

GFRP 복합재료를 이용한 조립식 교량 바닥판의 실험 연구

Experimental Study of Modular Bridge Deck Made of GFRP Composite Materials

정진우¹⁾ · 김영빈²⁾ · 이재홍³⁾
Jeong, Jin Woo · Kim, Young Bin · Lee, Jae Hong

요약 : 승용차 전용 조립식 고가도로 상부구조에 복합재료 바닥판을 적용하기 위하여 두 개의 사각형으로 이루어진 단위 모듈 단면이 개발되었으며, 설계된 단위 모듈 단면에 대해 두 가지의 적층형태로 각각 설계를 하여 성능을 비교하였다. 단위 모듈 및 2 연속 모듈 그리고 단위 모듈 5개를 접착제를 이용하여 부착한 바닥판 시스템에 대해 휨 거동 특성을 분석하고 설계하중 및 극한하중에 대한 바닥판의 사용성 및 구조안전성을 분석하기 위한 실험을 DBT와 LT로 설계된 실험체에 대해 각각 실시하였다. 또한 ABAQUS를 이용한 수치해석 결과와 실험 결과를 비교 분석하였으며, 실험 장치 및 방법과 파괴하중 및 파괴형상 등의 실험결과를 상세히 나타내었다. 구조실험결과 개발된 복합재료 바닥판은 승용차 전용 고가도로 바닥판으로 사용하기에 충분한 적용성과 효용성이 있음이 입증되었다.

ABSTRACT : A composite bridge deck system assembled from a modular profile with double-rectangular cell has been developed for highway bridges. This study is focused on the experimental characterization of flexure performance of pultruded GFRP deck under static loading. Several tests were conducted on single modules and adhesively bonded 2 and 5-modules. The specimen details such as dimensions, material properties and fiber architecture, and experimental set-up and testing procedure have been addressed. It is found that the presented GFRP composite modular deck is very efficient for use in bridges.

핵심용어 : GFRP 바닥판, 섬유 적층 설계, 인발성형, ABAQUS

KEYWORDS : Glass fiber-reinforced plastic decks, Fiber architecture, Pultrusion, ABAQUS

1. 서론

지난 200여 년 동안 건설재료 기술의 비약적인 발전과 더불어 건설공학자들은 사회가 요구하는 공공기술 분야에서 구조물의 안전성, 경제성, 기능성 부분의 놀라운 결실을 얻을 수 있었다. 강재와 콘크리트는 거의 모든 종류의 구조물 건설에 활용되었으며, 가장 일반적이고 보편적인 재료로 인식되어 왔다. 그러한 1950년대에 탄소섬유가 개발됨으로써 고성능의 섬유강화복합소재(fiber reinforced composite materials)를 구조물 제작에 활용할 수 있게 되었다. 개발 초기에는 섬유가격 및 생산비가 높아 고성능, 경량재료를 필요로 하는 항

공우주산업 및 방위산업분야에서 주로 사용되었으며, 건설 분야에 적용된 시기는 1980년대로 노후화된 구조물의 보수 및 보강공사에 사용되다가 1990년대에 들어서면서 건설 구조용 부재로 적용하기 위한 연구 개발이 시작되었다. 특히, 최근에는 교량 바닥판과 같이 경량성과 내화화성 및 내부식성을 요구하는 구조물에 적용이 두드러지게 나타나고 있다.(Karbhari, 2000; Eide 2003)

현재까지 개발된 복합재료 바닥판 중 상업적으로 사용될 수 있는 바닥판은 크게 샌드위치 구조(sandwich construction)와 접착제로 붙인 인발성형된 유형(adhesive bonded pultrusion shapes)으로 크게 분류 할 수 있으며(Bakis,

1) 학생회원, 세종대학교 건축공학과 석사과정
(Tel. 02-3408-3287, Fax. 02-3408-3331, E-mail: fsaberio@sju.ac.kr)
2) 학생회원, 세종대학교 건축공학과 박사과정(kbin13@empal.com)
3) 정회원, 세종대학교 건축공학과 부교수(jhlee@sejong.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2005년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

2001), 인발성형공법을 고려할 때 일정한 단면을 가진 모듈러 시스템으로 제작된 바닥판을 원하는 길이로 절단하여 접착제를 붙여 사용하는 방법이 시공성이나 경제성 측면에서 유리하다. 이러한 다양한 장점을 이용하여 교량 바닥판에 복합재료 시스템을 적용할 때 바닥판의 프리캐스트화가 가능하여 기존 시스템보다 현장수송 및 시공시간을 획기적으로 단축할 수 있으며, 바닥판의 경량화로 인하여 하부구조의 물량을 상당히 경감시킬 수 있다. 또한, 부식에 대한 높은 저항성으로 바닥판의 보수를 최소화하고 교량의 장수명화가 가능하다. 복합재료 바닥판 시스템의 적용시 초기 투자비용이 증가하는 단점이 있지만, 섬유의 사용량 증가 및 제조기술개발 등으로 인한 가격하락이 뚜렷한 추세에 있으며, 생애주기비용(life cycle cost)을 고려할 때 기존 교량 시스템보다 더욱 경제적인 것으로 연구되어지고 있다. (Meiarashi, 2002)

최근 국내에서는 차량의 지속적인 증가로 인하여 교통 혼잡비 등의 막대한 경제적 손실이 발생하고 있다. 따라서 도로의 확충 및 효율적인 사용을 위하여 고가도로의 건설이 효과적인 방법으로 대두되고 있는 실정이다. 특히, 고가도로의 이용차량을 승용차로 제한할 경우 이에 따른 건설비용의 경감 그리고 공기 및 교통 통제시간을 단축할 수 있는 다양한 장점이 있다. 이에 본 연구에서는 승용차 전용 조립식 고가도로에 모듈러 시스템으로 제작된 복합재료 바닥판을 적용하기위해 두 가지 적용형태로 설계된 단위 모듈 및 2 연속 모듈에 대한 4점 휨 실험 그리고 5개의 단위 모듈을 접착제로 부착한 바닥판에 대해 설계하중 및 극한하중 실험을 실시하였으며, 그 결과를 범용유한요소 프로그램인 ABAQUS(2003)를 이용하여 비교 검토하여 그 효용성을 입증하였다.

2. 바닥판 설계

2.1 설계 개요

대상 교량형식은 5경간 연속 FRP 바닥판 강 거더교로 가정하였으며, 교량 제원은 지간이 30m이며, 그림 1과 같이 교폭이 9m이고 간격이 2.5m인 4개의 거더(H-800×300×14×26)으로 단순지지 되어있다. GFRP 재료의 경우 콘크리트나 강재와 달리 이방성(anisotropic)재료가면서 강성이 낮아 동일한 하중에 대하여 처짐이 크게 발생하게 되므로 우선적으로 바닥판의 처짐이 설계의 주요 제한사항이 되고 있다. 복합재료 교량 바닥판의 처짐에 관한 제한규정은 국내 및 국외 시방서에서도 아직 정립되어있지 않지만 AASHTO LRFD 설계 시방서(AASHTO, 1998)의 직교이방성 강 바닥판의 처짐 제한인 L/300과 목재 바닥판의 처짐

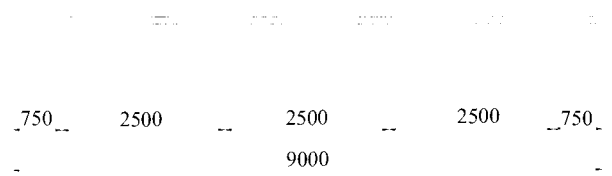


그림 1. 대상교량의 횡 단면도(단위:mm)

제한인 L/425 중 본 연구에서는 안전성을 고려하여 L/425을 적용하여 설계하였으며, 여기서 L은 거더 간격을 의미한다.

2.2 설계 하중

일반적으로 교량설계하중의 경우 차량하중 및 차선하중이 적용되고 있지만, 대부분 차량하중이 교량 바닥판설계에 지배적인 영향을 미치게 된다. 본 연구는 승용차 차량에 국한한 교량바닥판 설계로서 현재까지 승용차 차량하중에 관한 관련 자료가 미비한 실정이다. 따라서 설계하중은 국내에서 생산되고 있는 승용차를 분석하여 확률이론을 적용한 그림 2의 승용차 전용 고가도로 활하중 모델(김 상진, 2003)을 사용하였으며, 아스팔트 포장 및 상부구조의 자중을 고정 하중으로 고려하였다.

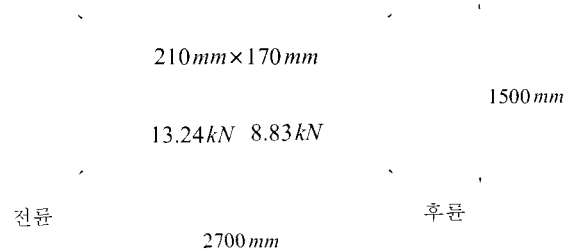


그림 2. 승용차 차량하중 및 타이어 접지면적

2.3 바닥판 시스템

현재까지 다양한 단면형상을 가진 복합재료 바닥판이 개발되었으나, 대부분 표준트럭하중(DB-24)을 고려한 교량 바닥판으로 설계되어졌다. 그러나 본 연구에서는 상대적으로 하중이 적은 승용차 전용 조립식 고가도로에 복합재료 바닥판을 적용하기위해 해석 및 설계 그리고 제작이 용이한 사각형 단면형상을 기본으로 바닥판을 설계하였으며, 사용성 및 구조안전성 그리고 시공성등을 고려하여 두 개의 직사각형으로 이루어진 단위 모듈을 제작하였다. 단위 모듈은 폴리에스터(polyester)수지에 함침된 유리섬유를 인발성형공정을 통해

제작하였으며, 생산된 단위 모듈은 Ashland사의 PLIOGRIP 8000/6660 접착 시스템을 사용하여 하나의 바닥판으로 부착되었다. 거더는 제작 및 시공성 등을 고려하여 국내에서 생산되는 기성재로 설계되었다. 그림 3은 복합재료 바닥판의 시스템의 전체적인 개념도를 나타내고 있다.

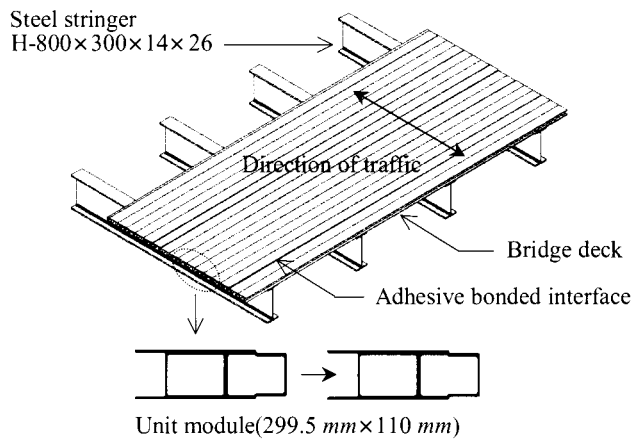


그림 3. 복합재료 바닥판 시스템의 개념도

2.4 적층 설계

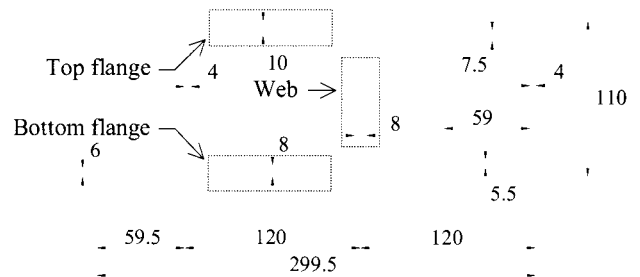
복합재료의 가장 큰 장점중의 하나는 섬유배열을 통해 부재의 물성을 사용자의 요구대로 설계(tailoring design)할 수 있다는 것이다. 현재 국내에서 구조용 부재로 사용되어지는 섬유는 강도특성 및 가격 경쟁력이 우수한 유리섬유가 널리 사용되어지고 있으며, 이러한 섬유를 이용한 부재 단면설계에는 CSM(chopped strand mat), 로빙(roving) 그리고 다축방향으로 직조된 직물(multi-axial stitched fabrics)이 주로 사용되어진다. CSM은 3~4cm 길이로 절단된 유리섬유가 방향성 없이 고르게 분포된 후 폴리에스터 분말(polyester powder)을 접착제로 사용하여 압착된 부직포 형태로 제작되며, 구조부재의 표면에 많이 사용된다. 로빙은 인장강도가 약 2.5GPa로 단면 종방향(0°)의 인장력에 저항하는 역할을 하는 싱글엔드 로빙(single-end roving)과 부재 단면의 공극이나 코너부분의 채움재로 사용되는 벌키 로빙(bulky roving)이 사용되어 진다. 표 1은 현재 국내에서 생산되어지는 유리섬유를 이용한 Lamina의 적층형태(종방향(0°), 횡방향(90°) 및 사선방향(±45°))를 나타내고 있다. 이러한 층을 조합하여 두께방향으로 직조(stitched)되어지며, CSM등을 부착하여 사용되어질 수 있다. 섬유의 다양한 적층 형태를 이용한 적층설계는 역학적인 특성과 인발성형 제작공정을 고려한 설계가 동시에 이루어져야 한다.

표 1. Lamina의 적층형태(www.iparamax.com)

Type	Series	Orientation	Series	Orientation
Uniaxial	L	0°	T	90°
Biaxial & Double Bias	LT	0°	DB	+45°
		90°		-45°
Triaxial	DBL	0°	DBT	+45°
		+45°		90°
Quadriaxial	DBLT	-45°		-45°
		0°		
		+45°		

본 연구에서 표 1과 같은 적층형태 중 바닥판의 설계 및 제작에 가장 유리한 DBT(double bias transversal)와 LT(longitudinal transversal)의 적층형태를 선택하였다.

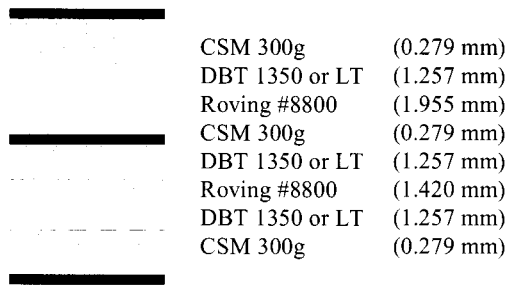
최종적인 단위 모듈 단면형상은 그림 4(a)와 같으며 차량 바퀴하중을 직접 받는 상부플랜지의 경우 하부 플랜지보다 2mm 두꺼운 10mm로 설계되었다. 단위 모듈 단면의 상부



(a) 단위 모듈 단면 제원(단위:mm)

	CSM 300g	(0.279 mm)
	DBT 1350 or LT	(1.257 mm)
	Roving #8800	(1.392 mm)
	DBT 1350 or LT	(1.257 mm)
	CSM 300g	(0.279 mm)
	Roving #8800	(0.768 mm)
	DBT 800 or LT	(0.279 mm)
	DBT 1350 or LT	(1.257 mm)
	CSM 300g	(0.279 mm)
	Roving #8800	(1.696 mm)
	DBT 1350 or LT	(1.257 mm)
	CSM 300g	(0.279 mm)

(b) 상부 플랜지의 적층 상세도



(c) 하부 플랜지 및 웹의 적층 상세도

그림 4. 복합재료 바닥판 단위 모듈 단면 제원 및 적층 상세도

플랜지 그리고 하부 플랜지 및 웹에 대하여 DBT와 LT의 적층형태를 이용하여 그림 4(b), 4(c)와 같이 상부 플랜지는 12개의 층으로 그리고 하부 플랜지와 웹은 8개의 층으로 각각 설계하였다.

복합재료의 물성은 섬유의 분포나 배열에 따라 크게 좌우된다. 재료 물성을 추정하는 방법에는 재료역학적인 방법인 혼합법(rules of mixture)과 변분의 원리를 이용한 방법 등이 있으나, 본 연구에서는 섬유와 수지의 함량에 따라 계산되는 혼합법을 이용하여 Lamina의 재료 물성을 유도하였다. (Jones, 1999) 본 연구에서 설계된 바닥판은 유리 섬유와 폴리에스터 수지를 사용하고 있으며, 각 재료의 물성을 표 2에 나타내었다. 섬유와 수지의 함량을 각각 60%와 40%의 무게비(weight fraction)로 함침하는 것으로 가정하였으며, 섬유와 수지의 부피비(V_f, V_m)는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 식에서 사용된 아래첨자 f 와 m 은 섬유(fiber)와 수지(matrix)를 나타낸다.

$$V_f = \frac{\frac{w_f}{\rho_f}}{\frac{w_f}{\rho_f} + \frac{w_m}{\rho_m}} \quad (1a)$$

$$V_m = 1 - V_f \quad (1b)$$

여기에서, w_f, w_m 은 섬유와 수지의 무게비를 나타내며, ρ_f, ρ_m 은 비중을 나타낸다. 혼합법을 이용하여 계산되는 Lamina의 재료 물성은 식 (2)와 같으며, 계산된 값은 표 3과 같다.

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (2a)$$

$$E_2 = \frac{1}{\frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m}} \quad (2b)$$

$$G_{12} = \frac{1}{\frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m}} \quad (2c)$$

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (2d)$$

위 식에서, E_1, E_2 는 각각 Lamina의 섬유방향 및 섬유 직각방향의 탄성계수를 말하며 G_{12}, ν_{12} 는 Lamina의 면내 전단계수 및 프와송 비를 나타낸다.

표 2. 섬유와 수지의 재료 물성

Materials	E(GPa)	G(GPa)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	ν_f
Fiber	72.5	27.6	2.54	0.22
Matrix	3.38	1.38	1.24	0.38

식 (1)과 식(2)를 이용하여 표 3과 같이 Lamina의 물성을 계산하였다.

표 3. Lamina의 물성

$E_1(\text{GPa})$	$E_2(\text{GPa})$	ν_{12}	$G_{12}(\text{GPa})$
32.599	5.663	0.312	2.306

두 가지 적층형태로 설계된 바닥판의 상·하부 플랜지 그리고 웹에 대하여 재료실험을 실시한 후 얻은 강도값을 표 4에 나타내었으며, X_t 는 단면방향 인장강도, X_c 는 단면방향 압축강도, Y_t 는 단면직각방향 인장강도, Y_c 는 단면직각방향 압축강도 그리고 S 는 면내 전단강도를 나타낸다.

표 4. 구성 재료의 강도(MPa)

Type	Components	X_t	X_c	Y_t	Y_c	S
DBT	Top flange	310	336	150	106	155
	Bottom flange & Web	269	372	129	121	135
LT	Top flange	300	322	140	137	150
	Bottom flange & Web	351	383	119	156	175

3. ABAQUS 해석 모델

실험의 선행단계로 범용유한요소 프로그램인 ABAQUS를

이용하여 바닥판의 거동을 검토하였다. 하나의 절점에 6개의 자유도를 가지는 8절점 쉘 요소인 S8R을 이용하였다. 경계 조건은 단순지지 그리고 단위 모듈간의 부착은 완전부착으로 가정하였다. 그림 5에 두 가지 직물 타입으로 설계된 바닥판의 극한하중 실험에 대한 해석모델을 나타내었으며, 실제 차량하중을 모사한 하중 재하방법은 차량하중 접지면적을 고려하여 분포 하중(210×170mm)으로 적용하였다. 바닥판 설계에 사용된 CSM은 단 섬유(short fiber)가 방향성 없이 무작위로 분포되어 있는 매트를 말하며, ABAQUS 해석을 위해 Lamina의 물성을 이용하여 유사등방성재료(quasi-isotropic)와 같이 [0/45/-45/90]로 적층하였고 로빙은 [0]로 DBT는 [45/90/-45]로 LT는 [0/90]로 적층하여 해석을 수행하였다. 그림 3의 섬유배열 상세도에 따라 DBT 적층형태로 설계된 단면의 상부 플랜지 및 하부 플랜지와 웹은 각각 34개, 23개의 층으로 적층하였으며, LT 적층형태로 설계된 단면의 상부 플랜지 및 하부 플랜지와 웹은 각각 29개, 20개로 적층하였다. 또한, 파괴하중을 예측하기위해 Tsai-Wu 파괴이론을 적용하여 해석을 수행하였다.

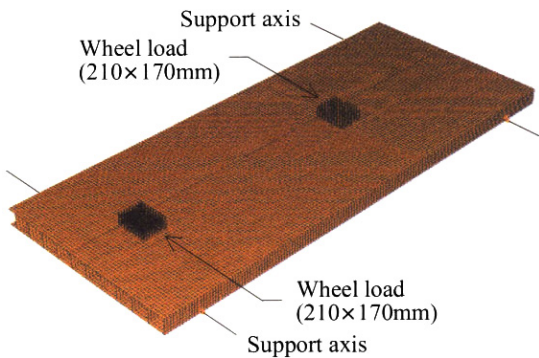


그림 5. 극한하중 실험의 ABAQUS 해석모델

4. 실험 방법 및 결과

본 실험은 인발성형공법으로 제작된 바닥판의 단위 모듈 및 2 연속 모듈에 대해 구조적인 특성을 파악하기위해 4점 휨 실험을 실시하였으며, 단위 모듈 5개를 접착제를 이용하여 부착한 바닥판에 대해 사용성 검토를 위해 설계하중 실험 그리고 구조적 안전성과 파괴양상을 파악하기 위해 극한하중 실험을 실시하였다. 하중은 MTS사의 250kN 용량의 액츄에이터(actuator)를 사용하여 재하 하였으며, FlexTest GT controller를 사용하여 실험을 제어하였다. 또한, 변형률 및 변위 측정을 위하여 TDS 303 데이터 로거를 사용하였다.

4.1 실험체

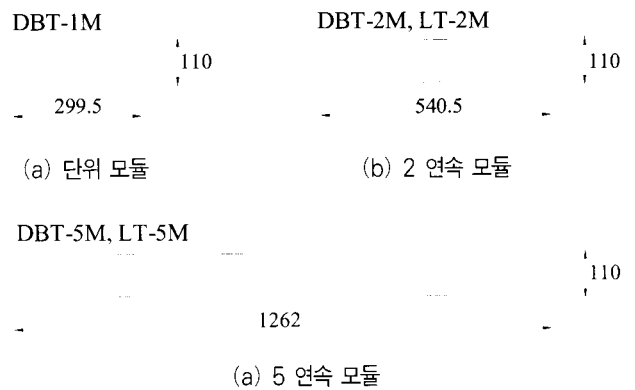


그림 6. 실험체 치수 및 단면형상(단위:mm)

설계된 교량의 거더간격(2.5m)을 고려하여, DBT와 LT 적층형태로 각각 설계된 단위모듈을 인발성형 후 3m 길이로 절단하여 제작하였으며, 실험을 위하여 그림 6과 같이 DBT로 설계된 단위 모듈(DBT-1M) 3개, 두 가지 적층형태로 설계된 단위 모듈 2개를 접착한 2 연속 모듈(DBT-2M, LT-2M) 그리고 5개를 접착한 5 연속 모듈(DBT-5M, LT-5M)을 각각 1개씩 제작하였다.

4.2 단위 모듈 및 2 연속 모듈

그림 7은 단위 모듈 및 2 연속 모듈에 대해 4점 휨 실험의 개념을 나타내고 있으며, 3m 길이로 제작된 실험체를 2.5m 단순지지로 설치하였다. 수직 처짐을 측정하기위해 지간의 중앙부와 1/4인 지점에 각각 변위계를 설치하였으며, 실험체가 완전히 파괴될 때까지 변위제어방식(0.05mm/sec)으로 하중을 제어하였다. 그림 8은 단위 모듈 및 2 연속 모듈에 대한 4점 휨 실험 전경을 나타내고 있다.

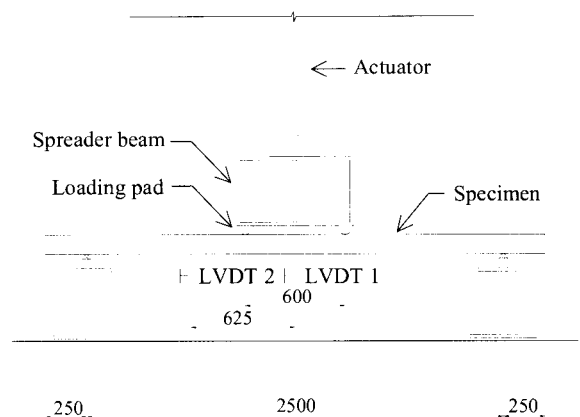


그림 7. 단위 모듈 및 2 연속 모듈에 대한 4점 휨 실험 개념도(단위:mm)

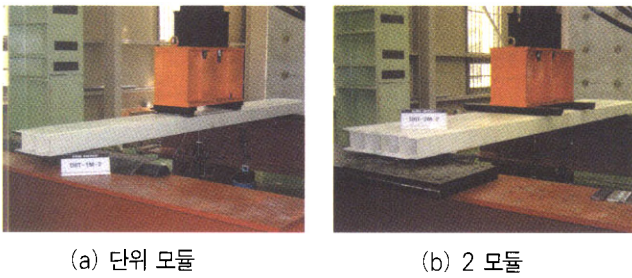


그림 8. 단위 모듈 및 2 연속 모듈에 대한 4점 힘 실험 전경

4.2.1 단위 모듈

복합재료 바닥판의 기본 단위인 단위 모듈에 대한 3번의 실험결과를 지간의 중앙부와 1/4지점의 처짐을 그림 9의 하중-처짐 곡선에 ABAQUS를 이용한 해석결과와 함께 나타내었다.

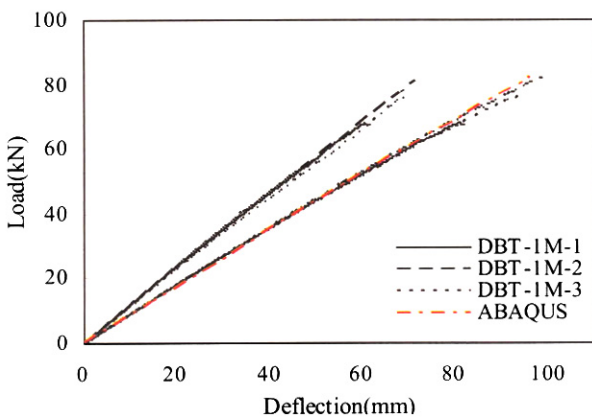


그림 9. 단위 모듈 DBT 실험체의 하중-처짐 곡선

표 5. 단위 모듈 실험체의 파괴하중

Test number	Failure load(kN)	
	Experiment	ABAQUS
DBT-1M-1	67.7	
DBT-1M-2	81.8	
DBT-1M-3	75.9	94.2
Mean value	75.1	

모든 실험체가 파괴에 도달할 때 까지 선형-탄성 거동을 보였으며, 취성파괴 양상을 나타내었다. 실험과 ABAQUS 해석 후 파괴하중을 표 5에 나타내었으며, 해석값이 실험값의 평균값보다 25%정도 크게 나타났다. 이러한 결과는 실험시 파괴양상은 하부 플랜지의 층간분리현상(delamination)에 의해서 발생하지만 해석모델에서 이용한 Tsai-Wu 파괴이론은 면외(out of plane) 파괴를 예측하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.(Jones, 1999) 실험체가 일정 하중에 도달 하였을때 부재 내부의 파단소리가 비 주기적으로 발생하다가 큰 파열음과 함께 실험체가 파괴되는 양상을 보였으며, 모든 실험체가 그림 10과 같이 하부 플랜지의 층간분리현상에 의해 파괴되었다.

4.2.1 2 연속 모듈

본 실험체는 단위 모듈 2개를 접착제를 이용하여 부착한 실험체로 휨 성능평가 및 모듈간에 사용된 접착제의 성능을 알아보기 위해 DBT와 LT로 각각 설계된 2 연속 모듈 실험체에 대하여 실험을 실시하였다. 실험결과 단위 모듈 실험체와 유사하게 그림 11의 하중-처짐 곡선과 같이 선형-탄성 거동을 보였으며, LT로 설계된 실험체가 DBT로 설계된 실험체 보다 강성이 큰 것으로 나타났다.

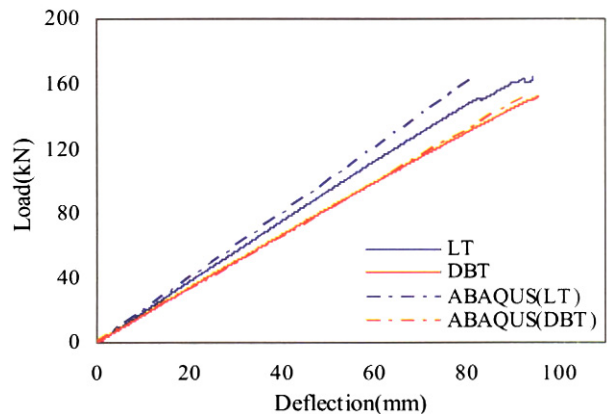


그림 11. 2 연속 모듈 실험체의 하중-처짐 곡선

표 6. 2 연속 모듈 실험체의 파괴하중

Fabric type	Failure load(kN)	
	Experiment	ABAQUS
DBT-2M	152	172
LT-2M	164	159

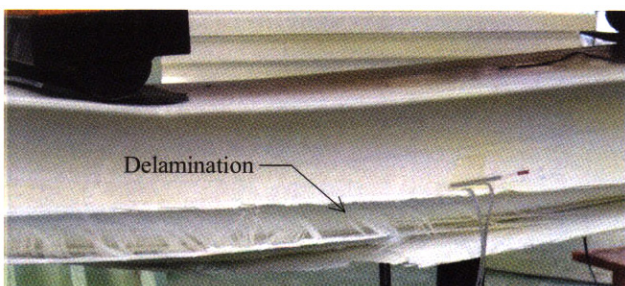
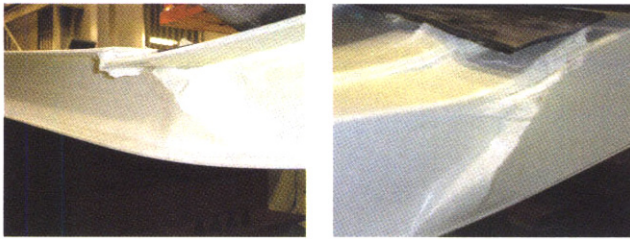
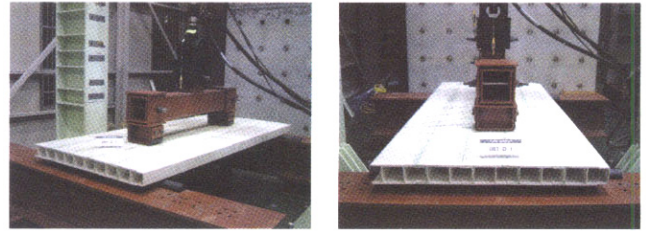


그림 10. 단위 모듈 실험체의 파괴형상



(a) 파괴형상 1 (b) 파괴형상 2

그림 12. 2 연속 모듈 LT 실험체의 파괴형상



(a) 실험전경 (b) 단면형상

그림 14. 바닥판의 설계하중 실험전경 및 단면형상

표 6의 2 연속 모듈 실험체에 대한 파괴하중은 단위 모듈 실험체의 두 배 정도로 나타났으며 LT실험체는 해석결과와 잘 일치한 반면 DBT실험체는 다소 오차를 보이고 있다. 실험체의 파괴양상은 DBT와 LT실험체 모두 상부 플랜지의 하중재하부의 파괴와 동시에 웹이 전단 파괴되는 양상을 보였다. 하중이 62kN에 도달하였을 때부터 실험체 내부의 파단 소리가 시작되었으며, 파괴 될 때까지 파단소리가 비 주기적으로 증가하면서 발생하였다. 그림 12는 LT 실험체의 파괴 양상을 나타내고 있다.

4.3.5 연속 모듈

단위 모듈 5개를 부착한 바닥판을 실제 시공을 고려한 시공모듈로 설계하였으며, 이러한 모듈에 대해 차량하중을 재하한 후 설계하중 실험 및 극한하중 실험을 실시하였다.

4.3.1 설계하중 실험

본 실험은 바닥판의 처짐을 측정하기 위해 그림 2에서와 같이 설계용 승용차 차량하중 중 전륜하중(13.24kN)을 사용하여 그림 13과 같이 지간의 중앙부에 하중제어 방식(0.01kN

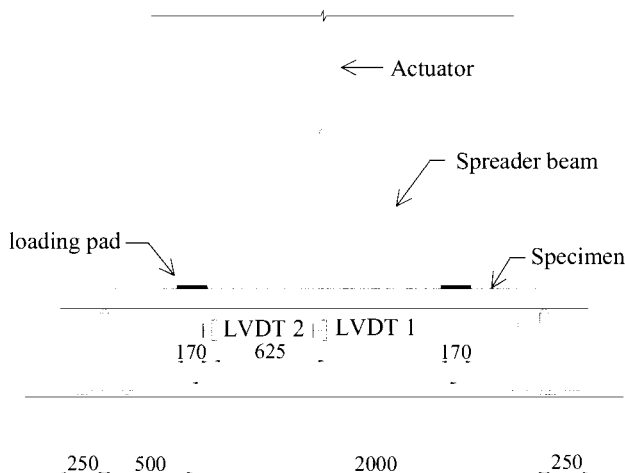


그림 13. 바닥판에 대한 설계하중 실험 개념도(단위:mm)

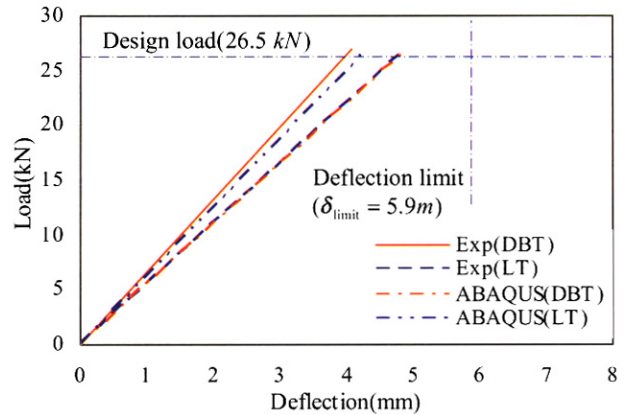


그림 15. 설계하중 실험에 대한 하중-처짐 곡선

/sec)으로 재하 하였으며, 하중이 26.5kN(설계하중)이 될 때까지 실험을 수행하였다. 그림 14는 사용성 평가를 위한 설계하중 실험전경 및 단면형상을 나타내고 있다.

설계하중 실험에 대한 하중-처짐 곡선을 그림 15에 ABAQUS 해석결과와 함께 나타내었다. 흥미로운 사실은 2 연속 모듈의 경우와 달리 이 경우에는 DBT 실험체가 더 높은 강성을 나타냈는데 이는 바닥판의 2 방향거동 때문인 것으로 판단된다. 두 실험체 모두 설계하중을 재하 하였을때 AASHTO LRFD 처짐 제한(5.9mm)을 충분히 만족하는 것으로 나타났으며, 선형-탄성 거동을 보이고 있다. 또한 실험 결과와 해석결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

4.3.2 극한하중 실험

설계된 복합재료 바닥판의 구조적 안전성 및 파괴형상을 파악하기 위해 그림 16과 같이 지간의 최대 모멘트를 유발시키는 지점에 차량하중을 재하한 후 0.05mm/sce의 속도로 실험체가 파괴 될 때까지 실험을 실시하였다. 그림 17과 그림 18은 각각 LT와 DBT실험체의 변형률게이지 및 변위계 위치를 나타내고 있다.

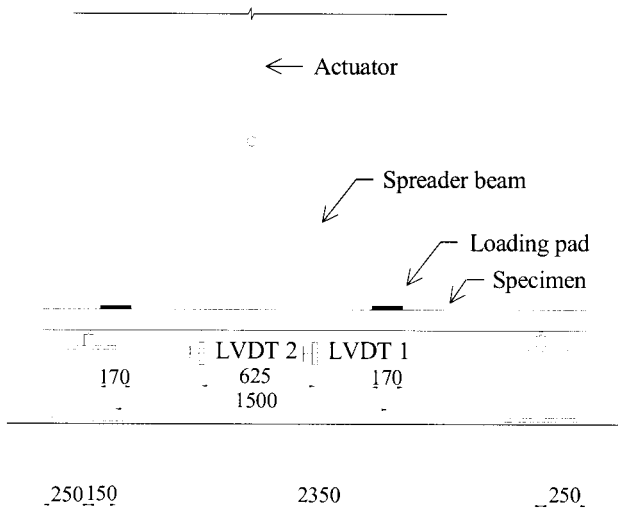


그림 16. 바닥판에 대한 극한하중 실험 개념도(단위:mm)

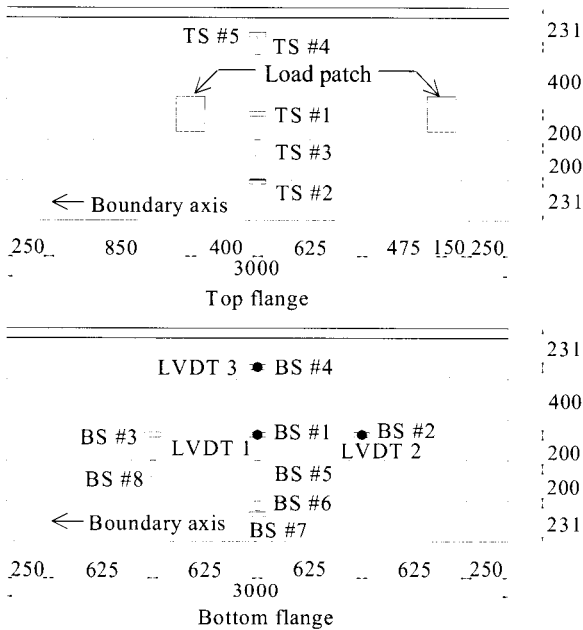


그림 17. LT 실험체의 변형률 게이지 및 변위계 위치(단위:mm)

그림 19~21에 하중-처짐 및 하중-변형률 곡선을 나타내었다. 실험체가 파괴될 때까지 거의 선형거동을 보이고 있으며, DBT로 설계된 실험체가 LT로 설계된 실험체보다 강성 및 강도가 더 높게 나타났다. 표 7은 실험과 Tsai-Wu 파괴이론을 사용한 ABAQUS 해석결과의 파괴하중을 비교하였다. DBT 실험체는 액츄에이터 최대용량(236kN)까지 하중을 재하 하였을때도 파괴가 일어나지 않았으며, LT 실험체는 그림 22와 같이 상부 플랜지의 차량하중 재하부분에 국부적인 펀칭(punching)파괴 양상을 보였으며 ABAQUS 해석결과와도 잘 일치하였다. 바닥판 단위 모듈간의 부착에 사용된 PLIOGRIP8000/6660 시스템의 파괴는 외관상 목격할 수

없었으며, 하중이 약 90kN에 도달했을 때부터 실험체로부터 알 수 없는 파단소리가 발생하였으며, 파괴 될 때까지 계속 증가하다가 큰 파열음과 함께 파괴되는 양상을 보였다. 이러한 파단소리는 섬유 파단(fiber breakage), 수지 균열(matrix cracking), 계면의 분리(interfacial debonding), 층간분리 등의 여러 가지 파괴양상의 복합적인 조합으로 나타나는 것으로 판단된다.

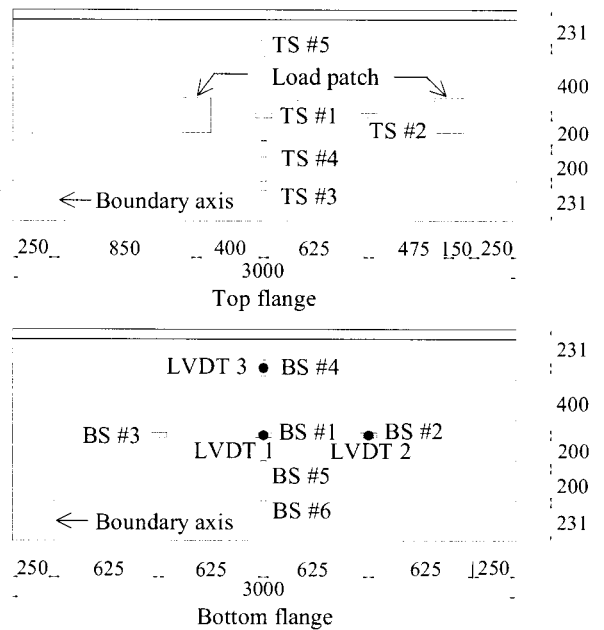


그림 18. DBT 실험체의 변형률 게이지 및 변위계 위치(단위:mm)

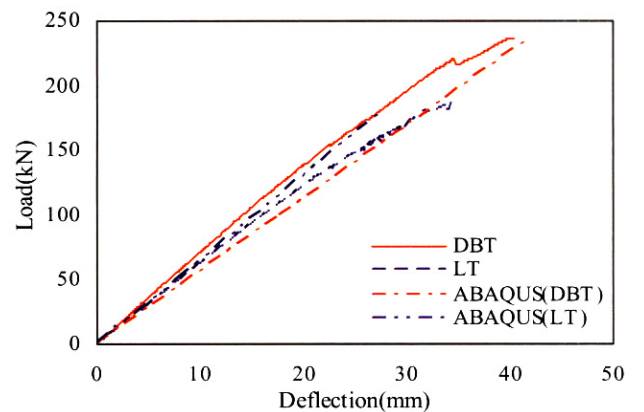


그림 19. 극한하중 실험에 대한 하중-처짐 곡선

표 7. 바닥판 실험체의 파괴하중

Fabric type	Failure load(kN)	
	Experiment	ABAQUS
DBT-5M	no failure	204
LT-5M	187.8	192

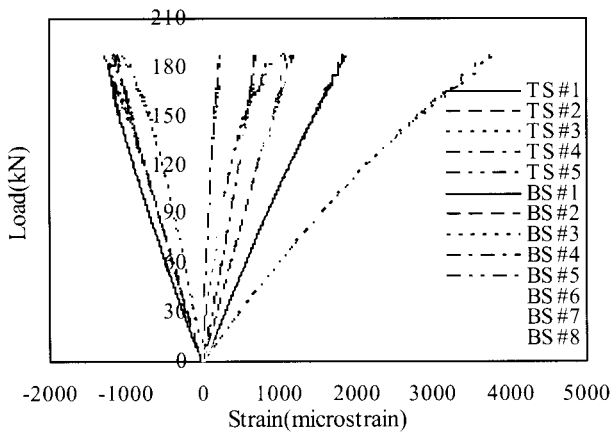


그림 20. LT 바닥판 실험체의 하중-처짐 곡선

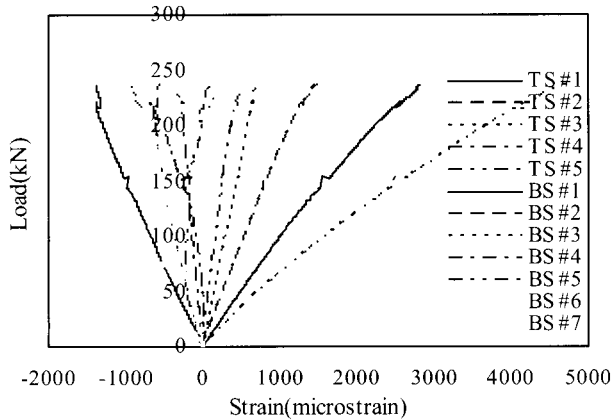


그림 21. DBT 바닥판 실험체의 하중-처짐 곡선

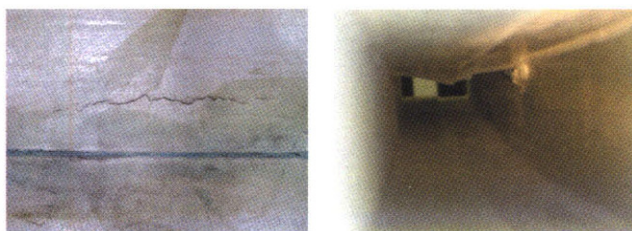
- (1) 단위 모듈 및 2 연속 모듈 그리고 5 연속 모듈 실험체에 대한 실험결과 충분한 휨 성능과 구조적 안전성을 보유하고 있으며, 승용차 전용 고가도로 바닥판으로 사용하기에 그 적용성과 효용성이 있음을 입증하였다.
- (2) 모든 바닥판 실험체가 선형탄성거동 및 취성과괴 양상을 보였으며, 단위 모듈 및 2 연속 모듈에 대한 휨 실험결과 LT로 설계된 실험체가 강성이 큰 것으로 나타났다. 또한 2 연속 모듈 및 5 연속 모듈 실험체가 강성이 큰 것으로 나타났으며, 2 연속 모듈 및 5 연속 모듈 실험체에 대한 실험결과 모든 경우에서 접합부의 파괴는 발생하지 않아 접합부는 안전한 것으로 판단된다.
- (3) 바닥판의 설계하중 실험결과 AASHTO 설계 시방서의 처짐 제한을 충분히 만족하며, DBT 실험체가 강도, 강성 모두 유리한 것으로 나타났다. DBT로 설계된 실험체는 액츄에이터의 최대하중(236kN)을 재하 할 때 까지 파괴가 발생하지 않았으며, LT로 설계된 실험체는 차량하중 재하부분의 국부적인 파괴양상을 보였다. 또한 휨이 차량하중 등의 국부적인 하중에 충분한 안전성을 보유하고 있는 것으로 판단된다.
- (4) 본 연구의 구조실험 결과와 ABAQUS의 해석결과를 비교 한 결과 강성은 매우 잘 일치하였으며 최종강도의 경우에는 층간박리와 같은 3 차원적인 파괴양상이 아닌 경우에는 큰 오차를 보이지 않아 해석모델의 정확성을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원(C102A2000005-04 A0200-00400)에 의하여 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

김상진(2003) 승용차 전용 고가도로 설계용 활하중 모델의 개발, 대한토목학회 학술발표논문.
 AASHTO(1998), LRFD bridge design specifications 2nd edition, American Association of State Highway and Transportation Officials.
 ABAQUS(2003), *User's manual: ver 6.4*, H. K&S Inc.
 Bakis, C. E. et al.(2001) Fiber-reinforced polymer composite for construction state-of-art-review,



(a) 파괴형상 1 (b) 파괴형상 2

그림 22. LT 바닥판 실험체의 파괴형상

5. 결론

본 연구는 승용차 전용 조립식 고가도로에 복합재료 바닥판을 적용하기 위해 단위 모듈 및 2 연속 모듈에 대해 4 점 휨실험 및 단위 모듈 5개를 접착제를 이용하여 부착한 바닥판 실험체에 대해 설계하중 및 극한하중 실험을 실시하였으며, ABAQUS를 이용한 해석모델과 비교 검토하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

Journal of Composite for Construction, ASCE, Vol. 6, No. 2, pp.73-87.

Einde, L. V. D., Zhao L., Seible F.(2003) Use of FRP composite structural applications, *Construction and Building Materials*, Vol. 17, No. 6-7, pp389-403.

Jones, R. M.(1999) *Mechanics of composite materials 2/e*, Taylor & Francis Inc.

Karbhari, V. M.(2000) Use of composite for 21st century civil infrastructure, *Computer Methods in*

Applied Mechanics and Engineering, Vol. 185, No. 2-4, pp.433-454.

Meiarashi, S., Nishihizaki I., Kishima.(2002) Life-cycle cost of all-composite suspension bridge, *Journal of Composite for Construction*, ASCE, Vol. 6, No. 4, pp.206-214.

(접수일자 : 2005. 3. 14 / 심사일 2005. 3. 24 /
심사완료일 2005. 5. 19)