

장대레일의 축력 예측에 대한 연구

A Study on the Longitudinal Force Prediction of CWR

이 우 철* 류 효 진** 임 남 형*** 이 진 옥****
Lee, Woo Chul* Ryu, Hyo Jin** Lim, Nam Hyong*** Lee, Chin Ok****

ABSTRACT

Continuous welded rail has many advantages over the conventional jointed rail, however It may cause high longitudinal force by temperature variation. Because the longitudinal force is very important among various parameters that depend to prevent the track buckling and that influence in effective maintenance procedure, In this paper, We shall present a approach for the prediction of rail longitudinal force using beam-column theory. Various parameters such as track modulus, ballast resistance, and unfastened length are considered effectively and rationally. After a spot verification, new longitudinal force measurement system may be developed using proposed equation.

key words : CWR, Longitudinal force prediction, Beam-Column, Reset

1. 서론

장대 레일은 기존 레일을 연속적으로 용접하여 이음매를 제거한 200m 이상의 레일로 궤도보수주기 연장, 소음 및 진동의 발생감소, 궤도재료의 손상 감소, 승차감 양호, 열차의 고속화 및 수송력 강화등 많은 이점을 갖는다. 하지만 레일은 체결장치에 의해 도상, 침목등에 이중 탄성 체결되는 특성을 갖고 있기 때문에 장대 레일과 같이 충분히 긴 레일의 부동 구간에서는 어떠한 온도 변화에도 신축의 영향을 전혀 받지 않게 된다. 그렇기 때문에 온도 변동시 레일의 자유 팽창 및 수축이 구속되어 레일에 축력으로 작용하게 된다. 장대레일의 신축이론에 따르면 양단 가동단 부분으로부터 100m 이후의 부동구간에서 레일의 설정온도에서 1도 상승시 약 19.6kN(2tf)의 종방향 축력이 발생하게 되며, 최대 40도의 온도변동시 약 784kN(80tf)의 높은 종방향 축력을 받게 된다. 이로 인해 레일의 좌굴 발생 위험요소가 생기고 또한 레일이 손상되었을 경우 축력으로 인한 좌굴 발생 및 탈선의 위험이 더욱 높아지게 된다.

장대 레일은 온도변동에 따른 내부 축력으로 기인된 좌굴 안정성 문제로 봄, 가을철 재설정 작업을 통해 종방향 축력을 풀어주고 있는 실정이지만, 체결구에 의해 구속되어 있는 레일의 특성으로 인해 일정한 변형이 일어나기 전까지 레일의 상태 파악이 어렵고, 재설정 구간 선정시 합리적인 선정보다는 경험이나 관행에 의존하기 때문에 불필요 구간의 재설정 작업으로 인해 인력 및 시간의 낭비뿐만 아니라 레일의 손상으로 인해 2차적인 위험요소까지 수반하게 된다. 따라서 레일의 좌굴 안정성 및 효율적이고 합리적인 기준에 의한 재설정 구간 선정을 위해 레일의 온도 변동에 따른 축력을 예측할 필요성이 있다.

* 충남대학교 토목공학과 박사과정, 정회원

** 충남대학교 토목공학과 박사과정, 비회원

*** 충남대학교 토목공학과 교수, 정회원

**** 충남대학교 토목공학과 교수, 비회원

일반적으로 레일의 축력은 게이지 등을 이용한 동적 Signal 해석으로 예측하는데 이는 체결장치, 침목, 도상 등의 다른 복합적인 요소의 영향을 배제한 순수한 온도변동에 따른 축력 예측으로 평가하기는 어렵다.

본 논문에서는 Beam-Column 이론식을 이용해 부동 구간에서의 축력 예측이라는 장대레일의 필수 과제를 해결하려고 한다. 실제 레일의 일정하지 않은 경계조건[1]을 선형 좌굴해석을 통한 보정 계수 산정으로 레일의 특성을 반영하고, 반영된 모델의 재료 기하 비선형 해석으로 축력-처짐 데이터를 이용해 처짐 보정계수를 산정하고 예측 축력식에 적용해 온도변동에 따른 레일의 축력을 예측하는 방법에 대하여 연구하였다.

2. Beam-Column 이론을 이용한 축력 예측

그림1 과 같이 집중하중 Q와 축력 P가 동시에 작용할 때 보의 처짐은 집중하중 Q의 영향 뿐만 아니라 축력 P의 영향도 받는다는 Beam-column의 이론적 개념을 이용하여 레일의 일정하지 않은 경계조건(양단 고정 ~ 양단 힌지)에 대한 Pcr 보정 계수로 레일의 경계 특성을 반영하고, 경계 특성에 따른 처짐을 처짐 보정계수로 반영하여 식(1)로 표현하였다.

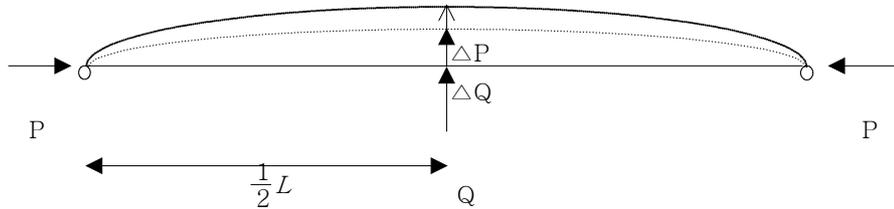


그림1. 축력 P와 집중하중 Q를 받는 보

$$\Delta = \Delta Q + \Delta P = \lambda_2 \cdot \frac{QL^3}{EI} \cdot \frac{1}{1 - \frac{P}{\lambda_1 P_{cr}}}, \quad \lambda_1 : P_{cr} \text{ 보정계수} \quad \lambda_2 : \text{처짐 보정계수} \quad (1)$$

$$\lambda_2 = \Delta \cdot \frac{EI}{QL^3} \cdot \left(1 - \frac{P}{\lambda_1 P_{cr}}\right) \quad (2)$$

식(1)의 전개 과정을 통하여 식(2)와 같은 처짐 보정계수 λ_2 를 얻을 수 있다. 처짐 보정계수 λ_2 를 보면 집중하중 Q와 축력 P에 대한 영향을 모두 받고 있음을 알 수 있다. λ_2 를 축력이 없을 때의 집중하중 Q에 대한 영향만을 반영하는 처짐 보정계수 λ_0 와 축력 P의 영향만을 반영한 처짐 보정계수 λ_3 로 분할 독립시켜 식(3)과 같은 이론식으로 표현하였다. 이 이론식의 전개 과정을 통하여 식(4)의 축력 예측식을 얻을 수 있고, 모델의 해석 데이터를 통한 보정 계수 산정으로 예측 축력의 적용성 및 정도에 대하여 연구하였다.

$$\Delta = \Delta Q + \Delta P = \lambda_0 \cdot \frac{QL^3}{EI} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\lambda_3 P}{\lambda_1 P_{cr}}} \quad (3)$$

$$\text{축력 예측식} \quad P = \frac{\lambda_1 P_{cr}}{\lambda_3} \cdot \left(1 - \frac{\lambda_0 QL^3}{\Delta EI}\right) \quad (4)$$

λ_0 : 집중하중 Q만을 반영한 처짐 보정 계수

λ_3 : 축력을 반영한 처짐 보정 계수

3. 기본 레일 모델

기본 레일 모델은 그림 2와 같이 축력 P가 작용하는 레일에 집중하중 Q를 중앙부에 재하한 모델이다. 기본 모델의 종방향 길이는 $(2L' + L)$ 로 L' (fastened length)구간은 체결구에 의해 레일과 침목이 체결된 길이를 나타낸다. 집중하중 Q를 레일에 재하하게 되면 중앙부에서 최대 처짐이 발생하게 되며, 이때 레일의 들림으로 인해 종방향으로 변위가 발생하게 된다. L' 구간은 재료 기하 비선형 해석을 통하여 집중하중 Q로 인한 종방향 변위의 영향이 없는 길이로 산정하였다.

L (Unfastened length)구간은 체결을 해체한 길이로 집중하중 Q를 재하하여 레일의 처짐을 얻기 위한 길이이다. L 구간은 그 길이에 의해 처짐 및 종방향 변위의 영향 정도, 실측이 용이한 처짐을 얻기 위한 하중의 크기 등이 변동되기 때문에 모델링에 가장 중요한 요소가 되며 또한 재설정 현장의 작업 편의성 및 인력, 시간의 소요에 큰 영향을 주기 때문에 하나의 중요한 변수가 된다.

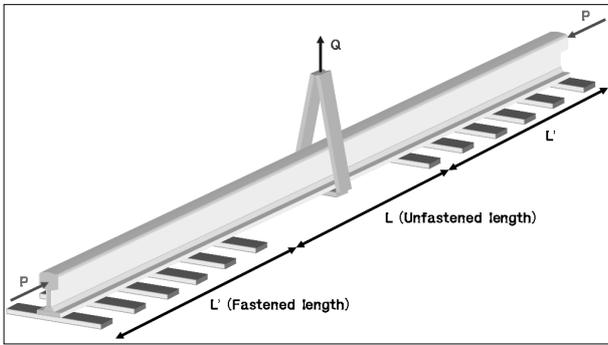


그림 2. Base model

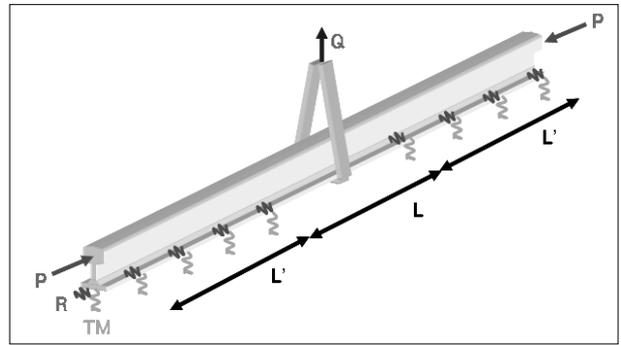


그림 3. Base analysis model

4. 레일의 제원과 도상저항력

범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS6.5를 이용하여 표 1.의 물성을 갖는 KS60 제원의 레일을 모사하여, 연직 방향 도상저항력 TM(Track Modulus)과 종방향 저항력 R(Longitudinal Resistance), 레일의 온도 변동 ΔT 를 주요 변수로 고려하였다.

다양한 도상 여건을 고려하여 Track modulus는 1800N/cm/cm/레일 ~ 9000N/cm/cm/레일의 값을 탄성 스프링으로 모사하였고, Longitudinal resistance는 3.3kN/m/레일 ~ 17kN/m/레일의 값을 최대탄성 변위 0.002m를 갖는 비탄성 스프링으로 모사하여, 침목간격인 0.6m 마다 적용하였다. 온도 변화는 레일의 중위온도로부터 최대 40도까지 고려하여 -40도 ~ +40도까지의 온도변동에 따른 레일의 축력을 예측하였다.

표 1. KS 60 Profile

레일종별	질량(N/m)	단면적 $A(m^2)$	중립축높이(m)	단면2차모멘트(I_x)	단면2차모멘트(I_y)
KS 60	595.84	7.75E-03	7.78E-2	3.09E-5	5.12E-6
비틀림강도($N \cdot m^2$)	탄성 계수(kN/m^2)	전단 탄성계수(kN/m^2)		열팽창계수($1/c$)	단면계수(m^3)
2.303E-2	2.1E+8	7.9154E+7		1.2E-5	3.97E-4

5. 구간 산정 및 하중 조건

L'(fastened length) 구간 산정을 위해 재료 기하 비선형 해석을 수행한 결과 그림 4와 같이 L' 구간이 204m 이상의 길이를 가질 때 레일 들림으로 인한 종방향 변위의 영향이 거의 없음을 알 수 있었다. 이에 L'(fastened length) 구간의 길이는 해석값 204m에 여유값 96m를 더하여 300m로 산정하였다.

L(Unfastened length)은 전술한 바와 같이 중요한 모델 변수이다. L 구간 산정을 위해 다양한 길이 (3m~12m)의 L을 변수 집중하중Q, TM(Track modulus), R(종방향 도상저항력)에 대하여 선형 좌굴 해석 및 재료 기하 비선형 해석을 하였다. L의 산정은 정도가 높고, 최대 온도 변동시 축력이 Pcr내의 안정적 범주에 들며, 실측이 용이한 처짐을 얻을 수 있고, 작업의 편의성 향상을 위해 길이가 짧은 L 산정 등 모든 변수를 종합적으로 고려하여야 한다. 해석 결과 그림 5, 6, 7과 같이 하중 조건 9.8kN일 때 L이 12m일때와 하중 조건 19.6kN일 때 L이 9m일때가 가장 합리적인 길이로 평가되어 본 연구에서는 현장성을 반영한 L구간 산정에 주안점을 두어 안정적 범주에 들고 실측이 용이한 좀 더 짧은 길이인 9m를 채택하고 하중 조건 Q는 19.6kN(2tf)를 모델에 반영하였다.

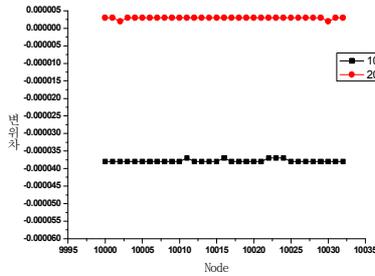


그림 4. 종방향 변위의 영향

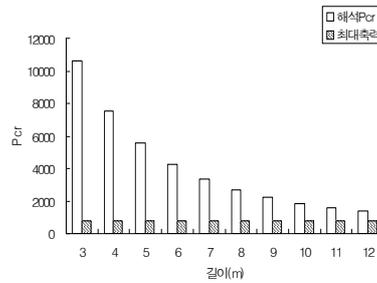


그림 5. 최대 축력 - Pcr 곡선

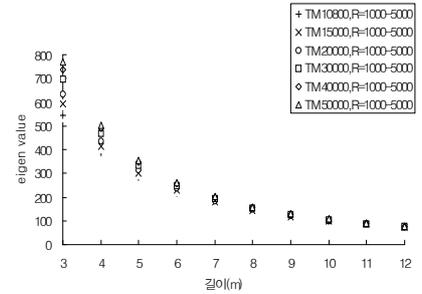


그림 6. L의 길이에 따른 고유값

6. 항복 응력 및 종방향 변위 검토

레일에 재하되는 집중하중 Q로 인하여 레일에 작용하는 응력이 항복응력을 초과하게 되면 2차적 안전 문제의 발생뿐만 아니라 축력 예측 작업이 비파괴적인 예측을 의미하지 않기 때문에 집중하중 Q에 따른 레일의 응력 분포를 검토하였다. 체결을 풀은 길이 L이 9m, 하중 조건이 9.8kN~39.2kN일때 도상 저항력이 가장 열악한 상태(연직 방향 도상저항력 18000N/cm/cm/레일, 종방향 도상 저항력 3.3kN/m)일때와 가장 좋은 상태(연직 방향 도상저항력 9000N/cm/cm/레일, 종방향 도상 저항력 17kN/m)일때 최대 온도 변동 40도를 주어 응력분포를 살펴보았으며 그림 8과 같이 두 조건의 최대 응력이 레일의 항복응력 이내의 응력분포를 갖는 것을 확인하였다. 또한 그림 9에서 보는 바와 같이 다양한 하중 조건과 최대 온도 변동 40도 일때 최대 탄성 변위는 2mm 미만임을 알 수 있다.

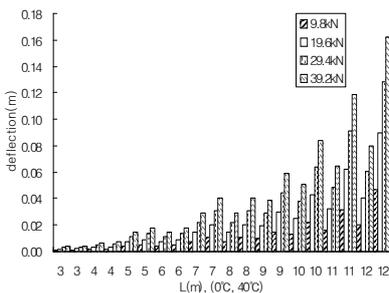


그림 7. L, 하중조건에 따른 처짐

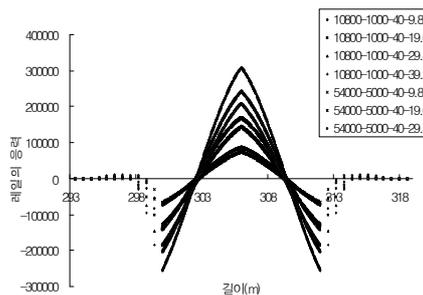


그림 8. L=12m, 레일의 응력

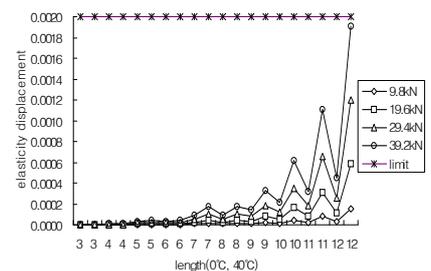


그림 9. 최대 탄성 변위

7. 보정 계수 산정 및 예측 축력의 정도

Pcr의 보정 계수 λ_1 은 레일의 경계조건에 의해 영향을 받는 Beam-column 계수값으로 변수 TM과 R을 고려한 모델의 선형 탄성 해석을 통해 이론 Pcr을 구하고 경계조건에 의한 Factor값인 K를 λ_1 으로 산출하여 임의의 경계조건을 갖는 레일의 Pcr로 표현하였다. 선형 탄성 해석을 수행한 바, 그림 10과 같이 연직 방향 도상 저항력 TM의 함수임을 알수 있었고, Regression 과정을 통해 λ_1 과 Pcr 보정 계수 식(5)를 산정하였다.

그림 11은 재료 기하 비선형 해석을 통해 얻어진 축력-처짐 곡선으로 식(2)를 이용하여 그림 12의 처짐 보정 계수 λ_2 -축력과의 관계를 얻고, 축력이 0일때 경계 조건에 따르는 집중하중 Q에 의한 처짐 보정계수 λ_0 와 축력을 반영하는 처짐 보정계수 λ_3 로 독립 분할 시켜 각각의 Regression 과정을 통하여 식(6), 식(7)의 처짐 보정 계수를 산정하였다.

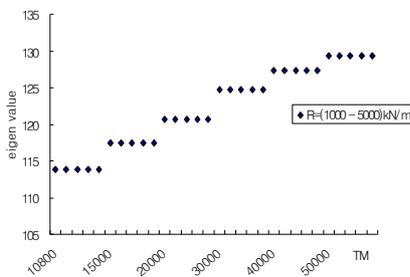


그림 10. 탄성 해석 결과

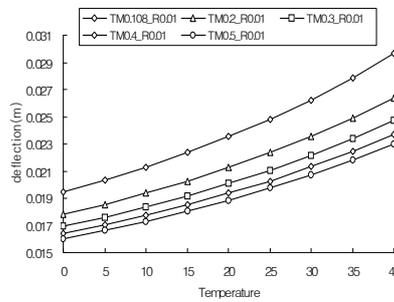


그림 11. 축력-처짐 곡선

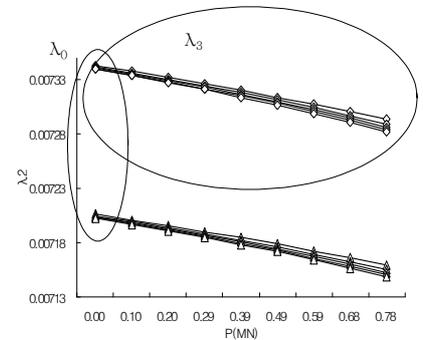


그림 12. 축력 - λ_2 곡선

$$\text{해석 } P_{cr} = \lambda_1 \frac{\pi^2 EI}{L^2} = \frac{\pi^2 EI}{K^2 L^2}$$

$$\lambda_1 = 35.54 * TM^5 - 70.57 * TM^4 + 56.72 * TM^3 - 24.01 * TM^2 + 6.07 * TM + 2.37 \quad (5)$$

$$P = \frac{\lambda_1 P_{cr}}{\lambda_3} \cdot \left(1 - \frac{\lambda_0 QL^3}{\Delta EI}\right)$$

$$\lambda_0 = A * R^2 + B * R + C \quad (6)$$

$$A = 16.63 * TM^6 - 33.17 * TM^5 + 25.50 * TM^4 - 9.39 * TM^3 + 1.67 * TM^2 - 0.13 * TM + 0.005$$

$$B = 0.90 * TM^6 - 1.82 * TM^5 + 1.42 * TM^4 - 0.54 * TM^3 + 0.1 * TM^2 - 0.009 * TM + 0.0006$$

$$C = 0.71 * TM^6 - 1.60 * TM^5 + 1.51 * TM^4 - 0.77 * TM^3 + 0.23 * TM^2 - 0.04 * TM + 0.01$$

$$\lambda_3 = A * TM^4 + B * TM^3 - C * TM^2 + D * TM + E \quad (7)$$

$$A = -2562058.99 * R^4 + 302627.84 * R^3 - 12561.27 * R^2 + 214.72 * R - 0.78$$

$$B = -3142264.45 * R^4 + 370874.42 * R^3 - 15444.95 * R^2 + 267.55 * R - 0.87$$

$$C = -1294221.28 * R^4 + 152824.04 * R^3 - 6408.76 * R^2 + 113.64 * R - 0.27$$

$$D = -210440.35 * R^4 + 24930.99 * R^3 - 1059.98 * R^2 + 19.62 * R - 0.003$$

$$E = 12310.29 * R^4 - 1484.36 * R^3 + 65.91 * R^2 - 1.41 * R + 0.98$$

Δ : deflection (m), P : longitudinal force (MN)

TM : Track modulus (MN/cm)

R : longitudinal resistance(MN/cm)

Q : 19.6 (kN), Pcr : (MN)

E, I : KS60 rail profile

산정된 보정 계수를 적용하여 축력 예측식을 통하여 중위 온도에서 최대 온도 변동 40도 까지의 축력 예측 결과 그림 13, 14 와 같이 레일이 압축력을 받을 때 최대 오차 0.4%미만 오차율, 인장력을 받을 때 최대 오차 1.3%미만의 오차율을 갖는 정도의 축력예측이 가능하였다.

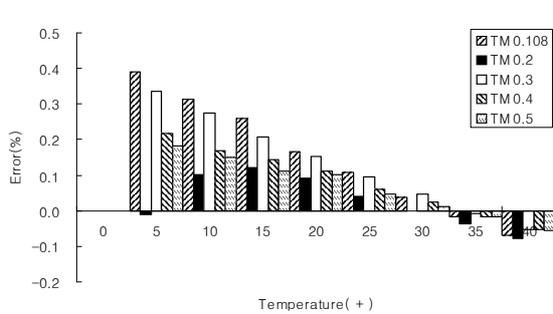


그림 13. 예측 축력 정도(압축력)

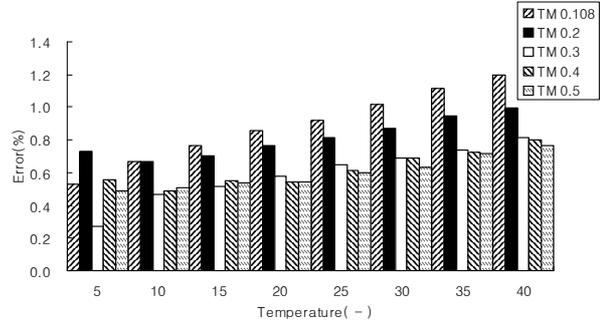


그림 14. 예측 축력 정도(인장력)

8. 결 론

첫째, Beam-column 이론적 접근을 통하여 레일의 특성을 보정 계수로 반영하여 축력 예측한 결과, 압축력을 받는 레일의 축력은 최대 오차 0.4%미만, 인장력을 받는 레일의 축력은 최대 오차 1.3% 미만의 정도를 갖는 축력의 예측이 가능하였다.

둘째, Beam-column 이론을 통한 레일의 축력 예측의 가능성 및 장비 활용의 가능성을 확인 하였다.

셋째, 레일의 일정하지 않은 경계 조건을 보정해 주는 보정 계수 λ_1 은 Track modulus의 함수로 종방향 도상 저항력의 영향은 없고, Factor값 K가 0.54 ~ 0.57 사이의 값을 갖는 것으로 볼때 양단 고정에 가까운 경계 조건을 가짐을 알 수 있다. 그리고 횡방향 도상저항력까지 고려된 축력 예측이 가능하도록 모델의 보정 및 합리적인 계수 사용, 현장 실험을 통한 검증 등 보완 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다. 끝.

참고문헌

- 1) A. D. Kerr (1976). "An analysis of thermal track buckling in lateral plane", U.S Department of ransportation, Federal Railroad Administration, Report No.FRA/DOSD-76-285.
- 2) A. Kish (1987). "Longitudinal force measurement in continuous welded rail from beam column deflection response", American railway engineering association, Vol.88 bulletin No.712.
- 3) A. Kish (1993). "Rail Longitudinal force measurement evaluation studies using the track loading vehicle", American railway engineering association, Vol.94 Bulletin No.742.
- 4) Coenraad Esveld (2001). "Modern Railway Track", 2th Ed., 도서출판 열과알.