

지능재료를 이용한 차세대 철도차량기술

Advanced Railway Vehicle Technology using Smart Materials

김재환¹⁾, 강부병²⁾, 김형진²⁾, 정홍채²⁾, 최성규²⁾

ABSTRACT

지능 재료를 이용한 디바이스는 자연계에 존재하는 생명체와 같이 내·외부 환경 변화에 대응하여 스스로 변하는 능동적 기능을 갖고 있기 때문에 시스템 성능의 극대화 및 유지비용의 최소화를 가져오게 된다. 이러한 지능재료 기술은 지난 10여년 전부터 연구되었는데 대표적인 응용을 보면, 산업, 항공, 교통, 운송 분야의 능동 소음 및 반능동 진동제어; 복합 재료 손상위치 탐지시스템, 손상구조 건전성 평가시스템, 교량, 저장탱크, 건물, 유조선, 대형 구조물의 건전성 평가 시스템; 초정밀 직진 안내기구, 나노 스테이지, 절삭오차 보정용 액츄에이터, 초음파 회전모터, 지능유압 서보밸브, 변형 거울 등의 모터/ 액츄에이터; 자동차 엔진 성능제어, 흡배기구 압력측정, 가속도 센서, 자이로센서, 에어백 센서, 타이어 센서 등의 지능 MEMS/NEMS 센서; electronic article 정찰, 도서태그, 비접촉 항공 운송물 분류 및 보안시스템, 전자 운전자 식별 시스템, 광섬유 건물 보안 시스템, 지능 신경망 형상 인식 시스템 등의 보안 시스템; 지능항공기 구조물, 인공위성안테나, 헬리콥터 회전익 등의 형상제어가 있다. 본 논문에서는 지능재료 기술을 정리하고 차세대 철도차량 기술에 지금까지 적용한 예를 소개하며 향후 적용할 수 있는 분야들을 가능성 및 실용성 면에서 소개하고자 한다.

1. 서론

수 십년 동안 엔지니어들과 과학자들은 진보적인 로봇이나 기계 시스템 설계에 자연을 영감으로 이용해 왔다. 오늘 날 자연은 완전히 새로운 단계의 재료 시스템 즉, 지능 재료 시스템에 대한 영감이 되고 있다. 노화되는 공정과 변화하는 환경을 수용하기 위해 물질의 구조, 조직 형상 그리고 특성 등을 적용시켜 가는 자연의 능력과 생물학적인 유사성은 특수한 기능을 갖춘 재료를 설계하는데 이용되어져 왔다. 이러한 재료는 스스로 형태를 변화시킬 수 있고 자신의 작동 상태를 감시하고 진동을 제어하며, 외부환경 변화에 능동적으로 적용할 수 있는 특성을 갖고 있다. 이러한 재료를 지능 재료(smart materials)라고 한다. 지능 재료를 이용한 디바이스는 자연계에 존재하는 생명체와 같이 내·외부 환경 변화에 대응하여 스스로 변하는 능동적 기능을 갖고 있다^(1,2). 따라서 지능 재료를 이용한 디바이스는 생명체의 감각 신경계와 같이 시스템에 접합 혹은 삽입된 센서를 통해 내부 및 외부의 자극과 현상을 감지한다. 생명체의 두뇌계가 신경계를 통해 얻은 정보를 토대로 판단하고 지시하는 것처럼, 센서 신호를 바탕으로 마이크로프로세서와 제어 알고리즘이 연계된 시스템이 환경조건 변화를 판단한 후 알맞은 조치를 취할 수 있도록 신호를 발생한다

¹ 인하대학교 기계공학과, 부교수, 정희원, Jaehwan@inha.ac.kr

² 한국철도기술연구원 차량기계연구본부, 강부병:주임연구원, 김형진:책임연구원, 정홍채:책임연구원, 최성규:수석연구원, 정희원

(그림 1). 따라서 지능 재료를 이용한 디바이스는 내·외부 환경변화에 대하여 자체 처리 능력을 보유하고 있기 때문에 시스템 성능의 극대화 및 유지비용의 최소화를 가져오게 된다.

지능 재료 시스템을 구성할 수 있는 재료의 종류는 수십 종류가 있지만, 실용화 측면에서 가장 활발히 연구되고 있는 것은 다음과 같다. 전기장과 자기장에 따라 유변학적 성질이 제어될 수 있는 ER (Electro-Rheological) 및 MR (Magneto-Rheological) 유체, 기계적 변형에 의해 전기적 신호가 발생하고, 전압인가에 의해 기계적 변형이 발생하는 압전 재료(Piezoelectric Material), 온도(혹은 열) 조절에 의해 기억된 형상이 제어될 수 있는 형상기억합금(Shape Memory Alloy), 그리고 지능 재료 시스템의 센서로 매우 효과적인 광섬유(Optical Fiber)등이다. 일반적으로, 지능재료 기술은 센서 기술, 액츄에이터 기술, 제어 기술, 그리고 시스템 통합 기술로 이루어지며 각종 산업, 국방, 의학 분야에 광범위하게 응용되는 새로운 개념의 기술이다. 본 논문에서는 지능재료 기술을 소개하고 철도차량 기술의 적용에 및 향후 적용이 가능한 분야를 가능성 및 실용성 면에서 살펴본다.

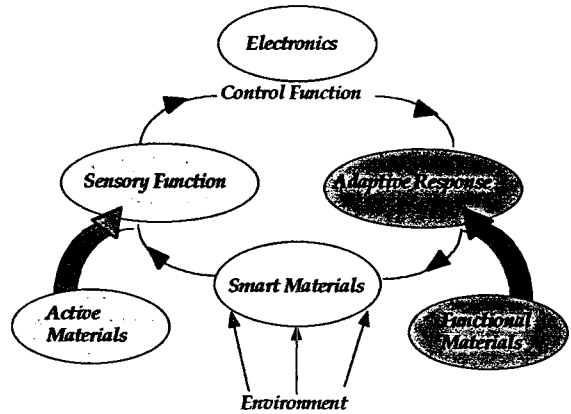


그림 1. 지능재료 시스템의 개념.

2. 지능재료 기술의 연구동향

2.1 지능재료 기술의 응용분야

지능 재료 시스템은 센서 및 액츄에이터의 다양한 기능을 제어 및 신호처리 기능과 함께 시스템에 통합하는 차세대 신기술로서 시스템에 적응성을 부여하면서 소형 경량화 및 민첩성을 확보하는 중요한 기술이다. 본 기술은 다음과 같은 분야에 매우 중요한 역할을 담당하고 있다.

▶ **능동 소음 및 반능동 진동제어** : 산업, 소모품, 항공, 교통, 운송 분야에 실제적으로 응용되며, 산업용 송풍기 소음저감, 생산 시설이나 TV 카메라의 진동저감, 냉장고 소음저감, 후드팬 소음저감, 항공기실내 소음저감, 엔진 진동저감, 디젤엔진 배기 소음저감, 트럭운전석 진동차단, 반능동 현가시스템 등 다양한 응용 제품이 있다. 일부 상용화 제품이 나오고 있으며, 새로운 시장 형성 가능성이 매우 높다.

▶ **건전성 평가시스템** : 복합 재료 손상위치 탐지시스템, 손상구조 건전성 평가시스템, 교량, 저장 탱크, 건물, 유조선, 대형 구조물의 광섬유 센서시스템 등이 있다. 가격과 복잡성으로 인해 시장 형성이 느려지고 있으나 시대가 변함에 따라 필요성이 점점 높아지고 있다.

▶ **모터/액츄에이터** : 초정밀 직진 안내기구, 나노 스테이지, 절삭오차 보정용 액츄에이터, 초음파 회전모터, 지능유압 서보밸브, 변형 거울, 광쌍안정소자, 고감도 공간검제, AC팽창계, 지능 VTR헤드, 프린터헤드 등이 있다. EAP(Electro-Active Polymer)와 같은 인공 근육은 로봇, 의료, 오락, 영화 산업에 새롭게 응용되고 있으며 그 잠재 가능성이 매우 높다.

- ▶ **지능 MEMS/NEMS** : 자동차 엔진 성능제어, 흡배기구 압력측정, 가속도 센서, 자이로센서, 에어백 센서, 타이어 센서 등의 세계시장이 2000년에는 8억불에 달하며 시장 성장률이 15%에 이르고 있다. 일회용 혈압계 역시 4천만불의 시장에 이르고 있는데, 높은 판매량, 높은 시장 형성률, 그리고 대형 시장으로의 발전 가능성이 새로운 시장 형성을 가능케 하고 있다.
- ▶ **지능 window/display** : 전기의 인가에 따라 색상이나 빛의 차단도가 달라지는 지능 window, 미소각도 조정 display, 바이모프 display 등이 있다. 건물, 자동차의 유리창을 비롯해 가전제품부터 항공에 이르는 정보 display 장치들은 수십 억 원의 시장을 놓고 경쟁하고 있다.
- ▶ **보안 시스템** : electronic article 정찰, 도서태그, 비접촉 항공 운송물 분류 및 보안시스템, 전자 운전자 식별 시스템, 광섬유 건물 보안 시스템, 지능 신경망 형상 인식 시스템 등이 있으며, 전자운전자 식별 칩의 경우 1억불의 매출이 Texas Inst.에 의해 창출되기도 하였다. 보안 시스템의 높은 판매고로 인해 새로운 기술 시장의 가능성이 매우 높다.
- ▶ **형상 제어** : 지능항공기 구조물, 인공위성안테나, 헬리콥터 회전의 등이 연구되고 있는 단계이며 시장 형성은 군사목적의 특성과 기술의 안전성으로 인해 느린 상태이다.

2.2 지능재료 기술의 국외 연구개발 현황

지능 재료 및 구조물의 연구는 10여 년 전부터 미국에서 주도적으로 시작되어 일본, 유럽에서 항공, 우주, 자동차, 군사, 의료 분야의 응용을 목적으로 활발히 진행되고 있다. 그 동안 개발된 대표적인 내용을 보면 압전 선트감쇠를 이용하여 진동을 저감시킨 Smart Ski, MR 댄퍼를 장착한 산악 자전거, 장력을 조절하는 Smart Bra, MR 반능동형 자동차 현가장치, 자동차 airbag 센서, 자동차 엔진 제어 유니트, 압력제어장치, 자이로센서, 광파이버센서, 초음파 회전모터, 초음파 스텝 모터, THUNDER 압전 작동기, 초정밀 스테이지, 6자유도 플랫폼, 항공기 날개의 플러터제어, 항력제어, 헬리콥터 회전의 진동제어, 팬, 가전제품, 산업 설비의 능동 소음/진동 제어, 우주 유연구조물의 진동제어 등이 있다. 지금까지의 연구가 지능재료시스템의 개념을 증명하는 단계이었다고 한다면 최근의 연구는 나노기술과 접목하여 재료 단계부터 설계하여 디바이스의 개발로 나아가거나, 반대로 디바이스의 성능으로부터 요구되는 재료를 설계하는 방식의 연구가 추진되고 있다. MEMS/NEMS 기술 및 이들을 통합하여 시스템을 구축하는 기술들, 예를 들면 polymer나 금속을 혼용한 삼차원 MEMS/NEMS 기술을 사용한 Smart Sensor 및 이들이 통합된 분산센서 시스템, 재해방지 시스템, 파손 예방 시스템 등이 최근 연구되고 있다. 한편 액츄에이터 및 모터와 같은 디바이스의 연구도 매우 활발하다. 디바이스의 응용은 종래의 기술을 개선하는 한계에서 벗어나 새로운 개념의 응용을 창출하고 있다. 지능재료시스템 기술의 최근 개발동향은 시스템의 통합화, 독립화, 경량화, 소형화, 그리고 네트워크화라고 할 수 있다. 지능재료의 연구 단계를 살펴보면, 주로 응용연구 및 개발연구가 주류를 이루고 있으며 연구주체를 보면, 응용 연구는 주로 학교에서, 개발연구는 주로 회사에서 하며 연구소는 두 가지를 모두 참여하는 방식을 취하고 있다.

2.3 지능재료 기술의 국내 기술개발 현황

국내에서 지능구조물 시스템의 진동제어를 연구하기 시작한 것은 1991년 이후부터이다. 지능 재료 및 구조물에 대한 소개와 더불어 대학에서부터 이에 대한 연구가 시도되었다. 압전 재료를 이용한 유연기구의 진동제어, 소음제어, 복합재료 구조물의 진동제어가 대표적인 예이다.

복합재료에 광섬유를 심어서 구조물의 건전성을 평가하는 시스템의 연구도 개념증명 차원에서 진행되고 있다. 압전재료를 이용한 진동파형 압전모터, 비틀림형 회전자동기, 작동셀 개념의 선형모터, 압전자동기를 사용한 나노급 변위제어, 나노구동 스테이지가 연구되고 있다. ER/MR유체를 이용한 능동댐퍼의 연구는 그 동안 국내에서 활발하게 진행되었다. ER유체의 조성 및 미시적 및 거시적 특성연구를 비롯하여 ER댐퍼 및 이를 장착한 기동장치의 현가장치의 개발, 군용 차량 장착 시도, 현대자동차와 공동으로 승용차 적용을 위한 연구, MR댐퍼, 클러치 및 브레이크와 같은 MR응용장치개발을 위하여 활발한 연구를 수행하고 있다. 지금까지 지능 재료 관련한 국내 연구는 산발적으로 수행되어 오고 있으며, 그 수준은 대부분 현상 파악이나 효과 입증에 목표를 둔 기초 단계라 할 수 있다. 국내에서 아직 이렇다 할 지능재료구조물과 관련한 국책 사업이 없었다. 지능재료구조물 연구는 응용연구와 개발연구 성격이 강하므로, 선진국이 아직 시도해보지 못한 적절한 응용 시스템을 찾아내어 적용한다면 성공할 가능성이 매우 높다.

3. 철도차량기술과 지능재료 기술

3.1 지능재료 기술을 이용한 철도차량기술의 연구동향

지능재료 기술을 철도차량기술에 응용한 예는 그리 많지 않다. MR유체 댐퍼를 고속철도차량의 승차감을 향상시키기 위하여 반능동형 현가장치에 적용한 연구가 있었다⁽³⁾. 차체와 트럭, 차륜세트의 회전 운동을 묘사하기 위하여 17자유도를 갖는 철도차량의 full-scale 모델을 수립하였으며, MR 댐퍼를 2차 현가장치에 설치하여 LQG 제어를 통하여 가속도 되먹임제어를 행하였다. 아직 이론적인 해석 단계에 있지만 실차 시험을 계획하고 있다.

유럽의 Fraunhofer 연구소에서는 철도차량에 대한 차세대 기술을 연구하고 있는데, 고속열차의 차륜세트를 검사하는 지능형 센서 시스템을 개발하고 있다⁽⁴⁾. 철도차량의 안전을 보장하기 위한 철도차륜 및 차륜세트에 대한 검사는 제작 후 또는 운행 중 정기적인 간격으로 이루어져야 한다. 정기적인 검사를 할 때는 차륜세트를 분해하여 각 부품들에 결함이 있는지를 규정에 따라 검사하는데 이 과정은 수작업으로 이루어지므로 시간과 인력이 많이 소모된다. 따라서, Fraunhofer 연구소에서는 철도차륜과 차륜세트를 완전자동으로 검사할 수 있는 기술을 개발하였다. AURA라

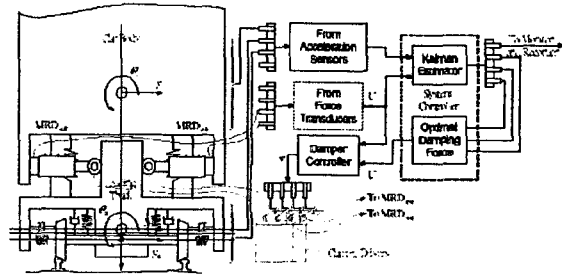


그림 2. Schematic of a railway vehicle integrated with semiactive controlled MR fluid dampers.

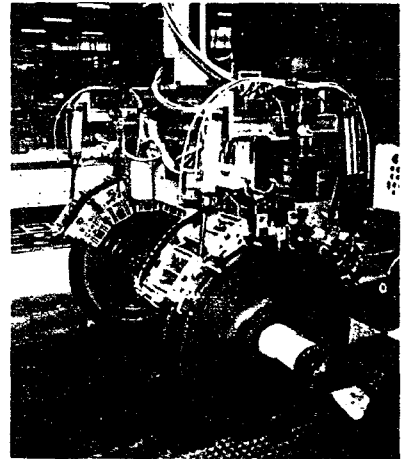


그림 3. Wheel test station AURA.

고 명명된 이 시스템은 디스크와 평행하게 분극된 전단파를 응용한 EMAT 신호변환기를 포함하여 28개의 초음파 신호변환기를 사용하며 자동으로 실험결과를 해석하고 자료정리를 할 수 있으며 차륜의 rim과 디스크를 검사할 수 있다. 그림 3은 AURA 검사장치를 나타내고 있다. AURA 시스템의 장점은 검사시간이 짧고(차륜세트를 검사하는데 10-15분 소요), 차륜세트를 자동 이송하며, 사용자가 쉽게 제어할 수 있고, 시스템의 서비스와 정비보수가 통합된 시험기이고, 원격 시스템진단이 가능하고, A-scan, B-scan, C-scan 형상의 해석 및 후처리가 가능하고, 검사기능 및 인자를 CAD로 나타낼 수 있으며, 사용하기에 매우 편리하다.

3.2 지능재료 기술을 이용한 철도차량기술

지능재료 기술은 적응성을 갖는 차세대 신기술로서 철도차량 및 철도 기술에 응용할 때 기존의 철도 및 철도차량 기술을 진일보 발전시킬 수 있다. 적용 가능한 세부 기술들을 보면 다음과 같다.

▶ **반능동 대차 현가장치** : 고속전철은 차량의 극심한 진동으로 인하여 주행 안정성, 승차감, 그리고 대차 유지보수비용의 문제가 발생한다. 차 본체와 보기(bogy)를 연결하는 철도차량 현가장치에는 수동형, 능동형, 그리고 반능동형이 있다. 능동형은 대차의 유압 또는 공압 댐퍼에서 유압 실린더나 공압 작동기를 제어하여 넓은 주파수 대역에서 높은 제어성능을 얻을 수 있으나 높은 출력과 복잡한 제어가 필요하며 가격이 비싸다. 반능동형 시스템은 MR/ER과 같은 지능형 유체를 이용하여 자기장 또는 전기장을 인가하여 빠른 시간에 현가장치의 댐핑력을 제어하는 시스템이다. 가격/제어성능비가 우수하며 시스템이 안정적인 장점이 있다.

▶ **반능동 MR 시트 댐퍼** : 운전자나 승객의 좌석 현가장치는 운전자 및 승객의 승차감 및 피로 면에서 매우 중요한 역할을 한다. 좌석 현가장치에서 진동을 감쇠시키는 댐퍼를 MR댐퍼로 하여 자기장에 따라 댐핑력을 조절함으로써 수동형 댐퍼의 한계를 극복하면서 능동형 댐퍼의 우수한 진동절연성능을 발휘할 수 있다.

▶ **능동 펜토그램 시스템** : 고속철도에서 펜토그래프를 이용하여 집전을 할 때 가장 큰 문제점 중 하나는 접촉선의 형상과 접촉선과 펜토그래프 사이에 발생하는 공진현상에 의해 발생하는 이선현상이다. 지능재료를 이용한 작동기/센서 및 적절한 제어를 사용하여 능동 펜토그램을 구성하면 이선현상을 줄일 수 있다.

▶ **지능 소음저감 기술** : 차량이 주행할 때 여러 가지 소음이 발생하는데, 이 소리는 차체의 구조, 대차의 구조, 궤도의 상태, 주위의 반향물의 유무에 따라 복잡하게 발생한다. 이러한 소음은 차량 실내로 전달되어 승객에게 불쾌감을 줄뿐만 아니라 선로 변의 소음공해를 유발한다. 철도차량의 소음은 발생원에 따라 전동소음, 공력소음, 집전계소음 그리고 하부 구조물에 의한 소음으로 나눌 수 있다. 소음원에 따라 능동적으로 대처할 수 있는 능력을 갖는 지능재료 및 구조물 기술을 이용한 소음저감 및 제어기술은 철도차량의 소음저감에 직접 응용될 수 있다.

▶ **차륜 모니터링 시스템** : 주행 시 철도 차량의 차륜 모니터링은 탈선방지, 주행 안전성과 유지 보수 면에서 필요하다. 압전재료를 이용한 변형센서 또는 AE 센서 유니트 그리고, RF MEMS 센서를 차륜에 설치하여 원격감지를 하거나 혹은 비접촉식 센서를 사용하여 차륜의 건전성을 평가할 수 있다. 계측된 자료는 탑재된 시스템에서 처리할 수도 있고, 철로 시스템에서 이를 감지하여 외부에서 철도차량의 건전성을 예측할 수도 있다.

▶ **충돌방지 시스템** : 운전 중 일어날 수 있는 급박한 상황에 대처할 수 있는 장치는 철도차량의 안전유지 및 재난을 방지하는데 매우 중요하다. 음파 또는 전파를 이용하면 전방에서 접근하는 물체를 인식하여 충돌을 경고하는 시스템을 구축할 수 있다. 또한 대구 지하철과 같이 전방에 자연재해가 발생하였을 때 이를 감지할 수 있는 능력은 재난방지에 필요하다.

▶ **레일 건전성 평가 시스템** : 자연재해나 테러의 공격 또는 유지보수문제로 인해 선로에 이상이 생겼을 때 이를 철도차량에서 즉시 감지하는 것은 재난방지에 매우 중요한 단서를 제공한다. 선로에 이상이 있는 부에서는 음파가 반사되는 현상을 이용한다면 선로의 건전성을 철도차량에서 감지할 수 있는 시스템을 개발할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 지능재료 기술을 정리하고 차세대 철도차량 기술에 지금까지 적용한 예를 소개하며 향후 적용할 수 있는 분야들을 가능성 및 실용성 면에서 소개하였다. 아직 선진국에서 시도하지 못한 철도차량 시스템에 지능재료 기술을 적용한다면, 국내 철도기술의 향상은 물론, 국제적으로 경쟁력 있는 철도기술을 확보함으로써 국가의 경쟁력을 향상시킬 수 있으며 경제발전에도 크게 이바지 할 수 있을 것이다.

5. 감사의 글

본 연구는 철도기술연구원의 지원에 의해 수행되었습니다. 관계자께 감사를 드립니다.

6. 참고문헌

1. C.A. Rogers(1993), "Intelligent Material System - The Dawn of a New Materials Age," J. of Intelligent Material System & Structure, Vol.4, pp.4-12.
2. W.B. Spillman Jr., J.S. Sirkis and P.T Gardiner(1996), "Smart Materials and Structures: What are they?", Smart Materials & Structures, Vol.5, pp.247-254.
3. D.-H. Wang and W.-H. Liao(March 2003), "Ride quality improvement ability of semi-active, active and passive suspension systems for railway vehicles," SPIE's 10th International Symposium on Smart Structures and Materials, Vol.5056-26, San Diego, California, USA.
4. M. Kroning(2000), Fraunhofer Annual Review 2000, pp.42-46, Fraunhofer Institut Zerstorungsfreie Prufverfahren(IZFP).