



대량치환 슬래그 시멘트의 초기강도에 미치는 Na₂CO₃의 영향

김태원¹⁾ · 함형길^{2)*}

¹⁾부산대학교 생산기술연구소 ²⁾부산대학교 건설융합학부 토목공학전공

The Effects of Na₂CO₃ on Early Strength of High Volume Slag Cement

Tae-Wan Kim¹⁾ and Hyung-Gil Hahm^{2)*}

¹⁾Research Institute of Industrial Technology(RIIT), Pusan National University, Busan 46241, Rep. of Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, College of Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Rep. of Korea

ABSTRACT This report presents the results of an investigation on the early strength development of pastes high volume slag cement (HVSC) activated with different concentration of sodium carbonate (Na₂CO₃). The ordinary Portland cement (OPC) was replaced by ground granulated blast furnace slag (GGBFS) from 50% to 90% by mass, the dry powders were blended before the paste mixing. The Na₂CO₃ was added at 0, 2, 4, 6, 8 and 10% by total binder (OPC+GGBFS) weight. A constant water-to-binder ratio (w/b) =0.45 was used for all mixtures. The research carried out the compressive strength, ultrasonic pulse velocity (UPV), water absorption and X-ray diffraction (XRD) analysis at early ages(1 and 3 days). The incase of mixtures, V5 (50% OPC + 50% GGBFS), V6 (40% OPC + 60% GGBFS) and V7 (30% OPC + 70% GGBFS) specimens with 6% Na₂CO₃, V8 (20% OPC + 80% GGBFS) and V9 (10% OPC + 90% GGBFS) specimens with 10% Na₂CO₃ showed the maximum strength development. The results of UPV and water absorption showed a similar tendency to the strength properties. The XRD analysis of specimens indicated that the hydration products formed in samples were CSH and calcite phases.

Keywords : high volume slag cement, sodium carbonate, early strength

1. 서 론

고로슬래그 미분말(Ground granulated blast furnace slag; GGBFS)은 오랫동안 시멘트(Ordinary Portland Cement; OPC)와 함께 사용되어온 혼화재료이다. GGBFS를 함께 사용한 시멘트는 장기강도 향상, 수화열 저감, 염해저항성 향상, 내구성 향상 등의 긍정적인 효과가 있다는 연구결과가 다수 발표되었다.¹⁻⁵⁾ 그러나 GGBFS의 치환율이 증가함에 따라 이러한 장점들과 함께 초기강도 저하, 응결 및 경화 지연 등의 단점도 발생하고 있다. 특히 대량치환 슬래그 시멘트(high volume slag cement; HVSC)의 경우, 많은 양의 GGBFS를 OPC와 치환함으로 인해서 심각한 초기강도 저하가 문제점으로 지적되고 있다. 일부 연구자들은 이러한 HVSC의 초기강도 저하를 위해 다양한 방법을 적용하여 초기강도 저하를 방지하기 위한 여러 연구 결과들을 발표하였다.³⁻⁸⁾

기존 연구결과들을 살펴보면 HVSC의 초기강도를 증진시키기 위해 다양한 방법들을 적용하고 있다. 이러한 방법들의 대부분은 GGBFS의 느린 활성화반응을 촉진하여 수화 초기에 수화반응을 촉진하는데 초점이 맞춰져 있다.^{3,7)} 선행연구를 통해 알려진 방법에는 화학적 방법과 물리적 방법이 있다. 물리적 방법은 GGBFS 또는 OPC의 분말도를 향상시키거나 양생온도를 높이는 방법이다.³⁻⁵⁾ 화학적 방법으로는 GGBFS의 느린 수화반응을 촉진시키기 위해 응결촉진제 또는 알칼리계 활성화제를 사용하는 방법이다.⁷⁻¹⁰⁾ 여기에 사용되는 활성화제는 알칼리 활성화 슬래그 시멘트(Alkali-activated slag cement, AASC) 또는 geopolymer 등에 사용되는 활성화제이다. 이들은 다음과 같이 분류된다.¹¹⁻¹³⁾

- Caustic alkalis(가성알칼리계) : MOH
- Non-silicate weak acid salts(비규산계약산염) :
M₂CO₃, M₂SO₃, M₃PO₄, MF, etc
- Silicates(규산염계) : M₂O·nSiO₂
- Aluminates(알루미늄산염) : M₂O·nAl₂O₃
- Aluminosilicates(알루미늄 규산염계) : M₂O·Al₂O₃·(2-6)SiO₂
- Non-silicate strong acid salts(비규산 강산염계) : M₂SO₄

*Corresponding author E-mail : hghahm@pusan.ac.kr
 Received December 8, 2015, Revised February 3, 2016,
 Accepted March 11, 2016
 ©2016 by Korea Concrete Institute

선행연구에서는 HVSC의 활성화제로 주로 silicate계인 sodium silicate(water glass)를 사용한 연구결과가 많았다.⁷⁻⁹⁾ 그리고 Non-silicate strong acid salts계열의 sodium sulfate를 사용한 연구도 있다.¹⁰⁾ 그러나 아직까지 활성화제를 사용한 HVSC의 초기강도 증진에 관한 연구결과를 실제 현장에 적용하기 위해서는 배합, 운반 및 비용 등 고려해야 할 사항들이 많다. 따라서 적합한 초기강도 증진 방법과 다양한 건설 환경에 적합한 활성화제를 개발하는 것이 필요하다.

본 연구는 GGBFS를 OPC 중량에 대해 50% 이상 치환한 HVSC의 초기강도 향상을 위해 Na₂CO₃를 사용하여 그 효과를 살펴보고자 하였다. 본 연구의 목적인 HVSC의 초기강도 향상을 검토하고자 초기강도는 재령 1일과 3일 강도를 사용하였다.

2. 실험계획

2.1 사용재료

본 연구에서 사용한 고로슬래그 미분말은 포항의 K사 제품이고, OPC는 국내 S사의 제품이며 각 재료의 성분은 XRF(X-ray fluorescence) 분석을 통해 Table 1에 나타내었다. 또한 Fig. 1은 OPC와 GGBFS의 XRD 결과를 나타내었다.

GGBFS의 Si/Al 비는 2.80, Ca/Al 비는 3.28이며 염기도(basicity) $K_b=(CaO+MgO)/(SiO_2+Al_2O_3)$ 는 0.92이다.

활성화제는 S사의 sodium carbonate(Na₂CO₃, anhydros, purity ≥ 99.0%, Guaranteed Reagent grade)로 흰색의 분말 성상의 것이다.

2.2 배합 및 실험방법

페이스트(paste) 배합은 물/결합재(w/B) 비가 0.45이다. GGBFS는 OPC의 중량에 대해 50~90%까지 10% 단위로

Table 1 The chemical and physical properties of GGBFS and OPC

		GGBFS	OPC
Chemical components (%)	SiO ₂	35.30	21.32
	Al ₂ O ₃	12.58	5.61
	Fe ₂ O ₃	0.79	3.12
	CaO	41.30	61.72
	MgO	3.19	3.94
	TiO ₂	0.70	-
	MnO	0.22	-
	SO ₃	4.75	2.51
	K ₂ O	0.63	0.79
Physical properties	Ig-loss	0.34	2.31
	Blain(m ² /kg)	420	330
	Density(g/mm ³)	0.0028	0.00315

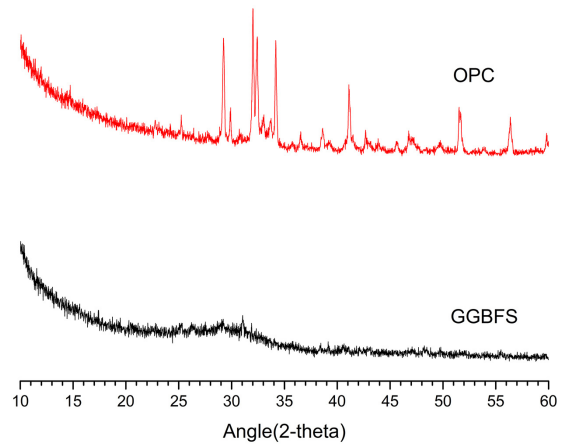


Fig. 1 XRD results of OPC and GGBFS

모두 5가지로 치환한 배합을 선정하였다. 각각의 GGBFS를 치환한 배합에 Na₂CO₃를 0, 2, 4, 6, 8 그리고 10%를 결합재(OPC+GGBFS) 중량에 대해 혼합하였다. 배합 요소는 Table 2에 나타내었다.

각각의 배합은 해당 혼합 비율로 재료들을 계량한 후

Table 2 Mix properties

Level	Contents ratio by weight of binder (%)		
	OPC	GGBFS	Na ₂ CO ₃
V5	50	50	0
			2
			4
			6
			8
			10
V6	40	60	0
			2
			4
			6
			8
			10
V7	30	70	0
			2
			4
			6
			8
			10
V8	20	80	0
			2
			4
			6
			8
			10
V9	10	90	0
			2
			4
			6
			8
			10

KS L 5109에 따라 배합하였다. 압축강도 측정은 50 × 50 × 50 mm 몰드에 타설하여 상대습도(relative humidity; RH) 75 ± 5%, 23 ± 2°C의 항온항습기에 넣고 1일(24h) 후 몰드를 탈형하였다. 몰드 탈형 후 압축강도 측정일까지 RH 75 ± 5%, 23 ± 2°C의 항온항습기에 보관하였다. 길이변화 측정용 시험체는 ASTM C490 규정의 25 × 25 × 285 mm 시험체를 사용하였다. 건조수축 측정은 ASTM C596에 나타난 방법에 따라 수행하였으며, 시험체는 RH 50 ± 5%, 20 ± 2°C의 환경에 91일까지 보관하였다. 압축강도의 측정은 본 연구의 목적인 초기강도에 초점을 맞춰 재령 1일과 3일에서 3개의 시험체에 대해 시험을 수행하고 그 평균값을 사용하였다. 초음파속도(ultrasonic pulse velocity; UPV)는 PROCEQ CCT-4를 사용하여 측정하였다. 초음파속도 측정방법은 시험체의 오른쪽에 발진자를, 왼쪽에 수신자를 두고 속도를 측정한 다음 동일 시험체에 대해 오른쪽에 수신자를 왼쪽에 발진자를 두고 측정하는 방식으로 서로 교대로 측정된 값의 평균을 사용하였고, 흡수율(absorption) 시험은 KS F2518에 따라 시행하였다.

XRD 시험용 분말도 강도 측정 후 파쇄된 시편조각을 아세톤에 48시간 침지시켜 수화정지시킨 다음 온도 35 ± 5°C, 상대습도 ≤ 50%의 건조기에서 48시간 건조시킨 후 분쇄하여 No.200체를 통과한 시료를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 압축강도

Fig. 2는 GGBFS의 치환율과 Na₂CO₃의 혼합률에 따른 초기재령 1일과 3일 강도를 측정한 결과이다.

1일 강도의 경우(Fig. 2(a)), V5, V6과 V7 시험체는 6% Na₂CO₃까지는 강도가 증가한 뒤 이후에는 감소하였다. V8은 4% Na₂CO₃까지 증가한 뒤 감소하던 강도가 10% Na₂CO₃에서 급격히 증가한 것을 볼 수 있었다. 또한 V9의 경우는 10% Na₂CO₃까지 지속적으로 강도가 증가하는 결과를 나타내었다.

3일 강도의 경우(Fig. 2(b)) 1일 강도에 비해 상대적으로 Na₂CO₃의 혼합에 따른 강도 증가경향이 작게 나타났다. 1일 강도와 유사하게 V5, V6 그리고 V7은 6% Na₂CO₃에서 최고 강도가 발생하였고, V8은 4% Na₂CO₃ 까지 완만한 강도 증가 후 감소하다가 10% Na₂CO₃에서 급격한 강도 증가를 보였다. 전반적으로 GGBFS의 치환율에 따른 시험체들의 초기강도는 Na₂CO₃를 혼합함에 따라 향상되는 결과를 보이고 있다.

Bilim and Atiş¹⁹⁾의 연구에서 liquid sodium silicate(LSS)를 활성화제로 사용하고, GGBFS를 20%, 40%, 60%, 80% 그리고 100% 치환한 OPC-slag cement에서 압축강도는 GGBFS의 치환율과 LSS의 농도가 증가함에 따라 증가하는 경향이 있다고 하였다.

V9의 시험체는 Atiş 등¹⁴⁾의 연구에서 Na₂CO₃를 GGBFS

증량에 대해 4, 6, 8%를 혼합한 무시멘트(without OPC) AAC(alkali-activated slag cement)의 강도 향상 특성과 유사하다. 또한 GGBFS를 100% 사용한 Fernández-Jiménez 등⁴⁾의 AAC에 대한 연구결과도 이와 유사한 경향을 나타내고 있다. GGBFS와 OPC의 혼합시멘트에 대해 Rakhimova and Rakhimov⁶⁾의 연구에서도 일정 수준의 활성화제 농도 또는 범위에서만 최고강도가 발생하는 현상을 보였다. 본 연구에서는 GGBFS를 OPC의 50%에서 90%까지 치환하였고 Na₂CO₃를 0%, 2%, 4%, 6%, 8% 그리고 10% 혼합한 경우, 초기 1일과 3일 강도의 향상에 영향을 미치는 Na₂CO₃의 최적 혼합률이 존재하는 것으로 판단된다.

Fig. 3은 각각의 GGBFS 치환율에서 Na₂CO₃를 혼합하지 않은 시험체(0% Na₂CO₃)에 대해 Na₂CO₃를 2~10% 혼합한 시험체의 상대 강도를 나타낸 것이다.

1일 강도에 대한 Na₂CO₃ 혼합률에 따른 상대 강도 특성을 보면 모든 시험체에서 Na₂CO₃를 혼합함에 따라 0% Na₂CO₃ 보다 향상된 결과가 나타났다. 그러나 3일 강도에 대한 강도 향상 효과는 1일 강도의 효과와 비교하여 상대적으로 낮아진 것을 볼 수 있다. 이는 GGBFS의 초

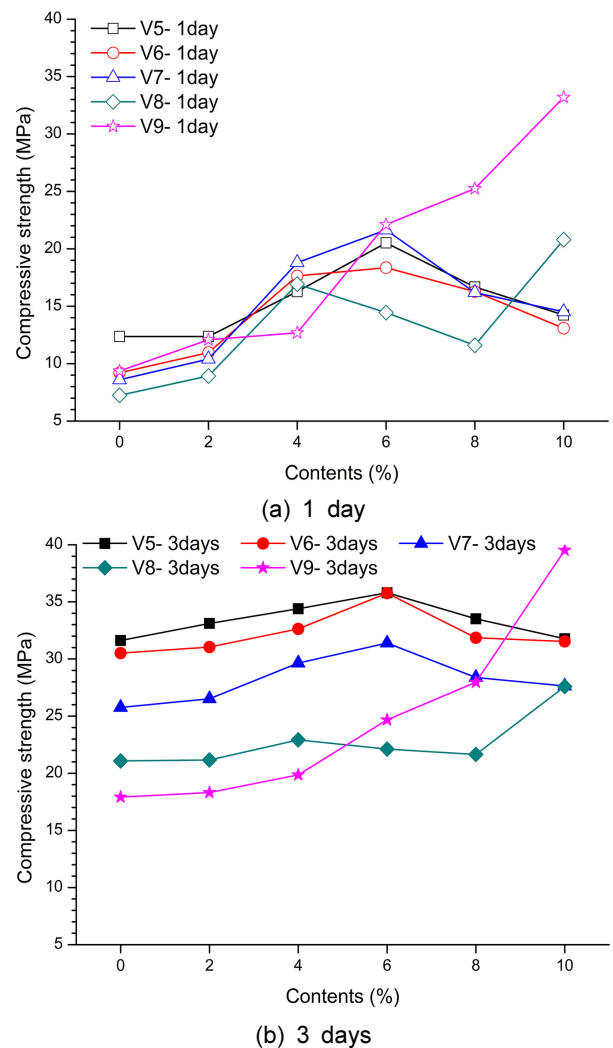
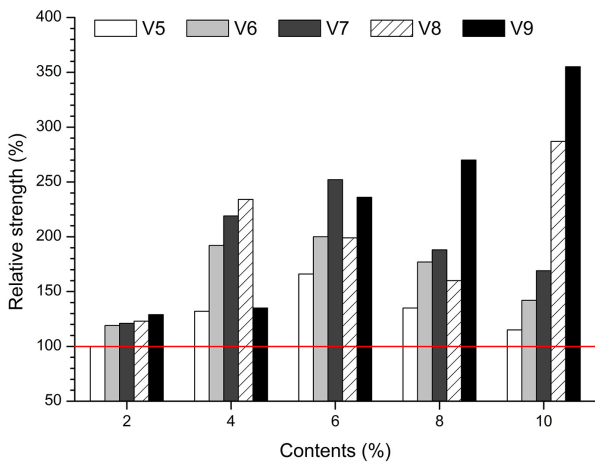


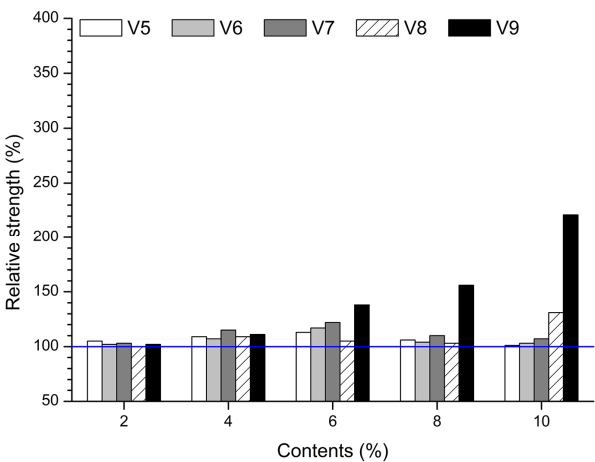
Fig. 2 Compressive strength for different replacement ratio of GGBFS

기 수화반응에 영향을 주는 OPC의 양과 Na_2CO_3 의 혼합률에 따른 배합수의 pH의 차이에 따라 GGBFS의 수화작용에 미치는 영향이 다르기 때문으로 판단된다. Na_2CO_3 가 HVSC의 초기강도 증진을 위한 활성화제로 사용될 경우 재령 1일과 3일의 강도와 반응생성물질에 미치는 영향이 있으며, 이는 GGBFS의 치환율과 Na_2CO_3 의 혼합률에 따라 변화되는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 GGBFS의 기본적인 특성과 배합조건 등을 충분히 고려한다면 Na_2CO_3 를 혼합한 HVSC의 초기강도 향상에 효과적일 것으로 판단된다.

Collins and Sanjayan¹⁶⁾의 activated slag pastes 연구에서 NaOH와 Na_2CO_3 를 혼합한 활성화제를 사용한 경우, NaOH에 의해 조성된 높은 pH의 수용액 환경에서 Na_2CO_3 의 농도가 증가함에 따라 강도가 증가하는 경향을 언급하였다. 따라서 본 연구 범위에서 볼 때 Na_2CO_3 의 혼합은 GGBFS의 활성화에 영향을 주어 초기 수화반응에 긍정적인 효과를 주는 것으로 볼 수 있다. 이러한 결과는 Na_2CO_3 의 농도가 적정 수준까지 증가함에 따라 강도가 향상되는 결과를 통해 확인할 수 있었다.



(a) 1 day



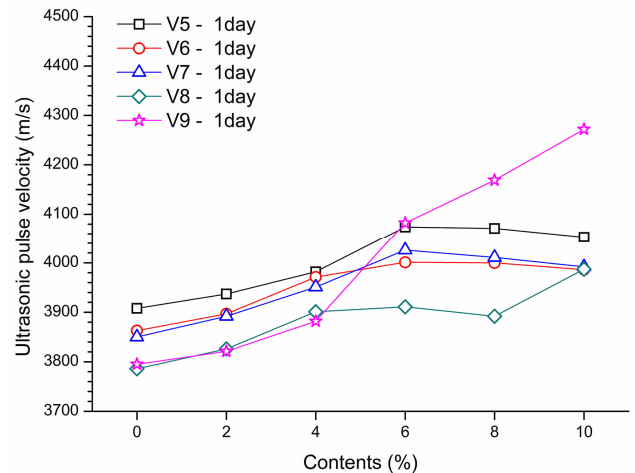
(b) 3 days

Fig. 3 Relative strength of concrete without and with Na_2CO_3 contents

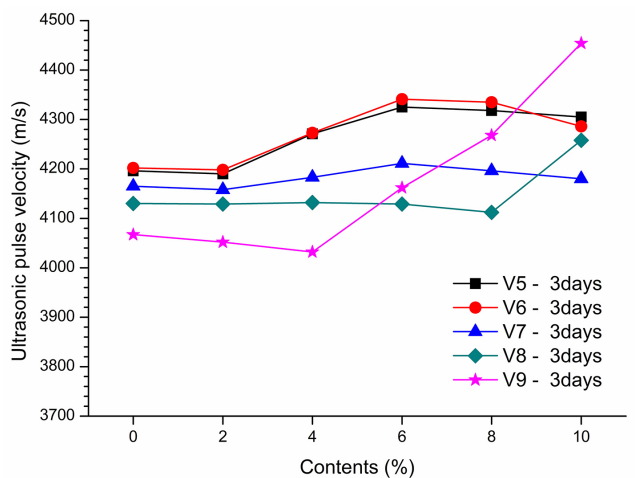
3.2 초음파 속도

초음파속도(Ultrasonic Pulse Velocity; UPV)는 콘크리트의 내부 상태를 개략적이고 간편하게 추정하는데 사용되는 일반적인 방법 중 하나이다. 시험체 내부가 치밀할수록 UPV는 증가한다. Fig. 4는 1일과 3일 재령에서의 각 시험체의 UPV를 측정된 것이다.

1일과 3일 시험체의 UPV 측정 값은 압축강도 경향과 상당히 유사한 경향을 나타낸다. 그러나 최고강도가 발생한 Na_2CO_3 혼합률 이후에도 UPV의 감소율은 강도 감소율보다는 완만하였다. 이는 재령의 증가에 따른 미수화 OPC 또는 GGBFS의 수화반응에 의한 반응생성물질의 증가와 내부 공극에 의한 영향때문으로 판단된다.¹⁷⁾ 특히 GGBFS의 치환율이 증가할수록 UPV의 감소경향은 완만하게 나타났다. 따라서 Na_2CO_3 의 혼합은 GGBFS의 수화반응을 촉진하여 반응생성물질을 형성하고 강도향상과 함께 시험체 내부 조직을 치밀하게 만드는 효과도 함께 발생하는 것으로 생각된다.



(a) 1 day



(b) 3 days

Fig. 4 Results of UPV

3.3 흡수율

Fig. 5는 재령 3일에서의 흡수율 측정 결과이다. 모든 배합에서(V5~V9) Na_2CO_3 가 증가함에 따라 흡수율이 감소하였다. 이는 GGBFS가 Na_2CO_3 의 작용에 의해 활성화 반응이 증대되고 그에 따라 수화반응의 촉진과 치밀한 반응생성물질을 형성하여 내부 공극이 감소하였기 때문으로 생각된다. 또한 반응생성물질들은 재령이 증가함에 따라 서서히 시험체 내부의 공극을 채워 상대적으로 낮은 흡수율이 측정된 것으로 판단된다. Hadj-sadok 등²⁰⁾의 연구에서는 활성화제를 사용하지 않은 배합에서 GGBFS의 치환율이 0%, 30% 그리고 50%로 증가함에 따라 water porosity와 Mercury porosity가 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구에서도 0% Na_2CO_3 의 시험체들은 GGBFS의 치환율이 증가함에 따라 흡수율이 증가하는 유사한 특성을 보이고 있었다.

Fig. 6는 재령 3일에서 측정한 흡수율과 UPV의 관계를 나타낸 것이다. 흡수율과 UPV의 관계를 통해 간접적으

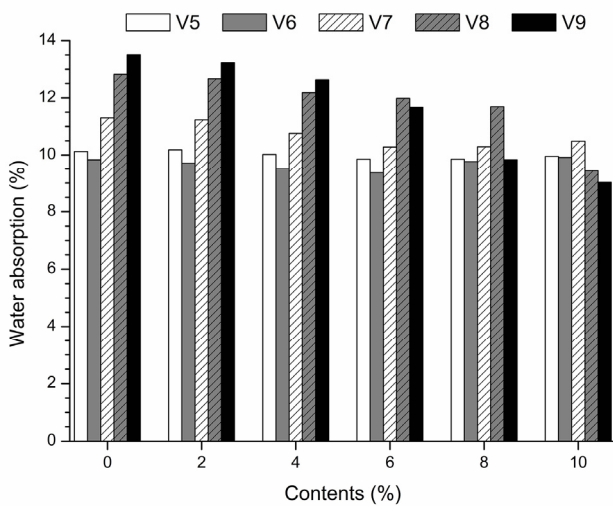


Fig. 5 Water absorption

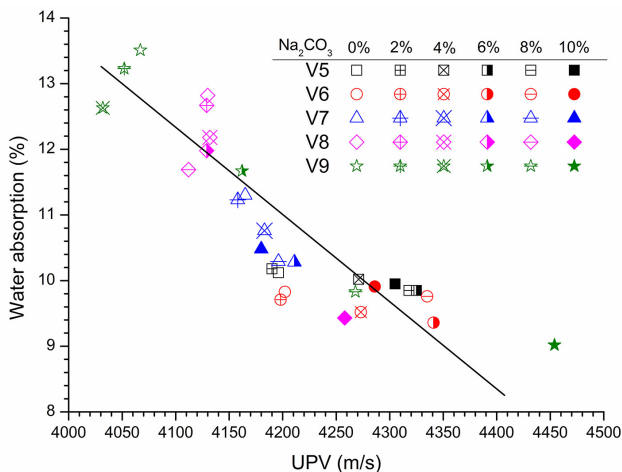


Fig. 6 Absorption vs UPV

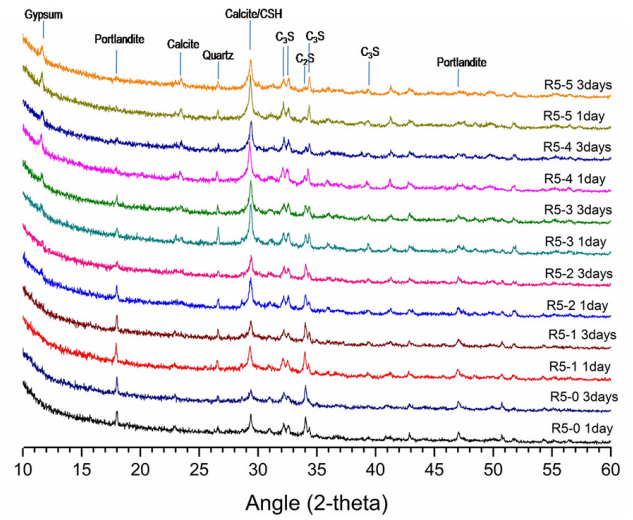
로 시험체 내부 조직에 대한 특성을 살펴 볼 수 있다. 낮은 흡수율과 높은 UPV는 상대적으로 치밀한 시험체 내부 조직이 생성된 것으로 판단할 수 있다. 본 연구의 범위에서 살펴보면 전체적으로 Na_2CO_3 의 혼합률이 증가함에 따라 높은 UPV와 낮은 흡수율이 측정되었다. 이러한 결과는 Na_2CO_3 가 GGBFS의 수화반응을 촉진하여 치밀한 반응 조직을 만드는 것으로 생각된다.

UPV와 흡수율의 관계를 살펴볼 때 기존의 OPC-slag cement에 활성화제의 혼합으로 수화반응이 촉진되어 치밀한 구조를 형성하여 강도향상 결과를 언급한 선행연구와 유사한 경향을 나타내었다.⁷⁻⁸⁾

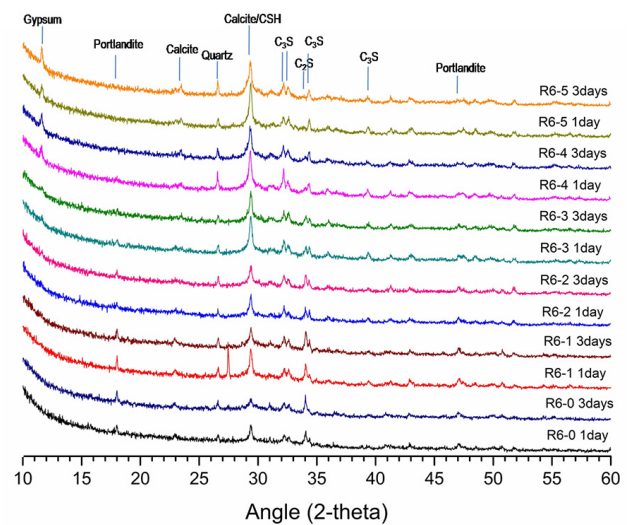
3.4 Microstructural analysis

각 시험체의 재령 1일과 3일에서의 반응생성물질 파악을 위해 XRD 분석을 하였다. Fig. 7은 XRD 분석 결과를 나타낸 것이다.

V5 시험체(Fig. 7(a))의 경우, Na_2CO_3 의 혼합률이 증가

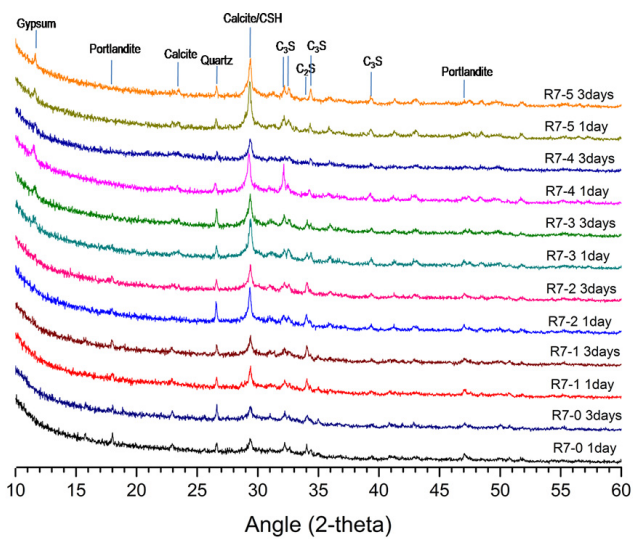


(a) V5 specimens

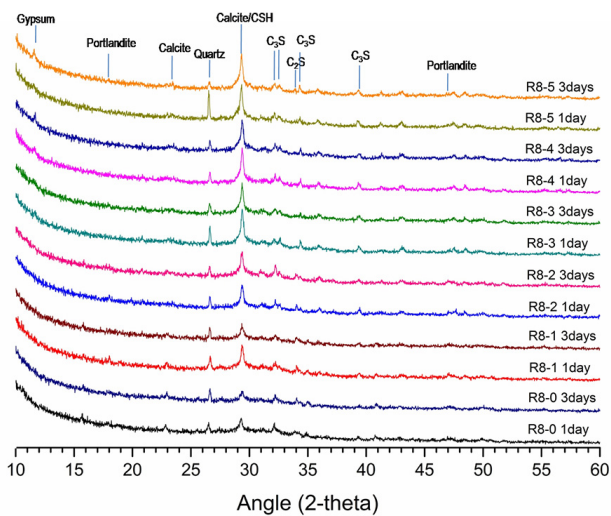


(b) V6 specimens

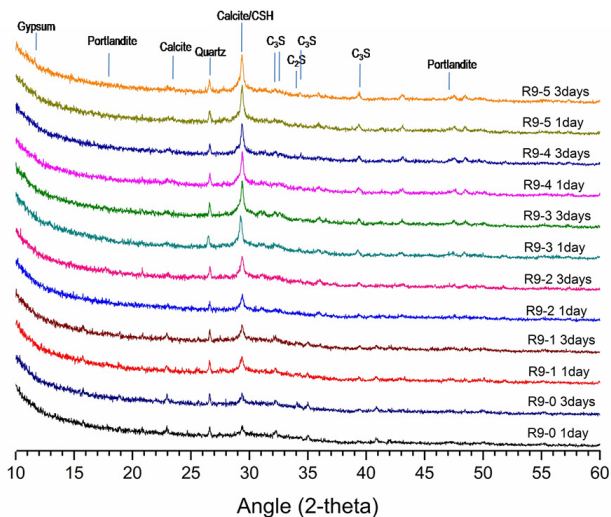
Fig. 7 XRD analysis



(c) V7 specimens



(d) V8 specimens



(e) V9 specimens

Fig. 7 XRD analysis (Continued)

함에 따라 gypsum의 생성이 점차 증가하고, portlandite는 감소하고 있다. 그러나 GGBFS의 치환율이 50%에서 90%로 증가함에 따라 gypsum과 portlandite는 거의 검출되지

않았다. 이는 Na_2CO_3 의 혼합률이 증가할수록 수용액의 pH는 알칼리성이 증가하게 되고, 이는 초기 수용액상에 존재하던 portlandite가 GGBFS의 활성화 작용을 증가시켜 Ca^{2+} 와 같은 물질의 용출이 활발해졌기 때문으로 생각된다. 또한 GGBFS의 치환율이 50%에서 90%로 증가함에 따라 미수화 시멘트 성분의 일부인 C_3S (alite)와 C_2S (belite) 등이 점차 감소하는 것으로 나타났다.

수화반응 초기인 1일에서는 Na_2CO_3 에서 분리된 Na^+ 의 일부가 NaOH 를 형성하여 배합수를 높은 알칼리 환경으로 조성하여 GGBFS의 수화작용을 촉진하고, 이때 OPC와 GGBFS에서 용출된 Ca^{2+} 와 CO_2 가 반응하여 calcium carbonate(CaCO_3)를 생성하는 것으로 생각된다. 3일에는 Na_2CO_3 의 농도가 증가함에 따라 calcium carbonate의 Ca^{2+} 가 CSH, gypsum 등의 생성에 소모되면서 감소하는 것으로 판단된다.

따라서 GGBFS의 치환율이 증가할 때 Na_2CO_3 의 혼합률이 증가함에 따라 다른 반응 생성물질들과 비교하여 상대적으로 calcite와 CSH가 강도 향상에 영향을 미치는 주요 반응물질인 것으로 나타났다.¹⁷⁾ 이는 Na_2CO_3 또는 다른 알칼리 활성화제를 사용한 AASC의 반응 특성과 유사한 경향을 나타내는 것으로 Na_2CO_3 가 GGBFS-OPC계 시멘트의 초기 활성화 작용에 효과가 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

Na_2CO_3 를 혼합한 대량치환 슬래그 시멘트의 초기재령(1, 3일)에서의 강도 특성에 관한 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) OPC의 50% 이상 GGBFS를 치환한 모든 배합에서 특정 Na_2CO_3 의 혼합률에서 Na_2CO_3 를 배합하지 않은 시험체보다 높은 초기 1, 3일 강도가 나타났다. 이러한 경향은 GGBFS에 대한 Na_2CO_3 의 최적 혼합률이 존재하는 것으로 생각할 수 있다. 본 연구의 범위에서 나타난 Na_2CO_3 의 최적 혼합률은 50%, 60%, 70% GGBFS치환 배합에서는 6% Na_2CO_3 , 80%와 90% GGBFS치환 배합에서는 10% Na_2CO_3 의 혼합률이 최고 강도가 발생하는 혼합률이었다.
- 2) 초음파속도와 흡수율의 관계를 통해 모든 시험체에서 Na_2CO_3 의 혼합에 따라 내부 조직이 치밀해지는 것을 간접적으로 알 수 있었다. 이는 Na_2CO_3 의 혼합에 따라 시험체들의 초음파속도가 증가하고, 흡수율이 감소하는 결과를 나타내었다.
- 3) XRD분석을 통해 Na_2CO_3 의 혼합에 따른 주요 반응 생성물질은 CSH와 calcite 등으로 나타났다. 초기재령(1, 3일)에서 Na_2CO_3 의 혼합은 GGBFS의 수화작용을 촉진하고, 치밀한 조직을 형성하여 강도 향상에 긍정적인 영향을 미치는 것을 관찰하였다.

본 연구의 대량치환 슬래그 시멘트의 초기재령에서 Na_2CO_3 의 효과를 바탕으로 28일 이상의 장기재령과 다른 특성에 대한 추가적인 연구의 수행이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

1. Jeong, J.Y., Jang, S.Y., Choi, Y.C., Jung, S.H., and Kim, S.I., "Effects of Limestone Powder and Silica Fume on the Hydration and Pozzolanic Reaction of High-Strength High-Volume GGBFS Blended Cement Mortars", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.27, 2015, pp.127-136.
2. Jeong, J.Y., Jang, S.Y., Choi, Y.C., Jung, S.H., and Kim, S. I., "Effects of Replacement Ratio and Fineness of GGBFS on the Hydration and Pozzolanic Reaction of High-Strength High-Volume GGBFS Blended Cement Pastes", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.27, 2015, pp.115-127.
3. Sajedi Fathollah, "Mechanical activation of cement-slag mortars", *Construction and Building Materials*, Vol.26, 2012, pp.41-48.
4. Fernandez-Jimenez, A., Palomo, J.G., and Puertas, F., "Alkali-activated slag mortars mechanical strength behaviour", *Cement and Concrete Research*, Vol.29, 1999, pp.1313-1321.
5. Sanjay, K., Bandopadhyay, A., Tajinikanth, V., Alex, T.C., and Rakesh, K., "Improved processing of blended slag cement through mechanical activation", *Journal of Material Science*, Vol.39, 2004, pp.3449-3452.
6. Rakhimova, N.R., and Rakhimov, R.Z., "Individual and combined effects of Portland cement -based hydrated mortar components on alkali-activated slag cement", *Construction and Building Materials*, Vol.73, 2014, pp.515-522.
7. Escalante-Garcia, J.I., Castro-Borges, P., Gorokhovskiy, A., and Rodriguez-Varela, F.J., "Portland cement-blast furnace slag mortars activated using waterglass: Effect of temperature and alkali concentration", *Construction and Building Materials*, Vol.66, 2014, pp.323-328.
8. Acevedo-Martinez, E., Gomez-Zamorano, L.Y., and Escalante-Garcia, J.I., "Portland cement-blast furnace slag mortars activated using waterglass: - Part I: Effect of slag replacement and alkali concentration", *Construction and Building Materials*, Vol.37, 2012, pp.462-469.
9. Bilim, C., and Atis, C.D., "Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag", *Construction and Building Materials*, Vol.28, 2012, pp.708-712.
10. Li, D., Wu, W., Shen, J., and Wang, U., "The influence of compound admixtures on the properties of high-content slag cement", *Cement and Concrete Research*, Vol.30, 2000, pp.45-50.
11. Shi, C., Krivenko, P.V., and Roy, D., "Alkali-activated cements and concrete", 1st Ed., Taylor & Francis, 2006.
12. Escalante-Garcia, J.I., Castro-Borges, P., Gorokhovskiy, A., Rodriguez-Varela, F.J., "Portland cement-blast furnace slag mortars activated using waterglass: Effect of temperature and alkali concentration", *Construction and Building Materials*, Vol.66, 2014, pp.323-328.
13. Sajedi, F., and Razak, H.A., "The effect of chemical activators on early strength of ordinary Portland cement-slag mortars", *Construction and Building Materials*, Vol.24, 2010, pp.1944-1951.
14. Atiş, C.D., Bilim, C., Celik, Ö., and Karahan, O., "Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar", *Construction and Building Materials*, Vol.23, 2009, pp.548-555.
15. Kim, G.W., Kim, B.J., Yang, K.H., and Song, J.K., "Strength development of blended sodium alkali-activated ground granulated blast-furnace slag (GGBS) mortar", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.24, No.2, 2012, pp.137-145.
16. Collins, F., and Sanjayan, J.G., "Early age strength and workability of slag pastes activated by NaOH and Na_2CO_3 ", *Cement and Concrete Research*, Vol.28, No.5, 1998, pp. 655-664.
17. Ahn, J.W., Cho, J.S., Kim, H.S., Han, G.C., Han, K.S., and Kim, H., "Activation property of blast furnace slag by alkaline activator", *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol.40, No.10, 2003, pp.1005-1014.
18. Bouikni, A., Swamy, R.N., and Bali, A., "Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag", *Construction and Building Materials*, Vol.23, 2009, pp.2836-2845.
19. Bilim, C., and Atiş, C.D., "Alkali activation of mortars containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag", *Construction and Building Materials*, 28, 2012, pp.708-712.
20. Hadj-sadok, A., Kenai, S., Courard, L., and Darimont, A., "Microstructure and durability of mortars modified with medium active blast furnace slag", *Construction and Building Materials*, Vol.25, 2011, pp.1018-1025.

요약 본 연구는 다양한 농도의 탄산나트륨(Na_2CO_3)로 활성화된 대량치환슬래그 시멘트(HVSC)의 초기강도 향상에 관한 연구이다. 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)에 대해 고로슬래그 미분말(GGBFS)을 질량의 50에서 90% 치환하였고, 페이스트 믹싱전에 건조한 분말재료를 서로 섞어 두었다. Na_2CO_3 는 전체 결합재(binder, OPC+GGBFS) 중량의 0, 2, 4, 6, 8 그리고 10%를 혼합하였다. 모든 배합의 물-결합재 비(w/b)는 0.45로 일정하게 하였다. 압축강도, 초음파속도(UPV), 흡수율 그리고 XRD를 초기재령(1일과 3일)에서 실시하였다. V5(50% OPC + 50% GGBFS), V6(40% OPC + 60% GGBFS) 그리고 V7(30% OPC + 70% GGBFS) 시험체에서는 6% Na_2CO_3 에서, V8(20% OPC + 80% GGBFS)과 V9(10% OPC + 90% GGBFS) 시험체에서는 10% Na_2CO_3 에서 최고강도가 나타났다. UPV와 흡수율은 압축강도 특성과 유사한 경향을 나타내었다. XRD 분석결과 수화반응생성물질은 CSH 그리고 calcite (CaCO_3)가 나타났다. 이러한 결과를 볼 때 HVSC 페이스트의 초기강도에는 Na_2CO_3 의 혼합이 Na_2CO_3 를 혼합하지 않은 경우와 비교하여 더 좋은 결과를 나타내었다.

핵심용어 : 대량치환슬래그 시멘트, 탄산나트륨, 초기강도