

# 고속철도 건설기술 선진화를 위한 기준개선 방향

## Improvement of Design Criteria for the Technical Advancement of High-Speed Railway Construction



강재윤\*

\* 한국건설기술연구원 인프라구조연구실 수석연구원

### 1. 서론

오늘날 건설산업의 세계적인 기조는 녹색건설(Green Construction)로 빠르게 변화하고 있으며, 녹색교통을 위한 기반시설로서 철도건설에 대한 관심과 투자가 집중되고 있다. 세계적으로 저탄소 녹색교통 수단으로서 고속철도에 대한 관심이 고조되어 글로벌 철도시장의 규모가 대폭 확대될 것으로 예상되며, 현재도 대규모 고속철도 프로젝트가 거론되고 있는 상황에서 국제시장에서 국내 철도건설 기술의 경쟁력을 확보하기 위해서는 안전성, 효율성, 경제성에 바탕을 둔 철도건설기술 및 관련 기준의 확립이 필수요소라 할 수 있다.

정부는 저탄소 녹색성장을 위한 건설과 차세대 교통 및 물류 인프라 구축과 관련하여 철도교통 활성화 방침을 세우고 전체 SOC투자 중 철도에 대한 비율을 향후 10년간 현재의 2배 수준으로 확대할 방침을 세운 바 있으며, 국내 고속철도 건설 및 운영 경험을 바탕으로 글로벌 철도시장에 진출하기 위하여 국내 철도건설기준을 체계적으로 재정립하는 노력을 기울이고 있다.

이에 한국건설기술연구원은 국토해양부의 발주로 2009년 12월부터 2010년 3월까지 「철도건설 경쟁력 확보를 위한 기획연구」를 수행하여, 선형·궤도분야, 노반분야, 교량분야, 터널분야, 방재분야 등의 철도관련 주요 시설물 건설

분야에 대해서 국내외 기술 동향과 건설기준 현황을 분석하여 문제 기술을 진단하고, 철도건설 관련 기준 합리화와 건설비 절감을 위한 52개 핵심 연구과제를 도출한 바 있다(국토해양부, 2010).

이 기획연구 결과를 토대로 한국철도시설공단은 “철도건설 경쟁력 확보를 위한 제반 연구”과제를 추진하였고, 여기에 대한토목학회, 한국건설기술연구원, 한국철도기술연구원의 3개 기관이 공동으로 참여하여 선형궤도분야, 노반분야, 교량분야, 터널분야, 터널방재분야 및 안전설비분야의 총 6개 연구분야의 기준 합리화 연구를 수행하고 있다(그림 1 및 그림 2 참조). 기관 별로는 대한토목학회가 연구

수행분야	주요 수행 내용
총괄분야	과제관리, 분야별 연계 및 조정, 국내외 세미나 및 공청회 등 행사추진
선형·궤도분야	선로선형(기울기 및 곡선) 최적화, 선로중심간격, 공기압 및 미기압 검토
노반분야	노반의 최적 요구성능 수준 결정, 성능수준별 최적단면 및 설계기준 제시
교량분야	설계기준 합리화 및 구조 최적화를 통한 공사비 절감
터널분야	라이닝, 발파기준, 기계화 시공, 터널내 인터페이스 조정 등 터널 구조물 전반의 기준 정립
방재분야	터널안전성 분석에 필요한 제반 기준 및 해석방안 제시
안전설비분야	안전설비 안전성 분석, 안전계획 및 안전설비 설치기준 정립 및 비용분석

그림 1 철도건설 경쟁력 확보 연구분야별 주요 연구내용

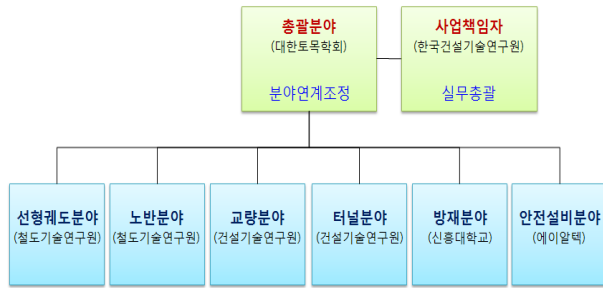


그림 2 철도건설 경쟁력 확보 연구수행 조직 구성

분야간 조정을 주요업무로 하여 터널방재분야 및 안전설비분야의 연구를 담당하고, 한국건설기술연구원은 교량분야와 터널분야 연구를 담당하며, 한국철도기술연구원은 선형궤도분야와 노반분야 연구를 담당하고 있다. 본 연구사업은 총예산 약 62억원으로써 2010년 9월 14일부터 2013년 12월 30일까지 약 3년 3개월간 수행되고 있으며, 연구소, 학계, 산업계의 전문가로 다양하게 구성된 총 126인의 연구진이 총 56개 세부과제에 대해서 철도건설과 관련한 제반 규정 및 기준의 합리적 재정립과 시공기술 향상에 관한 내용을 다루고 있다.

## 2. 분야별 기준 합리화 추진 내용

### 2.1 궤도선형 기준 개선

궤도선형기준은 철도시스템 건설 및 운영특성을 결정하는 중요한 요소로서 철도시스템의 경제성에 직접적인 영향을 미친다. 기존의 「철도건설규칙」 및 「철도의 건설기준에 관한 규정」은 2009년 개정을 통해 궤도선형 관련 제반 규정에 합리성을 부여하고자 하는 노력이 있었으나, 각 선형요소의 한계치에 대한 이론적 고찰과 구체적인 근거가 충분히 반영되지 못한 상태였다.

이에 그 동안의 열차운영 경험 및 차량기술 발전을 고려하고 국제기준 변화에 대응하여 노선 선정의 자유도를 높이고 선형 과다설계 요인을 줄임으로써 선형계획 수립시에 경제성을 향상시키는 관점에서 차량의 주행속도별로 선형요소의 합리성을 제고하는 방향으로 기준이 개정되었다. 또한, 각 제한치 설정에 대한 이론적 배경과 규정 마련의 구체적인 근거가 제시될 수 있도록 보완되었다. 궤도선형 기준 합리화를 위한 주요 기준개정 방향은 다음과 같다.

- 궤도시스템이 구조 안정성이 높은 콘크리트도상으로 전환되는 추세를 반영하여 최대 부족캔트를 확대함으로써 곡선반경을 줄이고 곡선통과속도를 향상

- 고속열차의 등판능력 및 제동능력 향상을 고려하여 여객전용선의 선로기울기를 완화
- 중곡선간 동일 기울기 직선선로의 최소길이를 승차감을 고려하여 산정하도록 이론적 근거에 바탕을 둔 산정식을 제공하여 중곡선-직선선로 통과시 열차 거동의 종방향 진동수가 열차고유진동수와 일치하지 않는 최소 직선구간 길이를 적용함으로써 승차감 확보와 종단선형 합리화
- 차량한계, 주행중 롤링에 의한 기울어짐, 열차 교행시 풍압에 의한 전복 안전성 등을 분석하여 궤도중심 간격을 축소하였고, 국제기준 변화 및 기존선 고속화를 고려하여 저속과 고속으로 단순 구분된 궤도중심 간격을 속도별로 세분화하여 규정하고, 70km/h이하 저속대역을 별도로 두어 경제성 도모

### 2.2 노반구조 최적화 및 성능향상을 위한 기준개선

새롭게 적용되고 있는 콘크리트 궤도를 지지하는 노반구조 형식에서도 큰 변화를 요구하고 있다. 콘크리트 궤도의 유지보수 비용을 절감하기 위하여 노반침하를 억제할 수 있고 건설비용 절감효과가 우수한 토공노반 구조를 제시하는 것은 시급한 과제라 할 수 있다.

노반분야에서는 철도노반 단면 최적화를 위하여 차량 성능 및 궤도구조를 고려한 요구 성능 수준별 품질관리 수준을 정립하며, 속도대역별로 노반층의 두께를 차별화하여 최적화된 노반구조를 제시하였다. 특히 차량속도와 관계없이 철도종류(일반철도와 고속철도)로 구분하여 노반두께를 일률적으로 적용하던 기존 기준에서 속도대역과 통과톤수를 고려하여 강화노반층의 최적두께를 정의함으로써 토공공사비를 약 8% 절감할 수 있게 되었고, 일반철도의 노반다짐관리 기준을 고속철도 기준으로 단일화함으로써 품질관리를 강화하는 방향으로 개정하였다.

### 2.3 고속철도 교량설계를 위한 단일 표준열차하중 체계 구축 및 구조형식의 다양화

기존에는 교량설계에서 있어서 고속철도 노선(여객전용선)은 HL하중, 일반철도 노선은 LS-22하중으로 양분하여 적용하였으나(한국철도시설공단, 2011), 최근 유럽의 신규표준열차하중인 LM2000과 맥락을 같이하여 현재 운영 중인 모든 국내 열차에 대한 결정론적, 확률론적 하중효과 및 비용분석 등의 통계적 분석을 통해 표준열차하중을 KRL-2012 체계로 단일화하였다(그림 3 및 4 참조). 이 KRL2012 표준열차하중은 직관적인 판단이 쉬운 등분포하중+집중하중



(a) KRL2012 표준열차하중(여객+화물 혼용노선)

(b) 0.75KRL2012 여객전용선 표준열차하중 (KRL표준열차하중의 75% 적용)

그림 3 KRL2012 표준열차하중 하중선도

차량종류 및 편성을 고려한 설계하중 적용

차량 주행속도를 고려한 설계검토

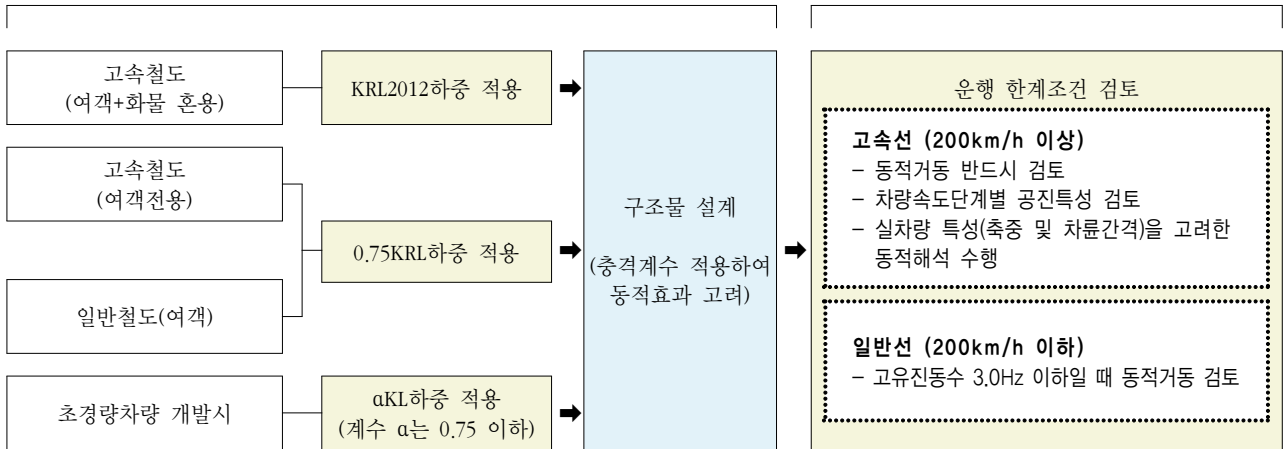


그림 4 KRL2012 표준열차하중의 설계 적용

중첩형태로서 운행 열차 변동성에 즉각적인 대응이 가능하다는 장점을 가지며, 향후 국제적 표준에 대응하여 신뢰도 기반 설계로의 전환에 대비한 것으로 평가할 수 있다.

우리나라의 고속철도 도입 초기에는 고속철도 교량설계 기술이 충분하지 않았던 상황이었기 때문에 해외 기술과 자문에 의존하여 교량이 건설되었다. 처음으로 시도하는 고속철도 건설사업이었던 만큼 안전성 확보에 비중을 두고 보수적으로 설계할 수밖에 없었으며, 특히 일반 철도교량에서는 고려할 필요가 없는 열차의 고속주행에 의한 동적 거동 특성이 설계에 고려되면서 동적 안정성이 상대적으로 우수한 PSC 박스거더 형식을 획일적으로 적용하였다. 그러나 경부고속철도 건설과 함께 교량의 동적거동 특성과 관련한 본격적인 연구가 진행되어 고속철도 교량설계에 있어서 세계적 수준의 기술적 노하우를 축적해 왔으며, 특히 한국건설기술연구원의 연구팀은 『고속전철 구조물 안전성 기술개발 연구』를 통해 고속철도 교량의 동적안정성을 향상시킬 수 있는 특정한 경간장, 즉 공진소멸 경간장이 존재하며 이를 설계에 반영하면 주행안전성 확보와 동시에 다양한 구조형식을 적용할 수 있음을 연구를 통해 밝힌 바 있다(한국건설기술연구원, 2002).

한국건설기술연구원을 주축으로 진행되는 기준 합리화 연구에서는 공진소멸 경간장을 도입하여 교량 시스템의 주

행안전성을 향상시킬 수 있는 교량설계 방안과 PSC 박스 거더 형식 이외에 PSC 빔 등의 다양한 거더 형식을 적용하는 방안을 제시하고, AREMA, AASHTO, ACI, 국내 콘크리트 설계기준, 도로교 설계기준 등 최신 설계기준을 분석결과를 반영하여 하중계수를 감소시키는 방향으로 기준을 개정하였다.

또한, 주행안전성 및 승차감 검토를 위한 절차 및 방법을 구체화하기 위한 방안으로서 동적해석시에 교량 모델링 방법을 구체적으로 명시함으로써 운영 한계조건 검토의 정밀도를 향상시키고 실제적인 거동이 설계에 반영될 수 있도록 하였고, 레일로부터 하중이 재하되는 실제 상황(편심효과, 도상에 의한 하중분배 등)이 고려될 수 있도록 하기 위해 구체적인 하중 재하방법과 검토위치를 도표로 명시하였다. 특히, 해석방법에 따른 동적응답 해석결과와의 차이를 보정하고 실제적인 거동을 평가할 수 있도록 구조물에 대한 추가감쇠비 적용 규정을 신규 제정함으로써 합리적 동적응답 평가가 이루어지도록 하였다.

최근에는 철도교 분야에서 교각에 대한 내진설계기술의 적용성 확대와 경제적인 시공성 확보를 이유로 중공원형 철근콘크리트 교각에 대한 관심이 높아지고 있다. 기존 철도설계기준은 콘크리트교각의 소성설계 시 ‘축방향 철근과 횡방향 철근’에 관한 규정 내용이 중실단면을 중심으로만

구분	시추조사 간격
1단계 조사(시추조사 6공)	약 200m
2단계 조사(시추조사 12공)	약 100m
3단계 조사(시추조사 19공)	약 60m

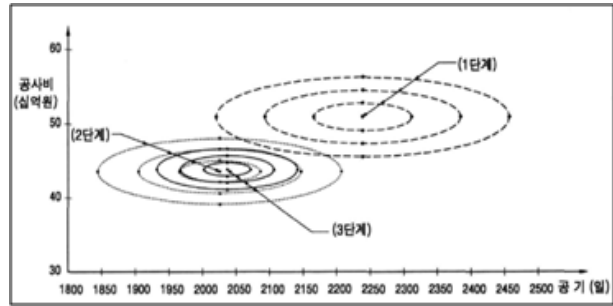


그림 5 시추조사 간격에 따른 공사비 및 공사기간 변화

작성되어 있어 중공단면에 대한 설계규정이 모호하므로, 실물교각 실험체에 대한 동적재하실험을 통해 중공 원형교각에 대한 배근상세와 단면설계 규정을 신설하였다. 기존 설계기준에서 중공단면에 대해 탄성설계법을 적용하는 한계를 넘어 소성설계법을 적용할 수 있도록 함으로써 교각 공사비를 약 30%까지 절감할 수 있는 토대를 제공하였다.

#### 2.4 고속철도 터널 구조 합리화를 위한 기준개선 및 시공성 향상

그동안 국내 철도터널 건설은 주로 안전한 터널건설에 주안점을 두고 설계가 이뤄졌으며, 터널 관련 설계기준 및 지침이 미흡하여 비교적 과대한 터널건설 비용이 소요되는 문제점이 발생하였다. 이 같은 문제점은 호남고속철도 설계, 시공 과정에서 많은 부분 개선되었으나 철도터널 관련 제반 기준의 전반적 개선이 요구되었다.

한국건설기술연구원을 중심으로 수행된 터널분야 기준 합리화 연구에서는 기반조사 효율화를 위하여 실시설계시 시추공의 간격을 터널입출구부를 포함하여 50~100m로 축소(기존 50~200m)함으로써 전체 공사비용과 기간을 단축시켜 경제성을 확보할 수 있도록 하였다(그림 5 참조).

발파진동 규제기준에 대해서는 최근의 해외 기준에 발맞추어 발파시 구조물 손상기준의 지반진동 허용치를 전국 13개 지역에서 실시한 터널 발파데이터에 근거하여 발파시 지반진동의 전달특성에 대한 회귀분석을 실시하고, 거리별 주파수 발생특성을 파악하여 주파수 대역별(50Hz 기준) 허용치로 구분하여 산정하도록 합리화하였다.

일반적으로 콘크리트 라이닝 설계개념은 역학적 기능을 부가시키는 개념과 역학적 기능을 부가시키지 않는 개념으로 분류되며, 국내에서는 터널완공 후 락볼트 및 슛크리트의 알칼리 골재반응 등으로 인한 1차 지보재의 열화 등을 고려하여 주지보재를 임시구조물로 간주하고 콘크리트 라이닝에 역학적인 기능을 부가하여 설계하였다. 또한, 터널 주지보재는 지반과 지보재가 상호 작용하면서 굴착하중을 분담할 수

있는 수치해석법을 통해 보강량의 적정성을 판단하는 방법이 보편화되어 있으나, 콘크리트라이닝은 지반을 단순히 반력스프링으로 고려한 골조모델이 사용됨에 따라 콘크리트라이닝과 지반의 상호작용을 적절히 고려하지 못하는 문제를 내포하고 있으며, 이는 과다설계의 주원인으로 지목되어 왔다. 지반 라이닝 상호작용(Ground-Lining Interaction)을 고려한 모델은 다양한 지반조건, 터널형상 등을 고려할 수 있는 장점이 있으나, 구조계산법의 복잡성 등으로 인하여 현실적으로 직접 적용하기에는 다소 문제점이 야기될 가능성도 배제할 수 없다. 이를 해결하기 위하여 일반철도와 고속철도 단면에 대한 설계사례 분석을 통해 암반등급별 대표 물성치와 토피고를 매개변수로 한 수치해석을 수행하여 지반하중 크기를 산정하고, 해석결과에 대한 다중회기분석을 통하여 지반하중크기 산정식을 도출하였다.

### 3. 결 론


철도건설기술에 있어서 대외 경쟁력을 확보하고 기술수출을 위해 가장 중요한 것은 시스템 통합 기술이며 이 중 기반기술인 토목관련 기술 즉, 노반, 구조물, 터널 등에 대한 기술력과 함께 글로벌 기준 정립과 효율성, 안전성이 확보된 설계가 이루어져야 한다.

국내 건설기준을 국제기준으로 선진화하기 위한 연구결과는 「철도의 건설기준에 관한 규정」에 이미 반영되어 34개 조항에 대해 개정이 완료(국토교통부고시제2013-236호, 2013.5.16.)되었으며, 이 규정의 주요 개정내용은 ①속도대역을 세분화하여 각 속도대역별 선형 설계조건, 궤도중심 간격 설정, ②기준에 일반철도와 고속철도로 이원화되어 있던 하중체계를 신규 표준활하중(KRL-2012)을 신설하여 단일화, KRL-2012 표준활하중을 기반으로 향후 차량개발에 따른 설계하중 변화에 유연하게 대처할 수 있도록 하중체계 기반 마련(유럽 등의 최신 설계하중체계 개발 추세를 반영), ③기타 모호한 용어를 명확히 하는 등의 내용을 포함하고 있다. 또한, 건설규정 개정에 후속하여 하위 기준으

로서 철도설계기준(노반편) 및 전문시방서의 개정이 진행되고 있다.

기반기술 경쟁력 확보로 인해 철도건설기술 수출의 돌파구가 마련될 것으로 전망되며, 이와 함께 관련 기준의 신뢰도 향상과 차기 철도건설 시 국가 예산 절감이 기대된다. 국가 예산 절감은 철도 경쟁력 강화의 한 축을 담당할 수 있으며, 비용절감은 향후 일반철도의 고속화를 가능케하여 전체적인 철도건설 시장의 팽창으로 이어질 것으로 예상된다.

## 참 고 문 헌

1. 국토해양부, 철도건설 경쟁력 확보를 위한 기획연구, 2010.3.
2. 한국철도시설공단, 철도설계기준(노반편), 2011.
3. 한국건설기술연구원, 고속전철 구조물 안전성 기술개발, 2002. 

[담당 : 조정래 편집위원]