

중공단면 복합소재 교량 바닥판의 제작성, 내구성 및 구조거동평가

Fabrication, Durability and Structural Characteristics of Composite Bridge Deck of Hollow Section

이 성 우†

Lee, Sung-Woo

(논문접수일 : 2005년 1월 6일 ; 심사종료일 : 2005년 9월 7일)

요 지

본 논문에서는 경량, 고내구성 특성을 지니고 있고 신속시공이 가능한 인발성형 복합소재 교량 바닥판의 단면설계와 제작공정에 대해 기술하였으며, 구조해석을 통해 구조안전성과 사용성을 검토하였다. 단면설계에는 바닥판 단면 형상 설계와 복합소재 적층설계 절차를 기술하였고, 해석은 5주형 복합소재 바닥판 거더 교량에 대해 실시하였으며, 치짐 사용성, 파괴지수, 좌굴안정성에 대한 검토를 실시하였다. 설계된 복합소재 바닥판 단면은 인발성형으로 제작하였으며, 제작시편에 대한 재료시험을 실시한 후 그 결과를 기술하였다.

핵심용어 : 복합소재, 교량 바닥판, 델타 데크, 적층설계, 인발성형, 유한요소해석, 사용성

Abstract

In this study, to develop composite bridge deck of many advantages such as light weight, high strength, corrosion resistance and high durability, profile design, laminate design and finite element analysis were carried out. In the analysis, 5-girder single span bridge with composite deck was considered. Deflection serviceability, failure criteria and web buckling were evaluated. Composite deck of designed profile was fabricated with pultrusion process. The coupon tests were conducted for the fabricated deck and the results were described.

keywords : composite, bridge deck, Delta Deck, laminate design, pultrusion, finite element analysis, serviceability

1. 서 론

본 연구에서는 건설분야의 첨단 신소재로 떠오르고 있는 경량, 고강도, 고내구성 특성의 복합소재를 이용하여 기존의 콘크리트 바닥판을 대체할 수 있는 복합소재 교량 바닥판을 개발하고자 하였다.

교량의 성능개선 및 신설시 복합소재 교량 바닥판을 사용하면, 교통통제기간을 최소화시켜 차량지체로 인한 에너지 비용의 낭비를 현저히 줄여주고 시민불편을 최소화시키며, 공기단축으로 공사비를 절감할 수 있다. 또한 내부식, 고내구성 특성으로 인해 콘크리트 열화로 인한 문제점을 근원적으로 방지하여 내구연환을 현격히 증대시킬 수 있어 수명기간

대비 실질 투자비용이 크게 감소된다. 한편 경량 특성으로 사하중을 감소시켜 하부구조의 경량화가 가능하며, 성능개선 시에는 하부구조에 대한 보강 없이 교량의 승급이 가능하므로 초기 공사비가 대폭 절감되며, 운송 및 시공장비의 경량화가 가능하고 자중경감에 의해 내진성을 크게 향상시킨다. 이미 해외에서는 복합소재 교량 바닥판에 대하여 활발한 연구가 진행되고 있다. 미국의 경우 MMC(Martin Marietta Composites)사는 Duaraspan™ 바닥판을 개발 생산하여 여러 시험을 실시하였으며, 시험시공 및 실교량등에 적용하였다(Defense Advanced Research Project Agency, 2000). 본 논문에서는 국내 최초로 산업용으로 개발(이성우, 2004)된 유리섬유 복합소재를 이용한 프리캐스트 교량 바닥판인 '델타

† 책임저자, 정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수
전화: 02-910-4696 ; Fax: 02-918-1979
E-mail: swlee@kookmin.ac.kr

• 이 논문에 대한 토론을 2006년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2006년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

데크의 설계와 제작 및 구조해석을 통한 성능검토내용을 기술하였다.

2. 복합소재 교량 바닥판의 단면설계

2.1 사용재료

본 논문에서 기술한 프리캐스트 바닥판은 고강도 유리섬유와 불포화 폴리에스터 수지로 구성되는 복합소재 재료를 이용하여 제작한다. 강화재인 유리섬유는 3,500MPa이상의 인장강도를 보유하고 있어 재료의 기계적 강도를 발휘하도록 하며, 수지는 구성재료를 일체로 성형되도록 하는 접착제로서의 역할을 할 뿐만 아니라 내식, 내화학 등의 특성을 보유하고 있어 외부 유해환경에 대한 내구성을 가질 수 있도록 한다. 이외에 사용되는 각종 충전재와 첨가제는 구조물 제조 시 성형성과 내화, 내연, 내열성능 등을 향상시키는 역할을 하게 된다. 따라서, 복합소재의 구성은 기계적 특성 및 필요한 용도에 따라 다르게 설계될 수 있다.

유리섬유는 강화섬유 중 가격경쟁력이 높아 현재 건설용 복합소재 구조물에서 가장 많이 사용되고 있으며, 훌륭한 강도특성을 보유하고 있다. 본 연구의 복합소재 프리캐스트 바닥판에는 종방향으로는 유리섬유 로빙을 사용하고, 횡방향으로는 다축 유리섬유 직포(multiaxial stitched fabric)를 사용하여 부재의 모든 방향으로 우수한 강도특성을 보유하도록 하였다. 또한, 수지는 가격 경쟁력이 높으면서도 우수한 내식, 내화학 특성을 보유하고 있는 불포화 폴리에스터를 사용하였다. 표 1에서는 유리섬유의 물성치를 보여주고 있으며, 표 2에서는 폴리에스터 수지의 물성치를 보여주고 있다.

2.2 단면형상 설계

본 연구의 유리섬유 복합소재 프리캐스트 교량 바닥판의 단면설계는 선행기초연구결과(이성우, 2005)를 바탕으로 3개의 제형 셀을 가지는 중공 단면을 기본 단면형상으로 하였다. 설계된 바닥판 단면형상의 특징은 다음과 같다.

- ① 제형 중공단면의 기본 단면형상은 바닥판의 종방향 및

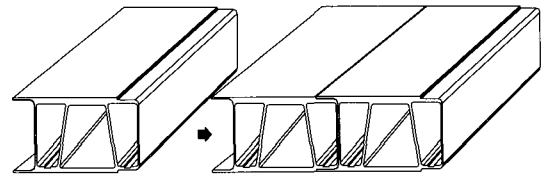


그림 1 복합소재 바닥판 튜브의 단면형상 및 바닥판 패널 연결개념도

횡방향에 대해 휨강성이 우수하다.

- ② 단면이 상부판, 하부판 및 복부판으로 구성되어 상부 하중의 지지 및 전달에 유리하다.
- ③ 합성형 교량의 주형-바닥판 연결을 위해 바닥판 내부에 전단 연결재가 설치되고 콘크리트가 충전될 수 있는 전단포켓 공간을 확보할 수 있다.

상기한 단면형상을 가지는 복합소재 교량 바닥판은 먼저 3개의 제형단면 셀을 가지는 튜브 형태로 인발성형으로 제작하고, 제작된 다수 개의 튜브를 운송이 가능한 크기로 연결 접합하여 바닥판 패널로 조립제작하게 되며, 다시 현장에서 패널간을 접합조립한 다음 거더위에 거치하게 된다. 따라서, 바닥판 튜브의 연결 접합이 용이하고 구조적 일체성을 도모할 수 있도록 튜브단면의 단부는 상호 연결이 가능한 압수부를 가지도록 하였다. 그림 1에는 복합소재 바닥판 튜브의 단면형상과 바닥판 패널의 조립제작을 위한 연결개념도를 보여주고 있다.

복합소재 바닥판 단면의 치수상세는 복합소재 바닥판을 사용한 강관형교를 대상으로 DB24하중에 대한 구조해석을 통해 적정 안전성 및 사용성을 가지도록 설계하였다.

유리섬유 복합소재 바닥판은 부재의 강도는 큰 반면에 상대적으로 탄성계수가 작으므로 처짐에 대한 사용성 검토가 우선 설계인자이며, 이를 만족하면 통상적으로 강도설계기준은 만족하게 된다. 따라서, 상세설계에서는 우선 설계기준상 처짐기준과 대비하여 적절한 처짐 안전율을 가지는 단면을 결정한 후, 바닥판의 응력을 검토하는 순서로 설계를 수행하였다.

복합소재 바닥판에 대한 처짐 사용성 설계기준은 해외 시방서에서도 아직 명확히 정립되어 있지 않으나, 현재 미국에서는 AASHTO LRFD 시방서(1994)의 직교이방성 강바닥

표 1 유리섬유의 물성치

항 목	물성치
섬유직경	0.001 mm
단위중량	25.7 kN/m ³
인장강도	3,500 MPa
탄성계수(E_L, E_T)	72.3 GPa
전단탄성계수(G_{LT})	30 GPa
프와슨비(ν_{LT})	0.2

표 2 폴리에스터 수지의 물성치

항 목	물성치
단위중량	12.4 kN/m ³
탄성계수(E)	3.0 GPa
전단탄성계수(G)	1.22 GPa
프와슨비(ν_{LT})	0.38

표 3 다축 유리섬유 직포 DBT1150 섬유 1장의 방향별 섬유량

섬유방향	섬유 방향			
	0°	+45°	-45°	90°
방향별 섬유량 (N/m ²)	-	2.97	2.97	5.74
*방향별 두께 (mm)	-	0.275	0.275	0.532

* 섬유무게비 60% 기준

판의 처짐 사용성 기준인 L/300과 목재 바닥판의 처짐 사용성 기준인 L/425 중 더 불리한 기준인 L/425를 준용하여 적용하고 있다. 여기서 L은 주형간 간격이다. 한편, 국내 기준은 1996년에 발간된 도로교시방서 하중-저항계수편에서 AASHTO LRFD와 동일한 기준을 제시하고 있다. 따라서, 본 연구의 복합소재 바닥판 단면설계에서는 처짐 사용성 기준을 충격을 포함한 활하중에 의한 주형간 최대처짐이 L/425 이하가 되는 기준을 적용하였다.

구조해석을 통해 바닥판 단면의 상세설계를 수행한 결과, 높이는 200mm, 상부판 두께는 최대 20mm, 최소 16mm, 하부판 두께는 12mm, 단위 폭은 332mm로 결정하였다. 그림 2에는 설계된 복합소재 바닥판 튜브의 단면을 보여주고 있다.

2.3 적층설계

유리섬유 복합소재는 강재 및 콘크리트의 등방성 특성과는 달리 부재의 방향에 따라 기계적 특성이 다른 이방성 특성을 가진다. 따라서, 방향별 섬유분배율을 결정하는 적층설계를 통해 복합소재 바닥판 단면의 상부판, 하부판, 복부판의 섬유배치를 설계하였다.

적층설계시 사용한 재료의 물성치 계산에는 유리섬유와 불포화 폴리에스터의 재료특성을 이용하였으며, 섬유무게비는 인발성형공정으로 제작이 가능한 60%로 가정하였다. 강화섬유는 튜브 종방향(0°), 경사방향(±45°), 횡방향(90°)에 대해 적정 배치하였으며, 로빙형태의 유리섬유와 다축 유리섬유 직포를 사용하여 적층구조를 설계하였다.

상부판은 운하중의 영향을 직접 받는 부재로서 복부판의

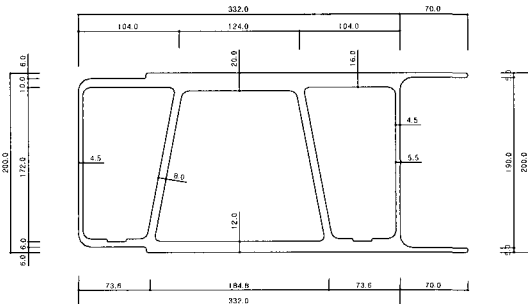


그림 2 유리섬유 복합소재 바닥판 튜브의 단면도

표 4 다축 유리섬유 직포 DBT2000 섬유 1장의 방향별 섬유량

섬유방향	섬유 방향			
	0°	+45°	-45°	90°
방향별 섬유량 (N/m ²)	-	4.83	4.83	9.66
*방향별 두께 (mm)	-	0.447	0.447	0.894

* 섬유무게비 60% 기준

표 5 다축 유리섬유 직포 LT2200 섬유 1장의 방향별 섬유량

섬유방향	섬유 방향			
	0°	+45°	-45°	90°
방향별 섬유량 (N/m ²)	5.38	-	-	15.65
*방향별 두께 (mm)	0.498	-	-	1.449

* 섬유무게비 60% 기준

지점간 국부적인 휨의 영향을 많이 받게 되므로 차량진행방향인 90°방향으로 보강되도록 적층설계하였다. 각 부재의 적층설계에 의한 계산된 탄성계수를 제작단면 결정을 위한 구조해석시에 사용하였다.

적층설계에 사용된 섬유는 튜브 종방향(0°)의 유리섬유 로빙의 경우 8,800 TEX(g/km)의 E-Glass로빙을 사용하였으며, 횡방향 및 경사방향 보강을 위한 다축 유리섬유 직포의 경우 동일산자에서 생산되는 DBT1150, DBT2000 및 LT2200섬유를 사용하였다. 표 3에서 표 5까지는 적층설계에 사용된 다축 유리섬유 직포 1장의 방향별 섬유량을 보여주고 있다. 바닥판 부재별 적층설계는 유리섬유 로빙과 다축 유리섬유 직포의 적층구조를 조합하여 각 부재의 방향별 요구강도에 맞게 설계하였다.

3. 복합소재 바닥판 거더교량의 구조해석

3.1 해석 대상교량 및 모델링

개발된 ‘델타테크’ 단면에 대한 사용성 및 구조 안전성의 해석적 검토를 위하여 설계 바닥판을 적용한 강관형교에 대한 유한요소해석을 실시하였다. 도로교설계기준의 DB24 하중에 대하여 복합소재 바닥판의 처짐, 응력 및 파괴지수를 검토하였으며, 복부판의 좌굴 안정성도 검토하였다. 해석대상 교량은 총 지간장이 30m, 거더간 간격이 2.5m인 5주형 단순판형교로 하였다. 구조해석은 바닥판 제작전과 제작후에 각각 실시하였으며 제작전 단계의 해석에서는 적층설계된 단면의 계산된 물성치를 이용하여 사용성과 안전성을 검토하였다. 이 해석결과로 검증된 단면을 인발성형으로 실제 제작한 후, 제작된 제품의 시편시험을 통하여 실제 물성치를 구하고 (표 9), 이를 이용하여 실제 제작된 단면에 대한 사용성과

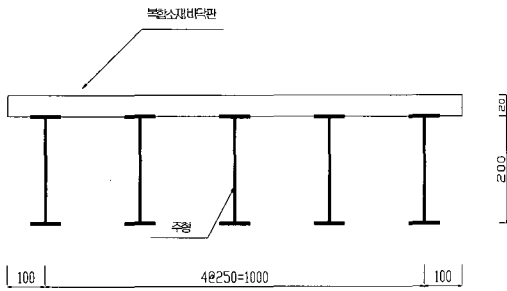


그림 3 해석대상 복합소재 바닥판 교량의 횡단면

안전성을 재검토하였다. 본 논문에는 지면관계상 단면 제작 후 재해석 부분의 결과만 수록하였다.

그림 3에서는 해석대상 교량의 횡단면을 보여주고 있다.

해석결과를 이용하여 Tsai-Wu파괴기준에 의한 바닥판의 구조 안전성을 검토하고, 바닥판의 처짐 사용성을 검토하였다. 또한, 고유치해석을 통하여 복부판의 좌굴 안정성을 검토하였다. 그림 4에서는 해석대상 교량의 유한요소해석 모델 및 하중재하위치를 보여주고 있다.

해석시 적용한 활하중은 충격하중을 고려한 DB24하중이며, 사하중은 바닥판의 자중뿐만 아니라 아스팔트 및 교량 방호벽의 자중을 고려하였다. 하중재하모델은 주형간격이 2.5m인 교량 바닥판의 횡방향 프레임 해석을 통해 최대처짐 및 단면력을 발생시키는 2차선 하중재하모델을 결정하여 적용하였으며, 충격을 포함한 DB24 차량의 후륜 축하중 (PL=124.8kN)은 접지면 23.0cm×57.7cm의 크기에 등분포 하중($w=PL/A=124.8/(23.0 \times 57.7)=0.94\text{MPa}$)으로 재하되는 것으로 가정하였다.

3.2 구조해석 결과분석

3.2.1 사용성 검토

복합소재 바닥판의 사용성 검토를 위해 충격을 포함한

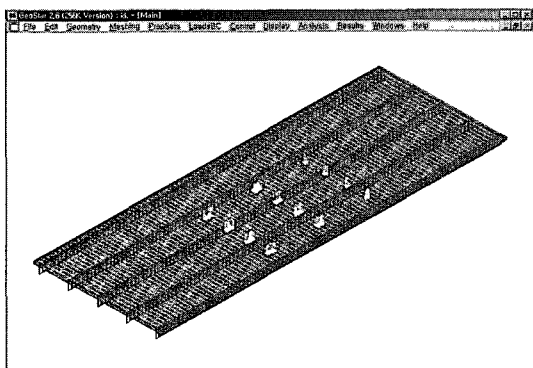


그림 4 해석대상 교량의 유한요소해석 모델 및 하중재하위치

DB24 2차선 재하 순수 활하중 상태에서 복합소재 교량 바닥판의 주형간 상대처짐을 구하기 위하여 5개의 주형을 지점으로 한 경계조건을 부여하여 해석을 수행하였다.

그림 5에는 해석결과 복합소재 바닥판의 수직방향 처짐분포를 보여주고 있다. 주형간격 2.5m인 해석대상 바닥판의 허용처짐은 5.9mm(2500/425)이며, 해석결과 최대처짐은 2.32mm로 처짐에 대한 안전율은 L/425기준으로 할때 2.53 정도 확보하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 설계된 바닥판 단면은 처짐 사용성 기준을 충분히 만족하는 것으로 평가되었다.

3.2.2 구조안전성 검토

구조안전성 검토는 발생응력을 허용응력과 비교하는 것이 일반적이다. 그러나, 응력장이 2축 또는 다축 응력상태에 있을 경우에는, 안전성 검토를 위해 적절한 파괴이론(failure theory)을 필요로 하게 된다. 강재와 같이 항복현상을 보이는 등방성 물질은 이러한 파괴이론으로 최대 전단응력이론이나 변형 에너지 이론 등이 사용되나, 복합소재 바닥판은 등방성 물질이 아닐 뿐만 아니라, 항복현상도 잘 나타내지 않으므로 기존의 등방성 물질에 대한 파괴이론을 통한 구조안전성 검토가 적절하지 않다. 본 해석의 복합소재 바닥판의 구조안전성은 방향별로 발생응력대비 최대파괴강도 비교와 함께 복합소재를 위해 제안된 Tsai-Wu파괴이론을 적용한 파괴해석으로 검토하였다.

구조해석 결과, 하중 접지면의 바닥 상부판에는 압축응력 $\sigma_x=-14.35\text{MPa}$, $\sigma_y=-16.0\text{MPa}$ 이 발생하고, 하부판에는 인장응력 $\sigma_x=17.7\text{MPa}$, $\sigma_y=7.34\text{MPa}$ 이 발생하였다. 이 발생응력을 표 9의 최대파괴강도와 비교해보면 10~18의 안전율을 확보하고 있는 것으로 나타났다(표 6참조). 그림 6에서는 복합소재 바닥판 상부판의 X방향 응력분포를 보여주고 있으며, 그림 7에서는 복합소재 바닥판 하중재하부의 X방향 응력분포 확대 그림을 보여주고 있다. 또한, 그림 8

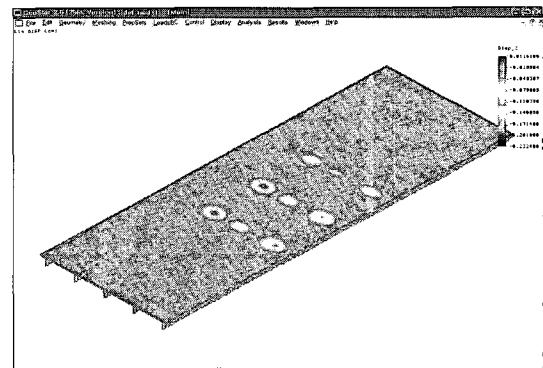


그림 5 복합소재 바닥판의 수직방향 처짐분포

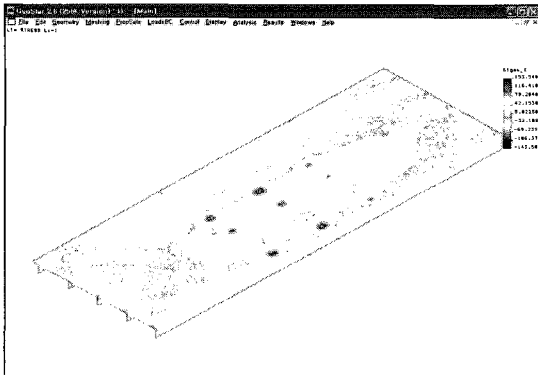


그림 6 복합소재 바닥판 상부판의 X방향 응력분포

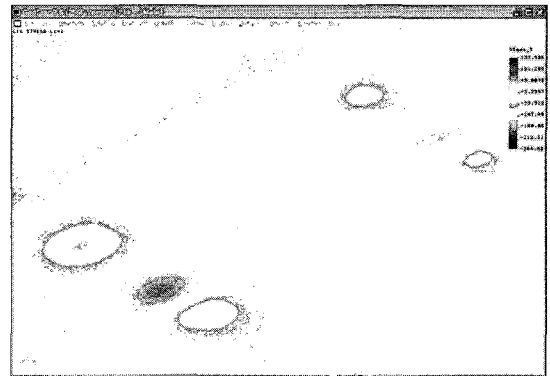


그림 7 복합소재 바닥판 하중재하부의 X방향 응력분포 확대

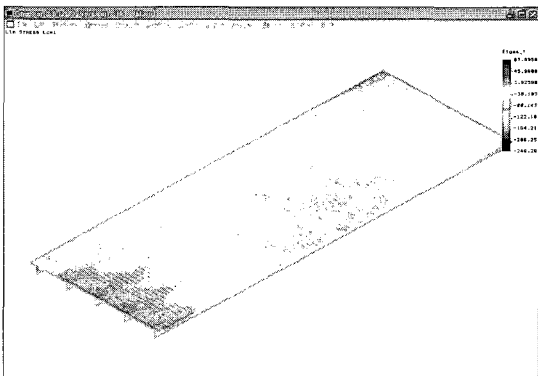


그림 8 복합소재 바닥판 상부판의 Y방향 응력분포



그림 9 복합소재 바닥판 하중재하부의 Y방향 응력분포 확대

에서는 복합소재 바닥판 상부판의 Y방향 응력분포를 보여주고 있으며, 그림 9에서는 복합소재 바닥판 하중재하부의 Y방향 응력분포 확대그림을 보여주고 있다.

Tsai-Wu 파괴해석 결과, 국부적인 응력집중에 의해 최대 응력이 발생하는 상부판에서 파괴지수는 0.096로서, 약 10.42의 충분한 파괴 안전율을 가지는 것으로 나타났다. 그림 10에서는 복합소재 바닥판 전체의 파괴지수 분포를 보여주고 있다.

3.2.3 복부판 좌굴 안정성 검토

활하중에 대한 복합소재 바닥판 복부판의 좌굴에 대한 안

전을 및 좌굴모드형상을 예측하기 위하여 고유치 좌굴해석을 수행하였다. 좌굴해석 결과, 복부판의 좌굴은 제1모드에서 나타났다. 고유치는 14.22로 계산되었다. 여기서 제작상의 오차나 기타 결함 변수들(knockdown factor)을 고려하여 고유치의 75%를 적용하더라도 사용하중의 복부판 좌굴에 대해서는 약 10.67의 충분한 안전율을 가지는 것으로 나타났다. 그림 11에서는 바닥판 단면의 좌굴모드형상을 보여주고 있다.

설계된 복합소재 바닥판을 적용한 시간장 30m, 주형간격 2.5m인 5주형 단순판형교의 구조해석 결과, 응력, 처짐, 파괴지수, 좌굴에 대한 결과를 정리하면 다음 표 6과 같다. 표에서 보는 바와 같이 설계된 복합소재 바닥판 단면은 사용성 및 구조 안전성을 모두 충족하고 있다.

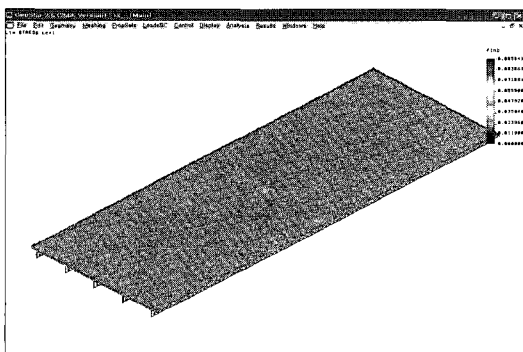


그림 10 복합소재 바닥판 전체의 파괴지수 분포

4. 설계된 복합소재 바닥판의 국부변형 해석

델타데크 복합소재 바닥판의 상부판의 국부 사용성을 해

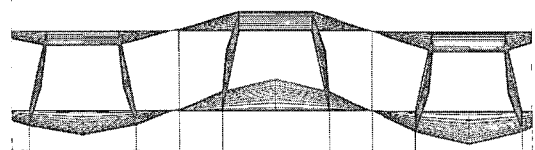


그림 11 좌굴해석 결과 좌굴모드형상 (좌굴 제1모드)

표 6 설계된 복합소재 바닥판 교량의 구조해석 결과 (DB24 하중재하시)

항 목	최대응력 (MPa)				Tsai-Wu 파괴지수	최대 처짐 (mm)	좌굴 고유치
	상부판		하부판				
	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y			
결과치	-14.35	-16.0	17.7	7.34	0.096	2.32	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)

석적으로 평가하기 위해 복합소재 바닥판에 대한 유한요소해석을 실시하였다. 포장의 내구성과 관련하여 한국도로공사에서 일본 연락교 교면포장 기준을 인용하여 발간된 보고서에 의하면, 강바닥판에 대하여 차도부의 텍플레이트의 최소두께는 운하중에 의한 처짐을 경간(세로 리브의 중심 간격)의 L/300이하가 되도록 규정하고 있다. 이 규정에 따르면 강바닥판의 경간 처짐이 L/300이하이면 포장의 내구성 저하에 영향을 미치지 않는 것으로 평가하고 있다. 따라서 포장의 내구성 저하에 영향을 주지 않는 복합소재 바닥판의 복부판 사이 국부처짐에 대한 허용기준은 상기 강바닥판의 기준을 원용하여 L/300을 적용하여 0.41mm(124/300)로 하였다. 해석은 폭 996mm(3개의 패널을 연결), 길이 900mm의 모델에 대해서 실시하였다. 국부처짐을 구하기 위해 복합소재 바닥판 상부의 웹과 웹사이가 가장 큰 중앙부에 하중을 재하하였으며, 재하하중은 DB-24 하중에 대해 충격계수를 고려하여 134.4kN(96kN×1.4(충격계수))으로 하였다. 여기서 충격계수는 국부변형에 따른 강바닥판의 판 두께 설계시 적용하는 0.4를 사용하였으며, 계산된 하중을 도로교설계기준의 운하중 집지면 580mm×230mm의 크기에 재하하였다. 그림 12에는 해석 모델 및 하중 재하모습을 보여주고 있다.

구조해석 결과 복합소재 바닥판의 상부판 중앙에서 최대 처짐은 0.23mm로 계산되었다. 그러나 복합소재 바닥판의 상부판의 국부처짐은 근접 복부판의 처짐을 고려해야 하므로

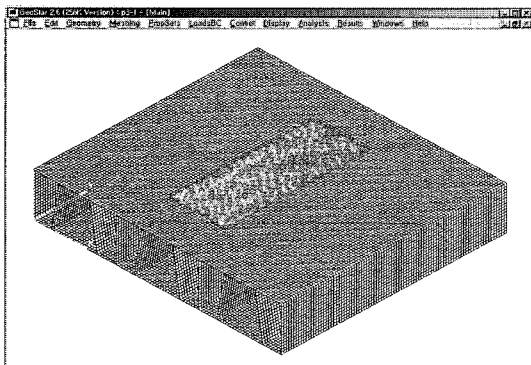


그림 12 해석 모델 및 하중 재하모습

표 7 복합소재 바닥판의 국부 유한요소해석 결과

구 분	국부처짐 기준	해석 결과	안전율
상부판 절대 처짐	L/300 =124/300 =0.41mm	0.23mm	-
복부판 수직처짐		0.12mm	-
상부판 상대 처짐		0.11mm	3.73

근접 복부판의 처짐(0.12mm)을 고려하면 복합소재 바닥판 상부판 중앙부의 상대적인 처짐은 0.11mm이다. 그림 13 및 그림 14에는 해석 결과 복합소재 바닥판의 처짐을 보여주고 있다.

이 국부처짐 0.11mm는 국부처짐 허용기준인 0.41mm(L/300=124/300)에 대해 약 3.7의 안전율을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 설계된 복합소재 바닥판은 차량하중이 재하되는 경우 국부처짐에 대해서도 충분한 안전율을 보유하고 있으며, 아스팔트 포장에 발생하는 응력 및 변형 등에 의한 내구성 저하에 문제가 없는 것으로 평가되었다.

5. 인발성형 공정을 이용한 복합소재 교량바닥판의 제작

설계된 단면의 복합소재 바닥판은 고품질 대량생산에 적합한 제조방법인 인발성형공정으로 제작하였다. 복합소재 바

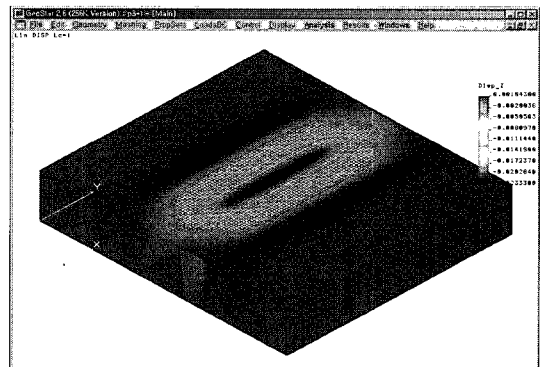


그림 13 해석결과에 대한 처짐 등고선

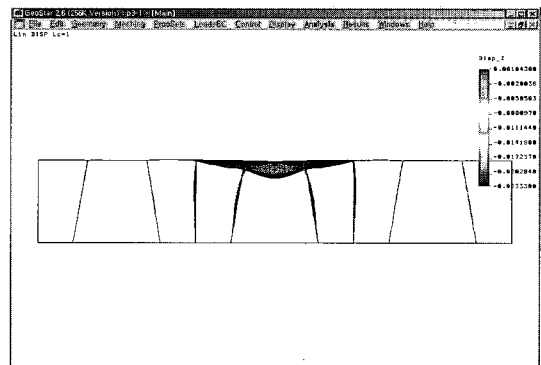


그림 14 해석결과 단면의 변형모습

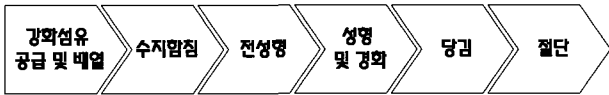


그림 15 복합소재 바닥판 인발성형 제작공정 개요

다판의 제작은 그림 15에 도시된 바와 같이 강화섬유의 공급 및 배열에서 최종 제품의 절단까지 일괄공정으로 이루어지며, 바닥판 패널은 제작된 바닥판 튜브의 연결접합 공정을 거쳐 제작된다. 사진 1에서는 유리섬유 로빙 및 다축섬유직포 형태의 섬유강화재가 공급 배열되는 모습을 보여주고 있으며, 사진 2에서는 완성된 복합소재 바닥판 튜브의 절단부 모습을 보여주고 있다.

복합소재 바닥판의 제작에 사용되는 인발성형공정의 특징을 요약하면 다음과 같다.

- ① 인발성형공정은 고온경화 방식의 제조공정으로 복합소재 구조물의 대량생산에 적합하다.
- ② 자동화된 제조공정으로 품질의 균질성을 얻을 수 있으며, 품질관리가 용이하다.
- ③ 복합소재의 기계적 성능을 좌우하는 섬유함유율은 부피비로 50% 이상을 얻을 수 있어 경제적으로 구조물을 설계할 수 있다.
- ④ 복합소재 바닥판은 상당 부분 외부에 노출되는 구조물이며, 바닥판 튜브의 접합연결을 위해 치수정확성이 요구되므로 인발성형공정으로 제작되면 접합부에서 외관 표면이 평탄하고 균일한 표면품질을 얻을 수 있다.
- ⑤ 1.5~60m/hr의 제작 속도로 연속 제작이 가능하고 쉬지 않고 주야로 제작할 수 있으므로 대량 생산시 생산비가 저렴하고 효율적이다.

복합소재 바닥판에서 유리섬유와 수지의 비율은 무게비를 기준으로 하였을 때 유리섬유가 60%, 수지가 40%로 구성되며, 전술하였듯이 유리섬유는 로빙과 직조 섬유의 형태가



사진 1 강화섬유의 공급 및 배열

표 8 섬유 구성비

구분	섬유 모델명	비율(%)
로빙(roving)	8800TEX	30~35
다축 유리섬유 직포 (multiaxial stitched fabric)	LT 2100	10~15
	DBT 2000	30~35
	DBT 1150-E06	20~25

사용된다. 표 8에는 복합소재 바닥판 제작시 섬유형태별 구성비를 보여주고 있다.

복합소재 바닥판에 사용한 내식, 내화학 특성이 우수한 불포화 폴리에스터 수지에 혼합 사용된 충전제는 복합소재 적층판의 유기질 함유율을 감소시킴으로써 내화 및 내연성을 포함한 기계적 특성을 향상시킨다. 또한 충전제가 함유된 수지는 함유되지 않은 경우보다 수축율이 적으므로 금형에 의해 성형된 부재의 치수 조절성을 향상시킨다. 또한 내수성, 내후성, 표면조도, 강성, 치수안정성, 내열성 등의 특성이 충전제의 적절한 사용을 통해 모두 향상될 수 있다. 첨가제는 재료특성을 개선하고 적층판의 성능을 향상시키기 위해 사용되며 수지에 비해 상대적으로 적은 양이 사용되지만 복합소재의 몇 가지 주요한 성능을 향상시킬 수 있다.

6. 복합소재 교량 바닥판의 재료시험

인발성형 공정으로 제작된 '델타테크' 바닥판의 실제 물성치를 구하기 위하여 제작된 패널로부터 시편을 채취하여 재료시험을 수행하였다. 인장, 압축 및 전단 시험은 '델타테크'의 상부판, 하부판 및 복부판에 대하여 종방향 및 횡방향으로 구분하여 수행하였다. 또한, 열팽창 시험 등의 물리적 특성 및 내약품성 시험 등의 내구성 관련 시험도 수행하였다. 표 9에서는 '델타테크' 시편의 재료시험결과를 보여주고 있으며, 표 10에서는 시편의 열팽창시험 및 내약품성시험 결과를 보여주고 있다.

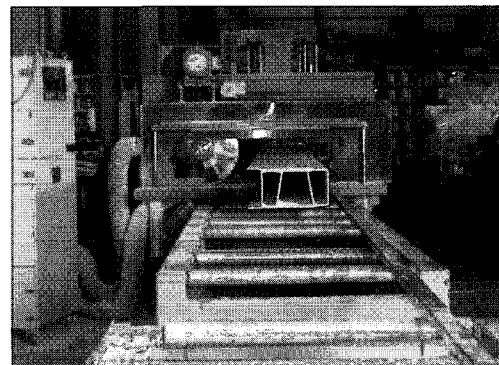


사진 2 제작된 바닥판 튜브의 절단부 모습

표 9 '델타데크' 시편의 재료시험결과

시험항목	시험기준	시험편위치	시험결과(MPa)	
			L방향 ¹	T방향 ²
인장강도	KS F2241	상부판	204.3	156.0
		하부판	303.2	158.8
		복부판	234.2	146.8
인장 탄성계수		상부판	17,097	20,190
		하부판	21,210	14,616
		복부판	18,933	15,636
압축강도	ASTM D695	상부판	261.0	162.1
		하부판	334.5	121.3
		복부판	267.8	105.4
압축 탄성계수		상부판	7,199	7,194
		하부판	7,447	6,581
		복부판	9,446	7,349
면내 전단강도	KS F2248	상부판	44.3	
		하부판	44.5	
		복부판	55.1	
편칭 전단강도	KS M3019	상부판	114.9	

1. 바닥판 튜브 중(0°)방향, 바닥판 패널 차량진행 직각방향
2. 바닥판 튜브 횡(90°)방향, 바닥판 패널 차량진행 방향

7. 결 론

본 논문에서는 경량, 고내구성 특성을 지니고 있고 신속 시공이 가능한 복합소재 교량 바닥판의 단면설계 및 구조해석과 제작공정에 관해 기술하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 설계된 단면의 복합소재 바닥판의 사용성과 구조안전성을 평가하기 위한 복합소재 바닥판 교량의 구조해석 결과, DB24하중에 대해 치짐 사용성 기준 대비 2.53의 충분한 여유를 보이며, 파괴지수에서 10.42, 복부판 좌굴에서도 10.67의 충분한 안전율을 가지고 있어 사용성 및 구조 안전성에 문제가 없는 것으로 평가되었다. 그러나 향후 실 교량에 현장적용하여 안전성이 평가되면 보다 경제적 설계로 단면수정이 가능할 것으로 사료된다.
- 2) 국부변형에 대한 해석결과, 복합소재 바닥판은 차량하

표 10 '델타데크' 시편의 열팽창시험 및 내약품성시험 결과

시험항목	시험기준	시험결과(1/°C)	
열팽창 계수	KS M3015	4.0~6.0 × 10 ⁻⁶	

시험항목	시험기준	약품명	시험결과	
			무게변화율(%)	외관
내약품성	KS F3083	황산(3%)	-0.04	이상없음
		질산(10%)	-0.12	이상없음
		메탄올(96%)	0.53	이상없음
		에탄올(95.5%)	0.18	이상없음
		벤젠(99.5%)	0.29	이상없음
		염화나트륨(3%)	0.11	이상없음
		수산화나트륨(10%)	0.29	이상없음

중이 재하되는 경우 국부치짐에 대해 충분한 안전율을 보유하고 있으며, 아스팔트 포장에 발생하는 응력 및 변형 등에 의한 내구성 저하에 문제가 없는 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 산·학·연 공동연구개발사업(목적A01)으로 수행되었으며, 연구지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 이성우(2004) 신속시공·경량·고내구성 복합소재 교량 바닥판 산업화 연구, *건설교통부 연구보고서*, 건설기술 평가원.
- 이성우(2005), 진공성형 제작 모델 복합소재 바닥판의 실험적 휨 거동 특성 분석, *한국전산구조공학회 논문집*, 18(4).
- 이성우(2005), 필라멘트 와인딩과 인발성형 제작 복합소재 교량 바닥판의 휨 특성 비교분석, *한국전산구조공학회 논문집*, 18(3), pp.191~200.
- Defense Advanced Research Project Agency (2000) Advanced Composites for Bridge Infrastructure Renewal-Phase II, Volume IV Task16-Modular Composite Bridge, *J.Muller International*, Martin Marietta Composites.