

# 고온조건에서 콘크리트의 수분증발 해석기법

## Analytical Method for Moisture Vaporization of Concrete under High Temperature

이태규

우송대학교 철도건설시스템학부

Tae-Gyu Lee(tglee@wsu.ac.kr)

### 요약

콘크리트가 화재에 노출되면 콘크리트 표면에서의 수분뿐만 아니라 콘크리트 내부에서의 수분도 수분의 평형 및 전달조건에 의하여 증발이 발생된다. 수분의 평형조건은 재료의 자기이력거동으로 표현되는 물의 증발에 대한 수착등온선 관계로 설명된다. 본 논문은 화재시 콘크리트 내부의 수분변화를 예측하고자 하는 것으로 부재 내부의 임의의 위치에서의 상대습도를 산정하기 위하여 유한요소방식을 적용하였다. 또한 고온에서 콘크리트의 수분확산 특성치에 대해서도 모델식을 제시하였다. 이러한 해석기법의 정확성을 검증하기 위하여 실험데이터와 비교하였으며, 그 결과 수분증발로 인하여 수분이 감소되는 효과를 포함한 전반적인 부재 내부의 수분이동현상이 실제 실험데이터와 거의 유사하게 나타나는 것으로 확인되었다.

■ 중심어 : | 콘크리트 | 수분확산 | 증발 | 발산 | 수축등온선 |

### Abstract

Moisture evaporates, when concrete is exposed to fire, not only at concrete surface but also at inside the concrete to adjust the equilibrium and transfer properties of moisture. The equilibrium properties of moisture are described by means of water vapor sorption isotherms, which illustrate the hysteretical behavior of materials. In this paper, the prediction method of the moisture distribution inside the concrete members at fire is presented. Finite element method is employed to facilitate the moisture diffusion analysis for any position of member. And the moisture diffusivity model of high strength concrete by high temperature is proposed. To demonstrate the validity of this numerical procedure, the prediction by the proposed algorithm is compared with the test result of other researcher. The proposed algorithm shows a good agreement with the experimental results including the vaporization effect inside the concrete.

■ keyword : | Concrete | Moisture Diffusion | Vaporization | Emission | Sorption Isotherm |

## 1. 서론

### 1. 연구의 배경

콘크리트는 일반 토목 구조물뿐만 아니라 건축 구조

물 등 모든 사회기반 구조물에 폭넓게 적용되어 사용되고 있다. 특히 최근에 들어 각종 구조물의 대형화 추세에 따라 장대교량, 특수교량, 고층 건축물 등이 다양하게 건설되고 있으며 이에 따라 고강도 및 고성능 콘크

접수일자 : 2017년 04월 06일

수정일자 : 2017년 05월 30일

심사완료일 : 2017년 05월 31일

교신저자 : 이태규, e-mail : tglee@wsu.ac.kr

리트의 사용이 필수적으로 되어가고 있는 추세에 있다. 다른 구조물들과 마찬가지로 콘크리트 구조물 역시 일반적으로 사용성(serviceability)과 안전성(safety)을 만족시키는 조건에서 설계를 하게 된다. 특히 콘크리트가 고강도화 할수록 화재 발생과 같은 고온 조건에서 인명 피해와 재산손실에 직접적인 영향을 미치기 때문에 일정한 수준 이상의 내화성능을 확보할 필요성이 절실히 제기되고 있으며 이에 따라 고온 하에서의 안전성(fire safety)도 중요한 설계조건으로 급부상되고 있는 상황이다.

화재와 같은 고온 하에서의 안전성은 결국 구조물의 내화성능(fire resistance)으로 평가되며, 내화성능은 고온 하에서의 구조부재의 하중저항성능으로 정의된다. 지금까지의 연구결과에 따르면 구조물의 내화성능은 콘크리트 압축강도, 내부 습도, 치밀성, 구조물의 크기와 형상, 사용재료, 하중조건, 화재발생조건 등에 따라 매우 큰 차이를 보이는 것으로 알려져 있다[1][2].

콘크리트는 강도가 높아질수록 단위수량의 감소로 인하여 치밀성(density)이 증가하게 된다. 이때 화재와 같은 고온이 발생되면 내부 수분의 증발로 인하여 증기압이 형성되며, 이 증기압이 콘크리트의 저항력보다 커질 경우 폭발(explosive spalling)이 발생된다[3]. 폭발은 급작스러운 온도 상승으로 인하여 콘크리트 부재 표면이 심한 폭음과 함께 폭발적으로 파열되는 현상으로, 구조물에 치명적인 내력저하를 초래하는 요인으로 작용한다. 그러므로 폭발현상을 평가하기 위해서는 그 근간이 되는 콘크리트 내부의 수분이동현상에 대한 명확한 규명이 우선적으로 필요하다.

## 2. 연구의 목적

콘크리트의 수분은 함수율의 구배에 의한 확산(diffusion)과 외부 환경과의 상대습도 차이를 통한 발산(emission)에 의해 액체 및 기체상의 이동만을 지금까지는 고려하여 왔다. 하지만 고온에서는 콘크리트 내부에서 수분이 바로 증발(internal vaporization)하게 됨에 따라 내부 함수량의 변화가 추가적으로 발생되고 있다. 또한 콘크리트 내부에도 매우 다양한 크기의 공극이 존재하고, 각 채렁에 따라 공극의 크기가 변화하기

때문에 콘크리트의 수분이동은 다른 다공질 재료에 비하여 매우 복잡한 양상을 보이고 있다.

따라서 본 논문에서는 콘크리트 내부에서의 수분증발에 따른 영향을 포함한 비정상상태 수분확산방정식을 전개하고, 고온에서의 재료의 수분이동 특성에 관한 해석적 모델링을 수행하고자 한다. 또한 이로부터 콘크리트 부재 내부에서의 시간에 따른 상대함수율의 변화 과정에 대한 해석적 알고리즘을 개발하고자 한다.

## II. 고온에서의 수분이동

### 1. 확산

콘크리트 내부의 함수율의 차이에 의한 확산에 따른 수분의 이동과정은 Fick의 확산법칙으로 알려져 있는 수분량 평형방정식으로 나타내게 된다. 수분의 확산유속(moisture flux,  $J$ )은 수분경사(moisture gradient)에 비례하므로 다음과 같이 콘크리트 내부 상대함수율(relative moisture ratio)의 형태로 표현할 수 있다.

$$J = -D_{x,y,z} \text{ grad } w \quad (1)$$

여기서,  $w$ 는 콘크리트 내부 상대함수율,  $D_{x,y,z}$ 는 각 방향으로의 수분확산계수(moisture diffusion coefficient)이다.

지금까지는 수분확산이론(moisture diffusion theory)의 적용에 있어서 콘크리트 내부 상대함수율과 상대습도를 동일하게 취급하여, 수분의 확산유속을 콘크리트 내부의 상대함수율 대신에 공극의 상대습도로 나타내는 방법을 사용하고 있다. 하지만 상대함수율과 상대습도는 동일한 값이 아니라 수축등온선의 관계로 변환시켜야 하기 때문에 본 논문에서는 보다 정밀한 해석을 수행하기 위하여 상대습도로 변경하지 않고 상대함수율을 그대로 수식으로 전개하였다.

식(1)로부터 수분질량 평형방정식(mass balance equation)은 식(2)와 같이 나타낼 수 있으며, 콘크리트에서 수분의 확산이 등방성이라고 가정하고 각 방향의 수분확산계수는 모두  $D$ 로 정의한다. 또한 내부에서 함

수량이 변화하지 않는 일반적인 경우에서의 정상상태 수분확산 평형방정식(steady-state moisture diffusion equation)을 유도하면 식(3)과 같이 나타난다.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\operatorname{div} J = \operatorname{div} (D \operatorname{grad} w) \quad (2)$$

$$D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (3)$$

## 2. 발산

콘크리트 표면에서 외부 환경으로의 기체상의 이동인 발산에 대하여 평가하기 위해서는 콘크리트 표면의 상대습도와 외기의 상대습도 사이의 관계를 설정하여야 하며, 본 논문에서는 다음과 같이 발산에 대한 경계조건을 설정하였다.

Bazant와 Najjar의 연구결과[4]에 의하면 콘크리트 표면에서의 수분 발산은 식(4)와 같은 Gibb's free energy의 차이에 비례한다고 알려져 있으며, Gibb's free energy의 차는 식(5)와 같다.

$$u = \left( \frac{R}{M} \right) T \ln H + u_{sat}(T) \quad (4)$$

$$\Delta u = u(H_{ext}) - u(H) \quad (5)$$

여기서,  $R$ 은 기체 상수,  $M$ 은 분자량,  $T$ 는 온도,  $H$ 는 콘크리트 표면의 상대습도,  $u_{sat}$ 는 포화시 Gibb's free energy,  $H_{ext}$ 은 외기의 상대습도이다.

콘크리트 표면의 온도와 외부의 온도는 비례한다고 가정하면 Gibb's free energy의 차는  $\ln(H_{ext}/H)$ 에 비례하며, 표면에서의 수분 발산에 의한 이동은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$n \cdot J = B (\ln H_{ext} - \ln H) \quad (6)$$

여기서,  $B$ 는 표면의 수분 발산률,  $n$ 은 외측으로의 단위수직벡터이다.

식(6)을 식(1)에 대입하여 콘크리트 표면에서의 수분 발산에 대한 경계조건으로 정리하면 다음과 같이 나타

낼 수 있다.

$$q_w = D_n \frac{\partial w}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{sa}} = f (H_{ext} - H) \quad (7)$$

여기서,  $q_w$ 는 외기와외의 접촉면에서 작용하는 발산량,  $D_n$ 은 표면의 발산계수,  $\Gamma_{sa}$ 는 외기와 접하는 면적,  $f$ 는 표면계수(surface factor)이다.

## 3. 내부증발

콘크리트 표면에서의 발산이 아닌 화재와 같은 고온 조건에서 발생하는 콘크리트 내부에서의 직접적인 수분증발은 주변온도가 100 °C 이상이고 콘크리트 내부에 수분이 존재하는 기화조건이 성립하는 경우에 발생한다.

시간에 따른 함수율의 변화를 고려한 비정상상태 수분확산 평형방정식(transient moisture diffusion equation)을 적용하여 손실되는 열량을 산정하고, 이를 부피의 단위로 환산하면 증발에 의하여 소실되는 함수량을 산정할 수 있으며, 이를 식(3)과 같은 형태의 평형방정식으로 전개하면 다음과 같다.

$$D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = - \frac{c_L}{\rho c_u} \frac{\partial w}{\partial t} \quad (8)$$

여기서,  $c_L$ 는 단위체적당 손실되는 열량,  $\rho$ 는 콘크리트의 단위중량,  $c_u$ 는 물의 기화열이다.

## 4. 수착등온선

수분확산해석을 수행하면 각 시간에 따른 콘크리트 내부의 상대함수율이 계산되며 이를 상대습도로 환산하려면 수착등온선 관계를 도입하여야 한다.

콘크리트 내부에서 상대함수율의 변화는 주변의 상대습도에 의해 좌우된다. 온도가 일정할 때 콘크리트 내부에 존재하는 수분의 양은 주변의 상대습도와 평형을 이루게 되는데 이때의 상대함수율과 상대습도의 관계를 수착등온선(sorption isotherm)이라 한다. 이러한 평형상태가 상대함수율이 증가하면서 도달했을 경우에

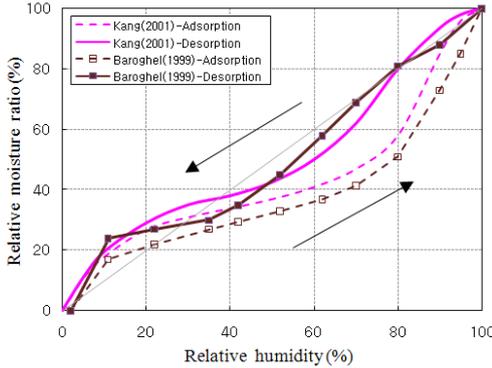


그림 1. 수착등온선 관계

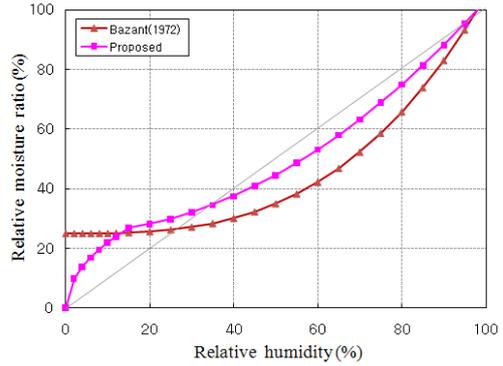


그림 2. 탈착등온선 모델

는 흡착등온선(adsorption isotherm)이라 하고, 반면에 상대습도가 감소하면서 평형상태에 도달했을 경우에는 탈착등온선(desorption isotherm)이라 한다.

[그림 1]은 다른 연구자들[5][6]에 의한 수착등온선의 사례로서 상대습도의 전 범위에 걸쳐서 상대습도와 상대습율과의 관계를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 콘크리트의 흡착등온선과 탈착등온선은 차이를 보이고 있는데 이는 콘크리트가 건조이력의 성질을 갖고 있음을 나타내는 것으로, 최초의 건조상태를 이미 겪은 콘크리트에서는 그 차이가 상당히 줄어드는 성질이 있다. 실제 콘크리트에서는 건조수축 또는 화재발생 등과 같이 거의 모든 경우에 있어서 함수량이 감소하는 경우가 대부분이므로 탈착등온선이 주된 연구대상으로 다루어진다.

콘크리트의 수착등온선은 물-시멘트비, 시멘트 종류, 양생기간, 양생방법, 온도, 혼화재료, 골재 함유량 등에 따라 차이를 보이는 것으로 알려져 있지만 아직까지 그 관계식이 명확하게 규명되지 못한 상황이다.

Bazant[7]는 콘크리트의 수착등온선 연구를 통하여 상대습도가 25~98%의 범위 내에서 [그림 2]와 같은 단순화된 모델을 제시하였다. 그러나 이 모델은 전반적으로 상대습도에 따른 상대습율을 적게 평가하고 있는 경향이 있으며, 또한 화재와 같은 완전 건조상태를 고려하지 않아서 상대습율이 25% 이상일 경우만 적용시킬 수 있는 제약조건을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 모든 상대습도 범위에 대하여

적용되면서 탈착등온선에 근접한 다음과 같은 식을 제안하였으며, 그 형상은 [그림 2]와 같다.

$$H \leq 15\% \text{일 경우, } w = 6.91 \sqrt{H} \quad (9)$$

$$H > 15\% \text{일 경우, } w = 100 - 75 \left[ 1 - \left( \frac{H}{98} \right)^2 \right]$$

### 5. 해석 알고리즘 개발

이상에서와 같은 수분확산 평형방정식에 발산과 내부증발을 포함시켜 유한요소법으로 해석이 가능한 행렬방정식의 형태[8]로 구성하면 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} & \int \int \int N^T N |J| d\xi d\eta d\zeta \dot{w} \\ & + \left[ \int \int \int D B^T B |J| d\xi d\eta d\zeta \right. \\ & \left. + \int \int f N^T N |J| d\xi d\eta \right] w \\ & = \int \int f w_{\text{ext}} N^T |J| d\xi d\eta \\ & - \int \int \int \left( \frac{c_L}{\rho_c c_u} \frac{\partial w}{\partial t} \right) N^T |J| d\xi d\eta d\zeta \end{aligned} \quad (10)$$

이와 같은 행렬방정식으로부터 상대습율을 구하고 이를 다시 상대습도로 변환시키는 해석 알고리즘을 [그림 3]과 같이 개발하였다. 기존의 해석 알고리즘의 경우에는 수분이동과 온도를 독립적인 관계로 취급하여 각기 별도의 해석을 수행하고, 최종적인 결과들만을 단순히 합산(summation)하는 방식을 취하고 있다. 그러

나 본 논문에서는 기화조건을 설정하고 증발에 따른 함수율 변화를 고려하기 위하여 수분이동과 온도를 서로 연계하여 동시에 평가하는 방식을 적용하였으며, 이 중 본 논문에서는 수분이동 해석에 관한 내용만으로 구성하였다.

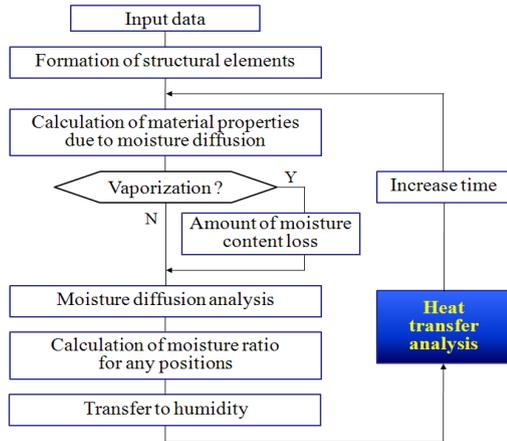


그림 3. 해석 알고리즘의 흐름도

### III. 재료의 수분이동 특성치

#### 1. 수분확산계수

수분확산계수는 당초 습도만의 함수로 여겨져 왔으나 이후 많은 연구에 따라 최근에는 온도와 습도의 복합함수로 취급되고 있다. 습도와 수분확산계수의 관계는 동일한 온도 하에서 습도가 90% 이상이거나 40% 이하일 때는 수분확산계수의 변화가 거의 없지만 그 사이인 40~90%에서는 급격히 변화되는 것으로 알려져 있다. 또한 온도와 수분확산계수와의 관계는 동일한 습도 하에서 온도를 100°C 이상 상승시키면 수분이 기화하여 투수성이 급격히 증가하기 때문에 수분확산계수도 급격히 증가하며, 온도가 40~60°C 이하일 경우에는 거의 변화가 없는 것으로 알려져 있다.

따라서 수분확산계수는 습도와 온도의 영향이 모두 포함되어 있으면서 현재 일반적으로 많이 사용되고 있는 다음과 같은 Mihashi와 Numao의 모델[9]을 적용하였다.

$$D = D_1 \cdot f_1(H) \cdot f_2(T) \cdot f_3(T) \quad (11)$$

$$f_1(H) = \alpha + \frac{1-\alpha}{1 + \left(\frac{1-H}{1-H_c}\right)^n}$$

$$f_2(T) = \left(\frac{T}{T_o}\right)^{N_1} \exp\left\{\frac{U}{R}\left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T}\right)\right\}$$

$$f_3(T) = \exp\left\{\left(\frac{T-273}{90}\right)^{N_2}\right\}$$

$D_1$ 은 기준온도( $T_o$ )와 포화상태( $H = 1.0$ )에서의 수분확산계수,  $\alpha$ 는 수분확산계수의 최대값과 최소값의 비율,  $H_c$ 는 평균 수분확산계수일 때의 상대습도(%),  $T_o$ 는 기준온도(293 K),  $U$ 는 활성화 에너지,  $R$ 은 기체상수,  $n, N_1, N_2$ 는 콘크리트 배합과 양생조건에 따라 변화하는 재료 정수이다.

#### 2. 표면계수

현재 보통강도 콘크리트의 표면계수는 [그림 4]와 같은 Sakata의 직선식[10]이 일반적으로 사용되고 있지만 고강도 콘크리트에 대하여서는 아직까지 실용화된 모델식이 없는 실정이다.

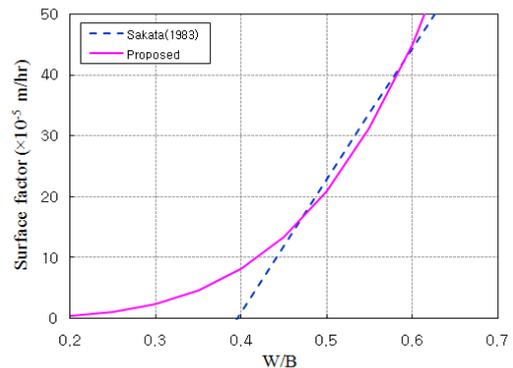


그림 4. W/B비에 따른 표면계수

따라서 본 논문에서는 고강도 콘크리트까지의 적용성 확대를 위하여 고차항의 식을 근간으로 하고, 물-결합재비( $W/B$ )가 0.2~0.3 정도일 때 표면계수가  $(1 \sim 2) \times 10^{-5}$ 을 보이는 연구결과[11]와 수분이 없을 경우에

는 표면계수가 0이라는 경계조건을 추가하여 식(12)과 같은 모델식을 제안하였다. 이를 Sakata의 식과 비교하면 [그림 4]와 같다.

$$f = [385 (W/B)^{4.2}] \times 10^{-5} \quad (12)$$

#### IV. 실험치와의 비교

高正遠 등[12]은 고강도 콘크리트에 대한 화재시 온도 및 습도의 변화를 파악하기 위하여 [그림 5]와 같이 벽체에 대한 실험을 수행하였다. 벽체는 두께 120mm에 500×500mm 크기로 제작하였으며, 철근은 D10을 사용하고 피복두께는 40mm로 배치하였다. 상대습도를 변화를 측정하기 위한 센서는 함수율측정용 전극[13]을 [그림 6]과 같이 표면으로부터 각각 30, 70, 90mm의 위치에 매설하였으며, 건조계시제령을 두 가지 형태로 구분하여 각각 실험을 수행하였다. 화재는 비제하 조건으로 [그림 7]과 같은 ISO 표준가열곡선[14]을 적용하여 한 면에서만 화재가 발생하는 것으로 하였으며, 시험시간은 2시간으로 설정하였다. 가열에 따른 콘크리트 내부로의 열전달은 콘크리트 온도평가시스템[15]에 의거하였다.

사용된 콘크리트의 배합은 [표 1]과 같으며, 타설 1일 후 27일간 수증양생한 후 다시 기건상태로 28일 경과된 시험체를 대상으로 하여 해석결과와의 비교를 수행하였다. 해석시작시간에서의 초기 상대습율은 실험결과에 의거하여 PC-25는 78%, PC-55는 90%로 각각 설정하였다.

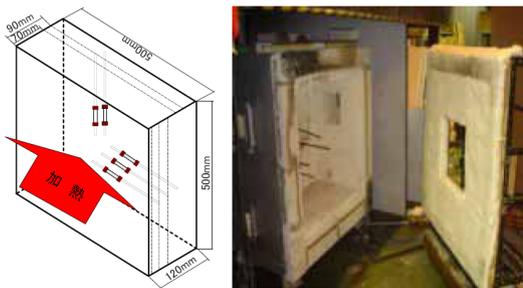


그림 5. 시험체 형상

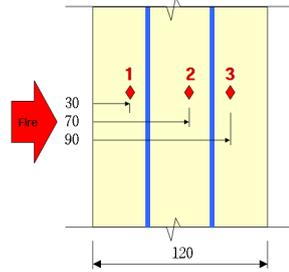


그림 6. 센서의 배치위치

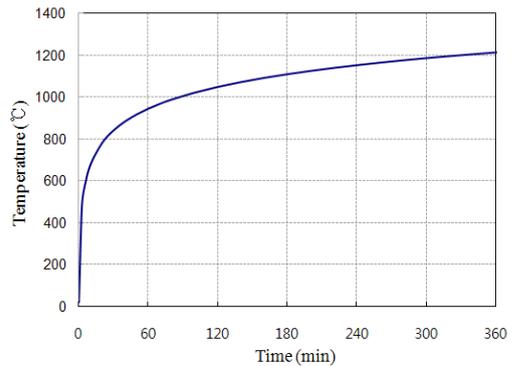


그림 7. ISO 표준가열곡선

표 1. 콘크리트 배합조건

Type	$f_{ck}$ (MPa)	W/B (%)	W	C	S	G	Ad. (C×%)
PC-25	80	25	165	660	818	742	0.75
PC-55	40	55	165	300	828	1035	0.40

[그림 8]은 콘크리트 압축강도 80 MPa의 고강도 콘크리트에 대한 결과(PC-25)로서 실험에 의한 상대습도를 해석결과와 비교해 보면 1, 2, 3번의 모든 계측위치에서 실험치와 해석결과 모두 시간에 따른 수분의 감소현상이 거의 비슷하게 나타나고 있음을 알 수 있으며, 화재에 따라 콘크리트 내부가 완전 건조상태가 되어 내부수분이 0에 도달하는 상태에 이르기까지 잘 예측되고 있음을 알 수 있다.

콘크리트 압축강도 40 MPa인 보통강도 콘크리트에 대한 결과(PC-55)는 [그림 9]와 같다. 보통강도 콘크리트에서도 해석결과는 화재에 따른 콘크리트 내부 수분의 감소를 잘 예측하고 있는 것으로 판단된다. 다만 실험치를 보면 2, 3번 위치에서 상대습율이 100%까지

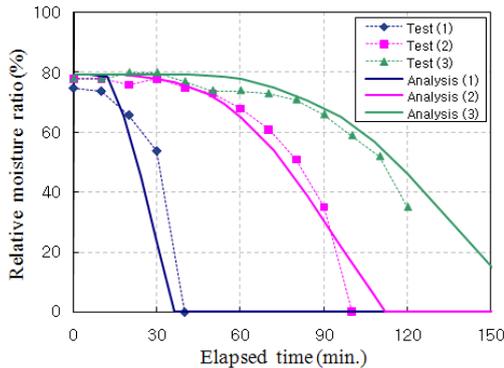


그림 8. PC-25 시험체의 상대습수율

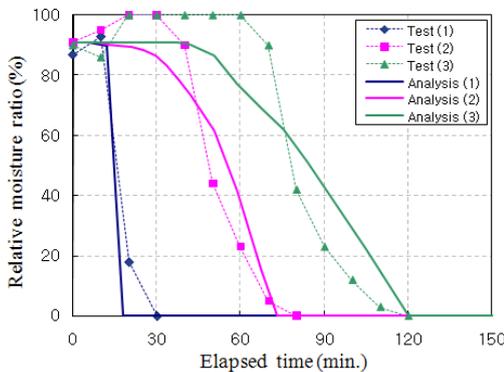


그림 9. PC-55 시험체의 상대습수율

부분적으로 증가되는 것을 볼 수 있는데 이는 급격한 온도상승에 따라 콘크리트 표면부의 증기압이 커지면서 압력차가 발생되어 표면의 수분이 내부방향으로 이동하였기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 재료가 치밀하지 못한 보통강도 콘크리트에서만 발생하는 것으로, 고강도 콘크리트인 PC-25의 경우에는 표면부의 급격한 온도상승에도 불구하고 재료 자체의 치밀성으로 인하여 표면의 수분이 내부로 이동하는 현상은 거의 나타나지 않고 있다. 하지만 본 논문에서는 아직까지 이러한 급격한 압력차에 의한 수분의 내부이동 현상까지는 고려하지 못하고 있어 해석결과에서는 이러한 경향이 나타나지 않고 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 고온 하에서 콘크리트의 수분확산, 발산, 내부증발의 수분이동과정, 수축등온선에 의한 정식화, 재료의 수분이동 특성치 개발을 모두 고려한 콘크리트의 수분증발을 평가할 수 있는 해석적 알고리즘을 개발하였다. 화재와 같은 고온 조건에서는 온도와 수분이 상호 밀접한 연관관계를 가지기 때문에 보다 정밀한 해석을 수행하기 위하여서는 기화조건을 판단하고 이에 따라 온도해석과 수분이동해석을 동시에 병행하는 기법의 적용이 필요하였으며, 이중 본 논문에서는 수분이동해석에 관한 내용만으로 구성하였다. 또한 사용되는 재료의 수분이동 특성치인 수분확산계수 및 표면계수에 대하여서도 분석하였다.

이러한 해석적 결과를 다른 연구자에 의한 실험치와 비교하였으며, 실험치와의 비교결과 시간에 따른 콘크리트 내부에서의 수분이동과정에 대하여 본 해석결과는 실제와 거의 유사하게 예측되고 있는 것으로 평가되었다. 또한 고온에서 콘크리트 내부의 수분증발에 따라 내부 수분이 감소하는 효과도 거의 유사하게 예측하고 있는 것으로 평가되어 본 해석 알고리즘의 정확성 및 신뢰성을 입증할 수 있었다.

## 참고 문헌

- [1] 강석원, 이순이, 이태호, “화재 패턴인식을 위한 학습 알고리즘,” 한국콘텐츠학회 학술대회 논문집, 제7권, pp.521-525, 2009.
- [2] 김홍열, *고온영역에서 고강도 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구*, 건국대학교, 박사학위논문, 2002.
- [3] 김형준, 한상훈, 최승관, “화재시 콘크리트 요소 폭렬영향성 고찰,” 한국화재소방학회 논문지, 제21권, 제2호, pp.54-63, 2007.
- [4] Z. P. Bazant and L. J. Najjar, “Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete,” *Materials and Construction*, Vol.5, pp.3-20, 1972.

[5] V. Baroghel-Bouny, "Water Vapour Sorption Experiments on Hardened Cementitious Materials," *Cement and Concrete Research*, Vol.37, pp.414-437, 2007.

[6] 강석화, 수화반응 모델과 미세구조의 상관관계 연구, 연구보고서, 과학기술부 국책연구개발사업, 동양메이저, 2001.

[7] Z. P. Bazant, "Thermodynamics of Hindered Adsorption and Its Implications for Hardened Cement Paste and Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol.2, No.1, pp.1-16, 1972.

[8] I. M. Smith and D. V. Griffiths, *Programming the Finite Element Method*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 1998.

[9] H. Mhashi and T. Numao, "Diffusion Process and Shrinkage of Concrete at Evaluated Temperatures," *Journal of JCI*, Vol.10, pp.139-146, 1988.

[10] K. Sakata, "A Study on Moisture Diffusion in Drying and Drying Shrinkage of Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol.13, pp.216-224, 1983.

[11] J. K. Kim and C. S. Lee, "Moisture Diffusion of Concrete Considering Self-Desiccation at Early Ages - An Experimental Investigation," *Cement and Concrete Research*, Vol.29, No.12, pp.1921-1927, 1999.

[12] 高正遠, 田村政道, 兼松學, 野口貴文, "火災加熱條件下にあはるコシクリートの細孔構造の變化と熱・水分移動に関する實驗的研究," *日本建築學會 大會學術講演概要集*, pp.55-56, 2005.

[13] 고정원, 박상준, 오보환, "화재 가열 환경 하에 있는 콘크리트 중의 열 수분 이동 측정 시스템," *한국콘크리트학회지 기술기사*, 제16권, 제9호, pp.58-62, 2007.

[14] ISO Technical Committee 92, *Properties of Materials at High Temperatures*, RILEM Committee 44, 1985.

[15] 이태규, "기화열을 고려한 콘크리트의 온도평가 시스템 개발," *한국콘텐츠학회논문지*, 제15권, 제12호, pp.604-611, 2015.

저 자 소 개

이 태 규(Tae-Gyu Lee)

종신회원



- 1989년 2월 : 한국과학기술원 토목공학과(공학석사)
- 1993년 2월 : 한국과학기술원 토목공학과(공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 우송대학교 철도건설시스템학부 교수

<관심분야> : 건설시스템, 알고리즘, OOP, 멀티미디어