

콘크리트의 건조수축과 수리에너지의 상관관계

(A Relationship between Drying Shrinkage and Water Potential)

한 만엽
Han, Man Yop

Abstract

Water potential which controls moisture movement in concrete is a kind of stress which causes concrete shrinks or expands. Therefore, there is a straightforward relationship between the water potential and the shrinkage strain. Explicit equations which show the relationships between the two parameters were derived through rational process. Two micro mechanisms among three shrinkage mechanisms were considered in the theory. Thermocouple psychrometer were embedded in a concrete slab to measure the water potential and also to find a correlation with the shrinkage. The test results prove the validity of the theory, and show the way to utilize the delived equations.

1. 서론

본 연구는 콘크리트에서 수분 증발이 일어나면서 발생하는 건조수축 현상에 관한 연구로서, 콘크리트내의 수분이동에 직접적인 영향을 미치는 수리에너지와 건조수축 응력과의 관계를 이론적으로 규명한 논문이다. 이러한 이론적인 관계는 콘크리트의 건조수축 균열 현상을 연구할때 콘크리트내에 발생하는 응력중 얼마만큼이 변형을 일으키는데 사용되고, 얼마만큼이 내부 응력으로 남아있는가를 구분 측정하는데 효과적으로 이용될 수 있을것으로 기대된다.

콘크리트내의 수분이동에 영향을 미치는 수리에너지의 분포는 압력 단위를 갖는 힘의 일종으로서 콘크리트내의 수분을 이동시키는 작용뿐만 아니라 시멘트 입자들을 직접적으로 당기는 작용을 함으로서 수분 이동에 따라 발생하는 내부 응력과 밀접한 관계를 갖는다.

실제 구조물에 있어서 건조수축에 의한 응력의 크기나 변형율의 크기는 탄성계수를 포함하여 3개의 변수 모두가 미지수이므로 이들을 각각 측정하기 전에는 그 값들을 알기도 어렵고, 또한 측정 자체가 어렵기도 하다. 그러나 수리에너지와 건조수축과의 이론적인 관계를 규명할 수 있을때는 수리에너지를 측정함으로써 자유 건조수축량을 계산해 낼 수 있기 때문에 구조물에서 측정된 외형적 변형량과 비교함으로써 건조수축에 의한 균열 발생시 응력의 크기를 계산해 낼 수 있게 된다.

본 연구에서는 콘크리트내의 수리에너지 분포를 측정하여 평균값을 구하고, 동시에 자유 건조수축을 측정하여, 이론적으로 유도된 관계식을 증명하고자 하였으며, 이들 측정 자료를 이용할 수 있는 방법을 제시하였다. 이들 실험은 시편 제작후 2주간의 건조 기간과, 2주간의 습윤 양생 기간, 그리고 다시 3주간의 건조 기간 동안 지속되었다.

2. 수리에너지와 체적변화

상대습도와 체적변화의 이론적인 관계는 T. C. Powers에 의하여 상당히 자세히 밝혀졌다. 이들 사이의 수학적 관계는 열역학 이론에 기초하여 유도된 것이었다. 시멘트 수화물의 건조수축 현상을 크게 3가지의 메카니즘으로 나누어 고체의 표면 장력에 의한 수축, 응축응력에 의한 수축, 모세응력에 의한 수축등으로 구분하였다. 보통 표면장력으로 알려져 있는 표면 자유 에너지는 흡착된 수분양에 비례하는 크기를 갖는 힘이고, 응축응력은 수분의 흡착이 좁은 공간에서 방해받게 될때 발생하는 응력이며, 모세응력은 모세관에서 흡착된 물이 곡면을 형성할때 발생하는 응력이다. 이들 응력에 관한 좀더 자세한 종합적인 설명은 참고문헌을 참조하시기를 바라며, 여기서는 상대습도가 보통 대기과 비슷한 50% 이상에서 작용하는 응축응력과 모세응력에 의한 건조수축에 관해서만 인용하겠다.

T. C. Powers가 유도한 응축응력에 의한 체적변화식은 아래와 같다.

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_d = \beta f(W_a) \frac{RT}{MV_w} \ln h \quad \text{--- (1)}$$

여기서 첨자 d는 응축응력에 의한 체적변화임을 의미하며, β 는 압축상수, W_a 와 V_w 는 각각 흡착된 수분의 함수량과 체적이고, R, T, M은 Kelvin식의 상수들이며, $f(W_a)$ 는 응축응력이 작용하는 부분의 면적비이다.

이 식에서 다공성 물체의 수분이 접촉하는 췌기 모양의 기하적인 조건을 고려하고, h가 h_1 에서 h_2 로 변화하는 동안의 체적변화를 계산하려면 아래와 같이 식을 변화시킬 수 있다.

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_d = \frac{k \cdot \beta}{V_w} \frac{RT}{M} \int_{h_1}^{h_2} \frac{W_a}{V_s} d \ln h \quad \text{--- (2)}$$

여기서 추가된 변수 k는 공극내의 기하적인 형상에 따르는 상수이다. 모세응력에 의한 체적 변화식은 근본적으로는 응축응력에 의한 체적 변화식과 같으나 k값이 항상 1인 점이 다르다. 따라서 이들 두가지 응력을 동시에 고려하면 아래와 같은 식이 된다.

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_d = (k+1) \frac{\beta}{V_w M} \frac{RT}{h_l} \frac{W_a}{V_s} d \ln h \quad \text{--- (3)}$$

여기서 Kelvin식을 도입하여 상대습도 h를 측정 가능한 수리에너지 ϕ 로 치환하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_d = (k+1) \beta \int_0^\phi \frac{W_a}{V_s} d\phi \quad \text{--- (4)}$$

함수량 θ 와 윗식에 나타난 변수들과 다음과 같은 관계가 있으므로

$$\theta = \frac{W_a}{W_s} = \frac{W_a}{\gamma_w G V_s} \quad \text{--- (5)}$$

이 식을 (4)식에 대입하고, 선형변형율이 체적 변화의 1/3 인점을 고려하면 아래와 같은 수리 에너지와 변형율과의 관계식을 구할수 있다.

$$\epsilon_p = \frac{1}{3} (k+1) \beta \gamma_w G \int_0^\phi \theta d\phi \quad \text{--- (6)}$$

이 식의 수축량은 시멘트 페이스트의 수축량이므로 콘크리트의 수축량을 계산하기 위해서는 다음과 같은 실험식을 도입하도록 한다.

$$\epsilon_c = \epsilon_p (1-g)^{\gamma} \quad \text{--- (7)}$$

여기서 g는 배합중 골재의 양이고, γ 는 탄성계수와 프아송비에 따르는 상수이다. 그러면 콘크리트의 건조수축은 아래와 같은 간단한 식으로 요약될 수 있다.

$$\epsilon_c = \lambda \int_0^\phi \theta d\phi \quad \text{--- (8)}$$

단

$$\lambda = (k+1) \beta \gamma_w G (1-g)^{\gamma} \quad \text{--- (9)}$$

식(8)의 적분 부분의 계산은 수리에너지에 대한 함수량의 적분이므로 이들 사이의 관계를 나타내는 식이 필요하다. 이들 두 변수 사이의 관계는 Sorption Isotherm이라 하는데 다른 재료에 비하여 콘크리트와 투수성이 가까운 진흙의 경우에 널리 쓰이는 다음과 같은 Gardener의 식을 이용하도록 한다.

$$\theta = \frac{n}{1 + (\phi/a)^m} \quad \text{--- (10)}$$

여기서 n은 공극율이고, a와 m은 실험 상수이다. m은 보통 1에서 3사이의 값을 갖는데 공극율이 큰 재료일수록 값이 커진다. 양생초기 콘크리트는 진흙보다 투수성이 크므로 그 값은 3에 가까울 것이며, 수화반응의 진전에 따라 점차로 1로 줄어들 것이 예상되며, 28일 이상 지나면 1보다 작아질 수도 있다. 식(10)을 식(8)에 대입하면 아래와 같은 식이 된다.

$$\epsilon_c = \lambda \int_0^\phi \frac{n}{1 + a^{-m} \phi^m} d\phi \quad \text{--- (11)}$$

양생 초기 콘크리트의 경우 수화반응으로 인하여 공극율과 실험상수들이 계속적으로 변화하기 때문에 a와 m이 고정된 값이 아닌데, 이 값들이 미지수인 상태에서는 수학적인 적분이 불가능하다. 또한 λ 가 a, k, β 에 따라 변화하므로 양생 초기에는 전체적인 적분이 별로 커다란 의미가 없다. 따라서 이 적분식을 일반적으로 푸는 것은 컴퓨터를 이용한 수치 해석적인 적분만이 해결책이라 할 수 있다.

그러나 양생이 어느 정도 진행된 후에는 앞에서 언급한 변화가 작다고 볼 수 있으므로 이들을 상수로 취급해도 문제가 없으리라 생각된다. 본 논문에서 유도된 식의 정당성을 알아보기 위하여 적당히 짧은 기간 동안 이들 상수들에 변화가 없다고 가정하면 다음과 같은 적분을 할 수 있다. 다만 이들이 모두 상수라 할지라도 식(8)의 적분은 m이 정수일때만 적분이 가능하기 때문에 m이 1, 2, 3 일때에 각각 적분을 하였다.

$$m=1 \text{ 일때 } \epsilon_c = \lambda n a \ln(1+\phi/a) \quad \text{--- (12a)}$$

$$m=2 \text{ 일때 } \epsilon_c = \lambda n a \arctan(1+\phi/a) \quad \text{--- (12b)}$$

$$m=3 \text{ 일때 } \epsilon_c = \lambda n a \left[\frac{1}{6} \ln \left(\frac{(a+\phi)^3}{1+(\phi/a)^3} \right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \arctan \left(\frac{2\phi/a-1}{\sqrt{3}} \right) - \frac{\ln(a)}{2} + 0.3023 \right] \quad \text{--- (12c)}$$

이 적분 결과를 살펴보면 건조수축의 크기는 λ , n, a의 크기에 비례하고, 건조수축 곡선의 형태는 m 값에 좌우됨을 알 수 있다. λ 는 재료의 압축성 및 골재함유량을 나타내는 변수이고, n은 공극율, a는 공극특성과 관련이 있는 Sorption Isotherm에 좌우되는 변수이다. 따라서 건조수축의 크기는 재료의 압축성, 골재의 양, 공극율, 공극분포 등에 좌우됨을 알 수 있으며, 건조수축 곡선의 형태는 m에 따라 곡선식이 바뀔므로 공극율과 공극 분포에 영향을 받을 수 있다.

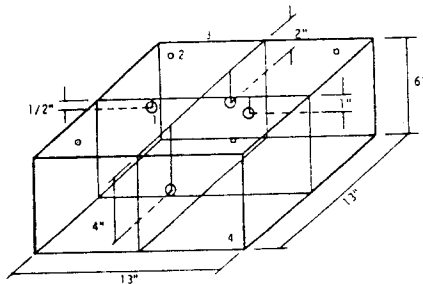
또한 양생 초기에는 식(12c)의 복잡한 식으로부터 나중에는 (12b), (12a)등의 형태로 변화해 가므로, 굳은 콘크리트의 경우는 건조수축곡선이 "ln"형태로 나타날 것으로 기대된다.

4. 실험 개요

콘크리트내의 수리에너지를 측정하는 방법은 여러가지가 있을 수 있으나 본 연구에서는 열전쌍 사이크로미터를 이용하여 측정하였다. 이 센서는 주로 토질분야에서 많이 사용되던 센서인데 콘크리트분야에서는 Lytton, R.L. 과 Brown, R.W.이 콘크리트의 크립 연구를 위하여 사용한 적이 있었다.

건조수축과 수리에너지를 측정하기 위하여 그림 1에 나타나 있는 것과 같은 약 33x33x15cm의 슬라브를 제작하였다. 슬라브내에는 4개의 측정 센서들이 서로의 간섭 현상을 피하기 위하여 표면에서 1.3 cm (1/2inch), 2.5cm (1 inch), 5cm (2inch), 10cm (4inch) 깊이에 분산 배치되었고, 표면에는 건조수축을 측정하기 위하여 설치된 DeMec Point를 볼 수 있다.

측정은 25°C에 상대습도 50%의 항온항습실에서 실시되었다. 시편 제작후 탈형전에는 밀폐 상태에서 보관되었다가 1차원 건조를 만들기 위하여 상부 표면을 제외한 모든 면을 2중의 비닐로 밀폐하였다. 실험은 2주간의 건조기와 2주간의 습윤기를 거쳐, 다시 3주간의 건조기 동안 진행되었다.



- | | |
|---------------------------|----------------|
| 1. Psychrometer | 2. DeMec Point |
| 3. Plastic Cover | 4. Wood Form |
| 5. Connector to Voltmeter | |

그림 1. 콘크리트 슬라브내 센서의 배치도

5. 결과 및 분석

수리에너지의 측정결과는 그림 2에 나와 있다. 이 그림에서는 시간과 깊이에 따른 전체 실험기간 동안의 수리에너지의 변화를 보여준다. 제1 건조기 동안 얇은 곳에 묻힌 센서들의 경우는 약 3일 내지 7일 정도까지 측정이 가능하였고, 깊은곳에 묻힌 센서들은 2주 이후까지도 측정이 가능하였다. 이 측정 결과에서는 건조기와 습윤기의 경계들이 명확히 구분되어 있음을 관찰할 수 있고, 또한 깊이에 따라 현저히 다른 값을 보여 줌으로써 깊이에 따른 수분 손실의 차이를 보여 주고 있다. 처음 2주간의 건조기간 동안은 수리에너지의 증가를 볼 수 있고, 그 후의 습윤 기간 동안은 수리에너지의 급격한 감소를 볼 수 있으며, 4주후 제2 건조 기간 동안에는 증가 속도가 현저히 떨어짐을 알 수 있다. 다만 여기서 수리에너지는 음압이기 때문에 에너지의 감소라고 해야 옳으나 혼돈을 피하기 위하여, 또한 건조수축이 증가한다는 개념으로 값이 증가한다고 설명을 한 것이다.

그림 3에서는 앞의 측정값들로부터 건조수축을 측정할 시점에 슬라브의 중앙 지점의 평균 수리에너지를 구하여 표시한 것이다. 이들 평균값을 구하는데 있어 문제점은 건조가 계속 되면 이 센서들로 측정 가능한 부분이 점차 내부로 축소되는데 본 실험에서도 2 주후에는 4 inch 깊이에 설치된 센서에서만 측정값을 얻을 수 있기 때문에, 제1 건조기간이 끝날때쯤 보이는 측정값의 저하는 사실과는 다른 값이 되었으므로 위의 계산에서 이 부분은 제외하였다.

그림 4에는 슬라브의 표면에 설치된 4개의 측정점에서 3번씩 측정된 12개의 측정값의 평균 건조수축으로써 정확한 측정이 되도록 하였다. 이 관측 결과에도 양생조건의 변화가 측정값에 명확하게 반영되어 있음을 알 수 있다. 슬라브가 표면적에 비해서 두껍기 때문에 - 즉 비표면적이 작다 - 약 140 $\mu\epsilon$ 정도의 약간은 작게 느껴지는 변형율이 관측되었다. 제2 건조기에는 건조 수축이 제1 건조기에 비하여 거의 절반 정도 되는 완만한 증가를 보이고 있다.

그림 5에는 건조수축량과 수리에너지와의 상관관계가 나타나 있다. 전체적으로 약간 구부러진 곡선을 이루고 있음을 알 수 있다. 이들 두 변수들 사이의 관계는 콘크리트의 양생초기를 제외하고는 "ln" 관계를 갖을 것으로 예측하였었는데 관측된 곡선의 형태에서 이를 미루어 짐작할 수 있다.

이를 좀더 명확히 규명하기 위하여 먼저 식 (12a)의 계수 λna 를 b 로 치환하여 아래와 같이 간략한 식을 만들었다.

$$\epsilon_c = b \cdot \ln(1 + \phi/a) \quad \dots \quad (13)$$

이 식은 a 와 b 의 두개의 변수를 갖고 있으며, 식을 선형화하기가 어려우므로 비선형 회귀 분석을 해야 a , b 값을 결정할 수 있다. 본 논문에서는 시행 착오법으로 a , b 값을 결정하였는

데, 그 결과가 표 1 에 요약되어 있다.

표 1. 건조 수축식의 상수들

기간 구분	a	b
First Drying	22	150
Wetting	14	135
Second Drying	1	38

이들 상수들을 이용하여 계산된 값이 그림에 선분으로 표시되어 있다. 측정값과 모델식에 의한 계산값들이 상당히 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 수리에너지와 건조수축을 연결하는 앞에서 유도된 이론식이 타당함을 증명하는 것이기도 하다.

본 논문에서 유도된 모델식과 상수들을 이용하여 건조수축을 계산한 결과와 측정값들을 비교하기 위하여 전 실험 기간동안 이들 두개의 값들을 그림 6 에 표시하였다. 전반적으로 수리에너지의 측정을 통하여 계산된 건조수축이 부분적인 오차를 제외하면 실제의 측정값과 잘 일치함을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 수분의 손실에 따라 콘크리트 내에서 발생하는 자유 건조수축을 측정할 수 있는 방법을 제시함으로써 구조물내에서 균열이 발생할때 콘크리트의 강도나 탄성계수를 추정할 수 있는 길을 제시하였다.

본 연구에서 제시된 방법은 시멘트 수화물의 미시적인 세계에서 일어나는 가역 건조수축 메커니즘에 바탕을 둔것으로써 건조수축과 수리에너지 사이에 "ln"의 관계가 있음을 밝혔다.

개발된 건조 수축식은 시멘트겔의 압축율등 많은 물리 상수들을 포함하고 있고, 각 미커니즘들이 건조수축에 기여하는 기여도등의 측정이 어렵기 때문에 실제 계산에 사용하는데는 어려움이 있었다. 따라서 본 연구에서는 이들 식들을 이용할 수 있는 방법으로서 보정 실험을 통하여 실험상수를 정하고, 이 상수들을 이용하여 건조수축을 계산할 수 있는 방법을 제시하였다.

앞으로는 건조수축식에 포함된 적분을 좀더 쉽게 하기 위한 적절한 Sorption Isotherm의 모델식 개발이나 측정이 수행되어야 하겠고, 이들을 계산할수 있는 수치해석 프로그램도 개발되어야 하겠다.

7. 참고 문헌

1. Kirkham & Powers, "Advanced Soil Physics", Wiley-Interscience, 1972
2. Mindness, S. and Young, J.F., "Concrete", Prantice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1981
3. Vos, B.H., "Moisture Migration in Concrete," in First Internal Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology," Paper H2/5 Berlin, Germany, 1971
4. Nilsson, L.O., "Hygroscopic Moisture in Concrete - Drying Measurements and Related Material Properties," Research Report, The Institute of Technology of Lund, Division of Building Material Report, TVBM-1003, 1980
5. Lytton, R.L. and Brown, K.W., "Unsaturated Permeability of Concrete," Incomplete Paper: Texas A&M University, 1971
6. Brown, R.W., "Measurement of Water Potential with Thermocouple Psychrometers: Construction and Applications." USDA Forest Service, Research Paper: INT-80, 1970
7. Powers, T.C., Copeland, L.E. and Mann, H.M., "Capillary Continuity or Discontinuity in Cement Pastes," Journal of Portland Cement Association, vol.1, No.2, 1958
8. Powers, T.C., "Mechanisms of shrinkage and reversible creep of hardened cement paste", Proceedings, International Conference on the Structure of Concrete, London, Cem. Concr. Assoc, 1965, pp319-344
9. Powers, T.C., "The thermodynamics of volume change and creep", Materiaux et Constructions, Vol 1, No 6, 1968, pp487-507
10. Young, J.F., "The Microstructure of Hardened Portland Cemete Paste", Creep and Shrinkage in Concrete Structures, editor Bazant Z.P. and Wittmann, F.H., John Wiley & Sons Ltd, 1982, pp3-22
11. Pihlajavaara, S.E., "Estimation of Drying of Concrete at Different Relative Humidities and Temperatures of Ambient Air with Special Discussion about Fundamental Features of Drying and Shrinkage", Creep and Shrinkage in Concrete Structures, editor Bazant Z.P. and Wittmann, F.H. John Wiley & Sons Ltd, 1982, pp87-107
12. Pickett, G., "Effect of Aggregate on Shrinkage of Concrete and a Hypothesis Concerning Shrinkage," Journal of ACI, vol.27, No.5, Jan. 1956, pp581-590
13. 한만엽, "건조수축의 메커니즘과 물의 역할" 콘크리트 학회지, 제3권, 2호, 1991.6, pp46-52

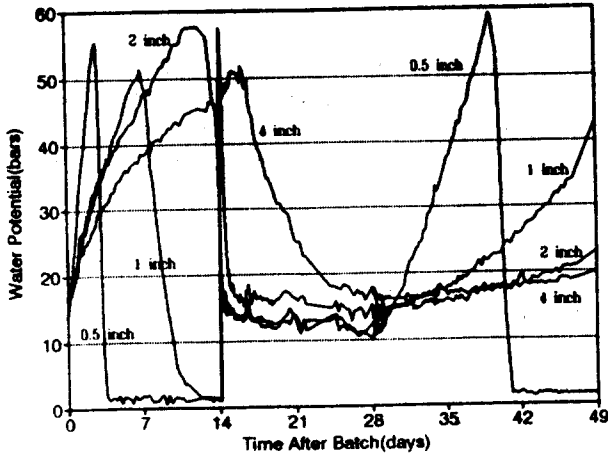


그림 2. 실험 기간동안의 수리에너지의 측정값

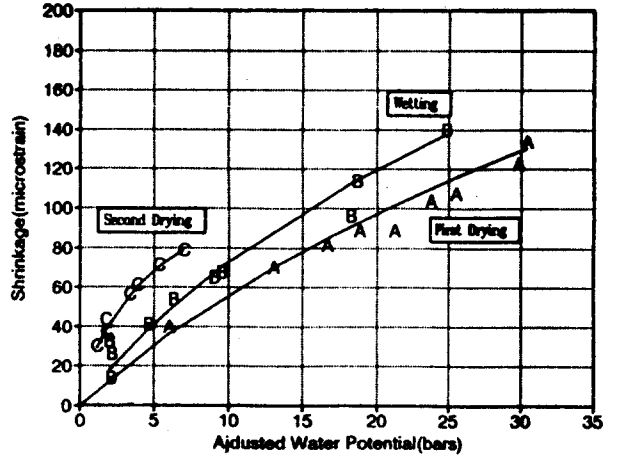


그림 5. 건조수축과 수리에너지의 상관관계

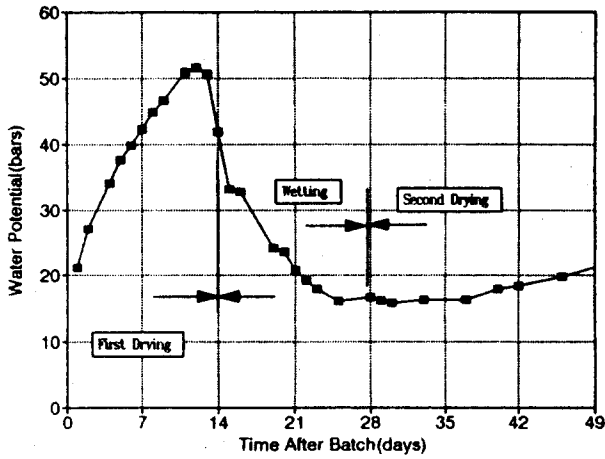


그림 3. 건조수축이 측정된 시점의 슬라브의 평균 수리에너지

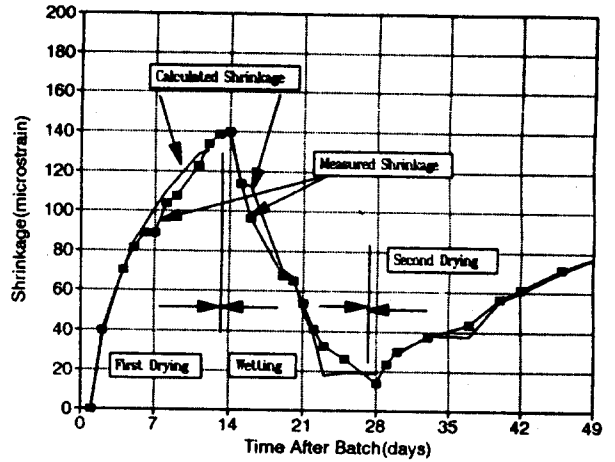


그림 6. 계산된 건조수축과 측정된 값의 비교

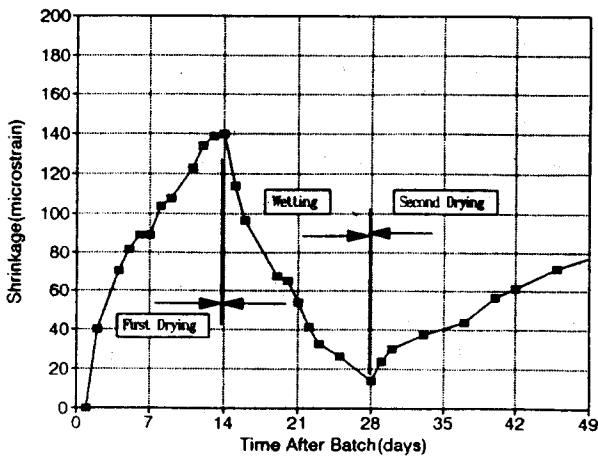


그림 4. 실험기간 동안의 건조수축 측정값