

# 양생온도가 고로슬래그 콘크리트의 미세구조에 미치는 영향

Effect of curing temperature on microstructure of blast furnace slag  
concrete

이규동\*  
Lee, Kyu Dong

이창수\*\*  
Lee, Chang Soo

설진성\*\*\*  
Seol, Jin Seong

전명일\*\*\*\*  
Jun, Myeong Il

## ABSTRACT

This study investigated on the differentiation of microstructure of blast furnace slag concrete(BBSC) using Mercury Intrusion Porosimetry(MIP). From the test result, it was found that the BBSC did not show shortcomings of high temperature curing. The BBSC gives more fineness microstructure than that of plain concrete when it is cured same curing condition. The curing age making stable structure to poor surroundings was 28, 14, 7 days for blast furnace concrete cured at 5, 20, 30℃, respectively.

### 1. 서론

최근 콘크리트 구조물의 내구성에 대한 관심이 증가함에 따라 혼합콘크리트의 사용빈도가 높아지고 있다. 시멘트의 일부를 고로슬래그 또는 플라이애쉬와 같은 혼화재로 치환하면 혼화재의 잠재수경성반응이나 포졸란반응으로 시멘트 매트릭스가 밀실하게 되며 이로 인해 외부 열화인자의 침입속도를 현저하게 낮추고 내구성을 증진시키게 된다. 그러나 혼화재료는 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.

콘크리트의 내구성저하는 인공적으로 만들어진 콘크리트와 철근이 본래의 상태로 회귀하려는 자연적 현상으로서 구조물의 내구성저하를 막는 가장 효과적인 방법은 열화인자의 침투를 막는 방법이다. 이러한 열화인자의 침투속도는 콘크리트의 공극특성에 따라 상이하며 동일한 량의 공극을 가진 콘크리트라 할지라도 조직구조에 따라서 상이한 내구 특성을 보일 수 있다.

현재 국내외적으로 콘크리트의 내구성능 평과에 관한 많은 연구가 진행되었음에도 불구하고 각각의 연구결과를 실험대상이 아닌 다른 구조물에 적용할 경우 정확도가 많이 떨어지는 이유도 콘크리트의 내구성을 지배하는 공극구조에 대한 체계적인 연구가 결여되었기 때문으로 판단된다.

본 연구는 수은압입시험기를 이용하여 미세구조적 관점에서 양생온도가 혼합콘크리트(고로슬래그)에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

\* 정회원, 이지엔지니어링 구조부 과장

\*\* 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

\*\*\* 정회원, 이지엔지니어링 회장

\*\*\*\* 정회원, 이지엔지니어링 사장

## 2. 실험

### 2.1 실험재료

실험에 사용된 결합재는 T사의 보통포틀랜드 시멘(비중:3.16, 비표면적:3370cm<sup>2</sup>/g)와 N제철소에 생산된 고로슬래그(비중 : 2.89,비표면적:4180cm<sup>2</sup>/g)를 혼합하여 사용하였다. 또한 잔골재는 쇄사(비중 : 2.64, 조립률 :2.69)와 산사(비중 : 2.63, 조립률 : 1.55)를 각각 8:2의 질량비로 혼합하여 입도분포를 만족시켰으며 굵은 골재(비중 : 2.64, 조립률 : 6.86, Gmax : 20mm)는 쇄석을 사용하였다.

### 2.2 배합조건

실험에 사용된 배합은 표1과 같으며 리그닌술포산계의 AE감수제와 알킬아릴술포산계의 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(%)	잔골재율(%)	단위량(kg/m <sup>3</sup> )					
		물	시멘트	고로슬래그	쇄사	산사	쇄석
40	43	171	213.8	213.8	583.0	145.7	966.7

### 2.3 실험변수

현장타설 콘크리트의 온도조건을 모사하기 위해 온도변수를 5℃, 20℃, 30℃로 설정하였다. 또한 타설 온도에 의한 초기수화현상의 왜곡을 방지하기 위하여 실험재료의 온도를 미리 낮추거나 상승시키는 방법으로 타설온도를 조절하였다. 5℃에서 양생된 시험체 이외에는 재령 28일 이후 뚜렷한 조직변화를 나타내지 않아서 20℃, 30℃ 양생 시료는 재령 28일까지 실험을 실시하였다. 본 연구에서 도입한 실험 조건은 표2와 같다.

표 2 실험조건

물시멘트비	양생온도	배합기호	타설온도	실험재료
40%	5℃	40-5	10±3℃	1, 3, 7, 14, 28, 56일
40%	20℃	40-20	20±3℃	1, 3, 7, 14, 28일
40%	30℃	40-30	30±3℃	1, 3, 7, 14, 28일

### 2.4 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)하였다. 수중양생된 콘크리트 공시체는 표면으로 부터의 깊이에 상관없이 일정한 조직구조를 가진다는 연구결과<sup>(1)</sup>를 참고하여 본 연구에서는 콘크리트 커터를 이용하여 원형 공시체의 중간부를 절단하여 분쇄한 후 5mm체를 통과하고 2.5mm체에 남는 시료만을 추출하였다. 추출된 시료에서 굵은 골재부를 제거하고 아세톤 용액에 24시간 침지한 후, 대기중에서 5시간 동안 건조하였다. 건조된 시료는 2주 동안 완전진공상태로 보관한 후, 수은압입 시험을 실시하였다.

### 2.5 수은압입시험(Mercury Intrusion Porosimetry, MIP)

수은압입시험은 젖지 않은 유체는 외부에서 압력이 작용할 경우만 고체 내부로 침투되는 특성을 이용하는 실험 방법으로 수은에 작용하는 압력과 침투량을 측정하고 Washbourn 방정식(식1)을 이용하여 공극량과 공극분포를 구하게 된다.

$$d = -4 \gamma \cos \theta / P \quad \text{식(1)}$$

여기서,  $d$ ,  $\gamma$ ,  $\theta$ 는 각각 공극의 직경, 표면장력, 유체의 접촉각을 나타낸다. 본 연구에서는 진공 상태에서부터 200MPa의 압력범위에서 공극분포를 측정할 수 있는 Micromeritics사의 Pore sizer 9310을 사용하여 실험을 수행하였다.

### 3. 실험결과

본 연구에서는 직경이 6nm~10 $\mu$ m 사이의 공극을 대상으로 실험결과를 정리하였으며 공극분포곡선은 누적공극량곡선을 대수적으로 100등분하여 차분압입량을 정리한 것이며 이산분포도는 공극의 범위를 천이구역(1 $\mu$ m~7 $\mu$ m), 대형모세관(100nm~1 $\mu$ m), 중형모세관(50nm~100nm) 및 소형모세관(6nm~50nm) 등으로 나누어 각각에 해당하는 공극량을 정리한 도표이다.

실험결과, 콘크리트공극은 재령이 증가함에 따라 공극량과 공극의 직경이 지속적으로 감소하였으며 양생온도가 초기재령의 총공극량에 미치는 영향을 크지 않았다.(그림1, 그림4, 그림7) 특히, 5 $^{\circ}$ C 양생 시료의 재령에 따른 공극분포를 보면 재령1일에서 약 1 $\mu$ m 부분에서 최대 피크가 발생하였지만, 재령 14일에는 피크가 약 30nm로 이동하였고 이후의 재령에서는 10nm 수준의 공극이 증가하는 현상을 확인할 수 있었다.(그림2) 그리고 양생온도가 20 $^{\circ}$ C, 30 $^{\circ}$ C인 시험체에서도 유사한 추이를 보였으며 양생온도 5 $^{\circ}$ C의 7일 양생이 양생온도 20 $^{\circ}$ C의 3일 양생 및 30 $^{\circ}$ C의 1일양생과 비슷한 효과를 보이는 것으로 나타났다.

한편, 공극의 피크가 50nm에 도달하는 재령은 양생온도 5 $^{\circ}$ C, 20 $^{\circ}$ C, 30 $^{\circ}$ C에서 각각 28일, 14일, 7일로 나타났다. 50nm를 기준으로 공극직경이 콘크리트의 내구특성에 미치는 영향이 급격히 변화하는 특성을 감안한 다면, 양생온도 5 $^{\circ}$ C, 20 $^{\circ}$ C, 30 $^{\circ}$ C에서 각각 28일, 14일, 7일 정도 이상으로 양생을 실시할 경우 밀실한 조직구조가 형성될 것으로 판단된다.

한편, 5 $^{\circ}$ C 양생콘크리트의 이산분포를 정리한 그림3을 보면 재령7일까지는 대형모세관공극이 차지하는 비율이 가장 컸으며, 소형모세관공극은 초반부터 지속적으로 증가하다가 재령 28일 이후에는 콘크리트 구조에서 차지하는 비율이 오히려 감소하였다. 이러한 현상은 재령 28일 이후에도 잠재수경성에 의해 소형모세관 공극이 지속적으로 겔공극(Gel pore)으로 변화하기 때문이다.

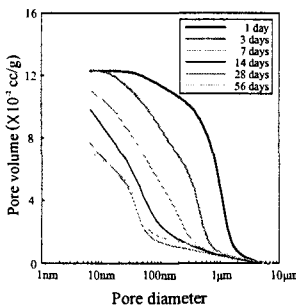


그림1 누적공극량곡선(40-5)

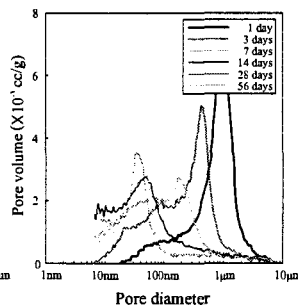


그림2 공극분포곡선(40-5)

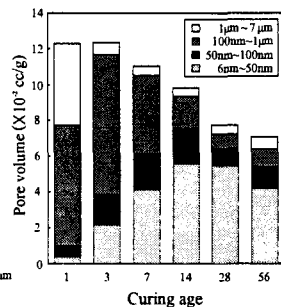


그림3 이산분포도(40-5)

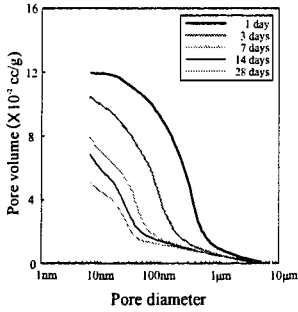


그림4 누적공극량곡선(40-20)

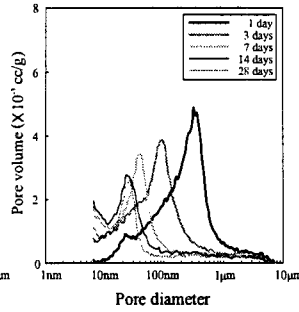


그림5 공극분포곡선(40-20)

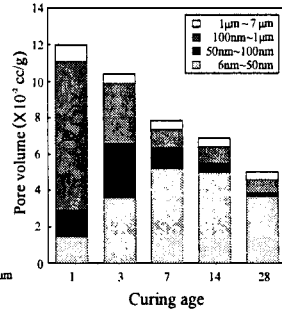


그림6 이산분포도(40-20)

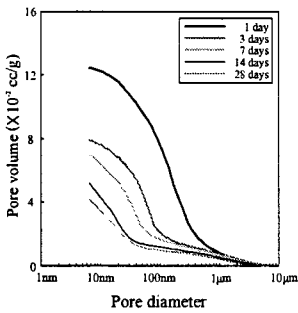


그림7 누적공극량곡선(40-30)

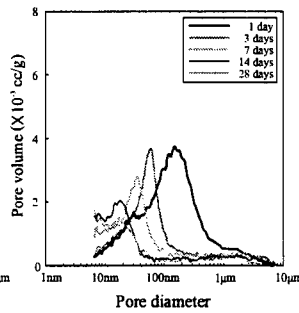


그림8 공극분포곡선(40-30)

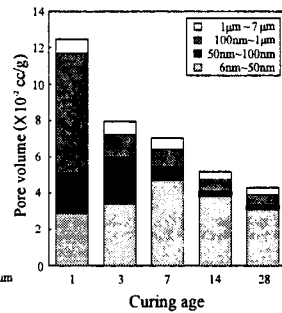


그림9 이산분포도(40-30)

#### 4. 결 론

수은압입법을 이용하여 고로슬래그 혼합콘크리트의 온도의존성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 양생온도가 높을수록 공극구조의 치밀화가 조기에 발생하였으며 보통콘크리트와는 달리 고온양생의 역효과<sup>(2)</sup>는 발견되지 않았다.
- (2) 양생온도가 초기재령 시험체의 총공극량에 미치는 영향은 크지 않았다. 따라서 총공극량을 기준으로 초기재령 콘크리트의 침투특성을 파악하는 것은 적절하지 않은 것으로 판단된다.
- (3) 고로슬래그의 잠재수경성 반응은 양생온도에 관계없이 일정기간 동안 지속적으로 발생하였다.
- (4) 혼합콘크리트는 양생온도 5℃, 20℃, 30℃에서 양생기간이 각각 28일, 14일, 7일 정도가 되었을 때 밀실한 조직구조를 형성하는 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

1. 郭度連, 宇治公隆, 國府勝郎, 上野敦, “養生條件によるコンクリートの組織変化と中性화를支配する細工徑の評価,” 日本土木學會論文集, No.718, V-57, pp.58-68
2. 이창수, 이규동, 한재호, “수은압입법을 이용한 보통포틀랜드 시멘트의 온도의존성 조사,” 대한토목학회정기학술대회 논문집, 2003, pp.1135-1138