

기존선 고속화 차량의 틸팅시스템 개념설계 연구

The Concept design of Tilting system for Express tilting train for conventional line

김남포* 유원희** 최성규***
Kim, Nam-Po You, Won-Hee Choi, Sung-Kyou

ABSTRACT

Tilting system allow the train to pass curve at higher speed without affecting passenger comfort. As the tilting trains offer the optimum means of providing faster and more comfortable rail service with minimum of environmental disturbance and capital investment, more than 14 countries have now adopted or are about to adopt tilting train technology. The Korean National Railroad is also planing to apply faster tilting train to the areas where the High speed rail service are not provided. This paper shows the concept design of Bogie and Tilting system for 180 km/h Express tilting train for Korean conventional line, which was done as a part of the KNR's R&D project.

1. 서론

틸팅차량은 자세제어에 의해 승차감의 저하 없이 일반차량보다 곡선궤도를 빠르게 주행할 수 있는 장점을 지닌 차량이다. 이 차량을 이용하면 곡선궤도가 많은 기존선에서 하부구조의 큰 투자 없이 운행시간을 효과적으로 단축시킬 수 있어 국외 14개국에 적용되고 있고 점진적으로 확대되고 있는 실정이다. 국내에서도 고속철도 비 수혜지역의 고속 서비스 제공과 이를 통한 국토의 균형발전과 철도 전반의 효율 향상을 위해 기존노선에 틸팅차량 도입을 적극적으로 검토하고 있으며, 철도청은 틸팅차량 운행 타당성 연구 용역 및 철도기술개발사업을 통해 국내 기존선 환경에 맞는 틸팅차량의 개발 도입을 추진하고 있다. 본 논문은 철도기술개발사업의 연구내용 중에서 대차 및 틸팅 시스템의 개념설계에 대한 것으로, 국내 철도환경에 적합한 틸팅 메카니즘과 대차 장치, 그리고 틸팅 제어 시스템의 개념설계 과정과 그 결과에 대해 기술한다.

본 연구에서의 틸팅 차량 개발 목표 및 성능 요구조건은 다음과 같다.

- 최고 설계속도 200 km/h, 운행 최고속도 180 km/h
- 곡선주행속도 $5.8\sqrt{R}$ (일반차량 $4.5\sqrt{R}$, 선형조건에 따라 상이)
- 승차감 수준 상하 110 dB 이하, 좌우 108 dB 이하
- 정상 횡가속도 0.08g 이하, 차체 롤(roll) 각속도 5도/초 이하
- 궤도 부가하중

최대 정적축중 15톤, 주행 횡압 $2.9 + 0.3P$ 이내 (여기서 P는 수직하중)

기존선로의 기반시설의 개량 없이 또는 최소한의 개량으로 틸팅차량의 효과를 극대화하기 위한 설계 개념 하에서 축중과 횡압의 목표치를 설정하였다. 즉 개발차량이 기존 차량보다 고속으로 주행을 하더라도 궤도에 미치는 부담력은 기존차량이 미치는 수준 이하가 되도록 한 것이다.

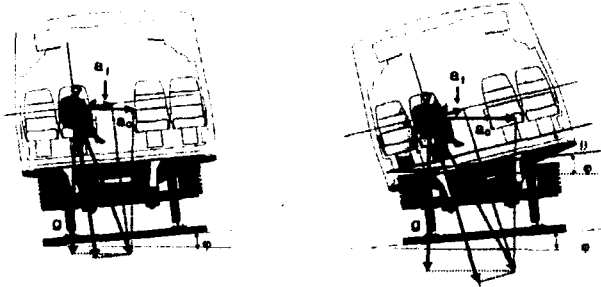
* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 주행시스템연구팀 선임연구원, 정희원

** 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단 단장, 정희원

*** 한국철도기술연구원 선임연구부장, 정희원

2. 틸팅 시스템의 원리 및 구성

틸팅 시스템의 원리는 그림 1과 같이 곡선부 주행 시 차체를 곡선의 안쪽으로 기울이게 함으로써, 승객이 느끼는 원심가속도 성분을 중력가속도의 횡방향 성분으로 감쇄시키는 것이다.



일반차량

틸팅차량

그림 1. 틸팅 시스템의 원리

여기에서 a_f : 승객이 느끼는 횡방향 가속도

a_c : 차량 원심 가속도

g : 중력 가속도

ψ : 캔트 각 [rad]

θ : 차체 틸팅 각 [rad]

V : 곡선 주행속도 [m/s]

차량 원심가속도는 $a_c = \frac{V^2}{R}$

승객이 느끼는 횡방향 가속도, 즉 차체에 평행한 원심가속도의 성분은

일반차량인 경우 $a_f = a_c - g \cdot \psi$ 이며, 틸팅차량인 경우 $a_f = a_c - g \cdot (\psi + \theta)$ 가 된다. 즉 동일한 속도로 주행한다고 가정할 경우 틸팅차량은 일반차량보다 $g \cdot \theta$ 만큼 횡방향 가속도가 저하된다.

이와 같은 기능을 수행하기 위한 틸팅 시스템은 틸팅 제어부와 틸팅 메카니즘으로 구성된다. 틸팅 제어부는 곡선상태를 검지하기 위한 센서와 틸팅 량을 연산하고 제어하는 틸팅 프로세서, 차체를 회전시키는 동작기(actuator)로 구성되며, 차체의 틸팅운동을 안내하는 기구인 틸팅 메카니즘으로 구성된다.

3. 틸팅 시스템 특허 MAP

틸팅 시스템의 개념설계를 위해서는 핵심기술과 발전 추이 대한 검토가 선행되어야 한다. 핵심기술을 파악하기 위한 가장 좋은 방법은 특허의 검색을 통하는 것으로서, 특허 MAP은 해당기술에 대한 과거에서부터 현재까지의 특허를 출원인, 출원시기, 기술분류, 국가별 등으로 분류, 분석함으로써 기술발전의 추이, 각 기술의 강점 등을 파악하는 도구이다.

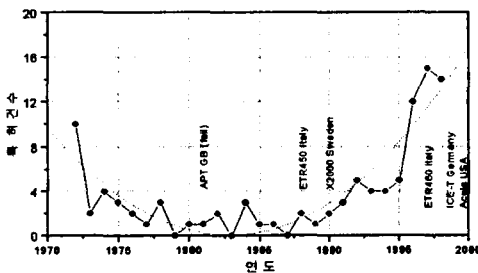


그림 2. 연도별 특허출원 추이(구미)

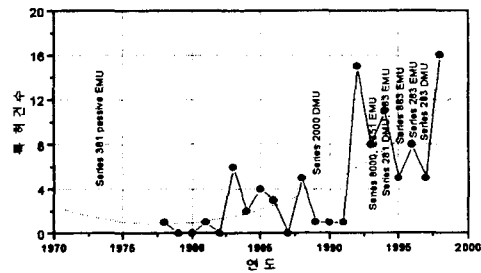


그림 3. 연도별 특허출원 추이(일본)

틸팅 시스템 관련 특허는 그림 2에서 보듯이 70년대 초기에 많이 출원되었다. 그러나 1981년 영국철도의 APT 개발 실패와 상용화 시 제기된 신뢰성 저하문제로 한동안 침체기(80년대)에 빠져들었다. 이와 같은 침체는 1988년 이탈리아의 ETR450, 1990년 스웨덴의 X2000이 최초로 성공적인 상업운행을 시작함과 동시에 급속도로 반전되었고, 기술의 성숙과 함께 틸팅차량의 경제적 이점으로 90년대 후반에 들어서는 ETR460, ICE-T와 미국의 Acela 등 다양한 틸팅차량이 등장하여, 틸팅차량의 전성기를 구가하고 있다. 일본은 80년대부터 출원이 되기 시작하여 90년대에 급속히 확산되고 있음을 알 수 있다.

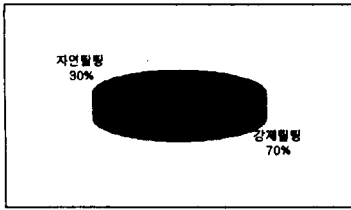


그림 4. 기초틸링방식(구미)

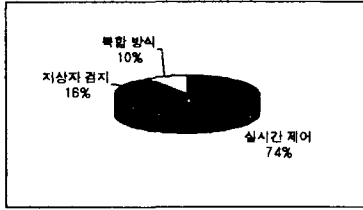


그림 5. 틸링 제어방식 (구미)

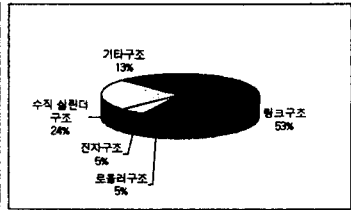


그림 6. 틸링메카니즘 (구미)

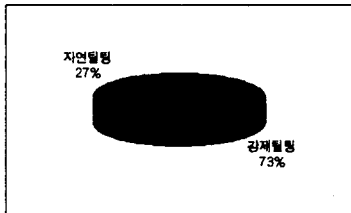


그림 7. 기초 틸링방식 (일본)

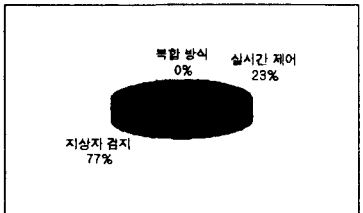


그림 8. 틸링 제어방식 (일본)

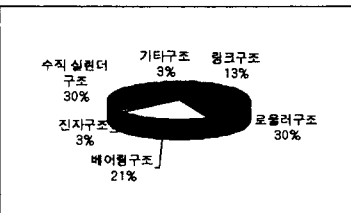


그림 9. 틸링메카니즘 (일본)

기초 틸링방식을 보면, 초기에는 일본의 시리즈 381 및 스페인의 Talgo 차량에 구조가 간단한 자연틸링방식이 사용되었으나, 그 성능에 한계가 있어 근래에는 강제틸링 방식이 주류를 이루고 있다. 틸링 제어방식은 구미는 차상내에서 실시간 제어하는 방식이, 일본에서는 지상자 신호의 도움을 받아 제어하는 방식이 주류를 이루고 있다. 일본의 궤도가 협궤이기 때문에 완화곡선길이가 충분치 않아 구미의 실시간 제어방식을 채택하지 못한 것으로 분석된다. 틸링 메카니즘은 구미는 링크 구조가 주류를 이루고, 일본은 각종 방식이 혼합 사용되고 있는 것으로 나타났다.

4. 국내 기존선에의 틸링 시스템 적합성 검토

틸링 차량은 본 곡선부에서의 차체 경사에 의해 정상 횡가속도를 저감함으로써 곡선주행속도를 향상시키는 개념으로, 일반차량에 비해 표 1 과 같은 기술적 부분이 해소되어야 한다.

표 1 . 틸링차량의 기술적 문제점

No	기술적 항목	해소 방안
1	완화곡선부 승차감 저하	차량측면 : 곡선 선형에 맞게 속도향상 폭 설정 궤도측면 : 완화곡선장 연신, 궤도틀림 관리 강화
2	멀미 문제	이론적 100% 저감 가능한 횡가속도를 일부만 틸팅으로 보정
3	횡압 증가	경량화 및 저중심화, 대차 조향장치 적용
4	차량 운동범위 증가	차체 폭 및 차량길이 축소, 차체 모서리 라운드 증가

이 중에 기존선 선형조건과 밀접한 관계를 갖는 완화곡선부 승차감 저하문제가 중요하게 다루어져야 한다. 국내 환경에 적합한 틸링 시스템의 설계 개념을 수립하기 위해 기존선 중에서 호남, 장항 및 경전선의 곡선부 선형조건과 궤도 틀림량을 조사하였고 그 결과가 그림 10에서 그림 12 에 나타나있다.

국내 기존선 상에 상기 특히 MAP 조사결과 주류를 이루고 있는 차상내 곡선검지에 의한 강제 제어 방식 틸링 시스템의 적용 가능성을 확인하기 위해 다음과 같은 개략식을 이용하였다. 승객이 완화곡선부 주행 시 느끼는 roll 각속도는 식 (6)과 같이 표현될 수 있으며, 이 허용한도는 국외에서 일반적으로 적용하고 있는 허용 기준인 5도/초를 적용하여 평가하여 보았다.

$$T_{ct} = 3.6 \frac{L}{V} \text{-----(1)} \quad T_{nit} = T_{ct} - T_d \text{-----(2)} \quad C_{rate} = \frac{C}{T_{ct}} \text{-----(3)}$$

$$\gamma_{max} = \tan^{-1} \left(\frac{K_1 \cdot CD}{1500} \right) \text{-----(4)} \quad \gamma_{max rate} = \frac{\gamma_{max}}{T_{nit}} \text{-----(5)}$$

$$\phi_{rate} = \frac{C_{rate}}{1500} \frac{180}{\pi} + K_2 \cdot \gamma_{max\ rate} \quad \text{-----(6)}$$

여기에서 ϕ_{rate} 는 승객 측면의 roll 각속도, C_{rate} 캔트 변화율, γ_{max} 최대 틸팅각, $\gamma_{max\ rate}$ 최대 틸팅율, K_1 틸팅에 의한 캔트부족 보정비율, K_2 현가장치 물강성율, T_c 완화곡선부 주행소요시간, L 완화곡선장, V 차량 속도, C 부설 캔트, T_{tilt} 차체 틸팅 소요시간, T_d 틸팅 시스템 시간지연을 나타낸다.

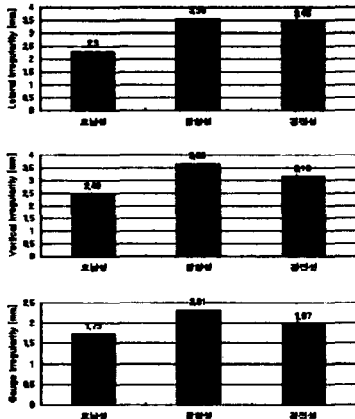


그림 10. 궤도 톨립 표준편차량

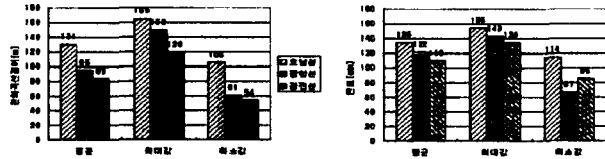


그림 11. 400R 곡선의 선형조건

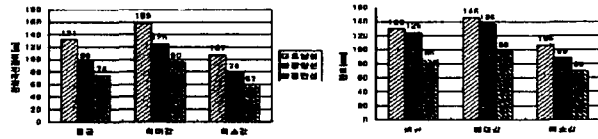


그림 12. 600R 곡선의 선형조건

식(6) 에 3개 기존선의 완화곡선 및 캔트 조건을 고려하여 틸팅차량의 곡선주행 속도 향상율을 산출하여 보았다. 큰 선형개량 없이 도달 가능한 속도향상율은 선형이 우수한 호남선은 현 일반차량 대비 약 30%, 장항 및 경전선은 약 10% ~20% 정도로 나타났다. 장항 및 경전선의 경우 완화곡선장 연신의 선형개량을 통해 틸팅 차량의 최대효과인 30% 수준의 속도향상이 가능할 것으로 판단되었다. 이를 통해 국내 기존선의 선형조건에서도 차상내 곡선점지에 의한 강제제어방식의 틸팅 시스템이 적용 가능할 것으로 예측되었다.

5. 틸팅 시스템 개념설계

틸팅 제어 시스템의 설계 개념은 대안 설계에 대한 기술적 성능, 경제성, 유지보수성에 대한 장단점을 비교 분석하고, 기술의 발전 추세 및 국내 기존선의 운용 환경을 고려하여 추진되었다. 개념설계는 자연 틸팅방식, 강제 틸팅방식 중에서 기초 틸팅 방식을 정의하고, 차량 독자적 틸팅 제어, 외부 정보 또는 기 입력 노선정보에 의한 틸팅 제어 중에서 기초 틸팅 제어 방식을 정의하고, 틸팅 구동방식을 정의하는 순서로 진행되었다.

표 2. 기초 틸팅방식 선정

구 분	자연 틸팅방식	강제 틸팅방식
초기비용	상대적 낮음	상대적 높음
속도향상	곡선통과속도 최대 15% 향상	곡선통과속도 최대 30% 향상
유지 보수성	기계적 구조로 부품수가 적어 유지보수성이 우수	전자제어 및 액츄에이터가 포함되 상대적 유지보수성은 낮음
응답	기계적 구조로 응답이 낮음	높음
적용 차량	스페인 Talgo 객차 일본 Series 381 차량	이탈리아 ETR, 독일 ICT, 스웨덴 X2000, 미국 Acela, 일본 Series 281 등 다수
분석결과	곡선통과속도 향상효과가 크며, 전 세계적 적용 추세에 맞추어 강제 틸팅방식 적용	

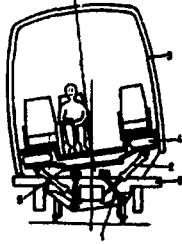
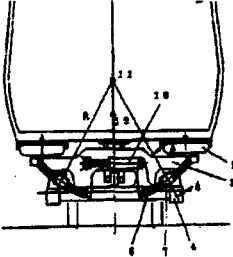
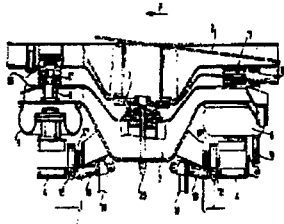
표 3. 틸팅 제어 방식 선정

구분	지상자 신호수신에 의한 틸팅 제어 시스템	차상내 곡선검지에 의한 틸팅 제어시스템
특징	- 지상자에서 곡선정보를 수신하여 사전 틸팅제어 - 제어의 시간지연이 없고 곡선진출입 시 좋은 승차감 확보가능	- 외부의 도움없이 차량 내에서 곡선검지 하여 틸팅 제어 - 곡선 진출입 시 승차감 확보를 위한 고도의 제어 기술 필요
초기 비용	차량가격 상승 5 ~ 10% 지상설비 비용 추가	차량가격 10% 상승
승차감	상대적 우수	상대적 낮음
유지 보수	지상설비 유지보수 필요 보선, 선형변경 시 노선정보 수정필요	지상설비 없음
가용성	지정 노선만 운행	우수
적용 추세	완화곡선장이 극히 짧은 협궤에만 적용	표준궤, 광궤에 적용
적용 차량	일본의 협궤노선 차량	유럽 및 미주의 표준궤 노선 차량
결과	국내 기존선은 표준궤간이며, 지속적인 선형개량을 도모했음. 지상시설의 투자, 열차 가용성을 고려 차상내 곡선검지에 의한 틸팅 시스템 채택	

표 4. 틸팅 구동방식 선정

구분	유압 구동방식	전기기계방식
구성	유압공급 시스템과 유압 실린더 규모 크고 복잡	전원공급장치와 전기기계식 액츄에이터 컴팩트한 구조
안전성	대차간 동일 밸브로 제어하여 대차간 틸팅량 차이 원천봉쇄	자기진단 기능 내장
제어성	보통	완전 디지털화로 우수
유지 보수성	미흡(작동유 오염 및 누유)	우수
소비 에너지	높음(에너지 변환 필요)	낮음
중량	높음	낮음
기술개발 추이	적용이 감소되고 있음	적용이 증가되고 있음
적용 차량	VT610, ETR460, X2000, ICT, Acela	VT611, ICT-VT, ICN, TGV-Pendular
분석 결과	제어성, 유지보수성, 소비 에너지, 경량화에 유리한 전기기계 방식 채택	

표 5. 탈팅 메카니즘 방식 선정

구 분		링크 방식	로울러(베어링) 방식	센타 피봇팅 방식
그림				
기술적 성능	안전성	우수 (견고한 구조, 안정적 링크 구조)	우수 (견고한 구조, 안정적 면 안내 방식)	보통
	소요 에너지	보통 (차체 중심 상하운동 있음)	낮음 (차체 중심 상하운동 적음)	많음
경제성	유지 보수성	우수 (구조가 단순, 마모부 없음)	미흡 (베어링 가이드부 구조가 비교적 복잡, 마모부 있고, 윤활장치 필요)	비교적 단순한 구조임
	초기 비용	낮음	높음	보통
신뢰성	fail-safe	우수 (틸팅실패시 자연진자운동)	우수 (틸팅실패시 자연진자운동)	낮음 (차체무게중심이 회전중심 위에 있어 자연진자 기능 없음)
	적용 차량	ETR460, X2000, Acela, ICT, VT611, TGV-P	ICN, Series 283	Socimi 대차
분석 결과		기술적 성능, 유지보수성 모두 우수하며, 국외 적용사례가 제일 많은 링크 방식 채택		

이와 같은 방식으로 탈팅 메카니즘의 설치방식, 대차장치의 형식 등이 분석되었고, 그 결과가 개념설계 도면 및 탈팅 시스템 개발사양으로 나타나 있다. 그림 13은 링크 방식의 탈팅 메카니즘에 대한 그림으로 탈팅 동작 전과 후의 형상을 나타내고 있다. 탈팅 메카니즘이 공기 스프링으로 구성된 2차 현가장치 하부에 위치하도록 하였으며, 이는 공기 스프링에 가해지는 원심력을 탈팅에 의해 보상함으로써 과도한 횡변위를 방지하기 위함이다. 또한 대차 당 1개의 전기·기계식 탈팅 액츄에이터가 대차 후레임과 볼스타사이에 설치하여 탈팅 운동을 유기 시키도록 하였다. 여기에서 차체와 대차간의 전후 및 좌우하중 전달요소로 센타 피봇 형식으로 일차적으로 구성하였으나, 이는 참고 사항으로 설계단계에서 링크방식과 같은 다른 방식으로 변경될 수 있다. 그림 14는 탈팅 시스템의 구성을 나타낸다. 여기에서 탈팅 액츄에이터 전원공급장치(DR)은 액츄에이터 1개당 1개로 구성할 수도 있으며, 한 차량의 액츄에이터 2개당 1개로도 구성할 수 있는 데 본 그림에서는 참고로 액츄에이터 1개당 1개로 표현해 놓았다.

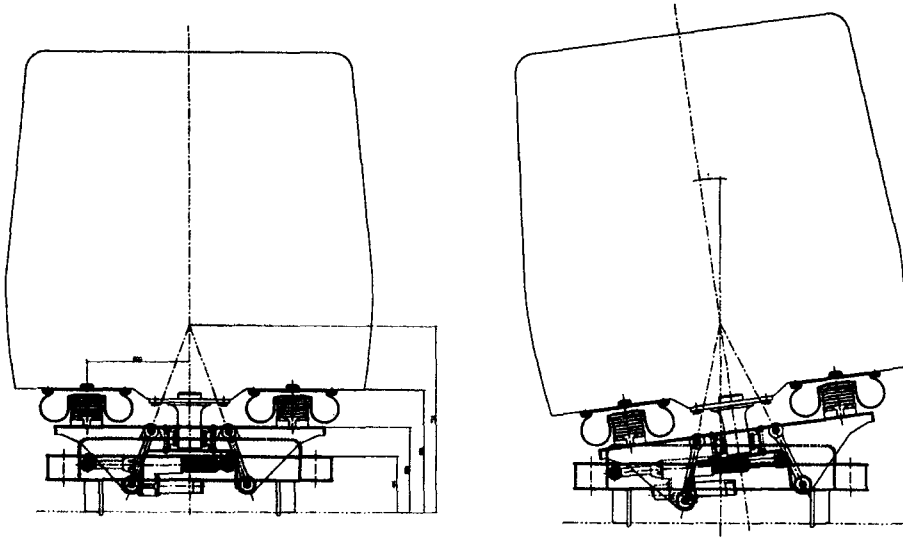


그림 13. 틸팅 매카니즘 개념설계도 (틸팅 전후의 형상)

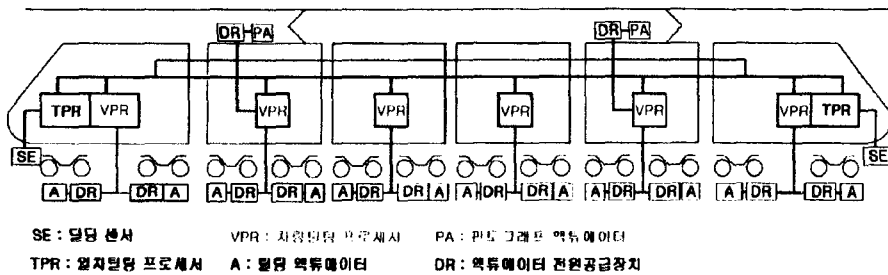


그림 14. 틸팅 시스템 구성도

6. 틸팅 시스템 개발사양

5항의 틸팅 시스템 개념설계를 기초로, 시스템 요구사항에서 요구되어지는 성능 조건을 만족시키도록 틸팅 시스템의 개발사양을 수립하였다.

6.1 틸팅 제어 시스템

◆ 일반사항

- 차상 내 곡선검지에 의한 강제 틸팅제어방식
- 편성차량을 순차적으로 일괄 틸팅 제어하는 방식 - 전기·기계식 틸팅 액츄에이터 사용
- 판도그래프는 차체 틸팅과 연동하여 가선중심 유지
- Fail-safe : fail 시 자동 중심 복원 및 일반차량처럼 운행가능

◆ 주요 제원

- 최대 틸팅각도 : 8도 - 최대 틸팅 속도 : 4도/초

◆ 틸팅 제어시스템

- 센서로 가속도계와 자이로스코프 병행 사용
- 각 차량에는 안전 가속도계가 구비, 틸팅 작동상태 모니터링
- 자기진단 기능 보유 및 진단결과 열차제어진단장치에 보고

6.2 대차 및 탈팅 메카니즘

◆ 일반사항

- 국내 기존선 및 개량 선로를 안전하게 주행 - 탈팅 메카니즘을 포함하는 간결 구조
- 링크 방식의 탈팅 메카니즘 - 탈팅 메카니즘 2차 현가장치하부 설치 권장

◆ 주요제원

- 최고속도 : 180 km/h, 최고설계속도 : 200 km/h
- 고정축거 : 2600 ~ 3000 mm - 차륜직경 : 860 mm - 최대 축중 : 15톤

◆ 대차 장치

- 1차 현가장치 : 코일 스프링과 Z링크방식 조향장치
- 2차 현가장치 : 공기 스프링, 안티 롤 장치
- 후레임 및 볼스터는 KS R 9210과 UIC 515/516 의거 강도설계 및 피로 시험
- 기초제동장치 : 차륜 디스크 제동장치(구동대차), 차축 디스크 제동장치(부수대차)

7. 결론

탈팅 시스템은 곡선부가 많은 국내 기존선 고속화 차량의 요체가 된다. 국외의 탈팅 시스템 후보대안별로 기술적 성능, 경제성, 유지보수성에 대한 장단점을 비교 분석하고, 기술의 발전 추세 및 국내 기존선의 운용환경을 감안하여 철도기술개발사업에서 개발코자 하는 시제차량의 탈팅 시스템에 대한 개발사양을 수립 제시하였다. 본 연구에서는 차상 내 곡선검지에 의한 강제 탈팅제어 방식과 시제 6량 편성차량을 순차적으로 일괄 탈팅 제어하는 방식으로 설계 개념을 설정하였다. 또한 기존선의 시설물 조건, 차체 외곽 치수, 완화곡선부 승차감을 고려하여 최대 탈팅각은 8도로, 최대 탈팅속도는 초당 4도 이내로 제한하였다. 앞으로 본 개념설계를 근간으로 시제차량에 대한 설계 및 제작, 시험 및 평가가 수행될 것이다.

참고문헌

1. 김남포, "탈팅차량 운영을 위한 기술·경제적 타당성 연구" 한국철도기술연구원, 2001
2. First Report on tilting train technology "The state of the art" UIC, 1998,
3. 유원희, "곡선부 고속주행용 대차설계기술개발 연구" 한국철도기술연구원, 2000
4. "기존선의 고속화를 위한 시스템에 관한 연구 2차년도 보고서", 한국철도기술연구원, 1998