레일의 온도 분포에 따른 레일 변형 분석

The Analysis of Deformation According to the Temperature Distribution in Rail

홍성욱* · 임남형** · 배현웅*** · 김경호**** · 김홍집***** · 조성진*****

Hong, SungUk*, Lim, NamHyoung**, Bae, HyunUng***, Kim, KyungHo****, Kim, Hongjip*****,
and Cho, Seong J.*****

Abstract

As global temperatures continue to increase, the problem of rail buckling, which affects railway networks, will become ever more severe. Railway companies monitor the temperature of their rails to set safe running speeds and predict when buckling is likely to occur. However, to obtain accurate temperature data, it is important to measure it at the correct point either on or within the rail. Existing methods of determining where to measure the temperature generally fail to account for the nonuniform distribution of temperature within a rail and instead choose surface measuring points based on ease of access. In the present study, we conduct a thorough thermal and structural analysis of a generic rail to understand the distribution of temperature and thermal deformation. The findings of this research are timely and of significant potential impact both theoretically and practically.

Key words : Rail Deformation, Rail Temperature, Buckling, Temperature Distribution

요 지

세계적으로 기온이 상승함에 따라 열차의 안전에 영향을 미치는 레일 좌굴의 문제는 더욱 심각해지고 있다. 열차 회사들은 열차의 안전 운행 속도를 결정하고 좌굴 발생을 예방하기 위해서 레일의 온도를 모니터링하고 있다. 레일의 온도 편차는 좌굴 발생이 예상되는 여름철에 크게 발생하며 이는 레일의 불균형한 온도 분포를 만들어 낸다. 하지만, 현존하는 레일 온도 측정에 관한 연구들은 레일의 불균형한 온도 분포를 고려하지 않고, 접근이 쉬운 표면의 레일 온도에만 중점을 두고 해석을 하였다. 본 연구에서는, 유한요소해석을 수행하여 온도 분포에 따른 열변형 결과를 얻고 이를 통해 레일의 온도 분포를 분석하였다. 이러한 연구 결과는 향후 진행될 레일 좌굴에 관한 연구의 정확성을 향상시켜 줄 것으로 기대된다.

핵심용어 : 레일변형, 레일온도, 좌굴, 온도분포

1. 서 론

레일의 좌굴은 레일 온도의 변화에 따라 발생하는 과도한

변형에 의하여 발생한다. 레일의 좌굴은 열차의 탈선사고를 불러일으키며, 인명사고로 이어진다. 레일의 좌굴에 의한 열차 탈선사고의 빈도는 다른 안전사고에 비해 낮지만, 그

*정회원, 충남대학교 기계공학부 석사과정(E-mail: hsu12375@gmail.com)

Member, Master of Degree Candidate, School of Mechanical Engineering, Chungnam National University

**정회원, 충남대학교 토목공학과 교수

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam National University

***정회원, 충남대학교 철도연구소 박사후연구원

Member, Post-doctoral Researcher, Cnu Rail Research Institute, Chungnam National University

****(주)에이베스트 연구소장

Director of Research, A-Best, Ltd.

*****충남대학교 기계공학부 교수

Professor, School of Mechanical Engineering, Chungnam National University

*****교신저자, 정회원, 충남대학교 기계공학부 교수(Tel: +82-42-821-5648, Fax: +82-42-822-5642, E-mail: scho@cnu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, School of Mechanical Engineering, Chungnam National University

피해정도가 막대하기 때문에 레일의 좌굴을 사전에 예측하는 기술은 매우 중요하다.

또한, 레일 온도는 열차의 안전 운행 속도를 결정하는데 중요한 역할을 수행한다. 한국의 고속 열차의 경우 레일 온도가 55-60℃이면 230 kmph의 제한속도를, 레일 온도가 60-64℃이면 70 kmph의 제한속도가 부여되며, 그 이상의 레일 온도에서는 열차의 운행이 중지된다. 미국, 영국, 오스트레일리아 등과 같은 국가에서도 각각 기준은 상이하지만 레일 온도를 기준으로 열차의 안전 운행 속도를 결정하고 있다(Kish and Samavedam, 1999; Ventry, 2002; Kish et al., 2011; Korail, 2011).

전 구간의 레일 온도를 직접 측정하는 것은 어렵기 때문에 레일 주변의 대기 온도를 이용하여 레일 온도를 예측하는 방법이 국내외에서 개발된바 있다(Hunt et al., 1994; Esveld et al., 2001).

이 방법을 더욱 개량한 방법으로서 레일 주변의 대기 온도뿐만 아니라 일사량과 같은 외부 환경 데이터를 추가적으로 이용하여 레일 온도를 예측하는 방법이 현재 개발되었으며, 이 방법은 열 해석 기반의 레일 온도 예측 방법과 다변수선형회귀분석 기반의 레일 온도 예측 방법으로 구분되어진다(Chapman et al., 2008; Zhang et al., 2007; Wu et al., 2012).

이전 연구에서는 레일의 두부(head)에 비해 마모가 덜하고 표면적이 넓어서 측정이 용이한, 레일의 복부(web)나 저부(base)의 표면 온도를 레일의 온도로서 이용하고 있었다(Chapman et al., 2008; Zhang et al., 2007).

앞서 언급한 연구들은 외부 표면의 단일 지점의 온도를 레일의 전체적인 온도로 생각하여 연구를 진행하였다. 하지만 레일의 여러 지점의 온도를 측정하는 연구들을 보면 여름철의 낮 시간의 경우 레일의 온도는 측정하는 지점에 따라서 5~7℃의 차이가 발생하게 된다 (Ryan, 2005; Fröhling et

al., 2009). 이러한 온도 편차에 의해서 레일의 모든 부분이 일정하게 변형되지 않고 국부적으로 다르게 변형된다.

본 연구에서는 레일의 내/외부 온도를 측정한 후 보간을 통해서 레일 내부 온도 분포를 파악하고, 이를 통해서 레일의 변형이 어떠한 경향을 가지고 발생하는 지를 분석하고자 한다. 이를 위해서 실제 레일이 설치된 환경과 유사한 레일 계측 시스템을 구축하여 여름철 레일 내/외부 온도 및 주변 기후 정보를 계측하였다. 계측된 레일 온도 데이터는 열변형 유한요소해석 방법을 통해서 해석되었으며 해석된 데이터를 분석하여서 경향을 파악할 수 있었다.

2. 방 법

본 연구에서는 계측 시스템을 구축한 후 레일의 내/외부 온도를 직접 측정한 후, 특별한 해석 프로세스를 통해 레일의 평균적인 변형이 발생하는 지점을 찾는 연구를 수행하였다.

2.1 레일 온도와 기후 데이터 계측

실제 열차가 운행 중인 레일의 온도를 측정하는 것이 가장 좋지만, 이러한 방법은 안전적인 위험 요소가 존재한다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 실제 레일이 놓인 환경과 유사한 레일 온도 계측 시스템을 구축하여서 레일의 온도와 레일 주변의 기후 데이터를 계측 하였다. 계측 시스템은 충남대학교 내부에 위치한 통행이 적은 평지에 구축되었으며, 레일의 도상과 침목 구조를 동일하게 사용하였다. 사용한 레일은 UIC 60 레일로서, 500 mm 길이로 자른 후에 남북 방향으로 설치하였다. 기후 데이터는 weather station(Vantage Pro2, Davis)을 이용하여 계측을 실시하였으며, 계측한 기후 데이터는 풍속, 풍향, 일사량, 대기 온도, 습도, 강우량 이다. 계측 데이터는 10분마다 획득되었으며, 2016년 8월 한 달 동안 계측이 진행되었다(Fig. 1).

Fig. 1. (a) Measurement System and (b) Installed Measurement System for the Present Study

Fig. 2. (a) Internal and Surface Rail Temperature Measurement Points (b) Attached and Inserted K-type Thermocouples

본 연구의 목적은 내/외부 온도를 계속하여 레일의 전체적인 온도 분포를 파악하는 것이다. 내부 레일 온도를 측정하기 위해서 레일에 드릴링을 실시한 후 탐침형 K-type 열전대를 삽입하고 에폭시를 이용하여 드릴링으로 발생한 틈새를 매우는 방법을 사용하였으며, 외부 레일 온도를 측정하기 위해 레일의 표면에 필름형 K-type 열전대를 부착하였다. 이러한 방법으로 내부 8개 지점과 외부 8개 지점에 K-type 열전대를 부착하였다(Fig. 2).

2.2 해석 방법

2.2.1 데이터 전처리

16개의 레일 온도 데이터를 10분 간격으로 계속하는 것을 1개월간 반복하여서 약 56,000개의 레일 온도 데이터를 확보할 수 있었다. 하지만 모든 계속 데이터를 이용하여 해석을 진행하는 것은 많은 시간이 소모되기 때문에, 불필요한 계속 데이터를 필터링 하는 전처리 과정을 해석을 진행하기에 앞서 실시하였다. 데이터 전처리 조건은 아래와 같다.

- 데이터 전처리 조건 1: 낮 시간(08:00 - 18:00) 동안 계속한 데이터만 해석한다. 일반적으로 밤 시간의 레일 온도의 편차는 센서의 오차 범위 이내이다. 이는 밤 시간의 레일 온도 분포는 매우 미세하다는 것을 의미한다. 또한 본 연구의 초점은 레일 변형에 맞춰져 있기 때문에, 레일의 변형이 주로 발생하는 낮 시간의 레일 온도 데이터가 더 중요하다.
- 데이터 전처리 조건 2: 계속한 데이터 중 정시의 데이터만 이용한다. 계속 데이터는 10분마다 수집되지만 기후 조건이 10분 만에 변화하지 않으므로 10분 간격마다 해석을 진행하더라도 유의미한 변화를 확인하기 어렵다. 그렇기 때문에 데이터의 간격을 한 시간으로 설정하여, 시간에 따른 해석 결과를 빠르게 분석하였다.

- 데이터 전처리 조건 3: 내부 온도 편차가 0.3°C 이하이면 무시한다. 보통 내부 온도 편차가 낮은 상황은 태양의 영향이 상대적으로 적은 아침이나 오후 늦을 때, 구름이나 다른 이유 등으로 인하여 태양 광선이 차단되었을 때 발생한다. 이러한 상황들에서는 레일의 온도가 낮게 발생되기 때문에 중요성이 상대적으로 떨어진다. 또한 내부 온도 편차가 0.3°C 이하인 상황은 센서의 오차 범위 이내이기 때문에 사실상 동일한 온도로서 생각해도 무방하다.

이러한 세 가지 데이터 전처리 방법을 이용하여 전체적인 데이터의 숫자를 감소시키면서 해석의 정확성을 향상시킬 수 있었다.

2.2.2 평균 변형량 발생 지점을 찾는 3 단계 프로세스

레일의 평균 변형량이 발생하는 지점을 찾는 프로세스는 총 3단계로 나누어진다. 자세한 과정은 아래와 같다(Fig. 4).

• 1 단계: 레일 온도 보간

1 단계에서 측정된 16개의 레일 내/외부 온도를 이용하여 측정되지 않은 지점의 레일 온도를 계산한다. 본 연구에서는 ANSYS를 이용하여 온도 보간을 실시하였다.

• 2 단계: 레일 변형 해석

2 단계에서는 1 단계에서 수행한 레일 온도 보간 해석을 이용해서 레일의 길이 방향 변형을 ANSYS를 이용하여 해석하였다. 해석을 위해 사용된 모델의 매쉬와 경계조건은 Figs. 3(a)와 (b)에서 볼 수 있다. 이때 생성된 노드는 998902 개이다. 실제 레일은 X, Y, Z 방향으로 모두 변형이 되지만, 레일 좌굴에 있어서는 길이 방향인 Z축의 변형이 다른 방향의 변형보다 더 중요하다. 본 연구에서는 Z축의 자유도를 고정 시키고 X축과 Y축의 자유도를 자유롭게 풀어주는

경계조건을 통해서 길이 방향 변형만을 중심으로 해석하였다. 2 단계 해석이 완료되면 레일의 길이 방향 변형에 대한 데이터를 얻을 수 있다.

Fig. 3. (a) Mesh (b) Boundary Conditions in the Rail Model

• 3 단계: 레일의 평균 변형 선분 획득

2 단계 해석에서 얻은 레일의 길이 방향 변형에 대한 데이터를 통하여 레일의 평균 변형량을 계산 할 수 있다. 이때 레일의 평균 변형량이 발생하는 지점은 레일의 단면상의 한 지점에서만 발생하지 않고 하나의 선분 형태로 발생한다. 본 연구에서는 이 선분을 ‘평균 변형 선분(Average deformation line)’으로 정의한다.

레일 변형 해석 데이터에서 이 선분을 획득하고 그 위치를 파악하기 위해 Excel VBA(Visual Basic for Applications)를 이용하였다. Excel VBA는 Excel에 내장된 프로그래밍 언어로서, 이 언어를 이용하여 간단한 프로그램을 제작함으로써 3 단계 해석의 시간을 획기적으로 감소시킬 수 있었다.

이러한 3 단계 프로세스를 통하여 레일의 평균 변형 선분에 대한 해석된 데이터를 획득 할 수 있었다.

3. 해석 결과 분석 및 고찰

레일 안전 관리를 위해서는 온도에 따른 열변형에 대한 정밀한 분석이 필요하다. 하지만 기존의 연구들은 대부분 레일 외부의 단일 지점의 온도를 계측하고 이를 통해 변형량을 산출하였기 때문에 변형량의 분포를 알기 어려웠다. 이를

Fig. 4. 3-steps Analysis Process

해결하기 위해 본 연구에서는 레일 내/외부에 16개 지점의 온도를 측정하고 보간 함으로써 실제 레일 내부 온도 분포 데이터를 얻을 수 있었으며 이를 토대로 레일 내부의 열변형을 시뮬레이션 하였다.

3.1 태양의 위치와 레일 온도 분포 비교

레일의 좌굴 발생이 예상되는 여름철의 레일 변형은 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 레일의 온도 분포는 태양의 위치와 밀접한 관련이 있다.

본 연구에서는 레일의 온도 분포를 좀 더 명확하고 직관

적으로 파악할 수 있도록 레일의 평균 온도 선분(average temperature line)을 사용하고자 한다. 레일의 평균 온도 선분은 레일의 온도 분포에서 평균적인 온도가 위치하는 지점을 나타내는 선분이다. 이 선분의 형상을 토대로 온도 분포의 경향을 파악할 수 있었다.

태양은 레일이 위치한 환경에 있어서 온도 분포를 결정하는데 있어서 지배적인 요소이며 Figs. 5(a)와 (b)에서 확인할 수 있듯이 태양 광선과 수직에 가까운 방향으로 평균 온도 선분이 발생한다. 이를 통해서 태양의 위치와 레일의 온도 분포가 밀접한 관련이 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 5. Rail Temperature Distribution (a) Measured rail temperature on cross section of rail at 13:00 August 22, 2016 (b) Measured rail temperature on cross section of rail at 15:00 August 20, 2016 (c) Average deformation line at 13:00 August 22, 2016 (d) Average deformation line at 15:00 August 20, 2016

또한 레일의 온도 분포를 확인해보면 태양 광선과 직접 접촉하는 레일의 표면 온도가 가장 높고, 태양 광선의 영향이 가장 적은 레일 저부 중심 부분의 레일 온도가 가장 낮다는 것을 확인 할 수 있었다.

3.2 레일의 변형량의 발생 경향과 온도 분포 비교

변형은 온도의 1차 함수이며, 일정한 온도에서 선형성을 갖는다. 하지만 레일의 형상은 복부 부분이 얇은 독특한 형상적 특징을 가지고 있을 뿐만 아니라 레일이 설치된 주변 환경에 의하여 결속되어 있기 때문에, 레일의 온도와 레일의 변형량이 정확히 일치하지 않는 특징을 보인다.

Figs. 5(a)와 (c)는 각각 2016년 8월 22일 13:00에 측정한 레일의 온도와 측정한 레일 온도를 이용하여 분석한 레일의 평균 변형량을 보여준다. 레일의 평균 온도 선분과 지표면이 이루는 각도는 65° 이지만, 레일의 평균 변형 선분과 지표면이 이루는 각도는 -5° 이다. 반면, Figs. 5(b)와 (d)는 각각 2016년 8월 20일 15:00에 측정한 레일의 온도와 측정한 레일 온도를 이용하여 분석한 레일의 평균 변형량을 보여준다. 레일의 평균 온도 선분과 지표면이 이루는 각도는 75° 이고, 레일의 평균 변형 선분과 지표면이 이루는 각도는 60° 이다.

측정한 레일의 온도 분포와 변형량 발생 경향은 2016년 8월 22일 13:00와 2016년 8월 20일 15:00에 각각 다른 결과를 보여준다. 이는 기존의 연구에서 온도 분포만으로 레일 변형을 예측하게 되면 큰 오차가 발생할 수 있음을 보여준다. 따라서 레일의 변형량을 산출하고 이해하는 데 있어서 온도 분포뿐만 아니라 레일의 형상을 고려한 열변형 해석이 필수적이다.

4. 결 론

본 논문에서는 레일의 온도 분포와 변형량 발생 경향을 알아보기 위해 실제 환경과 유사한 레일 계측 시스템을 구축한 후 측정한 데이터를 이용하여 해석을 진행하였으며 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 레일의 온도는 태양과 밀접한 연관이 있으며, 레일의 온도 분포는 태양의 위치에 밀접한 연관을 갖는다.
- (2) 레일의 변형량의 발생 경향은 일반적으로 레일의 온도 분포와 유사하다. 하지만 레일은 복부 부분이 얇은 독특한 형상을 보일 뿐만 아니라 주변의 환경에 의해서 결속되어 있기 때문에 레일의 온도 분포 상관없이 레일의 변형량이 발생하기도 한다. 따라서 열변형 해석을 통해 실제 변형량을 예측할 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원 (17RTRP-B113566-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Chapman, L., Thornes, J.E., Huang, Y., Cai, X., Sanderson, V.L., and White, S.P. (2008) Modelling of Rail Surface Temperatures: A Preliminary Study. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 92, No. 1-2, pp. 121-131. doi:10.1007/s00704-007-0313-5
- Esveld, C. (2001) *Modern Railway Track*. Vol. 385.
- Fröhling, R., De Koker, J., and Amade, M. (2009) Rail Lubrication and Its Impact on the Wheel/Rail System. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 223, No. 2, pp. 173-180.
- Kish, A., and Samavedam, G. (1999) Risk Analysis based CWR Track Buckling Safety Evaluations. *Proceedings of the International Conference on Innovations in the Design & Assessment of Railway*.
- Kish, A., McWilliams, R. S., and Harrison, H. (2011) Track Buckling Hazard Detection and Rail Stress Management. In *Proceedings of the 9th World Conference on Railway Research*.
- Korail (2011) *The Rules of High Speed Rail for Operation*. p. 13.
- Ryan, M. (2005) *Rail Temperature Measurement Study*. AEA Technology Rail.
- Ventry, D. (2002) *Railtrack Company Specification: Continuous Welded Rail (CWR) Track*. RT/CE/S/011
- Wu, Y., Rasul, M.G., Powell, J., Micenko, P., and Khan, M.M.K. (2012) Rail Temperature Prediction Model. In *CORE 2012: Global Perspectives; Conference on Railway Engineering*, p. 81.
- Zhang, Y.J., and Lee, S. (2008) Modeling Rail Temperature with Real-Time Weather Data. *Fourth National Conference on Surface Transportation Weather and Seventh International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology*.

Received	November 20, 2017
Revised	November 21, 2017
Accepted	November 27, 2017