

# 고온 가열시 Ca/Si 몰비율에 따른 합성 칼슘 실리케이트 수화물(C-S-H)의 구성 원자간 거리 변화

## Effects of Ca/Si Molar Ratio on the Interatomic Distance of Synthetic Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) at Elevated Temperature

임 수 민\*                      배 성 철\*\*  
Im, Su-Min                      Bae, Sung Chul

### Abstract

Calcium silicate hydrate(C-S-H) is the principal binding phase that controls the strength and thermal stability of concrete. However, the effects of high temperature on the lattice structure and interatomic structure of C-S-H remains poorly understood due to its nanocrystallinity. This study aims to elucidate the change in interatomic distance of synthetic C-S-H with different Ca/Si molar ratios after exposure to high temperature via high energy X-ray scattering experiment which is a powerful analytical tool for amorphous materials.

키 워 드 : 칼슘 실리케이트 수화물, 고온, pair distribution function  
Keywords : calcium silicate hydrate, high temperature, pair distribution function

### 1. 서 론

칼슘 실리케이트 수화물(C-S-H)은 콘크리트 결합재인 시멘트 경화체의 주요 수화생성물이며, 콘크리트 강도와 열 안정성에 많은 기여를 하는 물질로 알려져 있다. 또한, 시멘트 내부 C-S-H는 0.6부터 2.1까지 다양한 Ca/Si 몰비율을 가지고 있으며, 이에 따라 C-S-H 구조가 변화하고 물리·화학적 성질 및 역학적 성능이 결정된다. 하지만 비정질 및 다공성 구조로 인해 Ca/Si 몰비율이 다른 C-S-H가 고온에 노출되었을 때 구성 원자간 거리 변화가 아직 명확히 밝혀지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 3가지 Ca/Si 몰비율(0.6, 0.8, 1.0)을 가진 합성 C-S-H 경화체를 고온 가열 후 고 에너지 X-선 산란 실험을 통해 얻은 Pair distribution function (PDF)을 이용하여 구성 원자간 거리 변화를 관찰하였다.

### 2. 실험 재료 및 방법

#### 2.1 실험 재료

본 연구에서 Ca(OH)<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, 증류수를 사용한 직접 합성법을 이용하여 Ca/Si 몰비율이 각각 0.6, 0.8, 1.0이 되도록 C-S-H 경화체(5×5×10 mm<sup>3</sup>)를 합성하였으며, 경화체의 유동성을 확보하기 위해 소량의 고성능 감수제를 첨가하였다. 80일의 양생 기간이 지난 시험체는 10 °C/min의 속도로 목표 온도 (105, 200, 400, 500, 800 °C)까지 가열하고 해당온도에서 2 시간 동안 유지 후 상온에서 자연 냉각되도록 하였다.

#### 2.2 Pair distribution function

본 연구에서 방사광 가속기 시설 SPring8(Japan)의 Beamline BL22XU (λ=0.178Å)을 이용하여 제작한 시험체의 고 에너지 X-선 산란 데이터를 확보하였으며, 해당 데이터는 식(1)과 같이 푸리에 변환을 통해 원자간 거리 r만큼 떨어져 있는 위치에 다른 원자가 존재할 확률을 제시한 함수인 PDF를 제시할 수 있다.

$$G(r) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty Q[S(Q) - 1] \sin(Qr) dQ \text{ ----- (1)}$$

여기서, Q는 역격자 벡터, r은 원자간 거리, G(r)은 PDF를 나타낸다.

\* 한양대학교 건축공학과 석박통합과정  
\*\* 한양대학교 건축공학과 교수, 교신저자(sbae@hanyang.ac.kr)

### 3. 결과 및 고찰

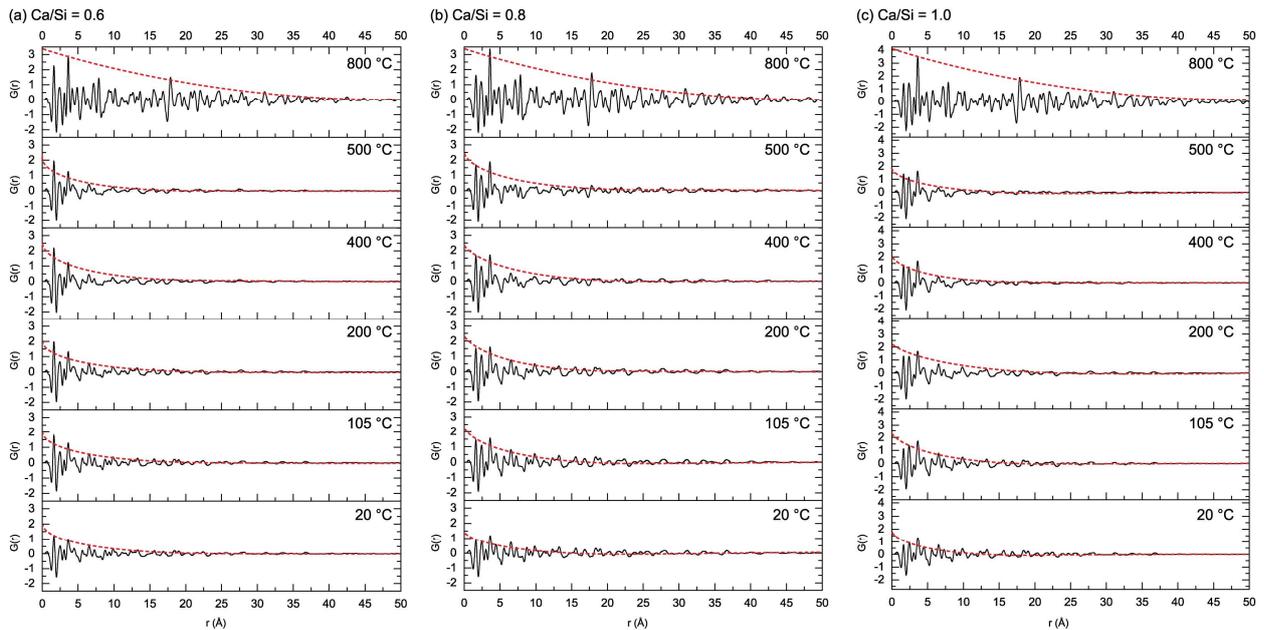


그림 1. Ca/Si 비율별 C-S-H 가열 후 0~50 Å 범위의 PDF 곡선: (a) Ca/Si = 0.6, (b) Ca/Si = 0.8, (c) Ca/Si = 1.0

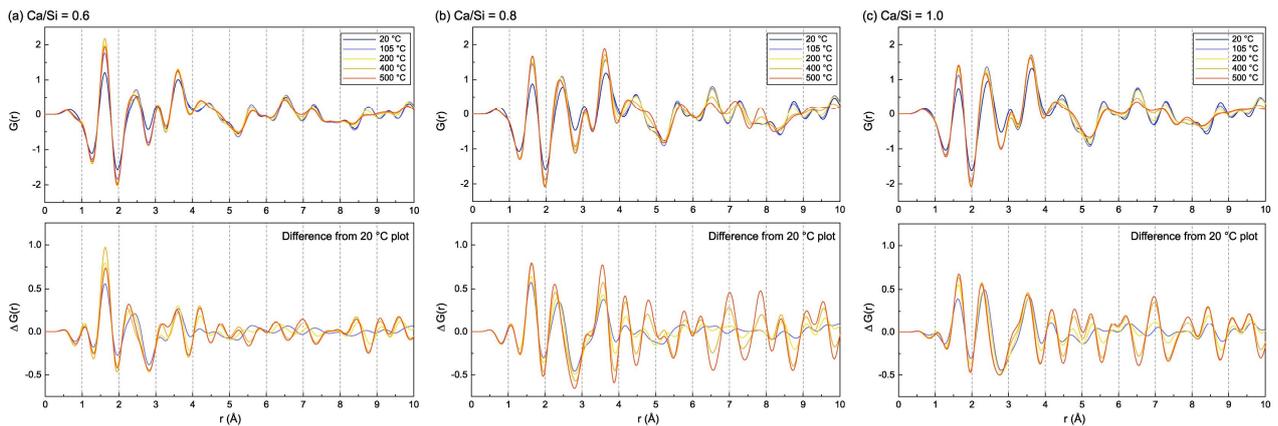


그림 2. Ca/Si 비율별 C-S-H 가열 후 0~10 Å 범위의  $G(r)$  및  $\Delta G(r)$  곡선: (a) Ca/Si = 0.6, (b) Ca/Si = 0.8, (c) Ca/Si = 1.0

그림 1과 같이 0~50Å 범위의 PDF 곡선을 통해 Ca/Si 비율과 관계없이 C-S-H의 나노 입자 크기는 대략 35 Å인 것을 확인하였다. C-S-H를 105~500 °C까지 가열하면 나노 입자 크기는 변화가 거의 없는 반면, 800 °C까지 가열하면 그 크기는 50 Å까지 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한,  $\Delta G(r)$  곡선을 통해 105 °C까지 가열한 C-S-H는 가열하기 전의 구성 원자간 거리와 큰 차이가 없는 것을 확인하였다 (그림 2).

### 4. 결 론

PDF 곡선을 통해 Ca/Si 비율이 다른 C-S-H 가열 후 나노 입자 크기 변화를 확인하였다. 또한, 가열온도가 200 °C 이상일 경우 C-S-H의 구성 원자간 거리 변화가 발생하는 것을 확인하였다.

### Acknowledgement

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 20NANO-B156177-02).

### 참 고 문 헌

1. H. Jee, et al. Determination of atomistic deformation of tricalcium silicate paste with high-volume fly ash. J Am Ceram Soc, 103.12, 2020, 7188-7201.