



FRP 합성재료에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률 응답 예측

조순호^{1)*}

¹⁾광주대학교 건축학부

Stress-Strain Responses of Concrete Confined by FRP Composites

Soon-Ho Cho^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Gwangju University, Gwangju 503-703, Korea

ABSTRACT An analytical method capable of predicting various stress-strain responses in axially loaded concrete confined with FRP (fiber reinforced polymers) composites in a rational manner is presented. Its underlying idea is that the volumetric expansion due to progressive microcracking in mechanically loaded concrete is an important measure of the extent of damage in the material microstructure, and can be utilized to estimate the load-carrying capacity of concrete by considering the corresponding accumulated damage. Following from this, an elastic modulus expressed as a function of area strain and concrete porosity, the energy-balance equation relating the dilating concrete to the confining device interactively, the varying confining pressure, and an incremental calculation algorithm are included in the solution procedure. The proposed method enables the evaluation of lateral strains consecutively according to the related mechanical model and the energy-balance equation, rather than using an empirically derived equation for Poisson's ratio or dilation rate as in other analytical methods. Several existing analytical methods that can predict the overall response were also examined and discussed, particularly focusing on the way of considering the volumetric expansion. The results predicted by the proposed and Samaan's bilinear equation models correlated with observed results with a reasonable degree, however it can be judged that the latter is not capable of predicting the response of lateral strains correctly due to incorporating the initial Poisson's ratio and the final converged dilation rate only. Further, the proposed method seems to have greater benefits in other applications by the use of the fundamental principles of mechanics.

Keywords : analytical model, confined concrete, FRP composites, Poisson's ratio, stress-strain response

1. 서 론

콘크리트 기둥의 강도 및 변형 능력을 향상시키기 위하여 FRP (fiber reinforced polymers) 합성재료로 콘크리트 외부를 감싸서 구속하는 기술은 이미 많은 건설 기술자들의 주목을 받고 있다. 최근에 발생한 일련의 지진은 이전의 부적절한 내진 기준에 의하여 설계된 기둥에서 보강의 필요성을 강조하였으며, 특히 횡보강이 부족함을 지적하고 있다. 현재까지는 주로 구조용 강재재킷 등에 의하여 콘크리트를 구속하는 방법을 사용하여 왔는데, 강재재킷은 여러 장점 이외에 등방성 재료 특성으로 인하여 축방향 거동과 횡방향 거동을 분리할 수 없다는 점, 초기하중 단계에서 콘크리트 보다 큰 포아송비를 나타내므로 분리 내지는 구속 기구가 지연되어 발동한다는 점, 큰 강성으로 인하여 일부하중을 직접 지지하다 보니 좌굴의 가능성이 높다는 점, 협소한 장소에서는 시공성이 크게 저하되는 점 등을 들어 FRP와 같은 경량 신재

료를 사용하는 대안을 모색하기에 이르렀다¹⁻⁴⁾.

FRP는 높은 강도-중량 비, 내부식성 및 전자기적 중립성 등과 같은 재료의 고유 특성 이외에 구조적으로 fiber 배치에 따라 이방성 거동을 나타내므로 최적의 구속기구를 유도할 수 있고 포아송비가 콘크리트와 유사하여 콘크리트를 구속하는데 보다 효율적이며 또한 저렴하고 신속한 작업이 가능하여 시공성이 매우 우수하다는 점을 들 수 있다¹⁻³⁾. 하지만 강재재킷과는 달리 항복거동 없이 초기 하중 영역에서 파괴 시점까지 연속적으로 증가하는 탄성 거동의 구속 기구를 발동하고, 매 단계마다 발동하는 구속력의 크기는 콘크리트의 수평 방향 팽창 거동에 좌우되며, 이는 또 다시 구속 장치에 의한 압력의 영향을 받는다. 따라서 이러한 거동을 해석적으로 정확히 묘사하기 위하여서는 기존 모델과는 달리 점증적으로 (incrementally) 나타나는 구속력을 매 단계마다 고려하여야 하는데, 이러한 구속 콘크리트의 해석 모델을 개발하는데 있어서 가장 큰 장애 요인은 횡방향으로 팽창하는 콘크리트와 이를 구속하는 매체의 상호 작용을 신뢰성 있게 포함하여 묘사할 수 있는 단순식이 별로 존재하지 않는다는 점이다.

*Corresponding author E-mail : gaza@gwangju.ac.kr
Received September 27, 2007, Accepted October 30, 2007
©2007 by Korea Concrete Institute

최근 Pantazopoulou¹⁻³⁾ 등은 미세 구조 거동에 입각하여 구속된 콘크리트의 횡방향 및 축방향 변형률 관계를 합리적으로 묘사할 수 있는 단순식을 제안한 바 있으며, 이러한 모델은 3축 등가압축력 (hydrostatic pressure)을 지지하는 일련의 고강도콘크리트 실린더에서 물-시멘트 비, 구속력의 크기 및 하중 경로 등을 주요 변수로 한 실험 결과로부터 유도되었다. 미세균열에 의한 부피 팽창 거동이 콘크리트 강성의 약화 및 강도 저하를 설명할 수 있는 핵심 변수임을 확인하고 있다.

본 연구는 이러한 개념에 착안하여 축하중 작용 시 FRP 합성재료에 의하여 구속된 콘크리트의 전체 응력-변형률 관계를 합리적으로 예측할 수 있는 해석 모델을 개발하고, 이의 검증을 위하여 실험으로부터 관측된 다양한 응답을 예측한다⁴⁾. 한편, 전체 응답을 위하여 기존에 Samaan⁵⁾, Fam⁶⁾, Samdani⁷⁾ 등이 제시한 다양한 모델을 비교·검토하였으며, 또한 이들의 핵심 사항인 부피 팽창 혹은 포아송비 변화를 고려하는 방법에 대하여 분석·토의하였다. 제시된 해석 모델은 상기 모델과는 달리 기계적 거동에 따라 콘크리트의 부피 팽창을 산정하고, 이에 따라 변화하는 구속응력을 고려한다. 점증 계산에 의하여 3축 응력하의 원형 단면 콘크리트의 축방향 응력-축 혹은 횡방향 변형률 응답을 예측한다.

2. 기존 모델

2.1 관측된 거동 및 기존 모델

FRP로 구속된 원형 단면 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 일반적으로 2선 형태로 응력 및 변형률의 관계가 서로 선형적으로 비례, 증가하는 양상을 나타낸다. 수동형 구속 (passive confinement)은 구속 매체의 성능에 따라 콘크리트가 팽창하고, 또한 이에 따라 점증적으로 그 크기가 증가한다. 따라서 기존의 일정한 구속력에 근거한 해석 모델은 파단 시까지 탄성 거동을 나타내며 변화하는 구속력을 유발하는 FRP의 구속 거동을 실질적으로 묘사할 수 없다.

이러한 구조적 특성을 묘사하기 위하여 Samaan⁵⁾ 등은 4개 변수에 근거한 Richard-Abbott⁸⁾ 식을 채택하여 FRP로 구속된 콘크리트의 축응력-축방향 혹은 횡방향 변형률 응답을 예측할 수 있는 일련의 관계식을 제시하였다. 실험으로부터 FRP로 구속된 콘크리트의 점진 팽창비 혹은 팽창변화율 (dilation rate (μ) = $\Delta\epsilon_{lat}/\Delta\epsilon_1$ = 후프 방향 변형률 변화량 / 축방향 변형률 변화량) 응답을 연속적으로 측정하였지만, 최종적으로 일정한 값에 수렴한다는 사실에 근거하여 최종 단계에 해당하는 팽창변화율 값만을 2선식에 채택하여 점증 계산 논리의 사용을 배제하였다. 또한 전체 응력-변형률곡선을 정의하는 여러 변수의 값은 실험 결과로부터 유도하였다.

한편, Fam⁶⁾ 등은 힘의 평형 및 변형률 적합 조건으로부터 구속력에 대한 관계식을 유도하고 Mander⁹⁾의 응력

-변형률 관계식을 사용하여 구속된 콘크리트의 전체 응답을 예측하였다. FRP에 대하여서는 2축 응력 파괴 기준을 적용하였으며, 또한 하중 단계마다 변화하는 콘크리트의 탄성계수 및 포아송비 관계식을 고려하였다. 콘크리트 탄성계수는 이전 단계에서 산정한 구속 콘크리트의 응력 및 변형률로 표시하며, 포아송비는 이전 단계의 구속응력 및 최대 변형률로부터 산정하게 되는데, 이러한 해석 논리상 이들의 방법은 점증 계산 논리를 요구한다.

Samdani⁷⁾ 등은 축방향 변형률을 변화시키면서 이에 해당하는 횡방향 변형률을 산정하고, 이를 다시 Mander 식에 대입하여 구속된 콘크리트의 전체 응력-변형률 관계를 산정하는 고전적 점증 계산법을 채택하고 있다. 횡방향 변형률을 산정하기 위하여 팽창변화를 대신에 포아송 혹은 팽창비 (dilation ratio (ν) = $\epsilon_{lat}/\epsilon_1$ = 후프방향 변형률 / 길이방향 변형률)를 축방향 변형률의 함수로 표시하고, 또한 최대 팽창비를 수평구속계수 (confinement modulus)의 함수로 표시하여 제한하였다. 이외에도 최대하중 도달 이후 섬유 (fiber) 가닥의 단계적 파단에 따른 약화 거동 (softening)을 묘사하기 위하여 유효한 FRP layer 수를 조정할 수 있는 관계식을 제시하였다.

2.2 분석 및 평가

이상에서 본 바와 같이 FRP로 구속된 콘크리트의 전체 응답을 예측하기 위하여 제시된 상기 모델은 하중 단계마다 변화하는 구속력을 실제적으로 묘사하는 것이 핵심 사항이다. Samaan의 경우는 FRP로 구속된 콘크리트의 실험으로부터 관측된 전체 팽창변화율 응답을 고려하기보다는 최종 값만을 채택하여 2선식에 고려하였으며, Fam 및 Samdani 등은 FRP가 아닌 다른 장치에 의하여 구속된 콘크리트의 실험 결과로부터 유도된 포아송비 관련식을 이용하여 매 단계마다 할선 팽창비를 산정하고, 또한 관련 최대 팽창비 값으로 전체 응답을 제한하고 있다. 따라서 하중 단계에 따른 팽창변화율 혹은 팽창비 및 최대 팽창비를 얼마나 정확히 결정하느냐에 따라 해석의 정확도가 크게 좌우되는데, 이들은 일관되게 실험으로부터 유도된 관계식을 사용하고 있으며, 최대 팽창비를 대략 0.5 정도로 제한하고 있다. 하지만, 콘크리트의 비균질 특성상 전 하중 구간에 걸친 팽창비 및 최대 팽창비를 신뢰성 있게 산정하는 일은 쉽지 않으며, 또한 기존 구속 콘크리트에 대한 실험 결과에 의하면 최대 하중 부근에서 0.5보다 큰 팽창비를 나타내는 것을 종종 관측할 수 있으므로, 아직도 이들의 접근 방법은 보다 향상시킬 필요가 있다. 이에 본 연구는 실험적으로 유도된 팽창비 관계식을 사용하지 않고, 대신에 콘크리트 기본 재료 특성 및 역학 모델에 근거하여 이들의 거동을 포함하는 보다 합리적인 방법으로 구속 콘크리트의 응력-변형률 응답을 산정한다.

3. 제시 모델

Pantazopoulou¹⁾는 3축 응력을 지지하는 고강도콘크리트의 거동에 대하여, 점증적으로 발생하는 내부 균열에 의한 부피 팽창은 재료의 미세 구조에서 손상 정도 (damage)를 나타낼 수 있는 중요한 척도가 되며, 이를 이용하여 손상 정도에 따라 변화하는 콘크리트의 지지 능력을 일관되게 산정할 수 있다고 보고하고 있다. 따라서 구속된 콘크리트의 경우, 경계조건으로부터 주어지는 구속 정도 및 부피 팽창 변형률 (ϵ_v)만 알 수 있다면 어떠한 응력 조건 하에서도 내부 응력 상태, 잔여 강성 및 강도를 산정할 수 있으며, 또한 콘크리트는 재료 특성상 내부에 공극 및 수분이 항상 존재하므로 구속 응력이 작용할 경우 이러한 공극을 다 채우고 난 뒤 실질적으로 구속을 유발할 수 있는 변형률을 발동하며, 이를 위하여 공극 채움 변형률 (compact strain)을 별도로 고려하여 3축 압축응력 하의 시험체에서 확인할 수 있는 소성흐름 (plastic flow)과 같은 연성 거동을 설명하였다. 본 연구는 이러한 배경 이론을 근거로 FRP로 구속된 콘크리트의 응답을 예측할 수 있는 일련의 관계식 및 절차를 개발하였다.

내부 미세균열에 의하여 발생하는 손상의 정도를 하중을 지지하는 면의 면적 변형률 ($\epsilon_A = 2\epsilon_{lat}$)로 표시할 때, 축방향 변형률 (ϵ_1 , 압축 +)에 대한 축응력 (σ_1)은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_1 = E_1 \epsilon_1 = \frac{E_0 \epsilon_1}{1 + \frac{\epsilon_A}{\beta}}$$

$$E_1 = \frac{E_0}{1 + \frac{\epsilon_A}{\beta}}, \quad \beta = -\frac{V_p^3 V_c}{3} \quad (1)$$

$$v_c = 3.22 \frac{w_0 - 0.3064 \alpha_\infty}{1 + 3.22 w_0}, \quad \alpha_\infty = \frac{1.031 w_0}{0.194 + w_0} \quad (2)$$

여기서, E_0 = 초기탄성계수, β = 단위면적당 공극, V_p = 페이스트의 부피비 (volume fraction), v_c = 페이스트의 자연 모세관 공극 (natural capillary porosity), w_0 = 물-시멘트 비, α_∞ 는 최종 수화 정도이다.

FRP로 구속된 콘크리트의 경우 Fig. 1과 같이 동일한 물리적, 기하학적 조건 (D, H) 및 단면 손상 특성 (ϵ_A)을 보유하는 비구속된 등가 시험체를 고려할 수 있는데, 구속된 콘크리트와 비구속된 등가 콘크리트 시험체를 비교하여 구속력 발동 시 구속 매체가 흡수하는 일의 양은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_{lat} E_{fr} \cdot 2\pi r_{fr} H \cdot \Delta \epsilon_{lat} R = (\sigma_1 - \sigma_{u1}) \Delta e_1 \pi R^2 H \quad (3)$$

$$\epsilon_1 = e_1 + e_1^p, \quad \epsilon_{lat} = -v \epsilon_1 - \left(\frac{1-2\nu}{2} \right) \epsilon_1^* \left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon_{lim}}{\epsilon_1^* - \epsilon_{lim}} \right)^c,$$

$$\epsilon_1^* = 0.9 \epsilon'_{c0} \quad (4)$$

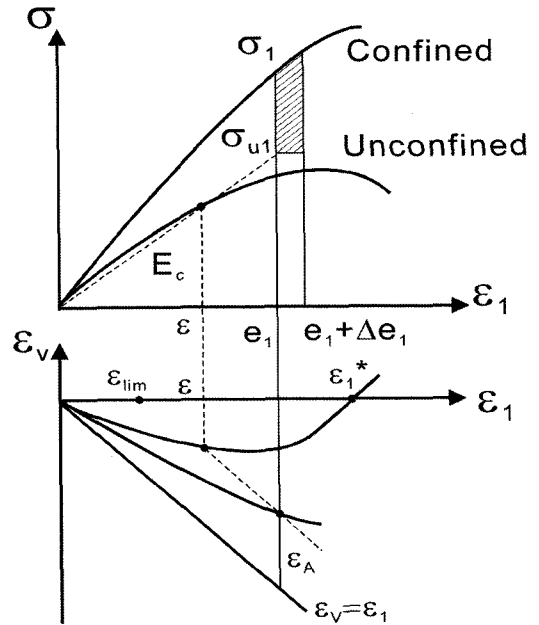


Fig. 1 Axial stress vs. axial strain and volumetric strain vs. axial strain for confined and unconfined concrete

여기서, ϵ_{lat} , $\Delta \epsilon_{lat}$ = 횡방향 변형률 및 증분, e_1 , Δe_1 = 응력에 의하여 유발된 축방향 변형률 및 증분, e_1^p = 축방향 공극 채움 변형률, ϵ_{lim} = 탄성거동 경계점에 해당하는 축방향 변형률 ($-\epsilon_{cr} / \nu$ = 균열변형률/포아송비), ϵ_1^* = 부피변형률이 0인 점에 일치하는 축방향 변형률, ϵ'_{c0} = 비구속 콘크리트의 최대 축방향 변형률, σ_1 , σ_{u1} = 구속 및 구속되지 않은 콘크리트의 축방향 응력, c = 재료 관련 상수이며, $< >$ 는 내부 수식이 -값 일 경우 0으로 간주한다. $D(2R)$, H = 원형 실린더의 직경 및 높이이며, t_{fr} , E_{fr} = FRP의 두께 및 탄성계수이다

식 (1), (2), (3) 및 (4)를 사용하여 전체 응답을 산정하기 위한 해석 논리는 1) 초기 증분량 Δe_1 가정, 2) $\Delta \epsilon_{lat}$ 산정, 3) σ_{u1} 산정, 4) 연속 증분량 Δe_1 가정, 5) 에너지 식으로부터 $\Delta \epsilon_{lat}$ 산정, 6) $\epsilon_{lat} + \Delta \epsilon_{lat}$ 산정, 7) σ_1 산정 등이다.

4. 실험 결과 예측 및 토의

본 연구의 이론 부분과 병행하여 수행한 일련의 FRP로 구속된 원형 단주 실험 (150 mm × 300 mm)의 주요 변수는 i) fiber 량 및 방향, ii) 단부 하중조건에 따른 wrap 혹은 tube 형식의 구속 형태 (CW 및 CF 그룹), iii) 이음부 여부에 따른 연속 혹은 불연속 구속형태 (CP 그룹) 등이다. 사용된 콘크리트의 설계기준강도는 f_{ck} 혹은 $f_{c0} = 21$ MPa이며, FRP 재킷을 구성하는 섬유 양 및 방향은 구입 가능한 1-방향 (수평 혹은 수직방향, 255 gf/m²) 및 2-방향 (수평 및 수직방향, 580 gf/m²) 유리섬유 메쉬를 다양하게 조합하여 그룹별로 6종류, 종류 당 2개씩의 동일 시험체를 고려하여 총 3그룹, 36개의 시험체를 결정하였다. 단조 가력 하중 하에서 실험을 수행하였으며, 실험에 관한 보다 자세한 정보는 본 연구의 실험 부분을

기술한 참고문헌 [4]와 같다.

상기와 같이 FRP로 구속된 시험체의 콘크리트 응력-변형률 응답을 예측하기 위하여 i) Samaan⁵⁾이 제안한 2선식 모델, ii) Samaan 및 Mirmiran^{5,11)}이 제시하는 팽창변화를 관련식과 식 (1) 및 (2)를 사용한 모델, iii) 본 연구에서 제안하는 모델 등을 사용하여 해석을 수행하였다.

해석모델 ii)에서 Samaan 및 Mirmiran 등이 제시하는 최대 (μ_{max}) 및 최종 수렴 (μ_{ult}) 팽창변화율은 식 (5)~(6)과 같다. ()안의 값은 Mirmiran이 제시하는 최대 및 최종 수렴 팽창변화율 값으로서 Samaan이 제시한 값보다 각각 60% 및 36% 정도 크다. 하지만 두 경우 모든 관련식들은 동일한 실험 결과로부터 유도된 것으로 판단되나, 최종적으로 작은 값을 제시하게 된 이유에 대하여 관련 문헌은 언급하고 있지 않다. 다만 작은 값을 사용하는 경우 실험 결과에 대한 fitting 관련 상관계수가 향상되었음을 확인할 수 있었다. 한편 Mirmiran 등은 실험으로부터 관측된 전체 팽창변화율 응답에 대하여 식 (7)과 같이 분수로 표현된 곡선식을 제시하고 있는데, 이를 Pantazopoulou 등이 제시하는 기본식에 보다 간편하게 사용하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 선형화하였고, 이에 대한 관련식은 식 (8), (9) 및 (10)과 같다. 최대 팽창변화율에 일치하는 축방향 변형률은 FRP의 구속 정도에 따라 다소 상이하나 여기서는 0.002로 가정하였다.

$$\mu_{max} = -0.977(or-0.7611) \ln\left(\frac{2E_{fr}t_{fr}}{Df_{c0}}\right) + 3.938(or + 4.01667) \quad (5)$$

$$\mu_{ult} = -0.187(or-0.375) \ln\left(\frac{2E_{fr}t_{fr}}{Df_{c0}}\right) + 0.881(or + 0.8646) \quad (6)$$

$$\mu = \frac{v+ax+bx^2}{1+cx+dx^2}, \quad x = \varepsilon_1/\varepsilon_{c0}, \quad a = vc, \quad b = \mu_{ult}d, \quad c = -2 \text{ and } d = (\mu_{max}-v)/(\mu_{max}-\mu_{ult}) \quad (7)$$

$$\varepsilon_1 \leq 0.002, \quad \mu = v + \frac{(\mu_{max}-v)}{0.002} \varepsilon_1 \quad (8)$$

$$0.002 \leq \varepsilon_1 \leq 0.004, \quad \mu = \mu_{max} - \frac{(\mu_{max}-\mu_{ult})}{0.002} (\varepsilon_1 - 0.002) \quad (9)$$

$$\varepsilon_1 \geq 0.004, \quad \mu = \mu_{ult} \quad (10)$$

한편, 본 연구에서 제안하는 해석 모델 iii)은 포아송비를 재료의 고유 특성치로 간주하여 전 하중 구간에 일정한 단일 값을 사용하고 있으며, FRP가 파단할 때를 시험체가 파괴하는 시점으로 간주하고 있다¹⁰⁾. 제안된 해석 모델은 축방향 응력-축방향 혹은 횡방향 변형률을 전술한 역학 모델로부터 유도된 관련식에 따라 자연스럽게 산정한다. 측정과 관련된 실험실 여건상 CF그룹 시험체

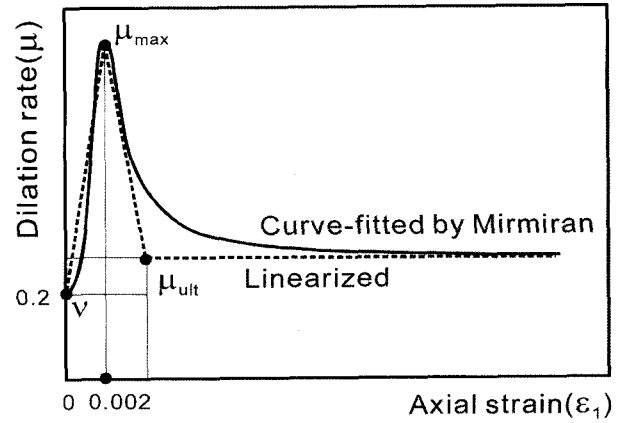


Fig. 2 Curve-fitted and linearized dilation rates to axial strain

에 대하여 보다 완전한 전체 응답이 측정되었으므로, 여기서는 CF그룹에 대한 예측 결과만을 기술한다.

3종류의 해석 모델을 사용하여 시험체 CF22-1의 축방향 응력-축방향 혹은 횡방향 변형률, 부피 팽창에 대한 응답을 산정한 결과는 Figs. 3 및 4와 같다. 실험 결과는 LVDT에 의하여 측정된 평균 축방향 변형률 및 변형 계이기에 의하여 측정된 국부 축방향 혹은 횡방향 변형률을 포함하고 있다.

횡방향 변형률 산정을 위한 재료상수 $c=1.1$ 및 $\beta=-0.0024$ 를 포함하는 제안 모델과 Samaan의 2선식 모델은 만족할 만한 범위 내에서 관측된 거동을 포착하고 있으며, 대체적으로 응력-변형률 관계는 실험 결과와 유사하게 예측하고 있는 반면에, 부피 팽창 거동은 아직도 상당한 차이가 있음을 알 수 있다 (Fig. 3). 여기서 $\beta=-0.0024$ 는 사용된 재료의 특성으로부터 산정된 값이다.

Samaan 모델에서 부피 팽창은 초기 및 후기 구간에서 각각 일정한 포아송비 및 최종 수렴 팽창변화율 값만을 채택하여 고려하고 있는 반면에, 제안된 모델은 매 단계마다 팽창하는 콘크리트와 구속 장치 사이의 에너지 평형 조건에 의하여 부피 팽창 거동을 결정한다. 즉 Mirmiran은 실험으로부터 부피 팽창에 대한 전체 응답을 측정하고 또한 이를 수학적으로 표현하는 관련식을 제시하고서도 실제로 구속된 콘크리트의 응력-변형률을 예측하는 데는 단지 초기 포아송비와 최종 수렴 팽창변화율만을 고려하였으므로, 실제적인 부피 팽창 거동을 묘사하는 데는 한계가 있다. 이러한 이유에서 Samaan의 2선식에 의하여 예측된 축응력-횡방향 변형률 관계는 제안된 모델에 비하여 실험 결과와 보다 큰 차이를 나타내고 있다.

한편, Fig. 4는 Mirmiran이 제시한 팽창변화율 곡선식을 식 (1) 및 (2)와 연계하여 예측한 응답을 나타낸다. Samaan 해석과는 달리 전 하중 구간에 팽창변화율의 변화를 고려하고 있다. Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 해석에 고려된 부피 팽창 거동은 어느 정도 하중 크기에서 FRP의 구속 작용이 발동함에 따라 부피가 축소하는 방향으로 역전하게 되는데, 이러한 이유로 Fig. 4(a)에서도 하중 지지 능력이 감소하다가 다시 크게 증가하는 형태를 취하고 있다. 실험으로부터 관측된 부피 팽창 관계

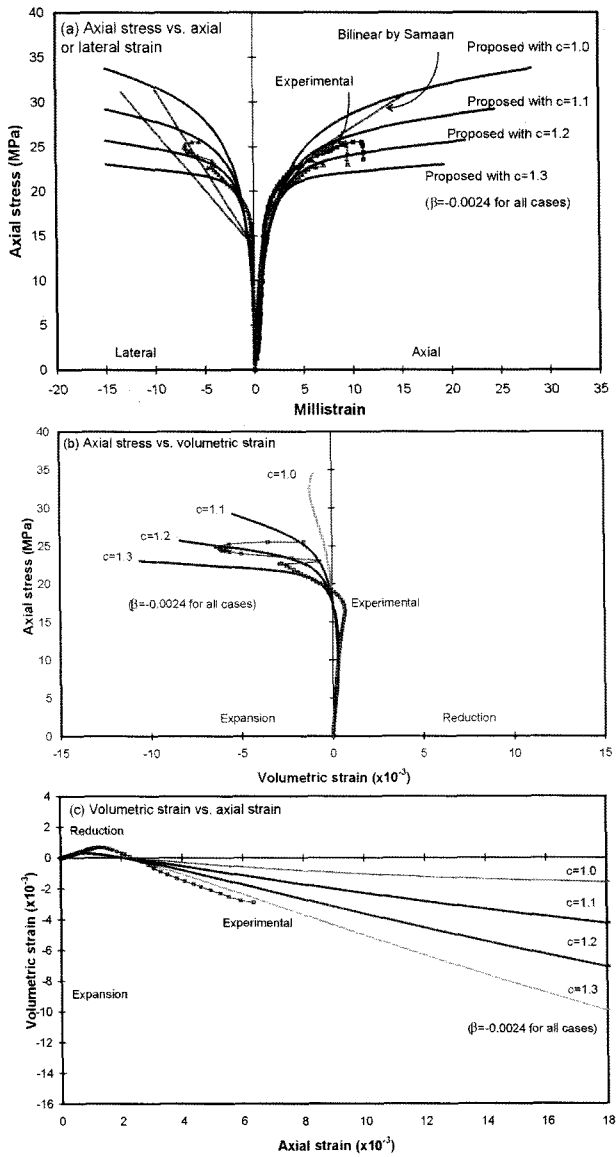


Fig. 3 Predicted responses for CF22-1 by Methods i) and iii)

를 해석 모델에 포함하여 충분히 묘사하였음에도 불구하고, 이러한 형태의 응답은 실험 결과와는 크게 상이함을 알 수 있다. 이러한 점에서 전체 응력-변형률 응답은 개개 구성 요소의 거동보다는 선택된 기본 곡선이 보다 지배적인 것으로 판단된다.

2 종류의 최대 및 최종 수렴 부피팽창률 값을 각각 사용하여 예측할 경우, 하중 지지 능력에 큰 차이를 나타내고 있으며, 또한 선형화된 값을 사용하는 경우 본래의 곡선식을 사용한 경우와 매우 유사한 응답을 예측하고 있다. 해석에 고려된 곡선 및 선형 팽창변화율의 변화는 Fig. 5와 같으며, 팽창변화율을 보다 간편하게 선형으로 표시할 수 있게 됨에 따라 향후 유사 관련식 개발이 용이할 것으로 판단된다.

β 및 c 값에 따른 제안모델 iii)의 특성을 알아보기 위하여 다양한 β 및 c 값에 대하여 예측한 결과는 Fig. 6과 같다. 동일한 c 값에 β 를 감소시키는 경우 하중 지지 능력이 향상됨을 알 수 있는데, 이는 β 값이 작을수록 페이스트에 자연공극이 많이 포함되었음을 의미하며, 이

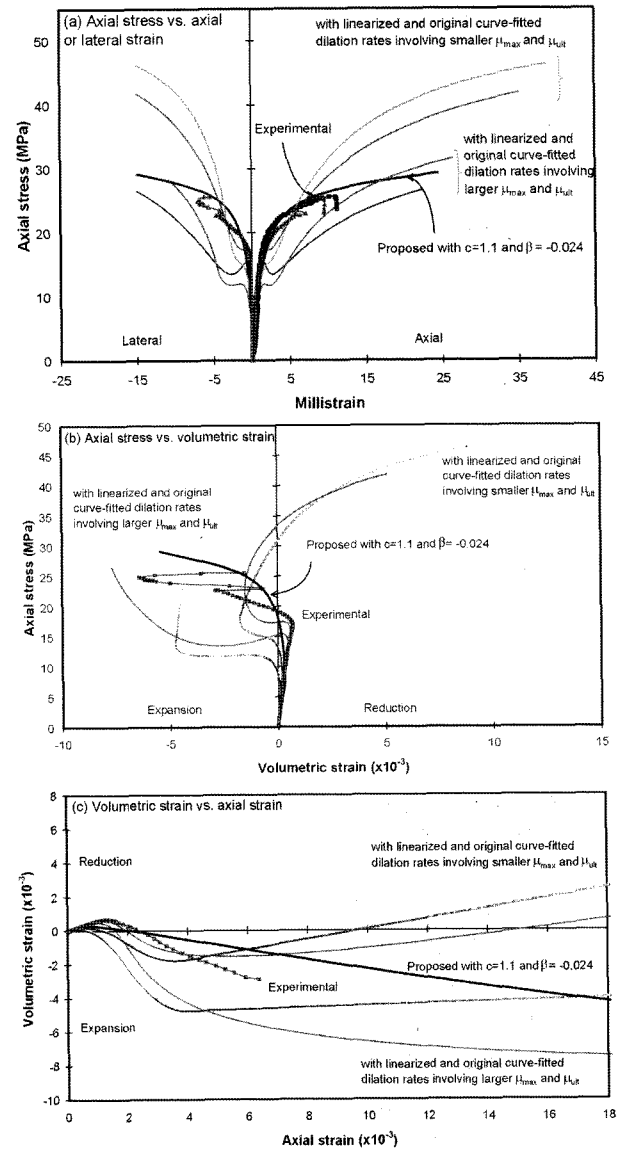


Fig. 4 Predicted responses for CF22-1 by Method ii)

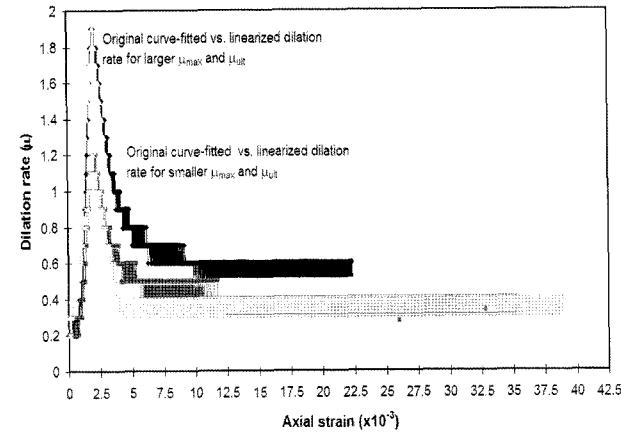


Fig. 5 Curve-fitted and linearized dilation rates used in the analysis

는 또 다시 부피 팽창과 관련된 탄성계수 (E_1) 값을 크게 결정한다. 이에 대하여 Fig. 6(b)는 공극이 많을수록 공극을 다 채우고 난 뒤에 부피 팽창 거동이 발동하므로, 이러한 지연된 거동이 하중 증가의 주요 원인임을

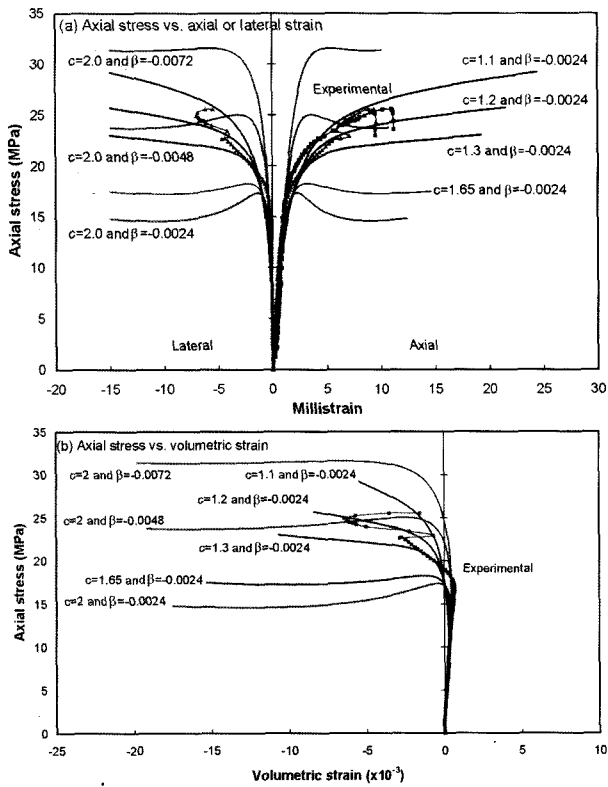


Fig. 6 Effects of c and β values on predictions based on the proposed method

설명하고 있다. 동일한 β 값에 대하여 c 값을 변화시키는 경우 응답 곡선 형태에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. c 값이 크면 클수록 고차 곡선에 가까우며 후반부 응답이 일정하거나 약화하는 거동을 나타내므로, 완전 소성 거동을 포함하는 재료를 묘사하기에 보다 적합한 것으로 판단된다.

이상과 같이 실험 결과와의 조정 단계 (calibration)를 거쳐 최종적으로 본 연구에서는 $c = 1.1$ 을 제안하고 있으며, 또한 2축 하중하의 FRP 응력 상태를 간접적으로 고려하기 위하여 파단시의 FRP 변형률을 $0.7\varepsilon_{fru}$ 로 제한할

때 실험 결과에 보다 일치하는 경향을 획득하였다. 제안된 모델을 사용하여 전체 CF그룹 시험체에 대한 예측 결과 및 실험치와의 비교는 Table 1과 같다. 최대변형률 (ε'_{cc}) 및 강도 (f_{cc})에 대한 실험치/예측치의 평균값은 각각 0.955 및 1.172이며, 변동계수는 각각 0.277 및 0.148이다. 또한, 파괴 시 관측된 횡방향 변형률/예측치의 평균값 및 변동계수는 각각 1.019 및 0.263이고, 최대하중에 도달할 때 이에 해당하는 팽창비는 대략 0.54~0.66 정도로 예측되었다. 한편, Samaan의 2선식 모델에 의하여 예측한 결과는 최대변형률 및 강도에 대하여 실험치/예측치의 평균값이 각각 0.876 및 0.948이며, 변동계수는 각각 0.213 및 0.094이다. 또한, 파괴 시 관측된 횡방향 변형률/예측치의 평균값 및 변동계수는 각각 1.913 및 0.730이고, 최대하중에 도달할 때 예측된 팽창비는 대략 0.10~0.63 정도이다. 일반적으로 Samaan 모델에 의한 예측은 제안된 모델 보다 비안전측의 결과를 나타내고 있으며, 예상한 바와 같이 횡방향 변형률 예측에는 큰 오차 및 산란을 포함하고 있다.

대표적인 시험체에 대하여 제안된 모델 및 Samaan 2선식 모델에 의하여 예측한 전체 응력-변형률 관계는 Fig. 7과 같다.

5. 결 론

FRP 합성재료에 의하여 구축된 3축 응력을 지지하는 콘크리트의 응답을 산정하기 위하여 본 연구에서 제안한 모델과 기존의 2선식 등의 관련 모델을 사용하여 실험 결과를 예측한 결과 다음과 같은 결론을 유도할 수 있었다.

- 1) 본 연구의 제안 모델은 부피팽창변형률을 주요 변수로 하고, 이를 실험치보다는 역학적 거동 및 에

Table 1 Comparison between observed and predicted results by the proposed method

Specimens	Observed			Predicted ($c = 1.1, \beta = -0.0024$)				Observed / Predicted		
	$\varepsilon'_{cc} (\times 10^{-3})$	f_{cc}	$\varepsilon_{lat} (\times 10^{-3})$	$0.7\varepsilon_{fru} (\%)$	$\varepsilon'_{cc} (\times 10^{-3})$	f_{cc}	$\varepsilon_{lat} (\times 10^{-3})$	ε'_{cc}	f_{cc}	ε_{lat}
CF22-1	11.005	25.6	7.003	1.05	16.980	28.0	10.501	0.648	0.914	0.667
CF22-2	10.207	26.5	7.306	0.98	15.110	26.1	9.967	0.676	1.015	0.733
CF32-1	12.833	28.0	8.794	1.12	18.640	29.0	11.205	0.688	0.966	0.785
CF32-2	14.790	31.8	12.127	1.12	18.610	29.0	11.200	0.795	1.098	1.083
CF52-1	21.159	40.3	8.700	0.90	15.920	30.1	8.997	1.329	1.338	0.967
CF52-2	23.139	41.5	9.133	0.91	15.950	29.9	9.104	1.451	1.389	1.003
CF72-1	20.205	45.1	15.138	1.26	23.290	32.6	12.604	0.868	1.385	1.201
CF72-2	25.980	47.0	16.309	1.26	23.630	33.0	12.604	1.099	1.423	1.294
CF31-1	18.382	32.0	17.343	1.12	18.680	29.1	11.206	0.984	1.101	1.548
CF31-2	18.512	31.9	11.439	0.98	16.240	28.5	9.808	1.140	1.120	1.166
CF43-1	12.470	34.0	6.802	0.98	16.820	29.5	9.810	0.741	1.153	0.693
CF43-2	15.070	33.7	9.118	0.84	14.410	29.9	8.407	1.046	1.164	1.085
$V_p = 0.297, w_0 = 52.6\%, \alpha_\infty = 0.753$ and $v_c = 0.728$							Mean	0.955	1.172	1.019
							COV	0.277	0.148	0.263

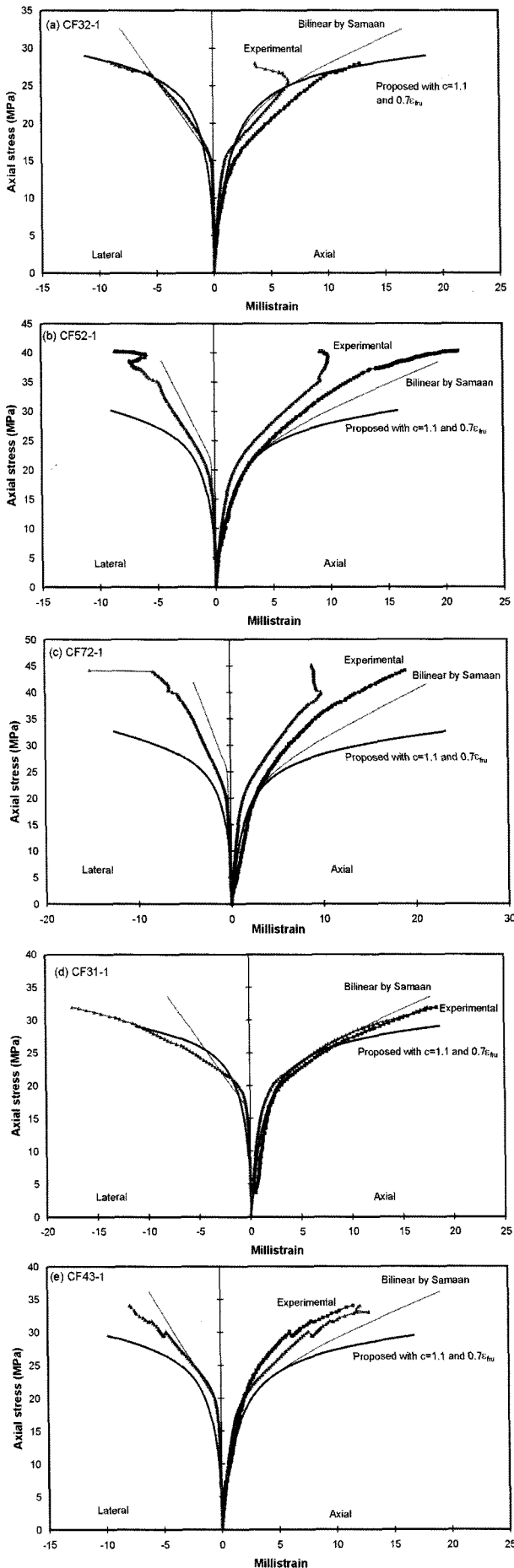


Fig. 7 Predicted axial stress vs. axial or lateral strain responses for selected test specimens

너지 평형식에 의하여 자연스럽게 산정한다. 횡방향 변형을 산정과 관련된 재료상수 $c=1.1$ 및 FRP의 유효과단변형률 $0.7\epsilon_{fu}$ 를 고려할 때 실험 결과와 매우 유사한 거동을 예측하였다. 해석 결과에 의하면 최대하중에 도달할 때 팽창비는 대략 0.54~0.66 정도를 나타내었으며, β 가 증가함에 따라 공극을 다 채우고 난 뒤 실질적인 부피 팽창 거동이 발생되므로 하중지지능력이 향상되었고, c 값을 증가시킬수록 응답곡선은 고차에 가까우며 후반부 응답이 일정하거나 약화하는 거동을 나타내므로, 완전 소성 거동을 포함하는 재료를 묘사하기에 보다 적합한 것으로 판단된다.

- 2) Samaan 2선식 모델은 축방향 응력-축방향 변형을 응답은 만족스럽게 예측하고 있으나, 횡방향 변형을 응답은 매우 큰 오차 및 산란된 결과를 포함하고 있다. 이는 매 단계마다 변화하는 팽창비 혹은 팽창변화율을 고려하기 보다는 단지 초기 포아송비와 최종 수렴 팽창변화율만을 고려하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 Samann의 모델은 개개 성분의 거동을 합성하여 전체 응답을 예측하기 보다는 2선식에 실험 결과를 fitting하였으므로 개개 성분의 거동을 묘사하고 이의 물리적 의미를 설명하는 데는 한계가 있다.
- 3) 팽창변화율에 대하여 Mirmiran이 제시한 곡선식을 선형화하였을 경우, 원래의 곡선식을 사용한 경우와 매우 유사한 응답을 획득하였다. 최대 팽창변화율에 일치하는 축방향 변형률은 FRP의 구속 정도에 따라 다르나 여기서는 0.002를 사용하였다. 팽창변화율 응답을 보다 간편하게 선형으로 표시할 수 있게 됨에 따라 향후 유사 관련식 개발이 용이할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 정부 (교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구 (R05-2003-11885-0)의 일부이므로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Pantazopoulou, S. J., "Role of Expansion on Mechanical Behavior of Concrete", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.121, No.12, 1995, pp.1795~1805.
2. Pantazopoulou, S. J. and Imran, "Experimental Study of Plain Concrete under Triaxial Stress", *ACI Structural Journal*, Vol.93, No.6, 1996, pp.589~601.
3. Imran, I. and Pantazopoulou, S. J., "Plasticity Model for Concrete under Triaxial Compression", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.127, No.3, 2001, pp.281~290.
4. 조순호, "GFRP로 구속된 원형단면 콘크리트 단주의 강도 및 변형 능력", 콘크리트학회 논문집, 19권 1호, 2007,

- pp.121~130.
5. Samaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M., "Model of Concrete Confined by Fiber Composites", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.124, No.9, 1998, pp.1025~1031.
 6. Fam, A. Z. and Rizkalla, S. H., "Confinement Model for Axially Loaded Concrete Confined by Circular Fiber-Reinforced Polymer Tubes", *ACI Structural Journal*, Vol.98, No.4, 2001, pp.451~461.
 7. Samdani, S. and Sheikh, S. A., "Analytical Study of FRP-Confined Concrete Columns", *Proc. CONSEC 04-Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading*, Seoul Korea, 2005, pp.258~267.
 8. Richard, R. M. and Abbott, B. J., "Versatile Elastic-Plastic Stress-Strain Formula", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.101, No.4, 1975, pp.511~515.
 9. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.114, No.8, 1988, pp.1804~1826.
 10. di Prisco, M. and Mazars, J., "Discussion of Role of Expansion on Mechanical Behavior of Concrete by S. J. Pantazopoulou", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.123, No.4, 1997, pp.535~537.
 11. Mirmiran, A. and Shahawy, M., "Dilation Characteristics of Confined Concrete", *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, Vol.2, 1997, pp.237~249.

요 약 FRP 합성재료로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 응답을 합리적으로 예측할 수 있는 해석 모델이 제시되었다. 제안된 모델은 하중이 증가함에 따라 점진적으로 발생하는 미세균열에 의한 부피팽창이 미세 재료 구조의 손상을 나타내는 중요한 척도이며, 이에 손상 정도에 따라 하중 지지 능력을 일관되게 산정할 수 있다는 기본 개념에 근거한다. 이를 위하여 제안 모델은 면적 변형률 및 공극의 함수로 표시된 탄성계수, 팽창 콘크리트와 구속 매체의 상호작용을 나타내는 에너지 평형식, 변화하는 구속력 및 점증 계산 논리를 포함한다. 따라서 실험으로부터 유도된 팽창비 관계식으로부터 횡방향 혹은 부피팽창변형률을 산정하는 기존의 해석 모델과는 달리 역학적 거동 및 에너지 평형식으로부터 연속적으로 변화하는 횡방향 변형률을 산정한다. 구속된 콘크리트의 전체 응답을 예측할 수 있는 기존의 여러 해석 모델에 대하여 검토하였으며, 특히 부피 팽창을 고려하는 방법에 초점을 맞추어 토의하였다. 제안된 모델 및 기존 Samaan의 2선식 모델을 사용하여 실험 결과를 예측한 결과, 만족할 만한 범위 내에서 일치점을 나타냈으나, Samaan의 2선식 모델은 부피 팽창 거동을 위하여 단지 초기 포아송비와 최종 수렴 팽창변화율만을 고려하기 때문에 횡방향 변형률 응답을 예측하는 데는 한계가 있는 것으로 판단된다. 제안된 모델은 역학적 거동에 근거하여 다양한 관련 응답을 산정하므로 다른 분야에도 쉽게 적용할 수 있다.

핵심용어 : 해석 모델, 구속된 콘크리트, FRP 합성재료, 포아송비, 응력-변형률 응답