C-S-H(I)의 분자구조변형을 통한 기계적 거동의 변화

Influence on mechanical property of C-S-H(I) due to its structural modification

오 재 은* Paulo J.M. Monteiro**
Oh, Jae Eun Paulo J.M. Monteiro

ABSTRACT

This high pressure synchrotron X-ray diffraction study examined the change of bulk modulus of C-S-H(I), core material creating strength in alkali-activated slag cement as well as structural model of C-S-H, mainly attributed to Al-substitution for Si, which occurs at the bridging tetrahedral sites in dreierketten silicate chains in the nanostructure of C-S-H(I). This study presents that Al-substitution in C-S-H(I) does not affect the bulk modulus of C-S-H(I), which is surprising because many researchers have expected that Al-substitution should induce some critical change in mechanical properties of C-S-H(I).

요 약

C-S-H(I)은 활성슬래그시멘트의 강도생성의 핵심물질이며 시멘트 수화물의 강도원천물질인 C-S-H의 구조모델로 사용되어 왔기 때문에, 나노 수준의 콘크리트 연구 분야에서는 세계적으로 아주 중요한 물질로 다루어지고 있다. 이러한 C-S-H(I)에서 발생되는 Si에 대한 Al 치환은 C-S-H(I)의 분자구조변경을 인위적으로 할 수 있다는 점에서 주목되어 왔고, C-S-H(I)의 기계적 물성치 (예, bulk modulus)에도 큰 영향을 미칠 것이라고 예상되어 왔었다. 그러나 본 연구를 통해 이러한 Al 치환이 실제로는 C-S-H(I)의 bulk modulus에는 거의 영향을 미치지 못함이 밝혀졌다.

1. 서론

C-S-H(Calcium Silicate Hydrate)는 concrete의 강도를 만들어내는 원천물질이며 잘 수화된 cement paste에서는 전체 부피의 60-70%가 C-S-H로 변한다. 그러나 C-S-H는 무결정질(amorphous) 재료이므로 아직까지도 그 물질구조가 정확히 규명되지 못하고 있어서, C-S-H의 분자구조를 변형시킴으로서 전체 콘크리트의 성능을 개선시키는 근본적인 재료공학적인 노력이 매우 힘든 과제로 남아있다 [1]. 최근에 C-S-H와 물질구조가 매우 흡사하여 모델로 사용되어지는 C-S-H(I)에 대해 많은 연구가 있어왔고 [1], 공교롭게도 활성슬래그(Alkali-activated slag)의 강도핵심물질이 또한 이 C-S-H(I)임이 알려지면서 [2], C-S-H(I)에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 기본적으로 이 두 가지 C-S-H(I)들은 물질구조가 동일하나, 활성슬래그의 C-S-H(I)는 층간구조사이에 다량의 Al을 치환시켜 함유시킴으로써, 일반 C-S-H(I)의 개조된 타입으로 볼 수 있다 [3]. 본래 콘크리트의 C-S-H 및 C-S-H(I)는 층간구조(layered structure)로서 [1], 이 층간사이의 구조를 변화시킴으로써, 콘크리트의 탄성계수, 화학적 내구성, 심지어 creep이나 건초수축 자체를 근본적으로 조정할 수 있다는 주장이 많은 학자들 사이에서 지지받고 있으며, 이 두 물질 사이의 비교가 이 주장에 대한 해답을 줄 수가 있다. 본 연구는 Al이 다량으로 치환됨으로써 층간구조가 변형된 활성슬래그 C-S-H(I)과 Al이 없는 일반 C-S-H(I)에 대한 기계적 거동 차이를 연구했다.

* 정회원, University of California, Berkeley, 토목환경공학과, 공학박사, Post-doc
** 정회원, University of California, Berkeley, 토목환경공학과, 공학박사, 정교수

2. 실험 방법 및 재료

본 연구는 방사광(synchrotron radiation) 시설인 미국 LBL(Lawrence Berkeley National Laboratory)의 ALS(Advanced Light Source)에서 High pressure synchrotron X-ray diffraction이라는 기법을 이용하여 실시되었다. 두 종류의 C-S-H(I)를 diamond anvil cell을 이용하여 대략 4GPa의 고압력 상태까지 정수압력(hydrostatic pressure)을 가함으로써 그 압력에 대한 물질의 부피변화인 Bulk Modulus를 구했다. 이를 위해 CELREF [4]라는 unit cell refinement 프로그램이 사용되었다. Bulk modulus는 unit cell의 압력(P)-부피(V) 실험 데이터에 2nd order of Birch-Murnaghan Equation of state [5] (B-M EoS)를 curve-fitting을 하여 구해졌다 (그림 1 참조). 일반 C-S-H(I) (Ca/Si=0.98, EPMA결과)는 프랑스의 Construction Technology Laboratories 사로부터 구입을 했으며, 활성슬래그 C-S-H(I) (Ca/Si=0.96, Al/Si=0.34, SEM EDS결과)은 NaOH 10M 용액을 soluton/binder wt. ratio = 0.4로 슬래그와 혼합하여 80°C로 40일간 수중양생을 하여 얻어졌다.

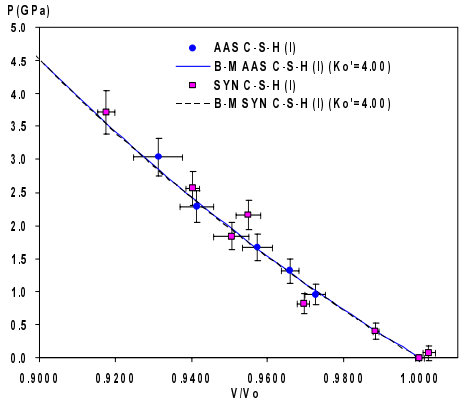

그림 1. C-S-H(I)의 Pressure-normalized volume 거동 (Vo=ambient volume)

3. 실험결과 및 결론

C-S-H(I)에서의 Al치환은 C-S-H(I)의 층간 구조를 변화시킨다. 본 실험에 사용된 활성슬래그의 Al 치환율은 층간 구조 내에 존재하는 silicate chain의 거의 모든 bridging site Si들이 Al로 치환된 매우 높은 수준 이었다[3]. 예상과는 달리 표1에서와 같이 실제 두 종류의 C-S-H(I)의 bulk modulus는 거의 동일한 값이 나왔으며, 그림1에서도 두 C-S-H(I)의 압력-부피 데이터 점들이 동일 곡선 (B-M EoS curve) 상에서 거동함을 알 수 있다. 이 결과는 다량의 Al치환이 실제 C-S-H(I)의 기계적 거동에는 영향을 미치지 못함을 보여준다.

표 1 측정된 C-S-H(I)의 Bulk Modulus

Materials	Bulk Modulus Ko(GPa)	R2
일반 C-S-H(I)	35 ± 7	0.969
활성슬래그 C-S-H(I)	35 ± 3	0.992

참고문헌

1. Taylor, H. F. W. (1997). Cement Chemistry, Thomas Telford,.
2. Palomo, A., Grutzeck, M., Blanco, M. (1999). "Alkali-Activated Fly Ashes a Cement for the Future." Cem. Concr. Res., 29(8), 1323-1329.
3. Richardson, I., Brough, A., Groves, G., Dobson, C. (1994). "The Characterization of Hardened Alkali-Activated Blast-Furnace Slag Pastes and the Nature of the Calcium Silicate Hydrate(C-S-H) Phase." Cem. Concr. Res., 24(5), 813-829.
4. Laugier, J. andBochu, B. CELREF. (2002). Version 3, Laboratoire des Matériaux et du Génie Physique, Ecole Nationale. Supérieure de Physique de Grenoble (INPG), France.
5. Birch, F. (1978). "Finite Strain Isotherm and Velocities for Single-Crystal and Polycrystalline NaCl at High Pressures and 300 K." J. Geophys. Res., 83(B3), 1257-1267.