

궤도보수 작업 조건별 장대레일 축력변화에 관한 연구
A study on the Longitudinal Force Variation of CWR
according to the Condition of Track Maintenance

원용환* 김관형** 권순정*** 이승열****
Won, Yong-Hoan Kim, Kwan-Hyung Kwon, Soon-Jung Lee, Seung-Youl

ABSTRACT

This research presents the method to decide proper locations for destressing of CWR using a non-destructive equipments to measure the longitudinal force(installation temperature) in CWR. The effect and necessity of destressing were analyzed by estimating changes of longitudinal force. The installation temperature was measured to find changes of longitudinal force in high speed and conventional lines before and after destressing or track maintenance at the locations where destressing was planed or where change of longitudinal force was expected during track maintenance. Past destressing was carried out within qualitative decision criteria. This research proposes the quantitative criteria to decide the priority order of the destressing locations reasonably by considering the difference of air temperature and stress free temperature during the track maintenances, the grade of ballast resistance force recovering and the length of destressing, etc.

Keywords : continuous welded rail, destressing, stress free temperature, track maintenance

1. 서 론

장대레일이 기준 설정온도 범위내로 부설되지 않았거나 설정한 후에 축력 분포가 고르지 못하다고 판단될 때 안정된 궤도에서 장대레일을 인위적으로 적절한 설정온도로 만들어 장대레일 내부에 작용하는 축력을 고르게 분포해주는 일련의 작업 즉 장대레일 재설정작업을 필요로 하게 된다.

본 연구는 장대레일의 온도변화에 따른 좌굴, 고저, 방향 등 틀림을 방지하기 위해서는 장대레일 온도 변화에 따른 안정성 등을 검토하고 장대레일 재설정을 보다 객관적으로 시행할 수 있는 기준을 연구하여 현장에서 장대레일 재설정 시행개소 선정시 도움을 주기 위함이다. 또한 재설정 작업은 인력과 장비가 복잡하게 투입되며 작업특성상 주로 야간에 열차를 중지시키고 시행하게 되므로 안전 및 열차운행에도 지장을 초래할 수 있으며 계절적으로는 해빙으로 인한 보수작업이 집중되는 시기임에도 재설정 작업에 보수인력이 투입되므로써 계절적 특성이 요구되는 작업에 지장을 받는 실정이다.

따라서 재설정작업에 투입되는 인력과 비용을 적정선에서 관리하고 선로유지보수의 효율화를 기하기 위해서 작업조건별 장대레일 축력변화가 예상되는 개소에 대하여 작업 전·후의 설정온도를 측정 분석하

* 책임저자 : 정희원, 한국철도공사 연구원 기술연구팀, 부장

E-mail : wonseulue@empal.com

TEL : (042)609-3764 FAX : (042)609-3720

** 정희원, 한국철도공사, 연구원 기술연구팀, 팀장

*** 비희원, 한국철도공사, 연구원 기술연구팀, 차장

**** 비희원, 한국철도공사, 연구원 기술연구팀, 대리

여 재설정개소 선정시 참고기준으로 제시하고자하였다.

2. 국내 재설정 기준

장대레일 재설정과 관련된 규정은 보선작업지침(2007)과 선로정비지침(2007)에 제시되어 있으며 그림 1은 고속선과 일반선의 장대레일 재설정시 설정온도 범위에 대해 설명한 것이다. 고속선의 경우 예상 레일온도 범위를 -20°C 에서 60°C 까지 가정하고 설정온도는 $25\pm 3^{\circ}\text{C}$ 로 정의하였다. 이 때 레일온도가 예상 최저온도에 이르게 되면 828kN의 인장력을 받으며 예상최고온도에 도달하면 644kN의 압축력을 받게 된다. 일반선의 경우는 추풍령을 기준으로 중부지방과 남부지방으로 분류하였다. 중부지방에서는 예상레일온도 범위를 고속선과 동일하게 가정하고 설정가능범위를 20°C 에서 25°C 로 정의하였으며, 레일온도가 예상최저온도일 때 653kN의 인장력을, 예상최고온도일 때 576kN의 압축력을 받게 된다. 남부지방에서는 예상레일온도를 -10°C 에서 60°C 까지 가정하였으며, 설정가능범위는 25°C 에서 30°C 까지 정의하였다. 이 때 레일온도가 예상최저온도일 때 576kN의 인장력을, 예상최고온도일 때 500kN의 압축력을 받는 것으로 나타났다.

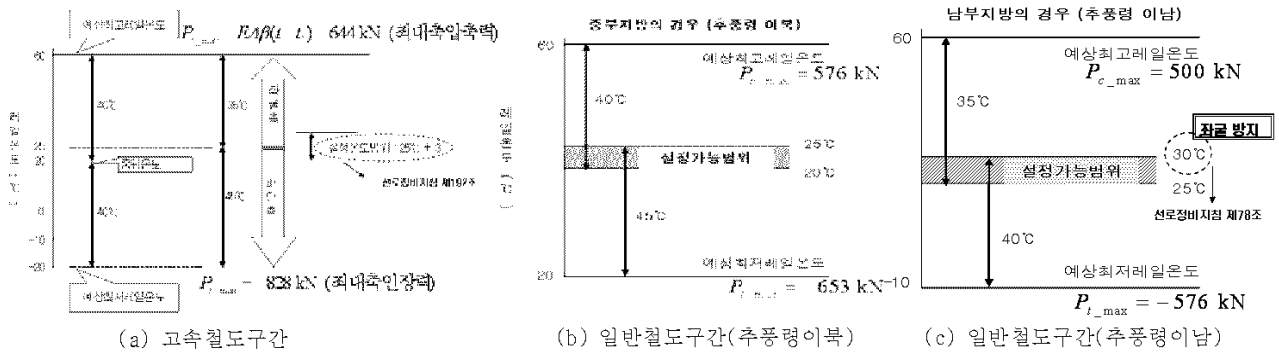


그림 1 고속철도 및 일반철도 장대레일 설정온도 범위

3. 현장 측정을 위한 축력 측정 이론 및 기법

3.1 축력측정 이론

레일축력(longitudinal force) 측정법은 장대레일 궤도의 좌굴 방지를 위한 관점에서 필요성이 높은 기술 과제이지만 충분한 성능을 가진 효과적인 측정법은 아직 확립되어 있지 않다. 현재 다양한 축력측정 기법이 개발되어 있지만 본 연구에서는 『레일 들어올림 측정법』을 기본 이론으로 하고 있는 영국의 Vortok International社에서 개발·제품화한 VERSE를 활용하여 축력을 측정하였다.

레일 들어올림(rail uplift) 측정법은 그림2와 같이 보-기둥 이론에 근거한다. 레일을 들어 올리는데 요구되는 수직력은 레일에 내재된 축력에 따라 변화한다.

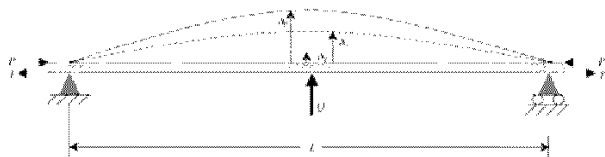


그림 2 보-기둥이론에서의 처짐 응답

축력이 작용하는 레일에 상향력 Q를 중앙부에 재하하여, 축력과 상향력에 의해 발생하는 레일의 수직변위의 관계식으로부터 레일의 축력을 계산할 수 있으며, 그 관계는 다음 식과 같다.

$$\delta = \left(\frac{\lambda QL^3}{EI} \right) \left(\frac{1}{1 - \frac{P}{P_c}} \right)$$

여기서 Q는 프레임에서 레일을 드는 힘, δ 는 레일의 수직 이동량, P는 상향력 Q에 의해 레일이 δ_p 까지 변화할 때의 종방향 압축력, T는 같은 하중 Q에 의한 종방향 인장력, λ 는 레일 끝단의 구속상태에 따른 상수, Pc는 레일 좌굴현상 임계 하중이다.

3.2 VERSE 개요

VERSE는 아래 보-기둥 이론식으로부터 장대레일의 축력 T를 유도할 수 있으며, 장대레일의 축력과 온도와의 상관 관계식을 이용하여 최종적으로 장대레일의 설정온도를 계산할 수 있다. 즉 장대레일을 설정온도를 측정하면 장대레일의 축력을 구할 수 있고, 이와 반대로 장대레일의 축력을 구할 수 있다면 장대레일의 설정온도를 구할 수 있는 것이다.

$$\Delta = \Delta_p + \Delta_T = \lambda \cdot \frac{PL^3}{EI} \cdot \frac{1}{1 - \frac{T}{T_c}}, \quad T = T_c \cdot \left(1 - \frac{\lambda PL^3}{\Delta EI}\right), \quad T = EA\beta(t - t_0), \quad t_0 = t - \frac{T}{EA\beta}$$

여기서 T는 레일축력, P는 레일 중앙부의 상향력, E는 레일의 탄성계수, A는 레일 단면적, β 는 레일의 선폽창계수, λ 는 레일 양단의 경계조건 보정 계수, t는 장대레일 온도이며, t0는 장대레일의 설정온도이다. VERSE는 그림3과 같이 구성되어 있으며 그림 4와 같이 현장에서 측정을 하게 된다

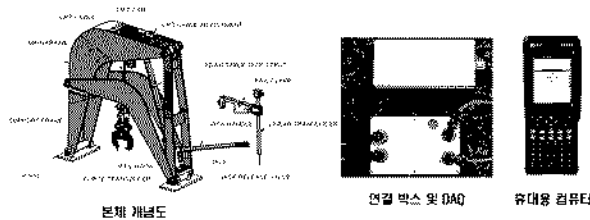


그림 3 VERSE 장비 구성

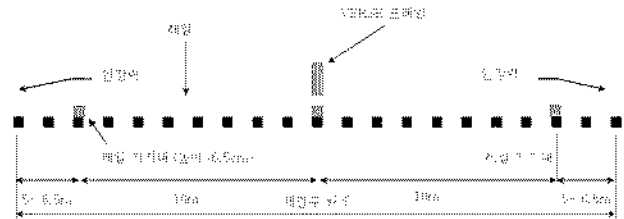


그림 4 VERSE 측정 개요도

4. 계측현장 선정 및 개소별 측정결과

4.1 계측현장 선정

본 연구에서는 코레일의 2008년도에 재설정작업이 계획된 개소로써 연속적인 침묵교환, 2종 작업개소 등으로 도상저항력의 이완이나 궤도보수작업으로 장대레일의 축력이 변화될 수 있는 개소를 선정하여 작업 전·후 또는 재설정 전·후에 대하여 객관적인 방법으로 설정온도를 측정하였으며 경험상 축력 변화에 많은 영향을 줄 수 있는 대표적인 개소를 표1과 같이 선정하여 재설정작업의 적합성 분석을 시행하였다.

표 1 장대레일 설정온도(축력) 측정지점

순번	선별	역구간	상하	위치	특이사항 (측정사항)	재설정 작업 유부
1	경부선	회덕-대전조차장	하	161K390	2종 작업 전·후 측정	-
2	호남선	계룡-개태사	하	26K870	2종 작업 전·후 측정	-
3	경의선	수색-화전	상	9K600	2종 작업 전·후 측정	재설정후측정
4	경원선	서빙고-왕십리	하	4K200	침묵연속 교환개소	재설정전·후측정
5	대구선	봉경역구내	하	29K030	육안 관측시 방향불량개소	재설정전·후측정
6	경부고속선		T1	96.550	-	재설정전·후측정
			T2	221.500	잡은 궤도틀림 발생개소	-
			T2	221.540	-	-
			T2	221.650	-	-
			T2	221.850	-	-

4.2 현장 조건별 측정결과

4.2.1 경부고속선 측정결과

표2의 경부고속선 장대레일 설정온도 측정 결과를 분석해 보면 96.550km 및 221.500km T1 및 T2 지점의 좌·우측 레일의 설정온도가 각각 1.8℃ 및 2.2℃로 편차가 있는 것으로 나타났다.

이중 2.2℃로 좌·우측 레일 설정온도 편차 구간을 보다 자세히 분석하기 위하여 222.500km T2 100m 내·외 인접개소 3구간을 6월 16일 측정한 결과 221.540km 구간의 좌·우측 레일 설정온도 편차가 1.6℃ 나타났으며, 거리가 보다 떨어진 221.650km와 221.850km 지점은 각각 0.2℃와 0.7℃로 양호하게 나타났다. 특히 221.500km 구간의 경우 “여름철 궤도틀림이 자주 발생 한다”는 현장관리자의 설명으로 보아 좌·우측 레일의 설정온도 차이도 하나의 원인이 될 수 있을 것으로 판단되어 진다.

표 2 경부고속선 장대레일 설정온도 측정 결과

순번	측정 일자	선별	위치 (KPR)	좌우 구분	레일 규격	측정 시간	레일 높이 (mm)	변위 (mm)	레일온도(℃)		측정 SFT (℃)	비고
									측정전	측정후		
1	3월13일	T2	221,500	좌	UIC60	1:00	171.55	62	7.1	6.9	23.0	
2	3월13일	T2	221,500	우	UIC60	1:30	171.80	58	6.6	6.6	25.2	
3	5월 3일	T1	96,550	좌	UIC60	3:00	170.30	60	9.5	4.7	25.2	재설정 직후
4	5월 3일	T1	96,550	우	UIC60	3:30	170.30	60	4.6	4.6	23.4	
5	6월16일	T2	221,850	좌	UIC60	0:40	171.50	86	19.2	19.0	23.4	
6	6월16일	T2	221,850	우	UIC60	1:20	171.95	89	18.9	18.8	22.7	
7	6월16일	T2	221,650	좌	UIC60	2:00	171.50	86	18.5	18.5	23.1	
8	6월16일	T2	221,650	우	UIC60	2:30	171.45	85	18.5	18.5	23.3	
9	6월16일	T2	221,540	좌	UIC60	3:00	171.35	87	18.5	18.5	23.3	
10	6월16일	T2	221,540	우	UIC60	3:30	171.40	81	18.5	18.5	24.9	

4.2.2 일반선 육안관측시 방향 불량개소 측정결과

표3은 대구선 봉정역구내 측정결과로써 재설정 전·후 모두 선로정비지침 제78조 일반철도 장대레일 설정온도 범위인 30℃ 이내로 측정되어 기준설정온도 범위를 만족하였다. 하지만 재설정 전 측정의 경우 햇빛이 있는 주간에 측력을 측정하여 측정값의 신뢰도에 약간의 문제가 있을수 있었으며 재설정 후의 측력 측정값은 좌·우측 레일의 설정온도차가 4.2℃가 났다.

표 3 대구선(봉정역구내) 장대레일 설정온도 측정 결과

순번	측정 일자	선별	위치 (KPR)	좌우 구분	레일 규격	측정 시간	레일 높이 (mm)	변위 (mm)	레일온도(℃)		측정 SFT (℃)	비고
									측정전	측정후		
1	4월 7일	2번선	29,030	우	KS50N	10:25	151.45	109	20.7	21.2	27.4	재설정 前
2	4월 7일	2번선	29,030	좌	KS50N	10:35	151.25	123	23.9	23.4	27.0	
3	4월 8일	2번선	29,030	우	KS50N	1:40	151.75	113	19.1	18.4	25.8	재설정 後
4	4월 8일	2번선	29,030	좌	KS50N	1:45	151.65	100	19.4	19.0	30.0	

4.2.3 일반선 침목연속교환개소 측정결과

표 4 경원선(서빙고-왕십리) 설정온도 측정 결과

순번	측정 일자	선별	위치 (KPR)	좌우 구분	레일 규격	측정 시간	레일 높이 (mm)	변위 (mm)	레일온도(℃)		측정 SFT (℃)	비고
									측정전	측정후		
1	4월16일	하선	4.200	좌	KS50N	1:11	152.95	121	14.4	14.4	18.9	
2	4월16일	하선	4.200	우	KS50N	1:32	152.30	125	14.3	14.2	16.8	
3	4월16일	상선	4.200	좌	KS50N	2:42	151.90	측정 가능한 변위 한도를 초과하므로, 설정온도 확인 불가				
4	4월16일	상선	4.200	우	KS50N	2:56	152.35					
5	4월25일	하선	4.200	좌	KS50N	1:26	152.70	63	10.3	10.3	36.0	재설정 後
6	4월25일	하선	4.200	우	KS50N	1:41	152.40	62	10.0	10.0	35.7	
7	4월25일	상선	4.200	좌	KS50N	2:36	151.65	75	10.5	10.6	29.6	
8	4월25일	상선	4.200	우	KS50N	2:59	152.30	72	10.6	10.7	31.9	

표4는 2008년 4월 16일 재설정 전 상·하선 좌우측 장대레일의 축력을 측정한 결과로써 하선의 경우 설정온도가 좌측 및 우측이 각각 18.9℃ 및 16.8℃로 측정이 되었고 상선의 경우 측정 장비의 허용변위를 넘어서 측정이 불가하였다. 2008년 4월 25일 재설정 후 장대레일의 축력을 측정한 결과 상선의 경우 30℃내외로 설정온도가 측정 되었지만 하선의 경우 좌측이 36.0℃, 우측이 35.7℃로 측정되었다. 이는 여름철 좌굴의 위험은 적어지지만 겨울철의 레일 절손의 위험은 커진다는 것을 의미한다.

4.2.4 일반선 2중 기계작업(자갈치기)개소 측정결과

일반선 3개소에 대해 2중 기계작업(자갈치기)개소에 대해 작업 전·후의 설정온도 변화를 측정한 결과 표 5와 같이 나타났다.

표 5 2중작업 개소별 장대레일 설정온도 측정 결과

위치	측정 일자	선별	위치 (KPR)	좌우 구분	레일 규격	측정 시간	레일 높이 (mm)	변위 (mm)	레일온도(℃)		측정 SFT (℃)	비고
									측정전	측정후		
경의선 수색-화전	5월 9일	상선	9.600	좌	KS60	2:15	174	61	14.1	14.1	29.6	
	5월 9일	상선	9.600	우	KS60	2:35	174	63	14.1	14.0	28.8	
	5월29일	상선	9.600	좌	KS60	1:55	174	69	17.6	17.5	28.7	2중
	5월29일	상선	9.600	우	KS60	2:15	174	68	17.3	17.2	28.5	작업後
	5월30일	상선	9.600	좌	KS60	3:20	174	79	21.3	20.8	27.7	재설정
	5월30일	상선	9.600	우	KS60	3:40	174	82	21.7	21.4	26.9	後
호남선 계룡-개태사	10월 2일	하선	26.870	좌	KS50N	2:18	153	89	14.0	13.8	25.7	
	10월 2일	하선	26.870	우	KS50N	2:36	153	97	14.0	14.0	22.9	
	10월17일	하선	26.870	좌	KS50N	2:38	153	82	12.4	12.3	24.1	2중
	10월17일	하선	29.870	우	KS50N	3:01	153	98	11.6	11.6	20.3	작업後
경부선 회덕-대전조차장	11월 6일	하선	161.390	좌	KS50N	1:57	152.1	102	10.3	10.2	18.9	
	11월 6일	하선	161.390	우	KS50N	2:27	152.4	100	10.2	10.13	18.9	
	11월18일	하선	161.390	좌	KS50N	1:46	152.1	91	3.3	3.3	16.1	2중
	11월18일	하선	161.390	우	KS50N	2:11	152.4	90	3.1	2.9	15.6	작업後

표 6 선별 2종 작업 후 설정온도 변화

온도	선별	경의선(상선) 9.600km 지점		호남선(하선) 26.870km 지점		경부선(하선) 161.390km	
		좌측레일	우측레일	좌측레일	우측레일	좌측레일	우측레일
2종작업 후 SFT변화(°C)		-0.9	-0.3	-1.6	-2.6	-2.8	-3.3
측정당시 레일온도(°C)		17.5	17.2	12.3	11.6	3.3	2.9

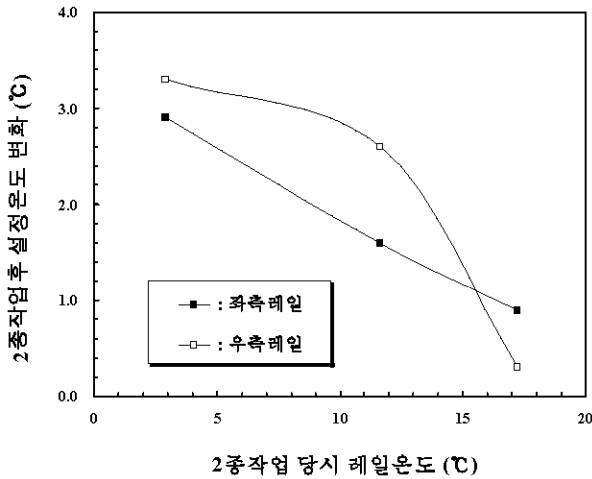


표 5의 결과를 활용하여 2종 작업시의 레일온도와 장대레일 설정온도의 변화를 표 6과 같이 정리하여 이를 그림 5와 같이 도시화 하였다. 2종 기계작업 당시의 레일온도 변화에 대한 2종 기계작업 후 설정온도 변화가 좌측레일의 선형적 변화를 보이고 있으며, 우측레일의 경우 선형적이지는 않다. 하지만 좌우측 레일 모두 2종 기계작업 당시의 레일온도가 낮을수록 2종 작업 후 설정온도의 변화가 동일하게 크게 나타남을 나타내고 있다. 즉 2종 작업 당시의 레일온도가 장대레일의 설정온도에 영향을 주는 변수임을 본 연구에서 알 수 있다.

그림 5 2종 작업시 온도와 장대레일 설정온도 변화

5. 결론

고속선 및 일반선 철도에서 장대레일 재설정 작업이 계획된 개소와 축력변화가 예상되는 궤도보수작업개소에 대하여 재설정 또는 작업 전·후의 설정온도를 현장에서 실측하여 변화량을 측정하고 재설정작업에 대한 효과와 필요성을 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 경부고속선 10개소에 대하여 설정온도 측정결과 모두 선로정비지침 제192조의 장대레일 기준설정온도 범위인 $25 \pm 3^\circ\text{C}$ 를 만족하였다. 이는 측정결과 계획된 설정온도와 실측값이 유사하게 측정되므로 값에 대한 신뢰도는 확보되었다고 판단되었다. 다만, 궤도틀림이 자주 발생하는 T2 221.500km부근의 측정 분석결과에서는 좌·우 레일 설정온도가 다소 차이가 나고 있어 궤도틀림에 영향을 주는 요소일수 있으므로 좀 더 정교한 계획과 기술로 좌·우 레일 설정온도를 균질하게 할 필요가 있다.

(2) 기온상승시기에 육안 관측시 방향 불량개소로서 레일축력 불균형 내재가 의심되었던 대구선 봉정역구내의 경우 재설정 전·후 측정결과 기준 설정온도 범위 내에서 변화량은 미소하였다. 또한 재설정 후는 좌·우 레일의 설정온도가 4.2°C 차이가 났다. 본 지점의 경우 고온 상승시 방향이 불량하여 재설정작업을 시행하게 된 구간으로 재설정 전·후 측정값을 토대로 분석한 결과 재설정의 효과와 필요 유무에 대한 신중한 검토가 이루어진 후 시행할 필요가 있다고 판단되었으며 가열법에 의한 재설정은 작업원들의 숙련도 및 현장여건에 따라 좌우레일은 물론 레일길이 방향으로도 설정온도가 다소 차이가 날수 있으므로 작업효과가 떨어질 수 있다. 따라서 긴장기 등 좀 더 현대화된 장비와 과학적인 방법으로 재설정작업을 시행하여 장대레일 관리에 신중을 기할 필요가 있다.

(3) 경원선과 같이 중위온도 이하의 저온 시(10월말~11월초 심야시간) 연속적인 침목 교환작업을 시행한 경우 도상저항력 이완으로 레일의 응축력이 상당히 발생한 것으로 예측되며 설정온도 확인결과 $16 \sim 19^\circ\text{C}$ 로 계측되었으며 이는 재설정이 시급한 개소임을 수치적으로 확인할 수 있었다.

(4) 2종작업 개소의 경우 경부선, 호남선, 경의선 등 3개소에 대하여 작업 전·후의 설정온도를 측정 분석하였다.

－ 중위온도보다 현저히 낮은 시기에 시행한 경부선, 호남선의 경우 레일에 신축변화가 있는 것으로 계측되어 재설정 작업이 필요한 개소로 판단되었다.

－ 경의선의 경우 작업기간의 대기온도가 19~21℃로써 중위온도와 비슷한 환경에서 작업을 하였으며 1일 작업량이 75m정도로 비교적 짧고 자갈치기작업과 동시에 DTS작업을 시행하여 도상저항력을 원래상태 수준으로 회복시켜줌으로써 계측결과 축력변화가 미미한 것으로 실측되어 재설정작업을 시행하지 않아도 되었을 개소로 판단되었다.

참고문헌

1. 건설교통부(2007) 선로정비지침 전부개정
2. 이우철 등(2006) 장대레일의 축력 예측에 대한 연구, 춘계학술발표대회논문집, 한국철도학회.
3. 이종득(2002) 철도궤도의 좌굴에 관한 연구, 철도전문대학 논문집 제17집, pp271-314.
4. 임용현 등(2001) 궤도손상에 따른 장대레일 재설정기준에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표대회 논문집.
5. Koob, M.J. (2005) *The development of a vibration technique for estimation of neutral temperature in continuously welded railroad rail*, M.S. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA.