

FRP 바닥판의 최적설계

박재균[†] · 안일찬^{*}

단국대학교 토목환경공학과 · ^{*}(주)DM 엔지니어링
(2008. 4. 11. 접수 / 2008. 11. 6. 채택)

Optimal Design of FRP Bridge Decks

Jaegyun Park[†] · Il-Chan Ahn^{*}

Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University
^{*}DM Engineering Co.

(Received April 11, 2008 / Accepted November 6, 2008)

Abstract : Although FRP is relatively new material for constructional use, there are several commercial GFRP bridge decks available today. In this paper we first set variables which decide the design of a GFRP deck based on commercial products. Under the assumption of linear elastic behavior under DB24 load, all the conditions of stability and serviceability are considered. We seek the best solution which minimizes the cross section area using genetic algorithm. The optimal solution shows that the shape is close to the ASSET deck with larger angle of the web and smaller area.
Key Words : GFRP deck, shape optimum design, genetic algorithm

1. 서론

가볍고 강도가 높은 섬유강화폴리머(FRP)가 구조물의 재료로 사용되기 시작한 이후 교량 바닥판의 재료로 사용하는 노력은 비교적 최근에 이루어졌다. 그 결과로 미국과 유럽에서 몇 가지의 상용 제품이 출시되어 있으며 현재에는 우리나라에도 상용 제품이 있으나 FRP 바닥판에 대한 충분한 연구가 이루어지지 않았으며, 그 시공 사례도 아직은 부족한 상황이다.

FRP는 일반적으로 인장 강도가 높고 그 강도에 도달하기 직전까지 선형 거동을 하는 특징이 있다. 일반적인 허용응력 설계에서 구조물은 사용하중 상태에서 탄성 선형 거동을 하는 것으로 가정하므로 같은 기준을 적용하면 강재와 비슷한 정도의 강도를 가지는 FRP 부재는 사용하중 상태에서 인장 강도보다 매우 작은 응력을 받게 되며, 따라서 선형 탄성 거동을 한다고 볼 수 있다. 조효남 등⁵⁾ FRP 바닥판의 최적 설계를 수행하는 조건에 fracture mechanics를 이용한 파괴한계 식을 적용하였으나 FRP의 파괴 메커니즘이 확실히 규명되지 않았으므로

탄성 한계 안에서의 좌굴 해석과 그에 따른 최적화 설계로 제한하는 것도 의미가 있다.

이번 연구에서는 기존 상용바닥판 자료^{6,7)} 및 기존 연구^{8,2,11)}를 바탕으로 FRP 바닥판의 기본 단면 형태를 정하고 설계 시 필요한 변수를 설정한 후, 이 변수의 값을 정하는 최적화를 수행하였다. 다양한 변수의 최적화 문제를 해결하기 위해 유전자 알고리즘¹⁰⁾을 도입하였다.

변수는 크게 기하학적 변수와 재료적 변수로 나눌 수 있다. 먼저 기하학적 변수의 개수를 설정하기 위해 Table 1에 기존 상용 바닥판의 특성을 정리하였다⁸⁾. 복합소재는 단일 물성을 갖기 힘들다는 특징이 있다. 즉 같은 재료를 사용하더라도 생산 공정에 따라서 방향성, 강도, 강성 등이 달라진다는 것이

Table 1. Comparison of GFRP Deck

Spec/Deck	Super deck	DuraSpan deck	EZ-Span deck	Asset deck
Slab thickness (mm)	203	127, 194	216	225
Weight(kN/m ²)	1.1	0.8~0.9	1	-
Deflection	L/530	L/340	L/950	-
Material	glass/vinylester	glass/polyester	glass/vinylester	glass/polyester
No. of Construction(future)	8	9(2)	1	개발중

[†] To whom correspondence should be addressed.
jpark@dankook.ac.kr

Table 2. Characteristics of GFRP

	Young Modulus (GPa)	Shear Modulus (GPa)	Strength (MPa)	Shear Strength (MPa)
Long direction	30	3.5	300	27
Normal direction	7		55	

다. 그러나 일반적으로 구조 재료로 많이 사용되는 GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer) 부재의 물성은 일정한 범위 내에 있으며, 이번 연구에서는 이 값을 상한 값으로 사용하였다⁸⁾(Table 2).

2. 최적화이론을 이용한 복합소재상판의 설계

일반적으로 최적 설계 방법은 두 가지로 나뉘어진다. 하나는 최적 해를 구하고자 하는 함수의 기울기를 이용하여 최적화를 수행하는 민감도기반 방법이고, 다른 방법은 미분 값을 이용하지 않고 일정한 규칙에 의하여 수치를 찾아가는 Heuristic Method로 유전자 알고리즘이 이러한 방법의 대표적 예이다.

민감도 기반 방법을 통한 최적설계 시, 변수가 하나만 존재할 경우 그 적용이 쉽다. 그러나 이러한 최적설계 방법의 문제점은 최적 해를 구해야 하는 함수 값 또는 기울기에 대한 정보를 알아야 최적 해를 구할 수 있다는 것이다.

본 연구에서는 설계조건을 만족하는 최소 단면의 바닥판을 설계하고자 하며 바닥판 단면적의 함수는 바닥판 두께, 플랜지 및 웨브의 두께 등 여러 변수들로 구성되어 있으나 이 함수의 기울기 정보

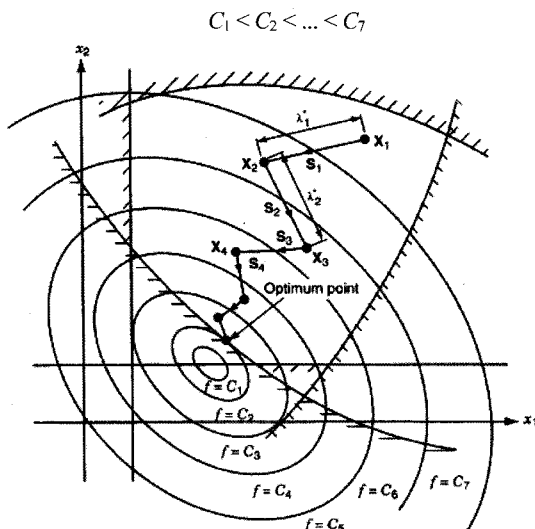


Fig. 1. Optimal design using iteration.

를 알기는 어려울 것이다. Fig. 1은 이러한 공간에서 반복에 의해 최적 해를 찾아가는 과정을 나타낸다. 이 그림에서 f 는 목적함수를 나타내고, X 는 각종 설계 변수들을 의미한다.

2.1. 바닥판의 설계 변수 및 범위설정

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. 또한 기존 상용 바닥판의 자료를 기초로 각 변수(Fig. 2)들의 범위를 설정하여 index화 하였으며 그 값들은 Table 3과 같다.

바닥판의 기하학적 설계 변수로 바닥판 상부두께(t_1), 바닥판 하부두께(t_2), 웹 두께(t_3), 웹 각도(α), 웹의 중심 간격(B), 바닥판 두께(H), 그리고 바닥판 형상(S)의 7개의 변수를 사용하였다.

7개의 변수를 2진수로 나타내기 위해 위와 같이 설계 범위 및 간격을 설정하였다. 상하부 플랜지 및 웨브의 두께는 0.1mm 간격으로 설정하였으며, 각도는 1° , 바닥판 두께 및 간격은 1mm로 설정하였다. 두께 및 간격의 경우 이보다 더 세밀하게 할 경우 제작 오차 범위내로 들어가게 되어 최적설계의 의미가 없어지기 때문이다. 설계 범위는 기존 상용 복합소재 바닥판들의 값 중 최대 값과 최소 값을 이용하여 결정하였다.

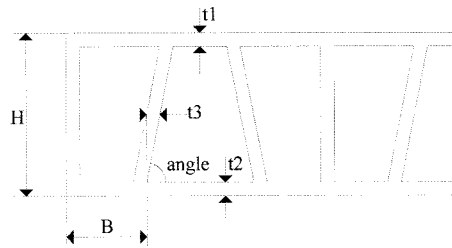
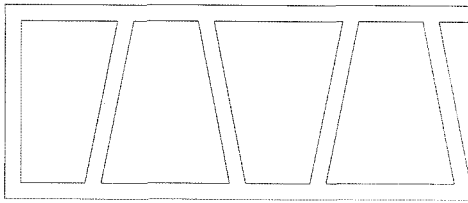


Fig. 2. Section Parameters of the GFRP deck.

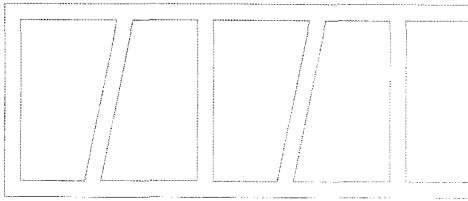
Table 3. Range of design parameters

Design parameters	var.	Design range	space	number of index
Upper deck depth	t_1	7.5 ~ 20.2(mm)	0.1mm	$128 = 2^7$
Bottom deck depth	t_2	7.5 ~ 20.2(mm)	0.1mm	$128 = 2^7$
Web thjckness	t_3	5 ~ 11.3(mm)	0.1mm	$64 = 2^6$
Web angle	α	$59 \sim 90^\circ$	1°	$32 = 2^5$
Deck Height	H	120 ~ 247(mm)	1mm	$128 = 2^7$
Web interval	B	100 ~ 227(mm)	1mm	$128 = 2^7$
Cross section shape	S	-	-	$4 = 2^2$



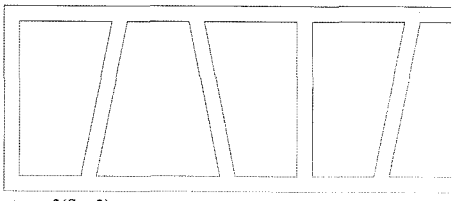
type 1(S=1)
고정된 수직 웹이 없는 경우
각도가 90°일 경우 모두 수직 웹으로 구성
예) ASSET

Fig. 3. Shape of Section Type 1.



type 2(S=2)
고정된 수직 웹 사이에 하나의 경사 웹
예) Duraspan

Fig. 4. Shape of Section Type 2.



type 3(S=3)
고정된 수직 웹 사이에 두 개의 경사 웹
예) 델타데크

Fig. 5. Shape of Section Type 3.

상용화된 바닥판들의 단면은 Fig. 3~5의 단면 모양 중 하나로 분류할 수 있다. 따라서 단면 형태에 대한 index는 3개이나 유전자 알고리즘에 대입하기 위해 dummy index를 한 개 도입하여 네 개로 결정하였다.

7개의 변수들로 구성되는 유전자의 길이는 41개 (상부 플랜지 두께 7, 하부 플랜지 두께 7, 웹 두께 6, 웹 각도 5, 바닥판 두께 7, 웹 간격 7, 단면 형상 2)가 된다. 여기서 유전자란 0과 1이 반복되어 나오는 숫자의 길이(2진수)로써 2진수로 표현하기 위해 각 변수들을 인덱스를 도입하여 2n으로 표현하였다.

2.2. 최적화를 위한 목적 함수

본 연구에서 최적화를 수행하기 위한 목적함수 f 는 설계하고자 하는 지간에 대한 바닥판의 단면적

(mm^2)이다. 목적함수는 Table 3에서 제시한 기하학적 설계 변수와 단위 길이 당 웹의 개수(n) 그리고 차량 진행방향 지간의 간격(L)로 구성되며 이는 다음 식 (1)과 같다.

$$f = n \times (h - t_1 - t_2) \times t_3 + L(t_1 + t_2) \quad (1)$$

2.3. 유전자 알고리즘의 적용

돌연변이 확률은 작게 할 경우 수렴은 빠르게 되나 전역 해를 구할 확률이 적어지게 되고, 너무 크게 할 경우 표준편차가 커지게 되어 만족하는 값에 가까운 값들을 구하기가 어려우므로 적절한 값을 사용해야 하며 보통은 3%를 사용한다. 본 연구에서는 돌연변이 확률에 변화를 주면서 그 결과를 비교하였고 결과를 검토하여 최적의 해를 구하면서 가장 빠르게 수렴하는 값을 이용하여 이후의 해석을 수행하였다.

유전자 알고리즘을 통하여 구한 여러 개의 설계 값들 중 주어진 설계 제약 조건을 만족하는 값들만 목적함수에 대입하게 된다. 이 목적함수 값이 최소가 되는 2개를 결정하여 다시 알고리즘에 대입하게 되고, 이렇게 하여 나온 최소인 2개의 목적함수 값이 같으면 수렴 값인지를 확인하여야 한다. 바로 전 단계에서 구한 값과 일정한 오차 내에 존재하게 되면 수렴한 것으로 결정한다.

초기 값은 어떠한 값을 넣어도 최적 해에 수렴하게 되지만 빠른 수렴을 위하여 상용 바닥판 중 두 개를 선택하여 1세대의 입력 값으로 결정하였다. 두 개의 상용 바닥판으로 최근 KCI에서 개발한 델타데크 바닥판과 기존에 많이 시공된 Duraspan을 사용하였다(Table 4).

2.4. 설계 조건

바닥판이 가져야 할 구조적 안정성, 사용성 등을 복합소재 바닥판을 설계하기 위한 설계 조건으로 정의하였다. 본 연구에서 바닥판을 설계하기 위해 사용한 설계 조건은 차량 진행 수직방향의 휨 응력에 대한 상하부 플랜지의 허용 응력, 웹의 국부좌굴에 대한 안정성, 압축력을 받는 플랜지의 국부좌굴에 대한 안정성, 국부 처짐에 대한 사용성 및 바닥판 최소 두께 조건 등이다.

Table 4. initial input for genetic algorithm

	t1(mm)	t2(mm)	t3(mm)	$\alpha(^{\circ})$	H(mm)	B(mm)	S
Delta Deck	20.0	12.0	8.0	80.0	200.0	111.0	3.0
Duraspan	16.8	16.8	11.2	75.0	194.6	101.0	2.0

Table 5. strength and allowable stress of GFRP flange

category	upper deck		lower deck	
	tensile strength	compressive strength	tensile strength	compressive strength
strength of material(MPa)	200	200	200	200
allowable stress(MPa)	80.0	66.7	80.0	66.7
factor of safety(F.S)	2.5	3.0	2.5	3.0

2.4.1. 차량 진행 수직방향(교량의 횡 방향)의 휨 응력에 대한 허용 응력 검토

바닥판의 경우 차량진행 방향에 대하여 1m 간격으로 횡 방향 설계를 하는 것이 보통이다. 따라서 교량의 횡 방향에 대하여 DB24하중에 의하여 걸리는 최대 정모멘트 및 부모멘트(M)를 계산하고 그 값에 대하여 단면의 최대 휨 응력(f)을 구한다. 이 값을 상하부 플랜지의 허용응력과 비교하여 안정성을 검토한다. 최대 휨 응력을 구하는 식은 (2)와 같고, 여기서 I 는 단면2차모멘트, y 는 단면 중심축에서 끝단까지의 거리이다. 이번 연구에서 사용한 GFRP 소재의 허용 응력은 Table 5²⁾와 같다.

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

따라서 휨 응력에 대하여 상부 플랜지의 압축력, 그리고 하부 플랜지의 인장력을 식 (2)에 의하여 구하고 이 응력이 허용응력 안에 들게 되는지를 판단한다. 상하부 플랜지의 허용응력에 대한 안전율은 위와 같이 인장에 대하여 2.5, 압축에 대하여 3.0을 사용하였다.

2.4.2. 웹의 횡 방향 국부좌굴에 대한 검토

웹의 국부좌굴의 경우 2.4.1 절의 상하부 플랜지

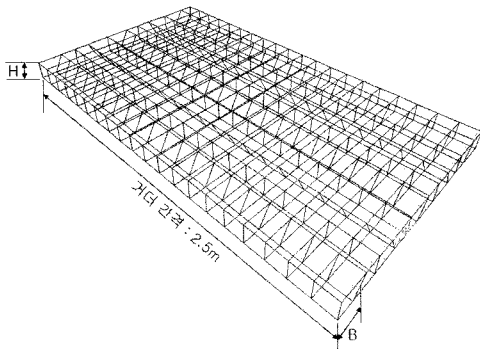


Fig. 6. 3D model of the GFRP deck.

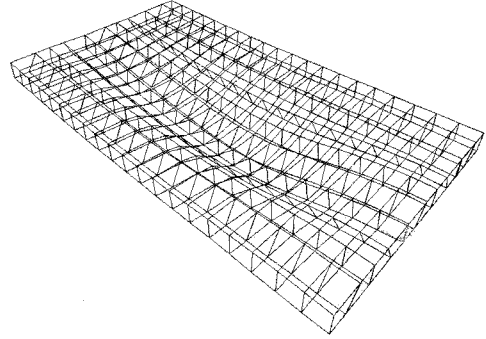


Fig. 7. Deformed shape of the GFRP deck.

허용응력치럼 수식을 이용하여 대입하기가 쉽지 않으므로 웹의 국부좌굴에 영향을 주는 모든 변수에 대한 3D모델링과 수치 해석(Fig. 6, 7)을 통하여 웹에 걸리는 응력을 계산하였다. 그리고 Euler좌굴 응력과 비교하여 웹의 국부좌굴에 대한 검토를 실행하였다. 모델링 및 해석 프로그램은 SAP2000⁴⁾을 사용하였다.

웹의 국부좌굴에 영향을 주는 변수는 웹의 각도, 웹의 간격, 바닥판의 두께이고, Euler 좌굴하중은 바닥판의 두께, 웹의 각도를 이용하여 계산 한다. 여러 경우에 대한 거동 해석을 수행하여 웹에 걸리는 하중을 계산하였고 그 값들에 대한 회귀 분석(regression analysis)을 통하여 만든 보간 곡선식을 유전자 알고리즘에 대입하였다. 웹 하중과 비교하는 Euler 좌굴 하중(σ_{cr})은 웹 부재의 유효좌굴길이(l), 탄성계수(E), 단면2차모멘트(I), 단면적(A)의 함수로 다음 식 (3)에 의해 구해진다(Fig. 8).

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

2.4.3. 압축력을 받는 플랜지의 국부좌굴

플랜지의 국부좌굴의 경우 휨 응력에 대해 압축력을 받는 플랜지는 상부 플랜지이다. 상부 플랜지

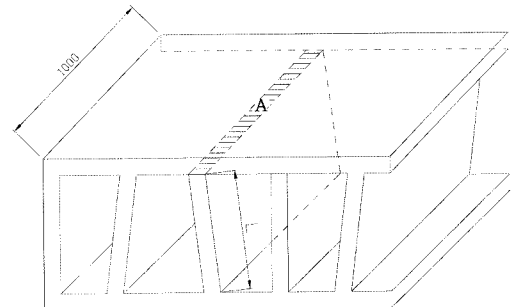


Fig. 8. local buckling length of the web.

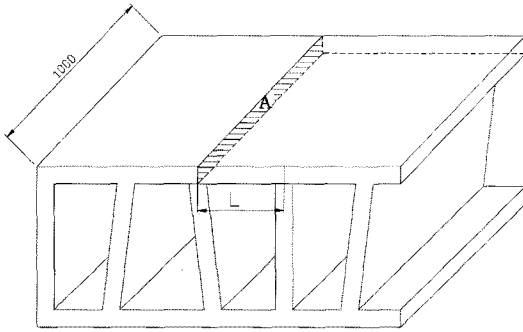


Fig. 9. local buckling length of the flange.

의 압축 응력 또한 웹의 응력을 구하는 방법과 같으며 회귀 분석을 통하여 얻은 곡선식을 유전자 알고리즘에 대입하였다. 좌굴 하중은 식 (3)으로 계산하며, 플랜지의 단면 특성을 사용한다(Fig. 9). 두 값들을 비교하여 Euler좌굴 하중보다 상부 플랜지의 휨 압축응력이 작게 되도록 설정하였다.

2.4.4. 국부 처짐

국부 처짐의 경우 허용 처짐은 AASHTO LRFD의 L/800를 사용하였고 플랜지의 양단을 고정 단으로 가정하여 처짐은 식 (4)로 계산하였다(Fig. 10).

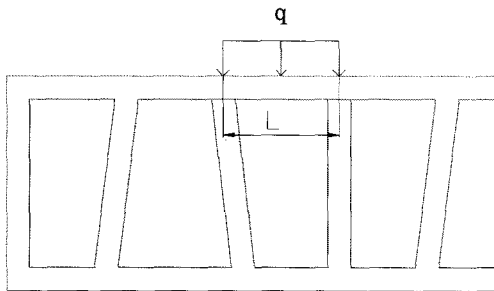


Fig. 10. load and interval for the calculation of local deflection.

$$\delta = \frac{qL^4}{384EI} \tag{4}$$

여기서, L : 웹 간격

I : 상부 플랜지의 단면 2차 모멘트

q : DB-24 뒷바퀴하중의 분포하중

2.4.5. 최적 설계

이상 바닥판의 설계를 위해 사용한 모든 조건들을 Table 6에 제시하였다.

복합소재의 경우 좌굴 등의 문제로 인장력보다 압축력에 취약하기 때문에 압축 플랜지의 안전율을 더욱 크게 결정하였으며, 처짐의 경우 안정성의 문제가 아니라 사용성의 문제이기 때문에 다른 설계 조건에 비해 작은 안전율을 갖게 된다. 각 설계 조건 및 안전율은 국내의 설계 기준³⁾과 건설교통부²⁾의 자료를 기초로 결정하였다. 이러한 조건들로부터 유전자 알고리즘을 통한 최적 해를 구한다. 이상의 과정을 순서도로 나타내면 Fig. 11과 같다.

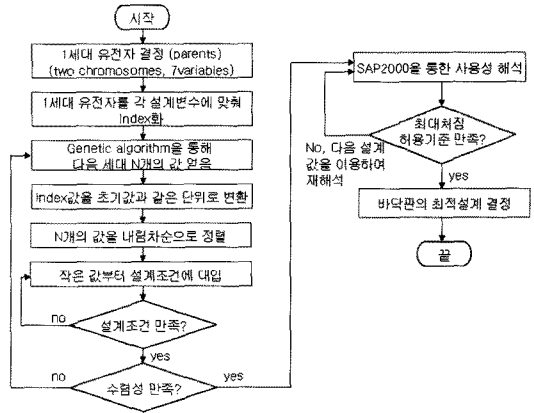


Fig. 11. flow chart for optimal design.

Table 6. Design requirement and factor of safety

category		design requirement	stress analysis	allowable limit	F.S.	
stability	allowable bending stress	comp. flange	$f^1 \leq f_a^1$	$f^1 = \frac{M}{I} y$	$f_a^1 = 66.7$	3
		tensile flange	$f^2 \leq f_a^2$	$f^2 = \frac{M}{I} y$	$f_a^2 = 80.0$	2.5
	local buckling of the web		$\sigma^3 \leq \frac{\sigma_{cr}^3}{2}$	σ^3 : regression analysis	$\sigma_{cr}^3 = \frac{\pi^2}{l^2} EI/A$	2
	local buckling of comp. flange		$\sigma^4 \leq \frac{\sigma_{cr}^4}{2}$	σ^4 : regression analysis 의해 구함	$\sigma_{cr}^4 = \frac{\pi^2}{l^2} EI/A$	2
serviceability	local deflection	$\delta^5 \leq \delta_a^5$	$\delta^5 = \frac{qL^4}{384EI}$	$\delta_a^5 = \frac{L}{800}$	1	

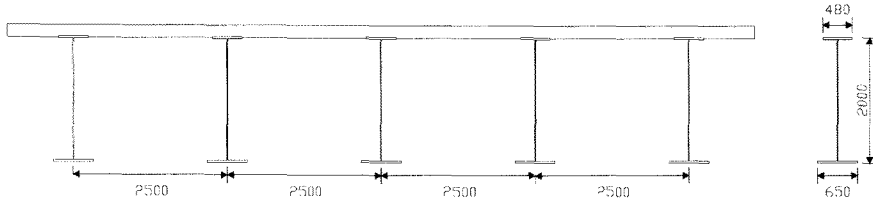


Fig. 12. cross section of the target bridge.

최적설계 대상 단면은 도로설계편람¹⁾의 설계예제로 제시된 지간 35m 및 2.5m간격 5개의 거터를 갖는 교량으로 단면도는 Fig. 12에 나와 있다.

3. 해석 결과

일반적으로 유전자 알고리즘을 사용한 연구의 경우 돌연변이 확률은 3~5%를 갖도록 한다. 돌연변이 확률이 너무 작을 경우 다변수의 전역 해를 구하기가 힘들어지고 확률이 너무 크게 되면 해가 수렴하기 어려워지는 경향이 있다. 본 연구에서는 돌연변이 확률을 변화시키며 수렴성을 확인하였다(Fig. 13). 돌연변이 확률이 30%가 넘을 경우 각 변수가 수렴을 하지 못하고 진동하는 현상을 보여준다. 그리고 1%의 돌연변이 확률을 갖게 한 경우 돌연변이 확률이 작기 때문에 전역 해가 아닌 지역 해로 최종 수렴 한다. 그래프 상으로 3%의 돌연변이 확률을 주었을 때 최적해로 가장 빨리 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

세 가지 단면에 대하여 각각 최적 설계한 결과 1번 단면이 최적의 값을 가진다(Fig. 14, Table 7). ASSET 제품과 유사한 형태이기는 하나, 웹의 각도 α 가 훨씬 큰 것을 알 수 있다.

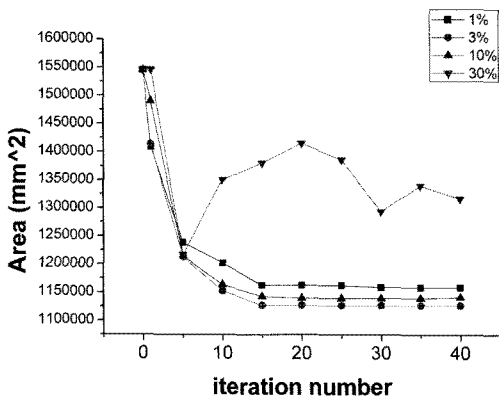


Fig. 13. convergence rate comparison on the variation of mutation ratio.

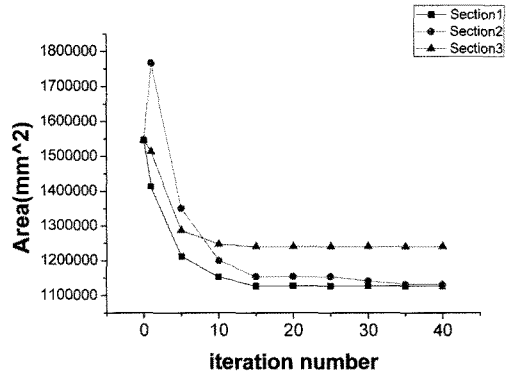


Fig. 14. comparison on the variation of cross section.

Table 7. Result of the optimum design

category	iteration	t1 (mm)	t2 (mm)	t3 (mm)	α (°)	H (mm)	B (mm)	S	f (mm ²)
Type 1	143	12.3	8.4	6.9	85.0	184.0	100.0	1	1119996
Type 2	117	12.3	8.4	7.0	83.0	184.0	100.0	2	1125728
Type 3	120	13.9	9.1	6.8	74.0	186.0	100.0	3	1194048

4. 결론

바닥판 최적 설계를 위한 다 변수 전역 최적 해를 구하기 위해 유전자 알고리즘을 도입하였다. 일반적인 유전자 알고리즘의 경우 여러 장점이 있으나 해가 수렴하기까지의 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 따라서 빠른 수렴성을 확보하기 위해 초기 입력 값을 기존 상용바닥판으로부터 결정하였고, 설계 범위 및 설계 간격을 설정하였다. 그리고 유전자 알고리즘의 돌연변이율 및 단면 형상에 따른 결과를 분석하였다. 이상의 연구내용을 정리하면 다음과 같다.

1) 돌연변이율은 유전자 알고리즘의 적용 방법에 따라 다른 값을 갖지만 본 연구에서는 3~5%일 때 전역 해를 가졌으며, 수렴 시간도 상대적으로 짧았다.

2) 단면 형상의 경우 목적함수(설계 단면적)를 최소로 만드는 형상은 Asset 바닥판과 같은 1번 형

식인 것을 확인하였다.

3) 최종 설계 단면인 Table 7의 1번 단면의 경우를 보면 델타데크, Duraspan 등의 상용 바닥판들에 비하여 바닥판의 높이(H)는 약 92%, 셀 하나의 폭(B)은 약 90~99%에 해당한다. 따라서 상용 바닥판에 비해서는 경제적인 설계이나, 상용 바닥판의 경우 교량의 설계 조건에 따라 그 형상을 바꾸기가 어려우므로 가장 불리한 경우에 대비하여 설계한 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 건설교통부, 도로설계편람, 2000.
- 2) 건설교통부 등, 신속시공 경량 고내구성 복합소재 교량 바닥판 산업화 연구보고서, 2004.
- 3) 건설교통부, 도로교 설계기준, 2005.
- 4) 남문희, 이관희, (엔지니어를 위한)SAP2000 구조해석, 서울, 2001.
- 5) 조효남, 최영민, 김희성, 김형열, 이종순, 인발성형된 FRP 바닥판의 형상 최적설계, 한국 전산구조공학회 논문집, 제17권, 제3호, pp. 319~332, 2004.
- 6) 이성우, 복합소재의 건설분야 이용 현황과 전망, 건설기술교육원 교육자료, 2004.
- 7) Bakis, C.E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesco, J.J., Machida, A., Rizkalla, S.H., Triantafillou, T.C., Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction, American Society of Civil Engineers, Pennsylvania State Univ, US. pp. 4~78, 2003.
- 8) Keller, Thomas, Recent all-composite and hybrid fibre-reinforced polymer bridges and buildings, Prog. Struct. Engng Mater., 3, pp. 132~140, 2001.
- 9) Keller, Thomas, Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich, Switzerland, 2003.
- 10) Melanie Mitchell, An introduction to genetic algorithms, MIT Press, 1997.
- 11) Roberto A. Lopes-Anido, Vistasp M. Karbhari, Fiber Reinforced Composites in Civil Infrastructure, ASCE, 2000.