특 집

‖온도조건 하의 콘크리트 기술‖

고강도 콘크리트의 내화성능 예측 기술

- Estimable Technique of Fire Resistant Performance for High Strength Concrete -

김흥열* *Kim, Heung Youl*　　서치호** *Seo, Chee Ho*　　신현준*** *Shin, Hyeon Joon*

1. 서 론

화재시 건축물 구조부재의 구조적 안전성을 평가하기 위한 성능적 개념의 내화성능 예측·계산 방법이 실용화되고 있으며, 특히 강구조 부재의 경우, 영국, 북유럽, 뉴질랜드 등의 국가에서는 활발히 적용되고 있다. 콘크리트 또한 골재의 종류, 콘크리트의 강도, 물-시멘트비, 함수율 등 다양한 인자에 의해 변화하는 특성을 가지고 있음에도 불구하고 다양한 데이터베이스 구축을 통해 콘크리트의 내화성능 예측·계산에 대한 방법이 제시되고 있으며, 영국의 경우에는 현재 활용 단계에 접어들고 있다.

이에 본고에서는 최근 고강도 콘크리트의 화재시 재료의 열적 특성, 해석 모델, 구조부재의 온도 특성 및 변형 특성 등을 이용하여 내화성능을 예측·계산할 수 있는 기술을 소개하고자 한다.

2. 고강도 콘크리트 열적특성 및 해석 모델

2.1 고강도 콘크리트의 고온시 역학적 특성

현재 영국을 비롯한 유럽 국가에서 고강도 콘크리트 구조부재의 내화성능 예측·계산을 위한 콘크리트 열적 특성 데이터베이스는 유럽 코드인 ENV 1993-1-2 및 CEB/FIP Model Code 90에서 제시하고 있는 데이터를 주로 사용하고 있으며, 여기에서는 이를 간략히 소개하고자 한다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 화재·설비연구부 선임연구원
** 정회원, 건국대학교 건축대학 교수
*** 한국건설기술연구원 화재·설비연구부 연구위원

2.1.1 압축강도

보통강도 콘크리트 및 고강도 콘크리트는 상온과 100 °C의 사이에서 초기 강도손실을 보이고 있고, 100 ~ 200 °C와 400 ~ 450 °C의 사이에서는 강도 안정 및 증가를 보이고 있다. 또한 고강도 콘크리트는 상온에서 400 °C 사이에서 강도손실이 보통강도 콘크리트 보다 현저히 큰 경향을 보이고 있다.

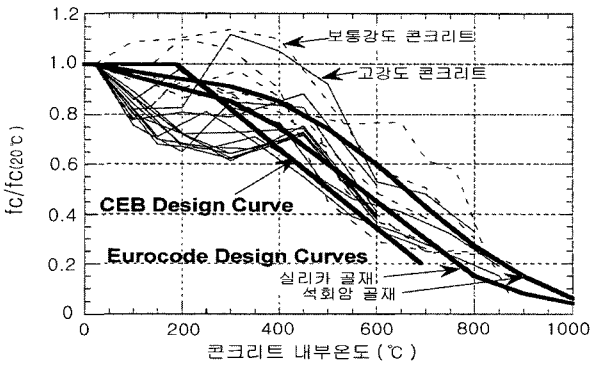


그림 1. 고강도 콘크리트의 압축강도 모델 곡선

2.1.2 탄성계수

고강도 콘크리트 탄성계수의 변화는 모든 콘크리트에서 300 °C 이후에서는 급격한 감소를 보이고 있지만 고강도 콘크리트와 보통강도 콘크리트 사이에서는 온도에 따른 탄성계수의 변화 차이는 거의 없는 것으로 나타나고 있으며, 골재의 형태에 있어서도 압축강도 변화와는 달리 거의 영향을 미치지 않는 것으로 보고 되고 있다.

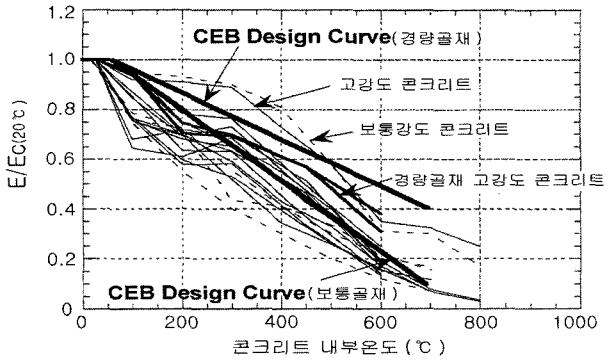


그림 2. 고강도 콘크리트의 탄성계수 모델 곡선

2.1.3 응력-변형 곡선

고강도 콘크리트의 응력-변형 곡선은 보통강도 콘크리트에 비하여 가파르게 항복점에 도달하고 있으며, 항복점 이후에 있어서도 가파른 하강을 보이고 있다. 고강도 콘크리트는 200 ℃까지는 탄성재료 특성을 보이고 있지만 300 ℃ 이상에서는 연성재료의 특성을 보이며, 보통강도 콘크리트에 비하여 항복 후의 잔존 에너지가 적기 때문에 항복점 이후에는 더 쉽게 붕괴된다.

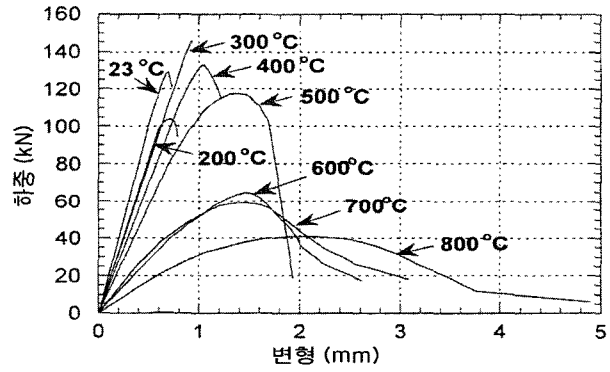


그림 3. 고강도 콘크리트의 응력-변형 곡선 모델

2.1.4 폭렬

일반적으로 폭렬은 350 ~ 650 ℃ 사이에서 발생되고, 폭렬된 시험체의 균열은 골재와 시멘트 페이스트에 나타나고 있다. 또한

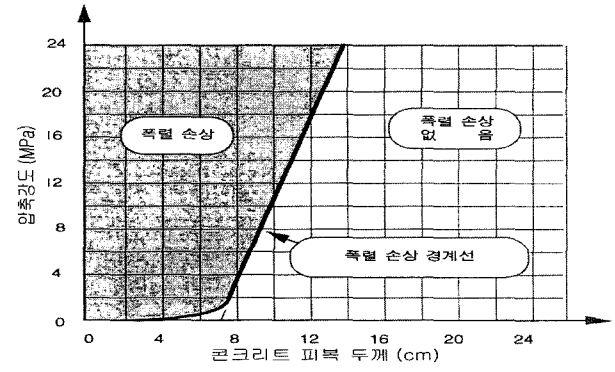


그림 4. 콘크리트 부재의 두께와 폭렬과의 관계

강섬유는 폭렬의 현상과 관계가 없으며, 고강도 콘크리트가 보통강도 콘크리트에 비하여 폭렬이 많이 나타나는 것으로 알려지고 있다. 또한 함수량과 가열속도가 폭렬을 발생시키는 중요한 인자이며, 높은 가열속도는 폭렬의 가능성이 높고 바닥, 벽보다는 기둥, 보 등과 같이 많은 면에서 가열된 부재가 폭렬의 가능성이 더 높은 것으로 알려져 있다.

2.2 고강도 콘크리트의 고온시 열적 특성 해석 모델

2.2.1 쉬나이더의 3변형 구성인자(tree-strain-component) 모델

세 가지 변형 구성요소에 의한 모델은 열팽창 변형, 역학적 탄소성 변형과 더불어 온도에 따라 빠르게 변형을 증가시키는 크리프 변형이 포함된다. 평가온도에 있어서 일반적인 구성방정식은 식(1)과 같이 표현된다.

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{th}(T) + \varepsilon_{\sigma}(T,\sigma) + \varepsilon_{cr}(T,t,\sigma) \quad \text{식(1)}$$

쉬나이더의 모델은 뛰어난 적용성 때문에 지난 몇 십년간 가장 일반적인 방법으로 사용되어 왔다. 그러나 이 모델은 약 100 ~ 200 ℃의 온도 범위에서 수분영향에 따른 갑작스런 응력 변화 또는 700 ℃ 이상에서의 소성 변형 성상 및 공극압 상승에 따른 추가적인 변형을 해석할 수 없었다. 이와 같은 오류를 수정하기 위하여 쉬나이더는 더 복잡한 과정들을 추가시키고 있지만 그 계산절차는 복잡하고 어려워 컴퓨터 프로그램으로서는 적절하지 않았다.

2.2.2 테로의 다항식 비정상상태 크리프 변형 모델

콘크리트의 변형 모델에서 전체 변형은 세 가지 구성인자로 나뉘어 지며, 전체 변형에 대한 관계는 식(2)와 같이 간략화 될 수 있다.

$$\varepsilon_{tot} = FTS + LITS \quad \text{식(2)}$$

여기서, FTS : 자유 열팽창 변형 (ε_{th})

LITS : 열 변형시의 하중 ($\varepsilon_{cr} + \varepsilon_{\sigma}$)

테로에 의한 다항식 모델은 다른 모델과 비교하여 만족할 만한 결과를 보였으며, 수치적 해석에 있어서 유용하게 사용되었다. 그러나 테로의 모델은 이러한 장점에도 불구하고 낮은 온도범위에 있어서 오차가 발생된다. 이는 테로의 모델이 특별한 조건에서의 재료에 대한 실험결과로부터 도출되었기 때문에 다양한 콘크리트 형태 및 응력조건을 반영하는 데는 다소 무리가 있었다. 또한 콘크리트 열적 특성 변화에 영향을 미치는 추가적인 인자들

을 적용하기에도 어려움이 많았다.

2.2.3 앤더버그의 4변형 구성인자(four-strain-component) 모델

이 모델은 전체 콘크리트의 변형이 다음 4가지 인자의 합으로 결정된다. 이 가정은 앤더버그와 테란더슨(1978)의 이론적 연구를 바탕으로 하고 있으며, 린, 엘링우드와 파이트(1988)의 실험적 결과를 적용하고 있다. 전체 4가지 변형은 온도상승에 따라 사전 재하된 콘크리트의 비정상상태 응력변화를 포함하고 있다.

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{th}(T) + \varepsilon_{\sigma}(\sigma, T) + \varepsilon_{cr}(\sigma, T, t) + \varepsilon_{tr}(\sigma, T) \quad 식(3)$$

앤더버그의 변형별 모델은 가장 이상적인 콘크리트의 변형별 모델이며, 현재까지 가장 좋은 결과를 도출해 낼 수 있는 모델로 여겨지고 있지만 이 모델은 기본적으로 정상 상태의 크리프 모델을 기본으로 한 것으로서 저온 영역에서는 추가적인 비정상상태 변형 계산절차가 필요하다.

2.2.4 잉글랜드와 코로우의 공극압력 예측 모델

잉글랜드와 코로우는 고강도 콘크리트와 보통강도 콘크리트가 목표온도에서 수분의 이동에 따른 공극압력을 수치적 모델로 나타내었다.

200℃ 이상의 온도에서 콘크리트의 폭렬과 공극압력을 증가시키는 콘크리트 내의 수증기의 부피 팽창은 온도변화 조건 (dT/dt)과 온도에 대한 부피 변화 (dv/dT)로서 나타낼 수 있다. 이 관계는 다시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} \quad 식(4)$$

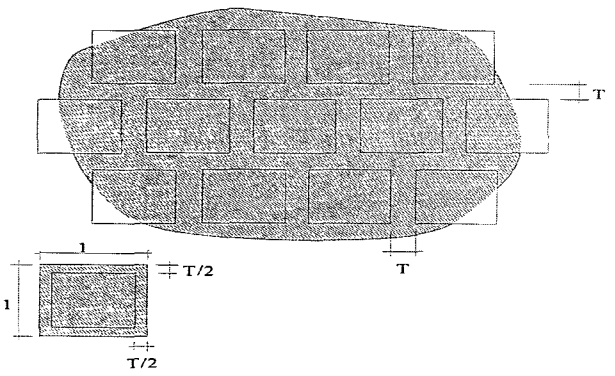


그림 5. 탄성 시멘트페이스트 골조에서 공극을 가지는 콘크리트

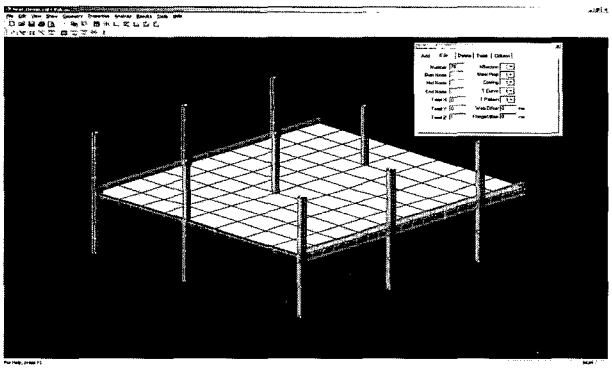
시멘트페이스트를 탄성 골조체로 가정하고, 공극은 시멘트페이스트 골조에 균일하게 분포되는 것으로 콘크리트 공극구조를 모델링할 경우, 공극압 예측과 시멘트페이스트 골조의 파괴시 온도 예측이 가능하다. 탄성 시멘트페이스트 골조의 두께 T는 시멘트페이스트 최대 인장강도(σ_t)를 방정식화하여 결정할 수 있다.

수학적 분석을 위해서는 물-시멘트비, 콘크리트의 용적대 공극의 용적비 (V_p/V_{tot}), 공극의 용적대 자유수 용적비 (V_{fw}/V_p), 콘크리트 용적대 빈 공극비 (V_{up}/V_{tot}) 뿐만 아니라 콘크리트 침투성과 콘크리트 강도가 필요하다. 이러한 데이터의 일부분은 실험적인 측정에 의하여 얻어질 수 있다.

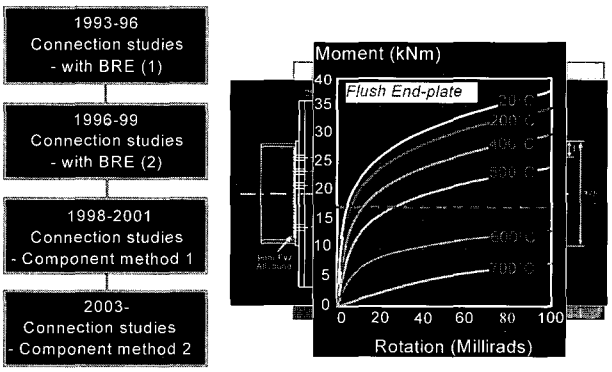
3. 고강도 콘크리트 내화성능 예측 · 계산 기술

화재시 고강도 콘크리트에 대한 내화성능 예측·계산 기술은 강구조 부재와는 달리 콘크리트의 강도, 골재 종류 및 형태, 물-시멘트비, 함수량 및 재령 등 많은 인자에 의해 변화되지만 최근 고강도 콘크리트의 다양한 데이터베이스 구축을 통해 전술한 해석모델에 기초한 컴퓨터 프로그램에 의해 수행되고 있다.

현재 고강도 콘크리트에 대한 내화성능 예측·계산 기술이 적용되고 있는 대표적인 국가는 영국이며, 영국에서는 VULCAN이라는 프로그램을 통해 내화성능을 예측하고 있고 컴퓨터 프로그램을 통해 예측된 내화성능은 실규모의 내화성능 시험으로서 검증하여 사용하고 있다.



a. 프로그램의 예

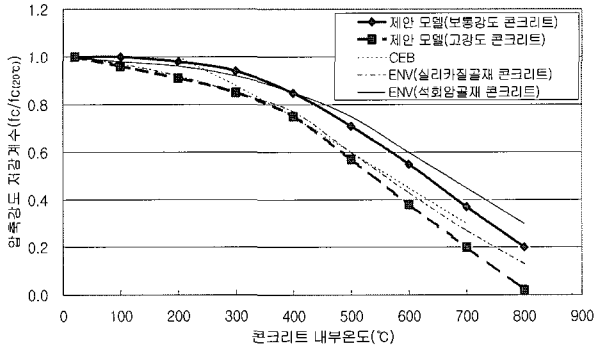


b. 결과의 예

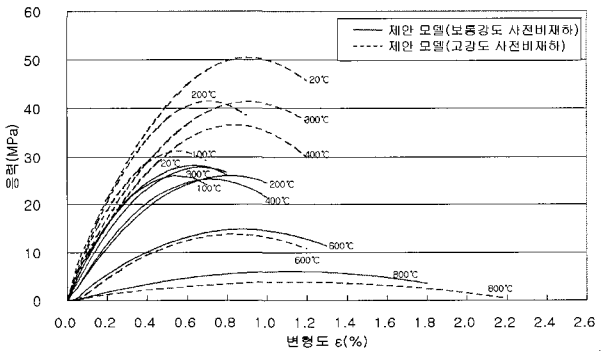
그림 6. 고강도 콘크리트 내화성능 예측·계산 프로그램의 예

4. 국내의 기술 동향

국내에서는 가열 후 냉각된 보통강도 콘크리트에 대한 압축강도, 균열 및 파괴형상 등 기본적인 특성 규명에 대해서만 이루어졌으나 최근 50 MPa의 고강도 콘크리트에 대한 압축강도, 탄성계수, 응력-변형곡선 등에 대한 데이터베이스 구축 및 모델 제시 등이 이루어지고 있으며, 이러한 데이터를 바탕으로 유한요소법에 의한 구조부재의 온도상승에 대한 예측 기술이 제시되고 있다.

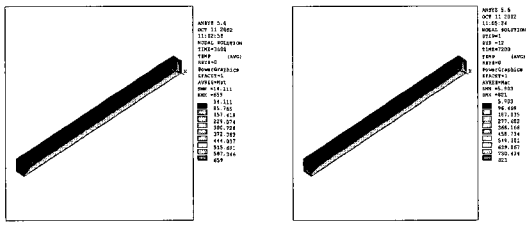


a. 압축강도



b. 응력-변형 곡선

그림 7. 국내 고강도 콘크리트 제안 모델의 예



a. 가열시간 60분 b. 가열시간 120분

그림 8. 국내 가열시간에 따른 콘크리트 보의 온도 분포 예측

5. 맺음말

최근 건축물 구조부재에 대한 내화성능 예측·계산 기술은 건축물이 고층화, 대형화, 복합화 및 신재료·신기술의 도입에 따른 특수 건축물에 대해서 공학적이고 합리적인 방법으로 내화성능을 확보하기 위한 방법으로 사용되고 있으며, 이미 선진 각국에서는 실용화 단계에 있다. 특히 고강도 콘크리트를 비롯한 다양한 종류의 콘크리트의 경우에는 콘크리트의 특성을 좌우하는 다양한 인자들로 인해 내화성능 예측·계산 기술이 강구조 건축물에 비해 늦게 도입되었지만 현재 실용화를 위한 준비 중에 있다.

따라서 국내에서도 강도 영역별, 골재의 형태별, 재령별 고강도 콘크리트의 고온에서의 열적 특성 데이터베이스 구축은 물론 이를 활용한 성능적 내화설계 예측·계산 기술 개발을 위한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 김홍열, 고온 영역에서 고강도 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구, 건국대학교 대학원 박사학위논문, 2003. 1983.
2. 한국건설기술연구원, 내화구조기준 개정연구, 2004. 8.
3. 安部武雄外 4人, 高溫度における高強度コンクリートの力學的特性に關する基礎的研究, 日本建築學會構造系論文集, 第515號, 1999.
4. American Concrete Institute, "State-of-Art Report on High-Strength Concrete," ACI 363R-92, Michigan, 1992 .
5. Castillo, C., and Durrani, A. J., "Effect of transient high temperature on high-strength concrete," ACI Materials Journal(American Concrete Institute), Vol.87, No.1, 1990, pp.47~53.
6. Comites Euro-International Du Beton, Fire Design of Concrete Structures-in accordance with CEB/FIP Model Code 90(Final Draft), CEB Bulletin D'Infermation No.208, Switzerland, 1991.
7. Comité, Européen de Normalisation(CEN), Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures. Part 1-2 : General Rules - Structural Fire Design, CEN ENV 1994.
8. Diederichs, U., and Jumppanen, U. M., Penttla, V., Material Properties of High Strength Concrete at Elevated Temperatures, LABSE 13th Concress, Helsinki, 1988.