

고로슬래그 치환율 변화에 따른 고강도 콘크리트의 강도 및 수축 특성

Properties of Shrinkage and Strength of Concrete Incorporating Blast-furnace Slag

손 호 정* 노 상 균* 김 성 환** 한 민 철*** 백 주 현**** 한 천 구*****
 Son, Ho Jung Noh, Sang-Kyun Kim, Seoung Hwan Han, Min Cheol Baek, Joo Hyun Han, Cheon-Goo

Abstract

This study investigates the properties of the flow, air content, strength, hydration heat, and the autogenous shrinkage, and the results are summarized as following. As a properties of fresh concrete, the flow increased and the air content decreased as the replacement ratio of BS increased. The time of set delayed as the replacement ratio of BS increased by latent hydraulicity. The compressive strength of hardening concrete was smaller than OPC as the replacement ratio of BS increased at young concrete, however it was more than equal after 28th day and from then on. The rising temperature ratio which occurs by simplicity insulation decreased as the replacement ratio of BS increased, but it increased by latent hydraulicity reaction at the latter half. The length ratio of autogenous shrinkage of OPC was 319×10^{-6} , however it was shorter when the replacement ratio was 40% as showing 290×10^{-6} .

키 워 드 : 고로슬래그 미분말, 단열온도 상승량, 압축강도, 자기수축

Keywords : ground granulated blast furnace slag, adiabatic temperature rise, compressive strength, autogenous shrinkage

1. 서 론

최근 우리나라 건설산업의 발전과 더불어 콘크리트 생산에 서는 환경오염 방지, 품질 향상 및 경제성 측면에서 산업부산물인 고로슬래그 미분말(이하 BS라 칭함), 플라이애시 등 각종 혼화제가 적극 활용되고 있다. 이 중에서도 특히 BS의 경우는 수화열 저감, 잠재수경성 반응에 의한 강도 증진, 염해 저항성 등 장점이 있어 매스콘크리트, 수밀성 콘크리트, 해안에 인접한 콘크리트 구조물에 시멘트 대신 일부 치환되어 사용되고 있는 반면에, 응결 지연, 초기강도 저하, 중성화 등 단점이 있어 활용 범위 및 사용량에 한계가 정해지고 있다.

그러므로 본 연구에서는 기존의 연구 범위와 다른 차원에서 고강도 콘크리트에 접근하여 BS의 치환율 변화에 따른 강도 및 수축 특성을 분석함으로써 BS 사용 고성능 콘크리트의 적극적인 활용에 기여하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

* 청주대 대학원 석사과정, 정회원

** (주) 리더스큐엠 연구원, 청주대 대학원 박사과정, 정회원

*** 청주대 건축공학부 전임강사, 공학박사, 정회원

**** (주) 리더스큐엠 대표이사, 기술사, 정회원

***** 청주대 건축공학부 교수, 공학박사, 정회원

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1과 같다.

표 1. 실험계획

실험요인		시험수준	
배합 사항	W/B(%)	1	30
	목표슬럼프플로우(mm)	1	700±100
	목표공기량(%)	1	3.5±1.5
	BS 치환율(%)	4	0, 30, 40(Plain), 50
실험 사항	굳지않은 콘크리트	3	<ul style="list-style-type: none"> • 슬럼프플로우 • 공기량 • 응결시간
	경화 콘크리트	4	<ul style="list-style-type: none"> • 압축강도(3, 7, 28, 56일) • 인장강도 (28일) • 간이 단열에 의한 수화열 • 자기수축

즉, 실험요인으로 W/B는 30% 1수준에 대하여 시멘트에 대한 질량비로 BS 40% 치환한 것을 플레인 배합으로 하고, 실험 변수로써 BS의 치환율을 0, 30, 40, 50%의 4수준으로 하여 총 4배치를 실험계획 하였다. 이때, 플레인 콘크리트는 목표 슬럼프플로우 700±100mm, 목표 공기량 3.5±1.5%를 만족하도록 배합 설계한 후 배합변수별 동일한 배합조건을 적용하였다.

실험 사항으로 굳지 않은 콘크리트에서는 슬럼프플로우, 공기량, 응결시간을 측정하고, 경화 콘크리트에서는 계획된 재

령에서 압축강도, 인장강도, 간이 단열에 의한 온도 상승량, 자기수축길이변화율을 측정하는 것으로 하였다.

2.2. 사용재료

본 실험에서 사용한 재료로서 시멘트는 국내산 보통 포틀랜드 시멘트를, BS 역시 국내산을 사용하였는데, 그 물리적성질은 표 2 및 3과 같다. 골재는 잔골재와 굵은 골재 모두 충북 옥산산을 사용하였고 그 물리적 성질은 표4와 같다. 또한, 혼화제로서 국내 S사산의 폴리칼본산계 고성능감수제와 AE제를 사용하였는데, 그 물리적 성질은 표 5와 같다.

표 2. 시멘트의 물리적 성질

밀도 (g/cm ³)	분말도 (g/cm ³)	안정도 (%)	응결시간(분)		압축강도(MPa)		
			초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3,144	0.18	230	375	20.9	28.4	38.9

표 3. 고로슬래그 미분말의 물리적·화학적 성질

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	염기성	화학적성분(%)		
			MgO	SO ₃	Cl
2.90	4,300	1.89	5.79	2.10	0.004

표 4. 골재의 물리적 성질

구분		밀도 (g/cm ³)	조립률	흡수율 (%)	단위용적 질량 (kg/m ³)	0.08mm체 통과량 (%)
잔 골재	강모래	2.58	2.21	0.46	1,518	0.30
	부순모래	2.58	3.26	0.46	1,684	0.32
굵은골재		2.62	6.48	0.58	1,564	0.40

표 5. 혼화제의 물리적 특성

구분	주성분	형태	색상	밀도 (g/cm ³)
고성능감수제	폴리칼본산계	액상	연갈색	1.05
AE제	고급 지방산	액상	연한 암갈색	1.01

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 굳지 않은 콘크리트의 혼합은 강제식 팬타입 믹서를 사용하였고, 굳지않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프플로우는 KS F 2594, 공기량은 KS F 2421, 응결 실험은 KS F 2436의 규정에 의거 실시하였다.

경화 콘크리트의 실험으로 압축강도는 $\phi 100 \times 200$ mm 공시체를 제작하여, 계획된 재령에서 KS F 2405 규정에 의거 측정하였고, 인장강도는 KS F 2423 규정에 의거하여 실시하였다. 콘크리트의 간이 단열에 의한 온도 상승량 시험은 각 배합조건에 따라 배합한 $\phi 100 \times 200$ mm의 콘크리트 시험체 중앙부에 열전대선을 매설한 후 두께 100mm의 스티로폼 단열재로 6면을 밀봉한 입방시험장치에 넣어 표준

실험실 조건에서 열전대 온도계에 의해 7일간 온도이력을 측정하였다. 자기수축시험은 KS F 2586 규정에 의거하여 사진 1과 같이 데이터로거로 매립형 게이지를 이용하여 측정하였다.



사진 1. 자기수축길이변화율 측정 모습

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지않은 콘크리트의 특성

그림 1은 BS 치환율 변화에 따른 슬럼프플로우치와 공기량을 나타낸 것이다.

먼저, BS 치환율 변화에 따른 슬럼프플로우치는 BS를 치환하지 않은 경우(이하 OPC라 칭함)를 제외한 여타의 배합은 모두 목표 범위인 700 ± 100 mm를 만족하는 것으로 나타났다. 또한, BS 치환율 변화에 따른 유동성은 치환율이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 BS의 입자 표면이 시멘트 입자의 표면에 비하여 치밀하고 매끈하므로써 페이스트와 골재 계면의 마찰이 작아짐에 기인 한 것으로 분석 된다.

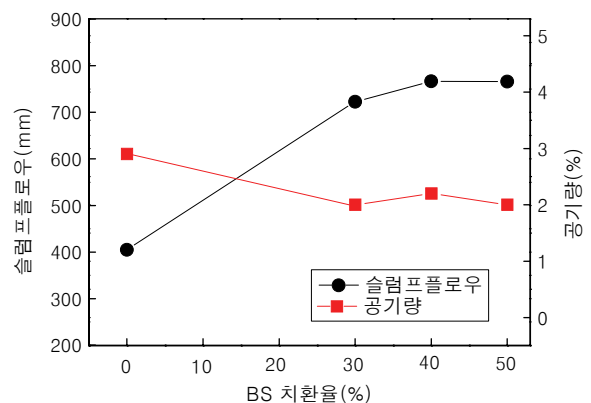


그림 1. BS 치환율 변화에 따른 슬럼프플로우 및 공기량

또한, BS 치환율 변화에 따른 공기량은 모두 목표 범위인 $3.5 \pm 1.5\%$ 를 만족하는 것으로 나타났고, BS 치환율이 증가할수록 감소 하는 경향이였다.

그림 2는 BS 치환율별 경과시간에 따른 관입 저항치를 나타낸 것이고, 그림 3은 BS 치환율 변화에 따른 초결 및 종결 시간을 나타낸 것이다.

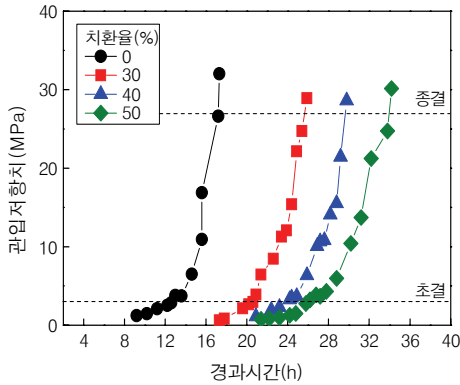


그림 2. BS 미분말 치환율 변화에 따른 관입저항치

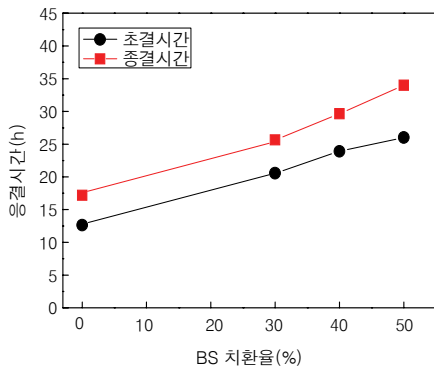


그림 3. BS 치환율 변화에 따른 초결 및 종결시간

전반적으로 BS 치환율이 증가 할 수록 응결시간은 지연되는 것으로 나타났다. 즉, OPC의 경우 초결시간이 12.7시간, 종결시간이 17.2시간이 소요되었으나, BS 치환율 변화에 따라서는 BS 치환율 30%의 경우는 초결시간이 20.6시간, 종결시간이 25.7시간, BS 치환율 40%의 경우는 초결시간이 23.9시간, 종결시간이 29.6시간, BS 치환율 50%의 경우는 초결시간이 26.0시간, 종결시간이 34.0시간으로 OPC와 비교하여 약 8~13시간 지연되는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트의 혼합시 물을 주입한 직후 BS 입자 표면에 ASH_6 의 부동태 피막이 형성되어 입자 내부로 물의 침투 및 입자에서 이온의 용출이 억제되어 응결시간이 지연 된 것으로 판단된다.

3.2 경화 콘크리트의 특성

3.1.1 강도 특성

그림 4는 BS 치환율 별 재령경과에 따른 압축강도를 나타낸 것이고, 그림 5는 BS 치환율 변화에 따른 재령 28일 인장강도를 나타낸 것이다.

먼저 BS 치환율 변화에 따른 압축강도는 BS 치환율이 증가 할 수록 OPC에 비하여 초기재령에서는 작게 나타났으나 재령 28일 및 그 이후에서는 OPC와 동등 이상의 수준을 발휘하였다.

즉, OPC의 경우 재령 3일 압축강도는 44.6MPa로 나타났고, BS 치환율 변화에 따라서는 치환율 30%에서 33.0MPa, 40%에서 28.5MPa, 50%에서 25.1MPa로 나타나 OPC의 비하여 약 23%~44% 수준을 발현하였다. 한편, 재령 28일 압축강도는 OPC의 경우 64.8MPa로 나타났고, BS 치환율 30%에서 71.2MPa, 40%에서 68.6MPa, 50%에서 67.5MPa로 OPC에 비하여 약 4~8% 증가하는 것으로 나타났는데, 이는, BS의 잠재수경성 반응에 기인한 것으로 판단된다.

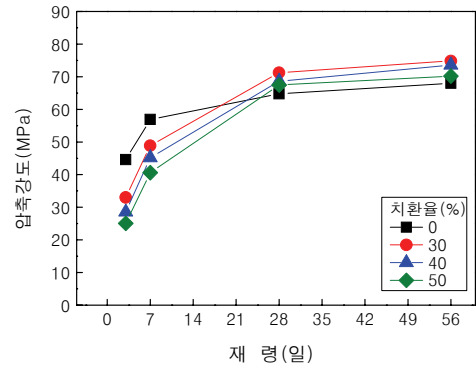


그림 4. BS 치환율 변화에 따른 압축강도

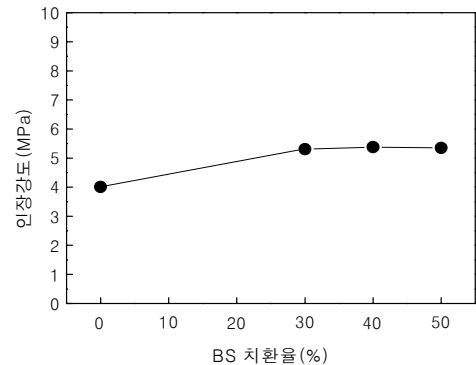


그림 5. BS 치환율 변화에 따른 인장강도(재령 28일)

BS 치환율 변화에 따른 28일 인장 강도는 압축강도와 유사한 경향을 나타내었다.

그림 6은 BS 치환율별 경과시간에 따른 단열 온도 상승량을 나타낸 것이다.

먼저 OPC의 경우는 비빔직후 약 31시간에 최고온도는 45.6℃로 가장 높은 온도 상승량을 나타내었고, BS 치환율 변화에 따라서는 치환율 30%에서 약 41시간에 최고온도 39.6℃, 40%에서 50시간에 최고온도 36.6℃, 50%에서 56시간에 최고온도 34.6℃로 나타났다. 즉, 수화 초기에는 BS 치환율이 증가 할 수록 초기 수화온도는 낮으나 후반 부에는 BS의 잠재수경성 반응에 의해 서서히 증가하는 것으로 나타났는데, BS 치환율 증가에 따라 최고 단열 온도는 감소하였다. 이는 BS 치환율이 증가 할수록 OPC에 비하여 초기에 실제 수화에 참여하는 시멘트량이 적어짐에 기인한 것으로 분석된다.

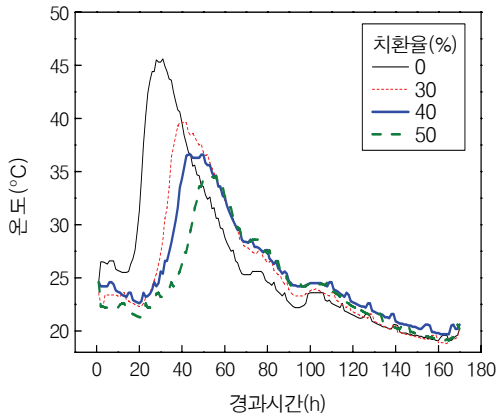


그림 6. BS 치환율별 경과시간에 따른 간이 단열온도상승량

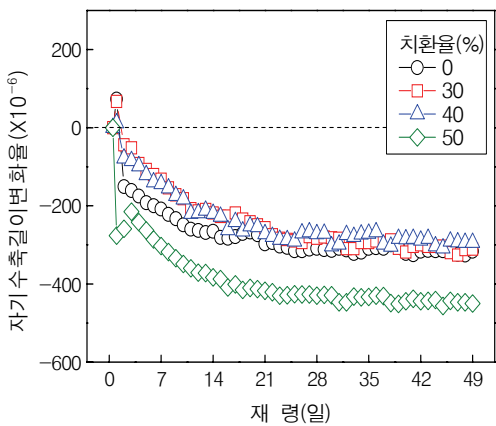


그림 7. BS 치환율별 재령경과에 따른 자기수축

3.1.2 자기 수축 길이변화율

그림 7은 BS 치환율별 재령경과에 따른 자기 수축 길이변화율을 나타낸 것이다.

먼저 OPC의 경우 재령 49일에서의 자기수축 길이변화율은 319×10^{-6} 으로 나타났고, BS 치환율 변화에 따라서는 BS 치환율 30%에서 313×10^{-6} , BS 치환율 40%에서 290×10^{-6} 으로 OPC 보다 작은 경향을 나타냈으나, BS 치환율 50%에서는 450×10^{-6} 로 가장 큰 자기수축 길이변화율을 나타내었는데, 이는 실험 오차 혹은 BS의 잠재수경성 반응에 의해 생성된 경화체 조직의 모세관장력 증대에 기인된 것으로 분석된다.

4. 결 론

본 연구에서는 BS의 치환율 변화에 따른 고강도 콘크리트 범위에서의 유동성, 공기량, 응결시간, 강도, 수화열 및 자기 수축 특성을 분석 하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 굳지않은 콘크리트의 특성으로, 먼저 유동성은 BS 치환율이 증가 할 수록 증가하는 경향을 나타내었고, 공기량은 감소하는 경향이였다.
- 2) 응결시간은 BS 치환율이 증가 할 수록 BS의 잠재 수경성 반응에 기인하여 지연되는 것으로 나타났다.
- 3) 경화 콘크리트의 압축강도는 BS의 치환율이 증가 할수록 OPC 보다 초기 재령에서는 작게 나타났으나, 재령 28일 및 그 이후에는 OPC와 동등 이상의 수준을 발휘 하였다.
- 4) 간이 단열에 의한 온도상승량은 수화 초기에 BS 치환율이 증가할 수록 감소하였으나, 후반부에서는 BS의 잠재 수경성 반응에 기인하여 증가 하는 것으로 나타났다.
- 5) 자기수축 길이변화율은 OPC의 경우 319×10^{-6} 인데 비하여, BS 치환율 40%일때 290×10^{-6} 으로 가장 작게 나타났다.

참 고 문 헌

1. 주은희, 손명수, 한민철, 차천수, 김성수, 한천구; 혼화제 종류에 따른 콘크리트의 배합 및 압축강도 특성에 관한 연구, 한국건축시공학회 학술, 기술논문발표회 논문집, v4 n2(통권 제7집) pp.51~54, 2004. 10
2. 이광명, 권기현, 이회근, 이승훈, 김규용; 고로슬래그를 함유한 콘크리트의 자기수축 특성, 한국콘크리트학회 논문집, 16 권 5호, pp.621~626, 2004. 08
3. 이상수, 송하영; 고로슬래그 미분말을 사용한 고성능 콘크리트의 역학특성 및 내구특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 논문집(구조계), v.23 n.11, pp.119~126, 2007. 10
4. 임명관, 박무영, 정상진; 고로슬래그의 분말도 및 재생 잔골재 치환율에 따른 모르타르의 강도 및 내구적 특성에 관한 연구, 대한건축학회 논문집(구조계) v.23 n.10, pp.91~98, 2007. 10
5. 최향, 이상수, 원철, 김동석, 정한용; 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 특성 및 경제적인 효과에 관한 연구, 대우건설기술, 통권 제22호, pp.61~73, 2000. 04
6. 이종록, 임상중, 송인명, 윤재환, 정상진; 고로슬래그 미분말에 내구성향상 혼화제를 첨가한 콘크리트의 기초물성에 관한 실험적 연구, 한국건축시공학회 학술.기술논문발표회 논문집 v.7 n.1(통권 제12호), pp.147~150, 2007. 04
7. 한천구; 한천구의 콘크리트 실무가이드 100, (주)건설미디어, 2006. 02
8. 김현태, 김주상, 이상수, 송하영, 김을용; 고로슬래그 미분말을 사용한 고성능콘크리트의 유동특성 및 강도특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 제26권 제1호(통권 제50집) pp.425~428, 2006. 10