

◆ 특집 ◆ 레일방식 철도차량의 고속화 기술

## 레일표면손상이 접촉피로수명에 미치는 영향

### Effect of Rail Surface Damage on Contact Fatigue Life

서정원<sup>1,✉</sup>, 이동형<sup>2</sup>, 함영삼<sup>1</sup>, 권성태<sup>1</sup>, 권석진<sup>2</sup>, 최하영<sup>2</sup>

Jung-Won Seo<sup>1,✉</sup>, Dong-Hyong Lee<sup>2</sup>, Young-Sam Ham<sup>1</sup>, Sung-Tae Kwon<sup>1</sup>, Seok Jin Kwon<sup>2</sup>, and Ha-Yong Choi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국철도기술연구원 시험인증안전센터 (Testing and Certification Center, Korea Railroad Research Institute)

<sup>2</sup> 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 (High-speed Railway Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute)

✉ Corresponding author: jwseo@krri.re.kr, Tel: 031-460-5210

Manuscript received: 2012.3.30 / Accepted: 2012.4.27

*Rails are subjected to damage from rolling contact fatigue, which leads to defects such as cracks. Rolling contact fatigue damages on the surface of rail such as head check, squats are one of growing problems. Another form of rail surface damage, known as "Ballast imprint" has become apparent. This form of damage is associated with ballast particles becoming trapped between the wheel and the surface of rail. These defects are still one of the key reasons for rail maintenance and replacement. In this study, we have investigated whether the ballast imprint is an initiator of head check type cracks and effect of defect size using Finite element analysis. The FE analysis were used to investigate stresses and strains in subsurface of defects according to variation of defect size. Based on loading cycles obtained from FE analysis, fatigue analysis for each point was carried out.*

Key Words: Rolling Contact Fatigue (구름접촉피로), Ballast Imprint (밸러스트임프린트), Finite Element Analysis (유한요소해석)

#### 기호설명

$b$  = Shear fatigue strength exponent

$c$  = Shear fatigue ductility exponent

$K$  = Material constant

$E$  = Young's modulus

$\Delta\gamma_{\max}$  = Shear strain range

$\Delta\sigma_{n,\max}$  = Maximum normal stress

$\sigma_y$  = Yield strength

$\tau_f'$  = Shear fatigue strength coefficient

$\gamma_f'$  = Shear fatigue ductility coefficient

#### 1. 서론

레일 표면에서 발생하는 접촉피로손상인 Squat, Head check 등은 중요한 문제로 대두되고 있다.<sup>1-3</sup> Squats 은 직선구간 및 반경이 큰 곡선구간에서 발생한다고 알려져 있으며 Head checks 의 경우에는 곡선부의 High rail 에서 반복적인 Plastic strain 에 의해 주로 발생한다. Squats 은 직선구간 및 반경이 큰 곡선구간에서 발생하며 레일 표면의 WEL (White etching layer) 또는 Dent 에서부터 발생하거나, 기관차 등 동력차의 견인력(Traction)에서 라켓팅에 의해 발생한다고 알려져 있으며 균열을 포함한 Dark spot 을 동반한다. 균열은 레일의 두부로

진전하며 처음에는 표면에서 얇은 각도로 진전한 후 깊이가 3 - 5 mm 정도에 도달할 때 아래쪽으로 진전하여 최종적으로는 파단에 이른다.<sup>4,7</sup> 레일 표면에서 발생하는 손상 중의 하나로써 UIC의 결함 코드<sup>2</sup>에서 설명하고 있는 Ballast imprint에 의한 Bruising이다. 이러한 손상은 자갈도상에의 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. 레일의 파손은 많은 인명과 재산 피해를 일으키는 차량의 탈선의 원인이 되므로, 레일표면에 발생하는 손상을 줄이기 위해서는 파손메카니즘의 이해가 중요하다.

이러한 손상이 발생하면 큰 충격하중이 발생하여 레일 및 차량에 안전에 영향을 주며, 적절한 시기에 제거하지 않으면 레일의 파단시켜 대형 사고를 유발한다. 본 논문에서는 Ballast imprint가 head check 형태의 균열 발생을 일으키는 원인인지를 시험편 접촉피로시험과 유한요소해석을 이용하여 조사하였다.

2. 구름접촉피로시험

2.1 시험편 및 시험조건

Fig. 1은 도상자갈에 의한 표면손상 메카니즘을 보여주고 있으며, 그림과 같이 자갈이 차륜과 레일 사이에서 부수지면서 레일표면에 손상이 발생한다.<sup>6</sup> Fig. 2는 도상자갈에 의해 레일 표면에 발생한 손상을 보여주고 있으며 직경이 약 10mm 정도가 발생하고 있다. 레일의 표면손상의 크기에 따른 거동을 조사하기 위하여 시험편 시험을 실시하였다. Fig. 3은 시험편 채취 위치를 나타내고 있으며, 그림에서와 같이 차륜 시험편은 차륜의 두부에서 채취하였고 레일의 경우에도 두부에서 채취하였다. 차륜 및 레일시험편의 직경은 50mm 이고 두께는 10mm 가 되도록 하였다. 시험편 접촉면의 경도를 일정하게 유지하기 위하여 열처리 실시하였고 접촉면의 조도를 맞추기 위하여 연삭을 실시하였다.

시험편에 Ballast imprint의 모양을 만들기 위하여 브리넬 경도기 및 비커스 경도기의 압흔자를 이용하였다. Fig. 4는 시험편에 형성된 표면손상을 나타내고 있으며 크기에 따라서 Dent 1부터 Dent 4로 구분하였다. 시험조건으로는 슬립율이 0.1%가 되도록 하였고, 접촉면에 공기를 분사하여 접촉에 의한 마모입자를 제거하였다. 하중의 크기는 접촉

압력이 1100 MPa 이 되도록 하중을 부가하였다. 시험속도는 500RPM 으로 유지하였고 일정 사이클 마다 되면 시험기를 멈추고 손상 거동을 살펴보았다.

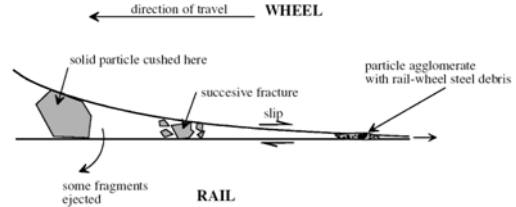


Fig. 1 Surface damage mechanism due to ballast imprint<sup>6</sup>

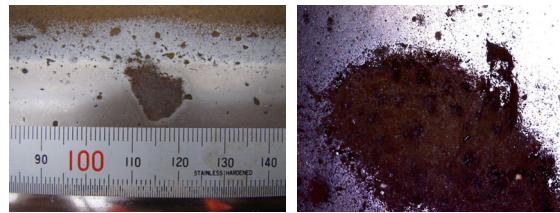


Fig. 2 Surface damage due to ballast imprint

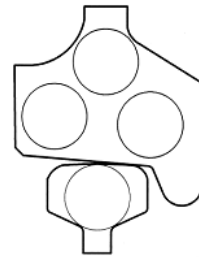


Fig. 3 Configuration of specimen

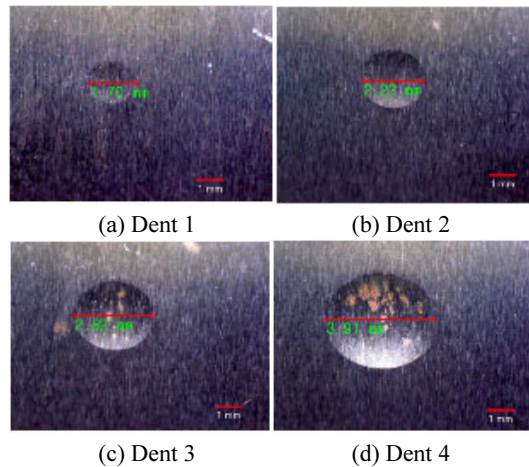


Fig. 4 Surface defect created using indenter of hardness tester

**2.2 시험 결과**

4 가지 종류의 손상이 발생시 반복적인 싸이클에 따른 손상의 변화를 살펴보았다. 최대 싸이클을 10 만싸이클까지 시험하였으며 일정 싸이클마다 시험기를 멈추고 표면 손상을 관찰하였다. Dent 1 의 경우에는 3000cycle 후에 모두 마모가 되어 형상이 사라졌으며, Dent 2 역시 9000cycle 이후에 마모가 발생하여 형상이 사라졌다. Dent 3 의 경우에는 6000 cycle 에서 Dent 의 시작부분에서 손상이 발생하고 9000cycle 에서는 중간부분의 옆면에서 균열이 발생하고 있다. 그러나 12000 cycle 에서는 마모량이 크기 때문에 발생한 손상과 균열이 모두 사라지고 없다. Fig. 5 는 Dent 4 에 대한 싸이클에 따른 변화 모습을 나타내고 있다. 6000 cycle 이 경과하면 Dent 의 시작면과 중간부분에서 손상이 발생하고 있으며, 9000 cycle 이 경과하면 Dent 의 중간부분 옆면에서 균열이 발생하여 큰 조각이 떨어져 나가는 현상을 볼수 있으며, 이로인하여 6000 싸이클보다 Dent 의 직경이 더 커졌음을 알 수 있다. 12000 싸이클에서는 마모가 조금 발생하여 Dent 의 직경이 조금 작아졌음을 알 수 있다. 시험편 시험 결과로부터 Dent 의 크기 작을 경우에는 마모에 의해서 손상이 제거되지만, 일정 크기 이상에서는 균열이 발생하고, 성장함을 알 수 있다.

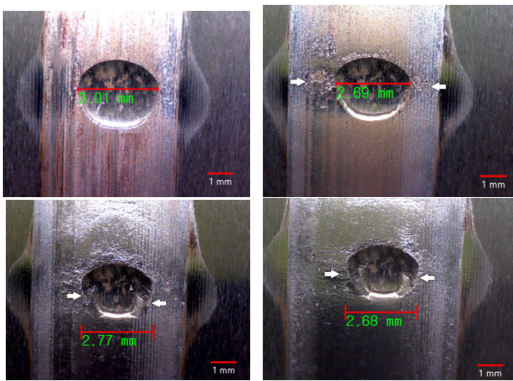


Fig. 5 Progression of damage on Dent 4 specimen

**3. 유한요소해석 및 피로수명평가**

**3.1 해석방법**

시험편 시험 결과로부터 일정 크기 이상의 손상이 발생 할 경우에는 균열이 성장함을 알 수 있었으므로, 실제 레일에서 발생한 손상의 크기에 따른 레일 표면의 재료적인 거동을 조사하기 위하

여 유한요소해석을 수행하였다. 레일 표면에서 발생하는 Ballast imprint 의 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 simulation 을 수행하였으며 차륜이 손상된 레일을 주행하는 현상은 Rigid body 를 이용하여 접촉해석을 수행하였고 해석절차는 Fig. 6 과 같다.

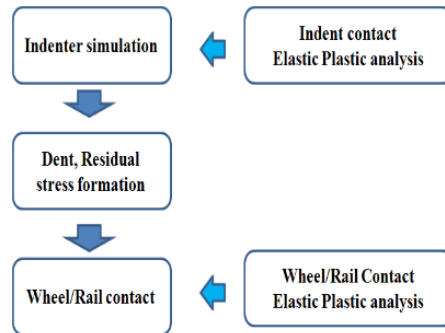


Fig. 6 Finite element analysis procedure

**3.2 Indenter simulation 해석모델 및 결과**

Ballast imprint 의 형성된 크기는 다양하지만 일반적으로 깊이가 0.5 mm 이내이고 너비는 3 - 60 mm 까지 다양하게 형성된다. 또한 이러한 손상에 의한 내부 응력상태의 변화를 관찰하기 위하여는 해석 모델의 요소 크기의 선택이 중요하다. 레일의 크기에 비하여 접촉면적이 굉장히 작으므로 요소크기를 0.5mm 이내로 결정하였다. 모든 부분에서의 요소크기를 작게 하면 해석시간에 문제가 있으므로 접촉면의 일부분만 요소크기를 세밀하게 모델링하였다. Fig. 7 은 Indenter simulation 을 위한 유한요소 모델을 보여주고 있다. 레일의 경우에는 Indenter 와 접촉하는 부위인 요소크기가 세밀한 부분은 탄·소성으로 모델링하였고 그 외 부분은 탄성체로 모델링하였다. 레일 모델에 사용된 요소갯수(Element)는 80,000 개, 절점갯수(Node)는 86,961 개이다. 탄·소성 해석에서 항복조건은 Von-mises, 유동성경화법칙(Kinematic Hardening Rule)을 사용하였다.

하중조건으로는 Indenter 에 변위를 0.4mm 가 되도록 부가하였다. Fig. 8 은 하중 제거 후 Indenter

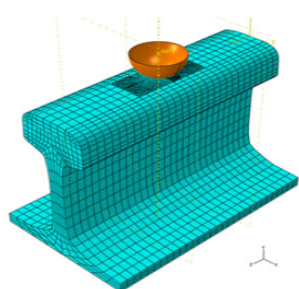


Fig. 7 Finite element model for indenter simulation

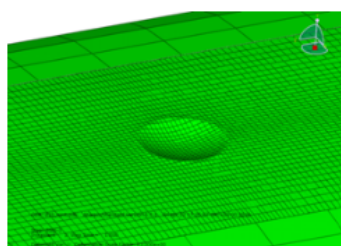


Fig. 8 Deformation caused by indenter after load removal

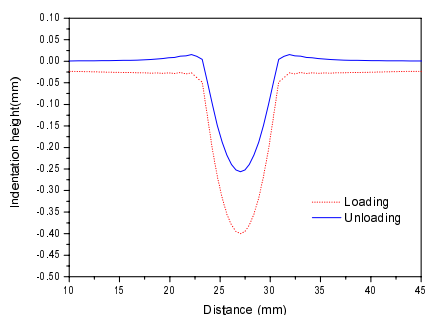


Fig. 9 Plastic deformation due to indenter

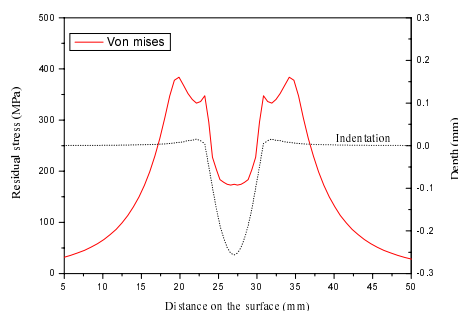


Fig. 10 Residual stress distribution after load removal

에 의해 변형된 모습을 나타내고 있으며 Indenter 모양과 동일하게 원형으로 변형이 되었다. Fig. 9 는 Indenter 의 하중 제거 후 레일의 변형을 나타내고

있다. 하중을 부가 중에는 0.4 mm 의 깊이까지 변형이 되었으나 하중제거 후에는 0.25 mm 까지 다시 복구되었다. Fig. 10 은 하중 제거 후에 레일의 길이 방향에 따른 잔류응력 분포를 나타내고 있다. 접촉면은 탄소성으로 모델링 되었기 때문에 하중 제거 후 접촉표면에 변형된 모습이 그대로 남아있고 항복강도를 넘어서기 때문에 잔류응력이 형성되었다. 표면의 잔류응력은 Indenter 에 의해 형성된 Dent 경계면에서 가장 크게 발생하고 있으며, Dent 의 내부에서는 잔류응력이 작게 발생하고 있다. 잔류응력의 최대 크기는 Dent 경계면에서 380 MPa 이 발생하고 있고, Dent 의 중앙에서는 30 MPa 이 발생하고 있다.

### 3.3 구름접촉해석모델 및 결과

Indenter 에 의해 형성된 Dent 주위의 차륜/레일 구름접촉에 의한 잔류응력 및 내부응력의 변화를 조사하기 위하여 구름접촉 해석을 수행하였다. 차륜/레일의 구름접촉은 Rigid body 를 이용하여 접촉 해석을 수행하여 차륜이 레일 위를 지나도록 모델링하였으며 Fig. 11 과 같다.

구름접촉의 경우에는 첫 번째 구름접촉 후에는 접촉응력이 탄성한도를 넘어서면 소성변형이 발생하여 잔류응력이 생성된다. 두 번째 하중이 통과 시에는 첫 번째 하중에서 생성된 잔류응력과 접촉응력을 받게 된다. Dent 가 있는 경우에는 Dent 가 형성될 때 잔류응력이 형성되었기 때문에 이러한 잔류응력과 접촉하중이 상호 작용하게 된다.

Fig. 12 는 차륜이 구름접촉하면 Dent 를 통과 시에 접촉압력분포를 나타내고 있다. Fig. 12(a)는 Dent 통과 전의 접촉압력분포로써 타원형의 접촉압력분포가 형성되었고 최대 접촉압력은 1210 MPa 이 발생하였다. Fig. 12(b)는 Dent 시작부분 통과시 발생한 접촉압력분포로써 Dent 부분은 접촉압력이 작용하지 않고 있으며, 최대 크기는 1670 MPa 이 발생하고 있다. Fig. 12(c)는 Dent 중앙부를 통과 할 때 발생한 압력으로써 최대크기는 1313 MPa 이 발생하고 있으며, 접촉압력은 Dent 시작부분과 끝단부 통과시에 가장 크게 발생하고 있다. Fig. 13 은 구름 접촉 후에 발생된 잔류응력의 변화를 나타내고 있으며 최대 잔류응력은 Dent 끝단에서 발생하고 있다. Fig. 14 는 초기에 Indenter 에 의해 형성된 잔류응력과 반복적인 구름접촉으로 인해 재 분포된 잔류응력 비교한 것이다. 구름 접촉으로 인하여 Dent 의 시작부분과 끝단부분에 큰 접촉압력이



작용하기 때문에 잔류응력이 재분포의 크기가 커졌으며 최대 크기는 500 MPa 이상이 발생하고 있다.

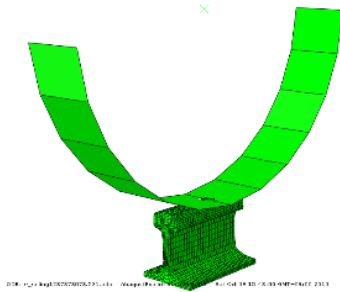


Fig. 11 Finite element analysis model for rolling contact

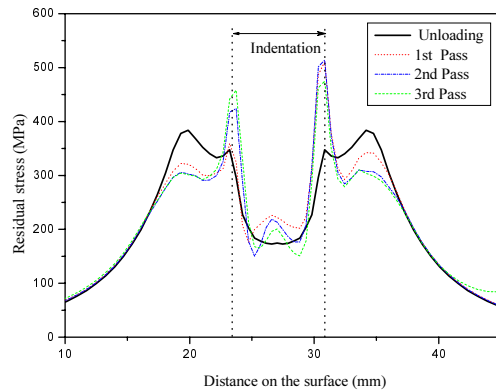


Fig. 14 Residual stress redistribution due to repeat load

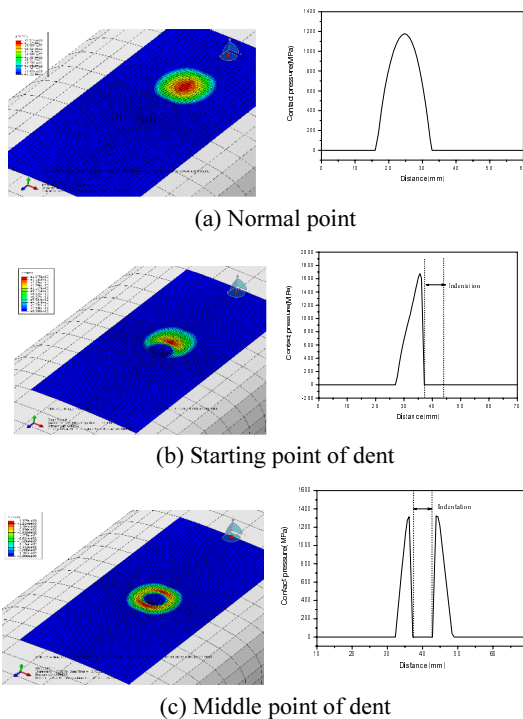


Fig. 12 Contact pressure distribution during rolling

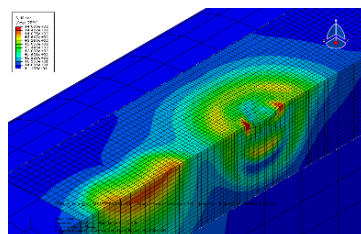


Fig. 13 Residual stress distribution after rolling

### 3.4 손상크기에 따른 영향평가

레일에 발생하는 손상의 크기에 따른 수명을 비교하기 위하여 손상크기 종류에 따라서 유한요소모형을 생성하였다. Fig. 15 는 손상크기에 따른 대표적인 유한요소모형을 보여주고 있다. 손상크기에 따라서 5 가지 종류에 대하여 모델을 생성하였고, 가장 크기가 작은 경우는 D1 으로서 직경이 4.6mm 이고 가장 큰 경우는 D5 로써 직경이 11.4 mm 이다.

레일에 생성된 손상크기에 따른 모델을 초기 조건으로 구름접촉해석을 수행하였다. Fig. 16 은 차륜이 레일의 손상 부위를 통과 시 각각의 손상 크기에 따른 최대 접촉압력의 크기를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 손상의 크기가 증가 할수록 손상면에 발생하는 최대 접촉압력의 크기가 증가하고 있으며, 이는 손상크기가 커질수록 손상에 의해 접촉할 수 있는 면적이 작아지기 때문이다. Fig. 17 은 각각의 손상에 대하여 발생한 접촉압력의 크기를 그래프로 나타낸 것이다. D1 의 경우 최대 접촉압력은 1364 MPa 이 발생하였고 손상크기에 따라서 비례적으로 증가하여 D4 의 경우에는 1583 MPa, D5 의 경우에는 1734 MPa 이 발생하였다.

Fig. 18 은 손상이 형성될 때 발생한 잔류응력 분포를 나타내고 있다. 각각의 발생된 손상에서 최대 잔류응력은 손상의 가장자리에서 가장 크게 발생하고 있다. 손상 크기가 가장 작은 D1 의 경우에는 최대 잔류응력의 크기가 456 MPa 이 발생하였고, 손상이 가장 큰 D5 의 경우에는 360 MPa 이 발생하여, 손상의 크기가 커질수록 잔류응력의 크기가 작게 발생하였다.

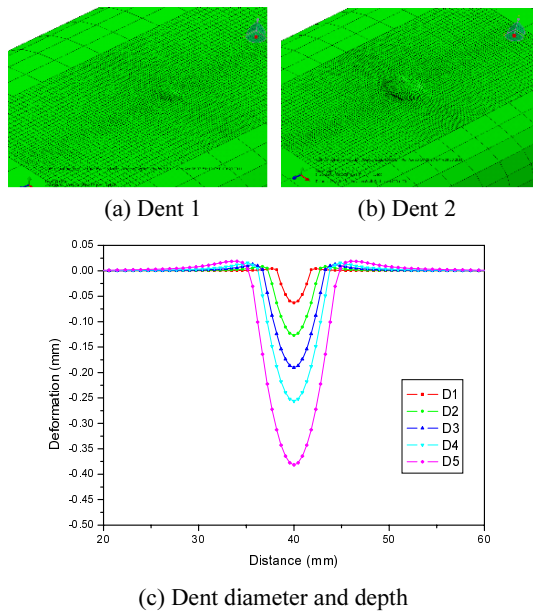


Fig. 15 Finite element model for dent size variation

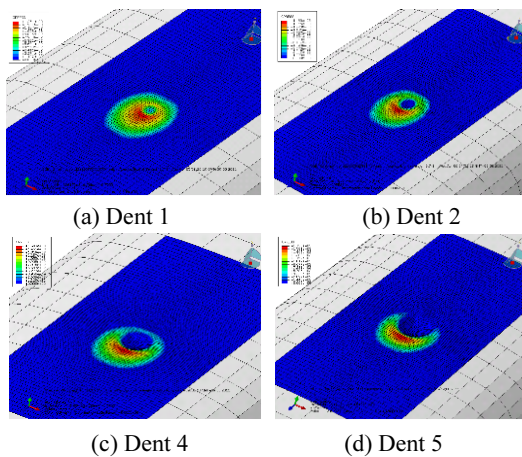


Fig. 16 Contact pressure according to Dent size variation

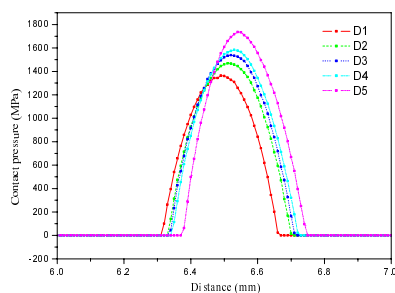


Fig. 17 Comparison of contact pressure according to Dent size variation

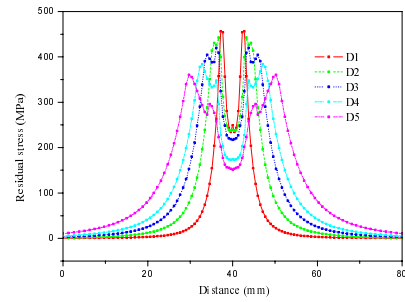


Fig. 18 Comparison of residual stress according to Dent size variation

#### 4. 접촉피로수명 평가 및 고찰

재료가 소성변형이 발생하면 수명평가 방법은 일반적으로  $\epsilon-N$  방법이 많이 사용되며, 전단변형률이 파손의 지배적인 경우에는 Coffin-Manson 식을 최대 전단진폭으로 표현된 식을 이용한다. 일반적으로 접촉피로의 경우는 전단변형률이 파손의 지배적이기 때문에 다음의 식을 이용하여 평가하였다.<sup>8,9</sup>

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} (1 + K \frac{\sigma_{n,\max}}{\sigma_y}) = \frac{\tau_f'}{G} (2N_f)^b + \gamma_f' (2N_f)^c \quad (1)$$

Fig. 19, 20 은 차륜이 손상된 레일 위를 구름접촉하면서 발생한 응력 및 변형률 이력을 나타내고 있다. 변형률 이력중에서  $\epsilon_{xy}$  와  $\epsilon_{xz}$  는 크기의 변화가 없었으며,  $\epsilon_{yz}$  가 크기의 변화가 가장 크게 발생하고 있다. 응력 이력 역시  $\sigma_{xy}$  와  $\sigma_{xz}$  는 크기 변화가 발생하지 않았고,  $\sigma_{yy}$  가 가장 크게 변화하고 있다.

Fig. 21 은 각도에 따른 피로파라메타의 변화를 보여주고 있다. 손상크기에 상관없이 균열발생 각도는 약  $48^\circ$  이고, D5 의 경우가 피로 파라메타가 가장 크게 발생하고 있으며 균열이 가장 먼저 발생한다. Fig. 22 는 손상크기에 따른 피로수명평가 결과를 나타내고 있다. 수명평가는 하중이 진행되는 방향에서 손상이 시작되는 부분(st)과 손상이 끝나는 부분(ed)에 대하여 수행하였다. 손상이 가장 작은 D1 의 경우에는 손상이 끝나는 부분에서 수명이 작게 발생하고 있으나, 나머지 크기에 대하여는 손상이 시작되는 부분에서 수명이 작게 발생하고 있다. 손상크기에 따른 수명의 영향을 살펴보면, D1 에서 D4 까지 는 손상크기가 커질수록 비례적으로 수명이 감소하는 경향을 보이고 있으

나, D5 에서 급격하게 수명이 작게 발생하고 있으며, 이때의 크기가 직경이 약 10 mm 이다. 이는 국외에서 표면손상의 크기에 따라서 균열 발생 및 진전을 관찰한 결과, 직경이 5, 6 mm 인 경우에는 마모에 의해서 제거되지만, 직경이 10 mm 인 경우에는 전형적인 스카트로 발전하는 결과<sup>10</sup> 와 유사한 경향을 보여주고 있다.

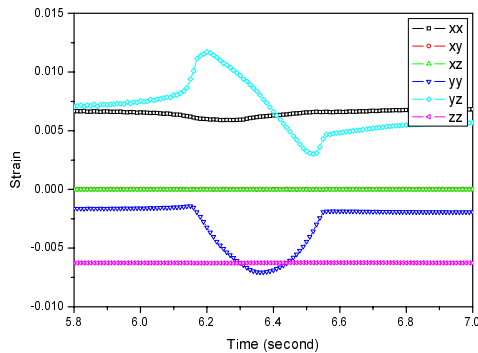


Fig. 19 Strain history at starting point of Dent 5

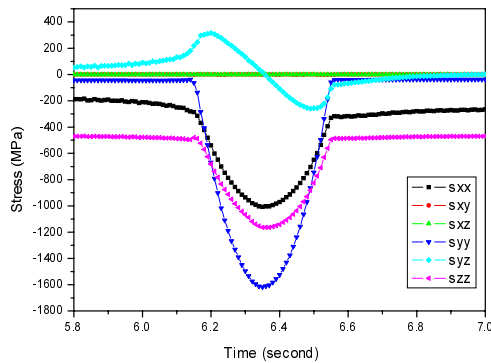


Fig. 20 Stress history at starting point of Dent 5

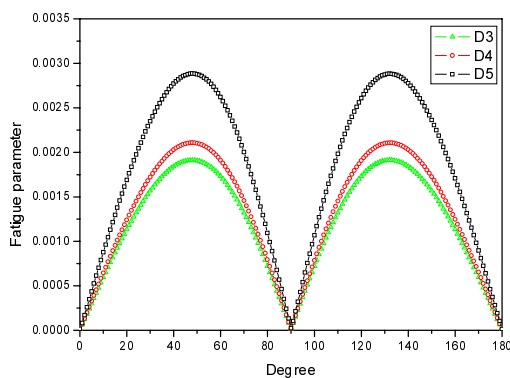


Fig. 21 Fatigue parameter variation

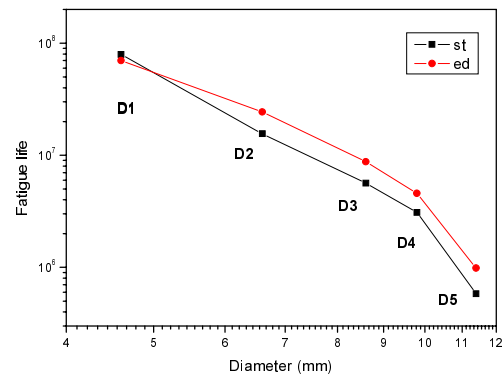


Fig. 22 Fatigue analysis results according to Dent size variation

### 5. 결론

레일에서 발생하는 Ballast imprint 가 구름접촉 피로손상에 미치는 영향을 평가하기 위하여 시험편 시험 및 유한요소해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Dent 크기에 따른 시험편 시험결과 Dent 의 크기가 작을 경우에는 마모에 의해서 손상이 제거되지만 일정 크기 이상에서는 균열이 발생하고 진전하였다.
- 2) Indenter 유한요소해석결과 변형의 잔류응력이 형성되었으며, Dent 가장자리에서 400 Mpa 정도의 큰 잔류응력이 형성되었다.
- 3) Dent 크기에 따른 유한요소해석 및 피로해석 결과 Dent 크기가 증가할수록 접촉압력이 증가하였고, 피로수명은 감소하였다.

### 참고문헌

1. Kondo, K., Yoroizaka, K., and Sato, Y., "Cause, increase, diagnosis, countermeasures and elimination of Shinkansen shelling," Wear, Vol. 191, No. 1-2, pp. 199-203, 1996.
2. UIC Leaflet 712, "Rail defects," 2002.
3. Cannon, D. F. and Pradier, H., "Rail rolling contact fatigue Research by the European Rail Research Institute," Wear, Vol. 191, No. 1-2, pp. 1-13, 1996.
4. Jin, Y. and Isidha, M., "Analysis of white etching layer generated on rail surface," RTRI Report, Vol. 19, No. 9, pp. 17-22, 2005.
5. Baumann, G., Fecht, H. J., and Liebelt, S.,

- “Formation of white-etching layers on rail treads,”  
Wear, Vol. 191, No. 1-2, pp. 133-140, 1996.
6. Dwyer-Joyce, R. S., Lewis, R., Gao, N., and Grieve, D. G., “Wear and fatigue of railway track caused by contamination, sanding and surface damage,” 6<sup>th</sup> International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Sheel Systems, 2003.
  7. Jun, H. K., Choi, J. Y., Na, S. H., and You, W. H., “Prediction of surface crack growth considering the wheel load increment due to rail defect,” J. of the KSPE, Vol. 28, No. 9, pp. 1011-1118, 2011.
  8. Han, C., Chen, X., and Kim, K. S., “Evaluation of multiaxial fatigue criteria under irregular loading,” Int. Journal of Fatigue, Vol. 24, No. 9, pp. 913-922, 2002.
  9. Guo, J. B. and Barkey, M. E., “Modeling of rolling contact fatigue for hard machined components with process-induced residual stress,” Int. Journal of Fatigue, Vol. 26, No. 6, pp. 605-613, 2004.
  10. Zili, L., Rolf, D., Marija, M., and Xin, Z., “Squat growth - Some observations and the validation of numerical predictions,” Wear, Vol. 271, No. 1-2, pp. 148-157, 2011.