

위상과 형상최적화 기법을 사용한 FRP 교량 바닥판의 설계

Design of a FRP Deck Using Topology and Shape Optimization

이 은 형* 박 재 균†

Lee, Eun-Hyung Park, Jaegyun

(논문접수일 : 2009년 8월 3일 ; 심사종료일 : 2009년 9월 3일)

요 지

FRP(섬유강화 복합재료)를 교량의 바닥판으로 설계하기 위하여 위상최적화와 형상최적화 기법을 사용하여 이론적 최적 단면을 제안하였다. 먼저 위상최적화를 통하여 바닥판의 최적 단면모양을 찾아 내었다. 그 결과, 단순보에서 중앙 집중하중의 경우 가장 이상적인 구조는 트러스 형태의 골조구조임을 알 수 있었다. 또한 수평부재와 경사부재가 만나는 절점에서 보강재를 볼 수 있었고, 이는 기존 상업용 FRP바닥판에 적용되지 않았기 때문에 새로운 설계변수로 사용하였다. 두 번째로 유전자 알고리즘을 이용한 형상최적화를 통하여 위상최적화 결과의 최적 규격을 찾고자 하였다. 기존 상용제품들과 비교를 위하여 바닥판의 높이를 제한하여 최적화를 수행하였다. 본 논문에서 제안한 바닥판의 성능을 검토하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 사용성 및 안전성을 검토한 결과, 기존 연구에서 제안한 설계 기준안을 만족하는 것을 확인하였다.

핵심용어 : FRP 교량바닥판, 위상최적화, 형상최적화, 유전자 알고리즘

Abstract

By using topology and shape optimization, a theoretically optimum FRP deck was proposed. Firstly, a topologically optimal shape, truss-like structure without hinges, was found. A truss-shape frame is the most ideal structure when subjected to a concentrated force at the center of simply supported beam. An armature was found at the point joining horizontal chord and diagonal chord, which was used as a new design variable. Secondly, optimum value of each variable was decided through shape optimization using genetic algorithm. To compare it with existing commercial FRP decks, shape optimization was performed by fixing the height of FRP decks. To verify the performance of the FRP deck proposed in this study, a finite element analysis was performed. As a result, it satisfies serviceability and safety guide lines of FRP decks.

Keywords : FRP deck, topology optimization, shape optimization, genetic algorithm

1. 서 론

가볍고 강도가 높으며 내부식, 고내구성의 특징을 갖는 섬유강화복합재료(FRP)는 주로 화학 플랜트에 화학물질 수송 파이프, 저장 탱크와 조선분야에서 많이 사용되었다. FRP가 구조물의 재료로 사용되기 시작한 이후 교량의 바닥판의 재료로 사용하는 노력은 최근에 이루어졌다. 미국과 유럽에서 몇 가지 상용제품이 출시되어 있으며 국내에서도 델타테크라는 상용제품이 있다. 그러나 세계적으로는 아직 충분한 연구와 시공이 이루어지지 않았으며, 국내에서는 GFRP 바닥판

을 이용한 교량이 실험적으로 시공되었으나 아직은 그 수가 부족한 상황이다.

기존 FRP 바닥판의 연구는(이종순 등, 2004; 한국건설기술연구원, 2006; 이성우 등, 2004; 건설교통부, 2004) 주로 FRP바닥판의 형상최적화를 통한 설계였다. 안일찬(2007)은 유전자 알고리즘(Mitchell, 1997)을 사용하여 FRP교량 바닥판의 최적단면을 계산하였다.

참고한 연구들은 주어진 바닥판의 형상에서 최적 치수를 찾아내었지만, 본 연구에서는 위상최적화 기법을 사용하여 FRP 교량바닥판의 이론적인 최적단면형상을 먼저 계산하고,

† 책임저자, 종신회원 · 단국대학교 토목환경공학과 조교수

Tel: 031-8005-3473 ; Fax: 031-8005-3496

E-mail: jpark@dankook.ac.kr

* 단국대학교 토목환경공학과 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2009년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

형상최적화 기법을 사용하여 그 형상에서의 최적 치수를 제안하였다. 제한한 이론적 최적 단면을 범용 유한요소해석을 통하여 성능을 검토하였고 기존 상용바닥판과 비교하였다.

2. FRP 바닥판의 설계

2.1 위상최적화

위상최적화는 구조물의 위상학적 기하형상을 주어진 조건에 가장 적합한 형태로 만드는 과정을 의미한다. 즉, 경계면의 치수만 정해진 상태에서 내부의 모양을 최적화하는 방법으로서, 공학에서 이용하는 위상 최적화 방법은 일반적으로 주어진 영역을 유한개의 요소로 나누고, 각 요소를 채워진 요소(material)과 빈 요소(no material)로 결정하는 과정이다.

구조물의 위상학적 기하형상을 최적화하기 위해서 본 연구에서는 'Material Distribution Problem(MDP)'를 이용하였다. MDP란 미리 구조물이 차지할 수 있는 최대 영역을 정의하고 목적함수를 극대화 시키는 밀도분포 함수 $\rho(x)$ 를 결정하는 문제이다. 여기서, 목적함수는 주어진 하중(외력)으로 발생한 일(work)을 의미하며, 발생하는 일을 최소화 하도록 설계하는 것이 목적이다. 즉, 구조물이 주어진 조건에서 최대 강성을 가지도록 하는 것이다. 본 연구에서는 실제로 최적화를 수행하기 위해서 penalized, proportional stiffness model을 사용하였다. 이 모델은 탄성계수 결정이 밀도 함수의 결정으로 모두 정해지는 모델이며, 기준 영역에 대한 밀도함수의 최적분포를 계산한다. 최적화 계산 순서는 다음과 같다.

2.1.1 Pre-processing of geometry and loading :

- ① 기준이 되는 영역(구조)을 정한다.
- ② 구조물이 반드시 있는 곳 또는 구조물이 없어야 하는 영역이 있으면 미리 정해준다.
- ③ 기준영역에 대한 유한요소 망을 만든다. 기하학적 모양을 묘사하기에 충분한 해상도가 나오도록 한다.
- ④ 설계변수에 대한 유한요소공간을 만든다.

2.1.2 최적화

기준영역에 대한 밀도함수의 최적분포를 계산한다. 최적화는 유한요소 해석과 밀도함수를 위한 최적합성 업데이트 기준을 사용한다. 알고리즘은 다음과 같다 :

- ① 최초의 설계를 한다. 즉, 기준 공간에 균질한 물성으로 이루어진 구조물을 가정한다.

- ② 재료의 밀도와 penalized 계수에 의해 요소의 탄성계수가 확정되고, 유한요소해석을 통하여 구조물에 대한 변형률과 변위를 계산한다.
- ③ 유한요소해석에서 구한 변위 값을 가지고 설계변수에 대한 목적함수의 민감도 해석을 수행한다.
- ④ 수치적인 특이성을 제거하기 위해 필터링(filtering)방법에 의한 민감도를 재차 구한다.
- ⑤ 요소 안에서 균일하게 분포하는 재료 밀도 값의 변화에 따른 목적함수의 필터링 민감도를 이용하여 최적조건법(Optimality Criteria Method)에 의해 최적 설계변수 값을 갱신한다(밀도함수를 업데이트한다.).
- ⑥ 수렴조건에 의해 수렴할 때까지 ②번으로 돌아가 반복한다.

그림 1은 위 방법에 대한 순서도를 보여준다.

위상최적화이론(topology optimization)과 프로그램을 사용하여 동일한 양의 재료를 사용하였을 때 최대 강성을 가지는 복합재료 바닥판의 단면 형상을 계산하였다. 단순보에서 절반 해석을 수행하여 여러 형상을 계산하였으나, 일반적인 복합재료 바닥판의 설계를 위해서는 단면의 모양이 단순하게 반복 적용되어야 하므로 최종적으로 그림 2의 형상을 기본으로 하였다. 그림 2는 세로 20, 가로 60개의 정사각형 요소를 사용하였고, 1/2 부분에 재료가 존재하며, 중앙에서 한 개의 집중하중을 받을 경우의 위상 최적화 결과이다. 즉, 중앙 집중하중의 경우 가장 이상적인 구조는 트러스 형태의 골구조이며 수평부재가 경사부재보다 큰 힘을 받음을 알 수 있다. 이 결과와 가장 유사한 상업용 FRP 바닥판은 유럽에서 공동 개발된 ASSET System(그림 3)이다. 이 제품은 덴마크, 영국, 스웨덴, 네덜란드, 스페인이 공동개발하여 영국 West Mill교에 시험 시공되었다.

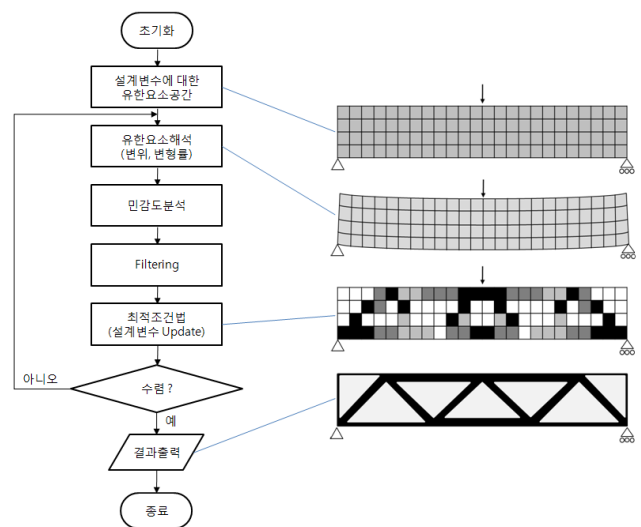


그림 1 위상최적화 순서도

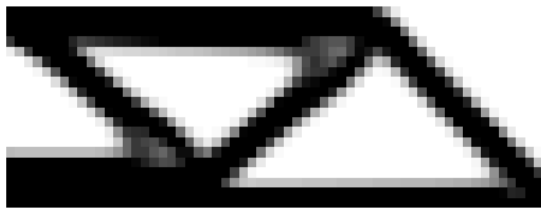


그림 2 20×60. $V_f = 0.5$ center load

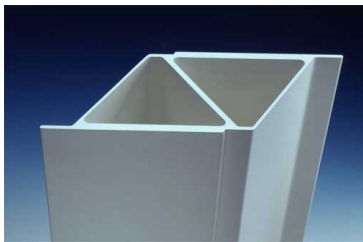


그림 3 ASSET System

여기에서 한 가지 중요한 결과는 절점 부근의 보강재 생성이다. 즉, 아래 절점과 위 절점에서 각각 수직에 가까운 보강재를 볼 수 있었다(그림 2). 일반적으로 절점에서 응력집중 현상이 일어나는 것을 감안하면 예측할 수 있는 결과이나 다른 상업용 FRP 바닥판에서는 볼 수 없는 부분으로 새로운 설계 변수로 사용하였다. 이를 바탕으로 유전자 알고리즘을 사용하여 형상 최적화를 통한 최적 단면의 치수를 결정하였다.

2.2 유전자 알고리즘을 이용한 형상최적화

형상최적화는 최적제어이론의 한 부분으로, 주어진 제약조건을 만족하면서 목적함수를 최소화하는 최적형상을 찾는 방법이다. 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 이용하여서 형상 최적화를 수행하였다.

유전자 알고리즘은 다변수의 전역 해를 푸는데 적합한 알고리즘으로 여러 변수가 혼재하는 문제를 풀기에 적합하나 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 그래서 목적함수가 빠르게 수렴하도록 하기 위해 유전자 알고리즘의 돌연변이 확률을 조정하면서 결과를 검토하였다. 바닥판의 기하학적 설계 변수로 바닥판 상부플랜지두께, 하부플랜지두께, 웹(Web)두께, 절점두께, 웹(Web)간격의 5개 변수를 사용하였다. 바닥판의 높이는 상용제품들과 성능 비교를 위해 200mm로 정하였으며 각 변수들로 구성된 유전인자들을 무작위로 교환하고 임의의 확률로 돌연변이가 발생하게 하여 구하고자 하는 최적설계의 함수에 대입하였다.

본 연구에서 목적함수(f)는 시간에 대한 바닥판의 단면적(mm^2)이며, 아래 표 1에서 제시한 기하학적 설계 변수와 단위 길이 당 웹의 개수(n) 그리고 차량 진행방향 시간의 간격

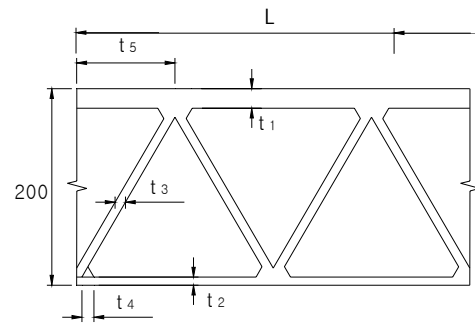


그림 4 설계변수

표 1 설계 변수와 설계 범위

설계변수	표시	설계 범위
상부플랜지 두께	t_1 (mm)	16.8 ~ 20.0mm
하부플랜지 두께	t_2	16.8 ~ 20.0mm
웹(web) 두께	t_3	8.0 ~ 11.2mm
절점 두께	t_3	1.0 ~ 10.0mm
웹(web) 간격	t_4	101.0 ~ 111.0mm

(L)로 구성되며, 이는 다음 식 (1)과 같다(그림 4, 표 1). 또한, 설계변수에 대입하게 되는 설계 범위는 표 1과 같다.

$$f = n \times ((200.0 - t_1 - t_2) \times t_3 + (t_4 \times 200.0 \times t_4 \div \sqrt{t_5^2 + 200.0^2})) + L(t_1 + t_2) \quad (1)$$

유전자 알고리즘을 통하여 구한 여러 개의 설계 값들은 주어진 설계 제약 조건을 만족하는 값들만 목적함수에 대입하게 된다. 바닥판을 설계하기 위한 구조적 안정성, 사용성 등의 조건을 설계 제약 조건이라고 정의하며 다음과 같다.

2.2.1 차량 진행 수직방향의 휨 응력

시간이 35m인 교량을 생각한다. 교량의 횡 방향에 대하여 DB24 하중에 의해 걸리는 최대 정모멘트 및 부모멘트를 해석 프로그램을 사용하여 구하고, 그 값에 대하여 단면의 최대 휨 응력을 구하였다. 구한 값을 상·하부 플랜지의 허용응력과 비교하여 안정성을 검토하였다. 최대 휨 응력을 구하는 방법은 다음 식 (2)와 같다.

$$f = \frac{M}{I} y \quad (2)$$

2.2.2 웹의 국부좌굴

웹의 국부좌굴의 경우 상·하부 플랜지의 허용응력처럼 수식을 이용하여 대입하기 쉽지 않으므로 웹의 국부좌굴에 대하여 영향을 주는 모든 변수에 대한 단순 모델링을 통하여

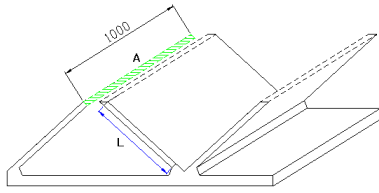


그림 5 웹의 국부좌굴

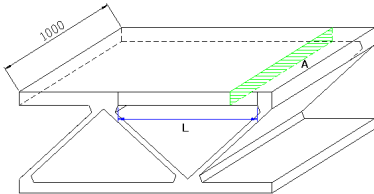


그림 6 플랜지의 국부좌굴

웹에 걸리는 응력을 계산하였다. 그리고 Euler 좌굴응력과 비교하여 국부좌굴에 대한 검토를 실행하였다. 웹의 국부좌굴에 영향을 주는 변수로는 웹의 간격(L), 웹의 두께, 바닥판의 두께를 대입하였고, Euler 좌굴하중의 경우 웹의 간격(L), 웹의 면적(A)으로 구하게 된다. 모든 경우에 대하여 해석을 실행하여 웹에 걸리는 응력을 정리하였고, 그 값들은 회귀분석을 통하여 가정한 곡선식을 유전자 알고리즘에 대입하였다. 이렇게 구한 웹에 걸리는 응력과 비교하는 Euler 좌굴 응력은 다음 식 (3)에 의해 구해진다(그림 5).

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2 A} \quad (3)$$

2.2.3 압축력을 받는 플랜지의 국부좌굴

압축력을 받는 플랜지의 국부좌굴의 경우, 휨 응력에 대해 압축력을 받는 플랜지는 상부플랜지를 의미한다(그림 6). 상부플랜지의 압축응력 또한 위의 웹의 응력을 구할 때 같이 구하였고, 회귀 분석을 통하여 가정한 곡선식을 유전자 알고리즘에 대입하였다. 그리고 그에 따른 Euler 좌굴하중에 의한 좌굴응력은 식 (3)과 동일하게 구한다.

두 값을 비교하여 Euler 좌굴응력보다 상부 플랜지의 휨 압축응력이 작게 되도록 설정하였다.

2.2.4 국부처짐

바닥판의 국부처짐은 웹과 웹사이 플랜지의 처짐을 고려한다. 국부 처짐의 경우 허용 처짐은 포장의 내구성과 관련하여 한국도로공사에서 일본 연락교 교면포장 기준내용을 인용하여 발간한 보고서에 의하면 강바닥판에 대하여 차도부의 텍플레이트의 최소두께는 운하중에 의한 처짐을 경간의 $L_w/300$ (L_w : 웹 간격)이하가 되도록 규정하고 있다. 이 규정에 따르면 강바닥판의 경간의 처짐이 $L_w/300$ 이하이면 포

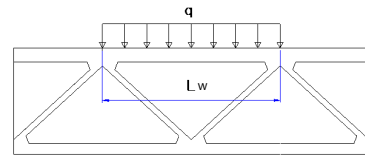


그림 7 국부처짐

장의 내구성 저하에 영향을 미치지 않는 것으로 평가하고 있어서 $L_w/300$ 기준을 적용하였다(이성우, 2004).

플랜지의 양단을 고정 단으로 가정하였으며, 변수로 사용된 I 는 상부플랜지의 단면2차 모멘트이며, q는 DB24 뒷바퀴하중의 분포하중이다(그림 7). 처짐은 식 (4)와 같이 가정하였다.

$$\delta = \frac{qL_w^4}{384EI} \quad (4)$$

설계 제약 조건을 대입한 알고리즘에서 목적함수 값이 최소가 되는 2개를 결정하여 다시 알고리즘에 대입하게 되고, 이렇게 하여 나온 최소인 2개의 목적함수 값이 같으면 수렴값인지 확인하여야 한다. 바로 전 단계에서 구한 값과 일정한 오차 내에 존재하게 되면 수렴한 것으로 결정하였다.

3. 최적설계결과

유전자 알고리즘을 사용한 형상 최적화의 결과는 표 2와 같으며, 설계결과를 2차원과 3차원 설계단면으로 작성하면 다음과 같다(그림 8, 9).

표 2 FRP 바닥판의 최적 단면 치수

설계변수	설계 결과
상부 플랜지 두께	19.6mm
하부 플랜지 두께	7.6mm
웹(Web)두께	9.7mm
절점두께	8.0mm
웹(Web)의 각도	60°
바닥판 높이	200mm
웹(Web)간격	102mm

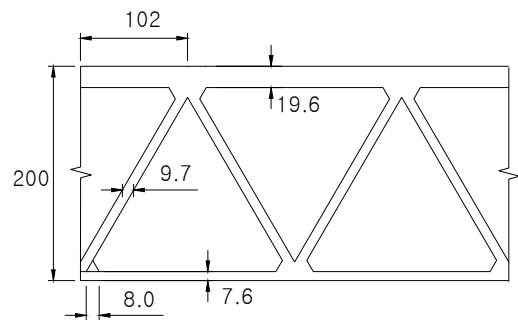


그림 8 2차원 설계단면

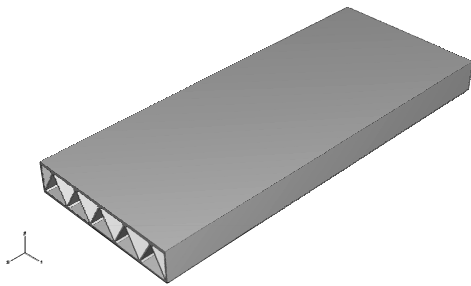


그림 9 3차원 설계단면

표 3 해석 조건 및 물성

거더간격		2.5m
차량 진행방향 길이		1.0m
탄성계수	섬유방향	30GPa
	섬유직각방향	7.0GPa
전단 탄성계수		3.5GPa
하중	분포하중	0.94N/mm ²

표 4 FRP 바닥판의 단면 치수

설계변수	설계결과	ASSET	델타테크
상부 플랜지 두께	19.6mm	20mm	20mm
하부 플랜지 두께	7.6mm	20mm	12mm
웹(Web) 두께	9.7mm	10mm	8mm
절점두께	8.0mm	-	-
웹(Web)의 각도	60°	58.3°	80.0°
바닥판 높이	200mm	200mm	200mm
웹(Web)간격	102mm	161mm	117mm
단면적	44mm ² /mm	49mm ² /mm	45mm ² /mm

4. 바닥판의 성능 검토

유한요소해석 모델의 조건은 다음 표 3과 같다. 거더 간격은 2.5m이며, 차량 진행방향으로는 단위 1m에 대하여 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 해석하였다. FRP는 이방성을 갖는 재료로써 길이 방향을 따라서는 높은 강도를 갖지만 길이에 수직인 방향으로 길기 방향에 비해 약한 특성이 있다. 따라서 길이방향의 탄성계수는 30GPa을 사용하였으며, 길이에 수직인 방향의 탄성계수는 7GPa, 전단계수는 3.5GPa을 사용하였다(Keller, 2003). 하중은 중앙에 DB-24의 후륜하중에 충격계수를 곱한 값(96×1.3=124.8KN)을 운하중 분포폭(580mm×230mm)의 면적에 재하 하였다. 접지압(0.94N/mm²)은 분포면적에 균일하게 분포하는 것으로 가정한다.

본 연구에서 제안한 단면을 기존 상용제품 단면과 사용성(처짐) 및 응력 분포를 비교해 보았다. 기존 상용제품은 이성우(2004)에서 제시한 단면을 참고하였다. 세 단면의 치수와 단면적은 표 4에 나와 있다.

4.1 사용성 검토

바닥판용 유리섬유 복합재료 바닥판은 강도는 큰 반면에 상대적으로 탄성계수가 작으므로 강성이 작다. 그러므로 처

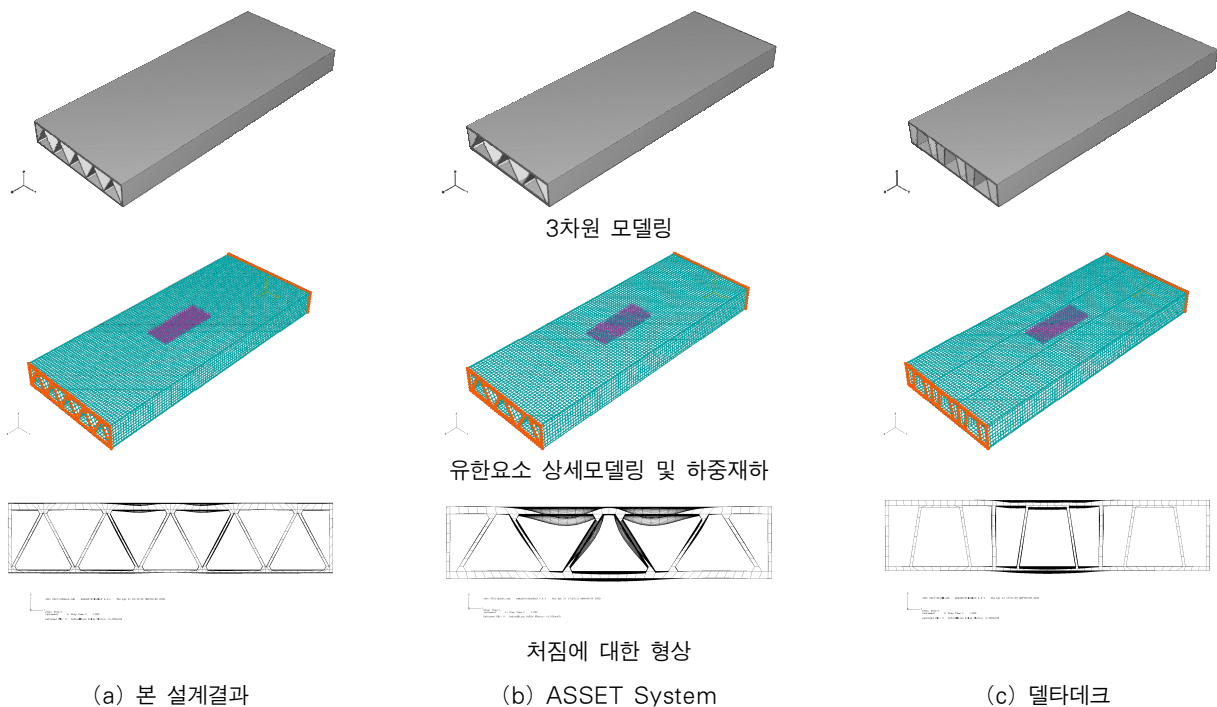


그림 10 각 단면의 유한요소해석

표 5 분포하중 재하 시 세 단면의 처짐

항목	설계 결과	ASSET	델타테크
하부플랜지의 처짐(mm)	2.262	5.161	4.908

짐에 대한 사용성 검토가 선행되어야 한다. 현행 설계기준에서 처짐 기준은 건설교통부의 도로교 설계기준에서 LG/800을 규정하고 있으며(LG : 거더간격), AASHTO(2004) 역시 강거더교와 철근콘크리트 거더교에 대하여 LG/800으로 규정하고 있다. 목교의 경우, LG/425로 규정하고 있으나, 바닥판 자체에 대한 처짐 기준은 제정되어 있지 않다. 현재로는 처짐에 대한 공인된 기준이 미비한 상태로서, 잠정적으로 FHWA에서 LG/800이 제안되어 있는 상태이다. 한국건설기술연구원(2006)에서는 다음과 같이 사용성 설계기준을 제시하였다: “바닥판용 유리섬유 복합재료 부재는 부재의 강도가 큰 반면에 상대적으로 탄성계수가 작아 처짐에 대한 사용성 검토가 선행되어야 한다. 사용성 기준은 충격을 포함한 활하중에 의한 바닥판의 처짐으로 평가하며, LG/800을 허용기준으로 규정한다. 여기에서 LG는 거더간 간격 또는 지간장을 의미한다.” 위의 결과들을 참조하여 본 연구에서는 허용 처짐의 기준으로 LG/800을 사용하였다.

본 연구에서 제안한 단면과 상용제품을 대상으로 사용성 검토를 수행하였으며, 각 단면의 해석은 다음 그림과 같다(그림 10).

설계기준의 허용 처짐은 $L_G/800=2500/800=3.125\text{mm}$ 이며, 각 단면의 해석 결과 처짐은 표 5와 같다. 본 연구의 설계 결과만 설계기준의 허용 처짐에 포함되는 것을 볼 수 있다.

4.2 응력검토

교량 횡방향에 대한 복합재료 바닥판의 단면검토는 설계하중에 의한 휨에 대하여 상부판 및 하부판의 응력을 부재의 허용응력과 비교하여 검토하였다. 한국건설기술연구원(2006)에서는 다음과 같은 사용성 설계기준을 제시하였으며, 본 연구에서는 이에 준하여 안전율 5.0을 사용하였다: “FRP 바닥판 설계 시에는 재료의 허용응력을 적절한 안전율로 나누는 허용응력설계법을 적용하는 것을 원칙으로 한다. 복합재료 구조는 재료의 특성상 취성파괴가 예상되므로, 휨부재의 연성파괴를 기준으로 한 하중-저항계수법 또는 강도설계법보다는 미국의 목재 설계에서와 같이 허용응력법을 적용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.” 이 결과에 따르는 복합재료 바닥판의 강도와 허용응력은 표 6과 같다(Keller, 2003).

분포하중은 각각의 해석 모델의 중앙에 재하하였으며, 해

표 6 복합재료의 강도와 허용응력

구분	섬유길이방향		섬유직각방향	
	인장강도	압축강도	인장강도	압축강도
재료강도(MPa)	420	250	110	150
허용응력(MPa)	84	50	22	30
안전율(F.S)	5.0	5.0	5.0	5.0

표 7 분포하중 재하 시 해석 결과

구분	설계 결과	ASSET	델타테크	
섬유방향 최대응력	인장(MPa)	26.15	28.73	37.01
	압축(MPa)	35.48	26.64	44.55
섬유직각방향 최대응력	인장(MPa)	10.81	6.588	20.68
	압축(MPa)	24.43	14.67	7.031

표 8 안전성 검토

구분	설계 결과	ASSET	델타테크		
안전율 (F.S)	섬유방향 최대응력	인장	16.06	14.62	11.35
		압축	7.05	9.38	5.61
	섬유직각방향 최대응력	인장	10.18	16.70	5.32
		압축	6.14	10.22	21.33

석한 결과는 다음과 같다(표 7). 세 단면의 응력은 모두 허용응력 이내에 포함되는 것을 확인할 수 있다.

위의 결과(표 7)를 복합재료의 강도(표 6)와 비교하여 안전성을 검토하였다(표 8).

안전성 검토 결과를 보면, 세 바닥판 모두 DB-24 하중에 대해서 충분한 안전율을 보유하고 있는 것으로 판단된다. 특히, 본 설계 결과의 처짐 및 응력분포는 기존 상용제품들과 비교해도 상대적으로 우수한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 FRP 바닥판의 단면 설계를 위하여 위상 최적화 및 유전자 알고리즘을 이용한 형상 최적화 방법을 사용하였다. 또한 바닥판의 성능을 검토하였고, 기존 상용제품과 비교 및 검토하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 일반적으로 FRP 압출 성형 부재의 길이 방향 휨 강성은 단면이차모멘트로 결정되지만, 그 직각 방향의 휨 강성은 결정하기 어렵기 때문에 먼저 위상최적화 방법을 사용하여 길이 직각 방향으로 가장 높은 강성을 가지는 단면의 기본 형태 및 그에 따른 설계 변수를 결정하고, 이 설계 변수를 사용하여 형상 최적화를 수행하였다.
- ② 위상최적화이론을 사용한 결과 중앙 집중하중의 경우 가장 이상적인 구조는 절점에 회전 자유도가 없는 트러스 형태의 구조이며, 수평부재가 경사부재보다 큰 힘

을 받음을 알 수 있었다. 또한, 기존 상업용 FRP 바닥판에 적용되지 않았던 질점 보강재를 볼 수 있었고, 이를 새로운 설계 변수로 사용하였다.

- ③ 기존 상용제품과 비교를 위하여 바닥판의 높이를 200mm로 제한하여 설계변수 5개에 대한 형상최적화를 수행하였다. 그 결과를 2차원 및 3차원으로 나타내었으며, 설계변수 5개에 대한 최적단면을 가지고 유한요소해석을 수행하였으며, 기존 상용제품과 비교 및 검토하였다. 본 연구의 설계 결과는 '장수명 합리화 바닥판 개발-복합재료바닥판 설계기준안'의 허용치집 이내에 포함되는 것을 확인하였다. 응력도 허용응력 이내에 포함되었으며, 세 단면 모두 설계기준안에서 제시한 안전율 이상을 보유하는 것으로 판단되었다.
- ④ 본 연구 결과를 실용화하기 위해서는 모듈의 연결부가 만들어지는 바닥판의 상·하부플랜지에 최소 두께 설정이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 단국대학교 2008년 일반연구 연구비 지원으로 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부** (2004) 신속시공·경량·고내구성 복합소재 교량 바닥판 산업화 연구보고서.
- 대한토목학회** (2008) 도로교설계기준해설.
- 안일찬** (2007) 유전자 알고리즘을 이용한 FRP 바닥판의 최적 단면에 관한 연구, 공학석사학위 논문, 서울대학교.
- 이동규, 신수미** (2006) 설계변수 가속법을 이용한 구조물의 위상최적화 알고리즘/최적화 수렴성의 개선과 관련하여, 대한건축학회 논문집, 22(6), pp.39~46.
- 이성우** (2004) 복합소재의 건설분야 이용 현황과 전망, 건설기술교육원 교육자료.
- 이성우, 임병주, 양필승** (2004) 인발성형 '델타테크' 복합소재 교량바닥판의 국부처짐과 피로거동 분석, 한국전산구조공학회가 가을 학술발표회 논문집, pp.403~410.
- 이종순, 조효남, 최영민, 김희성, 김형열** (2004) 인발성형된 FRP 바닥판의 형상 최적설계, 한국 전산구조 공학회 논문집, 17(3), pp.319~332.
- 한국건설기술연구원** (2006) Bridge 200 보고서-장수명 합리화 바닥판 개발-복합재료 바닥판 최종보고서.
- Bendsoe, M.P., Sigmund, O** (2004) Topology Optimization, Spinger.
- Keller, T.** (2003) Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction, IABSE.
- Mitchell, M.** (1997) An introduction to genetic algorithms, the MIT Press, US.