한국광물학회지 (광물과 산업) 제14권 제2호, 1-8, 2001
J. Miner. Soc. Korea (*Mineral & Industry*), 14, 2, 1-8, 2001

단 보

콘크리트 열화와 에트린자이트의 형성

이 효 민, 옥 수 석

부산대학교 지구환경시스템 학부
경성대학교 물리학과

콘크리트의 조기 열화 현상에 의한 콘크리트 내구성에의 문제점은 근래에 들어 많이 언급되고 있다. 콘크리트의 조기 열화를 유발하는 경우는 보강용 강제의 염분부식으로 인한 열화와 알칼리 골재반응에 의한 열화가 많이 알려져 있으며, 이에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 이러한 조기 열화현상은 일반적으로 단순한 원인에 의한 것보다, 이른바 복합적인 요인에 의해 발생하는 경우가 많다. 이에 따라 선진국에서는 신속하고 종합적인 연구체제를 갖추어 학제적인 조직에 의해 연구를 진행하여 그 진단과 대책을 검토하고 있다. 콘크리트는 하나의 복합재료, 즉 그 원천이 광물질인 시멘트와 암석인 골재, 그리고 경화작용과 내구성을 향상시키기 위한 다양한 종류의 화학물질들의 첨가물로 구성된 물질이다. 그래서 초기 콘크리트 혼합의 경우는 물론 경화된 후에도 물과 광물 간의 다양하고 복잡한 화학반응이 끊임없이 진행되는 물질이다. 따라서 조기 열화현상에서 광물학적 지식과 지구화학적인 지식이 요구되는 물과 광물 간의 상호반응의 주요한 연구 대상이 될 것이며, 이러한 지식을 토대로 한 열화현상에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

근래에 콘크리트 경화 후에 진행된 화학반응 결과로 형성되는 이차 생성 광물에 의한 열화현상 규명과 열화현상을 방지하기 위한 연구가 다각적으로 진행되고 있다. 그 중 하나가 에트린자이트의 형성과 관련된 열화현상과 그 방지책에 관한 것이다. 단보는 이 콘크리트 내의 에트린자이트의 생성과 산출상태, 그에 따른 콘크리트 구조물의 조기 열화현상과 그 열화 메카니즘에 대하여 간단히 정리한 것이다.

에트린자이트 (Ettringite)

자연 상태에서 에트린자이트는 열수용액으로부터 생성되는 주상의 아름다운 광물이다. 그러나, 일반적으로 에트린자이트는 콘크리트의 초기 수화반응에서의 중요성과 초기 열화현상에의 관련성으로 콘크리트 연구에서 중요한 광물로 인식되어져 왔다. 에트린자이트는 황산염 광물로서, 일반적으로 콘크리트 관련문헌들에서 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 32H_2O$ 혹은 $Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26(H_2O)$로 표기되는 칼슘술포알루민산 수화물(Calcium Sulfoaluminate Hydrate)이다. 시멘트의 초기 수화반응(즉 경화작용)에서 생성되는 반응 산물로서 에트린자이트 생성은 콘크리트의 경화작용 시간을 조절하며 강도를 증가시키고 수축작용을 방지하는 아주 중요한 광물이다. 그러나 이러한 수화반응의 초기에 형성되는 에트린자이트와는 달

리, 콘크리트가 경화된 후에 형성되는 에트린자이트는 소위 '콘크리트의 암(Cancer of Concrete 소위 Concrete Bacillus)'으로 불리며 콘크리트의 조기열화의 하나의 원인이 되는 유해한 광물로 인식된다. 이러한 이유로 콘크리트 연구에 있어서 에트린자이트는 그 형성기원에 따른 서로 다른 3가지 형태(type)의 에트린자이트를 구분하기 위해 일차 에트린자이트(primary ettringite), 이차 에트린자이트(secondary ettringite)와 지연 에트린자이트(delayed ettringite)와 같은 다른 용어로서 구분 · 사용한다.

이들을 간략히 정리하면 다음과 같다.

(1) 일차 에트린자이트는 상기한 수화반응의 초기에 용액 내의 황산염과 시멘트의 칼슘-알루민산 성분 반응함으로 생성되는 수화 반응산물로서의 에트린자이트를 지칭한다.

(2) 이차 에트린자이트는 일차 에트린자이트의 용액이 침전됨으로 생성되는 에트린자이트를 말한다.

(3) 지연 에트린자이트는 경화된 콘크리트 혹은 몰타르에서 황산염과 칼슘-알루민산과 반응으로 생성되는 것이다. 이러한 작용은 소위 "sulfate attack"으로 불리워지며, 일반적으로 황산염이 콘크리트 내부에서 유래된 것은 지연 에트린자이트의 형성(delayed ettringite formation, DEF)으로 불리워진다.

광물학적 특성

에트린자이트의 화학조성을 광물구조와 연관시켜 기술하면, $[Ca_3[Al(OH)_6] \cdot 12(H_2O)]^{3+}$을 단위로 하는 기둥(column) 구조들로 구성되어 있음을 나타내는 $\{Ca_6[Al(OH)_6]_2 \cdot 24(H_2O)\}(SO_4)_3 \cdot 2H_2O$로 표기할 수 있다. SO_4^{2-} 이온들과 물 분자들은 양전하를 띠는 기둥들 사이에 결합되어 있다(Taylor, 1990; Day, 1992). 에트린자이트 구조는 결정축 (c)에 평행한 이들 기둥들이 배열된 구조를 이루고 있어, 더많은 물분자와 황산염 분자들이 이 기둥 구조들이 이루는 공간(channel)에 들어 갈 수 있기 때문에 기둥들 간의 간격을 확장시킬 수 있다 (그림 1).

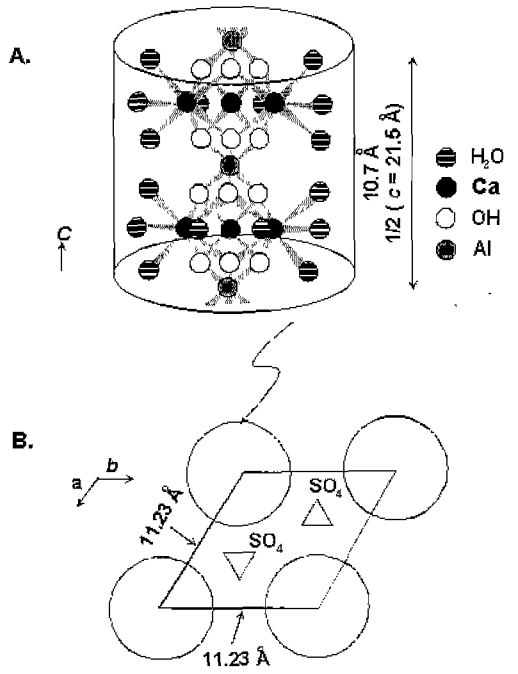

그림 1. A. 결정축 c 에 평행한 에트린자이트의 column 구조(One-half cell unit). B. a-b 면상의 평면도. 원들은 에트린자이트의 column을 나타내며, column 사이에 물분자들과 황산염분자들이 존재한다(Taylor, 1990; Day, 1996).

에트린자이트는 삼방정계(trigonal)의 c 점군(point group)과 P31c 공간군(space group)에 속하는 광물이다. 각 단위포(unit cell)는 c=21.5 Å, a=b=11.23 Å의 크기를 보인다. 그림 1의 A는 c축 상에서 기둥의 반(one half

unite cell)에 해당하는 부분의 구조를 보여주며, B는 a-b면을 따른 평면상에서 각 기둥구조들 사이의 공간을 보여 주는 그림이다. 하나의 완전한 단위포를 이루기 위해서는 4개의 완성된 기둥구조가 포함된다. 그러므로 기둥구조들 내 공간의 물분자와 황산염 분자들의 방향성으로 인하여, 완전한 단위포는 그림 1의 A에서 보여지는 것의 c축 상에서 두 배에 해당되는 길이를 갖는다. 이러한 이유로 하나의 완전한 화학식은 $\{Ca_{12}[Al(OH)_6]_4 \cdot 48(H_2O)\}(SO_4)_6 \cdot 4H_2O$으로 표현된다.

에트린자이트와 같은 광물군에 속하는 광물로서, 콘크리트에 유사한 영향을 미치는 것으로 알려진 두 광물들이 종종 보고되어진다. 이들은 싸우마사이트 (thaumisite)와 조우라브스카이트(jouravskite)이다. 이들의 화학식은 각기 다음과 같다.

싸우마사이트: $\{Ca_6[Si(OH)_6]_2 \cdot 24(H_2O)\}(SO_4)_3 \cdot 2(CO_3)_2$

조우라브스카이트: $\{Ca_6[Mn(OH)_6]_2 \cdot 24(H_2O)\}(SO_4)_3 \cdot 2(CO_3)_2$

싸우마사이트에서는 규소가 기둥 내의 알루미늄을 치환한 형태이며, 조우라브스카이트에서는 망간이 알루미늄을 치환한 형태이다. 두 광물은 모두 에트린자이트의 기둥구조들 사이의 물 분자 대신에 탄산염이 치환한 형태를 이루고 있다.

콘크리트 내에서의 산출상태

콘크리트 내의 에트린자이트의 존재는 일반적으로 광학현미경과 전자주사현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 동시에 사용하여 관찰해야 정확한 식별 가능하다. 광학현미경(편광현미경과 반사현미경)에서의 관찰은 종종 주변의 시멘트 구성광물 혹은 침전된 다른 2차 형성 광물들과 흔히 구분이 어려움으로 에트린자이트의 식별이 쉽지 않다. 암석학적 착색기법(staining method)이 사용되기도 하나, 이런 경우 전자현미경에 의한 EDX(Energy Dispesive X-ray Analysis)분석이 유용하다. 높은 진공상태를 유지하는 전자 현미경을 사용할 경우 콘크리트의 수화물들의 탈수현상과 이에 따른 균열이 발생할 수 있으므로, 낮은 진공상태를 유지하는 주사 전자현미경을 사용하는 것이 시료의 전처리 과정을 줄이면서 더욱 정확한 분석을 기대할 수 있는 방안이 된다.

열화현상을 나타내는 콘크리트에서, 에트린자이트는 콘크리트의 페이스트 내뿐만 아니라 기포, 미세균열 등의 공간에 많이 형성되고 있다. 콘크리트의 큰 기포 내에 많은 양의 백색의 침전물이 형성되어 있음이 열화현상을 나타내는 콘크리트에서 육안으로도 간혹 관찰되는데, 이는 대개 포트랜다이트($Ca(OH)_2$)와 에트린자이트로 감정된다. 이에 에트린자이트는 그림 2와같이 주상의 6면이 잘 발달한 육방정계의 결정형을 가지는 것으로 고배율의 전자현미형을 통해서 관찰된다.

그러나 이러한 이차 생성 혹은 지연 에트린자이트는 비정질형으로 형성되는 경우도 있다. 이 경우에 다른 이차 생성물인 실리카겔(silica gel)과 구분이 광학현미경으로는 불가능하다. 그리고 간혹 괴상의 에트린자이트가 보고되는 경우도 종종 있으므로(Metha, 1969), EDX 분석에 의한 확인이 반드시 필요하다.

미세한 기포나 균열 혹은 시멘트 페이스트의 미세 공극 내에 생성된 에트린자이트와 그와 관련된 미세 균열의 자세한 관찰은 콘크리트의 암석학적 연구방법과 마찬가지로 연마박편(polished thin section) 혹은 연마편을 적절한 방법으로 만들어 사용한다.

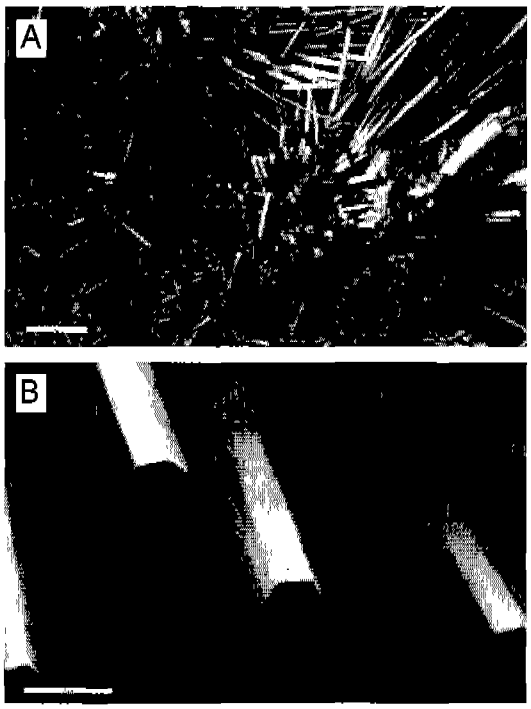

그림 2. 전자현미경으로 관찰한 콘크리트의 기포 내에 생성된 에트린자이트의 형태. (A) 450x (B) 1200x.

그러나 연마편을 이용한 방법은 광물의 결정형을 식별하지 못하므로 반드시 시료의 직접적인 관찰이 병행되어야 한다. 연마박편을 통해 전자현미경으로 관찰된 에트린자이트는 그림 3과 같이 나타난다. 에트린자이트의 식별은 EDX를 통해서 쉽게 식별된다. 에트린자이트는 주로 2가지 형태로 기포 내에서 관찰된다. 첫 번째의 경우는 에트린자이트가 직경이 100㎛ 이내의 적은 크기의 기포를 완전히 충진하고 나타나는 경우이며, 두 번째 형태는 에트린자이트가 직경 100 ㎛ 이상의 큰 기포내의 가장자리에 생성된 경우이다. 두 경우는 이차적으로 생성되는 에트린자이트의 양에 관련성이 있다.

두 경우 모두 그림 3 에서 보여지듯이 에트린자이트 내부에 많은 미세균열이 형성되어 있으며, 또한 방사선상의 미세균열이 시멘트 페이스트 내부로 전파되고 있다. 대부분의 경우에 많은 양의 에트린자이트들은 페이스트 내의 기포에 형성되나, 페이스트 내의 미세공극을 충진하고 있음에도 고배율의 전자현미경으로 관찰된다. 또한 이미 존재하고 있던 미세균열 내를 충진하고 있거나, 소골재와 시멘트 페이스트의 약화된 경계부에서도 종종 관찰된다. 고배율의 전자현미경하에서 이러한 에트린자이트의 형성에는 많은 미세 균열이 수반되는 것이 관찰된다. 이러한 에트린자이트에서 기원된 미세균열들에는 이 광물들이 충진되지 않고 있다는 사실은 이미 존재하던 에트린자이트가 생성된 미세 균열과의 구분되는 에트린자이트의 형성과 관련된 팽창성 균열임을 지시한다.

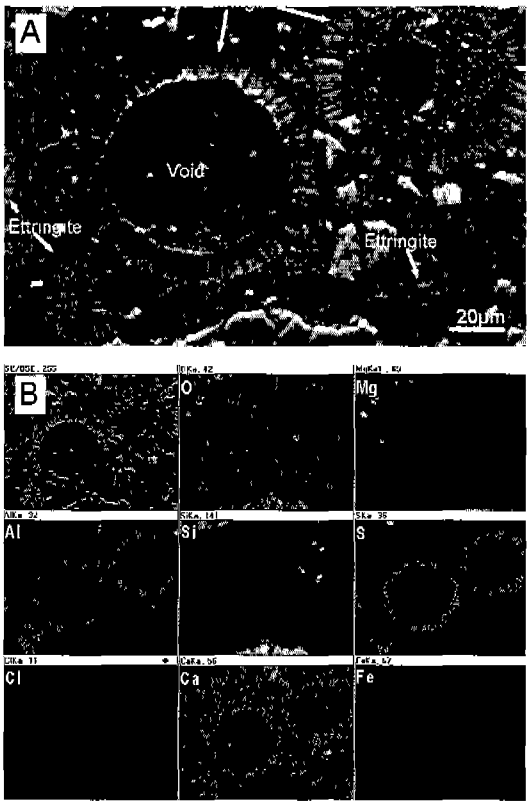

그림 3. 전자현미경을 이용한 연마박편 관찰로 나타나는 에트린자이트의 형태. (A) 전자 현미경 사진 (x 600) (B) 사진 부분의 EDX map.

에트린자이트의 생성

에트린자이트의 형성에 필수적인 요소는 황산염 (SO_4)이다. 이 황산염은 콘크리트 자체 내에서 제공되는 내부 기원과 외부로부터 유입되는 외부 기원으로 나눌 수 있다. 내부기원의 황산염이온은 다음과 같은 콘크리트 구성 요소로부터 잠재적으로 기원될 수 있다: 1. 골재 (aggregate), 2. 시멘트(cement), 3. 포졸란 (pozzolans), 4. 첨가재 (admixture).

골재 내의 석고(gypsum, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$)나 경석고 (anhydrite, $CaSO_4$)가 불순물로 함유되어 있을 경우, 결정질 석고도 쉽게 콘크리트 내의 수분에 의해서 쉽게 용해되어 황산염 이온을 공급하게 된다. 이러한 용해작용은 온도, pH와 입자 크기에 좌우된다. 그리고 현재 종종 문제점으로 지적되는 것은 골재 내에 황철석과 같은 황화광물들이 포함되어 있는 경우이다. 이들 황화광물들의 산화작용이 일어날 경우, 많은 양의 황산염이 공급되어 에트린자이트가 형성되므로써 콘크리트 구조물의 열화가 일어나기도 한다(Oberholster et al. 1984; Chinchon et al. 1995). 이 경우에 산화반응에 의해 산출되는 산들은 국지적으로 시멘트 내의 공극 용액의 pH를 감소시키므로 페이스트의 부식을 일으키는 한 요인이 되기도 한다.

시멘트의 구성요소로서 시멘트 공정에 첨가되는 석고는 황산염의 중요한 내부원천이 된다. 오늘날 많은 시멘트에서 아황산염(SO_3)의 함량은 1-8%의 범위로 과거 수십 년 동안 몇가지 이유로 지속적으로 증가되어 왔다. 과다한 양의 황산염의 존재는 지연 에트린자이트의 형성과 함께 콘크리트의 팽창을 유발하기 때문에 이를 방지하기 위하여 현재 약 2-4% 정도로 제한된다.

프라이 애쉬(fly ash)와 같은 포졸란은 황산염과 알루미늄의 원천이 되며, 각종 화학 첨가재도 종종 과다한 황산염의 공급원이 되기도 한다.

외부 기원의 황산염은 다양한 기원으로부터 콘크리트 구조물로 유입될 수 있다. 이는 콘크리트 구조물의 설치 환경과 밀접한 관련을 갖는다. 자연수 혹은 오염수가 한 원인이 될 수 있으며, 다량의 황산염을 포함한 토양과 산성비도 그 기원이 될 수 있다. 교통량이 많은 콘크리트 도로에서는 자동차의 화석연료의 연소로 방출되는 아황산 가스와 천연 제설제에 불순물로 함유된 황산염 광물들이 잠재적 기원이 될 수 있다.

이러한 내부 혹은 외부 기원의 황산염이 제공될 경우, 황산염은 시멘트의 주된 구성요소 중 (표1 참조), 알루민산석회(tricalcium aluminate, $CaO\ Al_2O_3$, C_3A)와 혹은 수화된 알루민산석회와 반응하여 에트린자이트가 생성된

표 1. 시멘트를 구성하고 있는 주요한 화합물.

명 칭	약식표현	화 학 성 분	수화반응 및 반응 생성물
규산3석회 (Tricalcium Silicate)	C_3S	$3CaO \cdot SiO_2$	$2C_3S+6H=C_3S_2H_3+3c$
규산2석회r (Dicalcium Silicate)	C_2S	$2CaO \cdot SiO_2$	$2C_2S+4H=C_3S_2H_3+3c$
알루민산3석회 (Tricalcium Aluminate)	C_3A	$3CaO \cdot Al_2O_3$	$C_3A+12H+ch_2=C_3AcH_{12}$
철알루민산4석회 (Tetracalcium aluminoferrite)	C_4AF	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	$C_4AF+10H+2ch_2=C_4AFH_{12}$

* $C=CaO$, $S=SiO_2$ $A=Al_2O_3$, $A=Fe_2O_3$, $H=H_2O$, $c=Ca(OH)_2$, $s=SO_4$

다. 그 반응식을 일반적으로 다음과 같이 표현할 수 있다;

$$3Ca^{+2} + 3SO_4^{2-} + 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 19\ H_2O + 13\ H_2O = 3CaO\ Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O.$$

이러한 콘크리트 내에서 에트린자이트를 형성시키는 반응 과정으로 두 가지 반응 메카니즘이 제안된다. 이는 (1) 'tophochemical' 반응과 (2) 'through solution' 반응이다. (1)의 반응은 고체 C_3A 혹은 C_3A의 수화물에 황산염 용액이 반응하여 에트린자이트가 생성되는 치환반응의 일종이다. (2)의 반응은 시멘트 성분이 콘크리트 내의 공극 용액에 용해된 후에 수화반응 산물로 과포화된 용액 중에서 에트린자이트가 침전 혹은 결정으로 성장하는 것이다. 실제 에트린자이트에 의한 열화현상을 일으키는 콘크리트 시료를 고배율의 전자현미경으로 관찰하면, 두 가지 반응 메카니즘으로 생성된 에트린자이트가 종종 같이 나타나고 있음을 알 수 있다. (1)의 반응 과정으로 생성된 에트린자이트가 반응되지 않은 C_3A의 수화물의 표면(혹은 가장자리)으로 부터 생성되고 있는 것이 관찰된다. 콘크리트 내의 공간들에 (즉 공극, 기포, 이미 존재하는 균열 등) 형성된 에트린자이트의 경우는 모두 (2)의 반응 과정으로 생성된 것으로 생각된다.

에트린자이트에 의한 열화 현상

열화특성

에트린자이트에 의한 열화현상에 대하여서는 많은 연구가 이루어져 왔으나, 열화현상에 대한 정확한 메카니즘에 대해서는 여전히 연구할 여지가 많음을 먼저 밝혀 둔다. 현재까지 일반적으로 알려진 그리고 필자에 의한 연구 분석 결과에 따른 에트린자이트에 관련된 열화현상의 특징은 다음과 같이 요약할 수 있다.

콘크리트에 황산염이 가해질 때 나타나는 현상은 시멘트 경화체의 조직을 현저하게 약화시키고 시멘트 페이스트와 골재의 결합력을 저해시켜 콘크리트의 전체적인 강도를 약화시키는 결과를 초래한다. 그리고 가장 현저한 특징은 콘크리트나 몰타르의 팽창과 함께 많은 불규칙한 균열이 발생하게 된다. 이러한 팽창은 에트린자이트의 형성과 관련된 것으로, 팽창 정도는 문헌과 실험방법에 따라 다양한 정도의 팽창이 보고되고 있다. 한 연구 결과에 의하면(Older and Gasser, 1988), 약 15%의 석고를 크린크에 추가한 시멘트로 제작된 시멘트 페이스트에서 일년 후에 170% 이상의 팽창이 수반되는 것으로 나타났다. 황산염에 의한 콘크리트 팽창은 필자에 의한 실험 결과로 검증했다. 0.75M 황산나트륨을 사용하여 기존 콘크리트도로에서 채취된 다양한 내구성을 가진 콘크리트 시료와 새로 제작된 시료를 반응시킨 실험 결과, 상당량의 에트린자이트가 생성되는 것이 확인되었다. 또한 반응과정에서 가해진 조건과 시료의 물리 화학적 특성에 따라 다르나, 약 0.15-2% 정도의 팽창과 균열 현상이 약 6개월 후에 일어나는 것이 관찰되었다. 이같은 에트린자이트에 의한 조기 열화현상이 나타난 콘크리트 도로의 시료에서 관찰된 특징적 열화 현상은 다음과 같이 요약될 수 있다.

1. 전술한 바와 같이 에트린자이트가 기포, 공극과 이미 존재하던 미세 균열에 다량 관찰된다.
2. 시멘트 페이스트 내의 미세공극을 에트린자이트가 다량 충진하고 있으며, C_3A의 치환에 의해 형성된 에트린자이트도 관찰된다.
3. 미세 균열은 에트린자이트가 형성된 곳에 집중되며, 그림3에서 보여지는 바와 같이 에트린자이트로 부터 방사상의 균열이 시멘트 페이스트로 전파되고 있다.
4. 일반적으로 다면체적 균열(polygonal

crack) 양상을 보이며, 도로의 조인트 부분에 근접함에 따라 균열이 더욱 많이 집중되는 양상을 보인다.

5. 골재는 주로 비반응성으로서 골재 주위에 반응환이나 실리카겔이 존재하지 않거나 미약한 것이 에트린자이트에 의한 열화현상의 특징이다. 그러나 다수의 경우 반응성 골재에 연관된 열화현상과 복합적으로 나타난다.

열화 메카니즘

에트린자이트가 형성됨에 따라 이들 광물이 어떠한 작용으로 콘크리트 열화를 일으키는지를 규명하는 연구는 근래에 들어 전자현미경의 발달로 인해 많은 진전이 이루어졌다.

콘크리트 수화반응의 초기 단계에서의 C_3A에 의한 빠른 수화반응을 지연하기 위해서 적정량의 석고가 시멘트 원료로서 첨가되는데, 이는 초기 수화반응에서 C_3A의 빠른 수화작용을 지연시키고 시멘트의 빠른 경화를 방지함으로써 작업능률을 증가시키는 작용을 한다. 이 과정에서 일차 에트린자이트가 생성되는데, 그 과정을 간단히 설명하면 다음과 같다. 초기 단계의 수화반응 과정에 첨가된 석고로 인해 용액중의 소석회와 석고가 포화상태에 이를 때까지, C_3A는 아주 빠른 속도로 용해되어 C_3A의 수화작용이 빠르게 진행된다. 알루민산의 용해도는 용액중의 소석회와 석고의 농도가 증가함에 따라 감소한다. 이런 이유로, 이들 광물들의 용해가 진행되어 소석회와 석고가 용액 중에 포화상태가 이르면, C_3A는 수화반응은 느리게 진행됨과 동시에 용액중의 칼슘과 황산염이 C_3A와의 반응으로 에트린자이트가 형성된다. 시간이 지남에 따라 용액중의 석고가 에트린자이트의 지속적인 형성으로 소모됨으로써 용액 중의 석고의 농도가 낮아지게 된다. 이 상태에 도달하면 알루미늄의 용해도가 다시 증가하게되고, 다시 C_3A의 수화작용이 급격히 가속되어 콘크리트의 경화가 진행된다. 이와 같이 초기 수화반응 단계에서 생성된 일차 에트린자이트는 콘크리트가 아직 소성 상태에서 형성되기 때문에 열화현상에 영향을 미치지 않는다. 또한 수화작용이 진행됨에 따라 콘크리트 내부에서 불안정한 상태로 존재하게되어, 모노설페이트(monosulfate, $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$)로 분해되거나 혹은 콘크리트 용액 속에 잔류하게 되어 나중에 이차 에트린자이트나 지연 에트린자이트를 형성하는데 기여한다.

이러한 콘크리트가 경화된 후에 생성되는 이차 혹은 지연 에트린자이트의 형성이 콘크리트의 열화에 중요한 역할을 한다. 이제까지의 연구결과에 의하면 이러한 에트린자이트의 형성에 따른 3가지 작용이 중요한 콘크리트의 열화 메카니즘으로 생각되어 지고 있다: (1) 결정성장, (2) 물의 흡착(adsorption)에 의한 에트린자이트의 팽창(swelling), (3) 에트린자이트의 생성에 따른 동결-융해작용에 의한 콘크리트의 열화의 가속화.

결정성장에 따른 열화작용은, 에트린자이트가 경화된 콘크리트 내에서 성장하므로 결정성장 압력으로 인한 팽창과 균열이 발생한다. 이 모델에 의하면 큰 결정들이 경화된 고체내의 한정된 위치에서 결정이 성장하는 경우에 그 열화효과가 극대화된다. 이와 같이 결정이 성장할 때 발생하는 압력은 약 35,000psi까지 이르기 때문에 시멘트 페이스트의 균열을 발생시키는 것으로 알려졌다.

두 번째의 물 흡착에 의한 에트린자이트 팽창 모델은 그림1에서 보여지듯이 과다한 물분자들이 에트린자이트 구조 내 혹은 표면에 흡착됨에 따라 에트린자이트의 팽창이 수반된다는 논리이다. 이는 점토광물의 팽창과 유사한 양상으로 에트린자이트 결정형태, 크기, 형성율과 직접적인 관계가 있다. 이 모델에 따르면, 생성된 에트린

자이트의 입자 크기가 작을수록 증가된 입자표면에 더 많은 물을 흡수함에 따라 더욱 현저한 팽창이 수반되며 열화현상도 현저해진 것이다.

세 번째 모델은 앞선 모델들과는 달리 에크린자이트의 생성이 팽창과 균열에 간접적인 영향을 미치는 경우이다. 콘크리트의 동해에 의한 균열을 방지하기 위해 인위적으로 콘크리트 내에 만들어진 기포들에서, 에트린자이트의 형성은 동결 및 해동 작용이 야기되어 이들 기포들의 효과가 저하됨에 따라 동해에 의한 균열이 가속화된다는 것이다.

필자에 의한 각 모델의 효과를 실험한 연구 결과에 의하면, 에트린자이트의 생성에 따른 콘크리트의 팽창과 수반되는 균열에 따른 열화현상은 두번째 모델의 효과를 적용한 실험에서 가장 현저했으며, 결정성장 과정에 의한 열화현상은 다른 두가지 경우보다 적게 나타났다. 이러한 결과로 보아 에트린자이트의 열화현상은 실제의 콘크리트 구조물의 설치 환경에 따라 결정성장에 의한 열화와 더불어 상기한 모델들의 열화메카니즘에 복합적으로 적용되어 그 열화정도가 더 크게 나타날 수 있음이 입증되었다.

결 언

에트린자이트에 의한 콘크리트의 팽창과 균열에 관련된 콘크리트 구조물의 열화현상에 대한 규명작업은 미국을 위시하여 많은 선진국의 연구로 최근에 많은 진전이 이루어졌다. 그리고 이러한 다양한 연구 결과를 콘크리트 제작 과정, 사용된 시멘트와 골재의 물리화학적 특성, 설치환경 등을 고려한 종합적인 데이터 베이스를 구축하는 작업도 꾸준히 진행되고 있다. 콘크리트 열화현상의 과정과 반응 메카니즘에 관련된 연구는 공학적인 지식뿐만 아니라, 지구화학과 광물학적인 지식이 요구되는 긴밀한 학제간의 연구가 진행되어야 할 분야이다. 에트린자이트의 생성에 의한 열화현상 뿐만 아니라, 콘크리트 내에서 발생하는 대부분의 열화작용은 광물과 물간의 상호작용에 밀접한 관련이 있다. 이와 같은 연구가 집중되어 열화현상에 대한 정확한 규명작업이 이루어지면, 그 연구를 기반으로 다양한 형태의 방지책이 개발 가능하여 이 분야의 발전에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

Chinchon, J. S., Ayora, C., Aguado, A., and Guirado, H., 1995, Influence of weathering of iron sulfides contained in aggregates on concrete durability. Concrete Cement and Research, Vol. 25, 1264-72.

Day, R. L., 1992, The effect of secondary ettringite formation on durability of concrete: A literature analysis: PCA Research and Development Bulletin RD108T, 1-115.

Oberholster, R. E., Toit, P. Du., and Pretorius, J. L., 1984, Deterioration of concrete containing a carbonaceous sulphide-bearing aggregate, in, Proceedings of the 6th International Conference on Cement Microscopy, Bayles, K., ed., Albuquerque, New Mexico, 360-373.

Older, I. and Gasser, M. (1988), Mechanism of sulfate expansion in hydrated portland cement. J. American Ceramic Society, 71, 1015-1020.

Taylor, H. F. W., 1990, Cement Chemistry: London, Academic Press Ltd. 475 p.