

# 화학적 침식을 고려한 콘크리트 구조물의 내구성 증진 방안

The Method of Durability Increase on the Concrete Structure Considering Chemical Attack



김도겸\*  
Do-Gyeum Kim



김성수\*\*  
Seong-Soo Kim



이승태\*\*\*  
Seung-Tae Lee



김종필\*\*\*\*  
Jong-Pil Kim

## 1. 머리말

콘크리트의 화학적 침식은 콘크리트 구조물이 해양, 지하도 양, 하수처리장 및 산업현장 등에서 배출되는 오·폐수 등의 유해 환경에 노출될 경우, 유해 이온의 침투 및 화학반응으로 인하여 콘크리트의 제 성질 및 미세구조를 변화시키는 현상이다. 이러한 화학적 침식을 받는 콘크리트 구조물은 심각한 성능저하를 발생시킬 뿐만 아니라, 나아가 구조체로서의 역할을 상실하게 되는 문제점이 있다<sup>1,2)</sup>.

한편, 유해 환경에 노출된 콘크리트의 화학적 침식 반응은 시멘트의 수화반응으로 생성된 수화생성물과 유해물질과의 화학적 결합으로 인하여 반응생성물을 생성시키게 된다. 반응생성물은 수화생성물과 직접적으로 반응하므로 다른 내구성 저하요인

에 비하여 성능저하 정도가 매우 크다고 알려져 있다. (그림 1)에 콘크리트 구조물의 환경과 화학적 침식 인자 및 성능저하 현상의 원인을 나타내었다. 콘크리트의 화학적 침식에서 콘크리트 중의 수화생성물을 분해하는 것은 유기·무기산, 동식물유, 부식성 가스, 탄산가스 및 황산의 생성을 동반한 미생물의 작용이 있다. 그리고 팽창성 반응을 생성하는 것은 동식물유, 황산염, 해수 및 알칼리 용액이 있으며, 수화물의 용해·박리에 의해 페이스트(paste)가 다공질화 되는 것은 농후한 염화물 및 질산염 용액의 작용을 들 수 있다<sup>3)</sup>.

화학적침식과 관련된 연구는 선진 외국에서도 장기간 동안 실험실의 재료적 연구뿐만 아니라, 현장의 실무적 차원에서도 큰 관심을 가져 국제적 표준화를 위한 많은 연구 활동이 있었지만, 지금까지도 화학적 침식에 의한 성능저하를 평가하는 방

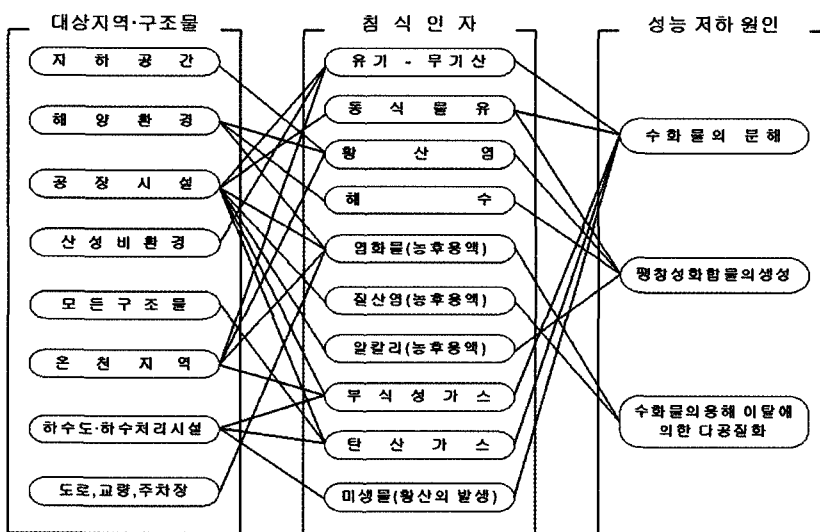


그림 1. 콘크리트 구조물의 화학적침식



사진 1. 황산염에 의한 침식을 받은 콘크리트 구조물의 열화 현상

\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원 (dgkim@kict.re.kr)  
\*\*\* 정회원, 군산대학교 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 대전대학교 건설시스템공학과 교수  
\*\*\*\* 정회원, 대전대학교 건설시스템공학과 강사

법, 항목 등이 각 연구자들 마다 크게 상이하며 콘크리트의 성능저하 메커니즘도 명확하게 밝혀지지 않고 있어 앞으로도 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

국내의 경우, 화학적 침식과 관련된 연구는 외국에 비해 극히 미미한 상황이며, 다른 내구성 저하 요인들에 비해 관련 연구가 활발히 진행되지 못하고 있는 상황이다.

따라서 본고에서는 화학적 침식과 관련하여 성능저하 메커니즘을 보다 명확하게 구명하고 실험방법, 성능기준 및 제어방안에 대하여 소개함으로써 화학적 침식에 노출된 콘크리트 구조물의 내구성 증진을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 화학적 침식을 받는 콘크리트 구조물의 성능저하 메커니즘

### 2.1 해수침식

콘크리트 구조물이 해수 환경에 접할 경우 해수중의 유해 이온들이 시멘트 경화체의 공극을 통하여 내부로 침투하게 된다. 해수 중 염류의 함유량은 약 4% 정도이고, 이 중 약 90%가 NaCl 및 MgCl<sub>2</sub>와 같은 염화물이며, 나머지 10%가 MgSO<sub>4</sub>, CaSO<sub>4</sub> 및 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>와 같은 황산염으로 구성되어 있다. 또한 대기 중의 CO<sub>2</sub>가 녹아 HCO<sub>3</sub><sup>3-</sup>로 용존 되어 있으며, 이를 이온의 종류별로 정리하면 <표 1>과 같다. 표에서 보는바와 같이 해수 중에는 염소이온이 가장 많은 약 19.2g/kg이며, 황산이온 및 마그네슘이온은 각각 2.7 및 1.3g/kg 정도로서 콘크리트 구조물에 대한 해수침식은 여러 유해이온들의 공존에 의한 복합적인 작용이라 할 수 있다.

일반적으로 해수에 존재하는 이온들이 시멘트 경화체 속으로 침투하는 속도는 Cl<sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > Na<sup>+</sup> > Ca<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup>의 순으로 알려져 있다. 이러한 해수중의 Cl<sup>-</sup>은 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>(약 0.4% 정도)보다 시

표 1. 해수의 주요 구성 원소별 농도

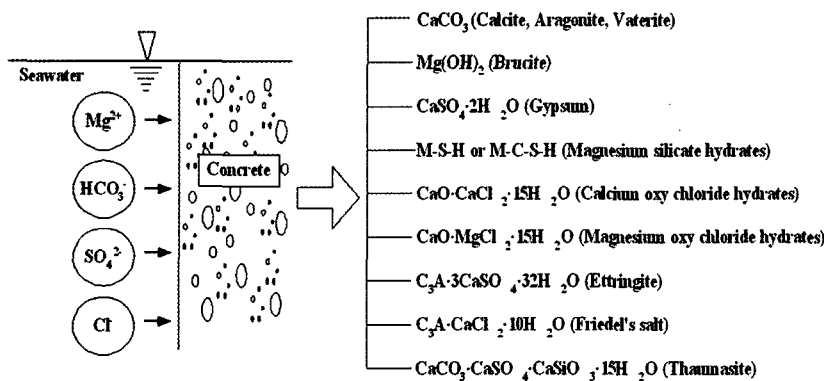
이온의 종류	항목	g/kg	mol/kg <sup>2</sup>	상대 농도
염소(Cl <sup>-</sup> )		19.162	0.5405	1
나트륨(Na <sup>+</sup> )		10.679	0.4645	0.8593
마그네슘(Mg <sup>2+</sup> )		1.278	0.0526	0.0974
황산(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )		2.68	0.0279	0.0517
칼슘(Ca <sup>2+</sup> )		0.4096	0.01022	0.0189
칼륨(K <sup>+</sup> )		0.3953	0.01011	0.0187

- 1) Cl<sup>-</sup> 농도는 34.7%
- 2) 이온 농도는 분자 단위로 표시됨. 1mol/kg은 단위해수(kg)당 들어 있는 6.023×10<sup>23</sup>개의 이온이나 분자 개수와 동일함.

멘트 경화체 속으로 침투하는 속도가 빠르고 용존량도 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 약 10배 이상이므로 시멘트 경화체의 팽창을 유발하는 칼슘 옥시클로라이드와 같은 반응생성물을 형성하는 Cl<sup>-</sup>의 침식에 대하여 고려하여야 한다는 연구결과도 있다<sup>5)</sup>.

또, Al-Amoudi 등에 의하면 해수 환경은 황산염환경과는 달리 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>이 Cl<sup>-</sup>과 공존하기 때문에 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>이 시멘트 수화물과 반응하여 시멘트 경화체내에 생성되는 Ettringite는 Cl<sup>-</sup>의 작용으로 비팽창성 결정이 형성되므로 황산염침식으로 인한 성능저하는 그다지 크지 않다고 보고하고 있다<sup>7)</sup>.

해수 중의 이온들이 시멘트 경화체 속으로 침투하여 반응 생성물을 형성하는 과정은 <그림 2>와 같고 <사진 2>는 해수침식을 받은 콘크리트 구조물이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 해수에 의한 콘크리트의 침식은 황산염 침식과는 상이하며, 훨씬 복잡한 반응으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 또한 해수에 의한 콘크리트의 침식은 시멘트 조성광물 중 C<sub>3</sub>A의 수화물인 C-A-H(약 10%) 뿐만 아니라 수화생성물의 약 20% 정도를 차지하는 Portlandite의 분해 및 60~70%를 차지하는 C-S-H가 M-S-H로의 전이 등 시멘트의 수화물 대부분이 해수 중의 유해이온과 반응한다.



(a) 해수 중의 유해이온 침투 (b) 해수침식에 의한 반응생성물

그림 2. 해수 중의 유해이온과 콘크리트의 반응생성물



사진 2. 해수침식을 받은 구조물

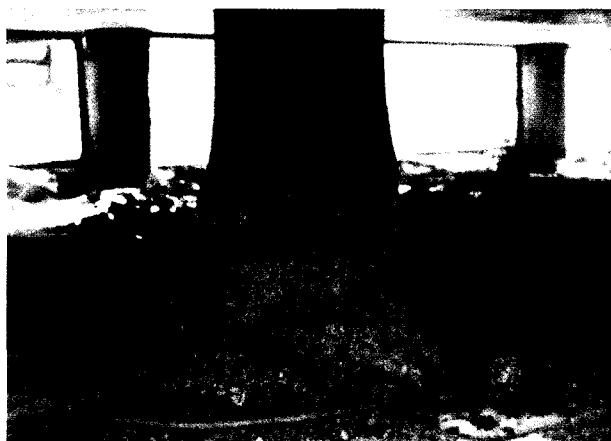


사진 3. 황산염에 노출된 콘크리트 구조물의 화학적침식

## 2.2 황산염 침식

콘크리트 구조물이 토양, 지하수, 해수, 하수종말처리장 및 쓰레기 소각장 등의 환경에 노출될 때 황산염 이온에 의하여 화학적 침식을 받게 된다. 이로 인하여 콘크리트 구조물은 성능저하가 발생하게 되며 점차적으로 내구성능이 저하된다. (사진 3)은 황산염 침식을 받은 구조물의 사진이다.

일반적으로 토양이나 지하수 등에 존재하는 황산염은 황산나트륨( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), 황산칼륨( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), 황산마그네슘( $\text{MgSO}_4$ ), 황산칼슘( $\text{CaSO}_4$ ) 등이 있다. 특히 점토질 흙 및 해수에는 많은 양의 황산염 이온이 함유되어 있으며, 하수처리 시설물 등은 폐수, 오수 등을 접하게 되므로 황산염 이온을 많이 포함한 환경에 놓이게 된다. 그러므로 황산염 이온의 침투에 의한 시멘트 경화체의 내구성 손상은 다른 화학적 침식보다 광범위하고 중요하다고 볼 수 있다.

콘크리트 중의 수화생성물이 황산염 이온을 함유한 환경에 노출되면, 황산염 이온의 물리적 반응에 의한 염의 결정화 및 시멘트 경화체의 수화생성물과 화학적 반응을 일으켜 성능저하가 진행되고, 이런 성능저하는 시멘트 경화체의 팽창을 야기시켜 균열을 발생시키게 된다. 콘크리트 구조물에 균열이 있으면 투수성이 커지게 되어 황산염 이온이 쉽게 내부로 침투할 수 있기 때문에 과도할 경우 팽창에 따른 붕괴를 일으킬 수 있다. 또한 콘크리트의 점착력 상실에 따른 연화(softening)작용으로 강도저하, 체적 및 점착력 감소를 동반하게 된다<sup>11,12,18)</sup>.

### 2.2.1 황산나트륨에 의한 침식

콘크리트 구조물이 황산나트륨 환경에 노출될 경우, 시멘트 수화물과 황산이온은 다음 식(1)의 반응과정을 통하여 Gypsum을 생성하게 된다. 그리고 이 Gypsum은 다시 시멘트 성분 중 알루미늄이트상과 반응하게 되어 팽창특성을 가진 Ettringite를

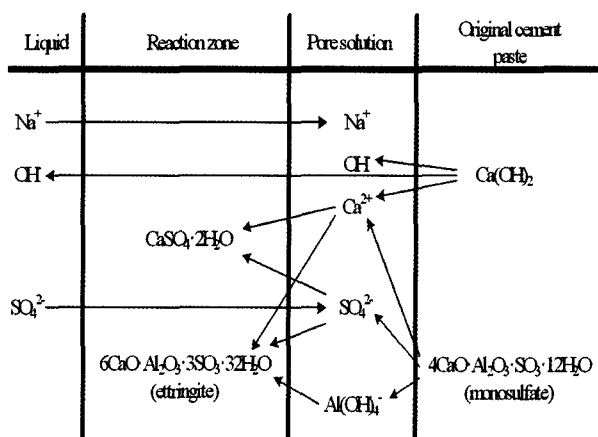
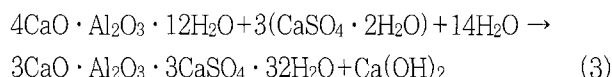
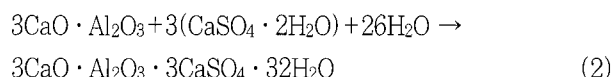
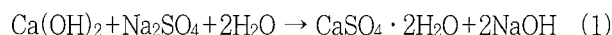


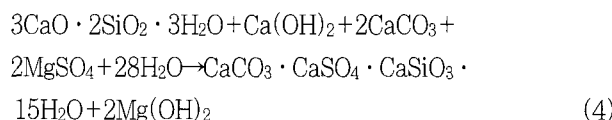
그림 3. 황산나트륨과 시멘트의 황산염침식 메커니즘<sup>17)</sup>

생성하게 되며, 그 반응관계는 다음 식(2) 및 식(3)과 같다.



황산염의 침식작용으로 인하여 생성된 Gypsum 및 Ettringite는 콘크리트 조직에 대한 연화 및 팽창작용을 일으키게 되며, 중국에는 콘크리트 구조물의 붕괴를 초래한다. 뿐만 아니라, 황산나트륨 환경에 놓인 콘크리트 구조물이 건습반복의 조건을 받게 되면 Mirailite( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) 및 Thenardite( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )의 생성으로 인한 결정압에 의하여 콘크리트의 조직구조가 손상을 입게 되며, 성능저하는 가속화되기도 한다<sup>6)</sup>.

또한 황산염은 다음 식(4)와 같이 Thaumascite를 생성하며, 이 물질은 시멘트 수화물인 C-S-H를 직접적으로 침식하기 때문에 콘크리트의 내구성에 나쁜 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다<sup>13,14)</sup>.



<그림 3>에 황산나트륨과 시멘트의 화학반응에 따른 황산염 침식 메커니즘을 나타내었다.

### 2.2.2 황산마그네슘에 의한 침식

콘크리트 구조물에 대한 황산마그네슘의 침식은 황산나트륨 침식과 비교할 때 성능저하 정도 및 반응생성물에서 상당한 차이를 보인다. 일차적으로 시멘트 수화물과 황산마그네슘이 반응

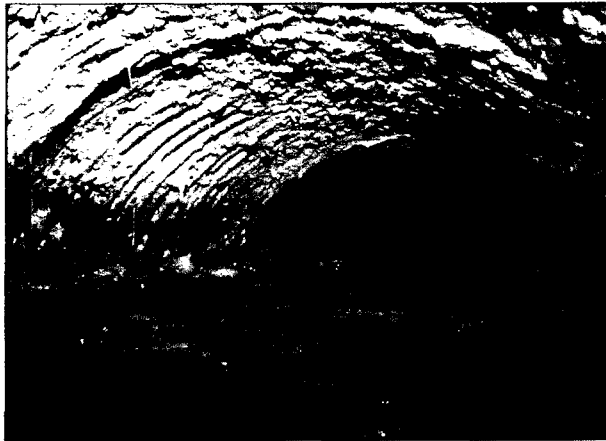


사진 4. 산의 침식을 받은 콘크리트 구조물

하게 되면 식(5)와 같이 불용성의 고밀도 반응생성물인 Brucite ( $Mg(OH)_2$ )가 생성되며, 이 물질은 연차적으로 생성된 Gypsum 과 함께 불투수성의 이중층(double layer)을 형성하게 되어 외부로부터 황산이온의 침투를 어느 정도 방지하는 역할을 하게 된다.



그러나 콘크리트가 지속적으로 황산마그네슘 침식을 받을 경우에는 이중층과 내부의 탈탄산화(decalcification)된 1차 또는 2차 C-S-H와의 결합력이 약화되어, 콘크리트 표면으로부터 이중층의 탈락이 야기된다. 결국, 황산마그네슘 환경에 직접 노출된 탈탄산화된 C-S-H는 식(6)과 같이 마그네슘이온과의 치환 반응으로 인하여 비결정질의 M-S-H로 변환되어 심각한 강도 저하 현상이 발생하게 된다<sup>16)</sup>.



〈그림 4〉에 황산마그네슘과 시멘트의 화학반응에 따른 황산염침식 메커니즘을 나타내었다.

### 2.3 산 침식

오·폐수 처리 및 하수시설, 온천지대, 산성하천유역, 화학공장 등에 건설되는 콘크리트 구조물은 화학적 침식에 의하여 내구성능이 크게 저하되며, 특히 하수도시설 콘크리트 구조물은 산 침식에 의하여 성능이 저하 된다고 알려져 있다.

포틀랜드시멘트의 수화생성물 중에서 다량으로 존재하는 알칼리성의  $Ca(OH)_2$ 는 산과 반응하기 쉬우며 수경성 화합물인 C-A-H와 C-S-H는 산과 반응하여 분해된다. 이  $Ca(OH)_2$ 가 산에 접하게 되면 중화되어 각종 염류가 생성되고 콘크리트는 이러한 염의 용출과 결정화 등에 의해 침식, 손상되며 콘크리트

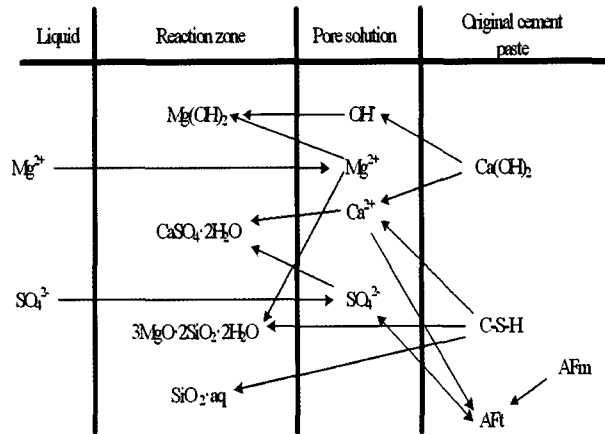


그림 4. 황산마그네슘과 시멘트의 황산염침식 메커니즘<sup>17)</sup>

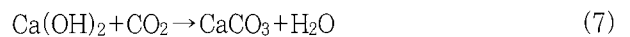
중의 C-A-H와 C-S-H까지도 분해된다.

〈사진 4〉와 같이 콘크리트를 침식하는 산은 크게 나누어 황산, 염산, 초산, 인산, 크롬산, 불산 및 이황산 등의 무기산과 유산, 구연산 등의 유기산으로 나눌 수 있으며 다소의 차이는 있지만 대부분의 콘크리트는 이들 산에 의한 침식을 받는다.

특히 염산, 황산 등의 침식작용은 그 정도가 심하여 수용성의  $CaCl_2$ ,  $Ca(NO_3)_2$ 와 난용성의  $CaSO_4$  등을 생성하고 규산과 알루미나 등을 용해시켜 실리카와 알루미나겔을 생성하며 골재까지도 침식시킨다. 특히 황산의 경우  $Ca(OH)_2$ 와 반응하여 Gypsum을 생성한다.

이 때 생성되는 Gypsum( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ )은 물에 대한 용해도가 비교적 낮아 황산의 농도가 낮을 경우 초기에는 수화생성물의 용출을 억제하여 산이 콘크리트로 침투하는 것을 막아 주지만 생성된  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 가 시멘트 중의  $C_3A$ 나 그 수화물과 반응하여 Ettringite를 생성하면서 현저한 체적팽창이 발생하여 콘크리트를 손상시켜 균열을 일으킨다.

연소가스 중의  $SO_2$ , 토양 중의 황화수소 및 해수 중의 황산염도 비슷한 작용을 보이며 염소 이외의 할로겐에 의해 생긴 산의 작용은 염산의 경우와 거의 비슷하지만 불소산은 콘크리트 중의 규산염 또는 골재를 직접 분해하는 작용도 있다. 탄산은 공기 중의 탄산가스가 물에 용해되어 생성하는 것 외에 토양과 지하수 중에도 존재하고 있으며 이러한 탄산은 콘크리트 중의 수산화칼슘과 식(7) 및 식(8)과 같이 반응한다.



한편 탄산의 용해도가 낮을 경우에는 물에 불용성인 중성탄산염의 탄산칼슘을 만들어 콘크리트의 조직이 치밀하게 되지만 탄산농도가 높은 경우에는 물에 가용성인 탄산염이 중탄산칼슘( $Ca(HCO_3)_2$ )으로 되기 때문에 콘크리트는 침식을 받게 된다<sup>10)</sup>.

또, 인산( $H_3PO_4$ )은 물에 불용성인  $Ca(PO_4)_2$ 를 생성하기 때문에 콘크리트에 대한 침식작용은 그다지 크지 않다. 유기산은 무기산에 비하여 그 작용은 미약하나 콘크리트의  $Ca(OH)_2$ 와 반응하여 생성하는 염류가 수용성 혹은 난용성 여부에 따라 또 유기산의 농도에 따라 그 침식정도가 다르다. 아세트산, 젓산 및 포름산 등의 칼슘염은 수용성으로 침식작용을 하지만 옥살산은 불용성의 염을 생성하여 콘크리트 표면에 보호층을 생성하기 때문에 침식은 상대적으로 적다.

올레인산, 스테아린산 및 팔미틴산 등 고급지방산이나 페놀 등도 가용성의 염을 만들어 콘크리트를 침식시키는데 후민산은 아세트산보다는 약하나 탄산보다는 강하며 반응생성물인 칼슘염은 난용성이므로 콘크리트에 대해서는 거의 영향을 미치지 않는다.

### 3. 화학적 침식 실험 방법 및 관련 기준

#### 3.1 화학적 침식 실험 방법

화학적 침식을 평가하기 위하여 실시하는 실내 시험의 경우는 시험용액을 제조한 후 공시체를 시험 용액에 침지하여 시험 항목에 따라 재량별 특성 변화를 파악한다. 화학적 침식에 대한 시험 항목으로는 공시체의 외관조사, 강도감소, 길이변화, 중량 감소, 동탄성계수의 변화 등이며, 성능저하 원인을 미세구조적 관점에서 조사할 수 있는 scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), mercury intrusion porosimetry (MIP), differential scanning calorimetry(DSC), BET surface area and pore solution analysis 등과 같은 기기분석 장치를 이용하게 된다. <그림 5>는 실내 시험에 의한 시험체의 파괴 형태를 나타낸 것이다.

한편, 화학적침식과 관련된 실내 실험은 촉진실험으로 진행된다. 실제 토양이나 지하수의 황산염 용액의 농도(<1000 ppm  $SO_3$ )는 낮지만, 실험의 효율성을 위하여 짧은 기간 동안 촉진반응을 시킨 실험결과로 장기간 반응과 내구수명을 예측하게 된다.

침식을 촉진시키는 시험법은 다음과 같다.

- ① 반응면적의 확대
- ② 용액의 농도를 높임
- ③ 결정압력을 높임
- ④ 용액의 온도를 높임

①항과 ②항의 방법이 가장 실용적이며 널리 사용되는 방법이다. ②항의 방법은 황산염용액의 농도에 따른 침식의 성질과 메커니즘을 연구하기보다는 주로 콘크리트의 침식을 촉진함으로써 내구성능을 평가하기 위한 방법으로 사용된다. ③항의 방

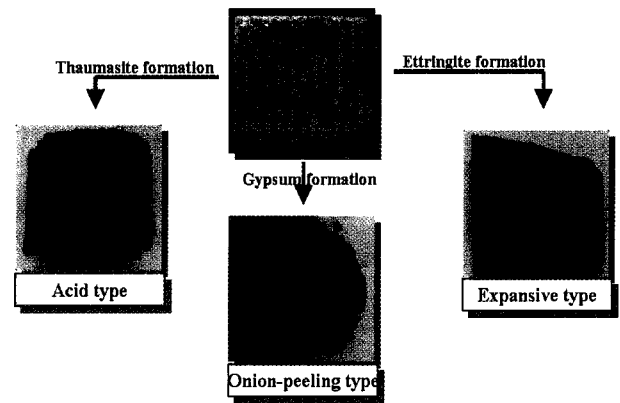


그림 5. 화학적침식에 의한 시험체의 파괴 형태

법은 해석의 결과에 영향을 주는 다른 파괴 메커니즘이 포함될 수 있기 때문에 많이 이용되지 않는 방법이다. ④항의 방법은 기술상으로 다소 어려움이 따른다. 온도상승은 혼합구성과 공시체의 크기에 따라 다른 영향을 준다. 또한 높은 온도는 화학작용과 미세구조에 큰 변화를 준다.

Mehta에 의해 제안된 황산염 침식 촉진법은 많은 관심을 모았다. 이 방법은 황산나트륨 용액에 산을 반복적으로 첨가하여 일정한 pH 6.2를 유지시키며, 황산염 침식에 대한 시멘트페이스트의 저항성을 실험하는 것이다. 이 방법은 황산염 침식 메커니즘이 Gypsum 생성에 국한되므로 Ettringite 형성과 구별되는 Gypsum 형성의 영향을 분석할 수 있는 장점이 있다<sup>15)</sup>.

다른 황산염침식 촉진법은 높은 W/C의 모르타르를 사용하는 방법과 Gypsum를 첨가하는 방법이 있다. 이 중 높은 W/C를 이용하는 방법은 모르타르의 투수성을 증가시키며 초기에 황산염침식을 받도록 하는 시험방법이지만 좋은 성과를 얻지는 못하였다. 이것을 기초로 K. Mather는 낮은 W/C를 사용하여 실험을 수행하였다((중량비 : 무 공기 연행 포틀랜드시멘트 0.485, 공기 연행 포틀랜드시멘트 0.460) - 이 방법은 콘크리트의 투수성이 작고 침식이 지연되므로 충분한 기간 동안 길이변화를 측정하여야 한다. 이것이 황산염 용액에 노출된 수중 시멘트 모르타르의 길이변화 측정법을 규정하는 ASTM C 1012의 기초가 되었다.). 이 방법은 혼합시멘트와 포틀랜드시멘트의 황산염 저항을 평가하는 데 적합한 방법이다.

두 번째 언급한 Gypsum를 첨가하는 실험방법은 황산염 침식을 촉진하는 효과적인 방법으로, 기존의 시멘트의  $SO_3$ 를 포함하여 포틀랜드시멘트 중량비 7%의  $SO_3$ 가 되도록 Gypsum를 첨가한다. 이 방법은 황산염에 노출된 포틀랜드시멘트 모르타르의 잠재적 팽창을 결정하는 표준시험법을 규정한 ASTM C 452의 기초가 되었으며 14일 이내에 실험 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 혼합시멘트나 슬래그·포졸란을 혼합한 포틀랜드시멘트는 수화반응이 늦기 때문에 이 방법을 적용하는

표 2. 콘크리트 노출조건에 따른 주변농도에 의한 규정(ACI Building Code 318)

Sulfate exposure	Water soluble sulfate (SO <sub>4</sub> ), % by mass	Sulfate (SO <sub>4</sub> ) in water, ppm	Cement type
Negligible	0.00 ≤ SO <sub>4</sub> ≤ 0.10	0 ≤ SO <sub>4</sub> ≤ 150	-
Moderate*	0.10 ≤ SO <sub>4</sub> ≤ 0.20	150 ≤ SO <sub>4</sub> ≤ 1,500	II, IP(MS), IS(MS), P(MS), I(PM)(MS), I(SM)(MS)
Severe	0.20 ≤ SO <sub>4</sub> ≤ 2.00	1,500 ≤ SO <sub>4</sub> ≤ 10,000	V
Very severe	SO <sub>4</sub> ≥ 2.00	SO <sub>4</sub> ≥ 10,000	V + pozzolan **

\* Seawater

\*\* Pozzolan that has been determined by test or service record to improve sulfate resistance when used in concrete containing type V cement.

것이 부적당하며, 충분한 수화를 보장할 수 있는 ASTM C 1012가 보다 적합한 시험방법이다<sup>9)</sup>.

한편, Biczok 및 Santhanam은 황산염 농도가 증가하면 황산염 침식에 의한 성능저하가 촉진되어 침식 메커니즘이 변하게 되므로 황산염 농도는 시멘트 경화체의 성능저하 및 내구수명을 결정하는 주요변수 중의 하나<sup>7)</sup>라고 지적하였다. 황산나트륨 침식의 경우 황산나트륨용액의 농도에 따라 침식 메커니즘이 두가지 형태로 구분된다. 저농도(0.12% 이하 즉 SO<sub>3</sub> 농도 830 mg/ℓ 이하 - 이 한계에서 포틀랜드시멘트의 C<sub>3</sub>A 함량이 변함)에서의 콘크리트 침식 형태는 Ettringite에 의한 성능저하이고, SO<sub>3</sub> 농도가 큰 경우의 침식 형태는 Gypsum 생성에 따른 성능저하인 것으로 보고하였다<sup>7)</sup>.

황산마그네슘 침식에 있어서 황산이온의 농도가 4,000 ppm 이하의 저농도일 경우에는 Ettringite가 주로 생성되며, 4,000 ppm 이상 7,500 ppm 이하의 중간농도에서는 Ettringite와 Gypsum의 생성되는 것에 비하여, 고농도(7,500 ppm 이상)에서는 칼슘실리케이트수화물(C-S-H)의 탈탄산화(Decalcification) 및 마그네슘(Mg<sup>+</sup>) 이온의 침식작용이 활발하게 발생하여 시멘트 경화체의 성능을 저하시킨다.

따라서 화학적 침식에 대한 실험은 ASTM의 실험방법이 그 기초를 이루겠지만 유해이온의 종류, 농도, 온도 및 습도 등에 따라 손상의 형태 및 정도가 상이하게 나타나므로 실험계획 수립시 충분한 고민과 주의를 요한다.

### 3.2 화학적 침식 관련 기준

ACI Building Code 318은 <표 2>과 같이 콘크리트 구조물이 노출되는 환경에 따라 이에 적합한 시멘트를 제안하고 있으며, ACI Committee 201 및 BS Code에서도 이와 유사한 규정을 정하고 있다.

국내의 화학적 침식관련 규정은 한국콘크리트학회에서 규정을 하고 있으며, 이 역시 ACI Code와 유사하다<sup>4)</sup>.

## 4. 화학적 침식에 대한 내구성 증진방안

### 4.1 화학적 침식에 대한 내구성 증진 방안

화학적 침식을 받는 콘크리트 구조물의 내구성을 향상시키기 위해서는 유해이온이 시멘트 경화체 중으로 침투·확산되는 것을 억제할 수 있도록 가능한 한 물-시멘트비를 낮추고 포졸란 물질을 적절하게 혼합하여 사용하는 것이 효과적이다.

콘크리트 구조물의 화학적 침식은 시멘트의 화학성분, 물-시멘트비, 단위시멘트량 및 광물질혼화체의 혼입 등 콘크리트의 성능 및 품질에 영향을 미치는 내적요인과 유해이온의 종류 및 농도, 온도, 습도 등의 외적요인 등 다양한 요인에 의하여 영향을 받는다. 따라서 본 장에서는 이 중 손상의 크기에 큰 영향을 미치는 몇 가지 요인에 대하여 알아보기로 한다.

#### 4.1.1 시멘트의 조성광물

황산염 침식을 받은 시멘트 경화체의 성능저하 평가 및 성능 개선에 대한 연구는 여러 연구자들에 의하여 수행되어 왔다. 특히, 포틀랜드시멘트계 경화체의 경우 시멘트 경화체 내의 조성광물 중 C<sub>3</sub>A 함량 및 칼슘실리케이트(C/S)비에 따라 황산염침식 저항성이 매우 상이하게 나타남을 확인하였다.

또한, 콘크리트 경화체의 황산염 침식 저항성을 향상시키기 위한 개선 방안으로 시멘트 클링커 조성 광물 중 C<sub>3</sub>A 함량을 줄이거나 시멘트 수화생성물인 수산화칼슘의 생성량을 저감시키는 방안이 제안되고 있다. 뿐만 아니라 황산염 침식의 요인인 황산이온으로 인하여 발생하는 Ettringite 및 Gypsum의 생성량을 저감시키기 위해서는 C<sub>3</sub>S 및 C<sub>2</sub>S와 같은 규산 칼슘계 광물을 줄임으로써 이들 광물의 수화반응에 의해 생성되는 수산화칼슘[Ca(OH)<sub>2</sub>]의 양을 감소시키는 것이 효과적인 것으로 분석되고 있다. 한편, ASTM C 150에서는 황산염 침식에 대한 개선 방안으로 C<sub>3</sub>A 함량이 최대 5%인 Type V의 내황산염 포틀랜드시멘트, C<sub>3</sub>A의 함량이 최대 8%인 Type II의 중

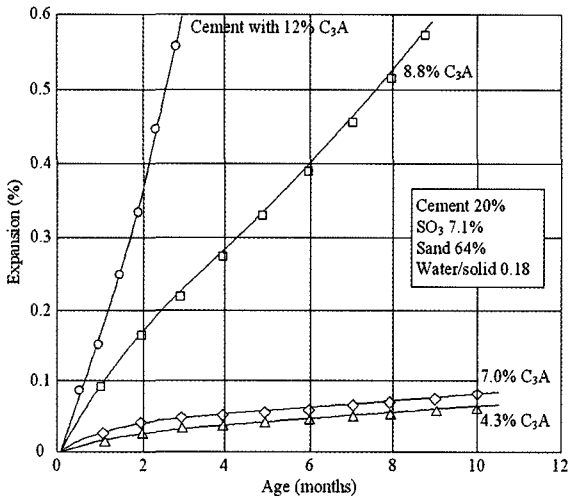


그림 6. 시멘트의 화학조성에 따른 팽창률

용열 포틀랜드시멘트의 사용을 규정하고 있다. <그림 6>은 C<sub>3</sub>A 함량에 따른 팽창률을 나타낸 결과로써 C<sub>3</sub>A 함량이 증가할수록 팽창률이 크게 발생함을 알 수 있다.

4.1.2 콘크리트의 배합

시멘트의 화학성분 변화 및 광물질 혼화재 이용으로 화학적 침식 저항성을 향상시킬 수 있지만, 무엇보다 중요한 것은 콘크리트 중으로 침입하는 유해이온을 차단하는 것이다. 이것은 곧 콘크리트를 치밀하게 만들어 침투성을 최소화하는 것으로, 시멘트페이스트의 미세구조를 개선하여 낮은 투수성을 지닌 콘크리트를 제조하기 위해서는 낮은 물-시멘트비와 높은 단위 시멘트 량을 적용하는 것이 유리하다.

<그림 7>은 단위 시멘트량이 상이한 모르타르 시험체를 제조한 후 5% 황산나트륨 용액에 침지하여 압축강도 및 길이변화를 측정된 결과이다. 이 그림에서 보듯이 단위 시멘트량이 증가할수록 침식에 대한 저항성이 향상되는 것을 알 수 있었으며, 이런 결과로 인하여 단위 시멘트량은 화학적 침식을 향상시키기 위한 중요한 인자로 작용하고 있음을 알 수 있다.

4.1.3 광물질 혼화재의 혼입

시멘트의 일정부분을 고로슬래그미분말, 플라이애쉬, 실리카 폼 등과 같은 광물질 혼화재로 대체할 경우, 광물질 혼화재의 포졸란 반응 및 잠재수경성 반응으로 인하여 다량의 2차 반응 칼슘실리케이트수화물(C-S-H)이 생성되어 콘크리트의 미세구조가 치밀하게 형성된다. 뿐만 아니라 실리카폼은 그 자체가 초미립자이기 때문에 시멘트 경화체의 미세공극을 메우는 충전(filler) 효과도 기대할 수 있다.

또한, 포졸란 및 잠재수경성 반응으로 인하여 수산화칼슘 [Ca(OH)<sub>2</sub>]의 양이 감소하기 때문에 황산염 이온과 반응하여

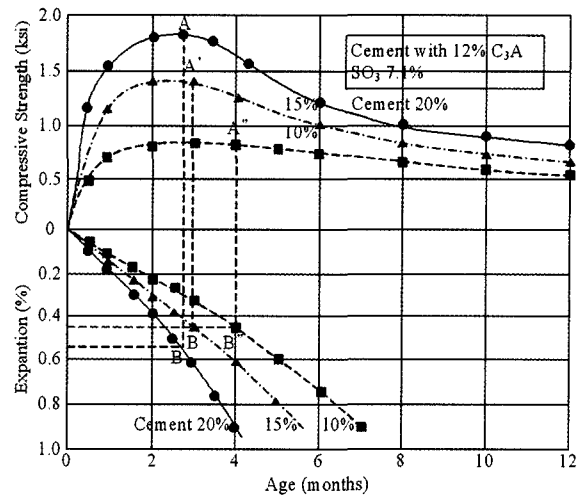


그림 7. 단위 시멘트량이 상이한 시험체의 압축강도 및 길이 변화(NaSO<sub>4</sub> 5%)

생성되는 Gypsum의 양이 감소하게 되며, 광물질 혼화재가 포틀랜드시멘트를 부분적으로 대체함으로써 C<sub>3</sub>A의 전체 양이 줄어들게 된다.

이러한 이유로 인하여 화학적 침식을 받을 우려가 예상되는 환경에서는 고로슬래그 미분말 또는 포졸란을 함유한 혼합시멘트를 사용할 것을 권장하고 있다.

4.1.4 콘크리트의 표면 도장

화학적 침식에 대한 저항성을 향상시키기 위하여 시멘트 경화체의 표면에 도장을 실시하는 표면 도장공법이 적용되기도 한다. 표면 도장은 콘크리트로 침투될 수 있는 각종의 외부로부터의 액체나 기체상태의 유해물질들을 1차적으로 표면에서 차단함으로써 콘크리트의 손상을 억제하는 매우 유용한 방법으로 최근에는 콘크리트 구조물의 미관을 좋게 하기 위한 경관도장으로서도 적극적으로 이용되고 있다.

최근 들어 국내외적으로 도장에 관한 연구가 폭넓게 수행되어 새로운 도장재료의 개발과 공법 개량 등이 이루어지고 있어 도장재료의 성능과 신뢰성이 크게 향상되었으며, 이에 따라 도장 공법별 품질기준과 시공요령이 정비되어 오고 있다. 그러나 도장공법은 공사비의 증가와 함께 추가적인 보수와 정비가 지속적으로 이루어져야 하는 단점을 내제하고 있으므로 주의를 요하는 부분이기도 하다.

5. 맺음말

앞에서 살펴본 바와 같이, 콘크리트의 화학적 침식은 시멘트의 수화생성물과 유해이온의 화학반응에 의해 생성된 유해한 반응생성물로 인하여 콘크리트가 팽창 및 균열을 발생시켜 성능을 저하시키는 과정이다.

이러한 콘크리트의 화학적 침식은 콘크리트의 강도 및 미세 구조의 형태뿐만 아니라 유해이온의 종류, 농도, 온도 및 습도 등의 노출환경에 따라 성능저하의 진행과정 및 정도가 매우 상이하기 때문에 성능저하의 원인으로부터 손상 메커니즘을 명확하게 하였다 하더라도 그 진행의 정도를 예측하는 것은 매우 어렵다.

따라서 화학적 침식을 받는 구조물의 내구성 설계를 위해서는 다양한 연구결과로부터 얻어진 데이터와 구조물이 처한 상황을 시뮬레이션한 실험을 토대로 얻어진 데이터로부터 성능저하의 과정을 예측할 수 있는 적절한 모델을 수립하여야 한다.

그러므로 콘크리트의 화학적 침식을 억제하기 위한 내구성 설계 측면에서 보면, 콘크리트 구조물의 사용기간 동안 내구성능을 보충하기 위해서는 다양한 화학적 침식 인자에 관한 적절한 연구를 통하여 장기적인 손상을 예측하고 구조물의 내구성능을 담보할 수 있는 효율적인 설계기법을 제시되어야 한다.

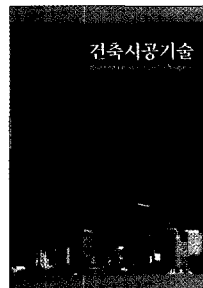
### 참고문헌

1. 문헌영, 김성수, "화약약품용액에 침지한 콘크리트의 열화에 대한 연구", 대한토목학회논문집, 12권, 2호, 1992, pp.55~66.
2. 이승태, "해수침식을 받은 시멘트 경화체의 성능저하 및 내구성 평가", 한양대학교 박사학위논문, 2003.
3. 김종필, "황산염침식을 받은 시멘트 경화체의 성능향상을 위한 연구", 한양대학교 박사학위논문, 2005.
4. ACI Building Code 318, *Requirement for Structural Concrete and Commentary*, American Concrete Institute, 2003, pp.37~38.
5. M. Conjeaud, *Mechanism of sea water attack on cement mortar, Performance of concrete in marine environments*, ACI Publication SP-65, 1980, pp.22~39.
6. J. P. Skalny, I. Odler, and J. Marchand, *Sulfate Attack on Concrete*, Spon, London, 2001.
7. M. Santhanam, M. D. Cohen, J. Olek, "Sulfate attack research-whither now", *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001, pp.845~851.
8. O. S. B. Al-Amoudi, "Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments", *Cement and Concrete Composites*, Vol.24, 2002, pp.305~368.
9. ASTM C 1012, *Test for length chang of hydraulic cement mortars exposed to sulfate soultion*, ASTM, 1995.
10. Liu J., Vipulanandan C., "Evaluating a polymer concrete coating for protecting non-metallic underground facilities from sulfuric acid attack", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.16, 2001, pp.311~321.
11. Brown, P. and hooton, R. D., "Ettringite and Thaumassite Formation in Laboratory Concrete Prepared Using Sulfate-Resisting Cements", *Cement and Concrete Research*, Vol.24, 2002, pp.361~370.

12. Brown, P. W. and Taylor, H. F. W., *The role of ettringite in external sulfate attack*, in J. Marchand and J. Skalny(eds) *Materials Science of Concrete Special Volume: Sulfate Attack Mechanisms*, The American Ceramic Society, Westerville, OH, 1999, pp.73~98.
13. Crammond, N. J., "The thaumasite form of sulfate attack in the UK", *Cement and Concrete Composites*, Vol.15, 2003, pp.809~818.
14. Hartshorn, S. A., Sharp, J. H., and Swamy, R. N., "Thaumassite Formation in Portland-Limestone Cement Pastes", *Cement and Concrete Research*, Vol.29, 1999, pp.1331~1340.
15. Mehta, P. K., "Mechanism of Sulfate Attack on Portland Cement Another Look", *Cement and Concrete Research*, Vol.12, 1983, pp.401~406.
16. Santhanam, M., Cohen, M. D., and Odler, J., "Mechanism of sulfate attack: fresh look Part 2. Proposed mechanisms", *Cement and Concrete Research*, Vol.33, 2003, pp.341~346.
17. Skalny, J., Marchand, J., and Odler, J., *Sulfate Attack on Concrete*, 1st Published by Spon Press, London, UK, 2002, pp.43~114.
18. Yang, R., Lawrence, C.D., Lyndsdales, C. J., and Sharp, J. H., "Delayed ettringite formation in heat-cured portland cement mortars", *Cement and Concrete Research*, Vol.29, 1999, pp.19~25.

### 도서소개

#### 건축시공기술



저 자 : 문승호  
 감 수 : 신현식, 김문한  
 출판사 : 기문당  
 발행일 : 2006년 06월 15일  
 ISBN : 89-7086-879-6  
 총쪽수 : 744 쪽 (판형 : B5)  
 정 가 : 28,000원

이 책은 현존의 건축시공학에서 다루는 공학적 지식과 기술인에게 필연적으로 수반하는 실무의 경험과학을 접목하여 알기쉽게 총정리해 놓은 건축시공기술서이다. 기초적인 자료 외에 총론에서 서술한 건축생산관리를 비롯하여 건축물의 규모와 크기에 관계없이 어느 하나 소홀히 다룰 수 없는 흠막이공법과 지반개량공법, 기초의 침하, 지하구조물의 부력, 그리고 건축구조의 기초자료인 구조물에 작용하는 하중과 그 특성을 다루어 장차 시설물의 안전에 대비하도록 하였다.