

# 도시형 자기부상열차 굴절식 분기기의 선형 요구조건 분석

## Requirement Analysis of Geometry of Articulated Turnout for Urban Maglev

장승엽\*  
Jang, Seung Yup

황성호\*\*  
Hwang, Sung Ho

### ABSTRACT

For the commercialization of the urban maglev, an articulated turnout which consists of several segments of turnout girders and where switching is done by rotating those segments is under development. In this paper, to determine the alignment of this articulated turnout, the requirements for the alignment are analyzed. Requirements include: those for the levitation control and for the ride comfort. For the levitation control, rail joint width should be limited to a certain value, and for the ride comfort, the lateral acceleration and the time derivative of the lateral acceleration satisfy a guideline. According to these requirements, the alignment criteria are discussed.

### 1. 서론

도시형 자기부상열차의 실용화를 위해 분기용 거더가 여러 개의 세그먼트로 구성되어 각 세그먼트가 회전을 하면서 분기를 이루는 굴절식 분기기의 개발을 추진하고 있다. 본 논문에서는 이러한 굴절식 분기기의 선형을 결정하기 위해 선형 요구조건을 분석하였다.

### 2. 굴절식 분기기의 선형 요구조건

#### 2.1 굴절식 분기기 개요

굴절식 분기기는 아래 그림과 같이 여러 개의 직선 세그먼트(segment)로 구성되고 각 세그먼트의 연결부에서 피보팅(pivoting)되는 구조로 이루어진다.

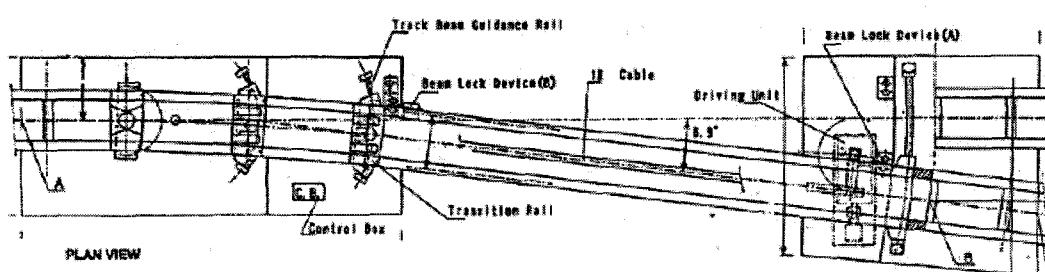


그림 1. 굴절식 분기기 개념도 (Linimo 분기기의 예)

\* 한국철도기술연구원, 궤도토목연구본부, 정희원

E-mail : [syjang@krri.re.kr](mailto:syjang@krri.re.kr)

Tel : (031)460-5302, Fax : (031)460-5814

\*\* 한국철도기술연구원

이 때, 각 세그먼트의 연결부를 이으면 일종의 완화곡선을 형성하게 되지만, 실제 차량은 직선의 세그먼트를 통과하면서 굴절부를 통과하므로 일반적인 WOR(Wheel on Rail) 시스템의 완화곡선 개념으로 굴절식 분기기의 선형을 결정하는 것은 어렵다. 즉, 굴절식 분기기의 선형은 사용성의 한계를 고려하여 굴절각과 세그먼트의 길이의 한계를 정하고 이 조건을 만족하도록 최적화되어야 한다.

## 2.2 분기장과 분기각의 관계

위의 그림 1과 같이 세 개의 세그먼트로 구성할 때, 각 세그먼트의 길이를  $L_1, L_2, L_3$ , 각 세그먼트 연결부(pivot point)에서의 굴절각을  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ , 총 분기각도를  $\theta_t$ 라 할 때( $\theta_t = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$ ), 분기장  $L$ , 세그먼트 길이, 분기각과의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \quad (1)$$

$$H = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2)$$

여기서,  $H$ 는 본선과 분기선의 이격거리를 나타내는 것으로 이것은 궤도중심간격과 건축한계 및 차량 한계에 의해 이미 결정되어 있는 값(즉, 상수)이다. 위 식에서 분기장  $L$ 을 최소화하기 위한 조건은 분기각  $\theta_t$ 를 최대한 크게 하는 것임은 자명하다. 따라서, 개별 굴절각의 한계값을  $\theta_{\text{lim}}$ 이라 하면,

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \theta_2 = \theta_3 = \theta_{\text{lim}} \\ \therefore \theta_t &= \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 3\theta_{\text{lim}} \end{aligned} \quad (3)$$

이 되어야 한다.

## 2.3 굴절각 한계 검토

굴절각의 한계를 정하기 위해서는 사용성(serviceability)의 한계를 먼저 결정해야 한다. 사용성은 기존 WOR 시스템에서 검토하는 승차감(ride comfort) 외에 자기부상열차의 특성을 고려하여 부상제어의 측면을 추가로 고려해야 한다. 즉, 사용성 한계는 승차감 한계(ride comfort)와 부상제어 한계(levitation control)의 두 가지 측면에서 검토되어야 한다.

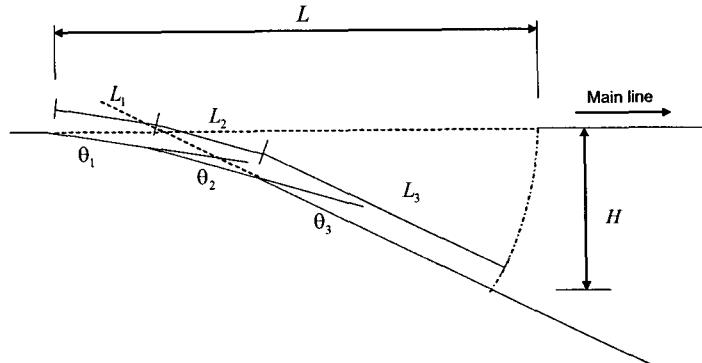


그림 2. 분기기의 선형

### (1) 부상제어 한계

각 Pivot point의 레일 이음매에서 pivoting angle에 의해 간격이 커지게 된다. 현재 개발중인 자기부상열차의 레일 이음매의 최대 허용간격은 두 개의 부상공극센서 간의 거리가 160cm 일 때 최대 80mm로 제시되고 있다. 그러나 실제 부상제어에 있어서는 어느 정도 안전율을 고려해야 하므로 설계는 이 한계치의 50%인 40mm를 기준으로 한다. 이음매 간격과 굴절각의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta = \frac{G}{2} \sin \theta \approx \frac{G}{2} \theta \quad (3)$$

여기서,  $\Delta$  : 이음매 간격,  $G$  : 궤간. 따라서 40mm와 궤간 1850mm에 대한 굴절각의 한계치는  $2 \times 40 / 1850 = 0.043 \approx 2.48^\circ$ 가 된다.

## (2) 승차감 한도 - 횡방향 가속도와 횡방향 가속도의 시간변화율

승차감의 한도는 다음의 두 가지 한도를 고려해야 한다.

- 제1한도 : 횡방향 가속도(lateral acceleration)에 의한 승차감 한도
- 제2한도 : 횡방향 가속도의 시간변화율(jerk)에 의한 승차감 한도

일반적으로 적용되고 있는 횡방향 가속도와 횡방향 가속도의 시간변화율에 대한 승차감 한도는 다음과 표 1과 같다.

표 1. 승차감 한도 비교

Items		WOR (UIC703R[1])			MAGLEV		Remarks
		Std.	Max.	Exc.	People Mover (ASCE) [2]	Transrapid [3]	
Max. acceleration [ $m/s^2$ ]	Vertical	0.2	0.3	0.4	1.0 (Crest) 4.0 (Sag)	0.6 (Crest) 1.2 (Sag)	
	Lateral	0.53	0.67	0.86	2.5	1.5	
	Longitudinal				2.5	1.5	
Max. jerk [ $m/s^3$ ]	Vertical				3.0		
	Lateral	0.17a 0.33b	0.47a 0.6b	0.6a -	2.5		
	Longitudinal				2.5		
Braking acceleration [ $m/s^2$ ]	Max.				-2.5		
	Emergency				-3.5		

주) \* Category I (max. speed 80~120km/h)

a in transition in constant curvature variation

b in transition in not constant curvature variation

위의 표에서 알 수 있듯이 승차감 기준은 WOR과 Maglev가 현저한 차이를 보이고 있다. 이와 같이 나타나는 이유는 현재로서는 분명하지 않지만 현가지 분명한 것은 고속일수록 한도가 더욱 엄격해진다는 점이다. 상위레벨 요구사항에서 보다 상세한 검토가 필요하겠지만 여기서는 우선 중저속 Maglev인 People Mover의 기준을 적용하기로 한다. 즉,

$$\text{횡방향 가속도 한도(lateral acceleration)} = 2.5m/s^2 (0.25g)$$

$$\text{횡방향 가속도의 시간변화율(jerk)} = 2.5m/s^3 (0.25g/s)$$

그림 3에서 차량이 등속으로 굴절부를 통과할 때 속도의 크기는 변화가 없고 방향만이 변화하게 됨을 알 수 있으며, 이 때 속도변화량은 다음과 같이 각도변화로부터 산정할 수 있다.

$$|\vec{\Delta V}| = |\vec{V}| d\alpha \quad (4)$$

여기서,  $\alpha$  : 차량 부상제어 모듈이 굴절부를 통과하면 발생하는 각도 ( $0 \leq \alpha \leq \theta$ ). 또한, 그림 3에서 차량 편측 부상제어 모듈의 길이를  $L_t$ 라고 할 때, 다음의 관계가 성립함을 알 수 있다.

$$\frac{\sin \alpha}{x} = \frac{\sin(\pi - \theta)}{L_t} = \frac{\sin \theta}{L_t} \quad (5)$$

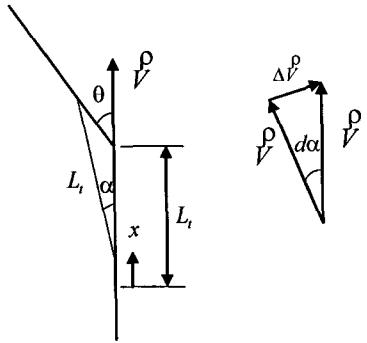


그림 3. 굴절각 개념도

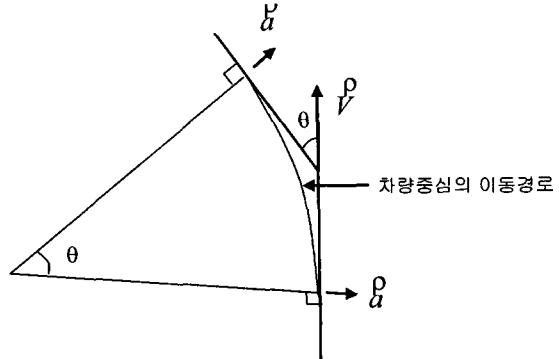


그림 4. 횡방향 가속도의 변화

위 식에서  $\alpha$ ,  $\theta$ 는 매우 작은 값이므로, 다시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\alpha}{x} = \frac{\theta}{L_t} \quad \text{즉}, \quad \frac{d\alpha}{dx} = \frac{\theta}{L_t} \quad (6)$$

따라서, 횡방향 가속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$|\vec{a}| = \left| \frac{d\vec{V}}{dt} \right| = \frac{|\vec{V}| d\alpha}{dt} = |\vec{V}| \frac{d\alpha}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{V^2 \theta}{L_t} \quad (7)$$

위 식에서 횡방향 가속도 역시 크기는 일정하게 유지됨을 알 수 있으며, 그림 4에서 가속도의 방향만 달라짐을 알 수 있다. 또한 그림 4에서 차량 중심의 이동경로를 원곡선으로 가정하면(실제로는 원곡선과 다소 차이가 있으나 근사적으로 원곡선으로 가정함) 횡방향 가속도의 변화각도 역시  $d\alpha$ 가 됨을 쉽게 유추할 수 있다. 따라서, 횡방향 가속도의 시간변화율은 다음과 같이 산정된다.

$$|\vec{J}| = \left| \frac{d\vec{a}}{dt} \right| = \frac{|\vec{a}| d\alpha}{dt} = \frac{V^2 \theta}{L_t} \frac{\theta}{L_t} V = \frac{V^3 \theta^2}{L_t^2} \quad (8)$$

상기 결과에 따라 횡방향 가속도 및 횡방향 가속도의 시간변화율은 차량 편측모듈의 길이, 굴절각, 그리고 열차속도에 따라 달라짐을 알 수 있다. 차량의 편측모듈의 길이  $L_t$ 는 10.74m로 가정하고, 횡방향 가속도와 가속도의 시간변화율(jerk)을 열차속도 및 굴절각에 따라 나타내면 그림 5와 6과 같다.

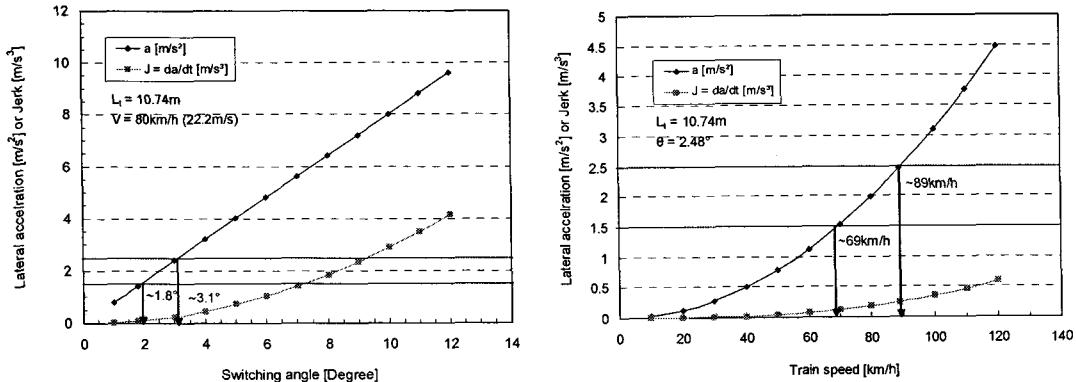


그림 5. 굴절각 및 주행속도에 따른 횡방향 가속도와 가속도 시간변화율

그림 5에서 승차감 기준은 횡방향 가속도의 시간변화율 보다는 횡방향 가속도에 의해 지배되는 것으로 나타났으며, 차량 부상제어모듈의 길이를 10.74m, 열차속도를 80km/h로 할 경우 횡방향 가속도의 한계  $2.5\text{m/s}^2$ 로 할 경우 굴절각은 약  $3.1^\circ$ 정도로 이음매 간격에 의한 한계치보다 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 6에서 같은 조건에서 이음매 간격을 만족하는 굴절각  $2.48^\circ$ 를 적용할 경우 열차속도는 약 90km/h까지 주행이 가능한 것으로 나타났다. 하지만 열차통과속도는 굴절부 통과에 따른 횡가속도 외에도 segment 길이 등 여러 가지 조건을 고려하여 결정해야 하므로 실제 주행가능속도는 이보다 작아질 것으로 예상된다. 이상 설명한 결과는 횡방향 가속도 기준을  $2.5\text{m/s}^2$ 을 적용한 것으로 이 값은 차량 개발 시 목표 승차감 기준에 따라 달라질 수 있다.

## 2.4 세그먼트 길이 검토

### (1) 세그먼트 최소길이

그림 2와 같은 굴절식 분기기에서 제3 세그먼트가 분기선과 직선으로 결합되는 것으로 하면 제3 세그먼트의 길이를 가장 길게 하는 것이 곡선부의 길이를 최소화하는 데 유리함을 알 수 있다. 식(1)과 식(2)에 따라 아래와 같이 주어진다.

$$L = (L_1 + L_2) + \frac{H - L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)} \quad (9)$$

따라서, 위 식에서 분기장  $L$ 을 최소화하기 위해서는  $L_1 = L_2 = L_{\lim}$ 이 되어야 한다. 여기서, 세그먼트 길이 한계는 분기기의 곡선부 통과속도와의 관계를 통해 살펴볼 수 있다. 다음과 같이 3개의 세그먼트를 갖는 굴절부 분기기에서 제1, 제2 세그먼트 구간을 곡선부로 하면 그 곡선은 3개의 굴절점을 지나는 원곡선으로 근사할 수 있다 (그림 6 참조). 이렇게 가정하면 그림 6에서 곡선반경  $R$ 은 세그먼트 길이( $L_1 = L_2 = L_{\lim}$ )와 굴절각( $\theta$ )과 다음과 같은 관계에 있음을 알 수 있다.

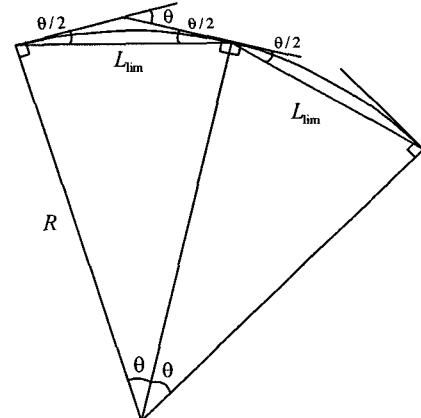


그림 6. 분기기 곡선부의 선형

$$L_{\lim} = R \theta \quad (10)$$

따라서 곡선부 통과 시의 횡방향 가속도는 캔트를 설정하지 않는 것으로 할 때 다음과 같이 구할 수 있다.

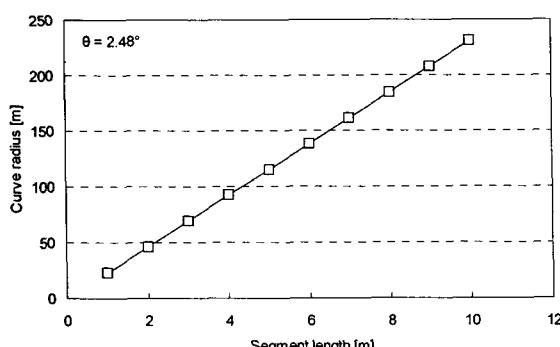


그림 7. 세그먼트 길이와 곡선반경

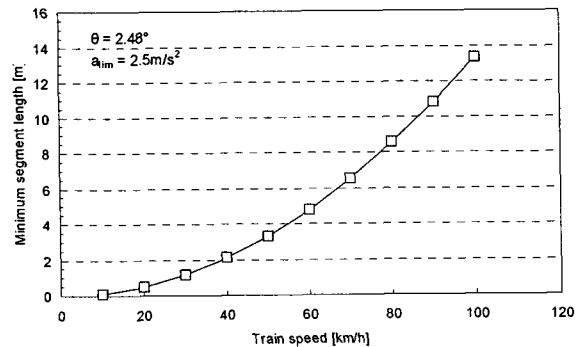


그림 8. 열차속도에 따른 세그먼트 최소길이

$$a = \frac{V^2}{R} = \frac{V^2}{L_{\lim}/\theta} = \frac{V^2\theta}{L_{\lim}} \quad (11)$$

위 식에 따라 굴절각을  $2.48^\circ$ 로 할 경우 세그먼트 길이에 따른 곡선반경을 계산해 보면 그림 8과 같이 구할 수 있다. 또한 횡방향 가속도의 한계값을  $2.5m/s^2$ 로 하면 주행속도에 따른 세그먼트 최소길이를 그림 9와 같이 구할 수 있다.

그림 8에 따르면 굴절각  $2.48^\circ$ 일 때 최소곡선반경  $60m[4]$ 를 만족하는 최소 세그먼트의 길이는  $2.6m$ 가 된다. 그림 9에서 분기 통과속도를  $50km/h$ 로 할 때 최소 세그먼트 길이는 약  $3.34m$ 가 됨을 알 수 있다.

## (2) 세그먼트 최대 길이

세그먼트의 최대 길이는 선형요건보다는 분기거더가 설계하중을 충분히 견딜 수 있고 거더의 처짐과 고유진동수가 열차의 부상제어에 문제가 없는 범위에 있도록 해야 한다. 분기거더의 설계하중, 처짐기준 및 고유진동수 범위 등 부상제어에 관한 요구사항 등을 추후 설계기준에서 제시될 예정이다.

## 2.5 분기기 선형기준

이상 검토한 바에 따라 선형기준은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 1) 굴절각은  $2.48^\circ$ 를 초과해서는 안된다.
- 2) 분기기 세그먼트 최소길이는 다음에서 정하는 값 이상으로 한다.

$$L_{\min} = \frac{V^2\theta}{32.4}$$

여기서,  $V$  : 열차통과속도( $km/h$ )

$\theta$  : 굴절각(radian),  $1^\circ = 0.01745$  radian

## 3. 결론

본 연구에서는 굴절식 분기기의 선형을 결정하기 위해 선형 요구조건을 분석하였다. 요구조건은 크게 부상제어에 관한 요구조건과 승차감에 관한 요구조건으로 나눌 수 있다. 부상 제어를 위해서는 레일 간 이음매 간격이 일정 크기 이하로 유지되어야 하며, 승차감에 관해서는 굴절부에서의 횡가속도와 횡가속도의 시간변화율이 정해진 기준을 만족하도록 해야 한다. 이러한 각 요구조건에 따라 분기기 선형조건을 분석하여 제시하였다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통기술연구개발사업의 일환으로 도시형 자기부상열차 실용화 사업을 통해 수행되었으며 재정적 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. UIC 703R, Layout characteristics for lines used by fast passenger trains, UIC leaflet, 2nd ed.
2. Urban Maglev Technology Development Program, Colorado Maglev Project, Final Report, Federal Transit Administration, Jun. 2004.
3. Transrapid 기술자료.
4. 도시형 자기부상열차 건설규칙(안), 도시형 자기부상열차 실용화 사업단, 2007.