



# 형상비 및 골재의 종류에 따른 콘크리트 시편의 건조수축특성 연구

## Drying Shrinkage of Concretes according to Different Volume-Surface Ratios and Aggregate Types

양 성 철\*      안 남 식\*\*      최 동 욱\*\*\*      강 승 민\*\*\*\*  
 Yang, Sung-Chul      Ahn, Nam-Shik      Choi, Dong-Uk      Kang, Seoung-Min

### Abstract

This study was performed to investigate the characteristics of drying shrinkage for concrete slabs as a project for Korean pavement design procedure. According to the volume-surface ratios and aggregate types, the experiments have been executed for 252 days. In order to simulate the volume-surface ratio of a real concrete pavement slab, three-layer epoxy coating and wrapping were used to prevent the evaporation at the part of specimen surfaces. As a result of preliminary test, coating and wrapping method was identified as reliable for three months.

According to the volume-surface ratio, the drying shrinkage of the concrete specimen using sandstone was measured 1.32 to 1.8 times higher than that of the limestone specimen. Comparing to the measured drying shrinkage strains and established ACI and CEB-FIP model equations, it turned out that those model equations were underestimated. Finally, considering the age and volume-surface ratios, the prediction equations of the drying shrinkage of concrete specimen were proposed through a multiple nonlinear regression analysis.

*Keywords : drying shrinkage, strains, volume-surface ratios, aggregate types*

### 요 지

본 연구는 한국형 포장설계법 과제의 일환으로 수행된 콘크리트 슬래브의 건조수축특성에 대한 연구로서 형상비 및 굵은 골재의 종류를 달리해 현재까지 252일간 수행된 실험결과이다. 실제 포장용 콘크리트 슬래브의 형상비에 접근하기 위한 방안으로 시편 일부 면의 수분 증발을 막기 위해 일부 면에 3중 코팅 처리와 랩 처리를 하였다. 예비실험결과 본 실험에서 채택한 수분방지 코팅 처리가 3달 정도까지는 신뢰성이 있음을 알 수 있었다. 동일한 형상비에서 사암

\* 정회원 · 홍익대학교 건축공학과 조교수 · 공학박사

\*\* 정회원 · 홍익대학교 건축공학과 조교수 · 공학박사

\*\*\* 정회원 · 한경대학교 건축공학과 부교수 · 공학박사

\*\*\*\* 정회원 · 홍익대학교 건축공학과 박사과정

을 사용한 콘크리트 시편의 건조수축이 석회암인 경우보다 형상비에 따라 1.32~1.80배 크게 측정되었다. 측정된 건조수축 변형률을 기존의 ACI와 CEB-FIP의 건조수축 모델식과 비교한 결과 두 식 모두 과소평가됨이 확인되었다. 최종적으로 재령 및 형상비 등을 고려한 다중 비선형 회귀분석을 통해 본 실험에 적합한 콘크리트시편의 건조수축 모델식을 제시하였다.

## 핵심용어 : 건조수축, 변형률, 모델식, 형상비, 굽은골재의 종류

### 1. 서론

콘크리트 구조물에 발생하는 균열은 심각한 구조적 문제뿐만 아니라, 부식의 원인이 될 수도 있다. 콘크리트에 균열을 발생시키는 요인은 다양하지만, 일반적으로 구조물에 가해지는 하중 및 콘크리트의 부피변화로 인한 인장응력의 발생 등을 들 수 있다.

건조수축의 경우는 현장에서 실제 구조물에 발생하는 확률이 상당히 높아 많은 관심을 유발시키는 요소 중의 하나로서, 콘크리트의 외부와 내부의 수축량의 차이로 인하여 인장응력이 발생하여 나타나는 균열이다. 예를 들면, 콘크리트 슬래브 등 부재의 단면 내에서도 표면은 건조수축이 크게 일어나고 내부는 그 수축량이 작게 일어나게 되므로 표면의 건조수축을 구속하게 된다. 그로 인하여 표면에는 인장응력이 유발되어 표면균열 발생의 원인이 된다. 이러한 표면에 생긴 균열은 초기에는 콘크리트 내부로는 관입되지 않으나, 지속적인 건조현상의 진행으로 인하여 콘크리트부재 내부로 깊숙이 전파될 수 있다.

건조수축에 관한 정량화 연구는 미국의 ACI나 유럽의 CEB-FIP 등을 통해 지난 30여 년간 여러 영향인자에 대해 개별적인 그러나 집약적으로 수많은 연구가 수행되었다(ACI 209R-92, 1992; Calson, 1937; Calson, 1938; Hansen et al., 1966; McDonald, 1993; Menezes, 1993; Muller et al., 1993). 또한 국내에서도 과거 15여 년간 여러 연구자들에 의해 건조수축 실험 및 확산계수와 부등 건조수축에 관한 수치해석방법의 정립 등 연구를 수행해 왔다(김진근 등, 1988; 김진근 등, 1998A; 김

진근 등, 1998B; 김진철, 2003). 우리 도로학회에서는 2000년에 조윤희 등(조윤희 등, 2000)이 콘크리트 포장의 잔존수명 추정을 위한 기초물성 정량화의 일환으로 국내 대표적인 5골재를 사용한 콘크리트 시편에 대해 콤퍼레이터 측정방법을 사용하여 건조수축을 측정하였다(조윤희 등, 2000; 이동근, 2002). 재령 60일까지의 실험결과 사암을 사용한 시편의 건조수축이 제일 크게 측정되었고 나머지는 유사하게 나타났다. 이와 같이 국내의 다수의 연구자들에 의해 많은 연구가 진행되어 왔으며 이러한 연구결과로 여러 가지 모델식이 제시되었지만 실제로 모델식은 실험치와 일치하지 않는 것이 일반적이다(김진근 등, 1988; 이동근 2002; 이효림, 2003). 또한 대부분의 연구가 보 구조물에 해당되는 표준시편 위주로 실험이 수행되어 왔으며, 이러한 실험결과는 포장용 콘크리트 슬래브의 건조수축과 비교해서 그 값이 상당히 큼을 알 수 있다(Burnham et al, 2001, 이효림, 2003).

최근에는 MnRoad의 계측으로부터 시험도로 현장에서의 부등건조수축을 스트레인 게이지를 통해 측정된 연구결과가 발표되었다(Burnham et al, 2001). 표면에서의 건조수축이 슬래브 하부의 건조수축보다 크게 측정되었고, 줄눈부위에서의 건조수축이 중앙부의 건조수축보다 크게 측정되었다. 슬래브 표면에서의 증발과 콘크리트 내부에서 습도의 이동 및 줄눈부의 거동에 기인된 결과이다. 그러나 현장에서의 실측되는 건조수축은 온도, 강우, 대기습도, 풍속 등 증발에 관련된 기상요소와 대기에 노출되는 콘크리트의 면적, 슬래브의 마찰, 줄눈부의 거

동 등에 영향을 받기 때문에 건조수축 자체의 영향만을 파악하기가 상당히 어려운 측면이 있다.

따라서 본 연구(김연복 등, 2003)에서는 대기중의 상대습도 등 다른 외부적인 요인이 배제된 실험실에서 포장용 콘크리트 슬래브의 건조수축 변화량에 초점을 맞추었으며, 동시에 여러 다른 시편의 형상비에 따른 건조수축의 변화를 측정하였다. 실제 포장용 콘크리트 슬래브의 형상비에 접근하기 위한 방안으로 시편의 일부 면의 수분 증발을 막기 위하여 일부 면에 3중 코팅 처리와 랩 처리를 하였다. 이렇게 준비된 슬래브를 항온항습실에 보관하여 1/1000 mm 정밀도까지 측정할 수 있는 다이얼 게이지를 이용하여 길이 변화를 측정하였다. 이러한 건조수축 실험을 두 가지 종류의 굵은 골재를 사용하여 시행하였다. 그리하여 실제 포장 슬래브의 형상비에 근접한 형상비를 갖는 슬래브 제작을 통하여, 형상비 증가에 따른 건조수축의 변화를 고찰하므로 형상비 증가와 건조수축 변화의 상관관계를 분석하였다.

## 2. 영향인자 및 모델식

건조수축에 영향을 주는 인자로는 콘크리트배합, 초기양생조건, 대기온도 및 상대습도, 부재형상 및 크기 등을 들 수 있다. 콘크리트배합으로는 시멘트 종류, 물-시멘트비, 공기량, 잔골재율, 시멘트량 등이 건조수축에 영향을 미치고 있다.

이러한 영향인자를 고려하여 건조수축을 예측하기 위한 여러 가지 모델들이 실험적으로 제시되었다. 국제적으로 널리 알려진 모델식으로는 ACI식, CEB-FIP식 및 B-P식(Bazant -Panula) 등이 있다. 우리나라의 경우 콘크리트표준시방서에서는 1999년 이전에는 ACI식을 사용하다가 현재는 CEB-FIP식을 사용하고 있는 실정이다(콘크리트표준시방서, 1999). 상기의 건조수축 모델식들은 앞에서 언급한 제반 영향인자를 고려하였으며 또한 방대한 실험데이터를 이용하여 모델식이 수립되었다. 특히 B-P식

의 경우에는 ACI식이나 CEB-FIP식에서 고려하지 못한 각 배합요소에 대한 중량, 확산계수, 온도 등이 추가적으로 고려되었으나, 너무 많은 영향인자를 모두 고려하여 만든 모델식인 관계로 모델식의 정확도가 많이 떨어지는 것으로 알려졌다(McDonald, 1993). 한편, McDonald는 건조수축 모델식을 수립할 때 요구되는 사항으로서 모델식의 정확성, 간편성, 이론과의 부합성, 초기재령의 데이터로부터의 장기적인 데이터의 예측성 등을 언급하였다. 따라서 본 논문에서는 다른 모델식보다는 간편하게 수립된 ACI식과 CEB-FIP식에 포함된 영향인자의 민감도 분석을 실시하여, 영향을 가장 많이 미치는 인자를 중심으로 실험계획을 수립하였다.

### 2.1 ACI식

현 ACI식은 ACI 209 위원회(ACI 209R-92)에서 92년에 작성하였고 97년에 재차 승인한 모델식이다. ACI 건조수축 모델식은 다음과 같다.

$$\epsilon_s(t-t_s) = \begin{cases} \frac{(t-t_s)}{35+(t-t_s)} \epsilon_{su} & (\text{습윤양생: } t_s \geq 7\text{days}) \\ \frac{(t-t_s)}{55+(t-t_s)} \epsilon_{su} & (\text{증기양생: } t_s \geq 1\sim 3\text{days}) \end{cases}$$

여기서,  $t$ ,  $t_s$  : 재령 및 초기습윤 양생기간(일)

$$\epsilon_s = -(780 \gamma_{MC} \gamma_{RH} \gamma_{VS} \gamma_{SL} \gamma_{FA} \gamma_{CC} \gamma_{AC}) \times 10^{-6}$$

$\gamma_{MC}$  : 초기 습윤양생조건에 대한 보정계수

$$\gamma_{RH} = \begin{cases} 1.4 - 0.01RH & (40\% \leq RH \leq 80\%) \\ 3.0 - 0.03RH & (80\% \leq RH \leq 100\%) \end{cases}$$

$RH$  : 대기의 상대습도

$$\gamma_{VS} = \max(0.2, 1.2 \exp(-0.00472(V/S)))$$

$V/S$  (형상비): 콘크리트의 체적-표면적 비로서 부재의 형상 및 크기를 나타냄, mm

$$\gamma_{SL} = 0.89 + 0.00161s$$

$s$  : 측정된 슬러프, mm

$$\gamma_{FA} = \begin{cases} 0.30 + 0.014f & (f \leq 50\%) \\ 0.90 + 0.002f & (f > 50\%) \end{cases}$$

$f$  : 전체 골재에 대한 잔골재의 비(%)

$$\gamma_{CC} = 0.75 + 0.00061c$$



$c$  : 단위 시멘트량 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $\gamma_{AC} = 0.95 + 0.008a$   
 $a$  : 공기량 (%)

## 2.2 CEB-FIP식

CEB-FIP식은 1978에 처음 제시되었으며 지금 사용되고 있는 모델식은 1990년도에 제정되었다. CEB-FIP 건조수축 모델식은 다음과 같다 (이효람, 2003).

$$\epsilon_{cs}(t, t_s) = \epsilon_{cso} \beta_s(t - t_s)$$

여기서,  $\epsilon_{cso} = \epsilon_s(f_{cm})\beta_{RH}$  로서 기본 수축계수

$$\epsilon_s(f_{cm}) = [160 + 10\beta_{sc}(9 - f_{cm}/f_{cmo})] \times 10^{-6}$$

$\beta_{sc}$  : 시멘트 종류에 따른 계수

$f_{cm}$  : 재령 28일에 콘크리트의 압축강도 (MPa)

$f_{cmo} : 10\text{MPa} = 101.97\text{kgf}/\text{cm}^2$

$$\beta_{RH} = -1.55[1 - (RH/100)^3] \quad 40\% \leq RH \leq 99\%$$

$$= +0.25 \quad RH \geq 99\%$$

$\beta_s$  : 시간에 따른 수축발현 설명계수

$$\beta_s(t - t_s) = \left[ \frac{(t - t_s)}{350(h/h_0)^2 + (t - t_s)} \right]^{0.5}$$

$$h = \frac{2 \times \text{단면적}}{\text{대기와 접하는 주변길이}} = 2 \times V/S, \text{ mm}$$

$h_0$  : 기준 시편의  $h = 100\text{mm}$

## 2.3 모델식에 의한 영향인자

표 1과 같은 고속도로에 사용되는 일반적인 포장용 콘크리트의 배합 및 양생조건을 토대로 ACI식과 CEB-FIP식에서 사용되는 건조수축 인자들의 영향 정도를 민감도분석을 통해 파악하였다. 표 1의 대기 중의 상대습도는 우리나라 과거 10년의 월평균 상대습도의 최저치(강원)와 최고치(제주)이다(기상청 데이터에서 발췌). 이에 대한 권역별 월평균 상대습도의 최고치와 최저치는 그림 1에 도식화되었다. 표 1의  $V/S=25$  ( $h=50$ )mm는 건조수축용 표준공시체 ( $10 \times 10 \times 40$ )mm를,  $V/S=300$  ( $h=600$ )mm는 두께 30cm의 포장용 슬래브 ( $600 \times 360 \times 30$ )mm를 각각 나타낸다.

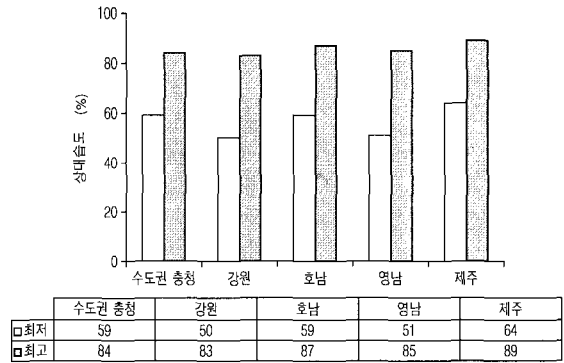


그림 1. 권역별 10년간 대기중의 월평균 상대습도의 최저-최고치

표 1. 포장용 콘크리트의 배합, 양생조건 및 형상비에 따른 보정계수 민감도분석결과

구분	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	잔골재율 (%)	시멘트량 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	압축강도 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	상대습도 (%)	$V/S^*(h^b)$ (mm)
배합 및 환경 인자 등 변화율	0-50	4-7	36-44	300-350	300-400	50-89	25-300(50-600)
ACI식 보정계수 변화율	0.92-1.00	0.97-1.00	0.88-1.00	0.97-1.00	-	2.70-1.00	3.69-1.00
CEB-FIP식 보정계수 변화율	-	-	-	-	1.12-1.00	2.96-1.00	그림 4 참조

a. ACI식에서 사용되는 부피/표면적의 비

b. CEB-FIP식에서 사용되는 h는 ACI식의  $2 \times V/S$ 에 해당



표 1의 입력변수로서 사용된 보정계수의 변화율은 배합, 환경인자 및 형상비의 변화율에 의해 ACI식과 CEB-FIP식으로 계산되어진 각 영향인자의 건조수축 보정계수를 각 영향인자의 최고치에 의해 계산되어진 건조수축 보정계수로 나눈 결과를 보여주고 있다. 표 1의 결과와 같이 현재 국내에서 슬러폼 페이 버로 포설되는 포장용 콘크리트의 배합조건 중 건조수축에 가장 많이 영향을 주는 인자는 잔골재율로서 보정계수의 차이도 12% 미만을 보이고 있다.

그러나 상대습도(50-89%)의 차이는 ACI식과 CEB-FIP식의 경우 각각 2.70 및 2.96배의 차이를 보이고 있다. 더욱이 ACI식 모델식에 의하면 건조수축용 표준공시체를 사용할 경우 실제 포장슬래브의 건조수축보다 3.69배 정도 과대평가될 수 있음을 나타낸다. 실제로 MnRoad 현장에서 실측한 그림 2의 건조수축 변형률(Burnham et al., 2001)에서 보듯 이 일반 실험실에서 표준 시편을 사용하여 측정된 결과(그림 9~12 참조)보다 건조수축 변형률이 상당히 작음을 알 수 있다. 이는 포장용 콘크리트 슬래브의 형상비(V/S)가 표준시편보다 크기 때문이다. 현장에서 상대습도의 변화는 이른 아침 100%에 달하는 높은 대기 상대습도로 매일 아침 슬래브 표면에서 건조수축의 회복이 일어나는 것에 기인하며 또한 그림 3에서 암시하는 바와 같이 일정한 평균 상대습도에서 측정된 건조수축보다 작은 것도 원인으로 작용한다(Muller et al, 1993).

한편, ACI식에서는 재령(t)과 형상비(V/S)를 각각 분리하여 곱셈으로 연관시키고 있으나, CEB-FIP식에서 두개의 변수가  $\beta_s(t-t_s)$  식 안에 같이 포함된 것이 두 모델식의 근본적인 차이점이 된다. 다음의 그림 4에는 두 모델식에 포함된 형상비에 따른 건조수축의 변화율 정도를 도식화하였다. 그림 4에서는 사각형 심볼은 ACI식을 나타내며 각 재령별 곡선은 CEB-FIP식을 나타낸다.

이러한 점에 착안하여 본 연구에서는 건조수축용 시편의 형상비 (V/S)를 달리하여 건조수축이 변화되는 정도를 파악하였다. 또한 골재의 종류로서 석회암 및

사암을 사용한 콘크리트의 건조수축을 비교하였다.

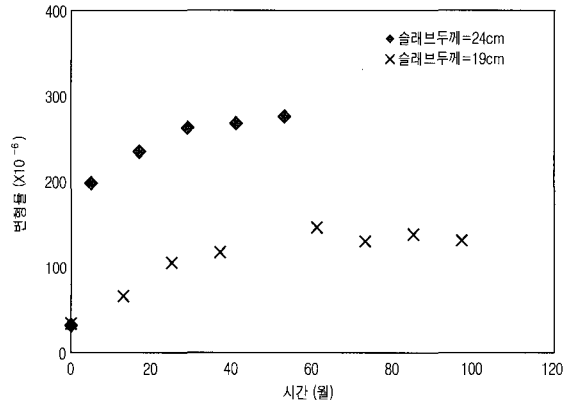


그림 2. MnRoad에서 측정한 포장용 콘크리트 슬래브의 건조수축 측정결과

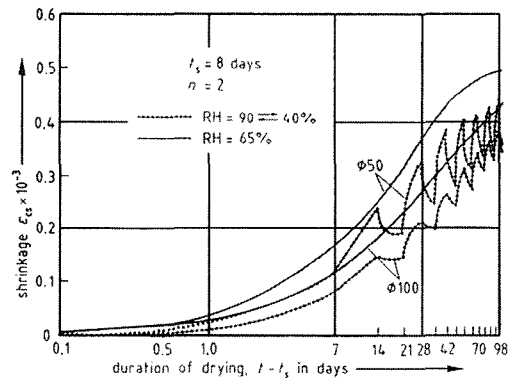


그림 3. 상대습도의 변동에 따른 콘크리트 시편의 건조수축 변화

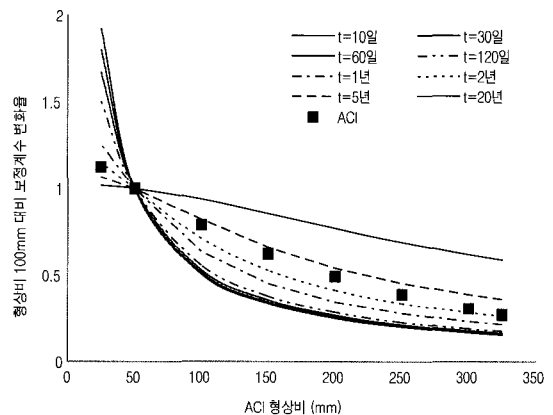


그림 4. 형상비에 따른 ACI식과 CEB-FIP식의 보정계수 변화



### 3. 실험개요

표준공시체의 건조수축과 포장용 콘크리트 슬래브의 건조수축을 비교하기 위해, 시편의 형상비(V/S)를 달리하여 실험을 실시하였다. 시편크기의 제약상 포장용 콘크리트 슬래브의 형상비를 모사하기 위해서, 원하는 표면만으로 수분이 발산되도록 에폭시도포하여 수분발산을 방지하였다. 슬래브 판에서 수분방지 코팅의 실질적인 효과를 알아보기 위하여 작은 큐브에 에폭시도포면적을 달리하여 무게를 측정 비교하여 실험의 정확성을 알아보았다. 또한, 압축강도 및 탄성계수 실험을 수행하여 기본적 역학적 특성을 알아보았다.

#### 3.1 실험내용

##### 3.1.1 실험변수

건조수축 실험변수는 두 종류의 골재를 사용한 시편의 수분 증발 면과 시편의 크기를 달리하므로 형상비에 변화를 주었고 환경조건은 동일하게 하였다. 또한, 수분방지 코팅의 실질적인 효과를 알아보기 위하여 작은 큐브의 수분 증발 면을 변화하였다. 골재는 석회암과 사암을 사용하였으며, 시편의 크기는 10×40×10cm, 10×40×30cm, 10×60×40cm로 변화하였고, 수분 증발 면은 6, 4, 2면으로 하여, 형상비가 22.2, 40, 85.7, 20cm로 변화되었다. 형상비 산정시 ACI나 CEB-FIP에서는 단면적 방향으로의 수분증발을 무시하고 산정하였으나 본 연구에서는 이를 포함하여 산정하였다. 참고로, ACI 모델식에 적용하는 경우의 형상비는 각각 25, 50, 150, 20cm

가 된다. 작은 큐브는 10×10×10cm의 크기로서, 수분 증발 면은 6, 4, 0면으로 하여 수분 증발을 막기 위한 코팅제의 실질적인 효과를 검증하고자 하였다.

##### 3.1.2 사용재료 및 배합설계

시멘트는 보통포틀랜드 시멘트(비중 3.15, 비표면적 3315 cm<sup>2</sup>/g)를, 잔골재로는 금강산 잔골재(비중 2.63, F.M. 2.87, 흡수율 1.52 %)를 사용하였다. 본 연구에 사용된 두 종류의 굵은 골재는 석회암 및 사암으로서, 골재 최대치수는 32mm이었다.

배합은 석회암과 사암에 대해 한국도로공사의 고속도로공사 전문시방서 기준(슬럼프값 2.5cm 이하, 공기량 4~7%)에 맞도록 시험배합을 통해 최적의 배합설계를 결정하였으며, 표 2에 나타나있다.

건조수축 실험에서는 실제 구조물의 슬래브 판의 건조수축 거동과 동일한 조건으로 하고자 하였으며, 원하는 면으로만 수분 증발을 할 수 있도록 수분증발 방지 코팅재료를 도포하였다. 수분증발 방지 코팅재로서는 U&V-H(A,B)를 사용하였으며, 이는 콘크리트 시편이 건조되지 않은 상태에서 도포를 하기 때문에 수중접착 에폭시를 사용한 것이다.

#### 3.2 시험체 제작 및 실험방법

##### 3.2.1 시편 제작

본 실험에 사용되는 시편은 포장용 콘크리트 슬래브 및 형상비에 따른 시편의 건조수축에 대해 알아보 고자 그림 5와 같이 제작하였다. 그림 5(a)는 수축 측정용 표준 막대로서 6면 수분 증발이 일어나는 시

표 2. 석회암과 사암의 콘크리트 배합설계

종류	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	물시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위중량(kg/m <sup>3</sup> )				
					혼합수	시멘트	잔골재	굵은 골재	AE표준 감수제 (g)
석회암	0~2.5	5.0	45.7	43.4	144	315	822	1,073	788
사암	0~2.5	4.5	45.7	43.7	144	315	822	1,057	788

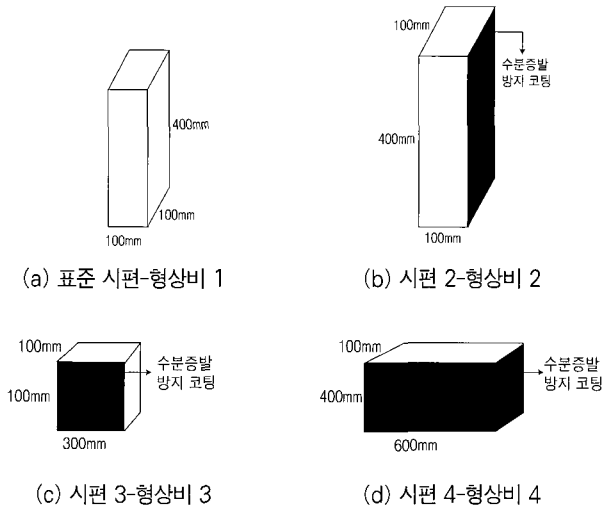


그림 5. 건조수축 측정용 시편의 형상

표 3. 콘크리트 시편의 형상비

구 분	포장슬래브	표준 막대 (형상비1)	형상비2	형상비3	형상비4
V, mm <sup>3</sup>	6.48 × 10 <sup>9</sup>	4.0 × 10 <sup>6</sup>	0.4 × 10 <sup>7</sup>	1.2 × 10 <sup>7</sup>	2.4 × 10 <sup>7</sup>
S, mm <sup>3</sup>	2.16 × 10 <sup>7</sup>	1.8 × 10 <sup>5</sup>	1.0 × 10 <sup>5</sup>	1.4 × 10 <sup>5</sup>	1.2 × 10 <sup>5</sup>
V/S, mm	300	22.2	40	85.7	200
수분 증발	1면	6면	4면	4면	2면

편이다. 그림 5(b)는 4면 수분증발이 발생하도록 2면(검은면)을 코팅하였고, 그림 5(c) 역시 4면에 수분 증발이 일어나도록 2면에만 코팅을 하였다. 그림 5(d)는 2면에서만 수분 증발이 일어나도록 4면에 코팅처리를 하였다. 코팅재료는 수분증발 방지 코팅재료인 U&V-H(A,B)를 사용하여 3중 코팅 후 랩으로 씌웠다. 본 실험에 사용된 시편의 형상비를 표 3에 정리하였다. 초기양생은 7일 양생으로, 20℃ 및 100% 상대습도를 유지하였다.

표 3에 정리한 바와 같이 실제 포장슬래브의 형상비는 300이지만 KS규준에 의한 표준막대를 사용할

경우 형상비는 불과 10%도 안 되는 22.2에 그침을 알 수 있다. 이것은 KS규준에 의한 건조수축 시험으로는 실제 포장슬래브의 건조수축을 예측하기에 무리가 있음을 의미하는 것이다. 따라서 그 대안으로서 슬래브의 축소형태를 제작하고 일부의 표면에 수분 증발 방지 코팅제를 도포하여 형상비를 증가시켰다. 그러나 여전히 실제 포장 슬래브의 형상비에는 모자라지만 형상비의 증가에 따른 건조수축의 변화를 고찰하면 형상비와 건조수축의 상관관계를 알 수 있을 것으로 사료되어 본 표와 같이 시험체를 제작하여 계측을 수행하였다.



### 3.2.2 실험방법

건조수축실험은 한국산업규격 KS F 2424에 제시되어 있는 방법 중에서 다이얼 게이지 방법을 사용하여 실험하였다. 다이얼 게이지는 1/100cm 정밀도까지 측정할 수 있다. 다이얼 게이지를 이용한 건조수축의 실험방법은 다음과 같다.

우선 위에서 제시한 시편의 형상을 만든 다음, 공시체를  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 수중에서 양생하여 재령 7일이 되었을 때 공시체에 각각 코팅과 랩을 씌워서 시편의 건조 면을 표 3의 형상비와 같게 만든다. 그리고 공시체를 향한 항습의 설비를 가진 실내 챔버( $20^\circ\text{C}$ , 60%)에 보관하여 공시체의 상단에 다이얼 게이지를

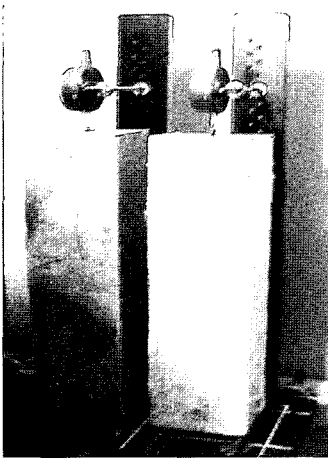


그림 6. 다이얼게이지를 설치한 시편

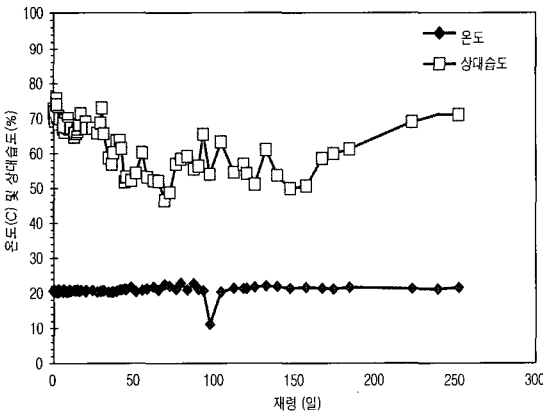


그림 7. 실내 챔버의 온도 및 상대습도 변화

설치한 후 길이 변화 값을 측정한다. 그림 6은 다이얼 게이지를 설치한 시편의 모습이며, 그림 7은 실내 챔버의 온도 및 상대습도의 변화를 보여준다.

## 4. 실험결과 및 고찰

본 실험에서 건조수축의 경우 실제 포장과 비슷한 형상비를 갖는 슬래브를 이용하여 형상비의 증가에 따른 건조수축의 변화를 고찰하여 형상비와 건조수축의 상관관계를 분석하였다. 또한 골재의 종류를 달리하여 석회암과 사암이 사용된 콘크리트 시편의 건조수축 변화를 비교하였다.

### 4.1 기본물성 결과

사용된 석회암, 사암 골재에 대한 비중, 흡수율, No. 200체 통과량은 다음 표 4와 같다. 실험에 사용된 재료는 KS F 2405에 의하여 압축강도 실험을 수행하였고,  $150 \times 300\text{mm}$  원주형 공시체를 3개씩 제작하여 그 평균값을 사용하였다. 탄성계수 실험은  $150 \times 300\text{mm}$  원주형 공시체를 사용하여 KS F 2438의 규정에 의해 실시하였다. 표 5는 건조수축 시험에 사용된 석회암, 사암 골재에 대한 콘크리트 28일 압축강도 및 탄성계수 측정결과를 나타내고 있다(김연복 등, 2003).

표 4. 골재의 기본 물성 결과

골재종류	비중	흡수율(%)	0.08mm(No. 200)체 통과량(%)
석회암	2.73	0.46	0.05
사암	2.68	0.64	0.03

표 5. 골재별 압축강도 및 탄성계수 실험결과

골재종류	평균 압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	평균 탄성계수(kgf/cm <sup>2</sup> )
석회암	366	$2.23 \times 10^5$
사암	362	$2.17 \times 10^5$





## 4.2 건조수축 실험결과 및 분석

### 4.2.1 큐브를 통한 수분방지 코팅의 신뢰성 검증

본 실험에서는 형상비에 따라 시편마다 수분이 증발되는 면이 다르기 때문에 보다 정확한 실험을 하기 위하여 시편에 수분증발이 일어나지 않는 면에 대해서는 3중 코팅처리와 랩 처리를 하였다. 이러한 처리가 본 실험에 있어서 얼마만큼의 신뢰성을 기여할 수 있는지를 알아보기 위하여 각 골재별로 10×10×10cm의 작은 큐브 3개씩을 준비하였다. 3개의 큐브 중 하나는 코팅 처리를 전혀 하지 않은 것이고 (Cube), 다른 하나는 2면을 코팅 처리한 것이며 (Type 1), 마지막으로 하나는 6면 전체를 모두 코팅 처리한 것이다 (Type 2). 그리고 본 실험의 시편과 동일한 환경에서 보관하였다. 실험에 입할 때에 각

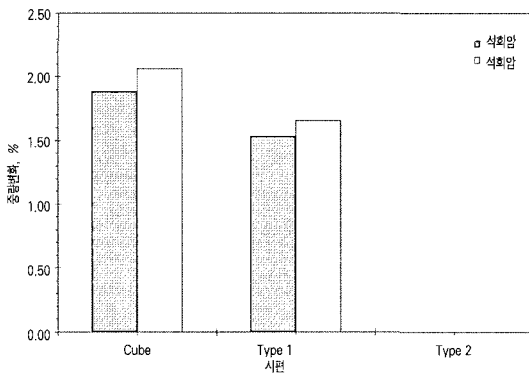
큐브의 무게를 측정 한 후, 20일이 지난 후에 다시 무게를 측정해 보았다. 그림 8에서 보는 바와 같이 예상한 결과대로 전면을 모두 코팅 처리한 큐브의 경우 전혀 줄어들지 않았음을 알 수 있었다. 그리고 코팅 처리를 전혀 하지 않은 큐브의 측정 결과 사암이 약간 더 감소하였고 평균 1.98% 무게 감소를 보였다. 또한 90일 경과 후에는 Cube는 평균 2.73%, Type 1은 2.40%, Type 2는 0.09%의 중량변화를 보이고 있다. 이러한 측정 결과로 인하여 본 실험에서 채택한 수분방지 코팅 처리가 3달 정도까지는 신뢰성이 있음을 알 수 있다. Menezes 등이 수행한 수분방지 코팅실험에서도 100일 정도까지 그 효력이 있음을 보여주었다(Menezes 등, 1993).

### 4.2.2 골재별 건조수축의 변화

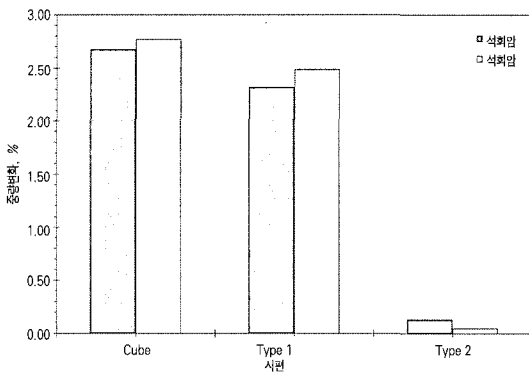
그림 9에서는 각 형상비 별로 석회암과 사암의 건조수축을 비교하였다. 그림 9(a)는 형상비가 22.2mm 일 때의 석회암과 사암의 건조수축을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 사암의 경우가 같은 재령일 때에 변형률이 더 크게 측정됨을 알 수 있다. 이는 석회암의 비중이 사암보다 비중이 크고 흡수율은 더 작기 때문인 것으로 판단된다(ACI 209R-92, 1997; 이동근, 2001; 이효림, 2003). 골재별 건조수축의 차이는 그림 9(a)에서 그림 9(d)로 형상비가 22.2mm에서 200mm로 증가함에 따라 각각 1.62배, 1.80배, 1.49배, 1.32배의 차이를 나타내고 있어 같은 형상비지만 골재의 종류에 따라서 건조수축이 다르게 측정됨을 알 수 있다.

### 4.2.3 형상비에 따른 건조수축의 변화 및 모델식

그림 10(a)는 석회암의 경우에 각 형상비에 따른 건조수축의 변화를 ACI 모델식을 사용하여 비교하였다. 그림에서와 같이 실측에 비해 ACI 모델식이 상당히 과소평가함을 보여준다. 마찬가지로 그림 10(b)는 CEB-FIP 모델식과 비교하였는데, ACI 모델식보다 더 차이가 남을 보여준다. 이는 그림 11에서 도식화한 것과 같이 ACI 모델식보다 CEB-FIP

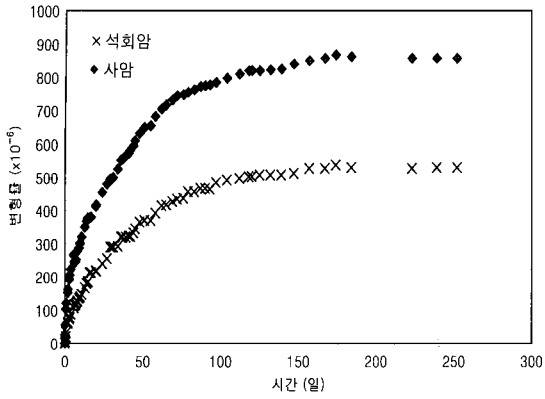
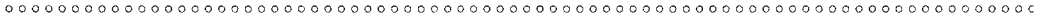


(a) 20일 경과

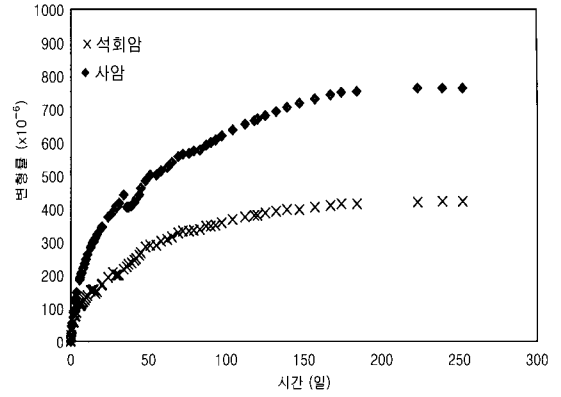


(b) 90일 경과

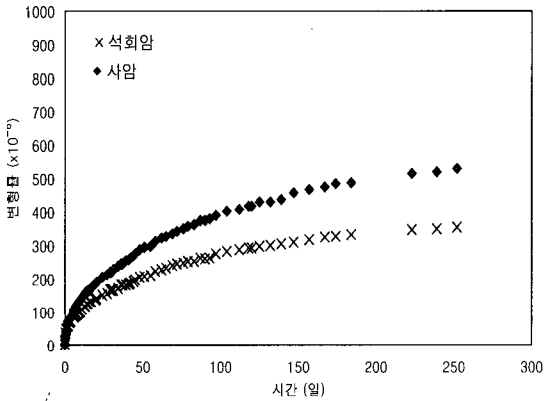
그림 8. 큐브의 무게 측정결과



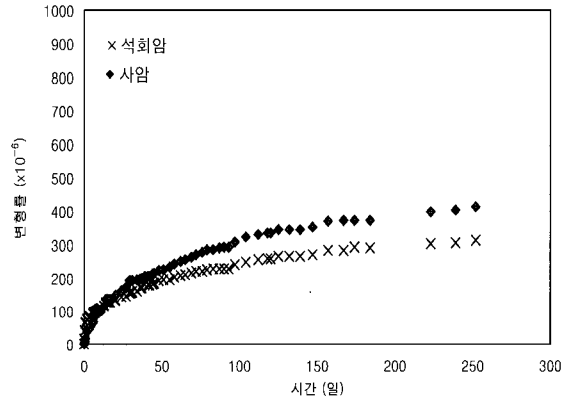
(a) 형상비 22.2mm



(b) 형상비 40mm

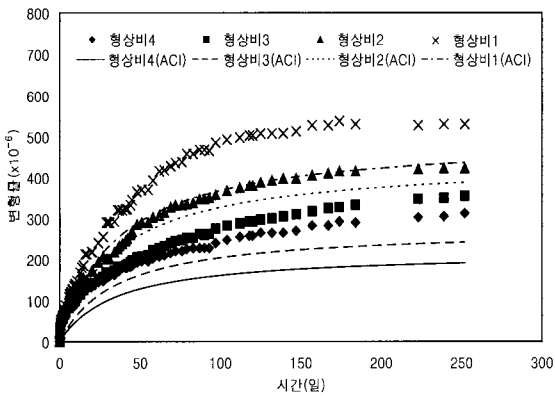


(c) 형상비 85.7mm

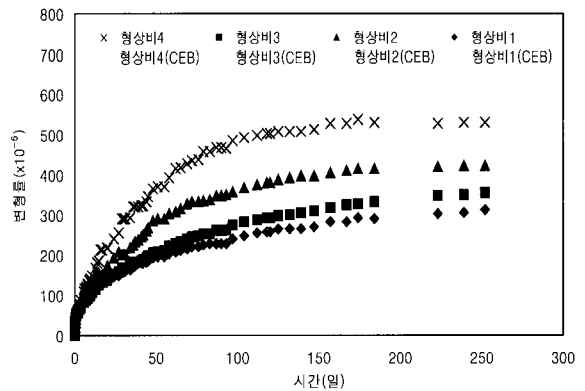


(d) 형상비 200mm

그림 9. 골재의 종류에 따른 건조수축 측정결과

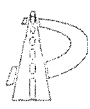


(a) ACI 모델식과 비교



(b) CEB-FIP 모델식과 비교

그림 10. 석회암 골재를 사용한 시편의 형상비에 따른 건조수축과 각 모델식과의 비교



모델식의 건조수축 변형률이 형상비 1인 경우를 제외하고는 과소평가되고 있음을 알 수 있다. 형상비 1은 두 모델식의 경우 표준 시편에 해당되므로 비교적 회귀분석식이 잘 맞으리라 추측할 수 있다.

형상비에 따른 건조수축 측정결과를 가지고 재령(t)과 형상비(V/S)를 변수로한 다중 비선형 회귀분석을 수행한 결과, 현행 ACI 건조수축 모델식 형태의  $\frac{a_1 t}{a_2 + t} \times \exp(-a_3 V/S)$  보다는 크리프의 모델식 형태인

$\frac{a_1 t}{a_2 + t} \times [1 + a_3 \exp(-a_4 V/S)]$  모델식이 더 큰 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 다음의 식은 각각 석회암과 사암을 사용한 콘크리트 시편의 형상비를 고려한 재령별 건조수축 변형률( $\times 10^{-6}$ ) 모델식이다.

$$\epsilon_s(t) = \frac{353.1t}{37.82 + t} [1 + 1.758 \exp(-0.0355V/S)] \quad (\text{석회암})$$

$$\epsilon_s(t) = \frac{419.9t}{35.36 + t} [1 + 2.382 \exp(-0.0211V/S)] \quad (\text{사암})$$

그림 12(a)는 석회암 골재를 사용한 시편의 형상비에 따른 건조수축 측정결과와 다중 비선형 회귀분석 모델식으로부터 구한 재령별 건조수축변화율이 각각의 형상비의 따라서 결정계수 R<sup>2</sup>이 0.866에서 0.990까지 나타나 비교적 상관관계가 높음을 알 수 있다. 그림 12(b)는 사암 골재를 사용한 경우는 형상비에 따라 결정계수의 값이 0.944~0.978 정도로 나타났다. 재령 252일 이후에도 계속해서 건조수축 변형률을 측정하고 있으며 향후에 얻어진 결를 바탕으로 모델식으로부터 구한 결과와 비교분석할 예정이다.

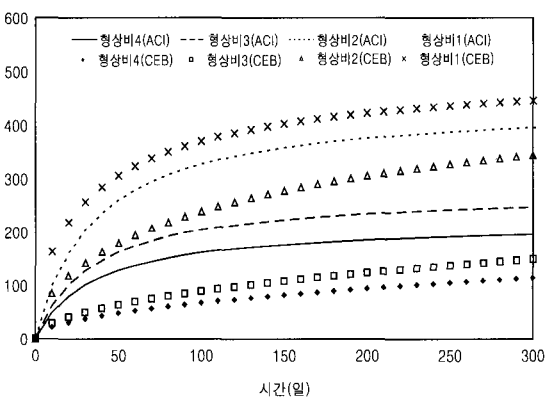
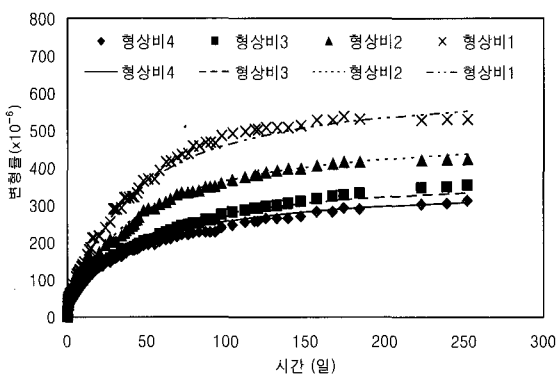
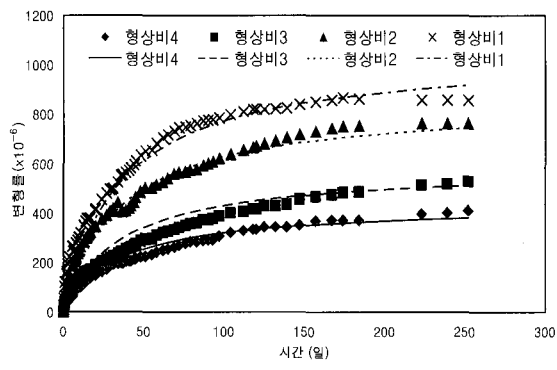


그림 11. 본 실험의 경우 형상비에 따른 ACI 모델식과 CEB-FIP 모델식과의 비교



(a) 석회암



(b) 사암

그림 12. 형상비에 따른 재령별 건조수축 측정결과와 모델식으로 얻은 결과의 비교



## 5. 결 론

본 연구에서는 포장용 콘크리트 슬래브의 건조수축특성에 대한 연구로서 형상비 및 굽은 골재의 종류를 달리해 시편을 제작해 항온항습실에서 건조수축 측정실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 수분증발이 일어나지 않는 면을 모사한 3중 코팅 처리와 랩 처리 90일 경과 후에 실시된 예비실험에서 0.09%의 중량변화만을 보이고 있어, 본 실험에서 채택한 수분방지 코팅 처리가 3달 정도까지는 신뢰성이 있음을 알 수 있었다.
2. 동일 굽은 골재를 사용하여 시편을 제작한 경우 빔시편에 비해 포장용 콘크리트 슬래브처럼 형상비(V/S)가 증가할수록 건조수축이 줄어들음을 확인하였다.
3. 동일한 형상비에서 사암을 사용한 콘크리트 시편의 건조수축이 석회암인 경우보다 형상비에 따라 1.32~1.80배 크게 측정되었다.
4. 각 골재별로 형상비에 따른 변형률을 ACI와 CEB-FIP의 건조수축 모델식과 비교한 결과 두 식 모두 과소평가됨이 확인되었다.
5. 최종적으로 재령 및 형상비 등을 고려한 다중 비선형 회귀분석을 통해 석회암과 사암이 사용된 콘크리트시편의 건조수축 모델식을 제시하였다.

## 감사의 글

본 논문은 건설교통부에서 지원하는 “한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 일부로, 연구를 가능케 한 건설교통부에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김연복 등 (2003), “콘크리트 포장 설계법 개발,” 1 단계 2차년도 최종보고서, 건설교통부
2. 김진근, 양은익, 권국현(1988), “콘크리트 건조수축에 관한 실험과 통계적 예측,” 대한건축학회논문집,

- 제4권 제3호, pp.131-139
3. 김진근, 이철성(1998), “자체건조를 고려한 초기재령 콘크리트의 수분확산,” 한국콘크리트학회논문집, 제 10권 제5호, pp. 189-195
4. 김진근, 이철성(1998), “자체건조를 고려한 초기재령 콘크리트의 부등건조수축,” 콘크리트학회논문집, 제 10권 제5호, pp. 197-204
5. 김진철(2003), “콘크리트의 건조수축 메커니즘과 예측모델,” 도로포장공학회지, 제5권 제3호, pp.32-41
6. 이동근(2002), “골재종류에 따른 CRCP 콘크리트 포장의 건조수축 특성연구,” 석사학위논문, 중앙대학교
7. 이효림(2003), “환경하중에 의한 콘크리트의 재료특성 연구,” 석사학위논문, 홍익대학교
8. 조윤호 등 (2000), “콘크리트 포장의 잔존수명 추정을 위한 기초물성연구,” 한국도로공사 연구보고서, 한국도로공사
9. 한국콘크리트학회(1999), “콘크리트표준시방서,” 한국콘크리트학회
10. ACI 209R-92(1997), “Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures,” pp.1-47
11. Burnham, T. and Koubaa, A.(2001), “A New Approach to Estimate the In-situ Thermal Coefficient and Drying Shrinkage for Jointed Concrete Pavement,” *Proceedings of 7th International Conference on Concrete Pavements*, Volume 1, pp. 313-332
12. Calson, R. W.(1937), “Drying Shrinkage of Large Concrete Members”, *ACI Journal, Proceedings, Vol.33, No.3*, pp.327-336
13. Calson, R. W.(1938), “Drying Shrinkage of Concrete as Affected by Many Factor”, *Proceedings, ASTM, Vol.38, Part 11*, pp.419-437
14. Hansen, T. C., and Mattock, A. H.(1966), “Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete”, *ACI*



- .....
- Journal, Proceedings Vol.63, No.2, pp.267-290*
15. McDonald, D.(1993), "Development of a simplified Code Procedure for the Prediction of Shrinkage and Creep," *Creep and Shrinkage of Concrete, Proceedings of the Fifth International Symposium, Barcelona, Spain, pp. 637-647*
16. Menezes, N.C. and Trinb, J.K.(1993), "Influence of Water Content on the Time-Dependent Properties of Concrete, Creep and Shrinkage of Concrete, *Proceedings of the Fifth International Symposium, Barcelona, Spain, pp. 277-282*
17. Muller, H.S. and Pristl, M.(1993), "Creep and Shrinkage of Concrete at Variable Ambient Conditions," *Creep and Shrinkage of Concrete, Proceedings of the Fifth International Symposium, Barcelona, Spain, pp. 15-26*
- 〈접수 : 2004. 7. 30〉