

고온수열 전후의 콘크리트 내구성 변화에 관한 연구

The Change of Concrete Durability under High Temperature

박재홍* 전봉민** 오상균*** 박동천****
Park Jae Hong Jeon Bong Min Oh Sang Gyun Park Dong Cheon

ABSTRACT

The nitrogen adsorption method was used to evaluate the change fine pore structure of concrete under high temperature. The mechanical properties and chloride ion diffusion coefficient were also measured. Two dimension FEM model for the life expectancy of RC structure was built considering the effect of high temperature. The porosity under $0.01\mu\text{m}$ decreased in proportion to the temperature. However, that of $0.01\mu\text{m}\sim 0.1\mu\text{m}$ increased. The strength decreased and the chloride ion diffusion coefficient increased in the temperature range of $200\sim 600^\circ\text{C}$.

요 약

본 연구에서는 고온 수열 콘크리트의 세공구조 변화를 평가하기 위하여 질소 흡착법을 이용한 분석을 실시하였다. 아울러 역학적 특성 및 염화물 이온 확산계수의 변화도 측정하였으며, 고온 수열 후의 내구성 변화가 RC조의 수명에 미치는 영향을 예측하기 위해 2차원 유한요소 모델을 구축하였다. W/C에 따라 각 시험체의 가열온도가 증가할수록 약 $0.01\mu\text{m}$ 이하의 미세 공극량은 감소하고, 약 $0.01\mu\text{m}\sim 0.1\mu\text{m}$ 크기의 세공공극은 증가하였다. 역학적 특성은 탈수가 발생하는 $200\sim 600^\circ\text{C}$ 에서는 급격하게 감소하였으며 염화물이온 확산계수는 반대로 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 수치해석을 통하여 가열(화재)에 의하여 콘크리트 속 철근 위치가 발청 한계 농도에 도달하는데 소요되는 시간이 단축되는 것을 알 수 있었다.

* 정회원, 동의대학교 건축공학과 대학원 석사과정

** 정회원, 동의대학교 건축공학과 대학원 박사과정

*** 정회원, 동의대학교 건축공학과 부교수

**** 정회원, 한국해양대학교 해양공간 건축학부 전임강사

1. 서론

콘크리트 구조부재가 화재 등과 같은 고온에 장시간 노출될 경우 시멘트 경화체와 골재는 각각 다른 거동을 하게 됨으로 균열이 발생하고, 탈수에 의하여 조직이 약해지게 되어 물리적 성질 및 내화능이 저하하게 된다. 본 연구에서는 질소를 이용한 가스 흡착법을 이용하여 가열온도에 따른 콘크리트 세공구조 변화를, 내구성에 관해서는 전기영동법을 이용하여 염화물 확산계수를 측정하였으며, 2차원 유한요소해석을 통해 고온의 영향을 받은 콘크리트 수명예측을 실시하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료 및 시험체 작성

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트, 밀도 2.6의 굵은 골재, 밀도 2.54의 잔골재, 폴리카르본산계 고성능 AE 감수제를 사용하여, 표1과 같이 배합하였다. 가열온도는 200, 400, 600, 800℃로 하였다.

강도시험은 KS F 2403(콘크리트의 강도시험용 공시체)에 따라 제작한 시험체를 사용하였으며, 염화물 이온 확산계수 평가용 시험체는 두께 50±2mm의 시험체를 전처리하여 사용하였다.

2.2 가스 흡착법에 기초한 공극 분포 측정

질소 흡착법은 사전처리를 끝낸 샘플에 질소 가스를 주입하여 샘플 표면에 질소 가스분자가 흡착하게 되면, 상대압력과 질소 가스분자의 흡착량의 관계를 통해 다공재료의 비표면적 및 세공구조 특성을 파악하는 방법이다. 본 연구에서의 측정은 질소 흡착 측정 장치(NOVA)를 이용하여 측정하였으며, 데이터의 처리는 BJH법을 이용하였다.

2.3 압축강도 및 탄성계수 측정

KS F 2405에 준하여 실시하였다.

2.4 염화물 이온 확산계수(이동계수) 측정

NT BUILD 492에서 제안한 방법을 사용하였으며, 측정된 염화물 이온 침투 깊이는 식(1)을 이용하여 염화물 이온 확산계수(이동계수)로 환산되었다. 그림 1은 측정 장치의 개요를 나타낸다.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right) \quad (1)$$

표 1 콘크리트의 배합

W/C (%)	S/A (%)	W (kg/m ³)	Unit Weight(kg/m ³)			SP (g/m ³)
			C	S	G	
45	44	185	411	283	942	1440.0
55	46	182	331	311	942	933.3
65	48	197	275	332	942	1363.0

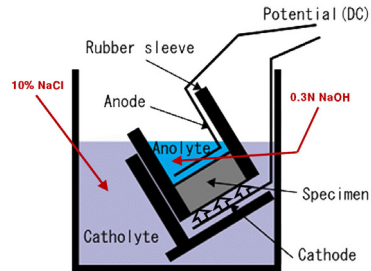


그림 1 염화물 이온 확산 실험 장치 개념도

여기서, D_{nssm} : 비정상 상태의 염화물 이동계수 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$), z : 염화물 이온 원자의 절대값, F : 패러데이 정수, U : 가인 전압의 절대값, R : 기체 정수, T : 측정 전후의 양극액의 평균 온도 ($^{\circ}\text{C}$), L : 시험체 두께 (m), x_d : 염화물 이온 침투 깊이 (mm), t : 측정 시간 (hour), erf^{-1} : 오차 함수의 전치, c_d : 변색부에서의 염화물 이온 농도 ($c_d \approx 0.7N$), c_0 : 변색부에서의 염화물 이온 농도 ($c_0 \approx 2N$)

3. 실험결과

3.1 가열온도에 따른 세공 분포의 변화

그림 2에 온도별 콘크리트의 공극 분포 변화를 나타내었다. 가열온도가 증가할수록 약 $0.01\mu\text{m}$ 를 기준으로 그 이하의 미세공극량은 약간 감소하였지만 그 이상의 공극량은 증가한 것을 알 수 있었다.

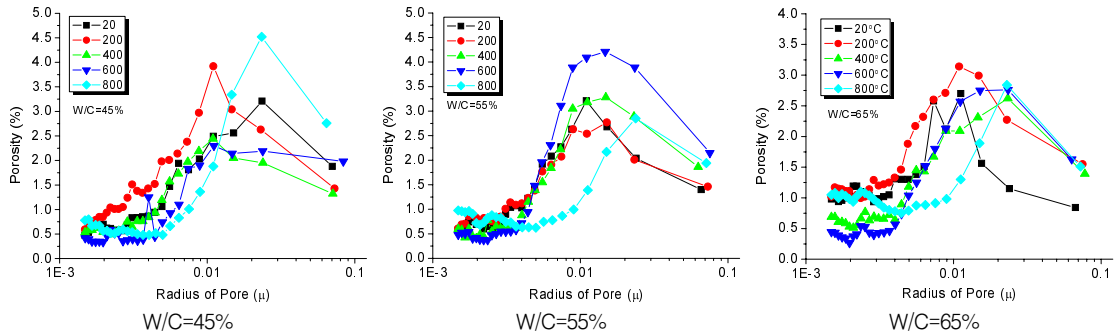


그림 2 가열온도에 따른 세공구조의 변화

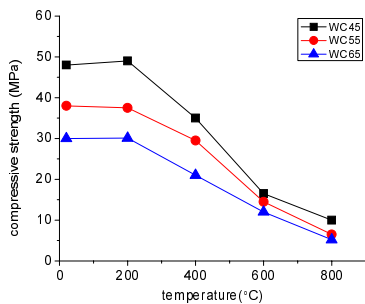


그림 3 압축강도의 변화

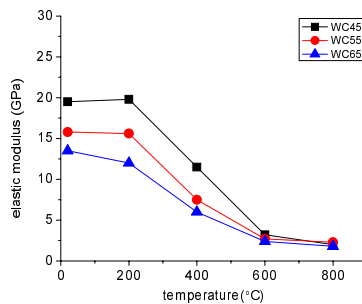


그림 4 탄성계수의 변화

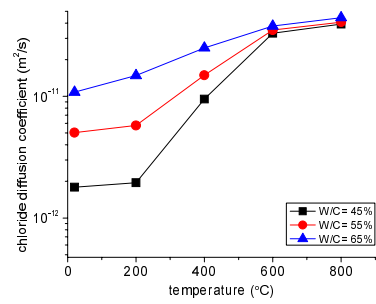


그림 5 염화물 확산계수의 변화

이러한 경향은 온도가 상승함에 따라 200°C까지는 콘크리트 내부의 유리수, 젤 수, 모세관수가 증발하여 수축하고 페이스트의 내부조직은 느슨하게 되어 미세공극(약 0.01 μm 이하)량이 증가한다. 하지만 약 300°C에 이르면 C-S-H의 층간수 및 수화물의 화학적 결합수의 일부가 없어지며, 400~700°C가 되면 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)이 분해되므로 온도 상승으로 인해 탈수량이 증가하여 미세공극(약 0.01 μm 이하)의 직경이 커지게 되어 미세공극(약 0.01 μm 이하)량이 줄어들게 된다. 따라서 전체적으로 질소 흡착법에서 측정된 공극경의 범위(약 0.001~0.1 μm)에서는 가열온도 상승에 따라 공극량이 감소하는 경향을 나타내었다.

3.2 가열온도에 따른 압축강도 및 탄성계수의 변화

가열온도와 압축강도의 관계를 그림 3에, 탄성계수를 그림 4에 나타내었다. 가열온도 증가에 따라 압축강도 및 탄성계수는 감소하는 경향을 나타내었다. 가열온도 200°C까지는 크게 변화가 없었으나, 200~600°C사이에서 급격한 감소를 나타내었다. 한편 콘크리트 물 시멘트별 가열에 따른 감소 정도는 고강도 콘크리트가 보통강도 콘크리트에 비해 비교적 크게 나타나는 것을 실험 결과를 통하여 알 수 있었다.

3.3 염화물 이온 확산계수의 변화

그림 5는 가열 온도에 따른 염화물이온 확산계수의 변화를 나타낸 것이다. 염화물 이온 확산계수는 가열 온도가 높을수록 증가 경향을 나타내었다. 가열을 받지 않은 상태에서의(상온 20°C) 확산계수는 $1.79 \times 10^{-12} \sim 1.08 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ 의 범위로 나타났고, 200°C가열까지는 거의 변동이 없으나, 가열온도 400°C 이후에는 급격히 증가하는 경향을 보였다.

4. 고온 수열 콘크리트의 내구수명 해석

4.1 고온 수열 해석 및 염화물 이온 확산 지배 방정식 및 초기조건, 경계조건

$$\frac{\partial C_T}{\partial t} = D_a(T) \left(\frac{\partial^2 C_T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_T}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

여기서, $D_a(T)$: 가열온도에 따른 겔보기 염화물이온 확산계수, C_T : 비열(J/kg·K)

고온 수열에 대한 초기조건은 상온 293.15K로 하였으며, 화재에 접한 경계조건은 Eurocode1의 Actions on Structure Part 1-2에 근거한 데이터를 조건으로 하였다. 외부온도, 대류, 복사가 동시에 고려된 경계조건을 적용하여 해석하였다.

콘크리트 속에는 고온 수열 전에는 염화물 이온 존재하지 않는 것으로, 경계는 해안으로부터 0.5km 떨어진 곳을 상정하여 표면 염화물 이온 농도 2.0kg/m^3 을 적용하였다.

4.2 고온 수열 콘크리트의 내구 수명 예측

철근 발청 임계 염화물이온 농도를 1.2kg/m^3 로 하여 가열(화재)을 받은 경우와 받지 않은 경우를 대상으로 내구 수명을 예측하여 그 차이를 그림 6에 나타내었다. 그림 속의 점선은 콘크리트 피복두께를 나타낸 것으로 본 해석에서는 5cm로 상정하여 수명을 예측하였다. W/C 45%에서는 가열(화재)을 받지 않은 경우에는 50년 이내에서 깊이 5cm에서 발청 한계에 이르지 못하지만, 가열을 받은 경우는 약 8년 만에 발청 한계에 이르게 되는 것으로 예측되어졌다. W/C 55%에서는 가열을 받지 않은 경우는 약 29년에서 가열을 받은 경우는 약 7.5년으로 수명이 단축되었다. W/C 65%에서는 가열을 받지 않은 경우는 약 13.7년에서 가열을 받은 경우는 약 6.3년으로 예측되었다. 또한 W/C가 증가할수록 수명이 단축되었으며 가열의 영향에 의한 발청 한계 수명도 점차 좁혀지는 것을 알 수 있었다.

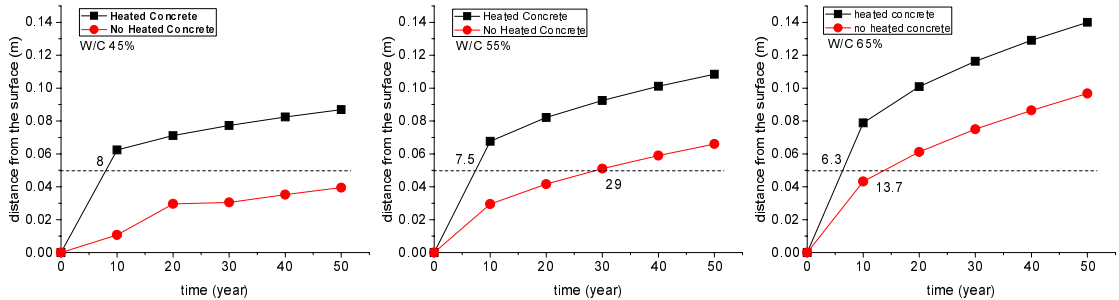


그림 6 고온 수열 콘크리트의 염화물 확산에 의한 내구 수명의 변화

5. 결론

본 연구에서는 질소 흡착법을 이용하여 고온 수열 콘크리트의 세공구조 및 역학적 특성 변화를 정량적으로 평가하였으며, NT BUILD 492에 준하여 염화물 확산계수를 평가하여 고온 수열에 의한 RC 조의 내구 수명 변화를 예측할 수 있는 모델을 구축하였다.

참고문헌

1. 송훈, 이종찬, 이세현, 高强度콘크리트의 細孔構造 變化와 加熱溫度와의 相關性, 대한건축학회 논문집(구조계), v.22 n.9(2006-09), pp.91-98