

# 기존선 틸팅차량 시스템 설계에 관한 연구

## The Study for System Design of Tilting Car for Conventional Railroad

유원희\* 한성호\*\* 김남포\*\* 김길동\*\* 박광복\*\*\*

Won Hee You, Song Ho Han, Nam Po Kim, Gil Dong Kim, Kwang Bok Park

### ABSTRACT

This report was studied about system design of tilting car for speed up for conventional railroad of KNR. The maximum operating speed of Kyun-Pu line was recorded a 140Km/h by saemaul train at 1985 and the average speed its is 107Km/h now. The chungang line, janghang line and honam line of KNR had rebuilt to the electrified line for operation of tilting train. This report was described about the operation status of advanced countries, the operation situation of trains of KNR, system design for operation and speed up by EMU tilting train on the conventional railroad in the future.

### 1. 개요

경부고속철도 KTX가 2000년 9월 천안-대전간 58km 시험선로에서 최고속도 300Km/h로 주행에 성공함으로써 고속철도 운용국가가 되었다. 그러나 경부선에서 새마을 열차표정속도는 107Km/h, 무궁화 열차는 92Km/h이고, 그 외 선로에서는 70-90Km/h로 운행 중에 있다.

한편 영국, 이탈리아, 독일, 프랑스 등의 선진국에서는 70년초부터 기존선 개량 및 틸팅차량개발을 통하여 160-220Km/h로 속도를 향상시켜 운행하고 있다.

우리나라는 철도영업선로가 1961년 3,022Km에서 1997년 3,118Km로 37년 동안 단 3.2%가 연장되었다. 이로 인해 200Km 이상 거리에서 철도여객분담율은 11.2%로서 일본 49.7%보다 낮아 대량수송의 이점을 활용하지 못하고 있다. 또한 철도발전도를 나타내는 전철화율이 21.2%로서 일본 59%, 프랑스 45%, 스웨덴 75%인 선진국 보다 훨씬 낮은 수준이다.

이러한 철도분야의 투자를 소홀히 하여 1997년부터는 수원-대전, 송정리-목포, 순천-여수 등의 구간, 2002년부터는 전주-순천, 원주-경주, 포항-부산, 대구-영천 구간 등의 주요간선이 선로허용용량을 초과한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 전철화와 선로개량사업 중인 중앙선(청량리-원주), 장항선, 호남선(송정리-목포)에 운용될 운행속도 160-200Km/h의 차량을 위해 선로개량 투자비를 최소화하고, 차량속도를 향상시킬 수 있는 EMU(Electric Multiple Unit) Tilting Train(차체경사식 열차)에 대한 차량 시스템 개발을 위하여 선진국 기존선 운영사례 조사와 우리나라의 철도 운영현황을 검토하여 기존선에 적합한 전기 틸팅 차량 시스템을 연구하고자 한다.

\* 한국철도기술연구원 : 기존철도기술개발사업단장

\*\* 한국철도기술연구원 : 선임연구원

\*\*\* 에스이테크놀로지(주) : 기술이사

## 2. 선진국의 기존선 철도 고속화 현황

### 2.1 스페인

스페인의 틸팅차량 도입은 독자적으로 자연틸팅차량을 개발하여, 1983년 운행거리가 338km인 Madrid - Zaragoza 노선 영업운전시 허용행가속도를 1.2% 이하로 제한하고, 최대 속도를 일반차량과 동일하게 140km/h로 하여 운행한 결과 약 7%의 시간단축 효과를 얻었다. 1986년에는 최대속도를 160km/h로 향상시켜 운행한 결과 여행시간을 3시간 22분에서 3시간 06분으로 16분 단축시킴으로써 기존차량 운행 시에 비하여 32분의 시간단축을 달성하였다.

### 2.2 이탈리아

이탈리아의 틸팅차량 도입과 기존선 고속화는 1987년부터 1992년까지 ETR401로부터 도입된 15편성의 ETR450차량이 영업운전에 투입되었다. ETR450은 최대속도가 250km/h로서 강제틸팅차량이다.

현재 ETR 450 차량은 로마-밀라노, 로마-베니스, 로마-바리 등 4개노선 2,399Km에 운행하고 있으며, 운행시간은 IC 차량에 비하여 단거리 구간에서 6%에서 장거리구간 최대 25%의 시간단축을 하여 평균적으로 15-20%의 시간단축을 달성하고 있다.

### 2.3. 알프스 노선

Lyon-Turin과 Lyon-Milan 구간에 승객이 ETR 차량의 투입 후 68% 증가(190,000→320,000인/년) 하였고, 시간 단축도 312Km와 459Km 노선에서 각각 35분과 62분의 시간단축을 달성하였다.

Milan-Zurich, Milan-Geneva, Milan-Berne, Milan-Basle 구간 등 총 1,370Km의 구간을 운행하여 시간단축을 30-50분 달성하여 기존차량에 비하여 평균 15%의 효과를 보고 있다.

### 2.4. 스웨덴

궤도에 큰 투자를 하지 않고 운행시간을 단축하는 방법으로서 차체경사기구와 조향성능이 우수한 대차를 갖춘 X2000차량을 ABB와 개발하였다. 그 후 4년 동안 300개의 건널목을 철거하였고, 200km/h에 대하여 가선을 정비하였다. 1990년 Stockholm-Gothenburg 노선에서 X2000차량 영업운행을 시작하였다. 영업 후 기존차량은 4시간 소요가 1992년에 2시간 59분으로 1시간단축하여 25% 효과를 얻었다. 따라서 철도의 점유율도 1990년에 37%대 58%에서 1995년에 55% 대 45%로 크게 향상되었다.

### 2.5 노르웨이

노르웨이는 현재 1998~2007년 동안의 철도현대화 10개년 계획을 추진 중에 있으며 약 4조 2천억원이 투입되고 있다. 이 계획은 신선의 건설보다는 기존선의 개량과 틸팅차량의 도입을 통한 속도를 향상시키고 있으며, 1999년부터 Signature 틸팅열차가 Oslo에서 기점으로 Trondheim, Bergen, Stavanger의 3개 구간으로 운행 중에 있다. 이들의 각 구간에서 23-54분의 시간단축을 얻고 있다.

### 2.6 독일

독일은 현재 가장 다양한 틸팅차량이 운행되고 있다. 스페인의 탈고(Talgo)객차, 근거리용 최고속도 160km/h의 VT610, 611, 612 디젤동차와 중장거리용 최고속도 230km/h급의 ICE-T(ICT)에 이르기까지 다양한 차량이 운행되고 있다. 2000년에는 중장거리용 최고속도 200km/h급 디젤동차인 ICT-VT가 운행되고 있으며, 2000년 이후에도 지속적으로 기존선용 Inter-City와 Inter-Regio 차량이 ICT와 ICT-VT차량으로 대체 중에 있다.

VT610을 3개노선 즉 Nuremberg-Hof, Nuremberg-Bayreuth, Heilbronn-Eberbach-Mannheim 구간에 투입하여 17-24%의 시간단축을 달성 하였다.

## 2.7 영국

영국은 틸팅기술의 선구자였으나, 1980년대 중반 APT 틸팅차량의 실패와 철도민영화로 인하여 틸팅기술이 사장되었다. 1992~1997년에 걸친 민영화사업의 완료 후 영국의 철도운영자들은 수익의 극대화를 위해 속도향상에 주력하고 있다.

WCML(West Cost Main Line)은 영국에서 교통수익이 가장 높은 노선으로 Virgin 레일은 틸팅차량을 도입하기로 하여, 1999년 Virgin 레일은 총 53편성의 최고속도 225km/h 급의 틸팅차량과 유지보수를 GEC-Alsthom과 Fiat-Ferroviana가 컨소시움을 구성하여 12억 5천만 파운드에 계약을 체결하였다. 2005년에는 런던-글라스고 구간에서 현재보다 약 1시간 정도의 여행시간 약 22% 단축이 가능할 것으로 보고 있다.

## 2.8 선진국 사례 분석

틸팅차량이 고속열차에 의한 방법보다 얼마나 우수한 효과를 얻는지에 대한 구체적인 예는 찾아보기 어렵다. 그러나 기존선 고속화를 수행함에 있어 기존열차보다 주행성능이 우수한 차량(최고속도가 높은 차량)을 투입하는 동시에 곡선 부에서의 주행성능 또한 향상시킴으로서 효과를 극대화하려는 의도가 있기 때문이다.

각 국에서 기존선 고속화를 추진함에 있어 공통적으로 검토하고 있는 것은 선로개량 투자비를 적게 들이고, 속도향상과 시간단축을 달성하는 방안이며, 이는 곧 틸팅차량을 기존선에 투입해야 하는 이유가 되는 것이다.

## 3. 우리나라의 기존선 고속화 현황

### 3.1 기존철도 속도 향상의 역사

1985년에 새마을호 열차가 서울-부산간의 최고속도를 120km/h에서 140km/h로 속도향상시켰다. 그 후 현재까지 경부선에서 새마을 여객열차의 표정속도는 107km/h에 머물러 있다.

### 3.2 기존선 고속화 추진 현황

철도 전철화 계획은 경부고속철도 운행을 위하여 2003년까지 대구-부산 구간을 전철화를 시설하고 있으며, 2006년까지 중앙선은 서울-제천 구간, 호남선은 송정리-목포 구간, 장항선 전구간 등에 선로개량 및 전철화 시설을 추진하고 있다.

한편 국가기간교통망계획(2000~2019, 1999 건설교통부)에 따르면, 수도권과 주요지역을 연결하는 X자형 한반도종단 고속철도망은 통일 이전에는 경부고속철도 및 호남고속철도 신설하고, 통일 후에는 서울-개성-평양-신의주축 및 서울-원산-함흥-나진 축이 신설되어 철도 네트워크가 구축되게 되어있다.

주요 간선철도는 고속철도 신선과 연결하여 KTX를 운행할 수 있도록 기존선의 5대 주요 간선(경부·호남·전라·중앙·장항선)은 선로개량 및 전철화를 추진하고 있다. 또한 지역 내 철도건설은 지방재정 여건을 감안하여 지자체 주도로 추진하고 있다. 경부선, 전라선, 호남선, 중앙선 등 주요간선의 선로설계속도는 150-200Km/h로 개량되고 있으며, 경원선, 충북선, 지하철 등은 선로설계 속도가 120Km/h이다.

따라서 건설되는 선로의 최고속도에 따라 기존선 틸팅열차는 최고운행속도 180Km/h, 설계속도 200Km/h로 개발하는 것이 기술개발 효과를 극대화시키게 된다.

건설교통부 "제1차 중기교통시설투자계획(2000~2004), 2001.3"에 의하면, 2004년까지 철도

전철화율은 46%로 상향될 것이다. 2004년 이후는 "국가기간교통망계획(2000~2019), 1999.12 건설교통부"에 따라 2019년까지 전철화율은 82%에 이르게 될 것이다.

### 3.3 주요간선 운용한계 년도

우리나라의 주요간선철도는 표 1의 철도청 자료와 같이 1997년에는 수원-대전, 송정리-목포, 순천-여수 등의 구간과 2002년부터는 전주-순천, 원주-경주, 포항-부산, 대구-영천 구간 등의 주요간선이 선로용량을 초과하고, 2012년에는 국철의 대부분 노선이 한계에 도달하게 된다.

표 1 주요 간선철도 용량한계 도달 년도

선로명	구간	선로용량	1997년	2002년	2007년	2012년
경부선	서울-수원	153		*****	*****	*****
	수원-대전	134	*****	*****	*****	*****
	대전-대구	123			*****	*****
	대구-부산	134				*****
호남선	서대전-송정리	68				*****
	송정리-목포	36	*****	*****	*****	*****
전라선	익산-전주	56				*****
	전주-순천	28		*****	*****	*****
	순천-여수	31	*****	*****	*****	*****
장항선	천안-장항	33				*****
중앙선	청량리-봉양	52				*****
	봉양-영주	33		*****	*****	*****
	영주-경주	32		*****	*****	*****
영동선	영주-철암	28				*****
	철암-강릉	25	*****	*****	*****	*****
경춘선	성북-춘천	56				*****
동해남부선	포항-울산	30		*****	*****	*****

표 2 각국별 표정속도 비교 (단위: Km/h)

국가	열차종류	최고운행속도	표정속도
프랑스	TGV 538/9	300	254.3
독일	2 ICEs	280	199.7
일본	노조미 503/508	275	261.8
이탈리아	10 Pendolino	250	164.9
영국	Scottish Pullman	201	180.2
미국	Metroliner 110	201	157.3
스웨덴	2 X2000	200	168
캐나다	Metropolis	153	145.4
한국	경부선:새마을(무)	140	107(92)
	전라선:새마을(무)	130	92/(82)
	호남선:새마을(무)	130	82/(67)

### 3.4 속도향상과 표정속도

표 2는 국가별로 표정속도에 대하여 살펴본 것이다. 주요 선진국들은 기존선의 최고운행속도를 160-200Km/h로 운용하고 있다. 한편 우리나라는 경부축에 인구 70%, 생산량 75%가 집중되어 있고, 총교통량 중 여객 66%와 화물 70%를 담당하고 있는데도, 철도차량의 최고운행속도 140Km에 표정속도 107Km/h로 되어 있다.

### 3.5 국내 고속화 연구 사례

국내에서는 중앙선과 장항선에 대하여 고속화 연구사례가 있으며, 본 연구에서는 장항선

의 연구사례를 살펴보고자 한다. 연구내용은 동일한 선로에 주행성능이 다른 새마을 열차, 고속차량 및 탈팅차량을 투입하였을 때의 효과를 비교해 보기 위하여 TPS 해석을 수행하였으며, 결과는 표 3과 같다.

온양~대야 구간에서 새마을 열차 투입하였을 경우에는 84.5분이 걸리나, KTX 고속열차를 투입하여 최고운행속도 150km/h로 운행 시에는 73.7분으로 10.8분 정도 단축이 되고, 탈팅열차를 투입하여 최고운행속도 150km/h로 운행 시에는 66.7분으로 17.8분 단축됨을 알 수 있다. 탈팅열차를 투입할 경우 고속열차에 비하여 10% 정도(7분) 시간단축효과가 있다.

표 3 차종별 운행 소요시간 비교

구 간	거리 (km)	운행시간, 정차시간(분)		
		새마을 열차	고속열차	탈팅열차 (ICT411)
온양~홍성	41.3	21.0	18.2	17.8
홍성		(1)	←	←
홍성~대천	33.4	24.0	21.4	18.4
대천		(1)	←	←
대천~신장항	39.3	27.0	23.1	20.4
신장항		(1)	←	←
신장항~대야	14.4	9.5	8.0	7.1
합 (온양-대야)	128.4	84.5	73.7	66.7

#### 4. 차량 탈팅 시스템

최근 기존선 고속화에 사용되고 있는 Tilting 차량은 신선로 건설에 막대한 투자비용을 줄이고, 기존선로의 시설물을 활용하여 최소한의 개량으로 고속주행을 쉽게 달성함으로써 이태리, 독일, 스웨덴, 프랑스, 일본, 노르웨이 등에서 여객수송에 큰 호응을 얻고 있다.

##### 4.1 차량 탈팅 원리

차량 Tilting 시스템은 차량이 곡선 주행시 차체를 그림 1에 차량 탈팅 원리와 같이 곡선 안쪽으로 기울게 하는 것으로서 원심가속도( $a=V^2 / R$ ) 방향의 횡가속도( $a*\cos(\alpha+\gamma)$ )를 중력(g) 방향의 횡가속도( $g*\sin(\alpha+\gamma)$ )와 상쇄시켜 승객이 느끼는 원심력 방향의 횡가속도를 감소시키는 것이다. 따라서 곡선 통과시 차량이 탈팅되어 승차감과 곡선통과 속도가 향상된다. 또한 운행시간 단축 및 곡선통과 속도를 줄이지 않고 달리 수 있어 에너지 소비 절감효과를 기대할 수 있다.

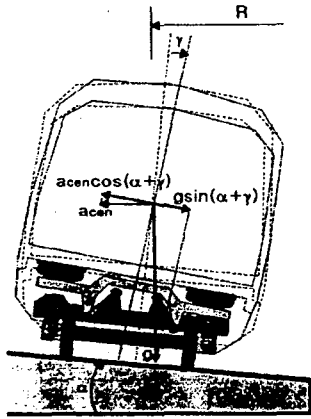
##### 4.2 탈팅 시스템 제어방식 및 제원

탈팅방식에 따라 곡선주행 시 차체를 일정 경사각으로 강제제어하는 강제식과 곡선 주행시 발생하는 경사각에 의거 제어하는 자연식으로 대별된다. 요즘에 사용되는 Tilting 방식은 대부분 강제식이 많이 사용되고 있다. 표 4에 주요국가에 가장 대표적인 Tilting 시스템 비교표이다. 표 4에서 나타나있는 것과 같이 대부분의 탈팅 차량은 200Km/h 이상으로 개발되었다. 따라서 이 대차를 사용할 경우는 고속철도뿐만 아니라, 기존선에서 고속으로 주행할 수 있게 된다.

국내에서는 아직 탈팅 시스템에 관한 연구 및 기술이 충분히 확보되어 있지 못하므로

이탈리아, 독일, 스웨덴 등에서 개발되어 여러 국가에서 사용중인 ETR460, ICT-VT, VT611, X2000, Signiture 등의 틸팅차량 시스템을 연구를 통하여 해외업체와 공동으로 개발하는 것이 바람직하다.

표 4 각국 틸팅차량 시스템 비교



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

그림 1 차량 틸팅 원리

기존선에서 틸팅 시스템을 이용할 경우 곡선주행 속도를 약 30% 향상시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다. 따라서 기존선의 고속화 구간을 노선설계속도에 맞게 개량하고, 틸팅 차량을 개발하여 최고속도를 180-200Km/h로 운행하는 것이 가장 적합한 기존선 고속화 실현이 된다.

## 5. 기존선 틸팅 차량 시스템 설계

### 5.1 개요

앞에서 기존선에 사용될 틸팅 차량은 최고속도 180km/h의 주행과 기존선 전철화를 대비한 EMU 차량 개발 필요성이 앞서 검토되었다. 틸팅차량의 개발은 지하철에서 운용 중인 EMU 방식의 전기차량(지하철)과 새마을 열차의 객차형식을 조합하여 개발하는 것이 되며, 또한 곡선에서 속도향상을 위하여 틸팅 시스템을 개발해야 하므로 해외협력 등이 요구되고 있다. 선진국에서는 이미 틸팅열차가 실용화되어 성공적으로 운행되고 있으므로 많은 기술 조사와 연구를 통해 틸팅 차량을 개발하여야 한다.

따라서 각 분야별에 대하여 국내의 기술을 조사 및 분석하고, 특히 경부고속전철, G7 고속전철 등에서 개발된 기술을 적극 활용하여 개발목표를 설정하여야 한다.

### 5.2 열차편성

열차편성은 승객수요에 효과적으로 대처 할 수 있도록 하고, 시스템 운영 효율성과 편성의 유연성을 위하여 3량 1유닛(구동차 2량과 부수차 1량) 단위로 편성하는 것이 운영과 시스템의 효율성이 높고, Fail-Safe 가능한 것으로 검토되었다. 열차편성은 향후 양산시를 대비하여 시스템의 특성을 동일하게 운영되고, 성능이 발휘되도록 그림 2와 같이 2유닛 6량으로 구성하였으며, 이는 중앙선 및 장항선 등에서 즉시 투입이 가능한 열차편성이다.

- 편성구성(6량) : Tc+M1+M2+M2+M1+Tc



M1, M2: 구동차 Tc:제어차 □ 동계실 ○ 구동대 ○× 객차대

그림 2 열차 편성도

아울러서 유니트 단위로 독립 시스템을 구성하였으므로 3유니트 9량, 4유니트 12량 등으로 편성을 확대할 수 있어 노선별 교통수요에 따라 편성을 자유롭게 할 수 있도록 편성의 유연성을 갖도록 하였다.

### 5.3 열차속도

한국철도는 중앙선, 장항선 등에 선로설계속도를 120-180Km/h로 개량하고 있으며, 호남선(송정리-목포)은 200km/h로 개량을 하고 있다. 틸팅열차의 운행속도는 향후 개량선로의 최고속도에 맞춰 설정되어야 하고, 또한 틸팅시스템도 해외공동개발을 추진해야 하므로 180-230km/h대로 운행하고 있는 선진국 틸팅기술을 그대로 큰 변경없이 활용하는 차원에서 운행속도를 180km/h로 설정하는 것이 가장 적절한 것으로 검토되었다.

따라서 철도청 연구개발사업 기획보고서에 의거 1단계(2004년까지) 160km/h로 되어있으나, 선진기술획득과 기술개발 효과를 증진시키기 위하여 최고운행속도 180km/h, 설계속도 200Km/h로 개발하는 것이 현실적인 개발목표가 된다.

### 5.4 설계기준

#### 1) 소음

틸팅차량은 곡선에서 틸팅시스템 구동뿐만 아니라, 전차선에서 전기를 공급받아 견인전동기를 구동하여 주행하는 전기차량이므로 주행 중 소음이 많이 발생하게 되어있다. 따라서 차체의 하부, 측부 및 단부에 흡음재 및 단열재를 충분히 시공하고, 특히 도아, 창문을 이중창 및 기밀구조로 하여 소음을 줄이고, 갱웨이를 기밀구조로 설비하여 근본적으로 소음을 차단하는 구조로 차량설계를 추진하여야 한다. 전장품 등을 최신 발전된 기술을 활용하고, 저소음구조로 설계하여 기존의 전동차 소음수준 78-83dB(A) 보다는 훨씬 낮추고, 새마을객차의 66-68dB(A) 보다는 다소 높은 수준인 70 dB(A)가 전기틸팅차량의 특성상 적절한 개발목표가 되어야 한다.

#### 2) 승차감

승차감은 선로와 승객의 쾌적성을 고려하여 목표를 설정하여야 하므로 최고속도 180km/h로 국유철도 1급선 직선평탄선로를 주행 시 일정구간에서 측정하여 상하 110dB 이하, 좌우 108dB 이하로 설정하는 것이 바람직하다. 이 기준은 새마을객차의 110-112dB 보다는 향상된 승차감으로 개발되어야 한다.

감·가속 시 종방향 가속도는 1.0% 이하, 종방향 저크(Jerk)는 0.7m/s<sup>3</sup> 이하가 되도록 목표를 설정하여 선진국 수준의 승차감이 되도록 하여야 한다.

틸팅차량은 곡선 진·출입 및 곡선케도 주행 시 승객에게 불쾌한 진동이나 충격, 멀미현상이 발생되지 않도록 해야 한다. 따라서 틸팅차량의 곡선통과속도로 주행 시 차체의 정상

횡가속도는 0.8% 이하로, 차체의 롤(roll) 각속도는 5° /초 이하로 선진국 수준의 승차감을 개발목표로 하여야 한다.

### 5.5 차체 설계

차체재질은 국내에서 개발된 알루미늄 합금 중공 압출재를 사용하는 것이 경량화와 조립 공수절감 측면에서 유리하다.

선진국에서는 이미 ICE 3, AGV, 신간선 700계 등 신차종에 사용하여 좋은 호응을 얻고 있다. 우리나라는 표준전동차 및 G7 고속전철의 차체에 알루미늄 합금 중공 압출재를 사용하여 20%의 차체중량을 감소시켰다.

또한 선로 위에 20톤 장애물이 놓여 있을 경우, 열차가 충돌시에 기관사를 보호하는 전두부 차체구조를 설계하여야 한다. 선진국에서는 차체설계 시 채택하고 있으며, UIC에서 2004년 법제화를 준비중에 있어 대비해야 한다.

아울러서 차체의 압축강도는 한국철도 규정에 따라 차량 연결속도 4-6km/h에 상응하는 120톤 압축하중으로 차량을 설계하여야 하며, 이 것은 새마을 객차 및 무궁화객차와 동일 조건이다.

### 5.6 대차

틸팅 대차는 곡선주행 시에 속도향상을 위하여 사용되어야 하며, 기존선 및 개량선로 모든 운행속도 영역에서 안전하고, 안정되게 주행할 수 있어야 한다. 또한 조향 등을 통하여 곡선에서 승차감 향상 및 차륜 플랜지 마모를 최소화하는 구조로 설계되어야 한다.

틸팅 메커니즘은 링크방식으로 하여야 하고, 전기-기계식 또는 유압식 틸팅 액츄에이터를 설치하여 제어시스템에 의해 작동되어야 한다. 틸팅 메커니즘은 2차 현가장치 하부에 설치하는 것이 일반적이며, 2차 현가장치 상부에 설치도 가능하다.

열차가 주행 중 틸팅 시스템 고장 또는 제어불능 시에 차량이 중심으로 복원되도록 틸팅 메커니즘을 설계하여 일반차량과 같이 주행할 수 있는 안전기능이 있어야 한다.

180Km/h의 속도로 열차가 주행하기 위해서는 설계속도 200 km/h에서 안전 및 안정성이 확보되어야 한다.

### 5.7 틸팅 시스템

선진국 틸팅차량의 틸팅 최대 각도는 대부분 8° 이하이며, 틸팅 링크 메커니즘은 차상 내 곡선검지장치를 통해 액츄에이터가 작동되는 강제틸팅방식을 사용하고 있고, 또한 틸팅 시스템은 제어 불능 시를 대비한 Fail-Safe 기능이 있다.

틸팅방식은 차상 내에서 곡선을 검지하고, 연산을 통해 강제적으로 차체를 경사 시키는 강제제어방식으로 되어야 한다. 강제제어방식은 현재 유압식(스웨덴)과 전기-기계식(이탈리아, 독일)이 가장 많이 사용하고 있으며, 시스템 상에 큰 차이는 없고, 현재 양 시스템 모두 잘 운영되고 있으므로 충분히 검토하여 선정하여야 한다.

틸팅 제어는 선두열차에 설치된 센서와 틸팅 프로세서로 곡선을 검지 하여 소요 틸팅차량을 연산 통해 편성 내 차량을 순차적으로 일괄 제어 시스템으로 하여야 한다.

판도그래프는 차체의 틸팅과 연동되어 가선중심에 위치하도록 하여야 하며, 주행 중 틸팅 시스템이 작동불능 시에는 차량이 중심으로 복원되도록 설계하여 일반차량과 같은 상태로 주행할 수 있어야 한다.

따라서 틸팅차량은 곡선에서 최대경사각은 8도가 적정하고, 강제식 차체경사 틸팅 시스템은 전기-기계식 또는 유압식 틸팅 시스템을 충분히 검토하여 선정하여야 하며, 틸팅 시스템이 고장 시에도 정상운행이 가능하도록 시스템 안전을 고려해야 한다.



## 5.8 제동 시스템

### 1) 제동 시스템

제동장치는 열차 주행 중에 안전하게 제동이 작용되어야 하고, 제어시스템의 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 전자변을 작동하여야 한다. 제동장치는 보안을 위하여 상용제동, 비상제동, 보안제동 및 주차제동으로 설비하고 제동의 작동 및 완해는 운전실에서 조작이 가능하여야 한다.

열차의 만차하중 시 비상제동거리는 기존선 운영을 고려하여 160Km/h의 속도로 운행 시에는 1,000m 이내가 되도록 설계하여야 하고, 최고운행속도 180Km/h에서는 1400m 이내 정차 성능이 확보되도록 설계되어야 한다. 따라서 톨팅열차가 개발되어 기존선로에서 운행 시는 열차신호보안장치의 제어 시스템에 맞도록 개선되어야 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 가능한 성능이 확보되도록 설계하여야 한다.

차륜의 점착효율을 향상시키고, 차륜과 궤도의 마모감소, 소요동력의 이용효율을 향상을 위하여 활주(Slid), 공주(Slip) 제어 시스템을 설비하여야 하고, 진단 및 응급조치 기능을 갖춰야 한다.

### 2) 제동 성능

#### (가) 제동계산 자료

6량 편성에 대하여 표 5와 같이 제동 시스템 기초 설계자료를 설정하여 제동계산을 수행하였다.

표 5 제동성능 계산 설계자료

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

#### (나) 계산결과

표 6에 제동력 조합에 따른 계산결과가 나타나 있다. 비상제동시 성능을 살펴보면 비상제동거리가 1,252m이고, 시간은 약 45초 감속도  $1.15\text{m/s}^2$ 로 계산되었다. 따라서 제동 시스템에서 언급된 최고운행속도에서 1,400m이내를 만족하고 있다. 아울러 회생제동력, 디스크 제동력 등에 대하여 검토하였다.

표 6 제동력 조합 및 계산 결과

구분	량수	회생	디스크	차륜디스크	주행저항(kN)	제동거리(M)	제동시간(초)	평균감속도
비상시	6량	100%	100%	100%	0%	1,252	45	1.15

\* 참고 :

- 경부고속철도(300Km/h에서) : 비상제동거리: 3,000m, 시간: 80초, 감속 : 1.04 m/s<sup>2</sup>
- G7 고속전철(350Km/h에서) : 비상제동거리: 3,720m, 시간: 63초, 감속도: 1.29 m/s<sup>2</sup>

그림 3은 6량 편성에 대하여 제동력 선도이다. 전기제동력(회생제동)은 추진력의 100%를 사용한 것이고, 디스크제동은 축당 12kN(3 디스크/축)을 사용하였으며, 공기제동만으로 비상제동 시에는 21kN/축을 사용하였다. 차륜 디스크 제동은 축당 8kN이 작용으로 하였으며, 공기제동만으로 비상제동 시에는 11kN/축을 사용하였다. 열차주행저항은 ETC-T차량의 최고운행속도가 180km/h로서 열차주행저항력 작아 제동력에 포함시키지 않았다.

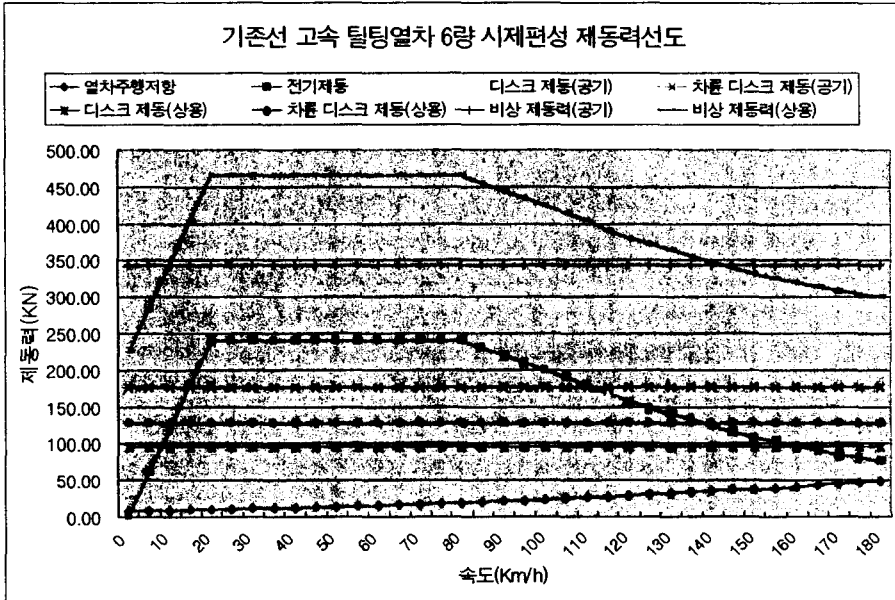


그림 3 제동력 선도

제동력 선도는 전기제동 및 기계제동에 대하여 제동력 분담을 설정하였으며, 비상제동거리는 공기제동만으로 최고운행속도에서 1,400m 이내에 정차 할 수 있도록 하였다. 전기제동력 및 축당 3개의 디스크 판 및 차륜 디스크 제동 설치 등의 고용량의 제동설계 연구를 집중적으로 수행하여 가속여력, 제동력 선도 등을 보완하여야 한다.

## 5.9 추진 시스템

### 1) 추진 제어 시스템

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

추진 시스템 구성은 KTX 이전기술 및 G7 고속전철개발기술 활용하고, 또한 선진국 최근 기술을 사용하여 주전력변환장치, 견인전동기, 주변압기, 보조전원장치 등을 개발하여야 한다. 추진 제어 시스템은 IGBT 이상의 전력소자를 사용과 PWM 제어를 채택하여 개발하고, 적절한 냉각설비를 하여야 하고, 견인전동기는 3상 교류 유도전동기로 하여야 한다.

판토히아프는 1 유니트(3량)당 1개씩 설치하여 설계속도 200 km/h까지 모든 속도에서 추

진 및 보조동력에 소요되는 전류를 집전할 수 있어야 한다. 터널 출입 시, 개활지 및 터널 열차 교행 시에 안정한 동적특성을 가져야 하며, 주행시간의 5% 이상 이선이 발생하지 않아야 한다. 또한 곡선통과 시 대차의 틸팅 메커니즘과 연동으로 작동하여 주행성능을 향상시키는 구조로 하여야 한다.

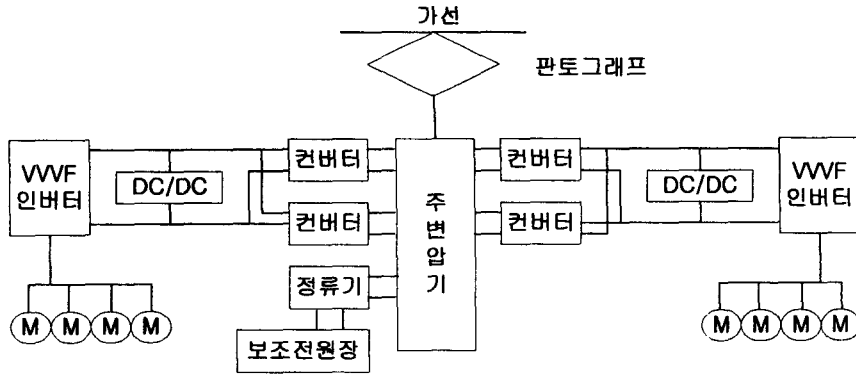


그림 4 추진 및 보조전원 회로 블록 다이어그램

## 2) 추진성능

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

(가) 견인전동기 정격 성능

- 출력(P) : 250 kW
- 회전속도(N) : 4,820 rpm

$$\text{회전력}(\tau_a) = (P \times 60) / (2\pi \times N) = (250 \times 60) / (2 \times \pi \times 4820) = 495 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(나) 열차 추진력

- 최고속도(180km/h)에서 :

$$F = (2 \times n \times \tau_a \times R \times \eta) / D = (2 \times 16 \times 495 \times 4.136 \times 0.975) / 0.82 = 78 \text{ kN}$$

(다) 최고운행속도

$$V = \{(60 \times \pi \times D \times N) / R\} \times 10^{-3} (\text{km/h}) = \{(60 \times \pi \times 0.82 \times 4,820) / 4.136\} \times 10^{-3} = 181 \text{ km/h}$$

(라) 기어 감속비

$$\text{감속비}(R) = \text{구동기어 이수} / \text{피니어 이수} = 91 / 22 = 4.136$$

(마) 열차주행저항식(철도청 디젤동차식 사용)

$$R(\text{kg}) = A + B \times V + C \times V^2$$

$$= 2.5 + 0.0186 \times V + \{(0.0269 + 0.0079(n-1)) \times V^2\} / W$$

$$\text{여기서 : } A : 2.5, B = 0.0186 \times V, C = \{(0.0269 + 0.0079(n-1)) \times V^2\} / W,$$

(마) 견인력 선도

앞에서 제시된 7% 오름구배에서 180km/h 주행성능, 250kW의 견인전동기, 최고속도에서 78kN의 추진력, 기어감속비 4.136 등의 설계자료를 토대로 추진성능을 계산한 결과 그림 4 견인력선도와 각 구배에서의 주행저항곡선을 얻었다.

6량 편성열차는 추진 시스템 성능 계산결과 총출력이 4,000kW이고, 기동 시에는 287kN,

최고속도에서는 76kN의 견인력이 소요되고, 평균가속도는 0.55m/s, 최고속도에서는 0.10m/s<sup>2</sup>와 9%의 등판능력이 있고, 35% 구배에서 약 125km/h 속도까지 운행할 수 있다. 아울러서 최고속도 도달거리는 4.8km이고, 시간은 139초가 소요되고, 평형속도는 220km/h로 계산되었다.

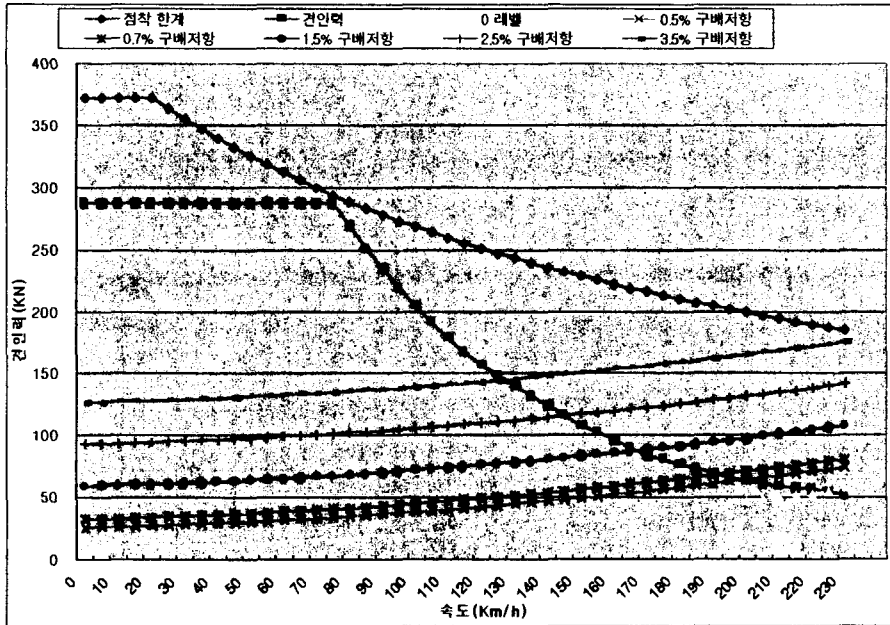


그림 5-6 랑 탈팅열차 견인력 선도

## 6. 결론

앞에서 살펴본 바와 같이 우리나라의 주요간선의 철도청 자료에 의하면 1997년부터 4개 간선이 운용한계에 도달하기 시작하여 2004년에는 주요간선에 대부분 구간에서 한계용량을 초과하게 되어 새로운 방안이 요구되고 있다. 한편 경부고속철도에 KTX가 2004년부터 개통되더라도 호남선, 전라선, 영동선 및 중앙선에는 혼잡도가 개선되지 않아 교통수송 체계에 문제로 남게된다.

선진국의 기존선로 속도향상에서 살펴 본바와 같이 이탈리아, 독일, 스웨덴 등에서는 기존선에 탈팅차량을 운행함으로써 투자비를 적게 들이고, 속도를 160~220km/h로 향상시켜 여행시간 단축 등 효과가 있는 것으로 조사되었다. 한국철도에서도 기존선 고속화를 위하여 중앙선 및 장항선에 탈팅차량 운영을 검토한 결과 시간단축에 효과가 있는 것으로 검토되었다.

본 연구는 철도기술연구원에서 추진하고 있는 기존선 고속화 실용기술 개발사업의 연구내용을 참고하였으며, 기존선에 운행될 탈팅차량의 개발 필요성, 운행속도, 편성구성, 소음/진동 및 승차감 기준, 차체 강도 및 재질, 제동장치 사양 및 성능, 대차 및 탈팅 시스템 사양, 추진 시스템 사양 및 성능 등 차량 시스템에 대한 연구를 수행하여 탈팅 차량의 개념설계와 사양을 제안하였다.

앞으로 산학연이 참여하여 시스템 엔지니어링, 차량 및 부품 설계/제작, 시험평가, 선로개량 등의 기술개발 연구를 통하여 기존선 고속 틸팅차량 개발을 추진해 나가야 할 것이다.

**참고자료:**

1. 한국철도기술연구원, 철도청 기존선 고속화 실용기술개발사업, "시스템 엔지니어링 및 시스템 통합 과제", 1차년도 연차보고서, 2002. 4
2. 에스이테크놀로지(주), 철도청 기존선 고속화 실용기술개발사업, "시스템 엔지니어링 관리체계 및 기본모델 구축", 1차년도 연차보고서, 2002. 3
3. 한국철도기술연구원, 철도기술 논문집, 1997. 4
4. 한국철도청, "21세기 철도기술의 비전", 1999. 9. 16
5. 한국철도청, 행정광, 1990. 10. 7, "한국 철도차량 수여전망과 철도산업 육성 전략"
6. 한국철도기술연구원, 철도기술 논문집, 2000. 6,
7. 한국철도기술연구원, 철도기술지: 21호(1999. 11), 23호(2000. 4)
8. 철도학회, 춘계논문발표집, "기존선 고속전철 연계운용으로 고속화 방안", 2001. 5
9. 철도차량공학, 박광복 著, 삼성종합출판, 2판, 2000. 8