

화재조건 하에서 철근콘크리트 부재의 거동에 관하여

진영화 | 방재시험연구원 건축구조부 대리

이 연구보고서는 2003년 2월에 홍콩에서 열린 Fire Asia International 2003 세미나 중의 일부로서 영국의 랭커셔대학의 플레튼교수가 발표한 것을 요약 소개하는 것으로, 가열조건하에 있는 콘크리트 구조부재 횡단면의 온도분포이력을 예측하기 위한 비선형유한요소모델(FEM)에 대한 것이다. 콘크리트에 있어서 온도 특성은 온도와 수분에 모두 민감한 것으로 가정하였으며 기존의 몇 가지 시험들이 개발된 모델과 비교되었다. 또한 실험값은 기존의 실험 결과와 비교 확인하였다. 이 연구보고서는 화재에 노출된 스틸보강이나 다른 강구조물 및 부재를 콘크리트가 보호한다는 점을 기본 가정으로 하고 있다.

1. 소개

화재조건에 노출된 철근콘크리트에 있어 온도분포이력을 예측하는 비선형 유한요소 해석 절차의 사용과 관련된 많은 수의 연구가 이루어져 왔으며, Ellingwood와 Lin¹⁾은 화재조건에 노출된 철근콘크리트 보의 횡단면에 있어 온도분포이력을 예측하는 열류에 대한 공식을 해결하기 위해 2차원 유한요소 연구를 수행하였다. 그러나 이 연구는 콘크리트 내부의 수분에 대한 영향을 고려하지 않았다. 실제로 수분은 재료의 열전도율에 영향을 미치는 중요한 인자이다. Wickstrom²⁾은 콘크리트에 있어 수분과 수분의 증발영향을 고려하기 위해서 엔탈피 개념을 사용하였다. 그러나 콘크리트에서 다양한 초기 수분함량을 고려하여 엔탈피 곡선을 수정하기란 어

려운 일이었다.

여기에서는 화재조건에 노출된 철근 콘크리트 보의 횡단면에 있어 온도분포이력을 평가하는 2차원 비선형 유한요소 모델을 이용한 컴퓨터 모델의 사용을 논의한다. 재료의 온도특성과 가열 경계조건이 다양하기 때문에 열류문제는 비선형으로 고려한다. 가열환경 해석은 표준가열곡선³⁾을 사용하여 이루어졌다. 표준가열곡선은 시간에 따른 곡선이며, 전도나 복사된 열전달 특성이 가열경계 조건으로 사용되었다. 선행된 시험결과와 비교하여 본 연구의 모델을 정량적으로 검증하였다.

2. 모델이론의 배경

화재조건에 노출된 철근콘크리트 온도해석의 목

적은 콘크리트 개별 성분의 온도분포이력을 예측하기 위함이다. 콘크리트는 모세-투과성 물질이므로, 수분의 유무에 따라 문제가 복잡해질 수 있다. 가열하는 동안 열과 수분의 중량 이동은 동시에 이루어지고, 온도분포는 수분유무에 영향을 받는다. 이 연구에서는 Sahota⁴⁾가 제안한 수분 중량의 확산, 대류, 증발, 응결을 설명하는 이론모델을 화재조건에 노출된 철근콘크리트 열해석의 기본식으로 채택하였다.

가. 재료의 특성과 수치해석

콘크리트 열전도율은 온도가 상승할수록 낮아진다. 그리고 열전도율 변화에 영향을 미치는 가장 큰 요소는 콘크리트 내부의 수분이다. 콘크리트 내부의 수분은 120℃에서 끓는 것으로 가정된다. 그러므로 120℃가 넘으면 수분은 없어지고 콘크리트는 건조된 것으로 가정한다.

콘크리트와 비슷한 방법으로 강재의 열전도율도 온도가 상승함에 따라 낮아진다. 이 열전도율의 감소율 및 감소량은 주로 강재의 구성성분에 따라 다르며, 특히 탄소 성분에 의해 달라진다. 본 연구에서는 콘크리트의 열특성이 온도와 수분에 의해 달라지고, 강재는 온도에 의해 달라진다고 가정된다.

해석기술로는 FEM이 사용되었다. 분석된 시스템

의 열전도 매트릭스는 각 요소의 열전도 매트릭스의 조합으로 구성된다.

선형 삼각형 요소(linear triangle element)와 사각형 요소(quadrilateral element)가 2차원 해석 형태구성을 위한 요소로서 쓰였다. 열용량은 각 절점에서 단위 온도변화율로 흡수된 열과의 비율로 나타낸다. 이러한 열용량 매트릭스는 각 절점의 인접 요소의 열용량 C_p 와 밀도 ρ 와 관련된 항들도 포함한다.

여기에서 중요한 점은 모델링에 적용된 가열환경의 경계조건이다. 그 조건은 플래쉬오버 상황과 동일하다. 가열상태에서 시간-온도관계는 가열곡선으로 나타낸다. 불과 콘크리트 표면의 열전달을 모델링하기 위해 비선형 가열 경계조건이 쓰였다.

나. ISO 834 FIRE에 관한 합성 슬래브 모델링

최근 ISO 834에 따라 종단면 강판재를 가진 합성 콘크리트 슬래브에 대한 세 가지 가열시험이 TNO Building and Construction Research의 Centre for Fire Research에서 수행되었다.⁵⁾

본 논문에서는 세 가지 가열시험들 중에서 Test 7로 일컬어지는 시험에 대해 다음과 같이 모델링 하였다. ISO 834 곡선은 [그림 1]에 나타내었고, 합성 슬래브 횡단면의 개략적 그림을 [그림 2]에 나타내

1) Ellingwood, B. and Lin, T. D., "Flexure and shear behaviour of concrete beams during fires", Journal of Structural Engineering, 117, No. 2, 440-458(1991)
 2) Wickstrom, U., "A computer program for temperature analysis of structures exposed to fire", Report No 79-2, Lund institute of Technology, Lund, Sweden (1979)
 3) - "ISO 834, Fire resistance tests- elements of building construction", international Organization for Standardization (1985).
 - ASTM Designation: E119, Standard methods of fire tests of building construction and materials", American Society for Testing and Materials, Philadelphia(1983).
 4) Sahota, M. S., "Heat and mass transfer in porous concrete structures subject to fire", Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley (1976)
 5) Both, C. & van de Haar, P.W., "The mechanical behaviour of three two-span fire-exposed composite steel/concrete slabs with Prins PSV73 steel decking", Test report, Delft University of Technology report 6. 94.24/TNO-Building and Construction Research report 94-CNB-R 1383, (1994).

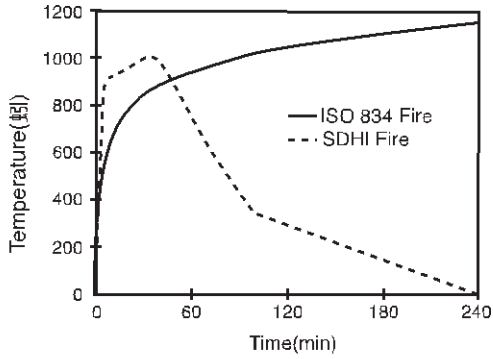
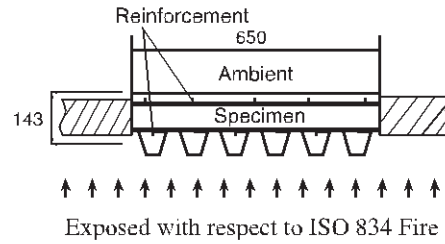


Figure 1: ISO 834 and SDHI Fire curves

[그림 1] ISO 834 및 SDHI Fire curves



[그림 2] 합성슬래브 횡단면의 개략도

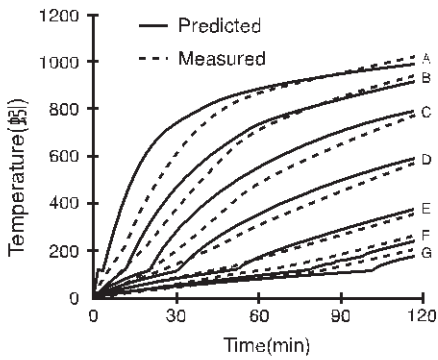


Figure 4(a): Comparison of predicted and measured [10] temperatures at

(a) $\epsilon_f=0.9$

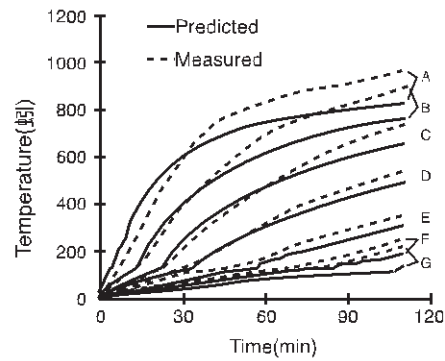


Figure 4(b): Comparison of predicted and measured [10] temperatures

(b) $\epsilon_f=0.6$

[그림 3] ISO 834 Fire 에 대한 예측 및 측정값 비교 1

었다. 무게는 일반 콘크리트와 동일하고, 28일 양생 조건이며, 28MPa의 압축강도를 가진다. 각 시험체의 수분함량을 결정하기 위해, 4개의 시편이 제작되었다. 각 시편은 두께와 강판재에 있어서 동일하고, 너비와 길이는 각각 330mm와 300mm로 제한하였다.

측정된 콘크리트 수분함량의 평균은 중량대비 4.8%이다. 하단부에 구조부재(構造部材) rib을 가진

합성슬래브 때문에, 2차원 해석이 필요하다. 보강의 영향은 무시하였다. 가열시 화염방사율(ϵ_f)에 대한 영향을 평가하기 위해, 화염방사율 0.6과 0.9의 두 값이 사용되었다. 건조 콘크리트의 온도분포 또한 수분 영향을 확인하기 위해 계산되었다.

[그림 3(a), (b)]에는 ϵ_f 를 0.6과 0.9로 사용하여 예측한 값과 실제 실험값을 동시에 나타내었다. 철근

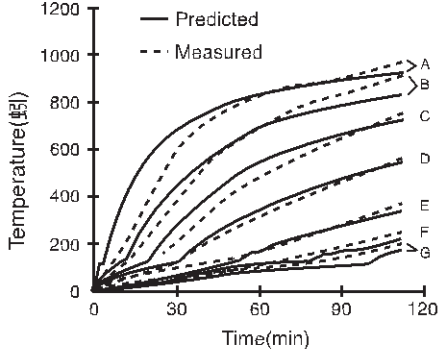


Figure 5(a): Comparison of predicted and measured [10] temperatures at reference positions for ISO 834 Fire ($w = 4.8\%$ and $\epsilon_f = 0.8$)

(a) $w = 4.8\%$ $\epsilon_f = 0.8$

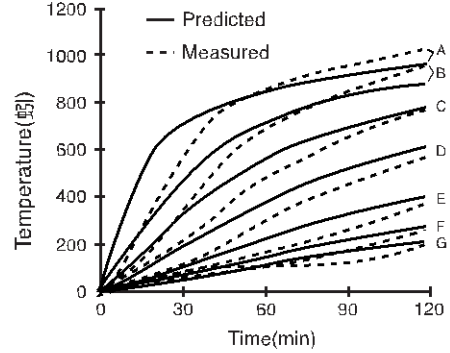


Figure 5(b): Comparison of predicted and measured [10] temperatures at reference positions for ISO 834 Fire ($w = 0$ and $\epsilon_f = 0.8$)

(b) $w = 0\%$ $\epsilon_f = 0.8$

[그림 4] ISO 834 Fire 에 대한 예측 및 측정값 비교 2

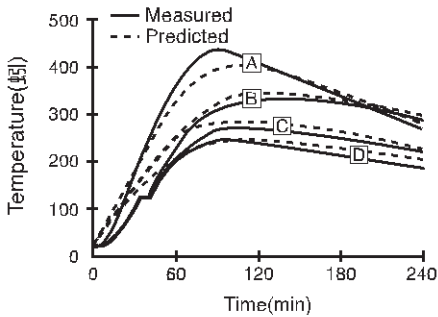


Figure 7(a): Comparison of predicted and measured [3] temperatures at reference positions for SDHI Fire ($\epsilon_f = 0.9$).

(a) $\epsilon_f = 0.9$

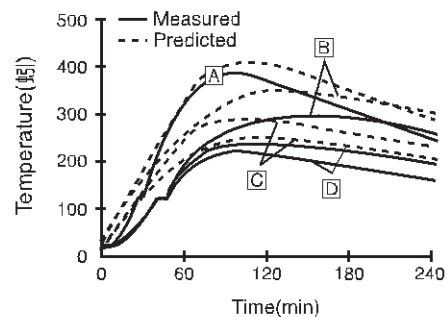


Figure 7(b): Comparison of predicted and measured [3] temperatures at reference positions for SDHI Fire ($\epsilon_f = 0.6$).

(b) $\epsilon_f = 0.6$

[그림 5] SDHI Fire 에 대한 예측 및 측정값 비교

콘크리트 구조부재의 횡단면에 있어 온도분포이력을 설명하는데 ϵ_f 의 영향은 중요하다는 점을 확인할 수 있다. 특히 불에 노출된 표면주위에 있는 영역에서는 더욱 중요하다.

[그림 4(a), (b)]에는 철근 콘크리트 구조부재의 열 거동에 대한 수분영향을 보여준다. ϵ_f 의 값은 0.8이 사용되었다. [그림 4(a)]는 중량대비 4.8%의 실제

수분함량이 적용되었고, 비교를 위해 수분함량이 없는 경우를 [그림 4(b)]에 나타내었다.

다. SDHI Fire에 관한 보강콘크리트빔 모델링

실제 화재에서 화재구획의 온도는 ISO 834 Fire에 의해 제시되는 온도-시간 곡선과 거의 같지 않다. 그러므로 실제와 비슷한 화재하중 및 구획-환

기 변수를 사용하여 개발한 SDHI(Short-Duration High Intensity) 화재를 철근 콘크리트 보 실험에 적용하였다. 온도-시간 곡선은 [그림 1]과 같다. 이 논문에서, Beam 5로 언급되는 실험구조물 중 하나가 보의 횡단면 온도분포를 예측하기 위해서 현 모델을 사용하여 모델링 되었다. 측정지점은 주철근의 위치이다. 보는 34MPa의 압축력을 가진 일반-중량 콘크리트를 사용하여 제작되었다. 수분함량은 없다. 그리고 역시 강재의 보강 또한 무시된다.

[그림 6(a), (b)]에 ϵ_f 를 0.6과 0.9로 사용하여 예측한 값과 실제 실험값을 동시에 나타내었다.

이들 그림은 중량비 2%의 초기 수분함량을 사용한 것이다. 선행 시험조건에서 관찰한 바와 같이, ϵ_f 는 가열과정이나 냉각과정 모두에 있어서 보의 횡단면 온도분포에 중요한 영향을 미치며, 특히 냉각 과정에 더 큰 영향을 미친다.

본 연구에서는 두 가지 다른 종류의 철근 콘크리트 부재(합성슬래브, 보)를 ISO 834와 SDHI Fire에 따라 해석하였다. 전반적으로 사용된 모델이 실험 데이터와 일치함을 확인할 수 있다. 그러나 화염방사율(\dot{q})을 정확히 입력하는 것이 중요하다. 콘크리트의 낮은 열전도율과 수분영향 때문에 콘크리트 구조부재 횡단면의 온도분포는 비선형이 되고, 온도는 측정지점이 불에 노출된 표면에서 멀어질수록 급격하게 줄어든다. 그러므로 콘크리트는 불에 노출된 강재보강 및 다른 강재 구조 요소, 성분을 보호하는 방법으로 사용될 수 있다는 결론은 내릴 수 있다. 그런 의미에서 콘크리트의 파손을 막는 것이 중요한 일이라 하겠다. 만일 콘크리트가 깨어진 상태라면, 보강이나 강재구조 요소는 직접적으로 불에 노출될 수 있고, 구조물의 화재 저항성을 크게 떨어뜨릴 수 있다.

3. 맺음말

이 연구보고서에서는 가열조건하의 철근 콘크리트 구조부재의 횡단면의 온도분포이력을 예측하기 위해 2차원 비선형 유한요소 모델에 대하여 설명하였다. 그리고 2차원 비선형 FEM 해석절차를 개발하였다. 이 과정에서 콘크리트내의 수분증발영향이 설명되었고, 콘크리트의 열특성이 온도와 수분에 의해 달라지는 것으로 고려되었다.

ISO 834 및 SDHI Fire의 시험방법에 따라 화재의 온도 추이에 관련된 다양한 경계조건을 고려하였고 화염방사율은 데이터에 큰 영향을 끼칠 수 있으며 이러한 조건들은 재료의 거동에 중요한 영향을 끼칠 수 있다는 것을 알 수 있었다.

- 여기에서 제안된 비선형 FEM은 가열조건에서 철근 콘크리트 구조부재의 횡단면 온도분포 이력을 측정값과 거의 동일하게 예측할 수 있었다.
- 수분영향은 가열조건동안 콘크리트의 온도분포이력에 있어 중요하다. 특히, 초기 수분함량은 철근 콘크리트 온도해석에서 반드시 언급되어야 한다.
- 철근 콘크리트 온도분포이력은 화재의 화염방사율(\dot{q})값에 민감하다. ϵ_f 의 값은 0.7~0.9정도의 값을 사용하는 것이 적당한 것으로 판단된다.
- 여기에서 모델로 생성된 온도분포이력은 화재에 노출되는 철근 콘크리트 구조부재의 역학적 반응을 예측하기 위한 온도 입력값으로 사용될 수 있다. 🌀