

철도고가교 급곡선부 레일장대화 방안연구

A study of CWR on railway viaduct with sharp curves

이상진* 김기훈** 신순호*** 이주현****
Lee, Sang-Jin Kim, Gi-Hun Shin, Soon-Ho Lee, Joo-Heon

ABSTRACT

The Seoul Subway Line 4 crossing downtown diagonally constructed in February 1980 and opened on October 11, 1983. The line 4 is thus able to link southern and northern parts of Seoul with the downtown as well as with the Seoul outskirts. More than 810,000 people use it everyday. Line 4 was constructed like Line 1,2,3 with ballast track system causing much maintenance cost gradually and especially much public discontent due to wheel and rail contact noise by railway viaduct with sharp curves.

CWR on railway viaduct with sharp curves, $180m \leq R \leq 300m$, hasn't been designed and constructed ever in domestic. Therefore in order to reduce noise and vibration caused by interaction between wheel and rail the possibility and the methods of CWR(Continuous Welded Rail) on railway viaduct with sharp curve less than R300 will lead it to the maintenance free system.

1. 서론

서울지하철 4호선은 서울의 남북(당고개~충무로~사당)을 잇고 서울의 중심을 통과하는 주요 대중교통수단 중의 하나로서 1983년 10월 11일 준공된 이후 서울시 시민 및 서울을 방문하는 관광객들에게 큰 편의를 제공하고 있다. 현재 서울지하철 4호선(연장 31.7km, 26개 역사)은 철도청에서 건설한 안산~금정~사당간의 지하철과도 연결되어 일일 81만명의 승객을 운송하는 서울시 내·외곽을 연결하는 중추 교통수단이 되었다. 하지만 서울지하철 4호선은 당시의 국내 지하철 1,2,3호선에 채택된 자갈도상으로 건설되어 시간이 흐름에 따라 자연적으로 발생할 수밖에 없는 유지보수노력이 점차로 증대하게 되었다. 특히 지상 고가구간으로 건설된 창동~당고개간은 최근 연변 아파트등 거주자들로 부터 열차운행으로 수반되는 소음,진동으로 심각한 민원이 제기되고 있는 실정이다. 그러나 국내에는 유도상 교량구간의 $180m \leq R \leq 300m$ 곡선에 레일장대화를 설계, 부설한 예가 없어 이에 대한 레일장대화 가능성을 검토하여 방안을 제시하고 소음,진동을 저감시켜 선로연변 주거시민의 쾌적한 환경을 도모하고 유지보수 노력을 경감하는데 본 연구의 목적이 있다.

* (재)한국철도기술공사 상무, 정회원
** (재)한국철도기술공사 부장, 정회원
*** (재)한국철도기술공사 과장, 비회원
**** (재)한국철도기술공사 사원, 정회원

2. 도상 횡저항력 측정

도상 횡저항력은 궤도좌굴안정성을 판단하는데 매우 중요한 요소로 서울지하철공사 유지관리팀의 협조를 받아 측정하였다. 측정된 도상 횡저항력 측정위치별 결과는 <표2-1>과 같다

<표2-1> 도상횡저항력 측정결과

구간	측정 위치	선별	R (m)	궤도구조	측정방향	도상횡저항력(kg/m)				비고	
						1차	2차	3차	평균		
당고개 ~ 상계	0k937	상	180	W.T. 10m@17(588mm)	자갈막이 이격 400mm	879	1064	1575	1173		
	0k937	하	180	W.T. 10m@17(588mm)	중앙부 어깨폭 750mm	576	733	762	690		
	0k520	상	229	W.T. 10m@17(588mm)	중앙부 어깨폭 750mm	566	746	572	628		
	0k520	하	229	W.T. 10m@17(588mm)	자갈막이 이격 440mm	878	540	532	650		
	0k630	상	직선		P.C.T. 10m@16(625mm)	중앙부 어깨폭 800mm	963	1013	1487	1154	
	0k630	하	직선		P.C.T. 10m@16(625mm)	자갈막이 이격 650mm	728	785	941	818	
노원 ~ 창동	3k230	상	500	P.C.T.10m@16(625mm)	중앙부 어깨폭 850mm	995	1165	922	1027	장대레일, 좌굴방지판 설치지역	
	3k230	하	500	P.C.T.10m@16(625mm)	자갈막이 이격 670mm	1186	1034	971	1064		
	3k230	상	500	P.C.T.10m@16(625mm)	중앙부 어깨폭 850mm	1039	673	731	814	장대레일, 좌굴방지판 미설치지역	
	3k230	하	500	P.C.T.10m@16(625mm)	자갈막이 이격 670mm	712	833	727	757		

3. 수치해석

3.1. 축력분포 해석

■ 축력 해석 모델 및 입력 제한

본 해석모델은 당고개 정거장 종점으로부터 상계 정거장 시점으로 총연장 1,007.5m, 47개의 경간으로 구성된 교량과 상계 정거장 종점으로부터 노원 정거장 시점까지 총연장 835m, 40개의 경간으로 구성된 교량에 대해 레일과 교량상판은 보(beam)요소로 그리고 자갈도상은 조인트(joint)요소로 이상화하였다. 이때 교량구간에서 발생하는 영향을 충분히 반영하기 위해 레일의 길이를 교량구간보다 길게하여 모델링하였다. 레일의 온도 변화범위는 통상 -20℃ ~ +60℃로 중위온도와의 차 ±40℃를 적용하였다. 교량상 장대레일 축력해석에 크게 영향을 미치는 도상 종저항력은 일반적으로 자갈도상궤도의 도상종저항력 값으로 사용하는 레일당 10kgf/cm/레일 보다 큰 13kgf/cm/레일로 적용하였다. 이는 실측결과와 거의 같으며 도상종저항력이 상당히 큰 경우로 레일당 10kgf/cm/레일의 값보다 여유율을 감안하였다.

■ 축력 해석 결과

LUSAS를 이용한 축력해석 각 위치별 최대축력<표3-1> 및 해석 그래프 결과는 <그림 3-1>과 같다. <표3-1>에서는 각구간 교량상 축력이 일반 토공 도상구간의 장대구간 축력에 비하여 60kg 레일의 경우 $P = EA\beta \Delta t = 74.2tf$ 의 경우와 비교하여 최대 약 52% 까지 증가하는 것을 알 수 있다. 참고로 60kg 레일을 사용하였을 경우는 50kgN 레일을 사용하였을 경

우($P = EA\beta \Delta t = 61.3\text{tf}$)에 비하여 대략 단면적 크기에 비례하는 약 20%의 축력이 증가하나 좌굴강도면에서 60kg 레일이 50kgN 레일보다 약 20% 큰 관계로 레일 종별에 따른 좌굴안전성 영향은 없을 것으로 판단된다.

<표3-1> 60kg 레일적용시 축력해석 결과표

역간	구분	제1	제2	제3	제4	제5
		Peak치	Peak치	Peak치	Peak치	Peak치
당고개-상계	위치	0k350	0k574	0k110	0k778	0k888
	직곡	직선	R229	직선	직선	R180
	축력	112.7tf	112.0tf	93.0tf	86.0tf	84.5tf
상계-노원	위치	1k928	1k488	1k688	2k048	1k408
	직곡	R300	R250	R260	R300	R250
	축력	103.2tf	91.2tf	80.8tf	80.0tf	79.21tf

3.2.파단시 개구량

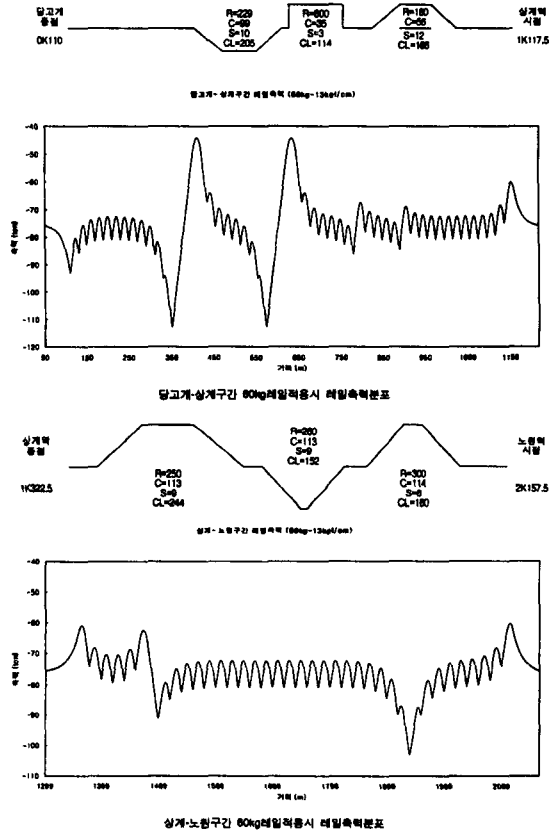
장대레일 구간은 동절기 온도가 하강하였을 경우 레일이 파손되는 것을 가정하여 파단시 개구량을 검토하여 열차안전에 이상이 없는지를 검토하여야 한다. 특히 교량상에서는 구조물 신장에 의한 부가 축력에 의하여 개구량이 일반구간보다 확대되는 관계로 어느 일정 범위내에 개구량이 위치하도록 조정하여야 한다. 장대레일구간 파단시 개구량(D)는

$$D = \frac{EA\beta^2 \Delta t^2}{\gamma_0}$$

개구한도는 일본에서 실험에 의해 제시된 "일반 장대레일 구간에 무도상 교량이 있는 경우"에서 제시한 60kg 레일 개구 허용한도량 67mm를 적용하기로 한다. 이때 최대온도차는 장대레일의 설정온도 +25℃를 가정하여 최저레일온도 -20℃와의 차 45℃를 적용하였다. 앞서 해석한 축력해석결과를 바탕으로 계산된 최대 개구량은 <표3-2>와 같으며 이때 파단시 최대 개구량이 허용기준치 (67mm)이내이므로 파단에 따른 열차 안전운행에는 지장이 없을 것으로 판단된다.

3.3.좌굴 안전성

궤도의 좌굴안전성은 장대레일 부설 조건 검토에 매우 중요한 요소중 하나로 레일장대화를 시행코자 하는 구간에 발생된 축력이 좌굴강도 이내여야 한다는 조건을 따라야한다. 만약 이



<그림3-1> 축력해석 결과

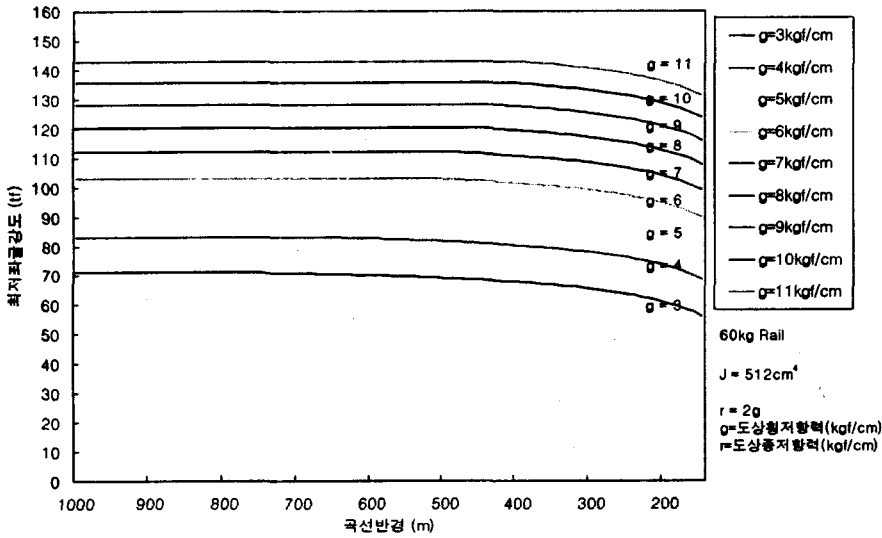
<표3-2> 레일 파단시 최대 개구량

레일 종별	단면적 A(cm ²)	온도차 Δt(℃)	도상종저항력 r(kgf/cm)	개구량 D(mm)	부가 축력비	최대예상 개구량 D(mm)
60kg	77.5	45	13	33	52%	50

조건에 부합되지 않는 경우 신축이음 설치나 활동체결구 설치등 별도의 대책을 강구하여야 할 것이다. 좌굴안전성 판단에 가장 큰 영향을 미치는 최저도상횡저항력은 PC침목부설 구간 실측 최저평균치인 760kgf/m를 적용하였다. 좌굴강도 정밀식에 의한 좌굴강도의 해석결과는 <표3-3> 및 <그림3-2>와 같다.⁽¹⁾⁽²⁾

<표3-3> 곡선별 좌굴강도 결과표

도상 횡저항력	곡선반경	R180	R230	R250	R300	R>300
7.6kgf/cm		137tf	>160tf	>160tf	>160tf	>160tf



<그림3-2> 곡선별 최저좌굴강도

위 <표3-3>에 나타난 바와 같이 급곡선에서도 좌굴강도는 상당히 높은 값을 보이지만 좌굴강도란 발생된 축력과 좌굴하려고 하는 힘간의 평형을 이루는 힘의 관계를 이론적으로 이끌어낸 결과인 관계로 이를 그대로 적용할 수는 없다. 사실상 좌굴현상은 궤도의 초기틀림에 큰 영향을 받고 기타 궤도의 부상, 열차의 가감속·제동 등 여러요소에 영향을 받는다. 식(3.1) 및 식(3.2)에 의한 각구간의 최저좌굴강도 해석결과는 <그림3-2> 및 <표3-4>와 같다.⁽²⁾⁽³⁾

R ≥ R₀인 경우

$$P_{t2} = 3.63J^{0.383} g^{0.535} N_j^{0.267} \quad (3.1)$$

R < R₀인 경우

$$P_{t1} = 3.81J^{0.383} g^{0.535} N_j^{0.267} - 20.2J^{0.789} N_j^{0.600} \frac{1}{R} \quad (3.2)$$

<그림3-2>에 나타난 바와 같이 일정한 곡선반경이상의 최저좌굴강도는 곡선반경에 관계없이 일정함을 알 수 있으며 이는 곧, 직선구간도 궤도의 초기 틀림에 영향을 크게 받음을 의미한다. 또한 <표3-1>과 <표3-4>의 결과에 따라 식(3.3)에 의한 좌굴안전율을 구하면 <표3-5>과 같다. 이때 최저좌굴강도가 발생된 최대축력의 1.2배 이상이 되어야 함을 알 수 있다.

$$\frac{P_{t\min}}{P_{\max}} \geq 1.2 \quad (3.3)$$

$P_{t\min}$: 궤도 최저좌굴강도
 P_{\max} : 가정되는 최대레일 축압력

<표3-4> 곡선별 최저좌굴강도

도상 횡저항력	곡선반경	R180	R230	R250	R300	R>477
7.6kgf/cm		107.6tf	110.9tf	111.9tf	113.7tf	117.2tf

<표3-5> 곡선별 안전율

도상 횡저항력	곡선반경	R180	R230	R250	R300	R>477
발생최대축력		84.5tf	112.0tf	91.2tf	103.2tf	112.7tf
g=7.6kgf/cm시 최저좌굴강도		107.6tf	110.9tf	111.9tf	113.7tf	117.2tf
안 전 율		1.27	0.99	1.23	1.10	1.04

<표3-5>로부터 R180 및 R250 구간을 제외한 전구간(직선포함)은 현 상태의 궤도상태를 유지한 상태에서 레일을 장대화 하는 것은 궤도의 좌굴로부터 안전하지 않음을 알 수 있다.

즉 급곡선부라고 할지라도 발생축력이 작으면 좌굴로부터 안전하고 곡선반경이 크다 할지라도 발생축력이 크면 좌굴로부터 안전하지 않음을 알 수 있다 이러한 좌굴에 대한 안전율을 향상시키기 위해서는

- 축력을 감소시킬 수 있는 수단을 마련하고,
- 도상횡저항력을 증강시키는 방안을 마련하는 것이 가장 효과적임을 알 수 있다.

따라서 신축이음매설치를 검토하고 계속적으로 좌굴안정성의 증강방안인 도상 횡저항력을 증강시키는 방안을 검토하여야한다.

4. 레일장대화 방안

4.1. 축력저감

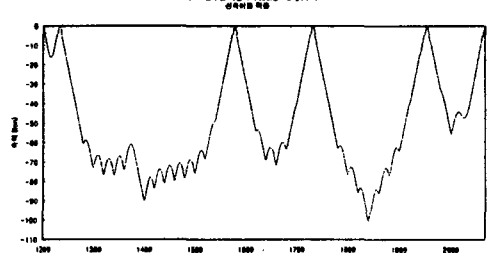
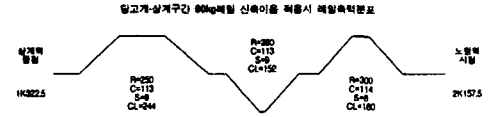
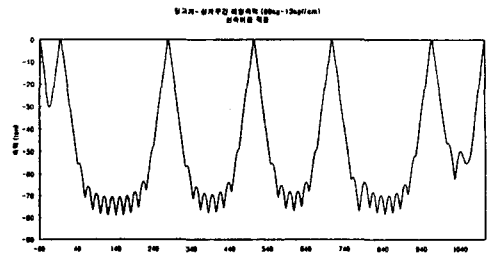
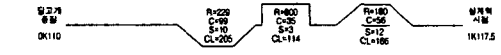
■ 신축이음매 설치 검토

신축이음매의 설치는 축력의 해소 역할 뿐 아니라 추후 급곡선부 레일마모에 따른 레일교환을 용이케 하는 장점이 있는 관계로 급곡선 전.후단에는 모두 신축이음매를 설치하고자 한다. 신축이음 설치에 따른 LUSAS 해석 프로그램을 이용한 축력해석 결과는 <표4-1> 및 <그림4-1>과 같고 축력감소 효과는 <표4-2>과 같다. <표4-1> 및 <표4-2>에서 신축이음 설치에 따른 유도상교량의 축력은 신축이음을 설치하지 않았을 때와 비교하여 당고개-상계 구간은 최대 약 30% 상당량 감소하였고 상계-노원구간은 약 2%정도 미미하게 감소하였음을 알 수 있다.

위와같은 결과는 당고개-상계구간의 2개소의 장경간 교량과 정거장 이동단 시점에 발생한 최대축력 위치에 직접 신축이음매를 설치함으로써 전체 축력이 상당량 감소한 반면 최대축력이 각각 R250과 R300 중간부위에서 발생한 상계-노원간은 신축이음매를 곡선상에 설치할 수 없어 불가피하게 곡선 양단 직선상에 설치함으로써 신축이음매 설치에 따른 영향이 미약하게 나타남을 알 수 있다.

<표4-1> 신축이음 설치시 60kg레일 적용 축력해석

역 간	구분	제1 Peak치	제2 Peak치	제3 Peak치	제4 Peak치	제5 Peak치
당고개 - 상계	위치	0k140	0k845	0k384	0k608	1k026
	직.곡	직선	R180	직선	R229	직선
	축력	79.1tf	78.5tf	77.9tf	77.0tf	62.4tf
상계-노원	위치	1k928	1k488	1k428	1k748	2k088
	직.곡	R300	R250	R250	R260	직선
	축력	100.8tf	89.8tf	76.6tf	71.4tf	55.5tf



<표4-2> 곡선별 신축이음설치에 따른 축력감소

도상	곡선반경	R180	R230	R250	R300	직 선
도상	횡저항력					
	신축이음설치전	84.5tf	112.0tf	91.2tf	103.2tf	112.7tf
	신축이음설치후	78.5tf	77.9tf	76.6tf	100.8tf	79.1tf
	감 소 율 (%)	7%	30%	16%	2%	30%

<그림4-1> 신축이음 설치시 축력해석결과

4.2.좌굴안정성 증대

<그림3-2>에서 도상횡저항력을 1kgf/cm 증가할 때마다 최저좌굴강도는 초기 약12tf에서 최하 7tf까지 향상되는 것을 알 수 있다. 이는 곧, 도상횡저항력의 증가에 따라 좌굴안정율은 급격히 높아 질 수 있음을 의미한다. 일반적으로 자갈도상의 도상횡저항력을 증강시키는 방안으로는 아래와 같은 방법이 있다.

- (1) 도상어깨폭의 확대 혹은 차단벽 설치
- (2) 도상어깨높이의 확대
- (3) 침목의 증량화
- (4) 좌굴방지판 설치
- (5) 침목 형상의 변경
- (6) 도상안정제 살포
- (7) 침목 수량의 증가

(가) (1), (2)의 방법은 자갈의 도상어깨폭을 확대하여 횡으로 이동하고자 하는 힘을 자갈의 체적을 증가시켜 즉, 중량을 증가시켜 횡저항력을 높이는 방법으로 <표2-1>에 보듯 최소 약 40% 이상의 도상횡저항력 증가 효과가 있는 것을 알 수 있다. 이는 또한 궤도의 초기이동을 방지하여 궤도의 틀림을 방지함으로써 유지관리 측면에도 큰 효과가 있을 것으로 판단된다.

(나) (3)의 방법은 경량(100kg)인 목침목을 중량(240kg)인 PC침목으로 증량화함으로 <표2-1>에서와 같이 목침목에 비해 최소 약 40%이상의 도상횡저항력 증가가 예상된다.

(다) (4)PC침목에 좌굴방지판을 설치하는 것은 도상횡저항력을 증가시키기 위한 저렴한 서도 매우 효과적인 방법으로 알려져 있다. 일반적으로 좌굴방지판의 설치는 도상횡저항력이 20~80%증가하는 것으로 되어있다.⁴⁾ <표2-1>의 도상저항력 측정결과에 따르면 최소 30%이상

의 효과가 있는 것으로 나타나 있다.

(라) (5), (6) 의 방안은 기대되는 효과에 비하여 비용이 과다할 것으로 판단된다.

(마) (7) 의 방안은 도상횡저항력 $g=P/2a$ 계산식에 따르면 침목간격은 도상횡저항력에 반비례한다. 따라서 예를 들어 침목간격 625mm를 588mm(10m@17정)로 변경하게 되면 약 6%의 도상횡저항력 증가 효과가 있게 된다.

따라서

- 목침목을 PC침목으로 변경하고
- 좌굴방지판을 설치하고
- 침목 단부로부터 일정하게 측벽을 설치하면 도상횡저항력이 상당히 증가할 것으로 예상된다. 좌굴강도 증강 방안 검토에 따른 도상횡저항력 증강방안 선정 및 기대효과를 요약하면 <표4-3>과 같다.

<표4-3> 도상횡저항력 증강방안

항 목	기 존	보강(안)	도상횡저항력 증강 기대효과
침 목	목침목	PC침목	약 50%이상
도상어깨목	400~900mm다양	전구간 400m 통일	약 30%이상
좌굴방지판	없음	침목당 1개 설치	약 30%이상

5. 결론

본 연구에서 장대레일 안전성 조건은 식(3.3)에 언급한 바와 같이 레일좌굴에 대하여 1.2배 이상의 안전성을 확보하도록 하였다. 신축이음매 설치에 따라 축력이 상당량 감소하였으므로 이에 대한 궤도의 좌굴안전성을 <표5-1>에 나타내었으며 이때 가장 취약개소는 상계-노원역 간의 R300구간임을 알 수 있다. 따라서 R300 구간에 대한 레일장대화 가능성은 다른 구간의 가능성을 동시에 만족시키는 기본 조건이 될 수 있다. 즉 신축이음매의 추가만으로는 여전히 R300 곡선의 궤도좌굴의 안전을 보장하지 못함을 알 수 있다. 따라서 이곳에 좌굴방지판을 설치하게 되면 도상횡저항력은 약 30% 증가하게 되고 이때의 좌굴 안전성은 아래 <표5-2>와 같다.

<표5-1> 도상횡저항력
 $g=7.6\text{kgf/cm}$ 시 좌굴안전성

곡선 반경	최대축력 위치	최대축력	최저 좌굴강도	안전율	장대화
R180	0K955	78.5tf	107.6tf	1.36	가능
R230	0K494	77.9tf	110.9tf	1.42	가능
R250	1K488	89.8tf	111.9tf	1.25	가능
R300	1K928	100.8tf	113.7tf	1.13	곤란

<표5-2> 도상횡저항력
 $7.6\text{kgf/cm} + \text{좌굴방지판} = 9.88\text{kgf/cm}$ 시 좌굴안전성

곡선 반경	최대축력 위치	최대축력	최저 좌굴강도	안전율	장대화
R180	0K955	78.5tf	126.1tf	1.61	가능
R230	0K494	77.9tf	129.4tf	1.66	가능
R250	1K488	89.8tf	130.4tf	1.45	가능
R300	1K928	100.8tf	132.3tf	1.31	가능

<표5-2>에서 알 수 있는 바와 같이 좌굴방지판의 설치로도 최소한의 궤도의 좌굴안전성은 확보가 되었음을 알 수 있다. 하지만 궤도의 추가적인 안전확보를 위하여 일정거리내에 측벽을 설치하게 되면 여기에 도상횡저항력이 약 30% 증가하게 된다. 이때의 좌굴안전도는 대폭 상향하며 그 결과는 아래 <표5-3>과 같다. 본 해석구간은 유지보수저감을 위한 레일장대화 목적뿐만 아니라 소음·진동의 목적 또한 그에 못지 않게 중요한 사안으로 이에 대한 대책으

로 침목패드 설치에 필요하다고 판단되었다. 하지만 침목패드의 설치의 많은 장점에도 불구하고 초기 도상횡저항력이 일시(약2~5mm 이내)에서는 약 20% 가량 감소하는 것으로 기술보고되고 있다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 따라서 이에 대한 도상횡저항력 감소분을 반영한 결과가 <표5-4>와 같다.

<표5-3> 도상횡저항력7.6kgf/cm
+좌굴방지판+측벽설치=12.16kgf/cm 시 좌굴안전성

곡선반경	최대축력 위치	최대축력	최저 좌굴강도	안전율	장대화
R180	0K955	78.5tf	143.0tf	1.82	가능
R230	0K494	77.9tf	146.4tf	1.88	가능
R250	1K488	89.8tf	147.3tf	1.64	가능
R300	1K928	100.8tf	149.2tf	1.48	가능

<표5-4> 도상횡저항력 7.6kgf/cm+좌굴방지판
+측벽설치-침목패드설치=10.64kgf/cm 시 좌굴안전성

곡선반경	최대축력 위치	최대축력	최저 좌굴강도	안전율	장대화
R180	0K955	78.5tf	131.8tf	1.68	가능
R230	0K494	77.9tf	135.2tf	1.74	가능
R250	1K488	89.8tf	136.1tf	1.52	가능
R300	1K928	100.8tf	138.0tf	1.37	가능

이상과 같이 축력저감대책과 좌굴안전성 증강대책에 따른 조치의 결과 궤도의 좌굴 안전율은 당초 안전을 대비 아래 <표5-5>와 같이 대폭 상향되었음을 알 수 있다. 상기 결과를 종합할 때 장대레일 유지관리 지침을 준수하고 정상적인 궤도상태를 유지하는 경우 <표5-4>의 개량(안)으로 시행할 경우

<표5-5> 축력감소 및 좌굴증강에 따른 안전율 변화

도상 횡저항력 \ 곡선반경	R180	R230	R250	R300
당 초	1.27	0.99	1.23	1.10
축력감소 및 좌굴증강 대책후	1.68	1.74	1.52	1.37
증 가 율	32%	77%	24%	25%

우 해당구간의 레일장대화는 가능하다고 판단된다. 침목에 방진패드를 취부할 경우 도상횡저항력은 탄성거동특성과 마찰력의 영향으로 초기(2mm이하)에는 일반침목보다 횡저항력이 약화되나 궤도가 안정된 후에는 일반침목 이상의 기능이 발휘될 것이 예상된다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 이상과 같이 R300미만의 유도상 교량구간에 대하여 레일장대화 하는 것은 기술적으로 충분히 가능하다고 판단되며 장대레일 시공이후 선형유지 및 장대레일 유지관리지침에서 크게 벗어나지 않는 한 열차안전운행은 충분히 확보될 수 있을 것으로 판단된다.

- 참고문헌 :

- (1) 沼田 實 : 「長大레일 座屈強度」, 日 鐵道技術研究報告書, 1979년 8월
- (2) 左藤吉彦, 梅原利之 : 「長大레일」, 線路工學, 1987년 2월
- (3) 中達 太郎 : 「長大레일軸력과 最低座屈強度」, 新線路, 제53권 제7호, 1999년 7월
- (4) V.A. Profillids : 「Transverse Effects」, Railway Engineering, 1995년
- (5) 堀池高廣 외 4명 : 「低廉化有道床彈性枕木開發」 RTRI REPORT Vol.12, No.3, 1998년 3월
- (6) 침목방진패드 제작사 제품자료
- (7) 4호선 당고개~노원역간 급곡선부 레일장대화 기술검토 용역 기술검토보고서, (재)한국철도기술공사, 1999년 12월