

碩士學位論文

띠철근이 철근 콘크리트 사각형  
기둥의 강도와 연성에 미치는 영향



濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學專攻

韓 昌 潤

2 0 0 9年 2月

# 띠철근이 철근 콘크리트 사각형 기둥의 강도와 연성에 미치는 영향

指導教授 朴 相 烈

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2009 年 2 月

濟州大學校 産業大學院  
建設環境工學科 土木工學專攻

韓 昌 潤

韓昌潤의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

2009 年 2 月

審査委員長 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

# Effect of Ties on the Strength and Ductility in Reinforced Concrete Rectangular Column

Chang-Yun Han

(Supervised by Professor Sang-Yeol Park)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for  
the degree of Master of Engineering

2009. 2.

This thesis has been examined and approved

Thesis director, Sang-Jin Kim, Prof. of Civil & Ocean Engineering

Thesis director, Sang-Yeol Park, Prof. of Civil & Ocean Engineering

Thesis director, Jung-Man Nam, Prof. of Civil & Ocean Engineering

*February 2009.*

Department of Construction and Environmental Engineering  
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

- 목 차 -

I. 서 론 .....	1
1. 연구배경 .....	1
2. 연구의 목적 .....	2
3. 연구내용 및 방법 .....	3
II. 기존 연구 및 이론적 고찰 .....	4
1. 기준식 고찰 .....	4
1) ACI 기준 .....	4
2) NZS 3101 : 1995(뉴질랜드 기준) .....	8
2. 기존 연구 고찰 .....	11
1) Kent-Park의 연구 .....	11
2) Seikh-Uzumeri 연구 .....	13
3) Cusson-Paultre 연구 .....	15
4) Nagashima et. al. 연구 .....	17
5) Saaticioglu-Razvi 연구 .....	19
3. 연성지수에 대한 연구 고찰 .....	21
1) 연성지수 .....	21
2) A. E. Naaman과 S. M. Jeong의 연구 .....	21
III. 실험 .....	24
1. 실험개요 .....	24
2. 시험체 제원 .....	24
3. 시험체 제작 .....	25
4. 실험변수 .....	27
5. 사용재료 .....	28
1) 콘크리트 .....	28

2) 철근 .....	29
3) FRP sheet .....	30
4) Epoxy .....	31
5) Strain gage (for concrete) .....	31
6. 실험방법 .....	32
1) 실험기기 .....	32
2) 시험체 설치 .....	33
3) 실험 및 데이터 측정방법 .....	34
<b>IV. 실험결과 및 분석 .....</b>	<b>35</b>
1. 일반사항 .....	35
2. 파괴 양상 및 균열형태 .....	36
1) 띠철근 간격에 대한 영향 .....	36
2) 띠철근 형상에 대한 영향 .....	41
3. 기둥의 연성 평가 .....	45
1) 연성의 개념 .....	45
2) 극한 변형량에 의한 연성 비교 .....	45
3) 에너지 방법에 의한 연성 비교 .....	48
4) 연성지수의 비교 .....	49
<b>V. 결 론 .....</b>	<b>51</b>
<b>VI. 참고문헌 .....</b>	<b>52</b>

## List of tables

Table 2.1 Parameter of Kent-Park's test .....	11
Table 2.2 Parameters of Seikh-Uzumeri's test .....	14
Table 2.3 Parameters of Cusson-Paultre's test .....	16
Table 2.4 Parameters of Nagashima et. al.'s test .....	17
Table 2.5 Parameters of Saaticioglu-Razvi's test .....	19
Table 3.1 Parameters for specimens .....	27
Table 3.2 Mix design of concrete .....	28
Table 3.3 Result for compressive strength test .....	28
Table 3.4 Result for tensile test .....	29
Table 3.5 Material properties of CFRP sheet .....	30
Table 3.6 Properties of epoxy .....	31
Table 3.7 Concrete strain gage specification .....	31
Table 4.1 Test results .....	35
Table 4.2 Deflection and ductility index of specimens .....	46
Table 4.3 Ductility index of specimens by energy .....	49

## List of figures

Fig. 1.1 Shear failure of pier by earthquake .....	1
Fig. 2.1 Effectiveness of spirals and ties compared with ACI 318-83 and ACI 318-89 .....	8
Fig. 2.2 Modified Kent-Park Model .....	12
Fig. 2.3 Seikh-Uzumeri Model and effective confinement area .....	14
Fig. 2.4 Cusson-Paultre Model .....	17
Fig. 2.5 Saaticioglu-Razvi Model and effective equivalent confinement pressure .....	21
Fig. 2.6 Elastic-perfectly plastic flow .....	22
Fig. 2.7 Total, elastic, and Inelastic energies .....	23
Fig. 3.1 Dimension of specimen .....	25
Fig. 3.2 Manufacturing process of specimens .....	26
Fig. 3.3 Compressive strength test .....	29
Fig. 3.4 Tensile test for D6 steel .....	30
Fig. 3.5 CFRP sheet .....	30
Fig. 3.6 Arrangement for data acquisition .....	32
Fig. 3.7 Test equipment .....	33
Fig. 3.8 Real view of test set-up (S80-2 specimen) .....	34
Fig. 4.1 Load - Strain curves of specimens with different tie spacing .....	37
Fig. 4.2 Final failure and crack of S60-1 specimens .....	38
Fig. 4.3 Final failure and crack of S60-2 specimens .....	38
Fig. 4.4 Final failure and crack of S40-2 specimens .....	39
Fig. 4.5 Final failure and crack of S40-3 specimens .....	39
Fig. 4.6 Final failure and crack of S80-1 specimens .....	40
Fig. 4.7 Final failure and crack of S80-3 specimens .....	40
Fig. 4.8 Final failure and crack of C60-1 specimens .....	42

Fig. 4.9 Final failure and crack of C60-2 specimens ..... 42

Fig. 4.10 Final failure and crack of H60-2 specimens ..... 43

Fig. 4.11 Final failure and crack of H60-3 specimens ..... 43

Fig. 4.12 Load - Strain curves of specimens with different tie shape ..... 43

Fig. 4.13 Load - Deflection curves of specimens with different tie spacing .. 46

Fig. 4.14 Load - Deflection curves of specimens with different tie shape ..... 48

Fig. 4.15 Comparison of the ductility Index by deflection and energy ..... 50





## Summary

The purpose of this study is to evaluate the influence and safety that the interval and shape of tie has on the strength and ductility of ferroconcrete square pillar with experiment.

Previous studies reported that a tie effectively promoted the safety by improving the strength and ductility of pillar through suitable restriction of core concrete and the horizontal direction support of compression bar.

There is the standard of the shape and reinforcement of tie for ferroconcrete pillar, but nevertheless currently a tie used in some fields under construction has been constructed in different way from the design for the convenience of construction. A research was required to analyze the problem on the behavior of concrete pillar caused from a shoddy and fault construction of tie, and then evaluate the safety. Accordingly, this study selected the interval and shape as major influential factor, then evaluated its influence on the strength and ductility with experiment. The method of droop using load-deflection curve from experiment and the method by the transformative energy were used to evaluate the ductility ratio.

As the result of this experiment, the ultimate strength of each testing body was almost similar each other, so it is considered that there is insignificant influence that the interval or shape of tie had on the ultimate strength.

For the influence of tie, the ductility is increased as its interval is narrower, and the safety is increased owing to delayed fracture.

Square concrete pillar with simple double-joint tie used in some fields under construction owing to the easiness of construction had much lower ductility as compared with standard closure tie pillar, thus its safety was reduced during ultimate fracture, so it must be sublated. On the other hand, tie pillar

doubly jointed with a hook had the ductility similar with that of standard closure tie pillar. Therefore it is considered that if it is very difficult to use standard closure tie when constructing, we can substitute other tie for this after sufficient investigation of efficiency.



# I. 서론

## 1. 연구배경

기둥은 높이가 단면 최소치수의 3배 이상이 되며, 주로 압축하중을 지지하도록 사용된 부재로 정의된다. 대부분의 기둥은 보와 기둥의 일체화로 유발되는 구속 모멘트, 불균형된 바닥판의 지지, 풍하중 또는 지진하중과 같은 수평하중 등에 의해 생긴 편심으로 인하여 다소의 휨모멘트를 받기 때문에 순수 축 하중만을 받는 압축부재는 거의 존재하지 않는다.

철근 콘크리트 기둥은 고정하중이나 적재하중과 같이 상부에서 전달되는 축하중과 횡하중에 저항할 수 있는 재료적인 장점을 가지고 있다. 콘크리트는 높은 압축강도를 가지므로 압축부재에 적용하기에 뛰어난 성질을 나타내고 취성적인 콘크리트를 보완하기 위해 연성이 높고 인장강도가 큰 철근이 휨이나 수평하중에 대해 저항하므로 구조물에 작용하는 하중을 효과적으로 저항할 수 있다. 그러나 최근 발생빈도가 높아지고 있는 지진하중과 같은 반복 수평하중에 의하여 충분한 연성을 확보하지 못한 구조물들이 갑작스런 전단파괴나 휨 파괴를 일으키



(a) 1995 Kobe earthquake



(b) 1999 Earthquake in Taipei

**Fig. 1.1** Shear failure of pier by earthquake

는 구조적인 취약성을 가지고 있다. Fig. 1.1은 지진으로 인한 교량 기둥의 전단 파괴 형상을 잘 보여주고 있다.

근래에 들어 건물의 고층화 및 특수 구조물 등의 필요성에 따른 콘크리트 강도의 증대와 더불어 취성 파괴에 대한 문제가 대두되고 있으나, 현재 사용되고 있는 철근 콘크리트 기둥은 무게에 비해 강도가 낮고 연성이 부족하다는 문제점을 내포하고 있다. 수년 동안 강도와 연성을 향상시키기 위한 띠철근의 상세에 대한 연구가 많은 연구자들에 의해 진행되어 왔고, 그 결과 띠철근에 의한 코어 콘크리트의 적절한 구속과 압축철근의 횡방향 지지는 기둥의 연성을 가장 효과적으로 증진시키는 것으로 증명되었다. 그럼에도 불구하고 현재 일부 시공현장에서 사용되어지는 띠철근은 시공의 편의성을 위해 설계와 다르게 시공 되어지는 경우가 있다. 따라서 이러한 부실시공으로 나타나는 구조물의 거동과 야기될 수 있는 문제점을 알아볼 수 있는 연구가 필요한 실정이다.

## 2. 연구의 목적

철근 콘크리트 기둥은 상부에서 전달되는 축방향 하중을 하부로 전달하는 기능을 갖는 1차 구조부재로써 작용하는 축하중과 횡하중이 효과적으로 저항하기 위해서는 콘크리트와 압축철근의 강도뿐만 아니라 띠철근의 간격과 형상이 중요시된다. 특히 띠철근은 코어 콘크리트의 구속과 종방향 주철근의 좌굴현상을 억제시키기 때문에 효과적으로 기둥의 강도와 연성을 향상시키는 기능을 갖는다.

이런 띠철근의 간격이 기둥의 강도와 연성에 어떠한 영향을 미치는지, 또한 일부 시공 현장에서 사용 되어지는 띠철근의 형상과 표준적인 형상의 띠철근을 비교하고 시공성과 연성을 향상시키는 대안적인 방법을 제공하고자 한다.

### 3. 연구내용 및 방법

본 연구는 철근콘크리트 사각형 기둥의 강도와 연성에 띠철근 형상과 간격이 미치는 영향을 알아보기 위한 내용으로, 특히 일부 시공현장에서 시공의 편의를 위해 사용되고 있는 스트립의 형상이 구조물의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 아래와 같은 방법으로 연구를 진행하였다.

- (1) 국내외의 기준 및 기존 연구 자료를 분석하고, 이를 바탕으로 기둥의 연성에 대한 평가방법을 결정하였다.
- (2) 사각형 철근 콘크리트 기둥의 거동을 나타낼 수 있는 시험체 (100×100×600mm)를 계획하고 스트립의 형상과 스트립의 간격 등을 주요변수로 선정하였다.
- (3) 기둥에 대한 실험은 변위제어로 하중을 재하하였으며, 하중 속도는 극한하중의 60%까지는 0.033mm/sec로, 60% ~ 파괴시까지 0.02mm/sec로 재하하였다.
- (4) 실험시 데이터는 동적변형률 측정기를 통하여 하중, 처짐, 표면변형률을 측정하였다.
- (5) 각 시험체의 극한거동에 따른 기둥의 변형과 처짐, 표면의 변형률과 균열양상 및 파괴형태를 분석하였다.
- (6) 하중-처짐 곡선을 통하여 각 시험체의 거동을 평가하였으며, 극한 변형량과 변형 에너지량을 통하여 연성지수를 계산하고 평가하였다.

## II. 기존 연구 및 이론적 고찰

### 1. 기준식 고찰

#### 1) ACI 기준

국내의 극한 강도설계법에 의한 철근콘크리트 계산규준은 미국콘크리트학회(ACI)의 규준을 근간으로 하고 있으며 현 ACI 규준의 구속철근 요구의 기본개념은 피복콘크리트가 박리한 후 기둥의 축하중 전달능력은 피복콘크리트 박리전과 같도록 유지하기 위한 것이다. 이 개념은 횡방향 구속철근의 사용으로 기둥의 강도를 증가시키는 것을 기본으로 하고 있다. 그러나 기둥부재의 연성능력에 큰 영향을 미치는 횡방향 철근에 대해서는 그다지 중요하게 다루어지지 않고 있다.

횡방향 철근에 대해 ACI 는 지난 40여년 1956년부터 2005년 까지 7번의 개정 절차를 밟아 왔다. 이것은 처음에 하나의 규준으로부터 여러 번의 개정과정을 거쳐 제정되었으며, 7번의 개정과정에 따라 변화되어 온 ACI 규준은 다음과 같다.

#### (1) 1956 ~ 1963년 ACI 기준

홍보강된 기둥에서 구속철근의 양에 관한 계산식은 없으며, 규준에서 요구하는 것은 띠철근에 대해 적어도 #2지름(6.4mm)이상의 철근을 사용하고, 이들의 간격은 주철근 직경의 16배보다 커서는 안 되고, 띠철근 직경의 48배 또는 최소 단면 치수보다 크지 않아야 한다고 규정하고 있으며, 연성과 구속력 또는 소성힌지(Plastic Hinge)에 대한 언급은 없었다. 그렇지만 원형나선 철근의 체적비 계산은 다음과 같이 제안되었다.

$$\rho_s = 0.45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \quad \text{Eq. 2.1}$$

$A_g$  : 전단면적

$A_c$  : 나선형철근의 외곽지름으로 측정된 코아콘크리트의 면적

$f_{ck}$  : 콘크리트 압축강도

$f_{yh}$  : 횡보강 철근의 항복강도

1956년과 1963년에 개정된 두 기준사이에 철근상세에 대해서 중요한 차이가 있는데 1956년 기준에서 모든 주철근은 횡보강 철근과 보조 횡보강 철근으로 횡지하도록 요구하고 있다. 그러나 1963년 개정에서는 이러한 횡보강 철근에 의한 주철근의 횡지지를 모서리 주철근을 제외한 내부의 모든 주철근은 2개중 하나 이상을 횡지지하도록 상당히 완화시켰다.

또한 1963년 기준에서 모든 주철근은 횡보강 철근으로 보강되고, 내부에 있는 주철근은 보조 횡보강 철근으로 지지하도록 되어 있는데 이렇게 보조 횡보강 철근으로 지지되지 않은 주철근은 실험을 통해 얻은 결과로서 주철근간의 순 간격이 16in(152mm)를 초과하지 않도록 규정하고 있다. 그러나 내부 횡보강 철근으로 감싸주므로 기둥의 취성과괴를 방지하도록 한 것뿐이다. 보조 횡보강 철근이 없이 네모서리를 감싼 경우는 좌굴과 횡보강 철근이 밖으로 벌어져 나가 상당한 구속력을 잃게 된다. 1956년 기준에서는 매우 충분한 철근의 상세가 주어졌고, 철근 간격도 작아 매우 좋은 구속력을 주었지만, 1963년 이후부터 현재까지 이규준은 변화되지 않고 있다.

## (2) 1971 ~ 1977년 ACI 기준

1971년에 개정된 기준의 부록 A에서 내진설계에 대한 특별규정이 소개되어져 있다. 그러나 1977년에는 실질적인 변화 없이 1971년에 개정된 내용이 그대로 적용되었다. 여기서는 연성의 중요성이 설명되어지고, 관련된 주요한 용어가 정의되어져 있다. 소성힌지는 비탄성 변형에서 극한 단면모멘트 능력이 증가되는 동안에 계속 커지고 유지되는 지역으로써 정의되어지며, 또한 기둥에서의 소성힌지 발생을 방지하기 위하여 강한 기둥-약한 보(Strong column-Weak beam)의 설계 개념이 도입되었다. 나선 철근의 체적비  $\rho_s$ 는 Eq. 2.1에서 주어진 그대로이고, Eq. 2.2에 의해 그 하한치가 규정되어 있다.

$$\rho_s = 0.12 \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \quad \text{Eq. 2.2}$$

나선철근의 간격은 3in(76mm)로 제한되어 있고, 최대간격은 횡보강 철근 사이 중심간격 4in(102mm)로 제한되어 있다. 또한 크로스(Cross)철근의 최소단면적은 다음 Eq. 2.3과 같이 주어진다.

$$A_{tie} = \frac{l_h \rho_s s}{2} \quad \text{Eq. 2.3}$$

$l_h$  : 횡보강 철근에 의해 지지되지 않은 최대길이

$s$  : 횡보강 철근의 간격

이 규준의 요구사항은 형태에서 장방형 기둥에 대한 횡보강 철근의 양은 단지 주철근의 최외곽 횡보강 철근으로 다음과 같이 쓰여질 수 있다

$$A_{sh} = 0.45 s h_c \left( \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_y} \geq 0.12 s h_c \frac{f_{ck}}{f_y} \quad \text{Eq. 2.4}$$

$A_{ch}$  : 구속된 코아콘크리트의 면적

$A_{sh}$  :  $h_c$ 의 치수로부터 평행한 장방형 철근의 전체 단면적( $A_{sh} = 2A_{tie}$ )

$h_c = l_h$

Eq. 2.4의 가정은 장방형주근의 최외곽 횡보강 철근만을 가진 기둥에 대해 고려된 것이고, 장방형의 유효 구속된 철근은 나선철근의 유효 구속력의 50%이다. 각 방향에서 Cross철근을 가진 장방형 띠철근의 경우에 대해서 직선 띠철근의 유효력은 나선 철근의 유효력보다 66%의 증가를 가진다. 횡보강 철근에 대해 허용된 최소 철근의 크기는 1960년 규준에서 주어진 것처럼 #2에서부터 증가하며, 주철근이 #10(31.8mm)또는 그보다 작은 주철근에 대해서는 #3(9.5mm)를 사용해야 하고, 주철근이 #11(34.9mm) 또는 그보다 큰 주철근을 사용할 경우에는 적어도 #4(12.7mm)를 사용해야 한다.

### (3) 1983년 ACI 규준

최대 횡보강 철근의 간격이 4in.에서 4in보다 작게 사용함으로 바뀌었고, 최소 단면 치수의 1/4로 사용함으로 변경되었고, 나선보강 철근의 양에 대한 요구는



Eq. 2.2와 Eq. 2.3의 앞에서 주어진 것과 비슷하다. 장방형 횡보강 철근의 전체 단면적은 다음과 같이 규정되었다.

$$A_{sh} = 0.3sh_c \left( \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_y} \geq 0.12sh_c \frac{f_{ck}}{f_y} \quad \text{Eq. 2.5}$$

이것은 Eq. 2.4에서 수치적 계수 0.45가 0.3으로 감소된 것을 제외하고는 바뀐 것이 없다. 1977년 기준에서부터 이러한 변화는 명확한 설명이 없고, Eq. 2.2, Eq. 2.3, Eq. 2.5에서부터 주철근의 외곽 횡보강 철근을 가진 장방형 기둥이 나선 철근에 대해서 그 하한값은 Eq. 2.2에서 표현되었으며, 연성에 대한 최소구속력을  $A_g/A_{ch} \leq 1.4$ 로 놓아 기둥에 적용하도록 하였다.

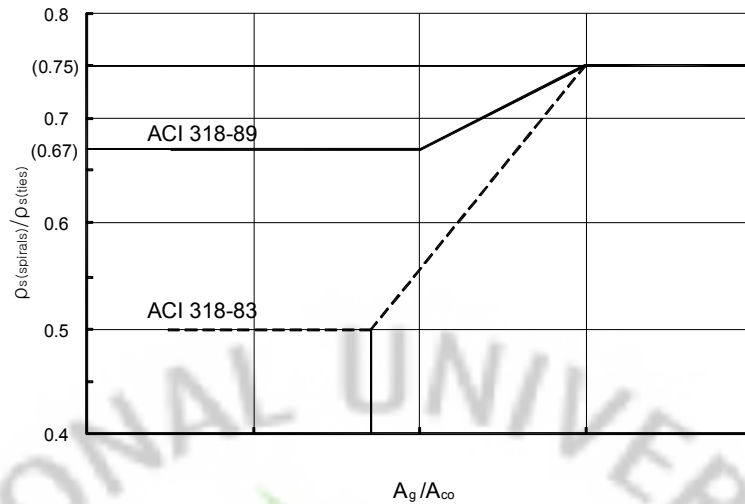
또한 기준은 비탄성 작용이 고려되어지는 그 이상의 부분에 대해 이러한 횡방향 철근을 분포시키도록 하였으며, 이러한 부분의 길이는 각 접합부분과 단면의 양쪽 면에 휨 항복과 비슷하게 또는 소성 힌지가 기대되는 곳의 길이로 정의하여 한쪽 단부에서 180도의 후크를 가진 Cross 띠철근을 사용하고, 다른쪽 면에는 90도의 후크를 가진 Cross 띠철근을 사용하도록 하였는데 이러한 사항은 시공의 편이를 위한 것이기도 하다. 그러나 구속된 코아 콘크리트에서 90도 후크는 높은 축력에 대해서는 그 유효성과 주철근의 초기 좌굴에 피할 수 없으며 이에 대한 방지로 높은 축력을 피하면 그 유효성은 의심할 여지가 없을 것으로 정의하고 있다.

#### (4) 1989 ~ 1995년 ACI 기준

비탄성적으로 거동하는 심한 지진지역에서 충분한 연성을 가진 철근 콘크리트 구조물 설계에 대한 주요한 관점이 부록 A에서 Chapter 21로 이동하였다. Chapter 21에 규정된 1989년 기준의 주요관점은 Eq. 2.1, Eq. 2.2, Eq. 2.5에서 0.12계수를 0.09로 바뀐 것 외에는 달라진 것 없이 그대로 적용하고 있으며 다음 식으로 규정 하였다.

$$A_{sh} = 0.3sh_c \left( \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_y} \geq 0.09sh_c \frac{f_{ck}}{f_y} \quad \text{Eq. 2.6}$$

이러한 변화는 횡보강된 기둥의 거동 관찰을 기본으로 하였으며, 여기에서 모



**Fig. 2.1** Effectiveness of spirals and ties compared with ACI 318-83 and ACI 318-89

든 기둥의 크기에 동일하도록 알맞게 상세한 띠철근과 Cross 띠철근, 그리고 모든 기둥의 크기에 동일하게 장방형 띠철근에 관련된 유효성이 규정되었다. Fig. 2.1은 나선형 횡보강 철근(ACI318-83)과 장방형 횡보강 철근(ACI318-89)의 유효성을 비교한 것이다.

(5) 1999 ~ 2005년 ACI 기준

1999년 개정된 기준은 1989~1995년 기준의 개념과 관계식을 유지하면서 횡보강 철근 간격을 제한하는 다음 Eq. 2.7을 추가하였다.

$$S_x = 4 + \left( \frac{14 - h_x}{3} \right) \quad \text{Eq. 2.7}$$

$h_x$  = 횡보강 철근의 수평거리(in)

2) NZS 3101 : 1995(뉴질랜드 기준)

(1) 중심축하중( $N_0$ )

기둥의 중심축하중은 다음의 식으로 나타내는데  $a_1$ 을 다음과 같이 정의하고 있다.

$$N_0 = a_1 f_{ck} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \quad \text{Eq. 2.8}$$

$$a_1 = 0.85, f_{ck} \leq 55 \text{MPa}$$

$$a_1 = 0.85 - 0.004(f_{ck} - 55), f_{ck} > 55 \text{MPa}$$

#### (2) 횡보강 철근량

소성힌지 영역에서 주철근의 좌굴을 방지하기 위하여 각 방향에 대한 횡보강 철근의 양  $A_{sh}$  (mm<sup>2</sup>)은 다음 식보다 커야 한다.

$$A_{sh} = \Sigma A_{te} \quad \text{Eq. 2.9}$$

$\Sigma A_{te}$  (mm<sup>2</sup>) : 주철근을 잡아주는 방향으로 가로지르는 횡보강 철근 면적의 tie leg  $A_{te}$ 의 합은 다음식과 같다.

$$A_{te} = \frac{1}{16} \frac{\Sigma A_b f_y s_h}{f_{yt} 6d_b} \quad \text{Eq. 2.10}$$

$\Sigma A_b$ : 띠철근이 감싸고 있는 주철근 면적의 합(mm<sup>2</sup>)

$f_y$ : 주철근의 항복강도(MPa)

$f_{yt}$ : 횡보강 철근의 항복강도(MPa), 800MPa 보다는 작아야 한다.

$s_h$ : 횡보강 철근의 중심간 수직간격(mm)

$d_b$ : 주철근의 직경(mm)

#### (3) 횡보강 철근의 간격

횡보강 철근의 간격은 단면 최소 길이의 1/4 이나 주철근 직경의 6배 중 적은 값을 초과할 수 없다. 횡보강 철근이나 십자형 보강 철근에 의해 구속되는 주철근 사이의 간격도 200mm나 기둥단면의 1/4 중 큰 값을 초과하지 못한다.

#### (4) 횡보강 철근의 유효면적

NZS는 전단철근의 유효면적에 대한 식이 주어지는데, 기둥의 횡보강 철근도 이 식을 만족하여야 한다. 전단철근의 식에 사용되는  $f_{cr}$ 를 70 MPa를 초과하지 못하며,  $f_{yt}$ 도 500 MPa를 초과하지 못한다. 이유는  $f_{cr}$ 의 경우 초고강도 콘크리트

의 전단저항에 대한식의 불확실한 적용성 때문이며,  $f_{yt}$ 는 콘크리트의 사인장 균열의 폭을 제한하기 때문이다.

각 방향 횡보강 철근의 전체 면적은 다음 식의 두 값 중에 큰 값으로 한다.

$$A_{sh} = 0.3s_h h_c \left( \frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \left( 0.5 + \frac{1.25P_e}{\phi f_{ck} A_g} \right) \quad \text{Eq. 2.11}$$

$$A_{sh} = 0.12s_t h_c \frac{f_{ck}}{f_{yh}} \left( 0.5 + \frac{1.25P_e}{\phi f_{ck} A_g} \right) \quad \text{Eq. 2.12}$$

$s_t$  : 부재축을 따른 횡보강 철근의 간격

$P_e$  : 축하중

$\phi$  : 강도저감계수 = 0.9

### 3) 기둥내력 산정식

기둥의 내력을 산정하는데 있어 다음의 식을 사용하고 있다.

$$P_0 = 0.85f_{ck}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \quad \text{Eq. 2.13}$$

$P_0$  : ACI 318-95의 일반강도 식에 따라 계산된 순축하중력(tonf)

$f_{ck}$ : 콘크리트 압축강도(kgf/cm<sup>2</sup>)

$A_g$ : 기둥의 전단면적 (cm<sup>2</sup>)

$A_{st}$ : 주근 단면적(cm<sup>2</sup>)

$f_y$  : 주근의 항복강도(kgf/cm<sup>2</sup>)

## 2. 기존 연구 고찰


### 1) Kent-Park의 연구

#### (1) 실험적 연구

Kent-Park는 1982년에 보통강도 콘크리트 기둥 시험체(45cm×45cm ×120cm) 27개에 대하여 중심축력 실험을 실시하므로 구속된 콘크리트의 강도와 연성을 평가하였으며 변수에 대한 요약은 Table 2.1과 같다.

실험 결과 하중재하속도(Strain Rate)가 증가할수록 콘크리트 코아의 응력-변형률 곡선의 최대응력과 최대강도 이후 하강부분의 기울기가 증가하였고, 주철근 수의 증가에 따라 띠철근의 간격이 좁아지므로 코아 콘크리트의 더 많은 구속효과와 결과를 가져왔다. 그리고 횡보강 철근의 체적비 증가에 따라 강도의 증진과 변형률의 증가, 최대강도 이후 하강부분의 기울기가 감소하였다. 그러나 횡보강 철근의 체적비를 동일하게 놓고 간격을 증가시켰을 때, 구속효과는 감소한다는 결론을 얻었다.

**Table 2.1** Parameter of Kent-Park's test

Yield stress of Main reinforcement	Tied quantity	Spacing (tie)	Tied Configuration	Strain Rates
272-434 MPa	1.4-3.09%	64~98mm		0.0000033/sec
				0.00167/sec
				0.0167/sec

(2) 해석적 연구

1971년 Kent와 Park는 Roy, Sozen, Felipa, Soliman, Yu 등의 실험자료 및 이론을 이용하여 다음의 Fig. 2.2와 같은 콘크리트 응력-변형률 관계를 제안하였다. 그러나 이 모델은 최대응력에 도달할 때까지는 횡보강 철근에 의한 구속효과가 콘크리트의 압축강도 및 그에 대응하는 변형률에 영향을 미치지 않고, 최대응력 이후에는 콘크리트의 압축강도, 코아 콘크리트의 폭과 횡보강 철근의 구속효과가 콘크리트의 거동에 영향을 미쳐 콘크리트의 연성이 변화되는 것으로 나타났다.

기존의 Kent-Park 모델을 실험결과(1982)를 토대로 수정 제안한 Modified Kent-Park 모델에서는 콘크리트의 구속효과로 인한 강도와 변형 능력의 증가에 관한 내용이 포함되었다. 이 수정된 모델에서는 구속계수  $K$ 를 통하여 구속에 의한 강도 증진효과를 고려하고 있다.

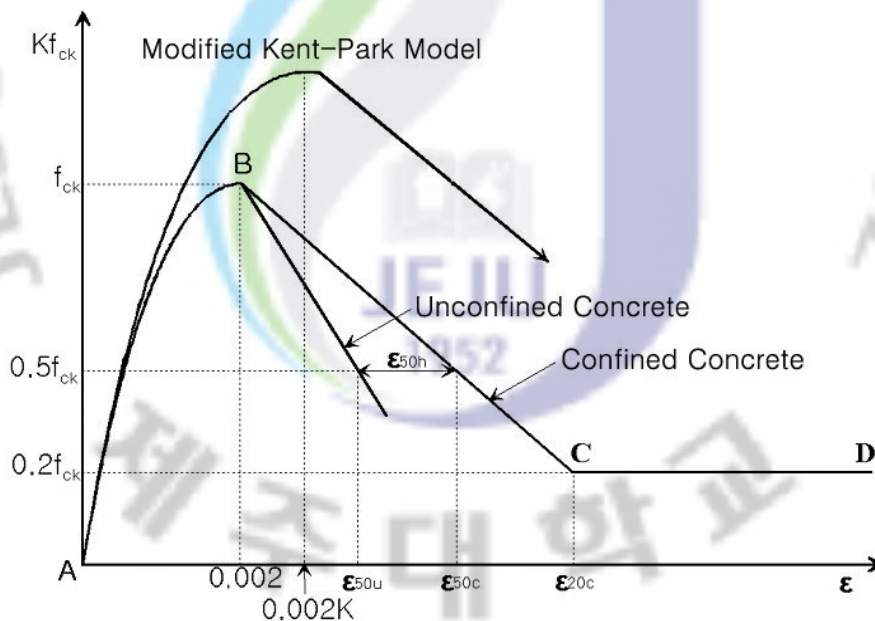


Fig. 2.2 Modified Kent-Park Model

$$\cdot \epsilon_c \leq 0.002K$$

$$f_c = Kf_{ck} \left( \frac{2\epsilon_c}{0.002K} - \left( \frac{\epsilon_c}{0.002K} \right)^2 \right) \quad \text{Eq. 2.14}$$

$$\cdot \epsilon_c > 0.002K$$

$$f_c = Kf_{ck}(1 - Z_m(\epsilon_c - 0.002K)) \geq 0.2Kf_{ck} \quad \text{Eq. 2.15}$$

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yt}}{f_{ck}}$$

$$Z_m = \frac{0.5}{\frac{3 + 0.29f_{ck}}{145f_{ck} - 1000} + \frac{3}{4}\rho_s \sqrt{\frac{h''}{s_h}} - 0.002K}$$

$\epsilon_c$  : 콘크리트의 축방향 변형률

$f_{ck}$  : 공시체 압축강도 (MPa)

$\rho_s$  : 코아콘크리트에 대한 횡보강 철근의 체적비

$s_h$  : 횡보강 철근(띠철근)의 중심간 간격 (mm)

$f_c$  : 콘크리트의 축강도 (MPa)

$f_{yh}$  : 횡보강 철근(띠철근)의 항복강도 (MPa)

$h''$  : 코아 콘크리트의 폭 (mm)

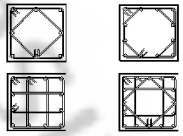
## 2) Seikh-Uzumeri 연구

### (1) 실험적 연구 (1980)

Seikh-Uzumeri는 1980년에 보통강도 콘크리트 기둥 시험체(30×30×195cm) 24개에 대하여 실험하여 구속된 콘크리트의 강도와 연성을 평가하였다. 주요변수들에 따른 구속된 콘크리트의 강도와 연성을 평가하여 유효구속면적과 구속압의 크기에 영향을 미치는 요인들을 고려하였으며 주된 변수는 Table 2.2와 같다.

실험 결과 주근근의 분포가 비슷하게 주어진다면, 기둥의 거동은 주철근을 지지하기 위해 주어진 횡보강근의 형태에 의해 지배되며, 횡보강근 체적비가 증가함에 따라 구속된 코아콘크리트의 연성은 명백하게 증가한다. 횡보강근의 양은 같게 하고 간격을 다르게 할 경우, 간격이 커질수록 연성과 강도가 감소하였으나 주철근의 체적비는 구속된 콘크리트 기둥의 거동에 큰 영향을 주지 않았다.

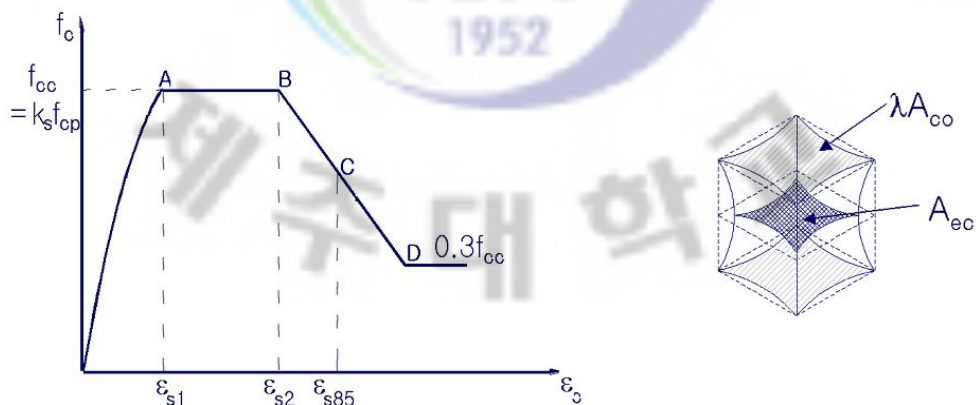
**Table 2.2** Parameters of Seikh-Uzumeri's test

Volume fraction of main reinforcement	Volume fraction of tie	Tied strength	Spacing (tie)	Tied Configuration
2~4%	0.8~2.4%	300~700MPa	1.5~4.0 in.	

(2) 해석적 연구 (1982)

Seikh-Uzumeri는 1980년에 실험결과를 회귀분석을 통하여 구속모델에 각각의 계수를 결정하였으며 단면의 기하학적인 형상으로부터 유효구속면적을 산정하여 횡보강 철근의 형태와 간격에 대한 영향을 고려하는 구속모델을 제안하였다.

Fig. 2.3은 Seikh - Uzumeri Model을 보여주고 있다.



**Fig. 2.3** Seikh-Uzumeri Model and effective confinement area



- Confined Concrete Strength

$$P_{cc} = K_s P_{occ} \quad \text{Eq. 2.16}$$

$$K_s = 1.0 + \frac{2.73\beta^2}{P_{occ}} \left( \left( 1 - \frac{nC^2}{5.5B^2} \right) \left( 1 - \frac{s}{2B} \right)^2 \right) \sqrt{\rho_s f_s} \quad \text{Eq. 2.17}$$

- Strain and Descending Branch

- Determination of Parameter  $\epsilon_{s1}$  : Soliman and Yu (1967)의 제안식 수정

$$\epsilon_{s1} = 0.55 K_s f_{ck} \times 10^{-6} \quad \text{Eq. 2.18}$$

- Determination of Parameter  $\epsilon_{s2}$  : Sargin and Vallenias (1977)의 제안식 수정

횡구속 철근에 의한 구속된 콘크리트의 연성의 증진효과

$$\frac{\epsilon_{s2}}{\epsilon_{00}} = 1 + \frac{0.81}{C} \left( 1 - 5.0 \left( \frac{s}{B} \right)^2 \right) \frac{\rho_s f_s}{\sqrt{f_{ck}}} \quad \text{Eq. 2.19}$$

- Determination of Parameter  $\epsilon_{s85}$  : Kent and Park (1971)의 제안식 수정

$$Z = \frac{0.5}{\frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{B}{s}}} \quad \text{Eq. 2.20}$$

$$\epsilon_{s85} = \frac{0.15}{Z} + \epsilon_{s2} \quad \text{or} \quad \epsilon_{s85} = 0.225 \rho_s \sqrt{\frac{B}{s}} + \epsilon_{s2} \quad \text{Eq. 2.21}$$

$K_s$  : 강도증진계수

$C$  : 횡지지된 주철근 사이의 중심간 간격

$s$  : 횡보강 철근의 중심간 간격

$n$  : 주철근의 개수

$B$  : 모서리 주철근 사이의 중심간 간격

$\epsilon_{00}$  : 무근콘크리트의 최대응력에서의 Strain

### 3) Cusson-Paultre 연구

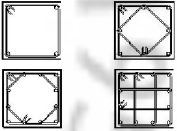
- (1) 실험적 연구 (1994)

Cusson-Paultre는 1994년에 고강도 콘크리트 기둥 시험체(23.5×23.5×140cm) 30

개에 대한 실험을 통해 구속된 콘크리트의 강도와 연성을 평가하였다. 이 연구에서는 구속에 의한 강도 증진효과( $P_{e2}/P_{oc}$ ), 구속에 의한 연성 증진효과( $\epsilon_{c50c}/\epsilon_{oc}$ ) 등의 지표를 통하여 구속된 콘크리트의 거동을 분석하였으며 주된 변수는 Table 2.3과 같다.

실험결과 먼저, 고강도 콘크리트의 구속된 기둥의 단면성능을 평가할 때는 콘크리트 피복은 구조적 측면에서 무시하고, 외각의 띠철근의 중앙에 의해 그려진  $A_{cc}$ 가 전체 콘크리트 축강도에 기여한다고 고려하는 것이 적합하며, 타이항복강도의 증가는 횡보강량이 큰 잘 구속된 시험체에서만 강도와 연성에 향상을 가져올 수 있다. 또한 횡보강 철근의 체적비를 증가시키고 배근간격을 줄일 때, 구속된 콘크리트의 강도와 연성은 향상된다.

**Table 2.3** Parameters of Cusson-Paultre's test

Volume fraction of main reinforcement	Volume fraction of tie	Tied strength	Spacing (tie)	Tied Configuration
2.2~3.6 %	1.5~4.9 %	300~700MPa	50~100 mm	

(2) 해석적 연구 (1995)

이 연구에서는 유효구속압력( $f_{le}$ )과 유효구속지수( $f_{le}/f_{oc}$ )를 Cusson-Paultre (1994)과 Nagashima et al(1992)의 실험결과를 토대로 회귀분석하여 찾아내는 방법으로 구속모델을 제안하였으며, 구속된 콘크리트의 최대응력에서의 횡보강 철근의 응력( $f_{hcc}$ )을 산정하는 식을 제안하였다. Fig. 2.4는 Cusson-Paultre Model 을 보여준다.

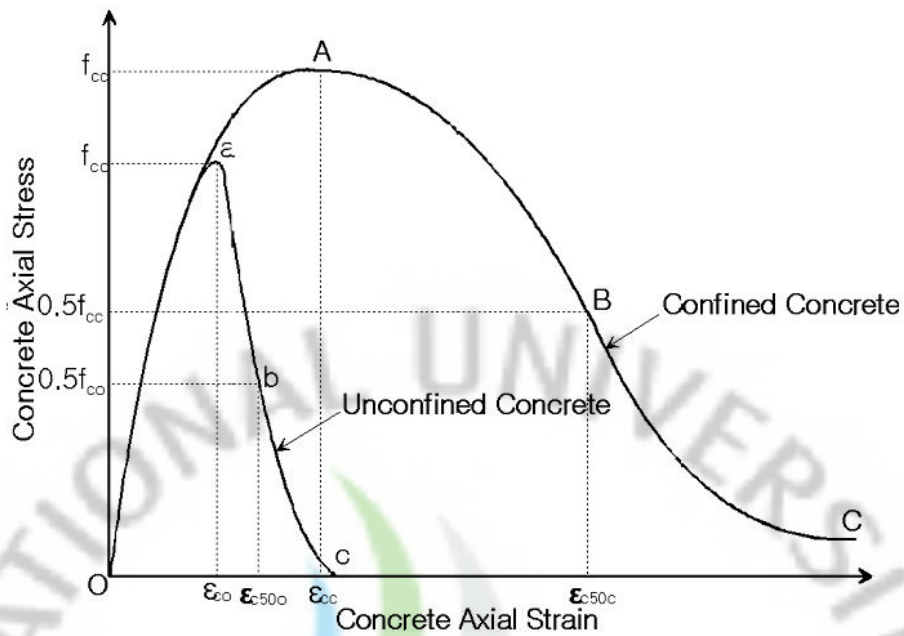


Fig. 2.4 Cusson-Paultre Model

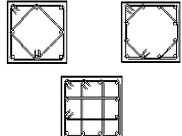
4) Nagashima et. al. 연구

(1) 실험적 연구 (1992)

Nagashima et. al.는 1992년에 고강도(60~120MPa) 콘크리트 기둥 시험체 (22.5×22.5×71.6cm) 26개에 대하여 중심축력 실험을 통해 구속된 콘크리트의 강도와 연성을 평가하였다. 실험 변수는 Table 2.4와 같다.

이 연구에서는 콘크리트 강도, 횡보강 철근, Tie Configuration, 주철근강도, 주철근의 수의 변화에 따른 구속효과에 의한 각주기둥의 강도와 연성에 대한 영향을 평가하였으며 주된 결과는 다음과 같다. 동등한  $\rho_w \cdot f_{yh}$ 를 가지는 경우 초고강

Table 2.4 Parameters of Nagashima et. al.'s test

Arrangement of main reinforcement	Volume fraction of tie	Tied strength	Spacing (tie)	Tied Configuration
6, 8, 12개	$\rho'_w = A_s (B \times s)$ 0.0087~0.189	800~1400MPa	23~55 mm	

도 콘크리트 기둥 시험체보다 고강도 콘크리트 기둥시험체가 더 연성적 거동을 보이고, 횡보강 철근(띠철근) 배근형태와  $\rho_w \cdot f_{yh}$ 가 같은 경우, 조밀한 띠철근 간격은 코어 콘크리트의 강도를 증가시키는 결과를 보이지만, 연성에는 별다른 차이가 없었다. 횡보강 철근 배근형태가 복잡해질수록 강도, 연성이 조금 더 커졌으나, 주철근의 강도가 변하여도 구속된 코어 콘크리트의 강도와 연성거동에 별다른 영향이 없었다.

(2) 해석적 연구 (1992)

실험결과의 회귀분석과 Mander et. al. (1988), Sheikh and Uzumery (1982)등의 기존모델의 수정 등을 통하여 구속모델을 제안하였다.

- 구속 콘크리트의 모델식 (Mander et al. 1988 ; 제안식)

- for  $0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cm}$

$$f_c = f_{\alpha} \cdot X \cdot \frac{r}{r-1+X^r} \quad \text{Eq. 2.22}$$

$$X = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cm}}, \quad r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}, \quad E_{sec} = \frac{f_{\alpha}}{\epsilon_{cm}}$$

- for  $\epsilon_{cm} < \epsilon_c$

$$f_c = f_{\alpha} \left( 1 - 0.5 \frac{\epsilon_c - \epsilon_{cm}}{\epsilon_{50} - \epsilon_{cm}} \right) \geq 0.3 f_{\alpha} \quad \text{Eq. 2.23}$$

- 구속된 코어 콘크리트의 압축강도,  $f_{cc}$

120 MPa까지의 콘크리트강도를 가지는 각주기둥에 대한 구속에 의한 강도증진은  $\rho_w \cdot f_{yh}$ 의 함수이며, 콘크리트 강도와는 무관하다.

$$\lambda^* = \left( 1 - \frac{\Sigma c_i^2}{6B^2} \right) \left( 1 - \frac{s}{2B} \right)^2 \quad (\text{Sheikh and Uzumery ; 1982}) \quad \text{Eq. 2.24}$$

→ 타이간격 고려

$$f_{cc} - f_c'' = 31.4 \sqrt{\lambda} \cdot \rho_w' \cdot f_{yh} \quad (\text{회귀분석결과}) \quad \text{Eq. 2.25}$$

$f_c''$  = 구속되지 않은 콘크리트 강도 ( $0.85 f_{ck}$ 로 가정)

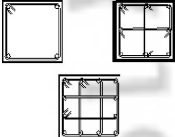
5) Saaticioglu-Razvi 연구

(1) 실험적 연구 (1998)

Saaticioglu-Razvi는 1998년에 고강도(60 ~ 124MPa) 콘크리트 기둥시험체 (25×25×150cm) 26개에 대하여 중심축력 실험을 통해 구속된 콘크리트의 강도와 연성을 평가하였으며 실험의 주요 변수들은 Table 2.5와 같다.

이 연구에서는 주요 변수에 따른 구속콘크리트의 거동에 미치는 영향을 평가하였으며 강도 및 연성 증진면에서의 기둥 구속을 위한 적절한 설계량을 산정할 수 있는 구속지수를 제안하고 있다.

**Table 2.5** Parameters of Saaticioglu-Razvi's test

Arrangement of main reinforcement	Volume fraction of tie	Tied strength	Spacing (tie)	Tied Configuration
0, 4, 8, 12개	1.05~4.59%	400~1000MPa	40~120 mm	

(2) 해석적 연구 (1998)

Razvi Model(1995)은 강도범위 60 ~ 124 MPa의 총 46개의 실제 크기에 가까운 고강도 콘크리트 기둥들과 다른 연구자들에 의해 실험된 124개의 보통강도 콘크리트 기둥들에 대한 실험결과를 바탕으로 제안된 모델이다.

Saaticioglu-Razvi Model(1998)은 이 모델을 보통강도에서 고강도 콘크리트 기둥들에 이르기까지 폭넓게 적용할 수 있고, 실제적으로 사용되는 횡단면형태와 주철근의 배열형태를 고려한 모델로 수정하여 제안한 모델이다. Fig. 2.5는 Saaticioglu-Razvi Model(1998)과 유효등가구속응력을 나타내고 있다.

- 구속된 콘크리트의 강도

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_{le} \quad \text{Eq. 2.26}$$

$$k_1 = 6.7(f_{le})^{-0.17}$$

$$f_{le} = k_2 f_l$$

$$f_l = \frac{\sum_{i=0}^a (A_s f_y \sin \alpha)_i}{s b_c}$$

- 구속된 콘크리트의 최대강도에서의 횡보강 철근의 응력

$$f_s = E_s \left( 0.0025 + 0.04 \sqrt[3]{\frac{k_2 \rho_c}{f_{co}}} \right) \leq f_{yt} \quad \text{Eq. 2.27}$$

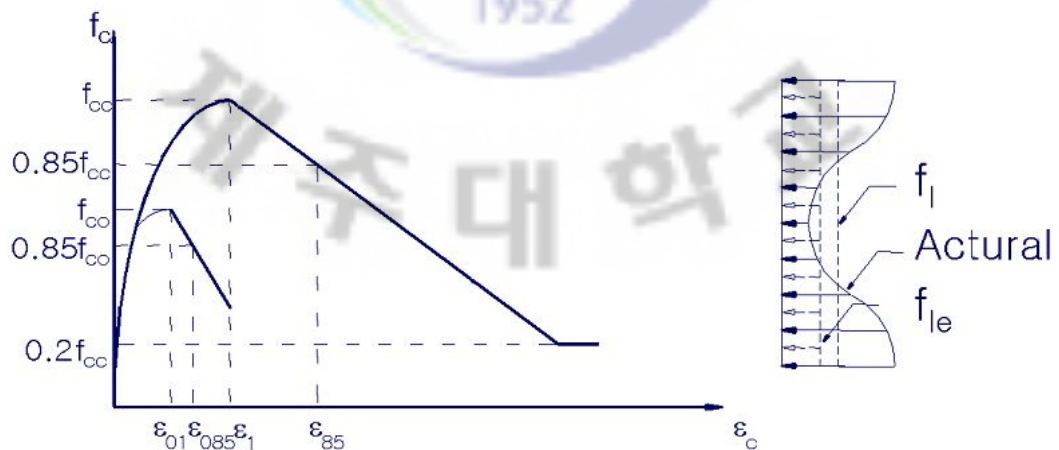
여기서,  $f_s$ 가 비록  $f_{yt}$ 와 같을지라도 특히, 고강도 보강철근이 고강도 콘크리트를 구속하기 위해 사용될 때, 횡보강 철근은 콘크리트의 최대응력에서 항상 항복하지는 않는다.

- 유효 등가 구속압력
  - 보통강도 콘크리트

$$k_2 = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_c}{s}\right) \left(\frac{b_c}{s_l}\right) \left(\frac{1}{f_l}\right)} \leq 1.0 \quad \text{Eq. 2.28}$$

- 고강도 콘크리트

$$k_2 = 0.15 \sqrt{\left(\frac{b_c}{s}\right) \left(\frac{b_c}{s_l}\right)} \leq 1.0 \quad \text{Eq. 2.29}$$



**Fig. 2.5** Saaticioglu-Razvi Model and effective equivalent confinement pressure

여기서, 고강도 콘크리트의 경우,  $f_l$ 에 민감하지 않고,  $f_l = 3.0 \text{ MPa}$ 의 평균값으로 사용하여 단순화한다면, 일반강도 콘크리트에 대해서도 충분히 정확한 결과를 나타낸다는 것을 많은 실험결과들을 근거로 알아냈다.

### 3. 연성지수에 대한 연구 고찰

#### 1) 연성지수

연성을 측정하기 위한 방법으로 연성지수(Ductility index) 또는 연성계수(Ductility factor)가 사용되는데 이는 곡률(curvature), 회전(rotation), 처짐(deflection)의 비로 정의된다.

$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y}, \mu_\theta = \frac{\theta_u}{\theta_y}, \mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad \text{Eq. 2.30}$$

$\mu$  = 연성지수,  $\phi$  = 곡률,  $\theta$  = 회전,  $\Delta$  = 처짐

아래첨자 y = 항복(yielding), u = 극한(ultimate)

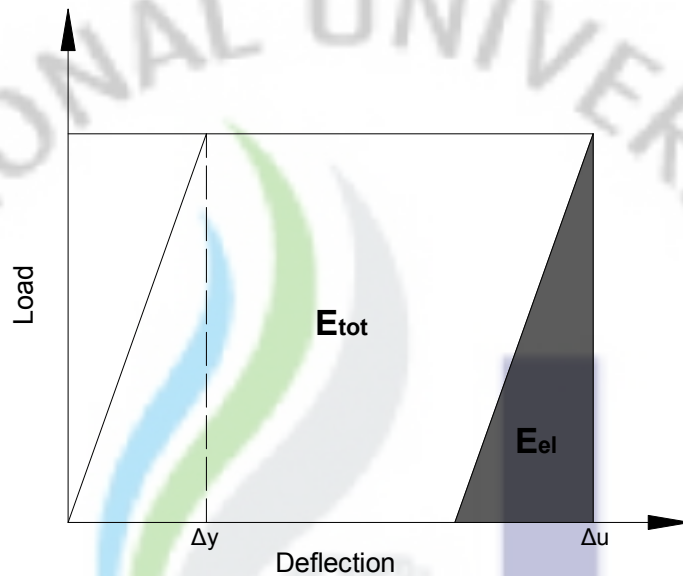
#### 2) A. E. Naaman과 S. M. Jeong의 연구

위 식과 같이 전통적인 식을 이용하는 경우 구조부재의 항복과 극한상태를 명확히 구분하여야만 정확한 연성지수 계산이 가능하다. 철근콘크리트 구조물의 경우 전통적인 방법으로는 정확한 연성지수를 계산하기 어렵다.

이러한 전통적인 연성지수 산정식은 비탄성 변형이 일어나면 흡수되는 비탄성 에너지를 전혀 고려하지 못하고 있기 때문에 A. E. Naaman과 S. M. Jeong은 비탄성 에너지를 고려한 연성지수 산정식을 제안했다.

$$\mu = \frac{1}{2} \left( \frac{E_{tot}}{E_{el}} + 1 \right) \quad \text{Eq. 2.31}$$

이 제안식은 기존의 연성지수 산정식에 기본을 두고 이식을 에너지 향으로 바꾸어서 표현한 것이다. 여기서  $E_{tot}$ 는 흡수에너지로서 부재의 하중-처짐 곡선 또는 단면의 모멘트-곡률 곡선에서 극한상태까지 총 면적으로 계산되며,  $E_{el}$ 은 탄성에너지로서 총에너지중 소모되지 않고 저장되는 변형에너지를 의미한다. Fig. 2.6과 같이 탄소성거동을 하는 재료에서는 다음과 같이 식을 유도할 수 있다.



**Fig. 2.6** Elastic-perfectly plastic flow

$\frac{E_{tot}}{E_{el}} = 2 \frac{\Delta_u}{\Delta_y} - 1$  이고, 여기에 기존 연성지수 산정식( $\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$ )을 대입하면 Eq. 2.32식과 같이 에너지 향으로 표현되는 식으로 바뀌게 된다.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = \frac{1}{2} \left( \frac{E_{tot}}{E_{el}} + 1 \right) \quad \text{Eq. 2.32}$$

위의 식은 하중-처짐 곡선을 통하여 유도 되었지만 모멘트-곡률 곡선 또는 모멘트-회전 곡선을 통해서 같은 식을 유도할 수 있다.

또한 Fig. 2.7과 같은 거동을 하는 재료의 경우에는 하중-처짐 곡선에서 편평한 부분을 기준으로 에너지 변곡점을 결정하고, Eq. 2.33을 이용하여  $E_{to}$ 과



$E_e$ 를 구하므로 Eq. 2.31을 통해 에너지 개념에 의한 연성지수를 결정할 수 있다.

$$S = \frac{P_1 S_1 + (P_2 - P_1) S_2 + (P_3 - P_2) S_3}{P_3} \quad \text{Eq. 2.33}$$

이에 본 연구에서는 축방향 변위를 이용한 극한 변형량에 의한 방법과 하중-처짐 곡선을 사용한 에너지 방법을 통해 띠철근의 형상과 간격에 따른 기둥의 연성을 평가하고자 한다.

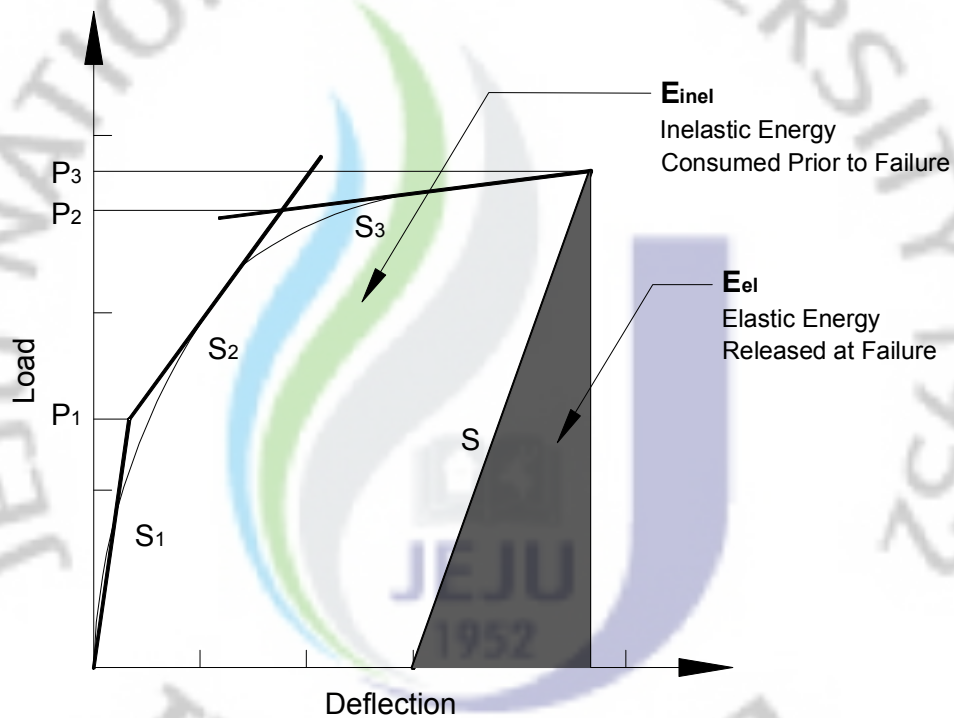


Fig. 2.7 Total, elastic, and Inelastic energies

### III. 실험

#### 1. 실험개요

본 실험은 중심축력을 받는 철근 콘크리트 사각형 기둥의 띠철근 형상과 간격이 강도와 연성에 미치는 영향을 알아보고자 하는 것으로서, 띠철근의 효과를 평가하기 위하여 5개의 실험변수를 선정하였다. 시험체는 띠철근의 구속효과를 평가할 수 있도록 기둥의 단면적, 코어 면적, 주철근비 등을 모두 동일하게 하여 실험하였다.

#### 2. 시험체 제원

시험체는 100×100mm의 정방형 단면을 사용하였으며, 시험체의 높이는 600mm로 일정하게 하였다. 주철근은 직경 8mm 8개를 사용하였으며, 피복두께는 10mm로 전체 단면적에 대한 코어 단면적이 64%가 되도록 모든 시험체를 동일하게 설계하였다. 또한 기둥의 단부효과를 고려하여 시험체 중앙부의 400mm 구간을 시험구간으로 결정하였으며, 시험체의 양끝단 100mm부분을 FRP Sheet(3겹)로 보강하여 단부효과에 따른 국부파괴를 방지하고, 실험구간에서 파괴를 유도하였다. Fig. 3.1은 본 연구에서 사용된 시험체의 제원을 나타내고 있다.

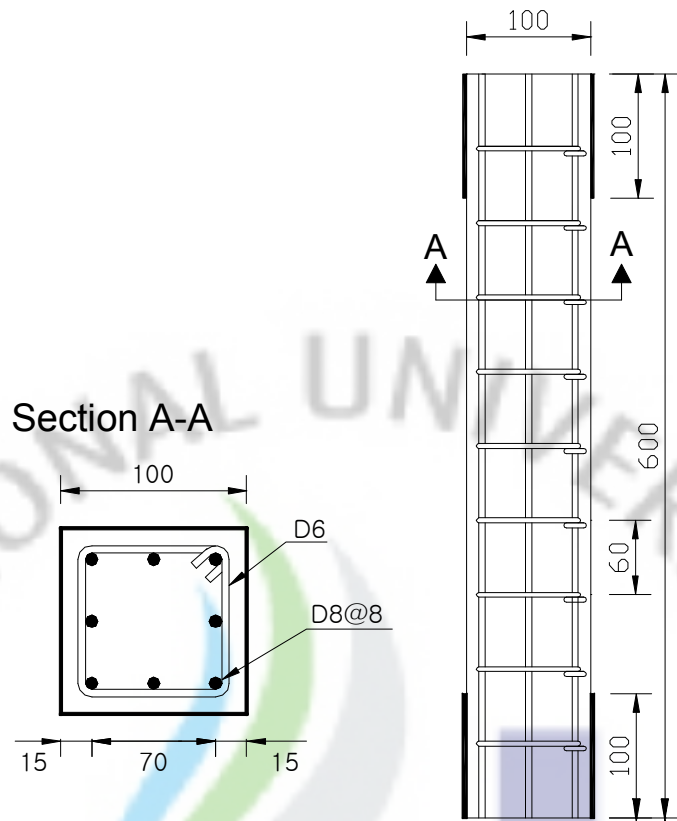


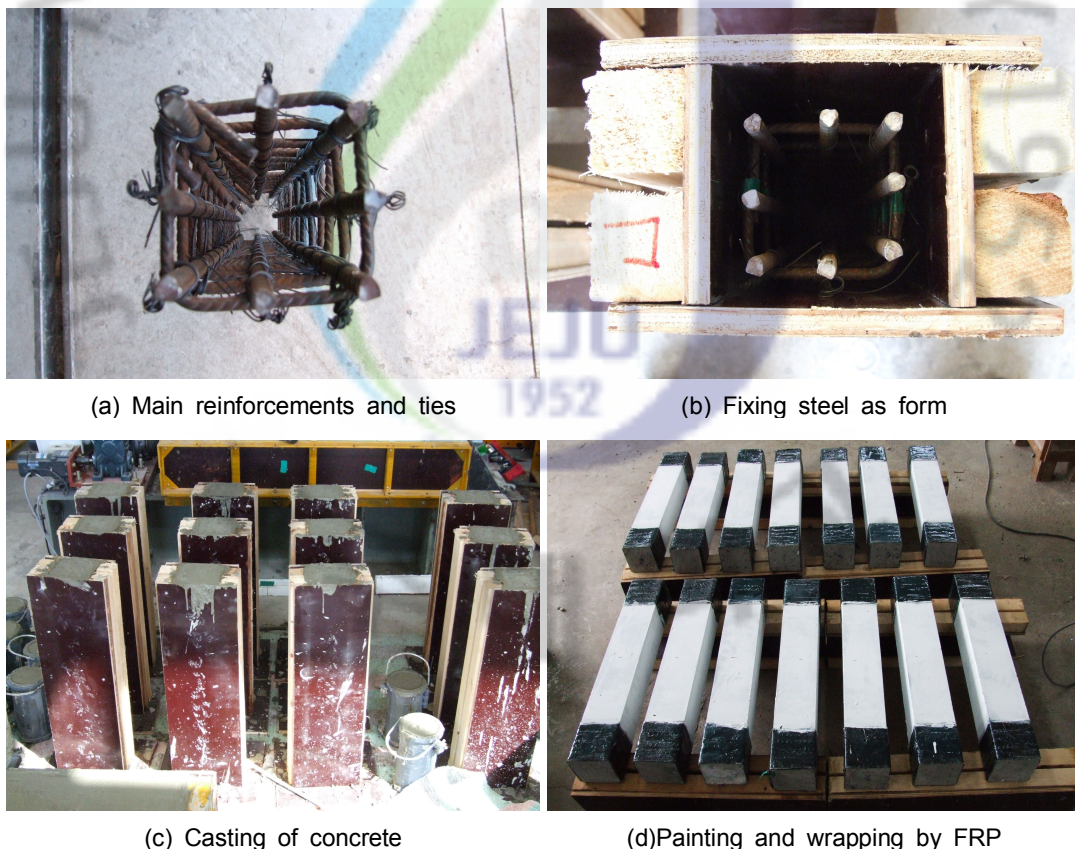
Fig. 3.1 Dimension of specimen

### 3. 시험체 제작

시험체에 사용된 철근은 모두 이형철근으로 주철근에는 D8을, 띠철근에는 D6을 사용하였다. 시험체의 양측단면을 평평하게 하기 위하여 주철근인 D8철근은 시험체보다 길게(630mm) 제단하여 시험체 제작 후 단부를 컷팅하였다. 이렇게 콘크리트면과 일치되게 제작하므로 압축 초기부터 주철근이 압축력을 부담하게 하였다. 형상별로 띠철근을 가공한 후 변수에 따라 일정 간격으로 주철근과 결속하였으며, 거푸집은 코팅합판으로 100×100×630mm인 시험체의 규격에 맞게 밀실하게 제작하였다. 콘크리트는 최대골재 직경을 9mm로 하였으며, 콘크리트 타설시 다짐은 시험체의 높이를 대략 3등분하여 다짐봉으로 각 층마다 25회씩 다

집하였다. 또한 콘크리트의 압축강도를 알아보기 위하여 타설과 동시에 10개의 원형 공시체(100×200mm)도 제작하였다. 콘크리트 양생은 수분 증발을 억제하기 위하여 타설 후 14일까지 물을 주고, 형겅으로 덮어 수분을 유지하여 습윤양생시켰다. 28일 양생 후 거푸집을 탈형하였으며, 시험체의 양 끝에 FRP Sheet를 3겹으로 감아 단부효과에 따른 국부파괴를 방지하고, 균열양상을 육안으로 확인하기 위해 표면에 흰색 수성페인트를 칠하였다. 마지막으로 시험체의 단부를 장축 방향에 수직으로 15mm씩 컷팅하여 시험체의 제원을 통일하였고, 압축면의 표면을 고르게 마무리 하였다.

콘크리트 표면 변형률을 측정하기 위하여 Strain gage 부착 위치에 P2본드로 표면을 코팅하였다. 종방향 gage는 시험체의 중앙에, 횡방향 gage는 시험구간 위쪽에서 1/3지점에 CN본드로 부착하여 콘크리트의 표면 변형률을 측정하였다. Fig. 3.2는 본 연구에서 사용된 시험체 제작과정을 나타낸 것이다.

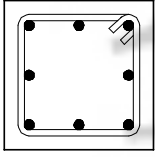
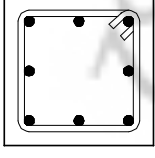
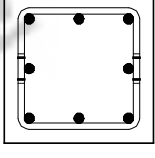
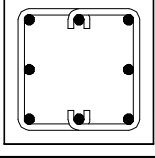


**Fig. 3.2** Manufacturing process of specimens

#### 4. 실험변수

띠철근의 형상과 간격을 주요변수로 정하였으며, 순수 띠철근의 영향을 확인하기 위해 시험체의 크기를 동일하게 계획하였다. 띠철근 형태는 □형(표준폐합) 띠철근을 기본으로 하여 □형(단순 겹이음된) 띠철근, ▤형(갈고리로 겹이음된) 띠철근을 사용하였으며, 띠철근의 간격은 60mm를 기본으로 하여 40mm와 80mm 간격으로 하여 실험변수를 결정하였다. 시험체는 각 변수별 3개씩 제작하였다. Table 3.1은 변수별 띠철근 형상과 시험체명을 나타내고 있다.

**Table 3.1** Parameters for specimens

Parameter	Specimen ID	Spacing	Shape
Basic	S60	60mm	
Spacing (tie)	S40	40mm	
	S80	80mm	
Shape (tie)	C60	60mm	
	H60		

## 5. 사용재료

### 1) 콘크리트

본 실험에 사용된 콘크리트는 Mixer기를 이용하여 직접 배합하였다. 골재의 크기는 최대치수 9mm를 사용하였고, 잔골재는 일반 모래를 사용하여 콘크리트가 밀실 될 수 있도록 하였다. 시험체 제작에 사용된 콘크리트의 배합비는 Table 3.2와 같으며, KS F 2425를 따라 혼합하였다.

시험체에 사용된 콘크리트의 압축강도를 측정하기 위하여 100×200mm 크기의 공시체를 KS F 2403에 따라 제작하였으며, 시험체와 동일한 조건으로 양생하였다. 시험체의 압축강도를 평가하기 위하여 본 실험 전에 100ton의 압축시험기를 사용하여 압축강도시험을 하였다. Table 3.3은 압축강도 시험 결과를 나타낸 것으로 평균 31.06 MPa의 강도를 나타내었다. Fig. 3.3은 압축강도시험 모습을 나타낸 것이다.

**Table 3.2** Mix design of concrete

	Water	Cement	Aggregate (~5mm)	Aggregate (5~9mm)	Total	W/C
배합비(%)	10.8	27	51.4	10.8	100	40%
배합량(kg)	2	5	9.5	2	18.5	

**Table 3.3** Result for compressive strength test

Specimen ID	Ultimate strength (kN)	Compressive strength (MPa)	Conversion strength (MPa)
Specimen 1	253.2	31.61	31.06
Specimen 2	280.8	35.06	
Specimen 3	244.4	30.51	
Specimen 4	224.4	28.01	
Specimen 5	277.6	34.66	
Specimen 6	242.0	30.21	
Specimen 7	272.8	34.06	
<b>Average</b>	<b>256.5</b>	<b>32.02</b>	



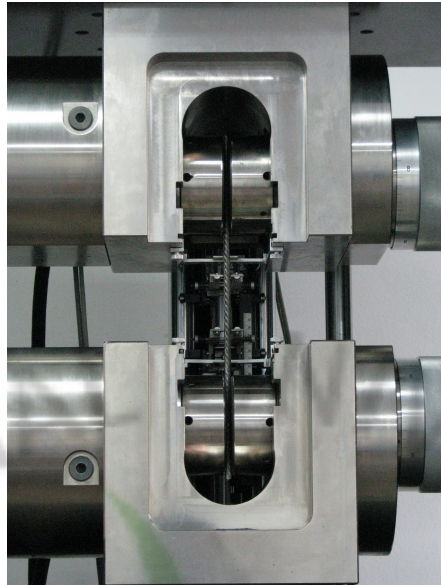
**Fig. 3.3** Compressive strength test

2) 철근

본 실험에 사용된 철근은 이형철근(SD40)으로써 주철근에 D8을 사용하였으며, 횡보강 철근에는 D6을 사용하였다. 철근의 인장강도시험은 제주시험연구센터(광주, 전남지방 중소기업청 산하)에서 KS B 0802의 금속재료 인장시험 방법에 따라 시험하였으며, 직경별로 3개의 시험편을 가지고 실험하였다. Table 3.4는 인장강도시험 결과를 나타낸 것이고, Fig. 3.4는 D6 철근에 대한 인장강도시험 모습을 나타낸 것이다.

**Table 3.4** Result for tensile test

Type	Diameter	Yield stress, $f_y$ (MPa)	Average stress (MPa)
SD400	D8 (7.94mm)	439.2	440.9
		440.5	
		443	
	D6 (5.57mm)	423	439.27
		451.3	
		443.5	



**Fig. 3.4** Tensile test for D6 steel

### 3) FRP sheet

시험체 양끝의 단부효과에 따른 국부파괴를 방지하기 위하여 사용된 FRP 탄소 섬유시트는 접착종이 위에 섬유를 일 방향으로 배열시켜 만든 일본 T사의 제품 Forca Tow Sheet(Fig. 3.5)를 사용하였다. Table 3.5는 CFRP Sheet 제조사에 의해 제공된 탄소섬유시트의 물성치를 나타내고 있다.



**Fig. 3.5** CFRP sheet

**Table 3.5** Material properties of CFRP sheet

Model	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Ultimate strain (%)
Forca Tow Sheet	3094.4	$3.555 \times 10^5$	0.87



#### 4) Epoxy

FRP 탄소 섬유시트를 부착하기 위하여 사용한 에폭시(Epoxy)는 C사에서 개발한 탄소섬유용 레진(CF-222)를 사용하였다. CF-222는 주제(A제)와 경화제(B제)로 나누어져 있고, A제와 B제를 무게 비 2:1의 비율로 섞어서 사용을 하였다. 다음 Table 3.6은 시험체 제작에 사용된 에폭시의 물리적 특성이다.

**Table 3.6** Properties of epoxy

Model	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Bend strength (MPa)	Tension-shear bond strength (MPa)
에폭시 탄소섬유용 레진(CF-222)	62.3	82.5	65.2	12.8

#### 5) Strain gage (for concrete)

시험체의 재하 하중에 따른 변형률을 측정하기 위하여 표면에 부착한 strain gage는 일본의 T사 제품을 사용하였다. Strain gage는 동일 회사 제품인 코팅용 본드로 콘크리트 표면을 처리한 후, gage용 본드로 표면에 부착하였다. 상세제원은 Table 3.7에 나타내었다.

**Table 3.7** Concrete strain gage specification

Gage Type	PL-60-11
Gage Factor	2.13 ± 1%
Adhesive	P-2
Coefficient of Thermal Expansion	11.8 ×10 <sup>-6</sup> /°C
Temperature Coefficient of G.F	+0.12±0.05%/10°C

## 6. 실험방법

### 1) 실험기기

Fig. 3.6은 본 실험에 사용된 기기 및 측정 장비들을 나타낸 것이며, 장비별 모델은 다음과 같다.

- 하중재하 장치
  - 유압식 가력 프레임 및 Actuator(50t), Controller
- Data 수집 장치
  - 동적 변형률 측정기 : M&T Korea, MDS-16
  - 데이터 수집 컴퓨터 : Samsung, Magic station M2000, MDS-2000 (Software)
  - 하중 측정기(Load cell) : Curiosity Technology, LCW-45TS
  - 변위측정기(LVDT) : Tokyo sokki, CDP-100 / CDP-25
  - 변형률 게이지(Strain gage) : Tokyo sokki, PL-60-11

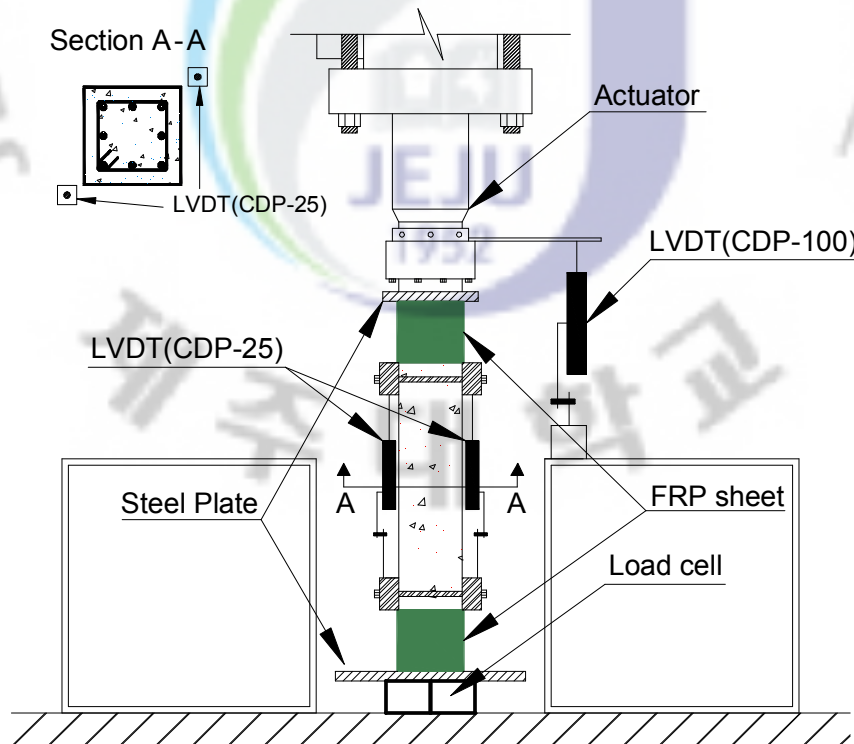


Fig. 3.6 Arrangement for data acquisition

- 게이지 접착제(Adhesive) : Tokyo sokki, P-2 (코팅용) / CN (접착용)
- 사진기(Digital camera) : Fujifilm, Finepix S9600

## 2) 시험체 설치

Fig. 3.6은 시험장비에 시험체를 설치한 모습을 나타낸 것으로 시험체의 양쪽 모서리에서 4방향 변위를 측정할 수 있도록 LVDT (CDP-25) 2개를 자체 제작한 설치대를 사용하여 시험체에 부착하였다. 하중측정을 위한 Load cell은 실험 중 장비의 안전을 고려하여 Fig. 3.6에 나타낸 것과 같이 바닥에 설치하였으며, 시험체의 수평을 유지하고 균일한 하중을 재하하기 위해 위아래에 철판(160×160×19 mm)을 올려놓았다. 또한 측면에 LVDT (CDP-100)를 설치하여 시험체 전체의 축변위량을 측정하였다. Fig. 3.7은 실험에 사용된 시험기기들의 상세 사진을 보여주고 있다.



**Fig. 3.7** Test equipment

### 3) 실험 및 데이터 측정방법

Fig. 3.8은 시험체를 설치한 모습을 나타낸 사진이다. 각 시험체들을 Fig. 3.8에 나타난 것과 같이 설치한 후, 50t의 Actuator를 사용하여 변위제어방식으로 하중을 재하하였다. 실험 전 콘크리트의 압축강도시험과 주철근의 인장강도시험 결과를 이용하여 시험체의 항복강도를 아래와 같이 계산하고, 예상 항복강도의 60%까지는 0.03mm/3sec의 속도로 하중을 재하하였으며, 60%부터 파괴시까지 0.02mm/sec의 속도로 가력하였다. 실험은 시험체가 완전히 파괴된 후에 종료하였다. 실험하는 동안 수집되는 하중, 축변위량, 콘크리트 표면 변형률은 동적변형률측정기(MDS-16)를 통해 데이터 수집 컴퓨터로 전달되고, 데이터 수집 프로그램인 MDS 2000을 통하여 하드디스크에 저장하였다.



**Fig. 3.8** Real view of test set-up (S80-2 specimen)

## IV. 실험결과 및 분석

### 1. 일반사항

철근 콘크리트 사각형 기둥의 압축실험을 통하여 얻은 결과는 띠철근의 간격 및 형상에 따른 시험체의 파괴양상, 시험체의 응력-변형률 곡선, 최대하중, 변형률 등으로, 주요 변수에 따른 구속된 콘크리트의 강도 및 연성을 평가하였다. 주요 변수에 따라 시험체별로 3개씩 시험하였으나 컴퓨터 오류 및 계측장비의 오류로 인해서 변수별 2개의 값을 선정하였다. 각 시험체의 실험 결과는 Table. 4.1에 나타나 있다.

**Table 4.1** Test results

Specimens	Parameter	Load (kN)		Ultimate deflection (mm)	Max. vertical strain ( $\epsilon_{\max} \times 10^{-3}$ )
		Initial crack ( $P_{cr}$ )	Max ( $P_{\max}$ )		
S80-1	띠철근의 간격	320.6	351.0	3.39	5.66
S80-3		310.8	347.1	3.69	6.42
S60-1		317.9	356.1	4.38	7.30
S60-2		298.2	354.5	4.13	6.88
S40-2		296.9	378.9	8.59	14.31
S40-3		304.8	371.8	8.44	14.06
C60-1		띠철근의 형상	326.0	360.8	3.04
C60-2	325.4		373.4	3.13	5.21
H60-2	280.1		335.0	4.20	7.26
H60-3	294.9		346.2	4.26	7.10

## 2. 파괴 양상 및 균열형태

시험체는 전반적으로 압축철근의 항복까지 선형적으로 거동하였으며, 이후 파괴에 이르기 까지 비선형 거동을 하였다. 콘크리트 기둥의 최대하중 이후부터는 띠철근의 간격 및 형상에 따라 차이를 보였다. 대부분의 시험체는 최대하중 이후 피복 콘크리트가 떨어지면서 압축철근의 좌굴현상이 발견되었으며, 이때 기둥의 내력이 서서히 감소하기 시작하였다. 각 시험체의 파괴 양상 및 균열형태를 요약하여 정리하면 다음과 같다.

### 1) 띠철근 간격에 대한 영향

S-Type 시험체는 S60 시험체(표준폐합 띠철근 간격 60mm 시험체)를 기본 모델로 하여 띠철근의 간격이 40, 60, 80mm 이며, 띠철근의 형태와 압축 철근비가 같은 시험체이다. 이들 시험체는 압축철근이 항복하기 전까지 선형적인 거동을 보였으며, 그 이후부터 시험체의 중앙부에서 균열이 발생하면서 비선형적 거동을 보이며 파괴되었다. 파괴에 이르는 동안 S-Type의 시험체는 최대하중까지는 비슷하였으며 그 이후부터 띠철근의 간격에 따라 최종 파괴에 이르기까지 내력 저하 구간의 기울기와 축변형량의 정도가 확연히 다르게 거동하는 것을 알 수 있었다.

S60의 기본 시험체와 비교하여 S40 시험체(표준폐합 띠철근 시험체)는 띠철근의 간격이 40mm로 파괴에 이르기까지 축변형량은 상당히 컸으며 시험체 전반에 걸쳐 균열이 발생하였다. S80 시험체(표준폐합 띠철근 시험체)는 간격이 80mm로 기본 시험체와 비교하여 축변형량이 현저히 떨어졌으며 압축철근의 좌굴현상에 의해 피복콘크리트가 떨어져 나가는 것과 동시에 급작스런 파괴가 발생하였다.

실험 결과 띠철근의 간격이 클 경우에는 띠철근의 횡방향 구속효과가 작아 공시체 파괴시와 같이 양 끝부분에서 미세하게 균열이 발생하기 시작하여 중심부에 세로 방향으로 균열이 발생되고 이후 대각선으로 균열이 발전되었다.

Fig. 4.1은 띠철근의 간격에 따른 콘크리트 기둥의 거동을 보여주고 있다. Fig. 4.1에서 알 수 있듯이 띠철근의 간격이 넓을수록 처짐량이 작고 갑작스럽게 파괴가 발생한다. Fig. 4.2 ~ 4.7은 띠철근 간격에 따른 각 시험체의 파괴모습을 나타낸 사진이다. 시험체 파괴양상에서 띠철근의 간격이 넓을수록 즉, 띠철근에 의한 구속효과가 작을수록 시험체 중앙부 균열이 커지는 것을 알 수 있었다. 이를 종합해 볼 때 띠철근의 간격이 클수록 무근 콘크리트에서와 같은 파괴 현상이 지배적으로 나타난다고 볼 수 있다.

시험체 최대 압축강도는 347.1kN~378.9kN으로 최대 압축강도에 대한 띠철근 간격의 영향은 실험 오차 범위 내에서 별 영향이 없는 것으로 판단된다.

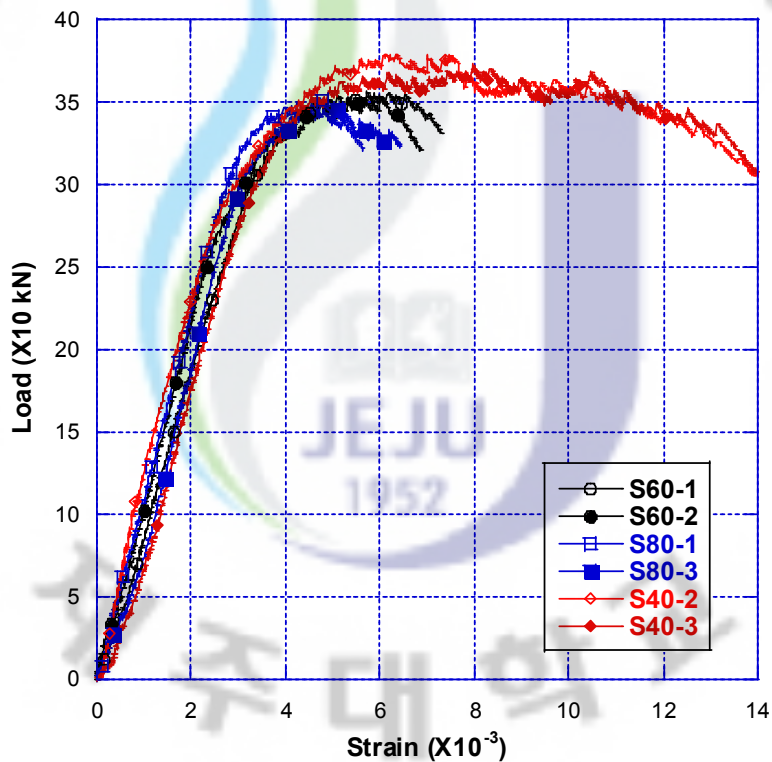
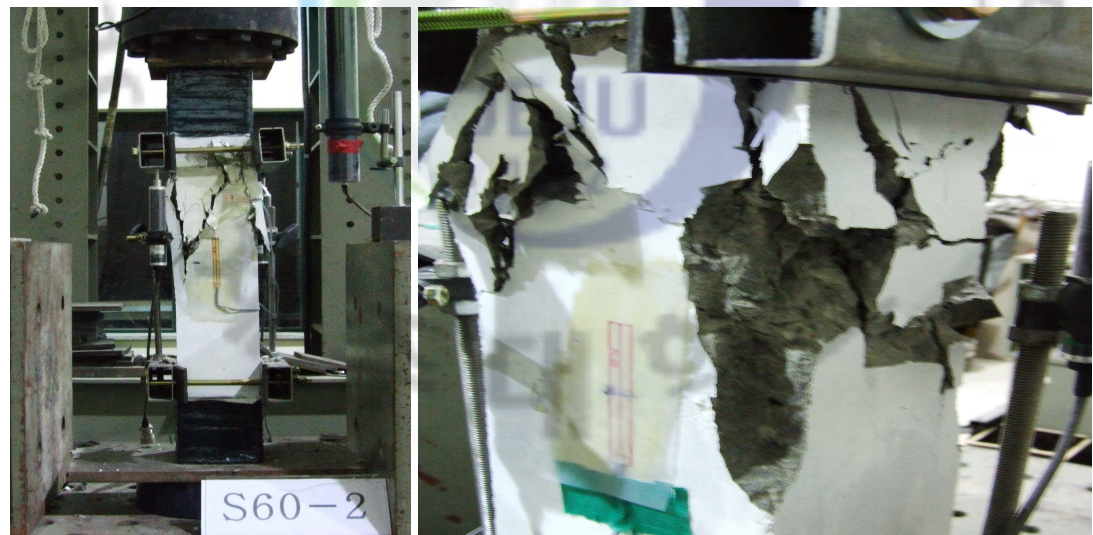


Fig. 4.1 Load - Strain curves of specimens with different tie spacing



(a) Final failure and crack (b) Buckling of main reinforcement

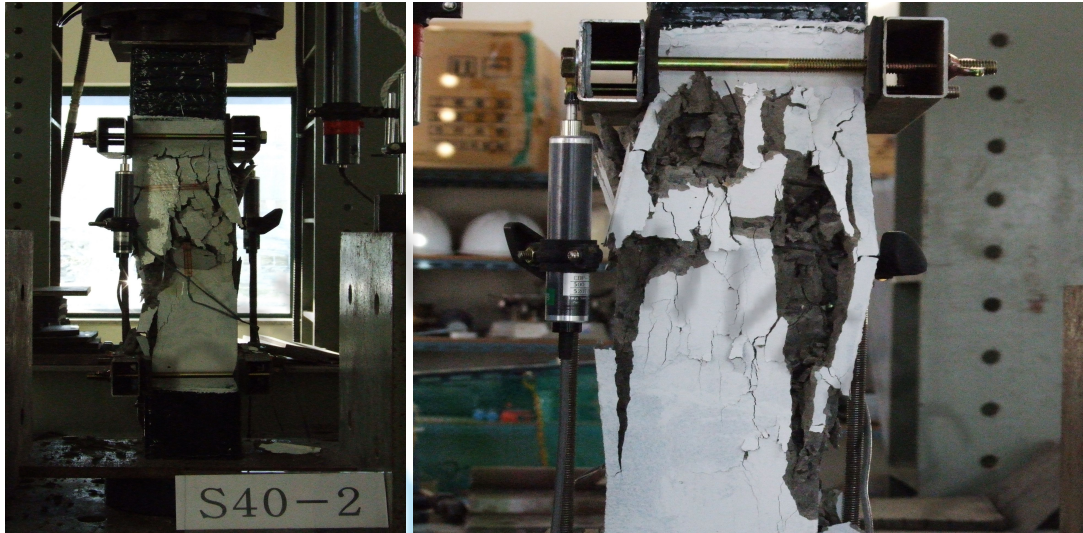
**Fig. 4.2** Final failure and crack of S60-1 specimens



(a) Final failure and crack (b) Buckling of main reinforcement

**Fig. 4.3** Final failure and crack of S60-2 specimens

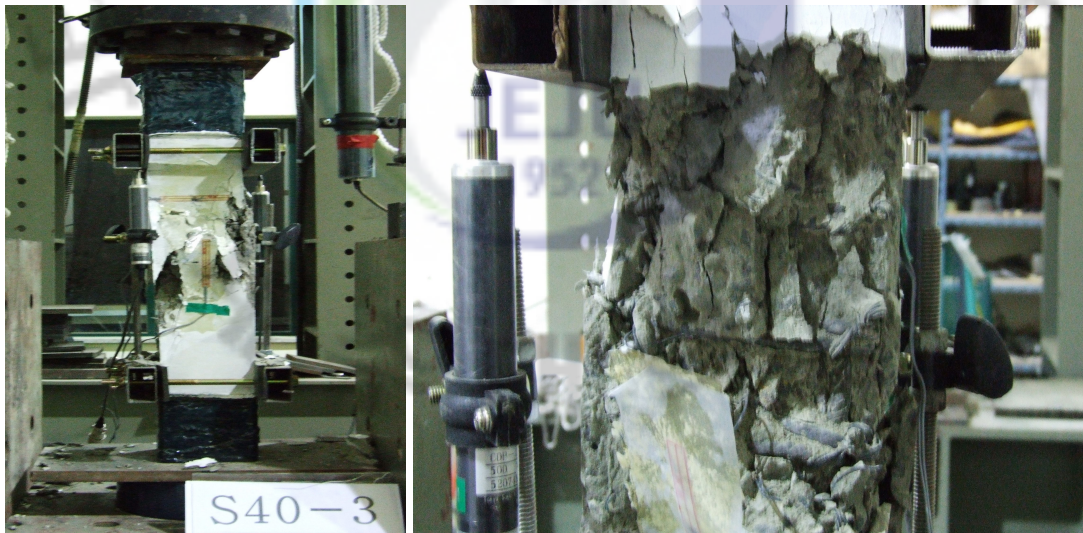




(a) Final failure and crack

(b) Buckling of main reinforcement

**Fig. 4.4** Final failure and crack of S40-2 specimens



(a) Final failure and crack

(b) Buckling of main reinforcement

**Fig. 4.5** Final failure and crack of S40-3 specimens



(a) Final failure and crack

(b) Buckling of main reinforcement

**Fig. 4.6** Final failure and crack of S80-1 specimens



(a) Final failure and crack

(b) Buckling of main reinforcement

**Fig. 4.7** Final failure and crack of S80-3 specimens

## 2) 띠철근 형상에 대한 영향

띠철근의 형상은 C-Type과 S-Type, H-Type 으로 C60 시험체(단순 겹이음된 띠철근 시험체)와 H60 시험체(갈고리로 겹이음된 띠철근 시험체)는 기본 시험체인 S60 시험체(표준 폐합 띠철근 시험체)와 단면 형상 및 띠철근 간격은 같지만, 띠철근 형태를 다르게 하여 띠철근 형태가 기둥의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위한 시험체이다.

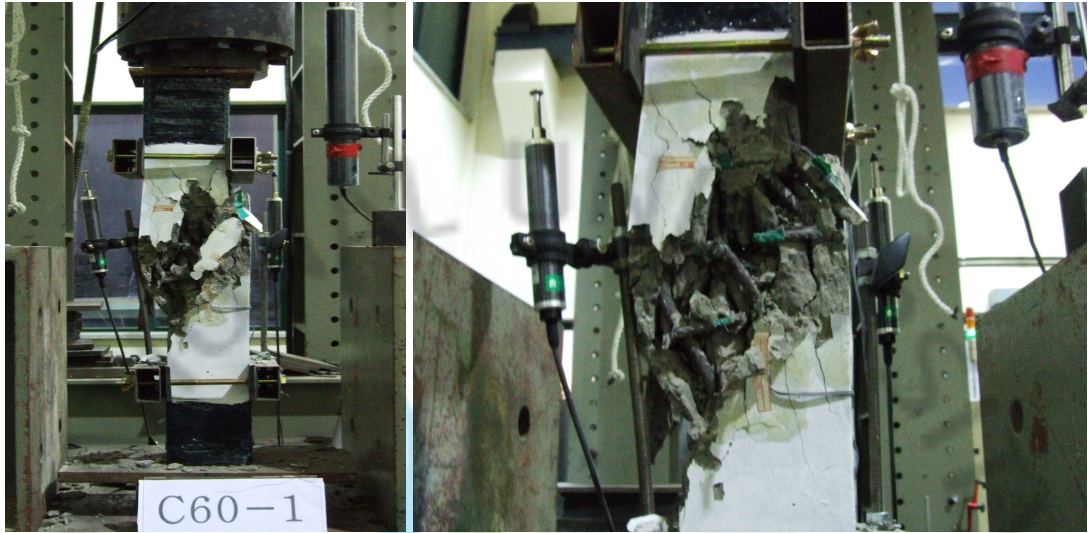
C60 시험체는 일부 시공현장에서 철근의 가공 및 조립을 수월하게 시공하기 위해 만든 형태이다. 파괴는 중앙부에서 대각선 방향으로 균열이 크게 발생하면서 파괴되었고, 이때 중앙부에서 압축철근이 대각선으로 좌굴되었다. 띠철근은 압축철근이 좌굴되면서 벌어졌다. 시험결과 C60 시험체는 S80시험체와 같이 양 끝에서 발생한 미세한 균열이 중심부에서 세로 방향으로 크게 발생되어 파괴가 일어난 것으로 보인다. Fig. 4.8 ~ 9는 C60 시험체의 실험 모습을 나타낸 것으로 (a) 시험체의 파괴 후 모습과 균열양상, (b) 압축철근의 좌굴모습을 보여주고 있다.

H60 시험체는 C60 시험체와 마찬가지로 단면 형상 및 띠철근 간격은 기본 시험체(S60)와 같고 띠철근 형태만을 다르게 한 것으로 띠철근의 끝부분을 갈고리로 만들어 배근한 형태이다. Fig. 4.10 ~ 11은 H60 시험체의 실험 모습을 나타낸 것으로 (a) 시험체의 파괴 후 모습과 균열양상, (b) 압축철근의 좌굴모습을 보여주고 있다.

Fig. 4.12에서 C60 시험체의 띠철근 모양을 가진 시험체는 다른 시험체들과 비교하여 처짐량이 작고 갑작스럽게 파괴가 발생하는 것으로 보아 연성 증진면에서 좋지 않다는 것을 알 수 있다. S60 시험체 및 H60 시험체의 경우에는 하중에 따라 비슷한 거동을 보이고 있어 H60 시험체가 횡보강근으로서 축하중에 대해 어느 정도의 보강효과를 나타낸다고 볼 수 있다. 여기서 C형 시험체와 H형 시험체를 비교하였을 때 두 시험체의 가장 큰 차이는 띠철근에 대한 갈고리의 유무 차이로서, 띠철근 간격 및 체적비 및 형상에 큰 차이가 없다면 띠철근을 갈고리 처리함으로써 연성 증진에 대한 효과가 있다는 것을 알 수 있다.

강도면에서는 335kN ~ 373.4kN으로 모든 시험체가 비슷한 강도 분포를 보이고

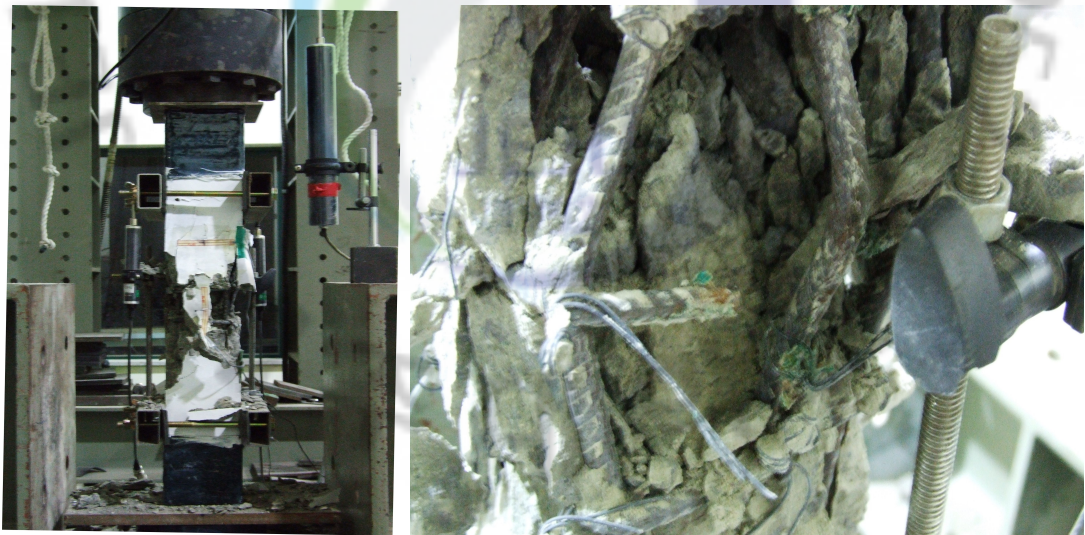
있다. 최대 차이가 38.4kN으로 이는 시험시 하중재하속도 및 시험체 제작시의 차이, 시험체 시험 준비 과정 중에서 차이가 생길 수 있는 오차범위 내에 있으므로, 띠철근의 형상에 따른 강도 증진의 영향은 없는 것으로 판단된다.



(a) Final failure and crack

(b) Buckling of main reinforcement

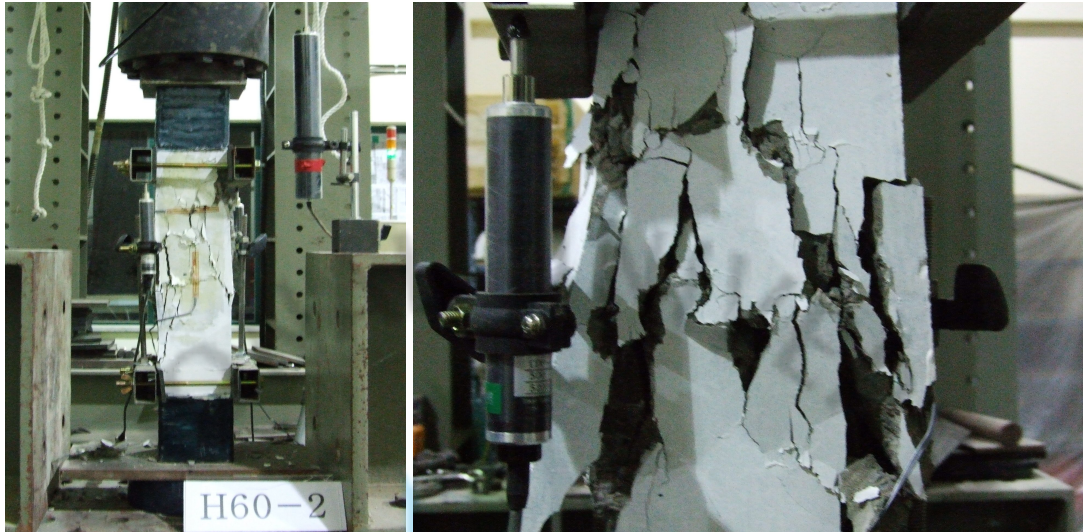
**Fig. 4.8** Final failure and crack of C60-1 specimens



(a) Final failure and crack

(b) Buckling of main reinforcement

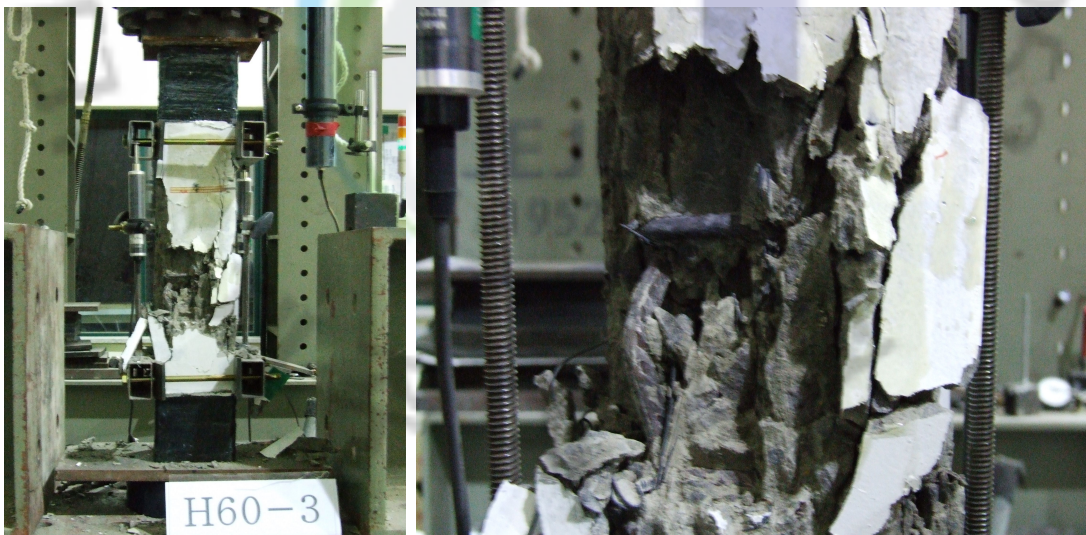
**Fig. 4.9** Final failure and crack of C60-2 specimens



(a) Final failure and crack

(b) Buckling of main reinforcement

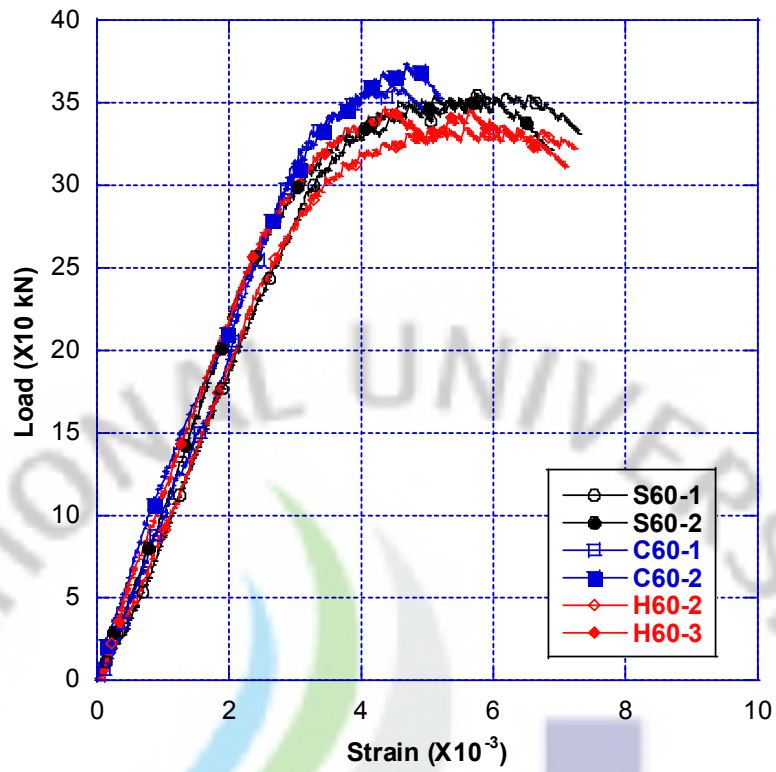
**Fig. 4.10** Final failure and crack of H60-2 specimens



(a) Final failure and crack

(b) Buckling of main reinforcement

**Fig. 4.11** Final failure and crack of H60-3 specimens



**Fig. 4.12** Load - Strain curves of specimens with different tie shape

### 3. 기둥의 연성 평가

#### 1) 연성의 개념

연성이란 재료, 구조단면, 구조부재 또는 구조계가 심각한 저항성의 손실이 없이 붕괴하기 전까지 보여주는 비선형 변형(Inelastic deformation)을 나타내는 정성적인 개념이다. 일반적으로 철근콘크리트 기둥에서는 갑작스런 취성파괴를 방지하고 구조물의 변형에너지 흡수 능력을 확보하기 위하여 어느 정도 이상의 연성을 확보하여야 한다. 이와 더불어 부정정 구조물의 경우 연성은 위험단면의 과잉 응력을 다른 단면으로 재분배시켜 국부파괴를 지연시키는 역할을 하는 중요한 요소이다.

연성을 평가하기 위한 방법으로 2장에서 언급하였지만 연성지수(Ductility index) 또는 연성계수(Ductility factor)가 사용이 되는데 이는 곡률( $\phi$ , curvature), 회전( $\theta$ , rotation), 처짐( $\Delta$ , deflection)의 비로 정의되며 아래와 같다.

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_u}{\phi_y}, \quad \mu_{\theta} = \frac{\theta_u}{\theta_y}, \quad \mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad \text{Eq. 4.1}$$

y=항복(yield), u=극한(ultimate)

본 실험에서는 기존 연구 고찰을 통해, 극한 변형량을 통한 기존 연성지수 산정식과 변형 에너지 개념을 이용한 연성지수 산정식을 이용하여 띠철근의 간격 및 형상에 따른 연성을 평가하였다.

#### 2) 극한 변형량에 의한 연성 비교

다음 Table 4.2는 시험 결과 나타난 시험체별 처짐량 및 연성지수를 나타낸 것이다.

**Table 4.2** Deflection and ductility index of specimens

Specimens	Deflection(mm)		Ductility Index
	Yield	Ultimate	
S80-1	1.71	3.39	1.98
S80-3	1.81	3.69	2.05
S60-1	2.02	4.38	2.17
S60-2	1.64	4.13	2.51
S40-2	1.82	8.59	4.71
S40-3	1.85	8.44	4.57
C60-1	1.89	3.04	1.61
C60-2	1.81	3.13	1.72
H60-2	1.75	4.20	2.41
H60-3	1.58	4.26	2.69

## (1) 띠철근 간격의 영향

S60(띠철근 간격 60mm), S40(띠철근 간격 40mm), S80(띠철근 간격 80mm) 시험체는 전단면에 대하여 단면적, 압축철근비, 철근비, 띠철근 강도 및 형태가 같을 경우에, 띠철근의 간격이 기둥의 연성에 미치는 영향을 알아보기 위한 시험체이다. Fig. 4.13은 띠철근 간격에 대한 시험체의 하중-처짐 곡선을 비교한 것이다.

시험결과 S80 시험체는 S60 시험체에 비해 연성이 14%감소하였고, S40 시험체는 S60 시험체에 비해 연성이 98% 증가하였다.

띠철근의 간격에 따른 연성 평가는 기존 연구들과 마찬가지로 띠철근의 간격이 좁을수록 구속효과가 증가하여 연성이 향상되는 것을 알 수 있었다. 이는 지연 파괴를 발생시켜 안전성이 증대된다.



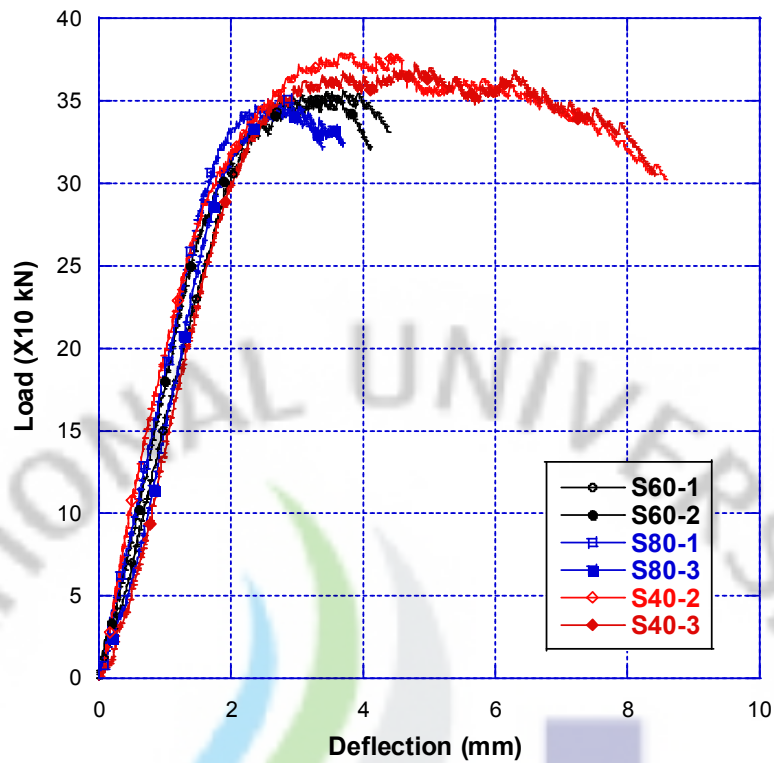


Fig. 4.13 Load - Deflection curves of specimens with different tie spacing

(2) 띠철근 형태의 영향

S60(□ 형 띠철근), C60(□ 형 띠철근), H60(□ 형 띠철근) 시험체는 전단면에 대하여 단면적, 압축철근비, 철근비, 띠철근 강도 및 간격이 같을 경우에, 띠철근의 형태가 기둥의 연성에 미치는 영향을 알아보기 위한 시험체이다. Fig. 4.14는 띠철근 형태에 대한 시험체의 하중-처짐 곡선을 비교한 것이다.

시험결과 C60 시험체는 S60 시험체에 비해 연성이 29% 감소하였고, H60 시험체는 S60 시험체에 비해 연성이 8% 증가하였다.

시험 결과에서 알 수 있듯이 단순 겹이음된 띠철근을 가진 기둥 시험체는 표준 폐합 띠철근을 가진 기둥에 비해 연성이 감소하였고, 갈고리로 겹이음된 띠철근을 가진 기둥은 표준 폐합 띠철근을 가진 기둥과 비슷한 연성을 나타내었다.

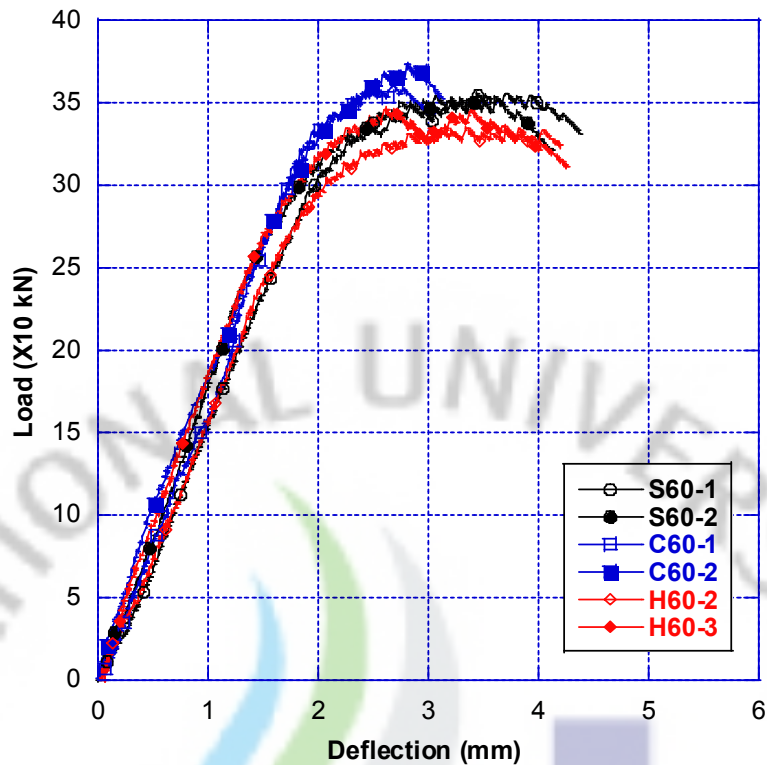


Fig. 4.14 Load - Deflection curves of specimens with different tie shape

### 3) 에너지 방법에 의한 연성 비교

에너지 정의에 기초한 연성은 비탄성, 탄성, 그리고 전체에너지 중에 어떤 두 개의 비로써 정의되어 지는데, 여기에서는 비탄성 에너지와 전체 에너지의 비로 정의하였다. 따라서 전체 에너지는 하중-변형 곡선 전체의 아래 면적으로 계산할 수 있다. 그러나 선형 에너지 부분과 비선형 에너지 부분을 결정함에 있어 다소 어려운 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하는 방법으로는 다음의 두 가지 방법이 보편적으로 이용된다. 첫 번째 방법은 하중의 증가가 다르게 바뀌는 점을 찾는 것이다. 두 번째 방법은 하중-처짐 곡선에서 편평한 부분을 기준으로 하여 에너지 변곡점을 찾아 구분하는 것이다. 본 논문에서는 A.E Naaman과 S.M Jeong이 제시한 방법을 선택하여 에너지 변곡점을 결정하였고, 에너지 개념에 의한 연성 지수를 결정하였다. 에너지 개념에 의한 연성지수를 각 실험체별로 분류하면

Table 4.3과 같다.

**Table 4.3** Ductility index of specimens by energy

Specimens	S	$E_{total}$	$E_{el}$	$E_{in}$	Energy rate $E_{in} / E_{total}$ (%)	Ductility Index
S80-1	19.66	84.40	26.27	58.13	68.87	2.11
S80-3	17.43	91.36	30.02	61.35	67.15	2.02
S60-1	15.83	113.01	34.76	78.25	69.24	2.13
S60-2	17.96	106.97	28.70	78.26	73.17	2.36
S40-2	18.27	262.11	25.07	237.05	90.44	5.73
S40-3	18.13	256.18	25.72	230.46	89.96	5.48
C60-1	17.14	70.67	34.30	36.36	51.46	1.53
C60-2	17.78	75.88	34.97	40.91	53.92	1.59
H60-2	14.90	103.35	35.22	68.13	65.92	1.97
H60-3	18.94	111.36	25.67	85.70	76.95	2.67

#### 4) 연성지수의 비교

다음 Fig. 4.15는 위의 2가지 방법으로 구한 연성지수를 나타낸 그래프로, 기본 시험체인 S60 시험체를 기준으로 하여 각 시험체 종류마다 비교한 것이다.

띠철근 간격이 80mm인 S80 시험체(띠철근이 □ 형태)는 띠철근 간격이 60mm인 표준 S60 시험체(띠철근이 □ 형태)에 비하여 극한 변형량에 의한 연성지수는 86%, 변형에너지에 의한 연성지수는 92%로 연성 특성에 있어서 낮은 성능을 보인다. 또한 띠철근 간격이 40mm인 S40 시험체는 표준 S60 시험체에 비하여 극한 변형량에 의한 연성지수는 198%, 변형에너지에 의한 연성지수는 249.7%로

연성 특성에 있어서 매우 높은 성능을 보인다.

띠철근이 □ 형태인 단순 겹이음된 C60 시험체는 표준 S60 시험체(띠철근이 □ 형태)에 비하여 극한 변형량에 의한 연성지수는 71%, 변형에너지에 의한 연성지수는 69%로 연성 특성에 있어서 매우 낮은 성능을 보인다. 또한 띠철근이 □ 형태인 갈고리로 겹이음된 H60 시험체는 표준 S60 시험체와 비교하여 극한 변형량에 의한 연성지수가 108%, 변형에너지에 의한 연성지수는 103%로 연성 특성에 있어서 S60 시험체와 비슷하게 나타났다.

기본 시험체와 C60, H60 시험체를 비교한 결과 띠철근의 형태에 따라 연성 특성에 있어 큰 차이를 보인다는 것을 알 수 있다. 특히 띠철근을 갈고리 처리하지 않은 C60 시험체는 띠철근의 간격이 큰 S80 시험체와 비슷한 연성 특성을 보인다. 이는 띠철근의 간격을 작게 하더라도 띠철근에 의한 압축철근의 구속효과가 작다면, 무근 콘크리트와 같이 취성파괴가 지배적으로 나타난다고 볼 수 있다.

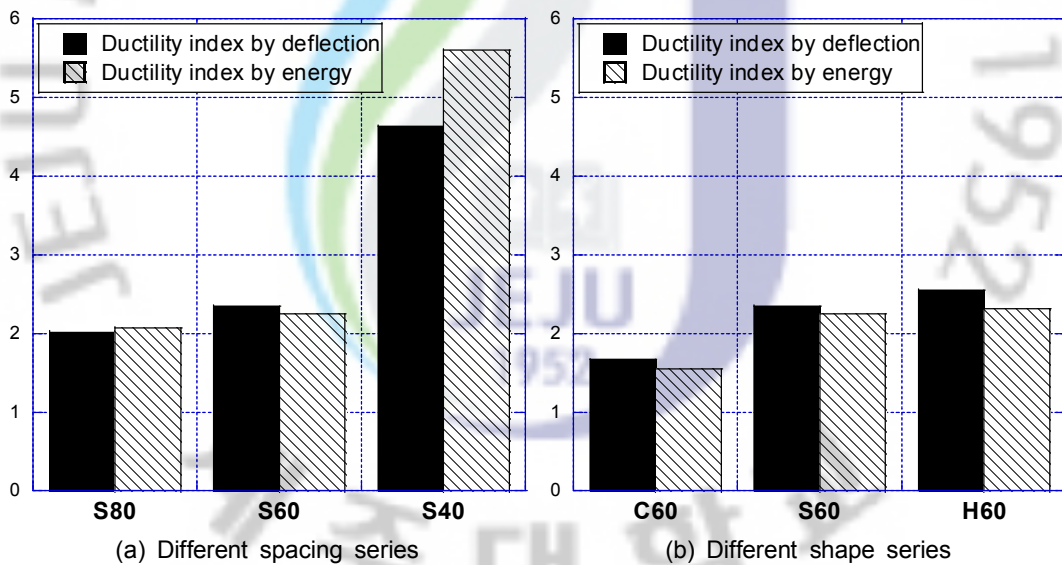


Fig. 4.15 Comparison of the ductility Index by deflection and energy

## V. 결 론

본 논문에서 띠철근이 철근 콘크리트 사각형 기둥의 강도와 연성에 미치는 영향을 실험을 통하여 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 띠철근 콘크리트 기둥에 대한 실험결과, 띠철근의 간격이나 형상이 콘크리트 기둥의 극한강도에 미치는 영향은 매우 적은 것으로 판단된다.
2. 띠철근의 간격과 형상은 사각형 콘크리트 기둥의 연성에 대해 큰 영향을 미치며, 이는 극한 상태에서 안전성에 커다란 영향을 미칠 것으로 판단된다.
3. 띠철근 콘크리트 기둥에서 띠철근의 간격이 좁을수록 연성이 증가하여 지연파괴가 발생함으로써 안전성이 증대할 것으로 판단된다.
4. 단순 겹이음된 띠철근 사각형 콘크리트 기둥은 표준 폐합 띠철근 기둥에 비해 연성이 매우 낮아 극한 파괴시 안전성이 감소된다. 따라서 시공상의 용이성으로 단순 겹이음된 띠철근 사용은 지양되어야 한다.
5. 갈고리로 겹이음된 띠철근 기둥은 표준 폐합 띠철근 기둥과 비슷한 연성을 나타낸다. 따라서 시공시 표준 폐합 띠철근의 사용이 매우 곤란한 경우, 충분한 성능 검토 후 대체 사용할 수도 있을 것으로 판단된다.

## VI. 참고문헌

- 김장환, (1999), “중심축력을 받는 정방형단면 기둥의 연성에 미치는 띠철근의 영향에 관한 실험적연구”, 전남대학교 대학원 석사학위 논문, pp.34~42
- 왕성근, (2002), “고강도 철근 콘크리트 띠철근 기둥의 구속효과”, 한양대학교 대학원 석사학위 논문, pp.5~32
- 정하정, (1999), “중심축력을 받는 철근 콘크리트 단주의 띠철근 구속효과에 관한 실험적연구”, 동국대학교 산업기술환경대학원 석사학위 논문, pp.14~26
- ACI, (1999) "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-99)", (ACI Committee 318, American Concrete Institute)
- A. E. Naaman and S. M. Jeong, (1995), "Structural Ductility of Concrete Prestressed Beams with FRP Tendons." Proceeding of the Second International RILEM Symposium -Non- Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Ghent, Belgium, pp.379~386
- Cusson, D. and Paultre, P. (1994), "High-Strength Concrete Columns Confined by Rectangular Ties", Journal of the Structural Engineering, ASCE, Vol.120, No.3, pp.783~804
- Kent, D.C and Park R, (1971), "Flexural Members with Confined Concrete", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.97, No. ST.7, pp.1969~1990
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R. (1988), "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete." Journal of the Structural Engineering, ASCE, Vol.114, No.8, pp.1804~1826
- Nagashima, T., Sugano, S., Kimura, H., Ichikawa, A., (1992), "Monotonic Axial Compression Test on Ultra-Strength Concrete Tied Columns.", (Proc. 10th World Conference on Earthquake Engineering, 2983~2988

Sheikh, S. A. and Uzumeri, S. M. (1982), "Analytical Model For Concrete Confinement in Tide Columns", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No. ST12, pp.2703~2722

Sheikh, S. A. and Uzumeri, S. M. (1980), "Strength and Ductility of Tide Concrete Columns", Journal of the Structural Division, Vol.106, No. ST5, pp.1079~1101

Saatcioglu, M. and Razvi, S. R. (1998), "High-Strength Concrete Columns with Square Sections under Concentric Compression" (ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.124, No.12, pp.1438~1447



## 감사의 글

어느덧 논문을 마치면서 다시금 지난 시간들을 떠올려 보며 글을 씁니다.

제가 포기하지 않고 무사히 논문을 끝낼 수 있게 이끌어 주시고 지도해주신 박상렬 교수님께 깊은 감사드립니다. 그리고 수업중 많은 가르침을 주신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 남정만 교수님, 이병걸 교수님, 김상진 교수님, 이동욱 교수님께도 감사드립니다.

부족한 제게 많은 조언과 질책을 해주신 연구실 박사과정 창훈이형께도 진심으로 깊은 감사드리고 제게 항상 모범이 되어주고 많은 도움을 주었던 연구실 후배 경남, 경태, 성협, 용현이 에게도 고맙다는 말을 전합니다.

제가 대학원 생활을 할 수 있게 옆에서 도와주시고 응원해 주신 많은 분들께도 고맙다는 말을 전합니다.

바쁜 일정 속에서도 논문에 전념 할 수 있게 시간을 할애해주신 박채규 소장님과 동료 직원들에게도 감사드립니다.

제 대학원생활 처음부터 지금 이 순간에도 믿고 지지해준 사랑하는 아내 은주와 아들 동민에게도 고맙고 사랑한다는 말을 전합니다.

그리고 저를 낳아 길러주시고 이제는 제 아들까지 보살펴주시는 사랑하는 어머니, 아버지에게도 감사 말씀 드리고 열심히 하는 아들 되겠습니다.

이제 논문을 마치면서 또 다른 시작이라 생각하며 조금 더 나아지려고 노력하는 사람이 되겠습니다.

끝으로 저를 아는 모든 분들께 감사드리고 행복을 빕니다.

2008년 12월 한창윤 드림.