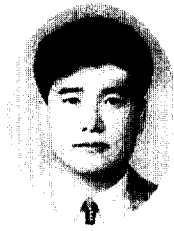


스터럽이 없는 철근콘크리트 보의 전단강도에서의 크기효과

Size Effects in Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement



송하원*

Song, Ha-Won



하주형**

Ha, Ju-Hyung



변근주***

Byun, Keun-Joo

ABSTRACT

Shear failure of reinforced concrete (RC) beams is serious problem due to sudden brittle failure and many experimental results proved that size effect in shear strength of RC beams is an important feature of reinforced concrete members. As the sizes of RC beams become very large, experiments sometimes become very difficult so that empirical design formula or the experimental data on shear strength of RC beams could not be obtained. Then the numerical analyses for size effect on shear strength of RC beams become very important. In this study, finite-element technique of reinforced concrete is employed for shear analysis of RC beams without web reinforcement and the size effects in shear strength are numerically analyzed. The influencing factors to the size effect in the shear strength of RC beams are extensively analyzed and compared with those by major shear strength equations including several standard specifications.

Keywords : size effect, shear strength, reinforced concrete beams, finite-element technique, shear analysis, shear strength equations

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수

** 정회원, 연세대학교 토목공학과 대학원

*** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 1999년 4월 30일까지 학회로 보내
주시면 1999년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

크기효과는 구조물의 크기가 커질수록 구조물이 저항할 수 있는 평균 저항력이 저하된다는 것으로 정의된다.⁽¹⁾ 많은 실험결과들은 스티럽으로 보강되지 않은 철근콘크리트 보의 전단저항력이 보의 크기에 상당한 영향을 받음을 증명하였다. 즉, 보의 깊이가 커짐에 따라 철근콘크리트 보의 공칭전단강도가 감소하는 전단강도의 크기효과가 존재함을 증명하였다. 이러한 철근콘크리트 보의 전단강도의 크기효과에 대한 연구는 전단강도에 대한 크기효과를 발생시키는 이러한 요인들에 대해서 주로 실험적으로 연구되었고 최근 세계 여러나라 전단강도에 대한 설계 기준식들이 전단강도의 크기효과를 본격적으로 기준식에 반영하고 있는 실정이다.^(2,3) 그러나 ACI 318 설계기준⁽⁴⁾을 그대로 반영한 대한토목학회(KSCE)의 콘크리트표준시방서⁽⁵⁾에서는 전단강도식에 전단지간비, 철근비가 반영되어 있지만 보의 크기에 따른 크기효과는 반영되어 있지 못한 실정이다. 한편 최근에 철근콘크리트 보가 대형화 됨에 따라 대형보의 구조적 안전성을 평가하기 위하여 크기효과가 고려된 기준식들을 사용하는 경향이 있으나 구조물의 규모가 점점 더 초대형화됨에 따라 실험이 매우 어려워 실험에 근거한 경험식이 존재하지 않거나 얻기도 어려운 실정이다. 이러한 경우 대규모 철근콘크리트 구조물에 대하여 전단거동에서 실제 존재하는 크기효과를 재현할 수 있는 검증된 해석적 방법은 매우 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 철근콘크리트의 유한요소해석기법을 적용하여 스티럽이 없는 철근콘크리트 보의 크기효과를 해석적으로 재현하였으며 실험결과와 비교하여 해석기법을 검증하였다. 검증된 해석기법을 사용하여 콘크리트의 압축강도, 하중작용형태, 주인장철근 보강비, 전단지간비 등을 변수로 하여 이러한 변수들이 철근콘크리트 보의 전단강도에서의 크기효과에 미치는 영향을 해석적으로 분석하였다. 또한 이러한 변수들의 영향이 여러 전단강도식에서 어떻게 반영되었나를 해석결과와 비교하였다.

2. 철근콘크리트 보의 크기효과

2.1 크기효과의 실험적 증명

Fig. 1은 $a/d = 3$, 폭이 200mm 인 RC 보에 대해 유효깊이를 변화시켜 실시한 보통콘크리트와 경량골재콘크리트를 사용한 철근콘크리트 보의 전단실험시편을 보여준다.⁽⁶⁾

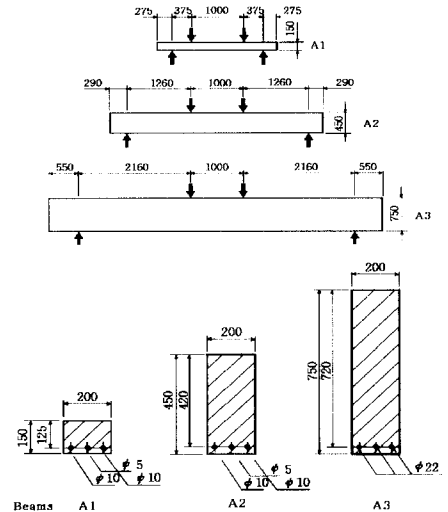


Fig. 1 Details of specimen

Fig. 2는 유효깊이 d 가 다른 Fig. 1의 RC 보시편에 대해 실험결과를 나타낸 것으로서 보의 유효깊이가 커질수록 전단강도는 작아지는 크기효과가 나타남을 보여준다. 특히 경량골재콘크리트의 경우에도 전단강도에서 크기효과가 나타난다는 것으로부터 전단강도의 크기효과는 콘크리트의 골재성질의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다.

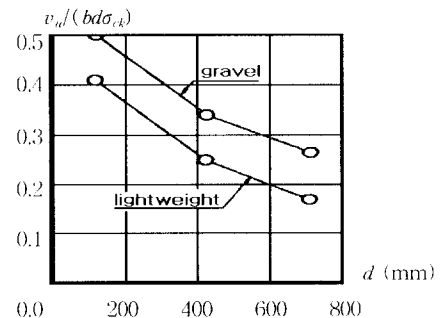


Fig. 2 Size effect for effective depth and type of concrete

Fig. 3은 전단 보강이 고 전단지간비는 1이며 보의 깊이가 16cm 에서 93cm 까지 변하는 깊은 보에서 전단강도에 대한 Walraven의 크기효과 실험모형이다.⁽⁷⁾ 보에 사용된 최대 골재 크기는 16mm이고 주철근비는 휨 파괴를 방지하기 위해 1.1%로 하고 보의 두께는 25cm이다. Fig. 4에서 보여주는 것처럼 실험결과 깊은 보에서 뚜렷한 전단강도의 크기효과가 존재하는 것을 알 수 있다.

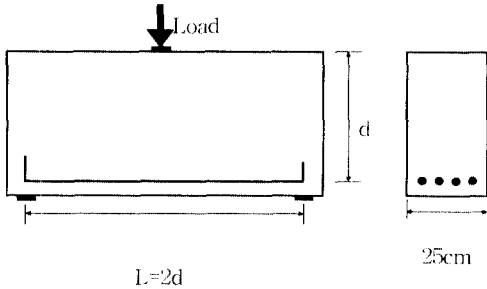


Fig. 3 Size effect experiment of deep beam

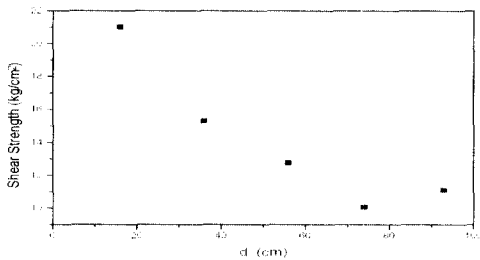


Fig. 4 Size effect in deep beam

Shioya등은 Fig. 5에서 보여주는 것처럼 유효깊이가 각각 10cm, 20cm, 60cm, 100cm, 200cm, 300cm 인 철근콘크리트 보에 대하여 실험을 수행하였다.⁽⁸⁾ 주철근 보강비는 0.4%이고 전 지간에 등분포하중을 가하였다. No.1과 No.2 시편들은 휨에 의해 파괴되었고 나머지는 전단에 의해 파괴되었다. Fig. 6에서 보여주는 것처럼 실험 결과 유효깊이 100cm 이상의 거대한 철근콘크리트 보의 전단강도에서도 크기효과가 나타남을 보여준다.

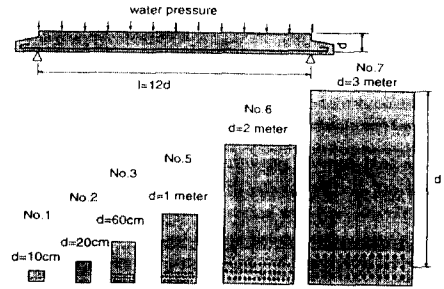


Fig. 5 Details of specimen

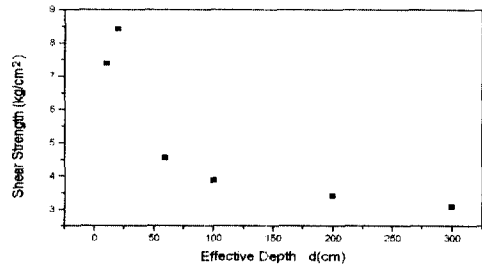


Fig. 6 Size effect on shear strength

2.2 전단강도식

대표적인 전단강도 모델식으로 유럽 (CEB-FIP)의 전단강도식⁽²⁾, 일본토목학회 (JSCE)의 전단강도식⁽³⁾, Kim & Park 전단강도식⁽⁹⁾과 ACI 전단강도식⁽¹⁾을 사용한 대한 민국 콘크리트표준시방서 (KSCE) 전단강도식⁽⁵⁾이 있다. 식(1)은 CEB-FIP 전단강도식이고, 식(2)는 일본 JSCE 전단강도식이고 식(3)은 Kim & Park의 전단강도식이다. 식(4a)는 콘크리트표준시방서의 $l_n/d > 5$ 인 경우에 사용하는 전단강도식이고, 식(4b)는 깊은 보에 사용하는 전단강도식이다. 식(1)과 식(3)에서 압축강도 σ_{ck} 는 MPa단위이고 a/d 는 전단지간비이고 유효깊이 d 는 mm단위이다. 식(2), (4a), (4b)에서 σ_{ck} 는 kg/cm^2 단위이고 d 는 cm단위이다.

$$V_c = [0.15 \sqrt{\frac{3d}{a}} \sqrt[3]{100\rho\sigma_{ck}} (1 + \sqrt{\frac{200}{d}})]bd \quad (1)$$

$$V_c = 0.9[(100\rho\sigma_{ck})^{\frac{1}{3}}(d/100)^{-\frac{1}{4}}]bd \quad (2)$$

$$V_c = 3.5\sigma_{ck}^{1/3}\rho^{3/8}(0.4 + d/a)(\frac{1}{\sqrt{1+0.008d}} + 0.18)bd \quad (3)$$

$$V_c = (0.5\sqrt{\sigma_{ck}} + 176\rho\frac{V_u d}{M_u})bd \quad (4a)$$

$$V_c = (3.5 - 2.5\frac{M_u}{V_u d})(0.5\sqrt{\sigma_{ck}} + 176\rho\frac{V_u d}{M_u})bd \quad (4b)$$

Fig. 7은 Walraven의 실험⁽⁶⁾과 전술한 전단강도 모델식의 유효깊이에 따른 전단강도를 비교한 것이다.

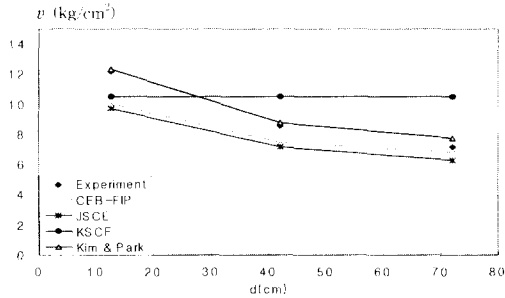


Fig. 7 Comparison of size effect models

Fig. 7을 보면, 전단강도식(1), (2), (3)은 실험에서 얻어진 RC보의 깊이에 따른 전단강도의 크기 효과를 반영하고 있으나 KSCE 전단강도식은 크기 효과를 직접적으로 반영하지 않고 있고 보의 깊이가 큰 경우 실험 및 다른 전단강도식과 다르게 전단강도를 과대평가할 위험성이 있음을 알 수 있다.

3. 전단거동 해석

해석적으로 철근콘크리트 부재의 전단파괴거동을 재현하고 전단강도의 크기효과를 규명하기 위하여 전단거동과 이에 따른 크기효과에 영향을 주는 인자를 분석하는 것은 매우 중요하다. 전단거동의 해석모델에서 철근의 부착효과가 영향을 미치는 철근주변의 영역(소위 RC영역)을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 비교해보면 RC영역을 고려하지 않은 경우는 실제의 전단강도보다 현저히 작은 값이 나타났으며, 전단강도의 크기효과도 해석적으로 재현할 수 없음을 알았다.⁽¹⁰⁾ 즉 RC영역에서의 인장경화(tension stiffening)현상은 전단해석에 매우 중요하게 고려되어야 하며 무근콘크리트만의 거동모델링에서

인장연화(tension softening)현상을 고려하지 않은 모델링에 의한 전단해석은 전단강도를 과대평가하였다. 한편 인장경화, 전단경화, 인장연화, 전단연화의 영향을 같이 분석했을 때 인장경화와 전단경화의 영향이 인장연화와 전단연화의 영향보다 상대적으로 크지만 이러한 영향을 모두 고려했을 때 가장 유사하게 전단거동을 재현하였다.⁽¹⁰⁾ 본 연구에서는 철근콘크리트 보의 해석시 철근의 부착의 영향이 미치는 콘크리트영역에 대해서는 인장경화 및 전단경화를 고려하였고, 그 이외의 무근콘크리트영역(소위 Plain concrete ; PL영역)에 대해서는 인장연화 및 전단연화를 고려하였다.

3.1 철근콘크리트영역 모델

Fig. 8은 콘크리트가 균열 부분에서 더 이상 인장응력에 저항할 수 없어도, 콘크리트가 철근과의 부착효과⁽¹¹⁾를 통해 철근으로부터 전달된 인장응력을 균열 이후에도 계속해서 받을 수 있다는 것을 보여주며, 또한 콘크리트와의 부착이 고려된 경우 철근의 구성모델을 보여준다.

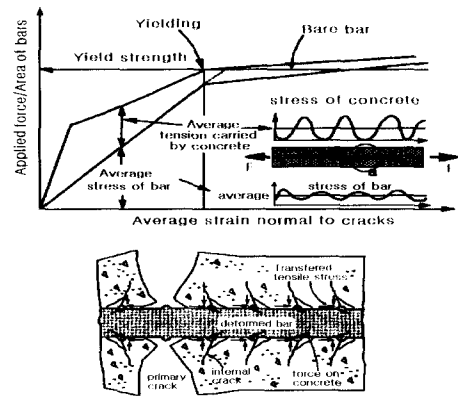


Fig. 8 Bond effect in cracked concrete

이와 같이 철근주변의 어느 일정 영역에서는 철근의 부착효과로 인해 콘크리트가 인장경화 거동을 보이며 이는 콘크리트의 전체적인 거동에 영향을 준다. 부착효과에 의한 콘크리트의 인장경화모델은 식(5)와 같이 표현될 수 있으며 Fig. 9와 같이 보강철근의 종류에 따라 다른 경화계수 c를 도입하여 경화의 정도를 다르게 고려할 수 있다.⁽¹²⁾

$$\sigma_t = \sigma_t(\varepsilon_t; c) = \sigma_{tk} \left(\frac{\varepsilon_{tu}}{\varepsilon_t} \right)^c \quad (5)$$

여기서, σ_t = 균열에 수직인 평균 인장응력, σ_{tk} = 콘크리트의 인장강도, ε_t = 균열에 수직인 평균 인장변형률, ε_{tu} = 콘크리트의 균열변형률이다.

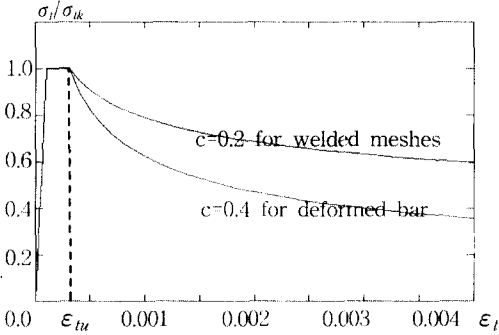


Fig. 9 Tension-stiffening model for concrete

전단력에 대해서도 철근의 전단저항능력 때문에 전단경화 거동을 보이며 이에 따라 콘크리트의 전단경화모델은 식(6)으로 표현되며 균열과 수직인 평균인장변형률의 크기에 따라 Fig. 10과 같이 전단경화의 정도를 다르게 할 수 있다.

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (6)$$

여기서, τ = 평균 전단응력, γ = 평균 전단변형률, G = 전단탄성계수,

$G = 1/(1/G_{st} + 1/G_c)$, G_c = 비균열 콘크리트의 전단계수, G_{st} 는 균열 콘크리트의 전단계수로서 식(7)로 표현된다.⁽¹³⁾

$$G_{st} = f_{st} \beta / (1 + \beta^2) \quad (7)$$

식(7)에서 f_{st} 는 전단강도로서 $18(\sigma_{ck})^{1/3}$ 를 사용하였으며 $\beta = (2\gamma)/\varepsilon_t$ 로 정의되는 계수이다.

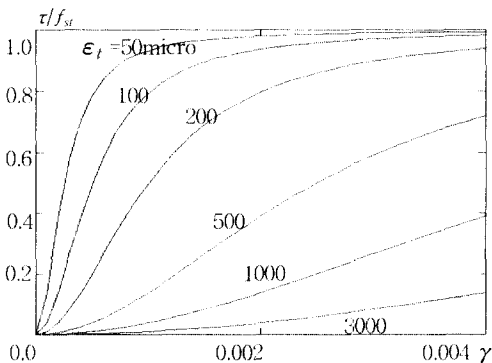


Fig. 10 Shear-stiffening model for concrete

철근의 부착효과가 영향을 미치는 철근 주위의 RC영역의 크기에 따라 Fig. 11에서 보여주는 것과 같이 균열 후의 부재의 강성도와 파괴형태가 달라지며 Fig. 11의 C 상태에서부터 해석모델링에 사용되는 RC 영역의 최대면적 A_{cmax} 와 이 크기에 대응하는 RC영역의 최대높이 h_{max} 를 식(8)로부터 구할 수 있다.

$$A_{cmax} = \frac{A_s \sigma_y}{\sigma_{tk}}, \quad h_{max} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} d_b \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_{tk}}} \quad (8)$$

여기서, A_s = 철근의 단면적, σ_y = 철근의 항복강도, d_b 는 철근의 직경이다.

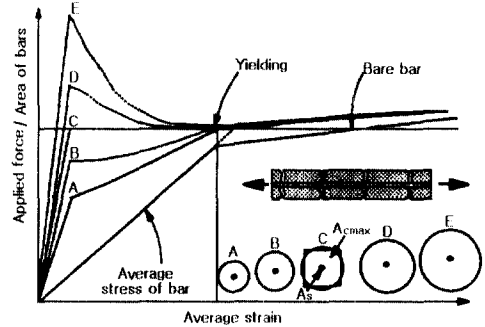


Fig. 11 Crack control capability and concrete area

3.2 무근콘크리트영역 모델

무근콘크리트영역 혹은 PL영역에서는 인장과 전단하중하에서 최대하중 이후 변형률-연화 현상이 나타나며 이 때 해석에서 유한요소크기 의존성을 제거하기 위해 연화시의 응력-변형률곡선(식(9))의 기울기를 조정하였다.(Fig. 12) 즉 연화가 일어나는 실제 균열폭(w_c)은 유한요소의 요소크기(l_r)로서 고려되며 요소크기에 상관없이 동일한 파괴에너지를 갖도록 Fig. 13과 같이 요소크기에 따라 다른 인장응력-변형률 곡선을 사용하였다.

한편 전단연화에 대해서도 전단변형률 γ 가 최대 전단응력 τ_{max} 에 의한 극한 전단변형률 γ_u 에 도달할 때 전단연화가 시작되며 식(10)으로 표현된다. Fig. 14는 인장변형률이 0.00005인 경우의 전단응력-변형률 연화 곡선을 나타낸다.

$$\sigma_t = \sigma_{tk} \left(\frac{\varepsilon_{tu}}{\varepsilon_t} \right)^c \quad (9)$$

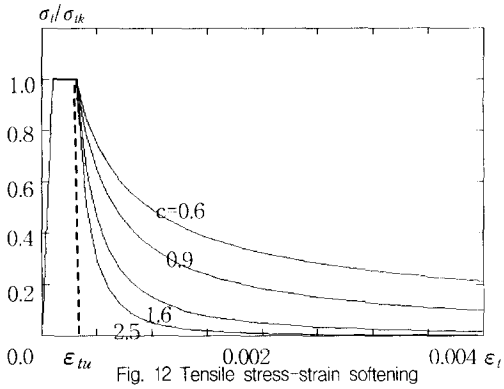


Fig. 12 Tensile stress-strain softening

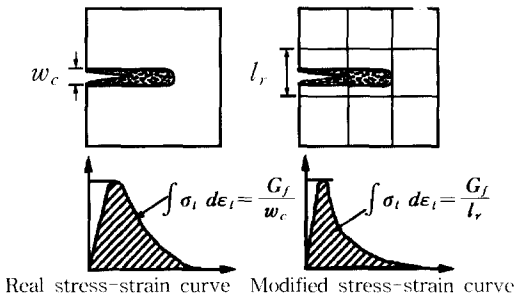


Fig. 13 Tension-softening model for analysis

$$\tau = \tau_{\max} (\gamma_u / \gamma)^c \quad (10)$$

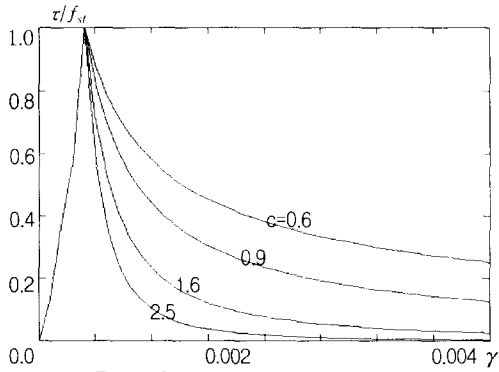


Fig. 14 Shear stress-strain softening curve

3.3 해석모델의 검증

해석모델의 검증을 위해 Fig. 1과 같이 Walraven이 행한 3가지 크기의 전단강도 실험체⁽⁶⁾에 대하여 Fig. 15와 같이 모델링하여 전단

거동에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 여기서 무근콘크리트영역(PL영역)의 유한요소크기에 따라 연화곡선의 기울기 \$c\$를 결정하였으며 RC영역의 크기는 식(8)로부터 구하였다.

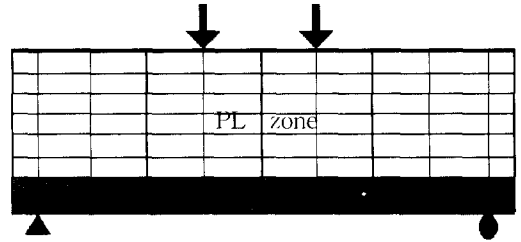


Fig. 15 FEM model used in analysis

Fig. 16은 여러 유효깊이에 대해 행한 해석결과를 실험결과와 비교한 것이다. 비교로부터 본 해석모델이 철근콘크리트의 전단거동에서의 크기효과를 재현할 수 있음을 알 수 있다.

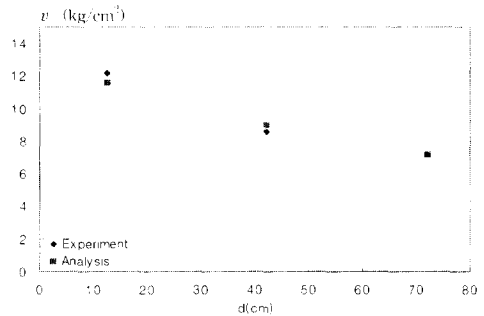


Fig. 16 Comparison of size effect models

다음으로 Fig. 3에서 보여주는 유효깊이가 16cm에서 93cm까지의 깊은 보들에 대해 철근콘크리트 보의 전단강도에 대한 크기효과를 해석하고 실험결과⁽⁷⁾와 비교하였다. Fig. 17에서는 유한요소해석에 사용된 모델을 나타낸 것이고 Fig. 18은 보의 깊이에 따른 전단강도값을 보여준다. 여기서 유효깊이가 20cm 이하의 작은 보의 경우는 해석에서 재하판의 강성의 영향을 고려하지 않았기 때문에 약간 작게 평가되었으나 실험과 해석결과가 대체적으로 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 19는 실험과 해석에서의 균열발생을 비교한 것으로서 해석이 실제의 균열진전을 유사하게 재현함을 알 수 있다. 여기서 균열도는 적분점에서의 인장변형률이 콘크리트 인장강도에 대한 인장강도 변형률값의 두 배에 도달한 적분

점들의 균열 발생 패턴을 나타내었다.

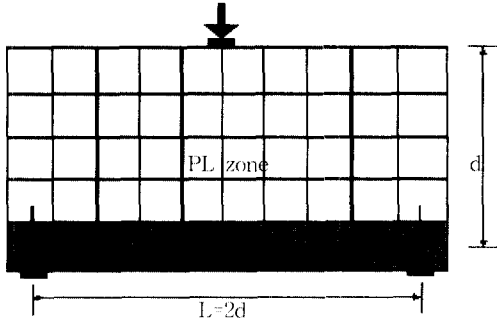


Fig. 17 Model used in analysis

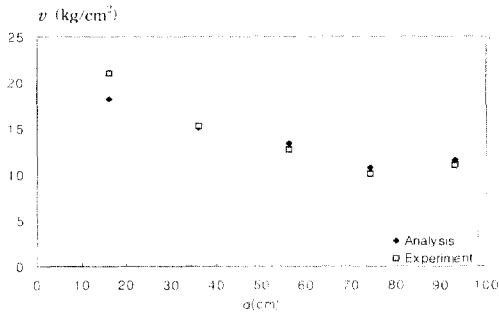


Fig. 18 Comparison between experiment and analysis

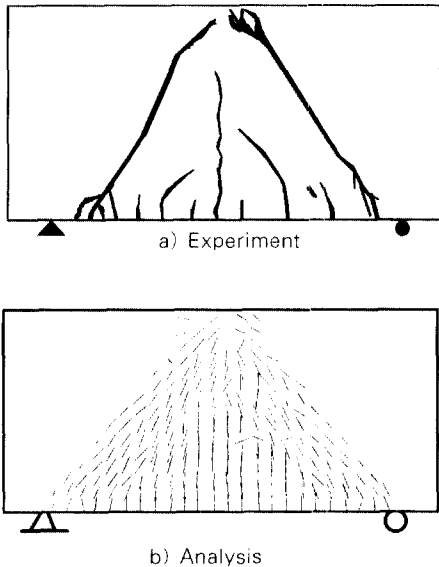


Fig. 19 Crack pattern comparison of beam (d=93cm)

4. 전단강도 영향인자별 크기효과 분석

위에서 검증된 해석모델링 기법을 사용하여 철근콘크리트 보의 전단강도에 관한 각각의 영향인자에 대해서 크기효과를 분석하기 위하여 모델링을 실시하고 해석하였다. 해석상 전단강도는 하중을 증가시켜 가면서 해석을 수행하여 전단파괴가 발생하는 순간 지점의 수직반력으로 구하였다. 경간의 중앙에서 집중하중 ($a/d = 3$)을 받거나 등분포하중을 받는 보의 경우에 대해 Fig. 20과 같은 보를 압축강도에 따른 크기효과와 주인장철근보강비에 따른 크기효과분석에 사용하였다.

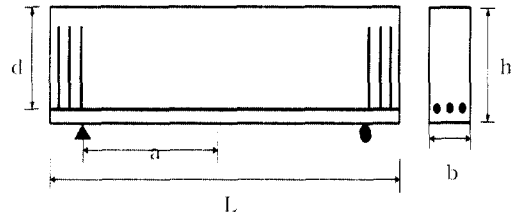


Fig. 20 RC beams for analysis

4.1 콘크리트의 압축강도에 따른 크기효과

전단보강이 없는 철근콘크리트 보의 전단강도에서의 크기효과에 대한 압축강도의 효과를 파악하기 위해서 Fig. 20의 RC보에 대해 유효깊이가 16, 36, 56, 74, 93cm 이고, 폭이 25cm, 보강비가 0.035인 보를 모델링하여 해석하였다. Fig. 21은 압축강도가 330kg/cm^2 , 400kg/cm^2 , 500kg/cm^2 인 전단지간비가 3인 1집에서 하중이 가해지는 보에서 콘크리트의 압축강도에 따른 크기효과를 나타내고, Fig. 22는 같은 보에서 등분포하중이 작용하는 경우이다. Fig. 21과 Fig. 22에서 보는 것과 같이 콘크리트의 압축강도가 커짐에 따라 각 경우의 철근콘크리트 보의 전단강도는 증가하며, 콘크리트의 압축강도가 커질수록 유효깊이가 40cm 이하에서는 크기효과가 더욱 분명히 나타나며 그보다 유효깊이가 큰 경우 압축강도에 의한 크기효과의 경향이 점차 감소함을 알 수 있다.

Fig. 23은 D-1, E-1, F-1 시리즈의 파괴시의 균열형태이다.

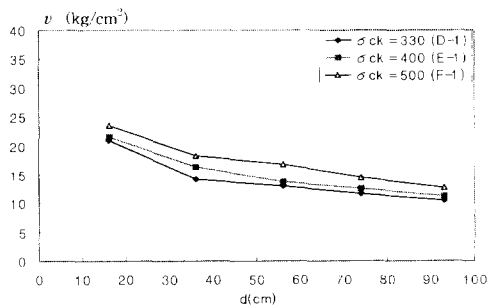


Fig. 21 Size effect on σ_{ck} in case of $a/d=3$

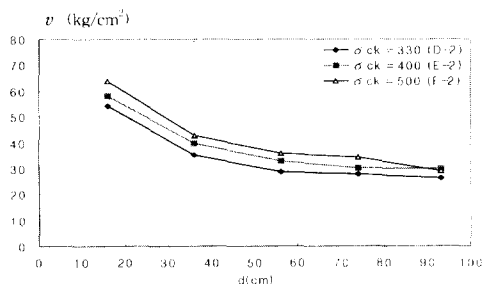


Fig. 22 Size effect on σ_{ck} in case of uniform loading

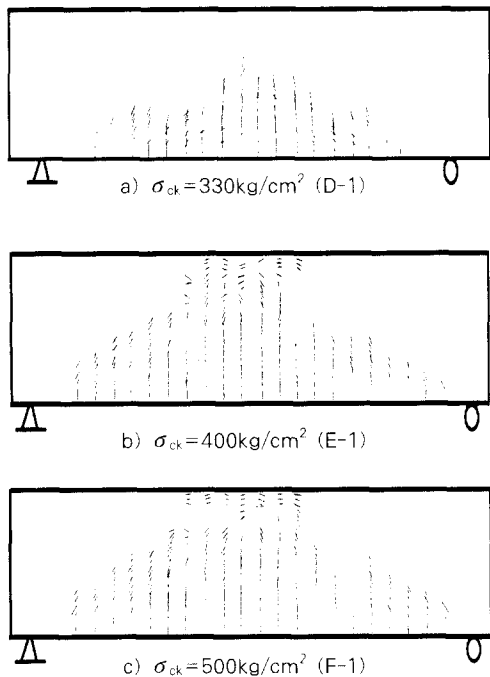
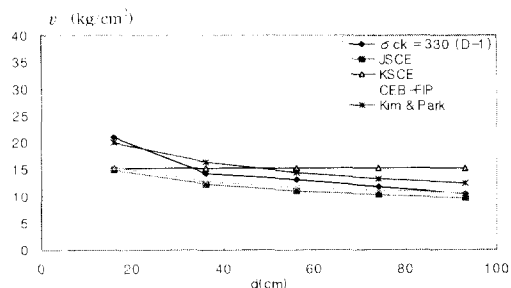
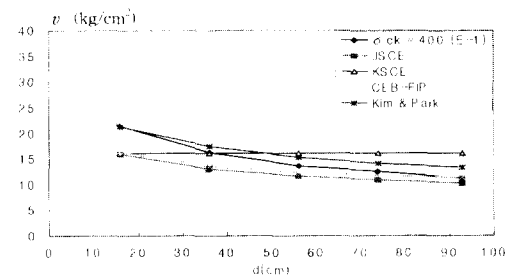


Fig. 23 Crack pattern of beams with different σ_{ck}

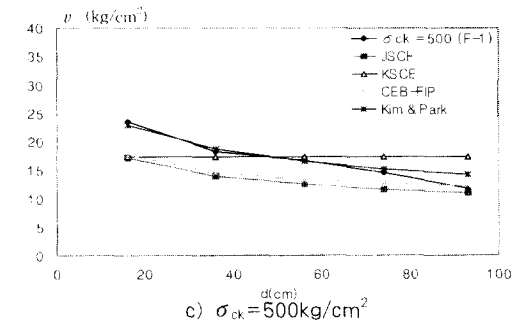
Fig. 23의 a), b), c)를 비교해보면 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 점점 휨균열폭은 줄어들고 전단균열이 발전됨을 알 수 있다. Fig. 24, Fig. 25는 $a/d=3$ 인 집중하중과 등분포하중인 경우 콘크리트의 압축강도에 따른 전단강도를 다른 전단강도식과 비교해 본 것이다. Fig. 24에서 Fig. 25까지의 비교로부터 크기효과를 식에 반영하는 JSCE 전단강도식, CEB-FIP 전단강도식 그리고 Kim & Park 전단강도식은 보의 유효깊이가 증가함에 따른 전단강도의 감소를 재현하며 해석은 강도식보다 유효깊이가 작은 경우 전단강도를 크게 추정하며 Kim & Park 전단강도식이 해석과 가장 유사하게 전단강도를 예측함을 알 수 있다.



a) $\sigma_{ck} = 330 \text{ kg/cm}^2$

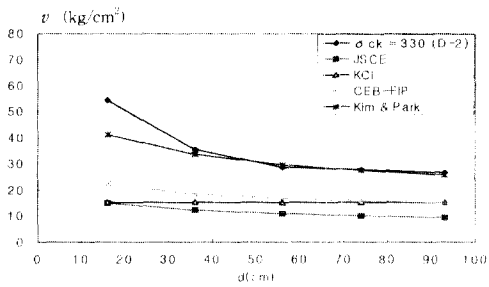


b) $\sigma_{ck} = 400 \text{ kg/cm}^2$

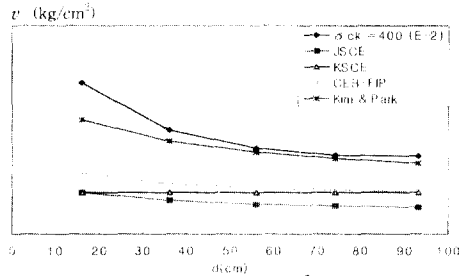


c) $\sigma_{ck} = 500 \text{ kg/cm}^2$

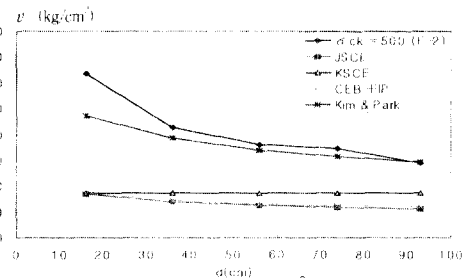
Fig. 24 Analysis and codes for different σ_{ck} on $a/d=3$



a) $\sigma_{ck} = 330 \text{ kg/cm}^2$



b) $\sigma_{ck} = 400 \text{ kg/cm}^2$



c) $\sigma_{ck} = 500 \text{ kg/cm}^2$

Fig.25 Analysis and codes for different σ_{ck} on distributed load

4.2 주인장철근 보강비에 따른 크기효과

크기효과에 대한 주인장철근 보강비의 효과를 파악하기 위해서 Fig. 20의 RC보에 대해 유효깊이가 16, 36, 56, 74, 93cm 이고, 폭이 25cm, 압축강도가 330 kg/cm^2 인 보를 모델링하여 해석하였다. Fig. 26은 보강비가 0.018, 0.035, 0.07이고 $a/d=3$ 인 보에서 주인장철근 보강비에 따른 크기효과를 나타내고, Fig. 27은 같은 보에서 등분포하중이 작용하는 경우이다. Fig. 26, Fig. 27은 각 유효깊이에서 보강비가 증가함에 따라 전단강도는 선형적으로 증가하나, 유효깊이가 커질수록 그 차이는 감소

함을 보여준다. Fig. 28은 L-1, J-1, K-1 시리즈의 파괴시의 균열형상이다.

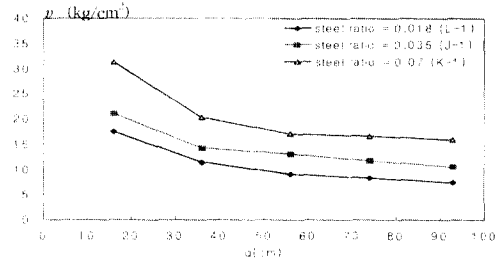


Fig. 26 Size effect on ρ in case of $a/d=3$

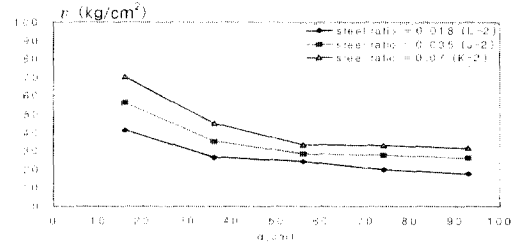
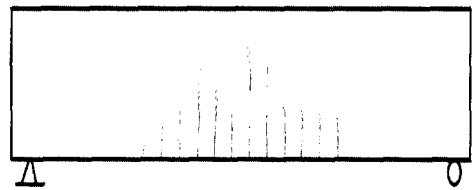
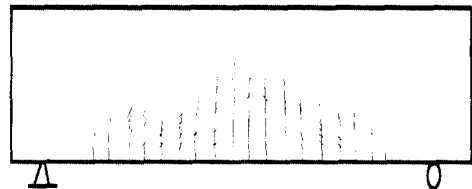


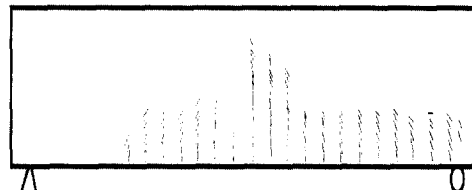
Fig. 27 Size effect on ρ in case of uniform loading



a) $\rho = 0.018$ (L-1)



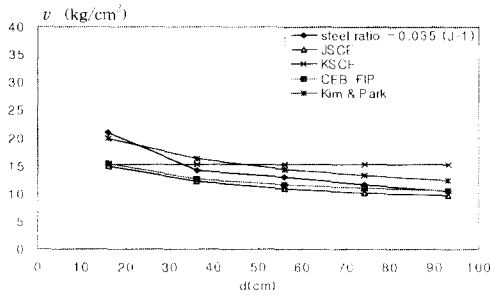
b) $\rho = 0.035$ (J-1)



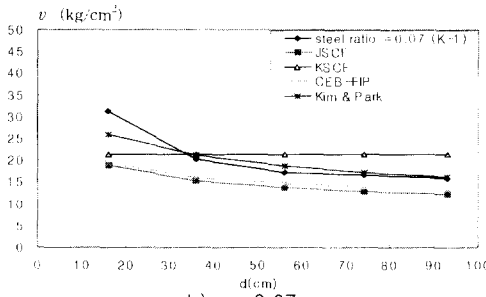
c) $\rho = 0.07$ (K-1)

Fig. 28 Crack pattern of beam with different ρ

Fig. 29, Fig. 30은 주인장철근 보강비에 따른 전단강도를 다른 전단강도식과 비교한 것이다.

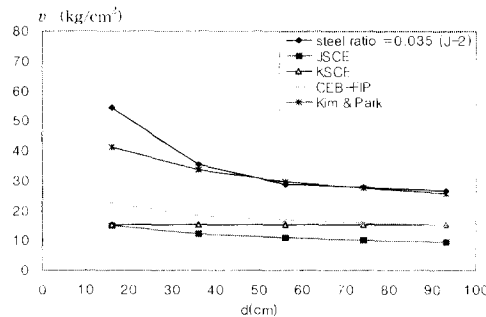


a) $\rho = 0.035$

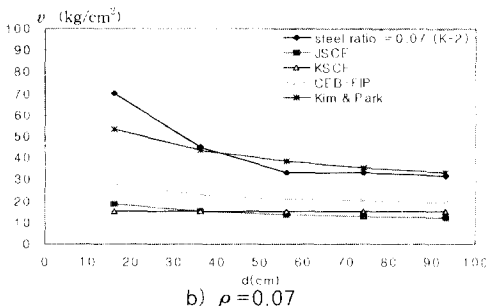


b) $\rho = 0.07$

Fig. 29 Analysis and codes for different ρ on $a/d=3$



a) $\rho = 0.035$



b) $\rho = 0.07$

Fig. 30 Analysis and codes for different ρ on distributed load

Fig. 28의 a), b), c)를 비교해보면 보강비가 커질수록 상대적으로 휨균열이 발생한 구간이 좁아지고 전단균열의 발생이 많아짐을 알 수 있다. 따라서 보강비가 커질수록 점점 복부의 전단균열에 의해 거동이 지배됨을 알 수 있다.

Fig. 29, Fig. 30에서 주인장철근 보강비에 따른 크기효과를 기존 기준식들과 비교해본 결과 크기효과를 식에 반영하는 JSCE 전단강도식, CEB-FIP 전단강도식 그리고 Kim & Park 전단강도식은 보의 유효깊이 증가에 따른 전단강도의 감소를 적절히 재현하며 Kim & Park 전단강도식에 의한 값이 해석결과와 가장 유사한 것으로 판단된다.

4.3 전단지간비에 따른 크기효과

전단지간비의 효과를 파악하기 위해서 유효깊이가 16, 36, 56, 74, 93cm 이고, 폭이 25cm, 압축강도가 330 kg/cm^2 이고, 전단지간비가 0.375에서 3가지 변하며 중앙 두지점에서 집중하중을 받는보를 모델링하여 해석하였다. Fig. 31은 동일한 보에서 전단지간비가 0.375, 1.125, 1.875, 3인 철근콘크리트 보의 전단강도에서의 크기효과 경향을 나타낸 것으로서 주철근비가 0.026, 콘크리트압축강도가 275 kg/cm^2 , 유효깊이가 27.4cm 인 Kani의 실험과 비교하였다.^[14]

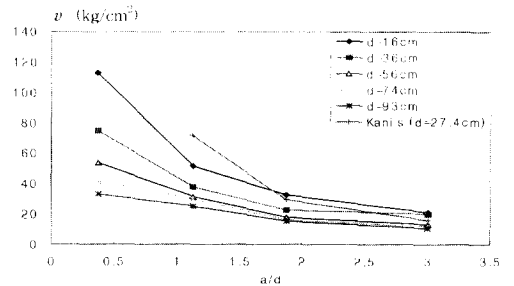
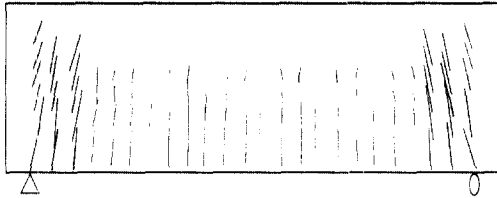


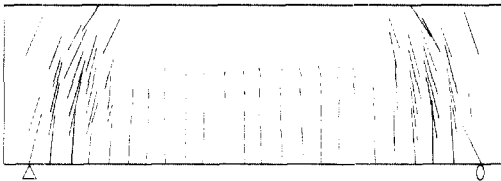
Fig. 31 Shear strength for increase of shear span ratio

Fig. 31에서 전단지간비가 증가함에 따라 각각 유효깊이에 따라 전단강도와 크기효과 영향이 감소됨을 알 수 있고, 유효깊이가 커질수록 전단강도와 크기효과에서의 차이는 감소됨을 알 수 있으며, Kani의 실험과도 경향이 유사함

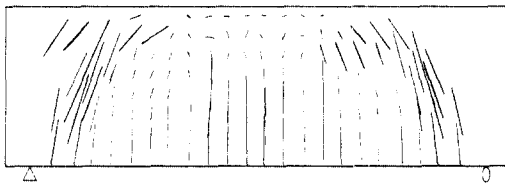
을 알 수 있다. Fig. 32는 각각 T-1, U-1, V-1 시리즈의 파괴시의 균열형태이다.



a) $a/d=0.375$ at failure (T-1)



b) $a/d=1.125$ at failure (U-1)



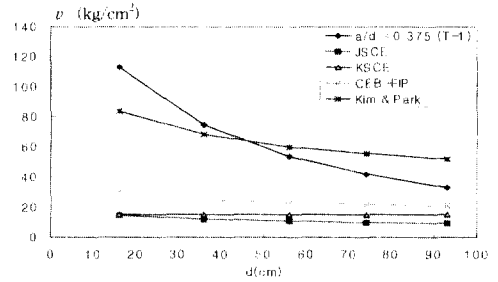
c) $a/d=1.875$ at failure (V-1)

Fig. 32 Crack pattern of beams with different a/d

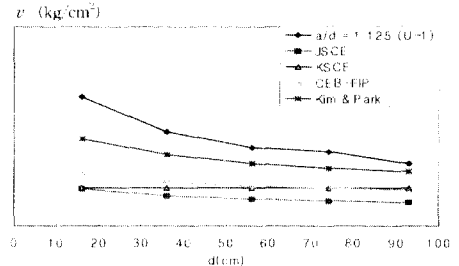
Fig. 32의 a), b), c)를 비교해보면 각 보가 전단지간내에서 발생한 전단균열에 의해 파괴에도달하였으며, 전단지간비가 클수록 휨구간 내부에서의 휨균열 발생이 많은 것을 볼 수 있다.

Fig. 33은 각각의 전단지간비에 따른 전단강도를 다른 전단강도식과 비교해 본 것이다.

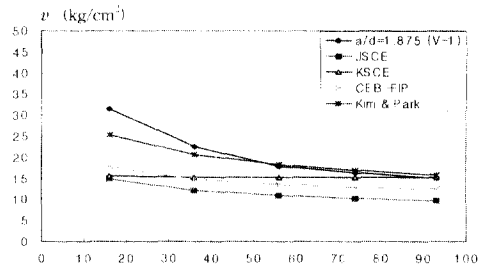
전단지간비에 따른 크기효과의 경향을 기존 기준식들과 비교해본 결과 크기효과를 식에 반영하는 Kim & Park 전단강도식은 전단지간비가 0.375로 작으며 유효깊이가 큰 경우 해석보다 전단강도를 크게 평가하나 그외의 전단지간비에서 해석값과 가장 유사하고 유효깊이의 증가에 따른 전단강도의 감소를 잘 재현하는 것을 알 수 있다.



a) $a/d=0.375$



b) $a/d=1.125$



c) $a/d=1.875$

Fig. 33 Comparisons of analysis and codes with different a/d

5. 결론

본 논문은 스테럽이 없는 철근콘크리트 보의 전단거동의 크기효과를 해석적으로 재현한 것으로서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 철근콘크리트 전단해석시 철근의 부착이 영향을 미치는 철근콘크리트영역에서는 인장경화, 전단경화를, 그외의 무근콘크리트영역에서는 인장연화, 전단연화를 고려하여 모델링함으로써 철근콘크리트 보의 전단거동의 크기효과를 더욱 정확히 해석할 수 있음을 밝혔다.
- 2) 콘크리트의 압축강도와 주인장철근 보강비와 전

단시간비에 관계없이 철근콘크리트보에서 전단강도의 크기효과가 나타나며 콘크리트의 압축강도가 커질수록 유효깊이가 40cm이하에서 크기효과의 경향이 더욱 분명히 나타나고 전단시간비가 증가함에 따라 크기효과의 경향이 감소하였다.

- 3) 기존 기준식과 실험 및 해석 결과를 비교해본 결과, Kim & Park의 전단강도식이 해석결과와 상대적으로 잘 일치하는 것으로 나타났으며 철근콘크리트 보의 전단강도에서의 크기효과를 직접적으로 반영하지 않는 우리나라 콘크리트 표준시방서 전단강도식은 철근콘크리트 보가 대형화됨에 따라 안전측이 아닌 경우도 있으므로 크기효과를 반영하여 개정이 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김진근, "콘크리트 구조물의 크기효과", 한국콘크리트학회지, 제5권 1호, 1993, pp. 38-53.
2. Comite Euro-International du Beton, CEB-FIP Model Code 1990, Bulletin d'Information, No. 213/214, 1993.
3. JSCE, Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures, Part I (Design), 1st Edition, Tokyo, 1986.
4. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Detroit, 1995.
5. 대한토목학회, 콘크리트표준시방서, 건설교통부 개정, 1996.

6. Walraven, J. C., "Size Effect : Their Nature and their Recognition in Building Codes", Proceeding of JCI International Workshop, Sendai, Japan, 1993, pp. 295-314.
7. Walraven, J. C., "Size Effects in Short Beams Loaded in Shear", ACI Structural Journal, Vol. 91, No. 5, 1994, pp. 585-593.
8. Iguro, M. and Shioya, T., "Experimental Studies on Shear Strength of Large Reinforced Concrete Beams under Uniformly Distributed Load", Concrete Library of JSCE, No. 5, 1985, pp. 137-154.
9. Kim, J.K. and Park, Y.D., "Prediction of Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement", ACI Materials Journal, Vol. 93, NO. 3, 1996, pp. 213-222.
10. 변근주, 하주형, 송하원, "철근콘크리트 보의 전단거동의 크기효과 해석", 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제10권 1호, 1998, pp. 321-326.
11. P. Bartos.(ed.), Bond in Concrete, Applied Science Publlishers LTD, London, 1982.
12. Okamura, H. and Maekawa, K., "Verification of Modeling for Reinforced Concrete Finite Element", Finite Element Analysis in Reinforced Concrete Structures, ASCE, 1985, pp. 528-543.
13. Okamura, H. and Maekawa, K., Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete, Gihodo - Shuppan, Tokyo, Japan, 1991.
14. Kani, G.N.J., "How Safe Our Large Reinforced Concrete Beams?", ACI Journal., Proceedings, Vol. 64, No. 3, 1967, pp. 128-141.

요 약

철근콘크리트 보의 전단파괴는 급작스런 취성파괴 때문에 중요한 문제이며, 많은 실험결과들에 의하면 철근콘크리트 보의 전단강도에서의 크기효과는 철근콘크리트 부재의 중요한 특징임이 밝혀졌다. 철근콘크리트 보의 크기가 점점 커짐에 따라 실험이 매우 어려워져 전단강도에 대한 실험데이터나 경험공식을 얻기가 힘들어지며 이에 따른 철근콘크리트 보의 전단강도의 크기효과에 대한 수치해석식 방법이 매우 중요하게 되었다. 본 연구에서는 스테럽이 없는 철근콘크리트 보의 전단해석에 유한요소해석기법을 적용하였고 전단강도에 대한 크기효과를 해석적으로 분석하였다. 또한 철근콘크리트 보의 전단강도에 대한 크기효과에 영향을 주는 인자를 분석하였으며 영향인자를 몇몇 표준시방서를 포함한 주요 전단강도식과 비교하였다.

(접수일자 1998. 6. 9)