

스냅-핏 착탈 연결부를 가지는 섬유강화 복합소재 바닥판의 개발 및 적용현황

Development and Applications of Fiber-Reinforced Composite Bridge Deck with Vertical Snap-fit Connection



박신전 (Sin-Zeon Park) 정회원 | 국민대학교 구조안전연구소 연구위원 | Sinzeon@kookmin.ac.kr
홍기중 (Kee-Jeung Hong) 이사 | 국민대학교 건설시스템공학부 부교수 | Kjhong@kookmin.ac.kr

1. 서론

섬유강화 플라스틱(fiber-reinforced plastic, FRP) 복합소재는 경량, 고강도 및 고내구성 특성을 보유하고 있어 종래에 사용되어 온 콘크리트와 강재 및 목재를 대체할 수 있는 건설분야 신소재로 설계 및 제조기술을 포함한 건설분야 적용기술이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 복합소재의 건설분야 적용기술은 상하수도관, 폐수처리시설, 구조부재 등 다양한 분야에 걸쳐 활용영역이 점차 확대되고 있으며, 그 중 교량 바닥판은 가장 유망한 복합소재 건설분야 적용기술의 하나로 전 세계적인 기술개발 경쟁이 심화되고 있으며, 현재 국내에서 개발된 복합소재 바닥판은 기술수준 및 적용실적에 있어 세계적인 우위를 점하고 있는 것으로 평가된다.

복합소재 교량 바닥판은 고내구 내부식 특성으로 인하여 교량수명을 연장시키고 유지관리비를 절감함으로써, 구조물의 생애주기비용(life-cycle cost)을 크게 줄일 수 있다. 특히, 콘크리트 바닥판 대비 1/4 정도의 경량 특성을 보유하고 있어 사하중을 크게 경감시킬 수 있으므로 하부구조의 경제적 설계가 가능하다. 즉, 이러한 복합소재 교량 바닥판의 경량 특성을 이용하여 기

존 교량의 하부구조 보강 없이 보도부를 확장할 수 있다. 또한, 경량 프리캐스트 바닥판을 이용한 신속설치로 공기를 대폭 단축시킬 수 있어 도심지 교량 건설시 교통통제를 최소화할 수 있게 된다.

현재까지, 대부분의 복합소재 교량 바닥판은 접착재를 이용한 암수접착(tongue-and-groove connection)에 의해 바닥판 튜브 및 패널간 연결이 이루어지도록 설계되어왔다. 하지만, 이러한 암수접착구조는 바닥판 패널간 및 바닥판-거더 간 연결 설치 시 구조적 일체화를 보장하기 어렵고, 비효율적인 시공성으로 인해 공기가 지연됨에 따라 공사비가 증대되는 문제점이 있다. 이러한 기존의 암수접착구조의 바닥판 패널 간 및 바닥판-거더 간 연결방식의 문제점을 해결하고, 시공성과 경제성을 크게 향상시킬 수 있도록 혁신적인 기계적 착탈구조의 스냅-핏 연결부(snap-fit connection)를 가지는 복합소재 교량 바닥판이 개발되었다. 개발된 스냅-핏 연결구조는 바닥판 패널 간 및 바닥판-거더 간 연결부 시공성을 크게 개선함과 동시에, 기계적 접합구조와 함께 화학적 접착을 이용하여 연결부 구조의 신뢰성을 제고할 수 있게 된다. 도로교용 복합소재 바닥판의 스냅-핏 착탈 연결부 적용은 성능 및 내구성에 대한 보다 면밀

한 검증이 필요한 바, 이에 대한 상세설계 및 해석적 검증이 더 필요하며 현재 이에 대한 연구를 진행하고 있다. 이에 본 기사에서는 1) 국내의 보도교 신설 및 기존 교량의 보도부 확장에 성공적으로 적용되고 있는 스냅-핏 연결부를 가지는 복합소재 교량 바닥판의 성능검증 및 대표적인 적용사례, 2) 기존 암수접착구조 복합소재 바닥판의 연구개발결과를 대표적인 적용사례와 함께 소개, 3) 이를 대체하기 위한 도로교용 스냅-핏 복합소재 바닥판의 연구개발 결과를 소개하고자 한다.

2. 보도교용 스냅-핏 복합소재 바닥판

2.1 보도교용 복합소재 바닥판의 개발

복합소재 교량 바닥판은 유리섬유와 불포화 폴리에스테르 수지를 주요 구성재료로 하며, 대량 생산 및 품질관리가 용이한 인발성형공정으로 제조된다. 도로교용 복합소재 교량 바닥판 개발과 관련된 국내의 연구개발성과를 바탕으로 보도하중에 적합한 단면을 가지는 일련의 보도교용 스냅-핏 복합소재 바닥판을 설계하였다. 그림 1에서는 보도교용 스냅-핏 복합소재 바닥판의 튜브 간 기계적 결합 개요를 보여주고 있으며, 그림 2에서는 보도교용 스냅-핏 복합소재 바닥판의 거더(H빔)상의 거치 및 고정을 보여주는 것으로 바닥판-거더 간 스테드 볼트 설치 후 바닥판의 튜브 및 패널 간 기계적 결합이 동시에 이루어지는 것을 알 수 있다. 그림 2에서 보여주는 바와 같이, 복합소재 바닥판 튜브는 거더 상면에 거치된 후, 스테드 볼트를 이용하여 거더와 일체로 연결된다. 바닥판 튜브와 거더 간 연결시공이 완료되면,

다음 단계의 복합소재 바닥판 튜브를 거치하고 기계적 스냅-핏 연결구조를 통해 수직방향으로 결합하게 된다. 이러한 바닥판-거더 간 연결과 바닥판 튜브 간 연결은 전체 바닥판 설치공정이 완료될 때까지 반복함으로써 매우 간단하게 전체 바닥판을 형성할 수 있게 된다.

복합소재 교량 바닥판의 스냅-핏 연결구조는 튜브 간 연결부의 기계적 착탈(snap-in and snap-out)이 가능한 구조로서 임시교량, 응급복구 교량 및 군사용 작전교량 등의 조립식 바닥판으로 이용될 수 있으며, 바닥판부재의 재사용이 가능한 장점을 가진다. 영구적으로 사용되는 복합소재 바닥판의 경우, 스냅-핏 연결구조에 의한 기계적 접합과 함께 에폭시 접착재를 이용한 접착을 동시에 이용할 수 있게 되어 연결부의 구조안전성과 내구성을 크게 향상시킬 수 있다. 그림 2에서 보여주는 바와 같이 기존의 암수접착 연결구조와 대비하여, 본 연구의 스냅-핏 연결구조는 단순화된 연결시공을 가능케 함으로써, 시공성, 시공품질 향상 및 공기단축 등 우수한 효과를 보장할 수 있다.

다양한 형식의 보도교량에 스냅-핏 복합소재 바닥판을 적용하기 위하여, 단면두께 75mm, 100mm 및 125mm를 가지는 일련의 보도교용 스냅-핏 복합소재 바닥판을 개발하였다. 표 1에서 보여주는 바와 같이, 개발된 바닥판은 단면 및 구성부재의 두께에 따라 SF75L(light duty), SF75H(high duty), SF100 및 SF125로 구분되며, 거더 간 최대 지점거리 1.5m에서 3.0m에 설치될 수 있도록 설계되었다. 그림 3은 인발성형에 의한 SF75H 보도교용 스냅-핏 복합소재 바닥판 튜브의 제조모습을 보여주고 있다. 보도교량의 바닥판-거더 연결에 있어, 바닥판과 거더의 합성이 요구되지 않기 때문에 스냅-핏 복합

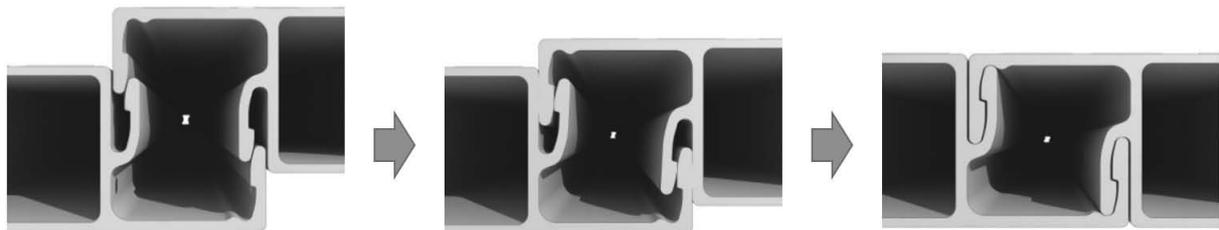


그림 1. 보도교용 스냅-핏 복합소재 바닥판의 튜브간 기계적 결합개요

소재 바닥판은 단순한 볼트접합에 의해 매우 효율적으로 설치될 수 있는 장점을 가진다.

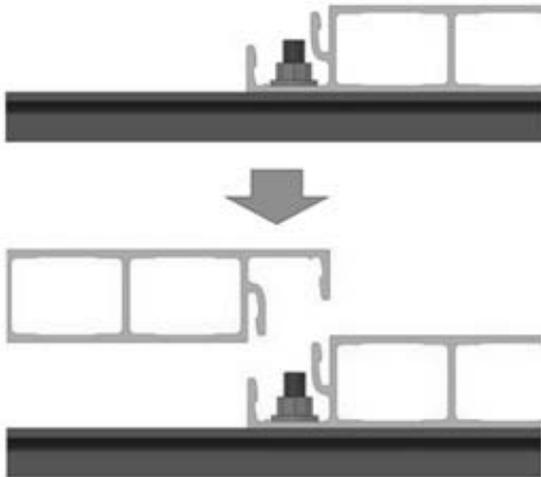


그림 2. 보도교용 스냅-핏 복합소재 바닥판의 바닥판-거더간 고정연결



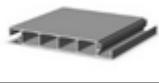
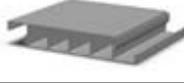
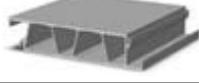
그림 3. 복합소재 바닥판의 인발성형 제작 (SF75H)

2.2 보도교용 복합소재 바닥판의 성능검증

보도교용 스냅-핏 복합소재 바닥판의 성능검증을 위해, 바닥판 튜브 및 이를 연결한 바닥판 패널에 대한 휨성능 시험, 스냅-핏 연결부 성능시험과 국부부재의 휨, 전단 및 좌굴에 대한 시험을 수행되었다. 2m 간격의 지점으로 지지된 SF75H 복합소재 바닥판의 3점 휨 시험 결과, 5kN/m²의 보도교 설계하중에 의한 처짐 사용성 기준인 최대처짐 L/300 (L:지점거리)을 발생시키는 등가 집중 활하중에 대해 3.7의 강도 안전율을 보유하고 있으며, 보도교 설계하중에 대해서는 약 28배의 큰 내하력을 보유하는 것으로 평가되었다. 이처럼 유리 섬유 강화 복합소재의 저항성 특성으로 인해 복합소재 바닥판은 강도 안전성에 우선하여 바닥판 지점간 처짐 사용성을 만족하도록 설계된다. 이러한 처짐 사용성 기준에 의해 설계된 복합소재 바닥판은 충분한 강도안전성을 보유하게 된다.

그림 4에서는 연결부 착탈시험의 개요와 스냅-핏 연결부의 변형을 게이지 설치 위치를 보여주고 있으며, 그림 5에서는 연결부 착탈시험 모습을 보여주고 있다. 연결부 착탈시험에서 결합시 최대 인장응력은 37.65MPa, 최대 압축응력은 16.98MPa으로, 부재의 인장강도 50MPa, 압축강도 110MPa과 대비하여 충분한 강도 안전율을 가지는 것으로 평가되었으며, 결합 및 이탈시험을 통해 어떠한 균열손상도 발생하지 않았다. 또한, 스냅-핏 연결부 결합 시 시험결과에 대한 Tsai-Wu 파괴해석 결과, 인장부(S2)에서 2.03, 압축부(S1)에서 6.6의 안전율의 충분한 구조안전성을 가지는 것으로 평가되

표 1. 보도교용 스냅-핏 복합소재 바닥판의 종류

모델명	SF75L	SF75H	SF100	SF125
단면도				
단면높이	75 mm	75 mm	100 mm	125 mm
단위 폭	700 mm	470 mm	500 mm	500 mm
단위 무게	30 kg/m ²	35 kg/m ²	40 kg/m ²	60 kg/m ²
최대 지점거리	1.5 m	1.8 m	2.0 m	3.0 m

며, 스냅-핏 연결부 이탈시험 결과에서도 유사한 결과를 보여, 충분한 구조안전성이 입증되었다. 전술한 다양한 시험을 통해, 보도교용 복합소재 바닥판의 보도하중에 대한 구조안전성과 사용성 및 스냅-핏 연결부의 기능성이 충분히 검증되었다.

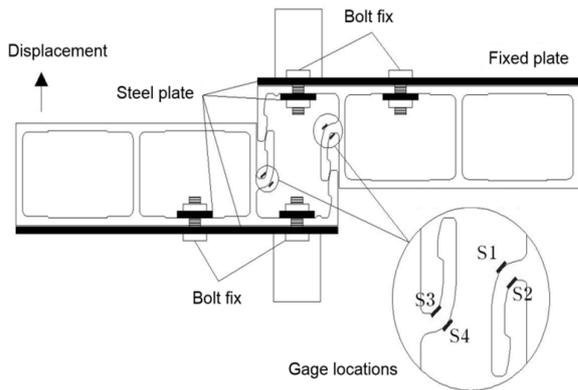


그림 4. 연결부 착탈시험 개요

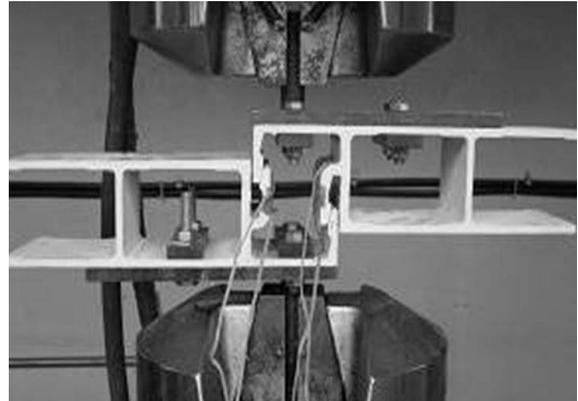


그림 5. 보도교용 복합소재 바닥판(SF75H) 연결부 착탈시험

2.3 보도교용 복합소재 바닥판의 현장적용
 보도교용 스냅-핏 복합소재 바닥판은 보도교의 신설 및 기존교량의 보도부 확장에 이용될 수 있으며, <표 2>에서 보여주는 바와 같이 2014년 9월 현재, 국내 26개소의 보도교량(총 면적 35,883㎡)에 적용되었다.

표 2. 보도교용 복합소재 바닥판의 적용실적 (2014. 09월 기준)

번호	교량명	위치	시공연도	교장(m)	교폭(m)
1	비우당교	서울시	2004	44.5	9.0
2	월출산교	월출산 국립공원	2006	53.1	1.0
3	오산천교	오산시	2006	140.0	5.0
4	기흥호수공원 보도교	용인시	2007	2,315.0	3.5
5	상주한방단지 보도교	상주시	2007	30.0	2.0
6	하늘다리	봉화군	2007	90.0	2.2
7	한강대교 보도확장	서울시	2007	840.9	9.0
8	삼성중공업 Catwalk	거제시	2008	82.0	5.0
9	신천 보도교	동두천시	2009	70.0	3.0
10	도담마을 보도교	용인시	2009	32.0	3.0
11	선유도 가도매트	군산시	2009	92.0	3.0
12	온천천교	부산시	2009	144.0	3.0
13	신접교 보도확장	양평군	2009	47.0	2.2
14	조현교 보도확장	양평군	2009	41.5	2.5
15	금천교 보도확장	서울시	2009	197.5	4.5
16	죽도산공원 보도교	영덕군	2009	140.0	1.5
17	대둔산공원 보도교	금산군	2009	58.0	1.5
18	세월교 보도확장	부산시	2009	77.0	3.0
19	파주운정지구 보도교	파주시	2009	190.0	4.5
20	신천교	김포시	2011	232.0	2.0
21	굴현교	김포시	2011	585.0	4.0
22	좌동교	부산시	2011	45.0	2.3
23	금강1교	공주시	2011	700.0	9.0
24	사상구 강변도로 보도교	부산시	2012	50.7	4.8
25	고척교 보도확장	서울시	2014	406.0	5.6
26	서남권 돔구장 보도교	서울시	2014	410.0	7.4

보도교용 스냅-핏 복합소재 바닥판은 기존 교량의 보도확장에 매우 효율적인 대안으로 적용될 수 있다. 이러한 보도확장의 대표적인 적용사례는 2009년 완공된 약 1.7km 연장의 한강대교 보도 및 자전거도로 확장으로 경량의 복합소재 바닥판(SF75L)을 기존 콘크리트 바닥판 철거 후 설치하였다. 1.34tonf/m 단위중량을 가지는 기존 콘크리트 바닥판을 신설 강재 브라켓을 포함하여 0.71tonf/m 단위중량의 스냅-핏 연결부를 가지는 복합소재 바닥판으로 대체함으로써, 보도폭을 기존 2.5m에서 4.5m로 확장하였다. 이러한 기존 교량의 보도확장 기법은 하부구조의 보강 없이 보도를 확장할 수 있는 신속하고 가장 경제적인 방안으로 평가된다. 그림 6에서는 한강대교 보도확장을 위한 스냅-핏 복합소재 바닥판의 시공모습과 완공 후 전경을 함께 보여주고 있다.



(a) 복합소재 바닥판의 설치



(b) 확장시공이 완료된 보도부 (양측 붉은 색)

그림 6. 한강대교 보도확장 (2009)

개발된 스냅-핏 복합소재 바닥판은 다양한 형식의 보도교량의 신설에 적용될 수 있다. 그림 7에서는 행정중심복합도시의 금강1교에 설치된 연장 1.4km, 폭 4.5m의 자전거도로를 보여주고 있다. 이 경우, 교량상부는 차량전용으로 이용되고, 교량의 양측 하부에는 브라켓을 설치한 후 경량 복합소재 바닥판을 설치하여 자전거도로로 이용될 수 있도록 함으로써, 별도의 추가공사의 비용 없이 교량 형하공간을 효율적으로 활용한 예이다. 또 다른 적용 예로서, 그림 8에서는 2007~2012년에 시공된, 총 연장 2.3km, 폭 5.0m의 기흥호수공원 보도교를 보여주고 있다. 유지관리비 절감을 위한 고부식 환경의 전형적인 적용 예로 그림에서 보여주는 바와 같이 긴 연장을 가지는 곡선교량에 대한 스냅-핏 복합소재 바닥판의 적용성을 함께 보여주는 사례이다.



그림 7. 교량 하부설치 자전거도로 (금강1교, 2011)



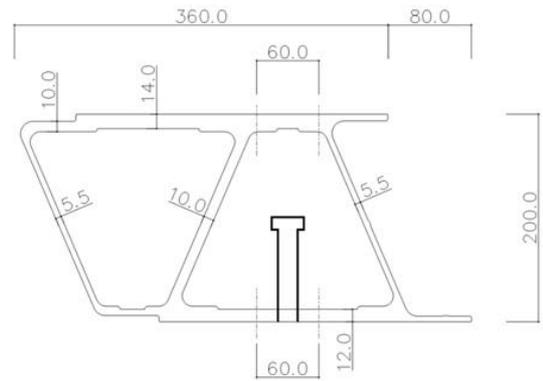
그림 8. 기흥호수공원 보도 및 자전거도로 바닥판 (2007~2012)

3. 도로교용 스냅-핏 복합소재 바닥판

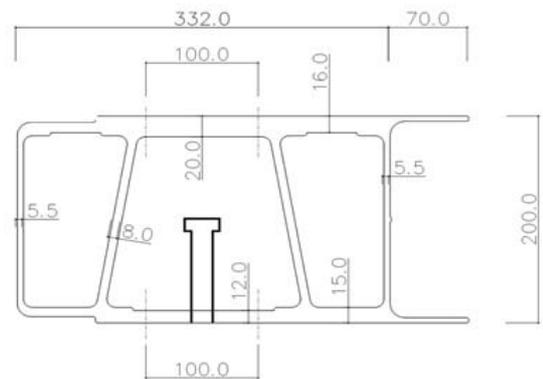
3.1 도로교용 압수접착식 복합소재 바닥판의 개발

스냅-핏 복합소재 바닥판의 개발에 앞서, 압수접착 연결구조의 도로교용 복합소재 바닥판 ‘델타데크(Delta Deck) TG200’이 개발되었다. 도로교용 복합소재 바닥판은 도로교 설계기준에 따라 DB24 표준트럭하중을 고려하여 전형적인 도로교의 거더 간격인 2.5~3.0 m에 대해 사용성과 구조안전성을 확보할 수 있도록 설계되었다. 복합소재 바닥판 휨거동의 단면형상 영향에 대한 선행연구 결과를 토대로 개발초기 1세대 바닥판(그림 9(a))은 삼각형 단면을 가지도록 설계되었으며, 일련의 시험과 해석을 통한 성능검증을 수행하였다. 삼각형 단면의 1세대 바닥판에 대한 압축피로시험을 통해 상부판의 국부적인 처짐 사용성 개선의 필요성이 인지되었다. 따라서, 기존 삼각형 단면에 수직 복부판을 추가함으로써, 상부판의 국부적인 처짐 사용성을 개선함과 동시에 거더와의 합성연결을 위한 공간을 확보할 수 있는 3셀 제형 중공 단면형상을 가지는 2세대 바닥판 단면(TG200)를 개발하였다(그림 9(b) 참조).

개발된 2세대 TG200 바닥판 단면의 구조안전성과 사용성을 검증하기 위해 30m의 길이를 가지고, 지점간 거리 2.5m인 5주형 강판형 교량의 DB24 표준트럭하중 하의 구조해석을 수행하였다. 해석결과, 설계된 복합소재 바닥판은 도로교 설계기준의 처짐 사용성 한계인 $L/425$ 보다 2.53배 작은 처짐을 가져 충분한 사용성을 보유하고 있으며, Tsai-Wu 파괴기준 최소 10.4, 복부판 좌굴에 대하여 최소 10.7의 안전율을 보유하는 것으로 평가되었다. 전술한 해석적 검증을 수행한 뒤, 그림 10에서 보여주는 바와 같이 압수접착 연결구조의 복합소재 바닥판은 인발성형을 통해 제작되었다. 복합소재 적층에는 바닥판 튜브 종방향(0°)으로 배치되는 8800TEX의 E-글래스 로빙과 횡방향 및 경사방향($90^\circ/\pm 45^\circ$)으로 배치되는 다축 유리섬유 직포(multi axial stitched



(a) 1세대 2셀 삼각형 단면



(b) 2세대 3셀 제형 단면(TG200)

그림 9. 압수접착식 도로교용 복합소재 바닥판 튜브 단면

fabric)를 이용하여 설계되었으며, 불포화 폴리에스터를 수지로 사용하였다. 그림 11에서 보여주는 바와 같이, 압수접착 연결구조의 복합소재 바닥판 튜브는 에폭



그림 10. 도로교용 복합소재 바닥판(TG200)의 인발성형 제작

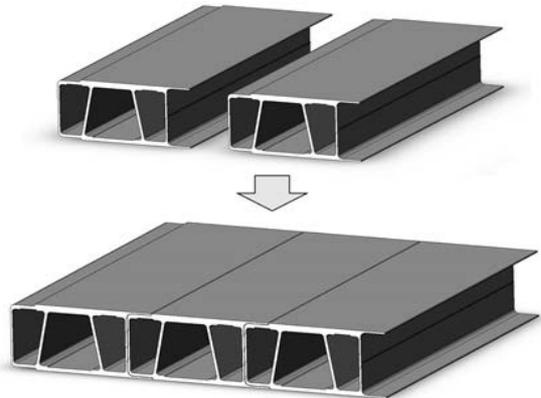


그림 11. 복합소재 바닥판의 튜브간 암수접착 연결

시 접착에 의해 횡방향으로 상호 결합함으로써 바닥판 패널로 제작된다.

3.2 도로교용 암수접착식 복합소재 바닥판의 성능검증

휨 시험, 압축피로 시험, 휨피로 시험, 연결부 전단 시험, 방호벽 시험, 포장부 접착 시험, 화학축진 시험 및 현장 재하시험을 통해 암수접착 연결구조의 인발성형 복합소재 바닥의 성능검증을 수행하였다. 시험결과, 휨 시험을 통해서서는 충격을 고려한 설계 차륜하중인 124.8kN에 대해 충분한 안전율을 보유하는 것으로 나타났다으며, 처짐 사용성에 대한 설계기준이 강도기준에 우선하여 복합소재 바닥판의 설계를 결정하는 것을 확인하였다. 또한, 전단 연결재가 설치된 바닥판 내부 포켓에 무수축 몰탈로 충전하여 제작되는 바닥판-전단 연결재 합성구조의 인발전단시험을 통해 안전율 4.0을 가지도록 전단연결재의 허용 전단력을 27kN로 산정하였으며, 현장재하시험을 통해 바닥판과 거더간의 합성거동을 확인하였다. 도로교용 복합소재 바닥판은 전술한 다양한 실내시험을 통한 성능검증 후, 2002년 정부고속도로 확장공사 우회도로용 강관형교에 국내 최초로 시험 시공되었으며, 현장 재하시험을 수행하였다. 현장 재하시험 결과, 시험트럭하중에 의한 바닥판 처짐은 1.92mm으로, 처짐 사용성 기준인 L/425(L:거더간 지점간격)을 적용하여 2m 거더간 지점간격을 가지는 바닥

판의 허용처짐인 4.7mm(2000mm/425) 보다 2.4배 작으므로 충분한 사용성을 가지며, 시험트럭하중을 설계하중인 DB24 표준트럭하중으로 환산 시 2.9배 작게 되어 충분한 처짐 사용성을 확보하는 것으로 평가된다. 또한, 현장 재하시험 시 바닥판 하부 플랜지에서 측정된 변형률로부터 얻는 교축방향 최대응력은 DB24 표준트럭하중 환산 시 부재강도 대비 39이상의 충분한 안전율을 가진다. 전술한 바와 같이, 현장 재하시험 결과, 개발된 인발성형 복합소재 바닥판은 처짐 사용성 및 응력에 있어 충분한 안전율을 확보한 것으로 평가되었다. 또 다른 현장의 공사용 가교에 대한 동적시험 결과에서도 개발된 인발성형 복합소재 바닥판은 설계하중에 의한 강도 및 처짐 사용성 기준을 만족하는 것으로 평가되었다.

3.3 도로교용 암수접착식 복합소재 바닥판의 현장적용

개발초기 가설교량에 대한 성공적인 현장적용을 통해 복합소재 바닥판은 2004년 일반국도상 도로교인 ‘개정교’에 최초 시공되었다(그림 12. 참조). 대상교량은 교장 25m, 교폭 11m의 강관형 교량으로 인발성형으로 제작된 복합소재 바닥판 튜브를 공장에서 접합한 바닥판 패널을 교량 현장에 설치하였다. 바닥판 패널의 설치가 완료된 후, 바닥판-거더의 합성연결을 위한 전단포켓 내부의 전단 연결재 용접설치 및 무수축 몰탈 충전 과정을 거쳐, 최종적으로 바닥판 상면의 아스팔트 포장을 통해 시공을 완료하였다. 또 다른 시공예로서, 그림 13에서는 2009년에 시공된 교장 47m, 교폭 10m의 곡선형의 강상자형 거더교량인 ‘배둔교’의 바닥판 설치모습을 보여주고 있다. 이 외에도 2011년에 시공된 교장 120m, 교폭 35m의 개구형 상자형 거더 교량인 ‘말무교’ 등 2014년 9월 현재까지, 강관형교, 강상자형교, PSC거더교 및 콘크리트 거더교 등 다양한 교량 형식의 국내 총 13개 도로교량(총 면적 20,094㎡)에 복합소재 바닥판이 적용되었다 (<표 3> 참조).

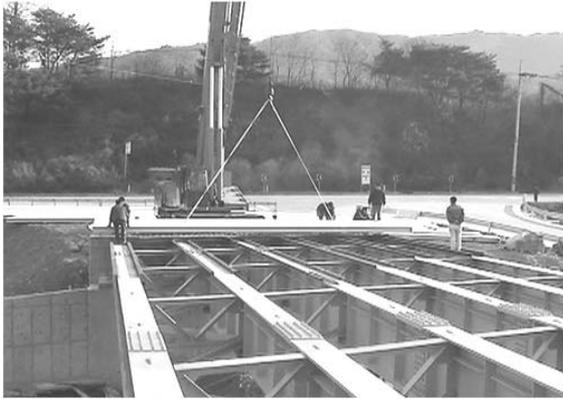


그림 12. 강관형교의 복합소재 바닥판 적용 (개정교, 2004)

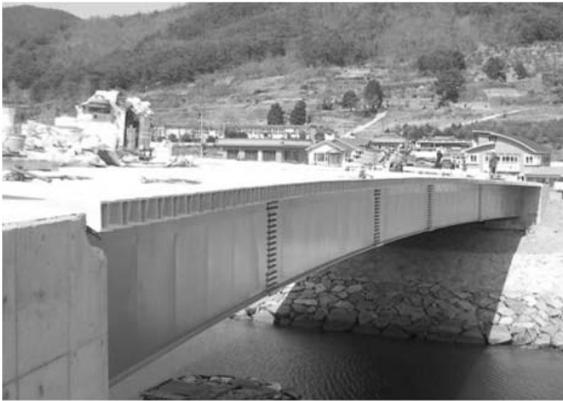


그림 13. 강상자형교의 복합소재 바닥판 적용 (배둔교, 2009)

3.4 도로교용 스넵-핏 복합소재 바닥판의 개발

현재까지, 대부분의 도로교용 인발성형 복합소재 바닥판은 대부분 암수접착에 의한 수평방향 결합방식에 의해 바닥판 튜브 및 패널간 연결이 이루어지도록 설계되었으며, 국내에 적용된 복합소재 바닥판 ‘델타테크 TG200’ 역시 이러한 암수접착 수평결합 방식을 이용하고 있다. 종래의 콘크리트 바닥판의 경우 바닥판-거더간 합성을 위한 전단 연결재는 바닥판 콘크리트 타설 이전에 거더 상면에 용접 설치되나, 암수접착 연결구조의 복합소재 바닥판의 경우 거더 상면의 횡방향 접합에 의해 바닥판이 설치되므로 전단 연결재는 바닥판의 거치 및 접합 전에 용접 설치될 수 없게 된다(그림 14(a) 참조). 따라서, 전단 연결재는 거더 상부의 모든 바닥판의 접합시공 후 바닥판-거더 간 합성 연결부의 바닥판 상부홀을 통해 강재 거더(또는 콘크리트 상부에 설치된 강판)에 용접 설치되고(그림 14(b) 참조), 합성 연결부에 무수축 몰탈을 충전하여 시공된다(그림 14(c) 참조). 이러한 바닥판 상부홀을 통한 전단 연결재의 설치시공이 용이하지 않으며, 공기가 과다하게 소요될 뿐만 아니라 용접품질을 확보하기 어려운 단점이 있다. 또한 교량의 연장이 클수록 접합 연결된 바닥판간 수평방향

표 3. 도로교용 복합소재 바닥판의 적용실적 (2014. 09월 기준)

번호	교량명	위치	시공연도	교장(m)	교폭(m)
1	형주교	경부고속도로 확장공사	2002	11.0	4.3
2	광양항 가교	광양시	2004	150.0	10.0
3	개정교	장수군	2004	25.0	11.0
4	평택항 진입교량	평택시	2005	70.0	11.9
5	눌차교	부산신항	2006	300.0	34.5
6	봉산 3교	강원도	2007	35.9	7.0
7	봉산 9교	강원도	2008	30.0	7.0
8	고한교	강원도	2008	29.9	12.0
9	시흥 농로교	시흥시	2008	25.0	3.5
10	배둔교	마산시	2009	47.0	10.0
11	예림교	기장군	2009	70.0	20.0
12	가재월교	용인시	2010	20.2	5.5
13	말무교	부산신항	2011	120.0	35.0



(a) 복합소재 바닥판 패널간 암수접착 수평결합 시공

(b) 바닥판-거더간 연결을 위한 전단 연결재 설치

(c) 복합소재 상부홀을 통한 합성부 몰탈 충전

그림 14. 델타테크 TG200의 바판간, 바닥판-거더간 연결시공예

접착부의 누적된 유격이 크게 발생하게 되어 바닥판-거더간 합성 연결부 상부홀의 위치와 설계된 전단 연결재 설치 위치의 차이가 발생할 수 있다. 뿐만 아니라, 바닥판 상부판의 다수 천공홀에 의해 과도한 폐기물이 발생할 수 있다. 전술한 문제점으로 인해 기존 복합소재 바닥판의 암수접착 연결구조에 의한 설치시공은 공기가 길어지고, 공사비가 과도하게 소요되며, 시공오차를 발생시키는 단점을 가진다.

전술한 기존 암수접착 연결구조의 복합소재 바닥판의 단점을 해결하기 위하여, 새로운 개념의 수직결합이 가능한 스냅-핏 연결구조를 가지는 초기 도로교용 복합소재 바닥판 단면인 ‘델타테크 SF200’을 개발되었다. 기계적 체결구조의 스냅-핏 연결구조로 인해 복합소재 바닥판은 전단 연결재를 거더 상면에 용접 설치 후 용이하게 바닥판간 수직결합이 가능하게 되어 작업성을 현격히 증대시키고 이에 따른 시공비용을 크게 절감할 수 있는 장점을 가지게 된다. 또한, 연결부의 접착성능을 상실하게 되더라도 기계적 스냅-핏 연결구조가 여전히 연결부의 구조안전성을 확보할 수 있는 장점을 가진다. 그림 15에서는 스냅-핏 연결부를 가지는 도로교용 복합소재 바닥판(델타테크 TG200)의 튜브의 인발성형 제조모습을 보여주고 있으며, 그림 16에서는 도로교용 스냅-핏 복합소재 바닥판의 바닥판 튜브간 수직결합 개요를 보여주고 있다.



그림 15. 도로교용 스냅-핏 복합소재 바닥판(SF200)의 인발성형제조

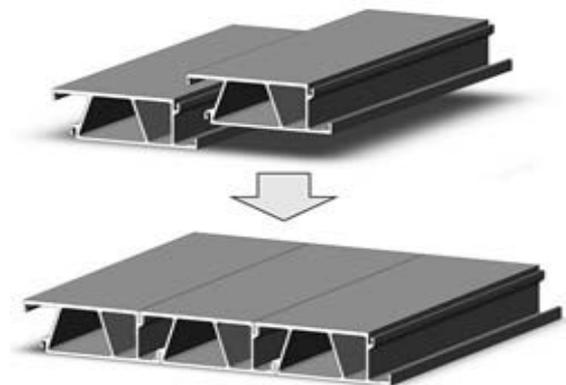


그림 16. 도로교용 스냅-핏 복합소재 바닥판의 튜브간 결합 개요

3.5 도로교용 스냅-핏 복합소재 바닥판의 성능검증

개발된 도로교용 스냅-핏 복합소재 바닥판의 성능검

증을 위하여, 휨 성능시험(그림 17), 휨 피로시험(그림 18)을 포함한 다양한 성능검증시험을 수행하였다.

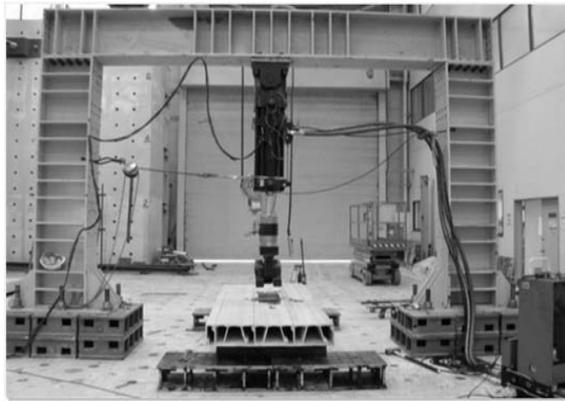


그림 17. 도로교용 스냅-핏 복합소재 바닥판(SF200)의 휨 시험

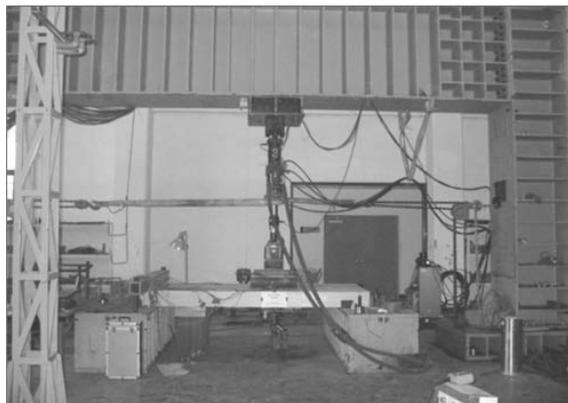


그림 18. 도로교용 스냅-핏 복합소재 바닥판(SF200)의 휨피로 시험

시험결과, 스냅-핏 복합소재 바닥판(SF200)의 파괴하중은 360kN으로 암수접착 복합소재 바닥판(TG200)은 420kN 대비 작지만, 도로교 설계기준의 DB24 표준트럭하중의 충격계수를 고려한 후륜 최대하중인 124.8kN 대비 2.9의 충분한 안전율을 보유하고 있는 것으로 평가되었다. 표 2에서는 TG200 및 SF200 복합소재 바닥판의 휨 성능시험 결과, 최대 응력, Tsai-Wu 파괴지수 및 안전율을 비교하여 보여주고 있다. 표에서 보는 바와 같이, Tsai-Wu 파괴해석 결과, SF200 복합소재 바닥판의 경우 4.79, TG200 복합소재 바닥판의 경우 4.94

의 파괴 안전율을 가지는 것으로 평가되었다. 휨 피로 시험 결과, 하중-변위 이력곡선은 200만 사이클 하중 이후에도 큰 차이가 발생하지 아니하여 두 가지 복합소재 바닥판 모두 피로시험 중 안정된 거동을 하는 것을 확인할 수 있었다. 200만 사이클 하중 재하 후 정적 휨 시험에서 스냅-핏 복합소재 바닥판(SF200)의 최대 응력은 18.07MPa로, 부재강도 대비 최소 6.8의 안전율을 보유하고 있는 것으로 평가되었다. 스냅-핏 복합소재 바닥판의 압축피로 시험에서도 안정적인 거동을 확인하였으며, 설계하중의 200만회 하중 재하 후 정적 시험 결과, 바닥판 중앙부 국부 처짐은 암수접착 복합소재 바닥판(TG200)의 경우 1.21mm, 스냅-핏 복합소재 바닥판(SF200)의 경우 0.71mm으로 확인되었으며, 스냅-핏 복합소재 바닥판의 최대응력은 29.68MPa로 부재강도 대비 최소 4.1이상의 안전율을 확보하고 있는 것으로 평가되었다. 전술한 휨 및 압축에 대한 피로시험 결과로부터, 도로교용 스냅-핏 복합소재 바닥판은 피로하중에 대해 충분한 강도와 내구성을 보유한 것으로 확인되었다.

3.6 도로교용 스냅-핏 복합소재 바닥판의 개선설계

전술한 초기 스냅-핏 복합소재 바닥판의 휨 시험 및 휨 피로시험 결과로부터, 바닥판이 충분한 휨 내하력을 보유하고 있고 설계하중이 파괴강도보다 작은 상태에서, 스냅-핏 연결부의 수직 접합면에서 최초로 국부적인 파괴가 발생함을 확인하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 그림 19에 도시된 바와 같이, 스냅-핏 연결부에 램-조인트 형태의 접착부를 형성할 수 있도록 상부판 및 하부판을 측면으로 연장시킨 복합 스냅-핏 연결구조(hybrid snap-fit connection)의 복합소재 바닥판을 고안하였다. 또한, 개선 설계에 의한 복합 스냅-핏 복합소재 바닥판 단면은 바닥판 튜브 및 패널 간 연결시공이 용이하며, 바닥판-거더 간 연결부의 시공성을 향상시킬 수 있도록 설계되었다.

상하부판 외측면에서 연장된 랩-조인트 형태의 접착 연결부와 기계적 착탈구조의 스냅-핏 연결부를 동시에 이용함으로써 수직 및 수평방향 접합이 가능하게 되어 바닥판 튜브 및 패널 간 일체화 성능을 확보함과 전술한 신개념 수직방향 스냅-핏 연결구조의 장점을 기대할 수 있다. 또한, 바닥판 튜브 및 패널 간 일체화를 통해 상호접합된 바닥판의 휨에 대한 구조안전성을 확보할 수 있다. 상하부판의 외측면에서 연장된 랩-조인트는 단부의 두께가 감소하는 형상(tapered configuration)으로 설계하여 연결부 단부의 변형집중을 감소시키게 되어 공용중 바닥판 상부 아스팔트 포장의 반사균열을 방지할 수 있도록 하였다.

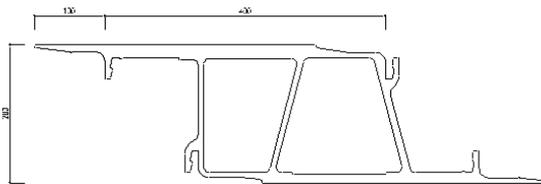


그림 19. 복합 스냅-핏 연결구조를 가지는 도로교용 복합소재 바닥판 튜브 단면

그림 20에서 보이는 바와 같이, 전단 연결재는 설치된 바닥판 튜브의 개방된 공간을 통해 용접설치되므로, 용접품질을 확보함과 동시에 바닥판 연결시공 이전에 전단 연결재를 시공하지 않아도 되므로 시공성을 크게

향상시킬 수 있다. 전단 연결재를 이용하여 먼저 설치된 바닥판 튜브가 견고하게 고정된 후, 기계적 스냅-핏 연결과 화학적 접착에 의해 다음 바닥판 튜브가 설치되는 과정을 반복함으로써 전체 바닥판의 설치가 완료된다. 따라서, 바닥판 튜브 간 연결 및 바닥판-거더 간 연결이 스냅-핏 연결부 단부의 개방된 공간을 통해 이루어지므로 연결부의 일체성을 확보함과 동시에 시공성의 획기적 향상을 기대할 수 있다. 전체 바닥판의 설치가 완료되면, 바닥판-거더 간 합성거동을 위하여 바닥판 상부의 주입홀을 통해 무수축 몰탈을 베딩부와 전단 연결재 설치부에 충전한다. 이렇게 바닥판 튜브단위의 설치가 신속하고 순차적으로 가능하게 되어 기존 압수 접착 연결구조 복합소재 바닥판의 패널단위 거치 및 연결시공이 필요 없게 된다.

4. 결론

본 기사에서는 보도 및 도로용 인발성형 복합소재 교량 바닥판의 연구개발결과와 적용현황을 소개하였다. 개발된 저하중용 스냅-핏 복합소재 교량 바닥판은 이미 국내 다수의 보도교 및 기존교량의 보도부 확장에 널리 이용되고 있으며, 경량, 고강도, 고내구성, 공기단축, 공사비 절감 및 시공성 향상 등 장점으로 최근까지 그 적용이 증가하는 추세에 있다. 또한, 본 기사에서는 도로

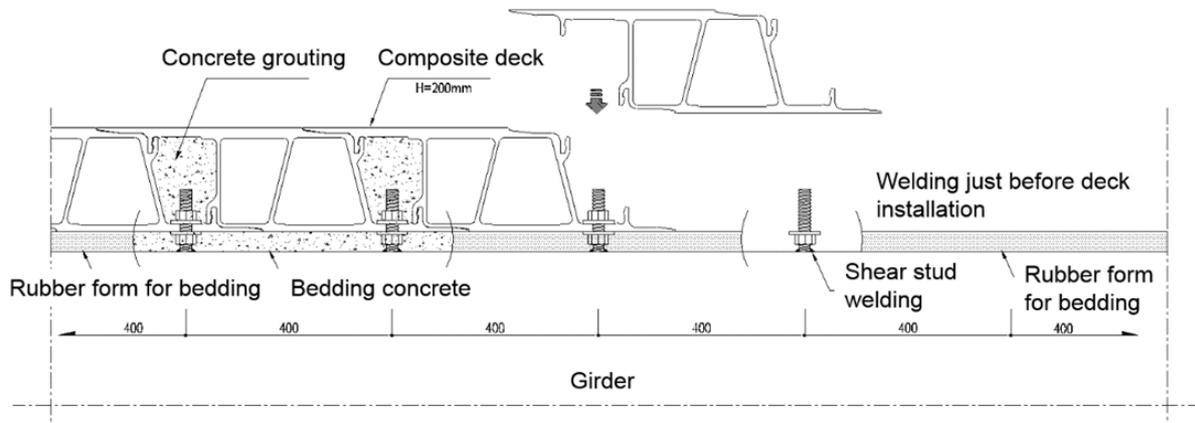


그림 20. 복합 스냅-핏 연결구조 복합소재 바닥판(hybrid SF200)의 연결부 시공개요

교량의 인발성형 복합소재 바닥판의 연구개발결과와 적용현황을 소개함과 동시에, 도로교 적용을 위해 개발된 신개념의 수직방향 기계적 스냅-핏 연결구조와 연장된 랩-조인트 형태의 수평방향 접착 연결구조를 가지는 복합 스냅-핏 연결구조의 복합소재 교량 바닥판의 연구내용을 소개하였다. 보도교 및 도로교의 대표적인 적용 사례를 통해, 기존 교량의 콘크리트 및 강재 바닥판을 대체할 수 있는 대안으로서 소개한 수직방향 스냅-핏 연결구조의 복합소재 교량 바닥판은 기술적, 경제적 및 사회적 파급효과가 클 것으로 기대된다.

Composite Bridge Deck of Tubular Profile Having Vertical Snap-Fit Connection, US Patent No. US 7, 131, 161 B2, USA.

7. Lee. S.W. (2013), *Structure and Method of Hybrid Connection for Fiber Reinforced Composite Decks and Deck to Girder with Snap-Fit and Bonding*, Korea Patent No. 10-1298581.

참고문헌

1. Keller, T. (2003), *Use of Fiber Reinforced Polymers in Bridge Construction*, *Structural Engineering Documents 7*, IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering), Switzerland.
2. Lee, S.W., Hong, K.J., PARK S. (2010), Current and Future Applications of Glass-Fibre-Reinforced Polymer Decks in Korea, *Structural Engineering International*, Vol. 20, No.4, 2010, pp.405-408
3. Lee, S.W., Hong, K.J. (2007), Development of Composite Deck Connection for Pedestrian Bridge Using Korean Traditional Wooden Joint Method, KOSEF Research Report, Korean Science and Engineering Foundation, Korea.
4. Lee, S.W. (2010), *Development of Light Weight Composite Deck with Snap-Fit connection for Rigmat and Bridge Deck*, MOLIT R&D Report, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea.
5. Lee, S.W. (2004), *Development of High Durable, Light Weight and Fast Installable Composite Deck*, MOLIT R&D Report, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea.
6. Lee, S.W. (2006), *Fiber Reinforced Polymer*