

## 콘크리트 구속 조건의 강도 증진 영향 연구

### Increasing effect of concrete strength by confined conditions

임석빈\* · 한상윤\*\* · 강영종\*\*\* · 강진욱\*\*\*\*

Im, Seokbeen · Han, Sang-yun · Kang, Young-Jong · Kang, Jin-Ook

#### Abstract

The confined concrete subjected multi-axial stresses have been known as the fact it increases strength of concrete significantly compared with unconfined concrete. Many researchers have studied in confining effects of concrete, and now are studying in many fields. Although many researches about confined concrete using FRP have been studied recently, it is difficult to apply concrete confined by FRP in real structures because FRP is a brittle material. To investigate the influence of concrete strength and ductility increased by confining stiffness in steel, this study was tested and compared with 51 specimens confined by different shapes and thicknesses of steel tube. This test verified the increasement of strength and ductility in confined concrete. Also, analyzing the experimental data by regression method, this study provides stress-strain model about CSS and R4S considering effect of confinement stiffness on the stress-strain relations of concrete.

#### 1. 서론

최근 들어 토목 구조물 분야의 기술 발달과 함께 구조물의 품질을 향상시킬 수 있는 재료의 연구, 개발은 끊임없이 계속되고 있으며, 그 필요성은 점차로 증가하고 있다. 특히 최근에는 합성재료의 연구와 개발이 급속도로 진행되고 있으며, 그 중에서도 FRP(합성섬유: Fiber reinforced polymer)를 이용한 많은 연구가 진행 중에 있다. 이러한 새로운 재료의 개발 외에 기존 재료의 특성을 이용한 합성재료의 사용도 늘어가는 추세이며, 그 한 예로 구속에 따른 콘크리트 강도 증진효과를 들 수 있다.

그림1과 같이 횡방향 구속에 의해 3축 응력 상태에 놓인 콘크리트(confined concrete)의 강도는 일반적으로 1축 압축 상태의 콘크리트 보다 상당히 큰 값을 갖는 것은 널리 알려져 있으며, 오

\* 고려대학교 공학기술연구소 연구원 · 공학석사 · E-mail : [sbeeni@korea.ac.kr](mailto:sbeeni@korea.ac.kr) - 발표자

\*\* 고려대학교 토목환경공학과 박사과정 · 공학석사 · E-mail : [hansangyun@korea.ac.kr](mailto:hansangyun@korea.ac.kr)

\*\*\* 고려대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사 · E-mail : [yjkang@korea.ac.kr](mailto:yjkang@korea.ac.kr)

\*\*\*\* 삼성물산 건설부문 차장 · 공학박사

래 전부터 이 부분에 대한 많은 연구 진행 및 실제 적용이 되어왔다. 이러한 적용은 횡철근으로 보강된 콘크리트 기둥을 비롯하여, 강관으로 구속된 기둥(CFT : concrete filled steel tube) 등에 사용되어 왔으며, 최근에는 강관 삽입 중공 기둥과 FRP를 이용한 합성 기둥들이 제안되고 있다.

특히 최근에 활발히 연구 진행 중인 FRP를 이용한 기둥의 합성 거동 효과는 FRP가 부식에 대한 저항성이 크고 강도와 강성이 크다는 재료적 특성 외에 철에 비해 가벼운 중량을 갖는다는 장점으로 그 연구의 폭이 확대되어 가고 있으나, 실제로 실 구조물에 적용하기에는 FRP의 재료 자체가 철에 비해 상당히 크게 취성에 의해 지배되는 재료이므로, 콘크리트와 합성 후 연성 거동에 대해 많은 불안 요소를 많이 갖고 있다고 하겠다.

그에 반하여 강관이나 강판으로 구속된 콘크리트 기둥은 강재의 재료 자체가 연성 거동의 큰 장점을 갖고 있을 뿐만 아니라 콘크리트 합성 후에도 구조물이 연성 거동을 하도록 지배하기 때문에 실 구조물 적용에 좀 더 적합하다고 볼 수 있다. 이러한 강재를 이용한 콘크리트 구속 효과는 CFT 기둥에서 실제로 많이 적용되어 왔으며, 보수 보강의 용도로 사용되는 강판 압착 공법 등에도 많이 사용되어 왔다.

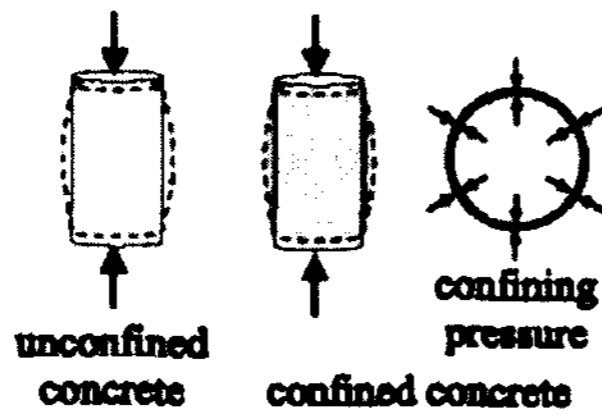


그림 1. 콘크리트 팽창에 의해 작용하는 구속압

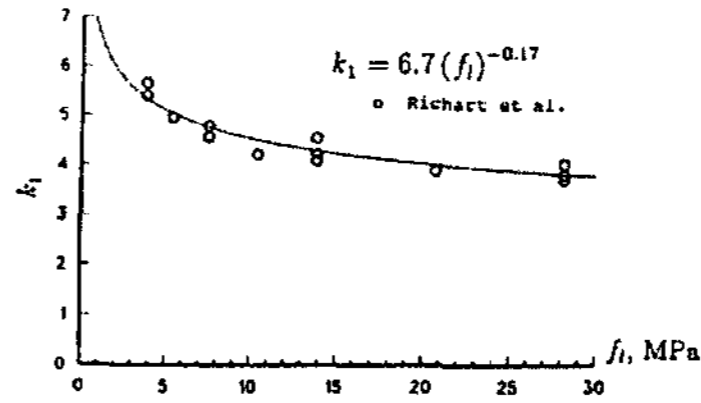


그림 2. 횡방향 압력에 따른 계수  $k_1$ 의 분포

횡구속 효과에 대한 기존 연구로는 Richart et al.(1928)이 처음으로 수압을 이용한 삼축 압축 시험을 통해 다음의 식(1),(2)에서 평균 계수 값을  $k_1 = 4.1$ ,  $k_2 = 5k_1$ 이라고 제안하였다. 또한 그들은 1929년에는 spiral 철근으로 보강된 실린더를 실험하여 이 시험이 수압에 의한 실험과 큰 차이가 없고 대략적으로 같다고 발표하였다.

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_l \quad - (1)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left( 1 + k_2 \frac{f_l}{f'_{co}} \right) \quad - (2)$$

그러나 그림 2와 같이 Richart et al.(1928)의 실험 결과의 계수 값  $k_1 = 4.1$ 은 높은 횡압력에서 측정된 값인 반면에 실제 철근으로 보강된 경우 낮은 구속압이 작용하므로 이 경우 4.1을 그대로 쓸 수 없다고 보고 많은 연구자들이 이에 대한 실험과 분석을 계속하였다. 1949년 Balmer는 그의 실험을 통해  $k_1$  값은 4.5에서 7.0 사이에 분포하며 그  $k_1$ 의 평균값은 5.6이라고 제안하였다. 또한 Sato and Ibushi(1988)<sup>1</sup>도 계수  $k_1$ 이 이와 비슷한 경향을 갖는다고 제안하였고, Saatcioglu and Razvi(1992)<sup>2</sup>는 Richart et al.(1928)의 실험을 회귀 분석하여 계수  $k_1$ 은 다음과 같은 값을 갖는다고 제안하였다.

$$k_1 = 6.7(f_l)^{-0.17} \quad -(3)$$

여기서,  $f_l$ 은 등분포 구속압(uniform confining pressure)

다축 응력 상태의 정육면체(cube)의 강도 증진 효과에 대한 실험은 Kupfer et al.(1969)<sup>3</sup>에 의해 유압 장치로 시험했는데, Kupfer 등은 일축 구속 상태(biaxial)에 대한 콘크리트 강도 증진 효과가 압축의 경우 두 축의 응력이 같을 경우 구속이 없는 경우의 콘크리트 강도(uniaxial test)보다 약 16% 증가하고, 인장의 경우는 별 차이가 없다고 발표하였다. 그 다음해인 1970년에 Zimmerman et al.<sup>4</sup>은 일축 구속 상태와 이축 구속 상태(triaxial loading condition)에 대해 다양한 경우의 강도 측정 실험을 하였고 구속이 없는 콘크리트 강도와 비교하였다. 같은 해에 Iyengar(1970)<sup>5</sup>는 Richart et al.이 언급했었던 spiral 철근에 의해 횡구속된 원주형 콘크리트는 유압에 의해 횡구속된 콘크리트와 유사한 강도를 갖는다고 재확인하였다.

그러나 실제로 고정된 응력에서의 실험과 철근의 탄소성 변형을 통한 구속압의 작용이 완전히 일치한다고 말할 수 없다. 따라서 이 후에 많은 연구자들은 횡방향 보강 철근에 대한 구속 효과에 대해 많은 연구를 수행하였다. Mander et al.(1984)<sup>6</sup>, Scott et al.(1982), Sheikh and Uzumeri(1980), Vellenas et al.(1977)은 다양한 실험을 통해 횡방향 철근의 배치와 강도, 형상과 횡방향 철근을 잡아주는 종방향 철근이 구속 효과에 미치는 바에 대해 연구하였다.

이렇게 구속된 콘크리트에 대한 연구는 기존에 많은 사람들이 실험하고 연구하였으나, 이러한 연구는 유압을 이용한 고정된 삼축 압축 응력 상태의 응력-변형률 곡선식의 산정과 횡철근에 의한 구속 정도에 따른 연구가 많이 진행되었으며, 최근에는 FRP를 이용한 구속 정도에 따른 연구가 많이 진행되고 있는 실정이다. 강관에 이용한 구속 정도에 따른 연구로는 CFT 기둥에 대해 많은 연구와 실험적 데이터가 축적되었으나, 이 경우 콘크리트와 강관이 같이 힘을 받음에 따라 콘크리트에서 약간의 강도 증진 효과를 보겠으나, 강관이 일정 하중 이상에서 먼저 좌굴이 일어나기 때문에 강재에 의한 콘크리트 구속 효과를 100% 발휘했다고 말하기 어렵다.

따라서 기존 실험들이 강관으로 구속된 콘크리트에 하중을 가했을 때 강재의 구속 정도 및 조건에 따른 콘크리트 강도 증진 효과를 적절히 평가했다고 말하기 어려우므로, 본 연구에서는 강관으로 횡구속된 원형, 각형 콘크리트의 압축 강도 성능 평가를 위한 실험을 수행하였다. 시험체는 강관의 두께를 변수로 실험을 수행하였으며, 현재 실험결과를 분석 중에 있다. 본 연구를 통하여 강재로 구속된 경우 콘크리트 강도 증진 효과와 구속 조건이 콘크리트의 응력 변형을 관계에 미치는 영향에 대해 접근해 보고자 한다

## 2. 실험의 개요

### 2.1 시험체의 제작

시험체는 그림 3과 같이 원형 구속 시험체, 사각형 일방향 구속 시험체, 사각형 이방향 구속 시험체의 3가지 종류로 제작되었으며, 각각의 경우 강관의 두께를  $t=0.8, 1.0, 1.2, 1.6, 2.0\text{mm}$ 의 5종류로 제작되었다. 원형 구속 시험체의 경우 공시체 크기와 같은  $\Phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ (내경 기준)로 제작되었고, 사각형 구속 시험체는  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ (내측 기준)로 제작되었다. 또한 표1.에서 제시된

시험체들은 시험체별 각각 3EA씩 제작되었으며, 대조군으로 구속이 없는 경우에 대한 시험체도 3EA씩 제작되었다.

표1. 시험체의 종류

시험체명	구속 조건	강판 두께 (mm)	시험체명	구속 조건	강판 두께 (mm)	시험체명	구속 조건	강판 두께 (mm)
CSS-1	원형 구속	0.8	R4S-1	이방향 구속	0.8	R2S-1	일방향 구속	0.8
CSS-2	원형 구속	1.0	R4S-2	이방향 구속	1.0	R2S-2	일방향 구속	1.0
CSS-3	원형 구속	1.2	R4S-3	이방향 구속	1.2	R2S-3	일방향 구속	1.2
CSS-4	원형 구속	1.6	R4S-4	이방향 구속	1.6	R2S-4	일방향 구속	1.6
CSS-5	원형 구속	2.0	R4S-5	이방향 구속	2.0	R2S-5	일방향 구속	2.0

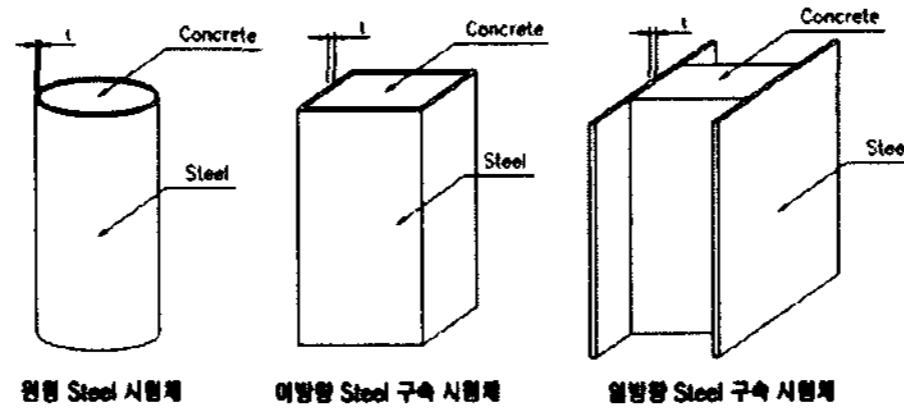


그림3. 시험체의 종류

콘크리트는 굵은골재 최대치수를 13mm, 배합강도는  $210\text{kg/cm}^2$ 으로 설계 배합하였으며, 믹서기의 용량 부족으로 인해 2번에 걸쳐 나누어 배합하였다. 배합은 실내에서 601씩 배합하였으며, 시험체의 수중 양생이 불가능함에 따라 공시체도 시험체와 함께 대기양생 하였다. 시험체의 28일 강도는 설계 배합 강도를 초과하는  $243.5\text{kg/cm}^2$ (타설2)와  $281.9\text{kg/cm}^2$ (타설1)가 나왔고, 실험 시의 강도(49일)는  $264.7\text{kg/cm}^2$ 와  $301.2\text{kg/cm}^2$ 가 나왔다. 실험실 배합에서 이러한 큰 값의 차이의 요인은 정확하게 말할 수 없지만, 잔골재의 함수량 측정에 따른 보정이 누락된 데에 따른 약간의 오차가 발생했을 거라 생각된다. 하지만, 이 실험에서는 배합강도 보다는 구속 조건에 따른 강도 증진 효과가 어떻게 변화하는 지를 살펴보는 것이므로, 각각의 배합 강도에 따른 비교를 시행하도록 한다.

## 2.2 실험 장비

그림4.는 시험체에 축하중을 작용하기 위한 2700kN 용량의 UTM( MTS 815 )으로 controller box를 통해 하중과 축방향 변위가 실시간으로 측정 가능하다. 축하중 재하에 따른 횡방향 변위를 측정하기 위해 강판과 콘크리트에 그림5.와 같이 게이지를 설치하였으며, 그림6.과 같이 LVDT를 설치하여 시험체의 변형을 측정하였다. 측정데이터는 UCAM-20A를 통하여 강판과 콘크리트의 strain과 LVDT의 변형값을 측정하였고, 재하 하중과 시험체의 수직 변위는 MTS 815의 자체 측정 장치를 통해 데이터를 얻었다. 또한 하중은 0.01mm/sec의 속도로 MTS 815에 내의 옵션인 변위제어 모드(displacement control mode)로 재하, 측정하였다.

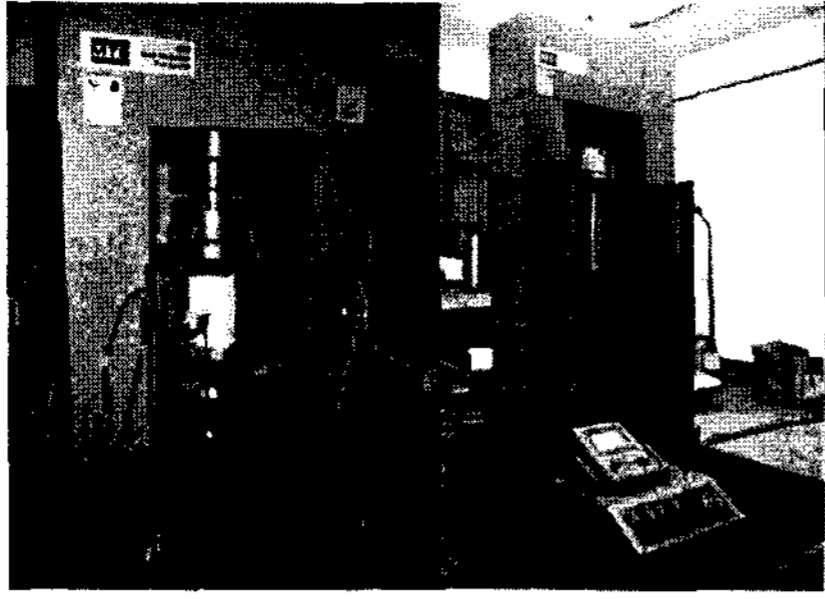


그림4. 가력 장치 UTM ( MTS 815)

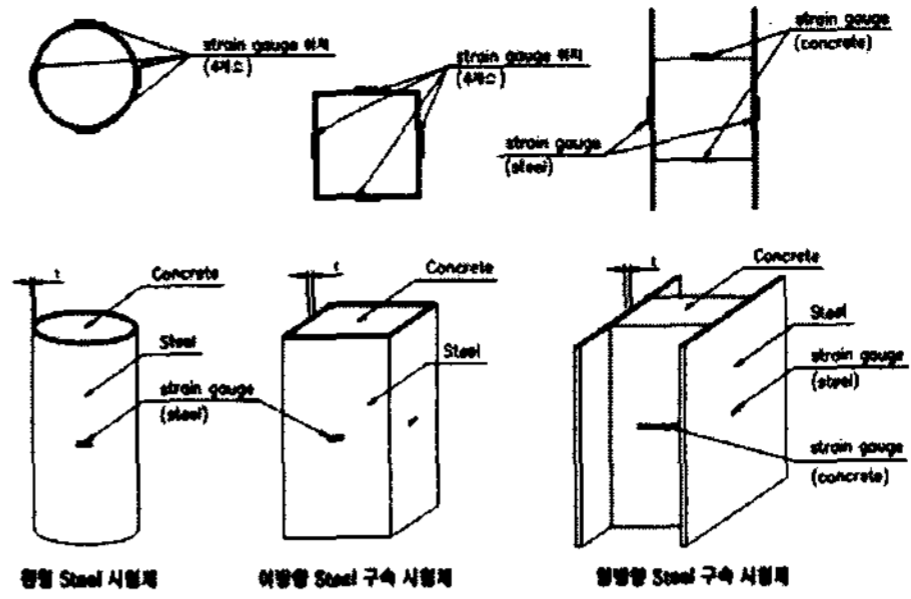


그림5. 시험체의 strain gauge 위치

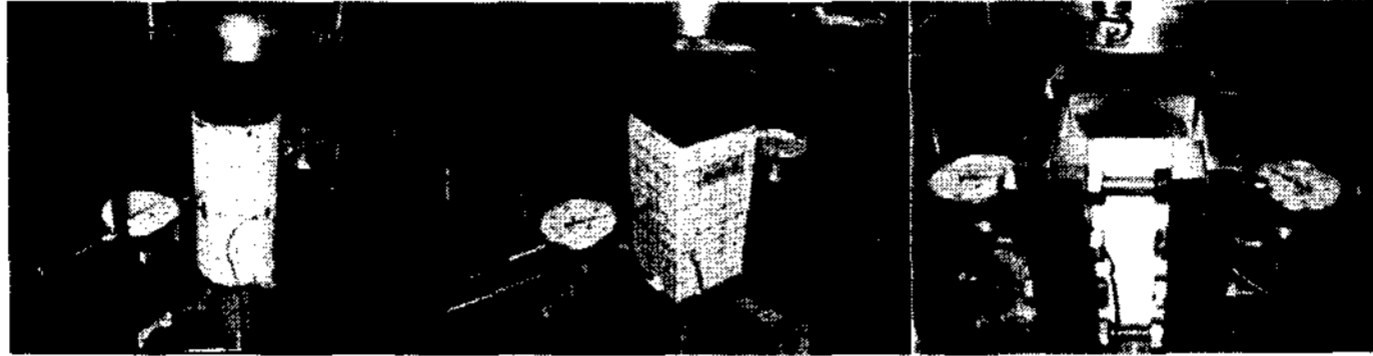


그림6. LVDT 설치 위치

일방향 구속의 경우 그림7.과 같은 실험틀을 만들어 구속 시켰고, 콘크리트에만 하중을 재하하기 위해 그림8.과 같은 가력판을 만들어 실험하였다.

일방향 구속 실험틀

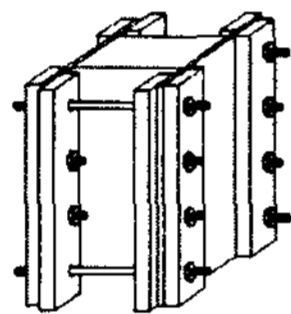
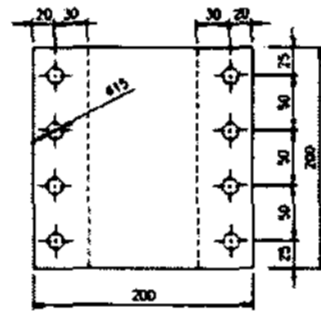
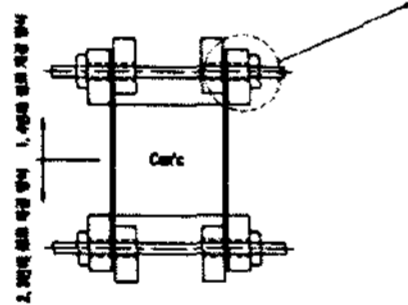


Plate hole 위치

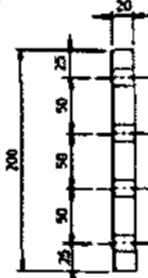


1EA 당 (총 8EA 소요)

경면도(실험틀 전체)



경면도



측면도

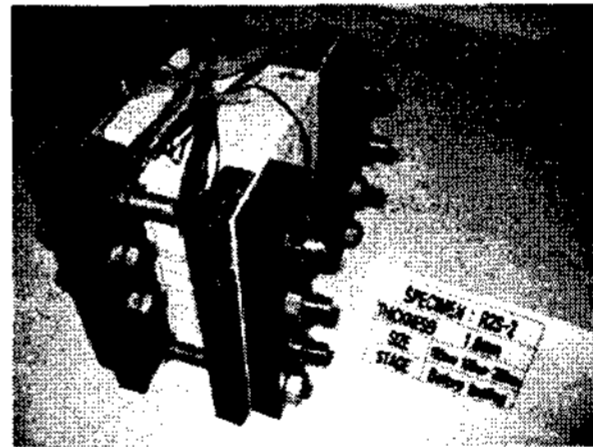


그림7. 일방향 구속 실험틀

실험 측면도

unit : mm

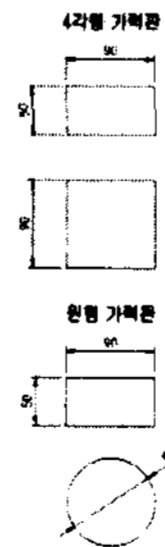
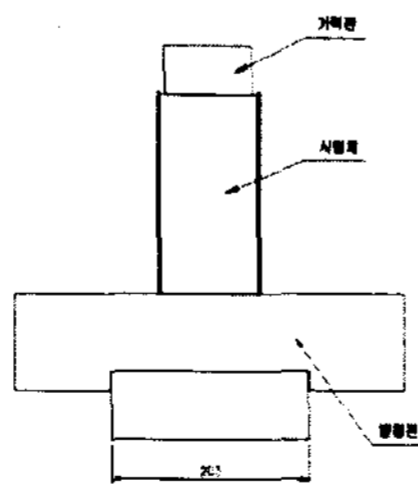


그림8. 실험 측면도 및 가력판 설계도

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 실험 결과

구속강성에 의한 콘크리트 강도 증진 효과 및 연성도 증진 효과에 대한 경향은 아래의 표와 그래프에 제시되어 있으며, R4S군의 경우 CSS군에 비해 강도 증진 효과는 떨어지나, 연성도 증진은 마찬가지로 발생했으며, R2S군의 경우 강도 증진 효과는 발생하지 않았으며, 콘크리트의 균열 이후 약간의 연성도가 증가하였다.

표2. CSS의 콘크리트 강도 증진 효과 (타설 2)

시험체명	강판 두께 (mm)	최대 압축 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	구속에 의한 강도 증진 효과(kgf/cm <sup>2</sup> )	증가량(%)
CSS-1	0.8	434.05	169.919	64.331
CSS-2	1.0	468.41	204.279	77.340
CSS-3	1.2	537.079	272.948	103.338
CSS-4	1.6	614.557	350.426	132.671
CSS-5	2.0	748.213	484.082	183.273
CSS대조군	-	264.131	-	-

표3. R4S의 콘크리트 강도 증진 효과 (타설 1)

시험체명	강판 두께 (mm)	최대 압축 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	구속에 의한 강도 증진 효과(kgf/cm <sup>2</sup> )	증가량(%)
R4S-1	0.8	347.639	-8.69	-2.433
R4S-2	1.0	360.788	4.479	1.257
R4S-3	1.2	384.873	28.564	8.017
R4S-4	1.6	425.717	69.408	19.480
R4S-5	2.0	459.837	103.528	29.056
R4S대조군	-	356.309	-	-

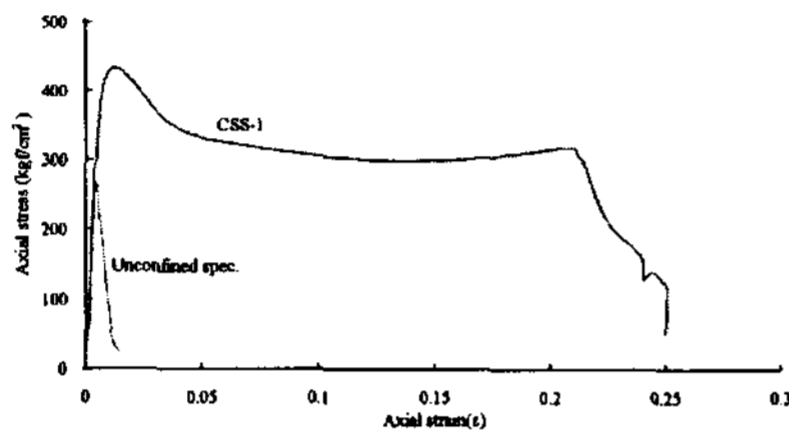


그림9. Unconfined specimen과 CSS-1의 응력-변형률 곡선 비교(타설 2)

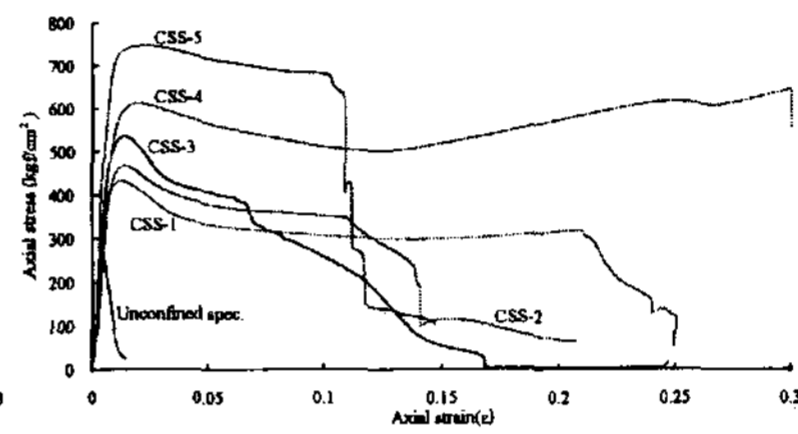


그림10. CSS군의 응력-변형률 곡선 비교(타설 2)

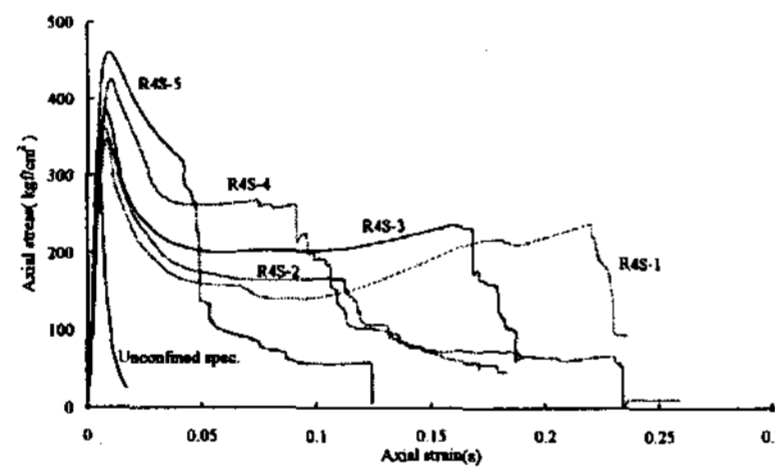


그림11. R4S군의 응력-변형률 곡선 비교(타설 1)

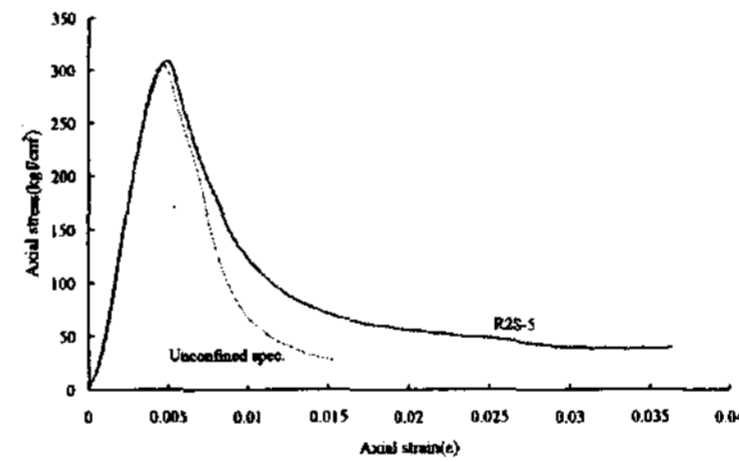


그림12. Unconfined specimen과 R2S-1의 응력-변형률 곡선 비교(타설2)

#### 3.2 결과 분석

구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선의 모델은 다음과 같이 철근으로 구속된 콘크리트 모델에서 많이 인용되는 식으로 접근하였다. Ascending 구간에 해당하는 그림13.에서의 OA구간은 Popovics(1973)의 식(4)를 이용하였고, descending 구간에 해당하는 AC구간은 구속 콘크리트의 최대 강도의 85%에 해당하는 B와 A를 잇는 직선이라고 가정하였다. C이후는 실험결과 약간 증가하기도 하였으나, 보수적으로 제안하기 위해 steel의 과단까지 평행하게 간다고 가정하였다.

$$\sigma = \sigma_{\alpha} \left[ \frac{\gamma(\epsilon_c/\epsilon_{\alpha})}{\gamma - 1 + (\epsilon_c/\epsilon_{\alpha})^{\gamma}} \right], \quad \epsilon \leq \epsilon_{\alpha}; \quad \gamma = \frac{E_c}{E_c - (\sigma_{\alpha}/\epsilon_{\alpha})} \quad (4)$$

$$\sigma = k(\epsilon - \epsilon_{\alpha}) + \sigma_{\alpha}, \quad \epsilon_{\alpha} < \epsilon \leq \epsilon_e; \quad k = \frac{0.15\sigma_{\alpha}}{(\epsilon_{\alpha} - \epsilon_{\alpha 0.85})}, \quad \epsilon_e = \frac{\sigma_e - \sigma_{\alpha}}{k} + \epsilon_{\alpha} \quad - (5)$$

$$\sigma = \sigma_e, \quad \epsilon_e < \epsilon \quad - (6)$$

위 제안식에 필요한  $\sigma_{\alpha}, \epsilon_{\alpha}, \epsilon_{\alpha 0.85}, \sigma_e$  값은 원형 steel 구속 시험체와 이방향 steel 구속 시험체에 대해 실험을 통해 얻은 data를 회귀분석하여 구하였다. 실험 결과 시험체의 용접부와 그 주변에서 파괴가 일어났으며, 용접부의 파괴는 용접부의 imperfection에 의한 파괴로 판단되고, 용접부 주변의 파괴는 용접에 의한 steel의 취성화에 의한 파괴라고 판단된다.(시험체의  $\epsilon=0.2$  이상인 경우) 이러한 imperfection은 두께가 얇은 강판을 사용하였기 때문에 지나친 용접의 경우 시험체의 변형이 일어날 수 있고, 또한 시험체 사이즈가 작아 내부면의 연마작업에 어려움이 있어 조심스럽게 용접 작업을 함에 따라 발생하였다. 따라서 좀 더 정밀한 용접 작업이 이루어지거나 공장 제작된 파이프를 사용할 경우 연성 거동은 더 크게 증가할 것이다. 실제 실험 결과 용접의 상태에 따라 연성 거동이 크게 좌우되었으며, 용접이 잘된 경우는 가력 장치 MTS 815의 최대 stroke를 가해도 파괴가 일어나지 않는 경우( $\epsilon=0.3$ , CSS-4<타설2>)도 있었다.

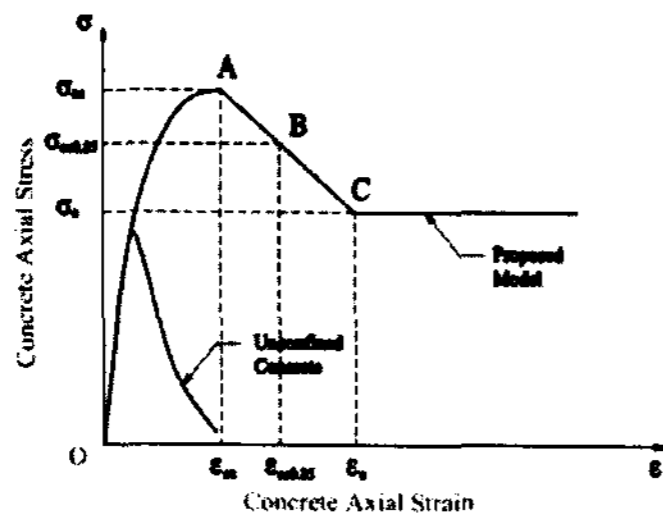


그림13. 구속 콘크리트의 응력-변형률 제안 모델

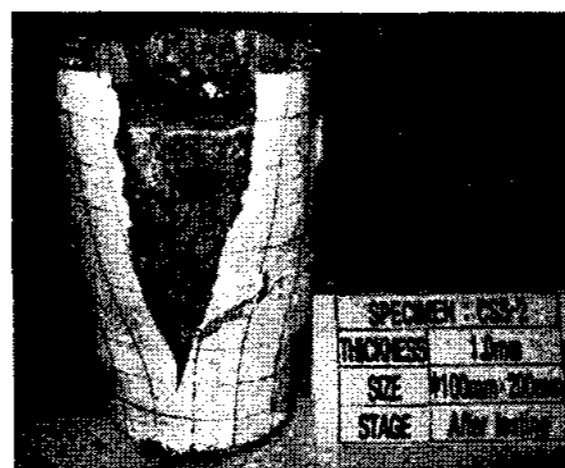


그림14. 용접부 취성화에 의한 파괴

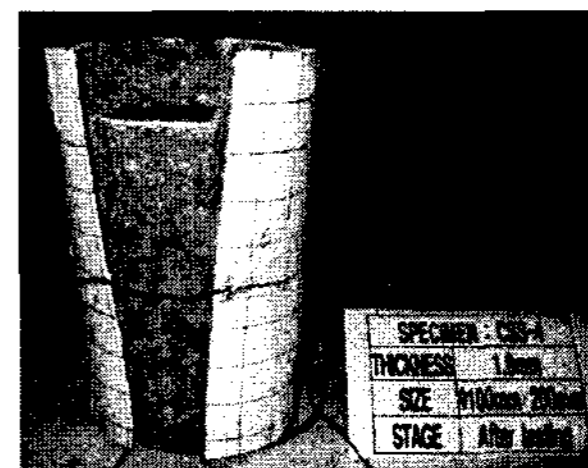


그림15. 용접부 불량에 의한 파괴

구속된 콘크리트의 강도 증진 효과는 membrane action에 의해 steel에 일정한 응력이 작용함으로써 이에 반하여 생기는 구속압에 의해 발생하게 된다. 이방향 구속 시험체의 경우 membrane action 외에 bending에 의한 steel의 변형이 생길 수 있지만, 탄성구간에 대해 FEA해석 결과  $t=2\text{mm}$ 경우에 대해 bending 영향이 거의 발생하지 않았다. 따라서 구속된 콘크리트에서 steel은 단위 신장량을 발생시키는 elastic stiffness  $k=EA/L$ 로 저항하게 되고 steel의 높이가 일정함에 따라 두께에 대해 강도 증진 효과가 비례하게 된다. 콘크리트의 구속 메커니즘은 그림16.과 같이 steel에 걸리는 응력에 대해 콘크리트 횡방향 응력  $\sigma_1$ 이 작용하게 된다.

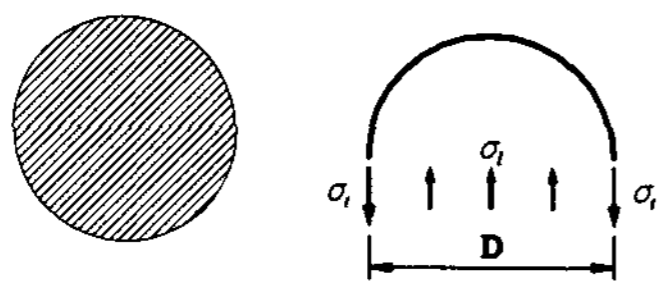


그림16. 원형 구속 시험체의 유효 구속영역과 횡방향 응력 메커니즘

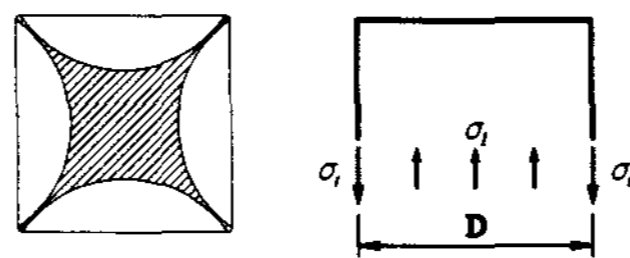


그림17. 이방향 구속 시험체의 유효 구속영역

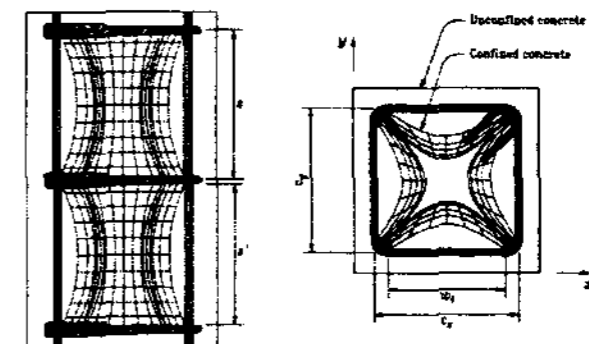


그림18. 철근으로 구속된 사각기둥의 유효 구속영역



사각형 단면일 경우 그 기하학적으로 원형에 비해 구속효과가 떨어지게 되고, 많은 연구자들은 그림14.와 같이 유효 구속영역이 줄어든다고 고려하였다. 본 실험에서는 Mander et al.(1988)가 제안한 철근으로 구속된 사각기둥에 대한 식(7)을 이용하여 이방향 구속 시험체의 횡방향 구속응력을 식(8)과 같이 고려하였다.

$$K_e = \frac{\left(1 - \frac{\sum w_i^2}{6c_x c_y}\right) \left(1 - \frac{s'}{2c_x}\right) \left(1 - \frac{s'}{2c_y}\right)}{(1 - \rho_c)} ; \rho_c = \frac{\text{longitudinal steel area}}{\text{core section area}} \quad (7)$$

$$\therefore \sigma_l = K_e \frac{2\sigma_t \times t}{D} ; K_e = \frac{\left(1 - \frac{\sum w_i^2}{6c_x c_y}\right)}{(1 - \rho_c)} \quad (8)$$

이렇게 고려한 횡방향 응력  $\sigma_l$ 에 대한 제안한 모델에 필요한  $\sigma_{cc}, \epsilon_{cc}, \epsilon_{cc0.85}, \sigma_e$  값 다음과 같이 회귀 분석을 통해 구하였다.

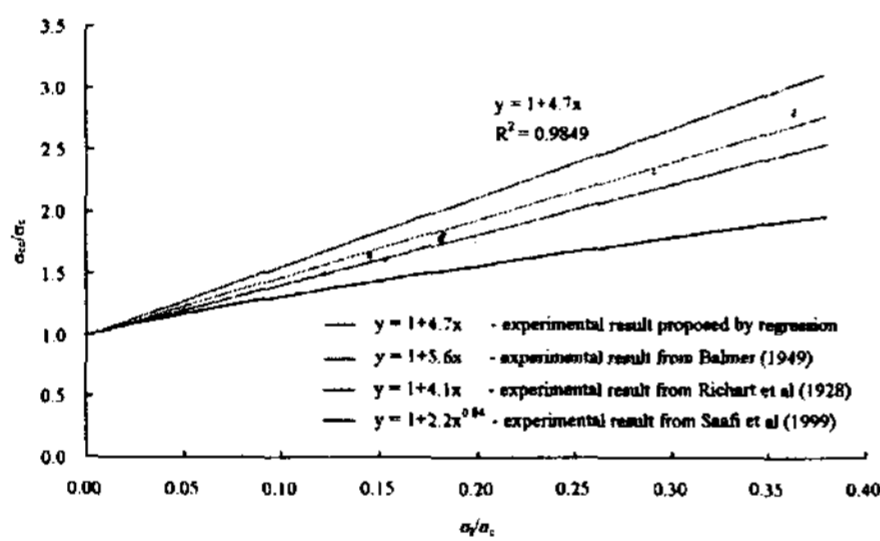


그림19. 구속 응력에 따른  $\sigma_{cc}$ 의 경향(CSS군)

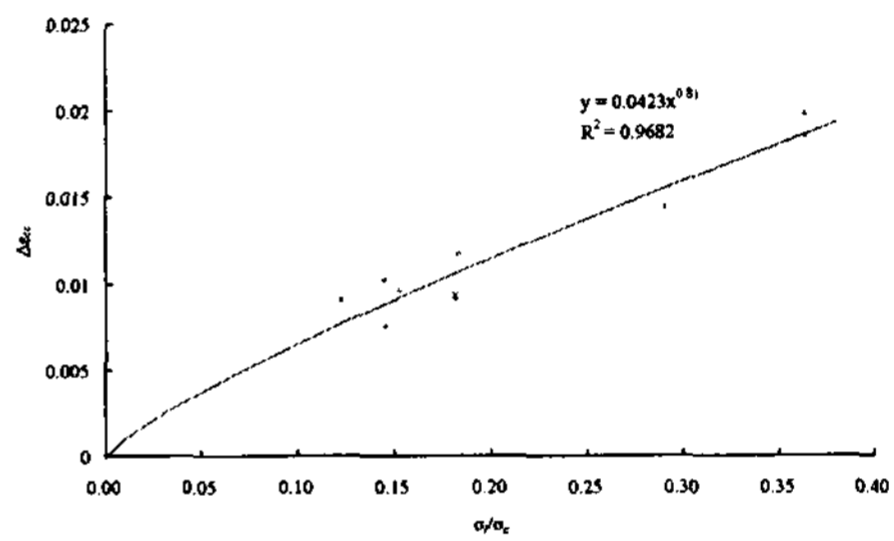


그림20. 구속 응력에 따른  $\epsilon_{cc}$ 의 경향(CSS군)

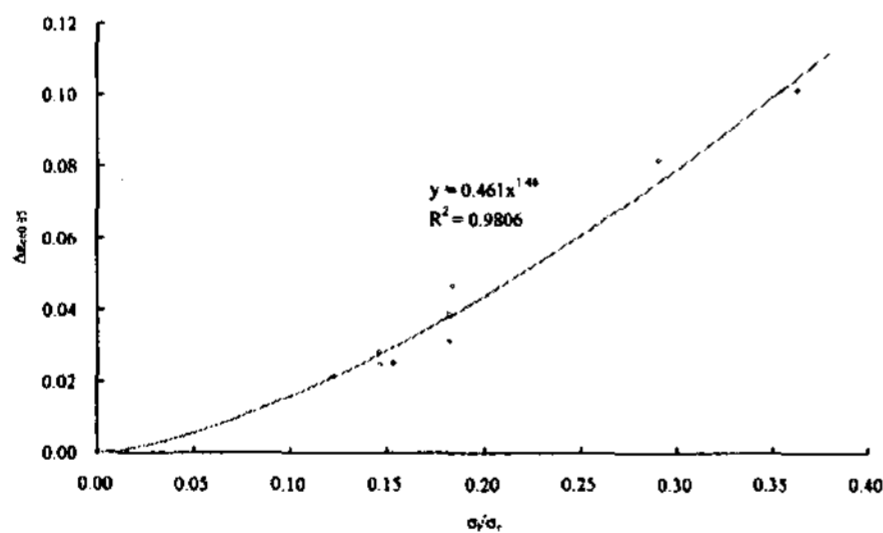


그림21. 구속 응력에 따른  $\epsilon_{cc0.85}$ 의 경향(CSS군)

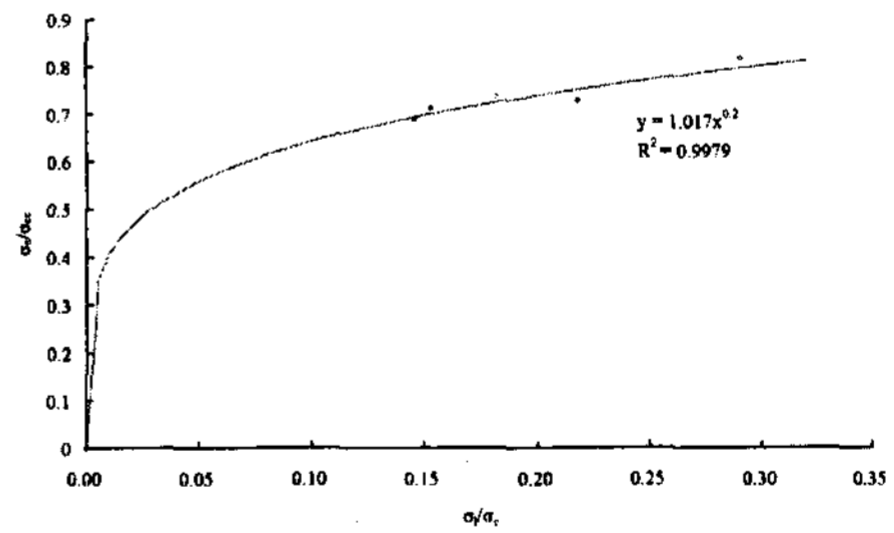


그림22. 구속 응력에 따른  $\sigma_e$ 의 경향(CSS군)



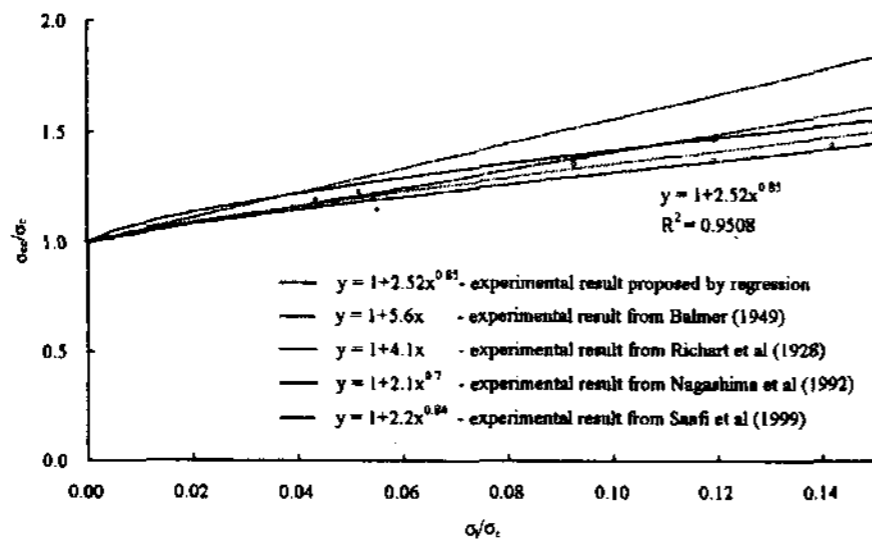


그림23. 구속 응력에 따른  $\sigma_{cc}$ 의 경향(R4S군)

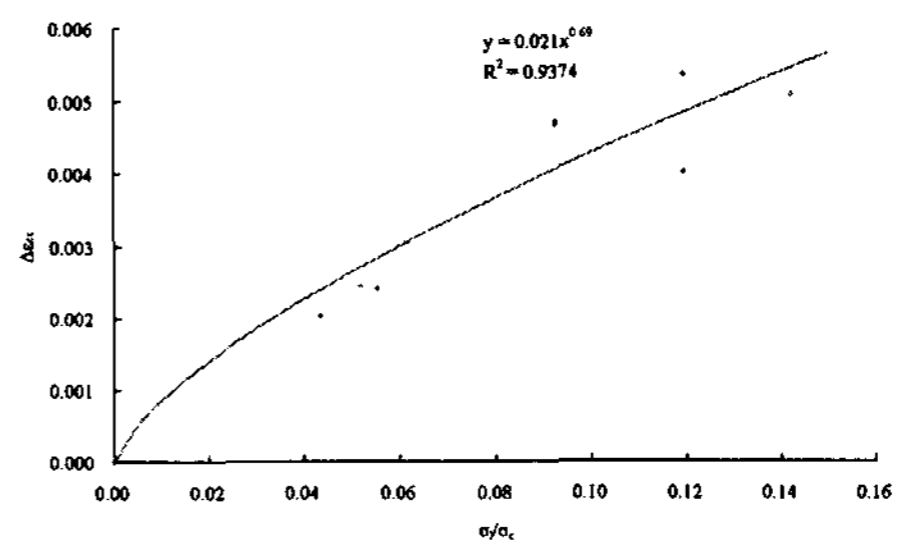


그림24. 구속 응력에 따른  $\epsilon_{cc}$ 의 경향(R4S군)

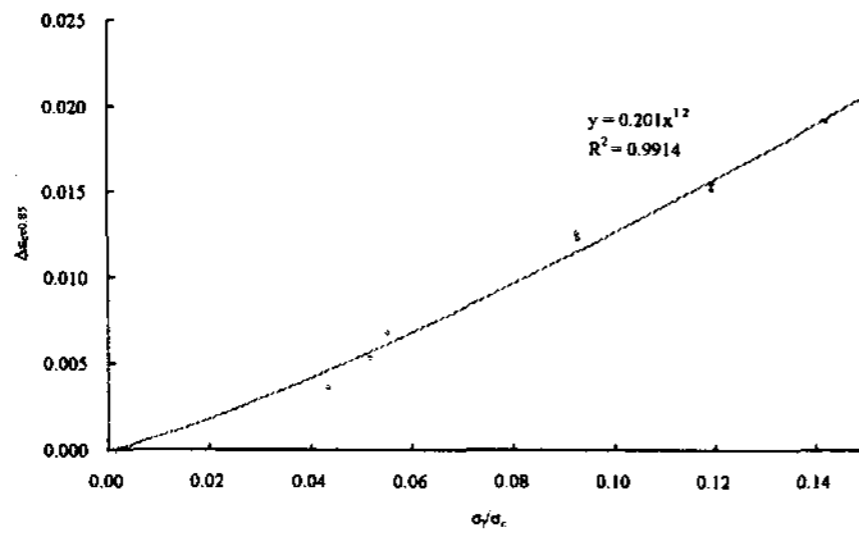


그림25. 구속 응력에 따른  $\epsilon_{cc0.85}$ 의 경향(R4S군)

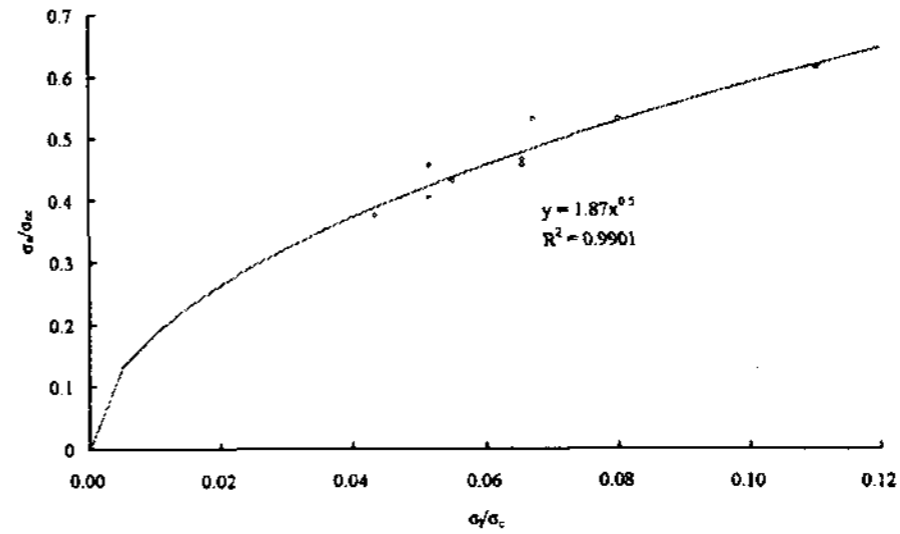


그림26. 구속 응력에 따른  $\sigma_e$ 의 경향(R4S군)

이러한 회귀분석을 통한 제안식과 기존 실험을 비교하면 다음 그림과 같다.

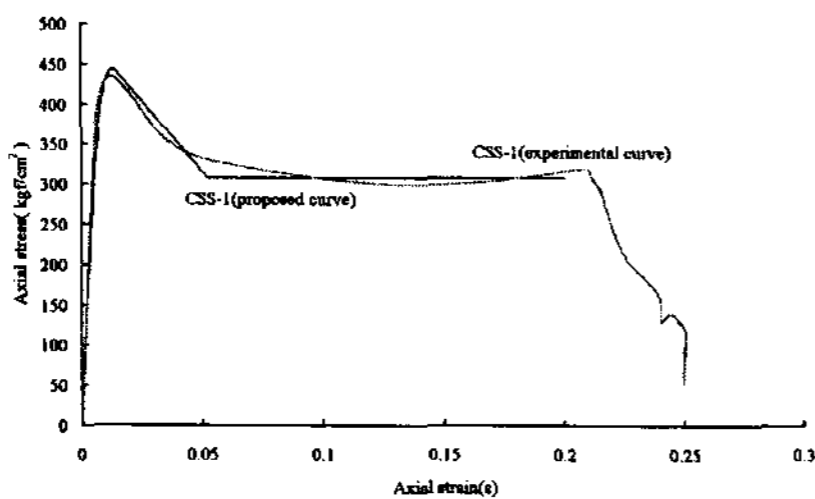


그림27. 실험식 제안식 비교(CSS1)

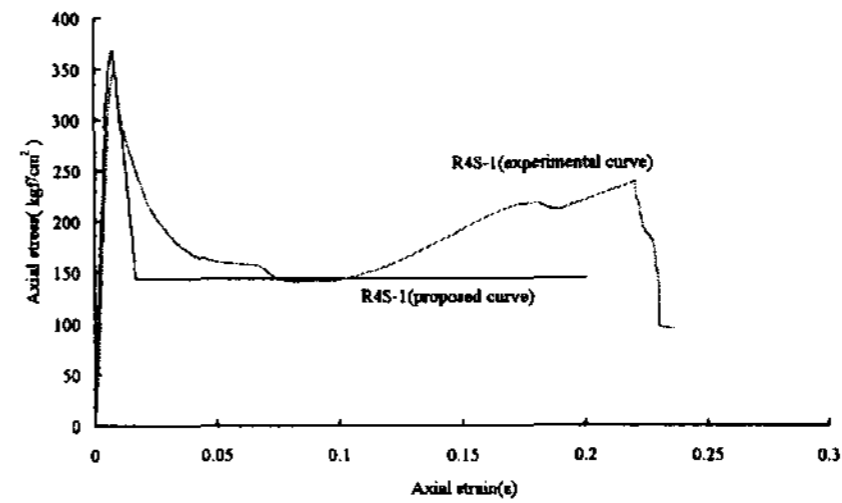


그림28. 실험식 제안식 비교(R4S1)

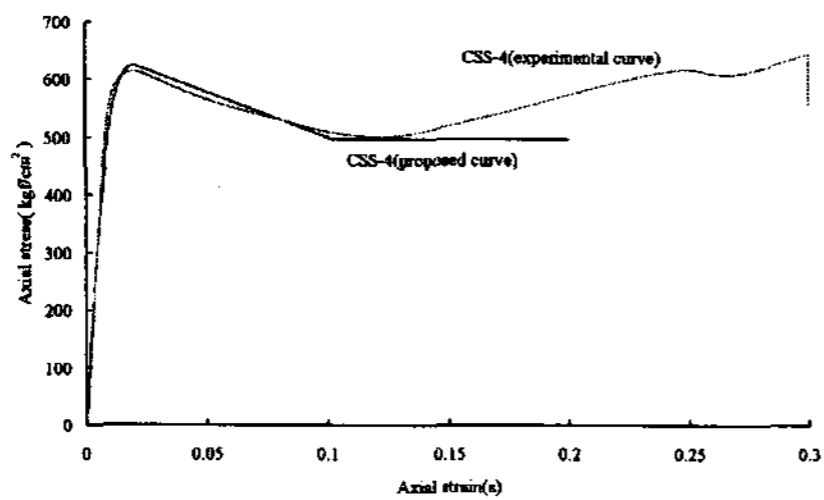


그림29. 실험식 제안식 비교(CSS4)

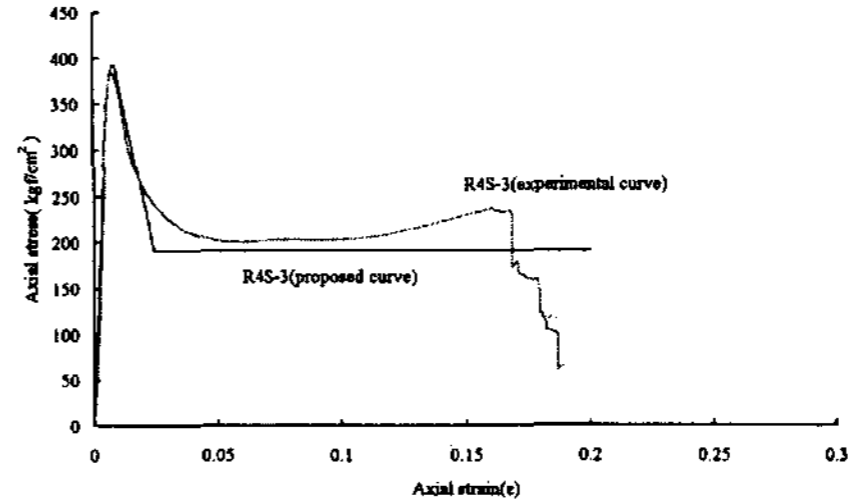


그림30. 실험식 제안식 비교(R4S3)

#### 4. 결론

실험결과를 통하여, 구속된 콘크리트의 강도 증진효과를 확인하였고, 연성 거동이 뛰어나게 증가함을 확인하였다. 또한 실험을 통한 결과를 회귀분석하여 구속 강성이 콘크리트 강도 증진 및 연성도에 미치는 영향을 고려한 원형 steel 구속 시험체와 이방향 steel 구속 시험체에 대한 stress-strain 모델을 다음과 같이 제안하였다.

- 원형 steel 구속 시험체(CSS)의 제안식 정리

1)  $0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{\alpha}$

$$\sigma = \sigma_{\alpha} \left[ \frac{\gamma(\epsilon/\epsilon_{\alpha})}{\gamma-1+(\epsilon/\epsilon_{\alpha})^{\gamma}} \right]; \quad \gamma = \frac{E_c}{E_c - (\sigma_{\alpha}/\epsilon_{\alpha})}$$

$$\sigma_{\alpha}/\sigma_c = 1 + 4.7(\sigma_l/\sigma_c)$$

$$\Delta\epsilon_{\alpha} = 0.0423(\sigma_l/\sigma_c)^{0.81} \quad \epsilon_{\alpha} = \epsilon_c + \Delta\epsilon_{\alpha}$$

2)  $\epsilon_{\alpha} \leq \epsilon \leq \epsilon_c$

$$\sigma = k(\epsilon - \epsilon_{\alpha}) + \sigma_{\alpha}; \quad k = \frac{0.15\sigma_{\alpha}}{(\epsilon_{\alpha} - \epsilon_{\alpha 0.85})}$$

$$\Delta\epsilon_{\alpha 0.85} = 0.461(\sigma_l/\sigma_c)^{1.46} \quad \epsilon_{\alpha 0.85} = \epsilon_c + \Delta\epsilon_{\alpha 0.85}$$

3)  $\epsilon_e \leq \epsilon$

$$\sigma = \sigma_e; \quad \epsilon_e = \frac{\sigma_e - \sigma_{\alpha}}{k} + \epsilon_{\alpha}$$

$$\sigma_e/\sigma_{\alpha} = 1.017(\sigma_l/\sigma_c)^{0.2}$$

- 이방향 steel 구속 시험체(R4S)의 제안식 정리

1)  $0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{\alpha}$

$$\sigma = \sigma_{\alpha} \left[ \frac{\gamma(\epsilon/\epsilon_{\alpha})}{\gamma-1+(\epsilon/\epsilon_{\alpha})^{\gamma}} \right]; \quad \gamma = \frac{E_c}{E_c - (\sigma_{\alpha}/\epsilon_{\alpha})}$$

$$\sigma_{\alpha}/\sigma_c = 1 + 2.52(\sigma_l/\sigma_c)^{0.85}$$

$$\Delta\epsilon_{\alpha} = 0.021(\sigma_l/\sigma_c)^{0.69} \quad \epsilon_{\alpha} = \epsilon_c + \Delta\epsilon_{\alpha}$$

2)  $\epsilon_{\alpha} \leq \epsilon \leq \epsilon_e$

$$\sigma = k(\epsilon - \epsilon_{\alpha}) + \sigma_{\alpha}; \quad k = \frac{0.15\sigma_{\alpha}}{(\epsilon_{\alpha} - \epsilon_{\alpha 0.85})}$$

$$\Delta\epsilon_{\alpha 0.85} = 0.201(\sigma_l/\sigma_c)^{1.2} \quad \epsilon_{\alpha 0.85} = \epsilon_c + \Delta\epsilon_{\alpha 0.85}$$

3)  $\epsilon_e \leq \epsilon$

$$\sigma = \sigma_e; \quad \epsilon_e = \frac{\sigma_e - \sigma_{\alpha}}{k} + \epsilon_{\alpha}$$

$$\sigma_e/\sigma_{\alpha} = 1.87(\sigma_l/\sigma_c)^{0.5}$$

본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

- 강판에 의해 구속된 콘크리트는 철근에 의해 구속된 콘크리트에 비해 뛰어난 강도 증진 효과와 연성도 증가로 에너지 흡수 능력이 탁월하게 되어 실제 구조물 적용에 매우 유리하다고 판단된다.

- 구속된 콘크리트는 강도 증진 효과에 비해 연성도의 증가가 더 현격하게 발생된다.

- 원형 steel 구속 시험체는 기하학적 단면 특성에 의해 이방향 steel 구속 시험체에 비해 descending 구간과 그 이후에 연성 거동이 크게 발생하였을 경우에 대하여 더 뛰어난 에너지 흡수 능력을 갖는다.

- 강판에 의한 구속은 강판의 연속성에 의해 부분 파괴에도 급격하게 파괴가 일어나지 않고, 주변부에서 에너지를 흡수하게 된다.

- 일방향 steel 구속 시험체의 경우 강도 증진 효과가 발생하지 않으며, 약간의 연성도가 증가하나 그 효과는 미미하다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 산·학·연 공동연구개발사업[건설교통기술혁신사업] 과제 연구의 일부로서, 『건설교통기술평가원』의 지원과, 『삼성물산 건설부문』의 부분지원으로 이루어졌으며, 지원 기관에 깊은 감사를 표합니다.

#### 참고문헌

1. Cusson, D., and Paultre, P.(1995). "Stress-Strain Model for Confined High-Strength Concrete." J. Struct. Engrg., ASCE, 121(3), 468-477
2. Fafitis, A., and Shah, S. P.(1985). "Predictions of Ultimate Behavior of Confined Columns Subjected to Large Deformations." ACI J. July-August 1985 pp. 423-433
3. H. S. Chung., K. H Yang., Y. H. Lee., H. C. Eun.(2002). "Stress-Strain Curve of Laterally Confined Concrete ." Engineering Structures. 24(2002) 1153-1163
4. Iyengar, K. T. R. J., Desayi, P., and Reddy, K. N., "Stress-strain characteristics of concrete confined in steel blinders," Magazine of Concrete Research, Vol. 22, No. 72, 1977, pp. 173-184
5. Kent A. Harries., Gayatri Kharel.(2003). "Experimental Investigation of the Behavior of Variably Confined Concrete." Cement and Concrete Res. 33, 873-880
6. Mander, J. B., Priestly, M. J. N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 114, No. 8, Aug. 1988, pp. 1804-1826
7. Mander, J. B., and Priestley, M. J. N., Park, R.(1988). "Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete." J. Struct. Engrg., ASCE, 114(8), 1827-1849
8. Saatcioglu, M. and Razvi, S. R., "Strength and ductility of confined concrete," Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 6, pp. 1560-1607