50 N 레일의 산악철도 급곡선부 적용성 평가

Evaluation of the Applicability of 50 N Rails to Sharp Curves on Mountain Railway Tracks

박종찬* · 엄기영** · 임남형***

Park, Jongchan*, Eum, Kiyoung**, and Lim, Namhyoung***

Abstract

Currently, a mountain railway system using existing mountain roads is being developed in Korea. Considering the alignment of domestic mountain roads with many sharp curves, the maximum radius of curvature of the mountain railway is about 10 m. Therefore, the 50 N rail applied to the track structure of the mountain railway must be manufactured with a radius of curvature of 10 m at the factory. In this study, the material properties of 50 N Rails were analyzed through indoor tests and the behavioral characteristics according to bending processing ($R = 10$ m) were analyzed to evaluate their applicability to sharp curves on mountain railways.

Key words : Mountain Railway, Sharp Curve, Rail, Bending Processing

요 지

최근 국내에서 기존의 산악도로를 활용하는 산악철도 시스템이 개발되고 있다. 급곡선부가 많은 국내 산악도로의 선형을 고려하면 산악철도 최대 곡률반경은 약 10 m이다. 그러므로 산악철도 궤도구조에 적용되는 50 N 레일은 공장에서 곡률반경 10 m로 휨 가공되어야 한다. 본 연구에서는 실내실험을 통하여 50 N 레일의 재료적 특성을 분석하고, 휨 가공($R = 10$ m)에 따른 거동특성을 분석하여 산악철도 급곡선부에서의 적용성을 평가하였다.

핵심용어 : 산악철도, 급곡선부, 레일, 휨 가공

1. 서 론

우리나라의 국토는 70%가 산악지형으로 산악 관광지 및 거주 지역의 접근은 대부분 산악도로에 의지하고 있다. 이러한 산악도로는 자동차의 배출 가스에 의해 대기오염을 유발한 뿐만 아니라, 급경사와 급곡선이 많은 형태로 치명적인 단점을 가지고 있다. 급곡선부의 산악도로는 자동차 운행 측면에서 빈번한 사고의 원인이 되며, 겨울철 노면 결빙으로 인한 자동차의 통행금지로 관광객 및 주민들이 이동에 불편함을 겪고 있다.

최근 국내에서는 기존 산악도로를 활용하여 자연 환경을

해치지 않는 친환경 산악철도 시스템을 개발 중에 있다. 이러한 친환경 산악철도 시스템은 기존 산악도로에 적용하기 위해 최대 $R = 10$ m의 곡률 반경이 고려되고 있다.

산악철도 궤도 시스템을 위한 레일은 장대레일을 적용하지 않고 Rack & Pinion으로 작동하는 산악철도 특성상 단면이 작고 경제적인 50 N 레일을 사용한다.

산악철도 시스템에 대한 기존 연구로는 급구배 지형특성을 고려한 궤도패널 적용성에 대한 연구(Park et al., 2015), 급구배 및 급곡선 궤도 추진시스템 개발 및 성능평가(Seo et al., 2016), 캔트 및 완화곡선 등의 설계기준에 대한 연구(Park et al., 2018) 등이 있다. 그러나 급곡선부 적용을 위한

*정회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: mioso@cnu.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Chungnam National University

**정회원, 한국철도기술연구원 첨단인프라융합연구소 수석연구원(E-mail: kyeum@krii.re.kr)

Member, Senior Researcher, Advanced Infrastructure Convergence Lab, Korea Railroad Research Institute

***교신저자, 정회원, 충남대학교 토목공학과 정교수(Tel: +82-42-821-7749, Fax: +82-42-825-0318, E-mail: nhrim@cnu.ac.kr)

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

휨 가공(곡률반경 $R = 10\text{ m}$)에 따른 레일의 거동특성을 분석한 연구는 전무하다.

본 연구에서는 휨 가공에 따른 50 N 레일의 거동특성을 분석하기 위하여 50 N 레일의 재료적 특성과 잔류응력을 측정하였다. 또한 잔류응력을 고려한 휨 가공에 따른 거동을 분석하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다.

2. 50 N 레일의 재료적 특성 및 잔류응력

산악철도용 50 N 레일의 휨 가공에 따른 거동 분석을 위하여 실내실험을 통해 50 N 레일의 응력-변형률 선도와 잔류응력의 분포를 도출하였다.

2.1 응력-변형률 선도

레일의 인장 거동 평가를 위하여 KS B 0801 (KATS, 2017)에서 규정하고 있는 5호 규격의 인장 시험편을 제작하였다 (Fig. 1).

레일시험편은 레일 저부에서 추출하였으며, 인장시험을 수행한 결과는 Fig. 2와 같다. 데이터 분석 결과 항복응력은 571.5 MPa, 인장응력은 830.1 MPa로 나타났으며, 이는 KS 규격(KATS, 2018)의 물성치를 만족하고 있다(Table 1).

2.2 잔류응력

50 N 레일의 잔류응력 분포 특성을 분석하기 위하여 굴곡 측정법(Countour Method)을 이용하였다(Song et al., 2018).

굴곡 측정법은 잔류응력을 가지고 있는 재료를 절단하였을 때, 그 잔류응력의 크기에 따라 절단면에 표면굴곡이 형성된다. 이러한 표면굴곡을 초기 평평한 표면으로 회복시키기 위한 응력은 유한요소해석을 통해 정밀 해석하게 되며, 이때 도출된 응력이 잔류응력과 등가가 된다.

시험편의 제작 조건은 방전가공(Electric Discharge Machining, EDM)을 이용하여 절단 시 내부 잔류응력에 줄 수 있는 영향을 최소화하였고 절단 속도 역시 $100\text{ }\mu\text{m/min}$ 의 속도로 설정하여 매우 정밀하게 절단하여 제작하였다(Fig. 3).

표면굴곡을 정밀하게 측정하기 위한 측정 장비는 Fig. 4와 같고 정반 위에 올려서 수평을 맞춘 뒤 레이저를 이용하여 비접촉식으로 측정하였다. 측정 포인트는 측정 간격 $200\text{ }\mu\text{m}$

Fig. 1. Tensile Test Piece (KS B 0801)

(a) UTM

(b) Stress-Strain Diagram

Fig. 2. Tensile Test of 50 N Rail

Table 1. Compare with Standard

Division	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
KS Standard	up to 800	up to 10
Test	829	17.2

Fig. 3. Cutting Section of 50 N Rail

로 설정하여 각 단면 당 20만 포인트, 총 40만 포인트로 레일의 표면굴곡을 측정하였다.

측정된 데이터는 외부 환경(온도, 습도, 먼지 등)에 의해 노이즈가 발생하므로 이를 제거한 뒤 범용 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS (Abaqus, 2018)을 이용하여 평평한 표면으로 회복시켜 잔류응력을 도출하였다. 굴곡측정법을 이용하여 분석한 레일의 잔류응력 분포 결과는 Fig. 5와 같다.

Fig. 4. Contour Measurement Set-up

Fig. 5. Residual Stress for 50 N Rail

Fig. 6. F.E. Model

3. 휨 가공($R = 10\text{ m}$)에 따른 50 N 레일 거동

3.1 유한요소 해석 모델

휨 가공에 따른 50 N 레일의 거동분석을 위하여 사용한 범용유한요소 해석 프로그램은 ABAQUS ver.2018을 사용하였다.

거동 분석을 위한 유한요소 해석모델은 Fig. 6과 같다. 단순보에 두 개의 집중하중을 작용시켜 순수 휨(Pure Bending) 구간이 발생되도록 하였으며, 순수 휨 구간의 곡률반경이 10 m가 되도록 집중하중의 크기와 거리를 결정하였다. 또한 분석의 편의성을 위해 순수 휨 구간의 중심각을 90° 로 제한하였다.

경계조건의 설정은 단순보를 모사하기 위하여 Fig. 7과 같이 힌지부분에서는 레일 끝단 중립축에서 병진방향 3축을 고정시켰으며, 롤러 부분에서는 길이방향(z축)을 제외시켰다. 또한 단면의 비틀림을 방지하기 위하여 레일 단면 2점에서 횡방향 변위를 구속하였다.

정밀한 응력해석을 위하여 레일단면을 4 mm 크기의 Mesh로 Solid 요소를 적용하였으며 물성치는 Fig. 2의 응력-변형률 선도를 적용하였다.

또한 잔류응력의 영향을 고려하기 위하여 Fig. 5의 잔류응력 분포도를 Fig. 8과 같이 단면의 평균값으로 초기응력 상태로 적용하였다.

Fig. 7. Boundary Condition

Fig. 8. Initial Condition for Residual Stress

3.2 응력 분포

곡률반경 $R = 10$ m로 휨 가공에 의해 50 N 레일에 발생된 Von Mises 응력은 Fig. 9와 같다.

해석 결과 최대 Von Mises 응력은 584.8 MPa으로 레일 저부 끝단에서 도출되었다. 50 N 레일의 항복응력 571 MPa과 비교했을 때 약 14 MPa가 초과함을 알 수 있다.

3.3 변위

곡률반경 $R = 10$ m로의 휨 가공에 의해 발생된 레일의 변위형상은 Fig. 10과 같다.

Fig. 10의 변위형상은 순수 휨 구간의 끝단과 순수 휨 구간의 중앙부에서의 변위차와 변형된 단면의 두부와 저부의 변위차를 나타낸 것이다.

레일 약축(연직축)에 대해 휨 가공이 이루어졌으나 단면의 비대칭(무게중심과 전단중심 불일치)으로 인해 연직방향(y축) 변위와 비틀림이 유발됨을 알 수 있다.

단부와 중앙부의 연직방향 단차가 11.7 mm 발생하고 비틀림에 의해서 곡률외측에서 0.4 mm의 단차가 또 발생한다.

또한 레일 두부와 저부의 변위차이가 단면중심으로 양측이 다르게 발생하는 것으로 뒤틀림이 발생하는 것으로 판단된다. 이와 같은 휨 가공에 의한 뒤틀림이 발생함에 따라 급곡선부 시공에 많은 어려움이 예상되며, 시공 중에 이러한

Fig. 9. Stress Analysis Result

Fig. 10. Displacement Shape

뒤틀림을 제거하기 위해서 추가적인 외력(체결장치 등 활용)이 가해지면 레일에 발생하는 응력에 대한 정밀한 검토가 필요하다.

4. 결 론

본 논문에서는 50 N 레일의 재료적 특성과 잔류응력 분포도를 실험을 통해 도출하고, 그 특성을 적용한 레일의 휨 거동에 대하여 유한요소 해석을 진행하였다.

분석 결과, 곡률 중심방향 레일 저부에서 최대 응력이 도출되었으며 산악철도에 적용하기 위한 곡률 $R = 10$ m을 50 N 레일에 적용하였을 때 최대응력이 항복응력(571 MPa)을 약 14 MPa를 초과하였다. 또한 변위형상을 분석한 결과 레일단면과 길이방향으로 뒤틀림이 발생되었다.

레일의 휨 가공을 통해 급곡선부에 시공하기 위해서는 레일 휨 가공에 따른 강재의 냉간선형(Cold Work) 효과를 고려한 응력변형률 특성을 반영하여야 하며 뒤틀림을 제거하기 위한 추가적인 가공방법이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 산악벽지용 친환경 전기열차 기술 개발 사업의 연구비지원(21SGRP-B159271-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Abaqus. (2018). *ABAQUS/Standard user's manual - version 2018*. ABAQUS, Inc.
- Korean Agency for Technology and Standards (KATS). (2017). *Test pieces for tensile test for metallic materials*. KATS, p. 5.
- Korean Agency for Technology and Standards (KATS). (2018). *Rail (KS R 9106)*. KATS, pp. 1-2.
- Park, S.H., Moon, J.H., Cheon, J.N., and Lee, C.J. (2015). A study on the design application of precast concrete panel slab on high gradient mountain railway. *Conference Journal of the Korean Society for Railway*, pp. 82-91.
- Park, S.H., Moon, J.H., and Jung, H.S. (2018). A study on proposal of rail alignment design criteria for Korean mountain railway. *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 21 No. 4, pp. 396-405.
- Seo, S.I., Mun, H.S., Moon, J.H., and Suk, M.E. (2016). Development and performance evaluation of traction system for steep gradient and sharp curve track. *Journal of Korea Academy Industrial Cooperation*

Society, Vol. 17, No. 9, pp. 493-501.

Song, M.J., Choi, W.J., Lim, N.H., Kim, D.K., Woo, W.C., and Lee, S.Y. (2018). Residual stress analysis of new rails using contour method. *Journal of the Korean Society for Urban Railway*, Vol. 6, No. 4, pp. 393-399.

<i>Received</i>	December 16, 2021
<i>Revised</i>	December 16, 2021
<i>Accepted</i>	December 24, 2021