

SCM 420강의 프레팅 피로 특성에 관한 연구

김태규* · 김현수* · 윤수종* · 김혜성*[†]

*밀양대학교 신소재공학부

A Study on Fretting Fatigue Characteristic of SCM 420 Steel

T. G. Kim*, H. S. Kim*, S. J. Yoon and H. S. Kim*[†]

*Department of Materials Engineering, Miryang National University, Miryang 627-706, Korea

Abstract Fretting fatigue behavior of SCM420 steel commonly used in the automotive industry for structural applications was investigated in this study. In addition, the effect of bridge pad on the fretting fatigue test was evaluated from different pad materials and following conclusions were drawn. Simple fatigue limit of SCM 420 steel was determined to be 350 MPa while this value was 225 MPa and 285.5 MPa with SCM420H and with SM45C pad, respectively. Reduction in fatigue limit was, thus found to be 35.7% and 17.9% with SCM 420H pad and SM45C pad, respectively. Results of fracture surface observation revealed that typical striation pattern of fatigue failure existed as well as dimpled and cleavage fracture appearance was found in final fractured region. From the EDS compositional analysis, test sample and pad part all had high signals for oxygen and iron, suggesting that worn particles might be iron oxide, although exact chemical composition has to be confirmed. Considerable reduction in fatigue life was apparent in SCM 420 steel under fretting fatigue against simple fatigue. Such reduced fatigue life by fretting damage should be considered as an important factor not only in the viewpoint of repairing but also inevitably in the design stage of structural components.

(Received January 4, 2006; accepted January 18, 2006)

Key words: Fretting Fatigue, Normal Fatigue, Bridge Pad, Contact Pressure, Fatigue Life

1. 서 론

최근 기어는 근대 공업의 발달과 함께 출력향상과 동력전달의 효율을 증가시키기 위하여 소형화, 경량화, 고강도의 기어가 요구되고 있다. 그러나 국내의 기어설계, 제조, 강도평가, 검사기술은 아직 낮은 수준이며, 고부하 능력, 고정밀화, 저소음화 및 가격 면에서도 국제경쟁력이 뒤떨어지고 있다.

우리나라에서 움직이는 자동차들은 대부분 SCM420강재의 기어를 사용하고 있는데, 자동차 및 재료의 장시간 사용으로 인하여 기어 치가 파손되는 등의 심각한 문제를 야기시켜 인명 및 경제적으로 많은 영향을 미치고 있다.

프레팅 피로손상이 발생하는 부재에서는 일반 피로 수명의 20-50% 정도로 피로수명이 감소하며, 접촉부 내면에서 초기 균열이 발생하기 때문에 균열의 검출이 초기에 거의 불가능 한 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 절실하고 시급한 과제라고 할 수 있다[1-6].

프레팅 피로는 피로강도를 저하시키고 피로 수명을 단축시키기 때문에 보수라는 측면에서도 중요한 과제이다. 그러므로 설계나 파손해석을 위하여 프레팅 피로 실험이 행하여지고 있다. 프레팅 피로 실험방법에 관한 규정은 제정을 위하여 노력하고 있지만, 아직 이루어지지 않고 있다. 그 때문에 프레팅 피로실험을 실험하는 연구자가 각각의 목적에 맞추어서 독자적인 방법으로 행하여지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 자동차용 구조용강으로 많이 사용되는 SCM420강의 프레팅 피로특성을 조사하였다. 또 프레팅 피로시험시 브릿지 패드의 영향을 살펴보기 위해 패드소재를 달리하여 실험을 실시하였다.

[†]E-mail : hsk4385@mnu.ac.kr

Table 1. Chemical compositions of used materials

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM420 (H)	0.23	0.24	0.71	0.016	0.015	1.03	0.15
S45C	0.46	0.22	0.75	0.019	0.013	0.1	0.024

Table 2. Mechanical properties of used materials

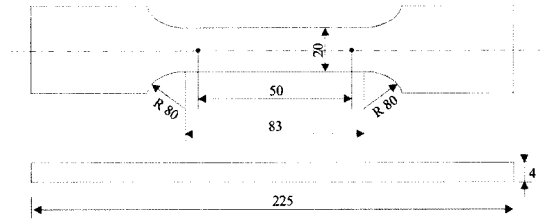
Material	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ε (%)	Hardness (Hv)
SCM420	386	683	20.6	239
SCM420H	516	914	15.4	290
SM45C	647	853	18.5	270

2. 실험방법

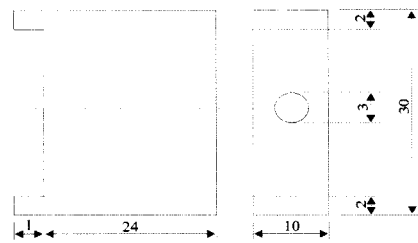
본 실험에 사용한 재료는 자동차용 기어, 컨베이어 롤러 등에 사용되고 있는 SCM420강이고, 프레팅 피로시험에서 접촉 면압을 가하는 역할을 하는 브릿지 패드는 SCM420H 및 SM45C강을 사용하였다. 각각의 화학조성과 기계적 성질을 Table 1 및 Table 2에 나타내었다. 피로시험용 시험편은 KS B 0801 7호의 규격에 의하여 폭 20 mm, 평행부 83 mm, 모서리반경 80 mm, 두께 4 mm로 제작하였다. 패드는 양단에 2 mm의 평행부가 있으며, 접촉면을 대칭으로 배치하기 때문에 안정된 접촉상태에서 시험을 할 수 있는 브릿지 패드를 사용하였다. 시험편의 평행부와 패드 접촉부는 표면 거칠기가 피로수명에 미치는 효과를 최소화하기 위하여 #2000까지 에머리페이퍼(Emery paper)를 이용하여 단계적으로 연마하여 사용하였다. 시험편 및 브릿지 패드의 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

조직관찰은 각 시험편을 경면 연마 후, 3% 나이탈 용액을 사용하여 5초 동안 에칭 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.

인장시험은 만능피로시험기(INSTRON Model 8516, 최대용량 10 ton)를 이용하여 Cross Head Speed 2 mm/min, 표점거리 20 mm로 실온에서 실시하였다. 피로시험은 최대용량 10톤의 만능피로시



(a) specimen



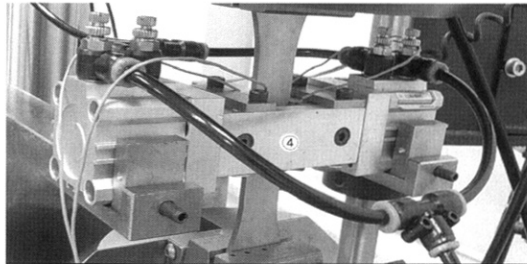
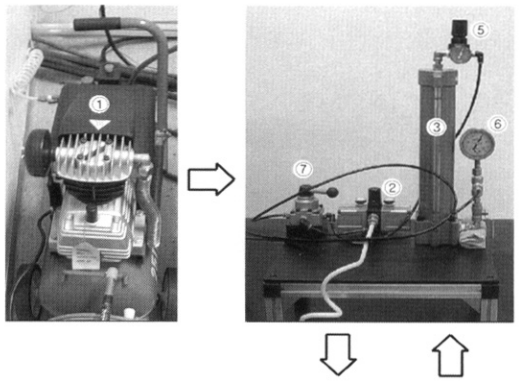
(b) bridge pad

Fig. 1. Schematic dimension of fretting fatigue specimen and bridge pad (in mm).

험기(Model 8516, INSTRON)를 사용하여, 정현파 형태로 반복수 15Hz, 응력진폭($\Delta\sigma$)을 변화시키면서 실험을 실시하였다. 피로시험에 사용한 프레팅 장비는 일본기계학회표준 JSME S 015를 참고하여 제작하였으며, 시험편과 브릿지 사이의 접촉압력(Contact Pressure)이 30 Mpa이 되도록 설정하였다. 피로시험 후 파단면은 SEM을 통하여 관찰하였다.

3. 프레팅 장치개발

본 연구에서는 초기 접촉압력이 파단에 이르기까지 동일한 접촉압력을 유지할 수 있는 장치를 개발하였다. Fig. 2에 프레팅 피로시험장치의 모식도를 나타내었다. Fig. 2에서 나타나는 바와 같이 프레팅 피로시험장치의 구성은 컴프레서(①), 2차 공기 압축기(②), 유압실린더(③) 및 프레팅 피로시험의 핵심인 프레팅 장비(④)로 이루어져 있다. 컴프레서에서 나온 압축공기는 2차 공기 압축기에서 한번더 압축되어 유압실린더를 밀어주게 된다. 유압실린더에서 나온 기름은 유압 호스를 통해 프레팅장치의 피스톤을 밀어주게 되고, 다시 피스톤은 패드에 힘을 가하게 되어 최종적으로 시험편에 면압을 부하하게 된다. 면압조절(0~40 MPa)은 유압실린더 위에 장



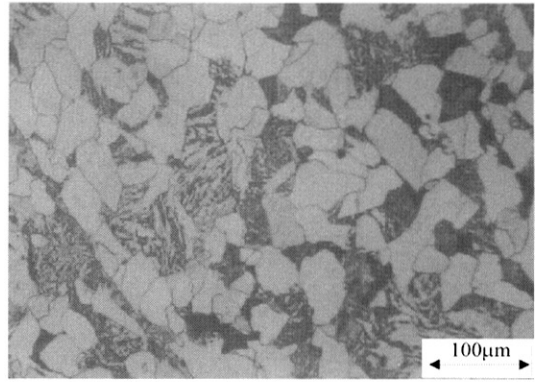
(a) Fretting equipment



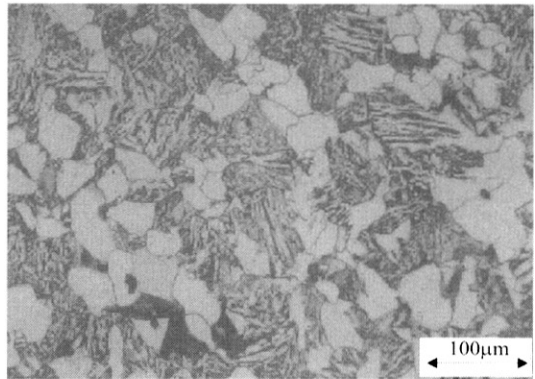
(b) Fatigue machine

Fig. 2. Photography of fretting equipment and fatigue machine.

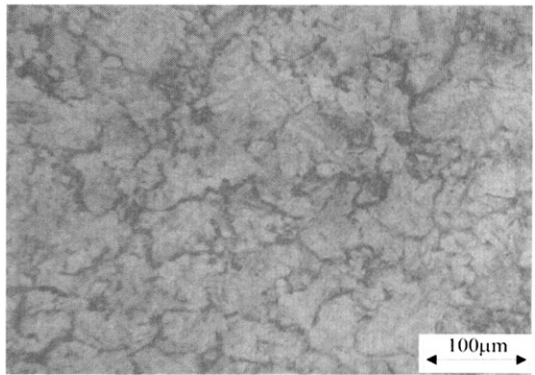
착된 밸브를 통하여 조절하였다. 압축공기가 유압실린더를 밀어주는 압력과 유압실린더에서 방출되는 유압을 측정하기 위하여 각각의 해당위치에 게이지(⑤, ⑥)를 설치하여 확인하였다. 면압의 부하 및 제거는 수동밸브(⑦)를 통하여 이루어지게 구성하였다. 본 연구에서 제작한 프레팅 장비는 시험 초기에만 면압이 가해지는 방식이 아니라, 시험 초기부터 종료시까지 계속 일정 면압을 가해줄 수 있는 장점을



(a) SCM420



(b) SCM420H



(c) SM45C

Fig. 3. Optical micrographs of SCM420(H) and SM45C.

가지고 있다.

Fig. 2에 본 실험에서 제작한 프레팅 장비의 구성과 만능피로시험기 및 프레팅 장치가 피로시험기에 장착된 사진을 나타내었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 미세조직관찰

피로시험에 사용한 SCM420강 및 브릿지 패드에 사용한 SCM420H 및 SM45C강의 미세조직을 3% 나이탈 용액으로 에칭하여 광학현미경으로 관찰한 사진을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 나타나는 바와 같이 SCM420 및 SCM420H 시험편에서는 흰색으로 나타나는 페라이트와 검은색의 펄라이트 및 회색의 베이나이트가 혼재하는 조직으로 나타났다. SCM420H강은 SCM420강과 합금조성은 같으나 고주파 열처리를 실시한 강으로 그 조직은 SCM420에 비하여 베이나이트 양이 많은 것으로 나타났다. SM45C 시험편에서는 페라이트 위주의 조직을 나타내었다.

4.2 경도특성

Fig. 4는 실험에 사용한 재료들의 경도값을 측정하여 나타낸 것이다. 경도 측정 결과 SCM420강은 230-250Hv값을 나타내었고, SCM420H강은 280-300Hv, SM45C는 260-285 Hv값을 나타내었다. 이와 같이 SCM420H강의 경도값이 높게 나타나는 이유는 위의 미세조직 관찰에서 나타난 바와 같이 SCM420H강은 SCM420강에 비하여 경한 조직인 베이나이트 양이 많기 때문이라고 생각된다.

4.3 인장특성

Fig. 5는 SCM420강의 정적 인장시험 실시 후 얻어진 Stress(S)-Strain(S) Curve를 나타낸 것이다. 실험결과 인장강도는 683MPa, 0.2% offset 항복강도는 386MPa, 연신율은 20.6%, 영 계수는 193, 395MPa로 각각 나타났다. 인장시험결과를 토대로 피로시험시 부하응력(Stress amplitude, $\Delta\sigma$)을 설정하였다.

4.4 피로특성

프레팅 피로시험편의 규격 및 시험방법은 최근 JSME S 015에 지금까지의 프레팅 시험방법들을 토대로 소개하고 있는 정도일 뿐 현재까지 명확하게 규정되어진 것은 없다[7]. 따라서 본 프레팅 피로시험에서는 Fig. 1에 나타낸 단순피로시험에서와 동일

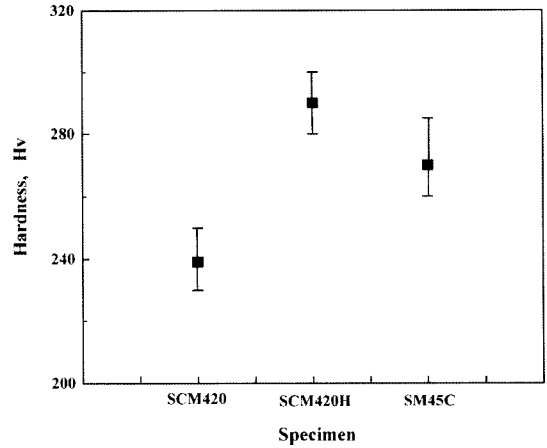


Fig. 4. Microvickers hardness of each specimen.

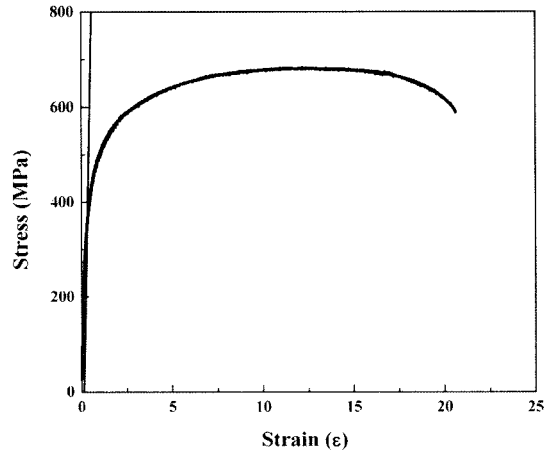


Fig. 5. Stress-strain curve of SCM420.

한 시험편을 사용하였다. 시험조건은 단순 및 프레팅 시험편 모두에 대하여 응력비 $R = 0$ 의 정현파형 (Sine wave), 인장-인장 형태를 채택하였으며, 주파수는 15 Hz로 일정하게 유지하였다. 단순 피로시험시 부하응력은 동일 시험편으로 정적인장시험 실시 후 인장데이터를 이용하여 437.5, 412.5, 387.5, 375 및 350 Mpa로 각각 변화시켜 실시하였고, 프레팅 피로시험의 경우는 단순피로시험에서의 부하응력과 312.5, 287.5, 250 및 225 Mpa를 추가하여 실험을 실시하였다. 시험편과 브릿지 패드사이의 접촉면압은 30 MPa로 실험 시작에서 종료시까지 동일하게 유지하였다.

Fig. 6은 응력진폭을 450 Mpa로 일정하게 유지한

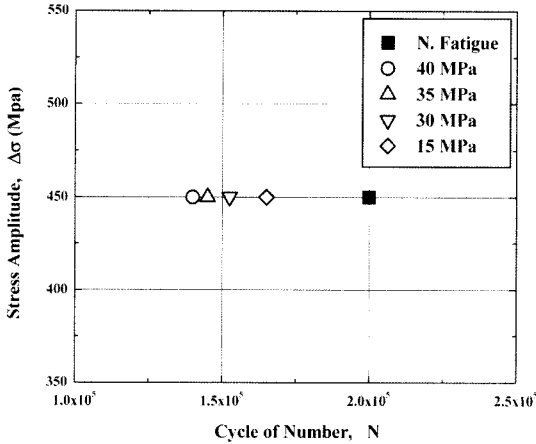


Fig. 6. Results of various contact pressure under constant stress amplitude ($\Delta\sigma = 450$ Mpa).

후, 접촉면압을 15, 30, 35 및 40 Mpa로 각각 변화시켜서 실험한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 6에 나타나는 바와 같이 프레팅을 하지 않은 시험편보다 프레팅을 실시한 시험편이 피로수명이 많이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 접촉면압이 증가할수록 피로수명은 감소하는 경향을 나타내었지만, 그 감소폭은 접촉면압이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었고, 계속 접촉면압을 증가시키면 어느 일정한 점에 근접하고 있음을 알 수 있다. 위의 결과를 토대로 피로시험시 접촉면압을 30 Mpa로 설정하였다.

Fig. 7은 SCM420 시험편에 대하여 단순 및 프레팅 피로시험 결과를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 나타나는 바와 같이 피로과파에 있어서 프레팅의 영향은 고 응력진폭 영역에서는 프레팅 피로와 단순 피로 수명의 차이가 크게 나타나지 않지만, 저 응력진폭 영역으로 갈수록 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 단순피로시험에서는 피로한도가 350 MPa로 나타났고, 프레팅 피로시험에서는 SM45C 패드를 사용한 경우가 287.5 MPa로, SCM 420H 패드를 사용한 경우는 225 MPa로 현저하게 낮게 나타났다.

자동차용 구조용 강재로 널리 사용되는 SCM420강은 프레팅 손상을 받았을 경우, 단순피로에 비하여 현저하게 피로수명의 감소를 나타내었다. SCM420H 패드를 사용한 경우는 약 35.7% 정도의 피로수명 감소를 나타내었고, SM45C 패드를 사용한 경우는 약 17.9% 정도의 피로수명 감소를 나타내었다. 피로수명 감소폭은 SCM420H 패드를 사용한 경우가 더 크게

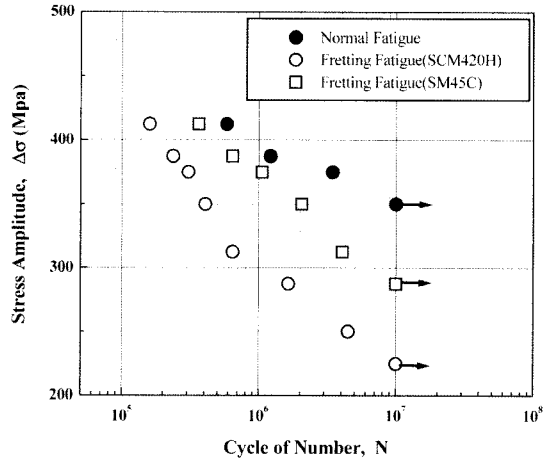


Fig. 7. Results of normal and fretting fatigue (S-N curve).

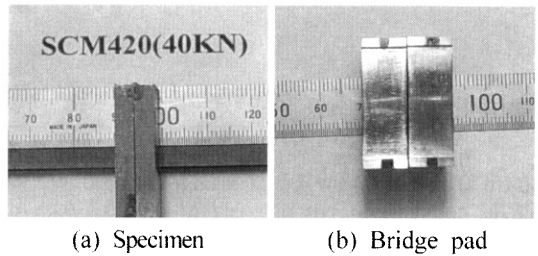


Fig. 8. Optical micrographs of fracture surface.

나타났다. 이것은 비교적 경도가 더 높은 SCM420H 패드가 SM45C 패드 보다 시험편을 더 마모시켜서 피로균열 발생이 용이하게 하였다고 생각된다.

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.

4.5 파면관찰

Fig. 8은 프레팅 피로 시험 후 파단면을 관찰한 것이다. Fig. 8에서 나타나는 바와 같이 시험편 및 브릿지 패드 접촉부에 프레팅의 흔적이 잘 나타나고 있고, 패드와의 접촉부에서 균열이 시작되었음을 알 수 있다.

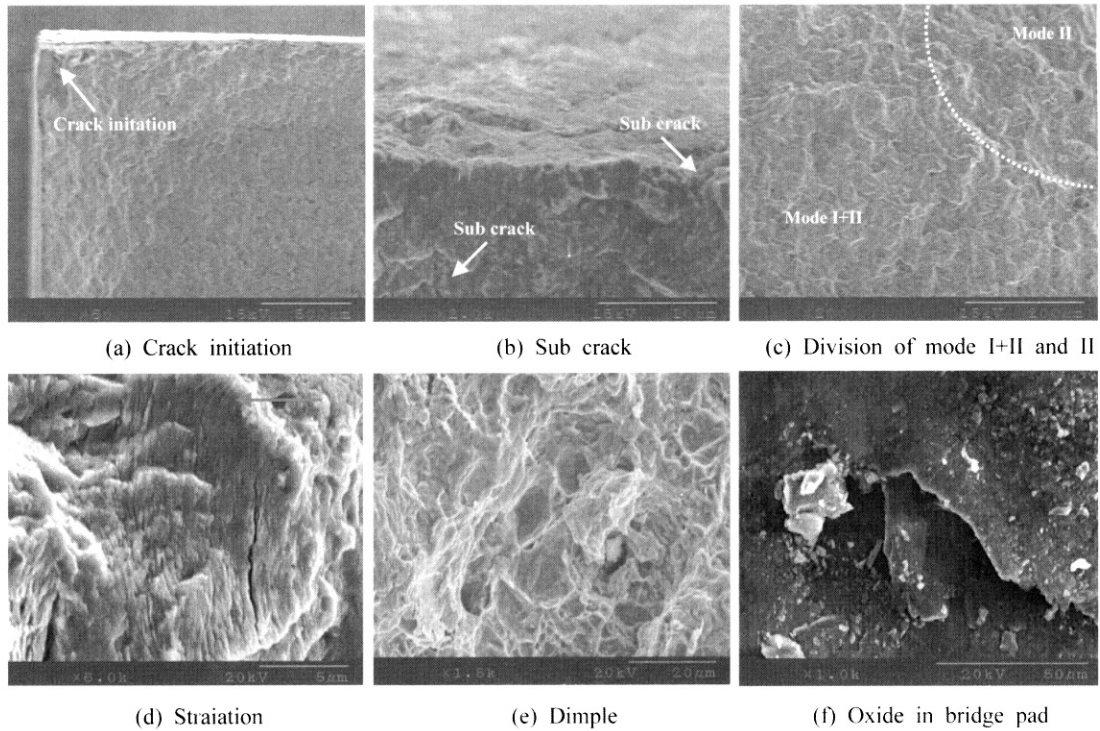


Fig. 9. SEM micrographs of fracture surface and contact area.

Fig. 9는 시험편의 파면 및 패드접촉부에서 얻어진 대표적인 SEM 사진을 나타낸 것이다. 본 실험에서는 모든 시험편이 패드와 시험편의 접촉부 끝에서 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 많은 균열들이 발생하지만, 특정 균열만이 지속적으로 성장한 후 파단에 이르며 상당수의 균열은 성장하지 못하고 파단면에 남게 된다고 생각된다. Fig. 9(c)는 초기 프레팅에 의한 경사 균열부(Mode II)와 주균열이 성장하기 시작하는 혼합부(Mode I+II)를 구별하여 나타낸 것이다. Fig. 9(d)는 파면을 관찰한 것으로서 피로파괴의 전형적인 파면 형상인 스트라이에이션이 일반피로 및 프레팅 파면에서 모두 관찰되었다. 최종파단부에서는 덤플이 형성되어 있었다(Fig. 9(e)).

Fig. 9(f)는 프레팅 실험 후 브릿지 패드의 붉은색 마모분을 관찰한 것으로서 패드 표면에 산화층이 형성되어 있었으며, 일부 산화층은 마모에 의해서 떨

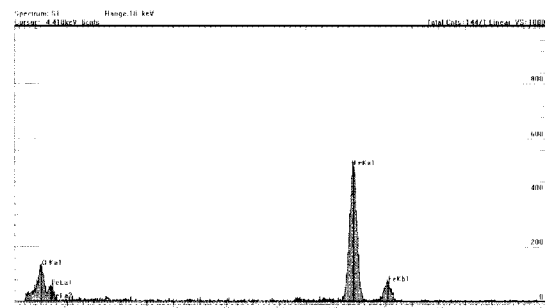


Fig. 10. EDX result of fracture surface in specimen.

어져 나간 형태를 나타내었다.

Fig. 10은 시험편과 패드가 서로 접촉하는 부분에서 붉은색의 마모분이 관찰되었는데, 이 마모분을 EDX 분석하여 대표적으로 시험편에 대하여 나타낸 것이다. EDX분석결과에서 나타나는 바와 같이, 시험편과 패드 부분 모두에서 산소원자 피크와 철원자 피크가 높이 나타나는 것으로 보아 마모분의 성분은 정확히 알 수는 없지만, 마모분은 산화철인 것으로 예상할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 자동차용 구조용강으로 많이 사용되는 SCM420재의 프레팅 피로특성을 조사였다. 또 프레팅 피로시험시 브릿지 패드의 영향을 살펴보기 위해 패드소재를 달리하여 실험한 후 아래와 같은 결론들을 얻었다.

1. SCM420강재의 단순 피로한도는 350 MPa로 나타났으며, 프레팅 피로한도는 SCM420H 패드를 사용한 경우가 225 MPa로 나타났고, SM45C 패드를 사용한 경우에는 285.5 MPa로 나타났다. 피로한도 SCM420H 패드를 사용한 경우에는 35.7%, SM45C 패드를 사용한 경우는 17.9%의 감소를 나타내었다.

2. 파면관찰 결과, 전형적인 피로파괴 양상인 스트라이에이션이과 최종파단부에서는 덤플 및 벽개파괴등을 관찰할 수 있었다. EDX분석결과, 시험편과 패드부분 모두에서 산소원자 피크와 철원자 피크가 높 이 나타나는 것으로 보아 마모분의 성분은 정확히 알 수는 없지만, 마모분은 산화철인 것으로 예상할

수 있다.

3. SCM420강재는 프레팅 피로를 받는 경우, 단순 피로보다 현저한 피로수명 감소를 나타내었다. 이러한 프레팅 손상에 의한 피로수명의 감소는 보수라는 견지에서 뿐만 아니라, 설계단계에서 반드시 고려되어야 할 사항이라고 생각된다.

참고문헌

1. T. N. Farris, A. F. Grandt, G. Harish and H. L. Wang, 41st Int. *SAMPE Symp. and Exhibition* (1996).
2. T. Hattori, *Fretting Fatigue*, *ESIS* **18** (1994) 437.
3. M. P. Szolwinski, G. Harish, P. A. Mcveigh and T. N. Farris, *Symp. on the Continued Ariworthiness of Aircraft Structures*, (1996) 585.
4. Z. M. Connor, W. Li, M. E. Fine and J. D. Achenbach, *Int. J. Fatigue*, **19** : Supplement No. 1, January (1997) S331.
5. Y. H. Hur, R. E. Edwards, M. W. Brown and E. R. los Rios, *Trans. of the KSME (A)*, **27** (2003) 1185.
6. H. D. Kwon, S. J. Choi, K. S. Kim and Y. T. Bae, *Trans. of the KSME (A)*, **27** (2003) 1979.
7. JSME, *JSME S 015*, (2002) 1.