

전단변형 효과가 고려된 보-기둥 섬유유한요소를 이용한 철근콘크리트 보의 비탄성 거동특성 평가

천주현¹, 황철성^{2*}, 박광민³, 신현목⁴

Evaluation of Reinforced Concrete Beam's Inelastic Behavior Characteristics using Beam-column Fiber Finite Element considering Shear Deformation Effect

Ju-Hyun Cheon¹, Cheol-Seong Hwang^{2*}, Kwang-Min Park³, Hyun-Mock Shin⁴

Abstract: The purpose of this study is to provide a reasonable analytical method for the reinforced concrete beams which shows failure mode of shear and flexure-shear by proposing a modified formulation to consider the effect of shear deformation on the beam-column fiber element based on the flexibility method and a new constitutive law of inelastic shear response history for the section. A total of 6 specimens of reinforced concrete beams which is designed to cause shear failure before yielding longitudinal reinforcement to investigate the influence of the main experimental variables on the shear behavior characteristics and the analysis was performed by using a non-linear finite element analysis program (RCAHEST) applying the newly modified constitutive equation by the authors. The failure mode and the overall behavior characteristics until fracture are predicted appropriately for all specimens and the results are expected to be useful enough for the 3 - D analysis to carry out reliable results of large-scale and complicated structures in the future.

Keywords: Flexibility method, Beam-column fiber element, shear failure, Nonlinear finite element analysis, RCAHEST

1. 서 론

역사적 강진으로 인한 교량의 피해사례를 돌이켜보면 교량 구조물의 급격한 취성과파괴는 대부분 비탄성 영역에서 교각의 취약한 거동에 기인하고 있으며 그 주된 요인으로는 소성힌지 영역에서 불충분한 철근 상세로 인한 교각의 연성능력 부족, 전단 파괴 및 기둥 주철근의 정착파괴 등을 들 수 있다 (Cheon, J. H., 2013). 또한, 최근 지진기록에서 알 수 있는 바와 같이 합리적인 내진 설계기준 제정 이전에 설계 및 시공되어진 오래된 철근콘크리트 건물 및 철근콘크리트 교량 교각의 경우 대부분의 구조물 파괴는 부재의 전단저항력의 부족에 기인되어 있는 것으로 나타났다(Cheon, J. H., 2013). 단면 크기에 대한 높이 비(比) 즉, 형상비(a/d)가 작은 교각의 경우

전체변형 성분 중에 전단변형이 차지하는 비중이 상당히 커지게 되며 따라서 전단변형의 기술 여부는 매우 중요하다고 할 수 있다.

철근콘크리트 부재의 파괴시까지의 복잡한 비탄성 거동특성 분석을 위해 현재까지 많은 실험적 및 해석적 연구가 수행되어 왔으며 휨파괴 양상을 보이는 철근콘크리트 부재에 대해서는 지식기반이 거의 갖추어질 정도로 많은 연구가 이루어져 왔다. 하지만, 전단파괴 및 휨-전단파괴의 복합 파괴 양상을 보이는 경우에 대해서는 휨파괴의 경우에 비하여 상대적으로 실험적 및 이론적 어려움으로 인하여 그 비탄성 거동 특성을 완전히 이해할 만큼의 지식기반이 구축되어 있지 않은 실정이다(Cheon, J. H., 2013). 또한, 대부분의 실험들은 부재단위로 이루어지기 때문에 구조물 전체의 거동 특성을 파악하기 위해서는 전단변형 효과의 기술 및 파괴시까지의 신뢰도 높은 재료의 구성관계식 등을 통한 수치해석적 방안 마련이 필수적으로 수반되어야 한다.

수치해석적 방법을 통한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가를 위한 해석적 연구가 여러 선행연구자들에 의해 수행되어왔다. 해석에는 파이버 기법을 적용한 보-기둥 요소, 2차원 평면 응력 요소 및 3차원 솔리드요소 등 다양한 수치해석 기

¹정회원, (재)한국건설생활환경시험연구원 주임연구원

²정회원, 가천대학교 토목환경공학과 교수, 교신저자

³정회원, (재)한국건설생활환경시험연구원 주임연구원

⁴정회원, 성균관대학교 건설환경공학부 교수

*Corresponding author: cshwang@gachon.ac.kr

Department of Civil and Environment Engineering, Gachon University, Seong-Nam, Gyeonggi-do

•본 논문에 대한 토의를 2017년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

법을 적용하여 실험결과와 비교·분석을 통해 결과에 대한 검증을 수행하였으며 현재까지도 이에 대한 연구가 활발히 수행되어 오고 있다.

기존의 유연도법을 근거로 일축 응력-변형을 구성관계식에 바탕을 둔 재료모델로 구성되는 보-기둥 섬유요소는 철근 콘크리트 부재를 해석하기 위한 효율적인 해법이 될 수 있지만 단면의 전단변형 효과를 해석에 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다(Spacone et al., 1996; Nuenhofer et al., 1997; Lee, J. H., 2000). 이는 단면의 전단변형 효과를 고려하기 위한 새로운 요소정식화 방안과 함께 실제 철근콘크리트 부재의 이력 거동 특성을 일축 응력 상태의 이력 거동으로 묘사하기 위한 방안 마련에 많은 어려움이 있기 때문이며 이를 위한 다양한 접근 방법이 제시되어 왔다.

D'Ambrisi et al.(1999)은 단면 전단력-전단변형을 이력 거동에 단순화된 비탄성 구성관계의 수치모델을 제안하였으나 전단 파괴보다 휨 파괴가 먼저 일어나는 경우에만 적용될 수 한계점을 가지고 있다.

Spacone, E.(2000)은 단순화된 이중선형(Bi-Linear)의 단면 비탄성 전단응답 이력 구성관계식을 제안하여 적용하였으나 부재의 전단 파괴시의 강도 감소를 제대로 평가하지 못하는 단점이 있음을 확인하였고, 지진하중과 같은 반복 이력 하중이 재하되는 경우 보다 신뢰성 있는 구성관계식의 적용이 필요함을 밝히고 있다.

Marini et al.(2006)은 초기의 포물선 형태(Parabolic Branch)와 그 이후의 선형(Linear Branch)의 형상을 가지며 단면 최대 전단저항 강도 이후의 반복하중 동안 균열의 진전으로 인한 전단강도의 손상을 고려한 구성관계식을 제안·검증하였다.

국내의 경우 Cho, K. H.(2001)는 기존의 유연도법 섬유요소 모델(Taucer et al., 1991)에 Timoshenko 보 이론을 기반으로 전단변형의 영향을 고려할 수 있도록 정식화를 수정 및 확장한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 기존의 저자 등에 의해 수행된 유연도법에 근거한 보-기둥 섬유요소에 수치해석적 방법으로부터 전단 변형 효과를 고려할 수 있도록 수정된 정식화 방안과 함께 단면에 대한 비탄성 전단응답 이력 구성관계식을 새로이 제안함으로써 전단 및 휨-전단의 복합 파괴 양상을 나타내는 철근 콘크리트 부재에 대한 합리적인 해석적 방안을 제시하는 것을 목표로 한다.

이를 위하여 기존의 저자 등에 의해 개발된 비선형 유한요소 해석프로그램(RCAHEST)을 사용하였으며 여러 연구자들에 의해 수행된 다양한 파괴 양상을 갖는 철근콘크리트 부재에 적용하여 본 연구에서 새로이 제안한 해석기법과 해석모델의 적용성과 타당성을 검증하였다(Cheon, J. H., 2013).

2. 보-기둥 섬유요소 모델 정식화

2.1 유연도법에 근거한 보-기둥 요소 정식화

유연도법에 근거한 보-기둥 섬유요소 모델은 강도법에 비해 적은 수의 요소로 재료의 축방향 구성관계만을 사용하여 부재의 비탄성 거동을 기술한다. 또한 휨모멘트-축력의 상호작용을 합리적으로 고려할 수 있는 섬유요소모델의 장점을 그대로 유지하며 결합된 모델이다. 요소 정식화는 요소내에서 평형을 만족하는 내력의 분포함수를 표현하는 것으로부터 적분점에서 단면변형에 대응하는 요소형상함수를 선택하는 혼합법(Mixed Method)을 기초로 함으로써 요소에서 힘의 평형조건과 변형 적합조건을 항상 만족한다.

유연도법에 근거한 정식화를 위해 Fig. 1에서와 같이 강체 거동과 비틀림 자유도를 제외한 2개의 절점을 갖는 일반적인 보-기둥 요소에서의 요소력(Q)과 그에 대응되는 변위 벡터(q) 및 요소 단면에서 발생하는 단면력($D(x)$)과 그에 따른 변형벡터($d(x)$)를 식 (1)~(4)에 각각 나타내었다.

$$Q = \{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6\}^T \quad (1)$$

$$q = \{q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6\}^T \quad (2)$$

$$D(x) = \begin{Bmatrix} N(x) \\ M_y(x) \\ M_z(x) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} D_1(x) \\ D_2(x) \\ D_3(x) \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$d(x) = \begin{Bmatrix} \varepsilon(x) \\ \kappa_y(x) \\ \kappa_z(x) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} d_1(x) \\ d_2(x) \\ d_3(x) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

정식화 유도는 요소력과 그에 상응하는 요소변형과의 행렬 관계를 이끌어내기 위해 평형방정식의 적분형태와 단면력-

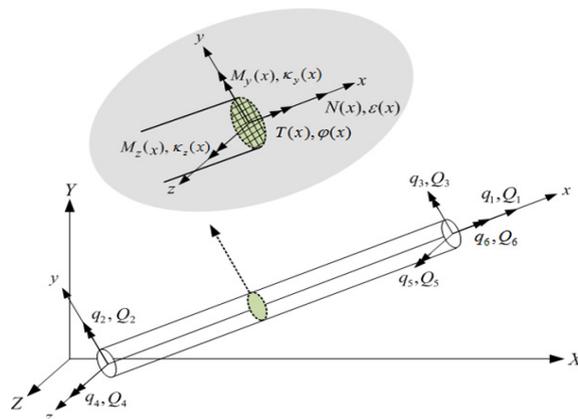


Fig. 1 Generalized forces and deformations at the element and section

단면변형 관계를 도입한다. 식 (5)에서와 같이 반복계산 과정에서 선형화된 요소력 - 요소변형의 관계를 얻기 위해 단면력 - 단면변형 관계를 현재 상태에 대해서 가상 힘의 원리로부터 선형화하며 허용 오차 내에서 비선형의 요소력-요소변형 관계가 수립할 때까지 반복 알고리즘이 사용된다.

단면 유연도 행렬을 요소에 대해 적분함으로써 요소 유연도 행렬은 식 (6)과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\int_0^L \delta D^T(x) [\Delta d^i(x) - f^{i-1}(x) \Delta D^i(x)] dx = 0 \quad (5)$$

$$F^{i-1} = \left[\int_0^L b^T(x) f^{i-1}(x) b(x) dx \right] \quad (6)$$

여기서, Δ 는 증분, F 는 요소 유연도 행렬, T 는 보간 함수 행렬에 따라 결정되는 행렬, i 는 Newton - Raphson 반복 단계 3차원 철근콘크리트 비선형 골조 구조물의 비선형 해석을 위해 각 단면은 Fig. 1에서와 같이 $n(x)$ 개의 파이버(Fiber)로 나누어지며 각 파이버의 변형을 변형전 평면인 단면은 변형 후에도 평면을 유지한다는 가정을 이용해서 계산한다. 요소의 축을 따라서 각각의 파이버 변형률($e(x)$)에 상응하는 응력($E(x)$)은 국부적인 거동을 나타내는 재료의 축방향 구성 모델로부터 구할 수 있으며 각각 식 (7)~(8)과 같다. 또한, 이 파이버들의 거동을 적분해서 각 요소의 전체 거동을 예측할 수 있으며 모든 요소의 거동을 조합해서 전체 구조물의 거동 특성을 알 수 있다.

$$e(x) = \begin{pmatrix} \varepsilon_1(x, y_1, z_1) \\ \vdots \\ \varepsilon_{i \text{ fib}}(x, y_{i \text{ fib}}, z_{i \text{ fib}}) \\ \vdots \\ \varepsilon_n(x, y_n, z_n) \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$E(x) = \begin{pmatrix} \sigma_1(x, y_1, z_1) \\ \vdots \\ \sigma_{i \text{ fib}}(x, y_{i \text{ fib}}, z_{i \text{ fib}}) \\ \vdots \\ \sigma_n(x, y_n, z_n) \end{pmatrix} \quad (8)$$

2.2 전단변형 효과를 고려한 보-기둥 요소 정식화

이 연구에서는 Spacone, E. (2000)의 연구 내용과는 달리 단면 자유도, 힘 보간 함수 및 단면 유연도 행렬의 확장과 같은 추가적인 정식화 과정 없이 기존의 유연도법에 근거한 보-기둥 섬유 요소 정식화를 그대로 유지하면서 간단한 수치해석적 반복 수립 계산 과정으로 전단변형 효과를 고려할 수 있는 방안을 제시한다.

우선, 기존의 요소 정식화 과정 중 j 로 표시한 요소 변형에 대한 요소 저항력을 결정하는 반복과정에서 첫 번째 반복은 $j = 1$ 에서 시작되며 $j = 0$ 으로 표현되는 요소의 초기 상태는 $(i-1)$ 번째 Newton - Raphson 반복과정에서 반복루프 j 의 수립된 상태에 대응한다. 첫 번째 반복 $j = 1$ 에서 대응되는 요소력 증분을 식 (9)~(10)와 같이 계산한다.

$$\Delta Q^{j=1} = [F^{j=0}]^{-1} \Delta Q^{j=1} \quad (9)$$

$$Q^{j=1} = Q^{j=0} + \Delta Q^{j=1} \quad (10)$$

전단변형 효과가 고려된 새로운 보-기둥 섬유 요소 정식화는 식 (6)과 같이 휨과 축력만에 의한 영향을 고려한 기존 5×5 의 요소 유연도 행렬 F 에 단면의 전단 유연도 항을 고려할 수 있도록 식 (11)에서와 같이 이 연구에서 새로이 제안한 요소 유연도 행렬 F_s 을 적용하는 것으로부터 시작된다.

식 (9)와 식 (10) 및 Fig. 2로부터 축방향 변형률 $Q_{s1}^{j=1}$ 을 제외한 요소 양단 모멘트로 인한 각 방향으로의 단면 전단력은 식 (12)~(13)과 같이 정의하며 계산된 단면 전단력은 요소길

$$F_s = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \times \left(1 + \frac{1}{20F_{22}G_zL}\right) & F_{13} \times \left(1 + \frac{1}{20F_{33}G_zL}\right) & F_{14} \times \left(1 + \frac{1}{20F_{44}G_zL}\right) & F_{15} \times \left(1 + \frac{1}{20F_{55}G_zL}\right) \\ & F_{22} + \frac{1}{G_zL} & F_{23} + \frac{1}{G_zL} & F_{24} \times \left(1 + \frac{1}{40F_{22}G_zL} + \frac{1}{40F_{44}G_yL}\right) & F_{25} \times \left(1 + \frac{1}{40F_{22}G_zL} + \frac{1}{40F_{55}G_yL}\right) \\ & F_{32} + \frac{1}{G_zL} & F_{33} + \frac{1}{G_zL} & F_{34} \times \left(1 + \frac{1}{40F_{33}G_zL} + \frac{1}{40F_{44}G_yL}\right) & F_{35} \times \left(1 + \frac{1}{40F_{33}G_zL} + \frac{1}{40F_{55}G_yL}\right) \\ & & & F_{44} + \frac{1}{G_yL} & F_{45} + \frac{1}{G_yL} \\ & & & F_{54} + \frac{1}{G_yL} & F_{55} + \frac{1}{G_yL} \end{bmatrix} \quad (11)$$

이에 걸쳐 일정하다.

$$V_y^{j=1} = (Q_{s4}^{j=1} + Q_{s5}^{j=1})/L \quad (12)$$

$$V_z^{j=1} = (Q_{s2}^{j=1} + Q_{s3}^{j=1})/L \quad (13)$$

각 방향으로 계산된 단면 전단력 $V_y^{j=1}$ 과 $V_z^{j=1}$ 을 2.3절에서 새로이 제안한 비탄성 전단응답이력 구성관계식에 적용하여 내부 반복 수렴을 통해 대응하는 전단변형률 γ_y^j 과 γ_z^j 및 증분 전단변형 $\Delta\gamma_y^{jj}$ 과 $\Delta\gamma_z^{jj}$ 을 각각 계산한다.

식 (14)와 같이 전체 증분 요소 변형 성분에서 순수 증분 요소 회전변형 성분을 계산한다.

$$\Delta q^{jj=1} = \Delta q_s^{j=1} - \Delta\gamma^{jj=1} \quad (14)$$

기존 요소 유연도 행렬 F 과 전단 유연도 항이 고려된 새로운 요소 유연도 행렬 F_s 및 식 (15)~(16)을 통한 순수 증분 요소 저항력 $\Delta Q^{jj=1}$ 과 전단변형이 고려되지 않은 순수 요소력 $Q^{jj=1}$ 을 각각 계산한다. 식 (12)~(13)을 이용하여 새로이 수렴된 $V_y^{jj=1}$ 과 $V_z^{jj=1}$ 을 계산하여 이전 결과와의 비교를 통해 주어진 허용 오차 범위 이내로 수렴할 때까지 식 (9)~(16)의 내부 반복 수렴 계산 과정 jj 을 수행한다.

$$\Delta Q^{jj=1} = [F^{j=0}]^{-1} \Delta q^{jj=1} \quad (15)$$

$$Q^{jj=1} = Q_s^{j=1} + \Delta Q^{jj=1} \quad (16)$$

2.3 비선형 단면 전단력 - 전단변형률 구성관계식

이축 응력 상태(Bi-axial)에서의 콘크리트 이력 거동특성을 일축 응력 상태(Uni-axial)로 묘사함으로써 하중 증분에 따른 전단변형 거동 특성을 적절히 묘사하기 위해서는 신뢰성 있는 전단응답 이력 구성관계식의 마련이 필요하다.

이 연구에서는 신뢰도 기반 한계상태설계법을 근간으로 하는 도로교 설계기준(2012)에서 제시하고 있는 전단설계 기준을 기본으로 콘크리트 전단균열 발생 이후의 인장증강효과를 고려한 새로운 전단응답 구성관계식을 제안하였다(Cheon, J. H., 2013). 우선, 전단보강철근이 배근되지 않은 철근콘크리트 부재에 대한 단면 전단강도 V_c 와 그에 해당하는 전단변형률 γ_c , 및 전단탄성계수(\overline{oa})를 식 (17)~(19)으로부터 각각 계산한다. 전단보강철근의 항복응력을 기준으로 식 (20)으로 계산되는 단면 전단강도 V_d 와 그에 대응하는 전단변형률 γ_d 및 전단탄성계수(\overline{ab})를 식 (21)~(22)으로부터 계산한다. 여기에, 콘크리트 전단균열 발생 이후의 인장증강효과가 고려

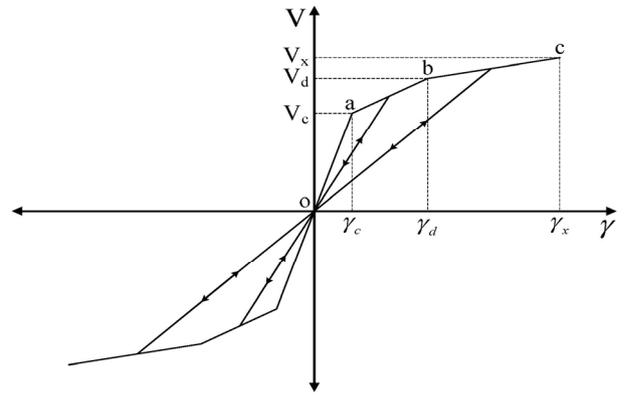


Fig. 2 Proposed hysteretic curve for nonlinear section response

된 가정된 최대 전단변형률 $\gamma_x (= 3\overline{\epsilon}_y)$ 과 이에 대응하는 최대 전단강도 V_x 및 그때의 전단탄성계수 $G_x(\overline{bc})$ 을 각각 식 (23)~(25)로부터 계산함으로써 Tri-linear으로 구성된 파괴 포락 곡선(Failure Envelope Curve)을 기본으로 반복하중에 의한 비탄성 전단응답 이력 구성관계식을 Fig. 2에서와 같이 제안하였다.

$$V_{cd} = [0.85\phi_c\kappa(\rho f_{ck})^{1/3} + 0.15f_n]b_w d \quad (17)$$

$$\gamma_c = \kappa \frac{V_c}{G_c A} \quad (18)$$

$$G_c = \frac{E_c}{2.3} = \frac{8,500(\sqrt{f_{ck}})^{1/3}}{2.3} \quad (19)$$

$$V_d = \frac{\phi_s f_{vy} A_v z}{s} \cot \theta_s \geq \frac{\phi_c v f_{ck} b_w z}{\cot \theta_s + \tan \theta_s} = V_{d,max} \quad (20)$$

$$\gamma_d = 2(\overline{\epsilon}_y + \epsilon_{2,d}) \tan \theta_s \quad (21)$$

$$G_d = \frac{V_d - V_c}{\gamma_d - \gamma_c} \quad (22)$$

$$V_x = \frac{\phi_s f_{vs} A_v z}{s} \cot \theta_s \geq \frac{\phi_c v f_{ck} b_w z}{\cot \theta_s + \tan \theta_s} = V_{d,max} \quad (23)$$

$$\gamma_x = 2(3\overline{\epsilon}_y + \epsilon_{2,x}) \tan \theta_s \quad (24)$$

$$G_x = \frac{V_x - V_d}{\gamma_x - \gamma_d} \quad (25)$$

여기서, ϕ_c = 콘크리트 강도감소계수, $\rho = A_s / (b_w d)$ 는 주

철근비, f_{ck} = 콘크리트 압축강도(N/mm²), f_{ctk} = 콘크리트인장강도(N/mm²), G_c = 콘크리트 전단탄성계수, κ = 전단계수(Shear Coefficient), $f_n = N_u / A_c \leq 0.2\phi_c f_{ck}$ (N/mm²)은 종방향 직각응력, A = 단면적, $\bar{\epsilon}_y$ = 전단보강철근의 평균 항복변형률, \bar{f}_y = 전단보강철근의 평균 항복응력, f_{vs} = 인장경화효과를 고려한 전단보강철근의 평균 최대응력, θ_s 는 콘크리트 압축 스트럿의 경사각으로 부재의 전단강도에 큰 영향을 미치는 인장철근비(ρ_s), 전단경간비(a/d), 축력비(f_n) 및 기초와의 접합부에서의 추가적인 구속효과 등과 같은 주요 인자를 계산과정에 간접적으로 적용함으로써 이들의 영향에 대하여 고려할 수 있도록 이 연구에서 새로이 제안하였다.

한편, 제하시(Unloading) 및 재제하시(Reloading)의 기울기는 모두 원점(O)을 향하는 직선으로 가정하며, 제하가 완전히 끝나지 않고 재제하가 일어날 경우에는 제하가 시작된 점까지는 초기 강성과 같은 기울기를 갖고 재제하가 일어난다고 가정하였다.

2.4 철근 및 콘크리트 재료모델

보-기둥 섬유요소와 비선형 거동 특성은 부재를 구성하는 콘크리트와 철근의 일축(Uni-axial) 재료모델에 의존적이며 이를 각각의 파이버에 적용함으로써 나타낼 수 있다. 저자 등에 의해 기존에 개발된 분산균열 개념에 근거한 콘크리트의 재료모델을 바탕으로 콘크리트의 압축모델, 균열 직각 방향의 인장모델, 균열면에서 전단전달모델, 그리고 콘크리트에 포함된 철근의 해석모델을 각각 적용하였다(Cheon, J. H., 2013). 여기에, Shima et al.(1987)이 제안한 기초로부터의 철근의 정착슬립에 관한 해석모델을 기본으로 새로이 수정 제안된 철근의 변형률-슬립 관계를 적용하였다(Lee, J. H., 2000).

2.5 비선형유한요소 해석프로그램(RCAHEST)

Table 1에서와 같은 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System

Table 1 Element Library

2D or 3D Flexibility-Based Fiber Beam-Column Element	4 nodes PSC Shell Element	4 nodes Elastic Shell Element	2D or 3D Spring Element
Joint Element	RCAHEST		4 nodes RC Shell Element
Reinforcing or Prestressing Bar Element	Interface Element	RC Plane Stress Element	2D Elastio-Plastic Plane Stress Element

Technology)를 사용하였다. 해석프로그램(RCAHEST)은 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP ver. 7.2에 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근 콘크리트 평면응력요소 등을 이식하여 모듈화된 프로그램으로 대상 구조물에의 적용을 통해 해석 결과에 대한 검증을 수행하였다(Kim et al., 2003; Seong et al., 2011; Cheon et al., 2012).

3. 전단에 지배적인 철근콘크리트 보 실험체

이 연구에서 새로이 제안한 수정된 해석기법과 단면 구성 관계식을 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 기존의 Lee et al.(2011)에 의해 수행된 총 6개의 철근콘크리트 보 실험체를 검증 대상으로 해석결과에 대한 적용성과 타당성을 검증하였다.

검증 대상 실험체는 콘크리트 압축강도, 철근비 및 전단지간비(a/d) 등과 같은 주요 실험변수들이 전단거동 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 제작하였으며, 모두 종방향 철근의 항복전에 전단파괴가 일어나도록 설계되었다. 서로 다른 전단지간비(a/d)를 갖는 3개의 실험체로 구성되는 S1과 S2 그룹 실험체에 대한 단면 형상, 배근 상세 및 재료 물성 값을 대표적으로 Fig. 3과 Fig. 4 및 Table 2에 각각 나타내었다.

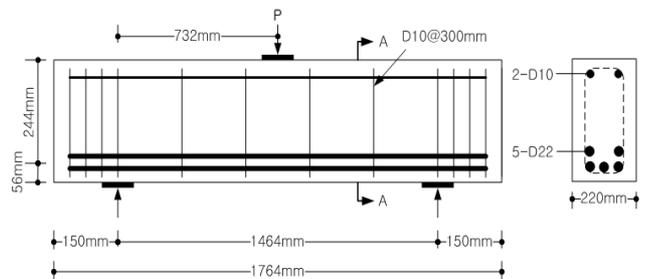


Fig. 3 Test specimens of S1 series(S1 - 3.0)

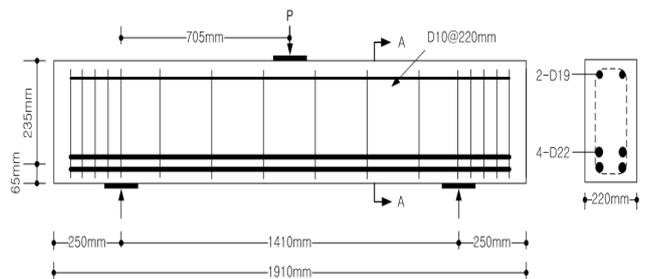


Fig. 4 Test specimens of S2 series(S2 - 3.0)

Table 2 Test variables and materials properties

Beams	d (mm)	a/d	Tension reinforcement			Shear reinforcement		
			Bar No.	ρ_s	f_{yt} (MPa)	Bar No.	ρ_v	f_{yt} (MPa)
S1-3.0	244	3.0	5 - D22	0.036	402.0	D10@300	0.00215	357.8
S1-3.5		3.5						
S1-4.0		4.0						
S2-2.5	235	2.5	4 - D22	0.033	402.0	D10@220	0.00324	
S2-3.0		3.0						
S2-3.5		3.5						

4. 비선형 유한요소해석

검증 대상 실험체에 대한 비선형 유한요소 해석을 수행하기 위해서 2절점의 보-기둥 섬유요소로 분할된 요소 및 단면 형상을 Fig. 5에 나타내었다. 실험체에서와 같이 단면 섬유모델로서 실제 단면적과 같도록 콘크리트와 철근을 분할하였고 단면 2차 모멘트는 실제 단면적에 대하여 약 0.3% 오차 이내로 계산되었다. Fig. 6과 Table 3에 전체 6개의 검증 대상 실험체에 대한 실험 및 저자 등에 의한 새로이 제안된 전단변형 고려 전·후 해석(Analysis (2) 및 Analysis (3))으로부터의 하중-

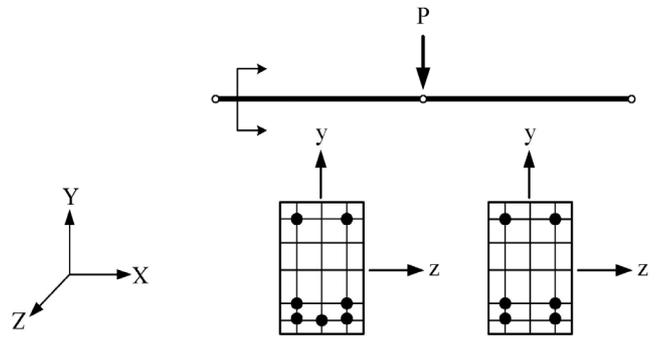


Fig. 5 Structure discretization and section fiber

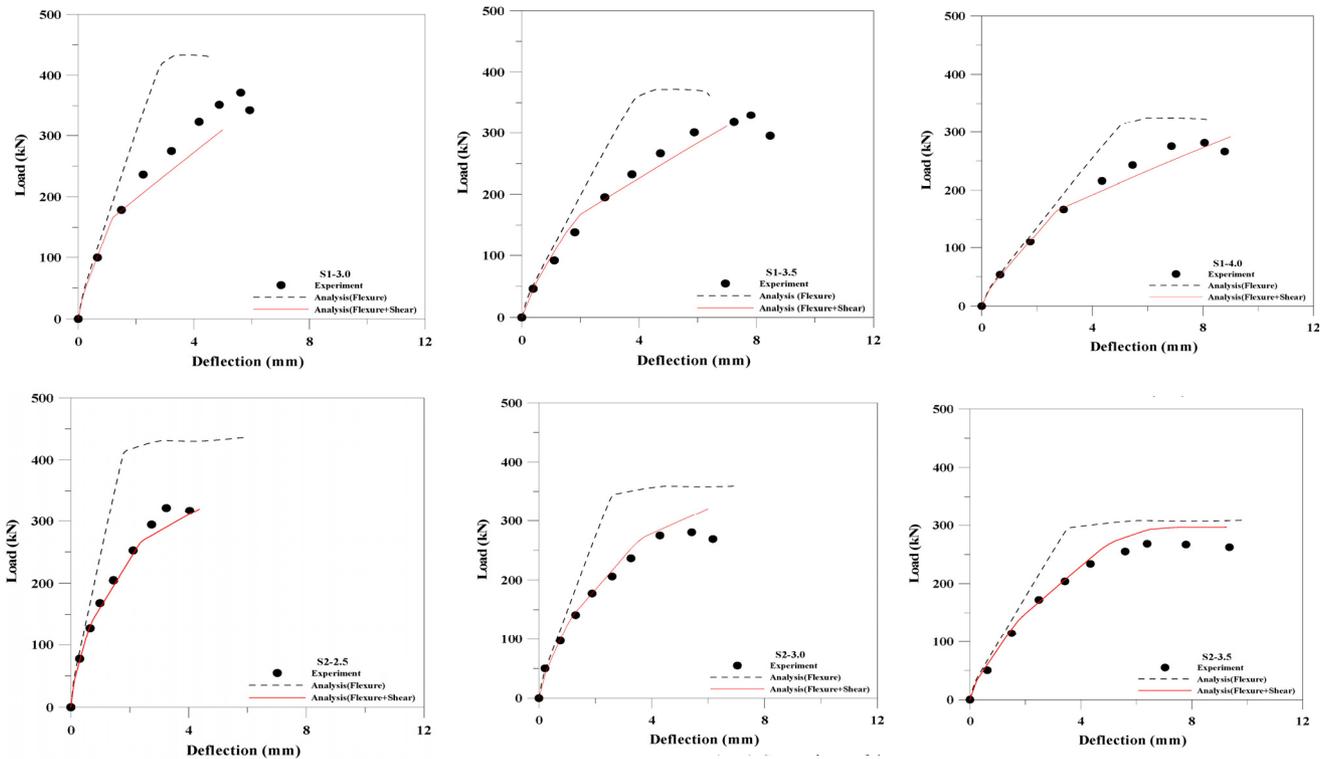


Fig. 6 Comparison of load vs deflection of specimens

Table 3 Comparison of experiment with analysis

specimen	V_u (kN)			δ_{max} (mm)			(2)/(1)	(3)/(1)	(5)/(4)	(6)/(4)
	Experiment (1)	Analysis (2)	Analysis (3)	Experiment (4)	Analysis (5)	Analysis (6)				
S1-3.0	372.5	311.1	433.4	5.6	5.1	2.9	0.84	1.16	0.91	0.52
S1-3.5	327.5	310.8	371.7	7.8	7.0	3.9	0.95	1.13	0.90	0.50
S1-4.0	284.3	291.3	345.8	7.8	9.0	5.0	1.02	1.22	1.15	0.64
S2-2.5	325.4	320.2	534.1	3.2	4.4	1.8	0.98	1.64	1.38	0.56
S2-3.0	280.3	320.6	445.1	5.4	6.0	2.6	1.14	1.59	1.11	0.48
S2-3.5	271.5	304.7	380.0	6.4	6.3	3.7	1.12	1.40	0.98	0.58
Mean							1.01	1.36	1.07	0.55
S.T.D							0.11	0.22	0.18	0.06
C.O.V							0.11	0.16	0.17	0.11

※ Analysis(2) = Flexure+Shear, Analysis(3) = Flexure

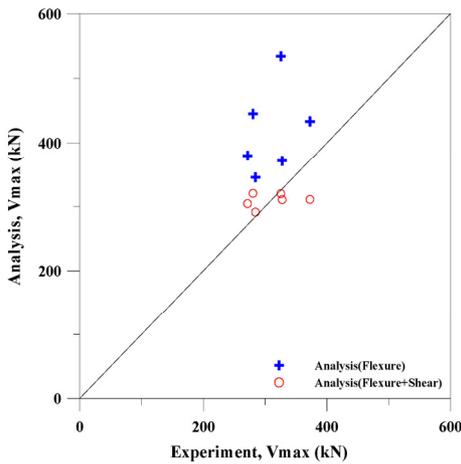


Fig. 7 Ultimate shear strength for specimens

변위 관계 및 최대강도에 대응하는 변위를 각각 비교하여 나타내었다.

Fig. 6에서와 같이 균열 발생 이후의 복잡한 전단거동 특성을 나타내는 전단에 지배적인 철근콘크리트 보에 대한 파괴 시까지의 비선형 전동거동 특성을 적절히 예측하고 있음을 알 수 있다.

해석과 실험결과로부터의 극한강도 비(比)에 대한 평균과 표준편차 및 변동계수는 Table 3에서와 같이 각각 1.01과 11% 정도로서 새로이 제안된 해석결과는 높은 신뢰도를 확보하고 있음을 알 수 있다. 이에 반해, 기존의 해석으로부터 극한강도 비(比)에 대한 평균은 1.36 정도로서 해석 결과가 약 36% 이상 과대평가하고 있다. 표준편차와 변동계수 역시 각각 22%와 16% 정도로서 전단거동 특성을 적절히 예측하고 있지 못함을 확인할 수 있다.

한편, Table 3에 해석과 실험결과로부터의 최대강도에 대

응하는 변위를 각각 비교하여 나타내었으며 새로운 해석 결과에 대한 평균과 변동계수는 각각 1.07과 17% 정도로서 강도 뿐만 아니라 파괴시의 변위 예측에도 높은 신뢰도를 확보하고 있음을 알 수 있다. 이에 반해, 기존의 해석으로부터 결과는 평균과 변동계수는 각각 0.55와 11% 정도로 산정되었으며 파괴시의 변위 역시 적절히 예측하고 있지 못함을 알 수 있다. Fig. 7에는 이와 같은 실험 및 해석으로부터의 극한강도에 대한 결과를 비교하여 나타내었다.

결과를 종합해 볼 때 이 연구에서 새로이 제안한 해석기법과 해석 모델을 적용한 해석 결과는 기존 평면요소의 적용에 비하여 상대적인 간편성이 있는 유연도법에 근거한 보-기둥 섬유요소를 이용하여 전단에 지배적인 거동특성을 나타내는 철근콘크리트 부재에 대한 내하력 평가에도 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 기존의 저자 등의 연구결과를 바탕으로 전단에 지배적인 철근콘크리트 부재의 비탄성 전단거동 특성을 해석적으로 평가하기 위한 수치해석 프로그램(RCAHEST)을 수정 및 보완하였다. 수치해석적 측면에서 효율적인 기존의 유연도법에 근거한 보-기둥 섬유요소 모델 정식화의 장점을 그대로 유지하면서 전단변형 효과를 고려할 수 있도록 새로이 제안한 해석기법과 함께 신뢰도기반 한계상태설계법을 근간으로하는 도로교설계기준(2012)에서 제시하고 있는 설계 전단강도를 기본으로 Tri - linear으로 구성된 파괴 포락 곡선으로 구성된 단면에 대한 비탄성 전단응답이력 구성관계식을 적용하였다.

철근콘크리트 재료의 구성방정식은 기존의 연구에서와 같

이 분산균열 개념에 근거하여 평균 응력과 평균 변형을 관계식으로 표현하였으며 콘크리트의 압축모델과 균열 직각 방향의 인장모델 그리고 콘크리트에 매입된 철근의 재료모델로 구성되었다.

전단에 지배적인 거동특성을 나타내는 철근콘크리트 보 실험체에의 적용을 통해 해석결과는 전단 균열의 발생과 균열 발생 이후의 파괴에 이르기까지의 비탄성 전단거동 특성을 높은 신뢰도로 적절히 예측하고 있음을 확인하였다.

해석결과에 대한 신뢰성을 바탕으로 기존의 2차원 평면요소 및 3차원 솔리드요소에 비하여 상대적인 단순성과 편리성을 가지고 있는 보-기둥 섬유요소는 비내진상세를 갖는 전단에 지배적인 철근콘크리트 골조의 내하력 및 내진성능평가에 도 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(15CTAP-C097438-01)에 의해 수행되었습니다.

References

Cheon, J. H. (2013), Inelastic Shear Behavior Analysis of Reinforced Concrete Members using Beam-Column Fiber Finite Element, University of SungKyunKwan.
 Cheon, J. H., Kim, T. H., Lee, B. J., Lee, J. H. and Shin, H. M. (2012), Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Circular Hollow Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake, *Magazine of Concrete Research*, 64(10), 919-930.
 Cho, K. H. (2001), Evaluation of Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Columns Using Flexibility-Based Fiber Element

Method, Seoul national University.
 D'Ambrisi A., and Filippou, C. (1999), Modeling of Cyclic Shear Behavior in RC Members, *ACI Structural Journal*, 97(4), 630-641.
 Kim, T. H., Lee, K. M., Yoon, K. M. and Shin, S. H. (2003), Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake. I; Theory and Formulation, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 129(9), 1199-1207.
 Lee, J. H. (2000), Nonlinear Seismic Analysis of 3D R.C Frame Structures based on Flexibility Method, University of SungKyunKwan.
 Lee, J. Y., Kim, S. W. and Mohamad Y. Mansour. (2011), Nonlinear Analysis of Shear-Critical Reinforced Concrete Beams Using Fixed Angle Theory, *ASCE*, 137(10), 1017-1029.
 Marini, A. and Spacone, E. (2006), Analysis of Reinforced Concrete Elements including Shear Effects, *ACI Structure Journal*, 103(5), 645-655.
 Nuenhofer, A. and Filippou, F. C. (1997), Evaluation of Nonlinear Frame Finite-Element Models, *Journal of structural Engineering ASCE*, 123, 958-966.
 Seong, D. J., Kim, T. H., Oh, M. S. and Shin, H. M. (2011), Inelastic Performance of High-Strength Concrete Bridge Columns under Earthquake Loads, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 9(2), 205-220.
 Spacone, E. (2000), Nonlinear Pushover Analysis of Reinforced Concrete Structures, Colorado Advanced Software Institute, FINAL REPORT
 Spacone, E., Ciampi, V. and Filippou, F. C. (1996), Mixed Formulation of Nonlinear Beam Finite Element, *Computer and Structure*, 58, 71-83.
 Taucner, F. F., Spacone, E., and Filippou, F. C. (1991), A Fiber Beam-Column Element for Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Structures, EERC Report 91/17, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Received : 03/10/2017

Revised : 04/03/2017

Accepted : 04/11/2017

요 지 : 본 연구에서는 기존의 저자 등에 의해 수행된 유연도법에 근거한 보-기둥 섬유요소에 수치해석적 방법으로부터 전단변형 효과를 고려할 수 있도록 수정된 정식화 방안과 단면에 대한 비탄성 전단응답 이력 구성관계식을 새로이 제안함으로써 전단 및 휨 - 전단파괴 양상을 나타내는 철근콘크리트 보에 대한 합리적인 해석적 방안을 마련하는 것을 목표로 한다. 주요 실험변수들이 전단거동 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 모두 종방향 철근의 항복전에 전단파괴가 일어나도록 설계된 총 6개의 철근콘크리트 보 실험체를 검증 대상으로 저자 등에 의해 새로이 수정된 구성관계식을 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 통한 해석을 수행하였다. 모든 실험체에 대한 파괴모드와 파괴시까지의 전반적인 거동 특성을 비교적 적절히 예측하고 있음을 확인하였으며 이러한 연구결과들은 향후, 대형화·복잡화 되어가고 있는 전체 구조물에 대한 신뢰도 높은 해석을 수행하기 3차원 해석에도 충분히 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 유연도법, 보-기둥 섬유요소, 전단파괴, 비선형 유한요소해석, RCAHEST