

# 환경인자를 고려한 건조수축의 예측모델 개발

## Modelling of Drying Shrinkage for Different Environmental Conditions

한만엽\*

Han, Man Yop

---

### 요 약

콘크리트의 건조수축 특성은 콘크리트 구조물의 내구성을 결정하는 대단히 중요한 특성으로서 환경적인 요인에 영향을 많이 받는다. 이 환경적 요인은 온도, 습도, 풍속 등으로 구성되어 있는데 이들 개별적인 인자들은 변화폭이 크고, 콘크리트의 건조에 미치는 영향이 복잡적이기 때문에 이들의 영향을 개별적으로 평가하는 것은 큰 의의가 없다. 본 연구에서는 건조수축에 영향을 미치는 환경적인 요인들을 통합하고자 증발속도라는 변수를 도입하였다. 적절한 온도와 습도, 풍속, 콘크리트 온도 등을 선정하여 선정된 환경하에서의 증발속도를 증발속도계로 측정하였으며, 이 결과를 기존의 PCA 도표와 비교 평가하였고, 설정된 조건하에서의 실험을 통하여 콘크리트의 건조수축과 증발속도간의 관계를 규명하였다. 또한 건조수축 실험결과와 이 변수 사이의 관계를 정량화하여 건조수축의 예측에 이용될 수 있는 예측모델식과 도표를 개발하였다.

### Abstract

Drying shrinkage is a very important properties of concrete, which is affected by environmental conditions. The environmental conditions are temperature, relative humidity, and wind speed, which is quite variable and its effect on drying shrinkage is quite complex, too. In this study, environmental effects on drying shrinkage were integrated into one variable-evaporation rate. In several different environmental conditions, evaporation rate was measured with Evaporometer and compared with PCA chart, and also compared with measured drying shrinkage to verify the possibility of being a single parameter. The results are summarized in a prediction chart and prediction equation for drying shrinkage.

**Keywords :** evaporation rate, concrete, drying shrinkage, ACI model, PCA chart

---

## 1. 서 론

콘크리트에서 체적변화에 의한 균열을 발생시키는 요인은 크게 두가지로 온도강하와 건조수축으로 구분된다. 이 중 온도강하에 의한 균열은 주

로 여름철과 같이 온도가 높은 계절에 타설된 콘크리트에서 특히 많이 발생하고 있으며, 주로 생산설비와 사용 재료의 온도를 낮춤으로써 균열 발생을 억제하고 있다<sup>(1)</sup>. 또 다른 요인인 건조수축에 의한 균열은 온도가 높은 여름철에 가장 심하게

---

\* 정회원, 아주대학교 토목공학과 조교수

● 본 논문에 대한 토의를 1996년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 1996년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

나타나지만, 습도가 낮고, 바람이 심한 봄, 가을에도 지속적으로 발생하고 있기 때문에, 이를 억제하기 위해서 콘크리트 타설 후 건조수축을 억제하는 다양한 방법이 사용되고 있다.

이러한 건조수축은 콘크리트 구조물중 비표면적이 넓어서 수분의 증발이 심한 슬래브나 콘크리트 포장 등에서 많이 발생한다. 특히 콘크리트 포장의 경우 대개 공사장의 위치가 개활지인 경우가 많아 과도한 건조수축이 예상되는 기상조건하에서는 콘크리트 타설후 수분 손실을 방지하기 위한 양생제의 살포등 다양한 방법이 사용되고 있다<sup>(2,3)</sup>. 수분손실에 영향을 미치는 요인인 온도, 습도, 바람 등 기상조건은 정량화가 어려운 변수 중의 하나이며, 이들 상호간의 연계작용으로 인하여 건조수축에 미치는 개별적인 효과의 정도를 분리, 측정하기는 쉽지 않은 형편이다<sup>(4)</sup>.

기상조건 중 온도는 시멘트의 수화반응 속도에 영향을 미치고 있으므로 콘크리트의 강도 발현에 중대한 영향을 주고 있다. 양생초기의 높은 온도는 일반적으로 콘크리트의 조기강도를 증진시키는 효과는 있으나, 장기적으로는 좋지 않은 영향을 미치고 있다. 다만 대개의 경우 외부의 기상조건은 콘크리트의 표면에만 주로 영향을 미치고, 내부에는 그리 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 알려져 있다<sup>(5)</sup>.

이에 반하여 상대습도와 풍속은 주로 콘크리트의 증발속도에 영향을 미치는 요인이 된다<sup>(6)</sup>. 굳은 콘크리트에 대한 증발속도 실험은 풍속이 결과에 그리 큰 영향을 주지 않으나, 타설 직후의 콘크리트는 수분손실에 따라 큰 영향을 받는 것으로 보고되어 있다<sup>(7,8)</sup>. 콘크리트 타설후 초기 7시간까지는 증발속도가 일반 수면으로 부터의 증발속도와 같다고 한다<sup>(7,9)</sup>. 이때의 증발속도는 온도, 습도, 풍속에 좌우되며, 그 손실량이 크기 때문에 초기의 소성수축은 건조수축중 가장 크게 발생한다. 또한 풍속이 클 경우에는 양생제의 사용이 별로 도움이 되지 않는다는 연구결과도 보고되어 있다<sup>(10)</sup>.

이러한 가운데 다양한 기상조건을 하나의 변수로 통합하기 위한 시도가 있었고, 그 결과 PCA도표<sup>(11)</sup>로 알려진 기상조건에 따른 증발량을 산정하

는 도표가 오늘날 널리 이용되고 있다. 이 PCA도표는 공기온도, 습도, 풍속과 콘크리트의 온도를 입력자료로 하여 새로 타설된 콘크리트로부터의 수분증발 속도를 계산하는 도표이다. 이 도표는 처음 발표된 1968년 이후 그 신뢰성에 대한 의문으로 수많은 비판을 받아오면서도 더 나은 대체 방법이 없으므로 해서 아직도 널리 사용되고 있다. 이 도표에 의해서 증발속도가 0.2lb/ft<sup>2</sup>/hr (1.0kg/m<sup>2</sup>/hr) 이상일 경우에는 콘크리트에서 수분손실을 억제할 수 있는 조치를 취할 것을 권고하고 있다. 그러나, 증발된 수분의 종류에 따라 발생하는 수축응력이 다르기 때문에 수분손실량과 건조수축량은 서로 선형비례하지 않으며, 따라서 이러한 기준이 항상 적용되는 것은 아니다<sup>(12)</sup>.

콘크리트의 건조수축을 억제할 수 있는 방법의 개발과 아울러 건조수축의 예측 방법에 대한 많은 연구가 있어 왔다. 이러한 노력의 일환으로 미국 콘크리트 학회에서는 ACI모델로 알려진 다음과 같은 식을 제안하여 건조수축을 계산하는데 사용하고 있다<sup>(13)</sup>.

$$\epsilon_s = \frac{\epsilon^\infty \times t}{N_s + t}$$

여기서  $\epsilon_s$  = 건조수축량

$\epsilon^\infty$  = 극한 건조수축량

t = 건조노출시간(일)

$N_s$  = 반건조시간(일) :  $\epsilon^\infty / 2$ 에 도달하는 시간

이 식에서는 콘크리트의 건조수축에 미치는 다양한 요인들이 극한 건조수축과 반건조시간이라는 두가지의 변수에 반영될 수 있도록 하였다. 시편의 형상이나 크기 등의 영향은 비표면적의 함수로 집약되어  $N_s$ 에 반영되어 있으며  $N_s$ 는 비표면적과는 대수적인 관계를 갖고 있다고 한다<sup>(13,14)</sup>. Hansen & Mattock은 건조수축과 비표면적이 서로 비례관계임을 보고하였다<sup>(15)</sup>. 그들의 실험결과는 실험실에서의 건조수축량이 실제 구조물에서의 건조수축량보다 작은 것임을 알려주는 것이며, 이는 시편의 크기에 따른 콘크리트내의 수분확산 현상의 지연에 따른 것으로 설명되고 있다.

이외에도 초기 습윤양생이나 주변온도, 상대습도 등과 같은 여러가지 요인들이 이 모델식의 두 가지 변수들에 반영될 수 있는 방법들이 제안되어 있으나, 이러한 요인들이 극한 건조수축량에 반영되는 것인지 반건조시간에 영향을 미치는 것인지에 대한 변수들의 적용방법에 관해서는 아직도 통일된 방법이 제시되어 있지는 않다<sup>(14,16)</sup>.

수분손실 속도 이외에 콘크리트의 건조수축을 좌우하는 또 다른 변수는 사용된 골재의 양과 강성이다<sup>(8,17)</sup>. 골재는 건조수축을 억제하는 역할을 하고 있으므로, 골재의 강성이 크면 건조수축을 감소시키는 효과가 있고, 골재의 양이 증가하면 그 억제효과가 더욱 커진다. 또한 배합의 유동성을 유지하기 위한 배합수의 사용량도 건조수축에 가장 직접적인 영향을 미치고 있는 요인이다.

본 연구에서는 기상변수중 대표적인 온도와 습도, 풍속, 콘크리트 온도 등을 선정하여 증발속도를 측정함으로써 PCA 도표 자체의 신뢰성을 평가하였고, 또한 건조수축과의 상관관계를 분석하였다. 또한 건조수축에 미치는 영향 정도가 큰 사용 골재의 종류와 배합수의 증감에 따른 영향을 실험, 측정하였다. 이에따라 콘크리트의 양생조건을 증발속도라는 하나의 변수로 통합하는 시도를 하였으며, 이들 변수에 따른 콘크리트의 건조수축 거동 예측식과 도표를 제시하였다.

## 2. 실험 개요

본 실험에서 실험조건으로 선정된 온도는 10℃와 23℃, 40℃이며, 상대습도와 풍속은 서로 조합하여 30%에서는 9.6km/hr의 풍속을, 65%에서는 14.4km/hr의 풍속을 유지하도록 하였다. 따라서 각 온도별로 두가지의 조건씩, 총 6가지의 다른 환경조건에서 건조수축 실험을 실시하였다. 이러한 환경조건외의 변수외에도 사용재료의 종류를 강자갈과 석회암 쇄석 등 두가지로 하였고, 슬럼프 값은 2.5cm, 3.8cm, 5.0cm 등으로 조정하였다. 본 실험에서 사용된 배합은 포장용 콘크리트의 경우를 대상으로 하였기 때문에 통상적인 콘크리트 배합에 사용되는 10cm의 슬럼프가 아니고 3.8cm의 슬럼프를 기준으로 정한 것이다. 따라서 슬럼프

값의 조정은 3.8cm의 표준 배합을 정한 뒤 적정량의 배합수를 증감하여 만든 배합이므로 실제 슬럼프값은 이 목표 슬럼프와 정확히 일치하지 않는다. 본 실험에 사용된 배합비와 배합 후 콘크리트의 기초적인 물성이 다음 표 1에 요약되어 있다. 또한 표 2에서는 슬럼프 즉 유동성을 변화시키기 위하여 조정된 배합수량을 보여준다.

Table 1 Mix design and properties of fresh concrete

Test Condition		w/c	Slump (cm)	Air (%)	Batch Weight(kg/m <sup>3</sup> )			
Temp	R.H.				Cem	Water	Sand	Agg.
River Gravel								
10℃	65%	.41	3.8	6.0	319	132	657	1311
	30%	.41	4.4	6.6	319	131	648	1316
23℃	65%	.42	3.8	4.6	319	135	656	1309
	30%	.39	3.5	5.5	319	126	657	1319
40℃	65%	.41	4.4	5.4	319	129	656	1316
	30%	.43	3.8	4.2	319	136	662	1315
Limestone								
10℃	65%	.42	3.8	5.3	319	135	656	1317
	30%	.41	5.1	6.8	319	130	656	1323
23℃	65%	.43	3.8	5.9	319	138	656	1321
	30%	.39	4.1	7.5	319	125	662	1353
40℃	65%	.45	3.2	5.5	319	142	648	1342
	30%	.44	4.4	4.7	319	140	656	1335

Table 2 Adjusted mixing water for different workability

Temp	R.H.	River Gravel			Limestone		
		2.5cm slump	3.8cm slump	5.0cm slump	2.5cm slump	3.8cm slump	5.0cm slump
10℃	65%	127	132	137	142	135	140
	30%	128	131	132	133	130	130
23℃	65%	137	135	141	138	138	141
	30%	125	126	133	118	125	121
40℃	65%	131	129	134	142	142	144
	30%	131	136	141	138	140	140

건조수축 시편은 7.5×7.5×25cm짜리 콘크리트 용 몰드를 이용하여 제작하였고, 시편제작 후 24시간 후에 탈형하여 전 표면을 양생제로 처리한 뒤, 길이와 무게를 기록하였고, 이후에는 계속 항온항습실에 보관, 측정하였다. 측정은 배합후 1일의 첫 측정으로부터 2일, 3일, 7일, 14일, 28일, 60일, 90일 등 총 90일간 지속되었는데, 길이변화와 더불어 무게감소도 병행 측정되었으며 건조수축 측정시 측정오차를 줄이기 위하여 같은 측정을 3

회 반복 실시하였다.

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1 증발속도 측정

다양한 기상 조건에 따른 증발속도를 측정하는 것은 쉽지 않은 일이다. 이는 증발속도의 측정 자체가 편차가 커서 그런점도 있지만, 기상변수 자체가 측정시 변화가 커서 그 대표값을 찾기가 쉽지 않기 때문이다. 특히 풍속의 경우 일정한 속도로 바람이 부는 것이 아니기 때문에 일정기간 동안의 평균치로 풍속을 계산하는 것이 일반적이다. 본 연구의 경우 시편의 노출 실험을 항온항습실에서 실시함으로써 어느 정도 균일한 환경조건을 유지할 수 있었지만, 풍속의 경우는 인공적인 바람이라 하더라도 평균치로 환산하는 방법을 사용하였다.

이렇게 주어진 기상 조건하에서 콘크리트로 부터의 증발속도를 측정하기 위해서는 다음의 두가지 방법이 사용되었다. 그 하나는 PCA 도표라 불리는 표를 이용하여 계산하는 방법이다. 이 도표의 정확도에 대해서는 의문을 제기하는 많은 논란들이 있었으나, 사용이 편리하고, 의문을 제기하는 실험결과 자체의 결함 등으로 인하여 아직까지도 계속 사용되고 있다. 이 도표의 경우는 기상온도와 습도, 풍속, 그리고 콘크리트의 온도를 입력 변수로 하기 때문에 많은 경우에 적절한 가정을 필요로 한다.

콘크리트의 수분증발 문제가 가장 심각한 것은 도로포장이므로 증발속도의 측정에 오래전부터

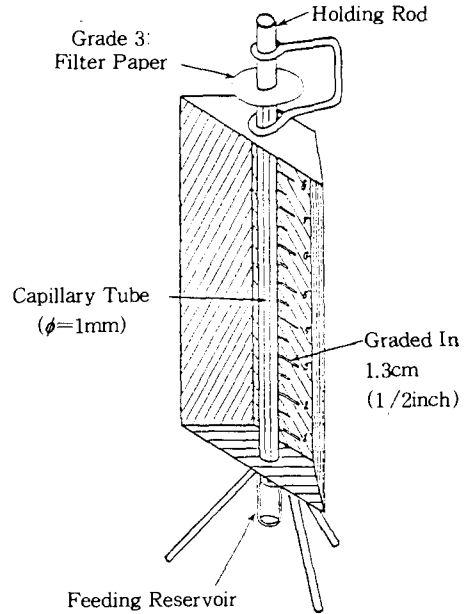


Fig. 1 Schematic drawing of Evaporimeter

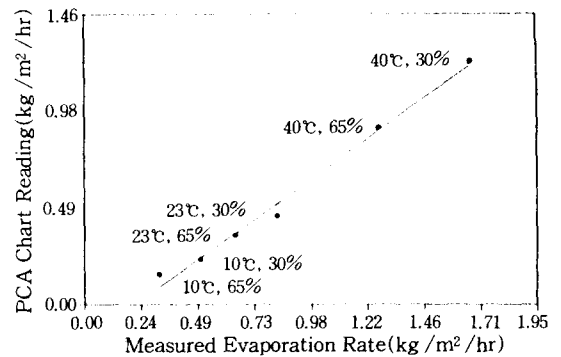


Fig. 2 The correlation between Evaporimeter measurement and PCA chart reading

Table 3 Evaporation rate measurements

Exposed Condition		Measured Evaporation		PCA Chart Reading (kg/m <sup>2</sup> /hr)
Temp	R.H. & Wind	Time (sec)	EvapoRate (kg/m <sup>2</sup> /hr)	
10°C	65% & 14.4km/hr	82	.323	.147
	30% & 9.6km/hr	53	.505	.221
23°C	65% & 14.4km/hr	41	.652	.343
	30% & 9.6km/hr	32	.833	.441
40°C	65% & 14.4km/hr	21	1.270	.882
	30% & 9.6km/hr	16	1.670	1.230

관심을 가져오던 분야도 이 분야로서, 텍사스의 도로교통국에서는 그림 1과 같은 간단한 증발량 측정장치를 개발하여 사용하고 있다<sup>(18)</sup>. 작동원리는 매우 간단하여 증류수를 채운 모세관의 물이 측정기의 상단에 위치한 일정한 면적의 여과지를 통과하여 증발하는 시간을 측정, 환산하는 방식이다. 이들 두가지 방식으로 측정된 증발속도가 다음 표 3과 그림 2에 요약되어 있다.

그림 2에서는 증발계를 이용한 측정과 도표를 읽어 계산된 값과 거의 선형비례하는 관계임을 보

여준다. 이 상관관계의 회귀 분석식은 다음과 같다.

$$PCA = -0.029 + 0.83 \cdot E$$

이 회귀식의 상관계수는 0.98로서 이 두가지의 측정방법은 충분히 같은 정도의 측정 정밀도를 갖고 있음을 시사하고 있으며, 따라서 증발량 환산에 관한 PCA도표의 정확도는 어느 정도 객관성이 있다고 할 수 있다. 증발량의 실험결과 40℃에서 상대습도와 풍속이 각각 30%와 9.6km/m<sup>2</sup>/hr일 때 최고의 증발속도를 나타냈으며, 10℃와 30% 및 14.46km/m<sup>2</sup>/hr일 때 최저의 증발속도를 보여주었다.

이러한 결과는 PCA 도표나 증발계에 의한 측정값이 건조수축과 서로 연관되어 있음을 의미한다. 따라서 만약 앞에서 언급된 PCA의 권고를 받아들인다면 현장에서 증발계를 이용한 측정값이 1.40kg/m<sup>2</sup>/hr을 넘어가게 되면 건조수축 균열을 방지하기 위한 적절한 조치를 취해야 하는 것의 의미한다.

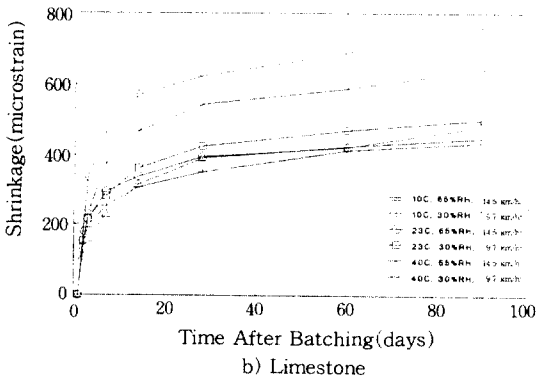
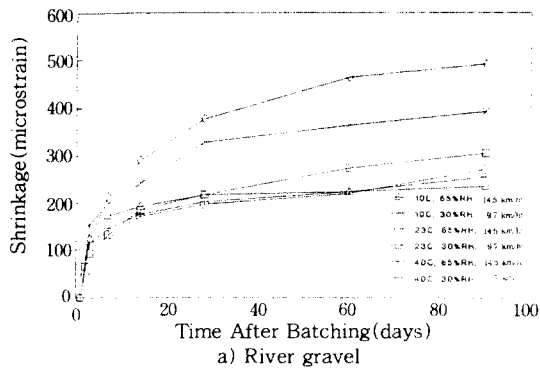


Fig. 3 The environmental effects on shrinkage of 3.8cm slump concrete

### 3.2 건조수축 실험

콘크리트에 있어서의 건조수축은 측정과 예측이 가장 어려운 물성 중의 하나이다. 일반적으로 콘크리트속의 수분은 건조수축의 발생 원인이며, 골재는 건조수축을 억제하는 역할을 한다. 그림 3은 강자갈과 쇄석을 사용한 슬럼프가 3.8cm인 콘크리트의 건조수축을 보여준 것이다. 노출 환경조건에 따라 건조수축이 210에서 490 사이의 분포를 보이고 있다. 이러한 환경적인 영향은 90일의 측정치에 가장 잘 나타나 있으며, 초기에는 일정한 경향을 보이지 않는 측정치가 많았다. 이는 환경적인 요인이 축적되어 그 효과가 실험오차보다 커지려면 어느 정도 시간이 소요됨을 의미한다. 석회암 쇄석을 사용한 경우에는 건조수축이 400에서 740 사이의 분포를 보여주는데 이는 쇄석을 사용한 경우가 강자갈보다 건조수축의 절대량이 큰 것을 의미한다. 이러한 결과는 건조수축이 같은 유동성을 갖는 콘크리트의 경우 환경적인 요

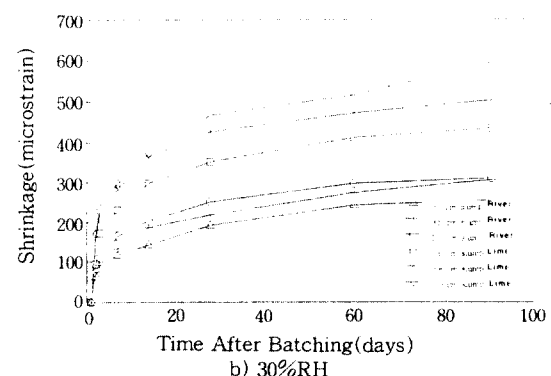
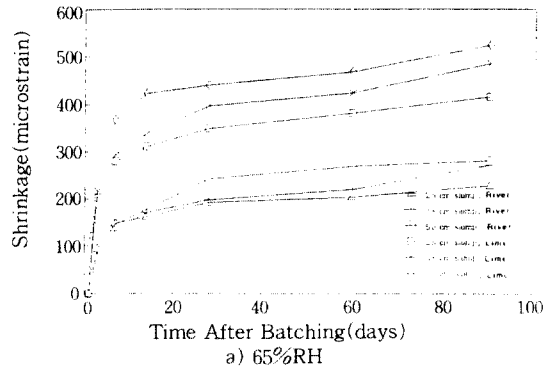


Fig. 4 The effects of slump and aggregate type on shrinkage at 23℃

인과 사용재료의 종류에 따라 상당히 달라질 수 있음을 보여주는 것이다.

그림 4에서는 배합수량의 변화에 따른 65%RH와 30%RH의 두가지 환경조건에서의 건조수축의 변화를 보여준다. 건조초기에는 측정의 오차가 커서 측정값의 역전이 몇군데 관측되고 있으나 후기에는 거의 일정한 크기 차이가 실험기간 내내 유지되고 있음을 보여주고 있다. 또한 배합수량의 변경에 따른 건조수축의 변화폭은 강자갈의 경우보다 쇠석일 때 더 편차가 큼을 관측할 수 있다.

그림 5에서는 여러가지 환경조건하에서의 건조수축과 무게감소와의 상관관계를 보여준다. 6개의 환경조건이 모두 한개의 선을 형성하고 있으므로 해서 한가지 배합에서는 한가지의 공극구조가 존재하고 이에따라 동일량의 수분 손실이 발생할 때는 동일 크기의 건조수축이 발생함을 알 수 있다. 또한 강자갈과 쇠석의 경우를 비교함으로써 사용재료의 변화와 이에따른 사용수량의 변화, 그리고

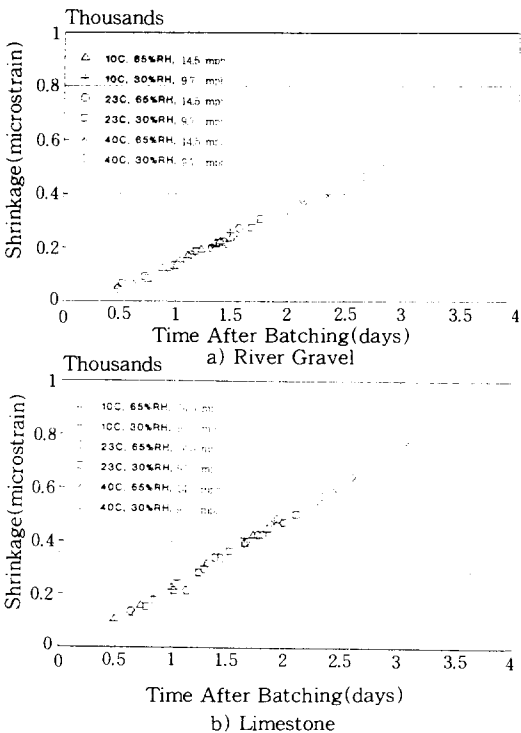


Fig. 5 The correlations between shrinkage and weight loss of 3.8cm slump concrete for different environmental condition

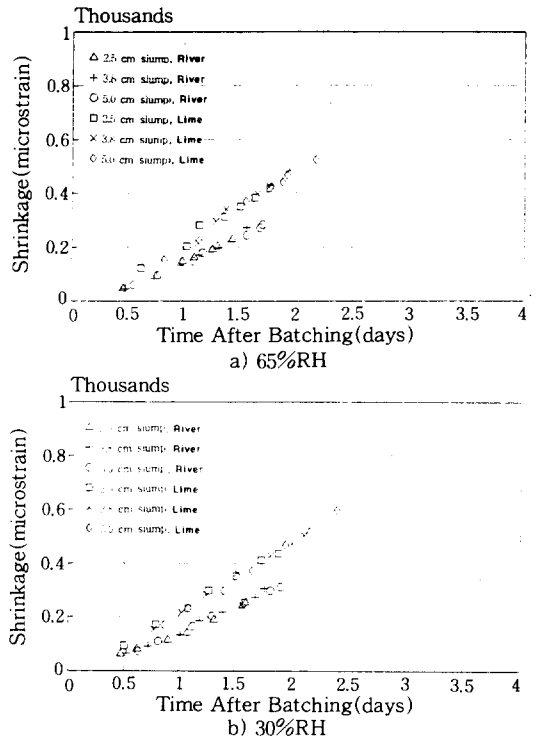


Fig. 6 The correlations between shrinkage and weight loss for different aggregate type at 23°C

콘크리트의 공극구조, 사용 골재의 강성 등의 차이에 따라 건조수축이 달라지고 있음을 보여준다. 이러한 경향은 그림 6에서도 마찬가지로 관측될 수 있다. 사용 골재의 종류에 따라 다른 무게감소와 건조수축 간의 관계를 보여주고 있으며, 이는 외부 노출조건에 따라 약간 달라지는 정도임을 알 수 있다.

### 3.3 ACI모델 분석

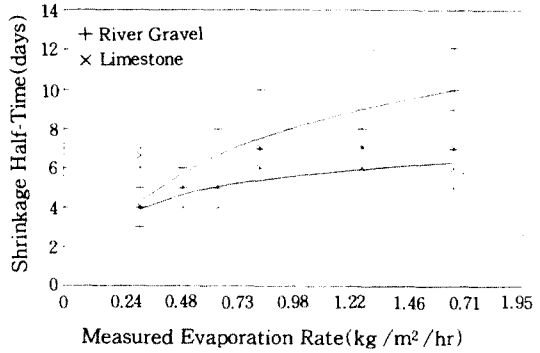
다양한 환경 조건하에서 건조수축의 거동을 예측하기 위하여 사용되는 기존의 모델식 중 ACI식을 적용하기 위한 통계분석을 실시하였다. ACI의 건조수축식은 비선형식이며, 선형식으로의 변환도 불가능하기 때문에 비선형 통계해석 프로그램인 SAS의 NLIN프로그램을 이용하였다. ACI의 건조수축식에 있는 두개의 변수를 구하여 정리한 것이 다음 표 4이다.

**Table 4** Ultimate shrinkage and shrinkage half time for ACI equation

Temp	R.H.	2.5cm slump		3.8cm slump		5.0cm slump	
		$N_s$	$\epsilon^\infty$	$N_s$	$\epsilon^\infty$	$N_s$	$\epsilon^\infty$
River Gravel							
10°C	65%	5.0	225	4.0	249	5.0	275
	30%	5.0	225	5.0	250	6.0	310
23°C	65%	5.0	230	8.0	270	8.0	304
	30%	10.0	275	10.0	324	7.0	325
40°C	65%	8.0	380	8.0	420	8.0	435
	30%	10.0	481	12.1	555	10.0	580
Limestone							
10°C	65%	6.6	465	7.0	481	6.0	534
	30%	5.0	440	5.0	440	4.0	500
23°C	65%	4.0	415	4.0	455	4.0	525
	30%	7.0	460	5.0	513	6.0	585
40°C	65%	7.1	653	6.0	670	7.0	720
	30%	7.0	730	6.0	760	5.0	790

이 표에서 극한값을 보면 거의 90일의 측정값과 비슷하다. 물론 이는 해당 콘크리트의 극한 건조수축이 될 수 없으며, 이러한 계산결과는 ACI 모델식의 가장 큰 문제점이기도 하다. ACI 모델식의 이러한 성질은 이미 기존 연구에서도 수차례 지적되었던 최대 단점의 하나이다. 그러나 실험실 조건에서의 90일 건조수축은 일간, 월간 또는 계절간의 변화에 따라 증감이 되풀이되는 실제 건조수축에서는 거의 극한 건조수축에 도달한다고 할 수 있다.

계산된 극한 건조수축과 반 건조시간을 증발속도의 함수로 표시한 것이 그림 7과 그림 8이다. 증발속도의 증가에 따라 극한 건조수축이 거의 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있으며, 반건조시간



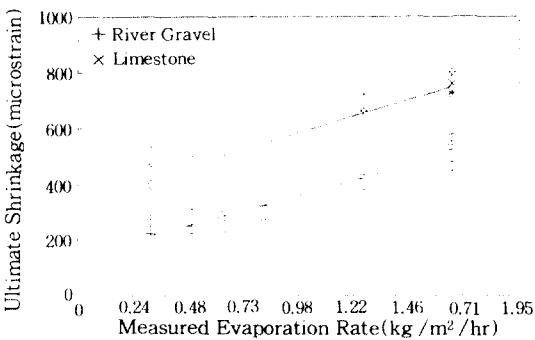
**Fig. 8** The shrinkage half time versus Evaporimeter reading

의 경우는 약간 비선형적인 증가를 보이고 있다. 이들 두가지 변수들은 사용 골재의 종류에 따라 각기 다른 별개의 관계를 갖고 있음을 볼 수 있다. 극한 건조수축의 경우는 상당히 명확한 관계를 보이고 있으나 반건조시간의 경우는 편차가 보다 큼을 알 수 있다.

이 극한건조수축과 반건조시간을 예측하기 위한 식을 일반화하기 위하여 최저 건조수축을 기준으로 한 상대적인 값들을 구하여, 도시한 것이 그림 9와 그림 10이다. 극한 건조수축의 경우 앞 그림에서 언급했던 1차식보다는 2차식을 이용하는 것이 더 정확하므로 이를 도입하였고, 반건조시간의 경우는 분수함수를 모델식으로 선정하였다.

### 3.4 건조수축의 설계도표

이러한 측정결과의 분석으로 부터 제작된 건조수축의 예측모델이 그림 11에 예측곡선과 식이 그림에 함께 제시되어 있다. 이 그림에서  $\alpha$ 는 극한 건조수축계수이고,  $\beta$ 는 반건조시간이다. 본 설계도표는 대상 콘크리트의 배합이 다를 경우에는 최소한 어느 한 경우에 대한 기초적 실험을 실시하거나 아니면 상대적인 값만을 알 수 있다. 만약 증발속도가 0.15인 환경조건이라면  $\alpha$ 는 도표에 제시된 식을 이용하여 계산하거나 도표로부터 1.18이란 값을 읽으면 되고,  $\beta$ 는 도표에 제시된 식을 이용하여 계산하거나 1.57이라는 값을 도표에서 읽으면 된다. 이렇게 산정된 계수들을 10°C, 65% RH 경우의 극한건조수축과 반건조시간에 각각



**Fig. 7** The calculated ultimate shrinkage versus Evaporimeter reading

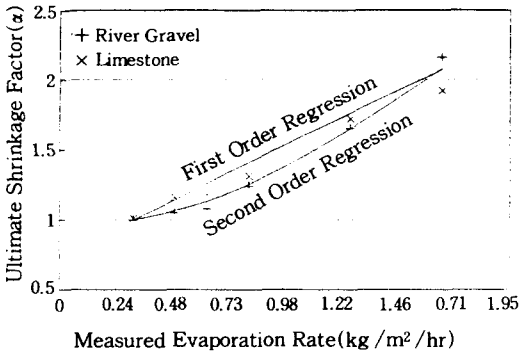


Fig. 9 The normalized ultimate shrinkage versus Evaporometer readings

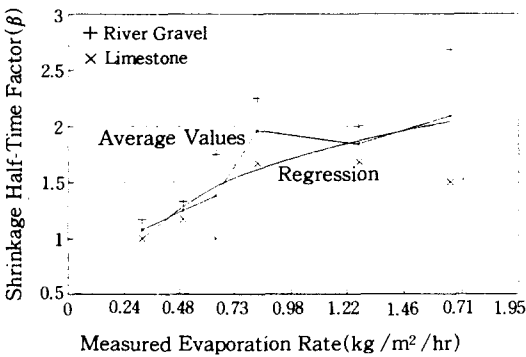


Fig. 10 The normalized shrinkage half time versus Evaporometer readings

곱하여 ACI의 건조수축식에 대입하면 건조수축을 계산할 수 있다.

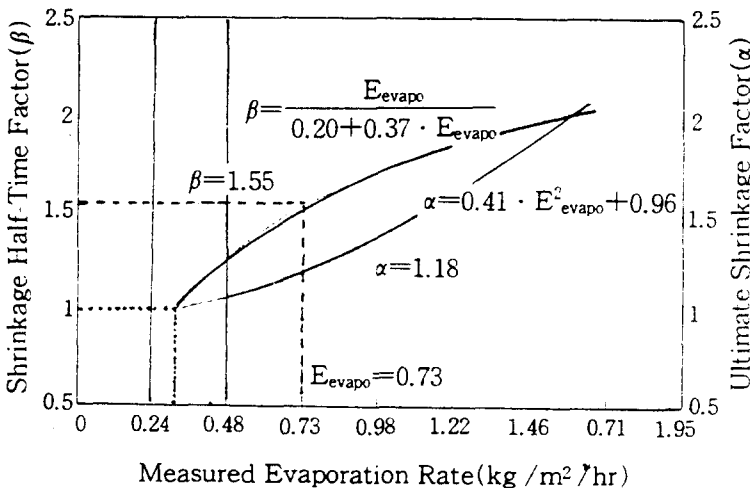


Fig. 11 The prediction chart for ultimate shrinkage factor and shrinkage half time factor as a function of Evaporometer reading

이 건조수축 설계도표는 특정한 환경조건에서의 증발속도와 건조수축이 측정되면 설계도표를 이용하여 건조수축을 예측할 수 있게 했다. 이 도표를 이용하여 석회암 쇄석 콘크리트의 경우 각각의 환경조건에 대한 건조수축곡선을 예측한 것이 그림 12에 나타나있다. 이 방법으로 예측된 건조수축을 보면 제일 낮은 온도인 10℃의 경우 초기에 건조수축의 역전을 볼 수 있으며, 이러한 사실은 실제 측정값에서 보았던 초기 건조수축의 측정값에서 역전이 발견된 이유가 단순히 측정오차에만 그 이유가 있었던 것은 아님을 암시한다. 또한 그림 13에는 사용 골재가 달라졌을 때와 배합수의 증감에 따른 예상 건조수축 곡선이 제시되어 있다.

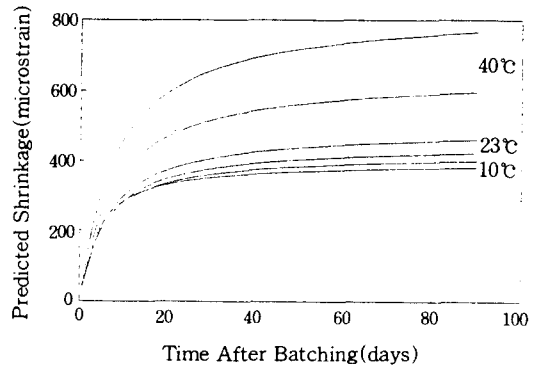


Fig. 12 The predicted shrinkage of limestone concrete for several different environmental condition



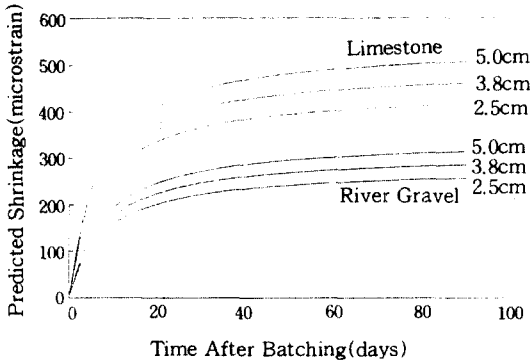


Fig. 13 The predicted shrinkage for different slump at 23°C, 30%RH.

## 참 고 문 헌

## 4. 결 론

환경적인 조건이 건조수축과 무게변화에 미치는 영향에 대한 실험결과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) PCA도표와 증발계로 측정된 증발속도는 서로 충분히 신뢰할 만한 상관성을 갖고 있으며, 이들 사이의 관계는 본문에서 제시된 식으로 표시될 수 있다.

2) 90일간의 건조수축의 거동에 미치는 환경적인 요인은 증발속도라는 단일변수로 집약될 수 있으며, 증발속도의 증가에 따라 건조수축이 증가함을 알 수 있다.

3) 쇄석과 강자갈을 사용할 때 사용재료의 종류에 따라 상당히 다른 건조수축이 관측되었으며, 이는 사용골재의 사용량, 표면질, 형상, 강성 등의 차이와 이에따른 배합수의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

4) 건조수축과 무게감소는 거의 직선적인 관계를 나타내고 있으며, 이 관계는 골재의 종류에 따라 다르게 나타났으나, 양생조건에는 크게 영향을 받지 않음을 보여 주었고, 사용 수량의 변동에 의한 영향으로 약간의 분산이 관측되었다.

5) 콘크리트의 건조수축 예측에 이용될 수 있는 ACI 건조수축식의 두개 변수를 증발속도의 함수로 표시하는 식과 도표를 개발하여, 이를 실제 적용하여 건조수축을 예측하는 방법을 제시하였다.

1. Gebler, S. "Predict Evaporation Rate and Reduce Plastic Shrinkage Cracks" Concrete International, vol. 5, No. 4, 1983. 4, pp. 19-22
2. ACI Committee 305, "Hot Weather Concreting" Journal of ACI, vol. 74, 1977. 8, pp. 317-322
3. Carrier, R. E. and Cardy, P. D., "Evaluating Effectiveness of Concrete Curing Compounds" Journal of Materials, JMLSA, vol. 5, No. 2, 1970. 6, pp. 294-302
4. Groth, L. D., Meyer, A. H. and Ledbetter, W. B., "Effects of Temperature, Wind and Humidity on Selected Curing Media" Research Report, 141-3, Texas Transportation Institute, College Station, 1974. 8
5. Wrbas, R. O., Ledbetter, W. B. and Meyer, A. H., "Laboratory Study on Effects of Environment and Construction Procedures on Concrete Pavement Surfaces" Research Report, 141-1, Texas Transportation Institute, College Station, 1972. 11
6. Kraai, P. P., "Proposed Field Test for Drying Shrinkage of Concrete" Concrete Construction, vol. 29, No. 7, 1984. 7, pp. 663-665
7. State of the Art Report, "Properties of Set Concrete at Early Ages" Materiaux et Constructions, vol. 14, 1981, pp. 398-450
8. Jones, T. R. Jr. and Hirsh, T. J., "A Report on the Physical Properties of Concrete at Early Ages" Research Report, RP-19, Texas Transportation Institute, College Station, 1961. 8
9. Van, D. J. and Boardman, V. R., "Plastic Shrinkage Cracking of Concrete" Proceedings, International RILEM Symposium on Concrete and Reinforced Concrete in Hot Countries, BRS Institute of Technology, Haifa, vol. 1, 1971, pp. 225-239
10. Hansen, T. C., "Effects of Wind on Creep and Drying Shrinkage of Hardened Cement Mortar and Concrete" Materials Research and Standards, vol. 6, No. 1, 1966. 1, pp. 16-19
11. Portland Cement Association, "Design and Control of Concrete Mixtures. Engineering

- Bulletin, 12th ed., Skokie, IL, 1968
12. Neville, A. M., "Properties of Concrete" 3rd ed, Pitman Publishing Inc. London, 1981
  13. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures" Design for Creep and Shrinkage in Concrete Structures, ACI Publication, vol. SP-27, Detroit, MI, 1982, pp. 193~300
  14. Almudaiheem, A. J. and Hansen W. "Effect of Specimen Size and Shape on Drying Shrinkage of Concrete" ACI Materials Journal, vol. 84, No. 2, 1987. 3-4, pp. 130~135
  15. Hansen, T. C. and Mattock, A. H., "Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete" Journal of ACI, vol. 63, No. 2, 1966. 2, pp. 267~289
  16. Portland Cement Association, "Prevention of Plastic Cracking in Concrete" Concrete Information Sheet, Structural and Railways Bureau, Chicago, IL, 1955
  17. Verbeck, G. J. and Helmuth, R. A. "Structure and Physical Properties of Cement Paste" Proceedings, 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Part III, Tokyo, 1968, pp. 376~384
  18. Edward, D. L., "Instrumentation for Field Determination of the Rate of Evaporation of Moisture from Portland Cement Concrete," Research Report, 3-20-70-028, Texas Highway Department, Austin, 1974. 7

(접수일자 : 1995. 11. 11)