

3D 유한요소해석을 통한 레일표면균열 응력확대계수 계산

Stress intensity factor calculation on the rail surface crack by 3D finite element analysis

*전현규¹, 서정원¹, 유원희²

*H.K.Jun(hkjun@krii.re.kr)¹, J.W.Seo¹, W.H.You²

¹ 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실, ² 한국철도기술연구원 주행추진연구실

Key words : Crack, Stress intensity factor, Rail, Squat

1. 서론

레일에 발생한 균열은 적절한 유지보수가 취해지지 않으면 계속 성장하여 레일의 파괴를 일으킬 수 있다. 균열의 발생 및 성장을 예측하기 위하여 파괴역학⁽¹⁾이 적용되고 있으며, 이를 위해서는 균열선단(crack tip)에서의 응력확대계수(stress intensity factor)의 계산이 필요하다. 응력확대계수는 하중의 크기, 균열의 형상 및 레일의 형상에 의존하며 이론해석 또는 유한요소 해석으로부터 계산할 수 있다. 본 연구에서는 레일구름접촉피로(rolling contact fatigue)에 의해 고속선에 대표적으로 발생하는 스퀫트(squat)균열의 성장을 예측하기 위한 연구의 일환으로 응력확대계수를 계산하기 위하여 3차원 유한요소모델을 만들고 균열의 크기에 따른 해석을 수행하였다.

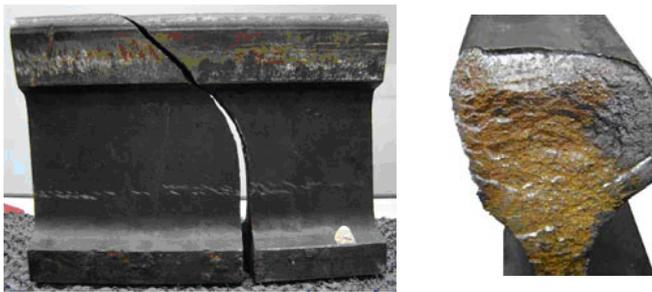


Fig. 1 Rail failure due to the propagation of a defect originated at subsurface of rail which is found at the metro line in Korea

2. 균열팁에서의 응력확대 계수

2.1 반타원 표면균열 응력확대계수

레일표면에 존재하는 스퀫트균열에 대한 균열선단에서 응력확대계수는 균열의 크기가 레일의 형상에 비해 상대적으로 매우 작다고 가정하면 평판상에 존재하는 반타원 균열로 단순화할 수 있으므로 다음과 같이 Raju-Newman⁽²⁾ 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$K_I = \sigma_0 \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F \quad (1)$$

σ_0 = nominal stress

$$Q = 1.464(a/c)^{1.65}$$

F = geometry factor

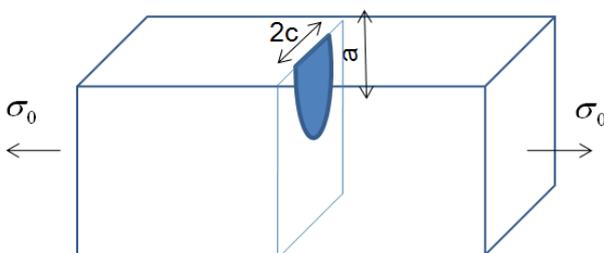


Fig. 2 Stress intensity factor model of a semi-elliptical crack in plate

한편, Jeong⁽³⁾ 등은 스퀫트균열에 대한 응력확대계수 계산식을 다음과 같이 제시하였다.

$$K_I = 1.12 M_1 \sigma_0 \frac{\sqrt{\pi a}}{E(k)} \quad (2)$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta, \quad k = \sqrt{1 - (a/c)^2}$$

여기서 $1.12 M_1$ 은 유한한 레일형상에 대한 수정계수이며 Fig. 3과 같다. $E(k)$ 는 이차타원적분이다. Fig. 3은 정규화한 수정계수로써 반타원 표면균열로 모델링 하였을 경우와 스퀫트로 모델링 하였을 경우에 대한 수정계수를 비교하였다. 균열의 크기가 작은 범위에서는 두 값의 차이가 작으나 균열의 크기가 커질수록 스퀫트로 모델링했을 경우의 수정계수가 점차 커지는 것을 알 수 있다.

$$M = 1.12 M_1 / E(k) \quad \text{for squat}$$

$$M = F / \sqrt{Q} \quad \text{for semi-elliptical crack}$$

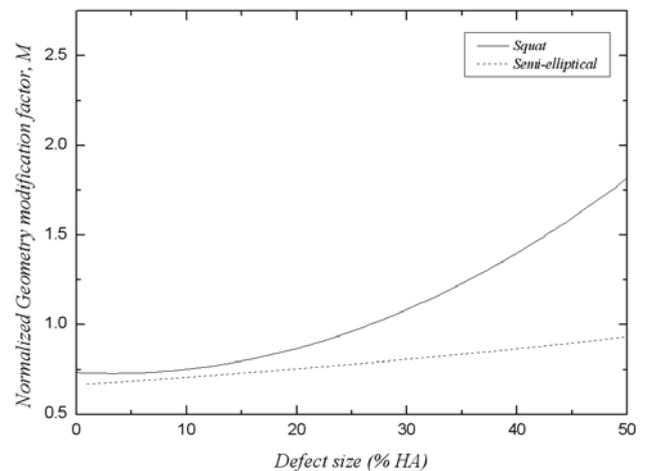


Fig. 3 Comparison of the shape modification factors to account for finite boundaries of rail.

2.2 임계균열크기 계산

앞서 두 식을 이용하여 레일의 임계균열크기를 계산해 보았다. 해석조건은 KTX 만차하중 조건을 이용하였으며, 사용된 레일은 UIC60레일이다. 사용된 레일소재의 파괴인성치, $K_{IC} = 30.4 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ 이며, 균열선단에서 계산한 응력확대계수, K_I 값이 K_{IC} 값보다 커지는 시점을 임계균열크기로 계산하였다. 초기균열길이, $a_0 = 0.5 \text{ mm}$ 로 가정하였다. Fig. 4는 균열길이에 따른 응력확대계수 그래프로써 레일소재의 파괴인성치와 비교하여 계산한 임계균열은 스퀫트로 모델링한 경우 12.4 mm, 반타원균열로 모델링한 경우 11.6 mm이다. 균열크기 12.4 mm는 레일 두부의 면적 3092 mm^2 의 6.8%(% HA)이기 때문에 임계균열의 차이가 많이 발생하지 않았다. 한편 Ravaee⁽⁴⁾ 등이 계산한 임계균열크기는 -20°C 열차운행환경에서 10 mm로 본 연구에서 계산한 임계균열의 크기와 유사하다고 할 수 있다.

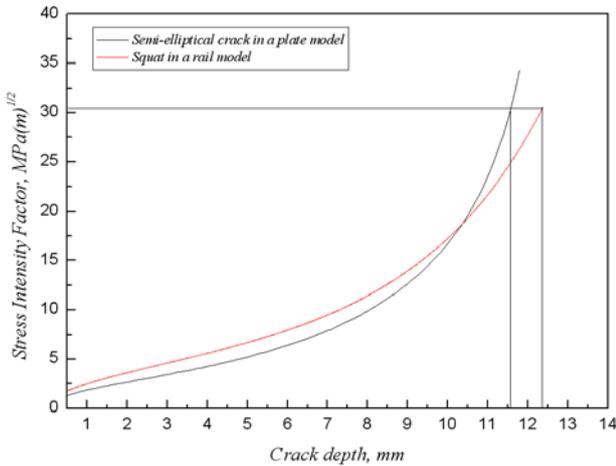


Fig. 4 Comparison of critical crack sizes

2.3 유지보수기준과 비교

UIC 레일결함 기준⁶⁾은 Table 1과 같다. 스쿼트균열은 균열깊이, D와 균열길이, L로써 정의되는데 균열깊이가 상대적으로 매우 큰 균열(D>25 mm)도 일정기간 허용하고 있으므로 앞서 계산한 임계균열크기 D=12.4 mm와 비교하면 임계균열길이가 과도하게 보수적으로 계산되는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 보다 타당한 임계균열크기를 계산하기 위한 방법이 필요한 것을 알 수 있다.

Table 1 Rail maintenance scheme depending on defect size

Type	Category I (mm)	Category II (mm)	Category III (mm)	Dimension
Squat	D > 25 or L . 200	10<D<25 or 50<L≤200	D<10 or L≤50	

*Category I : 2주일 이내 즉시 레일교체
 Category II : 12개월 이내 레일교체
 Category III : 지속적인 모니터링 요구됨

3. 고속철도 레일 응력확대계수 계산모델

3.1 해석모델

Fig. 5는 균열선단에서의 정확한 응력확대계수를 계산하기 위하여 구성한 레일두부의 스쿼트균열모델이다. 레일의 형상은 UIC 60 모델을 대상으로 하였으며, 해석의 단순화를 위하여 레일중심면을 기준으로 1/2만을 모델링 하였으며, 균열선단은 붕괴된 1/4절점 요소를 이용한 팬메시(fan mesh)를 생성하였다. 응력확대계수는 경로적분법(contour integral)을 이용하여 계산하였으며 해석프로그램은 ABAQUS v.6.7.1을 사용하였다.

하중조건은 레일 양단에서 인장하중을 작용하였으며, 구속조건은 레일 중심면에 대칭조건을 부여하고, 레일 바닥면에 미끄럼 구속조건을 부여하였다. 스쿼트균열이 레일표면에서 2-5mm 내부에 발생하는 것을 고려하여 레일표면에서 2mm 내부에 반타원 균열을 생성하였다. 해석에 사용된 요소의 종류는 20절점 이차사각요소(20 node quadratic qubic element)로써 해석의 신뢰성을 높였다. 해석에 사용된 요소의 수는 72,698개이며, 절점의 수는 310,735개이다. 해석은 탄성해석만을 수행하였다.

해석은 균열의 크기(a=10mm, 15mm, 20mm)를 달리하며 수행하였으며, 레일형상의 제약으로 인하여 HA가 20%이상인 균열은 수행하지 못하였다.

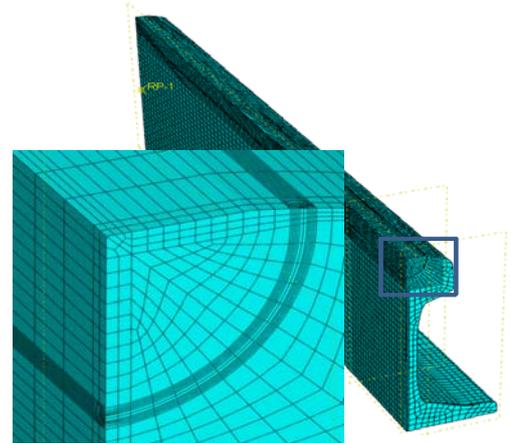


Fig. 5 Finite element model of a squat in rail head

Fig. 6은 해석결과로써 식(1), (2)의 형상보정계수와 비교하기 위하여 형상계수를 균열크기에 따라 정규화한 것이다. 3차원 유한요소해석에 의한 형상수정계수가 스쿼트모델 및 반타원 균열 모델보다 작게 계산된 것으로 판단할 때 이를 이용하여 임계균열 크기를 계산하면 앞서 계산한 임계균열크기보다 더 커질 것으로 기대할 수 있다.

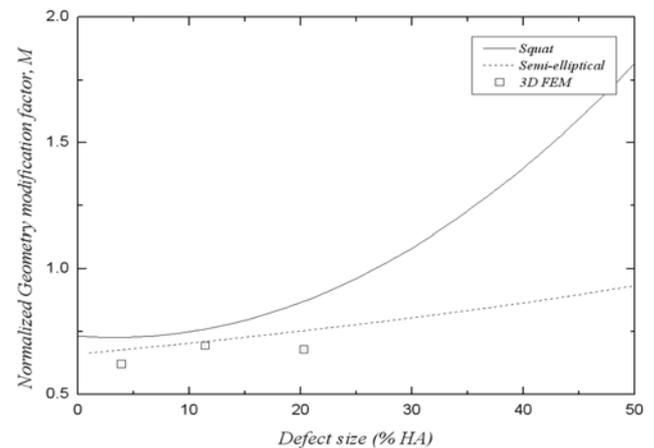


Fig. 6 Comparison of normalized geometry modification factors

4. 결론

본 연구에서는 레일구름접촉피로(rolling contact fatigue)에 의해 고속선에 대표적으로 발생하는 스쿼트(squat)균열의 성장을 예측하기 위한 연구의 일환으로 균열선단에서의 응력확대계수를 계산하기 위하여 3차원 유한요소모델을 만들고 균열의 크기에 따른 해석을 수행하였으며, 형상보정계수를 비교한 결과 기존의 방법이 과도하게 계산된 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Anderson, T.L., "Fracture mechanics - fundamentals and applications.", CRC press, 1991.
2. Newman, J.C. and Raju, I.S., "Stress intensity factor equations for cracks in three-dimensional finite bodies subjected to tension and bending loads", NASA technical memorandum, 1984.
3. Jeong, D.Y., "Correlations between rail defect growth data and engineering analyses, Part I : Laboratory tests", US Department of Transportation, 2003.
4. Ravaee, R and Hassani, A, "Fracture mechanics determinations of allowable crack size in railroad rails", Journal of Failure Analysis and Prevention, pp.305-310, 2007.
5. UIC, "Treatment of rail defects", International union of railways, 2007.