

크롬-몰리브덴강(SCM420)에 대한 프레팅 피로수명 예측에 관한 연구

곽동현*, 노홍래*, 김진광**, 조상봉#

A Study on Fretting Fatigue Life Prediction for Cr-Mo Steel(SCM420)

Dong Hyeon Kwak*, Hong Rae Roh*, Jin Kwang Kim** and Sang Bong Cho#

ABSTRACT

Recently, a lot of work and interest have been devoted to the development of multiaxial fatigue parameters for fretting fatigue life prediction. In this study, the fretting fatigue life and critical location were estimated and evaluated through the multiaxial fatigue theories in a cylinder-on-flat contact configuration for Cr-Mo steel, SCM420, the material commonly is used in gears of the automobile and rollers of the conveyor. The strain-life curve was obtained from fatigue test for SCM420. The Fretting fatigue life and critical location were estimated through stress distributions, SWT-parameters and FS-parameters obtained from FEA. This paper showed possibility of applying multiaxial fatigue theories to fretting fatigue life prediction comparing predicted life with experimental results.

Key Words : Fretting fatigue (프레팅 피로), Critical plane approach (위험단면법), Leading edge (접촉선단), SWT-parameter(SWT-파라미터), FS-parameter (FS-파라미터)

1. 서론

프레팅은 접촉하고 있는 두 물체 사이에 미세진동이 발생할 때 작은 진폭의 상대운동으로 인한 마멸현상을 말한다. 프레팅 피로손상은 국부적인 접촉영역에서의 높은 응력집중, 다축 응력, 그리고 비비례(non-proportional) 응력상태 등의 복잡한 조합에 의해 접촉계면에서 발생하며, 이는 초기균열 발생과 진전 그리고 파손으로 이어진다.

프레팅 피로가 발생하는 부재에서는 일반 피로

의 20~50% 정도 피로수명이 감소하며, 접촉부 내면에서 초기균열이 발생하기 때문에 조기 검출이 거의 불가능 한 점을 고려하면, 환경이 열악한 상황(고온·고압, 화학적 환경 등)에서 운용되는 구조물의 접촉부를 고려한 수명 평가기법에 관한 연구는 절실하고 시급한 과제이다.

일반 피로시험 시, 시편과 그림사이에서 유발되는 프레팅 현상을 Eden 등¹이 처음으로 언급한 후, 프레팅 피로시험은 다양한 형태로 행해졌는데 브리지 형태의 프레팅 패드가 1990년대 초까지 프레팅

접수일: 2006년 11월 24일; 게재승인일: 2007년 2월 21일

* 경남대학교 대학원 기계설계학과

** 경남대학교 기계자동화공학부

교신저자: 경남대학교 기계자동화공학부

E-mail: sbcho@kyungnam.ac.kr Tel. (055) 249-2620

피로시험으로 유행하였다.¹

Giannakopoulos 등²과 Yang과 Mall³은 응력특이성이 존재하는 구조물에 대하여 파괴역학과 접촉역학의 상사성을 이용하여 프레팅 피로 수명 예측방법을 제안하였다. 한편, 1970년대 초에 Nishioka와 Hirakawa는 실린더-평판의 접촉모델에 대한 시험을 제안하였는데⁴ 이는 Hertz⁴와 Mindlin⁵의 접촉해석으로 응력상태를 쉽게 알 수 있는 장점을 가지고 있다. 이 모델은 Bramhall⁶과 Hills 등⁷에 의해 일정한 수직력 및 반복적인 접선력과 인장응력을 받는 형태로 발전하였고 다양한 프레팅 피로해석에 연구되었다. Szolwinski와 Farris⁸는 다축 피로이론인 SWT-파라미터를 수정하여 프레팅 피로해석에 적용하였다. Lykins 등⁹은 다양한 다축 피로이론들에 따른 다축 파라미터 선도를 제안하였고 각각의 파라미터들에 대한 프레팅 피로수명을 비교 평가하였다. Leen 등¹⁰은 복잡한 형상의 접촉상태에 대한 SWT-파라미터를 구하였고 위험단면을 찾는 알고리즘을 통해 위험위치를 찾아내어 실험과 비교를 하였다.

본 연구에서는 자동차용 기어, 콘베이어 롤러 등에 사용되고 있는 SCM420강재의 원통과 평판 접촉^{9,11}에 대한 프레팅 접촉상태를 유한요소해석을 통해 분석하고 다축 피로이론을 도입하여 프레팅 피로수명을 예측 및 평가하고자 한다.

2. 다축 피로해석을 위한 위험단면법

프레팅은 접촉부분의 응력상태가 아주 복잡하고 주응력은 하중 사이클에 따라 비 비례거동을 하므로 프레팅 피로를 분석하기 위해서는 다축 피로이론의 도입이 필요하다. 위험단면법은 최대 손상이 발생하는 단면에 관한 다축 피로 접근법으로서 위험단면에 대한 임의의 파라미터를 응력과 변형률 등과 같은 물리량으로써 피로수명 평가에 사용한다.

2.1 SWT-파라미터

Smith¹²는 Basquin식을 변형률 수명 식에 단순히 곱함으로써 평균응력 효과를 표현하였다.

$$\sigma_{\max} \epsilon_a = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \epsilon'_f (2N_f)^{b+c} \quad (1)$$

여기서 σ'_f , b , ϵ'_f , c , $2N_f$, E 는 각각 피로강도계수, 피로강도지수, 피로연성계수, 피로연성지수, 파단까지의 반복수(reversal), 탄성계수이다.

Szolwinski와 Farris¹³는 변형률 진폭과 그 단면에 작용하는 수직응력의 곱, 즉 $\sigma_{\max} \epsilon_a$ 이 최대가 되는 단면에서 초기균열이 발생한다고 제안하였고 $\sigma_{\max} \epsilon_a$ 를 SWT-파라미터라고 하였다. 그들은 SWT-파라미터가 프레팅 피로의 초기균열 위치를 예측하는데 적합하다고 하였으며 Szolwinski¹⁴는 SWT-파라미터가 초기균열 발생까지의 수명도 예측 가능함을 보였다.

2.2 FS-파라미터

다축 피로연구에서 Fatemi와 Socie¹⁵는 비틀림 피로시험이 그와 같은 진폭의 단축 피로시험에 비해 장수명을 가짐을 관찰했다. 그들은 전단 하중 하에서 불규칙적으로 형성된 균열면이 마찰을 야기시키고 결국 균열 선단에서의 응력을 감소시키는 반면 균열면에 수직인 하중을 가하면 균열면은 열리고 마찰력에 의한 영향은 감소된다고 가정하여 다음 식과 같이 표현하였다.

$$\frac{\Delta \gamma_{\max}}{2} (1 + k \frac{\sigma_{n,\max}}{S_Y}) = \frac{\tau'_f}{G} (2N_f)^b + \gamma'_f (2N_f)^c \quad (2)$$

식 (2)에서 $\sigma_{n,\max}$ 는 최대 전단변형률이 작용하는 단면에서의 최대 수직응력이고 S_Y , k , τ'_f , G , b , γ'_f , c 는 각각 항복강도, 재료 상수, 전단 피로강도계수, 전단계수, 전단 피로강도지수, 전단 피로연성계수, 전단 피로연성지수이다. 식 (2)를 단축 피로 물성치를 이용하여 다음과 같이 표현 할 수 있다.¹⁶

$$\frac{\Delta \gamma_{\max}}{2} (1 + k \frac{\sigma_{n,\max}}{S_Y}) = [(1 + \nu_e) \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + (1 + \nu_p) \epsilon'_f (2N_f)^c] \times [1 + k \frac{\sigma'_f}{2S_Y} (2N_f)^b] \quad (3)$$

여기서 ν_e 와 ν_p 는 탄성 프아송비와 소성 프아송비고 k 는 1로 하였으며 식 (3)의 왼쪽 부분, 즉

$$\frac{\Delta \gamma_{\max}}{2} (1 + k \frac{\sigma_{n,\max}}{S_Y}) \text{ 을 FS-파라미터라 한다.}$$

유한요소해석으로부터 얻어진 응력과 변형률을 다음의 변환식을 사용하여 $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 사이의 위험단면(SWT, FS-파라미터)을 찾을 수가 있고 그 알고리즘을 Fig. 1에 도시하였다.

$$\sigma = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (4)$$

$$\epsilon = \frac{\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}}{2} + \frac{\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}}{2} \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta \quad (5)$$

$$\gamma = -(\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}) \sin 2\theta + \gamma_{xy} \cos 2\theta \quad (6)$$

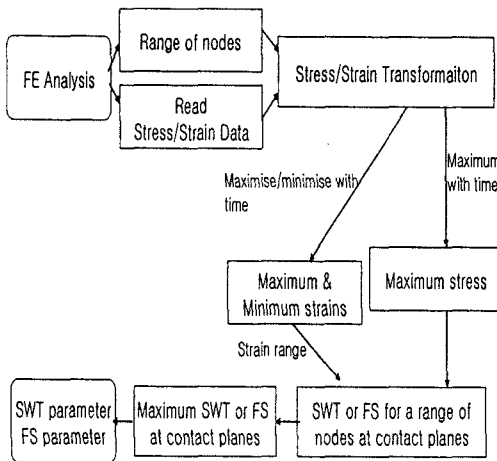


Fig. 1 Procedure to find the maximum SWT and FS value using the critical plane method

3. 프레팅 접촉해석 조건과 결과 비교

3.1 실린더-평판 접촉 모델 및 하중이력

프레팅 접촉 모델은 Fig. 2와 같이 구성되며 Roh 등¹⁷에 의해서 다양한 조건 하에서의 프레팅 접촉 해석결과를 비교 검토하였다. 패드와 평판 접촉 시 작용하중 P는 패드와 평판 사이에 가해지는 수직력이고, Q는 접선력, σ 는 평판에 작용하는 인장응력이다. R은 15mm, L은 60mm, 모재의 두께는 1.4mm로 하였고 모델의 대칭면은 시편의 중립면(neutral surface)으로 하였다.

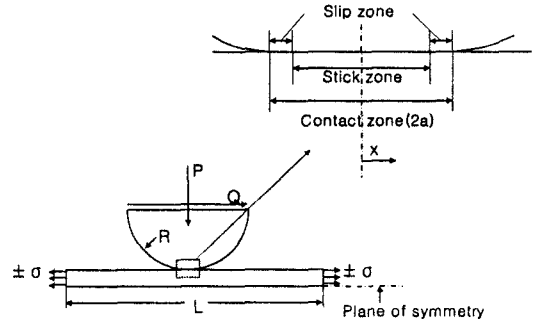


Fig. 2 Cylinder-on-flat contact and loading configuration

Fig. 3는 프레팅 피로의 하중이력을 나타낸 것이다. 하중이력은 다음과 같이 크게 4단계로 구성된다.

- 1단계: 프레팅 패드의 제일 윗면에 수직력 P가 주어지고 다음단계 동안에도 동일한 크기의 수직력을 계속 유지한다.
- 2단계: 양의 방향으로 전단력 Q와 인장응력 σ 을 각각 패드와 평판에 동일한 위상으로 가한다.
- 3단계: 전단력과 인장응력을 제거하고 수직력 P는 유지한다.
- 4단계: 전단력과 인장응력을 음의 방향으로 동일한 위상으로 가한다.

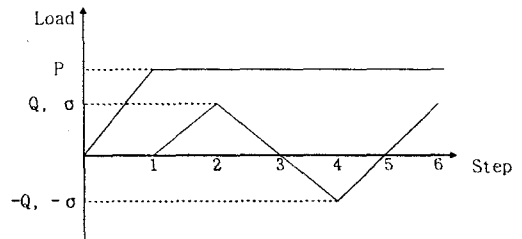


Fig. 3 Cylinder-on-flat loading history

재료는 항공기 구조용 알루미늄 합금인 Al 7075-T6로서 물성치는 Table 1과 같고 Meggiolaro와 Castro¹⁸의 실험에 의한 자료를 사용하였다.

Table 1 Mechanical properties of the tested materials

E(Gpa)	ν	μ	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)
71.9	0.3	0.5	576	498

3.2 3차원 모델의 내 외부 비교

수직력 P는 500N, 접선력 Q는 200N 그리고 인장응력 σ 가 200MPa이 작용하는 3차원 모델에 대한 유한요소해석을 수행하여 접촉영역에서의 SWT-파라미터와 FS-파라미터 분포를 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 도시하였다. 본 해석모델의 경우, 두 파라미터의 내·외부 분포가 전체적으로 비슷한 수준이지만 내부에서 최대 파라미터가 형성되었고 따라서 내부에서 위험단면이 형성될 것으로 예측되었다.

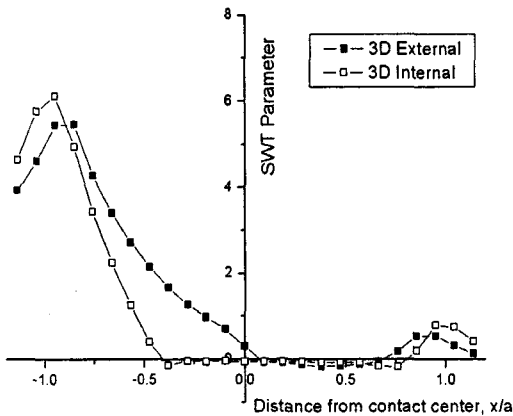


Fig. 4 Comparison of SWT parameter over the contact surface between the outside and the inside

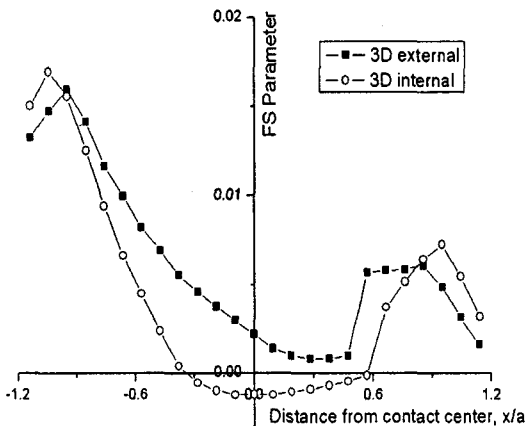


Fig. 5 Comparison of FS parameter over the contact surface between the outside and the inside

3.3 3차원 모델의 내부와 평면변형률 비교

3차원의 내부와 평면변형률 해석 결과에 대한 SWT-파라미터, FS-파라미터를 각각 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었고 두 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 3차원해석 결과, 내부가 외부보다 더 위험하였고, 또한 내부가 평면변형률의 해석결과와 잘 일치함에 따라 평면변형률 상태의 해석결과로부터 3차원 프레팅 피로 상태를 분석하고자 한다.

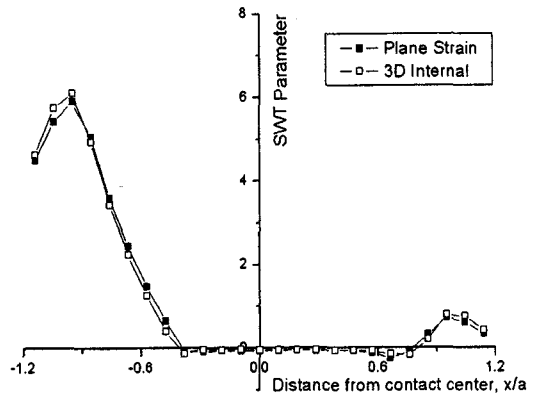


Fig. 6 Comparison of SWT parameter over the contact surface between plane strain and the inside of 3D

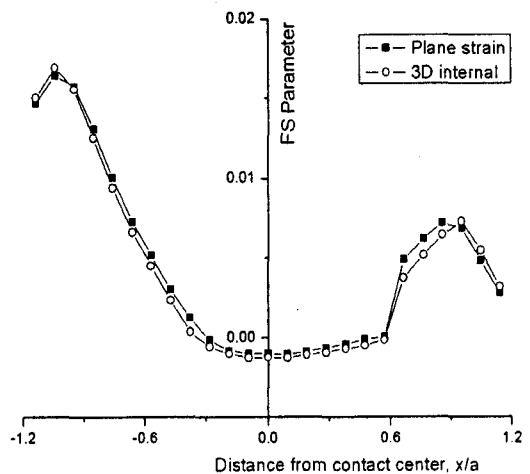


Fig. 7 Comparison of FS parameter over the contact surface between plane strain and the inside of 3D

4. 프레팅 피로시험 및 수명평가

4.1 인장시험 및 피로시험

표점거리가 12.5mm인 환봉시편을 크로스헤드 속도(cross head speed)를 1mm/min로 하여 실온에서 정적 인장시험을 하였다. 인장시험 결과를 토대로 변형률 단계(0.8%, 0.4%, 0.3%, 0.2%, 0.18%)를 결정하여 피로시험 및 증분단계시험을 수행하였다. Table 2와 3은 각각 인장시험 및 피로시험에 의한 물성치를 나타낸 것이다.

Table 2 Mechanical properties of SCM420

Yield strength	Tensile strength	Young's modulus
530 MPa	698 MPa	198 GPa

Table 3 Fatigue properties of SCM420

σ'_f (MPa)	ϵ'_f	b	c
673.2	0.1013	-0.056	-0.476

4.2 SWT-선도 및 FS-선도 결정

Table 3에 나타낸 SCM420강재에 대한 단축 피로 물성치를 이용하여 식 (1)과 (3)에 의해 일반적인 SWT-선도와 FS-선도를 얻을 수 있다. 시편들 각각의 SWT-파라미터와 FS-파라미터를 구하여 SWT-선도 및 FS-선도를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타내었으며 Table 4에 그 파라미터들을 정리하였다. SWT-선도와 FS-선도는 각 시편에 대한 SWT-파라미터와 FS-파라미터에 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

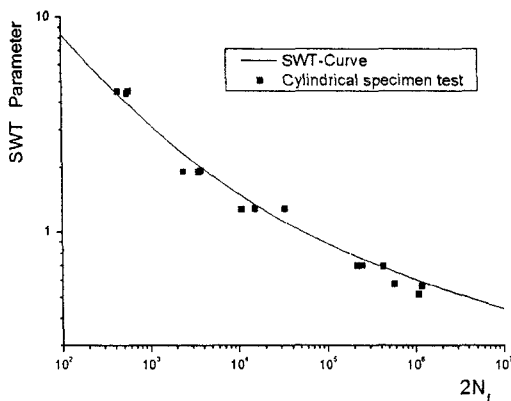


Fig. 8 SWT parameter versus cycles to failure

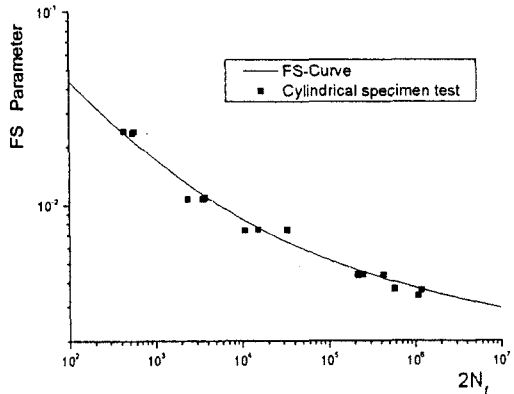


Fig. 9 FS parameter versus cycles to failure

Table 4 SWT and FS parameters from the fatigue test

Spec. No.	SWT	FS($\times 10^{-2}$)	N_f	
1st	1	4.3737	2.1548	274
	2	1.9472	0.9990	1,879
	3	1.2968	0.6851	7,750
	4	0.6915	0.4052	107,629
	5	0.4951	0.3177	542,467
2nd	1	4.4716	2.1965	217
	2	1.9231	0.9849	1,780
	3	1.2998	0.6841	16,740
	4	0.6886	0.4028	212,824
	5	0.5456	0.3397	589,535
3rd	1	4.4553	2.1905	286
	2	1.9261	0.9859	1,181
	3	1.2910	0.6810	5,425
	4	0.6944	0.4059	123,112
	5	0.5569	0.3443	288,461

4.3 프레팅 접촉 모델 및 하중이력

프레팅 접촉 모델은 Fig. 10과 같이 접선력 Q가 없고 패드는 인장응력의 작용방향으로 변위구속이 되어 있으며 수직력 P는 630N으로 하였다. 여기서 R은 15mm, L은 60mm, 모재의 두께는 1.4mm, 폭은 14mm로 하였고 모델의 대칭면은 시편의 중립면으로 하였으며 패드와 시편 모두 SCM420강재를 사용하였다. 재료의 물성치는 Table 2의 물성치를 사용하였고 마찰계수는 0.15로 하였다.

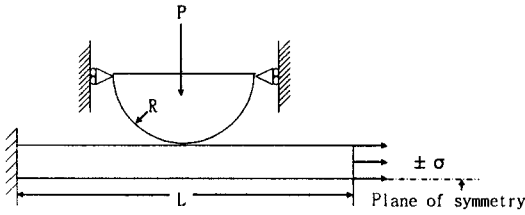


Fig. 10 Model of fretting fatigue equipment

Fig. 11은 프레팅 피로의 하중이력을 나타내었고 응력비, $R=0.1$ 로 하여 크게 3단계로 시험을 하였다.

- 1단계: 프레팅 패드의 제일 윗면에 수직력 P 가 주어지고 다음 단계 동안에도 하중이 계속 유지된다.
- 2단계: 양의 방향으로 최대 인장응력 σ 을 가한다.
- 3단계: 최소 인장응력까지 낮추고 수직력 P 를 유지한다.

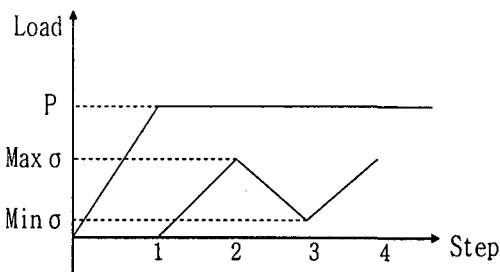


Fig. 11 Cylinder-on-flat loading history under fretting contact

4.4 유한요소해석 결과에 의한 다축 파라미터 분포

접촉구간에 따른 SWT-파라미터의 분포는 Fig. 12과 같고 접촉선단으로 갈수록 증가하다가 $x/a \approx 0.7$ 에서 가장 높았다. Fig. 13에서는 FS-파라미터 분포를 확인할 수 있는데 이 역시 접촉선단 근처($x/a \approx 1$)에서 가장 높게 나타났다.

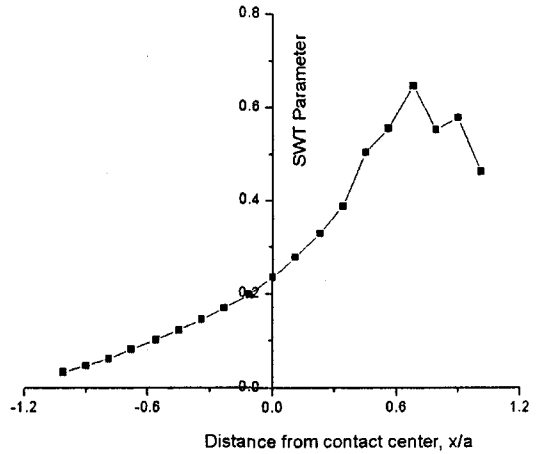


Fig. 12 Distribution of SWT parameters over the contact surface

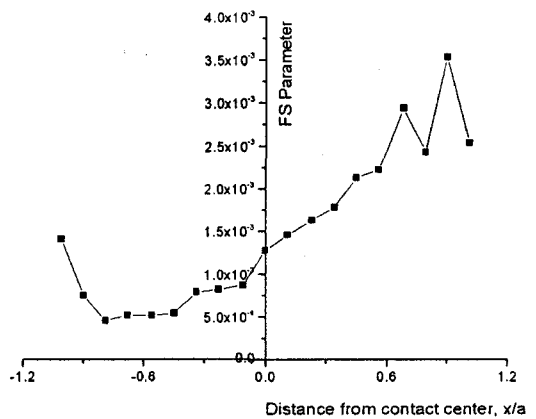


Fig. 13 Distribution of FS parameters over the contact surface

4.5 프레팅 피로시험 결과 분석

Fig. 14은 파단된 시편과 파단 단면을 나타내었다. 4.2절의 해석결과에 의해 시편의 중앙에서 각 파라미터가 크게 나타났는데 Fig. 14에서 보면 중앙부 접촉선단에서 초기균열이 나타남을 확인할 수 있다. 4.5절의 분석 결과에서 SWT-파라미터, FS-파라미터 둘 다 접촉선단 근처에서 높게 나타났는데 실제 시험에서도 접촉선단 근처에 초기균열이 발생함으로써 프레팅 피로에 의해 파손이 되었음을 알 수 있다.

Table 5는 프레팅 피로와 일반 피로의 실험결과

를 나타내었고 Fig. 15와 Fig. 16은 각각 SWT-선도와 FS-선도로 비교하여 나타내었다.

Table 5 SWT and FS parameter obtained from the fatigue test

No.	SWT	FS(10^{-3})	N_f	비고
1	1.02	5.352	68,372	Fretting
2	0.75	3.781	141,176	Fretting
3	0.68	3.900	4,143,742	Fretting
4	0.24	1.728	5,024,111+	Fretting
5	0.73	4.228	79,897	Non-Fretting
6	0.62	3.639	142,564	Non-Fretting

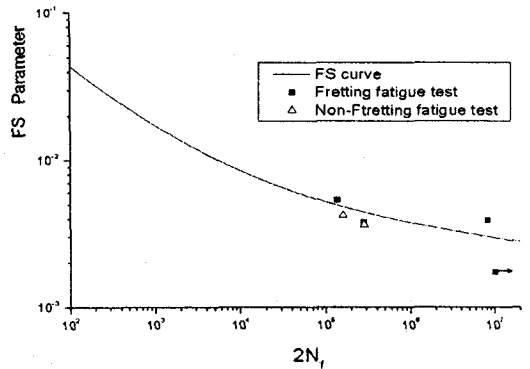


Fig. 16 FS parameter versus cycles about fretting fatigue test

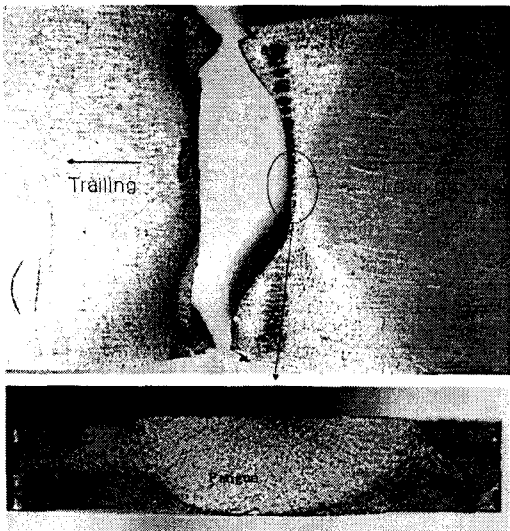


Fig. 14 Fracture surface of SCM420

5. 결론

크롬 몰리브덴강(SCM420)에 대한 프레팅 피로 수명 예측에 관한 연구로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. SCM420강재에 대한 인장시험과 피로시험을 수행하여 기계적 성질(인장강도, 항복강도, 영률) 및 피로 물성치에 대한 결과들을 제시하였다.
2. 프레팅 접촉 시 모든 하중단계에 대한 접촉면의 응력상태를 분석하였고 3차원상태를 평면변형률 상태로 평가 가능함을 보였다.
3. 프레팅 접촉 상태의 SWT-파라미터와 FS-파라미터를 얻을 수 있는 알고리즘을 프로그램화하여 다축 피로이론을 적용하였다.
4. SCM420강재에 대한 단축 피로 물성치를 이용하여 다축 피로 파라미터인 SWT-선도와 FS-선도를 얻었다.
5. 실제 프레팅 피로시험 결과 초기균열 위치가 유한요소해석을 통해 예측한 위험위치와 일치함을 확인하여 프레팅 피로에 다축 피로이론의 적용 가능함을 보였다.

후기

본 연구는 2006년도 경남대학교 교내학술조성 연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다. 실험에 많은 도움을 주신 부산대학교 나노시스템공학 공학과 김태규 교수님과 김현수 박사님께 감사드립니다.

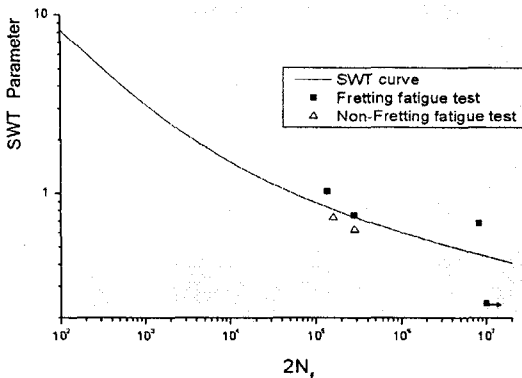


Fig. 15 SWT parameter versus cycles about fretting fatigue test

참고문헌

1. Nowell, D., Dini, D. and Hills, D. A., "Recent Developments in the Understanding of Fretting Fatigue," *Engng. Fract. Mech.*, Vol. 73, pp. 207-222, 2006.
2. Giannakopoulos, A. E., Lindley, T. C. and Suresh, S., "Aspects of Equivalence between Contact Mechanics and Fracture Mechanis," *Acta. mater.*, Vol. 46, pp. 2955-2968, 1998.
3. Yang, B. and Mall, S., "On Crack Initiation Mechanisms in Fretting Fatigue," *J. Appl. Mech.*, Vol. 68, pp. 76-80, 2001.
4. Hertz, H., "On the Contact of Elastic Solids," *J. reine und angewandte Mathematik*, Vol. 92, pp. 156-171, 1982.
5. Mindlin, R. D., "Compliance of Elastic Bodies in Contact," *J. Appl. Mech.*, Vol. 16, pp. 259-268, 1949.
6. Bramhall, R., "Studies in Fretting Fatigue," D. Phil. Thesis., University of Oxford, 1973.
7. Hills, D. A., Nowell, D. and O'Connor, J. J., "On the Mechanics of Fretting Fatigue," *Wear*, Vol. 125, pp. 129-156, 1988.
8. Szolwinski, M. P. and Farris, T. N., "Observation, Aalysis and Pediction of Fetting Ftigue in 2024-T351 Auminum Aloy," *Wear*, Vol. 221, pp. 24-36, 1998.
9. Lykins, C. D., Mall, S. and Jain, V., "An Evaluation of Parameters for Predicting Fretting Fatigue Crack Initiation," *Int. J. Fatigue*, Vol. 22, pp. 703-716, 2000.
10. Sum, W. S., Williams, E. J. and Leen, S. B., "Finite Element, Critical-plane, Fatigue Life Prediction of Simple and Complex Contact Configurations," *Int. J. Fatigue*, Vol. 27, pp. 403-416, 2005.
11. Araujo, J. A. and Nowell, D. "The Effect of Rapidly Varying Contact Stress Fields on Fretting Fatigue," *Int. J. Fatigue*, Vol. 24, pp. 763-775, 2002.
12. Smith, K. N., Waston, P. and Topper, T. H., "A Stress Strain Function for the Fatigue of Metals," *J. Mater*, Vol. 15, pp. 767-778, 1970.
13. Szolwinski, M. P. and Farris, T. N., "chanics of Fretting Fatigue Crack Formation," *Wear*, Vol. 198, pp. 93-107, 1996.
14. Szolwinski, M. P., Harish, G. and Farris, T. N., "omparison of Fretting Fatigue Crack Nucleation Experiments to Multiaxial Fatigue Theory Life Prediction," *Proceedings of the ASTM Syposium on high Cycle Fatigue, AD*, Vol. 55, pp. 449-457, 1997.
15. Fatemi, A. and Socie, D., "Critical Plane Approach to Multiaixal Fatigue Damage Including out of Phase Loading," *Fat. Fract. Engng. Mat. Struct*, Vol. 11, No. 3, pp. 149-165, 1988.
16. Wang, C. H. and Brown, M. W., "Path-independent Parameter for Fatigue under Proportional and Non-proportional Loading," *Fat. Fract. Engng. Mat. Struct*, Vol. 12, pp. 1285-1298, 1993.
17. Roh, H. R., Jang, S. K. and Cho, S. B., "Effects of Contact Zone according to Geometries and Mechanical Properties of Pad for Fretting Contacts," *of the KSPE*, Vol. 22, No. 11, pp. 125-134, 2005.
18. Meggiolaro, M. A. and Castro, J. T. P., "tactical Evaluation of Strain-life Fatigue Crack Initiation Predictions," *Int. J. Fatigue*, Vol. 26, pp. 463-476, 2004.