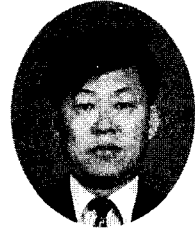


특 집

유지 관리 모니터링 최신 기술

인텔리전트 재료를 이용한 유지 관리 모니터링 기술 - Maintenance and Monitoring Technology Using Intelligence Materials -



이종열*

1. 서 론

최근 들어 인텔리전트 재료(intelligent materials)라고 하는 단어를 신문과 잡지 등에서 접하는 일이 많아졌고,^{1),2)} 인텔리전트 재료에 관한 국제 회의도 몇 번인가 개최된 바 있다. 인텔리전트 재료란 재료 자체가 주변의 환경 변화를 스스로 감지하여 사용자에게 위험성을 사전에 인지시키는 능력을 가진 재료를 말하는 것으로서 일본, 미국 등에서 많은 연구가 수행되고 있고, 여러 분야에 광범위하게 사용될 수 있지만 실용화에 가장 근접한 분야는 빌딩이나 교량의 구조 재료의 사용이다. 아직까지 이 분야는 연구 단계이지만 구조물 내의 내력 변화를 전기적 변화로 감지할 수 있다면 어느 정도 실현이 가능하다. 이러한 전기적 변화는 보통의 전기 측정기로도 쉽게 탐지할 수가 있어 콘크리트의 균열이 확대되기 전에 보수를 할 수가 있어 위험과 경비를 줄일 수가 있고, 나아가서는 구조물의 붕

괴 가능성을 사전에 미리 예측해낼 수가 있다. 기존에는 광 섬유등을 사용하여 이러한 가능성을 연구해 왔지만 콘크리트와의 일체화가 어렵다는 단점이 있어, 최근 일본에서는 시미즈건설, 동경대학이 공동으로 재료 개발에 참여하고 있다.^{4),5)} 본고는 인텔리전트 재료의 개발·실용에 대한 정리와 함께 인텔리전트 재료 개발의 본래 취지를 재확인함과 동시에, 특히 콘크리트계 재료·구조에 대해서 기술하고자 한다.

2. 현대 기술의 질환

Yanagida는 현대 기술을 아래의 5가지 측면에서 기술의 질환(증후군)을 앓고 있다고 지적하고 있다.^{2),3)} 제1증후는 우선 그 상태이다. 접시 위에 스파게티가 있는 것처럼 어디가 시작이고, 어떤 경로를 경유해서 어디가 종점인지 알기 어렵다. 이것은 기술을 이해하는 데 그 실마리가 파악되지 않고, 사고의 경로가 풀어지지 않고, 그리고 결론이 잡히지 않는 것과 같다. 제2증후는 문제 해결을, 간단히 부품과 회로를 추가하는 등 보다 복잡화시키는 방법으로 달성하려고

* 정회원, 쌍용중앙연구소 콘크리트연구실 실장

하는 방법론이다. 예를 들어 대형 구조물의 손상을 탐지할 필요가 있다고 하는 문제가 생겼다고 하자. 손상의 탐지이기 때문에 센서를 설치하고, 어디에 손상이 발생했는지가 명확하지 않기 때문에 여러 곳에 센서를 설치한다 등이다. 제3징후는 보다 복잡한 구조일수록 고도의 기술이라고 간주하는 가치관이다. 구조물의 손상 진단에 센서의 수를 자랑하고, 안전 장치의 수단을 자랑하는 등이 예이다. 안전 장치가 확실히 움직이고 있는가를 체크할 장치를 부착하는 것이 보다 안전성을 높인다고 생각하는 것이다. 제4징후는 본질의 해결을 잊어버리고 지엽적인 곳에 힘을 써버리는 것이다. 대형 구조물에서도 안정성을 높이기 위해 본체 구조의 안정성보다 센서의 성능을 높이는 방향으로 나아가는 것 등이다. 마지막 제5징후는 복잡해졌기 때문에 오히려 본질이 저하되는 것이다. 고장이 자주 일어나는 것, 유지비가 높은 것, 번잡해지는 등 전혀 다른 일에 노력이 소비되는 일이 일어난다. 너무 복잡해져서 시민의 반발을 일으키는 것도 기술 질환의 사회적인 측면이라고 할 수 있다.

3. 구조물의 신뢰성 향상을 위한 수단

구조물의 신뢰성을 높이는 수단으로 우선 생각되어 지는 것은 구조물을 보다 두껍게 하는 것이다. 그러나, 어디까지 두껍게 하면 유효한가를 적절히 판단하는 것은 극히 어렵다. 절대적으로 파괴되지 않는다는 것을 보증하는 것은 불가능하다.

보다 건전한 구조를 구축하는 데에는 비용이 든다. 자원도 다량으로 소비된다. 구조가 쓸모 없게 되었을 때 폐재의 양도 많아진다. 다음으로 파괴될 것 같은 곳을 추정해서 그 소재에 손상을 탐지하는 센서를 설치하는 수법을 생각하게 된다.

그러나, 만약 약한 곳을 해제하면 센서를 설치하기 전에 왜 그곳을 보강하지 않는가. 약해진 곳과 센서의 설치 장소와의 대응이 명확하지 않은 경우, 안전을 위해서라고 다수의 센서를 설치하게 된다. 다수일수록 안전하다고 믿고, 그 수가 많다는 것을 자랑하게 된다. 콘크리트계 구조에서 센서를

다수 내장시킨 것이, 인텔리전트 또는 스마트(smart)라고 부르고 있지만, 이것은 복잡화의 길로 빠지는 것으로 생각되며, 될 수 있는 한 센서등을 부가하지 않고 성과를 올리는 길을 신중히 찾아야 하는 것이 바람직하다고 생각된다. 인텔리전트 재료 또는 스마트 구조라고 불리는 것들이 모두 이런 개념으로 진행되는 것에 염려하는 것도 이와 같은 관점이 있기 때문이다. 결국 센서를 설치한 장소에서 파괴가 발생하는 것과 같다. 대체 무엇을 위해 센서를 설치했는가 라는 목적을 여기에서 완전히 잃어버리게 된다. 구조물의 안전성 확보에는 재료 자신이 보강도, 손상의 탐지도 해야 한다. 따라서 이하에서는 그 예를 들어 설명하고자 한다.

4. 콘크리트 보강근에 있어서 인텔리전트 재료의 예

이 예로서 콘크리트를 보강하는 철근 대체 재료로서 시미즈건설에서 개발된 CFGFRP(탄소 섬유 유리 섬유 복합 강화 플라스틱)근을 소개하고자 하며,⁶⁾ 특히 인텔리전트 재료들로서 현재 검토되고 있는 복합 재료의 물성을 소개하면 <표 1>과 같다.⁴⁾

특히 Yanagida는 자기 진단 재료로서 탄소 섬유와 유리 섬유를 복합화하는 것으로 보고, 다른 목적으로 이 재료가 이미 개발되었다고 주장하고 있다. 먼저 철근 대체 재료로서의 특징을 기술하여 보면 철은 녹이 스는 것에 반하여 이 재료는 녹이 슬지 않는다. 녹에 의한 철근의 팽창에 의한 콘크리트의 파괴를 방지한다. 또한 가볍다. 역학적 특성은 철근과 유사하다. 즉, 초기 부하에 대해서는 고탄성이다. 따라서 이 탄성 영역을 넘는 부하에 대해서도 돌발적인 파괴가 일어나지

표 1. 탄소 섬유 복합 재료의 물성(예)

종 류	인장 강도 (kgf/cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ² × 10 ³)	연신율 (%)	직경 (μm)	섬유 다발 (본수/다발)	전기 저항 (μ Ωcm)
Pan계 고강도 탄소 섬유	40,000	2,400	1.7	7.0	6,000	244
Pan계 고강도 탄소 섬유	30,000	3,500	1.1	6.7	6,000	263
Pitch계 고강도 탄소 섬유	26,000	2,450	0.9	10.0	3,000	148
유리 섬유	25,000	740	4.8	16.0	4,200	-
비닐에스테르	830	35	5.3	-	-	-

않는다. 다시 말해 저부하에 대해서는 탄성체, 고부하에 대해서는 인성체라고 하는 자기 조절 기능을 갖는 기능성 재료이다. 응력과 신율과의 관계를 <그림 1>에 나타내었다. 탄소 섬유가 절단되어도 치명적인 파괴가 일어나지 않는 것은 유리 섬유가 복합화되어 있기 때문으로 설명된다. 다음으로 자기 진단 재료로서의 특징을 설명하면 탄소 섬유는 도전체이다. 따라서 탄성을 표시하는 영역에서는 전기 저항이 작다. 탄소 섬유의 대부분이 절단되었을 때에는 저항의 대폭적인 증가가 관측된다.

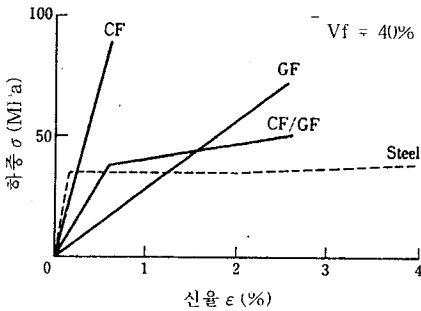


그림 1. 하중-변형의 관계

그러나, 이때 치명적인 파괴까지는 여유가 꽤 있다. 유리 섬유가 복합화되어 있기 때문이다. 만약 플라스틱 근이 탄소 섬유만으로 강화되면 저항의 증가는 치명적인 파괴를 의미한다. 저항의 증가를 손상의 진단에 사용하는 것은 어느 누구도 생각할 수 있지만, 탄소 섬유만을 사용할 때에는 무의미하다는 것을 우리는 잘 알고 있다. 탄소 섬유가 파괴하기 전의 저항 변화를 측정하려고 하면 그 변화는 미약해서 고가의 계측 장치가 필요하다. 고가 장치를 필요로 하는 기술 쪽이 고급이고, 저가 장치로 만족하는 기술 쪽이 저급이라고 하는 것은 적어도 이 사례에는 해당되지 않는다. 저가 장치로도 통한다고 하는 것은 고도의 개념 또는 첨단 기술이라고 하는 것과는 관계없다고 본다.

그렇지만 CFGFRP근에서는, 유리 섬유가 복합화되어 있기 때문에 '이병(罹病) 진단'이 가능하게 되었다. 부하를 제거한 후 잔류하는 변형이 대부분 나타나지 않는 경우에도 과거에 절단된 탄소 섬유를 포함한 재료에서는 저항 증가가 잔류한다. 이것은 '병역(病歴) 진단'이다. 저항 증가는 뚜렷하고, 저가의 테스트에서

도 쉽게 검출할 수 있다. 변형계를 이용해서 과거 최대 변형을 판정하는 데에는 상시 계측이 필요하고 기억을 시켜 놓고 호출하지 않으면 안되었다. 이 재료에서는 건강 진단, 이병 진단, 병역 진단 등 '자기 진단'이라고 하는 영리함을 가지고 있다. 이 재료의 응용에는 당연히 토목·건축 구조(건물, 교량, 고속도로, 해안벽 등)도 있지만(상시 진단보다 정기 진단에 적합함), 최근 금고의 보호벽에도 사용하기 시작한 예도 있다. 이것은 보호라고 하는 구조 재료와 동시에 침입 탐지라는 기능 재료도 된다. CFGFRP근의 특징을 정리해보자. 재료 개발이라는 것을 구조 재료와 기능 재료로 너무 세분화시켜 마치 구조 재료의 손상 탐지 기능 재료에만 의존하는 경향을 이 재료가 방지할 수 있다.

자기 진단과 같은 영리함을 '賢'이라고 하는 한자로 표기하고, 구조 재료로서의 의미를 '建', 센서와 같은 기능 재료로서의 의미를 '檢', 이 재료에는 구조 재료로서의 특성과 기능 재료로서의 기구가 융합되어 있다는 의미로 '兼'이라고 하는 한자에 해당한다. 구조는 간단하기 때문에 '檢'이라고 하는 글자에 해당되어도 좋을 것 같다. 간편하기 때문에 일반인들의 이해와 협력을 얻기도 쉽다. 환경 문제への 기여도 일반인의 협력·주체적 관여를 얻어 처음으로 가능하게 되었다. 이러한 기술은 '建'이 전부가 된다. 여기에서 사용한 7가지 한자는 어느 쪽도 일본어로 'Gen'으로 발음된다. 따라서 이와 같은 개념에서 연구·개발되어진 재료를 '겐·물질'이라고 부르기도 한다. 또한 연구 개발의 추진을 위해서 연구 컨소시엄(賢材研究會)이 결성되어 있다. <그림 2>는 이 개념을 나타내는 로고 마크를 소개한 것이다.

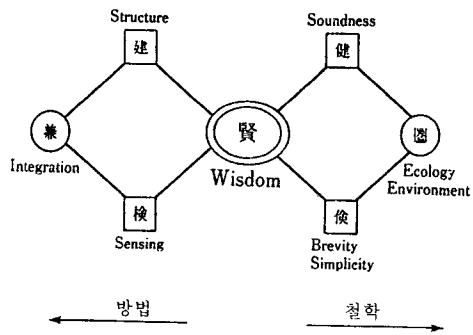


그림 2. 겐 재료의 개념

5. 콘크리트계 자기 진단 재료 개발

콘크리트를 보강하는 수단으로 철근을 이용하는 것이 가장 일반적이지만, 철근은 고인성 양도체이다. 콘크리트에 균열이 생겨도 철근은 파괴되지 않는다. 그렇기 때문에 사용되고 있지만, 콘크리트가 파괴되어도 저항의 변화는 거의 없다. 파괴를 검지하는 입장에서 보면 철근의 파괴까지 기다려야만 한다. 거기까지의 파괴라면 어느 누구의 눈에도 확실히 검지되기 때문에 의미가 없어진다. 이것에 반해 콘크리트의 파괴가 조금 늦어져 CFGFRP근 중의 탄소 섬유가 파괴하고 유리 섬유 쪽은 아직 파괴되지 않은 영역이 있다. 그렇기 때문에 전술의 자기 진단 재료가 구성될 수 있다. 그러나, 용도에 따라서는 콘크리트에 아주 적은 균열을 탐지하는 경우도 있다. 이 경우, 보강근이 아니고 재료 자신에 탐지 구조를 설계할 필요가 있다. 시멘트 모르타르의 도전율은 작고, 탐지에 이용하는 장치가 고가가 된다. 손상 탐지를 재료 자신에서 가능하게 하기 위해서는 재료 자신의 도전성을 향상시켜야 한다. 탄소 입자를 분산시키는 방법등이 채용되고 있지만, 도전성을 형성시키는 데에 다량으로 혼합시키기 때문에 강도가 저하된다. 따라서 탐지를 위해 강도가 저하되는 것은 절대적으로 바람직하지 않다. 다음으로 채용되는 방법이 탄소의 단섬유를 분산시키는 것이다. 이렇게 하면 도전성을 형성시키기 위해 필요한 혼합량이 적어지게 된다. 더구나 탄소 강화의 효과도 생긴다. 현재 일본 나고야의 (財)파인세라믹스센터에서 이 탄소 섬유 단섬유 강화 콘크리트를 콘크리트 자신의 마모, 박리, 균열의 탐지에 적용하기 위해서 실험이 진행되고 있다. 이 방법의 특징은 파괴하는 것은 콘크리트이고, 더욱이 콘크리트가 파괴되면 단섬유의 도전성도 파괴된다. 연속 섬유 강화도 도전성의 부여와 강화를 양립시키는 것에 유효하지만, 콘크리트가 파괴되어도 탄소 섬유는 절단되지 않은 상황이 발생한다. 또한 앞서 기술한 CFGFRP근과 같이 근으로서 콘크리트를 보강하는 것은 쉬워도 장섬유 탄소 섬유를 혼합한 콘크리트 구조를 직접 형성하는 것은 극히 곤란하고, 실용성이 부족하다. 이 외에 탄소 섬유로 코일상의 것을 실험실적 규모이지만 재현성이 있고, 제조될 수 있다고 하는 보고도 있다.^{7)~9)} 이 코일상 탄소 섬유로 강화한 콘크리트의 특성 측정은 아직 불충분하지만 적어도 직선상의 탄소 섬유보다 인성이 향상될 것이고,

도전체로서 보면 L성분이 있다. 통상의 탄소 섬유 단섬유 분산형에서는 R성분 밖에 없지만 전파 흡수 효과가 있다고 한다. 특히 L성분이 더해졌을 때의 전파 흡수 효과가 있는 것은 연구 과제라고 생각된다.

6. 자기 진단 이외에서의 콘크리트계 인텔리전트 재료의 제안

많은 연구자가 중대한 관심을 가지고 있는 것이 다공질 재료이다. 다공질 재료의 표면은 생물 활성인 것이 많고 수질 개선등의 환경 정화에 사용되고 있다. 이때 문제가 되고 있는 것은 강도이다. 일반적으로 다공질 재료는 강도가 작기 때문이다. 투수성 포장이 제안되어도 인도는 제외시키고도 차도에서도 보급이 잘 안되고 있는 것은 강도와 내마모성이 작기 때문이다. 이 때문에 투수성과 강도의 양립이 다음과 같은 과제가 된다.

양립해서 처음으로 이 재료를 현재(賢材)라고 불린다. 보호벽이 이것으로 되면 하천의 자기 정화도 촉진될 것이다. 여기서의 공극은 관통해야 한다. 관통하고 강도가 저하되지 않은 재료 설계는 일차원 관통 공극을 연꽃과 같이 만드는 것이다. 경석과 같이 공극이 많아도 관통되어 있지 않으면 단순히 경량화의 역할만을 할 뿐이다. 또한 강도가 증가하는 것을 기대할 수 없다. 연꽃상의 다공질 콘크리트를 개발하는 것이 차세대의 중요한 테마가 될 수도 있을 것이다.

7. 자기 진단 기구의 세라믹스에의 전개

CFGFRP근의 생각을 더욱 발전시킨 연구가 사례^{10)~13)}가 최근 (財)파인세라믹스센터에서 연구를 진행하고 있다. (그림 3)은 장섬유와 전기 전도상의 복합화를 이용해서 파괴와 손상에 대해서도 자기 진단(탐지) 기능을 가지는 세라믹스 및 FRP의 구조 설계 그림이다. 또한 (그림 4)는 설계 그림을 바탕으로 제작한 FRP의 응력-변형-전기 저항 변화의 그림이다. 여기에서 유리 섬유에 의한 강화는 CFGFRP와 같은 방법을 이용하고, 도전상이 탄소 섬유에 의한 것과 탄소 분말에 의한 것의 2종류의 재료 결과가 실려 있다. 탄소 입자를 도전상으로 이용한 경우에는 탄소 섬유를 이용한 경우에 비해 작은 변형에서 전기 저항의 변화가 관찰된다. 다시 말해 보다 고감도의 파괴 탐지가

가능하다는 것을 알 수 있다.

計器에서 개발 위탁되고 있다.

8. 재료인가 구조인가

지금까지 기술한 것은 재료에 관한 것이다. 그러나, 사람이 사용하는 것은 재료가 아니고, 기능 또는 특성이기다. 만약 단일 재료를 만드는 것이 극히 곤란한 경우, 구조로도 문제 해결을 얻을 수 있다는 것을 재료 연구자·기술자는 마음 속에 깊이 새겨 두어야 한다. CFGFRP근의 경우, 건강 진단, 이병 진단, 병역 진단 등이 가능하다는 것을 보았지만, 기존의 건조물에 대해서는 새롭게 만들어 바꾸지 않는 한 적용할 수 없다. 기존의 건조물에 적용하는 경우 충분하다고는 할 수 없지만, 변형계는 개발되어져 있기 때문에 건강 진단은 할 수 있다. 그러나, 변형계에 있어서 치명적인 것은 병역의 진단이 불가능하다는 것이다. 전술과 같은 변형계를 이용해서 병역을 탐지하기 위해서는 각각의 변형값을 컴퓨터에 기억시켜 필요에 대응해 호출해야 한다. 계측은 연속이고 필요한 데이터는 지진, 토사 유출 등 순간적 또는 일과성의 것이다. 연속 계측의 대부분은 무용한 것이 된다. 순간적 하중에서 변형 또는 일부 파손이 생기고 그 하중을 제거한 후 변형이 잔존하지 않은 경우, 결보기상 파손하지 않은 것으로 보인다.

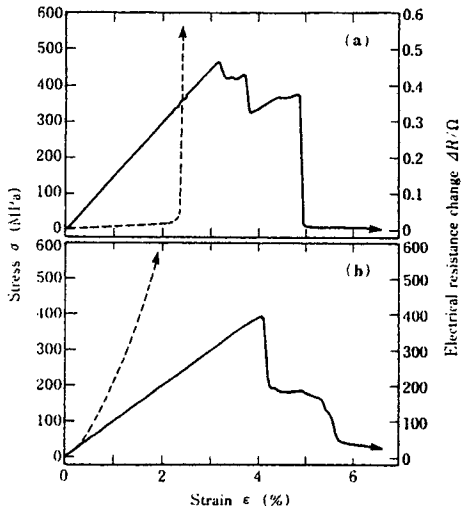


그림 4. 장섬유와 도전성을 이용한 FRP계 파괴 검지 재료의 응력-변형-전기 저항 변화의 관계

MASC 센서(Maximum Strain Sensor Composed of Carbon Fiber : 탄소 섬유에 의한 최대 하중 검출 센서)는 변형량에 대응해 탄소 섬유를 커트 해서 어디까지 변형에 대응하는 섬유가 절단됐는가를 전기적으로 측정하는 것이다. <그림 5>에 MASC 센서의 기구를 나타내었다.

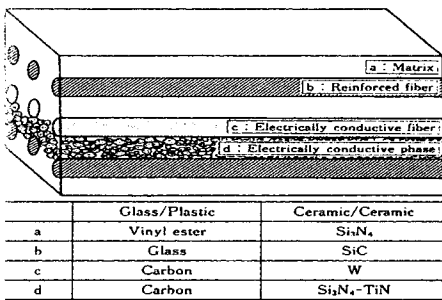


그림 3. 장섬유와 전기 전도상의 복합화에 의해 세라믹스 및 FRP에 자기 진단 기능을 발현시키는 재료 구조의 설계도

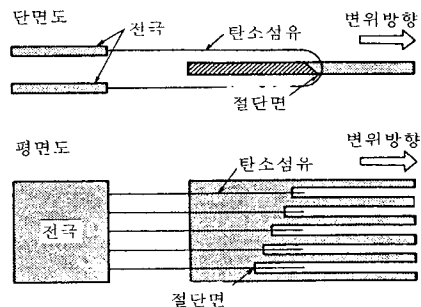


그림 5. MASC 센서의 구조

숨겨진 손상이 다음에 걸린 하중에서 치명적인 것으로 확대될 위험이 있는 경우, 적어도 과거 최대의 변형을 기억하는 기구의 도움을 빌릴 필요가 있다. 이와 관계된 것은 일본 신기술 사업단의 지원으로 長野

이 센서를 건조물의 필요 장소에 설치해서 정기적으로 측정하면 전회의 측정 이후의 최대 변형을 측정할 수 있고, 변형이 큰 곳을 보강하면 좋다. 인텔리전트 재료의 전형적인 것으로서 正倉院의 '교창(校倉)'

이 소개된다. 여기에서는 목재가 흡습 팽창해서 통기부를 폐쇄하고, 건조해서 수축하기 때문에 통기부를 넓히는 것이 가능하기 때문에 내부는 고도의 습도를 유지되지만, 목재를 사용하는 것은 재료이고, 짜 맞추는 것은 구조이다. 재료의 개발과 구조의 아이디어 중에서 어느 쪽이 간편하고 환경에 부하를 주지 않고 통하는 것이 충분히 검토되어야 할 사항이다.

9. 결 론

지금까지 인텔리전트 재료의 사례로서 콘크리트계 재료·구조에 대해서 기술하였다. 콘크리트계에 있어서 인텔리전트를 달성시키기 위해서는 많은 센서 을 추가하고, 복잡하게 하는 것은 가급적 지향되어야 할 것이라고 생각한다. 또한 본고에서는 자기 진단 기구를 가지고 콘크리트 구조의 보강을 위해서 CFGFRP 근이 건강 진단, 이병 진단, 병역 진단 등의 자기 진단 기구를 가지고 있다는 것을 소개했다. 또한 이 재료는 구조 재료로서의 기능, 산소 센서와 같은 기능 재료 기능, 구조 재료로서의 특성과 기능 재료로서의 기구가 융합되어 있고, 구조가 간단하다는 모든 의미를 담고 있는 우수한 재료이다. 이 외에도 콘크리트계 재료·구조의 기능적인 구조의 설계 기법에 대해서도 간단히 언급하였고, 대부분 이들 재료들은 연구 단계 수준이지만 구조물의 내력 변화를 전기적으로 감지할 수만 있다면 어느 정도 실현 가능하며, 앞으로 개발되는 신소재는 가급적 많은 기능을 갖고 있으면서 간단해야 되고, 사용의 편의성이 극대화되어야 된다고 생각된다. □

참고문헌

1. 柳田博明ほか著 : インテリジエントマテリアル(日刊工業新聞社), 1987. 11.
2. 柳田博明著 : 次世代素材インテリジエントマテリアル(講談社ブルーバックスB966), 1993. 5.
3. 柳田博明・由吉恵子著 : テクノデモクラシー宣言(丸善ライブラリー-215), 1996. 12.
4. 杉木 掄 : インテリジエント コンクリート, 日本コンクリート工學 協會, 콘크리트工學, Vol. 32, No. 7, 1994. 7.
5. 강석화, 신기능 콘크리트 특집(전기전도콘크리트), 콘크리트학회지 제10권 6호, 1998. 12.
6. 賢材研究會 : 賢材研究會報告集(平成 6, 7年度), (賢材研究會), 1996. 6.
7. 元島酒二ほか : マイクロコイル狀炭素纖維の氣相合成とその性質, 炭素, 174, pp.215~224, 1996.
8. 元島酒二 : ミクロの世界を旅行する, 化學, 51 12, pp. 749~751, 1996.
9. 元島酒二・岩永 浩 : 石巻き材料, 左巻き材料, マイクロコイル狀炭素纖維を中心に, 材料科學, 33, 4, pp. 150~151, 1996.
10. 宋原秀彰・石田 積 : 機能材料, 15, 34, 1995.
11. T. Mitsuoka, H. Matsubara, M. Takada, H. Kawamoto and Y. Matsuo : proceedings of the symposia of 3rd IUMRS international conference on Advanced Materials, Elseviere, 421, 1993.
12. 宋原秀彰・高田眞之, 柳田博明 : 化學と工業, 49卷, 第1号, p.40, 1996.
13. M. Takada, S. G. Shin, H. Matsubara and H. Yanagida : The UK-JAPAN Seminar on Intelligent Materials, 1996.