

고온에 노출된 고강도 콘크리트 기둥의 폭렬해석

Spalling Analysis of High-Strength Reinforced Concrete Columns under High Temperature

신 성 우*

유 석 형**

Shin, Sung-Woo

Yoo, Suk-Hyeong

Abstract

The spalling analysis of high strength concrete columns needs a very complex and difficult process accounting for peeling of cover concrete as well as thermal, thermo-stress and hygro-transfer phenomena. However, the study on the spalling analysis method is insufficient. The practical spalling analysis algorithm is developed in this study, which formulates a vapor pressure equation as the parameter of temperature and cover depth and uses the compatibility condition. In results of the spalling analysis, as the concrete strength increases and the content of PP fiber decreases the degree of spalling increases. This shows a similar result as the previous experimental study. Therefore the developed algorithm suggested in this study is expected to be useful in predicting the spalling of high strength concrete columns.

요 지

고온을 받는 고강도 콘크리트의 폭렬현상을 해석하기 위하여 온도해석, 열응력해석 및 수분이동 해석과 더불어 콘크리트 피복의 박리여부까지 고려하여야 하는 매우 복잡하고 어려운 해석과정이 요구되나 아직 이에 대한 연구가 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 수증기 압력을 온도와 피복두께의 함수로서 정의하고 또한 적합조건을 이용함으로써 피복콘크리트의 박리여부를 예측할 수 있는 실용적인 폭렬해석 알고리즘을 개발하였다. 폭렬해석결과 콘크리트 강도가 증가 할수록 PP섬유량이 적을수록 폭렬현상이 심하게 발생하였으며, 이는 기존의 실험결과와 유사한 경향을 나타내어 향후 고강도 콘크리트 내화설계를 위한 폭렬해석 시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords : Spalling analysis, Fire resistance, High-strength concrete, Polypropylene fiber

핵심 용어 : 폭렬해석, 내화성능, 고강도 콘크리트, 폴리프로필렌 섬유

* 한양대학교 건축학부 교수

** 한양대학교 BK21 계약교수

E-mail : piter31@hanyang.ac.kr 031-400-5132

• 본 논문에 대한 토의를 2007년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2008년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

고강도 콘크리트(이하 HSC)는 구조적 장점 뿐 만 아니라 내구성 및 사용성이 우수하여 건축 및 토목구조물에서의 활용이 증대되고 있다. 그러나 HSC는 고강도화에 따른 부재의 취성적 거동 이외에도 화재 시 폭발(explosive spalling) 현상이 발생하는 단점이 있다. 따라서 HSC의 폭발발생 기구(mechanism)를 관찰하여 이에 영향을 미치는 요인을 규명하고 재료적, 구조적 대안을 강구하기 위한 연구와 기술개발이 필요하다.

콘크리트의 폭발현상은 화재에 노출된 콘크리트 구조물이 100°C 이상에서 부재내부의 수분이 증발하면서 발생한 수증기가 수밀한 콘크리트에 갇히게 됨으로서 발생하며, HSC는 보통강도 콘크리트보다 수밀성이 높아 더 큰 폭발 위험성을 초래하는 경향이 있다. 그러나 폭발현상의 해석을 위하여 온도에 따른 재료의 열적, 역학적 특성의 변화, 여러 인자들 간의 복잡한 상호작용 및 수분증발을 고려한 물질의 상변화 등을 고려하여야 하는데 아직 이에 대한 명확한 규명이 이루어 지지 않고 있다. 고온을 받는 보통강도 콘크리트의 해석은 온도에 따른 재료의 열적특성 변화를 고려하여 열역학 방정식을 이용하여 부재내부의 온도분포 상태를 구하는 온도분석(thermal analysis)과 재료의 온도에 따른 역학적 특성변화를 이용하여 부재의 응력상태, 잔존강도 및 구조적 거동을 규명하는 열응력해석(thermal-stress analysis) 및 고온에서 콘크리트 내부 수분이 기화현상에 의해 수증기로 변환되는 상변화를 고려하여 수증기 압력을 산출하는 수분이동 해석(hygro-transfer analysis)⁽⁶⁾이 연구되어 왔다. 고온을 받는 고강도 콘크리트의 폭발해석은 수분이동해석과 더불어 콘크리트 피복의 박리여부까지 판정하는 매우 복잡하고 어려운 해석과정을 거쳐야 한다. Gawin⁽²⁾ 등은 multi-phase porous media model을 이용하여 고온 시 콘크리트의 화학적, 열적 및 역학적 특성변화 뿐 만 아니라 화학적 반응, 상변화, 균열 및 열-화학적(thermo-chemical) 특성변화까지 고려한 수치해석 모델을 제시하였으나 실용적으로 활용하기에는 매우 복잡하고 어려운 수식을 사용하고 있다.

따라서 본 연구에서는 고온을 받는 고강도 콘크리트 기둥의 폭발해석을 실용적으로 할 수 있는 기법을 제시하고자 한다. 먼저 ANSYS 프로그램을 이용하여 고온을 받는 철근콘크리트 단주에 대한 과도비선형 온도해석을 통하여 내부온도 분포를 구한 후 폭발에 가장 직접적인 영향을 미치는 수증기 압력을 기존실험결과를 이용하여 온도와 피복두께의 함수로서 정의하고 이를 변형율에 대한 적합조건에 대입하여 피복콘크리트의 박리여부를 예측할 수 있는 실용적인 폭발해석 알고리즘을 개발하였다. 폭발해석결과를 콘크리트 강도와 PP섬유량을 변수로 하는 기존 내화실험결과와 비교·검증함으로써 고강도 콘크리트 내화설계 시 폭발여부를 예측할 수 있는 알고리즘을 새롭게 제시하였다.

2. 재료의 열적·역학적 특성

고온을 받는 고강도 콘크리트 기둥의 해석을 위해서는 시간에 따라 가열온도가 변화되는 현상을 고려한 과도해석과 온도에 따른 재료의 열적, 역학적 특성변화를 고려할 수 있는 비선형 해석이 요구되어 전체적으로 과도비선형해석이 수행되어야 한다.

따라서 온도변화에 따른 콘크리트와 철근의 열적, 역학적 특성을 파악할 필요가 있다. 온도에 따른 콘크리트의 비선형특성은 함수율, 골재의 종류 및 비중 등에 따라 달라지며 고강도 콘크리트의 경우도 온도에 따라 역학적 특성이 크게 달라지지만 열적인 특성의 변화는 거의 없고 단지, 열전도율이 고강도 콘크리트에서 다소 높아지는 경향이 있다. 본 연구의 폭발해석에서는 Euro Code 2⁽³⁾ 및 Euro Code 4⁽⁴⁾에서 제시하는 재료의 열적, 역학적 특성을 적용하였다.

2.1 콘크리트

2.1.1 열전도율 및 비열

콘크리트의 열전도율은 골재의 종류, 비중, 강도 등에 따라 다르며 EC 2에서는 Fig. 1과 같이 상한치와 하한치를 규정하고 그사이 값을 적용하도록 하고 고강도 콘크리트에 대해서는 그 이상의 값을 사용할 수 있다고 규정하였다. 따라서 본 연구에서는 Holst

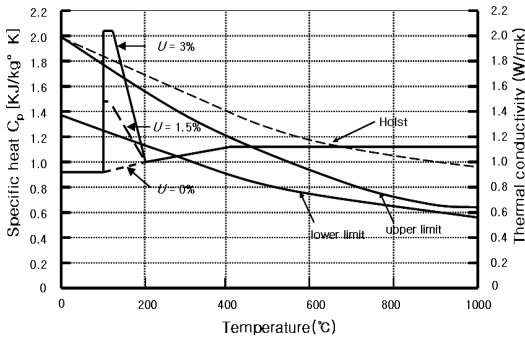


Fig. 1 고온 시 콘크리트 열전도율 및 비열

(1994)가 고강도 콘크리트에 대하여 별도로 제안한 식을 적용하였다.

비열은 열을 축적할 수 있는 능력으로서 골재의 밀도와 함수량에 따라 달라진다. 100°C에서 콘크리트 내부 수분이 증발하면서 발생된 잠열에 의해 이 부근에서 비열이 급속히 증가하게 되며 최대 비열의 크기는 함수율에 따라 다르다. Fig. 1은 EC 2에서 제시하는 온도에 따른 비열을 나타낸다.

2.1.2 밀도 및 열변형율

밀도는 온도팽창과 건조수축으로 인한 부피의 변화와 수분증발 및 탈수화에 의한 질량변화가 복합적으로 작용하여 최종적으로 온도가 증가 할수록 감소하는 경향을 보이며, EC 2에서는 화학적 분해 작용은 무시하고 수분증발만을 고려하여 Fig. 2와 같이 온도에 따른 밀도변화를 제시하고 있다. 본 연구에서는 상온(20°C)에서 보통강도 콘크리트 밀도를 2300kg/m³을 고강도 콘크리트는 2500kg/m³을 사용하였다.

콘크리트 변형율은 골재의 종류에 따라 다르게 나타나며 EC 2에서는 Fig. 2와 같이 규산계와 석회질계통의 골재의 열변형율을 제시하고 있다. 본 연구에서는 국내에서 일반적으로 사용되는 규산계 골재의 변형율 특성을 적용하였다. 고강도와 보통강도 콘크리트의 열 변형율은 EC 2 및 ACI 363 기준에 따라 동일하게 적용하였다.

2.1.3 역학적 특성

보통강도 콘크리트의 압축강도, 인장강도 및 탄성계

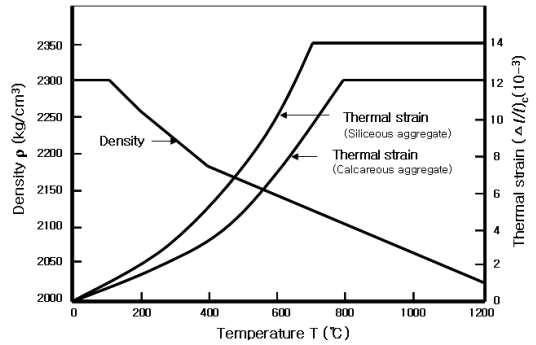


Fig. 2 고온 시 콘크리트 밀도 및 열변형율

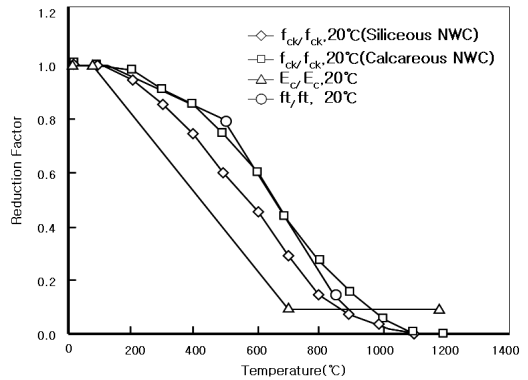


Fig. 3 온도에 따른 콘크리트 역학적 특성

수는 온도증가에 따라서 Fig. 3과 같이 감소하는 특성을 보이며 응력-변형율 관계곡선은 온도가 증가할 경우 최대응력 시 변형율이 증가하는 특성을 고려하여 EC 2에서 각 온도에 따른 변형율의 증가율을 제시하고 있다. 고강도 콘크리트의 경우 EC 2에서 콘크리트 강도 등급 C55이상부터 폭렬에 대하여 별도로 고려하도록 하면서, 콘크리트 강도 등급을 class1 (C55~C60), class2(C70~C80) 그리고 class3(C90)으로 나누어 온도증가에 따른 압축강도 감소계수를 제시하고 있으나, 이외의 역학적 특성은 제시되어 있지 않고 있다.

본 연구에서는 고온 시 고강도 콘크리트의 탄성계수, 인장강도 및 응력-변형율관계를 상온에서의 고강도 콘크리트에 대한 물성치를 이용하여 보통강도와 동일한 비율로 온도에 따라 변화시켜서 구하였다.

2.2 철근

철근은 균일한 재질로 이루어져 있어 온도에 따른 열적 역학적 특성변화가 비교적 단순하다. EC 4에서 온도변화에 따른 철근의 열전도율, 비열 및 열팽창계수의 변화를 제시하고 있으며, 밀도는 온도에 따라 변하지 않는 것으로 가정하였다. 철근의 응력-변형을 관계는 상온에서의 식에 대하여 온도에 따라 선형한계점, 항복점 및 탄성계수의 감소계수를 적용하여 온도에 따른 각 역학적 특성의 변화를 고려하도록 하고 있다.

3. 폭발해석

3.1 해석 흐름도

전체적인 폭발해석의 흐름을 Fig. 4에 나타내었다. 먼저 초기 조건과 재료의 비선형 특성 및 해석 모델을 입력하고 임의시간(t_i)에서 과도비선형 해석을 통하여 임의 절점(n_j)의 온도를 모든 절점(N)에 대하여 구하였다. 이와 같이 온도분포 해석을 통해 구한 i 시간 j 위치의 온도 (T_{ij})를 변형율로 치환하였다.

최종 변형율은 열팽창에 의한 것과 수증기압에 의한 것으로 구성된다. 수분이동 해석⁽¹⁾을 통하여 이론적으로 구한 수증기압은 실제 수증기압과 많은 오차를 나타내고 있다. 이는 아직 콘크리트내부에서 수분증발에 의한 압력산출이 불명확하고 해석에 사용되는 재료적 특성이 불확실하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 실용적으로 수증기압을 해석에서 고려하기 위하여 수증기압을 변형율로 치환하고 온도에 의해 발생한 변형율과 합하는 적합조건을 통하여 최종 변형율을 구하였다. 수증기압을 변형율(ϵ_{vapor})로 치환하는 과정은 3.4 절에 자세히 기술하였다. 최종 변형율을 EC 2에서 제시하는 고온에서의 콘크리트 응력-변형율관계식에 대입하여 응력(σ_{ij})을 산출하였고 산출된 응력은 William과 Warnke⁽⁵⁾에 의하여 제시된 3축 응력상태에서 콘크리트 파괴 기준에 따라 균열여부를 검토하였다. 균열로 판단된 요소는 제거시키고 새로운 경계조건을 부여한 후 다음시간 즉 Δt 만큼 증분 된 시간에 대하여 최종시간 (t_f)까지 온도 해석과 응력 해석을

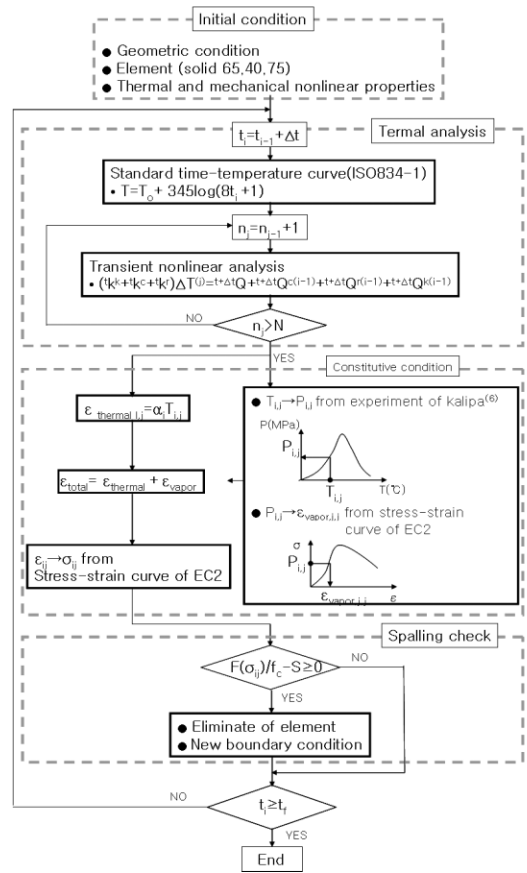


Fig. 4 폭발해석 흐름도

반복 수행함으로써 폭발발생시 피복콘크리트의 탈락현상을 해석상에서 구현하였다.

3.2 과도비선형해석

FEM을 이용한 과도비선형 해석식의 유도과정은 다음과 같다. 열전달방정식의 범함수에 대한 최소화 조건을 이용하여 식(2)와 같은 3차원 과도상태 열전도식에 대한 지배미분방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} = \frac{\rho c}{k} \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

여기서, ρ 는 밀도, c 는 비열 그리고 k 는 열전도율을 의미한다. 식(2)를 행렬의 형태로 표현하면

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (3)$$

여기서 Q 는 열량의 변화량, C 는 열용량, K 는 열전도를 행렬이다. 식(3)에서 시간에 따라 경계조건을 달리할 경우 다음과 같다.

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q(t)\} \quad (4)$$

온도하중이 온도와 시간에 따라 변하고 열용량과 열전도율이 온도에 따라 변하는 과도 비선형해석의 경우 다음과 같다.

$$[C(T)]\{\dot{T}\} + [K(T)]\{T\} = \{Q(T, t)\} \quad (5)$$

3.3 해석모델

해석결과를 기존실험⁽¹⁾결과와 비교하기 위하여 해석 모델은 Fig. 5와 같이 실험체의 대칭조건을 고려하여 1/8모델을 구성하였다. 경계조건은 콘크리트가 연속되는 면에는 서로대칭이므로 열전달이 없는 단열경계조건을 그리고 외부 면에는 가열을 하였으며, 기둥의 길이방향으로는 열전달이 없는 것으로 가정하였다. 가열 시 초기 온도 조건은 20℃로 하였고 이후 기존실험⁽¹⁾과 동일한 ISO 834-1기준에 따른 가열곡선을 따라 가열면에 온도하중을 주었다.

온도분포해석 단계에서는 3차원 열해석 요소인 solid 70(3-D thermal solid)을 사용하였고, 이후 응력해석 단계에서는 콘크리트는 solid 65(3-D reinforced concrete solid)를 철근은 solid 45(3-D structural solid)를 사용하였다. 폭발해석은 고온 시수증기 압력에 의한 콘크리트의 박리현상을 고려하여야 하므로 콘크리트의 인장, 압축 강도와 탄성계수 뿐만 아니라 3축 응력 상태에서 파괴면(3-D failure surface), 균열이후 강성의 변화 및 철근과의 부착거동 등 3차원 비선형 특성을 고려할 수 있는 solid 65 요소를 사용하였으며, 철근은 solid 65에서 콘크리트 내부에 배근된 철근을 모델링하기 위한 요소인 solid 45를 사용하였다. solid 65에서 보강된 콘크리트의 구성행렬은 식(6)과 같이 콘크리트요소와 철근요소 각각의 응력-변형을 행렬을 조합하여 구성된다.

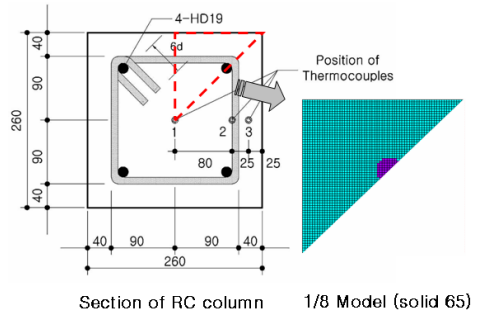


Fig. 5 해석모델

$$[D] = \left(1 - \sum_{i=1}^{N_r} V_i^R\right) [D_c^{ck}] + \sum_{i=1}^{N_r} V_i^R [D^r]_i \quad (6)$$

여기서, N_r : 보강재의 개수

V_i^R : 전체 부피에 대한 보강재의 부피의 비

$[D_c^{ck}]$: 균열이후 콘크리트의 응력-변형을 행렬

$[D^r]_i$: 보강재 i 의 응력-변형을 행렬

3축 응력상태에서 콘크리트의 파괴기준은 William과 Warnke⁽⁵⁾에 의하여 제안된 식(7)을 사용하였다.

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \quad (7)$$

여기서, F 는 주응력상태 함수, S 는 주응력과 재료물성치로 만들어지는 파단표면(failure surface), f_c 는 단축압축강도.

3.4 적합조건

수증기 압력에 의한 영향을 해석상에서 고려하기 위하여 Fig. 6과 같이 Kalifa^{(7),(8)}의 실험을 통하여 제시된 피복두께에 따른 시간-압력관계 및 시간-온도관계를 이용하여 온도-압력관계 곡선을 구한 후 온도분포 해석을 통하여 구한 온도(T_{ij})를 대입하여 압력(P_{ij})을 산출하였다. 산출된 압력은 EC 2에서 제시하는 고온에서의 콘크리트 응력-변형율관계식을 이용하여 변형율(ϵ_{vapor})로 치환하고 이를 식(8)과 같이 열에 의한 변형율($\epsilon_{thermal}$)과 더하여 최종 변형율(ϵ_{total})을 산정하였다.

$$\epsilon_{total} = \epsilon_{thermal} + \epsilon_{vapor} \quad (8)$$

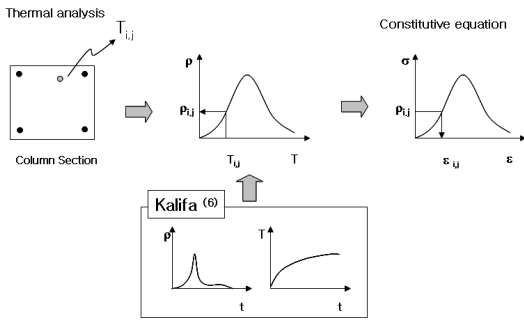


Fig. 6 수증기 압력에 의한 변형을 산출과정

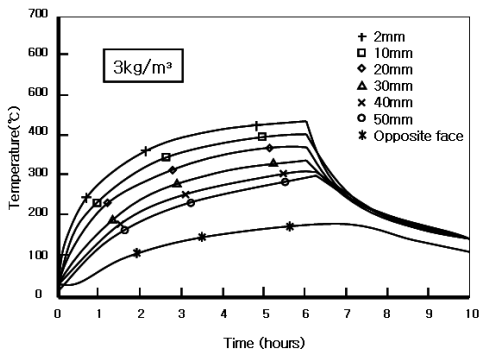


Fig. 7 시간에 따른 온도발현곡선(Kalifa)⁽⁸⁾

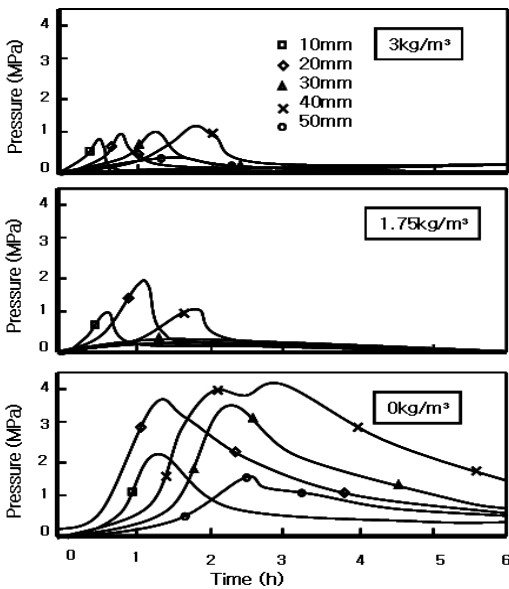


Fig. 8 시간에 따른 압력발현곡선(Kalifa)⁽⁸⁾

Kalifa는 콘크리트 강도⁽⁷⁾(30MPa와 100MPa)와 PP섬유량⁽⁸⁾(0-3kg/m³)을 변수로 한 내화실험을 통하여 내부 온도분포 및 압력측정결과를 제시하였다. Fig. 7과 같이 시간-온도곡선에서 최종시간까지 온도곡선은 증가만 진행하여 시간과 1:1대응관계에 있다.

그러나 Fig. 8과 같이 압력은 증가하다가 감소하여 시간과 1:1대응관계가 성립되지 않는다. 따라서 온도를 주변수로 압력을 종속변수로 할 수 있게 되어 Fig. 9와 같은 온도에 따른 압력관계를 구할 수 있다. 이는 Gawin⁽²⁾의 이론적 해석결과를 나타내는 Fig. 10과 같이 최대압력의 발생온도가 200°C 부근에서 발생하는 것과 유사한 경향을 나타낸다. Fig. 9에서와 같이 압력은 온도 뿐 만 아니라 피복두께에 따라 서로 달라지므로 본 연구에서는 피복두께에 따라 온도-압력관계를 별도로 구성하여 폭발해석 시 고려하였다.

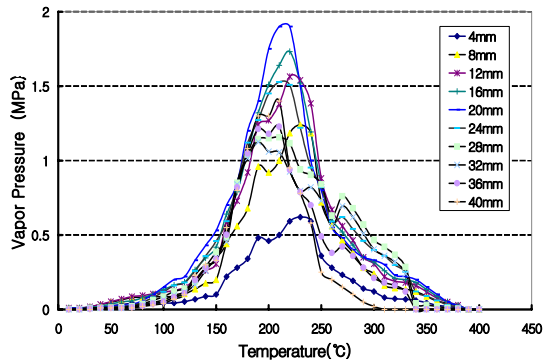


Fig. 9 온도-압력관계 (Kalifa)⁽⁸⁾

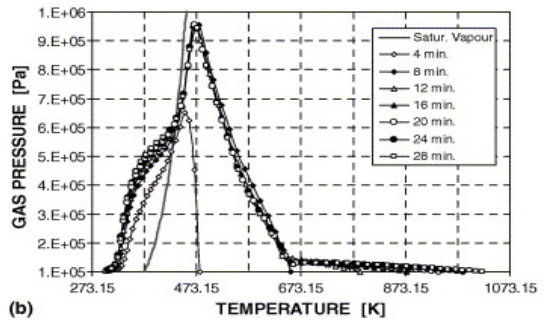


Fig. 10 온도-압력관계 (Gawin)⁽²⁾

4. 해석결과 및 분석

폭렬해석결과 나타난 폭렬발생시간, 및 폭렬정도 등을 콘크리트강도와 PP섬유량을 변수로 하는 기존실험⁽¹⁾ 결과와 비교하였다. Fig. 11과 같이 기존 실험결과에서 콘크리트 강도 30MPa과 100MPa에서 폭렬에 의한 질량감소율은 각각 6%와 25%로 나타났으며, 해석에서는 Fig. 12에서와 같이 각각 9% 및 52%로 나타나, 초고강도 콘크리트의 폭렬해석에 의한 질량감소가 높게 계산되었다. 이는 초고강도 콘크리트의 폭렬해석에 적용한 특성치들이 아직 불확실한 자료

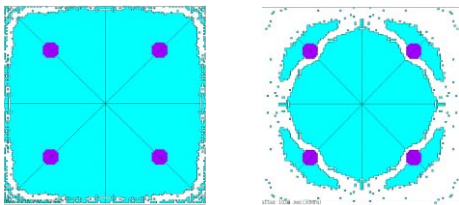


(a) 30 MPa



(b) 100 MPa

Fig. 11 고강도 콘크리트 기둥의 폭렬양상⁽⁶⁾



(a) 30 MPa

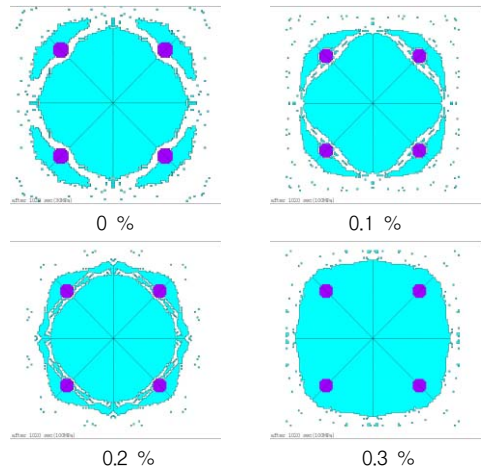
(b) 100 MPa

Fig. 12 폭렬해석 결과

를 바탕으로 제시되었기 때문인 것으로 판단된다.

폭렬발생 시간은 Fig. 14에 나타난 바와 같이 30MPa는 900초에 100MPa는 420초에 최초로 폭렬이 발생하였다. 실험⁽¹⁾에서는 100MPa 실험체에서 1320초에 피복 25mm위치의 온도가 급격히 상승하여 폭렬이 나타났음을 예측할 수 있으나, 30MPa에서는 급격한 온도상승은 나타나지 않았다. Fig. 14에서와 같이 콘크리트 요소의 파괴가 표면에서부터 내부로부터 진행하지 않고 피복두께 1cm 부근에서부터 발생하는 것은 해석상에서 산출된 응력이 온도에만 의존하지 않고 1cm 부근에서 최대가 되는 실측한 내부수증기 압력을 고려했기 때문이다. 폭렬해석결과 나타난 PP섬유 혼입율(% , 체적비)에 따른 온도분포 및 폭렬양상을 Fig. 13에 나타내었다. PP섬유 혼입율은 온도변화에는 전혀 영향을 주지 않고 압력에만 영향을 미쳐 PP섬유 혼입율이 증가 할수록 폭렬현상이 감소함을 보여준 Kalifa⁽⁸⁾의 실험결과와 유사한 경향을 보여주고 있다.

이와 같이 본 연구에서 제시한 폭렬해석결과는 실험결과와 비교하여 오차가 있으나, 폭렬에 중요한 영향을 미치는 콘크리트 강도 및 PP섬유 혼입율에 따른 폭렬양상을 기존 실험결과와 유사하게 예측함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 폭렬해석기법은 수증기 압력이 온도와 피복두께의 함수로서 주어질 경우 폭렬양상을 예측하는데 실용적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.



0 %

0.1 %

0.2 %

0.3 %

Fig. 13 PP섬유 혼입율별 폭렬해석결과

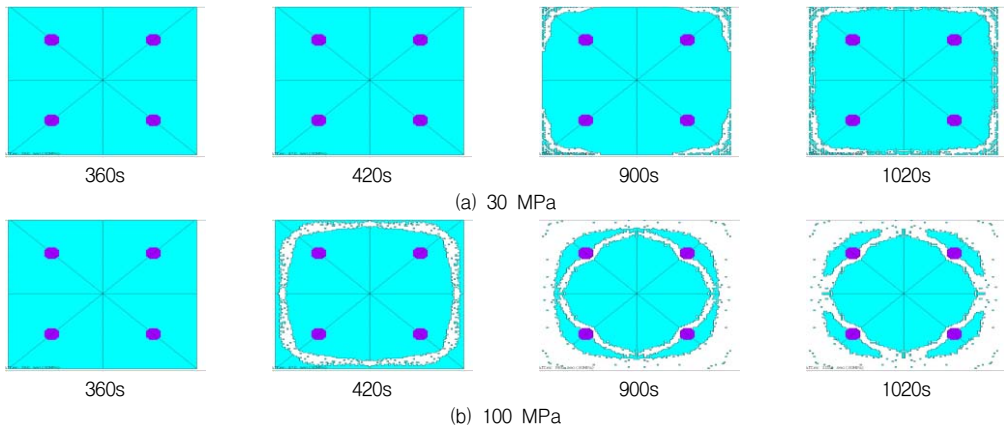


Fig. 14 시간에 따른 폭렬해석결과

5. 결 론

- 1) 고온을 받는 고강도 콘크리트의 폭렬현상을 해석하기 위한 프로그램이 개발되었으며, 이는 수증기 압력을 변형율로 치환하여 해석하므로 간편하고 실용적으로 폭렬현상을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 새롭게 제시한 폭렬해석 결과 콘크리트 강도가 증가 할수록 PP섬유량이 적을수록 폭렬에 의한 콘크리트 탈락이 심하게 발생하였으며, 이는 기존 실험 결과와 유사한 경향을 나타내어 해석의 신뢰성을 확인하였다.
- 3) 본 연구에서 제시하는 폭렬해석 기법은 수증기압력을 실험결과를 활용하고 있으나, 향후 수증기 압력을 온도와 위치에 대한 함수로서 수식화 할 경우 고강도 콘크리트 내화설계 시 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업 (과제번호: 04 핵심기술C02-02) 및 과학기술부 우수연구센터육성사업(R11-2005 -056-01003-0)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 유석형, 신성우, 'PP 섬유를 함유한 고강도 철근콘크리트 기둥의 폭렬 특성에 관한 실험적 연구', 한국구

조물진단학회논문집, 제10권, 2호, 2006, 3. pp. 83-90.

2. D. Gawin, F. Pesavento, B. A. Schrefler, "Towards prediction of the thermal spalling risk through a multi-phase porous media model of concrete," Computer method in applied mechanics and engineering, 195, 2006, pp. 5707-5729.
3. Eurocode 2: "Design of Concrete Structures". BS EN 1992_1_2: 2004 Part 1_2: General rules- Structural fire design.
4. Eurocode 4: "Design of Composite Steel and Concrete Structures". BS EN 1994_1_2: 2000 Part 1_2: Structural rules- Structural fire design.
5. Willam, K. J., and Warnke, E. D., "Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete", Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol. 19, ISMES, Bergamo, Italy, 1975, p. 174.
6. Bazant Z.P., and Kaplan, MF. Concrete at High Temperatures-Material Properties and Mathematical Models. Concrete Design and Construction Series. Longman Group Ltd, UK. 1996.
7. Pierre Kalifa, Francois-Dominique Menneteau, Daniel Quenard "Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures" Cement and Concrete Research 30 2000, pp. 1915-1927.
8. Pierre Kalifa, "High-Temperature behaviour of HPC with polypropylene fibers from spalling to microstructures", Cement and Concrete Research, Jun., 2001, pp.1487-1499.

금행 (접수일자 : 2007년 7월 2일)