

도시철도 콘크리트 궤도 설계기준(안)에 관한 연구
A Study on The Design Guideline for Concrete Track
of Urban Railway System

김태욱*
Kim, Tae-Wook

ABSTRACT

In this paper, main contents of the "Design Guideline for Concrete Track of Urban Railway System(Proposition)" is summarized. The proposed guideline is based on the research result of domestic and foreign theories, and will be useful for engineers in field, operational agencies, and related institutions. In foreign countries where have advanced railway technologies, there are few established design guideline for concrete track for the time being. However, considering increase of demand and urgency of technology, it is obvious that the national, public and economic importance of the establishment of the "Design Guideline for Concrete Track of Urban Railway System".

1. 서론

지하철 시설물 중 차륜을 직접 지지하여 열차를 안전하게 유도하는 궤도시설은 차량의 주행안전성을 확보하는 측면에서 매우 중요할 뿐 아니라 열차가 운행하는 도중에도 승객의 승차감이나 유지관리에 많은 영향을 미치게 되는 주요 시설이다. 이러한 궤도시설은 기본적으로 레일, 침목, 레일 체결장치, 도상, 노반 등의 다양한 구성품으로 전체 시스템이 구성되는데, 시스템의 총체적인 안정성이 확보되기 위해서는 해석 및 설계차원에서 합리적인 이론의 적용이 일관된 절차를 통해 단계적으로 수행되어야 하며, 특히 정형화된 형태의 설계기준이 우선적으로 확보되어야 한다. 이와 관련하여 현재 국내 지하철의 현황을 살펴보면, 현재 각 지하철의 운영기관 및 건설기관에서는 기존선의 개량 및 신선의 건설에 있어서 주행안정성 및 유지관리 측면의 장점을 바탕으로 콘크리트 궤도의 적용을 확장시켜 나가고 있는데, 무엇보다도 정형화된 형태의 콘크리트궤도 설계기준이 아직 확보되지 못하였기에 각 지하철별로 이미 국내에 도입된 다양한 국외 궤도의 설계기준을 별다른 수정이나 검토작업 없이 그대로 준용하는 상황에 놓여있다. 특히 이러한 상황은, 추후 각 도시철도 사이의 연계작업 및 교통망의 확장이 추진될 경우, 다양한 측면에서 상당한 정도의 기술적인 문제점들을 발생시킬 수 있는 부분으로 판단된다.

* 한국철도기술연구원 궤도·구조연구그룹 주임연구원, 회원

그러므로 본 연구에서는 선로시스템을 대표하는 동시에 국내·외적으로 그 사용수요가 증가하고 있는 콘크리트궤도를 대상으로 주요 설계기준 항목을 설정한 후, 관련 국내·외 이론의 종합과 재정립을 통해 운영기관과 설계실무자들이 기본적인 지침서로 활용할 수 있는, 표준화된 형태의 “도시철도 콘크리트 궤도 설계기준”을 제시하였다. 콘크리트궤도 관련기술이 상대적으로 현저하게 발전했다고 말할 수 있는 국외의 경우에도 현재 콘크리트궤도에 대한 공식적인 설계기준이 발표된 적은 없으나, 향후 수요증가 및 관련기술 국산화의 시급성을 고려할 때 본 연구는 국가·사회·경제적인 측면에서 복합적인 중요성을 가지는 것으로 판단된다.

2. 설계기준의 구성체계 및 세부내용

본 고에서 서술하고 있는 “콘크리트궤도 설계기준”은 건설교통부 “도시철도 표준화 사업”의 일환으로 진행된 “도시철도 선로시스템 표준화”연구과제의 주요 연구성과를 집약한 것으로서 그 구성체계 및 세부내용은 다음과 같고 이를 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 콘크리트궤도 설계기준의 구성체계

목차	세부 내용
설계총칙	목적 및 기본원칙, 적용범위, 용어정의
설계하중	하중일반, 직선부 설계하중, 곡선부 설계하중, 길이방향 하중, 하중조합
궤도구성품 설계제원	레일, 침목, 레일체결구, 콘크리트 슬래브 도상, 노반의 제원
시스템 설계	장대레일 설계, 궤도좌굴강도, 강성 변화구간 설계, 굴절각 한도
구조해석	구조해석 일반, 해석모델 선정 및 해석방법, 구성품 구조안정성 검토
궤도틀립 관리기준	궤도 정비, 궤도 준공검사, 궤도틀립조절 성능 기준

2.1 설계총칙

먼저 “설계총칙”편에서는 설계의 목적 및 기본원칙, 적용범위, 사용되는 용어를 정의하였으며 일본 유도상궤도 설계기준, 미국 AREMA 궤도설계기준, 국철 궤도설계기준, 서울/대구/대전 도시철도 설계시방서, 경량전철 설계기준에 관한 연구 보고서 등을 참조하여 설정된 본 설계기준의 주요 구성체계를 요약하였다.

2.2 설계하중

“설계하중”편에서는 궤도설계시 정량화가 요구되는 하중에 대해서 직선부와 곡선부로 구분하여 각각의 하중축, 상하방향 하중(윤중), 수평방향 하중(횡압), 길이방향 하중(축력, 제동 및 시동하중)에 대해 정적성분(정상분)과 동적성분(변동분)을 어떠한 방식으로 산정하는가에 대한 상세한 기준을 제시하였으며, 특히 2002년에 수행된 도시철도 현장계측 결과 및 자체 개발된 차량-궤도 상호작용 해석기법에 의한 윤중변동 해석 등을 통해 국내 도시철도 환경에 적용될 수 있는 궤도 충격계수를 산정하였다.

2.3 궤도구성품 설계제원

“궤도구성품 설계제원”편에서는 국유철도 건설규칙을 주로 참조하여 궤도의 주요 구성품인 레일, 침목, 레일체결구, 콘크리트 슬래브 도상, 노반 각각에 대해 해석 및 설계시 적용되는 제원과 주요 물성치에 대해 정리하였다. 특히 레일체결장치에 대해서는 국내/외 관련업체에 대한 포괄적인 조사를 통해 가능한 한 상세한 물성치를 제시하는 데 주력하였다.

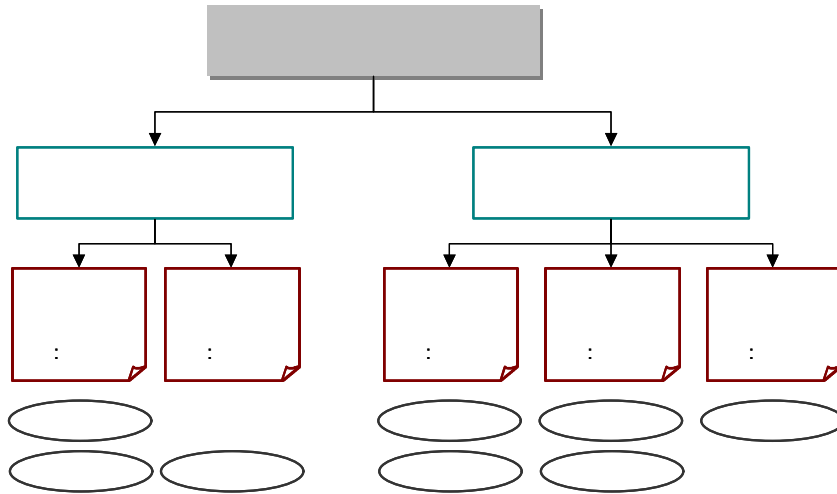
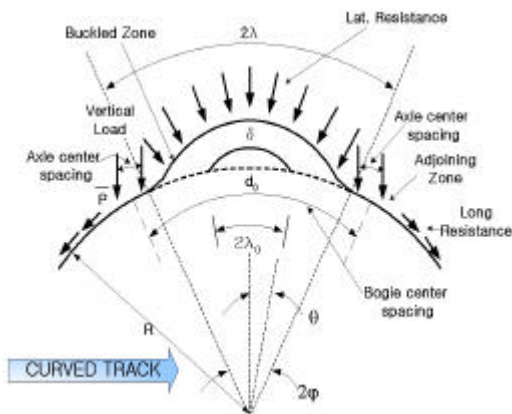


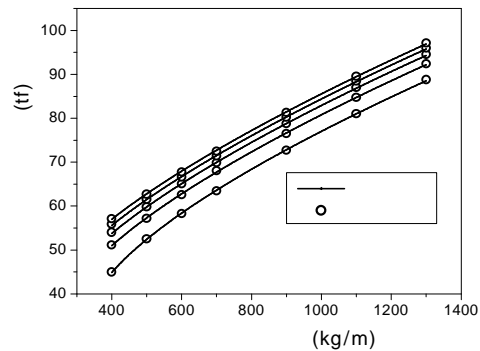
그림 1. 궤도에 작용하는 하중의 종류

2.4 시스템 설계

궤도의 성능은 각 구성품들(레일, 레일패드, 체결구, 침목, 자갈도상 또는 침목패드)이 구조적 및 재료적으로 어떻게 설계되어졌는가에 따라 달라지며 또한 각 요소 간의 결합방법에 따라서도 그 성능이 영향을 받으므로 전체 궤도성능을 파악하기 위해서는 각 구성품들의 물리적 특성을 고려한 시스템 설계가 필요하다. 이러한 측면에서 “시스템 설계”편에서는 국내 최초로 장대레일 설계기준, 궤도의 좌굴강도 추정식, 강성지지 변화구간의 설계기준, 굴절각 기준 등 궤도 시스템 설계시 핵심적으로 고려되어야 하는 주요 기준들에 대해 정리하였는데, 특히 UIC 설계기준, 일본 신칸센 설계기준, 대만 고속철도 설계기준, 국철 설계기준 등을 참조하여 국내 최초로 장대레일 설계기준을 제시하였으며, 궤도좌굴강도의 경우에는 회귀식을 설정한 후 수치해석값과 회귀식과의 비교를 통해 제안식에 대한 객관적 검증을 수행하였다.



(a) 설계좌굴하중 추정개념도



(b) 제안식과 해석값의 비교

그림 2. 궤도 좌굴강도 추정

2.5 구조해석 및 구성품의 구조안정성 검토

(1) 구조해석

궤도구조의 설계를 위해서는 각 궤도 구성품에 작용하는 부재력을 정확하게 산정해야 하며, 부재력을 산정하기 위해서는 궤도구조를 단순화하여 나타낼 수 있는 적절한 구조해석모델이 필수적으로 요구된다. 따라서 본 기준에서는 유도상 궤도의 구조해석에 널리 사용되는 탄성기초 위의 보 이론에 근거한 모델과 매트릭스 구조해석법 또는 유한요소법에 근거한 해석모델 두 가지를 제시하였다.

일반적으로 궤도구조설계에 필요한 부재 작용력 산정과 구조안정성 검토는 그림 3에 도시한 흐름에 따라 이루어질 수 있다. 기본적인 입력사항으로 궤도제원, 차량운전조건, 궤도부정상태 그리고 궤도구조조건 등이 주어지면, 이를 바탕으로 규정된 하중조합에 따라 하중조건을 산정해야 한다. 그리고 하중조건과 구조조건을 입력사항으로 하여 구조해석모델에 의해 부재작용력을 산정하고, 이 부재작용력에 근거하여 각 구성품의 구조안정성 검토를 수행해야 한다.

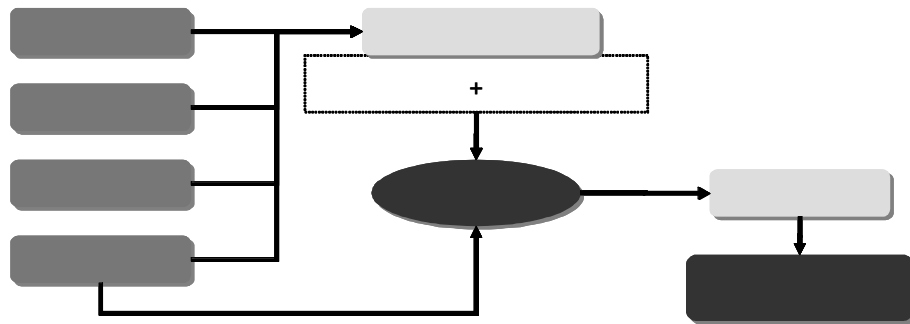


그림 3. 궤도구조의 해석절차

(2) 구성품의 구조안정성 검토

콘크리트 궤도의 구조 안정성을 검토하기 위해서는, 제반 궤도 구성품에 생기는 부재 응력과 허용 변위 등을 검토하여야 한다. 따라서 각 부재별로 발생하는 응력과 변위를 추정·계산하는데 따른 검토 기준들을 확립할 필요가 있다. 궤도 구성품은 대상으로 하는 궤도구조에 따라 다르지만, 본 기준에서는 일반적인 주요 구성품으로서 레일, 궤도패드, 침목, 콘크리트 슬래브, 궤도노반, 체결장치 등을 고려하였다. 레일, 침목, 궤도 슬래브, 궤도노반의 안정성 검토에서는 상하방향 극대 하중조건만을 고려하였으며, 궤도패드와 체결장치의 안정성 검토에서는 좌우방향과 상하방향의 극대 및 반복 하중을 모두 고려하였다. 구조 설계에서 필수적인 검토항목은 각 궤도형식의 특성을 고려하여 궤도구조의 구조적 취약점에 대해 적절한 검토가 이루어지도록 선정해야 하는데 본 기준에서는 일반적인 콘크리트 궤도구조를 대상으로 그림 4에 표시된 각 항목에 대해 검토하는 것으로 설정하였다.

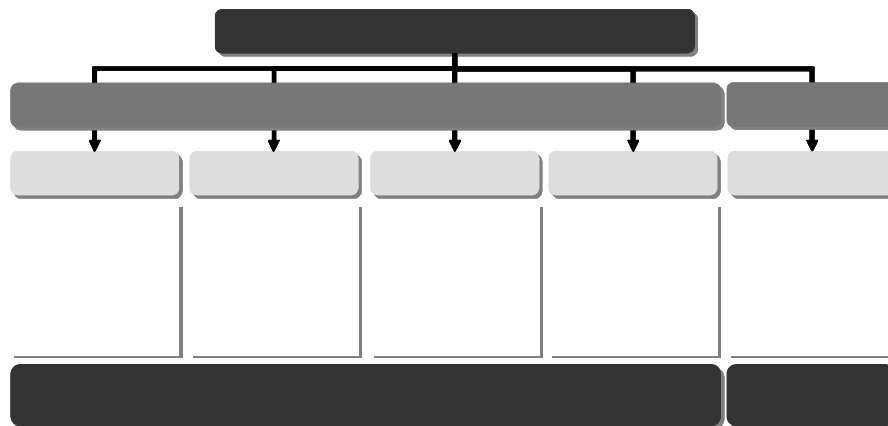


그림 4. 콘크리트 궤도 구조의 검토 항목 및 고려 하중

▶ **레일휨응력에 대한 검토**

레일은 궤도재료 중 가장 중요한 부재이기 때문에, 응력상태가 최악인 경우에도 레일강의 피로 한도를 초과하지 않도록 열차 하중에 의한 응력을 제한할 필요가 있다. 이를 위하여 상하 방향의 극대 하중에 대한 레일 휨 모멘트를 산출하고 휨응력을 구하여, 레일 허용응력과 비교하여 검토하는 것으로 제안하였다. 이 경우 열차하중 이외의 요인에 의해 레일에 발생하고 있는 응력을 가산할 필요가 있으며, 레일 단면 및 제조 방법과 관계가 깊은 잔류응력과 온도응력을 도입하였다.



그림 5. 레일휨응력 검토

▶ **침목 및 궤도슬래브에 대한 검토**

침목과 슬래브의 안정성 검토는 그림 6에 나타난 바와 같이 인장균열 검토와 레일 지지면의 지압력에 대한 검토로 구성된다.

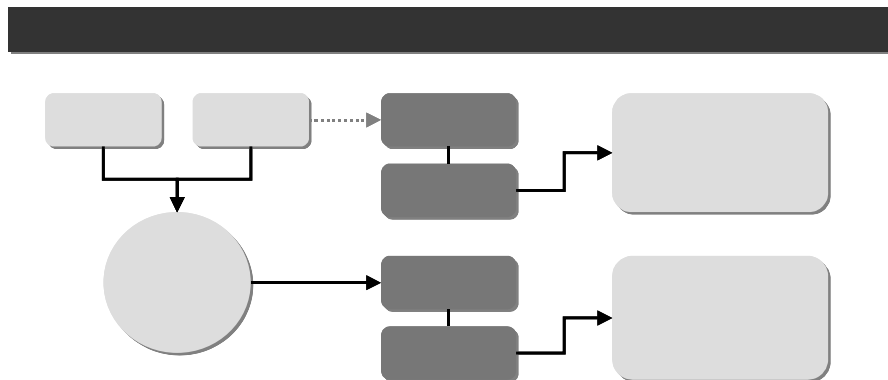


그림 6. 침목 및 궤도 슬래브의 안정성 검토

▶ **노반에 대한 검토**

궤도노반에서는 상하 방향의 극대하중 및 궤도구조 조건을 기초로 산정되는 평균 노반압력이, 노반의 허용 지지력보다 작으면 안정성이 확보된다. 본 기준에서 노반의 허용 지지력도는 1축 압축 시험, 콘 관입 시험, 표준 관입 시험의 N치 등에서 구해지는 점착력을 이용하여 흙 구조물 설계 표준 및 기초 구조물 설계 표준에 준하여 산정을 하는 것으로 기준을 설정하였다.

▶ **레일체결장치에 대한 검토**

레일체결장치는 구조해석적 관련식과 실내성능시험을 이용하여 그 안정성을 검토할 수 있다. 구조해석을 통한 안정성 검토는 하중재하시 레일체결장치에 의해 고정되어있는 레일의 변위를 산정하는 방식으로 수행되며, 각 레일체결장치 구성품들의 응력이나, 압축량 등이 허용기준을 만족하는지가 판단되어야 한다. 반면 실내성능 시험을 통한 안정성 검토는 여덟 가지의 성능시험을 수행하는 방식으로 구성되어있고, 각 시험기준을 만족하는지의 여부로 체결장치의 안정성을 판단하도록 되어 있다.

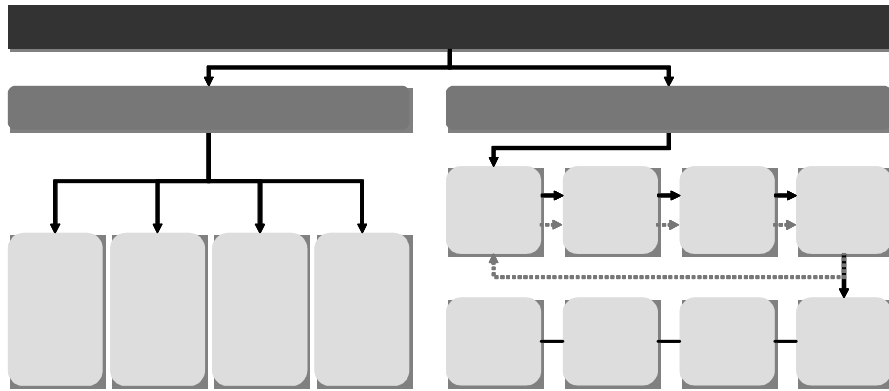


그림 7. 레일체결장치의 구조안정성 검토

2.6 궤도틀림 관리기준

마지막으로 “궤도틀림 관리기준”에서는 궤도의 정비기준, 준공검사기준, 궤도틀림의 조절성능 기준 등에 관해 국내 도시철도, 고속철도, 국철의 각 기준들을 비교/검토하고, 국외에 대해서는 일본, 프랑스 등 주요 철도국가들의 기준들을 비교/분석함으로써 국내 궤도틀림 관련 기준의 개선방향을 제시하고 있다.

3. 결론

본 논문은 “도시철도 표준화사업”의 일부로서 진행된 “도시철도 선로시스템 표준화”연구과제의 2003년도 주요 연구성과인 중 하나인 콘크리트궤도 설계기준을 소개하는 차원에서 작성된 것으로서 콘크리트궤도 설계기준의 작성배경, 전체적인 구성체계 및 세부내용들에 대해 간략하게 서술하고 있다. 본 고에서 소개하고 있는 “도시철도 콘크리트궤도 설계기준”은 선로시스템을 대표하는 동시에 국내·외적으로 그 사용수요가 증가하고 있는 콘크리트궤도를 대상으로 작성된 것이며, 관련 국내·외 이론의 종합과 재정립을 통해 운영기관과 설계실무자들이 기본적인 지침서로 활용할 수 있는 표준화된 형태의 기준이라는 데 그 의의가 있다. 향후 건설교통부 및 도시철도 운영기관과의 공청회 개최를 통한 의견수렴 및 지속적인 수정·보완 작업의 진행을 통해 기준의 최종안이 도출되어 실무에 적용된다면 국내 도시철도 관련기술의 발전과 제반시설의 성능향상에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2002), “도시철도 선로시스템 표준화 연구보고서”
2. 건설교통부 (2003), “도시철도 선로시스템 표준화 연구보고서”
3. 철도종합기술연구소 (1997), “철도구조물설계표준·동해설 - 궤도구조, 유도상궤도(안)”