

메카트로닉 열차 연구동향

Mechatronic Train for Next Generation

곽재호* 유원희**
Kwak, Jaeho You, Wonhee

ABSTRACT

This paper presents a brief overview of the concepts, achievements and challenges relating to the use of electronic and computer control for railway vehicles in the aspect of mechatronic design. It can provides the rail vehicles of tomorrow must be more cost effective, energy efficient, and dynamic performance. The main emphasis in this paper will be upon the use of active control for suspension and steering for new approaches of incorporation of sensors, controllers, and actuators. They can make vehicle designers to take advantages optimizing mechanics and electronics jointly which are not possible with a purely mechanical approach.

1. 서론

최근 KTX 고속열차의 도입으로 더 빠르게, 더 안전하게, 더 편안하게라는 운송수단의 궁극적인 목적에 한 걸음 더 다가서게 되었고, 우리 생활에도 많은 변화를 주고 있다. 하지만 이러한 변화를 얻기 위해 우리는 많은 비용을 지불해야만 했는데, 주된 이유 중 하나는 기존의 열차가 가지고 있는 구조적 성능의 한계 때문이다.

기존의 열차는 조향장치를 갖고 있지 않다. 따라서 고속열차의 경우 선로를 가능한 한 직선으로 만들어야 하며, 이는 바로 수 킬로의 터널을 뚫는다든가 다리를 놓아야만 하는 문제로 봉착된다. 더구나 고속에서의 안정성 및 승차감을 확보하기 위해 현재의 현가장치가 흡수할 수 없는 부분들을 엄격한 선로 공사를 통해 해결할 수 밖에 없었다. 이러한 제약 조건들은 곧바로 천문학적 공사비용으로 이어졌다. 일반 지하철의 경우에도 조향장치의 부재로 커브구간에서는 안정성을 확보하기 위해 속도를 줄여야만 할 뿐만 아니라 차륜/레일의 부적합한 접촉으로 인한 차륜/레일의 유지보수비용 문제와 스킨노이즈로 인한 환경소음문제를 안고 있다.

이와 같은 문제점들을 궁극적으로 해결하기 위해 도입된 개념이 메카트로닉열차이다. 메카트로닉 기술은 수동적 기계요소로만 작동함으로써 지니게 되는 구조적 성능의 한계를 전자제어와 결합하여 성능 향상, 시스템 및 유지보수 단순화, 그리고 경량화를 통해 에너지를 절감하자는 개념이다. 메카트로닉 기술은 항공기산업에서는 이미 60년대 fly-by-wire 라는 이름으로 처음 도입되어 현재는 완성단계에 있으며, 자동차산업에서도 약 10 여 년 전부터 drive-by-wire라는 이름으로 많은 부분에서 적용 중인 기술이다. 철도산업이 비록 항공기와 자동차에 비해 발전의 속도는 더디지만 이러한 발전의 흐름을 피할 수는 없다고 판단한다. 따라서 본고에서는 철도산업에서의 메카트로닉 기술의 적용성과 선진국가의 적용 예를 살펴봄으로서 앞으로 우리가 나아가야할 연구방향을 짚어보고자 하였으며, 특히 메카트로닉 열차(Mechatronic Train)라는 이름으로 유럽에서 개발되고 있는 열차에 대해 소개하고자 하였다.

* 곽재호, 정희원, 한국철도기술연구원 철도시스템안전연구본부 차량성능연구팀

E-mail : jkwak@krri.re.kr

* 유원희, 전희원, 한국철도기술연구원 철도시스템안전연구본부

2. 철도산업에서의 메카트로닉 개념 및 적용 예

열차에서 메카트로닉기술이 가장 먼저 적용 된 예는 반도체를 통한 능동 모터제어기술이다. 이 밖에도 능동 현가장치, 능동 조향장치, 능동 제동제어, 능동 판토틀라프제어 등이 있지만 이 중 관심의 대상은 능동 현가장치이다. 이는 현가장치가 전통적으로 완전히 기계요소로만 이루어져 왔으며 다른 항목에 비해 차량설계에 있어 보다 근본적인 문제로 귀착되기 때문이다. 따라서 능동조향장치에 대해서도 일부 언급은 하겠지만 주로 현가장치의 능동제어에 대해 다루기로 한다.

2.1 차량구조의 발전과 메카트로닉스

초창기 열차의 구조는 그림 1의 좌측 상단과 같이 두 개의 윤축박스 위에 놓여진 몸체만이 전부였다. 이러한 구조는 마차로부터 발전한 구조인데 주행속도의 한계, 승차감의 저하 그리고 커브구간에서의 탈선 등 여러 문제점을 안고 있었다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 150년이란 긴 세월을 걸쳐 그림 1의 하단 또는 그림 2와 같은 현대열차의 구조를

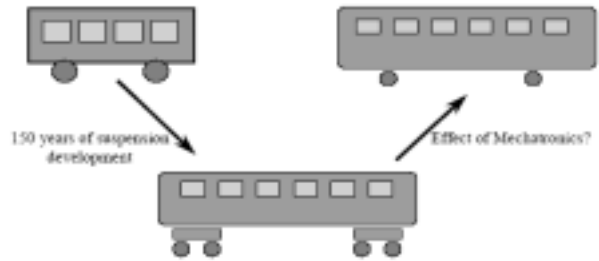


그림 1. 차량설계의 발달과정

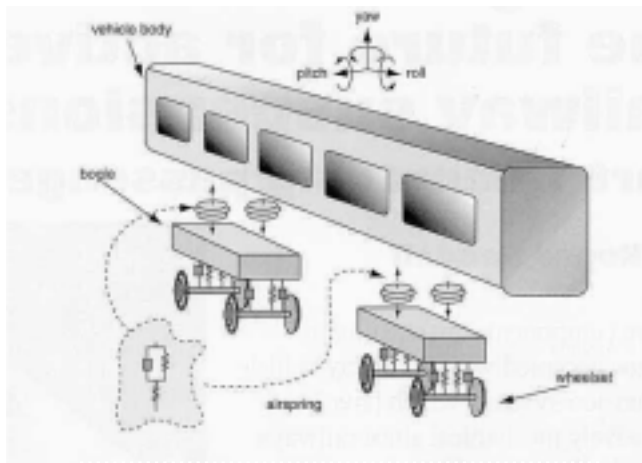


그림 2. 현대 열차의 기계역학적 구조

갖게 되었다 [1]. 그림 2와 같은 2개의 대차와 4개의 윤축으로 이루어진 구조는 이전에 비해 확실히 향상된 승차감과 안정성 등을 갖출 수 있었다. 그러나 수동적인 요소만으로 이루어진 이러한 구조는 분명 무겁고 기계적으로 복잡한 구조를 가질 수밖에 없다. 그림 1의 우측 상단과 같은 구조처럼 보다 가볍고 기계적으로 복잡성이 줄어들면서 성능을 유지할 수 있다면 분명 차량 자체의 가격 뿐 만 아니라 운영비용 모두를 절감할 수 있게 된다. 이러한 요구조건은 능동 현가장치 및 능동 조향장치 등과 같은 메카트로닉스 기술을 통해 달성가능하다. 즉, 능동적 요소에 의한 기계시스템의 단순화는 다른 말로 표현하면 기계적 복잡성이 전자적 복잡성으로

바뀔 수 있음을 의미한다. 하지만 여기에는 아직 극복해야할 중요한 기술적인 도전들이 남아있다. 다음 절 부터는 어떤 것들이 극복되었고 어떠한 것이 남아 있는지를 살펴본다.

2.2 틸팅열차 (Tilting Train)

틸팅열차는 커브구간에서 속도향상과 승차감을 확보하기 위한 표준 수단으로서 이미 널리 채용되고 있으며 유럽 일본 등 여러 나라에서 여러 종류의 열차가 운용되고 있다. 기본원리는 놀이공원의 롤러코스트가 속도를 줄이지 않고 커브를 돌기 위해 (안정성도 확보하면서) 차체를 안쪽으로 기울이는 현상과 동일하다. 다만 틸팅열차는 승객들이 불편함을 느끼지 않도록 하는 횡방향에 대한 가속도 제어기능이 요구된다. 그림 3은 스웨덴의 ABB가 개발한 X2000 틸팅열차와 현가장치의 구조를 나타낸다.[2] 틸팅메카니즘을 구현하는 방법으로는 센서, 구동기, 제어기 등에 따라 다양한 종류가 존재한다.

가장 직관적인 틸팅제어방법은 차체에 횡방향 가속도계를 설치하고 이 횡가속도를 적절히 제어하기 위한 현가장치, 즉 액츄에이터 (유압, 공압 또는 기계시스템)를 구동하는 것이다. 그런데 여기서 크게 두 가지 문제점이 대두되었다. 첫째는 차체에 설치된 가속도계가 횡방향 현가장치의 동작으로 상호간섭을 일으키는 문제와, 둘째는 불규칙성을 제거하기 위한 신호처리 및 구동기의 시간지연으로 승객들의 멀미를 도리어 악화시키는 문제가 있었다. 전자의 문제를 해결하기 위해 가속도 센서를 틸팅동작을 하지 않



(a) X2000 틸팅열차



(b) 틸팅현가장치의 구조

그림 3. 스웨덴 X2000 틸팅열차

는 대차에 설치하는 방법이 제안되었고, 후자를 해결하기 위해 유럽에서는 선두차량의 틸팅 시작신호를, 일본에서는 지상에 설치된 틸팅 시작신호를 이용하는 방법을 택하였다. 초기에는 간단한 제어시스템으로 여겨졌던 틸팅제어개념이 이러한 발전과정을 거치기까지 약 30년이란 시간이 걸렸다. 왜냐하면 초기 설계 시 복잡한 차량의 동역학, 궤도에 의한 가진력, 틸팅메카니즘, 센서의 측정능력 및 액츄에이터의 구동능력들이 통합적으로 고려되지 않았기 때문인데, 이제는 이러한 경험이 메카트로닉시스템적 통합설계의 필요성을 확인하는 계기가 되었다.

2.3 능동형 2차 현가장치 (Active Secondary Suspension)

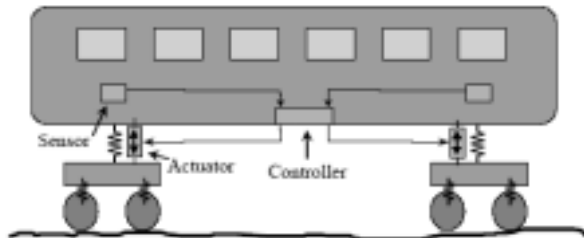


그림 4. 능동 2차현가장치의 구조

그림 2에서와 같이 현대의 열차는 1차 현가장치와 2차 현가장치로 구성되어 있다. 기본적으로 1차 현가장치는 궤도의 고주파수에 해당되는 불규칙성을 걸러주며 안정성을 확보하는 역할을 하고 2차 현가장치는 상대적으로 저주파수에 해당하는 승차감과 연관이 있다. 따라서 승차감향상을 위한 2차 현가장치의 능동제어가 활발히 진행되고 있다.

기본원리는 차량의 양 끝단에 상하진동가속도센서를 설치하고 2차 현가장치의 댐핑을 제어하는데 이는 스카이 훅 댐핑 (sky hook damping)으로 알려져 있으며 약 10여 년 전부터 자동차에 적용되고 있다. 그림 4 에서와 같이 철도차량에서는 제어기 설계 시 상하의 병진운동뿐만 아니라 차체의 회전 피칭모드와 차체의 1차 굽힘모드도 고려한 다변수 제어기를 설계해야 한다. 이러한 모드를 포함한 스카이훅제어는 이론과 실험에 의하면 RMS 기준으로 60% 정도까지의 승차감 향상효과가 있는 것으로 알려져 있다. 최근 틸팅과는 별도로 횡방향에 대한 2차 현가장치의 능동 및 반능동장치가 유럽에서는 피아트 펜돌리노 열차에, 일본에서는 신간센(500계 및 700계)에 적용되어 상업운전 중에 있다. 특히 신간센의 경우 펜돌리노의 공압액츄에이터 대신 응답속도가 빠르고 신뢰성이 향상된 전기기계식 액츄에이터를 적용하여 신뢰성을 향상시키고 있다. 그림 5는 신간센 반능동 현가장치의 제어구조를 나타내며, 그림 6은 반능동 및 능동 (후미 16호차) 현가장치 설치에 따른 승차감향상효과를 도시한 그림이다 [3].

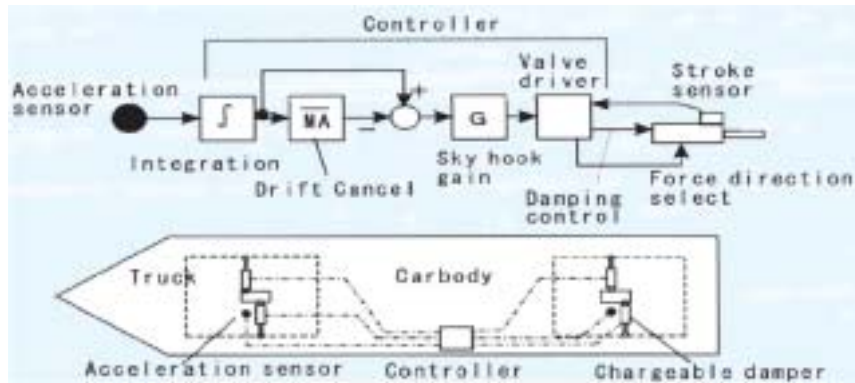


그림 5. 신간선의 반능동 현가장치의 제어구조

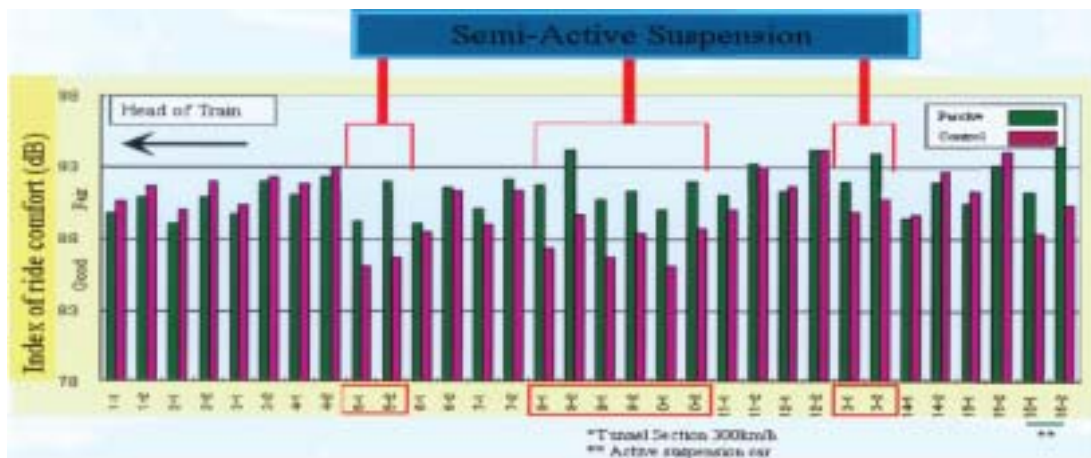
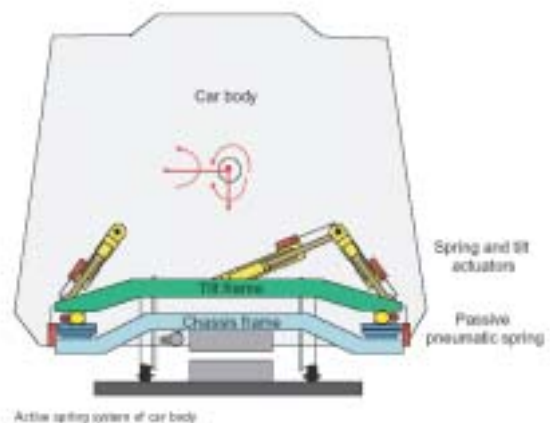


그림 6. 반능동 및 능동 현가장치에 의한 승차감의 향상효과 측정

2.4 통합형 현가장치와 무대차 열차 (Integrated Suspension and Bogieless Train)



(a) 페더본 대학의 Rail Cab 열차



(b) Rail Cab 열차의 통합형 현가장치

그림 7. 독일 페더본 대학의 Rail Cab 및 통합형 현가장치

앞서 설명한 틸팅은 사실 2차 현가장치의 특수한 한 형태일 뿐이다. 최근에는 이러한 현가장치들을 통합하여 메카트로닉스 관점으로 설계하는 실물크기의 실험적 구현이 오스트리아의 Siemens SGP에서 실험차량을 통해 이루어졌다 [4]. 여기서 특별히 관심을 갖게 하는 것은 관성센서를 이용하여 병진방향의 가속도 뿐만 아니라 회전방향에 대한 가속도도 동시에 다룰 수 있다는 것이다. 사실 여러 방향과 주파수 영역에서의 외란을 적극적으로 제어할 수 있다면 수동적 절연효과를 가지고 있는 대차의 필요성은

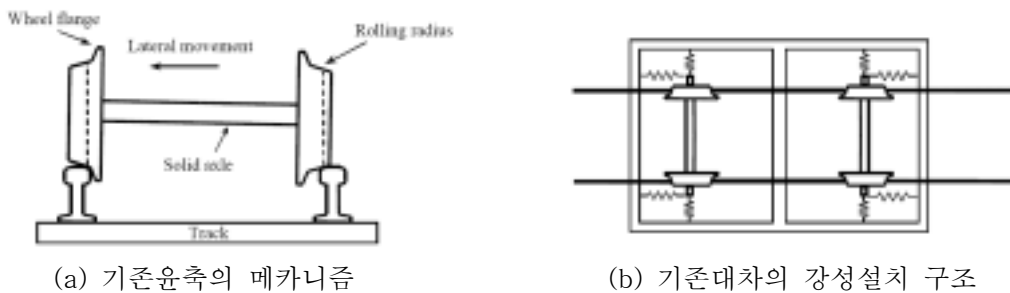
급격히 낮아진다. 전술한 바와 같이 대차가 없어지면 차체 하질량 (unsprung mass)의 감소와 시스템의 단순화로 승차감 제어가 용이해지고 차륜/레일의 유지보수비용도 크게 감소시킬 수 있다.

독일 페더본 대학에서 통합형 현가장치 (틸팅, 상하 및 좌우를 고려)를 개발하여 대차를 제거한 축소형 열차를 실험 운행 중에 있다. 그림 7에서 보는 바와 같이 상하 및 대각선으로 설치된 통합형 현가장치를 통해 안전성 및 승차감을 확보하고 있다. 확실히 이러한 구조는 현재 가장 진보된 메카트로닉 열차의 구현을 나타내고 있다 [5].

2.5 능동조향장치 (Active Steering)

기존의 윤축은 그림 8 (a)와 같이 차륜담면의 좌우 구름반경의 차이에 의해 어느 정도의 회전반경에 대해 주행할 수 있는 구조로 되어있다. 또한, 그림 8 (b)와 같이 전후/좌우 강성을 설치하여 윤축의 자력진동에 대한 위상차를 줌으로서 안정성을 유지한다. 그런데 직선주행성과 곡선주행성에 대해 이 강성치가 서로 대립되는 설계값을 가짐으로서 설계자들에게는 끊임없는 고민거리로 남아 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 여러 종류의 자기조향대차들이 개발되었지만 수동적인 방법으로는 차륜/레일사이의 공격각을 효과적으로 제어하기에는 한계가 존재한다 [1].

따라서 윤축의 강성을 능동적으로 제어하거나 (그림 9) 조향각을 직접 제어하는 방법 등 다양한 종류가 시도되고 있다. 그림 9 는 실험대차에서 링크를 이용하여 강성을 직접 제어하는 방법을 보여주는 데 80km/h 근처에 존재하는 기존의 현타속도를 능동제어를 통해 300km/h 이상으로 올릴 수 있음을 보여주었다 [6].



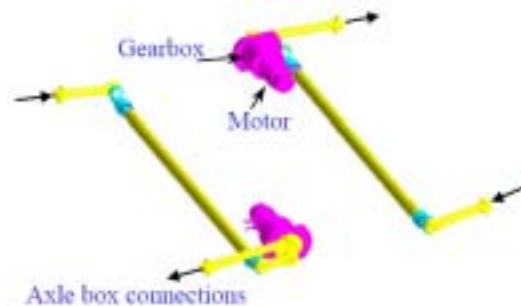
(a) 기존윤축의 메카니즘

(b) 기존대차의 강성설치 구조

그림 8. 기존 윤축 및 대차의 강성구조

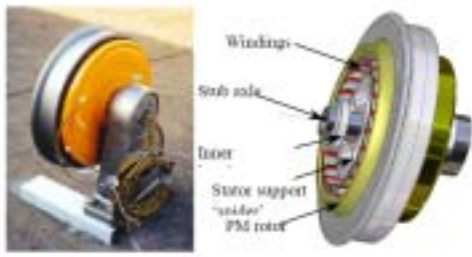


(a) 능동 강성 실험대차

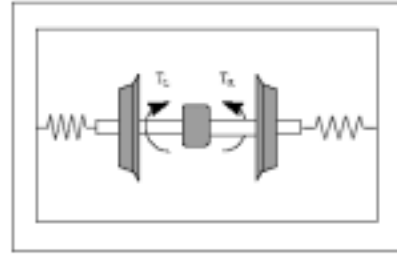


(b) 강성조정용 링크의 제어구조

그림 9. 능동 강성 조정용 대차 및 링크의 구조



(a) 독립차륜의 구조



(b) 독립차륜에서의 토크 제어

그림 10. 독립차륜의 구조 및 토크 제어

더 나아가 그림 10과 같이 독립차륜을 개발하여 기존 윤축의 역학을 과감히 바꾸어 차륜의 좌우 토크를 능동제어함으로써 조향효과를 이끌어낸 실험이 독일 DLR[7] 및 영국 MMU[8]에서 수행되었다. 그림 11은 독일 DLR의 1:5 스케일의 실험용 대차로서 EU Project 일환으로 수행되었던 실험용 roller rig를 보여준다 [9].



그림 11. 독일 DLR의 1:5 스케일의 실험용 대차

표 1 일본에서의 메카트로닉 기술 적용 예

Category	Item	Stage		
		A	B	C
Drive and braking	Anti-slip	○		
	Anti-slide	○		
	Pure electric brake	○		
Tilting	With control	○		
	Active	○		
Steering	Semi-active	○	○	
	Active		○	○
Pantograph	Anti contact-loss			○
Suspension	Semi-active	○		
	Active		○	
	With centering		○	○

2.6 그 밖의 능동제어장치

앞 절에서 설명한 능동 현가장치 및 조향장치 외에도 여러 분야에서 다양하게 능동제어 방법들이 시도되고 있다. 표 1은 일본에서의 메카트로닉에 의한 능동 및 반능동제어 장치를 요소별로 나타낸 경우이다.[10] 여기서 A는 실제 적용 중, B는 test line에서 시험 중 그리고 C는 실험실 레벨을 나타낸다.

3. 설계방법 및 문제점

지금까지는 기존의 기계시스템에 부분적으로 전자제어기능을 추가하는 개념이지만 궁극적으로 메카트로닉열차는 이러한 제어의 모든 이익을 취해 기계시스템까지 재설계하는 통합적인 설계개념을 가지고 있다. 따라서 메카트로닉열차를 보다 효율적으로 설계하고 검증하기 위해서는 그림 12와 같이 다양한 분야의 통합적 설계 방법이 요구되며 제어효율을 극대화하기 위해 그림 13과 같은 다변수 제어기의 설계 개념이 필수적이다.

한편, 철도차량에서의 메카트로닉스 기술을 실용화하는데 있어 극복해야 할 문제점들에 대해 살펴보기로 한다. 실용상에서는 아직 다음과 같은 문제들, 1) 기계적 연결이 없는 전기신호에만 의존하는 시스템의 신뢰성 문제, 2) 운영자들이 고도의 유지보수 관리로 인해 도입을 꺼리는 문제, 3) 생산자들이 운영자들에게 이러한 시스템을 만들거나 제안하는 것을 경쟁에서 뒤쳐질까봐 운영자들에게 제안하는 것을 두려워하는 문제, 4) 철도 기술자나 운영자는 일반적으로 기계적 연결이 없는 경우에 안정성확보가 어려울 것이라고 판단하는 문제들을 가지고 있다.

이러한 문제점들은 60년대 항공기 산업에서도 유사하게 대두되었던 문제들이다. 하지만 이후 fly-by-wire 라는 개념을 도입하여 현재 일반화 되었고, 이 후 자동차산업에도 전파되어

drive-by-wire 라는 이름으로 급속히 확산되고 있다. 철도가 다른 분야에 비해 보수적이고 발전이 늦지만 이러한 기술의 흐름을 피할 수 없다.

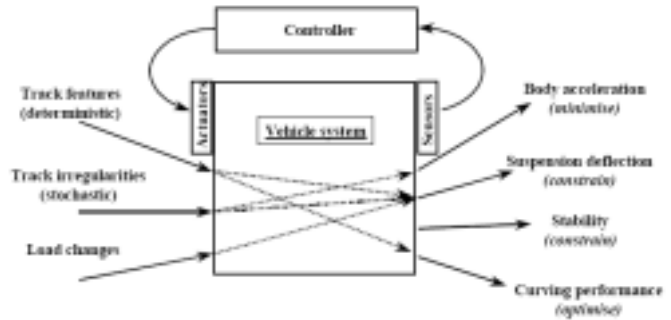
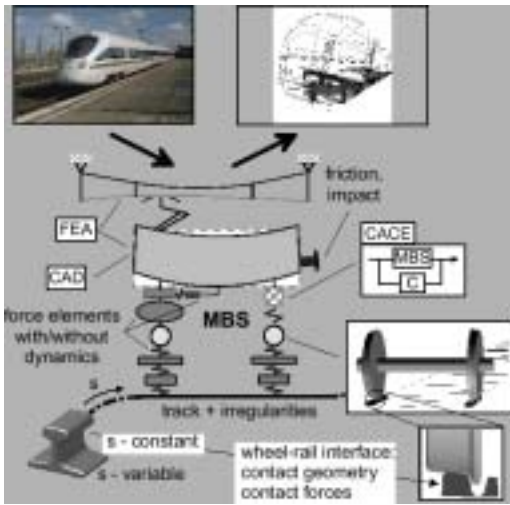


그림 12. 통합 메카트로닉열차 개발을 위한 방법 그림 13. 메카트로닉열차의 다변수제어 입력 및 출력 [1]

4. EU 에서의 메카트로닉열차 연구

결국 유럽의 여러 국가에서는 EC의 연구비로 'Mechatronic Train'이라는 프로젝트를 1998년부터 2000년까지 약 3년간의 기초연구를 통해 메카트로닉열차의 타당성을 확실히 검증하였으며 향후 10여년 후에는 시제열차가 만들어질 것으로 예측하였다. 이에 따라 유럽 각 국에서는 분야별 연구를 수행중이며, 관련 국가는 대략 9개국 이상인 것으로 파악되고 있다. 여기서 언급된 필요 기술은 다음과 같이 분류되었다. 1) 경량화를 위한 무대차 2축 차량시스템 기술, 2) 승차감 확보를 위한 상하방향 능동/반능동현가장치 기술, 3) 주행성능 향상을 위한 능동조향기술, 4) 곡선부에서의 중심유지 및 횡방향 승차감 향상을 위한 능동제어기술, 5) 차체진동 능동제어기술, 6) 능동판토틀라프 기술, 7) 능동형 제동제어 시스템 기술. 아울러 이러한 기술들이 개발되어 메카트로닉열차가 상업운전에 투입될 경우 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다. 1) 대차의 제거를 통한 축중감소로 윤축 및 궤도 유지보수비용의 대폭적인 절감, 2) 차량 경량화에 따라 에너지소비 절감, 3) 차량의 설계, 제작, 조립 비용의 절감, 4) 보다 간단한 기계적인 구조에 의한 차량 유지보수비용 절감.

5. 결론

모든 차량설계에 있어 승차감 및 안정성을 향상시키기 위한 메카트로닉스기술은 갈수록 그 중요성을 더해가고 있다. 항공기의 경우 fly-by-wire 를 통해 이미 변화하였고, 자동차의 경우도 전자엔진과, ABS, ESP (electronic stability program) 등을 통해 현재 큰 변화가 이루어지고 있다. 철도차량의 경우 긴 수명주기로 인해 현재 발전이 가장 늦어지고 있으나 여러 가지 측면에서 피할 수 없는 것으로 보인다. 다른 산업과 비교할 때 철도차량은 전략적으로 매우 중요하다. 이는 다른 나라에서 더디게 진행되고 있는 열차의 메카트로닉화를 이미 상당 수준에 도달한 국내 자동차 산업기술과 적극적으로 연계함으로써 그 동안 뒤쳐졌던 철도차량개발 기술을 만회할 수 있음을 의미한다. 아울러 메카트로닉열차기술개발, 즉 rail-by-wire 를 통한 철도차량의 기술향상을 적극 기대해 본다.

6. 참고문헌

- [1] R. M. Goodall and W. Kortum, "Mechatronic developments for railway vehicles of the future," *Control Engineering and Practice* 10, pp887-898, 2002.
- [2] E. Anderson, H. V. Bahr and N. G. Nilstam, "Allowing higher speeds on existing tracks—design considerations of the X2000 train for Swedish State Railways," *Proc. of IMechE* Vol. 209, No. 2, pp99-104, 1995.
- [3] <http://www.rtri.or.jp>
- [4] A. Stribersky, H. Muller and B. Rath, "The development of an integrated suspension control technology for passenger trains," *Proc. of IMechE*, Vol. 212, pp33-42, 1998.
- [5] <http://www.railcab.de>
- [6] S. Shen, T. X. Mei, R. M. Goodall and J. T. Pearson, "A novel control strategy for active steering of railway bogies," *Control* 2004, University of Bath, UK, September, 2004.
- [7] <http://www.dlr.de>
- [8] <http://www.rtu.mmu.ac.uk>
- [9] <http://www.railresearchuk.org.uk> and <http://www.epsrc.org.uk>
- [10] K. Tanifuji, S. Koizumi and R. Shimamune, "Mechatronics in Japanese rail vehicles: active and semi-active suspensions," *Control Engineering Practice* 10, pp999-1004, 2002.