

인발성형 복합소재 교량 바닥판의 개발 및 현장적용 Development and Field Application of Pultruded Composite Bridge Deck

이성우* 김병석** 박신전*** 박성용**** 김성태*****
Lee, Sung Woo Kim, Byung Suk Park, Sin Zeon Park, Sung Yong Kim, Sung Tae

ABSTRACT

In the conventional reinforced-concrete bridge deck, concrete and steels are likely to be deteriorated and corroded under the influence of noxious environment. To cope with these problems caused in the conventional reinforced-concrete bridge deck, pultruded composite bridge deck having light weight, high strength, corrosion resistance and durability is developed. Based on the previous study, Pultruded composite bridge deck is designed. For the DB24 truck load finite element analysis is performed to verify whether it meets both strength and serviceability design criteria. For the fabricated and assembled deck panel, structural testings are conducted. This paper present structural details and field application and testing results of composite bridge deck are presented. of composite bridge deck.

1. 서론

기존의 건설재료로 사용되어온 강재와 콘크리트의 부식과 열화 문제를 해결할 수 있는 복합소재는 구조물의 내구연한을 획기적으로 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 경량, 고강도 특성으로 인해 구조물의 자중을 크게 줄일 수 있고, 운송, 취급, 시공에 소요되는 공기를 대폭 단축할 수 있는 장점등으로 인해 많은 각광을 받고 있다. 복합소재의 건설분야 적용 구조물 중 복합소재 교량 바닥판은 최근 구미선진국에서 매우 활발한 연구개발이 이루어지고 있으며, 실용화에 박차를 가하고 있는 교량 분야의 첨단기술로서 세계적인 관심의 대상으로 떠오르고 있다.

본 논문에서는 국내 최초로 개발된 유리섬유 복합소재 프리캐스트 교량 바닥판의 설계와 구조 해석 및 시험을 통한 성능평가 결과를 기술하였으며 또한 시험시공을 통한 현장재하 시험결과를 기술하였다.

2. 복합소재 교량 바닥판의 특성

복합소재 교량 바닥판은 기존의 현장 타설로 인해 공기가 많이 소요되는 콘크리트 바닥판과는 달리 공장에서 미리 제작된 프리캐스트 교량 바닥판 패널로서 교통량이 많은 도심구간에 교량건설이나 보수시 프리캐스트 교량 바닥판 패널을 사용하면 공기 단축 및 교통통제 기간을 최소화할 뿐만 아니라 교통혼잡으로 인한

*정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수 · 공학박사 · 02-910-4696 (E-mail:swlee@kookmin.ac.kr)
**정회원 · 건설기술연구원 수석연구원 · 공학박사 · 031-910-0124 (E-mail:bskim@kict.re.kr)
***정회원 · (주)국민씨아이 · 과장 · 02-910-4652 (E-mail:sinzeon@kookminci.com)
****정회원 · 건설기술연구원 선임연구원 · 공학석사 · 031-910-0140 (E-mail:sypark@kict.re.kr)
*****정회원 · 건설기술연구원 연구원 · 공학석사 · 031-910-0557 (Email:esper009@kict.re.kr)

간접비를 대폭 절감할 수 있다. 복합소재 바닥판은 콘크리트 바닥판처럼 열화하지 않고 강재처럼 부식하지 않으므로 교량의 수명을 대폭 늘릴 수 있으며, 공용 중에도 유지관리 비용이 거의 들지 않는다. 또한 콘크리트 바닥판에 비해 중량이 1/5이하이므로, 교량의 자중을 경감하여 교각 기초나 거더를 경제적으로 건설할 수 있으며, 교량의 성능개선시 기존의 거더나 교각기초를 보강하지 않고 자중을 경감한 만큼 통과 차량 하중을 크게 할 수 있으므로 교량 등급을 높일 수 있어서 현저한 공기단축과 공사비 절감을 도모할 수 있다.

3. 복합소재 교량 바닥판의 단면 설계 및 구조성능평가

3.1 단면설계

복합소재 모델 바닥판에 대한 선행기초연구^{(2),(3)}를 바탕으로 국내 도로교시방서 기준에 따른 DB24하중에 적합한 유리섬유 복합소재 패널 단면을 설계하였다. 설계된 복합소재 프리캐스트 바닥판 단면은 종방향 및 횡방향 강성이 우수한 3개의 제형(사다리꼴)을 가지는 중공 단면을 기본 단면형상으로 하며, 상부판, 하부판 및 복부판으로 구성되어 상부하중의 지지 및 전달에 유리한 형태를 가지도록 설계되었다. 또한, 각 구성부재별로 최적화된 적층설계를 수행하였다. 사용성 및 구조 안전성의 해석적 검증을 위하여 설계 바닥판을 적용한 강판형교에 대한 유한요소해석을 실시하여 도로교 시방서의 DB24하중에 대한 바닥판 처짐, 국부응력 및 파괴지수를 검토하였으며, 설계단면 복부판의 좌굴 안전성을 검증하였다. 구조해석을 통해 유리섬유 복합소재 패널 단면의 상세설계를 수행한 결과 그림 3.1과 같은 복합소재 바닥판 튜브단면을 설계하였다.

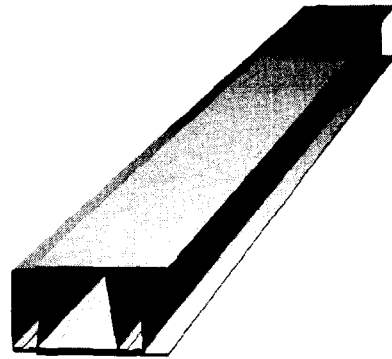


그림 3.1 복합소재 바닥판 튜브단면

3.2 복합소재 바닥판 교량 해석 및 성능시험

설계된 유리섬유 복합소재 바닥판 단면을 판형교에 적용하여 설계 단면 바닥판의 사용성과 구조 안전성을 평가하기 위해 유리섬유 복합소재 바닥판 교량에 대한 유한요소해석을 실시하였다. 해석대상 교량은 총 지간장이 30m, 거더간 간격이 2.5m인 5주형 단순판형교로 하였다.

유한요소해석에는 복합소재 적층판 해석이 가능한 범용 해석프로그램인 COSMOS/M을 이용하였으며, 복합소재 바닥판은 Tsai-Wu 파괴해석을 수행하기 위하여 SHELL1 요소 사용하였다. 또한 강재 주형은 3차원 보요소를 이용하였으며, 바닥판에 작용하는 하중과 변위를 주형에 전달하기 위하여 바닥판과 주형의 접합면에는 강결요소를 사용하여 모델링 하였다. 요소 크기는 10.0cm×10.0cm로써 가로 및 세로의 비가 약 1:1이 되도록 하였다. 복합소재 바닥판 교량의 구조해석에서는 1등교 설계하중인 DB24하중 재하시 계산된 해석결과를 이용하여 Tsai-wu 파괴기준에 의한 바닥판의 구조 안전성을 검토하고, 바닥판의 처짐으로 사용성을 검토하였으며, 또한 고유치해석을 통하여 복부판의 좌굴 안전성을 검토하였다. 그림 3.2에는 해석 대상 교량의 유한요소해석 모델을 보여주고 있으며, 그림 3.3~3.5에는 각각 바닥판의 수직방향처짐, 파괴지수, 좌굴모드를 보여주고 있다.

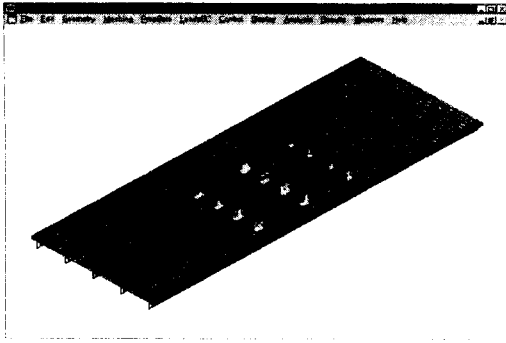


그림 3.2 해석대상 교량의 유한요소해석 모델 및 하중재하위치

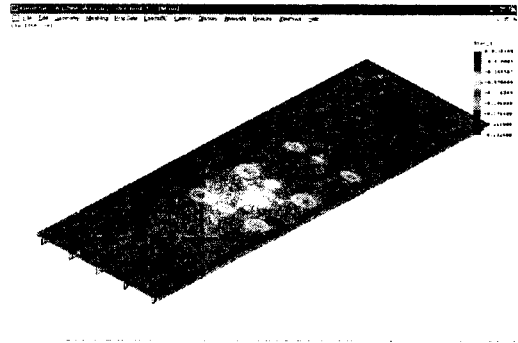


그림 3.3 복합소재 바닥판의 수직방향 치짐분포

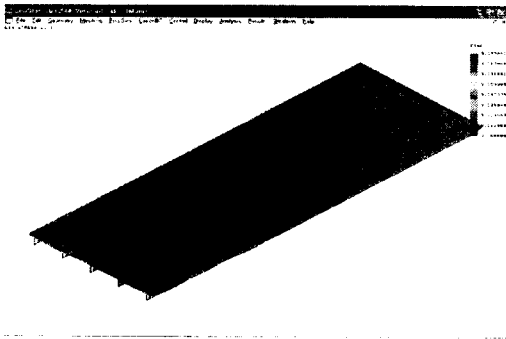


그림 3.4 복합소재 바닥판 전체의 파괴지수 분포

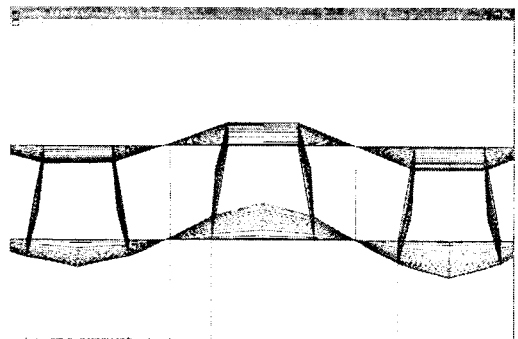


그림 3.5 좌굴해석 결과 좌굴모드형상 (좌굴 제1모드)

구조해석 결과 응력, 처짐, 파괴지수, 좌굴에 대한 결과를 정리하면 다음 <표 3.1>과 같다. 처짐규정에 대해서는 2.53의 충분한 여유를 보유하여 사용성을 만족시키고 있고 파괴지수에서도 10.42 및 북부판 좌굴에 있어도 10.67의 안전율을 가지고 있어 복합소재 바닥판 단면은 사용성 및 구조 안전성을 모두 충족하는 것으로 평가되었다.

<표 3.1> 설계 복합소재 바닥판 교량의 구조해석 결과 (DB24 하중재하시)

항 목	최대응력 (kgf/cm ²)				Tsai-Wu 파괴지수	최대처짐	좌굴고유치
	상부판		하부판				
	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y			
결과치	-143.5	-160	177	73.4	0.096	2.32 mm	14.22
안전율	18.19	10.13	17.13	11.01	10.42	2.53	10.67

X:바닥판 패널 종방향 (차량진행직각방향), Y:바닥판 패널 횡방향(차량진행방향)

4. 복합소재 교량 바닥판의 구조상세

유리섬유 복합소재 프리캐스트 바닥판 교량의 구조상세는 주형-바닥판의 연결부, 방호울타리, 신축이음부 및 포장에 관련된 상세를 포함한다. 이러한 구조상세는 주형 또는 교량 부대공과 복합소재 바닥판의 일체화를 도모함과 동시에 설계하중을 충분히 지지할 수 있도록 한다. 주형-바닥판 연결부는 합성형 연결부에 대한 상세와 비합성형 연결부에 대한 상세를 함께 개발하였으며, 합성형 연결부의 경우 중공 단면의 바닥판 패널에 전단 포켓을 형성하고 전단 연결재를 설치한 후 무수축 몰탈을 충전하여 합성연결부를 시공하여 주형-바닥판의 합성효과를 얻을 수 있다(그림 4.1). 강판형교에 대한 비합성형 연결부의 경우에는 주형의 상부 플랜지와 바닥판 패널의 하부판 간에 연결볼트의 전단력으로 지지하도록 주형-바닥판 연결부를 시공한다. 방호울타리의 설치를 위한 구조상세에서는 각종 방호울타리와 바닥판과의 연결을 위해 합성형 주형-바닥판 연결방식과 유사한 무수축 몰탈 충전 및 합성 방식을 사용한다(그림 4.2).

신축이음장치의 시공을 위한 구조상세에서는 기존 교량의 신축이음장치인 개방형(핑거 조인트), 판형(트랜스플렉스 조인트), 타설형(맹 조인트) 및 레일형 신축이음장치를 유리섬유 복합소재 바닥판 공법에 적용할 수 있도록 하였다(그림 4.3).

교면 포장은 복합소재 바닥판 상면과 포장층과의 부착을 양호하게 할 수 있도록 기존 강상판 포장에 사용되는 아스콘 접착공법을 사용하도록 하였으며, 포장 전단 시험 및 포장 부착시험을 통해 그 성능을 확인하였다(그림 4.4).

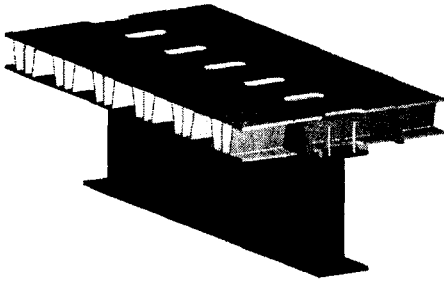


그림 4.1 강판형교의 주형-바닥판 연결부 사시도(합성형)

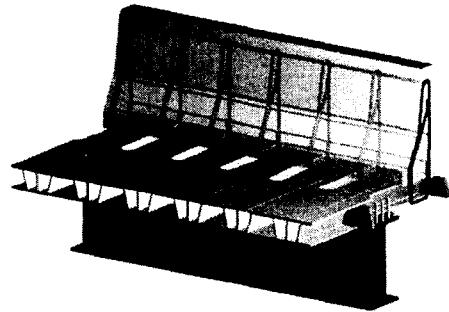


그림 4.2 콘크리트 방호벽의 연결구조상세

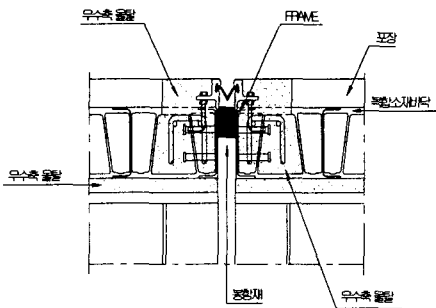


그림 4.3 레일형 신축이음장치의 구조상세

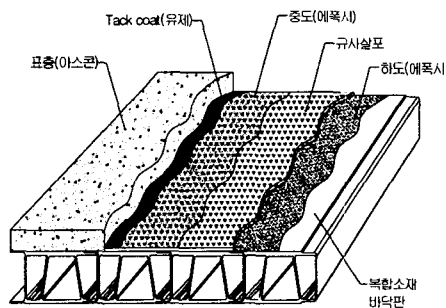


그림 4.4 복합소재 바닥판에 대한 아스콘 접착공법 개요

5. 복합소재 교량 바닥판의 현장시험시공

경부고속도로 부산-언양간 고속도로 확장공사 제2공구 형주교에 국내 최초로 개발된 유리섬유 복합소재 프리캐스트 교량 바닥판을 적용하여 시공하였다. 대상 교량의 제원은 교장 11m, 교폭 4.3m의 2차선 교량으로서 고속도로 확장공사용 교량이며, 강주형에 복합소재 바닥판을 합성한 교량이다. 복합소재 바닥판은 미리 공장에서 제작한 후 현장에서 복합소재 바닥판과 주형과의 합성을 위하여 바닥판-주형 연결에는 전단 스티드를 바닥판 내부의 그라우트 포켓에 매립하는 방법을 사용하였다. 사진 5.1에서는 복합소재 교량 바닥판을 인양하는 모습을 보여주고 있으며 사진 5.2에서는 복합소재 바닥판 패널을 거치하는 모습을 보여주고 있다. 사진 5.3에서는 거치된 패널간 연결부를 잭킹하는 모습이며 사진 5.4에서는 전단 포켓에 전단연결재(스티드)를 설치한 모습이다.

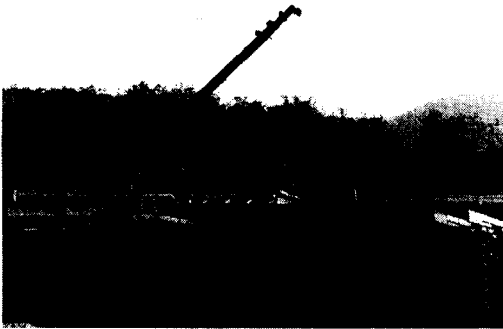


사진 5.1 바닥판용 복합소재 패널 인양

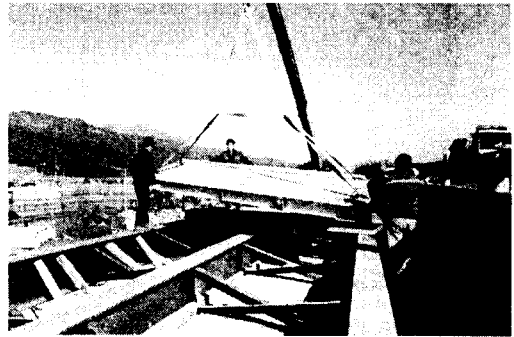


사진 5.2 바닥판용 복합소재 패널 거치

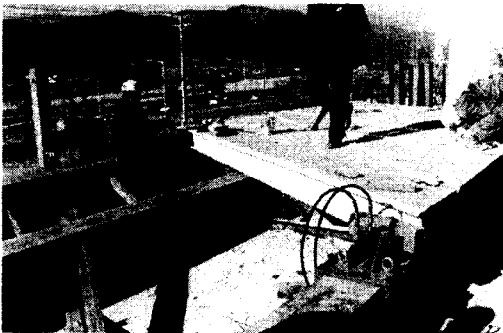


사진 5.3 패널간 연결부 잭킹

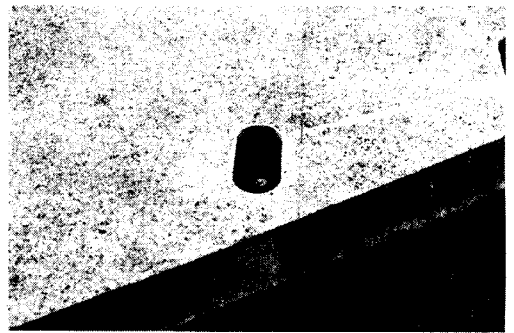


사진 5.4 전단연결재(스티드) 용접

6. 복합소재 교량 바닥판의 현장재하시험

6.1 개요

공용중 복합소재 바닥판 교량의 상부 활하중에 대한 복합소재 바닥판의 사용성 및 구조안전성을 분석하고 복합소재 바닥판과 강주형의 합성거동을 파악하기 위하여 정적재하시험을 실시하였으며 현장재하시험하중에 의한 바닥판 및 주형의 변형율, 처짐 등을 실측하였다.

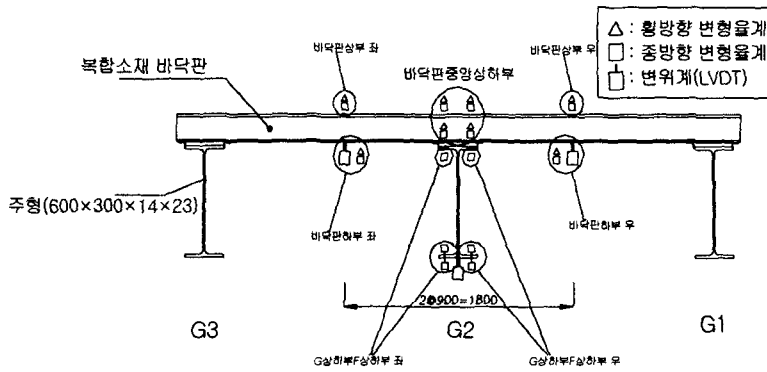


그림 6.1 복합소재 바닥판 횡단면 strain gage 및 LVDT 위치도

현장재하시험에서 사용된 시험하중 차량의 총중량은 29톤, 3축 덤프트럭으로써 현장재하시험차량의 재하 위치는 바닥판 최대 단면력이 발생하는 위치에 재하시험을 실시하였다. 그림 6.2와 사진 6.1에서는 하중재하 위치도 및 하중재하 모습을 보여주고 있다.

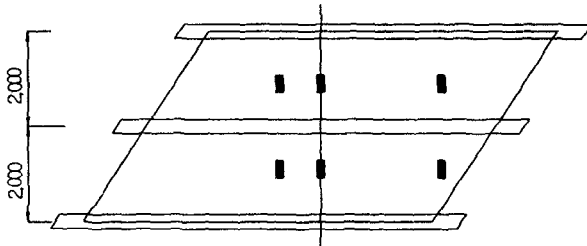


그림 6.2 복합소재 바닥판의 하중재하위치도



사진 6.1 복합소재 바닥판의 하중재하 모습

6.2 현장재하시험 결과

복합소재 바닥판의 사용성은 시방서상 바닥판의 최대허용 처짐기준을 대비하여 평가하였다. 도로교시방서에 복합소재 바닥판에 대한 사용성 기준이 아직 마련되어 있지 않으므로 1996년에 발간된 도로교시방서 하중-저항계수편(AASHTO LRFD(1994)와 동일한 기준)에서 직교 이방성 강바닥판의 처짐 사용성 기준인 $L/300$ 과 목재 바닥판의 처짐 사용성 기준인 $L/425$ 중 더 불리한 기준인 $L/425$ (L =주형간 간격)를 준용하여 재하시험결과에 대해 바닥판의 사용성을 평가하였다. 상기 기준을 적용할 경우, 계측대상 복합소재 바닥판의 처짐기준은 4.7mm ($L/425=2000/425$)이다. 계측결과, 현장재하하중에 의한 바닥판의 최대 처짐 5회 측정된 평균값은 1.92mm 로서 2.4정도의 처짐 안전율을 가지는 것으로 평가되었다. 시험 차량하중의 축중량 23톤의 DB24하중에 대한 추정 처짐 안전율은 약 2.9로 평가되어 처짐 사용성 기준을 충분히 만족시키는 것으로 확인되었다. <표 6.1>은 현장재하시험의 처짐 결과를 정리한 것이다.

<표 6.1> 처짐계측결과

	위치별 계측결과 (mm)		비고
	바닥판 좌측	바닥판 우측	
재하시험결과 [안전율]	-1.46 [3.21]	-1.92 [2.44]	처짐기준 4.7mm (2000/425)
DB24 (환산) [안전율]	-1.21 [3.88]	-1.59 [2.95]	

다음 <표 6.2>에는 현장재하시험하중에 대한 바닥판의 실측응력(실측변형율×해당탄성계수)을 보여주고 있다. 실측 결과 현장재하시험시 발생 응력이 최대응력은 바닥판 상부 L방향(차량진행방향)인 경우 -30.6kgf/cm², 바닥판 상부 T방향(차량진행방향 직각방향)인 경우 -47.3kgf/cm², 바닥판 하부 L방향(차량진행방향)인 경우 30.06kgf/cm², 바닥판 하부 T방향(차량진행방향 직각방향)인 경우 32.0kgf/cm²의 결과값이 나왔다. 모두 최대강도범위 안에서 응력값이 발생하였으므로 시공된 복합소재 바닥판은 충분한 구조적인 안전성을 보유하고 있는 것으로 평가되었다.

<표 6.2> 유한요소해석과 실험결과와의 비교

위 치	실측응력(kg/cm ²)					최대강도 (kg/cm ²)
	DL*	LL (재하하중실측)	LL (DB24 환산)	DL+1.3LL*		
				응 력	강도대비	
바닥판 상부 우 L1	-6.68	0.87	0.72	-5.74	209.1	1,200
바닥판 상부 중 L2	-6.78	-10.38	-8.64	-18.01	66.6	1,200
바닥판 상부 좌 L3	-6.68	-22.11	-18.40	-30.60	39.2	1,200
바닥판 하부 우 L1	-3.25	30.80	25.62	30.06	43.2	1,300
바닥판 하부 중 L2	-3.40	-2.89	-2.40	-6.52	184.1	1,200
바닥판 하부 좌 L3	3.23	11.52	9.58	9.22	150.0	1,300
바닥판 상부 우 T1	-0.93	-13.60	-11.31	-15.63	128.0	2,000
바닥판 상부 중 T2	-0.59	1.02	0.85	0.52	3,846	2,000
바닥판 상부 좌 T3	-0.99	-42.82	-35.63	-47.31	42.3	2,000
바닥판 하부 우 T1	1.73	27.98	23.28	31.99	62.5	2,000
바닥판 하부 중 T2	0.50	0.86	0.72	1.44	1,388.9	2,000
바닥판 하부 좌 T3	1.68	19.19	15.97	22.44	89.1	2,000

* DL:해석 사하중 응력, LL:DB24 환산 실측응력

7. 결 론

본 논문에서는 국내 최초로 개발된 유리섬유 복합소재 프리캐스트 교량 바닥판의 설계와 구조 해석 및 시험을 통한 성능평가 결과를 기술하였으며 또한 시험시공을 통한 현장재하 시험결과를 기술하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 재하시험 결과 정적재하시험에 의한 중립축 거리가 42.8cm로서 실제 구조물의 합성전 중립축 30cm보다 중립축이 주형의 상부 플랜지 쪽으로 상향 이동되어 확실한 합성거동을 확인할 수 있었다.
- 현장재하시험 결과 DB24하중으로 환산한 최대처짐은 1.74mm로서 복합소재 바닥판 처짐기준인 4.7mm에 대해 약 2.9의 안전율을 가지는 것으로 평가되었으며, 현장재하시험으로 계측된 응력을 DB24하중으로 환산한 응력에 대해 최대 강도 대비 안전율로 평가한 결과 최소 39이상의 안전율을 확보하는 것으로 확인되었으며 사용성 및 구조 안전성을 모두 충족하는 것으로 평가되었다.
- 복합소재 교량 바닥판은 경량, 고강도, 고내구성 특성 뿐만 아니라 교통통제 최소화와 신속시공을 가능케하는 여러 가지 이점으로 인해 교량 바닥판 신설 및 성능개선 공사시 앞으로 활발히 보급될 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 산학연 공동연구개발사업(목적A-01)으로 연구되었으며 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Sung Woo Lee, Sun Goo Lee, Doobyong Bea, Byung Suk Kim (2002), "Flexural Characteristics of Filament Wound GFRP Composite Bridge Deck", Proceedings of ICCI'02
- [2] 이성우, 이선구, 김정현, 경량 고내구성 복합소재 교량 바닥판의 개발, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2001
- [3] 이성우, 이선구, 송충한, 박성용, 인발성형 복합소재 교량 바닥판의 설계 및 제작, 전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제 15권 1호, 2002
- [4] Sung Woo Lee, Sun Goo Lee, Byung Suk Kim, Sin Zeon Park (2002), "Fabrication and Experiments for Glass Reinforced Composite Bridge Deck", Proceedings of ASSEM'02