

## 인발성형 복합소재 교량 바닥판의 설계 및 제작 Design and Fabrication of Pultruded Composite Bridge Deck

이 성 우\*      이 선 구\*\*      송 충 한\*\*\*      박 성 용\*\*\*\*  
Lee, Sung Woo    Lee, Sun Goo    Song, Chung Han    Park, Sung Yong

### ABSTRACT

Due to many advantages such as light weight, fast installation, high durability, composite bridge deck is considered to be one of the promising alternatives to concrete bridge deck. The paper presents procedures of finite element analysis and laminate design for composite bridge deck of triangular shape for DB24 load. After design of the section, glass reinforced composite deck tube of double triangular section with 200mm profile was fabricated with pultrusion and the procedure are presented.

### 1. 서 론

첨단 신소재인 복합소재는 경량·고강도·고내구성 특성으로 인해 건설분야에서 미래 산업의 총아로 떠오르고 있다. 이러한 탁월한 특성을 보유한 복합소재는 최근 제조공법의 급속한 발달에 힘입어 건설분야에서도 경쟁성을 갖게 되었다. 더욱이 기존의 건설재료로 사용되어온 강재와 콘크리트의 부식과 열화 문제를 해결할 수 있어 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 있어 건설분야에서 본격적인 활용은 이제 시간문제만 남아 있는 것으로 보여진다.

복합소재의 건설분야 적용 구조물 중 복합소재 교량 바닥판은 최근 구미선진국에서 매우 활발한 연구개발이 이루어지고 있으며<sup>(1),(2)</sup>, 실용화에 박차를 가하고 있는 교량 분야의 첨단기술로서 세계적인 관심의 대상으로 떠오르고 있다. 본 논문에서는 국내에서 개발한 DB24용 복합소재 교량 바닥판인 '델타데크'에 대한 유한요소해석과 단면설계 및 인발성형 공정을 이용한 제작현황을 기술하고자 한다.

### 2. 복합소재 교량 바닥판의 특성

복합소재 교량 바닥판은 종래의 현장 타설로 인해 공기가 많이 소요되는 콘크리트 바닥판과는 달리 공장

\* 정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수  
\*\* 정회원 · (주)국민씨아이 전무이사  
\*\*\* (주)국민씨아이 기술개발팀 부장  
\*\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 토목연구부 구조시스템 연구그룹 연구원

에서 미리 제작되어 신속하게 가설되므로 교통량이 많은 도심구간 교량건설에 복합소재 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 교각기초를 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 지진시에도 매우 유리해진다. 이러한 복합소재 교량은 내구연한이 길어 교량의 수명기간에 대하여 실질투자비 감소로 건설비용에 대한 투자효과가 극대화될 수 있다.

### 3. 복합소재 교량 바닥판의 해석 및 설계

#### 3.1 해석 대상교량 및 모델링

복합소재 모델 바닥판에 대한 선행기초연구<sup>(3),(4)</sup>를 통해 복합소재 교량 바닥판의 최적 단면형상을 삼각형으로 결정하고, 복합소재 바닥판 교량에 대한 유한요소해석을 통해 단면을 설계하였다.

구조해석 대상교량은 총 지간장이 30m, 바닥판 폭 12m이며, 거더간 간격이 2.5m인 5주형 단순판형교로 하였다. 그림 3.1에서는 해석 대상교량의 횡단면을 보여주고 있다. 유한요소해석에는 복합소재 적층판 해석이 가능한 범용 해석프로그램인 COSMOS/M을 이용하였고, Tsai-Wu 파괴해석을 수행하기 위하여 SHELL41요소를 사용하였으며, 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 3.2에서는 해석 대상교량의 복합소재 바닥판 단면형상을 보여주고 있으며, 그림 3.3에서는 해석대상 교량의 유한요소 모델을 보여주고 있다.

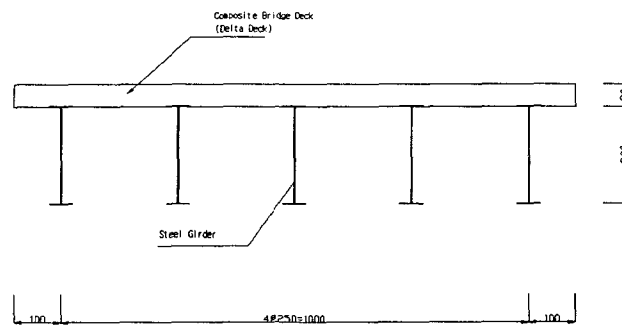


그림 3.1 해석 대상교량의 횡단면

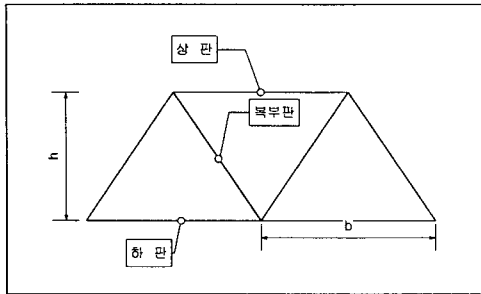


그림 3.2 복합소재 바닥판 단면형상

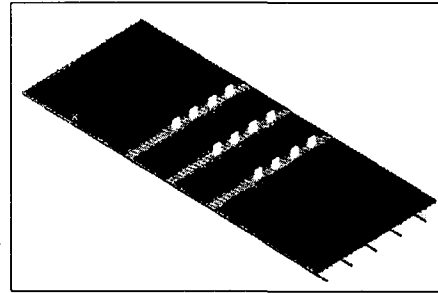


그림 3.3 복합소재 바닥판 교량의 해석모델

해석시 적용한 활하중은 DB24하중이며, 사하중은 바닥판의 자중 뿐만 아니라 아스팔트 및 교량 방호벽의 자중을 고려하였다. 하중재하모델은 주형간격이 2.5m인 교량 바닥판의 횡방향 프레임 해석을 통해 최대처짐 및 단면력을 발생시키는 2차선 하중재하모델을 결정하여 적용하였다. 그림 3.4에서는 복합소재 교량 바닥판의 유한요소해석에 사용된 2차선 하중재하모델을 보여주고 있다.

DB24 차량의 후륜 축하중의 접지면은 23cm×55.6cm의 크기로 하중재하하였으며, 접지면의 하중조건은 복부판 사이의 상부판에 하중이 위치하는 경우와 복부판 위에 위치하는 경우를 고려하였다. 그림 3.5에서는 상부판에 하중이 위치하는 경우를 보여주고 있는데, 이러한 하중조건은 응력 및 처짐해석시 사용하였으며, 그림 3.6에서 보여주는 하중조건은 복부판에 하중이 위치한 경우로 좌굴해석시 사용하였다.

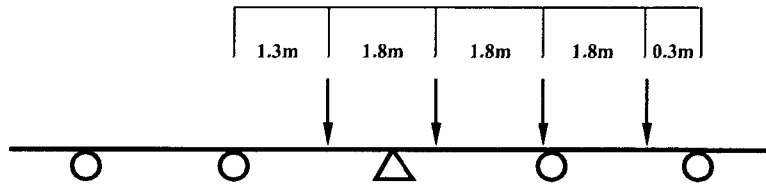


그림 3.4 2차선 하중재하모델

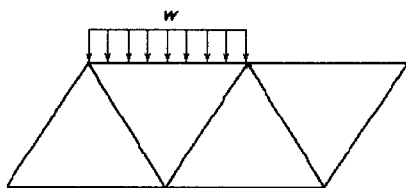


그림 3.5 응력 및 처짐해석시 하중조건(LC1)

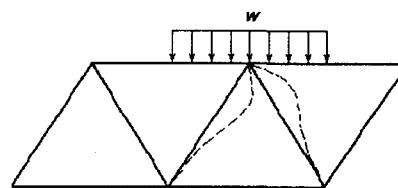


그림 3.6 좌굴해석시 하중조건(LC2)

### 3.2 단면설계

단면설계는 복합소재 교량 바닥판의 특성상 응력보다는 처짐이 지배적인 인자가 되어 결정되므로, 이를 기준으로 적절한 처짐 안전율을 가지도록 적정단면을 결정하여 바닥판 높이를 200mm로 하고 운하중의 접지

로 인해 추가적인 국부응력이 발생하는 상부판의 하중조건을 고려하여 상부판의 두께를 14mm, 하부판 두께를 12mm로 하였으며, 복부판의 두께는 10mm로 설계하였다.

복합소재 교량 바닥판의 적층설계는 상부판, 하부판 및 복부판으로 구분하여 설계하였으며, 사용된 복합소재 바닥판의 강화제로 유리섬유를 사용하고 수지는 불포화 폴리에스터를 사용하였다. 사용재료의 특성은 <표 3.1>과 <표 3.2>에 수록한 바와 같다. 적층설계시 강화섬유 함유율은 인발성형공정으로 제작이 가능한 섬유무게비 60%로 가정하였다. 강화섬유는 튜브의 종방향(0°), 경사방향(±45°) 및 횡방향(90°)으로 적정 배치하였으며, 종방향으로는 로빙형태의 유리섬유를 사용하였고 나머지 방향에 대해서는 다축 유리섬유 직포 (multiaxial stitched fabric)를 사용하여 적층구조를 설계하였다. 적층설계 및 해석에는 복합소재 해석 프로그램인 ESAComp 2.0<sup>(6)</sup>을 사용하였다. <표 3.3>에서는 적층설계 후 산정된 구조해석을 위한 재료의 물성치를 보여주고 있다.

<표 3.1> 유리섬유의 물성치

항 목	물성치
단위중량	2,570 kg/m <sup>3</sup>
EL, ET	72.3 GPa
GLT	30 GPa
$\nu_{LT}$	0.2

<표 3.2> 불포화 폴리에스터 수지의 물성치

항 목	물성치
단위중량	1,240 kg/m <sup>3</sup>
E	3.38 GPa
G	1.22 GPa
$\nu_{LT}$	0.38

<표 3.3> 구조해석을 위한 물성치

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 튜브 횡방향 (차량진행방향), Y: 바닥판 튜브 종방향 (차량진행직각방향)

### 3.3 구조해석 결과

#### (1) 처짐해석

DB24 활하중 상태하의 복합소재 교량 바닥판을 해석하여 주형간 바닥판의 상대처짐을 구하였다. 복합소재 교량 바닥판은 사용하중에 의한 처짐을 설계의 주요인자로 사용하는 바, 국내 및 해외의 도로교 시방서를 인용하여 바닥판의 허용처짐을 L/425(L:주형 간격)로 하여 해석결과를 분석하였다.

그림 3.7에서는 해석결과 수직방향의 처짐에 대한 등고선을 보여주고 있으며, 그림 3.8에서는 바닥판 횡단면의 처짐곡선을 보여주고 있다. 주형간격 2.5m인 해석대상 바닥판의 허용처짐은 5.9mm(2500/425)이며, 해석결과 최대처짐은 2.24mm로 처짐에 대한 안전율을 2.63 정도 확보하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 설계된 바닥판 단면은 허용처짐규정을 충분히 만족하는 것으로 평가되었다.

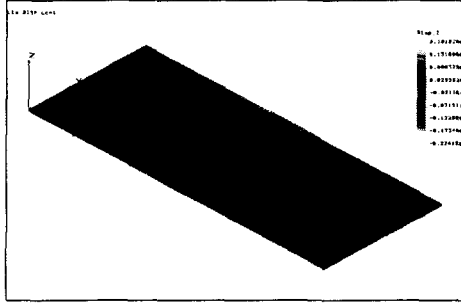


그림 3.7 처짐해석 결과 수직방향의 처짐 등고선

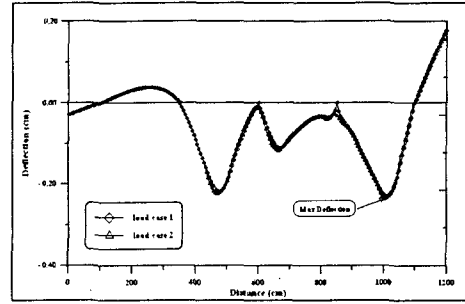


그림 3.8 바닥판 횡단면의 처짐곡선

(2) 국부응력 및 파괴해석

복합소재 교량 바닥판의 하중 지지면 응력집중을 검토하기 국부응력 및 파괴해석을 수행하였다. 통상적으로 국부적인 응력집중현상은 요소의 크기에 아주 민감하기 때문에 본 해석에서는 응력집중부에서요소수를 세분화하여 해석을 수행하였다. 요소 크기는 5cm×5.55cm로써 가로 및 세로의 비가 약 1 : 1이 되도록 하였다. 그림 3.9는 응력 집중부에서의 요소분할 형상을 나타낸다.

COSMOS/M 프로그램의 SHELL1 요소에 대해서는 Tsai-Wu 파괴해석을 수행할 수 있으며, 파괴지수를 계산하는 공식은 다음 식(1)과 같다. 파괴지수는 각 요소에 대해서 계산되며, 파괴지수가 1이상이면 파괴가 발생하며, 식(2)로부터 파괴에 대한 안전율을 구할 수 있다. 따라서 본 해석에서는 국부적인 응력집중으로 인한 응력 집중부의 파괴 안전율을 검토하기 위해 Tsai-Wu 파괴해석을 수행하였다.

$$F.I. = (F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2) + (F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{66}\tau_{12}^2) \quad (1)$$

$$F_1 = \frac{1}{X_1^T} - \frac{1}{X_1^C}, \quad F_2 = \frac{1}{X_2^T} - \frac{1}{X_2^C},$$

$$F_{11} = \frac{1}{X_1^T X_1^C}, \quad F_{22} = \frac{1}{X_2^T X_2^C}, \quad F_{66} = \frac{1}{S_{12}^2}, \quad F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{X_1^T} \frac{1}{X_1^C} \frac{1}{X_2^T} \frac{1}{X_2^C}}$$

여기서,

$X_1^T$  : X축 방향의 인장강도,                       $X_1^C$  : X축 방향의 압축강도  
 $X_2^T$  : X축 방향의 인장강도,                       $X_2^C$  : X축 방향의 압축강도

$$F.S = \frac{1}{\text{파괴지수}} \quad (2)$$

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. 그림 3.10에서는 상부판 하중 접지면 부근의 교축방향(X방향) 응력분포를 보여주고 있으며, 그림 3.11에서는 상부판 하중 접지면 부근의 교축직각방향(Y방향) 응력분포를 보여주고 있다. 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 3.12에서는 상부판 응력집중부의 파괴지수 분포를 보여주고 있다.

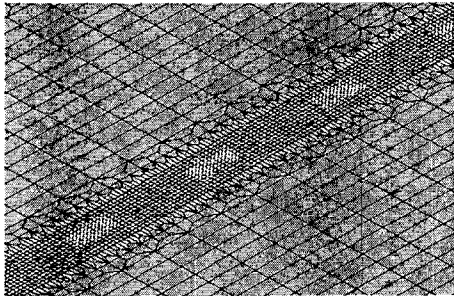


그림 3.9 응력집중부에서의 요소분할

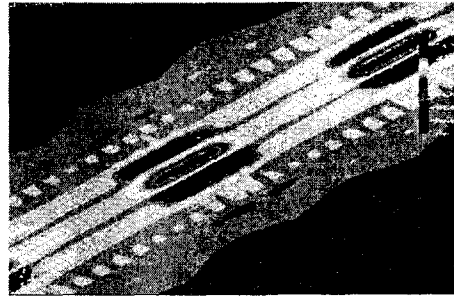


그림 3.10 상부판의 교축방향 응력분포

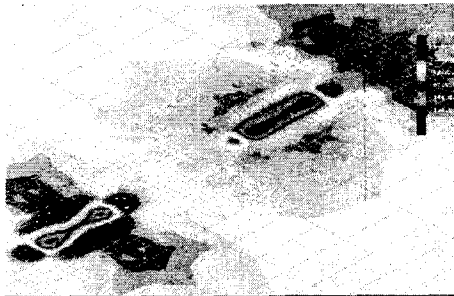


그림 3.11 상부판의 교축직각방향 응력분포



그림 3.12 상부판 응력집중부의 파괴지수 분포

### (3) 좌굴 해석

활하중에 대한 복합소재 교량 바닥판 복부판의 좌굴에 대한 안전율 및 좌굴모드형상을 예측하기 위하여 고유치 좌굴해석을 수행하였다. 고유치 좌굴해석을 통해 임계좌굴하중(critical buckling load)과 파괴모드를 추정할 수 있다. 좌굴에 대한 안전율은 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F.S = \frac{P_{cr}}{P_{applied}} = \text{Eigenvalue} \quad (3)$$

좌굴해석 결과, Eigenvalue는 11.04로 제작상의 오차나 기타 결함 변수들(knockdown factor)을 고려하여

고유값의 75%를 적용하더라도 사용하중에 대해 복부판의 좌굴에 대해서는 약 8.2의 충분한 안전율을 가지는 것으로 나타났다. 그림 3.13에서는 좌굴해석 결과 좌굴모드형상을 보여주고 있다.

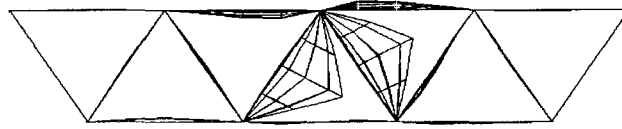


그림 3.13 좌굴해석 결과 좌굴모드형상

(4) 해석결과 종합

설계된 복합소재 교량 바닥판을 설치한 지간장 30m, 주형간격 2.5m인 5주형 단순판형교의 구조해석 결과, 응력, 처짐, 파괴지수, 좌굴에 대한 결과를 정리하면 다음 <표 3.4>와 같다. 처짐규정에 대해서는 2.63의 충분한 여유를 보유하여 사용성을 만족시키면서, 파괴지수 및 복부판 좌굴에 있어도 큰 안전율을 가진다.

<표 3.4> 구조해석 결과

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	2.24 mm	11.04
안전율	-	-	-	-	5.21	2.63	8.25

4. 복합소재 바닥판의 제작

결정된 삼각형 단면에 대해 이중 삼각형 구조의 튜브를 인발성형으로 제작하였다. 바닥판을 인발성형으로 제작할 경우 고품질 제작이 가능하고 대량생산에 매우 효율적이다. 전체 바닥판은 튜브를 그림 4.1과 같이 병렬로 접합하여 최종적으로 제작하게 된다. 사진 4.1에서는 바닥판 성형을 위한 섬유공급 및 함침 과정을 보여주고 있고, 사진 4.2에서는 함침된 섬유의 금형통과 및 바닥판 튜브의 성형 모습을 보여주고 있으며, 사진 4.3에서는 최종 생산된 바닥판 튜브의 절단 모습을 보여주고 있다.

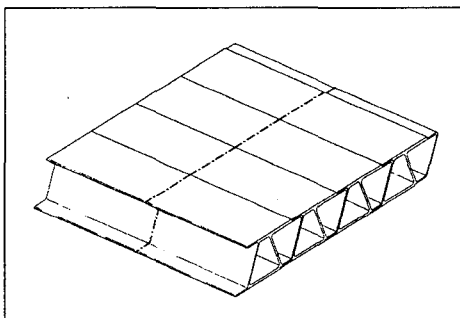


그림 4.1 인발성형 복합소재 바닥판

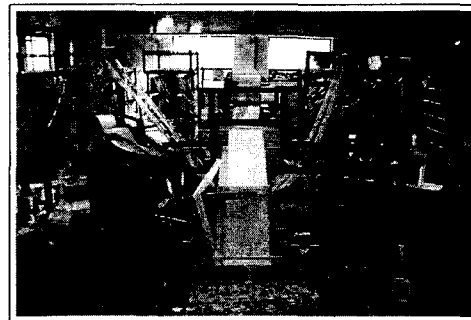


사진 4.1 바닥판 성형을 위한 섬유공급

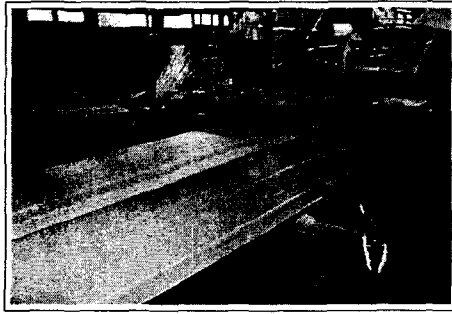


사진 4.2 금형통과 및 바닥판 성형

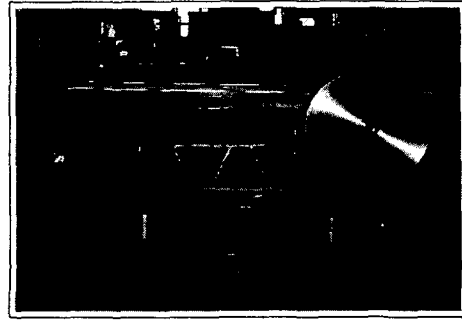


사진 4.3 최종 바닥판 절단

## 5. 결 론

본 논문에서는 국내에서 개발한 복합소재 교량 바닥판인 '델타테크'의 유한요소해석과 단면설계 및 인발 성형공정을 이용한 제작현황을 기술하였다. 개발된 '델타테크'는 높이 200mm, 상부판 두께 14mm, 하부판 두께 12mm, 복부판 두께 10mm로 설계되었고, 유한요소해석에 의해 처짐기준에 대하여는 2.63, Tsai-Wu 파괴기준에 는 5.21, 복부판 좌굴에 대하여는 8.25의 안전율을 보유하고 있는 것으로 해석되었으며, 현재 인발성형에 의 해 상용화 제품이 생산되고 있다. 복합소재 교량 바닥판은 경량, 고강도, 고내구성 특성 뿐만 아니라 교통통 제 최소화와 신속시공을 가능케하는 여러 가지 이점으로 인해 교량 바닥판 신설 및 성능개선 공사에 앞으로 활발히 보급될 전망이다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 산학연 공동연구개발사업(목적A00-07)으로 연구되었으며 연구지원에 감사드린다.

## 참고문헌

1. F. L. Moon, *Large-scale Experimental Validation of an All-Composite Bridge and Deck Connections*, University of Delaware, 2000
2. D. A. Eckel, *A Theoretical and Experimental Study of the Behavior of Sandwich Bridge Decks Composed of Composite Materials*, University of Delaware Center for Composite Material. 1998
3. 이성우, 주성애, 유리섬유 복합소재 데크의 휨거동 특성, 전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제 14권 1호, 2001, pp.89~196
4. 이성우, 이선구, 김정현, 경량 고내구성 복합소재 교량 바닥판의 개발, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2001
5. M. Palantera, *Theoretical Background of ESAComp ver. 2.0*, HUT/LLS, 1999