



알칼리 촉진제 첨가에 대한 C-S-H 구조의 변화

김근수* · 이승헌 · 배승묵

<군산대학교*, 군산대학교 공동실험실습관>

1. 서 론

시멘트 경화체의 여러 특성은 수화물의 미세조직에 지배된다. 그렇기 때문에 시멘트 경화체의 미세조직에 관한 연구는 많이 이루어져 왔다^{1,2)}. 경화체 미세조직의 검토는 기공분포의 측정 또는 수화물의 형태 관찰이 주를 이루고 있으며, 기공율과 강도와는 잘 설명되고 있다. 또한 미세조직의 형태관찰에는 SEM 관찰이 널리 행하여지고 있다.

일반적으로 시멘트 클링커 중의 알칼리는 다량 존재하면 장기재령에서 강도 발현이 억제되는 것으로 보고되고 있다^{3,4)}. 이러한 이유로서 Yamaguchi 등은 고 알칼리 시멘트의 수화에 의해 생성된 칼슘실리케이트 수화물은 6층 정도의 두께로 비표면적이 작아져서 표면에너지가 줄어들어 나타나는 현상으로 설명하였다³⁾. 한편 Kryzhannovskaya 등에 의하면 알칼리는 용액 중의 CaO 양을 저하시켜 시멘트 광물의 수화를 억제하고, 시멘트 중의 알칼리는 칼슘실리케이트 수화물에 고용되어 결정화를 촉진시킨다고 보고하였다⁴⁾. 더욱이 칼슘실리케이트 수화물을 K₂SO₄ 수용액에 침적시키면 형태가 현저하게 변화되는 것으로 보고하였다⁴⁾. 이러한 것으로부터 알칼리의 영향은 미세구조의 변화부터 검토할 필요가 있다. 알칼리가 미세구조에 미치는 영향을 규명한다는 것은 강도와 미세구조의 관련성을 연구하는데 매우 중요하다.

본 연구에서는 C₃S의 장기반응에서 Na계 알칼리 촉진제 첨가가 C-S-H의 미세구조에 미치는 영향에 대해 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 C₃S의 합성 및 사용 재료

시약급의 CaCO₃, SiO₂, MgO, Al₂O₃를 사용하였다. MgO와 Al₂O₃는 고온상의 C₃S를 안정시키는 안정화제로

첨가하였다. 이렇게 4종류의 화합물을 각 조성 맞게 계량 후 날것 용기에 계량한 분체와 에탄올, 알루미늄아를 넣고 약 24시간동안 습식혼합교반 시켰다. 혼합이 완료된 시료는 40°C 건조기에서 2~3일 건조하여 에탄올을 모두 날려 보냈다. 이후 건조된 시료를 약 10g씩 계량하여 펠렛 몰드에 넣고 1000 kg-f/cm²의 압력을 주어 펠렛 성형을 하였다. 성형한 펠렛을 백금도가니에 놓고 전기로에서 분당 10°C의 승온속도로 900°C에서 1시간 유지 후 1600°C에서 16시간 유지하는 스케줄로 소성한 후 급랭하였다. Fig. 1에서 보듯이 합성한 C₃S는 대부분 MIII형으로 존재하였다. 소성한 C₃S 펠렛을 일반적인 시멘트 분말도와 비슷한 조건을 주기 위하여 Blaine 3360 g/cm²으로 분쇄하였으며 건식 입도분석을 시행한 결과, 평균입경은 5.8 μm이었다. Table 1에 합성한 C₃S의 화학조성을 나타냈다.

사용한 알칼리 촉진제는 수산화물로는 NaOH, 탄산염으로는 Na₂CO₃, 황산염으로는 Na₂SO₄를 사용하였으며, 시약급의 분말을 이용하였다. 첨가량은 압축강도의 경우 5.0%까지 첨가하였으며, 미세조직과 반응율의 실험은 3.0%로 동일하게 첨가하였다.

2.2 시편 처리

소성한 C₃S를 물-C₃S 중량비 0.5로 하여 계량한 후 페

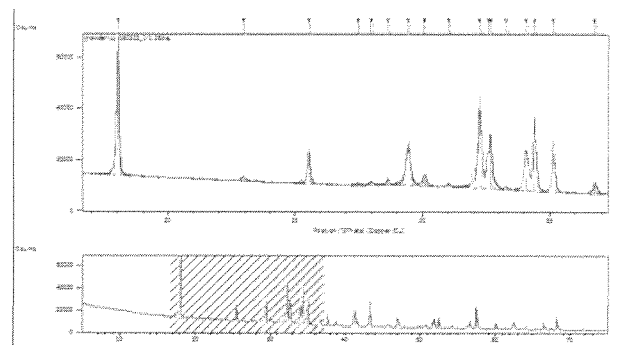


Fig. 1 합성한 C₃S의 X선회절도형

Table 1 합성한 C₃S의 화학조성(%)

구분	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
화학조성	71.9	25.7	0.6	1.8

이스트를 제조하였다. 페이스트를 제작한 후 밀폐용기에 넣어 온도가 20°C로 설정된 항온항습기에서 재령에 따라 샘플을 수화시켰다. 그리고 소정의 재령에 도달한 샘플은 수화 정지하였다. 이 때 수화정지는 소정의 재령에 도달하면 5 mm 이하의 크기로 분쇄하여 아세톤에 24시간 수화정지 시킨 후 아스피레이터와 종이필터를 이용하여 아세톤과 수분을 제거한 다음 40°C 건조기에서 24시간동안 건조시켰다. 또한 건조시킨 시료는 데시케이터에 보관하였다. 소정의 재령이 지난 시료는 반응율 측정, 미세구조, BET 비표면적을 분석하였다.

2.3 C₃S 반응율 측정

C₃S 반응율은 XRD-Rietveld법으로 측정하였다. XRD 측정은 PANalytical Co.의 모델 EMPYREAN인 고분해능 X-선 회절 분석기 (High Resolution X-ray Diffractometer : HR-XRD)를 사용하였다. 시료는 건조된 수화물을 유발로 50 μm이하로 분쇄하여 준비하였다. 실험은 40 kV/30 mA의 조건 하에서 Cu-Kα 단일파장(λ=1.5406 Å)을 사용하여 스텝-스캔 방식으로 회절값을 기록하였다. 5~75° 2θ 구간에서 주사간격 0.026° 2θ, 시료마다 총 주사시간을 1시간으로 각각 설정하여 측정하였다.

XRD-Rietveld 해석에는 분석 프로그램인 High score plus를 이용하였다. C-S-H는 비정질이므로 α-Al₂O₃를 내부표준물질로서 10% 첨가하여 무수물 기준으로 구했다. XRD-Rietveld 정량은 결정상만 정량할 수 있으므로 α-Al₂O₃ 정량했을 때의 값은 실제의 혼합 량과 비교했을 때 많게 정량된다. 그 정량 값은 비정질량과 일정한 관계를 갖게 된다. 본 실험에서는 이러한 원리를 이용하여 C₃S 반응율을 구했다.

2.4 미세구조 관찰

수화물의 구조는 전계방사형주사전자현미경(FE SEM, HITACHI Co.)으로 측정하였다. 장비는 HITACHI사의 모델을 사용하였으며 조건은 15 kV, WD는 15.8 mm로 하여 진행하였다. 시편의 파단면에 대해 관찰하였으며, 특정 부위에 대하여 에너지분산과장분석(EDS, HORIBA Co.)으로 원소분석하였다. 원소분포를 알아보기 위해 연마한 시편에 대해 반사전자상(BSE, HITACHI Co.)을 관찰하고 관찰된 BSE 이미지에 대해 EDS로 Mapping하였다. 시편의 연마는 샌드 페이퍼 P1000, P2000, 6 μm, 3 μm, 1 μm, 0.25 μm를 사용하였으며, 마이크로 단위의 연마에서는 다이아몬드 서스펜션으로 연마를 진행하였다.

2.5 압축강도 측정

모르타르의 압축강도는 알칼리 촉진제의 첨가에 따른 장기강도를 평가하기 위해 실시하였다. 시멘트는 고로슬래그 시멘트(분말도 3,500 cm²/g, SO₃ 3.5%)를 사용하였으며, OPC에 고로슬래그 미분말 65%를 혼합하여 제조

하였다. 모르타르의 압축강도는 물-결합재 비 0.5, 모래-결합재 비 3.0의 조건으로 표준사를 사용하였으며, 5 × 5 × 5 cm 큐브 공시체를 제작하고 표준 수증양생을 실시하여 재령 별 압축강도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모르타르 압축강도 평가

고로슬래그 65% 함유된 시멘트에 Na₂SO₄ 5.0%까지 첨가했을 때의 재령 28일과 91일의 압축강도 측정 결과를 Fig. 1, 2에 나타냈다. 재령 28일을 보면, Na₂SO₄ 첨가량이 증가할수록 강도 저하 현상이 현저하게 나타났다. Na₂SO₄ 무첨가는 54.5 MPa를 나타냈으나, 3.0% 첨가는 34.7 MPa, 5.0% 첨가는 32.5 MPa로 Na₂SO₄ 무첨가와 비교하여 22.0 MPa 정도 저하되어 약 40% 정도의 강도가 감소되었다. 재령 91일의 강도를 보면, 무첨가는 62.5 MPa이며 3.0% 첨가는 37.3 MPa, 5.0% 첨가는 37.2 MPa로 17.2 MPa 저하하여 약 30% 정도 강도가 감소하였다. 이와 같이 Na₂SO₄ 첨가하면 장기강도가 저하되는 이유를 알아보기 위해 C₃S 반응율과 미세구조를 검토하였다.

3.2 C₃S 반응율 평가

재령 28일에서의 알칼리 촉진제 3% 첨가시의 C₃S 반응율을 Table 2에 나타냈다. Fig. 3, 4에서 보듯이 알칼

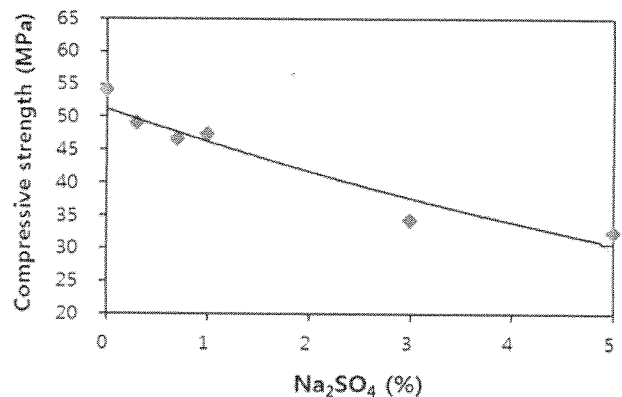


Fig. 2 재령 28일 모르타르 압축강도

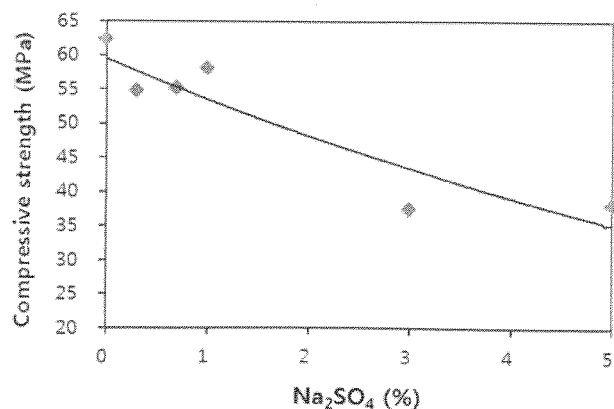


Fig. 3 재령 91일 모르타르 압축강도

Table 2 재령 28일에서 C₃S 반응율과 Ca(OH)₂ 생성량

시료	C ₃ S 반응율(%)	Ca(OH) ₂ 생성량(%)
C ₃ S 단미	72	4
C ₃ S-NaOH 3%	78	8
C ₃ S-Na ₂ CO ₃ 3%	77	6
C ₃ S-Na ₂ SO ₄ 3%	79	5

리 촉진제 첨가에 의해 압축강도가 저하되었으므로 C₃S 반응율이 저하될 것으로 예상되었다. 그러나 알칼리 촉진제 첨가에 의해 C₃S 반응율은 오히려 증가되는 경향을 나타냈다. C₃S 단미는 72%의 반응율을 나타낸 반면, NaOH는 78%, Na₂CO₃는 77%, Na₂SO₄는 79%로 반응율이 5~9% 정도 증가하였다. 알칼리 촉진제 종류에 의한 반응율의 차이는 거의 없었으나 Na₂SO₄가 약간 큰 경향을 나타냈다. Ca(OH)₂ 생성량도 알칼리 촉진제를 첨가한 것이 1~4% 정도 더 컸으며, NaOH가 무첨가에 비해 2배 정도 많은 양을 나타냈다. 일반적으로 알칼리 촉진제를 첨가하면 초기 반응속도가 증가하여 미수화 입자표면에 치밀한 수화물이 형성되어 물질의 확산이 어렵게 되므로 장기 강도가 떨어지는 것으로 해석되고 있다. 그러나 본 실험의 반응성으로 평가하여 볼 때, 반응율은 오히려 약간 증가하고 있어 생성된 C-S-H의 미세조직 영향이 큰 것으로 판단되어 미세조직을 검토하였다.

3.3 C-S-H의 미세조직 평가

Fig. 4는 알칼리 촉진제 3% 첨가한 재령 91일 경화체의 3,000배와 30,000배의 SEM 사진이다. 순수한 C₃S 경화체는 침상 또는 섬유상의 C-S-H 수화물로 미수화 입자를 치밀하게 감싸고 있는 것이 관찰된다. 침상의 C-S-H 수화물은 입자사이의 공간을 메꾸는 역할을 하여 모세관 기공을 감소시킬 수 있어 강도 발현율이 높을 것으로 판단된다. 침상의 수화물은 두께 0.1 μm, 길이

2~3 μm로 성장되어 입자간의 가교형태로 상호 결합이 되어 있는 것이 보여진다. 이때 내부 수화물은 보여 지지는 않지만 치밀한 박상으로 되어 있는 것으로 보고되고 있다⁵⁾.

알칼리 촉진제를 첨가하면 C-S-H 수화물이 박상으로 성장하여 서로 치밀하게 영켜 있는 것이 보여진다. 전반적으로 외부에는 성장이 적어 입자 사이의 기공을 메꾸는 데에는 바람직하지 않은 미세조직이다. 박상이지만 알칼리 촉진제 종류에 의해 약간 다른 형태와 구조를 보인다. NaOH는 박상 중에서 그물구조의 형태를 취하고 있으며, 1 μm 정도의 두께를 나타내고 있다. 두께가 두껍다는 것은 C-S-H의 층이 많아진 것으로 판단된다. 특이한 점은 Ca(OH)₂가 다른 알칼리 촉진제보다 많이 보여졌다. Na₂CO₃는 박상이 치밀하게 입자를 싸고 있는 형태로, C-S-H 수화물의 입자 표면은 두껍고 치밀한 층을 형성하고 있다. C-S-H 수화물의 외부로의 성장이 없어 입자간의 결합은 충분히 발달하지 못한 상태로 큰 모세관기공이 보여진다. C-S-H 수화물의 길이는 0.5 μm 정도로 비교적 짧다. Na₂SO₄는 박상 중에서 해면상으로 외부로 향한 성장이 적기 때문에 입자간의 상호결합은 강하지 않을 것으로 판단된다. 대체적으로 Na₂CO₃와 유사한 구조를 나타냈다. 특이한 점은 C₃S의 안정화제로 0.6%첨가한 Al 성분과 반응하여 에트린자이트를 형성했다는 것이다.

3.4 BSE-EDS에 의한 Na의 분포 평가

Fig. 5는 순수한 C₃S의 재령 28일 페이스트 경화체의 BSE상과 Ca과 Si의 원소 분포를 나타낸 것이다. C₃S 입자 주위에는 약 2 μm 정도의 C-S-H 수화물 층이 형성되고 있으며 Ca/Si 몰비는 1.60으로 CSH(II)의 조성을 하고 있다.

Fig. 6은 C₃S-NaOH의 28일 페이스트 경화체의 BSE상

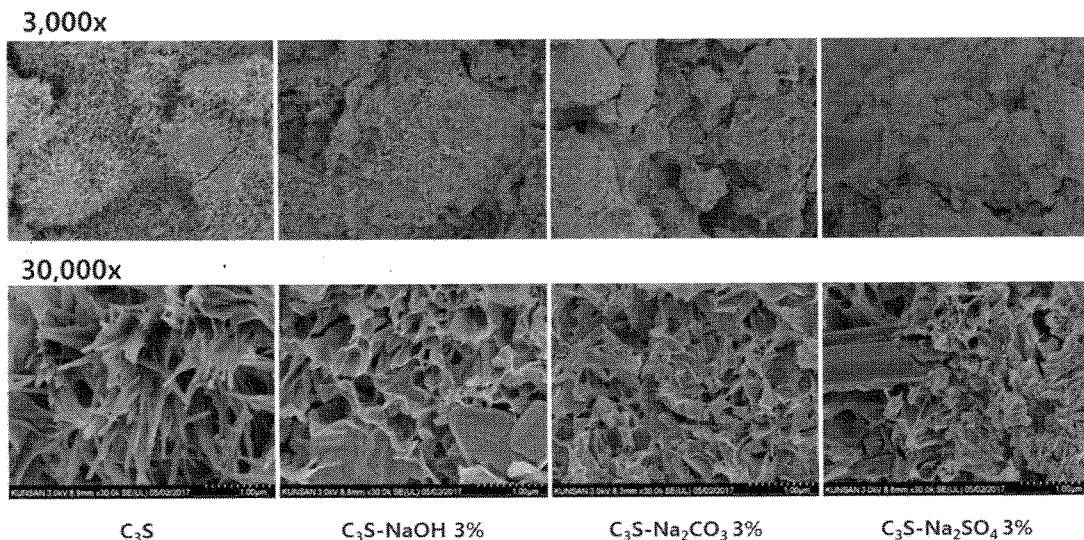


Fig. 4 알칼리 촉진제를 첨가한 재령 91일 경화체의 SEM 사진

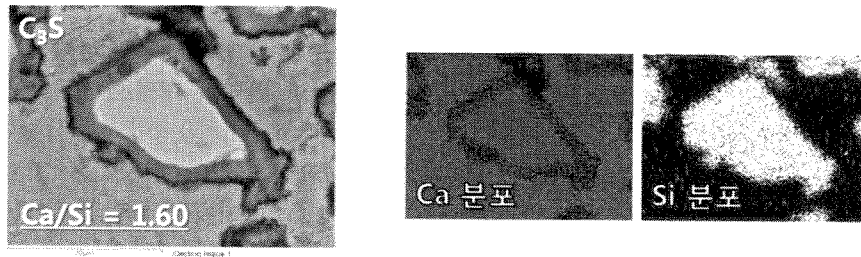


Fig. 5 재령 28일의 C₃S 페이스트의 BSE 이미지와 원소분포

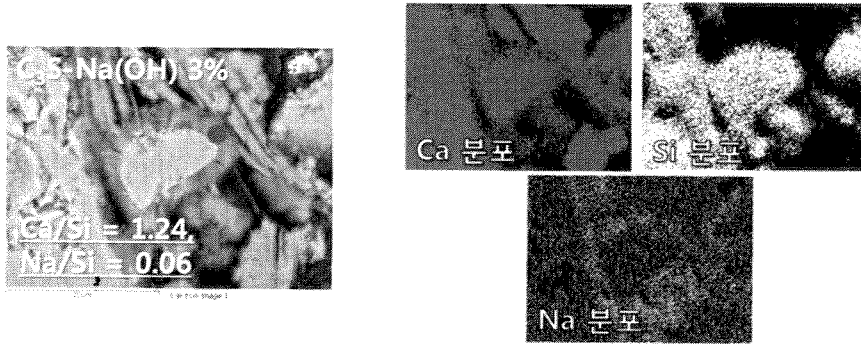


Fig. 6 재령 28일의 C₃S-NaOH 페이스트의 BSE 이미지와 원소분포

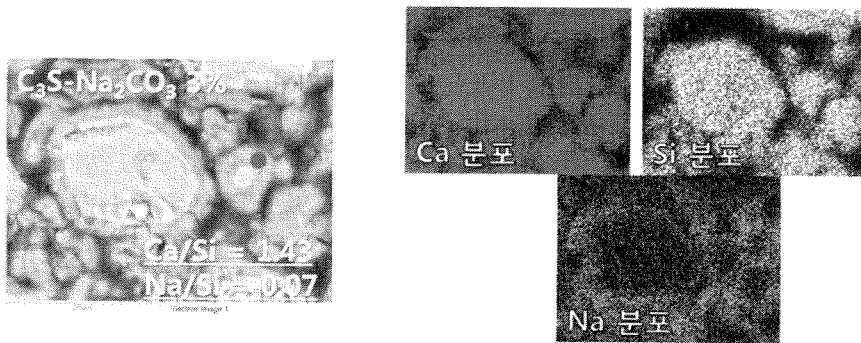


Fig. 7 재령 28일의 C₃S-Na₂CO₃ 페이스트의 BSE 이미지와 원소분포

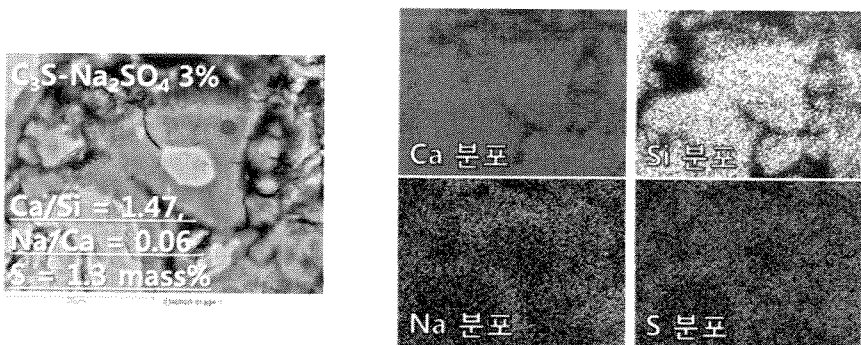


Fig. 8 재령 28일의 C₃S-Na₂SO₄ 페이스트의 BSE 이미지와 원소분포

과 Ca, Si, Na의 원소 분포를 나타낸 것이다. C₃S 입자 주위에는 약 3 μm 정도의 C-S-H 수화물 층이 형성되고 있으며 Ca/Si 몰비는 1.24으로 C₃S 단미보다 0.36 정도 저하되었다. Na으로 인해 Ca/Si 몰비가 저하되었으며 Na의 분포를 보면 C-S-H 수화물 층에 가장 많이 분포되어

있는 것을 볼 수 있다. C-S-H 수화물 층에서 Na/Si의 몰비는 0.06으로 보통 시멘트 포틀랜드 시멘트 경화체의 0.01보다 상당히 높은 값이었다.

Fig. 7은 C₃S-Na₂CO₃의 재령 28일 페이스트 경화체의 BSE상과 Ca, Si, Na의 원소 분포를 나타낸 것이다. C₃S

입자 주위에는 약 1 μm 정도의 C-S-H 수화물 층이 형성되고 있으나 C₃S 단미보다 반응층의 두께는 얇았다. 이것은 Na₂CO₃는 물속에 용해되면 Na⁺ 이온과 CO₃²⁻ 이온으로 용해되고 CO₃²⁻ 이온은 Ca²⁺ 이온과 결합하여 미결정의 CaCO₃를 형성한다. 생성된 CaCO₃는 C-S-H의 핵으로 작용하여 CaCO₃ 표면에 C-S-H가 형성되므로 C₃S 표면에 형성된 C-S-H 수화물 층은 얇아져서 수화반응을 촉진시킨다. 따라서 C₃S 입자 주위에 형성된 수화물 층의 두께는 얇아졌다. 이것이 필러효과이다. Ca/Si 몰비는 1.43로 C₃S 단미보다 0.17 정도 저하되었으나 NaOH보다는 0.19 높았다. Na의 몰비 차이에 의해 나타나는 현상으로 해석된다. Na으로 인해 Ca/Si 몰비가 저하되었으며 Na의 분포를 보면 C-S-H 수화물 층에 가장 많이 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. C-S-H 수화물 층에서 Na/Si의 몰비는 0.07로 NaOH와 유사한 값을 나타냈다.

Fig. 8은 C₃S-Na₂SO₄의 재령 28일 페이스트 경화체의 BSE상과 Ca, Si, Na, S의 원소 분포를 나타낸 것이다. C₃S 입자 주위에는 약 5~10 μm 정도의 C-S-H 수화물 층이 형성되고 있어 다른 알칼리 촉진제보다 반응층의 두께가 두꺼웠다. Ca/Si 몰비는 1.47로 C₃S 단미보다 0.13 정도 저하되었으나 Na₂CO₃와 유사한 값을 나타냈다. Na의 분포를 보면 마찬가지로 C-S-H 수화물 층에 가장 많이 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. C-S-H 수화물 층에서 Na/Si의 몰비는 0.06로 다른 알칼리 촉진제와 유사한 값을 나타냈다. S은 Na과 마찬가지로 C-S-H 수화물 내에 일정량 존재하는 것으로 나타났다. C-S-H 수화물 내에서 S²⁻ 이온은 O²⁻ 이온과 치환이 일어난 것으로 판단된다.

3.5 Na에 의한 C-S-H 구조 평가

앞서 실험 결과에서 보듯이 C-S-H 수화물은 Na과 결합하여 구조를 변화시키는 것을 알 수 있다. C-S-H에서 Na과의 결합의 형태는 두 가지로 생각할 수 있다. 하나는 C-S-H 표면에 Na이 흡착하는 것이고, 두 번째는 C-S-H 구조에 혼입되는 것이다. C-S-H 구조에 Na이 흡착 또는 구조에 혼입되면서 미세구조가 바뀌는 것으로 판단된다. Na에 의해 C-S-H 구조가 전환되는 것을 Jennings의 콜로이드 모델^{6,7)}과 이 모델을 Na에 적용시킨 Hailong Ye의 모델⁸⁾을 가지고 평가하고자 한다.

알칼리가 없는 C-S-H는 내부수화물과 외부수화물이 있고, 그 형태는 매우 다르다. 내부수화물은 미세한 입자로 구성되어 있고 균질한 형상을 가지고 있으며 직경이 10 nm 이하인 기공이 존재한다. 반면에 외부수화물은 섬유상을 가지고 있으며 C-S-H의 형태는 알칼리가 첨가되면 앞서 실험 결과와 같이 섬유상에서 박편상으로 변한다. 알칼리가 없는 C₃S는 C-S-H가 침상으로 고립된 클러스터에서 성장한다. 반면에 알칼리가 존재하면 윤곽이 뚜렷하지 않은 상태로 표면으로부터 바깥쪽으로 성장하

Table 3 재령 28일 경화체의 BET 비표면적

경화체 종류	비표면적(m ² /g)
C ₃ S	3.96
C ₃ S-Na ₂ SO ₄ 3%	2.50

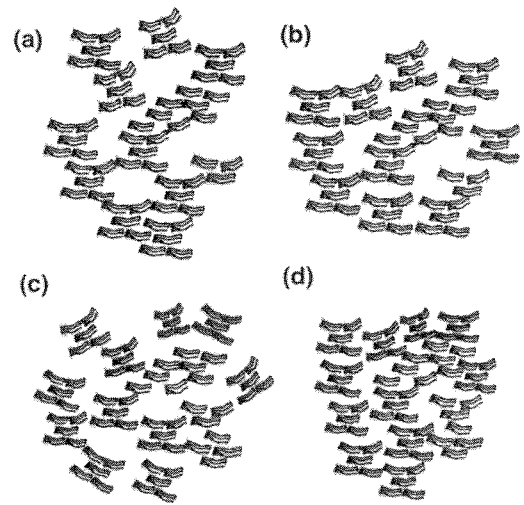


Fig. 9 C-S-H 클러스터의 예시 (a)순수한 C-S-H에 건조/하중이 가해지기 전, (b)순수한 C-S-H에 건조/하중이 가해진 후, (c)알칼리를 다량 함유한 C-S-H에 건조/하중이 가해지기 전, (d)알칼리를 다량 함유한 C-S-H에 건조/하중이 가해진 후⁸⁾

지 못한다. Jennings 등에 의하면 두 가지의 형상의 차이는 C-S-H 클러스터의 충전 밀도의 차이에 의한 것으로 설명하였다^{6,7)}. 밀도가 작으면 침상으로 성장하고 밀도가 크면 박상으로 성장한다는 것이다. 알칼리가 첨가되면 C-S-H 클러스터의 밀도는 커지게 되어 박상으로 성장하는 것으로 설명하였다. 이러한 것은 비표면적의 차이로부터 해석할 수 있다고 하였다. 이러한 것을 알아보기 위해 재령 28일 경화체의 BET 비표면적을 측정하여 그 결과를 Table 3에 나타냈다. C₃S 단미는 비표면적이 3.96 m²/g인데 비하여 C₃S-Na₂SO₄ 3%는 2.50 m²/g을 나타내어 비표면적이 1.46 m²/g 상당량 감소되어 치밀해졌음을 알 수 있다. Jennings의 보고와 잘 일치하는 결과를 나타냈다.

Jennings가 제안한 콜로이드 모델에 의하면 C-S-H는 석출된 콜로이드 입자들의 응집체로서 Fig. 9와 같이 C-S-H 구조 모델을 제시하였다. Fig. 9에서 보듯이 C-S-H의 나노구조는 기본적인 블록 입자의 집합체(Jennings는 globule이라 언급)로 두께가 약 4 nm인 디스크 모양이고 토버모라이트와 같이 층상구조를 갖는다고 보고하였다⁷⁾. Globule의 충전에 의해 구조의 치밀도가 결정되며 시멘트 경화체의 변형은 globule의 재배열과 재분포에 의존하는 것으로 설명하였다.

Hailong Ye의 모델은 Jennings의 모델과 비교하여 Na은 수화초기에 혼입하는 것에 의해 C-S-H 입자들의 적층구조에 대해 규칙성을 감소시킨다고 언급하였다. 그리

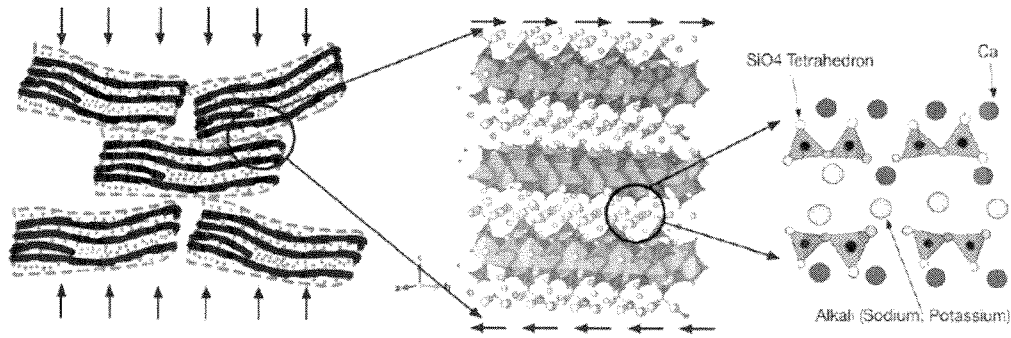


Fig. 10 내부 혹은 외부의 응력에 의해 C-S-H 나노입자들의 재편성/재배열에서 C-S-H에 혼입된 알칼리의 영향의 모식도⁸⁾

고 내부응력(건조) 또는 외부응력이 작용했을 때 Na에 의해 globule이 재배열되는 과정에서 Na이 중요한 역할을 한다는 것이다. Fig. 10에서 보듯이 Na⁺에 의해 일부 Ca²⁺과의 부분적인 치환은 이온 크기 차이에 의해 C-S-H 층간에서 구조적 무질서도를 유발하게 된다. 그리고 실리케이트 체인에서 Na⁺는 실리케이트 체인을 끊어버리고 휘게 만들어 C-S-H 입자들의 크기를 작게 만든다. 따라서 응력이 가해지면 Na이 풍부한 계에서는 쉽게 재배열이 일어나서 구조적으로 박상으로 만든다. 특히 C-S-H 입자의 외부 표면에 흡착하여 이동하기 쉬운 Na 또는 C-S-H 층간에 존재하는 Na은 C-S-H 입자끼리 미끄러지는 것을 도와서 재배열하기 쉬워져 충전율을 높이는 것으로 설명하였다. 결과적으로 C-S-H에서 Na이 풍부하다는 것은 Fig. 9에서 보는 바와 같이 C-S-H 클러스터의 밀한 충전을 하게 되어 미세구조의 변화를 일으키고 수축율을 증가시킨다는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 C₃S의 장기반응에서 알칼리 촉진제 첨가가 C-S-H의 미세구조에 미치는 영향에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

C-S-H는 구조 내에 상당량의 알칼리를 혼입되며 이에 따라 Ca/Si의 몰비는 C₃S 단독일 때 1.60에서 1.24~1.47로 저하되며, NaOH의 경우가 가장 낮은 Ca/Si 몰비 1.24를 나타내어 취약한 C-S-H 구조를 보였다.

C-S-H 구조에 혼입된 Na은 C-S-H 표면에 흡착하거나 C-S-H 층간에 Ca과 치환될 수 있는 움직이기 쉬운 Na과 반면에 실리케이트 체인에 들어가 비가교 산소와 결합되어 움직이기 어려운 Na으로 구분할 수 있다.

C-S-H 구조 내에서 움직이기 쉬운 Na은 C-S-H 입자

끼리 미끄러지기 용이하게 하여 충전밀도를 증가시켜 섬유상에서 박상으로 전환된다. 이것으로 말미암아 외부의 성장이 억제되는 형태로 미세구조가 성장한다. 따라서 결합제 입자간 결합력은 약해지고 모세관 기공은 증가하여 장기강도는 저하하게 된다.

C-S-H의 구조 내에서 움직이기 어려운 Na은 실리케이트 체인을 절단하여 구조를 불안정하게 만들고 C-S-H 입자의 크기를 작게 한다.

알칼리 촉진제의 사용은 C-S-H의 구조를 열화시켜 경화체의 수축율(자기수축, 건조수축) 및 미소균열을 증대시켜 내구성을 저하시킬 우려가 큼으로 알칼리 촉진제의 사용은 상당한 주의가 필요하다.

<참고문헌>

1. I. Richardson, "The nature of C-S-H in hardened cement paste", Cement and Concrete Research, 29, 1999, pp.1131-1147.
2. H. Stade, "On the reaction of CSH with alkali hydroxide", Cement and Concrete Research, 19, 1989, pp.802-810.
3. 山口, 内川, 高木, 小池, 日本窯業協會誌, 70(5), 1962, pp.91-97.
4. I. A. Kryzhannovskaya, V. M. Mirakyan and B. G. Shokotova, Tsement, 4, 1969, pp. 10-15.
5. I. Jawed and J. Skalny, "Alkalies in cement: A review", Cement and Concrete Research, 8, 1978, pp.37-52.
6. H. M. Jennings, "A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste", Cement and Concrete Research, 30, 2000, pp.101-116.
7. H. M. Jennings, "Refinements to colloid model of CSH in cement: CM-II", Cement and Concrete Research, 38, 2008, pp.275-289.
8. Y. Hailong and R. Alerksandra, "Effect of alkalies on cementitious materials", Journal of Advanced Concrete Technology, 15, 2017, pp.165-177.