

Mesoscopic 피로이론을 이용한 거친 표면의 접촉피로 수명예측

추효준¹ 김태완² 이상돈³ 조용주⁴

The contact fatigue life estimation between Rough surfaces by using mesoscopic fatigue criterion

¹Hyojun Chu (Preci. and Mech. Eng., Pusan National Univ.) *blueraina@korea.com*

²Taewan Kim (Research institute of Mech. Tech., Pusan National Univ.) *tw0826@hanmail.net*

³Sangdon Lee (Preci. and Mech. Eng., Pusan National Univ.) *lsd1975@pusan.ac.kr*

⁴Yongjoo Cho (School of Mech. Eng., Pusan National Univ.) *yjcho@pusan.ac.kr*

ABSTRACT

Rough surfaces are taking into account to estimate the contact fatigue life. A computational methodology and the theoretical basis in this case is presented in this paper. Displacement solution technique by Cho and Love is applied to calculate the stress history beneath the surface subjected to loading. Mesoscopic multiaxial fatigue criterion is then applied to predict fatigue life. This fatigue criterion yields satisfactory results for non-proportional loading and can satisfactorily describe the physical mechanisms of crack initiation as well. As a result of analysis the relation between the life and the roughness as well as the most probable depth of the crack nucleation is discussed

Keywords : Contact fatigue, Mesoscopic fatigue criterion, Rough surface, Contact analysis

기호설명

T_a	=	일반전단응력의 진폭
τ_a	=	분해전단응력의 진폭
t_{-1}, f_{-1}	=	피로한도(비틀림, 굽힘)
K, λ	=	재료상수
$\sigma_{H,m}, \sigma_{H,a}$	=	정수압 응력의 평균과 진폭
(ϕ, θ)	=	임의 단면을 정의하는 각도
χ	=	단면에서 정의되는 각도
p	=	응력 사이클에서 한 주기
t	=	한 주기내의 시간

1. 서론

점 접촉이나 선 접촉과 같은 비적합 (Non-conformal) 조건에서 작동되는 다양한 기계요소들은 요소 전체 크기에 비해 상대적으로 매우 작은 접촉영역을 가지고 있다. 예를 들어 베어링, 기어, 캠 등의 요소가 그 예이다. 이러한 기계 요소는 접촉표

면에 집중된 응력으로 인하여 표면에서 특정 사이클 후, Pitting 이나 Spalling 등의 표면 손상이 발생하게 된다. 이러한 접촉영역에 집중된 응력의 반복작용으로 유한 사이클 후 발생하는 표면손상을 접촉피로이라 한다.

접촉피로는 표면에서 발생하는 현상이기 때문에 상당히 많은 인자들에 의해서 영향을 받게 된다. 예를 들어, 재료의 물성, 접촉응력, 윤활조건, 표면 형상과 돌기들 간의 영향, 표면 잔류응력, 표면 마찰력 등이 접촉피로에 영향을 주는 주요인자라 할 수 있다. 이러한 많은 인자들로 인하여 아직 일반화된 접촉피로 이론이 존재하지 않는다.

접촉피로 현상은 초기에 Way⁽¹⁾에 의해 실험적인 접근이 이루어졌으며, 이 후 많은 연구자들에 의해 실험 및 해석적 접근이 시도되어 왔다.

Dufourg⁽²⁾는 금속학적 관점을 통해 기어의 접촉피로현상에 대해 연구를 하였으며 접촉피로가 표면 층에서 시작된다는 사실을 밝혀내었다. 그 후 Batista et al.⁽³⁾은 기어의 표면 거칠기와 표면 아래의 재료의 특성

을 고려하여 접촉피로에 대한 해석을 시도한 바 있으며, 그 외 많은 연구자들에 의해 다양한 관점으로 해석이 시도되어 왔다.

하지만 기존의 연구는 접촉 표면이 매끄럽다고 가정하여 Hertz 접촉 해석을 통한 접근을 시도하였거나 거친 표면에 대해서 2차원 문제로 국한하고 비례(proportional)하중 상태라 가정하여 해석하는 등 실제 적용에 많은 어려움이 존재하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 실제 거친 표면에 대한 접촉해석을 통해 표면 및 표면 아래에 대한 응력 성분을 구하고 다축 비비례 하중에 대한 피로이론을 적용하여 접촉 피로에 대한 해석적 접근을 시도하였다. 더불어 접촉 피로 수명과 표면 거칠기 사이의 상관관계를 알아보고, 표면 거칠기의 증가에 따른 균열시작 깊이의 변화를 예측해보았다.

2. 피로 해석

2.1 다축 피로이론

현존하는 피로 이론은 크게 고주기 피로(High cycle fatigue)와 저주기 피로(Low cycle fatigue)로 분류된다. 고주기 피로 이론에는 크게 임계평면법, 응력 불변량에 의한 접근법, 단위 체적에서의 평균응력에 의한 접근법, Mesoscopic scale 접근법 등으로 분류된다.⁽⁴⁾ 임계평면법과 응력 불변량법, 평균응력법은 비비례 하중에서 적절하지 못한 예측 결과를 나타내기 때문에 상기한 3가지 이론에 대해서는 고려하지 않겠다.

접촉 피로에 고주기 피로 이론의 적용에 대한 타당성은 다음을 통해 찾을 수 있다.

접촉에 의해 국부적으로 집중되어 발생하는 하중으로 인한 재료 표면은 탄성 셰이크다운(Elastic shakedown) 상태에 도달한다고 가정한다. 즉, 주기적 하중에 의해 재료가 정상상태의 거동을 보이게 비록 소성 변형을 겪는다 할지라도 지속적인 주기하중으로 인하여 재료가 탄성 셰이크다운 상태에 도달하게 되면 거시적인 소성변형이 발생하지 않을 것이라 가정한다.

Dang Van et al.⁽¹⁵⁾은 이러한 가정을 통해 철도 레일의 접촉피로 예측에 Dang Van의 고주기 피로이론을 접목한 바 있으며, Lee⁽¹⁶⁾는 접촉 피로에 관한 실험에서 베어링강이나 기타 고경도 재료에서는 높은 하중이 작용하더라도 거시적인 소성변형이 발생하지 않음을 확인하였으며, 이 경우

에는 결정학적으로 해석해야 할 필요성을 제기한 바 있다.

따라서 재료의 표면에서 국부적으로 높은 하중이 작용한다 할지라도 재료는 결국 탄성 셰이크다운 상태에 도달한다는 가정을 통한 고주기 피로이론의 적용은 충분히 타당성을 가질 수 있다고 사려된다.

2.2 Mesoscopic scale 접근법

고주기 피로 하중이 가해지는 재료는 거시적 관점에서의 소성변형이 발생되지 않으며 탄성적 거동을 보이게 된다. 하지만 재료에서 눈에 띄는 소성변형이 발생하지 않는다 하더라도 하중이 집중되는 부분의 결정 단위에서는 소성 슬립(plastic slip)이 발생한다는 사실이 실험을 통해 확인된 바 있다.⁽⁵⁾

이러한 사실이 고주기 피로에서 피로파손의 원인이 되며 고주기 피로 현상의 접근은 미시적 관점에서 시도되어야 함을 알려준다. 하지만 미시적 관점에서의 거동은 공학적 관점에서는 접근하기가 까다롭기 때문에 일반적인 연속체 역학에서의 응력과 변형량을 이용하여 재료의 미시적 거동을 설명할 필요성이 제기된다.

재료의 결정 단위에서 발생하는 미시적 거동을 연속체 역학이 적용되는 거시적 거동과의 상관관계를 밝혀 고주기 피로 현상을 이론적으로 제시한 접근법을 Mesoscopic scale 접근법 혹은 Mesoscopic 피로이론이라 한다.

Mesoscopic 피로이론은 Dang Van⁽⁶⁾에 의해 처음으로 소개되었으며, Papadopoulos에 의해 발전되었다.

Dang Van은 결정의 소성 거동을 Von-Mises 항복이론을 사용하여 설명하고 있기 때문에 비비례 하중에 대해서는 부정확한 예측을 하는 것으로 알려져 있다.

2.2.1 이론의 개념

Papadopolous는 Mesoscopic 피로 이론을 제시하기 위해 고주기 피로하중을 받는 재료의 그레인(Grain) 단위에서 발생하는 변형량과 응력은 Lyn-Taylor 조건을 만족한다고 가정하였다. 이러한 가정에 근거하여 거시적 관점에서의 물리량(응력, 변형량)과 미시적 관점에서의 물리량 사이의 관계를 규명하였다.

재료의 피로한도는 소성 슬립이 발생하는 결정의 탄,소성 거동에 따라 결정된다.

반복 하중에 의하여 결정이 탄성 셰이크다운(Elastic shakedown) 상태에 도달하게 되면 재료는 무한 수명을 가지게 되는 반면 소성 셰이크다운(Plastic shakedown)이 발생하게 된다면 결정은 유한 수명 후 피로 균열이 시작된다고 할 수 있다.

결정의 상기와 같은 거동은 결정의 축적된 소성변형량 (Accumulated plastic strain)에 의하여 구분 지을 수 있으며, 축적된 소성변형량은 분해 전단응력 (Resolved shear strain)과 비례관계에 있다. 따라서 분해 전단응력이 특정 임계값을 초과하게 되면 결정에서는 균열이 발생하게 된다. 단, 결정은 하나의 슬립 시스템을 갖는다고 가정한다.

재료 내부의 결정 하나에서 피로 균열이 시작되었다는 것은 공학적 관점에서 그리 주목할 만한 사실이 되지 못한다. 균열이 많은 수의 그레인을 가로질렀을 경우를 피로 균열이 시작되었다고 정의하는 것이 공학적 관점에서 타당하다고 할 수 있다. 따라서 축적된 소성 변형량의 임계값은 많은 수의 그레인을 통과하는 균열이 발생하는 값으로 정의될 수 있다. 즉, 재료가 무한 수명을 갖더라도 재료 내부의 미소 균열은 존재할 수 있음을 말해준다.

미소 균열은 재료를 가공할 때부터 존재할 수 있으며 피로 하중에 의해서도 발생할 수 있다. 이러한 미소 균열이 재료의 피로 거동에 미치는 영향은 정수압 응력을 도입함으로써 고려될 수 있다.

2.2.2 피로 판정식

피로 판정식(Fatigue limit criterion)은 재료가 부과된 하중으로 인한 피로 균열의 발생 여부를 알려주는 식이다. Papadopolous 에 의해 제안된 피로 판정식은 임계평면법의 형식을 따르며 다음과 같다.

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

일반 전단응력(Generalised shear stress, T_a)의 진폭은 관심을 갖는 점을 지나는 각각의 평면에서 분해전단응력의 진폭에 대한 평균값으로 표현된다. 일반 전단응력의 진폭이 최대값을 갖는 단면을 임계면이라 정의한다.

$$\max T_a = \max_{(\varphi, \theta)} T_a(\varphi, \theta) \quad (2)$$

일반 전단응력의 진폭은 다음과 같다.

$$T_a(\varphi, \theta) = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\chi=0}^{\chi=2\pi} \tau_a^2(\varphi, \theta, \chi) d\chi} \quad (3)$$

분해 전단응력의 진폭 (τ_a)은 다음과 같이 임의 단면에서의 고정된 임의의 방향을 통해 정의된다.

$$\tau_a(\varphi, \theta, \chi) = \frac{1}{2} \left[\max_{t \in P} \tau(\varphi, \theta, \chi, t) - \min_{t \in P} \tau(\varphi, \theta, \chi, t) \right] \quad (4)$$

정수압 응력의 최대값 (Hydrostatic stress, $\sigma_{H,\max}$)은 다음과 같다.

$$\sigma_{H,\max} = \max_{t \in P} [\sigma_{kk}(t)/3] \quad (5)$$

2.2.3 피로 수명식

피로 수명식은 재료가 피로 하중에 대해 유한한 수명을 가질 때 그 수명을 구하는 식이다.

Papadopolous 는 $\sigma_{H,m}, \sigma_{H,a}, \max T_a$ 를 3 개의 축으로 가지는 공간에서의 등방수명 평면을 통해 피로수명을 예측하기 위한 방법론을 제시하였다. 피로 수명식은 다음과 같다.

$$\frac{\max T_a + 3(t_{-1}/f_{-1} - 1/2)\sigma_{H,a}}{1 - \frac{3}{t_{-1}}(t_{-1}/f_{-1} - 1/2)\sigma_{H,m}} = \frac{t_{-1}}{1 - \kappa N^{-\lambda}} \quad (6)$$

κ 와 λ 는 비틀림 S-N 곡선을 Curve fitting 하여 얻을 수 있다.

2.2.2 과 2.2.3 의 피로 판정식과 피로 수명식에 대한 상세한 내용은 Papadopolous 의 논문⁽⁷⁾을 통해 알 수 있다.

2.3 불규칙하중에 대한 적용법

상기한 Papadopolous 에 의해 제시된 피로 수명식은 일정한 진폭을 가진 하중이 재료에 가해질 경우에 한해서 적용될 수 있다. 하지만 거친 표면의 접촉에서는 돌기의 영향으로 인해 표면 아래의 응력 성분은 항상 불규칙한 응력 상태에 놓이게 된다. 따라서 상기한 일정하중에 대한 피로 이론을 거친 표면에 대한 해석에 직접적으로 적용시킬 수는 없다. 따라서 불규칙한 하중상태를 적절한 사이클 카운팅(Cycle counting) 방법을 적용하여 일정하중 상태의 조합으로 표현하여야 하며, 각각의 사이클에서 발생하는 데미지가 최종 균열의 발생에 미치는 영향을 고려하여 피로 수명이 정의되어야 한다.

2.3.1 사이클 카운팅

다축 불규칙 진폭(Multi-axial variable amplitude)을 가진 응력을 해석하는데 가장 중요한 사항은 사이클을 정의하는 방법이다. 현재까지 제시된 카운팅 방법으로는 레벨 크로싱 카운팅 (Level-crossing counting), 피크 카운팅 (Peak counting), 심플 레인지 카운팅 (Simple-range counting), 레인 플로우 카운팅 (Rainflow counting) 등이 있다.

현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 방법은 레인 플로우 카운팅이다. 레인 플로우 카운팅은 Matsuishi 와 Endo⁽⁸⁾에 의해 처음으로 소개되었으며 여러 다른 연구자들⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾에 의해서 발전되었다.

다축 응력이 작용하는 부재에서 각각의 응력 성분은 평균값이나 진폭이 독립적으로 작용할 뿐만 아니라 주파수 또한 독립적으로 작용하게 된다. 따라서 이러한 응력상태에 대한 사이클 카운팅에서 가장 어려운 문제는 어떠한 응력 성분을 카운팅하여 전체 응력 상태를 대표할 수 있는가 하는 문제이다.

본 연구에서는 Weber et al.⁽¹¹⁾이 카운팅 변수로 사용한 바 있는 특정한 평면의 수직응력을 카운팅 변수로 정의하여 다축 불규칙 하중에 대한 사이클 카운팅을 수행한다. 임의의 평면은 가장 데미지(Damage)가 크게 작용하는 면으로 정의한다.

한 사이클에 대한 응력 텐서를 얻기 위해 카운팅 변수가 사이클을 형성하는 시간 간격에 상응하는 각각의 응력 성분을 이용한다.

2.3.2 데미지 법(Damage rule)

한 시퀀스(Sequence)에서 발생하는 총 데미지는 두 가지 방법을 통해 접근할 수 있다. 하나는 선형 데미지 법칙이며 Miner 법이라 알려져 있다. 다른 하나는 비선형 데미지 법이며 많은 연구자에 의해 제안되었다. Miner 법은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$D_{seq} = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad N_f = \frac{1}{D_{seq}} \quad (7)$$

비선형 데미지 법은 하중의 발생 순서에 따라 달라지는 재료의 거동을 설명하기 위해 제안된 방식이다. 하지만 이 방법을 통한 피로 해석의 기대효과가 현저하지 못할 뿐만 아니라 복잡한 실험을 통해 구해야 하는 재료와 형상에 대한 상수를 필요로 하기

때문에 유용한 해석절차가 아니라고 고려된다. 따라서 본 연구에서는 Miner 법을 사용하여 해석을 수행하겠다.

3. 접촉 해석

3.1 접촉해석 모델

Love⁽¹²⁾와 Cho et al.⁽¹³⁾은 3 차원 접촉 문제에서 Boussinesq 와 Cerruti 의 점 하중에 대한 힘과 변위 관계식을 이용한 수치적인 해석 모델을 제안하였다. 간략한 해석 절차는 다음과 같다.

부적합(Non-conformal) 조건에서 접촉하는 두 물체를 강체(Rigid body)와 탄성 반무한체(Semi-infinite body) 사이의 접촉으로 등가 시킨다. 강체에 작용하는 외력으로 인해 탄성 변형된 접촉부의 영역을 구하는 동시에 접촉부의 압력 분포를 n 개의 미소 사각요소로 이산화 시킨다.

하나의 사각요소에 작용하는 분포하중을 수직과 전단 집중하중으로 등가 시키며, 이 집중하중에 의해 반무한체 내부의 한 점에서 발생하는 응력텐서는 Love⁽¹²⁾와 Cho et al.⁽¹³⁾의 변위해를 통해 얻을 수 있다. 이제 모든 접촉 영역 내의 사각 조각에서 작용하는 집중하중의 영향을 고려하여 최종 응력 텐서를 구하게 된다.

본 모델은 재료가 연속적이고 탄성적으로 거동을 하며 균질하고 등방성이라는 가정에 근거를 둔 모델이다.

3.2 접촉해석

본 연구에서는 실제 거친 표면을 가진 두 개의 구(Sphere)에 대한 접촉 피로수명 예측을 관심의 대상으로 삼는다. 우선 표면 거칠기를 가지지 않는 이상적인 구 사이에서의 접촉 피로 수명을 구하고, 실제 표면으로부터 얻은 표면 거칠기를 갖는 두 개의 구 사이에서의 접촉 피로수명을 예측하겠다.

우선 구에 대한 접촉 문제는 등가된 하나의 구와 반무한 평면과의 접촉 문제로 해석 할 수 있다. 구 표면 아래의 임의의 한 점을 정의하게 되면 그 점은 시간에 따라 다른 응력 상태에 놓이게 된다. 만약 구가 한 바퀴 회전한 다음에는 같은 응력 상태가 반복되기 때문에 구가 한 바퀴 회전하는 것을 한 사이클로 둘 수 있다.

따라서 두 개의 구 접촉 문제를 해석하기 위해 두 개의 구를 하나의 구와 반무한

평면으로 등가 시키고 평면 아래의 한 점이 이동하면서 받게 되는 응력의 변화를 한 사이클에서의 응력 히스토리(History)로 정의할 수 있게 된다.

4. 해석 결과 및 고찰

본 연구에서는 지름이 33mm 이며 같은 재질을 갖는 두 개의 구에 대한 접촉문제를 해석의 대상으로 삼았으며, 재료의 물성치 및 단축 피로수명 데이터는 Lee⁽¹⁴⁾ 의 선행 연구를 인용하였다. 재질은 SM45C 이며 단축 피로 데이터 및 재료의 물성치는 Table. 1 에 나타내었다. 또한 재료는 850℃에서 10 분간 유지 후 물에서 담금질(Quenching)하였으며, 담금질 후 30 분간 650℃로 뜨임(Tempering)처리 하였다.

Table1 Mechanical properties of SM45C

f_{-1} (MPa)	t_{-1} (MPa)	E (GPa)	V
442	311	213	0.29

κ 와 λ 값은 비틀림 S-N 곡선을 Curve fitting 하여 얻었으며, 각각 62.3 과 0.53 의 값을 가진다.

거친 표면의 형상정보는 3 차원 표면 조도기를 이용하여 단위 격자의 길이가 24 (μm)인 51×51 의 표면 데이터를 얻었다.

Table2. Surface roughness of specimens(μm)

시편	R0	R1	R2	R3
Ra	0	0.3	0.7	1.0

해석에 사용된 표면의 거칠기(Ra)는 Table 2 에 나타내었으며 각각의 표면은 Ra 값만 다르고 Skewness 와 Kurtosis 는 같은 값을 갖는다. 해석의 편의를 위해 등가된 구 표면만 거칠기를 가지며, 탄성 반 무한체는 매끄러운 표면을 갖는다고 가정한다.

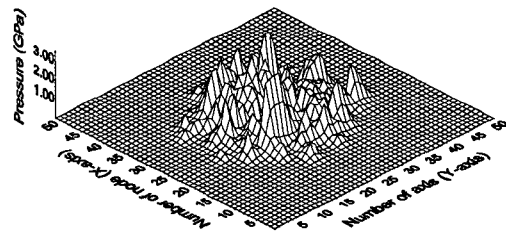
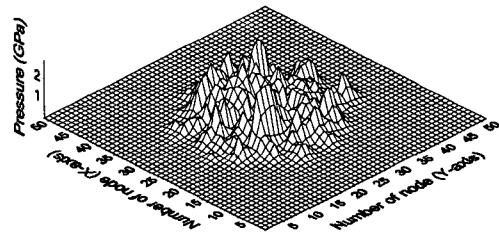
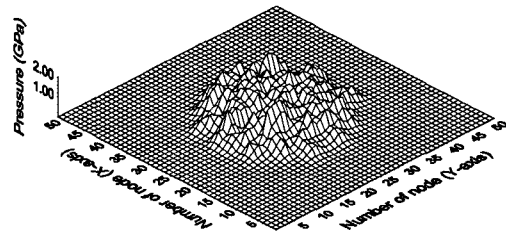
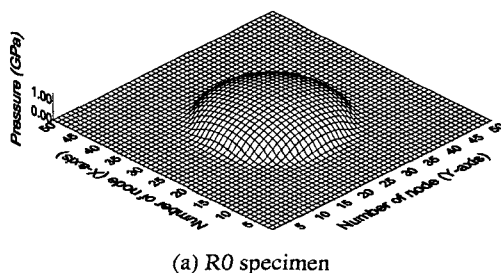


Fig. 1 Pressure distribution of the specimens

4.1 접촉해석 결과

상기한 모델을 이용하여 해석한 결과 표면의 압력은 돌기에 영향을 받아 상이한 분포를 나타내었으며, 매끄러운 구(R0)와 거친 표면을 갖는 3 개의 구(R1, R2, R3)에 300(N)의 하중이 작용한 경우의 압력분포를 Fig. 1 에 나타내었다.

매끄러운 표면을 갖는 R0 시편의 최대압력은 Hertz 압력과 동일한 1.41(GPa)을 나타내었으며, 나머지 시편에서의 최대압력은 각각 2.05, 2.94, 3.48(GPa)을 나타내었다.

4.2 피로해석 결과

Fig. 2 는 접촉해석을 통해 얻은 표면 아래의 응력에 근거하여 해석한 작용하중과 피로 수명의 관계를 보여주고 있다. 매끄러운 표면(R0)과 거친 표면(R1,R2,R3)에서의

피로한도에 상응하는 수명의 차이가 상당히 크다는 것을 알 수 있다.

해석결과에 따르면 매끄러운 표면인 R0 시편에서의 피로한도는 290(N)이며, R1, R2, R3 시편은 각각 90(N), 75(N), 68(N)이었다. 여기서 피로한도는 10^7 사이클에 해당하는 수명을 기준으로 삼은 것이다.

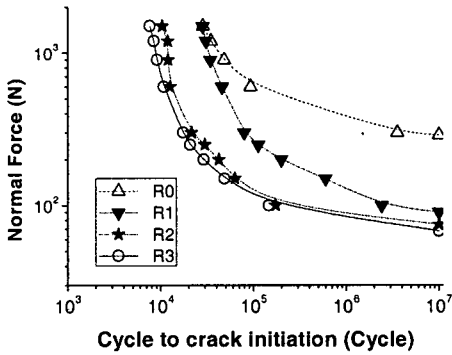


Fig. 2 Contact fatigue life of various surfaces

Fig. 3 는 표면 거칠기(Ra) 값의 증가에 따른 수명의 변화를 나타낸 도표이다. 도표에서 알 수 있듯이 수명과 표면 거칠기는 로그 좌표계에서 근사적 선형관계에 있음을 알 수 있다. 표면 거칠기가 3.3 배 증가함에 따라 수명은 3.6 ~ 4.6 배의 감소를 보였다. 따라서 거칠기와 수명의 증가비에 대한 기울기는 $-1.1 \sim -1.4$ 의 값을 갖는 것으로 보인다.

Norimune. et al.⁽¹⁷⁾ 은 3 가지의 거칠기를 갖는 실린더 형상의 시편에 대한 접촉피로 실험을 수행하였다. 시편의 재료는 SM45C 이며 4-롤러 타입의 롤링 피로 실험장치를 이용하였고 외부 롤러는 베어링강(AISI 52100)을 이며 광유(Mineral lubricant)를 이용하여 윤활을 하였다.

윤활상태, 시편의 종류, 실험 방법 등에서 많은 차이를 보여 Norimune. et al.의 실험결과와 직접적인 비교는 불가능하지만 표면 거칠기에 따른 접촉피로 수명의 변화에 대한 경향을 살펴볼 수 있다는 면에서 의미 있다고 할 수 있다.

그는 표면 거칠기가 10 배 늘어날 때 수명은 10 배 가량 감소한다는 실험 결과를 내어 놓았다. 따라서 표면 거칠기 증가에 대한 수명증가의 기울기는 -1 이라고 할 수 있으며, 저자의 해석결과인 $-1.1 \sim -1.4$ 에 비해 낮은 기울기를 보였다.

해석결과에서 더 큰 기울기를 예측하는 것은 다음과 같이 추론해 볼 수 있다. 거친 표면의 지속적인 구름접촉으로 인해 돌기들은 소성변형이 발생할 것이다. 이러한 돌기들의 소성변형이 원인되어 나타나는 표면의 길들여지는 과정을 본 해석에서는 고려되지 않았기 때문에 위와 같은 해석 결과를 보인 것으로 사려된다. 따라서 더 나은 예측 결과를 얻기 위해서는 정상상태에서의 표면 데이터를 이용하여 해석해야 할 것으로 보인다.

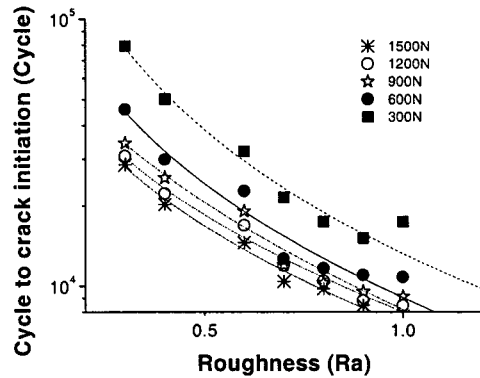


Fig. 3 Contact fatigue life of various surfaces

매끄러운 표면인 구(R0)인 경우의 피로 균열은 접촉 반경에 해당하는 깊이 부근에서 발생하며 표면의 거칠기를 고려하였을 경우에는 표면 근처에서 균열이 발생함을 알 수 있다. 이 결과는 Fig.4 에 보여주고 있다.

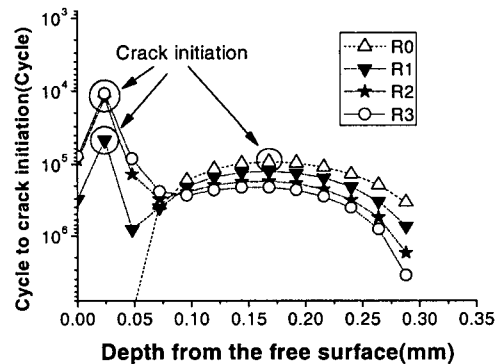


Fig. 4 The estimated depth of the most probable crack initiation site
Dufourg⁽²⁾ 를 비롯한 일부 연구자⁽³⁾ 들은 접촉피로에 의한 균열은 표면 근처에서

시작된다는 동일한 연구결과를 제시하고 있어 본 해석의 신뢰성을 뒷받침하고 있다.

본 연구에 적용한 해석적 모델에서는 재료표면이 거시적으로는 탄성 셰이크다운(Elastic shakedown) 상태에 도달한다는 가정을 통해 진행되었고 동일한 조건으로 Dang Van 등의 연구자에 의해 사용된 바 있다. 또한 Lee 등의 선행연구 결과에 의해 실험적으로 그 타당성이 뒷받침 되었다.

하지만 경도가 낮은 재질에서는 소성 셰이크다운(Plastic shakedown)이나 라체팅(Ratchetting)이 발생할 가능성이 충분하기 때문에 표면의 거시적인 소성변형에 따른 표면특성의 변화를 고려해볼 필요가 있으며, 저주기 피로이론을 동시에 고려해 볼 필요가 있다.

5. 결론

이번 연구에서는 서로 다른 4 개의 거친 표면에 대한 피로수명을 예측하여 표면 거칠기가 피로수명에 미치는 영향과 표면 거칠기에 따른 피로균열 시작위치를 비교해 보았다.

보다 정확한 예측을 위해서는 반복하중에 의한 돌기의 소성변형 및 표면 특성의 변화를 고려하여 정상상태의 표면 데이터를 해석에 적용할 필요성이 제시되었다.

또한 표면 거칠기를 고려하여 균열의 시작깊이를 해석을 하였으며 피로 균열은 돌기의 영향을 받아 표면 근처에서 접촉피로 균열이 시작될 것이라고 예측되어 Dufourg 등의 연구결과와 일치하였다.

이상의 결과로부터 접촉피로에서 표면 거칠기가 재료의 거동에 미치는 영향은 매우 크다는 사실을 알 수 있었으며 좀 더 근접한 해석을 위해 보다 깊이 있는 연구에 대한 필요성이 제기되었다.

참고문헌

1. S. Way, "Pitting due to rolling contact.", J. Appl. Mech., 2, A49-A58, 1935
2. X. Dufourg, "Pitting des engrenages de boite de vitesse", PhD thesis, Universite de Paris-Sud, Orsay, France, 1995
3. A. C. Batista et al., "Contact fatigue of automotive gears: evolution and effects of residual stresses introduced by surface treatments", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 23, 217-228, 2000
4. I. V. Papadopolous, "A comparative study of multiaxial high-cycle fatigue criteria for metals", Int. J. Fatigue., 19(3), 219-235, 1997
5. Gough, H. J., "Crystalline structure in relation to failure of metals ", Eighth Edgar Marburg Lecture 33. Proc. ASTM, 1933
6. Dang Van, "Criterion for high cycle fatigue failure under multiaxial loading", Biaxial and Multiaxial Fatigue, EGF3, Mechanical Engineering Publications, London, 459-478, 1989
7. I. V. Papadopolous, "Long life fatigue under multiaxial loading", Int. J. Fatigue., 23, 839-849, 2001
8. Matsuishi, M., Endo, T., "Fatigue of metals subjected to varying stress", In proceedings of the Kyushu branch of JSME, Hukuoka, Japan, 37-40, 1968.
9. R. J. Anthes, "Modified Rainflow counting keeping the load sequence", Int. J. Fatigue., 19(7), 529-535, 1997.
10. T. E. Langlais, "Multiaxial cycle counting for critical plane methods", Int. J. Fatigue., 25, 641-647, 2003.
11. 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.
12. Love. A. E. H., "Stress produced in a semi-infinite solid by pressure on part of the boundary", Phil. Trans. Royal Society, A228, 377-420, 1929.
13. Cho. Y. J. et al., "The stress field in a body caused by the tangential force of a rectangular on a semi-infinite solid", STLE Int. Journal., 2(1), 29-34, 2001
14. Lee, S.B. "Out of phase bending and torsion fatigue of steels", Biaxial and Multiaxial Fatigue, EGF3, Mecha. Eng. Public., London, 621-634, 1989.
15. Dang Van, K. "On some recent trends in modeling of contact fatigue and wear in rail", Wear, 253, 219-227, 2002
16. Lee, H.Y., "Analysis of rolling contact fatigue of ball bearing with various hardness by X-ray diffraction", Journal of the KSTLE, 17(3), 209-215, 2001.
17. Norimune, Soda, "Effect of tangential traction and roughness on crack initiation/propagation during rolling contact ", ASME Transactions, 25(2), 198-206, 1981