

알칼리 刺戟劑에 의해 高爐 水碎 슬래그의 周圍에 形成된 Reaction Rim의 特性†

†李昇憲 · 文永鈞*

群山大學校 新素材工學科, *星信洋灰 技術研究所

Properties of Reaction Rim on Blast Furnace Slag Grain with Alkali Activator according to Hydration Reaction†

†Seung-Heun Lee and Young-Bum Mun*

Dept. of Materials Science and Engineering, Kunsan National University, Kunsan, 573-701, Korea

*R&D Center, Sungshin Cement Co., Cheungwon-Kun, 363-940, Korea

요 약

고로 수쇄 슬래그에 알칼리 자극제(NaOH+Na₂O.SiO₂)를 첨가한 계는 보통 포틀랜드 시멘트의 수화반응과 다르게, 수화반응 초기에 높은 농도의 OH⁻, [SiO₄]⁴⁻ 이온이 존재하게 되므로, 유도기가 없이 수화반응이 빠르게 진행되며, 슬래그 입자 주위에 수화물에 의한 reaction rim을 형성한다. 반응기간 1일부터 고로 수쇄 슬래그 입자 주위에 0.6 μm의 reaction rim이 형성되었고, 반응기간이 증가함에 따라 reaction rim의 두께는 증가하여 28일에 1 μm으로 성장하였으며, 미반응 고로 수쇄 슬래그 입자는 각진 형태에서 구형의 형태로 변화되었다. 슬래그 입자의 내부로부터 reaction rim으로 갈수록 Ca/Si의 몰비는 감소하는 경향을 나타냈었다. 그리고 반응기간이 경과할수록 슬래그 입자 내부와 reaction rim 간의 Ca/Si 몰비 차이는 작아졌으며, 생성된 수화물은 저결정성의 Ca/Si 몰비가 1.5 미만인 CSH(I)이었다.

주제어 : 알칼리 자극제, 고로 수쇄 슬래그, reaction rim, 칼슘실리케이트수화물(I)

Abstract

Since there are OH⁻, [SiO₄]⁴⁻ ion of high concentration at early hydration in the system added with activator (NaOH+Na₂O.SiO₂) in the blast furnace slag, different from cement hydration, hydration progresses fast without induction period and forms reaction rim around the blast furnace slag grain. 0.6 μm reaction rim was formed around the blast furnace slag grain from the 1 day of reaction period, and the thickness of reaction rim increases over the reaction time, growing to 1 μm on the 28 days. Unreacted blast furnace slag grain deformed from angular shape to the spherical shape. Mole ratio of Ca/Si tends to decrease from inside of blast furnace slag grain to reaction rim. Difference of Ca/Si mole ratio between reaction rim and inside the blast furnace slag grain decreased and generated hydrate was a poor crystalline CSH(I) with Ca/Si mole ratio less than 1.5.

Key words : alkali activator, blast furnace slag, reaction rim, CSH(I)

1. 서 론

고로 수쇄 슬래그에 적절한 알칼리 자극제를 첨가하

여 제조한 시멘트는 치밀성이 높고, 수밀성이 있으며 동결융해저항성, 열저항성, 부식이나 풍화 저항성, 내화학성, 저수축성 및 높은 내구성 등의 우수한 특성을 갖고 있는 것으로 보고되고 있다.^{1,2)} 또한 생산에 소요되는 에너지는 포틀랜드 시멘트의 제조에 비하여 훨씬 적을

† 2009년 4월 30일 접수, 2009년 5월 22일 수리

* E-mail: shlee@kunsan.ac.kr

뿐만 아니라 제철과정에서 발생하는 산업부산물물을 자원으로 이용할 수 있으므로 잠재적 고부가가치를 갖고 있는 무기결합재라고 할 수 있다.^{3,4)}

일반적으로 고로 수쇄 슬래그 미분말은 고로슬래그 시멘트의 원료나 콘크리트용 혼화재로 사용하고 있다. 고로 수쇄 슬래그는 단독으로는 수화반응이 발생하지 않으며 알칼리와 같은 자극작용으로 경화하는 잠재 수경성을 갖고 있다. 이러한 고로 수쇄 슬래그 특성을 이용한 활성화 슬래그 재료는 중국과 동유럽 및 스칸디나비아 등지에서 이미 연구를 거쳐 사용되어 왔다.^{5,6)} 그러나 현재 국내에서는 고로 수쇄 슬래그 미분말을 주로 슬래그 시멘트의 원료나 콘크리트용 혼화재로 사용하고 있으나,⁷⁾ 고로 수쇄 슬래그만을 활성화시켜 경화체를 제조하는 알칼리 활성화 슬래그에 대한 연구는 보고되고 있으나 개발된 제품은 없는 실정이다.⁸⁾

고로 수쇄 슬래그는 순수한 물과 접촉할 경우, 고로 슬래그의 입자 표면에는 치밀한 피막이 형성되어 물의 침투와 내부 이온의 용출을 억제하므로 수화반응은 지속되지 않는다. 그러나 NaOH, Na₂SiO₃와 같은 강알칼리성 물질이 존재하면 고로 수쇄 슬래그의 불규칙한 3차원 망목구조가 강알칼리(pH > 12)에 의해 결합이 끊어지면서, Ca²⁺, Si⁴⁺, Mg²⁺, Al³⁺ 등 이온들이 용출되어 수화반응이 진행하게 된다. 이와 같이 고로 수쇄 슬래그의 수화반응을 촉진하는데 사용하는 물질을 일반적으로 자극제라 부르고 있다.^{5,6,9)}

따라서 본 연구에서는 알칼리 자극제를 이용한 슬래그계 특수 시멘트 기술 개발을 위한 기초 연구로서 알칼리 자극제를 첨가했을 때, 고로 수쇄 슬래그의 입자 주위에 수화반응으로 인해 형성되는 reaction rim에 대해 FE-SEM의 Back Scattered Electron Image와 Energy Dispersive Spectrometer를 활용하여 reaction rim의 생성과정과 화학조성의 변화를 검토하였다.

2. 실험

고로 수쇄 슬래그 미분말은 광양제철의 제철생산공정에서 산업부산물로 발생하는 고로 수쇄 슬래그를 사용하였다. Table 1은 실험에 사용된 고로 수쇄 슬래그의 화학분석결과를 나타내었다. 슬래그는 CaO 43.5 wt%와

SiO₂ 33.6 wt%를 주 성분으로 Al₂O₃ 14.5 wt%, MgO 5 wt% 이었고, Blaine 값은 4000 cm²/g, 비중은 2.91이었다. 본 연구에 사용된 알칼리 자극제 용액은 NaOH 4M 용액과 Na₂O·SiO₂ 2M 용액을 1:1로 혼합하여 사용하였다.

시편제작은 고로 수쇄 슬래그 미분말에 알칼리 자극제 용액 55 wt%를 혼합하여 5분간 교반 후, 플라스틱 용기에 넣어 밀봉하여 페이스트 시편을 제작하였으며 23°C에서 1일, 3일, 7일, 28일 동안 수화반응시켰다. 반응기간이 완료된 시료는 D-dry 건조장치(Dry ice 온도인 -79°C, 수증기압 5×10⁻⁴mmHg에서 건조)를 이용하여 48시간 건조하여 수화정지 시켰으며, 건조된 시편은 고로 수쇄 슬래그의 반응을 실험과 Back Scattered Electron Image(이하 BSE라 약함), Energy Dispersive Spectrometer(이하 EDS라 약함) 분석에 이용하였다. 또한 건조된 시편을 분쇄하여 X선회절분석으로 수화물을 동정하였다. 수화발열속도는 Twin Conduction Micro Calorimeter TCC-26을 사용하였다.

수화물 내의 미반응 고로 수쇄 슬래그의 함량분석은 D-dry 건조한 시료에 대해 salicylic acid 2.5 g, acetone 35cc, methanol 15cc를 혼합한 혼합용액에 수화시료 0.5 g을 넣어 magnetic stirrer에 1시간 교반한 후, 1일 정지한 다음 진공펌프로 여과하였다. 이렇게 여과하고 남은 시료를 750°C에서 10분간 열처리 한 다음, 열처리된 시료의 무게를 측정하여 구하였으며, 미반응 고로 수쇄 슬래그의 함량과 강알칼리를 이용하여 고로 수쇄 슬래그의 반응을 구하였다.

알칼리 자극제에 의한 고로 수쇄 슬래그의 수화반응에 의해 형성된 수화물의 미세구조와 성분의 변화를 관찰하기 위하여 전계방사형 주사전자현미경(FE-SEM)으로 관찰하였다. 수화정지 시료를 적당한 크기로 파단한 후, epoxy resin와 MMA 용액을 이용하여 전자현미경 관찰용 샘플을 만들고, 연마하였다. 연마된 시료는 Pt를 이용하여 coating 한 후 FE-SEM(JEOL JSM-6700F)을 이용하여 관찰하였다. 분석조건은 수화물의 이미지 관찰시 가속전압 15kV, WD 8 mm에서 관찰하였으며, EDS 분석시에는 가속전압 15kV, WD 15 mm에서 관찰하였다. X선 회절분석(MAC·SCIENCE Co., Japan)은 Cu target 40 kV, 100 mA 조건으로 측정하였다.

Table 1. Chemical composition of blast furnace slag (wt%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
33.6	14.5	0.75	43.5	5.2	1.4	0.23	-	0.77

3. 결과 및 고찰

3.1. 수화발열속도와 반응율

Fig. 1은 20°C에서 고로 수쇄 슬래그와 알칼리 자극제를 첨가한 계를 48시간 동안 측정된 수화발열 속도의 곡선으로 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)와 비교하여 나타내었다. 고로 수쇄 슬래그는 보통 포틀랜드 시멘트와 비교하여 초기에 강한 발열피크를 보이며 이후에는 다른 피크가 형성되어 있지 않음을 확인할 수 있다. Shi 등에 의하면¹⁰⁾ 자극제에 의한 슬래그의 수화반응은 자극제에 존재하는 높은 농도의 알칼리 음이온에 의하여 슬래그의 Ca-O, Si-O-Si, Al-O-Al, Al-O-Si 의 구조를 파괴하여 수화를 촉진시키는 것과 알칼리의 자극제의 양이 증가할수록 유도기가 짧아 진다고 보고하였다. 따라서 수화발열 곡선에서 유도기와 가속기가 나타나지 않는 것은 실험에 사용한 자극제 용액이 높은 농도의 OH⁻, [SiO₄]⁴⁻ 이온이 같이 존재하고 있어, 고로 수쇄 슬래그 입자의 파괴와 이온들의 흡착을 가속화시켜 유도기간 없이 초기에 계속적인 수화물을 형성시키기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 2에 XRD 분석 결과를 도시하였다. 고로 수쇄 슬래그 미분말은 2θ=25-35°에 걸쳐 halo 피크가 나타나고 있다. Halo는 장거리 질서를 잃어버렸다는 것을 의미하는 것으로, halo의 최고위치는 유리구조와 밀접한 관계가 있는 것으로 보고되고 있다.¹¹⁾ 알칼리 자극제에 의한 수화반응 생성상은 반응기간에 관계없이 저결정성 CSH(I)상이 생성되었으며, 반응기간이 길어질수록 29.1°, 31.9°, 49.7°에서 나타나는 저결정상 CSH(I)의 피크는 증가하는 경향을 나타냈다. 본 실험에서는 다른 반응생

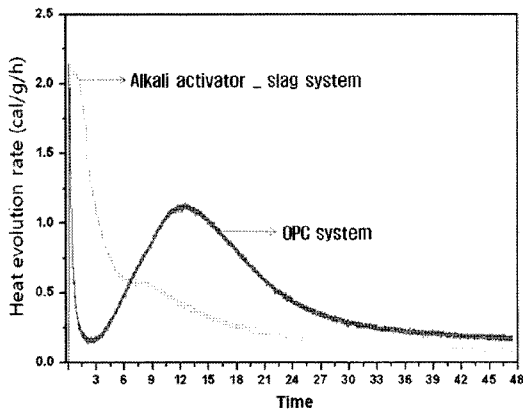


Fig. 1. Heat evolution rate of ordinary Portland cement (OPC) system and alkali activator-slag system.

성물은 나타나지 않았다.

Fig. 3에 수화기간에 따른 알칼리 자극제에 의한 고로 수쇄 슬래그의 반응율을 나타냈다. 초기 7일까지, 슬래그의 반응은 급속히 진행되어 약 32.5%의 반응율을 나타냈으나, 그 이후에는 반응이 완만하게 이루어져 28일이 경과해도 약 34%의 반응율을 나타냈다. 따라서 초기 수화반응에 의해 슬래그 입자 주위에 reaction rim이 형성되고, 이 reaction rim을 통한 이온확산이 수화반응을 지배하기 때문에 7일 이후에는 반응이 완만히 진행된 것으로 생각된다.

3.2. 고로 수쇄 슬래그 입자 주위 수화물 층의 형성과정

Fig. 4는 연마한 단면을 300배율로 측정된 BSE 이미

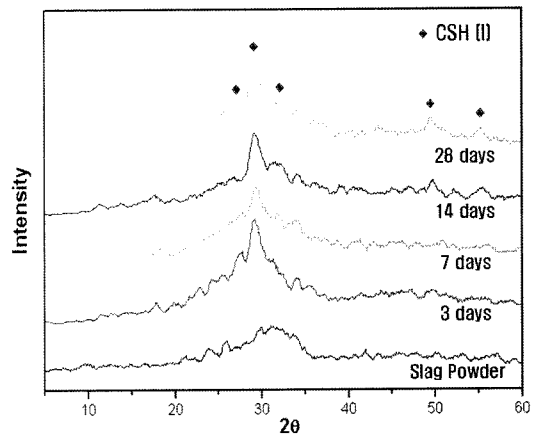


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of hydrated blast furnace slag cured for various periods.

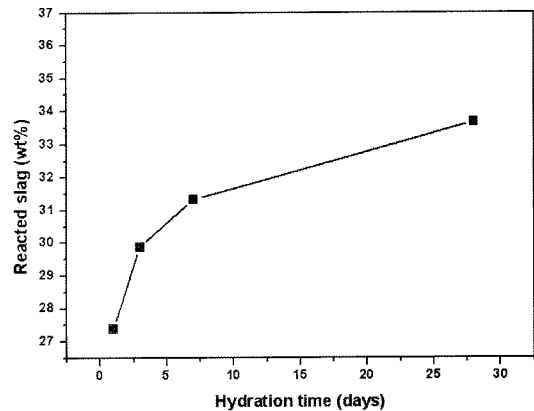


Fig. 3. Reaction rate of blast furnace slag cured for various periods.

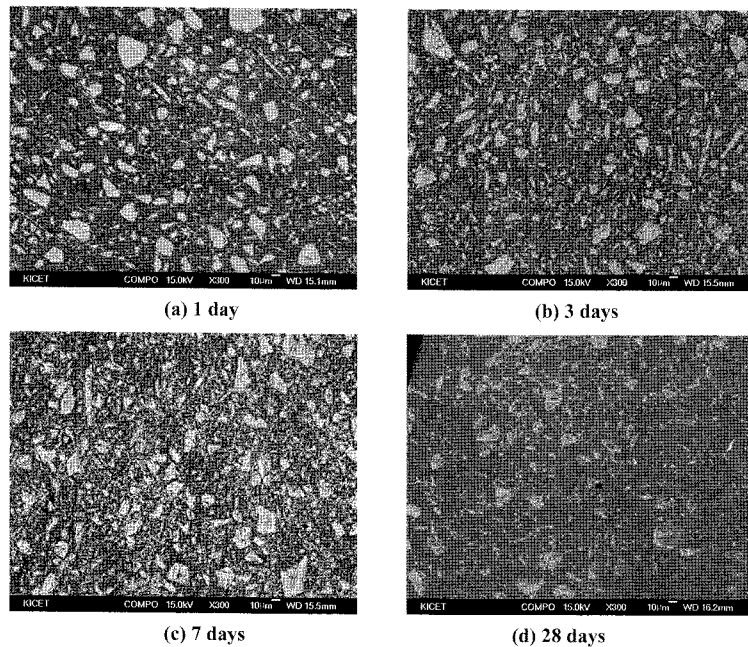


Fig. 4. BSE images of hydrated blast furnace slag cured for various periods.

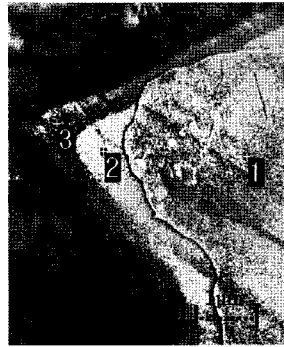
지로서 전체적인 수화반응 정도와 미반응 고로 수쇄 슬래그의 분포를 수화기간에 따라서 관찰한 이미지이다. BSE 이미지에서 광도는 평균 원자번호에 의해서 명암이 다르게 나타난다. 즉 평균 원자번호가 높으면 밝게 나타나며, 낮으면 어두운 이미지로 나타난다. 따라서 어둡게 나타나는 이미지는 CSH 수화물이며 밝게 보이는 부분은 미수화 고로 수쇄 슬래그 입자이다. 미세한 균열은 시편 준비 동안에 건조 수축 때문에 발생되며 진한 검정색 이미지로 나타난다. Fig. 4에서 보면, 반응기간이 길어질수록 수화반응으로 인해 고로 수쇄 슬래그의 입자가 수화물을 형성하여 어두운 이미지가 증가하였지만 여전히 반응하지 않은 고로 수쇄 슬래그의 입자(밝은 부분)가 관찰되고 있다. 이와 같은 결과를 토대로 수화반응에 의해서 생성되는 수화물의 발생량 및 수화 정도를 BSE 이미지를 통해서 어느 정도 유추할 수 있다.

수화반응 1일의 경우 입자가 각진 형태로 관찰이 되며, 또한 어두운 곳보다 밝게 보이는 부분이 더 많이 나타났다. 하지만 수화기간이 경과함에 따라 슬래그의 입자가 점점 구형으로 바뀌어 가고 있는 것을 볼 수 있고, 어둡게 보이는 부분(CSH 수화물)이 점점 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 고로 수쇄 슬래그의 생산과정에서 분쇄시의 충격으로 각진 형태로 혼입되어 수화 초기에는 반응이 비교적 미미하여 각진 형태로 관

찰된 것이며, 지속적인 고로 수쇄 슬래그 입자-자극제-물의 반응으로 고로 수쇄 슬래그 입자가 구형으로 바뀌어 가고 있다. 또한 고로 수쇄 슬래그 입자에서 이온의 용출 및 수화물 생성으로 밝게 보이는 고로 수쇄 슬래그의 부분이 줄어들고 크기가 작아져서, 어둡게 보이는 수화물이 많아지고 있다. 반면에 여전히 밝게 나타나는 부분은 반응하지 않은 고로 수쇄 슬래그이다.

Fig. 5는 7일 반응한 슬래그 입자의 모서리에서 형성된 reaction rim의 형성과 슬래그 입자내부와 바깥과의 화학조성을 나타낸 것이다. 슬래그의 모서리 부분에서 수화 정도가 커서 어두워 지는 것을 볼 수 있으며, point 1에서 point 2를 거쳐 point 3으로 갈수록 Ca, Al 양은 점점 감소하는 경향을 나타냈다. 반면에 Si, Na의 양은 증가하였다.

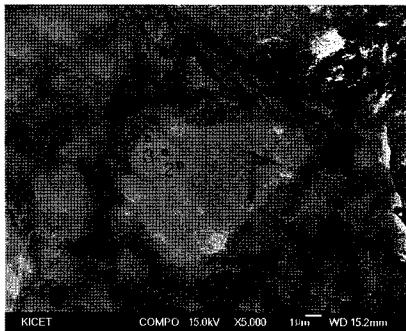
Fig. 6-Fig. 8에 특정한 고로 수쇄 슬래그 입자를 수화기간이 경과함에 따라 관찰한 BSE 이미지를 나타냈다. Fig. 6에서 보면, 초기 1일 단계부터 밝게 보이는 슬래그 입자 주위에 reaction rim이 생성되어 있다. 즉 밝게 보이는 부분의 직경이 약 8µm의 미수화 슬래그 입자와 어둡게 보이는 부분인 약 0.6µm의 reaction rim이 생성된 것을 볼 수 있다. 시간이 경과함에 따라 마찬가지로 7일인 경우(Fig. 7), reaction rim 크기는 약 1µm 정도이며 Fig. 8의 28일은 1µm이상의 reaction



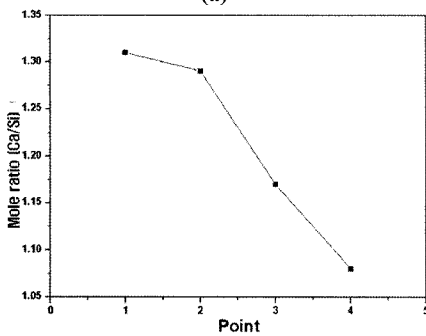
Unit : wt%

Point	O	Na	Al	Si	S	Ca	Ti	Fe	Total
1	54.6	-	19.5	2.5	-	18.1	0.7	4.7	100
2	55.9	0.8	18.3	2.4	-	17.2	0.6	4.9	100
3	60.1	2.8	6.3	5.6	5.1	14.3	0.5	5.2	100

Fig. 5. BSE micrographs of zonal structure of reaction rim and variation in chemical composition from inner to outer parts of a partly reacted blast furnace slag grain in the cured for 7 days.



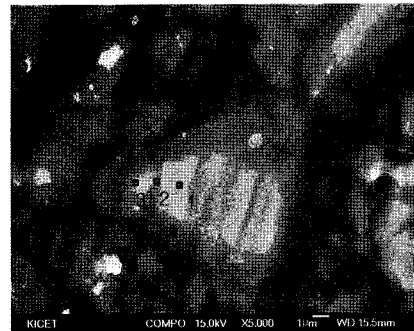
(a)



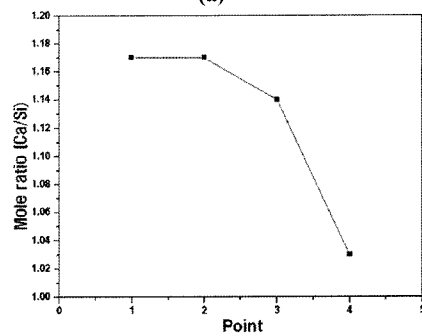
(b)

Fig. 6. BSE image of blast furnace slag grain (a) and variation in Ca and Si mole ratio (b) of the sample cured for 1 day.

rim이 형성되어 점점 커지고 있으며, 미수화 고로 수쇄 슬래그 입자는 직경이 약 3 µm 정도로 작아진 것을 볼



(a)



(b)

Fig. 7. BSE image of blast furnace slag grain (a) and variation in Ca and Si mole ratio (b) of sample cured for 7 days.

수 있다. 또한 점점 슬래그의 입자 주위에 형성된 수화 물이 치밀해져서 수화물과 슬래그 입자가 일체화 되고

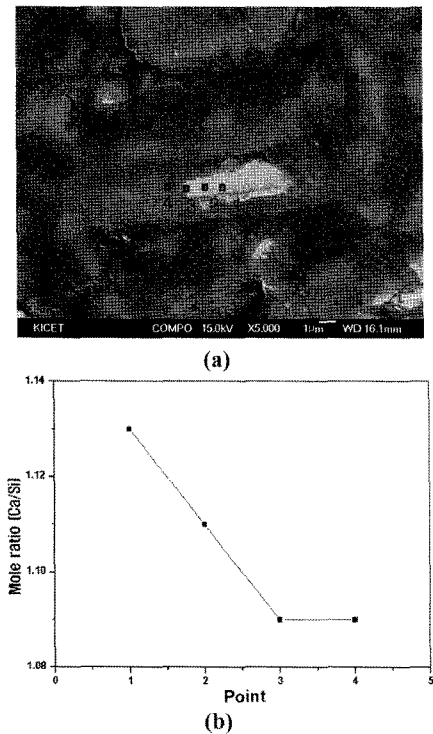


Fig. 8. BSE image of blast furnace slag grain (a) and variation in Ca and Si mole ratio (b) of sample cured for 28 days.

있다. 이와 같은 reaction rim의 존재와 수화물의 치밀화는 고체 확산 메커니즘인 topochemical reaction에 의해 내부 수화물이 형성되는 것을 의미한다.⁴⁾ 따라서 수화시간이 지남에 따라 고로 수쇄 슬래그 표면은 완전히 석출물로 덮이며, 고로 수쇄 슬래그 입자 주위에 수화물 통한 지속적인 이온 확산이 이루어져 reaction rim을 성장시키는 것으로 생각된다.

수화시간이 경과함에 따라 수화반응에 의해 형성된 수화물의 미세구조 관찰 후, 성분분석을 수행하였으며, 성분 분석은 FE-SEM 에 부착된 EDS를 이용하였다. Fig. 6-Fig. 8은 수화시간에 따른 고로 수쇄 슬래그 입자 중심부터 reaction rim까지의 Ca/Si 몰비의 변화를 나타냈다. 수화시간에 따른 고로 수쇄 슬래그 입자 중심의 화학조성을 비교하여 보면, 1일의 경우 고로 수쇄 슬래그 입자 중심(point 1)은 Ca/Si 몰비가 1.32로 나타났으나, 수화시간이 더 경과한 7일의 경우 1.17, 28일의 경우 1.13으로 수화시간이 1일에서 28일로 경과함에 따라 고로 수쇄 슬래그 입자의 Ca/Si 몰비가 낮아지는 경향을 나타냈다. 또한 수화시간에 관계없이 고로

수쇄 슬래그 입자로부터 수화물 층의 바깥쪽으로 갈수록 Ca/Si 몰비가 낮아졌으나, 반응기간이 경과할수록 슬래그 입자 내부와 reaction rim 간의 Ca/Si 몰비 차이는 감소하였다. 그리고 reaction rim의 Ca/Si 몰비는 반응기간에 관계없이 1.02~1.09의 값을 나타냈다.

C. Shi 등¹¹⁾에 따르면 이러한 Ca/Si 몰비의 변화는 Ca-O, Si-O와 Al-O 결합으로 구성된 슬래그 입자 표면의 결합이 자극제(NaOH+Na₂SiO₃)에 존재하는 OH⁻ 이온과 알칼리 이온에 의해 슬래그 결합이 파괴되어 Ca²⁺, [H₂SiO₄]²⁻, [H₃SiO₄], [H₄AlO₄]⁻ 이온이 용출되면서 입자 표면에 CSH 수화물 형성된 후, 수화물 층을 통한 이온 확산이 반응율속으로 보고하였다. 따라서 슬래그 입자의 Ca/Si 몰비는 수화물의 바깥쪽으로 갈수록 낮아지고 있는 것으로 생각된다. 수화반응에 의해 생성된 수화물은 CaO-SiO₂-H₂O계 수화물로서 Ca/Si 몰비에 의해서 Ca/Si 몰비가 0.8~1.5이면 CSH(I) 그리고 1.5이상이면 CSH(II)로 분류하므로,¹³⁾ 본 연구에서 알칼리 자극제에 의해 생성된 reaction rim은 Ca/Si 몰비가 1.5 미만인 저결정성 CSH(I)이다.

5. 결 론

알칼리 자극제(NaOH+Na₂O.SiO₂)를 첨가했을 때, 고로 수쇄 슬래그의 입자 주위에 수화반응으로 인해 형성되는 reaction rim에 대해 FE-SEM의 Back Scattered Electron Image와 Energy Dispersive Spectrometer를 활용하여 reaction rim의 형성과정과 화학조성의 변화를 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 고로 수쇄 슬래그에 알칼리 자극제(NaOH+Na₂O.SiO₂)를 첨가한 계는 보통 포틀랜드 시멘트 수화반응과 다르게, 수화반응 초기에 높은 농도의 OH⁻, [SiO₄]⁴⁻ 이온이 존재하게 되므로, 슬래그 입자 내의 결합을 파괴하여 유도가 없이 수화반응이 진행되어, 슬래그 입자 주위에 수화물 층, 즉 reaction rim이 형성된다. 생성된 수화물은 반응기간에 관계없이 저결정성 CSH(I) 상이 생성되었으며 반응기간이 길어질수록 CSH(I)의 생성량은 증가하였다.

2) 반응기간 1일부터 고로 수쇄 슬래그 입자 주위에 약 0.6 μm의 reaction rim이 형성되었고 미수화 고로 수쇄 슬래그 입자는 각진 형태를 나타내었으나, 반응기간이 증가함에 따라 reaction rim의 두께는 증가하여 28일에 약 1 μm으로 성장하였고, 미반응 고로 수쇄 슬래그 입자는 구형의 형태를 나타내었다. 따라서 고로 수

쇄 슬래그의 수화반응은 reaction rim을 통한 확산반응이 반응율속 단계이다.

3) 고로 수쇄 슬래그 입자로부터 reaction rim의 바깥쪽으로 갈수록 Ca/Si의 몰비는 감소하는 경향을 나타냈고, 반응기간이 경과할수록 고로 수쇄 슬래그 입자 내부와 reaction rim간의 Ca/Si 몰비 차이는 감소하였으며, 생성된 수화물은 Ca/Si 몰비가 1.5 미만인 저결정성 CSH(I)이었다.

참고문헌

1. 김원기, 2000 : 폐기물을 이용한 무기결합체의 개발, 세라미스트, **3**(6), pp. 20-25.
2. 김원기, 소정섭, 배동인, 2002 : 알칼리 첨가 및 양생방법에 따른 슬래그 경화체의 특성, 한국 콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, **14**, pp. 27-32.
3. S. D. Wang, 1995 : Hydration products of alkali activated cement, Cem. Concr. Res., **25**, pp. 561-571.
4. D. M. Roy, 1999 : Alkali-activated cement: Opportunities and challenges, Cem. Concr. Res., **29**, pp. 249-254.
5. J. Davidovits, 1994 : Geopolymers: Man-made rock geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement, J. Materials Education, **16**(2&3), pp. 91-139.
6. A. R. Brough and A. Atkinson, 2002: Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure, Cem. Concr. Res., **32**, pp. 865-879.
7. 조재우, 2000 : 고로슬래그 미분말을 이용한 시멘트콘크리트 기술, 세라미스트, **3**(6), pp. 25-30.
8. 안지환, 조진상, 2003 : 알칼리 자극제에 의한 고로 수쇄 슬래그의 활성화 특성, 한국세라믹학회지, **40**(10), pp. 1005-1014.
9. 문경주, 2004 : 산업폐기물을 이용한 비소성 시멘트 및 콘크리트의 특성, 전북대학교 대학원 박사학위 논문.
10. C. Shi and R. Day, 1995: A calorimetric study of early hydration of alkali-slag cement, Cem. Concr. Res., **25**, pp. 1333-1346.
11. M. Roode, E. Douglas and R. T. Hemmings, 1987 : X-ray diffraction measurement of glass content in fly ashes and slags, Cem. Concr. Res., **17**, pp. 183-197.
12. C. Shi and R. Day, 1996 : Some factors affecting early hydration of alkali-slag cement, Cem. Concr. Res., **26**, pp. 439-447.
13. 장복기 등, 1998 : 시멘트 재료화학, pp. 179-188, 전남대학교출판부,

李 昇 憲

- 연세대학교 세라믹공학과 학사
 - 연세대학교 세라믹공학과 석사
 - 연세대학교 세라믹공학과 박사
 - 일본 동경공업대학 이공학연구과 박사
 - 현 군산대학교 신소재공학과 교수
-

文 永 鈞

- 군산대학교 재료공학과 학사
 - 군산대학교 재료공학과 석사
 - 현 성신양회 기술연구소 연구원
-