

철도차량에 있어서의 동력학 및 진동 능동제어기술 현황

| 유 원 희 |
한국철도기술연구원
책임연구원



1. 서론

제 2차 세계대전 이후 군사 및 우주항공분야에서는 현저한 기술의 발전이 있었으며, 지금도 계속 발전을 거듭하고 있다. 이러한 군사 및 항공우주의 발전에 따라 다양한 학문분야의 발전이 있었으며, 특히 동력학 및 진동제어 분야에서는 다른 어느 학문 분야보다도 발전속도가 매우 빨랐던 것이 사실이다. 항공기 및 미사일, 우주왕복선 등의 자세제어, 위치제어 및 목표추적제어 등은 해당 시스템의 동력학적인 이해 없이는 불가능한 일이다. 이러한 군사 및 항공우주 측면에서의 동력학/진동 제어기술은 곧 자동차에 적용이 되어 고급승용차의 승차감을 향상시키기 위한 제어기술로 발전이 되었으며, 한편으로는 Anti-Skid 제동장치로 발전되었다. 이외에도 해양/조선 측면에서는 조종성 향상을 위한 기술이 점진적으로 발전되어 잠수함이나 항공모함 등을 위해 개발된 기술이 민간 선박에 적용되어 발전이 이루어져 왔다.

더 나아가 동력학제어기술은 로봇의 발전에 큰 기여를 하게 되었다. 제품의 조립 및 용접 로봇으로부터 가장 앞선 로봇에 해당하는 일본의 아시모, 한국의 휴보 등의 지능적인 로봇으로 발전되고 있으며, 국방에서는 전투로봇으로 진화하고 있다.

그렇다면 철도는 어떠한가? 일반적으로 철도차

량은 자동차처럼 개인의 욕구가 반영된 운송수단이 아니라 국가 인프라에 해당하는 것으로서 많은 사람의 안전을 책임져야 하는 대량운송수단이다. 해상운송이나 항공운송과는 달리 육지운송수단은 철도와 자동차로 명백하게 나뉘어져 있으며, 그 기능 또한 상당히 차별되고 있다. 자동차에 특징적인 동력학/진동 제어기술이 적용되면 상당한 부가가치를 가지게 되며, 이를 이용한 홍보 전략을 통해 상품의 가치를 높여 판매수익을 확보해 나아간다. 반면, 철도차량은 아무리 발전된 동력학/제어 기술이 적용된다고 하더라도 그것이 안전을 확보하지 못하면 그것으로 끝이다. 자동차의 경우 리콜제도가 있어서 수정/보완할 수 있는 것과는 전혀 다르다. 일단 잦은 고장 혹은 사고가 나면 그 철도차량은 수명 끝이다. 일례로 영국의 APT(Advanced Passenger Train)를 들 수 있다. 1978년 최초의 탈팅열차인 APT는 얼어붙은 선로위에서 시험운행 중 탈선을 하게 된 계기로 언론의 집중포화를 맞고 꽃도 피우지 못한 채 시들어야 했다. 결국 이 기술은 아주 싼 가격으로 이태리로 팔려 나갔고, 이태리에서는 성공적으로 이 기술을 발전시켜 많은 탈팅열차가 이태리에서 꽃을 피웠다. 현재는 독일, 스위스 및 일본 등 전세계에서 많은 탈팅열차가 운행 중이다. 특징적인 것은 탈팅제어기술을 통해 신선의 건설비 혹은 기존선의 과도한 개량비를 줄이고 속도를 향상시킬 수 있다는 것이었다. 만약, 영국에서 탈팅기술

이 성공적으로 채택되어 발전되었다면 어떻게 되었을까는 자명한 일이다. 영국이 이태리나 독일, 프랑스 등에 비하여 분명 발전된 기술을 갖고 있었을 것이며, 철도선진국의 최고 위치를 차지하고 있었을 것이다.

일레와 같이 대중의 안전과 맞물려 철도차량의 기술발전은 상당히 더딘 걸음을 하고 있다. 틸팅기술은 고급 자동차에서는 매우 흔한 기술인데도 열차에서는 매우 어려운 기술이다. 더욱이 제어가 실패할 경우 자동차에 비하여 철도차량은 치명적이다. 철도차량에서의 제어기술의 실패는 많은 사람에게 피해를 줄 수 있기 때문이다. 따라서 철도차량에서는 자동차에서보다 더욱 높은 수준의 Fail-Safe 기능이 필요하다.

이와 같이 철도차량의 동력학 및 진동제어 기술은 매우 고난도의 테크닉을 필요로 하는바, 본고에서는 현재 전 세계적으로 연구개발 및 적용되고 있는 철도차량의 동력학/진동 제어기술에 대해 살펴 보면서 앞으로 전개될 흐름을 보고자 하였다. 특히, 틸팅기술이나 제동기술은 이미 많이 소개되어 온 바 있기 때문에 여기서는 주로 능동조향기술, (반)능동현가기술 및 (반)능동 판토틀라프 기술 및 기타 진동제어기술만을 다루고자 한다.

2. 메카트로닉 열차(Mechatronic Train) 기술

현재 철도차량에서 적용되고 있거나 혹은 개발되고 있는 동력학/진동 능동제어기술은 크게 다음과 같이 나뉜다.

- ① 승차감 향상을 위한 상하 및 좌우방향 동력학제어 기술(능동현가기술)
- ② 차체 국부의 승차감 향상을 위한 차체진동 제어기술(능동진동제어기술)
- ③ 곡선부에서의 조향성능 향상을 위한 조향제어기술(능동조향기술)
- ④ 집전성능 향상을 위한 판토틀라프 능동제어기술(능동 판토틀라프기술)
- ⑤ 곡선부 승차감 향상을 위한 틸팅제어기술(능동틸팅 기술)
- ⑥ 제동력 향상을 위한 능동제동기술

이들은 각 기술별로 독립적으로 발전되어 왔으며, 최근에 이르러 1999-2001의 기간 동안 이 기술들을 모체로 하는

새로운 열차를 구상하기에 이르렀다. 유럽의 연구소 및 대학 10여 기관이 참여하여 수행된 연구결과는 크게 두 방향으로 전개되었는데, 하나는 새로운 개념의 열차인 '메카트로닉 열차'로서 상기한 모든 부분에 메카트로닉 기술을 도입하여 독일의 DLR(독일항공우주연구소) 연구소의 주도로 기초연구가 이루어졌으며, 다른 하나는 '메카트로닉 대차'로서 독일 Bombardier사와 영국 Loughborough대학의 Goodall 교수가 주도하여 연구가 이루어졌다.

메카트로닉 열차 기술은 대차가 없는(Bogie-less) 차량으로서 (반)능동형가장치, (반)능동조향장치, 차체진동의 능동제어기술, 접촉 무저항 판토틀라프 기술이 도입된 열차시스템이다. 이 열차의 장점으로서

- ① 대차의 제거에 의해 축중이 40% 정도 감소함으로 인하여 윤축 및 궤도 유지보수비용의 대폭적인 절감
- ② 차량의 경량화에 따라 에너지소비를 약 30% 절감
- ③ 차량의 설계, 제작, 조립 비용의 약 30% 절감
- ④ 보다 간단한 기계적 구조에 의한 차량 유지보수비용의 절감

등을 들고 있다. 그러나 이 기술은 매우 앞서가는 혁신적인 기술로서 철도차량의 발전과정에서 보듯이 안전을 최우선으로 하는 철도에 있어서는 받아들이기 어려운 기술로 인식되었다(이 점이 로봇이나 자동차 등 동력학제어 분야의 다른 산업과 크게 차별화 되는 부분이다). 따라서 Bombardier사를 비롯한 차량제작사로부터 크게 각광을 받지 못하고 현재 기초기술만을 개발한 상태이다. DLR에서는 연구 자금만 주어진다면 지금이라도 메카트로닉 열차를 제작할 수 있다고 자신하고 있다. 현재는 독일 Bombardier사의 주도로 개발되고 있는 '메카트로닉 대차' 기술에 밀려있는 상황이다. 그러나, 이 메카트로닉 대차 기술이 안정화 되어 영업 운전이 성공적으로 투입되면 향후에는 Mechatronic 열차의 개발이 추진될 것으로 보인다.

3. 분야별 동력학 및 진동 제어기술의 현황

유럽에서 메카트로닉 열차 기술이나 메카트로닉 대차 기술을 중심으로 동력학 및 진동의 능동제어기술이 발전하고 있는 것과는 별도로 일본에서는 다음 표에서 보는 바와 같이 독자적으로 동력학/진동 능동제어기술을 발전시

키고 있다.

이제 유럽과 일본을 막론하고 전 세계적으로 연구개발 및 적용되고 있는 동력학/진동 능동제어기술에 대해 알아 본다.

(1) 능동조향기술

능동조향기술의 최첨단은 앞 절에서 언급한 바와 같이 독일 Bombardier사의 주도로 개발되고 있는 메카트로닉 대차 기술이다.

Mechatronic 대차 기술은 기존대차에 능동조향기술을 도입한 대차로 이해될 수 있다. 즉, 곡선부에서 차축을 부채꼴 모양으로 벌려서 곡선부를 부드럽게 주행할 수 있도록 능동적으로 제어되는 대차기술이다. 틸팅기술에 더하여 능동조향기술이 채택된다면 속도의 향상은 물론 차륜과 레일의 유지보수 측면에서도 큰 효과를 볼 수 있다. 독일에서 개발된 메카트로닉 대차는 스웨덴 Bombardier사의 Regina 250 열차에 탑재되어 스웨덴 국내에서 실용화 시험을 수행하였다. 2007년 10월에는 250km/h까지 주행시험이 성공

적으로 수행되었다. 이 메카트로닉 대차는 역시 새로 개발되고 있는 궤도친화형 대차(Track-friendly Bogie)와 함께 X2000 틸팅열차를 대체할 Regina250에 장착될 예정이다. 참고로 궤도친화형 대차가 장착된 Regina250 열차는 스웨덴 기존선에서 최고속도 303km/h까지의 시험주행에 성공하였다. 이 궤도친화형 대차는 능동조향제어 기능이 없는 대신 1차 현가장치가 보다 soft한 대차로서 이 대차를 채택한 차량은 횡방향 2차 능동현가장치(Active Lateral Suspension)를 채용해야 한다. 이 차량은 250km/h 주행 시 능동현가장치 덕분에 수동현가장치를 장착하고 200km/h로 주행할 때와 동일한 횡방향 승차감을 갖도록 설계되어 있다.

유럽의 저명한 학자들 일부는 Mechatronic 대차에 대한 안전성 문제를 언급하고 있다. 제어기능이 실패할 경우에 대비한 Fail-safe 기능이 불안전하다는 것이다. 그러나 이 문제는 틸팅이 처음 도입될 때의 상황과 유사하다. 틸팅장치의 잦은 고장으로 영국에서 퇴출되었던 틸팅기술이 이태리에 험값으로 수출되어 성공리에 상용화된 반면, 영국의 철도 기술은 하향곡선을 그리게 된 바로 그 상황과 유사하다. 앞으로 스웨덴 철도청과 Bombardier사에서 이 기술을 어떻게 성공적으로 개발해 나아갈 지, X2000 대신에 Regina-250을 영업운전에 투입할 때 메카트로닉 대차가 채용될 지 자못 궁금하다.

한편, 우리나라에서는 2007~2008년까지 2년 동안 한국철도기술연구원에서 120km/h급 도시철도차량에 적용할 목적으로 F-링크 형태의 능동조향대차를 1/5-스케일 모델로 개발하여 실험실 테스트까지 수행한 바 있다. 독일의 메카트로닉 대차와 유사한 듯하지만 독자적인 설계와 해석을 통해 국제특허를 취득해 놓은 상태이다. 능동조향제어를 적용했을 때와 적용하지 않았을 때의 레일의 횡방향 작용력을 비교해 보면(그림 2(b) 참조) 상당한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

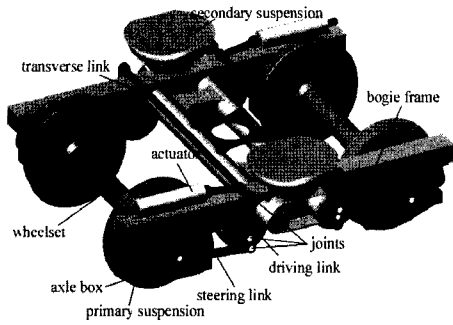
표 1. 일본에서의 동력학/진동 능동제어기술 개발현황

Category	Mechanism	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		○	○

A는 상용, B는 상용화 시험 중, C는 연구개발 중(실험실)

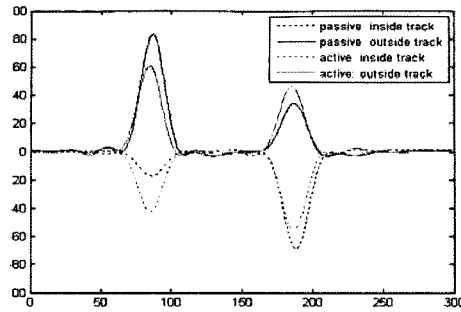


그림 1. 메카트로닉 대차 설계개념도 및 실물대차



(a) 능동조향대차 개념도

그림 2 한국철도기술연구원의 F-링크형 능동조향대차



(b) 능동조향 효과

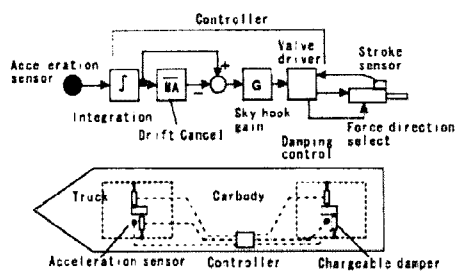
(2) 승차감 향상을 위한 (반)능동현가장치

철도차량의 (반)능동 현가장치는 횡방향 승차감 향상에 초점이 맞춰져 있다. 철도차량의 속도 향상에 따라 곡선부에서 보다 향상된 승차감을 확보해야 하기 때문이다. 앞 절에서 언급한 궤도친화형 대차를 채용한 스웨덴의 Regina250 시험열차 역시 횡방향 능동현가장치를 적용하고 있다.

한편, 일본의 경우 신간선 열차 500계를 포함하여 이후로 개발된 대부분의 신간선 열차에는 승차감 향상을 위해 가변 댐퍼를 이용한 횡방향 반능동현가장치가 적용되었다. 제어 방법으로는 자동차에서 흔히 많이 사용하는 스카이훅 제어

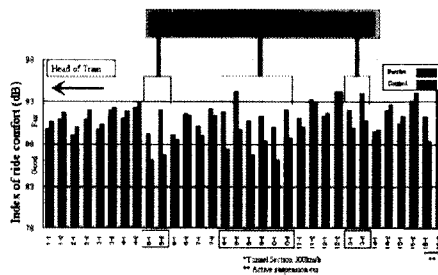
한편 JR-EAST에서는 FASTECH360 열차에 횡방향 승차감 향상을 위해 전자기를 이용한 능동현가장치를 도입하였다. 다음 그림은 FASTECH360에 도입된 횡방향 능동현가장치의 개략도를 보여주고 있다.

한편, Alstom에서는 AGV 개발단계인 1999~2000년 전기 액추에이터를 이용한 횡방향 능동현가장치를 장착하여 시험한 바 있으나, 상용화 단계에서는 적용하지 않았다. 이는 능동현가장치를 사용하지 않고도 횡방향 승차감을 향상시킬 수 있었던 때문으로 보인다.

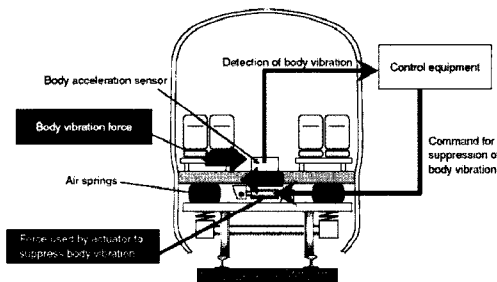


(a) 신간선 열차의 반능동현가장치

그림 3. 신간선 횡방향 반능동 현가장치



(b) 반능동현가장치의 진동저감효과



(a) 횡방향 능동현가장치

그림 4. 횡방향 능동현가장치가 적용된 FASTECH360



(b) FASTECH360 열차

방법이 적용되었다.

N700계 신간선 차량에서는 비선형 비선형 공기 스프링과 차량과 차량 사이의 댐퍼에 더하여 성능이 보다 향상된 반능동 현가장치가 적용되었다. 이 열차는 토가이도 신간선에서는 270km/h, 산요 신간선에서는 300km/h로 주행한다.

(3) 승차감 향상을 위한 차체진동 제어기술(능동진동제어기술)

승차감에 있어서 필수적인 요건은 낮은 진동수준이다. ISO2631에는 상하진동에 대하여 승차감 측면에서 가장 민감한 부분을 4Hz~8Hz로 보고 있다. 과거에는 차체진동을 저감하기 위하여 차체의 고유진동수를 높이는 방법을 취하여 왔고 그 결과로 차체의 중량이 증가되었다. 최근에 이르러 차체의 경량화가 필수적인 요소로 자리잡음에 따라 과거의 방법으로 차체의 진동을

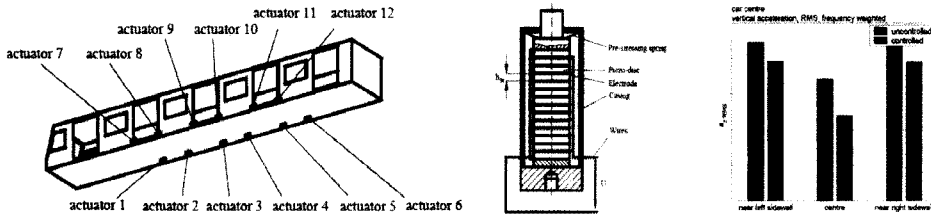


그림 5. 차체진동제어를 위한 SIEMENS의 연구내용

제어하기에는 매우 어려워졌으며, 최근에 각광을 받고 있는 Smart Material을 이용한 능동제어방법의 적용이 제시되어 왔다. 다음 그림은 지멘스에서 자체적으로 연구하고 있는 차체진동 능동제어기술이다. 여기에서는 압전세라믹 (Piezoceramics)으로 만들어진 센서 및 액츄에이터를 고려하고 있다.

한편, 일본에서는 RTRI를 비롯하여 학계 및 산업체에서

에서는 공기현가장치를 활용하여 반능동 스카이훅(sky-hook) 제어알고리즘을 적용하여 상하방향의 차체진동을 제어한 바가 있으며, 이를 주행시험대 위에서의 실험을 통해 능동진동제어의 효과를 입증한 바 있으나 영업운전에 적용되지는 않았다.

(4) 집전성능 향상을 위한 능동판토그래프 기술

가장 최근에 입수된 정보에 의하면 이태리의 경우 이태리 정부와 Trenitalia사의 지원으로 T2006이라 명명된 능동판토그래프에 대해 실험실 실험을 완료한 단계로서 피렌체공대, 밀라노공대, 피사대학, 나폴리대학 등 많은 이태리 대학이 연구에 참가하였다. 향후 실제 차량에 탑재하여 가선-판토그래프 접촉시험을 수행할 예정이며, 성공적으로 시험이 완료되면 영업차량에 장착될 예정이다.

독일에서는 Deutsche Bahn 과 Stemmann-Technik는 최근 400km/h까지 작동가능한 능동제어형 싱글암(Single-arm) 판토그래프를 개발하는 프로젝트를 착수하였다. 설계는 현재 320km/h까지 성능이 입증된 Stemmann사의 기존 DSA380 모델을 능동제어를 통해 업그레이드 하는 식으로 진행될 예정이다. 이 프로젝트는 과거 독일철도청과 봄바디사가 공동연구를 수행하여 왔었는데, 봄바디사의 역할을 Stemmann사가 대신하는 것이다.

한편, TGV Duplex에 사용된 Faiveley CX 판토그래프는

공압으로 능동제어되는 것으로서 와이퍼 아마추어에 있는 두 개의 가스실린더가 판토그래프 위쪽 암 부위의 강성을 제어하여 어떠한 속도에서라도 가선과 판토그래프 스펀의 접촉을 최적화할 수 있도록 해 준다.

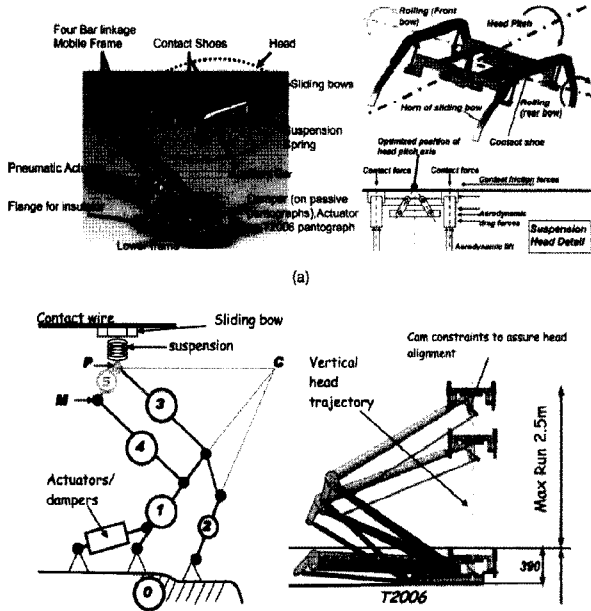


그림 6. 이태리의 능동판토그래프 T2006

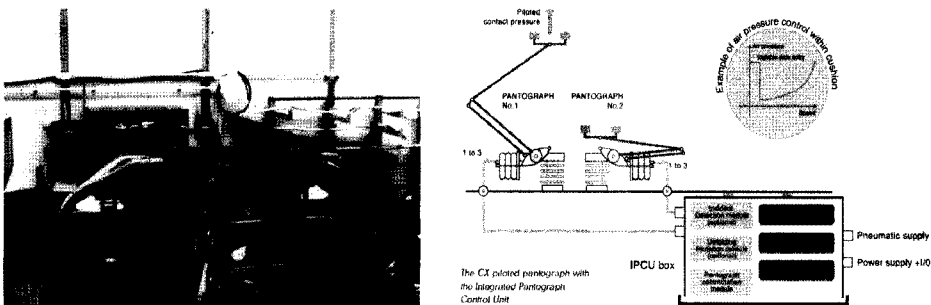


그림 7. TGV Duplex 판토그래프

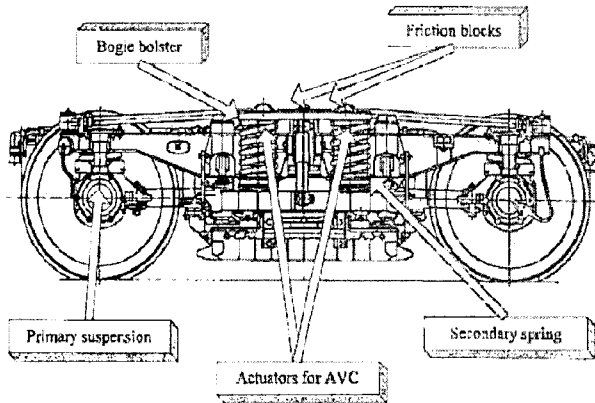


그림 8. ICE-1 차내소음저감을 위한 진동제어 개략도

5) 기타 목적의 능동진동제어

이러한 동력학 및 진동에 대한 직접적인 제어 이외에도 소음의 저감을 위한 진동제어 또한 활발히 연구되고 있다. 독일에서는 ICE-1 철도차량의 대차 하부에서 차륜의 불규칙에 의해 차내로 전달되는 구조전달음에 의해 차내소음이 특별한 주파수범위에서 피크값을 보이는 것을 저감시키고자 하였다.

또한, ICE-2 열차의 Prototype 대차(WU92)의 1차 현가장치에 능동진동제어를 적용하여 압전액츄에이터를 이용, 구조전달음을 줄이고자 하였다. 주파수별로는 틀리지만 220~250Hz 범위에 있는 진동가속도 피크성분들을 6~9dB 감소시켰다. 물론 이 방법이 실제 적용된 것은 아니지만 상당한 노력과 그 성과가 있었던 것은 사실이다.

이와 같이, 독일은 철도차량의 동력학 및 진동제어에 있어 다른 어느 나라보다도 적극적이며 진취적이다. 과거 기술의 강국 독일이 이와 같은 노력을 통해 조만간 옛 명성을 되찾을 수 있을 것으로 보인다.

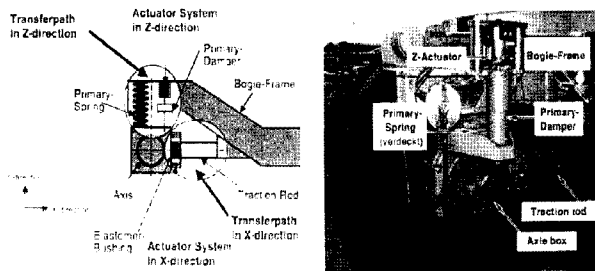


그림 9. ICE-2 구조전달음 저감을 위한 1차 능동현가장치

4. 고찰

지금까지 살펴본 것이 철도차량에 있어서 현재 전 세계적으로 가장 앞서 나아가고 있는 동력학/진동 능동제어기술이다. 철도차량의 동력학 및 진동분야에 능동제어기술이 점진적으로 적용되어 가고 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 그 속도는 다른 교통수단에 비하면 그리 빠른 편은 아니다.

이 시점에서 한번 고려해 보아야 할 부분이 있다. 우리는 어디쯤에 있는가? 항상 선진국을 뒤따라가야만 할 것인가? 앞선 기술을 개발한다면 그것은 얼마나 앞선 기술까지인가?

기술개발 착수로부터 시제차를 만들어서 안전성을 확보하여 영업운전에 투입하기까지에는 10여년의 기간이 걸린다. KTX-II가 그러했고, 텀팅열차역시 그러하다.

참고 문헌

1. B. Allotta, L. Pugi, F. Bartolini, 'Design and Experimental Results of an Active Suspension System for a High-Speed Pantograph', IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.13, Issue 5, Oct. 2008, pp.548-557.
2. B. Allotta, L. Pugi and F. Bartolini, 'An active suspension system for railway pantographs : the T2006 prototype', Proc. IMechE, Vol.223, Part F: J. Rail and Rapid Transit, 2009, pp.15-29.
3. R. Schneider and G. Himmelstein, 'Active radial steering and stability control with the mechatronic bogie', Bombardier Transportation, Germany
4. FLEXX Tronic Technology, Bombardier Transportation, Brochure, 2007
5. G. Schandl, 'Simulation of an active vibration control for flexible railway car bodies', 6th SIMPACK user meeting 2004.
6. Y. Sugahara, 'Development of vertical semi-active suspension', RTRI Report, vol.18, no.5, 2004, 5
7. www.trainweb.org
8. 'Pantographs pushed for higher speed', Railway Gazette, 25 Mar. 2008.
9. R. Schirmacher, 'The use of active vibration control for the reduction of ICE interior noise', 2001.
10. A. Peiffer and S. Storm, etc, 'Active vibration control for high speed train bogies', Smart materials and structures, vol. 14, 2005, pp.1-18.