

차륜-레일의 구름접촉에 의한 라체팅 시뮬레이션

Simulation of Ratcheting in Wheel-Rail Contact

구병춘*

Goo, Byeong-Choon

ABSTRACT

Ratcheting is a cyclic accumulation of strain under a cyclic loading. It is a kind of mechanisms which generate cracks in rail steels. Though some experimental and numerical study has been performed, modeling of ratcheting is still a challenging problem. In this study, an elastic-plastic constitutive equation considering non-linear kinematic hardening and isotropic hardening was applied. Under the tangential stress of the contact stresses, a cyclic stress-strain relation was obtained by using the model. Strain under repeated cycles was accumulated.

1. 레일의 라체팅

일정한 크기의 응력이 반복적으로 작용할 때 매 사이클마다 변형률이 증가하는 현상을 라체팅이라 한다. 변형의 증가 모양이 톱니와 유사하여 이러한 이름이 붙은 것이다. 라체팅은 차륜과 레일과 같은 구름접촉, 디스크와 디스크의 구름접촉, 열 사이클, 인장 반복 하중 등 다양한 조건에서 발견되고 있다 [1-6]. Fig. 1은 일반적인 금속재료의 응력과 변형률의 관계가 작용 하중의 크기에 따라 어떻게 변화하는 지를 보여준다. Fig. 1(a)는 최대응력의 크기가 재료의 항복점보다 작은 경우로 재료는 탄성거동을 한다. (b)는 작용 응력의 크기가 재료의 항복응력을 초과하여 소성변형을 일으키지만 몇 사이클 후에는 가공경화의 영향으로 재료는 탄성 거동을 하는 경우로 이 경우를 elastic shakedown 이라 한다. (c)의 경우는 소성변형이 있지만 이 소성변형이 계속 증가하지 않고 일정한 크기로 유지되는 경우로 이런 현상을 plastic shakedown 이라 한다. plastic shakedown을 초과하는 하중이 작용하면 (d)와 같이 일정 크기의 하중 사이클에서 소성변형이 계속하여 증가하는 현상이 발생하는데 이러한 현상을 라체팅이라 한다. 수직력과 마찰력이 작용할 때 항복은 수직력과 마찰력의 크기에 따라 표면에서 먼저 일어날 수도 있고 표면 아래에서 먼저 일어날 수도 있다. Tresca 항복조건을 적용하면 $\mu \geq 0.25$ 이면 표면에서 항복이 먼저 일어나고, von Mises 항복조건을 사용하면 $\mu \geq 0.30$ 이면 표면에서 먼저 항복이 일어난다. 마찰계수와 Hertz 압력분포의 최고값 p_0 의 값에 따라 탄성영역, elastic shakedown, plastic shakedown 그리고 라체팅 영역을 나타면 Fig. 2와 같이 표현할 수 있다 [7]. 이 영역의 경계는 적용하는 항복조건과 소성 영역에서의 재료 경화특성에 따라 달라진다.

* 책임저자 : 한국철도기술연구원, 정희원

E-mail : bcgoo@krri.re.kr

TEL : (031)460-5243, FAX : (031)460-5279

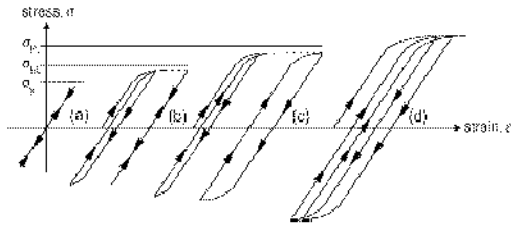


Fig. 1 하중에 따른 기계적 거동 [4]

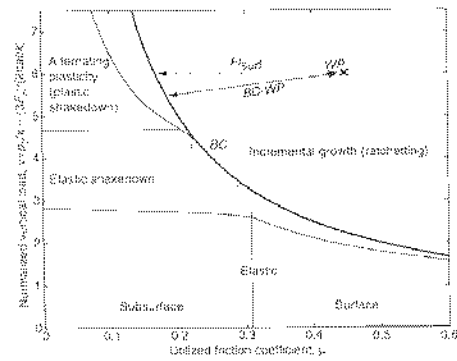


Fig. 2 라체팅 영역도 [5]

Ringsberg 등은 [8] 레일의 라체팅을 유한요소법을 적용하여 해석하고 라체팅과 저 사이클 피로에 의해 균열이 발생하는 사이클을 비교하여 피로에 의한 균열이 더 빨리 발생한다고 주장하였고, 라체팅과 구름접촉에 의한 손상을 줄이기 위해 두부를 코팅한 레일에 대해 shakedown 이론을 적용하여 코팅의 유용성을 밝혔다[9]. Franklin 등은[10] 라체팅에 의해 레일의 표면층이 떨어져 나가면서 마모가 일어나는 과정을 수치해석 하는 방법을 제시하였고, 차륜과 레일의 접촉 시 발생하는 온도가 이 과정에 미치는 영향도 평가하였다[11]. Kapoor 등은[12] 디스크-디스크 시편을 이용한 구름접촉 시험 결과를 이용하여 전단변형의 크기를 나타내는 경험적인 식과 정수압 응력과 정수압 하에서 구한 응력-변형을 관계식을 이용하여 이들을 고려할 때 라체팅 현상을 좀 더 정확하게 묘사할 수 있다고 주장하였다. 탄소성 분야에서 라체팅 현상을 포함하여 다양한 조건에서 금속재료의 거동을 묘사할 수 있는 구성방정식에 대해서는 최근의 리뷰 논문[13]에 잘 기술되어 있다. 구병춘은 [14] 차륜과 레일의 구름접촉에 의한 레일의 라체팅 현상을 이동성 경화법칙과 Von-Mises의 항복조건을 사용하는 탄소성 구성방정식을 이용하여 모델링하였다.

2. 라체팅 시뮬레이션

라체팅을 묘사하기 위한 여러 가지 모델이 있지만 본 연구에서는 비선형 이동 경화 (non-linear kinematic hardening)를 사용한 기존의 연구 [14]에 등방성 경화 (Isotropic hardening)를 추가로 고려한 Chaboche의 모델을 사용한다 [15]. von Mises의 항복조건을 사용할 때 항복조건은 다음과 같다.

$$f = J_2(\tilde{\sigma} - \tilde{X}) - R - \sigma_y = 0 \quad (1)$$

여기서 J_2 는 응력의 2차 불변량 (Second invariant), $\tilde{\sigma}$ 는 응력텐서, \tilde{X} 는 이동 경화 응력텐서, R 은 등방성 경화법칙 변수, σ_y 는 단축 인장 항복강도이다. 비선형 이동 경화법칙은 아래와 같이 가정된다.

$$d\tilde{X} = \frac{2}{3} C d\tilde{\epsilon}^p - \gamma \tilde{X} dp \quad (2)$$

여기서 C , γ 는 재료의 특성을 나타내는 상수이고, $dp = \left(\frac{2}{3} d\tilde{\epsilon}^p : d\tilde{\epsilon}^p \right)^{1/2}$ 는 누적 증가 소성변형률의 증분이다.

등방성 경화법칙은 다음과 같이 가정된다.

$$dR = b(Q - R)dp \quad (3)$$

여기서 b 와 Q 는 상수이다.

소성의 일반이론을 적용하면 소성변형률의 증분 $d\tilde{\epsilon}^p$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$d\tilde{\epsilon}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} = \frac{H(f)}{h} \left\langle \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} : d\tilde{\sigma} \right\rangle \frac{\partial f}{\partial \tilde{\sigma}} \quad (4)$$

여기서 $H(f) = 1$ if $f = 0$; $H(f) = 0$ if $f < 0$. $\langle x \rangle = 0$ if $x < 0$; $\langle x \rangle = x$ if $x \geq 0$ 이다. Von Mises 항복조건을 사용하는 경우 파라미터 h 는 다음과 같이 표현된다.

$$h = C - \frac{3}{2} \gamma \tilde{X} : \frac{\tilde{\sigma}' - \tilde{X}'}{\sigma_y} + b(Q - R) \quad (5)$$

여기서 $\tilde{\sigma}'$, \tilde{X}' 는 편차 응력텐서이다.

이 모델에서 필요한 재료상수는 C , γ , σ_y , b , Q 이다. 모델에 사용된 상수는 표 1과 같다.

Table 1. 파라미터의 값

	C (MPa)	γ	b (MPa)	Q (MPa)	E (MPa)	ν	σ_y (MPa)
Case 1	140,600	380	50	-45	210,000	0.3	540
Case 2	140,600	380	50	-25	210,000	0.3	540
Case 3	140,600	380	50	60	210,000	0.3	540

그림 3은 시뮬레이션에 입력으로 사용된 전단응력이다. 레일이나 휠의 라체팅은 전단 응력이 지배적이므로 본 해석에서는 전단응력만을 고려하였다. 전단응력의 분포를 수치해석의 편의를 위해 그림 3과 같이 사인 함수로 근사화시켜 해석하였다.

$$\tau_{13} = \pm \tau_{\max} \left| \sin\left(\frac{\pi}{2}t\right) \right| \quad (6)$$

Fig. 4는 표 1의 Case 1 상수 값을 사용하여 10 사이클의 전단응력이 작용한 경우의 등방성 경화 변수 R 의 변화를 보여준다. Fig. 5는 $\epsilon_{13} - \sigma_{13}$ 의 관계이다. Fig. 6은 $X_{13} - \epsilon_{13}^p$ 의 관계이다. Fig. 7과 8은 Case 2의 경우 $\epsilon_{13} - \sigma_{13}$ 과 $X_{13} - \epsilon_{13}^p$ 관계를 도시한 것이다. Fig. 9, 10은 표 1의 Case 3의 상수 값을 사용하여 10 사이클의 전단응력이 반복하여 작용한 경우의 $\epsilon_{13} - \sigma_{13}$, $\epsilon_{13}^p - X_{13}$ 의 관계이다. 시뮬레이션 결과는 라체팅 현상을 잘 모사함을 알 수 있다. 그러나 전단응력만을 고려할 경우 매 사이클마다 증가하는 스트레인의 폭이 일정하게 나타나고 있다.

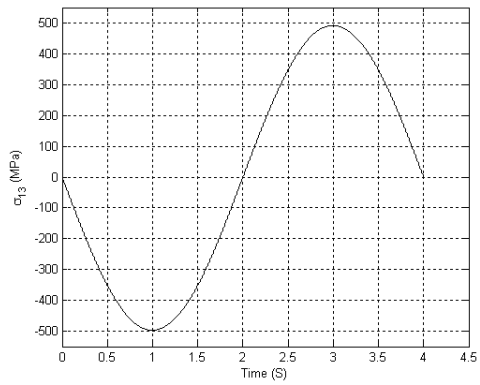


Fig. 3 해석에 사용된 작용 전단응력

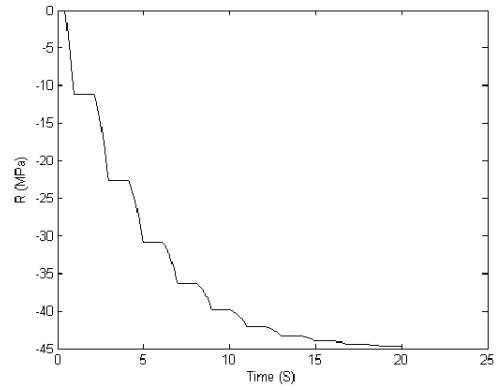


Fig. 4 등방성 경화 변수 R (Case 1)

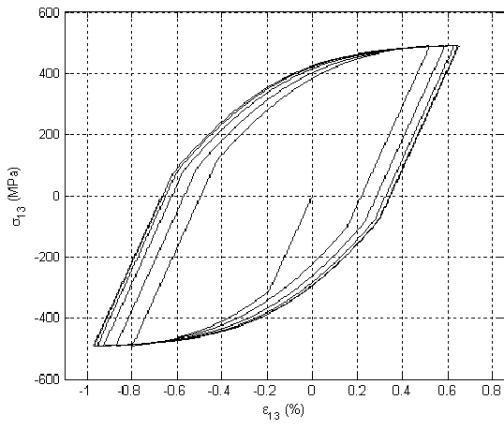


Fig. 5 $\epsilon_{13} - \sigma_{13}$ 의 관계 (Case 1)

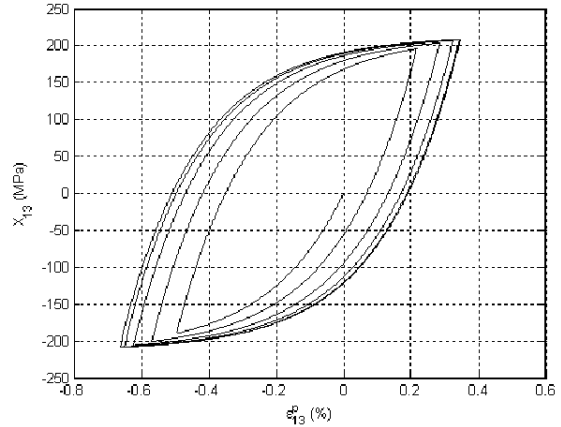


Fig. 6 $\epsilon_{13}^p - X_{13}$ 의 관계 (Case 1)

2.2 반복 경화 레일의 거동 모델링 (Case 2)

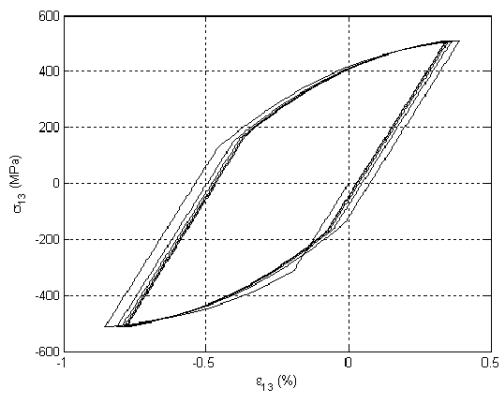


Fig. 7 $\epsilon_{13} - \sigma_{13}$ 의 관계 (Case 2)

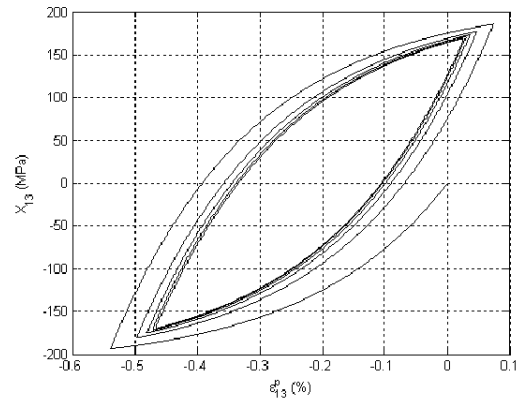


Fig. 8 $\epsilon_{13}^p - X_{13}$ 의 관계 (Case 2)

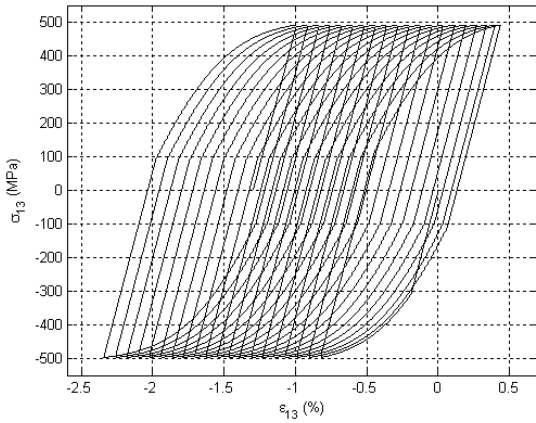


Fig. 9 $\epsilon_{13} - \sigma_{13}$ 의 관계 (Case 3)

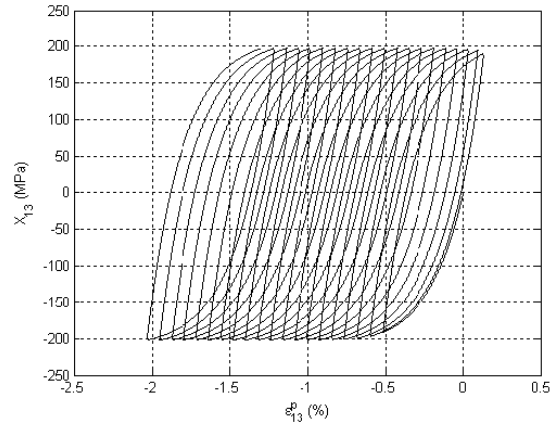


Fig. 10 $\epsilon_{13}^p - X_{13}$ 의 관계 (Case 3)

3. 결론

본 연구에서는 Von Mises 항복조건, 이동성 및 등방성 경화 법칙을 사용하는 탄소성 모델을 적용하여 전단응력이 반복적으로 작용하는 경우의 라체팅 거동을 성공적으로 시뮬레이션 하였다. 그러나 전단응력만을 고려하고 이동성 및 등방성 경화 법칙을 사용하는 탄소성 모델을 적용한 경우 매 사이클마다 소성 변형의 증가량이 일정하게 나타나므로 매 사이클마다 변형의 증분이 증가 혹은 감소하는 현상을 기술하기 위해서는 향후 전단응력 이외의 응력성분을 고려하고 구성방정식을 약간 보완할 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건교부의 철도종합안전기술개발사업 중 ‘철도차량 탈선 안전성능평가 및 사고방지기술 개발’ 과제의 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. A. Böhmer, M. Ertz, K. Knothe (2003), "Shakedown limit of rail surfaces including material hardening and thermal stresses," *Fatigue Frac Engng Mater Struc* 26, pp. 985-998.
2. M. Ertz, K. Knothe (2002), "A comparison of analytical and numerical methods for the calculation of temperatures in wheel/rail contact," *Wear* 253, pp. 498-508.
3. F. D. Fischer, W. Daves, E. A. Werner (2003), "On the temperature in the wheel-rail rolling contact," *Fatigue Frac Engng Mater Struc* 26, pp. 999-1006.
4. J. W. Ringsberg (2000), "Cyclic ratchetting and failure of a pearlitic rail steel," *Fatigue Frac Engng Mater Struc* 23, pp. 747-758.
5. L. Taleb, M. Cousin, J. F. Jullien (1998), "Metallic structures subjected to cyclic loadings - I. Inadequency of the elastic analysis for the steady state assessment," *Int. J. of Pressure Vessels and Piping* 75, pp. 173-180.
6. 이형연, 김종범, 이재한 (2002), "316L 스테인리스강 원통 구조물의 열라체팅 변형 시험 및 해석," *대한기계학회논문집 A 권, 제 26권, 제 3호*, pp. 479-486.
7. A. R. S. Ponter, A.D. Hearle, K. L. Johnson (1985) "Application of the kinematical shakedown

- theorem to rolling and sliding point contacts," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 33, pp. 339–362.
8. J. W. Ringsberg, H. Bjarnehed, A. Johansson, B. L. Josefson (2000) "Rolling contact fatigue of rails—finite element modelling of residual stresses, strains and crack initiation," *Proc Instn Mech Engrs* Vol. 214 Part F, pp. 7–19.
 9. J. W. Ringsberg, F. J. Franklin, B. L. Josefson, A. Kapoor, J. C.O. Nielsen (2005) "Fatigue evaluation of surface coated railway using shakedown theory, finite element calculations, and lab and field trials," *Int. J. of Fatigue*, Vol. 27, pp. 680–694.
 10. F. J. Franklin, T. Chung, A. Kapoor (2003) "Ratcheting and fatigue—led wear in rail—wheel contact," *Fatigue Fract and Mater Struct*, pp. 949–955.
 11. I. M. Widiyarta, F. J. Franklin, A. Kapoor (2006), "Modelling thermal effects in ratcheting—led wear and rolling contact fatigue," 7th Int. Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, Brisbane, Australia, September 24–26, pp. 279–286.
 12. A. Kapoor, J. H. Beynon, D. I. Fletcher, M. Loo—Morrey (2004), "Computer simulation of strain accumulation and hardening for pearlitic rail steel undergoing repeated contact," *J. Strain Analysis*, Vol. 39, No.4, pp. 383–396.
 13. J. L. Chaboche (2008), "A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theory," *Int. J. Plasticity*, doi:10.1016/j.ijplas.2008.03.009.
 14. B. C. Goo (2008), "차륜-레일 구름접촉에 의한 라체팅 모델링," *한국철도학회논문지* 제11권 제3호, pp. 313–316.
 15. J. Lemaitre, J. L. Chaboche (1996), "*Mécanique des matériaux solides*," pp. 219–229, Dunod 2nd Edition.