

원자쌍 분포 함수를 이용한 플라이애시를 대량 치환한 시멘트 클링커의 나노 구조 변형 거동 해석

Analysis of Nanostructural Deformation Behavior of Cement Clinker Substituting High-volume Fly ash by Pair Distribution Function

지 현 석*

Jee, Hyeon-Seok

박 재 연**

Park, Jae-Yeon

배 성 철***

Bae, Sung-Chul

Abstract

Recently, supplementary cementitious materials such as blast-furnace slag, fly ash and silica fume have been widely used as substitutes for cementitious materials. In this study, the deformation behavior of compressive loading of C₃S paste with 50% fly ash was analyzed by X-ray scattering data and pair distribution function analysis. The obtained results were compared with 131-day-old pure C₃S paste. The Ca(OH)₂ of the C₃S-FA paste showed almost complete elastic behavior, consistent with the deformation behavior of the r-range of 20 to 40, and the C-S-H phase contributed to the range of PDF r-range of less than 20. In addition, C-S-H of C₃S-FA showed greater deformation resistance than C₃S paste.

키 워 드 : 플라이애시, 나노 구조, 원자쌍 분포 함수

Keywords : fly ash, nano structure, pair distribution function

1. 서 론

1.1 연구의 목적

최근 고로 슬래그, 실리카 폼, 플라이애시와 같은 혼화재들이 시멘트의 대체재로서 널리 이용되고 있다. 그 중에서도, 화력발전소에서 연료의 연소과정에서 발생하는 미립자를 집진장치로 포집한 플라이애시는 산업부산물물을 재이용한다는 측면과 함께 시멘트 생산과정 중 이산화탄소 발생량을 줄이면서 시멘트의 기계적 물성을 효과적으로 증진시킬 수 있었다. 이에 본 연구에서는 원자쌍 분포 함수(pair distribution function, PDF)를 통하여 시멘트 클링커(C₃S)에 대용량의 플라이애시를 치환한 경화체의 나노 구조 변형 거동을 해석하였다.

2. 실험 방법 및 재료

2.1 실험 재료

실험에 사용된 재료는 triclinic C₃S와 Class F 플라이애시이며, 플라이애시를 C₃S 중량 대비 50% 치환하였다. 물-시멘트비는 0.5로 하였으며, 시험체는 5×5×10mm³로 제작되었다.

2.2 고 에너지 X-선 산란 실험

만들어진 시험체는 입자 가속기 시설 SPring8 (Japan)의 Beamline BL22XU($\lambda = 0.177820 \text{ \AA}$)를 통하여 X-선 산란 실험이 진행되었다. 실험이 진행되는 동안 압축 하중이 가해졌으며, 얻어진 X-선 산란 데이터를 식 (1)을 이용하여 PDF로 변환하였다. PDF해석 결과는 이전 연구의 C₃S paste와 비교하였다.¹⁾

$$G(r) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} Q[S(Q) - 1] \sin(Qr) dQ \quad \begin{array}{l} Q: \text{역격자 벡터, } r: \text{원자간 거리,} \\ S(Q): \text{구조 인자, } G(r): \text{원자쌍 분포 함수} \end{array} \quad \text{----- (1)}$$

* 한양대학교 건축공학과 석사과정

** 한양대학교 건축공학과 석박통합과정

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

3. 결과 및 고찰

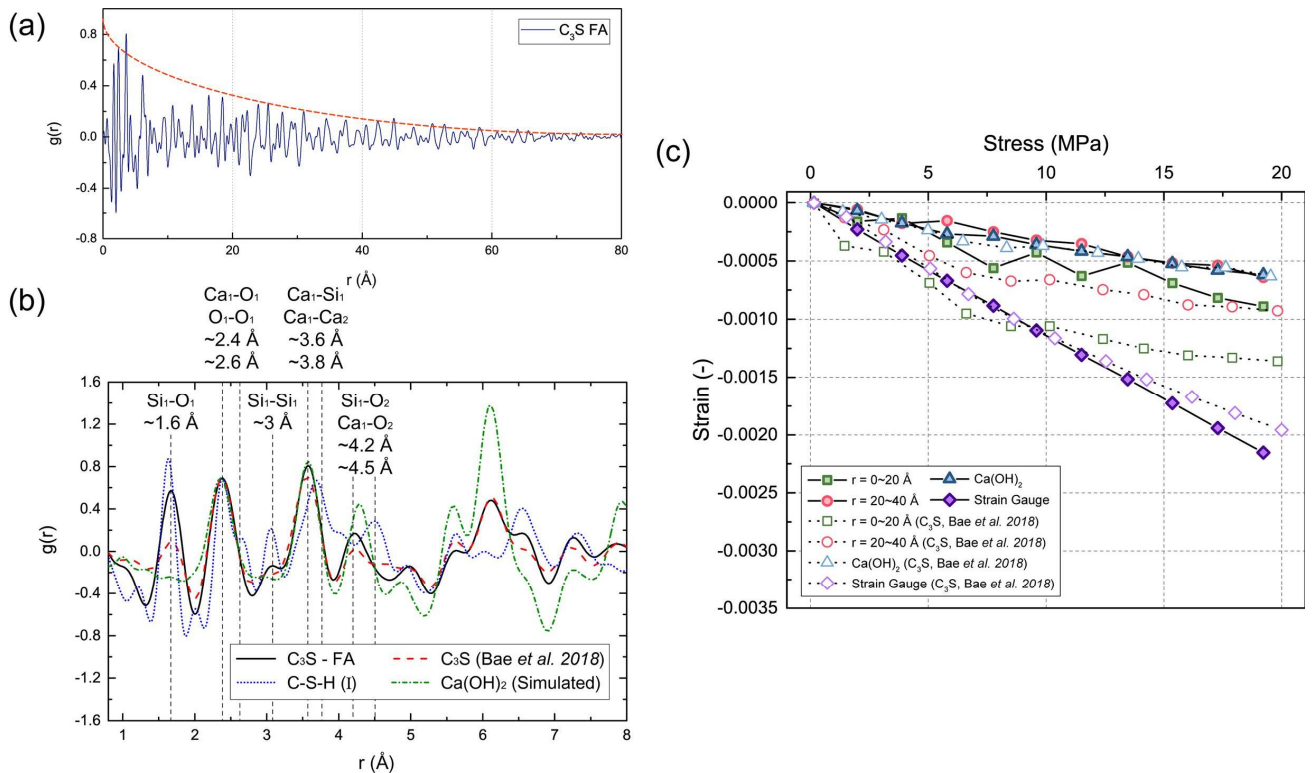


그림 1. (a) C_3S-FA 의 PDF 해석 결과, (b) C_3S-FA , C_3S , 합성 $C-S-H(I)$, $Ca(OH)_2$ 의 PDF 해석 결과, (c) C_3S-FA 와 C_3S 의 압축 하중 재하 시 응력-변형을 곡선

C_3S-FA 의 PDF 해석 결과가 그림 1(a)에 나타나 있으며, r 이 작은 구간을 그림 1(b)에 나타내었다. 기존 연구에서는 시멘트에 실리카가 풍부한 혼화재를 첨가하였을 때 $C-S-H$ 의 Ca/Si 비율이 줄어든다고 보고하였다. ~ 1.6 Å의 $Si-O$ peak과 ~ 2.4 Å의 $Ca-O$ peak의 강도는 Ca/Si 비율과 관련이 있다. 본 연구에서는 C_3S paste, C_3S-FA , 합성 $C-S-H(I)$ 순으로 $Si-O$ peak의 강도가 증가하였다. 이는 Si 가 풍부한 플라이애시가 생성된 $C-S-H$ 의 Ca/Si 비율을 감소시켰다는 것을 뒷받침해준다. 그림 1(c)에는 C_3S-FA 와 C_3S paste의 macroscopic, d-spacing, atomic 응력-변형을 곡선들을 비교하였다. 그 결과, 모든 범위, 특히 r 의 범위가 $0\sim 20$ Å인 구간의 변형률이 플라이애시를 첨가한 샘플이 낮은 경향을 보였다. 이는 플라이애시를 첨가하였을 때 일반 C_3S paste보다 변형에 대한 저항성이 훨씬 크다는 것을 의미한다. 이는 플라이애시를 첨가함으로써 $C-S-H$ 의 mean chain length가 늘어났기 때문이라고 판단된다.

4. 결 론

50%의 플라이애시를 혼입한 C_3S 페이스트의 압축 하중에 대한 변형 거동이 X-선 산란 실험 데이터를 통한 PDF 분석을 통하여 분석되었다. 그 결과, 플라이 애시를 첨가하였을 때 $C-S-H$ 의 Ca/Si 비율이 줄어드는 것을 확인하였으며, 플라이애시 첨가 C_3S 페이스트의 변형 저항성이 C_3S 페이스트보다 큰 것으로 나타났다.

Acknowledgement

이 논문은 2016년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2016 R1C1B1014179).

참 고 문 헌

1. S. Bae, H. Jee, M. Kanematsu, A. Shiro, A. Machida, T. Watanuki, T. Shobu, H. Suzuki, Pair distribution function analysis of nanostructural deformation of calcium silicate hydrate under compressive stress, *J Am Ceram Soc*, Vol.101 No.1, pp.408~18, 2018