

급곡선부에서 슬랙량 최적화를 위한 연구

Study on the Optimization of Slack Design in Sharp Curved Track

김순철* 김영구** 전병찬*** 한중문****
Kim, Soon-Cheol Kim, Young-Gu Jeon, Byung-Chan Han, Jong-Moon

ABSTRACT

The extent of slack is correlative with the wheelbase of vehicle as well as the distance between the inner faces of flanges. Since the movable clearance of wheel flange is getting reduced in curved track, the vehicle is more difficult to negotiate the track. By this reason, a certain extent of slack is normally designed for curved track to allow the movable clearance corresponding to that of straight track. In case of some foreign railways, the fixed extent of slack has been classified by the ranges of curve radius.

In case of KNR, the slack is calculated by a formula for each case of curve radius and it therefore seems quite precise method. However, since there is a wide range of slack adjustment ($S'=0\sim 15\text{mm}$) in calculation formula itself, too excessive or too little slack can be calculated. This study is to approach the technical review on slack calculation and to offer the reasonable slack design through the full-scale experiment at sharp curved track without slack.

1. 서론

슬랙이란, 곡선 및 분기기에 있어서 직선에 비해 차륜가동 여유가 축소되어 차륜주행이 원활하지 않게 되므로 직선구간에서와 같은 정도의 차륜가동여유를 확보하기 위해 내궤측으로 궤간을 확대하는 것을 말하며, 슬랙량은 차량의 고정축거 및 후렌지 내면간 거리의 상관관계로부터 결정된다. 이 슬랙량에 대해서는 통상적으로 외국에서는 곡선반경 범위별로 슬랙량을 정해놓고 있으나, 우리나라의 경우에는 슬랙량을 결정하는 산식을 정해놓고 곡선마다 산식에 의해 정하도록 하고 있다.

그러나, 이와 같이 곡선마다 산정식에 따라 계산된 슬랙량을 적용할 경우 매우 정밀한 슬랙량을 적용하게 되는 듯 하나 산정식의 조정값 ($S'=0\sim 5\text{mm}$) 으로 인해 이론적으로는 과다해지거나 과소해질 수 있으며, 실무에서는 사실상 이 조정치에 대한 적용이 배제되고 있어 상대적으로 과다한 슬랙이 적용되고 있는 실정이다.

이와 같이 슬랙량이 지나치게 과다해지면 차륜과 레일과의 접선각이 커지게 되어 레일 편마모 촉진과 승월탈선우려 등 부작용이 예상되기 때문에 외국에서는 가능한 슬랙을 최소화하고 있다.

이에 본 연구에서는 슬랙량 산정에 대한 이론적 고찰과 급곡선부에서 슬랙을 배제한 실험시험을 통해 합리적인 슬랙 설정방안을 제시 하고자 한다.

* (주)석탑엔지니어링 궤도부 전문, 정회원
** 한국철도공사 선로공사부장, 정회원
*** (주)석탑엔지니어링 궤도부 사원, 정회원
**** (주)석탑엔지니어링 궤도부 사원, 정회원

2. 슬랙의 필요성

차량이 곡선을 안전하면서도 원활하게 통과하기 위해서는 각각의 차축이 곡선의 중심을 향하는 것이 이상적이지만, 실제로는 하나의 대차에 2축 또는 3축의 차축이 고정되어 있기 때문에 각 차축 모두가 곡선의 중심을 향할 수는 없으며, 차륜은 레일과 일정한 각도(접선각)를 갖고 접촉하게 된다. 이때, 고정축거가 클수록 이 각도는 커지게 되며 빠져거리면서 주행하게 됨에 따라 다음과 같은 문제점이 생긴다.

- ① 차량의 횡압이 증대한다.
- ② 궤간변위, 방향변위 등 궤도변위가 조장된다.
- ③ 레일 마모량이 증대한다.

따라서, 이러한 문제를 완화시키기 위해 곡선반경 및 고정축거를 고려하여 슬랙을 설정하게 되며, 이 때 고정축거가 큰 동력차가 기하학적으로 통과하기 위한 최소한의 여유(강제주행)와 차량이 곡선을 통과할 때 과도한 횡압이 생기지 않도록 하기 위한 여유(자유주행)를 동시에 고려하게 된다.

3. 슬랙량 산정의 이론적 고찰

슬랙량 산정시에는 전·후 후륜지와 내·외궤 레일과의 접촉상태가 주행 가능한 최소한의 경우와 최대한의 경우를 동시에 만족할 수 있도록 설정되어야 하며, 이에 대해 대차 형식별로 기하학적인 측면에서 이론적으로 고찰하면 다음과 같은 분석이 가능하다.

3.1 3축 대차의 경우

① 최소슬랙(강제주행의 경우)

궤간이 기하학적으로 가장 나쁜 조건에서 차량이 통과할 수 있는 한도를 고려하면 다음 그림과 같이 곡선외측의 전륜과 후륜 및 곡선내측의 중간륜만이 레일에 접촉하면서 주행하는 경우를 가정할 수 있으며 때문에, 슬랙(S_1)과 고정축거(B), 곡선반경(R)의 관계에서 $G/2$ 에 비해 R 이 무한히 크므로 $G/2$ 를 무시하면 최소한의 슬랙량 $S_1 \approx B^2/8R$ 가 된다. 그러나, 레일과 차륜 사이에는 가동할 수 있는 여유가 있기 때문에 그 여유량 만큼은 슬랙을 붙이지 않아도 된다. 따라서 이 식은 다시 $S_1 \approx B^2/8R - \eta$ 로 표현할 수 있게 된다. 여기서, η 는 차륜가동여유량의 절반에 해당하는 값으로서 통상 7mm를 적용하면 적정하다.

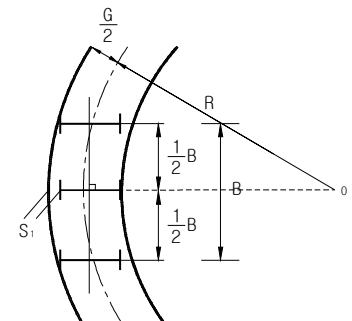


그림1. 3축차의 최소슬랙

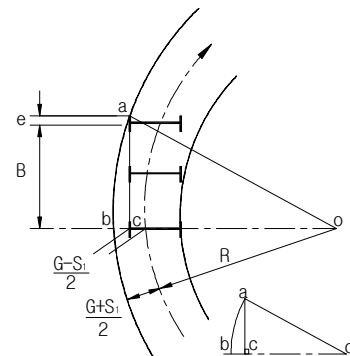
② 최대슬랙(자유주행의 경우)

가. 최후륜의 차축이 곡선중심을 향할 경우

3축 대차에서 최대 슬랙이 되는 조건 중에는 그림2와 같이 곡선외측의 전륜과 곡선내측의 최후륜이 각각 내·외궤 레일에 접촉하면서 주행하는 상태에서 최후륜의 차축이 곡선중심을 향할 경우를 가정할 수 있으며, 이 그림에서 $\overline{ao} = \overline{bo} = R + \{(G+S_1)/2\}$ 이므로 다음 식이 성립한다.

$$\left(R + \frac{G+S_1}{2}\right)^2 = \left(R + \frac{G-S_1}{2}\right)^2 + (B+e)^2$$

여기서 S_1 을 구하기 위해 상식의 좌변과 우변을 정리하면 그림2. 최후륜의 차축이 곡선중심을 향할 경우



$S_1 = \frac{(B+e)^2}{2R+G}$ 이 되며, 여기서 축거(B)는 차륜접촉길이 (e)에 비해 무한히 크고 곡선반경(R)도 궤간(G)에 비해 무한히 크기 때문에 e와 G를 무시하면, 결국 최대 슬랙량은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$S_1 \cong \frac{B^2}{2R}$$

나. 최후륜에서 축거(B)의 1/4 지점이 곡선중심을 향할 경우

3축 대차에서 최대 슬랙이 되는 조건은 상기 조건외에 그림 3과 같이 최후륜에서 축거(B)의 1/4 지점이 곡선중심을 향할 경우를 가정할 수 있으며, 이 그림에서 $\triangle aco$ 와 $\triangle cdo$ 는 $\overline{\omega}$ 를 공통변으로 하는 삼각형이므로, 여기서 $\overline{\omega}$ 를 구하면 다음 식이 성립한다.

$$\left(R + \frac{G+S_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{3}{4}B+e\right)^2 = \left(R + \frac{G-S_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{1}{4}B\right)^2$$

여기서, S_2 를 구하기 위해 상식의 좌변과 우변을 정리하면

$$S_2 = \frac{(3/4B+e)^2 - (B/4)^2}{2R+G}$$

이 되며, 여기서 e와 G를 무시하면, 최대 슬랙량 $S_2 \cong \frac{B^2}{4R}$ 이 되며, 이 값은 2축차의 경우에서는 최대 슬랙값이기도 하다. 또한, 상식 중에서 e와 G 및 $(B/4)^2$

$$\text{을 무시하면, } S_2' = \frac{(3/4B+e)^2 - (B/4)^2}{2R+G} \cong \frac{9B^2}{32R} \text{ 이 된다.}$$

이상에서와 같이 이론적인 최대슬랙에 대해 실제 슬랙은 이들 식으로 구한 값에 차륜가동여유 η 를 고려하여 단위를 정리하면, 각각 다음 식으로 표현된다.

$$\textcircled{1} S_{\max 1} = 1000 \times \frac{B^2}{2R} - \eta \text{ (mm)} \quad \textcircled{2} S_{\max 2} = 1000 \times \frac{9B^2}{32R} - \eta \text{ (mm)}$$

이상의 최대슬랙은 동일 고정축거에 대해 각기 다른 곡선반경에 대해 다음과 같은 결과를 얻게 된다. (단, $B=3.7\text{m}$, $\eta=7\text{mm}$)

$$\textcircled{1} S_{\max 1} = 1000 \times \frac{3.7^2}{2 \times 250} - 7 \cong 20\text{mm} \quad \textcircled{2} S_{\max 2} = 1000 \times \frac{9 \times 3.7^2}{32 \times 250} - 7 \cong 8\text{mm}$$

또한, $R=400\text{m}$ 및 $R=600\text{m}$ 일 경우에는

$$\textcircled{1} S_{\max 1} = 1000 \times \frac{3.7^2}{2 \times 400} - 7 \cong 10\text{mm} \quad \textcircled{2} S_{\max 2} = 1000 \times \frac{9 \times 3.7^2}{32 \times 400} - 7 \cong 3\text{mm}$$

$$\textcircled{1} S_{\max 1} = 1000 \times \frac{3.7^2}{2 \times 600} - 7 \cong 4\text{mm} \quad \textcircled{2} S_{\max 2} = 1000 \times \frac{9 \times 3.7^2}{32 \times 600} - 7 \cong 0\text{mm}$$

이와 같이 최대슬랙량 $S_{\max 1}$ 과 $S_{\max 2}$ 간에 많은 차이를 보이는 것에 대해 $S_{\max 1}$ 의 경우 축거(B)가 큰 3축차에서는 레일에서 차륜이 낙륜할 수 있을 정도로 궤간이 확장되어야 가능한 가정이므로 3축차에서는 현실성이 없는 이유로 축거가 짧은 2축차만 운행하는 노선에서는 최대슬랙량으로 고려할 수 있으나, 그 경우에도 3축차와 마찬가지로 슬랙량이 과다해지는 결과를 얻게된다.

따라서, 후술하는 2축차의 최대슬랙량 산정에 고려하는 공식은 이보다 작은 값을 유도하게 된다. 이상의 검토에서 $R=250\text{m}$ 곡선에 대해 최소슬랙이 0mm 최대슬랙 8mm이므로 이들의 평균값인 4mm를 적정 슬랙량으로 고려할 수 있음을 알 수 있다.

한편 $R=400\text{m}$ 곡선일 경우 최소슬랙은 -3mm가 되며 이때 최대슬랙은 +3mm이므로 이들의 평균값은 0mm가 된다. 고로, 슬랙적용이 불필요해지는 곡선반경은 3축차 운행노선에서 최소한 $R=400\text{m}$ 가 이에 해당된다고 볼 수 있다.

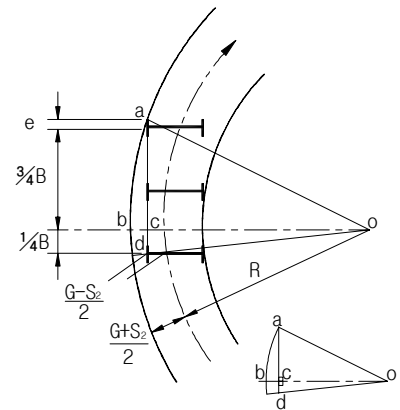


그림3. 최후륜에서 축거(B)의 1/4 지점이 곡선중심을 향할 경우

3.2 2축 대차의 경우

① 최소슬랙(강제주행의 경우)

2축차의 최소 슬랙은 차축의 가동여유가 전혀 없이 빠걱거리면서 운행하는 상태를 가정하면 차축과 차륜후렌지의 위치가 다음 그림에 나타난 것처럼 e만큼 어긋나게 된다. 여기서 e는 차륜후렌지가 레일측면에 접하게 되는 점과 차축 중심과의 거리로서, 차륜반경 $r=400\text{mm}$, 후렌지높이 $h=35\text{mm}$ 라 하면, $e = \sqrt{2r \cdot h} = \sqrt{2 \times 400 \times 35} \approx 170\text{mm}$ 가 된다.

따라서, 최소슬랙은 e값을 계수로 하여 $S_{\min} = e \cdot B/R = \sqrt{(2rh)} \times B/R$ 로 얻어지며, 여기에 차륜가동여유 η 를 고려하면 실제 슬랙은 $S_{\min} = \sqrt{(2rh)} \times B/R - \eta$ 이 된다.

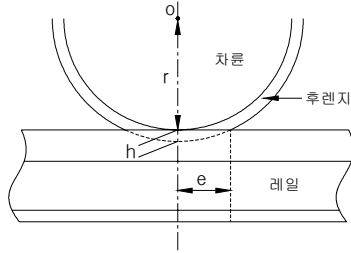


그림4. 차륜후렌지와 레일의 접촉

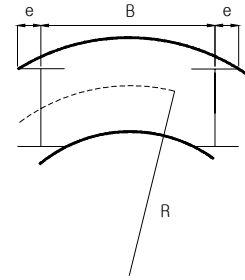


그림5. 2축차의 최소슬랙 평면형상

② 최대슬랙(자유주행의 경우)

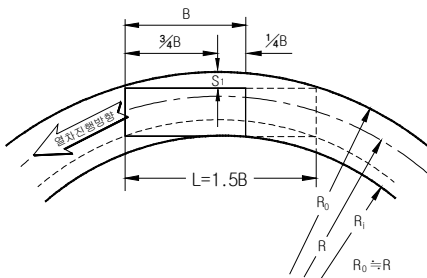
고정축거내의 여유를 가능한 작도록 고려하면, 그림6의 (a), (b)와 같은 상태를 가정할 수 있으며, 2축 대차가 곡선을 통과할 때 차축의 방향과 곡선중심 방향과의 관계를 보면 일반적으로 그림6의 (a)에 나타난 바와 같이 고정축거의 전축으로부터 3/4 거리에 있는 점에서 차축에 평행하게 그은 직선이 곡선중심과 일치하도록 되어있다. 전축의 외측 후렌지만이 외레일에 접촉하면서 주행하는 경우의 관계식은 $(L/2)^2 = R^2 - (R - S_1)^2$ 로 표현된다. 여기서, $R_0 \doteq R$ 이므로 이 식을 정리하면 $(L/2)^2 = (2R - S_1)S_1 \doteq 2RS_1$ 가 되므로 $S_1 = (L/2)^2 / 2R = L^2 / 8R$ 가 되며 차륜가동여유 η 를 고려하면 실제 슬랙은 $S_1 = (L^2 / 8R) - \eta$ 이 된다. 또한, 그림 (b)의 경우는 2축 대차가 곡선을 통과할 때 전륜의 외측후렌지와 동시에 후륜의 내측후렌지가 각각 외레 및 내레일에 접촉하면서 주행하는 경우이다.

전술한 바와 같이 고정축거의 전륜으로부터 3/4의 위치에서 차축에 평행하게 그은 직선이 곡선의 중심과 일치하도록 하여 후륜의 외측후렌지와 외레레일과의 간격 S를 구한다.

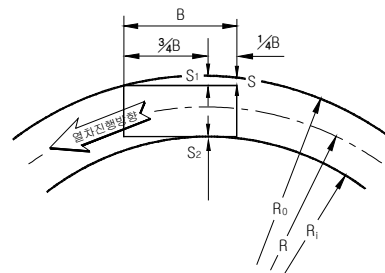
$$S_1 = \left(\frac{3}{4}B\right)^2 / 2R, \quad S_2 = \left(\frac{1}{4}B\right)^2 / 2R \quad \text{여기서, } R_0 \doteq R, \quad R_i \doteq R, \quad S = S_1 - S_2 \quad \text{이므로}$$

$$S = \left\{ \left(\frac{3}{4}B\right)^2 / 2R \right\} - \left\{ \left(\frac{1}{4}B\right)^2 / 2R \right\} = \frac{9B^2}{32R} - \frac{B^2}{32R} = \frac{8B^2}{32R} = \frac{B^2}{4R} \quad \text{이 되며,}$$

여기에 차륜가동여유 η 를 고려하면 $S = \frac{B^2}{4R} - \eta$ 가 된다.



(a)



(b)

그림6. 2축차의 최대슬랙

3.3 국유철도건설규칙상의 슬랙산정식

그림7 에서 차량의 전·후 고정축 중심점을 A와 B라 하고 차량 중앙점을 C, 곡선중심점을 O라 하면 C점의 종거는 근사식으로 $S_1 = \frac{L^2}{8R}$ 이 되며 이것을 이론적인 슬랙량 산정식으로 하고 있다.

여기서, $L = 3.75m + 0.6m = 4.35m$ 를 적용하면 $S_1 = \frac{L^2}{8R} = \frac{4.35^2}{8R} = \frac{2,365}{R} \approx \frac{2,400}{R}$ 이 되며, 여기에 선로유지보수실정을 고려하여 실용상 슬랙산정식으로 $s = \frac{2,400}{R} - S'$ (단, $S' = 0 \sim 15mm$)라 규정하고 있다.

여기서, L에 대해서는 7000호대 기관차를 대상으로 고정축거(B)를 3.75m, e를 0.6m (편측 0.3m)로 하여 4.35m를 적용한 것이며, 슬랙산정식 중에서 조정치(S')를 0~15mm로 한 근거는 다음과 같다.

즉, 차륜외면간 최대거리가 $1,356 + (34 \times 2) = 1,424mm$, 따라서 궤간 여유량은 $1,435 - 1,424 = 11mm$ 가 되며, 차량제작시 좌우동 여유량이 6~10mm이므로 최소치인 6mm를 취하면 $11 + 6 = 17mm$ 의 여유가 있게 된다. 여기서 궤간의 선로정비 규칙 최소치인 -2mm를 감안하면 $17 - 2 = 15mm$ 가 되어 이 값을 조정치(S')로 취한 것이다.

이상이 국유철도건설규칙상의 슬랙산정식 이론 근거이나 여기에는 다음과 같은 모순점이 있다.

첫째, 고정축거 L에 고려된 e값의 근사치는 앞에서 기술한바와 같이 0.34m(편측0.17m)에 불과할 뿐만아니라 통상 3축차에 대한 최소슬랙을 산정할 경우에는 이 값에 대한 고려가 불필요함에도 과다하게 0.6m를 적용하므로써 기본적으로 슬랙량이 과다하게 산출되는 결과를 초래하며,

둘째, 기본적으로 차륜가동여유값을 차인 하도록 하여야 하나 이를 선택적으로 차인하도록 하여 조정치 S'를 0mm를 선택할 경우에는 전향의 최대슬랙 산정값 보다 커지게 되고 S'를 15mm를 선택할 경우에는 반경 160m까지도 슬랙이 필요없게 되는 결과를 얻게 된다.

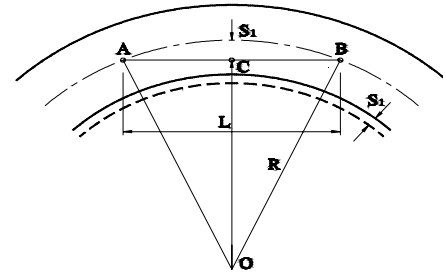


그림7. 슬랙

3.4 슬랙산정량 비교 분석

전향의 이론고찰과 국철의 산정식에 따라 3축차에 대한 슬랙량을 비교하면 다음 도표와 같이 대체로 이론고찰에 의할 경우 곡선반경이 클 수록 최대 최소값의 편차가 작아지는 반면 국철 산정식에 의할 경우 모든 곡선반경에 대해 일정한 편차를 나타냄에 따라 R=160m에서도 최소슬랙이 0이 되는 결과를 얻게 되는 것에 대해 현실적으로 3축차가 R=160m 곡선부를 원활히 통과할 것인가에 대한 의구심을 갖게 하여 산정식에 대한 합리성에 의문을 제기하게 된다. 그 이유는 3축차의 최소슬랙은 중간륜이 내측레일에 접촉하면서 동시에 전·후륜이 외측레일에 접촉하여 강제주행할 경우로서, 보기대차가 통과하기 위한 최소한의 궤간은 차륜외면간 최대거리 1,424mm에 곡율에 따른 보기대차 중심부에서의 종거 $S = L^2 / 8R = 4.04^2 / (8 \times 160) \approx 0.013m (= 13mm)$ 를 합한 1,437mm가 필요한데 이 수치는 정규궤간 수치 1,435mm를 2mm초과하여 마이너스 궤간이 되기 때문이다.

도표 1. 3축차에 대한 슬랙량 비교

(단위 : mm)

구 분		R=160	R=250	R=300	R=400	비 고
이론 고찰	최소 : $S = 1000 \times \frac{B^2}{8 \cdot R} - \eta$	4	0	(-1)	(-3)	B : 고정축거(3.7m 적용) η : 차륜가동여유(7mm)
	최대 : $S = 1000 \times \frac{9B^2}{32 \cdot R} - \eta$	17	8	6	3	
국철 산정식	$S = \frac{2400}{R} - S'$	최대	15	10	8	$S' = 0mm$ 적용시
		최소	(0)	(-5)	(-7)	$S' = 15mm$ 적용시
Note : ()내 수치는 계산값이며 실제적용은 0으로 가정함						

한편, 2축차에 대한 슬랙량을 비교하면 다음 도표와 같이 이론 고찰에 의할 경우에는 최대슬랙이 0에 가까운 R=250m에서 실제 차륜가동여유 축소량이 $L^2/8R=2.5^2/(8 \times 250)=3.1\text{mm}$ 이므로 이 때 이론상 최소슬랙량 보다 2mm정도의 여유를 갖게되어 궤간오차 -2mm를 감안하더라도 사실상 슬랙이 불필요하게 된다.

반면 국철의 경우에는 동일 곡선반경에서 최소슬랙 -5mm 최대슬랙 +10mm로서 편차가 과다한 관계로 평균값을 적용할 경우 약 3mm가 되나 실무에서는 통상적으로 조정치(S')를 고려하지 않고 최대슬랙을 적용하는 실정을 감안하면 상대적으로 궤간이 과다하게 확대되는 결과를 얻게 된다.

이것은 국철 산정식이 3축차의 경우와 2축차의 경우에 대해 구분없이 적용하고 있기 때문에 3축차의 경우에 비해 상대적으로 슬랙이 과다해지게 되는 것이다.

도표 2. 2축차에 대한 슬랙량 비교 (단위 : mm)

구분		R=150	R=200	R=250	R=300	비고
이론 고찰	최소 : $S = \sqrt{(2r-h)} \times B/R - \eta$	(-4.2)	(-4.3)	(-5.3)	(-5.6)	r : 400mm h : 35mm η : 7mm B : 2.5m
	최대(평균치) : $S = \frac{B^2}{4R} - \eta$	3.4	0.8	(-0.8)	(-1.9)	
국철	$S = \frac{2400}{R} - S'$	15	12	10	8	S' = 0mm 적용시
		0	(-3)	(-5)	(-7)	S' = 15mm 적용시

Note : ()내 수치는 계산값이며 실제적용은 0으로 가정함

4. 슬랙량 축소조정 실험시험

전항에서 슬랙산정식에 대한 이론적고찰을 통해 국철의 슬랙산정식에 의할 경우 통상 과다한 슬랙이 적용될 수 있음을 발견하였다. 이에 대해 한국철도공사에서는 합리적인 슬랙량 적용을 위해 호남선 논산~연산간 아호천 교량 A₂부근 R=400m 구간($\ell=300\text{m}$)의 상선은 슬랙이 없는 상태로, 하선은 국철 슬랙산정식에 따라 통상적인 최대슬랙량 6mm를 설정하여 시험운영중으로, 각 선로에 대한 유지보수실태와 주행안정성 등을 조사하기 위해 현장 실험시험을 시행하였다.

시험결과는 과거 일본에서 이와 동등한 목적으로 시행한 사례 결과에서 보는바와 같이 슬랙이 있는 경우에 비해 운중감소율이 약간 증가하거나 횡압이 약간 감소하는 것에 그치는 등 뚜렷한 변화를 보이지 않았으며 좌우진동가속도도 대체로 일정하게 나타났기 때문에 적어도 R=400m 곡선부에서 슬랙 배제에 따른 궤도안정성에 대해서는 특별한 문제는 없는 것으로 확인되었다.

유지보수실태와 관련해서는 슬랙이 없는 상선보다 오히려 6mm의 슬랙을 설정한 하선의 경우에는 상선에서 아직까지 나타나지 않고 있는 외계레일 편마모가 빠르게 진행되고 있는 것이 조사되었다. 특별히, 열차주행중 소음은 편마모가 진행되고 있는 하선의 경우를 포함해 상·하선 모두 매우 작게 느껴졌는데 이는 조사 당일의 우수가 레일에 윤활제 역할을 한 때문으로 추정되었다.



그림8. 슬랙 하선 횡압측정용 센서부착상태

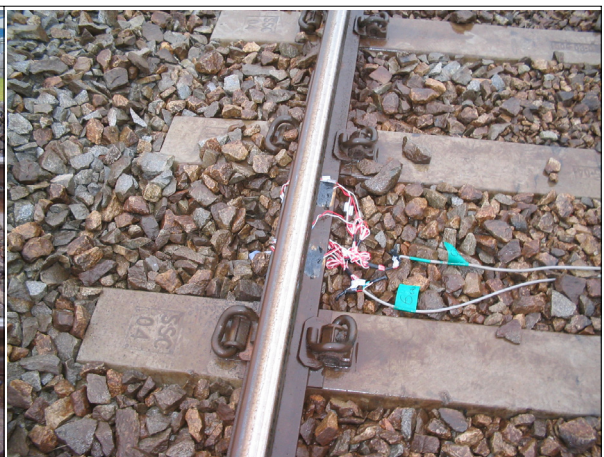


그림9. 슬랙 상선 횡압측정용 센서부착상태

5. 외국의 슬랙량 적용실태 분석

외국의 슬랙량 적용에 대해 살펴보면 도표 3과 같이 대체로 우리나라에 비해 축소하여 적용하는 경향이며, 적용방법도 우리나라와 같이 곡선반경마다 별도로 계산하여 세세히 적용하는 것이 아니라 몇 개의 그룹으로 분류하여 대표값을 적용하는 형태를 취하고 있다.

도표에서 살펴보면 슬랙을 적용하지 않는 제한곡선반경은 영국과 오스트리아의 경우는 약 200m이며 다음으로 독일이 300m, 프랑스가 600m의 순으로 나타나고 있다. 일본의 경우에는 반경 440m 이상 곡선까지는 슬랙을 적용하지 않고 있으며, 분기기내 슬랙적용에 대해서는 리드곡선반경이 200m 미만인 10# 분기기에 대해서는 5mm, 150m 미만인 8# 분기기에 대해서는 10mm를 적용하고 있으며 이는 우리나라의 경우에도 동일하다. 한편, 신간선의 경우에는 반경 300m 미만곡선에 한해 5mm의 슬랙을 적용하고 있다.

도표 3. 각국의 슬랙 적용 사례

구분	곡선반경	슬랙(mm)
독일	$R \geq 300m$	0
	$300 > R \geq 200$	5
	$200 > R \geq 150$	10
	$150 > R \geq 120$	15
프랑스	$150 > R \geq 100$	20
	$R \geq 600m$	0
	$600 > R \geq 400$	8
	$400 > R \geq 200$	18
영국	$200 > R$	28
	$R \geq 203m$	0
	$203 > R \geq 150$	6.4
	$150 > R \geq 110$	12.7
오스트리아	$110 > R$	19.25
	$150 \leq R < 200$	10
	$200 \leq R < 150$	15
일본	$R < 120$	20
	$R < 200$	20
	$200 \leq R < 240$	15
	$240 \leq R < 320$	10
	$320 \leq R < 440$	5

6. 결론

적정 슬랙량 적용을 위한 슬랙량 축소조정은 과거 일본에서 시험한 성과를 토대로 할 때, 레일 마모량과 궤도틀림진행이 억제됨에 따라 레일의 갱환주기, 궤간 및 방향정정 등 보수주기가 증가되고, 궤간 긴급정비값에 대한 여유가 생겨 탈선에 대한 보안도가 향상되며, 급곡선구간에도 PC 침목의 사용을 확대할 수 있어 경제적인 면에도 유리하다는 장점을 기대할 수 있게 한다.

따라서, 과다슬랙을 적용하기 보다는 가능한 슬랙을 축소 조정하여 적정슬랙을 적용하도록 하는 것이 바람직한 것으로 분석되었으며 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 3축차에서는 2축차와 달리 중간륜이 있어 이것이 최소 슬랙량을 결정하는 인자가 된다
- 최소 슬랙량 산정시 고려하게 되는 후렌지 접촉길이 e는, 후렌지 단면이 곡면으로 이루어져 있기 때문에 레일마모가 없는 정상적인 경우 후렌지가 접촉하는 위치는 레일 두정면의 코너부가 되기 때문에, 사실상 후렌지 접촉길이 e는 극히 미세하므로 무시할 수 있다.
- 국철의 슬랙 산정식에 따라 슬랙량 산정시 과다 슬랙을 적용하게 되는 주원인은, 실무에서 조정값의 적용이 거의 없기 때문으로 이를 선택이 아닌 필수 계산값으로 적용할 필요가 있다.
- 전항에서 기술한 최소슬랙량 산정이론에는 레일 편마모는 감안하지 않았기 때문에 허용마모량을 감안할 경우 운영중 슬랙량을 축소 조정할 수 있는 여유가 생긴다.
- 이론상 3축차가 운행하는 국철의 경우 반경 300m 이상 곡선에서는 슬랙이 불필요해지며 반경 250m 이상 300m 미만은 5mm, 150m 이상 250m 미만은 10mm, 150m 이하는 15mm의 슬랙 적용이 가능하다. 또한, 약 13mm의 레일 편마모 한도를 고려할 때 궤간의 최대치는 정규궤간에 25mm를 더한 1460mm를 초과하지 않도록 함이 타당하다. 또한, 2축차 전용노선인 경우에는 운행차종별 고정축거에 따라 구분하여 관리하여야 하나, 고정축거를 2.5m(새마을호 90계열 디젤기관차)로 할 경우, 전기한 평균슬랙량 산정식인 $S = B^2/4R - \eta$ 에 따라 산정시 반경 200m 이하 곡선에서만 슬랙이 필요하게 되므로 반경 150m~200m 는 5mm, 150m 미만은 10mm의 적용이 가능해진다.

참고문헌

1. 일본 토목관계기술기준 조사연구회 (2003), “철도에 관한 기술기준(토목편)”
2. Dr. Bernhard Lichtberger (2005), “Track Compendium”