

건설분야에서의 나노기술의 응용

Application of Nanotechnology in Construction



송 하 원*



남 상 혁**

*본학회 학회지 편집위원장, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수
**연세대학교 사회환경시스템공학부 연구교수

“나노과학과 나노기술은 내일의 돌파구를 여는 전략적 기술을 만들어 낼 것이다. 분자수준에서 원자를 하나씩 쌓아올려 ‘상상식’으로 새로운 물질을 만들 수 있게 되면, 우리 앞에 엄청난 가능성의 문이 열릴 것이다”
- 데이비드 스와인, 보잉사 기술담당 부사장 -

1. 서 론

나노기술은 최근 세계적으로 큰 관심이 집중되고 있는 연구개발 분야이다. 다른 기술들과는 달리 나노기술은 명확하게 정의되어 있지 않을 뿐 만 아니라 체계화 되어 있지도 못하다. 작다는 뜻의 그리스어가 어원인 나노는 10억분의 1을 나타낸다. 1nm는 10억분의 1m, 즉, 인간 머리카락 직경의 약 1/80,000 정도를 의미한다. 실생활에서 많은 응용분야를 갖는 나노기술은 모든 과학 기술 분야를 포함하는 포괄적인 기술로 고려될 수 있다. 나노기술의 정의는 다양하지만 일반적으로 나노 크기 즉, 0.1nm~100nm 정도의 물질에 대해 이해하고 제어하는 것으로 정의된다.

이러한 나노기술을 이용하여 개발에 성공한 사례를 보면, 재료분야에서는 나노기공 에어로겔 및 촉매, 나노분말 등이 있고, 전자소자로서는 탄소나노튜브와 스핀밸브 등이 있다. 투명한 Glass-like 실리카 에어로겔은 미국의 NASA Science News에 의하면 21세기에 플라스틱 만큼이나 많이 쓰일 나노재료로 평가받고 있으며, 이를 이용하여 건물의 단열재료로 사용한다면 수 천억 달러에 해당되는 에너지 절감효과가 있다고 보고되고 있다. 한편, 탄소나노튜브의 응용분야의 경우는 트랜지스터 각종 센서 복합체, 연료

전지 그리고 차세대 디스플레이 등 그 분야가 매우 광범위하다.

이렇듯 나노기술은 나노소자, 나노재료, 나노공정 그리고 나노시스템으로 이루어져 있고 주력산업의 고도화를 위한 공통기반기술이며, 차세대 국가성장동력의 요소기술이 되어 21세기 신 산업혁명의 핵심기술이 될 것이다.

2. 건설분야에서의 나노기술

1990년대 초 건설산업은 나노기술의 성공적인 적용이 가능한 산업 중의 하나였다. 당시 스웨덴과 영국의 건설분야 미래조사 보고서는 나노기술의 중요성을 강조하였다. 더욱이 레미콘과 콘크리트 제품 분야는 10~15년 내에 나노기술에 의해 영향을 받을 것으로 예상되는 상위 40개 산업분야 중 하나로 선정되기도 하였다. 그러나 대기업과 벤처 투자자들의 큰 관심과 투자를 나노기술의 연구개발에 집중시킨 자동차, 화학, 전자, 생명공학 등에 비하여 건설 분야는 나노기술의 연구개발이 크게 뒤쳐져 있는 실정이다.

세계적으로 나노기술에 대한 관심과 연구개발 활동이 산업전반에 걸쳐 크게 증대되고 있고, 건설 분야에서도 예외는 아니다.

유럽의 경우 나노차원에서 현상 이해와 현상 모델링, 나노스케일 입자와 섬유 개발, 나노구조를 변형시킨 재료, 기능성 재료, 얇은 필름과 코팅/도료, 에너지 절약 재료, 그리고 나노 센서가 혼입된 스마트 재료 등 광범위한 관심과 활동을 보이고 있다.

미국의 경우에는 건설과 직·간접적으로 연관된 여러 프로그램이 NNI(National Nanotechnology Initiative)의 지원 하에 수행되고 있으며, NSF(National Science Foundation)의 주도로 재료의 기본특성, 신소재 개발, 열화 연구, 진단 기술, 멀티스케일 모델링, 재료의 시뮬레이션과 설계, 그리고 건설 자동화 등의 연구가 진행되고 있다.

캐나다에서는 건설산업에서의 나노기술의 중요성과 가능한 응용분야에 대해서 인지하고 있어 최근 나노기술에 기초를 둔 건설산업 제품의 개발을 위해 공동연구 프로젝트를 시작하였다.

일본, 중국 등 다른 많은 나라에서도 건설분야에서의 나노기술 적용에 관한 연구개발을 시작하고 있다.

3. 건설분야와 관련된 나노기술의 진행 사업

3.1 나노 미립자, 탄소 나노튜브, 나노섬유 등

이 분야는 현재 나노기술 분야에서 상업적으로 가장 잘 개발된 분야이다. 나노스케일 재료의 사용은 다양한 산업 분야에서 현재 응용되고 있거나 앞으로 응용될 수 있는 바탕이 된다. 나노 미립자/섬유 재료를 탄소 나노 튜브, 나노 점토, 금속/비금속 산화물 등과 같은 다양한 형태로 생산하는 업체도 최근 늘어나고 있으며, 특히 건설분야에 있어서, 미립자, 나노 미립자, 탄소 나노 튜브, 나노 섬유는 새로운 기능의 재료/피복재의 개발, 더욱 향상된 성능을 가진 장비/시스템 개발 뿐 만 아니라 더욱 강하고 단단하며 더 내구성을 갖는 구조물 재료 개발을 위한 가능성이 제시되고 있다.

건설과 관련하여 몇몇 나노입자 재료는 복합재료, 즉 시멘트계 재료, 피복재/도색재, 접착제, 밀폐제 등의 충전제 또는 첨가제로서 널리 사용되고 있다. 예를 들면, 나노 점토와 나노 튜브/섬유는 고성능 복합재료에 많이 사용된다. 또한 비결정의 나노실리카 미립자는 무다짐 콘크리트에 있어서 재료분리 저항성을 향상시키고 경화된 콘크리트의 강도/내구성을 향상시키는 시멘트/콘크리트의 혼화재료로 사용되고 있다.

나노기술 분야에서의 발전은 물질의 분자구조를 요구에

맞도록 나노 스케일에서 설계하고 조절하여, 개선된 성능을 갖는 재료의 개발을 가능하게 하고 있다.

3.2 나노차원의 구조를 변형한 재료

하나의 예로서 나노차원의 구조를 변형한 보강철근 - 미국의 MMFX 철강에서 제조하는 MMFX2 철근- 이 있다. 이 철근은 스테인레스강 보다 훨씬 낮은 가격임에도 불구하고 스테인레스강과 비슷한 정도의 부식 저항성을 갖는다. 보통의 탄소강과 비교하면 MMFX 철근은 나노스케일에 있어서 완전히 다른 구조를 갖는다(그림 2). 뿐만 아니라, 변형된 나노구조에 의해 MMFX 철근은 우수한 역학적 성질을 갖는다. 이런 우수한 재료적 성질로 인하여 상대적으로 적은 비용으로 극심한 부식환경에서의 구조물이 요구하는 사용수명을 만족할 수 있게 되었다. 철근의 부식은 오늘날 건설산업이 직면한 가장 심각한 내구성 문제 중 하나이기 때문에 MMFX와 같은 높은 부식 저항성을 갖는 철근의 사용이 최근 본격적으로 시도되고 있는 실정이다. 현재 MMFX 철근은 미국 전역에 걸쳐 일반 건설에 사용하기 위한 필요한 조건 등을 검토하고 있으며, 연방도로국과 미 해군, 그리고 여러 미 연방 주의 교통국에서 상당한 관심을 보이고 있다.

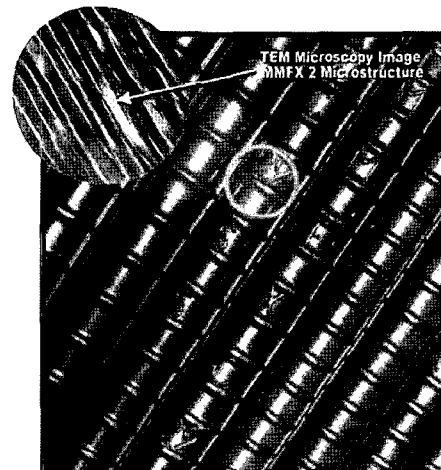


그림 2 나노구조를 변형시킨 철근

또 다른 중요한 개발 분야는 나노다공성 실리카 합성물과 에어로겔 같은 절연 재료이다. NanoPore사는 유기 미립자를 포함하는 나노다공성 실리카 합성물질을 개발하였다. 이 물질은 일반 절연 재료에 비해 최대 10배 정도의 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 낮은 밀도의 다공성 입방체의 우수한 절연특성은 다수의 공극들의 독특한 형상과

작은 크기(10~100 mm) 때문이다. 이 새로운 절연 합성물은 우수한 열효율, 최적 에너지효율, 또는 최소 절연 두께가 필요한 다양한 건설 구조물에 폭넓게 사용될 수 있다.

3.3 기능성 코팅 및 얇은 필름

특정 나노입자나 나노층을 코팅이나 얇은 필름에 혼합하여 성능을 개선시키고 추가적인 기능을 얻을 수 있게 된다. 현재 부식방지 코팅, 자가청소, 온도조절, 에너지 절약, 박테리아 코팅, 그리고 구조물에 대한 고내구성 도료 등의 제품들이 개발되어 건설분야에서 사용되고 있다. 이 코팅재들은 낙서방지 표면, 카펫, 그리고 보호용 특수외복 등에도 사용될 수 있다.

더욱이 나노구조의 코팅재는 서로 다른 주파수를 갖는 영역의 빛을 선별적으로 반사 또는 투과시키는데 사용될 수 있다. 이러한 코팅재는 복사열의 반사 또는 에너지 절약 목적으로 유리면에 사용될 수 있다. 또한 주위를 감지하거나 주변에 조화할 수 있고 또는 외관을 변형시킬 수 있는 스마트 반응성 재료에도 나노기술이 응용될 수 있다. 예를 들면, 이 스마트 신소재는 온도에 따라 색을 바꾸는 건축 코팅, 건물의 에너지 소비를 최소화할 수 있도록 열과 빛에 반응하는 피복재 등에 사용될 수 있다.

3.4 환경 및 성능 모니터링 센서 및 장치

마이크로 센서 및 마이크로 센서 기반의 장치들은 이미 환경조건(온도, 습도, 연기, 소음 등)과 재료/구조 성능(응력, 변형률, 진동, 균열 등)을 조절하거나 모니터링하기 위해 건설 및 유지관리 분야에서 사용되고 있다. 나노기술은 장치들을 보다 작고, 보다 신뢰성 있으며 보다 높은 에너지 효율을 갖는 마이크로규모 제품이 도달할 수 있는 범위 이상의 기능을 기대할 수 있는 가능성을 제시한다.

또한 나노기술은 자가진단 및 자가보수 능력을 가진 스마트 재료와 구조물을 개발할 수 있는 큰 잠재력을 제공한다. Cyran Sciences에서는 나노미터 단위의 얇은 필름 센서를 이용한 전자코를 개발하였는데, 탐지건보다 더 민감하고 저렴한 이 장치는 유독 가스, 화학약품의 누수, 오염 등의 탐지에 적용할 수 있도록 개발 중이다. Siemens and Yorkshire Water는 수질을 모니터링하고 오염경보를 자동으로 보내는 작은 칩을 탑재한 화학 센서를 개발하고 있다. 건설분야에 적용할 수 있는 또 다른 응용 분야는 균열과 손상을 자가치유 하는 능력을 가진 콘크리트, 정보 내장형 장치, 그리고 환경 및 기후 조건 변화 등에 따라 변

화하는 건설 구조물의 개발 등이 포함될 수 있다.

3.5 에너지 성능, 통신 및 기타 응용 분야

나노기술의 연구개발은 환경적 손상을 예방 또는 회복시키기 위한 연구 분야와 지속가능한 분야에 대한 개발을 촉진하는 부분으로 형성된다. 새로운 친환경적 에너지원, 에너지 효율적 광원과 공간 조절 장치/시스템, 물과 공기의 효과적 필터 등의 발달은 건설 및 환경 분야에 큰 영향을 주게 될 것이다.

에너지 및 환경 분야에서 가장 유망한 응용 분야는 연료 전지 개발과 광전변환공학이다. 지난 몇 년 동안 어떠한 표면에도 도장할 수 있도록 유연하고, 재래식 실리콘 반도체 태양전지 보다 훨씬 더 간단하고 저렴한 플라스틱 태양전지를 개발하기 위해 많은 노력을 기울여 왔다(그림 3).

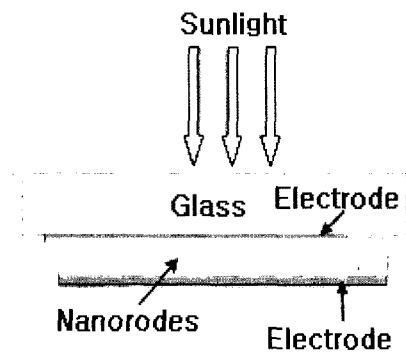


그림 3 저렴한 플라스틱 태양열 전지

나노기술로 실현 가능한 재료 및 제품들이 다른 산업 분야에서도 급속히 개발되고 있거나 이미 가능하게 되었다. 지속적인 크기 감소와 성능의 향상을 통해 이러한 개발품들은 건설 및 환경 분야에 영향을 미치게 될 것이다.

이러한 분야로서는 계속 발전하고 있는 컴퓨터, 전자 및 통신 장비, 탐사 및 탐지 장치, 효율적인 촉매장치, 신재료 등이 포함될 것이다.

3.7 복제, 복합 및 자기합성 재료

나노기술의 궁극적 목적 중 하나는 자기합성 및 자기복제 나노 장비 기반의 분자 제조이다. 비록 분자 제조 기술이 가능한 것으로 판명되고 있지만 완전한 분자 나노기술은 최소 20년의 개발 기간이 필요할 것이다. 그러나 목표물 향환 광범위한 노력과 함께 자연을 복제하는 분자 나노기술이 응용된다면 향후 5~15년 이내에 건설분야에 적용

할 수 있는 프로세스와 새로운 재료의 개발을 기대할 수 있다.

Biomimetics란 자연을 모방한 과학이라 할 수 있다. 자연계의 예로서, 경량의 구조이지만 놀라운 강도를 가진 벌집, 인공 세라믹 복합재료보다 더 강한 사슴뿔, 스스로 표면을 정화하는 연꽃잎, 환경에 따라 색을 변화시키는 카멜레온의 피부 등과 같이 거의 모든 곳에 존재한다. 나노기술의 발전으로 가능하게 된 원자 수준에서 재료를 다루는 기술로 인해 이러한 재료의 연구는 새로운 재료 및 제품을 창출할 수 있는 생산적인 접근 방법을 제공하게 되었다.

한 가지 재미있는 예가 도마뱀의 발을 모방한 나노기술이다. 도마뱀은 벽, 천정, 심지어는 유리에도 발가락 하나로 매달려 있을 수 있다. 도마뱀은 각각의 발가락에 50만 개의 작은 털을 가지고 있고, 털끝은 반데르발스(즉, 분자간의) 힘을 통해 어떠한 표면에도 집착될 수 있는 100~1000개의 작은 주걱모양으로 갈라져 있기 때문에 가능하다(그림 4). 도마뱀의 발가락에서 영감을 얻은 영국의 연구자들은 집착성 강하고 방수성이 뛰어나며 재사용이 가능한 초집착성 테이프를 개발하였다.

또한 거미줄의 특성과 그 생산 기술을 이해하기 위하여 연구가 수행되고 있다. 거미줄은 연성과 강성의 뛰어난 조합을 갖는 것으로 밝혀져 있어 사람 머리카락의 약 1/10 직경인 거미줄 가닥은 동일한 무게의 철강보다 몇 배 더 강하며, 끊어지지 않고 길게 늘어날 수도 있다(그림 5). 거

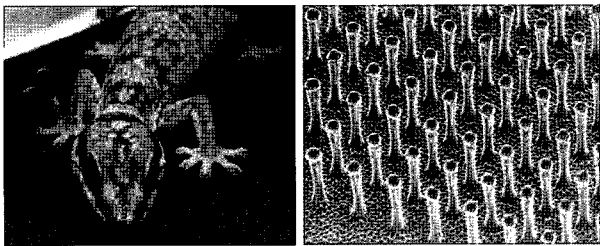


그림 4 도마뱀 발가락을 응용한 2 μ m의 인조 털

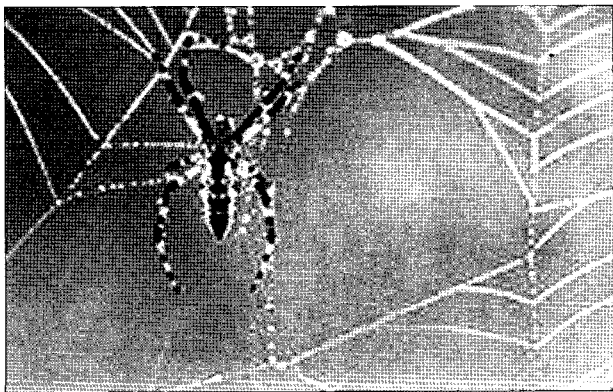


그림 5 강성과 연성의 뛰어난 조합을 갖는 거미줄

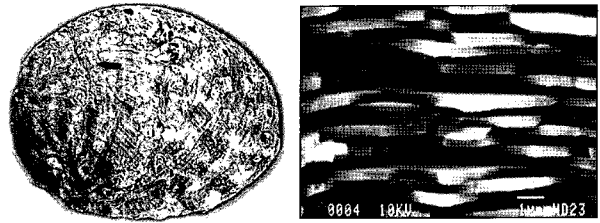


그림 6 전복 껍데기의 층상 구조

미줄의 비밀은 두 가지의 다른 단백질로 구성되는 복합구조에 있는데, 각 단백질은 서로 다른 특성을 갖는 세 가지 형태로 구성된다. 거미줄은 인공 섬유보다 뛰어난 역학적 특성을 가질 뿐만 아니라 공기 중이나 수중에서 가공될 수도 있다.

천연재료의 또 다른 특징은 다양한 스케일에서 다양한 형태의 구조를 갖는 조직이 있다는 것이다. 잘 알려진 예로서, 조개에서 찾게 된 'brick-and-mortar' 복합구조이다. 그림 6에 나타난 바와 같이 전복껍질은 대략 0.2mm 두께의 층으로 구성되어 있고, 각 층들은 더 많은 층으로 각각 약 0.5 μ m 두께의 brick-mortar의 집합을 이루고 있다. 합성구조 조직과 유기물 접착제의 특별한 성질이 혼합된 복합재료인 전복껍질은 매우 큰 파괴인성을 갖는다. 그것은 껍질 바깥쪽의 층에서 발생하는 균열들이 껍질을 통과하는 방향으로 진행되지 않기 때문이다. 균열은 접착층을 따라 진행되다가 많은 양의 에너지가 흡수/소산되며 소멸된다. 조개껍질과 관련된 현재의 연구는 조직형성의 과정과 메커니즘에 대한 시험을 통해 한 단계씩 복합 층구조 재료의 개발로 가고 있다.

4. 미래의 동향 및 가능성

현재 건설에 응용될 수 있는 나노기술 개발에 대한 전문가들의 조사에 따르면, 위에서 언급한 대부분의 연구 분야가 10년 내에 건설 산업 분야에 막대한 영향을 미칠 것이라는 것이다. 이 기간 중 나노기술에 대한 이해가 건설 산업과 경제에 미치게 될 가장 큰 영향은 나노기술 제어력을 통한 재료의 개발, 성능 개선과 건설 과정의 개선으로 이어질 것이다.

10~15년 이상의 장기적인 관점으로 보았을 때, 특히 재료과학에 있어서 큰 발전이 기대된다. 이러한 발전은 특정 요구사항에 따라 결정된 설계에 따라 재료를 만들어 내는 접근법으로 나타나게 될 것이다.

더욱이 나노기술 개발, 특히, 자연 재료의 구조형성과 제조 과정의 비밀을 벗겨내기 위한 연구와의 결합은 친환경

경성과 높은 에너지 효율을 갖는 재료와 구조물의 혁신적인 설계 및 건설 방법을 이끌어낼 것이다.

궁극적으로 분자 나노기술은 스스로 건설하는 구조물을 만들 수 있는 길을 열게 될 것이다.

5. 결 론

현재 건설분야에 있어서 나노기술의 연구개발이 다른 산업분야에 비해 크게 뒤떨어져 있으며, 외국의 경우에도 주로 정부에 의해 주도되고 있는 실정이다. 따라서 건설 분야에 있어서 나노기술의 응용도 여전히 매우 작다고 할 수 있다. 그러나 최근 나노기술을 바탕으로 한 재료와 제품들이 개발되어 건설 산업 분야에 서서히 적용되고 있다.

나노기술의 개발은 건설분야만을 위한 개발은 아니더라도 건설 분야에 많은 응용 가능성을 갖고 있다. 건설분야에 대한 나노기술의 응용 가능성은 엄청난 것이며, 재료와 시공 단계에 있어서의 매우 작은 성능 개선으로도 매우 큰 이익을 얻을 수 있다. 단기적으로는 재료의 성능 향상을 통해 건설 산업에 큰 파급효과를 주게 될 것이며, 장기적인 관점에서 보면 나노기술의 개발은 높은 에너지 효율을 가지며 친환경적인 재료/구조물을 설계하고 시공하게 되는 혁신적인 효과를 낼 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 마크 래트너, 대니얼 래트너 (김희봉 역) (2004), “미래를 위한 기술 나노테크놀러지”, 야스미디어
2. Chong, K.P. (2004), “Nanotechnology in Civil Engineering—Research and Challenge”, in ‘Nanotechnology in Construction’, P.J.M. Bartos et al. Eds.(Royal Society of Chemistry), pp.13~22
3. Makar, J.M. and Beaudion, J.J. (2003), “Carbon nanotubes and their application in the construction industry”, *Proceedings, 1st Inter. Symp on Nanotechnology in Construction*, Paisley, Scotland, pp.23~25
4. Powell, K. (2002), “Gecko glue round the corner”, *Nature: science update*, 28 August
5. Zhu, W., Batos, P.J.M and Porro, A. (2004), “Application of nanotechnology in construction”, *Materials and Structures*, Vol. 37, pp.649~658
6. MMFX Steel Corporation of America, <http://www.mmfsteel.com>
7. NanoPore Incorporated, <http://www.nanopore.com>
8. http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2002/3/28_solar.html
9. <http://www.netcomposites.com>
10. <http://www.lifesci.ucsb.edu/mcdb/faculty/morse/research/biomolecular/biomolecular.html> 