

# 레일 표면결함에 따른 구름접촉해석

## Finite Element Analysis of Rolling Contact according to Surface Defect on rail

\*서정원<sup>1</sup>, 권성태<sup>2</sup>, 권석진<sup>1</sup>, 이동형<sup>1</sup>,  
 \*#J.W.Seo(jwseo@krii.re.kr)<sup>1</sup>, S.T.Kwon<sup>2</sup>, S.J.Kwon<sup>1</sup>, D.H.Lee<sup>3</sup>  
<sup>1</sup> 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실, <sup>2</sup> 한국철도기술연구원 시험인증센터

Key words : Contact fatigue, Ballast imprint, Finite Element Analysis

### 1. 서론

레일 표면에서 발생하는 접촉피로손상인 Squat, Head check 등은 중요한 문제로 대두되고 있다<sup>(1,2,3)</sup>. Squats은 직선구간 및 반경이 큰 곡선구간에서 발생한다고 알려져 있으며 Head checks의 경우에는 곡선부의 High rail에서 반복적인 Plastic strain에 의해 주로 발생한다. 레일 표면에서 발생하는 손상 중의 하나로서 UIC의 결함코드<sup>(2)</sup>에서 설명하고 있는 Ballast imprint에 의한 Bruising로써 Fig. 1과 같다. 이러한 손상은 자갈도상에서의 자갈이 차량 통과시에 차륜과 레일의 접촉면에 위치하면서 발생하며, 주로 겨울철에 많이 발생한다. Bruising에 의한 손상의 형태가 날카롭게 되어있을 경우에는 노치효과를 발생시켜 균열의 원인이 될 수 있으며 파단에 이를 수도 있다.

이러한 손상이 발생하면 큰 충격하중이 발생하여 레일 및 차량에 안전에 영향을 주며, 적절한 시기에 제거하지 않으면 레일의 파단시켜 대형 사고를 유발한다. 현재의 레일 손상에 대한 유지보수 방법으로는 손상된 부위를 그라인딩하는 것으로 유지보수 비용을 증가시킨다. Ballast imprint의 발생을 방지하고 저감시키는 대책을 수립하기 위해서는 발생 메카니즘의 이해가 필요하다. 본 논문에서는 구름접촉에 따른 유한요소해석을 통하여 Ballast imprint의 거동을 평가하였다.

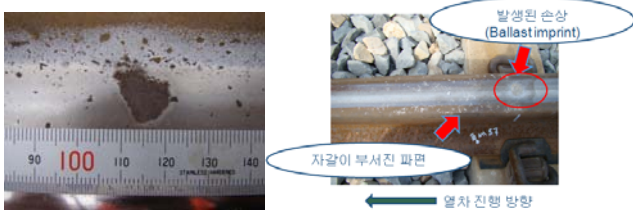


Fig. 1 레일 표면에 발생하는 Ballast imprint

### 2. 유한요소해석

#### 2.1 해석방법

레일 표면에서 발생하는 Ballast imprint의 경우에는 레일 위에 자갈 등의 물체가 존재하고 차량이 주행하면서 차륜이 이를 통과하면서 발생하는 현상이다. 차륜이 자갈 등의 물체에 접촉하고 접촉한 물체가 레일 표면에 하중을 가하면서 소성변형에 의하여 발생한다. 자갈 등이 레일 표면에 소성변형을 발생시키는 현상을 모사하기 위하여 Indenter simulation을 수행하였으며 차륜이 손상된 레일을 주행하는 현상은 Hertz 접촉압력을 이동 시키면서 해석을 수행하였고 해석절차는 Fig. 2와 같다.

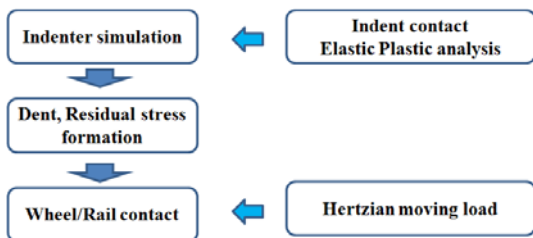


Fig. 2 유한요소 해석 절차

#### 2.2 Indenter simulation 해석모델 및 하중조건

Ballast imprint의 형성된 크기는 다양하지만 일반적으로 깊이가 0.5 mm 이내이고 너비는 3 - 60 mm까지 다양하게 형성된다. 또한 이러한 손상에 의한 내부 잔류응력상태의 변화를 관찰하기 위하여는 해석 모델의 요소 크기의 선택이 중요하다. 레일의 크기에 비하여 접촉면적이 굉장히 작으므로 요소크기를 0.5mm 이내로 결정하였다. 모든 부분에서의 요소크기를 작게하면 해석 시간에 문제가 있으므로 접촉면의 일부분만 요소크기를 세밀하게 모델링하였다. Fig. 3은 Indenter simulation을 위한 유한요소 모델을 보여주고 있다. Indenter는 하중을 추가하였을 때 깊이가 0.5mm 너비가 10mm가 되도록 강체(Rigid body)로 모델링하였다. 레일의 경우에는 Indenter와 접촉하는 부위인 요소크기가 세밀한 부분은 탄소성으로 모델링하였고 그 외 부분은 탄성체로 모델링하였다. 레일 모델에 사용된 요소갯수(Element)는 80,000개, 절점갯수(Node)는 86,961개이며, 해석에 사용된 물성치는 Table 1과 같다. 탄소성 해석에서 항복조건은 Von-mises, 유동성경화법칙(Kinematic Hardening Rule)을 사용하였다<sup>(4,5)</sup>.

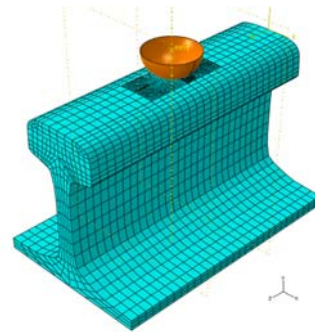


Fig. 3 F.E Model for indenter simulation

Table 1 Mechanical properties

Model	Young's Modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson' ratio
Indenter	Rigid Body			
Rail (Fine mesh)	206	Elastic Material	7850	0.3
Rail (Rough mesh)	206	507	7850	0.3

#### 2.3 해석 결과

하중조건으로는 Indenter에 변위를 0.5mm가 되도록 추가하였다. Fig. 4는 하중이 부과된 상태에서 Indenter에 의하여 변형된 모습과 응력 분포를 나타내고 있다. Fig. 5는 Indenter의 하중 제거 후 레일의 변형 및 잔류응력 분포를 나타내고 있다. 접촉면은 탄.소성으로 모델링 되었기 때문에 하중 제거 후 접촉표면에 변형된 모습이 그대로 남아있고 항복강도를 넘어서기 때문에 잔류응력이 형성되었다. Fig. 6는 하중 제거 후 Indenter에 의해 변형된 모습을 나타내고 있다. Indenter 모양과 동일하게 원형으로 변형이 되었고 하중을 추가 중에는 0.5 mm의 깊이까지 변형이 되었으나 하중제거 후에는 0.4 mm까지 다시 복구되었다. Fig. 7 (a)는 하중 제거 후에 레일의 길이 방향에 따른 잔류응력 분포를 나타내고 있다. 표면의 잔류응력은 Indenter에 의해 형성된 Dent 경계면에서 가장 크게 발생하고 있으며, Dent의

내부에서는 잔류응력이 작게 발생하고 있다. 잔류응력의 최대 크기는 Dent 경계면에서 550 MPa이 발생하고 있고, Dent의 중앙에서는 250 MPa이 발생하고 있다. Fig. 7 (b)는 Dent 경계면과 중앙부에서의 깊이 방향에 따른 잔류응력 분포를 나타내고 있다. Dent 경계면에서는 접촉표면에서 최대 잔류응력이 형성되었지만, Dent 중앙에서는 표면으로 깊이 3mm 부근에서 최대가 발생하고 있다.

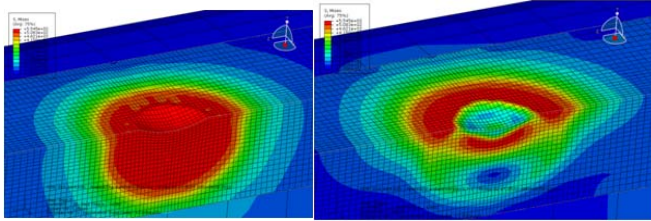


Fig. 4 Indenter Loading Fig. 5 Indenter Unloading

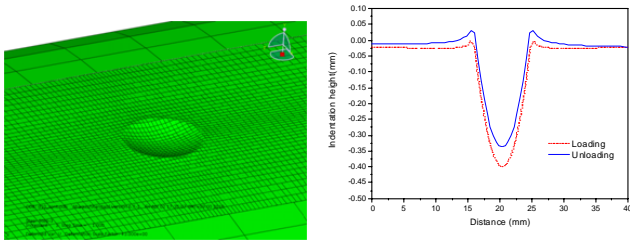
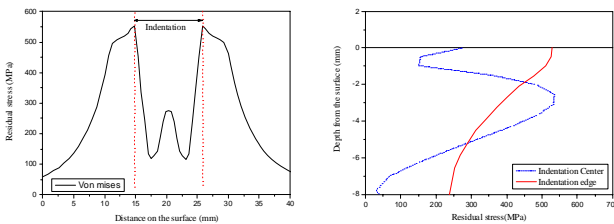


Fig. 6 Indenter Unloading 후의 변형 모습



a) 길이방향 b) 깊이방향  
Fig. 7 Indenter Unloading 후 잔류응력 분포

2.4 구름접촉해석모델 및 하중조건

Indenter에 의해 형성된 Dent 주위의 차륜/레일 구름접촉에 의한 잔류응력 및 내부응력의 변화를 조사하기 위하여 구름접촉 해석을 수행하였다. 차륜/레일의 구름접촉은 Hertz 하중이 연속적으로 레일 위를 지나도록 모델링하였다. 이때 하중의 크기는 다음의 식과 같다.

$$p(x,y) = p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{c}\right)^2} \quad p_0 = \frac{3F}{2\pi ac}$$

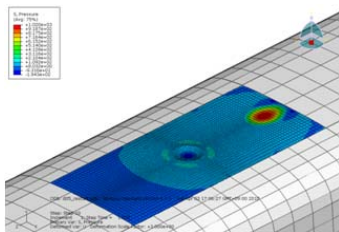
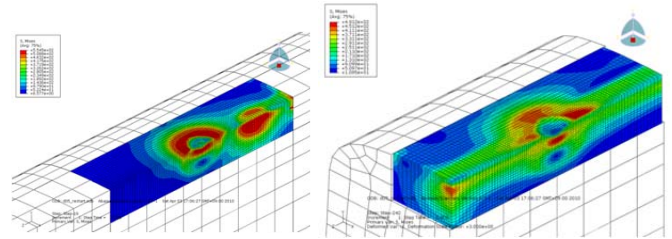


Fig. 8 구름접촉해석 모델

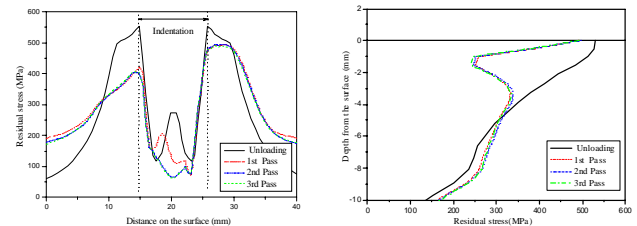
2.5 해석 결과

구름접촉의 경우에는 첫 번째 구름접촉 후에는 접촉응력이 탄성한도를 넘어서면 소성변형이 발생하여 잔류응력이 생성된다. 두 번째 하중이 통과시에는 첫 번째 하중에서 생성된 잔류응력과 접촉응력을 받게 된다. Dent가 있는 경우에는 Dent가 형성될 때 잔류응력이 형성되었기 때문에 이러한 잔류응력과 접촉하

중이 상호작용을 하게된다. Fig. 9는 Dent가 존재 할 경우에 접촉하중이 통과시 응력 분포를 나타내고 있다. Fig. 10은 초기에 Indenter에 의해 형성된 잔류응력과 반복적인 구름접촉으로 인해 재 분포된 잔류응력 비교한 것이다. Fig. 10 (a)는 레일의 길이 방향에 따른 잔류응력분포를 비교한 것으로 구름접촉하중에 의하여 Dent 경계면의 초기잔류응력이 재 분포되어 최대 크기가 작아졌다. 또한 Dent 경계에 하중이 통과하는 시작부분보다 끝단부분에서의 잔류응력의 크기가 더 크게 변화하였다. Fig. 10 (b)는 Dent 주위에서 깊이 방향에 따른 잔류응력 재 분포를 나타내고 있다. 그림과 같이 구름접촉 하중이 통과한 후에는 잔류응력의 형상이 크게 바뀌고 있음을 알 수 있다.



a) 하중이 Dent 통과 전 b) 하중이 Dent 통과 후  
Fig. 9 구름접촉 시의 응력 분포



a) 길이방향 b) 깊이방향  
Fig. 10 구름접촉 하중 통과 후 잔류응력 분포

3. 결론

유한요소법을 이용하여 레일의 표면결함에 따른 접촉응력 해석 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Indenter simulation을 통하여 Indenter 모양과 동일한 표면 결함인 Dent가 형성되었으며 소성변형에 의하여 잔류응력이 발생하였다. 표면의 잔류응력은 Dent 경계면에서 가장 크게 발생하고 있으며 크기는 550 MPa이었다.
2. Dent가 존재 할 경우에 반복적인 구름접촉하중 통과시 잔류응력은 재 분포되었다. 재분포된 잔류응력이 가장 크게 발생한 부위는 접촉하중이 통과하는 Dent 경계의 시작 부분이었고, 끝단부분은 잔류응력의 크기가 더 크게 변화하였다.

후기

본 논문은 고속화 인터페이스 기반기술 개발의 일환으로 수행 되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. K. Kondo, K. Yoroizaka, Y. Sato:Wear, "Cause, increase, diagnosis, countermeasures and elimination of Shinkansen shelling" Wear 191,199-203,1996.
- 2.UIC leaflet 712, 2002,"Rail defects"
- 3 D. F. Cannon, H. Pradier, "Rail rolling contact fatigue Research by the European Rail Research Institute", Wear 191, 1 - 13,1996.
4. V.M.M.B. Mota, P.M.G.P. Moreira,L.A.A. Ferreira, "A study on the effects of dented surfaces on rolling contact fatigue",Int. Journal of fatigue Vol. 30, 1997-2008,2008.
5. D. Nelias, F. Ville, "Detrimental effects of debris dents on rolling contact fatigue",ASME Journal of tribology,55-64, 2000.