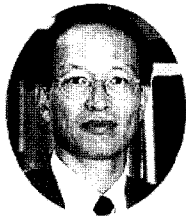


## 복합소재 교량 바닥판의 해석 및 설계



이 성 우\*



이 선 구\*\*

### 1. 서 론

최근 구미 선진국에서는 복합소재를 건설분야에 적용하는 선풍적인 붐이 일어나고 있으며, 그 중 복합소재 교량 바닥판은 본격적인 실용화 단계에 있다.

복합소재 교량 바닥판은 경량, 고강도, 고내구성 특성의 현저한 이점으로 인해 현재 미국의 연방도로국과 각주의 교통국에서 차세대 교량 바닥판으로 인식하고 연구개발지원과 시범 시공을 앞다투어 실시하고 있으며, 이미 실용화 단계에 접어들고 있다. 또한 유럽에서도 영국, 덴마크, 스웨덴, 네덜란드, 스페인 등이 유럽 컨소시움을 형성하여 복합소재 교량 바닥판의 연구개발과 실용화에 박차를 가하고 있는 교량 분야의 첨단기술로서 세계적인 관심의 대상으로 떠오르고 있는 새로운 기술이다.

이러한 복합소재 교량 바닥판은 종래의 현장 타설로 인해 공기가 많이 소요되는 콘크리트 바닥판과는 달리 공장에서 미리 제작되어 신속하게 가설되므로 교통량이 많은 도심구간 교량건설에 복합

소재 바닥판을 사용하면 공기를 현저하게 단축할 수 있어 교통통제 기간을 최소화할 뿐만 아니라 교통혼잡으로 인한 간접비를 대폭 절감할 수 있게 된다.

복합소재 바닥판은 제설제를 사용하여도 콘크리트처럼 열화하지 않고 강재처럼 부식하지도 않으므로 교량의 수명을 4-5배 이상 획기적으로 연장시킬 수 있으며, 사용 중에도 유지관리 비용이 거의 들지 않는다. 특히, 콘크리트 바닥판에 비해 중량이 1/5이하이므로, 교량의 자중을 경감하여 교각 기초나 거더를 경제적으로 건설할 수 있으며, 교량의 성능개선에 적용할 경우 종래의 거더나 교각 기초를 보강하고 콘크리트 바닥판을 타설하는 방법과는 달리, 콘크리트 바닥판을 복합소재 바닥판으로 교체하기만 하여도 콘크리트 중량을 경감한 만큼 통과 차량 하중을 크게 할 수 있으므로 교량의 등급을 높일 수 있어서 현저한 공기단축과 공사비 절감을 도모할 수 있고, 자중 경감으로 인해 지진 시에도 매우 유리해진다. 또한 복합소재 바닥판은 고강도이므로 트럭하중이나 탱크하중에 대해 배 이상의 안전율을 가지고 있다.

\* 정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수

\*\* 정회원 · (주)국민씨아이 전무이사

이러한 복합소재 교량은 내구연한이 길어 교량의 수명기간에 대하여 실질투자비 감소로 건설비용에 대한 투자효과가 극대화될 수 있다.

본고에서는 복합소재 교량 바닥판의 개발배경 및 해외 시공사례를 소개하고, 국민대학교 벤처기업인 국민씨아이가 국내에서 독자적으로 개발한 복합소재 교량 바닥판인 '델타테크'의 해석, 설계 및 제작과 관련된 일련의 개발현황을 기술하고자 한다.

## 2. 국내 도로교량 현황

국내의 도로 교량은 1966년 이후 건설되기 시작하였으며 1979년 이후에 급속하게 건설되었다. 건설교통부 2000년 교량현황조사(1999. 12. 31)에 따르면 전체 교량의 개소는 15,615개소로서 총연장 1,082,095m에 이르고 있다. 고속도로의 경우도 설계하중이 DB18 교량이 332개소로서 그 연장은 18,543m에 달한다.

이들 2등교는 중량 제한없이 차량의 원활한 통행을 위해 1등교로 승급되어야 하지만, 승급하려면 공사 기간 동안에 차량 통행을 통제해야 하고 활하중에 대한 내하력을 증진시키기 위해 상부구조와 하부구조를 재시공해야 하므로 막대한 공사비가 소요된다.

서울 도심을 통과하는 청계고가도, 서울역고가와 같은 경우, 현재 콘크리트 바닥판은 계절제와 배기가스로 심하게 열화되어 긴급보수가 진행되고 있으며, 완전한 보수공사는 3년간이나 교통을 차단

하고 보수공사를 할 계획에 있다. 이러한 장기간의 보수공사가 진행되면 교통통제 장기화로 인한 시민불편이 극도에 달할 것이며, 정체로 인한 유류소모량의 증가로 천문학적인 에너지 비용의 낭비를 비롯하여 엄청난 간접비가 지출될 수밖에 없다. 그림 1에서는 청계고가도로의 콘크리트 바닥판 노후모습을 보여주고 있으며, 그림 2에서는 한남대교의 콘크리트 바닥판 보수를 위하여 기존 바닥판을 철거 해체한 모습을 보여주고 있다.

## 3. 해외 시공사례

미국의 MMC(Martin Marietta Composites)사는 복합소재 바닥판 분야의 선도업체로서, 많은 시험 및 검증단계를 거쳐(Moon, 2000), 고성능 듀라스판(Duraspan™) 바닥판을 개발생산하고 있다. MMC사의 복합소재 바닥판은 그림 3에서 보여주고 있다. 사다리꼴 형상의 튜브부재로 구성된 인발성형 제품으로 개별 모듈을 병렬접합하여 신설 교량의 바닥판이나 성능개선이 필요한 노후교량의 바닥판 교체용으로 사용된다. 그림 4에서 그림 5에서는 미국 뉴욕주의 Warrensburg교에 시공된 MMC사의 복합소재 바닥판을 이용한 교량성능개선 사례로서 기존 콘크리트 바닥판 철거 및 복합소재 바닥판 설치 모습을 보여주고 있다. 이 교량은 1940년대에 건설된 교량으로 경량 복합소재 바닥판을 이용하여 종래의 보수공법에 비해 절반정도의 예산으로 단 하루만에 신속하게 시공하여 교량을 승급시키므로써 중차량 통행 제한을 해제시켜 매우

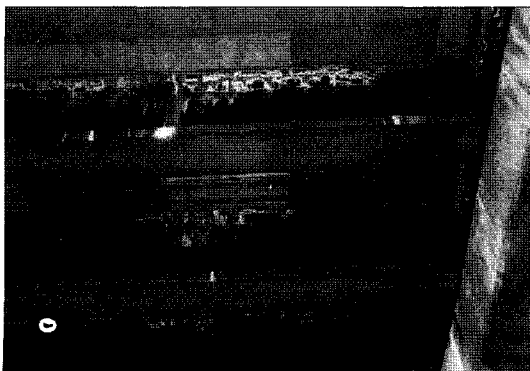


그림 1 청계고가도로의 콘크리트 바닥판



그림 2 기존 바닥판을 철거 해체(한남대교)



그림 3 미국 Martin Marietta Composites사의 교량 바닥판 단면

경제적이고 효과적으로 교량의 성능개선을 시행한 사례이다.

미국의 Hardcore Composites사는 또 다른 형태의 교량용 복합소재 교량 바닥판으로서 수직배치 내부코어를 이용한 샌드위치구조의 복합소재 교량 바닥판을 개발한 회사이다. 또한 진공성형(VARTM: Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)을 이용하여 대형 교량 바닥판 모듈을 일체로 제작하는 기술을 보유하고 있다. 특히 이러한 형태의 복합소재 교량 바닥판은 노후된 교량의 바닥판 교체시공

뿐만 아니라 하부 구조를 포함하지 않는 슬래브 교량 형식의 완전 복합소재 교량의 시공이 가능하다(Eckel, 1998).

그림 6에서는 뉴욕 주 Bentley천의 367번 교량으로서 노후 바닥판을 철거하고 교량의 성능개선을 위해 복합소재 교량 바닥판을 시공하는 모습을 보여주고 있다. 경량 복합소재 교량 바닥판을 사용하여 265톤의 사하중을 제거하여 시공 후 14톤 중량 제한을 철폐하게 되었으며, 30일 이내 신속 시공이 가능하게 되어 교통차단 기간을 최소화할 수 있었다. 그림 7에서는 뉴욕 주 Bennett천의 248번 도로교로서 노후 바닥판을 철거하고 기존 콘크리트 교대를 보수한 후 복합소재 교량 바닥판을 설치하는 것을 보여주고 있다. 재래적인 보수시 보다 15개월의 공기단축 효과를 보였으며, 공사비도 재래공법에 비해 1/3 밖에 들지 않았으므로 상당한 비용절감 효과가 있는 것으로 나타났다.

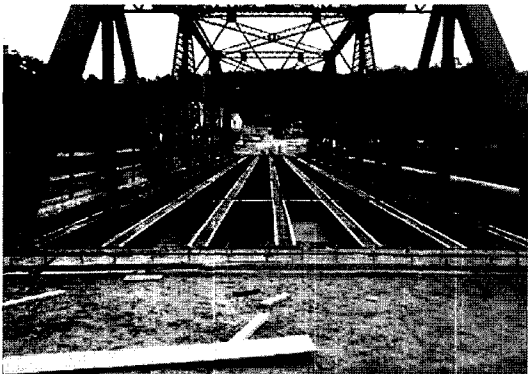


그림 7 콘크리트 바닥판 제거 후 모습

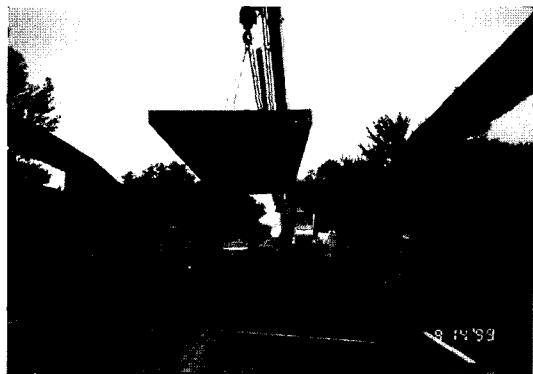


그림 6 복합소재 데크 인양 및 설치

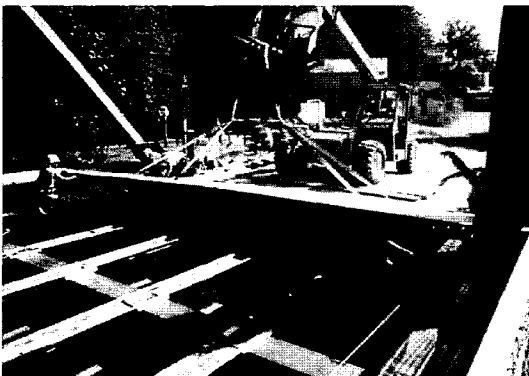


그림 5 복합소재 바닥판의 설치

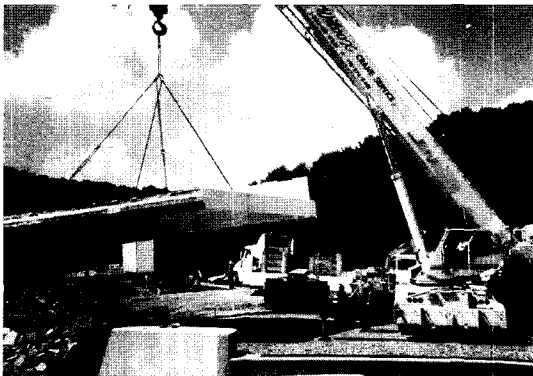


그림 7 복합소재 데크 인양 및 설치

#### 4. VARTM제작 복합소재 모델 바닥판의 휨특성

복합소재 교량 바닥판 개발을 위한 선행연구에서는 복합소재 제조방법 중 진공성형 기법인 VARTM (이성우, 2000)으로 제작된 제형단면(HS), 박스형 단면(BS), 삼각형 단면(TS)의 복합소재 바닥판 모델에 대해 3점 휨실험을 통하여 휨 거동특성과 파괴모드를 분석하고 그 사용성을 검토하였다(이성우, 2001a). 그림 8에서는 제작된 세 종류의 복합소재 바닥판 모델을 보여주고 있다.

복합소재 바닥판 모델에 대한 실험은 강축과 약축방향으로 3점 휨실험으로 수행하였으며, 하중은 선하중으로 재하하여 최대 인장·압축응력, 파괴하중, 파괴모드 그리고 하중-변위 관계로부터 가장 효과적인 단면을 검증하였다.

실험결과, 각 단면이 동일한 중량/부피를 갖도록 환산하였을 때의 하중-변위관계에서 강축모델에 대하여서는 그림 9에서와 같이 박스형 단면이 상대적으로 효율적인 단면임을 알 수 있으나, 다른 단면형과 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 하지만 약축모델에 있어서는 그림 10의 결과에서와 같이 삼각형 단면이 가장 큰 강성을 보여 주었고, 항복하중의 경우 다른 단면의 2배에 이르는 강도를 발

휘하는 것을 알 수 있었다.

상기와 같은 복합소재 모델 바닥판에 대한 연구 결과를 기초로 복합소재 교량 바닥판의 최적 단면형상을 삼각형 단면으로 결정하고, 실물 크기 복합소재 교량바닥판을 Filament Winding으로 설계, 제작하고 시험 검증 한후 2001년 4월에 국내 최초로 시범시공을 한바있으며(이성우, 2001b), 본고에서는 그이후에 이루어진 인발 성형 제작용의 복합소재 교량 바닥판에 대한 해석 및 설계절차에 대해 기술 하였다.

#### 5. 복합소재 교량 바닥판의 해석 및 설계

##### 5.1 해석 대상교량 및 모델링

단면 최적화를 위한 해석 대상교량은 총 지간장이 30m, 거더간 간격이 2.5m인 5주형 단순판형교로 하였다. 그림 11에서는 해석 대상교량의 횡단면을 보여주고 있으며, 그림 12에서는 해석 대상교량의 복합소재 바닥판 단면모듈을 보여주고 있다.

유한요소해석에는 복합소재 적층판 해석이 가능한 범용 해석프로그램인 COSMOS/M을 이용하였으며, Tsai-Wu 파괴해석을 수행하기 위하여 SHELL4 요소를 사용하였다. 또한 강재 주형은 3차원 보요

(a) 제형단면

(b) 박스형 단면

(c) 삼각형 단면

그림 8 제작된 복합소재 바닥판 모델 단면

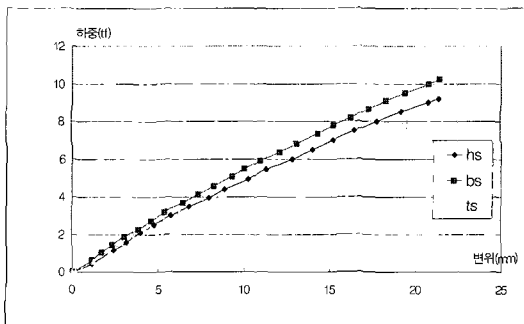


그림 9 강축 휨시험의 하중-변위도

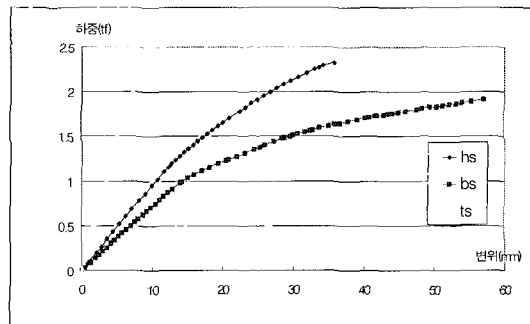


그림 10 약축 휨시험의 하중-변위곡선

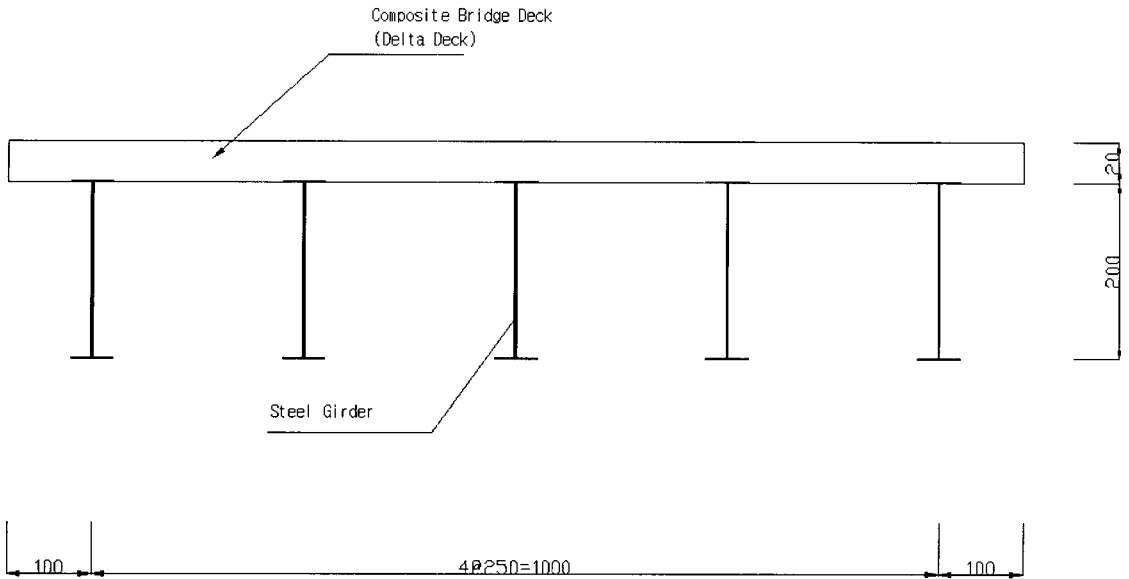


그림 11 해석 대상교량의 횡단면

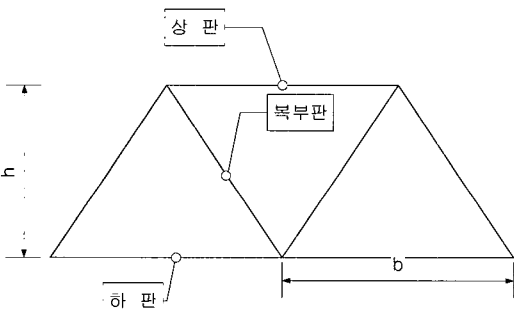


그림 12 복합소재 바닥판 단면모dul

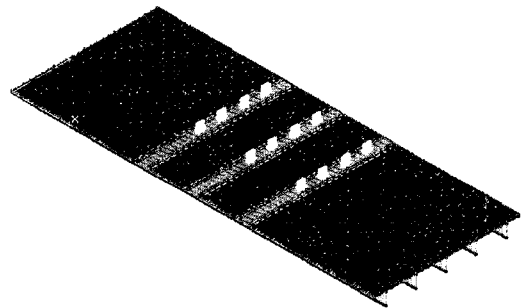


그림 13 복합소재 바닥판 교량의 해석모델

소를 이용하였으며, 바닥판에 작용하는 하중과 변위를 주형에 전달하기 위하여 바닥판과 주형의 접합면에는 강결요소를 사용하여 모델링하였다. 또한 하중재하단에서는 요소의 크기를 5cm×5.56cm으로 세분화하여 분할하였으며, 기타 영역에서는 20cm×50cm으로 분할하였다. 그림 13에서는 해석대상 교량의 유한요소 모델을 보여주고 있다.

구조해석에서는 충격을 고려한 DB24하중에 대해 Tsai-Wu 파괴지수로 바닥판 안전성을 검토하고, 바닥판의 처짐 및 복부판의 좌굴 안전성을 평가하였다.

그림 14에서는 상부판에 하중이 위치하는 경우를 보여주고 있는데, 이러한 하중조건은 응력 및 처짐 해석시 사용하였으며, 그림 15는 복부판에 하중이 위치한 경우로 좌굴해석시 사용하였다.

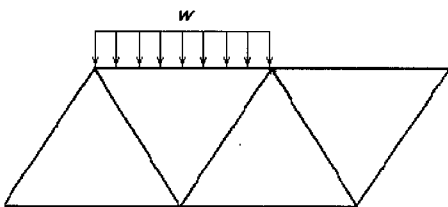


그림 14 응력 및 처짐해석시 하중조건(LC1)

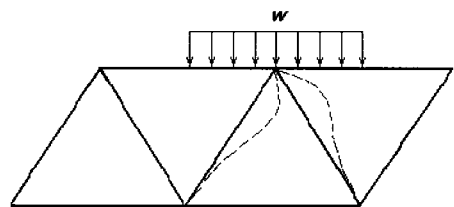


그림 15 좌굴해석시 하중조건(LC2)

### 5.2 단면설계

복합소재 교량 바닥판의 단면설계를 위하여 바닥판 높이 22cm, 상부판 및 하부판 두께 16mm인 복합소재 바닥판을 2차선 하중재하모델에 대하여 실제 복합소재 교량 바닥판의 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 단면설계는 복합소재 교량 바닥판의 특성상 응력보다는 처짐이 지배적인 인자가 되어 결정되므로, 이를 기준으로 적절한 처짐 안전율을 가지는 단면을 결정하고자 하였다. 해석결과를 이용하여 상부판과 하부판의 평균두께와 높이에 따른 바닥판의 주형간 처짐을 비례식을 이용하여 추정하였다. 여기서 처짐 안전율은 AASHTO 처짐 기준인 L/425에 대한 것이다.

단면설계에서는 바닥판 두께 20cm, 상부판 및 하부판의 평균 두께 13mm를 해석을 위한 바닥판 단면으로 결정하였으나 운하중의 집지로 인해 추가적인 국부응력이 발생하는 상부판의 하중조건을 고려하여 상부판의 두께를 14mm, 하부판 두께를 12mm로 하였으며, 복부판의 두께는 10mm로 설계하였다.

### 5.3 복합소재 적층설계

복합소재 교량 바닥판의 적층설계는 상부판, 하부판 및 복부판으로 구분하였으며, 유리섬유와 불포화 폴리에스터의 재료특성을 사용하여 설계하였다. 전체 복합소재 무게 중 강화섬유의 함유율로

복합소재 적층판의 특성에 영향을 미치는 섬유무게비는 인발성형공정으로 제작이 가능한 60%로 가정하였다. 강화섬유는 패널 종방향(0°), 경사방향(±45°), 횡방향(90°)으로 모든 방향성을 가지도록 배치하였으며, 종방향으로는 로빙형태의 유리섬유와 여러 가지 방향성을 가지는 다축 유리섬유 직포를 사용하여 적층구조를 설계하였다. 적층설계 및 해석에는 복합소재 해석 프로그램인 ESAComp 2.0을 사용하였다.

적층설계의 각 구성부재의 두께는 상부판 14mm, 하부판 12mm, 복부판 10mm로 하였다. 표 1에서는 적층설계 결과 해석 물성치로 사용하기 위한 부재별 특성을 보여주고 있다.

### 5.4 구조해석

#### 5.4.1 처짐해석

순수 활하중 상태하에서의 복합소재 교량 바닥판의 처짐해석으로 주형간 바닥판의 상대처짐을 구하기 위하여 주형에 경계조건을 부여하여 해석을 수행하였다. 복합소재 교량 바닥판은 사용하중에 의한 처짐을 설계의 주요인자로 사용하는 바, 국내 및 해외의 도로교 시방서를 원용하여 바닥판의 허용처짐을 L/425(L:주형 간격)로 하여 해석결과를 분석하였다.

그림 16에서는 해석결과 Z방향의 처짐분포를 보여주고 있다. 주형간격 2.5m인 해석대상 바닥판

표 1 적층설계 결과 부재별 특성치

항 목		상부판	하부판	복부판
탄성계수 (kg/cm <sup>2</sup> )	Ex	162,000	167,000	158,000
	Ey	193,000	190,000	176,000
전단탄성계수(kg/cm <sup>2</sup> )		34,600	33,600	42,000
프와슨 비		0.158	0.156	0.21
X방향 인장강도(kg/cm <sup>2</sup> )		1,500	1,500	1,300
X방향 압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )		1,500	1,500	1,300
Y방향 인장강도(kg/cm <sup>2</sup> )		2,600	2,600	2,200
Y방향 압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )		2,600	2,600	2,200
전단강도(kg/cm <sup>2</sup> )		422	422	422
두께(mm)		14	12	10

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

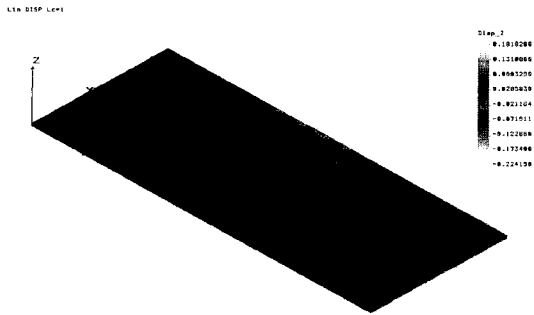


그림 16 처짐해석 결과 Z방향의 처짐분포

의 허용처짐은 5.9mm(2500/425)이며, 해석결과 최대 처짐은 2.24mm로 처짐에 대한 안전율을 2.63 정도 확보하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 설계된 바닥판 단면은 허용처짐규정을 충분히 만족하는 것으로 평가되었다.

#### 5.4.2 국부응력 및 파괴해석

복합소재 교량 바닥판의 하중 접지면 응력집중을 검토하기 국부응력 및 파괴해석을 수행하였다. 통상적으로 국부적인 응력집중현상은 요소의 크기에 아주 민감하기 때문에 본 해석에서는 응력집중부에서 요소수를 세분화하여 해석을 수행하였다. 요소 크기는 5cm×5.55cm로써 가로 및 세로의 비가 약 1 : 1이 되도록 하였다. 그림 17은 응력 집중부에서의 요소분할 형상을 나타낸다.

COSMOS/M 프로그램의 SHELLAL 요소에 대해서는 Tsai-Wu 파괴해석을 수행할 수 있다. 파괴지수는 각 요소에 대해서 계산되며, 파괴지수가 1이상이면 파괴가 발생한다. 따라서 본 해석에서는

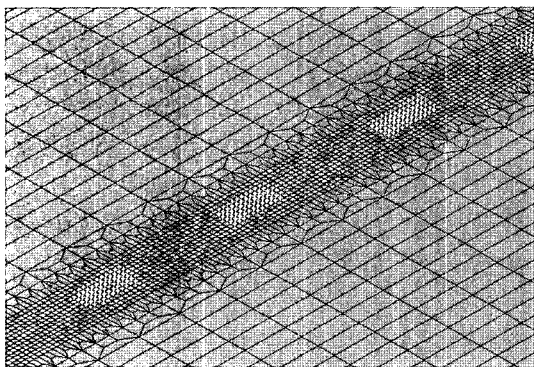


그림 17 응력집중부에서의 요소분할

국부적인 응력집중으로 인한 응력 집중부의 파괴 안전을 검토하기 위해 Tsai-Wu 파괴해석을 수행하여 파괴안전율을 구하였다.

구조해석 결과, 하중 접지면에서 발생하는 국부적인 처짐으로 인하여 바닥판 상부판에 상대적으로 큰 압축응력( $\sigma_x = -709 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\sigma_y = -296 \text{ kg/cm}^2$ )이 발생하는 것을 알 수 있다. 반면에, 하부판에서 발생하는 인장응력은 전체적인 휨거동에 의해 발생하므로 상대적으로 작은 값( $\sigma_x = 127 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\sigma_y = 132 \text{ kg/cm}^2$ )을 나타낸다. 국부응력 해석결과를 이용한 Tsai-Wu 파괴해석 결과, 국부적인 응력집중에 의해 최대응력이 발생하는 상부판에서 파괴지수는 0.192로서, 식(2)를 적용할 경우 약 5.2의 충분한 파괴 안전율을 가지는 것으로 나타났다. 그림 18에서는 상부판 응력집중부의 파괴지수 분포를 보여주고 있다.

#### 5.4.3 좌굴 해석

활하중에 대한 복합소재 교량 바닥판 복부판의 좌굴에 대한 안전을 및 좌굴모드형상을 예측하기 위하여 고유치 좌굴해석을 수행하였다. 고유치 좌굴 해석을 통해 임계좌굴하중(critical buckling load)과 파괴모드를 추정할 수 있다. 구조물의 임계좌굴하중은  $P_{cr} = P_{applied} \times \lambda_i$  (eigenvalue)이므로 만약 구조물에 실제 작용하는 활하중을 가했을 경우, 좌굴에 대한 안전율은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F.S = P_{cover} P_{applied} = Eigenvalue$$

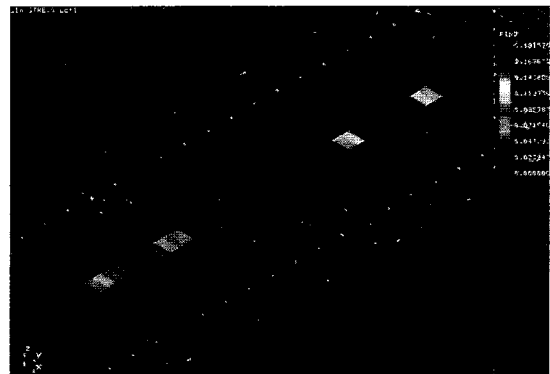


그림 18 상부판 응력집중부의 파괴지수 분포

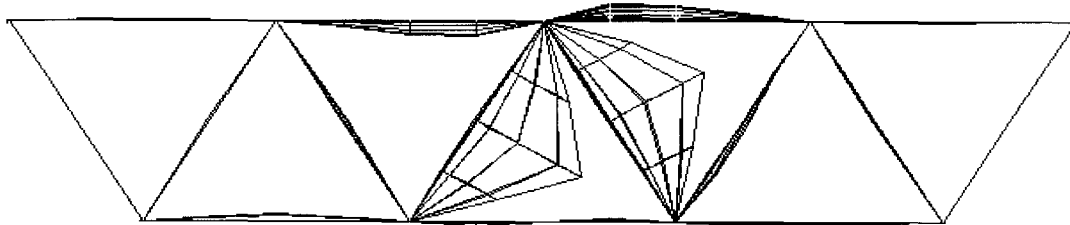


그림 19 좌굴해석 결과 좌굴모드형상

좌굴해석 결과, Eigenvalue는 11.04로 제작상의 오차나 기타 결함 변수들(knockdown factor)을 고려하여 고유치값의 75%를 적용하더라도 사용하중에 대해 복부판의 좌굴에 대해서는 약 8.2의 충분한 안전율을 가지는 것으로 나타났다. 그림 19는 좌굴해석 결과 좌굴모드형상을 보여주고 있다.

5.4.4 해석결과 종합

복합소재 교량 바닥판을 설치한 지간장 30m, 주형간격 2.5m인 5주형 단순판형교의 구조해석 결과, 응력, 처짐, 파괴지수, 좌굴에 대한 결과를 정리하면 다음 표 5.2와 같다. 처짐규정에 대해서는 2.63의 충분한 여유를 보유하여 사용성을 만족시키면서, 파괴지수 및 복부판 좌굴에 있어도 큰 안전율을 가지는 것으로 볼 수 있다.

6. 복합소재 바닥판의 제작

복합소재 교량 바닥판의 해석 및 설계를 통한 개발의 결과로 (주)국민씨아이에서는 고품질 제작이 가능하고 대량생산에 효율적인 인발성형공정을 이용하여 복합소재 교량 바닥판(상품명:델타테크)를 생산하고 있다. 그림 14에서는 개발된 복합소재 교량 바닥판의 모사도를 보여주고 있으며, 그림 20에서 그림 22에서는 인발성형 공정을 이용한 복합소재 교량 바닥판의 제조모습을 보여주고 있다.

7. 결 론

본고에서는 복합소재 교량 바닥판의 개발배경 및 해외 시공사례를 소개하고, 국내 개발사례로 국

표 2 구조해석 결과 종합

항 목	최대응력(kg/cm <sup>2</sup> )				Tsai-Wu 파괴지수	최대처짐	Eigenvalue
	상부판		하부판				
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_x$	$\sigma_y$			
결과치	-709	-296	127	132	0.192	2.24mm	11.04
안전율	-	-	-	-	5.21	2.63	8.25

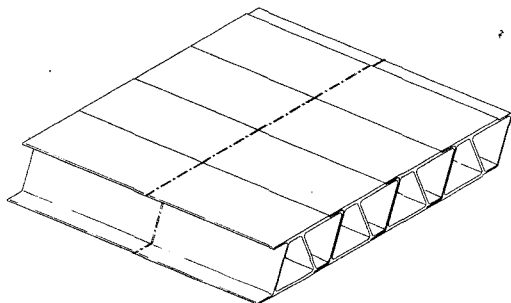


그림 19 인발성형 복합소재 바닥판



그림 20 바닥판 성형을 위한 섬유공급



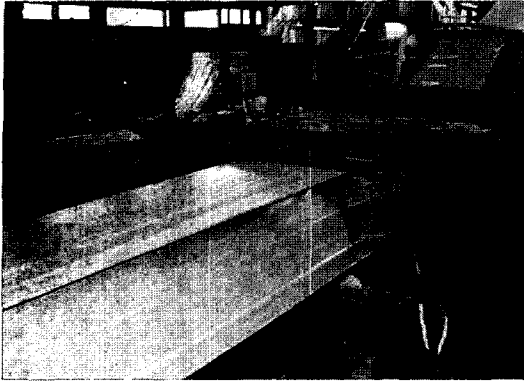


사진 21 금형통과 및 바닥판 성형

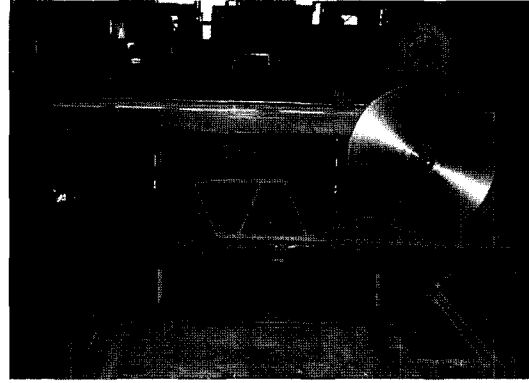


사진 22 최종 바닥판 절단

민대학교 벤처기업인 국민씨가 독자적으로 개발한 복합소재 교량 바닥판인 ‘델타테크’의 해석, 설계 및 제작과 관련된 일련의 개발현황을 기술하였다. 개발된 ‘델타테크’는 거더간격 3 m 이하 교량의 DB24 하중에 대해 높이 20cm, 상부판 두께 14mm, 하부판 두께 12mm, 복부판 두께 10mm로 설계되었으며, 유한요소해석결과 처짐기준에 대하여는 2.63, Tsai-Wu 파괴기준에 대하여는 5.21, 복부판 좌굴에 대하여는 8.25의 안전율을 보유하고 있으며, 현재 인발성형에 의해 상용화 제품이 생산되고 있다. 복합소재 교량 바닥판은 경량, 고강도, 고내구성 특성 뿐만 아니라 교통통제 최소화와 신속시공을 가능케하는 여러 가지 이점으로 인해 교량 바닥판 신설 및 성능개선 공사에 앞으로 활발히 보급될 전망이다.

### 참 고 문 헌

1. Moon, F. L., *Large-scale Experimental Validation of an All-Composite Bridge and Deck Connections*, University of Delaware, 2000
2. 이성우, 복합소재 구조물 제작을 위한 VARTM 제조공정 도입 및 건설분야 활용기법 연구개발, 연구보고서, KMU/SSRC-00/02, 국민대학교 구조안전연구소, 2000
3. Eckel, D. A., *A Theoretical and Experimental Study of the Behavior of Sandwich Bridge Decks Composed of Composite Materials*, University of Delaware Center for Composite Material, 1998
4. 이성우, 주성애, 유리섬유 복합소재 데크의 휨거동 특성, 전산구조공학회 학술발표회 논문집, 2001a
5. 이성우, 이선구, 김정현, 경량 고내구성 복합소재 교량 바닥판의 개발, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2001b 