

고속철도 레일의 피로수명에 영향을 미치는 매개변수 연구

The Parametric Study Effecting on the Fatigue Life of Rail on High Speed Railway

박용걸[†] · 강윤석* · 고동춘** · 성덕룡***

Yong-Gul Park · Yoon-Suk Kang · Dong-Chun Go · Deok-Yong Sung

Abstract With developing the next generation high speed railway, there need to be plans to make sure of running safety though researchs on the crack and break of rail by rolling contact fatigue. Therefore, this study performed the parametric analysis effecting on the fatigue life of rail using simplified equations. It analyzed the internal stress of rail according to the track quality, train velocity, wheel radius, track stiffness, sleeper space, wheel load. For the more, via the finite element method, it analyzed shear force on the rail head which could be changed by the early length of crack, angle of crack and temperature. As a result, this study confirmed the main parameter effecting on the fatigue life of rail.

Keywords : next generation high speed train, rail, rolling contact fatigue, parameter, stress intensity factor

요 지 고속열차의 개발과 함께 구름접촉피로에 의한 레일의 피로균열 및 피로파괴에 대한 연구를 통해 주행안정성을 확보할 수 있는 방안 마련이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Eisenmann의 근사계산식(실용식)을 이용하여 속도, 차륜반경, 궤도지지강성, 침목간격, 축중, 궤도품질에 따른 레일내부 발생응력을 검토하였다. 또한, 유한요소해석을 통해 초기균열의 길이 및 각도, 온도에 따라 레일두부에서 발생하는 전단응력을 검토하여 모드별 응력확대계수를 도출하였다. 이로써 고속철도 레일의 피로수명에 영향을 미치는 주요인자들을 확인하였다.

주요어 : 차세대고속열차, 레일, 구름접촉피로, 매개변수, 응력확대계수

1. 서론

국외 고속철도 선진국들은 경쟁적으로 신기술을 적용한 초고속열차 개발을 진행 중에 있으며, 철도기술의 경쟁력을 국가의 대표적 기술 경쟁력으로서 과시하고 있다. 이에 국내에서는 2017년 호남고속철도의 건설과 2020년 이후 KTX 대체열차의 필요에 따라 최고속도 400km/h로 주행하는 동력분산식 차세대고속열차를 개발하기 위한 연구가 2007년부터 시작되었다.

초고속 대량철도수송이 가능하려면 가장 먼저 이에 적

합한 윤연로의 확보가 필요하며, 이를 건설하는 것뿐만 아니라 유지관리하는 것이 매우 중요하다. 특히, 주행안정성 및 승차감 확보를 위한 궤도재료의 유지보수비용 중 가장 큰 부분을 차지하고 있는 것이 레일연마 및 교체비용이다. 현재 국내·외에서는 레일을 유지관리하기 위해 레일연마 작업을 수행하고 있으며, 레일파단에 따른 철도사고를 예방하기 위해 레일교체규정을 누적통과톤수에 따라 정하고 있다.

레일표면을 연마함으로써 레일표면에서 발생하는 결함들을 예방하거나 초기균열의 진전을 막을 수 있으며, 표면요철을 삭정함에 따라 레일저부에서 발생하는 휨응력을 저감시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다. 또한, 일본철도기술연구소(RTRI)에서 수행한 레일 휨피로시험결과 현존하는 레일탐상기법(탐상차, 휴대용초음파탐상, 자분탐상, 침투탐상 등)으로 검출이 불가능한 위치(레일저부중앙에서 벗어난 위치)에서 피로균열이 발생하는 것으로 나타났으며, 이

[†] 책임저자 : 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 교수, 공학박사
E-mail : ygpark@snut.ac.kr

TEL : (02)970-6575 FAX : (02)978-6575

* 정회원, 한국철도기술연구원 철도시스템연구센터 차륜궤도연구실
선임연구원, 공학박사

** 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 박사수료

*** 교신저자 : 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 박사수료

를 통해 누적통과톤수에 따른 레일교체규정의 필요성을 제시하였다[5].

따라서 본 연구에서는 레일의 피로수명에 영향을 미치는 주요인자를 확인하고자 외부하중에 의한 레일내부 발생 응력을 실용식(simplified equation)을 통하여 검토하였고, 레일표면에 미세균열이 존재할 경우 레일두부 전단응력의 변화를 응력확대계수를 통하여 검토하였다.

2. 구름접촉 및 피로파괴 원리

2.1 구름접촉피로

레일에서 나타나는 피로는 균열시작점의 위치에 따라 레일의 표면에서 시작되는 피로와 레일과 차륜 접촉면의 내부에서 시작되는 피로로 분류된다. 또한, 균열전파의 메커니즘에 따라서 레일의 재료에 존재하는 거시적 결함으로부터 시작되는 피로파괴, 거시적 결함이 없는 상태에서 시작되는 피로파괴, 차륜의 접촉면에 가해지는 열적, 기계적 응력으로부터 생기는 소성변형에 의한 피로파괴 등으로 나눈다.

차륜과 레일사이의 응력이 커지면 레일의 표면에 소성 변형이 증가하여 재료의 파손에 이르게 되는데 이러한 현상을 스폐링(spalling)이라 한다. 레일에서 스폐링은 표면에서 발생하게 되는데 이는 높은 마찰력이 원인이다. 스폐링에서 균열은 표면으로부터 얇은 각도로 반경방향으로 개시하고 방향을 원주방향으로 바꾸어 진행한 후 다시 표면 쪽으로 진행하여 표면으로부터 조각이 떨어져 나가게 된다(Fig. 1 참조). 또한, 차륜이 레일위에서 국부적으로 미끄러지게 되면서 레일의 접촉부위에 국부적이지만 평탄한 부분(flat)을 만들게 된다. 이 부분은 높은 온도에서 급냉하게 되므로 상태변화가 일어나 마르텐사이트 구역을 형성하고 이 구역은 취성이 매우 강해 균열전파가 쉽게 일어나게 된다[4].

일반적으로 레일 표면균열의 개시는 표면 재료의 과도한 소성유동에 의해 발생한다. 이것은 라체팅(ratchetting) 또는 표면 재료의 저주파수 피로(LCF)에 의해 균열이 개시되며 대략 최대 5mm 정도 깊이로 균열이 레일내부로 성장해 들어가다가 균열이 분기되어 레일의 담면으로 향할 때 발생한다. 표면 내부균열의 개시는 높은 수직하중과 국부적인 접촉상태, 미세한 황화망간의 침입 등과 같은 재료의 국부적으로 낮은 피로 저항 등이 상호작용하여 발생하며, elastic shakedown에 의한 고주파 피로(HCF)의 결과이다(Fig. 2 참조).

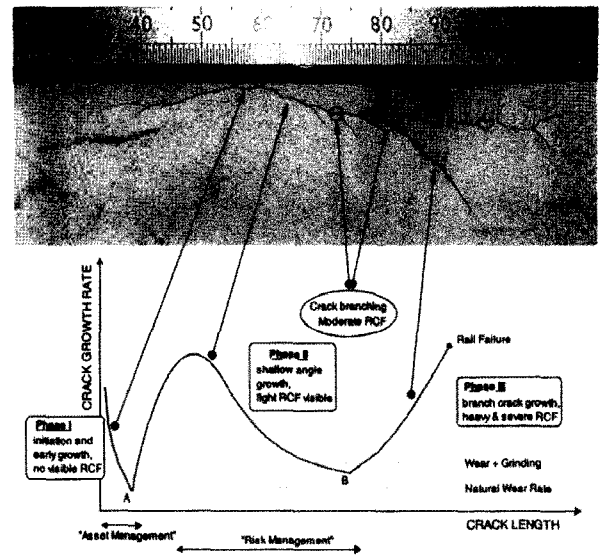


Fig. 1. The service life & surface crack growth of rail

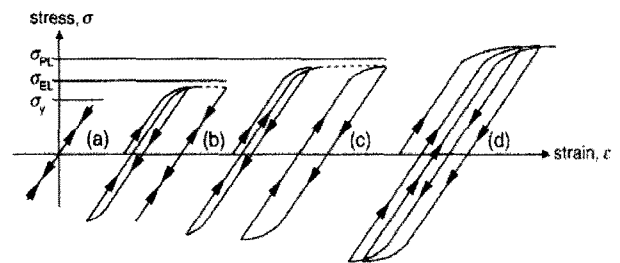


Fig. 2. Stress and expansion diagram for certain stress limits under cyclic load [6]. (a) Perfectly elastic, (b) Elastic shakedown, (c) plastic shakedown, (d) ratchetting

어떤 재료가 가지고 있는 결함의 크기가 그 재료의 피로 한계를 찾기 위한 시편이 가지고 있는 재료의 결함 크기보다 작을 때 그 재료에는 결함이 없다(defect-free)고 분류한다. 그러나 이 경우도 미세한 균열은 존재하고 이러한 미세 균열로 인해 피로 한계치가 감소하게 되며 가해진 응력에 따라 균열이 성장하게 된다.

2.2 피로파괴 이론

피로수명은 균열초기영역(initiation)과 균열전파영역(propagation)으로 구성되고, 이들은 Fig. 3과 같다. 초기영역에서 전파영역으로 천이하는 균열의 크기는 대개 알려져 있지 않고, 분석자의 관점이나 해석되는 부재의 크기 등에 의존한다. 그러나 두 수명간의 구분은 중요하다. 낮은 변형률진폭(strain amplitudes)에서는 초기영역이 전체 수명의 90%까지 차지하고, 높은 진폭에서는 균열전파영역이 피로 수명의 대부분을 차지한다. 파괴역학적 방법은 전파수명의 평가에 주로 사용된다. 따라서 파괴역학적 방법에서는 초기균열을 알거나 가정하게 된다. 초기균열이 없는 재료의 수명평가는 파괴역학적 방법과 변형률-응력방법을 모두 사

용한다. 파괴역학적 방법으로는 전파수명을 결정하고, 변형률-수명방법으로는 초기수명을 결정하여 두 수명을 합산함으로써 전체수명을 결정하게 된다[3].

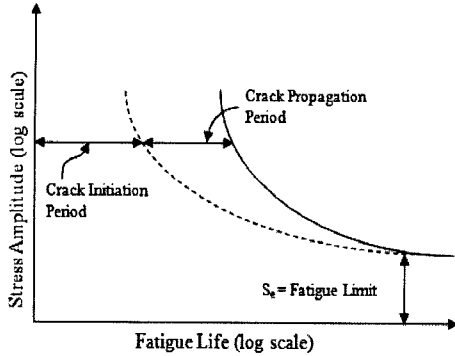


Fig. 3. Crack initiation period and crack propagation in fatigue life

선형탄성파괴역학(Linear Elastic Fracture Mechanics, LEFM)은 균열선단부근의 응력진폭과 분포를 균열의 크기와 형상, 균열부재의 재료특성, 균열부재와 원거리에서 작용하는 응력 등과 관련하여 사용한다. LEFM은 균열이나 결함을 갖는 부재에 탄성론의 적용을 기본으로 하며, 탄성론에서의 일반적인 가정들이 LEFM에도 그대로 적용된다. 따라서 미소변위와 응력-변형률 사이의 일반적인 선형성은 인정되며, 균열표면에 변형을 유발하는 하중의 형상은 3가지로 정리된다. 이는 Mode I(개구형, Opening mode), Mode II(면내전단 또는 미끄럼 모드, In-plane mode), Mode III(면외전단 또는 찢어짐 모드, Out of plane mode) 등의 하중형상>Loading Modes)이 있다(Fig. 4 참조).

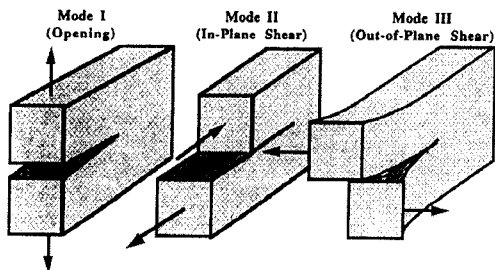


Fig. 4. Independent modes of crack deformation[8]

응력확대계수 K 는 균열부(crack tip) 주위의 응력장에 관한 응력장 강도를 나타내는 인자이므로 균열선단 주변의 국부응력크기를 정의한 식 (1)과 같은 일반식으로 표현한다.

$$K = f(g)\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

여기서, σ : 먼 거리에서 부재에 작용하는 응력
 a : 균열길이의 1/2

$f(g)$: 보정계수

응력확대계수(Mode II)는 유한요소해석을 통해 도출한 최대 전단응력(τ_c)을 식 (2)에 대입함으로써 구할 수 있다.

$$K_{II} = \tau_c \sqrt{\frac{\pi a}{2}} \quad (2)$$

3. 실용식을 이용한 매개변수 연구

3.1 레일내부 발생응력

레일에는 통상적으로 수직의 힘(윤중), 종방향의 힘(축력) 및 횡방향의 힘(횡압)이 가해진다. 이 하중에서 수직의 열차하중에 기인하는 휨응력, 주로 장대레일 궤도에서 온도 효과로 결정되는 축방향응력(축력), 제조 시 블러작업에 기인하는 잔류응력, 레일두부의 접촉응력 및 고주파 충격하중에 기인하는 응력이 발생한다(Fig. 5 참조)[1].

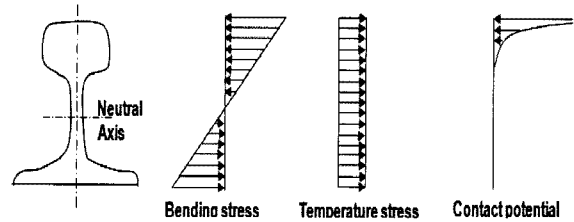


Fig. 5. Rail stress caused by load and temperature

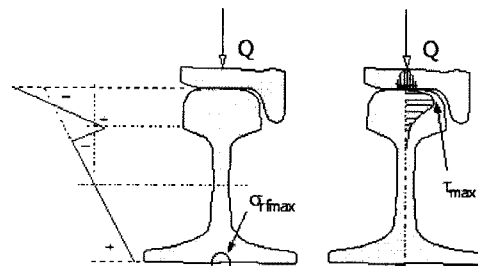


Fig. 6. Stress distribution in internal rail

반복하중에 의해서 레일저부 중앙을 시점으로 피로파괴가 발생하는 것으로 알려져 있다. 이것은 레일저부 중앙에 생기는 정적인 단면 응력과 수직 윤하중으로 생기는 동적 휨 인장응력의 조합으로 큰 인장응력이 생기기 때문이며, 레일에 작용하는 횡압 또는 수직 윤하중의 편심은 레일저부의 인장응력에 크게 영향을 주지는 않는다[2].

3.2 동적충격계수

강도 또는 피로의 계산은 속도계수 또는 동적충격계수(Dynamic Amplitude Factor, DAF)로 고려하는 동적효과에 따라 무한 길이의 보 이론을 사용하여 정적하중체계 또는

단일 윤하중에 대하여 계산하는 것이 보통이다.

하중에 대한 주행속도의 영향은 차량과 궤도간의 동적 상호작용 때문에 실제로는 매우 복잡하며, 하중 특성의 관점에서 보면 피로에 대한 안정성 판단여부가 매우 중요하다. 국외문헌에서는 레일의 정적응력을 평가할 목적으로 몇 개의 단순한 공식이 제안되어 있으나, 이들의 공식은 궤도 선형의 품질 및 궤도와 차량의 기계적 특성이 충분히 고려되지 않기 때문에 근사계산식으로 평가되고 있다. 유럽 철도운영기관들은 Eisenmann이 개발한 경험적 계산식을 이용하고 있으며, 이 식은 다음과 같은 가정에 기초한다[1].

- 레일 저부의 응력은 일정한 속도대역에서 통계적으로 정규 분포를 가진다.
- 평균값은 200km/h에 이르기까지의 검토에서 주행속도(V)에 무관하여 Zimmermann의 무한 길이 보의 계산으로 충분히 구할 수 있다.
- 표준편차는 주행속도(V)와 궤도의 품질에 좌우된다.

DAF를 결정하는 Eisenmann 식은 열차속도(V), 궤도품질(ϕ) 및 선택한 계수(t)에 좌우되며, Table 1의 계수값으로 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있다. 또한, 200km/h 이상의 속도에서 발생하는 DAF 값은 아직까지 보고된 바가 없으며, 현장측정을 통해 입증되어야하기 때문에 본 논문에서는 200km/h 이상에서도 레일 휨 응력이 선형적으로 증가한다고 가정하였다.

$$DAF=1+t\phi \quad : V < 60\text{km/h} \quad (3)$$

$$DAF=1+t\phi \left(1 + \frac{V-60}{140}\right) : 60 \leq V \leq 200\text{km/h}$$

Table 1에서 선택계수(t)는 신뢰구간에 좌우되는 표준편차의 증가율로 레일의 경우 철도수송의 안전과 신뢰성의 측면에서 대단히 중요하므로 3의 값이 권고되고 있다[1].

Table 1. The factors of DAF

확률	t	적용조건	궤도품질	ϕ
68.3%	1	접촉응력, 노반	대단히 양호(very good)	0.1
95.4%	2	횡 하중, 도상	양호(good)	0.2
99.7%	3	레일응력, 체결장치, 지지	불량(poor)	0.3

3.3 레일저부의 휨 응력[1]

Eisenmann 방법에 따르면 레일 휨 응력의 평균값과 동적 최대 휨응력을 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{mean} = \frac{Q}{A} \cdot \frac{A\sqrt[4]{I}}{4W_{yf}} \cdot \sqrt[4]{\frac{4Ea}{k_d}}$$

$$\sigma_{max} = DAF \cdot \sigma_{mean} \quad (4)$$

- 여기서, Q = 유효 윤하중(1.2×윤중)(N)
 A = 레일의 단면적(m^2)
 $I = I_u$ = 레일의 단면2차 모멘트(m^4)
 W_{yf} = 레일 저부에 대한 단면계수(m^3)
 E = 레일강의 탄성계수(N/m^2)
 a = 침목 간격(m)
 k_d = 지지스프링계수(N/m)

식 (4)에서 첫 번째 항은 응력의 단위를 가지며, 두 번째 항은 기하 구조적으로 레일의 특성을 정하는 계수이다. 세 번째 항은 레일의 크기에 무관하다. 이것은 운전상의 이유로 어느 특정한 선로의 유효 윤하중을 항구적으로 증가시켜야 하는 경우에 윤하중에 비례하여 레일 중량을 증가시키면 레일의 평균 휨 응력을 일정하게 유지할 수 있는 것을 나타낸다.

3.4 레일두부의 전단응력[1]

차륜과 레일간의 집중 하중은 Fig. 6에 나타난 것처럼 레일두부에 전단응력 분포를 일으킨다. 이것은 일정한 깊이에서 최대치를 가지며, 이것이 레일두부에서의 피로 파괴를 발생시킨다.

유효 윤하중($Q=1.2 \times \text{윤중}$)이 일정 폭($2b$)으로 접촉면에 걸쳐 고르게 분포한다면, 평균 접촉응력(q_{mean})은 식 (5)로 도출할 수 있다.

$$q_{mean} = \sqrt{\frac{\pi E}{64(1-\nu^2)} \frac{Q}{rb}} \quad (5)$$

- 여기서, r = 차륜 반경(mm), ν = 포아송 비
 $2b$ = 차륜/레일 접촉 폭(mm)
 E = 레일강의 탄성 계수(N/mm^2)

허용 윤하중 또는 차륜 반경을 결정하는 레일두부의 최대 전단응력은 식 (6)과 같이 추정 가능하다. 식 (6)의 실용적인 평균접촉응력 식에 대해서 최대 전단응력을 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{max} \approx 0.3q_{mean} \quad (6)$$

$$\tau_{max} = 412 \sqrt{\frac{Q}{r}} \quad (7)$$

이 실용식은 레일 두부에서 발생하는 최대 전단응력의 계산에 사용 할 수 있으며, 그것은 쉘링(shelling)이라 알려진 손상에 대응할 수 있다.

3.5 매개변수 해석결과 및 분석

앞 절에서 제시한 실용식을 이용하여 매개변수(속도, 차륜반경, 궤도지지강성, 침목간격, 축중, 궤도품질)에 따라 레일내부에서 발생하는 휨응력과 전단응력에 대하여 검토 하였으며, 매개변수 해석을 위한 궤도구조의 기본조건 및 매개변수 적용범위는 Table 2, 3과 같다.

궤도구조의 기본조건은 국내 경부고속철도(KTX)를 대상으로 하였으며, 속도향상에 대하여 검토하고자 하였다.

Table 2. The conditions of track for parametric study

구분	물성치	구분	물성치	구분	물성치
레일 종류	UIC60	도상 종류	자갈 도상	속도	400 km/h
레일강의 인장강도	880 MPa	레일당 체결력	20 kN	차륜 반경	450 mm
레일강의 허용 휨 응력	200 MPa	노반 지지력	70 N/cm ³	침목 간격	625 mm
레일강의 허용전단 응력	264 MPa	노반 반력계수	63.6 N/cm ³	궤도 지지강성	40 kN/mm
유효레일 지지면적	228 cm ²	궤도 상태	good	축중	170 kN

Table 3. Input parameters and numbers of track condition

구분	적용 범위	구분	적용 범위
속도	0~400km/h, 20km/h씩 증가	침목 간격	50~100cm, 2.5cm씩 증가
차륜 반경	300~600mm, 25mm씩 증가	축중	100~250kN, 25kN씩 증가
궤도 지지강성	10~100kN/mm, 5kN/mm씩 증가	궤도 상태	very good, good, poor로 구분

Table 4. The conditions of Kyeong-Bu high speed railway

구분	범위	구분	범위
열차운행속도	0~400km/h (속도향상 고려)	궤도지지강성	20~50kN/mm
차륜반경	450~500mm	침목간격	60~70cm
열차축중	130~170kN	궤도상태	very good, good

실용식을 이용한 매개변수 해석결과 레일저부 휨응력에 영향을 미치는 요인은 Fig. 7과 같이 속도, 궤도지지강성, 축중, 궤도상태이며, 레일두부 전단응력에 영향을 미치는 요인은 차륜반경, 축중임을 확인하였다. 레일결함이 없는 상태에서는 레일두부 전단응력의 경우 허용치(264MPa)를 모두 만족하였으나, 레일저부 휨응력의 경우에는 축중이 200kN 이상일 경우 허용치(200MPa)를 상회하였고, 궤도상태가 poor인 경우에도 허용치에 근사한 값

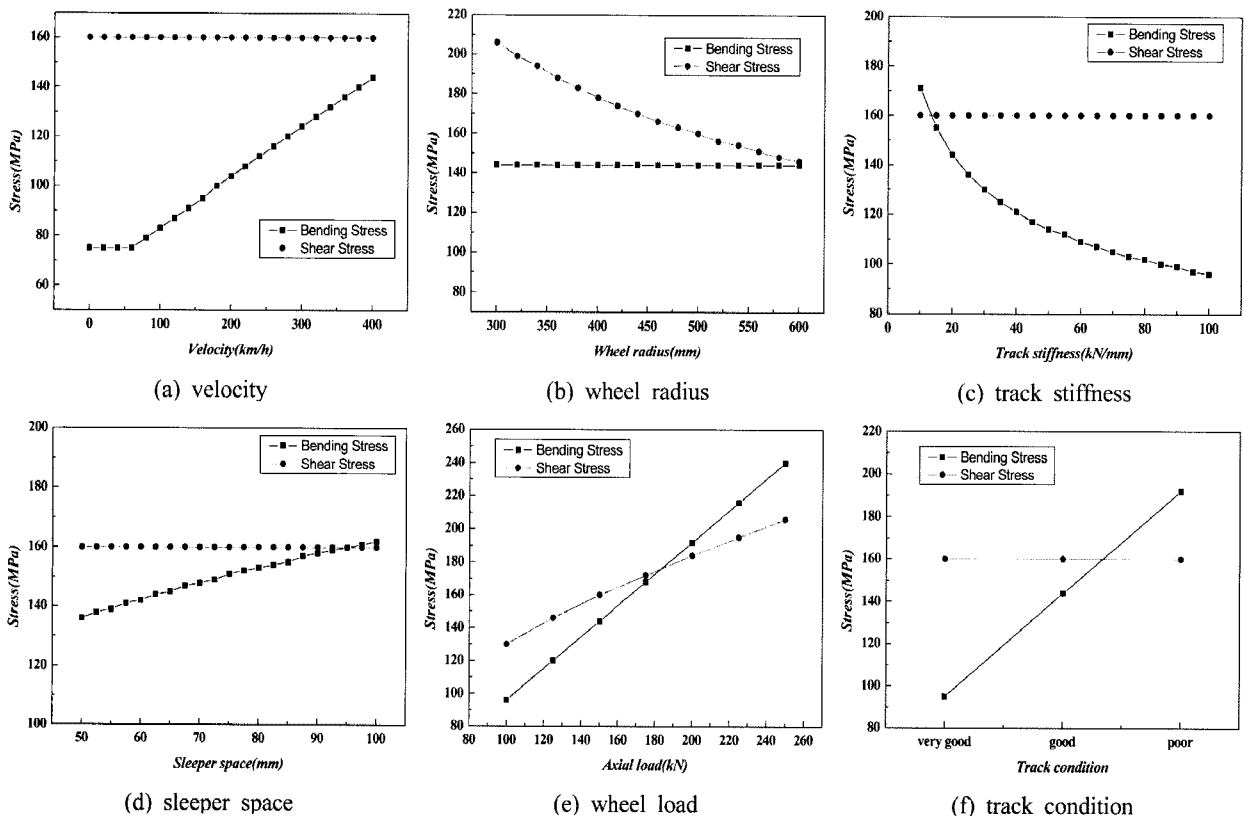


Fig. 7. The result of parametric analysis

으로 나타냈다.

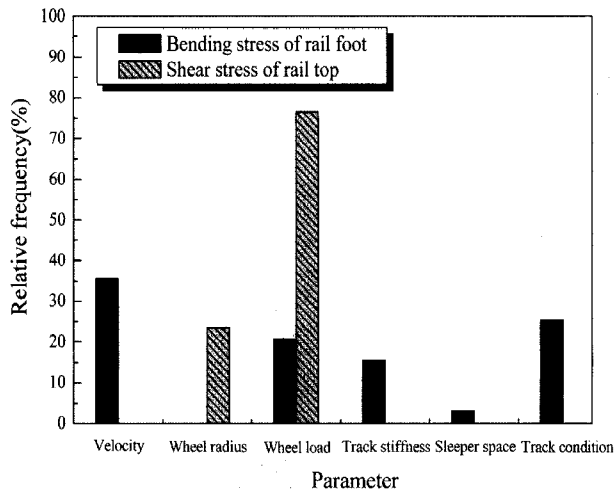


Fig. 8. The result of parametric analysis considering conditions of KTX

또한, Fig. 8에서와 같이 경부고속선을 고려하여 매개변수에 대한 분석을 시행한 결과 레일저부 휨응력에는 속도와 궤도상태에 따른 영향이 약 20~40%로 가장 컸으며, 그 다음이 축중, 궤도강성, 침목간격 순이었다. 레일두부 전단응력에는 축중에 의한 영향이 70% 이상을 차지했고, 차륜반경에 의한 영향이 약 20%정도 차지하는 것으로 분석되었다. 차량하중이 정해진 후에는 열차속도 및 궤도상태에 따라 레일저부 휨응력에 민감하게 반응하며, 허용치를 상회할 수 있는 것으로 분석되었다.

4. 레일두부균열의 피로해석

4.1 해석모델

유한요소해석을 이용한 표면균열의 이론적 모델을 Fig. 9에 도시하였다. 여기서, a 는 헤르츠압력 분포 길이의 1/2이며, c 는 표면균열의 폭, h 는 균열의 깊이를 나타낸다. 본 연구에서는 레일두부 표면에 균열이 존재할 경우에 대해 헤르츠압력에 의한 레일저부 휨응력과 레일두부에서의 전단응력을 평가하고자 전체길이 2.5m인 UIC 60레일 단면을 Fig. 10과 같이 이상화하여 2D Shell요소로 모델링하였다. 해석에 적용한 레일강은 UIC 60의 재료적 물성치를 적용하였다.

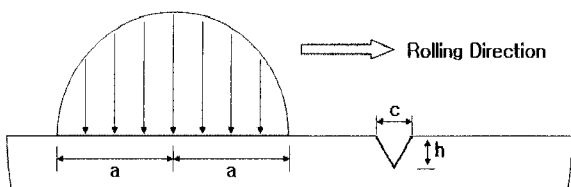
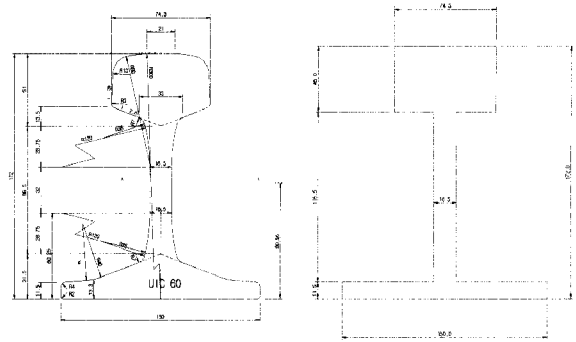


Fig. 9. Theoretical model of surface crack [8]



(a) UIC 60 rail (b) Idealization model
 Fig. 10. Idealization model for crack analysis

하중조건은 Fig. 11과 같이 차륜과 레일사이의 접촉부위에 발생하는 헤르츠 접촉압력(Hertzian contact pressure) 분포에 대해 $-a < x < +a$ 의 구간을 10개의 구간으로 나누어 계산하였으며, 각 구간별 하중조건을 Table 5에 나타내었다[9].

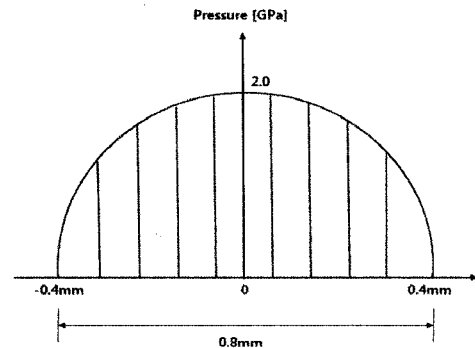


Fig. 11. Hertzian pressure distribution

Table 5. Applied load for Hertz contact pressure

$-a < x < +a$	$p(x)$ GPa
$\pm 400\mu\text{m}$	0
$\pm 320\mu\text{m}$	1.2
$\pm 240\mu\text{m}$	1.3
$\pm 160\mu\text{m}$	1.8
$\pm 80\mu\text{m}$	2.0
$\pm 0\mu\text{m}$	2.0

또한, Shell요소를 이용한 해석모델에 대해 레일두부 표면으로부터 최대 길이 2mm까지의 미세한 균열을 모델링하였다. 균열부 상부에는 물성치가 없는 요소를 모델링하고 tied mesh기능을 이용하여 하중이 해석모델에 이동하중으로서 균열부 위를 이동하도록 하였다. 레일표면의 균열에 대해서는 지점간 레일중앙 두부에 형상화 하였고, 균열의 길이, 각도에 변화를 주었다. 또한, 온도에 대한 영향을 파악하고자 $-40 \sim +40^\circ\text{C}$ 까지 변화를 주어 차륜/레일 접촉하중에 의한 레일내부 전단응력 및 휨응력을 검토하였다.

Fig. 12 (a)는 전체해석모델을 나타내며, (b)는 균열길이 2mm, 균열각도 60°의 균열부(crack-tip)를 확대한 모습을 나타낸다. Shell요소는 Plane stress요소를 이용하였으며, 종방향으로는 x축만을 고정하였고, 수직방향에 대해서는 침목간격(625mm)을 고려하여 한지조건으로 모델링하였다.

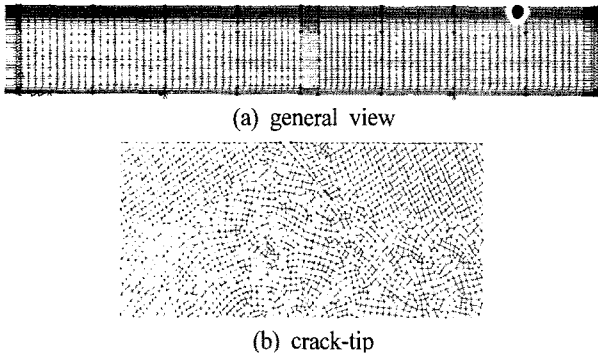


Fig. 12. Finite element mesh for surface crack

4.2 해석결과

Fig. 13~14는 전체 해석모델 중 균열부위만을 확대한 해석결과들이며, 각 하중단계별 발생 유효응력의 분포도를 나타낸다. 하중이 균열부에 접근함에 따라 균열부(crack-tip)에서 응력의 크기가 증가하고, 하중이 균열의 중앙부에 위치할 경우 가장 큰 응력이 발생하였다.

이러한 내부 발생응력은 균열면의 경계면에서 접선방향으로 작용하는 전단응력과 경계면의 법선방향으로 작용하는 인장응력으로 작용하게 되어 Mode I(opening mode), Mode II(In plane mode)의 두 경우가 동시에 나타난다[9].

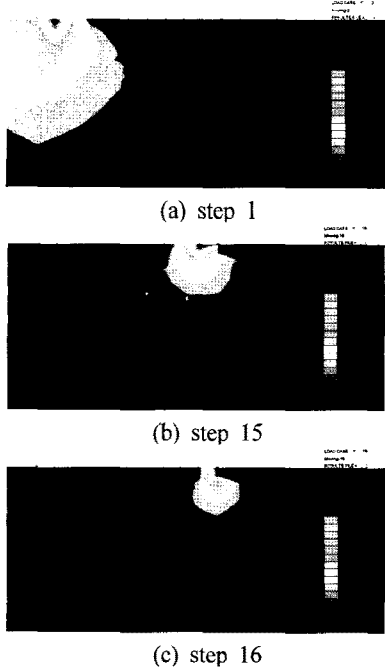


Fig. 13. Transient analysis of surface crack (crack length 0.8mm, crack angle 90°)

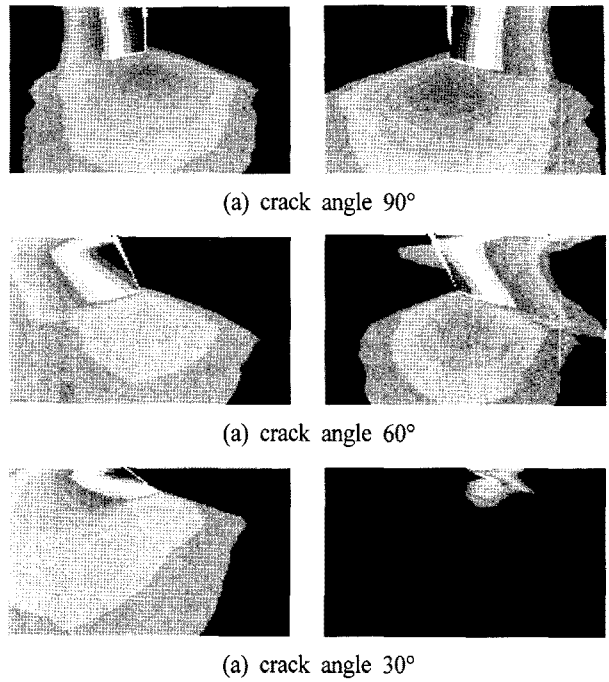


Fig. 14. Transient analysis of surface crack (crack length 0.8mm)

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 균열길이, 균열각도, 온도에 따라 레일에서 발생하는 최대 전단응력에 의한 응력확대계수(K_{II})에 대하여 검토하였으며, 그 결과를 Fig. 15~17에 나타내었다.

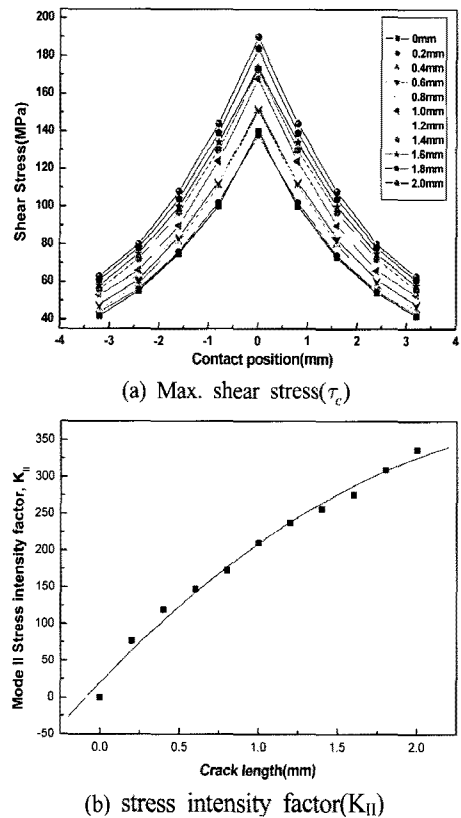


Fig. 15. The shear stress (τ_c) in crack tip & stress intensity factor (K_{II}) as crack length (crack angle 90°)

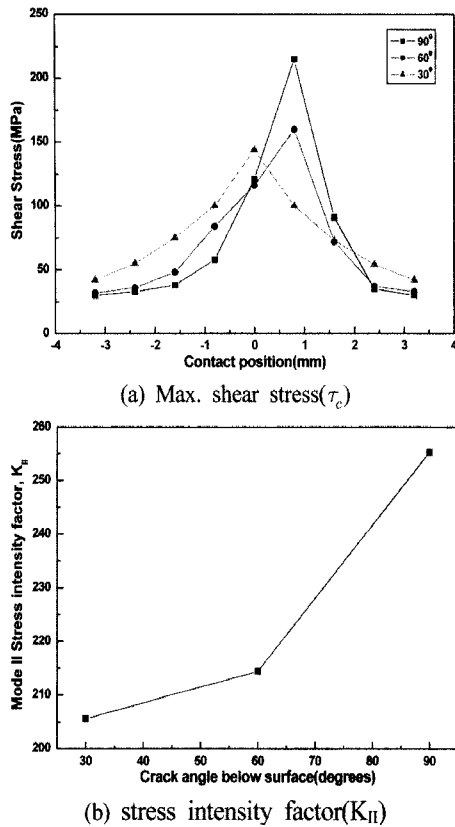


Fig. 16. The shear stress (τ_c) in crack tip & stress intensity factor (K_{II}) as crack angle (crack length 2mm)

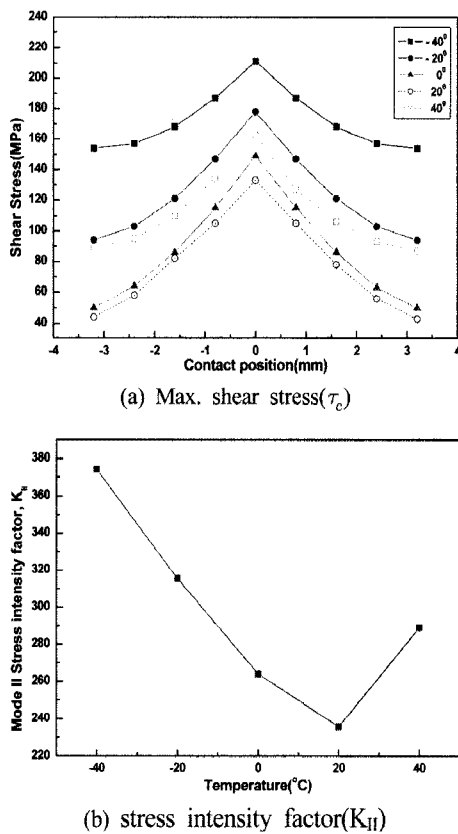


Fig. 17. The shear stress (τ_c) in crack tip & stress intensity factor (K_{II}) as temperature (crack length 2mm, crack angle 90°)

검토결과 균열길이가 길어질수록 균열부(crack-tip)에서

발생하는 전단응력은 증가하였으며, 균열이 없는 경우에 비해 2mm의 균열이 발생할 경우 최대 26.3%의 전단응력이 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 균열각도를 30°, 60°, 90°로 변화를 주어 해석한 결과 30°의 균열에 비해 90° 각도로 균열이 형성되어 있을 경우 레일두부 전단응력이 약 33.0% 증가하는 것으로 나타났다. 온도에 대한 영향은 상온(+20°C) 일 때보다 동절기(0~40°C)와 하절기(+40°C) 때에 레일두부 전단응력이 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 온도 변화에 따라 레일내부에 인장 및 압축응력이 발생하여 하중에 의한 전단응력을 증가시켜 균열진전을 촉진하기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 최고속도 400km/h의 차세대고속철도에 대응하기 위해 레일의 피로수명에 영향을 미치는 매개변수연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 실용식을 이용한 매개변수 해석결과, 레일저부 힘응력에 영향을 미치는 인자는 속도와 궤도상태가 약 20~40% 정도 영향을 미치며, 축중, 궤도지지강성, 침목간격 순으로 나타났다. 레일두부 전단응력에는 축중이 약 70% 이상을 차지하고 차륜반경에 의한 영향이 약 20%정도인 것으로 분석되었다.

2) 유한요소해석결과, 균열이 없는 경우에 비해 2mm의 균열이 발생할 경우 약 26%정도의 전단응력이 증가하고, 0°의 균열에 비해 90° 각도로 균열이 형성되어 있을 경우 레일두부 전단응력이 약 33%정도 증가하는 것으로 분석되었다. 또한, 온도의 영향은 상온(+20°C)일 때에 비해 동절기(0~40°C)에 레일두부 전단응력 및 응력확대계수가 가장 컸고, 하절기(+40°C) 때도 증가하는 것으로 분석되었다.

3) 레일두부 표면에 미세균열이 존재할 경우 레일내부 발생응력의 증가로 균열진전속도가 증가하여 수명을 단축시킬 수 있음을 확인하였다.

따라서 미세균열을 검출할 수 있는 탐상차 및 종합검측차의 운영과 이를 제어하기 위한 주기적인 레일연마가 시행되어야 하며, 동절기와 하절기에 균열진전속도가 증가하므로 이를 고려한 레일연마 작업이 수행되어야 할 것이다.

5. 향후연구과제

1) 본 연구의 매개변수연구 시 400km/h의 속도에 대한 검토결과는 현재까지 국내·외 문헌에 제시된 바가 없어 국외 문헌자료(0~200km/h)를 참고로 하여 가정한 결과이다. 향후 열차증속시 현장측정을 통해 속도에 따른 레일저부

휨응력 및 레일두부 전단응력에 대한 검토가 있어야 할 것으로 판단된다.

2) 레일형상에 대한 3차원 유한요소해석을 통해 차륜과 레일의 접촉면에서 발생하는 헤르츠압력을 구체화하여 검토함으로써 레일에서 발생하는 미세균열에 대한 영향을 검토할 필요가 있다.

3) 레일표면에서 발생하는 미세균열에 대한 검출기법 및 유지보수(레일연마 및 교체)를 위한 목표치 및 임계치의 설정을 위한 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원의 “차세대고속철도 기술개발사업”에 의해 수행되었으며, 관련자분들에게 감사드립니다.

참고 문헌

1. Coenraad Esveld(2001), “Modern Railway Track,” MRT-Productions, pp. 275-326.
2. Dr. Bernhaed Lichtberger(2005), “Track Compendium,” Eurail press, pp. 99-166.
3. Sanford, R.J.(2003), “FRACTURE MECHANICS,” Pearson Education Inc, pp. 197-235.
4. Cannon, D.F. and Pradier, H.(1996), “Rail rolling contact fatigue Research by the European Rail Research Institute,” Wear, Vol. 191, pp. 1-13.
5. Ishida, M. and Abe, N.(1990), “Relationship between rail surface irregularity and bending fatigue of welded part in long rails,” RTRI report, Vol. 4, No. 7.
6. Ringsberg, J.W.(2000), “Cyclic ratchetting and failure of a pearlitic rail steel,” Fatigue Frac Engng Mater Struc, Vol. 23, pp. 747-758.
7. 이용복, 김호경, 전진성(2005), “피로해석의 기초,” 청문각, pp. 198-245.
8. 마양수(2006), “철도차륜의 구름접촉피로에 의한 수명예측에 관한 연구,” 선문대학교 기계 및 제어공학과 박사학위논문.
9. 최성만(1998), “구름접촉에서 표면과 내부표면의 크랙전파에 관한 수치적 연구,” 명지대학교 석사학위논문.
10. 서울산업대학교 철도전문대학원(2008), “고속화를 위한 선로구축물 핵심기술개발,” 한국건설교통기술평가원, pp. 127-26.

접수일(2008년 11월 26일), 수정일(2009년 4월 17일),
게재확정일(2009년 5월 15일)