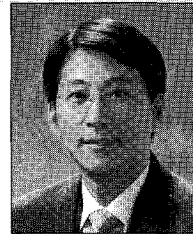
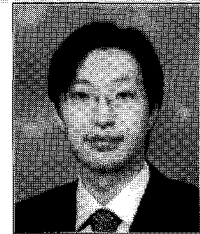


GFRP를 이용한 경량 중공 합성 바닥의 구조 거동

Structural Performance of Light-Weight Void Slab with GFRP



주 영 규*



류 재 호**

* 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

** 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정

1. 서 론

국내 대표적 주거 양식인 아파트는 최근 들어, 도시 인구 및 시설의 밀집화와 집약화로 한정된 토지를 효율적으로 이용할 수 있고, 직장과 주거를 근거리화하여 도심 속에 발생하는 공동화 현상 등을 감소시킬 수 있는 이점을 지닌 타워형 고층빌딩으로 그 형태가 점차 변화해 가는 추세이다.¹⁾ 그러나 아파트가 점차 고층화 되어감에 따라 아파트 골조 형식으로 주로 사용되어 왔던 RC 내력벽 구조는 그 한계에 도달하게 되었다.

특히, 빠르게 변화하는 현대사회에서 거주자의 가족 주기 변화에 따른 요구사항이나 기호를 충분히 반영할 수 있는 거주공간에 대한 수요가 높아짐에 따라 이러한 욕구를 충족시킬 수 있는 평면구조가 더욱 절실히 요구되고 있다. 이에 기존 내력벽 구조방식에 의한 획일적인 공간구성은 거주자 및 사회의 다양한 변화에 적절히 대응하지 못하는 단점을 지니고 있어, 간막이벽 설치가 용이하고 평면구성이 비교적 자유로운 형식의 아파트 구조는 앞으로도 꾸준히 증가할 것으로 예상된다.

더욱이 무분별한 재건축을 억제하고 주택의 장수명화를 장려하는 정책이 시행되면서 기존 아파트의 구조형식 변화는 불가피하게 되었다.²⁾ 지난 2010년 2월, 리모델링이 쉬운

지속가능형 건축구조에 대해서 용적률을 최대 10%까지 올려준다는 서울시 ‘공동주택 건립 관련 업무처리지침’의 공표는 이러한 변화를 더욱 가속화할 것으로 예상된다.³⁾

현재, 가변성 확보가 용이하면서 지속가능형 건축구조로 많이 적용되고 있는 시스템이 무량판 구조(Flat-Plate System)이다. 무량판 구조의 경우, 슬래브-기둥 골조 시스템을 기반으로 기존 벽식구조에 비해 평면계획이 자유로우며, 층고절감 효과가 뛰어난 장점을 지니고 있다.⁴⁾ 그러나



그림 1 타워형 주상복합아파트 (삼성동, H사)

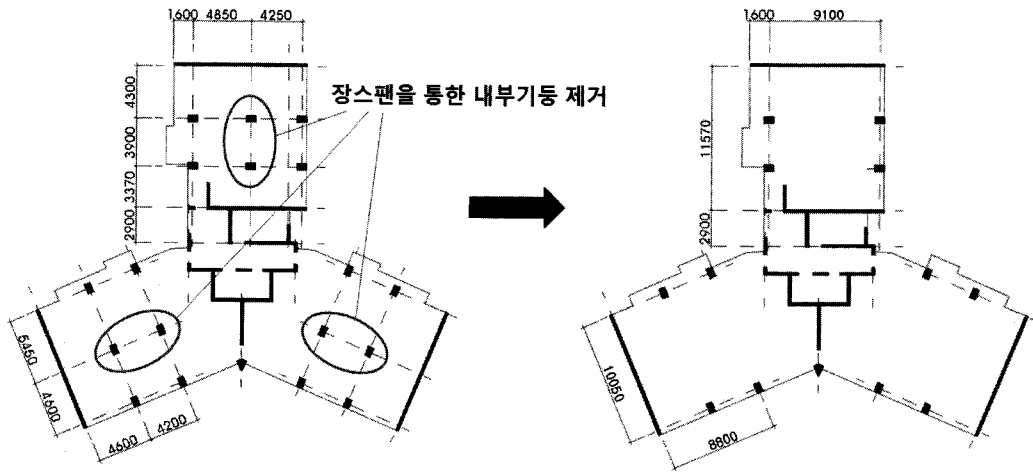


그림 2 전형적인 Y자형 무량판 구조 평면

슬래브와 기둥 접합부 사이의 철저한 구조 검토 및 정밀성 높은 시공이 요구되는 단점을 가지고 있으며⁹⁾, 균열 및 장기 처짐 등의 사용성에 대한 우려로 스패인 4~5m로 한정되는 제약을 가지고 있다. 따라서 한 변의 길이가 10m가 넘는 평면에서 세대 내에 기둥이 위치하게 되는 현상이 발생해 내부 공간 사용에 제약을 줄 수 있게 된다. 이에 장스팬 확보는 물론 기존 무량판 구조시스템과 비교해 충고절감 효과가 뛰어난 강구조 형식의 바닥시스템을 개발하고자 하였다.

2. GFRP를 이용한 경량중공 합성바닥

2.1 GFRP 특성 및 적용사례

GFRP란 Glass Fiber-Reinforced Plastics의 약자로 유리섬유와 이 섬유를 결합하기 위한 합성수지로 구성된 화학중합체를 일컫는다. GFRP는 기존 사용되어 온 건설재료에 비해 가볍고, 내구성 및 강도 등이 뛰어나 1950년대부터 구조공학 분야에 적용되기 시작하였으며⁶⁾, 최근 들어 다양한 연구를 기반으로 RC 구조물의 철근 대체 보강재나 기둥 및 보 부재 그리고 슬래브에 이르기까지 그 적용범위를 넓혀가고 있는 추세이다.

대표적인 적용사례로는 1999년 스위스에 건설된 ‘The Eyecatcher Building’으로 건물에 사용된 모든 구조체가 GFRP로 설계되었으며, 세계에서 가장 높은 GFRP 빌딩이다(그림 3).⁷⁾ 또한 미국의 ‘The O’FALLON Park Bridge’는 교량의 슬래브를 GFRP로 제작하여 적용하였다.⁸⁾

최근에는 이러한 GFRP 적용 확산과 더불어 내화문제의

관련된 연구가 많이 진행되고 있으며, 이를 통해 열에 의한 GFRP의 재료적 특성을 검증하고자 하는 노력이 많이 이루어지고 있다. 일반적으로 GFRP는 유리섬유를 감싸고 있는 합성수지 조직이 열에 의해 부드러워지는 유리전이온도(100℃~200℃)를 가지는 특성이 있으며, 이 온도 이상이 되면 크리프 현상이나 강도 저하 등의 특성이 발현된다. 그러나 열전도율이 매우 뛰어나 소정의 내화피복이 갖추어지게 되면, 뛰어난 열절연체로 거동하여 화재의 확산을 방지하고 주요 구조체와 함께 사용할 경우 이를 보호하는데 효과적인 장점을 가지고 있다.⁹⁾ 따라서 이러한 GFRP 특성을 충분히 반영하여 충고절감형 강구조 합성바닥을 제안하였다.

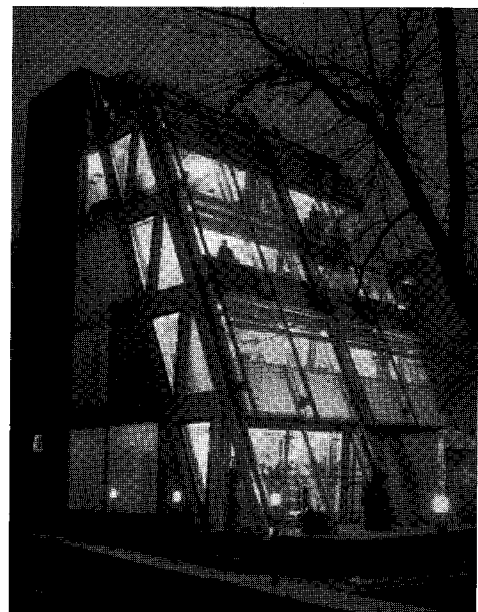


그림 3 The Eyecatcher Building

2.2 개선 방향

새로 개발된 GFRP를 적용한 합성바닥은 8m 이상의 장스팬 구현, 무량판 시스템 수준의 층고절감 효과 그리고 향상된 내화성능을 주요 연구목적으로 한다. 이를 달성하기 위해 다음에 기술되는 4가지의 개선 방향을 설정하였다.

첫째, 중공 설치에 따른 슬래브 경량화이다. 기존 무량판 시스템의 경우, 슬래브 두께가 일반 철골보 + 데크 시스템의 슬래브(약 135mm)에 비해 1.8~2배 가량 증가하여 보다 큰 휨강성을 가지나 자중 증가에 따른 장스팬 구현이 힘들었다. 이에 슬래브의 자중을 경량화하기 위한 방안으로 슬래브 내에 중공 EPS(Expandable Poly-Styrene)를 설치하였다(그림 4-1).

둘째, GFRP를 통한 내력증진이다. 슬래브가 장스팬화 되어감에 따라 보가 받아야 하는 휨내력은 증가하게 된다. 그러나 일반 합성데크 시스템 상에서 사용되던 강재보의 휨이 슬래브의 슬림화로 250mm이하로 줄어들게 되어 강재보의 휨 저항성능이 크게 떨어지게 된다. 이점을 보완하기 위해 GFRP 플레이트를 강재보 하부플랜지에 부착하였다. GFRP는 강재와 같은 뛰어난 인장력(약 500 MPa)을 가지고 있어 부족한 휨내력을 보완하기에 충분한 성능을 지니고 있다(그림 4-2).

셋째, 장스팬화에 따른 작은 보 제거와 물량 절감이다. 본 연구를 통해 개발된 합성바닥의 보는 스패ن 8m이상 구현하는 것이 가능하며, 철골 데크와 두꺼워진 콘크리트 슬래브의 일체화된 거동으로 일반 강구조 시스템에 비해 슬

래브의 강성을 증진시킬 수 있다. 이를 통해 작은 보를 제거하고 그에 따른 공기 단축, 물량 감소 그리고 경제성 등을 확보하고자 하였다(그림 4-3).

마지막으로 강구조 시스템 상에서 중요하게 확보되어야 하는 것 중의 하나가 바로 내화피복이다. 기존 합성데크 강구조 시스템 상에서는 이러한 내화 성능을 확보하기 위해 내화 뿔칠, 내화 페인트, 내화 보드 등을 사용하였다. 그러나 본 연구를 통해 제안된 시스템에서는 우선 슬림플로어(Slimfloor) 형식을 통해 전체 내화 피복량을 70%를 절감하였으며, 외기와 맞닿는 하부 플랜지에는 GFRP를 부착함으로써 내화성능을 향상시키고자 하였다. 현재 기술수준에서 GFRP의 내화 피복재로서의 성능은 크지 않으나, GFRP에 내화 페인트 등의 간단한 피복을 통해 난연재로서의 강재보를 보호하고 내력을 발현한다는 점에서 기존 뿔칠을 통한 작업보다 효과적인 현장 공정이 기대된다(그림 4-4).

2.3 GFRP 경량중공 합성바닥의 구성

앞서 언급한 4가지 개선안을 바탕으로 GFRP를 이용한 합성바닥은 비대칭 강재보, GFRP 플레이트, 상·하부 철근, 중공 EPS, 와이어 메쉬 그리고 콘크리트로 구성된다.

중양에 설치되는 강재보의 경우, 슬림플로어 시스템과 마찬가지로 양측면에 강재 데크의 설치를 용이하게 하기 위해 비대칭 형상을 사용하였다. 웹에는 원형으로 개구부를 두어 슬래브의 하부 철근을 관통시켜 슬래브의 연속성을 확보하고자 하였으며, 강재 물량 및 전체 시스템의 중

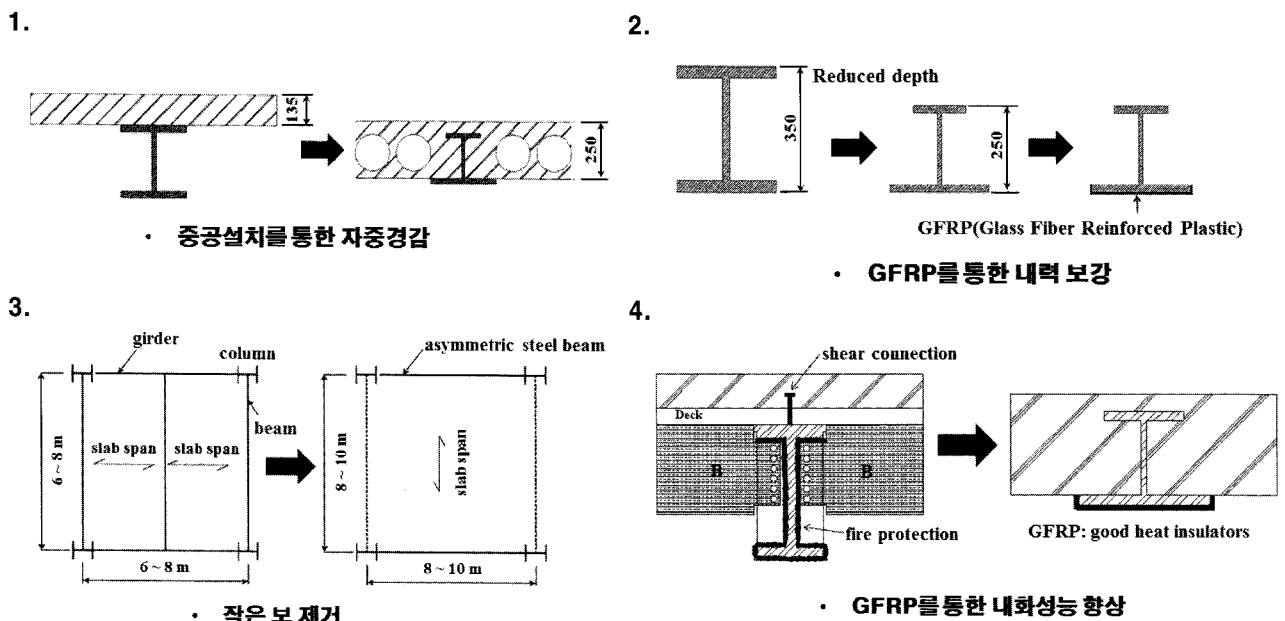


그림 4 개선방향

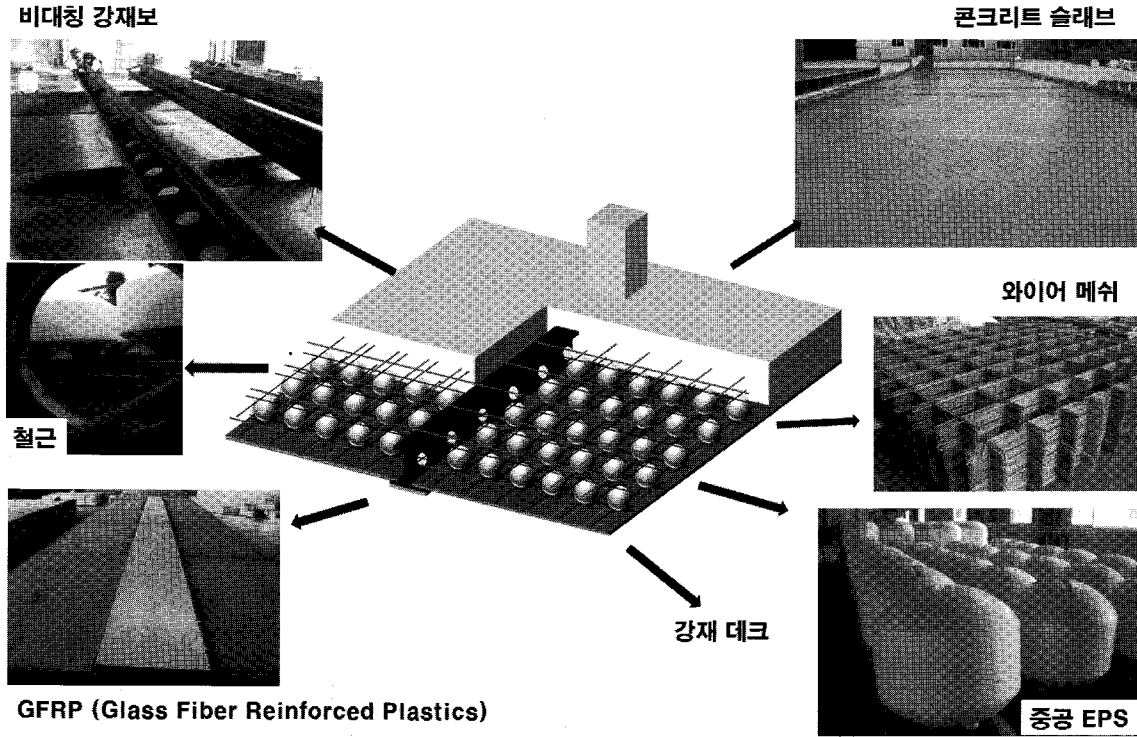


그림 5 GFRP 경량중공 합성바닥 구성

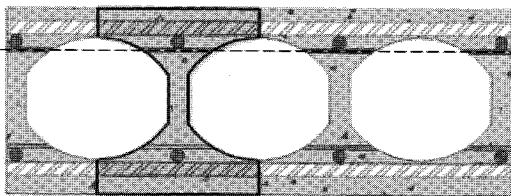


그림 6 중공 형상 및 설치 위치

량을 줄이고자 하였다. 또한 경우에 따라서는 이 개구부를 통해 설비시설을 위치시킬 수도 있다.

중공은 슬래브 휨성능에 큰 영향을 미치지 않는 압축측 콘크리트와 인장측 철근 사이의 공간에 설치하였으며, 그 형상은 가로방향으로 긴 타원형의 주변부를 수직방향을 잘라낸 형상을 사용해 남은 콘크리트 부분이 마치 일렬의 H 형강을 놓은 것과 같은 형상을 띠도록 하였다(그림 6).¹⁰⁾

와이어메쉬는 설치될 개개의 중공을 하나의 조립체로 묶어주는 역할을 하며, 이를 수개의 단위로 구성하여 강재 데크 및 슬래브 하부철근 위에 고정 설치한다(그림 7).

사용된 GFRP 플레이트의 경우, 외기와 맞닿는 하부플랜지 전체를 감싸기 위해 'ㄷ'자형의 형상을 사용할 계획이며, 접합 방식으로는 전면을 에폭시로 부착하는 방법과 볼팅(bolting)을 적용하고 단부에만 에폭시를 적용하는 방법이 있다(그림 8).

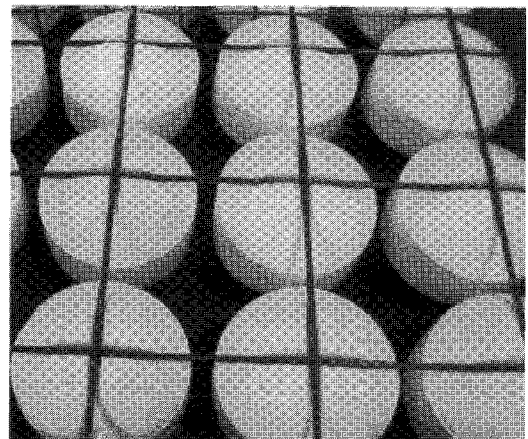


그림 7 와이어메쉬와 중공 조립체

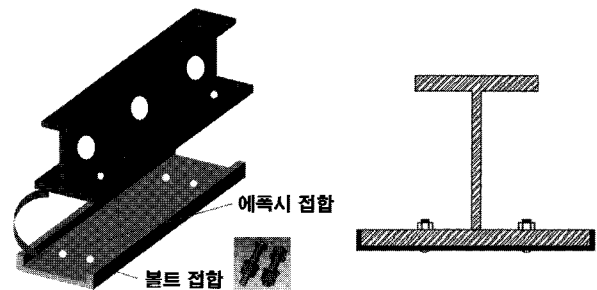


그림 8 GFRP 형상 및 부착 상세

3. GFRP를 이용한 경량중공 합성바닥의 휨성능 실험

3.1 실험 계획

개발된 GFRP를 이용한 경량중공 합성바닥의 휨성능을 평가하고 GFRP의 부착력 및 구조적 거동에 대해 살펴보기 위해 휨실험을 실시하였다.

3.1.1 실험 변수 및 내력 설계

총 3개의 실험체를 제작하였으며, 각각 GFRP의 부착여부, 웹 개구부 및 중공률을 변수로 설정하였다. 각각의 실험체에 대한 형상 및 상세는 표 1과 그림 9에서 살펴볼 수 있다. 휨 실험체 M-G0는 GFRP를 부착하지 않은 경량합성바닥으로 전체 슬래브 길이는 6,000mm, 폭 1,500mm, 콘크리트 슬래브 두께 : 260mm이다.

실험체 M-G1은 실험체 M-G0와 동일하게 제작되며, 여기에 비대칭 강재보 하부에 두께 4.5mm, 폭 300mm, 길이 6000mm의 GFRP를 에폭시로 부착하여 제작하였다. 본래 하부 플랜지를 감싸는 형태인 ‘ㄷ’자형의 GFRP를 적용하는 것

표 2 재료 실험 결과

(a) 강제 플레이트 (SM490 - 12t)			
실험체	F _y (MPa)	F _t (MPa)	E _s (×10 ⁵ MPa)
Avg.	384.5	555.6	1.95
(b) 강제 플레이트(SM490 - 20t)			
Avg.	345.0	535.7	2.01
(c) 철근 (SD400 - D10)			
실험체	F _y (MPa)	F _t (MPa)	E _s (×10 ⁵ MPa)
Avg.	509.8	639.7	1.72
(d) 철근 (SD400 - D16)			
Avg.	506.0	633.2	1.73
(e) 콘크리트 (f _{ck} = 23.54MPa, 재령일 35일)			
실험체	f _c (MPa)	E _c (×10 ⁴ MPa)	
Avg.	34.3	2.75	
(f) GFRP 플레이트 (4.5)			
실험체	F _t (MPa)	E _G (×10 ⁴ MPa)	
Avg.	504.3	1.19	

이 최종 목적이나 성능평가 단계에서 생산 여건 및 실험상의 편익을 고려해 가장 단순한 직사각형 플레이트를 적용하였다.

실험체 M-SL은 웹 개구부 유무와 중공률 변화에 따른 슬래브의 내력 설계가 기존 코드에 의한 방식으로 해석이 적합한지를 알아보기 위해 웹의 개구부를 없애고, 중공

표 1 휨 실험체 일람표

실험체명	실험체 크기			형강크기							경량체			GFRP 두께
	높이	폭	길이	상부 플랜지 길이	하부 플랜지 길이	웹 길이	플랜지 두께	웹 두께	길이	웹 개구부	가로/세로	높이	간격	
M-G0	280	1500	6000	160	300	200	20	12	6000	100	220/220	160	30	-
M-G1	284.5	1500	6000	160	300	200	20	12	6000	100	220/220	160	30	4.5
M-SL	330	1500	6000	160	300	250	20	12	6000	-	220/220	210	30	-

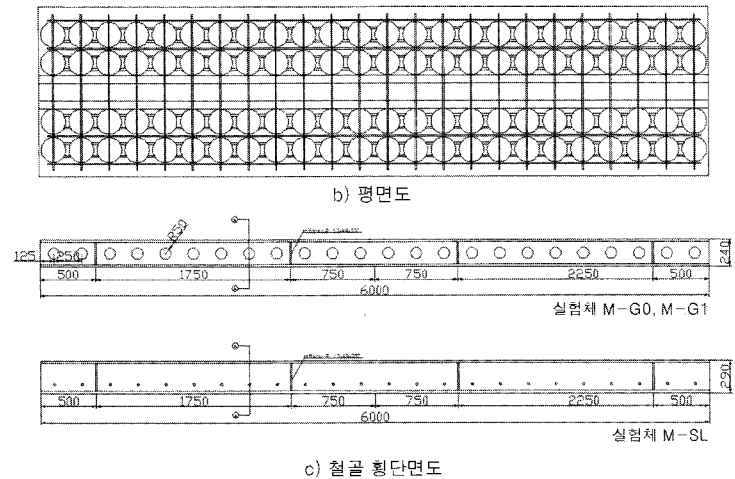
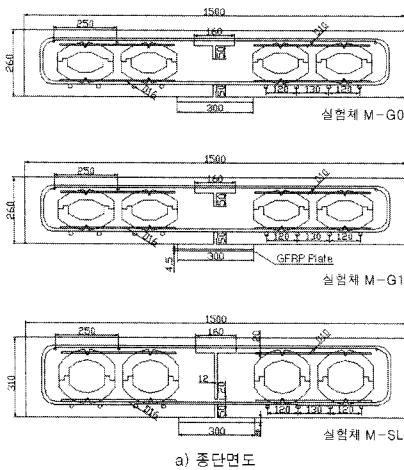


그림 9 휨실험체 종류 및 상세

를 29%에서 32%로 증가시킨 실험체이다.

한편 실제건물 적용 시, 사용하게 될 강재 데크는 춤이 35mm미만으로 장스팬 시스템에서 구조적으로 큰 성능을 발휘하지 못할 것으로 감안하였으며, 또한 실험전개상 발생하는 슬래브 하부의 균열 및 파괴 형상의 관찰을 용이하게 하기 위해 생략하였다.

한편, 본 연구를 통해 개발된 합성바닥의 극한내력은 미국 American Institute of Steel Construction에서 발행한 강구조 시방서의 I1.1b. Strain-Compatibility Approach에 의거하여 산출하였다.

3.1.2 가력 및 계측 계획

실험체 가력은 중앙부 1,500mm에 순수휨 구간이 형성되도록 2점 가력하였으며, 가력은 10,000kN UTM(Universal Testing Machine)을 사용하여 변위 제어 0.04~0.06mm/sec의 속도로 가력하였다. 지점은 롤러를 사용하여 단순지지 하였다(그림 10).

또한 실험체 중앙 처짐을 계측하기 위해 변위계를 설치하였으며, 하부플랜지와 주변 콘크리트 사이의 미끄러짐(slip)을 계측하기 위해 50mm 용량의 LVDT(Linear Variable Displacement Transducer)를 실험체 중앙부에서부터 600mm 간격으로 7개를 부착하였다. 그리고 각 실험체 위치별로 변형률 게이지를 부착하여 하중단계별로 변형률을 측정하였다.

3.2 실험 결과

3.2.1 재료실험 결과

재료실험 결과, 콘크리트는 9개 공시체에 대한 평균압축강도가 34.3MPa(재령일 35일)로 나타났으며, 강재(SM490)

및 철근(SD400) 시편의 인장강도는 각각 3개씩 제작, 실험하였으며, 그 결과는 표 2와 같다.

GFRP의 경우, 기준 규정 KS M 3381에 의거하여 실험하였으며, 세 개 인장 시편의 평균 인장강도는 504.3MPa, 탄성계수는 11,856MPa이었다.

3.2.2 휨성능실험 결과

실험체 M-G0와 M-G1의 전반적인 거동 양상은 [인장부 콘크리트 초기 균열] → [강재 웹개구부 하부 항복] → [강재 하부플랜지 항복] → [압축부 콘크리트 압괴] 순으로 거의 비슷하게 발생하였다. 그리고 실험체 항복은 추후 스트레인 분석을 통해 비대칭 철골보의 웹 개구부 하부에서 휨 인장응력의 집중으로 하부플랜지보다 먼저 항복이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 항복이후 최대내력점에 도달한 후, 압축부 콘크리트의 압괴로 하중이 감소하는 현상이 나타났다. 실험체 M-G1의 경우, 철골보 하부에 부착한 GFRP의 영향으로 하중감소가 굴곡형상을 띄며 점진적으로 나타났다. 이러한 웹 개구부 주변의 응력집중현상에 의한 하중 감소 및 파괴현상을 고려하여 적절한 웹 개구부 형상 및 사이즈에 대한 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

한편, 세 실험체의 항복하중에 대해서 실험값이 이론값에 비해 모두 7~10% 상회하는 일관된 경향을 나타냈으며, 최대내력의 경우, 실험값에 대해 2~5% 높은 해석값을 나타내 중공의 크기나 웹 개구부의 여부에 상관없이 유사한 해석경향을 나타냈다. 이를 통해 최대내력산정에 사용된 AISC I1.1b의 Strain-Compatibility Approach와 탄성범위 내의 탄성계수 비에 의한 단면치환법은 GFRP 경량합성바닥의 내력산정을 위한 적절한 해석방법으로 평가되어질 수 있다(표 3).

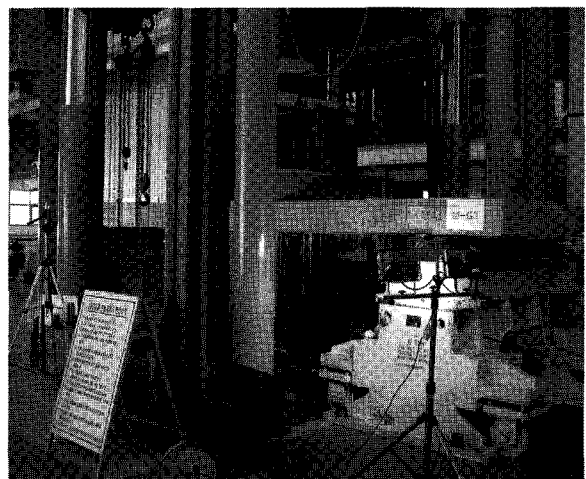
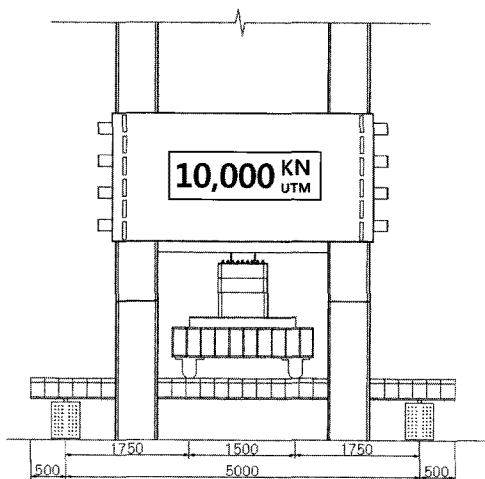


그림 10 Test Set-Up

표 3 실험 결과표

실험체	항복하중(P_y)			항복변위(Δ_y)		극한하중(P_u)		
	P_{ye}	P_{yt}	P_{ye}/P_{yt}	Δ_{ye}	Δ_{yt}	P_{ue}	P_{ut}	P_{ue}/P_{ut}
M-G0	677	625	1.08	48.8	35.3	713	781	0.91
M-G1	708	632	1.12	44.8	35.4	789	809	0.98
M-SL	857	803	1.07	36.8	29.7	991	1045	0.95

하중단위: kN, 변위단위: mm
아래첨자 'e'는 실험값, 't'는 이론값을 나타낸다.

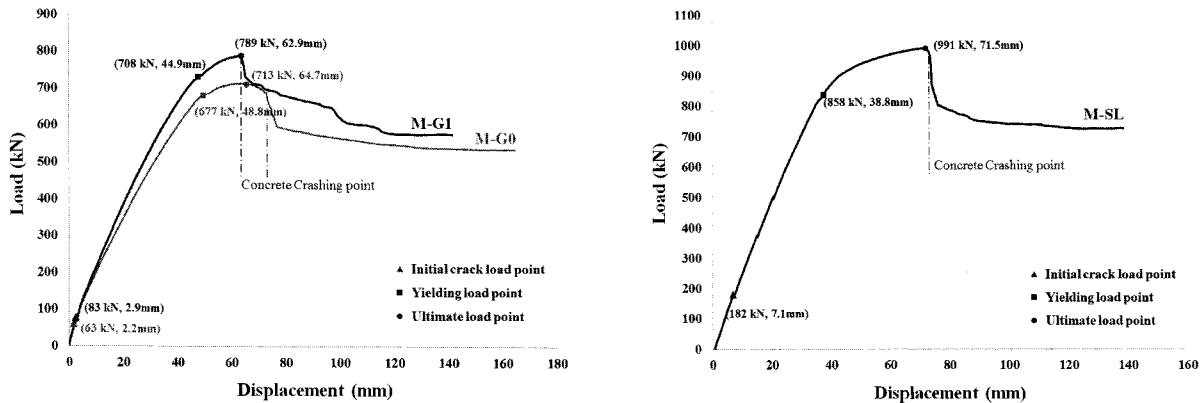


그림 11 각 실험체별 하중 변위 곡선

실험체 M-G1에 부착된 GFRP 플레이트는 실험이 종료되는 시점까지 강재보 하부 플랜지에서 탈락되거나 파단되지 않았으며, 강재보와 일체거동하였다. 강성이나 강도 측면에서는 부착하지 않은 실험체 M-G0에 비해 10% 성능이 향상된 것을 확인해 볼 수 있었다.

또한 콘크리트 슬래브와 강재보 사이에 설치한 LVDT 계측값이 1~1.5 mm로 매우 작은 미끄러짐(slip)만이 관찰되었으며, 실험체의 수직단면으로 부착한 변형률값을 통해서 웨브 개구부가 없는 구간에서는 파괴시점까지 선형적인 변형률 분포를 나타내 두 재료 간에 완전합성거동이 이루어졌을 확인할 수 있었다.

4. 결 언


본 기술은 기존의 무량판 구조 시스템을 대체할 장스팬-충고절감형 바닥시스템으로 기존 건설재료에 GFRP 소재를 적용한 것을 큰 특징으로 한다. GFRP는 유리섬유와 이를 둘러싼 합성수지로 구성된 화학중합체이며, 강재에 비해 가볍지만 높은 인장력을 가지는 것을 특징으로 한다. 이러한 GFRP 플레이트 부착을 통해 제안된 슬래브의 휨강성 및 강도 측면에서 10%에 가까운 성능 향상을 거둘 수 있었으며, 또한 내화피복 측면에서도 현장에서의 뿔칠 작업과 같은 번잡성을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

현재 개발된 기술의 실용화 및 보급화를 위해 지속적인 연구가 이루어지고 있으며, 추후 대규모로 건설되는 아파트 및 오피스 건축물에 주로 적용될 것으로 판단된다. 또한 본 기술을 통해 보다 개선된 장스팬 바닥슬래브 공법을 구현하며, 생산비, 운송비, 양중비 및 공기절감에 따른 건설비 절감 등 경제적인 효과도 달성할 수 있을 것이다.

건설 산업이 지구 환경에 미치는 영향이 큰 만큼 재료적으로 이산화탄소 발생량을 줄이고, 재사용 및 재활용할 수 있는 신소재를 도입한 시스템 개발이 앞으로 지속적으로 이루어질 것으로 예상된다. 이러한 점을 감안하였을 때, GFRP 소재를 이용한 본 기술은 향후 그 활용성 및 중요성이 점차 증가할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 정차수(2009) [특집] 초고층 건물의 친환경 계획을 위한 고려사항, 대한건축학회지, v.53 n.08
2. 송영, 최경륜(2008) 주거용 무량복합구조(FcDW)시스템 설계와 적용, 콘크리트학회지, 한국콘크리트학회, 제20권, 제2호, pp.37-42
3. 류재호, 박세호, 주영규, 김상대(2011) GFRP를 이용한 경량합성바닥의 휨성능에 대한 실험적 평가, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제23권 1호, pp.125~

4. 정광량, 손영진(2006) [자유기고]무량판 바닥 시스템에 대한 구조계획 및 시공기술, 건축(대한건축학회지), 대한건축학회, Vol. 50, No.3, pp.106-111.
5. 이현호, 김도현, 김영식, 우성우(2008) 무량판 구조의 횡하중 저항시스템 및 설계 절차, 콘크리트학회지, 한국콘크리트학회, 제20권, 제2호, pp.14-18.
6. Makowski ZS. (1964) The structural applications of plastics. In: Davis RM, editor. Plastics in Building Construction. Proceedings of the Conference on Plastics in Building Construction. London: Battersea College of Technology, pp.49-78.
7. Keller T.(2002) Fiber reinforced polymers in building construction. In: Proceedings of international association for bridge and structural engineering symposium, towards a better built environment, Melbourne, Australia, (CD-ROM)
8. Camata G. Shing P.B.(2004) Evaluation of GFRP Deck Panel For THE O'FALLON Park Bridge, COLORADO DEPARTMENT OF TRANSPORTATION RESEARCH BRANCH, Report No. CDOT-DTD-R-2004-2 Final Report
9. Robert, M. and Benmokrane B. (2010) Physical, Mechanical, and Durability Characterization of Preloaded GFRP Reinforcing Bars, J. Compos. Constr., American Society of Civil Engineers, Vol. 14, Issue 4, pp.368-375.
10. 웹사이트 <http://www.tvsforum.co.kr/> 

[담당 : 김명한, 편집위원]