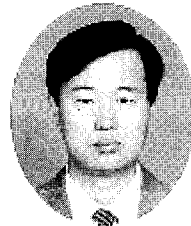


황산염해의 허구와 실제

- Sulfate Attack on Concrete : Separating Myths From Reality -



정원기*



이영우**

P. Kumar Mehta(University of California at Berkeley)는 "Sulfate Attack on Concrete - Separating Myths From Reality"(Concrete International, Aug. 2000, pp.57 ~ 67)를 통하여 황산염해에 대한 잘못된 인식과 새로운 정보를 기존의 연구 결과를 기초로 하여 심층적인 분석을 하였다. 따라서, 본 번역기사를 통해 관련 분야 연구자들에게 그동안 가져왔던 의구심을 해소할 수 있는 기회가 되었으면 한다.

최근 들어 캘리포니아에서는 건설산업과 관련된 수백만 달러의 소송들이 잇따르고 있다. 이 소송들 중의 일부는 화학적 염해와 혼동된 물리적 염해에 의한 콘크리트 표면 손상에 관한 것들로 나타났다. 염에 의한 풍화는 벽돌이나 석재 또는 부실한 콘크리트 등의 다공성 고체가 어떤 특정한 환경 하에서 발생하는 순수한 물리적 현상으로 특히 황산을 함유한 알칼리염 용액에 노출된 환경에서 나타나는 것으로 알려져 있다. 게다가 철도 궤도와 같이 고온 양생을 필요로 하는 콘크리트 제

품과 관련된 손해 배상 소송 중에는 지연된 ettringite 형성(Delayed Ettringite Formation, DEF)으로 인한 내부 황산염이 콘크리트에 균열과 변형에 원인이 된다는 주장이 제기되어 왔다. DEF와 관련된 콘크리트의 균열 및 변형에 관해 제안된 몇몇 메커니즘을 살펴보면 이러한 현상이 고전적인 황산염 피해와 본질적으로 다르다는 인상을 풍기고 있다.

이러한 황산염 피해에 대한 여러 가지 문헌들에서 나타나고 있는 다양한 논쟁과 상반된 결론들은 일반 사람들에게 상당한 궁금증을 자아내고 있다. 그렇다면 황산염에 의해 콘크리트가 입는 손상은 과연 어느 정도일까? 또, 과연 이러한 손상에 의해 구조물이 붕괴될 수도 있을까? 그리고 DEF에 의한 콘크리트의 손상을 설명하는 황산염 메커니즘들은 기존의 외부 황산염에 의해 나타나는 현상과 본질적으로 다르다고 할 수 있을까? 이러한 여러 가지 의문에 대한 답을 얻기 위해서는 먼저 이들 현상에 대한 새로운 정보와 더불어 기존의 연구 결과에 대한 심층적인 분석이 필요하다 할 수 있다. 앞서 제시한 몇 가지 질문에 대한 해답을 살펴보기에 앞서 황산염에 대한 기존의 견해를 살펴보는 것에서부

터 시작해 보겠다.

1. 역사적 배경

1915년에 미국 표준국에서 출간된 논문에서, Wig과 Williams^{1),2)}는 1900년에 미국 서부의 건조한 지역에서 알칼리성을 띠는 흙과 물에 노출된 콘크리트의 열화가 발견되면서부터 황산염에 대한 논의가 시작되었다고 기술하고 있다. 그 논문에서는 다음과 같이 표현되어 있다. "이 지역에는 염해가 아닌 다른 무언가에 의해 손상된 많은 콘크리트 구조물이 발견되고 있다. 많은 사람들은 이러한 콘크리트의 손상이 이 지역에서 발견되는 알칼리성 토양 때문이라고 여기고 있다. 그런 이유로 좋지 않은 재료의 사용이나 부실한 시공으로 인해 발생하는 구조물의 손상도 서부 지역에서는 그냥 넘어가는 경우가 종종 있다."

그들의 주장을 뒷받침하기 위해 Wig와 Williams는 몇몇 현장의 증거 자료를 제시하였다. 이 중 한가지가 많은 양의 황산 나트륨을 함유한 토양 위에 건설된 관개수로 구조물의 어떤 부분은 건설 후 7년이 지나도록 매우 양호한 상태를 보이는 반면 다른 한 쪽 부분은 콘크리트가 완전

* 정회원, (주)삼보기술단 기술연구소 소장

** (주)삼보기술단 기술연구소 연구원

히 손상되어 구조물이 거의 붕괴 직전까지 이르렀다는 것이다. 이 때 콘크리트의 공극 또한 염으로 가득 차있었다. 0.1% 황산 알칼리 농도 이상의 토양에서 수용성 황산염에 노출된 배수관에 대한 현장 시험을 통해 저자들은 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 다공성 관거의 경우 상대적으로 건조한 consistency를 갖는 버림 콘크리트를 이용하여 제작되므로 손상되기 쉽다.
- 이러한 구조물의 손상은 주로 공극 속의 염이 결정화되면서 발생시키는 팽창력과 시멘트 구성 성분에서 나타나는 화학적 작용으로 인한 콘크리트 손상 때문에 생긴다.

그러므로 20세기 초의 연구자들도 이미 콘크리트에 발생하는 알칼리-황산염 반응의 많은 부분들에 대해서 알고 있었다고 보여진다. 또한 모든 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트에서 피해가 발생하는 것이 아니고 부실한 배합 또는 높은 투과성을 유지하기 위해 제작된 콘크리트 구조물이 어떤 상이한 기후 조건에서 황산염 피해를 입을 가능성이 있다고 알려져 있다. 다공성 콘크리트 구조물의 손상은 알칼리 황산염이 공극 속에서 결정화되면서 발생하는 물리적 작용뿐만 아니라 황산 용액이 침투함으로써 시멘트 페이스트의 화학적 조성을 변화시키면서 발생하는 화학적 작용에 의해서도 영향을 받고 있다. 또한 연구자들은 염의 결정화에 의한 물리적 손상이 단지 알칼리 황산염 용액에 국한되지 않는다는 사실도 알고 있었다. 예를 들면, 이러한 현상은 알칼리 탄산 용액에서도 발견되며, 또한 자연석이나 대리석 등의 다공성 물질에서도 발견되고 있다.

화학적 손상의 경우 이미 1892년 이전부터 칼슘이나 알루미늄을 함유한 포틀랜드 시멘트 페이스트로부터의 ettringite 형성이 팽창이나 균열에 영향을 미친다는 사실이 알려져 있었다. 수화가 진전된 페

이스트 또는 보통 포틀랜드 시멘트에서, 알루미늄을 함유한 상태는 주로 황산 칼슘 수화물과 CaAl 수화물 두 종류를 들 수 있는데 이들은 황산염 용액에서 불안정한 상태로 존재한다. 일부 연구자들은 칼슘을 함유한 상태에서 황산염 반응이 gypsum을 형성시키고 있다고 보고하였다. Ettringite과 gypsum의 형성이 콘크리트의 팽창과 균열, 강도 및 접착력 감소를 일으키는 여러 메커니즘으로 제안되고 있다. 1990년에 Cohen과 Mather³⁾는 많은 연구자들이 인정하여 온 두 가지 가설을 증명하였다. 한 가지 가설에 의하면, ettringite 형성에 따른 결정 성장 압력이 팽창의 원인이며, 또 다른 가설에 의하면 높은 알칼리 환경에 노출된 ettringite의 미세 결정화가 팽창과 균열의 원인이 될 수 있다는 것이다.

1992년에 Mehta⁴⁾는 황산염해와 관련된 60년간의 현장 자료를 정리하여 발표하였다. 장기간 황산염에 노출된 콘크리트 구조물에 관한 몇 가지 자료를 살펴보면, 황산염의 화학적 작용으로 인해 나타나는 현상은 주로 ettringite 및 gypsum 형성에 따른 강도 및 접착력의 감소와 그에 따른 시멘트 수화물(수산화칼슘과 칼슘-실리케이트 수화물)의 주요한 화학적 성분 변형을 들 수 있다. 실내 실험으로는 ettringite와 관련된 팽창만이 설명될 수 있다는 지적도 있다.

2. 지난 10년간의 연구 실적

지난 10년 동안 물리·화학적 황산염해와 외부 및 내부 DEF, 그리고 황산염해에 대한 여러 가지 연구와 관련되어 발표된 논문들을 제시하였다.

2.1 물리적 황산염해

(Physical sulfate attack)

1989년에 Novak와 Colville⁵⁾는 서부 캘리포니아의 20~30년 정도의 낡은 건축물의 바닥 슬래브에 대한 조사 결과를

발표하였다. 이 지역의 토양과 지하수는 많은 양의 염분과 황산나트륨 및 염소를 함유하고 있는 것으로 나타났다. 손상된 콘크리트는 실내 실험에서 보여지는 전형적인 화학적 황산염해로 인한 것으로 보였다. 그러나, 콘크리트 시료를 분석한 결과 특정 부위의 경우 화학적 황산염해의 증거인 ettringite와 gypsum이 전혀 발견되지 않았다. 그 대신에 많은 양의 백색 황산나트륨 결정과 Na₂SO₄·10H₂O 만이 콘크리트 균열 사이에서 발견되었다. 따라서, 저자들은 건조한 환경에 노출된 투수 콘크리트에서는 염분이 모세관 작용에 의해서 표면을 따라 침투한다고 주장하였다.

이어서, 표면 증발의 결과로 용액이 과포화되고 염분이 결정화되며 균열을 유발할 수 있는 압력을 발생시키게 된다. 이러한 연구는 콘크리트에 발생하는 황산염 반응의 종류가 콘크리트의 품질과 구조물이 처한 기후환경에 의해 영향을 받음을 뒷받침한다고 볼 수 있다. 단지 토양이나 물이 다량의 황산염을 함유하고 있다고 해서 콘크리트가 화학적 황산염해를 받는다고 단정지어 말할 수는 없다.

Haynes과 O'Neill, Mehta⁶⁾는 또한 콘크리트 공극 속에서 황산염 결정화에 따른 물리적 작용이 거의 주목을 받지 못하고 있다고 판단하였다. 이것은 종종 물리적 황산염해가 화학적 황산염해로 오인되기 때문에 발생한다. 실내 및 현장 실험을 통해 저자들은 염분의 결정화로 인해 발생하는 콘크리트의 손상은 표면 탈락을 보면 명백해진다고 결론 내렸다. 게다가 부실한 콘크리트에서는 표면으로부터의 점차적인 질량 손실이 매우 중요하지만 이것이 실제 구조물의 파괴로 이어지는 것은 아니다.

염 결정에 의한 구조물의 손상 메커니즘으로부터, Binda와 Baronio⁶⁾는 구조물의 손상과는 별개로 염의 결정화를 발생시키는 기후 조건에 대해서 제안하였다. 저자에 따르면, 염 결정화에 의한 구조물의 손상은 이 부위에서 수분의 증발률과

염분 용액의 재충전율의 동적 균형에 의해 좌우된다고 주장하였다. 만약, 증발률이 콘크리트 내부로부터의 수분 보충률보다 작다면 염 결정화는 외측 표면에서 발생할 것이다.

실제로, 풍화라 불리는 이러한 현상은 구조물에 어떠한 손상도 유발하지 않는다. 그 예로 습윤 환경 하에서 저급의 콘크리트로 만들어진 기초의 경우 종종 풍화 작용을 받지만 전혀 손상을 보이지 않는다. 염분 용액의 유입률이 수분의 증발률보다 작을 때에만 건조 영역이 표면 바로 아래 형성되며 이때 공극 속에서 형성되는 염 결정이 콘크리트의 팽창과 탈락을 유발한다.

Binda와 Baronio는 염 결정과 결정 성장압에 의한 건축물의 표면 탈락 현상은 용액 속에 함유된 염이 수화가 가능할 때 더 심하게 나타나고 있음을 발견하였다. 그 예로 무수황산나트륨과 무수탄산나트륨은 10개의 물분자를 함유한 염을 형성시킨다. $\text{Na}_2\text{SO}_4(2.66 \text{ cmf/g})$ 와 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}(1.44 \text{ cmf/g})$ 의 큰 밀도 차이에 의해 무수 염이 수화되면 많은 양의 부피 증가를 동반하게 된다. Folliard와 Sandbergs는 Na_2SO_4 에서 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 로 상태 변화를 일으킬 때 상당한 부피 팽창이 발생한다는 것을 실험으로 증명하였다. Thenardite는 $20^\circ\text{C}(68\text{F})$, 상대습도 71% 또는 $30^\circ\text{C}(86\text{F})$, 상대습도 81% 이상의 조건에서 mirabilite로 변형된다. 흥미롭게도 탄산나트륨은 염과 비슷한 반응을 보이는 것을 알 수 있다. 세계 각지의 많은 지역에서 이루어지는 일상의 온도 및 습도 변화 정도에서는 그 변화 주기가 물질이 콘크리트 또는 점토성 제품이거나, 염이 황산나트륨이나 탄산나트륨 형태이거나 관계없이 다공성 물질의 손상에 심각한 영향을 미치고 있음은 분명하다는 것이다. 분명 콘크리트 구조물에 실제적인 균열이나 팽창을 유발하는 것은 결정의 성장 압력이 아니라 thenardite에서 mirabilite로의 상태 변화라 할 수 있다.

최근 발간된 논문에서, Hime와 Mather⁸⁾

는 황산염에 노출된 콘크리트는 시멘트 종류나 황산염해와 관련 없이 손상을 받고 있다고 보고했다.

PCA⁹⁾에서 수행된 황산마그네슘 또는 황산나트륨을 함유한 토양에 노출된 콘크리트 프리즘을 이용한 장기 시험 결과를 인용하여, Hime와 Mather는 지면 윗부분 시편에서만 심한 손상을 보임을 발견하였다. 황산을 함유한 토양에서 지면 아래 부분의 시편의 경우는 전혀 손상을 입지 않았다. 또한, 10% 염 용액에 완전히 침지된 동일한 시편에서도 전혀 손상이 나타나지 않았다. 손상된 콘크리트에서 일정량 이상의 ettringite 또는 gypsum이 발견되지 않는다면 이는 화학적 황산염해라 할 수 없다.

Hime와 Mather에 따르면, 이 경우는 특정 조건 하에서 콘크리트 속으로 침투된 용액에 함유된 염이 결정화되면서 구조물에 손상을 입히는 물리적 황산염해의 한 종류를 나타낸다. 그러나, 수화 가능한 황산나트륨과 같은 염분의 경우 인접한 환경의 온도와 습기가 조금만 변화하더라도 반대 상태로 변화할 수 있으므로 또 다른 형태의 분열 메커니즘을 보일 수도 있다.

2.2 화학적 황산염해 (Chemical sulfate attack)

화학적 황산염해의 경우, 황산염 이온은 시멘트 페이스트의 구성 성분과의 화학적 상호 작용을 일으킨다. 황산을 함유한 토양에 위치한 수많은 현장 구조물의 관찰을 통해 저자는 이전의 논문에서 다음과 같은 결론을 제시하였다.

· 많은 사례를 통해 볼 때 실내 시험이 아닌 현장에서 콘크리트의 팽창과 균열이 전적으로 황산염해에 의해 발생하는 경우는 거의 찾아보기 힘들다. 많은 현장 자료들을 통해 살펴보면, 황산 용액에 장기간 노출된 투과성 콘크리트의 경우에서 콘크리트 수화물의 화학적 변형과 관련

된 점착력 및 강도 감소와 ettringite, gypsum, 그리고 thaumasite 형성의 형태로 황산 염해가 나타난다.

- 시멘트의 화학적 조성보다 콘크리트의 투과성이 황산염해에 가장 중요한 영향을 미치는 요소임이 분명하다. 열악한 환경에 노출되어 손상된 콘크리트 구조물 샘플의 미세 구조를 살펴보면, 콘크리트에 발생하는 미세 균열과 그에 따른 투과성의 증가가 황산염해가 발생하기 위한 전제 조건임을 알 수 있다.
- 황산염해가 단독으로 콘크리트 구조물을 손상시키는 경우는 매우 드물다. 그러므로, 콘크리트 손상에 대한 전체론적인 접근을 위해서는 온도, 습도의 변화 주기나, 염 결정화, 동결 작용, 알칼리-실리카 작용, 철근의 부식 등의 균열이나 미세 균열의 형성에 영향을 미치는 다른 원인을 반드시 고려하여야 한다.
- 형성된 ettringite의 부피는 포틀랜드 시멘트에 존재하는 반응성 알루미늄의 양에 의해 좌우되지만 ettringite와 팽창 사이에 직접적인 관련은 없다. 칼슘 이온과 수산화 이온으로 포화된 환경 하에서, ettringite는 결정을 형성시키는 부착력의 감소로 인해 미세한 결정으로 응결되며 수분 흡수에 의해 팽창될 수 있게 된다. Ettringite의 팽창에 따른 콘크리트의 현저한 팽창은 단지 콘크리트 내부의 수산화칼슘과 칼슘-실리케이트 수화물이 부분적 또는 전체적으로 변형을 일으켜 콘크리트의 강도 감소에 영향을 미쳤을 때에만 발생한다.
- 이러한 현장 자료와 이론적 근거에서 살펴보면, 결정 성장 메커니즘이 화학적 황산염해에 의한 팽창 원인으로 보이지는 않는다. 사실 ettringite와 gypsum의 존재는 손상의 징후일 뿐 균열을 발생시켜 구조물을 붕괴시키는 결정적인 원인으로 간주할 수는 없다.

기존의 저서에서, 저자는 Reardon¹⁰⁾의 자료를 통해 황산염해를 받는 수화된 포틀랜드 시멘트 페이스트의 점진적인 칼슘 소실 과정을 설명하였다. 이 과정 동안 점차적인 pH의 감소가 발생하였다. pH 11.6 ~ 10.6에서 ettringite가 분해되고 gypsum이 형성되었다. 고체 CaOH₂의 양이온이 더 이상 작용하지 않으면, 칼슘-실리케이트 수화물이 칼슘 소실화하기 시작하며 Ca-Si 비율이 pH 9에서 약 2.1 ~ 0.5 정도로 감소하며, 점차적으로 칼슘-실리케이트 수화물은 완전히 분해된다.

현장 연구 결과로부터 얻은 위의 결론은 황산염해에 대한 최근 연구로 점차 인정받고 있다. Taylor와 Gollop¹¹⁾에 의하면, 콘크리트의 팽창과 균열은 ettringite의 형성과 유화, 그리고 분해에 의해 직접 혹은 간접적으로 영향을 받으며 또한 칼슘-실리케이트의 분해와도 관련이 있다고 여겨진다. 저자들은 후자의 반응이 실제 콘크리트의 팽창과 균열의 설명하는 데 중요하다고 여기고 있다. 칼슘 실리케이트의 분해 또는 칼슘 소실은 시멘트 페이스트의 수산화칼슘에 존재하는 칼슘이 더 이상 반응하지 않을 때부터 시작된다. 콘크리트의 팽창과 균열은 gypsum이 형성되는 지역의 표면에서 발생하지만, 그 손상은 ettringite에 의한 수분흡수 메커니즘과 좀더 관련이 있다고 볼 수 있다.

Thaulow와 Jakobsen¹²⁾는 오염된 물에 노출된 모든 콘크리트의 공극과 균열에서 ettringite의 침입이 공통적으로 존재한다고 지적하고 있다. 그러므로, ettringite 그 자체의 존재는 황산염해의 특징이 아니다. 황산염해를 진단하기 위해서는 gypsum으로 채워져 있는 표면 균열을 유발하는 표면부의 페이스트가 존재해야 한다. Gypsum같은 황산염 상태의 생성은 시멘트 페이스트의 분해를 통하여 일어난다. 황산염해를 받은 페이스트의 수산화칼슘 결정의 소실과 칼슘-실리케이트 수화물의 칼슘 상실이 이러한 현상의 미시적인 증거이다.

2.3 Ettringite 생성의 지연 (Delayed ettringite formation)

이것은 콘크리트의 외부가 아닌 내부에서 일어나는 황산염 이온의 침투에 해당하는 것이다. 이 현상은 새롭지 않은 것으로, gypsum 성분을 포함한 골재나 지나치게 많은 양의 황산염을 포함하고 있는 시멘트를 사용한 콘크리트에서 일어난다. 최근에, 이 현상이 많은 양의 황산염을 포함한 grinding clinker를 원료로 해서 생산된 시멘트를 사용한 증기 양생 콘크리트 제품에서 발생하는 것으로 보고되었다. 65 °C 이상에서는 ettringite는 불안정하기 때문에 65 °C 보다 높은 온도의 제조 공정에서는 ettringite는 분해되며 이로 인해 떨어져 나온 황산 이온이 칼슘-실리케이트 수화물에 의하여 흡수된다. 그 후에 콘크리트 구조물의 수명 동안에 황산염이 흡착되고, ettringite의 재생성이 팽창과 균열을 일으킨다.

증기 양생 콘크리트의 ettringite 생성 지연은 아직도 몇몇 연구자들이 새롭고 불확실한 측면에서 재조명하고 있다. 칼슘-실리케이트 수화물에 의해 황산염 이온의 흡수 그리고 초기 수화 생성물에서의 ettringite의 침하는 DEF에 의한 팽창의 필요 조건으로 제안되고 있다. 최근에 Yang과 Collepari¹³⁾ 등의 학자들이 DEF가 고유한 현상이라는 것을 주장할 만한 근거가 없다는 것을 밝혔다. 실제로, Famy 등은 황산염의 흡수가 팽창의 충분 조건이 아니라는 것과 DEF가 항상 팽창을 일으키는 것은 아님을 보고하였다. 이 연구원들에 의해서 팽창 현상은 시멘트 페이스트의 외부 수화 생성물의 공극 내에 작은 ettringite 결정의 형성과 관련되어 있고 이 현상이 습윤 양생 조건에서 일어남이 밝혀졌다.

비록 내부의 황산염해에 의한 DEF 현상은 황산염을 많이 포함한 시멘트로 만든 증기 양생 침묵에서 대부분 보고되었지만, Collepari는 DEF에 의한 손상은 증기 양생 여부에는 상관없이 동일하다는 것을

찾아내었다. 콘크리트의 DEF가 관련된 황산염해에 대한 몇몇 가설에 대한 논평과 함께 Collepari는 다음과 같은 가설을 제안하였다.

- a) 미소 균열은 알칼리-실리카 반응 또는 시멘트 클링커에서 황산염의 분리가 늦게 일어난다거나 하는 다른 원인에 의해 제조 공정 상에서 일어난다.
- b) 물에 노출되어 있는 경우는 이온의 이동은 촉진된다.
- c) 미소 균열 내에는 ettringite가 침적되어 있다.
- d) 균열의 진전은 ettringite의 증가나 결정의 성장 때문이다.

Collepari의 전반적인 접근 방법대로 볼 때, DEF 현상의 근간이 되는 기본 메커니즘은 외부 황산염에 의한 침투와 크게 다르지 않다는 것이 분명하다.

2.4 황산염해의 전반적 고찰 (Holistic approach to sulfate attack)

Mehta¹⁴⁾는 1994년 논문에서, 콘크리트의 열화에 대한 원인과 관리는 동결 융해 작용, 철근의 부식, 알칼리-골재 반응, 그리고 황산염해 전반에 걸친 고찰을 통해서만 만족할 만한 결과를 준다고 제안하였다. 이들 모두는 팽창 현상이고 팽창과 균열 모두 물이 존재해야 하는 현상이다. 실제 구조물의 실험을 통해서 내구성과 관련된 대부분의 문제들은 콘크리트 중에 물이 침투할 수 있을 때 발생하는 것으로 볼 수 있다. 좋은 품질의 양생 관리가 잘된 콘크리트는 아주 수밀하게 되지만 풍화와 하중 등에 의하여 미세 균열이 진전되거나, 공극들의 연결 등으로 수밀성은 떨어지게 된다.

앞에서 언급한 것처럼, Collepari는 DEF에 의한 콘크리트의 손상을 분석하는데 전체적인 접근을 하였다. 실제에서 허구를 분리시키는 것으로서, Collepari는

ettringite의 존재나 증기 양생 콘크리트에서 다량의 황산염을 포함한 시멘트의 사용이 왜 손상을 일으키기에 불충분한가를 설명하였다. 콘크리트의 제조상이나 다른 원인으로 인한 생김 미세 균열, 그리고 콘크리트 중의 물의 존재가 모든 팽창과 DEF에 의한 균열의 핵심 인자이다.

일반적인 양생 콘크리트의 경우, ettringite의 생성은 콘크리트 배합에 물을 붓는 즉시 관찰되는 것으로 알려져 있다. 콘크리트가 굳지 않는 상태로 있게 되면 ettringite의 형성은 부피 팽창을 일으키지 않는다. 많은 양의 반응성 알루미나, 황산염을 포함한 시멘트로 만든 초기 경화 콘크리트는 균일하게 구속되어 있는 상태에서 ettringite를 생성함으로써 아주 유용하게 사용했을 화학적 프리스트레스를 일으킨다. 어떠한 이유든지 내부든 외부든 황산염해에 의한 ettringite의 형성이 나중에 콘크리트가 더 굳어지는 구조물의 사용 기간에 발생하게 되면 ettringite에 의한 팽창은 균열과 탈락을 일으키게 된다. 따라서 ettringite와 관련된 균열은 모두 DEF 현상 때문이다. 그러므로, DEF가 다량의 황산염을 포함한 시멘트를 사용한 증기 양생 콘크리트에서만 발생한다고 하는 것은 틀리며 부적절한 표현이다. 이것은 실재가 아닌 허구를 조장하는 경향이 있다.

3. 결 론

(1) 황산염을 포함한 흙이나 물에 노출된 투수성이 큰 콘크리트는 황산염의 물리·화학적 침해로 열화될 수 있다. 일반적으로 염의 결정화로 알려져 있는 물리적 현상은 황산염에만 국한된 것은 아니다. 또한 공극을 가진 벽돌도 같은 열화를 일으킬 수 있으므로 콘크리트에만 국한된 것도 아니다. 이 현상의 전형은 결정 압력 또는 상의 변화(일상적인 온도와 습도에서 큰 부피 변화를 보이는 염의 경우)에 의한 표면의 침식과 탈락이다. 물리

적 황산염해에 의한 구조물의 완전한 파괴는 보고된 적이 없다.

- (2) 많은 양의 C_3A 를 함유한 모르타르나 콘크리트 시편의 실내 침지 실험에서, 시멘트 페이스트와 황산염 이온의 상호 작용을 포함하는 화학적 현상은 ettringite의 형성이 관련되어 있는 팽창과 균열의 형태로 나타난다. 하지만, 저품질의 콘크리트를 사용하거나 나쁜 환경에 노출된 구조물의 경우, 황산염해는 부착과 강도의 점진적인 손실의 형태로 나타난다. 이것은 부분적인 또는 시멘트 최초 수화 생성물의 완전한 분해가 원인이 된다. 따라서, ettringite, gypsum, 그리고 thaumasite의 형성은 황산염해의 징후이거나 기여할 뿐 주된 원인은 아니다.
- (3) 대부분의 DEF 보고서는 reductionistic 접근에 근거를 두고 있기 때문에 현장 실험에서 제한된 값을 보인다. 전체적인 접근을 적용시켜 볼 때 DEF 또는 내부 황산염해의 기본적인 메커니즘이 외부 황산염에 의한 침해의 그것과 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 황산염 이온의 생성 원인과 관계없이, 연결된 미세 균열과 물의 존재는 콘크리트에서 황산염이 관련된 모든 형태의 침해의 필요 요소이다.
- (4) 황산염해에 의한 구조물 파괴의 위험은 얼마나 심각한 것인가? 그것은 알칼리-골재 반응에 의한 위험보다 훨씬 작은 것이다. Idron은 알칼리-골재 반응을 고려한 60년간의 연구를 재검토 후 다음과 같이 말했다. "알칼리-골재 반응은 세계 각지에서 일어날 수 있다고 결론지을 수 있다. 사용 가능한 골재의 대부분이 알칼리 반응성이지만, 그럼에도 불구하고 발생하는 알칼리-골재 반응의 대부분은 해가 없다." □

참고문헌

1. Wig, R. J. and Williams, G. M., "Investigations on the Durability of Cement Drain Tiles in Alkali Soils", *Technological Papers of the Bureau of Standards*, No.44, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1915, p.56.
2. Wig, R. J. and Williams, G. M.; and Finn A. N., "Durability of Cement Drain Tiles and Concrete in Alkali Soils", *Technological Papers of the Bureau of Standards*, No.95, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1917, p.95.
3. Cohen, M. D. and Mather, B., "Sulfate Attack on Concrete-Research Needs", *ACI Materials Journal*, Vol.88, No.1, Jan.-Feb., 1991, pp.62-69.
4. Mehta, P. K., "Sulfate Attack on Concrete - A Critical Review", *Material Science of Concrete III*, J. Skalny, ed., American Ceramic Society, 1992, pp.105-130.
5. Novak, G. A. and Colville, A. A., "Efflorescent Mineral Assemblages Associated with Cracked and Degraded Residential Foundations in Southern California", *Cement and Concrete Research*, Vol.19, 1989, pp.1-6.
6. Haynes, H.; O'Neill, R.; and Mehta, P. K., "Concrete Deterioration from Physical Attack by Salts", *Concrete International*, Vol.18, No.1, Jan. 1996.
7. Binda, L., and Baronio, G., "Mechanism of Concrete Deterioration by Sodium Sulfate Crystallization", *Durability of Concrete - Third International Conference*, SP-145, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1994, pp.933-946.
8. Hime, W. G., and Mather, B.,

- "Sulfate Attack or Is It?", *Cement and Concrete Research*, Vol.29, 1999, pp.789-791.
9. Stark, D., "Durability of Concrete in Sulfate-Rich Soils", *Research and Development Bulletin RD 097*, Portland Cement Association, Skokie, Ill., 1989.
10. Reardon, E. J., "Ion Interaction Model for Determination of Chemical Equilibria in Cement-Water Systems", *Cement and Concrete Research*, Vol.20, 1990, pp.175-192.
11. Taylor, H. F. W., and Gollop, R. S., "Some chemical and Microstructural Aspects of Concrete Durability", *Mechanics of chemical Degradation of Cement-Based Systems*, K. L. Scrivner and J. F. Young, eds., E&FN SPON, London, 1997, pp.177-184.
12. Taulow, N., and Jakobsen, U. H., "The Diagnosis of chemical Deterioration by Optical Microscopy", *ibid*, pp.3-13.
13. Collepardi, M., "Damage by Delayed Ettringite Formation", *Concrete International*, Vol.21, No. 1, Jan. 1999, pp. 69-74.
14. Mehta, P. K., "Concrete Technology at the Cross Roads - Problems and Opportunities", *Concrete Technology : Past, Present, and Future*, SP-144, P. K. Mehta, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich. 1994, pp.5-31.

경제 용어 해설

● 콘티넨탈방식(continental system)

: 외환거래소에서 외환거래를 하는 방식을 말한다. 서독이나 프랑스에서는 공인된 외환거래소가 설치되어 있어 그곳에서 은행과 브로커들이 외환거래를 하고 환율을 결정하는데 이것을 픽싱(fixing) 이라고 한다. 외환거래소에서 결정되는 환율은 통상 1 일 1 회의 직물환율 뿐이며 통상의 외국환거래는 거래소거래와는 별도로 전화에 의한 은행간 거래 (텔레폰마켓) 에 의해서 이루어지기 때문에 거래소에 의한 외환거래는 점차 줄어들고 있다.

● 출자전환

: 은행이 기업에 빌려준 대출금을 그 기업의 주식으로 맞바꾸는 조치를 말한다. 대출금을 주식으로 전환하면 은행은 기업의 주주로 변한다. 은행지분만큼 소유를 분산시키는 효과도 거둘 수 있다. 주로 은행부채가 너무 많아 재무상태가 취약한 기업을 대상으로 한다. 은행이 주주가 되어 경영정보를 공유하게 되며 대출심사 등 은행 본연의 기능을 수행하는데도 도움이 된다. 다만 기업이 부실한 재무구조를 극복하지 못하고 쓰러지면 은행의 손실은 견잡을 수 없이 커질 위험이 있다.

● 채권시가평가제

: 펀드에 편입된 채권의 가격을 시장에서 받을 수 있는 현재 가격으로 평가하는 제도를 말한다. 지금까지 투신사들은 채권형 펀드에 편입된 채권을 일률적으로 평가한 후 경과이자를 붙여 원금과 이자를 돌려줬다. 채권 값이 고정가격보다 오르면 차익을 챙기고 손실이 나면 손해를 보면서 고객에게 제시했던 수익률을 맞춰 이자를 지급했다. 고객들은 고정된 이자를 받는 셈이어서 채권상품을 은행의 저축과 별로 다르지 않았다. 그러나 채권시가평가제가 적용되면 투신사 대신 고객이 주식투자와 마찬가지로 투자위험과 고수익을 모두 떠 안게 된다. 금리가 내려 채권 값이 오르거나 운용에 성공해 매매차익을 거두면 고객 수익률이 올라가지만 금리가 올라 채권 값이 떨어지거나 부실채권에 잘못 투자하면 고객 수익률이 낮아지게 된다.