

양생온도가 고로슬래그 콘크리트의 강도발현에 미치는 영향분석

이 규 동(이지엔지니어링 구조부 과장)

전 명 일(이지엔지니어링 대표이사)

이 창 수(서울시립대학교 토목공학과 교수)

김 동 식((주)KCC건설, 수원대학교 대학원 토목공학과 박사과정)

Effect of curing temperature and blast furnace slag concrete on concrete strength development

Lee, Kyu-Dong · Jun, Myeong-Il · Lee, Chang-Soo · Kim, Dong-Sik

ABSTRACT

The present work is attempt to evaluate the temperature dependence of blast furnace slag concrete(BFSC) based on the concrete strength cured with different curing temperatures and ages. A equivalent substitution index(ESI) was induced to explain temperature dependence of concrete quantitatively as well as concrete strength.

The results from compressive strength showed substantial crossover effect, which is the phenomenon that the compressive strength cured at low temperature becomes stronger than the one cured at high temperature. The crossover effect found more definitely on BFSC than plain concrete.. The ESI became 1.1 and

1.0 for the BFSC cured at 20°C and 30°C after age of 56 days, respectively. Which means that the contribution to strength development of blast furnace slag per unit mass is stronger than that of the Portland cement. It was considered therefore that the optimum curing temperature for BFSC is 20°C.

[Key Word : Blast furnace slag concrete(BFSC), Concrete quantitatively]

I. 서 론

최근 콘크리트 구조물의 내구성과 경제성에 대한 관심이 증가하고 생산 중에 다량의 온실가스를 배출하는 시멘트 산업에 대한 사회적 압력이 증가하면서 광물질 혼합콘크리트의 사용빈도가 높아지고 있다.

콘크리트에 사용되는 포틀랜드시멘트의 일부를 고로슬래그 또는 플라이애쉬와 같은 혼화재로 치환하면 혼화재의 잠재수경성반응이나 포졸란반응으로 시멘트 매트릭스가 밀실하게 되며 외부 열화인자의 침입속도를 현저하게 낮추고 내구성을 증진시키게 된다. 그러나 혼화재로는 자체적으로 수화반응이 시작되지 않고 반응성이 비교적 낮은 2차 반응에 의해 수화체를 형성하기 때문에 양생조건, 특히 양생온도에 따라 역학적 및 내구특성의 변동이 매우 큰 단점이 있다. 따라서 혼합 콘크리트의 사용을 활성화시키기 위해서는 혼합콘크리트의 온도의존성을 고려한 혼합 콘크리트의 강도발현에 대한 연구가 필요하다. 특히 최근 들어 자주 발생하는 자연재해에 의한 시공중 붕괴사고는 양생중인 구조물의 강도부족으로 발생하는 경우가 많으므로 양생조건에 따른 콘크리트의 강도분석은 시공 중 재해를 방지하기 위하여 매우 중요한 연구 분야가 될 수 있다.

본 연구에서는 양생온도와 재령에 따른 강도발현을 바탕으로 고로슬래그를 치환한 혼합콘크리트와 보통콘크리트의 온도의존성을 검토하였다. 그리고 등가치환지수 개념을 도입하여 고로슬래그의 온도의존성을 정량화 시켰으며 이를 바탕으로 최적 양생온도를 제시하였다.

II. 실 험

1. 실험재료

실험에 사용된 결합재는 T사의 보통포틀랜드 시멘(비중:3.16, 비표면적:3370 cm^2/g)와 N제 철소에 생산된 고로슬래그(비중 : 2.89,비표면적:4180 cm^2/g)를 혼합하여 사용하였다. 또한 잔 골재는 쇄사(비중 : 2.64, 조립률 :2.69)와 산사(비중 : 2.63, 조립률 : 1.55)를 각각 8:2

의 질량비로 혼합하여 그림1과 그림2와 같이 입도분포를 만족시켰으며 굵은 골재(비중 : 2.64, 조립률 : 6.86, Gmax : 20mm)는 쇄석을 사용하였다.

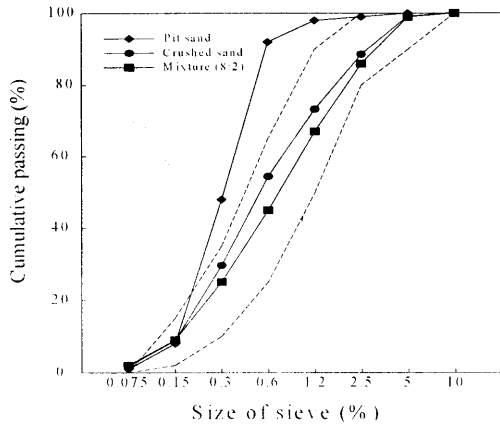


그림 1 잔골재의 입도분포

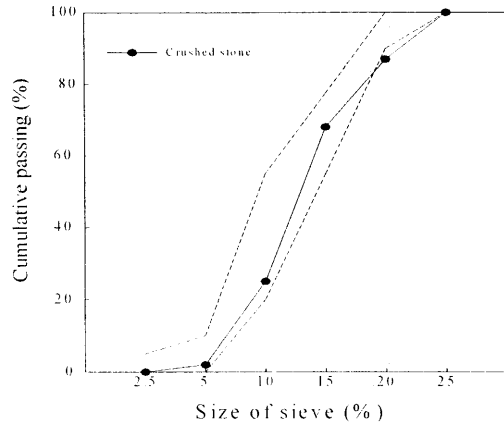


그림 2 굵은골재의 입도분포

2. 배합조건

실험에 사용된 배합은 표1과 같으며 리그닌술폰산계의 AE감수제와 알킬아릴술폰산계의 공기연행제를 각각 단위시멘트량의 0.2~0.3% 및 0.004~0.0085% 첨가하여 슬럼프는 5~10cm, 공기량은 4.5~5.0% 이내로 조절하였다.

표 1 배합조건

| 물시멘트비 (%) | 치환률 (%) | 잔골재률 (%) | 단위량(kg/m ³) | | | | | |
|-----------|---------|----------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | | | 물 | 시멘트 | 고로슬래그 | 쇄사 | 산사 | 쇄석 |
| 40 | 0 | 43 | 171 | 427.5 | - | 588.7 | 147.2 | 976.2 |
| 40 | 50 | 43 | 171 | 213.8 | 213.8 | 583.0 | 145.7 | 966.7 |
| 50 | 0 | 43 | 171 | 342.0 | - | 613.2 | 153.3 | 1016.9 |
| 50 | 50 | 43 | 171 | 171.0 | 171.0 | 608.7 | 152.2 | 1009.3 |
| 60 | 0 | 43 | 171 | 285.0 | - | 629.6 | 157.4 | 1044.0 |
| 60 | 50 | 43 | 171 | 142.5 | 142.5 | 625.8 | 156.4 | 1037.0 |

3. 실험변수

현장타설 콘크리트의 온도조건을 모사하기 위해 온도변수를 5℃, 20℃, 30℃로 설정하였다. 또한 타설온도에 의한 초기수화현상의 왜곡을 방지하기 위하여 실험재료의 온도를 미리 낮추거나 상승시키는 방법으로 타설온도를 조절하였다. 양생온도와 재령의 적이 동일하면 콘크리트의 강도도 동일하다는 성숙도(Maturity) 이론(1)을 바탕으로 실험기간을 결정하였다. 따라서 5℃ 양생된 시험체는 재령120일까지 시험을 수행하였으며 20℃와 30℃ 양생 배합에 대해서는 각각 재령 91일, 56일까지 실험을 실시하였다. 본 연구에서 도입한 실험변수는 표 2와 같다.

표 2 실험조건과 배합기호

| 항 목 | 실험변수 |
|-------|---|
| 물결합재비 | 40%, 50%, 60% |
| 치환률 | 0%, 50% |
| 양생온도 | 5℃, 20℃, 30℃ |
| 실험재령 | 5℃양생 : 1,3,7,14,28,56,91,120*일 20℃양생 : 1,3,7,14,28,56,91일 30℃양생 : 1,3,7,14,28,56일 |

*물결합재비가 60% 배합에 대해서는 재령120일에서 압축강도시험을 수행하지 않음.

4. 시료제작

원형철제몰드(100×200mm)를 사용하여 공시체를 제작하였다. 재령 24시간 이후 탈형하여 실험재령까지 수중양생을 실시하였으며 온도조건의 균일성을 확보하기 위해 모든 작업은 각각의 양생온도 조건에 맞게 설정된 항온항습실에서 수행하였다. 또한 원형철제몰드의 접합부로부터 유출되는 수분을 차단하기 위하여 원형철제몰드의 접합부를 그리스로 팩킹(Packing)하여 실제 강도보다 시험체의 강도가 높아지는 실험오류를 방지하였으며 3회 시험의 평균치를 바탕으로 실험자료를 정리하였다.

Ⅲ. 강도분석

1. 콘크리트의 압축강도

콘크리트는 양생수와 결합재의 화학적 반응에 의해 수화체를 형성하고 강도를 발현하기 때문에 역학적 특성은 초기반응온도(양생온도)와 반응시간(재령)에 영향을 크게 받는다. 일반적으로 높은 온도에서 양생을 실시한 시험체의 강도는 초기강도발현은 빠르지만 지속적인 강도발현현상이 발생하지 않아 장기재령에서는 저온양생 시험체에 비하여 낮은 강도를 보인다. 이러한 강도역전효과(Cross over effect)는 초기에 빠른 속도로 형성된 조악한 조직구조가 지속적인 수화반응을 저해하기 때문이다. 따라서 양생온도에 따른 콘크리트의 강도와 성능예측에 있어 강도역전효과는 매우 중요한 항목이 된다. 본 연구에서는 양생온도와 재령에 따른 강도역전효과와 초기 및 장기강도 증진현상을 효과적으로 분석하기 위하여 식(1)과 같은 쌍곡선함수(Hyperbolic function)를 이용하였다.

$$f_c = \frac{t}{a \cdot t + b}$$

여기서, S는 압축강도(MPa), a와b는 실험상수, t는 재령(days)을 말한다.

2. 등가치환지수

고로슬래그는 잠재수경성반응에 의하여 콘크리트의 미세구조를 강화시켜 내구수명을 강화시키고 이와 동시에 경제성이 우수하여 사용빈도가 늘어나고 있다. 그러나 고로슬래그는 산업부산물이므로 품질의 변화가 크고 온도의존성이 큰 단점이 있다. 따라서, 고로슬래그의 온도의존성을 평가하기 위해서는 결합재로서 콘크리트의 강도발현에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 國府(Kokubu)(2)의 등가치환지수 개념을 도입하여 콘크리트의 강도발현에 있어 고로슬래그의 기여도를 정량적으로 분석하였다. 등가치환지수는 단일온도 상승에 있어 광물질 혼화재의 기여도를 분석하기 위하여 고안된 것으로 개념적으로는 포틀랜드 시멘트의 성능에 대한 광물질 혼화재의 성능비를 말한다.

고로슬래그를 결합재로 사용할 경우 고로슬래그의 치환률은 다음과 같다.

$$r = \frac{B}{C+B} \quad (1)$$

여기서, C와 B는 각각 포틀랜드시멘트와 고로슬래그의 단위질량(kg/m³)을 말한다.

$$\frac{W}{C+k \cdot B} = \frac{\frac{W}{C}}{1 + \frac{k \cdot r}{1-r}} \quad (2)$$

물결합재비 $W/(C+k \cdot B)$ 를 $(W/C)_{eq}$ 로 표시하면 등가치환지수(k)는 다음과 같다.

$$k = \frac{\left(\frac{C}{W}\right)_{eq}}{\left(\frac{C}{W}\right) - 1} \cdot \frac{1-r}{r} \quad (3)$$

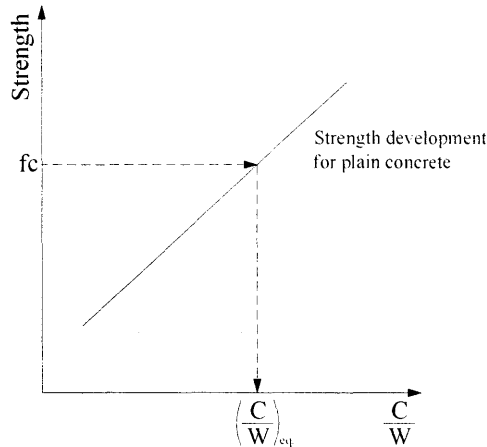


그림 3 등가치환지수의 개념

IV. 실험결과

1. 재령에 따른 압축강도

그림 4는 보통콘크리트의 압축강도 시험결과를 정리한 것으로서 양생조건이 동일한 경우에 콘크리트의 강도는 물결합재에 반비례하였다. 또한 양생온도가 30℃인 배합의 강도상승률은 20℃와 5℃에서 양생된 시험체에 비하여 초기재령에서는 높았으나 재령7일 이후에는 역전되는 것으로 나타났다. 그리고 물결합재비가 60%인 배합을 제외하고는 양생온도가 5℃인 배합이 장기적인 강도증진효과가 가장 우수한 것으로 나타났다. 이러한 현상은 높은 양생온도에 의해 빠르게 형성된 수화물질이 시멘트입자의 외층에 단단한막 (Coarse shell)을 형성하여 콘크리트의 지속

적인 수화를 방해하기 때문이다. 물결합재비가 0.6인 배합의 경우 균일하지 않은 시험결과가 산출되었으나 이러한 결과는 실험 및 회귀분석식의 중복적 오차에 기인한 것으로 생각된다.

그림 5는 양생온도와 재령에 따른 고로슬래그 콘크리트의 강도발현을 정리한 것으로 양생조건이 동일한 경우에 콘크리트의 강도는 물결합재에 반비례하였다. 또한 양생온도가 30℃인 배합의 강도상승률은 20℃와 5℃에서 양생된 시험체에 비하여 초기재령에서는 높았으나 재령 14일 이후에는 역전되는 것으로 나타났다. 물결합재비 0.4 및 0.5인 배합은 강도역전효과가 발생하였으나 물결합재비가 0.6인 배합은 강도역전효과가 명확하게 나타나지 않았다. 5℃양생된 배합의 경우, 가장 우수한 장기강도 발현을 보였던 보통콘크리트와는 달리 재령 28일에서 30℃양생 시험체의 약 60% 수준의 강도발현을 보였다. 그리고 양생온도가 20℃인 배합이 가장 우수한 장기 강도 발현을 보였다. 실험결과로 부터 고로슬래그는 시멘트에 비하여 높은 활성화 에너지가 필요하며 고로슬래그의 잠재수경성 반응은 장기적으로 매트릭스를 균질화시키고 천연 구역을 안정화시켜 장기강도를 증진시킨다는 사실을 확인할 수 있었다

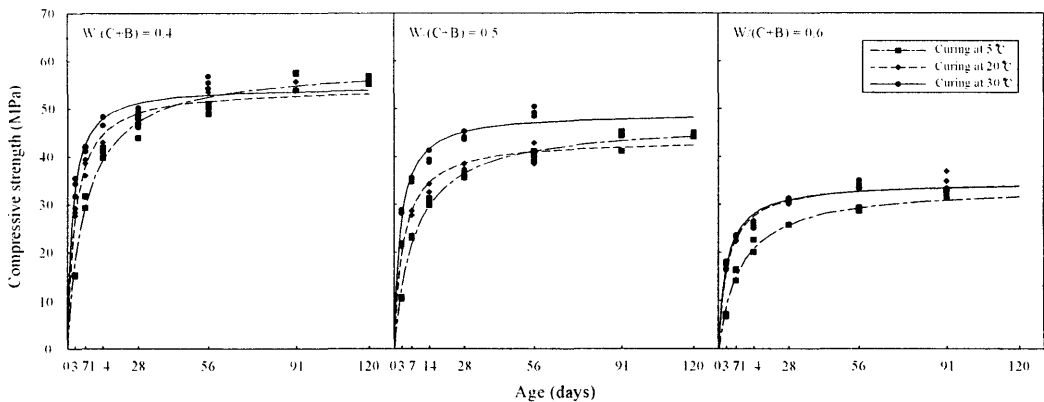


그림 4 보통콘크리트의 압축강도

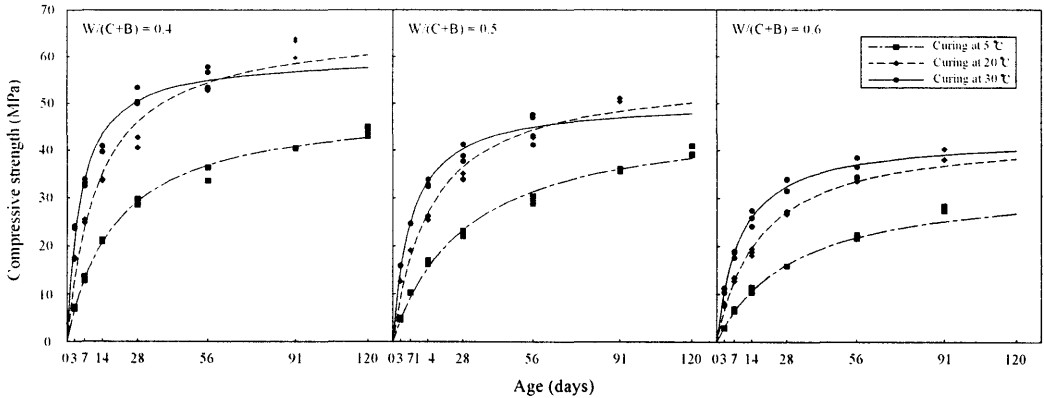


그림 5 고로슬래그 콘크리트의 강도

2. 등가콘크리트지수

그림 6은 강도발현에 대한 고로슬래그의 기여도를 정량화시키기 위하여 도입한 등가치환지수를 정리한 것이다. 실험결과, 양생온도가 5℃인 시험체는 물결합재비에 관계없이 재령 28일에서 약 0.5로 매우 낮았으며 재령91일에서는 약 0.8로 증가하였다. 실험 결과로 부터 저온 양생된 고로슬래그의 경우는 보통시멘트에 비하여 장기재령에서도 강도발현에 대해 낮은 기여를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 20℃양생배합은 재령56일에서 약1.1정도로 강도발현에 대한 기여도가 포틀랜드시멘트에 비하여 10% 이상 높았으며 재령91일에는 약1.2정도로 지속적으로 증가하였다. 그리고 30℃ 양생배합은 초기재령에서는 빠른 속도로 등가치환계수가 증가하였으나 재령28일 약1.0에 도달한 이후에는 오히려 감소하였다. 따라서 고로슬래그의 최적양생온도는 20℃이며 콘크리트 강도발현에 있어 포틀랜드 시멘트보다 높은 기여를 하는 것으로 나타났다. 그러나 5℃ 양생에 대해서는 매우 취약한 강도발현 기여도를 보임에 따라 동절기에는 일반구조물을 대상으로 고로슬래그 콘크리트를 사용하지 않는 것이 좋을 것으로 생각된다.

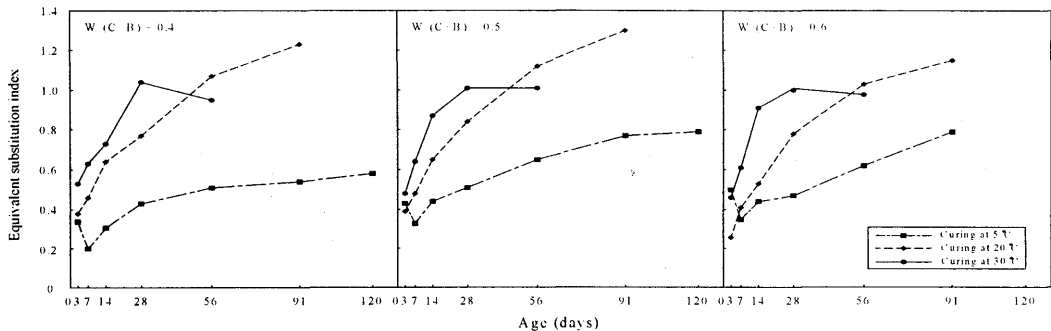


그림 6 고로슬래그의 등가치환계수

V. 결론

강도시험결과와 등가치환계수를 통하여 양생온도에 따른 고로슬래그 혼합콘크리트의 온도의 존성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 양생온도가 20℃이상인 경우 장기적으로 고로슬래그가 강도발현에 있어 포틀랜드시멘트보다 높은 기여를 하였다.
- (2) 고로슬래그의 최적양생온도는 각각 20℃인 것으로 나타났으며 동절기에는 일반구조물을 대상으로 고로슬래그 콘크리트를 사용하지 않는 것이 좋을 것으로 생각된다.
- (3) 향후 배합조건에 따른 등가치환지수표를 작성하여 배합설계에 참고한다면 시공관리와 더불어 콘크리트 구조물에 있어서 방재적 개념의 품질관리에 유용한 자료가 될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 國府勝郎, 村田芳樹, 高橋茂, 安齋浩幸(1988), “高爐スラグ微分末を用いたコンクリートの斷熱 溫度上昇と水和性狀に關する研究.” 土木學會論文報告集, 第369号, pp.33-48.
2. Saul, A.G.A.(1951) “Principless Underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure,” Magazine of Concrete Research, Vol. 2, No. 6, pp.127-140.

논문접수일 : 2006년 11월 7일

심사의뢰일 : 2006년 11월 10일

심사완료일 : 2006년 12월 3일