

공학석사 학위 청구논문

단면확대공법을 이용하여 휨 보강된
RC보의 보강 효과에 대한 실험적 연구

2006년 2월

부경대학교 산업대학원

토 목 공 학 과

이 진 희

공학석사 학위청구논문

단면확대공법을 이용하여 휨 보강된
RC보의 보강 효과에 대한 실험적 연구

지도교수 장 희 석

이 논문을 공학석사 학위청구논문으로 제출함

2006년 2월

부경대학교 산업대학원

토 목 공 학 과

이 진 희

이진희의 공학석사 학위논문을 인준함

2005년 11 월 19 일

주 심 공학석사 김 명 식 ②인

위 원 공학박사 국 승 규 ②인

위 원 공학박사 장 희 석 ②인

목 차

표 차례	ii
그림 차례	iii
사진 차례	v
Abstract	vi
제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 연구 범위	3
제 2장 문헌고찰	4
제 3장 실험	7
3.1 시험체 제작	7
3.2 실험방법 및 측정방법	15
제 4장 실험결과 및 분석	16
4.1 파괴 형태	16
4.2 하중 처짐 관계	23
4.3 하중 변형률 관계	30
4.4 실험 결과에 따른 보강효과 분석	37
4.5 단면확대공법의 이론해석	41
제 5장 결론	45
참 고 문 헌	46

표 차 례

표 3.1	사용재료 물성치	8
표 3.2	시험체 종류	10
표 4.1	각 시험체의 최대하중과 처짐	38
표 4.2	실험치와 이론치 비교	43

그 립 차 례

그림 3.1	시험체 형상 및 치수	7
그림 3.2	시험체명에 대한 설명	9
그림 4.1	기준시험체의 하중-처짐 관계	23
그림 4.2	시험체 0.5L-2-NF의 하중-처짐 관계	24
그림 4.3	시험체 0.7L-2-NF의 하중-처짐 관계	24
그림 4.4	시험체 0.9L-2-NF의 하중-처짐 관계	25
그림 4.5	시험체 0.5L-4-NF의 하중-처짐 관계	25
그림 4.6	시험체 0.7L-4-NF의 하중-처짐 관계	26
그림 4.7	시험체 0.9L-4-NF의 하중-처짐 관계	26
그림 4.8	시험체 0.5L-2-F의 하중-처짐 관계	27
그림 4.9	시험체 0.7L-2-F의 하중-처짐 관계	27
그림 4.10	시험체 0.9L-2-F의 하중-처짐 관계	28
그림 4.11	시험체 0.5L-4-F의 하중-처짐 관계	28
그림 4.12	시험체 0.7L-4-F의 하중-처짐 관계	29
그림 4.13	시험체 0.9L-4-F의 하중-처짐 관계	29
그림 4.14	기준시험체의 하중-변형률 관계	31
그림 4.15	시험체 0.5L-2-NF의 하중-변형률 관계	31
그림 4.16	시험체 0.7L-2-NF의 하중-변형률 관계	32
그림 4.17	시험체 0.9L-2-NF의 하중-변형률 관계	32
그림 4.18	시험체 0.5L-4-NF의 하중-변형률 관계	33
그림 4.19	시험체 0.7L-4-NF의 하중-변형률 관계	33
그림 4.20	시험체 0.9L-4-NF의 하중-변형률 관계	34
그림 4.21	시험체 0.5L-2-F의 하중-변형률 관계	34
그림 4.22	시험체 0.7L-2-F의 하중-변형률 관계	35

그림 4.23	시험체 0.9L-2-F의 하중-변형률 관계	35
그림 4.24	시험체 0.5L-4-F의 하중-변형률 관계	36
그림 4.25	시험체 0.7L-4-F의 하중-변형률 관계	36
그림 4.26	시험체 0.9L-4-F의 하중-변형률 관계	37
그림 4.27	FRP bar 2본 보강한 보의 최대하중	39
그림 4.28	FRP bar 4본 보강한 보의 최대하중	39

사 진 차 례

사진 1.1	철근콘크리트 구조물의 노후화 현상	2
사진 2.1	시험체 제작 과정	11
사진 3.1	데이터 수집장치 및 하중가력 장치	15
사진 4.1	기준시험체의 최종 파괴 모습	16
사진 4.2	시험체 0.5L-2-NF의 최종 파괴모습	17
사진 4.3	시험체 0.7L-2-NF의 최종 파괴모습	17
사진 4.4	시험체 0.9L-2-NF의 최종 파괴모습	18
사진 4.5	시험체 0.5L-4-NF의 최종 파괴모습	18
사진 4.6	시험체 0.7L-4-NF의 최종 파괴모습	19
사진 4.7	시험체 0.9L-4-NF의 최종 파괴모습	19
사진 4.8	시험체 0.5L-2-F의 최종 파괴모습	20
사진 4.9	시험체 0.7L-2-F의 최종 파괴모습	20
사진 4.10	시험체 0.9L-2-F의 최종 파괴모습	21
사진 4.11	시험체 0.5L-4-F의 최종 파괴모습	21
사진 4.12	시험체 0.7L-4-F의 최종 파괴모습	22
사진 4.13	시험체 0.9L-4-F의 최종 파괴모습	22

An Experimental Study on the Strengthening Effect of RC Beam Strengthened with Section Increment Method

Jin-Hee Lee

**Department of Civil Engineering, Graduate School
Pukyong National University**

Abstract

Steel-reinforced concrete structure, one of the most widely used construction structures will be needed to check, to repair, and to strengthen, for it would have been impact on by the structural and environmental factors. The methods to repair and to strengthen are widely used for the deteriorated steel-concrete structures such as CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer), GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer), and AFRP(Aramid Fiber Reinforced Polymer).

However, the methods to strengthen steel-concrete structures with FRP sheet or plate have some problems, since they have difficulty in checking the damages after the strengthened process, some problems of adhesion concrete to sheet or plate, the decreased load carrying capacity. Therefore it is necessary to research the methods to strengthen among those conditions. Among the strengthening methods there are NSM, which fulfill

some FRP bar into the tension part, and SIM(Section Increment Method), which enlarge mortar surface after chiefting concrete surface, adding FRP bar to the structure.

In applying the method of sectional magnification with FRP bar in order to repair and to strengthen the steel-concrete structure, the research has been investigated through steel-concrete experiments to obtain the strengthened effect by way of the variations of the strengthened length and the strengthened quantity. In the research the strengthening effect was estimated after constructing assistant test objects of steel-concrete.

For this the whim experiment was practiced by the method of sectioned magnification by pressure scattered CFRP bar to surface with Garnet. As a result of the experiment, the larger CFRP bar increases, the adhesive length and the maximum load degree increases. But the comparison between two beam strengthening and four beam strengthening doesn't make difference.

제 1 장 서론

1.1 연구 배경 및 목적

오늘날 가장 널리 사용되고 있는 건설 재료 중의 하나인 철근콘크리트를 사용한 구조물은 구조적 및 환경적 요인에 의해 노후화가 진행됨에 따라 (그림 1.1) 구조물의 내하력과 사용성이 저하되므로 정기적인 점검과 보수 및 보강이 요구된다. 이러한 보수 및 보강공법 중 탄소섬유(Carbon Fiber Reinforced Polymer : CFRP), 유리섬유(Glass Fiber Reinforced Polymer : GFRP), 아라미드섬유(Aramid Fiber Reinforced Polymer : AFRP) 등의 복합소재를 얇은 sheet 또는 plate 형태로 가공하여 노후화된 철근콘크리트 구조물을 보수 및 보강하는 방법이 근래에 많이 이용되어 왔다¹⁻¹⁰⁾.

그러나 FRP sheet 또는 plate를 사용하여 철근 콘크리트 구조물을 보강하는 방법은 콘크리트와 sheet 또는 plate와의 부착성, 보강 후 진행되는 손상에 대해서 점검의 어려움, 내화성능의 저하, 자외선에 의한 열화 등의 문제점이 지적되고 있다. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위한 보강 방법의 연구가 필요한 실정이며 이에 따른 연구가 진행되고 있다.

연구되는 보강 방법 중에 필요량의 FRP bar를 콘크리트 구조물의 인장 부분에 매립하여 구조물을 보강하는 표면매립공법(Near Surface Mounted Strengthening : NSM)과 콘크리트 표면을 치핑한 후 모르타르로 표면을 증설한 후 FRP bar를 그 위에 설치하여 보강하는 단면확대공법(Section Increment Method : SIM)이 있다¹¹⁻¹⁵⁾.

표면매립공법은 주로 휨을 받는 부재의 휨 내력을 보강하기 위하여 철근 콘크리트 구조물의 노후화된 부분에서 일정깊이의 홈을 파고 치핑한 후 인장강도가 매우 큰 FRP bar를 삽입하고 에폭시로 충전하여 철근콘크리트 구조물의 휨 성능을 개선하는 방법이다. 단면확대공법은 노후화된 부분의 콘크리트 표면을 전체적으로 치핑하고 고강도 폴리머모르타르를 이용하여 1

차 보수 후 FRP bar로 보강하고 그 위에 고강도 폴리머모르터로 2차 보수를 하는 방법이다.

위의 두 가지 공법은 FRP bar의 접촉면을 현저히 증가시키므로 기존의 부착공법 사용시 문제가 되는 계면파괴를 개선할 수 있는 장점을 가지고 있다. 위의 공법 중 표면매립공법은 노후화된 철근 콘크리트 구조물에 적용할 때 철근의 노출 및 피복두께가 부족하여 일정한 폭과 깊이로 치핑하는 것이 어렵고 또한 FRP bar 보강 후 에폭시 주입에 따른 현장시공이 다소 힘든 것으로 보고 되고 있다.

FRP 복합소재는 철근 콘크리트 구조물의 보수 및 보강시 유효하게 사용되지만 철근에 비하여 가격 면에서 고가이므로 경제적인 면을 고려하는 것이 필요하다. 그동안 FRP sheet 혹은 plate를 부착시켜 보수 및 보강하는 경우에는 보강길이 및 보강량의 변화에 따른 보강효과에 대한 연구가 많이 행해져 왔으나, FRP bar를 매립하는 경우에는 아직 연구가 미진한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 위에서 설명한 두 공법 중 단면확대공법 적용시 FRP bar의 보강길이와 보강량을 변화시킨 일련의 철근 콘크리트 보 시험체 실험을 통하여 보강효과를 조사하여 보았다.



그림 1.1 철근 콘크리트 구조물의 노후화 현상

1.2 연구 범위

본 연구에서는 철근 콘크리트 구조물의 보수 및 보강을 위하여 FRP bar를 사용한 단면확대공법 적용시, FRP bar의 보강길이와 보강량의 변화에 따른 보강효과를 일련의 철근 콘크리트 보 실험을 통하여 조사하고자 한다. 따라서 본 연구를 위하여 철근 콘크리트 보 시험체를 제작한 후, 표면에 가넷(Garnet)이 압력 살포된 CFRP bar를 사용하여 단면확대공법으로 실험변수에 따라 보강하고 휨 실험을 통하여 보강효과를 조사하였다. 가넷은 300~400 μm 크기의 매우 작은 규산염광물체의 골재로서 골재의 입자가 강모래 또는 규사와는 달리 많은 각을 가지고 있다. 높은 경도(7.5)와 압축강도(180MPa)를 가지고 있으므로 이것을 섬유복합재 봉에 압력살포 시켰을 경우 콘크리트 속에서 높은 부착성능을 갖는 표면조직을 형성시킬 수 있다.

실험에 사용된 가넷으로 표면 처리한 CFRP bar는 국내의 (주)R건설에서 생산한 것으로서 단면확대공법에 사용되는 고강도 폴리머모르터와의 접착을 최대한 높일 수 있도록 제작된 CFRP bar이다.

본 연구에서는 실험변수로서 CFRP bar의 보강길이와 보강량을 택하였으며, 또한 사전가력 여부의 영향이 보강효과에 미치는 영향을 조사하기 위하여 보강 전에 미리 하중을 가하여 균열을 발생시킨 보 시험체에 대하여도 조사하였다.

제 2 장 문헌 고찰

철근콘크리트 구조물의 노후화에 따라 여러 종류의 보수 및 보강공법이 개발되어 있으며 실제로 현장에서 적용되고 있다. 대표적인 공법으로 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유를 sheet 또는 plate 형태로 하여 구조적으로 취약한 부분에 부착시켜 보강하는 공법이 있다. 그러나 이 공법은 콘크리트 표면과 sheet 또는 plate 사이의 부착성이 문제가 되어 구조적으로 취약점이 생기고 또한 보강 후 콘크리트의 열화진행 상태를 점검할 수 없는 문제점 등이 지적되고 있다.

따라서 이러한 문제점들을 개선할 수 있는 방법으로서 표면매립공법(NSM)과 단면확대공법(SIM)이 대표적인 공법으로 제시되고 있다.

2.1 정상모 등의 연구

정상모 등¹²⁾은 FRP bar를 이용하여 표면매립공법 및 단면확대공법에 대하여 실험적으로 성능평가를 하였다. 실험에 사용된 시험체는 길이 8m, 폭 2m, 두께 60cm의 슬래브에 FRP bar로 보강하였으며 순지간은 7m로 하였다. 실험체는 총 8본을 제작하여 이를 보강형식, 실험종류 등으로 분류하여 실험을 실시하였다.

휨내력을 기준으로 한 안전도에 대한 성능평가 결과, 설계식에 의한 휨내력을 1.1배 이상 상회하여 충분히 안전한 것으로 평가되었다. 또한 피로시험 결과에 따른 사용성에 대한 성능평가에서 200만회의 반복 하중 재하 후에도 충분히 지지능력을 보유하고 있는 것으로 평가되었다. 특히 반복하중의 횟수가 증가하여도 표면의 계면파괴가 발생하지 않았다. 연성도(Ductility)에 대한 성능평가에서는 모든 실험체에서 연성도가 2.5 이상으로 충분한 것으로 평가되었다.

실험 결과, FRP bar를 이용한 표면매립공법 또는 단면확대공법의 보강효과는 하중 내하력, 피로도, 연성도를 기준으로 평가할 때 효과적인 보강공법으로 확인되었다

2.2 정우태 등의 연구

정우태 등¹³⁾은 표면매립공법으로 휨 보강된 RC보의 부착파괴방지에 대한 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 RC보는 길이 3.4m, 폭 20cm, 두께 30cm의 슬래브에 FRP bar로 보강하였으며 순지간은 3m로 하였다. 인발성형으로 제작된 탄소판을 부착공법 및 표면매립공법에 사용하였다. 부착공법에 의한 보강은 표면처리 후 프라이머 도포 및 보강재 부착의 공정으로 실시하였으며, 보강된 보는 에폭시의 양생을 위하여 상온에서 7일 이상 양생을 실시하였다. 표면매립공법은 그라인더를 이용하여 보 하단에 흠을 시공하고 접착제를 도포한 후 보강재를 매립하는 공정으로 보강하였으며, 보강된 보는 3일 이상의 양생을 실시하여 접착제로 사용된 에폭시가 설계강도를 발현할 수 있도록 하였다.

재하실험 결과, 표면매립공법은 부착공법보다 보강재의 활용도 면에서 우수한 것으로 나타났으며, FRP bar를 효율적으로 활용하여 보강성능은 향상되나 보강재와 에폭시가 탈락하는 부착파괴 양상을 나타내므로, 부착공법의 문제점을 가지고 있는 것으로 나타났다. 또한 기계적 맞물림 변수로 실험한 결과에 의하면 부착파괴 방지에 탁월한 것으로 나타났다.

2.3 Nanni 등의 연구

Nanni 등¹⁴⁾은 표면매립공법에 사용된 FRP bar의 특성에 대하여 연구하였다. CFRP bar를 표면매립공법에 적용하여 인장 및 부착에 대한 실험을 실시한 결과 에폭시 표면이 갈라지고 흠 주변의 콘크리트의 균열이 발생하

여 부착 파괴되는 형태가 발생하였다. 평균부착응력은 부착길이에 거의 동일한 결과를 보였다.

2.4 Hassan 등의 연구

Hassan¹⁵⁾ 등은 CFRP strip을 사용하여 표면매립공법으로 보강한 콘크리트 구조물의 부착에 대하여 연구를 하였다. 표면에 매립된 CFRP strip과 콘크리트와의 부착특성과 하중전달 메커니즘을 조사하기 위해 지간 2,500mm, 깊이 300mm인 T-beam에 대하여 실험을 실시하였다. 총 9개 시편 중 1개의 시편은 기준 시험체로서 사용하였으면 8개의 시편은 보강길이를 150, 250, 500, 750, 850, 950, 1,050, 1,200mm로 달리하여 보 하면에 매립하여 보강하였다. 하중은 철근이 항복하기 전까지는 1.0mm/min의 속도로 정적재하를 하였으면 항복 후에는 3.0mm/min의 속도로 파괴시까지 재하하였다.

실험결과, 표면매립공법에 CFRP strip의 사용은 콘크리트 구조물의 보수 및 보강에 대하여 아주 적합하며 효과적이라고 하였다. 표면매립공법에 CFRP strip을 사용하였을 때 콘크리트 보의 강성과 강도가 모두 증가하였으며, 최대하중의 경우 53%가 증가하는 것으로 나타났다.

제 3 장 실험

3.1 시험체 제작

본 실험에서는 제원이 $150 \times 250 \times 2400\text{mm}$ (지간 2200mm)인 철근 콘크리트 보를 제작하여 실험하였다. 본 연구는 휨 보강 효과를 조사하기 위한 것이므로 전단력에 의한 콘크리트의 조기파괴를 방지하기 위하여 D10 스트립을 전단지간에는 100mm 간격으로, 중앙 부분에는 200mm 간격으로 배근하였으며, 실험에 사용된 보 시험체의 형상 및 치수는 그림 3.1에 나타내었다.

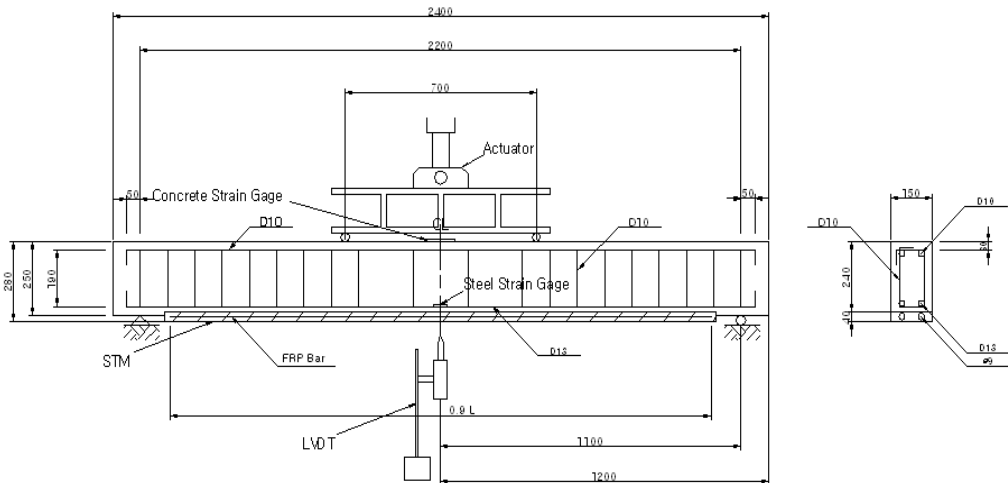


그림 3.1 시험체 형상 및 치수

단면확대공법에 사용된 FRP bar는 국내의 (주)R건설에서 개발한 bar 표면에 가넷을 살포한 CFRP bar이다.

콘크리트 보의 제작에 사용된 콘크리트의 설계기준강도는 24MPa 이고, 실험 당시 측정된 공시체의 압축강도는 26.2MPa 이었다. 실험에 사용된 사

용재료의 물성치는 표 3.1에 정리하여 나타내었다.

표 3.1 사용재료 물성치

사용 재료	물리적 특성	
콘크리트	압축강도 (MPa)	26.2
	탄성계수 (MPa)	2.43×10^4
철근	항복강도 (MPa)	350
	탄성계수 (MPa)	2.0×10^5
CFRP bar	인장강도 (MPa)	2050
	탄성계수(MPa)	12,941.8
	파단변형률 (%)	11.5
	직경 (mm)	6
가넷 폴리머 모르터 (RE-PH 모르터)	부착강도 (MPa)	2
	휨강도 (MPa)	8
	압축강도 (MPa)	43
	건조수축율 (%)	-0.096

실험변수로서 보강길이(0.5L, 0.7L, 0.9L), 보강량(CFRP bar 2본, 4본), 사
전가력여부를 택하였기 때문에 실험에 사용된 보 시험체는 총 14개이며 이
중에서 2개는 보강효과 비교를 위한 기준시험체로 사용하였다. 12개의 보
시험체 중에서 6개는 사전가력을 받지 않은 상태에서 보강길이와 보강량을
달리하여 단면확대공법으로 보강을 실시하였다. 또한 나머지 6개의 보 시험
체는 실제 상황과 유사한 상태를 유지하기 위하여 사전가력을 행하여 보
시험체에 손상을 가한 후, 보강길이와 보강량을 달리하여 보강을 실시하였
다. 이 때 철근 콘크리트 보에 손상을 주기 위하여 가한 하중은 기준시험체

의 항복하중의 75%로 하였다. 이 수치는 실제 손상된 보의 상태를 만들기 위한 기존의 실험에서 얻은 가장 적절한 값이라고 본다. 본 실험에서 사용된 시험체 명에 대한 설명은 그림 3.2와 같다.

CFRP bar의 길이	
0.5L ;	1100mm
0.7L ;	1540mm
0.9L ;	1980mm

CFRP bar의 보강량
2 ; 보강량 2본
4 ; 보강량 4본

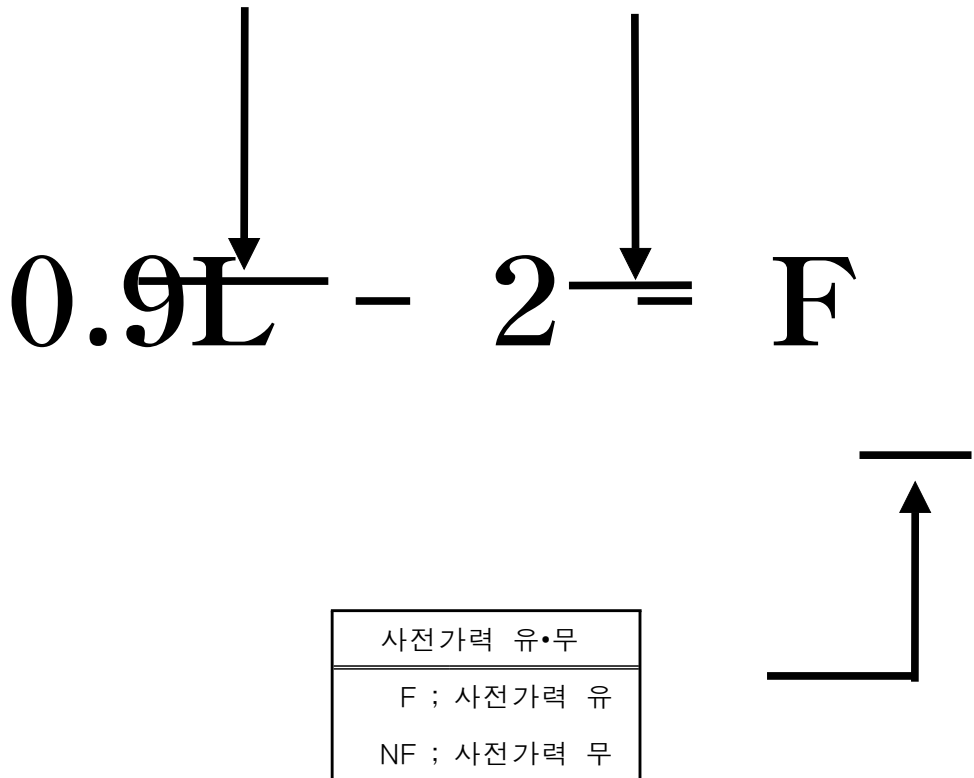


그림 3.2 시험체명에 대한 설명

표 3.2에 실험에 사용된 시험체의 종류와 각 시험체의 변수들을 정리하여 나타내었다.

표 3.2 시험체 종류

시험체명	보강 길이 (mm)	보강량 (본)	사전가력 ($0.75P_y$) 유 • 무
CONT	-	-	-
0.5L-2-NF	1100	2	무
0.7L-2-NF	1500	2	무
0.9L-2-NF	2000	2	무
0.5L-4-NF	1100	4	무
0.7L-4-NF	1500	4	무
0.9L-4-NF	2000	4	무
0.5L-2-F	1100	2	유
0.7L-2-F	1500	2	유
0.9L-2-F	2000	2	유
0.5L-4-F	1100	4	유
0.7L-4-F	1500	4	유
0.9L-4-F	2000	4	유

사진 3.1은 본 실험에서 사용된 단면확대공법에 의한 시험체의 제작 과정을 보여준다. 첫 번째 과정으로 콘크리트 보의 노후화된 부분을 치핑장비를 사용하여 제거하는 과정이다. 이 과정에서 현장 시공의 경우 거의 모든 작업이 상향작업으로 이루어지지만 실험의 편의성을 위해 하향작업으로 실시하였다. 두 번째 과정은 치핑한 부분의 콘크리트와 고강도 폴리머모르터와의 접착력을 높이기 위해 약품을 도포하여 보수하는 작업이다. 약품처리 작업 후 24시간의 양생기간을 가진 후 다음 작업을 실시하였다. 세 번째 과정

은 충분히 양생한 콘크리트 표면에 고강도 폴리머모르터로 1차 타설을 하는 과정이다. 이 과정은 실험의 주 재료인 가넷을 살포한 CFRP bar를 정착하기 위해 표면을 고르게 하는 작업과 동시에 노화된 콘크리트 부분을 보수하는 작업이라고 할 수 있다. 이 작업 또한 충분한 양생기간을 가져야 하므로 실험에서는 48시간의 양생을 하여 모르터에 의한 강도 저하를 막았다. 네 번째 과정은 충분히 양생되어 일정한 강도를 가진 모르터 표면에 가넷을 살포한 CFRP bar를 앵커를 사용하여 정착하는 과정으로 본 실험에서는 길이를 0.5L, 0.7L, 0.9L을 사용하였으며, 보강량을 2본과 4본을 사용하였다. 마지막 과정으로 설치된 CFRP bar의 위에 다시 고강도 폴리머모르터로 2차 타설을 하는 작업이며, 모든 시험체에 대하여 0.9L로 동일하게 타설하였다.



(a) 콘크리트 보의 하면 치핑 과정

사진 3.1 시험체 제작 과정



(b) 치핑부분 약품처리 과정



(c) 1차 고강도 폴리머 모르터 보강작업

사진 3.1 시험체 제작 과정(계속)



(d) 가넷을 살포한 CFRP bar 설치과정



(e) 2차 고강도 폴리머모르터 보강작업

사진 3.1 시험체 제작 과정(계속)



(f) 단면확대공법이 완료된 시험체



(g) 앵커에 의한 CFRP bar의 정착

사진 3.1 시험체 제작 과정(계속)

3.2 실험방법 및 측정방법

실험은 Steel Frame을 반력벽에 ㄱ자 형태로 설치하고 수평 Frame의 중앙 하부에 MTS사 250kN Actuator를 부착시켜 4점 가력으로 1mm/min의 재하속도로 보가 파괴될 때까지 가력하였다. 실험에서 가력된 하중은 Load cell을 이용하여 측정하였고 보 중앙점 하부의 처짐은 보 하부에 LVDT를 설치하여 측정하였다. 그리고 휨보강근의 중앙점과 콘크리트 압축부 상면의 변형률은 부착된 변형률게이지로부터 측정하였다. 사진 3.2에 본 연구에 사용된 데이터 수집장치와 하중가력장치를 나타내었다.



사진 3.2 데이터 수집장치 및 하중가력장치

제 4 장 실험결과 및 분석

4.1 파괴 형태

본 실험에서 사용된 시험체들의 최종 파괴 형태는 다음의 3가지로 분류할 수가 있다. 첫 번째 파괴 형태는 기준시험체의 파괴 형태로서 철근 항복 후 하중 증가 없이 처침만 계속 증가하다가 콘크리트의 압축파괴가 발생하는 일반적인 철근 콘크리트 보의 파괴 형태이다. 두 번째 파괴형태는 보강 길이가 상대적으로 짧은 0.5L, 0.7L의 보 시험체에서 나타나는 것으로서 CFRP bar의 보강이 끝나는 부분에서 시작하여 가력지점 방향으로 큰 폭의 균열이 발생하여 최종적인 파괴가 발생하였다. 끝으로 세 번째 파괴 형태는 보강길이 0.9L의 보 시험체에서 나타나는 것으로서 CFRP bar의 보강이 끝나는 부분에서 최초 균열이 발생하여 인장철근의 하부를 따라 수평방향으로 진전되는 균열에 의하여 최종적인 파괴가 발생하였다. 실험에서 발생한 각 시험체의 최종적인 파괴 형태를 사진 4.1~사진 4.13에 나타내었다.



사진 4.1 기준시험체의 최종파괴모습



사진 4.2 0.5L-2-NF 시험체의 최종파괴모습



사진 4.3 0.7L-2-NF 시험체의 최종파괴모습



사진 4.4 0.9L-2-NF 시험체의 최종파괴모습



사진 4.5 0.5L-4-NF 시험체의 최종파괴모습

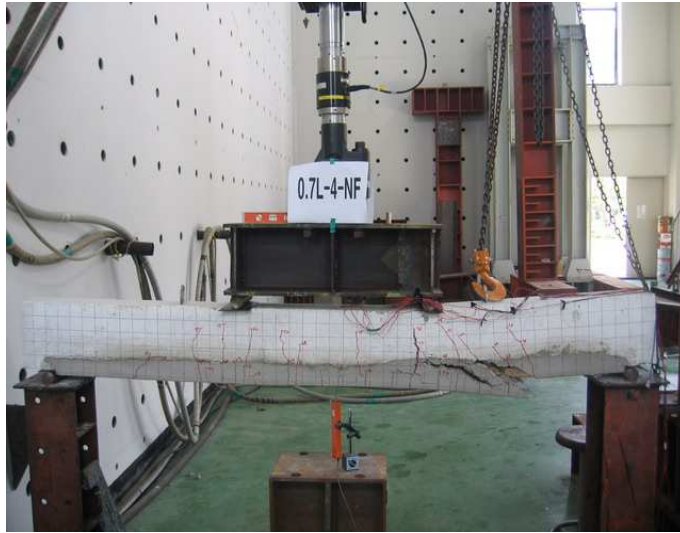


사진 4.6 0.7L-4-NF 시험체의 최종파괴모습



사진 4.7 0.9L-4-NF 시험체의 최종파괴모습



사진 4.8 0.5L-2-F 시험체의 최종파괴모습

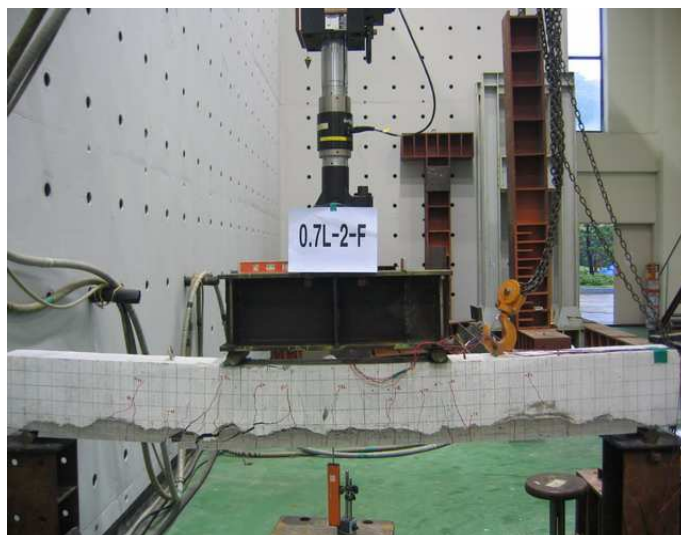


사진 4.9 0.7L-2-F 시험체의 최종파괴모습



사진 4.10 0.9L-2-F 시험체의 최종파괴모습



사진 4.11 0.5L-4-F 시험체의 최종파괴모습

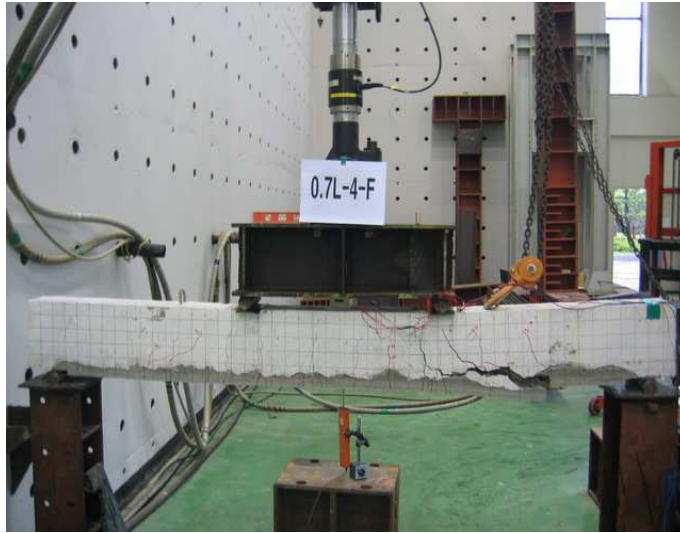


사진 4.12 0.7L-4-F 시험체의 최종파괴모습



사진 4.13 0.9L-4-F 시험체의 최종파괴모습

4.2 하중-처짐 관계

실험으로부터 측정된 각 시험체에 대한 하중-처짐 그래프를 그림 4.1~그림 4.13에 나타내었다.

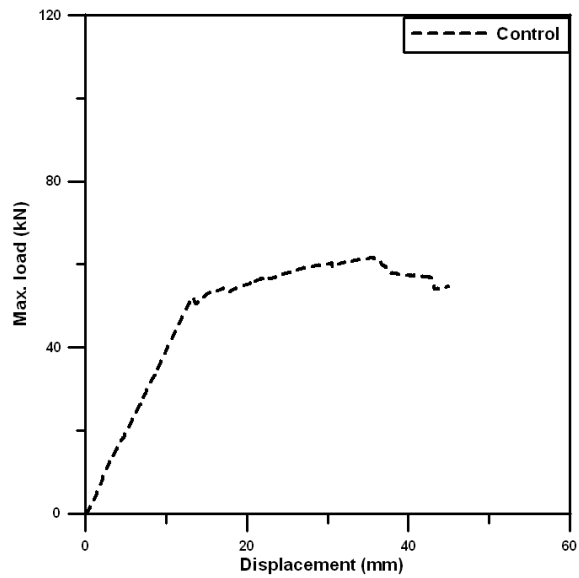


그림 4.1 기준시험체의 하중-처짐 관계

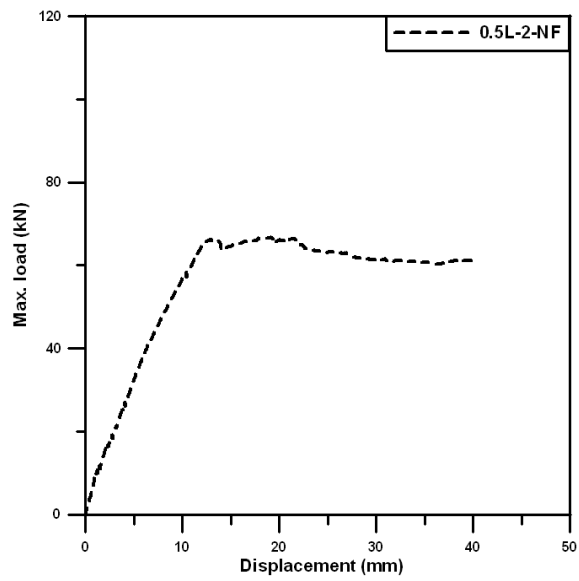


그림 4.2 시험체 0.5L-2-NF의 하중-처짐 관계

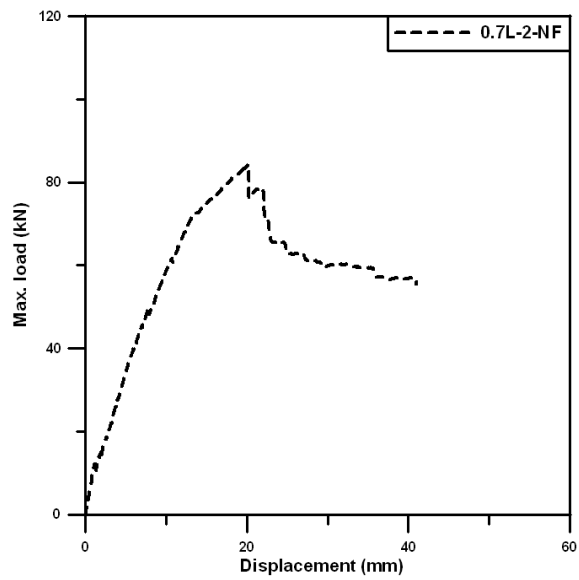


그림 4.3 시험체 0.7L-2-NF의 하중-처짐 관계

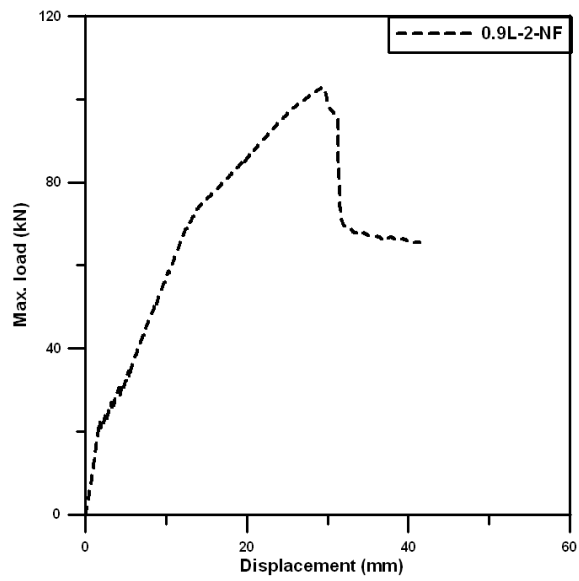


그림 4.4 시험체 0.9L-2-NF의 하중-처짐 관계

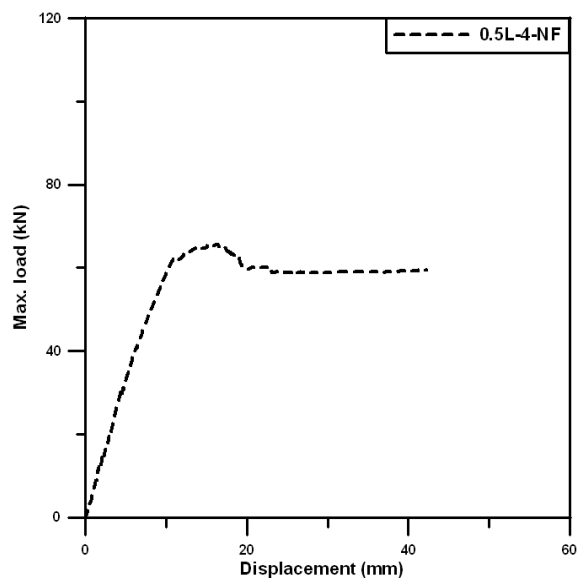


그림 4.5 시험체 0.5L-4-NF의 하중-처짐 관계

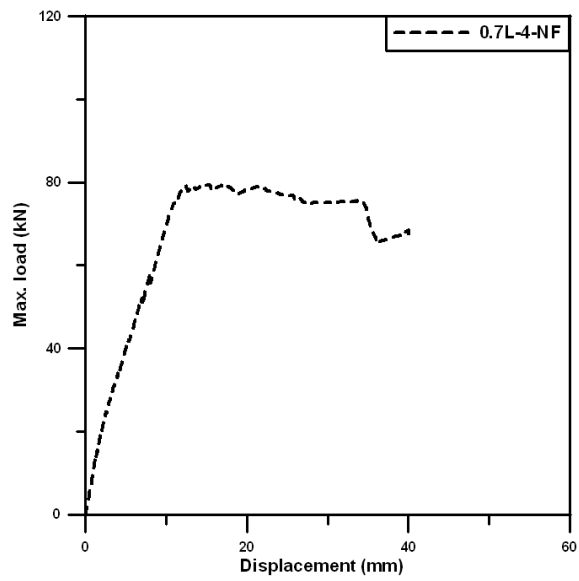


그림 4.6 시험체 0.7L-4-NF의 하중-처짐 관계

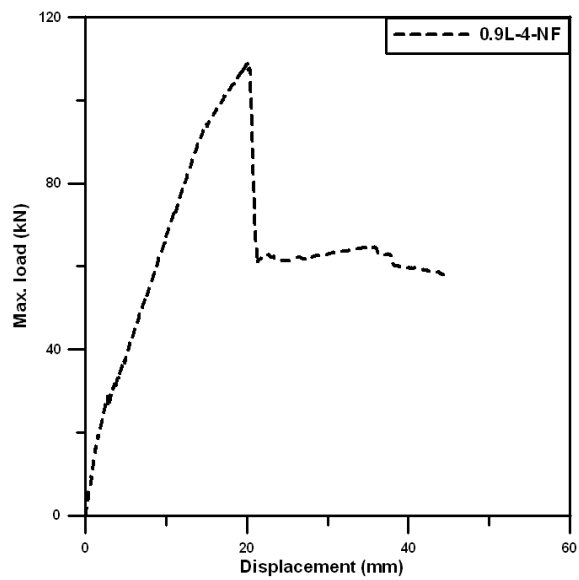


그림 4.7 시험체 0.9L-4-NF의 하중-처짐 관계

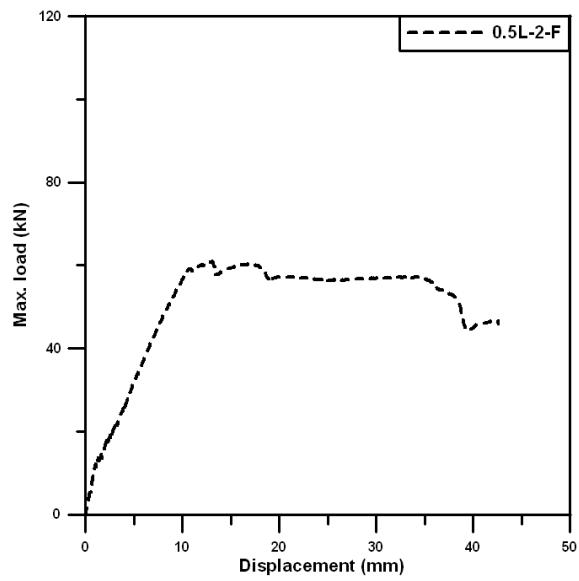


그림 4.8 시험체 0.5L-2-F의 하중-처짐 관계

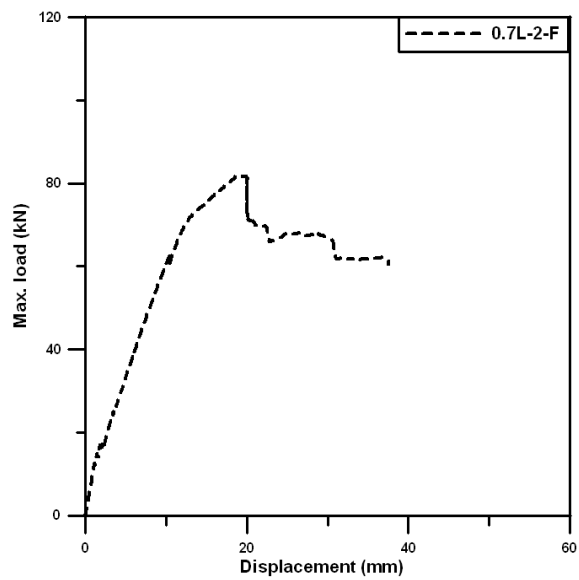


그림 4.9 시험체 0.7L-2-F의 하중-처짐 관계

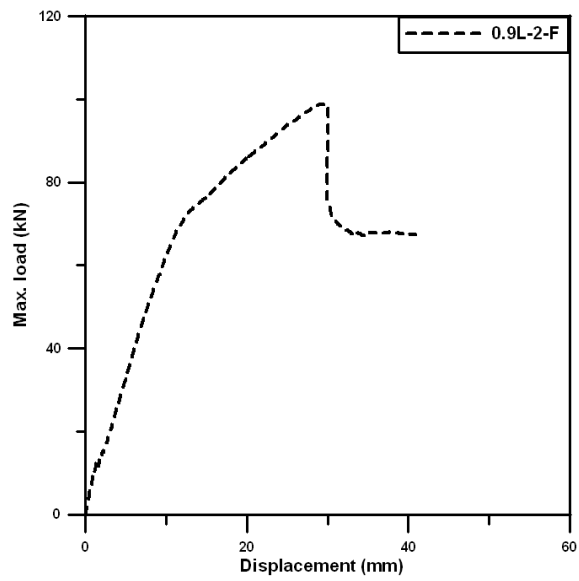


그림 4.10 시험체 0.9L-2-F의 하중-처짐 관계

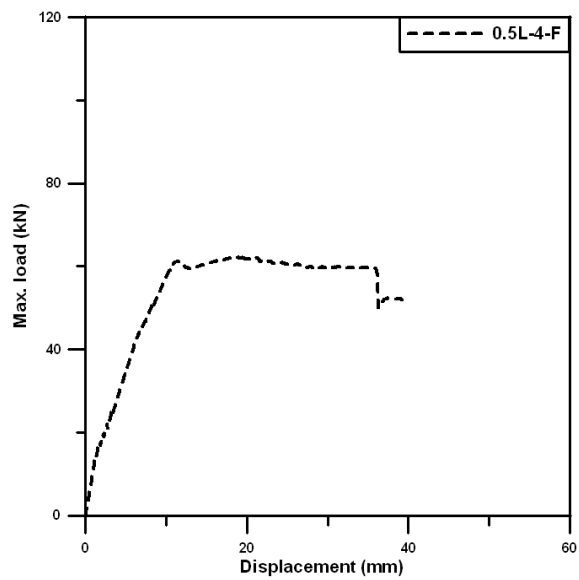


그림 4.11 시험체 0.5L-4-F의 하중-처짐 관계

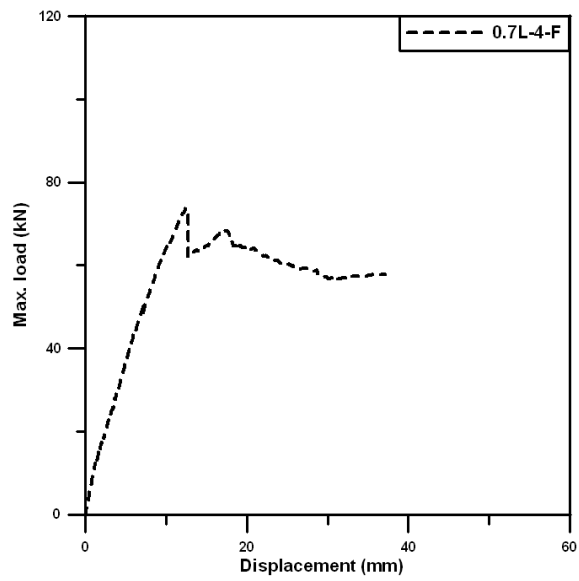


그림 4.12 시험체 0.7L-4-F의 하중-처짐 관계

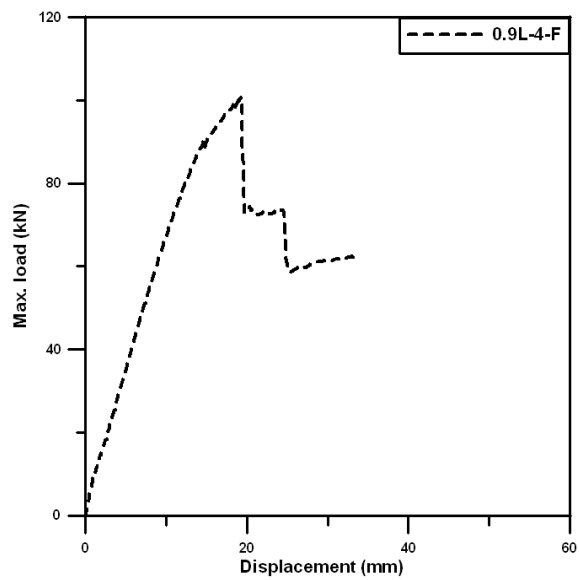


그림 4.13 시험체 0.9L-4-F의 하중-처짐 관계

실험을 통하여 얻어진 각 시험체의 하중-처짐 관계를 살펴보면 보강길이
가 길어질수록 최대하중이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 0.9L 보강 시
험체의 경우에 파괴가 발생하면 급격히 하중이 떨어지는 취성적인 파괴가
발생하는 것으로 나타났다.

상대적으로 짧은 보강을 한 0.5L 및 0.7L 보 시험체의 경우, 정착길이의
부족에 따른 CFRP bar 단부에서의 응력집중에 의하여 최대하중이 0.9L 시
험체에 비하여 감소되었다고 판단된다. 또한 0.9L 보 시험체의 경우는 다른
시험체보다 충분한 정착길이를 확보하므로써 상대적으로 높은 최대하중을
나타내었지만, 하중이 증가함에 따라 CFRP bar 단부에서 발생한 응력집중
이 철근 아래층의 부착력이 취약한 부분을 따라 파괴를 유발시킨 원인이
되었다고 판단된다.

4.3 하중-변형률 관계

실험으로부터 측정된 콘크리트 상부 및 인장철근의 하중-변형률 관계를
그림 4.14~그림 4.26에 나타내었다. 이 그림들에서 왼쪽의 실선(B1) 및 점
선(B2)은 2개의 주철근에서 측정된 인장변형률을 그리고 오른쪽의 점선
(CT)은 콘크리트 상부의 압축변형률을 표시하고 있다. 기준시험체의 경우
철근의 항복변형률이 0.002 부근에 그리고 콘크리트의 최대변형률은 0.003
정도인 것을 알 수 있다. 그러나 0.5L 및 0.7L 길이로 보강된 보 시험체의
경우 CFRP bar의 정착길이 부족에 따른 조기파괴로 인하여 철근 및 콘크
리트의 변형률이 기준시험체의 값에 미치지 못하는 것을 볼 수 있다.

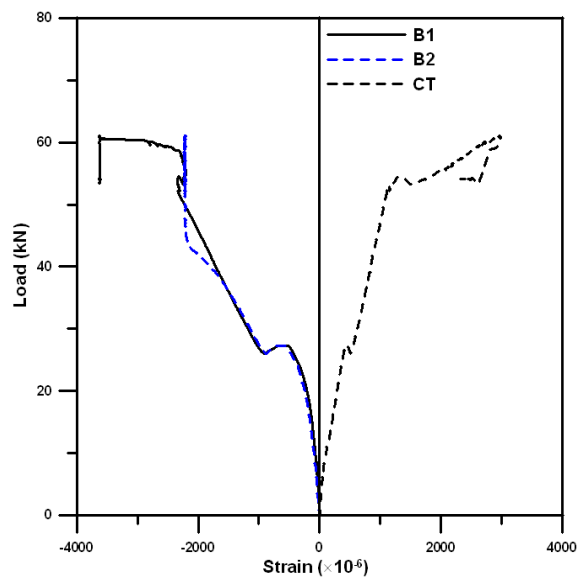


그림 4.14 기준시험체의 하중-변형률 관계

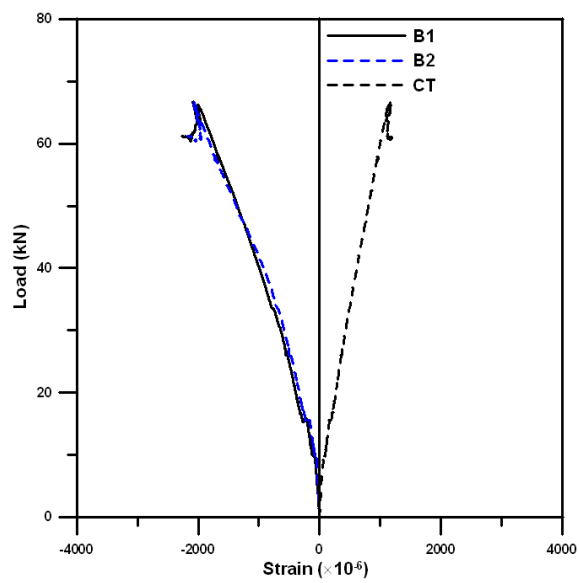


그림 4.15 시험체 0.5L-2-NF의 하중-변형률 관계

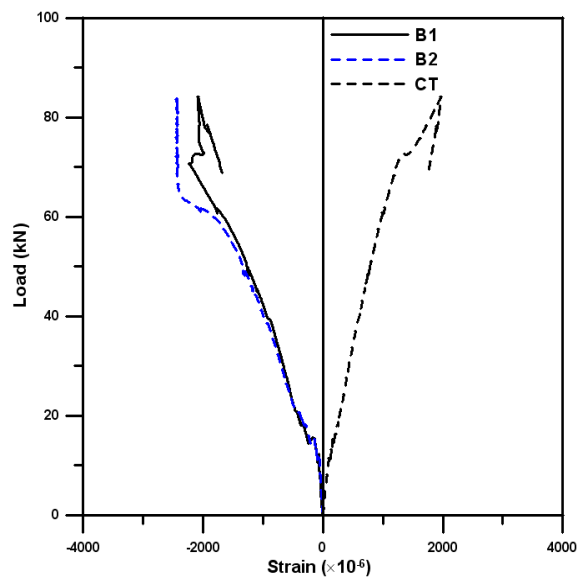


그림 4.16 시험체 0.7L-2-NF의 하중-변형률 관계

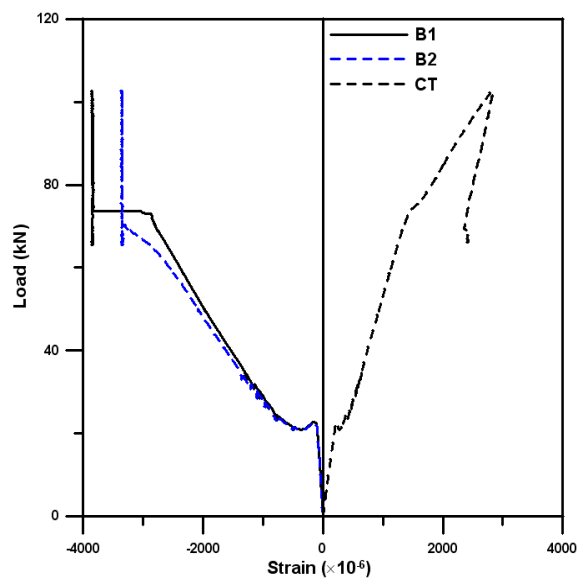


그림 4.17 시험체 0.9L-2-NF의 하중-변형률 관계

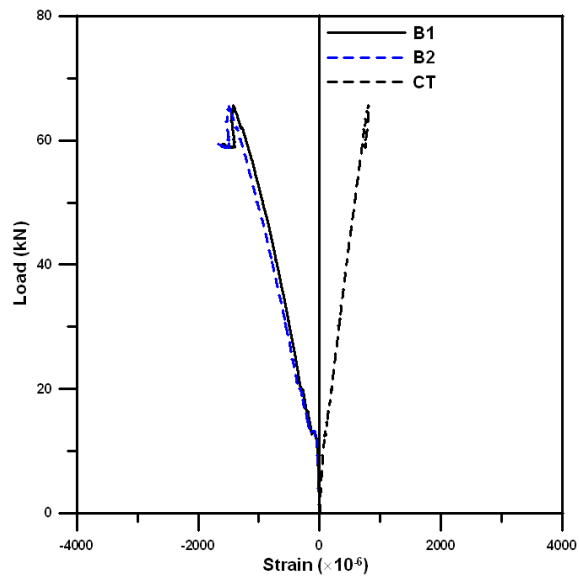


그림 4.18 시험체 0.5L-4-NF의 하중-변형률 관계

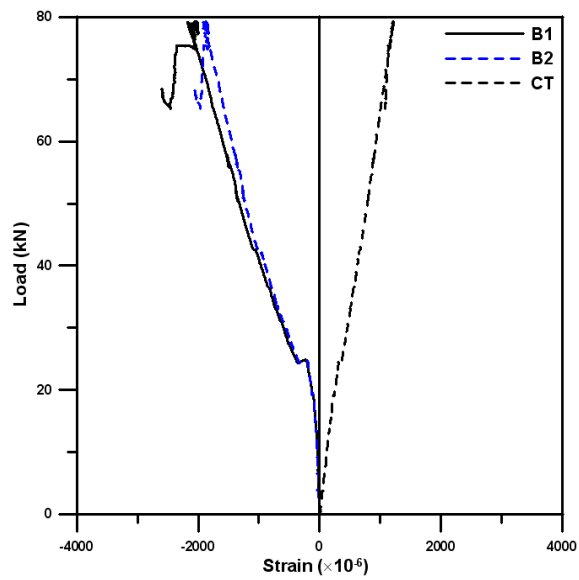


그림 4.19 시험체 0.7L-4-NF의 하중-변형률 관계

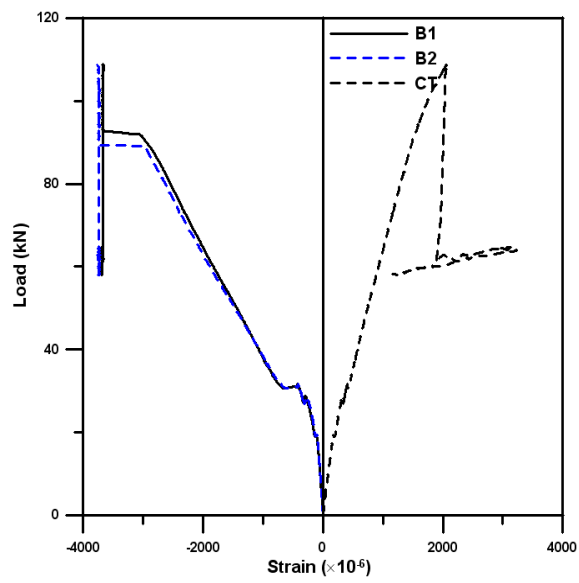


그림 4.20 시험체 0.9L-4-NF의 하중-변형률 관계

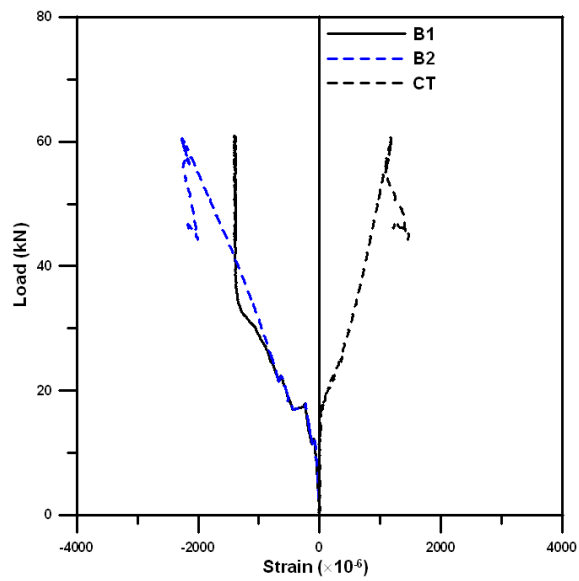


그림 4.21 시험체 0.5L-2-F의 하중-변형률 관계

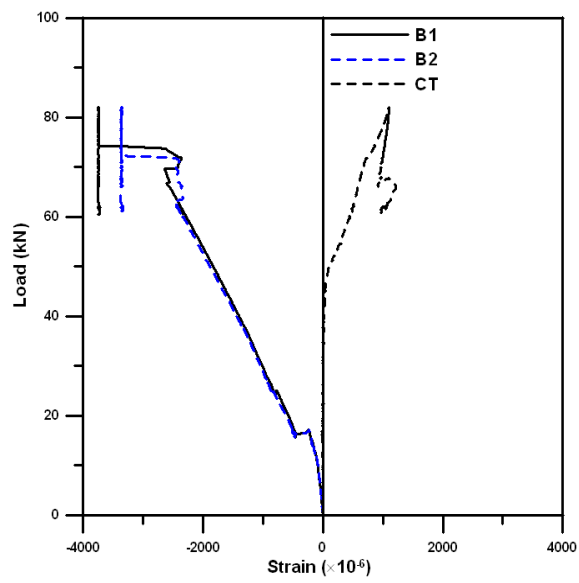


그림 4.22 시험체 0.7L-2-F의 하중-변형률 관계

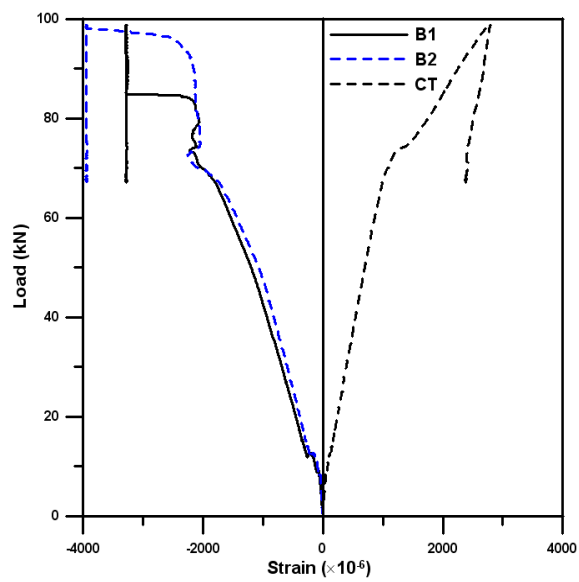


그림 4.23 시험체 0.9L-2-F의 하중-변형률 관계

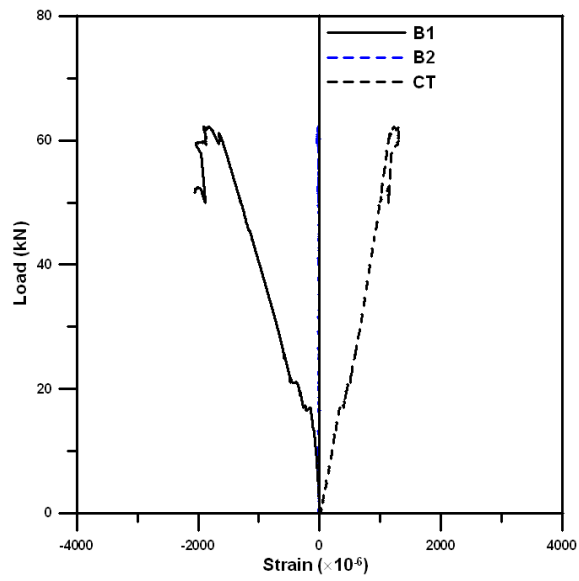


그림 4.24 시험체 0.5L-4-F의 하중-변형률 관계

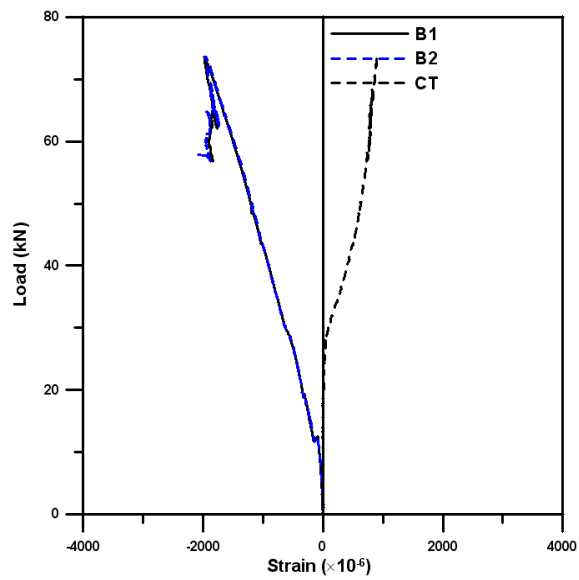


그림 4.25 시험체 0.7L-4-F의 하중-변형률 관계

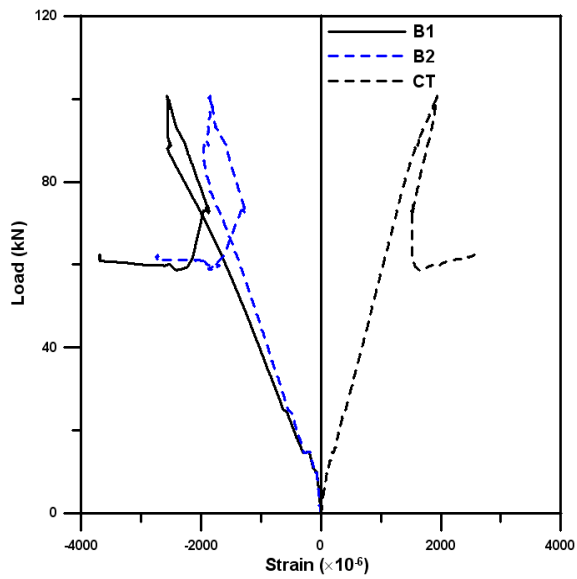


그림 4.26 시험체 0.9L-4-F의 하중-변형률 관계

4.4 실험결과에 따른 보강효과 분석

실험으로부터 얻어진 각 시험체의 항복시의 하중, 처짐, 기준시험체에 대한 보강효과 그리고 파괴시의 하중, 처짐, 기준시험체에 대한 보강효과를 표 4.1에 정리하여 나타내었다. 또한 최대하중시의 처짐과 항복하중시의 처짐 비교로부터 구한 연성지수도 함께 나타내었다.

표 4.1 각 시험체의 최대하중과 처짐

시험체명	항 복 하 중			최 대 하 중			연성 지수
	하중 (kN)	처짐 (mm)	보강효과 (CONT 기준)	하중 (kN)	처짐 (mm)	보강효과 (CONT 기준)	
CONT	52.184	13.416	1.00	61.490	35.716	1.00	2.66
0.5L-2-NF	58.432	10.394	1.12	66.703	18.159	1.08	1.75
0.7L-2-NF	72.600	13.722	1.39	84.185	20.224	1.37	1.47
0.9L-2-NF	70.546	12.971	1.35	102.725	29.338	1.67	2.26
0.5L-4-NF	62.219	11.213	1.19	65.595	16.230	1.07	1.45
0.7L-4-NF	75.010	11.059	1.44	79.323	15.309	1.29	1.38
0.9L-4-NF	83.064	12.851	1.59	108.840	20.150	1.77	1.57
0.5L-2-F	59.269	10.701	1.14	60.979	13.056	0.99	1.22
0.7L-2-F	62.401	10.382	1.20	82.119	19.302	1.34	1.86
0.9L-2-F	68.586	11.469	1.31	98.846	29.798	1.61	2.60
0.5L-4-F	61.205	11.571	1.17	62.119	18.483	1.01	1.60
0.7L-4-F	64.562	10.081	1.24	73.656	12.442	1.20	1.23
0.9L-4-F	90.151	14.746	1.73	100.697	19.354	1.64	1.31

위의 시험결과를 기초로 하여 각 시험체의 CFRP bar 보강량, 보강길이, 사전가력하중 유·무에 따른 최대하중의 크기 변화를 그림 4.27~그림 4.28에 나타내었다.

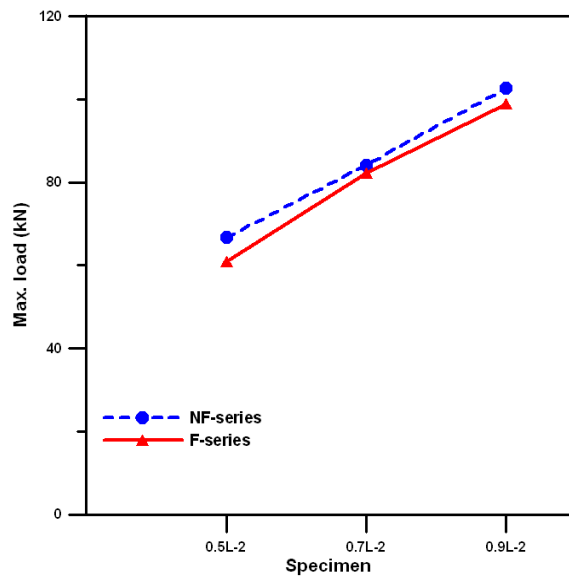


그림 4.27 CFRP bar 2분 보강한 보의 최대하중

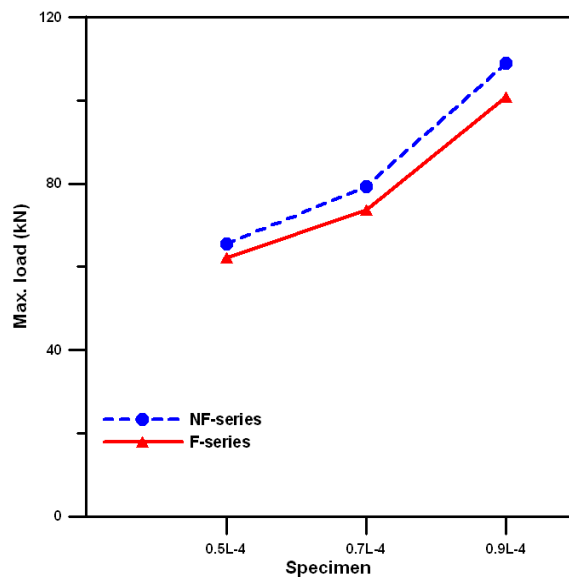


그림 4.28 CFRP bar 4분 보강한 보의 최대하중

그림 4.27, 그림 4.28에서 CFRP bar의 보강길이가 길어질수록 정착길이가 증가하여 최대하중도 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 표 4.1을 살펴보면 보강길이가 증가함에 따라 2본 보강한 경우는 기준시험체에 비하여 최대하중이 8%~67% 증가하였고 4본 보강한 경우는 7%~77% 증가하였다. 기준시험체 항복하중의 0.75배 크기의 사전가력을 받은 경우는 2본의 경우에 -1%~61% 증가하였고, 4본의 경우는 1%~64% 증가하였다.

2본 보강의 경우와 4본 보강의 경우에 보강효과의 차이는 예상보다는 크지 않았다. 즉, 사전가력을 받지 않은 경우에 보강효과의 최대치만을 비교하면 10%의 증가가 있었으며, 사전가력을 받은 경우는 단지 3%의 증가가 있었다. 이러한 현상은 CFRP bar 보강량의 증가가 바로 보강효과의 증가로 나타나지 않는다는 것을 의미하며 따라서 이러한 원인에 대하여 CFRP bar의 보강 간격, 앵커 간격의 적정성 등에 대한 추가적인 조사가 필요하다고 판단된다. 사전가력을 받은 경우와 받지 않은 경우의 보강효과를 2본과 4본의 경우에 최대치를 통하여 비교한다면 사전가력을 받은 경우에 평균하여 약 10% 정도의 보강효과 감소가 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 FRP sheet를 사용하여 보강하는 경우에 사전가력이 보강효과에 별 차이점을 주지 않는 것과 유사한 경향을 보여준다.

보 시험체의 연성 경향을 파악할 수 있는 연성지수에 대하여 조사해보면 보강을 행한 보 전체가 기준시험체에 비하여 연성지수 값이 작아진 것을 알 수 있다. 이는 인장강도는 크지만 취성이 강한 FRP 재료를 사용하여 보강하는 경우에 일반적으로 나타나는 현상이다. 사전가력을 받은 4본 보강의 경우를 제외하고는 대체적으로 보강길이가 증가할수록 연성지수도 증가하는 경향을 보여주고 있다. 0.9L 길이로 2본 보강한 경우는 사전가력의 영향에 따라 연성지수가 2.26 및 2.60의 값을 갖지만 0.9L 길이로 4본 보강한 경우는 1.57 및 1.31의 상대적으로 낮은 값을 보여주었다. 이러한 낮은 값은 본 실험에서 4본 보강의 경우에 최대하중의 증가가 2본 보강의 경우에 비

하여 예상보다 적었음을 실험적으로 보여주고 있다. 구조물에서 연성은 구조물의 파괴시 에너지를 흡수할 수 있는 중요한 특성이므로 이에 대한 보완대책이 필요하며, 따라서 재료적인 면에서는 Hybrid FRP bar의 사용, 시공적인 면에서는 부분 비부착 공법 등이 연구되고 있다¹¹⁾.

4.5 단면확대공법의 이론 해석

본 연구에서는 대한건축학회에서 제시한 식에 따라 FRP bar를 사용하여 단면확대공법으로 철근 콘크리트보를 보강하였을 때, 보강보가 갖는 보강성능을 구하고 이 값들을 실험결과와 비교 분석하였다.

4.5.1 해석 이론

보강보가 갖는 이론적인 보강성능을 다음의 순서에 의하여 구한다.

1) FRP Bar 보강 면적을 등가의 철근 면적(A_{ps})으로 환산.

(그림 4.29 참조).

$$A_{ps} = (A_{fu} \times n_f) \times \left(\frac{f_{fm} \times \Phi}{f_y} \right) \quad (4.1)$$

윗 식에서

A_{ps} = FRP Bar의 환산면적

A_{fu} = FRP Bar의 면적/개

n_f = FRP Bar의 개수

f_{fm} = FRP Bar의 강도

Φ = FRP Bar의 강도감소계수 (일반적으로 = 0.75 적용)

2) 전체 등가철근면적 (A^e) 계산

$$A_e = A_{ps} + A_s \quad (4.2)$$

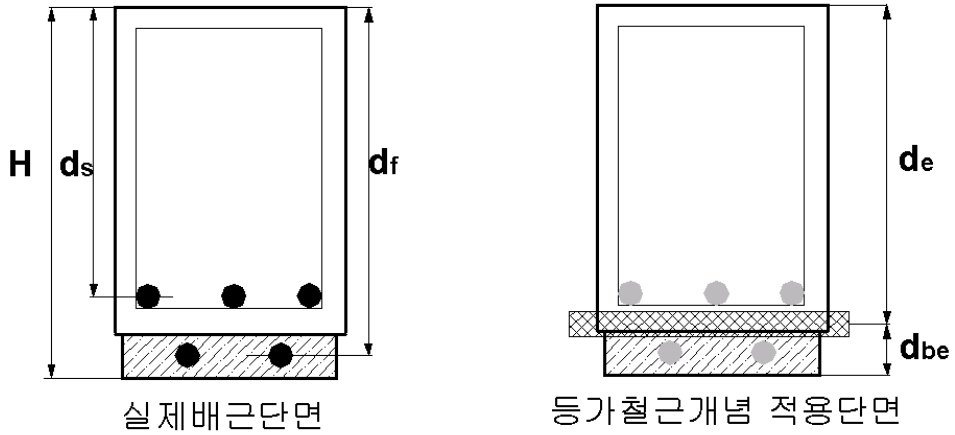


그림 4.29 등가철근개념

3) 환산된 면적의 유효깊이(d_e) 계산

$$d_s = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} A_{si} d_{si}}{\sum_{i=1}^{n_s} A_{si}} \quad (4.3)$$

위 식에서 d_{si} = 압축단에서 인장철근 A_{si} 중심까지의 거리

$$d_{be} = \frac{(A_s \times d_{sb}) + (A_{fu} \times n_f \times (H - d_f))}{A_e} \quad (4.4)$$

$$\text{위 식에서 } A_s = \sum_{i=1}^{n_s} A_{si} \quad d_{sb} = H - d_s$$

$$\therefore d_e = H - d_{be} \quad (4.5)$$

4) 등가 사각형 깊이(a) 구한 후 M_n 및 ϕM_n 계산.

$$a = \frac{(A_e \times f_y)}{(0.85 \times f_{ck} \times b)} \quad (4.6)$$

$$M_n = 0.85 \times f_{ck} \times a \times b \times (d_e - \frac{a}{2}) \quad (4.7)$$

$$\phi M_n = 0.85 M_n \quad (4.8)$$

5) 철근비 검토

$$\rho_{se} = \frac{A_e}{b \times d_e} \quad (4.9)$$

4.5.2 본 실험 결과에의 적용

4.5.1 절에서 주어진 식에 따라 본 실험에서 사용된 값 들을 대입하여 다음의 계산 결과(표 4.2)를 얻었다. 이 표에서 최대하중(이론치)는 식(4.8)에 의하여 계산된 모멘트를 4점 가력(4-point bending)시의 집중하중으로 환산하여 얻은 값이다.

표 4.2 실험치와 이론치 비교

시험체	최대 하중 (실험치)	최대 하중 (이론치)	실험치/이론치	비고
0.7L-2-NF	84.185	88.099	0.96	
0.9L-2-NF	102.725		1.17	
0.7L-4-NF	79.323	129.384	0.61	
0.9L-4-NF	108.84		0.84	

위의 표에는 실험에서 구해진 최대하중을 결과 비교를 위하여 함께 나타내었는데, 0.5L 길이로 보강한 보의 결과는 0.7L 길이로 보강한 경우보다 적은 값이므로 생략하였다.

위의 표에서 알 수 있듯이 2분 보강의 경우에 0.9L 길이로 보강한 경우는 실험치가 이론치를 초과하고 있으나, 0.7L 길이로 보강한 경우는 이론치보다 4% 적은 결과를 보여주고 있다. 또한 4분 보강한 경우는 보강길이에 관계없이 실험치가 이론치보다 작게 나왔다.

제 5 장 결 론

본 연구에서는 노후화된 콘크리트 구조물의 보수 및 보강 방법으로 개발된 단면확대공법(SIM)을 이용하여 보강한 콘크리트 보의 보강효과에 대하여 조사하였다. 가넷을 압력살포한 CFRP bar의 보강길 이와 보강량을 달리 한 일련의 철근콘크리트 보 시험체에 대하여 실험을 실시하였으며, 실험결과들로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) CFRP bar의 보강길이가 길어질수록 정착길이가 증가하여 최대하중도 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다.

2) 2분 보강의 경우와 4분 보강의 경우에 보강효과의 차이는 예상보다는 크지 않았다. 이러한 현상은 CFRP bar 보강량의 증가가 바로 보강효과의 증가로 나타나지 않는다는 것을 의미하며 따라서 이러한 원인에 대하여 CFRP bar의 보강 간격, 앵커 간격의 적정성 등에 대한 추가적인 조사가 필요하다고 판단된다.

3) 사전가력을 받은 경우와 받지 않은 경우의 보강효과를 비교해보면 사전가력을 받은 경우에 평균하여 약 10% 정도의 보강효과 감소가 있는 것을 알 수 있었다. 이러한 현상은 사전가력이 보강효과에 영향을 주지 않는 것을 보여준다. 그리고 기준시험체와 비교 시는 최대하중의 증가를 보였다.

4) 보 시험체의 연성 경향을 파악할 수 있는 연성지수에 대하여 조사한 결과, 보강을 행한 보 전체에서 기준시험체에 비하여 연성지수가 작게 나온 것을 알 수 있었다. 구조물에서 연성은 구조물의 파괴시 에너지를 흡수할 수 있는 중요한 특성이므로 재료적인 면 또는 시공적인 면에서 이에 대한 보완책이 필요하다고 판단된다.

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, pp.228-236, 2001.
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, pp.246-253, 2001.
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, SanFransico, 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", 대한토목학회논문집, 제21권 제6-A호, pp. 997~1005, 2001.
8. 한만엽 외, "단부 부착력 개선을 위한 보강콘크리트보의 피로특성에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 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", 한

국콘크리트학회논문집 제12권 제1호, pp. 61~67, 2000.

11. 이차돈, 정상모, 원종필, 이승환, “부분 비부착 NSM Hybrid FRP 보강근에 의한 철근콘크리트 보의 연성평가”, 한국콘크리트학회논문집 15권 1호, pp.143~153, 2003.
12. 정상모, 이차돈, 원종필, 황윤국, 김정호, “FRP 보강근을 이용한 표면매립 및 단면확대공법의 실험적 성능평가”, 2003년도 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집.
13. 정우태, 박종섭, 유영준, 박영환, 강재윤, “표면매립공법으로 휨보강된 RC보의 부착파괴 방지 상세에 대한 실험연구”, 한국건설기술연구소, 2004.
14. Laura De Lorenzis and Antonio Nanni, “Characterization of FRP Rods As Near-Surface Mounted Reinforcement”, Journal of Composites for Construction, Vol. 5, No. 2, 2001.
15. Tarek Hassan and Sami Rizkalla, “Investigation of Bond in Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted Carbon Fiber Reinforced Polymer Strips”, Journal of Composites for Construction, Vol. 7, No. 3, 2003.

감사의 글

고등학교를 졸업하고 직장생활을 하면서 항상 공부란 건 동경의 대상으로만 생각하고 있었습니다. 그러다가 주위의 많은 선배들의 충고어린 격려에 힘입어 다시 시작한 공부가 전문대부터 오늘에 이르기까지 10년 이란 시간이지나 마침내 대학원 과정까지 무사히 마치게 되었습니다. 처음 대학원에 진학 할 때에는 아무 목적 없이 2년 반 동안 생활하면서 졸업만 하려고 생각했는데 막상 콘크리트 FRP 및 콘크리트구조연구실에 들어가니 수업 과정 외에 이루어지는 세미나 및 보 제작에서 파괴실험까지 이루어지는 과정이 힘이 들었지만, 논문을 마친 지금은 누구보다도 가장 알찬 수확을 거두게 되었습니다. 특히 토목 구조물 유지관리 및 보수·보강 실무에 종사하면서 여러 의문점이 많았지만, 세미나 및 이번 논문을 통해서 많은 것을 실무에 적용할 수 있었고, 이런 기회를 주신 장희석 교수님에게 감사드리고 이번 논문이 이루어지도록 도와준 연구실 연구원들, 바쁜 와중에도 보 제작에 참여해주신 (주)이왕코리아 관계자 여러분에게도 다시 한번 감사드립니다. 그리고 논문이 완성되기까지 바쁘신 와중에도 불구하고 저의 논문을 세심하게 심사해주신 국 승규 교수님과 김 명식 교수님께도 이 글을 통해 다시 한번 감사의 인사를 드립니다. 마지막으로 언제나 나와 같이하는 가족에게 고마움을 전합니다.