

고온에서의 비선형 변형도를 고려한 콘크리트 구조물에서의 열응력 분포

Thermal stress of concrete structure at high temperature considering inelastic thermal strain change

강 석 원*
Kang, Suk Won

홍 성 곁**
Hong, Sung Gul

신 영 수***
Shin, Young Soo

ABSTRACT

Concrete behaves as ductile material at high temperature. The existing stress-strain relationship is not valid at high temperature condition. Thus, stress-strain curve of concrete at high temperature is re-established by modifying Saenz's suggestion in this study. A constitutive model of concrete subjected to elevated temperature is also suggested. The model consists of three components; free thermal strain, mechanical strain and thermal creep strain. As the temperature increase, the thermal creep becomes more critical to the failure of concrete. The thermal creep strain of concrete is derived from the modified power-law relation for the steady state creep. The proposed equation for thermal creep employs a Dorn's temperature compensated time theorem

Keywords: Stress-strain relationship, constitutive model, high temperature, free thermal strain, mechanical strain, thermal creep (strain), power-law relation, temperature compensated time

1. 서론

콘크리트는 재료 자체의 고유한 물성으로 인하여 우수한 구조물의 방화구획 혹은 내화재료로 취급된다. 그 이유는 다른 구조재료에 비해 에너지 소산능력이 뛰어나고, 열확산계수 혹은 전도율이 낮고, 온도가 증가할수록 그 값이 점차 감소하는 재료적 특성 때문이다. 그러나 이와같은 장점에도 불구하고 화재 등과 같이 콘크리트 구조물 혹은 구조 부재가 고온에 장시간 노출되어 있을 경우, 부분적이거나 때로는 전체 구조 시스템에 심각한 영향을 끼칠 수 있는 손상이 발생할 우려가 있으며, 차후 구조물에 대한 보수 및 보강이 필요하게 된다. 한편, 최근의 기술 개발과 경제적 이유 등으로 하여 고강도 및 고성능 콘크리트의 사용이 증대되고 있으나, 내화성능의 측면에서 볼 때, 단면의 크기 감소, 낮은 투수율과 화재시 그로 인한 박리 및 이에 수반하는 철근의 직접적 노출, 그리고 취성거동 특성 등은 구조물의 안전성에 큰 위해가 되며, 이에 대한 이해가 필요하다.

구조체에 대한 열거동은 외부 열원의 영향에 의한 온도분포해석과 그 결과를 이용한 구조해석의 두 단계로 구분할 수 있다. 따라서 열거동 해석은 콘크리트의 온도에 따른 재료 물성에 대한 조사와 기존

* 정희원, 서울대학교 건축학과 박사수료

** 정희원, 서울대학교 건축학과 교수

*** 정희원, 이화여자대학교 건축학과 교수

의 연구에 의해 알려진 바와 같이 고온에서 발생하는 비선형 변형도의 증가를 모델링할 필요가 있다. 또한, 고온에서는 콘크리트의 연성도가 급격히 증가하여 규준에서 제시된 응력도-변형도 관계로서는 이를 효과적으로 표시할 수가 없으므로, 이에 대한 보완책이 필요하다.

1940년대 이후, 구조재료로써 철근 및 콘크리트에 대한 온도에 따른 물성의 변화 및 재료적 특성에 대한 연구가 진행되어 왔다. 철근의 경우에는 재료의 균질성으로 인하여 고온에서의 재료적 특성에 대한 많은 연구가 진행되어 신뢰성있는 재료모델들이 개발되었다. 반면, 콘크리트의 경우 이질재료의 복합체이며 고온에서 시멘트 페이스트 내부에서 화학적 성분변화로 인하여 특히 고온에서의 비선형 변형도에 대한 분석에 어려움이 많다. 최근까지의 연구결과에 따르면 콘크리트는 온도가 증가할수록 연성거동의 특징이 현저히 증가하며, 따라서 고온으로 갈수록 재료물성 및 거동양상에 대해서 철근에서와 동일한 방법을 이용하여 온도에 대한 모델링이 가능하다고 알려졌다.

이상과 같은 현재까지의 연구 결과를 토대로 본 연구에서는, 기존의 재료실험결과를 바탕으로 회귀 분석으로 통하여 온도에 따른 콘크리트의 물성을 모델링하였으며, 고온에서 콘크리트의 연성거동을 표현하기 위해 Saenz가 제시한 응력도-변형도 관계를 변형하여 고온에서도 적용할 수 있도록 수학적으로 유도하였다. 또한, 고온에서 콘크리트의 변형에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 콘크리트의 열적크리프를 고려한 구성방정식 모델을 제시하였다.

2. Saenz 수정모델을 이용한 응력도-변형도 관계

여태까지의 실험결과에 의하면, 고온일수록 콘크리트의 거동은 상온에서와 비교해서 연성의 특성을 취하게 되며, 기존의 응력도-변형도 관련식을 이용하여 이를 표현하려 하였을 경우 실제 실험결과와는 상당한 오차가 존재한다. 본 연구에서는, 널리 알려진 Saenz의 제안식을 변형하여 고온에서의 응력도-변형도 관계를 포함할 수 있도록 하였다.

$$\sigma = \frac{(b_0 + b_1 \epsilon) E_c}{c_0 + c_1 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}\right) + c_2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}\right)^2 + c_3 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}\right)^3 + c_4 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}\right)^4} \quad (1)$$

여기서 E_c 는 초기 탄성계수이다. 그리고 $b_0 \dots c_4$ 는 상수이며, 다음의 조건들을 통해서 구할 수 있다.

- 조건 1, 2. $\epsilon = 0$ 일 때, $\sigma = 0$ and $E_T = E_c$ (그림 1에서 pt. 1)
- 조건 3. $\epsilon = \epsilon_l$ 일 때, $\sigma = \sigma_l$ (" pt. 2)
- 조건 4, 5. $\epsilon = \epsilon_c$ 일 때, $\sigma = f_c'$ and $E_T = 0$ (" pt. 3)
- 조건 6. $\epsilon = \epsilon_u$ 일 때, $\sigma = f_u$ (" pt. 4)

여기서 E_T 는 접선 탄성계수이며 식(1)을 미분하여 구할 수 있다. 조건 1에서 b_0 는 0이 됨을 알 수 있고, 이를 다시 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma = \frac{\epsilon E_c}{a_0 + a_1 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}\right) + a_2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}\right)^2 + a_3 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}\right)^3 + a_4 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c}\right)^4} \quad (2)$$

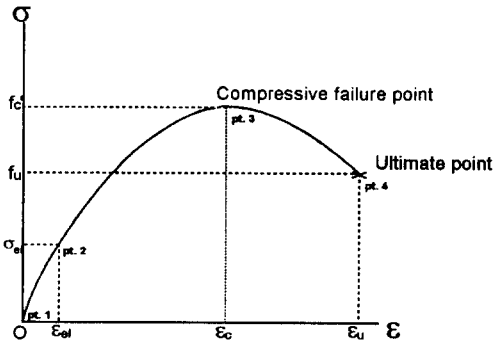


그림 1 응력도-변형도 곡선과 좌표조건

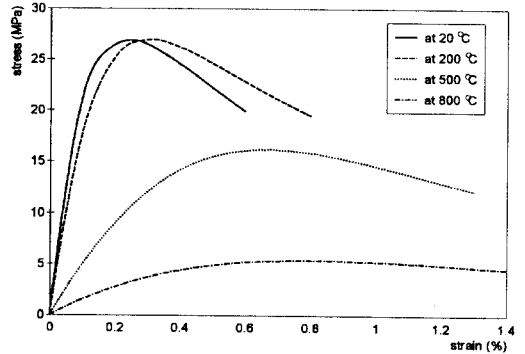


그림 2 고온에서의 응력도-변형도 곡선의 모델링

여기서 a_i ($i=1$ to 4)는 상수이며 마찬가지로 위의 조건들을 이용한 연립방정식으로부터 계산할 수 있다. 그림 2는 본 연구에서 제시한 모델을 이용하여 나타낸 응력도-변형도 곡선이다. 실제 실험결과와 같이 온도가 증가할수록 연성도가 증가함을 잘 나타내고 있다. 그림에서 극한강도(ultimate strength)는 압축항복강도(compressive failure strength)의 75%로 가정하였다.

3. 고온 하에서 콘크리트의 구성방정식

본 연구에서는 고온에서의 콘크리트의 변형도 성분을 다음과 같이 정의하였다.

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

여기서 ϵ_{th} , ϵ_{σ} 및 ϵ_{cr} 은 각각 열팽창변형도(free thermal strain), 응력계산을 위한 역학적변형도(mechanical strain), 그리고 열적크리프변형도(thermal creep strain)이며, T 와 t 는 각각 온도와 시간을 가리킨다. 열팽창변형도는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\epsilon_{th} = \int_{T_1}^{T_2} \alpha(T) dT \quad (4)$$

여기서 $\alpha(T)$ 는 콘크리트의 열팽창계수이다. 열적크리프변형도는 장기크리프변형도에 대한 Bailey-Norton 방정식을 변형하여 사용하였다. 기존의 Bailey-Norton 식에서 크리프변형도는 응력도와 시간의 지수함수로 표시할 수 있다. 고온에서의 열적크리프변형도는 응력도와 시간과 더불어 온도의 변화가 주요변수에 포함된다. 본 연구에서는 또한 고온에서 콘크리트의 거동 특성이 매우 큰 연성도를 지함에 따라 Dorn이 금속계열의 열적크리프를 표현할 때 사용하였던 온도보상시간(temperature compensated time, θ)의 개념을 도입하여 Bailey-Norton을 수정하여 사용하고자 하였고, 이를 식(5)에 나타내었다.

$$\dot{\epsilon}_{cr}(\sigma, T, t) = C \cdot \sigma^m \cdot \theta^n \quad \text{그리고} \quad \theta = \int_0^t \exp(-\Delta H/RT) dt \quad (5)$$

여기서 R 은 일반기체상수(Universal gas constant, 8315 J/kmol · K)이다. 그리고 C , m 및 n 은 상수이고, ΔH 는 콘크리트의 내부 활성화 에너지(activation energy)이며, 이들의 값은 열적크리프변형도의 로그함수와 응력도 혹은 온도보상시간과의 관계곡선(Arrhenius plot)을 이용하여 계산할 수 있다(그림 3). 본 연구에서는 Dias 등에 의한 기존의 실험 결과자료를 이용하여 회귀분석하여 다음과 같은 값을 얻을 수 있었다.

$$T \leq T_0, C = 2.651 \times 10^{-6}, m = 0.865,$$

$$n = 0.408, \text{ 그리고 } \Delta H = 15.7 \times 10^6$$

$$T \geq T_0, C = 1.070 \times 10^{-5}, m = 0.865,$$

$$n = 0.339, \text{ 그리고 } \Delta H = 25.9 \times 10^6$$

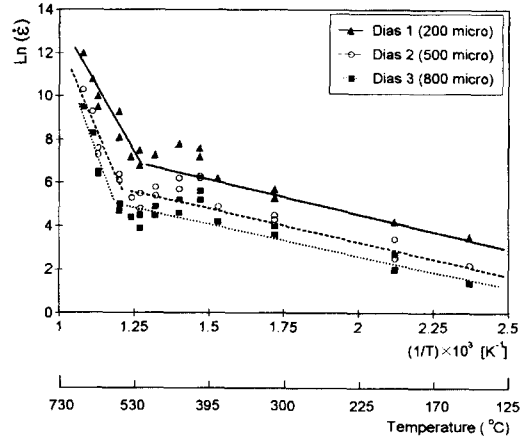


그림 3 열적크리프에 대한 Arrhenius plot
(Dias et. al., 1990)

여기서 T_0 는 임계온도이며 대개 용융온도의 50%로 가정한다. 콘크리트의 경우는 이론적으로 약 550°C 정도가 추정할 수 있다. 그림 4에서는 본 연구에서 제시한 구성성분 모델을 이용하여 실제 부재에 작용하는 응력도를 계산하는 과정을 요약하여 표시하였다.

4. 해석예제

본 연구에서 제시한 각 재료모델 및 구성방정식 모델의 검증을 위해 Technical University of Braunschweig에서 K. Rudolph 등에 의해 수행된 압축부재의 응력도 분포에 대한 실험연구 결과(1995)를 본 연구에서의 모델들을 이용한 해석결과와 비교하였다. 실제 해석 시, 온도에 따른 콘크리트의 물성 변화는 그림 5에 나타내었다. 본 연구에서의 물성 모델은 기존의 고온에서의 콘크리트 재료실험에서 얻은 결과자료를 토대로 분석한 결과를 이용한 것이다.

해석에 이용된 연구자료는 ISO 834 표준화재에 노출된 이후 30분 경과시의 온도분포 결과이다(그림

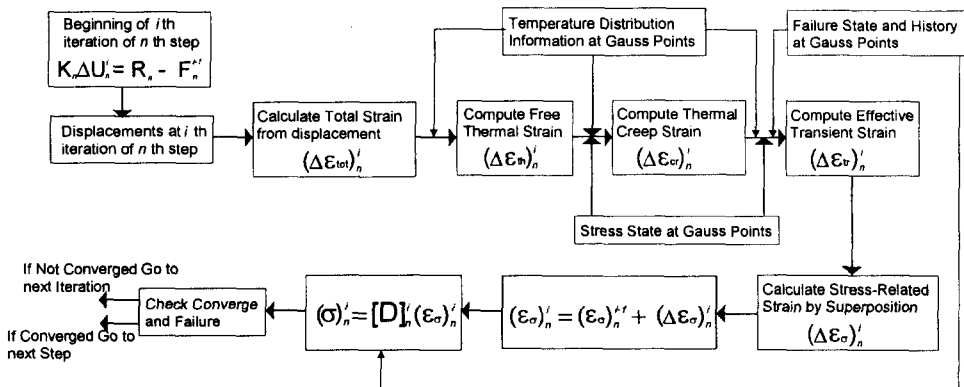


그림 4 역학적변형도와 응력도의 계산

6). 외부에서 가해진 초기 하중과 모멘트는 각각 100 kN과 25 kN·m 이다. 그리고 콘크리트의 압축강도는 30 MPa 이며, 인장강도와 초기탄성계수는 각각 $0.1f_c'$, $5000\sqrt{f_c'}$ 으로 가정하였다. 내부 철근과 외부 각형 강관의 항복강도는 각각 240 MPa, 420 MPa 이며, 탄성계수는 206 GPa 이다. 철근과 콘크리트의 마찰은 무시하였으며, 변형 전후의 단면은 동일하다고 가정하였다. 또한 해석이 보다 용이하도록 재축방향 이외의 모든 응력도를 무시하였으며

위의 가정에 따라 역학적으로 식(6)과 같이 외부 하중에 의한 변형도를 계산할 수 있고, 응력도는 식(7)에 의해 결정된다.

$$\epsilon_{tot}^i = \frac{N}{A} + \frac{M}{I_x} y_i + \frac{M}{I_y} x_i \quad (6)$$

$$\epsilon_{\sigma}^i = \epsilon_{tot}^i - (\epsilon_{th}^i + \epsilon_{cr}^i) \quad \text{그리고} \quad \sigma_i = E_i(T) \cdot \epsilon_{\sigma}^i \quad (7)$$

여기서 N , M , A 및 I 는 각각 축하중, 가력모멘트, 단면적 및 단면 2차계수이며, x_i , y_i 는 각각 중심으로부터 x 혹은 y 방향으로의 거리이다.

단면 해석 결과는 그림6에서 Rudolph 등에 의한 연구결과와 비교하여 나타내었다. 그림에서 보듯이 절단면에서의 변형도 및 응력도의 상태는 Bernoulli-Navier의 가정에 따라 외부하중에 의한 선형의 변형도와 비선형 온도분포에 의해 발생하는 변형도와 차이로 인해서 불규칙적인 변형도가 발생하고 (그림 7(a)에서 빗금친 부분) 그로 인한 응력이 존재하게 된다. 이러한 과정을 통해서 발현되는 응력도를 자기평형 응력도(self-equilibrating stress)라고 일컬으며, 화재시 부재 내부에서는 조기에 광범위한 부위에 걸쳐 인장응력을 유발하여 콘크리트의 성능을 저하시킴과 동시에 표면 근처에서의 압축파괴를 발생시킨다. 특히 고강도콘크리트를 사용하거나 기둥과 같은 압축부재의 경우 표면 근처의 압축파괴는 이른바 급격한 박리(spalling) 현상을 일으켜서 내부 보강철근을 고온에 직접 노출시켜 초기에

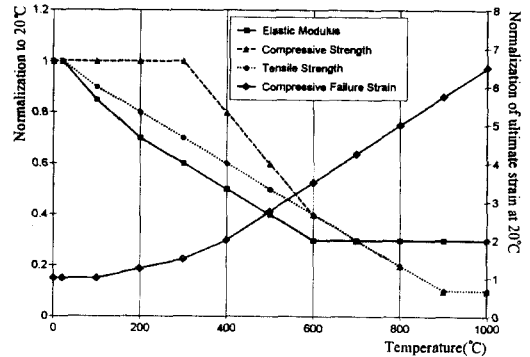


그림 5 온도에 따른 콘크리트의 물성 변화

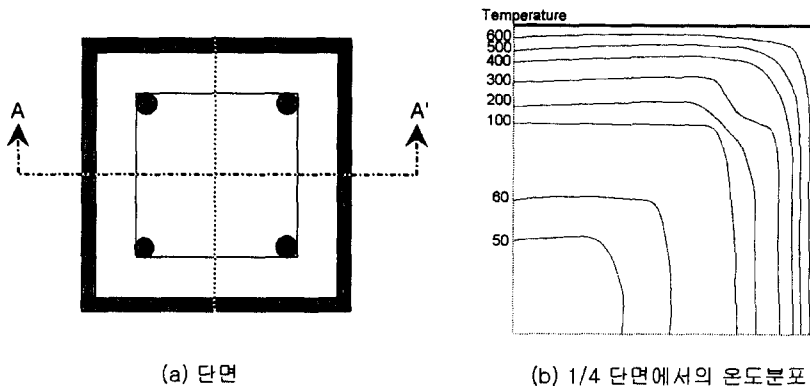


그림 6 단면 및 ISO 834 표준화재에 의한 온도분포(1/4 단면)

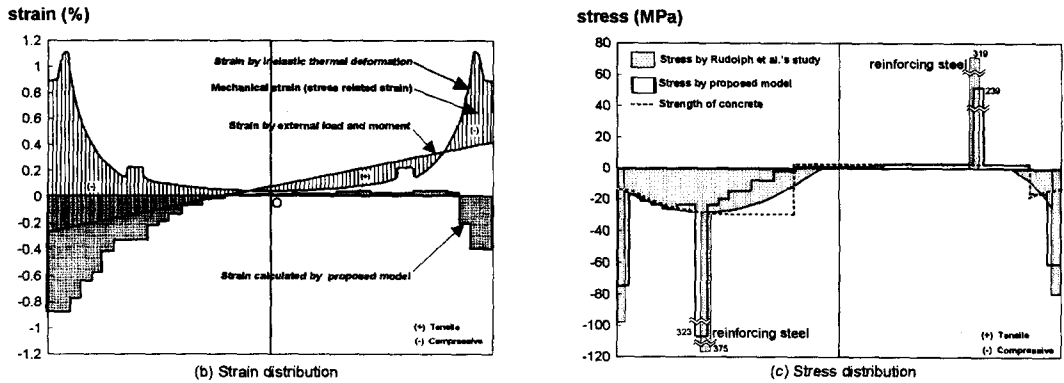


그림 7 AA' 절단면에서의 변형도 및 응력도의 분포

구조부재를 붕괴시킬 우려가 있다.

5. 결론

본 연구에서 제시한 고온에서의 콘크리트 응력도-변형도 모델과 구성방정식 모델을 이용한 해석 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 콘크리트의 재료 거동은 고온일수록 압축강도 및 탄성계수는 낮아지고 항복 시의 변형도가 증가하는 연성 거동의 특성을 지니게 되며, 본 연구에서 제시한 Saenz의 응력도-변형도 관계식을 수정한 모델을 이용하여 효과적으로 나타낼 수 있다.
- (2) 온도가 증가할수록 콘크리트의 열적크리프 변형도는 증가하며 콘크리트의 파괴에 결정적인 역할을 하게 된다. 콘크리트의 열적크리프는 본 연구에서 제시한 바와 같이, Baily-Norton 방정식을 수정하여 응력도와 온도보상시간의 지수함수의 형태로 나타낼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 교육부가 지원한 두뇌한국 21 연구의 일환으로 수행되었음을 밝히며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. CEB-FIP Model Code, Design Code: Temperature Effects, CEB, 1991
2. F. Fumura, T. Abe, and Y. Shinohara, "Mechanical Properties of High Strength Concrete at High Temperatures," Proceedings of the 4th Weimar Workshop on High Performance Concrete: Material Properties and Design, 1995, pp. 237-254
3. G. A. Houry, B N. Grainger, and P. J. E. Sullivan, "Strain of Concrete During First Heating to 600 under Load," Magazine of Concrete Research, Vol. 37, 1983, pp. 195-215
4. J. E. Dorn, "Mechanical Behavior of Materials at Elevated Temperatures," McGraw-Hill Book Co., 1961