

철도차륜의 구름접촉피로에 의한 수명예측에 관한 연구

전중균^{1*}, 양진승², 박삼진¹, 이규세³, 마양수⁴

A Study on the Life Span Prediction of Railroad Wheels caused by Rolling Contact Fatigue

C. K. Chun^{1*}, J. S. Yang², S. J. Park¹, G. S. Yi³ and Y. S. Ma⁴

요 약 철도차량의 차륜에서 발생하는 크랙은 표면으로부터 개시하는 표면크랙, 내부에서 개시하는 내부크랙으로 나눌 수 있고, 이들 크랙은 철도의 안전운행에 위험요소가 된다. 그러므로 이들 크랙의 성장수명 판단은 매우 중요하다. 본 연구에서는 철도차륜의 표면크랙 및 내부크랙의 응력분포상태, 변위 및 성장수명을 연구하였다. 특히 내부 및 표면크랙에 대해 유한요소해석을 실시하여 크랙선단의 응력상태, 변위, 응력확대계수를 찾아내었고, 이를 바탕으로 Paris 공식을 사용하여 성장수명을 예측하였다.

Abstract The crack that occurs on the wheels of railroad cars can be categorized into a surface crack that starts from the surface or a subsurface crack that starts from the inside and can be detrimental to safe railroad operations. Therefore, estimating the growth life span of this type of crack is very important. In this research, the stress distributions, displacements, and the growth-life spans of both surface cracks and subsurface cracks have been studied. By using the finite element analysis, especially in the life span prediction process, the stress conditions and the stress intensity factors of the crack tip have been discovered. The Paris formula has been used to analyze the growth-life span prediction.

Key Words : Surface Crack, Subsurface Crack, Life span, Rolling Contact Fatigue, Paris Formula.

1. 서 론

철도차량은 차륜과 레일이 미끄럼마찰계수가 작도록 설계되는 특성이 있고, 이는 차륜과 레일의 피로파괴현상에 많은 영향을 미친다. 철도차량 차륜의 파괴는 차륜과 레일사이의 접촉응력에 의한 박리, 제동열에 의한 열크랙 또는 마모 등에 의해 발생하고, 박리는 스펠링(Spalling), 셸링(Shelling), 라체팅(rachetting)과 같은 다양한 형태로 나타나게 된다. ERRI(European Rail Research Institute)에서는 구름접촉에 의한 피로에 대하여 많은 연구를 수행했다 [1]. 특히 Ekberg는 차륜에 대한 구름접촉피로에 대한 모델을 만들어 피로수명을 예측하는 연구를 수행했다

[2~5].

본 연구의 목적은 구름접촉상태에서 사용되는 차륜의 피로크랙에 대하여 성장수명의 판단에 필수요소인 응력상태, 변위 및 응력확대계수를 유한요소해석으로 구하고 이를 이용하여 피로수명을 예측하기 위한 것이다.

2. 크랙선단의 응력분포와 수명예측

피로크랙은 응력집중의 특수한 문제로 취급된다. 응력확대계수 K 는 크랙주위의 응력장 세기에 관한 정도를 나타내는 Factor이고, LEFM (Linear Elastic Fracture Mechanics)의 일반식으로부터 유도한다. 또한 복잡한 크랙상태의 응력확대계수는 중첩법의 한 방식인 합성기술(Compounding Technique)을 이용하여 이미 알고 있는 단순한 경우의 해를 조합하여 구한다.

크랙은 형태에 따라 그림1과 같이 열림형, 미끄럼

¹선문대학교 기계공학부

²명지대학교 기계공학부

³선문대학교 토목공학과

⁴한국폴리텍Ⅱ 인천대학 컴퓨터응용기계학과

*교신저자: 전중균(ckchun@sunmoon.ac.kr)

형, 찢음형의 모드 I, II, III으로 나뉘고, 각 모드의 크랙에 대한 응력과 변위는 응력확대계수 K_I, K_{II}, K_{III} 의 향으로 표시된다. 이 중에서 K_I 은 인장력 및 인장 변위와 관계가 있고, K_{II} 는 전단력 및 전단 변위와 관계가 있다. K_{III} 는 평면변형을 해석에서 0이 된다. 차륜에서 실제로 나타나는 spalling과 ratcheting현상을 바탕으로 차륜의 내부크랙은 모드 II로 해석하고, 표면 크랙은 모드 I와 모드 II가 복합된 상태로 해석된다. 표면크랙 주위의 임의 미소면적에 대하여 응력의 중첩 원리를 적용하면 식 (1)과 같다[6].

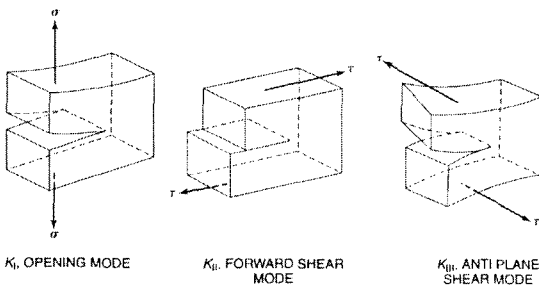


그림 1. 크랙모드 형상

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} (2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2})$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (1)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2})$$

ΔK 과 da/dN 값을 로그그래프로 나타낸 피로크랙 성장률 곡선에서 영역 II에 대한 피로수명의 예측은 Paris식을 적분하여 구할 수 있다. Paris식은 $da/dN = f(K)$ 로 나타낼 수 있고, 이 식으로부터 피로수명 N_f 는 다음과 같다.

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \quad (2)$$

$$N_f = \frac{1}{C(Y\Delta\sigma)^m} \frac{a_0^{1-(m/2)} - a_f^{1-(m/2)}}{(m/2)-1} \quad (m \neq 2) \quad (3)$$

a_i : 초기크랙크기, a_f : 최종 임계크랙의 크기,
 C, m : 재료상수, Y : 크랙길이와 재료폭의 비

3. 내부크랙의 유한요소해석

3.1 내부크랙의 모델과 해석조건

유한요소해석에 사용된 표면내부 크랙의 이론적 모델은 그림 2와 같다. 최대전단응력이 발생하는 지점에 있는 크랙에서 전파가 먼저 일어날 것이므로 최대전단 응력의 발생지점인 $h/a = 0.8$ 의 지점에 크랙이 위치한다고 가정한다. 모델에 사용하는 조건은 접촉반경 $a \approx 400 \mu m$, 크랙의 반 길이 $c = 15 \mu m$, 크랙의 깊이 $h = 320 \mu m$ 로 한다. 크랙의 반 길이 c 와 크랙 깊이 h 또는 Hertzian 접촉의 접촉 반경 a 와의 비는 1보다 매우 작다 ($c/h \ll 1, c/a \ll 1$). 크랙의 길이가 크랙 깊이나 접촉반경에 비하여 매우 작기 때문에 크랙이 매우 작다고 할 수 있다.

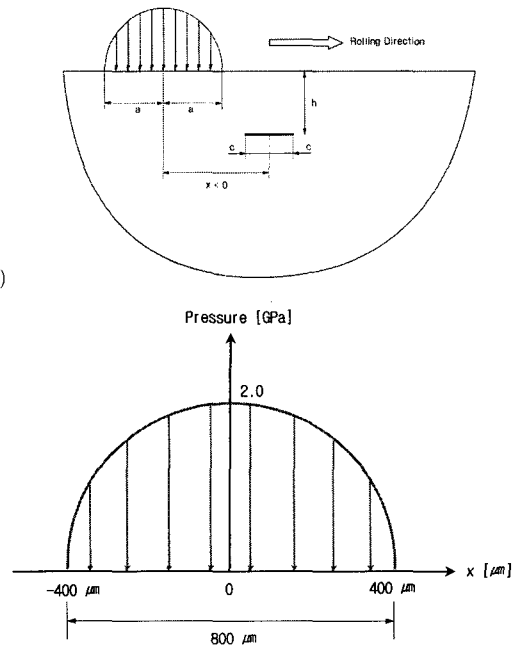


그림 2. Subsurface Crack의 해석모델

차륜과 레일 사이의 접촉부위에서는 Hertzian Contact 압력분포를 적용하였다. 차륜과 레일이 접촉하는 접촉부의 압력분포는 식(4)로 나타낸다. 크랙의 유한요소해석에 하중을 적용하기 위하여 접촉구간(2a)을 10개의 구간으로 나누었다. 유한요소해석을 위하여 사용된 차륜의 물성치는 표 1과 같다.

$$p(x) = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}, \quad p_0 : 2.0 \text{ GPa}, \quad a : 400 \mu m \quad (4)$$

표 1. 철도 차륜의 물성치 (Cast Steel)

Young's Modulus of Wheel/Rail	210 GPa
Poisson's Ratio	0.3
Tensile Strength of Wheel	500 MPa

3.2 내부 크랙의 해석

차륜의 내부에 위치한 크랙을 유한요소해석하기 위하여 먼저 모델링을 한다. 크랙팁을 방사형태의 메시로 하기 위해 4절점 평면요소를 사용하였다. 크랙의 좌우팁 주위에 여러개의 원호를 생성한 뒤 크랙부분의 면적 생성을 완료했다. 내부 크랙 면사이의 Surface-to-Node Contact 조건을 부여하기 위하여 CONTACT 48 요소를 사용하였다[7]. 왼쪽과 오른쪽 경계면은 수평방향으로 고정되어 있고, 아래면은 수평,

수직적으로 구속하였다. 또한 크랙팁의 절점들은 같이 움직이도록 구속하였다. 그림 3에 유한요소 모델을 도시하였다. 모델의 전체길이는 6400 μm 로 하였고, 크랙의 중심은 모델의 중앙인 3200 μm 에 위치시켰다.

구름 조건으로 Hertzian 하중을 부여하기 위하여 유한요소 해석방법 중 Transient Analysis를 사용하였고, Time Step은 0.1로 하고 Substep은 10으로 하였다. Transient Analysis를 통하여 생성된 총 Load Step은 52이며 Step당 100 μm 씩 이동시켰다. 크랙의 윗면은 Contact Element, 아랫면은 Target Element로 설정하였고, 크랙면 사이의 마찰을 고려하여 마찰계수는 0.0, 0.3, 0.5의 세 경우를 적용하여 해석하였다. 그림 4~6에 Transient Analysis 해석결과를 도시하였다.

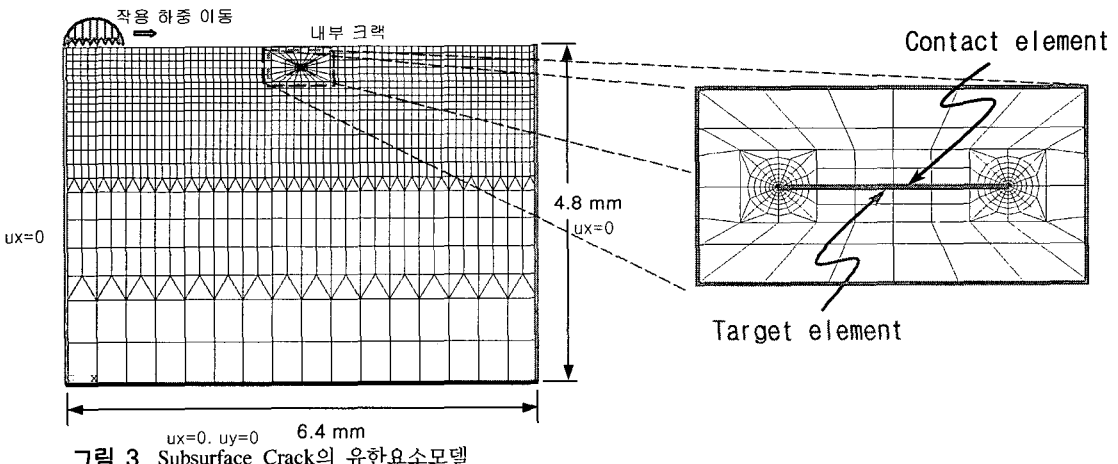


그림 3. Subsurface Crack의 유한요소모델

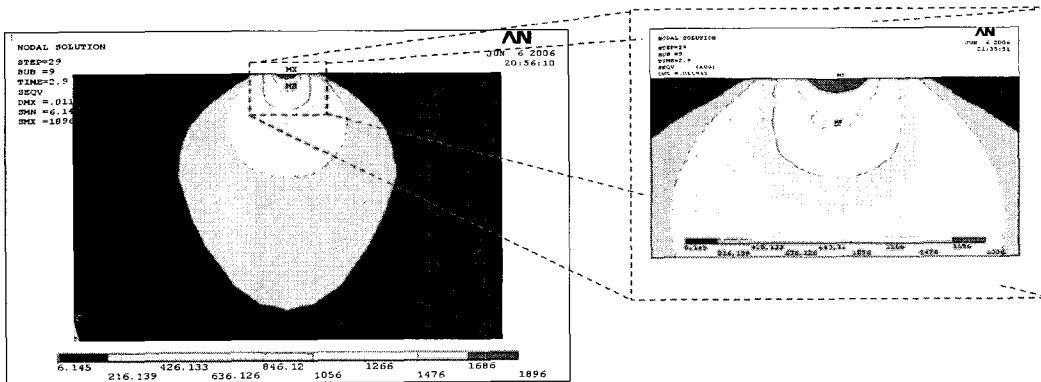


그림 4. Subsurface Crack의 과도해석결과 (응력분포)

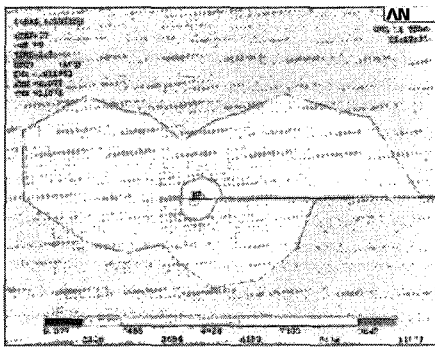
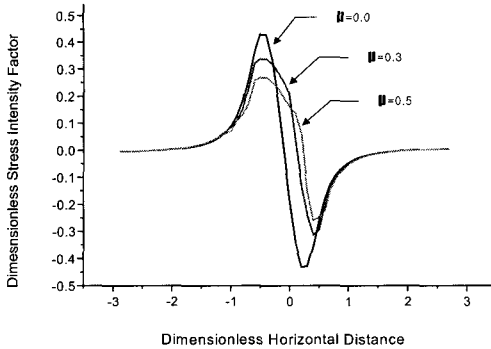


그림 5. 무차원 응력확대계수와 왼쪽 Tip의 응력분포

K계산 기능을 사용하여 응력확대계수 K_{II} 값을 찾아낸다. 그림 5는 왼쪽 크랙팁 주위에 대한 무차원화한 K_{II} 와 응력분포를 나타내었다. $\mu = 0.0$ 인 경우에는 Hertzian 하중의 최대값인 $p_0 = 2.0 \text{ GPa}$ 이 $2800 \mu\text{m}$ 에 위치하면 순간적인 응력확대계수가 0에 수렴한다. 즉 이 순간에 응력집중현상이 해소된다. $\mu = 0.3$ 인 경우에는 $2900 \mu\text{m}$, $\mu = 0.5$ 인 경우에는 $3100 \mu\text{m}$ 인 지점에서 동일한 현상이 나타난다. 또한 하중이 크랙팁에 가까이 접근할수록 크랙면의 마찰로 인해 응력집중현상이 증가한다. 유한요소해석을 이용하여 얻어진 K_{II} 값을 변환하여 얻어진 무차원모드 K_{II} 의 음수값은 크랙성장을 일으키는 전단응력의 방향변화를 나타내며, 전단응력의 변화와 같은 형태의 변화를 가진다. 크랙팁 주위에 분포하는 응력도 응력확대계수의 분포와 동일한 양상을 나타낸다. 크랙의 왼쪽 팁과 오른쪽 팁의 응력분포를 비교하면 양자의 분포 경향은 같으나 왼쪽 팁의 최대응력값이 오른쪽 팁 보다 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 크랙면의 마찰계수가 증가함에 따라 최대응력값과 $\Delta\sigma$ 값이 작아지고 응력확대계수가 0이 되는 하중의 위치(거리)도 증가함을 알 수 있었다(그림 6).

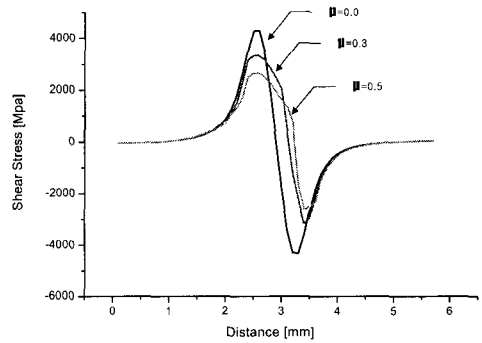
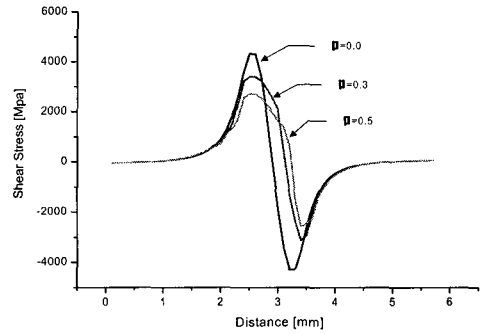


그림 6. 마찰계수에 따른 Subsurface Crack 왼쪽 Tip과 오른쪽 Tip의 전단응력 비교

K_{II} 의 크기는 근사적으로 $\tau_{xz} \sqrt{\pi c}$ 와 같다는 것을 알 수 있다. 그러나 크랙면 마찰이 존재하는 경우에는 그림 5에 나타낸 바와 같이 K_{II} 의 변화는 전혀 달라진다. 하중이 크랙에 접근함에 따라 K_{II} 는 크랙면을 미끄러지게 할 수 있는 순수전단응력이 더 작기 때문에 마찰이 없는 크랙면의 K_{II} 보다 낮은 비율로 증가한다. 순수전단응력은 작용전단응력과 크랙면 마찰응력의 차이, 즉 $\tau_c = \tau_{xz} - \mu|\sigma_n|$ 로 정의된다. 하중이 응력확대계수 최저발생지점에 접근하면 왼쪽 크랙팁에서 순수전단응력이 최저값에 도달한다. 이 지점에서 크랙면은 고착되고 더 이상 앞으로 미끄러지지 않는다.

응력확대계수는 상대적인 크랙변위에만 의존하기 때문에 K_{II} 는 크랙면이 고착되어 있는 기간동안 일정하게 유지된다. 하중이 왼쪽 크랙팁을 지나서 이동할 때 작용전단 응력의 τ_{xz} 의 부호가 변해서 음이 된다. 음의 전단응력과 고착영역의 전단응력 τ_c 를 더한 값이 반대방향의 크랙면 마찰을 극복하기 위해서 충분히 크다면, 크랙은 반대방향으로 미끄러질 것이다. 반대방향으로 미끄러질 때 응력확대계수는 감소하고, 최저 지점에서 최대값의 크기와 같은 최소값에 도달한다.

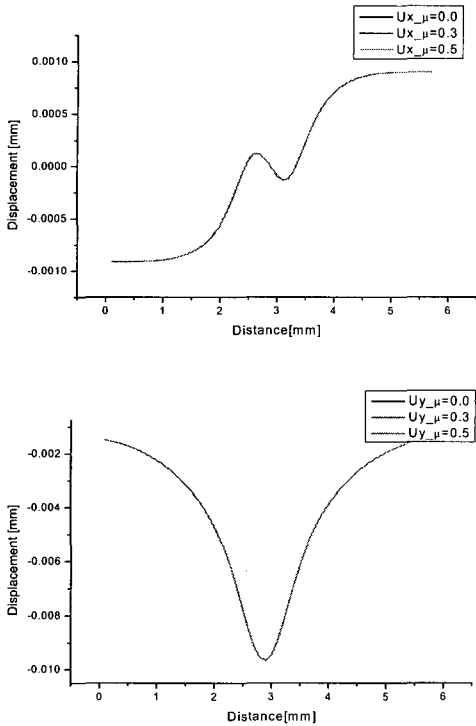


그림 7. 왼쪽 Tip에 대한 변위 (Ux, Uy) 형상

내부크랙의 왼쪽팁에 대한 x, y축방향의 변위를 살펴보면(그림 7), x축방향의 변위는 응력확대계수의 최대지점에서 최대가 된다. y축방향의 변위는 고착지점에서 최대가 된다. 크랙면의 마찰계수는 x축 방향의 변위에 영향을 미치지 않아 상이한 마찰계수에서 변위는 근사적으로 동일한 거동을 보이며, 최대하중이 2.9 mm, 3.3 mm에 작용할 때 최대값과 최소값을 나타내므로 인장과 압축변형이 반복적으로 발생한다.

3.3 응력확대계수를 이용한 수명예측

유한요소해석을 통하여 구한 K_{II} 값과 Paris의 식(2), (3)을 이용하면 내부크랙의 성장 수명을 예측할 수 있다. 위 식에 재료상수 $C = 1.6475 \times 10^{-11}$, $m = 3.15$ 를 각각 적용하고, 마찰계수 $\mu = 0.3$ 인 경우의 ΔK_{II} 를 해석의 결과에서 구한 뒤($\Delta K_{II} = 5.3 \text{ MPa m}^{1/2}$), Threshold Crack Length = $30 \mu\text{m}$, Final Crack Length = $800 \mu\text{m}$ 를 적용하여 적분하면 $N = 6.635 \times 10^{11}$ 을 구할 수 있게 된다. 이 때 N은 상기 하중조건에서 크랙의 길이가 $30 \mu\text{m}$ 에서 $800 \mu\text{m}$ 까지 성장하는데 소요되는 사이클 수가 된다. 이 값은 Threshold Crack Length = $30 \mu\text{m}$ 에 도달 할 때까지의 시간은 포함되지 않았다.

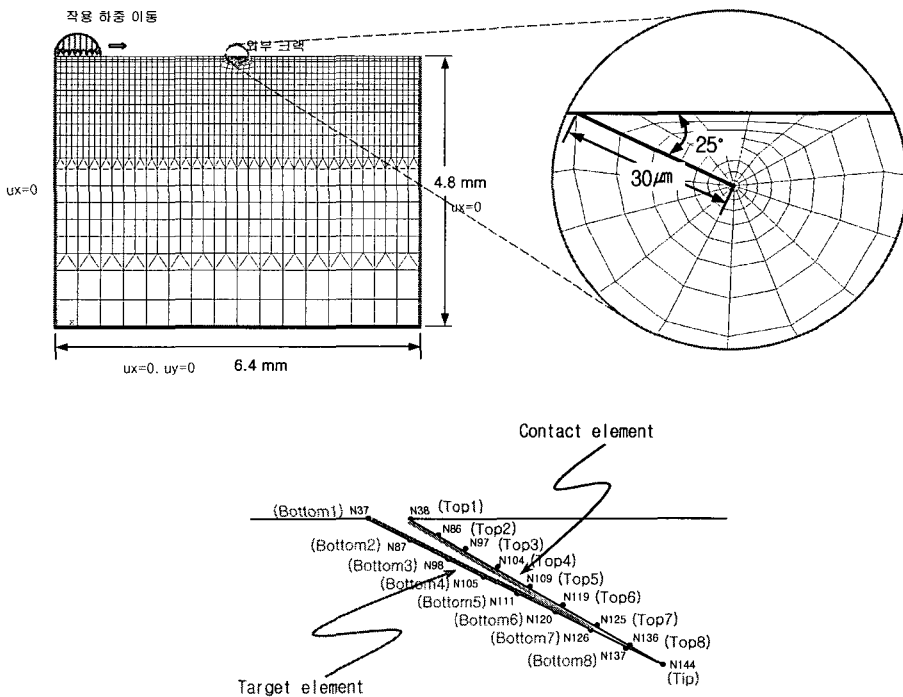


그림 8. 표면크랙 해석을 위한 유한요소모델

4. 표면크랙의 유한 요소 해석

4.1 표면크랙의 모델과 해석조건

표면크랙의 유한요소모델을 그림 8에 도시하였다. 해석모델의 전체크기는 가로 6.4 mm, 세로 4.8 mm로 구성하였다. 크랙은 차륜의 담면으로부터 25°의 경사를 갖도록 하였으며, 크랙의 반길이 $c = 15 \mu\text{m}$, 접촉반경 $a = 400 \mu\text{m}$ 로 하였고, 왼쪽으로부터 3.2 mm지점부터 시작되도록 하였다. 구름접촉하중압력은 크랙면의 경계면과 접선방향으로 작용하는 전단응력과 경계면의 법선방향으로 작용하는 인장응력으로 작용하게 된다. 따라서 표면크랙은 모드 I, II의 두 상태가 중첩되어 나타나게 된다.

크랙요소는 Contact Element와 Target Element가 접촉할 수 있는 형태로 모델링되었고, Contact Element를 윗면으로, Target Element를 아랫면으로 설정하여 양 면사이의 마찰계수가 0, 0.3, 0.5가 되는 마찰이 작용하는 상태로 해석하였다. 이를 위해 크랙 경계면 사이의 Surface-to-Node Contact 조건을 부여하기 위해 CONTACT 48 요소를 사용하였다. 또한 크랙팁을 방사형태로 메쉬하기 위해 4절점 평면요소를 사용하였다. 차륜과 레일사이의 접촉부위에는 Hertzian Contact의 압력분포를 적용하였다. 해석과정에서 하중은 1 step당 100 μm 의 이동간격을 갖도록 적용하였다. 경계조건은 해석모델에서 좌, 우 경계면에 재료의 연속(대칭)조건을 주기 위해 x축 방향을 고정하고($u_x = 0$), 하부의 경계면은 x, y축을 모두 고정하였다($u_x = u_y = 0$). 해석에 사용된 재료의 물성치는 표 1과 동일하게 적용하였다.

4.2 표면크랙의 해석

유한요소해석은 평면변형률조건을 사용하였다. ANSYS를 사용하여 해석하였으며 해석에 따른 응력분포상태는 그림 9과 같다. 하중조건으로 Hertzian 하중을 부여하기 위해 해석방법 중 Transient Analysis를 사용하였다. Transient Analysis의 결과를 보면 하중이 크랙방향으로 접근함에 따라 크랙팁에 응력집중현상이 나타나는 것을 그림 10에서 관찰할 수 있다. 크랙팁의 응력분포를 살펴보면 표면크랙에서는 크랙면 사이의 마찰계수와 마찰력에 의한 전단력이 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 크랙팁의 응력분포를 살펴보면 응력값은 2.9 mm지점에서 최대가 되고 마찰계수의 차이에 의한 응력의 차이가 거의 발생하지 않는 동일한 분포를 나타내며, 내부크랙의 양 크랙팁의 응력분

포에 비하여 현저히 적으므로 차륜에서 내부크랙과 표면크랙이 공존할 경우 내부크랙이 훨씬 위험요인으로 작용함을 알 수 있다. 또한 2.5 mm와 3.4 mm지점에서 응력의 최저값이 나타난다. 특히 3.4 mm지점은 최대하중이 크랙을 벗어난 지점이다. 무차원 응력확대계수도 응력분포와 같은 거동을 보이고 있다.

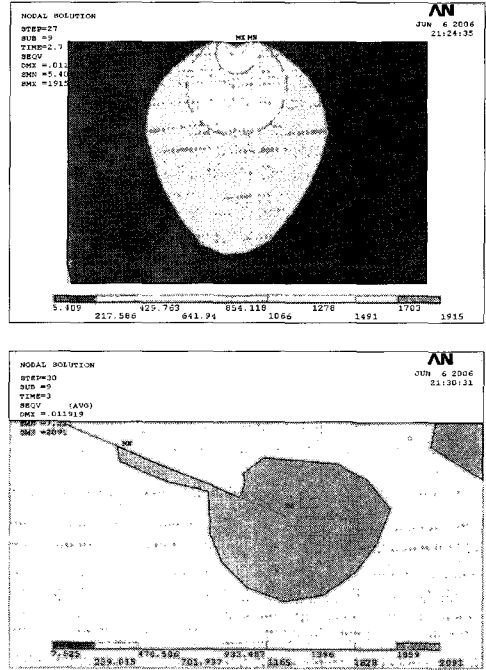


그림 9. 표면크랙의 과도해석결과와 Tip에서의 응력분포

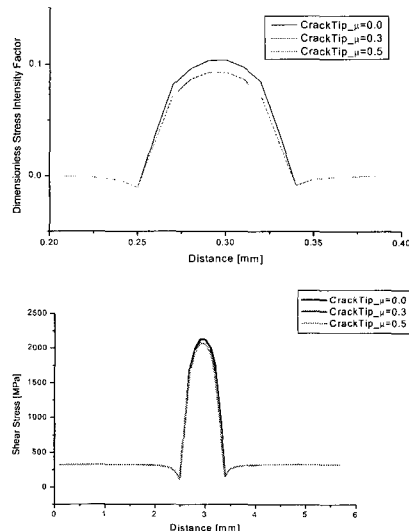


그림 10. 마찰계수에 따른 표면크랙 Tip에 대한 응력확대계수와 전단응력

크랙팁의 변위를 그림 11에서 살펴보면 x축방향의 변위는 2.5 mm, 3.4 mm지점에서 최대가 되고, 2.9 mm지점에서 최소가 된다. 특히 응력 최대지점인 2.9 mm지점에서는 x축방향의 변위가 최소값을 나타내고, y축방향의 변위가 최대값을 나타냄으로써 이 지점에서 나타나는 최대응력은 x축 방향으로의 영향을 미치지 않고 y축 방향으로만 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

상, 하 크랙면 사이에서 수평 위치에 있는 절점 top 3(N97), 절점 bottom 2(N87)과(그림 8참조) 수직위치에 있는 절점 top 2(N86), 절점 bottom 3(N98)의 x, y축 방향의 변위를 살펴보면 그림 12, 13과 같이 그림 11의 크랙팁의 변위와 같은 거동을 보인다. 절점 N97, N87의 x축 방향의 변위는 3.4 mm 지점에서 최대가 되고, 2.9 mm지점에서 최소가 되며 두 지점사이에 변위가 근사적으로 일치하므로써 크랙의 윗면과 아랫면의 x축 방향의 변위에 차이가 없음을 알 수 있다. 그리고 절점 N86, N98의 y축 방향 변위는 2.9 mm지점에서 최대가 된다.

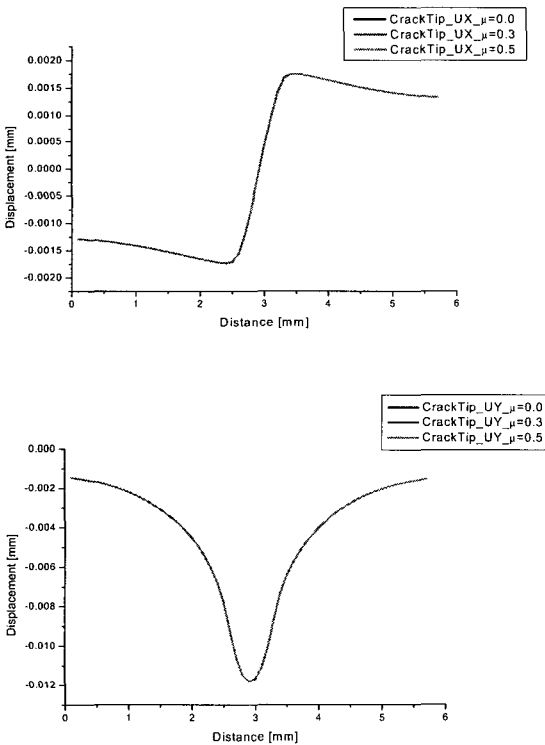


그림 11. 표면크랙 Tip에 대한 x 방향, y 방향 변위

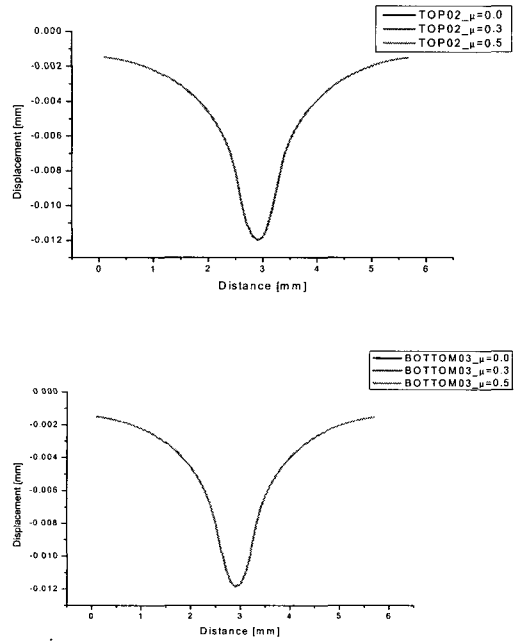


그림 12. 절점 N86(Top 2)과 N98(Bottom 3)에 대한 y 방향 변위

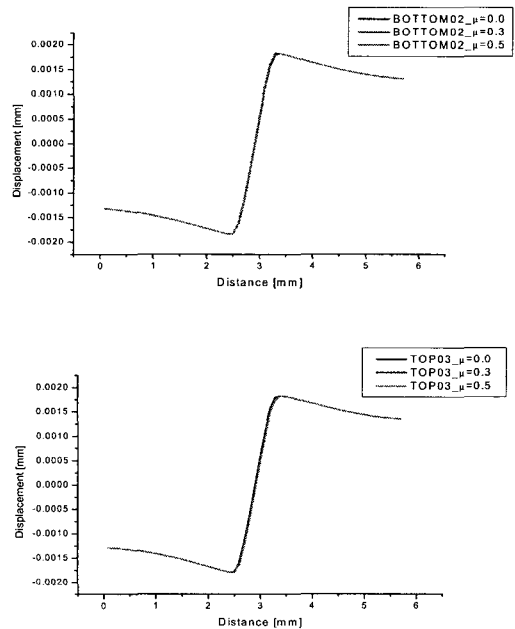


그림 13. 절점 N97(Top 3)과 N87(Bottom 2)에 대한 x 방향 변위

4.3 응력확대계수를 이용한 수명예측

유한요소해석을 통하여 구한 K값과 Paris의 식(2), (3)을 이용하면 표면크랙의 성장 수명을 예측할 수 있다. 위 식에 재료상수 $C = 1.6475 \times 10^{-11}$, $m = 3.15$ 를 각각 적용하고, 마찰계수 $\mu = 0.3$ 인 경우의 ΔK 를 해석의 결과에서 구한 뒤($\Delta K = 1.9 \text{ MPa m}^{1/2}$), Threshold Crack Length = $30 \mu\text{m}$, Final Crack Length = $800 \mu\text{m}$ 를 적용하여 적분하면 $N = 1.68 \times 10^{13}$ 을 구할 수 있게 된다. 이 때 N은 상기 하중조건에서 크랙의 길이가 $30 \mu\text{m}$ 에서 $800 \mu\text{m}$ 까지 성장하는데 소요되는 사이클 수가 된다.

5. 결론

본 연구에서는 구름 접촉을 받고 있는 차륜에서 차륜 접촉면의 표면내부에 존재하는 내부크랙과 표면에 존재하는 표면크랙에 대하여 응력확대계수, 응력분포 및 변위를 유한요소해석으로 구하였고, 잔존수명을 예측하였다. 특히 해석을 통하여 내부크랙에서는 왼쪽팁이 오른쪽팁보다 크랙의 진전이 먼저 나타남을 알 수 있었고, 내부크랙이 차륜의 파괴에서 위험요인임을 확인할 수 있었으며, 표면크랙의 경우 크랙면사이의 마찰이 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다. 이들 해석의 결과를 요약하면 다음과 같다.

내부크랙에서는 크랙면사이의 마찰계수 차이에 따라 최대응력값이 작아지고, 최대응력이 발생하는 지점이 증가하였으며, 내부크랙의 왼쪽팁의 최대응력이 오른쪽팁보다 크게 나타났다. 내부크랙에서 마찰계수 $\mu = 0$ 인 경우에는 Hertzian 하중의 최대값인 $p_0 = 2.0 \text{ GPa}$ 이 $2800 \mu\text{m}$ 에 위치하면 순간적인 응력확대계수가 0에 수렴하여 응력집중현상이 해소되고, $\mu = 0.3$ 인 경우에는 $2900 \mu\text{m}$, $\mu = 0.5$ 인 경우에는 $3100 \mu\text{m}$ 인 지점에서 동일한 현상이 나타난다. 내부크랙의 왼쪽팁에서 크랙면의 마찰계수가 x축 방향의 변위에 영향을 미치지 않아 근사적으로 동일한 거동을 보이며, 최대하중이 2.9 mm, 3.3 mm에 작용할 때 최대값과 최소값을 나타내므로 인장과 압축변형이 반복적으로 발생한다.

표면크랙에서는 2.9 mm지점에서 최대응력이 나타나고, 마찰계수의 차이에 의한 응력의 차이가 거의 발생하지 않는 동일한 분포를 나타내며, 2.5 mm와 3.4 mm 지점에서 최저값이 나타난다. 표면크랙의 크랙팁 변위는 x축 방향의 변위가 2.5 mm, 3.4 mm지점에서 최대가 되고, 2.9 mm지점에서 최소가 되며, 최대응력은 x축

방향의 변위에 영향을 미치지 않고 y축 방향의 변위에만 영향을 미친다.

크랙이 $800 \mu\text{m}$ 까지 성장하는데 소요되는 수명은 내부크랙의 경우 6.635×10^{11} cycles, 표면크랙의 경우 1.68×10^{13} cycles 이 된다. 결론적으로 철도의 안전운행의 위험요소인 내부크랙, 표면크랙에 대하여 유한요소해석을 이용하여 크랙의 성장과 성장수명을 예측할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] D. F. Cannon, H. Pradier, "Rail rolling contact fatigue Research by the European Rail Research Institute," Wear, vol. 191, pp. 1-13, 1996.
- [2] A. Ekberg, H. Bjarnehed, and R. Lunden, "A Fatigue life model for general rolling contact with application to wheel/rail damage," Fatigue and Fracture of Engineering materials and Structures, vol. 18, pp. 1189-1199, 1995.
- [3] A. Ekberg, "Rolling contact fatigue of railway wheels a parameter study," Wear, vol. 211, pp. 280-288, 1997.
- [4] A. Ekberg, E. Kabo, and H. Andersson" Predicting Rolling Contact Fatigue of Railway Wheels," 13th International Wheelset Congress in Rome, Sep. 17-21, 2001.
- [5] A. Ekberg, and J. Marais, "Effects of imperfections on fatigue initiation in railway wheels," IMechE, Journal of Rail and Rapid Transit, pp. 163-167, 1999.
- [6] H. Salehizaden and N. Saka, "Crack Propagation in Rolling Line Contacts," Journal of Tribology, vol. 114, pp. 690-697, 1992.
- [7] Swanson Analysis Systems Inc., "Ansys Dynamic User's Guide for Revision 5.4", 1993.

전 종 균(Chong-Keun Chun)

[정회원]



- 1980년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1985년 12월 : University of California, Los Angeles (공학석사)
- 1991년 6월 : University of California, Los Angeles (공학박사)
- 1992년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

응용역학, 소음/진동제어

양 진 승(Jin-Seung Yang)

[정회원]

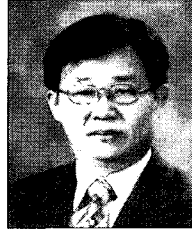


- 1980년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1983년 8월 : 서울대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1989년 6월 : Georgia Inst. of Tech. 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 기계공학부 교수

<관심분야>
기계설계, Tribology

이 규 세(Gyu-Sei Yi)

[정회원]



- 1979년 9월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 1983년 8월 : 고려대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1996년 12월 : Utah State Univ. 토목공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 토목공학과 부교수

<관심분야>
구조공학, 콘크리트 구조, 구조해석.

박 삼 진(Sam-Jin Park)

[정회원]



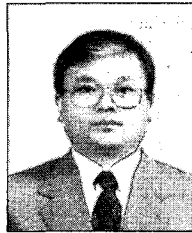
- 1977년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1979년 8월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학석사)
- 1984년 1월 : Case Western Reserve Univ. 기계공학과 (공학박사)
- 1984년 4월 ~ 1994년 2월 : 한국기계연구원 CAD/CAM실 실장, 책임연구원

- 1994년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학부 교수

<관심분야>
기계설계, CAD

마 양 수(Yang-Soo Ma)

[정회원]



- 1997년 8월 : 아주대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : 선문대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 한국폴리텍II 인천대학 컴퓨터응용기계학과 교수

<관심분야>
재료역학, 절삭(CAM/CNC가공), 폴리메카닉