

# POD 곡선기반 레일유지보수 Maintenance of a Railway Rail based on Probability of Detection Curve

\*#전현규<sup>1</sup>, 서정원<sup>2</sup>

\*#H. K. Jun(hkjun@krri.re.kr)<sup>1</sup>, J. W. Seo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국철도기술연구원 기술전략실, <sup>2</sup>한국철도기술연구원 시험인증안전센터

Key words : Probability of Detection Curve, Gauge Corner Crack, Non-Destructive Inspection

## 1. 서론

철도분야에서 비파괴검사기술은 타산업설비분야에서와 마찬가지로 차량 및 레도 등 인프라의 건전성을 확인하는 방법으로 이용되고 있으며, 비파괴검사의 결과가 유지보수계획의 수립시 활용되고 있다. 특히, 레일의 경우에도 탐상차 또는 수동식 비파괴검사장비를 이용하여 주기적인 비파괴검사가 이루어지고 있으나, 검사해야할 개소가 많고 장비성능, 작업자의 숙련도, 운영환경 등 비파괴검사 시스템의 한계로 인하여 아직까지 신뢰성 있는 결함검출이 이루어지지 않고 있다 [1].

특히, 레일의 파괴는 Fig. 1과 같이 레일의 온도가 내려가는 겨울철에 전체 발생량의 약 50%가 집중되고 있으나, 겨울철의 작업여건은 더욱 좋지 않아 결함탐상의 불확실성을 가중시키고 있다.

본 연구에서는 결함의 탐상성능과 연계한 레일 유지보수계획을 수립하기 위한 기초연구로써 레일의 두부에 균열이 존재할 때 균열성장속도를 계산하고, 주기적인 레일검사를 통해 결함이 발견되지 않을 확률을 계산하였다.

## 2. 결함탐상 확률

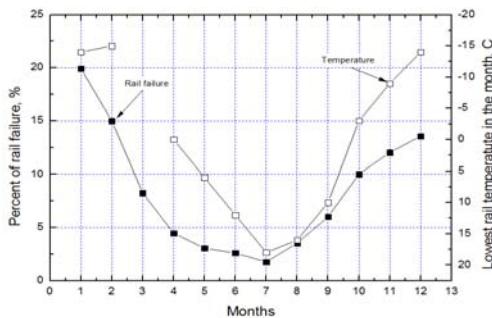


Fig. 1 Seasonality of rail defect occurrence

비파괴검사로부터 검출된 결함의 불확실성은 POD(Probability of Detection)곡선을 이용하여 정량화하고 있다. Fig. 2는 Jeffrey[2] 등이 초음파 탐상방법에 대한 레일 두부결함의 POD 곡선으로 일반적으로 식(1)과 같이 정량화 할 수 있다.

$$POD(a) = \frac{\exp(\alpha + \beta \ln a)}{1 + \exp(\alpha + \beta \ln a)} \quad (1)$$

여기서  $a$ 는 결함의 크기이며,  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 곡선상수이다. 레일과 같이 장기간 사용되는 구조물은 주기적으로 비파괴 검사가 이루어지고 있으며, 주기적인 검사기간에 결함이 탐상될 확률은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\binom{n}{x} = p_i^x q_i^{n-x} = \frac{n!}{x!(n-x)!} p_i^x q_i^{n-x} \quad (2)$$

여기서  $n$ 은 검사횟수,  $x$ 는 결함의 탐상 횟수,  $p_i$ 는 균열길이  $a_i$ 에 대한 탐상확률,  $q_i$ 는  $a_i$ 에 대해 탐상되지 않을 확률( $1-p_i$ )이다. 따라서  $x=0$ 이면 주기적인 검사를 통해 한번도 검출되지 않을 확률이다. 따라서, Fig. 3과 같이 초기균열( $a_0$ )이 허용균열( $a_w$ )까지 진전하는데 소요되는 기간과 이 기간 중 검사횟수를 알게 되면 균열의 성장을 고려하여 유지보수계획을 수립할 수 있다.

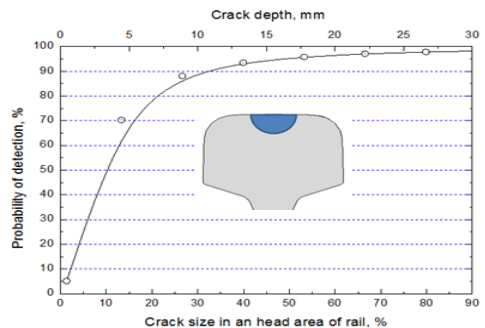


Fig. 2 Probability of detection curve in a rail head[2]

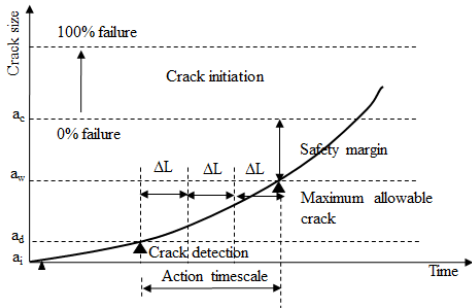


Fig. 3 Schematic diagram of crack growth vs. periodic inspection

### 3. 허용균열크기 계산

열차의 운행하중하에서 레일이 견딜 수 있는 최대 균열크기 또는 허용균열크기를 계산하기 위하여 Fig. 4와 같이 유한요소모델을 개발하고 균열의 크기를 변화시키면서 균열 팁에서의 응력확대계수를 계산하였다. 해석에 사용된 레일은 50kg 레일이며, 레일두부에 온도차이( $\Delta T=45^{\circ}\text{C}$ )로 인한 축하중(=106.20 MPa)과 윤중(=7.16 ton)을 각각 축방향과 수직방향으로 작용하였다. 균열은 타원형으로 가정하였으며, 단축과 장축의 비는 1:2이다. 일반적인 레일소재의 파괴인성치가  $40.0\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 인 것을 고려해볼 때 임계균열크기(=허용균열크기)는 11.44 mm로 계산되었다.

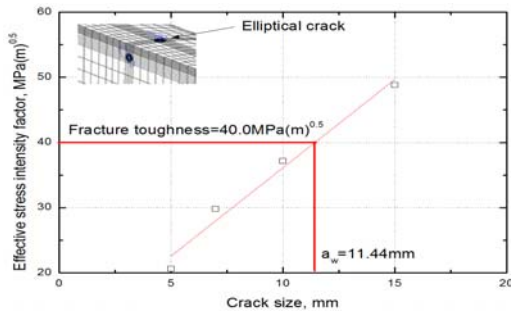


Fig. 4 Schematic diagram of crack growth vs. periodic inspection

### 4. 주기적 검사를 고려한 결함탐상확률

0.5mm 크기의 초기 결함이 레일표면에 존재할 때 허용균열크기까지 성장하는데 소요되는 시간을 계산하기 위하여 저자들[4]이 앞서 개발한 Raildoctor 프로그램을 이용하여 균열성장속도를 Fig. 5와 같이 계산하였다. 균열모델은 레일표면과 균열면이 이루는 각도를 각각 달리하며 3개로 모델

링 하였다.  $90^{\circ}$ 균열의 경우 허용균열까지 성장하는데 1번의 사용중 검사가 이루어지며,  $60^{\circ}$ 의 경우는 4번,  $45^{\circ}$ 의 경우는 8번의 검사기회가 주어지는 것을 알 수 있다. 따라서 식(2)와 Fig. 2를 고려하여 운영중 적어도 1번 균열이 발견될 확률을 계산하면 Table 1과 같다.

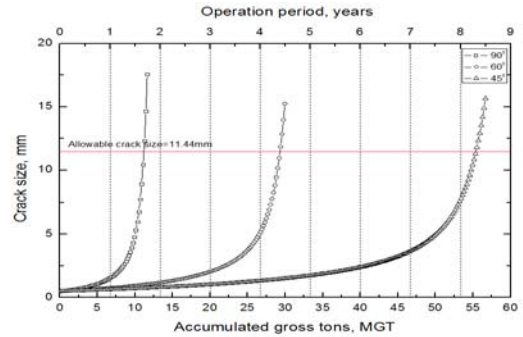


Fig. 5 Predicted crack growth curve

Table 1 Total probability of detection(TPOD) until an initial crack(0.5mm) grows to the allowable crack

Crack angle	No of Inspection	TPOD
$90^{\circ}$	1	6%
$60^{\circ}$	4	43.2%
$45^{\circ}$	8	85.8%

### 5. 결론

본 연구에서는 결함의 탐상성능과 연계한 레일 유지보수계획을 수립하기 위한 기초연구로써 비 파괴 탐상성능, 결함진전속도 및 주기적인 검사를 고려하여 결함의 발견확률을 계산하였다.

### 참고문헌

- 이재봉, 박재학, 김홍덕, 정한섭, "유효 POD를 이용한 물리적 결함수의 추정," 한국안전학회지, 제 21권 제 4호, 42-48, 2006.
- 구봉근, 서사범, "궤도관리를 위한 레일 온도의 특성," 한국철도학회논문집, 제 3권 제 1호, 19-26, 2000.
- Jeffrey, B. D. and Peterson, M. L., "Assessment of Rail Flaw Inspection Data," Department of Civil Engineering, Colorado, 19-28, 1999.
- Jun, H. K. et. al., "Calculation of minimum crack dize for growth under RCF between wheel and rail", Contact and surface, 123-135, 2011.