



콘크리트 건조수축 측정 방법 및 예측 모델에 대한 비교

양은익^{1)*} · 김일순¹⁾ · 이성태²⁾ · 이광명³⁾

¹⁾강릉원주대학교 토목공학과 ²⁾인하공업전문대학 토목환경과 ³⁾성균관대학교 사회환경시스템공학과

Comparison of Measurement Methods and Prediction Models for Drying Shrinkage of Concrete

Eun-Ik Yang,^{1)*} Il-Sun Kim,¹⁾ Seong-Tae Yi,²⁾ and Kwang-Myong Lee³⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Kangnung-wonju National University, Gangnung 210-702, Korea

²⁾Dept. of Civil & Environmental Engineering, Inha Technical College, Incheon 402-752, Korea

³⁾Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

ABSTRACT In this study, the drying shrinkage strains were compared of 24~60 MPa concrete specimens subjected to various curing conditions and measurement methods were compared. And, the applicability of the test and prediction methods were investigated. According to the results, drying shrinkage was significantly reduced in 28 day curing condition. In the sealed curing case, drying shrinkage strain from demolding time was identical to the one of the standard curing case for low strength concrete, however, drying shrinkage strain was greatly increased than the standard case for high strength case because of the effect of autogenous shrinkage. The efficient measurement was possible using the embedded gage for concrete drying shrinkage, but, the measured value by contact gage was lower than the one by the embedded gage. The test results agreed with EC2 model better than the other.

Keywords : concrete drying shrinkage, measurement method, prediction model, curing condition

1. 서 론

콘크리트 구조물은 타설 후 경화 과정에서 외부 환경에 노출되면 정도의 차이는 있으나 필연적으로 체적 변화를 일으킨다. 과도한 체적 변화는 콘크리트에 균열을 발생시키며 그 원인 중에 건조수축이 있다. 건조수축은 콘크리트 중의 수분이 증발하면서 발생하는 현상으로 크리프와 함께 시간 의존적인 거동을 나타내는 콘크리트의 고유 현상이다. 건조수축을 측정하는 방법에는 대표적으로 KS F 2424¹⁾ 와 ASTM C 157²⁾ 기준이 있다. 그런데 두 가지 방법 모두 건조수축 측정에 대한 정확한 시작점을 제시하지 않고 있어서, 작업자의 오차로 인하여 결과값에 차이가 발생할 확률이 높고, 건조수축 개시시기에 대해서도 다른 시기(7, 28일)를 제안하고 있다. 또한 두 방법 모두 표면 접지(contact) 게이지 사용^{3,4)}을 기본으로 하고 있다. 그러나 최근에는 매립 게이지를 이용한 측정^{5,7)}들이 활발히 진행되고 있어서 건조수축 변화량도 수중 양생 종료 후 즉시 측정이 가능하여 연속적인 측정값을 얻을 수 있다. 하지만 선행된 연구에서는 양생 종료 후

정확한 측정시간과 측정방법간의 차이에 대해서는 언급이 되어 있지 않고^{3,5)}, 또한 실제 현장에서의 양생조건의 차이는 물론 실험기준에 따라서도 건조수축 발생량이 다르지만 이에 대한 비교·검토는 미비한 실정이다.

한편 건조수축은 구조물의 내구성에 큰 영향을 미치므로 우리나라의 콘크리트구조설계기준을 비롯하여 세계 각국의 코드에서는 건조수축에 대해서 규정하고 있다. 콘크리트 건조수축에 대하여 1999년 이전에는 ACI 209 위원회 모델⁸⁾을 주로 사용하였으나, 개정된 콘크리트구조설계기준⁹⁾에서는 CEB-FIP 1990 Model Code¹⁰⁾의 규정을 따랐다. 이 규정은 총 수축을 건조수축과 자기수축으로 분류하지 않은 모델이며, 최근에 개정된 CEB-FIP Code(Adv)¹¹⁾나 EC2 코드¹²⁾에서는 총 수축을 자기수축과 건조수축으로 나누어 구하는 방식을 취하고 있다. 콘크리트의 총 수축이 자기수축과 건조수축으로 나누어진다는 것은 이미 널리 알려진 사실이다. 이에 따라 우리나라의 콘크리트구조설계기준의 건조수축 규정도 개정이 필요한 실정이다.

이 연구에서는 압축강도 24~60 MPa 범위의 콘크리트에 대하여 다양한 양생조건과 측정 방법(매립 게이지, 접지(contact) 게이지)을 적용하여 재령에 따른 조건별 건조수축량을 비교·검토하고자 하였다. 또한 이러한 결과를 예측하기 위한 기존의 모델식과 비교하여 모델식의 적용성을 검증하고자 하였다.

*Corresponding author E-mail: eiyang@gwnu.ac.kr

Received August 12, 2009, Revised September 25, 2009,

Accepted September 28, 2009

©2010 by Korea Concrete Institute

게이지를 이용한 측정을 하였다. 측정은 수중양생을 완료한 후 공시체를 항온항습실로 옮긴 후(건조수축 4시간 후) 부터 실시하였다. 접지 게이지를 부착한 시험체를 Fig. 2에 나타내었다. 시험체 표면에 붙인 금속체는 주문 제작하였으며, 두 점간의 측정은 다이얼 게이지를 이용하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 압축강도

재령 28일에 $\phi 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체로 압축강도를 측정하였다. 설계 강도별 압축강도는 Fig. 3에 나타내었다. 측정 결과 목표 강도 60 MPa를 제외하고는 모두 목표 압축강도에 도달하였다.

3.2 양생 기간에서의 변형률 분석

이 연구에서는 공시체 타설 후 상온에서 24시간 거치한 후 탈형을 실시하였다. 탈형 후 실험 조건에 따라 양생을 실시하였으며, 양생 기간 동안 콘크리트는 체적변화가 발생하였다. 양생 기간 동안 매립 게이지로 측정된 콘크리트 체적변화량을 Table 5에 나타내었으며, Table 5의 결과는 3개 시험체의 평균값을 의미한다.

Table 5의 결과를 살펴보면 습윤 양생 기간이 길수록 콘크리트는 많이 팽창하는 것을 확인할 수 있으며, 6일간

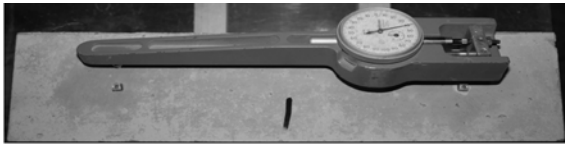


Fig. 2 Contact gage

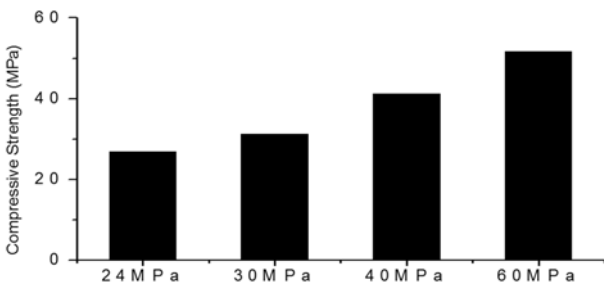


Fig. 3 Results of compressive strength

Table 5 Volume variation during curing (unit : μ)

Condition Strength	Standard curing	Short time curing	Long time curing	Sealed curing
24 MPa	54	-	-	-
30 MPa	54	41	90	-10
40 MPa	55	-	-	-
60 MPa	38	30	77	-35

통합하여 상온에서 양생한 통합양생의 경우는 수축하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 콘크리트는 습윤 양생 상태에서는 수분을 흡수하여 팽창하고, 통합양생 상태에서는 자기수축으로 인하여 시험체가 수축하는 것으로 판단된다. 특히, 단위시멘트량이 가장 많은 60 MPa 콘크리트 경우에는 자기수축에 의한 수축량이 다른 콘크리트에 비해 많이 발생한 것으로 판단된다. 이와 같은 자기수축에 관한 내용은 자기수축만을 고려하는 추가 실험을 통해 검증할 예정이다.

3.3 건조시작 전 · 후의 변형률 분석

실험 조건에 따라 양생을 실시한 후, 시편을 20°C, 60% 조건의 항온항습실로 이동 후 건조수축 측정을 시작하였다. 각 시험체는 건조가 시작되면서 상대적으로 급격한 기울기로 수축하기 시작하였다. 건조시작 직전부터 1일까지의 변형률 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

변화량을 살펴보면 모든 시험체에서 수축량이 생겼으나 동일한 양생조건에서의 강도별 차이는 20 μ 내외로 나타나 콘크리트 강도수준에 따라 초기 건조량이 크게 변화하지는 않는 것으로 판단된다. 또한 7일 표준양생과 3일 단기 양생의 경우 큰 차이를 보이지 않았으나 28일 양생의 경우에는 70% 수준으로 감소함을 보였다. 이와 같은 현상은 3.4절에서 다시 검토하고자 한다.

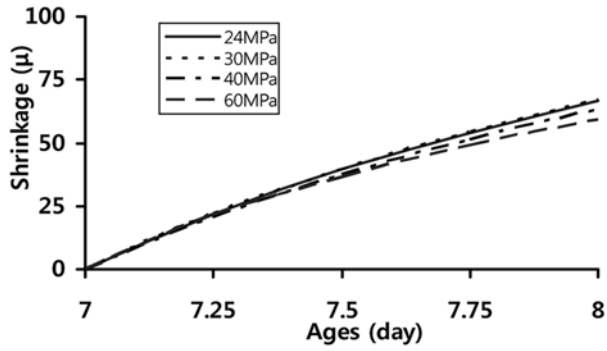
한편, Fig. 4의 건조 1일간 발생하는 건조수축량을 종합하여 볼 때 매립 게이지와 같이 건조 즉시 측정가능한 경우와 접지 게이지와 같이 표면 수분 제거 후 표점 설치 등 측정까지 소요되는 시간(약 4시간)을 제외한 경우의 측정 결과는 20 μ 미만의 차이를 보였다. 따라서 접지 게이지를 사용하여도 전체 건조수축량을 측정하는데 있어 효율적으로 측정이 가능하며 건조시작 4시간까지의 초기 건조수축 발생은 크지 않은 것으로 판단된다. 4시간 동안의 매립 게이지에 의한 건조수축량을 Table 6에 나타내었다.

3.4 양생 조건에 따른 건조수축 특성 분석

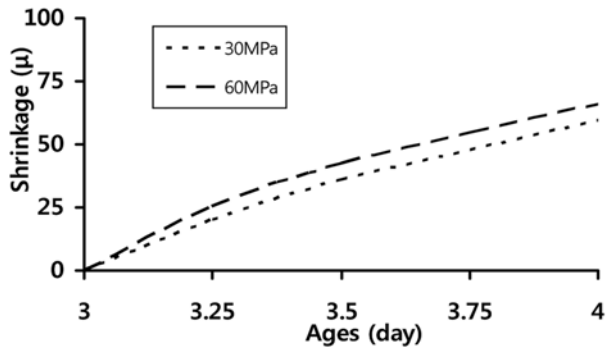
계획된 실험조건에 따라 측정된 건조수축량을 건조 직후부터 재령 180일까지 Fig. 5에 강도별로 나타내었다.

변형률을 살펴보면, 콘크리트의 건조수축은 상대습도가 높아질수록 작아지는 것을 알 수 있으며, 양생 조건에 상관없이 물-시멘트비가 작아질수록 감소하는 경향을 나타냄을 확인할 수 있다.

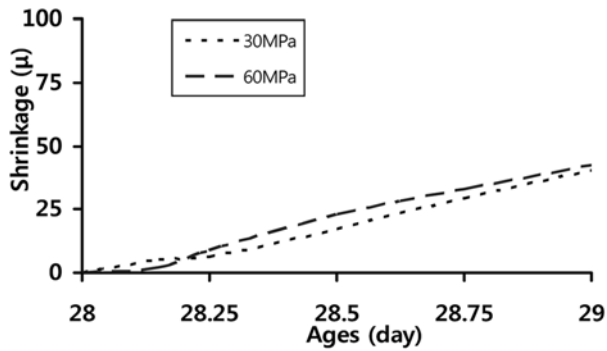
보다 상세하게 비교하여 살펴보면, 상대습도가 높은 B method가 가장 적은 건조수축을 나타냈다. 같은 상대습도 조건에서는 습윤양생기간이 제일 긴 D method가 가장 적은 건조수축을 나타냈다. 28일간 습윤양생한 D method의 경우 자기수축의 저감으로 인해 전체수축량이 크게 저하하는 것으로 판단된다. 3일간 습윤양생한 C method의 경우 7일 습윤양생인 A method에 비해 큰 차이는 나지 않았다. 이러한 결과는 습윤양생을 2주간 이내로 실시할 경



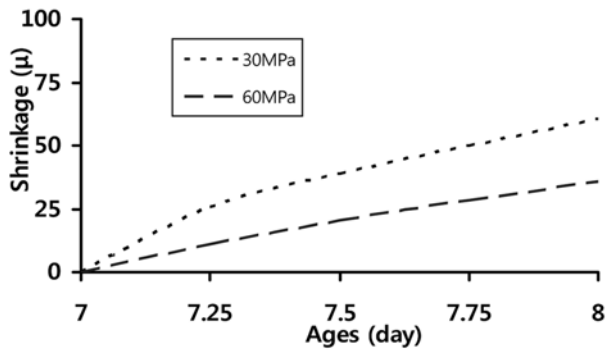
(a) Standard curing



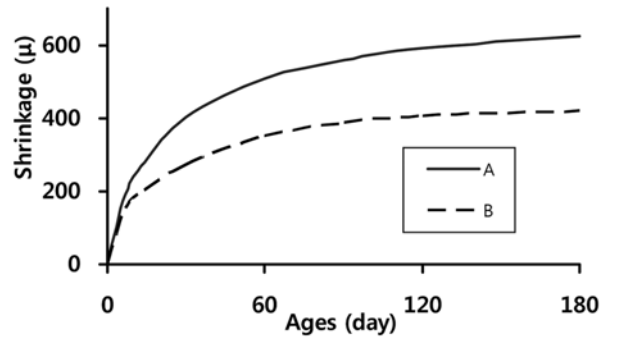
(b) 3 days curing



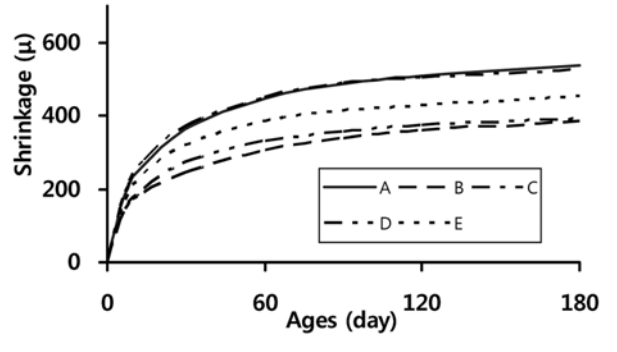
(c) 28 days curing



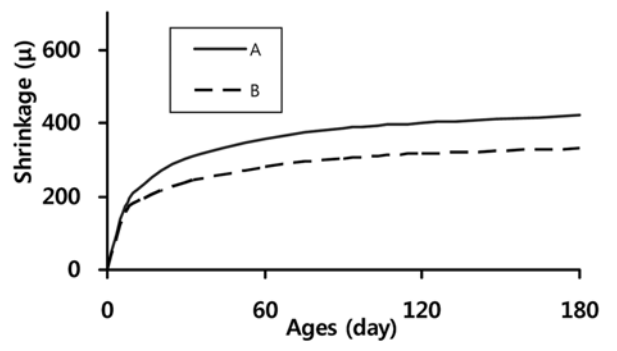
(d) Sealed curing



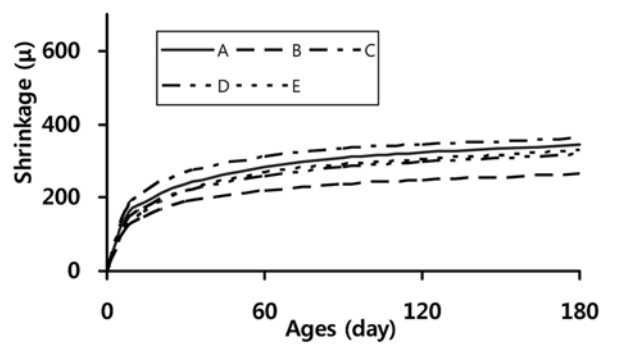
(a) 24 MPa



(b) 30 MPa



(c) 40 MPa



(d) 60 MPa

Fig. 4 Shrinkage strain at initial drying

Fig. 5 Drying shrinkage with strength

Table 6 Drying shrinkage at early 4 hours (unit : μ)

Condition \ Strength	Standard curing	Short time curing	Longt ime curing	Sealed curing
24 MPa	-12	-	-	-
30 MPa	-11	-13	-5	-20
40 MPa	-10	-	-	-
60 MPa	-11	-19	-2	-7

우 건조수축에 큰 영향이 없다고 제시한 CEB 해설¹⁰⁾과 일치하는 것으로 판단된다. 그러나 봉합양생인 E method의 경우는 A method에 비해 건조수축량이 약간 저감하는 것으로 나타났다. 그러나 탈형 후부터의 변형률을 비교해보면, 수중양생의 경우 팽창하고 봉합양생의 경우 계속하여 수축이 발생하게 되므로 탈형 직후의 길이를 기준으로 판단할 때, 봉합양생의 경우와 표준양생의 경우가 크

게 변하지는 않는 것으로 판단된다. 그러나 60 MPa 경우와 같이 자기수축이 크게 발생하는 경우에는 수증양생에 의한 자기수축 감소로 인하여 봉합양생 경우의 총 건조수축이 크게 나타난다. 이와 같은 현상을 나타내기 위하여, 탈형 이후부터 발생한 시험체의 변형률을 양생방법 (A method, E method)으로 구분하여 Fig. 6에 나타내었다.

3.5 측정 방법에 따른 건조수축 특성 비교 분석

이 연구에서는 매립 게이지로 측정된 실험 결과값과 비교하기 위해 접지 게이지를 이용하여 건조수축을 측정하였다. Fig. 7에 측정값을 비교하여 나타내었다. Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 건조수축량이 작은(단위시멘트량이

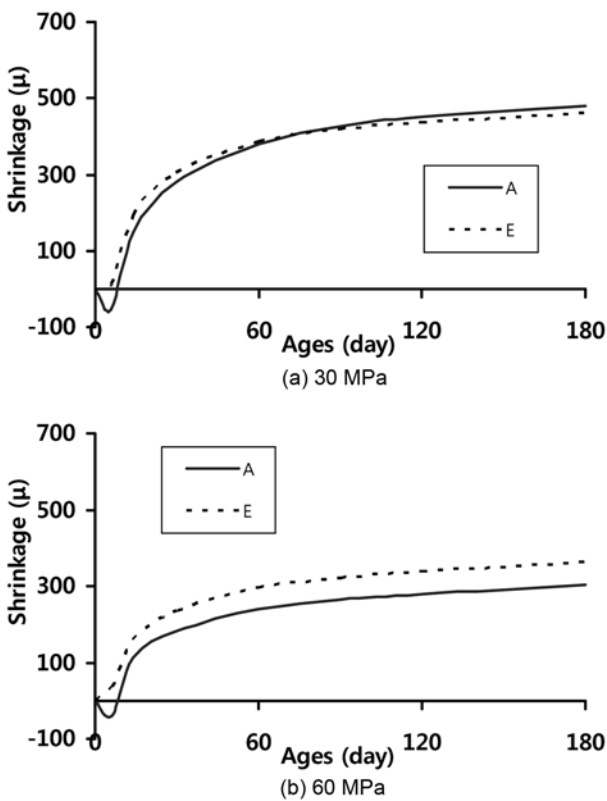


Fig. 6 Comparison of A & E method

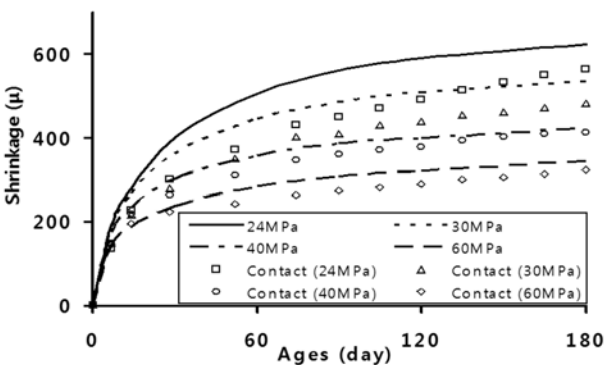


Fig. 7 Comparison of embedded & contact gage

큰 배합) 콘크리트의 경우, 시험체의 내부 중심부에서 매립 게이지로 측정된 변형률과 시험체의 외부표면에서 접지 게이지로 측정된 변형률의 차이가 크지 않음을 확인할 수 있었으나, 건조수축량이 상대적으로 큰 시험체에 있어서는 그 차이가 커짐을 확인할 수 있었다. 일반적으로 접지 게이지로 측정하여 계산된 변형률 값이 매립 게이지로 측정된 값보다 작음을 확인할 수 있었다.

접지 게이지와 매립 게이지 측정값의 비는 Table 7에 나타내었다. 이러한 측정값의 차이가 발생하는 이유는 다음과 같은 내용으로 설명되어질 수 있다. 콘크리트의 건조수축은 콘크리트 표면으로부터 수분을 상실함에 따라 콘크리트 내부의 공극수압이 감소하게 되며, 이에 따라 부피가 감소하는 현상이다. 따라서 콘크리트의 내부는 건조에 따라 내부의 수분이 이동하게 되며 비선형 수분 프로파일이 발생하게 된다. 그러나 시험체의 단면은 평면을 유지하게 되므로 표면에는 인장응력이 내부에는 압축응력이 발생하게 되며 건조수축량이 클수록 이러한 응력발생은 증가한다. 한편, 콘크리트 내부의 매립 게이지는 콘크리트와 동일재료가 아니며 겉보기 탄성계수도 콘크리트에 비해 작으므로 응력집중에 의한 변형률 증가를 예상할 수 있다. 따라서 매립 게이지와 접지 게이지의 측정값의 차이가 발생하게 되었다고 판단할 수 있으며, 이에 대한 정확한 판단을 위해서는 지속적인 검토가 필요할 것으로 판단된다. 한편, 이러한 콘크리트 내외부의 변형률 차이는 시간이 흐름에 따라 콘크리트 내부 습도 프로파일이 완만해지기 때문에 그 차이가 감소하게 되며, 이 실험에서는 내·외부의 측정값의 비율이 건조재령 180일에서 0.90~0.98의 범위로 나타났다.

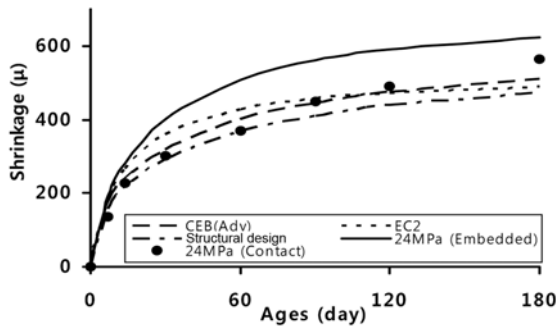
3.6 실험 결과와 모델코드와의 비교

이 연구에서는 대표적인 건조수축 예측 모델과 표준양생 조건에서의 실험 결과를 비교하였다. 비교 대상은 CEB-FIP(Adv) Code와 EC2 Code 그리고 우리나라의 콘크리트 구조설계기준이다. Fig. 8은 표준양생이고, Fig. 9는 고습도 양생의 결과이다.

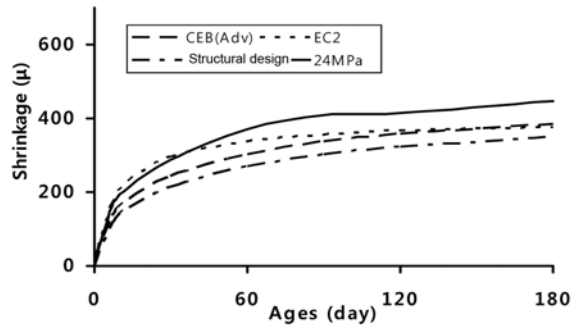
결과를 보면, 높은 물-시멘트비 배합에서는 모델 예측값들이 과소평가하였으며, 낮은 물-시멘트비 배합이 될수록 크게 예측하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 건조수축과 자기수축을 각각 예측하여 합산하는 과정에서 저항도는 자기수축을 적게, 고강도는 자기수축을 과다하게 예측하여 발생하는 오차가 존재하는 것으로 예상된다. 따라서 건조수축과 자기수축을 각각 측정하고 이에 대한 예

Table 7 Results of contact/ Embedded gage value

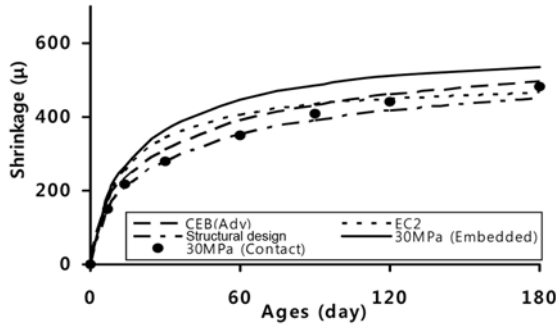
Dry age (day)	7	28	52	90	120	150	180
24 MPa	0.71	0.77	0.76	0.80	0.83	0.87	0.90
30 MPa	0.79	0.79	0.81	0.84	0.86	0.88	0.90
40 MPa	0.86	0.89	0.89	0.93	0.95	0.97	0.98
60 MPa	1.02	0.97	0.88	0.89	0.90	0.92	0.93



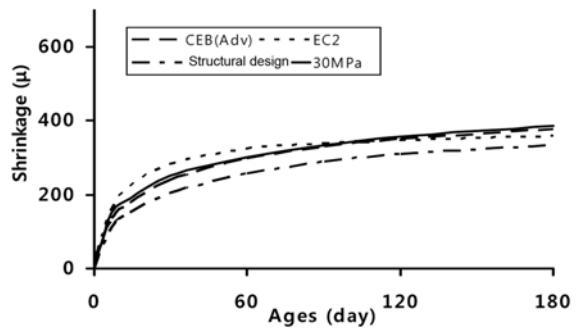
(a) 24 MPa



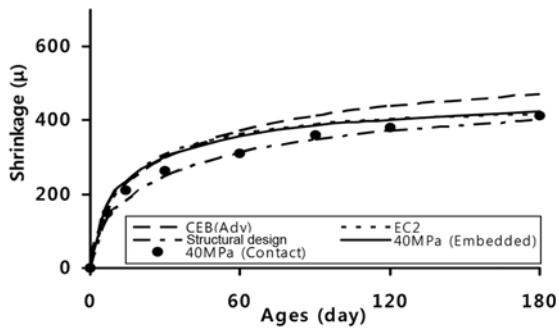
(a) 24 MPa



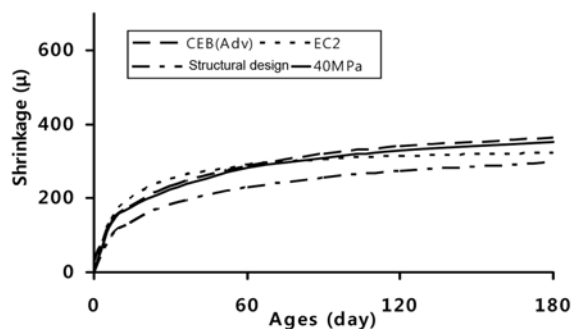
(b) 30 MPa



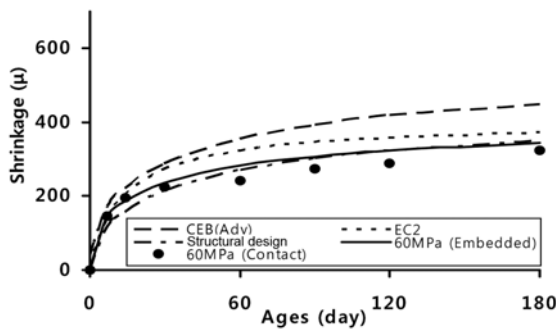
(b) 30 MPa



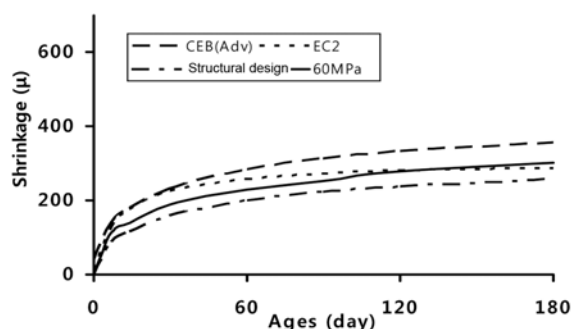
(c) 40 MPa



(c) 40 MPa



(d) 60 MPa



(d) 60 MPa

Fig. 8 Comparison of model code (60%)

Fig. 9 Comparison of model code (75%)

측값을 비교평가하여 오차발생의 원인을 규명할 필요가 있을 것으로 판단된다. 이에 대한 검토는 추후 자기수축 실험을 통하여 이루어질 예정이다.

이 실험 결과에서는 모델 중에서 EC2 모델예측식이 실제 실험결과와 보다 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 또한 현행 구조설계기준의 모델식은 콘크리트의 자기수축량을 반영하지 않은 모델로서 양생조건 및 건조수축 개시시기 등의 변화가 있을 경우에는 콘크리트의 수축량을 과소평가 할 수 있는 소지가 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

이 연구에서는 압축강도 24~60 MPa 범위의 콘크리트에 대하여 다양한 양생조건과 측정방법(매립 게이지, 접지 게이지)을 적용하여 재령에 따른 조건별 건조수축량을 비교·검토하고자 하였다. 또한 이러한 결과를 예측하기 위한 기존의 모델식과 비교하여 모델식의 적용성을 검증하고자 하였다. 실험 결과는 다음과 같다.

- 1) 습윤양생기간이 제일 긴 장기양생이 가장 적은 건조

수축을 나타냈으며, 단기양생과 표준양생은 비슷한 수축을 나타내었다. 한편, 봉합양생의 경우 표준양생에 비해 건조수축량이 약간 저감하는 것으로 나타났다. 그러나, 탈형 후부터의 변형률을 비교해보면, 수중양생의 경우 팽창하고 봉합양생의 경우 계속하여 수축이 발생하게 되므로 종합적으로 봉합양생의 건조수축이 크게 변하지는 않는 것으로 판단된다. 그러나 60 MPa 경우와 같이 자기수축이 크게 발생하는 경우에는 수중양생에 의한 자기수축 감소로 인하여 봉합양생 경우의 총 건조수축이 증가한다.

- 2) 접지 게이지를 사용해도 효율적인 건조수축량 측정이 가능하며, 건조시작 4시간까지의 매립 게이지에 의한 측정 결과 초기 건조수축 오차는 20 μ 미만으로 크지 않은 것으로 판단된다.
- 3) 매립 게이지로 시험체 내부에서 측정한 변형률과 접지 게이지로 외부표면에서 측정한 변형률의 차이는 초기재령에서 크지만 재령경과에 따라 서로 근접하는 결과를 보였으며, 접지 게이지로 측정하여 계산된 변형률 값이 매립 게이지로 측정한 값보다 작게 측정된다.
- 4) 실험결과와 모델코드 비교에서는, 높은 물-시멘트비 배합에서는 모델 예측값들이 과소평가하였으며, 낮은 물-시멘트비 배합이 될수록 크게 예측하는 경향을 보였다. 실험결과는 EC2 모델예측식과 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 산하 한국건설교통기술평가원의 성능중심의 건설기준 표준화 연구단에 의해 수행되는 2006 건설교통 R&D 정책 및 인프라사업(06-기반구축-A-01)의 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 이에 감사드립니다.

1. KS F 2424, “모르타르 및 콘크리트의 길이 변화 시험 방법,” Korean Industrial Standards, 2005, pp. 1~12.
2. ASTM C 157, “Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete,” *American Society for Testing Materials*, ASCE, 2003, pp. 1~7.
3. 한천구, 한민철, 송승헌, 윤섭, “팽창제와 수축저감제를 병용한 콘크리트의 건조수축 특성,” 콘크리트학회 논문집, 18권, 3호, 2006, pp. 397~404.
4. 고경택, 류금성, 윤기원, 한천구, 이장화, “잔골재 종류가 콘크리트의 건조수축과 내구성에 미치는 영향,” 콘크리트학회 논문집, 18권, 2호, 2006, pp. 249~255.
5. 이광명, 선우주연, 이회근, Kamal H. Khayat, “양생조건이 콘크리트의 체적 변화에 미치는 영향,” 콘크리트학회 논문집, 18권, 3호, 2006, pp. 331~338.
6. Yang, Y., “Autogenous Shrinkage of High-strength Concrete Containing Silica Fume under Drying at Early Ages,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, Issue 3, 2005, pp. 449~456.
7. Zhang, M. H., “Effect of Water-to-cementitious Materials Ratio and Silica Fume on the Autogenous Shrinkage of Concrete,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, Issue 10, 2003, pp. 1687~1694.
8. ACI 209R-92, “Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effect in Concrete Structures,” *ACI Manual of Concrete Practice*, ACI, 1992, pp. 1~47.
9. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 해설, 한국콘크리트학회, 2000, pp. 47~48.
10. CEB_FIP Code, *CEB-FIP Model Code, Design Code*, Comite Euro International du Beton, 1990, pp. 51~59.
11. Fib Bulletin 1, “Structure Concrete-Textbook on Behaviour,” *Design and Performance, Updated Knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990*, Vol. 1, Federation International du beton, 1999, pp. 37~52.
12. EuroCode 2, “Design of Concrete Structures,” *European Committee for Standardization*, 2004, pp. 202~204.

요약 이 연구에서는 24~60 MPa 범위의 콘크리트에 대하여 다양한 양생조건과 측정 방법을 적용하여 재령에 따른 조건별 건조수축량을 비교하였고, 이를 통해 실험 방법의 적합성 및 예측 방법의 적용성을 검토하였다. 연구 결과에 따르면, 28일 양생이 가장 적은 건조수축을 나타냈으며, 저강도 콘크리트 봉합양생의 경우 탈형 후부터의 변형률을 비교해보면, 표준양생의 건조수축과 크게 변하지 않는 것으로 나타났으나, 고강도 콘크리트 봉합양생의 경우 자기수축이 크게 발생하여 더 큰 건조수축을 나타냈다. 매립 게이지를 사용해도 효율적인 건조수축량 측정이 가능하며, 접지(contact) 게이지로 측정된 값이 매립 게이지로 측정한 값보다 작게 나타났다. 실험 결과는 EC2 모델예측식과 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 콘크리트 건조수축, 측정 방법, 예측모델, 양생조건