

복합재료 패널로 보강된 철근 콘크리트 보의 휨 실험

Experiment on Flexural Analysis of RC Beams Strengthened with Composite Material Panel

김진만*
Kim, Jin-Man

정미루**
Jung, Miroo

이재홍***
Lee, Jaehong

윤광섭****
Yoon, Kwang-Sup

요약

본 논문은 복합재료 패널로 보강된 철근 콘크리트 보의 휨 실험과 해석을 통하여 패널의 보강효과에 대하여 알아보고자 한다. FRP 복합재료 패널은 전통적인 재료인 강재와 콘크리트에 비해 단위 무게당 강도 및 강성이 크고 부식에 대한 높은 저항성, 절연성, 고내구성 및 낮은 열전도성 등 우수한 물성으로 유지관리 측면에서 매우 유리하여 최근 많은 연구가 이루어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 복합재료 패널로 보강된 철근 콘크리트 보의 극한 하중을 예측하고 실험을 수행하여 그 보강효과에 대한 고찰하였다. 복합재료 패널은 복합재료 패널 층의 유리섬유직조 형태에 따라 LT, DB, DBT로 구분하고 복합재료 패널의 층 개수에 따라 2ply, 3ply로 구분하였다. 실험을 수행한 결과, 해석과 일치하였으며 복합재료 패널로 보강한 철근 콘크리트 보가 극한강도 측면에서 효율적이었다는 결론도 얻었다.

Abstract

Experiment on flexural analysis of RC beams strengthened with composite material panel is presented. Recently, the strengthening of reinforced concrete structures using advanced fiber reinforced plastic (FRP) composites, and in particular the behavior of FRP-reinforced concrete structure is topic that has become very popular because of good corrosion resistance and easy for site handling due to their light weight. In this study, an efficient computational analysis using ABAQUS to predict the ultimate moment capacity of reinforced concrete beams strengthened with FRP is presented. Test parameters in this study are the shape of fiber arrangement (LT, DB, DBT) and the number of carbon fiber sheets (2ply, 3ply). When comparing with results of the analytical model, results of the experiment show similar values. Furthermore, reinforced concrete beam with FRP obtains improved effects for ultimate strength.

키워드 : 복합재료 패널, 철근 콘크리트 보강, 휨 해석

Keywords : Composite material panel, Reinforced concrete, Flexural analysis

1. 서론

1.1 연구의 목적

현재 건축·토목분야 구조물을 이루고 있는 주된 재료는 강재와 콘크리트로서 경제성, 시공성, 내구성 등에서 만족할만한 성능을 나타내고 있다. 그러나 최근 다양한 형상의 구조물이 출현하고, 리모델링 사업에 의한 구조물 변경과 철근부식, 콘크리트의 품질관리나 시공 불량, 사용하중 증가 등으로 끊임없이 성능저하가 계속된다. 이에 따라, 내구성능을 고려한 설계 및 유지관리 기법을

* 현대건설 건축사업본부 수주설계부 구조팀
E-mail : jmkim@hdec.co.kr

** (주)CS구조엔지니어링 기술연구소, 연구원

*** 교신저자, 세종대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Tel: 02-3408-3287 Fax:02-3408-3671
E-mail : jhlee@sejong.ac.kr

**** (주) 미래 ISE 대표이사, 공학박사

이용하여 콘크리트 구조물의 수명을 연장시키기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 다년간 국내에서 적용되고 있는 철근콘크리트 구조물의 보수·보강공법에는 강판접착공법 및 단면증대공법이 널리 사용되고 있으나, 이는 구조물의 자중 증대, 사용면적의 감소, 시공의 난해성 등의 다양한 문제점을 발생시키고 있다.

FRP(Fiber Reinforced Plastic) 복합재료는 전통적인 재료인 강재와 콘크리트에 비해 단위 무게당 강도 및 강성이 크고 부식에 대한 높은 저항성, 절연성, 고내구성 및 낮은 열전도성 등 우수한 물성으로 유지 관리 측면에서 유리하며, 다양한 범위의 구조부재에 적용 할 수 있다는 장점을 가지고 있어서 철근 콘크리트 부재를 보강하기 위해 탄소섬유, 유리섬유와 아라미드섬유 등을 이용한 FRP 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1)~5), 9)~14)}

현재 일반적인 철근콘크리트 구조보강방법은 복합재료의 일종인 탄소섬유(carbon fiber)를 프리프레그 시트(prepreg sheet) 형태로 접착제를 이용하여 콘크리트 보나 슬래브에 부착시키는 방법이다.

이러한 방법은 부착면의 sandblast, 청소하기, 다듬기 등의 작업과 프라이머 도포 등 사전에 많은 작업으로 인해 시간이 소요됨은 물론 접착제의 적정 양생온도를 맞춰 줘야하며 최소한 24시간의 양생시간이 필요해 아무리 빨라도 3일 정도의 공기가 소요된다. 또한 시간이 지남에 따라 구조내력보다 훨씬 낮은 강도에서 복합재료 접착면이 콘크리트로부터 박리 탈락(delamination)하는 단점이 있다. 따라서 구조적으로 보강이 시급한 경우 및 동절기에는 철저한 품질관리 조건하에서 복합재료 섬유 시트 보강이 이루어져야 한다.

따라서 본 연구에서 사용된 복합재료 패널은 접착제를 사용하지 않고 볼트와 같은 긴결재를 이용하여 구조물의 저면에 밀착시키고 철근콘크리트 구조물에 접합하여 구조성능을 향상시킴으로써 구조보강 기술을 획기적으로 발전시킬 수 있다.

1.2 연구의 방법 및 절차

본 연구에서는 기존 실험 결과^{9),10)}와 연구 결과^{2),5)}에 대하여 고찰하고, 위에서 언급한 것과 같은 복합재료 패널

로 보강된 보에 대한 복합재료 패널 층의 섬유직조 형태에 따라 LT, DB, DBT로 구분하고, 패널을 구성하는 층의 개수에 따라 2ply, 3ply로 구분하여 철근 콘크리트 보의 극한강도를 해석연구를 하였다. 복합재료 패널로 보강된 철근 콘크리트 보의 해석을 위해서 범용 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS^{6), 15)}를 이용하였다.

2. 복합재료 패널

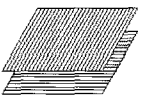
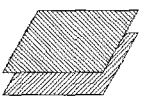
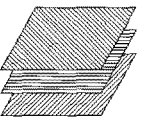
2.1 복합재료의 개요

복합재료는 거시적(macroscopic scale) 관점에서 둘 또는 그 이상의 재료를 혼합하여 본래의 성질과는 전혀 다른 우수한 재료를 만드는 것을 목적으로 하고 있다. 따라서 콘크리트 및 철근콘크리트도 광범위하게 보면 복합재료의 한 일부이기도 하다. 복합재료를 구성하는 각각의 재료는 성형공정 및 제작된 구조물의 성능에 중요한 역할을 하게 되는데, 수지(matrix)는 재료를 일체로 성형되도록 하는 접착제로서의 역할을 하게 되고, 섬유는 재료의 기계적 강도를 발휘하게 하는 역할을 한다. 또한, 각종 충전제(fillers)와 첨가제(additives & modifiers)는 구조물의 성형성 및 일부 성능을 향상시키는 역할을 하게 된다. 복합재료는 매트릭스라는 임의 물질에 일정한 방향을 가진 섬유를 첨가함으로써 하나의 일체화된 재료로 만들어지게 된다. 그러므로 기계적 특성 및 복합재료의 구성은 필요한 용도에 따라 다르게 설계될 수 있으며, 구조물을 제작하기 위한 제조공정 뿐만 아니라 선택된 재료의 종류 및 양이 기계적 특성 및 성능에 영향을 미칠 수 있으므로 구조용 부재에 사용될 수 있는 섬유 및 수지의 특성을 분석하였다.

2.2 복합재료의 섬유배열

복합재료의 가장 큰 장점중의 하나는 섬유배열을 통하여 부재의 물성을 사용자의 요구대로 설계할 수 있다는 것이다. 현재 국내에서 주요 구조용 부재에 사용되어지는 섬유는 강도특성 및 가격경쟁력이 우수한 유리섬유가 널리 사용되어 지고 있다. 유리섬유를 이용한 부재단면 설계는 CSM(Chopped Strand Mats)과 로빙(Rovings)

〈표 1〉 층의 섬유 직조 형태

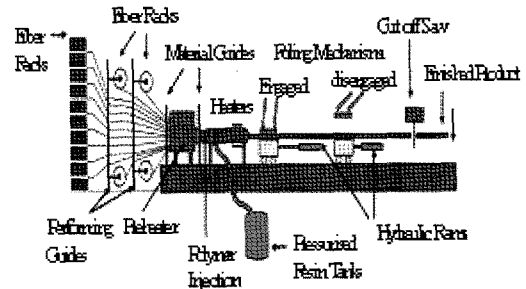
LT series		0°
DB series		90°
DBT series		+45° 90° -45°

CSM은 30mm-40mm 길이로 절단된 유리섬유가 방향성 없이 고르게 분포된 후 폴리에스터 분말(Polyester Powder)을 접착제로 사용하여 압착된 부직포 형태로 제작되며, 구조 부재의 표면에 많이 사용된다. 로빙은 인장강도가 약 2.5GPa로 단면 종방향(0°)의 인장력에 저항하는 역할을 하는 싱글엔드 로빙(Single-End Rovings)과 부재단면의 공극이나 코너 부분의 채움재로서 사용되는 벌키 로빙(Bulky Rovings)이 사용되어 진다.

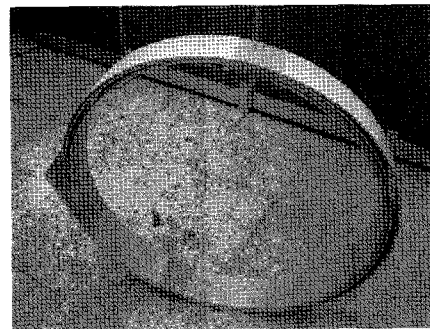
표 1은 현재 국내에서 생산되어지는 섬유의 직조 형태에 따른 층(Layer)의 구성형태(종방향(0°), 횡방향(90°), 및 사선방향(±45°))를 나타내고 있다. 이러한 층을 조합하여 두께방향으로 직조(Stitched) 되며, CSM등을 부착하여 사용되어질 수 있다. 본 과제에서는 섬유 배열이 LT[0/90], DB[+45/-45], DBT[+45/90/-45] 세 종류에 대한 복합재료 패널에 대하여 연구를 하였다.

2.3 인발성형에 의한 제조

복합재료의 제조방법으로 수직층 성형법, 필라멘트 와 인딩, VARTM(Vacuum Aassisted Resin Transfer molding)성형법, 인발성형(Pultrusion)등의 많은 제조공법이 있으나 일정한 단면을 가진 구조부재를 대량으로 생산 가능한 인발성형공법이 가장 적합한 것으로 판단된다. 그림 1은 인발성형 제조공정으로 연속섬유에 수지를 함침 시켜 일정한 단면형상의 가열된 금형을 통과하면서 연속적으로 제품이 성형되는 자동화된 제작방법이다. 금



〈그림 1〉 인발성형 개념도



〈그림 2〉 본 연구에서 제작한 구조보강용 복합재료 패널 형제제작비용이 높고, 횡방향(90°)의 섬유배열이 까다로운 단점도 있지만, 건설구조용 부재 생산에 가장 타당한 제조공법으로 인정되고 있다.

그림 2는 본 연구를 위해서 실제 제작한 구조 보강용 복합재료 패널의 형태로서 시트 형태가 아니지만 약 1m 지름으로 말아서 현장에서 손쉽게 이동할 수 있다.

2.4 복합재료 패널의 역학적 특성

복합재료는 인장력 작용시 파단 전에 소성거동(항복)을 보이지 않는 것이 특징이다. 복합 재료의 인장거동은 파단될 때까지 선형 - 탄성 응력 - 변형을 관계를 갖는다. 복합재료 중 보강섬유가 주 하중전달 모재이기 때문에, 보강섬유의 종류, 배향, 혼입량이 복합재료의 인장특성을 좌우한다.

일반적으로 접착판 공법에서 복합재료는 압축응력을 받는 경우로 사용되지 않는다. 복합재료의 압축강도는 인장강도보다 낮다. 길이방향으로 압축을 받는 복합재료의 파괴양상에는 종방향 인장파괴, 섬유 국부좌굴, 전단 파괴가 있고, 파괴형태는 섬유형태와 혼입량, 수지의 종류에 따라 다르다. 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드섬유의

〈표 2〉 복합재료 시편 시험 결과⁷⁾

	인장강도 (MPa)	인장탄성계수 (GPa)	휨강도 (MPa)	휨탄성계수 (GPa)
DB 2ply	536	32.1	584	18.7
DB 3ply	465	33.8	641	22.5
LT 2ply	546	35.4	515	21.8
LT 3ply	420	36.5	519	26.9
DBT2 ply	297	23.4	266	12.6

압축강도는 각각 인장강도의 55%, 78%, 20%이다. 일반적으로 압축강도는 인장강도가 높아질수록 또한 높아진다. 단, 상대적으로 낮은 응력에서 압축거동이 비선형을 보이는 아라미드의 경우는 예외이다.

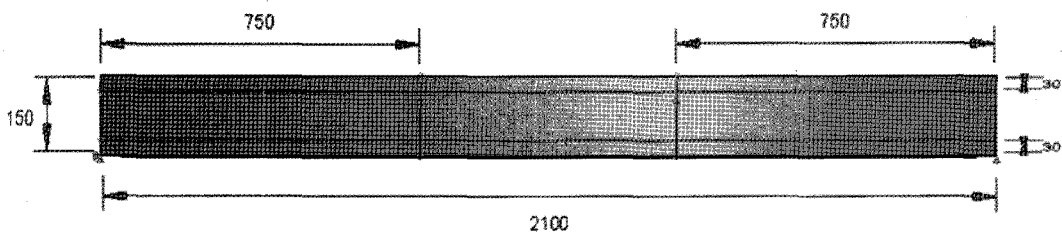
압축 탄성계수는 복합재료에 있어서 인장 탄성계수보다 더 작게 나타난다. 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드섬유의 압축 탄성계수는 인장 탄성계수의 각각 80%, 85%, 100%이다.

표 2에는 본 연구에 사용된 복합재료 패널을 한국화학시험연구원에 의뢰하여 재료 시편 실험을 한 결과를 나타내고 있다.⁷⁾

3. ABAQUS 해석

3.1 구조해석 개요

본 연구에서는 복합재료 패널의 보강 효과를 알아보기 위하여 범용유한요소 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 구조해석 모델의 콘크리트와 복합재료 패널의 부재 요소는 CPS4R(Plane stress)를 적용하였고, 철근은 T2D2(Truss)를 적용하였다.



〈그림 3〉 구조해석 모델의 형상 3.2 구조해석 모델

구조해석 모델은 철근콘크리트의 강도, 유효철근비와 복합재료 패널의 보강 종류에 따라 구별하였으며, 구조해석 모델의 종류 및 해석 시 입력된 재료값을 표 3에 나타내었다. As'는 압축

철근 단면적을 나타내고 As는 인장 철근 단면적을 나타낸다. 철근의 탄성계수와 항복강도는 각각 210GPa, 400MPa를 사용하였고, 철근과 콘크리트의 프아송비는 0.3과 0.167을 사용하였다. 최소철근비 이하의 모델은 전 단면에 대해서 인장이 작용할 것으로 보고 탄성계수를 압축부분의 탄성계수(31.034GPa)의 1/10(3.103GPa)을 사용하였다. 최소철근비 이상의 모델인 경우 철근콘크리트의 탄성계수를 인장부분과 압축부분을 나누어 모델링을 하였고, 인장부분의 탄성계수는 압축부분의 탄성계수의 1/10을 사용하였다. 각각의 해석 모델은 보강재의 종류에 따라 무보강보, DB2, LT2와 LT3로 4가지 해석을 하였다. 경계조건은 단순 지지이며, 하중은 양단부에서 각각 750mm떨어진 지점에 가하였다.

〈표 3〉 구조해석 모델의 종류

	As'(mm ²)	As(mm ²)	철근비
A	143	143	-
B	143	214	0.00297
C	143	380	0.00990
D	143	596	0.01888

3.3 구조해석 결과

복합재료 패널을 ABAQUS를 이용하여 해석한 극한 하중 값을 표 4에 비교하였다.

DB-2ply의 보강효과는 19%~35%를 나타냈으며 평균적으로 26%이며, DB-3ply의 보강효과는 21%~36%

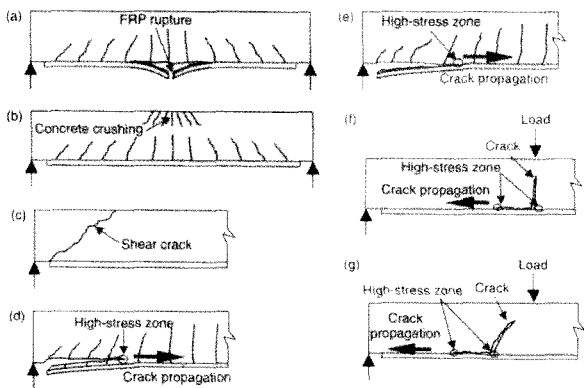
를 나타냈으며 평균적으로 29%이다. LT 패널의 경우 LT-2ply의 보강효과는 23%~34%를 나타냈으며 평균적으로 29%이며, LT-3ply는 24%~42%를 나타냈으며 평균적으로 34%의 높은 보강효과를 보였고 DBT 패널의 보강효과는 10%~30%를 나타냈으며 평균적으로 20%로 다른 패널에 비해 다소 낮은 보강효과를 보였다.

〈표 4〉 구조해석 모델의 결과(극한 하중) 단위: kN

	fck(MPa)	A	B	C	D
무보강	50	25.3	29.40	43.86	65.37
	25	14.53	17.65	27.57	49.00
DB2	50	31.77	37.79	57.60	78.54
	25	18.42	21.63	32.75	65.96
DB3	50	32.20	39.19	59.62	78.90
	25	19.05	22.46	34.14	64.58
LT2	50	32.01	39.37	58.15	80.13
	25	19.35	22.29	34.00	65.09
LT3	50	34.53	40.54	62.33	81.13
	25	20.42	23.38	34.29	64.24
DBT	50	27.84	36.07	55.08	75.64
	25	17.01	20.24	33.91	63.85

3.4 파괴 형태

그림 4는 일반적으로 휨 보강된 철근콘크리트 보의 7 가지 파괴형태를 보여주고 있다. (a)복합재료 패널 파열, (b)콘크리트 압축파괴, (c)전단 파괴, (d)콘크리트 표면 분리현상, (e)복합재료 패널 탈착, (f)내부 휨 균열에 의한 복합재료 패널 탈착, (g)전단 균열에 의한 복합재료



〈그림 4〉 휨 보강된 철근콘크리트 보의 파괴 형태

패널 탈착이 있다. 본 연구의 해석에서는 이러한 균열을 고려하지 않고, 복합재료 패널과 철근콘크리트가 완전하게 부착된 것으로 가정하였다.

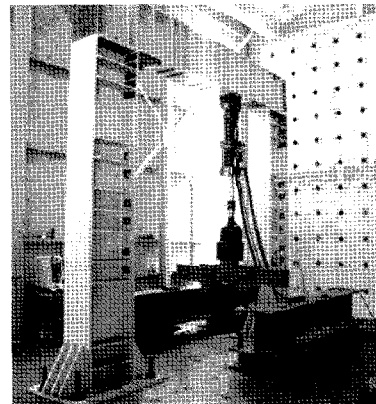
4. 구조실험

4.1 구조실험의 개요

본 실험은 인발성형 공법으로 제작된 복합재료 패널의 휨 보강 성능을 파악하기 위해 실험을 실시하였다. 철근 콘크리트 보의 하단에 긴결재를 이용하여 복합재료 패널을 접합하고, MTS사의 250kN 용량의 액츄에이터(Actuator)를 사용하여 변위제어 방법으로 가력 하였으며, FlexTest GT 제어기(Controller)를 사용하여 실험을 제어하였다. 또한, 변형률 및 변위측정을 위하여 일본 TDS 303 데이터로거(Data logger)를 사용하였다. 그림 5는 실험전경을 나타내고 있다.

4.2 실험체 개요

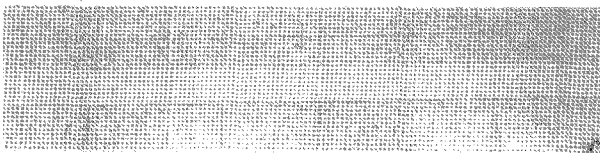
복합재료 패널을 표 5와 같이 제작을 하였다. 그림 6은 섬유배열이 DB인 복합재료 패널의 모습이다. DB-2 패널은 섬유배열을 DB로 하여 2층으로 적층을 하여 제작한 것이며, LT는 층의 개수에 따라 LT-2와 LT-3로 제작하였다.



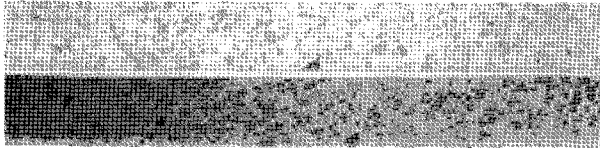
〈그림 5〉 프레임 및 액츄에이터 등의 실험전경

〈표 5〉 복합재료 패널의 제원

복합재료 패널 분류	패널 두께(t)	패널 폭(b)	패널 길이(L)
LT-2, LT-3, DB-2	3mm	120mm	2000mm

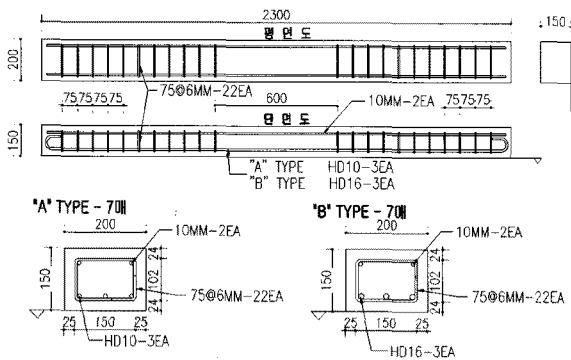


(a) 정면에서 본 복합재료 패널



(b) 측면에서 본 복합재료 패널

〈그림 6〉 복합재료 패널



〈그림 7〉 철근 콘크리트 상세

복합재료 패널의 휨 보강 성능을 확인하기 위하여 본 연구에서는 최소철근비 이하의 실험체 B와 일반적인 균형철근비의 실험체 D로 구분하여 실험을 진행하였다. 콘크리트의 강도는 50MPa이고, 철근의 인장강도는 400MPa이다. 그림 7은 실험모델의 전체적인 치수를 나타낸 것이다.

4.3 접합방법

복합재료의 접합은 크게 접착제를 이용한 접합방법과 긴결재를 이용한 접합방법이 있다. 접착제를 이용한 접합방법은 다음과 같이 복잡한 과정으로 이루어진다. 먼저, 보강재의 부착력을 향상시키기 위해 보강재를 부착하기 전에 표면을 그라인딩하여 불순물을 제거하고 접착면을 평활하게 먼처리 한다. 또한 접착이 잘 되도록 표면

에 프라이머로 도포하고 완전건조 후에 두께가 일정하게 에폭시를 바른다. 여기에 보강 재료를 접착시킨 후 다시 에폭시를 도포하여 보강 재료를 완전하게 접착되도록 한다. 보강재의 양생은 시공 후 5일 이상 충분히 양생한다.

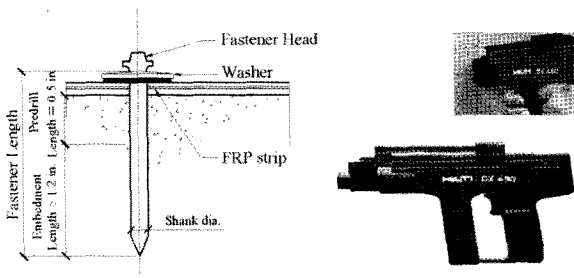
그러나 이러한 접착제를 이용하여 구조체에 부착시키는 방법은 보강성능, 시공성, 내구성 등에 있어 많은 문제를 야기시킨다., 또한 사전에 많은 작업으로 인해 시간이 소요되는 물론 접착제의 적정 양생온도를 맞춰 줘야 하기 때문에 공기가 길어진다.

접착제를 이용하여 접합을 하는 경우에는 응력집중이 최소화 되는 장점은 가지고 있으나, 접착제로 인한 환경적 영향과 접합부분의 표면 처리에 많은 시간을 필요로 한다. 그로인해 시공시간이 길어진다는 단점을 가지고 있다. 긴결재를 이용하여 접합을 하는 경우에는 사전작업이 필요하지 않아서 공사시간을 충분히 단축시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 국내에서는 긴결재를 이용한 접합방법에 관한 연구가 많이 이루어지고 있지 않다. 본 연구에서는 표 5에서와 같이 많은 장점을 가진 긴결재를 이용한 접합방식을 이용하였다.

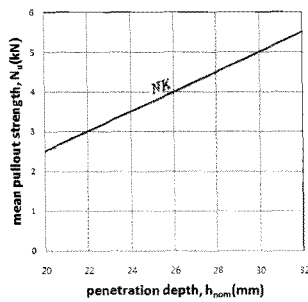
그림 8은 콘크리트와 복합재료 패널을 부착할 때 사용되는 타정공구(DX 450)와 긴결재(NK 54)이다. 타정공구는 소음, 강도 조절기와 자동 공포이송 장치가 있어서 작업이 쉽고, 또한 간단하게 청소 및 수리를 할 수 있다.

〈표 6〉 복합재료 접합 종류별 장단점

	접착제를 이용한 접합	긴결재를 이용한 접합
장점	- 응력 집중의 최소화	- 환경영향 받지 않음 - 표면처리 불필요 - 시공과정과 기간 단축 - 부착성능 검사 용이
단점	- 수지경화에 수분 악영향 - 접착제 사용으로 내화성능 저하 - 표면처리에 시간과 노력 필요 - 접합면이 구조물에서 박리 탈락 - 동절기에 부적절 - 부착성능검사가 어려움	- 긴결재 구멍에 응력집중 발생

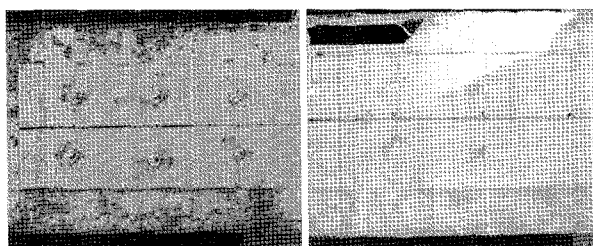


〈그림 8〉 긴결재 및 공구



〈그림 9〉 긴결재의 강도

긴결재 NK 27~NK 72까지는 DX 450을 이용하여 설치할 수 있고, 그 이상의 NK핀은 미리 망치질을 해야 한다. 선행 연구에서는 콘크리트 강도가 41.5 MPa의 실험체에 NK 47을 사용하였다. 본 연구에서는 실험체의 콘크리트 강도가 50MPa로 강도가 높아 긴결재가 충분히 들어갈 수 있도록 함과 동시에 효율적인 작업을 위하여 NK 54를 선택하였다. NK54의 전체 길이는 54mm이지만 헤드부분(5mm)과 복합재료의 두께(4mm)를 제외하면 최대 삽입길이는 45mm이다. 고강도 콘크리트를 사용하기 때문에 실제 삽입길이는 최대 삽입길이의 60%(27mm)로 가정을 하였다. 그림 9의 그래프는 삽입된 길이에 따른 긴결재의 강도를 나타내며, 본 연구의 긴결재 강도를 4kN으로 설정하였다.



(a) 80mm 50개소 (b) 80mm 6개소, 160mm 22개소

〈그림 10〉 긴결재의 설치

긴결재를 이용하여 복합재료 패널과 콘크리트를 부착하는 경우 최초 이격거리가 부적절하면 균열이나 실험체의 일부가 떨어져 나가게 된다. 이를 방지하기 위해서 최초 이격거리를 일반적으로 3인치를 권장하고 있으나 (ICBO 1998; Ramset 1999; Baldwin 1978), 고강도 콘크리트인 경우에는 최초 이격거리는 51mm(2in)를 사용한다(Hilti 1999). 본 연구는 긴결재를 80mm의 간격으로 50개소에 설치하거나(그림 10(a)), 단부 12개소는 80mm간격, 중앙부는 160mm간격으로 설치하였다.(그림 10(b))

4.4 실험결과

철근콘크리트 보에 복합재료 패널을 이용하여 구조보강 실험 및 해석한 결과를 표 7과 그림 11에 나타내었다. 표 7의 뒤에 첨자A는 똑같은 실험을 두 번 했을 때의 결과이며, 그림 11의 10, 16은 철근의 지름이다.

그림 11(a)는 B-DB-2와 B-DB-2A의 하중-변위 곡선을 나타내고 있다. 곡선의 개형은 비슷하게 나타나고 있지만 최대하중 41.15kN, 37.06kN과 최대 처짐 67.72mm, 51.01mm로 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이는 하중이 증가함에 따라 철근 콘크리트와 복합재료 패널의 부분적으로 탈착이 되면서 일어나는 현상으로 판단된다.

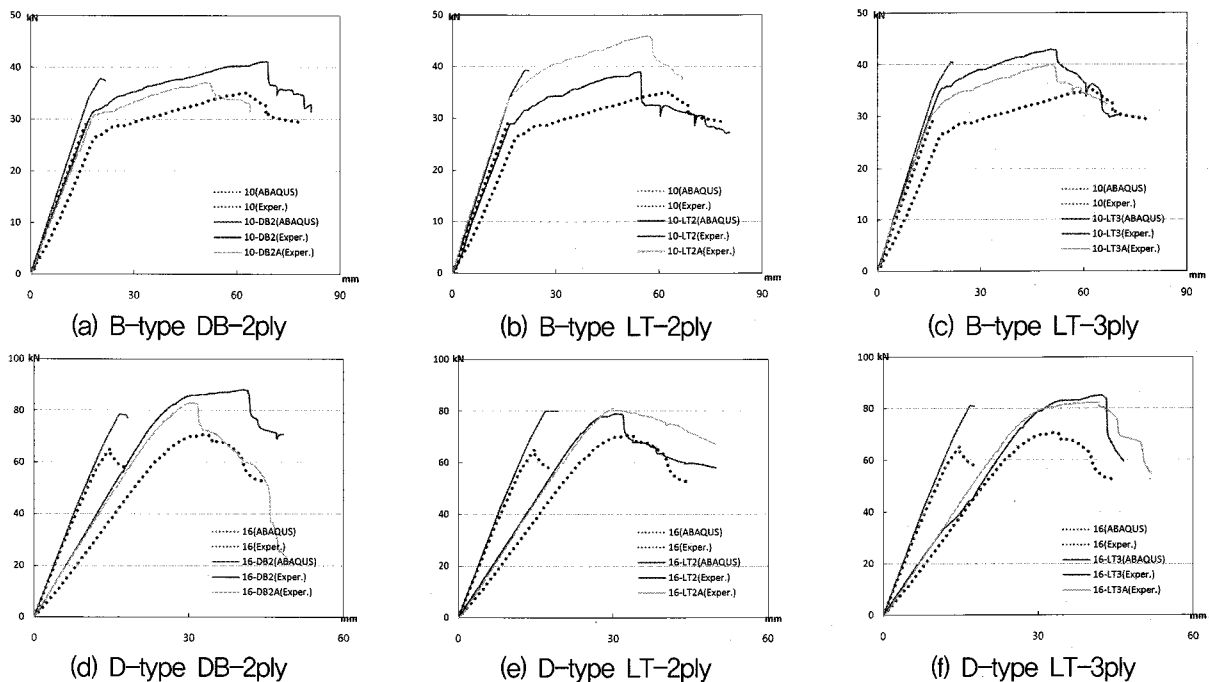
B-LT-2는 긴결재를 단부 80mm, 중앙부 160mm 간격으로 설치를 하였고, B-LT-2A는 단부와 중앙부 모두를 80mm 간격으로 설치하였다. 그림 11(b)에서와 같이 B-LT-2A의 최대하중이 45.88kN으로 B-LT-2의 최대하중(39.03kN)보다 크게 나타났으며, 이는 보강면적 전체에 긴결재를 80mm 의 간격으로 설치하는 것이 보다 큰 효과가 나타남을 알 수 있다.

D-DB-2와 D-DB-2A의 하중-변위 곡선(그림 11(d))도 B-type과 같이 최대하중 88.04kN, 82.88kN과 최대 처짐 40.49mm, 30.27mm로 차이가 나는 것을 알 수 있다.

D-LT-2는 긴결재를 단부에 앵커볼트를 설치하고, 중앙부에는 160mm 간격으로 긴결재를 설치하였고, 실험체 D-LT-2A는 단부와 중앙부 모두를 80mm 간격으로

〈표 7〉 구조보강용 복합재료 패널의 구조해석 및 실험 결과

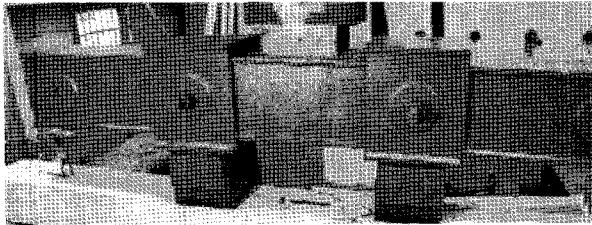
실험체 분류	복합재료 패널	긴결재간격	실험체 분류	복합재료 패널	
			극한하중(kN)	극한하중(kN)	변위(mm)
B	무보강	-	29.40	35.08	63.19
B-DB2	DB-2ply	단부-80mm 2열 중양부-160mm 2열	37.79	41.15	67.72
B-DB2A	DB-2ply	단부-80mm 2열 중양부-160mm 2열		37.06	51.01
B-LT2	LT-2ply	단부-80mm 2열 중양부-160mm 2열	39.37	39.03	50.45
B-LT2A	LT-2ply	80mm 2열		45.88	50.40
B-LT3	LT-3ply	80mm 2열	40.54	42.97	54.42
B-LT3A	LT-3ply	80mm 2열		39.91	56.66
D	무보강	-	65.37	76.70	32.97
D-DB2	DB-2ply	단부-80mm 2열 중양부-160mm 2열	78.54	88.04	40.49
D-DB2A	DB-2ply	단부-80mm 2열 중양부-160mm 2열		82.88	30.27
D-LT2	LT-2ply	Anchor 사용 80m1열	80.13	79.12	30.61
D-LT2A	LT-2ply	80m2열		81.21	29.91
D-LT3	LT-3ply	80m2열	81.13	85.14	42.22
D-LT3A	LT-3ply	80m2열		82.42	41.52



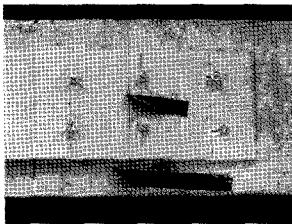
〈그림 11〉 복합재료 패널 종류별 하중-변위 곡선



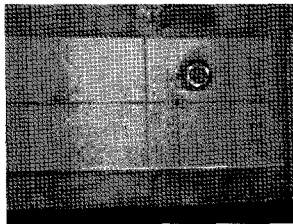
〈그림 12〉 "B" TYPE DB-2의 휨파괴



〈그림 13〉 "D" TYPE LT-3의 압축파괴



〈그림 14〉
"B" TYPE LT-2 지압파괴



〈그림 15〉
"D" TYPE LT-2 지압파괴

설치하였다. 그림 11(e)에서와 같이 최대하중 및 최대 처짐까지의 하중-변위 관계가 일치하였다. 앵커볼트를 사용하지 않고 긴결재로 충분히 같은 효과를 낼 수 있음을 알 수 있다.

D-LT-3와 D-LT-3A는 긴결재를 모두 80mm 간격으로 설치를 하였다. 그림 11(f)에서와 같이 두 실험체 모두 비슷한 곡선을 그리고 있으며, 최대 하중 역시 85.14kN, 82.42kN으로 거의 일치하고 있다.

4.5 실험결과(파괴형태)

"B" TYPE의 실험체는 그림 12에서와 같이 전형적인 휨 파괴를 하였다. 지속적으로 힘을 가하였을 경우 가력점에서 압축 파괴가 일어났다. 또한 복합재료 패널과 콘크리트를 접합하는 긴결재의 지압 파괴도 일어났다.(그림 14) "D" TYPE의 실험체도 "B" TYPE의 경우와 같이 전형적인 휨 파괴를 하였다. "D" TYPE에서도 지속적으로 힘을 가하였을 경우 가력점에서의 압축파괴가 일어났

다.(그림 14) 앵커볼트를 사용한 실험체에서도 지압파괴 현상이 일어났다.(그림 15)

5 결 론

본 연구에서는 섬유 적층각 최적화 방법을 이용한 비접착식 구조보강용 복합재료 패널을 개발 하였다. ABAQUS를 이용한 구조해석 결과와 구조실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) B-LT2와 B-LT2A의 실험결과와 ABAQUS를 이용한 해석을 비교해 본 결과 본 연구에 사용된 긴결재 NK를 사용한 결과와 앵커볼트를 사용한 결과가 매우 유사하다. 따라서 본 연구에 사용된 긴결재(NK)는 철근콘크리트와 복합재료 패널을 접합하기 위해 충분한 것으로 사료된다.

(2) 보강면적 전체에 긴결재를 충분히 이용하여 접합하지 않으면 복합재료를 이용한 보강의 효과가 큰 오차를 보이고 있음을 알 수 있다.

(3) 본 연구에 사용된 복합재료 패널은 최대 31%의 우수한 보강효과를 보였다. 접합방법으로는 긴결재를 이용하여 시공이 간단하며, 시간도 매우 절약됨을 알 수 있다.

(4) 본 연구에서 사용된 복합재료 패널은 긴결재 접합에서 발생하는 쪼개짐이나 전단파괴 형태의 급격한 파괴 형태가 아닌 유리섬유 방향을 적절히 보강함으로써 파괴 형태 중 가장 바람직한 지압파괴 양상을 유도하였다.

-감사의 글-

본 연구는 2008년도 중소기업 기술개발 지원사업(과제번호 : S1024289)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

-참고문헌-

1. 김중구(2004). 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보의 보강성능에 관한 연, 한국건설관리학회논문집.
2. 안상호, 이상호(2006). FRP로 보강된 철근콘크리트 보의 휨 보강설계, 대한건축학회논문집.
3. 유영찬, 최기선, 한상환, 강기연(2004). 난연성 FRP패널을 이용한 철근콘크리트 보의 휨 보강성능 평가, 대한건축학회논문집.
4. 이수진(2001). FRP로 외부 보강된 철근 콘크리트 보의 보강 변수 영향에 관한 연구. 학위논문.
5. 이원호, 임재형(2005). 탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보의 휨내력 평가에 관한 실험연구, 대한건축학회논문집.
6. 이용택, 나정민, 이리형(2002). 탄소섬유시트 또는 강판으로 휨보강된 철근콘크리트 보의 유한요소해석, 대한건축학회 논문집.
7. 한국화학시험연구원(2008). FRP 시편 시험성적서.
8. 힐티 코리아(2008). www.hilti.co.kr 제품 정보
9. Guido Camata, Enrico Spacone, Poko Zarnic(2007). Experimental and nonlinear finite element studies of RC beams strengthened with FRP plates, Composites part B.
10. Hamid Rahimi, Allan Hutchinson(2001). Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates, Journal of composites for construction.
11. J. Yao, J. G. Teng(2007). Plate end debonding in FRP-plated RC beams- I :Experiments, Engineering Structures.
12. Lawrence C. Bank, David T. Borowicz, Dushyant Arora, Anthony J. Lamanna, Gerardo I. Velazquez, James C. Ray(2004). Strengthening of concrete beams with fasteners and composite material strips-scaling and anchorage issues, US Army Corps

of Engineers.

13. Lawrence C. Bank, Dushyant Arora(2007). Analysis of RC beams strengthened with mechanically fastened FRP(MF-FRP) strips, composite structures
14. Paul J. Fanning, Oliver Kelly(2001). Ultimate response of RC beams strengthened with CFRP plates, Journal of composites for construction.
15. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.(Version 6.5). ABAQUS Manual.

▶접수일자 : 2009년 6월 10일

▶심사 완료일자 : 2010년 6월 10일

▶게재 확정일자 : 2010년 6월 10일