

碩士學位論文

炭素 FRP로 補强된 R.C 보의
힘 舉動



濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

韓 璟 豪

2008 年 2 月

炭素 FRP로 補强된 R.C 보의 힘 舉動

指導教授 朴 相 烈

韓 璟 豪

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2008 年 2 月

韓璟豪의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2008 年 2 月

The Flexural Behavior of R.C Beams Strengthened
Using Carbon FRP

Kyung-Ho Han

(Supervised by Professor Sang-Yeol Park)

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

2008. 2.

This thesis has been examined and approved

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

Thesis director, Nam-Hyung Kim, Prof. of Civil Engineering

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

February 2008.

Department of Civil & Ocean Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

목 차	i
List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vii
I. 서론	1
1. 연구배경	1
2. 연구 목적	2
3. 과거의 연구	2
4. 연구내용 및 방법	3
5. 논문의 구성	4
II. FRP 부착공법	6
1. FRP의 개념	6
2. FRP 부착공법의 사용재료	6
3. FRP의 역학적 성질	16
4. FRP 부착공법의 보강시스템	17
5. FRP 부착공법의 적용과정	20
III. 실험계획 및 방법	28
1. 시험체 내용 및 변수	28
2. 재료	31
3. 탄소 FRP 부착	36

IV. 실험결과와 분석	43
1. 탄소 FRP 쉬트로 휨 보강한 보의 파괴형태와 거동	43
2. 탄소 FRP 판으로 휨 보강한 보의 파괴형태와 거동	68
3. 각 시험체의 파괴과정과 파괴형태의 비교	85
4. 실험인자 해석	95
V. 결론	108
1. 탄소 FRP 쉬트로 보강된 철근콘크리트 보	108
2. 탄소 FRP 판으로 보강된 철근콘크리트 보	109
VI. 참고 문헌	111
감사의 글	115

LIST OF TABLES

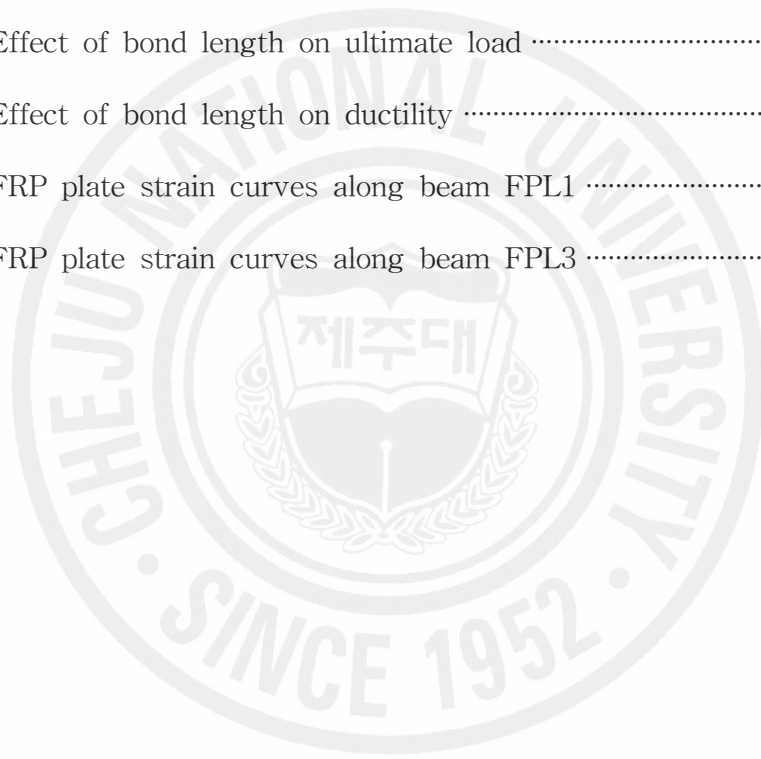
Table 2.1 Technical data for CFRP sheet and plate	10
Table 2.2 Properties of different adhesives	13
Table 2.3 Comparison of fibers to various environments	14
Table 2.4 Comparison of different FRP sheets	15
Table 2.5 Comparison of steel and FRP bonding technique	16
Table 2.6 Applicability of different strengthening systems	20
Table 2.7 Recommended methods for surface preparation	23
Table 3.1 Details and parameters of test beams	29
Table 3.2 Details and parameters of test beams	31
Table 4.1 Failure mode and process of CFRP sheet bonded test beams	85
Table 4.2 Ultimate load, deflection and ductility of CFRP sheet bonded test beams	86
Table 4.3 Failure mode and process of CFRP plate bonded test beams	90
Table 4.4 Ultimate load, deflection and ductility of CFRP plate bonded test beams	90
Table 4.5 Average ultimate shear stress	99
Table 4.6 Average ultimate shear stress	107

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 CFRP sheet and plate	7
Fig. 2.2 FRP reinforcing bar and tedon	7
Fig. 2.3 Stress-strain curves of various FRP reinforcements	17
Fig. 2.4 Procedure for FRP bonding technique	18
Fig. 3.1 Test beam set-up, dimensions and gauges	29
Fig. 3.2 Experimental test parameters	30
Fig. 3.3 Reinforcement bar settlement	32
Fig. 3.4 Water proofing on concrete strain gauge	34
Fig. 3.5 Strain gauges bonded on CFRP sheet test beams	35
Fig. 3.6 Strain gauges bonded on CFRP plate test beams	35
Fig. 3.7 Concrete disk grinding	36
Fig. 3.8 Dust cleaning out	37
Fig. 3.9 Priming	37
Fig. 3.10 CFRP sheet cutting	39
Fig. 3.11 CFRP sheet-bonded test beams	39
Fig. 3.12 Roller pressing on CFRP plates	40
Fig. 3.13 CFRP plate-bonded test beams	40
Fig. 3.14 Data capturing system	41
Fig. 3.15 Hydraulic load test system	42
Fig. 4.1 Steel yielding-concrete compression failure (Control beam)	44
Fig. 4.2 Delamination shear failure of 1-layer CFRP sheet	46

Fig. 4.3 Delamination shear failure of 2-layers CFRP sheet	49
Fig. 4.4 Delamination shear failure of 3-layers CFRP sheet	52
Fig. 4.5 Delamination shear failure of 4-layers CFRP sheet	55
Fig. 4.6 Tensile failure of 1-layer CFRP sheet with web anchorage	58
Fig. 4.7 Tensile failure of 2-layers CFRP sheet with web anchorage	61
Fig. 4.8 Tensile failure of 3-layers CFRP sheet with web anchorage	64
Fig. 4.9 Concrete compression failure of 4-layers CFRP sheet with web anchorage	67
Fig. 4.10 Steel yielding-concrete compression failure(Control beam)	69
Fig. 4.11 Concrete cover failure of beam FPL1	71
Fig. 4.12 Concrete cover failure of beam FPS1	73
Fig. 4.13 Delamination shear failure of beam FPL2	75
Fig. 4.14 Delamination shear failure of beam FPL3	78
Fig. 4.15 Delamination shear failure of beam FPL4	80
Fig. 4.16 Delamination shear failure of beam FPS2	82
Fig. 4.17 Delamination shear failure of beam FPS3	84
Fig. 4.18 Load-deflection curves with no web anchorage(above), with web anchorage(below)	87
Fig. 4.19 Delamination shear failure (F2)	88
Fig. 4.20 Tensile failure of CFRP sheet (F2W)	89
Fig. 4.21 Load-deflection curves ($L_b = 2,000\text{ mm}$, above/ $L_b = 1,400\text{ mm}$, below) ...	93
Fig. 4.22 Concrete cover failure of beam FPL1	94
Fig. 4.23 Delamination shear failure of beam FPL3	94
Fig. 4.24 Ultimate load-strengthening level curves	95

Fig. 4.25 Ultimate deflection–strengthening level curves	96
Fig. 4.26 Ductility index–number of CFRP sheet column	97
Fig. 4.27 Strain curves of FRP sheet along beam F2	98
Fig. 4.28 Strain curves of FRP sheet along beam FW1	99
Fig. 4.29 Ultimate shear stress of concrete at failure	100
Fig. 4.30 Effect of web anchorage on ultimate load	102
Fig. 4.31 Effect of web anchorage on ultimate deflection	102
Fig. 4.32 Effect of bond length on ultimate load	104
Fig. 4.33 Effect of bond length on ductility	104
Fig. 4.34 FRP plate strain curves along beam FPL1	105
Fig. 4.35 FRP plate strain curves along beam FPL3	105



Abstract

Carbon FRP sheets or plates as advanced composites seem to gradually play a significant role in future construction applications, especially in the strengthening and rehabilitation of existing bridges. Such techniques as external prestressing and epoxy-bonded steel plate have been used successfully to increase the strength of girders in existing bridges and buildings. Because of 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, Carbon FRP sheets and plates as high strength composites are an efficient substitute for the steel plating method.

This paper presents the flexural behavior and strengthening effect of reinforced concrete beams strengthened using glued-on carbon fiber reinforced plastic (CFRP) sheet or plate. Parameters involved in this experimental study are the number of CFRP sheet or the bond length of plate and whether there is web anchorage or not. In general, normally sheet-strengthened beams with no web anchorage were failed by delamination shear failure within concrete. The delamination occurred suddenly and the concrete cover cracked vertically and diagonally by flexure and shear was spalled off due to the released energy. The sheet-strengthened beams were stiffer than the reference beam before and after steel yielding. On the other hand, sheet-strengthened beams with web anchorage were finally failed by CFRP sheet rupture after reaching their maximum ultimate loads. The ultimate load considerably increased with an increase of strengthening level. However, the ultimate deflection curvilinearly decreased. The sheet-strengthened beams with web anchorage had slightly increased ultimate loads and high ductility in their ultimate deflection. Therefore, the increment of the load obtained by strengthening was

curvilinearly proportional to the strengthening level. The shape of strain distribution of CFRP sheet was very similar to that of bending moment diagram. Based on the assumption of constant shear stress in the analysis of delamination shear stress of concrete, the average shear stress of concrete at interface ranges between $0.3\sqrt{f_{ck}}$ and $0.7\sqrt{f_{ck}}$ (in kg/cm^2) depending on strengthening level.

The plate-strengthened beams with no web anchorage were generally failed by concrete cover failure along the longitudinal reinforcement. On the other hand, plate-strengthened beams with web anchorage were finally failed by delamination shear failure within concrete after breaking of CFRP sheet wrapping around web. The ultimate load and deflection of plate-strengthened beams increased with an increased bond length of CFRP plate. Also, the ultimate load and deflection increased with an increased anchorage length of CFRP sheet. Particularly, the plate-strengthened beams with web anchorage maintained high ultimate load resisting capacity until very large deflection. The shape of strain distribution of CFRP plate along beam was very similar to that of bending moment diagram. Therefore, an assumption of constant shear stress in shear span could be possible in the analysis of delamination shear stress of concrete. In the case of full bond length, the ultimate resisting shear stress provided by concrete and CFRP sheet increased with an increase of web anchorage length from $0.45\sqrt{f_{ck}}$ to $2.12\sqrt{f_{ck}}$ (in kg/cm^2). In the resisting shear force, about $90kgf/cm$ shear force was provided by FRP anchorage sheet.

Keywords : strengthening, carbon FRP sheet, number of sheet, bond length, concrete cover failure, delamination, shear failure, FRP sheet rupture, web anchorage

I. 서론

1. 연구배경

FRP(Fiber Reinforced Polymer) 합성재료는 현재는 물론 장래의 건설산업에 있어서 중요한 역할을 담당할 것으로 판단되고 있다. 특히 기존 교량들은 교통하중의 증가로 인한 일반적인 마모 및 콘크리트의 열화나 철근의 부식과 같은 환경적 요인에 의하거나 설계 및 시공상의 결함이나 유지 및 보수 등의 소홀로 인하여 구조적인 결함이 끊임없이 발생되고 있기 때문에 많은 교량들이 교체되거나 보강되어야 하는 실정이다. 따라서 단순한 보수만으로는 이러한 결함을 지닌 구조물의 하중지지 능력을 만족할 수 있는 수준으로 향상시킬 수 없는 경우가 대부분이기 때문에 현재의 구조물에 대하여 반드시 근본적인 보강을 고려하지 않을 수 없게 된다.

이제까지는 외부 포스트텐션 공법이나 외부 프리스트레싱(external prestressing) 공법 및 강관 부착공법 등과 같은 기술이 이와 같은 결함을 지닌 교량이나 건물의 보와 슬래브의 강도를 증가 시키는데 성공적으로 기여를 하였다. 고강도의 FRP 쉬트나 판을 이용한 FRP 부착공법은 강관 부착공법을 확장하여 적용시킨 것으로서 비부식성, 경량성 및 무제한적인 사용길이로 인한 겹이음의 불필요성 등과 같은 FRP 재료의 장점을 지니고 있다. FRP 쉬트나 판은 힘에 대하여 보강을 하는 경우 보나 슬래브의 인장부 하면에 접착제인 에폭시로 부착하여 구조부재의 강도와 강성을 증가시킨다. 이러한 FRP 부착공법의 두드러진 장점은 현장적용이 용이하며 외부 프리스트레싱 공법에서와 같이 기존 구조물의 부재에 정착단과 deviator와 같은 정착장치를 설치할 필요성이 없을 뿐만 아니라 기존의 강관 부착공법 사용 시 발생하는 강관의 부식으로 인한 부착강도의 저하를 막을 수 있다는 것이다. 그러므로 FRP 부착공법에 사용되는 FRP 쉬트나 판

은 구조적으로는 부재의 최대 하중지지능력을 향상시켜줄 뿐만 아니라 사용하중 상태에서는 처짐과 균열의 크기를 감소시켜 콘크리트 구조 부재의 내구성을 향상시킨다.

이와 같은 장점으로 최근 개발된 FRP 부착공법은 선진국에서는 기존 콘크리트 구조물의 보강에 이미 실용화되었으며 우리나라에서도 기존의 강판 부착공법을 빠르게 대체해 나가고 있다. 그러나 건설현장에서 이러한 FRP 쉬트나 판을 이용한 부착공법을 적용하는 경우가 증가하고 있음에도 불구하고 FRP를 부착시켜 보강한 철근콘크리트 구조물에 대한 구조적 거동 현상이나 보강효과의 정도에 대한 연구가 충분하지 않은 실정이어서 일반적인 표준 설계기준이나 시공 시방 규정, 품질관리 규정 등이 마련되지 않아 FRP 부착공법을 현장에 적용하는데 여전히 어려움이 발생하고 있다.

2. 연구 목적

본 연구는 탄소 FRP 쉬트나 판을 에폭시로 접착하여 보강된 철근콘크리트 보의 구조적 거동을 통한 보강효과를 파악하여 강판 부착공법을 대체하여 점차 증가하고 있는 탄소 FRP 부착공법에 관한 현장 적용성을 현저하게 높이는데 첫 번째 목적을 두었다. 또한 철근콘크리트 보에 사용된 탄소 FRP 보강량으로서 탄소 FRP 쉬트의 보강 겹수와 복부정착 여부 및 탄소 FRP 판의 휨 부착길이와 탄소 FRP 쉬트에 의한 복부정착 길이와의 관계를 통하여 보강효과를 예측할 수 있는 실험연구로부터 탄소 FRP 부착공법 적용 시 필요한 일반적인 표준설계기준을 마련해 내는 것을 두 번째 목적으로 하였다.

3. 과거의 연구

- 1) 탄소 FRP 쉬트 부착공법으로 보강된 T형 콘크리트 보는 쉬트의 인장파괴 대신 계면 콘크리트의 전단파괴에 의한 갑작스런 박리파괴를 나타냈다. 보강된 보는 철근의 항복을 전후하여 보강하지 않은 보에 비해 높은 강성을 보였고 보강량에 따라 극한하중 지지력은 상당히 증가한 반면 극한처짐은 급격히 감소하였다. 극한상태 시 탄소 FRP 쉬트의 인장력과 콘크리트의 평균전단응력은 보강량에 따라 선형적으로 증가하였고 이에 따라 극한하중 증가분도 선형적으로 증가하였다. 한편, 기존 철근량은 보강량에 따른 하중지지력의 증가분에는 큰 영향을 미치지 않았다(박상렬, 정상모, '탄소섬유 보강량과 철근량이 RC보의 보강효과에 미치는 영향', 1999).
- 2) 철근비와 보강판비를 조정한 보강철근비를 변수로 탄소 FRP 쉬트로 접착된 철근콘크리트 보의 변형특성과 강도특성 및 파괴모드를 실험적으로 고찰하였다. 철근비와 보강판비가 증가할수록 최대 내력은 증가하지만 탄소 FRP 쉬트의 겹수가 증가할수록 에너지 흡수능력이 저하되었다. 파괴모드와 연성의 측면에서 보강철근비의 한계값을 제안하였다. 보강된 보는 철근항복 이후까지 합성거동을 유지하여 구조적 거동이 비선형적임을 나타내었다(오용복, 권영웅, '탄소섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트 보의 보강철근비에 따른 구조적 거동', 콘크리트학회지 제10권 2호, 1998.4).

4. 연구내용 및 방법

본 논문은 철근콘크리트 보에 에폭시로 부착된 탄소 FRP 쉬트의 보강 겹수 및 탄소 FRP 판의 부착길이와 복부정착 여부를 선택하여 파괴 시까지 하중을 증가시켜 보강하지 않은 철근콘크리트 시험체(Control beam)의 거동과 비교하여 탄소 FRP 보강량에 따른 하중과 변위, 극한 하중과 보강량, 극한하중 상태에서의

변형과 보강량과의 관계를 비교하여 보강량의 증가에 따른 보강효과와 구조적 특성에 따른 파괴양상을 실험적으로 연구하였다.

이를 위하여 탄소 FRP 슈트 부착 시험체 9개 및 탄소 FRP 판 부착 시험체 8개 등 총 17개의 시험체를 제작하여 시험하였는데 각 시험체 군에서 한 개의 보는 아무런 보강도 하지 않은 시험체로서 다른 보들과 비교될 수 있도록 하였다.

또한 탄소 FRP 보강량의 증가에 따라 극한상태 시 탄소 FRP의 인장력과 콘크리트의 평균 전단응력은 선형적으로 증가하고 탄소 FRP의 인장파괴 대신 계면 콘크리트의 전단파괴에 의한 갑작스런 박리파괴를 나타낸다는 과거의 실험 결과에 따른 파괴모드를 이론적으로 제시하고 있다.

5. 논문의 구성

1장에서는 본 연구의 배경과 목적, 과거의 연구들과 연구내용 및 방법을 서술하였다.

2장에서는 FRP 부착공법에 대한 일반적인 내용을 다루고 있는데 그중 FRP의 개념과 FRP 부착공법의 사용재료, FRP의 역학적 성질, FRP 부착공법의 보강시스템 및 FRP 부착공법의 적용과정 등을 서술하였다.

3장에서는 탄소 FRP 슈트 및 판을 부착한 시험체의 실험계획 및 방법을 서술하였다. 먼저 시험체 내용 및 변수에서 탄소 FRP 슈트 시험체의 휨 보강효과를 조사하기 위하여 탄소 FRP 슈트의 보강 겹수와 복부정착 여부를 비교 대상으로 선택하였으며, 탄소 FRP 판 시험체에 있어서는 탄소 FRP 판의 휨 부착길이와 탄소 FRP 슈트의 복부정착 길이를 선택하여 비교하였다. 재료에 있어서는 콘크리트와 철근 및 탄소 FRP 슈트의 내용에 대하여 서술하였다. 또한 탄소 FRP 부착에서는 부착될 콘크리트의 표면처리와 탄소 FRP를 부착하는데 따른 내용을

서술하였다. 마지막으로 하중재하와 데이터 수집에서는 하중을 4점 재하법으로 작용시켰으며 동적변형률 측정기와 컴퓨터 자동 데이터 수집 프로그램을 이용하여 그 결과를 측정하여 수집하였다.

4장에서는 탄소 FRP를 부착한 시험체의 실험결과와 분석을 서술하였다. 먼저 시험체의 파괴형태와 거동에서는 각 시험체의 파괴과정과 최종 파괴형태를 탄소 FRP 슈트로 휨 보강한 보와 탄소 FRP 판으로 휨 보강한 보로 분류하여 각 시험체의 경우에 대해서 서술한 다음 각 시험체의 파괴과정과 파괴형태를 서로 비교하여 서술하였다. 다음으로는 실험인자 해석을 서술하였다. 탄소 FRP 슈트 부착 시험체의 경우 실험인자로서 보강계수에 따른 보강효과와 복부정착 여부에 따른 보강효과를 알아보기 위하여 탄소 FRP 슈트를 1겹에서 4겹까지 부착하여 실험한 결과를 각각 비교하였고, 탄소 FRP 판 부착 시험체의 경우 실험인자로서 탄소 FRP 판의 휨 부착 길이와 탄소 FRP 슈트의 복부정착 길이에 따른 보강효과를 관찰하기 위하여 전 지간 부착의 경우와 2/3 지간 부착의 경우 및 각각의 경우에 있어서 부분 지간 복부정착의 경우와 전 지간 복부정착의 경우로 나누어 실험한 결과를 각각 비교하였다.

5장에서는 탄소FRP를 부착한 보의 휨 거동에 관한 보강효과를 파악한 결과를 근거로 하여 본 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하여 기술하였다.

II. FRP 부착공법

1. FRP의 개념

FRP(Fiber Reinforced Polymer)는 일반적으로 강성이 큰 섬유로 보강된 고분자 중합체(Polymer matrix)로 정의된다. 건설공사에 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. 건설재료로서의 FRP는 1950년대 중반 콘크리트 구조물의 인장재(reinforcement)로서 철근 대신 처음 사용되어 1970년대 말에는 부식 방지용 에폭시 피복 철근(epoxy coated reinforcing bar)과의 비교연구가 시작되었고 1986년에는 세계 최초로 독일의 고속도로 교량에 철근대신 FRP 봉이 사용되었다.

현재 FRP 쉬트나 판을 부착하는 보강공법은 미국, 일본, 유럽 등지에선 이미 실용화 되었으며 국내 건설현장에서는 강판 부착공법을 대신하여 적용되고 있다. FRP 봉이나 케이블은 신설 콘크리트 구조물에 있어서는 시험 적용단계로서 세계 각국의 연구소 및 대학에서 많은 연구를 통하여 그 적용성(applicability)을 확인하고 설계기준이나 시방규정을 마련하고 있다.

FRP는 장점으로 비부식성, 고인장강도, 비전기·전자성, 경량성 등을 지니고 있으며, 단점으로는 파괴 시 취성적인 성질과 낮은 횡방향 전단강도, 높은 인장응력 하에서의 응력부식(stress-rupture) 현상 등이 있고 강재에 비하여 고가인 점 등이 있다.

2. FRP 부착공법의 사용재료

토목공학에 주로 사용되는 섬유들은 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유들이다. 이와 같이 FRP는 일반적으로 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유 등의 긴 섬유들을 서로 접합제(resin matrix)로 길게 병렬로 접합하여 만든다.

보강이 필요한 구조물에 접착시키는데 사용되는 접착제로는 에폭시, 폴리에스터, 비닐에스터 등의 열경화성 물질이나 나일론, 폴리에틸렌 등의 열가소성 물질이 사용된다.

가장 흔한 형태의 FRP는 박판(laminate)이다. 박판은 많은 수의 얇은 섬유층들을 접합제(matrix)로 한 데 묶고 그들을 일정한 두께로 결합시켜 만든 것으로서 비교적 얇은 쉬트(sheet)나 비교적 두꺼운 판(plate)등이 있다. 탄소섬유로 만든 CFRP 쉬트/판, 유리섬유로 만든 GFRP 쉬트/판, 또는 아라미드섬유로 만든 AFRP 쉬트/판들은 에폭시, 폴리에스터, 비닐에스터 등의 고분자 접착제로 구조물에 접착하여 강판 대신 사용되고 있다. Fig. 2.1과 2.2는 현재 사용되고 있는 FRP 쉬트/판과 FRP 봉/케이블을 각각 보여주고 있다.



Fig. 2.1 CFRP sheet and plate

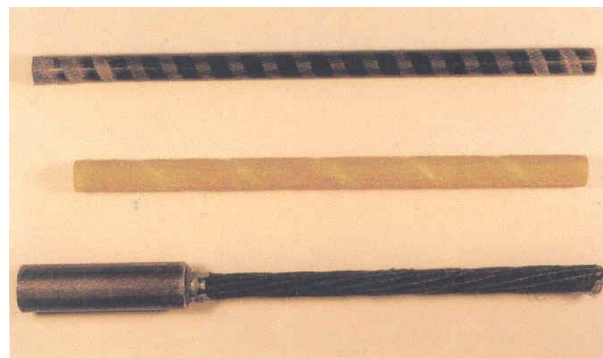


Fig. 2.2 FRP reinforcing bar and tendon

2.1. 탄소 FRP 쉬트 및 판

탄소 FRP(Carbon FRP)와 유리 FRP(Glass FRP) 쉬트 및 판은 콘크리트 구조물의 외부 보강에 있어서 좋은 재료이다. 그러나 유리 FRP의 몇 가지 성질들, 즉, 자외선에 대한 열화도, 낮은 피로 저항성, 고응력-파괴(stress-rupture)현상, 비교적 낮은 탄성계수 등을 고려할 때 탄소 FRP 쉬트 및 판(특히 탄소/에폭시계)이 강판 대신 콘크리트 구조물의 보강에 적용함에 있어서 가장 높은 잠재력을 가지고 있다. 탄소 FRP 쉬트는 손쉽게 취급할 수 있는 경량성과 현저한 피로 저항성, 고강도와 고강성을 가지고 있다. 더구나 탄소 FRP 쉬트는 콘크리트 구조물 내부나 외부에서 일어날 수 있는 모든 형태의 환경적인 영향에 잘 견뎌내는 것으로 알려져 있다.

탄소 FRP 쉬트 및 판은 탄소섬유들과 에폭시 접착제의 결합으로 구성된 합성 물질이다. 탄소 FRP 쉬트 및 판 속에 있는 모든 섬유들은 한 방향으로 구조를 형성하고 있다. 따라서 탄소 FRP 쉬트 및 판은 섬유방향으로 매우 높은 강도와 탄성계수를 지닌 탄성재료이다. 탄소 FRP 쉬트 및 판의 횡방향(섬유 직각방향) 전단강도는 낮으나 이 단점은 인장방향과 섬유방향을 일치시켜 부착함으로써 부착 보강공법의 적용에 영향을 주지 않는다.

일반적으로 CFRP는 다음의 기준에 따라 구분된다.

- 700 MPa(1,015 ksi)까지의 인장강도를 갖는 고강도 섬유
- 600 GPa(87,000 ksi)까지의 탄성계수를 갖는 고탄성계수 섬유

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

일방향성 FRP 재료들은 여러 회사에서 생산되고 있으며 이 회사들은 광범위한 등급의 탄소섬유 쉬트를 공급하고 있다. 대표적인 제품은 다음의 세 가지로서

Sika사의 CarboDur Plate, Tonen사의 Forca Tow Sheet, Mitsubishi사의 Replark이다. 이 세 가지 제품에 관한 물리적인 성질과 역학적인 성질을 Table 2.1에 요약하였다.



Table 2.1 Technical data for CFRP sheet and plate

제품 성질	Sika CarboDur	Tonen Forca Tow 쉬트		Mitsubishi Replark
타입/등급	Type 50 Type 80 Type 100	FTS-C1-20 FTS-C1-30 FTS-C5-30	FTS-GE-30 FTS-GT-30	Type 20 Type 30 Type MM Type HM
섬유타입	탄소섬유 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 (MPa)	2,400	3,480 3,480 2,942	1,516 2,694	3,400 3,400 2,900 1,900
탄성계수 (GPa)	150 이상	230 230 373	72.6 87.1	230 230 390 640
파괴 시 극한신장도 (%)	1.4	1.5 1.5 0.8	2.1 3.2	N/A
단위면적당 무게(g/m^2)	N/A**	200 300 300	300 300	200 300 300 300
밀도 ρ (g/cm^3)	1.6	1.82	2.55 2.50	1.6
두께* (mm)	1.2	0.11 0.17 0.17	0.118 0.120	0.11 0.17 0.17 0.14
쉬트 폭 (cm)	50 80	50 50 50	50 50	25 33 50
접착제	Sikadur30	Primer, FR-E3P, FR-E3PS, FR-E3PW	Primer, FR-E3P, FR-E3PS, FR-E3PW	EpothermPrimer, Putty, Resin
적용길이	250m까지	표준 : 100m	표준 : 100m	표준 : 100m

* 단위길이당 섬유의 면적, **N/A : 참고자료 없음

2.2. FRP 접착제(Adhesive)

접착제는 구조물의 외양을 변화시킴 없이 구조 요소들을 상호 부착시키는 작용을 한다. 부착력은 접착제와 부착된 재료들 간의 분자 인력에 의하여 발생된다. 접착제의 강도는 접착제 분자의 모양과 분자 간의 거리에 연관되어 있다. 부착강도는 더러움, 기름, 먼지, 그리스와 같은 요인들에 의해 현저히 감소될 수 있다. 따라서 부착될 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 볼트연결과 같은 고정방법은 응력의 집중을 유발시킨다.

FRP 제품에 사용 가능한 접착제는 대부분 유기 고분자들(에폭시 접착제)이다. 다음은 구조물 접착제의 필수적인 고려 사항들이다.

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

에폭시(epoxy) 접착제는 조밀한 연결구조를 가지고 있어 위의 요구사항들에 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. 탄소 FRP 슈트용 접착제의 대표적 종류는 다음과 같다.

- Tonen사 : 표준, 봄, 여름용
- Mitsubishi사 : 봄/가을, 겨울, 터널용
- Sika사 : 에폭시 몰탈(epoxy mortar) 1종류

대표적인 접착제의 성질에 관한 비교를 Table 2.2에 나타내었다.



Table 2.2 Properties of different adhesives

성질 \ 제품	Sika	Tonen									Mitsubishi							
		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																	
재료	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	에폭시	
종류	접착제 모르터	Primer 표준	Primer 기름	Primer 기름	Primer 겨울	Primer 기름 습기면	Primer 겨울 습기면	접착제 표준	접착제 기름	접착제 겨울	Primer 가을/봄	Primer 봄/가을	Primer 연중	Putty 연중	접착제 봄/가을	접착제 겨울	접착제 터널	
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:무게 부피	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 (MPa S)	500 (MPa S)	17 (MPa S)	Putty	4,000 (MPa S)	3,500 (MPa S)	4,000 (MPa S)	
Pot Life(분) @30℃ @20℃ (23℃) @10℃	(70)	40	40 120	20	120 120	40	20 50	40	40	110	20 50	25 (40) 95	140 (240)	120	30 (50) 100	50 (70)	(20) 70	(20) 70
경화시간(시) @30℃ @20℃ (23℃) @10℃	N/A	10	12	7	3	12	10	10	10	12	12	- (3.5) 6.5	4.0 (7.0) -	- (2.5) 4.0	3.0 (3.5) 5.0	3.5 (6.0) -	(3.5) 6.0	(3.5) 6.0
양생시간(일) @30℃ @23℃ @10℃	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	5 7 -	- 7 14	7 7 14

* N/A : 해당자료 없음

2.3. FRP 섬유 종류에 따른 비교

섬유는 그것이 천연적인 것이든 합성된 것이든 FRP의 기초를 이루는 구성성분이다. 그들은 일반적으로 FRP의 가장 큰 부피를 차지하고 있으며 하중을 전달하는 요소이다. 보강공법에 사용되는 FRP 재료는 섬유의 물리적, 역학적 성질과 함께 내구성을 고려하여 선택된다. 탄소섬유로 이루어진 FRP 쉬트 및 판은 Table 2.3(Meier, 1995)에 보인 바와 같이 환경에 대한 대부분의 필요조건들을 충족시키고 있기 때문에 토목공학 분야에 적용하는데 있어서 가장 좋은 재료이다. 유리섬유 및 아라미드섬유와 같은 다른 종류의 섬유들은 내구성에 대한 조건을 충분히 만족시키지 못하며 따라서 열악한 환경에 노출되는 경우에는 사용될 수 없다.

Table 2.3 Comparison of fibers to various environments

성질 \ 섬유	탄소섬유 (CF)	유리섬유 (GF)	아라미드섬유 (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

2.4. FRP 쉬트 종류에 따른 비교

탄소섬유, 아라미드섬유 그리고 유리섬유로 보강된 FRP는 토목공학 분야에 적용되고 있는 대표적인 세 종류의 FRP들이다. FRP의 특성은 섬유와 접합제(matrix)의 성질은 물론 제작방법과 FRP 자체의 구조에 의해 영향을 받게 된다.

Table 2.4(Meier, 1995)는 구조물에 대한 보강재료로서 FRP 쉬트 종류별로 관련 기준항목들에 대한 평가들이다. 이 평가는 프리스트레스를 도입한 후 콘크리

트 구조물에 부착 보강하는 공법에 대해서도 적용할 수 있다. Table 2.4로부터 탄소 FRP 쉬트 및 판이 기존 콘크리트 구조물 보강에 가장 적합하다는 사실을 알 수 있다.

Table 2.4 Comparison of different FRP sheets

FRP 쉬트 성질	탄소 FRP	유리 FRP	아라미드 FRP
인장강도	매우 좋음	매우 좋음	매우 좋음
압축강도	매우 좋음	좋음	부적당함
탄성계수	매우 좋음	적당함	좋음
장기거동	매우 좋음	적당함	좋음
피로거동	탁월함	적당함	좋음
용적밀도	좋음	적당함	탁월함

2.5. 강판 부착공법과 FRP 부착공법의 비교

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

콘크리트 구조물에 적용함에 있어서 탄소 FRP 부착공법과 강판부착공법을 Table 2.5에서 비교하고 있다(EMPA, Meier, 1995).

Table 2.5 Comparison of steel and FRP bonding technique

재료 기준	FRP 박판	강판
무게	경량, $\rho = 1.6 g/cm^3$	중량, $\rho = 8.0 g/cm^3$
재료의 강도	섬유방향으로 매우 높은 인장강도, 섬유 직각방향으로 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 비평면에 적용 가능	불편, 단단한 재료로 비평면에 적용 불가
재료비	높음	낮음
설치비	낮음	높음
부식	비부식, 알칼리에 저항	접착계면 부식
내구성	접착제의 내구성에 영향	접착제의 내구성에 영향

3. FRP의 역학적 성질

역학적으로 FRP는 탄성적인 성질을 지니며, 항복(yielding)과 같은 소성변형(plastic deformation) 없이 파괴 시 취성적이다. 섬유방향으로는 강재보다 훨씬 높은 인장강도를 가지고 있으나 섬유 직각 방향으로는 비교적 낮은 전단강도를 가지고 있다. FRP의 탄성계수는 섬유의 종류와 함유량에 따라 다르나 일반적으로 강재보다 낮은 탄성계수를 나타낸다. Fig. 2.3은 탄소, 유리, 아라미드 FRP의

응력-변형률 곡선(stress-strain curve)을 보여주고 있다.

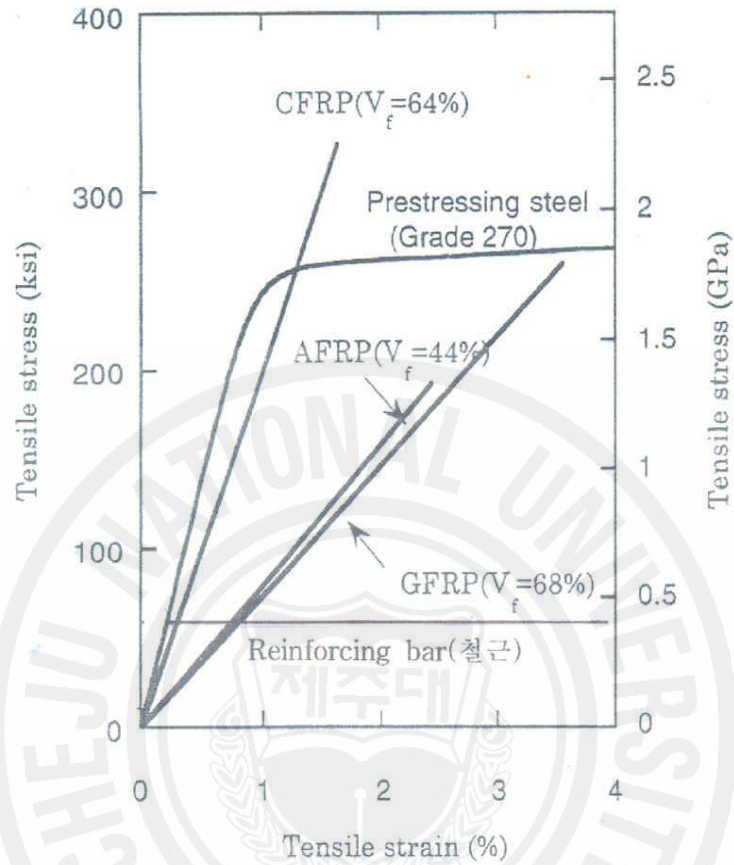


Fig. 2.3 Stress-strain curves of various FRP reinforcements

4. FRP 부착공법의 보강시스템

4.1. FRP 부착공법의 보강방법

FRP 쉬트 및 판을 사용한 FRP 부착공법은 아래와 같은 일반적인 방법으로 철근콘크리트나 프리스트레스트 콘크리트 구조물을 보강한다.

- FRP 쉬트, 판, 그리드(grid) 등을 구조부재에 부착시켜 보강

- FRP 쉬트, 판, 그리드를 콘크리트 보나 슬래브의 인장부 하면에 부착시켜 부재의 휨강도 증대
- FRP 쉬트, 판으로 콘크리트 보의 복부(Web)에 감싸 부착시켜 전단강도 증대
- FRP 사나 쉬트, 판으로 콘크리트 기둥을 감싸 구속효과(confinement effect)를 향상시켜줌으로써 하중 지지능력과 연성을 증대
- 기둥, 보 연결 부위를 FRP 사나 쉬트로 감싸 휨강도와 전단강도를 연성과 함께 증대
- 접착제(adhesive)의 균열 봉합효과와 피복효과로 철근 및 PC 강재의 부식방지 및 방수효과

FRP 부착공법은 일반적으로 Fig. 2.4와 같은 과정으로 콘크리트 구조물에 적용된다. 즉, 콘크리트 표면처리, 프라이머(primer) 바름, 퍼티(putty) 바름(필요 시), 접착제 바름(undercoating), FRP 쉬트 부착, 접착제 바름(overcoating), 마감 혹은 페인팅(painting) 등의 순서로 적용한다.

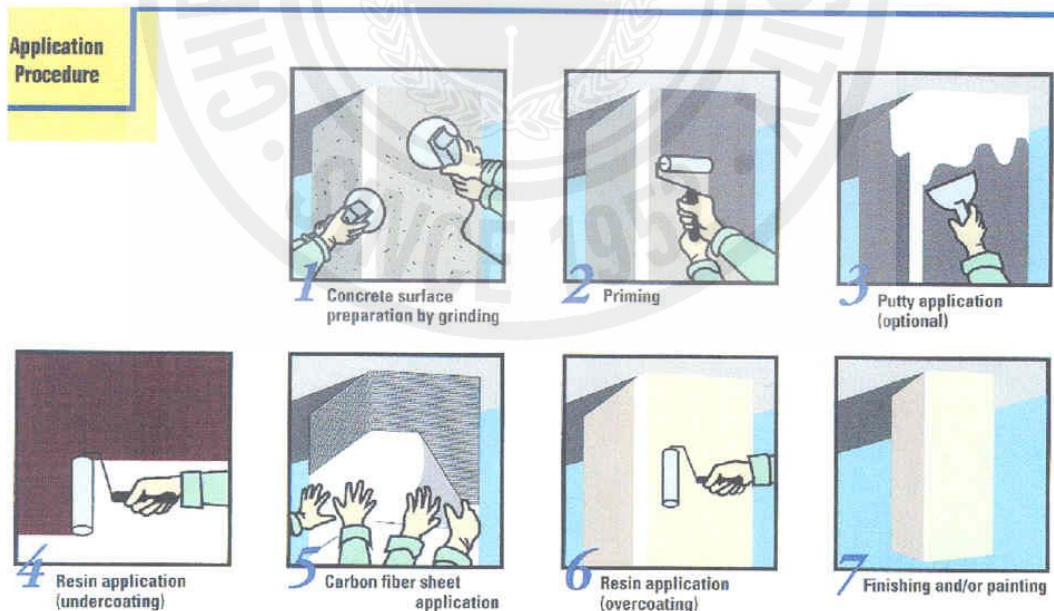


Fig. 2.4 Procedure for FRP bonding technique

4.2. FRP 보강 시스템

여러 가지의 보강 시스템에 따른 적용성에 관한 비교를 Table 2.6에 나타내었다. Tonen사의 Forca Tow Sheet, Mitsubishi사의 Replark, Sika사의 CarboDur가 시중의 상업적 시스템으로 고려되었다. Tonen사의 Forca Tow Sheet 시스템은 쉬트 겹수로서 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 2.6 Applicability of different strengthening systems

영역 시스템	Tonen사 Forca Tow 슈트	Mitsubishi사 Replark	Sika사 CarboDur
CFRP 슈트(판)	<ul style="list-style-type: none"> - 겹수로써 보강량 조절 용이 - 두께 : 얇음(0.17mm) - 휨 보강 <ul style="list-style-type: none"> • 슬래브, 상자형 보 : 1~2겹 • I 또는 T형 보 : 3~5겹 - 전단 보강 <ul style="list-style-type: none"> • 보의 감싸기 용이 • 충분한 부착 면적 • 정착길이 유리 	<ul style="list-style-type: none"> - Tonen Forca Tow 슈트와 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"> • 슬래브, 상자형 보 : 몇 개의 띠 • I 또는 T형 보 : 1겹 • 부착부의 높은 전단 강도 필요 - 전단보강 <ul style="list-style-type: none"> • 감싸기 불가능 • 불충분한 부착 면적 • 정착불리
에폭시와 Primer	<ul style="list-style-type: none"> - 콘크리트 표면과 기후 조건에 적합한 다양한 접착제 시스템 (4종류의 에폭시와 6종류의 Primer) 	<ul style="list-style-type: none"> - 기후 조건에 따라 2종류의 에폭시와 3종류의 Primer 	<ul style="list-style-type: none"> - Sikadur 30 접착제의 광범위한 적용 <ul style="list-style-type: none"> • 양생 전후 또는 양생기간 동안의 충분한 습윤상태 • Primer 필요치 않음
현장적용	<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"> - 델라웨어 대학, 델라웨어 도로교통국 - 서버지니아 대학 - 연방고속도로부(FHA) - 캘리포니아대학교 (미해군 공학서비스센터) - 캘리포니아 도로교통국(Caltrans) 	<ul style="list-style-type: none"> - 캘리포니아 도로교통국(Caltrans) - 플로리다주 맥클린 소재 연방고속도로부 - 플로리다주 도로교통국 - 조지아주 공대(GIT) 	<ul style="list-style-type: none"> - 스위스 EMPA(연방재료시험 및 연구소)

5. FRP 부착공법의 적용과정

5.1. 현장 여건 조사

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

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

5.2. 표면처리

접착제와 부착재료들 사이의 부착강도는 접착제 자체뿐만 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.

부착공법에 관련된 모든 접착면들(콘크리트 혹은 강재, FRP 쉬트)은 표면처리가 되어야 한다. 따라서 부착되는 콘크리트 부재의 표면과 FRP 쉬트 표면을 철저하게 준비, 처리하는 것이 대단히 중요하다. FRP는 손상되지 않고 깨끗한 표면에 적용되어야 한다.

다음은 상업적 자료와 대학이나 연구소의 연구 자료로부터 정리한 종합적인 표면처리 방법들이다.

5.2.1. 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 시멘트풀보다 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 몰탈(Repair mortar)에 의해 충전 보수되어야 한다.
- 부착될 표면은 평탄해야 한다. 2m 길이당 비평탄성은 10mm를 초과하지 말아야 한다(Steiner).
- 콘크리트 표면의 부착강도는 표면처리 작업이 끝난 후, ACI 503R에 따라 무작위 pull-off 시험법에 의해 확인되어야 한다. 이 시험은 보수 시스템 제공자가 요구하는 부착면의 최소 인장응력을 증명하여야 한다.

오염도, 노화도 및 제거해야 할 콘크리트 피복 두께에 따른 여러 가지 표면처리 기술에 관한 비교가 Table 2.7에 제시되어 있다. 오염도와 제거될 콘크리트의 두께가 깊을수록 보다 적극적인 방법을 적용하여야 한다. 콘크리트 부착 표면의 최적의 조도(0.5~1.0mm)는 sandblasting에 의해 만들어질 수 있다(Steiner).

Table 2.7 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	모래분사, 물-모래분사, 고압수 분사
저장도 콘크리트 표면을 가진 두꺼운 피막 및 심도 깊은 오염	화염 제거 및 기계적 제거
깊이 박힌 제설용 소금과 기타 오염 물질의 제거	연마 및 기계적 제거

5.2.2. FRP 쉬트

탄소FRP 쉬트 및 판의 표면처리는 다음과 같은 방법과 내용으로 실시한다.

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

5.3. 접착제와 혼합

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

- 보관이나 사용 시 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 양만큼만 준비한다.
- 두 구성성분의 혼합 전 각 구성성분을 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 500rpm)로 혼합한다.
- 혼합 도중 용기면이 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.

5.4. 구조물에의 적용

5.4.1. 적용절차

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

- 사용되는 보강시스템(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

록 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 슈트를 콘크리트 표면에 배치한다.
- 접착제가 슈트 및 판의 가장자리 바깥으로 빠져 나올 때까지 슈트 및 판을 단단한 고무 롤러(roller)를 사용하여 압착시킨다.
- 바깥으로 빠져 나온 과잉의 접착제를 제거한다.
- 요구되는 FRP 겹수만큼 적용과정을 반복한다. 이때 각 층과의 접착 폭을 일정하게 유지한다.
- 형성된 접착 층은 최소한 24시간 이상 교란되지 않도록 그대로 놓아둔다.
- 필요에 따라 보호 또는 미관을 위하여 페인트를 칠한다.
- 접착제의 양생시간 동안 일어날 수 있는 접착제의 부착강도의 감소를 막기 위하여 중량의 교통하중은 통제되어야 한다.

5.4.2. 추가적 제한사항 및 요구조건

다음은 FRP 부착공법의 적용에 있어서 추가적인 제한사항이나 요구조건들이다.

- FRP 재료들은 운반과정이나 현장에서 절단, 절곡, 짓밟힘 등으로 쉽게 손상될 수 있으므로 유의한다.
- 부착공법 적용 시 콘크리트 최소 재령은 해당 보수 시스템의 요구사항을 충족시켜야만 한다. 대부분의 경우, 콘크리트 최소재령은 특별한 양생조건이 주어지지 않는 한 1~28일이어야 한다.
- 규정에 없는 한 접착제를 묽게 해서 사용하는 안된다. 용제는 접착제의 적절한 양생을 방해한다.
- FRP는 양생 후 콘크리트 내의 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.

5.4.3. 보강된 구조물에 대한 요구조건

보강된 구조물의 안전성은 사용조건을 고려하여 평가된다. 그러나 탄소 FRP 슈트 및 판이 어떤 이유에서 파괴되더라도 결과적으로 안전에 대하여 어떠한 위험도 수반되어서는 안된다는 것을 보장할 필요가 있다. U. Meier에 의하면 사후에 보강된 구조물은 FRP 슈트 및 판이 파괴된 후 1.2의 전체 안전율을 지속적으로 지녀야 한다고 한다(EMPA). 따라서 보강을 필요로 하는 구조물의 상태에 관한 기록은 중요하다. 치수, 기존 구조물의 시공상태, 재료의 품질과 주변 환경 조건들이 신중히 검토되어야 한다.

탄소 FRP 슈트 및 판이 소성변형을 가지고 있지 않다는 사실은 하중 지지능력을 고려할 때 강제로 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 조짐 없이 탄소 FRP 슈트 및 판이 급작스럽게 계면 박리파괴된다. 따라서 탄소 FRP 슈트 및 판이 급작스런 계면 박리파괴에 대한 사전 경고는 다른 방법으로 이루어져야 한다.

5.5. 안전 예방과 응급처치

접착제에 대한 안전예방과 응급처치는 부착공법의 현장 적용 시공사 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 보호장비를 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(snadblasting) 결정실리카 모래먼지에의 노출은 오래되어 나타나는 폐의 손상을 야기시킬 수 있고 암을 유발할 가능성도 있다. 적합한 방진구의 사용이 요구된다.

III. 실험계획 및 방법

1. 시험체 내용 및 변수

재하 시험을 위한 하중 배치와 보의 단면 치수 그리고 측정 게이지 위치는 Fig. 3.1과 같다. 시험체는 콘크리트 구조설계기준(참고문헌 15)에 따라 휨에 대해서는 SD40 D16 철근 2개를 배근하여 최대 철근비의 76%를 사용하였으며 압축철근으로는 SD40 D10 철근 2개를 사용하였다. 전단철근으로는 SD40 D10 스티럽을 배근간격을 100mm로 하여 충분한 전단저항능력을 가지게 함으로써 하중 재하에 따라 발생할지도 모를 전단파괴를 방지하여 휨 보강효과에 대해서만 조사할 수 있도록 하였다.

시험변수로는 탄소 FRP 쉬트 부착시험체의 경우 탄소 FRP 쉬트의 보강겹수와 복부정착 여부를 선택하였고 탄소 FRP 판 부착 시험체의 경우 탄소 FRP 판의 부착길이와 탄소 FRP 쉬트의 복부정착 길이를 선택하여 휨 보강효과에 미치는 영향을 조사하였다. 탄소 FRP 쉬트를 부착한 시험체는 9개이고, 탄소 FRP 판을 부착한 시험체는 8개로서 총 17개의 시험체를 시험하였는데 각각의 시험체군에서 하나의 보는 아무런 보강도 하지 않은 기준 시험체로서 다른 보들과 비교될 수 있도록 계획하였다. 탄소 FRP 쉬트 부착 시험체의 경우 보강겹수로는 1겹부터 4겹까지 부착하였고 복부정착 여부는 휨 보강 쉬트의 섬유방향에 직각되게 1겹의 탄소 FRP 쉬트를 전 복부에 걸쳐 휘감아 부착하였다. 자세한 시험체 내용과 변수는 Table 3.1과 같다.

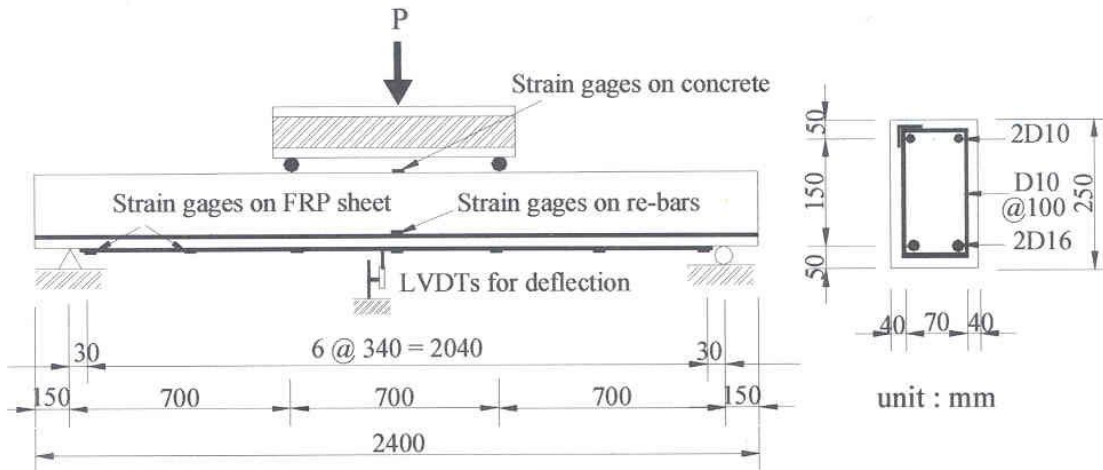


Fig. 3.1 Test beam set-up, dimensions and gauges

Table 3.1 Details and parameters of test beams

시험체	탄소FRP 쉬트 보강접수	복부정착여부	주철근	전단철근
F0	0	-		
F1	1	복부정착 없음	SD40 2D16 (397 mm ²) 철근비=1.31% (최대철근비의 76%)	SD40 2D10 스터립 (143 mm ²) @ 100mm 전단철근비=0.9 5%
F2	2			
F3	3			
F4	4			
F1W	1	탄소FRP 쉬트 1겹 전복부 정착		
F2W	2			
F3W	3			
F4W	4			

탄소FRP 판 부착 시험체의 경우 휨 부착길이는 전지간 부착과 2/3지간 부착의 경우로 나누었고 전지간 부착의 경우 탄소 FRP 쉬트로 복부 정착한 폭은 전지간의 2/6, 4/6, 6/6이며 2/3지간 부착의 경우에는 전지간의 2/4, 4/4로 정하였다. 탄소 FRP 판 부착 시험체의 경우에 있어서도 복부정착용 탄소 FRP 쉬트는 섬유방향이 보의 길이방향과 직각되게 하였다. 시험변수에 대한 그림은 Fig. 3.2에 나타내었고 자세한 시험변수 및 시험체 상세는 Table 3.2와 같다.

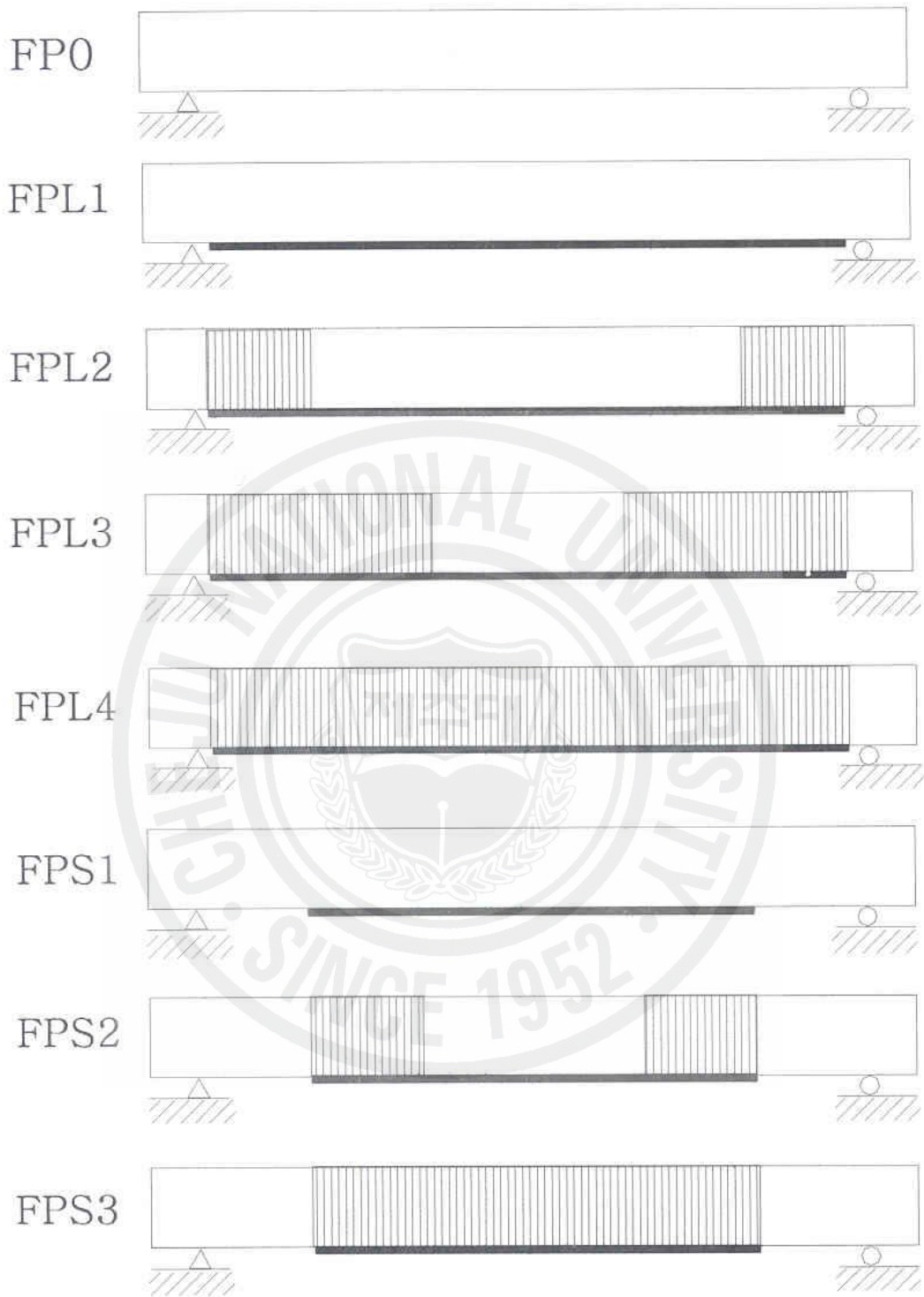


Fig. 3.2 Experimental test parameters

Table 3.2 Details and parameters of test beams

시험체	CFRP 판 부착길이 L_b (mm)	CFRP 쉬트 복부정착길이 L_d (mm)	주철근	전단철근
FP0	0	0	SD40 2D16 (397mm^2) $\rho = 1.31\%$	SD40 2D10 스터립 (143mm^2) @ 100mm $\rho_v = 0.95\%$
FPL1	2,000	0		
FPL2	2,000	325×2sides		
FPL3	2,000	650×2sides		
FPL4	2,000	1,000×2sides		
FPS1	1,400	0		
FPS2	1,400	350×2sides		
FPS3	1,400	700×2sides		

2. 재료

2.1. 콘크리트

시험체는 레미콘(Ready-Mixed Concrete)을 사용하여 시험체의 균질성이 확보 되도록 하였다. 시멘트 종류는 포틀랜드 제1종 시멘트를, 잔골재는 자연모래를, 굵은골재는 최대크기 25mm의 쇄석골재를 사용하였다. 염화물의 함량은 $0.3\text{kg}/\text{cm}^3$ 이하였고 공기량은 $4.5 \pm 1.5\%$ 였으며 슬럼프의 값은 8cm인 제품을 사용하였다. 목표 설계강도는 20.6MPa 였으며 공시체는 시험체와 같은 조건, 즉 7일간 습윤양생 후 온도 약 20°C , 습도 약 50%의 실내에서 양생하였다. 시험체 실험 시점의 5개의 공시체 압축강도 시험결과는 평균 23.3MPa 을 나타내었다.

2.2. 철근

시험체 제작에 사용된 철근은 탄성계수가 $2.0 \times 10^5\text{MPa}$ 인 SD40 종류로 주철근

용으로 D16을, 압축철근과 스테럽용으로는 D10을 사용하였다. 인장시험 결과 D16철근은 평균항복응력 $410.8MPa$ 을 나타내었고 D10철근은 평균 항복응력 $527.4MPa$ 을 나타내었다. Fig. 3.3에 철근조립이 완성된 상태를 나타내었다.

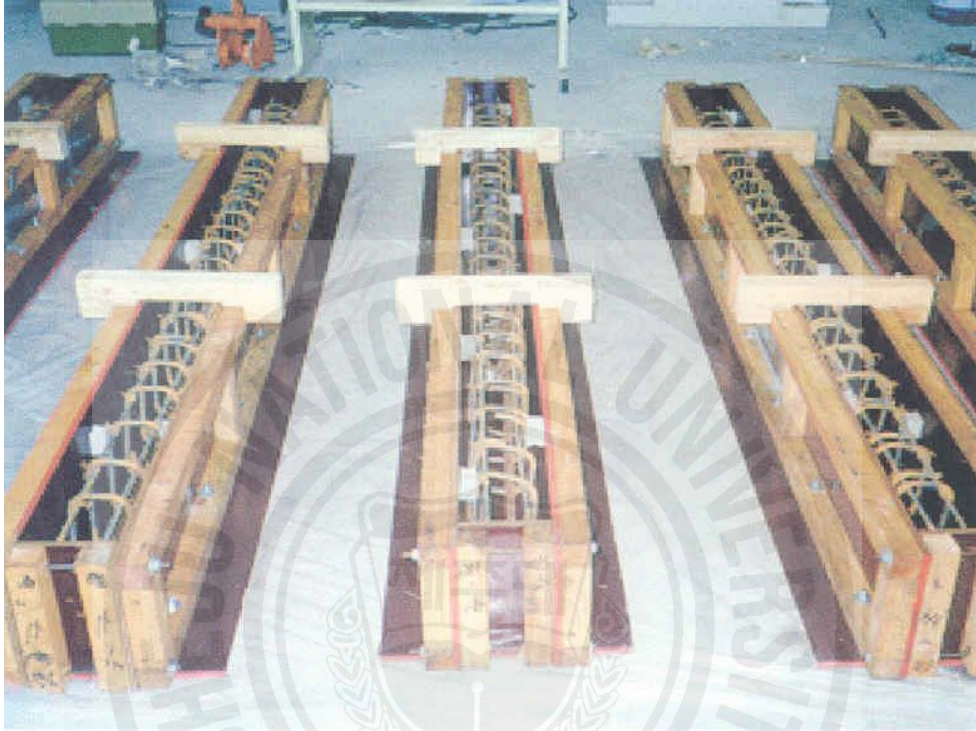


Fig. 3.3 Reinforcement bar settlement

2.3. 탄소 FRP 쉬트

본 시험에 사용된 탄소 FRP 쉬트는 접착종이 위에 일방향으로 배열시켜 만든 것으로 두께 $0.11mm$, 폭 $500mm$ 인 일본 Tonen사의 제품, Forca Tow Sheet(FTS-C1-20)를 사용하였다. 제조사에서 제공한 탄소 FRP 쉬트의 인장강도는 $383N/mm$ 이며 탄성계수는 $2.28 \times 10^5 MPa$ 이고, 최대변형률은 1.5% 이다. 접착제로 사용된 에폭시는 사용환경에 따라 여러 가지 종류가 있는데 본 시험에 사용된 에폭시는 보통 표준환경용인 FR-E3P를 프라이머를 도포한 후 사용하였다.

2.4. 탄소 FRP 판

본 시험에서 휨 보강용으로 사용된 탄소 FRP 판은 두께 1.2mm, 폭 50mm인 Sika사의 제품, CarboDur를 사용하였다. 제조사에서 제공한 탄소 FRP 판의 인장강도는 $2,868 N/mm$ 이며 탄성계수는 $1.53 \times 10^5 MPa$ 이고, 최대변형률은 1.4%이다. 접착제로 사용된 에폭시는 프라이머 없이 모든 사용환경에 사용하는 Sikadur30을 사용하였다. 한편, 복부정착용으로 사용된 탄소 FRP 쉬트는 접착종이 위에 섬유를 일방향으로 배열시켜 만든 것으로 일본 Tonen사의 제품, Forca Tow Sheet(FTS-C1-20)를 사용하였다. 제조사에서 제공한 탄소 FRP 쉬트의 인장강도는 $383 N/mm$ 이며 탄성계수는 $2.28 \times 10^5 MPa$ 이고 최대변형률은 1.5%이다. 쉬트 접착제로 사용된 에폭시는 보통 표준환경용인 FR-E3P를 사용하였다.

2.5. Strain gauge

시험체의 철근과 콘크리트 및 탄소 FRP 쉬트의 변형율을 측정하기 위하여 시험체의 인장철근의 중앙 상부에 강재용(길이 5mm) Strain gauge와 시험체 중앙 압축부 콘크리트 상부 표면에 콘크리트용(길이 60mm) Strain gauge 및 시험체의 인장측 하면에 부착된 탄소 FRP 쉬트 및 판 외부에 강재용(길이 5mm) Strain gauge를 부착하였다.

철근 표면은 돌출된 마디 부분을 그라인딩하여 제거하고 굵은 샌드페이퍼에서 가는 샌드페이퍼 순으로 작업하여 거울처럼 매끈하게 되도록 처리를 한 후 아세톤으로 표면을 깨끗이 닦아 내었다.

강재용 Strain gauge 배면에 CN본드를 발라 철근 표면에 압착하여 부착을 한 후 방수를 위하여 N-1코팅제를 발랐다. N-1코팅제가 완전히 건조한 후 그 위에 방수용 테이프인 VM(vinil/mastic)테이프를 감고난 후 마지막으로 합성고무접착제인 ThreeBond를 도포하여 방수 및 방습 처리를 철저히 함으로써 습기와 물기의 영향을 배제하여 정밀 측정이 가능하도록 하였다.

시험체 압축부의 중앙에 콘크리트용 Strain gauge를 접착하기 위하여 콘크리트 표면을 그라인딩 작업을 한 후 먼지를 제거하고 아세톤으로 깨끗이 닦아내었다. P-2접착제로 콘크리트 표면의 공극을 매우기 위해 실제 Strain gauge 접착 면적보다 조금 넓게 도포하였다. 접착제가 완전히 굳은 후 콘크리트용 Strain gauge를 접착 방법에 따라 접착한 후 습기의 영향을 배제하기 위하여 그 위에 N-1코팅제를 도포하였다.(Fig. 3.4)

인장측의 탄소 FRP 쉬트 및 판의 외부에 일정간격(10cm)으로 강재용 Strain gauge를 접착한 후 마찬가지로 N-1코팅제를 도포하여 방습 처리를 하였다.(Fig. 3.5, 3.6)



Fig. 3.4 Water proofing on concrete strain gauge



Fig. 3.5 Strain gauges bonded on CFRP sheet test beams

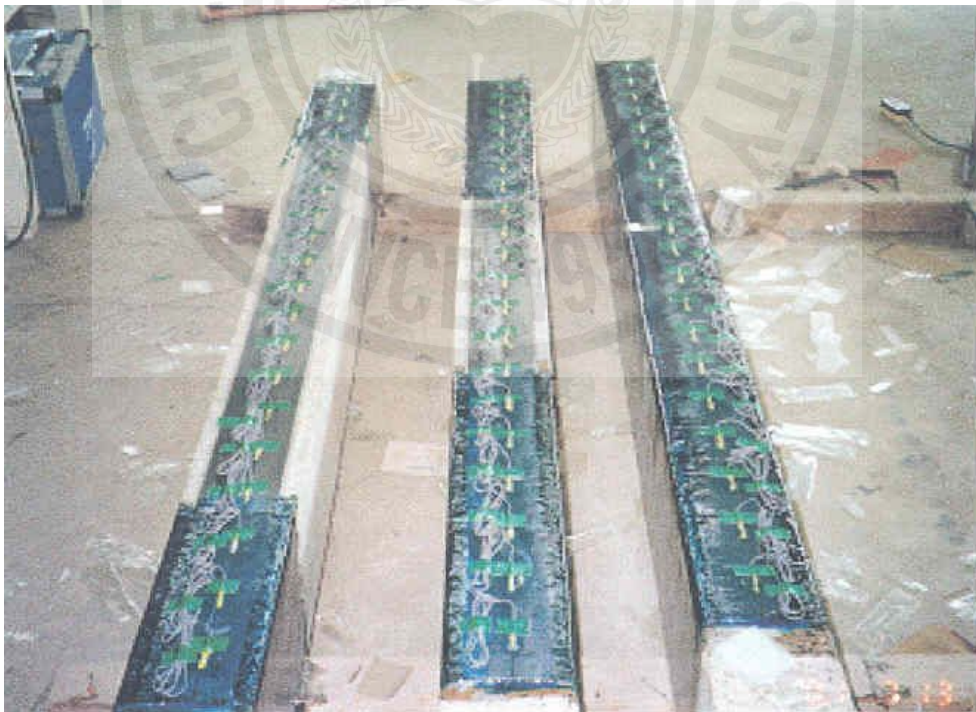


Fig. 3.6 Strain gauges bonded on CFRP plate test beams

3. 탄소 FRP 부착

3.1. 콘크리트 표면처리

부착할 콘크리트 표면처리를 위해 디스크 그라인딩 방법을 채택하였다. 콘크리트 표면은 레이턴스를 완전히 제거하고 굵은 골재의 조직이 충분히 나타날 정도로 갈아내었으며 거푸집 표시나 돌기가 1.0mm 이상이 되지 않도록 면밀하게 처리하였다.(Fig. 3.7) 콘크리트 표면은 갈아낸 후 솔과 진공청소기를 이용하여 먼지들을 완전히 제거하였다.(Fig. 3.8) 에폭시 접착제의 부착효과를 증대시키기 위해 제조사에서 제공된 프라이머를 탄소 FRP 쉬트 접착 하루 전에 콘크리트 조직 내로 충분히 스며들 수 있도록 도포하였다.(Fig. 3.9)



Fig. 3.7 Concrete disk grinding

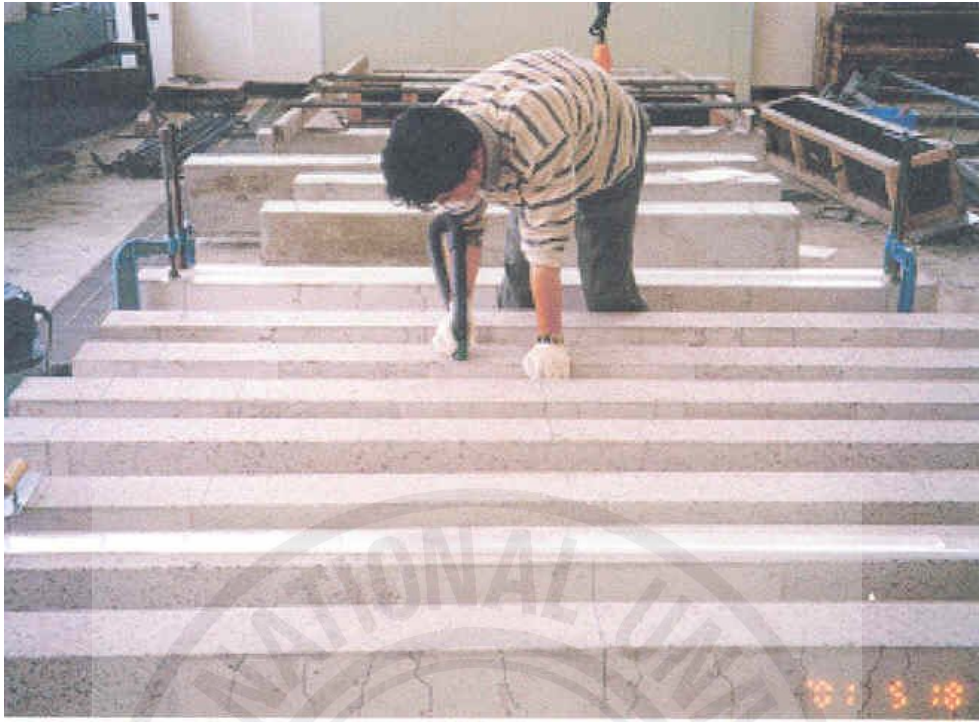


Fig. 3.8 Dust cleaning out



Fig. 3.9 Priming

3.2. 탄소 FRP 부착

탄소FRP 쉬트는 필요한 길이만큼 칼로 자르고 탄소 FRP 판은 전기 절삭기로 자른 후 깨끗한 형겅으로 쉬트나 판에 묻어 있을 수도 있는 탄소가루나 먼지 등을 제거하였다.(Fig. 3.10)

접착제는 제조사의 기술자료에 따라 레진과 경화제를 혼합하여 충분히 섞일 수 있도록 저어주었다. 에폭시접착제는 굵은 솔로 콘크리트 표면에 바르고 탄소 FRP 쉬트를 붙인 다음 고무 롤러를 사용하여 압착함으로써 접착제가 탄소 FRP 쉬트 섬유 사이로 충분히 스며들어 탄소 FRP 쉬트가 에폭시 접착제와 일체로 작용되도록 하였다.(Fig. 3.11)

탄소 FRP 판 접착용 에폭시 접착 몰탈은 콘크리트 표면과 판에 일정한 두께로 바르기 위한 틀을 설치하여 작은 흡손으로 균일하게 발랐으며 바른 후 맞붙여 고무 롤러를 사용하여 압착함으로써 일정한 두께(약 2mm)가 될 수 있도록 하였다(Fig. 3.12). 복부 정착을 위한 탄소 FRP 쉬트는 탄소 FRP 쉬트 부착 시험체의 경우와 동일한 방법으로 부착하였다.(Fig. 3.13)



Fig. 3.10 CFRP sheet cutting



Fig. 3.11 CFRP sheet-bonded test beams



Fig. 3.12 Roller pressing on CFRP plates



Fig. 3.13 CFRP plate-bonded test beams

3.3. 하중 재하와 데이터 수집

하중은 4점 재하법으로 지간의 1/3지점 두곳에 하중이 작용될 수 있도록 강재보를 설치하고 가력 프레임에서 유압 하중기를 사용하여 파괴 시까지 재하하였다. 하중은 변위 조절방법으로 분당 약 1.5mm의 속도로 재하하였으며 재하하중 약 2ton마다 균열을 표시하고 사진을 촬영하였다. 데이터 수집은 동적변형기를 사용하고 컴퓨터 자동 데이터 수집 프로그램을 이용하여 작용하중, 처짐, 철근과 콘크리트, 탄소 FRP 쉬트 및 판의 변형률을 측정하였다.(Fig. 3.14, 3.15) 하중, 처짐, 변형률의 측정위치는 Fig. 3.1에 나타내었다.



Fig. 3.14 Data capturing system

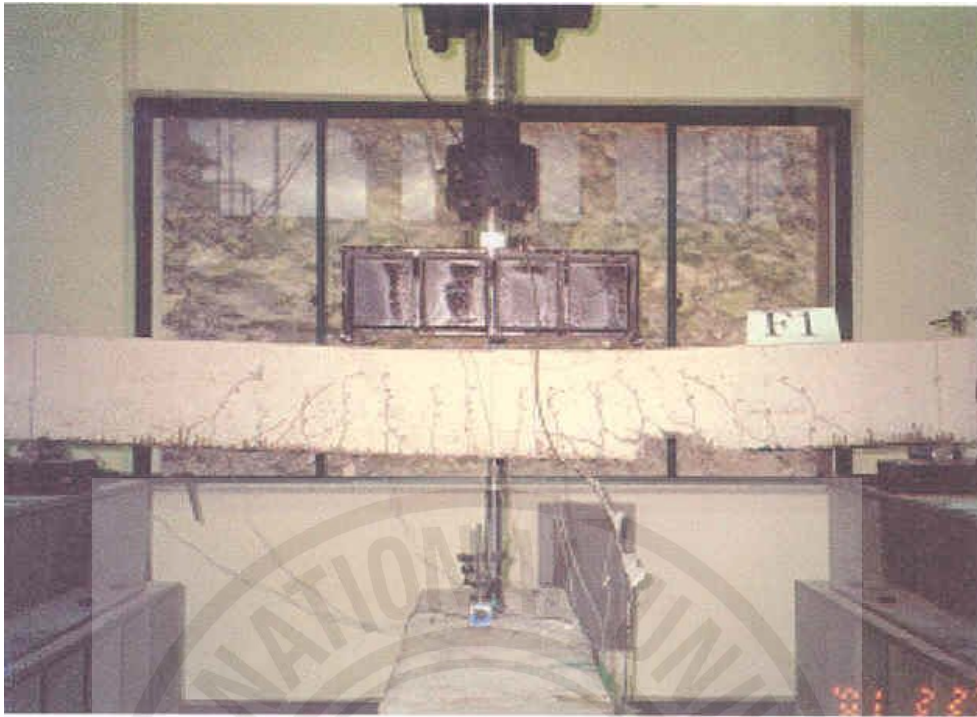
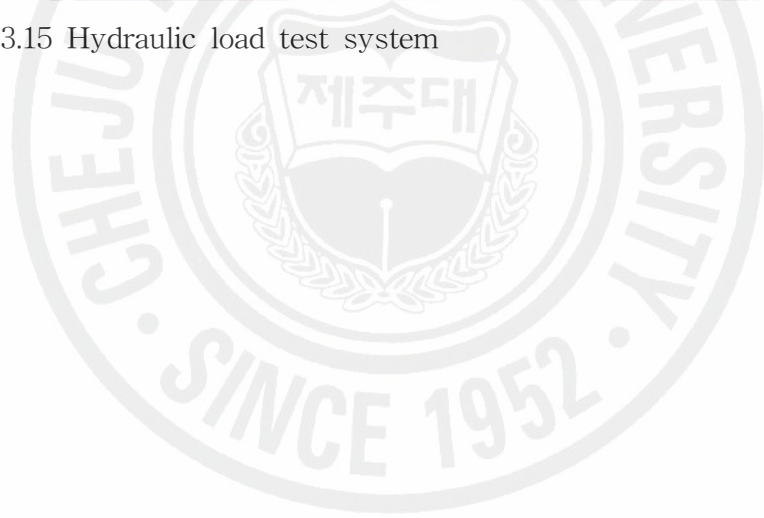


Fig. 3.15 Hydraulic load test system



IV. 실험결과와 분석

1. 탄소 FRP 쉬트로 휨 보강한 보의 파괴형태와 거동

파괴형태는 탄소 FRP 쉬트 부착 시험체의 경우 휨 인장균열과 전단균열의 발생과 진전, 쉬트의 파단이나 탈락여부, 압축부 콘크리트 파괴의 발생과 진전, 하중-처짐 곡선 등을 면밀히 검토하여 각 시험체의 파괴과정과 최종 파괴형태를 결정하였다.

1.1. 복부 정착이 없는 시험체

1.1.1. 기준 시험체(무보강 시험체)

탄소 FRP 쉬트를 보강하지 않은 기준 시험체 F0는 하중의 증가에 따라 철근이 항복하였으며 최대 극한 하중인 7.443톤에 달하자 시험체 중앙에서의 처짐은 37.782mm를 나타내었다 그러나 철근항복 후에도 상당한 처짐이 지속됨으로써 사전에 파괴를 예측할 수 있는 연성파괴 거동을 나타내었다. 파괴 시 하중은 6.953톤이었고 이 때의 시험체 중앙에서의 처짐은 40.776mm를 나타내었다. 이 시험체는 하중이 2톤으로 증가하자 시험체 중앙 부근의 인장측 하면에서 수직 균열이 발생하기 시작하였다. 하중이 계속 증가하자 균열은 좌우 지점부근을 향하여 확장되면서 전단철근이 배근된 위치에서 수직방향으로 발생하였고 이러한 균열은 하중의 지속적인 증가에도 불구하고 거의 수직으로만 발달하는 양상을 보였다. 나중에는 콘크리트 압축 부분이 파괴되었으며 전형적인 휨 인장파괴 형태를 나타내었다.(Fig. 4.1)

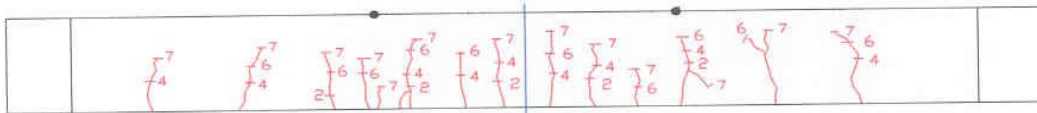


Fig. 4.1 Steel yielding-concrete compression failure (Control beam)

1.1.2. 1겹 보강 시험체

복부 정착이 없는 시험체 F1은 탄소 FRP 쉬트를 1겹으로 시험체의 인장측 하면에 보강하였다. 이 시험체는 하중이 2톤으로 증가하자 시험체 중앙 부근의 인장측 하면에서 수직 균열이 발생하기 시작하였다. 하중이 계속 증가하자 균열은 좌우 지점 부근을 향하여 확장되면서 전단철근이 배근된 위치에서 수직방향으로 발생하였고 하중이 6톤으로 증가하자 시험체의 양 지점과 하중점 사이에서 수직 균열이 발생하였다. 하중이 계속 증가함에 따라 시험체 내부에 발생한 전단응력은 시험체 요소가 45도 회전하면서 최대전단응력인 사인장응력으로 발전하여 콘크리트의 최대인장응력인 파괴계수를 넘어서자 균열은 하중점을 향하여 경사를 지닌 휨-전단균열의 형태로 발달하였다.

이 시험체는 소리를 내면서 약 8톤에서 철근이 항복하였고 최대 극한하중은 10.592톤이었다. 이 때의 처짐은 30.442mm이었으며 연성계수는 3.23을 나타내었다. 무보강 시험체 비하여 최대 극한하중이 약 3.1톤 증가하여 42%의 증가율을 나타낸 반면 연성계수는 약 0.78 감소하여 19%의 감소율을 나타내었다.

이 시험체는 아무런 보강도 하지 않은 기준 시험체 F0의 경우와는 달리 철근이 항복한 직후 변형에 따른 하중이 상당히 증가하고 있다. 이것은 시험체 하면에 휨 보강된 탄소 FRP 쉬트가 부착 후 시험체와 일체로 작용하여 철근콘크리트 보의 강도를 효과적으로 증진시키고 있다는 사실을 나타내고 있는 것이다. 이 시험체는 하중의 증가에 따라 철근항복 후에도 처짐이 계속하여 증가하다 나중에는 탄소 FRP 쉬트가 에폭시 접착부 바로 위에 접해 있는 콘크리트의 경계면에서 소리를 내면서 횡방향 전단력에 의해 탈락되는 계면 박리 파괴형태를 보여주었다. 파괴 시의 하중은 10.223톤이었고 이 때의 시험체 중앙에서의 처짐은 33.179mm를 나타내었다. 이 시험체는 철근콘크리트 보의 계면 박리파괴 시 휨이나 휨-전단에 의해 균열된 콘크리트 피복이 파괴 시 일시에 방출되는 변형에너지에 의해 함께 떨어져 나가는 파괴 모습을 보여주었다.(Fig. 4.2)

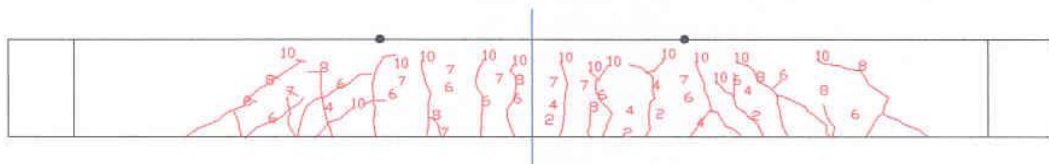


Fig. 4.2 Delamination shear failure of 1-layer CFRP sheet

1.1.3. 2겹 보강 시험체

복부 정착이 없는 시험체 F2는 탄소 FRP 쉬트를 2겹으로 시험체의 인장측 하면에 보강하였다. 이 시험체는 하중이 2톤으로 증가하자 시험체 중앙 부근의 인장측 하면에서 수직 균열이 발생하기 시작하였다. 하중이 계속 증가하자 균열은 좌우 지점 부근을 향하여 확장되면서 전단철근이 배근된 위치에서 시험체 중간 깊이까지 수직 방향으로 발생하였고 시험체의 양 지점과 하중점 사이에서 발달된 수직 균열은 하중이 8톤으로 증가하자 하중점을 향하여 시험체의 중간 깊이에서 경사를 지니면서 휨-전단균열의 형태로 발달하는 경향을 1겹 보강 시험체 F1의 경우보다 더욱 뚜렷이 나타내었을 뿐만 아니라 하중점과 중앙부 사이에서 발생된 수직균열에서도 그러한 경향을 나타내기 시작하였다.

이 시험체는 소리를 내면서 약 9톤에서 철근이 항복하였다. 하중이 10톤에 이르자 시험체의 양 지점 부근에서 뚜렷한 사인장균열이 발달하여 11톤에 이르러서는 압축부로 확장되면서 거의 수평균열을 이루었다.

이 시험체는 11.685톤에서 최대극한하중을 나타내었고 이 때의 처짐은 24.190mm이었으며 연성계수는 2.57을 나타내었다. 1겹 보강시험체에 비하여 최대극한하중이 약 1.1톤 증가하여 1겹 보강 시험체의 극한하중 증가율 42%보다 약 4배 이상 둔화된 10%의 증가율을 나타내었으나 연성계수는 약 0.66 감소하여 20%의 감소율을 보이며 1겹 보강 시험체의 경우에 비해 약간 더 감소된 연성감소율을 나타내었다.

이 시험체는 1겹 보강 시험체 F1의 경우처럼 철근이 항복한 직후 변형에 따른 하중이 상당히 증가하였고 1겹 보강 시험체 F1의 경우 보다 동일 처짐량에서는 하중이 더욱 증가하였다. 이것은 2겹의 탄소 FRP 쉬트로 휨 보강된 시험체가 1겹으로 보강된 경우보다 철근콘크리트 보의 강도를 더욱 효과적으로 증진시키고 있다는 사실을 나타내고 있는 것이다. 또한 이 시험체는 무보강 시험체에 비하여 최대 극한하중이 약 4.2톤 증가하여 대략 57%의 증가율을 나타내어 1겹 보강 시험체 F1의 증가율보다 15%정도 더 높았다. 반면 연성계수는 약 1.44 감소하여 대략 36%의 감소율로서 1겹 보강 시험체 F1에 비해 약 2배 정도 더 감소하였다.

이 시험체는 1겹 보강 시험체 F1과 마찬가지로 하중의 증가에 따라 철근항복

후에도 처짐이 계속하여 증가하다 나중에는 탄소 FRP 쉬트가 에폭시 접착부 바로 위에 접해 있는 콘크리트의 경계면에서 소리를 내면서 횡방향 전단력에 의해 탈락되는 계면박리 파괴형태를 보여주었다. 파괴 시의 하중은 11.547톤이었고 이때의 시험체 중앙에서의 처짐은 24.929mm를 나타내었다. 이 시험체는 철근콘크리트 보의 계면 박리파괴 시에도 휨이나 휨-전단에 의해 균열된 콘크리트 피복이 파괴 시 일시에 방출되는 변형에너지에 의해 함께 떨어져 나가는 파괴 모습을 보여주었다.(Fig. 4.3)



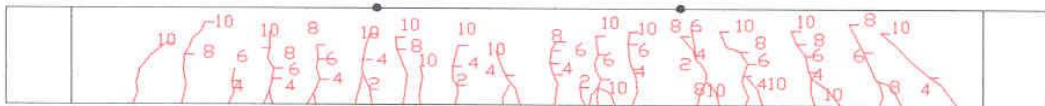


Fig. 4.3 Delamination shear failure of 2-layers CFRP sheet

1.1.4. 3겹 보강 시험체

복부 정착이 없는 시험체 F3은 탄소 FRP 슈트를 3겹으로 시험체의 인장측 하면에 보강하였다. 이 시험체는 하중이 4톤으로 증가하자 시험체 중앙 부근의 인장측 하면에서 수직 균열이 발생하기 시작하였다. 하중이 계속 증가하자 균열은 좌우 지점 부근을 향하여 확장되면서 전단철근이 배근된 위치에서 수직방향으로 발생하였고 시험체의 양 지점과 하중점 사이에서 발달된 수직 균열은 하중이 6톤으로 증가하자 2겹 보강 시험체 F2의 경우처럼 하중점을 향하여 경사를 지면서 휨-전단균열의 형태로 발달하는 경향을 뚜렷이 나타내었을 뿐만 아니라 하중점과 중앙부 사이에서 발생된 수직균열에서도 그러한 경향을 나타내기 시작하였다. 이러한 사인장 균열의 발달 경향은 2겹 보강 시험체의 경우에 비해서 수직 균열이 보의 중간 깊이에 도달되기 이전부터 발생하는 모습을 보여주고 있었다.

이 시험체는 약 10.5톤에서 소리를 내면서 철근이 항복하여 12.970톤에서 최대 극한하중에 이르렀으며 이 때의 처짐은 21.699mm이었고 연성계수는 2.30을 나타내었다. 이 시험체는 2겹 보강 시험체에 비하여 최대 극한하중이 약 1.3톤 증가하여 2겹 보강 시험체의 극한하중 증가율 10%보다 약간 높은 11%의 증가율을 나타내었다. 연성계수는 약 0.27 감소하여 약 11%의 감소율로서 2겹 보강 시험체의 연성 감소율 20%에 비해서 약 2배 정도 연성 감소율이 둔화되었음을 나타내었다.

이 시험체는 2겹 보강 시험체 F2의 경우처럼 철근이 항복한 직후 변형에 따른 하중이 상당히 증가하였고 2겹 보강 시험체 F2의 경우보다 동일 처짐량에서는 하중이 더욱 증가하였다. 이것은 3겹의 탄소 FRP 슈트로 휨 보강된 시험체가 2겹으로 보강된 경우보다 철근콘크리트 보의 강도를 더욱 효과적으로 증진시키고 있다는 사실을 나타내고 있는 것이다. 또한 이 시험체는 무보강 시험체에 비하여 최대 극한하중이 약 5.5톤 증가하여 대략 74%의 증가율을 나타내어 2겹 보강 시험체 F2의 증가율보다 17%정도 더 높았다. 반면 연성계수는 약 1.71 감소하여 대략 43%의 감소율로서 2겹 보강 시험체 F2에 비해 약 7% 정도 더 감소하였다.

이 시험체는 2겹 보강 시험체 F2와 마찬가지로 하중의 증가에 따라 철근항복 후에도 처짐이 계속하여 증가하다 나중에는 탄소 FRP 슈트가 에폭시 접착부 바

로 위에 접해 있는 콘크리트의 경계면에서 소리를 내면서 횡방향 전단력에 의해 탈락되는 계면박리 파괴형태를 보여주었다. 파괴 시의 하중은 12.826톤이었고 이때의 시험체 중앙에서의 처짐은 21.808mm를 나타내었다. 이 시험체는 철근콘크리트 보의 계면박리파괴 시에도 휨이나 휨-전단에 의해 균열 된 콘크리트 피복이 파괴 시 일시에 방출되는 변형에너지에 의해 함께 떨어져 나가는 파괴 모습을 보여주었다.(Fig.4.4)



1.1.5. 4겹 보강 시험체

복부 정착이 없는 시험체 F4는 탄소 FRP 쉬트를 4겹으로 시험체의 인장측 하면에 보강하였다. 이 시험체는 하중이 6톤으로 증가하자 시험체 중앙 부근의 인장측 하면에서 수직 균열이 발생하기 시작하였다. 하중이 계속 증가하자 균열은 좌우 지점 부근을 향하여 확장되면서 전단철근이 배근된 위치에서 수직방향으로 발생하였고 시험체의 양 지점과 하중점 사이에서 발생된 수직 균열은 하중이 8톤으로 증가하자 3겹 보강 시험체 F3의 경우처럼 하중점을 향하여 경사를 지면서 휨-전단균열의 형태로 발달하는 경향을 뚜렷이 나타내었을 뿐만 아니라 하중점과 중앙부 사이에서 발생된 수직균열에서도 그러한 경향을 나타내기 시작하였다. 이러한 사인장 균열의 발달 경향은 3겹 보강 시험체의 경우와 마찬가지로 수직 균열이 시험체의 중간 깊이에 도달되기 이전부터 발생하는 모습을 뚜렷이 나타내고 있었다.

이 시험체는 약 11.5톤에서 소리를 내면서 철근이 항복하기 시작하여 13.929톤에서 최대 극한하중에 이르렀으며 이 때의 처짐은 18.617mm이었고 연성계수는 1.98을 나타내었다. 이 시험체는 3겹 보강 시험체에 비하여 최대 극한하중이 약 1톤 증가하여 3겹 보강 시험체의 하중 증가율 11%보다 다소 낮은 약 7%의 증가율을 나타내었다. 연성계수는 약 0.32 감소하여 약 14%의 감소율로서 3겹 보강 시험체의 연성 감소율 11%에 비해서 다소 연성 감소율이 증가되었음을 나타내었다.

이 시험체는 3겹 보강 시험체 F3의 경우처럼 철근이 항복한 직후 변형에 따른 하중이 상당히 증가하였고 3겹 보강 시험체 F3의 경우보다 동일 처짐량에서는 하중이 더욱 증가하였다. 이것은 4겹의 탄소 FRP 쉬트로 휨 보강된 시험체가 3겹으로 보강된 경우보다 철근콘크리트 보의 강도를 더욱 효과적으로 증진시키고 있다는 사실을 나타내고 있는 것이다. 또한 이 시험체는 무보강 시험체에 비하여 최대 극한하중이 약 6.5톤 증가하여 대략 87%의 증가율을 나타내어 3겹 보강 시험체 F3의 증가율보다 13%정도 더 높았다. 반면 연성계수는 약 2.03 감소하여 대략 51%의 감소율로서 3겹 보강 시험체의 F3에 비해 약 8%정도 더 감소하였다.

이 시험체는 3겹 보강 시험체 F3과 마찬가지로 하중의 증가에 따라 철근항복 후에도 처짐이 계속하여 증가하다 나중에는 탄소 FRP 쉬트가 에폭시 접착부 바로 위에 접해 있는 콘크리트의 경계면에서 소리를 내면서 횡방향 전단력에 의해 탈락되는 계면박리 파괴형태를 보여주었다. 파괴 시의 하중은 13.865톤이었고 이때의 보 중앙에서의 처짐은 18.714mm를 나타내었다. 이 시험체는 철근 콘크리트 보의 계면 박리파괴 시에도 휨이나 휨-전단에 의해 균열 된 콘크리트 피복이 파괴 시 일시에 방출되는 변형에너지에 의해 함께 떨어져 나가는 파괴 모습을 보여주었다.(Fig. 4.5)



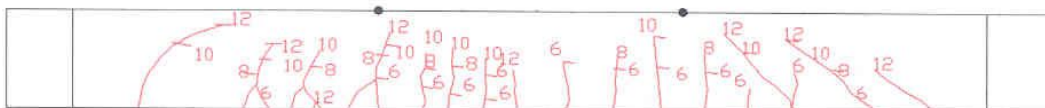
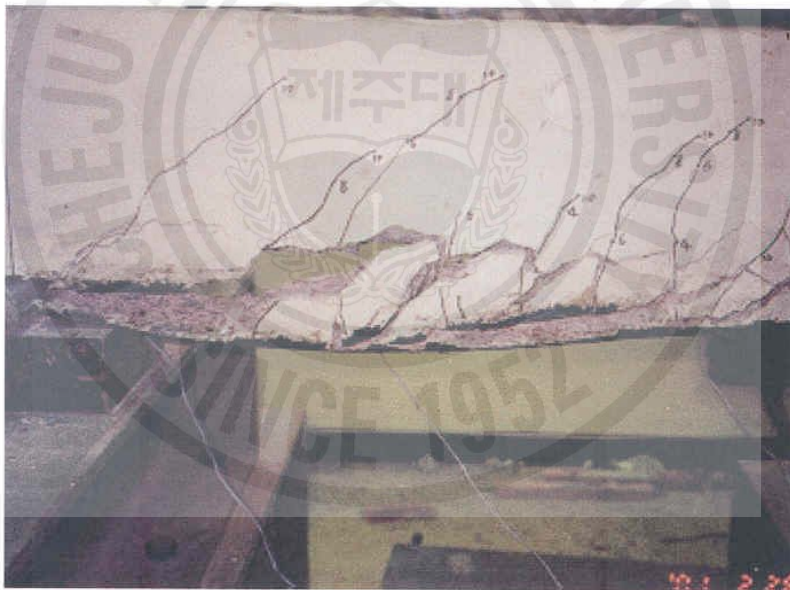
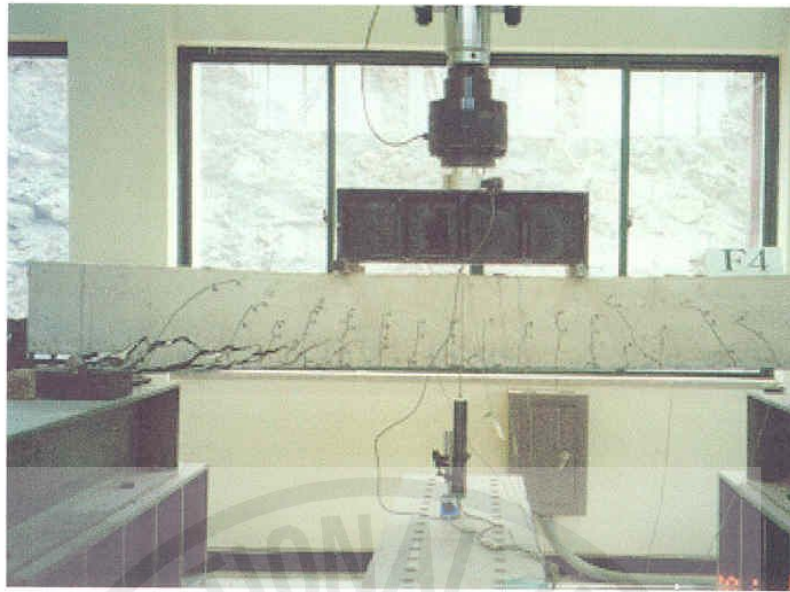


Fig. 4.5 Delamination shear failure of 4-layers CFRP sheet

1.2. 복부 정착이 있는 시험체

1.2.1. 1겹 보강 시험체

탄소 FRP 슈트로 휨 보강된 시험체의 복부면 전체를 한 겹의 탄소 FRP 슈트로 감싸 정착시킨 시험체들의 경우는 다른 파괴형태를 보여주었다. 그 중 시험체의 인장측 하면에 1겹으로 휨 보강된 시험체 F1W는 하중이 4톤으로 증가함에 따라 시험체의 중앙과 좌우 인장측 하면에서 수직 방향으로 균열이 발생하기 시작하였고 6톤에서는 새로운 균열이 지점 방향으로 확장되며 전단철근이 배근된 위치에서 수직방향으로 발생하였다. 하중이 8톤으로 증가하자 소리를 내면서 철근이 항복하기 시작하였고 철근항복에 이어 하중이 약 10톤에 다다르자 다시 소리를 내면서 탄소 FRP 슈트 접착부에 있는 콘크리트의 횡방향 전단파괴가 시작되었다. 그 후 최대 극한하중에 다다른 후에도 처짐이 계속 증가하다 결국 시험체의 중앙부 좌측에서 휨 보강된 탄소 FRP 슈트가 소리를 내면서 파단되는 파괴형태를 보여주었다.

이 시험체의 최대 극한하중은 11.157톤으로서 이 때 시험체 중앙에서 발생된 처짐은 35.586mm이었으며 연성계수는 3.78을 나타내었다. 최대 극한하중은 무보강 시험체에 비하여 약 3.7톤 증가하여 대략 50%의 증가율을 나타낸 반면 연성계수는 약 0.23 감소하여 대략 6%의 감소율을 나타내었다. 복부 정착을 하지 않은 시험체 F1과 비교하면 최대 극한하중은 약 600kg 정도 증가하여 복부정착에 의한 강도의 증가효과가 그다지 크지 않았다. 반면 연성계수에 있어서 복부정착을 하지 않은 시험체 F1의 경우 무보강 시험체의 연성계수에 비해 20%의 감소율을 보였으나 복부정착을 한 경우에 있어서는 6%의 감소율을 나타냄으로써 연성이 복부정착을 하지 않은 시험체에 비해 3배 이상 증가하였음을 나타내었다.

이 시험체는 하중이 약 8톤이 되자 철근이 항복한 후 하중이 10톤으로 증가하여 탄소 FRP 슈트 접착부에 있는 콘크리트의 횡방향 전단파괴가 일어날 때까지는 복부 정착을 하지 않은 시험체 F1과 거의 동일한 하중-처짐 관계를 나타내다가 그 이후부터는 복부 정착을 하지 않은 시험체 F1보다 동일 처짐량에서 하중이 다소 증가하는 복부 정착효과를 나타내었다. 따라서 탄소 FRP 슈트로 휨 보

강되고 복부정착을 한 시험체 F1W는 복부정착을 하지 않은 경우보다 철근콘크리트 보의 강도를 다소 증진시켰다.

여기서 시험체 F1W의 최종파괴는 탄소 FRP 쉬트의 파단으로 나타났으나 탄소 FRP 쉬트의 파단 전에 최대 극한하중에 도달하였으므로 탄소 FRP 쉬트가 파단되기 전에 탄소 FRP 쉬트 접착부에 있는 콘크리트의 횡방향 전단파괴가 시작된 것으로 판단되었다.(Fig. 4.6)





Fig. 4.6 Tensile failure of 1-layer CFRP sheet with web anchorage

1.2.2. 2겹 보강 시험체

탄소 FRP 슈트로 휨 보강된 시험체의 복부면 전체를 한 겹의 탄소 FRP 슈트로 감싸 정착시킨 시험체들의 경우는 다른 파괴형태를 보여주었다. 그 중 시험체의 인장측 하면에 2겹으로 휨 보강된 시험체 F2W는 하중이 4톤으로 증가함에 따라 시험체의 중앙과 좌우 인장측 하면에서 수직 방향으로 균열이 발생하기 시작하였고 6톤에서는 새로운 균열이 지점 방향으로 확장되며 전단철근이 배근된 위치에서 수직방향으로 발생하였다. 하중이 9톤으로 증가하자 소리를 내면서 철근이 항복하기 시작하였고 철근항복에 이어 하중이 약 11톤에 다다르자 다시 소리를 내면서 탄소 FRP 슈트 접착부에 있는 콘크리트의 횡방향 전단파괴가 시작된 후 하중이 더욱 증가하여 12톤에 이르자 복부정착을 한 탄소 FRP 슈트가 시험체의 압축부 하중점 부근에서 시험체의 복부면에 직각 방향으로 용기하기 시작하였다. 그 후 하중이 최대 극한하중 12.806톤에 다다른 후에도 처짐이 계속 증가하다 결국 시험체 중앙부 하단에서 휨 보강된 탄소 FRP 슈트가 소리를 내면서 파단되고 시험체 중앙 상부의 복부 정착 부분의 탄소 FRP 슈트가 박리되는 파괴형태를 보여주었다.

이 시험체의 최대 극한하중 시 시험체 중앙에서 발생한 처짐은 30.952mm이었으며 연성계수는 3.29를 나타내었다. 최대 극한하중은 무보강 시험체에 비하여 약 5.4톤 증가하여 대략 72%의 증가율을 나타낸 반면 연성계수 약 0.72 감소하여 대략 18%의 감소율을 나타내었다. 복부 정착을 하지 않은 시험체 F2와 비교하면 최대 극한하중은 약 1.1톤 정도의 증가를 나타내어 복부정착에 의한 강도의 증가효과가 그다지 크지 않았다. 반면 연성계수에 있어서 복부정착을 하지 않은 시험체 F2의 경우 무보강 시험체의 연성계수에 비해 약 36%의 감소율을 보였으나 복부정착을 한 경우에 있어서는 약 18%의 감소율을 나타냄으로써 연성이 복부정착을 하지 않은 시험체에 비해 2배 정도 증가하였음을 나타내었다.

이 시험체는 하중이 약 9톤이 되자 철근이 항복한 후 하중이 11톤으로 증가하여 탄소 FRP 슈트 접착부에 있는 콘크리트의 횡방향 전단파괴가 일어날 때까지는 복부 정착을 하지 않은 시험체 F2와 거의 동일한 하중-처짐 관계를 나타내다가 그 이후부터는 복부 정착을 하지 않은 시험체 F2보다 동일 처짐량에서 하중

이 다소 증가하는 복부 정착효과를 나타내었다. 따라서 탄소 FRP 쉬트로 휨 보강되고 복부정착을 한 시험체 F2W는 복부정착을 하지 않은 경우보다 철근콘크리트 보의 강도를 다소 증가시켰다.

여기서 시험체 F2W의 최종파괴는 탄소 FRP 쉬트의 파단으로 나타났으나 탄소 FRP 쉬트의 파단 전에 최대 극한하중에 도달하였으므로 탄소 FRP 쉬트가 파단되기 전에 탄소 FRP 쉬트 접착부에 있는 콘크리트의 횡방향 전단파괴가 시작된 것으로 판단되었다(Fig. 4.7).





Fig. 4.7 Tensile failure of 2-layers CFRP sheet with web anchorage

1.2.3. 3겹 보강 시험체

탄소 FRP 쉬트로 휨 보강된 시험체의 복부면 전체를 한 겹의 탄소 FRP 쉬트로 감싸 정착시킨 시험체들의 경우는 다른 파괴형태를 보여주었다. 그 중 시험체의 인장측 하면에 3겹으로 휨 보강된 시험체 F3W는 하중이 4톤으로 증가함에 따라 시험체의 중앙과 좌우 인장측 하면에서 수직 방향으로 균열이 발생하기 시작하였고 하중이 계속 증가함에 따라 새로운 균열이 양 지점과 하중점 사이의 중간부분까지 좌우로 확장되며 전단철근이 배근된 위치에서 수직 방향으로 발생하였다. 하중이 9.7톤으로 증가하자 소리를 내면서 철근이 항복하였고 이어서 시험체의 압축부 상부에서 정착된 탄소 FRP 쉬트가 콘크리트 표면으로부터 박리되기 시작하였다. 하중이 약 11.7톤에 다다르자 소리를 내면서 탄소 FRP 쉬트 접착부에 있는 콘크리트의 횡방향 전단파괴가 시작되었고 복부에 정착된 탄소 FRP 쉬트의 일부가 시험체의 압축부 하중점 부근에서 시험체의 복부면에 직각 방향으로 용기하기 시작하며 압축부 콘크리트의 일부가 파괴되기 시작하였다. 그 후 하중이 최대 극한하중 13.591톤에 다다른 후에도 처짐이 계속 증가하다 결국 시험체의 중앙부 하단에 휨 보강된 탄소 FRP 쉬트가 소리를 내면서 파단되고 시험체 중앙 상부의 복부 정착 부분의 탄소 FRP 쉬트도 파단되는 파괴형태를 보여주었다.

이 시험체의 최대 극한하중 시 시험체 중앙에서 발생된 처짐은 25.703mm이었으며 연성계수는 2.73을 나타내었다. 최대 극한하중은 무보강 시험체에 비하여 약 6.1톤 증가하여 대략 83%의 증가율을 나타낸 반면 연성계수는 약 1.28 감소하여 대략 32%의 감소율을 나타내었다. 복부 정착을 하지 않은 시험체 F3와 비교하면 최대 극한하중은 약 600kgf 정도의 증가를 나타내어 복부정착에 의한 강도의 증가효과가 그다지 크지 않았다. 반면 연성계수에 있어서 복부정착을 하지 않은 시험체 F3의 경우 무보강 시험체와 비교하여 약 43%의 감소율을 보였으나 복부정착을 한 경우에 있어서는 약 32%의 감소율을 나타냄으로써 연성이 복부정착을 하지 않은 시험체에 비해 약 1.3배 정도 증가하였음을 나타내었다.

이 시험체는 하중이 약 9.7톤이 되자 철근이 항복한 후 하중이 11.7톤으로 증가하여 탄소 FRP 쉬트 접착부에 있는 콘크리트의 횡방향 전단파괴가 일어날 때

까지는 복부 정착을 하지 않은 시험체 F3에 비해 동일 처짐량에서 오히려 하중이 약간 감소하였다. 그러다가 하중이 12.4톤으로 증가한 이후부터는 복부 정착을 하지 않은 시험체 F3보다 동일 처짐량에서 하중이 다소 증가하는 복부 정착 효과를 나타내었다.

여기서 시험체 F3W의 최종파괴는 탄소 FRP 쉬트의 파단으로 나타났으나 탄소 FRP 쉬트의 파단 전에 최대 극한하중에 도달하였으므로 탄소 FRP 쉬트가 파단되기 전에 탄소 FRP 쉬트 접착부에 있는 콘크리트의 횡방향 전단파괴가 시작된 것으로 판단되었다.(Fig. 4.8)





Fig. 4.8 Tensile failure of 3-layers CFRP sheet with web anchorage

1.2.4. 4겹 보강 시험체

탄소 FRP 쉬트로 휨 보강된 시험체의 복부면 전체를 한 겹의 탄소 FRP 쉬트로 감싸 정착시킨 시험체들의 경우는 다른 파괴형태를 보여주었다. 그 중 시험체의 인장측 하면에 4겹으로 휨 보강된 시험체 F4W는 하중이 2톤으로 증가하자 시험체의 중앙과 중앙부근 인장측 하면에서 수직 방향으로 균열이 발생하였다. 하중이 계속 증가함에 따라 기존 균열은 수직방향으로 발달하였고 새로운 균열이 좌우로 확장되며 전단철근이 배근된 위치에서 수직방향으로 발생하였다.

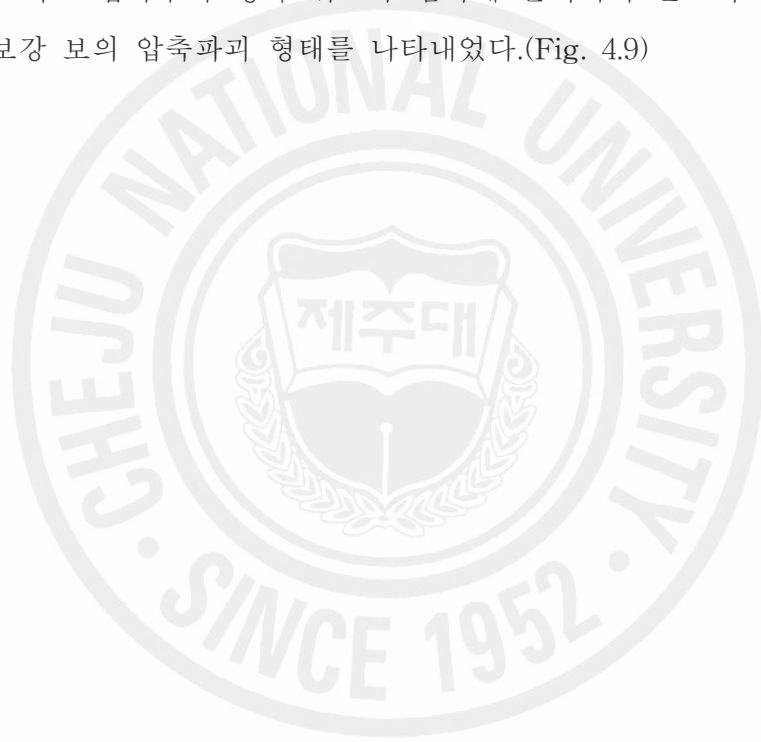
하중이 9.5톤으로 증가하자 좌우 지점부가 조금씩 파괴되기 시작하였다. 하중이 10톤으로 증가하자 소리를 내면서 철근이 항복하기 시작하였고 철근항복에 이어 시험체의 압축부 상부에서 정착된 탄소 FRP 쉬트가 콘크리트 표면으로부터 박리되기 시작하였다. 하중이 약 13.3톤으로 증가하자 복부에 정착되었던 탄소 FRP 쉬트의 일부가 시험체의 압축부 하중점 부근에서 시험체의 복부면에 직각 방향으로 용기하기 시작하며 압축부 콘크리트의 일부가 파괴되기 시작하였다. 그 후 하중이 최대 극한하중 15.493톤에 다다를 때까지 압축부 콘크리트가 심하게 파괴되면서 압축철근이 좌굴되며 시험체의 하중지지능력을 현저히 상실하였다. 최대 극한하중 이후에도 처짐은 계속 증가하였으나 이미 압축부의 파괴가 심하게 진행된 상태였다.

이 시험체의 최대 극한하중 시 시험체 중앙에서 발생한 처짐은 24.708mm이었으며 연성계수는 2.62를 나타내었다. 최대극한하중은 무보강 시험체에 비하여 약 8톤 이상 증가하여 대략 108%의 상당한 증가율을 나타내었고 연성계수는 약 1.39 감소하여 대략 35%의 감소율을 나타내었다. 복부 정착을 하지 않은 시험체 F4와 비교하면 최대 극한하중은 약 1.6톤 정도의 증가를 나타내어 복부정착에 의한 강도의 증가효과가 그다지 크지 않았다. 반면 연성계수에 있어서 복부정착을 하지 않은 시험체 F4의 경우 무보강 시험체와 비교하여 약 51%의 감소율을 보였으나 복부정착을 한 경우에 있어서는 약 35%의 감소율을 나타냄으로써 연성이 복부정착을 하지 않은 시험체에 비해 약 1.5배 정도 증가하였음을 나타내었다.

이 시험체는 하중이 약 10톤이 되자 철근이 항복한 후 하중이 11톤에서 12톤

으로 증가하는 동안은 복부 정착을 하지 않은 시험체 F4에 비해 동일 처짐량에서 오히려 하중이 약간 감소하였으나 그 이후 하중이 13.3톤으로 증가하여 압축부 콘크리트의 일부가 파괴될 때까지는 거의 동일한 하중-처짐 관계를 나타내었다. 그러나 그 이후부터는 복부 정착을 하지 않은 시험체 F4보다 동일 처짐량에서 하중이 다소 증가하는 복부 정착효과를 나타내었다. 따라서 탄소 FRP 쉬트로 휨 보강되고 복부정착을 한 시험체 F4W는 복부정착을 하지 않은 경우보다 철근 콘크리트 보의 강도를 다소 증가시켰다.

여기서 시험체 F4W의 최종파괴는 탄소 FRP 쉬트의 과보강과 복부정착으로 인하여 콘크리트 압축부의 정착 쉬트가 심하게 분리되며 콘크리트 압축부가 파괴되는 과보강 보의 압축파괴 형태를 나타내었다.(Fig. 4.9)



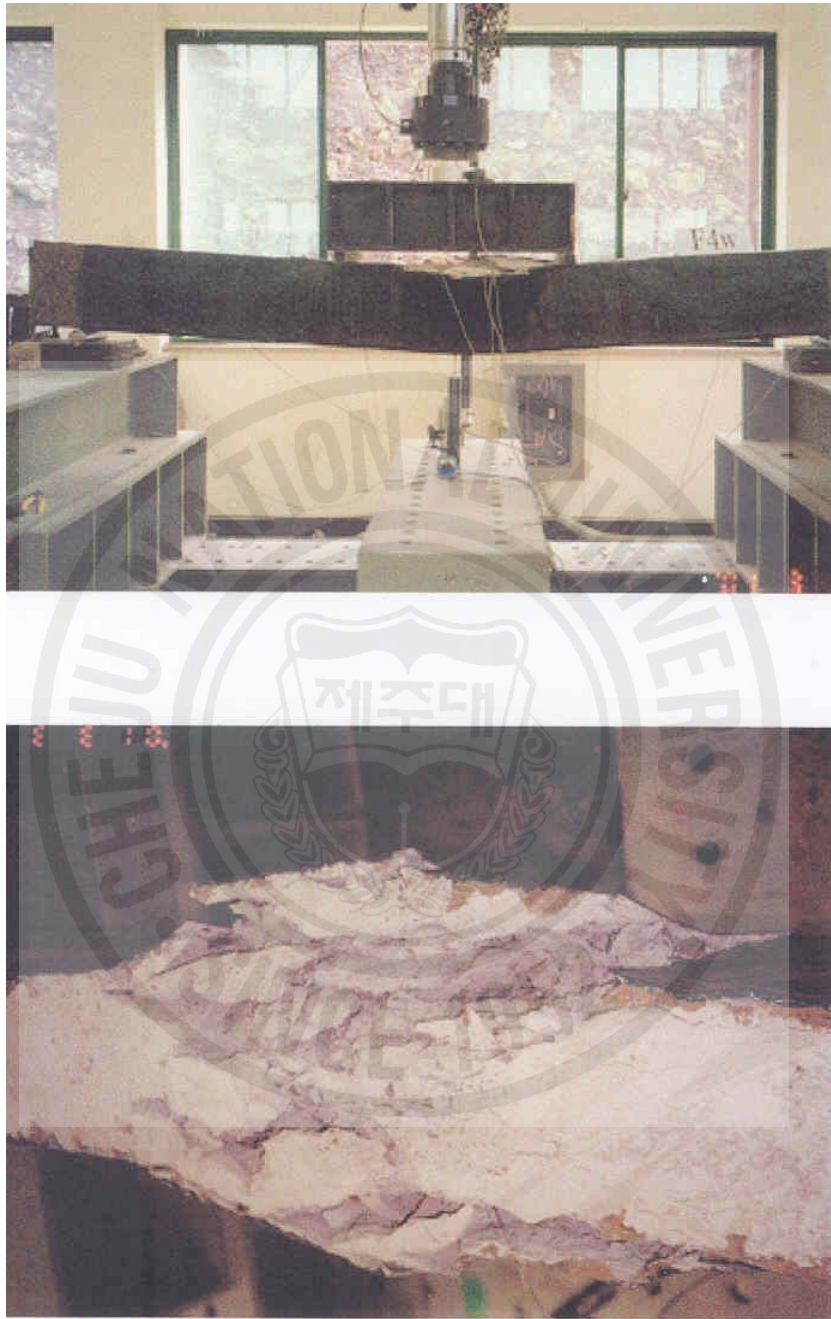


Fig. 4.9 Concrete compression failure of 4-layers CFRP sheet with web anchorage

2. 탄소 FRP 판으로 휨 보강한 보의 파괴형태와 거동

탄소 FRP 판 부착 시험체의 경우 휨 인장균열과 전단균열의 발생과 진전, 휨 부착한 판의 부착파괴 여부, 복부 정착한 슈트의 파단이나 탈락 여부, 압축부 콘크리트 파괴의 발생과 진전, 변형률 게이지로부터의 판과 콘크리트 변형률 곡선, 하중-처짐 곡선 등을 면밀히 검토하여 각 시험체의 파괴과정과 최종 파괴형태를 결정하였다.

2.1. 복부 정착이 없는 시험체

2.1.1. 기준 시험체(무보강 시험체)

탄소 FRP 판을 보강하지 않은 기준 시험체 FP0는 하중의 증가에 따라 철근이 항복하였으며 최대 극한하중인 7.443톤에 달하자 시험체 중앙에서의 처짐은 37.782mm를 나타내었다. 그러나 철근항복 후에도 상당한 처짐이 지속됨으로써 사전에 파괴를 예측할 수 있는 연성파괴 거동을 나타냈었다. 파괴 시의 하중은 6.953톤이었고 이때의 시험체 중앙에서의 처짐은 40.776mm를 나타내었다. 이 시험체는 하중이 2톤으로 증가하자 시험체 중앙 부근의 인장측 하면에서 수직 균열이 발생하기 시작하였다. 하중이 계속 증가하자 균열은 좌우 지점 부근을 향하여 확장되면서 전단철근이 배근된 위치에서 수직방향으로 발생하였고 이러한 균열은 하중의 계속적인 증가에도 불구하고 거의 수직으로만 발달하는 양상을 보였다. 나중에는 콘크리트 압축 부분이 파괴되었으며 전형적인 휨 인장파괴 형태를 나타내었다.(Fig. 4.10)



Fig. 4.10 Steel yielding-concrete compression failure (Control beam)

2.1.2. 전지간 휨 보강 시험체(FPL1)

탄소 FRP 판을 전 지간에 휨 보강한 시험체 FPL1은 하중이 6톤으로 증가하자 시험체의 중앙 부근의 인장측에서는 수직균열이, 시험체의 지점 부근에서는 하중 점을 향하는 사인장균열이 발생하였다. 하중이 11.5톤으로 증가하자 소리가 나면서 철근항복과 함께 탄소 FRP 판 끝에서 발생한 전단균열은 탄소 FRP 판의 인장력에 의하여 그 경사를 낮추며 콘크리트 인장 저항력이 약한 주철근을 따라 진전하며 콘크리트 덮개가 아래 방향으로 회전함으로써 탄소 FRP 판이 탈락하기 시작하여 최대 하중저항력을 상실하였다.

이 시험체의 최대 극한하중은 11.577톤이었고, 이 때 시험체 중앙에서 발생된 처짐은 12.570mm이었으며 연성계수는 1.335를 나타내었다. 최대 극한하중은 무보강 시험체에 비하여 약 4.1톤 증가하여 대략 56%의 증가율을 나타낸 반면 연성계수는 2.678 감소하여 대략 67%의 큰 감소율을 나타내었다.

그러나 최대 하중저항력이 상실된 후에도 시험체 FPL1은 보강하지 않은 시험체 FP0 보다는 높은 하중 지지력을 가지며 상당한 처짐까지 저항하였다. Fig. 4.11은 시험체 FPL1의 콘크리트 덮개 균열과 이에 따른 탄소 FRP 판의 탈락에 의한 콘크리트 덮개 박리파괴 형태를 보여주고 있다.

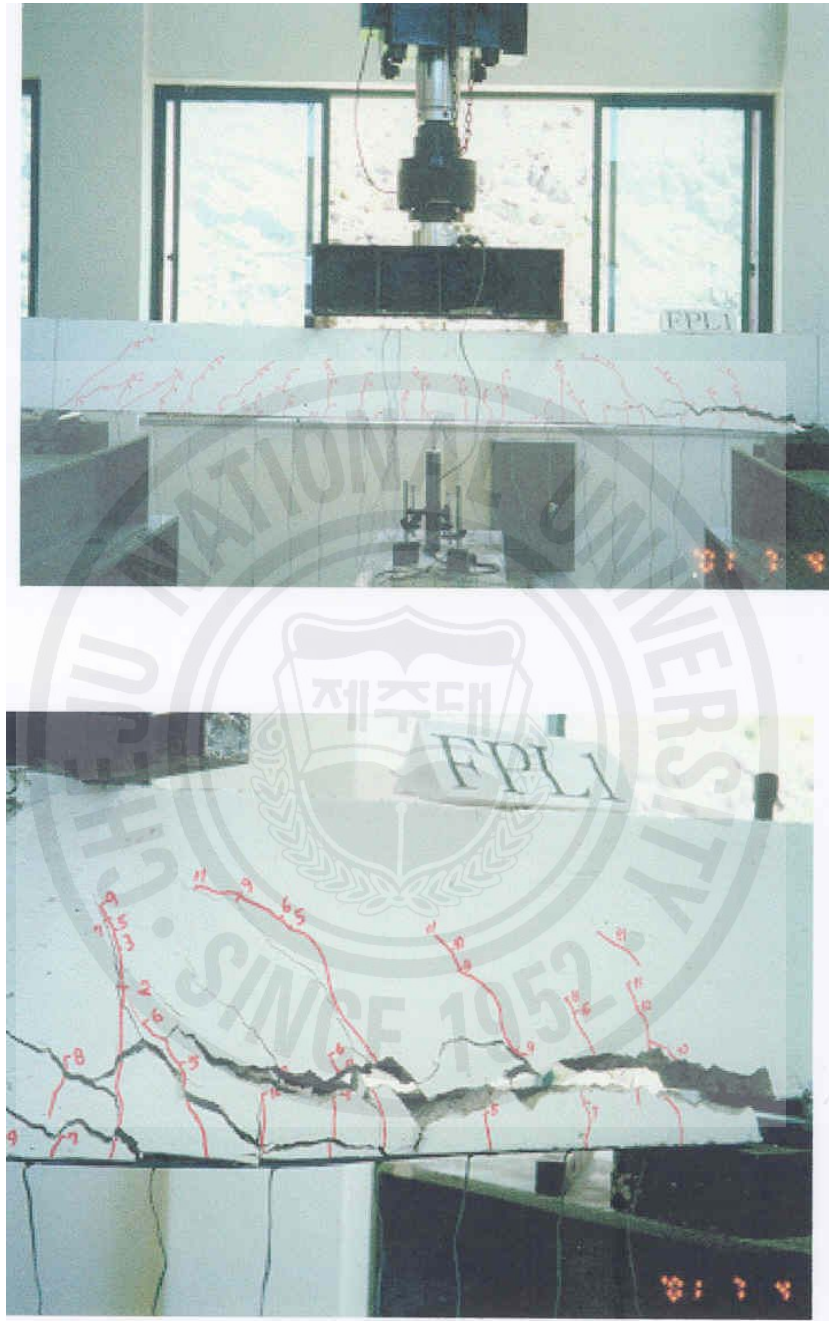


Fig. 4.11 Concrete cover failure of beam FPL1

2.1.3. 2/3지간 휨 보강 시험체(FPS1)

탄소 FRP 판을 지간의 2/3, 즉 전단지간의 1/2에 휨 부착하고 복부 정착이 없는 시험체 FPS1은 하중이 4톤으로 증가하자 수직 균열이 발생하기 시작하였으며 계속하여 하중이 6톤으로 증가하자 시험체의 하중점 부근의 인장측에서는 수직 균열이, 탄소 FRP 판의 정착단부 근처 및 시험체의 지점 부근에서는 하중점을 향하여 사인장 균열이 발생하였다. 하중이 8.5톤으로 증가하자 소리가 나면서 철근향복과 함께 탄소 FRP 판 끝에서 발생한 전단균열은 탄소 FRP 판의 인장력에 의하여 그 경사를 낮추며 콘크리트 인장 저항력이 약한 주철근을 따라 진전하며 콘크리트 덮개가 아래 방향으로 벗겨지다가 탄소 FRP 판이 탈락하기 시작하여 최대 하중저항력을 상실하였다.

이 시험체의 최대 극한하중은 8.841톤 이었고, 이 때 시험체 중앙에서 발생된 처짐은 9.947mm이었으며 연성계수는 1.056을 나타내었다. 최대 극한하중은 무보강 시험체에 비하여 약 1.4톤 증가하여 대략 19%의 증가율을 나타낸 반면 연성계수는 2.957 감소하여 대략 74%의 큰 감소율을 나타내었다.

그러나 주철근을 따라 균열이 진전되는 동안 최대하중을 크게 상실하지 않고 보강하지 않은 시험체 FP0 보다는 높은 하중 지지력을 가지며 상당한 처짐까지 저항하였다. 따라서 최종파괴 형태도 콘크리트 덮개 균열에 의한 탈락과 이에 따른 탄소 FRP 판의 탈락으로 발생한 콘크리트 덮개 박리파괴로서 전 지간에 휨 보강한 시험체 FPL1과 같은 파괴형태를 보여주었다.(Fig. 4.12)



Fig. 4.12 Concrete cover failure of beam FPS1

2.2. 복부 정착이 있는 시험체

2.2.1. 전 진간 휨 보강 1/3지간 복부정착 시험체(FPL2)

전 지간을 탄소 FRP 판으로 휨 보강하고 지간 길이의 1/6씩 지간 양단 안쪽으로 탄소FRP 슈트로 복부정착을 한 시험체 FPL2의 경우 하중이 7톤으로 증가하자 시험체 중앙 부근에서는 수직 균열이, 시험체 우측의 정착 슈트 왼쪽 단부에서는 하중점을 향하여 전단 균열이 발생하기 시작하였으며 하중이 9톤으로 증가하자 시험체의 하중점 부근의 인장측 하면에서는 전단철근이 배근된 위치에 여러 개의 수직 균열이 발생되었고 탄소 FRP 판의 좌우 정착슈트 단부 근처에서는 하중점을 향하여 가파른 사인장균열이 발달하였다.

하중이 11.57톤으로 증가하자 소리를 내면서 철근이 항복하였고 계속하여 곡선적으로 하중이 증가하다 13.77톤에 이르자 시험체 우측의 탄소 FRP 판과 경계면 콘크리트 사이의 부착이 소리를 내면서 파괴되어 박리되기 시작하였으나 아직 대부분 부착되어 있는 탄소 FRP 판의 하중 저항력은 계속하여 증가되었다.

그러나 하중이 계속 증가함에 따라 탄소 FRP 판과 경계면 콘크리트 사이의 부착이 소리를 내면서 거의 파괴되기 시작하자 곧 최대 극한하중 14.486톤을 상실하였다. 그러나 일부 남은 부착과 복부에 정착한 탄소 FRP 슈트의 정착효과에 의해 다시 하중 저항력이 증가되다 복부 정착된 탄소 FRP 슈트가 큰 소리를 내면서 시험체 단면 아래 양 모서리에서 파단되며 파괴되었다. 따라서 탄소 FRP 슈트로 복부정착을 한 시험체의 경우 톱날 같은 하중-처짐도를 나타내었다.

이 시험체의 최대 극한하중 시 시험체 중앙에서 발생된 처짐은 16.910mm이었으며 연성계수는 1.796을 나타내었다. 최대 극한하중은 무보강 시험체에 비하여 약 7톤 이상 증가하여 대략 95%의 높은 증가율을 나타낸 반면 연성계수는 2.217 감소하여 대략 55%의 감소율을 나타내었다. 복부정착을 하지 않은 시험체 FPL1에 비하면 최대 극한하중은 약 2.9톤 증가하여 대략 25%의 하중증가율을 나타내고 있으나 연성계수는 오히려 0.461 증가하여 대략 35%의 증가율을 나타내고 있다. 이것은 복부정착을 실시한 시험체의 경우가 그렇지 않은 경우보다 높은 극한하중과 큰 연성을 나타내는 보강효과를 지니고 있음을 보여주고 있다. Fig. 4.13

은 시험체 FPL2의 콘크리트 경계면 부착파괴와 탄소 FRP 쉬트 파단파괴에 의한 경계면 전단 박리파괴 형태를 보여주고 있다.



Fig. 4.13 Delamination shear failure of beam FPL2

2.2.2. 전지간 휨 보강 2/3지간 복부정착 시험체(FPL3)

전 지간을 탄소 FRP 판으로 휨 보강하고 지간 길이의 2/6씩 지간 양단 안쪽으로 탄소 FRP 쉬트로 복부정착을 한 시험체 FPL3의 경우 하중이 6톤으로 증가하자 시험체 중앙과 중앙부 우측에서 수직 균열이 발생하였고 하중이 11톤에 다다를 때까지는 수직균열로서 성장하고 있었으나 하중이 14톤에 달하였을 때에는 좌우측 정착쉬트의 내측 단부에서 시험체의 콘크리트 압축부 중앙을 향하여 사인장균열이 발생하기 시작하였으며 좌측 지점에서 시험체의 하중점을 향하여 사인장균열이 발생하기 시작하였다.

하중이 14.83톤으로 증가하자 시험체의 좌측 지점의 하부에서 콘크리트가 파괴되기 시작하였고 계속하여 하중이 증가하자 소리를 내면서 철근이 항복하였다. 그 후에도 계속하여 곡선적으로 하중이 증가하다 16.83톤에 이르자 탄소 FRP 판과 경계면 콘크리트 사이의 부착이 파괴되어 박리되기 시작하였으나 아직 대부분 부착되어 있는 탄소 FRP 판의 하중 저항력은 계속하여 증가되었다. 그러나 하중이 계속 증가함에 따라 탄소 FRP 판과 경계면 콘크리트 사이의 부착이 소리를 내면서 거의 파괴되기 시작하자 곧 최대 극한하중을 상실하였다. 그러나 일부 남은 부착과 복부에 정착한 탄소 FRP 쉬트의 정착효과에 의해 다시 하중 저항력이 증가된 후 하중이 10.72톤으로 감소하면서 시험체의 압축부 콘크리트가 소리를 내면서 파쇄되고 압축철근이 좌굴된 후 다시 하중이 8.45톤으로 감소하면서 압축부의 균열은 시험체의 좌측 방향으로 확장되었고 복부 정착한 탄소 FRP 쉬트가 큰 소리를 내면서 시험체 단면 아래 양 모서리에서 파단되며 파괴되었다. 따라서 탄소 FRP 쉬트로 복부정착을 한 시험체의 경우 톱날 같은 하중-처짐도를 나타내었다.

이 시험체의 최대 극한하중 시 시험체 중앙에서 발생된 처짐은 20.392mm이었으며 연성계수는 2.166을 나타내었다. 최대 극한하중은 무보강 시험체에 비하여 약 9톤 이상 증가하여 대략 126%의 높은 증가율을 나타낸 반면 연성계수는 1.847 감소하여 대략 46%의 감소율을 나타내었다. 복부정착을 하지 않은 시험체 FPL1에 비하면 최대 극한하중은 약 5.3톤 증가하여 대략 45% 이상의 높은 하중 증가율을 나타내고 있으며 연성계수도 0.831 증가하여 대략 62% 이상의 높은 증

가울을 나타내고 있다. 이것은 복부정착을 실시한 시험체의 경우가 그렇지 않은 경우보다 높은 극한하중과 큰 연성을 나타내는 보강효과를 지니고 있음을 보여주고 있다. 또한 이 시험체의 반 정도 복부 정착한 시험체 FPL2의 경우에 비해 극한하중과 연성이 모두 약 2배 정도 증가되는 보강효과를 나타내고 있다. Fig. 4.14는 시험체 FPL3의 콘크리트 경계면 부착파괴와 탄소 FRP 쉬트 파단파괴에 의한 경계면 전단 박리파괴 형태를 보여주고 있다.





Fig. 4.14 Delamination shear failure of beam FPL3

2.2.3. 전 지간 휨 보강 전지간 복부정착 시험체(FPL4)

전 지간을 탄소 FRP 판으로 휨 보강하고 전 지간을 탄소 FRP 쉬트로 복부정착을 한 시험체 FPL4의 경우 하중이 8톤으로 증가하자 시험체의 좌측 지점에서 하중점을 향하여 경사 균열이 발생하였다. 하중이 12톤으로 증가하자 우측 지점에서도 하중점을 향하여 경사 균열이 발생하였다. 하중이 16톤으로 증가하자 우측 하중점을 향하여 시험체의 인장측에서 수직 균열이 발생하였고 하중이 계속하여 증가함에 따라 소리를 내면서 철근이 항복하였다. 그 후에도 계속하여 곡선적으로 하중이 증가하다 17.63톤에 이르자 탄소 FRP 판과 경계면 콘크리트 사이의 부착이 소리를 내며 파괴되어 박리되기 시작하였으나 아직 대부분 부착되어 있는 탄소 FRP 판의 하중 저항력은 계속하여 증가되었다. 그러나 하중이 계속 증가함에 따라 탄소 FRP 판과 경계면 콘크리트 사이의 부착이 소리를 내면서 거의 파괴되기 시작하자 곧 최대 극한하중을 상실하였다. 그러나 일부 남은 부착과 복부에 정착한 탄소 FRP 쉬트의 정착효과에 의해 다시 하중 저항력이 증가되면서 시험체의 압축부 콘크리트가 파쇄되고 시험체 하부에서 우측 하중점 방향으로 균열이 발생하였다. 이어서 시험체의 우측 복부에 정착한 탄소 FRP 쉬트가 큰 소리를 내면서 시험체 단면 아래 양 모서리에서 파단되며 파괴되었고 하중도 급격히 감소하였다. 따라서 탄소 FRP 쉬트로 복부정착을 한 시험체의 경우 톱날 같은 하중-처짐도를 나타내었다.

이 시험체의 최대 극한하중 시 시험체 중앙에서 발생된 처짐은 22.635mm였고 연성계수는 2.404를 나타내었다. 최대 극한하중은 무보강 시험체에 비해 약 10톤 이상 증가하여 대략 137%의 높은 증가율을 나타낸 반면 연성계수는 1.609 감소하여 대략 40%의 감소율을 나타내었다. 복부정착을 하지 않은 시험체 FPL1에 비하면 최대 극한하중은 약 6톤 증가하여 대략 52% 이상의 높은 하중 증가율을 나타내고 있으며 연성계수도 1.069 증가하여 대략 80% 이상의 높은 증가율을 나타내고 있다. 이것은 복부정착을 실시한 시험체의 경우가 그렇지 않은 경우보다 높은 극한하중과 큰 연성을 나타내는 보강효과를 지니고 있음을 보여주고 있다. Fig. 4.15는 시험체 FPL4의 콘크리트 경계면 부착파괴와 탄소 FRP 쉬트 파단파괴에 의한 경계면 전단 박리파괴 형태를 보여주고 있다.

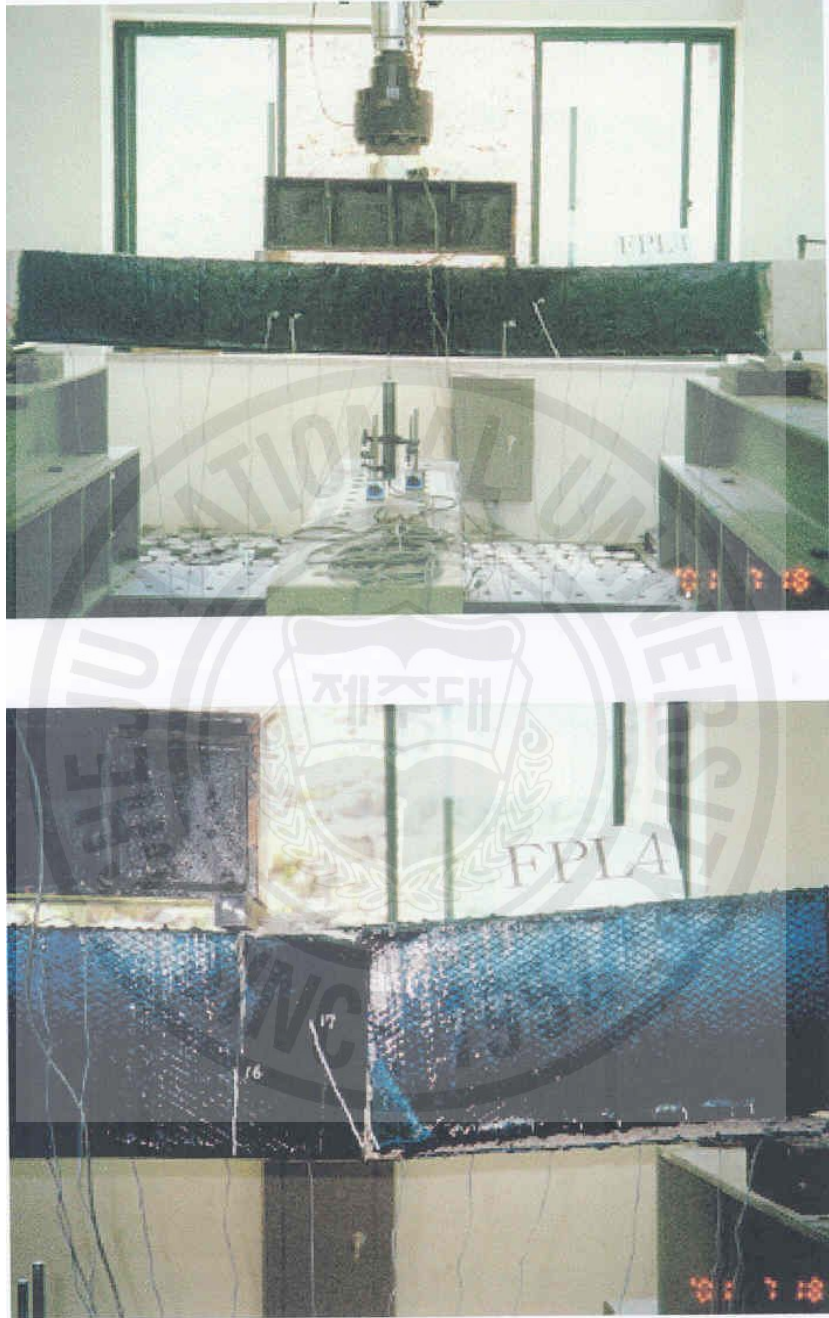


Fig. 4.15 Delamination shear failure of beam FPL4

2.2.4. 2/3지간 휨 보강 1/3지간 복부정착 시험체(FPS2)

전 지간의 2/3 부분에 탄소 FRP 판으로 휨 보강하고 전 지간의 1/3부분에 탄소 FRP 슈트로 복부정착한 시험체 FPS2의 경우 하중이 4톤으로 증가하자 시험체의 좌측 복부정착 슈트의 좌측 중간 부분에서 하중점을 향하여 사인장균열이 발생하였고 하중이 6톤이 되자 시험체의 우측에서 거의 좌측의 경우와 같은 균열이 발생하였다. 하중이 10톤으로 증가하자 시험체의 중앙 부근에서 수직균열이 발생하였고 11톤에 이르러서는 시험체의 좌측 지점에서 수직균열이 발생하였다. 하중이 12톤에 이르자 소리를 내면서 철근이 항복하였고 하중이 계속 증가함에 따라 탄소 FRP 판과 경계면 콘크리트 사이의 부착이 소리를 내며 파괴되어 박리하기 시작하자 곧 최대 극한하중 12.2톤을 상실하여 하중이 10.3톤으로 감소하였다. 그러나 일부 남은 부착과 복부에 정착한 탄소 FRP 슈트의 정착효과에 의해 다시 하중 저항력이 11.5톤으로 증가되었고 이어서 복부에 정착한 탄소 FRP 슈트가 소리를 내면 박리되면서 하중은 다시 10톤으로 감소하였다. 그러나 아직도 남은 탄소 FRP 판의 부착과 복부에 정착한 탄소 FRP 슈트의 정착효과에 의해서 하중 저항력은 10.5톤으로 증가되었고 이어서 시험체의 우측에 복부정착된 탄소 FRP 슈트가 큰 소리를 내며 시험체 단면 아래 양 모서리에서 파단되며 파괴되었고 하중도 급격히 감소하였다. 따라서 탄소 FRP 슈트로 복부 정착을 한 시험체의 경우 톱날 같은 하중-처짐도를 나타내었다.

이 시험체의 최대 극한하중 시 시험체 중앙에서 발생된 처짐은 12.909mm였고 연성계수는 1.371이었다. 최대 극한하중은 무보강 시험체에 비해 약 4.8톤 정도 증가하여 대략 64%의 증가율을 나타낸 반면 연성계수는 2.642 감소하여 대략 66%의 감소율을 나타내었다. 복부정착을 하지 않은 시험체 FPS1에 비하면 최대 극한하중은 약 3.4톤 증가하여 대략 38% 정도의 하중증가율을 나타내고 있으며 연성계수도 0.315 증가하여 대략 30%정도의 증가율을 나타내고 있다. 이것은 복부정착을 실시한 시험체의 경우가 그렇지 않은 경우보다 높은 극한하중과 큰 연성을 나타내는 보강효과를 지니고 있음을 보여주고 있다. Fig. 4.16은 시험체 FPS2의 콘크리트 경계면 부착파괴와 탄소 FRP 슈트 파단파괴에 의한 경계면 전단 박리파괴 형태를 보여주고 있다.



Fig. 4.16 Delamination shear failure of beam FPS2

2.2.5. 2/3지간 휨 보강 2/3지간 복부정착 시험체 (FPS3)

전 지간의 2/3 부분에 탄소 FRP 판으로 휨 보강하고 전 지간의 2/3부분에 탄소 FRP 쉬트로 복부정착한 시험체 FPS3의 경우 하중이 2톤으로 증가하자 시험체의 복부정착 쉬트의 좌측 부분에서 수직균열이 발생하고 우측 부분에서는 시험체의 중간 깊이에서 하중점을 향한 사인장균열이 발생하였다. 하중이 5톤으로 증가하자 복부정착 쉬트의 우측 단부 위에 수직균열이 발생하였고 복부정착 쉬트의 좌측 단부 끝에서는 시험체의 중간 깊이에서 하중점을 향한 사인장균열이 발달하였다. 하중이 11톤에 이르자 시험체의 좌우측 지점 부근에서 하중점을 향하여 사인장균열이 발달하였고 하중이 12.67톤에 이르자 소리를 내면서 철근이 항복하였다. 하중이 계속 증가함에 따라 보의 우측지점 부근에서 발달한 사인장균열은 탄소 FRP 판의 인장력에 의하여 그 경사를 낮추어 콘크리트 인장저항력이 약한 주철근 방향을 따라 수평으로 발달하였다. 탄소 FRP 판과 경계면 콘크리트 사이의 부착이 파괴되어 소리를 내면서 박리하기 시작하자 곧 최대 극한하중 12.808톤을 상실하여 하중이 11.2톤으로 감소하였다. 그러나 일부 남은 부착과 복부에 정착한 FRP 쉬트의 정착효과에 의해 다시 하중 저항력이 12.5톤으로 증가되었고 이어서 복부에 정착한 탄소 FRP 쉬트가 소리를 내며 박리되면서 하중은 다시 9.5톤으로 감소하였다. 그러나 아직도 남은 탄소 FRP 판의 부착과 복부에 정착한 탄소 FRP 쉬트의 정착효과에 의해서 하중 저항력은 10.5톤으로 증가되었고 이어서 시험체의 우측 복부에 정착한 탄소 FRP 쉬트가 큰 소리를 내며 시험체 단면 아래 양 모서리에서 파단되며 파괴되었고 하중도 급격히 감소하였다. 따라서 탄소 FRP 쉬트로 복부정착을 한 보의 경우 톱날 같은 하중-처짐도를 나타내었다.

이 시험체의 최대 극한하중 시 시험체 중앙에서 발생된 처짐은 13.317mm이었으며 연성계수는 1.414이었다. 최대 극한하중은 무보강 시험체에 비하여 약 5.4톤 정도 증가하여 대략 72%의 증가율을 나타낸 반면 연성계수는 2.599 감소하여 대략 65%의 감소율을 나타내었다. 복부정착을 하지 않은 시험체 FPS1에 비하면 최대 극한하중은 약 4톤 정도 증가하여 대략 45% 정도의 하중증가율을 나타내고 있으며 연성계수도 0.358 증가하여 대략 34% 정도의 증가율을 나타내고 있

다. 이것은 복부정착을 실시한 시험체의 경우가 그렇지 않은 경우보다 높은 극한 하중과 큰 연성을 나타내는 보강효과를 지니고 있음을 보여주고 있다. Fig. 4.17 은 시험체 FPS3의 콘크리트 경계면 부착파괴와 탄소 FRP 쉬트 파단파괴에 의한 경계면 전단 박리파괴 형태를 보여주고 있다.

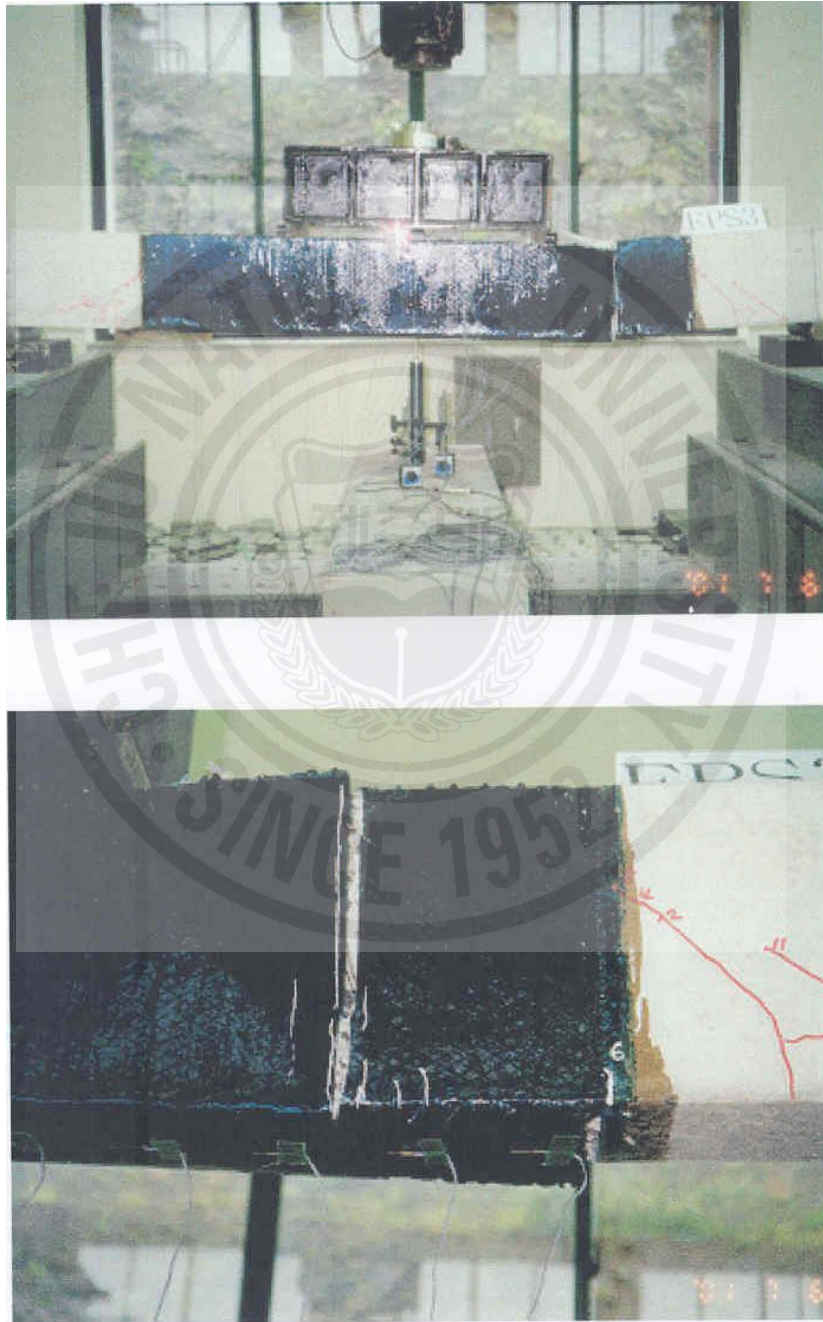


Fig. 4.17 Delamination shear failure of beam FPS3

3. 각 시험체의 파괴과정과 파괴형태의 비교

3.1. 탄소 FRP 쉬트 보강 시험체

Table 4.1에서는 탄소 FRP 쉬트로 휨 보강한 각 시험체의 파괴 과정과 최종 파괴형태를 정리하였고 Table 4.2는 각 시험체의 최대 극한하중과 처짐, 탄소 FRP 쉬트의 탈락이나 파단 시의 하중과 처짐 값, 연성계수들을 정리하였다. 연성계수는 보강하지 않은 기준 시험체(F0)의 항복 시 처짐값($S_y = 9.416mm$)과 시험체들의 최대 극한 하중 시 혹은 파괴 시의 처짐값(S_{u1} 과 S_{u2})과의 비로 나타내었다.

Table 4.1 Failure mode and process of CFRP sheet bonded test beams

시험체	파괴과정	최종파괴 형태
F0	철근항복-콘크리트 압축파괴	휨 인장파괴
F1	철근항복-CFRP 쉬트 탈락	경계면 전단박리파괴
F2	철근항복-CFRP 쉬트 탈락	경계면 전단박리파괴
F3	철근항복-CFRP 쉬트 탈락	경계면 전단박리파괴
F4	철근항복-CFRP 쉬트 탈락	경계면 전단박리파괴
F1W	철근항복-경계면 전단파괴 시작-CFRP 쉬트 파단	CFRP 파단파괴
F2W	철근항복-경계면 전단파괴 시작-CFRP 쉬트 파단	CFRP 파단파괴
F3W	철근항복-경계면 전단파괴 시작-CFRP 쉬트 파단	CFRP 파단파괴
F4W	철근항복-콘크리트 압축파괴	콘크리트 휨 압축파괴

Table 4.2 Ultimate load, deflection and ductility of CFRP sheet bonded test beams

시험체	최대 극한하중시		연성계수 ϕ_1	파괴 시		연성계수 ϕ_2
	하중, ton	처짐, mm		하중, ton	처짐, mm	
F0	7.443	37.782	4.01	6.953	40.776	4.33
F1	10.592	30.441	3.23	10.223	33.179	3.52
F2	11.685	24.190	2.57	11.547	24.926	2.65
F3	12.971	21.699	2.30	12.826	21.808	2.32
F4	13.929	18.617	1.98	13.865	18.714	1.99
F1W	11.157	35.586	3.78	10.841	37.732	4.01
F2W	12.806	30.952	3.29	12.417	34.583	3.67
F3W	13.591	25.703	2.73	11.498	38.499	4.09
F4W	15.493	24.708	2.62	12.004	43.140	4.58

Fig.4.18에서는 복부정착을 하지 않은 시험체와 복부정착을 한 시험체들의 하중-처짐 곡선을 나타내고 있다. 하중-처짐도에서 나타낸 바와 같이 아무런 보강도 하지 않은 기준 시험체(F0)는 철근항복 후 하중이 추가적으로 증가하지 않음에도 불구하고 계속 처짐이 증가하다 종국에는 콘크리트 압축부분이 파괴되는 전형적인 휨 인장파괴 형태를 나타내었다.

반면 복부 정착이 없는 F1, F2, F3, F4 시험체는 하중이 증가함에 따라 철근이 항복한 후 하중이 추가적으로 증가함에 따라 변형 또한 증가되고 있는 상태를 나타내고 있다. 이것은 복부 정착이 없고 또한 아무런 보강도 하지 않은 기준 시험체(F0)의 경우와는 달리 복부정착이 없는 F1, F2, F3, F4 시험체에 휨 부착된 탄소 FRP 쉬트가 부착 후 철근콘크리트 보와 일체로 작용하여 철근콘크리트 보의 강도를 효과적으로 증진시키고 있다는 것을 의미한다.

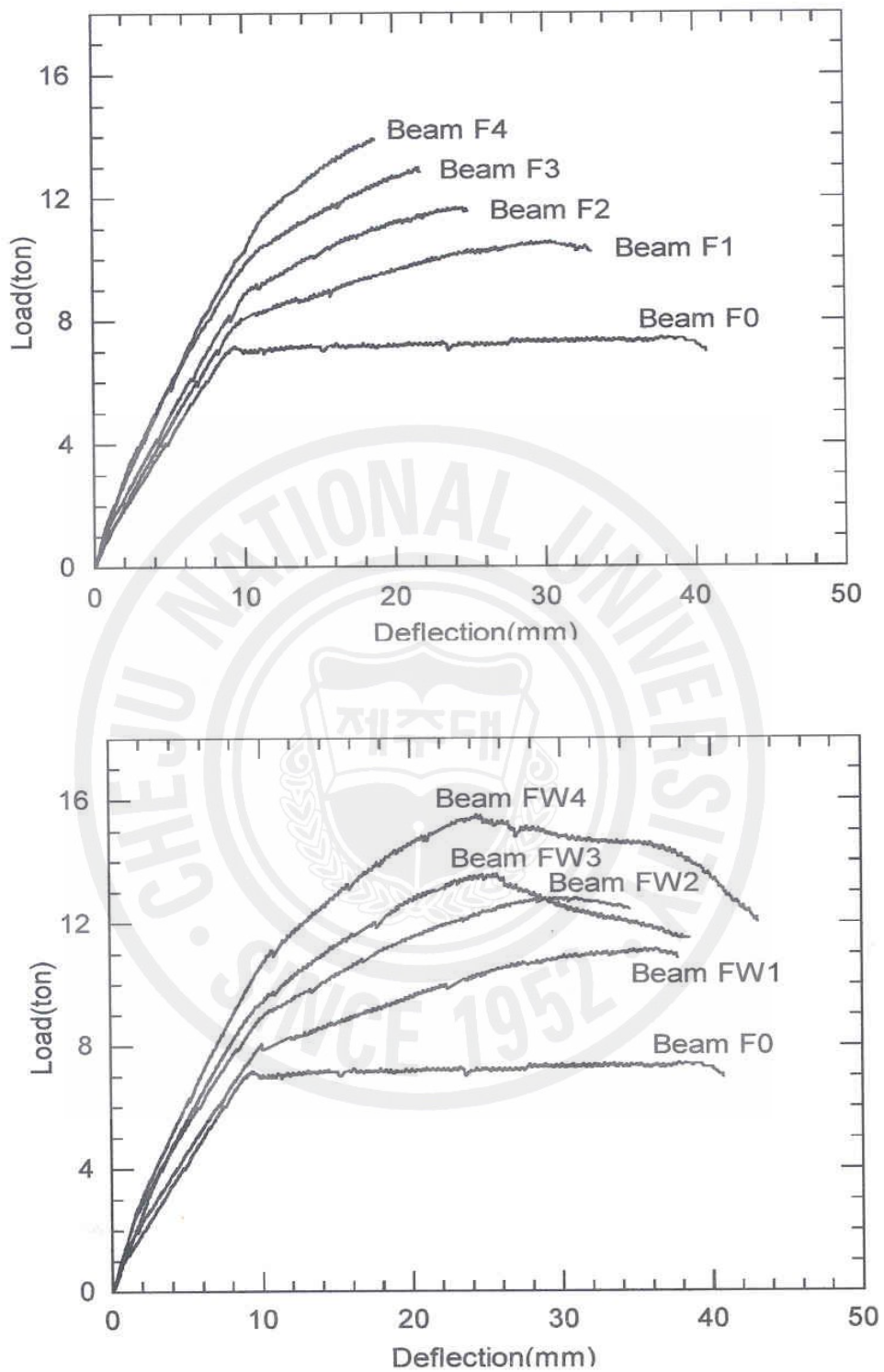


Fig. 4.18 Load-deflection curves with no web anchorage(above), with web anchorage(below)

또한 이들 시험체는 철근항복 후 추가적인 하중의 증가에 따라 처짐이 계속 증가하다가 탄소 FRP 쉬트가 에폭시 접착부 바로 위 콘크리트의 계면에서 횡방향 전단력에 의해 탈락되는 계면 박리파괴 형태를 보여주었다. 이 시험체들은 철근 콘크리트 보의 계면 박리파괴 시에 휨이나 휨-전단에 의해 균열된 콘크리트 피복이 박리 시 일시에 방출되는 변형에너지에 의해 함께 떨어져 나가는 파괴 모습을 보여주었다.(Fig. 4.19)



Fig. 4.19 Delamination shear failure (F2)

한편 탄소 FRP 쉬트로 휨 보강하여 전 복부면에 탄소 FRP 쉬트로 정착시킨 시험체들의 경우는 다른 파괴 형태를 보여주었는데 시험체 F1W, F2W, F3W는 철근항복에 이어 최대 극한하중에 다다른 후 처짐이 계속 증가하다 휨 보강된 탄소 FRP 쉬트의 파단에 의한 파괴 형태를 보여주었다.(Fig. 4.20)



Fig. 4.20 Tensile failure of CFRP sheet (F2W)

이 중 시험체 F3W는 쉬트 파단 전 콘크리트 압축부에 정착된 탄소 FRP 쉬트 일부가 분리되며 압축부 콘크리트가 일부 파괴되기 시작하였다. 여기서 시험체 F1W, F2W, F3W의 최종파괴는 탄소 FRP 쉬트의 파단으로 나타났으나 FRP 쉬트의 파단 전에 최대 극한 하중에 다다른 점으로 미루어 볼 때 탄소 FRP 쉬트의 파단 전 쉬트 정착부 콘크리트의 횡방향 전단파괴가 시작된 것으로 판단된다.

시험체 F4W는 탄소 FRP 쉬트의 과보강과 복부정착으로 인하여 콘크리트 압축부의 정착 쉬트가 심하게 분리되며 콘크리트 압축부가 파괴되는 과보강 보의 압축파괴 형태를 나타내었다.

3.2. 탄소 FRP 판 보강 시험체

Table 4.3에서는 탄소 FRP 판으로 휨 보강한 각 시험체의 파괴 과정과 최종 파괴형태를 정리하였고 Table 4.4는 각 시험체의 최대 극한하중과 처짐, 최대하중 시 연성계수를 정리하였다. 연성계수는 보강하지 않은 기준 시험체(FP0)의 항

복 시 처짐값($S_y = 9.416mm$)과 시험체들의 최대 극한하중 시 혹은 파괴 시의 처짐값(S_{u1} 혹은 S_{u2})과의 비로 나타내었다.

Table 4.3 Failure mode and process of CFRP plate bonded test beams

시험체	파괴과정	최종파괴 형태
FP0	철근항복-콘크리트 압축파괴	휨 인장파괴
FPL1	철근항복-콘크리트 덮개 탈락-FRP 판 탈락	콘크리트덮개 박리파괴
FPL2	철근항복-FRP판 부착파괴-FRP정착쉬트 파단	경계면 전단박리파괴
FPL3	철근항복-FRP판 부착파괴-FRP정착쉬트 파단	경계면 전단박리파괴
FPL4	철근항복-FRP판 부착파괴-FRP정착쉬트 파단	경계면 전단박리파괴
FPS1	철근항복-콘크리트 덮개 탈락-FRP 판 탈락	콘크리트덮개 박리파괴
FPS2	철근항복-FRP판 부착파괴-FRP정착쉬트 파단	경계면 전단박리파괴
FPS3	철근항복-FRP판 부착파괴-FRP정착쉬트 파단	경계면 전단박리파괴

Table 4.4 Ultimate load, deflection and ductility of CFRP plate bonded test beams

시험체	최대 극한하중시		연성계수 ϕ
	하중, ton	처짐, mm	
FP0	7.443	37.782	4.013
FPL1	11.577	12.570	1.335
FPL2	14.486	16.910	1.796
FPL3	16.829	20.392	2.166
FPL4	17.629	22.635	2.404
FPS1	8.841	9.947	1.056
FPS2	12.200	12.909	1.371
FPS3	12.808	13.317	1.414

다음의 Fig. 4.21에서 윗 그림은 탄소 FRP판을 전 지간, 즉 전 전단지간

($L_b = 2,000mm$)에 휨 부착한 시험체들의 하중-처짐 곡선을 나타내고 있다. 하중-처짐도에 나타난 바와 같이 아무런 보강도 하지 않은 기준 시험체(FP0)는 철근 항복 후 계속 처짐이 증가하다 결국에는 콘크리트 압축부분이 파괴되는 전형적인 휨 인장파괴를 보여주었다. 그러나 복부정착이 없이 탄소 FRP 판으로만 전 지간에 걸쳐 휨 보강한 시험체 FPL1은 철근항복과 탄소 FRP 판 끝에서 발생한 전단균열이 탄소 FRP 판의 인장력에 의하여 그 경사를 낮추며 콘크리트 인장저항력이 약한 주철근 방향을 따라 진전하며 콘크리트 덮개가 아래 방향으로 회전함으로써 탄소 FRP 판이 탈락하기 시작하여 최대 하중저항력을 상실하였다. 그러나 최대하중 상실 후에도 시험체 FPL1은 보강하지 않은 시험체 FP0 보다는 높은 하중 지지력을 가지며 상당한 처짐까지 저항하였다. Fig. 4.22는 시험체 FPL1의 콘크리트 덮개균열과 이에 따른 탄소 FRP 판의 탈락에 의한 콘크리트 덮개 박리파괴 형태를 보여주고 있다.

전 지간에 휨 보강한 탄소 FRP 판을 탄소 FRP 쉬트로 복부에 정착한 시험체 FPL2, FPL3, FPL4는 철근 항복 후 곡선적으로 하중이 증가하다 탄소 FRP 판과 경계면 콘크리트 사이의 부착이 파괴되며 최대하중을 상실하였다. 그러나 일부 남은 부착과 복부에 정착된 탄소 FRP 쉬트의 정착효과에 의해 다시 하중 저항력이 증가되다 복부에 정착된 탄소 FRP 쉬트가 시험체 단면 아래 양 모서리에서 파단되며 파괴되었다. 따라서 탄소 FRP 쉬트로 복부정착을 한 시험체의 경우 톱날 같은 하중-처짐도를 나타내었다.

Table 4.4와 Fig. 4.21에서 알 수 있는 바와 같이 복부정착을 실시한 시험체의 경우 그렇지 않은 시험체에 비하여 높은 극한하중과 큰 연성을 나타내었다. Fig. 4.23은 시험체 FPL3의 콘크리트 경계면 부착파괴와 탄소 FRP 쉬트 파단파괴에 의한 경계면 전단 박리파괴 형태를 보여주고 있다.

Fig. 4.21의 아래 그림은 탄소 FRP 판을 지간의 2/3, 즉, 전단지간의 1/2에 휨 부착한 시험체의 하중-처짐 곡선을 나타내고 있다. 복부정착이 없는 시험체 FPS1은 전 지간의 휨 부착한 시험체 FPL1과 마찬가지로 탄소 FRP 판 끝에서 발생한 균열이 탄소 FRP 판의 인장력에 의하여 주철근을 따라 진전하며 콘크리트 덮개가 벗겨지다 탈락함으로써 최대 하중저항력을 상실하였다. 그러나 주철근

을 따라 균열이 진전되는 동안 최대하중을 크게 상실하지 않고 보강하지 않은 시험체 FP0 보다는 높은 하중 지지력을 가지며 상당한 처짐까지 저항하였다. 따라서 최종파괴 형태도 콘크리트 덮개 탈락과 이에 따른 탄소 FRP 판의 탈락으로 발생한 콘크리트 덮개 박리파괴로서 전 지간의 휨 보강한 시험체 FPL1과 같은 파괴형태를 나타내었다.

지간의 2/3에 휨 보강한 탄소 FRP 판을 탄소 FRP 쉬트로 복부에 정착한 시험체 FPS2, FPS3는 전 지간에 휨 부착한 시험체 FPL2, FPL3, FPL4와 마찬가지로 탄소 FRP 판과 경계면 콘크리트 사이의 부착이 파괴되며 최대하중을 상실하였다. 그러나 일부 남은 부착과 복부에 정착된 탄소 FRP 쉬트의 정착효과에 의해 다시 하중 저항력이 증가되다 복부에 정착된 탄소 FRP 쉬트가 시험체 하면의 양 모서리에서 파단되며 파괴되었다. 따라서 FRP 쉬트에 의한 복부정착을 가진 시험체의 경우 톱날 같은 하중-처짐도를 나타내었다. 또한 복부정착을 실시한 시험체 FPS2, FPS3의 경우 그렇지 않은 시험체 FPS1에 비하여 높은 극한하중과 큰 연성을 나타내었다.

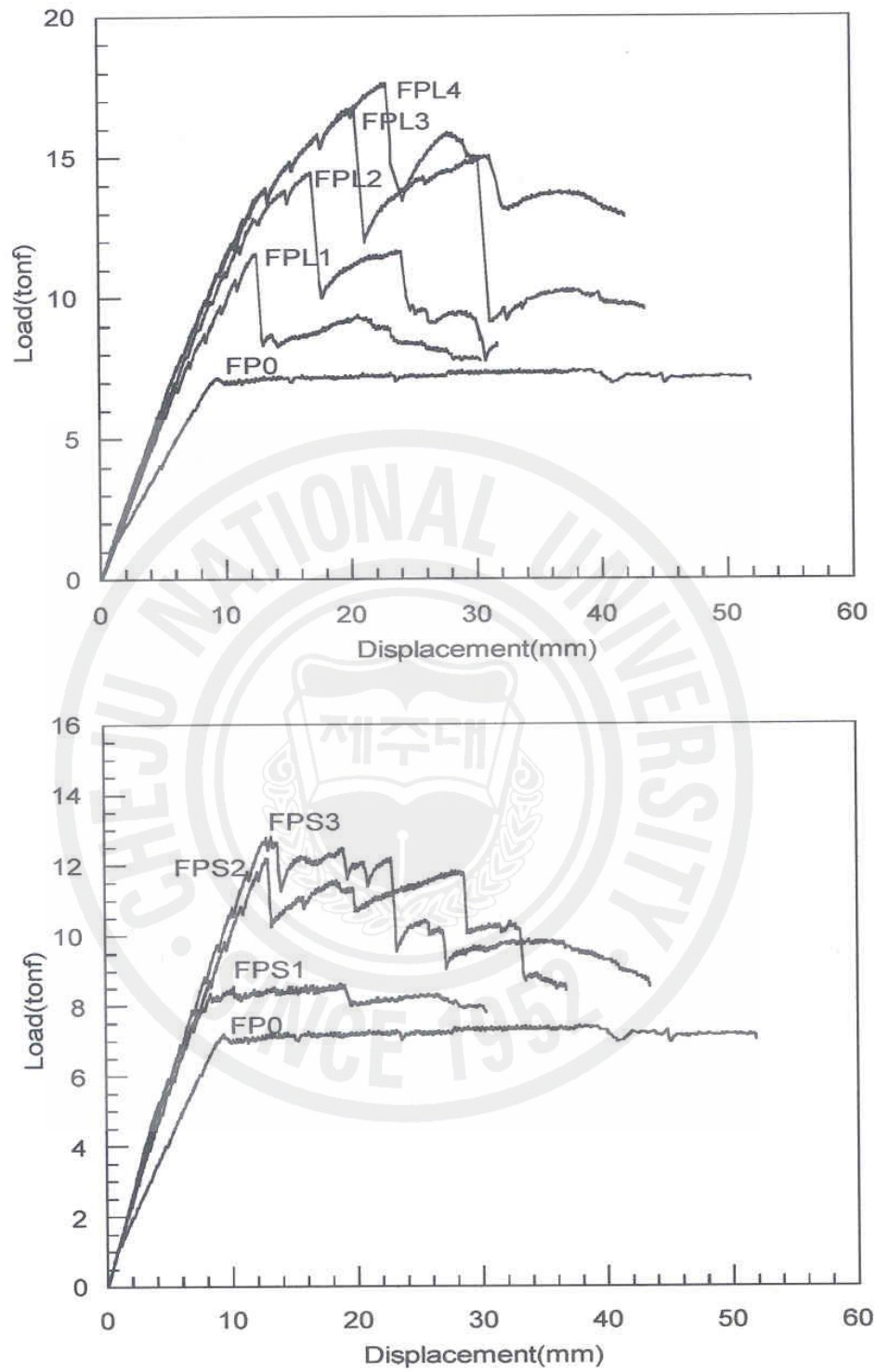


Fig. 4.21 Load-deflection curves ($L_b = 2,000\text{ mm}$, above / $L_b = 1,400\text{ mm}$, below)

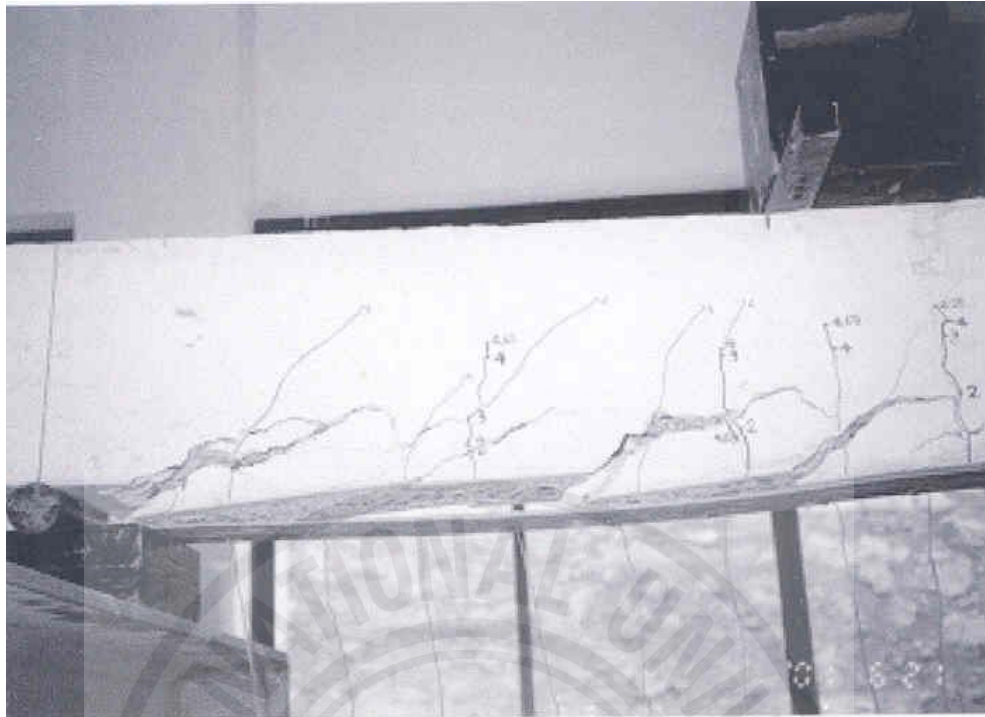


Fig. 4.22 Concrete cover failure of beam FPL1



Fig. 4.23 Delamination shear failure of beam FPL3

4. 실험인자 해석

4.1. 탄소 FRP 쉬트 보강 시험체

보강 겹수에 따른 보강효과를 알아보기 위해 탄소 FRP 쉬트를 1겹에서 4겹까지 부착하여 실험한 결과 최대 극한하중은 Fig. 4.24에 보인 바와 같이 보강 겹수의 증가에 따라 곡률이 적은 블록 곡선형으로 혹은 개략적으로는 직선형으로 증가하였다. 복부 정착을 하지 않은 시험체들은 보강 겹수에 따라 1겹은 기준보에 비하여 42%, 2겹은 57%, 3겹은 74%, 4겹은 87%의 내하력 증가를 가져왔다. 한편, 복부 정착을 실시한 시험체들에 있어서 보강겹수의 증가에 따른 극한하중 증가 경향은 복부정착이 없는 보들과 비슷하였고 최대 극한하중에 있어서 복부 정착 효과는 1겹의 경우 5.3%, 2겹은 9.6%, 3겹은 4.8%, 4겹은 11.2% 등으로 그다지 크게 증가하지는 않았다.

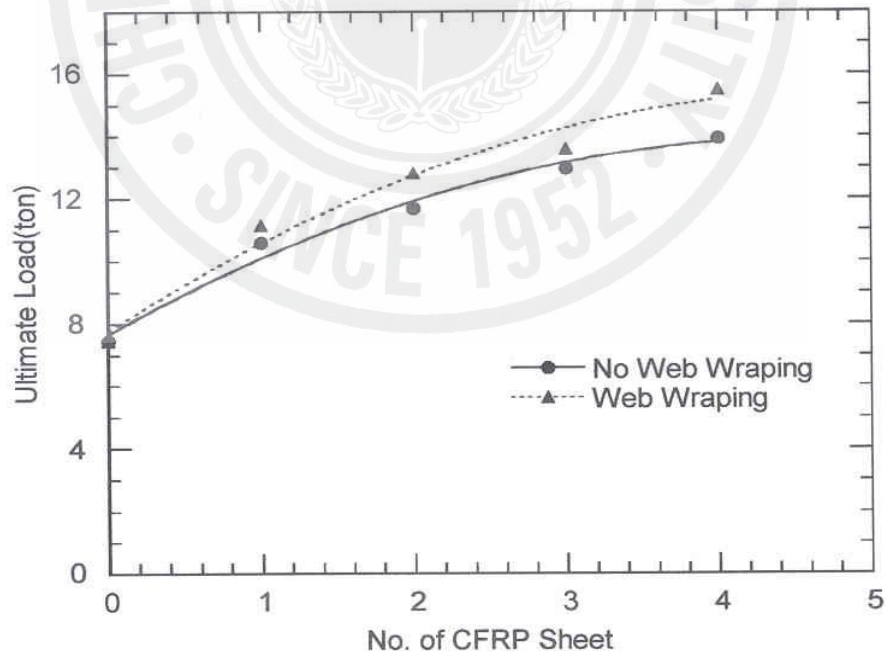


Fig. 4.24 Ultimate load-strengthening level curves

최대 극한하중 시의 처짐은 Fig. 4.25에 나타난 바와 같이 보강 겹수의 증가에 따라 곡선적으로 감소되었으며 이 경향은 복부 정착을 실시한 시험체들에서도 마찬가지였다. 다만 복부 정착여부에 따른 최대 극한하중 시의 처짐은 복부 정착을 실시한 시험체가 1겹의 경우 17%, 2겹은 28%, 3겹은 19%, 4겹은 33%의 낮은 처짐값을 나타내었다.

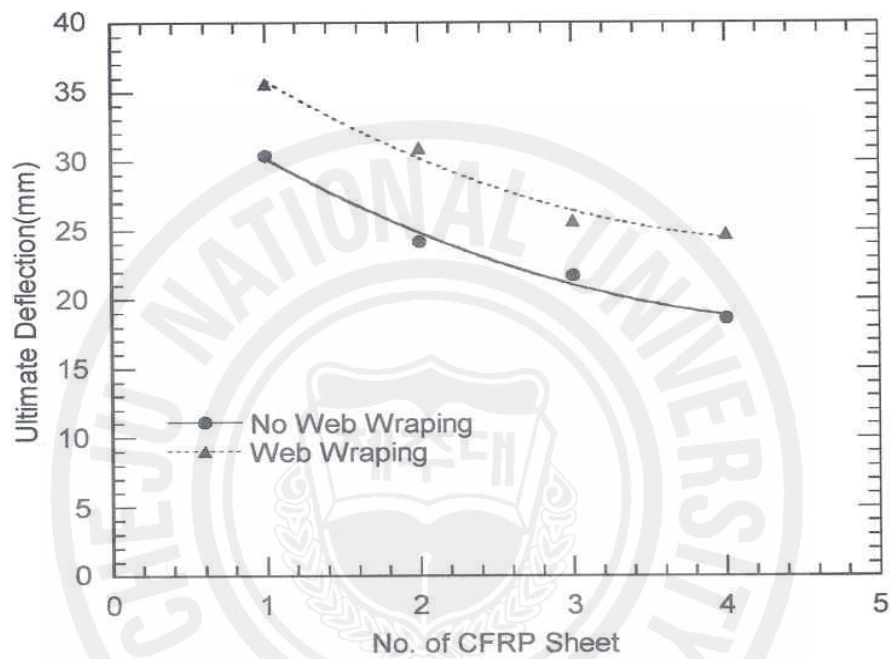


Fig. 4.25 Ultimate deflection-strengthening level curves

복부 정착의 효과는 최대 극한하중의 증가보다는 최대 극한하중 시나 파괴 시 부재 강성의 감소없이(오히려 조금 증가) 극한 처짐을 증가시킴으로써 연성을 증대시키는데 있었다.

Fig. 4.26에서 보인 바와 같이 파괴 시를 기준으로 할 때 연성지수에 있어서 복부 정착을 실시한 시험체들은 그렇지 않은 시험체에 비하여 1겹의 경우는 14%, 2겹은 38%, 3겹은 76%, 4겹은 130%의 증가를 가져왔으며 파괴 시는 이보다 더욱 증가하였다.

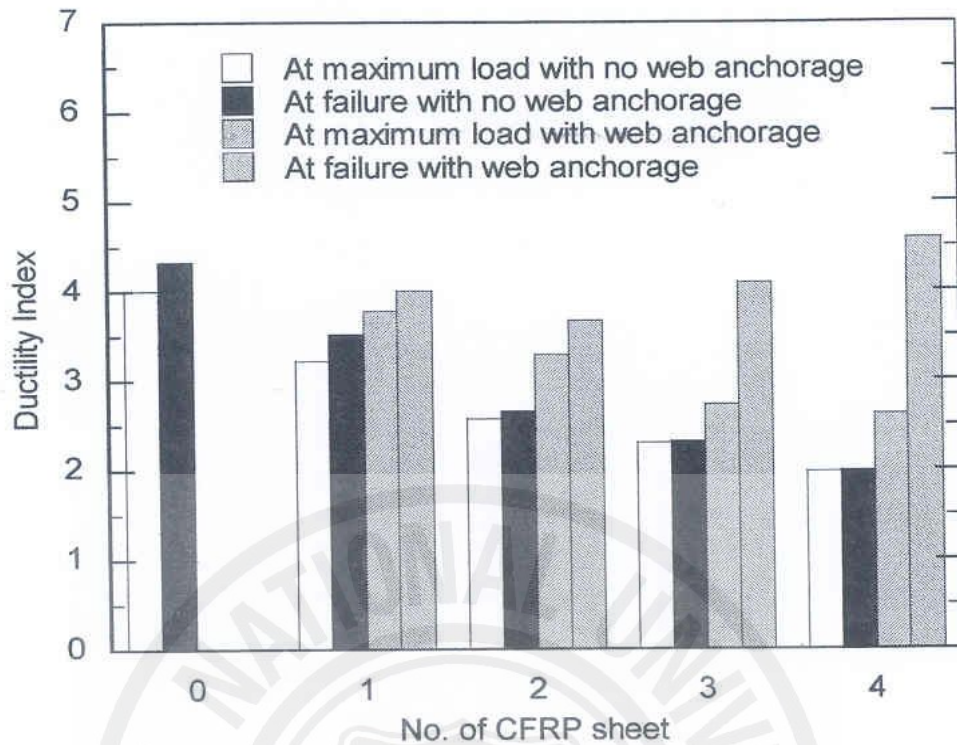


Fig. 4.26 Ductility index-number of CFRP sheet column

Fig. 4. 27은 시험체 F2와 F1W의 하중 증가에 따른 탄소 FRP 쉬트의 변형률을 시험체 길이에 따라 나타낸 것으로 변형률 게이지 번호 3과 5는 거의 하중 재하점과 일치하는데, 변형률 선도의 모양은 휨 모멘트도의 모양과 거의 일치하였으며 전단지간 사이의 변형률의 변화는 거의 직선적인 분포를 보였다. 따라서 콘크리트의 계면 전단파괴의 경우 일정한 전단응력의 가정 하에 콘크리트의 평균 극한전단강도를 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\tau_{cuh} = \frac{T_{uFRP}}{wl_b} \quad (1)$$

여기서 T_u 는 탄소 FRP 쉬트의 최대 극한 인장력이며 w 는 CFRP 쉬트의 폭 (15cm)이고, l_b 는 하중 재하점부터의 부착길이(67cm)이다. 탄소 FRP 쉬트의 최대 극한 인장력은 아래와 같이 해석적인 방법으로 계산할 수 있다.

$$T_{uFRP} = \frac{\Delta M_{FRP}}{\left(h - \frac{a}{2}\right)} \quad (2)$$

여기서 ΔM_{FRP} 는 탄소 FRP 쉬트로 휨 보강된 보와 보강하지 않은 기준 시험체와의 휨 모멘트 강도차로서 탄소 FRP 보강 쉬트가 저항해주는 휨 모멘트 강도이다. h 는 시험체의 높이(25cm)이고 a 는 등가 직사각형 압축응력 블록의 깊이이다.

Fig. 4.27에서 발견 할 수 있는 복부정착 여부의 차이점은 변형률 분포가 전단 구간에서 복부정착이 없는 시험체의 경우는 직선형으로 분포되며 복부정착이 있는 시험체의 경우 제한된 변형률 게이지 수를 고려하여 예상하면 오목 곡선형으로 분포된 것으로 보여진다.

한편 시험체 중앙에서는 복부정착이 없는 시험체의 경우 하중 재하점보다 조금 낮거나 혹은 같은 분포를 보인 반면 복부 정착을 실시한 시험체는 같은 휨 모멘트 값을 가짐에도 불구하고 높은 재하 하중 단계에서는 지간 중앙에서 높은 값을 보여주었다.

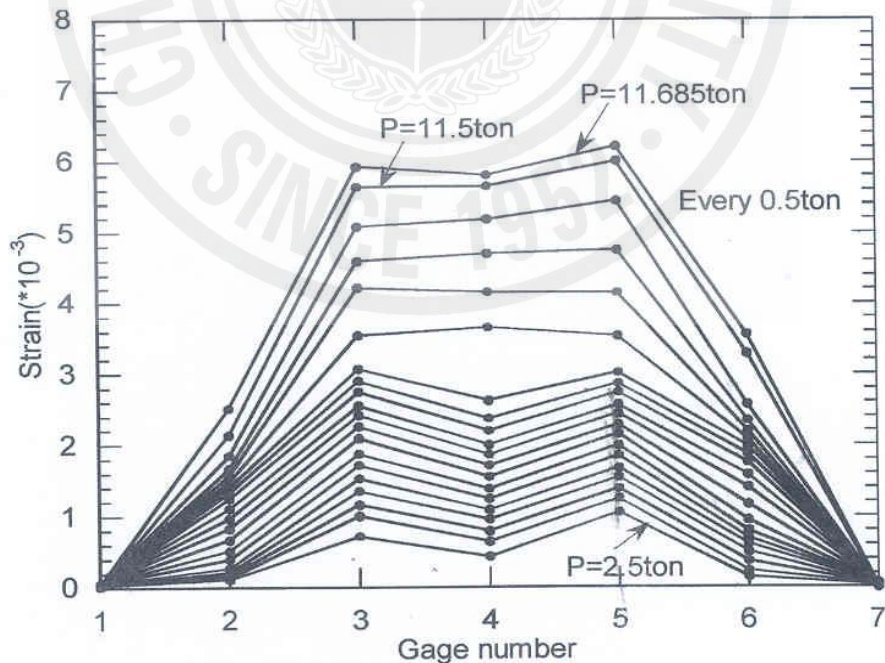


Fig. 4.27 Strain curves of FRP sheet along beam F2

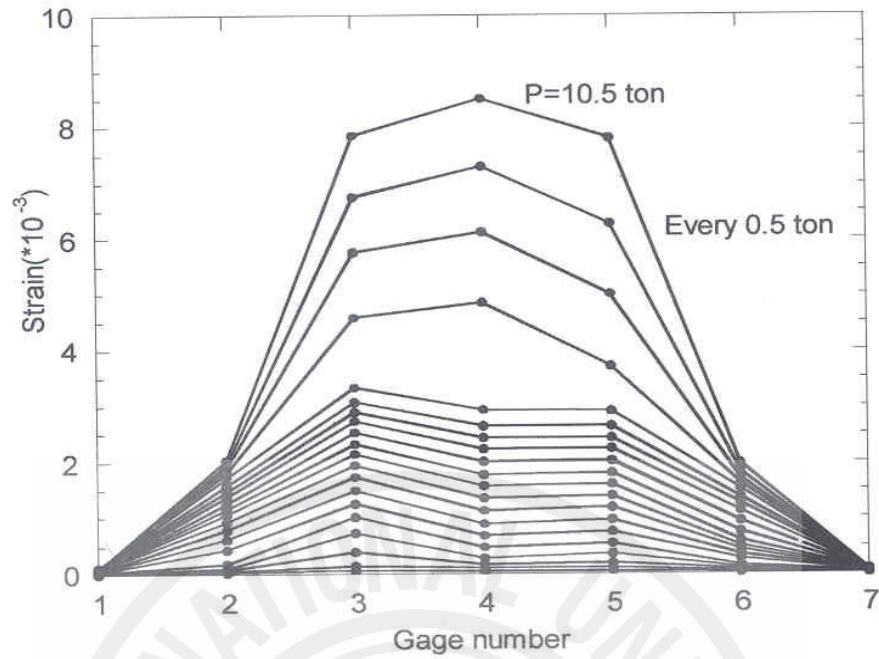


Fig. 4.28 Strain curves of FRP sheet along beam FW1

Table 4.5 Average ultimate shear stress

시험체	최대극한 하중, P (ton)	극한 휨 모멘트, $M(t \cdot m)$	FRP저항 모멘트, $M_{FRP}(t \cdot m)$	철근극한 인장력, $T_{us}^*(ton)$	압축응력 깊이, $a^{**}(cm)$	FRP극한 인장력, $T_{uFRP}(ton)$	평균 극한 전단강도, (kg/cm^2)
F0	7.443	2.721	-	16.309*	5.49	-	-
F1	10.592	3.707	0.986	16.309	7.03	4.590	4.567
F2	11.685	4.090	1.369	16.309	7.67	6.468	6.436
F3	12.970	4.540	1.819	16.309	8.35	8.753	8.709
F4	13.929	4.875	2.154	16.309	9.03	10.515	10.463
FW1	11.157	3.905	1.184	16.309	7.36	5.553	5.525
FW2	12.806	4.482	1.761	16.309	8.34	8.453	8.411
FW3	13.591	4.757	2.036	16.309	8.82	9.888	9.839

* $T_{us} = A_s \times F_y = 3.97 \times 4108 = 16,309 kg$ ** $a = \frac{T_{us} + T_{uFRP}}{0.85 f_{ck} b}$

Fig. 4.29에서 나타난 바와 같이 콘크리트의 보의 수평방향 평균 극한 전단저항 강도는 탄소 FRP 쉬트의 보강계수 즉 탄소 FRP 쉬트의 보강지수의 증가에 따라 선형적으로 증가하였다. 따라서 탄소 FRP 쉬트로 보강된 콘크리트 보에 있어서 경계면 콘크리트의 전단 파괴의 경우 극한 전단강도는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

복부 정착을 실시하지 않은 보의 경우 :

$$\tau_u = 0.167(1 + 11.66\omega_f)\sqrt{f_{ck}} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (3)$$

복부 정착을 실시한 보의 경우 :

$$\tau_u = 0.237(1 + 8.91\omega_f)\sqrt{f_{ck}} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (4)$$

여기서, ω_f 는 FRP 쉬트만의 보강지수이며, f_{ck} 는 콘크리트의 압축 강도이다.

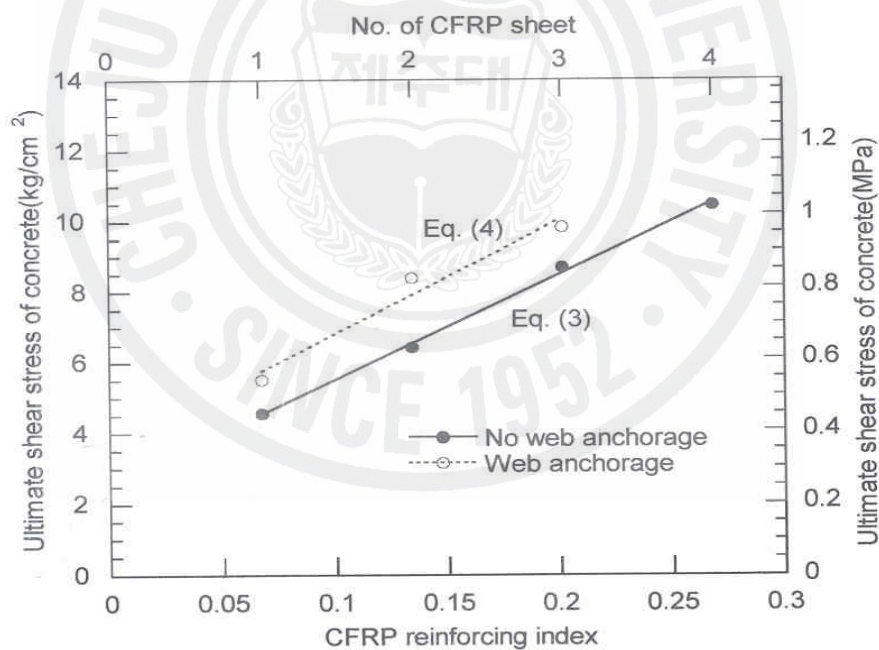


Fig. 4.29 Ultimate shear stress of concrete at failure

따라서 앞의 식들은 탄소 FRP 쉬트로 보강된 콘크리트 보의 경우 콘크리트의 경계면 전단파괴 시의 강도를 예측함으로써 탄소 FRP 쉬트가 분담하는 인장력

을 산출할 수 있어 탄소 FRP 쉬트로 보강된 철근 콘크리트 보의 보강효과를 예측할 수 있다.

복부 정착을 실시하지 않은 경우 콘크리트의 수평 극한전단강도를 계산하여 보면 1점의 경우 $0.30\sqrt{f_{ck}}$, 2점은 $0.42\sqrt{f_{ck}}$, 3점은 $0.52\sqrt{f_{ck}}$, 4점은 $0.69\sqrt{f_{ck}}$ 의 값을 보였다.

4.2. 탄소 FRP 판 보강 시험체

탄소 FRP 판으로 보강한 철근콘크리트 보에 있어서 탄소 FRP 쉬트에 의한 복부정착의 효과는 최대 극한하중과 극한 처짐값을 상당히 증가시켰다. 전 지간에 걸쳐 휨 보강한 보들의 경우 최대극한 하중값은 복부정착을 하지 않은 시험체 FPL1에 비하여 FPL2는 25%, FPL3는 45%, FPL4는 52% 증가하였다. 또한 최대 극한하중 시 처짐량도 복부정착을 하지 않은 시험체 FPL1에 비하여 FPL2는 35%, FPL3는 62%, FPL4는 80% 증가하였다. Fig. 4.30와 4.31은 전 지간에 있어서 휨 보강한 시험체들의 복부정착 효과를 나타내는 것으로서 최대 극한하중과 극한처짐 값들이 복부정착 길이에 따라 선형적으로 증가되는 것을 보여주고 있다.

그러나 휨 보강된 판의 전 부착길이에 대하여 쉬트로 복부 정착한 시험체 FPL4와 FPS3이 각각 전단 지간에만 복부 정착한 시험체 FPL3과 FPS2에 비하여 완전히 선형적으로 증가되지 못하고 조금 높은 극한하중 지지력을 나타내고 있다. 이것은 휨 모멘트가 일정한 중앙부에 대한 복부정착은 휨 부착에 대한 복부정착의 효과가 적거나 없기 때문으로 판단된다.

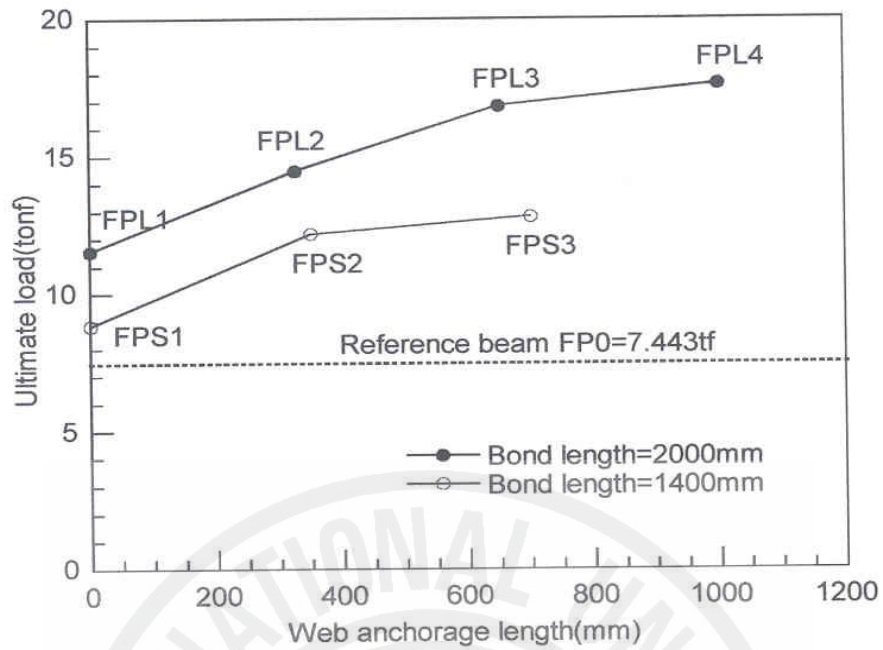


Fig. 4.30 Effect of web anchorage on ultimate load

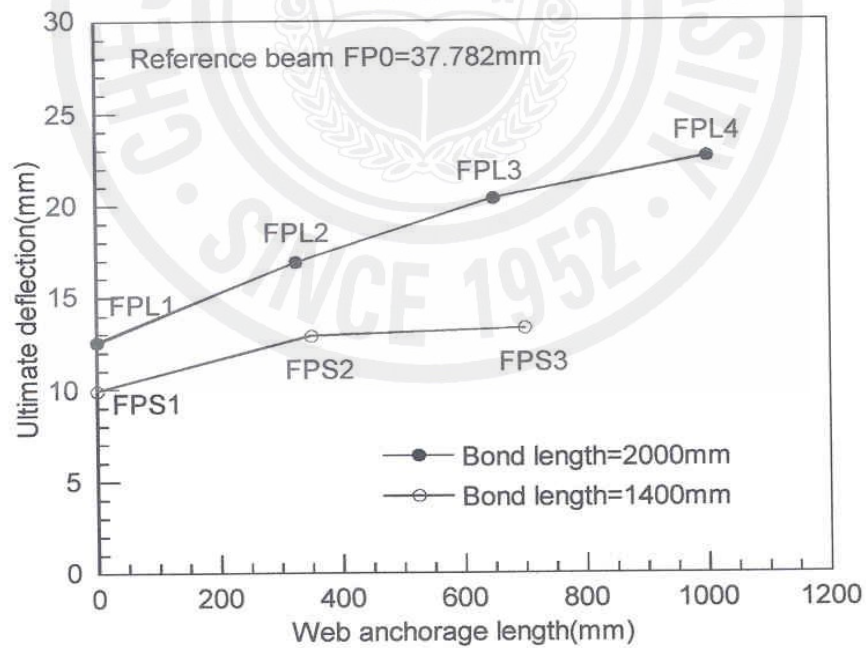


Fig. 4.31 Effect of web anchorage on ultimate deflection

지간 2/3만 탄소 FRP 판으로 휨 보강한 시험체들의 경우 복부정착 효과를 살펴보면 시험체 FPS2는 최대 극한하중에 있어서 FPS1에 비하여 38%, FPS3은 45% 높은 값을 보여주었다. 또한 최대하중 시 처짐량에 있어서 시험체 FPS2는 FPS1에 비하여 30%, FPS3은 34% 큰 값을 보여주었다. Fig. 4.30과 4.31은 지간 2/3에 휨 보강한 시험체들도 전 지간에 휨 보강한 시험체들과 마찬가지로 복부정착의 효과로서 최대 극한하중과 극한처짐 값들이 복부장착 길이에 따라 선형적으로 증가되는 것을 보여주고 있다.

Fig. 4.32와 4.33은 휨 부착길이에 따라 비슷한 복부정착 형태를 갖는 시험체들의 보강효과를 비교하고 있다. Fig. 4.32에서 보는 바와 같이 전 지간을 휨 보강한 시험체들은 지간의 2/3를 보강한 시험체들에 비하여 높은 극한하중값과 극한처짐값을 가짐을 알 수 있다. 탄소 FRP 쉬트에 의한 복부정착이 없는 시험체 FPL1은 FPS1에 비하여 31%, 전단지간의 일부 혹은 전부를 복부정착한 시험체 FPL2와 FPL3은 FPS2에 비하여 각각 19%, 38% 휨 보강한 부분을 전부 복부정착한 시험체 FPL4는 FPS3보다 38% 높은 극한 하중 지지력을 나타내었다.

한편 최대 극한하중 시의 연성지수를 휨 부착길이에 따라 비교하여 보면 탄소 FRP 쉬트에 의한 복부정착이 없는 시험체 FPL1은 FPS1에 비하여 26%, 전단지간의 일부 혹은 전부를 복부정착한 시험체 FPL2와 FPL3은 FPS2에 비하여 각각 25%, 58% 높은 값을 가지며 휨 보강한 부분을 전부 복부정착한 시험체 FPL4는 FPS3보다 70% 높은 값을 나타내었다.

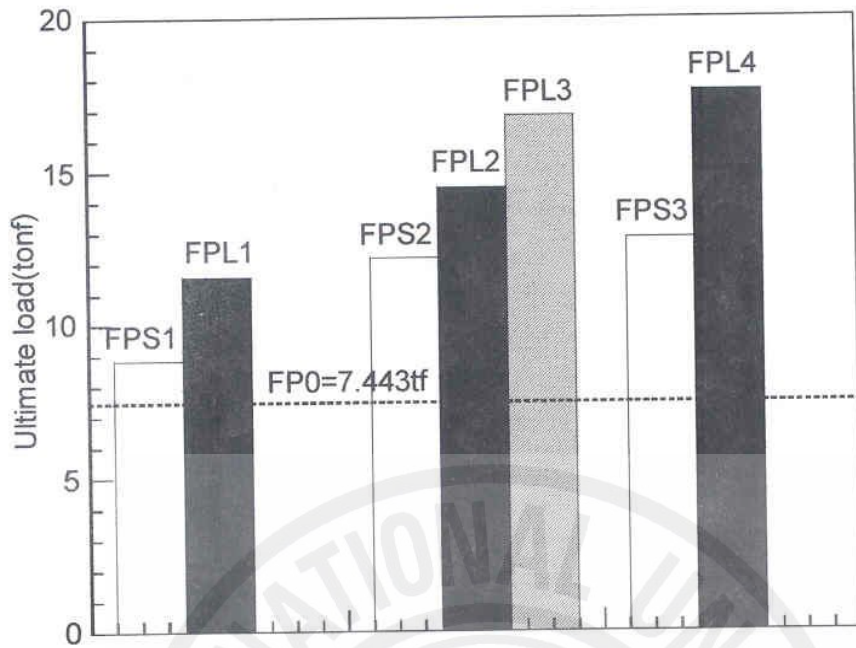


Fig. 4.32 Effect of bond length on ultimate load

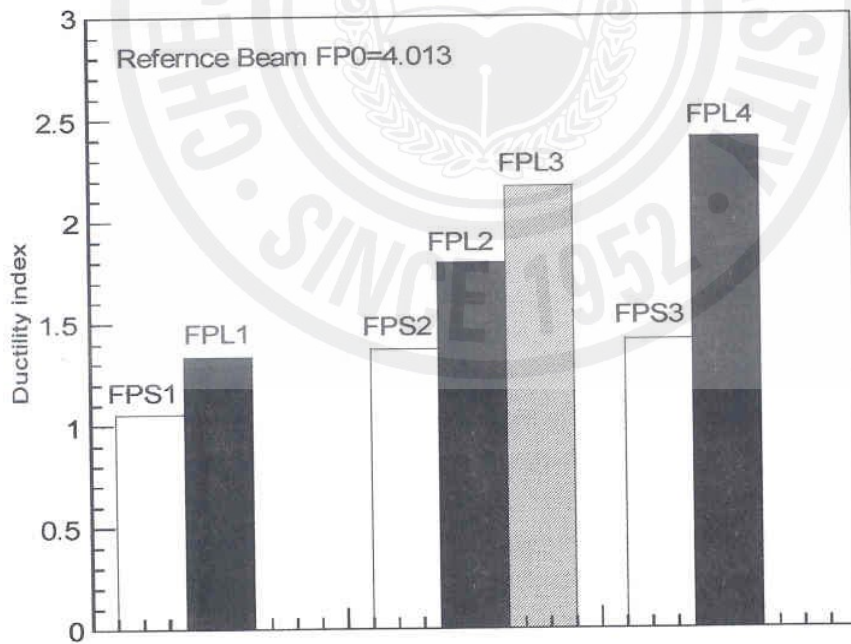


Fig. 4.33 Effect of bond length on ductility

Fig. 4.34와 4.35는 복부정착이 없는 시험체 FPL1과 복부정착이 있는 시험체 FPL3의 하중 증가에 따른 탄소 FRP 판의 변형률을 보 전 길이에 걸쳐 나타낸 것으로 변형률 선도의 모양은 휨 모멘트도의 모양과 거의 일치하고 있으며 전단 지간 사이의 변형률의 변화는 개략적으로 직선적인 분포를 보인다.

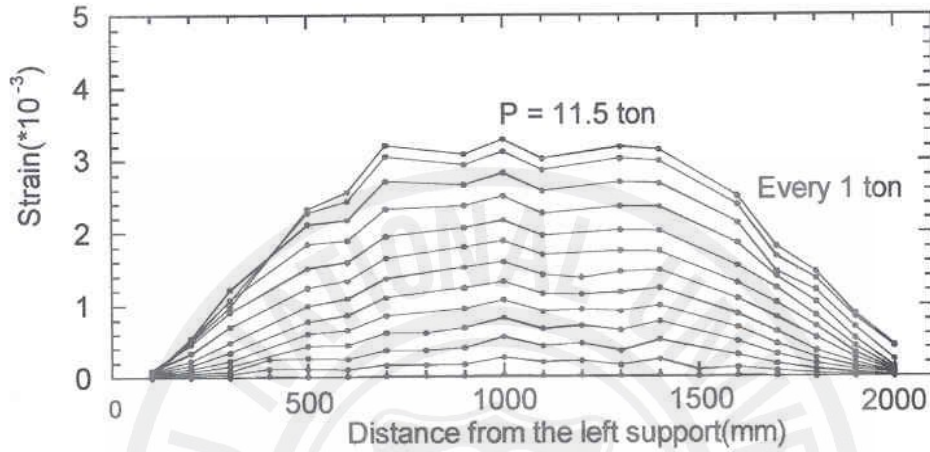


Fig. 4.34 FRP plate strain curves along beam FPL1

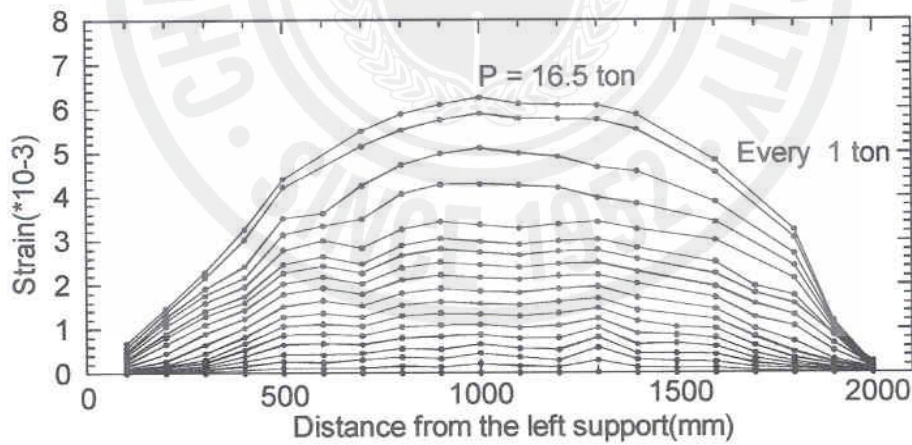


Fig. 4.35 FRP plate strain curves along beam FPL3

따라서 콘크리트 계면 전단파괴의 경우 일정한 전단응력 가정 하에 콘크리트의 평균 극한전단강도를 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\tau_{cuh} = \frac{T_{uFRP}}{wl_b} \quad (1)$$

여기서 T_{FRP} 는 CFRP 판의 최대 극한 인장력이며, ω 는 FRP 판의 폭이고, l_b 는 하중 재하점으로부터 지지점까지의 부착길이이다. FRP 판의 최대 극한인장력은 아래와 같이 해석적인 방법으로 계산할 수 있다.

$$T_{FRP} = 0.85f_{ck}ba - T_S \quad (2)$$

$$a = (T_S + T_{FRP}) / (0.85f_{ck}b) \quad (3)$$

$$T_{FRP} = \left(M_u - T_S \left(20 - \frac{a}{2} \right) \right) / \left(25 - \frac{a}{2} \right) \quad (4)$$

여기서 b 는 보의 너비 15cm이며 a 는 등가 직사각형 압축응력 블록의 깊이이다. 또한 T_S 는 철근의 항복 인장력으로 총 16,309kgf이며, M_u 는 보강된 보의 극한 모멘트이다.

그런데 경계면에서의 극한전단강도 τ_u 는 콘크리트에 의한 극한 전단강도와 복부 정착한 FRP 슈트의 극한 전단강도와 합이므로 다음과 같은 식을 세울 수 있다.

$$\tau_u = \tau_{Cu} + \tau_{Fu} \quad (5)$$

여기서 τ_{Cu} 는 콘크리트에 의한 극한 전단강도이며, τ_{Fu} 는 복부 정착한 FRP 슈트에 의한 극한 전단강도이다. τ_{Fu} 는 복부정착 슈트가 보 하면 양 모서리에서 저항해 주는 강도이므로 단위길이당 전단강도 v_{Fu} 로 환산하면 다음과 같다.

$$v_{Fu} = \frac{\tau_{Fu}\omega l_b}{2l_{wa}} = \frac{T_{FRP}}{2l_{wa}} \quad (6)$$

여기서 l_{wa} 는 복부 정착한 FRP 슈트의 길이로 시험체 FPL4와 FPS3의 경우 전단지간 사이의 길이만 고려하였다.

Table 4.6에서는 FRP 판의 인장력과 평균 극한전단강도, FRP 슈트의 단위길이

당 극한 전단강도를 계산하였으며 콘크리트에 의한 극한 전단강도는 복부 정착이 없는 시험체 FPL1과 FPS1을 기준으로 삼았다.

Table 4.6에서 보는 바와 같이 전지간에 걸쳐 FRP 판으로 휨 보강하고 복부 정착이 없는 시험체의 경우 콘크리트 덮개파괴 시 콘크리트의 극한 전단강도는 철근콘크리트 보에서의 전단강도 식으로 표시하면 $0.45\sqrt{f_{ck}}$ 정도이고, 지간의 2/3에 대하여 휨 보강한 경우는 $0.18\sqrt{f_{ck}}$ 정도이다. 한편 복부 정착한 FRP 슈트에 의한 전단강도는 약 93에서 98kgf/cm 정도의 비교적 일정한 값을 보여주었으며 전단지간 외 중앙부까지 전 복부에 정착한 경우는 약 10% 정도 높은 값을 보여주었다.

Table 4.6 Average ultimate shear stress

시험체	$P_u(\text{tonf})$	$M_u(\text{tf}\cdot\text{m})$	$a(\text{cm})$	$T_{FRP}(\text{tonf})$	$\tau_u(\text{kgf/cm}^2)$	$v_{Fu}(\text{kgf/cm}^2)$
FP0	7.443	2.605	5.49	-	-	-
FPL1	11.577	4.052	7.76	6,736	6.909*	0
FPL2	14.486	5.070	9.87	13,027	20.042	96.78
FPL3	16.829	5.890	11.83	18,821	28.955	92.96
FPL4	17.629	6.170	12.56	21,012	32.326	109.82
FPS1	8.841	3.094	5.98	1,453	2.768*	0
FPS2	12.200	4.270	8.19	8,017	20.906	93.77
FPS3	12.808	4.483	8.62	9,300	26.571	112.10

* $\tau_u = T_{FRP} / (bl_b)$

V. 결론

1. 탄소 FRP 쉬트로 보강된 철근콘크리트 보

탄소 FRP 쉬트로 휨 보강된 철근콘크리트 보에 있어서 보강량, 즉 보강접수와 복부정착 여부에 따른 보강효과에 대한 실험연구로부터 다음과 같은 결론들을 도출할 수 있다.

- 1) 탄소 FRP 쉬트를 이용한 외부 부착공법은 보통의 철근비를 가진 철근 콘크리트 보의 경우 휨 저항강도를 상당히 증가시킬 수 있다.
- 2) 일반적으로 보통의 철근비를 가진 보에 대하여 보통으로 보강된 콘크리트 보의 경우 파괴형태는 콘크리트의 경계면 전단박리파괴를 나타낸다.
- 3) 보강접수에 따른 보강효과는 보강량의 증가에 따라 개략적인 선형 혹은 곡률이 작은 블록 곡선형으로 증가한다. 한편 파괴 시 극한치짐이나 곡률은 오목 곡선적으로 감소한다.
- 4) 복부정착 여부에 따른 보강효과는 최대 극한하중의 경우 조금 증가하며, 가장 큰 잇점으로 연성을 상당히 증가시킨다.
- 5) 탄소 FRP 쉬트의 인장응력 분포 모양은 휨 모멘트도와 거의 유사하며 전단 구간의 응력분포는 직선적인 분포로 가정할 수 있다. 그러나 복부 정착을 한 보에 있어서는 오목곡선적으로 분포될 것으로 예측되며 하중 재하점 아래에서 높은 응력을 나타낸다.

- 6) 경계면 박리파괴 시 콘크리트의 수평 극한전단강도는 전단구간에서 개략적으로 일정하게 분포한다고 가정할 수 있으며 그 값은 보강접수, 즉, 보강량의 증가에 따라 선형적으로 증가한다.
- 7) 탄소 FRP 보강접수 혹은 보강지수와 콘크리트의 극한 전단 강도 사이의 관계로부터 보강효과를 예측할 수 있다.

2. 탄소 FRP 판으로 보강된 철근콘크리트 보

탄소 FRP 판으로 휨 보강된 철근콘크리트 보에 있어서 FRP 판의 휨 부착길이와 FRP 쉬트에 의한 복부정착 길이에 따른 거동과 보강효과에 대한 실험연구로부터 다음과 같은 결론들을 도출할 수 있다.

- 1) 탄소 FRP 판을 이용한 외부 부착공법은 일반적으로 보통의 철근비를 가진 철근 콘크리트 보의 경우 휨 저항강도를 상당히 증가시킬 수 있다.
- 2) 탄소 FRP 판으로 휨 보강한 보는 복부정착이 없는 경우 콘크리트 덮개 박리파괴를 나타내고, 탄소 FRP 쉬트로 탄소 FRP 판을 복부 정착한 보는 콘크리트 계면 전단 박리파괴를 나타낸다.
- 3) 탄소 FRP 판의 휨 부착길이는 길수록 극한하중 지지력과 극한 처짐량을 증가시킨다. 그러므로 가급적 휨 부착은 지지점까지 연장해 주는 것이 좋다.
- 4) FRP 쉬트에 의한 휨 보강 FRP 판의 복부정착은 극한하중 지지력과 극한 처짐량을 매우 증가시키며 그 효과는 복부정착 길이에 비례한다. 특히, 복부정착의 경우 최대 극한하중 도달 후에도 최후 파괴 시까지 상당한 하중지지 능력과 함께 높은 연성을 유지한다.
- 5) FRP 쉬트에 의한 휨 보강 FRP 판의 복부정착이 극한하중과 극한 처짐량을

증가시키는 것은 FRP 쉬트의 섬유 직각방향으로 저항하는 전단 저항력이 FRP 판의 양 모서리에서 발생하기 때문으로 판단된다.

- 6) 하중재하 시 FRP 판에 발생하는 변형률은 휨 모멘트도의 모양과 거의 일치한다. 따라서 전단지간에서 경계면 콘크리트에 발생하는 전단 저항응력이 일정하다는 가정을 세울 수 있다.



VI. 참고 문헌

- ACI Commitee 440. "State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", American Concrete Institute, Michigan, 1996.
- 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/REINFORC.pdf.
- 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 Materinals", 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.
- EMPA-Swiss Federal Laboratories For Material Testing And Research, "CFRP Laminates in the Construction Industry" Internal Report, Dubendorf.
- 이현호, 구은숙, "아라미드 섬유쉬트로 휨 보강한 RC보의 강도성능 및 변형성능에 관한 고찰", 콘크리트 학회지, 제10권, 제5호, 1998, pp.151-165.
- 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., Yoshzawa H., "Field Applications of a Carbon Fiber Sheet Material for Strengthening Reinforced Concrete Structures.", 41st International SAMPE Symposium, March24-28, 1996, pp.636-644.
- 정원용, 이성우, "탄소 및 유리섬유 인발성형 스트립으로 보강된 RC보의 실험적 거동분석", 대한토목학회 논문집, 제20권, 제6-A호, 2000, pp.1039-1048.
- 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
- 콘크리트 구조 설계 기준, 건설교통부, 1999.
- M' Baza I., Misssihoun 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 Cabon Fiber/Epoxy Composites", Construction and Building materials, Vol.9, No.6, 1995, pp.341-351.
- Meier, U. and Winistoerfer, A., "Retrofitting of Structures through External

- Bonding of CFRP Sheets," Proceeding of the Second International RILEM Symposium, RILEM Proceedings 29, Taerwe, L., Editor, E & FN Spon, 1995, pp.465-472.
- 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.
- Naaman, A. E., Park S. Y., and Lopez M. M., "Flexural Behavior of RC Beams Strengthened Using CFRP Sheet", University of Michigan, Research Report No. UMCEE 98-21, August 1998.
- 오용복, 권영웅, "탄소섬유쉬트 보강된 철근콘크리트 보의 보강철근비에 따른 구조적 거동", 콘크리트 학회지, 제10권, 제2호, 1998, pp.119-126.
- Park S. Y., Naaman A. E., Lopex, 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.
- Park S. Y., Park J. W.. and Min C. S.. "Strengthening Effect of R/C Beams with Different Strengthening Level", KCI Concrete Journal, Vol.12, No.1, 2000, pp. 113-120.
- Plevris, N. and Triantafillou, T. C., "Time Dependant Behavior of RC Members Strengthened with FRP Laminates", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 3, 1994, pp. 1016-1042.
- 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, 1991, pp.3471-3433.

- Saadatmanesh H., "Fiber Composites for New and Existing Structures", ACI Structural Journal, Vol.91, No.3, May-June 1994.
- 심종성, 김규선, "보강재로 보강된 RC 보의 계면응력해석 모델", 대한토목학회 논문집, 제19권, 제 I-2호, 1999, pp.161-170.
- "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 Concrete 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

이 세상엔 있어서 좋은 사람이 있습니다.



한 경 호 드림