콘크리트의 건조수축 메커니즘과 예측모델

김 진 철*

1. 개요

콘크리트 구조물은 타설후 경화과정에서 외부 환경에 노출되면 정도의 차이는 있으나 필연적으로 체적변화를 일으킨다. 과도한 체적변화는 콘크리트에 균열을 발생시키며 그 원인으로써 온도강하와 건조수축으로 구분할 수 있다. 이중 온도강하에 의한 균열은 주로 여름철과 같이 온도가 높은 계절에 타설된 콘크리트에서 많이 발생하므로 생산설비와 사용재료의 온도를 낮추거나 파이프 쿨링과 같은 시공방법의 개선으로 균열발생을 억제하고 있다. 또 다른 요인인 건조수축에 의한 균열은 온도가 높은 여름철에 가장 심하게 발생되지만 습도가 낮고 바람이 심한 봄, 가을에도 지속적으로 발생되므로 이를 억제하기 위하여 콘크리트 타설 후 건조수축을 억제하기 위한 다양한 방법이 사용되고 있다.

콘크리트 구조물이 모든 방향에 대하여 구속되어 있지 않다면 균일한 체적변화가 일어나므로 균열을 발생시키지 않는다. 그러나 현실적으로 이러한 구조물은 존재할 수 없으며, 구조물의 크기만으로도 불균일 체적변화가 발생하고, 보통 내·외부적으로 균열을 발생시키기에 충분한 구속을 받는 경우가 많다.

건조수축은 콘크리트 중의 수분이 증발하면서 발생하는 현상으로 크리프와 함께 시간 의존적인 거동을 나타내는 콘크리트의 고유 현상이다. 공기 중에 놓여 있는 콘크리트는 필연적으로 건조수축이 발생하는데 이것은 회복 가능한 부분과 회복 불가능한 부분으로 나뉜다. 수분 증발에 의해 발생되는 체적변화는 증발되는 수분량과 밀접한 관련이 있으나 일치하지는 않는다. 초기에 발생되는 자유수 증발에 의한 수축량은 매우 작지만 건조가 계속 진행됨에 따라 흡착수가 증발하기 시작하면 수축량도 크게 진행된다.

콘크리트는 내부에 무수히 많은 공극이 있으며 크기에 따라 겔공극수, 모세관 공극수 및 화학적 결합수 등으로 구분된다. 겔공극수(흡착수)가 수축에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 결합수는 건조에 의해 증발되지 않고, 모세관 공극수도 수축에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있다.

콘크리트의 수분증발은 구조물의 크기, 형태 및 외부환경에 따라 달라지며, 각 영향인자의 분포도가 변화하기 때문에 정확한 예측은 곤란하다. 특히 비표면적이 넓은 포장체의 경우 공사장의 위치가 개활지인 경우가 많아 수분증발이 과도하게 발생하므로 건조수축에 의한 균열발생 가능성도 증가하게 된다. 따라서 과도한 건조수축이 예산되는 기상조건 하에서는 콘크리트 타설 후 수분손실을 방지하기 위한 양생제의 살포, 수축줄눈에 의한 균열 유도 등 다양한 방법이 사용되고 있다.

* 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원

2. 콘크리트의 수축 메커니즘

시멘트 경화체의 수축형태는 시멘트의 수화에 의한 자기수축(autogenous shrinkage), 공극수의 증발에 의한 건조수축(drying shrinkage) 및 공기중의 CO_2의 유입에 의한 중성화 수축(carbonation shrinkage)으로 분류된다. 이러한 수축형태에서 자기수축 및 건조수축은 시멘트 경화체중에 존재하는 수분의 상변화에 의해 일어나며, 중성화에 의한 수축은 시멘트 경화체 중의 $Ca(OH)_2$와 공기중의 CO_2의 반응에 의하여 생성된 수분의 증발에 의하여 발생한다.

수축에 관계되는 시멘트 경화체 중 수분의 상 변화는 공극중의 수분이 시멘트의 수화에 의해 수화물로 고착되는 고체로의 상 변화와 외부 환경에 노출되었을 때 공극수의 증발에 의한 기체로의 상 변화로써 분류된다. 수화물의 형성에 의한 고체로의 상 변화를 자기수축 공극수의 증발에 의한 기체로의 상 변화를 건조수축이라 하며, 시멘트 경화체에서 이러한 수축이 중요시되는 것은 재료적인 특성상 압축강도에 비하여 인장강도가 상대적으로 낮아 수축에 의한 균열의 발생가능성이 증가하기 때문이다.

2.1 자기수축(autogeneous shrinkage)

시멘트 경화체의 자기수축은 내부에 존재하는 수분이 수화물을 형성하면서 고체로 상변화하기 때문에 수화에 의한 내부 수분의 손실 즉, 자기건조(self-desiccation)에 의하여 발생된다. 포틀랜드시멘트의 수화반응에서 생성된 수화물의 체적은 반응전 시멘트와 물의 합계보다 작다. 이러한 체적 감소는 시멘트의 수화에 의해 경화체의 거시적인 골격이 형성되면서 대부분이 발생된다. 시멘트의 자기수축은 시멘트의 광물조성, 광물과 함께 화학반응 및 반응율이 정해지면 화학양론적으로 계산할 수 있다. 예를 들면 포틀랜드 시멘트의 구성광물중 가장 많은 양을 차지하는 C_3S의 수화반응이 다음과 같고 100% 수화한다고 가정하면 이론적인 수화반응의 물-시멘트비 23.7%(108.1/456.6)에서 수화에 의한 자기수축율은 10.9%이다.

$$2C_3S + 6H_2O \rightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2$$

weight	456.6	108.1	342.5	222.3
specific gravity	3.15	1.0	2.71	2.24
Absolute volume	145.0	108.1	126.4	99.2
		253.1		225.6

$$Shrinkage\ ratio = \frac{(253.1 - 225.6)}{253.1} \times 100 = 10.87(\%)$$

시멘트의 자기수축에 의한 실험은 ASTM C 827에 의하여 측정할 수 있으며, 화학양론적으로 계산된 이론적 수축율과 실험에 의한 측정값을 비교하여 겉보기 수축율을 정할 수 있다. 이 방법은 수화반응에 의한 자기수축율을 예측할 수 있고, 동일 시멘트의 환경요인에 따른 반응속도의 추정에 유용한 자료로 활용할 수 있다.

시멘트 경화체를 제조후 24시간에 탈형하여 자기수축율을 측정한 결과, 물-시멘트비가 적어지면 수축이 증가하고 물-시멘트비 30~40%에서는 약 $1,800\times10^{-6}$ 정도 수축이 발생된다고 한다. 또한 물-시멘트비 감소는 초기에 큰 자기수축이 일으키고 재령 700일에서도 수축이 계속되어 물-시멘트비 17%의 경우 재령 1일에서 약 $2,500\times100^{-6}$의 수축율을 나타내는 경우도 있다.

콘크리트 타설후 초기에 발생하는 소성 수축은 초기 건조수축으로 간주하여 수분의 증발을 막으면 방지할 수 있다고 생각하였으나 수분증발을 허용하지 않는 환경에서도 물-시멘트비가 감소되면 수화에 의한 자기수축을 고려해야 된다.

2.2 건조수축

콘크리트의 건조수축은 시멘트 경화체중의 수분이

증발하면서 발생되며, 처음으로 건조될 때 최대의 수축이 일어나며 이 수축의 상당부분은 재습윤되어도 원 상태로 돌아오지 않는다.

건조수축은 시멘트 경화체중의 수분손실과 밀접한 관련이 있으나, 증발된 수분의 종류에 따라 발생되는 수축응력이 다르기 때문에 수분손실량과 건조수축량은 선형적으로 비례하지 않는다. 그림 1은 상대습도에 따른 시멘트 경화체중의 수량감소가 건조수축에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 상대습도 약 10%에서 건조에 의한 수량감소량의 기울기가 변화하고 있음을 알 수 있다. 즉, 상대습도 10% 이상에서 시멘트 경화체의 수량감소는 약 17%이고, 이때 건조수축율은 약 0.6%이었다.

그러나 상대습도 10% 미만에서는 약 6%의 수량감소가 발생하면 건조수축은 약 1.2%로 크게 발생함을 알 수 있다. 따라서 시멘트경화체의 건조단계에 따른 수량감소와 건조수축율을 비교하면 초기단계의 영향은 적지만 최종단계에서는 수량감소에 따른 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 이와같이 수량감소에 대한 건조수축율의 기울기가 변화하는 것은 시멘트 경화체의 건조수축이 한 개 이상의 메커니즘에 기인한다는 것을 시사하고 있다.

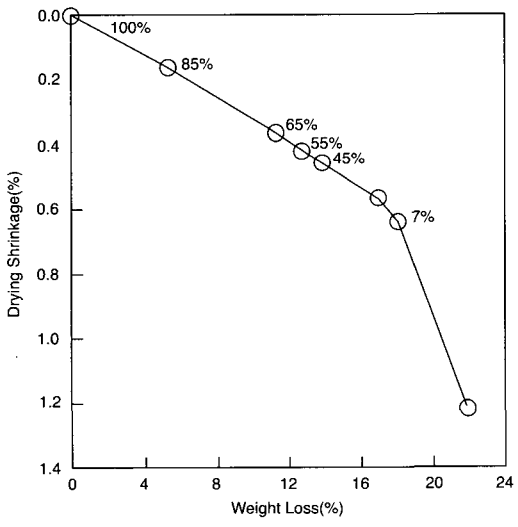

그림 1. 시멘트 경화체의 수분증발과 건조수축

3. 건조수축 영향요인

3.1 물-시멘트비

물-시멘트비가 시멘트 경화체의 건조수축에 미치는 영향은 수축속도가 빠른 초기재령에서 물-시멘트비에 의한 건조수축의 영향은 크지 않으나 장기재령에서는 물-시멘트비의 감소에 따라 건조수축도 감소되며, 물-시멘트비가 낮은 시멘트 경화체의 건조수축은 초기 재령에서 종료되는 것으로 알려져 있다.

이것은 물-시멘트비에 따른 건조수축율의 차이는 여러 단계에서 손실되는 수분의 종류에 의해 설명될 수 있다. 즉 재령 28일까지는 모세관 공극과 같은 비교적 큰 공극에서 수분 증발이 일어나기 때문에 수축에는 큰 영향이 없으나, 건조가 계속됨에 따라 겔 공극으로부터의 수분 손실이 일어나 큰 수축을 일으키게 되며 겔 공극수와 모세관수의 비가 다르면 손실수량이 동일하여도 수축량은 달라질 수 있음을 알 수 있다. 실험결과에 따르면 재령 28일까지의 초기 건조단계에서는 물-시멘트비가 증가함에 따라 수량감소는 큰 차이를 나타내지만 건조수축율은 약 1.2×10^{-6} 정도의 수축을 나타내고 있다. 그러나 재령이 증가함에 따라 물-시멘트비가 높은 시멘트경화체일수록 건조수축율은 현저히 증가됨을 알 수 있다.

그림 2와 같이 물-시멘트비가 다른 시멘트경화체가 재령 28일에서 동일한 수축량을 나타내는 것은 모든 시멘트 경화체가 거의 동일한 양의 겔 공극수를 소실함에 따라 수축율이 유사하고 전 손실수량의 차이는 모세관수의 손실량 차이에 의한 것으로 생각할 수 있다. 모세관 공극수의 양은 물-시멘트비와 함께 증가하므로 물-시멘트비가 높은 시멘트 경화체의 수량감소는 증가한다.

또한 모세관 공극수의 손실은 건조수축에 대하여 영향을 거의 미치지 않으므로 수축량은 전 손실수량의 다소에도 불구하고 모든 시멘트경화체에서 거의 동일하다. 재령 28일 이후 시멘트 경화체를 다시 건

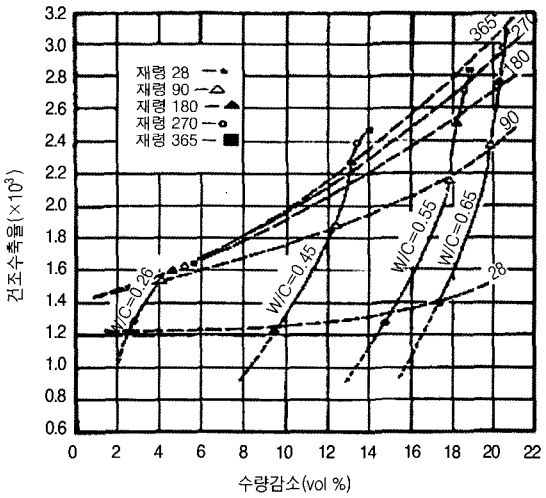

그림 2. 물-시멘트비에 따른 시멘트경화체의 수량감소와 건조수축율

조시키면 주로 겔 공극수의 증발이 일어난다. 수화도가 같다고 가정하면 시멘트 경화체의 겔공극량은 동일하여야 한다. 따라서 거의 같은 양의 수분이 재령 365일까지 손실되는 것으로 가정할 수 있다.

3.2 골재의 영향

골재의 수축은 시멘트 경화체의 수축과 비교하여 매우 작다. 따라서 시멘트 페이스트에 대한 콘크리트의 건조수축은 골재 함유율이 증가함에 따라 감소할 것이다. 골재는 시멘트 페이스트의 수축을 구속하기 때문에 콘크리트의 수축은 골재의 강성이 증가함에 따라 감소된다.

Hansen과 Almudailheem은 동일 물-시멘트비와 수화도를 갖는 시멘트페이스트의 수축량으로부터 단위골재 부피량과 골재의 탄성계수를 고려하여 콘크리트의 수축량을 추정할 수 있음을 제시하였다.

골재의 크기와 입도는 건조수축에 거의 영향을 미치지 않지만 매우 큰 골재는 건배합이 가능하므로 낮은 건조수축을 나타낸다. 골재의 크기가 6.3㎜에서 152㎜로 증가하면 단위골재부피량이 전체부피에서 차지하는 부피가 60%에서 80%로 증가하는 것과 같다.

그림 3은 단위골재량에 따른 콘크리트의 수축과 시멘트 페이스트의 수축비를 정리한 것이다. 콘크리트의 단위골재량이 71에서 74%로 증가하면 수축량은 20% 감소함을 알 수 있으며, 이것은 골재의 강성 시멘트 페이스트보다 크기 때문이다. 골재의 탄성계수가 크면 콘크리트의 건조수축량을 감소시킬 수 있다. 예를 들어 강철골재를 사용한 콘크리트는 일반콘크리트보다 수축량이 1/3 정도 작고, shale을 사용한 콘크리트는 수축량이 1/3 이상 크게 나타난다.

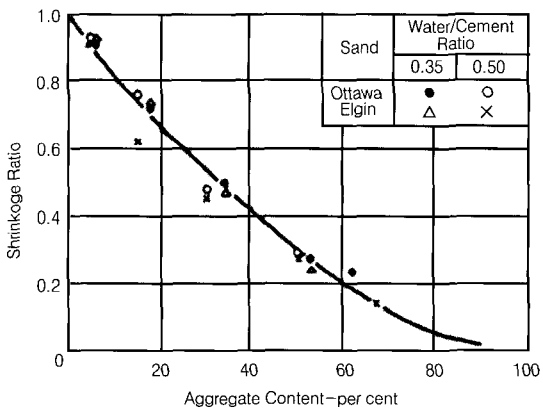

그림 3. 단위골재량에 따른 콘크리트의 수축과 시멘트 페이스트 수축의 비

골재중에 점토질 성분(또는 미분)이 존재하면 수축량이 증가한다. 점토가 포함된 골재를 사용한 콘크리트의 수축량은 70% 이상 증가될 수 있다. 또한 건조수축량은 골재의 종류에 따라 달라진다. 건조수축량을 증가시키는 골재로서는 dolerites와 basalts가 있고 greywacke와 mudstone과 같은 퇴적암도 건주수축량을 증가시킨다. 그러나 granite, limestone, quartzite 등은 건조수축을 감소시킨다.

수축량이 큰 골재를 사용하는 것은 추가적인 변형을 발생시켜 사용상 문제를 야기할 수 있다. 또한 높

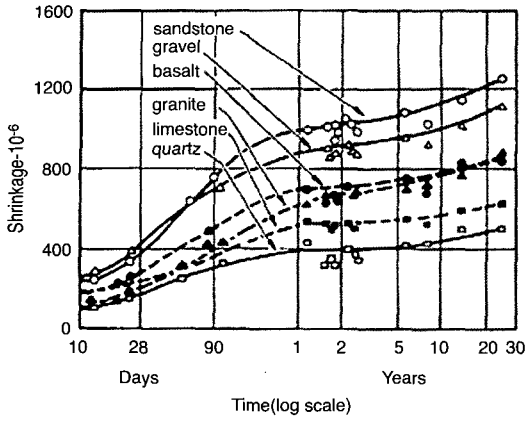

그림 4. 골재 종류에 따른 콘크리트의 건조수축

은 수축량으로 인하여 발생된 균열은 구조물의 내구성에도 큰 영향을 미친다. 이러한 이유로 사용골재가 수축에 미치는 영향을 미리 파악하는 것이 중요하다. 일반적으로 수축량이 큰 골재는 흡수율이 크고 큰 변형이 발생되기 때문에 정밀한 검토가 필요하다.

콘크리트의 탄성계수가 건조수축에 미치는 영향을 나타낸 것이 그림 5이다. 골재의 강성은 콘크리트의

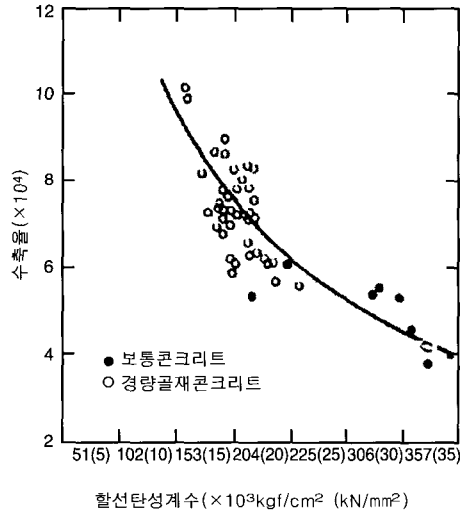

그림 5. 콘크리트의 수축과 탄성계수와의 관계

탄성계수에 영향을 크게 미치기 때문에 경량골재를 사용한 콘크리트의 수축은 다른 조건이 동일한 보통 콘크리트의 수축보다도 크게 나타나고 있다.

골재의 강성과 함유율이 콘크리트의 건조수축에 미치는 영향에 관해서는 Pickett에 의하여 연구되었다. 그는 구형의 골재입자가 역시 구의 형태를 한 콘크리트의 중심부에 위치하고 있으며, 골재 및 콘크리트 부분이 모두 탄성적이라고 가정하였다. 골재는 건조수축을 줄이는 역할을 하고 있으므로 골재량은 건조수축에 가장 큰 영향을 미치는 요인이다. 콘크리트의 수축량 S_c와 시멘트 페이스트의 수축 S_p 의 비는 콘크리트의 단위골재량 V_a에 의존하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_c = S_p(1 - V_a)^n$$

여기에서 V_a : 골재의 체적율

$$n = \frac{3(1-\nu_c)}{1+\nu_c+2(1-2\nu_c)E_c/E_a}$$

E_c : 콘크리트의 탄성계수
E_a : 골재의 탄성계수
ν_c : 콘크리트의 포아슨비
ν_a : 골재의 포아슨비

실험상수 n은 콘크리트의 탄성특성에 대한 골재의 탄성특성의 상대량을 나타내는 것으로 대개 1.2에서 1.7사이의 값이다.

3.3 콘크리트 배합

물-시멘트비와 단위골재 부피량이 건조수축에 미치는 영향을 나타낸 것이 그림 6 및 7이다. 물-시멘트비가 일정할 때 단위시멘트량이 증가하면 건조수축량이 증가함을 알 수 있다. 이것은 콘크리트에서 건조수축이 발생하는 부분이 시멘트 페이스트 부분이기 때문이다. 그러나 단위수량이 동일한 경우 단위

시멘트량의 증가는 건조수축량이 영향을 미치지 않거나 건조수축량을 감소시킨다. 왜냐하면 물-시멘트비의 감소가 건조수축을 억제하는 역할을 하기 때문이다. 단위수량이 증가하면 이로 인하여 골재가 차지하는 부피가 감소하기 때문에 건조수축량이 증가되지만 단위수량이 건조수축을 증가시키는 1차적인 요소는 아니다.

그림 8은 단위수량 증가에 따른 건조수축량의 변화를 나타낸 것으로 동일 단위수량을 가진 배합들도 골재의 종류나 골재/시멘트비에 따라 건주수축량이 달라지는 것을 알 수 있다.

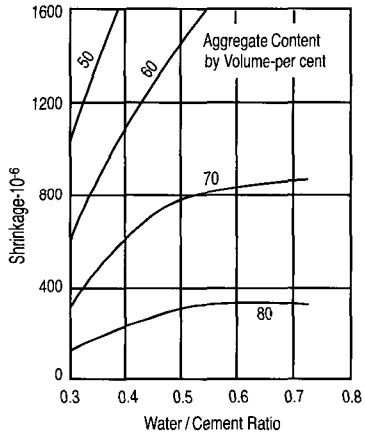

그림 6. 건조수축에 대한 물-시멘트비와 단위골재량의 영향

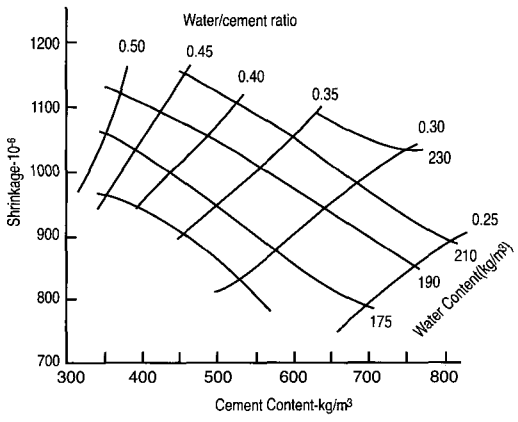

그림 7. 단위시멘트량, 단위수량, 물-시멘트비에 따른 건조수축(28일 습윤양생, 450일 이후의 건조수축)

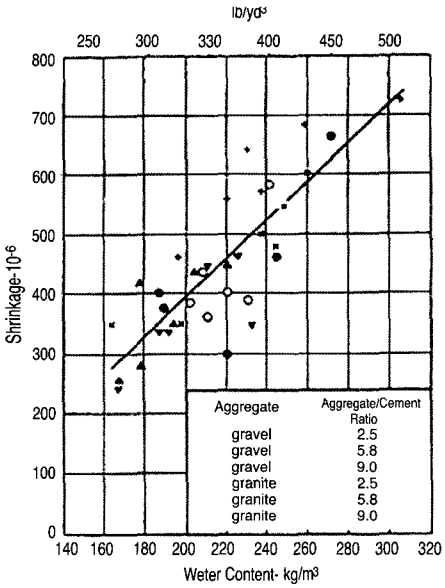

그림 8. 콘크리트의 단위수량과 건조수축의 관계

4. 건조수축 예측모델

콘크리트 구조물의 형상, 외부환경조건(재령, 온도변화, 습도변화, 양생조건, 기간 등)에 따라 변화되는 임의 재령에서의 건조수축을 예측하기 위하여 여러 가지 모델들이 실험적으로 제시되었다.

실험적으로 제시된 모델은 그 정확도, 간편성에 따라 크게 ACI 209 위원회모델, CEB-FIP 모델 및 BP(Bazant-Panula) 모델로 나눌 수 있으며, 우리나라의 경우 건설부 제정 『콘크리트 표준시방서』에서는 1999년 개정판 이전에는 ACI 209 위원회 모델을 사용하였으나 CEB-FIP 모델로 전환하였다.

4.1 ACI 209 위원회 모델

콘크리트의 건조수축을 예측하기 위한 여러 가지 모델중 가장 간단한 것으로써 Branson, Christiason 등의 연구결과를 근간으로 하여 ACI 209위원회에서 제시한 모델이다.

건조수축 예측식은 다음과 같으며, 본 위원회에서

표 1. 건조수축 영향요인, 모델식에서 고려된 변수 및 기준조건

영향요인			변수	기준조건
콘크리트	콘크리트 배합	단위 시멘트 페이스트량 물-시멘트비 배합 골재특성 다짐정도	시멘트종류	1종 또는 3종
			슬럼프	70mm
			공기량	≤6%
			잔골재율	50%
			단위시멘트량	279~446kg/m³
	초기양생조건	초기양생기간 양생온도 양생습도	습윤양생	7일
			증기양생	1~3일
			습윤양생	23±2℃
			증기양생	≤100℃
			상대습도	≥95%
부재형상 및 환경요인	환경요인	콘크리트온도 콘크리트 수분 함유량	콘크리트온도	23±2℃
			상대습도	40%
	부재형상	크기 및 형상	체적-표면적비(v/s) 최소두께	v/s=38mm 150mm

건조수축 예측에 고려된 변수, 영향요인 및 기준조건은 표 1과 같다.

$$(\varepsilon_{sh})_t = \frac{t^a}{f + t^a}(\varepsilon_{sh})_u$$

여기서, a : 시간 비로 정해지는 부재의 형태 및 크기에 대한 상수(0.9~1.10)

f : 재령(일) - 재령 7일 습윤양생 : 35일

- 재령 1~3일 증기양생 : 55일

$(\varepsilon_{sh})_u$: 극한 건조수축 변형율(415~1,070×10⁻⁶㎜/㎜)

t : 초기 양생 종료 재령(일)

건조수축에 대한 실험결과가 없을 때 극한 건조수축 변형율은 다음과 같이 정한다.

$$(\varepsilon_{sh})_t = 780\gamma_{sh} \times 10^{-6}(m/m)$$

여기서, γ_{sh} : 보정계수 $(\gamma_{sh} = \gamma_{cp}\gamma_\lambda(\gamma_h$ 또는 $\gamma_{vs})$ $\gamma_s\ \gamma_\phi\ \gamma_c\ \gamma_\alpha)$

또한 보정계수는 표 1과 같은 기준 조건의 경우 1.0으로 정하고, 이외의 경우 콘크리트 배합 및 외부 환경조건의 변동에 따라 다음과 같이 정한다.

- 보정계수

① 초기 습윤양생 기간 : 초기양생기간에 대하여 표 2의 값을 적용한다

② 상대습도

$$\gamma_\lambda = 1.40 - 0.010\ \lambda \quad 40 \le \lambda \le 80$$
$$3.00 - 0.030\ \lambda \quad 80 \le \lambda \le 100$$

표 2. 초기양생조건에 대한 보정계수

습윤양생기간(일)	γ_{cp}
1	1.20
3	1.10
7	1.00
14	0.93
28	0.86
90	0.75

③ 부재의 평균두께 또는 체적-표면적비

콘크리트 건조수축에 미치는 부재의 크기효과는 기본적으로 양면성이 있다. 첫째는 시간 비의 영향이고, 두 번째는 극한 건조수축 변형율에 미치는 영향이 있다. 건조수축에 미치는 크기효과를 추정하는 방법은 평균두께 또는 체적-표면적비의 두 가지가 있으며, 평균두께법이 약간 크다.

• 평균두께법

평균두께 152mm 이하의 경우 표 3을 사용하고, 이상의 경우에는 다음 식을 사용한다.

$$\gamma_h = 1.23 - 0.00015h \quad \text{재하 후 1년이내}$$
$$1.17 - 0.00114h \quad \text{극한 값}$$

• 체적-표면적법

$$\gamma_{vs} = 1.2\exp(-0.00472\ v/s)$$

표 3. 평균두께법에 의한 보정계수

부재의 평균두께 (mm)	γ_h	
	≤1년	극한값
51	1.35	1.35
76	1.25	1.25
104	1.17	1.17
127	1.08	1.08

④ 슬럼프

$$\gamma_s = 0.89 + 0.00161\ s$$

⑤ 잔골재율

$$\gamma_\phi = 0.30 + 0.014\phi \quad \phi \le 50\%$$
$$0.90 + 0.002\phi \quad \phi > 50\%$$

⑥ 단위시멘트량

$$\gamma_c = 0.75 + 0.00061\ c$$

⑦ 공기량

$$\gamma_\alpha = 0.95 + 0.0008\ \alpha$$

4.2 CEB-FIP 모델

총 수축변형율 $\varepsilon_{cs}(t,\ t_s)$는 다음 식과 같이 추정하여 사용하며 최종 건조수축 변형율은 실험값이 없을 때 압축강도 20~50MPa에서 표 4의 값을 사용하도록 하고 있다.

$$\varepsilon_{cs}(t,\ t_s) = \varepsilon_{cso}\beta(t - t_s)$$

여기서, ε_{cso} : national 수축계수

$$\varepsilon_{cso} = \varepsilon_s(f_{cm})\beta_{RH}$$

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

f_{cm} : 재령 28일 평균 압축강도

$f_{cmo} = 10$ MPa

β_{sc} : 시멘트 종류에 따른 계수로써 표5와 같다

$$\beta_{RH} = -1.55\beta_{sRH} \quad 40\% \le RH < 99\%$$
$$+0.25 \quad RH \ge 99\%$$

$$\beta_{sRH} = 1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3$$

RH : 대기압하 상대습도(%)

$RH_0 = 100\%$

표 4. 재령 70년의 보통 콘크리트에 대한 건조수축 변형률 ($\varepsilon_{cs,70y} \times 10^3$)

건조 대기하 조건 (내부)(RH=50%)			습한 대기하 조건 (외부)(RH=80%)		
Notational size $2A_c/u$(mm)					
50	150	600	50	150	600
-0.57	-0.56	-0.47	-0.32	-0.31	-0.26

표 5. 시멘트 종류에 따른 보정계수

시멘트 종류	β_{sc}
경화 지연 시멘트(SL type)	4
보통 또는 조강 시멘트 (N 또는 R type)	5
고강도 조강시멘트 (RS type)	8

β_s : 시간에 따른 수축발현 설명계수

$$\beta_s(t-t_s)=\left[\frac{(t-t_s)/t_1}{350(h/h_0)^2+(t-t_s)/t_1}\right]^{0.5}$$

h : 부재의 notational size(㎜)

$$h=\frac{2A_c}{u}$$

A_c : 단면적

u : 대기와 접하는 주변길이

h_o = 100㎜

t_1 = 1일

t : 재령(일)

t_s : 수축 시작 재령

4.3 Bazant-Panula 모델

Bazant와 Panula에 의해 제안된 모델로써 서로 다른 실험실에서 각종 콘크리트에 대하여 실험된 10,000여 개의 실험결과를 체계적으로 정리하여 수치해석에 입각하여 제안한 예측식이다.

BP모델에서 건조수축은 기본적으로 확산과정이며, 이러한 확산이론을 사용하여 제시된 BP모델은 위의 두 모델에서 고려하지 못했던 많은 건조수축 영향인자에 대하여 고려하고 있을 뿐만 아니라 넓은 시간영역에 대해서도 적용이 가능한 것으로 알려져 있다.

$$\varepsilon_{sh}(t_1,t_0)=\varepsilon_{sh_\infty}\ k_h\ S(t_1),\ t_1=t-t_0$$

여기서, $\varepsilon_{sh_\infty}=\varepsilon_{s_\infty}\dfrac{E(7+600)}{E(t_0+\tau_{sh})}$

$$\varepsilon_{s_\infty}=(1.21-0.88y)10^{-3}$$

$$y=(390z^{-4}+1)^{-1}$$

$$z=\left[1.25\left(\frac{a}{c}\right)^{\frac{1}{2}}+\frac{1}{2}\left(\frac{g}{s}\right)^2\right]\left(\frac{1+s/c}{w/c}\right)^{\frac{1}{3}}(f_c)^{\frac{1}{2}}-12$$

단, $z\geq 0$인 경우에 한하며 이외의 경우 $z=0$

여기서, f_c : 재령 28일 원주형 공시체 압축강도(ksi)

w,c,a : 콘크리트 중 물, 시멘트, 골재의 중량

$a=g+s$: 굵은골재 및 잔골재의 합

$$k_h=1-h^3 \quad h\leq 0.98$$
$$=-0.2 \quad h\leq 0.98$$

h : 외부환경의 상대습도

$$S(t_1)=\left(\frac{t_1}{\tau_{sh}+t_1}\right)^{1/2}$$

$$\tau_{sh}=600\left(\frac{k_s}{150}D\right)^2\frac{10}{C_1(t_0)}$$

k_s : 형상계수로써 표 6과 같다.

D : 유효두께

$D=2\dfrac{v}{s}$ ($\dfrac{v}{2}$ 는 체적-표면적의 비)

$C_1(t)$: 재령 t에서 건조 확산계수(㎟/day)

$$C_1(t)=C_7k_T'\left[0.05+\sqrt{6.3/t}\right]$$

C_7 : 재령 7일에서의 C_1

$$C_7=\frac{c}{8}\frac{w}{c}-12 : C_7<7 \text{ 인 경우 } C_7=7$$
$$C_7>21 \text{인 경우 } C_7=21$$

$$k_T'=\frac{T}{T}\exp\left(\frac{5000}{T_0}\ \frac{-5000}{T}\right)$$

T_0 : 기준온도(23℃)

표 6. 형상계수

구 분	k_s
무한 슬래브	1.0
무한 원주	1.15
무한 각주	1.25
구	1.30
정육면체	1.55

5. 맺음말

건조수축은 수분 증발에 의해 발생하는 현상으로 크리프와 함께 시간의존적인 거동을 나타내는 콘크리트의 고유 현상이다. 콘크리트 구조물이 모든 방향에 대하여 구속되어 있지 않다면 균열을 발생시키지 않겠지만 현실적으로 이러한 구조물은 존재할 수 없다. 결국 구조물의 크기만으로도 불균일 체적변화가 일어나고 내·외부적으로 균열을 발생시키기에 충분한 구속을 받는 경우가 많다.

콘크리트 포장체의 경우 비표면적이 넓고 공사장이 개활지인 경우가 많기 때문에 과도한 수분증발이 일어나므로 건조수축에 의한 균열발생 가능성도 증가하게 된다. 따라서 일정간격의 수축줄눈을 설계하므로써 콘크리트에 발생되는 인장응력을 완화시켜 균열발생을 억제하고 있다. 현행 콘크리트 포장에서는 경험적으로 6m 간격의 일률적인 수축줄눈을 두고 있다.

그러나 콘크리트 포장의 파손원인이 대부분 줄눈부에서 발생한다는 점을 감안한다면 줄눈간격을 늘리는 것은 원활한 시공뿐만 아니라 파손부 감소에 따른 유지보수 비용을 절감할 수 있다. 따라서 콘크리트 건조수축의 메커니즘을 이해하고 포장콘크리트의 건조수축 현상을 모사할 수 있는 시험방법을 확립하여 콘크리트 배합 및 환경조건 변화에 따른 건조수축량의 예측이 이루어진다면 최적화된 줄눈설계를 통하여 포장의 장기공용성에 크게 이바지할 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Gebler, S., "Predict Evaporation Rate and Reduce Plastic Shrinkage Cracks", Concrete International, Vol. 5, No. 4, 1983. 4, pp. 19~22
2. 한만엽, "환경인자를 고려한 건조수축의 예측모델 개발", 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 8, No. 1, 1996. 2, pp.111~120
3. ACI Committee 305, "Hot Weather Concreting", Journal of ACI, Vol. 74, 1977. 8, pp. 317~322
4. Carrier, R.E., Cardy, P.D., "Evaluating Effectiveness of Concrete Curing Compounds", Journal of Materials, JMLSA, Vol. 5, No. 2, 1970. 6, pp. 294~302
5. Mehta, P.K., "Concrete : Structure, Properties, and Materials", Prentice-Hall, 1986, pp. 89~103
6. Neville, A.M., "Properties of Concrete, 4th Ed." Longman, 1995, pp. 423~449
7. Young, J. F., Mindess, S., "Concrete", Prentice-Hall, 1981, pp. 485~500
8. ACI Committee 209R-92, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures", ACI Practice Manual
9. Tazawa, E., "Influence of curing time on Shrinkage and weight loss of hydrating portland cement", Proc. of JSCE, No.159, 1969
10. Tazawa, E., Miyazawa, M., "Autogenous Shrinkage caused by Self Desiccation in Cementitious Material", 9th International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, Vol. IV, 1992, pp.712~718
11. Reichard, T. W., "Creep and Drying Shrinkage of Lightweight and Normal Weight Concrete", Monograph No. 74, National Breau of Standards, Washington, 1964
12. 田澤榮一, 宮 伸吾, "水和反應による硬貨セメントペーストのマクロな體積減少, セメント·コンクリート論文集, No.45, 1991, pp.122~127
13. Pickett, G., "Effect of Aggregate on Shrinkage of Concrete and Hypothesis Concerning Shrinkage", Proceeding of ACI, 52, No. 5, 1956, pp.581~590
14. Carrier, R. E., Cardy, P. D., "Evaluating Effectiveness of Concrete Curing Compounds", Journal of Materials, JMLSA, Vol. 5, No. 2, 1970, pp. 294~302
15. Bazant, Z. P., Wittmann, F. H., "Creep and Shrinkage in Concrete Structures", John Willey and Sons, 1982,
16. Branson, D. E., Chritiason, M. L., "Time-Dependent Concrete Properties Related to Design - Strength and Elastic Properties, Creep and Shrinkage", Symposium on Creep, Shrinkage, and Temperature Effects, SP-27-13, ACI 1971, pp.257~277