

## 증속에 따른 고속철도 궤도구조물 핵심설계인자 검토

### Review on Design Parameters of High Speed Railroad Track Structure according to Speed-up

박영곤\*<sup>†</sup>, 윤희택\*, 엄기영\*, 홍철기\*\*

Young-Kon Park\*<sup>†</sup>, Hee-Taek Yoon\*, Ki-Young Eum\*, Chul-Kee Hong\*\*

**Abstract** Korea efforts to improve the speed of high-speed rail like China, Europe and Japan. For each country, as well as infrastructure such vehicles, especially the track structures like track, roadbed, bridge, tunnel have been checked to support reliable service for high-speed driving of railroad vehicle. In research on 400km/h high-speed railroad infrastructure started after 2010, we are building a test-bed for some sections of Honam high-speed railroad, and we have examined key design factors in track structures with increased speed. In this study, the additional key design parameters in order to improve the speed of railroad including domestic and international high-speed railroad in operation, are derived and research topics of track structures for 400km/h or more are comprehensively investigated.

**Keywords** : high speed railroad, track structure, design core parameter

**초 록** 고속철도의 속도향상 노력은 유럽과 일본 등 철도선진국은 물론 후발주자인 한국과 중국에 이르기까지 모두 경쟁적으로 하고 있다. 이에 각 국은 차량뿐만이 아니라 인프라, 특히 궤도구조물의 고속에 대한 안정적인 서비스 지원을 위해 선형, 궤도, 토공, 교량, 터널 등에 대한 안정성을 전반적으로 점검하고 이의 성능을 지속적으로 보완하고 있다. 2010년도부터 시작된 400km/h급 고속철도 인프라 연구에서는 현재 구축중인 호남고속철도 일부 구간을 테스트베드로 지정하고, 증속에 따른 핵심설계인자를 선정하여 현장 센서 매설과 함께 궤도구조물의 안정성을 검토하고 있다. 따라서 본 연구에서는 현재 진행중인 핵심설계인자를 포함하여 국내외적으로 운영되고 있는 고속철도의 속도향상을 위해 필요한 궤도구조물의 추가적인 핵심설계인자를 도출하였고, 400km/h 이상의 열차속도에 따른 궤도구조물의 기술연구항목을 종합적으로 검토하였다.

**주요어** : 고속철도, 궤도구조물, 핵심설계인자

## 1. 서론

최근 철도 선진국들의 최고속도 향상 경쟁에 의해 프랑스, 일본, 중국 등에서 열차속도 400km/h 이상으로 시험운행 및 철도 인프라 기술개발을 하고 있다. 국내는 고속철도 차량의 속도향상을 위해 400km/h급 HEMU-430X 개발 및 시험운행을 하고 있으며, 400km/h급 고속철도 인프라 기술개발 및 선로구조물 설계기준 연구를 수행 중이다. 또한 최고속도 향상을 위한 차량 개발을 위해 레일방식 500km/h(HEMU-500X)급 초고속철도 핵심기술 개발 연구도 진행 중이다.

† 교신저자: 한국철도기술연구원 고속철도연구본부([ykpark@krri.re.kr](mailto:ykpark@krri.re.kr))

\* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부

\*\* (주)도화엔지니어링

이에 430km/h 이상 그리고 500km/h대의 고속철도 선로구축물 기술 연구 개발사업의 추진이 필요하며, 이를 위해 현재 수준의 현황 조사와 국내 및 국외 고속화 R&D 동향 파악을 통하여 향후 초고속화 선로구축을 위한 핵심개발 연구기술의 도출이 필요하다.

본 연구에서는 국내·외에서 연구 수행한 결과를 바탕으로 고속철도의 열차속도를 500km/h 이상으로 향상시 열차속도에 민감한 주요 인자들을 선형, 궤도, 흙구조물 분야에서 제한적으로 선정하였고, 각 인자들에 대한 열차속도와의 상관성 및 열차속도 향상시 요구조건들을 검토하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 곡선반경

“철도의 건설기준에 관한 규정”에서는 제6조 곡선반경에 대해 설계속도에 따라 다음 표의 값 이상으로 요구하고 있으며 이 이외의 값은 다음의 공식으로 산정토록 하고 있다.

$$R \geq \frac{11.8V^2}{C_{max} + C_{d,min}}$$

여기서, R:곡선반경(m), V: 설계속도(km/h),  $C_{max}$ : 최대 설정캔트(mm),  $C_{d,min}$ : 최대 부족캔트(mm) 이다. 이 식에 의하면 곡선반경은 열차속도의 제곱에 비례하고 최대캔트 및 최대부족캔트 합에 반비례한다. 콘크리트궤도의 최대캔트는 180mm, 최대 부족캔트 130mm로 규정에서 제시하고 있다.

곡선반경은 속도의 제곱에 비례하기 때문에 속도가 500km/h일 경우 9,520m에 해당한다(Fig. 1 참조). 따라서 이 경우 국제적으로 적용되는 이론식을 이용하여 초고속 조건에서 곡선반경을 계산하였으나, 단계적 증속에 의한 차량과 선로구축물의 모니터링과 안전성 평가가 필요하다.

Table 1 Minimum radius of curvature for high speed railroad line

설계속도 V(km/h)	최소 곡선반경(m)	
	자갈도상 궤도	콘크리트도상 궤도
350	6,100	4,700

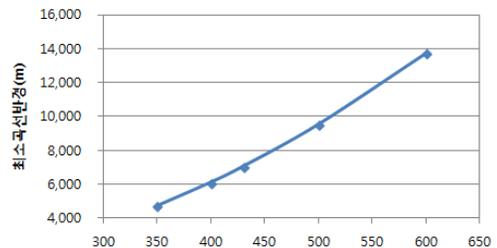


Fig.1 Velocity vs. minimum radius of curvature

### 2.2 완화곡선장

“철도의 건설기준에 관한 규정”에서는 제8조 제3항에서 완화곡선의 길이를 캔트 변화량에 대한 배수와 부족캔트 변화량에 대한 배수를 활용한 다음의 값 중 큰 값 이상으로 요구하고 있다.

$$L_T = C_1 \Delta C, \quad L_T = C_2 \Delta C_d$$

여기서  $L_{T1}$ 은 캔트 변화량( $\Delta C$ )에 대한 완화곡선 길이(m),  $L_{T2}$ 는 부족캔트 변화량( $\Delta C_d$ )에 대한 완화곡선 길이(m)이다. 국내 완화곡선 길이 설정시 부족캔트 변화량 시간변화율 최대값은 45mm/초 및 캔트 시간 변화율 최대값 38mm/초이다.

- 캔트 변화량에 대한 배수:  $C_1 = \frac{V}{3.6} \left( \frac{dC}{dt} \right)^{-1} = \frac{7.31V}{1000}$
- 부족캔트 변화량에 대한 배수:  $C_2 = \frac{V}{3.6} \left( \frac{dC_d}{dt} \right)^{-1} = \frac{6.18V}{1000}$

완화곡선장은 Fig.2와 같이 열차속도에 따라 선형적으로 증가하기 때문에 단계적인 증속에 의한 차량과 선로구축물의 모니터링 및 안전성 평가가 필요하다.

**Table 2** Minimum length of transition curve of high speed railroad line

설계속도 V(km/h)	자갈도상 궤도	콘크리트도상 궤도
350	6,100	4,700

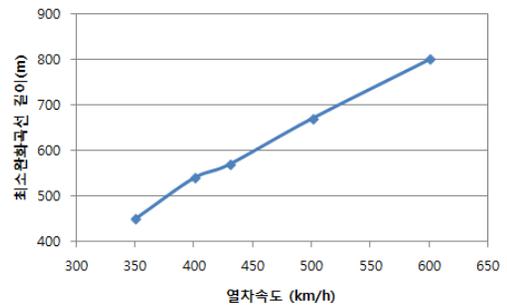


Fig.2 Velocity vs. minimum length of transition curve

### 2.3 궤도중심간격

국내의 고속철도 궤도의 중심간격은 경부고속철도의 경우 5.0m에서 호남고속철도 4.8m 그리고 수도권고속철도의 경우 4.5m로 축소되었다. 이에 “철도의 건설기준에 관한 규정”에서는 설계속도에 따라 최소 중심간격을 조정하여 국제적인 경쟁력을 확보토록 하고 있다.

**Table 3** Track spacing according to design speed

설계속도 V(km/h)	궤도의 최소 중심간격(m)
250 < V ≤ 350	4.5
150 < V ≤ 250	4.3

유럽철도연맹(UIC)의 2001년도 고속철도 설계사양에 대한 보고서에서는 최고운행속도 300km/h 이상인 노선에서 유럽의 각 국가별로 각기 다른 선로중심간격을 제안하고 있으며, 다. 유럽철도규격인 TSI에서는 선로중심간격과 관련된 기준조항은 최대 4.5m이다.

**Table 4** Suggestion of track spacing to maximum service speed (UIC, 2001)

최고운행속도	궤도중심간격 제안	차량이격	국가 및 차량 비교
300km/h	4.2m	1.3m	- 프랑스 TGV
	4.3m	1.4m	- 스페인 AVE
	4.5m	1.4m	- 독일ICE3
	5.0m	-	- 이탈리아
350km/h	4.5m	1.6m	- 프랑스
	4.7m	1.6m	- 독일, 스페인
	5.0m	-	- 이탈리아

**Table 5** Track spacing of TSI (Technical Specification for Interoperability)

차량의 최고허용속도, V	궤도 중심간격
230km/h < V ≤ 250 km/h	4.0 m
250km/h < V ≤ 300 km/h	4.2 m
V > 300 km/h	4.5 m

열차속도 증속시 선로중심간격 산정은 열차속도와 상관관계를 가지는 충격압력(Impulsive Pressure)과 선로변 환경에 영향을 미치는 열차풍의 산출이며 또한 승객이 느끼는 이명감의 조절이 중요하다. 따라서 궤도의 중심간격 결정은 선로에서 운행될 차량의 특성인자(형상 등)와 테스트베드에서의 시험이 중요하므로 차량분야와의 협의에 의한 최적화 연구가 필요하다.

## 2.4 동적하중

KR CODE 2012에 의하면 동적충격하중(DAF)은 동적 충격의 크기를 결정하기 위해 통계학적인 접근을 이용한 유럽의 Eisenmann식을 채택하였다. 이 식은 열차속도, 궤도 품질 및 신뢰구간에 좌우되는 표준편차의 증가율에 의해 동적하중이 산정된다.

$$DAF = 1 + t\Phi\left(1 + 0.5 \frac{V-60}{190}\right), \quad \text{열차속도: } 60 < V \leq 300 \text{ km/h}$$

동적충격계수는 각 나라에서 선로 실내시험, 현장시험 등에서 측정 데이터를 기반으로 제시되어 왔다. 각 나라의 충격계수는 다음과 같다.

**Table 6** Impact factor suggested by foreign countries

충격계수 제안	동적 충격 계수	
AREA	$= 1 + 5.21 \frac{V}{D}$	V: 열차속도 (km/h) D: 차륜 지름(mm)
Eisenmann	$= 1 + \delta \cdot \eta \cdot \gamma$	$\delta$ : 선로상태계수 $\eta$ : 속도계수, $\gamma$ : 통계안전계수
ORE	$= 1 + \alpha' + \beta' + \gamma'$	$\alpha' \beta'$ : 충격계수의 평균값 $\gamma'$ : 충격계수의 표준편차

궤도의 동적하중은 궤도구조의 구조안전성 계산시 하중산정을 위한 인자로 열차증속에 의한 궤도단면설계의 핵심사항이다. 국내에서 사용하는 Eisenmann 충격계수식은 프랑스 차량을 도입하여 운영하는 경부고속철도 건설시 유럽에서 도입되었으나 열차속도 300km/h이내의 한계조건을 가지고 있다. 국내 충격계수식이 열차속도 300km/h에서 적용해야 하는 한계로부터 국내에서 R&D연구로 시험열차 HEMU430X의 충격계수를 연구 중에 있으나, 500km/h급 열차를 새로 개발하는 경우 차량특성이 반영된 동적충격하중식의 검증 또는 개발이 필요하다.

## 2.5 노반허용침하

철도설계기준(노반편)은 콘크리트 궤도에서의 쌓기 층 허용잔류침하량은 30mm로 노반 인수인계 후 예상되는 원지반 침하량과 성토체 침하량 및 궤도구조에서의 침하량(총합 25mm), 그리고 열차하중에 의한 침하량(5mm로 가정)을 모두 포함한다. 또한 분지모양으로 잔류침하가 발생할 경우 큰 종곡선 반경으로 보정되는 것이 허용될 수 있으므로 경사부를 ra (보정된 종곡선 반경(m))가  $0.4 \times V^2$  (V는 설계속도, km/h)보다 클 경우, 추가 검토를 통해 잔류침하량을 60mm까지 허용할 수 있다. 콘크리트궤도를 부설하는 다른 국가들의 기준들을 살펴보면 독일 DB기준은 국내와 동일하며 그 외 각국의 침하량 기준은 다음과 같다.

**Table 7** Settlement criteria suggested by foreign countries

독일	일본	대만
궤도구축 후 허용잔류침하량 15~25mm 20m 이상 균등침하시 30mm까지 허용	궤도구축 후 10mm이하/10년 최대잔류침하량 30mm 굴절각 3/1000이내	10mm/20m

노반의 허용 잔류침하량은 흙노반 건설 초기의 급격한 침하 발생이후 개통 이후는 보통 서

서히 침하가 진행되어 수렴되는 것으로 보고되고 있다. 따라서 서서히 발생하는 균등침하의 문제보다는 국부침하나 허용탄성침하가 차량의 고속주행에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 향후에는 구축하는 상시 모니터링 시스템을 이용하여 500km/h급 개발열차 운행에 대한 노반허용침하량의 안전성 확인 및 필요시 보완이 필요하다.

### 3. 결 론

열차속도 향상을 위한 기술인자는 선형, 궤도, 노반 분야 중 일부만을 검토, 제시하였으며, 상기 인자 이외에도 교량, 터널 등 주요한 인자들이 다수 있지만 여기서는 5개 항목만을 제시하였다.

앞에서 언급된 바와 같이 곡선반경, 속도증가에 따라 선형적으로 증가하기 때문에 단계적인 증속에 의해 차량과 선로구축물의 모니터링 및 안전성 평가가 필요하며 이를 통해 증속에 따른 적정한 길이선정이 요구된다. 또한 궤도중심간격도 350km/h까지 4.5m 간격만을 제시하였지만 열차교행시 발생하는 열차풍과 승객의 이명감 등 차량 인터페이스와 연계하여 검토되어야 할 인자가 다수 존재하기 때문에 이에 대한 체계적인 연구가 필요한 실정이다. 궤도의 동적하중은 국내에 적용되는 충격계수식이 300km/h의 속도 내에서 적용되고 있기 때문에 그 이상의 속도에서의 적용식의 검증 및 개발이 필요하며, 노반허용침하량 역시 각 국의 기준이 상이한 바 증속에 따라 합리적인 한계값을 설정하는 것이 중요하다.

국내의 고속철도는 이제 과거의 300km/h대에서의 “고속”이라는 개념에서 400km/h대의 “초고속”의 개념으로 옮겨가고 있다. 따라서 차량의 속도뿐만 아니라 차량을 안전하게 운행할 수 있도록 하는 인프라, 특히 궤도구조물이 중요함을 다시한번 인식하고 안전한 초고속 철도시대를 위해 새로운 연구개발 준비가 필요하다.

### 감사의 글

이 논문은 국토해양부에서 지원한 "400km/h급 고속철도 인프라 시범적용 기술개발" 과제의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- [1] Research on Optimum Speed for High Speed Lines volume 1(2012), UIC
- [2] ENV 13803-1, Juillet (2003), Paramètres de conception du tracé de la voie-Ecartement 1435mm et plus large, Partie I: Voie courante.
- [3] 해설 철도에 관한 기술기준(토목편)
- [4] KR-CODE 2012, 한국철도시설공단(2012.12.5)
- [5] 선로유지관리지침, 한국철도시설공단(2012.12.31)
- [6] 철도설계기준(노반편), 한국철도시설공단(2011.5)
- [7] 철도 구조물 등 설계 표준.동해설 - 변위제한(2006.2)