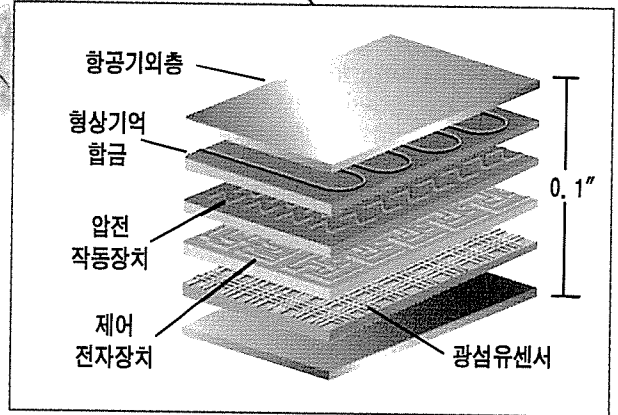


콘크리트 하부구조는 시멘트의 균열과 강철보강용 막대기의 부식을 찾아내는 센서를 내장할 수 있다. 형상기의 작동장치는 응력변형에 대응한다.



항공기의 기체는 피로를 상쇄하고 사소한 물리화학변화도 언제나 탐지할 수 있는 얇은 작동장치층과 광섬유센서를 내장할 수 있다.

첨단과학현장

‘살아있는’ 지능재료

玄 源 福 <과학저널리스트/본지 편집위원>

아프거나 피로를 느낄 때 말 또는 신음소리로 호소하듯
 다리나 건물도 지나친 피로가 겹치거나 무너질 정도의 압력이 걸리면 스스로 이런 위급사태를 알리는 방법은 없을까?
 지진이 일어날 때 스스로 보강하고 금이 가면 자발적으로 틈새를 메우는 다리나 건물을 만들 수는 없을까?
 포 생물처럼 필요하다면 스스로 구조를 바꾸고 피해를 입으면 수리하고 나이를 먹으면
 우아하게 은퇴할 수 있는 구조물을 만들 수 없을까?
 2세기에는 이런 살아있는 지능재료들이 등장하여
 성수대교와 삼풍백화점과 같은 대형구조물의 붕괴사건을 미리 막을 수 있게 될지 모른다.

현대판 '연금술사'

1980년대 말부터 세계의 여러 연구 집단들은 다리나 도로와 같은 구조물에게 '눈'과 '머리'와 '신경'을 제공하여 명칭했던 구조물을 생물처럼 영리하게 만들자는 연구개발사업을 꾸준히 밀고 있다. 예컨대 미국 버지니아공대의 리처드 클라우스교수팀은 오래된 다리(교량)에다 광섬유를 깔고 다리의 피로도를 감시하는 연구를 하고 있다.

캐나다 토론토대학 광섬유지능구조연구소의 과학자들은 항공기날개와 동체 재료인 고성능의 복합재 속에 광섬유를 깔아 이들에게 신경구실을 맡기는 연구를 하고 있다. 정상시에는 광섬유가 빛을 잘 통과시키지만 피로가 겹쳐 재료의 모양이 일그러진다면 속에 내장된 광섬유도 함께 휘어져서 빛이 제대로 전달되지 못하게 되어 이것은 조종실의 경고등을 깜빡이게 만든다.

한편 미국 일리노이대학 재료공학과 의 캘로라인 드라이교수는 생물처럼 '생각하는 콘크리트'를 개발하고 있다. 그녀의 방법은 먼저 폴리우레탄섬유 오라기의 텅빈 구멍 속을 방부제(칼슘질 산염)로 채우고 폴리올이라는 화학물질로 봉한 뒤 이 섬유를 콘크리트에 섞어 준다. 만약에 콘크리트 속으로 찌물(물)이 스며들어 강철막대기를 부식하기 시작하면 섬유를 봉했던 폴리올이 녹아 섬유 속의 방부제가 흘러 나오면서 강철 막대기를 덮어주어 결국 부식을 막게 된다는 것이다. 드라이교수는 또 콘크리트에 끈적거리는 충전제(메틸 메타크라레이트)를 채운 섬유를 섞어 만약에 콘크리트에 금이 가기 시작하면 섬유 속의 충전제가 흘러 나와 자연스럽게 갈라진 틈을 뭍질하게 만들자는 연구도

하고 있다.

최근 여러 과학자들은 이보다 한걸음 더 나아가 '살아 있는' 재료를 만드는 연구를 활발하게 추진하고 있다. 이를테면 현대판 '연금술사'인 이들은 근육처럼 행동하는 액추에이터(작동장치), 신경과 기억장치구실을 하는 센서, 뇌와 척추역할을 하는 통신 및 계산기량을 동원하기 시작했다. 이들이 만든 시스템중에는 생물학적 기능보다 뛰어난 게 우수한 것도 있다.

그런데 이른바 '지능재료'는 전통적인 구조물보다 유리한 점이 많다. 오늘날 경험이 많은 설계자들은 다리나 건물같은 구조물을 설계할 때 언제나 '최악의 시나리오'를 상정한다. 그 결과 이런 설계에는 많은 보강재와 지나친 여재(餘材) 그리고 예비시스템 등 안전을 위한 대비가 지나칠 정도로 배려된다. 따라서 이런 구조물을 만들고 유지하려면 더 많은 에너지를 소비하게 마련이다.

더욱이 모든 불의의 사태를 미리 예측한다는 것은 거의 불가능하다. 이에 비하면 지능재료시스템은 이런 문제들을 빚겨갈 수 있고 사람이 미리 예측할 수 없는 긴박한 상황이 발생하면 구조물이 스스로의 힘으로 보완할 수도 있다. 예컨대 과중한 무게를 받고 있는 사다리의 경우는 전기에너지를 사용하여 받치는 힘을 강화할 수도 있고 사용자에게 위험하다고 경고할 수도 있다.

지능형 인공근육

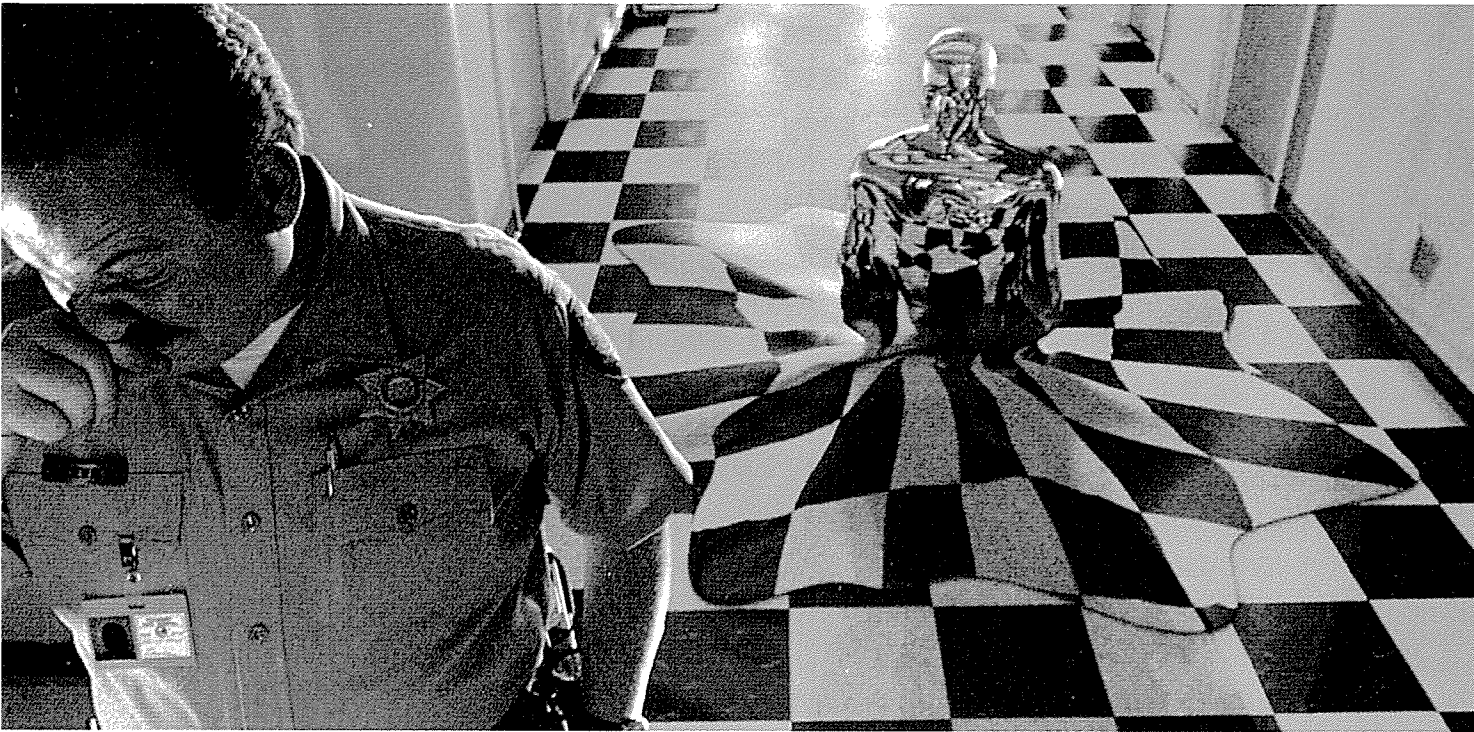
사다리처럼 구조물에게 스스로 환경에 적응할 수 있게 만드는 것은 액추에이터(작동장치)다. 이 장치는 온도나 전자기장에 대응하여 스스로의 모양, 강도, 위치, 자연주파 및 그밖의 기계

적인 특성을 바꿀 수 있다. 오늘날 가장 많이 쓰이는 작동장치에는 형상기억합금, 압전세라믹, 자기(磁氣)변형재료 그리고 전기유동 및 자기유동액 등 4가지가 있다.

먼저 형상기억합금은 어떤 온도에서 본래의 모습으로 되돌아가는 성질이 있기 때문에 이런 성질을 이용하여 작동하는데 필요한 큰 힘을 만들어 낼 수 있다. 그중에서도 가장 유망한 것은 미해군병기연구소에서 개발한 니켈-티타늄합금가족이다. '니티놀'이라고 불리는 이 재료는 압력을 주어 길이의 8%까지 연장시켰다가 열을 주어 원상으로 되돌아가게 할 수 있다.

일본의 엔지니어들은 니티놀을 마이크로 원격조작장치와 로봇의 작동장치에서 사람 근육의 매끄러운 동작을 모방하는데 사용하고 있다. 니티놀이 본래의 모습으로 돌아갈 때 생기는 힘을 이용하면 물이 가득 찬 종이컵도 잡을 수 있다. 미국 버지니아공대 지능재료시스템 및 구조센터 과학자들은 항공기에서 테니스라켓에 이르는 여러 제품에 사용되는 흑연강화 복합재료 속에다 니티놀철사를 심어 둔 결과 니티놀은 구조물 속의 변형작용을 줄이는 역할을 한다는 것이 밝혀졌다.

예컨대 온도가 화씨 3백도(섭씨 약 1백49도)를 넘어서면 흑연강화에폭시수지의 강도는 반으로 줄어들지만 형상기억섬유를 첨가한 에폭시는 이런 높은 온도에서 오히려 강도가 늘어난다. 이런 재료를 사용한 항공기가 비행할 때 마찰열로 가열되면 에폭시섬유는 본래의 기억된 모습으로 되돌아가려고 하기 때문에 재료에 에너지를 더해준다. 그래서 이런 복합재는 높은 온도에서 오늘날 사용하는 항공기재료보다 10배이



▲ 최후의 적응물질은 영화 '터미네이터'에서 묘사되어 있다. 터미네이터는 스스로 타일바닥으로 위장하면서 쉽게 고체로부터 액체로 모습을 바꾼다. 전기유동액체기술은 아직도 터미네이터의 제주를 먼 발치에서 바라보는 위치에 있다.

상 강력하다.

형상기억합금을 이용한 액추에이터는 이밖에도 엔진받침대와 진동을 제어하는 차대받이장치에도 이용된다. 그러나 형상기억합금의 주요한 결점은 데우거나 냉각하는 온도의 변화에 따라 작동하기 때문에 변화속도가 더디다는 점이다. 형상기억합금의 이런 굵직한 성질을 보완할 수 있는 것이 압전장치다. 1880년 프랑스의 과학자 피에르 및 자크 큐리가 발견한 이 재료는 전압을 걸면 팽창하고 위축한다. 1천분의 1 초라는 빠른 속도로 움직이는 압전장치는 정밀·고속작동장치에서는 없어서는 안될 존재가 되었다. 광추적장치, 자기헤드, 로봇용 광시스템, 잉크젯 프린터 및 스피커 등에 쓰이고 있다. 그중에서도 가장 널리 쓰이는 타입은 납-지르콘산염 - 티탄산염(PZT)이다.

최근에는 PZT작동장치를 사용하여 소리를 약하게 하고 구조물의 진동을 가라앉히고 스트레스를 제어하는 연구에 열을 올리고 있다. 예컨대 버지니아 공대에서는 압력이 집중적으로 걸린 곳 근처의 장력과 저항하기 위해 연결부분에 압전작동장치를 사용한 결과 일부 부품의 피로수명을 크게 연장시킬 수 있다는 사실을 밝혔다.

버지니아공대 연구자들은 또 항공기벽의 패널 속에 압전물질로 된 결정을 꾸며 넣어 진동시키면 난류에서 나오는 소음을 제거할 수 있다고 생각하고 있다. 이런 시스템은 자동차, 교량, 잠수함, 인공위성 그리고 심지어는 우주정거장의 진동까지 잠재우는데 응용할 수 있다. 그런데 가정에서도 압전물질을 내장한 벽지를 이용하면 냉장고나 에어컨디셔너의 소리를 제거할 수 있다.

작동장치의 세번째 가족은 자기변형 재료에서 나온 것이다. 압전재료와 다른 점은 전기의 장이 아닌 자장에 대해 반응한다는 점이다. 희토류원소 테르븀을 내포한 '테르페놀-D'는 0.1% 이상 팽창한다. 비교적 최근에 나온 이 신소재는 저주파의 고효율 소나변환기, 모터 및 수력작동에 쓰이고 있다. 테르페놀-D도 앞의 니티놀과 마찬가지로 진동을 가라앉히는 용도에 사용할 계획이다.

자유로운 변신

우리나라에서도 많은 관객을 모았던 영화 '터미네이터 2 : 심판의 날'에 등장하는 '불사의 로봇' T-1000은 능숙한 솜씨로 액체에서 고체로 변신할 수 있다. 이 로봇은 총탄을 맞아 구멍이 뚫리면 액체금속으로 된 피부가 재빨리

뚫린 구멍으로 흘러 들어가고 조각조각으로 부서질 때는 몽땅 녹아 버린 뒤 다시 본래의 모습으로 굳어진다. 전기유동액체는 바로 이 영화의 제작자가 꿈꾸는 것과 같은 뛰어난 적응성을 제공할 수 있는 물질이다.

전기유동액체는 그 모양이 전장(電場)에서 변화하는 물질이다. 전장의 세기에 따라 이 액체는 물처럼 자유롭게 흐르기도 하고 꿀처럼 질척거리는가 하면 젤라틴처럼 굳어지기도 한다. 이렇게 한 상태에서 다른 상태로 바뀌는데 불과 1천분의 2~3초밖에 걸리지 않는다. 예컨대 옥수수녹말과 같은 작은 입자는 전류가 없는 한 옥수수기름과 같은 액체 위에 뜬다. 그러나 전기가 있으면 입자들은 정렬하여 섬유를 형성하여 굳어진다. 마이크론크기의 입자를 갖고 있는 이 물질은 전장이나 자장에 놓을 때 사슬을 형성하면서 1천분의 1초 내에 점도(粘度)가 5~6배나 올라간다.

1947년 윌리스 윈스로우가 8년간의 연구 끝에 처음으로 전기유동액체에 관한 특허를 따자 많은 연구자들의 관심을 모으기 시작했다. 예컨대 자동차엔지니어들은 전기유동클러치를 만들어 보면 어떨까 하는 생각을 했다. 클러치속의 이 액체가 엔진을 드라이브 샤프트(구동축)와 연결하는데 고체화될 때는 구동축을 회전시키지만 액체로 될 때는 마치 중립 기어에 있는 것처럼 엔진을 구동축에서 떨어지게 하여 자유롭게 회전시킨다.

이런 클러치는 닳거나 실패할 부품이 거의 없다. 한편 보통 쇼크업소버(완충장치)는 내부에 피스톤을 가진 실린더로 되어 있는데 압축할 때 작은 구멍을 통해 끈끈한 기름을 밀어 넣는다. 이

액체는 완만하고 끈끈한 동작으로 충격의 힘을 흡수한다. 그러나 기름의 점도는 온도에 대해 매우 민감하다. 추운 날은 기름이 더 걸죽해져서 완충장치는 한결 딱딱해질 수 밖에 없다. 또 기름은 반복되는 압축과 가열로 헐거워져서 완충장치가 가장 필요한 길고 울퉁불퉁한 도로에서는 충격을 줄이는 능력이 사라져 버린다. 피스톤을 전기유동액체로 채운 뒤 전극과 마이크로프로세서를 첨가하여 완충장치를 만들 수 있다.

피스톤이 움직일 때 마이크로프로세서가 전극간의 전압을 재빨리 조절하여 액체의 점도를 바꿀 수 있어 필요하면 액체의 점도를 늘려 구멍 뚫린 도로에서 받는 충격을 줄일 수 있다. 전기유동액체의 응용분야로서 제동기, 진동격리시스템, 로봇팔의 관절, 운동장비의 저항제어 및 클러치와 브레이크 등을 꼽고 있다. 이밖에도 건물의 기초에 첨가하여 지진이 발생할 때 충격을 완화하는데 이용할 수 있다.

신경역할을 하는 센서

한편 작동장치에게 정보를 제공하는 센서는 재료시스템의 물리적인 상태를 알려준다. 그런데 지능시스템과 잘 어울릴 것으로 기대되는 센서로서는 광섬유와 압전재료를 꼽고 있다. 지능재료 속에 심어 둔 광섬유는 앞서의 버지니아공대의 클라우스교수팀의 예와 같이 센서에게 일정한 빛의 신호를 제공하고 만약에 빛이 단절되면 이것은 재료의 구조적인 잘못에서 발생한다는 것을 알려준다. 광섬유는 또 자장, 변형, 진동 및 가속을 측정할 수도 있다.

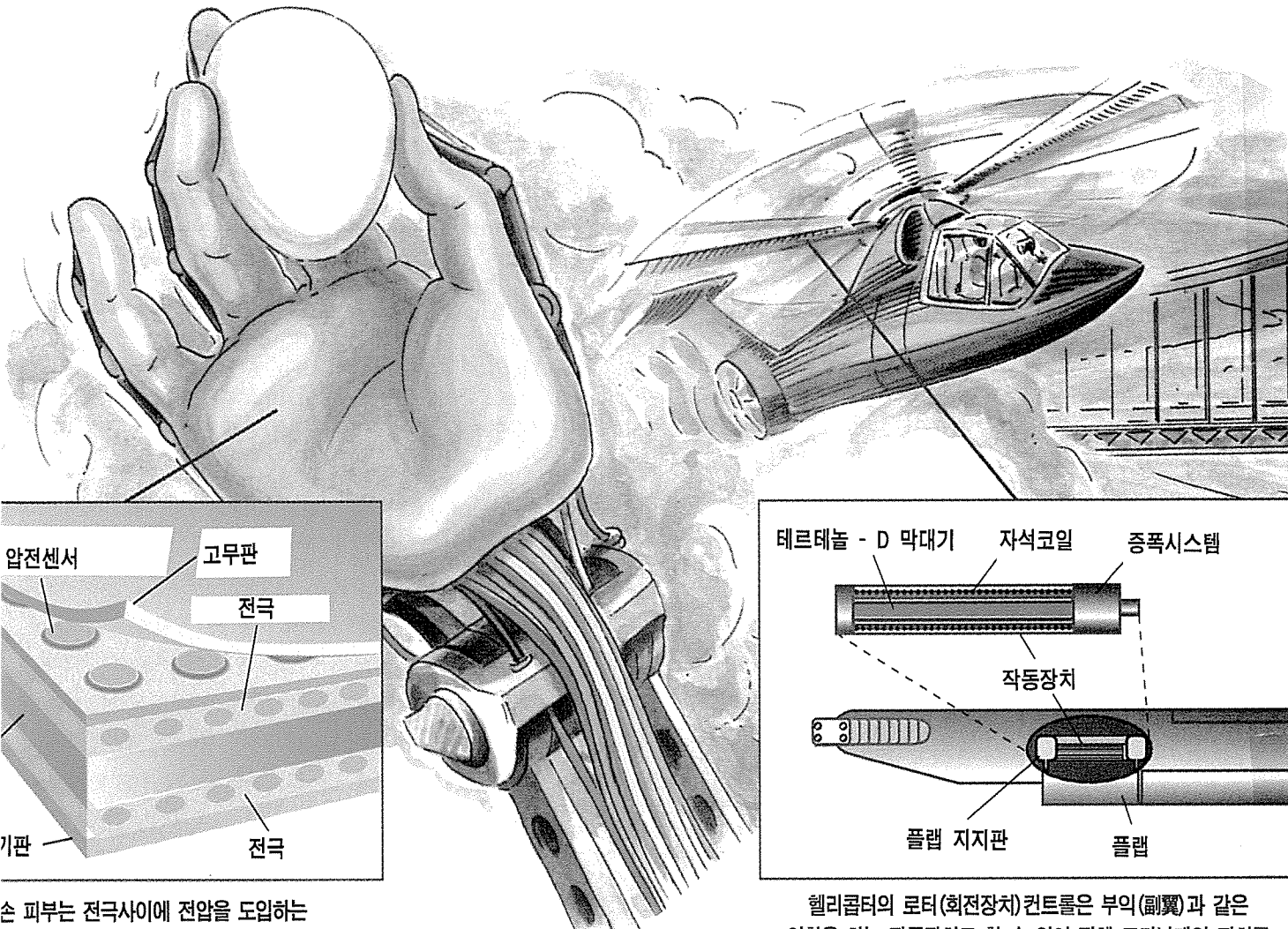
한편 압전재료는 작동장치 외에도 훌륭한 센서역할을 한다. PVDF와 같은 압전폴리머는 얇은 필름을 형성하여 여

러가지 표면에 접촉할 수 있기 때문에 센서로서 널리 쓰일 전망이다. PVDF 필름은 점자를 읽고 샌드페이퍼의 등급을 가려낼 수 있을 정도로 압력에 대해 매우 민감하다. 200~300미크론 두께의 초박막 PVDF필름은 로봇에 사용하여 사람의 피부처럼 온도를 탐지하고 서로 다른 옷감의 차이를 가려내며 가장자리와 구석과 같은 기하학적 특징을 분별할 수 있는 능력을 갖게 될 것으로 보인다.

엔지니어들은 현재 지능재료시스템을 여러 분야에 도입하고 있다. 예컨대 미항공우주국(NASA)은 펜실베이니아주립대학이 제작한 전기활성재료를 사용하여 허블우주망원경의 광도를 수정하고 있다. 그러나 오늘날 기술이 가장 성숙된 응용분야로서는 음향의 제어기술을 꼽을 수 있다. 그 목적은 엔진의 진동으로 생기는 항공기 동체 내의 소음이나 또는 잠수함의 음향을 줄이자는 것이다.

소음을 제어하는 방법의 하나는 물론 힘을 앞세운 이틀테면 '억지기법'이다. 진동을 멎게 구조물에 대해 충분한 무게를 보태주면 된다. 그러나 지능재료 기법을 이용하면 소음을 발산하는 구조적인 진동을 감지하고 구조물 전체에 고루 깔린 작동장치를 사용하여 가장 불쾌한 진동을 제어할 수 있다. 이런 개념은 조종사들이 사용하는 소음(消音)헤드폰의 기본원리로 되어 있고 현재 터보프롭식 통근용 여객기에서 완전한 시스템을 시험중이다.

정교한 지능재료를 만들기 위해서는 센서, 작동장치, 동력원 그리고 제어용 프로세서를 입체적으로 서로 연결해야 한다. 이렇게 복잡한 구조를 만들자면 막대한 비용이 필요하지만 싸게 만드는



손 피부는 전극사이에 전압을 도입하는 리머로 만들 수 있다. 이런 폴리머는 힘을 수 있을 정도로 섬세하게 반응한다.

헬리콥터의 로터(회전장치) 컨트롤은 부익(副翼)과 같은 역할을 하는 작동장치로 할 수 있어 전체 로터날개의 피치를 컨트롤하는 회전경사판이 필요없게 된다.

방법도 있다. 그것은 컴퓨터칩을 만드는 기법인 사진석판법이다. 사진복사와 닮은 이 공정은 원칙적으로는 얼마 안되는 비용으로 부품을 만들 수 있다. 이런 센서망은 실리콘 마이크로칩의 내용과 닮게 된다.

새로운 공법

지능재료시스템은 재료혁명에 불을 지를 수는 없을지 모르나 복잡한 물리적인 현상을 이해하는데 선도적인 역할을 할 것은 틀림없다. 이상적인 기록장

치구실을 하는 이 시스템은 환경을 감지하고 오랜 시간에 걸쳐 재료의 상태에 관해 상세한 정보를 저장하는 한편 재료의 구성분을 바꿔가면서 여러 현상에 대한 실험을 할 수 있다.

그러나 지능재료시스템이 가장 연속적인 영향을 미칠 분야는 설계분야로 보고 있다. 지능재료가 발전하면 엔지니어들은 설계할 때 구조물의 안전을 보장하기 위해 필요 이상의 질량과 비용을 첨가하지 않아도 된다.

이들은 지난 날처럼 실패한 구조물의

'부검'을 통해서 배우게 되는 것이 아니라 실제하는 건물에서 나오는 산 경험을 통해 배우게 된다. 지능재료가 더욱 발전되면 우리는 구조물에게 마치 살아 있는 생물처럼 '지금 기분이 어떤가' 또는 최근에 혹사를 당했다면 '어디를 다쳤는가' 물을 수 있는 날도 멀지 않았다. 이렇게 생명없는 물체를 보다 자연스럽고 생명체처럼 만들 수 있는 지능재료시스템은 21세기에 전개될 엔지니어링혁명을 선도할 것으로 기대된다. ①7