

자기치유 콘크리트의 연구동향 및 전망

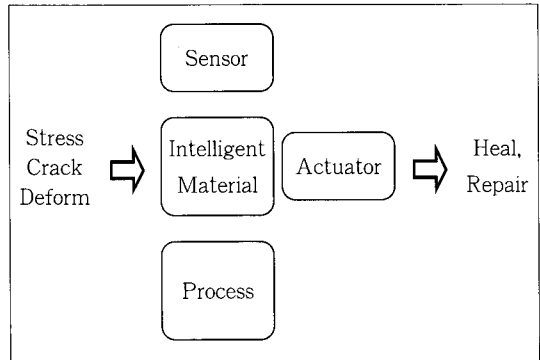
박 철 (쌍용양회공업(주) 기술연구소 콘크리트연구실 연구원)
 이 중 열 (쌍용양회공업(주) 기술연구소 소장)
 김 동 석 (쌍용양회공업(주) 기술연구소 콘크리트연구실 책임연구원)
 엄 태 선 (쌍용양회공업(주) 기술연구소 콘크리트연구실 실장)

1. 서 론

콘크리트에 발생한 균열을 콘크리트 자신이 스스로 감지하고, 보수 및 복구의 필요성을 스스로 판단하며 그 결정을 기초로 콘크리트 스스로 보수 및 복구를 실행하는 기능을 갖는 자기치유(수복) 콘크리트에 대한 연구들이 최근 들어 일본 및 유럽 국가들을 중심으로 활발하게 진행되고 있다. 이와 같은 기능을 갖는 콘크리트가 실제 구현된다면 “인텔리전트 재료” 콘크리트라고 부를 수 있을 것이다.

인텔리전트 재료란 일본에서 90년대 후반부터 사용된 용어로 우리가 흔히 알고 있는 정보라는 개념을 재료조건에 도입하여 환경 변화에 스스로 적응 가능한 재료로서 센서, 프로세서, 작동기구(Actuator)와 같은 3개의 기능을 갖는 새로운 재료로 정의되었던 것을 시작으로 하고 있다.

인텔리전트 재료의 개념도를 <그림-1>에 나타낸다. 또한 거의 같은 시기에 구미에서는 “스마트 재료”란 용어를 사용하여 인텔리전트 재료와 같은 개념을 도입하였다. 이것은 인텔리전트 재료가 새로운 재료창조를 지향하는 것에 비해 각종의 기능을 갖는 장치 및 장비의 구성에 의해 인텔리전트 재료와 동



<그림-1> 인텔리전트 재료의 개념도

등한 기능을 부여하는 것을 목적으로 하고 있다. 이와 같은 지적능력을 갖는 재료 기술은 나노 기술을 이용한 재료설계와 같이 매우 작은 재료를 다루고 있는 이미지가 강하지만 최근 콘크리트 구조물과 같은 중량 및 거대 구조물에 대해서도 그 적용성 및 가능성이 존재한다는 연구자들의 연구 성과들이 발표되고 있다.<그림-1>

사회기반시설의 대부분을 이루고 있는 콘크리트 구조물은 성능 유지를 위한 유지 관리를 위해 매우 많은 시간과 비용이 필요하며, 시간 및 환경조건에 따라 내구수명이 점차 감소하게 된다. 이에 따라 재

〈표-1〉 제1회 자기치유재료학회의 주요 연구 분야 및 학술 위원회

주요 연구 분야	학술 위원회
<ul style="list-style-type: none"> • Asphaltic materials • Bio-inspired technical materials • Cementitious materials • Composites and hybrids • Metals • Paints and other coatings • Structural polymers • Biological systems • Theoretical models related to self healing • Characterization of self healing behaviour 	<ul style="list-style-type: none"> • DSM Research, The Netherlands • University of Bristol, UK • Institut National Polytechnique de Grenoble, France • MPI of Colloids and Interfaces, Germany • Air Force Office of Scientific Research, USA • University of Michigan, USA • Shanghai Jiao Tong University, China • CSIRO, Australia • Eindhoven University of Technology, The Netherlands • University of Illinois, USA • University of North Carolina, USA • University of California, USA • Federal Highway Administration, USA, Etc.

료나 구조물 스스로가 발생된 변형과 같은 내구성 저하 현상을 감지 및 이해하고 적절한 대처방안을 갖고 대응할 수 있다면 구조물의 안전성 및 내구성이 현저하게 향상되는 것을 기대할 수 있다. 이미 콘크리트의 재료분야에 있어서도 “지적”이라는 형용사를 포함하는 초기단계의 연구들이 활발하게 진행되고 있다.

아직 국내에서는 그 사례 및 성과를 찾아보기 힘들지만 건설기술 선진국인 일본 및 유럽 국가들에서는 자기치유(수복) 재료 및 시스템에 대한 연구 사례를 찾아볼 수 있다. 이에 따라 본고에서는 자기치유(수복) 콘크리트에 대해 용어의 정의, 자기치유 기구의 개념 및 국외 연구동향에 대해서 소개하고자 한다.

2. 국외 연구동향

나. 자기치유 관련 국제회의 개최

자기치유 콘크리트에 관련한 연구활동은 그동안 관련 연구자들의 특별 강연이나 개념위주의 문헌, 단발적인 연구보고가 주를 이루었기 때문에 본 연구 분야에 대한 일목요연한 정리 및 검토가 제한되었다.

그러나 2007년 4월 18일~20일 네델란드에서 제1회 자기치유 재료의 국제회의가 개최되었다. 국제회의에서는 〈표-1〉에서와 같이 10개의 연구분야에 관하여 14개국 196명인 연구자가 참가하였고 12개의 초대 강연, 75편의 구두발표, 50개 이상의 포스터 발표 등이 진행되었다고 전하고 있다.⁵⁾

국제회의 참가기에 따르면 시멘트계 재료에 대해서는 미시간 대학의 Victor Li 교수의 초대강연, 텔 포트 공과대학 Klaas van Breugel 교수의 “Is there a market for self-healing cement-based systems in the building industry?” 제목의 일반 강연 등 자기치유 연구분야에 대한 이해를 돕는 내용이 주를 이루었다고 전하고 있다.

또한 참가기 내용 중 Breugel 교수는 철근 콘크리트에서 균열이 발생하는 것은 당연한 것이고 설계 단계에서 발생하는 것이 전제가 되어 있는 균열은 복원해야 하며 이를 손상이라고는 간주하지 않는다고 하였으며 이점이 다른 분야의 손상과 크게 다르고 균열 발생의 자기치유에 과대한 코스트를 투자할 수 없다는 의견을 제시했다. 그러나 아무리 코스트 증가를 초래하더라도 복원해야 하는 균열은 존재한다는 의견도 제시하였다. 예를 들면 방사성 폐기물 등의 저장 용기에 균열이 발생하는 경우나

미관의 대한 관리 및 요구성능이 엄격할 때 등의 경우가 이에 해당한다. 또한 균열폭이 큰 균열 뿐만 아니라 골재 주위가 미세한 균열과 그것들이 연결된 것, 과도한 공극의 연결도 철근콘크리트 구조의 내구성 저하요인이 되기 때문에 자기치유 대상 범위라는 의견도 제시하였다.

Victor Li 교수는 초대 강연에서 시멘트계 재료가 본래 자기치유 기능을 가지고 있다는 것과 Breugel 교수와 같이 다른 연구 분야의 재료와 비교해 균열 발생에 의한 손상의 중대성이 반드시 같지 않다는 점을 강조하였다. 일본의 참가자들은 시멘트계 재료 이외에도 요코하마 국립대학의 교수 그룹이 세라믹의 자기치유 기능에 대한 많은 연구 성과를 발표하였다. 제2회 회의는 2009년 일리노이즈 대학의 주최에 의해 개최될 예정으로 전하고 있다.

나. 일본과 유럽에서의 위원회 활동

JCI에는, 2007년 6월부터 「시멘트계 재료의 자기복원성의 평가와 그 이용법 연구위원회」가 설치되고 연구활동을 개시하였다. RILEM에서는 Self Healing Concrete의 TC(TC SHC:Self-healing Phenomena in Cement-based Materials)를 설치하였으며 델프트 공과대학의 Dr. Shlangen 교수를 위원장으로 2005년 11월로부터 활동을 개시해 왔다. 델프트 공과대학의 Delft Center for Materials는 현재 자기치유 연구분야에 대해 국가적인 지원을 받고 있으며 집중적인 연구를 진행하고 있다.

다. 자기치유 콘크리트의 연구 사례의 소개

홋카이도 북방 건축 종합 연구소, 홋카이도 대학 등의 공동 연구에서는, Fly-ash의 지속적인 수화반응을 응용하여 동해를 받은 콘크리트의 자기치유 연구를 진행하였다. 치유대상이 되는 균열은 부재의 휨 및 외력에 의한 균열 발생 등 거시적인 것이 아닌 동해나 건조 수축에 의한 미세 균열을 대상으로

한 것으로 동결융해 작용에 의한 열화가 생긴 후, 압축강도, 상대동탄성 계수, 중성화 깊이, 세공용적, 가시적 균열조사 등으로부터 치유 정도를 조사했다. 연구결과, Fly-ash 종류에 따른 치유 효과의 영향은 크지 않고, 치환율이 높을수록 물시멘트비가 낮을수록 치유 효과가 높게 나타났으나 실제 환경하에서 치유시키기 위한 보양조건의 평가방법이 이후의 과제로 남아있다고 밝혔다.

낮은 물시멘트비의 팽창 콘크리트의 추가 팽창현상을 통한 매크로(Macro)한 균열의 자기치유 효과를 확인한 연구결과도 있었다. 치유 기구는 균열이 발생한 장소의 매우 근접한 장소에서 추가 팽창에 의한 균열폭의 감소, 균열발생 장소에서 새로운 수화물의 석출 기구가 주요한 것이었다.

매스조건을 예상한 고온 이력이나 수분공급 조건이 치유성능에 미치는 영향이나, 팽창재를 포함하는 경우의 강재에 의한 외부 구속이 치유능력이나 누수 방지 효과에 미치는 영향 등에 대한 연구도 소개되었다.

콘크리트가 근본적으로 치유기능을 갖는다는 것에 관한 연구결과도 발표되고 있다. 균열을 유도한 철근 콘크리트 공시체에 장기 폭로시험을 실시하고 균열이 발생한 장소의 염화물 이온 함유량의 분포 상황 측정을 통해 0.2mm 정도의 균열이 장기 폭로 시험을 통해 폐색된다는 가능성을 시사하는 연구도 있다. 그외에도 어떤 특별한 조치를 하지 않아도 자연히 균열부의 투수계수가 저하하는 현상에 관한 연구결과도 보고되었다.

3. 자기치유 재료 및 작용기구

가. 자기치유 재료란?

자기치유 재료의 일반적 정의에 대한 국외 연구자료의 내용을 살펴보면 Nick Strandwitz는 자기치유 물질이란 “인간의 인위적인 조치나 간섭없이 어떤 방법으로 손상을 복구할 수 있는 물질을 말한다”라

고 정의하고 있으며 “만약 우리가 손상된 부분을 어떠한 수단을 통해 밝혀내고 복구한다면 그것은 자기치유라 할 수 없다”라고 설명하고 있다.

자기치유의 메커니즘과 원리 중 기본이 되는 많은 개념들은 이미 우리 주변에 오랫동안 있어 왔다. 특히 자기치유 물질은 생물학 관점에서 바라본다면 가장 오래된 아이디어 중 하나일 수 있다. 인류가 탄생하기 그 이전부터 생물학적 시스템은 그들 스스로의 번식능력과 생명력 강화를 위해 자기치유라는 개념을 도입하고 이를 발전시켜 왔다. 이와 같은 원리는 인간의 신체에서도 적용된다. 우리 몸에 상처를 입거나 뼈가 부서진 경우 우리는 부상을 치유하기 위해 부러진 뼈를 물리적으로 직접 치료하지는 않는다. 단지 치유효과를 높게 하기 위한 행위를 통해 스스로 다시 본래의 형태로 돌아오게 하는 방법을 이용하고 있다. 이처럼 우리 몸은 치료 및 치유가 필요한 장소에 치료를 담당할 수 있는 대리인을 보내며 이를 통해 상처를 입은 피부 또는 뼈를 치유하게 된다.

나. 자기치유 관련 용어의 정의

우리는 자기치유관련 문헌 및 논문을 통해 “자기치유”, “자기수복”이라는 단어를 많이 접하게 되며 두가지 단어는 같은 단락에서도 혼재되어 사용되는 경우를 볼 수 있다. 두 단어의 의미 및 차이점 대해 일본의 자기치유 관련 문헌조사위원회에서는 다음과 같이 설명하고 있다. 일단 콘크리트에 대해 어떤 단어가 더욱 적합한지에 대한 고려가 필요하며 특히 균열이라는 관점에서 단어를 선택할 필요가 있다. 또한 치유는 병이나 부상(손실)을 되돌리기 위한 것이며 수복이란 건조된 사물을 얼버무려 다시 고치는 것이라는 사전적 의미의 정의를 고려해야 한다. 다시 말해 치유는 인간이 적극적으로 관여하지 않아도 시스템 자체가 자연히 본래로 돌아오는 것이라는 의미가 강하며 수복이란 인간이 적극적으로 관여하는 의미가 강하다 할 수 있다. 우리나라의 사전적 의미

를 살펴보면 치유란 “치료하여 병을 낫게 함”으로 정의되며 수복이란 “고쳐서 본 모습과 같게 함”으로 정의된다. 여기서도 마찬가지로 수복이란 의미는 다소 인위적인 간섭이나 행동이 작용한다는 의미가 강하다 할 수 있다. 다시 말해 우리 몸의 상처나 불안정한 상태를 자연히 되돌리게 하는 것은 “자기치유”가 컴퓨터내의 시스템 불안정이 생겼을 경우 시스템내의 프로그램이 자동적으로 복원 작업을 실시하는 경우는 “자기복원”이라는 단어가 더욱 적합할 것이다. 그러나 자기치유 콘크리트와 관련된 연구분야에서 두 단어를 완벽하게 의미상 분리해서 사용하는 것은 불가능하며 실제로도 동일한 의미를 갖고 혼용되고 있는 실정이다.

다. 자기치유의 작용기구

자기치유의 작용기구 즉 메커니즘은 간단히 정의되거나 분류되지는 않는다 왜냐하면 사용재료, 적용방법, 환경조건 등 매우 많은 변화인자와 조건 등의 존재하에서 변화인자와 조건을 어떻게 조합하느냐에 따라 매우 많은 자기치유 작용기구가 존재할 수 있으며 또한 세분화 될 수 있기 때문이다.

따라서 본절에서는 대표적인 자기치유 작용기구의 분류 및 종류에 대해 정리해 보았다. 자기치유 콘크리트의 연구분야는 크게 분류해 2종류로 나눌 수 있다. 즉, 자기치유라는 새로운 기능을 갖는 콘크리트의 개발을 지향하는 것과 콘크리트가 본래적으로 가지는 자기치유 기능을 검증하는 것이다. 일본의 자기치유관련 문헌조사위원회에서 조사한 연구내용과 특징에 대해서 간단히 정리한 것을 <표-2>에 나타낸다.

자기치유 콘크리트의 개발을 목적으로 하는 연구 사례는 자기치유 기능을 부여하기 위한 방법에 따라 다시 2종류로 분류할 수 있다. 하나는 기능 요소가 되는 보수체를 동봉한 미소구체와 같은 캡슐이나 파이프 형태로 직경이 매우 작은 섬유 및 튜브 형상의 재료를 콘크리트의 제조시에 혼입하여 일체화시킨

〈표-2〉 자기치유 콘크리트 관련 연구의 동향 및 분류

개 념		자기치유기구	연구의 개요
적극적 자기치유 기능부여	콘크리트내 기능요소 매설	콘크리트에 집착제 공급용 파이프 매설	• ECC의 특징을 이용하고, ESEM에 의한 파이프의 파손이나 보수제 방출 과정의 관찰, 강성의 회복에 의해 효과를 평가
			• 치유대상 및 접착제 종류 변경에 따른 반복 하중시 균열 개수에 의한 치유정도 평가
			• 고점성 보수제의 압입에 의한 공급 제안
			• 매집성을 갖는 파이프에 중공 또는 액체 코어의 광섬유를 사용. 균열발생 개소의 모니터링과 그 자기복원 양립
		형상 기억합금 철근을 사용한 균열복원	• 균열폭이 cm단위 이상인 큰 변형후 1/10 이하의 균열폭까지 복원
콘크리트 혼합시 기능요소 혼입	내부에 접착제를 갖는 단섬유 혼입	• 공시체 전체를 통과하는 매집성 파이프에 보수제를 주입한 단섬유를 콘크리트 혼합시 혼입	
	시멘트 대신 결합재로 박테리아를 사용	• 모래에 박테리아를 첨가하여 탄산 칼슘 결정을 석출시킴. 이것을 시멘트를 대신하는 결합재로서 사용하는 것을 제안	
콘크리트가 갖고 있는 자기복원 효과의 검증	균열 내부 물의 공급 표면부 재수화를 통한 균열을 제어	• 균열표면부 재수화 기구를 제시. 이와 같은 원리를 이용 투수계수 감소 가능성 제시 • 재수화에 대한 수온의 영향을 20~80°C 범위에서 검증	
	부식 환경하 섬유보강 콘크리트의 균열 폐색	• 소량의 PP섬유를 혼입한 경우 부식 환경하에 균열이 자동치유 되는 현상 보고	

후 콘크리트를 타설하는 것이다. 다른 하나는 철근과 같이 기능 요소를 사전에 특정 범위내에 배치해 놓고 콘크리트를 타설하고 이들을 일체화 하고 기능을 부여하는 방법이다.

(1) Microsphere Embedment
- 미소구체(캡슐)의 혼입

미소구체혼입 아이디어는 생명체의 시스템과 비교될 수 있다. 이 경우는 합성물(Composite) 또는 중합체(Polymer) 물질을 아주 작은 구체안에 채워 넣는 방법이다. 이와 같은 구체는 그 크기가 대략 100µm 정도로 매우 미세하다. 또한 이 구체를 싸고 있는 외피는 매우 얇아서 외부의 물리적 간섭이나 교란 작용에 의해 쉽게 파괴될 수 있다.

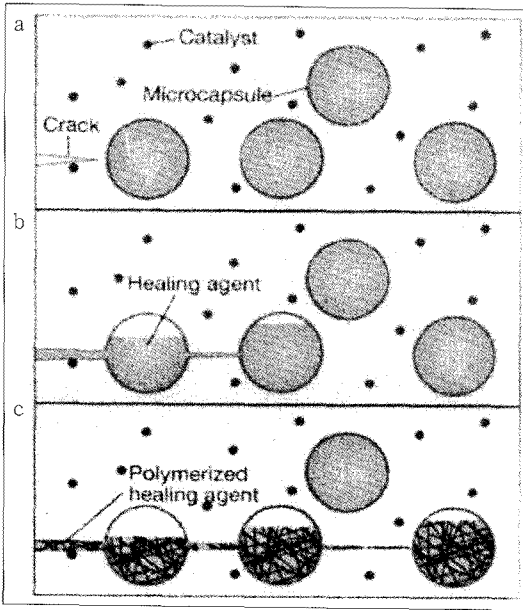
구체 내부는 합성물 또는 중합체 물질 등 치유를 위한 작용제가 채워져 있으며 물리적 힘에 의해 구체의 외피가 파괴되면 내부의 작용제와 기혼입되어

있는 촉매제의 반응을 치유 작용을 하게 된다. 작용 기구에 대한 개념도를 〈그림-2〉에 나타낸다.

균열이 발생할 경우 이 미소구체는 〈그림-3〉에서와 같이 외피가 파괴되고, 치료물질은 촉매제와 섞이게 된다. 48시간 안에 구체내부의 작용제와 촉매제의 중합반응은 완료되며 균열이 치료된다. 그러나 이와 같은 작용기구는 균열발생으로부터 기인하는 외부의 응력이 요구되며 미소구체 내부의 작용제의 양으로 치유될 수 있는 미세균열에 한정된다.

이와 같은 미소구체 혼입방법은 이론상으로 매우 효과적인 결과를 얻을 수 있어 치유 작용을 통해 일정부분까지 초기강도를 회복할 수 있다. 그러나 초기 물질이 갖는 강도를 완벽하게 회복하는 것은 불가능하다.

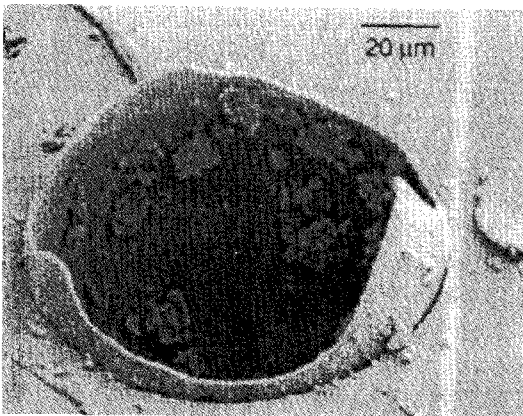
이 방법의 문제점 중 다른 하나는 촉매 및 미소구체를 밀집하게 하는 것이다. 높은 자기치유 효과를 얻기 위해서는 특정 위치에 미소구체와 촉매제가 밀



〈그림-2〉 Microsphere Embedment 방식의 작용기구

집해 있어야 한다는 점이다. 균열이 발생하는 위치에 촉매제 및 미소구체가 존재하지 않게 되면 치유 현상이 발생하지 않을 수도 있다. 또한 미소구체의 분산이 고르지 못한 경우에는 치료반응이 극소부위에서 한정되어 진행될 수도 있게 된다.

실용적인 측면에서도 미소구체 및 중합제 물질은 생산하기가 매우 어려우며 적용하기 어려울 정도로



〈그림-3〉 미소구체의 표면파괴 후 작용제가 유출된 형상

경제성의 확보가 곤란하다는 단점을 갖는다. 이와 같은 단점들이 기술 실용화에 큰 제한 요소로 작용하고 있다.

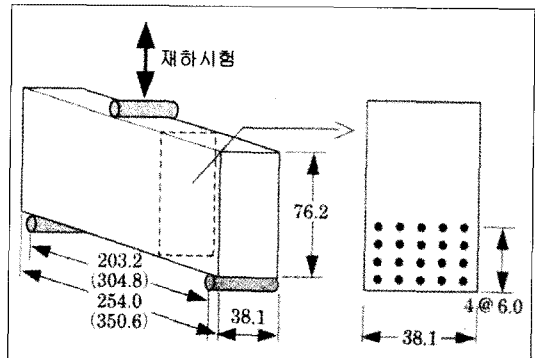
(2) Tube(Pipe) Embedment

- 튜브(파이프) 혼입

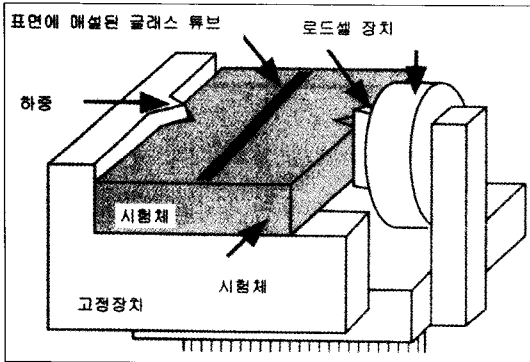
튜브 삽입방법은 미소구체 혼입방법과 유사한 원리를 갖는다. 유리관 또는 파괴되기 쉬운 매질성(외력에 의한 작은 변형에도 파괴되는 성질)의 외피를 갖고 내부에 작용제가 주입된 재료가 목표로 하는 구체의 치료를 위해 혼입되는 방식이다.

내부에는 슈퍼글루(Superglue)와 같은 열가소성 물질 등이 채워져 있다. 균열의 감지 및 반응이 미소구체 혼입 방법의 감지 및 반응 메커니즘과 같은 방식이다. 혼입된 이 튜브는 이상적으로 파괴될 수 있도록 설계되어 있으며 균열이 발생하면 내부의 치료물질이 흘러 나와 균열을 치유하게 된다. 미소구체가 아닌 튜브(파이프)를 사용한 한 연구사례가 많은 것은 독립된 미소구체의 경우 발생하는 균열을 치유하기 위한 충분한 양의 작용제를 보유하는 것이 제한되기 때문이다.

튜브 삽입방법의 효과 검증은 ECC(Engineered Cementitious Composite)라 명칭된 시험체(미세균열유발을 위해 제작된 시험체)의 휨시험을 통해 검증되었다. ECC 시험체는 균열 길이를 통제하기 위한 수단으로 사용되었다. 〈그림-4〉는 시험체의 시험방



〈그림-4〉 튜브를 혼입한 시험체의 크기 및 단면도

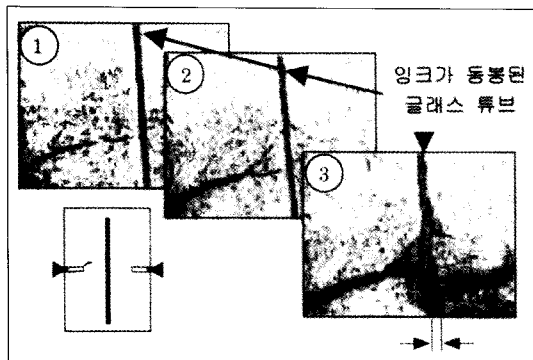


〈그림-5〉 시험체 형상

법 및 단면도를 나타낸다. 또한 매우 작은 공시체를 통한 실험에 의해 자기치유기능 발현을 확인한 사례도 있다.

〈그림-5〉에서와 같이 매우 작은 공시체(10mm × 10mm × 1.5mm)에 1개의 글래스 튜브(외경:500 μ m, 글래스 두께:60 μ m)를 매설하고, 이것에 균열을 일으키게 한다. 그 과정을 전자현미경에 의해 관찰하고, 균열의 감지와 보수 즉 글래스 튜브의 파손과 보수제의 방출이 실행되는 것을 확인하였다. 보수제 대신에 점도가 같은 정도의 잉크가 주입된 경우 〈그림-6〉과 같이 균열이 글래스 튜브에 도달하면, 균열이 발생한 튜브와 ECC 계면의 균열면을 따라서 잉크가 유출되는 것을 확인할 수 있다.

그러나 콘크리트의 자기치유를 위해 튜브가 삽입된 방법도 몇 가지 제한사항을 갖고 있다. 모세관 방



〈그림-6〉 균열발생 및 잉크의 유출 장면

법에 의해 글래스 튜브에 충전되는 치유 재료들이 항상 정확하게 충전되지는 못하며 자기치유 재료들이 이미 반응하여 치료작용이 일어나지 않는 경우도 발생한다.

또한 실용화 측면에서 시험에 사용된 ECC는 일반적인 콘크리트의 균열형상과는 다른 미세한 균열 발생을 유도하기 때문에 일반적인 콘크리트에서 발생하는 폭인 큰 균열에 대해서는 파이프 내부에 충분한 보수 작용제를 확보하는 것이 제한된다.

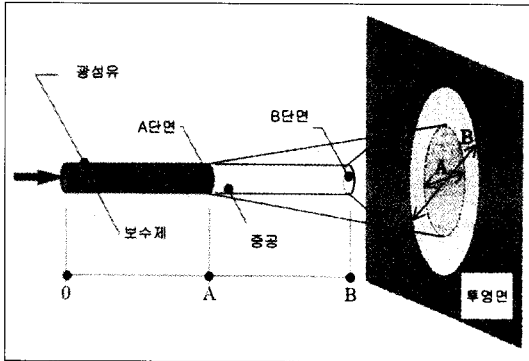
튜브 혼입 방법상에서 보수제 종류에 따라 치유성을 평가한 연구 사례도 있다.

Dry는 튜브 내부에 공급되는 보수제 종류를 달리 하여 실험을 진행하였다. 시험은 소형 공시체에 대한 재하시험을 통해 균열을 발생시킨 후 보수제를 공급해 2주일의 보양기간이 지난 후 다시 재하시험을 실시하는 방법을 적용하였다. 이때의 자기치유 효과의 평가는 초기 재하시 얻어지는 균열 갯수의 변화와 반복 재하시험을 통해 발생하는 균열의 개수를 이용한 비를 구하여 그것을 지표로 사용하였다.

연구결과 보수제 종류에 따라 미미하지만 치유효과와의 차이가 나타났으며 보수제의 점성에 대한 성능 평가 결과 점성이 지나치게 작을 경우에는 보수제가 균열의 내부 공간을 충당하지 못하고 유출되는 현상이 나타났고, 점성이 너무 높은 경우에는 매짐성을 갖는 튜브로부터 균열이 내부로 진행되어 보수제가 방출되지 않는다는 문제점을 제시했다. 이것을 해결하는 수단으로 펌프 등을 사용해 일정 압력을 준 상태에서 점성이 높은 보수제를 사용하는 것이 바람직하다는 결론을 제시했다.

(3) 광섬유를 이용한 균열의 계측

Dry, Vries 등은, 자기치유 효과를 얻기 위해서 광섬유나 액체 코어를 갖는 광섬유를 이용하는 것에 대하여 연구하였다. Dry는 광섬유에 의해 균열 발생을 계측하는 방법을 제안하였다. 계측방법은 광섬유를 투과하는 레이저 광선이 출구쪽으로 투영하는 빛의 반경을 측정하는 것으로 개념도를 〈그림-7〉에



〈그림-7〉 보수제를 주입한 광섬유의 투과 광선 계측

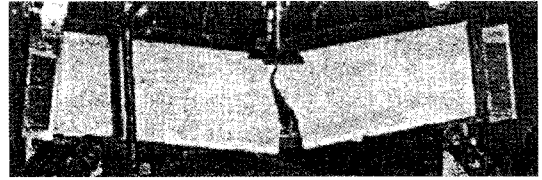
나타낸다.

광섬유 내부에 고르게 보수제가 주입되어 있는 경우와 균열 발생에 의해 일부가 방출된 경우에는 그림에서와 같이 투영되는 빛의 반경의 크기가 다르다. 이와 같은 현상을 계측하여 보수제의 유출량과 발생된 균열의 크기, 위치 등을 계측할 수 있다라고 밝히고 있다. 그러나 자기치유 효과에 대해서 구체적인 수치를 제시하고 있지는 않다. Vries는 균열 측정용 광섬유와는 별도로 Silica Fiber를 매설하고 내부에 에폭시 수지를 펌프압송에 의해 공급했다. 이 공시체에 대해 재하시험을 실시해 균열을 발생시키고 수일간의 보양기간 뒤 다시 재하시험을 실시하고 파단강도에 의해 자기치유 효과를 평가했다.

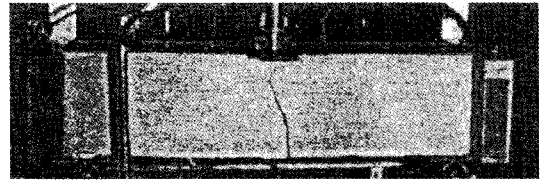
(4) 형상 기억합금의 이용

비록 실제 구조물에서 사용되는 사례는 드물지만 형상기억 합금도 자기치유 재료로 사용된다. Nitinol (티탄과니켈의 합금)과 같은 형상기억합금은 정상적인 온도에서 쉽게 그 형상이 변형된다. 만약 오랜 기간 동안 변형된 상태로 존재하였다더라도 일정 온도 이상의 온도조건이 만족된다면 원래의 형상으로 돌아오게 된다.

이와 같이 형상 기억합금의 복원 원리를 이용한 기술은 복원 작용에 대한 온도의존성 때문에 작동장치를 필요로 하지만 온도에 의한 수축 및 휨 손상을 입을 수 있는 부재 및 구체에 매우 유용하게 사용될



〈그림-8〉 최대 하중시 공시체의 변형



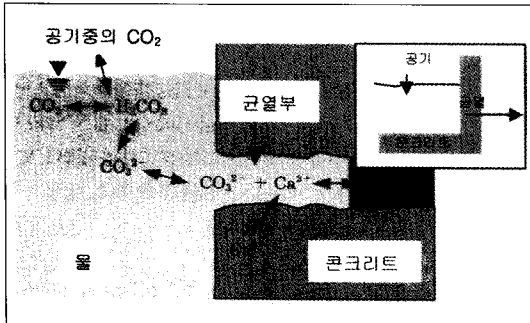
〈그림-9〉 하중 제거후 공시체의 변형

수 있다. 어떤 구조체내에서 분리현상이 일어나고 가열이 가능할 경우 치유효과를 가시화할 수 있는 것이다. 이와 같은 방법의 자기치료 기술은 실용화 사례를 찾기는 힘들지만 온도 변화에 의해 변형을 원래의 형상으로 복구하는 형상 기억합금(Shape Memory Alloy, 이하 SMA)을 사용해 콘크리트에 자기치유 기능을 부여한 연구사례를 찾아볼 수 있다.

Sakai 등은 주요 배근에 SMA를 사용한 Mortar 공시체에 대해 휨재하 시험을 실시하고 자기치유 기능 부여가 가능함을 확인하였다. 공시체 상하에는 주요 배근으로서 각각 5개의 Ti-Ni SMA(직경: 2mm)가 매설되었고, 공시체 양단에 설치된 금속의 블록의 나사를 사용해 고정하였다. 비교 대상으로서 일반적인 탄소강을 사용한 공시체에 대하여 같은 방법의 재하시험을 실시하였다. 이러한 공시체에 대해 3점 휨재하 시험을 실시한 결과 SMA를 사용한 경우 최대 하중시에는 〈그림-8〉에 나타내는 사진과 같이 폭이 큰 균열이 확인되었지만, 하중을 제거한 후에는 〈그림-9〉과 같이 균열의 회복이 가능한 것을 보여준다.

(5) 박테리아 콘크리트

앞서 언급한 방법들과는 전혀 다른 형식으로 자기치유 콘크리트의 가능성을 찾은 연구사례도 있다. Ramakrishnan 등은 박테리아를 이용한 콘크리트의



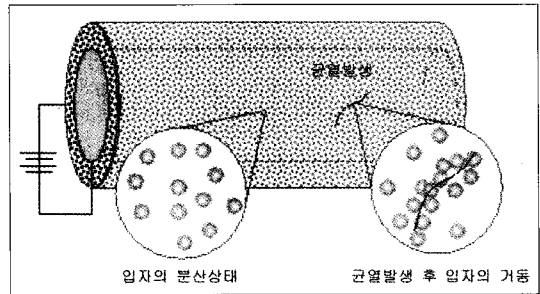
〈그림-10〉 콘크리트 자체의 자기치유 기구 모식도

보수방법을 제안하였다. 이 방법은 결합재로 시멘트를 사용하지 않고 모래에 박테리아를 혼입한 것을 콘크리트 균열 보수에 적용하는 것을 제안하고 있다.

일반적인 자연환경하에서의 탄산칼슘의 석출에는 생물학적 반응이 동반되는 것을 응용한 것으로 모래와 바실루스균(Bacillus Pasteurii)을 암모니아나 염화칼슘의 용액안에 담아 모래의 주위로 탄산 칼슘 석출을 유도한다. 바실루스균은 일반적으로 우리 주변에서 흔히 볼 수 있는 일반적인 박테리아이며 유기수지 등의 접착제 및 시멘트를 사용하지 않고 경화시키는 것이 가능하기 때문에 환경 부하가 매우 적은 보수재료라는 가능성을 제시하고 있다. 연구 내용상에는 구체적인 자기치유 효과의 검토는 없지만 가능성을 모색할 수 있는 새로운 재료에 대한 접근이라는 것에 매우 큰 의미를 갖고 있다.

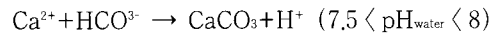
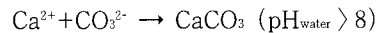
(6) 콘크리트 자체의 자기치유 효과

콘크리트에 새롭게 자기치유 기능을 부여하지 않고 보수적으로 얻어진 자기치유 효과에 대해서 검증한 연구사례도 있다. Edvardsen은 일반적으로 콘크리트가 근본적으로 갖고 있는 자기수복(Autogenous Healing) 기능에 대해서 검토하였다. 균열이 발생된 장소에 압력을 받은 상태에서 수분이 공급되면 〈그림-10〉에 나타내는 것과 같이 $CaCO_3$ - CO_2 - H_2O 의 관계에서 이하의 반응식에 따라서 균열의 표면으로 탄산 칼슘의 결정이 석출된다는 이론을 제시



〈그림-11〉 폴리스틸렌 입자의 분포와 균열발생시 입자의 거동

하였다.



Reinhardt 등은 콘크리트의 재수화에 의한 자기치유 효과가 온도에 의해 받는 영향에 대해서 검토하였다. 이 연구에서는 균열발생 당시에 측정된 균열을 투과하는 수량과 일정 시간이 지난 후 측정된 투과수량의 비교를 통해 자기치유 효과를 평가하였다. 균열폭 0.05~0.20mm, 온도 20~80°C 범위내에서는 균열폭이 작을수록, 또 온도가 높을수록 높은 자기치유 효과를 얻을 수 있다고 밝히고 있으며 균열폭 0.05mm, 80°C의 조건에서는 균열발생 이후 투과수량을 초기 투과수량의 약 3%까지 감소시킬 수 있다고 제시하였다.

(7) Electrohydrodynamics(전기적수화역학)

전기적수화역학 방법은 기존 튜브 및 미소구체 방법과는 전혀 다른 시스템으로 이 방법은 〈그림-11〉에서와 같이 튜브 내부에 2개의 전위차를 갖는 층이 존재하며 층 사이에는 폴리스틸렌 입자가 분산된 액형 물질이 존재한다.

외부력에 의해 튜브에 손상이 발생하게 되면 손상 위치의 폴리스틸렌 입자의 응고에 의해 전류의 흐름이 집중되게 된다. 이를 통해 손상부를 치료하게 된다. 또한 폴리스틸렌 입자가 용해되어 있는 액형 물질 안에 $NiSO_4$ 가 첨가되어 균열 발생시 균열의 표

면에 전기도움이 가능하게 된다. 이와 같은 작용을 통해 균열사이의 남아있는 간극을 메우게 되는 방식이다.

또한 전기수화역학은 전류와 전압을 측정할 수 있는 부속장치에 의해 손상에 대한 모니터링이 가능하게 된다. 예를 들면 부재안에 균열이나 불안정 상태가 발생하면 전류나 전압이 변경되고 이를 통해 예측이 가능하게 되는 원리이다. 이와 같은 방법 역시 아직 실행단계는 아니다 그러나 사용되는 재료와 시스템 원리는 기계분야에서 그 가능성을 높게 제시하고 있으며 추후 의료, 전자, 항공, 건축 등과 같은 여러 분야에 그 가능성을 제시할 수 있다.

(8) 매스콘크리트 수화열 억제 및 부식방지 콘크리트

매스 콘크리트는 높은 수화열에 의한 온도 균열발생에 따라 균열 억제 대책이 필요하다. 현재 기술에서는 저발열형 재료인 혼합계 시멘트의 이용과 분할 타설을 통한 수화열 제어 방안이 가장 폭넓게 이용되고 있다. 그러나 콘크리트에 수화열을 제어할 수 있는 기능을 부여한 경우의 사례도 찾아볼 수 있다. 작동기구 원리는 미소구체 혼입방법에서는 미소구체 외피의 파괴기구가 외부력이었으나 이 기술은 외피 파괴의 원인이 되는 요소를 콘크리트의 수화열에서 찾고 있다. 다시 말해 콘크리트 제조시 수화 지연제를 주입한 파라핀제 캡슐을 이용하여 콘크리트 내부의 온도가 일정 수준에 도달하면, 캡슐이 용해해서 지연제가 용출하게 된다. 이를 통해 자동적으로 시멘트의 수화반응이 지연되며 온도균열을 유발하는 구조물 내외부 온도차도 줄어들게 되는 원리를 응용한 것이다.

또한 염해 및 중성화로 인한 철근부식 현상을 제어하고 구조물의 장기수명화를 목적으로 콘크리트에 부식 및 중성화 방지 기능을 부여한 개념의 아이

디어도 찾아볼 수 있다.

4. 향후 과제 및 맺음말

자기치유 재료의 사용을 통해 우리가 생각하고 상상하는 방법으로 생체구조나 물리구조를 변경할 수 있는 가능성은 최근의 연구 사례들을 통해 그 가능성이 명확해지고 있다. 본고에서는 자기치유 기능을 콘크리트에 부여하기 위해 검토된 국외 연구사례를 중심으로 조사한 내용을 서술하였다. 독창적이고 새로운 개념의 연구사례들이 많았지만 실제의 구조물에 대한 적용을 고려한 기술의 적용방법, 재료의 구체적인 사용방법 등 실용화에 중점을 두고 있는 연구사례는 아직 미비한 실정이다. 그러나 모든 연구의 개발 및 실용화가 그러하듯 연구의 초기단계에서는 무한한 가능성 및 상상력을 기초로 한 연구 활동이 선행되며 이러한 연구 성과들이 실용화를 위한 검증단계를 거치고 실용화를 달성하게 된다. 검증단계에서는 재료의 안정성, 경제성, 실용성, 환경적 측면 등 여러 분야의 검토를 통해 앞서 서술한 각종 자기치유 작동기구의 문제점과 제한요소를 개선할 수 있으며 이를 통해 각 기술의 구체화 및 현실화의 밑바탕을 마련할 수 있게 된다.

자기치유 콘크리트 관련분야의 연구자들 가운데는 이와 같은 기술이 향후 수년안에 실용화 될 것이라는 전망을 하는 의견과 현실화 되기에는 아직 너무나 많은 유무형의 문제점과 제한요소 존재하기 때문에 그 시기를 전망하기 어렵다는 의견이 공존한다. 그러나 최근 자기치유 재료에 관한 국제회의가 개최되고 시멘트계 재료에 관한 독립 분과가 만들어지는 등 관련분야의 활발한 연구 활동이 진행되고 있는 실정이므로 향후 많은 연구자들의 심도 깊은 연구를 통해 실용화가 가능하게 될 것이라는 기대를 갖는다. ▲