

## 콘크리트의 강도와 재령을 고려한 응력-변형을 관계식의 개발

오탈근<sup>1)</sup> · 이성태<sup>2)</sup> · 김진근<sup>3)</sup>\*

<sup>1)</sup>(주)삼안건설기술공사 <sup>2)</sup>한국전력기술(주) <sup>3)</sup>한국과학기술원

(2001년 4월 18일 원고접수, 2001년 9월 14일 심사완료)

## Development of Stress-Strain Relationship Considering Strength and Age of Concrete

Tae-Keun Oh<sup>1)</sup>, Seong-Tae Yi<sup>2)</sup>, and Jin-Keun Kim<sup>3)</sup>\*

<sup>1)</sup> Saman Engineering Consultants, Co., Ltd., Seoul, 427-040, Korea

<sup>2)</sup> Korea Power Engineering Company, Inc., Yongin, 449-713, Korea

<sup>3)</sup> Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 305-701, Korea

(Received on April 18, 2001, Revised on September 14, 2001)

### ABSTRACT

Many investigators have tried to represent the nonlinear behavior of stress-strain relationship of concrete using mathematical curves. Most of empirical expressions for stress-strain relationship, however, have focused on old age concrete, and were not able to represent well the behavior of concrete at an early age. Where 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 this paper, effect of 5 different strength levels and ages of from 12 hours to 28 days on compressive stress-strain relationship was observed experimentally and analytically. Tests were carried out on  $\phi 100 \times 200$  mm cylindrical specimens water-cured at  $20 \pm 3$  °C. An analytical expression of stress-strain relationship with strength and age was developed using regression analyses on experimental results. For the verification of the proposed model, the model was compared with present and existing experimental data and some existing models.

The analysis shows that the proposed model predicts well experimental data and describes well effect of strength and age on stress-strain relationship.

**Keywords :** stress-strain relationship, strength, age, early ages (of concrete), compressive strength

### 1. 서 론

콘크리트의 응력-변형을 곡선은 변형특성과 강도를 나타내는 콘크리트의 중요한 재료적 특성 중의 하나이다. 따라서 1900년 이후 많은 연구자들에 의하여 응력-변형을 곡선의 모델링이 이루어져 왔으나, 영향인자가 다양하고 실험조건이 서로 다르기 때문에 모델식마다 차이가 많으며, 현재까지도 대부분의 모델식은 경화된 콘크리트에 대한 것으로 초기재령을 고려한 모델식은 상당히 부족한 실정이다. 그러나 거푸집이나 동바리의 제거 시기 결정 및 수화열에 의한 온도응력의 해석 등에 있어서 초기재령에서의 응력-변형을 관계는 중요한 역할을 한다. 이러한 초기재령 콘크리트의 거동을 파악하는 것은 콘크리트 구조물의 설계와 시공에서 뿐만 아니라 내구성 및 잔존 수명

의 예측에도 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 5가지의 강도수준과 12시간에서 28일까지의 재령이 응력-변형을 관계에 미치는 영향을 실험을 통해 살펴보고, Carreira와 Chu의 모델식<sup>1)</sup>을 기본식으로 하여 강도와 재령에 따른 응력-변형을 관계를 제시하고자 한다. 또한 이에 대한 검증을 위하여 본 연구로부터의 실험결과, Khan 등의 실험결과<sup>2)</sup>, Carreira와 Chu의 모델식<sup>1)</sup>, Ahmad와 Shah의 모델식<sup>3)</sup>, 및 Kim과 Lee의 모델식<sup>4)</sup>을 상호 비교·분석하고자 한다.

### 2. 실험 및 실험결과의 고찰

#### 2.1 실험방법

본 실험에서는 일반적으로 압축강도 시험에 사용되는  $\phi 10 \times 20$  cm의 원주공시체를 사용하였고, 배합은 28일에서의 압축강도가 150, 200, 300, 500, 및 700 kgf/cm<sup>2</sup>가 되

\* Corresponding author

Tel : 042-869-3614 Fax : 042-869-3610

E-mail : kimjinkeun@cais.kaist.ac.kr

도록 Table 1과 같은 배합설계를 하였다. 그리고 모든 공시체는 제작 후 20±3 °C의 온도가 유지되는 양생실에 보관한 다음 10시간만에 탈형하였으며 그 후 바로 수중양생을 하였다.

초기재령에는 공시체의 단부를 연마하는 것이 불가능하므로 재령 1일 이전에는 초속경 시멘트를 이용하여 캡핑을 하였다. 그리고 실험에 사용된 가력장비는 250 tonf 용량의 만능재료시험기 (UTM, Closed-Loop Servo-Hydraulic Testing Machine)였다. 하중의 측정시 낮은 강도수준에서는 22.5 tonf 용량의 로드셀을, 그리고 높은 강도수준에서는 225 tonf 용량의 로드셀을 사용하였으며, 공시체의 길이방향 변위의 측정시에는 Compressometer (LVDT와 지지대 어셈블리로 구성되는)를 이용하였는데 여기서 10.0 mm 용량을 갖는 2개의 LVDT가 사용되었다. 실험은 0.003 mm/sec의 속도로 변위제어법에 의해 수행되었으며, 로드셀과 LVDT를 이용하여 하중과 변위를 연속적으로 측정하였다.

## 2.2 실험결과의 고찰

물-시멘트 비 (w/c)는 89, 69, 54, 39, 및 30%의 5가지로 하였고 각각에 대하여 재령 12시간, 18시간, 1일, 2일, 3일, 7일, 14일, 그리고 28일에서의 응력-변형률 곡선을 구하였으며, 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 이 그림에서 실험결과를 각 재령에 대해서 3개 공시체로부터 얻은 곡선의 평균을 나타낸다.

실험결과로부터 얻은 5수준의 서로 다른 강도를 갖는 콘크리트의 재령에 따른 응력-변형률 곡선의 특성을 살펴보면 다음과 같다.

1) 타설 후 처음 몇 시간 동안은 매우 낮은 탄성계수, 낮은 강도, 그리고 최대응력에서의 매우 큰 변형률이 관찰되었으나, 강도가 점점 발현됨에 따라 최대응력에서의 변형률이 급격하게 줄어들었다.

2) 각 배합에 대해서 7일을 전후하여 응력-변형률 곡선에 급격한 변화가 있으며, 7일 후에는 28일에서의 응력-변형률 곡선의 모양을 닮아가기 시작했다.

Table 1 Mixture proportions of concrete

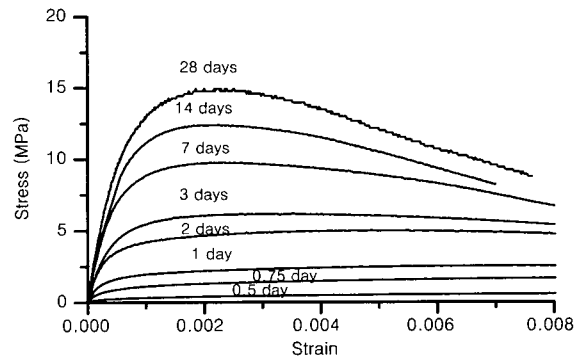
w/c (%)	s/a (%)	Unit weight (kgf/m <sup>3</sup> )					Ad.*** (%)
		W	C	S	G*	S.P.**	
89.0	49.5	185	208	925	950	68	-
69.0	40.0	185	268	717	1085	-	0.15
54.0	42.0	185	342	727	1012	-	0.3
39.0	45.4	175	449	799	970	-	0.8
30.0	42.6	170	567	714	970	-	1.1

\* maximum aggregate size of 19 mm

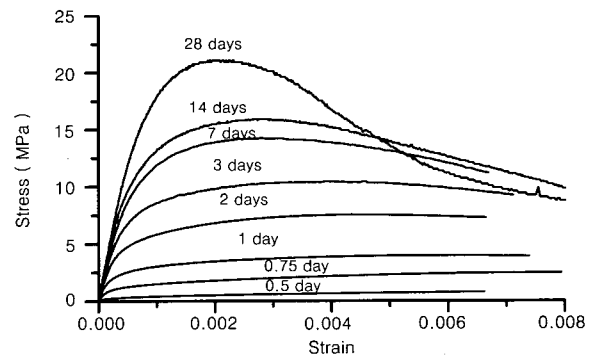
\*\* stone powder

\*\*\* superplasticizer (ratio for cement weight)

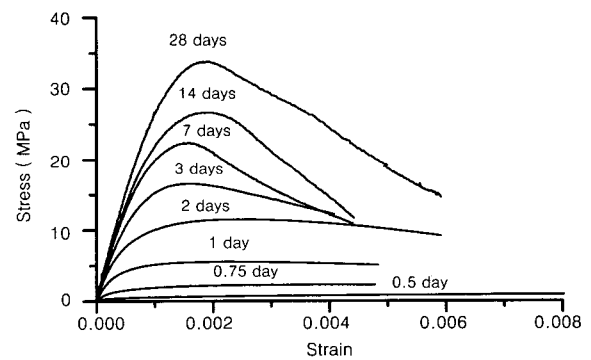
3) 재령에 따른 응력-변형률 곡선의 최대응력에서의 형률은 초기재령에서 가장 크다. 그러나 이 변형률은 강도의 발현이 이루어짐에 따라 급격히 작아지고, 강도발현이



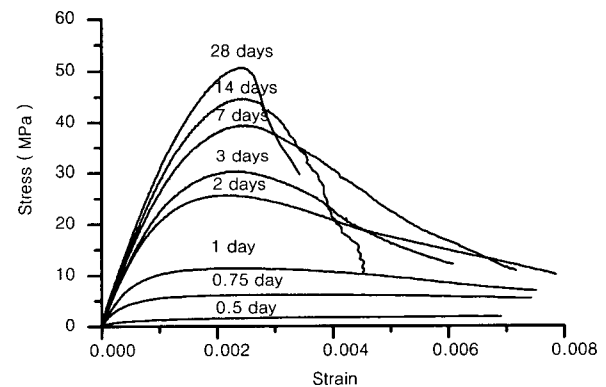
(a) w/c=0.89



(b) w/c=0.69



(c) w/c=0.54



(d) w/c=0.39

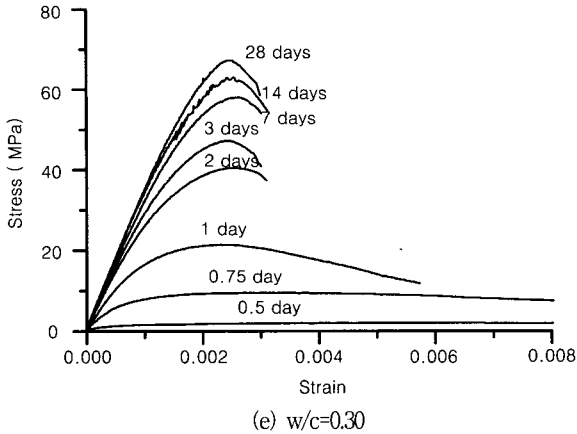


Fig. 1 Compressive stress-strain curves at 8 different ages with 5 different w/c

어느 정도 이루어지고 난 후에는 다시 서서히 증가하는 경향을 나타내었다.

4) 28일 재령을 기준으로 강도수준이 높을 수록 최대력에서의 변형률이 커짐을 알 수 있었다.

5) w/c가 작을수록 재령에 따라 탄성계수가 급격하게 증가하는 경향을 알 수 있었다.

6) w/c=39%에서는 14일 이상, 30%에서는 2일 이상부터 콘크리트의 급격한 취성파괴로 인하여 응력-변형률 곡선의 하강부를 구할 수 없었다.

### 3. 응력-변형률 관계식의 개발

#### 3.1 개요

실험에 의해서 얻어진 콘크리트의 응력-변형률 곡선이 구조물의 부재에 대한 설계 및 해석을 수행할 때 사용되기 위해서는 적절한 수식으로 표현되어야 한다. 응력-변형률 곡선의 모양은 여러 요인에 의해 영향을 받으며 이 요인은 독립적으로 작용하는 것이 아니기 때문에 매우 복잡하다. 즉, 곡선의 형태에 영향을 주는 인자들을 상수로 표현하는 것이 쉽지 않다. 또한 실험조건이 달라진다면 응력-변형률 관계를 정의하는 인자의 영향도 달라지므로 훨씬 복잡하게 된다. 그러나 일반적으로 개발되는 모델식은 다음과 같은 조건을 만족시켜야 한다.

- 1) 주의깊게 수행된 실험결과에 의한 것이어야 한다.
- 2) 상승부와 하강부를 나타낼 수 있어야 한다.
- 3) 실험으로 결정될 수 있으며 물리적으로 중요한 의미를 갖는 요소에 근거를 두어야 한다. 한편, 원점에서  $d(f)/d\epsilon$ 는  $E_{ci}$ 인데, 여기서  $f$ 는 콘크리트의 응력,  $\epsilon$ 는 콘크리트 변형률, 그리고  $E_{ci}$ 는 초기접선탄성계수이다.
- 4) 최대응력에서 모델식의 기울기는 0이어야 한다.

또 위 3)항에서 기술한 물리적 의미를 갖는 중요한 요소란 다음과 같은 것이 있을 수 있다.

- 1) ASTM C 39, “원주공시체의 압축강도 시험”으로 측정된 콘크리트의 압축강도 ( $f_{cu}$ )
- 2) 콘크리트의 압축강도에 대응하는 변형률 ( $\epsilon_{cu}$ )
- 3) ASTM C 469, “정탄성계수 표준 측정법”으로 측정된 탄성계수 ( $E_c$ )
- 4) 초기접선탄성계수 ( $E_{ci}$ )
- 5) 파괴될 때의 변형률 ( $\epsilon_{cf}$ )

#### 3.2 응력-변형률 곡선의 모델링

##### 3.2.1 기본 모델식의 선정

앞서 설명한 바와 같이 모델식의 형태는 여러 연구자들<sup>1~7)</sup>에 의해 제시되었으나, 어느 것도 물리적 이론에 근거한 것이 아니라 실험결과에 따라 정해졌다. 이 논문에서는 기본 모델식의 형태로 Carreira와 Chu가 제시한 형태<sup>1)</sup>를 도입하였는데, 그 이유는 식이 간단하고 하나의 영향인자인  $\beta$ 값의 변화에 따라 초기재령에서의 응력-변형률 곡선 형태를 잘 표현할 수 있으며 (Fig. 2 참조), 기존 연구자들 (Hognestad 등<sup>8)</sup>, Kaar 등<sup>9)</sup>, 및 Wang 등<sup>10)</sup>의 실험결과에 대해서도 좋은 상관관계를 맺고 있어 검증된 식이라 할 수 있기 때문이다. 따라서 제안된 모델식은 Carreira와 Chu의 식<sup>1)</sup>을 기본형태로 도입하였으며, 여기에 강도와 재령에 따른 영향을  $\beta$ 값에 포함시켰다.

Carreira와 Chu의 모델식<sup>1)</sup>은 다음과 같다.

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

여기서,  $\beta \geq 1.0$  이고,  $\epsilon_c \leq \epsilon_{cf}$

위의 식(1)에서  $\beta$ 를 초기접선탄성계수( $E_{ci}$ )로 표현하면 다음과 같다.

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

또한  $\beta$ 를 탄성계수( $E_c$ )로 표현하면 다음과 같다.

$$(0.4 \frac{f_{cu}}{E_c \epsilon_{cu}})^\beta - \beta (\frac{f_{cu}}{E_c \epsilon_{cu}} - 1) - 1 = 0 \quad (3)$$

강도가 발현됨에 따라 초기접선탄성계수와 정점에서의

활선탄성계수  $E_o (= f_{cu}/\epsilon_{cu}$ , 응력-변형률 곡선의 원점과 정점을 연결한 활선탄성계수)의 비가 커져 식 (2)에서의  $\beta$  값이 커지는데 이에 따라 응력-변형률 곡선의 기울기가 증가하여 Fig. 2와 같은 경향이 나타난다.

그러나 Carreira와 Chu의 모델식<sup>1)</sup>을 살펴보면 다음과 같은 단점이 있음을 알 수 있다. 즉, 식 (2)는 초기접선탄성계수에 의한  $\beta$  값의 표현이며 이 초기접선탄성계수는 수식적으로 구하는 모델코드가 있긴 하지만 그 값이 정확하지 못하다. 또한 실험적으로 구하는 방법이 비교적 정확하지만 그 과정이 어렵기 때문에 실용적이지 못하다. 그리고 식 (3)에서와 같이 탄성계수로 표현된 수식은 저항도 콘크리트와 초기재령에서  $\beta$  값을 1보다 작게 하는 오류가 발생한다. 따라서 보다 사용하기 쉬운 재료특성을 이용하여 실용적인 응력-변형률 곡선을 표현하는 것이 필요하다.

한편, Ahmad와 Shah의 모델식<sup>3)</sup>은 다음과 같다.

$$Y = \frac{AX + (D-1)X^2}{1 + (A-2)X + DX^2} \quad (4)$$

여기서,

$$X = \frac{\epsilon}{\epsilon_o}, \quad Y = \frac{f}{f_o}, \quad E_o = \frac{f_o}{\epsilon_o}$$

$$E = 3.950 \sqrt{f_o}, \quad A = \frac{E}{E_o}$$

$$D = 0.876 A - 0.8164$$

그리고 Kim과 Lee의 모델식<sup>4)</sup>은 다음과 같다.

$\epsilon_c \leq \epsilon_o$ 에 대하여,

$$f_c = f_o \left[ A \frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} - (A-1) \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \right)^{A/(A-1)} \right] \quad (5)$$

$\epsilon_c > \epsilon_o$ 에 대하여,

$$f_c = f_o \exp [ -B(\epsilon_c - \epsilon_o)^C ] \quad (6)$$

여기서,  $A = \frac{E \epsilon_o}{f_o}$

$$B = \left( 260 + \frac{100}{f_o} \right)$$

$$C = 1.2 - 0.006 f_o$$

### 3.2.2 모델식의 개발

$E_o$ 와  $E_c$ 의 비  $E_o/E_c$ 는 많은 연구자들에 의하여 응력-변형률 곡선의 중요 영향인자로 사용되어 왔다<sup>4-7)</sup>. 본 모델식에서도 이를 기본으로 하고 여기에 재령 ( $t$ )과

28일에서의 압축강도 ( $f_{28}$ )를 포함시켜 이들이 응력-변형률 곡선에 미치는 영향을 살펴보았다.  $E_o/E_c$ 의 영향과 실험값을 비교한 결과, 상승부와 하강부에 영향을 미치는 정도가 큰 차이를 보이므로, 상승부와 하강부를 분리하여 다음의 과정에 따라 수정된  $\beta$ (즉,  $\beta_m$ )를 구하였다.

한편  $\beta_m$ 은 식(3)으로부터 구했는데, 이는 본 실험의 결과가 식(3)이 가지고 있는 문제점과는 무관하였기 때문이며 Fig. 3으로부터도 이와 같은 사실을 확인할 수 있었다.

#### 1) 상승부 $\beta_{m,a}$

상승부의  $\beta_{m,a}$ 는 실험결과를 회귀분석하여 추정된  $\beta_{m,a}$  (fitted)와 앞에서 설명한 재료특성과의 상관관계로부터 구하였다. 이들 사이의 상관관계를 얻기 위해 각 배합에서의 재령에 따른  $E_o$  ( $\text{kgf/cm}^2$ ),  $E_c$  ( $\text{kgf/cm}^2$ ),  $E_o/E_c$ , 그리고  $\beta_{m,a}$  (fitted)를 Table 2에 나타내었다. 이 Table에서 실험결과가 없는 곳은 초기재령에서의 하강부가 거의 존재하지 않거나 fitting 결과가 적절하지 못한 경우, 및 고강도에서의 하강부가 나타나지 않는 경우에 생략한 곳이 있음을 의미한다.

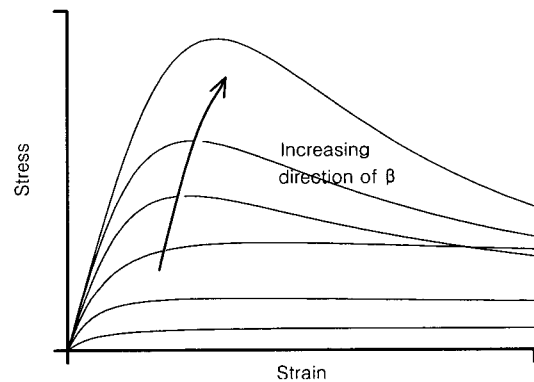


Fig. 2 Effect of  $\beta$  on shape of stress-strain curve

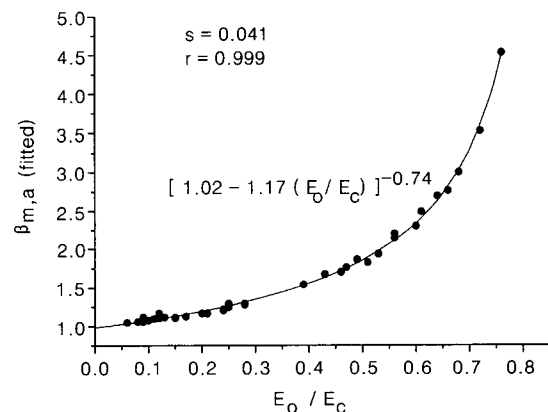


Fig. 3 Relationship between  $\beta_{m,a}$  (fitted) and  $E_o/E_c$

Table 2 Material properties with w/c of concrete

w/c (%)	Age (days)	$E_o$	$E_c$	$E_o/E_c$	$\beta_{m,a}$ (fitted)	$\beta_{m,d}$ (fitted)
89	1	3266	56199	0.06	1.05	1.40
	2	10308	119010	0.09	1.06	1.42
	3	18013	119673	0.15	1.11	1.48
	7	42742	176693	0.24	1.21	1.60
	14	56346	224075	0.25	1.28	1.70
	28	67000	236000	0.28	1.29	1.75
69	0.5	800	3400	0.25	1.29	-
	0.75	3600	30000	0.12	1.17	-
	1	6600	88800	0.08	1.06	1.42
	2	17600	147300	0.12	1.11	1.47
	3	26700	180500	0.15	1.12	1.60
	7	52300	207100	0.25	1.26	1.65
	14	57300	226500	0.25	1.25	1.95
	28	101400	258200	0.39	1.54	2.24
54	0.5	900	11100	0.09	1.12	-
	0.75	5300	53300	0.10	1.08	-
	1	26200	132600	0.20	1.17	1.47
	2	46000	191700	0.24	1.22	1.66
	3	108800	234400	0.46	1.70	1.85
	7	141800	267700	0.53	1.93	2.63
	14	137700	274700	0.51	1.82	3.00
	28	176600	294400	0.60	2.30	-
39	0.5	3000	22800	0.13	1.12	-
	0.75	21000	121700	0.17	1.13	-
	1	50300	179700	0.28	1.28	1.75
	2	123100	259900	0.47	1.76	2.19
	3	130500	266800	0.49	1.86	3.06
	7	160800	287900	0.56	2.14	3.18
	14	187100	305500	0.61	2.49	5.19
	28	209800	318300	0.66	2.76	7.18
30	0.5	3900	36900	0.11	1.10	-
	0.75	28000	133200	0.21	1.17	-
	1	94100	217400	0.43	1.67	2.46
	2	162200	286500	0.56	2.20	4.08
	3	198100	310000	0.64	2.69	5.69
	7	225200	332900	0.68	3.00	6.23
	14	252700	352900	0.72	3.52	7.52
	28	277300	362700	0.76	4.53	-

Table 2로부터  $E_o$ 와  $E_c$ 의 값이 재령의 증가에 따라 급격히 증가함을 알 수 있으며,  $E_o/E_c$ 의 값도  $E_o$  값이  $E_c$  값보다 상대적으로 더 증가함에 따라 더욱 증가함을 알 수 있다. 또한 w/c가 낮을수록 같은 재령에서도  $E_o/E_c$ 의 값이 더 커진다는 사실을 알 수 있다. 이 Table에서  $E_o/E_c$ 와  $\beta_{m,a}$  (fitted)는 어떤 상관관계를 맺고 있음을 알 수 있는데, 각 배합에서 모든 재령에 대한 이들 사이의 상관관계는 Fig. 3에 나타나 있다.

Fig. 3에서 기본 모델식 (1)의 기울기를 의미하는  $\beta_{m,a}$  (fitted)와  $E_o/E_c$  사이에는 다음과 같은 상관관계가 있음을 알 수 있다.

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

Fig. 3으로부터  $\beta_{m,a}$  (fitted)는  $E_o/E_c$ 이 0.4~0.5의 범위에서부터 시작하여 급격히 증가함을 알 수 있다. 이것은 어느 정도의 강도수준과 재령을 넘어서게 되면 응력-변형률 곡선의 기울기가 급격히 증가함을 의미한다.

### 2) 하강부 $\beta_{m,d}$

식 (1)로 표현되는 응력-변형률 곡선은 이 곡선 하강부의 기울기를 너무 완만하게 평가하는 단점이 있다. 저강도 콘크리트라도 재령이 증가하여 콘크리트가 경화되면 취성도가 증가하기 때문에 같은 강도를 지니는 재령이 작은 고강도 콘크리트에 비해 하강부에서의 기울기가 급해지는 경향이 있다. 실험결과에서도 어느 정도 경화되어 취성도를 갖추면 하강부에서의 기울기가 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 따라서 하강부에서의  $\beta_{m,d}$ 의 값은 상승부  $\beta_{m,a}$ 의 값에 추가적인 기울기를 포함해야 한다. 추가적 기울기를 구하기 위하여 하강부의 실험 값으로부터 추정된  $\beta_{m,d}$  (fitted)와 앞에서 구한  $\beta_{m,a}$  (fitted)의 차이, 즉  $\beta_{m,d}$  (fitted) -  $\beta_{m,a}$  (fitted)를 각 배합에 대해서 재령 별로 살펴보면 Fig. 4와 같다. 이 그림으로부터 재령이 증가함에 따라 추가되어야 할 기울기,  $\beta_{m,d}$  (fitted) -  $\beta_{m,a}$  (fitted)가 선형으로 증가함을 알 수 있다. 또한 각 배합에 대해서 재령이 증가함에 따라 추가되어야 할 기울기 값이 증가하며, w/c가 작을수록 추가되어야 할 기울기 값이 더 커짐을 알 수 있다.

각 배합에 대해서 추가되어야 할 기울기를 직선식  $a + b \cdot t$ 로 나타내면 28일에서의 콘크리트 압축강도  $f_{28}$ 과 a, b의 관계는 Fig. 5와 같이 된다.

### 3) 모델식의 제시

앞의 분석결과로부터 재령 (t일)과 28일에서의 압축강

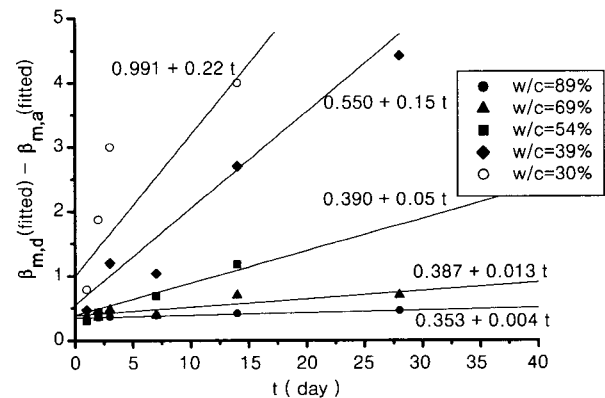


Fig. 4 Relationship between  $\beta_{m,d}$  (fitted) -  $\beta_{m,a}$  (fitted) and age t

## 4. 모델식의 검증

### 4.1 본 논문 실험결과와의 비교·분석

모델식의 유용성과 신뢰성의 여부는 주의깊게 수행된 실험결과와의 비교를 통해 결정되어야 한다. 기존의 연구 결과 들을 살펴보면 공시체의 모양과 크기, 재하율, 시험 기기의 강성도, 그리고 변위제어의 방법 등 실험조건들이 서로 다르므로 각 응력-변형률 모델식에는 차이가 있다<sup>11)</sup>. 최근의 연구결과들을 살펴보면 각 모델식의 상승부에서는 거의 차이를 보이고 있지 않으나, 하강부에서는 차이가 크다. 이것은 실험조건 중, 변위제어 방법의 차이에서 그 이유를 찾아볼 수 있다. 본 실험에서도 최대한의 안정된 하강부 곡선을 얻기 위해 재하속도를 0.003 mm/s로 설정하였다.

본 연구에서는 각 배합에 따른 응력-변형률 곡선을 근거로 하여 모델링 작업을 수행했으며, 이 모델링이 기존의 연구결과들과 어떤 차이가 있는지를 비교·분석함으로써 그 신뢰성을 검증하였다.

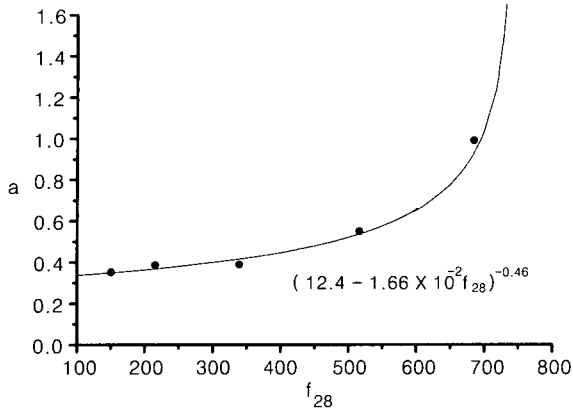
여기서는 앞에서 제시한 모델식과 실험결과를 재령 ( $t$  일), 28일에서의 압축강도 ( $f_{28}$ ),  $E_o$ 와  $E_c$ 의 비인  $E_o/E_c$ 의 관점에서 검토함으로써 제시된 모델식이 응력-변형률 곡선을 잘 나타내고 있는지를 살펴 본 후 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 각 배합에서의 재령에 따른 응력-변형률 곡선은 상승부에서는 좋은 상관관계를 맺고 있으나 하강부에서는 어느 정도의 오차가 있다.

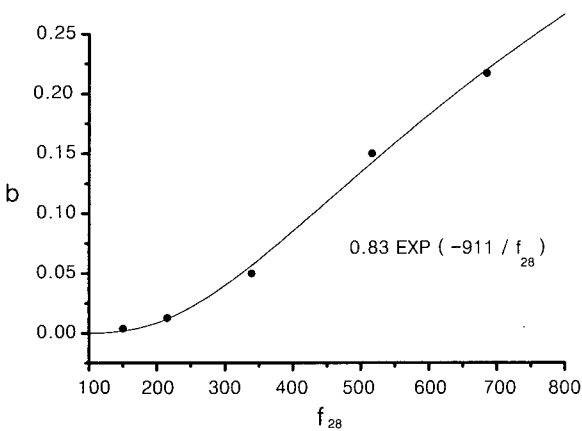
콘크리트의 파괴특성을 살펴보면, 균열은 최대응력점을 지나면서 안정되고 규칙성 있게 발생하는 것이 아니기 때문에 응력-변형률 곡선의 하강부는 불안정하다고 할 수 있다. 본 실험에서도 초기재령에서의 경화가 덜 된 공시체에서는 실험결과가 거의 같은 양상을 나타냈으나, 재령이 어느 정도 지나 경화가 이루어진 공시체에서는 실험결과와 하강부가 각각 조금씩 다른 양상을 나타내었다.

### 4.2 기존 실험결과와의 비교·분석

기존에 수행된 실험의 대부분은 주로 28일 재령에 대한 연구결과이며, 초기재령에서 고재령까지의 콘크리트 응력-변형률 관계에 대한 실험결과는 거의 찾아볼 수 없었다. 한편, Khan 등의 논문<sup>2)</sup>에서는 3가지 양생조건, 즉, 1) 콘크리트 내부의 발생온도에 맞춘 수중양생, 2) 일정한 온도에서 수분이 빠져나가지 못하게 한 양생, 그리고 3) 일정 온도에서의 기건양생에 대하여 6시간부터의 응력-변형률 곡선을 얻을 수 있었다. 이들의 실험결과를 살펴보면, 양생조건에 따라 그 결과에 차이가 있으며, 경화가 진행됨에 따른 곡선의 모양 변화에도 큰 차이가 있음을 알 수 있다.



(a) a and  $f_{28}$



(b) b and  $f_{28}$

Fig. 5 Relationship between parameters (a, b) and compressive strength at 28 days ( $f_{28}$ )

도 ( $f_{28}$ ),  $E_o$ , 및 ASTM C 469에 의한 탄성계수 ( $E_c$ )의 함수로서 응력-변형률 곡선을 표현하는 다음의 식을 제안할 수 있다.

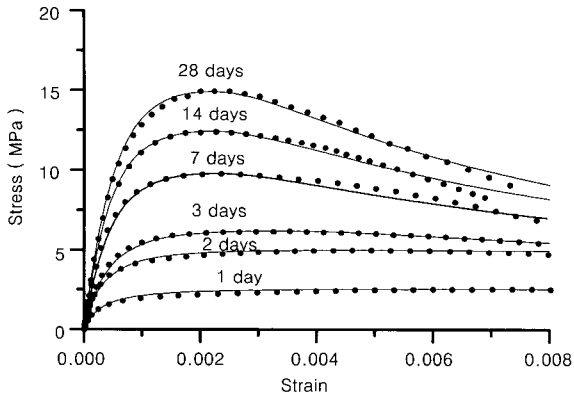
$$\frac{f_c}{f_{cu}} = \frac{\beta_m (\epsilon_c / \epsilon_{cu})}{\beta_m - 1 + (\epsilon_c / \epsilon_{cu})^{\beta_m}} \quad (5)$$

$$\beta_m = \beta_{m,a} \text{ (fitted)} = [1.02 - 1.17(E_o/E_c)]^{-0.74} \quad (\epsilon_c \leq \epsilon_{cu}) \quad (6)$$

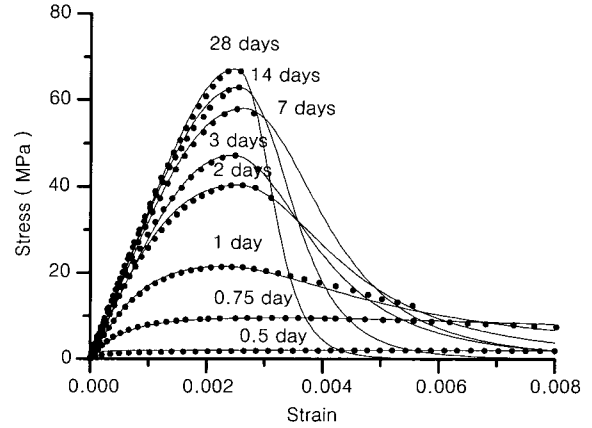
$$\beta_m = \beta_{m,d} \text{ (fitted)} = \beta_{m,a} \text{ (fitted)} + (a + b \cdot t) \quad (\epsilon_c \geq \epsilon_{cu}) \quad (7)$$

$$a = (12.4 - 1.66 \times 10^{-2} f_{28})^{-0.46} \quad (8)$$

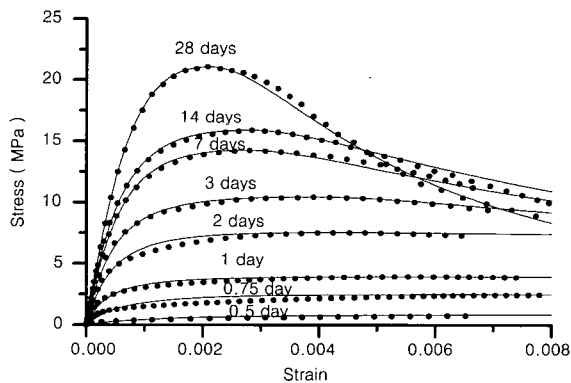
$$b = 0.83 \text{EXP}(-911/f_{28}) \quad (9)$$



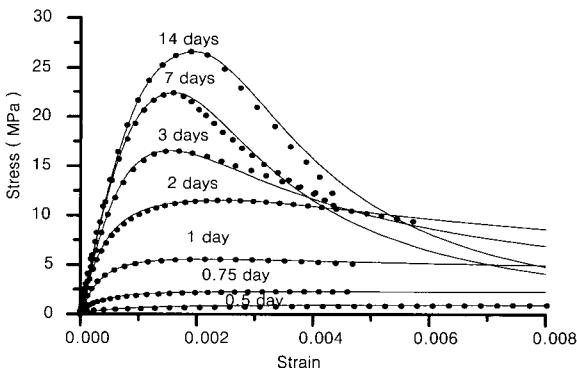
(a) w/c=89 %



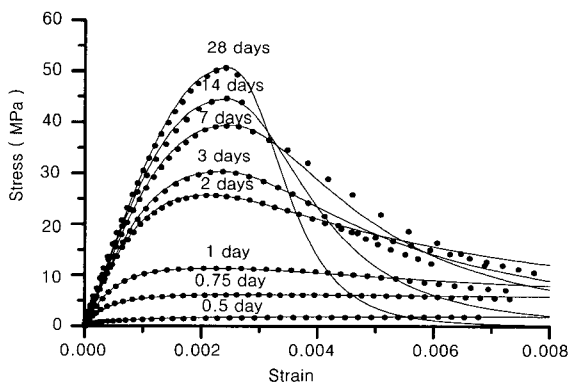
(e) w/c=30 %



(b) w/c=69 %



(c) w/c=54 %



(d) w/c=39 %

Fig. 6 Comparison of proposed model with experimental results

본 논문의 실험결과와 비교해본 결과, 1) 수중양생의 경우 그 응력-변형률 곡선의 변화모양이 서로 유사함을 알 수 있었다.

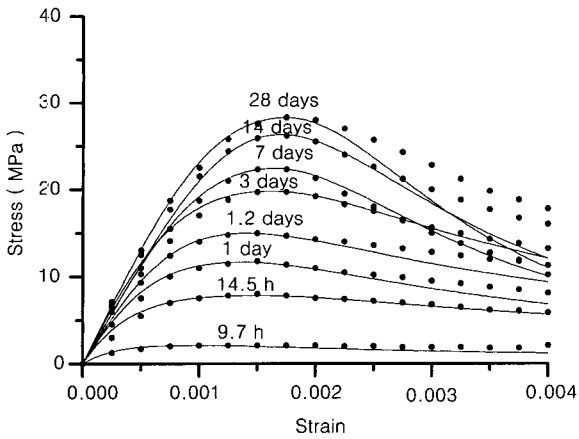
Fig. 7에는 본 논문에서 제안된 모델식과 Khan 등<sup>2)</sup>에 의한 실험결과와의 비교가 선택된 양생조건에 대하여 나타나 있는데, 제시된 모델식이 실험결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 즉, 본 논문의 실험자료에 근거해서 제시된 모델식이 다른 조건에서 얻은 실험결과와 잘 맞으므로 본 논문에서 제시된 예측식이 상당히 일반적이며 정확함을 알 수 있다.

한편, 이 그림들의 높은 재령에서는 실험결과와 제시된 모델식 사이에 차이가 있음을 알 수 있는데 이것은 변위 제어법과 양생조건이 서로 다르기 때문으로 판단된다.

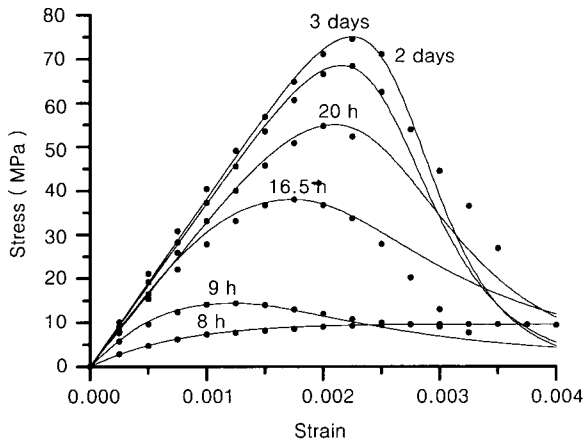
#### 4.3 기존 모델식과의 비교·분석

기존의 연구자들에 의한 모델식은 콘크리트가 거의 경화된 이후의 상태를 나타내고 있다. 따라서 제안된 모델식과의 검증을 위해서 경화가 거의 이루어진 재령의 배합에 대한 비교를 수행하였다 (Fig. 8 참조). 비교에 사용된 모델식은 Carreira와 Chu의 모델식<sup>1)</sup>, Ahmad와 Shah의 모델식<sup>3)</sup>, 그리고 Kim과 Lee의 모델식<sup>4)</sup>이었다.

Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이 기존의 모델식은 대개 하강부의 기울기를 과소평가하는 경향을 보인다. 여기서 각 모델식에서의 하강부의 기울기가 차이를 보이는 것은 변위제어의 방법이 서로 다르기 때문으로 사료된다. 제안된 모델식의 하강부는 Carreira와 Chu의 모델식<sup>1)</sup>, Ahmad와 Shah의 모델식<sup>3)</sup>, 그리고 Kim과 Lee의 모델식<sup>4)</sup>의 사이에 존재함을 알 수 있다. 또한 고강도 콘크리트로 갈수록 각 모델식의 하강부에서의 기울기의 차이가 더 커짐을 알 수 있다.



(a) Temperature-matched curing ( $f_{28}=30$  MPa)

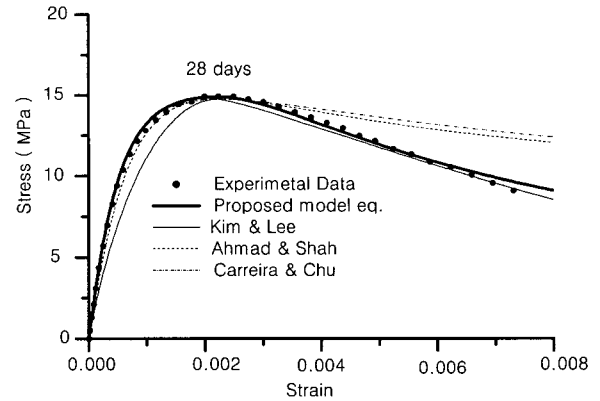


(b) Sealed curing ( $f_{28}=70$  MPa)

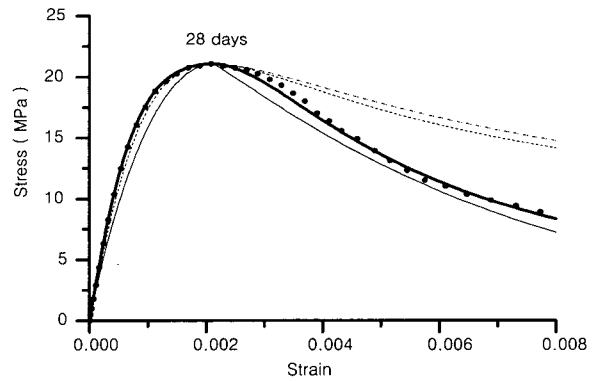
Fig. 7 Comparison of proposed model with Khan et al.'s experimental results

저강도 콘크리트는 수화되는 속도가 고강도 콘크리트보다 느리므로 경화되는 속도가 상대적으로 더 느리다. 저강도 콘크리트와 고강도 콘크리트의 대표적인 응력-변형을 곡선에 대한 검토가 본 논문에서 제안된 모델식과 기존의 모델식에 대하여 재령에 따라 수행되었으며 그 결과를 Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)에 각각 나타내었다.

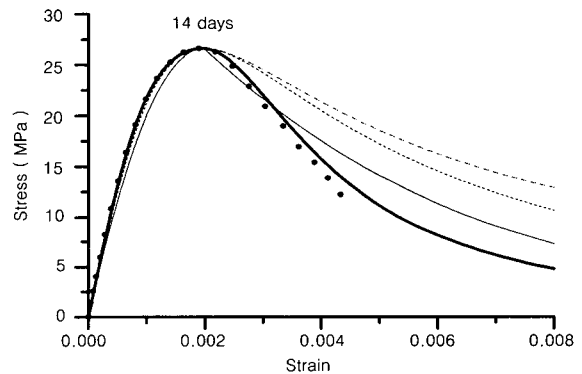
Fig. 9(a)에서 알 수 있는 바와 같이 재령이 증가함에 따라 저강도 콘크리트의 하강부 기울기가 증가하는 속도는 빠르게 되며 (고강도 콘크리트보다는 느리지만, 하강부의 기울기를 과소 평가하는 기존의 모델식과의 차이도 점점 커짐을 알 수 있다. 한편, 고강도 콘크리트(Fig. 9(b))에서도 재령이 증가함에 따라 기존 모델식과의 차이가 저강도 콘크리트보다 더 커짐을 알 수 있으며, 28일의 경우에는 강도가 커져 하강부를 실험에 의해 구할 수 없었다. 따라서 이 경우에는 1일, 2일, 그리고 7일에 해당하는 실험자료를 이용하여 그 특성을 살펴보았다.



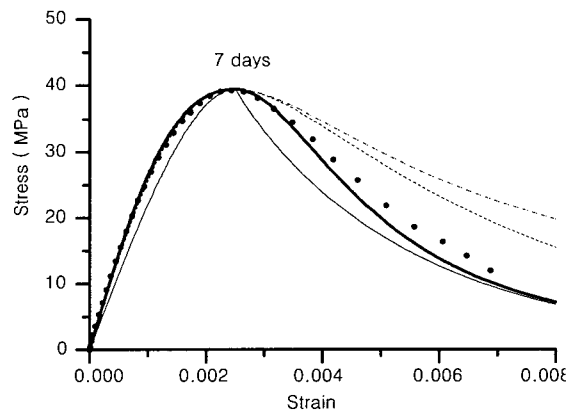
(a)  $w/c=89\%$



(b)  $w/c=69\%$

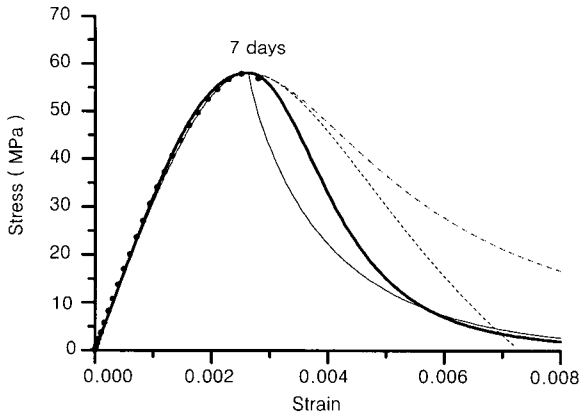


(c)  $w/c=54\%$



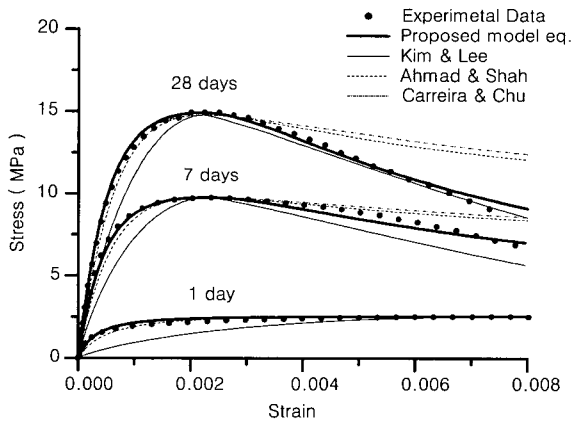
(d)  $w/c=39\%$



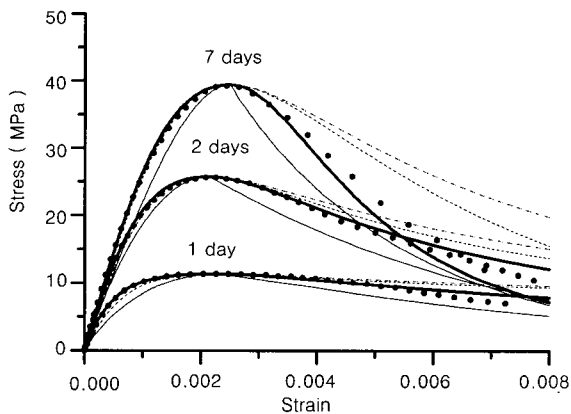


(e) w/c=30 %

Fig. 8 Comparison of experimental results with proposed and existing models



(a) w/c=89 %



(b) w/c=39 %

Fig. 9 Comparison of stress-strain curves with age

## 5. 결 론

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

1) 실험결과와 기존의 모델식을 이용하여 콘크리트의

강도와 재령의 영향을 고려할 수 있는 보다 합리적인 모델식을 제시하였다.

2) 본 연구에서 제안된 모델식은 응력-변형률 곡선의 상승부를 정확하게 예측할 뿐만 아니라, 하강부에서도 어느 정도의 오차 범위 내에서 정확히 예측하였다.

3) 경화된 콘크리트에 대해서, 본 논문에서 제안된 모델식과 기존 모델식의 상승부는 서로 일치하는 경향을 보였으나, 하강부에서는 기존 모델식과의 차이를 보였다. 이는 제안된 모델식이 재령에 따른 하강부의 기울기를 조절할 수 있는데 비하여 기존 대부분의 모델식은 하강부에서의 재령에 따라 증가하는 기울기를 고려하지 못하기 때문으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 국가지정연구실(National Research Laboratory, NRL)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- Carreira, D. J., and Chu, K. H., "Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression," *ACI Journal*, Proceedings Vol.82, No.6, Nov.-Dec. 1985, pp.797~804.
- 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, Nov.-Dec. 1995, pp.617~624.
- Ahmad, S. H., and Shah, S. P., "Stress-Strain Curves of Concrete Confined by Spiral Reinforcement," *ACI Journal*, Proceedings Vol.79, No.6, Nov.-Dec. 1982, pp.484~490.
- 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.
- Martinez, S., Nilson, A. H., and Slate, F.O., "Spirally-Reinforced High-Strength Concrete Columns," Research Report No. 82-10, Department Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, Aug. 1982, 255pp.
- Scott, B. D., Park, R., and Priestly, M. J. N., "Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates," *ACI Journal*, Proceedings Vol.79, No.1, 1982, pp.13~27.

7. Desayi, P., and Krishnan, S., "Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete," *ACI Journal*, Proceedings Vol.61, No.3, Mar. 1964, pp.345~350.
8. Hognestad, E., Hanson, N. W., and McHenry, D., "Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design," *ACI Journal*, Proceedings Vol.52, No.4, Dec. 1955, pp.455~480.
9. Kaar, P. H., Hanson, N. W., and Capell, H.T., "Stress-Strain Characteristics of High-Strength Concrete," *Douglas McHenry International Symposium on Concrete and Concrete Structures*, SP-55, American Concrete Institute, Detroit, 1987, pp.161~185.
10. Wang, P. T., Shah, S. P., and Naaman, A.E., "Stress-Strain Curves of Normal and Lightweight Concrete in Compression," *ACI Journal*, Proceedings Vol.75, No.11, Nov. 1978, pp.603~611.
11. Ahmad, S. H., and Shah, S. P., "*The Complete Stress-Strain Curve of Concrete and Non linear Design*," Progress Report, National Science Foundation Grant No. PPR 78-22878, Department of Materials Engineering, University of Illinois at Chicago Circle, Aug. 1979, 29pp.

## 요 약

그 동안 많은 연구자들은 콘크리트의 응력-변형률 관계의 비선형 거동을 적절한 수식으로 나타내기 위해 많은 노력을 해 왔다. 그러나 이 응력-변형률 관계에 대한 대부분의 경험식은 경화된 콘크리트에 초점을 맞추어 왔으며, 초기재령에서의 콘크리트의 거동을 잘 나타내지 못하였다. 여기서 초기재령에서 경화시까지 걸친 전 콘크리트의 재령에 대한 폭 넓은 이해는 콘크리트 구조물의 내구성과 잔존수명을 평가하는데 있어서 매우 중요하다.

본 논문에서는 5가지의 강도수준과 12시간에서 28일까지의 재령에 대하여 응력-변형률 관계를 검토하였으며,  $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 에서 수중양생된  $\phi 100 \times 200$  mm의 원주공시체에 대하여 1축압축강도실험을 수행했다. 실험결과에 대한 회귀분석을 수행하여 강도와 재령에 따른 응력-변형률 관계의 모델식을 제시하였으며, 제시된 모델식의 검증을 위하여 실험결과와 기존의 실험결과와 모델식에 대한 해석적 검토도 수행하였다. 해석결과, 제시된 모델식이 실험결과와 잘 맞으며 응력-변형률 관계에 강도와 재령이 미치는 영향을 잘 나타내고 있음을 알 수 있었다.

**핵심용어 :** 응력-변형률 관계, 강도, 재령, 초기재령, 압축강도