

## 철도 차축재료의 프레팅 피로거동 평가

최성종\* · 권종완

경일대학교 기계자동차학부

### Evaluation of Fretting Fatigue Behavior for Railway Axle Material

Sungjong Choi\* · Jongwan Kwon

School of Mechanical & Automotive Engineering, Kyungil University, Gyeongbuk 712-702, Korea  
(Received 29 January 2007 / Accepted 12 April 2007)

**Abstract** : Fretting is a kind of surface damage mechanism observed in mechanically jointed components and structures. The initial crack under fretting damage occurs at lower stress amplitude and lower cycles of cyclic loading than that under plain fatigue condition. This can be observed in automobile and railway vehicle, fossil and nuclear power plant, aircraft etc. In the present study, railway axle material RSA1 used for evaluation of fretting fatigue life. Plain and fretting fatigue tests were carried out using rotary bending fatigue tester with proving ring and bridge type contact pad. Through these experiments, it is found that the fretting fatigue limit decreased about 37% compared to the plain fatigue limit. In fretting fatigue, the wear debris is observed on the contact surface, and oblique cracks at an earlier stage are initiated in contact area. These results can be used as useful data in a structural integrity evaluation of railway axle.

**Key words** : Fretting fatigue(프레팅 피로), Railway axle(철도차축), Rotary bending fatigue tester(회전굽힘 피로 시험기), Friction force(마찰력), Contact stress(접촉면압), Debris(마모 분), Oblique crack(경사균열)

#### 1. 서론

각종 기계 및 구조물 체결부 접촉면의 미소한 반복 상대슬립(relative slip)에 기인하는 프레팅(fretting) 손상은, 상대슬립 진폭, 마찰력, 온도와 습도 등의 환경인자, 재료종류, 접촉형태 등과 관련된 사항을 마모현상에 주안점을 두고 연구하는 프레팅 마모(fretting wear) 분야와 균열의 발생과 성장 및 피로 수명에 주안점을 두고 연구하는 프레팅 피로(fretting fatigue) 분야로 대별 된다.<sup>1)</sup>

이러한 프레팅 손상은 차량구조물, 항공기 구조물 및 발전설비와 같이 진동을 동반하는 모든 구조물의 체결부에서 필연적으로 발생하며, 피로수명을 50~70% 정도로 급감시킨다고 알려져 있다.<sup>2,3)</sup> 또한,

프레팅 손상에 의하여 접촉부 표면에서 초기균열이 발생하기 때문에 조기에 균열검출이 불가능하여 대형사고로 이어진다는 점에 그 위험성이 매우 크다고 할 것이다.<sup>4)</sup>

특히 철도차량 차축과 같이 브레이크 디스크(break disk) 및 차륜(wheel) 이 강제 압입되어진 상태에서 고속으로 장기간 운행되는 경우에는, 부재의 내구수명이 접촉부의 프레팅 피로수명에 의존하기 때문에 안전성 및 장수명의 확보라는 측면에서 확률론적 평가<sup>5)</sup>와 더불어, 프레팅 피로수명 평가가 시급한 과제이다.<sup>6)</sup> 그러나 강제 압입부를 가지는 차축의 프레팅 피로시험은, 시험편(축)이 접촉부와 함께 회전하는 원리 때문에 실제상황을 모사한 시험장치 구축이 번거롭고, 시험 중에 마찰력, 상대슬립 및 접촉면압 등의 측정을 위해서는 장치구성이 고가 및

\*Corresponding author, E-mail: dgiches@kiu.ac.kr

복잡하여진다. 이러한 이유 때문에 선진 외국에서는 실물을 이용한 시험이 주를 이루고 있는 실정이나 시험장치 및 결과에 관한 상세정보의 공개는 매우 드문 실정이다.<sup>7)</sup>

본 연구에서는 차륜 및 브레이크 디스크 강제 압입부에서 프레팅 피로손상 발생이 문제되고 있는 철도차량 차축의 압입부 체결상태를 모사한 프레팅 피로수명 시험장치 및 평가기법을 개발하고자 하였다. 또한 현재 사용되고 있는 철도차축 재료(RSA1) 및 차륜재료(RSW1)로 프레팅 피로시험을 수행하여 설계단계뿐만 아니라 보수 및 점검의 방법과 시기결정에도 이용되어질 수 있는 기초 자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 시험재료 및 시험장치

### 2.1 시험재료

본 연구에 사용되어진 재료는 국내 철도차량에 사용되고 있는 철도차축 재료 RSA1 및 차륜재료 RSW1이다. 이 재료는 차축 및 차륜의 완성품 형태로 세아베스틸(SeAH Besteel)로부터 구입하였다.

구입당시 차축은 노말라이징(normalizing) 및 템퍼링(tempering) 처리되어 있었으며, 차륜의 보스(boss)부는 열처리 하지 않은 상태이다.

두 재료 모두 표면정화 처리 하지 않은 상태였으나, 본 연구에 입하여, 차축재료는 열처리에 의한 재료조직의 불균형을 억제하기 위하여 직경 200 mm 정도의 환봉 표면 10 mm를 절단하여 폐기하였다.

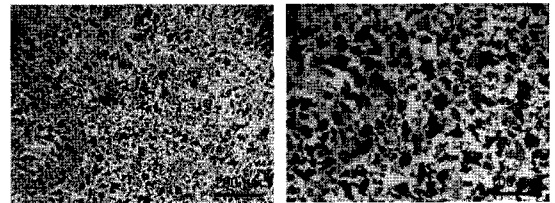
Table 1에는 구입재료의 화학적 조성을 제시하였으며, 규격 값과 SeAH의 분석결과를 병기하였다. 또한 Table 2에는 기계적 강도 값을 제시하였으며, 표내의 KYU로 표시한 값들은 본 연구자에 의하여 얻어진 값이다.

Table 1 Chemical composition of RSA1 and RSW1(wt.%)

Material	Test Lab.	C	Si	Mn	P	S
Axel RSA1	Spec.	0.35~0.48	0.15~0.40	0.40~0.85	Max 0.035	Max 0.045
	SeAH	0.44	0.236	0.75	0.014	0.002
Wheel RSW1	Spec.	Max 0.63	Min 0.15	0.60~0.90	Max 0.045	Max 0.045
	SeAH	0.53	0.32	0.71	0.007	0.009

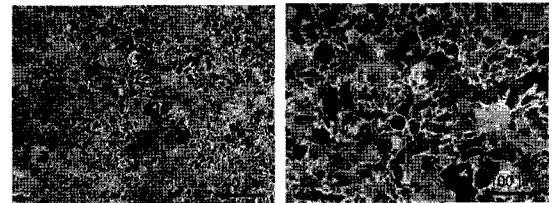
Table 2 Tension test results of RSA1 and RSW1

Material	Test Lab.	0.2% $\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_U$ [MPa]	$\epsilon$ [%]	H <sub>B</sub>
Axel RSA1	Spec.	Min 295	Min 590	Min 20	-
	SeAH	360	618	20	-
	KYU	363	619	30	185(Hv)
Wheel RSW1	Spec.	-	835~960	Min 14	248~285
	SeAH	-	940	21	269



(a) RSA1(×100)

(b) RSA1(×200)



(c) RSW1(×100)

(d) RSW1(×200)

Fig. 1 Optical micrographs of RSA1 and RSW1

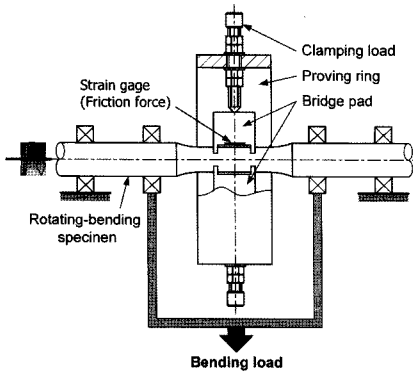
Fig. 1에는 재료의 조직사진을 나타내었다. 조직 관찰은 소재 중앙부에서 채취한 재료에 대하여 수행되었다. 차축재료 RSA1은 일반 구조용 탄소강의 대표 조직인 페라이트(ferrite)와 펄라이트(pearlite)가 등축조직을 이루고 있었다.

그러나 차륜재료 RSW1은 상대적으로 결정립이 크고 거칠었으며, 과공석강(hyper-eutectoid steel)의 조직과 유사하였다.

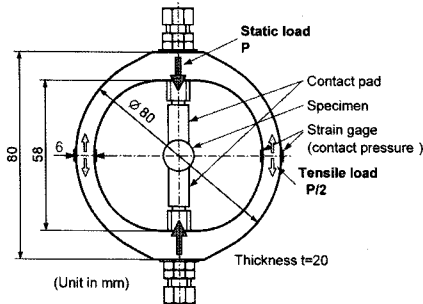
### 2.2 프레팅 피로시험 장치

본 연구에 사용되어진 시험기는 차축 압입부의 프레팅 손상을 모사하기 위하여 기존의 Ohno식 회전굽힘 피로시험기에 프레팅 손상(접촉면압) 발생장치(proving ring, contact pad)를 자체 제작하여 장착하였다.

접촉면압은 Fig. 2(b)의 프로빙 링(proving ring)에 장착된 볼트를 이용하여 접촉패드(contact pad)에 부



(a) Principles of rotary bending type fretting fatigue test



(b) Shape and dimensions of proving ring

Fig. 2 Schematic illustration of fretting fatigue test apparatus

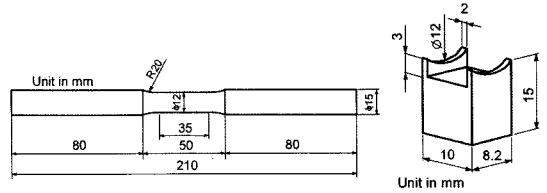
하되며, Fig. 2(a)에 나타내는 것과 같이 시험편, 접촉패드 및 프로빙 링이 동시에 회전하는 타입이다. 접촉면압은 실기를 고려하여 초기 값만 일정 값을 부하하는 형식을 택하였다.

접촉 패드는 Fig. 3(b)에 나타내는 것과 같이 원주면 접촉의 형태를 취하고 있으며, 시험편 표면 원주의 1/4의 원주를 가지도록 가공하여 사용하였다.

또한 대칭으로 설치 가능하고 마찰력의 검출이 용이 하도록 내면에 스트레인 게이지(strain gage)를 부착한 브릿지(bridge) 형태의 접촉 패드를 사용하였다. 프로빙 링 및 브릿지 패드의 스트레인(strain) 신호를 증폭기로 증폭하고, 증폭기는 컴퓨터의 A/D 보드로 연결되어 접촉면압 및 마찰력의 검출 및 저장 가능하도록 하였다.

### 3. 시험편 및 시험방법

본 시험에 사용되어진 시험편 및 접촉 패드의 형상과 치수를 Fig. 3에 나타내었다. 시험편 재료는

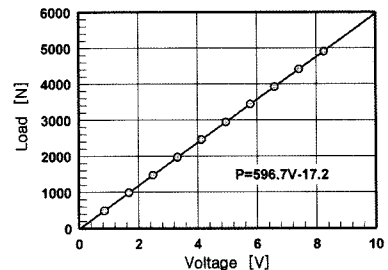


(a) Fatigue and fretting fatigue specimen (b) Contact pad  
Fig. 3 Shape and dimensions of specimen and contact pad

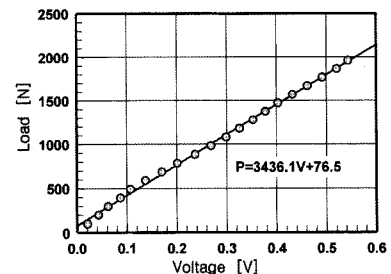
RSA1, 패드 재료는 RSW1이며 시험편의 길이 방향은 차축 방향과 일치한다. 시험편과 브릿지 패드 접촉부는 표면 거칠기 효과를 최소화하기 위하여 #1000~2000까지 에머리 페이퍼(emery paper)를 이용하여 단계적으로 연마 후 최종적으로 산화 알루미늄( $Al_2O_3$ ) 파우더를 이용하여 마무리 연마를 하였으며, 아세톤으로 세척 후 실험에 임하였다.

회전굽힘 피로시험(plain fatigue test)에 사용되는 표준 시험편을 이용하여 일반 피로시험 및 프레팅 피로시험을 약 2000rpm으로 수행하였다.

마찰력의 측정 시에는 시험기를 멈춘 후, 약 5rpm 정도로 수동으로 구동하였다. 컴퓨터 A/D 보드를 이용하여 검출한 전압 데이터로부터 Fig. 4(a)에 표시한 관계를 이용하여 마찰력으로 산출하였다. 또한 최소값과 최대값을 결정하고, 사이 각이 1/2회전( $\pi$



(a) Probing ring



(b) Contact pad

Fig. 4 Calibration curves for proving ring and contact pad

rad)에 해당함을 확인하였으며, 나머지 데이터는 등 간격으로 배치하였다.

접촉면압은 하중이 패드 중앙부의 한 지점에 작용하는 점을 고려하여 접촉부 투영면적(2×8.2)으로 산출하였으며, Fig. 4(b)에 접촉면압의 산출에 필요한 프로빙 링의 하중-검출전압 관계 곡선을 나타내었다. 접촉면압은 초기값 70MPa 일정으로 시험하였으며, 모든 피로시험에 있어서 하중 반복 횟수가 10<sup>7</sup> 사이클에 도달하여도 파괴되지 않은 시험편은 강제 종료하였다.

#### 4. 시험결과 및 토론

##### 4.1 피로수명, 마찰력 및 접촉면압

피로시험 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 피로한도는 일본재료학회 표준의 JSMS-SD-6-04<sup>8)</sup>에서 배포하는 프로그램을 이용하여 구하였으며, 차축재료의 일반 피로(PF) 한도는 약 269 MPa, 프레팅 피로(FF) 한도는 약 169 MPa로 프레팅 손상에 의하여 피로한도가 37% 정도 감소하였다.

또한, Fig. 5 내의 ●으로 표시한 응력진폭 231 MPa 및 173MPa 시험편은 소정의 하중 반복횟수에서 마찰력을 측정된 시험편이며 각 하중 사이클 동안의 마찰력 거동을 Fig. 6(a) 및 (b)에 나타내었다.

시험초기에 마찰력의 변화가 불안정한 것은 무부하 상태로 패드와 시험편이 70MPa의 면압으로 고정되며, 접촉면이 안정화 되지 않은 상황에서 부하되기 때문으로 판단된다. 3000 사이클까지 반복하중 횟수의 증가와 함께 최소값은 음수(압축) 값으로

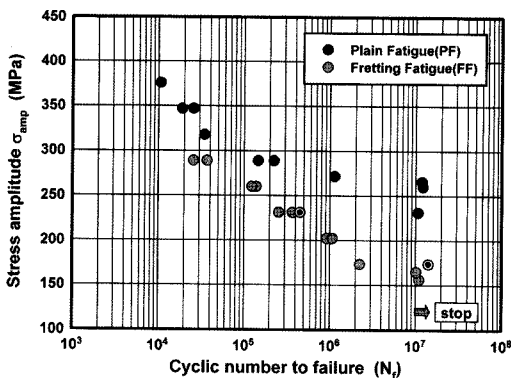
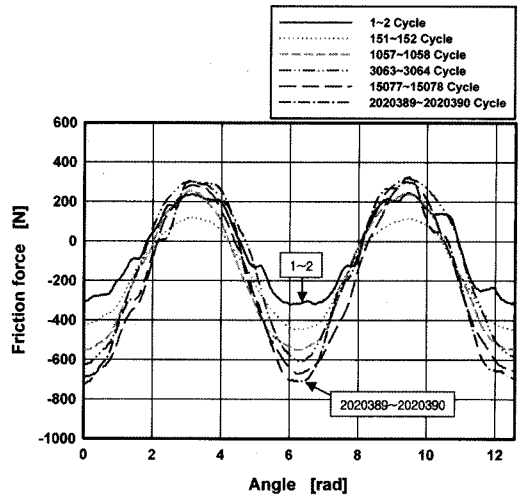
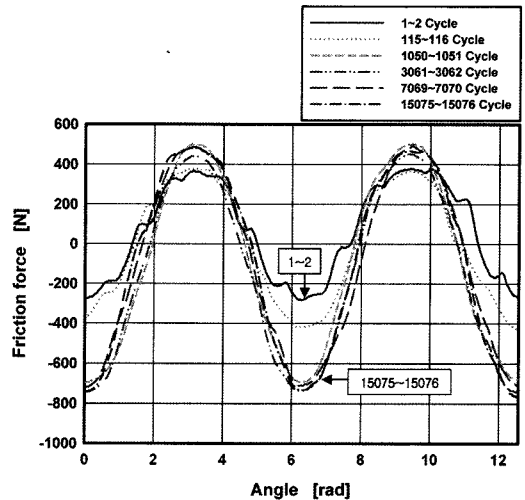


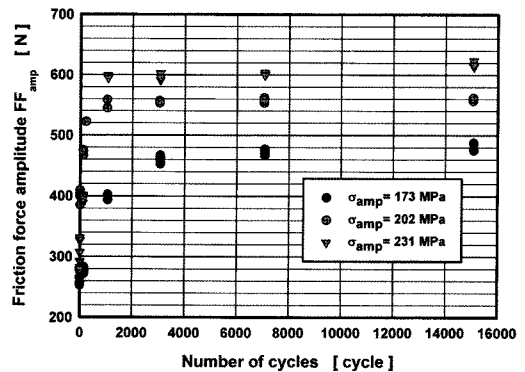
Fig. 5 Results of plain and fretting fatigue test



(a) Stress amplitude  $\sigma_{amp}=173\text{MPa}$



(b) Stress amplitude  $\sigma_{amp}=231\text{MPa}$



(c) Friction force amplitude

Fig. 6 Relationship between friction force and number of cycles

급감하며, 최대값은 상대적으로 소폭 증가 후 안정하였다.

이 기간동안에 접촉부에서는 미끄럼 발생과 함께 가공표면(산화막)의 파손을 동반하는 초기마모가 발생하고, 두 표면 간에 마모분(debris)이 게재하여, 접촉면압도 국부적으로 다소 증가한다고 추정된다. 또한 반복하중 횟수의 증가에 따라 마찰력이 음수 값으로 급감하는 것은 패드가 시험편의 상부에 위치하면 굽힘 모멘트에 의하여 구속되고 압축력이 강하게 작용하지만, 패드가 하부에 오면 접촉면의 감소와 함께 슬립량이 증가하고 상대적으로 마찰력 증가량이 감소한다고 판단된다(Fig. 8 참고).

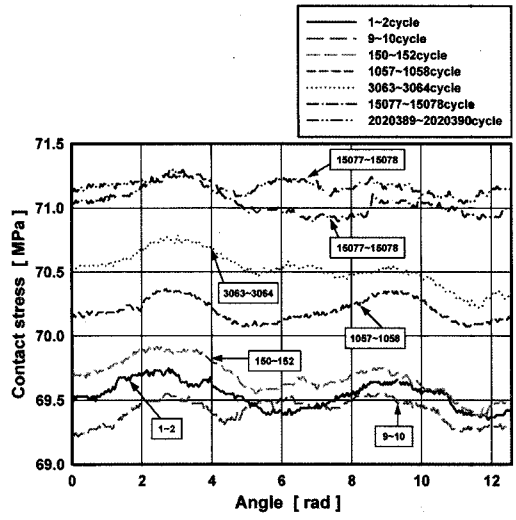
Fig. 6(c)에 마찰력 진폭의 변화를 제시하였다. 마찰력 진폭은 반복하중 횟수의 증가와 함께 약 3000 사이클까지 급증하고 이후에는 변화량이 미미하였으며 시험편에 작용하는 부하하중 진폭  $\sigma_{amp}$ 가 증가하면 마찰력 진폭도 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 7(a) 및 (b)에는 하중진폭  $\sigma_{amp}=173$  MPa 및  $\sigma_{amp}=231$  MPa로 시험한 시험편의 소정의 하중 사이클에서 검출된 접촉면압 거동을 나타내었다. 접촉면압의 변화양상은 하중 사이클 및 마찰력 사이클의 형태와 유사한 거동을 보이고 있었으나 최대값 및 최소값의 변화량은 초기 설정치 70 MPa의  $\pm 2\%$  이내로서 매우 적은 범위 내에서 반복적으로 변화하고 있었다. 또한 하중진폭  $\sigma_{amp}=173$  MPa에서는 사이클 수의 증가와 함께 접촉면압이 다소 증가하고 있었으나, 하중진폭  $\sigma_{amp}=231$  MPa에서는 사이클 수의 증가와 함께 접촉면압이 감소하여 안정된 값을 나타내고 있었다.

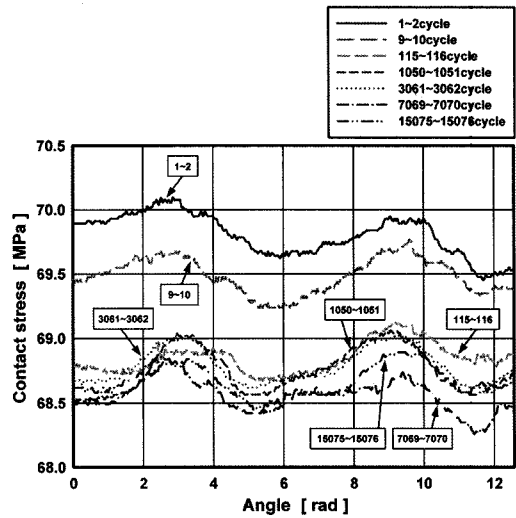
접촉면압의 최대값을 제시하고 있는 Fig. 7(c)에도 잘 나타나 있는 것과 같이 하중진폭이 증가하면 접촉면압이 감소하는 경향을 보였다.  $\sigma_{amp}=173$  MPa에서는 접촉면압이 하중 사이클 수의 증가와 함께 증가하고 있으며,  $\sigma_{amp}=202$  MPa에서는 증가폭이 상당히 둔화 되었으나 미세하게 증가하였다.

그러나  $\sigma_{amp}=231$  MPa에서는 초기 접촉면압이 1000사이클 까지 지속적으로 감소하였으며 이후에는 거의 안정된 값을 보이고 있었다.

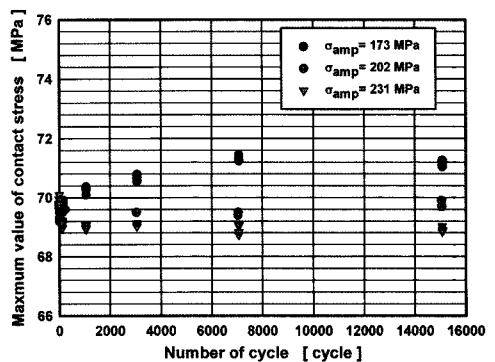
이러한 경향은, Fig. 8에 나타내는 모식도와 같이 반복하중이 증가하면 시험편의 굽힘 변형이 증가하고, 접촉 패드와 시험편간의 국부 틈새가 과대하여



(a) Stress amplitude  $\sigma_{amp}=173$ MPa



(b) Stress amplitude  $\sigma_{amp}=231$ MPa



(c) Maximum value of contact stress

Fig. 7 Relationship between contact stress and number of cycles

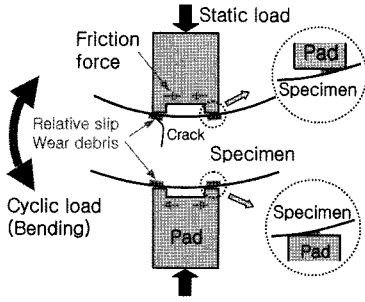


Fig. 8 Schematic illustration of fretting damage in rotary bending fatigue

마모분이 접촉면에서 유출되기 때문으로 추정된다.

#### 4.2 접촉부 표면 및 파면 관찰

시험 종료 후,패드접촉부 및 파면을 절단하여 아세톤으로 세척한 표면을 SEM(Scanning Electron Microscope)로 관찰하였다. 프래팅 손상된 대표적인 접촉부 사진을 Fig. 9에 나타내었다.

거의 모든 시험편 접촉부의 양끝에서 마모가 발생하였으며, Fig. 9(a)와 같이 스텝(step)이 형성되어 있었다. 또한 균열이 발생하여 파면이 형성되고 파단한 층의 표면이 상대적으로 마모가 심하였으며, Fig. 9(c) 및 (d)와 같이 아세톤 세척 후에도 접촉부 표면에는 마모분(debris)이 상당히 부착되어 있었다.

Fig. 10에는 파면에서 관찰된 대표적인 SEM 사진을 제시하였다. 모든 파면은 Fig. 10(a)와 같이 좌우패드 접촉부에서 균열이 발생하여 파면에 이른 것을 알 수 있었다. 그러나 선행한 균열을 판단하기에는 어려웠으며, 중앙부에서 최종파면에 이르고 있었다. 초기균열 발생부(경사균열 부)는 Fig. 10(b)와 같이 거의 모든 파면이 접촉에 의하여 마모손상되어 있었으며, 표면에서 유입된 마모분의 고착도 예상되었다. 그러나 반복하중에 의한 피로파면 영역에서는 Fig. 10(c) 및 (d)와 같이 피로파면의 전형적인 특징과 함께 스트라이에이션(striation)과 타이어 트랙(tire track)이 관찰되었다.<sup>9)</sup>

특히, 타이어트랙은 일반 피로시험(PF)편에서 관찰되는 것에 비하여 광범위한 영역에서 다수 형성되어 있었다. 이러한 손상은 접촉면압에 의하여 초기 경사균열부에서 발생하는 균열 닫힘현상(crack closure effect)<sup>10)</sup>에 기인하여 발생하는 상하파면의

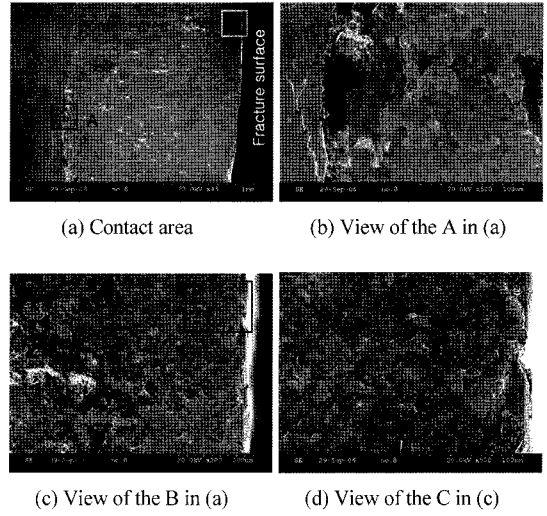
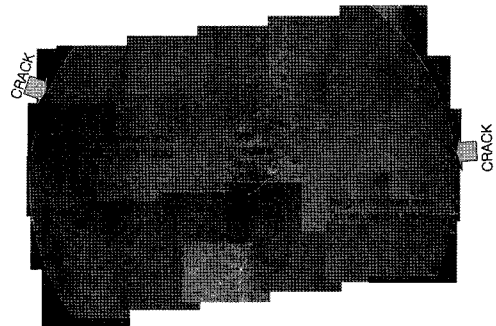


Fig. 9 SEM micrographs of fretted surface( $\sigma_{amp}=231\text{MPa}$ )



(a) Fretting fatigue fracture surface

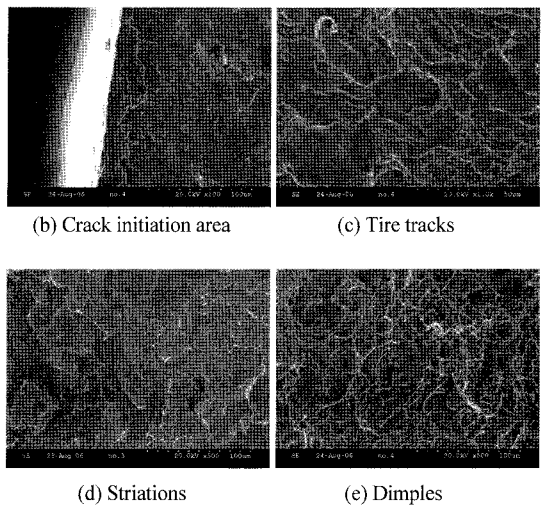


Fig. 10 SEM micrographs of fracture surface( $\sigma_{amp}=202\text{MPa}$ )

반복적 접촉결과로 추정된다.

최종 파단이 발생한 중앙부를 나타내는 Fig. 10(e)에는 정적 파단의 대표적 형상인 딴플(dimple)이 형성되어 있었다.<sup>11)</sup> 또한 반복하중의 증가와 함께 파면에서 차지하는 피로파면 영역이 감소하고 최종 파단영역이 증가하는 경향이 있었다.

## 5. 결론

철도차축 재료 RSA1의 프레팅 피로손상 거동을 평가하기 위하여 회전굽힘 피로시험기에 프레팅 발생장치(프로빙 링 및 브릿지 타입 접촉패드)를 제작하여 구축하였다. 피로수명 평가, 마찰력 변화, 접촉면압 변화, 접촉부 표면 및 파면관찰로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 표준시험편에 있어서, 차축재료 RSA1의 일반 피로한도는 약 269 MPa, 프레팅 피로한도는 약 169 MPa로 프레팅 손상에 의하여 피로한도가 37% 정도 감소하였다.
- 2) 마찰력은 반복하중 횟수의 증가와 함께 약 3000 사이클까지 최소값이 급감하고, 최대값은 상대적으로 증가량이 미미하였다. 이 기간동안 마찰력 진폭도 급격하게 증가하였으며, 이후에는 변화량이 미미하였다. 또한 부하하중이 증가하면 마찰력 진폭도 증가하였다.
- 3) 접촉면압은 하중진폭이 증가하면 다소 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 하중진폭의 증가에 의한 접촉부 틈새 증가로 마모분이 유출되기 때문으로 추정된다.
- 4) 거의 모든 시험편 접촉부의 양끝에서 마모가 발생하였으며, 스텝이 형성되어있었다. 균열이 발생하여 파면이 형성되고 파괴된 축의 표면이 상대적으로 마모가 심하였다.
- 5) 모든 파면은 좌우 패드 접촉부에서 균열이 발생하여 성장하였으며, 선형균열의 특징은 어려웠다. 또한 초기 경사 균열부 파면은 마모손상이 심하였으며, 피로균열부에서는 스트라이에이션 및 타이어 트랙이 다수 관찰되었다.

## 후 기

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-041-D00025).

## References

- 1) R. B. Waterhouse, Fretting Corrosion, Pergamon Press, p.106, 1975.
- 2) P. J. E. Forsyth, "Occurrence of Fretting Fatigue Failures in Practice," in Fretting Fatigue, Edited by R. B. Waterhouse, Applied Science Publishers LTD, p.99, 1981.
- 3) Y. Mutoh, Fretting Wear and Fatigue(in Japanese), Kougyousiryousenta, p.111, 1997.
- 4) M. Kubota, S. Niho, C. Sakae and Y. Kondo, "Effect of Understress on Fretting Fatigue Crack Initiation of Press-Fitted Axle," JSME International Journal, Vol.46, No.3, pp.297-300, 2003.
- 5) B.-C. Goo and J.-W. Seo, "Probabilistic Fatigue Life Evaluation of Rolling Stock Structures," Transactions of KSAE, Vol.11, No.5, pp.89-94, 2003.
- 6) Y. Mutoh, "Fracture Mechanics of Fretting Fatigue," Journal of Society Materials Science, Japan, Vol.46, No.11, pp.1233-1241, 1997.
- 7) K. Hirakawa, K. Toyama and M. Kubota, "The Analysis and Prevention of Failure in Railway Axles," International Journal of Fatigue, Vol.20, No.2, pp.135-144, 1998.
- 8) JSMS Committee on Fatigue of Materials, Standard Evaluation Method of Fatigue Reliability for Metallic Materials-Standard Regression Method of S-N Curves: JSMS-SD-6-04(in Japanese), JSMS, 2004.
- 9) R. Koterazawa, Application of Fractography(in Japanese), Nikankougyousinbunnya, p.44, 1981.
- 10) S. Suresh, Fatigue of Materials, Cambridge University Press, p.222, 1996.
- 11) H. Kitagawa and R. Koterazawa, Fractography(in Japanese), Baihukan, p.39, 1977.