

碩士學位論文

FRP 附着工法에 관한 研究

指導教授 楊 城 基



71.663

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

趙 汝 珍

1999年 8月

FRP 附着工法에 관한 研究

指導教授 楊 城 基

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

1999年 8月 日


濟州大學校 産業大學院
建設環境工學科(土木工學)

趙 汝 珍

趙汝珍의 工學碩士學位 論文을 認准함

1999年 8月 日

委員長 

委 員 

委 員 

A STUDY ON FRP BONDING TECHNIQUE
FOR STRENGTHENING OF STRUCTURES

Yeo-Jin Cho

Supervised by Professor Sung-Kee Yang



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

Abstract

Advanced composites are likely to play a significant role in future construction applications, particularly in the strengthening and rehabilitation of existing bridges. Techniques such as external prestressing and epoxy-bonded steel plate have been used successfully to increase the strength of girders in existing bridges and buildings. High strength composite plates are used as an extension of the steel plating method, offering the advantages of composite materials such as immunity to corrosion, a low volume to weight ratio, and unlimited delivery length thus eliminating the need for joints.

This thesis provides a review of existing literature on the repair and strengthening of reinforced and prestressed concrete beams using glued-on Fiber Reinforced Polymer(FRP) sheets, particularly Carbon Fiber Reinforced Polymer(CFRP) sheets. A particular emphasis is placed at synthesizing the information so as to allow engineers to first comprehend the material, and then make rational decision about its use.

목 차

I. 서론	1
1. 연구 배경과 목적	1
2. 연구 내용과 범위	3
3. 논문의 구성	3
II. FRP 부착공법의 소개	5
1. FRP의 소개	5
2. FRP 부착공법의 목적	10
3. FRP 부착공법의 내용	13
4. FRP 부착공법의 장점	20
III. FRP 부착공법의 재료와 시스템	21
1. 탄소 FRP 쉬트/판	21

2. 접착제(Adhesive)	26
3. CFRP 부착 보강 시스템 종류에 따른 비교	29
IV. FRP 부착공법의 적용과정	31
1. 현장 조건에 대한 평가	31
2. 표면처리	32
3. 접착제의 혼합	35
4. 구조물에의 적용	37
5. 부착공법 시스템별 적용과정의 비교	40
6. 안전 예방과 응급 조치	41
V. 부착공법의 연구와 현장적용	43
1. 서론	43
2. 구조적 거동	44



3. 힘 거동	48
4. 전단 거동	57
5. 부착	61
6. 현장 적용	63
VI. 결론	67
참고문헌	69
감사의 글	73



LIST OF TABLES

Table 3.1 Technical data for CFRP sheet and plate	22
Table 3.2 Comparison of steel and FRP bonding techniques	24
Table 3.3 Comparison of fibers to various environments	25
Table 3.4 Comparison of different FRP sheets	26
Table 3.5 Properties of different adhesives	28
Table 3.6 Applicability of different strengthening systems	30
Table 4.1 Recommended methods for surface preparation	34
Table 4.2 Comparison of application procedure for different strengthening systems	40



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 CFRP sheet and plate	6
Fig. 2.2 FRP reinforcing bar and tendon	7
Fig. 2.3 Stress-strain curves of FRP reinforcements	8
Fig. 2.4 Flowchart for repair and strengthening system	12
Fig. 2.5 Typical strengthening using bonding technique	14
Fig. 2.6 Procedure for FRP bonding technique	15
Fig. 2.7 Strengthening examples using CFRP sheets	16
Fig. 2.8 Strengthening of slab using CFRP plate	19
Fig. 5.1 Typical failure modes of beams strengthened with FRP sheets or plate	47

I. 서론

1. 연구 배경과 목적

최근에 개발된 FRP(Fiber Reinforced Polymer) 합성재료는 미래의 건설재료로서, 특히 기존 교량을 보강하고 개량하는데 있어서 중요한 역할을 할 것으로 판단된다. 기존 교량들의 결함은 증가하는 교통하중에 의한 구조물의 손상과 환경적 요인, 불충분한 세부설계, 유지 보수의 소홀 등에 기인하고 있다. 따라서 소극적인 보수만으로는 이러한 교량을 증가된 교통하중에 안전하게 견딜 수 있는 수준으로 끌어올릴 수 없기 때문에 반드시 보강공법을 고려해야 할 것이다.



이제까지 외부 프리스트레싱(external prestressing) 공법과 강판 부착공법등이 기존 교량과 건물의 보나 슬라브의 강도를 성공적으로 증가시켜 왔다. 고강도 FRP 쉬트나 FRP 판 부착공법은 강판 부착공법을 확장시킨 방법인데 비부식성, 경량성, 무제한적 사용 길이로 인한 접이음의 불필요성 등과 같은 FRP 재료의 장점을 제공하고 있다. FRP 쉬트나 FRP 판은 휨 보강의 경우 보나 슬라브의 인장부 하면에 에폭시 접착제 등으로 부착하여 구조부재 강도와 강성을 증가시킨다. 이 보강공법의 가장 큰 장점은 현장적용이 용이하고 강판의 부식으로 인한 부착강도의 저하를 막을 수 있으며 외부 프리스트레싱 공법에서와 같은 특수 정착장치가 필요 없다는 점이다.

위와 같은 장점으로 최근 개발된 FRP 슈트/판 부착공법은 선진국에서는 기존 콘크리트 구조물의 보강에 이미 실용화되었으며 우리 나라에서도 기존의 강판 부착공법을 빠르게 대체해 나가고 있다. 그러나 FRP 부착공법의 현장적용의 증가에도 불구하고 FRP 재료와 공법 자체에 대한 깊은 이해가 부족하고 일반적인 표준 설계기준이나 시공 시방규정, 품질관리 규정 등이 마련되지 않은 실정이어서 FRP 부착공법의 효과적인 현장적용에 어려움을 주고 있다.

현재 제주도내 각종 도로 상에 가설되어 있는 교량은 약 230여개소로 대부분 철근콘크리트 교량으로 이루어져 있으며, 최근의 안전 점검 결과에 따르면 이중 약 40%가 재가설하거나 보수, 보강이 필요한 실정이다. 제주도는 지난 4년간 35개소의 교량을 재가설하였고 강판 부착공법으로 11개소를 보강하였다. 따라서 FRP 부착공법은 적절한 보강공법의 부재로 인한 기술적인 불확신으로 재가설되는 경우와 강판 부착공법의 적용이 부적절한 경우, 즉 부식작용이 우려되거나, 부재길이가 길거나, 곡선부재의 보강이 필요한 경우에 적극적으로 고려해야 할 공법으로 판단된다.

따라서 본 논문은 FRP 부착공법에 관련된 기술자료와 연구 문헌들을 조사, 정리하고 평가함으로써 FRP 부착공법에 대한 지식과 이해를 증진시킴을 첫 번째 목적으로 하였다. 두 번째 목적으로는 FRP 부착공법 연구에 대한 심도깊은 정리, 평가를 통하여 앞으로의 연구개발과제를 찾는 데 있으며, 마지막으로 부착공법의 설계 및 현장 시공 시 기술자료로서 활용하고자 하였다.

2. 연구 내용과 범위

본 연구는 철근 콘크리트와 프리스트레스 콘크리트 보나 슬라브를 보강하기 위한 FRP 쉬트/판, 특히 탄소 FRP 쉬트/판을 사용한 부착 공법에 관하여 현재까지의 관련문헌을 조사연구 하였다. 특히 FRP 부착 공법의 설계자 및 시공자들이 FRP 재료들을 이해하고 공법을 합리적으로 적용할 수 있도록 하기 위하여 관련 정보들을 종합, 정리하는데 중점을 두었다. 이를 위하여 FRP 쉬트/ 판 재료와 공법 시스템을 제공하는 회사들의 기술자료와 세계의 연구소와 대학에서 연구 발표된 문헌을 조사, 정리, 요약, 평가하였다.

이를 위하여 본 논문은 FRP 부착공법에 대한 연구보고서(박상렬, 1997)을 주로 참조하였다.



3. 논문의 구성

1장에서는 본 연구의 배경과 목적, 연구 내용과 범위를 서술하였다.

2장에서는 FRP 부착공법에 대한 일반적인 소개를 다루고 있는데 FRP 재료와 역사에 대한 소개, FRP 부착공법의 내용, 부착 공법의 목적, FRP 부착공법의 장점을 서술하고 있다.

3장에서는 FRP 부착공법의 재료와 시스템에 대하여 기술하고 있다. 먼저 재료에 있어서 강판 부착공법과 FRP 쉬트/판 부착공법을

비교하였으며 FRP 종류에 따라서도 비교하고 있다. 또한 FRP 슈트/판과 접착제의 역학적 성질과 내구성에 대한 요약된 기술적인 자료도 실고 있으며 시중의 상업적 탄소 FRP 슈트 보강 시스템별 적용성에 대한 평가도 기술하고 있다.

4장에서는 콘크리트 보의 표면에 부착되는 CFRP 슈트의 적용에 관한 여러 과정들에 대한 정보를 제공하고 있다. 즉, 표면처리, 접착제의 혼합, 구조물에의 적용절차, 추가적인 제한사항과 요구 조건들에 대해 설명하고 있다. 마지막으로 안전 예방책과 응급처치에 관련된 특별한 정보를 수록하고 있다.

5장에서는 콘크리트 구조물의 보수 보강에 이용되는 FRP 부착공법에 관한 문헌연구를 보강된 콘크리트 부재의 구조적 거동을 중심으로 다루고 있다. 대상 연구자료들은 세계 각국의 대학과 기술연구소에 의해서 연구된 것들이다. 앞 부분에서는 FRP 부착공법에 의하여 외적으로 보강된 콘크리트 부재의 구조적 거동이 파괴 형태, 휨거동, 전단거동 등으로 나누어 서술되고 있다. 뒷 부분에서는 FRP 부착공법으로 보강된 부재의 구조적 거동에 가장 큰 영향을 입히는 부착강도에 대한 연구들을 조사, 정리, 요약하였다.

6장에서는 FRP 부착공법에 관한 상기 연구를 통하여 얻은 결론을 간단히 요약하여 기술하고 있다.

II. FRP 부착공법의 소개

1. FRP의 소개

가. FRP 재료

Fiber Reinforced Polymer(FRP)는 일반적으로 강성이 큰 섬유로 보강된 고분자 중합체(polimer matrix)로 정의된다. 건설 공사에 사용되는 FRP는 섬유의 체적비율을 65%까지 사용하고 있다. 현재 FRP는 봉(bar), 케이블(cable, strand), 격자(grid), 쉬트(sheet), 판(plate) 등의 형태로 생산되고 있다. 이와 같은 FRP 제품은 일반적으로 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드 섬유 등의 긴 섬유들을 접합제(resin matrix)로 하여 병렬로 길게 접합하여 만든다. 접착제로는 에폭시, 폴리에스터, 비닐에스터 등의 열경화성물질이나 나일론, 폴리에틸렌 등의 열가소성물질이 사용된다.

토목공학에 적용하여 주로 사용되는 섬유들은 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드 섬유들이다. 가장 흔한 형태의 FRP 제품 중의 하나는 박판(laminate)이다. 박판은 많은 수의 얇은 섬유층들과 접합제(matrix)를 한 데 묶고 그들을 원하는 두께로 결합하여 만들어진 것으로 비교적 얇은 쉬트(sheet)나 비교적 두꺼운 판(plate)등이 있다. 탄소섬유로 만들어진 FRP 쉬트/판(CFRP), 유리섬유로 만들어진 FRP 쉬트/판(GFRP), 또는 아라미드 섬유로 만들어진 FRP 쉬트/판(AFRP)들은 에폭시, 폴리에스터, 비닐에스터 등의 고분자 접착제로 접착하여 강판 대신 사용되고 있다. Fig. 2.1과 2.2는 현재 사용되고

있는 FRP 쉬트/판과 FRP 봉/케이블을 각각 보여주고 있다.

역학적으로 FRP는 탄성적인 성질을 가지고 있으며, 항복 (yielding)과 같은 소성변형(plastic deformation) 없이 파괴 시 취성 적 이다. 섬유방향으로는 강재보다 훨씬 높은 인장강도를 가지고 있 으나 섬유 직각방향으로는 비교적 낮은 전단강도를 가지고 있다. FRP의 탄성계수는 섬유의 종류와 함유량에 따라 다르나 일반적으 로 강재보다 낮은 탄성계수를 보이고 있다. Fig. 2.3은 탄소, 유리, 아라미드 FRP의 응력-변형률 곡선(stress-strain curve)을 보여주고 있다.

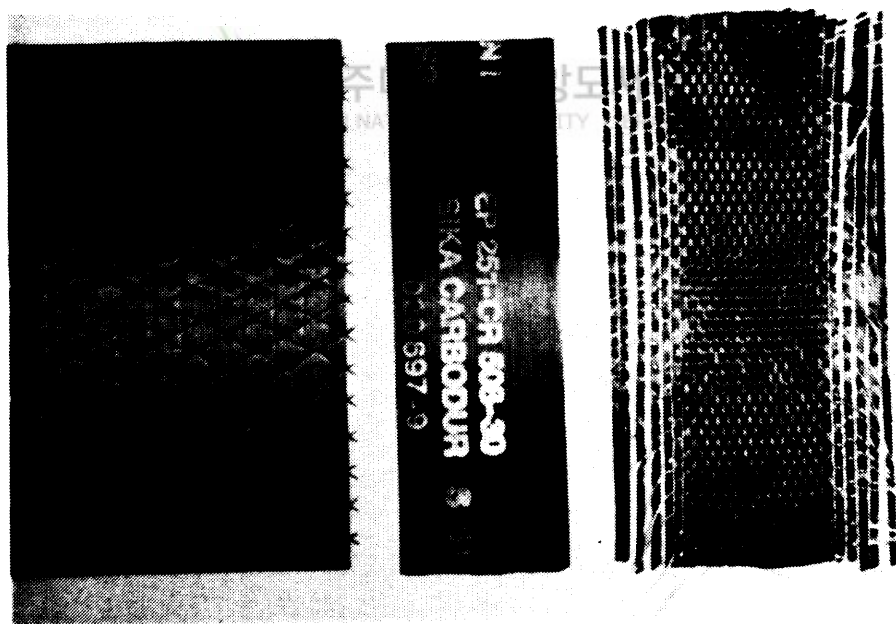


Fig. 2.1 CFRP sheet and plate

FRP는 장점으로 비부식성, 고 인장강도, 비 전기.전자성, 경량성 등을 장점으로 가지고 있으며, 단점으로 파괴시 취성적인 성질과 낮은 횡방향 전단강도, 높은 인장응력 하에서의 응력부식(stress-rupture) 현상 등이 있고 강재에 비하여 고가인 점등이 있다.



Fig. 2.2 FRP reinforcing bar and tendon

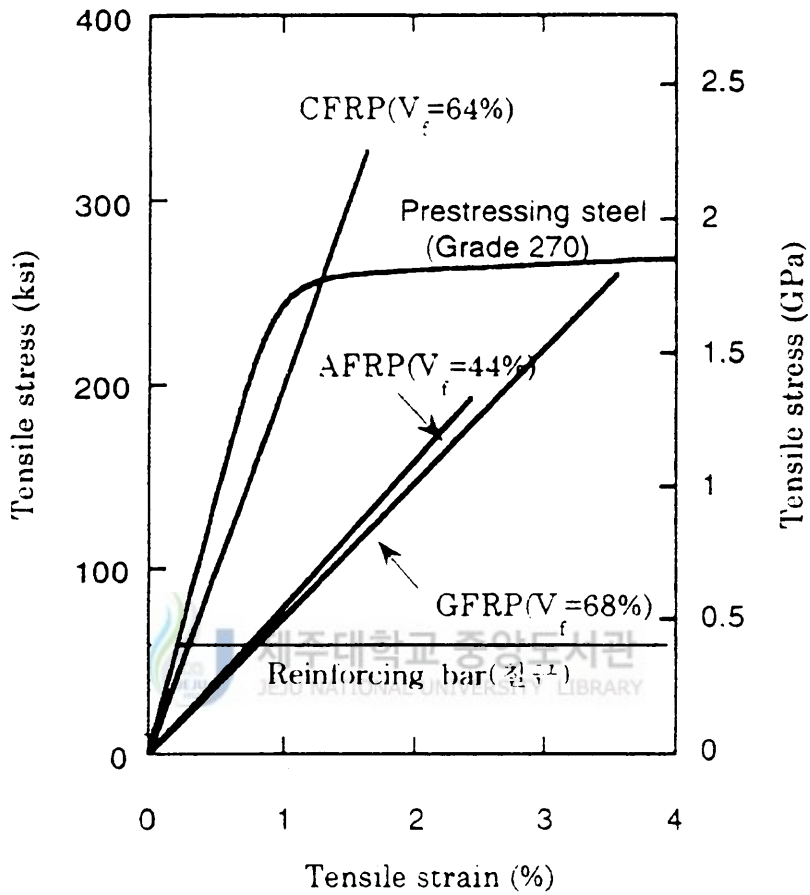


Fig. 2.3 Stress-strain curves of various FRP reinforcements

나. FRP의 역사


토목(건축)재료로서의 FRP제품은 1950년대 중반 콘크리트 구조물의 인장재(reinforcement)로서 철근대신 처음 사용되기 시작하였다. 1970년대 말에는 부식방지를 위한 에폭시 도막 철근(epoxy coated reinforcing bar)과 비교하기 위한 연구가 시작되었다. 1986년에는 세계 최초로 독일의 고속도로 교량에 FRP 봉이 철근 대용으로 사용되었다. 현재 FRP 쉬트나 판을 사용한 부착 보강공법은 미국, 일본, 유럽 등지에선 이미 실용화 되었으며 우리나라에서는 현장에서 강판공법을 대체해 나가고 있는 단계에 있다. FRP봉이나 케이블은 신설 콘크리트 구조물에 있어서는 시험 적용하고 있는 단계로 세계 여러나라의 연구소와 대학에서 많은 연구를 통하여 그 적용성(applicability)을 확인하고 설계기준이나 시방규정을 마련하고 있는 단계이다.



1995년 기준으로 미국 약 7개, 일본 약 7개, 유럽 약 6개의 대규모 업체에서 다양한 형태의 토목재료용 FRP를 생산하고 있다. FRP는 토목재료로서 엄청난 잠재적인 시장성 때문에 여러나라의 기업체, 연구소, 대학 등에서 많은 연구가 진행되고 있는 중이며, 특히 실제 구조물에 FRP를 사용한 기간이 짧은 관계로 내구성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

2. FRP 부착공법의 목적

FRP 쉬트/판이나 그리드(grid) 등을 사용한 부착공법은 다음의 목적들을 위해 사용된다.

- 하중 조건의 변화
 - 교량의 트럭 하중 증가
 - 교량의 트럭 교통량 증가
 - 건물의 활하중 증가
 - 건물의 중기계 설치
 - 진동을 받는 구조물
- 사용성의 향상 
 - 변형의 감소(주로 처짐)
 - 철근/PC강재의 응력 감소(피로)
 - 균열 폭의 감소
- 설계 및 시공 결함의 수정
 - 불충분한 철근량/강재량
 - 불충분한 부재 깊이(두께)
 - 품질관리의 소홀로 인한 저품질 시공
- 손상된 구조부재의 보수
 - 콘크리트의 열화
 - 철근의 부식
 - 차량의 충격에 의한 구조 부재의 손상

- 화재에 의한 구조 부재의 손상
- 구조적 수정
 - 통로 설치를 위한 벽이나 기둥의 제거
 - 개구부 설치를 위한 슬라브의 제거
- 내진력 증대
 - 기둥의 보강
 - 기둥-보의 연결부 보강
- 구조물의 용도 변화: 하중조건 변화와 구조적 수정

일반적으로 FRP 부착공법은 상기 목적들을 달성하기 위하여 Fig. 2.4의 시설물 유지관리 및 보수 보강 시스템의 5단계 과정에 따라 적용된다.

시설물 유지관리 및 보수·보강 시스템

▶ 1단계 : 구조결함상태조사

- 현황조사 - 구조물내력, 설계도서 환경조건 및 육안조사
- 상세조사 - 현장비파괴 및 각종시험 테스트

▶ 2단계 : 평가 및 분석

- 구조적 능력검토 - 인장능력, 전단능력, 휨능력, 압축능력, 기타부재의 안전성
- 기능적 요인검토 - 누수, 균열, 마모, 처짐, 열화, 박리, 발청, 조인트 등

▶ 3단계 : 보수·보강설계

- 응력계산 및 보강방법 결정
- 사용재료 및 시공 방법결정
- 시방서 및 예산서 작성

▶ 4단계 : 보수·보강시공

- 구조적보강 필요시 : 단면확장 및 오버레이, 합성구조화(철판/CF), 탄소섬유 및 에폭시 보강
- 표면보수 및 보호필요시 : 단면치환 및 복구, 지수, 차수, 조인트보수, 표면보호처리

▶ 5단계 : 사후관리

- 완료상태에 대한 자체검사시험 및 평가
- 사후관리에 대한 유지관리방안

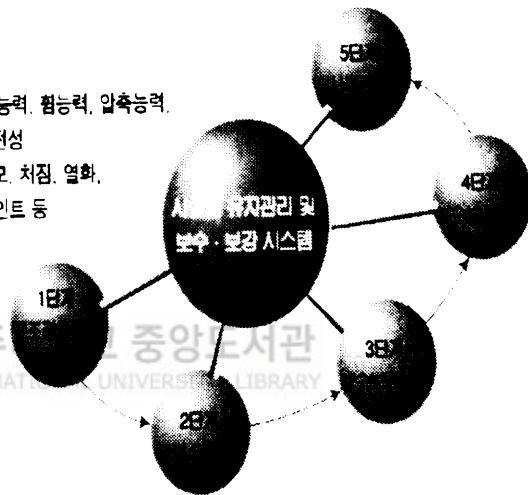


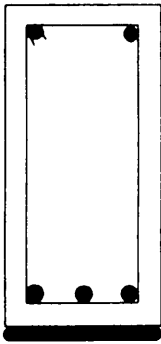
Fig. 2.4 Flowchart for repair and strengthening system

3. FRP 부착공법의 내용

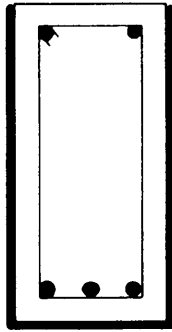
FRP 슈트/판 부착공법은 아래와 같은 일반적인 방법으로 철근 콘크리트나 프리스트레스트 콘크리트 구조물을 보강한다.

- FRP 슈트, 판, 그리드(grid) 등을 구조부재에 부착시켜 보강
- FRP 슈트, 판, 그리드를 콘크리트 보나 슬라브의 인장부 하면에 부착시켜 부재의 휨강도 증대
- FRP 슈트/판으로 콘크리트 보의 복부(web)에 감싸 부착시켜 전단강도 증대
- FRP사나 슈트/판으로 콘크리트 기둥을 감싸 구속효과(confinement effect)를 향상시켜 좁으므로써 하중 지지 능력과 연성을 증대
- 기둥, 보 연결 부위를 FRP사나 슈트로 감싸 휨강도와 전단강도를 연성과 함께 증대
- 접착제(adhesive)의 균열 봉합효과와 피복효과로 철근/PC강재의 부식방지와 방수효과

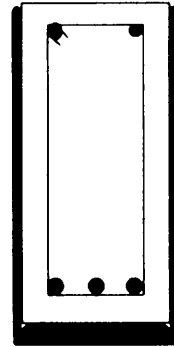
대표적인 구조보강으로 휨 및 전단에 대하여 직사각형 콘크리트 보를 보강하는 방법들을 Fig. 2.5에 보여주고 있으며, FRP 부착공법은 일반적으로 Fig. 2.6와 같은 과정으로 콘크리트 구조물에 적용된다. 즉, 콘크리트 표면 처리, 프라이머(primer) 바름, 퍼티(putty) 바름(필요시), 접착제 바름(undercoating), FRP 슈트 부착, 접착제 바름(overcoating), 마감 혹은 페인팅(painting)등의 순서로 적용한다. 각종 콘크리트 구조물의 보강 예들이 Fig. 2.7에 나타나 있다.



휨 보강



전단보강



휨 및 전단보강

Fig. 2.5 Typical strengthening using bonding technique

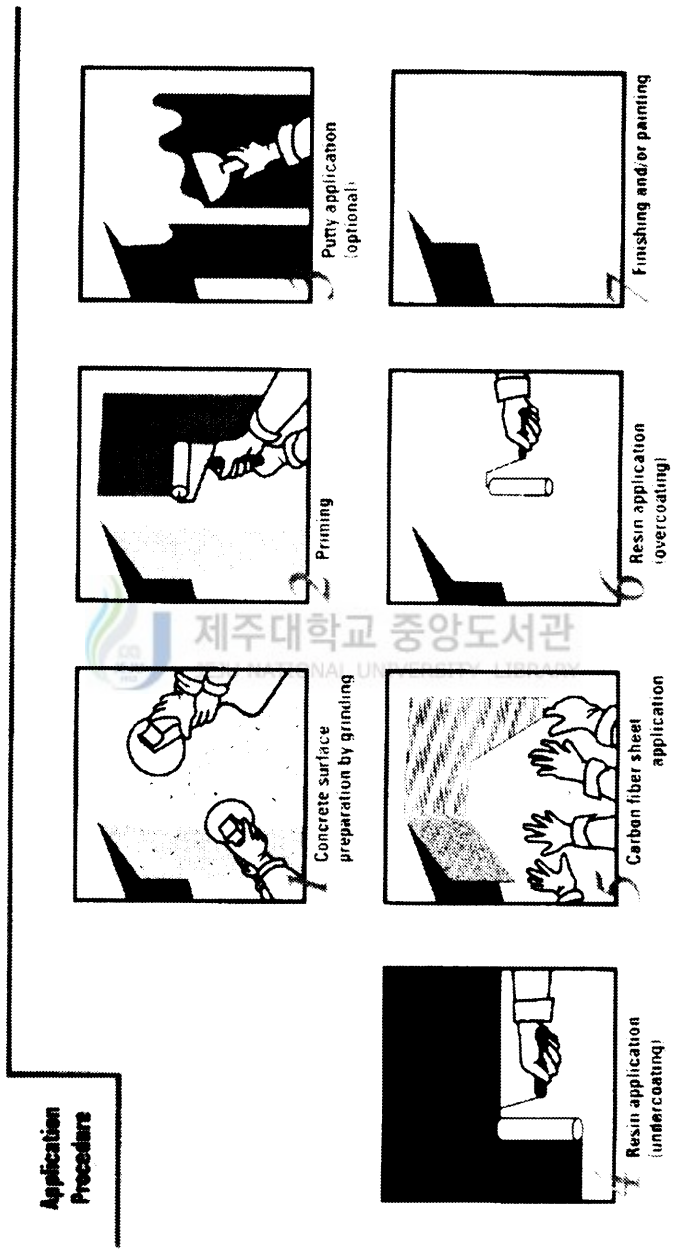
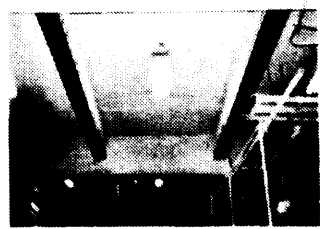
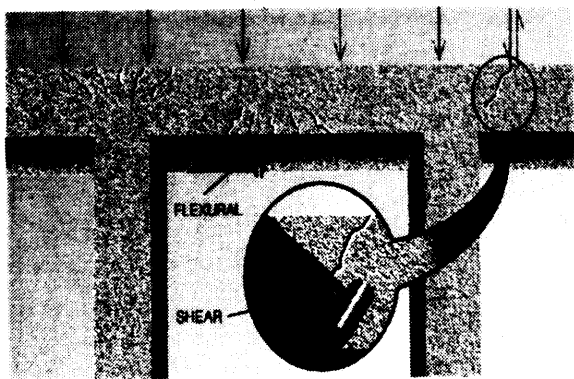


Fig. 2.6 Procedure for FRP bonding technique

BEAMS



SLABS

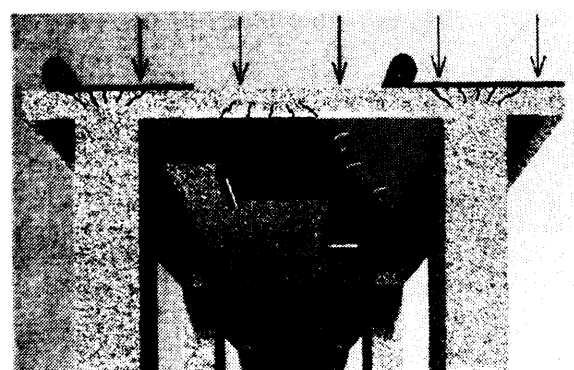
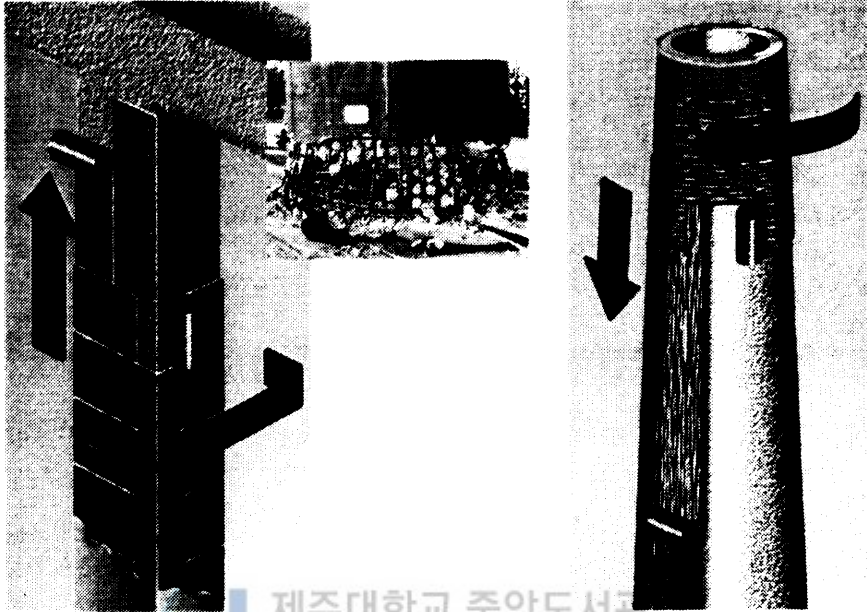


Fig. 2.7 Strengthening examples using FRP sheets(1)

COLUMNS

CHIMNEYS



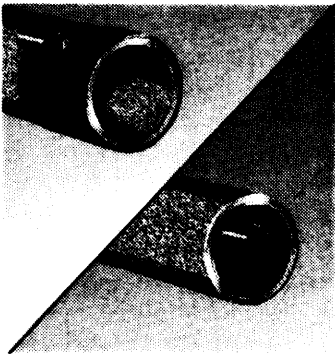
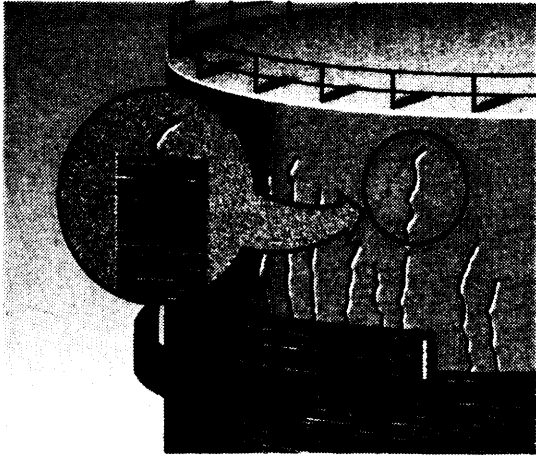
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



Fig. 2.7 Strengthening examples using FRP sheets(2)

SILO/TANK

PIPE/TUNNEL



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

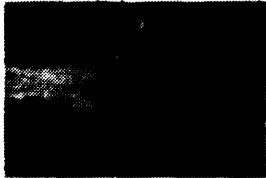
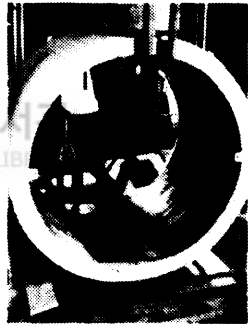
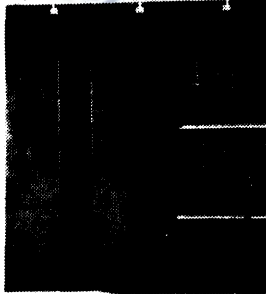
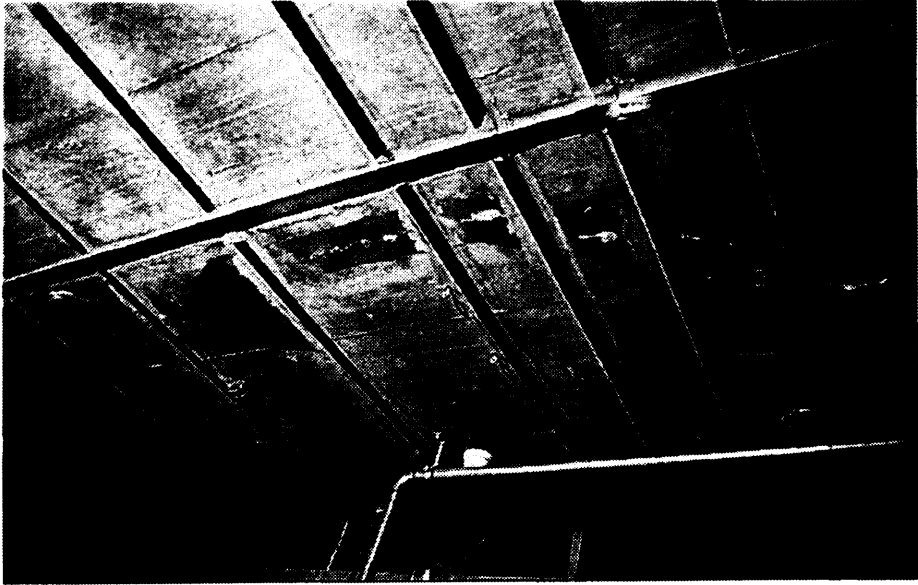


Fig. 2.7 Strengthening examples using FRP sheets(3)



제주대학교 중앙도서관
Fig. 2.8 Strengthening of slab using CFRP plate

4. FRP 부착공법의 장점

탄소나, 유리 또는 아라미드 섬유로 만들어진 여러 형태의 일방향 또는 양방향 FRP 쉬트/판들이 기존 콘크리트 구조물을 보강하는데 강판 대용으로 사용되고 있다. FRP 쉬트나 판은 다음과 같이 부착 공법에 적용되는데 알맞은 장점들을 지니고 있다.

- 비부식성
- 높은 인장 응력과 양호한 탄성계수
- 경량성
- 연결 부위 불필요
- 용이한 시공성



III. FRP 부착공법의 재료와 시스템

1. 탄소 FRP 쉬트/판

탄소 FRP(Carbon FRP) 와 유리 FRP(Glass FRP) 쉬트/판은 콘크리트 구조물을 외적으로 보강하는 데에 있어서 좋은 재료이다. 그러나 GFRP의 몇 가지 성질들, 즉, 자외선에 대한 열화도, 낮은 피로 저항성, 고응력-파괴 현상(stress-rupture), 비교적 낮은 탄성계수 등을 고려하여 볼 때 CFRP 쉬트/판 (특히 탄소/에폭시계)이 강판을 대용하여 콘크리트 구조물의 보강에 적용함에 있어서 가장 높은 잠재력을 가지고 있다. CFRP 쉬트는 손쉽게 취급할 수 있는 경량성과 현저한 피로 저항성, 고강도와 고강성을 가지고 있다. 더구나 CFRP 쉬트는 콘크리트 구조물 내부나 외부에서 일어날 수 있는 모든 형태의 환경적인 영향에 잘 견디어 내는 것으로 알려져 있다.

CFRP 쉬트/판은 탄소섬유들과 에폭시 접착제의 결합으로 구성된 합성물질이다. 쉬트/판 속에 있는 모든 섬유들은 한 방향으로 구조를 형성하고 있다. 따라서 CFRP 쉬트/판은 섬유 방향으로 매우 높은 강도와 탄성계수를 지닌 탄성 재료이다. CFRP 쉬트/판의 횡방향(섬유 직각 방향) 전단강도는 낮으나 이 단점은 인장방향과 섬유 방향을 일치시켜 부착함으로써 부착 보강공법의 적용에 영향을 주지 않는다.

Table 3.1 Technical data for CFRP sheet and plate

성질 \ 제품	Sika CarboDur	Tonon Forca Tow 쉬트		Mitsubishi Replark
타입/등급	Type50 Type80 Type100	FTS-C1-20 FTS-C1-30 FTS-C5-30	FTS-GE-30 FTS-GT-30	Type20 Type30 TypeMM TypeHM
섬유 타입	탄소 섬유 Toray T300 & T700	고인장강력 CF 고인장강력 CF 고탄성계수 CF	E- 유리섬유 T- 유리섬유	표준탄성계수 CF 표준탄성계수 CF 중간탄성계수 CF 고탄성계수 CF
접착제	에폭시 접착제	에폭시 접착제	에폭시 접착제	에폭시 접착제
인장강도	2,400 MPa	3,480 MPa 3,480 MPa 2,942 MPa	1,516 MPa 2,694 MPa	3,400 MPa 3,400 MPa 2,900 MPa 1,900 MPa
탄성계수	150 GPa이상	230 GPa 230 GPa 373 GPa	72.6 GPa 87.1 GPa	230 GPa 230 GPa 390 GPa 640 GPa
파괴시 극한 신장도(%)	1.4	1.5 1.5 0.8	2.1 3.2	N/A
단위면적 당 무게 (g/m ²)	N/A**	200 300 300	300 300	200 300 300 300
밀도 ρ	1.6 g/cm ³	1.82 g/cm ³	2.55 g/cm ³ 2.50 g/cm ³	1.6 g/cm ³
두께*	1.2 mm	0.11 mm 0.17 mm 0.17 mm	0.118 mm 0.120 mm	0.11 mm 0.17 mm 0.17 mm 0.14 mm
쉬트 폭 (cm)	50 mm 80 mm	50 cm 50 cm 50 cm	50 cm 50 cm	25 cm 33 cm 50 cm
접착제	Sikadur30	Primer, FR-E3P, FR-E3PS, FR-E3PW	Primer, FR-E3P, FR-E3PS, FR-E3PW	EpothermPrimer, Putty, Resin,
적용 길이	250 m 까지	표준:100m	표준:100m	표준:100m

* 단위 길이 당 섬유의 면적, ** N/A=참고자료 없음

일반적으로 CFRP는 다음의 기준에 따라 구분된다.

- 7000 MPa(1015 ksi)까지의 인장강도를 갖는 고강도 섬유
- 600 GPa(87000 ksi)까지의 탄성계수를 갖는 고 탄성계수 섬유

어떤 종류의 CFRP를 특별히 사용해야 하는가는 적용하는 목적에 따라 달라진다. 필요로 하는 보강 방법을 안정성에 연관시켜야 할 것인지, 아니면 사용성에 연관시킬 것인지가 고려되어야 하며, 부재의 보강해야 할 응력이 압축응력인지, 인장응력인지, 전단응력인지를 검토해야 할 것이다. 이렇게 하여 CFRP 쉬트 중에서 적합한 종류가 선택되고 적합한 방향으로 적용되어야 할 것이다

일방향성 FRP 재료들은 여러 회사에서 생산되고 있다. 이 회사들은 광범위한 등급의 탄소 섬유 쉬트를 공급하고 있다. 이 논문을 작성하는 시점에서 사용되는 대부분의 연구자료들은 다음의 세가지 제품에 관련된 것으로, Sika사의 CaboDur Plate, Tonen사의 Forca Tow Sheet, Mitsubishi사의 Replark이다. 이 세가지 제품에 관한 물리적인 성질과 역학적인 성질을 Table 3.1에 요약하였다.

가. 강판 부착공법과 FRP 쉬트 부착공법의 비교

강판을 붙여서 보강하는 공법은 세계적으로 널리 보급, 사용되어 왔다. 스위스의 한 연방 연구소인(EMPA)의 U. Meier (1995)에 따르면 부식 작용이 없고 보강 길이가 5m 미만일 때, 강판은 적절한 해결책을 제공해 준다고 한다. 그러나 부식작용이 예상되고 보강해야 할 구조부재의 길이가 길어 취급 등이 지배적인 역할을 하는 경우에 있어서는 FRP 쉬트를 고려해야 한다고 언급하였다.

콘크리트 구조물에 적용함에 있어서 CFRP 슈트 부착 공법과 강판 부착 공법을 Table 3.2에서 비교하고 있다(EMPA, Meier, 1995).

Table 3.2 Comparison of steel and FRP bonding technique

기준 \ 재료	FRP 박판	강판
무게	경량, $\rho = 1.6\text{g/cm}^3$	중량, $\rho = 8.0\text{g/cm}^3$
재료의 강도	섬유방향으로 매우 높은 인장강도, 섬유 직각 방향으로 낮은 전단강도	모든 방향에서 높은 강도
기계적인 거동	취성	연성
피로	뛰어남	적당
전체 두께	매우 얇음	얇음
적용 길이	무제한	제한, 이음부 필요
이음부	쉬움	복잡
접착제 종류	에폭시 접착제	에폭시 접착제
적용기술	설치장비 비용 저렴. 구조물 하단 보강 용이	철관 상승 장비와 철관 고정 장치 필요. 구조물 하단 보강 어려움
취급	용이, 탄력적인 재료로 비 평면에 적용 가능	불편, 단단한 재료로 비 평면에 적용 불가
재료비	높음	낮음
설치비	낮음	높음
부식	비부식, 알칼리에 저항	접착계면 부식
내구성	접착제의 내구성에 영향	접착제의 내구성에 영향

나. FRP 섬유 종류에 따른 비교

섬유는 그것이 천연적인 것이든 합성된 것이든 FRP의 기초를 이루는 구성 성분이다. 그들은 일반적으로 FRP의 가장 큰 부피를 차지하고 있으며 하중을 전달하는 요소이다. 보강공법에 사용되는

FRP 재료는 섬유유 물리적, 역학적 성질과 함께 내구성을 고려하여 선택되어진다. 탄소 섬유유로 이루어진 FRP 쉬트/판은 Table 3.3(Meier, 1995)에서 보인 바와 같이 환경에 대한 대부분의 필요조건들을 충족시키고 있기 때문에 토목공학 분야에 적용하는데 있어서 가장 좋은 재료이다. 유리섬유 및 아라미드 섬유유와 같은 다른 종류의 섬유유들은 내구성에 대한 조건을 충분히 만족시키지 못하며 따라서 열악한 환경에 노출되는 경우에는 사용될 수 없다.

Table 3.3 Comparison of fibers to various environments

성질 \ 섬유	탄소 섬유유 (CF)	유리 섬유유 (GF)	아라미드 섬유유(AF)
습기에 대한 취약성	없음	있음	없음
용제에 대한 취약성	없음	N/A	N/A
산에 대한 취약성	없음	있음	있음
염기에 대한 취약성	없음	있음	있음
자외선에 대한 취약성	N/A	N/A	있음

* N/A=참고자료 없음

다. FRP 쉬트 종류에 따른 비교

탄소 섬유유, 아라미드 섬유유, 그리고 유리섬유유로 보강된 FRP는 토목공학 분야에 적용되고 있는 대표적인 세 종류의 FRP들이다. FRP의 특성은 섬유유와 접합제(matrix)의 성질은 물론 제작 방법과 FRP 자체의 구조에 의해 영향을 받게 된다.

Table 3.4(Meier, 1995)는 구조물에 대한 보강재료로서 FRP 쉬트 종류별로 관련 기준항목들에 대한 평가들이다. 이 평가는 프리스트레스를 도입한 후 콘크리트 구조물에 부착 보강하는 공법에 대해서

도 적용할 수 있다. Table 3.4로부터 탄소 FRP 쉬트/판이 기존 콘크리트 구조물 보강에 가장 적합하다는 사실을 알 수 있다.

Table 3.4 Comparison of different FRP sheets

성질 \ FRP 쉬트	탄소 FRP	유리 FRP	아라미드 FRP
인장강도	매우 좋음	매우 좋음	매우 좋음
압축강도	매우 좋음	좋음	부적당함
탄성 계수	매우 좋음	적당함	좋음
장기 거동	매우 좋음	적당함	좋음
피로 거동	탁월함	적당함	좋음
용적 밀도	좋음	적당함	탁월함

2. 접착제(Adhesive)

접착제는 구조물의 외양을 변화시킴 없이 구조 요소들을 상호 부착시키는 작용을 하고 있다. 부착력은 접착제와 부착된 재료들 간의 분자인력에 의하여 발생된다. 접착제의 강도는 접착제 분자의 모양과 분자 간의 거리에 연관되어 있다. 부착 강도는 더러움, 기름, 먼지, 그리스와 같은 요인들에 의해 현저히 감소될 수 있다. 따라서 부착되어질 콘크리트 면의 철저한 표면처리가 매우 중요하다. 외부로 노출된 골재에 대한 부착력이 일반적으로 경화된 시멘트풀(cement paste)에 대한 부착력보다 더 좋다. 접착제에 의한 부착은 전 부착면에 걸쳐 고르게 분포된 부착응력을 나타낸다. 이와는 대조적으로 볼트 연결과 같은 고정 방법은 응력의 집중을 유발시킨다.

FRP 제품에 사용 가능한 접착제는 시장에 많이 나와 있는데 대부분의 이러한 접착제들은 유기 고분자들(에폭시 접착제)이다. 아래 특성들은 구조물의 접착제로서 필수적으로 고려하여야 할 사항들이다.

- 부착된 요소들에 대한 강한 부착력
- 접착제 상호 간의 강한 점착력
- 하중이 재하된 상태에서 매우 낮은 크리이프 경향
- 습도 및 염기성에 대한 양호한 저항성

에폭시(epoxy) 접착제는 조밀한 연결구조를 가지고 있어 위의 요구 사항들에 매우 잘 부합되고 있다.

FRP 제품의 주 생산자들은 특허 받은 접착제들을 함께 제공하고 있는데, FRP 재료와 함께 하나의 보강 시스템(system)으로 공급하고 있다. 특수한 종류의 접착제는 작업 조건들(온도, 습기)에 따라 선택된다. 여러 종류의 접착제가 CFRP 쉬트의 주 생산자들에 의해 아래와 같이 제공되고 있다.

- Tosen사 : 표준, 봄, 여름 용
- Mitsubishi사 : 봄/가을, 겨울, 터널 용
- Sika사 : 에폭시 모르타르(epoxy mortar) 1 종류

대표적인 접착제의 성질에 관한 비교를 다음의 Table 3.5 에 나타내고 있다.

Table 3.5 Properties of different adhesives

성질 \ 제품	Tonen										Mitsubishi						
	Sika	FP-NS	FP-NSS	FP-NSW	FP-S	FP-WE7	FP-WE7W	FR-E3P	FR-E3PS	FR-E3PW	PS-301	PS-401	PS-318	L525	L700S	L700W	L700R
등급	Sikadur 30	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시
재료	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시
종류	접착제	Primer	Primer	Primer	Primer	Primer	Primer	접착제	접착제	접착제	Primer	Primer	Primer	Putty	접착제	접착제	접착제
적용온도(℃)	18-30	15-25	25-35	5-15	5-35	15-25	5-15	15-25	25-35	5-15	5-25	20-35	5-35	5-35	15-35	5-15	5-25
혼합비: 무계	3:1	2:1	2:1	2:1	1:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1	2:1
점도(cps)	N/A*	2,000	2,000	1,300	90	45,000	45,000	20,000	20,000	10,000	500	500	17	Putty	4,000	3,500	4,000
Pot Life(분)																	
@ 30℃		40	40	20	120	40	20	40	40	20	25	140	120	30	50	(20)	(20)
@ 20℃ (23℃)	(70)	120	120	20	120	40	50	110	110	50	(40)	(240)	(2.5)	(50)	(70)	(20)	(20)
@ 10℃					120	50					95		120	100		70	70
경화시간(시)																	
@ 30℃																	
@ 20℃ (23℃)	N/A	10	12	7	3	10	10	7	12	7	-	4.0	-	3.0	3.5	(3.5)	(3.5)
@ 10℃											(3.5)	(7.0)	(2.5)	(3.5)	(6.0)	(3.5)	(3.5)
양생시간(일)																	
@ 30℃	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	-	7
@ 23℃																7	7
@ 10℃																14	14

* N/A = 해당 자료 없음

3. CFRP 보강 시스템 종류에 따른 비교

여러 가지의 보강 시스템에 따른 적용성에 관한 비교를 Table 3.6에서 보여주고 있다. Tonen사의 Forca Tow Sheet, Mitsubishi사의 Replark, Sika사의 CarboDur가 시중의 상업적 시스템으로 고려되었다. Tonen사의 Forca Tow Sheet 시스템은 쉬트 겹수로써 보강량의 조절이 용이하고 얇은 특성으로 보를 감싸 보강하는 전단보강에 유리한 장점을 가지고 있으나 여러 겹의 시공에 따라 부착시공에 하자가 발생할 가능성이 높다. 한편 Sika사의 CarboDur 시스템은 판의 두께가 두꺼워 휨 보강의 경우 여러 겹을 부착시키는 수고를 덜 수 있으나 전단보강의 경우 감싸기가 불가능하여 충분한 정착길이의 확보가 불리한 단점이 있다.



Table 3.6 Applicability of different strengthening systems

시스템 \ 영역	Tonen사 Forca Tow 슈트	Mitsuibishi사 Replark	Sika사 CarboDur
CFRP 슈트(판)	<ul style="list-style-type: none"> -접수로써 보강량 조절 용이 -두께:얇음(0.17mm) -휨 보강 <ul style="list-style-type: none"> · 슬라브, 상자형 보: 1-2 겹 · I 또는 T형 보: 3-5 겹 -전단 보강 <ul style="list-style-type: none"> · 보의 감싸기 용이 · 충분한 부착 면적 · 정착길이 유리 	Tonen Forca Tow슈트와 같음	<ul style="list-style-type: none"> -띠(strip)의 폭으로써 보강량 조절 -두께:두꺼움(1.19mm) -휨 보강 <ul style="list-style-type: none"> · 슬라브, 상자형 보: 몇개의 띠 · I 또는 T형 보: 1 겹 · 부착부의 높은 전단 강도 필요 -전단 보강 <ul style="list-style-type: none"> · 감싸기 불가능 · 불충분한 부착 면적 · 정착 불리
에폭시와 Primer	콘크리트 표면과 기 후 조건에 적합한 양한 접착제 시스템 (4종류의 에폭시와 6종류의 Primer)	기후 조건에 따라 2종류의 에폭시와 3종류의 Primer	Sikdur 30 접착제의 광범위한 적용 <ul style="list-style-type: none"> · 양생 전후 또는 양생기간 동안의 충분한 습윤 상태 · Primer 필요치 않음
현장 적용	<ul style="list-style-type: none"> -일본에서 120개 현장에 적용 -미국 델라웨어주 Foulk Road 교량 (상자형 보)에 적용 	<ul style="list-style-type: none"> -16개 현장에 적용 -플로리다주 교량거더에 적용 	<ul style="list-style-type: none"> -주로 유럽에서 적용 -스위스 이바하 교량 (상자형 보)에 적용
연구 프로그램	<ul style="list-style-type: none"> -델라웨어대학, 델라웨어 도로교통국 -서버지니아대학 -연방고속도로부 (FHA) -캘리포니아대학교 (미해군 공학서비스 센터) -캘리포니아 도로교통국(Caltrans) 	<ul style="list-style-type: none"> -캘리포니아 도로교통국 (Caltrans) -플로리다주 맥클린소재 연방고속도로부 -플로리다주 도로교통국 -조오지아주 공대(GIT) 	<ul style="list-style-type: none"> -스위스 EMPA (연방 재료시험 및 연구소)

IV. 부착 공법의 적용과정

이 장은 여러 상업적 기술자료와 연구 자료로부터 얻은 정보에 근거하여 FRP쉬트 부착 공법의 일반적 적용 방법과 절차를 비교하고 종합하였다. 그러나 어떤 특별한 FRP 부착 공법을 사용하는 경우에는 보강 시스템 공급자로부터 제공된 적용절차를 따라야 한다.

1. 현장 조건에 대한 평가

어떤 보강 기술을 적용할 것인가의 결정은 다음과 같은 기존 구조물의 구조적 조건과 환경적 조건에 대하여 철저한 조사를 통하여 이루어져야만 한다

- 구조 부재의 상태
- 콘크리트 품질
- 철근의 모양 및 배치
- 부재의 기하학적 형태
- 노출된 환경(제설용 소금, 자외선, 동결융해 등)

2. 표면처리

접착제와 부착 재료들 사이의 부착강도는 접착제 자체 뿐만 아니라 부착면의 더러움, 먼지, 기름과 그리스 등과 같은 이물질의 존재 여부에 따라 상당한 영향을 받는다. 많은 공학자들은 규정된 초기의 부착강도를 얻는 데에만 초점을 맞추는 경향이 있으나, 접착성질은 부착면의 환경적 안정성에 의해서 지배를 받고 있다. 이것은 특히 토목구조물에 적용할 경우에 있어서는 온도, 습도, 하중 등의 변동이 매우 크기 때문이다.

따라서 부착되는 콘크리트 부재의 표면과 FRP 쉬트 표면을 철저히 하게 준비, 처리하는 것이 대단히 중요하다. FRP는 손상되지 않고 깨끗한 표면에 적용되어야 한다. FRP 부착공법 제공자들은 적합한 표면상태를 이루기 위한 필요한 조치들을 규정하고 있다. 다음은 상업적 자료뿐만 아니라 대학이나 연구소의 연구 자료로부터 정리한 종합적인 표면처리 방법들이다. 부착공법에 관련된 모든 접착면들(콘크리트 혹은 강재, FRP쉬트)은 표면처리가 되어야 한다

가. 콘크리트

다음은 콘크리트 표면과 FRP 쉬트의 부착강도를 증진시키기 위한 콘크리트 표면처리의 방법과 내용들이다.

- 콘크리트 표면을 거친 상태로 노출시키기 위해서는 다음과 같은 표면처리 기술을 이용한다.
 - 고압 모래연마(Sandblasting)

- 고압수 세척(High-pressure water washing)
 - 부쉬 햄머링(Bush-hammering)
 - 디스크 연마(Disk abrading)
- 대부분의 접착제들은 건조된 표면상태를 요구하므로 콘크리트 표면은 물기가 없어야 한다.
 - 콘크리트 표면에 응결(이슬점 형성)이 발생하지 않도록 한다.
 - 진공청소 등으로 먼지를 제거한다.
 - 그리스, 경화제, 주입액, 왁스, 콘크리트 풍화물질, 도료, 회반죽, 벽지 등 부착을 방해하는 이물질의 제거
 - 경화된 시멘트풀에 보다는 노출된 골재에 부착하는 것이 일반적으로 낫다. 그러므로 레이턴스는 제거되어야 하며 골재는 가능한 한 조심스럽게 노출시켜야 한다.
 - 구조물 틈과 공동 및 평탄치 못한 부분들은 적절한 보수 모르타르(repair mortar)에 의해 충전 보수되어야 한다.
 - 부착될 표면은 평탄해야 한다. 2m 길이 당 비평탄성은 10mm를 초과하지 말아야 한다(Steiner).
 - 콘크리트 표면의 부착 강도는 표면 처리 작업이 끝난 후 ACI 503R에 따라 무작위 pull-off 시험법에 의해 확인되어야 한다. 이 시험은 보수 시스템 제공자가 요구하는 부착면의 최소 인장 응력을 증명하여야 한다.

오염도, 노화도 및 제거해야 할 콘크리트 피복 두께에 따른 여러 가지 표면처리 기술에 관한 비교가 Table 4.1에 제시되어 있다. 오염도와 제거될 콘크리트의 두께가 깊을수록 보다 적극적인 방법을 적용하여야 한다. 콘크리트 부착 표면의 최적의 조도(0.5-1.0 mm)는 sandblasting 에 의해 만들어질 수 있다(Steiner).

Table 4.1 Recommended methods for surface preparation

표면 상태	추천 방법
기름, 그리스, 단백질의 제거	표면을 젖게 하는 약품이 첨가된 증기 분사
페인트의 제거	표면을 젖게 하는 약품과 모래가 첨가된 증기 분사
페인트, 저장도 콘크리트 표면의 심한 오염, 제설용 소금에 의한 손상	모래 분사, 물-모래 분사, 고압수 분사
저장도 콘크리트 표면을 가진 두꺼운 피막 및 심도 깊은 오염	화염 제거 및 기계적 제거
깊이 박힌 제설용 소금과 기타 오염물질의 제거	연마 및 기계적 제거

나. FRP 쉬트

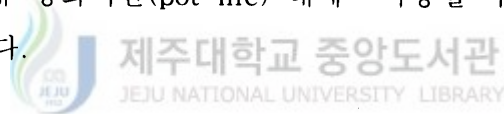
FRP 쉬트/판의 표면처리는 다음과 같은 방법과 내용으로 실시한다.

- 탁자와 같은 평평한 표면에 FRP 쉬트를 배치한다.
- 손상, 균열 여부 등에 관하여 검사한다.
- CFRP 쉬트는 칼이나 가위로, 판은 쇠톱이나 디스크-커터로 부착하기 전에 적당한 길이로 자른다.
- FRP 판은 아세톤 등의 적합한 세제로 깨끗이 세척하는 것이 좋다. 이 작업은 먼지 뿐만 아니라 탄소 분진까지도 제거한다. 세척 작업은 천 조각의 흰 표면이 흰 상태로 남을 때까지 계속 되어야 한다.
- 깨끗하고 마른 천조각으로 FRP 판을 닦아내어 건조시킨다.

3. 접착제의 혼합

접착제의 혼합은 사용되는 접착제에 관한 기술자료를 참조하고, 다음 사항들을 유의하여 혼합한다.

- 보관이나 사용시 직사광선으로부터 레진(resin)과 경화제(hardner)를 보호한다.
- 적절한 구성성분(레진과 경화제)의 함량을 유지한다. 무게에 의하거나 체적에 의한 구성성분의 정확한 함량을 유지한다.
- 용기 내 경화시간(pot life) 내에 사용할 수 있는 양 만큼만 준비한다.
- 두 구성성분의 혼합 전 각 구성 성분을 최초의 용기에서 자체 혼합한다.
- 어떤 구성성분이 어떤 구성성분에 추가되어야 하는지에 관하여 기술자료를 참조한다. 일반적으로 경화제(hardner) 성분이 레진(resin) 성분에 추가된다.
- 혼합된 접착제의 점도가 전체에 걸쳐 동일할 때까지(색체가 동일할 때까지) 혼합한다. 약 3분간 전기 핸드 믹서(electric hand mixer)를 사용하거나 흙손이나 주걱을 사용하여 혼합한다. 이때 가능한 한 공기가 연행되지 않도록 낮은 속도(최대 500 rpm)로 혼합한다.



- 혼합 도중 용기 면이 긁혀 이물질이 혼합되지 않도록 주의한다.
- 용기 속에 혼합된 접착제는 레진과 경화제가 혼합된 때부터 경화되기 시작하므로 시간관리에 유의한다.
- 용기 내 경화시간(pot life)을 연장시키기 위하여 다음의 방법들이 있다.
 - 용기 속의 접착제 수명은 저온 상태에서 더 길다. 따라서 필요한 경우 접착제 구성성분들을 혼합 전에 낮은 실내 온도까지 낮출 수 있다.
 - 적은 양으로 준비된 접착제는 용기 속에서 보통 더 긴 수명을 지닌다.



4. 구조물에의 적용

가. 적용절차

표면처리와 접착제의 혼합이 끝나면 아래의 적용절차에 따라 FRP 쉬트/판을 콘크리트 표면에 부착시킨다.

- 사용되는 보강 시스템(Tonen 시스템, Mitsubishi 시스템 등)에 초기 도포제(primer)가 필요한 경우 제공된 기술자료에 따라 도포한다.
- 필요한 두께의 층으로 만들기 위하여 흙손이나 주걱 등으로 혼합된 접착제를 콘크리트 위에 바른다.
- 접착제는 콘크리트 표면의 모든 공극이 채워지고 공동들이 남아 있지 않도록 세심하게 주의하여 바른다.
- 혼합된 접착제를 요구되는 두께의 층을 만들기 위해 FRP 판에 바른다.(Sika 시스템)
- 혼합된 접착제의 온도를 고려하여 접착제를 사용할 수 있는 시간 내에, FRP 쉬트를 콘크리트 표면에 배치한다.
- 접착제가 쉬트/판 가장자리 바깥으로 빠져 나올 때까지 쉬트/판을 단단한 고무 롤러(roller)를 사용하여 압착시킨다.
- 바깥으로 빠져 나온 과잉의 접착제를 제거한다.
- 요구되는 FRP 겹수만큼 적용 과정을 반복한다. 이때 각 층과의 접착폭을 일정하게 유지한다.
- 형성된 접착층은 최소한 24시간 이상 교란되지 않도록 그대로 놓아둔다.
- 필요에 따라 보호 또는 미관을 위하여 페인트를 칠한다.

- 접착제의 양생 시간 동안 일어날 수 있는 접착제의 부착강도의 감소를 막기 위하여 중량의 교통하중은 통제되어야 한다.

나. 추가적 제한사항 및 요구조건

다음은 FRP 부착공법의 적용에 있어서 추가적인 제한사항이나 요구조건들이다.

- FRP 재료들은 운반 과정이나 현장에서 절단, 절곡, 짓밟힘 등으로 쉽게 손상될 수 있으므로 유의한다.
- 부착공법 적용 시 콘크리트 최소 재량은 해당 보수 시스템의 요구사항을 충족시켜야만 한다. 대부분의 경우, 콘크리트 최소 재량은 특별한 양생 조건이 주어지지 않는 한 21-28일 이어야 한다.
- 규정에 없는 한 접착제를 묽게 해서서는 안된다. 용제는 접착제의 적절한 양생을 방해한다.
- FRP는 양생 후 콘크리트내의 습기나 수분의 증발을 차단한다는 점에 유의한다.
- 사용하는 접착제의 종류에 따라 부착되는 콘크리트와 주변의 최소 온도가 정해지므로 기술자료에 의해 검토되어야 한다.
- 과도한 태양 빛에 대한 노출은 대부분 보통 온도에서 경화되는 에폭시 접착제의 전단계수와 전단강도의 감소를 일으킨다는 점에 유의한다.

다. 보강된 구조물에 대한 요구조건

보강된 구조물의 안전성은 사용 조건을 고려하여 평가된다. 그러

나 FRP 슈트/판이 어떤 이유에서 파괴되더라도 결과적으로 안전에 대하여 어떠한 위험도 수반되어서는 안된다는 것을 보장할 필요가 있다. U. Meier 에 의하면 사후에 보강된 구조물은 FRP슈트/판 파괴 후 1.2의 전체 안전율을 지속적으로 지녀야 한다고 한다(EMPA). 따라서 보강을 필요로 하는 구조물의 상태에 관한 기록은 중요하다. 치수, 기존 구조물의 시공 상태, 재료의 품질과 주변 환경 조건들이 신중히 검토되어야 한다.

FRP 슈트/판이 소성 변형을 가지고 있지 않다는 사실은 하중 지지능력을 고려할 때 강재로 된 부재의 경우보다 작은 적절한 감소계수를 적용하여야 한다. 공학자는 한계 단면에서 보강 수준을 적절히 선택하여 전체 시스템의 극한 하중을 극대화할 수 있다. 일반적인 철근콘크리트 구조물에 있어서는 휨 파괴 시 보통 심한 변형과 큰 균열이 선행하지만, 사후 보강된 구조물에 있어서는 이러한 사전 조짐없이 FRP 슈트/판이 급작스럽게 계면 박리파괴된다. 따라서 FRP 슈트/판의 급작스런 계면 박리파괴에 대한 사전 경고는 다른 방법으로 이루어져야 한다.

5. 부착 공법 시스템별 적용 과정의 비교

Table 4.2는 대표적인 세 종류의 주요 보강 시스템에 관한 적용 과정에 대하여 비교하고 있다.

Table 4.2 Comparison of application procedure for different strengthening systems

과정 \ 시스템	Sika 시스템	Tonen 시스템	Mitsubishi 시스템
FRP 세척	해당(필요시)	해당(필요시)	해당(필요시)
물 분사 콘크리트 표면처리	해당(허용시)	해당(실험시)	해당(실험시)
모래분사 콘크리트 표면처리	해당(필요시)	해당(실험시)	해당(실험시)
콘크리트 연마	선택 사항	해당(필요시)	해당(필요시)
초기도포작업	해당 없음	해당	해당
충진제 사용	해당 SikaDur 41	해당	선택 사항
Undercoating: 최초 및 그 이상 층에 대한 1차 접착제 도포	해당	해당	해당
Overcoating - 2차 접착제 도포작업	해당 없음	해당	해당
마무리 및 페인팅	선택사항	선택 사항	해당

6. 안전 예방과 응급 처치

접착제에 대한 안전예방과 응급처치는 부착공법의 현장 적용시 공사 감독자나 기술자, 기능자에게 사전 교육시켜야 하며, 다음사항들을 강조해야 한다.

- 적용하기 전 접착제의 안전에 관한 자료를 참조한다.
- 에폭시 접착제는 오랫동안 접촉하거나 반복하여 접촉한 후에는 피부나 눈에 가려움증을 주거나 눈에는 화상을 입힐 수도 있다.
- 접착제의 고농축 증기는 호흡 곤란을 야기할 수 있다. 그러므로 적절한 환기가 필요하다. 과도한 노출은 간, 신장과 혹은 중앙 신경계에 영향을 줄 수 있다.
- 보안경과 내화학성 장갑 같은 표준 예방책의 사용이 요구된다. 작업에 착수하기 전에 양 손을 보호크림으로 바른다.
- 어떤 경우든 접촉을 피하고 필요한 최소한의 노출로 국한한다.
- 피부에 접촉되었을 때 비누와 물로 즉시 그리고 완전히 세척한다. 증상이 남으면 의사의 처치를 받는다.
- 눈에 접촉되었을 때는 즉시 충분한 물로 최소한 15분 동안 세척하고, 즉시 의사의 처치를 받는다.
- 호흡에 문제가 생겼을 때는 사람을 신선한 공기 속으로 옮긴다. 증상이 남으면 의사의 처치를 받는다.
- 엷지르거나 새어나간 경우 적절한 보호 장비를 착용하고, 엷질러진 것을 담고, 흡수된 재료를 모아 적절한 용기에 옮긴다. 그 구역에 대하여 적절히 환기시켜야 한다.

- 사용되지 않은 접착제들은 하수도나 수로나 땅으로 배출시켜서는 안된다.
- 접착제 재료들은 어린이의 손에 닿지 않게 두어야 한다.
- 호흡기가 과도하게 노출될 경우에는 적합하고 알맞게 제작되어 관련 기관이 인정한 방독면을 사용한다.
- 모래를 사용하여 연마하는 경우(sandblasting) 결정실리카 모래먼지에의 노출은 오래되어 나타나는 폐의 손상을 야기시킬 수 있고 암을 유발할 가능성도 있다. 적합한 방진구의 사용이 요구된다.



V. 부착공법의 연구와 현장적용

1. 서론

본 장에서는 콘크리트 구조물의 보강에 이용되는 FRP 부착공법에 대한 세계 여러나라의 대학과 기술 연구소의 연구와 현장적용에 관한 연구문헌들을 조사, 정리, 요약하였다. 참고문헌은 각각의 주제에 대하여 부문별로 나누고 종류별로 묶어 요약하였다. 현장시험은 대부분의 경우 실제 구조물 위에서 행해졌으므로 파괴 시의 정보는 제공되지 않았다. 실험결과들은 구조물을 육안 관찰 및 전자식 자료 입수 방법에 의한 것들이다.



FRP 부착공법에 관한 연구주제들은 참고문헌(Karbhari 등, Reddy 등, ACI, Witcher, 1996)에서 찾아 볼 수 있다. 주요 연구주제들은 다음의 세 영역으로 나누어질 수 있다.


- 구조적 거동(휨, 전단, 피로, 부착)
- 내구성(동결-융해, 화학적 침식, 저온, 자외선, 내화성)
- 현장적용 및 현장시험

2. 구조적 거동

본 절에서는 부착 공법에 관한 구조적인 특징과 중요한 주제들을 검토하였다.

가. 영향 변수 및 인자

FRP 쉬트/판으로 부착된 구조물의 구조적 거동은 여러 변수들에 의해 좌우된다. 부착 공법의 성공적 적용은 어떤 특정한 보강체계에 요구되는 사항에 대하여 가능한 최고의 수준을 유지하는데 있다. FRP 부착 구조물의 거동에 영향을 미치는 아래의 고려 사항들 (Reddy 등, 1996)은 고려해야 할 모든 변수를 포함하고 있지 못하지만 문제의 복잡성과 참고 문헌의 영역을 짐작케 하고 있다.

- 
- 제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY
- 보의 기하학적 형상
 - 콘크리트 보의 기계적 성질(압축 강도, 탄성계수)
 - 하중(정하중, 동하중)
 - 보의 배근 상태(저보강, 과보강, 프리스트레스)
 - 보의 균열 상태
 - 환경 작용에의 노출(부식, 날씨, 동결/융해, 햇빛, 재령)
 - FRP 쉬트/판의 기하학적 성질(두께, 면적)
 - FRP 쉬트/판의 역학적 성질(인장강도, 탄성계수)
 - FRP의 종류(섬유의 종류와 matrix의 종류)
 - 프라이머와 접착제의 종류
 - 표면처리 과정
 - 부착공법 적용 과정
 - FRP 판과 콘크리트의 부착.

FRP와 콘크리트 간의 접착은 보강된 부재의 구조적 특성에 중요한 역할을 하고 있다. FRP 보강 구조물의 지배적인 부착구조는 기계적 상호 결합에 의한 것이다. 표면을 연마하여 만들어진 거칠어진 표면의 형상은 접착제가 이 불규칙한 면에 침투하도록 하여 강한 부착면을 형성한다. 부착의 영향은 다음과 같이 분류할 수 있다 (Karbhari 등, 1996).

- 내적 영향:

- 화학작용
- 전기화학적 작용
- 알칼리 성분과 PH 수준
- 응력
- 습기 침투
- 용액, 염분의 이동

- 접촉면의 영향:

- 습기 함유
- 습기 확산
- 화학약품의 선택적 이동
- 열팽창, 탄성 변형률의 불일치(콘크리트, 접착제, FRP)

- 외적 영향:

- 습도, 습기
- 온도, 온도 변화(일별, 계절별, 연별)
- 해로운 천연 및 인공 약품
- 자외선



나. 파괴 형태

FRP로 보강된 콘크리트 보의 파괴 형태는 여러가지이다. 파괴 형태는 이전의 절에서 언급한 변수와 요인들에 의존한다. 몇몇 형태들은 다른 것보다 발생할 가능성이 더 있다. 가능한 파괴 형태들은 다음과 같다.

1) 콘크리트의 파괴

- 콘크리트 압축파괴(CC): 콘크리트 압축응력이 최고치에 도달했을 때 콘크리트 압축부 파괴.
- 콘크리트 전단파괴(CS): 콘크리트의 전단 파괴.
- 콘크리트 계면 박리파괴(CD): 콘크리트 피복 부위의 수평 전단파괴

2) 철근의 파괴

- 철근 인장파괴(RT): 철근의 항복점 변형을 초과로 인한 파괴
- 철근 피로파괴(RF): 철근의 피로 강도 초과로 인한 파괴

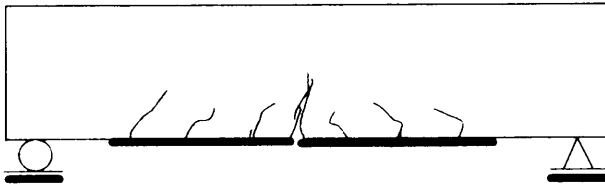
3) FRP 박판의 파괴

- FRP 인장파괴(FT): FRP가 최대 인장강도에 도달했을 때의 FRP 파괴
- FRP 계면 박리파괴(FD): FRP 슈트/판 층 내부의 수평 전단파괴
- FRP 전단파괴(FC): 보의 바닥에서 균열단의 횡방향 상호변위에 의해 야기되는 FRP 슈트/판의 파괴.

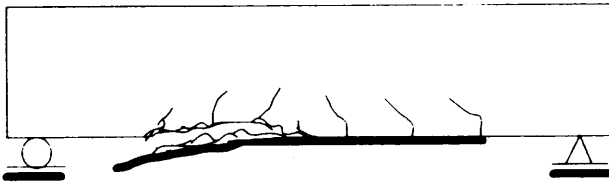
4) 접착면의 파괴

- 콘크리트: FRP 계면 박리파괴(BF): 콘크리트와 FRP 사이 계면의 수평 전단파괴

가장 대표적인 파괴형태에 관한 예를 그림5.1에서 보여주고 있다.



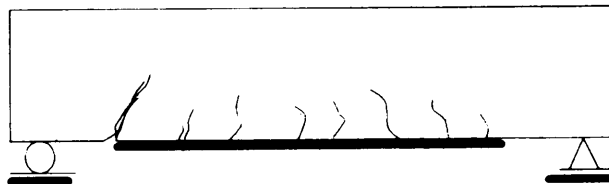
FRP 인장파괴



콘크리트 박리파괴



FRP 박리파괴



전단파괴

Fig. 5.1 Typical failure modes of beams strengthened with FRP sheets or plate

3. 휨 거동

콘크리트 부재의 휨 저항능력을 보강하는데 쓰이는 FRP 쉬트는 그들의 강도와 강성으로 인하여 대단히 큰 효과를 발휘하고 있다. 그 결과 보수 비용은 비교적 저렴하다.

대부분의 휨 보강에 있어서 일방향으로 만들어진 쉬트가 철근 콘크리트나 PC 콘크리트 보의 중앙 단면을 보강하는데 적절하다는 것이 판명되었다. 전단과 함께 휨이 작용하여 복합된 응력 상태일 경우 2 방향이나 여러 방향으로 짜여진 FRP 쉬트/판들을 사용하거나 일방향의 쉬트/판을 2 방향이나 여러방향으로 부착 사용하여야 한다.

본 절에서는 FRP로 보강된 콘크리트 부재의 휨 거동에 초점을 맞춘 실험연구들을 요약하였다. 수록된 내용들은 연구기관별로 분류하였다.

가. Tonen Corp., H.S. Klinger & Associates, Structural Preservation Systems

- 참고문헌: (Kobayashi 등, 1995)

실험 계획은 CFRP로 보강된 철근 콘크리트 보의 휨 강도를 조사하기 위하여 수행되었다. 일방향으로 짜여진 섬유들은 보의 인장 측에 부착되었으며, 총 10개의 보가 시험되었다. 그 중의 하나의 보는 강판으로 보강되었고 또 한 개는 비교용으로 외부 보강을 하지 않

았다. 몇 개의 보는 파괴형태에서 정착(anchoring) 효과를 조사하기 위하여 슈트를 90도로 감싸 부착시켰다. 항복 하중은 각각 FRP 슈트 한 겹과 세 겹의 경우 각각 91%, 158%의 증가를 나타내었다. 가로 방향으로 휨 보강한 FRP 슈트를 90도로 감싸 정착한 보에서는 FRP 슈트가 벗겨 이탈되는 파괴가 관찰되지 않았다. 이러한 정착 형태를 사용함으로써 보의 극한강도는 최대치를 보였고 보강되지 않은 보의 207%까지 증가하였다. 다른 보들은 콘크리트와의 계면에서 박리 이탈 현상이 있음을 보여주었다. 이론적 예측과 실험 결과들을 비교하여 서로 잘 일치한다는 것을 증명하였다.

- 참고 문헌: (Yoshizawa 등, 1996)

실험 계획은 CFRP 로 보강된 철근 콘크리트 보의 휨 강도를 조사하기 위하여 수행되었다. 그 주요 목적은 보강 효과에 미치는 표면처리의 영향을 연구하기 위한 것이었다. 총 8개의 보가 시험되었으며 일반적으로 CFRP 는 보강되지 않은 보와 비교하여 보의 항복 하중을 증가시켰다. 최대 하중은 콘크리트 표면 처리에 의해서 큰 영향을 받았다. 고압수 분사로 표면 처리한 보는 모래를 분사하여 표면 처리된 보 보다 구조적 거동이 훨씬 양호하였다. 최대 하중은 물 분사로 표면 처리된 보에서는 70-80% 증가하였고, 모래 분사로 표면 처리된 보에서는 30-40% 증가하였다. 결론적으로 고압수 분사 표면 처리법이 매우 효과적인 표면처리 방법임을 보여주었다.

나. Mitsubishi(Replark), Craig Ballinger & Associates

- 참고 문헌: (Nakamura 등)

휨에 대한 일련의 실험들은 4점 하중법(four point loading)으로 직사각형 단면의 철근콘크리트 보에 대하여 수행되었다. 두 개의 다른 종류의 CFRP 슈트를 한 겹과 두 겹으로 보강하였다. 보강되지 않은 보와 비교하여 중탄성계수 CFRP 보강 보에서 균열 발생하중은 한 겹인 경우 32%, 두 겹인 경우는 72%로 증가하였고, 고탄성계수 CFRP 보강 보에서는 한 겹인 경우 88%, 두 겹인 경우는 120%로 증가하였다. 비보강 보와 비교할 때 중탄성계수 CFRP 보강 보에서는 최대하중이 한 겹인 경우 40%, 두 겹인 경우는 71%로 증가되었고, 고탄성계수 CFRP 보강 보에서는 한 겹인 경우 42%, 두 겹인 경우는 82%로 증가되었다. 중탄성계수 CFRP 보강 보에서는 휨 강성도가 한 겹인 경우 24%, 두 겹인 경우는 31%로 증가되었고, 고탄성계수 CFRP 보강 보에서는 한 겹인 경우 50%, 두 겹인 경우는 91%로 증가되었다. 더 큰 탄성계수를 지닌 슈트는 더 큰 보강 효과를 나타내었다. 추정 방법과 계산 결과는 실험결과와 잘 일치함이 증명되었다. 마지막으로 CFRP로 보강하는 RC 보의 설계 절차는 파괴 순서를 인장철근의 항복, CFRP 슈트의 파괴, 콘크리트 압축 파괴 순으로 가정하여야 한다고 결론짓고 있다.

다. University of Arizona

- 참고 문헌: (Saadatmanesh 등, 1990, 1991)

Saadatmanesh, H와 Ehsani, M.R.은 5 개의 직사각형 단면 보와 인장 플렌지에 GFRP판을 붙여서 보강한 하나의 T형 보에 관한 실험적 연구를 보여주고 4점 하중법으로 휨 시험을 하였다. 초기의 연구 결과에 근거하여, 고무로 강화된 에폭시는 시멘트 풀과 비슷한 반죽질기를 가지고 보를 보강하는데 사용되었다. 이 연구의 결과에

따르면, 결론적으로 보강된 콘크리트 보의 인장 면에 GFRP판을 접착하여 휨강도를 상당히 증가시킬 수 있다는 사실이다. 극한 휨 강도의 증가는 낮은 철근비를 가진 경우에 더욱 크다. 또한 보강판은 모든 하중 조건 하에서 보의 균열 크기를 줄이나 보의 연성은 감소시킨다. 이러한 기술을 성공적으로 적용하기 위해서는 콘크리트 표면을 조심스럽게 처리하고 끈기 있는 에폭시를 선택하는 것이 요구된다. 결국, 계산된 하중-변형률 곡선은 변형률 적합 방법을 사용하여 얻어진다. 실측된 하중-변형률 곡선과 비교하면, 그들은 잘 일치하고 있다.

- 참고 문헌: (Char 등, 1994)

Char M.S., Saadatmanesh, H 와 Ehsani, M.R은 에폭시와 결합된 섬유보강 소성체(FRP)로 외부에서 프리스트레스를 준 콘크리트 거더의 휨 강도에 관한 매개변수 연구(parametric study)를 수행하였다. 고려된 변수들은 FRP 판의 형태와, 판의 면적 및 콘크리트 압축강도들이다. 거더들이 상향력에 의해서 만곡(캠버)되어 있는 반면에, 거더들은 그 인장면에 에폭시로 접착시킨 FRP 판으로 외부적으로 프리스트레스가 주어졌다. 마지막 단계로서, 하나의 설계 예가 주어졌는데 이러한 기술이 전형적인 콘크리트 교량의 하중 지지력을 최초 설계된 H15 하중에서 HS20 하중으로 상향시킬 수 있는 방법을 보여주고 있다.

이 연구에서 분석 모델들은 하중에 대한 파괴 시까지의 전반적인 영역을 통하여 GFRP를 사용하여 외부에서 보강된 콘크리트 거더의 모멘트와 곡률을 계산하기 위하여 제시되었다. 이 연구의 결론은 다음과 같다.

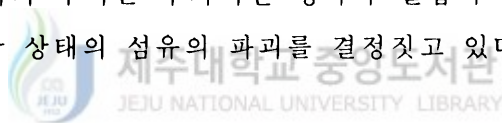
- FRP 판을 인장 면에 접착하면 거더의 모멘트 저항력이 상당히 증가한다.
- 판의 면적을 4 in.에서 8 in.로 증가시키면 그 단면의 모멘트 저항력은 더욱 증가한다.
- 캠버가 있는 보의 거동은 솟음(camber)이 없는 보의 거동과 비슷하다. 보의 모멘트 저항력은 동일하다.
- CFRP 판의 높은 인장응력은 GFRP의 경우와 비교하여 모멘트 저항강도에 있어서 매우 큰 증가를 가져온다. 그러나 보의 연성은 CFRP 판의 더 큰 강성으로 인하여 감소된다
- 설계 예에 있어서, 솟음없이 GFRP와 CFRP 판으로 보강된 보의 응력들은 AASHTO 시방서에 규정된 허용응력보다 약간 높다. 외부에서 보강된 보는 허용응력에 대한 AASHTO의 요구사항들을 만족시킨다.
- 휨에 대하여 보강된 보는 전단에 대하여는 파괴될 수 있다. 휨에 대한 보강은 보의 전단응력도 마찬가지로 증가시켜야 되는 경우가 있다.

라. University of Delaware, Delaware Department of Transportation

- 참고문헌: (Chajes, 1994)

Delaware 대학교에서는 14개의 직사각형 단면의 보강된 콘크리트 보의 실험이 수행되었다. 실험의 목적은 외부에서 접착된 합성재료인 FRP 쉬트가 보의 휨 거동에 미치는 효과를 평가하는 것이었다. 각기 다른 형태의 FRP 가 사용되었다(CFRP, GFRP, AFRP). 하중이 반복적으로 증가되어 파괴에 이르기 까지 4점 하중법에 의

한 휨 장치가 사용되었다. 합성재료인 섬유로 보강된 보의 일반적인 휨 거동은 비슷했지만, 휨 강성과 최종적인 파괴 형태는 사용된 섬유의 종류에 따라 달랐다. 섬유로 보강된 보는 강재 만으로 보강된 보에 비교하여 연성이 작았으나 파괴 상태에 이르기 전에 다소의 연성을 보여 주었다. 외부에서 보강된 모든 보는 극한 휨 능력이 상당히 증가함을 보여 주었는데, 비교용 보와 비교하면, 34%에서 57% 사이의 범위 내에 있었다. 또한 보강된 보들의 평균 강성도 45%에서 53% 범위 내에서 증가하였다. 실험과 병행하여 보의 능력을 예측하기 위한 분석적 모델이 개발되어 시험값에 근사한 결과를 가져다 주었다. 이 연구의 결과는 외부 부착 보강은 콘크리트 보를 보수하거나 보강하는데 효과적으로 사용될 수 있음을 지적하고 있다. 이러한 거동을 묘사하기 위한 분석적 방법들은 이용 가능하다. 섬유와 콘크리트 사이의 부착은 추가적인 정착과 결합되어 압축 상태의 콘크리트나 인장 상태의 섬유의 파괴를 결정짓고 있다.



마. RUTGERS University of New Jersey, GEOPOLYMERE

- 참고문헌: (Balaguru 등, 1997)

New Jersey주의 RUTGERS 대학교에서 수행된 보의 휨 강도에 대한 실험들은 탄소 섬유와 무기질 고분자 접착제(geopolymer adhesive)의 적용성을 시험하기 위한 목표로 하여 수행되었다. 4개의 시험체가 각기 다른 두께의 CFRP 층을 가지고 시험되었다. 보는 M'Bazaa I.와 Missihoun M. 및 Labossiere P. 에 의하여 수행되는 시험 결과들을 비교하기 위하여 설계되었다(M' Bazaa 등, 1996). 실험결과는 강체 고분자 접착제가 콘크리트 표면과 섬유의 내부판막면에 탁월한 부착력을 제공한다는 것이다. 모든 시험체들은 섬유가

찢어질 때 파괴되었다. 무기질 고분자 접착제는 내화성이 있고(1000 °C 까지), 자외선 하에서 질이 저하되지 않으며 화학적으로 콘크리트와 조화를 이룬다. 이러한 무기질의 고분자 접착제는 수용성 알루미늄 규산염(water-based alumino-silicate)으로 유기질의 고분자 접착제와는 달리 장갑과 같은 특별한 보호장구를 필요로 하지 않는다. 보의 강성은 CFRP 접수와 함께 증가하였으며 보강된 보는 비교용 보와 비교해서 더 작은 폭으로 조밀한 균열 양상을 나타내었다.

바. Ohio Department of Transportation, Wright Patterson Air Force Base

- 참고문헌: (Craeto 등)

보의 바닥에 보강재로서 부착되는 탄소 섬유 판을 연구하기 위해 Wright Patterson 공군 기지에서 일련의 휨 시험이 행해졌다. Hercules사의 흑연/에폭시 계가 사용되었다. 일방향과 두 방향의 층을 가진 섬유판들이 보에 적용되었다. 40개의 시험체가 시험되었으며 4가지의 보강형태가 선택되었다. 즉,

- A: 접이음이 없는 단일 판
- B: 최대 모멘트 구역 내의 한 개의 접이음
- C: 최대 모멘트 구역 밖의 두 개의 접이음
- D: C 형태와 같은 위치에서의 두 개의 연결장치(coupler)

접착 표면들은 보강하기에 앞서 표면처리를 하였다. 판들을 보 표면에 잘 접착시키기 위하여 진공 자루(vacuum bag)가 사용되었다. 형태 B에서 접이음의 파괴는 B형태의 연결이 적절하지 않음을 보여주었다. 형태 D는 C형태의 접이음과 비교하여 더 작은 응력집

중을 나타냈다. D형태의 접이음부에서는 어떤 파괴도 나타나지 않았고 예정된 현장 시험 형태로 선정되었다. 실험결과들은 보의 강성과 강도의 실질적 증가를 나타내었다. 실험결과를 이론적인 예측과 비교하였을 때 잘 일치하였다. 실험의 결과물들은 Ohio 주의 Butler County 지방의 교량에서 현장 시범적용을 하기 전에 경험을 얻기 위한 것이었다.

사. West Virginia University, Constructed Facilities Center

- 참고문헌: (Faza 등, 1994)

CFRP 판과 강판 보강 시스템을 사용하여 21개의 철근 콘크리트 보를 시험하였다. 보들은 보강 시스템을 적용하기에 앞서 콘크리트에 균열이 생기고 철근의 항복점에 가깝게 사전에 재하를 하였다. 9 ft의 길이와 3x3 ft의 힘의 거리를 가진 4점 하중법에 의한 휨 시험방법이 선정되었다. CFRP의 사용은 보의 하중 지지 능력을 평균 57% 증가시켰다. 강판을 이용한 보강은 6%의 증가 밖에 가져오지 못하였다. 여러 감싸기 형태의 보들 사이에서는 감싸기 모양의 효과가 분명하지 않았다. CFRP로 보강된 보들은 하중이 재하된 점들 사이에서 콘크리트의 압축파괴에 의해서 파괴되었는데, 감싼 탄소 섬유 박리 현상은 없었다. CFRP의 높은 강도/무게비가 주어졌을 때 결과적으로 더 좋은 물리적 결합과 성취결과를 가져왔다.

아. Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research

- 참고문헌: (ACI, 1996)

Meier(1987)는 콘크리트 보의 휨 능력을 보강하는 것으로서 얇은 CFRP 쉬트의 사용에 관하여 보고하였다. 그는 CFRP가 강재를 대체함으로써 전체적으로 25%의 비용절감을 가져올 수 있다는 것을 보여 주었다. Keiser(1989)는 실제 크기의 철근 콘크리트 보를 CFRP 판으로 보강하여 실험하였는데 단면해석에 있어서 변형 적합 방법의 타당성을 보여주었다. 경사 방향의 균열이 보강판을 벗겨지게 함으로써 지나치게 이른 파괴를 이끌 수 있다는 것을 시사하였다(BF 파괴형태). 연구는 FRP 판의 정착에 관한 분석 모델을 개발하였는데, 시험 결과와 일치함을 보여주었다.

- 참고문헌: (Meier, 1995)

3장 표3.4는 구조물의 보강 재료로서 FRP 종류별에 따른 관련 기준들이며 특히 프리스트레스가 가해진 판에 적용된다. 이 표로부터 분명한 것은 탄소 FRP 재료들이 구조물의 보강에 대한 요구 사항을 가장 가깝게 충족시켜주고 있다는 것이다. 만일 그 판이 부착되기 전에 프리스트레스가 가해지지 않은 경우를 고려해 보면, 판 재료의 탄성계수는 대단히 중요하다. 왜냐하면 강성을 지닌 판만이 기존의 철근에 작용하는 응력들을 감소시킬 수 있기 때문이다. 그러므로 CFRP 는 GFRP보다 눈에 띄는 이점을 지니고 있다.

실험 작업을 통하여 전단 균열의 발생 가능성은 보강된 FRP 판의 박리 이탈을 야기시킬 수 있다는 것을 보여주고 있다. 그리하여 진행된 전단 균열은 설계 시 고려해야 할 기준을 보여준다. 휨 하중 시험에서 관찰된 파괴형태는 여러 가지로 이미 본장의 2절에서 언급하였다.

4. 전단 거동

FRP 보강 시스템의 전단 거동은 다음의 요인들로 인하여 주된 연구 관심사가 되고 있다.

- 여러방향으로 FRP 쉬트/판의 부착이 요구되는 여러방향의 응력상태
- FRP 쉬트/판의 제한된 정착길이는 추가적인 정착 방법을 요구(예, 볼트 연결)
- 거더 측면으로의 접근에 대한 제한 (예, 슬라브 교량의 박스 거더)

이제까지의 정보로부터 만일 정착 문제가 적절히 해결될 수 있다면 FRP는 콘크리트 부재의 전단 능력을 증진시키는데 성공적으로 사용될 수 있음을 확인할 수 있다. 본 절은 전단거동의 연구에 관한 문헌들을 정보원, 연구기관별로 분류하여 정리하였다.

가. State of the Art Reports & Review Documents

- 참고문헌: (ACI, 1996)

FRP 쉬트로 콘크리트 부재를 감싸 부착하는 형태로 외부에서 전단을 보강하는 기술은 불충분한 보의 전단강도를 증진시키기 위해 사용되어 왔다. 1993년에 Rider에 의해서 수행된 시험들은 이러한 방식이 충분한 전단 저항력을 제공하여 보의 휨 능력을 완전히 발휘시킬 수 있게 하였다.

나. Delaware University, Delaware Department of Transportation

- 참고문헌: (Char 등, 1994)

이 논문은 전단 보강에 적용하는데 있어서 각기 다른 강도와 강성을 지닌 다양한 종류의 FRP 재료(아라미드, 유리, 탄소 FRP)의 효용성을 비교하였다. 또한 전단거동에 있어서 부착 섬유의 방향에 관한 연구도 포함되어 있다. 시험들은 ACI 시방서에 따라 설계된 총 12개의 T형 보에 대하여 행해졌다. 보들은 그들의 휨 강도에 비하여 낮은 전단강도를 갖도록 설계되었다. 섬유 종류로는 평면으로 직조된(plain-weave) 아라미드 섬유, 미나리아재비 공단으로 직조된(crowfoot satin weave) E- 유리 섬유, 평면으로 직조된 흑연 섬유들을 사용하였다.

보의 표면은 FRP를 부착시키기 전에 미리 처리되었다. 레이턴스(laitance) 층이 제거될 때까지 기계적으로 연마되었고, 이어서 air-blasting으로 남아 있는 입자들을 제거하였다. 가능한 한 가장 좋은 부착력을 얻기 위하여 진공 주머니가 사용되었다. 4점 하중법에 의한 휨 시험법이 사용되었다. 시험된 모든 보는 전단에서 파괴되었고, 보강된 보에서는 상당히 높은 극한 하중을 나타내었다. 모든 보가 일정한 전단력 범위에서 상당한 인장 균열을 동반하며 취성 파괴 양상을 나타내었다. FRP로 감싼 보는 보강하지 않은 비교용 보 보다 하중 지지능력을 60-150% 증가시켰다. 보의 하중 지지능력의 증가는 비교용(0%), 아라미드 섬유(83%), E-유리섬유(88%), 흑연섬유(91%) 순 이었다. 45도/135도 방향으로 흑연섬유로 감싸진 보들은 강도에서 125% 증가를 나타내었다. 비교용 보의 이론적으로 계산된 전단강도는 평균적으로 실측치보다 28% 낮았다. FRP의

전단보강 효과를 계산해 내기 위하여 분석적 방법이 개발되었다. 전단 능력은 9-13%의 정확도로 예측할 수 있었으며, FRP로 보강된 보에 대한 예측은 비교용 보에서보다 더 정확하였다. 모든 예측된 계산 전단강도는 보수적인 값이었다.

다. Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research

- 참고문헌: (Meier, 1995)

전단력이 작용하는 부위를 효과적으로 보강하는 새로운 방법이 개발되어 여러 번의 시험에 시도되었다. 내부의 전단철근 들은 긴장되었거나 단순히 부착된 땅거나 단일 방향의 FRP 외부 부착 재료에 의해서 보강되었다. 프리스트레스를 주는 재료는 한 쪽 면에서 단면 둘레에 감싸져서 반대 쪽 면에서 압축 부위에 정착되었다.

전단 효과는 많은 변수들에 의해서 영향을 받기 때문에 단지 근사적으로만 예측될 수 있다. 콘크리트 표면의 수직 방향의 엇갈린 차이는 FRP 판에 휨 모멘트를 발생시켜 부착된 FRP 강도를 초과할 수 있다. 국부적 비평탄성은 특히 초기 긴장응력이 없는 얇은 합성 재료의 경우 작은 하중에서조차 FRP를 자르는 효과(shearing effect)를 초래할 수 있다. 그러므로 CFRP는 최소두께가 1mm는 유지해야만 한다. 초기에 긴장되지 않은 박판으로 보강된 시스템의 하중 능력은 수직전단에 의한 절단이 파괴의 원인이 되는 경우 감소될 수 있다.

균열이 벌어질 때 수직 변위의 차이가 발생할 수 있다. 균열 양면의 수직 변위의 차이에 기인한 부착 CFRP의 절단 효과는 다음의 변수들의 영향을 받는다.

- 하중: 모멘트, 축력, 전단력
- 기하적 형상: 콘크리트, 철근 혹은 PC 강재, CFRP 합성재료
- 역학적 성질: 콘크리트, CFRP 합성재료, 철근
- 균열의 기하적 형상: 작고 큰 조도, 균열 폭, 균열 양면의 수직 방향 변위차
- FRP의 최대 신장률: 외부 힘에 의한 합성재료의 신장률

5. 부착

FRP 슈트/판과 콘크리트 표면 사이의 접촉면 부착은 FRP 슈트/판 보강 체계의 거동을 조정하는 결정 요소 중의 하나이다. 휨이나 전단 거동을 조사하는 많은 연구에서 부착 문제가 보강된 부재의 파괴형태를 결정하는 중요한 요소로 연구되었다.

CFRP 슈트 보강 시스템에 사용되는 접착제의 역학적 성질들은 보강된 구조물의 전반적인 거동, 특히 부착면에 대한 강도와 내구성에 영향을 준다. 이제까지 수행된 대부분의 실험 연구는 시중의 보강 시스템들이 접착제내의 부착면에서 보다는 오히려 콘크리트 결 표면에서 파괴가 일어난다는 것을 확인시켜 주고 있다. 이러한 사실은 접착제가 충분한 강도를 지니고 있다는 것을 증명해 주고 있다. 부착면의 내구성은 접착제에 관한 연구의 주요 관심사로서 더욱 심도 있는 연구가 필요하다.

가. Tonen Corp., H.S. Kliger & Associates, Structural Preservation Systems

- 참고문헌: (Yoshizawa 등, 1996)

CFRP의 부착 강도를 조사하기 위하여 축하중을 받는 프리즘 형상의 시험편을 사용하여 시험을 수행하였다. 높은 인장강도와 높은 탄성계수를 지닌 탄소 섬유 슈트를 사용하였다. 총 9개의 시험편이 시험되었다. 부착 표면은 물 분사와 모래 분사를 사용하여 처리되었다. 대부분의 시험편에서 파괴는 콘크리트의 내부 층에서 발생하였

다. 물 분사로 처리된 표면은 일반적인 모래 분사법으로 처리된 표면보다 두 배나 높은 부착 강도를 나타내었다. 부착 강도는 또한 슈트의 접수가 많을수록 증가하였다.

나. University of Arizona

- 참고문헌: (Saadatmanesh 등, 1990, 1991)

Saadatmanesh 와 Ehsani는 네 가지 다른 종류의 에폭시로 GFRP 슈트를 부착시킨 보를 연구하였다. 5개 보의 정적 휨 강도를 확인하기 위하여 시험하였다. 4개의 보는 각기 다른 에폭시들을 사용하여 GFRP 슈트로 보강되었고 다섯 번째의 보는 비교 대상으로 사용하기 위해 보강하지 않았다. 보강된 보는 두 가지의 파괴 형태를 보였는데 그 하나는 CFRP 슈트의 인장 파괴이고 또 다른 하나는 부착면에 따른 콘크리트 층의 전단파괴였다. 계면 박리파괴 시의 판의 최대 부착력은 전단 응력의 총합과 같다는 것도 알아내었다. 결론으로서는 적절한 에폭시의 선택이 이러한 보강 기술을 성공시키는 데 있어서 매우 중요하다는 것이었다. 에폭시 접착제는 FRP 슈트와 콘크리트 사이에 전단력을 전달하기 위하여 충분한 강성과 강도를 가져야 하며, 또한 콘크리트 균열로 인한 취성적인 부착파괴를 막기 위하여 강한 인성(toughness)을 지녀야 한다고 결론짓고 있다. 고무로 강화된(toughened) 에폭시가 FRP 슈트 접착에 특히 적절하다는 것을 알아내었다.

6. 현장 적용

FRP 부착공법은 현장에서 성공적으로 적용되어 왔다. 휨 부재의 보강은 가장 흔하게 사용되어 왔는데, 휨 부재의 보강에 관한 새로운 기술의 장점이 미국 및 해외의 수많은 현장 적용에서 입증되었기 때문이다. 본 절에서는 콘크리트 구조물에 있어서 FRP 보강 시스템의 현장 적용 예를 요약한 것으로 정보원 및 연구기관에 따라 분류하였다.

가. Tonen Corp., H.S. Kliger & Associates, Structural Preservation System

- 참고문헌: (Kobayashi 등, 1995)

강재 거더 위에 설치된 RC 슬라브의 고속도로 교량은 Forca Tow Sheet FTS-C1-30으로 보강되었다. 설치된 지 20년이 지난 교량은 상판 길이 방향과 횡 방향으로 많은 균열을 보여줬다. 총 면적 164m²의 FRP 쉬트는 길이 방향과 횡 방향으로 부착되었다. 보강 작업은 약 2 주일 걸렸으며 교통은 방해받지 않았다. 하중 실험은 보수 전 및 보수 후 실시하며 측정값을 비교하였다. 현장실험은 트럭의 최저속도(시속 15km)와 표준속도(시속 40km)에서 이루어졌다. 실험결과 슬라브의 처짐은 약 15 내지 20% 감소되었다. 주철근의 변형율은 대략 30 내지 40% 감소되었고 유사하게 부철근에서의 변형율은 개략 20 내지 40% 감소되었다.

- 참고문헌: (Jay 등, 1996, Kobayashi 등, 1995)

Forca Tow Sheet는 일본 규슈 지방의 시로타 교량에 적용되었다. 허용 트럭하중(20에서 25톤) 초과에 의해 교량 슬라브의 주철근 및 부철근의 응력이 1200 kg/cm^2 의 허용응력을 초과하였다. CFRP 보강은 철근의 응력을 허용치 이하로 감소시키도록 설계되었다. 보강 후에 주철근 및 부철근에 설치된 변형율 게이지(strain gage)를 사용하여 측정 결과 상당한 처짐의 감소와 30% 이상의 철근응력의 감소가 확인되었다. 장기간의 보강 효과를 확인하기 위해 1년 넘도록 변형율 게이지로 계속 측정하였다. 그 결과 보강효과가 1년 후에도 여전히 있음을 분명하게 보여줬다.

나. Delaware University, Delaware Department of Transportation

- 참고문헌: (Chajes 와 Finch, 1996)

외부 부착 CFRP 쉬트로 Delaware주 Wilmington시 Foulk가 도로교의 보를 보강하였다. 교량의 상부구조는 각각의 길이가 16.4m인 24개의 단 경간의 상자형 보(box-beam)로 이루어졌다. 보의 단면은 폭 0.9m와 높이 0.7m이며, 복부 두께는 약 130mm 이었다. 총 24개의 보 중에 6개가 보강되었다. 보강작업은 1994년 10월 5명의 인부가 하루 5-8시간 작업하여 일주일 걸렸다. 보수한 보와 보수하지 않은 보를 포함한 구조물의 검사 방법들은 정기적인 육안 관찰과 계속적인 부착 거동과 균열발달 측정 등이었다. 현재까지 Foulk 도로교 보강은 훌륭하게 효과를 보이고 있다. 부착된 FRP 쉬트에서는 어떠한 악화된 조짐도 보이지 않았다. 보수되지 않은 보들은 보수된 보들과 비교하여 볼 때 눈에 띄게 균열이 진행되었음을 보여줬다.

다. 미국에서의 적용

- California 주, 기둥 보강: 일반적으로 지진에 대한 저항력을 높이기 위한 계획의 일환으로 캘리포니아 주 도로교통부(Caltrans)는 유리 섬유 매트를 사용하여 교각 주변을 감싸 보강하였다.
- Nevada 주, Reno에서 기둥 보강: 1993년 네바다 주 도로교통부는 FRP 감싸기 보강 시스템으로 지름 0.3m 기둥 96개를 시공하였다.
- California 주 Glendale시 벽체 보강 : FRP 쉬트/판을 벽돌이나 콘크리트 벽체의 표면에 에폭시 수지로 접착시켜 보강하였다.
- Delaware 주 Wilmington시 Foulk가 교량 상부구조 보강: 위의 나.항 참조

라. 일본에서의 적용



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

- Forca Tow CFRP 쉬트는 터널, 굴뚝, 벽체, 슬라브, 보 등을 포함한 200개가 넘는 공사에 광범위하게 사용되어 왔다.
- Replark CFRP 쉬트는 기둥, 도로상판, 교각, 교량 거더, 지지벽, 슬라브, 마루 및 보들의 보강 시스템으로 사용되었다.

마. 유럽에서의 적용

- Kattenbusch 교량(Meirer 1987): 두 개의 상자형 거더(box girder)로 이루어진 11 경간의 포스트텐션(post-tensioned) 콘크리트 교량이 GFRP 판으로 보강되었다. 교량은 모멘트가 영인 지점에 시공이음(working joint)을 주었는데, 이곳에서 시공 후 몇 년이 지나 광범위한 균열이 발생했다. 균열 폭을 조절하고 긴장

재의 응력을 줄이기 위하여 1개의 상자형 거더마다 8개의 연결 부위는 강판으로, 2개의 연결 부위는 GFRP 판(두께 30mm, 폭 150mm, 길이 3200mm)으로 보강하였다. 보강 판들은 하부 플랜지의 윗면에 부착되었다.

- 스위스, Ibach 교량(Meier 외 1992): 유지보수 작업 중 프리스트레스 긴장재에 훼손이 발생하여 1991년 이 교량에 대한 보수 작업이 필요했다. 교량은 폭이 150mm, 두께가 1.75mm, 길이가 5m인 CFRP 판으로 보강되었는데, 이 판들은 교량의 하부 표면에 부착 적용되었다. 개략 14 lb의 CFRP가 385 lb의 강판 대신 사용되었다.

VI. 결론

FRP 부착공법에 대한 관련 기술자료와 연구문헌의 조사, 정리, 요약, 평가를 통한 본 연구로부터 다음과 같은 일반적인 결론을 지을 수 있었다.

- 1) FRP 부착 공법에 대한 상당한 양의 연구 실적은 콘크리트 구조물에 대한 보강 기술로서의 FRP 부착 공법의 타당성을 입증하였다.
- 2) FRP 부착공법은 비부식성, 높은 인장응력과 양호한 탄성계수, 경량성, 연결부위의 불필요, 용이한 시공성 등으로 재래의 강판 부착공법보다 훨씬 유리한 장점을 지니고 있다.
- 3) 기존 구조물 보강에 사용되는 FRP 재료에 대한 고비용은 적용의 용이성과 낮은 노무비용으로 충분히 보충된다.
- 4) 본 연구에서 논의된 다양한 FRP 쉬트/판 가운데에서 탄소 FRP 쉬트/판이 콘크리트 구조물의 보수 보강에 가장 적합한 것으로 판단된다. 이는 탄소 섬유가 특출한 역학적, 내구적 성질을 지니고 있기 때문이다.
- 5) FRP 쉬트/판 부착 공법은 그의 단순한 적용 과정으로 콘크리트 구조물의 보수 보강에 FRP 쉬트/판의 활용을 가능케 했다. 그러나 FRP 보강 시스템의 적용 시 지금까지 표준화된 시방서가 개발되어 있지 않아 적절한 품질을 얻기 위해서는 제품

생산자들이 원하는 절차에 따라야 한다.

- 6) FRP 부착 공법의 적용에 있어서 부착될 콘크리트 표면의 적절한 처리는 공법 성공에 매우 중요한 영향을 미친다.
- 7) FRP 부착공법에 관한 모든 문제가 연구된 것은 아니다. FRP 부착 보강공법에 대한 물리적, 역학적, 구조적 요인들의 영향을 확인하기 위한 실험 연구와 보강효과를 정확히 예측할 수 있는 보편적인 이론연구가 요구된다. 특히, 내구성 문제는 특별한 환경 조건 하에서 FRP 부착 공법의 타당성을 확인하기 위하여 심도 있는 실험과 연구가 필요하다.



참고문헌

- 박상렬, Naaman, A. E., Lopez, M. M., and Stankiewicz, P., "Glued-on FRP Sheets for Repair and Rehabilitation - Summary of Current State of Knowledge," UMCEE Research Report, University of Michigan, 1997.
- 박상렬, Naaman, A. E., and Lopez, M. M., "Flexural Behavior of RC Beams Strengthened Using CFRP Sheet, UMCEE Research Report, University of Michigan, 1997.
- Balaguru P., Kurtz S., Rudolph J., "Geopolymer For Repair And Rehabilitation Of Reinforced Concrete Beams", Internet, http://www.insset.u-picardie.fr/geopolymer/fichiers_pdf/REINFO RC.pdf.
- EMPA- Swiss Federal Laboratories For Material Testing And Research, "CFRP Laminates in the Construction Industry," Internal Report, Dubendorf.
- Chajes M.J., Finch W.W., "Performance of a Prestressed Concrete Bridge Rehabilitated Using CFRP Sheets", 1st International Conference Composites in Infrastructure, ICCI, Tucson, Arizona, January 1996, pp. 1186-1193.
- Chajes M.J., Thomson T.A., Januszka T.F., Finch W.W., "Flexural Strengthening Of Concrete Beams Using Externally Bonded Composite Materials", 1994.
- Char M.S., Saadatmanesh H., Ehsani M.R., "Concrete Girders Externally Prestressed With Composite Plates", PCI Journal, May-June 1994, pp.40-51.
- Crasto A.S., Kim R.Y., Fowler C., Mistretta J., "Rehabilitation

- Of Concrete Bridge Beams With Externally-Bonded Composite Plates. Part 1", pp.857-869.
- Faza S.S., GangaRao H.V.S., Barbero E.J., "Fiber Composite Wrap for Rehabilitation of Concrete Structures", Conf. On The Repair and Rehabilitation of the Infrastructure of the Americas, University of Puerto Rico, Mayaguez, August 1994, pp.181-192.
- Jay T., Kliger H.S., Yoshizawa H., "Field Applications of a Carbon Fiber Sheet Material for Strengthening Reinforced Concrete Structures", 41st International SAMPE Symposium, March 24-28, 1996, pp.636-644.
- Karbhari V.M., Seible F., Hegemier G.A., "On use of Fiber Reinforced Composites for Infrastructure Renewal - A Systems Approach", Materials for the New Millennium Proceedings of the Fourth Materials Engineering Conference, Washington D.C. Nov. 10-14, 1996, pp.1091-1100
- Kobayashi A., Endoh M., Kuroda H., Kliger H., "Use of Carbon Fiber Tow Sheet Reinforcement for Improved Bridge Capacity Ratings in Japan", 40th International SAMPE Symposium and Exhibition, Anaheim CA, May 8-11, 1995.
- Kobayashi A., Ohori N., Kuroda H., "Repair and Reinforcement of Concrete Structure With Carbon Fiber Tow Sheet", International Symposium on Non-metallic (FRP) Reinforcements for Concrete Structures, FRPCS-2, 23-25 August 1995, Ghent, Belgium
- M' Bazaa I., Missihoun M., Labossiere P., "Strengthening of Reinforced Beams with CFRP Sheets", 1st International Conference Composites in Infrastructure, ICCI, Tucson, Arizona,

- January 1996, pp.746-759.
- Meier U., "Strengthening of Structures Using Carbon Fiber/Epoxy Composites", Construction and Building materials, Vol.9, No.6, pp.341-351, 1995.
- Nakamura M., Sakai H., Yagi K., Tanaka T., "Experimental Studies On The Flexural Reinforcing Effect Of Carbon Fiber Sheet Bonded To Reinforced Concrete Beam", pp. 760-773.
- Reddy D.V., Gervois G.B., Carlsson L.A., "Laminate Bonding for Repair and Retrofit", Materials for the New Millennium. Proceedings of the Fourth Materials Engineering Conference. Washington D.C. Nov.10-14, 1996, pp.1579-1591.
- Saadatmanesh H., Ehsani M.R., "Fiber Composite Plates Can Strengthen Beams", Journal of concrete International, March 1990, pp.65-71.
- Saadatmanesh H., Ehsani M.R., "RC Beams Strengthened with GFRP Plates. I : Experimental Study", Journal of Structural Engineering, Vol.117, No.11, Nov, 1991, pp.3417-3433.
- Saadatmanesh H., "Fiber Composites for New and Existing Structures", ACI Structural Journal, Vol.91, No.3, May-June 1994.
- "State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", ACI Committee 440, 1996.
- Steiner W., "Strengthening of Structures with CFRP strips", Sika AG, pp.11.
- Witcher D.A., "Application Of Fiber Reinforced Plastics In New Construction And Rehabilitation Of The Infrastructure", 1st

International Conference Composites in Infrastructure, ICCI,
Tucson,Arizona, January 1996, pp.774-785.

Yoshizawa H., Myojo T., Okoshi M., Mizukoshi M., Kliger H.S.,
“Effect Of Sheet Bonding Condition On Concrete Members
Having Externally Bonded Carbon Fiber Sheet”, Materials for
the New Millennium. Proceedings of the Fourth Materials
Engineering Conference, Washington D.C. Nov. 10-14, 1996,
pp.1608-1616.



감사의 글

먼저 그동안 본 논문이 나오기까지 박상렬 교수님의 지속적인 지도와 값진 충고. 그리고 따뜻한 격려에 진심으로 감사드리며, 또한 아낌없는 가르침과 깊은 배려로 성공적인 대학원 생활을 마치게 해주신 양성기 교수님, 이병걸 교수님, 김남형 교수님께 깊이 감사드립니다.

밖으로는 바쁜 직장 업무에도 불구하고 저의 대학원 과정을 이해하여 주시고 적극 격려하여 주신 제주시 김태환 시장님과 동료직원 여러분들께 감사의 마음을 전합니다.

그리고 배놓을 수 없는 고마운 분들, 산업대학원의 좌종근 원장님을 비롯한 여러 교수님과 산업대학원 동료들, 본 논문의 자료정리에 도움을 준 한경호 선생님께도 감사를 포함합니다.

끝으로 여러 가지 어려운 여건 속에서도 학업에 정진할 수 있도록 사랑과 정성으로 든든한 힘이 되어준 사랑하는 아내와 아이들, 혜영, 소민, 철우에게 이 기쁨을 전하고자 합니다.

이 논문은 저와 저를 아끼고 도와주신 많은 분들의 것입니다. 거듭 진심으로 감사를 드리며 이 기쁨을 함께 하고자 합니다.

1999년 여름날

조 여 진