

콘크리트의 수축현상

(Shrinkage of Concrete)

김진근

〈한국과학기술원 토목공학과 교수〉

이철성

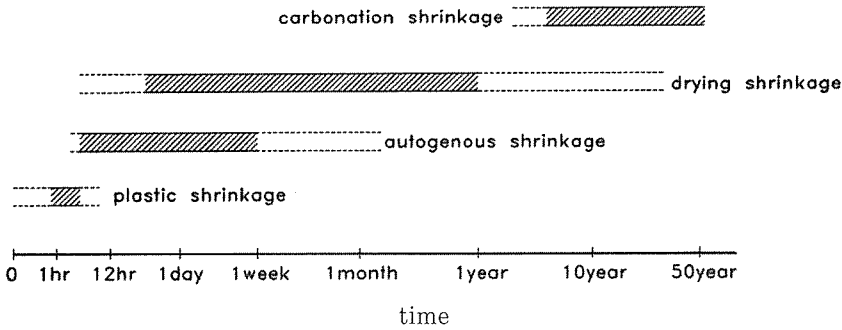
〈한국과학기술원 토목공학과 박사과정〉

- | | |
|-----------------------------|--------------------------------|
| I. 머리말 | V. 탄화수축(carbonation shrinkage) |
| II. 소성수축(plastic shrinkage) | VI. 팽창(swelling) |
| III. 자기수축 | VII. 맺는말 |
| IV. 건조수축 | |

I. 머리말

콘크리트는 수경성 재료이다. 다시 말하여, 콘크리트는 물과 시멘트의 수화반응이 진행됨에 따라 경화되어가는 재료이다. 이로 말미암아 콘크리트는 항상 내부에 물을 갖고 있고, 또한 물의 이동이 일어나고 있는 재료이다. 그리고 수화반응은 발열반응으로서 열을 발산하게 된다. 이와같은 수분의 이동과 온도의 변화에 의해 콘크리트는 태어나면서부터 체적의 변화, 즉 수축(shrinkage) 또는 팽창(swelling, dilatation)을 일으킨다. 이 글에서는 콘크리트 재료에서 수분의 변화에 의해 일어나는 각종 수축현상에 대하여 설명하고자 한다.

콘크리트 내부의 수분의 변화는 화학적 반응으로 인한 화학적 요인과 수분의 이동 확산으로 인한 물리적 요인으로 크게 나누어 생각할 수 있는데, 전자에 속하는 것이 자기수축(autogenous shrinkage)과 탄화수축(carbonation shrinkage)이고, 후자에 속하는 것이 소성수축(plastic shrinkage)과 건조수축(drying shrinkage)이다. 그리고 이와는 달리 물속에 담겨있는 콘크리트는 물의 흡수에 의해 팽창(swelling)이 일어나는데 이 또한 수분의 이동에 의한 것으로 볼 수 있다. 그리고 각종 수축현상은 일어나는 시기가 [그림 1]에서 보듯이 콘크리트의 재령에 따라 달리 일어난다.



(그림 1) 각종 수축(shrinkage)이 일어나는 시기

수화반응에 의한 자기수축은 수화반응이 활발한 타설초기에 주로 일어나고, 탄화수축은 수화물과 탄산가스의 반응에 의해 일어나므로 수년 후부터 일어난다. 그리고 수분의 이동에 의한 소성수축과 건조수축은 [그림 1]에서 보듯이 콘크리트가 아직 굳지 않은 상태, 즉 수시간 이내의 재령에서 일어나는 소성수축과 경화 콘크리트에서, 즉 수일 후의 재령에서부터 일어나는 건조수축으로 나눌 수 있다.

II . 소성수축(plastic shrinkage)

소성수축에는 다음 두 가지 요소가 포함된다. 첫째는 굳지 않은 콘크리트나 모르타르에서 증발에 따른 수축이고, 다른 하나는 시멘트풀의 수화반응에서의 수축이다. 소성상태의 콘크리트는 강도를 거의 갖지 못한다. 그러나 콘크리트가 소성상태에서는 탄성계수도 매우 작은 값이므로 인장변형도는 존재하더라도 인장응력은 또한 매우 작은 값이다. 그러나 이 경우 수분의 발산정도에 따라 매우 큰 인장변형도가 발생할 수 있으며 이 값이 임계 인장변형도를 초과하면 균열이 발생할 수 있다. 이러한 균열을 소성수축균열(plastic shrinkage cracking)이라 한다. 소성수축균열은 포장, 슬래브, 벽체 등과 같이 표면적이 넓은 구조물이나 사질토 지반 위에 설치된 기초 등에서 발생할 가능성이 크

다. 또한 건조하고 바람이 많이 부는 고온기후에서 타설된 콘크리트는 보통기후에서 타설된 콘크리트보다 균열이 발생될 가능성이 크다.

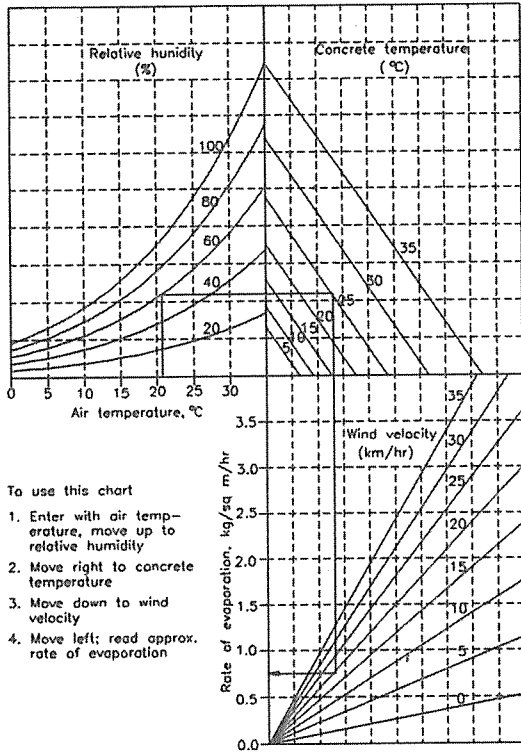
증발량과 소성수축균열의 발생 가능성은 밀접한 관계가

있다. ACI 305R에 의하면 증발량이 $1 \text{ kg/m}^2/\text{hr}$ 을 초과하는 경우에 소성수축에 의하여 균열이 발생할 가능성이 매우 높다고 보고하고 있다. 온도와 풍속이 높을수록 상대습도가 낮을수록 증발이 빠르게 일어나며, 이에 따라 소성수축균열이 발생할 가능성도 높아진다.

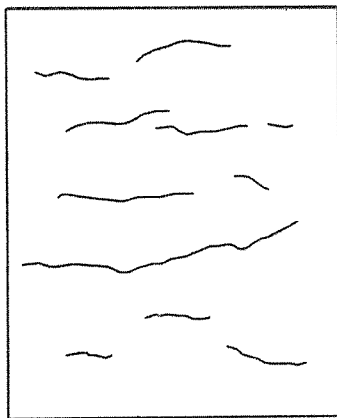
증발량 추정방법은 에너지보존법칙 및 공기역학 법칙을 응용한 경험 공식과 증발접시를 이용한 관측에 의한 방법 등이 있다. ACI 305R에 의하면 증발량은 [그림 2]를 이용하여 추정하거나 증발접시를 이용하여 측정하도록 하고 있다.

[표 1]은 상대습도에 따라 소성수축균열이 발생할 수 있는 임계온도를 나타낸 것이다. 이 표는 풍속이 상당히 큰 16 km/hr (10 mph)이고 콘크리트의 온도가 주변온도에 비하여 $5.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ($10 \text{ }^\circ\text{F}$) 클 때를 기준으로 작성된 것이다. 상대습도가 낮을수록 임계온도가 낮아짐을 알 수 있다.

소성수축균열은 콘크리트를 타설한 후 1~4시간 사이에 물광택이 표면에서 사라진 직후 갑자기 발생된다. 소성수축균열은 일반적으로 슬래브의 길이방향에 직각으로 발생하지만 일정한 형태는 없으며, 경화된 콘크리트에서 발생하는 균열과는 다르다. 경화된 콘크리트에서 발생하는 균열은 날카롭고 뚜렷한 윤곽을 가지고, 때때로 골재입자를 뚫고 지나간다. 반



(그림 2) 증발량 추정(PCA nomograph)



(그림 3) 전형적인 소성수축 균열

면에 소성수축균열은 철근이나 골재입자를 따라서 발생하고, 경화된 콘크리트에서처럼 골재를 관통한 모습은 없다. 전형적인 소성수축균열의 형태는 [그림 3]과 같다.

소성수축균열은 일단 발생하면 균열을 없애는 것이 거의 불가능하며, 이러한 균열은 이후 염화물이나 수분의 침투를 용이하게 하여 콘크리트의 열화 및 손상을 가속화시키는 원인이 된다. 따라서 소성수축이 일어나기 쉬운 구조형식의 콘크리트를 타설할 때는 외부 환경 조건을 주의깊게 고려하여야 하고, 가능하면 타설 후 즉시 다시 마감작업을 하는 것이 좋다.

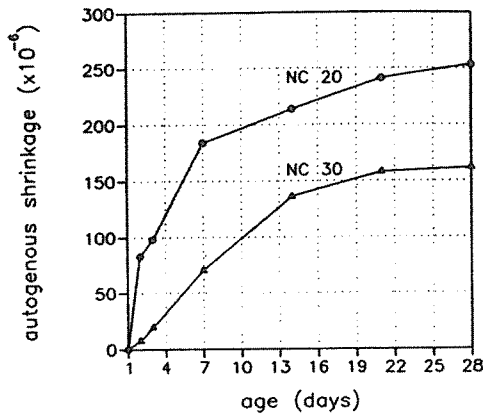
Ⅲ. 자기수축(autogenous shrinkage)

배합수 이외의 물을 첨가하지 않고 외기로의 수분손실이 없을 때 콘크리트는 시멘트의 수화반응에 의하여 건조하기 시작한다. 즉, 종결(final set) 이후에 시멘트 입자는 공극 속의 물과 수화반응을 하기 때문에, 콘크리트 내부의 수분을 소모하게 되어 시멘트 페이스트의 체적이 감소하게 된다. 콘크리트가 건조상태에 있을 때는 콘크리트 내부에 존재하는 물이 수분확산에 의하여 외기로 증발하므로 중량이 감소하지만, 시멘트 수화반응에 의한 수분손실은 콘크리트 내부의 물이 비증발성인 화학적 결합수로 변하기 때문에 중량의 감소는 거의 없다.

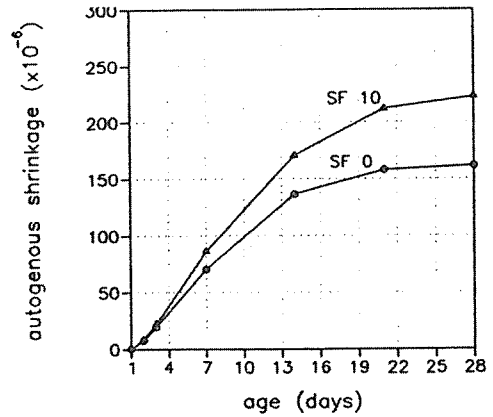
이러한 현상은 특히 낮은 물 시멘트비(이론적으로 0.42 이하)를 가진 콘크리트에서 수화가 일어나는 동안 물이 내부에서 소모되어 나타난다. 이와 같은 현상을 자체건조(self-desiccation)라 하며 그에 의해 발생하는 거

(표 1) 소성수축균열이 발생될 수 있는 임계온도

콘크리트 온도 (°C)	40	38	35	32	29	27	24
상대습도 (%)	90	80	70	60	50	40	30



(a) 물 시멘트 비



(b) 실리카흙 대체율(W/C=0.3)

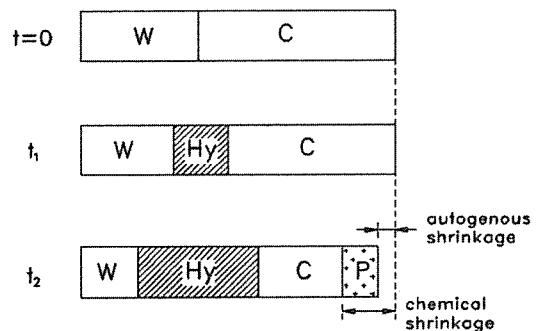
(그림 4) 물 시멘트 비와 실리카흙 대체율에 따른 콘크리트의 자기수축

시적인 체적감소를 자기수축(autogenous shrinkage)이라 한다. 자기수축은 건조수축과 유사한 메커니즘에 의해 발생하는 것으로 건조수축이 외부로의 수분손실에 의해 발생하는 것과는 다르게, 자기수축은 단지 물이 내부에서 소모된다는 차이를 갖고 있다.

콘크리트의 자기수축은 물 시멘트 비가 감소할수록 증가한다. 물 시멘트 비가 감소할수록 상대적으로 수화반응을 위하여 더 많은 양의 물이 소모되기 때문이다. 그리고 실리카흙 대체율이 증가할수록 자기수축은 증가한다. [그림 4]는 물 시멘트 비 0.2(NC 20)와 0.3(NC 30), 그리고 결합재에 대한 실리카흙 대체율 0%(SF 0)와 10%(SF 10)에 대한 자기수축량을 나타낸 것이다. 따라서 자기수축은 물 시멘트 비가 낮고 실리카흙을 사용한 고강도 콘크리트에서 특히 문제가 될 수 있으며, 고강도 콘크리트 제조시 필수적으로 사용되고 있는 실리카흙의 사용여부에 따라 동일한 물 시멘트 비라도 자기수축량은 크게 달라진다.

수화되지 않은 상태의 시멘트가 물과 반응하여 생성된 수화물의 체적이 수화되지 않은 시멘트의 체적과 물의 체적을 합한 것보다 작아

지는 것을 수화수축(chemical shrinkage)이라 하며, 시멘트의 수화반응에 의해 발생하지만 자기수축과 구별하기도 한다. 시멘트 경화체는 고체상태의 물질(수화되지 않은 상태의 시멘트 + 반응생성물), 액체상태의 물질(수화반응에 쓰이지 않은 물) 및 기체상태의 물질(혼합이 시작된 후부터 존재하는 기포와 수화에 의해 생성된 공극)로 이루어져 있다. 자기수축은 경화체에 내재된 기체상태의 체적을 합하여 고려한 체적의 감소인 것이다. [그림 5]는 자기수축과 수화수축의 개념을 나타내고 있다.



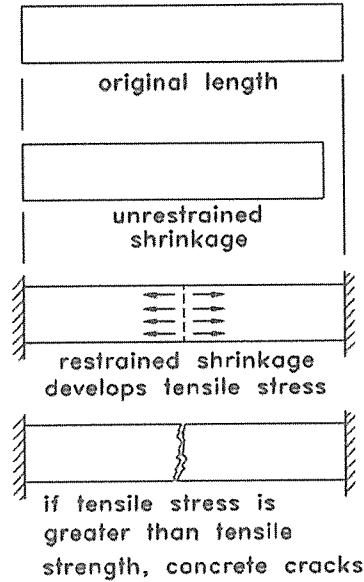
W : 물 C : 시멘트 P : 공극 Hy : 수화생성물 (그림 5) 수화반응에 의한 콘크리트의 수축현상

IV. 건조수축

건조수축에 의한 균열은 가장 흔히 발생할 수 있는 콘크리트 균열로서 설계, 시공과정에서 균열제어 기법이 특별히 필요하다. 건조수축에 의한 균열은 경화과정 뿐만 아니라 경화후에도 다른 요인 즉, 열응력, 동결작용으로부터 복합되어 발생한다. 다른 재료와 마찬가지로 콘크리트는 건조시 수축하고 습윤시 팽창한다. 즉 콘크리트 내부의 시멘트풀의 함수량의 정도가 콘크리트의 수축 또는 팽창의 원인이 된다. 이러한 함수량의 변화에 따른 체적의 변화는 수경성 시멘트 제품의 본질적 특성이다.

시멘트에 물이 첨가되어 수화작용이 일어나고 이 결과 수산화칼슘의 결정물질이 생성된다. 이러한 결정물질은 겔 상태(calcium silicate gel)로서 콜로이드의 미세 입자이며 비표면적이 극히 크다. 경화된 시멘트풀 내부 공극에 물이 차 있고, 또한 상당량의 수분이 겔에 포함되어 있다. 수축은 주로 이러한 겔에 흡수되어 있는 수분이 손실될 때 발생한다. 건조시에 먼저 시멘트풀 내의 공극수가 증발되며 이로 인한 수축량은 작은 반면, 수화된 겔 결정구조 사이에 수분이 감소할 때 수축량이 커진다. 콘크리트가 건조조건에 노출될 때 수분은 내부에서 외부로 서서히 확산되고 외부 표면에서 증발된다. 물기에 젖을 때는 이와 반대현상이 일어나며 콘크리트는 팽창하게 된다.

일반적으로 건조에 의해서 건조수축이 발생한다고 하더라도 외적으로 구속되지 않는다면 콘크리트에는 균열이 발생하지 않는다. 그러나 대부분의 콘크리트 구조물은 기초나 다른 구조요소 또는 콘크리트내의 보강철근 등에 의해 구속을 받게 된다. 이러한 수축작용의 구속은 인장응력을 유발시키며, 이 인장응력이 콘크리트의 인장강도에 도달할 때 콘크리트는 균열이 발생한다. (그림 6)은 이러한 건조수축

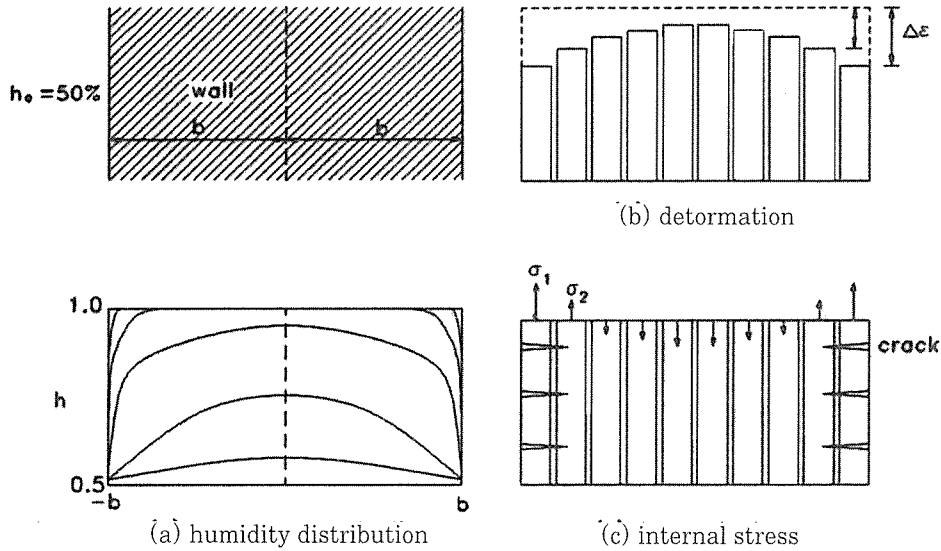


(그림 6) 건조수축으로 인한 균열발생 메커니즘

균열의 발생 메커니즘을 보여주고 있다.

콘크리트는 외부의 구속이 작용하지 않더라도 내부의 구속으로 인해 균열이 발생하기도 한다. 즉 콘크리트 표면을 통한 수분의 증발은 내부의 수분분포에 영향을 미치게 되고 각 위치에서의 습도 차이로 인해 콘크리트에서의 부등건조수축을 유발하게 된다. 부등건조수축은 콘크리트 표면에 인장응력을 발생시키며, 이 때 발생된 인장응력에 의해 콘크리트에서는 표면균열이 발생하는 경우가 빈번하고, 콘크리트에서의 표면균열은 장기적으로 구조물의 강도를 떨어뜨릴 뿐 아니라 콘크리트의 내구성 등에 문제를 야기시킨다. 표면에 생기는 이러한 균열은 초기에는 콘크리트 내부로 관입되지 않으나, 지속적인 건조현상이 진행됨에 따라 콘크리트 부재 내부로 깊숙히 전파될 수 있다. (그림 7)은 부등건조수축으로 인한 균열발생메커니즘을 보여주고 있다.

[그림 8]은 외기에 노출된 콘크리트에서 부등수분분포로 인한 각 위치에서 수축변형도에 대한 실험결과를 나타내고 있다. 수분확산에



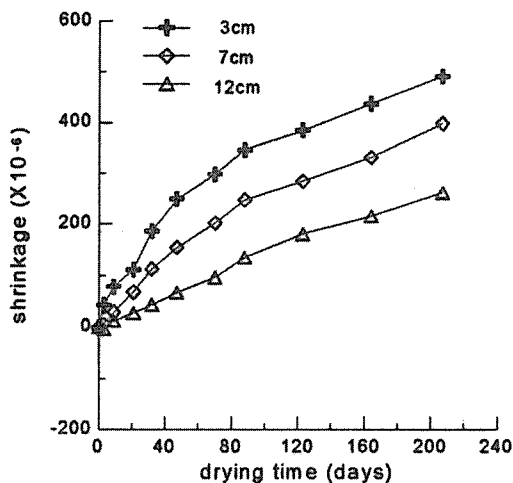
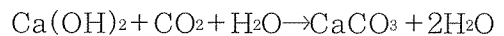
(그림 7) 부등건조수축으로 인한 균열발생 메커니즘

의하여 콘크리트 내부의 위치에 따라 수축변형도가 큰 차이를 보이고 있다. 콘크리트의 노출표면 근처(3cm)는 노출이 시작된 후 수분이 빠른 속도로 외기로 발산하기 때문에 수축변형도가 크고, 증가 속도도 빠르다. 그러나 콘크리트 내부(12cm)는 수분함유량이 많으

므로 수축변형도가 작고, 증가 속도도 느린 것을 알 수 있다. 즉 수분량의 차이에 따라 수축변형도가 위치에 따라 현저하게 다르게 나타나는 것을 알 수 있다.

V. 탄화수축 (carbonation shrinkage)

탄화수축은 건조수축의 특수한 경우로 간주되고 있으나 수분손실에 관한 반응 메커니즘이 상이하므로 별도의 중요성을 가진다. 시멘트 페이스트에서 수화생성물인 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)은 대기중에 존재하는 이산화탄소와 수분이 존재할 때 다음과 같이 반응하여 탄산칼슘과 물을 생성한다. 이와같이 이산화탄소와 수화생성물과의 반응, 즉 탄화작용은 시멘트 페이스트의 체적감소를 수반하며, 이것을 탄화수축(carbonation shrinkage)이라 한다.

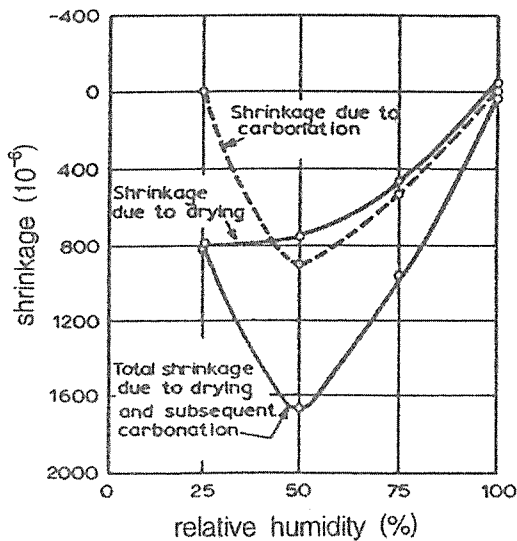


(그림 8) 부등수분분포로 인한 부등건조수 (W/C=0.68)

탄화수축은 대기중의 이산화탄소 농도나 페이스트의 미세공극, 페이스트의 함수량과 같은 인자에 영향을 받으며, 특히 함수량의 영향은 매우 크다. 따라서 높은 물 시멘트 비에서 이산화탄소 농도가 증가할수록 탄화율은 높아지고, [그림 9]에서와 같이 상대습도에 따른 함수로 표현된다.

높은 상대습도에서는 공극이 물로 가득차 있어 이산화탄소가 시멘트 페이스트 내부로 잘 침투하지 못해 탄산화작용이 매우 느리게 일어난다. 그리고 매우 낮은 상대습도에서는 수막(water film)이 없어서 용해될 수 있는 이산화탄소(CO₂)의 양이 한정되므로, 결국 탄화반응율을 감소시켜서 탄화작용은 느리게 된다. 따라서 [그림 9]에서와 같이 탄화수축은 상대습도가 50% 근처에서 최대치에 도달한다. 그리고 탄화반응율은 콘크리트의 수분함량, 주위의 상대습도, 부재의 크기 등에 영향을 받으며 근사적으로 시간의 제곱근에 비례한다.

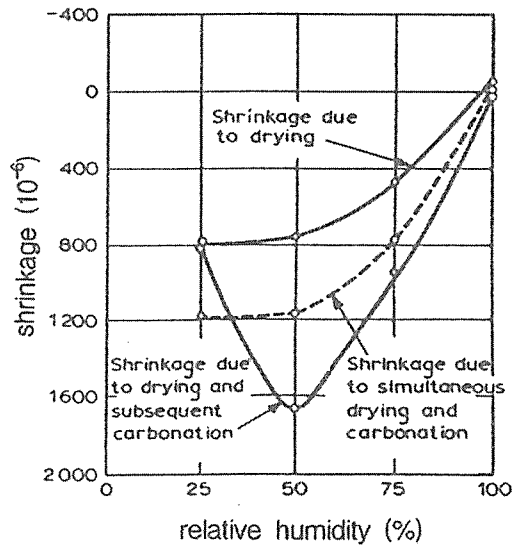
한편 콘크리트의 탄화수축은 건조순서에 따



[그림 9] 상대습도에 따른 건조수축과 탄화수축의 비교

라 수축이 크게 차이를 나타낸다. [그림 10]에서 건조 후의 탄화의 경우에 상대습도가 50% 근처에서 최대수축이 일어난다. 그렇지만 건조와 탄화가 동시에 발생하였을 때에는 약 25%의 상대습도에서 최대수축이 일어난다. 이와 같은 결과의 차이는 탄화 순서의 차이에 기인한다. 건조는 시간의존성이기 때문에 탄화반응이 동시에 진행되는 시험체 내부의 상대습도는 언제나 주위의 상대습도보다 높아지게 된다.

이로 인하여 건조후에 탄화한 경우에서처럼, 최대수축은 주위의 상대습도가 50%에서 일어나지 않고, 약 25% 근처에서 일어나게 된다.



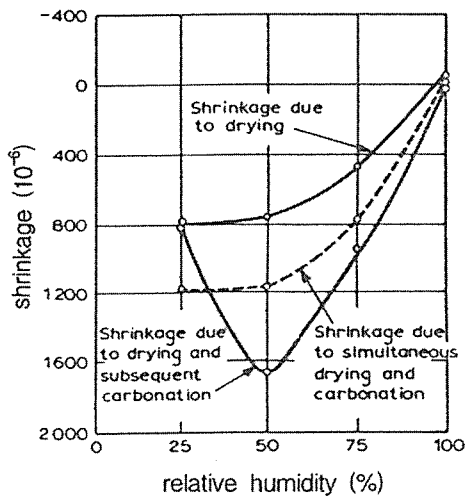
[그림 10] 건조순서와 탄화가 콘크리트의 수축에 미치는 영향

VI. 팽창(swelling)

콘크리트나 시멘트 페이스트가 타설 이후에 수중에서 계속적으로 양생된 경우에 부피가 팽창하게 된다. 이러한 팽창(swelling)은 시멘트 겔에 의한 물의 흡착때문이다. 물 분자는

결합력에 대하여 저항하기 때문에, 팽창압이 발생하고 또한 시멘트 겔 입자를 서로 분리시키려는 힘이 작용한다. 또한 물의 침투는 시멘트 겔의 표면장력을 감소시키므로 팽창이 발생한다. [그림 11]은 수중이나 상대습도가 100%인 공기 중에 있는 콘크리트가 시간의 경과에 따라 팽창이 일어나는 것을 보여주고 있다. 팽창에 의한 콘크리트의 변형도는 상대습도가 70%인 공기중에 노출된 콘크리트의 수축변형도보다 약 6배, 상대습도가 50%인 경우에는 약 8배 정도 작은 것을 알 수 있다.

콘크리트의 팽창은 일반적으로 해수(sea water)에서 더 증가하고, 또한 압력이 높은 경우에 증가한다. 따라서 심해의 해양구조물 등에서 콘크리트의 팽창은 더 증가한다. 해수면으로부터 100m 깊이에서 100 kg/cm²의 압력이 작용할 때, 3년후 팽창은 대기압에서보다 약 8배 큰 것으로 보고되고 있다.



(그림 11) 콘크리트의 팽창

VII. 맺는말

이 글에서는 콘크리트에서 수분의 변화에 의해 일어나는 각종 수축현상에 대하여 설명하였다. 물론 콘크리트는 수분의 변화 이외에도 온도의 변화, 화학적 물질 침투, 동결융해 그리고 하중의 작용 등에 의해서도 체적의 변화가 일어난다. 그러나 콘크리트 구조물에서 균열의 원인이 되는 가장 큰 요인은 수분의 이동에 의한 균열이다. 따라서 이러한 수분변화에 의한 각종 수축에 대한 성질과 일어나는 재령을 이해하면 각 수축현상의 특징과 저감대책을 세울 수 있을 것이며, 나아가 수축에 의한 콘크리트 균열 제어에 도움이 될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Neville, A. M., "Properties of Concrete," Longman, 1995, 844pp.
2. Mindess, S. and Young, J. F., "Concrete," Prentice-Hall, 1981, 671pp.
3. ACI Committee 224, "Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures," (ACI 224R-84), American Concrete Institute, Detroit, 1984, 20pp.
4. ACI Committee 305, "Hot Weather Concreting," (ACI 305R-91), American Concrete Institute, Detroit, 1987, 20pp.
5. Bazant, Z. P. and Wittmann, F. H., "Creep and Shrinkage in Concrete Structures," John Wiley & Sons, New York, 1982, 362pp.