

TSC 보 내화성능에 관한 수치해석적 연구

Numerical Study on the Fire Resistance Performance of the TSC Beam

최 승 관* 김 성 배** 이 창 남** 김 상 섭*** 김 흥 열* 신 현 준*
Choi, Seng-Kwan Kim, Sung-Bae Lee, Chang-Nam Kim, Sang-Seup Kim Heung-Youl Shin, Hyun-Joon

Abstract

The use of composite floors is now the one of most preferred methods for a wide range of commercial buildings in the world, offering significant advantages, such as speed, simplicity and greater accuracy of construction, flexibility of further floor modification and reduction of construction cost. However, since steel is well known to lose its strength and stiffness properties under elevated temperatures, the fire resistance of the composite construction needs to be investigated. This research is organized to numerically study the structural performance of 4.4m TSC beam under a standard ISO fire, which composite system is developed by SEN Structural Engineering Ltd. Steel and concrete properties under elevated temperatures are obtained from Eurocode and the temperature development across the section is suggested from mathematical methods and heat transfer FE analyses. Based on a modified plastic section capacity, the fire performance of the model is also examined.

키워드 : TSC 보, 합성보, 열전도 해석, 내화성능

Key word : TSC Beam, Composite Beam, Heat Transfer Analyses, Fire Resistance Capacity

1. 서론

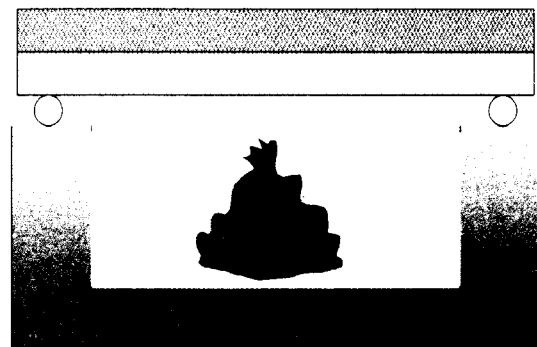
복합구조는 강과 콘크리트 재료의 장점인 인장과 압축 특성을 충분히 활용하고 시공상의 경제성, 단순성, 신속성, 정확성 그리고 추후 변형에 대한 용이성 등의 여러 장점에 기인하여 최근 유럽에서 가장 일반적으로 많이 쓰이는 빌딩 구조물의 형태이다. 그러나 화재 조건에 취약한 강부재가 포함된 구조 시스템이므로 내화 거동에 대한 안전 검증이 고려되어야 하는 것은 주지의 사실이다. 본 연구는 현재 국내에서 연구 개발되어 사용하고 있는 복합 구조의 한 형태인 TSC 보의 내화성능 평가를 위하여 수학적 및 수치 해석적인 방법을 통해 내화 거동을 예측 및 분석하는 것에 그 목적이 있다.

분석 모델 및 조건은 KS F 2257[1]의 '건축구조 부재의 내화 시험방법' 및 건설교통부 고시 제2000-93호[2]에 따라 단순지지 상태의 4.4m 소형 TSC보[그림 1]를 60분간 ISO 표준화재 조건에 3면 노출상태에서 온도 분포 거동을 분석하였다. 강과 콘크리트의 재료특성은 Eurocode로부터 고려하였으며 온도의 변화는 열전도 FE 해석과 수학적 방법으로 산정하였고, 이것을 기본으로 모델의 내화성능 분석을 시도 하였다.

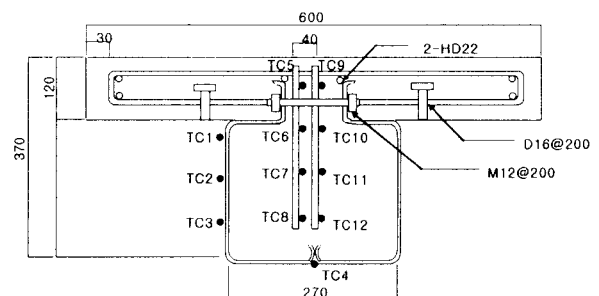
2. 고온 재료 특성

고온에서 건설용 재료는 화학적 구성과 원자의 구조에 따라서 관련 특성인 강도, 강성, 비열, 전도율, 열팽창률 등이 온도와 함께 연동되어 비선형적으로 변화한다. 이는

화재 발생시 구조물에 복합적인 거동을 발생시키는 한 원인이 된다. 본 연구에서는 열전도 해석을 위하여 강과 콘크리트 재료의 고온 특성을 Eurocode 3&4 Part1.2 [3, 4]를 기본으로 설정 하였다.



(a) 화재실험 개념도



(b) 단면

그림 1. TSC 보 소형 모델

- 1) 정희원, 한국건설기술연구원
- 2) 정희원, (주)센구조연구소
- 3) 정희원, 한국기술교육대학교 건축학부 교수

2.1 강

고온에서 강의 응력-변형률 곡선은 [그림 2]와 같다.

고온에서 강의 응력-변형 특성은 선형적인 초기 변형을 지나서, 타원방정식을 사용하여 항복응력에 접근함으로써 수치해석 연구를 수행함에 안정적인 수렴조건을 제공한다. 또한 필요에 따라 변형도 경화(strain hardening) 영향을 포함 할 수 있으며, 한계 변형률을 20%까지 허용한다. 강도(2% 변형 한계 조건)는 약 300°C부터 열의 영향으로 그 값이 감소하여 800°C가 넘으면 잔류강도가 상온의 10%까지 감소하며, 강성 역시 강도가 변하는 것과 유사한 방식으로 감소한다.

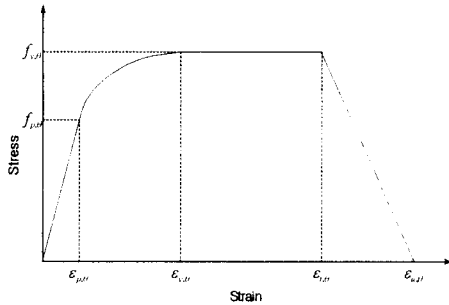


그림 2. Stress-strain relationship for steel at elevated temperatures

where

- $f_{y,\theta}$ is the effective yield strength
- $f_{p,\theta}$ is the proportional limit
- $\epsilon_{p,\theta}$ is the strain at the proportional limit
- $\epsilon_{y,\theta}$ is the yield strain (2%)
- $\epsilon_{c,\theta}$ is the limiting strain for yield strength (15%)
- $\epsilon_{u,\theta}$ is the ultimate strain (20%)

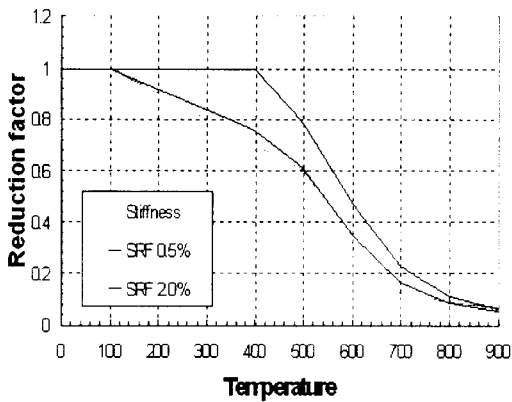


그림 3. 온도별 강의 잔류 강도 및 강성

그림 3은 온도변화에 의한 강의 잔류강도 및 강성의 변화 그래프이다.

강의 비열 및 열전도율은 온도 변화와 연동하여 변화하는 특성을 갖고 있다. 또한 약 750°C 부터 일정기간 동안 지속되는 재료의 결정구조의 상변위 현상을 고려하여 비선형적으로 표현되는 것으로 발표되었고, 본 논문에서

는 이러한 강재의 온도특성은 생략 하였다. 밀도(ρ_a)는 온도 변화와 비교적 독립적으로 고려되고 있으므로 고정된 값(7,850kg/m³)을 사용 하였다.

2.2 일반 콘크리트

콘크리트는 재료의 비관질성 및 재령의 영향 등으로 온도 변화에 따른 열역학적 특성 분석이 다른 건설재료에 비해 상대적으로 복잡하고, 실험 방법에 의한 영향도 커서 정의에 어려움이 있다. 이러한 열역학적 특성 분석이 어려운 것은 부피의 주류를 이루는 골재의 영향력이 지배적이기 때문이다. 또한 고온 조건에서 강도와 탄성비산장은 골재/시멘트 비율과 골재의 종류 및 크기가 중요한 변수로 인식이 되어 있다. Eurocode 4 Part 1.2 [4]에 정의 되어 있는 일반 콘크리트의 고온에서 압축 영역의 응력-변형률 곡선은 다음과 같다.

$$f_c = f_{c,\theta} \left[\frac{\epsilon_{c,\theta}}{\epsilon_{c1,\theta}} \left(\frac{3}{2 + \left(\frac{\epsilon_{c,\theta}}{\epsilon_{c1,\theta}} \right)^3} \right) \right] \quad [1]$$

where

- $f_{c,\theta}$ Peak compressive cylinder strength of concrete, in N/mm²
- $\epsilon_{c1,\theta}$ The concrete strain corresponding to $f_{c,\theta}$

이 때 열전도율(c_c , [W/mK])은 다음과 같다.

$$c_c = 2 - 0.24 \times (\theta_c/120) + 0.012 \times (\theta_c/120)^2 \quad \text{for } 20^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad [2]$$

온도와 함께 비선형적 증가를 보이는 비열(C_c , [J/kgK])은 아래의 식 3으로 표현 될 수 있으나, 본 연구에서는 콘크리트 하중대비 4% 함수량을 고려하여 100°C~200°C 구간에서 부분적인 피크($C_c^* = 2750$ J/kgK)를 포함하였다. 밀도(ρ_c)는 온도의 변화와는 독립적으로 고정된 값 2300 kg/m³을 사용 하였다.

$$C_c = 900 + 80 \times (\theta_c/120) - 4 \times (\theta_c/120)^2 \quad \text{for } 20^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad [3]$$

3. 내화 성능 분석

TSC 합성보에서 소성 휨 저항력은 강재부분이 인장응력을 부담하고, 콘크리트 슬래브가 압축응력을 부담하도록 구성되어 있다. 이에 각각의 응력 블록에서 화재조건의 영향을 고려하면 전체적인 변화에 대한 고찰이 가능하다. 표준 화재 조건의 가열로에서 강재의 온도변화는 많은 연구결과를 통해 기본적인 화재 실험 기간 동안 부

재의 온도 산정에 대한 결과가 제시되어 있다.

본 연구에서는 무피복 및 피복 상태의 TSC 보 온도 변화에 대한 열역학적 분석을 수행하였다. 또한 60분간 내화성능기준을 KS F 2257[1]에서 제시한 강재의 평균 온도 538°C, 국부적인 최대 온도 649°C를 넘지 않는 조건을 만족시키도록 온도 변화를 고려한 단면의 소성모멘트 관점에서 단면력의 변화를 고찰 하였다.

3.1 무 피복 조건

가열로에서 무 피복 강재의 온도 산정은 Fourier Heat diffusion 공식을 적용하여 식 4가 제시 되어 있다 [4]. 식을 위한 가정은 강재의 온도 변화가 일정해야 한다. 또한 열전도의 역학적 조건은 가스를 통한 대류와 가열로 벽면의 복사 에 의한 영향 등이 고려 되어 한다. 그리고 단면 형상에 따른 온도 변화의 영향을 고려하기 위해 단면 계수 (A/V , section factor)를 포함하며, 사용된 강재의 단면적과 화재에 노출된 비율을 고려하여 온도의 발달 정도를 산정할 수 있게 정의 하였다.

$$\Delta\theta_a = \frac{\alpha_c + \alpha_r}{C_a \rho_a} \cdot \frac{A}{V} \cdot (\theta_f - \theta_a) \cdot \Delta t \quad [4]$$

where

α_c is the coefficient of convective heat transfer

α_r is the coefficient of radiative heat transfer

$$\left[= \Phi \left(\frac{5.67 \times 10^{-8} \epsilon_{res}}{\theta_i - \theta_a} \right) \left((\theta_i + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4 \right) \right]$$

in which Φ is the configuration factor

ϵ_{res} is the resultant emissivity of the fire compartment and the surface

C_a is the specific heat of steel

ρ_a is the density of steel

A is the exposed surface area of the part of the steel cross section per unit length (m^2/m)

V is the volume of the part of the steel cross section per unit length (m^3/m)

θ_i is the average gas temperature during the interval t ($^{\circ}C$)

θ_a is the steel temperature at the end of the interval t ($^{\circ}C$)

Δt is time interval (s)

TSC 보에서 사용된 강재($A/V=222m^{-1}$)를 식 4에 적용하면 강재 부분의 온도 변화는 다음 그림 4와 같다. 이는 표준 화재 조건에서 약 11.8분과 15.7분이 지나면, 강재의 온도가 600°C와 700°C에 도달하게 된다. 이러한 온도특성은 그림 3을 참조하면 잔류 강도는 약 47%와 23% 정도가 된다. 이는 일반적인 사용하중을 고려하였을 경우 무 피복 상태에서 고려된 모델은 약 10분 내외의 표준 화재 조건에서 내구성이 확보됨을 확인할 수 있다. 본 해석에서는 일반적으로 검증된 열역학적인 관련 계수를 사용하

였으며, 4%의 수분 함량 조건에서 수행 되었다. 고려된 모델의 소성중립축의 위치가 단면의 윗부분으로부터 30cm 이내에 존재함을 고려하였을 때, 60분간의 표준 화재 조건에서 온도의 변화는 200°C 이내이며, 이는 그림 3을 참조하면 화재 내구 기간 내 강도의 변화는 무시할 수 있음을 인식할 수 있다.

표준 화재 조건에서 일반콘크리트를 사용 시 TSC 보의 압축블록을 포함한 콘크리트의 온도 변화를 고찰하였다. 열전도 해석은 TSC 보 대칭 단면의 절반을 FE 소프트웨어인 FPRCBC-T[5]를 사용하여 수행 하였다.

그림 5는 표준 화재 조건에서 일반 콘크리트를 사용한 TSC 보의 시간별 온도 분포 변화이다.

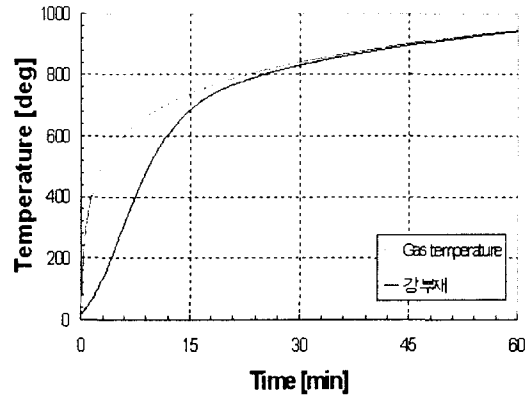


그림 4. ISO표준 화재에서 무 피복 조건의 TSC 보 온도 곡선

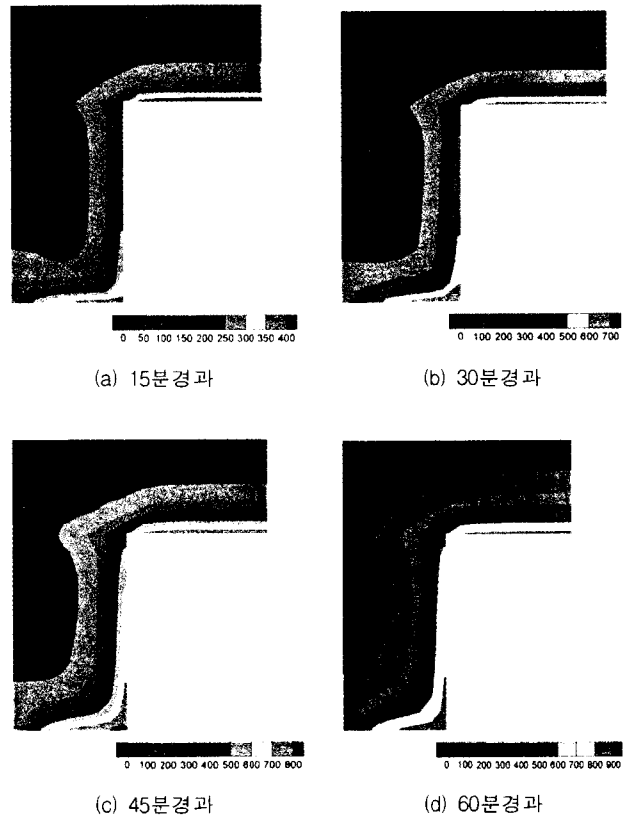


그림 5. TSC 보의 시간에 따른 온도 분포 변화

무 피복 상태에서 TSC 보의 온도 변화를 고찰 하여 보면 압축 블록의 강도 감소는 미미하다. 그러나 인장 부분의 감소는 10분정도가 경과하면 급격히 진행되어 화재 상태의 사용하중에 대한 60분간의 내구성을 확보하는 것에는 어려움이 있으며, 인장 블록 보강을 위한 피복이 필요함이 확인되었다. 이러한 해석결과는 식 4가 보수적인 관점에서 정의된 결과이며, 그 밖의 복합구조의 경우도 거의 유사한 결과를 갖는 것으로 확인되고 있다. 그러므로 실구조물의 실험결과와는 다소간의 차이가 있을 수 있다.

3.2 피복 조건

피복된 강부재의 온도 변화 고찰은 피복물질의 열전도 특성을 고려하여 부재에 온도의 전도를 산정하는 방법이 일반적으로 사용되고 있다. 이는 식 4를 기본으로 피복물질의 열특성을 포함하면 식 5와 같다.

$$\Delta\theta_a = \left[\frac{\lambda_i/d_i}{c_a\rho_a} \cdot \frac{A}{V} \cdot \left[\frac{1}{1+\xi/3} \right] \cdot (\theta_t - \theta_a) \cdot \Delta t \right] - [(e^{\xi/10} - 1)\theta_i] \quad [5]$$

where

$$\xi = \frac{c_i d_i \rho_i A_i}{c_a \rho_a V}$$

- λ_i is the thermal conductivity of the insulation material (W/mK)
- d_i is the thickness of the insulation material (m)
- c_i is the specific heat of the insulation material (J/kgK)
- A is the area of the inner surface of the insulation material per unit length of the part of the steel member (m²/m)
- ρ_i is the density of the insulation material (kg/m³)
- $\Delta\theta_t$ is the increase of the ambient temperature (°C) during the time interval Δt

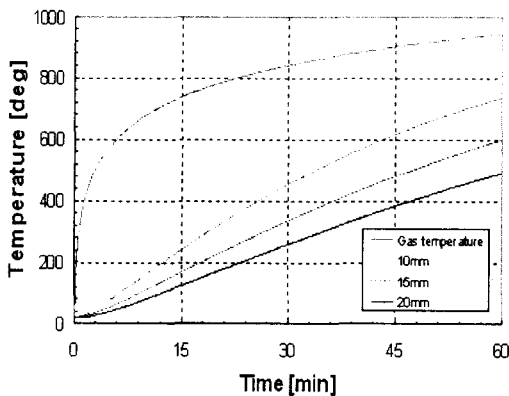


그림 6. 피복재 사용 시 온도 분포 변화

본 연구에서는 단열물질로 무기섬유 뿔칠용 재료 (단

위질량:300kg/m², 전도율:0.12W/mK, 비열:1200/kgK)를 사용하여 두께 10mm, 15mm 와 20mm를 TSC 보의 강재에 적용 하였을 경우, 표준화재 조건에서 강재의 온도 변화를 식 5를 이용하여 산정하였다.

그림 6은 표준화재 조건에서 피복재를 사용한 경우의 온도 분포 변화이다. 피복 두께가 15mm와 20mm 경우 부재의 온도가 각각 600°C와 500°C까지 60분간의 화재에서 증가하는 것을 고려하면, KS F 2257[1]에서 제시한 조건을 만족시키기 위하여 약 17.5mm 정도의 피복재가 필요함을 확인할 수 있다. 이는 약 60% 잔류용력을 허용하므로 사용하중에 대한 적절한 대응능력이 주어진다 고 판단된다.

4. 결론

60분간의 표준화재조건에서 TSC 합성보의 열전도 해석을 기본으로 내화성능을 분석하였다. 무피복 조건에서는 강재(인장블록) 온도의 급격한 증가로 인해 적절한 피복이 요구되며, 콘크리트 슬래브의 압축블록은 온도의 영향이 거의 전무함이 확인되었다. 또한 적절한 피복이 적용된 후에는 요구되는 온도에 대한 적절한 거동의 확보가 가능하다고 판단된다.

참고문헌

1. KS F 2257, 건축 구조 부재의 내화 시험 방법, 1999.
2. 건설교통부 고시 제2000-93호, 2000.
3. European Committee for Standardisation, ENV 1993-1-2: Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1.2: General Rules: Structural Design for Fire, Brussels, BE, 1993.
4. European Committee for Standardisation, ENV 1994-1-2: Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures. Part 1.2: General Rules: Structural Fire Design, Brussels, BE, 1994.
5. Huang, Z., Platten, A and Roberts, J., Non-linear finite element model to predict temperature histories within reinforced concrete in fires, Building and Environment, 31(2), pp 109-118, 1996.