

철도차량 능동현가시스템 기술동향



| 허 현 무 |
한국철도기술연구원
책임연구원



| 박 준 혁 |
한국철도기술연구원
선임연구원



| 유 원 희 |
한국철도기술연구원
책임연구원



| 김 남 포 |
한국철도기술연구원
주행추진연구실 실장

1. 서론

철도 교통은 환경 친화적인 녹색수송교통시스템으로서 장점과 중요성이 더욱 더 부각되고 있다. 최근 고속화 경향과 더불어 승객을 쾌적하고 편안하게 해주는 철도차량 기술의 발전이 철도차량 산업의 핵심 경쟁요소가 되고 있다. 특히, 미래 철도차량기술은 기존 철도차량의 주행성능의 한계를 극복하기 위하여 능동제어기술을 응용하고 있다. 응용분야로 능동현가, 능동조향, 능동판토, 능동제동, 능동틸팅 등으로 구성되고 이중 승객 서비스와 밀접한 능동현가시스템은 차량의 고속화로 약화되는 승차감을 혁신적으로 향상시킬 수 있는 핵심기술이라 할 수 있다.

능동현가시스템은 그림 1과 같이 횡방향 승차감을 향상시키기 위한 횡방향 능동현가시스템과 상하방향 승차감을 향상시키기 위한 상하방향 능동

현가시스템으로 개발되고 있다. 철도선진국이라 할 수 있는 일본이나 독일, 스웨덴 등의 여러 나라는 이미 고속열차에 능동 혹은 반능동형 현가기술을 적용하고 있으며, 우리나라와 유사한 기술수준을 보유하고 있는 중국 또한 능동 현가기술 개발에 대한 연구가 활발하다. 기술 개발 성공 시 기존 차량 대비 성능 우위와 경제적 부가치를 높일 수 있는 철도차량 미래 핵심기술로서 미래 철도차량기술 선점측면에서 선행 연구를 수행하고 있다.

2. 기술동향

2.1 국외 기술동향

승차감 향상을 위한 능동현가장치 기술은 일본 및 유럽의 선진 철도국에서 능동형 혹은 반능동형으로 개발되고 있으며 특히 일본의 경우에는 10여 년 전부터 횡방향 승차감 개선을 위한 능동현가시스템이 신간선 차량에 적용되고 있다.

능동형과 반능동형은 각각 장단점을 가지고 있다. 능동현가장치는 승차감 제어 성능은 매우 우수하나 구현이 어렵고 장치가 복잡하며 비용이 증가하는 단점이 있다. 반면, 반능동현가장치는 능동현가장치에 비하여 제어성능은 다소 떨어지나 장치가 간단하고 비용이 저렴하며 에너지소모가 적다는 장점이 있다. 최근에는 기존 솔레노이드 유압밸

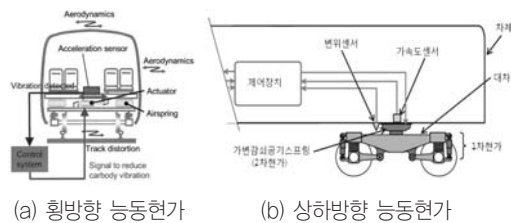


그림 1. 철도차량용 능동현가시스템 구성도

표 1. 일본 능동현가시스템적용 차량

신간선 열차	반능동현가장치적용 차량	능동현가장치적용 차량	생산 차량 수
JR 토카이 700계	선두차량, 특실, 판토그래프 장착차량 등 7량		1998년 이후 378량
JR 서일본 500계	선두차량, 특실, 판토그래프 장착차량 등 7량		1995년 이후 63량
JR 서일본 700E계	선두차량, 특실, 판토그래프 장착차량 등 4량		1999년 이후 32량
JR 동일본 E2계	선두차량과 특실을 제외한 전 차량	선두차량, 특실	2002년 이후 147량
JR 동일본 E3계	선두차량을 제외한 전 차량	선두차량	2002년 이후 28량
JR 구주	전 차량		30량

브를 이용한 가변형 댐퍼방식의 문제점을 극복하고 응답 속도가 빠르며 장치 구성이 단순한 MR댐퍼를 이용한 반능동현가시스템 연구가 활발히 진행되고 있다.

미국 Virginia Tech. 대학은 Lord사의 MR유체를 이용하여 자동차 현가장치 및 트럭 운전석 진동제어장치 등에 사용되었던 기술을 철도차량에 도입하여 연구를 하고 있

으며, 중국 및 이탈리아 등에서도 철도차량 반능동현가장치에 사용될 대용량 고효율의 MR댐퍼를 개발하고 있다.

일본에서는 1995년 고속철도차량용 진동제어기술로 반능동형 현가장치를 개발하여 세계 최초로 신간선 철도차량에 양산 적용하기 시작하였으며, 그 후 전자기기 기술을 적용한 능동형 현가장치를 개발하여 2001년 8월부터 신간선에 세계 최초로 적용하여 영업운전을 시작하고 있다. 현재 생산되고 있는 신간선 전 편성에는 횡방향 능동 현가장치를 채택하고 있으며 특히, 열차 1편성 중 횡방향 허용기준을 초과하는 차량들만을 대상으로 선택적으로 능동형 현가장치를 적용하고 있다. 2002년 이후 생산되는 신간선 전 차량에는 능동형 현가장치를 채택하고 있으며 능동형 현가장치를 적용한 신간선 열차는 표 1과 같다.

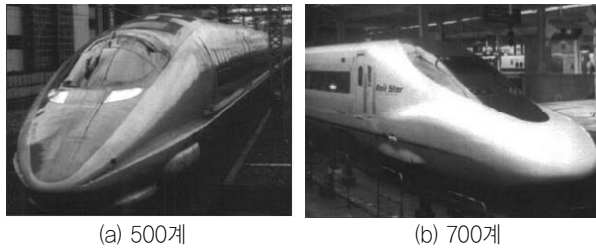


그림 2. 능동현가시스템 적용 신간선 열차

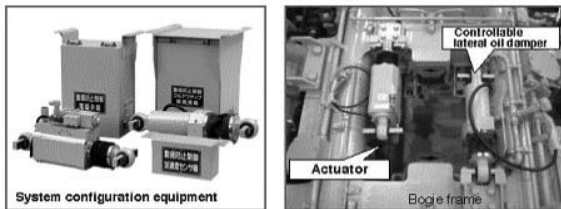


그림 3. 스미토모고속 능동현가시스템

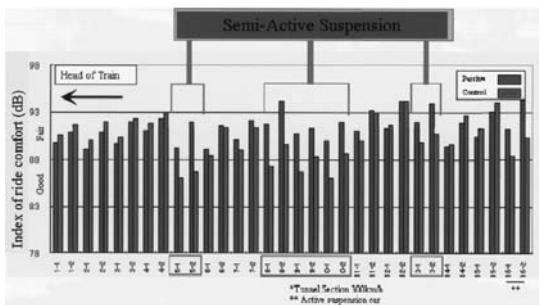


그림 4. 능동현가시스템 적용시의 승차감 개선효과

그림 3은 신간선 탄환열차와 특급열차 1등실에 적용하고 있는 스미토모고속의 공압 액추에이터를 적용한 능동현가시스템을 나타낸다. 차체와 대차간에 횡방향 액추에이터를 적용하고 있으며 횡진동을 약 50% 저감시켜 승차감 향상 효과를 보고 있다. 그림 4는 능동현가시스템을 적용한 E2계 신간선의 승차감 개선 효과를 나타낸다. 반능동형에 비하여 능동형 현가시스템 적용 시의 승차감 개선 효과가 크음을 알 수 있다.

일본 고속철도차량 선도 제작사인 가와사키중공업은 Mechatronic 기술을 응용한 능동현가시스템과 틸팅시스템을 적용한 중고속용 시제 대차를 개발하여 시운전 중에 있다. 이 현가시스템은 기존선의 속도향상을 위한 틸팅열차의 횡방향 승차감에 영향을 미치는 차체의 횡진동을 저감할 목적으로 개발된 것으로서 기존 신간선 차량에서 사용되는 공압 및 유압 액추에이터를 대체할 목적으로 응답성과 내구성이 우수한 선형모터형식 솔레노이드 액추에이터를 적용함으로써 신뢰성이 향상된 것을 특징으로 한다. 신간선 차량에 적용 시험결과 차체진동이 최대 약 10dB

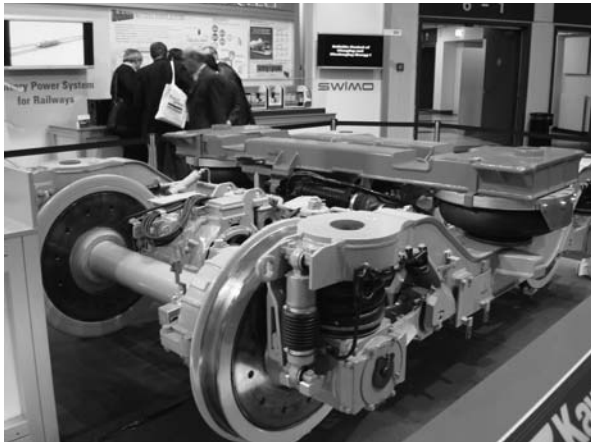


그림 5. 가와사키중공업의 능동현가시스템 적용 시제 대차

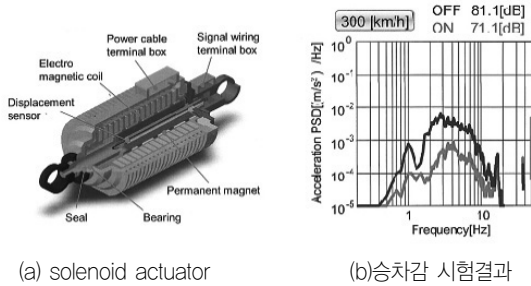


그림 6. 가와사키중공업의 능동현가 액추에이터와 승차감 시험결과

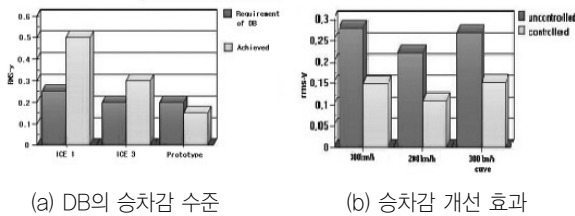


그림 7. 능동현가시스템 적용에 따른 승차감 개선(독일 DB)

저감되었으며 선형모터형식 선형액추에이터 개발로 철도 차량 능동현가시스템기술 분야에서 선도적 위치를 선점하였다고 할 수 있으며 향후 고속철도시장에서 기술 경쟁력 제고가 기대된다.

독일의 경우에도 일본과 마찬가지로 철도 선형이 취약하고 그로인한 승차감 저하의 문제점을 안고 있었다. 이를 극복하기 위한 승차감 개선을 위한 능동현가장치 개발에 많은 노력을 기울이고 있으며 최근에 들어 더욱 활발한 연구가 진행되고 있다. ICE-1 및 ICE-3의 경우 DB에서 요구되는 승차감 기준을 초과하고 있고 있었는데 능동현가장

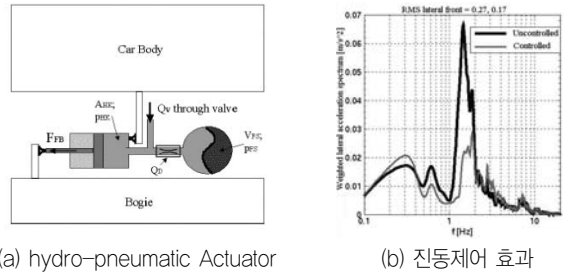


그림 8. 독일 DB 능동현가시스템 액추에이터 및 진동제어 효과

치를 개발 적용한 시제열차 주행시험 결과, 승차감 기준을 충족하는 개선 효과를 보고 있다.

능동현가시스템에 적용되는 액추에이터는 hydro-pneumatic 액추에이터로서 기존의 철도차량이 가지고 있는 기계식 브레이크용 컴프레서에서 발생하는 공기를 이용하여 유압피스톤을 밀어주는 독특한 방식을 적용하고 있다. 이것의 장점 중의 하나는 공압이 작용하지 않는 상태에서는 2차 현가장치의 스프링과 함께 수동댐퍼로서 역할을 수행한다는 것이다. 또한, 횡방향 승차감의 경우 최대 1Hz까지, 수직 승차감의 경우 6~10Hz 범위에서 동시에 제어할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 액추에이터 구조가 복잡해질 가능성이 있으며, 공압과 유압을 동시에 제어해야 하는 고난도의 제어기술이 필요하고, 유압과 공압 모두 추가적인 유지보수를 해야 하는 단점이 있다. 또한, 차체 하부에 공압 및 유압을 위한 부품들이 부가된다는 단점도 있다.

스웨덴의 경우 현재 200km/h급 틸팅열차(X-2000)를 동일한 노선에서 250km/h의 EMU형 틸팅열차 (REGINA250)로 대체하기 위한 “Green Project”를 수행하고 있다. 이 차량은 봄바르디어사가 개발한 차량으로 고속화에 따른 승차감 저하를 해결하기 위하여 2차현가장치를 능동적으로 제어하기 위한 ALS(Active Lateral Suspension) 시스템을 적용하고 있다. 현재 시제차가 개발

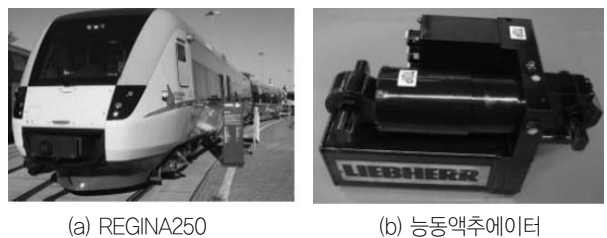


그림 9. REGINA250과 능동액추에이터 실물

The ALS system

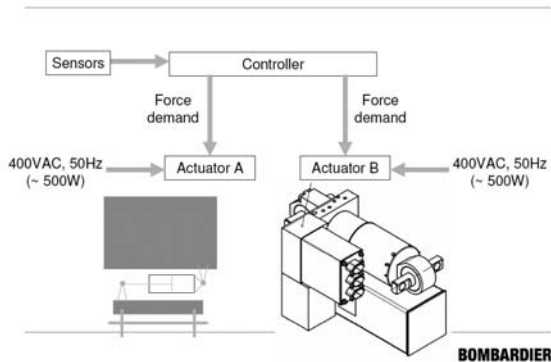


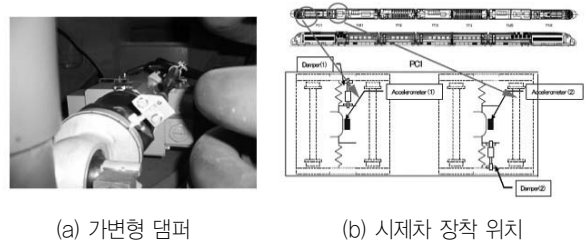
그림 10. Bombardier사의 ALS 시스템

되어 실선로에서 시험운행 중에 있다. 능동액추에이터는 모터와 볼스크류로 조합된 평균 추력 13kN, 피크 추력 37kN 용량의 전기기계식(Electric Mechanical) 액추에이터를 적용하고 있다. 시험결과 250km/h 주행 시의 승차감은 200km/h 주행 시와 동급으로 평가되고 있다.

한편, 횡방향 능동현가시스템이 실용화되고 있는 반면 상하방향 능동현가시스템은 아직 연구 개발 단계에 있다. 능동현가요소로서 2차현가용 가변감쇠형 공기스프링, 가변댐퍼나 1차현가용 가변형 댐퍼 시제품이 개발, 적용되고 있다. 그러나, 공기스프링의 비선형성에 의하여 동역학적으로 제어하기가 어려운 점이 있다. 승차감 제어 시험결과 그 효과는 횡방향 능동현가시스템에 비하여 크지 않으나 1차현가용 가변댐퍼 적용 시 약 3dB 이상 저감효과가 있다고 보고되고 있다. 현재 내구 주행시험 중에 있으며 2년내 실용화를 목표로 신뢰성 향상, 저비용화를 위한 제품 개발이 진행 중에 있다.

2.2 국내 기술 동향

국외의 활발한 능동현가시스템 연구 분위기와 달리 국내에선 이에 대한 연구가 매우 미미한 수준이다. 2004년 철도차량 제작사에서 횡방향 능동현가시스템에 대한 기초 연구 수준의 이론해석 연구가 최초로 시도된 바 있으며, 2007년~2008년엔 한국철도기술연구원에서 한국형 고속열차에 신간선에서 사용되고 있는 반능동형 댐퍼를 적용한 시험이 시도된 바 있다. 그림 11은 한국형 고속열차에 적용되었던 가변형 댐퍼와 시제차 장착 위치를 나타낸다.



(a) 가변형 댐퍼

(b) 시제차 장착 위치

그림 11. 한국형 고속열차에 시도된 반능동 댐퍼시스템

또한, 2007년 한국철도기술연구원에서는 기존의 유압식 가변형 댐퍼의 응답성능 향상을 위하여 고용량의 MR 댐퍼 시제 개발을 시도한 바 있다. 철도차량을 위한 고용량 MR 댐퍼로는 세계 최초로 시도된 사례라 할 수 있으며 2회의 시제 개발을 통하여 철도차량에 적합한 고용량 MR 댐퍼 개발에 대한 가능성을 제시한 바 있다. 이를 바탕으로 2010년 4월 지식경제부의 산업원천기술개발사업에서 ‘철도차량용 능동현가장치 기술개발’ 과제가 착수되어 연구가 진행되고 있다. 이 연구에서는 중속 및 고속철도차량에 탑재하기 위한 반능동현가장치 및 능동현가장치를 개발하는 것이 목표이며, 이를 위하여 철도차량용 대용량 MR 댐퍼 및 선형모터식 액추에이터가 개발될 예정이다. 국의 선진국에 비하여 뒤늦게 시작하여 능동현가 설계 및 차량시스템 인터페이스관련 기술은 미흡하나 선형모터형식 액추에이터 기술 및 IT응용 일부 요소기술은 상대적으로 그 격차가 크지 않아 단기간의 기술개발로 선진국 수준에 진입할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 국가별 산업재산권 동향

철도차량용 능동현가시스템 출원, 등록 현황을 살펴보면 연구개발이 활발하고 실용화에 성공한 일본이 374건(45%)로 가장 많은 특허출원 활동을 보이고 있다. 출원인 별로는 스미토모금속이나 히타치와 같은 차량 제작사나 연구소인 RTRI에서 원천특허를 많이 보유하고 있다. 다음으로 유럽이 222건(27%)의 현황을 보이고 있다. 국가로는 독일, 프랑스가 출원인으로는 지멘스, 피아트, 알스톰과 같은 차량 제작사가 주류를 이루고 있다. 미국의 경우에는 47건의 등록현황을 보이고 있다.

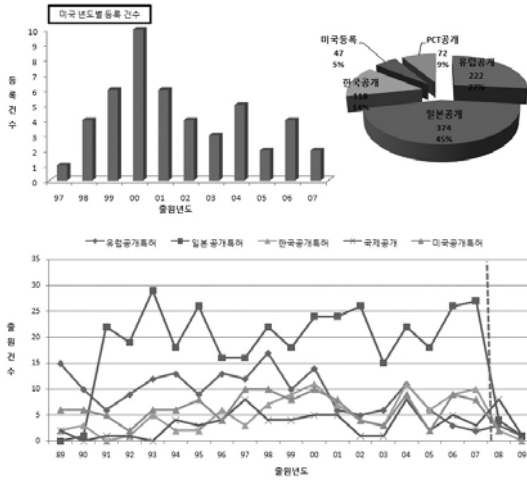


그림 12. 국가별 출원 동향

철도차량 능동현가장치에 관한 기술은 미국보다는 일본과 유럽에서 많은 연구개발 활동을 하고 있는 것으로 볼 수 있다. 미국의 경우 등록된 건 47건 공개된 건 159건으로 공개된 건을 모두 포함할 경우 206건의 현황을 보이고 있다. 2000년도 가장 많은 등록 건을 보이고 있으며 2001~2007년도까지는 감소 추세를 보이고 있는 것으로 나타나며, 하지만 2000년 이후 공개 건의 현황으로 볼 경우 꾸준한 출원현황을 보이고 있다. 일본의 경우, 1990년대부터 등록을 반복하며 다른 국가에 비해 상대적으로 많은 특허를 지속적으로 출원하고 있다. 유럽의 경우 2000년도까지 10건 내외의 꾸준한 출원현황을 보이다가 2000년 이후에 전반적으로 감소 추세를 보이고 있다.

한국의 경우, 철도차량 현가시스템관련 모든 특허를 조사한 결과 약 118건(18%)으로 이중 내국인이 82건을 출원하고 있다. 주로 로템과 한국철도기술연구원과 같이 철도차량 제작사나 연구소에서 특허를 출원하고 있다. 위와 같이 국외 특허 동향이나 능동현가시스템관련 핵심기술 확보 측면에서 보면 국외 선진국에 비하여 연구개발 활동이 미흡한 실정이다.

4. 맺음말

능동제어기술 응용하여 승차감을 개선시키기 위한 철도차량 능동현가시스템기술은 현재 실용화 진입단계에서

활성화 단계로 발전하고 있는 추세라 할 수 있다. 과거 공기압방식 혹은 유공압방식 액추에이터를 적용하여 그 성능에 한계가 있고 유지보수측면에서 문제점을 안고 있었으나 최근 선형모터형식 액추에이터의 실용화로 제어 영역이 넓어지고 유지보수성도 향상되고 있다. 향후 철도차량에 있어 능동현가기술은 타 능동제어기술 응용보다 기술 진보가 빠르고 실용화를 선도할 분야라 할 수 있다. 이는 기존 철도차량기술의 기술적 한계를 극복하기 위한 미래 철도차량기술의 핵심요소기술로서 기술적 우위 확보를 통한 철도차량 경쟁력 제고에 크게 기여할 수 있을 것이다. 따라서 국내에서도 최근 본 기술의 중요성과 필요성을 인식하여 기초연구가 진행되었고 능동현가시스템에 대한 기술개발연구가 국가 연구개발사업의 일환으로 진행중에 있다.

국내의 경우 철도분야에서 능동현가기술에 대한 기술개발은 국외 선진국에 비하여 늦었지만 세계적으로 경쟁력이 있는 자동차, IT, 전자기술 등의 관련분야의 기술을 적용하면 빠른 시일 안에 상당한 수준의 기술 확보가 가능할 것으로 판단되며 이는 국내 철도산업 경쟁력 제고에 기여할 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. 김상수 외, "일본 신간선의 진동제어 기술 현황", 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, 2005
2. 김상수 외, "한국형 고속열차 세미액티브 진동제어", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 2007
3. Masahito Adachi, "Analysis of the Improvement of Running Performance by Secondary Suspension", Vehicle System Dynamics Supplement 41, 2004
4. R. Streiter, M. Boller, B. Riege, R. Schneider and G. Himmelstein, "Active Lateral Suspension for High Speed Trains"
5. A. Orvnas, "Active Secondary Suspension in Train", ISBN 978-91-7415-144-2
6. P. Wu, J. Zeng and H. Dai, "Dynamic Response Analysis of Railway Passenger Car with Flexible Carbody Model Based on Semi-Active Suspensions", Vehicle System Dynamics, Vol.41, 2004
7. Kimiaki Sasaki, "Recent Research and Development on Improvement on Ride Comfort", RTRI Report, Vol.24, No.6, 2010
8. Y. Sugahara, T. Kojima, A. Kazato and H. Morishita, "Suppression of Vertical Vibration of Railway Vehicles by Damper Control of Secondary Vertical Oil Damper", RTRI Report, Vol.24, No.6, 2010