

# 기존선 속도향상을 위한 실용화 기술



유원희

엄기영, 한성호, 김대상,  
신광복, 이수길

## 1. 서론

기존선 속도향상, 안전성 확보, 수송서비스 개선을 목표로 하는 철도기술연구개발사업은 고객에게 고품질의 서비스를 제공하고 타 교통시스템과의 경쟁력을 확보하기 위하여 주관행정부처인 철도청과 전문기관인 한국철도기술연구원에서 추진하고 있다.

이 사업은 1999년 12월 철도기술연구개발사업기본계획을 수립하여 2001년 8월 한국철도기술연구원을 사업자로 선정하고 총 450억의 정부지원예산을 투입하여 2004년까지 4차년도에 걸쳐 기존선 속도향상을 위한 실용화 기술개발, 철도유지보수시스템개발, 고속철도운영시스템개발을 목표로 하고 있다.

주요 사업내용으로는 기존선 속도향상(140km/h, 160, 200km/h)에 필요한 차량, 선로구축물, 전기신호 시스템 기술 및 제품개발, 유지보수 과학화 및 체계화 기술(maintenance free화 지향) 개발, 고속철도운영 효율성 향상에 필요한 선로용량계산 프로그램개발을 들

수 있다. 특히, 초기시설투자비용을 최소화하면서 속도향상에 따른 운행시간단축 효과를 최대화하기 위하여 선진외국에서 이미 성공적으로 적용하고 있는 틸팅 차량시스템의 실용기술개발을 추진하고 있다.

이 기술은 궤도 곡선부의 캔트부족량을 차체 틸팅제어를 통해 보상해 줌으로써 곡선구간에서의 열차주행 속도를 향상시킬 수 있기 때문에 기존 운행되는 열차보다 20% ~ 30% 정도의 속도향상 효과를 얻을 수 있다.

국내에서 본격적으로 틸팅기술개발이 추진되는 것은 이번이 처음이며 틸팅메커니즘(대차, 판토틀라프)과 틸팅제어기술에 대한 고도의 신뢰성과 안전성, 횡가속도 증가에 따른 승객의 승차감 향상 등 최신 제어 기술을 바탕으로 한 시스템엔지니어링기술의 확보가 주요 관건이다.

특히 틸팅 핵심제어기술의 국내기술확보를 국내 수급 상황에 맞게 최대한 달성하기 위해 해외틸팅 제작회사와의 기술협력을 통해 시험평가기술 및 속도향상에 관한 시스템인터페이스기술을 적극 활용하여 성공

적인 한국형 틸팅차량개발을 추진하고 있다.

이 사업이 종료되는 2004년 이후에는 연구결과를 토대로 최고운행속도 180km/h급 틸팅열차가 실제 영업선로에 투입되기 위해 제작될 것이며 차량수급계획에 따라 2010년까지 단계적으로 추가 운영될 전망이다. 따라서, 300km/h급 고속철도차량(KTX) 개통과 함께 200km/h급 특급틸팅열차의 운영으로 고속철도와 기존 철도와의 속도차이를 줄이고 지역간 균형적인 발전 등 철도전반의 수송효율성 향상이 가능하게 될 것이다.

## II. 기존선 속도향상을 위한 실용화 사업 추진현황

### 1. 사업 개요

#### ● 사업내용

- 사업기간 : 2001년도 ~ 2004년도
- 총사업비 : 450억원('02년까지 기투자액 : 78억원)
- 사업규모 : 2개 대과제, 6개 중과제
- 지원형태 : 출연금(지원조건 : Matching Fund)
- 사업시행주체 : 철도청, 전문기관(한국철도기술연구원)

#### ● 지원근거 및 추진경위

- 지원근거
  - '과학기술기본법' 제7조(과학기술기본계획)
  - '국유철도의운영에관한특별법' 제32조(철도기술의 진흥)
- 추진경위
  - '99.12.:' 철도기술연구개발 기본계획' (2000-2010) 수립
  - 3대 중점추진목표, 10대 중점추진과제, 발전지표 설정
  - 연구개발투자지표설정('04년:국유철도사업수입의 2%)

- '00.4~6 : 철도기술연구개발사업 기획
- '00. 9 : 2001년 신규사업으로 확정
- '01.8.14 : 철도연과 '01년 사업분 용역계약체결 (착수)
- '02.3.13 : '01년 사업분 용역완료
- '02.8.1 : 사업시행을 위한 전문기관 다년도 협약

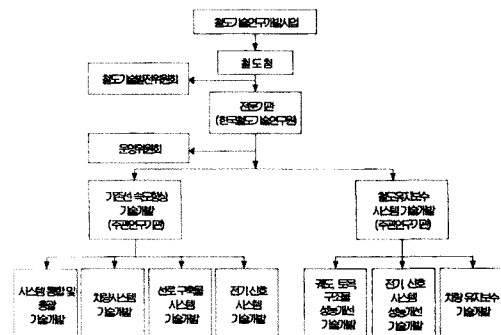
## 2. 사업 목적

기존선 속도향상을 위한 실용화에 필요한 차량/선로 구축물/전기·신호 시스템등의 상호 인터페이스를 최적으로 유지하여 최고운행속도 180km/h의 기존선 고속틸팅열차 개발

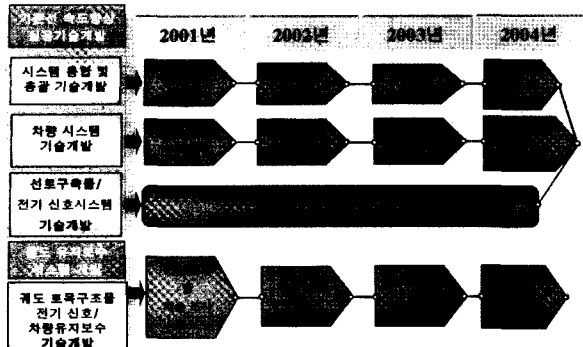
- 기존선속도향상을 통한 여행시간단축 및 국가물류 비용 절감
- 차량·시설·전기·신호분야등의 품질안전성 향상
- 철도시스템의 현대화, 자동화를 위한 유지보수체계 최적화
- 철도시스템 자동진단 및 수명 예측을 통한 고장과 사고예방

## 3. 사업 추진계획 및 내용

#### ● 사업추진체계



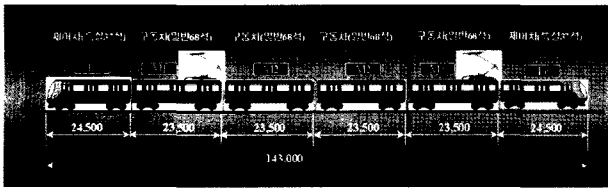
● 사업추진일정



● 주요사업내용

○ 기존선 속도향상 실용기술개발

기존선 속도 향상(140 160, 200km/h)에 필요한 기술·제품개발 틸팅차량, 선로구축물, 전기·신호시스템 등



[ 열차편성도 (6량 1편성) ]

○ 철도유지보수시스템 기술개발

저비용 고효율로 유지보수 비용 대폭절감  
- 유지보수 과학화 및 체계화기술 확보(Maintenance free 지향)

III. 기존선 속도향상을 위한 실용화 기술 현황

III-1. 틸팅차량시스템 기술개발

1. 틸팅 메커니즘

운전을 하는 사람이라면 누구나 차(car)가 곡선구간을 주행할 때 원심력이 작용한다는 것을 알고 있다. 열

차(train)도 마찬가지로 곡선선로를 주행하면 원심력을 받게 된다. 원심력(centrifugal force)은 식(1)과 같이 속도 제곱에 비례하고 곡선 반경에 반비례한다.

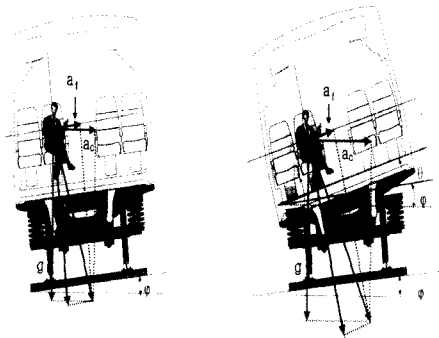
$$\text{Centrifugal Force} \propto v^2 / r \quad (1)$$

만약 열차가 고속으로 곡선선로를 주행하고 있다고 생각하면 열차는 외측으로 원심력이 작용하여 속도를 줄이지 않는다면 탈선을 하거나 탈선을 하지 않더라도 승객들은 한쪽으로 몸이 기울어져 편안한 열차여행은 하지 못할 것이다. 과연 롤러 코스터(roller coaster) 같은 열차를 누가 계속 타겠는가? 이런 이유로 철도 차량 제작회사들은 곡선선로에서도 고속으로 주행이 가능하고 승객들에게는 안락함을 줄 수 있는 고속철도 제작에 대한 필요성과 요구에 직면하게 되었다. 고속철도 제작에는 두 가지 방법이 있다. 첫 번째는 기존선(existing railway lines)을 사용하여 틸팅이 가능한 열차(틸팅열차, tilting train)를 개발하는 방법이고 두 번째는 틸팅 열차를 개발하지 않고 새로운 선로를 구축하는 방법이다. TGV 등과 같은 열차는 큰 곡선 반경을 갖는 전용 고속 선로(dedicated high speed lines)를 가지고 있기 때문에 열차의 틸팅은 필요치 않게 된다. 그러나 후자의 경우에는 막대한 비용과 공사 기간이 소요되므로 예산 및 경제성 검토를 통해 많은 국가에서는 기존의 인프라를 이용한 틸팅 차량 개발에 박차를 가하고 있다.

1) 차량 틸팅 원리

열차가 곡선선로를 주행할 때 승객에게는 그림 3.1.1에서 보듯이 두 가지의 하중이 작용하게 된다. 하나는 중력이고 다른 하나는 곡선주행 시 외측으로 발생하는 가속도에 의한 원심력이다. 물리적으로 두 개의 힘이 작용하면 결과적으로 합력(resultant force)이 생긴다. 합력은 승객을 앉은 의자 아래 방향과 바깥 방

향으로 당길 것이다. 그러나 열차가 틸팅이 되면 원심력은 현저히 줄어들거나 없어지고 의자에 작용하는 수직 접촉력(normal contact force)은 합력과 같게 된다. 이것은 승객이 더 이상 바깥 방향으로 몸이 기울는 불편함을 느끼지 않는다는 것이다. 이런 틸팅 열차는 승객의 안락함뿐만 아니라 기존 열차보다 곡선 구간에 25% ~ 40%의 속도향상을 얻는 장점을 가지고 있다.



〈그림 3.1.1〉 틸팅 유무에 따른 작용 합력의 변화

## 2) 틸팅시스템 제어방식

틸팅방식에 따라 곡선주행 시 차체를 일정 경사각으로 강제 제어하는 강제식과 곡선주행 시 발생하는 경사각에 의거 제어하는 자연식으로 구분된다. 요즘에 사용되는 틸팅 방식은 대부분 강제식이 많이 사용되고 있다. 국내에서는 아직 틸팅 시스템에 관한 연구 및 기술이 충분히 확보되어 있지 못하므로 이탈리아, 독일, 스웨덴 등에서 개발되어 여러 국가에서 사용중인 ETR460, ICT-VT, X2000 등의 틸팅 차량 시스템 연구를 통하여 해외연구기관과 공동으로 개발하는 것이 바람직할 거라 판단된다.

## 2. 국외 틸팅차량 연구개발 역사

철도차량은 100년이 넘게 곡선구간에서의 운행속도 향상에 대한 가능성을 캔트(cant) 수정에서 찾았는데 이는 고속열차와 저속열차를 모두 고려해야 하는 데

이런 점이 고속열차연구개발 추진에 걸림돌이 되었다. 그럼에도 불구하고 1950년대부터 국외 선진 철도 당국에서는 승객에게 불편함을 느끼게 하는 중심력의 영향을 부분적으로나마 완화시킬 수 있는 틸팅차량을 도입하는 데 총력을 기울여 왔다.

스페인은 독자적으로 자연틸팅차량(natural tilting train)을 개발하여 1983년 운행거리가 338km인 마드리드-자라고자 노선 영업운전 시 허용 횡 가속도를 1.2m/s<sup>2</sup> 이하로 제한하고 최대속도를 일반차량과 동일하게 140km/h로 하여 운행한 결과 약 7%의 시간단축 효과를 얻었다.

이탈리아의 틸팅차량 도입과 기존선 속도향상을 위한 실용화는 1987년부터 1992년까지 ETR401로부터 도입된 15편성의 ETR450차량이 영업운전에 투입되었다. ETR450차량은 로마-밀라노, 로마-베니스, 로마-바리 등 4개 노선 2399km에 운영하고 있으며 운행시간은 IC 차량에 비해 단거리 구간에서 6%, 장거리 구간에서 최대 25%의 시간단축 효과를 얻어 평균적으로 15 ~ 20% 시간단축 성과를 올렸다.

스웨덴은 궤도에 큰 투자를 하지 않고 운행시간을 단축하는 방법으로서 차체경사기구와 조향성이 우수한 대차를 갖춘 X2000 차량을 ABB와 공동 개발하였고 1990년 Stockholm - Gothenburg 노선에서 X2000차량 영업운행을 시작하였다. 영업 후 기존차량은 4시간 소요되는 것이 1992년에 2시간 59분으로 1시간 단축되어 25%의 운행 시간 단축효과를 얻었다.

스위스(ETR), 노르웨이(BM71), 독일(VT610, IC-T), 포르투갈(Alfa pendular), 일본(Series 381등) 등도 틸팅 차량을 도입 또는 개발하여 운영 중에 있으며 시간단축 및 철도의 점유율 상승효과를 거두고 있다.

## 3. 국내 틸팅차량 연구개발 현황

우리나라에서도 철도 속도향상을 위하여 경부고속

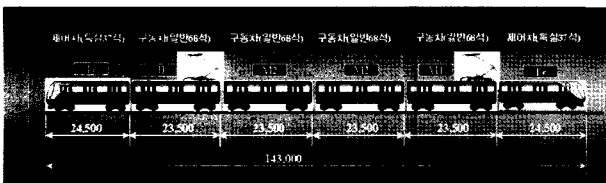
철도가 1994년 이래 건설되고 있어, 발전적인 방향으로 추진되고 있으나, 기존선은 1986년 최고운행속도 140km/h로 상향된 후 속도향상이 멈춰진 상태이다. 또한 각 시도의 지방자치에서 경부고속철도가 특정 지역에 대한 배려로 인식되어 민원이 폭증할 것이 예상되고 있다. 이를 대비해 철도청에서는 중장기 철도발전계획을 수립하여 천안선, 장항선, 춘천선 등을 순차적으로 전철화하는 사업을 추진 중에 있다. 철도청에서는 2000년 8월에 철도시설 기술향상을 위하여 철도 기술연구개발사업을 수행하여 기존선 개량과 틸팅열차 개발을 통하여 열차의 최고운행속도를 2004년에는 160km/h, 2010년에는 200km/h 까지 향상시키는 장기 계획을 수립하였다. 이 사업에서는 최고운행속도 180km/h의 한국형 독자 고유모델의 기존선 고속틸팅열차를 개발함으로써 주요간선의 속도향상과 네트워크에 대비하고, 또한 기존선의 속도향상을 선진국의 기존기술에서 탈피한 자체기술을 확보하는 것을 목표로 하고 있다.

#### 4. 한국형 기존선 고속틸팅열차 사양

한국철도기술연구원에서 2001~2002년도(1차년도) 기존선 속도향상 실용기술개발 과제를 수행하여 결정된 국산 기존선 틸팅고속열차(ETC-T, Express Tilting Train EMU for Conventional Railroad)의 차량 시스템 기본 사양(안)은 다음과 같다.

##### 1) 열차편성

열차편성은 향후 양산시를 대비하여 시스템이 동일



(그림 3.1.2) ETC-T 시제차 편성도

하게 운영되고, 성능이 발휘되도록 그림 3.1.2와 같이 2유닛 6량으로 구성하였으며 이는 중앙선 및 장항선 등에서 즉시 투입이 가능한 열차편성이다.

##### 2) 열차속도

철도청은 중앙선, 장항선 등에 선로설계속도를 120~150km/h로 개량하고 있으며, 호남선 일부구간(송정리-목포)은 200km/h로 개량하고 있다. 틸팅열차의 운행속도는 향후 개량선로의 최고속도에 맞춰 설정되어야 하고, 또한 틸팅시스템도 해외 공동개발을 추진해야 하므로 180~230km/h대로 운행하고 있는 선진국 틸팅기술을 토대로 큰 변경 없이 활용하는 차원에서 운행속도를 180km/h로 설정하는 것이 가장 적절한 것으로 검토되었다.

##### 3) 차량설계기준

소음 : 틸팅차량은 곡선에서 틸팅시스템 구동뿐만 아니라 전차선에서 전기를 공급받아 견인전동기를 구동하여 주행하는 전기차량이므로 주행 중 소음이 많이 발생하게 된다. 따라서, 차체의 하부, 축부 및 단부에 흡음재 및 단열재를 충분히 시공하고, 특히 도어, 창문을 이중창 및 기밀구조로 하여 소음을 줄이고 갱웨이(gangway)를 기밀구조로 설비하여 근본적으로 소음을 차단하는 구조로 차량설계를 추진하여야 한다. 전장품 등을 최신의 기술을 활용하고, 저소음 구조로 설계하여 기존의 전동차 소음수준 73~83dB(A) 보다는 훨씬 낮추고, 새마을 객차의 66~68dB(A)보다는 다소 높은 수준인 70dB(A)를 전기틸팅차량의 특성상 적정한 개발목표로 설정하였다. 이는 동력분산식 열차로서는 쾌적한 수준이다.

승차감 : 승차감은 선로와 승객의 쾌적성을 고려하여 목표로 설정하여야 하므로 최고속도 180km/h로 국유철도 1급선 직선평탄선로를 주행 시 일정구간에서 측정하여 상하 110dB이하, 좌우 108dB이하로 개발목

표 3.1.1 시제 틸팅 대차 주요 사양(안)

항 목	기본 사양(안)	선정 사유
기본 틸팅방식	강제 틸팅방식	곡선제한속도향상효과 큼(30%)
틸팅 제어방식	차상내 곡선감지방식(Command Driven)	지상자 곡선감지 방식에 비해 구조단순, 운행의 탄력성 우수
틸팅 메커니즘 구조	링크방식	유지보수성, 신뢰성 우수
틸팅 메커니즘 위치	2차 현가장치 하부	구조단순(휠 액츄에이터 불 필요)
틸팅 액츄에이터 형식	전기제어식	구조단순, 유지보수성 우수
최대 틸팅각도	8°	틸팅 효과 극대화
최대 틸팅율	4 /sec	짧은 완화곡선 길이
최대 설계속도	200km/h	기존선 및 고속신선 주행가능
최고 운행속도	180km/h	최고설계속도의 90%수준
조향 메커니즘	반강제식 Z링크방식	횡압감소효과 우수
1차 현가장치	코일스프링	유지보수성, 신뢰성 우수
2차 현가장치	공기스프링 틸팅볼스터 yaw 및 상하 댐퍼 Anti-roll 장치	승차감 우수, 현가장치의 roll 억제로 승차감 향상
고정축거	2600 mm	기존 새마을 기준 틸팅, 조향 구성품 설치공간 확보

표를 설정하였다. 또한, 감 가속 시 종방향 가속도는 1.0m/s<sup>2</sup>이하, 종방향 저크(jerk)는 0.7m/s<sup>3</sup>이하로 목표표를 설정하였다.

### 3) 대차

틸팅대차는 곡선주행 시에 속도향상을 위하여 사용되어야 하며, 기존선 및 개량선로 모두 운행속도 영역에서 안전하고, 안정된 주행을 할 수 있어야 한다. 또한, 조향장치 등을 통하여 곡선에서 승차감 향상 및 차륜 플랜지 마모를 최소화하는 구조로 설계되어야 한다. 표 3.1.1은 시제 틸팅대차의 사양(안)을 나타낸다.

### 4) 차체설계

차체재질은 국내에서 개발된 알루미늄 합금 중공 압출재를 사용하는 것이 경량화와 조립 공수절감 측면에서 유리하다고 판단된다. 선진국에서는 이미 ICE3, AGV, 신간선 700계 등 신차종에 사용하여 좋은 호응을 얻고 있다. 국내에서는 표준전동차 및 G7 고속철도의 차체에 알루미늄 합금 중공 압출재를 사용하여 20%의 차체 중량을 감소시켰다. 이러한 차체 중량감소를 통해 속도향상에 의한 궤도부담력의 증가를 완화시킬 수 있었다. 또한, FRP나 하니컴과 같은 복합재료

(composite material)의 적용도 고려할 수 있지만 알루미늄 대비 제작비가 높기 때문에 현재는 특정 부위(전두부 등)에 일부 사용되고 있는 실정이다. 그러나, 비강성, 비강도가 철, 알루미늄 보다 월등히 높은 복합재료의 적용을 위한 선행 연구가 필요하다고 생각된다. 이미 AAR Composites과 Bombardier는 2004년 개발 목표로 고등복합재료(advanced composite materials)를 사용한 Las Vegas Monorail Car Body 개발에 착수하였다.

### 5) 틸팅시스템

틸팅차량의 틸팅최대각도는 8 이하, 틸팅메커니즘은 차상내 곡선감지장치를 통해 액츄에이터가 작동되는 강제틸팅방식을 선택하였고, 또한 틸팅시스템은 제어 불능 시를 대비한 Fail-Safe 기능도 추가하였다..

틸팅방식은 차상내에서 곡선을 감지하고 연산을 통해 강제적으로 차체를 경사시키는 강제제어방식으로 하였다. 틸팅제어는 선두열차에 설치된 센서와 틸팅프로세서로 곡선을 감지하여 소요 틸팅차량을 연산을 통해 편성 내 차량을 순차적으로 제어하는 일괄 제어 시스템으로 하였다.

선진국은 이미 수십 년 전부터 틸팅 차량에 대한 필

요성 및 요구에 직면하여 연구개발에 집중 투자하여 현재 많은 결실을 보고 있다. 항공기와 자동차 등과 같은 타 운송 및 여행 수단에 빼앗겼던 점유율도 점차 높아지고 있으며 쾌적하고 빠른 서비스로 틸팅 열차는 이제 당연한 철도 시스템으로 받아들여지고 있다. 국내에서도 선진국에 비해 늦은 감은 있지만 철도청에서 국가기술연구개발사업(2001~2004, 1단계)을 통해 기존 고속틸팅 열차 개발에 박차를 가하고 있다. 한국철도기술연구원은 틸팅 열차의 타당성 분석 및 외국 선진 기술 분석을 통해 가능성을 확신하였으며 한국형 틸팅 열차 시스템에 대한 기본사양(안)을 확정하였다. 틸팅 제어 기술 등과 같은 일부 핵심 기술은 해외 선진국과 공동 개발을 추진하고 기외 대부분의 기술은 국내 순수 기술로 개발하고자 한다.

## III-2. 선로구축물 시스템 기술개발

### 1. 선로구축물 시스템 인터페이스

기존선에 틸팅 차량의 사용으로 인한 속도 향상은 노반개량, 도상개량, 개량형 분기기의 도입 등 선로구축물 시스템의 성능 향상이 필요하게 된다. 각각의 선로구축물의 속도향상에 따른 영향과 기존선 속도향상에 따른 제약요인 및 이에 따른 틸팅차량 적용의 타당성 검토결과를 요약하면 다음과 같다.

#### 1) 선로구축물의 속도향상에 따른 영향

##### 가. 터널

속도향상에 따른 큰 영향은 없으나, 터널 출구에서 발생하는 미기압 파와 과열음의 발생 가능성도 배제할 수 없다. 보통 200km/h 정도의 속도에서 미기압파의 영향이 고려된다.

##### 나. 노반

노반은 열차하중에 대하여 충분한 지지력을 유지하면서 열차통과 시 과도한 진동을 유발시키지 않아야 한다. 따라서 증가하는 차륜하중에 대하여 연약 지반상의 노반이 안정을 유지하는가에 대하여 검토 할 필요가 있으며, 열차 속도 증가로 인한 노반 변위 증가에 대한 궤도 틀림량을 추정하여야 한다. 속도향상에 따른 노반의 지지력 부족, 이상 진동, 침하 등이 예측되는 경우, 궤도 및 노반·지반 개량을 위한 대책공법을 시행하여야 한다.

##### 다. 토사 붕괴 낙석 등에 대한 안전성

재해방지를 위하여 낙석방지책, 비탈면공 등의 대책공을 시행하는 것이 최선의 방법이나, 대책공의 시공이 어려운 장소의 경우에는 운전규제와 재해를 검지할 수 있는 재해검지시스템을 채용하여 속도향상에 따른 안전성을 확보하는 것이 가능하다.

##### 라. 소음과 속도향상

소음의 원인에 따라 구조물음, 전동음, 집전계음, 차체공력음의 4가지 음으로 구분되는 음원 중 가장 큰 영향을 미치는 음원을 파악하여 효과적인 대책을 세울 필요가 있다.

#### 2) 기존선 속도향상에 따른 제약요인

##### 가. 선별 최고속도 현황

선로의 등급에 따른 최고속도의 현황은 표 3.2.1 같으며 대략 100~140km/h 범위에 있다.

##### 나. 분기부 속도제한

정거장내의 분기부내 곡선이 없는 본선의 경우 분기부 통과속도는 분기부 궤도구조의 취약성 및 분기부 결선부 통과 시 충격에 의한 승차감 저하 등을 예방하고자 선별 최고속도보다도 5~20km/h 정도 낮게 통과

표 3.2.1 선별 최고속도 현황

등급	선별	구간	최고속도(km/h)
2 급선	경부선	표준선 구간	140
		기타선 구간	135
	호남선	익산-송정리	140
	분당선	전 구간	100
3 급선	호남선	서대전-강경	125
	대구선	전 구간	120
	중앙선	청량리-영천	110
		영천-경주	120
	전라선	전 구간	100

속도를 제한하여 운행하고 있다.

#### 다. 곡선부 속도제한

곡선부에서는 열차 축하중에 의한 수직력 외에 열차의 곡선방향주행으로 인한 원심력이 발생한다. 원심력으로 인하여 발생하는 주요 현상으로는 외측 레일의 편마모 촉진, 이상소음 및 곡선부 줄뜰림 진전을 들 수 있다.

### 3) 틸팅차량 적용의 기술적 타당성 검토 결과

틸팅차량 운행에 따른 기술적 타당성 검토는

가. 완화 곡선상에서의 승차감 측면

나. 탈선안전도 및 횡압 측면

다. 차량과 시설물간의 간섭 측면에 대해 집중적으로 검토되었다.

틸팅차량 운행에 따른 완화곡선부 승차감 확보 측면에서 수행된 선형 적합성 검토는 개량을 최소화하여 틸팅차량을 조기 투입하려는 취지에 맞추어, 개량이 최소화되는 제한속도 수준 하에서 수행되었다. 곡선부 적합성 검토 결과, 선형 개량을 요하거나 또는 속도향상을 못하는 곡선개소는 원주-안동간 2개소, 제천-동백산간 2개소로서 극미하게 나타났다.

틸팅차량은 곡선을 일반차량보다 고속으로 주행하기 때문에 원심력 증가와 이에 따른 궤도 횡압 및 탈선

안전도 저하를 초래할 수 있다. 따라서 이를 해소하기 위해 차량의 축중 감소 및 조향장치를 적용한 틸팅시스템을 사용한다.

대상노선은 노후된 곡선터널이 많아 차량과의 간섭 위험이 높은 구간이다. 따라서 차량의 최대 운동범위 해석을 통해 선로건축물과 안전하게 운행될 수 있도록 차량의 폭을 제한하여 검토하였으며 그 결과는 다음과 같다.

기존 하부구조의 개량을 최소화하기 위해 구간별 틸팅차량의 최고속도 및 곡선제한속도가 차등 설정되었다. 개량공사 설계조건 및 일부 선형이 좋은 구간은 곡선제한속도가 5.8√R 까지 향상 가능할 것으로 나타났으나, 급곡선이 많은 일부 구간에서는 4.2√R 수준으로 미미한 속도향상을 보였다. 따라서 대상노선의 급곡선부 선형개량, 즉 곡선반경 증대 및 완화곡선 길이를 증가시킨다면 대부분의 곡선제한속도를 5.8√R 까지 향상 될 것으로 판단되며, 이 경우 틸팅차량의 운행시간이 약 20%~30% 향상 될 것이다.

대상노선의 역구간에 양개형 분기기가 설치되어 분기에 의한 속도 제한을 받고 있으며 운행시간 향상의 저해요소로 작용되고 있다. 따라서 역구내를 편개형 분기기로 적용하고, 주본선은 편개형 분기기의 직선측으로 통과토록 선형을 배치하는 등의 개량공사를 점진적으로 추진해가는 것이 바람직할 것이다.

## 2. 선로구축물 시스템 기술개발

틸팅차량의 사용으로 인한 기존선 속도향상에 따라 선로구축물에서 필요한 제반기술을 검토하고 그에 따른 대책방안을 강구해야 할 필요성이 있다. 틸팅차량의 개발로 선로에 주는 부담이 최소화된다 하더라도 곡선부 뿐 아니라 직선부에서도 차량의 주행안전성 등과 같은 문제가 발생할 수 있으므로 이와 관련하여 1차년도 주요연구성과 및 2차년도 연구개발 과제를 간



략하게 소개하면 다음과 같다.

### 1) 선로 시스템 개선 기술 개발

2차년도부터 수행하게 될 선로시스템 개선기술개발에 관한 연구에서는 먼저 기존선 속도향상을 위한 선로시스템 개선(안)을 제시하고 속도 및 승차감 향상을 위한 선로시스템개선기술을 개발하여 기존선 속도향상을 위한 선로성능을 검토 분석 할 계획에 있다.

### 2) 관형교의 보수보강 및 유도상화 기술개발

현재 공용중인 철도 교량의 설계는 정적내하력 확보 측면에서만 수행되었기 때문에 운행중인 열차에 의한 교량의 동적 거동특성이 불확실하며 기존선 속도향상에 따른 동적안전성도 보장할 수 없다. 본 연구과제에서는 기존선 속도향상화에 따른 관형교의 진동저감을 통한 구조적 안전성 확보방안, 그리고 열차의 주행안전성과 승차감 향상 방안을 수립하기 위한 연구의 일환으로 관형교의 분포현황과 손상현황 파악, 각 국 철도교량의 설계기준 분석, 현장측정을 통한 관형교의 동특성 측정 및 분석, 수치해석에 의한 동적안전성 평가에 관한 연구를 수행하였다. 1차년도 주요연구결과를 정리하여 보면 다음과 같다.

#### 가) 현장계측에 의한 동적응답실험의 분석결과

현재의 교량상태 및 열차운행조건에서의 동적응답 특성을 파악하기 위하여 경부선(4개소)과 호남선(3개

표 3.2.3 수직 및 수평 방향 최대가속도 교량명

교량명	수직가속도		수평가속도	
	계측치(G)	발생경우	계측치(G)	발생경우
진평천	0.681	무궁화 104km/h	0.740	무궁화 1102km/h
심천천	0.505	무궁화 106km/h	0.396	무궁화 112km/h
원평천	1.382	새마을 127km/h	1.099	새마을 132km/h
북삼천	1.740	무궁화 72km/h	1.713	무궁화 61km/h
삼가천	0.977	화물 110km/h	0.869	화물 75km/h
동명천	1.554	무궁화 120km/h	1.136	무궁화 120km/h
하서천	1.53	무궁화 130km/h	1.624	무궁화 108km/h

소)의 14개 경간에 대하여 수직변위 및 수직방향가속도, 윤중과 횡압, 플랜지와 브레이싱의 변형률 및 복부판의 전단변형률등을 측정하였다. 계측대상 교량의 최대수직변위와 수직 및 수평방향 최대가속도는 표 3.2.2. 및 3.2.3과 같다. 최대변위는 약10mm 정도로 무궁화 열차 통과시에 나타나는데 이는 철도교 설계기준상의 한계인 23mm이내에 있다. 그리고 현재의 열차주행환경과 구조물 상태하에서는 차량의 속도에 따른 동적수직처짐의 증폭현상은 뚜렷하게 나타나지 않고 동력차의 중량에 의한 효과가 더 크게 영향을 미칠 수 있다.

가속도의 경우 직접적인 비교 기준이 없기 때문에 절대적인 비교는 어려우나, 고속철도 교량의 경우 도상의 교량을 방지할 목적으로 0.35g로 수직방향가속도를 제한하고 있으므로 관형교상에서 발생하는 가속도는 유도상교량에서 발생하는 가속도보다 매우 크게 발생함을 유추할 수 있다.

표 3.2.2 최대수직변위

교량명	수직변위		설계기준 (mm)	비 고	
	계측치(mm)	발생경우		경간길이	설계하중
진평천	9.83	무궁화 101km/h	23	18.0m	LS22
심천천	7.31	무궁화 106km/h	23	18.0m	LS18
원평천	4.46	무궁화 55km/h	11	9.0m	LS18
북삼천	8.36	무궁화 66km/h	15	12.0m	LS22
삼가천	5.48	화물 82km/h	15	12.0m	LS18
동명천	6.63	무궁화 123km/h	11	9.0m	LS18
하서천	7.49	무궁화 130km/h	11	9.0m	LS22

나) 수치해석에 의한 동적응답특성 분석 및 성능평가  
5가지 열차유형(PMC8량, 16량 편성, Diesel 1,2량 견인, KTX 20량 편성), 8가지 속도대역(40~180km/h) 및 3종류의 경간길이에 대한 관형교의 동적거동특성을 분석하였다.

분석결과 현재의 열차유형으로 180km/h로 증속운행을 하더라도 교량의 수직처짐이 설계기준상의 한계 범위내에 존재하여 과도한 수직처짐에 의한 구조적 문

제는 발생하지 않을 것으로 추정되었다. 또한 수직진동가속도에 대한 분석결과로부터 전반적으로 수직진동가속도가 크게 발생하는 것을 알 수 있고, 경간길이와 차량의 유형에 따라 다르지는 하지만 속도 대역에 따른 증폭현상을 보이는 경우도 나타나고 있어 승차감과 차량의 주행안전성에 대한 검토가 수행되어야 할 필요성이 제기되었다.

### 3) 기존선 분기기 구조개선

본 과제에서는 기존선 속도향상을 대비한 현용 레일 두부형상의 적합성을 검토하고 분기기 구조개선을 통한 분기기 직선 측 통과속도 향상을 목적으로 수행하였다. 따라서 궁극적으로는 레일의 마모량을 저감시키고 속도향상을 통하여 전체 운행효율을 향상시키고자 하였다.

#### 가) 레일두부형상에 관한 연구

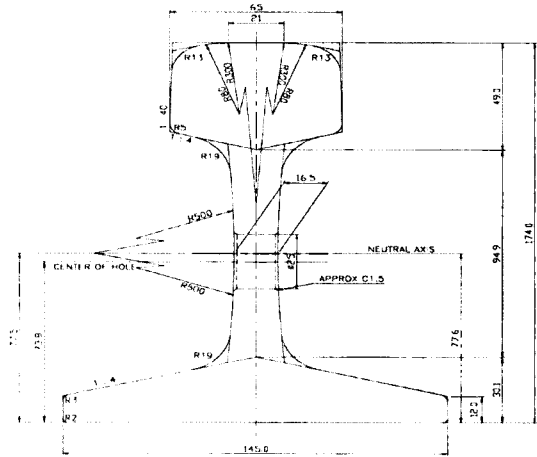
차륜-레일 간의 정적, 동적 적합성 분석을 위하여 기존 레일과 차륜 형상과의 적합성은 운행 경험을 통하여 완료되었고 신형 레일규격은 KTX 와도 원활한 적합성을 갖는 등의 기본전제로 하였다. KTX 차륜과 기존레일(KS50N, KS60, UIC60)과의 적합성을 검토한 결과 정적해석 측면에서 KS50N레일이 KS60레일보다 KTX차륜과의 적합성이 우수함을 확인할 수 있었다.

또한, 그림 3.2.1와 같은 신형레일 단면을 제안하여 궤도 부담력, 레일 휨응력, 침목의 허용 레일압력, 노반의 허용압력등 구조적 성능을 검토하였다. 성능검토 결과 기존선 속도향상과 KTX차량에 적합한 레일로서 KS50N의 두부와 KS60의 저부를 갖는 신형 레일 규격을 제시하였다.

#### 나) 분기기 구조개선에 관한 연구

기존선 속도 향상을 위하여는 반드시 분기기 통과속도 향상이 필요한데 이를 위하여 우리나라 국철 기존

노선상의 분기기 부설 현황과 국내 및 국외의 분기기 통과 속도 제한요인 및 통과속도 향상 사례를 조사 분석하여 우리나라 국철에 적합한 분기기 통과속도 개선 모델을 제시하였다. 이에 반드시 개선되어야 하는



<그림 3.2.1> 신형 레일 형상

기본 개선(안) 과 경제성을 고려하여 선택적으로 개선할 선택(안)으로 나누어 제안하였다.

#### ○기본 개선안

- 가. 탄성포인트화
- 나. 망간크로싱화
- 다. 가드레일 교체
- 라. 레일 장대화
- 마. PC 침목화

#### ○선택안

- 가. 스위스레일 안전잠금장치의 설치
- 나. 전기 선로 전환기 시스템
- 다. 열선 사용
- 라. 크로싱 형상 개선
- 마. 롤러 형식의 침목 상판 사용

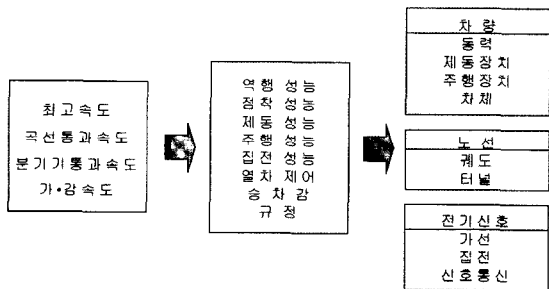
### III-3. 전기신호 시스템 기술개발

### 2. 국내 기존선 전기신호시스템 현황

#### 1. 기존선 전기신호시스템의 속도향상에 따른 설계개념

철도시스템에서의 전기·신호시스템기술은 열차의 안전운행 뿐만 아니라 수송효율을 향상시키는데 중요한 역할을 하고 있다. 전기신호설비는 전동차에 양질의 전력을 공급하며 전철변전설비, 전차선, 급전설비로 구성되는 전력시스템과 열차 운행조건을 제시하여 열차의 진·출입, 진행의 가부 및 위험의 여부를 알려 주어 열차 운행의 안전성을 확보하고 정확성과 신속성을 도모하는 신호시스템으로 구분된다. 특히 열차의 속도향상을 위해서는 신뢰성 및 안전성 확보 측면에서 전기신호 시스템의 역할이 매우 중요하다.

열차의 속도향상을 달성하기 위한 가장 기본적인 형태는 최고속도, 곡선통과속도, 분기기 속도, 가감속도의 향상이 궁극적으로 이루어져야 하며 이것은 차량, 선로, 전력, 신호등 각 철도분야의 기반요소가 상호 유기적으로 결합되어 달성할 수 있다. 이 가운데 전기신호 시스템분야는 전력, 신호분야를 포함하고 있으며 속도향상을 위해 이 분야가 차지하는 관련성을 그림 3.3.1에 나타내었다.



(그림 3.3.1) 속도향상을 위한 전기신호시스템분야의 분류

#### 1) 기존선 신호시스템 현황

국내 신호시스템은 1899년 완목식 신호기를 사용하여 노량진~제물포간 개통과 함께 시작되어 100여년 이상의 변천을 거치며 현재 경부선, 호남선, 중앙선 등 전국 53개 노선 3,123km에 CTC장치 및 ATC장치, ATS장치, 자동폐색장치, 연동장치, 신호기, 선로전환장치, 건널목보안장치 등이 설치되어 사용되고 있다.

100년이 넘는 역사를 가진 우리나라 철도는 격동의 세월 속에서 국가발전의 원동력으로서 눈부신 역할을 수행하였으며 그동안 신호보안장치들은 열차의 안전운행을 도모하고 수송 효율을 꾸준히 높이면서 발전을 거듭하여 왔다. 최근에도 관련 분야의 기술발전을 위하여 산 학 연 관등이 다방면에서 기술 개발을 위한 투자를 하고 있다.

표 3.3.1은 우리나라 국철 신호설비의 총괄현황을 나타낸 것이며, CTC장치 및 연동장치 등 상당한 장치들이 국산화된 설비들이다.

#### 2) 기존선 전차선로 시스템 현황

전철화 사업의 일환으로 우리나라에서 가장 먼저 착공된(1968년) 산업선은 중앙선, 태백선, 영동선을 포함한 총연장 400.7km의 전철화 공사가 1988년에 완료되어, 그동안 우리나라의 산업·공업 발전에 일익을 담당하여 왔다. 최근에는 영주-철암간 87.1km의 전철화 공사를 마무리하였으며 현재에도 전철구간확장 및 복선화사업이 추진중에 있다. 현재 국내에서 사용중인 가선 시스템은 65mm<sup>2</sup>, 12000N의 조가선과 107mm<sup>2</sup>, 12000N의 전차선으로 구성되어 있다.

pre-seg는 경간의 1/1000이며, 표준 드로퍼 간격은 9m이다. 그리고 이 커테너리는 Y 현수선은 없으며, 25kv와 2 25kv(1987년 이후)를 사용한다.

이 커테너리는 1950년 최대 설계속도 120km/h인 원

래의 시스템으로부터 변형되었다. 원래 커테너리에서는 65mm의 청동 조가선과 107mm의 경동 전차선으로 구성되었다. 이 두 전선은 DC 전철 시스템에 장기간 사용되었다. 조가선과 전차선의 장력은 각각 10,000N이었다. 전차선의 pre-sag는 없었으며, 속도범위이내에서 집전성능은 양호하였다.

이후 120km/h에서 160km/h까지 속도향상을 위하여 지지점에서 탄성도를 높이기 위한 목적으로 Y-선이 추가되었다. 140km/h 이상의 속도에 대하여 새로운 타입의 곡선당김금구가 적용되었는데 이는 판토틀래

프의 압상량을 보다 크게 허용하기 위한 목적이었다. 마지막 단계에서, 이 타입의 커테너리는 전차선의 마모 문제 때문에 조가선을 8,500N, 전차선을

11,500N으로 장력을 변경하였다. 이것은 장력장치에서 배분 바(Distribution Bar)를 교체함으로써 이루어졌다. 드로퍼 변경 없이 63m 경간에서 59m의 이도(sag)가 자동적으로 주어지게 되었다. 이에 따라 이 커테너리는 이론적 속도 225km/h가 가능하도록 수정되었다. 이 커테너리를 "Catenaire Nord-Est(북동선 커테너리)"라 부른다.

표 3.3.1 국내 신호설비 현황 장치별

장치별	내용	연장 (km)	역수	설치율 (%)	비고
열차 집중 제어 장치 (CTC)	수도권	187.2	53	42	영업 거리: 3,123 km
	경부선(수원~부산)	402.8	58		
	중앙선(청량리~영천)	344.9	67		
	호남선(서대전~강경)	60.7	9		
	태백선(제천~백산)	113.1	20		
	영동선(영주~강릉)	193.6	32		
	북호랑선, 삼척선	18.8	2		
계	1,321.1	241			
열차자동 제어 장치 (ATC)	과천선, 분당선 일산선	52.1	21	2	
자동폐색 장치(ABS)	경부선의 21개선	1,812.4	325	58	ATC 구간포함
열차자동 정지 장치 (ATS)	경부선의 52개선	3,123.0	485	100	
연동 장치	전기식		393	81	원격제어 장치: 70억
	전자식		65	13	
	기계식		27	6	
	계		485	100	
건널목 보안 장치	건널목수	1종(차단기,경보기, 안전표지)	1,651	93	전동 차단기 1,701 개소
		2종(경보기, 안전표지)	21	1	
		3종(안전표지)	104	6	
		계	1,776	100	
	신호정보 분석장치	886	50	지장물 비상보턴	
	고장감시장치	1,599	90	159	
	지장물 검지장치	309	17	개소	

참고자료: 2001년 신호업무자료 제17호, 철도청

### 3. 신호시스템 기존선 속도향상 사례

#### 1) 신호설비 시스템

스위스, 불가리아, 오스트리아, 헝가리, 독일 등 유럽의 각국은 ERTMS/ETCS를 도입하기 위하여 EU(유럽연합)를 중심으로 신호보안체계를 통합하는 추세이며 국경에서 열차제어를 유연하게 하기 위해 상호운용성(Interoperability) 목적의 ERTMS/ETCS 개발을 진행하여, 현재는 완성된 사양을 가지고 현장시험을 거쳐 여러 선구에서 도입을 계획하고 있다.

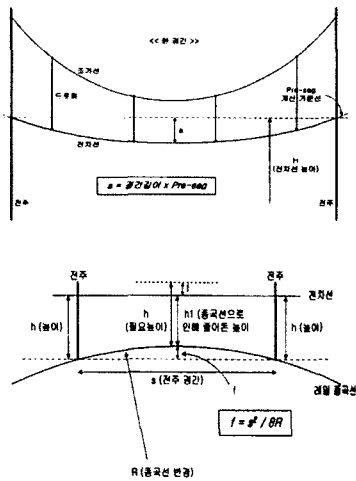
스위스 SBB는 Olten-Lucerne 35km 구간에서 ERTMS/ETCS Level 2를 유럽에서 최초로 상용화하는 시험선의 건설 프로젝트를 수행하였다.

그리고 불가리아는 ERTMS/ETCS Level 1 프로젝트를 1999년 1월에 계약하고 2001년 12월부터 운영하기 시작하여 유럽에서 제일 먼저 Level 1 시스템을 운영하는 국가가 되었다. 이것은 동부 유럽 쪽의 풍부한 산업자원을 유럽의 중심지로 연결시키기 위한 것으로 표준화된 ERTMS/ETCS 설비가 유럽전체로 설치되는 시발점으로 중요한 의미를 갖는다.

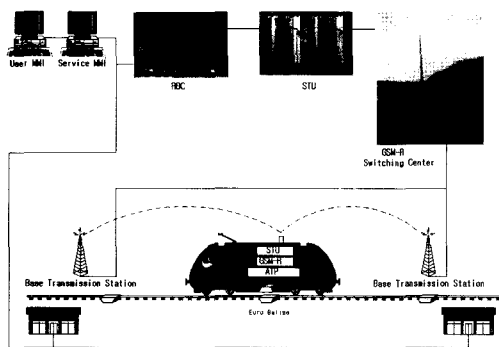
오스트리아와 헝가리는 비엔나와 부다페스트간을 연결하기 위한 사업으로 ERTMS/ETCS 도입을 위해 오스트리아 Alcatel, 독일 SEL Alcatel, 이탈리아 Ansaldo,

프랑스 CS Transport, GEC-Alsthom, 벨기에 ACEC로 구성되는 각국의 제작자 컨소시엄을 만들었다. 향후 통합된 열차가 연결되어 운영되기를 희망한다는 것을 배경으로 하고 있다.

독일은 쾰른-프랑크푸르트간의 고속신선에 대한 계획을 수립하고 있다. 스웨덴과 덴마크에서는 서로 다른 철도시스템, 언어, 신호제어방식에도 불구하고 이미 양국을 연결하는 철도건설사업이 진행되었고 두 시스템간의 경계에서 ATP 시스템의 전환과 폐색방식, 연동장치를 상호 사용하는 방법이 합의되고 시험되었다.



<그림 3.3.2> 전차선 설치구조



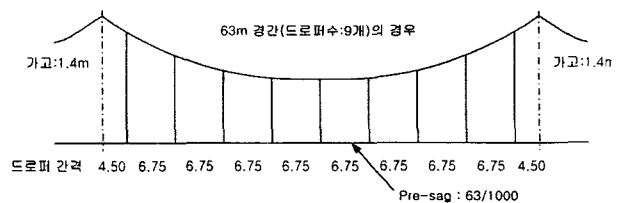
<그림 3.3.3> ERTMS/ETCS Level 2 시스템 블록도

## 2) 전차선로 시스템

전차선로는 일본의 경우 재래선은 대부분 심플 커테

너리 방식을 사용하고 있다. 그러나 고속선인 신간선은 컴파운드 커테너리 방식으로 개선되어 있으나 행거 간격은 5m로 동일하며, 새로운 고속전차선로는 심플 커테너리 타입으로 계획중이다.

프랑스의 경우 고속선로인 TGV 남동선(South-East)은 재래선 보다 장력을 높인 Y-stitched 방식으로 건설되었고, 이후 대서양선(Atlantic Line)과 북부선(Nord Line)에서는 심플 커테너리 방식을 사용하였다. 드로퍼 배치 간격은 경간 내에서 첫 번째와 마지막 드로퍼는 무조건 4.5m로 하고 나머지는 6.75m를 원칙으로 하되 표준경간 길이를 고려하여 4.5m를 경간 중앙에 배치할 수도 있도록 하였다. 따라서 표준경간 길이는 4.5m와 6.75m의 조합 값 중에서 선정되며, 최대 63m부터 최소 27m까지 다양한 표준경간 길이를 규정하여 두고 있다. 그림 3.3.4는 프랑스 대서양선 커테너리를 나타낸 것이다.



<그림 3.3.4> 프랑스 대서양선 Catenary

## 4. 기존선 전기신호시스템 속도향상기술

### 1) 신호설비 시스템 속도향상 기술

국내의 지상신호방식은 5현시, 3현시방식 자동폐색 신호장치나 연동폐색신호장치, 통표폐색장치(개량중)를 사용하고 있으나 5현시방식 자동폐색신호장치로 개량을 추진하고 있는 등 3종류의 폐색신호방식을 사용하고 있다.

호남선 전철화 구간중 송정리~목포간 등 일부구간에서는 열차의 운행최고속도를 180km/h로 계획하여

시공중에 있다. 따라서 신호설비는 200km/h 이상에서도 운전이 가능한 신호방식과 운전방식을 검토하여야 할 것이다.

#### 신호시스템 속도향상 연구방향

- 유럽 등 철도선진국에서 사용하고 있는 차상신호 방식 및 지상신호방식에 관하여 기술적 검토가 필요함.
- 운동속도 : 220km/h에서도 지상차상 간 정보전송이 가능함.
- 경보를 울리고 제동을 작동시켜야 되는 지점에서 지상자 무응동시에도 열차안전사고 방지 가능함.
- 안전성의 검증 : 유럽철도안전규격의 최고레벨인 SIL 4 적용
- 열차제어정보 전송기술의 연구 : 텔레그램 전송 기술
- 열차제어기술의 연구 : 열차제어장치의 자동화로 인한 정밀정차제어가 가능하며 속도구간에 따른 자동속도추종기능이 포함된 제어기술 적용

#### 2) 전차선로 시스템 속도향상 기술

전차선로의 선종 선정 및 장력 결정은 기존선 속도 향상을 결정하는 중요한 요인이다. 전차선로는 현재 고속선에서 많이 사용하는 전차선과 조가선을 선정하여 전차선로 시스템에 따른 접촉력 영향등을 면밀히 검토하여야 한다.

#### 전차선로 시스템 속도향상 연구방향

- 속도향상에 적합한 선종 및 장력 검토가 필요함
- 곡선반경이 작은 선로에서의 가동 브라켓의 기술적 검토가 필요함
- 시뮬레이션을 통한 최대경간길이 선정 검토
- 속도향상으로 인한 속도와 전차선 이선과의 관계 검토
- 속도향상으로 인한 판토틀라프 압상력 기술검토
- 최적의 판토틀라프 개수 선정

철도 교통에 있어서 사고란 대량의 인명 및 재산피해로 이어지기 쉽기 때문에 Fail Safe에 의한 전기신호 시스템이나 안전설비를 이용하여 사고를 예방하는 것이 일반적이다. 전력시스템의 경우 기존선의 속도향상과 용량증대에 따라 전차선로의 성능향상, 신뢰도 확보 등이 필수적이다. 특히 신호보안체계의 경우 현재 국내의 대부분의 노선에서 사용하고 있는 신호방식이 지상신호기의 현시상태를 기관사가 직접 확인하고 열차를 운전하는 지상신호방식으로서 속도향상을 위해서는 차상신호방식의 도입이 요구된다.

### IV. 결론

기존선의 속도향상은 차량/선로/신호등 각 분야에서의 충분한 기술개발과 전체 시스템 측면에서의 인터페이스가 매우 중요하다. 속도향상을 위한 틸팅차량의 개발이 선 시행되지만 결국은 선로 및 신호와 같은 인프라 분야의 기술개발이 조속히 이루어져야 한다. 본 철도기술연구개발사업이 성공적으로 완료되면 우리나라의 국가철도망의 속도는 크게 향상되어 국가물류비용의 절감 및 국가경쟁력 향상에 큰 이바지를 할 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

1. 유원희 외, "기존선 틸팅차량 시스템 설계에 관한 연구", 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp.317 - 329, 2002.
2. A.Gugliotta, A.Soma 외, "Simulation of Rail Dynamics at Politecnico of Torino", 12th European ADAMS User's Conference, Marburg 18-19 Nov. 1997.
3. "차량시스템 엔지니어링 기술개발 통합 및 총괄", 철도청 기존선 고속화 실용기술 개발사업 1차년

- 도 연차보고서, 한국철도기술연구원, 2002.3.
4. “시스템 통합 및 총괄”, 철도청 기존선 고속화 실용기술 개발사업 1차년도 연차보고서, 한국철도기술연구원, 2002.3.
  5. Netcomposites, News letter, 2001. 06. 29. (www.netcomposites.com)
  6. 연구보고서, “시스템 통합 및 총괄”, 철도청, 2002. 3
  7. 연구보고서, “신호보안체계 최적구축방안 개발”, 철도청, 2002. 3.
  8. 연구보고서, “ATS장치의 기능향상에 관한 연구”, 철도청, 1998. 12.
  9. 연구보고서, “기존선의 고속화를 위한 시스템에 관한 연구”, 한국철도기술연구원, 2000.12
  10. 奥村幾正, “海外の無線を利用した列車制御システムの動向”, 鐵道と電氣技術, Vo1. 8, No, 10, 1997.
  11. Hirao, Yuji, “유럽의 열차제어시스템(ERTMS/ETCS) 동향”, 철도와 전기기술, Vol. 12, No. 9, 2001. 9.
  12. Bennett, Steve, “UIC Debates ERTMS Progress In Florence,” International Railway Journal, pp. 41-45, <http://www.railjournal.com>, May 2001.
  13. 연구보고서, “경부선 전구간 전철화에 따른 Catenary System의 Speed-up에 대한 연구”, 한국철도기술연구원, 2001. 11
  14. 연구보고서, “고속철도 전차선로 설계 요소기술 분석 및 성능 시험기술연구”, 한국고속철도건설공단, 1998.
  15. “Basic environment data for catenary design”, Seoul-Pusan HSR Project, Korea TGV Consortium, 1995