

공학석사 학위 청구논문

탄소섬유 보강 중에 반복하중을  
받은 RC보의 보강효과에 관한  
실험적 연구

2006년 2월

부경대학교 산업대학원

토목공학과

조 일 래

공학석사 학위청구논문

탄소섬유 보강 중에 반복하중을  
받은 RC보의 보강효과에 관한  
실험적 연구

지도교수 장 희 석

이 논문을 공학석사 학위청구논문으로 제출함

2006년 2월

부경대학교 산업대학원

토 목 공 학 과

조 일 래

# 조일래의 공학석사 학위논문을 인준함

2005년 11 월 19 일

주 심 공학석사 이 동 욱      ㉠

위 원 공학박사 이 환 우      ㉠

위 원 공학박사 장 희 석      ㉠

# 목 차

표 차례 .....	iii
그림 차례 .....	iv
사진 차례 .....	vi
Abstract .....	vii
<b>제 1 장 서론 .....</b>	<b>1</b>
1.1 연구 배경 및 목적 .....	1
1.2 연구 범위 및 방법 .....	2
<b>제 2 장 실험 .....</b>	<b>4</b>
2.1 시험체 제작 .....	4
2.2 실험과정 .....	8
2.3 실험 결과 및 파괴형태 .....	9
<b>제 3 장 실험결과 분석 및 고찰 .....</b>	<b>19</b>
3.1 하중-처짐 관계 .....	19
3.2 하중-철근-콘크리트의 변형도 .....	23
3.3 반복횟수-처짐 관계 .....	28
3.4 실험결과 분석 .....	31
<b>제 4 장 결론 .....</b>	<b>36</b>

참 고 문 헌 ..... 37

# 표 차 례

< 표 2-1 >	사용재료 물성 .....	4
< 표 2-2 >	시험체 구분 .....	7
< 표 2-3 >	시험체의 항복하중, 최대하중 및 파괴형태 .....	18
< 표 3-1 >	반복하중 후 최종처짐 .....	31
< 표 3-2 >	반복하중 가력시작시간에 따른 시험결과 .....	32
< 표 3-3 >	반복하중 크기변화에 따른 추가시험체 구분 .....	33
< 표 3-4 >	반복하중 크기 변화에 따른 시험결과 .....	34

# 그 립 차 례

< 그림 2-1 >	보 시험체 형상 및 단면 .....	6
< 그림 2-2 >	반복하중 재하과정 .....	9
< 그림 2-3 >	보의 파괴형태 .....	10
< 그림 2-4 >	S-2-CON 시험체의 균열형상 .....	16
< 그림 2-5 >	S-2-NF 시험체의 균열형상 .....	16
< 그림 2-6 >	S-2-00 시험체의 균열형상 .....	16
< 그림 2-7 >	S-2-03 시험체의 균열형상 .....	17
< 그림 2-8 >	S-2-06 시험체의 균열형상 .....	17
< 그림 2-9 >	S-2-12 시험체의 균열형상 .....	17
< 그림 2-10 >	S-2-24 시험체의 균열형상 .....	17
< 그림 3-1 >	S-2-CON 시험체의 하중 - 처짐 곡선 .....	19
< 그림 3-2 >	S-2-NF 시험체의 하중 - 처짐 곡선 .....	20
< 그림 3-3 >	S-2-00 시험체의 하중 - 처짐 곡선 .....	20
< 그림 3-4 >	S-2-03 시험체의 하중 - 처짐 곡선 .....	21
< 그림 3-5 >	S-2-06 시험체의 하중 - 처짐 곡선 .....	21
< 그림 3-6 >	S-2-12 시험체의 하중 - 처짐 곡선 .....	22
< 그림 3-7 >	S-2-24 시험체의 하중 - 처짐 곡선 .....	22
< 그림 3-8 >	보 시험체의 하중 - 처짐 곡선 .....	24
< 그림 3-9 >	S-2-CON 시험체의 하중 - 처짐 곡선 .....	25
< 그림 3-10 >	S-2-NF 시험체의 하중 - 철근 변형도 .....	25
< 그림 3-11 >	S-2-00 시험체의 하중 - 철근 변형도 .....	26
< 그림 3-12 >	S-2-03 시험체의 하중 - 철근 변형도 .....	26
< 그림 3-13 >	S-2-12 시험체의 하중 - 철근 변형도 .....	27
< 그림 3-14 >	S-2-24 시험체의 하중 - 철근 변형도 .....	27

< 그림 3-15 >	S-2-00 시험체의 반복하중 가력 중 변위곡선 .....	28
< 그림 3-16 >	S-2-03시험체의 반복하중 가력 중 변위곡선 .....	29
< 그림 3-17 >	S-2-06시험체의 반복하중 가력 중 변위곡선 .....	29
< 그림 3-18 >	S-2-12시험체의 반복하중 가력 중 변위곡선 .....	30
< 그림 3-19 >	S-2-24시험체의 반복하중 가력 중 변위곡선 .....	30
< 그림 3-20 >	항복하중 크기 비 .....	35

# 사 진 차 례

< 사진 2-1 >	S-2-CON 시험체의 최종 파괴모습 .....	12
< 사진 2-2 >	S-2-NF 시험체의 최종 파괴모습 .....	13
< 사진 2-3 >	S-2-00 시험체의 최종 파괴모습 .....	13
< 사진 2-4 >	S-2-03 시험체의 최종 파괴모습 .....	14
< 사진 2-5 >	S-2-06 시험체의 최종 파괴모습 .....	14
< 사진 2-6 >	S-2-12 시험체의 최종 파괴모습 .....	15
< 사진 2-7 >	S-2-24 시험체의 최종 파괴모습 .....	15

# **An Experimental Study on the Strengthening Effect of RC Beam subjected to Repeated Loading during CFS Strengthening Process**

Il-Lae Cho

Department of Civil Engineering, Graduate School  
Pukyong National University

## **Abstract**

The deterioration and damage, which decrease the durability and the security of the steel-concrete structures, have been greatly improved by the high tech repair and strengthening skills.

FRP material is used recently to repair and to strengthen the structures of plate or sheet forms due to its easy application and transportation. When they are repaired or strengthened with FRP, the steel-concrete structures are needed to avoid the interactions from the vibrating objects during curing. However, in case of being strengthened to the bridge or buildings with FRP, it is likely to get outside imparts on the structures with FRP.

Like this working load occurs during curing, the existing researches have focused on the strengthening impart. The researches on the working

loads' impacts on the strengthening have been rarely practiced. As a result, in case of strengthening with FRP, the impact of the repetitive working load.

The research studied repetitive working load's impacts on the strengthening impacts during CFS curing of CFS 2 plies Strengthening, and compared the result to that of the cases are applied to the steel-concrete structures, the resulted data can be used for the basic data to obtain the maximum repair, strengthening impacts and the secure construction.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

철근 콘크리트 구조물의 내구성과 안전성을 저하시키는 노화 및 손상은 각종 보수·보강 기술의 발전에 의하여 획기적으로 개선이 되고 있다. 근래에는 비부식성, 고강도, 경량이며 또한 시공성과 운반 측면에서 유리한 FRP(Fiber Reinforced Polymer or Plastic) 재료를 plate 혹은 sheet 형태 가공하여 구조물의 보수·보강에 많이 이용하고 있다.

철근 콘크리트 구조물에 대하여 FRP로 보수·보강 작업시, 주변 온도에 따른 일정기간의 양생을 필요로 하며<sup>4)</sup> 또한 양생과정 중 외부의 진동원으로부터 유해한 작용을 받는 것을 피하는 것이 바람직하다. 그러나 예를 들어 FRP로 교량 혹은 건축물의 슬래브를 보강하는 경우에 차량통행이나 슬래브 상부의 이동하중에 의한 영향 등과 같이, FRP로 구조물 보강시에 외부 하중의 영향을 피할 수 없는 경우가 대부분이다.

이와 같이 FRP 양생 도중이라도 사용하중을 받고 있는 경우가 대부분이지만 기존의 연구<sup>1, 2, 6-21)</sup> 들은 보강효과에 대해서만 관심이 집중되어 왔다. 따라서 시공 과정에서 생길 수 있는 이러한 영향을 고려하는 즉, FRP 양생 중 사용하중이 보강 효과에 미치는 영향에 관한 연구는 Carolin 등<sup>3)</sup>에 의해서 조사되었을 뿐 현재까지 극히 미미하다고 판단되었다. 그 결과 현장에서 FRP로 보수·보강을 하는 경우에 반복하중의 영향에 대해서는 의구심을 가진 상태에서 시공이 되고 있는 것이 현실이다.

Anders Carolin 등<sup>3)</sup>은 11개의 철근 콘크리트보 시험체를 사용하였다. 보강재로서는 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer) plate와 NMSR(Near Surface Mounted Reinforcement)을 사용하였으며, 반복하중의 유·무를 주된 실험변수로 하였다. 보강재 부착 후 20분 지나서 가력을 시작하였으며,

108초의 하중가력주기로서 72시간동안 반복하중을 가하였다. 반복하중 가력기간을 포함하여 CFRP 양생 7일째 되는 시점에서 파괴실험을 행하였다. 실험결과, CFRP plate와 NMSR로 보강된 된 보의 최대하중은 양생 도중 받는 반복하중에 의하여 거의 영향을 받지 않는다고 하였다. 그러나 실험결과를 자세히 살펴보면 CFRP plate로 보강된 시험체의 개수는 CFRP plate의 재료 및 반복하중의 유·무에 따라 구분하여 총 4개인데, CFRP plate의 재료에 따라 약 10%의 최대하중 감소가 반복하중 작용에 의하여 나타나고 있음을 알 수 있었다.

이러한 점에 착안하여 이동원<sup>5)</sup>은 철근 콘크리트 보 시험체를 탄소섬유쉬트(Carbon Fiber Sheet : CFS) 1겹을 사용하여 보강하고 CFS 양생과정중 작용하는 반복하중이 보강성능에 미치는 영향을 일련의 실험을 통하여 분석하였다. 그 결과, 보강효과를 실무적으로 판단해볼 수 있는 항복하중의 감소에 대하여 분석한 후, CFS 1겹 보강의 경우에 24시간 지나서 반복하중을 받기 시작한다면 항복하중 감소량은 2% 이내이므로, CFS 부착 후 약 24시간 정도의 반복하중 또는 진동요인을 차단하는 양생기간이 필요하다고 발표하였다.

본 연구는 위의 연구의 계속적인 연구로서 CFS 2겹 보강의 경우에 CFS 양생 도중 작용하는 반복하중이 보강효과에 미치는 영향을 조사하고 아울러 1겹 보강의 경우와 보강효과를 상호 비교해보고자 한다. 실제 현장에서 CFS로 철근 콘크리트 구조물을 보강할 때 2겹 보강의 경우가 많으므로 본 연구에서 얻어진 자료는 보수·보강 효과의 극대화과 안전시공을 위한 기초 자료로서 유용하게 활용되리라고 판단된다.

## 1.2 연구 범위 및 방법

철근 콘크리트 구조물 보수·보강에 사용되는 FRP 재료 중에서 CFRP가 Sheet 형태로 하여 일반적으로 많이 사용되고 있다. 따라서 본 연구는 CFS

로 보강되는 철근콘크리트 구조물에 대하여 CFS 양생과정 동안에 작용하는 반복하중이 보강효과에 미치는 영향을, 일련의 철근 콘크리트 보 시험체에 대한 실험을 통하여 조사하고자 한다.

실험에 사용된 CFS의 보강 겹수는 2겹으로 하였으며, 앞서 CFS 1겹을 사용하여 얻어진 실험결과<sup>5)</sup>와 비교하여 CFS 보강 겹수에 따른 보강효과를 분석하였다.

실험변수로서 CFS 부착 후 반복하중 가력시작시간을 택하고 이에 따른 7개의 철근 콘크리트 보 시험체에 대하여 실험을 행하였다. 실험결과를 분석하는 과정에서 반복하중의 크기 변화에 대한 추가 실험의 필요성이 있어서 6개의 시험체에 대하여 추가로 실험을 행하였다.

CFS 양생기간은 CFS 부착 후 양생온도 15℃ 이상을 유지한 상태에서 반복하중 작용기간을 포함하여 7일간으로 하였다.

실험에 사용된 반복하중의 주기는 앞의 연구<sup>5)</sup>에서와 같이 콘크리트 구조물에 미치는 영향이 미미할 것으로 판단되는 경차량의 운행횟수는 제외하고, 통행량이 가장 많은 시간대의 대형화물차와 컨테이너의 운행 횟수만을 고려하여 0.1Hz로 정하였다. 반복하중의 최대하중 값으로서 기준시험체로 사용되는 보 시험체 항복하중의 50%를 택하였으며, 최소하중 크기로서 최대하중의 10%를 사용하였다.

실험과정에서 보 시험체들의 균열하중, 항복하중, 최대하중 및 각각의 하중상태에서의 처짐 등을 측정한 후, 이들을 서로 비교하여 CFS 양생 중 작용하는 반복하중이 보수 및 보강효과에 미치는 영향을 분석하였다.

## 제 2 장 실험

### 2.1 시험체 제작

본 연구에서는 실험변수로서 CFS 보강 후 반복하중의 가력시작시간을 택하였다. 시험체는 <그림 2-1>과 같이 단면 15cm×25cm, 길이 240cm의 철근 콘크리트 보 시험체를 사용하였으며, 2-D13의 인장철근, 2-D10의 압축철근, D10의 전단철근(전단지간 10cm 간격, 순수 휨구간 20cm 간격)을 배근하였다.

콘크리트는 일정한 품질을 얻기 위하여 굵은 골재의 최대치수가 25mm인 쇄석 골재를 사용한 레미콘을 이용하였다. 압축강도 측정용 공시체를 제작하여 재령별로 압축강도를 측정하였으며, 보 시험체들은 현장과 유사한 상태를 유지하기 위하여 휨 파괴시까지 약 6개월 간 기건양생을 실시하였다.

본 실험에 사용된 콘크리트, 철근 및 CFS들의 재료 특성치를 <표 2-1>에 정리하여 나타내었다.

<표 2-1> 사용재료 물성치

(a) 콘크리트

설계기준강도 (MPa)	슬럼프 (cm)	평균압축강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
24	15	25	$1.4 \times 10^4$

(b) 철근

철근종류		항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
SD30	D10	350	490	$2.0 \times 10^5$
	D13			

## (c) 탄소섬유시트

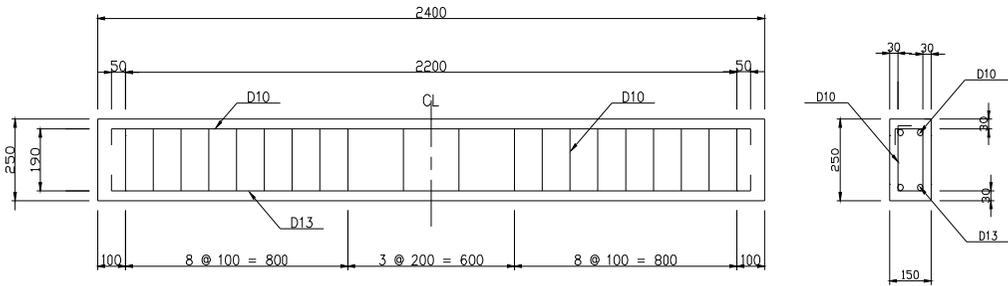
품목	섬유종류	섬유중량 (g/m <sup>2</sup> )	설계두께 (mm)	인장강도 (MPa)	인장탄성율 (MPa)	파단시변형률 (%)
CF730	고강도 탄소	300	0.167	3,550	235,000	2.1

## (d) 프라이머 및 에폭시

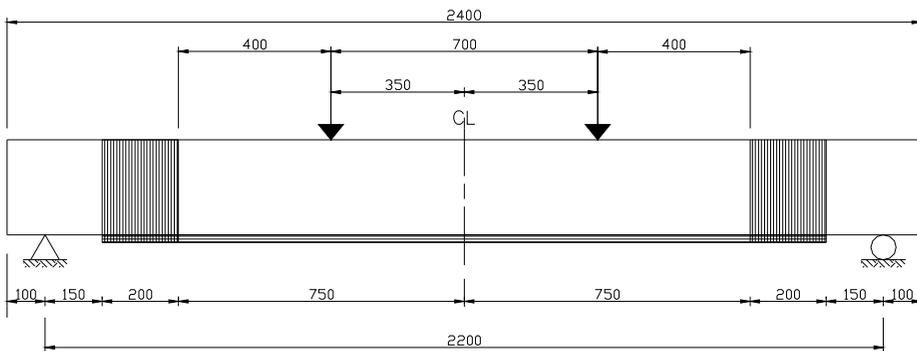
접착제 종류	인장강도 (MPa)	인장탄성율 (MPa)	굴곡강도 (MPa)	굴곡탄성율 (MPa)
프라이머	88.8	4,492	105.9	2,654
에폭시	88.3	4,858	118.9	2,761

인장철근의 변형율을 측정하기 위하여 주철근의 중앙부에 철근 변형률 게이지를 부착하였으며, 콘크리트 변형률게이지는 시험체 중앙부의 상단부 표면에 부착하였다.

실험에 사용된 시험체는 CFS로 보강을 하지 않은 기준보(S-2-CON), CFS로 보강은 하였으나 반복하중을 받지 않은 보(S-2-NF), CFS 보강 후 반복하중의 최초 작용시간을 즉시(S-2-00), 3시간 후(S-2-03), 6시간 후(S-2-06), 12시간 후(S-2-12), 24시간 후(S-2-24)로 구분한 총 7개로 구성하였다 (표 2-2).

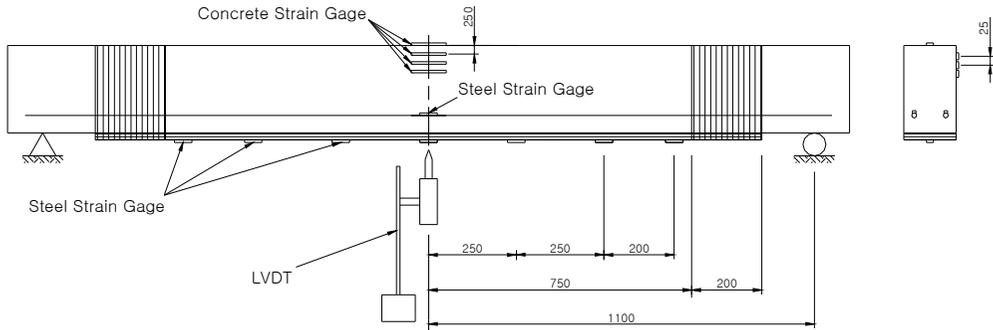


(a) 철근배근도 및 단면



(b) CFS 부착 및 하중가력 위치

<그림 2-1> 보 시험체 형상 및 단면



(c) 변형률 및 처짐 측정장치 부착 위치도

<그림 2-1> 보 시험체 형상 및 단면 (계속)

<표 2-2> 시험체 구분

시험체 명	CFS 보강 겹수	반복하중 가력시작시간 (CFS 부착후)	반복하중 가력시간 (hrs)
S-2-CON	-	-	-
S-2-NF	2	-	-
S-2-00	2	즉시	168
S-2-03	2	3시간 후	165
S-2-06	2	6시간 후	162
S-2-12	2	12시간 후	156
S-2-24	2	24시간 후	144

CFS 보강을 위하여 CFS를 부착할 보의 면은 그라인더로 레이탄스 등의 이물질을 완전히 제거하고 또한 거꾸집 표시나 돌기가 1.0mm이하가 되도록

록 처리하였으며 그라인더 작업 후 고압의 공기로 먼지들을 완전히 제거하였다.

에폭시의 부착효과를 증대시키기 위하여 프라이머를 CFS 접착 하루전에 콘크리트 조직 내로 충분히 스며들 수 있도록 도포하였다. 프라이머 작업시 보의 면에서 부분적으로 파인 곳은 에폭시 수지 퍼티로 메워 주었으며, 프라이머와 퍼티에 사용된 재료의 배합은 주제와 경화제를 2:1로 혼합하여 사용하였다.

프라이머 도포 및 평활도 조정이 완료된 표면은 CFS를 부착하기 위한 함침용 레진을 도포한다. 함침용 레진은 주제와 경화제를 규정의 배합비로 혼합하여 충분히 믹싱 후 소정량을 도포하였다(하도 함침). 보의 저면에 부착한 CFS는 길이 190cm, 폭 13cm로 미리 제단하여 접착면에 접착시키고 이형지를 벗겨낸 후 고무주걱으로 표면을 섬유방향으로 2~3회 이상 문질러 수지가 충분히 함침 되도록 하여 기포를 제거하였다. 다시 시트상부에서부터 수지를 재 도포하면서 섬유방향에 따라 압착하여 수지를 시트전면에 완전하게 함침시켰다(상도 함침).

그리고 CFS의 부착능력을 강화하기 위하여 시험체의 양 지점에서 15cm 떨어진 곳에서 U형 형태로 20cm폭의 동일한 CFS를 부착하였다.

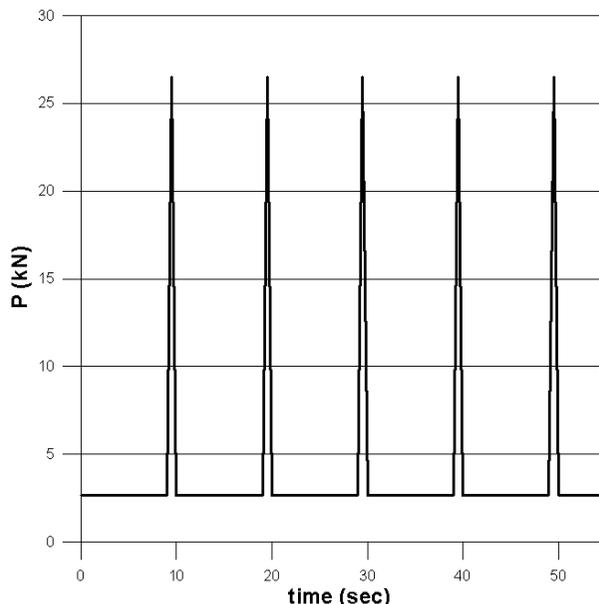
## 2.2 실험과정

재하실험은 MTS사의 250kN Actuator와 가력보를 사용한 4점 재하로 실시하였으며, 사용된 반복하중의 주기는 교통량 조사 자료를 참고하여 0.1Hz(<그림 2.2>)로 하였다. 반복하중의 최대하중 값은 기준보의 파괴실험결과 얻어진 항복하중(53kN)의 50%, 최소하중은 최대하중 값의 10%로 하였다.

CFS 양생기간은 CFS 부착 후 양생온도 15℃ 이상을 유지한 상태에서 반복하중 가력시간을 포함하여 7일간으로 하였다. 본 실험은 시험체에 부착

된 CFS의 양생기간 때문에 장기간이 소요되었는데, 동절기에는 히터를 사용하여 실험실의 실내온도를 상승시켜 요구되는 온도를 유지하였다.

반복하중 가력 종료 후, 보 시험체를 1mm/min의 변위제어로 파괴시까지 가력하였으며 균열진전상황, 항복하중, 최대하중 및 각 하중에서의 보 시험체 중앙점의 처짐을 측정하였다.

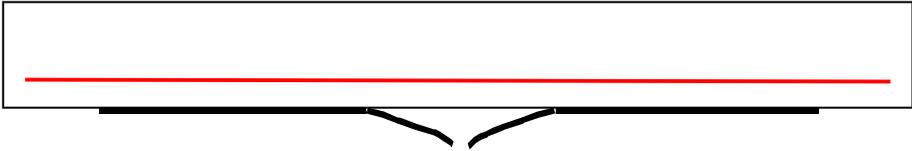


<그림 2-2> 반복하중 재하과정

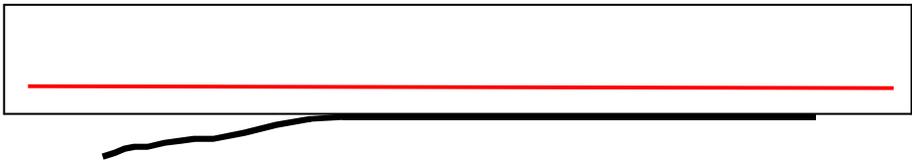
## 2.3 실험결과 및 파괴형태

CFS로 보강된 휨 부재의 파괴는 여러 가지 양상을 나타낼 수 있으며 일반적인 파괴형태로서는 보의 중앙부에서의 CFS의 인장파단(tension failure), 단부에서의 계면박리(peeling), CFS가 콘크리트를 물고 떨어지는 피복박리(concrete layer failure), 철근층 아래까지의 콘크리트 피복을 물고 떨어지는 피복분리(rip off), 콘크리트 압축파괴(concrete crushing) 및 이들

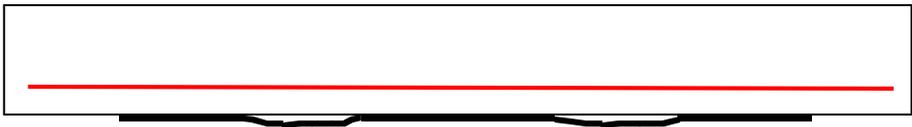
형태가 복합적으로 나타나는 형상으로 구분되는데 이들 파괴 형태를 <그림 2.3>에 나타내었다.



(a) 인장파단(tension failure)

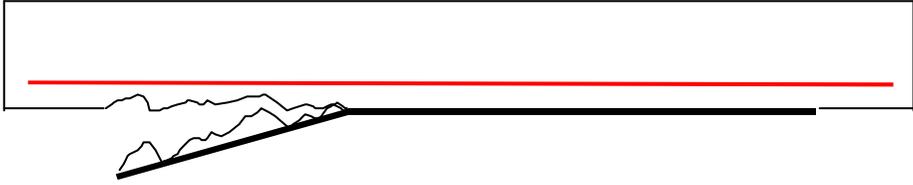


(b) 계면박리(peeling)

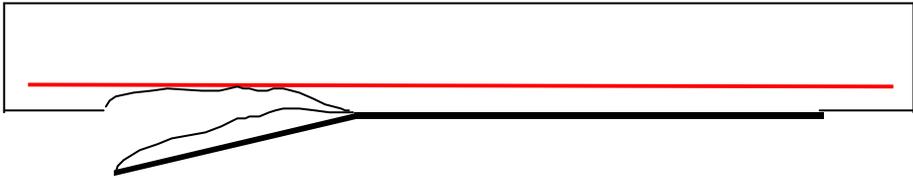


(c) 계면박리(peeling)

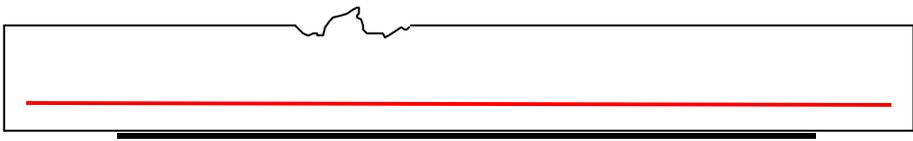
<그림 2.3> 보의 파괴 형태



(d) 피복박리(concrete layer failure)



(e) 피복분리(rip off)



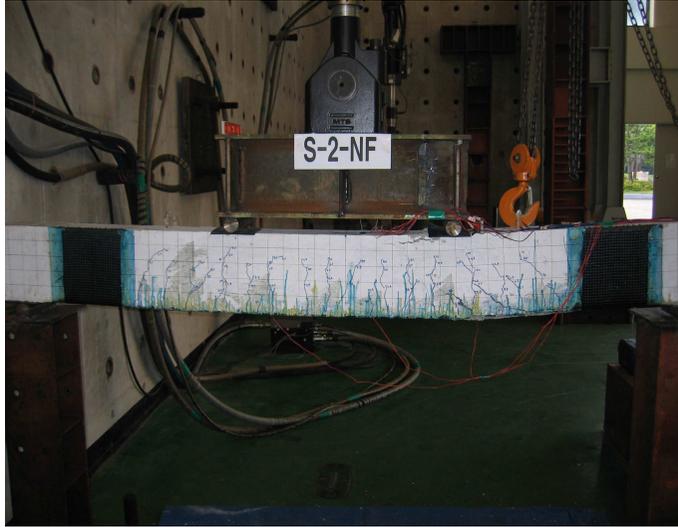
(f) 콘크리트 압축파괴(concrete crushing)

<그림 2.3> 보의 파괴형태 (계속)

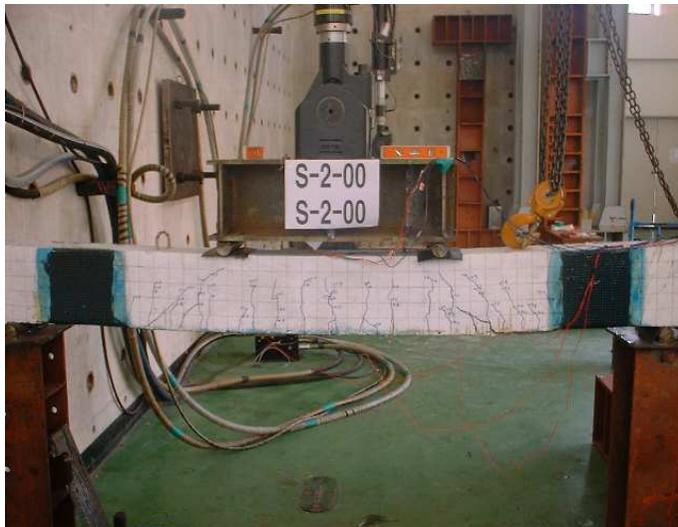
본 실험에서의 파괴형태로서 단부 쪽 박리는 일어나지 않고 대부분의 보에서 그림 2.3 (c)의 계면박리와 콘크리트 인장파괴가 복합적으로 나타났다. 이와 같이 모든 시험체가 단부 쪽 계면박리가 일어나지 않은 것은 CFS 단부가 U형 보강으로 인하여 구속된 것에 기인된다고 판단된다. 실험 도중 CFS의 섬유가 파열되는 소리가 몇 차례 나타났으나 급작스런 파괴 또는 단부박리에 의한 파괴현상은 발생하지 않았으며, 대부분이 탄소섬유의 계면박리 및 부분적인 파단과 가력점 하부에서부터 발생하기 시작한 균열 및 압축측 콘크리트의 압괴에 의한 파괴를 보여주었다. <사진 2-1>~<사진 2-7>은 본 실험에서의 최종적인 파괴형태를 나타낸다.



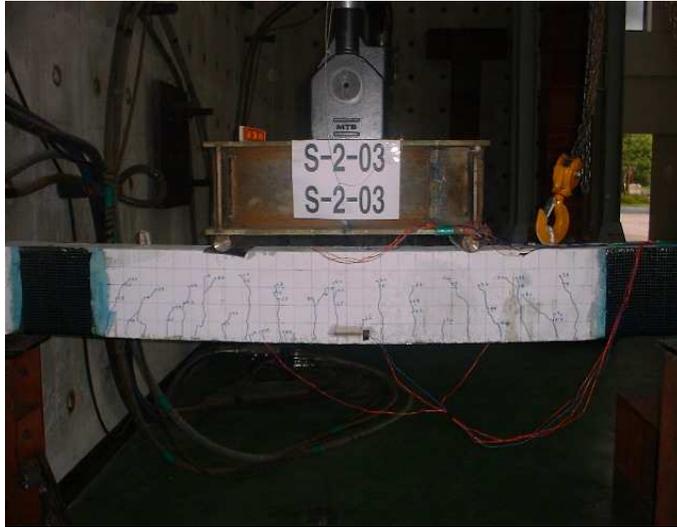
<사진 2-1> S-2-CON 시험체의 최종 파괴모습



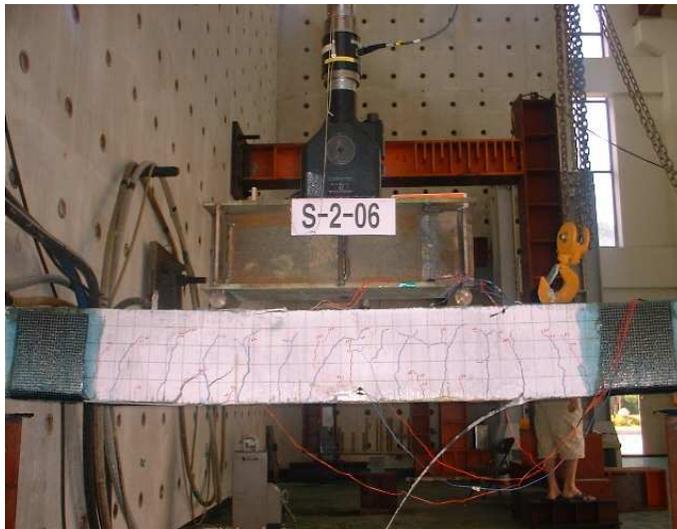
<사진 2-2> S-2-NF 시험체의 최종 파괴모습



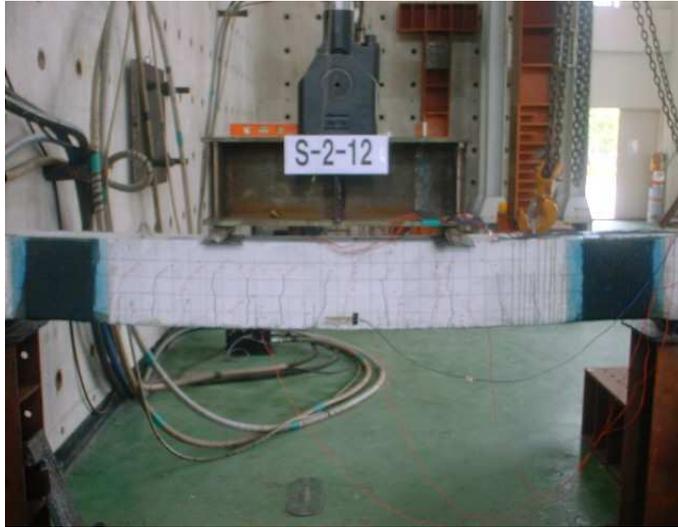
<사진 2-3> S-2-00 시험체의 최종 파괴모습



<사진 2-4> S-2-03 시험체의 최종 파괴모습



<사진 2-5> S-2-06 시험체의 최종 파괴모습



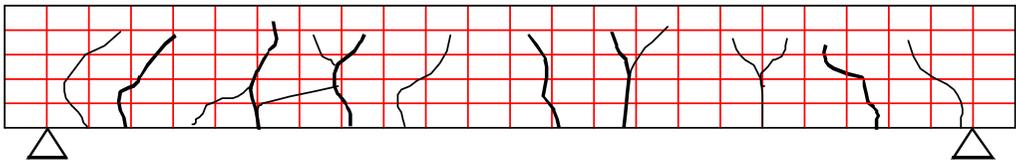
<사진 2-6> S-2-12 시험체의 최종 파괴모습



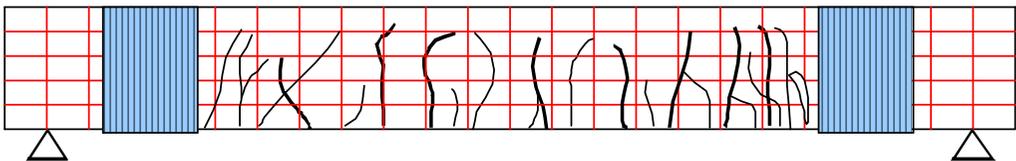
<사진 2-7> S-2-24 시험체의 최종 파괴모습

<그림 2-4>~<그림 2-10>는 최종 파괴후의 균열 형상을 나타내었는데 모든 시험체는 반복하중 가력시 이미 초기균열이 발생하여 있었다. 균열은 보 중앙부에서의 휨균열로 시작된 이후 점차 단부방향으로 발생 범위를 넓혀가면서 휨전단균열 등으로 확대되었다.

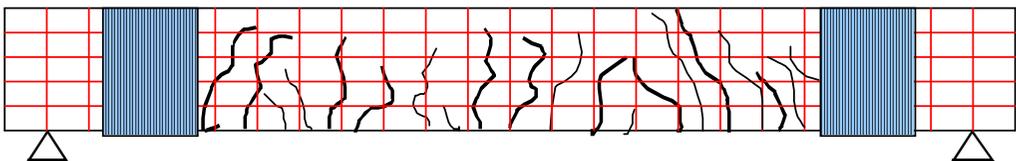
또한 기준보의 경우에는 처음 발생된 균열이 최종까지 그대로 진전되는 가운데 균열폭이 점차 커지면서 파괴까지 이르게 하였으나, CFS로 보강된 시험체의 경우는 기준보에 비하여 상대적으로 가는 폭의 균열이 보의 전체에 골고루 분포되었고 또한 보의 하부에 작은 균열이 많이 발생하였음을 알 수 있었다.



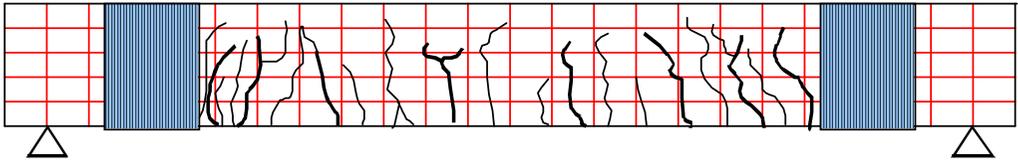
<그림 2-4> S-2-CON 시험체의 균열형상



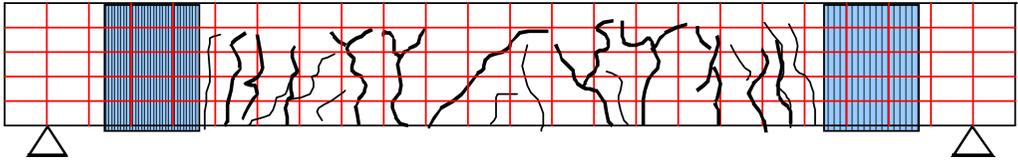
<그림 2-5> S-2-NF 시험체의 균열형상



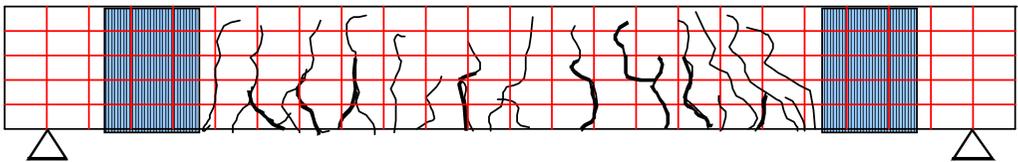
<그림 2-6> S-2-00 시험체의 균열형상



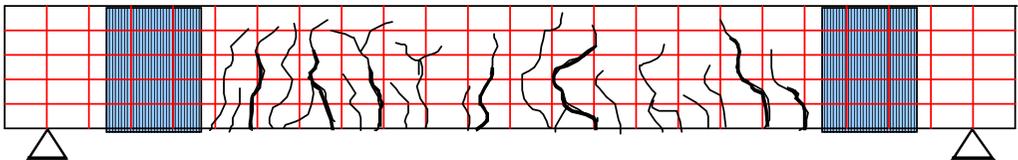
<그림 2-7> S-2-03 시험체의 균열형상



<그림 2-8> S-2-06 시험체의 균열형상



<그림 2-9> S-2-12 시험체의 균열형상



<그림 2-10> S-2-24 시험체의 균열형상

본 실험에서 얻어진 항복하중, 최대하중, 이들 하중에서의 처짐, 파괴형태를 <표 2-3>에 정리하여 나타내었다.

<표 2-3> 시험체의 항복하중, 최대하중 및 파괴형태

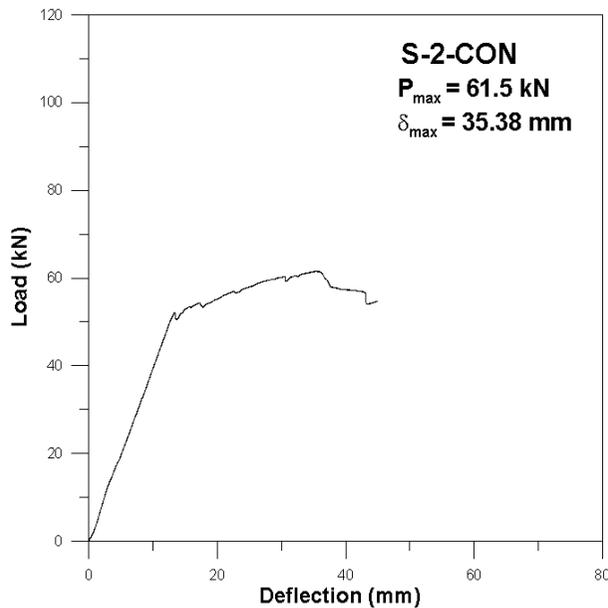
시험체명	항복하중		최대하중		파괴형태
	하중 (kN)	처짐 (mm)	하중 (kN)	처짐 (mm)	
S-2-CON	53.0	15.10	61.5	35.38	휨인장파괴
S-2-NF	79.5	15.51	105.2	29.72	계면박리 + 휨인장파괴
S-2-00	75.2	13.61	103.7	30.77	계면박리 + 휨인장파괴
S-2-03	77.1	12.81	101.9	24.32	계면박리 + 휨인장파괴
S-2-06	81.7	13.34	104.3	25.12	계면박리 + 휨인장파괴
S-2-12	88.1	14.84	101.3	23.05	계면박리 + 휨인장파괴
S-2-24	82.3	12.80	108.1	23.68	계면박리 + 휨인장파괴

표에서 알 수 있듯이 CFS 양생 도중 반복하중을 받은 시험체라 하더라도 기준시험체(S-2-CON)보다 항복하중과 최대하중이 증가하였다. 그리고 파괴형태는 기준시험체를 제외하고 모두 CFS의 계면박리와 콘크리트의 휨인장파괴를 나타내었다.

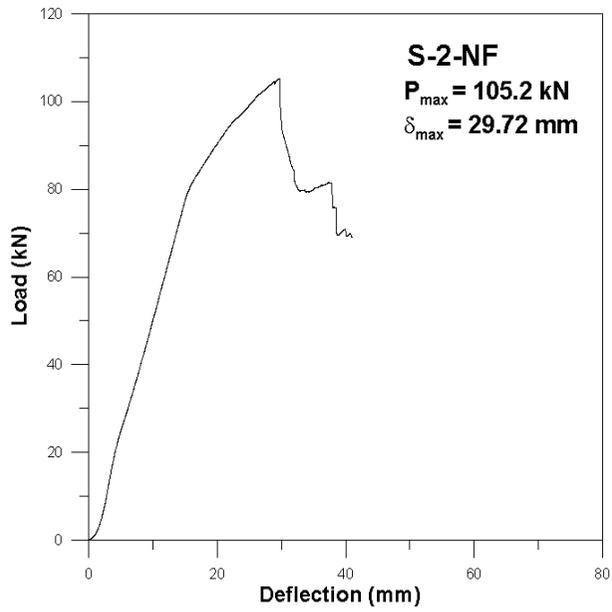
## 제 3 장 실험결과 분석 및 고찰

### 3.1 하중-처짐 관계

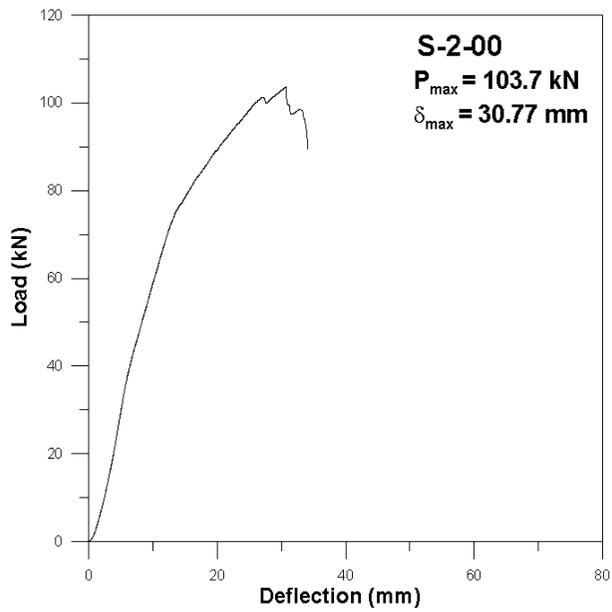
<그림 3-1>~<그림 3-7>은 기준시험체와 CFS보강시험체들의 하중-처짐 관계를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 기준시험체는 항복 이후에 강성이 크게 줄어드는 가운데 최종 파괴시까지 상당한 연성을 보였으나, 보강시험체들은 항복 이후에도 CFS의 높은 인장력으로 인하여 상당 부분의 강성을 그대로 유지한 채 하중의 증가를 계속하다가 CFS의 박리 및 파단에 의한 시험체의 파괴로 급격한 하중 감소가 발생하였음을 보여주었다.



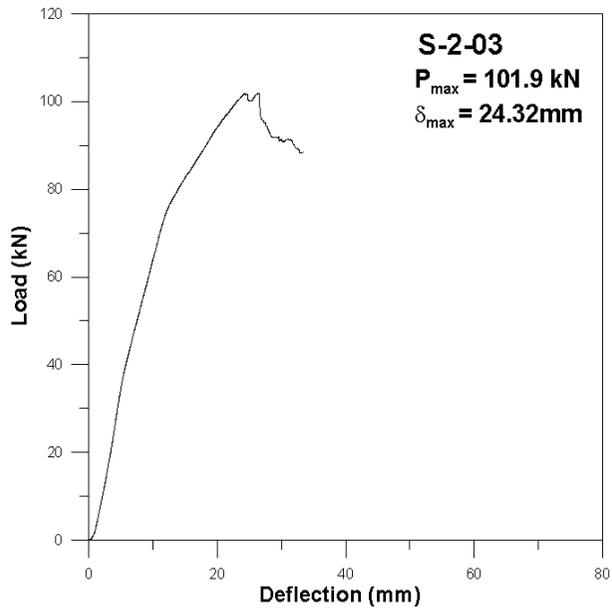
<그림 3-1> S-2-CON 시험체의 하중 - 처짐 곡선



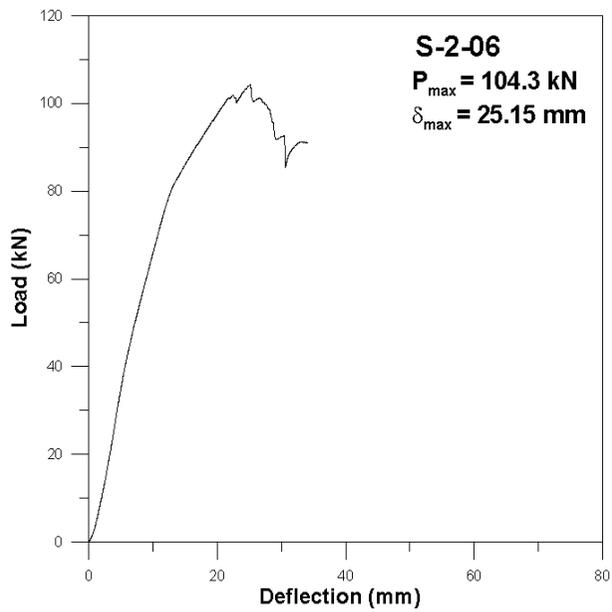
<그림 3-2> S-2-NF 시험체의 하중 - 처짐 곡선



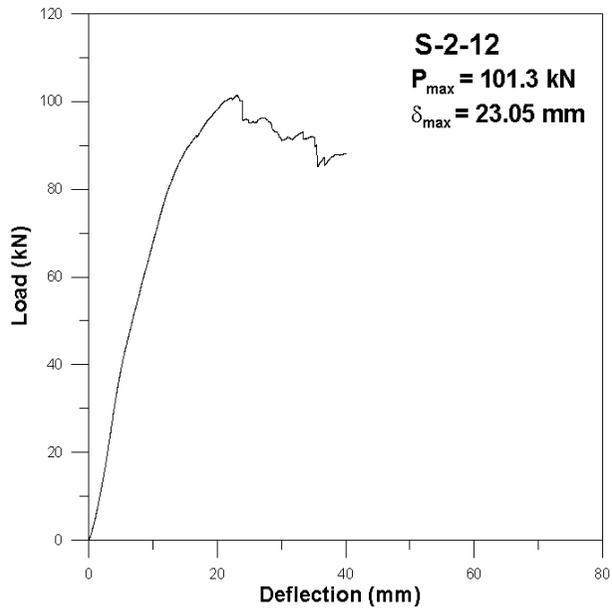
<그림 3-3> S-2-00 시험체의 하중 - 처짐 곡선



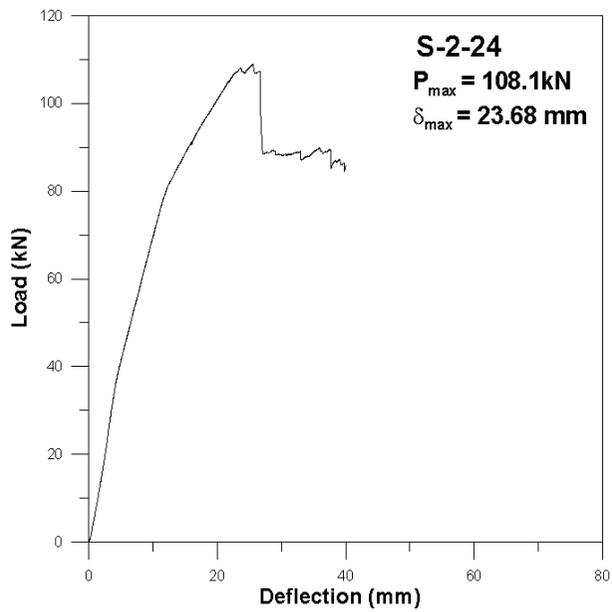
<그림 3-4> S-2-03 시험체의 하중 - 처짐 곡선



<그림 3-5> S-2-06 시험체의 하중 - 처짐 곡선

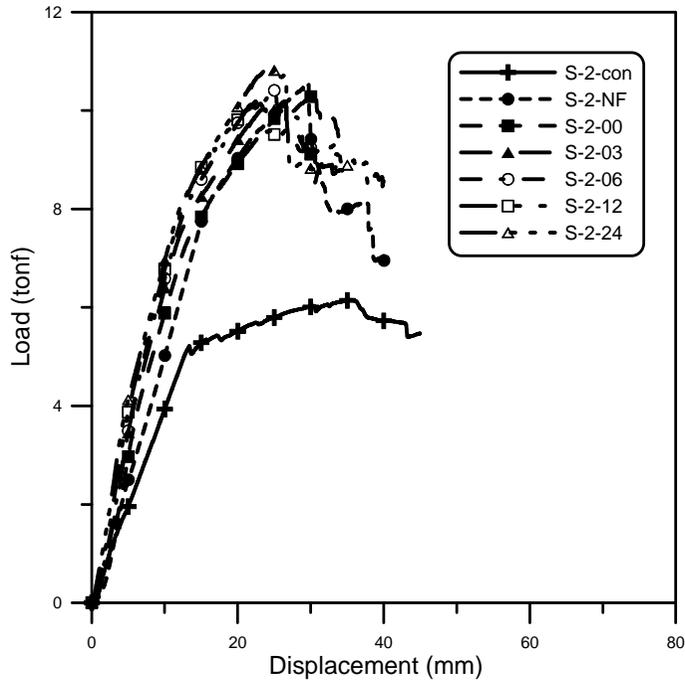


<그림 3-6> S-2-12 시험체의 하중 - 처짐 곡선



<그림 3-7> S-2-24 시험체의 하중 - 처짐 곡선

<그림 3-8>에서는 앞의 <그림 3.1>~<그림3.7>을 종합하여 나타내었다.

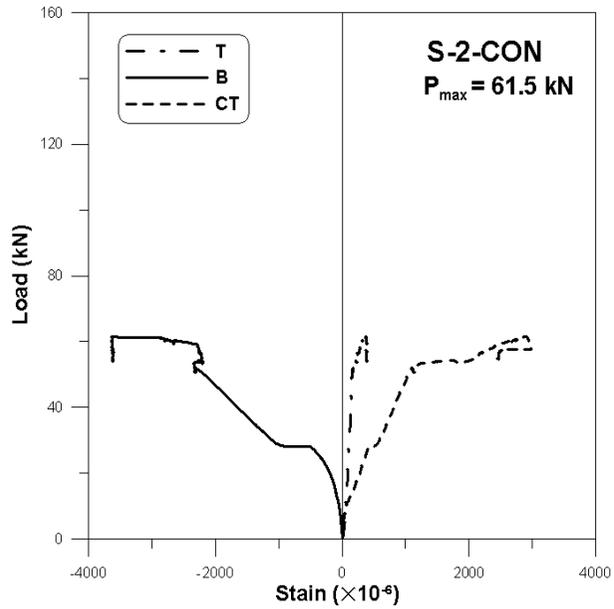


<그림 3-8> 보 시험체의 하중-처짐곡선

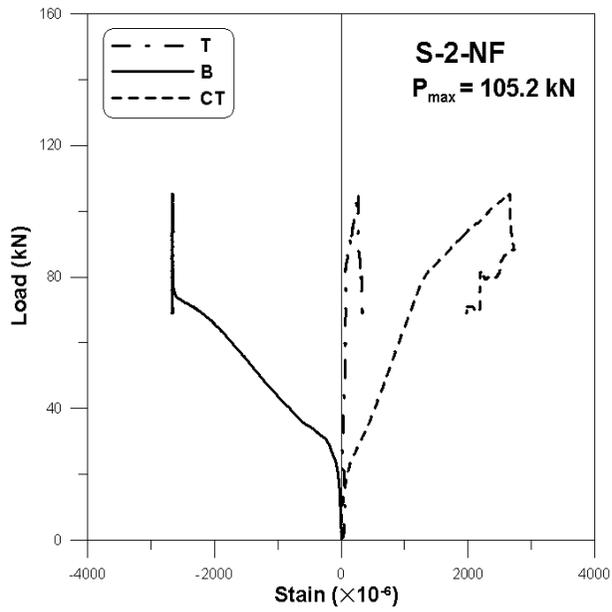
### 3.2 하중-철근-콘크리트의 변형도

<그림 3.9>~<그림3.14>에 작용하중에 대한 인장철근 및 압축철근의 변형율, 보 시험체 상부의 콘크리트 변형률의 관계를 나타내었다. 이 그림들에서 인장철근 및 압축철근의 변형율은 T 및 B로 그리고 보 시험체 상부의 콘크리트 변형률은 CT로 표시하였다. 인장철근의 항복점 변형율은 약 0.002 부근에 있는 것을 알 수 있으며, 철근의 항복을 일으키는 하중값은 시험체들의 항복하중과 대략 일치하여 시험체들의 항복이 인장철근의 항복

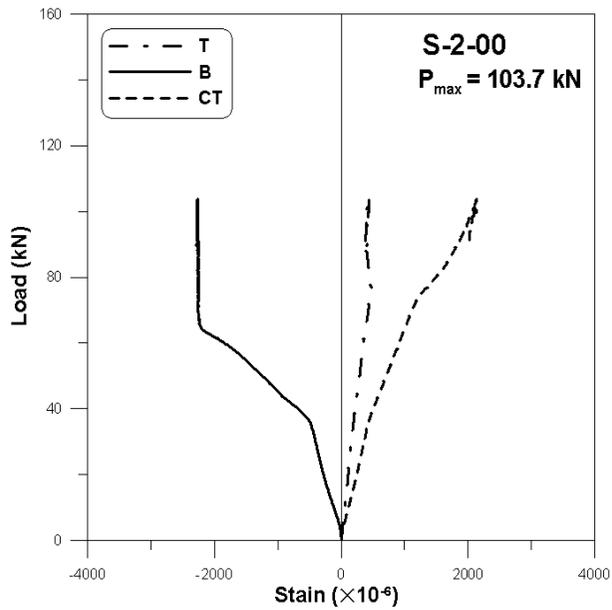
과 밀접한 관계에 있음을 알 수 있었다. 그리고 이 그림들에서 끝 부분에 변형률이 수직으로 변하는 것은 실험 종료에 따른 일시적 현상이라고 판단된다.



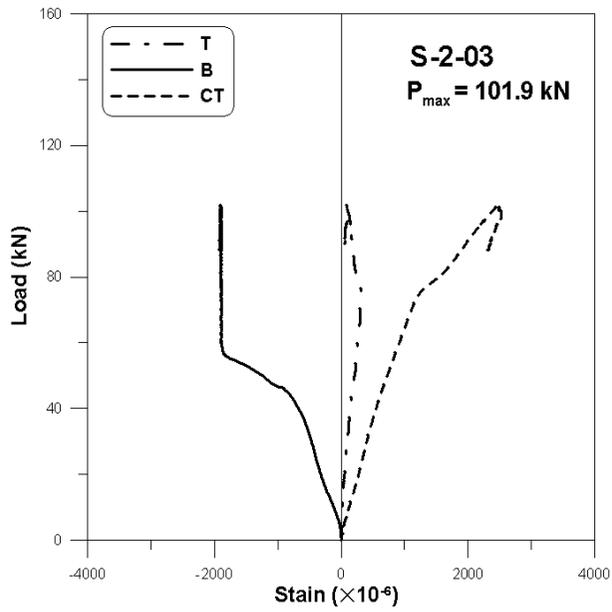
<그림 3-9> S-2-CON 시험체의 하중 - 철근 - 콘크리트 변형도



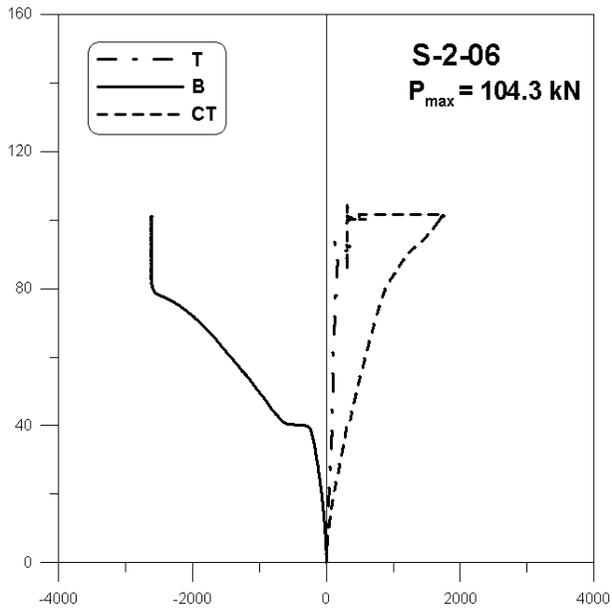
<그림 3-10> S-2-NF 시험체의 하중 - 철근 - 콘크리트 변형도



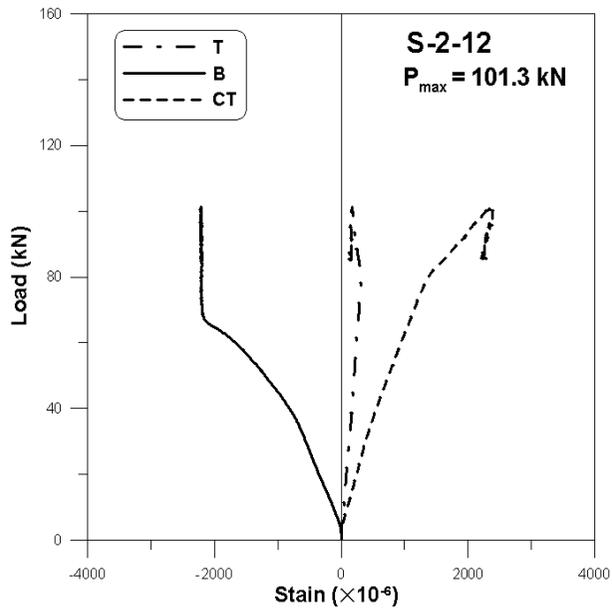
<그림 3-11> S-2-00 시험체의 하중 - 철근 - 콘크리트 변형도



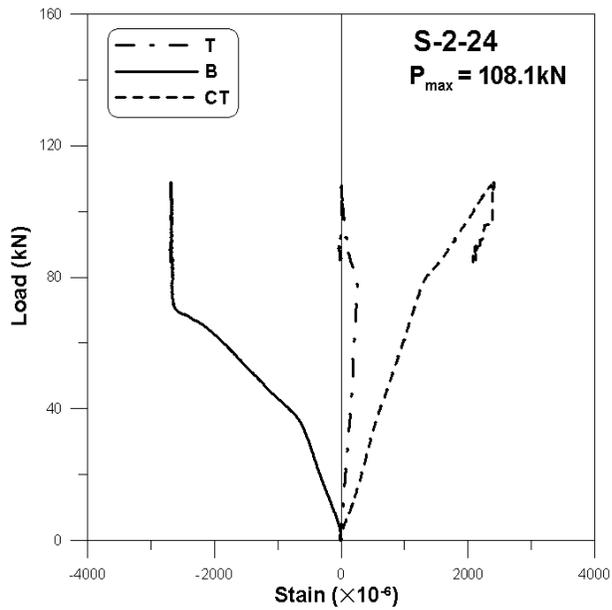
<그림 3-12> S-2-03 시험체의 하중 - 철근 - 콘크리트 변형도



<그림 3-13> S-2-06 시험체의 하중 - 철근-콘크리트 변형도



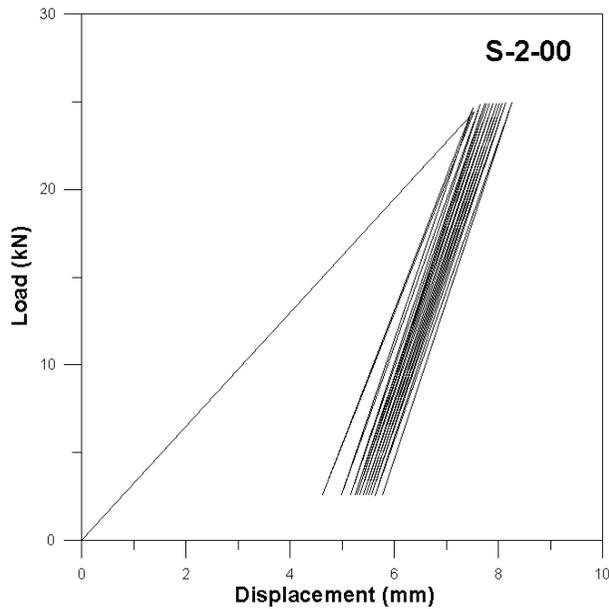
<그림 3-14> S-2-12 시험체의 하중 - 철근 - 콘크리트 변형도



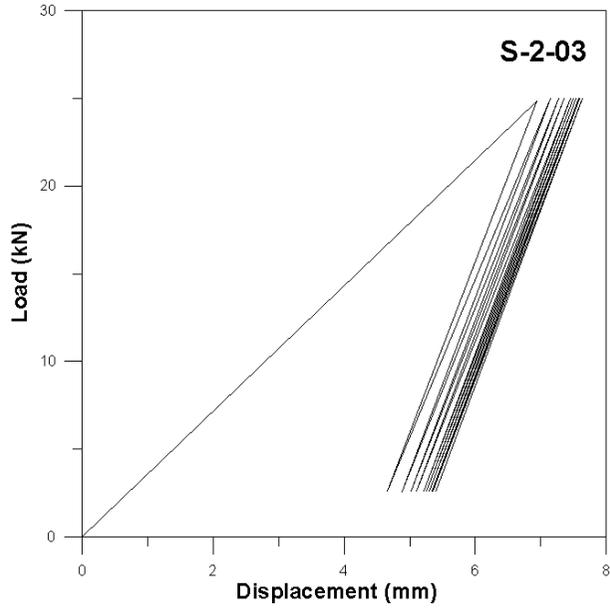
<그림 3-15> S-2-24 시험체의 하중 - 철근 - 콘크리트 변형도

### 3.3 반복횟수-처짐 관계

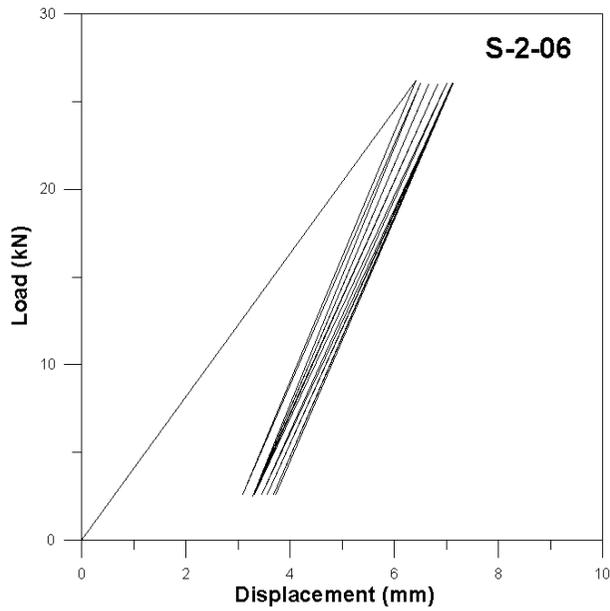
<그림 3-16> ~ <그림 3-20>은 시험체들의 반복횟수-처짐 관계를 나타낸 그래프이며, <표 3-1>는 반복하중 가력 후 최종처짐을 나타낸다. 그래프에서 개개의 시험체에서 전체 반복횟수가 거의 60,000번을 상회하는 횟수이므로 처음 시작 시와 반복하중이 매 5,000번 증가할 때 마다 나타난 값들만을 표시하였다. 최초 1회 하중 가력 시 균열하중을 초과하는 하중이 가력되었고 반복하중 최종 가력 시 약 4~5mm정도의 처짐이 발생하였다.



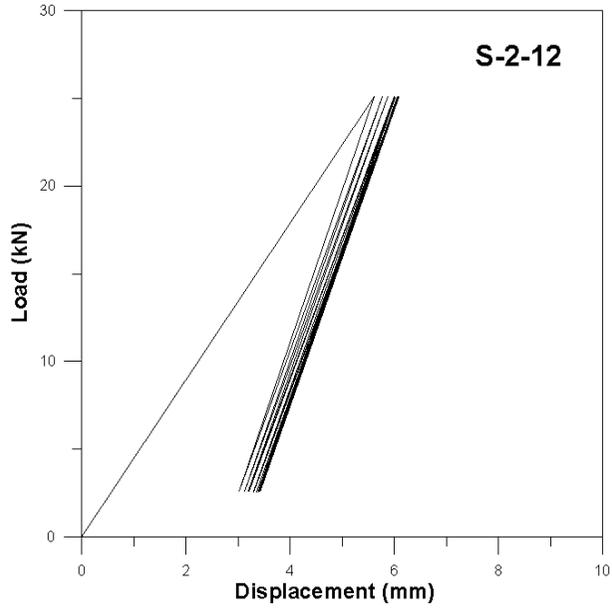
<그림 3-16> S-2-00 시험체의 반복하중 가력 중 변위곡선



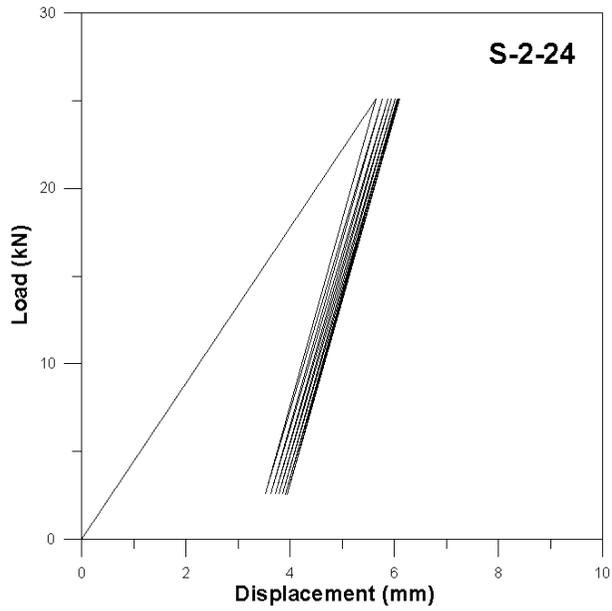
<그림 3-17> S-2-03 시험체의 반복하중 가력 중 변위곡선



<그림 3-18> S-2-06 시험체의 반복하중 가력 중 변위곡선



<그림 3-19> S-2-12 시험체의 반복하중 가력 중 변위곡선



<그림 3-20> S-2-24 시험체의 반복하중 가력 중 변위곡선

<표 3-1> 반복하중 가력 후 최종처짐

시험체명	반복하중 가력 후 최종처짐 (mm)
S-2-00	5.757
S-2-03	3.490
S-2-06	3.712
S-2-12	3.427
S-2-24	3.902

### 3.4 실험결과 분석

실험결과로 얻어진 각 시험체들의 항복하중, 최대하중 및 각 하중에서의 처짐, 보강효과, 그리고 항복하중과 최대하중에서의 처짐값의 비교로부터 계산된 연성지수를 <표 3-2>에 정리하여 나타내었다. 여기서 CFS 1겹 보강의 경우에 얻어진 결과<sup>5)</sup>도 비교를 위하여 함께 나타내었다.

반복하중 가력시작시간에 따른 항복하중 및 최대하중의 변화는 CFS 양생 중 작용하는 반복하중을 받은 시험체라도 기준시험체(S-1-CON 및 S-2-CON)에 비하여 항복하중의 증가(1겹 보강시 12~29%, 2겹 보강시 42%~66%) 및 최대하중의 증가(1겹 보강시 27~44%, 2겹 보강시 65%~76%)를 나타내었다.

그러나 양생 도중 반복하중의 작용이 없었던 시험체(S-1-NF 및 S-2-NF)를 기준으로 하여 비교하면 보강효과는 대부분 감소(항복하중은 1겹 보강시 최고 13% 감소, 2겹 보강시 최고 5% 감소, 최대하중은 1겹 보강시 최고 16% 감소, 2겹 보강시 최고 4% 감소)하는 것으로 나타났으며, 1겹 보강시에 보강효과가 2겹 보강에 비하여 상대적으로 더 감소하는 것을 알 수 있었다. 2겹 보강의 경우에는 반복하중 가력시작시간이 증가함에 따라 보강효과가 오히려 증가하는 경향도 일부 보여주었다.

<표 3-2> 반복하중 가력시작시간에 따른 시험결과

시험체명	항 복 하 중				최 대 하 중				연성 지수
	하중 (kN)	처짐 (mm)	보강효과		하중 (kN)	처짐 (mm)	보강효과		
			CON 기준	NF 기준			CON 기준	NF 기준	
S-1-CON	48.0	11.00	1.00	-	61.0	43.60	1.00	-	3.96
S-1-NF	61.7	12.24	1.29	1.00	91.6	39.26	1.50	1.00	3.21
S-1-00	55.3	9.72	1.15	0.90	77.2	29.27	1.27	0.84	3.01
S-1-03	55.5	9.28	1.16	0.90	80.7	29.88	1.32	0.88	3.22
S-1-06	54.7	10.49	1.14	0.89	79.5	31.67	1.30	0.87	3.02
S-1-12	53.1	10.81	1.12	0.87	78.6	32.37	1.29	0.86	2.99
S-1-24	60.5	9.36	1.26	0.98	83.8	32.05	1.37	0.92	3.42
S-1-36	62.1	15.84	1.29	1.01	88.1	39.30	1.44	0.96	2.48
S-2-CON	53.0	15.10	1.00	-	61.5	35.38	1.00	-	2.34
S-2-NF	79.5	15.51	1.50	1.00	105.2	29.72	1.71	1.00	1.92
S-2-00	75.2	13.61	1.42	0.95	103.7	30.77	1.69	0.99	2.26
S-2-03	77.1	12.81	1.46	0.97	101.9	24.32	1.66	0.97	1.90
S-2-06	81.7	13.34	1.54	1.03	104.3	25.15	1.70	0.99	1.89
S-2-12	88.1	14.84	1.66	1.11	101.3	23.05	1.65	0.96	1.55
S-2-24	82.3	12.80	1.55	1.04	108.1	23.68	1.76	1.03	1.85

즉, 2겹 보강시 S-2-NF 시험체의 항복하중을 기준으로 하는 경우 CFS 부착 후 즉시 와 3시간 후 반복하중을 받는 경우에 각각 5% 및 3%의 감소를 나타내었을 뿐 다른 경우에는 오히려 증가함을 보여주었다. 최대하중도 유사한 경향을 보여주고 있다. 이와 같이 2겹 보강시의 거동이 1겹 보강시와 다른 것은 2겹 보강시는 보강의 효과가 커서 1겹 보강시 작용시켰던 하중으로는 반복하중 가력시작시간에 영향을 받지 않았던 것으로 분석해볼 수 있었다.

<표 3-3> 반복하중 크기변화에 따른 추가시험체 구분

시험체명	CFS 보강겹수	반복하중 가력시작시간 (CFS 부착후)	반복하중 가력시간 (hr)	반복하중 크기 (S-2-CON 항복하중의)
S-2-00-75	2	즉 시	168	75%
S-2-12-75	2	12시간 후	156	75%
S-2-24-75	2	24시간 후	144	75%
S-2-00-100	2	즉 시	168	100%
S-2-12-100	2	12시간 후	156	100%
S-2-24-100	2	24시간 후	144	100%

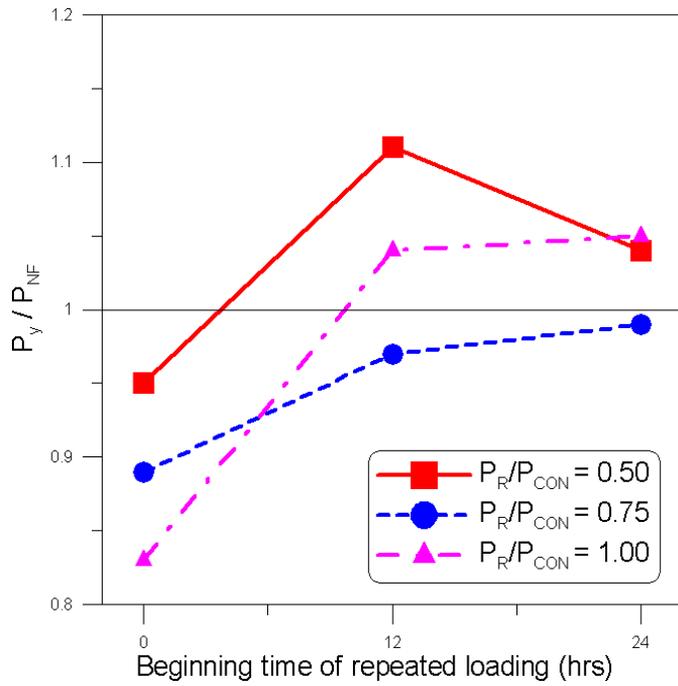
따라서 2겹 보강시 반복하중의 작용에 따른 하중 감소비가 1겹 보강에 비하여 상대적으로 작게 나온 점을 감안하여, 2겹 보강의 경우에 반복하중의 크기를 기준시험체(S-2-CON) 항복하중의 75% 및 100%로 증가시켜 추가로 실험을 행하였다. CFS 부착 후 즉시 반복하중을 가한 경우와 CFS 부착 후 12시간 및 24시간 지나서 반복하중을 가하기 시작한 경우에 대하여 행하였으며, 시험체 명에 대한 설명을 <표 3-3>에 그리고 시험결과를 <표 3-4>에 나타내었다.

시험결과, CFS 부착 후 즉시 반복하중을 받은 S-2-00-75 시험체의 항복하중은 S-2-NF 시험체의 항복하중을 기준으로 할 때 11%의 감소를 가져왔으나 S-2-12-75 및 S-2-24-75의 경우는 1~3%의 감소를 보여주었다. 최대하중 값은 모두 S-2-NF 시험체보다 증가하였다. S-2-00-100 시험체는 S-2-NF 시험체에 비하여 17%의 항복하중 감소를 나타내었으나, S-2-12-100 및 S-2-24-100 시험체의 경우는 항복하중이 오히려 증가함을 보여주었다. 최대하중도 S-2-NF 시험체의 값과 유사하거나 증가함을 보여주었다.

<표 3-4> 반복하중 크기 변화에 따른 시험결과

시험체명	항 복 하 중				최 대 하 중				연성 지수
	하중 (kN)	처짐 (mm)	보강효과		하중 (kN)	처짐 (mm)	보강효과		
			CON 기준	NF 기준			CON 기준	NF 기준	
S-2-CON	53.0	15.10	1.00	-	61.5	35.38	1.00	-	2.34
S-2-NF	79.5	15.51	1.50	1.00	105.2	29.72	1.71	1.00	1.92
S-2-00-75	71.0	9.48	1.34	0.89	112.3	30.75	1.83	1.07	3.24
S-2-12-75	77.1	11.41	1.45	0.97	109.0	25.95	1.77	1.04	2.27
S-2-24-75	79.0	11.38	1.49	0.99	109.1	23.44	1.77	1.04	2.06
S-2-00-100	66.0	11.17	1.25	0.83	102.6	29.35	1.67	0.98	2.63
S-2-12-100	83.0	9.76	1.57	1.04	115.0	24.11	1.87	1.09	2.47
S-2-24-100	83.1	11.51	1.57	1.05	110.3	25.23	1.79	1.05	2.19

2겹 보강의 경우에 S-2-NF 시험체의 항복하중에 대한 시험체들의 항복하중 크기 비를 반복하중의 크기 비와 반복하중 가력시작시간에 따라 나타내면 <그림 3-21>과 같다



<그림 3-21> 항복하중 크기 비

<그림 3-21>로부터 2겹 보강의 경우에 반복하중 가력시작시간이 12시간 이후이면 반복하중의 크기에 관계없이 S-2-NF 시험체의 항복하중과 유사하거나 그 이상의 값을 갖게 되는 것을 알 수 있다.

## 제 4 장 결 론

탄소섬유쉬트(CFS)로 보강되는 철근 콘크리트 구조물에서 CFS 양생 도중에 작용하는 반복하중이 보강성능에 미치는 영향을 조사하기 위한 본 연구에서, 일련의 보 시험체에 대하여 휨 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) CFS 양생 도중 반복하중을 받은 시험체라도 보강되지 않은 기준시험체에 비하여 항복하중 및 최대하중의 증가를 나타내었다.

2) CFS 양생 도중 반복하중의 작용이 없었던 시험체를 기준으로 반복하중을 받은 시험체의 항복하중 및 최대하중을 비교할 경우, CFS 1겹 보강의 경우에는 보강효과가 대부분 감소하는 것으로 나타났으나, 2겹 보강의 경우에는 1겹 보강에 비하여 상대적으로 적은 량의 감소를 보여주었다.

3) CFS 2겹 보강의 경우에 반복하중 가력시작시간이 CFS 부착 후 12시간 이후이면 작용하는 반복하중의 크기에 관계없이 반복하중 작용을 받지 않은 시험체의 항복하중과 유사하거나 그 이상의 값을 갖게 되는 것을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. Masoud,S., Soudki,K. and Topper,Y. "CFRP strengthened and corroded RC beams under monotonic and fatigue loads", Journal of Composites for Construction, Vol.5, No.4, 2001, pp.228-236.
2. Papakonstantinou,C.G., Petrou,M.F. and Harries,K.A. "Fatigue behavior of RC beams strengthened with GFRP sheets", Journal of Composites for Construction, Vol.5, No.4, 2001, pp.246-253.
3. Carolin,A., Hejll,A. and Täljsten,B. "Behavior of concrete beams strengthened with CFRP and loaded in fatigue during the strengthening process", Third International Conference on Composites in Infrastructure, Univ. of Arizona, SanFrancisco, California, Jun 10-12, 2002.
4. 건설교통부, "콘크리트 교량의 보수·보강방법의 표준화", pp.71, 1999.12.
5. 이동원, "CFS로 보강된 RC보의 양생중 반복하중이 보강효과에 미치는 영향에 대한 실험적 연구", 부경대학교 산업대학원 공학석사 학위논문, 2004.8.
6. 최창식 외, "탄소섬유로 보강된 R/C 보의 최대내력에 관한 연구", 한국 구조물진단학회 제5권 제2호, pp. 199~204, 2001.
7. 박상렬, "탄소 FRP 쉬트로 휨 보강된 R.C 보의 보강효과에 관한 연구", 대한토목학회 논문집 제21권 제6-A호, pp. 997~1005, 2001.
8. 한만엽 외, "단부 부착력 개선을 위한 보강콘크리트보의 피로특성에 관한 연구", 대한토목학회 논문집 제20권 제3-A호, pp. 407~416, 2001.
9. 홍건호 외, "RC 구조물에 적용된 부착식 휨보강공법의 보강성능 평가", 한국콘크리트학회 논문집 제15권 1호, pp. 78~86, 2003.
10. 한만엽 외, "탄소섬유 보강공법의 조기 탈락 방지 공법 개발 연구", 콘

- 크리트학회논문집 제12권 제1호, pp. 61~67, 2000.
11. 박현정 외, "탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보의 연성거동에 관한 실험적 고찰", 한국구조물진단학회 제5권 제3호, pp. 181~189, 2001.
  12. 조병완 외, "격자형 탄소섬유로 보강한 R/C보의 보강효과", 한국콘크리트학회 논문집 제15권 3호, pp. 377~385, 2003.
  13. 김성도 외, "R.C.보에 부착된 섬유시트의 파단변형률 평가에 관한 실험적 연구", 한국구조물진단학회 제7권 제3호, pp. 157~165, 2003.
  14. 박성수 외, "CFS로 보강된 RC보의 가력상태에 따른 휨파괴 거동", 한국구조물진단학회 제7권 제3호, pp. 223~230, 2003.
  15. 황진석, "탄소섬유시트 보강 보의 실험 및 해석적 연구", 한국구조물진단학회 제2권 제4호, pp. 177~185, 1998.
  16. 심낙훈 외, "탄소섬유그리드를 이용한 RC보의 보강효과에 관한 실험적 연구", 한국구조물진단학회 제6권 제4호, pp. 107~118, 2002.
  17. 박대호 외, "밑면 및 옆면 섬유시트로 보강된 철근콘크리트보의 휨 해석", 대한토목학회 논문집 제22권 제5-A호, pp. 1045~1057, 2002.
  18. 배주성 외, "접착수지층의 두께에 따른 CFS 보강 콘크리트보의 실험에 의한 분석적 연구", 대한토목학회 논문집 제20권 제5-A호, pp. 707~714, 2000.
  19. 유명찬 외, "탄소섬유시트와 콘크리트의 부착강도 실험연구", 한국콘크리트학회 논문집 제13권 2호, pp. 168~174, 2001.
  20. 박현정 외, "탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보의 시공불량시 휨 거동에 관한 연구", 한국구조물진단학회 제6권 제1호, pp. 95~102, 2002.
  21. 양동석 외, "강연선 및 탄소섬유시트로 보강된 철근 콘크리트 보의 휨 거동 특성", 한국콘크리트학회 논문집 제14권 2호, pp. 216~222, 2002.

## 감사의 글

처음 대학원 생활을 시작하여 어느덧 2년 반의 시간이 지나 이제 졸업을 하게 되었습니다.

앞만 보고 달려온 그동안의 시간 이제 이 논문을 통해 그동안 저에게 많은 가르침과 힘을 주신 모든 분들께 감사의 마음을 표하고자합니다.

처음 대학원에 진학하여 스스로의 부족함에 과연 할 수 있을까 하는 두려움마저 느낄 때 언제나 아낌없는 칭찬과 격려로 대해 주시고 부족함을 항상 메워 주신 장희석 교수님께 고개 숙여 감사를 드리며 소중한 가르침 가슴깊이 새겨 언제나, 어디서나 열심히 노력하는 제자가 되겠습니다. 이 논문이 완성될 때까지 바쁘신 와중에도 세밀하게 저의 논문을 심사해주신 이동욱 교수님과 이환우 교수님께도 깊이 감사를 드리며, 아울러 그동안 많은 가르침을 주신 토목공학과 교수님들께 이 글을 통해 다시 한번 감사를 드립니다.

학기 중이나 방학 중 세미나를 통해 항상 많은 가르침을 주셨던 김희성 박사님 처음 실험 계획을 세워 보 제작을 위한 철근조립과 거푸집 제작 시부터 파괴 실험에 이르기까지 힘든 작업을 언제나 함께 해준 콘크리트 파과역학 연구실의 박현영, 윤형수군에게 감사를 드리며, 직장인으로서 학교에 다니다 보니 업무에 소홀함이 있을 수 있으나 언제나 따뜻한 격려와 배려로 지원을 주신 최대경 과장님, 김지덕 계장님 그리고 건설과 동료직원 여러분들에게 다시 한번 감사의 인사를 전하고자 합니다.

마지막으로 언제나 뒷바라지에 힘든 모습 보이지 않고 같이 해준 아내 그리고 가족모두와 이 논문을 함께 하고자합니다.