

## 임계평면법을 이용한 거친 표면의 구름접촉시 피로균열 시작수명

설광조 · 김태완\* · 조용주\*\*

부산대학원 정밀기계공학과, \*부산대학교 기계기술연구소, \*\*부산대학교 기계공학부

### The Fatigue Crack Initiation Life under the Rolling Contact of Rough Surfaces using Critical Plane Approach

Kwoang-jo Seorl, Tae-Wan Kim\* and Yong-Joo Cho\*\*

Dept. of Precision Engineering, Graduate School, Pusan National University

\*Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University

\*\*School of Mechanical Engineering, Pusan National University

**Abstract** – The stresses of surface and substrate under the rough surface contact are irregular. Using rainflow counting method for irregular stresses, the fatigue surface crack initiation life was calculated. With the surface generated by computer, this paper figures out the random load generated by contacting to the rough surface, analyzes the stress of its subsurface, and calculates the fatigue crack initiation life of the rough surface fatigue theory.

**Key words** – fatigue wear, crack initiation life, contact fatigue, rainflow counting.

#### 1. 서 론

대부분의 기계들은 상대운동을 하는 요소들로 구성 되어있고 이 요소들은 구동 목적에 따라 적합한 접촉 상태를 유지토록 설계된다. 이렇게 접촉하고 있는 상태가 지속되면 거친 표면의 돌기(Asperity)들이 서로 직접 접촉하게 되면서 하중사이클동안의 국부적인 응력집중에 기인하는 피로마멸이 생겨 표면에 심각한 손상을 야기하게 된다. 표면의 피로수명은 진동 및 소음을 수반하고 수명을 단축시키며 기계 또는 제품자체의 신뢰도를 떨어뜨리게 된다. 이렇게 트라이볼로지 적 관점에서 수명에 대한 연구는 그 중요성에도 불구하고 활발하지 못한 실정이다.

피로거동은 크게 균열의 시작, 균열의 전파, 전파되는 균열들의 합체 등으로 나눌 수 있다. 피로균열시작의 위치와 형태는 금속의 미시적 구조(Micro-structure), 작용하중의 상태, 시편의 형상에 의존한다. 접촉피로균

열의 경우 일반적인 피로문제와 달리 표면의 형상이 접촉피로균열거동에 미치는 영향은 절대적이다. 따라서, 접촉피로거동을 이해하기 위해서는 표면형상을 고려한 접촉해석이 필수적이다. 최근에는 두 물체의 접촉을 미세한 돌기들간의 접촉으로 모델링 하여 접촉문제를 해석하는 방법이 많이 연구되고 있다[1]. 그러나 기존의 접촉피로균열에 대한 연구는 2차원 문제에 국한되거나 돌기 효과를 고려하지 않은 경우가 많아서 개선의 여지가 많다[2,3]. 따라서 본 연구에서는 표면간의 접촉을 실제 표면에 가까운 Gaussian표면들 간의 접촉으로 모델링 하여 접촉시뮬레이션을 통해 접촉물체의 피로균열 시작거동을 연구하고자 한다. 균열시작 수명을 구하기 위해서 접촉부에 대한 응력 해석이 필수적이다.[4] Hertz[5]는 탄성체사이에 수직하중만이 작용하는 경우에 대해 수직하중과 접촉면적 및 접촉면 압력분포와의 관계를 닫힌 해의 형태로 구하였다. 또한 수직접촉을 하는 두 개의 non-conformal 탄성체의 계면에 수직하중과 접선하중이 동시에 작용하는 경우에 대해서 **Bufler** [6]는 서로 다른 탄성계수를 가진 물체간의 2차원 접촉

<sup>†</sup>주저자 · 책임저자 : yjcho@pusan.ac.kr

에 대한 접선하중의 영향에 대해 연구하였다. 일반적으로 수치적인 접촉문제의 해석에서 반 무한체위의 사각조각 표면에 작용하는 균일한 수직 분포하중에 의한 하중·변위 관계[7]가 많이 이용된다.

일반적으로 피로해석은 단축 비례 하중(proportional loading)에 대한 HCF(High Cycle Fatigue)의 피로 수명 판정은 S-N curve와 Modified Goodman Equation을 이용하여 구하는 방법이 많이 사용되어져 왔다[8].

본 연구에서는 수치적인 응력해석을 수행하고, 이를 토대로 Mataka등[9]이 제시한 피로한도 모델을 기초로 하여 균열시작수명을 예측하였다. 여기서 불 균일한 하중에 대해서는 Rainflow counting 방법과 Palmgrem-Miner 법칙을 이용하여 거친 표면 접촉 하에서의 피로균열시작 수명을 예측하고자 한다.

## 2. 피로 이론

### 2-1. Critical Plane

1973년 Brown과 Miller는 피로균열의 성장에 관한 현상의 물리적인 해석을 바탕으로 하여 다축 피로 이론은 제시하였다[10]. 그들은 최대전단변형률 평면과 그 면에 작용하는 수직 변형률을 고려하여 피로조건을 구하였다. Fig. 1(a)에서 보는 것처럼 전단변형이 균열면에 작용하고 있다. 그러나 균열면이 닫혀 있으므로

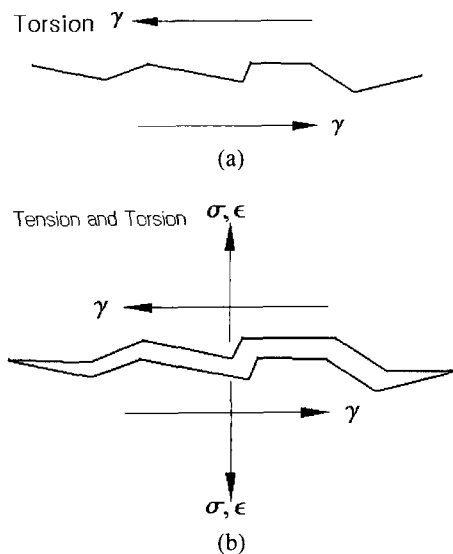


Fig. 1. Rough surface generated by computer simulation ( $Ku=3$ ). (a) shear load applied at crack faces (b) shear and tensile load applied at crack faces

균열면의 마찰에 의해 전단력이 균열의 진전에 미치는 영향이 줄어들게 된다. 그러나 Fig. 5(b)는 균열면에 수직 변형률 또는 응력이 작용하게 되어 균열면이 열리게 되고 균열 선단에서는 전단력의 영향을 더 많이 받게된다. 이러한 경우에는 더욱 짧은 피로 수명을 가지게된다. 이와 같이 균열이 특정한 면에서 시작되어 진전한다고 가정하고 균열이 생성되기 쉬운 평면의 조건을 제시한 다음 그 평면에 작용하는 응력 크기를 조사하여 그것을 조합하여 표현된 식을 피로조건에 적용하면 수명을 예측할 수 있다[11].

임계평면에 대한 여러 형태의 이론이 제시되었지만, 그 적용 절차는 비슷한 순서를 따른다. 먼저 임계평면을 정의하고 그 정의에 해당되는 임계 평면을 구한다. 그리고 그 평면의 응력량을 조사하여 피로 조건이 만족하는지 확인한다. 만약 그 평면이 피로 조건을 넘어서게 되면 그 평면에서 균열이 시작된다고 할 수 있다. 그러므로 균열이 시작되는 방향과 임계평면의 방향은 일치한다고 할 수 있다.

임계평면이 정의되면 한 점을 통과하는 여러 면을 분석하여 임계평면을 결정하게 된다. 하지만 재료의 모든 점들을 분석해야 하고 또 한 점에서 여러 방향을 분석해야 하므로 많은 계산 시간이 소요된다. 이런 해석시간에 따른 문제와 더불어 일반적으로 피로균열의 경우 표면과 평행한 면에서 발생하는 경우가 많으므로 본 연구에서는 임계평면을 표면과 평행한 면으로 가정하였으며 그 값이는 균열이 발생되면 바로 표면으로 진전할 수 있다고 가정할 수 있는 표면 바로 아래의 위치로 가정하였다.

### 2-2. Mataka criterion

Mataka[9]조건은 임계평면에 작용하는  $C_a$ 와  $N_{max}$ 의 선형 조합으로 구성되어있다. 이 조건에서는 전단 응력의 진폭이 최대가 되는 면을 임계평면으로 정의한다.

$$(\phi^*, \theta^*): \text{Max}[C_a(\phi, \theta)] \quad (1)$$

여기서  $(\phi^*, \theta^*)$ 는 임계 평면에 해당하는  $(\phi, \theta)$  값을 나타낸다. 피로 조건은 다음과 같다.

$$C_a(\phi^*, \theta^*) + \chi N_{max}(\phi^*, \theta^*) \leq \lambda \quad (2)$$

여기서  $\chi$ 와  $\lambda$ 의 값들은 Eq. 2를 순수 완전 반복 비틀림을 주는 경우와 완전 반복 굽힘을 주는 경우에 적용함으로써 구해진다.

순수 완전 반복 비틀림이 작용하는 경우

$$C_a(\phi^*, \theta^*) = t_{-1},$$

$$N_{max}(\phi^*, \theta^*) = 0 \text{ 이고,}$$

완전 반복 굽힘이 작용하는 경우

$$C_a(\phi^*, \theta^*) = f_{-1}/2,$$

$$N_{max}(\phi^*, \theta^*) = f_{-1}/2 \text{ 이다.}$$

그러므로 재료 상수 값은 다음과 같이 된다.

$$\chi = \left( \frac{2t_{-1}}{f_{-1}} \right) - 1, \quad \lambda = t_{-1} \quad (3)$$

여기서,  $t_{-1}, f_{-1}$  비틀림과 굽힘 테스트에서의 피로한도이다.

Eq. 3의 부등식을 만족하게 되면 균열이 발생하지 않게 되고, 부등식을 만족하지 않게 되면 균열이 발생하여 무한수명이 되지 않게 된다. 본 연구에서의 목적은 단순히 피로한도를 제안하는 것이 아니라 정량적인 피로 수명을 예측하는데 있으므로 본 연구에 사용된 식은

$$C_a + \left[ \left( \frac{2t_{-1}^*}{f_{-1}^*} \right) - 1 \right] N_{max} \leq t_{-1}^* \quad (4)$$

Eq. 4을 이용하여 임의의 특정 하중조건에 따른 각각의 피로수명을 예측하였다.

### 2-3. Rain flow counting

본 연구에서 불규칙적인 하중을 받는 경우 피로수명을 예측하기 위하여 rainflow counting을[12] 이용하였다. 여기서 각 하중조건에 해당하는 수명은 Matake 가 제안한 피로 식을 이용하여 수명을 계산하였다. 마지막으로 Palmgren-Miner 법칙을 적용해 거친 접촉에서의 피로 균열시작 수명을 계산하였다.

## 3. 응력 해석

### 3-1. 접촉모델

거친 면의 접촉은 불규칙한 형상의 돌기들에 의해 이루어지므로 거친 접촉을 시뮬레이션 하기 위해서는 3차원 거친 표면의 모델링이 필요하다. Fig. 2에 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 생성된 표면을 보여주고 있다. 그리고 본 논문에서는 Fig. 2과 같이 한 쌍의 거친 표면간의 접촉을 가압 하는 강체 상당표면(Rigid body equivalent surface)과 반 무한탄성체로 모델링 하였다.

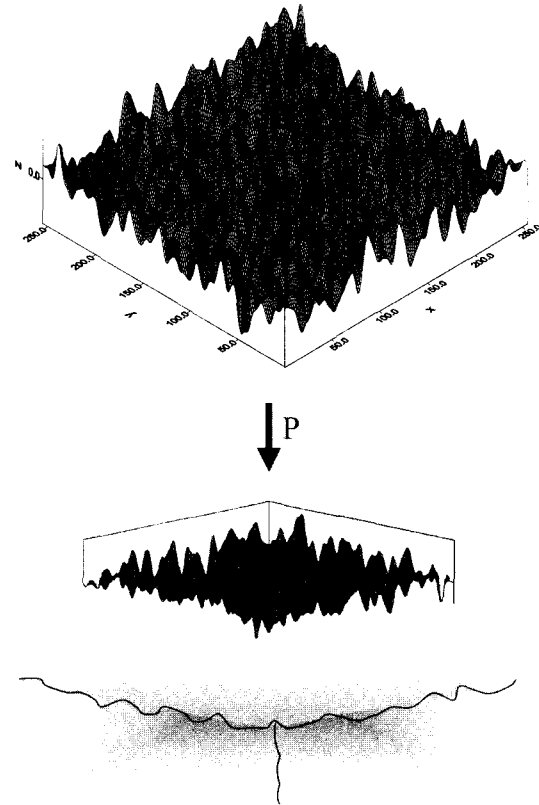


Fig. 2. Schematic diagram of an equivalent contact geometry.

본 연구에 이용된 표면은  $\sigma=1.0, sk=0.0, ku=3.0$ 인 거친 Gaussian 표면으로서 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 수치적으로 생성된 것이다. 이 결과는 Cho 등[13]의 선행 연구결과에서 인용한 것으로  $256 \times 256$ 의 표면 데이터를 포함한다.

### 2-2. 접촉 해석

본 연구에서는 수치적인 접촉문제의 해석에서 보다 효율적으로 쓰일 수 있는 사각조각 표면에 대한 Love의 수직분포하중에 의한 변위 해[7]와 Cho 등의 접선 분포하중에 대한 변위 해[14]를 이용하여 수치적으로 접촉면적과 접촉면 압력분포를 구하여 접촉압력을 구하였고 돌기들의 접촉을 영향계수법을 이용하여 돌기 접촉압력 및 표면아래 응력을 계산하였다. 이 경우 생성된 표면이 사각형 모양의 편지형태를 띠므로 모서리 부분에서 접촉압력이 과도하게 커지는 Edge 효과가 생길 수 있다.

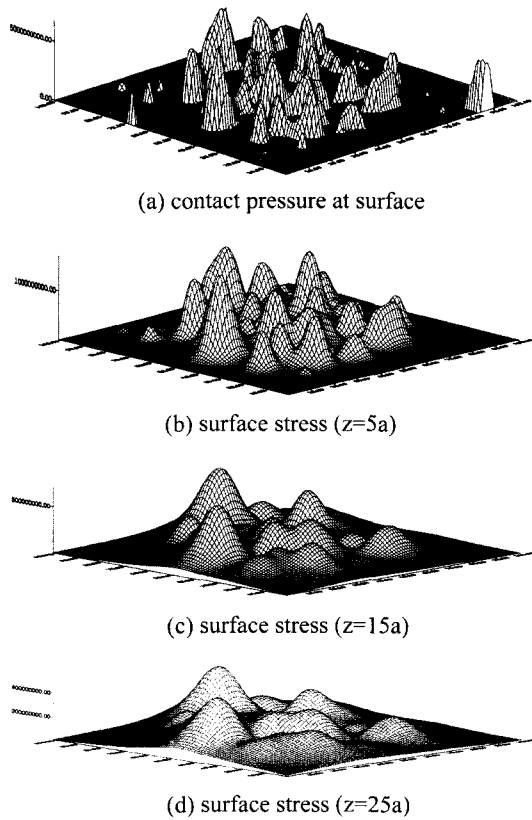


Fig. 3. Contact pressure distribution on the surface and subsurface stress.

따라서 본 연구에서는 반 무한체 가정에 적합한 접촉해석을 수행하기 위해 사각 편치에서의 프로파일링 기법을 이용하여 모서리 부에 약간의 라운딩 처리를 함으로서 사각 모서리에서의 압력 Edge 효과를 없앴다. 본 연구에서는 구름접촉에서의 피로균열수명을 예측하고자 모든 해석에서  $\mu=0$ 로 가정하였다.

Fig. 4에서는 Gaussian 표면에 대한 접촉 표면 압력과 그 표면아래에서의 응력상태를 단계적으로 보여주고 있다.

거친 접촉에서의 피로를 시뮬레이션 하기 위해서는 일정한 특징을 가지는 무한한 표면이 생성되어야 하지만 현실적으로 무한한 표면을 생성시키는 것은 불가능하기 때문에 본 연구에서는 생성된 표면이 불규칙적으로 반복된다고 가정하였다. Fig. 4에 표면 바로 아래의 임의의 한 점이 접촉이 이루어지는 동안 받는 응력상태를 나타내었다.

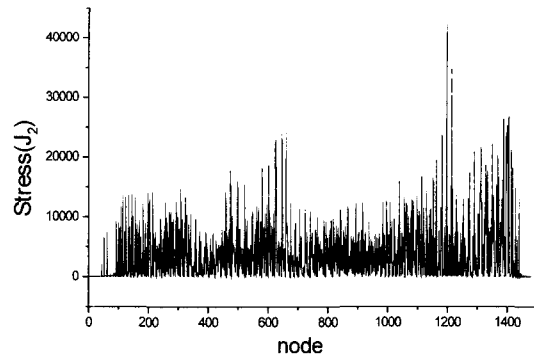


Fig. 4. Stress history at the near surface.

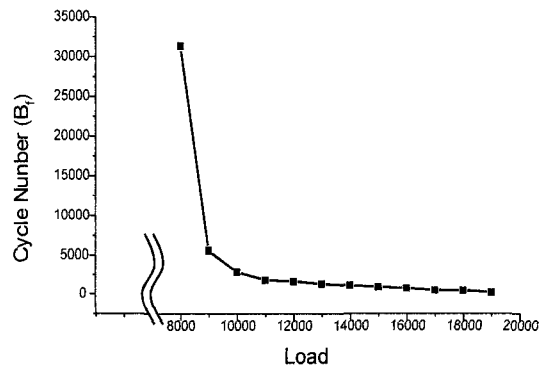


Fig. 5. Fatigue crack initiation life under rough contact.

#### 4. 피로수명

표면 바로 아래의 임의의 한 점은 거친 표면의 영향으로 불규칙적인 응력을 받게 된다. 본 연구에서는 거친 접촉으로 인한 불규칙 하중을 받는 표면의 피로수명을 Rainflow counting을 한 후 Mataka의 수명조건을 이용하여 각각의 응력상태에 대한 수명을 계산하였다. 그리고 Palmgren-Miner 법칙을 이용하여 실제 거친 접촉을 하는 표면의 피로수명을 시뮬레이션 하였다.

Fig. 5에는  $Ku=3$ 인 정규분포를 가지는 거친 표면에 대한 피로수명 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 거친 표면 접촉 시 불규칙적인 하중을 받는 표면에 대한 피로균열 시작수명에 관하여 연구하였다. 거친 접촉 시 피로수명의 대한 기존의 연구가 전무한 상황에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 생성된 거친 표면에 대한 접촉해석을 바탕으로 이러한 연구가

진행되었으며 결과는 다음과 같다.

1. 하중조건에 따라 피로수명은 급격히 감소하였다.
2. 표면조건에 따른 피로특성 관련 연구의 가능성을 제시하였다.

본 연구를 바탕으로 실제 거친 표면 접촉 시의 피로 균열시작수명 특성에 관한 좀더 다양한 연구가 가능할 것으로 보인다.

### 참고문헌

1. R. S. Zhou, H. S. Cheng, T. Mura, "Micropitting in rolling and sliding contact under mixed lubrication," *Journal of Tribology*, Vol. 111, pp. 605-613, 1989.
2. W. Cheng, H. S. Cheng, T. Mura, L. M. Keer, "Micromechanics modeling of crack initiation under contact fatigue," *Journal of Tribology*, Vol.116, pp.2-8, 1994.
3. K. Tanaka, T. Mura, "A theory of fatigue crack initiation at inclusions," *Metallurgical transactions*, Vol. 13A, pp. 117-123, 1982.
4. T. W. Kim, M. H. Kang, Y. P. Koo, Y. J. Cho, "The Elastic Contact Analysis of 3D Rough Surface of Nongaussian Height Distribution," *KSTLE 31st Conference*, pp. 34-41, 2000.
5. Hertz.H., "Uber die Berührung fester elastischer Körper," *J. f. d. Reineu. Angewandte Math.*, Vol.92, pp.156-171. 1882.
6. K. L. Johnson., "Contact mechanics," Cambridge university press, 1985.
7. 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.
8. Ky Dang Van, 1999, "High-Cycle Metal Fatigue From Theory to Applications," SpringerWien NewYork.
9. Mataka, T. Bull, 1977, *JSME Vol. 20, No. 257*.
10. M. W. Brown, K. J. Miller, 1973, "A Theory for Fatigue Failure under Multiaxial Stress-Strain Conditions," *Proc. Inst. Mech. Eng. Vol. 187, No. 65*, pp. 745-755.
11. J. A. Bannantine, J. J. Comer, J. L. Handrock, 1990, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis".
12. Norman E. Dowling, "Mechanical Behavior of Materials," Prentice Hall International.
13. 김태완, 구영필, 조용주, "Kurtosis를 고려한 3차원 거친 표면의 탄성접촉해석," *한국 정밀공학회*, 제18권, 제 10호, pp. 53-60, 2001.
14. 조용주, 이분주, "반 무한체위의 사각조각 표면에 작용하는 집선하중에 의한 반 무한체내의 응력해석," *대한기계학회 논문집*, A권, 제24권, pp.149-150, 2000.

### 기호설명

- $a_s$  : half size of slip band.  
 $B_f$  : repeated cycle number of rough surface.  
 $C_{max}$  : maximum value of shear stress.  
 $J_2$  : second invariant.  
 $N_{max}$  : maximum value of normal stress.  
 $\mu$  : friction coefficient.  
 $t_{-1}, f_{-1}$  : fatigue limit under fully reversed torsion, fully reversed bending, respectively.  
 $t_{-1}^*, f_{-1}^*$  : the pressure at specific life under fully reversed torsion, fully reversed bending, respectively.