

휨압축력을 받는 폴리머 콘크리트의 응력-변형 관계와 응력블럭 계수

Stress-Strain Relation and Stress Block Parameters on Flexural Compressive Strength of Polymer Concrete

연규석* · 이재철** · 최윤상*

Yeon, Kyu-Seok* · Yi, Jaichul** · Choi, Yoon-Sang

Abstract

Stress-strain relation and stress block parameters of polymer concrete flexural compression members were experimentally investigated. For these purposes, a series of C-shaped polymer concrete specimens subjected to axial compressive load was tested. Based on the test results, we proposed an equation by which the stress-strain relation of polymer concrete can be predicted. In this model, we took account the slope of descending branch beyond the peak stress point of single curve. The proposed equation was numerically integrated to compute the rectangular stress block parameters. Computed β_1 was greater than the values prescribed in ACI 318 Code for cement concrete, and γ was about 0.85 that is similar to the value regulated in the ACI.

Keywords : Polymer concrete, C-shaped specimen, Stress-strain relation, Stress block parameters

1. 서 론

최근 건설산업용이나 농업용 콘크리트 구조물로써 널리 이용되고 있는 시멘트 콘크리트는 강도가 낮아 단면이 커지고 중량이 무거워지는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 자중 감소가 가능한 고강도의 건설재료를 사용하는 것이 유리하다. 이에 부응할 수 있는 재료 중의 하나가 고분자 물질을 결합재로 이용한 폴리머 콘크리트이다. 일반 시멘트 콘크리트는 인장이나 휨에 대한 저항력이 작

아 균열이 발생하기 쉽고, 내약품성도 약한 결점을 갖고 있다. 이에 비하여 폴리머 콘크리트는 압축, 인장, 휨강도가 클 뿐 아니라 양생 시간이 짧고, 내마모성, 내충격성, 내약품성, 전기 절연성, 방수성, 내동결융해성 등과 같은 물리·화학적 성능이 우수하다. 또한, 폴리머 콘크리트는 철근이나 시멘트 콘크리트 등 다른 재료와의 접착성이 양호하고, 충격, 침식에 대해 우수한 저항성을 가지고 있기 때문에 농업용 구조물 소재로서 널리 사용될 수 있다. 더 나아가 폴리머 콘크리트는 콘크리트 구조물의 보수뿐만 아니라 얇은 단면의 보나 슬래브, 프리캐스트 맨홀, 전력구, 철도 침목, 건물벽체와 같은 구조물에 적용이 가능하여 오래전부터 신건설재료로 널리 사용되고 있다(Helal, 1978; Knab et al., 1974; Knab, 1972; Loft et al., 1973).

* 강원대학교 지역건설공학전공

† Corresponding author. +82-33-250-7285

Fax: +82-33-242-2095

E-mail address: jyi@kangwon.ac.kr

2008년 5월 23일 투고

2008년 9월 4일 심사완료

2008년 9월 5일 게재확정

구조물에 대한 폴리머 콘크리트의 적용성을 넓히기 위해서는 구조적 성질에 대한 연구가 이루어져야 하며, 이에 대한 설계기준도 마련되어야 한다. 그러나 아직 폴리머 콘크리트의 구조적 거동에 대한 기존연구는 그리 많지 않은 실정이며, 적용기준 역시 제정되어 있지 않다 (San-Jose et al., 2005). 폴리머 콘크리트를 손상된 콘크리트 구조물의 보수용에 사용할 경우는 구조적인 요소가 그리 중요하지 않지만, 구조용 부재로 사용될 경우는 구조해석 및 설계가 필수적이기 때문에 앞으로 범용화가 가능한 설계기준이 마련되어야 할 것이다.

전술한 바와 같이 아직 폴리머 콘크리트를 구조물에 적용키 위한 명확한 설계기준은 제정되어 있지 않으나, 이의 제정을 위해서는 구조적 거동 특성에 대한 많은 연구 자료가 필요하다고 생각한다.

일반적으로 폴리머 콘크리트의 양생방법, 온도 등은 강도 및 응력-변형률관계에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Vipulanandan et al., 1988). 폴리머 콘크리트는 취성파괴 양상을 나타내므로 후첨두(post peak) 응력-변형률 거동을 개선하는 것이 중요하다. 따라서 폴리머 콘크리트를 응용하는데 있어서는 우수한 성능을 가진 소재의 개발과 함께 구조적 특성을 구명하는 것이 필수적이다.

이와 같은 폴리머 콘크리트의 설계에 필요한 구조적 특성을 구명하기 위해서는 재료적인 측면에서의 많은 연구와 폭넓은 이해가 요구된다. 그러나 폴리머 콘크리트에 관한 기초 데이터의 연구가 아직 미흡한 상태이다(Ribeiro et al., 2003; Vipulanandan & Paul, 1988).

본 연구에서는 폴리머 콘크리트 C형 시험체에 대한 힘압축실험을 통하여 응력-변형률 모델을 제시하고 타 모델과 비교분석하였으며 제시된 모델을 이용하여 등가직사각형 응력블럭 계수를 계산하였다.

II. 사용재료

본 연구에서는 결합재로 불포화 폴리에스터 (poly-ester) 수지를 사용하였으며 이 수지는 코발트(cobalt)계 경화촉진제가 첨가되어 있는 오소형(ortho type)

이다. 불포화 폴리에스터 수지의 점도를 낮추어 폴리머 콘크리트의 작업성을 개선하기 위해 스티렌 모노머(styrene monomer)가 사용된다. 그러나 스티렌 모노머는 결합력이 약하므로 과도하게 사용하면 강도가 저하된다. 또한, 불포화 폴리에스터 수지의 작업성을 개선하기 위해 스티렌 모노머가 기본량 포함되어있는 불포화 폴리에스터 70 그리고 MMA를 30 mass %의 비율로 혼합하여 사용하였다.

한편, 불포화 폴리에스터 수지는 경화시 7-10%의 큰 수축을 발생시킨다. 경화수축은 균열이나 치수의 안정성에 있어서 매우 불리한 요소로 작용하며, 이와 같은 수축량을 감소시키기 위하여 열가소성 폴리스티렌(polystyrene)을 스티렌 모노머에 용해시킨 수축저감제를 사용하였다. 불포화 폴리에스터 수지의 경화를 위해 경화 촉진제와 촉매제가 첨가되며, 촉진제가 첨가된 불포화 폴리에스터 수지는 촉매제만 첨가되면 경화반응이 일어난다. 본 연구에 사용된 불포화 폴리에스터 수지에는 공장에서 생산될 때 이미 경화 촉진제가 첨가되어 있으므로 촉매제만 첨가시키면 경화반응을 일으키게 되어 있다. 본 연구에서 사용한 UP 수지, MMA 모너머 및 수축저감제의 재료 특성은 Table 1과 같다.

폴리머 콘크리트 배합시 충전재는 결합재와 골재 사이의 공극을 충전시켜 단위체적당 수지의 사용량을 감소시키기 위해 사용된다(Farrell, L. J., 1995). 일반적으로 사용되는 충전재에는 미립의 알루미늄아

Table 1 Properties of used materials

UP resin			
Density (20°C)	Viscosity (20°C, mPa·s)	Acid value	Styrene content (%)
1.13	300	20.0	40.0
MMA monomer			
Density (20°C)	Viscosity (20°C, mPa·s)	Molecular weight	Appearance
0.942	0.56	100	Transparent
Shrinkage-reducing agent			
Density (20°C)	Viscosity (20°C, mPa·s)	Nonvolatile matter (%)	Appearance
1.11	3100~4100	34~38	Transparent

Table 2 Physical and chemical properties of heavy calcium carbonate

Physical properties					
Density (g/cc)	Absorption (cc/g)	Water content (%)	pH	Mean grain size (μm)	Retained percentage of 325 mesh sieve
0.75	0.20	<0.1	8.8	13	0.03
Chemical component					
CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Ignition loss
53.7	0.25	0.09	2.23	0.66	42.4

Table 3 Physical properties of fine aggregate

Size (mm)	Density (g/cm ³ , 20°C)	Water content (%)	Organic impurities
5.0-13.0	2.78	<0.1	Nil
0.8-5.0	2.62	<0.1	Nil
0.0-0.8	2.45	<0.1	Nil

(alumina), 규석, 석영, 실리콘 카바이트(silicon carbonate), 산화철, 시멘트, 플라이 애시 (fly ash), 석분, 중질탄산칼슘(ground calcium carbonate) 등이 있다(Devi, M. S. et al., 1998). 본 연구에서는 폴리머 콘크리트의 작업성을 고려하여 중질탄산칼슘을 충전재로 사용하였으며, 입자크기는 1-30 μm , 분말도는 2500-3000 cm^2/g , 수분함량 0.1% 미만인 것을 선택하였다. 사용된 중질탄산칼슘의 물리·화학적 성질은 Table 2와 같다.

폴리머 콘크리트에 사용되는 골재는 일반 시멘트 콘크리트와 동등한 수준의 것을 사용한다. 그러나 친수성 골재가 물을 흡수 하면 폴리머 콘크리트는 골재를 둘러싼 결합재층과 골재표면 사이의 수막이 결합재와 골재간의 접착력을 약화시켜 폴리머 콘크리트의 강도를 저하시키므로 함수율이 0.25% 이하가 되도록 건조시킬 필요가 있다(Sugama, T. et al., 2003). 따라서 골재는 수분 함수량이 0.1% 이하가 되도록 110 \pm 5 °C 에서 24시간 건조시킨 후 냉각하여 사용하였으며 물리적 성질은 Table 3과 같다.

III. C형 공시체의 휨압축시험

구조실험에 사용된 폴리머 콘크리트 표준 원추형

Table 4 Mixing proportion of polymer concrete

Binder content (mass %)	Binder formation				Aggregate ratio
	UP	MMA	MEKPO	CoOc	
8.5	70	30	0.75	0.50	2.0 : 1.0

시험체의 압축강도는 약100 MPa, 탄성계수 2.25 $\times 10^4$ MPa, 프아송비 0.25였으며, 시험체 제작에 사용된 배합비는 Table 4와 같다.

1. C형 공시체

Fig. 1에 본 연구를 위해 제작된 C형 시험체의 형상, 치수 및 가력점을 나타내었다. 공시체의 중앙부는 보강하지 않았으나 상하 단면에서의 전단 파괴를 방지하고 중앙부에서의 파괴가 발생하도록 양단에

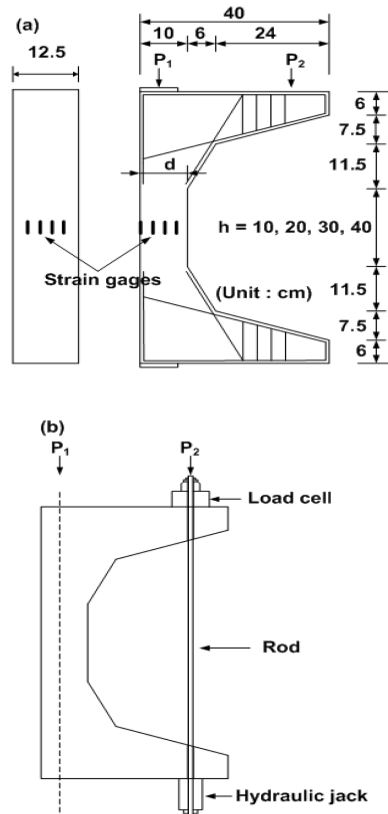


Fig. 1 (a) Shape and size and, (b) Loading equipment of C-shaped specimen

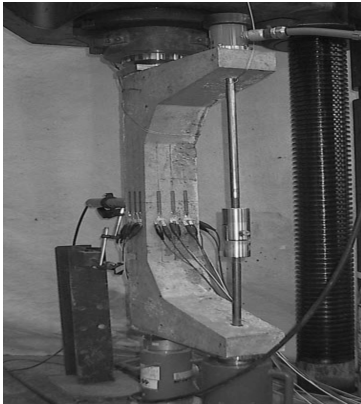


Fig. 2 View of test for C- shaped specimen

휨 및 전단 보강을 하였다. 시험체 중앙부의 두께는 12.5 cm, 깊이는 10 cm로 고정하고 길이는 각각 10, 20, 30, 40 cm로 하였다. 또한 편심하중을 가력하기 위한 강봉을 설치하기 위해 타설시 단부에 사전에 지름 3 cm의 원형봉을 미리 삽입하였다. 각각의 길이에 대하여 3개씩 총 12개의 공시체를 제작하였다. Fig. 2는 실험장면 사진이다.

2. 시험방법

휨하중을 받는 콘크리트 보에 대한 실험시 단면의 중립축의 위치, 보강 비, 가력점의 위치 등이 변하므로 크기효과를 체계적으로 계산할 수 없다. 이런 문제를 해결하기 위해 김진근 등은(Kim, J. K., 2002) C형 시험체에 축하중을 가하여 실험적으로 휨 모멘트를 구하였다.

C형 시험체 중앙부의 압축측, 인장측 및 측면에 각각 4개씩 12개의 스트레인게이지를 부착하였다. 또한 시험체의 단부에 대한 중앙부의 상대적 처짐을 측정하기 위해 시험체 중앙부의 압축측에 2개의 변위측정기(LVDT)를 설치하였으며, 여기서 얻은 데이터의 평균치는 재하시 편심거리 보정에 사용되었다. 재하과정은 다음과 같다. 먼저 시험체 중앙부 인장측 연단에 부착된 스트레인 게이지(strain gauge)의 초기값이 특정값 (100×10^{-6})에 도달할 때까지 축력을 유발하는 주하중(P_1)을 가한 후, 이 상태에서 인장측 연단의 변형률이 0에 도달 할 때까지 휨모멘트를 유

발하는 편심하중(P_2)을 서서히 증가시킨다. 이렇게 인장측 변형률이 0이 되게 주하중과 편심하중을 비례적으로 증가시키면서 시험체가 파괴될 때까지 반복하였다. 이때 단계별 하중과 위치별 변형률 및 LVDT 값을 연속적으로 기록하였다.

IV. 결 과

1. 압축응력-변형률 모델

응력-변형률 관계는 많은 요인에 의해 달라지므로 각각의 폴리머 콘크리트 구조부재에 하나의 곡선으로 표현하는 것은 불가능하다. 그러나 구조부재의 거동을 설명하기 위한 응력-변형률 모델이 필요하므로 많은 연구자들에 의해 여러 가지 모델들이 제시되었다. 그 중 대표적인 연구자들은 Hognestad (1955), Kent & Park(1971), Sheik & Uzeri(1982), Roy & Sozen(1964), Sargin(1971), Saatcioglu & Razvi (1992), Muguruma et al.(1993), Collins et al. (1993), Hsu(1994) 등이다.

보통강도 콘크리트, 고강도 및 초고강도 콘크리트의 경우 어느 모델식을 사용하느냐에 따라서 구조물의 해석 및 거동에 미치는 영향은 매우 크게 나타난다. 마찬가지로 보강 폴리머 콘크리트 부재의 극한강도 산정시 필요한 등가응력블록 모델의 정확성을 위해서도 폴리머 콘크리트 강도 증가에 따른 응력-변형률 거동의 변화를 정확히 표현할 수 있는 모델식이 정립되어야 한다.

콘크리트의 응력-변형률 모델은 최대 응력점을 기준으로 상승곡선 모델식 및 하강곡선 모델식으로 나누어 표현하는 방법과 상승부와 하강부를 동일한 단일곡선식으로 표현하는 방법이 있다. Sargin & Handa (1968)가 제안 한 식 (1)이 단일곡선식의 대표적인 형태이다.

$$Y = \frac{AX + (B-1)X^2}{1 + (A-2)X + BX^2} \quad (1)$$

여기서 $Y = \sigma/\sigma_m$, $X = \epsilon/\epsilon_m$ 이고, σ 는 시험체의 응력(N/mm^2), σ_m 은 최대 응력, ϵ 은 변형률, ϵ_m 은 σ_m 에서의 변형률이다. A와 B는 저자들이 시험의 성격

에 따라 정할 수 있는 식 또는 상수이다.

폴리머 콘크리트의 응력-변형률 모델을 가정하는 것은 응력블럭 계수를 수치적으로 계산하기 위한 과정이어서 적분이 용이한 형태이어야 하고 또한 실험 결과와 일관성을 유지하기 위해 다음과 같은 경계조건을 만족하여야 한다.

$$(i) \quad \left. \frac{dY}{dX} \right|_{X=0} = E_0 \quad (E_0: \text{초기 탄성계수})$$

$$(ii) \quad \left. \frac{dY}{dX} \right|_{X=1} = 0$$

$$(iii) \quad X=1 \rightarrow Y=1$$

이러한 경계조건과 폴리머 콘크리트 C형 공시체에 대한 휨압축시의 역학적 특성을 고려하여 본 연구에서는 식 (1)을 바탕으로 식 (2)와 같이 단일곡선 형태의 응력-변형률 곡선을 제안하고자 한다.

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_m \frac{E_r X + (E_u - 1) X^2}{1 + (E_r - 2) X + E_u X^2} \quad (2)$$

여기서, $E_r = E_0/E_m$, $E_0 = \sigma_0/\varepsilon_0$ 는 초기탄성계수, $E_m = \sigma_m/\varepsilon_m$, $E_u = (\sigma_u - \sigma_m)/(\varepsilon_u - \varepsilon_m)$ 는 하강부 곡선의 기울기, σ_u 는 극한응력 그리고 ε_u 는 극한응력 일 때의 변형률이다.

Fig. 3(a)은 압축을 받는 콘크리트 시험체의 응력-변형률 곡선과 본 연구에서 사용된 기호들의 정의를 나타낸다. 식 (2)에서 E_m , E_u 는 실험 데이터로부터 명확하게 구할 수 있다. 그러나 초기탄성계수는 E_0 를 변수로 하여 실험 데이터와 식 (2)를 곡선맞춤한 후 구했다. Fig. 3(b)에 식 (2)의 도함수를 도식하였다. 이론적으로 선형구간의 도함수는 빗금친 부분에 도식한 점선으로 나타나야 한다. 이런 조건을 감안하여 응력-변형률 관계의 경계조건 (i)에 의한 도함수 값 E_0 와 실제 도함수가 만나는 점을 ε_0 로 결정하고, 이 빗금친 부분을 응력-변형률 관계의 탄성영역으로 가정하였다.

Sargin & Handa(1968), Ahmad & Shah(1982), Sun et al.(1993), Saenz(1964)등 많은 과학자들이 (1)식의 A와 B를 다른 형태로 바꾸어 콘크리트 시험체의 응력-변형률을 예측하였다. Table 5에 각 저

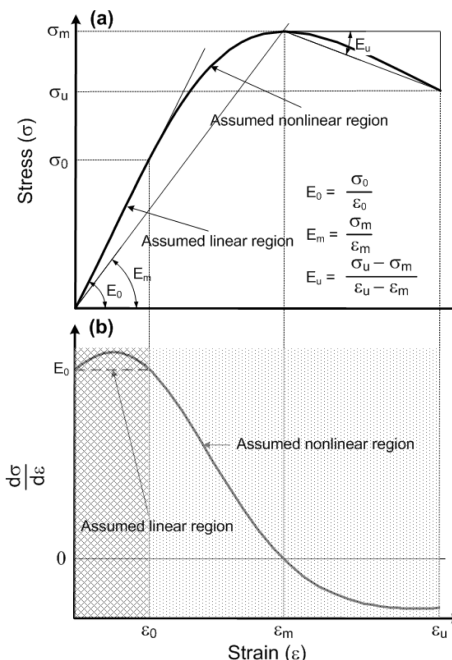


Fig. 3 (a) Typical monotonic stress-strain relation of compression and notations used in this study (b) Derivation of stress with respect to strain

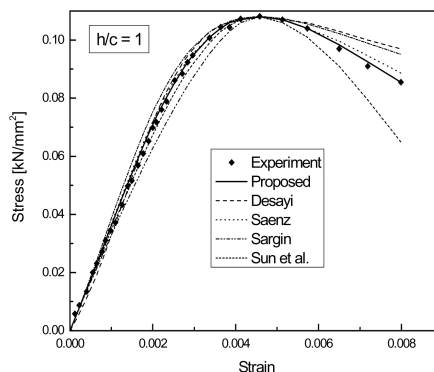


Fig. 4 Comparing models proposed by several authors

자들이 제안한 A와 B를 요약해 놓았다.

Fig. 4에 최대응력이 108 MPa일 때 위에 언급한 저자들이 콘크리트 시험체의 압축에 대한 응력-변형률 모델을 나타내었다. 예견된 바와 같이 콘크리트에 대한 모델은 상승부 뿐 아니라 하강부에서도 폴리머 콘크리트에 대한 본 연구의 결과와 일치하지 않음을

알 수 있다.

Fig. 5에는 본 연구의 실험결과와 식 (2)를 C형

Table 5 Proposed definitions of A and B by several authors

Authors	A	B
Sargin & Handa*	E_0/E_m	0
Ahmad & Shah	E_0/E_m	0.876A-0.8164
Sun et al.	E_0/E_m	1.5-0.00168 σ_m
Saenz	E_0/E_m	1
Proposed	E_0/E_m	E_u

[Note] *: $\sigma_m \geq 50 \text{ N/mm}^2$

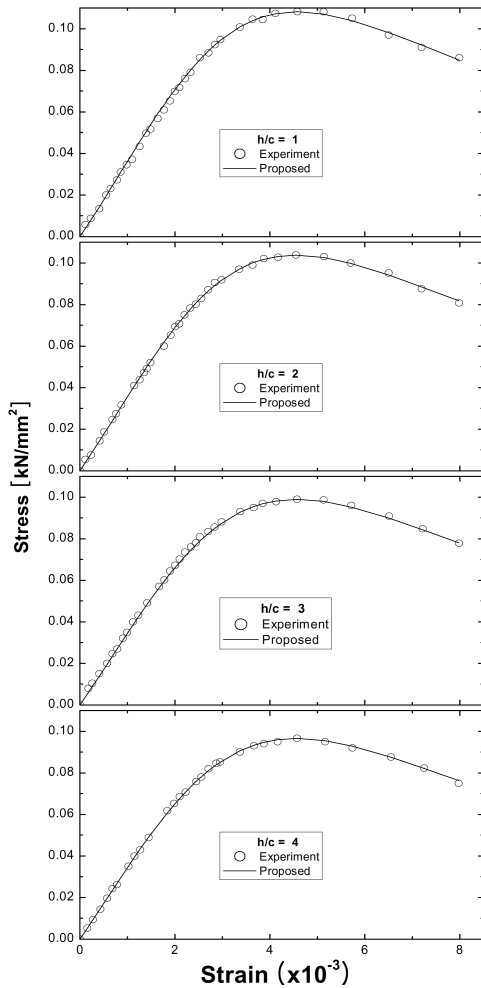


Fig. 5 Plots of experimental results and proposed stress-stress models for polymer concrete

시험체의 길이에 대한 깊이의 비 $r(=h/d)$ 별로 표시해 놓았다. 그림에서 보듯이 본 연구의 제안 식과 실험결과가 각기 다른 길이의 시험체의 경우에도 잘 일치함을 알 수 있다.

2. 등가직사각형 응력블록 계수

부재에서의 콘크리트의 휨압축응력 분포형상에 대한 가설은 포물선 응력분포, 삼각형 응력분포, 직사각형 응력분포, 사다리꼴 응력분포 등이 일반적으로 사용된다. 그러나 응력블록의 형상에 관계없이 콘크리트 부재단면에서의 압축력 C와 그 작용점의 위치를 알 수 있다면 실제의 응력분포가 어떠한 부재의 단면에 대한 등가적 이론해석이 가능하다. 또한 휨압축부재에서의 압축력 C와 그 작용점의 위치는 Hognestad(1955) 등이 제안한 C형 시험체에 대한 휨압축실험을 통하여 실험적으로 구할 수 있다. 본 연구에서는 Whitney(1937)가 제안한 기하학적 형상이 비교적 단순한 직사각형 응력블록에 대한 파라미터 α , β_1 및 γ 를 C형 시험체에 대한 휨압축실험을 통하여 구명하였다 (Fig. 6).

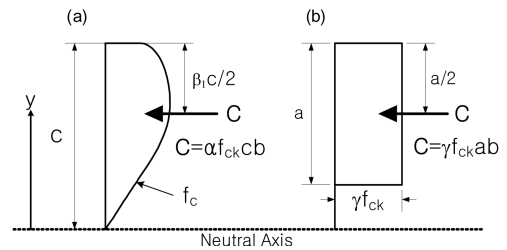


Fig. 6 Analysis of rectangular stress block, (a) Actual stress distribution at ultimate state, (b) Equivalent rectangle block

극한상태에서의 실제 응력분포를 직사각형 응력분포로 등가 변화시키기 위해서는 다음식 (3), (4)와 같은 두 가지 조건을 만족해야 한다.

(1) 합력의 크기 C가 같아야 한다.

$$C = \int_0^c f_c b dy = \alpha f_{cr} c b = \gamma f_{ck} \alpha a b \quad (3)$$

(2) 합력의 작용점 위치가 같아야 한다.

$$\frac{\beta_1}{2}c = \frac{a}{2}c - \frac{\int_0^c f_c y b dy}{\int_0^c f_c b dy} \quad (4)$$

여기서, f_c 는 실제 응력분포를 나타내는 함수, f_{ck} 는 폴리머 콘크리트의 표준 압축강도, α 는 부재에서 최대 압축응력에 대한 평균 압축응력의 비, β_1 는 부재의 중립축길이에 대한 압축연단에서 압축합력까지의 거리비 그리고, γ 는 등가직사각형 응력블록에서 최대압축응력에 대한 평균 압축응력 비이다. (3)식과 (4)식에 의해 계수 들을 구하기 위하여 응력-변형률 곡선식인 식 (2)를 사용하여 다시 쓰면 다음의 식 (5)와 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$C = \int_0^{\epsilon_u} \sigma(\epsilon) d\epsilon = \alpha f_{ck} \epsilon_u = \gamma f_{ck} a \quad (5)$$

$$\frac{\beta_1}{2} \epsilon_u = \frac{a}{2} = \epsilon_u - \frac{\int_0^{\epsilon_u} \sigma(\epsilon) \epsilon d\epsilon}{\int_0^{\epsilon_u} \sigma(\epsilon) d\epsilon} \quad (6)$$

식(5), (6)과 본 연구에서 제안한 응력-변형률 모델인 식(2)를 이용하여 길이가 다른 4조의 시험체에 대하여 Table 6과 같이 등가직사각형 응력블록의 파라미터 α , β_1 및 γ 를 구하였다. Fig. 7은 C형 시험체의 길이에 대한 깊이 비($r = h/d$)에 따른 β_1 의 변화를 나타낸다.

시멘트 콘크리트에서는 응력블록 파라미터 α 및 β_1 값은 강도의 증가에 따라 작은 값을 취하는데 $f_{ck} \geq 55\text{MPa}$ 이면 $\alpha=0.56$, $\beta_1=0.65$ 의 일정한 값을 취하도록 ACI 318 Code(2008)에 규정되어 있다. 본 연구에 사용된 폴리머 콘크리트의 원기동형 시험체에 대한 f_{ck} 가 약100 MPa인데 Table 7에서 보는 바와 같이 평균값이 ACI 318 Code의 규정보다 높게 나타났다. 이는 불포화 폴리에스터 수지를 결합재로 사용한 폴리머 콘크리트가 고강도 시멘트 콘크리트에 비해 탄성계수가 작은 반면 소성영역이 매우 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한 α 와 β_1 의 비인 γ 는 강도크기에 관계없이 0.85의 거의 일정한 값을 보인다는 ACI 318 Code의 규정과 같이 평균값이 0.85였다.

Table 6 Test results for C-shape specimens

r	ϵ_{max} ($\times 10^{-3}$)	α	β_1	γ
1	7.84	0.69	0.83	0.84
	7.95	0.69	0.81	0.85
	7.98	0.69	0.82	0.84
2	8.02	0.65	0.76	0.85
	8.10	0.65	0.76	0.86
3	8.08	0.62	0.74	0.84
	7.98	0.62	0.74	0.84
	7.89	0.62	0.72	0.86
4	7.88	0.62	0.72	0.86
	7.96	0.62	0.74	0.83
	8.03	0.61	0.71	0.86
Ave.	7.98	0.64	0.76	0.85

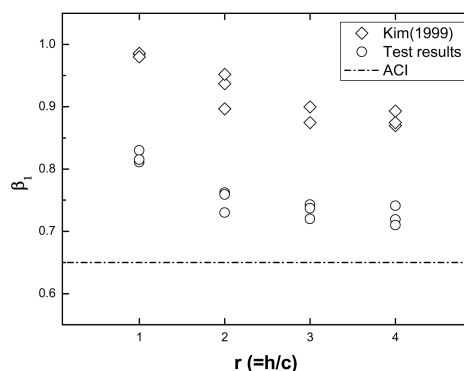


Fig. 7 Depth of the equivalent rectangular stress block versus ratio of length to depth

Table 7 Comparison of parameters of stress block

Description	α	β_1	γ
Cement concrete ($f_{ck} \geq 55\text{MPa}$)*	0.56	0.65	0.86
Polymer concrete ($f_{ck} \approx 100\text{MPa}$)	0.64	0.76	0.85

[Note] *: ACI 318 Code(2008)

V. 요약 및 결론

불포화 폴리에스터 수지를 주된 결합재로 하는 폴리머 콘크리트를 이용하여 제작한 C형 시험체에 대한 휨압축실험에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 폴리머 콘크리트 C형 시험체의 응력-변형률을 예

측할 수 있는 모델식을 제안하였다. 기존의 다른 모델과 달리 단일곡선의 하강부의 기울기를 고려한 이 식은 서로 다른 길이/깊이 비의 시험체에 대한 실험결과와 잘 일치하였다.

- 본 연구에서 제안된 응력-변형률 곡선을 수치적으로 적분하여 등가사각형 응력블럭 계수를 구하였다. α 및 β_1 값이 ACI 318 Code의 규정보다 높게 나타났다. 이는 불포화 폴리에스터 수지를 결합재로 한 고강도 폴리머 콘크리트가 고강도 시멘트 콘크리트에 비해 탄성계수가 작기 때문인 것으로 판단된다. 한편, γ 는 길이에 관계없이 ACI 318 Code의 규정과 비슷한 0.85의 값을 보였다.

이 논문은 2008년도 2단계 두뇌한국(BK)21 사업에 의하여 지원되었음.

References

- ACI Committee 318, 2008, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and Commentary, An ACI Standard, American Concrete Institute, Detroit.
- Ahmad, S. H. & S. P. Shah, 1982, Stress-strain curves of concrete confined by spiral reinforcement, *ACI Journal Proceedings*, 79(6), pp.484-490.
- Collins, M. P., D. Mitchell & J. G. MacGregor, 1993, Structural design considerations for high strength concrete, *Concrete International, Design and Construction*, 15(5) pp.27-34.
- Devi, M. S., V. Murugesan, K. Rengaraj & P. Anand, 1998, Utilization of flyash as filler for unsaturated polyester resin, *Journal of Applied Polymer Science*, 69(7), pp. 1385-1391.
- Farrell, L. J., 1995, Low resin content polymer concrete product, United States Patent 5393807.
- Helal, M. S., 1978, Experimental study of mechanical properties and structural applications of polymer concrete, Ph.D. Dissertation, University of Rice, Houston.
- Hognestad, E., N. W. Hanson & D. McHenry, 1955, Concrete stress distribution in ultimate strength design, *ACI Structural Journal*, 52(12), pp.455-480.
- Hsu, L. S. & C. T. Hsu, 1994, Complete stress-strain behavior of high strength concrete under compression, *Magazine of Concrete Research*, 46, pp.301-312.
- Kent, D. C. & R. Park, 1971, Flexural members with confined concrete, *Journal of the Structural Division*, 97(7), pp.1969-1990.
- Kim, J. K., S. T. Yi & T. G. Lee, 1999, Effects of specimen length on flexural compressive strength of concrete, *Journal of Korea Concrete Institute*, 11(4), pp.63-71.
- Kim, J. K. & S. T. Yi, 2002, *Application of size effect to compressive strength of concrete members*, *Sādhanā* 27(4) pp.467-484.
- Knab, L. I., 1972, Flexural behavior of conventionally reinforced polyester concrete beams, Ph.D. Dissertation, University of Cincinnati, Cincinnati.
- Knab, L. I. & J. P. Cook, 1974, Shear and flexural behavior of reinforced polyester concrete beams, *Journal of the American Concrete Institute*, 71(10), pp.493-501.
- Loft, D. N. & P. Howdyshell, 1973, Polymer concrete-reinforced concrete, *Publication SP*, 40 pp.295-305.
- Muguruma, H., M. Nishiyama & F. Watanabe, 1993, Stress-strain curve model for concrete with a wide range of compressive strength, I. Holand, E. Sellevold (Eds), *Proceedings of Symposium on Utilization of High Strength Concrete*, 1, pp.314-321.

17. Ribeiro, M. C. S., C. M. L. Tavares, M. Figueiredo, A. J. M. Ferreira & A. A. Fernandes, 2003, Bending characteristics of resin concretes, *Materials Research*, 6(2), pp.247-254.
18. Roy, H. E. H. & M. A. Sozen, 1964, Ductility of concrete, Proceedings of the International Symposium on Flexural Mechanics of R.C., *ASCE-ACI Joint Symposium*, Miami, pp.213-235.
19. Saatcioglu, M. & S. R. Razvi, 1992, Strength and ductility of confined concrete, *Journal of Structural Engineering*, 118(6) pp.1590-1607.
20. Saenz, L. P., 1964, Discussion of the equation for the stress-strain curve of concrete, *ACI Journal*, 61(9), pp.1229 - 1235.
21. San-Jose J. T., I. Vegas & F. Meyer, 2005, Structural analysis of FRP reinforced polymer concrete material, *Construction and Building Materials*, 20(2006), pp. 971-981.
22. Sargin, M. & V. K. Handa, 1968, Structural concrete and some numerical solutions, *Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference*, New York, pp.563-574.
23. Sargin, M. 1971, Stress-strain relationships for concrete and the analysis of structural concrete section, Ph.D. Dissertation, University of Waterloo, Ontario, Canada.
24. Sheikh, S. A. & S. M. Uzumeri, 1982, Analytical model for concrete confinement in tied columns, *Journal of the Structural Division*, 108(12) pp.2703-2722.
25. Sugama, T., L. E. Kukacka & W. Horn, 2003, Catalytic effect of a portland cement filler on the cure of water-compatible resin-phenol-formaldehyde polymer concrete, *Journal of Applied Polymer Science*, 26(5), pp.1453-1463.
26. Sun, O. P. & G. Sakino, 1993, Experimental study on improvement of stiffness of reinforced concrete beam with high-strength material, *Annual Report of Concrete Engineering*, 15, pp.719-726.
27. Vipulanandan, C. & E. Paul, 1988, Mechanical properties of epoxy and polyester polymers and polymer concrete systems, Report No. UHCE 88-13, University of Houston, Houston.
28. Vipulanandan, C., N. Dharmarajan & E. Ching, 1988, Mechanical behavior of polymer concrete systems, *Materials and Structures*, 21(4), pp.268-277.
29. Whitney, C. S., 1937, Design of reinforced concrete members under flexure or combined flexure and direct compression, *ACI Structural Journal*, 33(3), pp.483-498.