스트라이에이션 간격도 증가하고 있음을 알 수 있었다. 스트라이에이션 간격은 피로하중이 1사이클 동안의 균열진전량을 나타내는 것으로서 스트라이에이션 간격이 크다는 것은 그 만큼 균열진전속도가 빠른 것을 의미한다. Fig. 8(d)는 최종파단부를 관찰한 것으로서 딥플, 벽개파괴 등이 관찰되었다.

Fig. 9는 프레팅 피로시험 후 파단면을 SEM으로 관찰한 것이다. 사진에서 화살표는 균열발생 시점을, 점선은 균열진전부와 최종파단부의 경계를 나타내고 있다. 모든 시험편에 대하여 관찰하였지만, 대표적으로 C60F(최대인장강도 60%의 하중으로 프레팅 피로실험)에 대하여 나타내었다. 모든 시험편에서 패드와 시험편의 접촉부에서 균열이 발생하였다. Fig. 9(a)는 초기균열이 시험편의 모서리에서 발생하여 성장한 경우를 나타낸 것이다. Fig. 9(b)는 접촉부 주위를 관찰한 것으로서 주 균열 이외에 작은 균열들이 다수 관찰되었다. 즉, 프레팅에 의해서 초기에 많



(a) Crack initiation



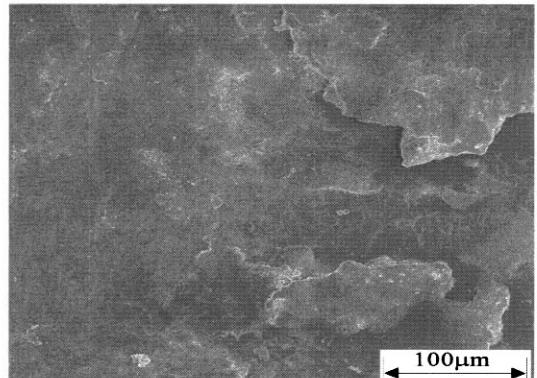
(b) Sub crack

Fig. 9. SEM micrographs of fracture surface in C60F.

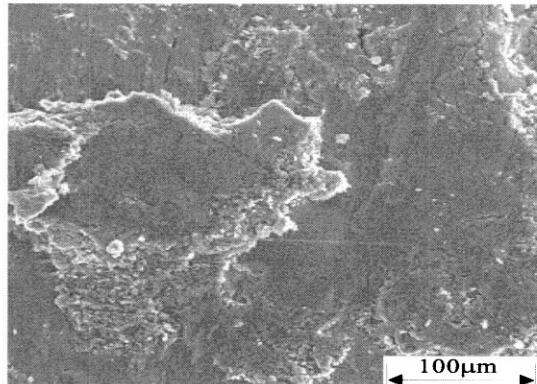
은 균열들이 발생하지만, 특정 균열만이 지속적으로 성장 한 후 파단에 이르며 상당수의 균열은 성장하지 못하고 파단면에 남게 된다고 판단된다.

Fig. 10은 프레팅 피로실험시 브릿지 패드와 시험편이 접촉한 부분을 관찰한 것이다. 사진에서 나타나는 바와 같이 시험편 및 브릿지 패드 모두 마찰에 의한 산화피막이 생성되었고, 일부 산화피막은 마모분으로 떨어져나간 형상을 나타내고 있다.

Fig. 11은 시험편과 브릿지 패드의 접촉 부분을 각각 EDX 분석하여 나타낸 것이다. EDX분석결과 시험편 및 브릿지 패드 양측에서 모두 O원자 피크와 Fe원자 피크가 높이 나타나는 것으로 보아마모분의 성분은 정확히 알 수는 없지만, 마모분은 산화철인 것으로 추정된다.



(a) Specimen



(b) Bridge pad

Fig. 10. SEM micrographs of fracture surface in specimen and bridge pad.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차용 커넥팅로드에 사용되는 재료의 피로특성을 조사한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. C70S6 소재에 규칙적인 반복응력을 가했을 때 파괴가 발생하기까지의 응력반복수로 정의되는 피로수명은 134,000 ~ 147,000 cycles 정도로 나타났으며, 평균치는 140,200 cycles로 나타났다. Paris식의 기울기로 정의 되는 m 값은 3.96 ~ 4.57로 나타났으며, $\log C$ 값은 -9.5045 ~ -10.3249로 나타났다.

2. 단순 피로시험 결과, 재료의 사용 허용한도라고 할 수 있는 피로한도는 432 MPa로 비교적 높게 나타났다. 허용한도가 높다는 것은 사용할 수 있는 응력이 높다는 것을 나타내고, 또한 같은 허중에서

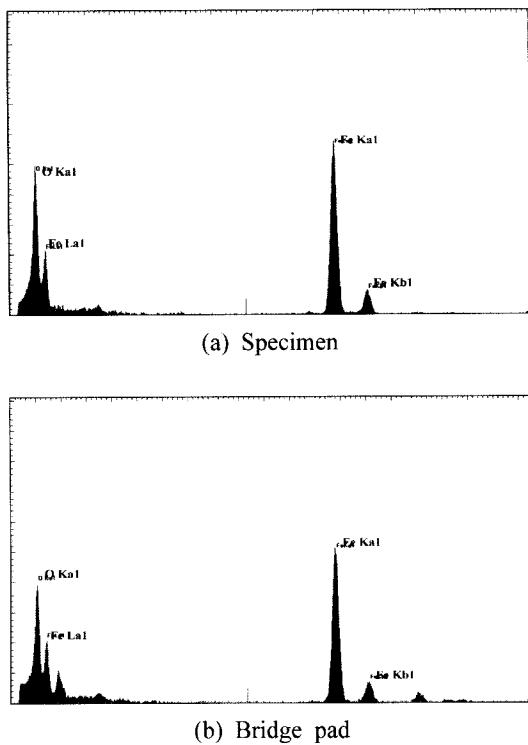


Fig. 11. EDX results of fracture surface in specimen and bridge pad.

사용할 때 보다 더 안전하다는 것을 의미한다.

3. 자동차용 커넥팅로드에 사용되고 있는 재료는 프레팅 손상을 받았을 경우, 단순피로에 비하여 현저하게 피로수명의 감소를 나타내었다. 프레팅 피로한도는 96 MPa, 피로수명의 감소는 약 77.8% 정도

로 나타나났다.

4. 파면관찰 결과, 프레팅에 의해서 초기에 많은 균열들이 발생하지만 특정 균열만이 지속적으로 성장한 후 파단에 이르며 상당수의 균열은 성장하지 못하고 파단면에 남아있는 형상도 관찰되었다.

참고문헌

- 조영갑 : 대한기계학회지, **20**(6) (1980) 442.
- 김철수, 이준형, 김정규 : 대한기계학회논문집 A권, **25**(10) (2001) 1651.
- Tatsunami, T., Matsui, K. and Akahane, H.: Technology of Automobile, **43**(4) (1986), 80.
- 조재웅, 최두석, 김기선 : 한국자동차공학회지, **13**(6) (2005) 154.
- Wittkowsky, B. U., Brich P. R., Dominguez J. and Suresh S. : Fatigue Fract. Engng. Struct., **22** (2004) 307.
- Mall S., Namjoshi S. A. and Porter W. J.: Materials Science and Engng. A **383** (2004) 334.
- Garcia D. B. and Grandt Jr. A. F.: Engng. Failure Analysis, **12** (2005) 537.
- 이봉훈, 이순복: 대한기계학회논문집 A권, **21**(3) (1997) 511.
- 허용학, Edwards R. E., Brown M. W. and de los Rios E. R. : 대한기계학회논문집 A권, Vol. **27** (7) (2003) 1185.
- 권재도, 최성종, 김경수, 배용탁 : 대한기계학회논문집 A권, **27**(11) (2003) 1979.
- 日本機械學會 : JSME S **015** (2002) 1.
- Kitagawa: Materials, **26**(284) (1977) 482.