

철도차량 능동조향제어전략 특성 분석

Analysis on the Active Steering Control Strategy for Railway Rolling-stock

*#허현무¹, 김민수¹, 박준혁¹

*H. M. Hur(hmhur@krri.re.kr)¹, M. S. Kim¹, J. H. Park¹

¹ 한국철도기술연구원 주행추진연구실

Key words : Active Steering Control, Strategy, Rolling-stock, Wheelset

1. 서론

철도차량 주행장치 설계 시 우선적으로 설정하는 목표는 설계 최고속도에서의 주행 안정성을 확보함에 있다. 이는 직선구간에서의 고속 주행 안정성에는 장점이 있지만 급곡선과 같은 곡선 구간에서의 주행은 윤축의 조향(steering) 기능 부재로 차륜/레일의 마모 발생시키고 심한 소음을 발생시키는 요인이 되고 있다. 특히 도심 구간을 통과하는 철도차량에 있어서는 그 정도가 매우 심하여 과도한 차륜의 마모로 인한 조기 삭정, 그로인한 차량 가용성 저하, 유지보수 비용 증가와 같은 문제점을 초래하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로는 차륜/레일 인터페이스 최적화 방안이 1차적인 대안이라 할 수 있으나 효과는 제한적인 것이 사실이다.

한편, 일본, 독일 등 철도선진국들에선 급곡선 주행 시 차량의 속도향상을 위한 틸팅차량 개발과 더불어 차륜/레일의 마모, 손상 저감을 위한 조향장치를 개발 적용하고 있는 추세이다. 과거엔 자기조향장치나 조향링크를 적용한 수동형조향장치에 대한 연구 개발, 실용화가 활발하였으나 최근에는 기존 passive 1차현가 기능을 보완하고 능동형 제어기술의 약점인 fail-safe 문제를 극복한 능동형 조향장치 연구에 집중하고 있다.

능동조향제어기술은 향후 철도차량의 주행성능을 혁신적으로 향상시킬 수 있는 미래형 철도차량 주행장치인 Mechatronic Train의 조향모듈로도 활용될 수 있다. 또한 고효율, 저마모/저소음 구현을 위한 track-friendly 녹색 친환경 주행장치의 핵심 기술로서 향후 철도차량 주행장치에는 조향장치가 기본적으로 적용될 것으로 예측되며 이로 인한 파급효과는 사회적, 경제적으로 클 것으로 기대된다.

따라서 본 논문에서는 철도차량의 능동조향제어를 위한 제어 개념 및 전략에 대하여 살펴보고 각 각의 특성에 대하여 분석하고자 한다.

2. 기술동향

조향기술은 자기조향방식(self-steering)방식, (반)능동조향방식으로 구별된다. 자기조향방식은 액슬박스의 전후지지강성을 최적화하여 곡선통과 성능과 이에 상충되는 직선 고속주행 시 사행동 안정성의 양립을 도모한 방식이다. 가장 단순한 구조로 조향대차를 구성할 수 있는 반면 횡압 저감 효과에는 한계가 있다. 대표적인 것이 남아프리카 연방의 화차용 Sheffel 대차가 있다. Sheffel 대차는 남아프리카연방 철도에서 시작 시험된 후 1970년대에 실용화되었다. 또한 1차현가계의 강성을 이용한 자기조향 방식의 대표적인 것은 일본에서 실용화된 전후비대칭 강성 조향대차이다. 기존의 대차는 직선선로에서의 주행안정성 향상에 초점을 두고 윤축을 지지하는 1차 현가장치의 전후강성을 강하게 함으로서 곡선부에서의 윤축의 조향성능이 취약하고 횡압 증가의 원인이 되는 구조였다. 이에 비해 전후비대칭강성 조향대차는 전륜축의 전후 강성을 유연하게 하여 자기조향성능을 강화하고 후륜축의 전후강성은 기존의 강성을 유지하여 직선 선로에서의 주행안정성을 담당하는 구조이다. 이 대차는 JR도카이 특급차량에 실용화되었다. 구조가 간단하여 적용성 및 유지보수 면에서는 양호하나 횡압저감에는 한계가 있다.

자기조향방식 중 링크를 이용한 강제조향방식이 있다. 이는 차체와 대차간의 상대변위나 윤축과 대차간의 상대변위가 링크 구조를 이용하여 윤축에 전달되어 조향을 보조하는 방법이다.

설계에 따라 공격각을 최소화할 수 있으며 구조가 다소 간단하여 실용화가 용이한 점이 있다. 일본에서는 1984년에 시험대차 DT953을 제작하여 각 조향방식을 적용하였고 이에 대한 곡선주행 시험을 수행한 것이 이 분야에서 큰 출발점으로 되어있다. 강제 조향대차의 대표적인 시스템으로는 JR 홋카이도에서 틸팅 시스템과 병행하여 사용된 Z-링크방식이 있다. 이 시스템은 반경이 작은 급곡선이 많고 궤도 조건이 취약하여 큰 횡압이 걸리던 노선에 투입되어 횡압을 본래 대차의 30~50% 정도 저감시켰다.

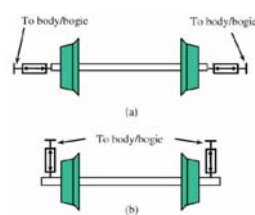
능동 조향 방식은 윤축을 액추에이터의 구동을 이용하여, 윤축의 공격각을 적절히 제어하는 방식이다. 조향을 능동구동장치를 통하여 직접 구현하는 방법, 자기조향방식과 능동안정성 제어를 혼용하는 방법, 독립차륜을 이용하는 방법, 대차각 능동 조향을 통한 간접적인 방법 등이 개발되고 있다. 이 방식은 횡압 저감 효과가 가장 높지만, fail-safe문제로 실용화에 어려움이 있다.

3. 능동조향제어전략

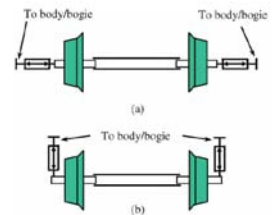
윤축의 조향제어 방법은 액추에이터 구동력이 윤축에 직접적으로 전달되는 직접적인 방법과 액추에이터 구동력의 2차적인 효과에 의한 간접적인 방법으로 분류할 수 있다. 직접적인 방법에는 ASW(actuated solid wheelset), AIRW(actuated independently wheelset), DIRW(driven independently rotating wheelset) 그리고 DSW(directly steered wheelset)이 있다. 간접적인 방법으로는 SYC(secondary yaw control)이 있다 [1,2,3].

ASW는 Shen과 Goodall에 의해 제안된 방법으로 Fig. 1과 같이 액추에이터 횡방향 구동에 의한 윤축 횡방향 제어와 액추에이터 길이방향 구동에 의한 윤축 요 모멘트 제어로 구분된다. 윤축 요 모멘트 제어가 적은 제어력을 요하고 차량의 안정성이나 승차감 측면에서 양호하다고 평가되고 있다.

AIRW는 Mei와 Goodall에 의해 제안된 독립차륜을 이용한 제어 방법으로 액추에이터 구동방법은 Fig. 2와 같다. 곡선 주행 시 종방향 크립력이 "0"으로 되는 장점이 있으나 직선선로 주행 시에는 복원력이 상실되어 트랙 중심으로 복원하기 위한 active guidance 제어가 필요하다. 액추에이터 구동방법에 따라 윤축 횡방향 제어와 요 모멘트제어 방법이 있다.



(a) lateral actuation
(b) yaw actuation
Fig. 1 ASW concept



(a) lateral actuation
(b) yaw actuation
Fig. 2 AIRW concept

DIRW는 Gretzschel와 Bose에 의해 제안된 방법으로 Fig. 3과 같이 각 각의 독립차륜이 능동적으로 구동되는 방식이다. 1/5 축소모델 시제를 이용하여 적용 타당성이 입증된 바 있다. 곡선 주행 시 종방향 크립력이 "0"으로 되는 장점이 있으나 각

각의 윤축에 대하여 능동 조향 액추에이터가 필요하고 각 각의 차륜에 대하여 견인모터가 필요하다. 간단하고 경량화를 기하기 위한 영구자석 모터가 적용된 DIRW 제안되기도 하였다.

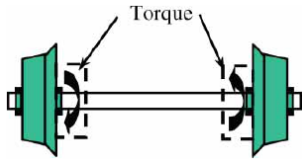


Fig. 3 DIRW concept

DSW는 1991년 Aknin에 의해 최초 제안되었다. Fig. 4와 같이 guidance와 curving을 위하여 한 쌍의 독립차륜으로 구성된다. 조향성능이 우수 하다. 일본에서는 2축 DSW 차량 개발을 위한 1/10 축소모델에 대한 연구가 진행되고 있다.

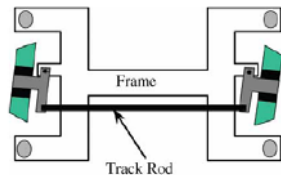


Fig. 4 DSW concept

SYC는 Diana에 의해 제안된 방법으로 Fig. 5와 같이 조향 성능과 안정성을 동시에 향상시키기 위한 대차 요 토크 제어방식이다. 킬팅 고속차량에 electro-mechanical actuator 적용한 방법이 제안되기도 하였다. 직선선로에서는 passive yaw damper 역할(6~8Hz)을 수행하고 곡선선로에선 대차 조향 기능을 수행한다. Bruni는 ETR470에 electro-mechanical actuator 시제를 개발하여 주행시험을 실시하였고 승차감 개선 효과를 확인하였다. Matsumoto는 시제대차를 제작하여 주행시험대에서 주행시험을 실시하여 guiding force 저감 효과를 확인한 바 있다.

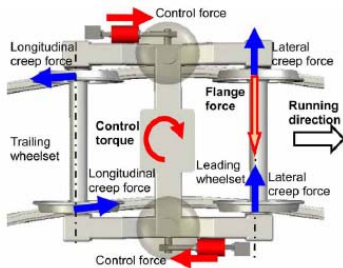


Fig.5 SYC concept

각 각의 조향제어 방법은 조향성능, 안정성, 그리고 guidance 성능을 구현하기 위한 제어 전략이 필요하다. 안정성 제어전략은 능동 요감쇠 방식이 능동 횡감쇠 방식에 비하여 제어력과 에너지를 적게 하는 효과가 있으며 승차감 개선 효과가 있다. IRW는 윤축과 차체에 수동형 요댐퍼를 적용하고 있으며 SYC는 차체와 대차간에 능동 요댐퍼를 적용한다.

guidance 제어전략은 차륜/레일간의 상대 횡변위 측정을 요한다. 그러나 이는 현실적으로 측정이 불가하여 실용성이 없다고 할 수 있다. 이에 대한 대안으로서 구름반경차를 이용한 제어방식이 제안되고 있다. DIRW는 견인 토크제어를 적용하고 있으며 DSW는 tracking error를 측정하여 궤도 중심선 추종 제어 전략을 적용하고 있다. 일체 윤축인 경우에는 크립력 저감 제어를 위하여 제어력이 증가함으로써 실용성이 저하된다.

곡선부 조향제어전략은 불필요한 크립력, 소음, 마모 저감에 제어 목적이 있다. Radial steering 방법은 캔트부족량이 "0"인 조건 하에서만 완벽하다고 할 수 있다. 그렇지 않을 경우, 이에 대한 대안으로서 목표 공격각(desired attack angle) 추종 제어가 제안되고 있다. 불필요한 종방향 크립력 제거가 필요하지만 횡방향으로 캔트부족을 보상하기 위한 크립력이 필요하기도 한다. 완벽한 조향조건이라 함은 종방향 크립력이 "0" 이거나 혹은 두 차륜간의 크립이 동일한 조건이라 할 수 있다. 또는

모든 윤축에 대하여 동일한 횡방향 크립조건, 혹은 동일한 공격각 조건이라 할 수 있다. 각 각의 조향제어 방법에 따라 다음과 같은 제어전략이 제안되고 있다.

- AIRW: 요토크 제어, 궤도중심선 추종 제어
- IRW:
 - 견인모터 양측 차륜 등속 제어(일체윤축 모사)
 - 견인모터 차동 속도 제어, 궤도 중심선 추종 제어, 부가적으로 차륜/레일 변위에 따른 요모멘트 부여
 - 차동 토크 제어(부수 IRW와 같이 양측 차륜의 종방향력을 같게 함)와 조향제어를 위한 yaw actuation 적용
- DIRW: radial steering, 궤도 중심선 추종 제어
- DSW: 제어 조향을 위한 피드포워드방식 토크제어
- SYC: 캔트부족(대차 횡가속도측정 필터처리), 대차 요율(자이로) 측정을 통한 궤도 곡률반경 추정, 조향 토크 제어, 피드포워드 방식, lookup table 활용

위와 같은 능동조향제어전략 중 차륜/레일간 상대변위나 차륜/레일간 공격각을 이용하는 제어방법은 센서기술 미확보로 이를 구현하기가 현실적으로 어렵다. 따라서 차륜/레일간 상대변위 측정에 대한 간접적인 방법으로 차륜단면형상과 레일의 두부형상을 입력으로 하여 추정하기도 한다. 그러나 차륜과 레일이 마모가 된 경우, 또는 궤간이나 레일 경도가 변한 경우와 같이 가변성이 크므로 현실적인 방법으로 사용하기에는 부적합하다고 할 수 있다. DSW방법은 궤도 중심으로 부터의 윤축 중심의 위치를 제어 목표로 하나 이 역시 개념적인 제어 방법이며 현실적으로 구현하기에는 불가하다고 할 수 있다. 그리고 궤도 곡률반경이나 캔트에 대한 실시간 추정도 어려움이 있으므로 현실적으로 GPS센서를 이용한 궤도 데이터베이스를 활용하는 방법이 제시되고 있다.

한편, ASW방법에 대한 실용적 접근으로서 passive 대차의 윤축 조향각을 보완하기 위한 어시스트(assist) 조향방식이 제시되고 있다. 또한, 차체와 대차간의 요변위 제어를 위한 SYC방법은 윤축에 대한 센싱을 요하지 않음으로 가장 실차적용이 용이한 방법이라 할 수 있다. 차체에 대한 대차의 요각속도 측정을 위하여 능동 요댐퍼에 내장된 속도센서가 사용되기도 하였으며 대차 요가속도를 적분하여 사용하기도 한다.

4. 결론

철도차량의 조향기능 향상을 위한 능동조향제어 개념과 전략에 대하여 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

능동조향제어전략 중 직접적인 조향제어전략은 차륜/레일 상대변위나 공격각과 같은 제어입력을 필요로 하나 센서기술 미확보로 실차적용에 이르지 못하고 있다.

실차에 적용하기 위한 적합한 조향제어전략으로 어시스트조향방법이나 SYC와 같은 간접적인 조향제어전략이 대안이 될 수 있으나 조향제어 성능에 한계가 따른다.

따라서 직접적인 능동조향제어전략을 구현하기 위해서는 차륜/레일 상대변위나 공격각을 실시간으로 측정하여 제어입력으로 활용할 수 있는 센서기술 확보가 시급하다고 판단된다.

참고문헌

1. T.X.Mei and R.M.Goodall, "Recent Development in Active Steering of Railway Vehicles", Vehicle System Dynamics, Vol.39, 415-436, 2003
2. A. Matsumoto, Y. Sato, et al, "Curving Performance Evaluation for Active-bogie-steering Bogie with Multibody Dynamics Simulation and Experiment in Test Stand", Vehicle System Dynamics, Vol.46, 191-199, 2008
3. Stefano Bruni, Roger Goodall, T.X. Mei and Hitoshi Tsunashima, "Control and Monitoring for Railway Vehicle Dynamics", Vehicle System Dynamics, Vol.45, No.7-8, 743-779, 2007