



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 Sheet 감싸기로 구속된
원형 콘크리트 기둥의 보강효과에
관한 연구



濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學專攻

金文瑄

2006

碩士學位論文

CFRP Sheet 감싸기로 구속된
원형 콘크리트 기둥의 보강효과에
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

土木工學專攻

金 文 瑄

2 0 0 6

CFRP Sheet 감싸기로 구속된 원형 콘크리트 기둥의 보강효과에 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

金 文 瑄

金文瑄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
1. 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적	2
1.3 연구내용	4
1.4 논문구성	5
2. FRP 보강에 대한 기존 이론 고찰	6
2.1 기존 연구 동향	6
2.1.1 Kent-Park의 연구	6
2.1.2 Mander et al. 의 연구	7
2.2 FRP로 보강된 기둥의 거동 특성	9
2.3 FRP로 구속된 콘크리트의 압축강도	12
2.3.1 일반	12
2.3.2 강도모델의 평가	12
2.3.3 Lam and Teng의 모델	15
3. FRP 재료에 대한 기존 연구	17
3.1 FRP의 일반사항	17
3.2 FRP의 재료적 특성과 역학적 특성	18
3.3 FRP의 종류와 특징	21
3.3.1 유리섬유(Glass Fiber)	21

3.3.2 탄소섬유(Carbon Fiber)	22
3.3.3 아라미드섬유(Aramid Fibe)	22
3.3.4 하이브리드섬유(Hybride Fibe)	23
3.3.5 격자섬유(NEFMAC)	23
3.4 탄소섬유(Carbon Fiber)의 특성	24
3.4.1 탄소섬유의 개요	24
3.4.2 탄소섬유의 종류 및 제조 공정	25
3.4.3 탄소섬유의 특성	27
4. 기둥보강 공법	29
4.1 기둥 보강 공법의 개요	29
4.2 기둥 보강 공법의 종류와 특성	30
4.2.1 강판접착공법	30
4.3 탄소섬유쉬트보강 공법	33
4.3.1 탄소섬유쉬트보강 공법의 특징	33
4.3.2 탄소섬유쉬트의 보강효과	34
4.3.3 탄소섬유쉬트의 시공절차	34
5. 시험체 제작 및 실험	40
5.1 시험체 제작	40
5.2 실험 변수	41
5.3 사용재료	42
5.3.1 Concrete	43
5.3.2 탄소섬유쉬트(CFRP Sheet)	43
5.3.3 Epoxy	45
5.4 시험체 제작	46
5.4.1 원형 콘크리트 시험체 제작 과정	46
5.4.2 탄소섬유쉬트 접착과정	47

5.5 실험 과정	47
5.5.1 압축시험기	47
5.5.2 실험 Data 수집 과정	48
6. 실험결과 및 분석	50
6.1 시험결과	50
6.2 각 변수별 실험 결과 분석	52
6.2.1 보강정도	52
6.2.2 기둥의 크기	57
6.2.3 형상비	61
6.2.4 겹이음 길이	65
7. 결 론	70
8. 참고문헌	72

List of Tables

Table 2.1 Various strength models for FRP-confined concrete	14
Table 2.2 Statistical performance of Lam and Teng's model	16
Table 3.1 Properties of CFRP, AFRP and GFRP	21
Table 3.2 Comparison of FRP sheets	24
Table 3.3 Characteristics of CFRP	28
Table 3.4 Physical characteristics & application field of CFRP	28
Table 4.1 Steel plate thickness equivalent to 1 carbon fiber sheet folding	29
Table 4.2 Comparison of FRP and steel strengthening method	30
Table 4.3 Comparison of steel-jacket methods	32
Table 4.4 Comparison of strengthening methods for concrete column	36
Table 5.1 Summary of test parameters	42
Table 5.2 Characteristics of concrete	43
Table 5.3 Mechanical properties of CFRP sheet	44
Table 5.4 Properties of epoxy	46
Table 5.5 Specification of compression tester	48
Table 6.1 Summary of test results (averages of 3 specimens)	50
Table 6.2 Test results of all specimens	51

List of Figures

Fig 2.1 Kent-Park's stress-strain model	7
Fig 2.2 Mander <i>et al.</i> 's stress-strain model	8
Fig 2.3 Confining action of FRP composite	9
Fig 2.4 Failure of a FRP-confined circular concrete specimen	10
Fig 2.5 Typical stress-strain curves of FRP-confined circular concrete column specimens	11
Fig 3.1 Types of FRP composites	18
Fig. 3.2 Stress-strain relationship of FRP and steel	20
Fig 5.1 Dimensions of specimen	40
Fig 5.2 Tension test of FRP sheet (by JIS K 7073)	44
Fig 5.3 Epoxy (Sikadur-31) used for test specimen	46
Fig 5.4 Compression tester	48
Fig 5.5 Test setup and instruments	49
Fig 6.1 Relationship of stress and number of FRP sheet	53
Fig 6.2 Load-Axial deformation curves	53
Fig 6.3 Stress-Hoop strain curves	54
Fig 6.4 Stress-Axial strain curves	54
Fig 6.5 Failure mode (T0)	55
Fig 6.6 Failure mode (T1)	55
Fig 6.7 Failure mode (T2)	56

Fig 6.8 Failure mode (T3)	56
Fig 6.9 Relationship of stress and column diameter	58
Fig 6.10 Load-Axial deformation curves	58
Fig 6.11 Stress-Hoop strain curves	59
Fig 6.12 Stress-Axial strain curves	59
Fig 6.13 Failure mode (T4)	60
Fig 6.14 Failure mode (T5)	60
Fig 6.15 Relationship of stress and H/D ratio	62
Fig 6.16 Load-Axial deformation curves	62
Fig 6.17 Stress-Hoop strain curves	63
Fig 6.18 Stress-Axial strain curves	63
Fig 6.19 Failure mode (T6)	64
Fig 6.19 Failure mode (T7)	64
Fig 6.21 Relationship of stress and overlap length	66
Fig 6.22 Load-Axial deformation curves	66
Fig 6.23 Stress-Hoop strain curves	67
Fig 6.24 Stress-Axial strain curves	67
Fig 6.25 Failure mode (T8)	68
Fig 6.26 Failure mode (T9)	68
Fig 6.27 Failure mode (T10)	69

Strengthening Effect of Circular Concrete Column Wrapped with Carbon FRP Sheet

Kim, Moon Kwan

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

Supervised by Professor Park, Sang Yeol

Summary

This study presents the strengthening effect and the applicability of circular concrete column wrapped with carbon FRP sheet. The increase in axial compression capacity comes from the confinement effect of wrapped CFRP sheet. For the experimental research, four parameters including the number of sheet, the size of column specimen, the ratio of height and width, and the overlapping bond length of sheet were chosen to investigate the strengthening effect 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 wrapped and bonded CFRP sheet can greatly

increase axial compression capacity in circular concrete column. The resistance in compression capacity increased by 70% to 200% as the number of bonded CFRP sheet increased from one (1) sheet to three (3) 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 overlapping bond length of the CFRP sheet unless it was longer than 15% of column diameter. All circular columns strengthened with CFRP sheet showed brittle failure at the ultimate state.

From this experimental study, it was suggested that the wrapping and bonding CFRP sheet around circular concrete column is a very useful and effective strengthening method.

1. 서 론

1.1 연구배경

철근콘크리트(Reinforced Concrete, RC)는 콘크리트의 취약점인 휨 및 인장강도를 철근이 보완하고 철근의 취약점인 압축강도와 부식을 콘크리트가 보호하는 우수한 내구성을 갖는 재료로써, 완벽한 시공과 유지관리를 철저히 한다면 수백 년의 내구성능을 가질 수 있는 구조물을 형성 할 수 있어, 지금까지 건축물 및 항만, 댐 등의 구조물에 광범위하게 적용되어져 왔다.

현대 건축물 및 여러 시설의 고층화와 대규모화가 불가피한 추세에서 구조물은 콘크리트의 강도 한계에 의하여 높이가 한정되고 단면이 큰 기둥은 건축계획의 장애물이 되며, 지진 및 충격시 중량에 비례하여 작용하는 관성력에 의해 큰 피해가 발생하게 한다.

또한 콘크리트 구조물은 부재의 중량 때문에 증장비 사용이 필수적이며, 긴 공기가 필요하게 되어 콘크리트의 고강도화가 필연적으로 대두되었다.

이러한 요구로 콘크리트의 고품질화 및 고강도화에 대한 연구가 활발히 진행되어 70~120 MPa의 초고강도콘크리트, 60MPa 이상의 고강도 경량 콘크리트, 고인성(High toughness) 콘크리트 등 고성능·신기능 등의 콘크리트들이 등장하게 되었다.

그러나 철근콘크리트구조는 습식공법으로 시공상의 어려움, 콘크리트의 중성화, 철근의 부식과 하중 조건의 변화, 각종 진동 및 유지관리의 소홀 때문에 구조물의 내력 성능이 감소하게 되어 보강 대책이 절실히 요구된다.

내력 성능이 감소한 구조물의 보강방법으로 1960년대부터 철근콘크리트 구조체와 강관을 에폭시(Epoxy)수지로 접착하는 강관 압착공법, 추가 보 혹은 기둥을 증설하는 공법, 기존 구조물 혹은 손상된 단면을 복구·확대하는 공법이 많이 사용되었다.

그러나 이러한 보강방법은 건축물이나 구조물의 중량이 증대되고, 넓은 작업을 위한 공간 확보가 요구되어지며, 이용공간이 제한되어지는 단점이 있다.

또한 내력이 감소한 구조물을 보강하는 방법 중 가장 많이 사용되는 강판압착보강법의 경우, 운반 및 압착 작업에서 중량으로 인한 작업의 어려움이 있다. 특히 피해가 발생된 구조물에 강판압착을 하였을 경우 모재와 강판의 사이가 충분하게 접촉되었는지 확인이 불가능하며, 오히려 무거운 강판이 모재에 매달려 있는 상태가 되어 구조적으로 불안정 상태를 가져오는 경우도 있다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위한 방법으로 1980년대에 들어와서 미국, 일본 등과 같은 지진의 영향권에 있는 나라에서는 재료 자체가 경량적이고, 보강공사 기간이 짧으며, 재료가 부식이 안 되고, 보강흔적이 거의 없는 복합섬유와 수지를 이용한 구조물의 보강방법이 제시되었다.

최근 우리나라에서도 탄소섬유쉬트(Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheet)를 이용한 보강 효과에 관한 실험연구가 활발하게 진행되고 있으나 대부분 힘을 받는 보부에 편중되어 있는 실정이다.

또한 실제 구조물의 적용에 있어서는 제품 생산회사의 사용설명서를 토대로 일부 적용하고 있어서 탄소섬유쉬트를 사용한 부재의 보강효과에 대한 연구가 보다 적극적으로 이루어 져야 한다.

1.2 연구목적

1990년대 초반까지 철근콘크리트 케이지를 추가하거나 강재 자켓 내에 그라우팅하는 방법이 손상된 철근콘크리트 기둥에 대한 일반적인 보강방법이었다. 철재 자켓을 사용하는 것이 콘크리트 케이지를 사용하는 경우보다 효과적이었는데 이것은 후자가 더 많은 단면과 자중의 증가를 발생시키기 때문이다. 그러나 두 가지 모두 노동집약형이며, 현장에서 적용이 불가능한 경우가 있다. 또한 철재 자켓은 기후에 대한 내구

성이 떨어진다.

최근 몇 년간 FRP 복합재료를 이용한 철근콘크리트 기둥의 보강에 대한 기술이 철재 자켓을 대신하여 폭넓게 사용되고 있다. 가장 일반적인 기둥의 FRP 보강공법은 FRP 쉬트나 띠를 기둥의 외부에 둘러쌈으로써 기둥을 보강하는 것이다.

강재나 FRP 자켓에 의하여 철근콘크리트 기둥의 보강은 콘크리트의 횡방향 구속 에 의하여 축방향 압축강도와 연성이 부가적으로 증가된다는 기존의 가정에 근거하고 있다. FRP로 구속된 콘크리트의 압축강도와 응력-변형률 거동에 대한 많은 연구가 수행되었다. 기존의 연구자들은 FRP로 싸여진 콘크리트의 거동과 강재로 싸여진 콘크리트와의 거동과는 차이가 있음을 나타내고 있다. 따라서 두 기둥의 거동이 상대적으로 유사함에도 불구하고, 강재로 구속된 콘크리트 기둥에 대하여 개발된 설계기준을 FRP로 구속한 기둥에 사용할 수 없다.

구조물의 구조적 성능향상을 위한 보강공사는 구조물의 사용뿐 아니라 나아가 인명과 관련된 매우 중요한 것으로 상세하고 명확한 보강방법 및 보강설계에 따른 보강공사가 필요하다.

구조물의 유지관리 및 사용성과 내구성의 성능향상을 위해 복합재료를 사용한 보강은 매우 활발하게 진행될 것으로 보이며, 이에 대한 규정의 확립 또한 이루어질 것으로 보인다.

본 연구에서는 복합재료의 하나인 탄소섬유쉬트에 의하여 보강된 기둥의 횡구속 효과를 검증하고자 한다.

1.3 연구내용

최근 국내에서 실시되고 있는 탄소섬유쉬트 보강공법은 시공성 및 경제성 면에서 매우 뛰어난 공법으로 주목을 받고 있으나, 그 설계 및 시공에 있어 아직도 매우 불확실한 요소를 내포하고 있기 때문에 이를 해결하기 위하여 재료 및 구조성능에 관한 연구의 필요성이 대두되고 있다.

콘크리트는 취성적인 성질을 가지고 있기 때문에 구조재료로 사용하기 위해서는 소성변형에 의한 에너지 흡수 능력을 충분히 갖게 할 필요가 있으며, 이를 위하여 콘크리트 주변을 탄소섬유쉬트로 횡 보강함으로써 일축 압축강도가 보강재에 의하여 3축 압축으로 거동하여 압축강도의 증진과 소성변형에 의한 에너지 흡수 능력을 지니게 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 압축강도가 24MPa인 콘크리트를 사용한 기둥 시험체에 대해 탄소섬유쉬트 보강을 실시하고, 압축시험기로 실험하여 콘크리트 기둥의 최대내력 및 보강효과를 확인하고자 한다.

실험결과를 바탕으로 기둥보강에 따른 내력 상승 및 거동 특성 등 보강이 거동에 미치는 영향을 분석하고 보강설계를 위한 기초자료로 제공하고자 한다.

1.4 논문구성

본 논문은 총 일곱 개의 장과 부록으로 구성되어 있으며 각 장에 기술되어 있는 내용을 간략하게 소개하면 다음과 같다.

2장에서는 기존의 연구동향을 살펴보고

3장에서는 FRP에 대한 종류와 역학적 성질과 탄소섬유에 대한 설명을 하였다.

4장에서는 기둥의 부착공법에 대하여 비교하여 설명하였다.

5장에서는 시험체의 변수와 시험체를 만드는 과정, 그리고 실험에 사용된 재료의 특성에 대하여 기술하였다.

6장에는 실험데이터를 수집하여 기준 시험체와 비교하고 보강효과를 분석하였다.

7장에서는 결론부분으로 실험을 바탕으로 도출된 결과들을 정리하였다.

2. FRP 보강에 대한 기존 이론 고찰

2.1 기존 연구 동향

2.1.1 Kent-Park의 연구

1971년 Dulley Charles Kent 와 Robert Park는 Roy, Sozen, Felipa, Soliman, Yu 등의 실험자료 및 이론을 이용하여 Fig 2.1과 같은 콘크리트 응력-변형률 관계를 제안하였다.

제안된 곡선에 나타났듯이 Kent와 Park는 구속콘크리트의 최대강도와 비구속 콘크리트의 최대강도를 공시체의 최대강도인 f'_c 와 같다고 하였으며, 이때의 변형률도 콘크리트의 구속여부에 관계없이 0.002라 하였다.

또한 Fig 2.1에서와 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.

$$f_{cc} = Kf'_c \quad (\text{Eq 2.1})$$

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f'_c}$$

f_{cc} : 횡구속된 콘크리트의 압축강도(MPa)

f'_c : 공시체의 최대 압축강도(MPa)

ρ_s : 띠철근의 체적비

f_{yh} : 띠철근의 항복강도(MPa)

위 식에서 구속계수 K는 콘크리트 강도에 대한 횡보강철근의 역학적인 비에 비례하여 증가하는 것으로 정의하고 있다.

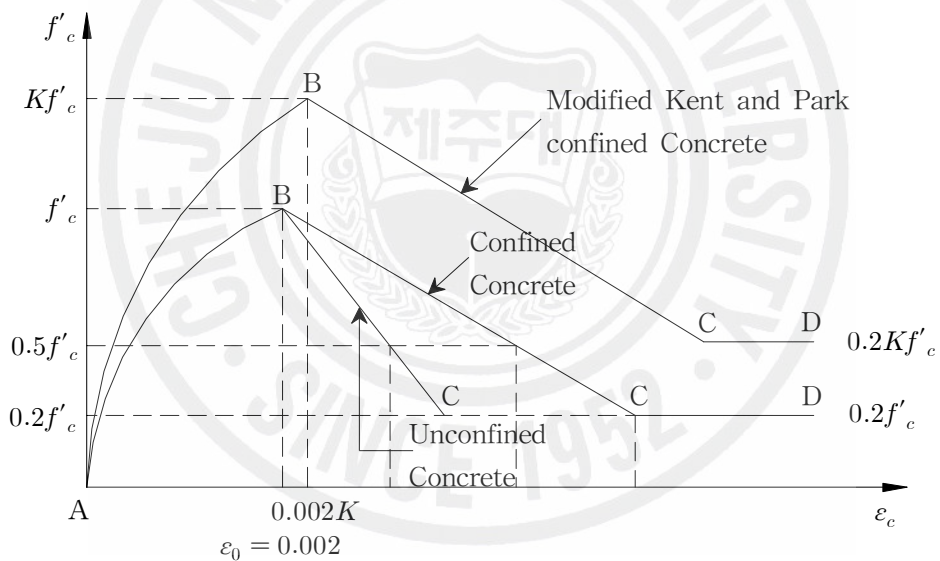


Fig 2.1 Kent-Park's stress-strain model

2.1.2 Mander et al. 의 연구

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

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

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

f_{cc} : 횡구속된 콘크리트의 압축강도(MPa)

f_{co} : 비구속 콘크리트의 압축강도(MPa)

f_{yh} : 띠철근의 항복강도(MPa)

A_{sh} : 띠철근 단면적(mm²)

d_h : 단면치수(mm)

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.

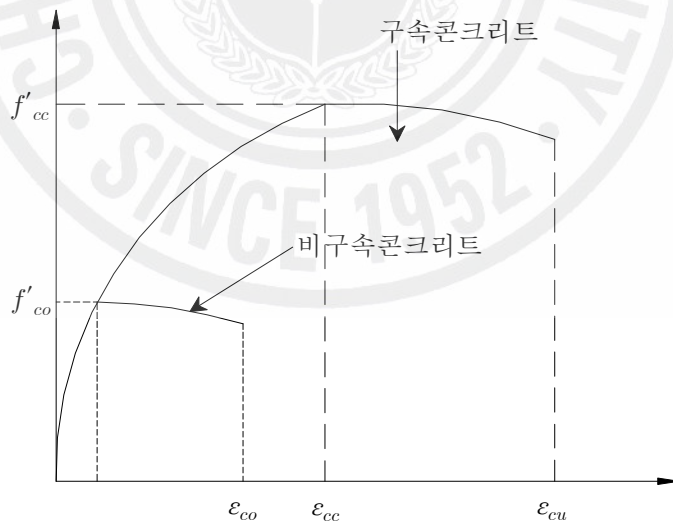


Fig 2.2 Mander *et al.*'s stress-strain model

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 2.3에 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.

$$f_l = \frac{2f_{frp} \cdot t_{frp}}{d} = \frac{\rho_{frp} \cdot f_{frp}}{2} \quad (\text{Eq 2.3})$$

여기서 f_l 은 횡방향 구속력이며, f_{frp} 는 기둥을 둘러싼 때 보강재 방향의 FRP 인장강도이다. 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.

$$\rho_{frp} = \frac{\pi \cdot d \cdot t_{frp}}{\pi \cdot d^2 / 4} = \frac{4t_{frp}}{d} \quad (\text{Eq 2.4})$$

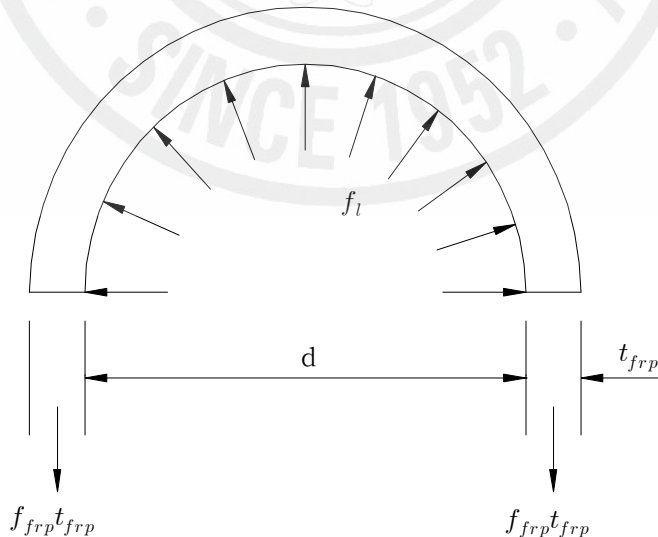


Fig 2.3 Confining action of FRP composite

Fig 2.3에 나타난 것처럼 FRP가 띠(hoop)보강재 방향으로 인장을 받게 되면, 보강재는 인장강도에 도달하게 되고 점차 파괴되어 Fig 2.4와 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 2.4 Failure of a FRP-confined circular concrete specimen

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 Fig 2.5와 같이 비구속 콘크리트 강도의 응력수준 부근의 전이구간(Transition zone)에서 연화(softening)이 발생하는 전형적인 2중 선형(bilinear) 형태는 갖는 것으로 나타내게 된다.(Samaan et al. 1998,

Toutanji 1999) 첫번째 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 변형율은 동시에 도달하게 된다.(Mirmiran et al. 1998a)

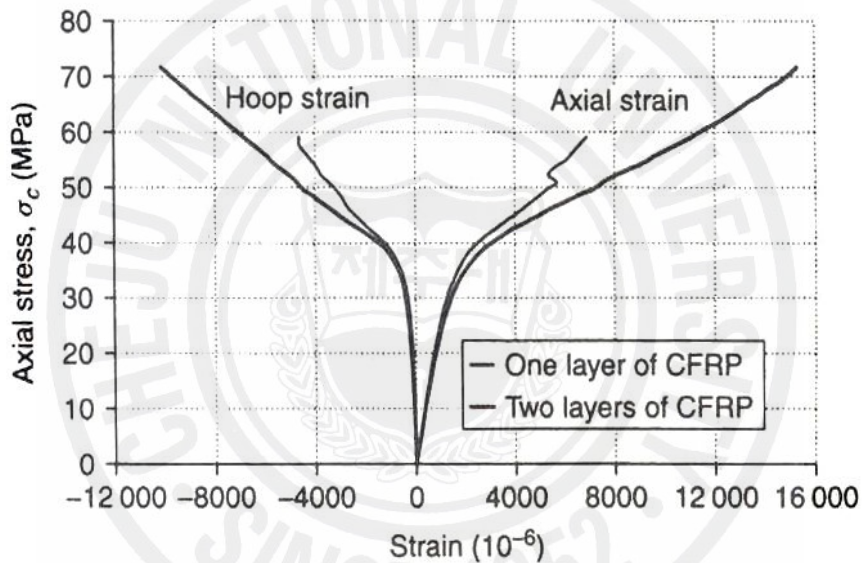


Fig 2.5 Typical stress-strain curves of FRP-confined circular concrete column specimens

그러나 원형기둥에서 FRP 보강량이 아주 작은 경우에는 콘크리트 기둥의 구속효과가 매우 낮기 때문에 위에서 설명한 2중 선형의 응력-변형률 관계를 나타내지 않을 것이다.

2.3 FRP로 구속된 콘크리트의 압축강도

2.3.1 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).

2.3.2 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).

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (\text{Eq 2.5})$$

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 제안 되었으며, 효

과적으로 구속된 콘크리트의 경우 k_1 은 4.1이다. Richard et al.(1929)의 후속 연구에서는 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 Eq 2.5의 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 나타낸 것처럼 f_l/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 나타낸 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.

$$f'_{cc} = f'_{cc2:1} [0.0288(L/d)^2 - 0.263(L/d) + 1.418] \quad (\text{Eq 2.6})$$

Eq 2.5에 대하여 Table 2.1에 표현한 것과는 별개로 Karbhari와 Gao(1997)은 다른 제안식을 아래와 같이 제시하고 있다.

Table 2.1 Various strength models for FRP-confined concrete

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	$2.1 \left(\frac{f_l}{f'_{co}}\right)^{-0.13}$	$6.0 f_l^{-0.3}$	2.98	$2.2 \left(\frac{f_l}{f'_{co}}\right)^{-0.16}$	$3.5 \left(\frac{f_l}{f'_{co}}\right)^{-0.15}$

$$f'_{cc} = f'_{co} + 3.1 f'_{co} v_c \frac{2t_{frp}}{d} \frac{E_{frp}}{E_c} + \frac{2f_{frp}t_{frp}}{d} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

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 Model 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)

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

FRP 띠(strap)를 일정한 간격에 맞춰 기둥을 부분적으로 감싼 경우, Saadatmanesh et al.(1994)는 Eq 2.8의 f_l 을 f'_l 으로 대체하여 제안하였다.

$$f'_l = k_g f_l \quad (\text{Eq. 2.9})$$

여기서 f_l 은 추후에 가해지는 유효 외방향구속압이고 k_g 는 간격계수로써 아래와 같이 계산된다.

$$k_g = \frac{(1 - s_{frp} / (2d))^2}{1 - \rho_{sc}} \quad (\text{Eq 2.10})$$

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

FRP가 파단되는 극한 상태를 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.

2.3.3 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 Eq 2.5의 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 축압축강도 계산을 위한 다음 식을 설계시 사용할 것을 제안하였다.

Table 2.2 Statistical performance of Lam and Teng's model

Model	Test-to-predicted ratio		
	Average	Standard deviation	Coefficient of variation(%)
Lam and Teng(2001)a	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

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (\text{Eq 2.11})$$

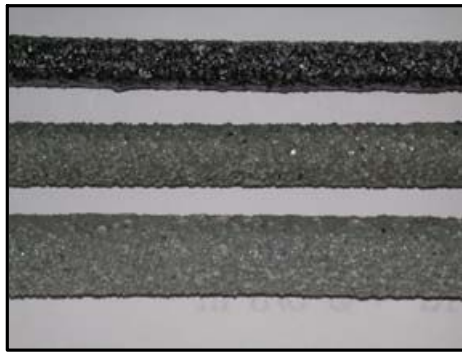
이식은 약간 보수적인 결과를 나타내며, 위에서 언급한 다른 식들에 비하여 훨씬 단순한 형태를 갖는다. 이식은 Set1의 실험결과를 사용하여 유도되었기 때문에 Lam과 Teng(2001a)은 설계시 락철근 방향의 FRP의 인장강도를 ASTM D3039/D3039M-95a(1995)에 의한 flat-coupon시험에 의한 값으로 사용하길 권장하고 있다. 또한 Lam과 Teng은 ring test에 의한 시험결과를 의미하는 Set2에 대한 Eq 2.11의 해석 결과 $f_l/f'_{co} < 1$ 일 경우에는 충분히 보수적인 것으로 나타났기 때문에 FRP 판을 제작하는데 있어 연구자들이 가장 일반적으로 사용하는 방법인 ring-splitting test(e.g. ASTM D2290-92 1992)로부터 산출된 FRP의 인장강도를 사용하여 Eq 2.11으로 압축강도를 산정할 수 있다고 허용하고 있다.

3. FRP 재료에 대한 기존 연구

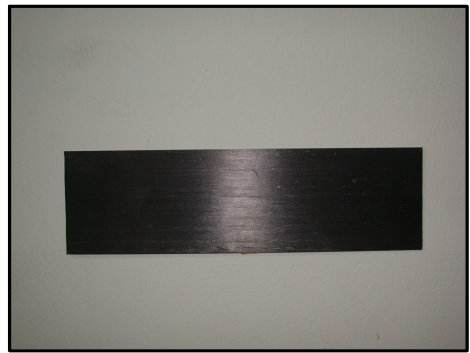
3.1 FRP의 일반사항

Fiber Reinforced Polymer(FRP)는 일반적으로 강성이 큰 섬유로 보강된 고분자 중합체(polimer matrix)로 정의된다. FRP는 glass, aramid, carbon등과 같은 높은 일축 인장강도를 가지는 섬유(fiber)들과 이들이 일체가 되어 거동하도록 하는 폴리머를 기지(matrix)재료로 하여 구성된다. 건설공사에 사용되는 FRP는 섬유체적비율을 65% 까지 사용하고 있다.

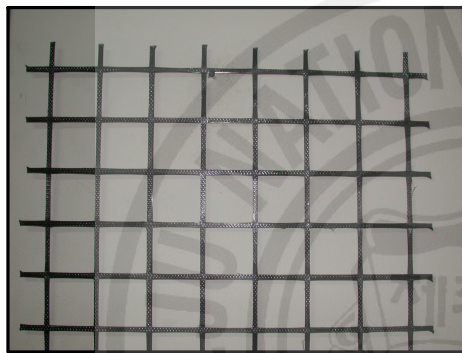
FRP는 사용된 섬유와 기지(matrix)에 따라 역학적 특성이 달라지게 되며, 그 기학적 형상도 다양하다. 이는 일반적인 강재와는 달리 어떤 표준을 가지고 제작되는 것이 아니라 세계 여러 제조사들이 각각 그들만의 FRP를 개발, 발전 시켜왔기 때문이다. FRP는 주로 사용된 섬유에 따라 분류된다. 즉 크게 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer), GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer), AFRP(Aramid Fiber Reinforced Polymer), 그리고 HFRP(Hybride Fiber Reinforced Polymer)로 나뉘어 진다. 그리고 FRP는 Tendon(strand), 봉(re-bar), 케이블(cable), 격자(grid), 쉬트(sheet), 판(plate)등의 형태로 생산되어 지고 있다. Fig 3.1은 현재 많이 쓰이고 있는 FRP의 형태별 사진을 나타내고 있다.



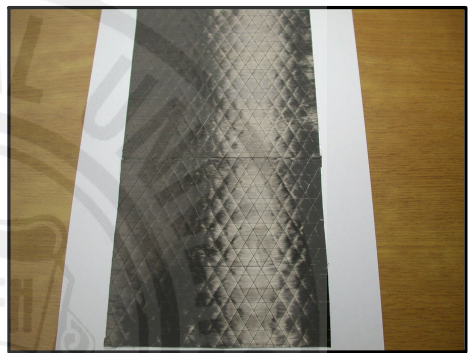
a) Bar type



b) Plate type



c) Grid type



d) Sheet type

Fig 3.1 Types of FRP composites

3.2 FRP의 재료적 특성과 역학적 특성

FRP는 사용된 섬유 종류와 형태별로 다른 특성을 갖고 있기는 하지만, 여기서는 FRP가 가지는 일반적인 특성을 다음과 같이 정리하였다.

먼저, FRP가 가지는 장점은 다음과 같다.

- 1) FRP는 우수한 비부식성을 가지고 있다. 현재 FRP가 주목받고 있는 가장 큰 장점이다. 현재 해양구조물의 염화물의 침투, 확산에 의한 철근의 부식, 콘크리트 교량상판 등의 강수, 습기, 제설제등의 사용으로 인한 철근의 부식 등은 철근의 대체재로서 FRP의 사용성 연구를 촉진시키고 있다.
- 2) FRP는 매우 높은 인장강도를 가지고 있다. FRP re-bar를 이용한 주인장 배근(FRP re-bar), 외부 부착 공법에 따른 보수·보강(gird, sheet, plate), 외부 Tendon에 의한 보강공법(strand, cable) 등으로 휨 내력을 증진 시킬 수 있는 탁월한 효과를 가질 수 있다.
- 3) FRP는 비자성체(non-magnetic)이면서 비전도체(non-conductive)이다. 고속 철도, 자기부상열차를 위한 구조물과 같이 전자기장의 영향을 받게 되는 곳에서의 건설재료로서 적용시킬 수 있다. 그 외의 MRI와 같은 특별한 설비가 들어가는 병원, 레이더용 구조물 같은 곳에 적용시킬 수 있다.
- 4) FRP는 경량성이다. 같은 강도를 지닌 강재의 1/4~1/5 정도의 중량을 가진다. 구조물에 자중을 감소시킬 수 있으며, 시공자들의 편의를 도모하여 공사기간을 단축시킬 수 있으며, 직·간접적으로 전체적인 건설비용의 절감을 가져올 수 있다.

다음, FRP가 가지는 단점은 다음과 같다.

- 1) FRP는 소성 거동을 하지 않는다. Fig. 3.2에서 보는 바와 같이 철근과는 달리 재료가 파단 될 때까지 선형-탄성거동을 한다. 이로 인해 FRP가 사용된 구조물은 연성이 매우 낮게 된다. 또, 구조물의 파단 시 급격한 취성파괴로 인해 사용자에게 상당한 위험을 줄 수 있다. FRP의 많은 장점에도 불구하고 FRP가 널리 사용되지 못하는 이유가 바로 낮은 연성을 가지고 있다는 점이다. Fig. 3.2는 철근과 FRP 재료의 응력-변형률선도를 나타낸 것이다.

- 2) FRP는 높은 인장강도에 비해 낮은 전단강도를 갖는다. 섬유방향으로는 강재보다 훨씬 높은 인장강도를 가지고 있으나 섬유 직각방향으로는 비교적 낮은 전단강도를 갖는다.
- 3) FRP는 높은 인장응력 하에서의 응력파손(stress-rupture), 강도저하(strength deterioration)와 같은 현상이 생긴다.
- 4) FRP는 고가이다. FRP의 비용으로 인해 시공비가 상승하게 된다. 현재 기존의 철근비용이 많은 상승에도 불구하고 FRP는 수요에 대한 불확실한 전망, 생산기술의 부족 등으로 인해 가격이 상당히 비싼 편이다. 하지만, 이 문제는 최근 구조물의 보수·보강에의 성공적인 적용, FRP 재료의 설계개념의 정립으로 인해 건설시장에서의 많은 수요로 차차 해소될 수 있는 부분이다.

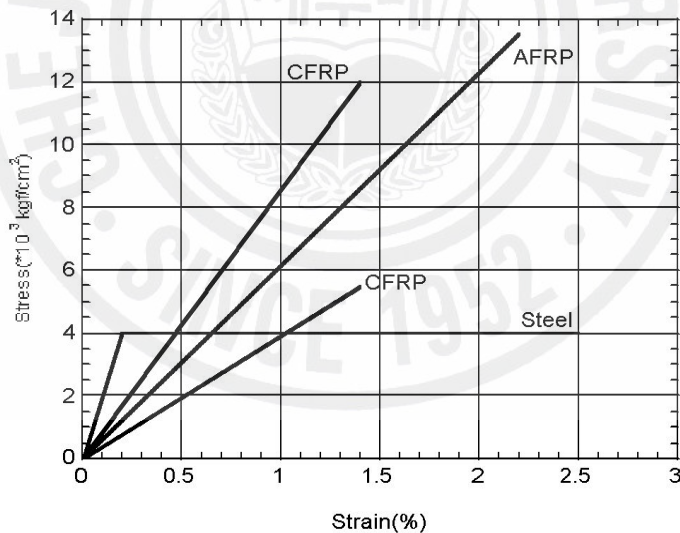


Fig. 3.2 Stress-strain relationship of FRP and steel

Table 3.1 Properties of CFRP, AFRP and GFRP

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 각 FRP와 강재의 응력-변형률 선도를 보여주고 있는 그림으로 FRP는 탄성재료로 항복점이 일정하게 나타나지 않으며, 어느 순간에 바로 파괴되는 취성재료의 특성을 보여주고 있는 그림이고, Table 3.1은 각 섬유별 역학적 특성을 보여주고 있다.

위와 같이 FRP의 재료·역학적 특성을 살펴보았다.

3.3 FRP의 종류와 특징

3.3.1 유리섬유(Glass Fiber)

유리섬유는 유리의 원료를 녹인 유리액을 압축공기로 비산(飛散)시켜 가는 섬유모양으로 만든 것이다. 유리섬유의 최고 안전 사용온도는 30°C 정도, 비중은 0.1이하,

인장강도는 20 MPa 정도이다. 탄성이 작고 인장강도, 전기절연성, 내화성, 단열성, 내식성, 내수성 등이 우수하며 경량이다. 그러나 굴곡에 약한 점과 집속(集束)된 것은 모세관 현상에 의하여 흡수성이 있다는 결점이 있다. 유리섬유는 플라스틱 제품의 보강용으로 쓰이고, 단열재, 방음재, 보온재, 전기절연재, 축전지용 격벽재 등에 사용된다.

3.3.2 탄소섬유(Carbon Fiber)

탄소섬유는 1959년에 미국 UCC회사가 처음 개발하였고, 그 후 급속한 발전을 하여 근래에는 우주·항공 재료로써 많이 이용되고 있다. 탄소섬유는 폴리아크릴니트랄(PAN)계, 피치계, 레이온계로 분류된다.

PAN계의 탄소섬유는 우주·항공 분야에서 70%이상 이용되고 있으며, 스포츠, 레저 분야에서도 많이 이용되고 있다. 피치계는 팬계에 비하여 값이 싸고, 패킹계, 단열제 등의 용도로 이용되며 콘크리트 보강 재료로도 이용된다. 탄소섬유의 특징은 강성 및 피로강도가 높으며 이러한 탄소섬유보강 콘크리트는 역학적 성질이 우수할 뿐만 아니라 열에도 강하고, 부식하지 않는다는 장점을 가지고 있기 때문에 건설재료로 이용이 증가할 것으로 예상된다.

3.3.3 아라미드섬유(Aramid Fiber)

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

케블라 섬유는 고강도 및 탄성계수 외에 화학적, 열적으로 아주 안정되어있다. 또한 케블라 섬유는 탄소섬유와 유리섬유처럼 쉽게 부러지지 않으므로 일반 방직기로

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 긴장재로써 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.

3.3.4 하이브리드섬유(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 혼입 하여 강도가 낮은 섬유가 먼저 파단 하고 연차적으로 그 다음 섬유가 파단 되면서 철근에서의 소성변형과 유사한 거동을 하도록 유도한 형태의 섬유이다.

3.3.5 격자섬유(NEFMAC)

네프맥 재료의 특징을 살펴보면 우선 네프맥은 다른 섬유제품과 마찬가지로 FRP 복합섬유로 제조되어 FRP섬유가 지니는 고강도, 비부식성, 경량성 등의 특징을 지니고 있다. 아울러 내알칼리성, 내산성, 내약품성 등에서 우수한 비닐에스터수지를 함유하여 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 선팅창 계수는 $9\sim 10\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 콘크리트의 선팅창 계수 $10\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 와 거의 비슷한 값을 보이고 있어 콘크리트와 일체거동을 가능하게 한다.

Table 3.2는 각 섬유별 성질들을 비교하여 나타내었다. 어떤것이 좋고 나쁜것이 아니라 각 특징을 잘 살펴서 사용하여야 한다.

Table 3.2 Comparison of FRP sheets

성질 \ 쉬트	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

3.4 탄소섬유(Carbon Fiber)의 특성

3.4.1 탄소섬유의 개요

탄소섬유(Carbon Fiber) PAN(Polyacrylonitrile) 또는 석유정제 부산물인 Pitch를 약 $1000\sim 2500^{\circ}\text{C}$ 의 고온에서 탄화시킨 고순도 탄소결정의 섬유를 지칭하며 섬유를 구성하는 탄소원자의 결정구조 때문에 매우 강한 강도를 가지게 된다. 탄소체의 대표적인 탄소섬유는 고강도, 고탄성, 소재로써 경량이면서도 고강도의 구조재, 특히 가공성이 높은 첨단 복합재료의 강화재로서, 항공기의 구조재, 우주 왕복선 및 우주 구조물등 제조의 핵심소재로 이용되고 있다.

탄소섬유가 처음 알려진 것은 약 100년전 T.A 에디슨이 대나무 섬유를 탄화시켜 전구의 필라멘트로 사용했을 때이다. 공업적으로 제조되기 시작한 것은 1959년 셀룰로오스계 섬유를 기초로 하여 생산한 것이며 한국에서는 1990년 태광산업이 처음으로 생산에 성공하였다.

원료로는 셀룰로오스, 아크릴 섬유, 비닐론, 피치(Pitch)등이 쓰이는데, 원료에 따라 또는 처리 온도에 따라 분자배열과 결정의 변화가 생긴다. 일반적으로 탄소의 육각 고리가 연이어 층상격자를 형성한 구조이며, 금속광택이 있고 흑색이나 회색을 띤다. 강도는 10~20 g/d, 비중 1.5~2.1, 내열성, 내충격성이 뛰어나며, 화약약품에 강하고, 해중에 대한 저항성이 크다. 가열과정에서 산소, 수소, 질소 등의 분자가 빠져 나가 중량이 감소되므로 금속(알루미늄)보다 가볍고, 반면에 금속(철)에 비해 탄성과 강도가 뛰어나다. 이런 특성으로 인하여 스포츠용품(낚시대, 골프채, 테니스 라켓), 항공우주산업(내열재, 항공기 동체), 자동차, 토목건축(경량재, 내장재), 전기전자, 통신(안테나), 환경산업(공기정화기, 정수기)등 각 분야의 고성능 산업용 소재로 널리 쓰인다.

탄소섬유는 일반적으로 단독으로 사용되지 않고 에폭시 등의 기지재료와 함께 탄소섬유 복합재료인 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer) 형태로 사용되는데 탄소섬유 복합재료는 기존의 금속재료에 비하여 높은 무게비 강보 및 탄성계수, 낮은 열변형률, 높은 피로강도 등을 가지고 있다.

3.4.2 탄소섬유의 종류 및 제조 공정

탄소섬유는 적어도 92%이상의 탄소로 이루어진 섬유를 지칭하는 것으로써, 제조방법 및 출발 원료에 따른 PAN계, Pitch계, 그리고 Rayon계 탄소섬유로 구별되어진다. PAN계 탄소섬유는 높은 인장강도 및 전단강도를 지닌 고기능성 충전재료로서 우주 및 항공분야에 소비되어 왔으며, Pitch계의 경우 값싼 범용성 탄소섬유로써 많은 가능성을 내포하고 있으며, 실질적으로 가시적인 성과도 보이고 있다.

(1) PAN계 탄소섬유

가) 폴리아크릴 니트릴 섬유를 구워서 탄화시켜 만든 제품

나) 제조 공정

- 안정화 : 사다리 고분자구조(Labber Polymer)로 변함.
안정화 반응 동안에 연신을 가함.
- 탄화 공정 : $1200 \sim 2500^{\circ}\text{C}$ 이상에서 열처리, 역학적 특성이 개선

(2) Pitch계 탄소섬유

가) 석유나 석탄에서 나온 Pitch를 줌고, 가는 노즐을 통해 구워서 만들어진 제품.

나) 제조 공정

- 열처리 : 350°C 이상으로 장시간 열처리. 탈수소 축합반응이 일어남.
메조페이즈 액정 형성.
- 용융방사 : 메조페이즈 Pitch를 직경이 작고 배향이 잘 이루어진 전구체 섬유로 용융방사함
- 탄화 공정
- 흑연화 공정

(3) Rayon계 탄소섬유

가) 셀룰로오스에서 만든 레이온을 원료로 만든 제품

- 장점 : 경량성, 낮은 열전도성, 열적 안정
- 단점 : 낮은 탄소화 수율 제조 공정

나) 제조 공정

- 열처리 : $240 \sim 320^{\circ}\text{C}$ 온도범위에서 열분해, 사슬분열 일으킴.
물성을 증가시키기 위하여 연신을 준다. 무정형 탄소 생성.
- 탄화 공정 : $1200 \sim 2500^{\circ}\text{C}$ 온도에서 연처리. 중량손실이 일어남.
- 연신흑연화 공정 : $2800 \sim 3000^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 열처리.

3.4.3 탄소섬유의 특성

(1) 역학 특성

탄소섬유의 대표적인 특성은 가볍고 강하며, 높은 탄성율이 있다. 최근 수년간에 걸쳐서 역학적 특성의 향상이 이루어졌는데 인장강도로는 대략 5586MPa, 인장 탄성율은 490MPa를 지닌 탄소섬유가 판매되고 있다. 이렇게 뛰어난 기계적 특성의 원인으로서는 탄소섬유의 기본적인 구조에 기인한 것으로 PAN계의 높은 인장강도는 리본상의 미세구조에 기인한 것이며, Pitch계 탄소섬유의 경우 도메인이 섬유 축 방향으로 배열하여 매우 높은 열적 그리고 전기적 특성을 보인다. 기본적으로 강도는 구조에 매우 민감한데, 조그마한 미세구조의 변화, 결합의 형태 및 양에 의하여 크게 영향을 받는다.

(2) 열적 특성

탄소섬유의 열특성 중에서 가장 뛰어난 것으로는 선팽창계수를 들 수 있다. 대략 $-0.7 \sim -1.2 \times 10^{-6} K^{-1}$ 으로 보고되고 있다. 매트릭스 수지의 대표작인 에폭시의 선팽창계수는 $45 \sim 65 \times 10^{-6} K^{-1}$ 로 탄소섬유에 비하여 매우 높은 수치를 보이는데, 이것이 복합재료의 열응력의 문제가 된다. 탄소섬유의 열전도율을 직접 측정하는 예는 극히 드물며, 대부분 복합재료의 열전도율을 측정한 값으로부터 추정한다. 고탄성율의 경우, $85 Wm^{-1}K^{-1}$ 으로 금속에 비견되는 값을 보인다. 그리고 극저온에서의 낮은 열전도율 때문에 액체헬륨, LNG 등의 용기의 단열 구조재로서 기대를 모으고 있다.

(3) 전기적 특성

탄소섬유의 전기전도율은 일반적으로 결정성에 의존을 하므로 흑연화 섬유가 탄소섬유보다 높은 전기전도율을 보이는데, 전자의 경우가 $1.5 \sim 3.0 \times 10^{-3} \Omega cm$, 후자의 경우가 $0.5 \sim 0.8 \times 10^{-3} \Omega cm$ 의 전기저항 값을 보인다.

(4) 화학적 특성

탄소섬유의 화학조성은 PAN계, Pitch계, Rayon계 등의 프리커서 종류, 열처리 온도 등에 의하여 크게 다르다. PAN계 탄소섬유의 경우 프리커서의 공중합상태, 방사시 용매 등의 조건에 의하여 변하게 된다. 고강도계의 섬유는 질소라 어느 정도 남아 있으나 고탄성계의 경우 거의 탄소원자로 이루어진다. 탄소섬유의 수분 함유율은 0.03 ~ 0.05%로서 실질적으로 문제가 되지 않는다. 그리고 탄소섬유는 일반 탄소재료와 마찬가지로 내약품성이 뛰어나 매우 안정된 재료라 말할 수 있다. 여기서 가장 주의를 해야 될 부분은 산화에 대한 저항성으로서, 강산 등에 약하며 고온에서 쉽게 공기와 반응한다.

다음 Table 3.3은 탄소섬유의 장·단점을 나타내고 있는 표이고, Table 3.4는 탄소섬유의 물리적 특성에 따른 탄소섬유의 응용분야를 나타내고 있는 표이다.

Table 3.3 Characteristics of CFRP

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

Table 3.4 Physical characteristics & application field of CFRP

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

4. 기등보강 공법

4.1 기등 보강 공법의 개요

현재 국내에서 사용되고 있는 보강공법은 크게 강판접착공법과 섬유접착공법으로 대별 할 수 있다. 강판접착공법의 경우 구조적인 성능을 향상시키는데 효과적인 공법이나 시공 중 강판의 조작이 어렵고, 제한된 부재치수와 적절한 포인트 형성 그리고 강판의 부식으로 강판과 콘크리트 경계면과의 부착손실 등 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 새로운 보강공법으로 신소재인 복합재료에 관한 연구가 진행되고 있다.

섬유접착공법의 경우 강판접착공법에 비하여 시공이 간편하고 구조부재의 형상에 영향을 받지 않으며 시공을 위한 특수장비가 필요치 않다는 장점이 있으나 강판접착공법에 비하여 시공비가 높다는 단점을 가지고 있다.

탄소섬유쉬트접착공법의 시공을 강판접착공법과 비교하기 전에 먼저 탄소섬유쉬트(Carbon Fiber Sheet) 1겹(Ply)에 대응하는 철판두께를 Table 4.1에 나타내었으며, 두 가지 공법의 시공과정을 분석하기 위하여 보강공법의 비교는 다음 Table 4.2에 나타내었다.

Table 4.1 Steel plate thickness equivalent to 1 carbon fiber sheet folding
(unit : mm)

물성		종류		
		FTS-CI-20	FTS-CI-30	FTS-C5-30
철판두께	장기허용응력 기준	0.9	1.6	1.2
	탄성율 기준	0.12	0.19	0.30

주) 철판인장강도 : 240 MPa(장기허용응력 : 140 MPa)

인장탄성률 : $2.10 \times 10^6 \text{ MPa}$

Table 4.2 Comparison of FRP and steel strengthening method

보강공법	탄소섬유슈트접착	강판접착
구조특성	· 보강재료 : 경량, 고강도 · 중량증가 거의 없음	· 시공실적이 많음 · 자하중 증가
시공성	· 중장비 필요 없음 · 시공전 면처리 필요 · 시공기간이 짧음	· 중장비 필요 · 현장용접, 앵커필요 · 시공장소 제한
유지관리	· 필요시 도장처리	· 정기적으로 도장 필요
인장강도	· 매우 높음	· 높음
피로	· 뛰어남	· 적당
관길이	· 무제한	· 제한
하중지지	· 길이방향	· 양방향
재료비	· 높음	· 낮음
공사비	· 낮음	· 높음

4.2 기둥 보강 공법의 종류와 특성

4.2.1 강판접착공법

강판접착공법은 콘크리트면에 강판을 접착시켜 기존의 콘크리트와 강판을 일체화 하는 방법이다. 이때 강판의 역할은 콘크리트 부재에서 철근이 하는 역할과 같다. 그러므로 보강설계 시는 기존부재의 철근비를 검토하여 추가강판의 폭 및 두께를 제한해야 한다. 이는 압축콘크리트의 취성과파괴를 방지하기 위한 필수적인 사항으로 일반적인 콘크리트 슬래브 또는 콘크리트 보에서는 기존부재의 최대 철근비에 따라 추가

로 제공 할 수 있는 내력의 상한 값이 결정된다.

연속보 또는 골조시스템에 의하여 모멘트 재분배가 허용되는 경우에는 이러한 모멘트 재분배를 이용하여 단부와 중앙부의 추가 내력을 조정 할 수 있다. 그러나 어떠한 경우에도 강판을 접착함으로써 단면의 최대 철근비가 초과되어서는 안된다.

강판을 기존 콘크리트에 일체화시키는 방법은 앵커를 사용하거나 에폭시를 사용하는 방법이 있다.

앵커를 사용하는 앵커공법에는 철골 보에서 전단 연결재(Shear connector)를 산정하는 계산식에 따라 앵커의 지름, 깊이 그리고 간격을 결정해야 한다. 그러나 철골 보의 전단 연결재와는 달리 앵커공법에서의 앵커는 기존 콘크리트부재의 폭과 높이가 한정되어 있으므로 이에 대한 검토가 필요하다. 일반적으로 강판공법에서 앵커는 임시 가설용으로 주로 사용되며, 앵커만으로 강판을 접착시키는 강판앵커공법은 사용되지 않고 있다.

에폭시를 사용하여 강판과 콘크리트를 일체화시키는 방법은 에폭시 사용방법에 따라 압착공법과 주입공법으로 구분한다. 그러나 이는 단지 사용방법만의 문제가 아니라 공법에 따라 적절한 에폭시를 선택해야 한다.

강판접착공법과 강판주입공법에 대한 설명은 다음과 같다.

(1) 강판압착공법

강판압착공법은 강판의 접착면에 접착제를 도포하여 콘크리트면에 부착하는 공법으로 콘크리트면에 미리 박아둔 앵커 및 볼트 등으로 강판을 콘크리트 면에 밀어붙이는 공법이다.

강판압착공법은 강판에 주어진 압착력에 의하여 여분의 접착제가 강판의 밖으로 밀려나오고 그 동안에 강판과 콘크리트 면과의 사이에 얇고 밀실한 수지막이 형성되어 강판과 콘크리트의 확실한 일체화가 기대된다.

그러나 이와 같이 확실한 접착을 얻기 위해서는 바닥판의 접착면이 평활하여야 하며, 강판을 접착하는데 있어서 수지계의 탄성계수가 강재와 콘크리트에 비하여 상당히 적으므로 수지층은 될 수 있는 대로 얇게 하는 것이 보강효율을 높이게 된다.

(2) 강판주입공법

이 공법은 콘크리트면과 강판 사이에 스페이서 등으로 2~6mm 정도 간격을 유지시킨 상태에서 주변을 실링하여 한쪽 방향에서 점도가 낮은 에폭시수지를 주입하여 접착하는 공법이다.

이 공법은 콘크리트면이 평탄하지 않을 경우라든가 일부분 또는 전면이 곡면으로 된 경우를 접착하는데 적용된다. 그러나 이 공법은 강판과 콘크리트면 사이에 약간의 기포가 존재할 수 있으며, 주입작업에 시간이 소요된다는 단점이 있다. 그럼에도 불구하고 현재 강판공법 적용시에는 이 공법을 대부분 사용하므로 보강공사 과정에서 시공관리와 보강공사 후의 품질시험을 철저히 관리할 필요가 있다.

Table 4.3은 강판접착공법에서 압착공법과 주입공법의 비교를 설명하는 표이다.

Table 4.3 Comparison of steel-jacket methods

특성 \ 공법	압착공법	주입공법
적용조건	· 콘크리트면이 평평하지 않고 일부 또는 전체적으로 곡면이 포함된 부위	· 콘크리트면이 평평하고 압착앵커로 고정할 수 있는 부위
수지주입·도포	· 콘크리트면과 강판간에 간격제를 사용하여 3~5mm 간격유지, 밀봉 공정후 수지 주입	· 콘크리트면, 강판면, 공히 1~2mm 두께 정도의 수지도포
공기제거	· 주입파이프로 수지를 공급하면서 기포 배출시킴	· 앵커를 이용하여 압착력을 가하면서 수지를 밀어냄과 동시에 기포 배출시킴
이점	· 시공면 제약 없음	· 내부기포 발생 거의 없어 접착효과 큼
문제점	· 내부에 기포발생 우려가 많고, 수지주입에 상당한 시간을 요함	· 시공면 제약 있음

4.3 탄소섬유쉬트보강 공법

4.3.1 탄소섬유쉬트보강 공법의 특징

(1) 고강도, 고탄성

탄소섬유쉬트 접착공법은 쉬트(Sheet)형태의 탄소강화섬유가 일방향으로 배열되어 있어 섬유가 가지는 뛰어난 강도 특성을 발휘할 수 있는 공법으로 재료적으로 기존 강판과 비슷하거나 그 이상의 탄성률뿐만 아니라 10배 가까운 인장강도로 구조물이 균열을 억제하고 내구력을 향상시켜 탁월한 보강효과를 나타낼 수 있다.

(2) 경량

탄소섬유쉬트 접착공법은 경량(철의 1/4)의 탄소섬유쉬트를 사용하므로 보강 후 구조물의 중량 및 단면증가가 극히 적어서 사하중과 건축한계에 영향을 미치지 않는다.

(3) 우수한 내구성 및 방식·방수효과

탄소섬유쉬트 접착공법은 탄소섬유쉬트와 에폭시수지만으로 구성되는 복합재료이므로 물, 염기, 산, 자외선 등 외기의 영향에 따른 부식이나 열화현상이 없을뿐 아니라 수지에 의한 방수효과를 기대할 수 있다.

(4) 뛰어난 시공성

탄소섬유쉬트 접착공법은 탄소강화섬유쉬트를 상온 경화형 에폭시수지로써 접착하는 것만으로 보강이 완료되며 별도의 장비나 공구가 필요하지 않고 기존 강판보강과는 달리 용접, 앵커볼트매설 등에 의한 소음과 분진발생 등이 없어 현장에서 손쉽게 시공할 수 있다.

4.3.2 탄소섬유쉬트의 보강효과

(1) 휨내력의 향상

탄소섬유쉬트 접착공법은 구조물의 휨내력을 향상시키는데 효과적인 방법으로써 철근콘크리트 구조물의 인장부에 보강하여 부족한 내력을 증진시킬 수 있다.

(2) 균열의 보강

피로하중, 충격, 과다하중 등의 원인으로 콘크리트 표면에 발생된 균열부위에 탄소섬유쉬트를 사용하여 보강함으로써 내력이 회복되어 파괴에 이르기까지 변형구속 성능이 향상된다.

(3) 원형구조물의 보강

터널, 싸이로, 굴뚝, 흡관등 원형구조물의 경우에도 탄소섬유쉬트 보강은 기존 강판등과 같이 Rigid 형태의 보강공법과 달리 적용이 용이하여 우수한 효과를 얻을 수 있다.

(4) 내마모성의 향상

탄소섬유쉬트에 의한 보강표면은 기존 콘크리트 표면보다도 탁월한 내마모성을 갖게 된다.

다음 Table 4.4 는 각 섬유쉬트별 보강공법을 비교하여 나타내었다.

4.3.3 탄소섬유쉬트의 시공절차

탄소섬유쉬트를 콘크리트 면에 접착 보강하여 충분한 효과를 얻기 위해 실시되는 콘크리트 면처리 작업은 콘크리트 면에 발생한 균열을 에폭시 레진 주입 등을 통하여 보수하고, 열화층을 제거하여 에폭시 퍼티로 충전하고 면을 그라인더로 연마하여 면의 요철을 1mm 이내로 줄이는 작업이다. 프라이머 및 에폭시 레진은 주제와 경화

제를 적정의 혼합비로 혼합하여 사용하며, 시공 현장의 대기 온도에서 경화되는 것이므로 여름용, 겨울용, 그리고 봄·가을의 표준형의 3가지가 있으며 이들 각각은 가사 시간과 경화시간에 차이가 있다. 완전한 경화시간은 보통 7일 이상이 소요된다. 탄소섬유쉬트접착 공법의 시공절차는 다음과 같다.

(1) 표면 그라인딩

- 탄소섬유쉬트의 충분한 접착력 확보를 위해 콘크리트 표면의 도장부위, 오염, 열화층을 그라인더 등으로 제거, 연마하여 강도가 높은 면을 노출 시킨다.
- 연마시 콘크리트 표면의 돌출부위를 제거하여 표면을 평평하게 만든다.
탄소섬유쉬트 시공시 적절한 표면단차는 1mm 이내이다.
- 모서리부는 연마하여 $R=10mm$ 이상으로 곡면화 한다.
- 양호한 콘크리트 표면이라 할지라도 최소한 한번의 그라인딩은 필요하다.

Table 4.4 Comparison of strengthening methods for concrete column

	아라미드섬유쉬트 보강공법	탄소섬유쉬트 보강공법	강관감싸기 보강공법
시공 개요	<ul style="list-style-type: none"> 바탕처리를 시공한 부재에 아라미드섬유쉬트를 감싸 붙이고, 휨보강은 주철근 방향으로 부착한다. 	<ul style="list-style-type: none"> 바탕처리를 시공한 부재에 탄소섬유쉬트를 감싸 붙인다. 인성, 전단보강으로서는 띠철근 방향으로 감싸 붙이고, 휨보강으로서는 주철근 방향으로 부착된다. 	<ul style="list-style-type: none"> 바탕처리를 실시한 부재의 주위에 강관을 감아 강관끼리 용접하고, 강관과 부재와의 사이는 충전재를 주입한다.
주요 재료	<ul style="list-style-type: none"> 아라미드섬유 함침수지(에폭시계수지) 마감재 	<ul style="list-style-type: none"> 탄소섬유쉬트 함침수지(에폭시계수지) 마감재 	<ul style="list-style-type: none"> 강관 주입재(에폭시계수지) 기타(Anchor, 주입재(Seal재))
특징	<ul style="list-style-type: none"> 사용재료는 인력으로 운반가능하다. 인력작업으로 시공 가능한 공간이 있으면 된다. 보강 후의 단면증가는 무시할 수 있는 정도의 양이다. 	<ul style="list-style-type: none"> 사용재료는 인력으로 운반가능하다. 인력작업으로 시공 가능한 공간이 있으면 된다. 보강 후의 단면증가는 무시할 수 있는 정도의 양이다. 	<ul style="list-style-type: none"> 공장가공 제품을 이용하므로 품질의 신뢰성이 높다.
주의 사항	<ul style="list-style-type: none"> 시공시 온도가 낮으면 수지의 경화가 지연된다. 수분히 있으면 수지의 경화에 악영향을 미친다. 모서리 부분에 약간의 처리가 필요하다. 	<ul style="list-style-type: none"> 시공시 온도가 낮으면 수지의 경화가 지연된다. 수분이 있으면 수지의 경화에 악영향을 미친다. 모서리 부분에 약간의 처리가 필요하다. 	<ul style="list-style-type: none"> 현장 용접을 필요로 한다. 현장가공이 필요하므로 가공에 수고가 필요하다. 보강 후 단면증가는 작지만, 전체를 감지 않는 경우는 단차가 발생한다.
유지 관리	<ul style="list-style-type: none"> 내구성을 보완하기 위해, 최저한도의 도장을 한다. 낭비방지, 차량충돌 대책으로서의 보호공이 필요하게 된다. 	<ul style="list-style-type: none"> 내구성을 보완하기 위해, 최저한도의 도장을 한다. 낭비방지, 차량충돌 대책으로서의 보호공이 필요하게 된다. 	<ul style="list-style-type: none"> 최저한도의 도장교체 도포가 필요하게 된다.

(2) 손상부위 복구

- 현저한 콘크리트 표면의 결손 부위를 콘크리트 이상의 강도를 가지는 고강도 모르타르, 에폭시 모르타르 등으로 매워준다. 이때 모르타르 면은 단차 1mm 이내로 평활하게 마감한다.
- 철근이 노출된 경우에는 방청처리를 한다.
- 균열 부위는 에폭시수지 등을 주입하여 보수한다.
- 시공면에서 누수가 있는 경우에는 지수, 도수 처리를 실시한다.
- 손상부위 복구의 목적은 콘크리트 표면중 큰 결손부위의 보수에 있다. 표면 그라인딩을 마친 후 시공면을 세심히 관찰하여 보수가 필요한 부분을 결정한다.

(3) 프라이머 도포

- 시공면 청결상태(먼지, 수분)를 확인하고 온도를 고려하여 적절한 프라이머 타입을 선택한다.
- 작업면적, 가사시간, 가용인원, 작업자의 숙련도 등을 고려하여 1회 작업시 혼합할 프라이머의 양을 결정한다.
- 프라이머의 주제와 경화제를 무게비 2:1로 혼합용기에 담아 진동믹서로 약 2~3분간 색상이 균일하게 될 때까지 혼합시킨다.
- 적당한 배분용기로 혼합된 프라이머를 옹긴 다음 시공면에 도포롤러로 균일하게 도포한다. 도포량은 시공면의 상태에 따라 다르지만 일반적으로 $250g/m^2$ 이다.
- 프라이머의 침투량이 많은 부위는 프라이머가 완전히 건조된 후 추가 도포를 실시한다.
- 온도 $5^{\circ}C$ 이하, 상대습도 85% 이상에서는 시공하지 않는다.
- 프라이머 도포량이 많은 경우에는 표면에 방울 맺힘 현상이 나타날 수 있다.
- 프라이머의 완전한 건조란 손으로 만져서 끈적거림이 느껴지지 않는 상태이다.
- 프라이머 도포 목적은 탄소섬유슈트 접착강도를 높이기 위해서 이다.

(4) 에폭시 퍼티처리

- 접착강도, 점도, 경화속도 등을 고려하여 적절한 에폭시 퍼티 재료를 선택한다.
- 프라이머가 완전히 건조된 후 표면상의 구멍, 요철부위를 고무 또는 플라스틱 주

격을 사용하여 퍼티로 매끈하게 마감한다.

- 구석부위는 라운딩 처리를 한다.
- 에폭시 퍼티 처리의 목적은 탄소섬유슈트 부착을 위한 최종적인 요철수정작업에 있다. 프라이머 건조 후에 도포면을 세심하게 관찰하여 에폭시 퍼티 처리가 필요한 부분을 결정한다.

(5) 탄소섬유슈트 부착

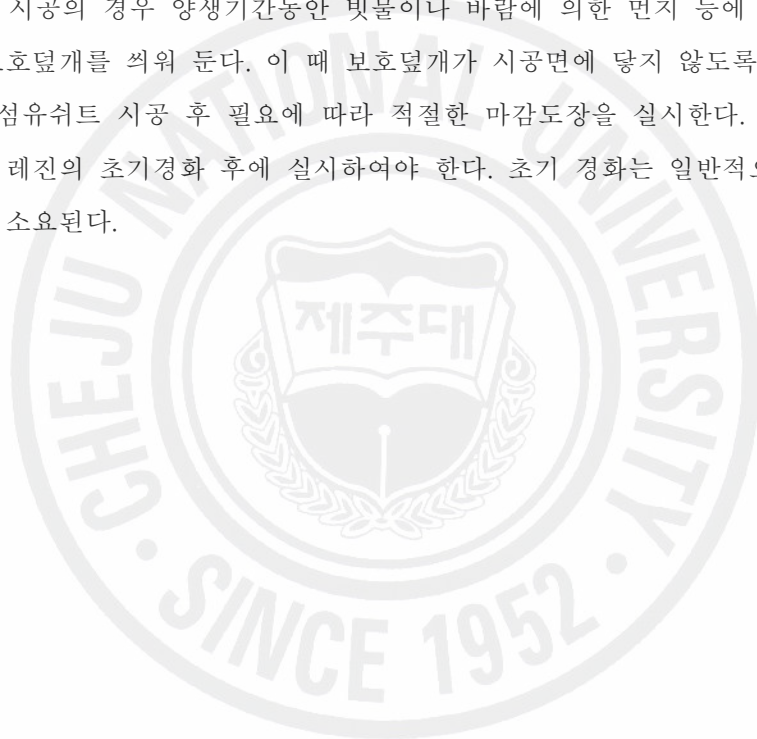
- 시공면의 면적, 형태, 가용인원, 가사시간 등을 고라하여 시공계획을 수립하고 적절한 함침용레진 Type을 결정한다.
- 시공계획에 의거하여 탄소섬유슈트를 커터등을 사용하여 미리 적당한 길이로 절단한다.
- 1회 사용분 함침용레진의 주제와 경화제를 무게비 2:1로 혼합용기에 담아 전동믹서로 약 2~3분간 색상이 균일하게 될 때까지 혼합 시킨다.
- 적당한 배분용기로 혼합된 함침용 레진을 옹긴 다음 시공면에 도포롤러로 균일하게 도포한다. 이 때 도포하는 레진을 하도레진이라 부른다.
- 절단된 탄소섬유슈트를 하도레진이 도포된 시공면에 이형지가 붙어있는 상태로 부착시킨다. 부착 후 고무주걱 등을 사용하여 슈트를 시공면에 완전히 밀착시킨 다음 곧바로 이형지를 벗겨낸다.
- 슈트 위에서 섬유방향에 따라 롤러로 강하게 문질러 하도레진이 탄소섬유슈트위로 배어나 올때까지 함침 및 기포제거 작업을 실시한다.
- 섬유길이 방향으로 10cm 이상의 겹침길이를 확보하면서 슈트를 부착시켜 나간다. 부착 후 함침 및 기포제거 작업은 동일한 방법으로 수행한다. 폭 방향의 겹침은 필요하지 않다.
- 함침 및 기포제거 작업은 작업 후 약 30분~3시간 사이에 혼합된 함침용 레진을 탄소섬유 슈트면에 도포한다. 이 때 도포하는 레진을 상도레진이라 한다. 상도레진은 탄소섬유 슈트면에 균일하게 도포되어야 하며 롤러는 반드시 섬유길이 방향으로만 움직이면서 도포를 실시한다.
- 2층 이상의 탄소섬유슈트를 시공하는 경우에는 첫 번째 층의 상도레진이 완전히 건조된 후에 하도레진으로부터 동일한 방법으로 작업한다. 일반적으로 1일 1층 시

공이 원칙이다.

- 온도 $5^{\circ}C$ 이하, 상대습도 85% 이상에서는 시공하지 않는다.
- 표면처리가 불량할 경우 주사기 등으로 에폭시 수지를 주입한다.
- 탄소섬유쉬트가 들뜨는 경우가 있을시 불량부위 절단 제거 후 쉬트 재부착 한다.

(6) 양생 및 마감 도장

- 옥외 시공의 경우 양생기간동안 빗물이나 바람에 의한 먼지 등에 오염되지 않도록 보호덮개를 씌워 둔다. 이 때 보호덮개가 시공면에 닿지 않도록 한다.
- 탄소섬유쉬트 시공 후 필요에 따라 적절한 마감도장을 실시한다. 마감도장은 합침용 레진의 초기경화 후에 실시하여야 한다. 초기 경화는 일반적으로 2~3일 정도가 소요된다.



5. 시험체 제작 및 실험

5.1 시험체 제작

CFRP Sheet 감싸기로 구속된 원형기둥의 압축 실험을 위하여 각 변수별 시험체를 제작하였는데 시험체는 원형 거푸집을 제작하고 그 안에 콘크리트를 타설하여 제작하였다.

다음 Fig 5.1은 시험체의 형상과 크기를 보여주고 있는 그림이다.

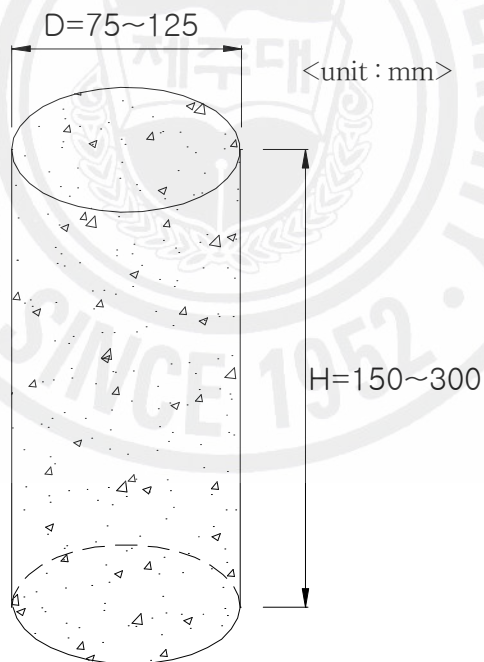


Fig 5.1 Dimensions of specimen

5.2 실험 변수

실험 연구에서 선택된 실험변수는 CFRP Sheet로 보강된 원형기둥의 보강 효과에 영향을 미칠 수 있는 것들로 CFRP Sheet의 보강정도, 기둥의 크기, 형상비, CFRP Sheet의 겹이음 길이 등을 선택하였다.

시험체 개수는 통계적 분석을 위하여 각 실험변수별로 3개씩을 선정하여 총 33개의 시험체를 제작하였다.

다음 Table 5.1은 압축실험에 사용된 실험변수를 나타내고 있는 표인데 T0 시험체는 보강이 없는 무보강 시험체로 기준 시험체로 삼아서 다른 시험체의 보강효과를 파악할 수 있게 하였다.

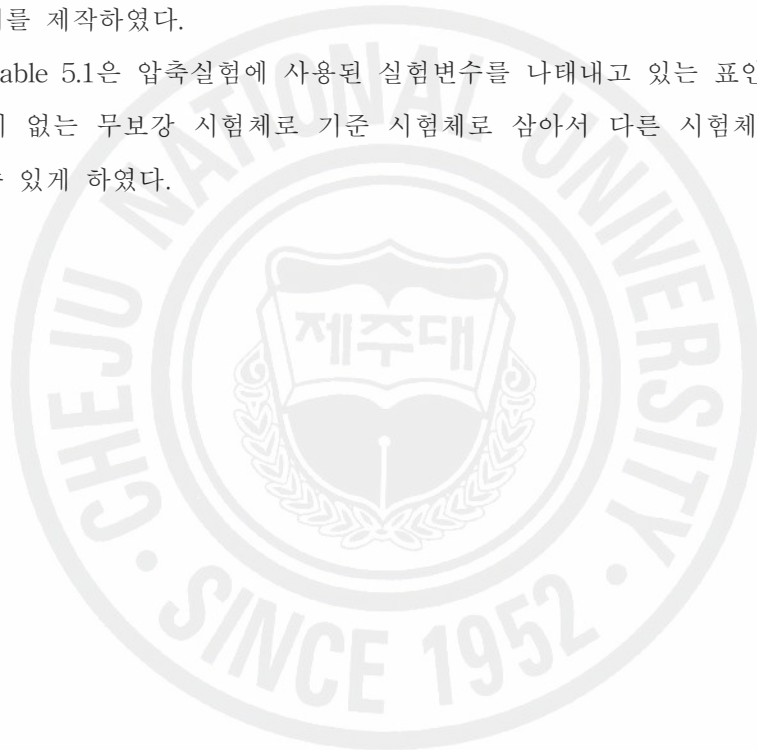


Table 5.1 Summary of test parameters

실험 변수	시험체명	FRP 쉬트 접수	기둥의 크기 (mm)	형상비(H/D), 접이음 길이(OL) (mm)
무보강 시험체	T0	-	D=100 H=200	H/D=2.0
보강정도	T1	1겹	D=100 H=200	H/D=2.0 (OL=30)
	T2	2겹		
	T3	3겹		
기둥의 크기	T4	1겹	D=75 H=150	H/D=2.0 (OL=30)
	T1		D=100 H=200	
	T5		D=125 H=250	
형상비 (H/D)	T4	1겹	D=75 H=150	H/D=2.0 (OL=30)
	T6		D=75 H=225	H/D=3.0 (OL=30)
	T7		D=75 H=300	H/D=4.0 (OL=30)
접이음 길이	T8	1겹	D=100 H=200	H/D=2.0 (OL=0)
	T9			H/D=2.0 (OL=15)
	T1			H/D=2.0 (OL=30)
	T10			H/D=2.0 (OL=45)

5.3 사용재료

시험체 제작에 사용된 콘크리트와 CFRP Sheet, Epoxy 재료의 특성 및 역학적 성질은 다음과 같다.

5.3.1 Concrete

시험체 제작에 사용된 콘크리트는 재령 28일 설계 강도가 24 MPa인 레미콘 제품을 사용하였는데 자세한 내용은 다음 Table 5.2와 같다.

Table 5.2 Characteristics of concrete

구 분	설계값	측정값
설계 강도 (MPa)	24	25
슬럼프 (cm)	10	9.8
굵은 골재의 최대 치수 (mm)	25	25 이하
시멘트 종류	1종 보통 포틀랜드 시멘트	1종 보통 포틀랜드 시멘트
공기량 (%)	4.5±1.5	3.2
염화물량 (kg/m ³)	0.30 이하	0

5.3.2 탄소섬유쉬트(CFRP Sheet)

5.3.2.1 탄소섬유쉬트 일반

탄소섬유쉬트는 접착종이 위에 섬유를 일 방향으로 배열시켜 만든 일본 Tonen사의 제품 Forca Tow Sheet를 사용하였으며 쉬트 접착제로 사용된 에폭시는 보통 표준 환경용을 사용하였다. 탄소섬유쉬트는 실험법에 따라 시편을 제작 후 인장실험을 실시하였으며 아래의 Table 5.3은 CFRP Sheet 제조사에 의해 제공된 탄소섬유쉬트의 물성치를 나타내고 있는 표이다.

Table 5.3 Mechanical properties of CFRP sheet

재료명	인장강도	탄성계수	극한변형률(%)
Forca Tow Sheet	3094.4 MPa	3.555×10^5 MPa	0.87

5.3.2.2 탄소섬유 재료시험 방법

탄소섬유쉬트의 재료적 성능을 확인하기 위한 인장시험법(JIS K 7073)은 다음과 같다.

시험항목은 인장강도와 인장탄성율이 있고, 시험방법은 모두 JIS K 7073의 탄소섬유강화플라스틱의 인장시험방법에 준한다.

① 인장강도

탄소섬유쉬트에 소정량의 함침레진을 침투, 경화한 CFRP에서 시험편을 채취하여 인장특성을 측정, 평가, 확인한다. 시험편의 형상은 JIS K 7073에 기재되어 있는 I형 시험편에 준한 것이며, Fig 5.2에 나타낸 바와 같다.

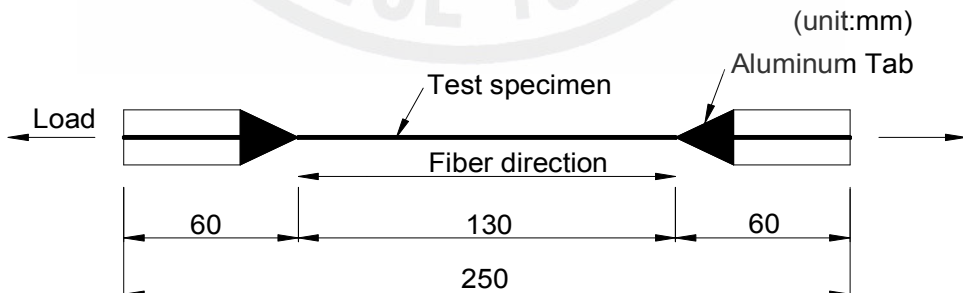


Fig 5.2 Tension test of FRP sheet (by JIS K 7073)

인장강도는 다음 식에 의해 산출된다.

$$\sigma_B = \frac{P_B}{A_m}$$

여기서, σ_B : 인장강도
 P_B : 파단 하중
 A_m : 단면적

② 인장탄성율

인장탄성율은 하중-변위곡선 또는 인장응력-변형률곡선에 있어 직선부분을 사용하며 다음 식에 의해 산출된다.

$$E_\gamma = \frac{\Delta P/A_m}{\Delta \varepsilon} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}$$

E_γ : 인장탄성율
 A_m : 단면적
 ΔB : 하중 증분
 $\Delta \varepsilon$: 변위 증분
 $\Delta \sigma$: 응력 증분

5.3.3 Epoxy

실험에서 사용한 에폭시(Epoxy)는 Sika사에서 개발한 고탄성, 고강도의 구조물 접착제인 Sikadur-31이다. Sikadur-31의 특징으로는 모체가 건조하거나 습한 것에 상관없이 시공이 가능하고, 콘크리트, 나무, 철근 등 건설재료에 대해 접착력이 매우 우수하다. 뿐만 아니라 고강도, 고탄성, 내마모성, 내충격성이 우수하고 초기 강도 발현이 우수하다. Sikadur-31은 주제(A제)와 경화제(B제)로 나누어져 있고, A제와 B제를 부피비 2:1의 비율로 섞어서 사용을 한다.

다음은 시험체 제작에 사용된 에폭시의 물리적 특성이다.

Table 5.4 Properties of epoxy

재료명	인장강도 (재령14일)	접착강도 (재령14일)	탄성계수 (재령7일)
Sikadur-31	25 MPa	16.8 MPa	2689.7 MPa

다음 Fig 5.3은 본 연구에서 사용된 에폭시의 모습을 보여주고 있는 사진이다.



Fig 5.3 Epoxy used for test specimen (Sikadur-31)

5.4 시험체 제작

5.4.1 원형 콘크리트 시험체 제작 과정

시험체를 제작하기 위하여 원형 거푸집을 사용하였으며, 콘크리트 타설 전 시험체와 거푸집을 쉽게 분리시키기 위하여 거푸집 표면에 오일을 도포하여 거푸집과 시험

체를 쉽게 분리시킬 수 있게 하였다. 콘크리트는 3층으로 나누어서 채웠으며 각 층마다 내부 진동기를 이용하여 다짐하였다. 진동 다짐은 큰 기포가 나오지 않게 되고 큰 골재의 표면을 모르타르 층이 덮을 때까지 실시하였으며 그 후에 구멍이 남지 않도록 천천히 빼어내었다. 이와 같이 제작된 시험체는 28일 동안 습윤양생하였다.

5.4.2 탄소섬유쉬트 접착과정

탄소섬유쉬트를 시험체에 부착하는 과정은 다음과 같다.

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

5.5 실험 과정

5.5.1 압축시험기

본 연구에서 시험체의 압축강도를 측정하기 위하여 M&T에서 제작된 자동압축강도 시험기(MT-150AC)를 사용하였다. 실험시 압축강도를 정확하게 측정하기 위하여 시험체 아래에 압축시험기와는 별도로 Loadcell을 설치하여 측정값을 비교하였다. Table 5.4는 압축시험기의 사양이고, Fig 5.4는 압축시험기의 사진이다.

Table 5.5 Specification of compression tester

Max Capacity	Test Space	Pressure Control	Resolution
150 Tonf	350 mm	Manual Relief Valve Control	1/10000(Indicator)



Fig 5.4 Compression tester

5.5.2 실험 Data 수집 과정

Data를 수집하기 위하여 압축시험기와 시험체를 동적변형을 측정기를 통하여 컴퓨터에 Fig 5.5와 같이 연결하였다. 먼저, 시험체의 가로변형과 세로변형을 확인하기 위하여 시험체의 가로와 세로 방향으로 변형 게이지를 부착하였고, 하중을 정확히 측정하기 위하여 시험체 밑으로 Loadcell을 추가 설치하였다. 시험체가 일점하중을 받는 것을 방지하기 위하여 Capping을 하고 다시 위에 고무판을 대어서 하중이 균등하게 시험체에 전달할 수 있게 하였다.

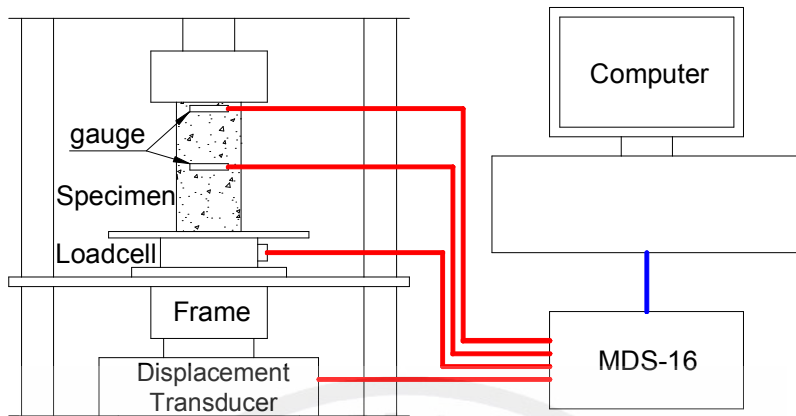


Fig 5.5 Test setup and instruments

6. 실험결과 및 분석

6.1 시험결과

원형기둥 시험체의 압축강도 실험을 통하여 파괴양상, 최대내력, 시험체의 하중-변위 및 응력-변형을 곡선 등을 분석하고 탄소섬유쉬트의 보강효과를 분석하였다. Table 6.1, Table 6.2는 실험 결과를 요약한 표로서 각 변수별 최대하중, 최대 변형량, 파괴 형태 등을 나타내고 있다.

Table 6.1 Summary of test results (averages of 3 specimens)

시험변수	시험체명	사용변수	평균최대하중 (*10 kN)	평균최대변형 (mm)	비고
무보강 시험체	T0	-	26.668	1.519	-
보강정도	T1	1겹	58.142	5.178	H/D=2.0
	T2	2겹	75.705	4.818	
	T3	3겹	103.457	9.294	
기둥의 크기	T4	75/150	44.915	3.511	H/D=2.0
	T1	100/200	58.142	5.178	
	T5	125/250	57.733	2.681	
형상비 (H/D)	T4	75/150	44.915	3.511	-
	T6	75/225	35.408	3.179	
	T7	75/300	28.698	2.282	
겹이음 길이	T8	0	31.769	2.512	H/D=2.0
	T9	1.5cm	53.244	5.614	
	T1	3.0cm	58.142	5.178	
	T10	4.5cm	53.315	5.546	

Table 6.2 Test results of all specimens

시험체	최대하중 (*10kN)		평균최대하중 (*10kN)	파괴형태
T0	1	24.283	26.668	압축 파괴
	2	29.053		압축 파괴
T1	1	59.552	58.142	부착 파괴
	2	56.071		부착 파괴
	3	58.802		부착 파괴
T2	1	75.699	75.705	부착 파괴
	2	75.703		부착 파괴
	3	75.714		부착 파괴
T3	1	103.5	103.457	압축 파괴
	2	101.45		부착 파괴
	3	105.42		압축 파괴
T4	1	36.518	44.915	부착 파괴
	2	52.692		부착 파괴
	3	45.535		부착 파괴
T5	1	43.508	57.733	부착 파괴
	2	59.114		부착 파괴
	3	70.577		부착 파괴
T6	1	-	35.408	부착 파괴
	2	37.39		부착 파괴
	3	33.425		부착 파괴
T7	1	34.994	28.698	부착 파괴
	2	23.158		부착 파괴
	3	27.941		부착 파괴
T8	1	35.437	31.769	압축 파괴
	2	34.245		압축 파괴
	3	25.626		압축 파괴
T9	1	50.168	53.244	부착 파괴
	2	54.623		부착 파괴
	3	54.941		부착 파괴
T10	1	52.144	53.315	부착 파괴
	2	53.68		부착 파괴
	3	54.122		부착 파괴

6.2 각 변수별 실험 결과 분석

6.2.1 보강정도

본 실험의 첫 번째 변수는 CFRP Sheet의 보강량에 따른 보강효과를 파악하는 것이다. D=100mm, H=200mm의 표준 시험체에 CFRP Sheet의 겹수를 1겹, 2겹, 3겹 보강하여 이들을 비교하였다. 이들의 비교 분석을 위하여 T0~T3 시험체를 비교 분석하였다.

Fig 6.5 ~ 6.8은 시험체의 파괴시 모습을 보여주고 있는 사진이다. CFRP Sheet로 보강된 모든 시험체에서 파괴는 겹이음을 한 곳에서 일어났으며, 가운데의 변형이 먼저 일어나면서 파괴되었다. 파괴시 CFRP Sheet은 섬유 방향인 가로 방향으로 분리되는 파괴가 일어났다. 기준 시험체는 사진에서 보이는 것과 같이 압축에 의한 가로 방향의 인장 응력에 의하여 세로 균열이 발생하고 이에 따른 압축파괴가 일어났다.

Fig 6.1은 CFRP Sheet의 보강량에 따른 최대압축응력을 그래프로 나타낸 것으로 보강량이 증가함에 따라 보강효과가 증가함을 알 수 있다. 여기서 보강효과는 기준 시험체와 비교한 값들이다.

Fig 6.2는 실험에서 하중과 변형량 곡선을 나타내는 그래프로써 각각의 3개 시험체 중 평균값에 가까운 시험체를 보여주고 있는데 여기서 T0는 기준 시험체이다. 그래프에서 살펴보면 보강 겹수가 많을수록 최고 하중이 높아지고 파괴전까지 처짐도 점점 커지는 것을 알 수 있다. Fig 6.3은 시험체의 응력-가로 변형률 그래프를 보여주고 있다. 이 그래프에서 보강이 겹수가 많을수록 높은 응력을 나타내고 변형률은 점점 커지고 있다. 이는 보강 겹수가 많을수록 변형이 크게 일어나서 점점 높아지는 경향을 보이고 있다. Fig 6.4는 시험체의 응력-세로 변형률 그래프를 보여주고 있다. 그래프에서 보강 겹수가 많을수록 응력이 마찬가지로 높아지면서 가로 변형은 세로 변형보다는 작게 일어남을 알 수 있다.

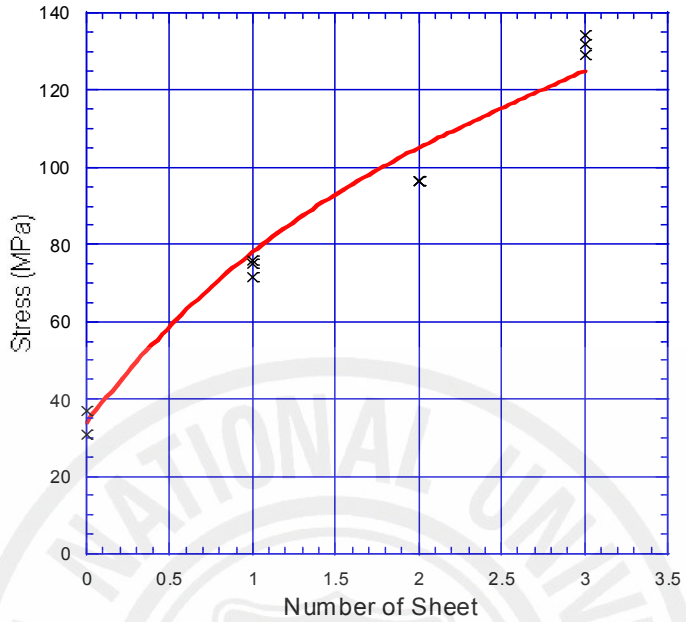


Fig 6.1 Relationship of stress and number of FRP sheet

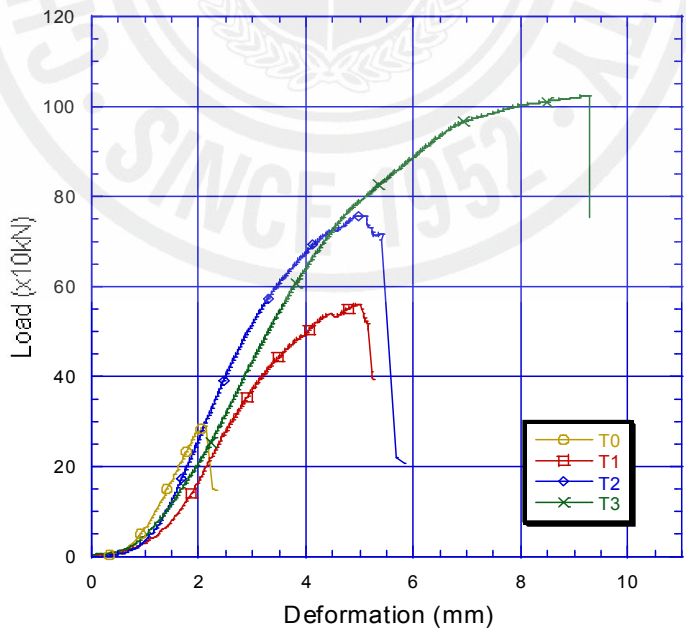


Fig 6.2 Load-Axial deformation curves

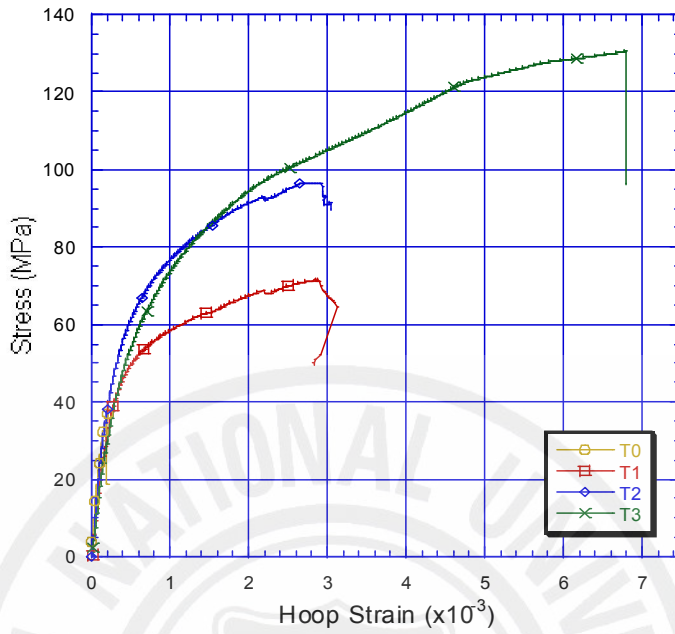


Fig 6.3 Stress-Hoop strain curves

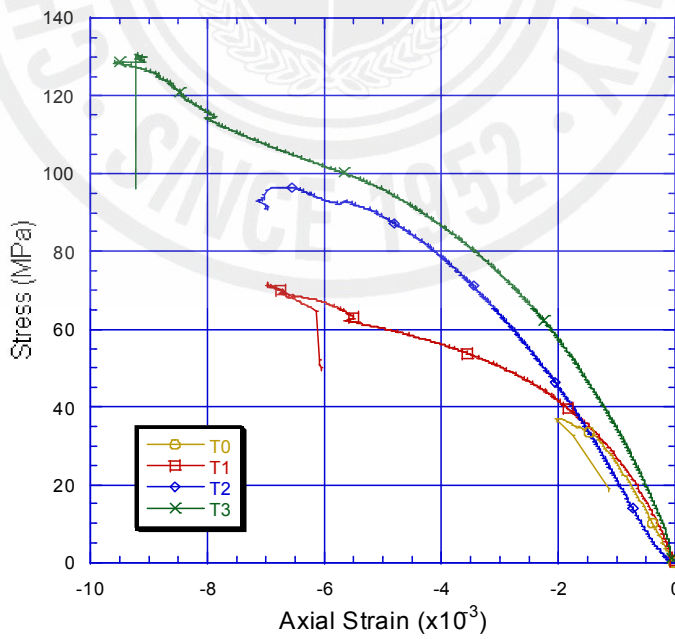


Fig 6.4 Stress-Axial strain curves



Fig 6.5 Failure mode (T0)

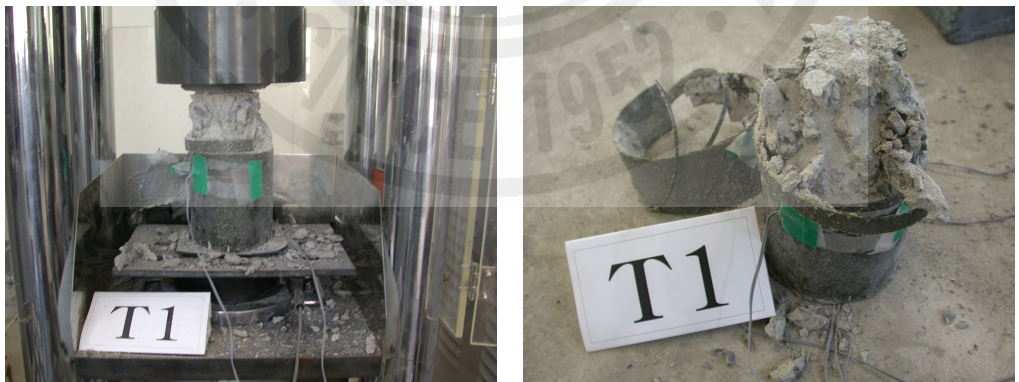


Fig 6.6 Failure mode (T1)

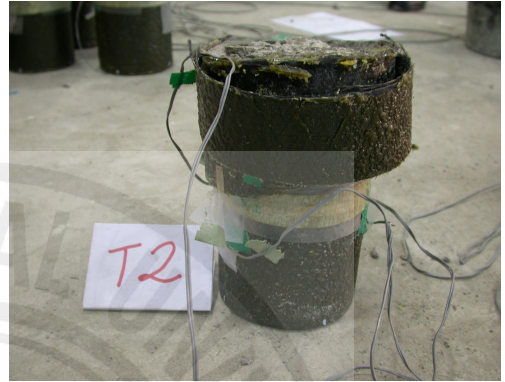
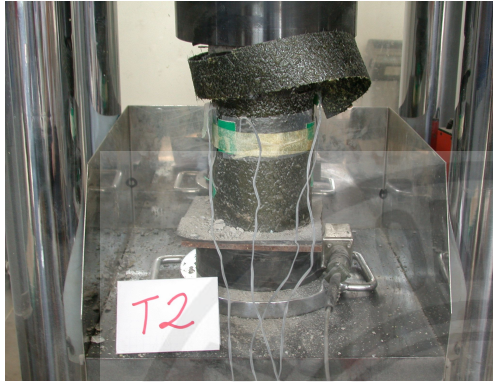


Fig 6.7 Failure mode (T2)



Fig 6.8 Failure mode (T3)

6.2.2 기둥의 크기

실험 연구의 두 번째 변수인 기둥 크기에 대한 보강효과를 분석하였다. 기둥크기에 따른 효과를 검토하기 위해서 시험체의 형상비(높이/지름)은 2.0으로 일정하게 정하여 크기에 따른 구속효과를 분석하였다. 이 변수의 분석을 위하여 T4, T1, T5 시험체를 사용하였다.

Fig 6.9는 CFRP Sheet로 보강된 기둥의 크기에 따른 최대 압축응력을 그래프로 나타낸 것으로 기둥 크기가 커질수록 보강효과가 감소됨을 알 수 있다. Fig 6.10은 시험체의 하중-변형률 그래프이다. 그래프에서 T1과 T5 시험체가 견디는 하중이 비슷함을 볼 수 있으나 시험체의 단면을 고려하고 보면 응력이 감소되었음을 알게 된다. 그리고 시험체는 연성구간 없이 바로 취성 파괴를 보여주고 있다. Fig 6.11은 시험체의 응력-가로 변형률 곡선이다. 시험체의 크기가 클수록 크기에 비해 가로 변형은 작게 일어나는 것을 확인할 수 있다. Fig 6.12는 시험체의 응력-세로 변형률 그래프이다. 이 그래프에서도 시험체의 크기가 작을수록 응력이 높다는 것을 확인할 수 있다.

Fig 6.13 ~ 14는 시험체의 실험 모습과 파괴시 모습을 보여주고 있는 사진이다. 파괴는 주로 겹이음 위치에서 일어났으며, CFRP Sheet의 가로 방향으로 파괴가 일어났다.

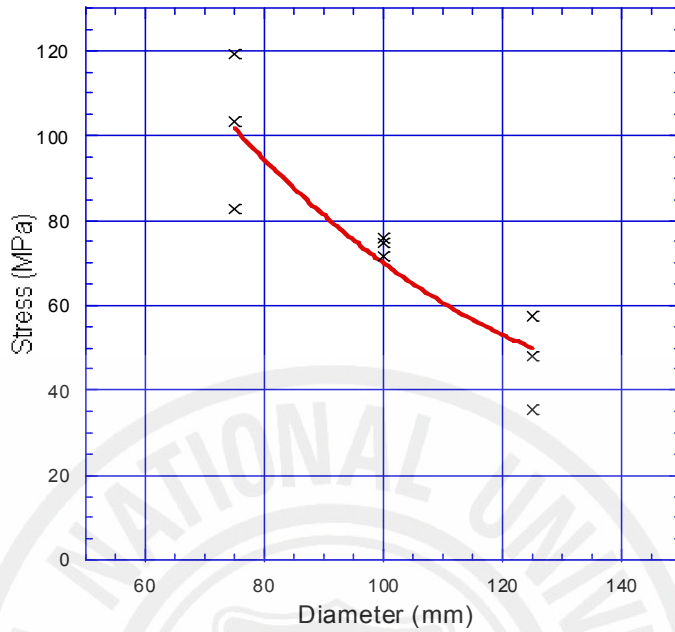


Fig 6.9 Relationship of stress and column diameter

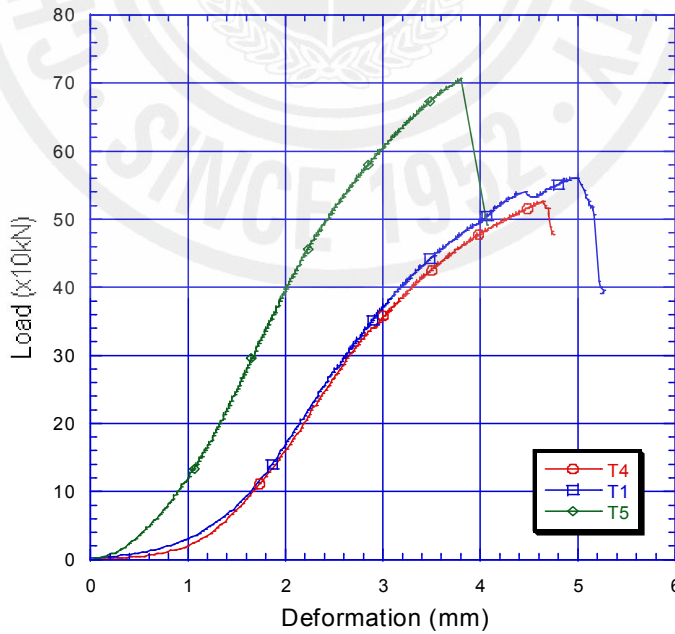


Fig 6.10 Load-Axial deformation curves

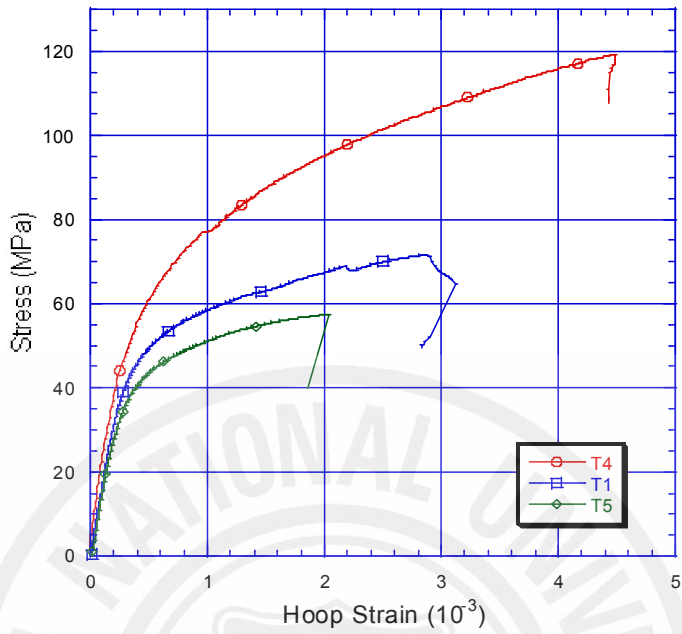


Fig 6.11 Stress-Hoop strain curves

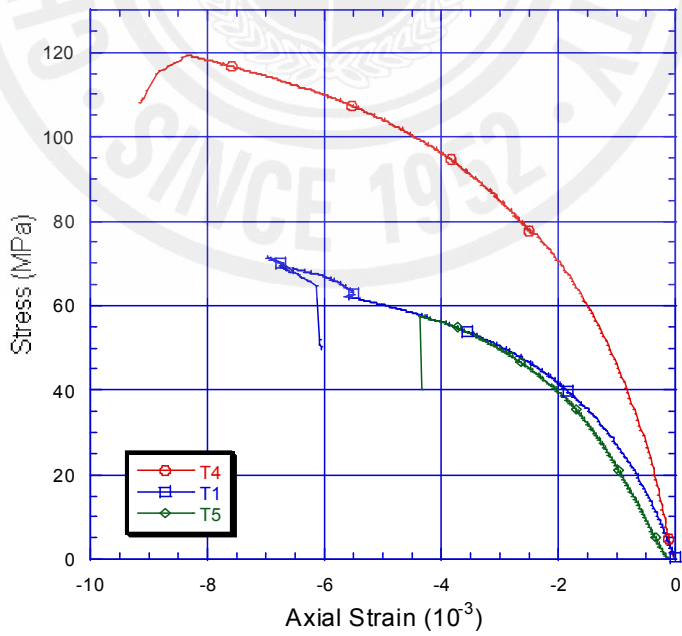


Fig 6.12 Stress-Axial strain curves

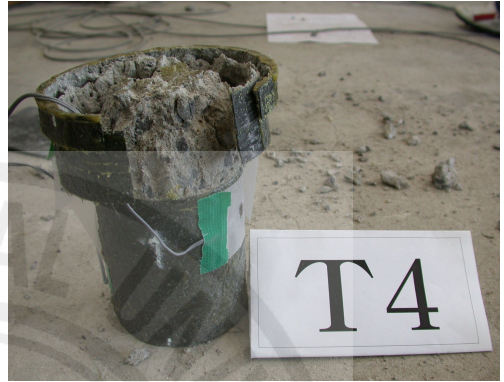
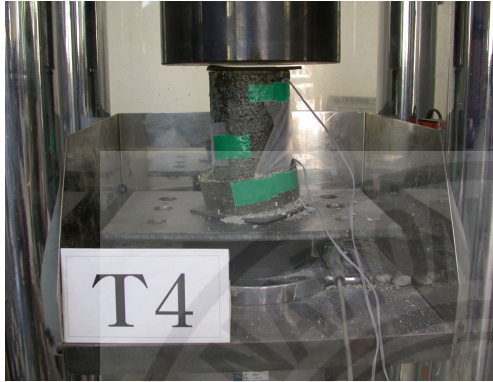


Fig 6.13 Failure mode (T4)

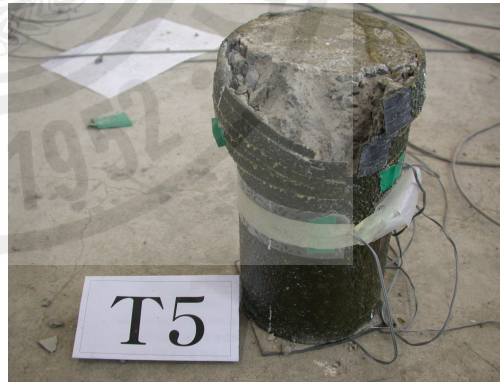
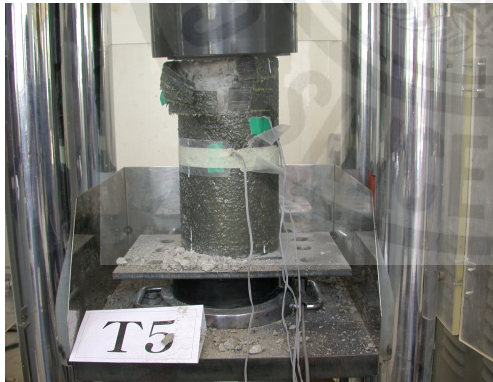


Fig 6.14 Failure mode (T5)

6.2.3 형상비

실험의 세 번째 변수는 시험체의 형상비(H/D)에 대한 영향이다. 이 실험을 위하여 T4, T6, T7 시험체를 비교 분석하였다.

Fig 6.15는 시험체의 형상비에 따른 CFRP Sheet의 보강 효과를 알아보기 위한 곡선이다. 이 그래프에서 형상비가 클수록 기둥이 받는 압축응력은 낮아짐을 보게 되는데 이는 세장비의 영향으로 응력이 감소됨을 알 수 있다. Fig 6.16은 시험체의 하중-처짐 곡선 그래프이다. 하중-처짐 그래프에서 살펴보면 H/D가 2, 3, 4로 점점 커질수록 하중이 작아지는 것을 확인할 수 있었고, 시험체 모두 비슷한 거동을 보이면서 파괴하였다. 그러나 하중을 기준으로 변형량을 비교해 보면 형상비가 커짐에 따라 크게 나타났고, 변형량을 기준으로 하중을 비교하면 형상비가 작아짐에 따라 크게 나타났다. 즉, 형상비에 따른 실험 결과는 세장비와 임계응력간의 관계를 그대로 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 다음 Fig 6.17은 응력-가로 변형률 곡선 그래프이고, Fig 6.18은 응력-세로 변형률 곡선 그래프이다. 이 두 그래프에서 형상비가 클수록 변형률이 작아지는 것을 볼 수 있는데, 이를 통해 기둥의 높이가 커짐에 따라 작은 변형에도 파괴가 일어남을 확인할 수 있었다. 즉, 기둥의 파괴는 세장비가 커짐에 따라 작은 변형, 곧 낮은 하중에서도 파괴가 일어남을 확인하였다. 세 시험체 파괴는 모두 쉬트의 부착부분에서 일어났으며, CFRP Sheet의 가로 방향으로 파괴가 일어났다.

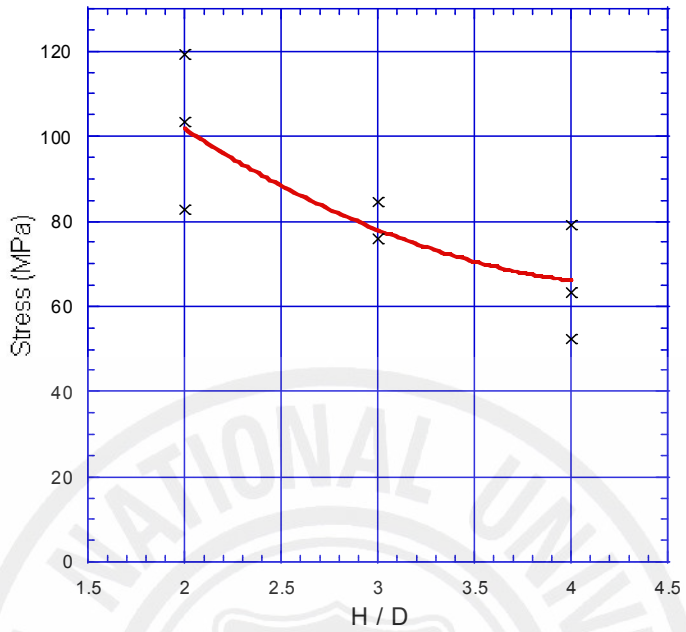


Fig 6.15 Relationship stress and H/D ratio

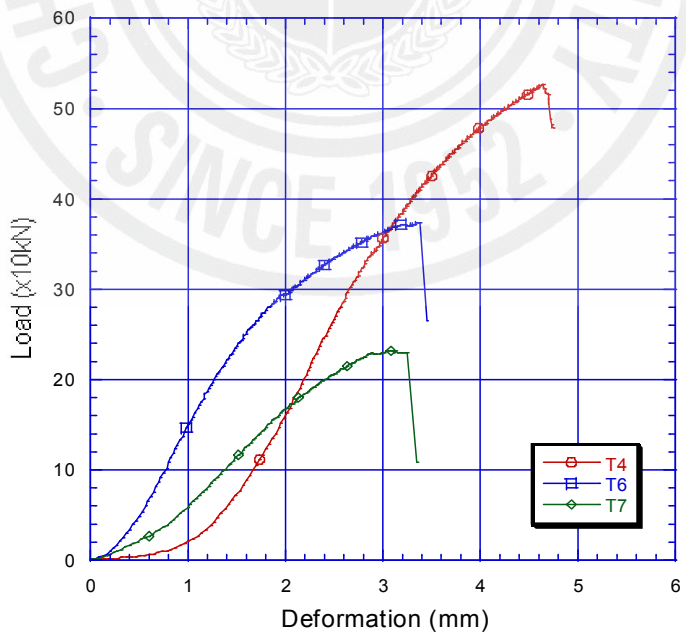


Fig 6.16 Load-Axial deformation curves

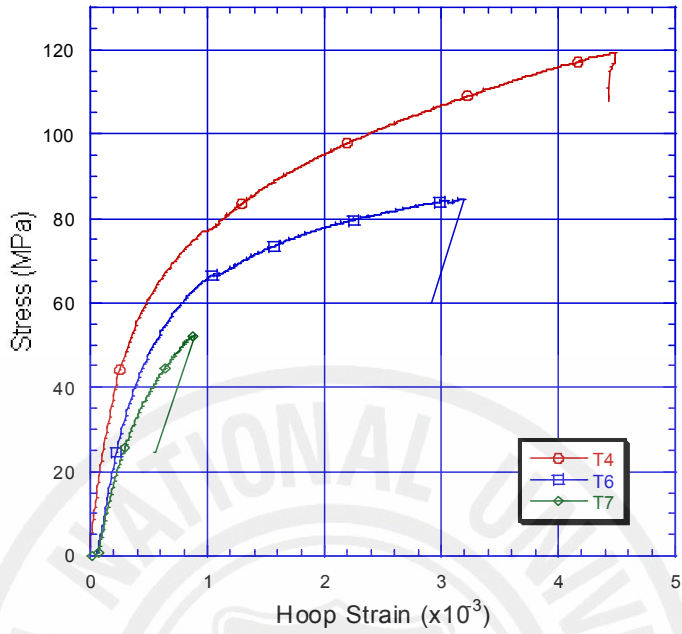


Fig 6.17 Stress-Hoop strain curves

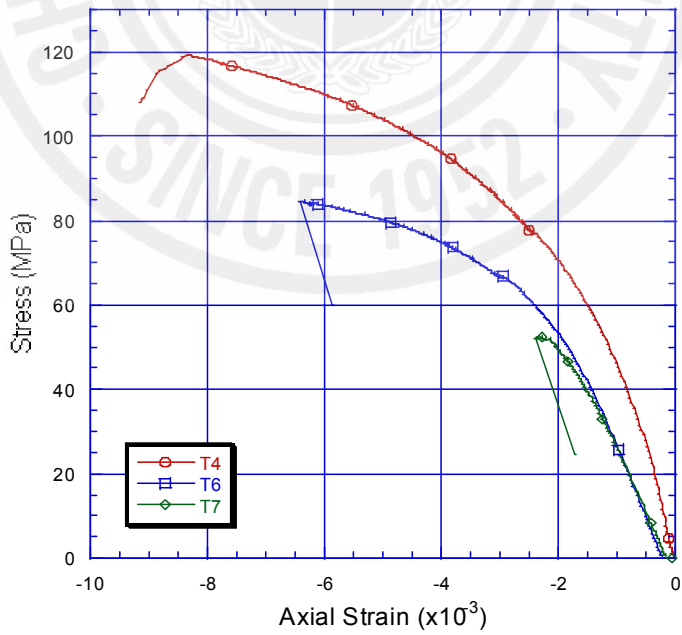


Fig 6.18 Stress-Axial strain curves

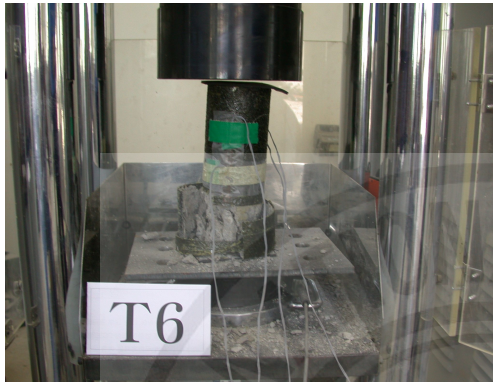


Fig 6.19 Failure mode (T6)

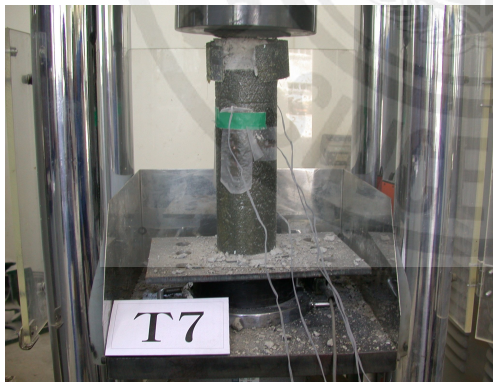


Fig 6.19 Failure mode (T7)

6.2.4 겹이음 길이

실험의 네 번째 변수는 시험체의 CFRP Sheet의 겹이음 길이를 변화시켜서 겹이음 길이가 시험체에 어떤 영향을 주는지 비교하였다. 이번 실험을 위해서 T8 ~ T10, T1 시험체를 비교하였다. 이 실험은 CFRP Sheet의 겹이음을 0 mm, 15 mm, 30 mm, 45 mm으로 시험체마다 15 mm의 간격을 두어서 실험하였다.

Fig 6.21은 CFRP Sheet의 겹이음 길이가 보강 효과에 미치는 영향을 나타내는 그래프이다. 이 그래프에서 보았을 때 0 mm 와 15 mm 사이에는 보강효과가 60% 정도 향상되나 15 mm 이상에서는 그 효과가 거의 증가하지 않음을 보게 된다. 즉, 겹이음 길이가 일정량 이상이면 그 후에는 겹이음 길이가 기둥의 보강효과에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. Fig 6.22는 하중-변형률 곡선 그래프이다. 이 그래프에서 겹이음 길이가 0 mm과 15 mm는 파괴하중이 큰 차이를 보이지만, 15 mm 이상 일 때는 비슷한 하중 범위에서 파괴는 것을 파악 할 수 있다. Fig 6.23은 응력-가로 변형률 곡선 그래프이고, Fig 6.24는 응력-세로 변형률 곡선 그래프이다. 두 그래프에서 겹이음 길이가 0 mm일 때와 15 mm 사이에는 응력과 변형률 사이에 차이가 나타나지만 15 mm 이상에서는 모두 비슷하게 거동함을 볼 수 있다. 이는 겹이음 길이가 보강효과에 작용은 하나 일정량 이상에서는 크게 작용하지 않음을 확인 할 수 있다.

Fig 6.25 ~ 27은 시험체의 파괴된 형상을 나타내고 있다. T8을 제외한 모든 시험체가 CFRP Sheet의 부착부분에서 파괴가 일어났으며, CFRP Sheet의 가로 방향으로 파괴가 일어났다. T8의 경우 겹이음 길이가 없으므로 겹이음 부분에서 구속력을 견디지 못하여 세로 방향으로 파괴가 일어나는 것을 볼 수 있다.

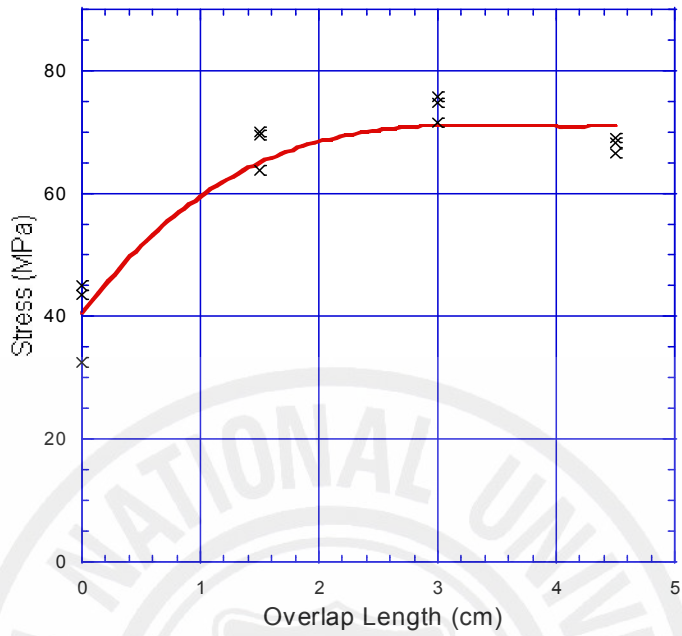


Fig 6.21 Relationship of stress and overlap length

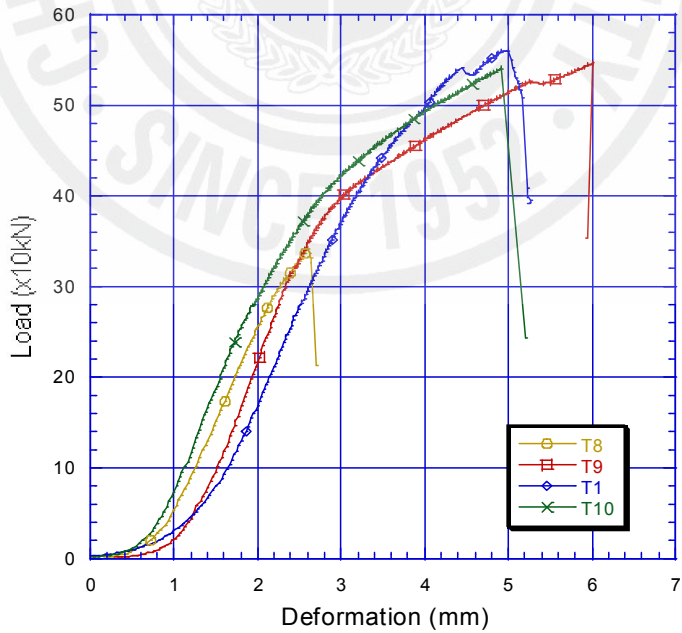


Fig 6.22 Load-Axial deformation curves

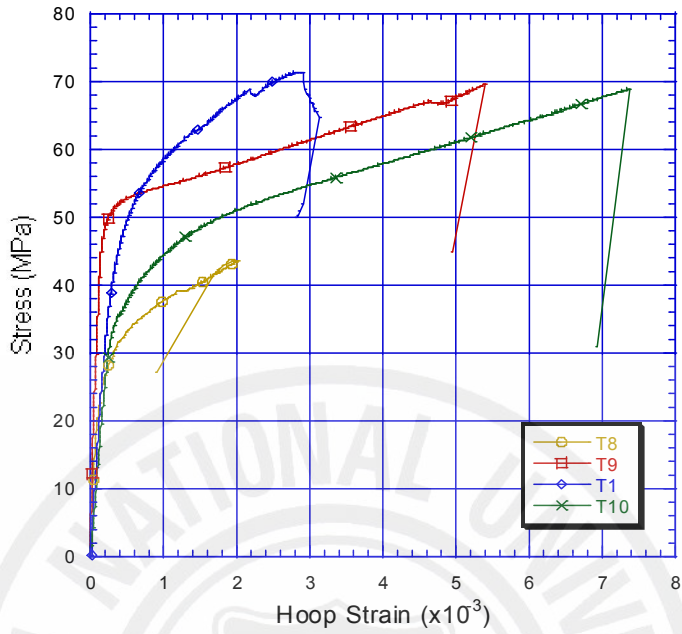


Fig 6.23 Stress-Hoop strain curves

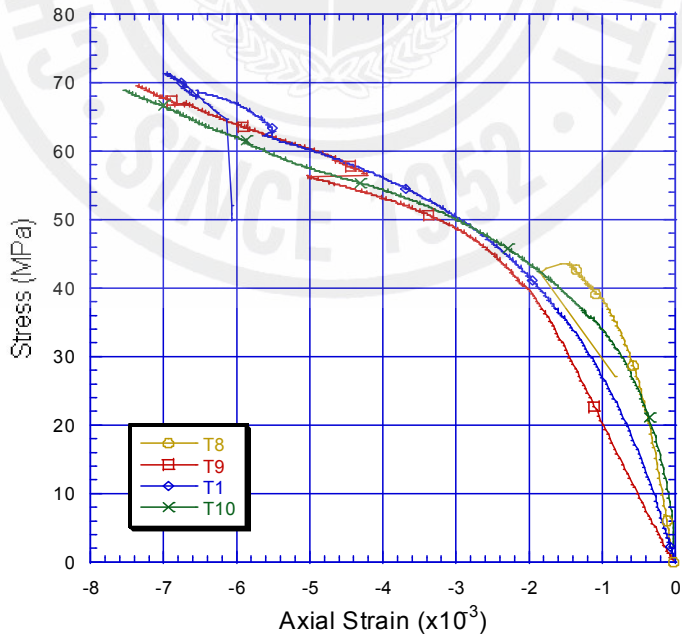


Fig 6.24 Stress-Axial strain curves

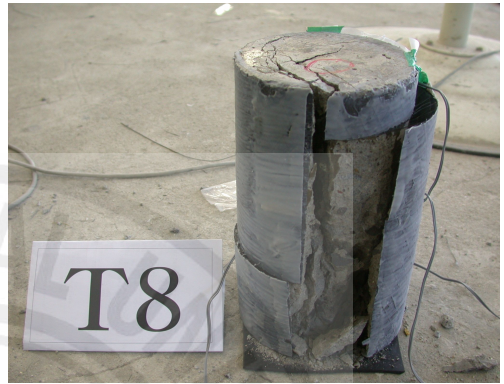
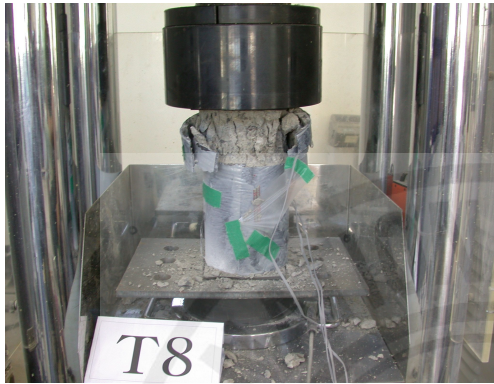


Fig 6.25 Failure mode (T8)

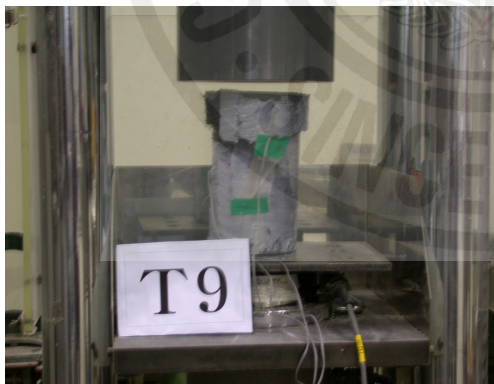


Fig 6.26 Failure mode (T9)



Fig 6.27 Failure mode (T10)

7. 결 론

CFRP Sheet 감싸기로 구속된 콘크리트 원형 기둥의 압축 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. CFRP Sheet로 감싼 원형 콘크리트 기둥의 압축 성능은 Sheet에 의한 구속효과에 의해 크게 개선되어 원형 기둥의 보강공법으로서의 적용성을 확인할 수 있었다.
2. CFRP Sheet로 감싼 콘크리트 원형 기둥 시험체에서 보강량이 많을수록 더 높은 내력에 견디는 것을 확인할 수 있었다. 실험에서 사용된 $D = 100 \text{ mm}$ 원형 시험체의 경우 약 70%(1겹) ~ 200%(3겹)의 압축 내력향상 효과가 있었다.
3. CFRP Sheet로 보강된 시험체에서 시험체의 크기가 클수록 구속효과는 감소되어 압축응력이 낮아짐을 확인할 수 있었는데 이는 구속 효과가 원형 콘크리트 기둥의 곡률에 비례함을 알 수 있다.
4. 본 실험을 통하여 형상비(H/D)의 대한 영향을 비교하였는데, 형상비가 커짐에 따라 압축응력은 감소하게 된다. 이는 CFRP Sheet로 보강된 콘크리트 기둥이 높이가 커지게 되면 임계응력이 작아짐을 확인할 수 있었다.
5. CFRP Sheet로 감싼 원형 콘크리트 시험체의 겹이음 길이가 증가할수록 보강효과가 증가되나 일정정도(지름의 15%) 이상의 겹이음 길이에서는 보강효과에 대한 영향이 없었다.
6. 본 실험에서 시험체는 모두 연성구간이 없는 취성파괴를 보였다. 무보강 콘크리트 기둥의 경우에는 할렬 균열에 의한 압축파괴를 보였고, CFRP Sheet로 감싼 콘크리트 기둥은 대부분 CFRP Sheet의 부착파괴에 따라 압축파괴 되었다.

7. 원형 콘크리트 기둥에 대한 CFRP Sheet 감싸기 공법은 보강효과, 시공의 난이도 등에서 타 공법에 비해 우수함을 알 수 있었다.
8. 본 실험에서는 철근의 보강이 없는 25MPa의 무근 콘크리트를 사용하였지만, 추가적인 실험을 통하여 철근이 배근된 기둥 형상의 시험체를 통하여 철근비등의 관계를 고려한 실험이 이루어져야 할 것이다.



8. 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.
- 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.
- Gere · Timoshenko, 1999, 「재료역학」. 김문생, 이종원, 황충렬 공역, 서울: 半島出版社.
- 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

산천단 언덕을 속절없이 몇 년을 오르내리며 제주대학교 산업대학원 건설환경공학과 여러 교수님을 뵙게 된 것은 내 인생의 크나큰 행운이었습니다. 현장과 그 주변의 좁은 공간 속에서 사고력 조차도 좁아지려나 하는 걱정과 자꾸만 변해가는 환경에 웬지 소외되는 듯한 열등감을 털어보려고 시작한 것이 오늘까지 이르게 되었습니다.

이 논문이 완성 되도록 처음부터 끝까지 열과 성을 다하여 주신 박상렬 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 항상 변함없이 격려의 말씀을 아끼지 않으셨던 양성기 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다. 또한 산업대학원의 강의에 세심한 배려를 해주셨던 남정만 교수님, 이병걸 교수님, 김상진 교수님께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 재학 중에 꼭 강의실에서 뵙고 싶었지만 뒤늦게야 뵙게 된 김남형 교수님께도 앞으로 뵈는 날을 기대하며 감사의 말씀을 드립니다.

산업대학원의 특성인지, 같이 5학기 강의를 들었던 동료 학생들의 격려가 없었다면 오늘 이 자리는 없었을지도 모르겠습니다. 특히 같은 실험실에서 논문을 마무리 했던 고�광민씨의 고마움도 잊을 수 없습니다.

논문 정리를 끝까지 도와준 철근 콘크리트 연구실의 여러 학생들에게도 심심한 감사의 말씀을 드립니다.

또한 말없이 후원해 준 아내에게도 고마운 마음을 전합니다.

2006년 12월