

경부고속철도 건설과 시설분야 기술발전

1. 머리말

철도의 가장 큰 특징은 3차원의 항공 교통과 2차원의 도로 교통과 달리 열차가 선로 위를 1차원적으로 이동하므로 가장 안전한 교통기관이라는 점이다. 고속철도에서 요구되는 선로조건은 열차가 고속으로 안전하게 주행할 수 있고 안락한 승차감을 유지하면서 소음, 진동, 등 주변 환경에도 대응할 수 있어야 하는 점이다.

우리 철도는 100년 이상의 역사를 지내오면서 경부고속철도의 신선을 건설하고, 기존 선로의 갱신과 속도의 향상, 승차감의 향상, 안전도의 향상 등 공학 분야에서 전문화된 기술로서 괄목한 성장을 하여 왔다. 철도의 르네상스 시대를 맞이하여 철도산업은 앞으로 더욱 성장, 발전할 것이며, 철도기술에 대한 수요는 더 고급화된 전문 기술을 필요로 하고 있으나, 국내 철도기술을 살펴보면 외형적인 발전과는 다르게 기술적인 면에서 다소의 문제점과 어려움도 있는 것이 현실이다.

본고에서는 지난 10여 년간 철도시설 분야의 기술 성과와 발자취를 돌아보면서 향후 철도 기술 도약을 위한 계기를 삼고자 한다.

2. 설계기술

가. 고속철도 기술 도입

우리 나라의 고속철도 건설은 국내 철도시설 분야의 기술



강기동 | 삼성물산(주) 건설부문 기술 고문/공학박사·철도기술사



서사범 | 한국철도시설공단 궤도기술 팀장/공학박사·철도기술사

을 획기적으로 향상시켰다.

고속철도는 300km/h로 열차가 운행될 때 고주파진동에 기인하는 재료의 피로, 구조물 공진 현상에 따른 불안정성 (unstability), 터널 내 급격한 공기압력의 변화로 인한 승차감 저하 등 기존철도에서 볼 수 없던 여러 가지 복잡한 동역학적 현상이 발생된다. 고속철도 공사는 이러한 기술적인 특성을 감안하여 충분한 강도와 안정성이 확보되는 구조물을 시공해야 하는 건설공사이다. 따라서 고속철도 구조물은 아래 사항을 만족시킬 수 있도록 건설하여야 한다.

- 300km/h의 고속주행시의 안전 확보
- 쾌적한 승차감 확보
- 구조물의 내구성 확보(영구 구조물)
- 선로 유지보수의 최소화
- 소음과 진동 등 환경공해의 최소화

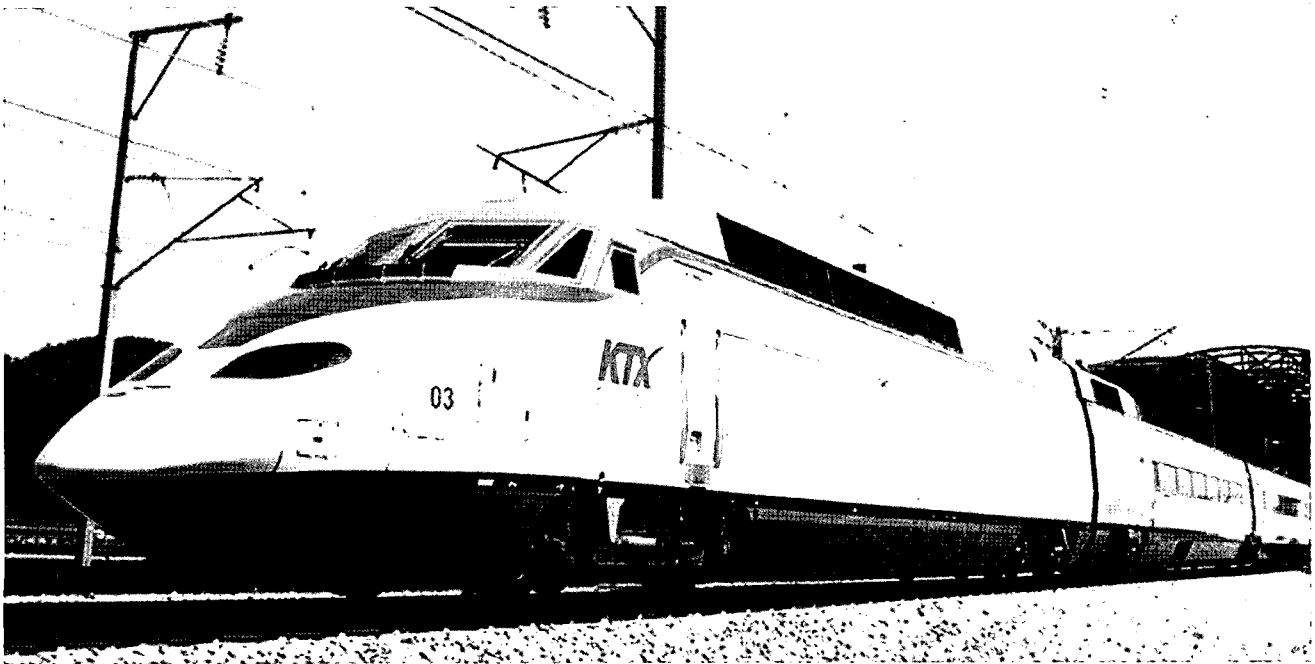
한편, 경부고속철도에서 주요한 특징의 하나는 토목 구조물이 많다는 점이다. 표준화된 구조물과 건설 공법은 건설 공정을 최적화하기 위하여 적용하였다. 전형적인 고가교 구조물은 2 또는 3 연속 25m 경간 또는 2 연속 40m 경간으로 구성하였다. 이들의 전형적인 경간의 적용은 교량 상판의 신

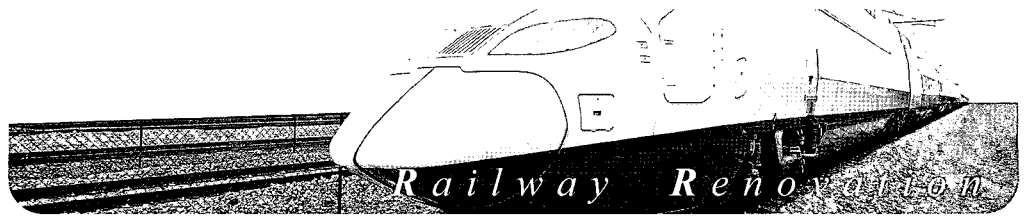
축 이음매간 길이를 80m보다 작도록 제한하였으며, 따라서 대부분의 경우에 레일 신축 이음매의 설치를 피하였다. 터널 출입구는 나팔모양으로 시공하여 터널 내 고속주행 시의 안전 확보에도 차질이 없도록 하였다.

나. 노반 설계

고속철도 신선건설과 기존철도 연결운행 등의 노선선정 및 정거장 시설, 궤도시설, 전기시설, 신호시설, 통신시설, 차량성능, 철도경제 분석 등 고속철도계획 능력을 국내기술로 축적하였다.

노선 및 정거장 등 철도토목공사 부문은 우리나라에서 처음으로 항공사진촬영 측량을 국내항공측량회사가 3차원 해석으로 실시하여 지형도를 컴퓨터디스켓 작업을 하게 되어 토공, 교량, 터널, 정차장, 차량기지 등 토목공사설계를 컴퓨터로 설계할 수 있게 하였으며, 설계속도 350km/h로 철도 노선 및 정거장입지, 토공, 교량, 터널 등을 설계하여 고속철도 차량제공 국가의 검토보완으로 프랑스, 독일 등 유럽 선진국 고속철도 설계 기법과 설계프로그램, 특히 교량 동특성 해석(dynamic study), 터널 공기압 해석(air dynamic





study) 등 국제적으로 최고권위자의 검토를 받아 고속철도 설계기술을 선진국 기술수준으로 향상시키게 하였다.

또한, 교량에 장대레일을 부설하기 위하여 궤도와 교량 구조물간의 상호작용 문제를 정밀하게 해석함으로써 이 분야의 기술을 향상시켰으며, 교량을 포함한 전 구간을 장대레일로 부설하였다. 분기기에도 장대레일 개념을 도입하고, 분기선의 곡선반경을 크게 하고 완화곡선을 삽입하였으며, 노스 가동 크로싱을 채택함으로써 최적의 승차감을 확보할 수 있게 되었다.

다음에, 속도와 관련된 기술을 살펴보면, 교량의 설계 단계에서 동적 해석을 하여 교량의 동적 안정성을 검토하게 되었으며, 상판 가속도, 단부 꺾임각, 처짐, 비틀림 등을 검토하는 기술을 확보하였다. 또한, 터널 내 풍압과 미기압파에 관한 문제를 해소하게 되었다.

(1) 열차성능 모의시험(train performance simulation, TPS)에 의한 노선 선정

TPS는 건설하고자 하는 선정 노선의 제원을 입력하여 열차 주행 시의 운행 소요 시분, 표정속도, 전력 소비량 등을 거의 유사하게 산출할 수 있으며, 신선의 철도 계획에 있어 최적의 노선을 결정하는 기법이다. 항공 측량에서 해석·도화된 지형 정보와 선로의 건설 조건을 입력하면, 차량의 운행 상황, 운행 시간, 정거장간 운행 소요 시간, 전력 소모 소모량, 운전선도 등을 출력한다.

(2) 전산화 시스템에 의한 설계 및 도면 제작

디스크에 수록된 지형도의 해석 도화 정보와 TPS에서 검토된 노선을 전산 프로그램에 입력하여 노선의 중·평면도 작성, 절·성토량의 산출, 유도 곡선도의 작성, 공사비 산출, 교량·터널의 위치 및 구조 형식 대안 등에 대하여 반복 작

업으로 최적 안을 제시한다.

(3) 교량의 동적 해석 및 설계

고속철도의 교량 설계는 국철의 일반적인 설계와 같이 UIC 하중¹⁾을 재하시켜 교량단면과 PC강선 및 철근량 등을 산정하나, 고속열차주행에 필요한 동적 안정성을 만족시키기 위해서는 실제 차량을 재하하여 설 계속도로 시뮬레이션 한 후 상판 가속도(0.35g), 단부 꺾임각(50×10⁻⁵ rad: 1'43"), 비틀림(0.4mm/3m) 등의 기준을 만족하여야 한다.

고속철도 교량은 고속으로 주행하는 연행하중을 받는 구조물로 실제 주행속도에서 현행하중에 의한 교량구조물의 공진 현상²⁾이 발생할 가능성이 있다. 구조물 공진이 발생할 경우 구조물의 거동은 매우 불안정해지고 교량의 상판가속도와 처짐을 증폭시키는 주요 원인이 된다. 공진으로 인하여 교량의 상판가속도와 처짐 폭이 일정 값 이상이 되면 구조물의 불안정성은 물론, 교량 위에 설치되어 있는 도상자갈이 튀는 현상이 발생한다.

또한, 열차가 교량 위를 고속으로 주행하는 경우 교량상판의 길이와 처짐 현상은 열차의 상하 진동을 유발시키며 이 진동이 차량의 고유 진동주기(1~1.5 Hz)와 공진을 일으킬 경우, 차상의 진동가속도가 크게 증폭되어 승차감을 악화시키고 순간적으로 열차의 수직하중을 저감시켜 탈선계수를 증가시키거나 구조물에 수직하중을 증가시킬 수 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다.

경부고속철도는 교량설계 시에 이러한 점을 감안해 정적 안전성과 사용성 뿐만 아니라 동적 안전성도 추가적으로 검토하였으며 상판 가속도·단부 꺾임각·처짐·비틀림 등 검토된 모든 항목이 다음의 허용치 이내가 되도록 설계하여 열차의 고속주행에 대한 안전성을 확보하고 있다.

1) UIC하중 : 우리나라 철도의 LS 표준하중처럼 유럽 철도에서 적용하는 표준하중으로 경부고속철도에서는 이것을 HL 하중이라 하며, 2005. 7월에 개정된 철도건설규칙에서는 HL-25로 부르고 있다.
 2) 공진 현상 : 열차가 교량 위를 주행하면 교각과 교각 사이에 하중이 작용하여 상판이 밑으로 처지게 되고, 열차 통과 후에는 상판이 제자리로 돌아오려는 "스프링"과 같은 현상이 발생하므로 이 때 돌아오려는 힘에 의하여 하중이 작용하지 않을 때를 기준으로 상하로 진동이 발생하고 열차가 고속으로 주행 시에 차량의 등과 진동과 교량의 진동 현상이 증폭되어 구조물에 지속적으로 충격을 가하게 됨에 따라서 공진현상이 발생하며 진폭이 더욱 커지게 된다.
 3) Yoshihiko Satō(佐藤 吉彦) : 일본철도기술연구소 궤도연구실장, 일본기계보선 교문을 역임하였으며, 신간선 궤8도에 대한 연구로 궤도고주파 진동의 세계적인 권위자로 경부고속철도 건설초기부터 궤도기술에 관하여 자문을 하여 한국의 궤도기술발전에 크게 기여하였다.
 4) Coenraad Esvald : UIC 궤도연구위원과 네덜란드 철도의 궤도품질관리 및 기술연구소장을 역임하였고, 현재 Delft 공대 교수로 재직 중이며, Esvald Consulting Service를 운영하고 있으며, 경부고속철도 건설초기부터 궤도기술에 관하여 자문을 하여 한국의 궤도기술발전에 크게 기여하였다.

(4) 고속 주행을 위한 선로의 직선화 및 수평유지

300km/h의 주행을 위하여 선로가 거의 직선화되고 지면 과도 수평이 유지되도록 건설하였다. 즉, 곡선반경이 7 km 인 원의 곡선보다 반듯하도록 설계하고, 지면과의 수평각도가 1,000m당 25m 이상 변화되지 않을 만큼 지면과 거의 수평을 유지하였다.

(5) 터널 내 풍압

열차가 터널 내를 고속으로 진입하면 차체가 공기를 밀고 나가 압축함으로써 터널내의 공기압 변동이 발생하고 이러한 공기압 변동은 터널 내부에서 ±10,000Pa 정도이다. 열차의 계속적인 통과에 따른 공기압 변동은 파동을 발생시켜 반복 응력에 의한 구조물 피로를 증가시킨다. 터널의 길이는 파동수와 상관이 없이 열차의 속도에 관계되어 증가한다. 또한, 장대터널에서 열차가 교행하는 경우 압력의 변화 값은 단선주행의 두 배로 된다.

경부고속철도는 승차감을 고려하여 터널내 공기압 변동량의 기준 값을 3초간 4,300Pa(10,000Pa이 1/10 기압에 해당됨)이하가 되도록 설계하였으며, 구조물의 피로현상을 방지하기 위하여 터널 단면적을 크게 하고, 터널 내의 wave-front를 반사하는 통풍구를 설치해 압력 최고점을 크게 감소시켰다.

터널 출입구는 나팔모양으로 시공하여 터널 내 고속주행 시의 안전확보에도 차질이 없도록 하였다.

(6) 터널 내 미기압파

미기압파는 운행 열차의 고속주행에 따라 터널내부에서 발생하는 공기의 압력파가 터널 입·출구부에 도달했을 때 “핑” 하는 소리가 발생하는 현상으로 터널출구 주변에 소음 등 환경문제를 일으킨다.

경부고속철도는 터널 단면적을 107m²로 설계하여 공기압 변동량이 3초 동안 4,300 파스칼 이내로 조정되어 터널내 공기압 및 미기압파 문제를 해소하였다.

다. 궤도 설계

(1) 궤도구조의 선정과 기본설계

최적의 궤도구조를 선정 하기위하여 6개의 궤도구조 모

델을 경부선 부곡역 구내에 부설(연장은 각각 5m)하고 유축 낙하 시험하여 고속주행에 따른 동 특성을 해석하였다. 이 과정에서는 일본의 Y. Sato 박사³⁾가 참여하였다. 또한, 궤도 각부의 응력 계산(네덜란드의 C. Esveld 박사⁴⁾ 참여), 궤도구조의 동역학적 설계, 궤도관리 한도에 의거한 검토, 노반강도에 의거한 검토, 궤도보수비의 추정 등을 시행하여 고속주행에 적합한 최적의 대안을 선정하였다.

경부선 서정리~평택 간에도 850m에 걸쳐 14종의 시험 궤도구조로 갱신하여 통과 톤수에 따른 궤도 각부의 응력, 장기적인 궤도 변형거동 메커니즘 해명과 성능을 조사하고 검토하였다.

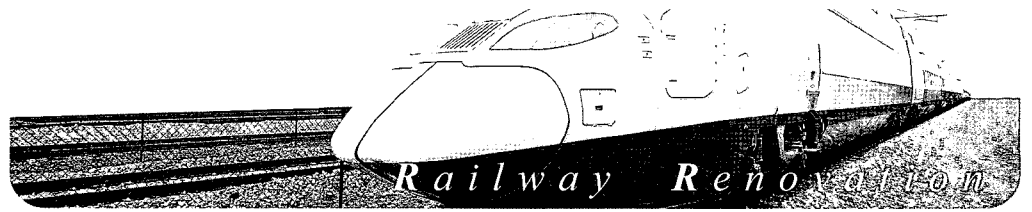
(2) 궤도재료의 설계

고속철도의 궤도재료는 엄격한 규격과 철저한 품질이 요구되므로 국내에서 제작하여 조달이 가능한 주요 궤도재료를 설계하고 규격화하여 설계 성능시험을 수행하고 품질 수준의 적합성을 검증하였다. 궤도재료의 설계와 규격화는 일반적으로 설계 하중→기능 및 제원 검토→구조와 재료 선정→구조해석→성능확인 시험→표준화 등의 과정을 거쳤다.

궤도재료 설계 시에 레일은 고속주행 열차에 대한 동특성 결과로부터 레일 단면에 대한 응력을 검토하였고, PC 침목은 대한토목학회와 서울대학교 팀에서 설계하였으며, 궤도 자갈은 도상 응력과 입도 및 물성치를 검토하였고, 레일 체결장치는 응력과 동특성에 대한 기술 검토를 하였다. 분기기는 오스트리아의 전문가인 Holzinger 및 프랑스 기술진 등의 기술 자문을 받아 노스 가동 크로싱과 탄성 포인트 등을 포함하는 고속용으로 설계하였다. 신축 이음매는 양쪽의 신축부와 중앙의 일반 궤도부로 구성되어 있으며, 분기기와 마찬가지로 PC 침목을 이용하였다.

(3) 실시설계와 기지계획

궤도공사 실시설계 시에는 프랑스의 궤도 시공회사인 TSO 등의 협조를 받아 프랑스 사례 등을 참고로 하여 고속의 조건에 부합되는 궤도부설공법을 선정하고, 이에 따른 공사 투입 장비 등을 검토하여 궤도의 기계화 시공에 필요한 설계를 하였다.



한편, 향후의 궤도보수기지를 궤도공사 전진기지로 겸용할 수 있도록 기지의 계획을 수립하였다. 궤도보수기지는 기계화 궤도보수에 따른 궤도 장비와 궤도재료 보급열차, 보수 담당 선로의 연장 등 규모를 감안하고 외국의 사례를 참고로 하여 위치와 규모 등을 계획하였으며, 각종 궤도보수기지는 전차선 등 전기분야의 보수를 위한 기지의 역할도 할 수 있도록 배려하였다.

한편, 고속열차의 안전 운행과 차량 등 코어 시스템과의 기술적인 연계성을 확보하기 위하여 궤도의 설계와 건설 및 유지관리 등에 관하여 TGV 고속철도의 설계, 건설, 운행의 경험이 있는 프랑스 기술진(SOFRERAIL)에게 자문을 받았으며, 궤도기술 요원을 교육하였다.

3. 건설공사

가. 교량상부의 시공

P.C box 교량(상자형 교량)의 시공 공법으로는 M.S.S 공법(Movable Scaffolding System), P.S.M 공법(Precast Span Method), F.C.M 공법(Free Cantilever Method), F.S.M 공법(Full Staging Method) 등으로 대별되나 경부 고속철도에서는 주로 M.S.S, F.S.M 공법을 사용하였고, 공기가 촉박한 일부 공구에 대해서는 이탈리아 고속철도 건설 시에 사용되어 안정성과 품질이 입증된 P.S.M 공법을 사용했다.

F.S.M 공법은 교량의 높이가 높지 않고, 지반이 양호한 곳, M.S.S 공법은 교량이 높고 하부에 하천이나 연약지반 등이 통과하는 구간에 적용하였다. 특히 M.S.S 공법 적용 시에는 부분 공장철근 조립공법(Partial Caging Method)를 개발하여 시공함으로써 공기단축, 정밀시공, 품질확보 등의 효과를 거두었다.

(1) 이동식 비계공법 (M.S.S 공법)

종래에는 교량 시공 시에 거푸집, 동바리를 각각 조립하여 작업 후 다시 거푸집 동바리를 해체하여 다음 구간으로 운반·설치하는 작업을 반복하였다. 그러나 이와 같은 조립해체 작업의 반복시행에는 많은 노력과 시간을 필요로 하며, 또한 작업 중에 인근주민이나 교통 등에 지장을 초래할 염려

가 있다. 따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위해 고안된 시공법이 이동식 비계공법이다. 이동식 비계공법은 교량의 상부구조 시공 시에 거푸집이 부착된 특수한 이동식 비계를 이용하여 한 구간씩 시공해 나가는 공법으로서 원래 독일의 Strabag사에 의해 처음으로 개발되어, 1959년 독일의 Kettiger Hang교에 최초로 시공된 이래 많은 발전이 거듭되어 오늘날 선진국에서 널리 사용되고 있는 공법이다.

이 공법은 독일의 Strabag사 외에도 Dywidag사, P&Z사 등 여러 회사에서도 시공법을 개발하는 등 공법의 다양화가 이루어지고 있다. 이 공법이 국내에 도입된 것은 1983년 1월로서 한강변에 위치한 노량대교에 최초로 시공되어 1986년 5월 성공적인 완공을 보게 되었다.

시공속도는 일반적으로 30~35m의 한 구간을 시공하는데 20일 정도 소요되므로 한 달에 50~60m의 길이를 시공할 수 있다. 시공방법이 일정작업의 반복수행에 의한 것이므로 능률이 오르게 되면 더욱 효과를 나타낼 수 있다.

이 공법이 여러 가지 장점을 지니고 있는 반면에 이동식 비계의 중량이 무겁고 제작비가 비싸, 제작비 및 감가상각비가 많이 소요된다는 문제점이 있다. 따라서 이 공법의 특징과 경제성을 발휘하기 위해서는 고 교각(高橋脚), 다 구간(多徑間) 교량에 적용하는 것이 바람직하다.

이동식 비계공법으로서 현재 개발되어 사용되고 있는 종류에는 여러 가지가 있으나, 사용 장비에 따라 시공방법이 약간씩 다르다. 그러나 기본적인 원리는 동일하며 장비의 위치에 따라 하부이동식(Support Type)과 상부이동식(Hanger Type)등으로 구분된다.

하부이동식에는 비계 보와 추진 보가 계산척 모양으로 이동해 나가는 Rechenstab 방식, 비계 보가 추진 보 역할까지 하는 Mannesmann 방식 등이 있으나 이 중 대표적인 형태는 독일의 Strbag사에서 개발한 Rechenstab 방식이다.

상부이동식에는 Gerystwagen 방식, FPS식, PSC식 등이 있으며, 이 중 대표적인 형태는 Dywidag사에서 개발된 Gerustwagen 방식이다. FPS 방식, PSC 방식은 기본적으로는 Gertistwagen 방식과 동일하나 FPS 방식은 주형이 2개로 되어 있어 횡행으로 연결되어 있으며, PSC 방식은 이들 장비 외에 거푸집 이동용 거더가 추가로 설치되어 있는 것이 다르다.



M.S.S 공법에 의한 PC BOX 교량시공

(2) PSM 공법

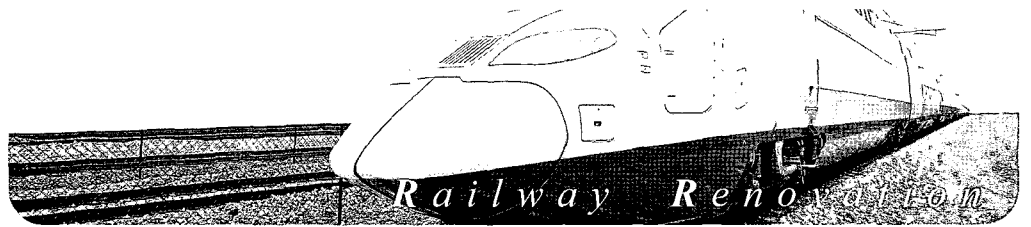
장대 고가교 상판의 건설에 적용한 프리캐스트 경간 공법(PSM, Precast Span Method)이란 1경간 길이 25m, 폭 14m, 중량 600ton의 교량 상부(콘크리트 Box Girder)를 Precast 제작공장에서 고정된 Mould에 의해 Pretension을 도입하여 제작한 후에 특수차량(Straddle Carrier)으로 현장까지 운반하고 교량에 이미 설치된 이동식 가설장비(Launching Girder)를 사용하여 설치하는 최신 교량 가설 공법으로써 최신식의 건설 기술이다.

이탈리아의 고속철도 및 고속도로 교량에 적용하여 안전성 및 품질이 입증된 바 있으며, 국내에서는 고속철도가 처음 도입한 공법이다. 당초에는 현장 타설 이동식 비계(MSS) 공법으로 설계되었으나 이 공법은 하절기 및 동절기에 현장 작업시 기후의 영향을 많이 받으며 또한 기능공의 숙련도에 따라 품질에 영향을 미쳐 균일한 품질 유지가 어렵고 연장이 긴 교량의 공기 준수가 불투명하여 균일한 품질확보 및 공기 준수가 가능한 새로운 PSM공법을 적용하게 되었다.

(3) Caging 공법(철근의 공장 조립공법)

P.C Box 상판 시공법 중 기준에 사용 중인 MSS(Movable Scaffolding System) 공법은 P.C Box(Prestress Concrete Box)를 2단계로 구분 시공하도록 되어있으며, 1단계는 바닥과 벽체(Web), 2단계는 상부 슬래브로 구분 시공한다. 그러나 고속철도의 교량상판 P.C Box는 철근 가공 종류가 많고 특히 다이아프램 부위(단부)의 철근이 복잡하고 정밀조립을 요하므로 조립 시간이 많이 소요된다. 이를 극복하기 위하여 지상의 공장에서 철근을 가공·조립하여 교량 위에 설치된 MSS에 운반 설치하는 Caging System을 개발함으로써 품질향상 및 고기단축 등의 효과를 거두었다. 적용 구간은 정거장과 접속된 교량이며, 정거장 접속 구간이 40m의 12 연속 경간으로 기존의 공법으로는 관리기준 공정의 준수가 곤란하여 Caging공법을 도입하여 공기를 단축(경간당 10일 단축)하였다.

(4) TFS 공법(Travelling Formwork System)



3경간 연속구조의 25m P.C Box(3@25 P.C box)를 F.S.M (Full Staging Method)공법을 적용하여 시공 시에 지보공 상부에서 바로 해체, 이동, 설치 작업이 가능한 거푸집인 Travelling Formwork System(이동식 거푸집 공법)을 사용한다.

외부 거푸집에 대한 Travelling Formwork System의 적용은 대량의 장비 및 인력을 투입하여 설치, 해체 작업을 반복하여야 했던 기존의 재래식 거푸집 공법을 탈피하여 지보공 상에서 간단한 조작과 소수의 인원만으로 이동, 조립, 설치가 가능하므로 공사비 절감과 공기 단축이 가능하다. 특히 최적 설계를 통한 거푸집 경량화를 실현하여 인력만으로 손쉽게 운영할 수 있도록 하였으며 form til 수량을 최소화하여 작업의 편리성과 우수한 품질을 실현하였다.

(5) 강합성 아치교 회전 거치 공법

경부고속도로를 가로지르는 모암1교는 교축 방향으로 최소 125m 순경간과 약 20° 사각으로 만들어졌다. 최초 설계 시 90° 각도(약 20m 지간)로 고속도로를 가로지르는 4개의 PSC 라멘 교각과 표준 고속철도 25m 지간 포스트텐션 콘크리트 박스 구조물 사용을 계획하였다. 그러나 이 구간에 대한 시공 시 고속도로에 대한 교통 방해나 어떠한 임시 가설물 재배치가 허용되지 않았으므로 이 시공 방법은 복잡하고 부적절했다. 이러한 이유로 125m 단경간 강재 아치교를 고속도로와 평행한 위치에서 제작하여 시공하는 '회전 거치 공법'으로 변경하였다.

이 공법은 교량 설치 시에 고속도로상의 교통에 방해를 주지 않는 최대한 안전한 임시 가설기구 위에 있는 최종 위치에서 구조물을 회전시키는 방식으로 하였다.

이 교량의 설계는 프랑스에서 가장 최근에 건설된 고속철도선인 프랑스 지중해 고속철도에 건설된 아치 구조물을 기본으로 한 것이다. 한국에서 최초로 건설된 이러한 형식의 철도교는 고속철도 아치교에 있어서는 건설 당시 세계에서 가장 긴 교량 구조물이다.

나. 터널의 시공

터널공사는 NATM공법을 최신기계로 드릴 잠보 (Hydrolic Drill Jumbo), 슛트리트 로봇, 라이닝거푸집 전

단면 자부식 스틸 폼, 레이저광선 측량, 슛크리트 처리 공해물 자동여과시설 등 시스템화하였으며 특히 슛크리트 건식 공법을 습식 공법으로 로봇화하여 재료 및 장비를 국산화한 것은 터널공사기술수준을 선진국 기술수준으로 향상시키고 국가경쟁력을 강화하는데 더욱더 기여하였다.

(1) 3차원(NET2B) 광파 측정

최근 전자/통신의 발달로 터널 계측도 과거 인력에 의존 하던 방법에서 탈피, 자동화한 타겟 부착 장치 및 3차원 광 파 계측기를 활용한 내공 변위 및 천단 변위를 계측할 수 있는 신기술을 적용하였다.

현재 국내에서 시공되고 있는 대부분의 터널 공사의 경우 NATM공법으로 시공하고 있으나 수동 계측의 경우 인위적 오차 발생 및 측정기간 중 작업 중단 등의 문제점이 있어 계 측의 정밀도 확보 및 공기 단축 필요성 대두되었다.

(2) T.S.P 탐사 시스템

T.S.P(Tunnel Seismic Prediction) 탐사는 터널 안에서 굴착지점이나 굴착지점 전면의 상태를 용이하게 탐사할 수 있도록 개발된 방법으로 화약을 장약한 여러 곳의 발파공(약 24~30공)에서 발파를 시행하면 이 발파에 의해 암반에 충격이 주게 되어 암반에서는 진동이 생기게 되고, 이 진동은 발파 점에서 모든 방향으로 진행하게 되는 반사법을 이용한 공법이다. 따라서 터널 막장 후방과 터널 막장 전방으로 진행되는 진동을 주로 수신기에 기록하는 방법이 TSP 탐사의 개요이다. 발파공에서 수신기 방향으로 진행되는 진동파는 수신기와 발파공사이의 거리, 발파순간부터 수신기에 기록 될 때까지의 시간을 이용하여 진동파의 진행속도를 알 수 있다(속도=거리/시간).

발파 후 터널 막장 전방으로 진행되는 진동은 지질구조대에서는 거울면의 역할을 하여 진동파가 반사되어 수신기 쪽으로 오게 되고, 이를 수신기에서 기록하게 되며, 이후 수신기에 기록된 시간과 속도를 이용하여 지질 이상대의 위치를 알아내게 되는데 위와 같은 작업을 여러 개의 발파공에 대해 실시함으로써 여러 기하학적 각도의 자료를 얻게 되고, 이 자료들을 종합하면 터널 전방 지질의 이상 유무에 대한 상황을 정확히 예측할 수 있는 공법이다.

고속철도는 21세기 교통혁명을 선도하는 주체가 될 것이며,
 또한 남북철도가 서로 연결되면,
 중국, 몽골, 러시아, 유럽까지 철도와 연결 운행할 수 있으므로
 유라시아 철도실크로드가 부활될 것이다.
 이는 또한 우리나라 경제 재도약의 발판이 되고 세계일류 국가로 도약하는 계기가 될 것이다.

터널 굴착 작업의 안전성과 시공능률의 극대화를 위해 터널 막장 전방 암층의 물성 뿐 아니라 지질구조에 대한 정확한 정보가 필요하다. 선진 조사공의 경우 비용과 시간이 많이 들고 경우에 따라 터널 작업을 지연시키므로 이의 개선이 필요하므로 적용하였다.

다. 토공 및 유지보수

(1) 토공과 구조물 접속부

토공과 구조물의 접속부에서 급격한 노반강도 변화방지 및 구조물과 토공 사이의 부등 침하를 방지하기 위하여 어프로치 블록을 설치하였다. 어프로치 블록이 규정대로 시공이 안 될 경우 고속주행열차의 진동으로 수직방향에 과대한 침하가 발생 시에 탈선의 우려가 있다.

(2) 강화노반

궤도를 충분히 지지하고 상부노반의 연약화를 방지하기 위하여 도상자갈 아래에 강화노반 층을 설치, 노반 연약화 등 문제발생으로 열차의 안정운행에 지장을 초래하지 않도록 별도의 쇄석 층포설이 필요하다.

4. 궤도의 기술

가. 주요 기술특성

궤도분야는 궤도역학, 궤도파괴 이론의 연구, 궤도시험 및 기술개발, 동역학 등을 응용한 연구, 시험 및 기술개발에 따른 새로운 이론체계의 확립으로 설계능력을 확보하였으며, 최첨단 장비를 이용한 완전기계화 공법으로 궤도를 정밀하게 시공할 수 있는 능력을 배양함으로써 국내의 철도 기술을 크게 향상시키는 계기가 되었다.

(1) 고속철도용 분기기

분기부를 통과할 때에 직선의 기준선 측에서 속도의 제한을 받지 않고 운행최고속도와 일치되어야 하며, 분기선 측의 통과속도도 가능한 고속으로 통과가 가능하도록 설계되어야 한다. 기존철도의 분기기 선형은 분기 통과속도가 낮기 때문에 직선 구간과 원곡선 구간에 완화곡선이 없었으나, 고속철도에서는 분기 통과속도 증가가 필요함에 따라 완화곡선을 삽입하였다.

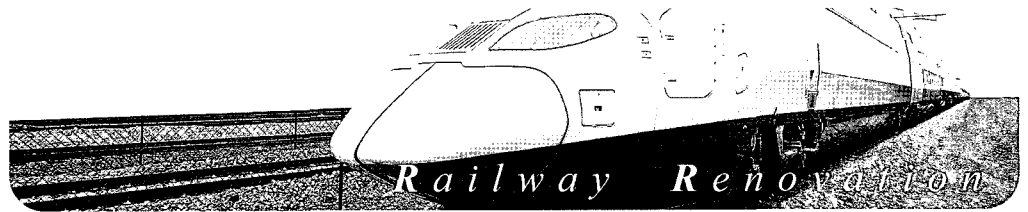
기존철도의 분기기는 분기부 내에 레일 이음매 및 크로싱 부분의 결선 부로 인하여 충격이 발생되고 전환되는 각도가 커서 고속운전이 불가능하였으나, 고속 분기기는 분기부 내의 레일을 용접하고 가동 크로싱의 채용으로 결선부를 제거하였으며 전환되는 각도를 적게 하여 고속운전 시 승차감을 향상하였으며, 탄성 포인트를 도입하였다.

또한, 분기부 내 탈선을 방지할 수 있도록 밀착 검지장치 및 쇄정 장치 등을 설치하여 안전성을 확보하였다.

(2) 장대레일 용접과 부설

열차속도가 고속화됨에 따라 승차감을 유지하고 충격 등에 대한 재료파괴를 최소화하고 안전 확보를 위하여 고속선로에는 장대레일 부설이 필수적이다. 장대레일 부설을 가능하게 하기 위하여 레일 용접기술에 대한 확신과 신축이음장치의 설치가 필요하다.

분기기를 포함한 서울-부산 전구간의 레일 이음매를 모두 용접하고 장대 교량 등 특수 구간에는 신축 이음매를 설치하여 덜컹거림이 없이 쾌적한 운행이 가능토록 하였다. 기지 용접은 국내에서 최초로 도입된 플래시 버트 용접을 이용하였다. 장대레일의 부설로 궤도재료의 수명이 연장되고 궤도유지보수 주기 및 작업량이 절감되며 소음 및 진동을 저감



시키는 효과를 얻을 수 있다.

(3) 최첨단 장비를 이용한 궤도부설

초음파나 레이저 장치 등 첨단 장비를 이용하여 자동화, 기계화 시공을 통하여 정밀하게 궤도를 부설하였다. 궤도부설은 먼저 10km 정도의 임시 궤도를 부설하여, 그 위로 레일, 침목 등 궤도 재료를 운반하여 부설하여 궤광을 조립하고, 6회의 자갈 살포 다짐, 장대레일 설정, 선형 조정, 선형 측정의 순으로 진행하였다.

나. 궤도재료 및 궤도시공

(1) 궤도재료 생산설비의 갱신

고속철도의 궤도재료는 엄격한 규격과 철저한 품질이 요구되므로 국내에서 제작하여 조달이 가능한 주요 궤도재료를 설계하고 규격화하여 설계 성능시험을 수행하고 품질 수준의 적합성을 검증하였다. 궤도재료의 설계와 규격화는 일반적으로 설계 하중→기능 및 제원 검토→구조와 재료 선정→구조해석→성능확인 시험→표준화 등의 과정을 거치었다.

궤도재료 설계 시에 레일은 고속주행 열차에 대한 동특성 결과로부터 레일 단면에 대한 응력을 검토하였고, PC 침목은 대한토목학회와 서울대학교 팀에서 설계하였으며, 궤도자갈은 도상 응력과 입도 및 물성치를 검토하였고, 레일 체결장치는 응력과 동특성에 대한 기술 검토를 하였다. 분기기는 오스트리아의 전문가인 Holzinger 및 프랑스 기술진 등의 기술 자문을 받아 노스 가동 크로싱과 탄성 포인트 등을 포함하는 고속용으로 설계하였다. 신축 이음매는 양쪽의 신축부와 중앙의 일반 궤도부로 구성되어 있으며, 분기기와 마찬가지로 PC 침목을 이용하였다.

레일, 침목, 체결장치, 궤도자갈, 분기기 등 주요 궤도재료의 기술규격과 품질기준은 프랑스 고속철도의 규격과 국제철도연맹(UIC), 유럽철도표준규격(CEN) 등의 규격을 바탕으로 SOFRERAIL에서 작성하여 국제궤도자문회의(SITAC)의 심의를 받아 각각의 규격(성능 시방서)을 확정하였다. 이 과정에서는 새 규격의 궤도재료 설계 검증을 위하여 국내제작 시제품(레일 체결장치와 침목)의 시험(진동 시험, 피로 시험 등 20여 항목)을 프랑스 철도청의 재료시험소에 의뢰하여 그 시험결과를 토대로 설계 기준을 보완하고 일

부는 재설계하여 재료 규격의 작성을 완료하였다. 특히, 체결장치의 경우에는 나중에 일부 시험기준 등이 모호하다는 지적에 따라 프랑스 기술진(SYSTR)이 새로운 CEN 규격을 바탕으로 새로 작성하여 UIC의 검증을 받고 SITAC의 자문을 받아 성능 시방서를 개정하였다.

새로 작성한 국제 수준의 기술 규격과 품질기준에 적합한 궤도재료를 공급하기 위해서는 낙후된 기존의 국내 제작·생산 설비를 전면적으로 개량하고 ISO 9000 시리즈에 따른 엄격한 품질관리 활동이 필요하였다. 따라서 관련 업체에서는 제작설비를 개량하고, 공단에서는 재료를 구매하기 전에 생산설비를 사전에 심사하였다. 심사 과정에서는 사전에 프랑스 기술진 등 국내·외의 전문가가 제작에 필요한 설비의 종류와 사전심사 기준 등을 작성하고 나서, 예비심사와 본심사 등 2회에 걸쳐 실시하였다.

(2) 자갈궤도의 시공

궤도공사는 다음과 같이 단계적으로 진행하였다. 궤도부설을 위한 시공측량→(고가교 등 매트 설치 개소에 밸리스트 매트 설치)⇒1 궤도 임시궤도 부설(평화차 위의 임시궤도를 전방의 런칭 빔으로 부설)⇒1, 2 궤도 장대레일 화합(문형 크레인 주행통로의 폭인 3.31 m에 적합하게 배열)⇒1, 2 궤도 바닥자갈 살포(1 궤도는 자갈화차 이용, 2 궤도는 1 궤도의 컨베이어 호퍼 화차에서 2 궤도의 덤프트럭으로 자갈공급→피니셔에 자갈공급→피니셔로 살포 고르기)⇒1 궤도의 궤광 조립(임시궤도 철거→바닥자갈 도상단면 정리→침목 배열→장대레일을 침목 위에 거치 및 침목 간격 조정→레일 체결(본 궤도와 임시궤도 경계부에 특수 건넌 장치의 설치)·2 궤도의 궤광 조립[침목 배열(1 궤도 화차 위의 침목을 쇼벨기로 2 궤도에 배열)→장대레일 거치 및 침목 간격 조정→레일 체결]⇒레일 용접(테르밋 용접)⇒자갈 살포 및 다짐(2차~4차, 동적 안정화)→(분기기 설치 개소에 분기기 부설)⇒자갈 살포 및 다짐(5차~6차, 동적 안정화)⇒장대레일 설정(레일온도가 22~28℃일 때는 자연 온도에서, 그 외는 긴장기 사용)⇒최종 다짐⇒궤도 점검.

궤도 부설 직후 전구간의 레일표면을 연마하였으며, 탐상차로 전구간의 레일을 탐상하였다.

(3) 콘크리트 궤도의 시공

콘크리트 궤도는 철도 100년여의 역사 중에 처음 시도된 것으로 광명 정거장 3.4km(단선 기준), 일직~장상 터널 간 18.3km와 화신5 터널 12.4km, 황학 터널 19.8km 등 53.9km의 궤도는 콘크리트 궤도(레다 디비닥 궤도 구조)로 시공하였다. 시공 회사에서는 독일의 Dywidag International GmbH와 기술협력 합의계약을 맺어 시공기술을 도입하고 구조검토를 하였다. 또한, 콘크리트 궤도의 궤도회로 절연 문제는 프랑스의 궤도 전문가인 S. Motagne⁵⁾ 씨의 기술자문을 받았으며, 광명 차량주박기지에 궤도회로 시험용 궤광을 부설하여 프랑스 신호 기술진에서 콘크리트 궤도/궤도회로 간섭에 따른 전기적 특성 값 확인 시험을 하고 그 결과에 따라 신호와 궤도의 설계를 일부 보완하였다.

레다 디비닥 콘크리트 궤도는 자갈 도상을 콘크리트로 바꾼 것으로 자갈궤도의 프리텐션 방식의 콘크리트 침목 대신에 포스트텐션 콘크리트 침목을 사용하며, 모노 블록 침목이 콘크리트 도상에 묻히는 구조이다. 콘크리트 궤도용 포스트텐션 콘크리트 침목은 독일 DB-C회사에 의뢰하여 구조계산과 도면을 보완하였으며, 침목 및 레일체결장치의 성능 시험을 하였다. 이 과정에서 체결장치(보슬로 시스템)의 절연 부족으로 매립전에 그리스를 추가로 충전하였다. 시공하기 전에 시험궤도를 부설하여 콘크리트 궤도의 시공성 등을 확인하였다.

5. 공사관리

가. 인터페이스 기술의 관리

철도는 토목, 궤도, 건축, 차량, 기계, 신호, 전기, 전자, 통신 분야 등이 통합된 기술의 집합체이다. 우리나라는 경부고속철도를 건설함에 따라 우리의 철도기술 능력을 세계에 과시하였으며, 고속철도의 건설과정에서 최첨단의 궤도장비를 이용한 궤도의 기계화시공, 궤도재료의 성능과 품질의 향상, 교량·터널·노반 설계와 시공 기술의 향상 등을 이룩하

였다. 또한, 자동열차제어시스템, 전력 공급선과 변전설비, 카테너리, 차량간의 기술적 연계성 등의 기술을 확보하고 설계·제작 기술의 향상 및 재료의 국산화와 품질 향상 등을 이루었다.

나. 사업관리

고속철도의 사업관리는 사업초기에는 외국기술에 의존하였으나, '01년 12월 이후에는 독자적인 기술자립을 통해 고속철도건설 사업을 성공적으로 추진·완료하게 되었다. 이러한 사업관리체계 구축을 통해 사업 공종을 업무분류체계(WBS)로 세분화, 타 분야와의 연계공정의 명확화, 업무처리의 절차화 등 표준화된 관리체계를 구축함과 동시에 직원 개인 및 조직의 목표와 책임사항을 부여하였고, 사업추진상의 문제점 및 현황에 대하여 사업관리시스템을 통한 전 요원의 정보공유가 가능하였다.

아울러, 사업참여 개개인은 각자의 책임사항의 시작점과 종료시점, 연관된 선행 및 후속공정을 충분히 숙지하게 됨으로써 사업비 증가나 일정 지연 발생을 조기에 파악하여 대처할 수 있으므로, 조기경보를 통한 예방조치 및 문제 발생 시에 즉각적인 조치가 가능하게 되었다.

'98년 종합사업관리시스템을 구축하여 운용한 이래 사업비, 공정, 품질 등이 계획 또는 계획을 상회하여 진행되었던 결과, '98년~'02년 기간 중에는 연평균 15%씩 공정을 추진하게 되었다.

다. 품질관리

품질관리기법으로 ISO 9000 계열을 도입('00년 5월 ISO 9001: 1994 인증, '03년 5월 ISO 9001: 2000 인증전환 및 재인증)하였으며 각종 시험자료의 축적으로 노하우를 확보하였으며, 또한 건설장비의 국산화에도 큰 성과를 달성하였다.

또한, 시공업체와 감리업체도 ISO 9000 인증을 받도록 하고 품질관리 절차서 개발과 고속철도 선진국인 프랑스, 독일 감리 팀의 참여로 고속철도 건설공사 관리기술을 선진국 기술을 습득하여 선진국 수준으로 향상되도록 하였다.

5) Serge Montagne : UIC의 궤도연구위원과 SNCF의 궤도연구실장을 역임하였으며, 현재 SYSTRA의 고문으로 재직하고 있다. TGV 궤도의 설계, 시공 및 시험을 주도적으로 수행하여 고속철도 궤도에 대하여 세계적인 권위자이다. 경부고속철도건설초기부터 궤도기술에 관하여 자문을 하여 한국의 궤도기술발전에 크게 기여하였다. 그 외에도 UIC 궤도연구위원과 DB의 궤도연구실장을 역임하면서 독일 ICE 궤도의 설계, 시공 및 시험을 주도적으로 수행한 Gerhand Kaess 씨와 UIC 궤도연구위원과 Graz 공대의 철도기술연구소장을 역임한 Graz 공대 교수 Klaus Reissberger 박사가 상기와 같이 한국의 궤도기술발전에 기여하였다.

ISO 9001 인증을 통하여 국제품질기준에 따른 체계적 품질관리시스템을 수립하였는데, 고속철도 사업과정의 주요 업무에 대한 절차서 작성을 완료하여 업무수행에 있어 시행착오 방지체계를 구축하였으며, 현장에서는 부실의 우려가 있는 시중 레미콘 사용을 자제하고 각 현장마다 자체 배치플랜트(Batch Plant)를 설치하여 골재 규격별 투입구를 분리해 배합설계대로 컴퓨터에 의한 자동생산관리를 이룰 수 있게 되었고, 공종별 주요공사 착공 시에는 철저한 시험시공을 통하여 사전에 문제점 발견 및 해결이 가능하게 되었다.

라. 재료 관리와 품질 향상

건설 분야는 공사용 재료의 생산제품 수준을 국제기술수준으로 국산화하고 기계화하여 해외고속철도 사업진출이 가능하도록 하였다.

건설현장에 투입되는 모든 기자재는 사전 공급원 승인을 받은 후 현장에 투입되도록 제반 절차 및 시스템을 구축하였고, 모든 설계 자료는 자격을 갖춘 요원에 의하여 검토·승인되고 그 결과가 기록·관리되도록 하였으며, 고속철도 건설참여자들에 대한 지속적인 교육시행으로 품질관리의 중요성을 항상 인식하도록 조치하였다. 따라서 재료부문은 새로운 공법의 도입에 따른 공사용 재료와 신소재의 국산화에 기여하였고 재료생산 공장설비 및 생산제품의 시험, 검사방법 등을 국제수준으로 향상시키는 계기가 되었다.

6. 맺음말

고속철도의 개통은 전국을 만나질 생활권으로 탈바꿈시키며, 요즈음 날로 악화되고 있는 심각한 도로의 교통 체증, 물류난, 수도권 인구집중의 심화 및 부동산가격 폭등 등의 문제들을 크게 개선시킬 수 있을 것이다. 또한, 생활레저의 변화, 주거환경의 변화, 교육과 문화의 변화, 그리고 교통의 변화를 통해 국민의 생활을 풍요롭게 변화시킬 것으로 기대된다. 고속철도는 21세기 교통혁명을 선도하는 주체가 될 것이며, 또한 남북철도가 서로 연결되면, 중국, 몽골, 러시아, 유럽까지 철도와 연결 운행할 수 있으므로 유라시아 철도실�크로드가 부활될 것이다. 이것은 우리나라 경제 재도약의 발판이 되고 세계일류 국가로 도약하는 계기가 될 것이다.

그동안 철도기술의 발전 과정과 최근의 성과를 뒤돌아보

면 외국으로부터 설계자문과 검증을 이제는 점차 자립화의 단계에 들어서고 있다. 특히 10년에 걸쳐 공단에서 개최한 국제궤도자문회의 등을 통하여 고속철도 궤도의 주요 기술에 대하여 자문을 받고 공단에서 검토, 계획한 주요 기술 사항에 대하여 인증을 받았으며, 최신의 기술에 대한 정보 교류를 통하여 궤도기술을 축적하고 국내의 철도 기술을 선도적으로 향상시킨 사례를 들 수 있다. 각종 시험과 측정을 통하여 우리 고유의 궤도 구조 등을 결정하고, 주요 재료의 생산 설비를 국제 수준으로 향상시키는 등 고속철도 건설을 체계적으로 준비하여, 비록 선진 외국 기술의 도움을 받기도 하였지만 우리의 노력과 기술로 세계적인 품질의 철도를 건설한 것은 향후 철도기술의 도약을 위한 중요한 발판이 될 것이라 생각한다. ☞

참고 문헌

1. 강기동, 서사범, "경부고속철도 건설 분야의 기술특성과 파급효과", 대한토목학회지 제52권 제12호, 2004, 12.
2. 강기동, "고속철도 기술의 성과와 반성", 鐵道線路 No. 37, 2001. 6.
3. 강기동, "경부고속철도 건설을 통한 성과와 교훈", 시공사례세미나 자료, 한국건설기술인협회, 2004. 3.
4. 서사범, "고속철도 궤도의 건설 준비에서 유지관리까지의 과정", 대한토목학회지 제52권 제5, 6호, 2004, 5~6.
5. 강기동, "고속철도 궤도재료의 품질확보", 제6회 철도선로기술발표회 자료집, 한국철도선로기술협회, 1998. 4.
6. 徐士範, "大韓土木學會 學術發表會 紹介", 鐵道施設 No. 51, 1994. 3.
7. 한국고속철도건설공단 : 경부고속철도건설사(Ⅰ), 2000. 7.
8. 한국철도시설공단 : 경부고속철도건설사(Ⅱ), 2004. 12.
9. 金載學, "京釜 高速鐵道 試驗線 區間 軌道工事 機械化 新工法 紹介", 鐵道施設 No. 73~74, 1999. 9~12.
10. 궤도공영, "경부고속철도 궤도부설공사(10)", 鐵道線路 No. 44, 2003. 3.
11. 한국고속철도건설공단 궤도처의 각종 업무자료