

# 구름접촉을 고려한 레일표면균열발생수명 예측 S/W 개발

## Development of a Software for Predicting Fatigue Initiation Life in a Surface of Railway Rail under Rolling Contact Condition

김동욱\*, 전현규\*<sup>†</sup>

Dong-Wook Kim\*, Hyun-Kyu Jun\*<sup>†</sup>

**Abstract** Fatigue damage at the surface of railway rail under rolling contact fatigue is increasing with the increase of axle load and vehicle speed. Although it is very important to know the moment of surface damage initiation for the proper rail maintenance and the secure of railway safety, it is very hard to perform the fatigue damage assessment in field because the analysis require very complex modeling of finite element analysis, high computing power and very expensive analysis software. For this reason, in this study, we developed a standalone computing software for the prediction of fatigue damage initiation life at railway surface under rolling contact fatigue. For this purpose, several fatigue life models were programmed. By using this software, we expect that it is possible to predict the damage initiation life even though in the field by railway engineer who is not a fatigue expert.

**Keywords** : Rolling contact fatigue, Fatigue crack initiation, Simulation software, Contact stress

**초 록** 구름접촉에 의한 레일표면에서의 손상은 고속화와 축중의 증가로 인해 가속화되고 있는 추세이다. 표면손상이 발생하는 시기를 아는 것은 레일의 유지보수 및 안전성을 확보하는데 매우 중요하나, 이를 위해서는 매우 복잡한 유한요소모델의 생성과 매우 높은 컴퓨팅 파워를 요구하며, 또한 고가의 해석 프로그램이 필요하므로, 균열발생정보가 필요한 현장에서는 시도조차 할 수 없는 상황이다. 이러한 이유로 본 연구에서는 특별한 해석 프로그램이 필요하지 않도록 윈도우즈 운영체제에서 단독으로 구동되는 레일표면균열발생수명 예측 소프트웨어를 개발하였다. 이를 위하여 다양한 손상모델을 프로그래밍 하였으며 구름접촉하중뿐 만 아니라 레일온도차이에 의해 발생하는 선팅하중, 잔류응력 등의 효과도 고려할 수 있도록 하였다. 따라서 이러한 소프트웨어를 이용하면 열차운행 현장에서도 레일의 대략적인 균열발생시기를 예측할 수 있을 것으로 기대한다.

**주요어** : 구름접촉피로, 피로균열발생, 시뮬레이션 소프트웨어, 접촉응력

## 1. 서 론

차륜과 레일의 구름접촉에 의한 표면에서의 피로손상은 열차 운행에 따라 지속적으로 누적되고 결국은 미소 균열로 성장한다. 이러한 손상의 발생속도는 축중의 증가, 속도향상을 위한 견인력의 증가와 더불어 가속화되고 있는 실정이다[1].

<sup>†</sup> 교신저자: 한국철도기술연구원 피로손상연구팀 (hkjun@krri.re.kr)

\* 한국과학기술연합대학원 철도시스템공학과

레일의 표면에 손상이 발생하면, 표면이 거칠어지며 이로 인하여 열차의 주행안정성 저하 및 소음의 발생을 야기할 수 있다. 또한 손상이 방치될 경우 균열로 성장하게 되며, 이러한 균열은 점차 성장하여 레일의 파괴를 일으킬 수도 있다. 즉, 균열로 성장하여 적절한 시기를 놓치면 주기적인 그라인딩으로 제거하기가 어려우며, 레일의 교체 및 파괴를 야기할 수 있다. 따라서 균열로 성장하는 시점에서 적절한 유지보수를 수행함으로써 균열로 성장할 수 있는 가능성을 낮출 수 있다. 따라서 균열의 발생시기를 예측하는 것은 열차 운영현장에서 레일의 유지보수시기를 결정하는데 매우 중요하나, 이를 위해서는 매우 복잡한 유한요소모델의 생성과 매우 높은 컴퓨팅 파워를 요구하며, 또한 고가의 해석 프로그램이 필요하므로, 일선 현장에서는 시도조차 할 수 없는 상황이다.

피로에 의한 균열발생수명의 예측은 대표적으로 작용응력을 기반으로 한 접근법(stress life approach)과 작용변형률을 기반으로 한 접근법(strain life approach)이 있다[2]. 차륜과 레일의 접촉에 의한 표면에서의 작용하중은 매우 큰 압축하중의 형태로 작용하고 있으며, 열차의 이동을 위한 견인력과 결합하여 다축응력의 형태로 작용하고 있다. 따라서 레일표면에서의 손상을 예측하기 위해서는 높은 압축하중이 작용하는 다축하중하에서의 피로균열발생모델을 이용할 필요가 있다. 또한 레일표면에서의 손상 및 진전은 전단력에 의한 것으로 알려져 있으므로[1], 전단력에 의한 피로균열발생수명 모델을 이용할 필요가 있다. 그러나 전단력에 기반한 피로손상모델도 지금까지 여러 모델이 발표된 바 있다. 대표적으로 Tresca 전단응력, Octohedral 전단응력, Critical plane 전단응력 모델 등[3~6]이 있다.

본 연구에서는 레일의 손상발생시기의 예측을 전문연구기관에서만 아니라 일선 열차운영현장에서도 수행할 수 있도록 열차 운행조건을 고려한 손상발생 수명예측 소프트웨어를 개발하였으며, 본 논문에서는 이론적 배경, 소프트웨어의 구조 및 사례연구에 대해 소개하였다.

## 2. 배경이론

단축(uniaxial)하중하에서의 손상발생은 대표적으로 Von Mises 또는 Tresca 이론을 기반으로 하며, 단축하중은 주응력의 방향이 시간의 흐름에 대해 변하지 않는 것으로 가정한다. 반면 다축하중(multi-axial)에서는 주응력의 방향이 시간의 흐름에 따라 계속적으로 변하기 때문에 이를 고려하여 수명을 예측하여야 한다[2]. 다축하중에서의 피로손상모델은 전단응력에 의해 발생하는 손상 또는 법선력에 의해 발생하는 손상으로 대별되나, 실제 많은 실험결과들이 이와 같이 최대 전단응력 또는 최대 법선응력에서 발생하지 않고 임계면(critical plane)으로 정의되는 면을 따라 발생됨을 보여주고 있다. 물론 임계면은 전단응력의 크기 및 법선응력의 크기와 직접적인 관계에 있다. 대표적인 다축피로 평가기준으로는 Jiang와 Sehitoglu [3]가 제안한 피로한도(fatigue parameter: FP)가 있다.

$$FP = \frac{\Delta\epsilon}{2} \langle \sigma_{max} \rangle + J\Delta\gamma\Delta\tau \quad (1)$$

여기서,  $\Delta\varepsilon$ 은 법선변형률 범위(normal strain range)이며,  $\sigma_{max}$ 는 최대법선응력(maximum normal stress)이다.  $\langle \rangle$ 는 McCauley 브라켓으로  $\langle x \rangle = (|x| + x)/2$ 로 정의되며,  $\Delta\gamma$ 는 전단응력범위(shear stress range),  $J$ 는 재료특성치(material dependent constant)이다. 경두레일(head hardened rail)의 경우  $J=0.2$  정도이며, 일반레일의 경우에는  $J=0.3$  [6] 정도이다.

피로한도와 피로수명의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(FP - FP_0)^m N_f = C \tag{2}$$

여기서  $FP_0$ ,  $m$ ,  $C$ 는 재료상수이며,  $N_f$ 는  $FP$ 에 대한 피로수명이다.  $FP$ 와  $N_f$ 의 관계는 Fig. 1과 같다.

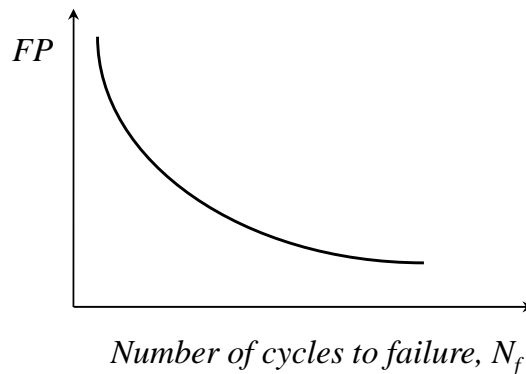


Fig. 1 The curve for fatigue parameter to number of cycles to failure

Fig. 2는 열차차륜에 의해 레일이 받는 하중상태를 모사한 구름접촉모델[7,8]로써 레일의 한 점에서는  $x,y,z$ 방향의 법선응력 및 전단응력이 작용한다. 그림에서 보듯이 시간의 흐름에 따라 다축하중의 형태로 작용하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 한사이클 동안의 법선변형률 이력 및 전단변형률 이력을 산출하면 식(1)을 이용하여 피로한계를 계산할 수 있으며 이를 이용하여 피로수명을 계산할 수 있다.

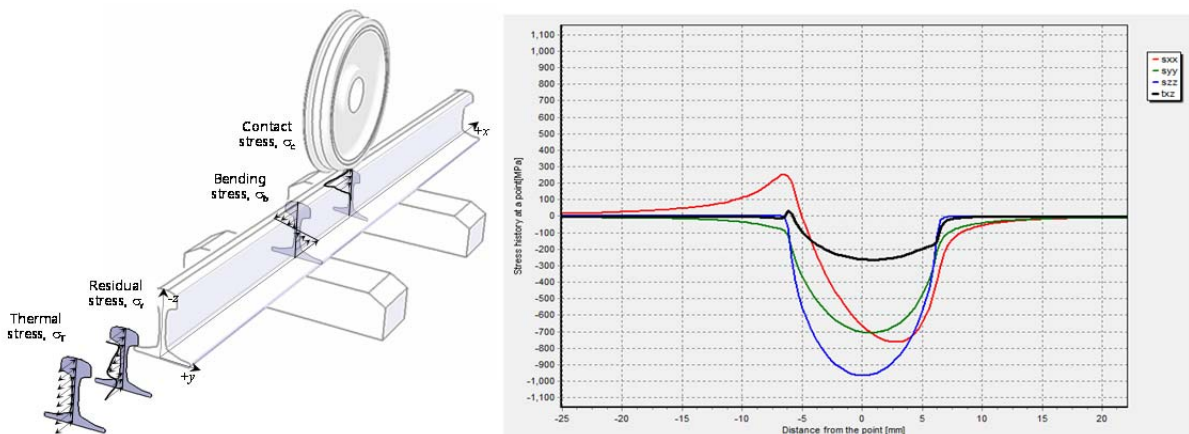


Fig. 2 Schematic of a typical rail under the service loadings [7,8]

### 3. 소프트웨어 개발

본 연구에서 개발한 차륜의 구름접촉에 의한 레일손상발생 및 진전수명 예측 소프트웨어, FE-RAIL(Fatigue Evaluation for Railway RAIL)은 크게 레일손상발생수명 예측부분과 손상진전 예측부분으로 구성되어 있으며, 손상진전예측부분에 대해서는 앞서 발표한 논문[7,8]에 자세히 수록되어 있다. 본 논문에서는 레일손상발생수명 부분에 대해서만 소개하고자 한다. Fig. 3은 손상발생수명 예측 프로세스와 예측결과 화면(예)이다. FE-RAIL은 Visual C++ 언어로 개발되었으며, 윈도우 표준인터페이스를 이용함으로써 사용자가 별도의 프로그램 교육 없이도 쉽게 사용할 수 있도록 하였다. 입력창에는 사용자의 편의를 위해 다이어그램을 동시에 나타나도록 함으로써 사용자가 쉽게 프로그램에서 요구하는 데이터를 이해할 수 있도록 하였다. 손상발생수명을 예측하기 위해서는 먼저 하중 및 운영조건을 선택한다. 하중조건은 접촉하중, 굽힘하중, 선팅창하중 및 잔류응력을 고려할 수 있으며, 해석의 상황에 따라 각 하중의 영향을 포함시키거나 제외시킬 수 있다. 다음으로는 차량조건 및 접촉조건을 고려하는 것으로 차량의 축중, 1일 통과횟수, 편성당 축의 수 등과 차륜과 레일이 어떠한 형태로 접촉하고 있는지 등에 대한 정보를 입력한다. 레일조건 및 S-N 선도 입력에서는 레일의 치수, 재료물성치 등 재료특성을 입력하며, 레일 깊이에 따른 잔류응력을 입력한다. 해석결과로는 차륜이 지나감에 따른 응력분포와 각 평가방법에 따른 수명을 예측할 수 있다.

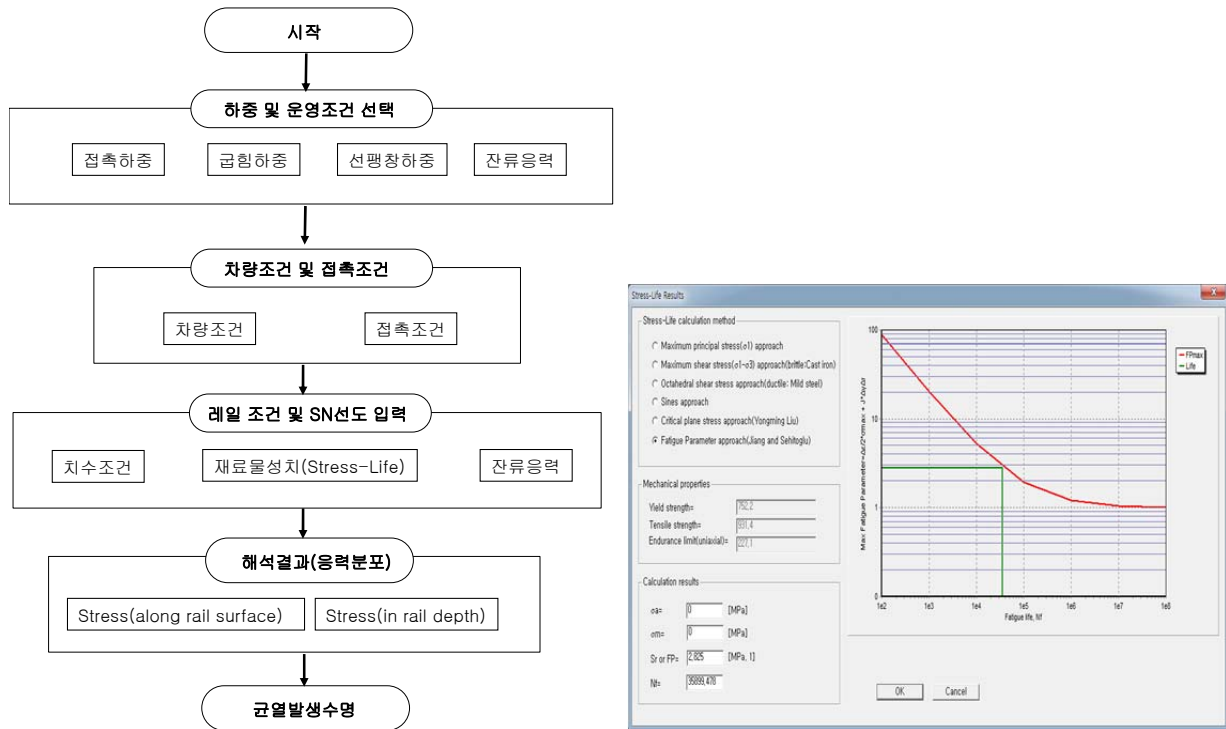


Fig. 3 Menu structure of FE-RAIL and the example of screen captures for the input condition

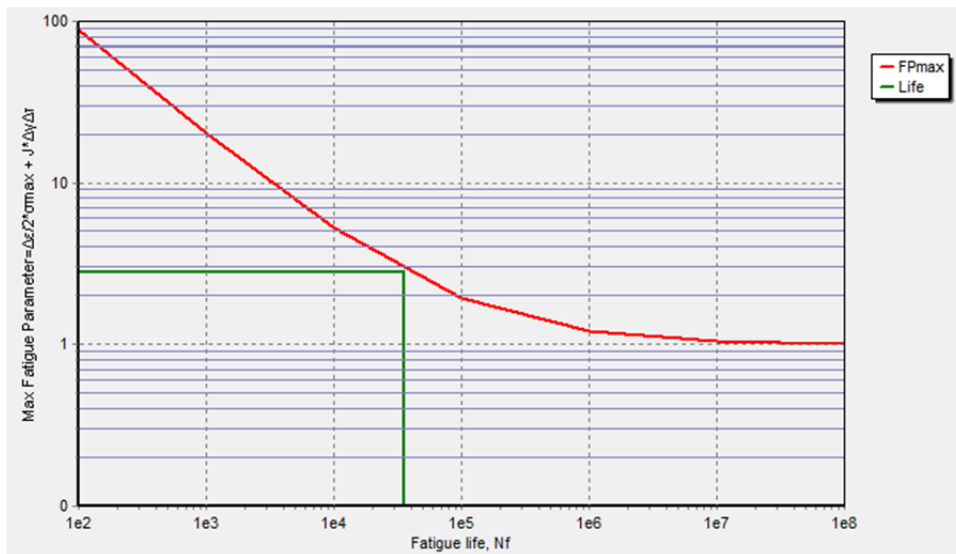
#### 4. 사례연구

FE-RAIL의 효용성을 검증하기 위한 사례연구를 수행하였다. Table 1은 사례연구에 사용한 입력조건으로 앞서 발표한 논문[7]에서 레일의 균열성장조건해석을 위해 사용한 입력값과 동일한 조건을 적용하였다. 차륜이 레일 위를 1회 지나감에 따른 손상률을 계산하였으며, 누적손상률이 1이 될 때까지 반복적으로 해석을 수행하였다. 차륜과 레일의 접촉조건으로 접촉패치의 형상은 타원형 접촉으로 가정하였다.

**Table 1** Input condition for case study

Loading condition	Contact	Bending	Thermal	Residual			
	O	O	O	O			
Contact conditions	Type	Peak contact stress	Long half contact patch	Short half contact patch	Surface friction coefficient	Loading direction	
	Elliptical	800 MPa	6.21mm	5.40mm	0.30	90°	
Material conditions	Fatigue Parameter curve	Poisson ratio	Young modulus	Neutral temp	Operating temp		
	Akama et al.[6]	0.3	207,000	25°C	20°C		

Fig. 4는 피로결함 발생수명예측 결과이다. 차륜이 1회 통과함에 따라 발생하는 최대 피로 한도(FP)는 약 2.8로 계산되었으며, 이 값을 선도에 대입한 결과 피로발생수명은 약  $3.5 \times 10^4$ 으로 계산되었다. 따라서 신규레일이 부설된 후 또는 레일의 그라인딩으로 새로운 레일표면이 구성된 후 약  $3.5 \times 10^4$ 사이클이 경과하면 레일표면에 손상이 발생하는 것으로 예측할 수 있다. 그러나 이러한 계산결과는 사례연구에서 가정한 입력데이터에 의한 것으로 실제 현장에서의 열차운행조건에 따라 다르게 나타날 수 있으므로 실제 유지보수전략 수립에 적용하기 위해서는 각각의 열차운행조건에 따라 계산할 필요가 있다.



**Fig. 4** Prediction of fatigue damage initiation life

## 4. 결 론

본 연구에서는 레일표면에서의 피로손상수명을 예측하기 위한 소프트웨어, FE-RAIL을 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유한요소해석과 같은 복잡한 모델링 및 해석과정 없이도 간단하게 손상발생수명을 예측할 수 있었으며, 이를 위한 노력 및 시간이 매우 단축되었다.
2. 사례연구결과  $3.5 \times 10^4$ 사이클이 경과하면 레일표면에 손상이 발생하는 것으로 계산되었으나, 이는 견인력, 레일소재특성 등 다양한 조건에 따라 변경될 수 있다.
3. 레일 NDT 주기설정과 연계하면, 보다 더 효율적인 유지보수전략을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

개발된 소프트웨어의 정확도를 향상시키기 위해서는 해석을 위한 각 파라미터에 대한 보다 더 정확한 정보가 필요하며, 이는 향후 수행해야 할 연구과제로 남는다.

## 참고문헌

- [1] P.E. Bold, M.W. Brown, R.J. Allen (1991) Shear mode crack growth and rolling contact fatigue, *Wear* 144, pp. 307-317.
- [2] J. A. Bannantine, J. J. Corner, J. L. Handrock (1990) *Fundamentals of metal fatigue analysis*, Prentice Hall, New Jersey, pp. 1-87.
- [3] Y. Jiang and H. Sehitoglu (1999) A model for rolling contact failure, *Wear* 224, pp.38-49.
- [4] Y. Liu and S. Mahadevan (2005) Multiaxial high-cycle fatigue criterion and life prediction for metals, *Int. J. Fatigue* 27, pp.790-800.
- [5] Y. Liu, B. Stratman and S. Mahadevan (2006) Fatigue crack initiation life prediction of railroad wheels, *Int. J. Fatigue* 28, pp.747-756.
- [6] M. Akama, H. Matsuda, H. Doi and M. Tsujie (2012) Fatigue crack initiation life prediction of rails using theory of critical distance and critical plane approach, *J. Computational Science and Technology* 6(2), pp. 54-69.
- [7] D.W. Kim and H.K. Jun (2016) Development of a software for predicting fatigue crack growth in a rail head surface, *Proceedings of 2016 Autumn conference of the Korean Society for Railway*, Gyeongju.
- [8] H.K. Jun, D.H. Lee and D.S. Kim (2015) Calculation of minimum crack size for growth under rolling contact between wheel and rail, *Wear* 344-345, pp.46-57.