

기존선 속도향상을 위한 틸팅차량시스템 기술사양(안) 제시 연구

한성호, 박광복, 이수길, 유원희, 엄기영  
한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단

Technical specification of Tilting train EMU for speed up on existing lines

Seong-Ho Han, Kwang-Bok Park, Su-gil Lee, Won-Hee You, Ki-young Eeum  
Conventional Rail Engineering Corps. Korea Railroad Research Institute.

**Abstract** - This paper suggested that the technical specification of tilting train EMU for speed up on existing lines. High speed strategy of existing lines are the modification of railway system which are made on cant, lengths of transition curves, the catenary system and train system. Tilting technology is more useful a strategy for speed increases on existing lines with low investment needed. We performed a feasibility study which is considered out real track conditions and designed propulsion and braking system of tilting EMU system.

2. 차량 틸팅 시스템

2.1 차량 틸팅기술 기본 개념

열차 틸팅기술은 차량이 곡선 주행시 차체를 곡선 안쪽 방향으로 기울게 하는 것으로서 원심가속도( $a = V^2 / R$ ) 방향의 횡가속도( $a \times \cos(\alpha + \gamma)$ )를 중력( $g$ ) 방향의 횡가속도( $g \times \sin(\alpha + \gamma)$ )와 상쇄시켜 승객이 느끼는 원심력 방향의 횡가속도를 감소시켜 줌으로써 곡선 통과시 승차감과 곡선통과 속도를 향상시킬 수 있다.

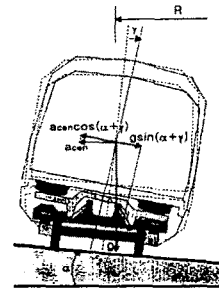


그림 1. 차량 틸팅 기술 기본 개념도

1. 서 론

철도교통의 경쟁력 확보를 위하여 무엇보다도 중요한 것은 열차의 고속화 달성이며 이를 위한 기본적인 형태는 최고속도, 곡선통과속도, 분기기속도, 가감속도의 향상이 궁극적으로 중요하다. 즉 차량, 선로, 전력, 신호등 각 철도분야의 기반요소가 상호 유기적으로 연계되어 경제성을 고려한 최적 설계를 기반으로 해야만이 달성할 수 있다.

속도향상기술에는 크게 새로운 선로를 건설하여 고속열차 차량을 투입하는 고속철도 기술과 기존선의 일부 개량과 틸팅차량을 투입하는 기존선 고속화 기술로 나누어 볼 수 있다. 국내 2004년 개통을 앞두고 있는 KTX차량이 전자에 해당하고 후자는 비수혜지역의 균등한 서비스를 지원하기위해 추진하고 있는 기존선 고속화 사업을 들 수 있다.

기존선의 고속화를 위하여는 선형개량, 전기신호개량, 틸팅차량시스템 개발 등 다각도에서의 속도향상을 고려해야 한다. 이 가운데 틸팅차량의 투입운영은 기존선의 인프라 개량비용을 최소화하면서 곡선부의 속도향상에 따른 기존선 고속화를 달성하는 방안으로 시설투자비용 최소화에 대한 장점이 있다.

이외에도 기존선, 개량된 재래선, 신설 고속선 등 모든 노선에서 시속 160[km/h]~250[km/h]의 속도로 차량이 운용될 수 있다. 또한 신설 노선을 건설하는 동안 그 공백을 매워줄 수 있으며 신설노선으로 대체할 수 없는 기존선의 운용 효율을 향상시킬 수 있다.

틸팅방식은 기존 노선에서 선로의 곡선부를 지날 때 차체를 기울여 승객이 받는 원심력을 최소화하고 승차감과 안전성을 확보하는 범위에서 속도를 향상하는 기술이다. 외국의 사례를 보면 틸팅방식 적용시 비틸팅차량에 비해 속도향상의 효과를 15[%]~30[%]를 얻을 수 있음이 입증되고 있다. 이탈리아의 경우 틸팅방식의 연구에 집중 투자한 결과 현재 자체기술로 프랑스 TGV나 독일 ICE에 못지 않은 시속 250[km/h]급의 고속철도를 운행하고 있다. 산악지대가 많은 지역의 경우 신설 건설비용이 높은 고속철도 보다 기존선을 이용하는 틸팅차량의 투입 효과가 상대적으로 크다.

본 연구는 기존선 고속화를 위한 최고운행속도 180[km/h]급 한국형 고유모델 틸팅차량시스템의 추진, 제동성능해석과 틸팅시스템 사양을 제시하였다.

2.2 해외 틸팅 시스템 사양 비교

틸팅방식은 곡선주행 시 차체를 일정 경사각으로 강제 제어하는 강제틸팅제어식과 곡선 주행시 발생하는 경사각에 의거 자연적으로 제어되는 자연틸팅제어식으로 구분된다. 현재 틸팅방식은 대부분이 강제식이 많이 사용되고 있으며 주요 해외 국가의 대표적인 틸팅시스템 사양을 표 1에 비교 분석하였다.

표 1. 각국 틸팅차량 시스템 비교

대차	제작사	속도 Km/h	틸팅 방식	액추에이터	경사 각도	축거 m	적용 차종	상용 연도
ETR 460	Fiat	250	강제틸팅	유압식	8	2.7	ETR, ICT, S220	1995
X2000	ABB	210	강제틸팅	유압식	8	2.9	X2000	1990
Acela	Bombardier	240	강제틸팅	유압식	8	3.0	Asela, LRC	2000
VT611	Adtranz	160	강제틸팅	전기식	8	2.45	VT611, VT612	1997
ICT-VT	Siemens	200	강제틸팅	전기식	8	2.6	ICT-VT	2000
TGV-Pendul	Alsthom	220/320	강제틸팅	전기식	8	3.0	TGV-Pendular	2002
ICN	Fiat-SIG	200	강제틸팅	전기식	8	2.6	ICN, Virgin Rail	2001
Series 283	Fuzi	130	강제틸팅	공압식	6	2.15	Series 283	1997

### 3. 국내 기존선 틸팅 차량시스템 설계 사양(안)

#### 3.1 최고운행속도 목표사양(안)

현재 국내에서 추진 중인 기존철도 주요 개량사업으로는 중앙선, 장항선의 선로설계속도 120[km/h]~180[km/h] 향상, 호남선 송정리-목포구간 200[km/h]로 개량 사업들을 수 있다. 이는 인프라 성능향상을 위한 시설투자로서 향후 개량선로의 최고운행속도를 고려해 볼 때 틸팅차량의 목표속도는 이를 반영해야 한다. 또한 해외 대부분의 틸팅시스템 운행속도를 살펴보다라도 180[km/h]~230[km/h]대로 운행하고 있어 향후 기술 추세를 고려해 볼 때 운행속도를 180[km/h]로 설정하는 것이 가장 적절한 것으로 검토되었다.

이는 철도청 연구개발사업 1단계 기획보고서에서 제시하는 2004년까지의 160[km/h] 보다 상향 설정한 것으로 선진기술의 국내기술 보유 및 기술발전 추세를 고려한 기술향상 증진을 위한 것이다.

#### 3.2 열차 편성(안)

열차편성은 승객수요에 효과적으로 대처 할 수 있도록 하고, 시스템 운영 효율성과 편성의 유연성을 위하여 3량 1유닛(구동차 2량과 부수차 1량) 단위로 편성하였다. 이는 시스템 운영의 효율성과 Fail-Safe 기능 향상을 위한 구조로 검토되었다. 열차 편성의 기본(안)은 향후 양산시를 대비하여 시스템의 특성을 동일하게 운영되고, 성능이 발휘되도록 2유닛 6량(Tc+M1+M2+M2+M1+Tc)으로 구성하였으며, 이는 중앙선 및 장항선 등에서 즉시 투입이 가능하도록 고려한 열차편성이다.

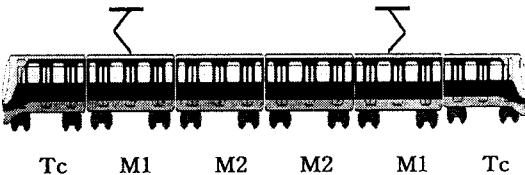


그림 2. 열차 기본 편성 구성(안)

이러한 구성(안)은 각 유닛 단위로 독립 시스템을 구성하여 3 유닛 9량, 4 유닛 12량 등으로 편성을 확대할 수 있는 장점을 갖게되어 노선별 교통수요에 따라 편성을 자유롭게 할 수 있어 편성의 유연성을 가질 수 있다.

#### 3.3 틸팅 시스템 사양(안)

틸팅시스템은 대차와 팽토그래프 프레임과 관련된 틸팅메커니즘과 열차제어진단장치와 관련된 틸팅제어기로 크게 구분된다. 틸팅 링크 메커니즘은 차상 내 곡선검지장치를 통해 액튜에이터가 작동되는 강제틸팅방식을 선정하였으며 틸팅을 위한 최대 각도는 국외 수준에 맞추어 8° 이하로 설정하였다. 또한 틸팅 시스템은 제어 불능 시를 대비한 Fail-Safe 기능을 갖도록 하여 승객의 안전성과 시스템의 신뢰성을 확보하도록 하였다.

틸팅방식은 차상 내에서 곡선을 감지하고, 연산을 통해 강제적으로 차체를 경사 시키는 강제제어방식으로 하며, 전기-기계식 틸팅제어방식으로 선정하였다.

틸팅 제어는 편성틸팅제어기와 차량틸팅제어기로 구성하여 선두열차에 설치된 편성틸팅제어기와 센서로부터 곡선을 감지하여 틸팅을 위한 제어명령을 편성 내 각 차량의 틸팅제어를 담당하는 차량틸팅제어기에 순차적으로 명령을 전달하는 일괄 집중제어식으로 시스템을 구성하도록 하였다.

그림 3은 선두차에 탑재된 편성틸팅제어기의 구성(안)을

보여준 것이다. 팽토그래프는 집전판은 차체의 틸팅과 연동되어 항상 전차선 중심에 위치하도록 제어되어야 하며, 주행 중 틸팅 시스템이 작동불능 시에는 차량의 중심으로 복원되도록 설계하여 일반차량과 같이 편위 및 접촉율의 이상 없이 정상상태로 주행할 수 있도록 고안하였다.

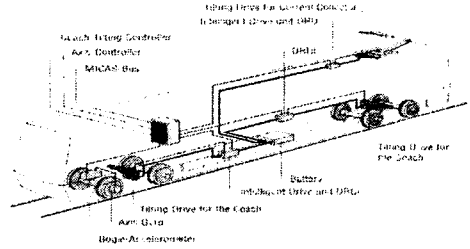


그림 3. 틸팅제어시스템 구성(안)

#### 3.4 제동 시스템 기술 사양(안)

제동장치는 열차 주행 중에 안전하게 제동이 작용되어야 하고, 제어계통의 작동불량 시 안전하게 정차할 수 있도록 Fail-Safe 개념으로 설계되어야 한다.

제동장치는 전기제동과 기계제동이 자동적으로 조합되어 작동되도록 설계하여 하여야 하고, 상용 및 비상제동 작용 시 전기제동이 기계제동보다 우선하여야 하며, 응답이 빠르고, 정밀제어가 가능해야 하고, 신뢰성 및 안전성이 있어야 한다.

제동제어는 전기지령으로 전기제동과 기계제동의 전차변을 작동하여야 한다. 제동장치는 보안을 위하여 상용제동, 비상제동, 안전제동 및 주차제동으로 설비하고 제동의 작동 및 완해는 운전실에서 조작이 가능하여야 한다.

열차의 만차하중 시 비상제동거리의 기존선 운영을 고려하여 160[km/h]의 속도로 운행 시에는 1,000[m] 이내가 되도록 설계하여야 하고, 최고운행속도 180[km/h]에서는 1400[m] 이내 정차 성능이 확보되도록 설계되어야 한다.

열차가 운행 중 전기제동이 1/4 고장 시에 고장난 차량은 기계제동으로 전환하여 다른 차량과 함께 정상적인 상용제동이 가능해야하고, 1/8 전기제동과 부수대차 1대가 작동불가 시에도 비상제동이 가능하도록 제동성능이 확보 차원에서 설계하여야 한다.

차륜의 점착 효율을 향상시키고, 차륜과 궤도의 마모감소, 소요동력의 이용효율을 향상을 위하여 활주(Slid), 공주(Slip) 제어 시스템을 설비하여야 하고, 진단 및 응급조치 기능을 갖춰야 한다. 표 2는 6량 편성에 대한 제동성능 계산을 위해 설정된 기초 설계자료를 나타낸 것이다.

표 2. 제동성능 계산 설계자료

차륜경	820mm(반마모)	회전 편성	3.84%
기어 효율	0.975	전동기 출력	250 kw
전기 제동	16개 모터	디스크 제동	8축
기어비	3.64	차륜제동 중량	32 유니트 344톤

전기제동력(회생제동)은 추진력의 100[%]를 사용한 것이고, 디스크제동은 축당 12[kN](3 디스크/축)을 사용하였으며, 공기제동만으로 비상제동 시에는 21[kN/축]을 사용하였다. 차륜 디스크 제동은 축당 8[kN]이 작용으로 하였으며, 공기제동만으로 비상제동 시에는 11[kN/축]을 사용하였다. 그림 3은 6량 편성에 대한 제동력산출 선도이다.

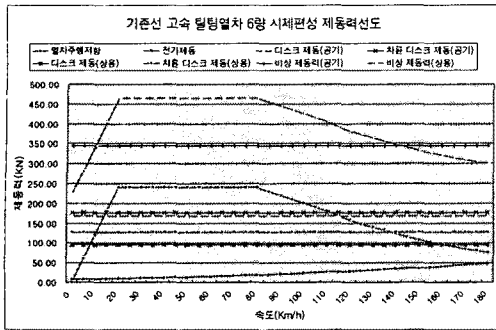


그림 4. 제동력 계산결과(안)

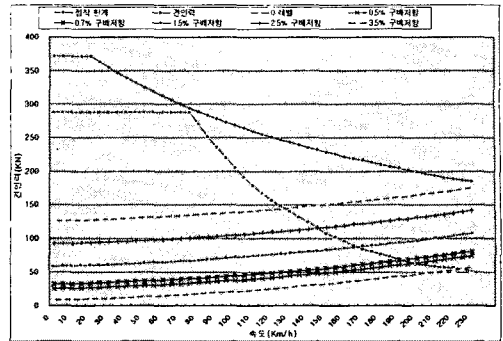


그림 6. 견인력 계산결과(안)

제동력 선도는 전기제동 및 기계제동에 대하여 제동력 분담을 설정하였으며, 비상제동거리는 공기제동만으로 최고운행속도에서 1,400[m] 이내에 정차할 수 있도록 하였다. 전기제동력 및 축당 3개의 디스크 판 및 차륜 디스크 제동 설치 등의 고용량의 제동설계 연구를 집중적으로 수행하여 가속역력, 제동력 선도 등이 보완되어야 한다.

### 3.5 추진 시스템 기술사양(안)

열차는 선로의 구배, 곡선, 속도제한 등에 의해 제한되는 구간을 제외하고는 최고속도 180 [km/h]를 주행할 수 있어야 하며, 직선선로 7[‰]의 오름 구배에서 균형속도가 180 [km/h] 이상 주행할 수 있는 추진성능을 갖어야 하고, 설계속도 200[km/h]의 주행이 가능해야 한다.

추진 제어 시스템은 IGBT 이상의 전력소자를 사용과 PWM 제어를 채택하여 개발하고, 적절한 냉각설비를 하여야 하고, 견인전동기는 3상 교류 유도전동기로 하여야 한다. 판도그래프는 1 유니트(3량)당 1개씩 설치하여 설계속도 200 [km/h]까지 모든 속도에서 추진 및 보조동력에 소요되는 전류를 집전 할 수 있어야 한다. 터널 출입 시, 개활지 및 터널 열차 교행 시에 안정한 동적특성을 가져야 하며, 주행시간의 5[%] 이상 이선이 발생하지 않아야 한다. 또한 곡선 통과 시 대차의 틸팅 메커니즘과 연동으로 작동하여 주행성능을 향상시키는 구조로 하여야 한다.

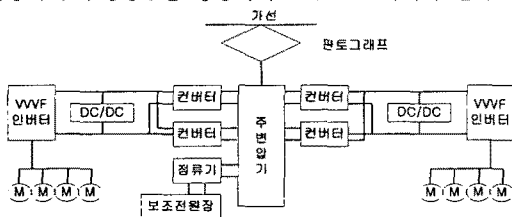


그림 5. 차량 추진 및 보조전원회로 설계(안)

추진 시스템 설계에서 요구되는 추진성능을 검토하기 위하여 견인전동기의 출력, 추진력, 최고속도 및 감속비, 그리고 열차의 운행속도에 대하여 검토하였다.

앞에서 제시된 7[‰] 오름구배에서 180[km/h] 주행성능, 250[kW]의 견인전동기, 최고속도에서 78[kN]의 추진력, 기어감속비 4.136 등의 설계자료를 토대로 추진성능을 계산한 결과 그림 6과 같은 견인력선도와 각 구배에서의 주행저항곡선을 얻었다.

6량 편성열차에 대한 추진 시스템 성능 계산결과 총 출력이 4,000[kW]이고, 기동 시에는 287[kN], 최고속도에서는 76[kN]의 견인력이 소요되고, 평균가속도는 0.55[m/s], 최고속도에서는 0.10[m/s<sup>2</sup>]와 9[‰]의 등판능력이 있고, 35[‰] 구배에서 약 125[km/h] 속도까지 운행할 수 있다. 최고속도 도달거리는 4.8[km]이고, 시간은 139초가 소요되고, 평형속도는 220[km/h]로 계산되었다.

## 4. 결 론

본 논문은 기존선 속도향상을 위한 방안으로 틸팅차량의 운행에 대한 필요성과 국내 기존선에 적합한 시스템 기술사양(안)을 제시하였다. 특히 틸팅차량의 성능을 나타내는 차량의 최고운행속도, 편성개념, 틸팅시스템, 추진시스템, 제동시스템에 대한 기술사양(안)을 분석하고 제시하였다. 본 논문에서 제시된 기술사양(안)은 향후 기본설계, 상세설계시 수정, 보완될 계획이며 국내외 최고의 기술진이 참여하는 연구개발사업을 추진하여 기존선 속도향상을 위한 핵심기술인 시스템 엔지니어링기술, 차량 및 부품 설계/제작, 시험평가, 선로개량, 전기신호 성능개선 등의 연구개발을 통하여 국내 기존선의 속도향상에 관한 연구를 집중적으로 수행할 계획이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 한국철도기술연구원, 철도청 기존선 고속화 실용기술개발사업, "시스템 엔지니어링 및 시스템 통합 과제", 1차년도 연차 보고서, 2002, 4
- [2] 한국철도기술연구원, 철도기술정보지 논문집, 1997, 4
- [3] 한국철도청, "21세기 철도기술의 비전", 1999, 9, 16
- [4] 한국철도청, 행정광, 1990, 10, 7, "한국 철도차량 수여전망과 철도산업 육성 전략"
- [6] 한국철도기술연구원, 철도기술정보지 논문집, 2000, 6,
- [7] 한국철도기술연구원, 철도기술정보지: 21호(1999. 11), 23호 (2000. 4)
- [8] 철도학회, 춘계논문발표집, "기존선 고속전철 연계운용으로 고속화 방안", 2001, 5
- [9] 철도차량공학, 박광복, 삼성종합출판, 2판, 2000, 8