

나노테크놀로지와 콘크리트 : 연구기회

Nanotechnology and Concrete: Research Opportunities



박기봉*

Ki-Bong Park

본 논문은 ACI SP-254 'Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives', 중 P. Balaguru and K. Chong이 발표한 논문을 저자의 허락하에 번역한 것임을 밝혀둔다.

1. 서론

나노테크놀로지는 가장 활동적인 연구 분야이며 많은 영역에 적용된다. 현재 이 기술은 새로운 재료의 개발을 위해 사용되어지며 또한 분자, 나노 및 마이크로레벨에서의 장비 및 시스템의 개발을 위해서 사용되어지고 있다¹⁻⁸⁾. 미국의 많은 정부 지원기관은 매년 수십억 달러를 나노테크놀로지 연구에 지원하고 있다. NSF는 연구비 지원에 적극적으로 참여하는 곳 중의 하나이다.

(1) 2006년 재정지원 조사 분야

- 기초적 나노스케일 현상과 과정
- 나노재료
- 나노스케일 장치 및 시스템
- 기구연구, 방법론 및 나노 테크놀로지를 위한 표준화
- 나노공정
- 주 연구 설비 및 기구 수집
- 사회적 중요성

(2) 2007년 재정지원 강조 프로그램

- 증가하는 복합 대형 나노시스템에 초점. 나노스케일 장치, 시스템 건축, 동적 및 돌출 작동 및 그들 각각의 구성 등에 관한 연구는 강조 될 것이다.
- 증가하는 고 시간 분해(time resolution)에 관련된 공학 분야의 3차원 측정예 초점

- 나노시스템 융합에 의한 과학, 나노스케일로부터의 공학과 기술을 적용에 집중
- 다른 정부 지원을 받는 나노 테크놀로지의 잠재적 관련 확대 공동연구 프로그램
- NSF교육네트워크에 접근을 통한 K~12학년을 위한 조기교육 프로그램과 교재 재료
- 산업체, 의료기기 및 주정부 등 연구자간의 파트너십 확대

2007년까지 NSF에 의해 지원받고 있는 활동적 연구 프로젝트는 700건 이상이다. 이 페이퍼의 주요목적은 나노- 및 마이크로-콘크리트를 포함한 포틀랜드시멘트계 복합물을 위한 나노테크놀로지의 사용 가능성을 소개하는 것이다.

포틀랜드시멘트는 건설재료 중 가장 일반적이고 폭넓게 사용되며, 현재 생산량은 연 80억 큐빅 야드로 추정된다¹⁸⁾. 이 재료의 가장 큰 장점은 세계도처에서 천연재료를 사용하여 쉽게 생산할 수 있는 이용성, 저비용, 실온 경화, 건설의 용이함, 디자인과 건설을 위한 성능 데이터 및 특성을 즉시 이용할 수 있는 것 등이다. 더불어 현 콘크리트는 175년 이상의 기간 동안 매우 좋은 성능을 갖는다. 포틀랜드시멘트는 전형적으로 수 mm부터 수 m 두께의 제품을 생산하기 위해 잔골재 및 굵은 골재와 함께 시멘팅 재료로 사용된다. 포틀랜드시멘트 입자의 평균크기는 약 50 μm 이다. 얇은 최종 생산물 및 빠른 응결시간을 요구하는 경우 약 5 μm 의 최대 입자크기를 가진 마이크로 시멘트가 사용된다¹⁰⁾. 그러므로 입자크기는 나노포틀랜드시멘트를 얻기 위해 상당량 감소되어야 한다. 이러한 나노시멘트 입자가 나노튜브 및 반응성의 나노스케일 실리카입자와 같이 제조될 수 있다면 전도성 있고, 강하고, 질기며, 실온에서 제조된 세라믹은 전자적용과 코팅을 위해 개발될 수 있다. 400°C 이상의 온도에서 일산화탄소 때문에 실온 제조는 카본나노튜브의 역학적 특성을 유지하기 위해 유용하게 될 것이다. 대부분의 세라믹은 400°C보다 높은 온도에서

* 정회원, 강원대학교 건축학부 교수
kbpark@kangwon.ac.kr

제조되므로 카본화이버는 이러한 공정을 가지고 사용될 수 없다.

마이크로레벨에서 철근콘크리트와 화이버합성물 사이에는 매우 좋은 유사점이 있다. 또한 화이버철근 콘크리트에서 얻은 교혼은 마이크로-, 나노-레벨에서 짧은 불연속적인 화이버를 사용하는 것이 더욱 유효할 수 있다는 것이다. 예를 들어 스틸화이버 0.5%를 포함한 하이버철근 콘크리트가 실제적 건설에 사용된다. 콘크리트 매트릭스에서 0.5% 스틸화이버에 의해 제공된 물성의 증진은 고성능 복합물안의 0.5% 카본나노튜브로 인한 증진과 거의 같다^{9,10}. 카본화이버는 역학적 및 전기적물성의 증진을 제공한다.

2. 나노콘크리트의 정의

나노콘크리트는 시멘팅 현상과 같이 500nm보다 작은 포틀랜드시멘트입자를 가지고 만들어진 콘크리트로 정의된다. 현재 시멘트입자 크기는 수 나노미터부터 최대 약 100 μ m까지의 범위이다. 마이크로시멘트의 경우, 평균입자크기는 5 μ m까지 작아진다. 나노시멘트 생산에는 상당량 크기의 감소가 필요하다.

3. 나노콘크리트는 필요한가?

저자는 'Yes'라고 믿는다. 포틀랜드시멘트의 확실한 유일한 물성인 실은 제조, 작은 수축, 600 $^{\circ}$ C까지의 온도 저항성, 카본화이버를 포함한 수 종류 화이버와의 혼화성, 나노실리카와 비독성 특성과 같은 현재 이용할 수 있는 나노재료가 가진 반응능력 등은 유일한 생산품을 만드는데 유용하게 사용될 수 있다. 또한 다른 나노 재료를 가지고 열 양생, 코팅으로 복잡한 형상을 만들 수 있다.

제조될 수 있는 나노시멘트가 합성된다면 μ m 두께 평판 및 실린더와 같은 다른 모양이 높은 온도센서 및 전기적 복합체를 포함한 많은 적용을 위해 제작될 수 있다. 카본 나노튜브는 전기적 서킷을 강하게 하고 창조하기 위해 사용될 수 있다. 또 다른 중요한 적용은 코팅 부분이다. 현재 포틀랜드시멘트를 기초로 한 코팅은 일반적이지 않다. 왜냐하면 그것은 두껍게 되는 것이 필요

하고, 폴리머의 첨가가 응집의 향상을 위해 필요하기 때문이다. 나노시멘트는 이러한 적용분야에 새로운 패러다임을 창조할 것이다. 무균열의 텍크는 꿈이 아니고 실현될 것이다.

4. 현재 기술 조사 현황

4.1 콘크리트와 나노테크놀로지

우선 콘크리트에 나노테크놀로지를 활용할 수 있다는 것을 주장할 수 있다. 왜냐하면 콘크리트는 나노수분 입자 및 나노공기 공극과 같은 성분의 나노 입자를 포함하고 있기 때문이다. 그러나 나노테크놀로지의 사용을 주장하기 위해서는 최종생산물안의 나노 구성성분의 위치와 양을 조정 할 수 있어야한다. 콘크리트의 많은 구성 재료의 스케일을 <그림 1>에 나타낸다. 칼슘실리케이트 수화 생성물의 위치 및 나노스케일 공극을 조절할 수 있는 화학적 또는 기계적 기구를 만들 수 있다면 콘크리트는 나노테크놀로지의 생산품이 된다.

콘크리트에 대한 나노테크놀로지의 현재 연구 활동은 시멘트 수화특징, 콘크리트에 나노크기실리카의 첨가 영향, 나노입자를 사용한 시멘트의 합성, 콘크리트를 보호하기 위해 적용되는 코팅 등을 포함한다.

4.2 시멘트 반응성 나노 구조

FHWA와 NSF에 의해 지원받는 공동연구활동은 나노스케일 레벨에서의 시멘트 수화를 연구하기 위해 코네티컷대학에서 수행되고 있다. 이 연구에서 미국과 독일 과학자들은 수화물이 시멘트 입자의 표면에 위치하는 것을 조사하기 위해 핵공명반응분석(NMRA)을 사용한다. 질소원자 빔은 수소원자, 물의 필요 구성 또는 반응생성물의 위치를 파악하기 위해 반응하고 있는 시멘트입자의 조사에 사용한다. 이러한 수소원자의 위치는 반응 중 형성되는 많은 표면층의 정렬 뿐만 아니라 물 침투율을 보여주는 수소 깊이 프로필을 만들기 위해 사용된다.

연구자는 <그림 2>와 같이 시멘트가 수화하는 동안에 활동하

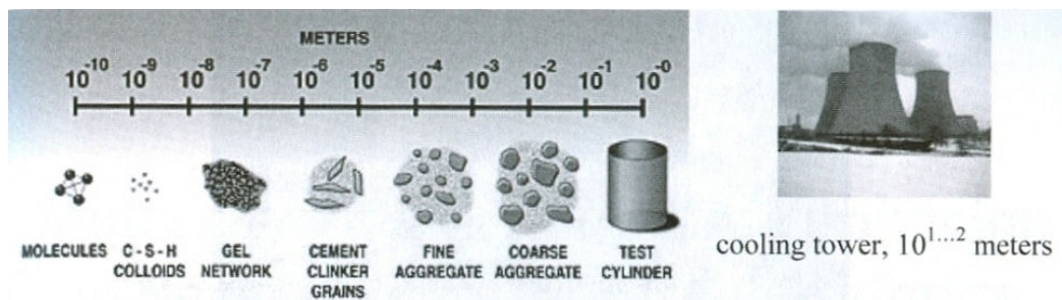


그림 1. Scales of various constituents of concrete and a typical application⁷⁾

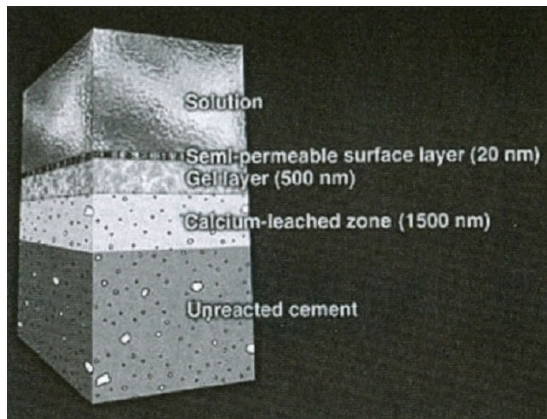


그림 2. Details of hydrating cement grain at nano-scale⁷⁾

는 4개의 구성물을 입증한다. 다음절은 그러한 관찰의 요점을 제공한다. 20nm 두께 반침투 표면층은 칼슘이온을 걸러내고 시멘트 입자대로 물이 들어오는 것을 허락한다. 시멘트안의 커다란 실리케이트이온은 반침투 표면층 뒤에 잡혀있다. 반응이 지속되면 실리케이트 젤이 시멘트입자안의 팽창의 원인으로 거기에 형성된다.

이것은 결국 가장 바깥층의 파괴를 유도한다. 표면 붕괴는 용액주위에 축적되어 있는 실리케이트를 풀어준다. 이 실리케이트는 콘크리트를 굳게 하고 시멘트 입자를 연결하는 칼슘실리케이트 수화젤을 형성하기 위해 칼슘이온과 반응한다.

수소 외형의 전개는 표면층 분열의 타이밍을 보여준다. 이 정보는 시간, 온도, 시멘트 화학 및 다른 인자들의 함수로써 콘크리트 경화 과정을 연구하는데 사용될 수 있다. 예를 들어 연구자들은 30°C 시멘트 수화에서 표면층 분열이 1.5시간에서 발생하는 것을 정확히 알아내기 위해 NRR를 사용했다⁷⁾.

4.3 콘크리트 성능을 향상시키기 위한 나노스케일 실리카 폼

초미립 무정형 교질 실리카는 침투성 및 내구성의 성능을 향상시키기 위해 마이크로실리카보다 훨씬 더 효과적이다⁵⁾. 또한 나노실리카의 약 15~20kg의 감소된 양은 마이크로실리카 60kg와 같은 강도를 제공한다.

4.4 알칼리 실리카 반응 연구

ASR은 재료적 열화의 주원인인 알칼리/실리카 젤의 형성의 결과이다. 젤은 시멘트알칼리와 골재 또는 첨가제로부터의 실리카와 반응하여 형성된다. FHWA 연구자들은 젤 화학, 온도 및 상대습도의 함수로써 젤 미세구조안의 나노스케일 변화를 측정하기 위해 뉴트론분산 과 양전자 전멸 분광기를 사용하고 있다⁷⁾.

4.5 플라이 애쉬 반응 특성

FHWA는 플라이 애쉬와 포틀랜드시멘트 젤 나노구조와의 상호작용을 조사하는 연구프로젝트를 수행중이다. 작은 각도 뉴트론분산이 시간과 플라이 애쉬 구성성분의 함수로써 나노 스케일 상의 각각의 변화를 정량화하기 위해 사용된다.

4.6 시멘트 수화 동역학

재래식 분석방법은 온도, 물시멘트비 및 입자크기의 함수로 물과 같이 반응하는 시멘트 반응물에 대한 정확한 모델을 제공할 수 없다. 왜냐하면 반응은 시멘트 젤의 나노스케일 공극 내에서 발생하기 때문이다. 그러므로 콜드뉴트론 연구를 위한 NIST의 과학자와 FHWA는 나노스케일에서 물의 반응과 이동을 측정하기 위해 뉴트론분산 방법을 사용한다. 이 연구는 시멘트 파괴 나노스케일 구조의 발전에 있어 많은 인자의 효과가 설명하기를 기대한다.

4.7 나노입자를 사용한 시멘트 합성

NSF에 의해 지원된 프로젝트에서 나노 입자를 사용한 포틀랜드시멘트 Type I의 구성물을 합성하고 그 특성을 일반시멘트와 비교하였다. SEM과 XRD장비는 합성된 에라이트(C3S) 구성물의 구조 및 형태를 파악하기 위해 사용되었다. 동 산화물 뿐만 아니라 에라이트(C3S), 비라이트(C2S)의 양을 포함한 수정체 구조를 가진 등글게 덩어리진 나노 입자들이 합성된 시멘트 안에서 발견되었다. 수화반응 실험에서 나노시멘트는 포틀랜드시멘트 Type I과 III보다 급속한 수화 속도를 나타내었다. 나노 입자를 사용한 합성 시멘트의 압축강도는 보통포틀랜드시멘트 사용의 압축강도보다 작은 것을 알 수 있었다. 저자는 압축강도 감소가 여러 가지 인자 즉 입자집성체, 급속한 수화, 높은 물시멘트비, 석고의 부족 등 여러 요인에 기인한 것으로 생각한다¹⁴⁾.

4.8 카본나노튜브

카본나노튜브는 시멘트의 합성물로 사용하기에 뛰어난 잠재성을 가지고 있다. 이러한 튜브의 기본 역학적 특성을 다음 절에 소개한다⁴⁻⁶⁾. 더 자세한 사항은 참고문헌 4번에서 얻을 수 있다.

4.8.1 일반적 기술

가장 일반적인 나노튜브는 1991년 일본과학자인 수미오 이치마에 의해 발견된 카본나노튜브이다⁶⁾. 짧은 기간 안에 아크증발 기술은 나노튜브의 대량 생산을 위해 사용되었다. 이러한 나노튜브는 이중구조이다. 단층구조 나노튜브는 흑연전극에 코발트와

같은 금속을 첨가하여 1993년에 합성되었다. 1996년 미국 텍사스의 스멜리 그룹은 특별히 균일한 지름을 가지고 높은 연성을 얻는 단일 벽 튜브를 개발하였다. 이 균일한 튜브는 아크증발을 이용해 준비한 다른 것과 비교하여 정렬된 다발을 형성하는 경향을 가진다. 묶어놓은 나노튜브는 종종 나노 '루프'로써 언급된다.

카본나노튜브의 다른 형태는 나노뿔(nano-horns), 나노테스트 튜브, 나노화이버이다. 나노뿔은 주목할 만한 흡착성과 접촉 반응성을 갖는 단일벽 카본코어로 연료전지에 사용될 수 있는 특별한 잠재성을 가지고 있다.

나노테스트 튜브는 의료분야를 포함한 많은 분야에 적용될 수 있으며 생태학 분자를 포함한 재료에 적합할 것이다. 나노화이버는 매우 높은 강도, 강성, 비열면, 순도성 때문에 중국적으로 카본화이버가 될 수 있다.

단일층 나노튜브는 균일한 두께, 정밀한 기하형상, 선형탄성의 재료특성 때문에 완전한 얇은 벽 실린더로 간주될 수 있다. 단일층 나노튜브의 연구는 강도, 강성 및 안전한 물성을 얻기 위해 실시되며, 여러 기술이 전기 역학 장치를 사용하여 힘과 측정응답을 유도하기 위해 개발되고 있다.

단일벽 튜브, 복합벽 튜브, 단일벽 덩어리 튜브의 구조적특성은 전자적, 바이오 적용 및 나노/마이크로 복합물의 개발에 이러한 재료의 유효한 활용을 위해 필요하다. 다음 절은 카본나노튜브의 기하학적 부피 및 역학적특성에 대한 기본정보를 제공한다.

4.8.2 카본나노튜브의 수치

최초 나노튜브의 발견은 복합벽 튜브이다¹¹⁾. 전파전자현미경 연구는 이러한 튜브가 약 0.34 nm의 중간층 공간을 가진 새집 껍데기와 같은 형상을 보여준다. 이 튜브에 상응하는 직경은 10~50 nm의 범위 내에 있다. 전형적 길이는 100에서 1,000 nm까지 다양하다. 단일층 튜브는 훨씬 적은 직경(1 nm~3 nm), 길이(약 300 nm)를 갖는다. 단일층 튜브는 많은 개개의 튜브를 평행하게 접근 응집하여, 종종 '루프' 또는 '덩어리'의 형태로 제조된다.

4.8.3 나노튜브의 역학적 물성

분석을 위해 필요한 기본정보는 탄성계수, 응력-변위 특성, 압축과 인장에서의 변위능력, 전단계수 및 여러 모드에서의 강도 등이다. 이러한 값은 실험적 기술 또는 이론적 공식을 사용하여 얻을 수 있다. 튜브의 미세한 수치는 실험적 연구를 위해 연구자에게 상당한 도전을 부가한다. 최근 혁신적인 개발에 의해 높은 해상도를 가진 여러 종류의 현미경은 나노 조절의 범위에서 그 결과를 정량화하는데 많은 도움이 된다. 그러나 강도와 계수 값은 크게 변하는 결과가 나타난다. 계수 값은 270부터 3,600 GPa까지의 범위로 기록된다. 이론적 예측으로는 계수가 5,000 GPa과 같이 높게 될 수 있다. 전형적인 응력-변위 플롯은 두 연구자가 <그

림 3>과 같이 나타내었다¹⁰⁾. 응력은 단일튜브에서 0.34 nm의 균일 두께로 가정하여 추정하였다. 기록된 변위는 공학변위이다.

인장모드 파괴에서 기록된 변위는 12%만큼 높고, 강도는 10부터 63 GPa까지 변한다. 매우 긴(약 2 mm)루프의 강도는 1.72 ± 0.64 GPa의 범위 안에서 발견되었다¹²⁾.

4.9 나노 합성물

나노튜브는 나노튜브의 뛰어난 특성의 어떤 것을 이어받을 수 있는 화이버 합성물을 구성하기에 사용될 수 있다. 예를 들어 카본나노튜브는 매우 강하고 높은 전도성이 있는 매우 얇은 웨이퍼를 생산하기 위해 알루미늄-실리케이트와 같이 혼합될 수 있다. 이 혼합물은 또한 질기고, 내구적이고, 높은 온도와 저-마찰 코팅으로 사용될 수 있다. 현재 알루미늄-실리케이트는 50~100 nm의 범위 안에 실리카입자로 구성된다⁸⁾. 5 nm 또는 10 nm까지의 매트릭스내에 최대입자 크기를 줄이기 위해 공정을 정제하는 것이 가능하다. 이러한 매트릭스는 나노튜브의 0.5%만큼 낮춰 보장할 수 있으며 현저한 강도 및 전기 전도성의 향상을 제공할 수 있다.

NIST와 펜실베이니아대학의 연구자들은 역학적 특성뿐만 아니라 내화성을 향상시킬 수 있는 나노클레이를 채운 폴리머를 만들었다¹⁵⁾.

또한 금속산화물 나노입자는 UV 빛을 막기 위한 코팅, 자가

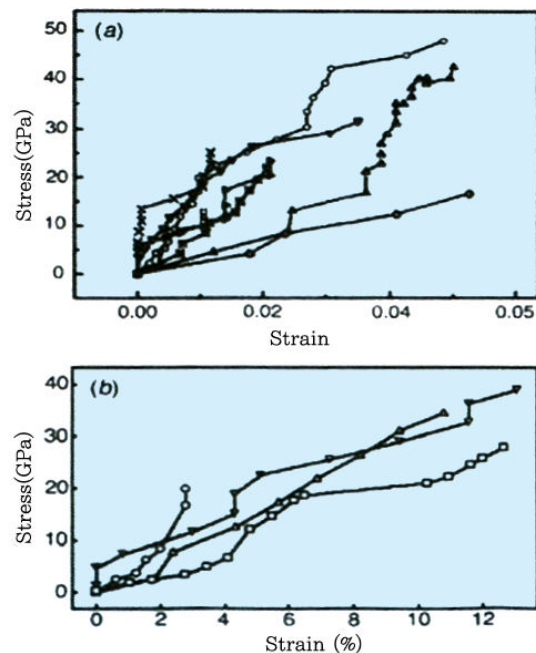


그림 3. Stress-strain relationships of nano-tubes¹¹⁾

항균 표면, 태양전지, 실내공기질청소 등에 사용된다. 다른 나노 복합물은 탁월한 구조성을 갖는다.

4.10 콘크리트구조를 위한 나노센서

콘크리트 안에 넣어둔 무선 센서를 가지고 Cyberliths의 실현 가능성 또는 스마트 골재는 평가되고 있다¹⁶⁾.

미래에 이러한 마이크로센서는 최적의 모니터링 능력을 위해 스마트 더스트로 전체교량을 칠하는 능력을 가지고, 즉 스마트 센서 넷으로 먼지입자크기까지 줄일 수 있다. 이러한 센서는 구조적 손상 없이 콘크리트와 철근의 상태를 간접적으로 모니터링 하기에 사용된다.

5. 나노시멘트와 관련된 기초적 시멘트 수화 개념

지난 150년간 콘크리트의 특성은 개발되었다⁸⁾. 나노크기 시멘트 입자에 관련된 가능한 이슈를 이 절에서 토론한다. 첫번째 중요한 이슈는 나노시멘트의 합성이다. 전에 언급한 바와 같이 입자크기는 상당량 감소될 수 있다. 가능한 방법은 화학적 합성과 기계적 수단을 사용하여 마이크로시멘트로부터 나노크기 입자의 분리가 있다. 각각의 방법에 대한 정보는 공개된 문서로 이용할 수 없다.

두번째 중요한 이슈는 수화된 시멘트의 구조이다. 수화열과 제조기술은 이 주제 분야에 관련된다. 시멘트 수화로부터 얻어진 다음 사실은 나노시멘트 페이스트의 수화를 이해하는데 중요한 역할이 될 것이다.

- (1) 시멘트의 1큐빅 mm는 완전히 수화된 후 공간 약 2큐빅 mm를 점유한다.
- (2) 수화된 시멘트 페이스트의 3가지 주요 고체 구성물은 CSH, CH와 CS이다. CSH는 체적의 약 50~60%, CH는 20~25%, CS는 15~20% 점유한다.
- (3) CSH 시트의 크기는 2nm보다 작고, 시트사이의 공간은 0.5부터 2.5nm까지 변한다. 거칠게 결정된 CSH입자의 응집체는 1~100nm를 점유할 수 있다. 응집체간의 상호입자간격은 0.5~3nm까지 변한다.
- (4) CSH는 커다란 표면적(100~700m²/g)을 갖으며, 이 재료의 강도는 van der Waals 힘에 기여한다.
- (5) CH 생성물은 약 1,000nm의 폭을 갖으며 전형적으로 크다.
- (6) CS는 침 형태구조를 가지며 불안정하다.
- (7) 수화된 시멘트 페이스트는 흡착수를 포함할 수 있다. 물의 6분자 층까지 약 1.5nm 두께는 수소결합에 의해 형성될 수 있다. 이 물의 대부분은 약 30% 상대습도 건조

에 의해 제거될 수 있다.

- (8) 모세관 공극 크기 범위는 10~1,000nm이다. 그러나 낮은 물시멘트비를 가진 완전히 수화된 페이스트내의 공극크기는 전형적으로 100nm보다 적다.
- (9) 작은 CSH 결정, 육각형의 칼슘 알루미늄에이트 수화물과 칼슘 셸퍼 알루미늄에이트는 커다란 표면적과 응집 능력을 소유한다. 그들은 또한 미수화시멘트입자와 골재입자에 점착한다.
- (10) 포졸란반응은 CSH를 가진 수산화칼슘의 대체와 감소된 모세관 공극의 결과이다.
- (11) 화열은 시멘트 입자크기에 강하게 영향을 받는다. 시멘트 비표면적은 일반시멘트에서 320m²/kg에서 초속경 시멘트 900m²/kg까지 다양하다.
- (12) C3A는 대부분의 열을 발산하고 C2S는 적은양의 열을 발산한다.
- (13) 수화열은 두개의 피크를 갖는다. 첫 번째는 용해단계에서 발생하고 두번째는 혼합물을 형성하는 동안 발생한다.
- (14) 활동적인 수화 존은 약 2,000nm두께이다<그림 2>.
- (15) 수화의 두가지 메커니즘 중, 전해질 용해 수화(through-solution hydration)는 나노시멘트를 위한 수화메커니즘에 적합하다.
- (16) 알루미늄에이트 수화는 실리케이트보다 훨씬 빠르다. 시멘트의 약 75%인 실리케이트는 강도발현에 지배적 역할을 수행한다.

5.1 가능한 성능과 제조 기술

포틀랜드시멘트에 대해 진술한 사실 및 그림의 주위 깊은 조사는 나노시멘트의 성능을 예상하기에 사용된다.

- 1) 제조공정의 모드에 상관없이 석고량은 수화열과 강도발현을 조절하기위해 계획되어야 한다.
- 2) 나노시멘트 슬러리 안에 나노카본 튜브 다발을 혼합하는 것이 가능하다. 규칙적인 카본 위스커와 같은 특정한 적용에도 사용될 수 있다.
- 3) 단지 나노크기 포졸란 및 필러는 나노시멘트 합성을 위해 사용되어야한다. 실리카 폼과 티탄늄 산화물은 나노크기 안에 즉시 이용될 수 있다.
- 4) 석면 시멘트 시트 공정을 위해 사용된 기술은 μm(마이크로미터) 두께 카본시멘트 시트를 제조하는데 사용될 수 있다. 석면시트 공정의 필터링 기술은 항공기 구조 합성물의 제조를 위해 사용되는 진공백 기술과 결합되는 것이 필요하다.

5.2 기초적 질문

대답을 요하는 기초적 질문의 몇몇은 다음과 같다.

- 1) 나노시멘트에 대해서 물시멘트비의 영향은 같은가?
- 2) 남아있는 강도와 변위 능력은 같은가?
- 3) 금속성 나노 화이버의 사용은 가능한가?
- 4) 시멘트 필러 화이버 혼합과 증기주입 사용 양생에 건조 공정은 가능한가?

6. 몇몇 기회와 도전

6.1 시멘트 구성물

포틀랜드시멘트가 나노크기 시멘트입자를 가지고 발전시킬 수 있다면 수많은 기회가 열릴 것이다. 예를 들어 시멘트는 카본화이버와 함께 무기 점착물로 사용할 수 있다. 현재 μ (마이크론) 크기의 시멘트 입자는 7μ 직경 카본화이버와 같이 사용하기엔 전도성이 없다. 시멘트는 유기질 폴리머보다 더 경제적인 뿐만 아니라 내화적인 것이다. 더불어 그것은 어떠한 휘발성 유기 화합물을 발산하지 않을 것이고, 그 복합물은 적합한 점착물을 사용하여 구체콘크리트 기질에 점착할 수 있다. 또한 현재 무기질 복합물은 높은 온도에서 제조할 수 있기 때문에 매우 경쟁적이다.

카본화이버를 사용한 스마트 콘크리트에 대한 개발이 진행되어 왔다¹⁷⁾. 그러나 나노카본튜브가 카본화이버보다 더 효과적이기 때문에 나노시멘트를 가지고 더 현실적이 될 것이다. 혼합물의 두께는 μ (마이크론)까지 감소할 수 있으므로 유연하고 스마트한 시멘트 복합물이 제조 될 수 있다.

근원적 도전은 나노크기 시멘트 입자를 제조하는 것이다. 화학적 증기 침전이 그 가능성을 보여준다¹⁴⁾. 다른 수단은 하이테크 그라인딩이다. 두번째 도전은 수화열이다. 특별한 무기, 유기 첨가제는 수화열과 경화시간을 조절하기 위해 개발될 필요가 있다. 이것이 모험적이고 어려운 방법일지라도 저자는 이러한 모험이 가치 있다고 믿는다.

6.2 콘크리트를 위한 코팅

코팅은 마모, 화학적 공격, 하이드로 온도 변화 및 미관 향상을 위한 보호막 등 일상적으로 사용된다. 현재 이 코팅의 대부분은 μ m(마이크로미터) 범위 안에 있다. 새로운 재료 및 기술로는 마찰감소로 인해 열 발생을 줄이고 내구성이 있는 nm(나노미터) 두께 코팅의 개발이 있다. 코팅은 자기정제와 자기복구를 유도한다. 대부분의 경우 이러한 코팅의 성능은 실험에 의해 평가된다. 평가에 있어 주요 파라미터로는 여러 노출상태하의 코팅의

내구성, 마모 저항성, 마찰 저항성, 고온 저항성과 전자적 특성 등이 있다. 코팅필름, 필름 사이의 경계면과 모체 재료의 성능은 시스템의 최종 내구성에 중요한 역할을 한다. 이론적 모델은 많은 종류의 코팅의 성능예측을 위해 필요하며, 그 결과로 최적 설계 접근이 개발될 수 있다. 모델은 경계면을 따라 모체재료를 가진 코팅필름의 상호작용 때문에 꽤 복잡하게 된다. 대부분의 경우, 모체 표면의 역학적 특성과 이용할 수 있는 몇몇의 코팅재료는 잘 알려져 있다. 그러나 역학적, 열수작용 및 자력하의 경계면의 성능에 대해서는 잘 알려져 있지 않다. 나노코팅을 위해서는 코팅자체의 물성조사가 필요하다.

약한 코팅은 일반적으로 '벗겨짐' 보다는 균열, 압력, 박리에 의해 파괴된다. 견고한 이론적 모델이 균열의 발생 및 진행을 예측하기 위해 필요하다. 얇은 벽 구조를 분석하기 위해 개발된 지식의 기초는 앞서 말한 이론적 모델의 개발에 유효할 수 있다. 대부분 존재하는 코팅은 미관성을 저해하는 더러운 먼지를 침착하는 경향이 있다. 이 침착된 재료는 시간 경과에 따라 모체 표면의 품질을 저하시킨다. 미세한 나노스케일의 코팅은 물과 먼지를 억제할 것이며, 로터스 잎의 코팅 후 형상이 만들어 질것이다. 로터스 잎은 자신을 청소하고 건조시키는 특별한 능력을 가지고 있다. 지금 나노테크놀로지는 로터스 잎 표면을 흉내내기위해 사용되어지며, 나뭇가지 없는(no-stick) 생산품을 상회하는 새로운 생산품을 창조하기 위해 사용된다. 전형적으로 친유성(hydrophobic) 또는 물 방수 표면위의 먼지 입자는 물 떨어짐에 의해 제거된다. <그림 4>는 나노입자를 사용한 코팅의 자가 정제 특성을 보여준다. 코팅된 표면에 곰팡이가 없음을 알 수 있다¹³⁾.

7. 결 론

많은 양의 연구비와 노력이 나노테크놀로지의 개발에 활용되고 있다. 시멘트 및 콘크리트분야는 이런 전체적 노력의 작은 부분

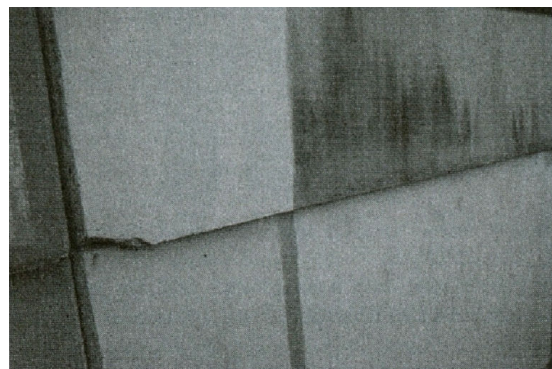



그림 4. Self-cleaning coating made of nano-particles¹³⁾

일 수 있지만, 이 분야의 연구는 최신기술의 분야에 거대한 부담과 경제적 이익을 지불할 수 있다.

현재의 노력은 시멘트입자 수화의 이해, 나노크기 실리카 및 센서 등에 집중되고 있다. 유일한 기회는 앞으로 가장 길게 지속되는 공헌을 유도할 수 있는 나노시멘트의 개발을 위해 존재한다. 

참고문헌

1. Boresi, Arthur P., Chong, Ken P., Saigal, Sunil. *Approximate Solution Methods in Engineering Mechanics*, John Wiley, New York, 2002, 280 pp.
2. Chong, K.P. Smart Structure Research in the U.S. Keynote paper, Proc. NATO Adv. Res. Workshop on Smart Structures, held in Pultusk, Poland, Smart Structures, Kluwer Academic, 1998, pp. 37 ~ 44.
3. Chong, K.P. "Research and Challenges in Nanomechanics" 90-minute Nanotechnology Webcast, ASME, 2002.
4. Chong, K.P. "Nanoscience and Engineering in Mechanics and Materials", *J. of Physics & Chemistry of Solids*, 65, 2004, pp. 1501 ~ 1506.
5. Collepardi, M., Collepardi, S., Troli, R., and Skarp, U. "Combination of Silica Fume, Fly Ash and Amorphous Nano-Silica in Superplasticized High-performance Concretes", *Proceeding of First International Conference on Innovative Materials and Technologies for construction and Rehabilitation*, Lecce, Italy, 2004, pp. 459 ~ 468.
6. Iijima, S. Helical microtubes of graphite carbon. *Nature*, 354(6348), 1991, pp. 56 ~ 58.
7. Livingston, D. and Schweitzer, J. FHWA, Private Communications.
8. Mehta, P.K. *Concrete: Structure, Properties and Materials*, Prentice-all, New Jersey, 1986, 449 pp.
9. Balaguru, P; and Chang, P. "High strength composites for repair, rehabilitation and strengthening of concrete structures", *ICI Journal*, 3, 2003, pp. 7 ~ 18.
10. Balaguru, P., and Shah, S.P. *Fiber Reinforced Cement Composites*, McGraw-Hill, New York, 1992, 530 pp.
11. Srivastava, D.; Wei, C.; and Cho, K. "Nanomechanics of carbon nanotubes and composites", *Applied Mechanics Review*, 56, 2003, pp. 215 ~ 230.
12. Qian, D., Wagner, G.J., Liu, W.K., Yu, M., and Ruoff, R.S. "Mechanics of carbon nanotubes", *Applied Mechanics Review*, 55, 2002, pp. 495 ~ 533.
13. Balaguru, P. "Inorganic Polymer Composites for Protection of Aging Infrastructures", *Proceeding of the Society for the Advancement of Material and Process Engineering*, 2007(in press).
14. Aui, M., and Huang, C.P. *The Chemistry and Physics of Nano-Cement*. Report submitted to NSF-REU, University of Delaware, 2006.
15. Kashiwagi, T., Du, F., Douglas, J.F., Winey, K.I., Harris, R.H., and Shields, J.R. "Nanoparticle networks reduce the flammability of polymer nanocomposites", *Nature Materials*, 4, 2005, pp. 928 ~ 933.
16. Song, G. "Smart Aggregates: A Distributed Intelligent Multi-Purpose Sensor Network(DIMSN) for Civil Structures", *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, 2007, pp. 775 ~ 780.
17. Chong, K.P., and Garboczi, E.J. "Smart and Designer Structural Material Systems" *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4, 2002, pp. 417 ~ 430.
18. "Concrete", Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Concrete>

담당 편집위원 :
박기봉(강원대학교) kbpark@kangwon.ac.kr

<http://www.kci.or.kr>

KOREA CONCRETE INSTITUTE