

강도와 재령이 저강도, 중간강도, 및 고강도 콘크리트의 응력-변형률 곡선에 미치는 영향

Effect of Strength and Age on Stress-Strain Curves in Low-, Medium-, and High-Strength Concretes

오태근* 이성태** 양은익*** 최홍식** 김진근****
Oh, Tae Keun Yi, Seong Tae Yang, Eun Ik Choi, Hong Shik Kim, Jin Keun

ABSTRACT

Many researchers have rigorously studied the nonlinear behavior of stress-strain relationship of concrete using mathematical curves. Most of model equations for stress-strain relationship, however, have been focused on old age concrete, and were not able to adequately represent the behavior of concrete at an early age. A wide understanding on the behavior of concrete from early age to old age is very important in evaluating the durability and service life of concrete structures.

In previous study by authors of this paper, a stress-strain model equation for low- and medium-strength concretes was suggested. In this paper, to extend the application region of compressive stress-strain curve to high-strength concrete, an analytical research was performed. An analytical expression of stress-strain curve with strength and age was developed using regression analyses on the experimental results. For the verification of the proposed model equation, it was compared to the experimental data.

The result showed that the proposed model equation was not only compatible with the experimental data quite satisfactorily but also describing well the effect of strength and age on stress-strain curve.

1. 서론

콘크리트의 응력-변형률 곡선은 변형과 강도특성을 나타내는 콘크리트의 중요한 재료적 특성 중의 하나이다. 따라서 1900년 이후 많은 연구자들에 의하여 응력-변형률 곡선의 모델링이 이루어져 왔으나, 영향인자가 다양하고 실험조건이 서로 다르기 때문에 모델식 마다 차이가 많으며, 현재까지도 대부분의 모델식은 굳은 콘크리트에 대한 것으로 초기 재령을 고려한 모델식은 매우 부족한 실정이다. 그러나 거푸집이나 동바리의 제거 시기 결정 및 수화열에 의한 온도응력의 해석 등에 있어서 초기재령에서의 응력-변형률 곡선은 중요한 역할을 한다. 이러한 초기재령 콘크리트의 거동을 파악하는 것은 콘크리트 구조물의 설계와 시공에서뿐만 아니라 내구성 및 잔존 수명의 예측에도 필수적이다. 따라

* 정회원, (주)삼안건설기술공사 철도구조부 대리

** 정회원, 충청대학교 토목공학과 교수

*** 정회원, 강릉대학교 토목공학과 교수

**** 정회원, 한국과학기술원 건설환경공학과 교수

서 본 논문은 5가지의 강도수준과 12시간에서 28일까지의 재령에 대한 실험결과와 기존의 응력-변형률 실험결과를 이용하여 강도와 재령에 따른 응력-변형률 모델식을 Carreira와 Chu의 모델식¹⁾을 기본으로 하여 제시한 바 있다. 하지만 이때 제시된 연구결과²⁾는 고강도 콘크리트에 잘 맞지 않은 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 저강도와 중간강도에 대한 연구결과를 고강도 콘크리트에도 잘 맞도록 모델식의 적용가능 영역을 확장시키는 연구를 수행하고자 한다.

2. 본 연구에 사용된 실험결과

본 연구에서는 이 논문의 저자들에 의해 기 얻어진 실험결과²⁾와 Khan 등의 실험결과³⁾를 이용하여 강도와 재령이 응력-변형률 곡선에 미치는 영향을 분석한 후, 고강도 콘크리트에도 잘 맞는 보다 일반적인 모델식을 제시하고자 한다.

3. 응력-변형률 모델식의 개발

3.1 기본 모델식의 선정

지금까지 제시된 모델식의 형태는 여러 연구자들에 의해 제시되었으나, 어느 것도 물리적 이론에 근거한 것이 아니라 실험결과에 따라 정해졌다. 본 논문에서는 실험결과에 Carreira와 Chu의 식¹⁾을 기본 모델식으로 도입하여 강도와 재령을 고려한 모델식을 개발하고자 하였다. 이는 Carreira와 Chu의 식¹⁾은 형태가 간단하고, 중요 영향인자인 β 값의 변화에 따라 초기 재령에서의 응력-변형률 곡선 형태를 잘 표현할 수 있으며, 기존 연구자들의 실험결과와도 좋은 상관관계를 맺고 있어 검증된 식이라 할 수 있기 때문이다. 여기서 Carreira와 Chu의 모델식¹⁾은 다음과 같다.

$$\frac{f_c}{f_{cu}} = \frac{\beta (\epsilon_c / \epsilon_{cu})}{\beta - 1 + (\epsilon_c / \epsilon_{cu})^\beta} \quad (\text{여기서, } \beta \geq 1.0 \text{ 이고 } \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}) \quad (1)$$

β 를 초기접선탄성계수 (E_{ci})로 표현하면 다음과 같다.

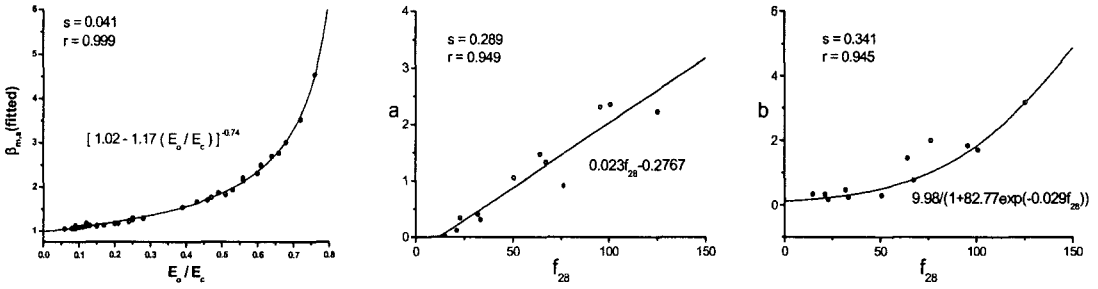
$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{f_{cu}}{\epsilon_{cu} E_{ci}}} \quad (2)$$

강도가 발현됨에 따라 초기접선탄성계수와 정점에서의 할선탄성계수 E_0 의 비가 커져 식 (2)에서의 β 값이 커지며 이에 따라 응력-변형률 곡선의 기울기가 증가하여 재령에 따른 응력-변형률 곡선을 잘 표현할 수 있다.

3.2 모델식의 개발

식 (1)로 표현되는 응력-변형률 곡선은 재령에 따른 콘크리트의 경화로 인해 하강부 기울기의 증가를 잘 나타내지 못한다. 예를 들어 재령 28일에서의 압축강도 20MPa의 콘크리트 공시체와 재령 1일에서 압축강도 20MPa가 발현되는 공시체와의 응력-변형률 곡선은 상승부에서는 거의 유사한 형태를 나타내나, 하강부에서의 모양은 서로 다르다. 이것은 재령 28일에서의 공시체와 재령 1일에서의 공시체 간의 취성도가 다르기 때문이다.

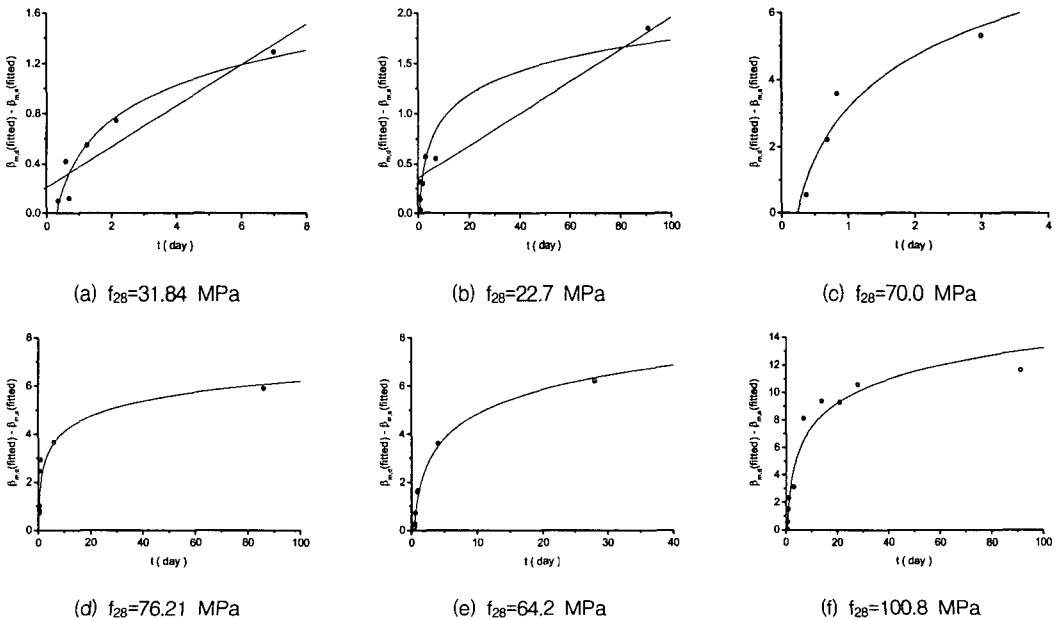
본 연구에서는 상승부와 하강부에 대하여 β 의 수정된 값($=\beta_m$)을 $\beta_{m,a}$ 와 $\beta_{m,d}$ 로 구분하여 분석하였다. 상승부에서는 정점에서의 탄성계수 E_0 와 ASTM C 469⁴⁾에 의한 탄성계수 E_c 의 비를 이용하여 그림 1(a)와 같은 좋은 상관관계를 얻었다. 하강부에서는 재령에 따른 취성도의 증가를 각 강도에 대한 재령의 함수로 상승부에서의 기울기에 추가하였다. 각 배합에 대하여 추가되어야 할 기울기를 $a \times \ln(t) + b$ 로 나타내면 28일에서의 콘크리트 압축강도 f_{28} 과 a, b 의 관계는 그림 1(b)와 같이 된다. 즉, 이 식의 기울기는 재령에 따라 선형적인 증가를 보이다 어느 기점을 기준으로 수렴하는 양상을 보인다.



(a) (b)

그림 1 상승부 $\beta_{m,a}$ 값 및 28일에서의 콘크리트 압축강도 f_{28} 과 매개변수(a, b)의 관계

아래의 그림 2는 재령 t 와 $\beta_{m,d}(\text{fitted}) - \beta_{m,a}(\text{fitted})$ 의 관계를 나타내고 있는데, 저강도와 중간강도에 대해서는 그 경향을 직선과 log식을 이용하여 같이 나타내었고 고강도의 경우에는 log식만으로 나타내었다. 이는 기존의 연구²⁾에서 저강도와 중간강도의 경우에 직선식으로 이들 사이의 관계를 나타내었기 때문인데, 고강도의 경우에는 직선식으로 나타내기에는 무리가 있어 log식만으로 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 고강도의 경우는 물론, 저강도와 중간강도에 대해서도 직선식이 좀더 가까워 보일 수 있지만 log식과 큰 차이가 없으므로 전체강도(저강도, 중간강도, 및 고강도)에 대해서 log식으로 그 경향을 나타내었다.



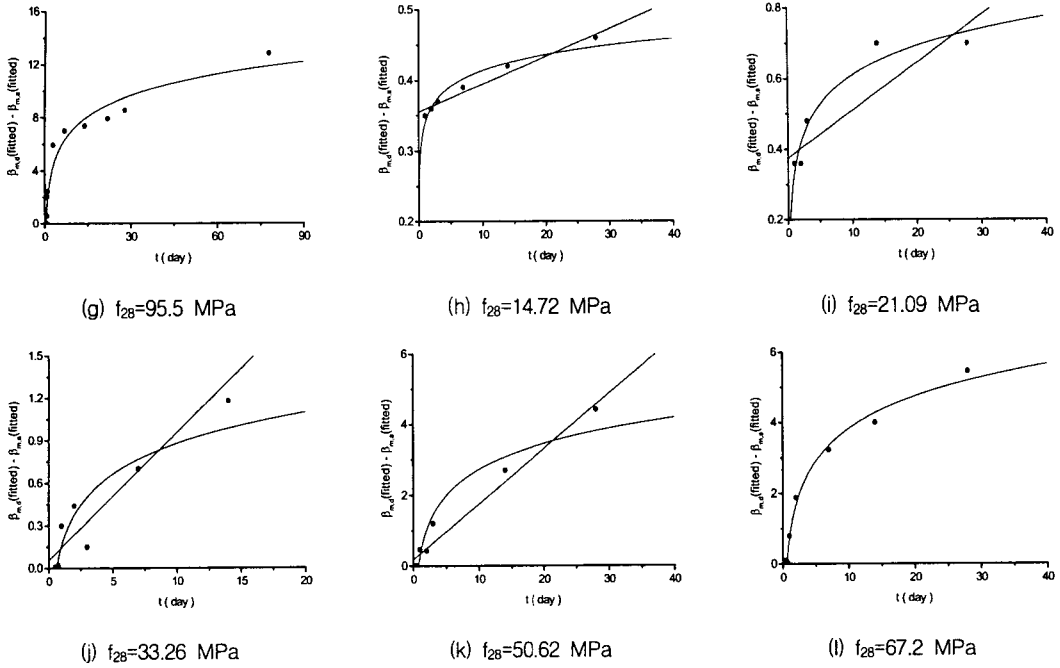


그림 2 재령 t와 $\beta_{m,d}(\text{fitted}) - \beta_{m,a}(\text{fitted})$ 의 관계 (a~g; Khan 등의 자료, h~l; 기 수행된 연구로부터의 자료)

위의 결과들을 이용하여 다음의 모델식을 얻었다.

$$\frac{f_c}{f_{cu}} = \frac{\beta_m (\epsilon_c / \epsilon_{cu})}{\beta_m - 1 + (\epsilon_c / \epsilon_{cu})^{\beta_m}} \quad (3)$$

$$\beta_m = \beta_{m,a}(\text{fitted}) = [1.02 - 1.17 (E_o / E_c)]^{-0.74} \quad (\epsilon_c \leq \epsilon_{cu}) \quad (4)$$

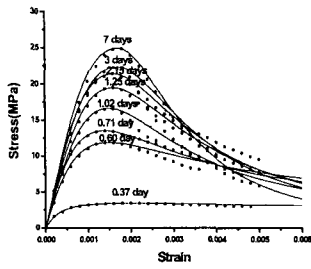
$$\beta_m = \beta_{m,d}(\text{fitted}) = \beta_{m,a}(\text{fitted}) + [a \times \ln(t) + b] \quad (\epsilon_c \geq \epsilon_{cu}) \quad (5)$$

$$a = 0.023 f_{28} - 0.2767 \quad (6)$$

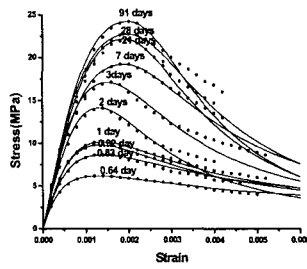
$$b = 9.98 / \{1 + 82.77 \exp(-0.029 f_{28})\} \quad (7)$$

4. 제안된 모델식과의 비교 및 분석

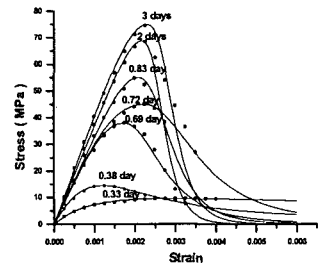
모델식의 유용성과 신뢰성의 여부는 주의 깊게 수행된 실험결과와의 비교를 통해 결정되어야 한다. 기존의 연구결과들을 살펴보면, 모델식의 상승부는 거의 차이를 보이고 있지 않으나 하강부에서는 차이가 있는데 이것은 변위제어의 방법이나 공시체의 양생 방법 등이 서로 다르기 때문이다. 또한 최대응력점을 지나서 균열은 안정되지도 규칙성 있게 성장하지도 않으므로 응력-변형률 곡선의 하강부는 매우 불안정하다. 이를 살펴보기 위해 제안한 모델식과 각 강도에 따른 실험결과와의 비교를 그림 3에 나타내었다.



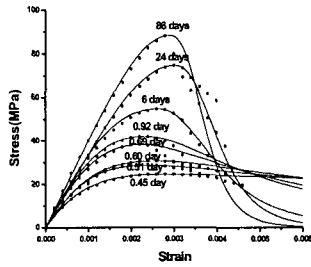
(a) $f_{28}=31.84$ MPa



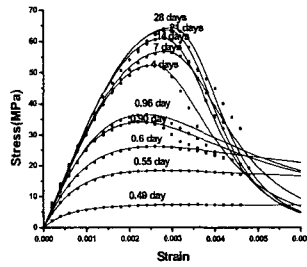
(b) $f_{28}=22.7$ MPa



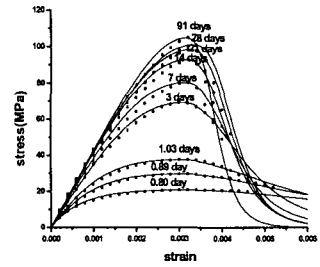
(c) $f_{28}=70.0$ MPa



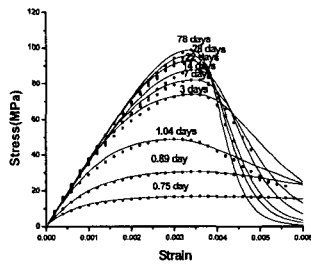
(d) $f_{28}=76.21$ MPa



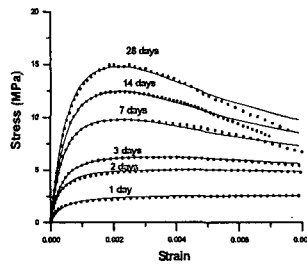
(e) $f_{28}=64.2$ MPa



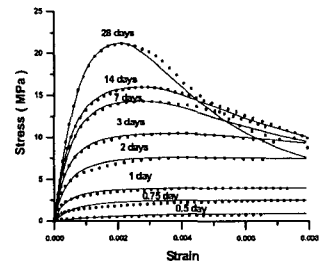
(f) $f_{28}=100.8$ MPa



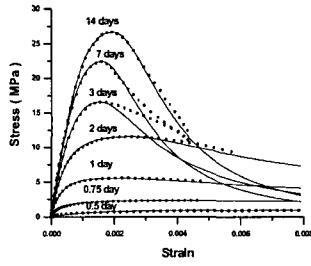
(g) $f_{28}=95.5$ MPa



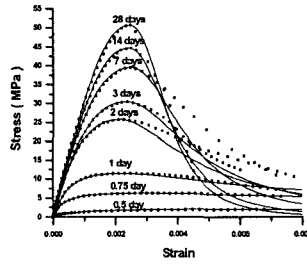
(h) $f_{28}=14.72$ MPa



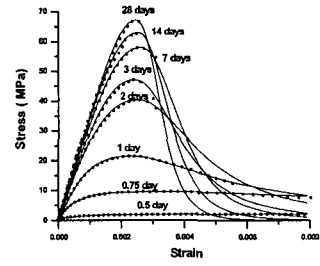
(i) $f_{28}=21.09$ MPa



(j) $f_{28}=33.26$ MPa



(k) $f_{28}=50.62$ MPa



(l) $f_{28}=67.2$ MPa

그림 3 제안된 모델식과 실험결과의 비교 (a~g; Khan 등의 자료, h~l; 기 수행된 연구로부터의 자료)

위의 그림 3으로부터 본 연구에서 제안된 모델식이 저강도와 중간강도 뿐만 아니라 고강도 콘크리트의

강도와 재령에 대한 응력변형률 곡선의 예측에도 적절히 사용될 수 있음을 알 수 있다. 또한 어느 정도의 오차는 있으나 서로 다른 실험조건에서 구한 실험결과들과 본 연구에서 제시한 모델식이 다 잘 맞는다는 사실로부터 본 연구에서 제시한 모델식에 대한 실험적 그리고 이론적 연구가 추가로 수행된다면 보다 일반식인 예측식의 제시가 가능함을 알 수 있다. 앞으로의 연구에서는 이에 대한 연구를 심도 있게 수행하고자 한다.

5. 결 론

본 논문에서는 응력-변형률 관계에 콘크리트의 강도와 재령이 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였으며, 여기서 도출된 결과는 다음과 같다.

- (1) 실험결과와 기존의 모델식을 이용하여 저강도, 중간강도, 및 고강도 콘크리트의 응력-변형률 곡선에 강도와 재령의 영향을 고려할 수 있는 보다 합리적인 모델식을 제시하였다.
- (2) 본 연구에서 제안된 모델식은 응력-변형률 곡선의 상승부를 재령에 따라 정확하게 예측할 뿐만 아니라, 하강부에서도 어느 정도의 오차 범위 내에서 정확히 예측하였다.
- (3) 제안된 모델식은 본 실험결과 뿐 아니라 Khan 등의 실험결과와도 좋은 상관관계를 맺고 있어 일반적인 식으로도 사용 가능할 것으로 예상된다.
- (4) 고강도 콘크리트(대략 70 MPa이상)에 대해서는 추가되어야 할 기울기 $[\beta_{m,d}(\text{fitted})-\beta_{m,a}(\text{fitted})]$ 를 직선식으로 하기에는 본 연구에서 살펴 본 바와 같이 무리가 있다. 이는 고강도 콘크리트의 경우, 단위 시멘트량의 증가로 인하여 수화반응이 빨리 일어나고 또 조기강도의 발현이 크기 때문에 취성도가 급격히 증가한 후 일정한 값에 빨리 수렴하기 때문이다. 따라서 고강도 콘크리트에 있어서 하강부는 취성도와 밀접한 관계가 있으므로 로그계열의 식 $[a \times \ln(t) + b]$ 을 기울기에 추가해야 그 경향을 잘 나타낼 수 있다.

참고문헌

1. Carreira, D.J. and Chu, K.H., "Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression," Journal of ACI, Vol. 82, No. 6, 1985, pp. 797-804.
2. 오태근, 이성태, 김진근, "콘크리트의 강도와 재령을 고려한 응력-변형률 관계식의 개발," 한국콘크리트학회 논문집, 제13권 5호, 2001, pp. 447-456.
3. Khan, A.A., Cook, W.D., and Mitchell, D. "Early Age Compressive Stress-Strain Properties in Low-, Medium-, and High-Strength Concretes," ACI Materials Journal, Vol. 92, No. 6, 1995, pp. 617-624.
4. American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, (ASTM C 469-94), Philadelphia.
5. Ahmad, S.H. and Shah, S.P. "Stress-Strain Curves of Concrete Confined by Spiral Reinforcement," Journal of ACI, Vol. 79, No. 6, 1982, pp. 484-490.
6. Kim, J.K. and Lee, T.G. "Failure Behavior of Reinforced Concrete Frames by the Combined Layered and Nonlayered Method, Computers and Structures," Vol. 48, No. 5, 1993, pp. 819-825.