

하이브리드 GFRP-강재 심재를 갖는 복합샌드위치 교량바닥판의 정적거동에 관한 실험 연구

An Experimental Study on Static Behaviors of Composite Sandwich Bridge Decks with Hybrid GFRP-Steel Core

지효선 Ji, Hyo-Seon*[†] · 천경식 Chun, Kyung-Sik** · 박대용 Park, Dae-Yong***
· 손병직 Son, Byung-Jik****

(Received August 2, 2011 ; Revised September 14, 2011 ; Accepted September 25, 2011)

ABSTRACT

This paper presents the flexural behavior of a hybrid Glass Fiber-Reinforced Polymer(GFRP)-steel decks for use in deteriorated bridge decks replacement. Static load tests were conducted to investigate the structural characteristics of the hybrid FRP-steel deck. The tested deck panel satisfied the design criteria. The failure mode of the hybrid deck was demonstrated ductility with deformation beyond initial yielding. The responses were compared with the ANSYS finite element predictions. It was found that the presented hybrid deck was efficient for use in bridges. The thickness of the hybrid deck may be decreased when compared to that of the all FRP deck with similar flexural rigidity.

요 지

본 논문은 노후교량바닥판 대체용으로서 하이브리드 GFRP-강재 바닥판의 휨거동을 구조적 거동특성을 기술하고 있다. 하이브리드 GFRP-강재 바닥판의 구조적 특성을 조사하기 위해 정적하중의 실험적 연구를 수행하였다. 하이브리드 바닥판의 파괴모드는 초기항복을 지나서 연성거동을 나타내었다. 결과는 유한요소프로그램 ANSYS의 값과 비교하였다. 제안된 하이브리드 바닥판이 교량적용에 유용함을 확인하였다. 하이브리드 바닥판의 두께는 유사한 휨강성을 갖는 완전복합신소재 바닥판계와 비교하였을 때 감소될 수 있었다.

Key Words: hybrid GFRP deck, structural characteristics, failure mode, ANSYS

1. 서 론

교량의 공용연수 증대와 중차량 교통량의 증가에 따른 중소형교량 열화손상이 심하여 안전에 관한 문제가 야기되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 교량유지관리는 주로 교량 상부구조물인 바닥판의 유지보수에 집중되어 왔다. 그러나 상부 구조물을 보강하더라도 내하력 부족으로 인해 중차량 통행이 어려워 불가피하게 기존의 가설된 교량을 모두 철거하여 신설하는 방식으로 교량을 관리하여 왔다. 이와 같이 기존의 교량을 부분적으로 보수 또는 전면적인 철거 후 재가설하는 방법은 경제적, 시간적으로 많은 손실을 가져오고 있다. 기존 교량의 전면 철거 후 재시공과 같은 상기 문제점을 극복할 수 있고 내하력을 1등급(DB-24)로 상향 조정할 수 있으며, 급속 시공이 가능한 새로운

건설재료인 복합신소재의 응용이 교량 바닥판 등 최근에 건설 분야에 활발히 진행되고 있다. 복합신소재는 비강성, 비강도가 기존의 콘크리트나 강재에 비해 상대적으로 높고 비부식성, 경량성, 비전기성 등 재료적 장점과 방향성을 이용하여 우수한 역학적 성질을 얻을 수 있으며, 다양한 형태로 만들 수 있는 뛰어난 성형성을 가지고 있다. 복합신소재(Advanced Composites Materials)를 단순히 기존의 재료에 대한 대체 재료로서가 아니라 비등방성 재료의 특이한 물성을 응용한 구조물의 주재료로 사용하기 위하여 연구가 많이 진행되어 왔다(Alagusundaramoorthy et al. 2006), (Burgueno et al. 2001). 국내에서도 FRP 재료를 이용한 교량 바닥판이 개발이 진행되어 교량에 적용하는 등 연구가 활발히 이루어지고 있다(지효선 등 2001), (이성우 등, 2006), (정진우 등, 2005), (Zi 등 2008) (Ji et al. 2010).

*[†] 정회원·대원대학 철도건설과 부교수, 교신저자(hsj@mail.daewon.ac.kr)

** 정회원·(주)바우컨설팅트 구조부 차장 공학박사

*** 정회원·대림산업(주) 특수교량팀 과장 공학박사

**** 정회원·건양대학교 건설시스템과 부교수

대부분의 개발된 FRP 바닥판의 형상이 다실(multi-cell box) 형식을 심재(core)로 하는 샌드위치(sandwich) 구조 형식이다. FRP 재료의 특성을 살린 구조 형식이다. 그 이유는 FRP 바닥판 특히 유리섬유(Glass fiber)로 제작된 FRP 바닥판은 부재의 강도가 큰 반면에 상대적으로 탄성계수가 작아 처짐에 대한 사용성 검토에서 만족되어야 하기 때문이다. 이러한 복합신소재의 장점에도 불구하고 아직까지 건설분야에 제한적으로 적용되는 이유 중 하나가 기존 건설재료에 비하여 높은 초기 공사비 때문이다. 이러한 높은 초기 공사비를 저감하기 위한 시도가 하이브리드 GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer)재료를 이용한 구조형식 개발이다. 최근에는 하이브리드 FRP-콘크리트의 교량바닥판이 개발되는 등 많은 연구가 진행되고 있다 (Aref et al 2005). 본 논문은 하이브리드 GFRP-강재의 심재를 갖는 복합샌드위치 교량 바닥판의 개발과 구조적 거동특성에 대해 기술한다. 하이브리드 GFRP-강재의 심재를 갖는 복합샌드위치 바닥판의 휨에 대한 거동 특성을 분석하기 위하여 3점 휨시험을 실시하고 구조해석을 통해 시험결과를 비교 분석하였으며, 또한, 완전 복합신소재 교량바닥판의 공사비와 비교분석하였다.

2. 실험개요

2.1 실험체의 설계 및 제작

본 연구에서 개발한 하이브리드 GFRP-강재 심재를 갖는 복합샌드위치 교량 바닥판의 설계대상 교량은 단경간 플레이트 거더교로서, 거더는 4개이고 거더간의 간격은 2.5m로 Fig. 1의 단면도와 같으며, 지간 30m, 교폭 9m인 단경간 하이브리드-강재 바닥판 플레이트(plate) 거더(girder)교로 가정하였다. 플레이트 거더(H-900×400×22×22)는 4개이고 거더 간격은 2.5m이다. 거더와 하이브리드GFRP-강재 바닥판은 전단 연결재에 의해 합성된 것으로 가정하였다.

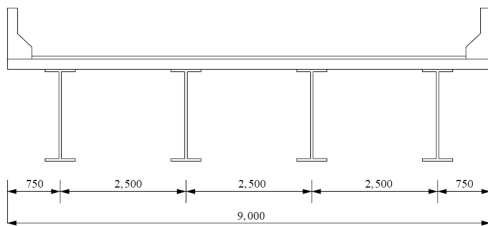


Fig. 1 대상교량 단면도 (unit: mm)

이때 복합신소재에 대한 허용처짐에 대한 설계기준이 아직 제정되지 않은 관계로 처짐에 대한 허용기준은 AASHTO LRFD를 적용하였다. 단면설계는 복합신소재의 제작공정을 고려하여 설계하였다. 고려한 활하중은 도로교 설계기준의 표준트럭하중(DB-24)이며 Fig. 2와 같다. 이 때, 충격을 고려하기 위하여 충격계수 0.3을 적용하였다. 복합신소재의 재료적 특성은 표 1에 나타나

었다.

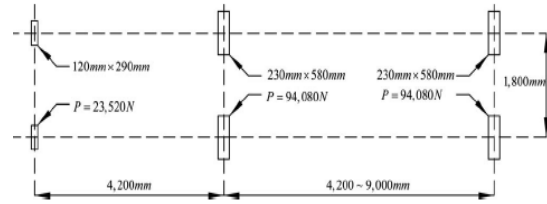


Fig. 2 설계하중(DB-24)과 차량접지면적

이와 같은 설계대상교량에 본 논문에서 제시된 하이브리드 교량바닥판을 가지고 ANSYS 유한요소 해석프로그램을 이용하여 구조해석을 실시하였으며, 변수연구를 통해 최종 단면설계된 복합샌드위치 교량바닥판은 Fig. 3, 4과 같이 GFRP-강재의 심재와 GFRP 면재로 구성되어 있다.

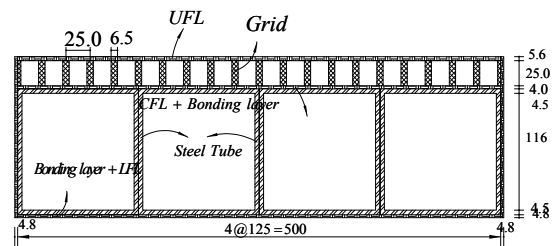


Fig. 3 하이브리드 바닥판 단면도 (단위: mm)

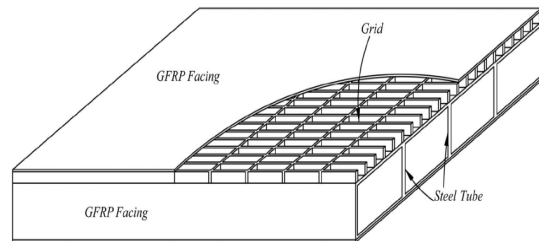


Fig. 4 하이브리드 GFRP-강재 바닥판

Table 1 사용 재료의 재료적 성질

사용재료	E (GPa)	G (GPa)	ν	ρ (g/cm^3)
유리 섬유	72.50	27.60	0.22	2.54
폴리에스터 수지	3.38	1.38	0.38	1.24
비닐 에스터 수지	3.91	1.43	0.37	1.15

구성부재에 대한 재료적 성질은 표 2에 나타내었다. 복합신소재의 물성은 섬유의 분포나 배열에 따라 크게 좌우된다. 재료 물성을 추정하는 방법으로 많이 사용되는 재료역학적인 방법인 혼합법을 이용하였으면 사용된 식은 다음 식 (1)과 같다.

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

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

여기서, W_f , W_m 은 섬유와 수지의 무게비를 나타내며, ρ_f , ρ_m 은 비중을 나타낸다. 혼합법을 이용하여 계산되는 Lamina의 재료물성은 식 (2)로 구할 수 있다.

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

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

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

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

윗 식에서, E_1 , E_2 는 각각 Lamina의 섬유방향 및 섬유직각방향의 탄성계수를 말하며 G_{12} , ν_{12} 는 lamina의 면내 전단탄성계수 및 프와송 비를 나타낸다. 혼합법을 사용하여 계산된 값을 표2와 같이 나타내었다.

Table 2 바닥판의 구성 적층부재 재료적 성질

적층부재	적층각도	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	V_f
UFL	임의 방향	7.99	7.99	1.69	0.349	0.194
UFL	0°/90°	19.55	4.35	1.77	0.343	0.234
LFL	임의 방향	7.99	7.99	1.69	0.349	0.194
CFL	0°/90°	19.55	4.35	1.77	0.349	0.234
그리드 심재	0°	20.38	4.42	1.80	0.341	0.246
강재심재	등방성	204.00	204.00	76.90	0.300	-
접착층	임의 방향	8.17	8.17	1.73	0.343	0.183

그리고 심재로 사용된 강재는 KS D3568이다. 표2에서 UFL, CFL, LFL은 상층, 중간층 및 하층면재를 나타내며 V_f 는 적층부재의 섬유함유량을 나타낸다. Fig. 3과 같이 적층설계에 의해서 최종 구성된 치수에 맞추어 수적층(hand lay-up)으로 Fig. 5와 같이 시험체를 제작하였다. 특히 GFRP와 강재와의 온도변화에 의한 층간분리현상(delamination)을 막기 위해 신축성이 우수한 비닐 에스터의 수지를 사용하였다.

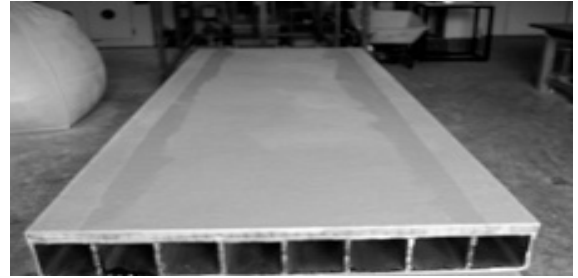


Fig. 5 하이브리드 GFRP-강재 바닥판

2.2 실험방법 및 측정

하이브리드 GFRP-강재 심재를 갖는 복합샌드위치 교량 바닥판의 휨에 대한 특성과 사용여부를 검증하기 위하여, 한국표준과학연구원에서 복합샌드위치 교량바닥판의 파괴형태, 하중-변위관계, 하중-변형률관계 및 파괴하중을 위한 3점 휨시험을 실시하였다. Fig. 6는 정적 휨시험의 모습을 나타내고 있으며, 하이브리드교량 바닥판에 변형률 게이지 및 처짐계를 Fig. 7과 같이 설치하고 사용(설계) 및 극한하중을 단계적으로 재하하여 실시하였다.

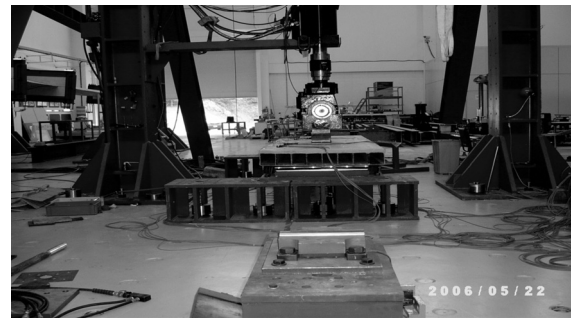
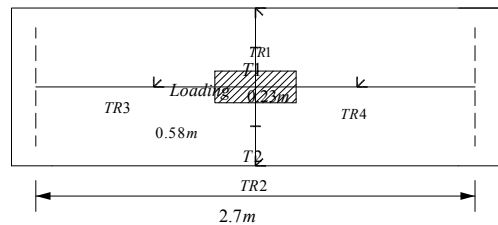
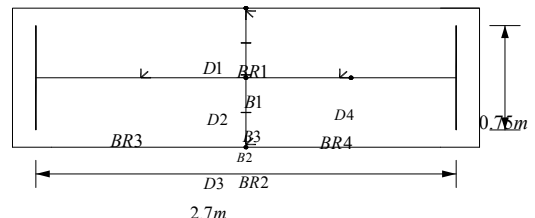


Fig. 6 정적 휨시험 모습



(a) 바닥판 상면의 변형률 측정위치



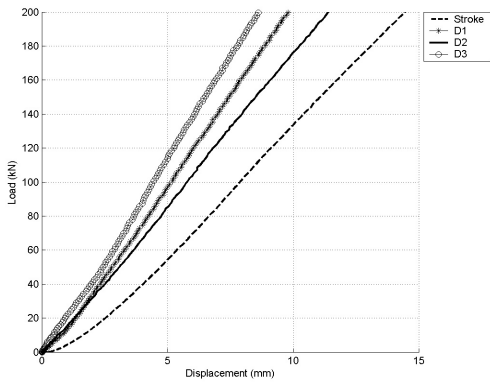
(b) 바닥판 하면의 변위 및 변형률 측정위치

Fig. 7 처짐 및 변형률 측정위치

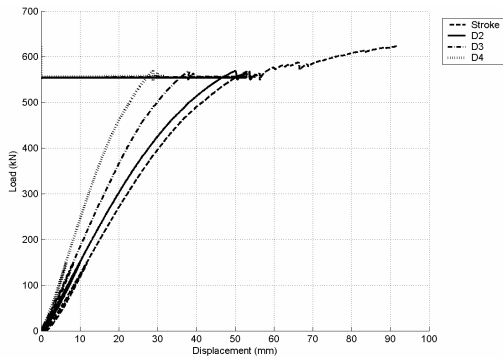
Fig. 7의 도면에 표시된 기호로서 T(TR, T)는 바닥판 상면에 부착된 변형률 게이지를 나타내고 있으며 B(BR, B)는 바닥판 하면의 변형률 게이지를 나타내고 있다. 그리고 D는 바닥판 하면에 위치한 변위계를 표시하고 있다.

3. 실험결과 및 분석

바닥판이 사용 하중하에서는 선형거동을 보이고 있으나 사용하중 이후에는 비선형 거동을 보이고 있다. 최대 재하하중은 63.25 ton이며, 이때 처짐은 92.3mm였다. Fig. 8는 하중-변위 관계를 사용하중과 극한하중하에서 나타낸 것이다. 또한 사용하중 하에서 처짐은 5.65mm로서 AASHTO LRFD 시방서의 허용처짐은 6.35mm로 안전측으로 볼 수 있다.



(a) 사용하중하에서 하중-변위 곡선

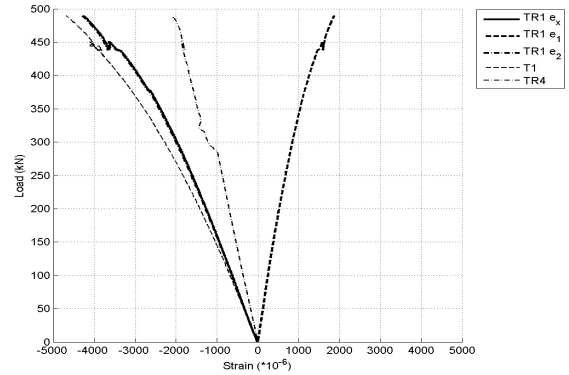


(b) 극한 하중하에서 하중-변위 곡선

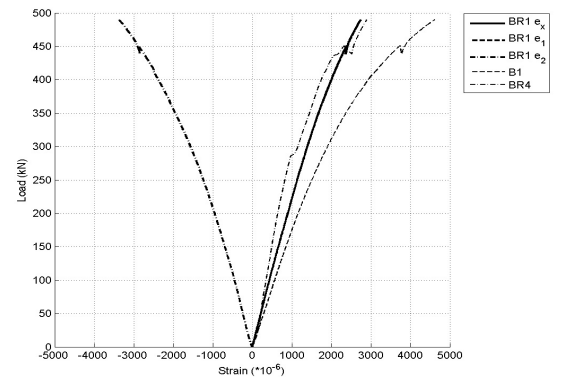
Fig. 8 하중-변위 곡선

Fig. 9는 각각 바닥판의 상면과 하면에서의 하중-변형률 곡선을 보인다. 사용하중하에서 상층면재(T1)에서 변형률 값은 $-1006 \mu\epsilon$, 하층면재(B1)에서 변형률 값은 $911 \mu\epsilon$ 로서 모두 허용 변형률 이내로 들어왔다. 본 실험에서 사용한 로제트 게이지(TR, BR ; $0^\circ, 90^\circ, 45^\circ$ 방향)를 이용하여 주응력 방향의 변형률

(e1, e2) 을 Fig. 9에 나타내었다.



(a) 바닥판 상면에서 하중-변형률 곡선



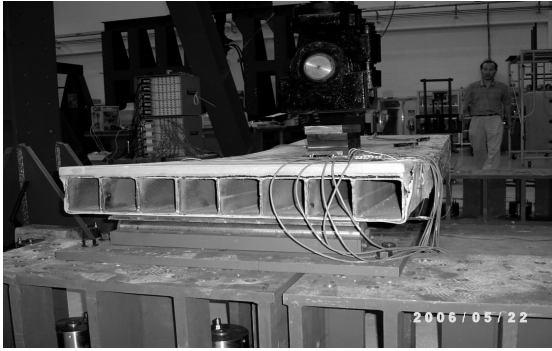
(b) 바닥판 하면에서 하중-변형률 곡선

Fig. 9 하중-변형률 곡선

최대내력에 도달하였음에도 불구하고 하중의 증감없이 변형만 지속하는 매우 안정적인 연성적 거동을 나타내었다. 특히, 파괴하중에 근접하면서 부분적으로 보강섬유가 파단되면서 하중이 감소되는 현상을 볼 수 있었다.



(a) 하이브리드 GFRP-강재 바닥판의 측면에서의 파괴모습



(b) 바닥판의 면재와 심재간 분리 모습

Fig. 10 파괴하중에서의 하이브리드 GFRP-강재 바닥판 파괴

Fig. 10은 파괴하중에서 파괴모습을 보여주고 있다. 한편, 유한요소해석(ANSYS) 값은 4.29mm로 계산되었다. 본 하이브리드 바닥판의 휨강성은 16.7 KN/mm 으로 계산되었다. Fig. 11은 하이브리드 GFRP-강재 바닥판의 유한요소 모델을 나타내고 있으며 Fig. 12는 해석결과 중 처짐의 분포도를 나타내고 있다.

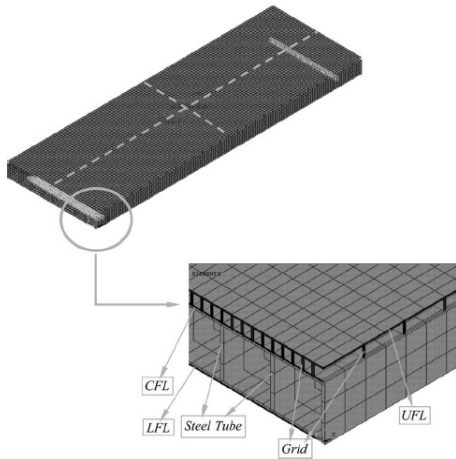


Fig. 11 하이브리드 GFRP-강재 바닥판의 유한요소 모델

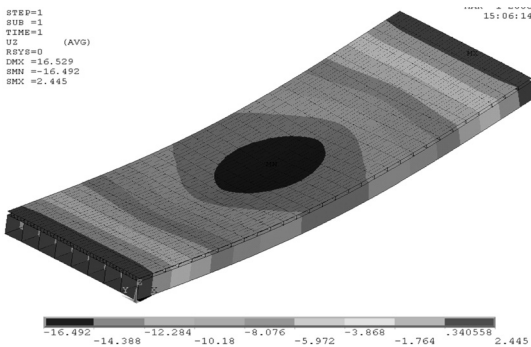


Fig. 12 하이브리드 GFRP-강재 바닥판의 처짐분포도(ANSYS)

본 연구의 하이브리드 바닥판 시편에 대한 하중-변위 곡선을 실험 값과 유한요소해석 값을 비교하여 Fig. 13와 같이 나타내었다. 해석값과 실험값과의 차이로는 시편의 제작상에서 오는 물성값의 미확보로 인한 것으로 판단된다. 그리고 파괴시작되는 하중인 400kN에서의 처짐과 변형률 값의 실험값과 유한요소 해석값을 표 3에 비교하여 나타내었다.

Table 3 처짐과 변형률 값 비교 (하중 400kN)

구분	처짐			변형률	
	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	T1	B1
시험편 1	20.5	25.5	18.5	-0.00329	0.00298
시험편 2	20.9	25.7	19.2	-0.00317	0.00294
평균값	20.7	25.6	18.8	-0.00333	0.00296
FE(ANSYS)	13.9	18.1	13.4	-0.00288	0.00208

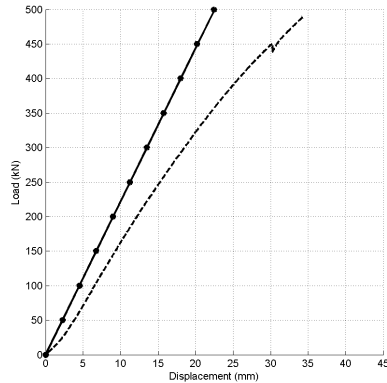


Fig. 13 하이브리드 GFRP-강재 바닥판의 지간 중앙에서 처짐 비교

Table 4 완전 복합신소재 바닥판과의 비교

바닥판 형태	단면높이 (mm)	중량 (kg/m ²)	처짐한계	휨강성 [Nm ² (×10 ⁶)]
Superdeck (CP)	203	107	L/530	9.83
DuraSpan (MMC)	203	90	L/450	4.28
하이브리드 바닥판 (본연구)	164	177	L/478	8.95

표 4에서 나타낸 것처럼 본 연구에서 제시한 복합샌드위치 교량바닥판의 두께를 동일한 휨강성을 갖는 완전 GFRP 교량바닥판과 비교하였을 때 최대 19%까지 줄일 수 있었다. 복합샌드위치바닥판은 완전 GFRP 바닥판과 비교하였을 때 우수한 강재심재의 항복강성으로 인한 충분한 휨강성을 나타 내었다. 또한, 미국 등 기 상용중인 완전 복합신소재 바닥판의 공사비는 평균적으로 70만원/m²으로 조사되었으며, 한편 본 연구에서 제시된 하이브리드 복합소재 바닥판은 38만원/m²으로 추산되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 개발된 하이브리드 GFRP-강재를 갖는 복합샌드위치 교량바닥판의 구조적 거동특성을 조사하기 위해 정적하중의 실험적 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 각각의 구성재료의 강도 및 재료적 특성을 활용한 하이브리드 심재를 갖는 복합샌드위치 바닥판의 사용이 가능함을 확인할 수 있었다.

2) 복합샌드위치 교량바닥판의 두께를 동일한 휨강성을 갖는 완전 GFRP 교량바닥판과 비교하였을 때 최대 19%까지 줄일 수 있었다.

3) 복합샌드위치바닥판의 파괴형태는 완전 GFRP 바닥판과 비교하였을 때 우수한 강재심재의 항복강성으로 인한 안정적인 연성거동을 나타 내었다.

참고 문헌

1. 이성우, 김병석, 조남훈, “인발성형 중공단면 복합소재 교량바닥판의 구조적 특성분석”, *대한토목학회논문집*, 제26권 제1A호, 2008, pp. 35-43.
2. 정진우, 김영빈, 이재홍, “GFRP 복합재료를 이용한 조립식 교량 바닥판의 실험 연구”, *한국강구조학회논문집*, 제17권, 3호, 2005, pp. 337-346.
3. 지효선, 손병직, 장석윤 “노후화된 교량 바닥판 대체용 복합신소재 교량 바닥판의 거동에 관한 실험적 연구”, *한국강구조학회논문집*, 제13권, 6호, 2001, pp. 631-640.
4. 지효선, 천경식 “노후교량 바닥판 대체용 Modular GFRP 바닥판 거동에 관한 실험 연구”, *한국복합신소재구조학회논문집*, 제1권, 2호, 2010, pp. 44-50.
5. Alagusundaramoorthy, P., Harik, I.E., and Choo, C.C. "Structural behavior of FRP composite bridge deck panels" *ASCE Journal of Bridge Engineering*, Vol. 11, No. 4, 2006, pp. 384-393.
6. Aref, A.J., Kitan, Y., Lee, G.C. "Analysis of hybrid FRP-concrete multi-cell bridge superstructures," *Composite Structures*, Vol 69, 2005, pp. 346-359.
7. AASHTO LRFD. (2007). *AASHTO LRFD bridge design specifications, 4th Ed.*, AASHTO, Washington D.C.
8. ANSYS Ins. (2005). *ANSYS 10.0 documentation ANSYS Inc. distributed with ANSYS 10.0.*
9. Burgueno R., Karbhari V.M., Seible F., and Kolozs R.T. "Experimental dynamic characterization of an FRP composite bridge superstructure assembly," *Composite Structures*, Vol 54, 2001, pp. 427-444.
10. Ji, H.S., Song, W.C. and Ma, Z. John, “ Design, Test and Field Application of a GFRP Corrugated-Core Sandwich Bridge”, *Engineering Structures*, Vol.32, No.9, 2010, pp. 2814-2824.
11. Zi, G., Kim, B.M., Hwang, Y.K., and Lee, Y.H. "An

experimental study on static behavior of a GFRP bridge deck filled with a polyurethane foam", *Composite Structures*, Vol 82, 2008, pp. 257-268.