

철도공학의 새로운 체계



강기동
(한국고속철도 품질안전실장)

1. 서언

한국철도는 100여년의 역사를 지내오면서 설계, 건설, 운영에 이르기까지 괄목할만한 성장을 하였으며 기술산업의 측면에서도 고부가가치를 창출해 낼 수 있는 공학분야의 전문화된 기술이라는 인식이 사회전반에 확산되고 있다.

특히, 90년대 초에 시작된 고속철도 건설사업을 계기로 철도산업은 그 동안의 낙후된 이미지를 벗어나 고속열차 운행에 따른 여행시간의 단축과 효율성의 극대화 그리고 쾌적한 환경을 창출하고자 하는 강한 사회적 욕구에 부응할 수 있는 새로운 산업영역으로 각광을 받고 있다.

그러나 국내의 철도 현실을 좀더 세밀히 들여다보면 이러한 화려한 여건과 외형적인 발전과는 다르게 많은 문제점과 어려움을 안고 있음을 볼 수 있다. 어느 면에서는 철도기술이 오히려 10여년 전보다 퇴보하고 있는 것이 아닌가 하는 우려와 실망을 갖게 하기도 한다. 이

러한 상황은 새로운 도전과 시련을 겪지 않고 국내 철도기술자들이 그 동안 안이한 환경 속에서 활동해온 결과이기도 하며 국내 철도산업 전반에 대하여 위기가 닥쳐 올 수 있다는 걱정이 앞서게 한다.

철도공학은 이론보다는 현장실무에서 얻어지는 경험적인 기술이라는 특징을 갖고 있으므로 체계적인 기술의 정립이 어려운 속성이 있다.

이것은 대다수 특화된 전문기술의 경우와 마찬가지로 폐쇄적이고 독선적으로 흐르게 되어 기술의 전수가 잘 되지 않고 새로운 기술의 도입을 더욱 어렵게 하는 요인이 되고 있다.

이러한 요인들은 양적으로 많은 성장과 발전을 거듭하고 있는 국내 철도기술산업에서 혼란과 문제점을 갖게 한다.

철도사업을 추진하는 과정에서, 또는 철도운영 현장에서 발생하는 여러 가지 난해한 문제들에 대하여 철도기술자 스스로가 문제의 본질에 대한 이해가 부족할 뿐 아니라 기술적인 해결방안을 위한 전문가의 자문을

언을 수 없는 것이 우리의 현실이라 할 수 있다.

그간에는 이러한 전문지식 부족의 문제를 안전율을 다소 크게 하여 해결하여 왔으나 종래 경험하지 못한 새로운 문제에 대하여는 이것도 더 이상 용인되지 않는 상황이 되어 가고 있다.

이러한 국내 철도기술분야의 현실을 개선하고 한 단계 더 발전시키기 위한 근본적인 대안으로 철도공학을 새로운 내용으로 체계화하는 것이 필요하다고 생각한다. 유능한 철도기술자와 전문가를 양성하고 훈련시키는 것이 철도산업의 장래를 위하여 중요한 것이라 한다면 철도기술에 대한 이해의 심도를 깊게 하고 체계화하는 수단으로서 철도공학을 새롭게 보완하는 것이 시급하다고 생각하기 때문이다.

본 고에서는 이러한 관점에서 현재 국내에서 활용되고 있는 철도공학의 내용을 외국의 경우와 비교하여 고속철도 시대에 부응하는 새로운 철도공학의 체계를 정립하는 문제에 대하여 논의하고자 한다.

2. 국내의 경우

철도산업을 시장에서 기술이 공급되고 소비되는 유통이라는 관점에서 보면 기술을 필요로 하고 사용되는 곳으로 철도의 건설, 운영을 담당하는 발주처가 있고 기술을 제공하는 곳으로 용역회사, 연구소 또는 대학 등이 있다.

이러한 기술 시장에서 공급되는 기술이라는 상품은 과연 소비자가 필요한 수준의 품질을 갖추고 있는지 소비자는 우수한 품질의 상품을 구별할 수 있는 변별력을 갖추고 있는지 반문할 필요가 있다. 현재의 거래 관행을 파악하는 것은 국내 철도기술 수준과 현상을 이해하는데 많은 도움을 줄 것이다.

그러나 무엇보다도 이러한 기술 상품의 정상적인 거래 관계를 유지하고 일부에서 나타나는 기술 시장의 혼란과 무질서를 바로잡는데 철도기술자들의 역할이

가장 중요하다. 철도공학의 내용을 새롭게 체계화하는 것도 이런 면에서 의미가 있는 일이 될 것이다.

현재 국내에서 활용되고 있는 철도공학의 내용은 대부분 일본철도의 기술을 근간으로 하고 있다. 일본철도공학 내용의 일 예는 표 1.에서 보는 바와 같이 공학적인 배경이 미흡하기 때문에 철도기술을 체계적으로 이해하는데 어려움이 있다. 따라서 철도현장에서 발생하는 많은 현상에 대하여 실질적인 해답을 주기 위해서는 보다 근본적이고 이론적인 접근이 필요하며 더 나아가서는 이것이 새로운 기술로 발전할 수 있게 될 것이다.

이를 위하여 대부분을 철도용어와 규정의 해설, 부품 및 재료의 설명 등에 치중하고 있는 현재의 철도공학 내용을 보완하는 것이 첫째의 과업이며 무엇보다도 철도기술을 공학적으로 이해할 수 있도록 체계화하는 것이 중요하다. 다시 말하면, 동일한 내용과 항목이라도 이것이 상호 관련되어 있기 때문에 철도기술을 공학적인 관점에서 체계적으로 이해할 수 있도록 정리하고 배열하는 것이 중요한 것이다.

두 번째로 국내의 철도공학 내용이 최근 개발된 새로운 기술을 공급하지 못하고 있다는 점이다. 20세기 초에 개발된 기술을 21세기가 된 현재까지도 기본 틀이 크게 변하지 않고 그대로 계속 유지하고 있는 현재의 상황이 변화되어야 할 것이다. 모든 공학분야의 기술이 눈부시게 발전하고 정비되어 쉽게 변환되고 호환될 수 있는 소위 디지털화되고 있는데 유독 국내의 철도기술만이 아직도 아날로그 상태의 기술로 남아 있다는 사실에 유의해야 할 것이다.

3. 외국의 경우

국내 철도기술이 일본철도의 영향을 많이 받았기 때문에 국내철도공학의 내용은 일본철도공학과 유사하므로 여기에서는 유럽철도기술을 위주로 하여 소개하

고자 한다.

외국 철도공학의 내용은 표2에서 보는 바와 같이 근본적인 철도기술을 공학적인 원리로 이해할 수 있도록 비교적 심도 있게 다루고 있음을 볼 수 있다. 특히 선로에 작용하는 힘을 체계 있게 설명하고 궤도에 대한 역학적인 이해를 돕기 위한 차륜과 레일의 상호작용에 대하여 상세하게 기술하고 있다.

표 1. 일본철도공학 주요내용의 예

1. 개론	2. 철도의 사명
3. 철도의 정비	4. 철도의 장래
5. 철도정비와 재원	6. 계획개론
7. 신선건설	8. 기존선 개량과 근대화
9. 대도시철도	10. 신간선 철도
11. 철도건설일반	12. 선로개론
13. 궤도관리	14. 궤도구조
15. 정차장	16. 철도구조물
17. 특수철도	

참고로 여기에서 네덜란드 델프트 공대의 철도공학 교과 과정 속을 소개하면 다음과 같다.

●델프트 공대 (TU Delft) 철도공학 교과 과정

토목공학 교과과정 속에서 철도공학은 다음 세 가지 코스로 나뉘어 진다.

1) 예비 과정 (Introductory Course) : 1년차

예비 과정은 철도구조물에 대한 4시간 강의와 교통, 도로, 철도 등 일반적인 과정으로 구성되어 있다.

- 차륜/레일 기술의 기본원리 - 열차하중
- 궤도 구조 - 유지보수 및 갱환
- 도로와 철도의 특징적 차이점

2) 기본 과정(Basic Course) : 2년차

기본과정은 강의 18시간과 40시간의 컴퓨터 교육으로 구성되어 있다.

- 철도 유도의 원리 - 선형계획

표 2. 외국철도공학 주요내용의 예

네덜란드(I)	1. 소개 3. 곡선과 구배 5. 정적 궤도설계 7. 궤도안정성 9. 슬라브궤도 11. 분기기 13. 궤도수치해석 15. 소음과 진동 17. 고속철도 19. 철도자산관리	2. 차륜/레일 상호작용 4. 하중 6. 동적궤도설계 8. 자갈궤도 10. 레일 12. 궤도유지보수 14. 시험 및 인수 16. 검증시스템 18. 유지관리 시스템 20. 총 사용시간 소요비용
네덜란드(II)	1. 철도 개요 3. 기초 기술 5. 구조계산 및 설계 7. 분기기와 건넘선 9. 지하철 건설	2. 운영계획 4. 궤도하중 6. 공사방법 8. 유지보수
영국	1. 차륜/레일 상호작용 3. 동역학 해석방법 5. 승차감 7. 곡선주행 거동 9. 궤도작용력	2. 열차의 거동 4. 궤도선형검측 6. 차륜/레일 형상 8. 궤도하중과 손상 10. 탈선현상
프랑스(I)	1. 역학 개요 3. 궤도 응력 5. 규정 7. 레일 결함 9. 파상마모 11. 레일의 재 설정 및 용접	2. 궤도-차량 상호작용 4. 레일용 강철 6. 궤도 부설 8. 궤도 검사(관리) 10. 유지보수
프랑스(II)	1. 철도구조물의 선형연구 3. 레일 5. 이음매판과 장대레일 7. 궤도 부설 9. 분기기 부록 : 1. 기초 구조물 모델링 : 유한 요소법 2. Fourier 변형 상관관계 함수 - 시그널 스펙트럼 분석	2. 궤도역학 차량궤도상호작용 4. 침목과 체결구 6. 기초 구조물 8. 궤도 유지보수 10. 궤도장비
미국	1. 철도산업 3. 수입과 비용 5. 궤도해석 7. 노반설계 및 건설 9. 배수 11. 분기기 13. 레일 15. 궤도선형 17. 작업방법	2. 철도교통의 성질 4. 구배와 곡선 6. 노반재료 8. 노반안정성의 문제 10. 자갈 12. 콘크리트와 인공침목 14. 체결구 및 기타 궤도재료 16. 궤도/차량 동역학 17. 유지보수
독일	1. 철도의 필수요소 3. 차량/레일 작용력 5. 품질관리 7. 장대레일 제작과 관리 9. 레일연마, 파상마모 11. 경제적인 레일관리	2. 철도의 이론적 원리 4. 레일 특성 6. 특수레일에 대한 경험 8. 운행상 레일의 결함 10. 체결장치

- 궤도설계 - 궤도 동역학
- 온도의 효과 - 궤도의 안정성

- 레일 - 분기기
- 점검기술 - 유지보수와 갱신

3) 전문과정(CAPITA SELESTA) : 3년차

이 과정은 일반적으로 특별한 주제에 대한 것을 포함한다. 이 과정의 학생들은 시험실에서 연구 및 시험을 받드시 수행하게 되어있다.

- 현재 철도 프로젝트 - 궤도장비의 최신 주제
- 열차 기술과 관련된 사항

※ 대학원 및 박사과정은 독자적인 주제를 가지고 연구

4. 몇 가지 사례

국내 철도공학의 내용이 근본적인 철도기술의 원리를 설명하는데 미흡하므로써 발생하는 문제점 중 실무과정에서 잘못 이해되거나 잘못 적용되는 몇 가지의 사례를 들어보고자 한다

가. 장대레일

철도현장에서 적용하고 있는 기술 중 잘못 이해되고 있는 기술중의 하나가 장대레일의 원리에 대한 사항이다. 정철레일을 용접하여 길게 부설한 장대레일이 그 긴 길이에도 불구하고 어떻게 온도신축에 저항하여 부설, 유지되는 것인가에 대한 의문에 대하여 명쾌한 설명이 없다.

특히, 고속철도에서와 같이 장대레일을 부설하는데 선형이나 노반구조물에 의하여 특별한 제한을 받지 않는 경우 장대레일의 길이는 수십 Km에서 수백 Km까지 길이에 제한 없이 부설 가능하다는 것에 대하여 공학적으로 충분한 설명을 하지 못하고 있다. 다음은 장대레일의 원리에 대하여 설명하고 있는 국내 기술서적의 내용이다.

장대레일의 원리

레일을 길게 용접하여 레일과 침목을 탄성체결하면 체결구에 의한 마찰력, 도상에 의한 저항력들이 작용하여 레일의 자유신축을 구속하며 중앙부는 신축하지 않는 부동구간이 형성되며 양단부는 약 80 ~ 100m 부분만 온도변화에 따른 신축이 작용한다.

이러한 설명 내용이 전혀 다르게 기술되었거나 큰 모순이 있는 것은 아니다. 그러나 중요한 것은 공학적인 원리에 근거한 정확한 설명이 없기 때문에 많은 사람들이 의문을 갖는 문제에 대한 명확한 해답을 줄 수 없다는 것이다. 이렇게 장대레일의 원리에 대하여 이해가 부족하기 때문에 궤도설계 과정에서 뜻밖의 작업을 많이 하게 되는 등 불필요한 노력을 기울이게 한다.

특히 교량상 장대레일 문제에 대하여 많은 계산과 보고서를 만들게 되고 그것이 실제의 문제에 대하여 어떠한 설명이나 해답을 주지 못하고 보고서 작성으로 끝나고 있는 실정이다.

나. 체결장치 설계

체결장치의 설계는 침목설계와 함께 궤도재료 설계 부분의 가장 중요한 기술이다. 열차의 하중을 노반으로 전달하면서 국부적으로는 레일과 침목을 연결하는 기능을 위하여 일정한 탄성과 변형 복원력을 유지하여야 한다.

그러나 체결장치의 설계과정에서 가장 중요한 것은 궤도에 작용하는 역학적인 현상을 잘 이해하고 그러한 배경에서 결정된 요구되는 성능에 대한 공학적인 기준과 이를 입증할 수 있는 시험방법 절차 등 기술규정이 잘 정립되어야 한다. 참고로 유럽철도에서 적용하고 있는 체결장치의 성능기준을 예시하면 표 3과 같다.

표 3. 체결장치의 성능기준 주요항목

주요항목	성능기준	비고
레일패드	피로전: 80~120kN/mm	
스프링계수	피로시험후 변화량: 25% 이하	
체결력 시험	피로시험전: 2×8kN 피로시험후: 피로시험후의 20% 이하	
종방향 저항력	피로시험전: 9kN이상 피로시험후: 피로시험전의 20% 이하	
부식저항	외관상 변화 및 해체, 체결가능여부	
비틀림시험	장대레일 안전검토시 활용	선택사항
충격감쇠	충격감쇠계수 30% 이상	
피로시험	단계별 레일두부 측면변위: 4mm 이하	
인서트 시험	균열이나 파손이 없어야 함	
전기저항시험	3.0km	

이러한 성능평가 기준은 충분한 기술검토와 검증을 통하여 확정되어야만 객관적인 평가가 가능하며 그렇지 않으면 실제 설계과정에서 알맹이가 없이 막연한 논의의 설계가 될 수밖에 없다.

표 4. 레일체결장치 성능검토(1)

명칭	102형	NABLA	VOSSLOH	PANDROL	
체결방식	판스프링 +보울트	판스프링 +보울트	선스프링 +보울트	선스프링	
스프링 레일압력	≥1,250kg	1,000~1,300kg	1,100~1,350kg	1,100~1,400kg	
크립 복진저항력	≥1.1t/조	≥2t/조	≥2t/조	≥2t/조	
타이페드	두께	6mm	9mm	6mm	10mm
	탄성계수	60t/cm	70t/cm	150t/cm	50t/cm

표 4. 레일체결장치 성능검토(2)

구분	RN형	Nabla형	Vossloh형	Pandrol형	비고
국명	일본	불란서	독일	영국	
스프링 레일압력	≥500kg	1,000~1,300kg	1,150~1,350kg	400~1,400kg	
크립 복진저항력	≥1.1 t/조	≥2 t/조	≥2 t/조	≥2 t/조	
레일패드	6mm	9mm	6mm	5~10mm	

표 5 레일체결장치의 장단점

도상	RN형	NABLA형	VOSSLOH형	PANDROL형
체결원리	판스프링의 BENDING	판스프링의 BENDING	선스프링의 BENDING과 TORSION	선스프링의 BENDING과 TORSION
체결력	양호	양호	양호	양호
체결력조절	유리	유리	유리	불리
궤간조절	가능	가능	가능	가능
부품수	다수	다수	다수	소수
수명성	불리	불리	불리	유리
작업성	불리	불리	불리	편리
점검성	불리	불리	불리	편리
보수성	불리	불리	불리	유리

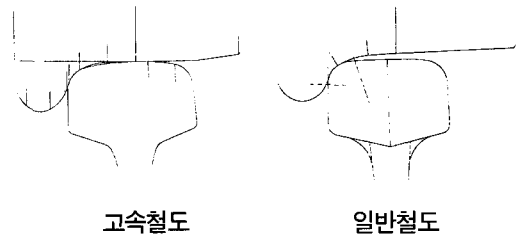
여기에 표 4, 5에서와 같이 실제 설계과정에서 적용되고 있는 설계 보고서 내용을 보면 이러한 사항을 잘 알 수 있다.

다. 레일단면과 차륜형상의 관계

레일 단면과 차륜의 형상이 적절하지 못한 경우, 열차가 곡선을 통과할 때 불완전 접촉이 발생하게 되고 소음이나 이상마모가 발생한다.

레일 단면과 차륜 단면의 관계를 보다 잘 이해하고 이상화하기 위해서는 우선 두 단면의 기하학적인 형상을 겹쳐서 놓고 생각 할 필요가 있다.

이것은 문제의 본질에 대하여 가장 쉽게 접근하고자 하는 것으로 프랑스 고속철도를 참고로 하여 적용하고 있는 고속철도 경우와 일반철도 차량과 레일의 경우를 기하학적인 현상으로 비교하면 그림 1과 같다.



고속철도

일반철도

그림 1. 차륜과 레일 단면 형상 비교

일반철도에서 열차의 차륜과 레일단면이 기하학적으로 불완전하게 접촉하므로 적용마모 발생 시까지 소음과 마모가 발생하는 것으로 보고되고 있다.

라. 선로중심간격

선로 중심 간격을 정하는 것은 두 열차의 교행에 따른 여러 가지 현상과 승차감 안전을 감안하고 있으나 철도 건설비용에 많은 영향을 주고 있다. 그러나 이것에 대하여 심도 있는 검토가 이루어지고 있지 않다.

예로서, 선로중심간격을 결정하는데 필요한 여러 가

지 사항들을 모두 합하여 최소한의 간격을 정한 후 그에 따른 문제점을 검토하여 결정하는 과정이 생략되어 있다.

프랑스 철도의 경우 선로 중심간격을 정하는 과정을 설명하는 공식을 소개하면 다음과 같다.

- 궤도중심간격 산정공식

$$D = a + [Si + Se + 0.7(Cm-0.05)+0.7(Cd - 0.025)] +$$

b

여기서 D : 궤도중심간격

b : 속도 120km/h 이하 0.050

Cm : 부설 캔트량

Cd : 부족 캔트량

a : 차량한계

속도 120~160km/h 0.065

속도 160~200km/h 0.100

Si, Se : 곡선에서 차량의 내, 외측 돌출범위

선로 중심간격에 대한 문제는 위의 궤도중심간격의 산정공식에서와 같이 곡선부분의 영향을 감안하였음에도, 곡선에서 건축한계의 확폭량만큼 중심간격을 확대하도록 하고 있는 현재의 규정에 대하여 충분한 검토가 필요하다. 또한 정차장 구간에서 궤도중심간격을 확대하도록 명시한 규정도 인위적으로 매우 불리한 선형을 만들고 있기 때문에 다시 한번 심도 있게 검토해야 할 필요가 있다.

5. 개선을 위한 제안

현재의 국내 철도공학 체계에서 양성된 많은 철도기술자가 철도기술에 대한 이해부족으로 정책결정 시 또는 철도건설이나 철도운영 현장에서 실무를 담당하면서 설계, 감리 용역 수행과정에서 기술적인 판단하는데 오류를 발생시켜서는 안될 것이다. 나아가 왜곡된

기술이 철도기술시장에 보급되어 이것이 국내 철도산업전체에 부정적인 영향을 미치게 해서는 더욱 안될 것이다. 따라서 종래의 철도공학 내용을 보완하여 새로운 체계로 정립한다는 것은 매우 시급하고 의미 있는 일이 될 것이다.

이러한 관점에서 새로운 체계의 철도공학을 정립하기 위하여 보완되어야 할 철도기술의 주요방향에 대하여 다음과 같이 제안하고자 한다.

- 철도기술의 원리와 이론을 체계화하는데 중점을 두어 이에 대한 사항을 비중 있게 소개할 필요가 있다. 궤도와 차량의 동적 거동에 대하여 심도 있는 이해가 필요하며 궤도응력으로부터 침목, 체결구의 설계 이론을 정리하는 것과 특히, 레일과 차륜의 상호작용을 심층적으로 분석함으로써 레일파상마모, 소음, 진동, 승차감 탈선현상에 대하여 해석이 가능할 것이라 생각한다.

- 철도시스템을 큰 틀에서 파악하고 기술적인 판단 이외에도 효율적이고 경제적인 안목에서 철도기술을 이해할 수 있도록 하는 것이 필요하다. 궤도구조는 건설에 많은 비용이 소요되는 노반구조물 특히 교량이나 터널 등의 설계에 큰 영향을 미치게 되므로 궤도 구조물의 상호작용에 대한 현상을 이해하는 것이 필요하며 철도 시스템 전체의 기능을 확보하는 측면에 신호 전차선 등과의 연계 기술이 중요하다.

특히, 유지관리에 대한 새로운 인식을 위하여 궤도 선형 설계, 검측기술 및 총 서비스기간내의 비용 분석 등에 대한 기술이 소개되어야 할 것이다.

- 철도기술을 일반공학분야 특히 토목공학의 전문기술분야와 연계하여 체계화하는 것이 필요하다.

넓은 의미에서 철도공학도 토목공학의 한 분야라는 점에서 현재 국내 공과대학 토목과의 교과과정 중 구조, 토질 및 기초 등의 학문분야가 철도공학의

기본과목으로 연계될 수 있도록 하는 것이 중요하다. 이를 위하여 공통적인 역학개념 등을 도입하고 그 내용 속의 용어 기호 단위 등을 통일하는 것도 필요할 것이다.

- 현재의 철도시스템인 차륜/레일 방식의 철도기술은 어쩌면 21세기를 넘지 못하고 쇠퇴할 운명에 있을지 모른다.

산업혁명 시대의 19세기 초에 개발된 현재의 차륜/레일 방식의 철도기술은 이제 2025년이면 기술이 실용화된 지 200년이 되게 되며, 이제는 다른 대부분의 기술과 같이 첨단 기술화된 대체 기술에 자리를 물려주고 퇴역할 때가 올 것이다.

철도시스템은 바야흐로 21세기라는 새로운 시류에 적합하게 개발된 새로운 기술 예로서 자기부상열차로 대체될 것으로 보는 것이 많은 전문가의 예상이다. 그러나, 이러한 새로운 철도시스템이 도입된다

하더라도 철도라는 기본적인 역학개념과 공학이론의 근본개념은 크게 변하지 않을 것이며 오히려 현재의 철도공학 이론이 더욱 필요하게 될지도 모른다.

6. 결론

현재의 국내철도산업은 철도 르네상스시대를 맞이하여 향후 더욱 성장, 확대될 것이며 철도기술에 대한 수요는 더 고급화된 전문기술을 필요로 하고 있다.

또한 철도기술의 시장이 개방되고 투명하고 정상적인 상품거래가 이루어지게 하려면 좀더 체계적이고 공학적인 기술과 경험을 갖춘 철도기술자가 필요하다. 이러한 기술자를 양성하고 훈련시키는데 중요한 수단으로서 철도공학을 새로운 관점에서 재정립하고 체계화하는 노력이 필요하고 이를 위해 많은 철도기술자의 관심과 협력이 모아져야 할 것이다.