

시멘트계 건설재료와 나노기술

이 승 현 (군산대학교 신소재·나노화학공학부 교수)

최근 세계적으로 건설분야의 눈부신 발전과 함께 새로운 건설재료에 대한 개발도 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 경향은 지구상의 인구증가, 지가상승, 대도시로의 인구집중 등 사회 환경의 변화와 밀접한 관계가 있는 것으로 생각할 수 있으며, 특히 연구개발은 초고층 구조물의 개발, 해양구조물의 개발, 지하공간의 개발 및 우주개발 등 건설분야에서의 새로운 영역으로 각광받고 있다. 최근 콘크리트의 고성능화, 고강도화는 기존의 일반 콘크리트가 갖는 문제점을 상당 보완하여 왔지만, 다른 재료와 비교하여 강도에 비해 중량이 크다는 단점이 있어 구조물의 거대화, 고층화 등 그 영역이 넓어지고 있는 현 단계에서 실용성에 한계를 드러내고 있다. 따라서 콘크리트가 갖는 특성을 개선시키기 위해서는 나노기술 등 새로운 기술과 접목시키는 것은 매우 바람직한 것이라 생각된다. 나노기술은 나노미터 크기의 분자, 원자 혹은 거대한 분자 규모의 물질 및 재료를 사용하여 초미분체를 제조하거나 그것을 이용하여 미세하고 또한 정밀한 장치나 시스템을 제조하는 기술이다. 본고에서는 건설재료의 성능향상을 위해 적용된 나노기술이 어떠한 것이 있는지 알아보기로 한다.

1. 나노기술이란 무엇인가

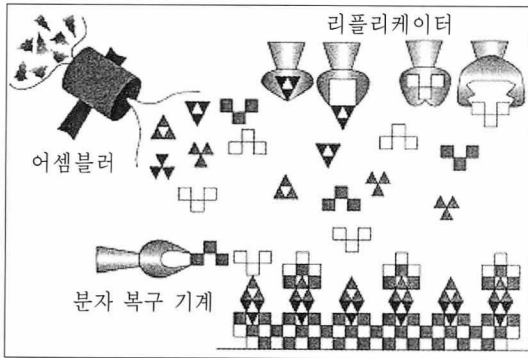
나노(nano, n)라는 단위는 10^{-9} 즉 10억분의 1을 나타내는 접두어이다. 예를 들면 나노의 뒤에 크기

를 나타내는 단위인 미터(m)가 붙으면 나노미터(nm)로 1nm라는 것은 10억분의 1미터이며, 초(sec)가 붙은 1나노초(ns)는 10억분의 1초를 나타낸다. 즉, 크기를 나타내는 단위이기 때문에 나노기술이란 나노미터 스케일을 취급하는 기술이다.

나노기술에 대한 명확한 정의는 내려있지 않지만, 일반적인 Dr. Dresselhaus나 Dr. Eklund 등에 의하면 “나노기술은 원자나 분자를 정교하게 조작하여 새로운 재료나 분자 장치를 만드는 방법이나 기술로서 물리·재료과학·기술이 융합된 새로운 기술이다.”라고 정의하였다.

나노기술의 원점은 Richard Feyn-Man이 1959년에 미국 물리학회에서 “There’s plenty of room at the bottom”라는 제목으로 강연하면서, 앞으로 분자나 원자를 기계적으로 조립하는 것에 의해 새로운 재료를 만들 수 있는 가능성이 있다는 것을 처음 언급한 것으로부터 시작되었다.

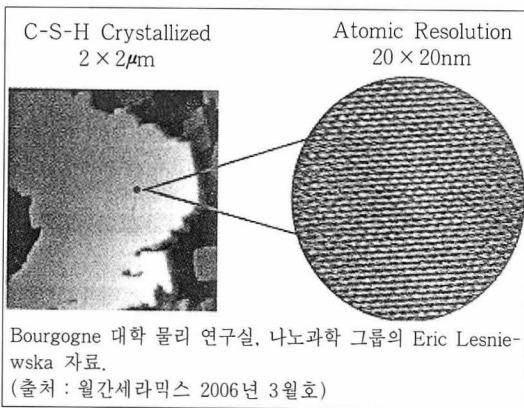
1962년에는 Von Hippel이 재료의 분자설계나 분자기술의 진보가 있으면 재료과학적인 측면에서 가능하다고 언급하였다. 그후 Drexler나 그밖의 연구자들이 나노 스케일 재료의 제조원리를 발표하였다. 1986년에 당시 MIT 대학의 학생이었던 Drexler가 “창조하는 기계”라는 그의 저서에서 매우 독특한 생각을 내세웠다. 그것은 Bottom-Up의 나노기술로서 Drexler의 나노기술이라 불리우고 있다. 그의 발상은 <그림-1>과 같이 어셈블러(Assembler)라는 분자제조기가 존재하여 어셈블러에 원재료가 되는 질



〈그림-1〉 Drexler의 나노기술

소, 산소, 수소 등을 넣으면 특정 모양의 분자가 만들어지고, 나노 컴퓨터로 제어하는 복제장치의 복사체(Replicator)라는 것에서 나온 분자를 기관 위에 차곡차곡 나열해가면 자유자재로 원하는 물질을 만들 수 있다는 것이다. 이것이 Drexler의 나노기술이라 불리우는 것으로, 즉 Bottom-Up의 수법이 기초된 것으로 Feyn-Man의 Top-Down 수법과는 반대되는 개념이다.

나노기술이 적용되는 나노 스케일은 1~100nm로 현재 나노 입자, 나노 복합재료, 탄소 나노 튜브 등의 나노 소재가 널리 개발되고 있다. 최근에 AFM (Atomic Force Microscopy)을 이용하여 시멘트 수화물인 CSH 겔의 구조를 조사한 결과 〈그림-2〉와 같이 나노 크기에서 매우 정돈된 구조인 것으로 밝



〈그림-2〉 매우 잘 정렬된 C-S-H 겔(Ca/Si=0.9)구조

혀져, 시멘트의 수화반응이 나노 구조제어의 방향을 제시해 줄 수 있을 것으로 기대되고 있다.

2. 나노 입자 첨가 시멘트계 복합재료

복합재료란 측면에서 보면, 보통 콘크리트는 시멘트 페이스트를 매트릭스로 하고 골재를 보강재로 하는 마이크론 단위의 입자 분산 강화형 복합재료의 하나라고 볼 수 있다. 시멘트계 복합재료는 매트릭스 중에 공기포가 필연적으로 개재될 뿐만 아니라 시멘트 페이스트와 보강재간의 결합력은 에폭시와 보강재간의 결합력에 비해서 비교적 약한 특성을 갖고 있다. 따라서 시멘트계 복합재료는 나노기술에 의하여 보강효과를 대폭 개선할 여지가 많다.

가. 실리카 흙의 사용

실리카 흙은 전기 아크 용융로에서 금속 실리콘이나 또한 페로실리콘 합금철을 제조하는 과정에서 산출되는 부산물로서 매우 미세한 비정질 실리카 분말이다. 이 분말의 평균 입경은 100~200nm 정도로 포틀랜드 시멘트 수화물 입자의 크기보다 100배 정도나 더 적은 입경을 가지고 있다. 그리고 SiO₂ 함량은 85~98%이고, 포졸란 활성이 가장 큰 물질이다. 실리카 흙은 콘크리트 혼화제로서 다른 혼화제에 비하여 콘크리트의 제반 특성을 탁월하게 향상시키는 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 그 효과는 강도, 탄성계수 등 기본적인 구조적인 특성은 물론 진동 흡수성, 흡음성 등 비구조적인 특성에 이르기까지도 우수한 효과가 인정되고 있다. 그러나 단섬유를 사용하는 콘크리트 혼합물에 있어서는 섬유 분산성을 저해하여 콘크리트 혼합물의 작업성을 저하시킨다.

Chang은 실리카 흙(Elken Materials사의 EMS 965)을 1종 포틀랜드 시멘트(Lafarge Corp.)에 중량비로 15%를 첨가한 후, 대기중 실온에서 상대습도 100%의 조건으로 28일간 양생한 결과 다음과 같

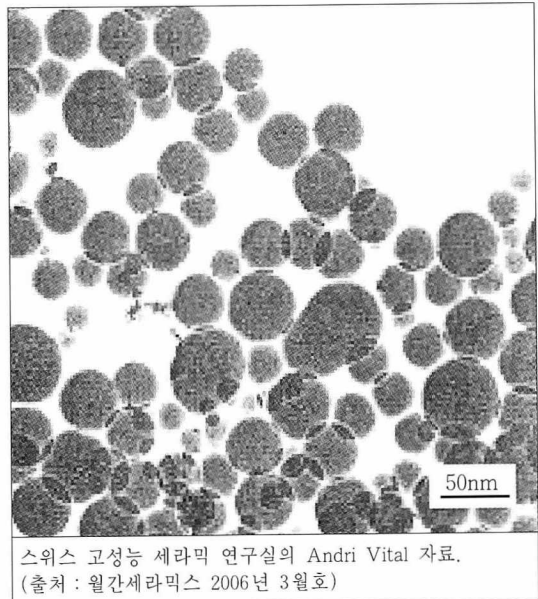
은 결론을 얻었다. 실리카 흙의 사용은 인장강도, 압축강도, 압축탄성계수 그리고 굽힘 탄성계수를 증가시켰으나 압축 연성은 감소하였다. 그리고 실리카 흙은 동결융해 저항성, 진동흡수성, 내마모성, 철근 부착강도, 내화화성, 철근의 내식성을 증가시켰다. 또한, 실리카 흙은 알칼리-실리카 반응, 건조수축, 투수성, 크리프 변형률, 열팽창계수, 유전상수를 감소시키는 효과가 나타났다. 이에 더하여 비열은 증가하였으나 열전도도는 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 실리카 흙을 또 다른 혼화재인 실란과 같이 사용하게 되면 열전도도는 증가하였다.

나. 나노 실리카 입자의 사용

나노 실리카 입자를 시멘트 몰탈과 함께 사용했을 경우의 특성을 Li와 그의 연구진에 의해 보고되었으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 나노 입자를 포함하고 있는 몰탈은 압축강도와 신축성이 증가한 것으로 나타났으며, 나노 실리카 분말의 함유량을 늘릴수록 몰탈의 강도가 더 증가하는 것이 밝혀졌다. 전자현미경 사진에 의하면 나노 실리카 입자들이 기공들을 채워 경화체 내의 수산화칼슘의 함량을 줄여서 미세조직을 강화하여 몰탈의 기계적 성질을 향상시키는 것으로 나타났다. 나노 실리카 입자의 투과전자현미경 사진을 <그림-3>에 나타냈다.

나노 실리카 입자가 첨가한 플라이 애시 혼합 콘크리트는 플라이 애시의 포졸란 반응이 나노 실리카에 의해 크게 향상되어 초기강도를 향상시켰으며, 큰 부피를 갖는 플라이 애시 혼합 콘크리트의 항복 강도를 증가시켰다. 나노 실리카 입자에 의해 개선된 콘크리트는 일반 콘크리트와 비교했을 때 81% 높은 강도를 나타냈다.

Colleparidi는 5~50nm의 나노 실리카를 콘크리트의 점도 조절 작용물질로 사용하였다. 물/시멘트의 비를 0.58로 일정하게 하고, 슬럼프는 아크릴계의 고성능 AE감수제의 양을 조절하여 780~800mm로 하였다. 특정한 슬럼프를 유지하기 위해 고



스위스 고성능 세라믹 연구실의 Andri Vital 자료.
(출처 : 월간세라믹스 2006년 3월호)

<그림 3> 초미세 실리카 입자

성능 AE감수제의 첨가량은 사용된 각 나노 실리카 분말의 퍼센트당 약 0.21%만큼씩 증가시켰다. 나노 실리카 분말을 첨가함으로써 콘크리트 혼합물은 보다 접착성이 향상되고 재료분리가 거의 일어나지 않았으며, 나노 실리카 분말은 초기 30분 이내의 슬럼프 손실에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

상업화된 콘크리트용 나노 첨가제 중에 하나인 Gaia Ulmen S.A은 Cognoscribe Technologies에 의해 개발되어 실리카 흙을 대체하는데 사용되고 있다. 이 제품은 액체 형태로 사용이 가능하여 나노 실리카 입자를 콘크리트내에 고르게 분포시킬 수 있는 장점이 있다. Gaia는 물량 감소 효과와 슬럼프 증가 효과를 가지고 있으며, 콘크리트 배합물은 뭉침이나 재료분리가 없는 완벽한 작업성을 나타내어, 자기 충전 콘크리트를 매우 쉽게 만들 수 있는 장점이 있다. 1.3%의 Gaia를 첨가한 경우 7일과 28일 압축 강도는 무첨가와 비교하여 거의 2배 정도 증가하였으며, 콘크리트의 초기강도는 68.2MPa 정도로 3배 정도 향상되었다. <표-1>에 콘크리트 특성에 미치는 Gaia의 영향에 대해 나타냈다.

〈표-1〉 콘크리트 특성에 미치는 Gaia의 영향

혼 합 변 수	일 반	Gaia 첨 가
시멘트 유형(EN-197)	II/A-P 42.5R	II/A-P 42.5R
시멘트 함량(kg/m ³)	460	460
혼합 첨가량(%)		1.3
공기 함량(%)	2.7	1.1
슬럼프(mm)		
5분 후	60	200
30분 후	25	210
60분 후	15	160
90분 후		140
양생온도(°C)	20	20
압축강도(MPa)		
1일	22.7	68.2
7일	32.7	77.3
28일	45.2	91.7

다. 나노 입자 사용에 의한 효과

나노 입자가 시멘트계 재료에 첨가되면서 나타나는 긍정적인 효과는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

- ① 잘 분산된 나노 입자는 액상의 점도를 증가시켜, 시멘트 입자와 골재가 위치를 확보할 수 있게 하여 응집을 방해하고 작업성을 향상시킨다.
- ② 나노 입자는 시멘트 결정립계 사이의 기공을 채워 물이 이동하지 못하게 한다.
- ③ 잘 분산된 나노 입자는 시멘트 수화물 생성의 핵으로 작용하여 수화반응을 촉진시킨다.
- ④ 나노 입자는 쉽게 작은 크기의 결정을 형성할 수 있어, CSH는 균일한 크기의 클러스터를 형성한다.
- ⑤ 나노 실리카는 수산화칼슘을 소비하는 포졸란 반응에 참가하여 추가적인 CSH를 형성한다.
- ⑥ 나노 입자는 재료간의 접촉면의 구조를 향상하여, 혼합재와 시멘트 접촉 물질간에 보다 강한 결합을 만든다.
- ⑦ 나노 입자에 의해 제공되는 크랙 포획과 미끄

럼면간의 상호 잠김 효과는 취성과 전단응력, 인장 강도를 향상시킨다.

3. 나노 섬유 첨가 시멘트계 복합재료

시멘트계 재료들의 성능 개선은 특성치의 증가가 필요한 것과 특성치의 감소가 필요한 것으로 대별할 수 있다. 특성치의 증가가 필요한 것은 강도, 탄성계수, 연성과 같은 구조적 특성들과 특히 한랭지역에서 중요한 동결융해에 대한 저항성 등이 있다. 그리고 특성치의 감소가 필요한 것은 건조수축과 염소 이온 및 물의 침투성 등이 있다. 건조수축은 시멘트 혼합물이 양생과 건조중에 발생하는 수축현상으로 이는 콘크리트 구조물의 균열을 유발시키고 내구성을 저해하는 주요 원인이다. 그리고 염소 이온 및 물의 침투성은 콘크리트 중에 묻혀 있는 보강재인 철근의 부식에 지대한 영향을 끼치는 인자이다. 이러한 각종 특성치의 증감에 의하여 콘크리트의 성능을 개선하기 위해서는 무엇보다 보강재로 사용할 첨가재의 선정이 중요하다. 주로 대형 구조물에 다량으

로 사용하게 되는 콘크리트는 성능에 비하여 가격이 싸다는 것이 가장 큰 장점이자 또한 콘크리트 재료의 존립기반이다. 이러한 측면을 고려하여 구조용 시멘트계 나노 소재는 비용과 성능이 균형을 이뤄야 한다. Chung은 이러한 의미에서 탄소섬유를 섬유상 보강재로 선택하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 나노 탄소 섬유의 사용

나노급 탄소섬유는 주로 탄소를 함유하고 있는 기체상태의 화합물을 약 500~700℃의 고온에서 열분해시켜 금속촉매 위에 섬유형태로 성장시켜 제조한 것으로 보통 200nm 정도의 직경을 가지고 있다. 종래의 직경 5~20um 탄소섬유와는 다른 것이며 또한 5nm 정도의 탄소 나노튜브와도 다른 것이다. 종래의 탄소섬유는 연속성 장섬유인데 반하여, 나노급 탄소섬유는 직선형이 아닌 불연속성 단섬유이나 형상비(길이/직경)가 크기 때문에 장섬유의 형태를 나타내고 있다. Chung은 Applied Sciences Inc.가 철촉매를 사용하여 메탄가스로부터 성장시킨 직경 160nm 급의 탄소섬유를 사용하였으며, 이 섬유의 비표면적은 12.5m²/g, 비중은 2g/cm³, 형상비는 20~200의 범위이다. 섬유형태는 목화 솜뭉치를 유사한 형상이고, 결정학적으로는 비정질에 가깝다. 나노급 탄소섬유는 고유의 불연속성 섬유상으로 인하여 복합재료의 보강재로서의 효과가 종래의 연속성 탄소 섬유에 비하여 훨씬 떨어졌으나, 인장응력하에서는 어느 정도 보강효과를 나타내고 있다. 시멘트계 복합재료에 있어서 나노급 탄소섬유는 인장응력과 연

관된 인장강도, 인장탄성계수 등은 모두 증가시켰으나 압축강도는 감소되었다. 그리고 나노급 탄소섬유는 물론 일반 탄소섬유도 시멘트계 복합재료의 진동 흡수성과 열전도도에는 큰 영향을 미치지 못하였다.

시멘트와 탄소간의 결합력은 폴리머와 탄소간의 결합력에 비하여 약하다. 그러므로 시멘트와의 약한 결합력을 향상시키기 위해서는 탄소섬유의 표면처리가 필요하다. 따라서 탄소섬유의 표면처리는 160℃의 오존가스 중에 노출시켜 처리하였다. 오존가스로 처리한 탄소섬유는 시멘트계 복합재료의 인장강도, 탄성계수 및 압축강도 등 제반 기계적 특성을 향상시켰다.

4. 맺음말

최근에 나노기술이 본격적으로 관심을 끌고 많은 연구개발이 추진되고 있다. 나노재료는 전자, 통신, 촉매, 바이오산업 등에 주로 적용되기 시작하였으며 건설재료에의 적용은 거의 시도되고 있지 않다. 앞으로 건설재료들은 고성능, 고기능성, 친환경, 고내구성 및 에너지 저감 등을 요구하고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위해서는 현재 적용되는 기술로는 부족한 점이 많다. 따라서 빠르게 성장하고 있는 나노기술에 의해 밝혀지는 새로운 지식을 건설재료에 도입하면 시멘트 콘크리트 재료의 큰 발전이 있을 것으로 기대된다. 본 내용은 한국과학기술정보연구원의 시멘트 매트릭스 구조용 복합재료(최룡), 월간 세라믹스(2006. 3) 및 나노테크놀로지(대영사)에서 인용하였다. ▲