

표면 거칠기가 접촉피로 수명에 미치는 영향

추효준* (부산대학교 정밀기계공학과), 이상돈(부산대학교 정밀기계공학과)
조용주(부산대학교 기계공학부)

The Effect of Surface Roughness on the Contact Fatigue Life

Hyo Jun Chu (Mecha. & Precision Eng. Dept. PNU), Sang Don Lee (Mecha. & Precision Eng. Dept., PNU)
Yong Joo Cho (Mechanical Eng. Dept. PNU)

ABSTRACT

The effect of surface roughness on the contact fatigue was investigated in this study. To accomplish this goal, contact analysis based on the influence functions and the rectangular patch solutions was performed to obtain the subsurface stress. Mesoscopic multiaxial fatigue criterion is then applied to predict fatigue damage. Suitable counting method and damage rule were used to evaluate the fatigue life of random loading caused by rough surface. As a result of the analysis, relationship between the life and roughness as well as the crack initiation depth was revealed. Below the critical roughness, It is observed that the fatigue life has hardly changed and crack is initiated around the depth at which the maximum shear stress occurs. Different behavior, however, is observed in case that the roughness is above the critical value.

Key Words : Contact Fatigue (접촉피로), Surface Roughness (표면 거칠기), Contact Analysis (접촉해석)

1. 서론

기어와 베어링과 같은 기계 요소는 Non-conformal 접촉을 하게 된다. 이러한 조건에서 접촉할 경우 접촉 부위의 집중 하중이 반복 작용하여 발생하는 표면 손상을 접촉 피로라 하며 손상의 형상에 따라 피팅(Pitting), 스폐링(Spalling), 플레이킹(Flaking) 등으로 불린다.

접촉 피로는 접촉 표면에서 발생하는 현상이기 때문에 표면의 다양한 특성에 의해 영향을 받게 되며, 그 예로 표면 거칠기, 유막 두께, 접촉 응력, 잔류 응력, 표면 마찰력 등이 있다. 접촉피로 현상은 이러한 다양한 특성에 영향을 받기 때문에 아직 일반화된 이론은 존재하지 않고 있는 실정이다.

접촉 피로에 관한 연구는 Way[1]에 의해 처음으로 실험적 접근이 이루어 졌으며, Tallian[2]에 의해 폭넓은 연구가 진행되었다. Norimune et al[3]는 Four-roller-type 장치를 통해 거칠기를 고려한 구름 접촉피로에 관한 실험을 하였으며, 접촉 피로 균열은 표면에서 시작되며 표면의 돌기는 접촉피로 시작수명에 큰 영향을 끼친다는 결론을 얻었다.

Kim et al[4]은 3 차원 접촉해석과 다양한 고주

기 피로모델을 이용한 피로 모델을 제시한 바 있다. 하지만 현재까지 표면 거칠기가 접촉피로 수명에 미치는 영향이 정량적으로 보고된 바 없으며 대부분 실험에 의존하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구를 통해 구 접촉에서 표면의 돌기가 접촉피로 수명에 미치는 영향을 3 차원 표면 형상을 이용하여 정량적으로 해석하고자 한다.

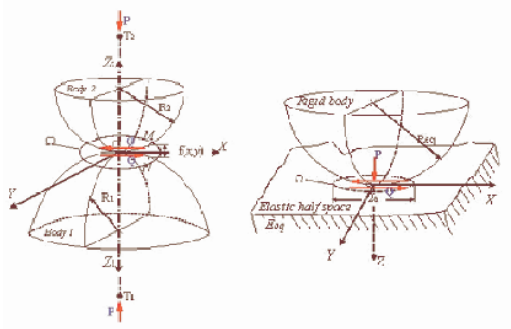
연구 결과를 통해 베어링, 기어, 캠 등의 정밀 기계 설계 시, 접촉 부위의 표면 거칠기에 대한 명확한 기준을 제시하여 원가 절감에 도움을 줄 수 있으며 수명 예측을 통해 신뢰성을 증가에도 큰 기여를 할 수 있을 것으로 보인다.

2. 이론

2.1 접촉 해석

2.1.1 접촉 응력

본 연구에서 관심을 갖는 대상은 두 개의 탄성체간의 접촉이다. 접촉면의 응력은 영향함수를 이용한 반무한체 해석을 통해 얻을 수 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 Non-conformal 접촉을 하는 물체의 접촉 영역은 물체 크기에 비해 매우 작으며



(a) Contact of two bodies. (b) Equivalent contact

Fig. 1 Contact of two non-conformal bodies.

로 두 탄성체는 반 무한체로 생각 할 수 있다. $f(x, y)$ 는 두 탄성체의 접촉 전 형상함수 (Shape function)이고 $e(x, y)$ 는 접촉 후 거리이다. 하중이 가해진 경우 두 탄성체간 거리는 다음과 같다.

$$e(x, y) = f(x, y) + u_{z_1}^P + u_{z_2}^P + u_{z_1}^O + u_{z_2}^O + \delta \quad (1)$$

여기서 $u_{z_1}^P$, $u_{z_2}^P$ 와 $u_{z_1}^O$, $u_{z_2}^O$ 는 각각 수직하중과 접선하중에 의한 두 탄성체 사이의 변위를 나타내며 δ 는 유효 강체 변위를 나타낸다.

접촉문제를 풀기 위해 다음의 구속조건을 만족시키기 위한 반복 연산이 요구된다.

접촉영역 내에서는

$$p(x, y) > 0, e(x, y) = 0 \quad (2)$$

접촉영역 밖에서는

$$p(x, y) = 0, e(x, y) > 0 \quad (3)$$

여기서 $p(x, y)$ 는 접촉 압력을 나타낸다. 접촉영역 내에서 식(1)은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\iint_{\Omega} (u_{z_1}^P + u_{z_2}^P + u_{z_1}^O + u_{z_2}^O) dx dy = \delta - f(x, y) \quad (4)$$

사각 조각면 내에서는 균일한 압력을 가지므로 위 식은 다음과 같이 이산화 될 수 있다.

$$C_1 \sum_{j=1}^k F_{ij} P_j + \mu C_2 \sum_{j=1}^k F_{ij}' P_j = \delta - f_i \quad (5)$$

여기서 $C_2 = (1 - 2\nu_1)(1 + \nu_1)/2\pi E_1 + (1 - 2\nu_2)(1 + \nu_2)/2\pi E_2$

이며 $C_1 = (1 - \nu_1^2)\pi E_1 + (1 - \nu_2^2)\pi E_2$ 이고, k 는 접촉 영역의 사각조각 수를 나타낸다. F_{ij} 과 F_{ij}' 는 각각 j 에서의 수직 접선 분포하중에 의한 i 점에서의 변위를 나타내는 영향함수를 나타낸다.

2.1.2 표면 아래 응력

우선 접촉영역을 균일한 분포하중이 작용하는 사각조각으로 이산화한다. 각각의 사각요소에 작용하는 하중으로 인한 탄성체 내부 한 점에서의 응력은 Love[5]의 변위해를 중첩하여 얻을 수 있다.

2.2 피로 해석

Table 1 Material properties of SM45C

f_1 (MPa)	t_{-1} (MPa)	E (GPa)	ν	κ	λ
442	311	213	0.29	62.3	0.53

2.2.1 피로 판정식

피로 판정식(Fatigue limit criterion)은 재료의 피로한도를 판단하기 위한 식이다. Papadopoulos[6]에 의해 제안된 피로 판정식은 임계평면법의 형식을 따르며 다음과 같다. 임계 평면은 일반 전단응력(Generalised shear stress)의 진폭이 최대값을 갖는 면으로 정의된다. 우선 분해 전단응력(Resolved shear stress)의 진폭은 다음과 같다.

$$\tau_a(\varphi, \theta, \chi) = \frac{1}{2} \left[\max_{t \in P} \tau(\varphi, \theta, \chi, t) - \min_{t \in P} \tau(\varphi, \theta, \chi, t) \right] \quad (6)$$

여기서 (φ, θ) 는 임의의 면을 정의하는 각이다. χ 는 임의의 면 (φ, θ) 에서 정의되는 임의의 선의 방향이다. t 와 P 는 각각 하중의 시간과 주기를 나타낸다. 일반 전단응력(Generalised shear stress, T_a)은 임의 면에서 분해 전단응력의 평균값을 나타낸다.

$$T_a(\varphi, \theta) = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int \tau_a^2(\varphi, \theta, \chi) d\chi} \quad (7)$$

제안된 피로 판정식은 다음과 같다.

$$\max T_a + 3 \left(\frac{t_{-1}}{f_{-1}} - \frac{1}{2} \right) \sigma_{H, \max} \leq t_{-1} \quad (8)$$

여기서 t_{-1} 와 f_{-1} 는 각각 완전 교번 비틀림과 굽힘 피로한도 값이다. $\sigma_{H, \max}$ 는 정수압 응력의 최대값을 나타낸다.

2.2.2 피로 수명식

피로 수명식은 부가된 하중에 의해 재료에서 피로균열이 발생할 경우 그 피로 수명을 밝혀내기 위한 식이며 다음과 같다.

$$\frac{\max T_a + 3(t_{-1}/f_{-1} - 1/2)\sigma_{H,a}}{1 - \frac{3}{t_{-1}}(t_{-1}/f_{-1} - 1/2)\sigma_{H,m}} \leq \frac{t_{-1}}{1 - \kappa N^{-\lambda}} \quad (9)$$

여기서 κ 와 λ 는 비틀림 실험에서 얻은 S-N Curve 를 선형 피팅하여 얻을 수 있다. $\sigma_{H,a}$ 와 $\sigma_{H,m}$ 는 정수압 응력의 진폭과 평균값을 나타낸다.

2.2.3 변동하중에 대한 적용법

앞서 설명한 피로 이론은 일정한 진폭의 하중이 작용 할 경우에 적용이 가능하다. 하지만 거친 표면간의 접촉인 경우에는 돌기의 영향을 받아 불규칙한 변동하중(Variable amplitude loading)이 작용하게 된다. 따라서, 적절한 카운팅 방법(Counting Method)을 이용하여 변동하중을 일정한 하중(Constant amplitude loading)의 조합으로 등가시

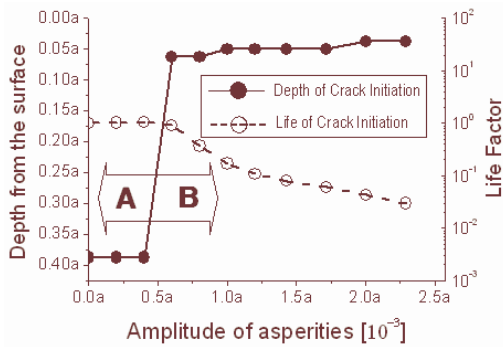


Fig. 2 Fatigue life and crack initiation depth of sinusoidal rough surface

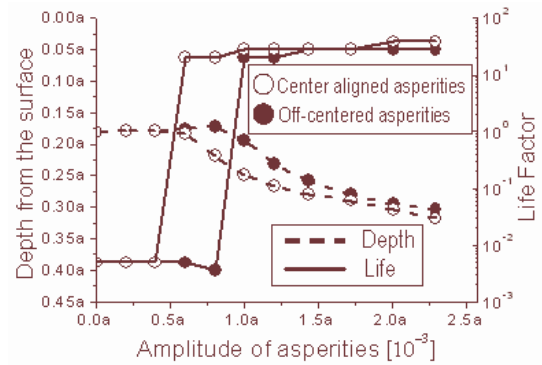


Fig. 4 Changes in asperity distribution

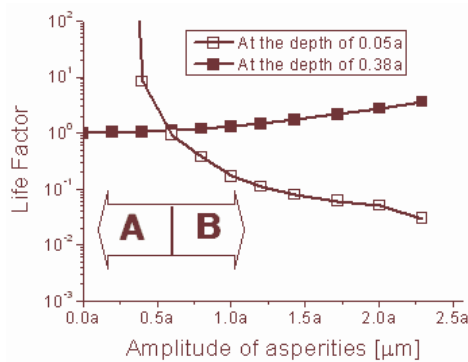


Fig. 3 Life change at two different depths

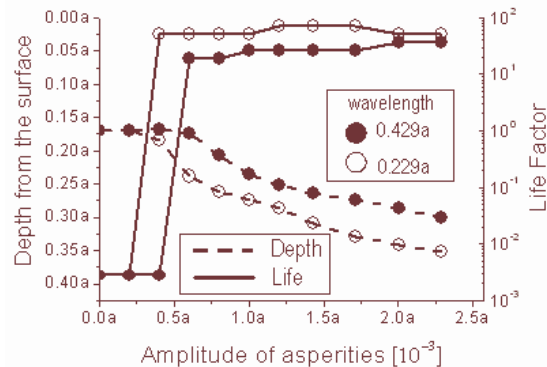


Fig. 5 Changes in wavelength

켜야 한다. 본 연구에서는 일반적으로 널리 사용되고 있는 Rainflow Counting[7]을 사용하였다.

다축 응력이 작용하는 부재에서 각각의 응력 성분은 평균값이나 진폭이 독립적으로 작용할 뿐만 아니라 주파수 또한 독립적으로 작용하게 된다.

본 연구에서는 Weber et al.[8]이 카운팅 변수로 고려한 바 있는 임의 평면의 수직응력을 카운팅 변수로 정의하여 다축 응력 성분의 카운팅을 수행한다. 임의의 평면은 가장 데미지(Damage)가 크게 작용하는 면으로 정의한다. 한 사이클에 대한 응력 성분을 얻기 위해 카운팅 변수가 사이클을 형성하는 시간에 상응하는 각각의 성분을 추출하여 얻었다.

그 후에 Linear Miner rule 을 사용하여 각각의 Damage 를 가산한 후 최종 수명을 얻는다.

3. 결 과

두 종류의 표면을 수치적으로 생성하였으며 접촉 해석과 피로 해석을 실시하였다. 우선 Sinusoidal 표면의 해석을 통해 돌기의 형상과 위치의 변화가 수명에 미치는 영향을 알아보았으며, 실제와 유사한 정규 분포의 돌기를 가진 표면에 대한 해석을 수행하여 표면 거칠기가 피로 수명에 미치는 영향을 알아 보았다. 해석에 사용된 재료의 물성치는 Fig. 1 과 같다. 매끄러운 표면의 Hertz 최대 압력은 1.57 [GPa] 이다. 접촉 반폭은 a 로 표

기하며 $0.35 \text{ [}\mu\text{m]}$ 이다. Life factor 는 매끄러운 면의 최소 수명($0.36 \times 10^6 \text{ Cycle}$)에 대한 비를 나타낸다.

3.1 Sinusoidal 표면

Sinusoidal 표면의 돌기는 표면의 전체에 걸쳐 균일한 Amplitude 와 Wavelength 를 갖는다. Wavelength 가 $0.429a$ 일 경우 Amplitude 별 피로 수명과 균열시작 깊이의 변화를 Fig. 3 에 나타내었다. 돌기의 Amplitude 변화는 피로 수명과 피로균열 시작위치의 변화를 가져왔으며 그 변화 양상에 따라 Amplitude 를 두 구간으로 나눌 수 있었다.

구간 A 에서, 균열은 매끄러운 표면에서의 균열 시작 깊이인 $0.38a$ 에서 발생하였고 수명의 변화는 무시할 수 있을 정도로 미소하였다. 하지만 구간 B 에서는 구간 A 와 다른 양상을 보였다. 구간 B 에서 균열은 표면근처에서 시작되며 Amplitude 에 따라 깊이가 $0.05a$ 근방에서 최소 수명을 보이는 것으로 예측되었다. 또한 피로 수명은 돌기의 Amplitude 증가에 따라 현저한 감소를 보였다.

이렇게 구간에 따라 피로 수명과 피로발생 깊이에서 다른 양상을 보이는 이유를 알아보기 위해 각 구간 별 피로 균열 발생 지점인 $0.38a$ 와 $0.05a$ 에서 돌기의 Amplitude 변화를 Fig. 4 에 나타내었다.

$0.38a$ 깊이에서의 수명은 Amplitude 증가에 따라 오히려 서서히 증가하였으나 구간 A 내에서의 증가량은 무시할 정도였다. 반면 표면 근처인 $0.05a$

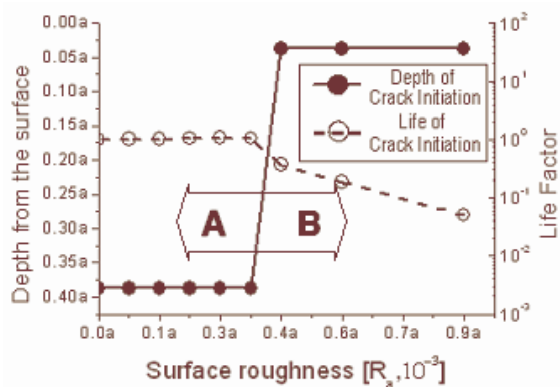


Fig. 2 Fatigue life and crack initiation depth of Gaussian random rough surface

깊이에서의 수명은 Amplitude 증가에 따라 현저한 감소를 보였다. Amplitude가 구간 B에 속한 경우에는 0.05a 깊이에서 수명이 0.38a 깊이에서 수명보다 작아 표면 근처에서 피로 균열이 시작될 것임을 예측할 수 있었다.

Fig. 5에서는 돌기가 구름 운동의 중심선 상에 분포되어 있는 표면과 구름 운동의 수직 방향으로 1/4 Wavelength 만큼 벗어나게 분포되어 있는 표면을 비교하였다. Fig. 6에서는 돌기의 Wavelength가 0.429a인 표면과 0.229a인 표면을 비교하였다. 해석 결과에 따르면 돌기의 분포와 Wavelength는 피로 수명 및 발생 깊이에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

돌기가 중심에 배치되어 있는 표면과 Wavelength가 작은 표면에서 그렇지 않은 경우보다 돌기의 Amplitude가 작을 때 두 구간의 변이(變移)가 발생하였으며 낮은 수명이 예측되었다.

3.2 Generated Gaussian Rough Surface

실제의 접촉면은 동일한 표면 거칠기를 갖더라도 돌기의 분포와 Wavelength가 접촉 위치에 따라 아주 불규칙적이다. 따라서 동일한 거칠기를 갖는 다른 여러 접촉면을 해석한 후 깊이 별 수명을 평균화하여 수명을 예측하였다.

Fig. 7은 Auto-correlation length가 0.09a인 정규 분포 표면의 거칠기 별 접촉 피로 수명을 나타낸다. 여기서 Auto-correlation length는 랜덤한 표면에서의 Wavelength를 나타낸다.

해석 결과에 따르면 Sinusoidal 표면과 마찬가지로 구간 A에서 피로 균열은 0.38a 깊이에서 발생하며 수명의 변화는 무시할 정도인 것으로 나타났다. 반면 구간 B에서 피로 균열은 표면 근처에서 발생하며 수명은 현저하게 감소하였다. 그리고 두 구간의 변이는 표면 거칠기가 $0.35 \times 10^{-3}a$ 와 $0.4 \times 10^{-3}a$ 사이에서 발생할 것으로 예측되었다.

4. 결론

본 연구를 통해 구 접촉 시 표면 거칠기가 피로 수명에 미치는 영향을 알아 보았다.

해석 결과를 통해 표면 거칠기가 일정 수준 이상이 될 경우에 접촉 피로수명이 현저하게 감소한다는 것을 알 수 있었다. 그리고 거칠기가 일정 수준 이하일 경우에는 매끄러운 면의 해석결과와 아주 유사한 결과를 보이며 돌기의 영향은 아주 미미하다는 것을 알 수 있었다. 그 원인은 표면 돌기의 영향이 표면 근처에 집중되기 때문인 것으로 밝혀졌다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- Way, S., "Pitting due to rolling contact", *J. Appl. Mech.*, 2, pp. A49 A58, 1935.
- Tallian, T. E., "Simplified contact fatigue life prediction model: Part 1. Review of published models", *J. Trib.*, 114, pp. 207 213, 1992.
- Norimune, S., et. al. "Effect of tangential traction and roughness on crack initiation/ propagation during rolling contact", *ASME Trans.*, Vol 25(2) pp. 198-206, 1982
- Kim, T.W. et al., "The fatigue crack initiation life prediction based on several high-cycle fatigue criteria under spherical rolling contact", *Tribology Transaction*, Vol 46, No.1, pp. 76-82, 2003
- Love, A. E. H., "Stress produced in a semi-infinite solid by pressure on part of the boundary", *Phil. Trans. Royal Society*, A228, pp. 377 420, 1929.
- Papadopoulos, I. V., "Long life fatigue under multiaxial loading", *Int. J. Fatigue*, 23, pp 839 849, 2001.
- Matsuishi, M. et. al, "Fatigue of metals subjected to varying stress", In proceedings of the Kyushu branch of JSME, Hukuoka, Japan, 37-40, 1968.
- B. Weber. et al., "A stress-based approach for fatigue assessment under multiaxial variable amplitude loading", *Biaxial/ Multiaxial fatigue and fracture*, 25, 218-231, 1999.