

고강도 콘크리트의 자기수축 및 건조수축특성 평가

The Evaluation of Properties on Autogenous Shrinkage and Dry Shrinkage of High Strength Concrete

이웅종* 엄태선** 이종열*** 谷村 充****
Woong-Jong Lee Tae-Sun Um Jong-Ryul Lee Tanimura Makoto

ABSTRACT

The shrinkage properties of the high strength concrete using the cement of Type I, Type III and Type IV was examined, and the following results were obtained. (1) Consideration of the autogenous shrinkage when evaluating appropriately the shrinkage properties of the high strength concrete is indispensable. (2) The autogenous shrinkage prediction expression of JSCE can estimate the properties of autogenous shrinkage of the cement made from Korea with in general sufficient accuracy. (3) It is necessary to advance examination which used Korean aggregate about dry shrinkage from now on, and to attain highly accuracy of the autogenous shrinkage prediction expression.

1. 서론

최근 건설기술의 발전에 따라 초고층 건축물이 시공되는 등, 고강도 콘크리트의 사용도 증가하고 있는 추세이다. 고강도 콘크리트는 물-시멘트비가 낮고, 단위결합재량이 많은 배합으로서, 시멘트 수화반응에 의한 자기수축이 크게 되고, 균열의 발생 원인으로 되는 사례도 일반적으로 보고 되어 있다¹⁾. 국내의 경우도 자기수축에 대한 중요성을 충분히 인식하고 있으나, 수축 예측식에 대해서는 아직 정비되어 있지 않아서, 설계 단계에서 이를 고려하는 것은 사실상 불가능한 실정이다. 다시 말하면, 한국 콘크리트학회 제정 구조설계기준에는 보통강도 콘크리트에 대한 건조수축 예측식에 대해서는 제시되어 있지만, 고강도 콘크리트에 대한 자기수축 및 건조수축 예측식은 제시되어 있지 않다. 콘크리트의 고강도화에 따른 균열의 문제 또는 내구성을 검토하는 한 수축예측식의 정비도 필요한 실정으로 본다.

본 연구에서는 한국산(국내 S사) 보통, 저열 및 조강 포틀랜드 시멘트를 이용한 고강도 콘크리트의 수축특성(자기수축 및 건조수축)을 재령 약 2년까지 측정된 결과를 분석하였고, 또한 일본 토목학회 표준시방서에 제시되어 있는 고강도 콘크리트의 수축 예측식과 비교 평가하였고, 한국 콘크리트 구조설계기준에 제시되어 있는 건조수축 예측식과도 비교 평가하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

실험에 사용한 재료 및 물리적인 성질은 표 1에 나타내었고, 시멘트의 화학성분 및 Bogue식에 의해 구한 광물조성은 표 2에 나타내었다. 표 2에 나타낸 자기수축의 추정 값은 官澤 등²⁾이 제안한 식으로부터 각 광물조성의 반응률을 100%로 가정하여 산출한 것이며, 저열시멘트의 자기수축이 명확히 작음을 알 수 있다. 표 3에는 실험에 이용한 콘크리트 배합, 슬럼프 플로우(목표: 65±7.5cm) 및 공기량(목표: 2.0%이내)의 측정결과를 나타내었다.

* 정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 콘크리트연구실 선임연구원, 공학박사

** 정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 콘크리트연구실 실장, 공학박사

*** 정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 소장

**** 일본 태평양시멘트(주) 중앙연구소 연구개발부 콘크리트기술팀 주임연구원, 공학박사

표 1. 사용재료 및 물리적 성질

| 재료 | 종류 | 기호 | 물리적 성질 및 조성 |
|------|---------------------|----|---|
| 시멘트 | 보통포틀랜드시멘트(국내 S사) | SN | 밀도: 3.15g/cm ³ , Blaine: 3,290cm ² /g |
| | 저열포틀랜드 시멘트(국내 S사) | SL | 밀도: 3.20g/cm ³ , Blaine: 3,450cm ² /g |
| | 조강포틀랜드 시멘트(국내 S사) | SH | 밀도: 3.13g/cm ³ , Blaine: 4,580cm ² /g |
| 혼화제 | 코아플로 CP-300(일본TMC사) | SP | 폴리카르본산계 고성능 감수제 |
| 잔골재 | 육사(일본산) | S | 표건밀도: 2.60g/cm ³ , FM:2.4, 흡수율:1.44% |
| 굵은골재 | 쇄사(20mm, 일본산) | G | 표건밀도: 2.64g/cm ³ , FM:6.7, 흡수율:0.82% |

표 2. 시멘트의 화학조성, 광물조성 및 자기수축 추정결과

| 종류(기호) | SiO ₂ (%) | Al ₂ O ₃ (%) | Fe ₂ O ₃ (%) | CaO (%) | SO ₃ (%) | R ₂ O (%) | C ₃ S (%) | C ₂ S (%) | C ₃ A (%) | C ₄ AF (%) | 자기수축추정 결과 |
|--------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 보통(SN) | 20.34 | 5.83 | 3.15 | 62.63 | 2.1 | 0.78 | 56.6 | 15.6 | 10.1 | 9.6 | 1196×10 ⁻⁶ |
| 저열(SL) | 25.31 | 3.14 | 3.51 | 63.09 | 2.3 | 0.51 | 38.4 | 43.6 | 2.4 | 10.7 | 527×10 ⁻⁶ |
| 조강(SH) | 19.88 | 5.88 | 3.11 | 61.72 | 4.2 | 0.64 | 56.2 | 14.6 | 10.3 | 9.5 | 1209×10 ⁻⁶ |

표 3. 콘크리트의 배합

| 배합기호 | W/C (%) | s/a(%) | 단위량(kg/m ³) | | | | SP (C×%) | Slump Flow(mm) | Air (%) |
|------|---------|--------|-------------------------|-----|-----|-----|----------|----------------|---------|
| | | | W | C | S | G | | | |
| SN30 | 30 | 49.2 | 175 | 583 | 792 | 832 | 1.55 | 630×620 | 1.2 |
| SH30 | | 49.4 | | | 800 | | 2.55 | 700×700 | 1.2 |
| SL30 | | 49.1 | | | 789 | | 0.85 | 640×660 | 1.3 |

2.2 공시체 제작 및 실험방법

고강도 콘크리트의 자기수축 및 건조수축 측정용 공시체(치수100×100×400mm)는 “시멘트 페이스트, 모르타르 및 콘크리트의 자기수축 및 자기팽창시험방법(2002)¹⁾”에 준하여 제작 및 측정을 행하였다.

실험방법에 대한 자세한 내용은 참고문헌 3에 기술하였다. 공시체의 양생방법으로서 자기수축을 측정하는 경우는 밀봉상태에서의 20℃로 하고, 건조수축을 측정하는 경우는 재령 7일까지는 밀봉상태의 20℃로 하고, 7일 이후는 20℃, R.H. 60%의 기중상태로 하였다. 자기수축 및 건조수축 측정재령은 약 2년까지 하였다.

3. 수축 예측식 검토

본 연구에서 비교 검토에 위해 사용한 수축 예측식은 1) 일본토목학회 콘크리트 표준시방서(이하 JSCE)⁴⁾, 2)한국 콘크리트학회 콘크리트구조설계기준(이하 KCI)⁵⁾ 등 2가지이다. JSCE의 수축예측식의 기본식은 다음 식(1)과 같으며, 건조수축과 자기수축의 합으로 기술되어 있다. 자기수축 예측식은 물-결합재비 20%~60%, 온도 20~60℃ 및 압축강도는 100MPa까지 적용이 가능하고, 적용 오차는 ±40% 정도로 보고 있다. 한편 건조수축 예측식은 단위수량 130~230kg/m³, R.H. 40~90% 및 압축강도는 80MPa까지 적용범위로 보고 있고, 적용오차는 ±40%로 보고 있다.

$$\epsilon'_{cs}(t, t_0) = \epsilon'_{ds}(t, t_0) + \epsilon'_{as}(t, t_0) \quad (1)$$

여기서, $\epsilon'_{as}(t, t_0)$ 는 콘크리트 재령 t_0 부터 t 까지의 수축변형률($\times 10^{-6}$)이고, $\epsilon'_{ds}(t, t_0)$ 는 건조수축변형률이고, $\epsilon'_{cs}(t, t_0)$ 는 자기수축변형률이다. 한편, KCI에 제시되어 있는 수축 예측식은 건조수축만을 대상으로 하고 있고, 식 (2)와 같이 제시되어 있다(상세 내용 생략). 식 (2)는 CEP-FIP-1990 모델코드⁶⁾와 동일하지만, 시멘트의 종류에 따라 결정되는 계수 β_s 의 값 중 조강시멘트인 경우만이 다르다($\beta_s=8$ 이 아닌 6).

$$\epsilon'_{ds}(t, t_0) = \epsilon_{sh\infty} \beta_s (t - t_0) \quad (2)$$

4. 결과 및 고찰

그림 1은 응결 초결부터의 자기수축변형률의 경시변화를 나타낸 것이다. SL30(저열)의 자기수축 변형률은 SN30(보통) 및 SH30(조강)의 자기수축변형률 보다 전재령에 걸쳐 현저히 작게 나타났고, 저열시멘트는 저수축의 관점에서 우수한 시멘트임을 알 수 있다. SH30의 자기수축변형률은 SN30보다 약간 크지만, 양자의 차이는 50×10^{-6} 정도로 작다.

그림 2에 응결 초결부터 건조수축변형률(자기수축변형률+건조개시이후의 전수축변형률)을 나타낸 것이다. 재령 약 2년에서의 전수축변형률은 SN30 > SH30 > SL30의 순으로 크다. 그림 3는 수분증발에 기인한 건조수축변형률(건조개시이후의 전수축변형률-자기수축변형률)의 경시변화를 나타낸 것이다. 자기수축변형률 성분을 제거한 건조수축변형률을 보면, SL30 > SN30 > SH30의 순으로 크다. SL30의 건조수축변형률이 가장 크게 된 것은 건조를 개시한 재령 7일의 시점에서 SN30 만큼의 수화가 진행되지 않고, 경화체 내부에 자유수가 아직 많이 존재하기 때문에 사료된다. 이러한 사실은 그림 4의 건조수축변형률과 중량감소율의 관계로부터 이해하면 알 수 있다. 같은 이유로 SN30과 SH30에서도 SH30이 건조수축변형률이 작게 나타난 것으로 생각된다. 참고로, 재령 7일에서의 압축강도는 SN30: 71.9MPa, SH30: 86.1MPa, SL30: 45.2MPa이다.

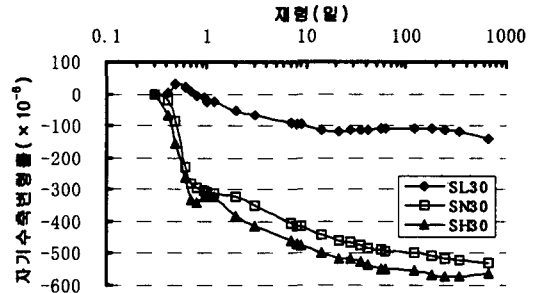


그림 1 자기수축변형률의 경시변화

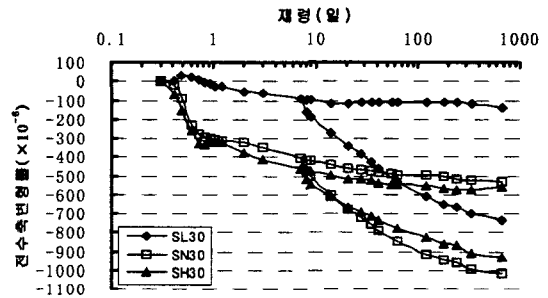


그림 2 전수축변형률의 경시변화

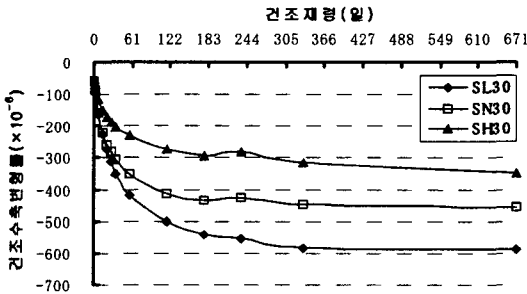


그림 3. 건조수축변형률의 경시변화

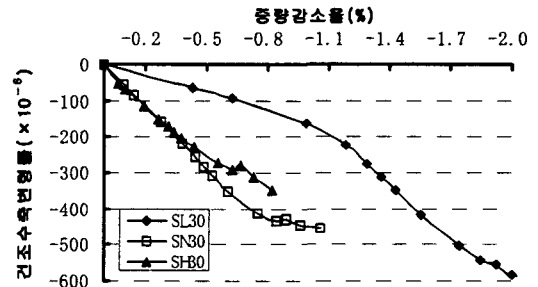


그림 4. 건조수축변형률과 중량감소율관계

다음으로 그림 5에 자기수축 및 건조수축변형률의 실측 값과 JSCE 또는 KCI의 예측식에 의한 계산 값을 비교하여 나타낸 것이다. 자기수축 변형률의 실측값은 JSCE의 예측식에 의해 정도 높게 표현됨을 알 수 있다. 건조수축변형률의 경우, 보통 및 저열시멘트를 이용한 경우는 KCI의 예측식 보다 JSCE의 예측식에 의한 것이 실측 값을 잘 표현하고 있다. KCI의 예측식은 자기수축변형률을 고려하지 않았기 때문에(즉, 전수축 변형률), 자기수축을 제거하지 않은 건조수축변형률은 과다하게 평가하고 있음을 알 수 있다. 한편 조강시멘트를 이용한 SH30은 KCI에 의한 예측식의 적합성이 높게 나타났다.

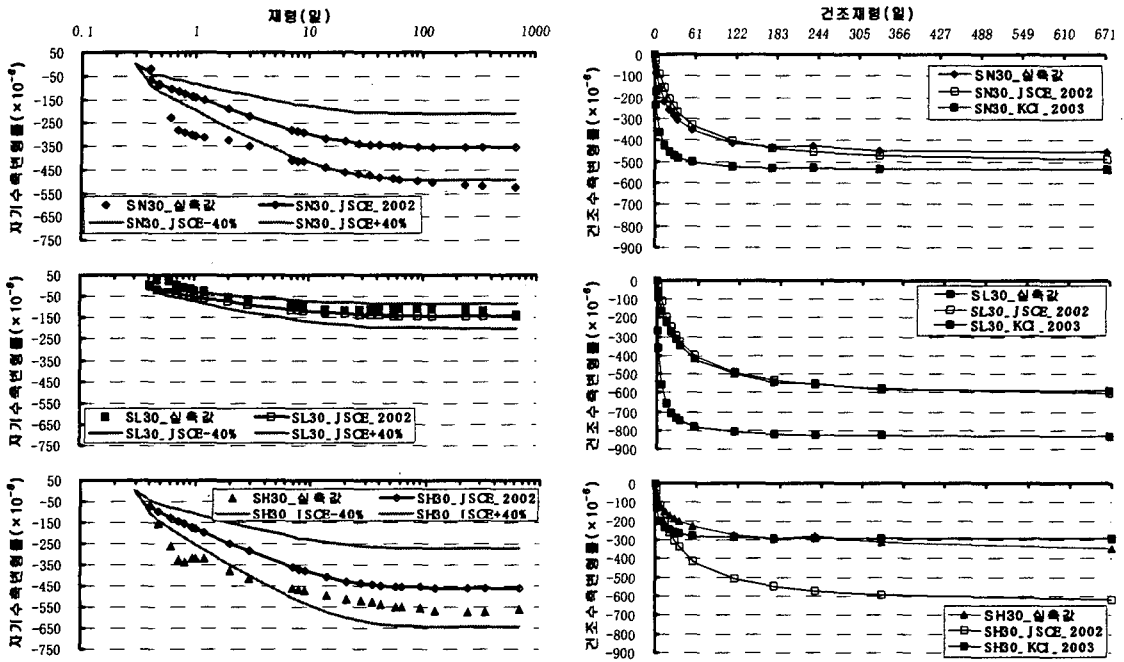


그림 5. 자기 및 건조수축변형의 실측값과 예측식의 비교

이러한 이유의 하나로서 한국 및 일본산 조강시멘트의 화학조성의 차이에 의한 것으로 생각된다. 한편, 건조수축의 경우는 골재 품질의 영향을 크게 받기 때문에 앞으로 한국의 골재를 이용한 실험을 진행하여 보다 상세한 검토를 행할 필요가 있다.

5. 결론

보통, 저열 및 조강시멘트를 이용한 고강도 콘크리트의 수축특성을 검토한 결과는 다음과 같다.

- (1) 고강도 콘크리트의 수축특성을 평가하기 위해서는 자기수축특성의 고려는 반드시 필요하다.
- (2) JSCC의 수축 예측식에 의해, 한국산 시멘트의 자기수축 특성을 정도 높게 평가가 가능함을 확인하였다.
- (3) 건조수축은 한국산 골재를 이용한 검토를 진행하여 수축예측식의 정밀도를 높일 필요가 있다.

참고문헌

1. 일본 콘크리트공학회, "自己收縮研究委員會報告書", 2002
2. 宮澤伸吾, 田澤榮一, "セメント系材料の自己收縮に及ぼすセメントの化學組成の影響", 콘크리트공학년차논문보고집, Vol.18, No.1, 699~704, 1996
3. 이웅중, 유재상, 이종열, "1종 및 4종시멘트를 이용한 고성능콘크리트의 자기수축 및 건조수축 특성", 한국 콘크리트학회 2004년도 가을학술발표회 논문집, pp.561~564
4. 일본 토목학회, "コンクリート標準示方書[構造性能照査編]", 2002년 제정
5. 한국 콘크리트학회, "콘크리트 구조설계기준", 2003년 제정
6. CEB-FIP : Model Code 1990, Comite Euro-International du Beton, 1990