



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

CFRP Sheet로 보강한 사각형
콘크리트 기둥의 보강효과와
파괴특성에 관한 연구

The seal of Cheju National University is a large, faint watermark in the background. It features a central shield with the Korean characters '제주대' (Jeju University) and an open book below it. The shield is surrounded by a circular border containing the text 'CHEJU NATIONAL UNIVERSITY' and 'SINCE 1952'.

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學 專攻

高 廣 敏

2 0 0 6

碩士學位論文

CFRP Sheet로 보강한 사각형
콘크리트 기둥의 보강효과와
파괴특성에 관한 연구

指導教授 朴 相 烈

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

高 廣 敏

2 0 0 6

CFRP Sheet로 보강한 사각형 콘크리트 기둥의 보강효과와 파괴특성에 관한 연구

指導教授 朴 相 烈

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2006年 12月 日

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科 土木工學 專攻

高 廣 敏

高廣敏의 工學 碩士學位 論文을 認准함

2006年 12月 日

委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

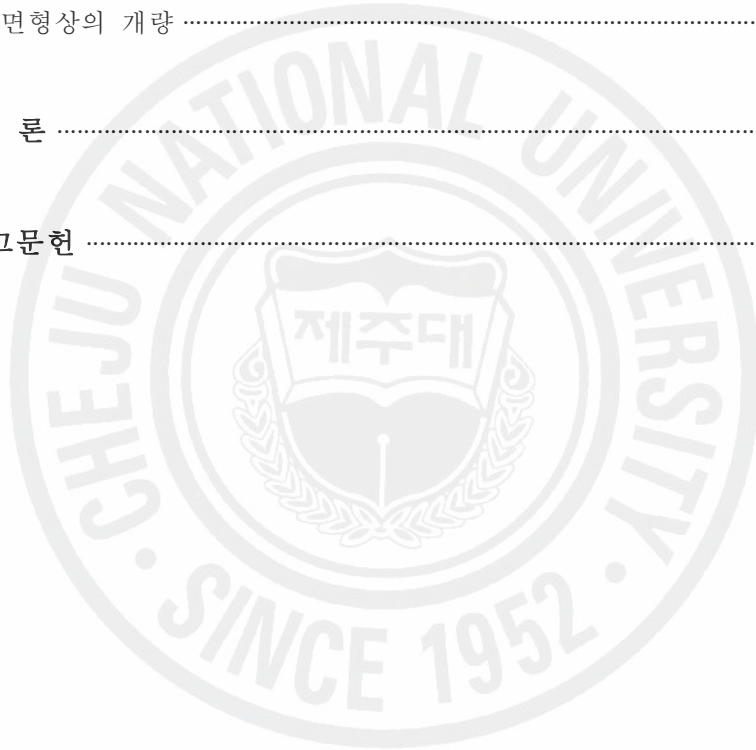
委 員 _____ 印

목 차

목 차	i
List of Tables	iv
List of Figures	v
summary	vii
I. 서 론	1
1. 연구배경 및 목적	1
2. 연구 범위 및 방법	2
3. 논문의 구성	2
II. 기존이론 고찰 및 FRP 보강이론	4
1. 기존이론 고찰	4
1) Fafitis-Shah 연구	4
2) Mander et al. 의 연구	5
3) Kent-Park의 연구	6
4) Murat Saatcioglu와 Salim R. Razvi의 연구	8
2. FRP로 보강된 기둥의 거동 특성	9
3. FRP로 구속된 콘크리트의 압축강도	12
1) 일반	12
2) 강도모델의 평가	12
3) Lam and Teng의 모델	15
4. FRP로 구속된 사각형 콘크리트 기둥	17
1) 개요	17
2) 기존모델	17
3) Lam and Teng의 모델	21

III. 탄소섬유 Sheet 공법의 개요	23
1. FRP의 일반사항	23
2. FRP의 종류와 특징	24
1) 유리섬유(Glass Fiber)	24
2) 탄소섬유(Carbon Fiber)	24
3) 아라미드섬유(Aramid Fiber)	25
4) 하이브리드 섬유 (Hybrid Fiber)	26
5) 격자섬유(NEFMAC)	26
6) FRP 재료의 역학적 성질	27
3. 섬유부착 공법과 격자섬유 보강공법의 특징	28
1) 섬유부착공법	28
2) 격자섬유 보강공법	31
4. 탄소섬유(CFRP Sheet)의 특성	34
IV. 실험체 제작 및 실험	36
1. 실험체 제원	36
2. 실험 변수	37
3. 사용재료	38
1) Concrete	38
2) 탄소섬유 Sheet	38
3) Epoxy	39
4) 압축시험기	40
4. 기둥형상의 개량	40
5. 실험체 제작	43
1) 사각형 실험체 제작 과정	43
2) 탄소섬유쉬트 접착과정	43
6. 실험 데이터 수집	43

V. 실험결과 및 분석	45
1. 실험결과	45
2. 각 변수별 실험 결과 분석	47
1) 보강정도	47
2) 기둥의 크기	52
3) 형상비	56
4) 모따기	60
5) 단면형상의 개량	65
VI. 결 론	68
VII. 참고문헌	69



List of Tables

Table 2.1 Strength prediction models of concrete columns confined by FRP	14
Table 2.2 Model coefficient of the Lam and Teng	16
Table 3.1 Comparison of FRP materials	26
Table 3.2 Characteristics of materials for FRP	27
Table 3.3 Advantages and disadvantages of carbon fiber	35
Table 3.4 Field of FRP's application by physical properties	35
Table 4.1 Parameters for square test columns	37
Table 4.2 Characteristics of concrete	38
Table 4.3 Mechanical of CFRP Sheet	39
Table 5.1 Summary of experiment results	45
Table 5.2 Summary of ultimated loads and failure modes	46

List of Figures

Fig 2.1 Equivalent area of a rectangular column (Fafitis-Shah)	5
Fig 2.2 Stress-strain curves of Mander	6
Fig 2.3 Proposed curves of Kent-Park	8
Fig 2.4 Concrete columns confined by FRP Sheet	10
Fig 2.5 Test view of Concrete column confined by FRP Sheet	11
Fig 2.6 Effective confined concrete in square column	18
Fig 2.7 Lam and Teng's sectional form model against an equivalent circular column	21
Fig. 3.1 Stress-strain relationship of FRP and steel	27
Fig. 3.2 Type of FRP composite materials	28
Fig. 3.3 Application of external bonding method using CFRP sheet.	30
Fig. 3.4 Application of NEFMAC method using CFRP sheet	33
Fig 4.1 Dimensions of test column specimen	36
Fig 4.2 Epoxy	40
Fig 4.3 The case which did not make the corner with curve	42
Fig 4.4 The case which made the corner with curve	42
Fig 4.5 Circular test specimen transformed from square column	42
Fig 4.6 Arrangement of gauges for data acquisition.	44
Fig 4.7 Test set up for column specimen	44
Fig 5.1 Relationship of ultimate stress and number of layer (FRP sheet)	48
Fig 5.2 Load-deformation curves with different number of layer	49
Fig 5.3 Stress- horizontal strain curves with different number of layer	49
Fig 5.4 Stress- axial strain curves with different number of layer	50
Fig 5.4 Real view of compression failure (C0)	50
Fig 5.5 Real view of debonding failure (C1)	51

Fig 5.6 Real view of debonding failure (C2)	51
Fig 5.7 Real view of debonding failure (C3)	52
Fig 5.8 Relationship of ultimate stress and column dimension	53
Fig 5.9 Load-deformation curves with different dimension of columns	54
Fig 5.10 Stress- horizontal strain curves with different dimension of columns	54
Fig 5.11 Stress- axial strain curves with different dimension of columns	55
Fig 5.12 Real view of debonding failure (C4)	55
Fig 5.13 Real view of debonding failure (C5)	56
Fig 5.14 Relationship of ultimate stress and Height/width ratio	57
Fig 5.15 Load-deformation curves with different Height/width ratio	58
Fig 5.16 Stress- horizontal strain curves with different Height/width ratio	58
Fig 5.17 Stress- axial strain curves with different Height/width ratio	59
Fig 5.18 Real view of debonding failure (C6)	59
Fig 5.19 Real view of debonding failure (C7)	60
Fig 5.20 Relationship of ultimate stress and corner rounding	61
Fig 5.21 Load-deformation curves with different corner rounding	62
Fig 5.22 Stress- horizontal strain curves with different corner rounding	62
Fig 5.23 Stress- axial strain curves with different corner rounding	63
Fig 5.24 Real view of debonding failure (C8)	63
Fig 5.25 Real view of debonding failure (C9)	64
Fig 5.26 Real view of debonding failure (C10)	64
Fig 5.27 Stress-deformation curves with different section	66
Fig 5.28 Stress- horizontal strain curves with different section	66
Fig 5.29 Stress- axial strain curves with different section	67
Fig 5.30 Real view of debonding failure (C11)	67

*Strengthening Effect and Failure Mode of
Rectangular Concrete Column Confined
with CFRP Sheet*

Koh, Kwang Min

*Department of Construction and Environmental Engineering
Graduate School of Industry
Cheju National University*

Supervised by professor Park, Sang Yeol

Summary

This study deals with the strengthening effect and failure mode of rectangular concrete column confined by carbon FRP sheet. The increase in axial compression capacity comes from the confinement effect of confined CFRP sheet. Because of the shape of rectangular concrete column, the confinement effect is smaller than that in circular column. For the experimental program, four parameters including the number of sheet, the size of column specimen, the ratio of height and width, corner rounding, and the transformation in shape from circular to square were selected to examine the strengthening effect and failure mode of each

parameter. Experimental program comprised thirty three circular concrete column specimens for different eleven test column types.

The compression test results confirmed that the confinement effect due to rolled and bonded CFRP sheet can considerably increase axial compression capacity in square concrete column. The resistance in compression capacity increased by 30% to 100% as the number of wrapped and bonded CFRP sheet increased from one sheet to three sheets. The strengthening effect of the parameters, the height and the diameter of circular concrete column decreased as they increased. The resisting capacity in axial compression was not affected by corner rounding unless it was larger than 30mm of radius. All square columns showed ductile behavior at the ultimate state. The transformation in shape from square to circular greatly affected the strengthening effect by 75% increase in axial compression capacity, compared to the original circular shape.

I. 서 론

1. 연구배경 및 목적

철근콘크리트(Reinforced Concrete, 이하 RC) 구조물은 재료, 시공, 환경, 구조적인 요인 등에 의해 시공 직후 또는 사용 중 시간이 경과되면서 내력저하 등 여러 가지 구조적인 성능이 저하되는 경우가 빈번하다. 따라서 적절한 시기에 보수, 보강이 절 대적으로 요구된다. 특히 구조물 중에서 기둥은 하중을 지지하는 중요한 역할을 하고 있으며 최근에는 지진에 저항하는 기둥의 내력증진방안이나 띠철근의 구속효과 및 기둥의 연성을 확보하기 위한 다양한 연구가 진행중이고, 이런 연구들은 구조체의 강도 및 연성설계를 주로 다루고 있다.

기둥에 대한 보강 방법으로는 강판보강, 단면증설, 에폭시그라우팅 방법이 많이 이 용되고 있으나 이들 방법들은 시공 상 복잡하고 많은 노력이 요구된다. 특히 강판보 강 방법은 높은 인건비, 강판연결의 어려움, 강판의 부식문제, 단면의 일체성 확보 등 의 어려움으로 그 사용이 제한적이다. 이에 따라 시공성과 일체성 등에 있어서 종래 의 보강공법의 여러 단점들을 보완할 수 있는 탄소섬유 Sheet(Carbon Fiber Sheet), 아라미드섬유 Sheet(Aramid Fiber Sheet), 유리섬유 Sheet(Glass Fiber Sheet)등과 같은 고분자복합재료를 이용한 보강공법에 관한 연구가 증대되고 있으며, 실제적으로 많이 적용되고 있다. 탄소섬유 Sheet의 경우에는 단위 무게당 높은 강도, 시공의 용 이성, 일체성확보의 용의, 내부식성 등으로 인하여 강판보강법보다 선호하는 공법으 로 인식되고 있다.

탄소섬유 Sheet를 이용한 보수·보강에는 주로 외국에서 제작된 제품을 수입하여 보나 슬래브에 적용되고 있어 탄소섬유 Sheet를 기둥에 보강했을 경우의 재료의 소 요성능뿐만 아니라 역학적 거동의 특성을 규명하는 연구가 필요하다. 또한, 보강한 기둥의 연성과 인성을 확보하면서 원하는 강도 및 거동에 대한 신뢰성 있는 예측모 델의 제한이 시급한 실정이다.

현재 탄소섬유 Sheet 보강설계는 명확한 기준 없이 기존의 RC 기둥에 대한 모델을 단순하게 확장한 개념을 사용하고 있으며, 탄소섬유 Sheet 보강설계 및 시공과정에서의 여러 가지 불확실한 요소를 내포하기 때문에 이를 해결하기 위한 재료 및 구조성능에 관한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 FRP Sheet로 보강된 콘크리트 직사각형 기둥의 보강 효과를 검증하고, 원형 기둥에 대한 구속 효과 비교, FRP Sheet 기둥 보강 공법에 대하여 직사각형 기둥과 원형기둥의 파괴 형태 비교, 직사각형 기둥에 대한 보강 효과를 극대화하기 위한 공법 및 그 효과를 검증 하고자 한다.

2. 연구 범위 및 방법

본 연구에서는 탄소섬유 Sheet로 보강된 RC기둥의 횡구속 효과와 파괴거동을 관찰하기 위하여 기둥형상의 시험체를 만들어서 압축실험을 실시하였다.

실험결과를 분석하여 압축력을 받는 탄소섬유 Sheet로 보강된 시험체의 탄소섬유 Sheet보강 효과를 규명하고, 사각형태를 원형 단면으로 개량했을 경우의 파괴거동을 비교 분석하였다.

3. 논문의 구성

본 논문은 총 7장으로 구성되어 있으며 각 장에 기술되어있는 내용을 간략하게 소개하면 다음과 같다.

2장에서는 기존의 연구동향을 살펴보고

3장에서는 FRP에 대한 종류와 역학적 성질, 그리고 FRP종류에 따른 부착공법등을 소개한다.

4장에서는 실험전 실험체의 변수와 실험체를 만드는 과정, 그리고 실험에 사용된 재료의 특성에 대하여 기술하였다.

5장에는 실험데이터를 수집하여 시험체의 변수에 따른 비교 분석하고, 원형 기둥 시험체와 파괴 거동을 비교할 것이다.

6장에서는 결론부분으로 실험을 바탕으로 도출된 결과들을 정리하였다.



II. 기존이론 고찰 및 FRP 보강이론

1. 기존이론 고찰

1) Fafitis-Shah 연구

1985년 Apostolos Fafitis, Surendra P. Shah는 횡구속된 콘크리트와 횡구속되지 않은 콘크리트 기둥의 극한거동에 관하여 비교 연구하였다.

원형, 정사각형, 팔각형, 기둥의 횡구속 효과에 관한 연구를 통하여 응력-변형률에 대한 곡선을 수학적으로 표현하고, 기둥의 압축강도 및 변형률에 대한 관계를 다음과 같이 제안하고 있다.

기둥의 횡구속 값인 f_r 를 구하기 위하여 구속된 정방형 코어(Core)의 면적은 길이가 같은 원형기둥으로 가정하여 등가직경을 구한 다음 정방형 기둥에 적용하였다.

$$f_{cc} = f_{co} + (1.15 + \frac{214.3}{f_{co}})f_r \quad (\text{Eq 2.1})$$

$$\varepsilon_o = 14.61 \times 10^{-7} f_{co} + 0.0296 \frac{f_r}{f_{co}} + 0.00195$$

$$f_r = \frac{A_s f_y}{d_e s}$$

f_{cc} : 횡구속된 콘크리트의 압축강도 (kgf/cm^2)

f_{co} : 비구속 콘크리트의 압축강도 (kgf/cm^2)

f_r : 횡구속압 (kgf/cm^2)

d_e : 등가직경(cm)

s : 띠철근 간격(cm)

A_s : 띠철근 단면적 (cm^2)

ε_0 : 최대응력시 변형률

f_y : 띠철근 항복강도 (kgf/cm^2)

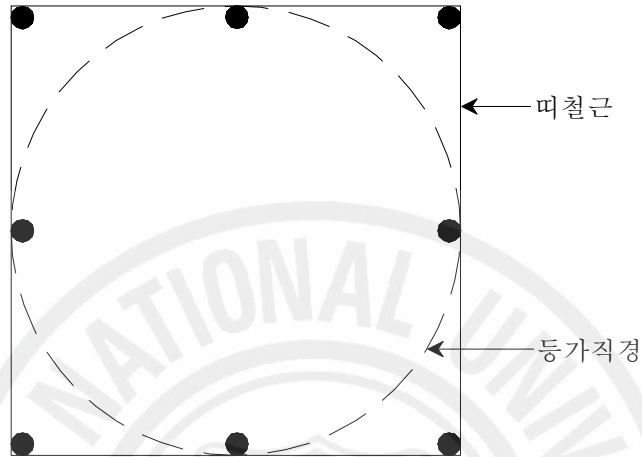


Fig 2.1 Equivalent area of a rectangular column (Fafitis-Shah)

횡구속된 콘크리트의 최대강도는 횡구속압과 콘크리트의 강도에 의해 식을 제안하였다. 일반적으로 구조체를 감싸고 있는 철근의 극한변형률에 비해 콘크리트의 극한변형률이 작은 값을 가지기 때문에 콘크리트 극한변형률은 부재의 연성을 산정하는데 결정적인 기준이 된다.

2) Mander et al. 의 연구

1988년 Mander et al. 은 띠철근과 나선철근에 대하여 횡구속압이 일정하다고 가정하여 다음의 관계를 제안하였다.

$$f_{cc} = f_{co} + (2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{f_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f_{co}} - 1.254) \quad (\text{Eq 2.2})$$

$$f_l = \frac{2f_{yh}A_s}{sd_h} k_e$$

f_{cc} : 횡구속된 콘크리트의 압축강도 (kgf/cm^2)

f_{co} : 비구속 콘크리트의 압축강도 (kgf/cm^2)

f_{yh} : 띠철근의 항복강도 (kgf/cm^2)

A_{sh} : 띠철근 단면적 (cm^2)

d_h : 단면치수(cm)

k_e : 단면형상에 따른 보강효과 계수

유효구속면적 개념을 통하여 원형과 직선형 띠철근을 통일적으로 평가할 수 있는 강도식을 제안하였으며 띠철근 간격, 내부 띠철근의 유무, 주근의 개수, 띠철근의 체적비, 기둥 단면의 형태 등을 변수로 하였다.

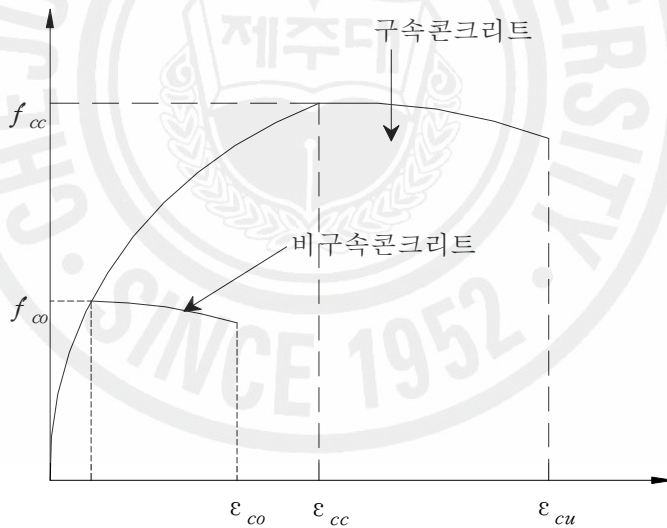


Fig 2.2 Stress-strain curves of Mander

3) Kent-Park의 연구

1971년 Dulley Charles Kent 와 Robert Park 은 Roy, Sozen, Felipa, Soliman, Yu 등의 실험자료 및 이론을 이용하여 Fig 2.3과 같은 콘크리트 응력-변형률 관계를 제

안하였다.

제안된 곡선에 나타났듯이 Kent와 Park는 구속콘크리트의 최대강도와 비구속콘크리트의 최대강도를 공시체의 최대강도인 f_c 와 같다고 하였으며, 이 때의 변형률도 콘크리트의 구속여부에 관계없이 0.002라 하였다.

또한 Fig 2.3에서와 같이 최대강도 이후의 구간 B-C를 직선으로 제안하였으며, 이 구간에서는 횡보강 철근에 의한 콘크리트의 구속효과가 콘크리트의 거동에 영향을 끼친다고 하였다.

즉, 최대응력에 도달할 때까지는 횡보강 철근에 의한 구속효과가 콘크리트의 강도 및 그에 대응하는 변형률에 영향을 미치지 않으나, 최대응력 이후에는 콘크리트의 압축강도, 코아 콘크리트의 폭과 횡보강 철근의 구속효과가 콘크리트의 거동에 영향을 미쳐 콘크리트의 연성이 변화되는 것으로 나타내었다. 횡보강 철근에 의한 항복변형률 및 연성의 증가는 고려하고 항복강도 증진은 무시하였다.

이후 1982년에 Park, Priestley and Gill의 수정된 Kent-Park 모델에서는 콘크리트의 구속효과로 인한 횡보강근의 구속효과에 따라 연성의 증진뿐만 아니라 항복강도 및 항복변형률의 증가를 고려한 내용이 포함되었다. 이 수정된 모델에서는 항복강도와 항복변형률의 증가를 일정한 구속계수(K)에 의하여 증가된 값으로 표현하고 있으며, 구속된 콘크리트의 최대응력은 Kf_c 까지 도달하여 최대응력에서의 변형률은 0.002K 까지 도달한다고 제안하였다.

$$f_{cc} = Kf_c \quad (\text{Eq 2.3})$$

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f_c}$$

f_{cc} : 횡구속된 콘크리트의 압축강도 (kgf/cm^2)

f_c : 공시체의 최대 압축강도 (kgf/cm^2)

ρ_s : 띠철근의 체적비

f_{yh} : 띠철근의 항복강도 (kgf/cm^2)

위 식에서 구속계수 K는 콘크리트 강도에 대한 횡보강철근의 역학적인 비에 비례

하여 증가하는 것으로 정의하고 있다.

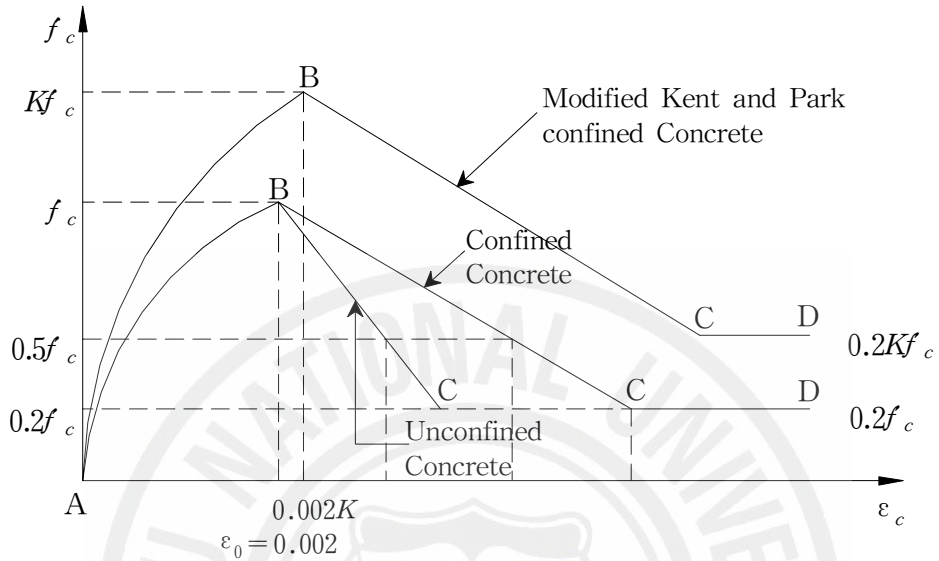


Fig 2.3 Proposed curves of Kent-Park

4) Murat Saatcioglu와 Salim R. Razvi의 연구

Murat Saatcioglu와 Salim R. Razvi는 횡구속된 콘크리트의 강도와 연성에 관한 연구에서 횡구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 집중하중과 편심하중 하에서 철근비와 서로 다른 기하학적(원형, 정사각형, 직사각형) 기둥에 의해서 얻어진 결과로 비교하여 정방형 기둥에 대해 다음과 같이 제안하였다.

$$f_{cc} = f_{co} + k_1 f_{le} \tag{Eq 2.4}$$

$$f_{le} = k_2 f_l$$

$$f_l = \frac{\sum A_s f_{yh} \sin \alpha}{s} b_c$$

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

$$k_2 = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_c}{s}\right)(b_{overs})\left(\frac{1}{f_l}\right)} \leq 1.0$$

f_l : 횡구속압 (kgf/cm^2)

f_{le} : 등가횡구속압 (kgf/cm^2)

k_1 : 횡구속 계수 (confinement effectiveness coefficient)

k_2 : 횡구속압 감소계수 (coefficient to reduce the lateral pressure)

b_c : 외곽 띠철근 중심간 길이 (cm)

A_s : 띠철근 단면적 (cm^2)

f_{yh} : 띠철근의 항복강도 (kgf/cm^2)

2. FRP로 보강된 기둥의 거동 특성

FRP로 구속된 기둥이 축방향 압축을 받을 경우 콘크리트는 횡방향으로 팽창하려고 하지만 FRP에 의하여 구속된다. 원형 콘크리트 기둥에서의 FRP의 구속효과는 Fig 2.4에 보이는 바와 같다. 원형 콘크리트는 균등한 구속력을 받는다. 그리고 FRP에 의한 최대 구속압은 FRP 복합재료의 보강량과 강도, 그리고 심부콘크리트의 직경에 의하여 결정되며, 이때의 구속압은 다음 식으로 주어진다.

$$f_l = \frac{2f_{frp}t_{frp}}{d} = \frac{\rho_{frp}f_{frp}}{2} \quad (\text{Eq 2.5})$$

여기서 f_l 은 횡방향 구속력이며, f_{frp} 는 기둥을 둘러싼 띠 보강재 방향의 FRP 인장 강도이다. t_{frp} 는 FRP의 총 두께 또는 약간의 틈을 가지고 감싼 FRP 스트랜드 및 스트랩 경우의 등가두께이다. d 는 구속된 콘크리트 기둥의 직경이며, ρ_{frp} 는 기둥을 완전히 감싼 경우의 FRP 체적비로서 다음의 식으로 주어진다.

$$\rho_{frp} = \frac{\pi d t_{frp}}{\pi d^2 / 4} = \frac{4 t_{frp}}{d} \quad (\text{Eq 2.6})$$

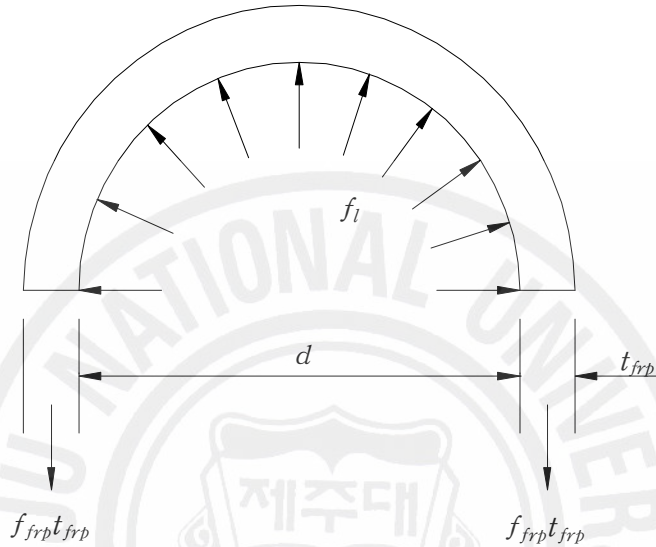


Fig 2.4 Concrete columns confined by FRP Sheet

Fig 2.4에 나타난 것처럼 FRP가 띠(hoop)보강재 방향으로 인장을 받게 되면, 보강재는 인장강도에 도달하게 되고 점차 파괴에는 Fig 2.5와 같이 이르게 된다. 비록 몇몇 연구들에서 불충분한 겹이음 길이를 갖는 기둥의 FRP의 박리에 의한 조기파괴 형태가 나타나고 있지만(e.g. Demers와 Neale 1994, Nanni와 Bradford 1995), 이와 같은 파괴형태는 FRP로 구속된 콘크리트 기둥에 대한 대부분의 실험결과에서 나타나는 가장 일반적인 것이다.(Lam and Teng 2001a)

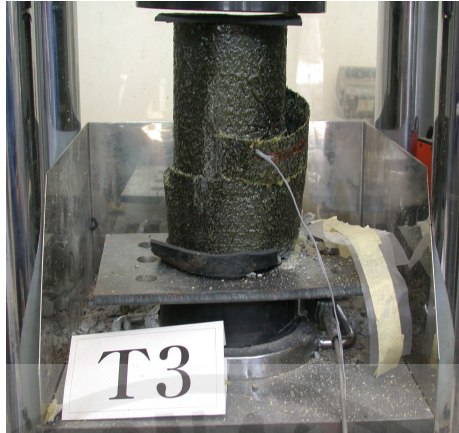


Fig 2.5 Test view of Concrete column confined by FRP Sheet

지금까지의 대부분의 실험 결과들에서 Xiao와 Wu(2000)의 실험과 같이 FRP의 보강량이 기둥의 강도향상을 기대할 수 없을 정도로 작지 않은 경우라면 FRP로 구속된 콘크리트 원형기둥의 응력-변형률 곡선은 그림 6.6과 같이 비구속 콘크리트 강도의 응력수준 부근의 전이구간(Transition zone)에서 연화(softening)가 발생하는 전형적인 이중선형(bilinear) 형태를 갖는 것으로 나타내게 된다.(Samaan et al. 1998, Toutanji 1999) 첫 번째 선형구간에서 응력-변형률곡선의 기울기는 비구속된 기둥의 경우와 유사하다. 비선형구간에서의 FRP에 의한 영향이 극히 미소하다는 것을 나타내는 것이다. 이후 이차선형구간에서 콘크리트는 균열이 발생하고, FRP의 구속효과가 발휘되면서(Toutanji 1999), 구속된 콘크리트의 응력은 FRP의 변형률 증가와 함께 선형적으로 증가하게 되며, 궁극적으로 FRP의 파단에 이르게 된다. 이 경우, 콘크리트의 극한 또는 최대 응력과 FRP의 극한 변형률은 종시에 도달하게 된다.(Mirmiran et al. 1998a)

그러나 원형기둥에서 FRP 보강량이 아주 작은 경우에는 콘크리트 기둥의 구속효과가 매우 낮기 때문에 위에서 설명한 이중선형의 응력-변형률 관계를 나타내지 않을 것이다.

3. FRP로 구속된 콘크리트의 압축강도

1) 일반

기둥의 보강설계를 위해서는 FRP의 구속에 의한 강도향상 정도를 정량적으로 평가하는 것이 필요하다. 강재로 구속된 콘크리트에 대한 많은 연구들이 제시되어 있는 것은 사실이지만(e.g. Richart et al. 1928, 1929, Mander et al. 1988, Cusson and Paultre 1995), 최근의 연구에는 기존의 제시된 일축압축을 받는 강재로 보강된 콘크리트의 강도 평가 모델들이 실제로는 엄격하지 않으며 FRP로 구속된 콘크리트에는 적용할 수 없다는 것이 나타나고 있다(Mirmiran and Shahawy 1997, Samaan et al. 1998, Saafi et al. 1999). 결과적으로 균일한 구속력을 받은 FRP로 구속된 원형 기둥에 실험결과를 바탕으로 한 강도모델이 다수의 연구자들에 의하여 제시되고 있다(Karbhari and Gao 1997, Mirmiran et al. 1998a, Samaan et al. 1998, Miyauchi et al. 1999, Saafi et al. 1999, Toutanji 1999, Lam and Teng 2001a).

2) 강도모델의 평가

FRP로 구속된 콘크리트의 강도평가를 위한 기존 모델들은 대부분 아래의 형식을 따르고 있다.(Karbhari and Gao 1997, Samaan et al. 1998, Miyauchi et al. 1999, Saafi et al. 1999, Toutanji 1999).

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_l}{f_{co}} \quad (\text{Eq 2.7})$$

여기서 f_{cc} 와 f_{co} 는 각각 구속된 콘크리트와 그렇지 않은 콘크리트의 압축강도를 나타낸다. f_l 은 횡방향 구속력으로써 위의 식에 의하여 정의되고, k_1 은 구속효과 계수이다. 이 형태의 강도평가모델은 Richard et al.(1928)에 의해 처음 제안되었으며, 효과적으로 구속된 콘크리트의 경우 k_1 은 4.1이다. Richard et al.(1929)의 후속 연구에

서는 이 모델이 강재로 구속된 콘크리트의 강도평가에도 적절히 사용될 수 있다는 것을 보고하고 있다. Fardis and Khalili(1982)는 Richard et al.(1928)의 모델을 FRP로 구속된 콘크리트에 직접 사용할 수 있다고 제안하였다.

그러나 최근의 연구에서는 일축압축을 받는 강재로 보강된 콘크리트의 강도 평가 모델들이 실제로는 보수적이지 않으며 FRP로 구속된 콘크리트에는 적용할 수 없는 것으로 나타나고 있다.(Mirmiran and Shahawy 1997, Samaan et al. 1998, Saafi et al. 1999) 최근에 제시된 FRP로 구속된 콘크리트 기둥의 강도평가 모델들은 위의 식 2.7의 k_1 을 수정제안하고 있다.(Karbhari and Gao 1997, Samaan et al. 1998, Miyauchi et al. 1999, Saafi et al. 1999, Toutanji 1999) Miyauchi 등(1999)은 20~100 MPa의 강도 범위를 갖는 CFRP로 구속된 콘크리트 시편에 대한 실험 결과를 기초로 하여 k_1 을 2.98로 제안하였다. 다른 모델들에서는 k_1 을 상수로 가정하지 않고 Table 2.1에 나타난 것처럼 f_{ll}/f_{co} 또는 f_l 의 변화에 종속적인 것으로 가정하였다. 이 모델들에서 Samaan et al.(1998)과 Saafi et al.(1999)가 제안한 모델은 콘크리트로 채워진 FRP관에 대한 실험결과에 근거를 두고 있는 반면에 다른 모델의 경우는 콘크리트 기둥을 FRP로 감싼 시험체에 대한 실험 결과로부터 식을 유도하였다. Table 2.1에 나타난 Karbhari 와 Gao의 Model I은 Karbhari 와 Gao(1997)에 제안식을 의미하는 것이며, 같은 논문에서 다른 제안식을 제시하고 있기 때문에 Model I으로 구분하였다.

Mirmiran et al. (1998a)는 시험체의 세장비(L/d)의 효과를 고려하였으며, 세장비가 2인 경우에 대한 구속된 콘크리트의 강도를 $f_{cc2:1}$ 으로 다음과 같이 표현하였다.

$$f_{cc} = f_{cc2:1} [0.0288(L/d)^2 - 0.263(L/d) + 1.418] \quad (\text{Eq. 2.8})$$

식 2.7에 대하여 Table 2.1에 표현한 것과는 별개로 Karbhari와 Gao(1997)은 다른 제안식을 아래와 같이 제시하고 있다.

Table 2.1 Strength prediction models of concrete columns confined by FRP

Source	Kabhari and Gao (1997): I	Samaan et al. (1998)	Miyauchi et al. (1999)	Saafi et al. (1999)	Toutanji (1999)
Equation			$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_l}{f_{co}}$		
k_1		$6.0f_l^{-0.3}$	2.98	$2.2\left(\frac{f_l}{f_{co}}\right)^{-0.16}$	$3.5\left(\frac{f_l}{f_{co}}\right)^{-0.15}$

$$f_{cc} = f_{co} + 3.1f_{co}v_c \frac{2t_{frp}}{d} \frac{E_{frp}}{E_c} + \frac{2f_{frp}t_{frp}}{d} \quad (\text{Eq 2.9})$$

여기서 v 와 E_c 는 푸아송의 비와 콘크리트의 탄성계수이다. 그리고 E_{frp} 는 FRP의 탄성계수이다. 이 모델은 Karbhari와 Gao(1997)의 Model II이며, 다른 모델인 Karbhari와 Gao(1997)의 모델 I과는 구분되는 것이다.

이와는 다른 방법으로 콘크리트의 다축파괴면으로부터 유도된 Mander et al.(1988)의 모델이 FRP로 구속된 콘크리트의 강도를 예측하기 위하여 사용되기도 한다.(Saadatmanesh et al. 1994, Purba and Mufti 1999, Spoelstra and Monti 1999)

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = -1.254 + 2.254\sqrt{1 + \frac{7.94f_l}{f_{co}}} - 2\frac{f_l}{f_{co}} \quad (\text{Eq 2.10})$$

FRP 띠(strap)를 일정한 간격에 맞춰 기둥을 부분적으로 감싼 경우, Saadatmanesh et al.(1994)는 식 6.6의 f_l 을 f_l 으로 대체하여 제안하였다.

$$f_l = k_g f_l \quad (\text{Eq 2.11})$$

여기서 f_l 은 추후에 가해지는 유효 횡방향 구속압이고 k_g 는 간격계수로서 아래와 같이 계산된다.

$$k_g = \frac{(1 - s_{frp}/(2d))^2}{1 - \rho_{sc}} \quad (\text{Eq 2.12})$$

여기서 s_{frp} 는 FRP 띠(Strap)간의 순간격이고 ρ_{sc} 는 전체단면에 대한 종방향의 철근의 철근비를 나타내는 것이다.

FRP가 파단 되는 극한상태를 식에 포함하고 있는 기존의 FRP로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 모델은 구속효과가 실질적으로 작용하는 경우 최대강도를 산정하기 위하여 사용할 수 있다. 그러나 구속효과가 작은 경우, 극한상태에서의 하중과 최대하중이 일치하지 않을 수 있다.

3) Lam and Teng의 모델

대부분의 실험결과들에서 FRP로 구속된 콘크리트의 강도 f'_{cc} 는 횡방향 구속압 f_l 과 선형적인 관계를 갖으며, 최근 제안된 모델들(Karbhari and GAo 1997, Mirmiran et al. 1998a, Samaan et al. 1998, Saafi et al. 1999, Toutanhi 1999)에서 부가적으로 제시되고 있는 복잡성은 불필요한 것들이다(Lam and Teng 2001a). Lam과 Teng(2001a)는 식 2.7의 k_1 이 2.15일 때 Table 2.2와 같이 Set1에 대해서 정확한 해석 결과를 갖는 것을 발견하였으나, 해석결과는 구속도가 높은 경우(i.e. $f_l/f'_{co} > 1$)에 있어 약간 덜 보수적인 것으로 나타났다. 따라서 Lam과 Teng(2001a)은 FRP로 구속된 콘크리트의 일축압축강도 계산을 위한 다음 식을 설계시 사용할 것을 제안하였다.

Table 2.2 Model coefficient of the Lam and Teng

Model	Test-to-predicted ratio		
	Average	Standard deviation	Coefficient of variation(%)
Lam and Teng(2001a)	1.03	0.10	9.4
$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 2.15 \frac{f_l}{f_{co}}$	1.00	0.09	9.1

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + 2 \frac{f_l}{f_{co}} \quad (\text{Eq 2.13})$$

이식은 약간 보수적인 결과를 나타내며, 위에서 언급한 다른 식들에 비하여 훨씬 단순한 형태를 갖는다. 이식은 Set1의 실험결과를 사용하여 유도되었기 때문에 Lam과 Teng(2001a)은 설계시 락철근 방향의 FRP의 인장강도를 ASTM D3039/D3039M-95a(1995)에 의한 flat-coupon 시험에 의한 값으로 사용하길 권장하고 있다. 또한 Lam과 Teng은 ring test에 의한 시험결과를 의미하는 Set2에 대한 식 2.13의 해석 결과 $f_l/f_{co} < 1$ 일 경우에는 충분히 보수적인 것으로 나타났기 때문에 FRP 관을 제작하는데 있어 연구자들이 가장 일반적으로 사용하는 방법인 ring-splitting test(e.g. ASTM D2290-92 1992)로부터 산출된 FRP의 인장강도를 사용하여 식 2.13으로 압축강도를 산정할 수 있다고 허용하고 있다.

4. FRP로 구속된 사각형 콘크리트 기둥

1) 개요

사각형 RC기둥에서는 FRP 자켓에 의하여 콘크리트가 균일하게 구속되지 않기 때문에 이 모델들을 직접 적용할 수 없다. 결과적으로 구속의 효과는 많이 감소된다 (Mirmiran et al. 1998a). 구속효과의 불균일성 때문에 콘크리트의 구속으로 인한 압축강도는 변화는 단면에 따라 변화하게 된다. 횡방향으로 구속된 비원형 단면에 대한 일반적인 접근방식은 단면을 하중으로 나눈 값인 평균 축응력의 향으로 표현된 등가 모델을 사용하는 것이다. 여기서의 일반적인 해석에서의 ‘평균’은 암묵적인 생략을 통해 단순하게 표현된 식을 뜻한다. 이 절에서는 실험에 기초한 정사각형과 직사각형의 구속된 콘크리트의 압축강도에 대한 모델에 대해서 논의하고자 한다. 두개의 초기모델에 대해서 언급할 것이며, Lam 과 Teng (2001c)의 최근 모델에 대하여 보다 상세하게 설명할 것이다.

2) 기존모델

(1) 일반방정식

모서리가 둥근 사각기둥을 Fig 2.6에 나타내었다. 여기서 폭은 b 로 표시하였으며, 높이 h 보다 작은 것으로 가정하였다. 사각단면의 형상은 형상비 h/b 로 나타내었다. 모서리의 반지름은 R_c 로 나타내었으며, 모서리의 반지름은 내부철근의 존재에 따라 제한적이며, 일반적으로 R_c 는 작다.

강재로 구속된 콘크리트에 대한 연구들(Mander et al. 1988, Cusson and Paultre 1995)에서는 Fig 2.6에 나타낸 것과 같은 사각형기둥에 대하여 4개의 2차포물선에 의한 부분만 완전한 구속되고 나머지 부분들은 무시할 수 있다는 단순한 가설을 도출했다.

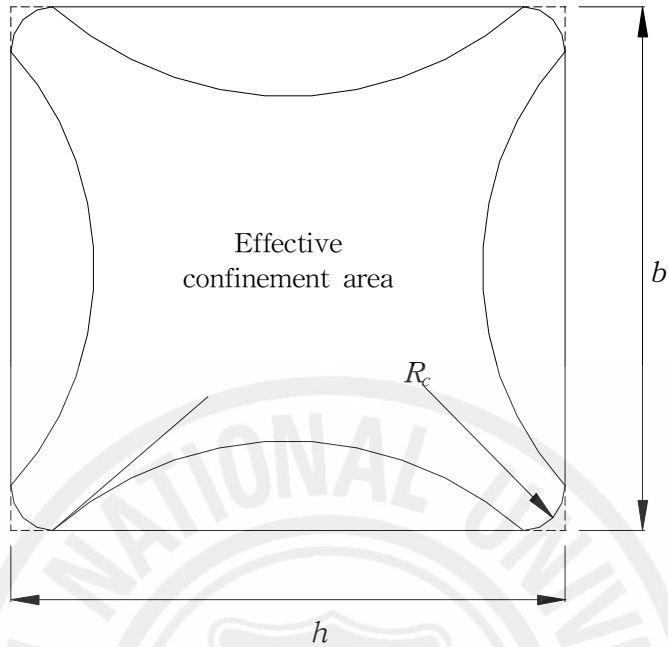


Fig 2.6 Effective confined concrete in square column

이 4개의 포물선은 모서리에서 45도의 각을 이루게 된다. 이 가설을 FRP로 구속된 콘크리트에 적용할 수 있으며(e.g. Restrepo and De Vito 1996, Harries et al. 1998, Chaallal and Shahawy 2000), 이 가설은 사각형 단면을 FRP로 구속하는 경우에는 콘크리트에 동일한 정도의 구속효과가 발생하는 원형콘크리트 기둥에 대한 보강보다 덜 효과적인 현상을 반영할 수 있다.

전체 단면에 대해 대하여 유효구속압(f'_l)은 형상계수(k_s)을 사용하여 형상의 함수로 표현할 수 있다.

$$f'_l = k_s f_l \quad (\text{Eq. 2.14})$$

여기서 f_l 은 지름 D를 등가원형기둥에 동일한 두께의 FRP 자켓으로 구속한 경우의 구속압을 나타내는 것이며, 다음 식으로 계산된다.

$$f_l = \frac{2f_{frp}t_{frp}}{D} \quad (\text{Eq 2.15})$$

식 2.14와 식 2.15를 사용하여 유효구속압을 계산하기 위해서는 형상계수와 등가원형기둥의 지름을 산정하여야 한다. 두 변수가 산정되면, FRP로 구속된 사각형 콘크리트 기둥의 강도는 원형공시체에 대한 제시된 FRP로 구속된 콘크리트의 압축강도 모델(e.g. Lam and Teng 2001 a)의 구속압을 유효구속압으로 변경, 적용하여 예측할 수 있다.

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + k_1 k_s \frac{f_l}{f_{co}} \quad (\text{Eq 2.16})$$

여기서 k_1 은 FRP로 구속된 원형공시체에 대한 실험을 통하여 도출한 구속유효계수이며, Lam과 Teng(2001a)의 연구에서는 2로 주어져 있다.

(2) 형상계수

강재로 구속된 기둥에 대하여 정립된 그림 2.6의 가설은 Restrepo와 De vini(1996), Harries et al (1998)과 Chaallal 과 Shahawy(2000)에 의하여 등근 모서리를 갖는 사각형 기둥의 형상 계수를 유도하기 위하여 사용되었다. 형상계수는 유효구속단면적(A_e)과 FRP로 감싸진 전체 단면적(A_g)의 비로 주어지며, 아래와 같다.

$$k_s = \frac{A_e}{A_g} = \frac{1 - [(b - 2R_c)^2 + (h - 2R_c)^2] / (3A_g) - \rho_{sc}}{1 - \rho_{sc}} \quad (\text{Eq 2.17})$$

여기서, A_g 는 등근모서리를 갖은 기둥의 전체단면이고 ρ_{sc} 는 종방향 철근의 철근비이다. 식 6.31은 형상계수에 대한 유효구속면적 모델을 설명하는 것이다. 식 2.17에서 포물선 외측에 존재하는 종방향 철근의 단면적은 전체 철근의 단면적에서 두배 감소시키며, 이 단순화의 효과는 미소하고 보수적인 결과를 나타낸다.

$$A_g = bh - (4 - \pi)R_c^2 \quad (\text{Eq 2.18})$$

한편, Mirmiran et al (1998)은 형상효과를 고려하여 원형기둥에 대한 구속비 (f_l/f_{co})를 사각형 기둥으로 수정하는 수정 구속비(m)를 제안하였다. 수정된 구속비는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$m = \left(\frac{2R_c}{h} \right) \frac{f_l}{f_{co}} \quad (\text{Eq 2.19})$$

여기서, f_l 등가 원형기둥에 대한 구속압이다. Mirmiran et al (1998)는 실험결과들로부터 $m < 15\%$ 일 때에는 기둥에 대한 보강으로서의 FRP 구속이 비효율적이, 강도증진 효과도 없다는 것을 제시하였다. 이들은 $m > 15\%$ 일 때, Samaan et al. (1998)의 구속모델을 사용할 수 있음을 제시하였다. 이들의 제안식은 다음과 같이 형상계수를 정의하고 있다.

$$k_s = \frac{2R_c}{h} \quad (\text{Eq 2.20})$$

식 2.20은 형상계수에 대한 모서리 반경 모델로 인용하였다.

(3) 등가 원형기둥 지름

Restrepol과 De Vino (1996), Herries et al. (1998) 그리고 Chaallal 과 Shahawy (2000)의 연구에서, FRP로 구속된 사각형 콘크리트 기둥의 공칭 구속압 f_l 을 산정하기 위한 등가기둥의 지름은 비록 Cusson과 Paultre(1995)의 횡방향 강재에 의하여 구속된 콘크리트 기둥에 대한 연구에 의하여 D 는 평균 측면길이 $(b+h)/2$ 로 사용될 수 있지만, 아직 정확한 정의는 없는 상태이다. 이 정의는 Lam 과 Teng (2001c)의 유효구속면적모델에서 사용되었다.

Mirmiran et al. (1998a)은 오직 정사각형 기둥에 대한 연구만을 수행하였으며, 측면 길이를 D 로 정의하였다. 그러나 이후의 연구에서 사각형 기둥의 경우의 D 는 장변의 길이로 정의되어야 한다고 제시하였다. (Mirmiran 2000). 식 2.20에서 단면의 높이 h 의 사용은 이 정의를 기초로 하고 있다.

3) Lam and Teng의 모델

Lam 과 Teng (2001c)은 FRP로 구속된 정사각형 단면과 사각형 콘크리트 공시체에 대한 상세한 실험을 수행했다. 그 실험은 10개의 정사각형 단면과 2개의 사각형 단면에 대하여 수행하였다. FRP의 보강량과 모서리 반지름을 변화시켜가면서 다양한 구속도에 대하여 평가하고자 하였다. 또한 정사각형과 사각형 공시체에 대한 실험 결과의 예측에서 식 2.16을 적용하는데 필요한 FRP 구속유효계수 k_1 의 값이 2.98이 되는 두개의 원형 시험체에 대한 실험을 추가적으로 수행하였다. 유효구속면적 모델은 모서리 반경 모델에 비하여 덜 보수적이고 보다 상관성이 떨어진다.

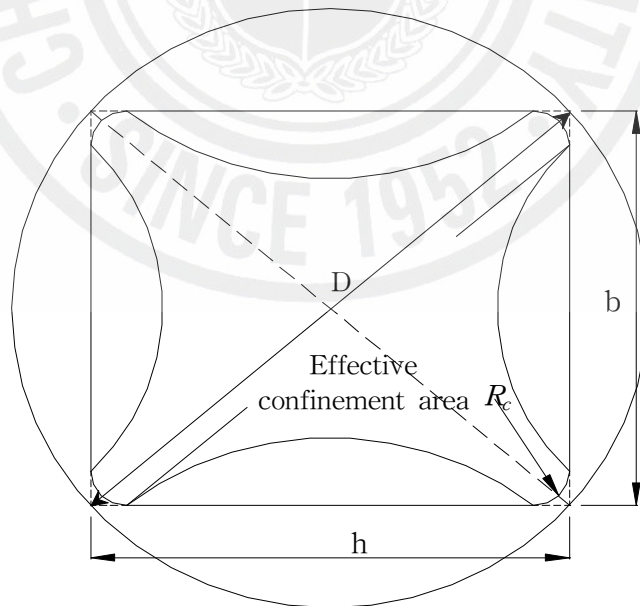


Fig 2.7 Lam and Teng's sectional form model against an equivalent circular column

FRP로 구속된 콘크리트의 압축강도를 보다 정확하게 예측하기 위하여 Lam 과 Teng (2001c)은 형상계수에 대한 향상된 유효구속면적모델을 제안하였다. 이 모델에서 유효구속면적은 Fig 2.7에 나타낸 것처럼 4개의 포물선으로 구성되어 있으며, 포물선의 초기 기울기는 인접한 대각선과 동일한 것으로 가정하였다. 초기 기울기는 정사각형 단면에 대해서는 1이다. 유효구속면적비 A_e/A_c 는 아래의 식으로 주어진다.

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - [(b/h)(h - 2R_c)^2 + (b/h)(b - 2R_c)^2] / (3A_g) - \rho_{sc}}{1 - \rho_{sc}} \quad (\text{Eq 2.21})$$

단면형상 k_s 는 유효구속면적비를 형상비로 나누어서 산정할 수 있다.

$$k_s = \frac{b}{h} \frac{A_e}{A_c} \quad (\text{Eq 2.22})$$

Lam 과 Teng (2001c)은 식 2.15의 등가원형기둥의 지름 D 는 단면의 대각선 길이로 정의하였다. 이것은 등가원형단면이 사각형 단면의 외접원임을 의미하는 것이다. 따라서 등가 구속압 f_l 은 다음에 의해 주어진다.

$$f_l = \frac{2f_{frp}^t f_{rp}}{\sqrt{h^2 + b^2}} \quad (\text{Eq 2.23})$$

여기서 $\sqrt{h^2 + b^2}$ 는 사각단면의 대각선 길이이다.

III. 탄소섬유 Sheet 공법의 개요

1. FRP의 일반사항

복합재료인 섬유는 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic), CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic), AFRP(Aramid Fiber Reinforced Plastic)등이 있으며, 1940년대에 개발된 유리섬유 복합재료를 시작으로 건설분야에서 복합재료의 신장률이 약 40%에 이를 정도로 성장을 계속 하고 있다. 선진국 몇몇 나라에서는 우주항공, 방위산업, 자동차, 산업분야(건설, 기계)등의 여러 분야를 복합재료화 한다는 계획을 추진 중이며, 건설분야에서는 복합재료의 용도와 그 이용공법은 시설물의 특성에 따라 아주 다양하게 개발, 활용되고 있다. 복합재료의 활용이 가능하게 된것은 화학분야의 고분자계 신소재가 개발되면서 기존 건설재료와 혼합 병용하여 강도, 내부식성, 내마모성, 내충격성, 절연성, 단열성, 경량화, 미려한 외관 등의 특성으로 시설물의 내구성과 안전성 등을 확보할 수 있기 때문이다.

구성은 수지(Resin)에 부가적인 강도나 특정 성능을 내기 위하여 섬유 Sheet(Fiber Sheet) 또는 섬유조직과 적층방식으로 복합재료를 제조하는데, 주로 이용하는 섬유는 유리섬유(E-glass), 탄소섬유(Carbon Fiber), 아라미드섬유(Aramid Fiber)등이고, 이들 섬유를 매트릭스(Matrix)로 하여 혼화제를 첨가하여 보강한 재료를 FRP 복합재료라 정의한다. 즉 섬유 보강형태로 된 열경화성수지와 열가소성수지를 말한다. 여기서 매트릭스를 구성하는 주요섬유(Fiber)를 살펴보면 다음과 같으며, 각각의 섬유별 재료적 특징은 다음 Table 2.1에 나타내었다.

2. FRP의 종류와 특징

1) 유리섬유(Glass Fiber)

유리는 오래 전부터 사용되어 왔으나 19세기에 와서야 비로소 가는 섬유형태로 만들어졌으며 1939년에 미국의 오웬스 코닝(Owens-Corning)사가 처음으로 대량 생산하였다. 유리 섬유의 원료로는 규사(silica), 석회석(limestone), 붕사 등이 주를 이루며 그 배합에 따라 성질이 달라진다.(최신복합재료, 1995)

유리섬유는 유리의 원료를 녹인 유리액을 압축공기로 비산시켜 가는 섬유모양으로 만든 것이다. 유리섬유의 최고 안전 사용온도는 300°C 정도, 비중은 0.1이하 인장강도는 20MPa 정도이다.

유리 섬유는 강도 면에서는 낮은 강도를 발휘하나 파단 시까지의 변형이 아라미드 섬유의 경우와 같이 크게 발생하는 특징이 있다. 이러한 아라미드 섬유와 유리 섬유의 인성은 구조물에 사용시 과도한 처짐을 유발하는 요인으로 작용하기도 하나 여분의 변형을 충분히 확보할 수 있는 역학적 능력으로 볼 수도 있다. 유리섬유의 경우는 다른 섬유와는 달리 콘크리트에 철근의 대용으로 사용되었을 경우 콘크리트내의 알칼리 성분 에 의하여 강도가 약해지는 단점이 있다.

2) 탄소섬유(Carbon Fiber)

탄소섬유는 흑연섬유로도 지칭되며 탄소원자의 결정구조를 이용한 고강도 섬유로 현재 최신 복합재료에 사용되는 보강섬유의 대종을 이루고 있다. 탄소섬유는 1959년 미국의 유니언 카바이트사에 의해 처음 상품화된 이래 그 성능 면이나 가격 면에서 꾸준한 발전을 거듭하고 있다.(최신복합재료, 1995)

현재 국내에서 건설 산업에 주로 사용되는 재료로서 고강도 탄소섬유와 고탄성 탄소섬유 두 종류가 있다. 탄소섬유는 PAN(polyacrylonitrile) 또는 석유정제 부산물인 Pitch를 약 1000~2500°C의 고온에서 탄화시킨 고 순도 탄소결정의 섬유를 지칭하며 섬유를 구성하는 탄소원자의 결정구조 때문에 매우 강한 강도를 지니게 된다. 미세

한 섬유를 에폭시 수지를 이용하여 적층시켜 Sheet, 판, 격자 등의 형태로 제조하게 된다. 이렇게 제조된 탄소섬유는 가벼운 중량에 비해 고강도 고탄성을 지니게 되며 일방향성의 성질을 가진다. 탄소섬유 복합재료는 기존의 금속재료가 갖고 있지 않은 여러 장점, 즉 높은 무게비 강도 및 탄성계수, 낮은 열변형률, 높은 피로강도 등을 가지고 있다. 그러나 탄소섬유의 경우는 비교적 낮은 변형에서 섬유가 취성적으로 파단되는 성질을 지니고 있다. 즉 인성이 다른 섬유에 비해서는 작은 단점을 지니고 있다.

3) 아라미드섬유(Aramid Fiber)

아라미드(aramid)섬유는 방향성 폴리아미드(aromatic polyamide) 섬유의 총칭으로서 “섬유의 구성물질이 긴 사슬모양의 합성 폴리아미드이며, 적어도 85%의 아미드 결합이 두 개의 방향성 고리에 직접 붙어 있는 인조섬유”로 정의된다. 1971년에 듀폰(Du Pont)사에서 케블라(Kevlar)라는 이름으로 아라미드 섬유를 처음 시장에 내놓았다.

케블라 섬유는 고강도 및 탄성계수 외에 화학적, 열적으로 아주 안정되어 있다. 또한 케블라 섬유는 탄소섬유와 유리섬유처럼 쉽게 부러지지 않으므로 일반 방적기로 직조할 수 있는 장점이 있다.(최신복합재료, 1995)

아라미드섬유의 약 60% 이상이 자동차 타이어 보강 재료로 이용되고 있으며 방호복, 로프 등의 용도로 이용된다. 건설 분야에서는 단섬유를 모르타르나 콘크리트에 혼입한 ARFC(아라미드섬유 보강 콘크리트), 아라미드섬유를 에폭시수지로 굳힌 봉재 등의 용도 개발이 진행되고 있다.

아라미드 섬유의 경우는 고강도이나 밀도가 비교적 낮고 파단 시까지의 변형이 큰 특징을 가지고 있다. 즉 인성이 탄소섬유에 비해 큰 편이다. 이러한 성질은 탄성거동을 하는 재료임에도 많은 양의 에너지를 흡수할 수 있는 능력을 지니게 된다.

특히, 아라미드 섬유의 고장력, 낮은 영계수의 특성을 살려서 프리스트레스트 콘크리트의 긴장재로서 이용하는 연구가 수행되고 있다. 이것은 프리스트레스트의 하중을 줄여 긴장재의 총량을 적게 할 수 있고, 염분에 의한 부식의 우려가 없는 등의 장점이 있기 때문에 그 연구 개발이 주목되고 있다.

4) 하이브리드 섬유 (Hybrid Fiber)

일반적으로 한 종류의 재료로 직조된 섬유는 파단 시까지 선형 탄성거동을 하는 경향이 있어 소성역이 없는 단점을 지니고 있다. 이런 단점을 어느 정도 보완하기 위해 개발된 섬유가 하이브리드 섬유로 두 종류 이상의 섬유를 일정 비율로 혼합 하여 강도가 낮은 섬유가 먼저 파단 하고 연차적으로 그 다음 섬유가 파단 되면서 철근에서의 소성변형과 유사한 거동을 하도록 유도한 형태의 섬유이다.

5) 격자섬유(NEFMAC)

네프맥 재료의 특징을 살펴보면 우선 네프맥은 다른 섬유제품과 마찬가지로 FRP 복합섬유로 제조되어 FRP 섬유가 지니는 고강도, 비부식성, 경량성 등의 특징을 지니고 있다. 아울러 내알칼리성, 내산성, 내약품성 등에서 우수한 비닐에스터수지를 함침하여 제작되어지고 있다. 이렇게 제작 되어진 네프맥은 내약품성이 우수하고 고온(90℃)에서도 재료의 역학적 성질이 변하지 않고 상온에서의 인장최대 하중의 70~80%정도를 유지하는 등의 내열특성도 우수하게 나타나고 있다. 또한 네프맥의 선팽창 계수는 $9\sim 10\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 콘크리트의 선팽창 계수 $10\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 와 거의 비슷한 값을 보이고 있어 콘크리트와 일체거동을 가능하게 한다.

Table 3.1 Comparison of FRP materials

Sheet 성질	CFRP	GFRP	AFRP
인장강도	매우 좋음	매우 좋음	매우 좋음
압축강도	매우 좋음	좋음	부작당함
탄성계수	매우 좋음	적당함	좋음
장기거동	매우 좋음	적당함	좋음
피로거동	탁월함	적당함	좋음
용적밀도	좋음	적당함	탁월함

6) FRP 재료의 역학적 성질

FRP재료의 물성치와 응력 변형률선도가 Table 3.2와 Fig. 3.1에 나와 있다.

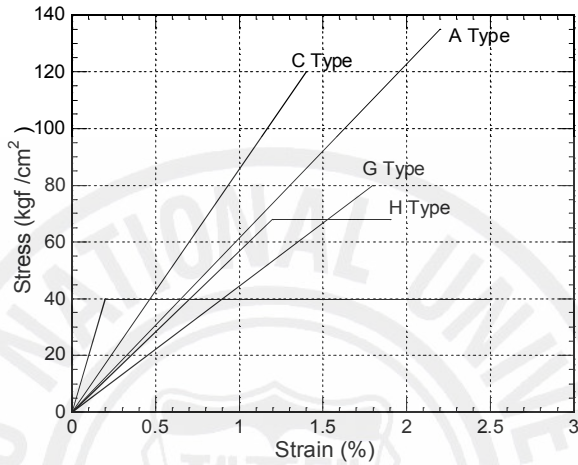


Fig. 3.1 Stress-strain relationship of FRP and steel

Table 3.2 Characteristics of materials for FRP

섬유의 종류		인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	신장량 (%)	밀도 (g/cm ³)
탄소	PAN	고강도	35.7	$2.0 \times 10^3 \sim 2.4 \times 10^3$	1.3~1.8
		고탄성	25.5~40.8	$3.6 \times 10^3 \sim 6.6 \times 10^3$	0.4~0.8
	Pitch	보통	8.0~10.2	$3.9 \times 10^3 \sim 4.1 \times 10^3$	2.1~2.5
		고탄성	30.6~35.7	$4.1 \times 10^3 \sim 8.2 \times 10^3$	0.4~1.5
아라미드	고탄성	28.6	1.3×10^3	2.3	1.45
	고강도	35.7	7.6×10^2	4.6	1.39
유리	E-Glass	35.7~36.7	$7.6 \times 10^2 \sim 7.7 \times 10^2$	4.8	2.6
	Alkali Resistant Glass	18.4~35.7	$7.1 \times 10^2 \sim 7.8 \times 10^2$	2.0~3.0	2.27

Fig. 3.2는 본 실험에서 사용하고 현재 국내외에서 콘크리트 구조물의 보강에 사용되어 지고 있는 탄소섬유의 형태를 보여주고 있다. (a)그림은 Re-bar 형태로 제조된 모습이고 (b)는 Plate 형태 (c)는 격자형태의 섬유로 만들어진 모습을 나타내고 있다.

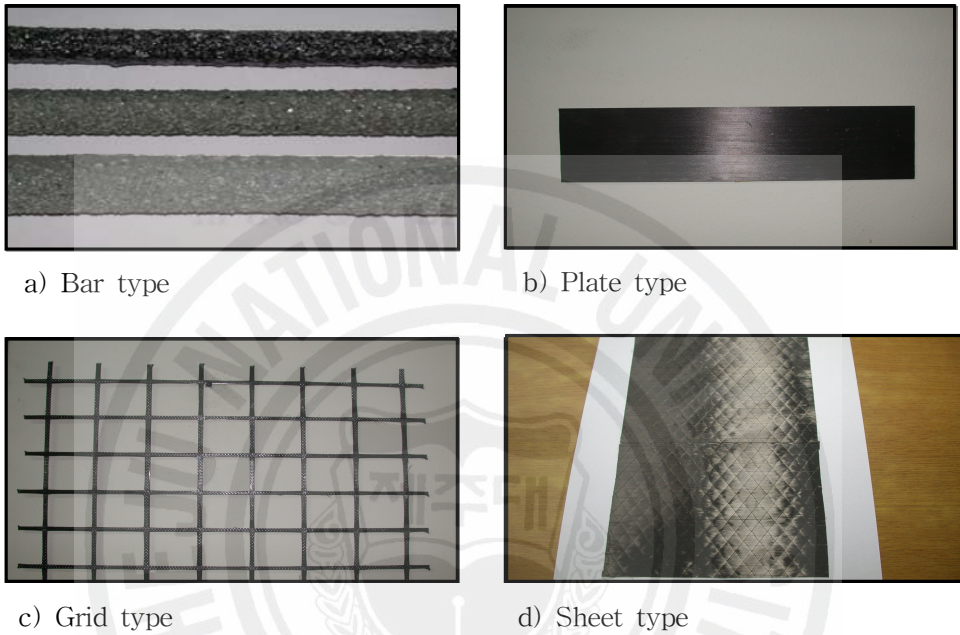


Fig. 3.2 Type of FRP composite materials

3. 섬유부착 공법과 격자섬유 보강공법의 특징

1) 섬유부착공법

섬유 부착공법은 손상된 콘크리트 구조물의 표면에 일방향의 섬유를 접착제를 이용하여 부착시킴으로서 구조물을 보강하는 공법으로 효과적으로 구조물의 내하력을 향상시키고 기존의 발생한 균열의 성장을 억제하는 효과를 지니게 된다. 섬유부착 공법은 주로 Sheet나 판 형태의 섬유를 에폭시를 이용하여 구조물의 표면에 부착시

켜서 내력을 형성하는 방법인데 본 연구에서는 Sheet와 판을 모두 이용하여 휨 및 정착보강을 실시하였다. 판을 이용한 부착공법의 경우는 섬유 Sheet 접착의 경우와 달리 프라이머를 사용하지 않으므로 시공단계가 단순해지고 접착제가 모르타르 형태로 되어있어 보강면에 미장용 흙손을 이용하여 손쉽게 작업이 가능한 장점도 지니고 있다.

(1) 공법의 특징

섬유부착공법의 특징에 대하여 기술하면 다음과 같다.

- 섬유자체 비중이 철에 비해 월등히 적어 경량이므로 시공이 용이하고 시공후 사하중의 증가부담이 거의 없다.
- 섬유의 강도가 철에 비해 10배정도 이므로 소량의 섬유로도 보강효율을 높일 수 있다.
- 구조물의 보강에 있어서 Sheet와 판 형태로 되어있어 작업이 용이하다.
- CFRP와 접착제가 경량이므로 모든 공정이 수작업으로도 가능하고 작업공간이 협소한 곳에서도 작업이 가능하다.
- 온도변화에 따른 부피팽창이 적어 기온변화에 대해 안정된 보강효과를 유지한다.
- 자연 부식이 이루어지는 강재와는 달리 부식이 발생되지 않으므로 보강 후 높은 내구성을 지니게 된다.

(2) 공법의 적용범위

섬유부착공법이 처음으로 구조물의 보강에 적용되기 시작한 것을 1990년대 초부터이다. 초기에는 굴뚝, 건축구조물의 보, 슬래브 등의 보강에 사용되어왔으나 최근 들어서는 휨 보강을 필요로 하는 R.C 교량의 상판의 보강이나 교량의 주 거더 보강, 박스구조물의 보강, 터널의 보강, 지하구조물의 보강 등 여러 형태의 구조물의 보강에 사용되어지고 있다. 우리나라의 경우는 근래 들어 몇 몇 사회문제가 되는 사고가 일어난 후 구조물의 보수나 보강, 유지관리에 대한 관심이 높아지면서 1990년대 중 후반부터 구조물의 보강에 섬유부착공법이 적용되어 지고 있다.

● 적용범위 ●

- 도로교 철도교의 주거더 보강
- R.C상판의 보강
- 터널 보강
- 지하구조물의 보강
- 교각의 내진보강
- 건축구조물 기둥의 보강

Fig. 3.3에는 FRP Sheet를 이용하여 교량과 건축구조물의 슬래브를 보강하는 모습이 나와 있다.



Fig. 3.3 Application of external bonding method using CFRP sheet.

(3) 시공절차

섬유부착공법의 경우는 보강면의 먼 처리를 한 후 에폭시를 이용하여 보강면에 섬유 Sheet나 판을 이용하여 보강하는 방법이다. 본 절에서는 FRP 판을 이용한 보강공법의 시공절차에 대하여 기술하고 있다. FRP Sheet 부착공법의 경우는 판 부착의 경우와 비슷하나 접착제를 이용하여 FRP를 부착시키기 전에 에폭시와 콘크리트 면의 접착력을 향상시키기 위하여 프라이머를 도포 하는 과정이 추가된다.

CFRP판 부착공법의 시공절차를 살펴보면 다음과 같다.

a). 표면그라인딩

섬유의 부착력을 향상시키기 위해 콘크리트 표면의 레이턴스, 열화층, 오염부위를 그라인더 등으로 연마하여 골재 면이 들어날 정도까지 표면을 정리한다. 또한 연마시 돌출부위를 제거하여 표면의 단차가 1mm 내외가 되도록 한다.

b). 손상부위 복구

표면처리 후 요철부위 등은 고강도 몰탈로 매워 주며 균열부위는 에폭시 수지를 주입시켜 균열을 보수한다. 시공면이 누수가 있는 경우는 지수처리를 하고 철근이 노출되어 있는 부위는 방청처리를 실시하여 표면을 몰탈로 보수한다.

c). 접착제 부착

주제와 경화제를 일정비율(2 : 1)로 하여 혼합한 후 미장용 흙손을 이용하여 보강면과 탄소섬유의 한쪽 면에 바른다.

d). 탄소섬유판 부착

접착제를 바른 후 탄소섬유판을 보강면에 접착한 후 롤러 등을 이용하여 접착제와 탄소섬유 판이 완전히 밀착될 수 있게 한다.

e). 양생

기존의 Sheet부착 에서와 동일하게 양생을 실시한다.

2) 격자섬유 보강공법

본 공법은 FRP를 원자재로 하여 2방향 격자형태로 성형한 격자섬유를 사용하여 콘크리트 구조물을 보강하는 공법으로 마감 재료는 폴리머모르터를 사용하여 일반 모르터보다 신구콘크리트의 부착강도를 향상 시켰으며 아크릴 계통의 에멀션 혼화제를 기존구체 표면에 도포 및 침투시켜 부착강도를 개선되도록 하였다. 또한 격자섬유 설치 시 앵커핀을 사용하여 격자섬유를 고정하게 되며 앵커핀에 간격재를 놓아 격자섬유 사이로 모르터가 충분히 삽입될 수 있도록 하였다. 본 공법에 사용되는 격자섬유는 내부식성, 내화학성 성질이 탁월하므로 얇은 두께의 모르터 시공으로도 내구성을 충분히 확보할 수 있다.

(1) 공법의 특징

- 격자섬유는 내알칼리성, 내산성, 내화확성의 성질로 염해 약품피해를 받는 가혹한 조건하의 구조물의 내구성을 향상.
- 격자의 교차부 강도를 충분히 확보하여 콘크리트와 정착력을 향상시킴.
- 격자섬유의 비중이 낮아 경량이므로 현장에서의 생산성이 향상.
- 비자성을 요구하는 구조물에 적용가능.
- 복잡한 형태의 구조물에도 일체성형이 가능하여 현장에서의 생산성을 향상시킬 수 있음.
- FRP 섬유로 되어있어 녹이 슬지 않음

(2) 공법의 적용범위

본 공법은 토목 및 건축 구조물의 보강공법으로 기존 구조물의 내구성증진 및 역학적 성능 향상을 위해 사용할 수 있다. 특히 항만구조물과 같이 해안에 구조물이 위치해 있는 경우 또는 화학플랜트와 같이 특수 목적으로 사용되는 구조물에 적용이 가능하다. 건축 구조물의 경우는 슬래브, 보, 기둥 등에 보강에 있어서 모르터를 이용하여 피복을 형성하여 보강을 실시하므로 화재 시에도 보강재가 소실되거나 또는 내력을 발휘하지 못하는 경우가 없이 적용이 가능하고 또한 유독가스 발생이 없어 인명의 피해도 줄일 수 있는 장점이 있다.

◎ 적용범위 ◎

- 교량의 상부구조보강 및 하부구조 보강
- 철도 및 도로의 터널 보강
- 항만구조물 보강
- 석유화학 플랜트 콘크리트 구조물 보강
- 건축구조물 보강
- 석유 비축 지하 공동구
- 상하수도구조물 및 공동구 박스구조물 보강

Fig. 3.4에 격자섬유보강공법을 이용하여 기존 구조물의 보강에 이용되고 있는 모

습이 나와있다. (a)는 교량의 상판을 보강하는 모습이고 (b)의 경우는 교각의 내진 보강에 사용되고 있는 모습이다.



(a) 교량의 상판보강모습



(b) 교각의 보강모습

Fig. 3.4 Application of NEFMAC method using CFRP grid

(3) 공법의 시공절차

격자섬유 설치 시 앵커핀과 간격재를 이용하여 구조물에 정착을 시킴으로써 일정한 두께로 피복을 형성할 수 있고 슬래브나 터널 등의 보강 시 위치고정이 용이한 편이다. 터널 구조물과 같이 보강면이 넓고 곡면으로 된 경우는 모르터를 뿜칠공으로 시공이 가능하며 공사기간을 단축함은 물론 시공이 용이한 장점도 있다. 격자섬유보강공법의 일반적인 시공방법을 살펴보면 다음의 절차를 통하여 구조물에 보강을 실시할 수 있다.

a). 준비공

보강공사에 앞서 기존 콘크리트 구조물의 손상상태를 조사하여 시공계획 마련

b). 면정리

보강하고자 하는 기존 콘크리트면의 레이턴스나 이물질을 제거하고 취약한 부위를 보수한 후 고압 물청소기로 깨끗이 세척한다.

c). 격자섬유설치

보강할 콘크리트 면에 격자섬유의 고정을 위하여 간격재를 격자모서리에 위치시키고 해머드릴을 이용하여 간격재에 나있는 구멍을 통해 콘크리트면을 천공한다. 중심봉 타격식 금속확장 앵커핀을 설치한다. 설치시 격자섬유의 이음부위

는 반드시 2개 격자가 겹치도록 시공한다.

d). 접착증강제 도포

보강 모르터의 부착을 증강시키기 위한 접착증강제 리포텍스를 무게비로 리포텍스:물을 1:2의 배합비로 혼합하여 붓이나 로울러로 고르게 보강면에 도포한다.

e). 보강모르터 타설

보강 모르터의 배합비는 무게비로 리포텍스(1):물(3.5):프리믹스 시멘트(25)로 하여 두께 2cm이상으로 미장을 하거나 뿔어서 시공을 한다.

f). 양생

양생은 콘크리트양생과 동일하게 실시한다.

4. 탄소섬유(Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheet)의 특성

이 장에서는 실험에 사용할 탄소섬유 Sheet의 구성물질인 탄소섬유 재료의 특징 및 역학적 성질과 탄소섬유 Sheet의 재료시험방법에 관하여 기술하였다.

(1) 재료

섬유접착공법에서 사용되는 재료는 탄소섬유 Sheet 자체와 이를 기존 콘크리트 면에 접착시키는 에폭시 수지가 있어야 한다. 이러한 재료들은 탄소섬유 Sheet를 개발한 회사에서 자사의 탄소섬유 Sheet에 적합한 프라이머 및 접착제를 동시에 제공하고 있다. 그러므로 탄소섬유 Sheet를 사용할 경우에는 탄소섬유 Sheet 제작회사의 특성에 맞는 그 회사의 제품을 사용하는 것을 원칙으로 하고 있다. 일방향 탄소섬유 Sheet의 일반적인 제품형태와 재료의 장점 및 단점, 물리적인 특성은 Table 3.3과 Table 3.4에 나타내었다.

Table 3.3 Advantages and disadvantages of carbon fiber

장 점	단 점
비부식성	비소성(탄성), 취성
고(高)인장강도	낮은 회방향 전단강도
비전기, 전자성	Stress-Rupture 현상
경량성	고가

Table 3.4 Field of FRP's application by physical properties

물리적 특성	응용분야
비강도, 비인성, 저중량	우주항공, 육·해상 수송, 스포츠용품
높은 형태안정성 낮은 열팽창계수와 낮은 마모성	미사일, 항공기 브레이크, 항공기 안테나
높은 진동 감쇄, 강도, 인성	오디오 장비
전기 전도성	자동차 후드
생체 불활성, X-ray 투과성	인공보철, 엑스레이 장비
피로 저항성	자기 유회성 섬유 기계
화학적 불활성, 높은 부식저항성	화학공업, 핵 관련 분야

IV. 실험체 제작 및 실험

1. 실험체 제원

실험체의 제원은 Fig 4.1과 같이 사각형의 단면 형태로 제작하였다. CFRP Sheet 감싸기로 구속된 사각형 기둥의 압축 실험을 위하여 각 변수별 시편을 제작하였는데 실험체는 사각형 거푸집을 제작하고 그 안에 콘크리트를 타설하여 제작하였다.

다음 Fig 4.1은 실험체의 모습을 보여주고 있는 그림이다.

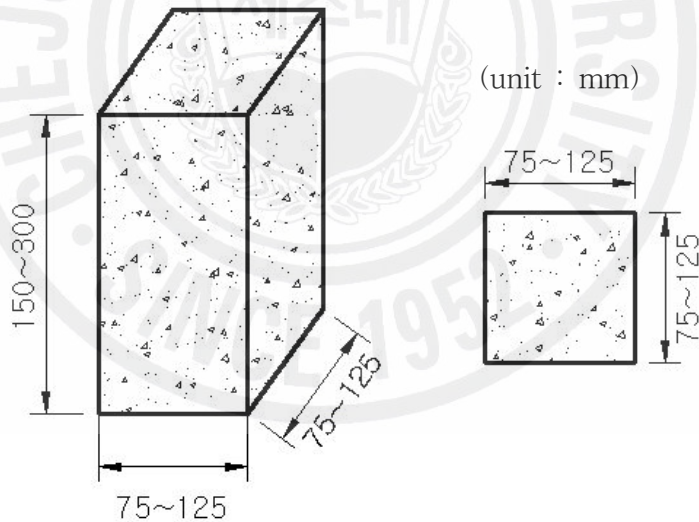


Fig 4.1 Dimensions of test column specimen

2. 실험 변수

본 논문에서 실험연구로 선택된 실험 변수는 CFRP Sheet로 보강된 사각형 기둥의 보강효과에 영향을 미칠 수 있는 인자들로 CFRP Sheet의 보강정도, 기둥의 크기, 형상비, 사각형 기둥의 모서리를 완만하게 만든 모따기의 정도 등 총 4가지 변수를 선택하여 총 33개의 시편을 제작하여 실험을 실시하였다.

Table 4.1은 실험변수를 나타내고 있는 표인데 C0 실험체는 보강이 없는 무보강 실험체로 기준 시험체로 삼아서 다른 실험체의 보강효과를 파악할 수 있게 하였다.

Table 4.1 Parameters for square test columns

시험변수	시험체명	FRP Sheet 겹수	기둥의 크기	형상비(H/D) (모따기, R)
무보강 시험체	C0	-	B=100mm H=200mm	H/B=2.0 (R=3.0)
보강정도	C1	1겹	B=100mm H=200mm	H/B=2.0 (R=3.0)
	C2	2겹		
	C3	3겹		
기둥의 크기	C4	1겹	B=75mm H=150mm	H/B=2.0 (R=3.0)
	C1		B=100mm H=200mm	
	C5		B=125mm H=250mm	
형상비 (H/B)	C4	1겹	B=75mm H=150mm	H/B=2.0 (R=3.0)
	C6		B=75mm H=225mm	H/B=3.0 (R=3.0)
	C7		B=75mm H=300mm	H/B=4.0 (R=3.0)
모따기	C8	1겹	B=100mm H=200mm	H/B=2.0 (R=0.0)
	C9			H/B=2.0 (R=1.5)
	C1			H/B=2.0 (R=3.0)
	C10			H/B=2.0 (R=4.5)
단면보강	C11	원형보강	D=141mm H=200mm	H/D=1.42

3. 사용재료

시험체 제작은 목재 거푸집을 조립하여 시험체를 제작하였다. 양생이 끝난 다음 보강을 실시하였으며 시험체 제작과 보강에 사용된 재료의 물성치는 다음과 같다.

1) Concrete

시험체 제작에 사용된 콘크리트는 재령 28일 설계강도가 24MPa인 레미콘 제품을 사용하였으며 콘크리트 공시체를 제작하는 방법과 같이 3층 25회 다짐을 실시하여 28일간 수증양생 하였다. 시편에 사용된 레미콘 제품의 사양은 다음 Table 4.2와 같다.

Table 4.2 Characteristics of concrete

골재의 종류에 따른 구분	콘크리트용 부순 골재	측정값
설계 강도(MPa)	24	25
슬럼프(cm)	10	9.8
굵은 골재의 최대 치수(mm)	25	25이하
시멘트 종류	1종 보통 포틀랜드 시멘트	1종 보통 포틀랜드 시멘트
공기량(%)	4.5±1.5	3.2
염화물량kg/m ³	0.30 이하	0

2) 탄소섬유 Sheet(Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheet)

탄소섬유 Sheet는 접착종이 위에 섬유를 일 방향으로 배열시켜 만든 일본 Tonen사의 제품 Forca Tow Sheet를 사용하였으며 Sheet 접착제로 사용된 에폭시는 보통 표준 환경용을 사용하였다. 탄소섬유 Sheet는 시험법에 따라 시편을 제작 후 인장실

험을 실시하였으며 아래의 Table 4.3은 사용된 탄소섬유 Sheet의 물성치를 나타내고 있는 표이다. 그리고 Fig 4.3은 실험에 사용된 탄소섬유 Sheet의 모습을 보여주고 있는 사진이다.

Table 4.3 Mechanical of CFRP Sheet

재료	인장강도	탄성계수	극한변형률(%)
CFRP Sheet	31576MPa	3.628×10^6 MPa	0.87

3) Epoxy

콘크리트 표면과 CFRP Sheet를 부착하기 위해 사용된 에폭시(Epoxy)는 Sika사에서 개발한 FRP 슈트용 접착제인 Sikadur-330을 사용하였다. Sikadur-330은 접착제 A제와 경화제 B제로 구성되었는데, A제와 B제를 무게비 1:5의 비율로 섞어서 사용을 한다.

다음은 실험체 제작에 사용된 에폭시의 물리적 특성이다.

- 밀도(20℃) : 1.31 kg/ℓ (A+B 혼합물)
- 혼합물의 경화 시간
 - +10℃ : 90min (5kg)
 - +35℃ : 30min (5kg)
- 접착성 : 유성이 없는 반죽상태
- 사용온도 : 10℃ ~ 35℃
- 접착제를 바른 콘크리트의 인장강도 (EN 24624)
콘크리트 파괴 1일후 (>10℃)
- 인장강도 (DIN 53452)
양생 : 7일, +23℃ : 30N/mm²
- 휨 강도 (DIN 53452)

양생 : 7일, +23℃ : 3800N/mm²

- 열 뒤틀림 저항 (ASTM D648)

양생

HDT

다음 Fig 4.2는 본 연구에서 사용된 에폭시의 모습을 보여주고 있는 사진이다.



Fig 4.2 Epoxy

4) 압축시험기

본 연구에서 실험체의 압축강도를 측정하기 위하여 자동압축강도 시험기를 사용하였다. 실험을 실시하는데 있어서 실험체의 정확한 측정과 데이터 수집을 위하여 실험체 아래에 추가로 Loadcell을 부착하여 자동압축강도 시험기와의 측정값을 비교하였다.

4. 기둥형상의 개량

원형기둥에 있어 FRP 자켓팅은 매우 효과적인 구속효과를 제공하지만, 직사각형 기둥에 있어서는 상대적으로 덜 효율적이다. 사각형 기둥들에 있어 보다 효과적인 구

속효과를 얻기 위해서는 FRP 자켓팅을 하기 전에 기둥의 형상을 원형 또는 타원형으로 바꾸는 것이다.

기둥의 형상 개량에 대한 개념은 Priestley and Seible(1995)에 의하여 처음으로 연구되었다. 그들은 연구에서 기둥을 FRP Sheet로 감싸기 전에 미리 제작된 콘크리트 블록으로 기둥을 원형 또는 타원형으로 변화시킨 후 FRP 보강공법을 적용하였다. 이러한 형상의 변환은 속건성시멘트를 활용할 수 있다(Saadatmanesh et al. 1997). 일반적으로 직사각형 기둥은 과도한 형상의 확대를 피하기 위하여 타원형 기둥으로 변환시키고, 직사각형 기둥은 원형 기둥으로 변경하는 것이 효과적이다. FRP 구속효과를 극대화하기 위한 기둥의 형상 개량의 개념은 다른 형태의 기둥에도 충분히 적용될 수 있다.

미리 제작된 원형 혹은 타원형의 FRP Plat를 직사각형 기둥의 보강에 사용될 수도 있다(Teng and Lam 2001). 직사각형 기둥을 보강하기 위하여, 타원형의 FRP Plat와의 간격은 콘크리트로 채워 보강할 수 있다. FRP Plat는 콘크리트를 채우기 위한 거푸집으로서 또한 동시에 타원형 단면으로 변환된 기둥의 강도향상을 위한 보강재로서의 역할을 기대할 수 있다. 또한 보강기둥의 단면크기를 줄이기 위하여 아래의 Fig 4.3, Fig 4.4와 같이 모서리 부를 완만하게 처리할 수도 있다.

FRP Plat는 하나의 줄눈 또는 틈을 갖는 하나의 Plat로 제작할 수 있다. 이와 같은 Plat들은 두께가 얇기 때문에 손쉽게 기둥에 배치시킬 수 있으며, 이음부는 수직 FRP 띠로 보강할 수 있다. 그러나 수직 FRP 띠의 섬유 방향성은 수평으로 적조되어야 한다. 많은 또는 적층의 FRP Plat로 보강하는 경우에 대해서는 한쪽이 갈라진 원 또는 연속된 롤의 형태로도 제작할 수 있다(Xiao and Ma 1997). 또 다른 대안으로서 하나의 이음부를 수직으로 중첩시키는 방법이나 두 개의 이음부를 두어 중첩시키는 방법을 사용할 수 있다. 타원의 FRP Sheet를 실험실에서 mandrel 주위로 감싸 CFRP Plat로 제작할 수도 있다(Teng and Lam 2001). 실제적으로, 이와 같은 Plat들은 세사감싸기 공정으로 만들 수도 있으며, 두 개의 적층으로 구성된 CFRP Plat로 현장에서 기둥에 설치하기가 아주 쉽다는 장점이 있다. 또한 한층으로 제작된 Plat의 경우는 보다 더 유연한 시공성을 갖게 된다.

본 실험 연구에서는 정사각형 실험체에 원형으로 단면 형상을 개량하고 CFRP Sheet를 감싸서 그 보강효과를 확인하였다. 아래 Fig 4.3과 Fig 4.4는 사각형 실험체

의 원형으로 단면 변환한 모습을 보여주고 있다. Fig 4.5은 실험체의 사진을 보여주고 있다. 본 실험에서는 정사각형 실험체를 원형 실험체로 변환하였는데 모서리 곡선 처리 안한 경우이다.

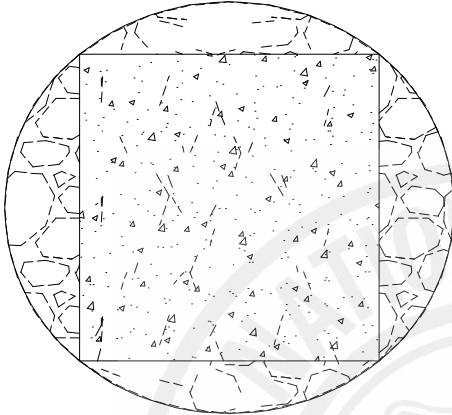


Fig 4.3 The case which did not make the corner with curve

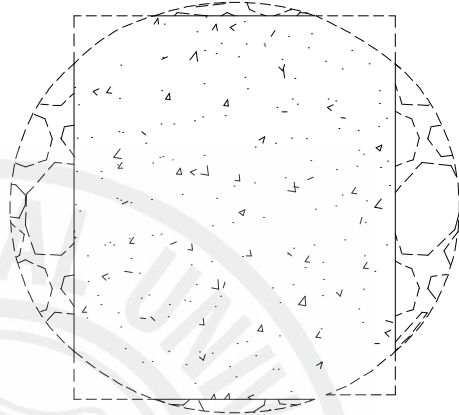


Fig 4.4 The case which made the corner with curve



Fig 4.5 Circular test specimen transformed from square column

5. 실험체 제작

1) 사각형 실험체 제작 과정

실험체를 제작하기 위하여 사각형 거푸집을 사용하였다. 콘크리트 타설 전 실험체와 거푸집을 쉽게 분리시키기 위하여 거푸집 표면에 오일을 도포하여 거푸집과 실험체와 쉽게 분리시킬 수 있게 하였다.

2) 탄소섬유쉬트 접착과정

탄소섬유쉬트를 실험체에 부착하는 과정은 다음과 같다.

- ①하지(下地)처리 - 콘크리트열층 제거, 균열 보수, 표면요철 제거
- ②프라이머 도포 - 탄소섬유쉬트 접착강도 및 콘크리트 표면강도 향상과 중성화 방지
- ③표면 평활 수정 - 에폭시 퍼티 처리로 콘크리트 표면 평활작업
- ④탄소섬유쉬트 접착 - 에폭시수지 도포, 탄소섬유쉬트 접착 함침공정 후 에폭시수지 도포

6. 실험 데이터 수집

다음은 실험체의 실험전 모습을 보여주고 있다. 실험체의 가로변형과 세로변형을 측정하기 위하여 실험체의 가로와 세로 방향으로 변형 게이지를 부착하였고, 실험체가 편심하중을 받는 것을 방지하기 위하여 시편의 상부에 Capping을 하고 다시 위에 고무판을 대어서 하중이 균등하게 실험체에 전달할 수 있게 하였다. 실험하는 동안 모든 데이터의 수집은 동적변형률 측정기로 압축하중과 변형률을 측정하였고, 모든 실험체에 대해 동영상과 사진으로 파괴형태를 기록하였다. Fig 4.6은 실험체의 콘크

리트게이지의 부착 위치를 보여주고 있는 그림이고, Fig 4.7은 실험 전 압축시험기 모습의 사진이다.

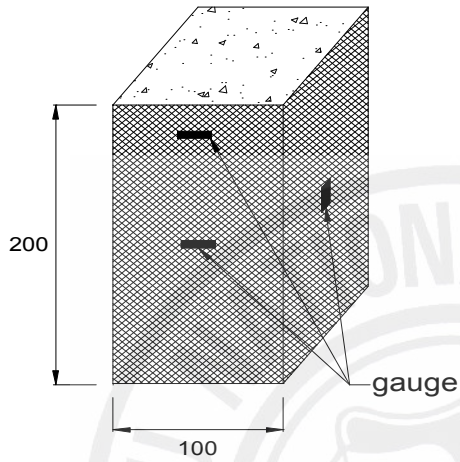


Fig 4.6 Arrangement of gauges for data acquisition.

Fig 4.7 Test set up for column specimen

V. 실험결과 및 분석

1. 실험결과

CFRP Sheet 감싸기로 구속된 사각형 기둥 실험체의 압축강도 실험을 통하여 파괴 양상, 최대내력, 하중-변형량 및 응력-변형률 곡선 등을 분석하고 탄소섬유Sheet의 보강효과를 분석하였다. Table 5.1과 5.2는 실험 결과를 나타낸 표로서 각 변수별 최대하중, 최대 변형량, 파괴 형태 등을 나타내고 있다.

Table 5.1 Summary of experiment results

시험변수	시험체명	사용변수	평균최대하중 (*10kN)	평균최대변형 (mm)	비고
무보강 시험체	C0	-	28.129	2.1994	-
보강정도	C1	1겹	36.226	1.9074	H/D=2.0 R=3.0
	C2	2겹	45.176	15.226	
	C3	3겹	55.906	16.765	
기둥의 크기	C4	75/150	26.157	7.2871	H/D=2.0 R=3.0
	C1	100/200	36.226	1.9074	
	C5	125/250	34.637	2.4806	
형상비 (H/D)	C4	75/150	26.157	7.2871	R=3.0
	C6	75/225	27.904	3.5648	
	C7	75/300	26.737	4.3663	
모따기	C8	R=0	35.377	2.6983	H/D=2.0
	C9	R=1.5	38.692	3.2242	
	C1	R=3.0	36.226	1.9074	
	C10	R=4.5	34.848	2.4216	
단면보강	C11	원형보강	63.715	5.6138	-

Table 5.2 Summary of ultimated loads and failure modes

실험체	최대하중 (*10kN)		평균하중 (*10kN)	파괴형태
C0	1	29.031	28.129	압축파괴
	2	27.226		압축파괴
C1	1	36.807	36.226	부착 파괴
	2	36.639		모서리 파괴
	3	35.231		부착 파괴
C2	1	49.462	45.176	부착 파괴
	2	43.236		부착 파괴
	3	42.829		부착 파괴
C3	1	54.538	55.906	부착 파괴
	2	64.773		부착 파괴
	3	48.406		부착 파괴
C4	1	25.406	26.157	모서리 파괴
	2	26.138		모서리 파괴
	3	26.928		부착 파괴
C5	1	33.268	34.637	부착 파괴
	2	35.239		부착 파괴
	3	35.404		부착 파괴
C6	1	28.414	27.904	부착 파괴
	2	28.299		부착 파괴
	3	26.998		모서리 파괴
C7	1	26.315	26.737	모서리 파괴
	2	26.829		부착 파괴
	3	27.068		부착 파괴
C8	1	33.263	35.377	부착 파괴
	2	40.498		부착 파괴
	3	32.371		부착 파괴
C9	1	39.123	38.692	부착 파괴
	2	37.34		부착 파괴
	3	39.614		부착 파괴
C10	1	35.413	34.848	부착 파괴
	2	37.144		부착 파괴
	3	31.987		부착 파괴
C11	1	73.67	63.715	부착 파괴
	2	63.370		부착 파괴
	3	58.87		부착 파괴
	4	58.95		부착 파괴

2. 각 변수별 실험 결과 분석

1) 보강정도

본 실험의 첫 번째 변수로 CFRP Sheet의 감싸기량에 따른 보강효과를 파악하는 것이다. D=100mm, H=200mm의 표준 실험체에 CFRP Sheet의 겹수를 1겹, 2겹, 3겹의 보강량을 달리하여 이들을 비교하였다. 이들의 비교 분석을 위하여 표준 실험체의 C0와 보강한 실험체 C1~C3 실험체를 비교 분석하였다. 겹이음은 사각형 한 변을 감싼 길이로 겹이음을 하였고, 모든 실험체에서 파괴 형태는 부착파괴의 형태로 일어났다. Fig 5.1은 CFRP Sheet의 보강량에 따른 최대압축응력을 그래프로 나타낸 것으로 보강량이 증가함에 따라 보강효과가 증가함을 알 수 있다. 여기서 보강효과는 기준 시험체와 비교한 값들이다. FRP Sheet의 겹수에 따라 표준 실험체의 최대압축응력은 29~98%의 보강 효과를 얻는 것으로 확인되었다. Fig 5.2는 실험에서 하중과 변형량 곡선을 나타내는 그래프이다. C0는 표준 실험체이다. 그래프에서 살펴보면 보강 겹수가 많을수록 최고 하중이 높아지고 파괴전까지 변형량도 점점 커지는 것을 알 수 있다. Fig 5.3은 실험체의 응력-가로 변형률 그래프를 보여주고 있다. 이 그래프에서 보강이 겹수가 많을수록 높은 응력을 나타내고 변형률은 점점 낮아지고 있다. 이는 보강 겹수가 많을수록 변형이 적게 일어나서 점점 낮아지는 경향을 보이고 있다. Fig 5.4는 실험체의 응력-세로 변형률 그래프를 보여주고 있다. 그래프에서 보강 겹수가 많을수록 응력이 마찬가지로 높아지면서 세로 변형은 가로 변형보다는 작게 일어나는 알 수 있다.

아래 사진은 실험체의 실험 모습과 파괴시 모습을 보여주고 있는 사진이다. CFRP Sheet로 보강된 모든 시험체에서 파괴는 표준 시험체를 제외하고 모서리가 아니라 겹이음을 한 변에서 콘크리트와 Sheet 사이의 부착파괴의 형태로 일어났으며, 시편 중간부분의 변형이 먼저 일어나면서 파괴되었다. 파괴시 CFRP Sheet는 섬유방향인 가로 방향으로 분리되는 파괴가 일어났다. 기준 시험체는 사진에서 보이는 것과 같이 압축에 의한 가로 방향의 인장응력에 의하여 세로균열이 발생하고 이에 따른 압축파괴가 일어났다. 일반적으로 원형 공시체의 파괴형태는 중간부분에서 콘모양의 파괴형

태와 갑작스런 취성파괴의 형태를 갖는데 보강된 사각형 공시체에서는 최대압축하중까지 즉 탄성범위 내에서는 직선적으로 거동하다가 내부 콘크리트의 균열과 동시에 약간의 하중감소가 일어났다. 이후 Sheet의 응력이 증가하면서 일반적인 취성파괴의 형태와는 다른 연성적인 거동을 나타내었다. 실험 경과시간을 보더라도 무보강인 표준 실험체인 경우 수십초에 불과 파괴가 이뤄졌는데 비해 보강한 실험체에서는 겉수의 증가에 따라 2~3분에 걸쳐 점진적으로 파괴가 이뤄지는 것을 알 수 있었다.

본 실험에서 보강효과 뿐만 아니라 최종 파괴에 이르는 동안 연성적인 거동으로 인해 실제 구조물에 대한 보수 보강에 충분한 효과를 얻을 수 있을 것으로 본다.

Fig 5.5~5.7은 시험체의 파괴 형태와 실험 모습이다.

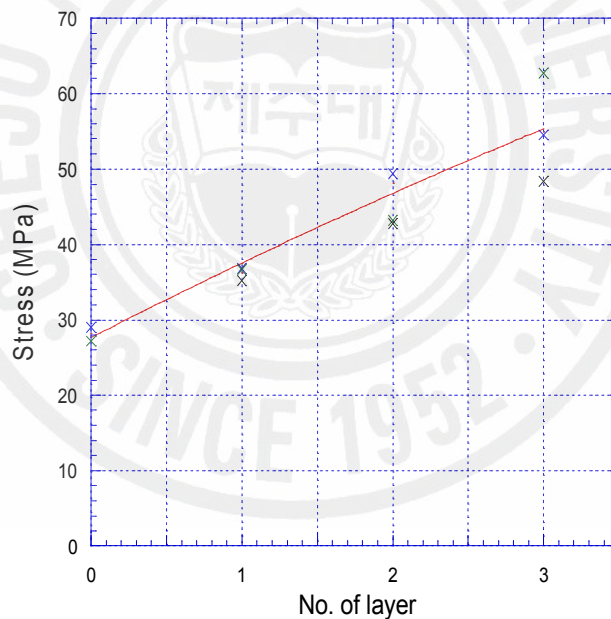


Fig 5.1 Relationship of ultimate stress and number of layer (FRP sheet)

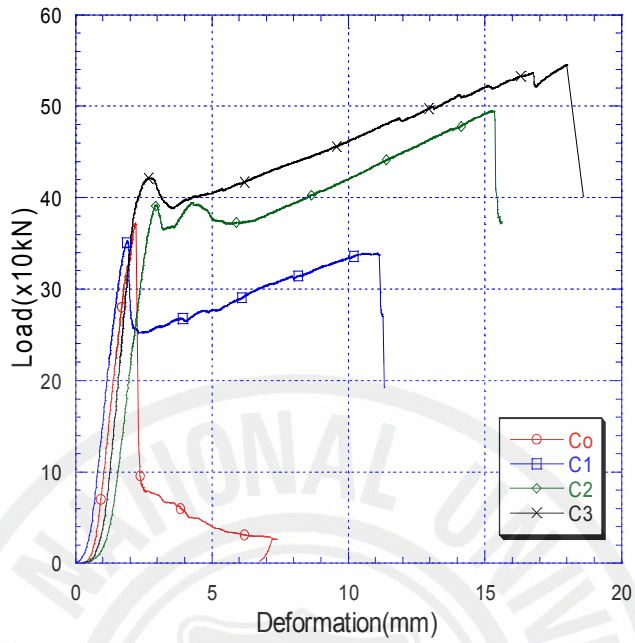


Fig 5.2 Load-deformation curves with different number of layer

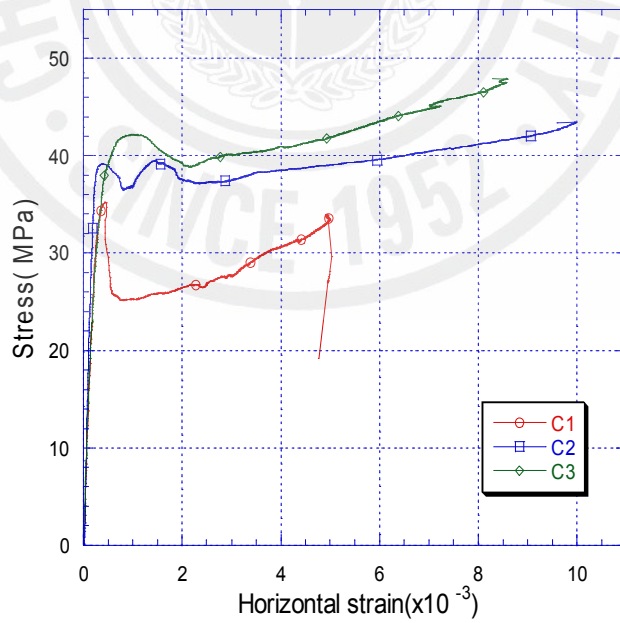


Fig 5.3 Stress- horizontal strain curves with different number of layer

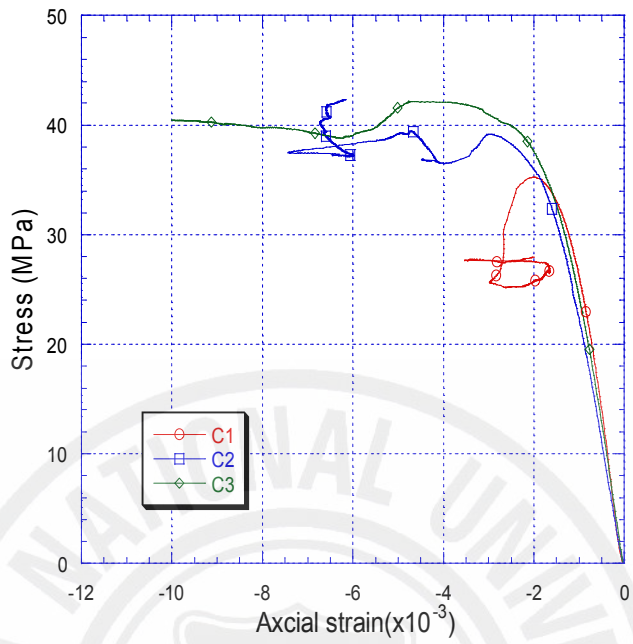


Fig 5.4 Stress- axial strain curves with different number of layer

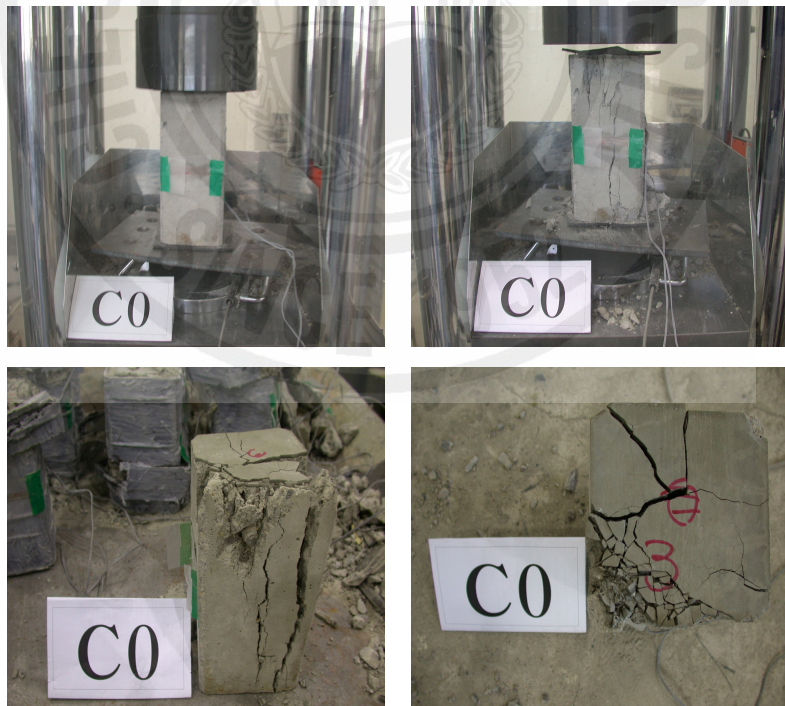


Fig 5.4 Real view of compression failure (C0)

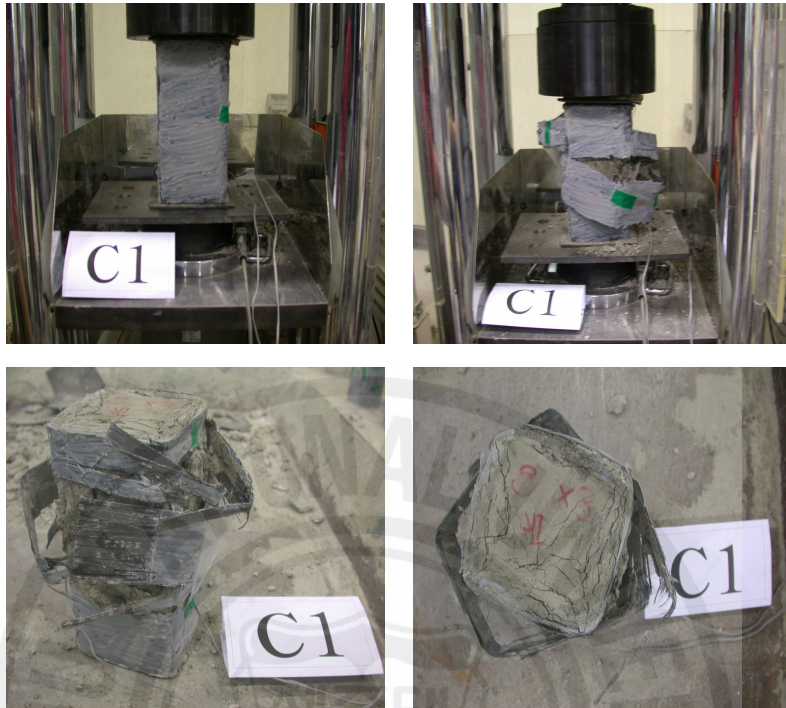


Fig 5.5 Real view of debonding failure (C1)

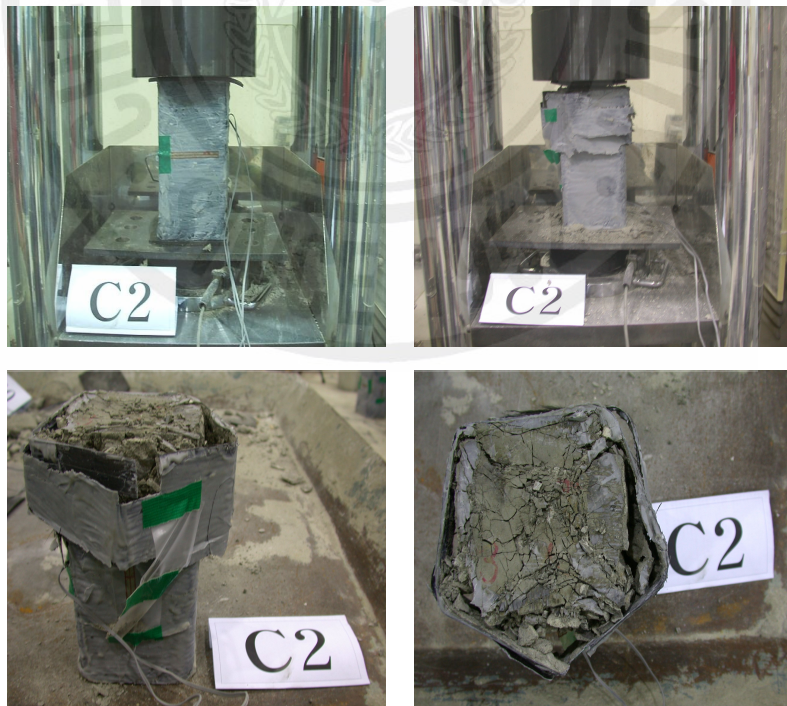


Fig 5.6 Real view of debonding failure (C2)

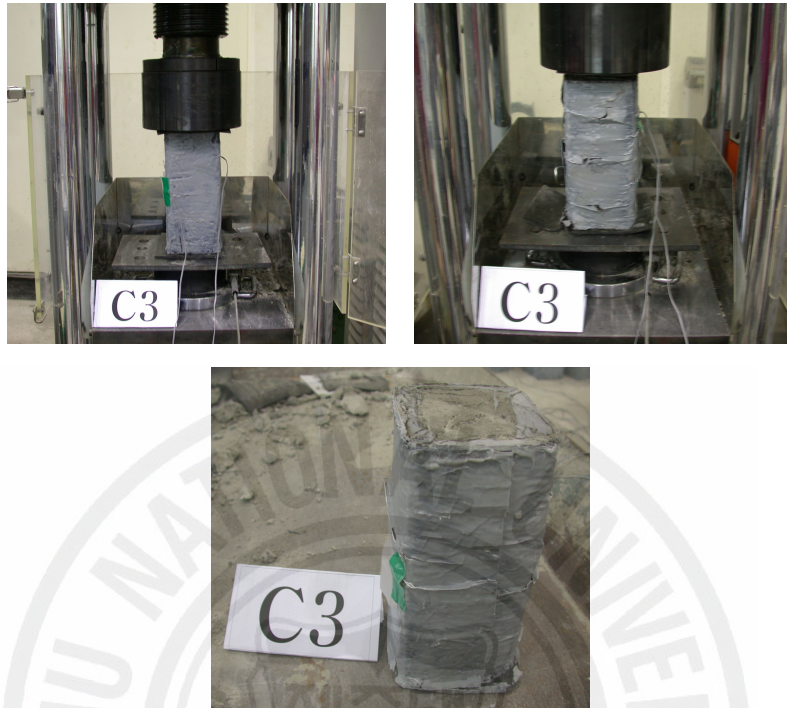


Fig 5.7 Real view of debonding failure (C3)

2) 기둥의 크기

실험 연구의 두 번째 변수인 기둥 크기에 대한 보강효과를 분석하였다. 기둥 크기에 따른 효과를 검토하기 위하여 시험체의 형상비(높이/한변의 길이)는 2.0으로 일정하게 정하여 크기에 따른 구속효과를 분석하였다. 이 변수의 분석을 위하여 C4, C1, C5 시험체를 분석하였다. 이 변수 역시 겹이음은 사각형의 한변을 감싼 길이로 하였다.

Fig 5.8은 CFRP Sheet의 기둥의 크기에 따른 보강효과를 알아보기 위한 곡선들로 기둥 크기가 클수록 보강효과가 낮아지는 것을 알 수 있다. Fig 5.8는 기둥의 크기에 따른 최대압축응력을 그래프로 나타낸 것으로 기둥의 크기가 커짐에도 응력이 크게 증가하지 않는 것은 기둥의 크기가 클수록 그 보강효과는 작다는 것을 알 수 있다. Fig 5.9은 시험체의 하중-변형량 그래프이다. 그래프에서 시험체의 D가 클수록 H가

클수록 견디는 최고 하중은 높아지고 있는 것을 볼 수 있다. 변형량도 실험체의 크기가 클수록 처짐이 많이 생김을 그래프에서 확인할 수 있다. 다음 Fig 5.10은 실험체의 응력-가로 변형률 곡선이다. 그래프에서 실험체의 크기가 클수록 응력이 높다는 것을 볼 수 있다. 그리고 실험체의 크기가 클수록 가로 변형은 작게 일어나는 것을 확인할 수 있다. Fig 5.11은 실험체의 응력-세로 변형률 그래프이다. 이 그래프에서도 실험체의 크기가 클수록 응력이 높다는 것을 확인할 수 있다.

아래 사진은 실험체의 실험 모습과 파괴시 모습을 보여주고 있는 사진이다. 파괴는 주로 사각형의 변에서 일어났으며, 파괴시 CFRP Sheet의 섬유방향인 가로 방향으로 파괴가 일어났다.

Fig 5.12, 5.13은 시험체의 파괴 형태와 실험 모습이다.

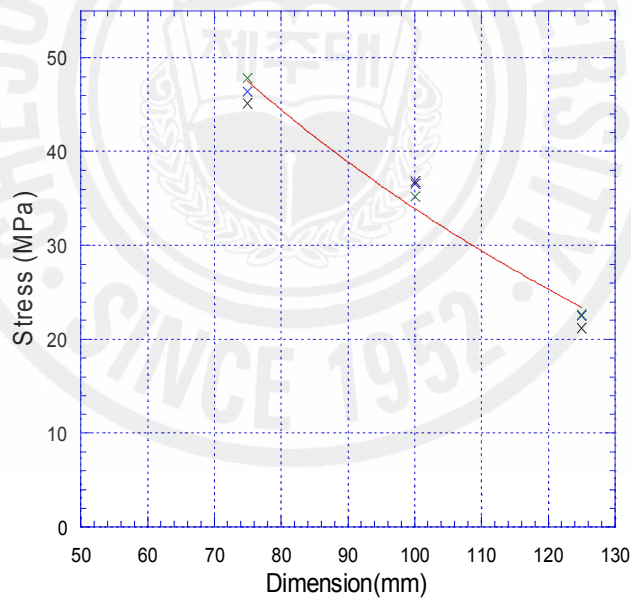


Fig 5.8 Relationship of ultimate stress and column dimension

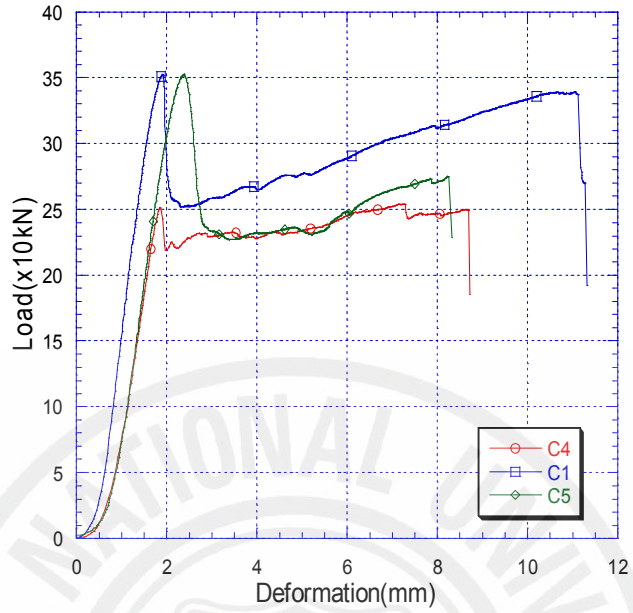


Fig 5.9 Load-deformation curves with different dimension of columns

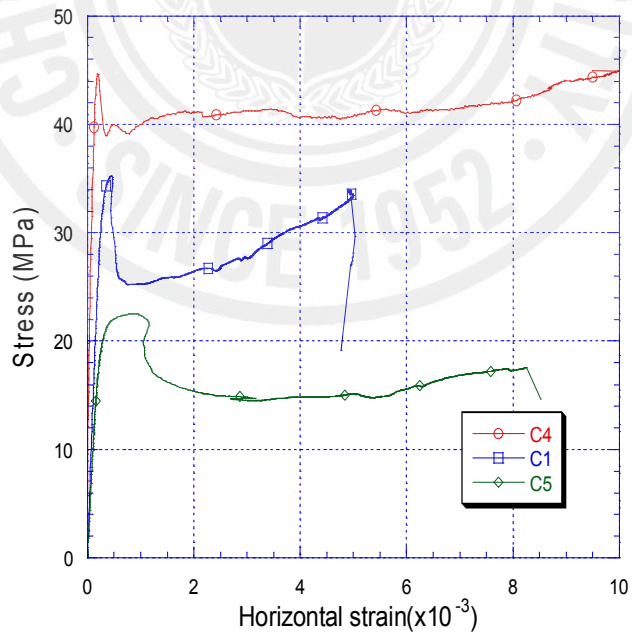


Fig 5.10 Stress- horizontal strain curves with different dimension of columns

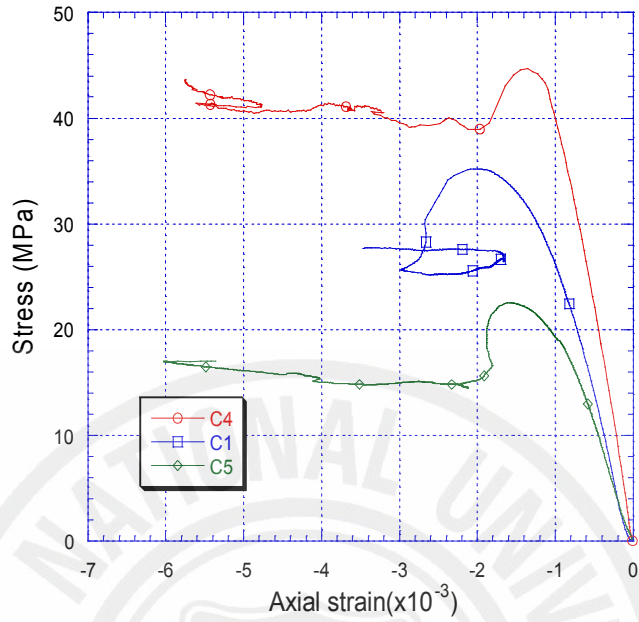


Fig 5.11 Stress- axial strain curves with different dimension of columns

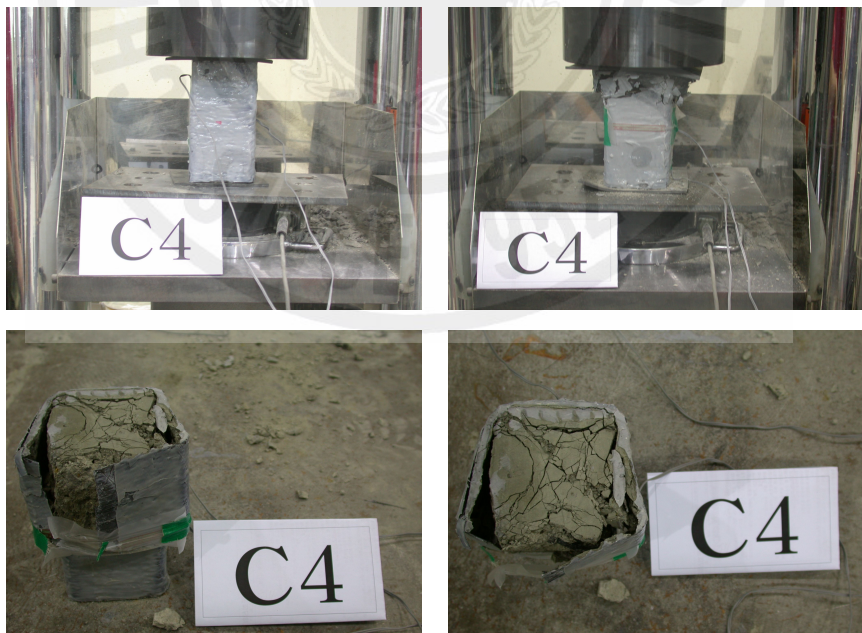


Fig 5.12 Real view of debonding failure (C4)

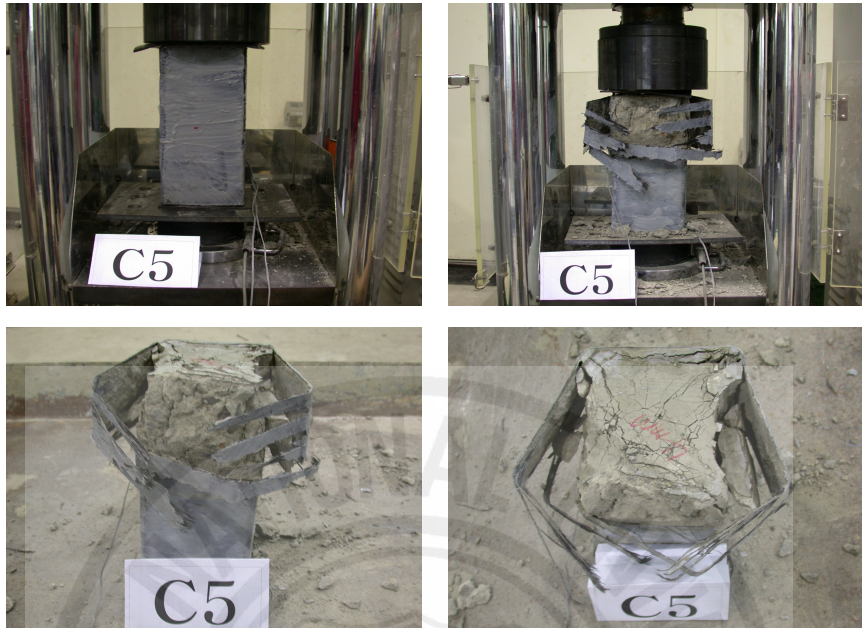


Fig 5.13 Real view of debonding failure (C5)

3) 형상비

실험의 세 번째 변수는 실험체의 형상비(H/B)에 대한 영향이다. 이 실험을 위하여 C4, C6, C7 실험체를 비교 분석하였다.

Fig 5.14는 CFRP Sheet의 형상비에 따른 보강 효과를 알아보기 위한 곡선이다. 이 그래프에서 형상비가 클수록 보강 효과는 눈에 띄는 경향을 찾아 볼 수 없었다. Fig 5.15은 실험체의 하중-변형량 곡선 그래프이다. 하중-처짐 그래프에서 살펴보면 형상비(H/B)가 2, 3, 4로 점점 클수록 하중은 높아지나 큰 차이는 없다. 세 시험체 모두 비슷한 거동을 보이면서 파괴하였고, 변형량 역시 큰 차이가 없었다. 이 결과로 형상비가 실험체의 하중과 변형량에는 큰 영향을 주지는 못하고 있는 것으로 볼 수 있다. 다음 Fig 5.16은 응력-가로 변형률 곡선 그래프이다. C4의 경우 가로 변형률이 현저하게 많아서 같은 그래프에 나타내지 못했다. 이 그래프에서 형상비가 클수록 응력이 커지는 것이 아니라 모두 비슷한 곳에서 파괴가 일어났음을 알 수 있다. 이는 형상비가 응력에 크게 영향을 끼치지 않는다고 볼 수 있다. Fig 5.17는 응력-세로 변형률 그래

프이다. 이 그래프 역시 응력과 변형률 모두 비슷한 거동을 보이고 있고, 형상비에 따라서 조금의 차이는 있지만 큰 영향을 끼치지 못하고 있음을 알 수 있다.

세 실험체 모두 파괴시 겹이음에서 일어났으며, CFRP Sheet의 섬유방향인 가로 방향으로 파괴가 일어났다.

Fig 5.18~5.19는 시험체의 파괴 형태와 실험 모습이다.

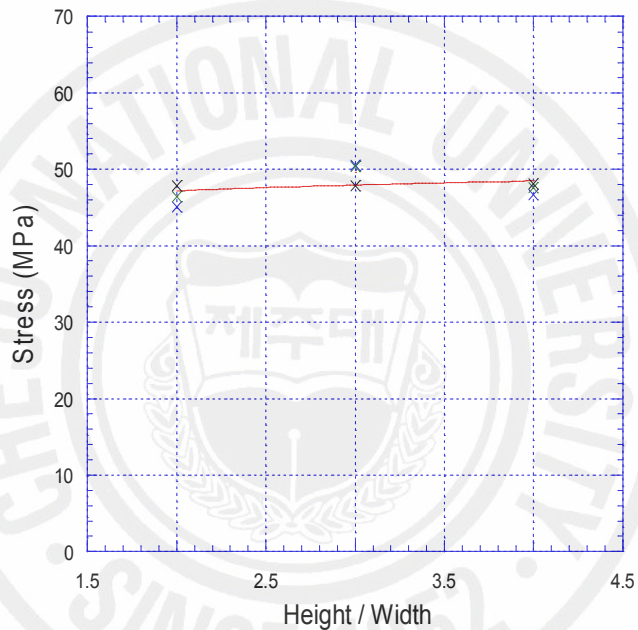


Fig 5.14 Relationship of ultimate stress and Height/width ratio

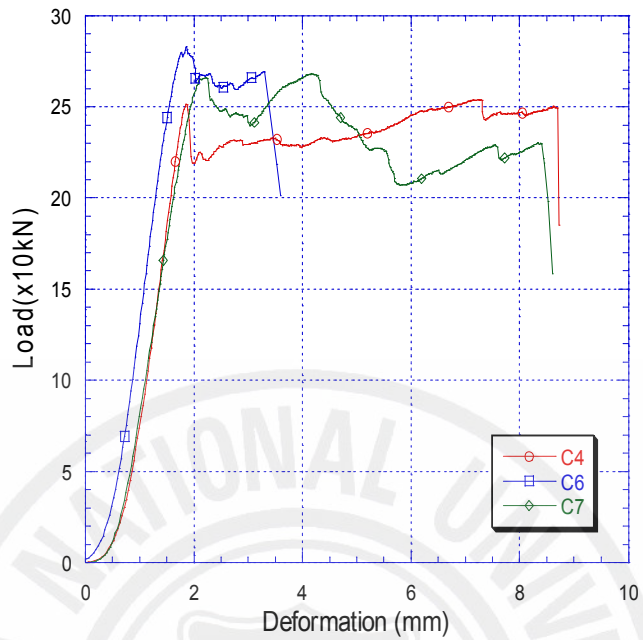


Fig 5.15 Load-deformation curves with different Height/width ratio

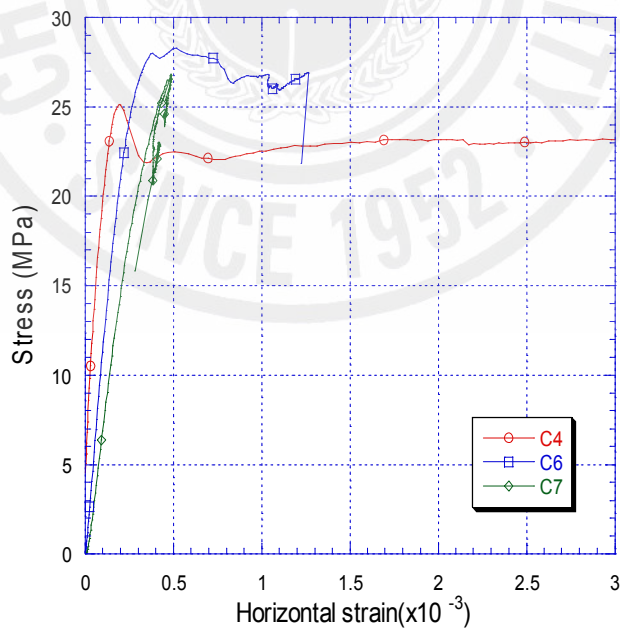


Fig 5.16 Stress- horizontal strain curves with different Height/width ratio

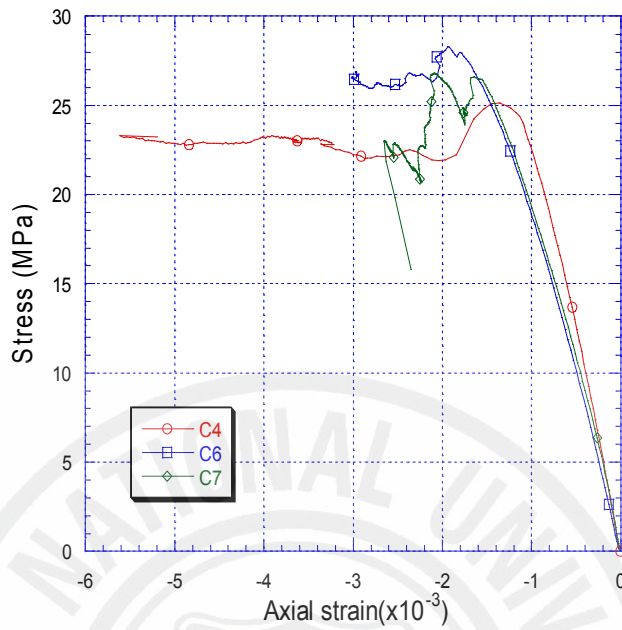


Fig 5.17 Stress- axial strain curves with different Height/width ratio

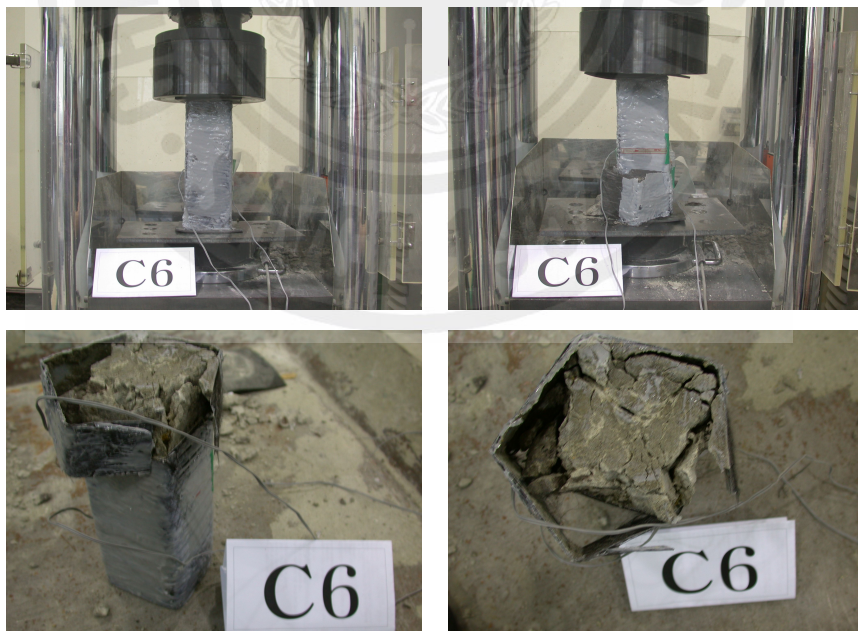


Fig 5.18 Real view of debonding failure (C6)

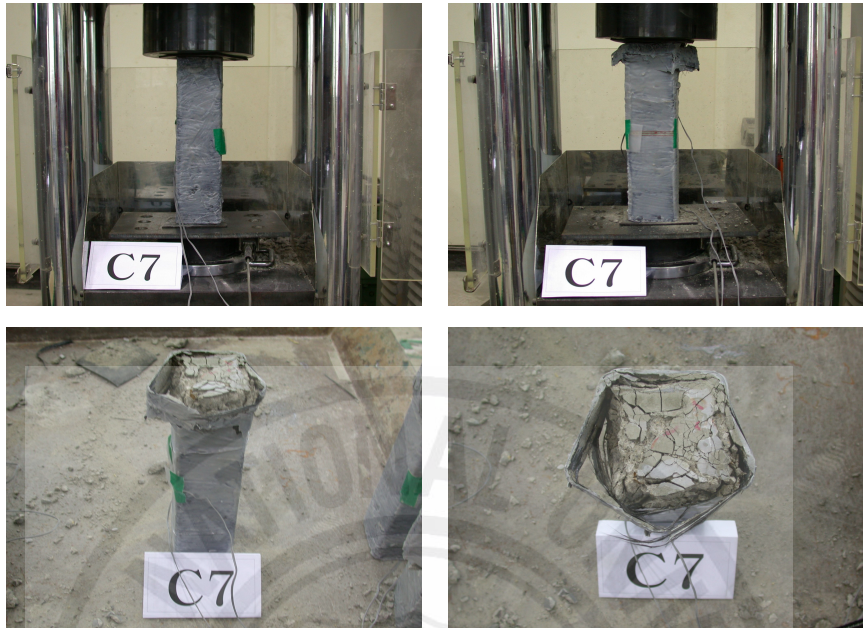


Fig 5.19 Real view of debonding failure (C7)

4) 모따기

실험의 네 번째 변수는 사각형 실험체의 모서리를 갈아내서 CFRP Sheet의 부착 성능이 어떻게 변하는지 비교하였다. 이번 실험을 위해서 C8~C10, C1을 비교하였다. 이번 변수도 앞의 변수들과 마찬가지로 겹침은 사각형의 변에서 했으며 모따기의 정도는 4.5, 3.0, 2.5로 나누어서 실험하였다.

Fig 5.20은 CFRP Sheet의 모따기에 따른 보강 효과를 알아보기 위한 곡선인데 이 그래프에서 모따기 정도의 차이가 기둥의 보강 효과에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 어느 일정한 정도만 모따기가 이루어 진다면 기둥의 보강 효과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 볼 수 있다. Fig 5.21은 실험체의 하중-변형률 그래프이다. 하중-변형률 그래프에서 하중이 모따기가 클수록 조금은 높아지는 경향을 볼 수 있지만 그 차이는 크지 않았다. Fig 5.22는 실험체의 응력-가로 변형률 곡선 그래프이다. 응력-가로 변형률 곡선에서 모따기가 없는 C8실험체 보다는 모따기를 한 다른 실험체에서의 응력이 높다는 것을 볼 수 있다. 그리고 가로 변형률은 모따기의 크기가 클수록 변형이 더 많이 생기고 있음을 알 수 있다. Fig 5.22는 실험체

의 응력-세로 변형률 곡선 그래프이다. 이 그래프에서도 모따기의 정도가 다를수록 조금의 응력 차이는 있으나 그 차이가 크지 않고, 모따기의 처리가 없는 C8실험체를 제외하고는 세로 변형이 비슷하게 일어남을 알 수 있다. 이는 변형량 곡선에서 C8 실험체와 다른 모따기를 실시한 실험체를 비교하면 확인할 수 있다.

이 실험에서 모따기에 대한 보강효과는 경향성이 없었으나 차후의 실험에서는 시편의 면적에 대한 모따기비로 인자를 두어 연구가 이뤄져야 할 것으로 사료된다.

다음 아래 사진은 실험체의 실험전 모습과 실험후 모습을 보여주는 사진이다. 모든 실험체가 겹이음에서 파괴가 일어났으며, CFRP Sheet 섬유 방향인 가로 방향으로 파괴가 일어났다.

Fig 5.24~5.26는 실험체의 파괴 형태와 실험 모습이다.

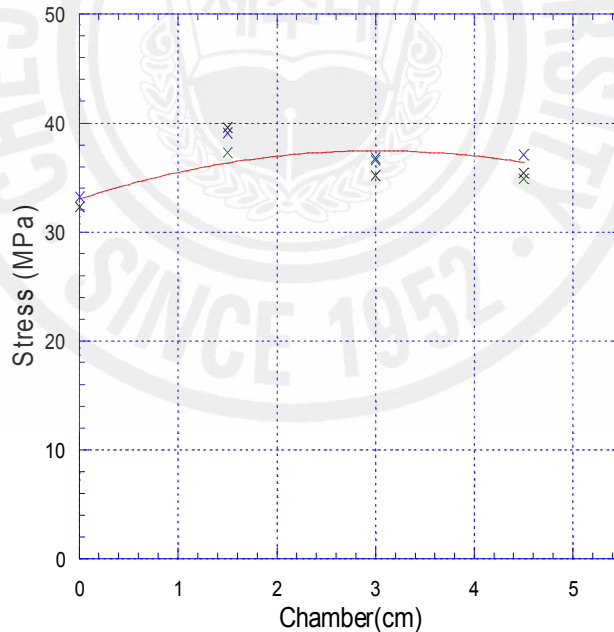


Fig 5.20 Relationship of ultimate stress and corner rounding

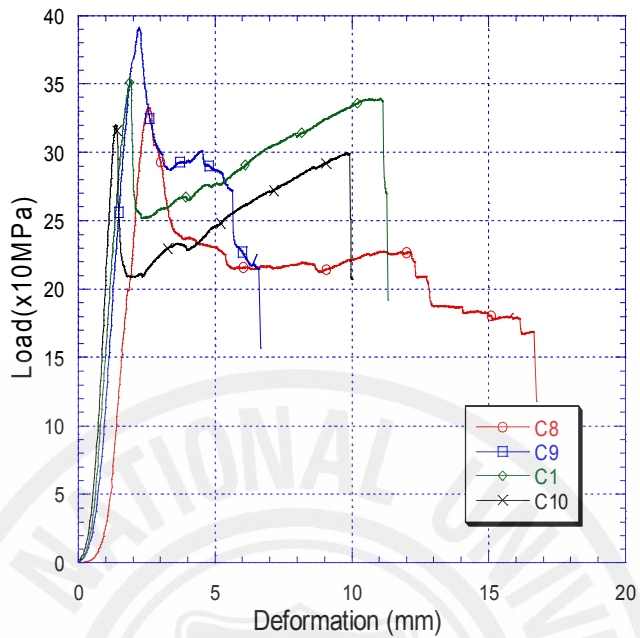


Fig 5.21 Load-deformation curves with different corner rounding

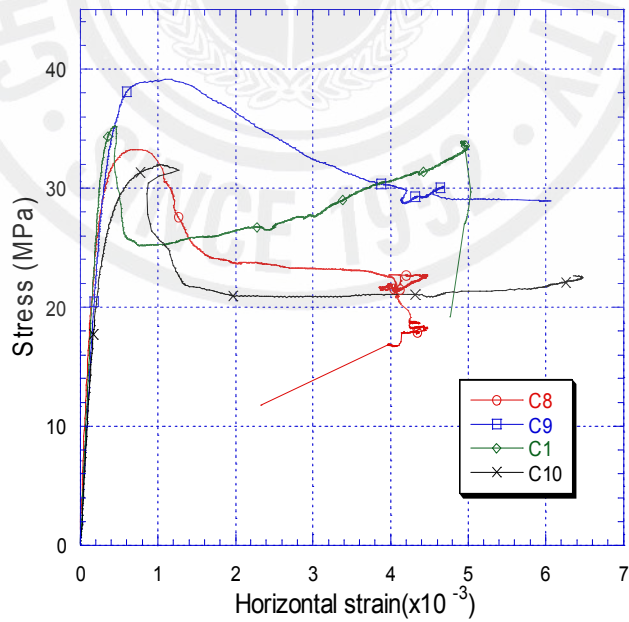


Fig 5.22 Stress- horizontal strain curves with different corner rounding

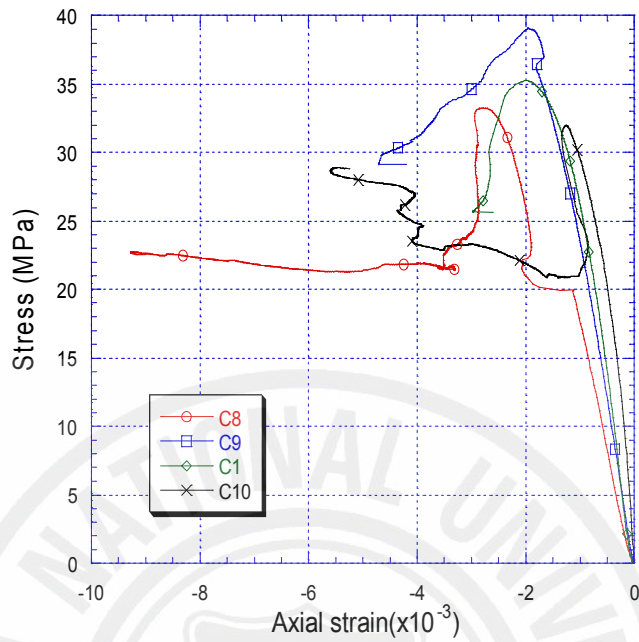


Fig 5.23 Stress- axial strain curves with different corner rounding

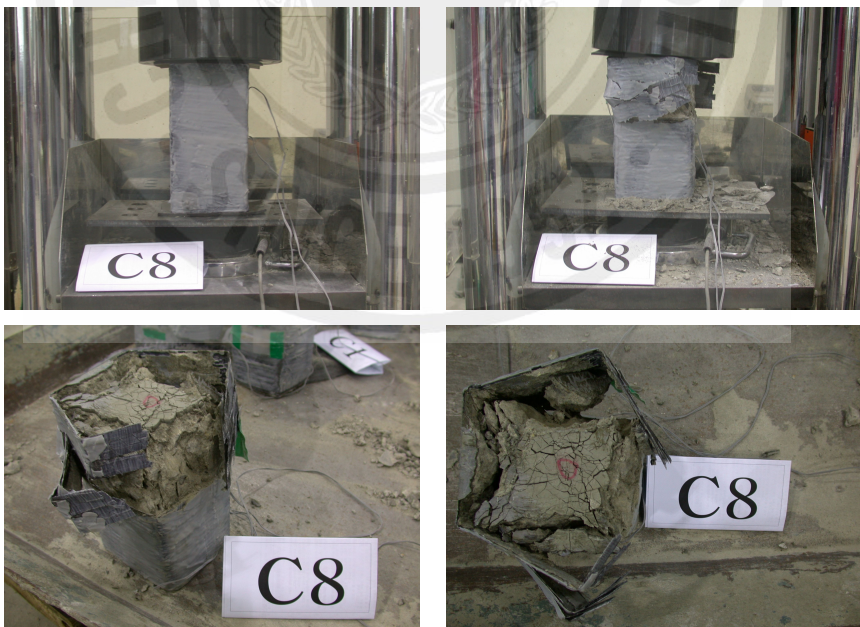


Fig 5.24 Real view of debonding failure (C8)

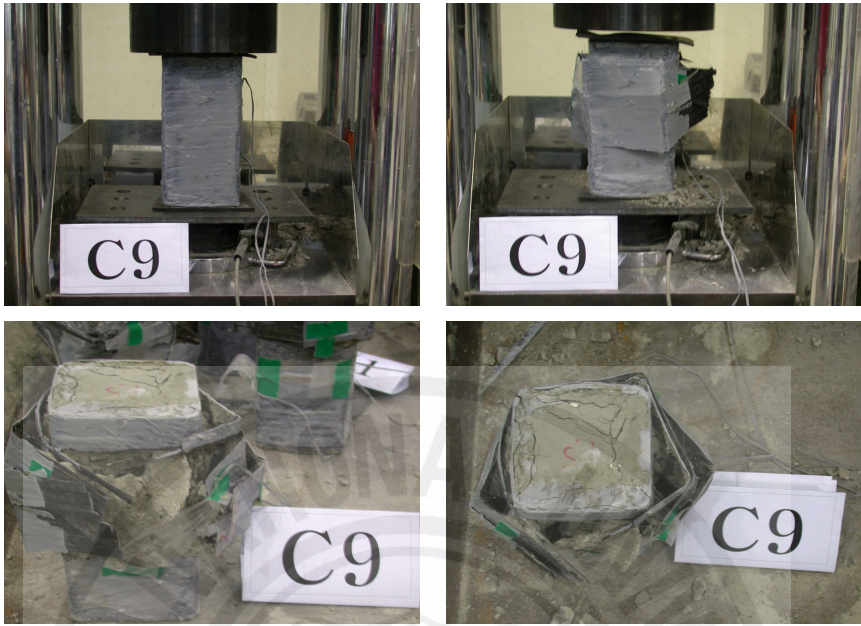


Fig 5.25 Real view of debonding failure (C9)

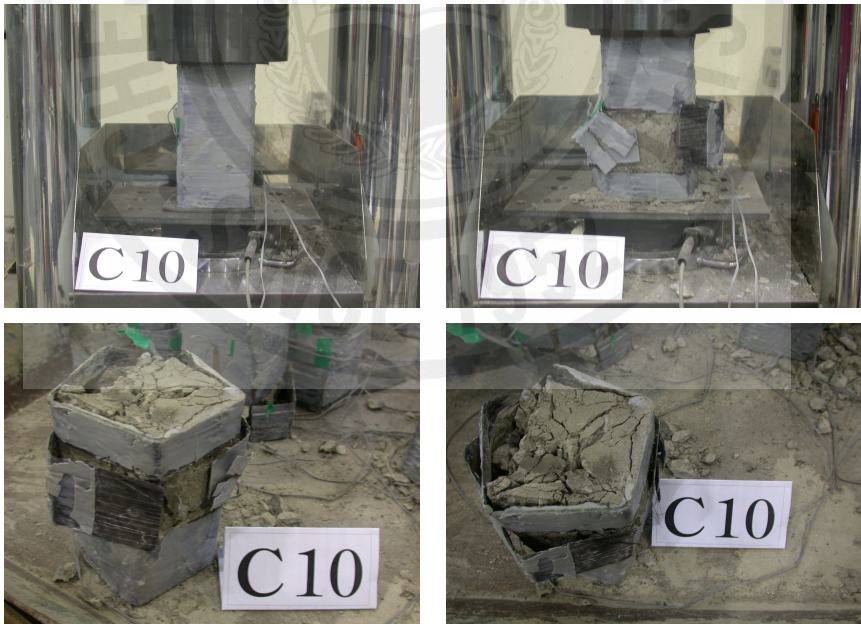


Fig 5.26 Real view of debonding failure (C10)

5) 단면형상의 개량

본 실험의 마지막 변수는 사각형 실험체를 원형 실험체로 단면 보강 했을 경우이다. 이때의 내력증가와 실험체의 거동을 파악하였다. 이 실험을 위하여 C1 실험체와 C11 실험체를 비교하였다. Fig 5.27은 실험체의 응력-변형량의 관계 그래프이다. 이 그래프에서 단면을 원형으로 보강한 C11 실험체의 경우 거동이 FRP Sheet로 보강한 원형 실험체의 거동과 유사한 연성 부분이 없이 바로 파괴가 일어나는 취성적인 파괴형태를 보이고 있다. 그리고 내력은 약 79%정도 더 높은 하중에서 파괴되는 것을 확인 할 수 있다. 이 두 시험체의 파괴거동을 살펴보다라도 확연히 차이를 보이고 있다. 이는 탄성범위 내에서는 두 시험체 모두 거동은 비슷하나 내부 콘크리트가 파괴되는 시점부터 서로 다른 거동은 보이고 있다. 원형인 경우는 내부 콘크리트가 파괴되는 시점부터 FRP Sheet가 콘크리트를 효과적으로 구속하여 압축하중에 저항력이 높은 것으로 판단된다. 반면 사각 시험체에서는 내부 콘크리트가 균열이 일어난 후 약간의 하중 감소가 이뤄지면서 시험체가 파괴되기까지 원형의 시험체보다 큰 변형을 보이면서 연성적인 파괴형태를 보이고 있다.

보강효과를 보았을 때 사각형보다 원형의 시험체에서 FRP Sheet가 콘크리트의 횡구속효과가 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 변형량에 있어서 원형의 시험체에서는 최대압축하중에서 갑작스런 파괴가 이뤄지는 반면, 사각형의 시험체는 1차적으로 내부콘크리트가 먼저 균열한 이후에도 변형이 크며, 균열이 진행되어 파괴에 이르기까지 경과시간 또한 원형보다 2배 이상 걸리는 것으로 이번 실험을 통해 확인할 수 있었다. Fig 5.28은 실험체의 응력-가로 변형률 곡선 그래프이다. 이 그래프에서 단면 보강한 C11 실험체의 변형률도 원형 시험체와 비슷한 곡선모양을 이루다 갑자기 파괴가 일어나는 것을 볼 수 있다. 그리고 C1 실험체보다 더 높은 응력을 견디는 것을 확인 할 수 있다. Fig 5.29는 응력-세로 변형률 곡선 그래프이다. 이 그래프에서도 가로 변형률 곡선 그래프와 마찬가지로 단면 보강한 C11 실험체는 곡선을 이루면서 원형 실험체와 비슷한 거동을 하고 더 높은 응력에서 파괴가 일어나는 것을 볼 수 있다.

아래 Fig 5.30의 사진은 실험체의 실험 사진이다.

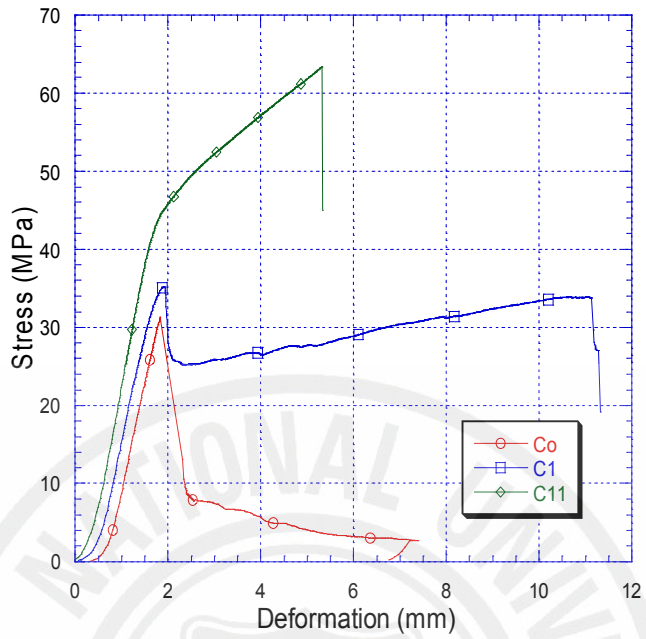


Fig 5.27 Stress-deformation curves with different section

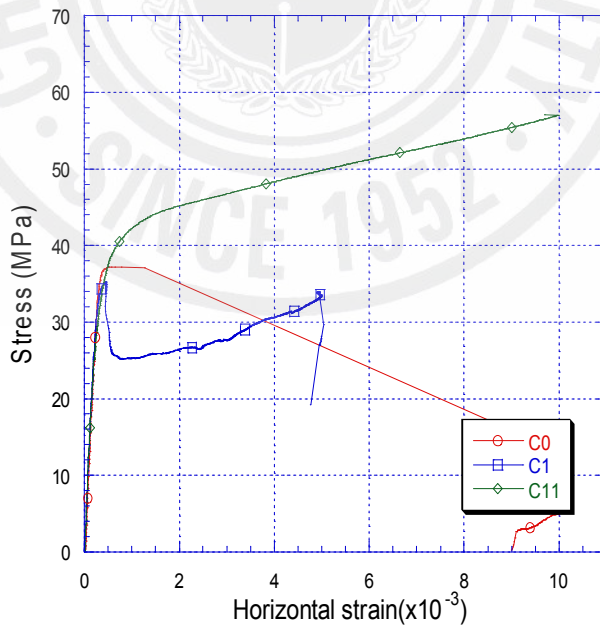


Fig 5.28 Stress- horizontal strain curves with different section

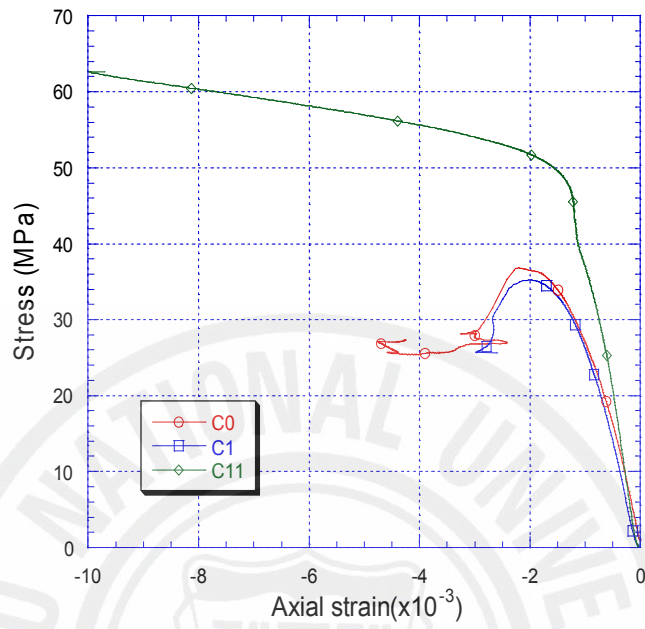


Fig 5.29 Stress- axial strain curves with different section

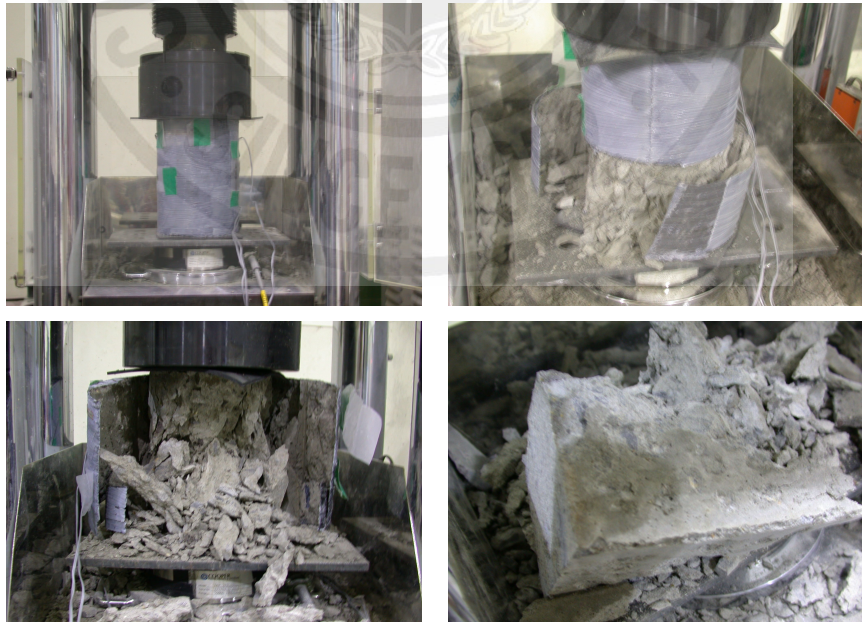


Fig 5.30 Real view of debonding failure (C11)

VI. 결 론

CFRP Sheet를 이용하여 보강한 콘크리트 실험체의 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. CFRP sheet로 보강된 정사각형 콘크리트 기둥 시험체는 무보강 시험체보다 약 30% (1겹) ~ 96% (3겹) 정도의 내력 보강 효과를 나타낸다.
2. 보강된 직사각형 시험체의 파괴 거동은 모서리 부분의 콘크리트 균열 이후 큰 내부 변형과 함께 최종 파괴되는 연성파괴 형태를 나타내었다.
3. CFRP sheet로 보강된 시험체서 보강량이 증가할수록 내력 증진 효과를 나타내었고, 연성도 함께 증가 되었다.
4. 사각형 단면 크기가 증가할수록 구속효과가 감소되어 보강효과가 감소되었다.
5. 본 실험에서는 모따기 길이 증가에 의해 보강 효과가 증가되나 일정 정도 ($R=3.0\text{cm}$) 이상의 모따기 경우 보강효과에 대한 영향이 없었다.
6. 사각형 단면을 원형으로 개량한 경우 약 75%의 개량효과를 나타내었고 파괴형태는 연성 파괴에서 취성파괴로 변화되었다.
7. CFRP Sheet로 보강한 시험체의 보강효과를 증대시키기 위해서는 정사각형 단면인 경우에는 원형단면으로, 직사각형 단면인 경우에는 타원형으로 단면 개량을 실시하는 것이 더 높은 내력 증진의 효과를 볼 수 있다.

VII. 참고문헌

- 건설교통부 제정, 1996, “콘크리트 표준시방서”
- 신성우 등. 1998, “탄소섬유쉬트 보강공법에 사용되는 Epoxy 수지의 특성 및 국내외 동향”, 구조물진단학회지, 제 2권, pp.24~36.
- 신영수, 홍기섭, 홍영균, 최완철. 1995. 10, “탄소섬유쉬트로 횡 보강된 콘크리트의 강도 특성”, 대한건축학회 논문집, 제 11권 10호(통권 84호), pp.323~328.
- 송병표, 한만엽, 황희승, 홍영균. 1997, “보수, 보강재료의 공법개발연구”, 한국콘크리트 학회 논문집 제 8권.
- 이영호. 2003.01, “탄소섬유시트로 횡구속된 콘크리트의 구조효과”, 건설기술정보.
- 이한승. 1998.11, “탄소섬유시트의 재료 역학적 특성에 관한 연구”
- 장정수, 조성찬, 주수석. 2001, “탄소섬유시트로 보강된 철근 콘크리트 기둥의 강도 특성에 관한 연구”, 한국 구조물 진단학회 논문집, 제 17권 9호, pp 57~63.
- 최완철 등. 1995, “철근 콘크리트 보수 · 보강재료 및 공법” 콘크리트 학회지 제 7권 pp. 4~13,
1996. 05, “철근, 강판 및 CFRP를 적용한 RC보의 보강효과 비교 · 연구” 한국콘크리트학회 논문집 제 8권 1호.
- Gere · Timoshenko, 1999, 「재료역학」. 김문생, 이종원, 황충렬 공역, 서울: 半島出版社.
- Amir. Mirmiran, Mohsen, Shahaway. 1997. 05, “Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites”, Journal of structural engineering, pp. 583~590.
- Antoine Naaman, Sang Yeol Park, Maria del Mar Lopez, Paul Stankiewicz. 1997. 08. 21, “Glued-on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Sheets for Repair and Rehabilitation”, Report No. UMCEE 9-12.
- Antoine Naaman, Sang Yeol Park, Maria del Mar Lopez. 1998. 08. 24, “Flexural Behavior of RC Beams Strengthened using CFRP Sheet”. Report No.

UMCEE 98-21.

- Ballinger, C., Maeda, T. and Hoshijima, T.(1993) "Strengthening of reinforced concrete chimneys, columns and beams with carbon fiber reinforced plastics", Proceeding of the International Symposium on Fiber-Reinforced Plastics Reinforcements for concrete Structures, ACI SP 138, pp. 243~248
- Chaallal, O. and Shahawy, M. (2000) " performance of fiber-reinforced polymer-wrapped reinforced concrete column under combined axial flexural loading", ACI Structural Journal, Vol. 97, No. 4, pp. 659~668.
- Lam, L. and Teng, J. G. (2001a) "Strength models for FRP-confined concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, submitted.
- Lam, L. and Teng, J. G. (2001b) "Stress-strain models for FRP-confined concrete", to be published.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R.(1998) " Theoretical stress-strain model for confined concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 1084~1826.
- Nanni, A., and Bradford, N. M., 1995, "FRP Jacketed Concrete under Uniaxial Compression", Construction and Building Materials, Vol. 9, No. 2, pp.115~124.
- Wong, P. M. H., Davies, J. M., and Wang, Y C., 2004, "An Experimental and Numerical Study of the Behavior of Glass Fiber Reinforced Plastics(GFRP) Short Columns at Elevated Temperatures", Composite Structures, Vol. 63, pp.33~43.
- Xiao, Y. and Wu, H.(2000) " Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 12, No. 2, pp. 139~149
1995. 07, "Innovative Design of FRP Combined with Concrete : Short-Term Behavior", Journal of Structural Engineering, ASCE, V.121, No. 7.

감사의 글

이 논문이 완성되기까지 바쁘신 일정 속에서도 여러 차례 검토하고 학문에 대한 많은 지도와 격려를 해주신 박상렬 교수님께 진심으로 감사드립니다.

아울러, 세심하게 검토하고 지적해주신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 남정만 교수님, 이병걸 교수님, 김상진 교수님께도 감사드립니다.

또 대학원 생활을 시작할 수 있게 동기부여를 하고 끝마칠 수 있도록 조언을 해 준 산업정보대 강수웅 교수님, 강용식 교수님께도 감사드립니다.

또한, 본 논문 완성에 많은 시간과 노력을 기울여준 철근, 콘크리트구조 연구실의 김창훈, 양철영, 홍성룡, 김경남, 문경태, 홍성협 군에게도 고마움을 전합니다.

이 논문과 오늘의 저는 가족들의 희생과 성원으로 이루어졌습니다. 특히, 학생이 된 남편을 위하여 오로지 희생으로서 오늘까지 오게 해준 사랑하는 아내 경미와 열심히 공부하며 최선을 다하는 수림, 동하, 수현에게 사랑을 전하며 결실의 기쁨을 같이 하고자 합니다.

끝으로 성원하여 주신 모든 분들에게 다시 한번 감사드리며 앞으로도 변함없는 관심과 지도를 부탁드립니다.

2006년 12월