

콘크리트 폭렬 발생 메카니즘에 관한 이론적 고찰

김형준 · 김흥열* · 김경옥

(주)종합건축사사무소 광일건축, 한국건설기술연구원*

An Theoretical study on Spalling Mechanism of Concrete

Kim, Hyung Jun · Kim, Heung Youl*

Kwang Il Architecture Co. Ltd, * Korea Institute Construction Technology

요 약

The major cause of Concrete Spalling at high temperatures can be divided into the Vapor Pressure Rising, caused by the increase in free water temperature within the concrete, and Pore Pressure Rising induced by the vapor moving into dense pores within the concrete. Although the occurrence of spalling within concrete caused by these pressure increases can be assessed experimentally, a close examination into Mechanistic influence against various spalling factors shall be carried out first by using Mathematical Modeling and Theoretical Equations. The Spalling Prospect Process by theoretical mechanism is expedited in order of the following; selection of heating condition (fire strength and flame heating direction), a selection of constituent elements, an analysis of heat transmission, an analysis of moisture movement, distribution of water content, an analysis of pore/vapor pressure, and assessment of spalling occurrence.

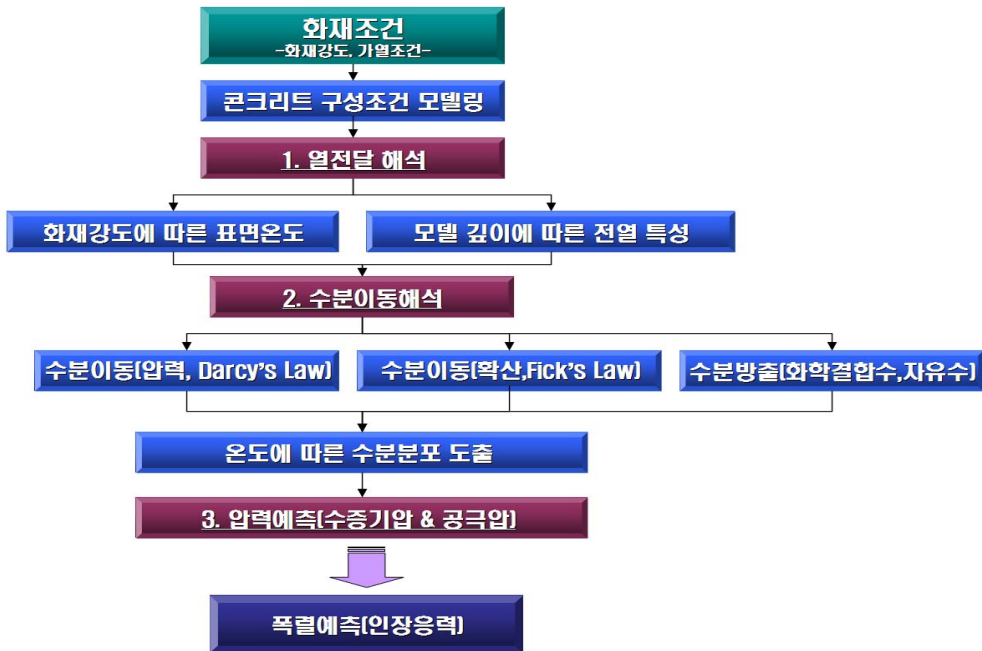
1. 서 론

화재조건에서의 콘크리트 구조체는 열적·역학적 응력을 받을 경우엔 점진적인 박락(Progress spalling)이나 폭발성 탈락(explosive spalling)으로 인해 단면 결손이 유발되며, 열-역학적 또는 열-수-역학적 메카니즘에 의해 폭렬 현상이 진행된다. 고온 가열시 골재는 화학적 재구성이 이루어지기 전까지는 팽창하게 되지만, 시멘트 페이스트는 180℃ 부분에서 수분의 건조와 탈수현상으로 인해 수

축하게 되기 때문에 이러한 골재팽창과 시멘트 페이스트의 수축으로 인해 국부적으로 양립할 수 없는 변형 현상이 발생하게 되어 열-역학적 메카니즘 현상에 의한 폭렬이 발생하게 된다.

2. 콘크리트 폭렬발생예측 프로세스

콘크리트 내부 공극압력과 수분의 이동특성은 물의 압력 · 밀도 · 온도와 관련된 열역학적 특성에 의해 지대한 영향을 받으며, 콘크리트 공극내부의 수분에 의한 열역학적 조건은 건조 · 습윤 · 준-습윤 3가지 종류로 분류된다. 이러한 열역학적 조건을 토대로 한 폭렬발생 메카니즘은 열전달해석 · 수분이동 · 압력예측에 규명될 수 있으며, <그림 1>과 같은 단계적 프로세스에 의해 예측할 수 있다.

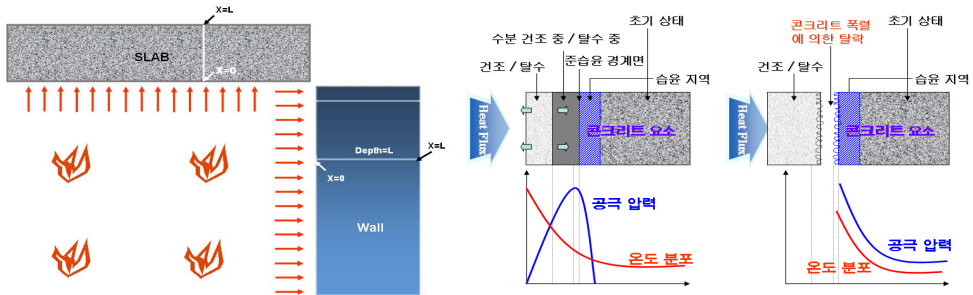


<그림 1> 콘크리트 폭렬메카니즘 규명 프로세스

2.1 가열조건

콘크리트 구조가 화재에 노출되었을 때, 구조요소(슬래브, 기둥, 보)의 온도가 급격하게 상승하게 되며, <그림 2>와 같이 가열이 진행될 경우 수분이동에 의한 공극압력과 콘크리트 내부의 온도상승에 의한 수증기압력 상승에 의해 콘크리트의 폭렬이 발생하게 된다. 주요 구조체중 슬래브와 벽의 경우엔 1방향 가열조건

이며, 보의 경우엔 3방향 가열, 기둥의 경우엔 4방향 가열이므로 구조요소에 따른 가열조건을 산정하여 폭발예측을 위한 모델링을 수행하여야 한다.



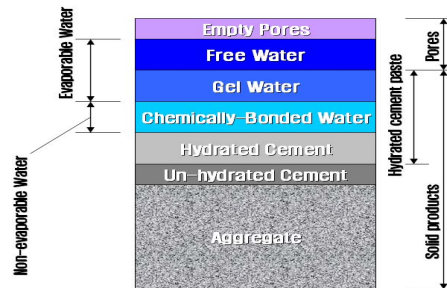
<그림 2> 콘크리트 구조요소 가열조건 및 폭발발생 메카니즘

2.2 콘크리트 모델링

본 연구에서는 콘크리트 벽과 슬래브를 대상으로 모델링을 수행하며, 두께 L의 화재에 노출된 가열표면(X=0)과 상온에 노출된 반대면(X=L)으로 일차원으로 모델링하여 해석모델을 <그림 3>과 같이 정립한다.

□ 콘크리트 구성요소

- 골재
- 시멘트 페이스트
 - 탈수된 시멘트 + 비 탈수된 시멘트
- 화학적 결합수(비 증발 수분)
- 젤 수분(GEL-WATER)
- 자유수
- 빈 공극



<그림 3> 콘크리트 구성특성

골재와 시멘트는 고체부분이며 화학적 결합수는 고체부분에 포함되어 있으며, 자유수는 콘크리트 공극내부에서 이동하고 있는 것으로 가정한다. 자유수가 포함되지 않은 공극을 “Empty Pores”라 정의 하며, 자유수와 빈 공극의 체적을 합한 것을 공극체적이라 정의한다.

3. 콘크리트 폭발발생관련 이론식 고찰

3.1 열전달 이론식

열전도에 의해 영향을 받는 열전달은 Fourier`의 공식을 준용한다. 가열전에 콘크리트의 온도는 상온에서 일정하게 분포되어 있으나, 가열 후 가열면의 온도

는 시간에 따라 변화하게 된다. 콘크리트 내부의 온도 변화는 콘크리트의 열적특성(열전도성, 비열, 밀도), 온도조건(화재강도, 가열속도), 경계조건(가열 모델 형상)에 의해 영향을 받으며, <식 1>에 의한 이론식에 지배된다.

$$P_{con}c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \dots \dots \dots \text{<식 1>}$$

P_{con} : 콘크리트 밀도
 c : 콘크리트 비열
 λ : 열전도성
 T : 콘크리트 온도

3.2 수분이동 이론식

수분의 이동은 다음과 같은 3가지 메카니즘에 의해 결정되며, <식 2>와 같은 이론식에 의해 콘크리트 내부 깊이에 따른 수분분포가 결정된다.

- 압력이 유발하는 수분흐름(Darcy`s Law)
 - 고압력 지점에서 저 압력지점으로의 수분의 흐름을 발생시킨다.
- 확산을 기반으로 한 수분흐름(Fick`s Law)
 - 높은 수분집중지점에서 낮은 수분분포지역으로의 수분흐름이 발생한다.
- 화학적 결합수와 젤 함유 수분의 방출
 - 콘크리트의 가열로 인해 화학적 결합수와 gel내부에 함유된 수분의 방출현상이 발생하여 자유수에 첨가되어 수분흐름에 영향을 준다.

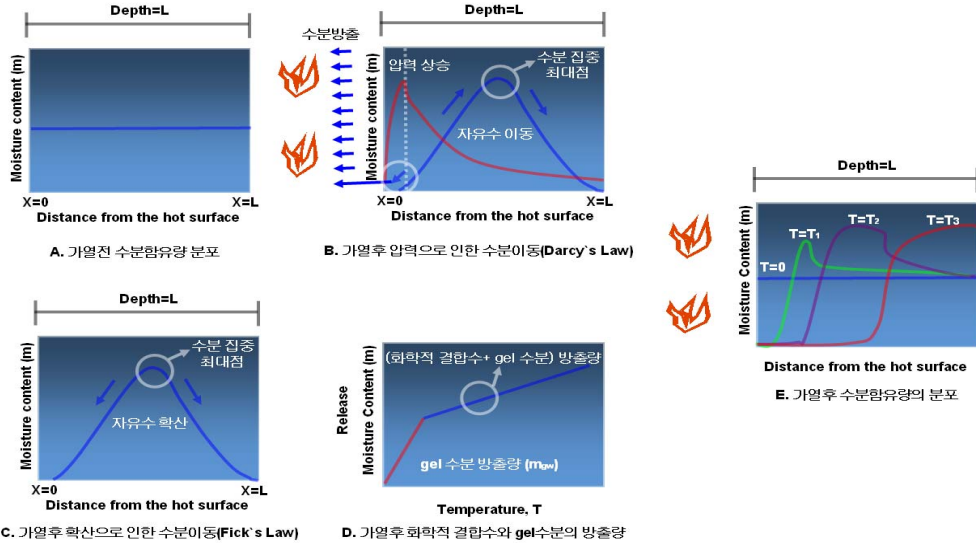
$$\frac{\partial m_{fw}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{P_{fw}}{\eta_{fw}} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial t} (m_{gw} - m_{nw}) \dots \dots \dots \text{<식 2>}$$

Darcy`s Law **Fick`s Law** **Release Water**
 m_{fw} : 자유수의 함유량
 k : 콘크리트 투수성
 D : 콘크리트 확산계수
 P : 압력
 P_{fw} : 투수된 자유수의 밀도
 η_{fw} : 자유수의 동점성
 m_{gw} : 젤에서 방출된 수분 질량
 m_{nw} : 화학적 결합수에서 방출된 수분 질량

3.3 수분분포

가열 전에는 수분의 분포가 균일하게 되나, 가열 후에는 수분의 이동현상과 가열면 외부로의 방출현상이 발생하게 된다. 압력에 의한 수분의 흐름이 선행하여 발생하게 되고, 수분의 확산특성으로 인해 수분의 이동현상이 이후에 발생하게 된다. 압력에 의한 흐름과 확산으로 인한 수분변화는 수분의 집중현상과 압력의 변화특성에 따라 <그림4>와 같이 진행방향이 같을 경우도 있고 다르게 나타날 수도 있다. 수분함유량의 분포는 콘크리트 특성(투수성 · 확산계수 · 배합비 · 탈

수정도), 가열조건(화재강도 · 가열속도), 경계조건 등에 영향을 받는다.



<그림 4> 가열에 따른 수분이동 메카니즘 분석

3.4 수분압력 이론식

습윤지역에서의 수분의 압력은 수분의 온도에 따른 포화수증기의 압력과 같고, 건조 및 포화지역에서는 수분의 온도와 자유수의 밀도에 의해 수분압력이 변화한다. 수분의 이동현상을 제외할 경우, 이러한 압력은 아래 <식 3>과 같이 정의될 수 있다.

$$P = P_{svp,T} \text{ Pa for a wet zone } (T \leq T_{cr} \text{ and } \rho_{g,T} \leq \rho_{fw} \leq \rho_{l,T}) \dots \dots \dots \text{ <식 3>}$$

$$P = P(T, \rho_{fw}) \text{ Pa for a dry zone and a saturated zone}$$

$$(T > T_{cr} \text{ or } \rho_{fw} < \rho_{fw} \text{ or } \rho_{fw} \geq \rho_{l,T})$$

- P_{svp} : 포화수증기 압력
- T_{cr} : 한계 온도 (373.99°C)
- $\rho_{g,T}$: $\geq L$ 에 포함된 수분의 밀도
- ρ_{fw} : 자유수의 밀도
- $\rho_{l,T}$: 포화상태 전체수분의 밀도

3.5 공극압력상승

수분의 이동은 건조지역, 포화지역, 습윤지역을 형성시키게 되며, 이지역에서의 시간에 따른 압력변화를 유발한다. 습윤지역에서의 압력은 액체상태의 수분과 기체상태의 수분이 상존하게 되며, 포화수증기 압력과 균형을 이룬다. 오직 수증기만 존재하는 건조지역에서의 압력은 포화수증기 압력보다 낮다. 오직 액체상태만 존재하는 포화지역의 압력은 포화수증기압보다 높은 상태를 유지하게 된다.

3.6 인장응력과 폭렬현상

공극압력이 상승할수록 인장응력은 증가하게 되며, 이러한 인장응력의 변화는 튜브형의 구형 모델로 설명할 수 있다. 인장응력 변화의 주요요인은 공극압력과 공극체적이며, 인장응력이 콘크리트의 인장강도를 초과하게 될 때 <식 4>에 의해 폭렬현상으로 귀결된다.

$$\sigma_t = \frac{(1+2V_p)}{2(1-V_p)}p > f_t \quad \dots\dots\dots<식 4>$$

σ_t = 공극압력에 의해 유발되는 인장응력
 f_t = 콘크리트 인장강도
 V_p = 공극의 체적
 p = 공극압력

4. 소결

콘크리트 폭렬을 유발하는 압력상승을 명확히 해석하기 위해서는 신뢰성 있는 이론식을 기반으로 콘크리트 폭렬메카니즘을 규명하여야 하므로, 본 연구에서는 시간에 따른 전열특성 · 수분이동 · 압력상승 · 폭렬발생에 관한 이론식을 고찰하였다. 폭렬발생 메카니즘의 이론적 고찰을 토대로 향후 수분함유량 측정실험과 공극압력 계측실험을 수행하여, 상기 이론식을 통한 계산 값과의 검증을 통해 콘크리트 폭렬발생을 수학적으로 규명할 수 있는 해석적 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국가 R&D과제인 “미래철도기술개발사업(2008)”과제와 관련하여 국토해양부와 한국건설교통기술평가원의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김형준, 한상훈, 최승관 (2007). “화재시 콘크리트요소 폭렬영향성 고찰” 화재소방학회 논문지 Vol.21.NO.2.
2. 김홍열(2002). “고온가열시 콘크리트 역학적 특성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집 제8권 제 118호.
3. Yoshikazu Ichikawa(2000), "Prediction of Pore Pressures, Heat and Moisture Transfer Leading to Spalling of Concrete during Fire", Ph. D. Thesis, Imperial College.
4. Khan, S. A.(1990),"Pore Pressure and Moisture Migration in Concrete at High and Non Uniform Temperature", Ph. D. Thesis, King's College, University of London.
5. Kontani, O.(1994), "Experimental Determination and Theoretical Prediction of Pore Pressure in Sealed Concrete at Sustained High Temperature", Ph.D.Thesis, Northwestern University