

# 양생온도와 재령에 따른 콘크리트의 결합수량과 수산화칼슘의 변화

## A Variation of Non-Evaporable Water and Calcium Hydroxides of Concrete with Various Curing Temperatures and Ages

이 창 수\*      윤 인 석\*\*      이 규 동\*\*\*  
Lee, Chang-Soo    Yoon, In-Seok    Lee, Kyu-Dong

### ABSTRACT

The non-evaporable water and calcium hydroxides were measured by TG/DTA for studying the temperature effect on hydration of concrete mixture. The experimental parameters introduced in this study were the curing temperatures, ages and W/C ratios. The mixing temperature was also controlled to improve the efficiency of experimental work. While the mixture cured at high temperature showed the large quantity of non-evaporable water and calcium hydroxides at early age, the production rate of these hydration products was decreased as increasing the curing age, and the quantity of hydration product became smaller than that of the corresponding mixture cured at lower temperature at later age.

### 1. 서 론

콘크리트는 시멘트와 배합수의 화학반응에 의해 발생된 수화물과 미수화시멘트, 골재 및 공극으로 이루어진 복합체이다. 콘크리트 타설에 사용되는 배합수는 초기에는 시멘트 입자와 화학적 반응을 일으키지 않은 자유수 상태로 존재하지만 수화반응이 증가함에 따라 시멘트 입자와 화학적으로 결합한 결합수량이 증가하고 흡착수와 모세관수를 포함한 자유수가 지속적으로 감소한다. 콘크리트의 수화반응은 화학적 반응과 수화생성물의 물리적 특성이 중요한 영향을 미치기 때문에 환경조건, 즉 양생온도와 재령에 따라 다른 특성을 보이게 된다.

현재 수치해석을 통한 콘크리트의 역학적 특성이나 내구성을 판단하기위해 많은 연구가 수행되고 있지만 효율적인 수화도 발현식의 개발과 계수결정을 위한 실험적인 연구는 활성화되지 않고 있다. 현장 콘크리트 구조물은 다양한 온도조건에서 양생되며 수화도는 콘크리트의 강도에 직접적인 관계를 가지기 때문에 이에 대한 연구는 콘크리트의 성능평가와 거푸집존치기간의 설정에 있어 매우 중요한 연구 결과가 될 수 있다고 판단하여 열분석기(TG/DTA)를 이용하여 다양한 온도상태에서 양생되는 보통포틀랜드 콘크리트 내부 수화생성물의 변화를 측정하였다.

\* 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

\*\* 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 연구원

\*\*\* 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 박사수료

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

실험에 사용된 재료로서 시멘트는 T사의 보통포틀랜드 시멘트(비중:3.16, 비표면적:3370cm<sup>2</sup>/g)를 사용하였으며 잔골재로는 시공성 확보를 위하여 쉐사(비중:2.64, 조립률:2.69)와 산사(비중:2.63, 조립률:1.55)를 각각 8:2의 질량비로 혼합하여 사용하였다. 굵은골재(비중:2.64, 조립률: 6.86, Gmax : 20mm)로는 쉐석을 사용하였다.

### 2.2 배합조건

실험에 사용된 배합은 표 1과 같으며 리그닌술폰산계의 AE감수제와 알킬아릴술폰산계의 공기연행제를 각각 단위시멘트량의 0.2~0.4% 및 0.004~0.0085% 첨가하여 슬럼프는 5~11cm, 공기량은 3.7~5.2% 이내로 조절하였다.

표 1 배합조건

물-시멘트비(%)	잔골재비(%)	단위량(kg/m <sup>3</sup> )				
		물	시멘트	쉐사	산사	쉐석
40	43	171	427.5	588.7	147.2	976.2
50	43	171	342.0	613.2	153.3	1016.9

### 2.3 실험변수

일반적인 현장 타설 콘크리트의 온도조건을 모사하기위해 온도변수를 5℃, 20℃, 30℃로 설정하였다. 또한 타설온도에 의한 초기수화현상의 왜곡을 최소화시키기 위하여 실험재료의 온도를 미리 낮추거나 상승시키는 방법으로 타설온도를 조절하였으며 실험에 도입한 변수는 표2와 같다.

표 2 실험변수

배합기호	물-시멘트비 (%)	타설온도	양생온도	실험재령
40-5	40	10	5	1, 3, 7, 14, 28, 56, 91, 120일
40-20	40	20	20	1, 3, 7, 14, 28, 56, 91일
40-30	40	30	30	1, 3, 7, 14, 28, 56일
50-5	50	10	5	1, 3, 7, 14, 28, 56, 91, 120일
50-20	50	20	20	1, 3, 7, 14, 28, 56, 91일
50-30	50	30	30	1, 3, 7, 14, 28, 56일

### 2.4 시료제작

원형철제몰드(100×200mm)를 사용하여 공시체를 제작하였다. 재령 24시간 이후 탈형하여 실험재령까지 수중양생을 실시하였으며 온도조건의 균일성을 확보하기 위해 모든 작업은 각각의 양생온도 조건에 맞게 설정된 항온항습실에서 수행하였다. 수중양생된 콘크리트 공시체는 표면으로부터의 깊이에 상관없이 일정한 조직구조를 가진다는 연구결과를 참고하여 본 연구에서는 콘크리트 커터를 이용하여 원형 공시체의 중간부를 절단하여 분쇄한 후, 5mm체를 통과하고 2.5mm체에 남는 시료만을 추출하였다. 추출된 시료에서 굵은 골재부를 제거하고 아세톤 용액에 24시간 침지한 후, 대기중에서 5시간 동안 건조하였다. 건조된 시료는 2주 동안 완전건공상태로 보관한 후, 압밀분쇄하여 40μm체를 통과한 시료만을 이용하여 열분석 시험(TG/DTA)을 실시하였다.

## 2.5 열분석(Thermogravimetry / Differential Thermal Analysis, TG/DTA)

수화된 조직체를 대기온도에서 1000℃까지 가열시키면 시료 내부에 존재한 결합수분과 수화물의 분해로 시료의 중량이 지속적으로 변화한다. 열분석기는 외부 온도변화에 의한 시료의 중량변화를 측정하는 천칭부와 시료내부의 화학반응으로 인한 발열 또는 흡열 변화를 측정하는 시차열분석부로 구성된 장치로 온도변화에 의한 특정 화합물이 분해되는 온도구간과 이 구간에서의 시료의 중량변화를 동시에 측정할 수 있는 실험 장치이다. 본 연구에서는 RIGAKU사의 Thermoplus 8110기를 이용하여 실험을 수행하였으며 시료는 20℃에서 105℃ 까지 20℃/min의 속도로 승온시킨 후, 15분간 일정한 온도로 유지하고 다시 1000℃까지 20℃/min의 속도로 가열하였다.

수산화칼슘량은 425-550℃ 온도범위에서 발생하는 수산화칼슘의 탈수반응을 시차열분석 그래프를 이용하여 측정하고, 이 온도범위에서의 시료의 중량변화량에  $Ca(OH)_2$ 와  $H_2O$ 의 몰중량비를 곱하여 정리하였다. 또한 105℃에서 1000℃의 온도범위에서 발생하는 시료의 중량변화량을 결합수량으로 가정하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 수산화칼슘

보통 포틀랜드 시멘트의 주요광물인  $C_3S$ ,  $C_2S$ 는 수화반응을 일으켜  $C-S-H$ 와 수산화칼슘을 생성한다. 수화생성물 중 수산화칼슘은 조직체를 구성하는 성분중에 가장 약한 성분으로 알려져 있지만 혼화재를 사용하지 않은 배합의 경우는 수화도가 증진됨에 따라 수화칼슘의 생성량도 동시에 증가하여 수화특성을 판단하는 지표로 사용될 수 있다.

물시멘트 40% 배합의 양생온도와 재령에 따른 수산화칼슘 생성량을 표시한 그림 1을 보면 양생온도가 높을수록 수화반응 활성화로 초기재령에서 높은 수준의 수산화칼슘이 생성되었으나 중기이후의 재령에서는 지속적인 수화반응으로 양생온도가 낮은 배합이 수산화칼슘 생성량이 오히려 크게 나타났다. 특히 30℃와 20℃ 양생의 경우는 각각 재령 3일과 28에 이후에는 수산화칼슘의 추가적인 생성이 정지되었으나 5도양생의 경우는 재령 91일까지도 지속적인 수산화칼슘의 생성을 보였다.

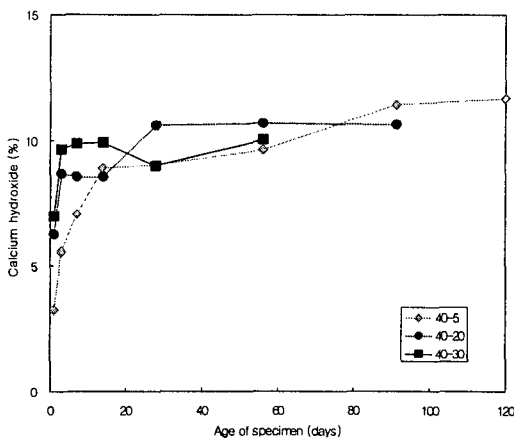


그림 1 수산화칼슘 생성량 (W/C = 0.4)

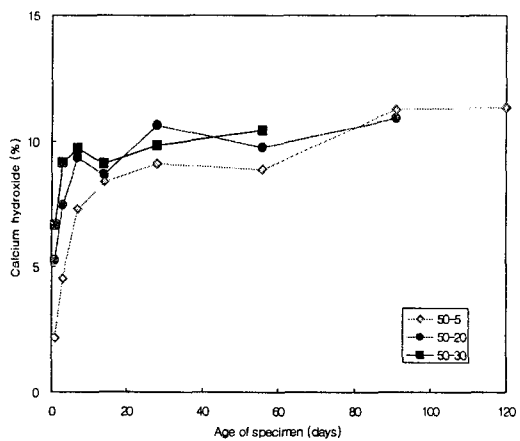


그림 2 수산화칼슘 생성량 (W/C = 0.5)

### 3.2 결합수

콘크리트의 수화도는 원칙적으로  $C-S-H$ 의 생성량을 기준으로 판단하는 것이 가장 적절하지만  $C-S-H$ 는 명확한 결정구조를 가지지 않기 때문에 열분석 결과만으로 이를 실험적으로 정량화하는 것이 불가능하여 본 연구에서는 결합수량을 이용하여 수화특성을 측정하였다.

물시멘트 40% 배합의 양생온도와 재령에 따른 결합수량의 변화를 나타낸 그림 3을 보면 양생온도가 높을수록 수화반응의 활성화로 초기에 급격한 결합수량의 증가를 보였지만 중기이후, 결합수량의 증가율이 감소하여 최종적으로는 양생온도가 낮을수록 높은 결합수량이 측정되었다. 특히 30°C 양생의 경우 재령 7일 이후 결합수량의 증가가 발생하지 않았으며 20°C의 경우도 재령 14일에 조정기에 돌입하였으나 5°C 양생의 경우는 지속적으로 결합수가 증가하였다. 물시멘트비 50%의 실험결과를 정리한 그림 4에서는 5°C 양생, 재령 14일의 측정결과가 실험적 오차로 인해 다소 과다하게 측정되었으나 전반적으로 물시멘트비 40%의 경우와 유사였다.

결과적으로 물시멘트비에 관계없이 양생온도가 높을수록 가장 낮은 최종결합수량을 보였으며 이러한 현상은 고온양생은 초기수화를 활성화 시키지만 시멘트 입자 주위에 비교적 단단한 수화막을 형성시켜 중·후기에는 비수화물질의 확산 방해와 동시에 내부수화물질(Inner product)의 지속적인 수화도 방해하기 때문으로 판단되며 콘크리트의 수화는 초기재령에서는 화학적반응에 영향을 크게 받지만 재령이 증가함에 따라 조직체의 물리적 현상에 오히려 크게 영향을 받는 것으로 사료된다. 또한 결합수 생성량은 물시멘트비의 영향이 매우 작았으며 이러한 현상은 실험에 사용된 배합이 포틀랜드 시멘트 입자를 완전히 수화시키는데 필요한 수량인 25-35%를 충분히 초과하기 때문인 것으로 판단된다.

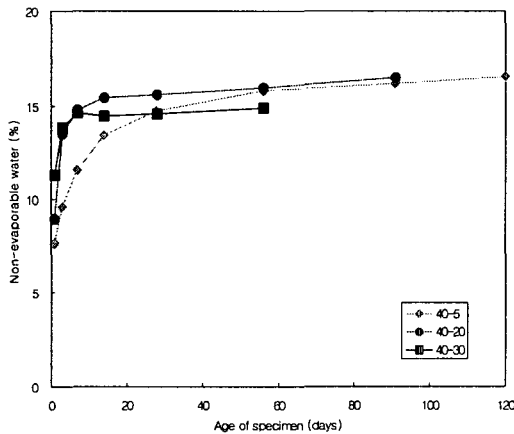


그림 3 결합수량 (W/C = 0.4)

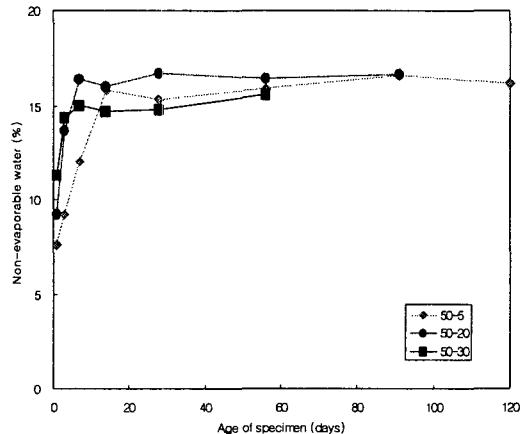


그림 4 결합수량 (W/C = 0.5)

## 5. 결 론

열분석 (TG/DTA)을 통하여 양생온도와 재령에 따른 수화체 내부의 수산화칼슘과 결합수의 변화를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 양생온도가 높을수록 수화촉진으로 인해 초기재령에서 수산화칼슘과 결합수가 빠르게 생성되었다.
- (2) 수산화칼슘과 결합수의 최종생성량은 양생온도가 낮을수록 크게 나타났다.
- (3) 콘크리트의 수화에 있어 초기에는 온도에 의한 화학반응이 영향을 크게 미쳤지만 중·후기 이후에는 조직체의 물리적 특성이 더욱 크게 영향을 미치는 것으로 나타나, 수화도 모델링에 있어 이러한 효과를 복합적으로 고려하는 것이 필요할 것으로 판단된다.