

접촉 폭 크기를 고려한 알루미늄(Al6061) 시험편의 프레팅 피로시험과 수명평가에 관한 연구

A Study on Fretting Fatigue Life Evaluation and Experiments for Al6061 Specimen Considering the Contact Width Size

*박상훈¹, 이진호², 김진광³, 김대규⁴, 조상봉³

*S. H. Park¹, J. H. Lee², J. K. Kim³, T. G. KIM⁴, S. B. CHO(sbcho@kyungnam.ac.kr)³

¹경남대학교 대학원, ²부산대학교 대학원, ³경남대학교 기계자동차공학부, ⁴부산대학교 나노시스템공정공학과

Key words : Fretting fatigue, Contact size effect, Point method

1. 서론

리벳 또는 축과 휠, 핀 조인트, 클러치, 스피들 등으로 체결된 연결부와 항공기 터빈엔진의 블레이드와 디스크 접촉부 등에서 관찰할 수 있는 프레팅(Fretting) 현상은 접촉하고 있는 두 물체 사이에 미세한 진동의 상대변위로 인한 접촉 손상과정을 말한다. 접촉조건에 따라 전면슬립(gross slip)현상에 의한 프레팅 마멸과 부분슬립(partial slip)현상에 의한 프레팅 피로가 있다.¹

본 논문에서는 Al6061 소재의 실린더 패드와 평판 시험편간 프레팅 피로 수명평가에 대한 연구를 하고자 한다. 실린더 패드의 곡률반경 변화에도 접촉표면에서 최대 수직 접촉압력은 일정하며, 접촉 폭이 증가함에 따라 피로수명이 감소하는 접촉 폭 크기 효과¹에 관한 연구를 수행하였다. 다축피로 이론에 기초한 위험단면 SWT-파라미터 수명평가법과 위험거리법을 적용한 예측수명과 프레팅 피로시험 수명을 비교 분석하였다.

2. 위험단면 모델 및 Al6061의 물성 평가

프레팅 접촉에 의한 위험단면 부근에는 과도한 응력집중현상과 다축, 비-비례 응력상태에 의해 복잡한 응력장이 형성된다. 피로수명을 평가하기 위해서는 다축피로 이론의 도입이 필요하다. 다축피로에 기초한 위험단면 파라미터에는 Szolwinski와 Farris²가 제안한 SWT-파라미터와 Fatemi와 Socie³가 제안한 FS-파라미터가 있다. 본 논문에서는 식 (1)과 같은 SWT-파라미터를 사용하여 초기균열 발생 위치와 수명을 예측하였다.

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

여기서 σ'_f , b , ϵ'_f , c , $2N_f$, E 는 각각 피로강도계수, 피로강도지수, 피로연성계수, 피로연성지수, 파단까지의 반복수 및 탄성계수이다. 본 연구에서 사용한 재료는 Al6061이며 물성치는 Table 1과 같다. Table 1은 INSTRON사의 만능시험기(Model 8516)로 인장시험과 총 6단계(0.8%, 0.7%, 0.6%, 0.48%, 0.3%, 0.22%)의 변형률제어로 양진피로시험을 본 연구에서 직접 수행하여 얻은 결과이다.

Table 1 Mechanical and fatigue properties of Al6061

E (GPa)	ν	σ'_f (MPa)	b	ϵ'_f	c
72	0.33	541.118	-0.08669	0.1526	-0.64605

3. 프레팅 피로시험 및 수명 평가

프레팅 피로시험의 소재와 장비는 인장 및 피로시험과 동일한 Al6061과 만능시험기를 사용하였다.

프레팅 피로시험은 Fig. 1과 2에서 보는 바와 같이 수직력 P, 접선력 Q와 반복인장응력 σ_b 가 일정한 속도 10Hz와 응력비 R=-1로 작용되는 완전교변하중 조건으로 설정하였다. 여기서 수직력 P는 실린더 내부압력 p와 유압실린더 내부면적 A의 곱으로 표현되고, 접선력 Q는 병렬로 연결된 4개의 스프링을 조합한 등가 스프링상수 k와 인장응력에 의한 상대변위 δ 의 곱으로 표현된다.

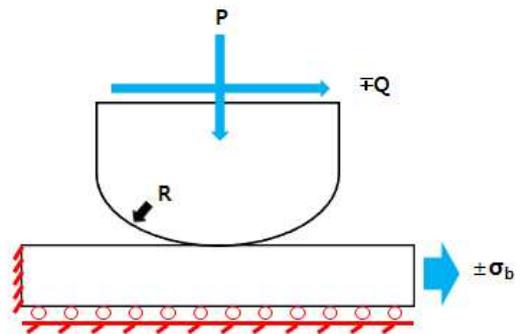


Fig. 1 Schematic of fretting fatigue

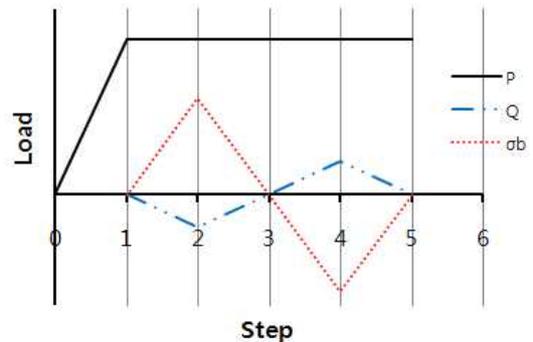


Fig. 2 Loading history under fretting contact

- 1Step : 패드에 수직력이 주어지고 계속 유지가 된다.
- 2Step : 최대 인장응력과 최소 접선력이 작용된다.
- 3Step : 인장응력과 접선력은 0으로 작용된다.
- 4Step : 최소 인장력과 최대 접선력이 작용된다.
- 5Step : 인장응력과 접선력은 0으로 작용된다.

Table 2 Experimental conditions for fretting fatigue

Experimental conditions	Pad			
	R50	R70	R90	R110
P (N)	981.5	1374	1767	2160
Q (N)	45.675	61.625	50.75	57.275
σ_b (MPa)	130	130	130	130
p (kg/cm ²)	3.21	4.5	5.8	7.1
A (mm ²)	3177.25	3177.25	3177.25	3177.25
k (N/mm)	580	580	580	580
δ (mm)	0.07875	0.10625	0.0875	0.09875

Table 2는 실린더 패드의 곡률반경이 50, 70, 90, 110 mm의 4종류에 따른 프레팅 피로시험 조건이다. 접촉표면에서 최대 수직 접촉압력은 일정하고 접촉 폭이 증가하도록 수직력 P를 식 (2)에 의해 구하여 Table 2와 같이 가하였다.

$$p_{\max} = \frac{2 \times P}{\pi \times a \times L} \quad (2)$$

여기서 P, a, L 은 각각 수직력, 접촉반폭, 패드와 시험편이 접촉되는 폭이며, L은 6mm이다.

그러나 실험한 프레팅 모델에서 유한요소해석 한 결과는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 최대 수직 접촉압력이 다소 차이가 난다. 수직력 P는 무한판에 대한 이론적으로 구한 값이며 실제 프레팅 모델은 두께(t=3mm)가 얇은 유한판이므로 경계조건에 기인한 차이이다.

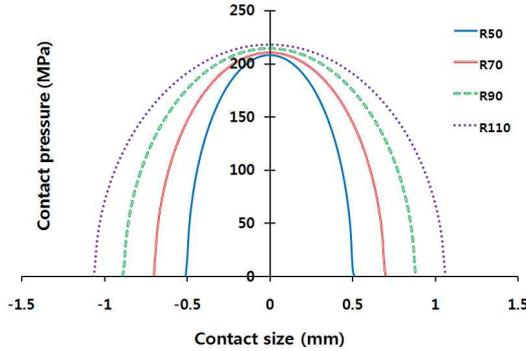


Fig. 3 Contact pressure vs. contact size

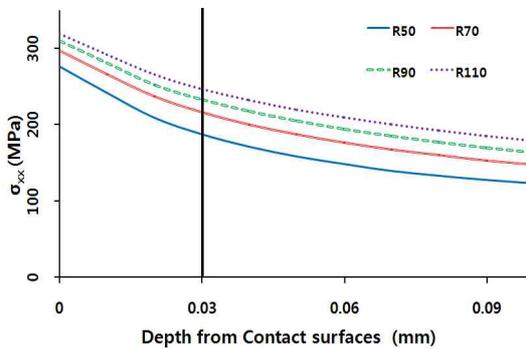


Fig. 4 Comparison of σ_{xx} for the various pad radius

Fig. 4는 Table 2에 주어진 조건으로 실제 프레팅 모델을 유한요소해석하고 패드의 곡률반경에 대하여 접촉 표면에서 깊이 방향으로 σ_{xx} 를 비교한 것이다. σ_{xx} 는 프레팅 피로에 영향을 가장 많이 미치는 응력성분이다. σ_{xx} 의 최대가 같도록 하려고 하였지만 경계조건의 효과 때문에 접촉 폭 크기에 따라 차이가 나는 것을 Fig. 4에서 볼 수 있다.

Table 3은 Table 2에 제시한 시험조건으로 프레팅 시험한 프레팅 피로수명 결과를 타나낸 것이다. 접촉 폭이 증가함에 따라 단수명의 경향을 볼 수 있다.

Table 3 Result of fretting fatigue experiment

Pad	Contact half width (mm)	No.	Experiment life (cycles)
R50	0.501	1	146,244
		2	87,390
		3	92,535
		4	93,846
R70	0.701	1	84,010
		2	91,875
R90	0.902	1	48,909
		2	64,732
		3	53,088
		4	46,663
R110	1.102	1	48,358
		2	64,288
		3	49,055

프레팅 피로 문제의 유한요소해석 모델은 Fig. 1과 같이 상하 대칭성을 고려하여 1/2 모델만 표현하여 2차원 평면 변형률 상태의 탄성-접촉문제로 해석을 하였다. 이때 유한요소 상용프로그램인 ABAQUS 6.7을 이용하였다. 하중조건은 Table. 2의 조건을 평면문제로 하기 위해 단위두께로 환산하여 사용하였으며, 하중

이력도 프레팅 피로시험조건과 동일하게 Fig. 2와 같이하고, 패드의 곡률반경을 변화 시키면서 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석 결과 최대 인장응력이 가해지는 2step에서 반복인장응력이 가해지는 방향의 접촉표면 끝 선단에서 초기균열 발생 위치를 예측 할 수 있었으며 프레팅 피로 시험 결과와 일치함을 보였다. 또한 유한요소해석 결과의 응력, 변형률 데이터와 Table 1의 물성값을 사용하여 식 (1)에 의해 패드의 곡률반경에 따라 수명을 예측할 수 있었다.

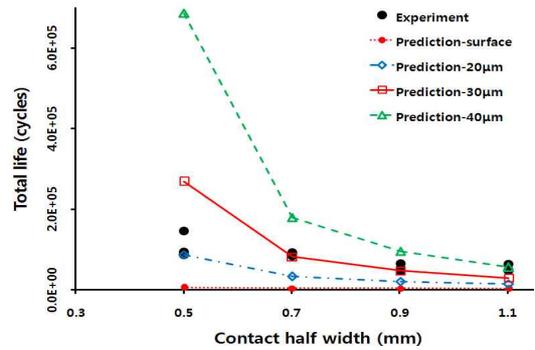


Fig. 5 Total life vs. contact half width

접촉표면의 결과 값으로 초기균열 발생 위치는 예측 할 수 있지만 수명은 Fig. 5와 같이 시험수명과 오차가 크다는 것을 알 수 있다. 그래서 위험거리이론을 도입하여 수명평가를 하였다. 참고문헌⁴에서는 임계체적의 평균값인 요소응력과 요소변형률 값을 이용하여 수명을 예측하였지만, 본 논문에서는 초기균열 생성지점으로부터 깊이방향으로 절점의 응력과 변형률을 이용하여 수명을 예측하는 점법(point method)을 이용하였다

점법을 이용하여 초기균열 생성지점의 깊이 방향으로 절점의 응력과 변형률을 이용하여 수명을 예측한 결과 Fig. 5와 같은 결과가 나타났으며, 0.03mm지점에서 예측수명이 시험수명과 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 접촉 폭이 작을 경우는 0.02mm에서, 접촉 폭이 크면 0.04mm에서 더 잘 일치 하는 경향을 알 수 있다. 그 이유는 Fig. 3에서 접촉 폭이 증가함에 따라 기울기가 완만해져서 같은 위치의 응력이 증가하며, 접촉표면의 σ_{xx} 도 증가한다. 두 가지 이유로 접촉 폭이 증가함에 따라 수명이 감소하는 경향을 알 수 있다. 따라서 위험거리는 0.02mm에서 0.04mm사이 에 존재한다고 판단된다. 여기서 접촉표면의 σ_{xx} 를 평균 내어 평균값에 패드의 곡률반경에 따른 4종류 경우의 σ_{xx} 를 동일하게 하면 0.03mm에 더 잘 일치 할 것으로 판단된다.

4. 결론

실린더 패드와 평판 시험편간의 접촉 폭 크기를 고려하여 프레팅 피로시험 및 수명평가를 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Al6061의 인장시험 및 피로시험을 수행하여 기계적 성질 및 피로 물성값을 얻을 수 있었다.
2. 접촉 폭 크기에 따른 프레팅 피로시험과 유한요소해석의 결과 값으로 접촉 폭 크기효과를 설명하였다.
3. SWT-파라미터와 위험거리법을 도입하여 깊이방향으로 프레팅 예측 피로수명과 시험수명을 비교한 결과에서 위험거리 는 0.03mm로 나타났다.

참고문헌

1. Magaziner, R., Jin, O. and Mall, S., "Slip regime explanation of observed size effect in fretting," Wear, 257, 190-197, 2004.
2. Szolwinski, M. P. and Farris, T. N., "Mechanics of fretting fatigue crack formation," Wear, 198, 93-107, 1996.

-이하 생략-