

인발성형 FRP 바닥판의 물성 최적화

Material property optimization of Pultruded FRP bridge deck section

최영민* 조효남** 이종순*** 김희성****
Choi, Young-Min Cho, Hyo-Nam Lee, Jong-Soon Kim, Hee-Sung

ABSTRACT

The apparent advantages of FRP (fiber reinforced plastics) composites over the conventional structural materials may be attributed to their high specific strength and stiffness. Other affordable properties of FRPs including an excellent durability make them particularly attractive for the structures in severe service conditions. Therefore, the material and sectional properties of a FRP structural component should be designed to meet its specific requirements and service conditions. This paper is performed the material property optimization under optimum design of pultruded FRP bridge deck section. In the problem formulation, an objective function is selected to minimize the maximum R(strength ratio). The thickness of layers, volumes of fibers and matrix, fiber orientation, and stacking sequence of FRPs are used as the design variables. Strength ratio in the design code, material failure criteria and pultruded manufacture thickness are selected as the design constraints to enhance the material performance of FRP decks. From the results of the numerical investigation, we obtained the optimum deck section profile for conventional using object.

1. 서 론

교량의 기존 건설재료인 강재나 콘크리트를 사용한 바닥판은 부식과 열화문제와 같은 화학적 환경에 취약성을 지니고 있다. 또한 교량 바닥판은 그 기능에 비해 고정하중의 비중이 높은 구조재료이다. 이러한 문제점을 동시에 해결할 수 있는 새로운 재료로 내화학성 및 내구성이 뛰어난 복합재료를 활용하려는 연구가 국내·외적으로 활발히 진행되고 있다. 복합재료는 고비강도, 고비강성을 갖기 때문에 기존 재료의 큰 고정하중을 획기적으로 줄일 수 있고, 그에 따라 신속한 가설 및 교체도 가능하다.

하지만 복합재료를 사용한 바닥판 설계 시 강이나 콘크리트 바닥판이 갖는 외형으로 인한 직교 이방성뿐만 아니라 재료자체로 인한 직교 이방성의 특성을 고려해야만 하는 어려움이 있다. 이러한 재료 특성을 반영하여 합리적이며 체계적이면서도 경제적인 FRP 바닥판을 건설하기 위해서는 많은 설계제약조건(응력제약, 변위제약, 인발성형 제조법에 따른 단면제약 등)들을 모두 만족시키며, 건설경비가 가장 적게 되는 최적단면설계가 필요하다.

복합재료와 관련한 연구동향을 살펴보면 국외의 경우, Qiao⁽⁹⁾(1997)는 Winged-Box(WB) 단면에 대한 기하적 치수와 적층단면(profile)을 동시에 최적화하였다. 또한, Salem⁽¹⁰⁾(2000)은 FRP Precast 교량시스템의 비용을 최소화하는 최적설계를 수행한 바 있고, Zabinsky⁽¹¹⁾(1999)는 휨강성과 축강성을 최대로 할 수 있는 박막 복합재료 보에 대한 설계를 수행하였으나, 이는 단면의 기하적 형상의 최적화를 고려하지 않았다. 국내의 경우, 한국건설기술연구원⁽²⁾(2001~2003)에서 복합재료의 실험기준 및 활용지침에 관하여 연구를 수행했으며, 국민씨아이 및 이성우⁽⁴⁾(1998~2003)는 유리섬유를 이용한 GFRP 바닥판에 대한 연구 및 제품을 개발해 일부 교량에 적용하였다. 또한 배하록⁽³⁾(2001)이 복합적층 개단면 보의 최적설계를 수행한 바 있다. 이와 같이 국

* 정회원 · 한양대학교 토목환경공학과 BK연구교수

** 정회원 · 한양대학교 토목환경공학과 교수

*** 한양대학교 토목환경공학과 박사과정

**** 한양대학교 토목환경공학과 석사과정

내·외적으로 FRP 바닥판 단면의 최적설계에 대한 연구가 이론적으로는 일부 수행되었으나, 실용화 단계에는 시범적으로만 적용되고 있는 것을 확인할 수 있다.

어떤 구조체의 설계에 있어서 일반적으로 사용재료의 치수와 재료성질 그리고 설계하중이 필요하다. 복합 재료를 사용한 설계에서는 설계요소로 사용성, 가격, 재료의 혼합, 적층각, 적층순서를 들 수 있는데, 구조체의 설계목적에 맞게 구조적 기하형상이 결정되었다면 다음으로 물성의 결정이 초점이 될 것이다. 본 연구는 다단계 최적설계인 “인발성형된 FRP 바닥판 최적설계”⁽⁵⁾ 연구 중에 바닥판의 물성 최적화 모듈에 대한 보다 세부적이고 체계적인 연구의 일환으로 수행하였다.

2. FRP 바닥판의 응력과 강도 해석

2.1 인발성형 적층판

n 개의 층을 갖는 그림 1과 같은 적층판(Laminate plate)에서 각각의 층(Layer)은 matrix와 fiber로 구성되어 있다. 그리고 각각의 층 내에서는 모든 fiber가 동일한 방향으로 놓여있다. 그림 2에서 fiber가 놓인 방향(주방향 1)은 직각 방향(주방향 2)에 비해 훨씬 강한 역학적 성질을 가지게 된다. 그림 1에서 다양한 층들의 fiber는 각각 다른 방향으로 놓일 수 있으므로 이러한 층마다 다른 섬유방향들의 구성으로 인하여 적층판은 지정된 하중 방향과 조합에 대해 특별하게 설계될 수 있다.

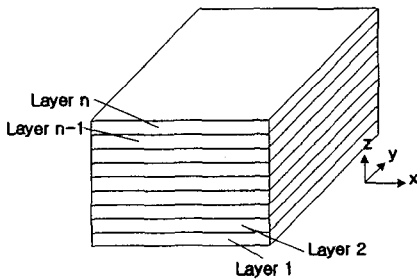


그림 1. 적층판(Laminate plate)

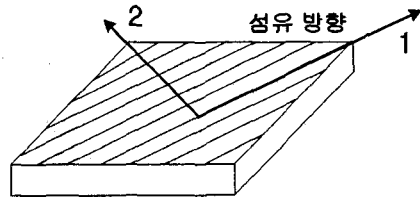


그림 2. 복합재료 층(Composite layer)

2.2 Laminar의 응력-변형률 관계

복합재료 바닥판은 판이나 쉘의 형태로 사용된다. 판의 두께가 다른 치수에 비해 작을 때 두께 방향 응력은 $\sigma_3=0$ 으로 가정하여 평면응력 상태로 간주할 수 있다. 또한 층의 두께는 매우 얇기 때문에 σ_4, σ_5 이 무시될 수 있으므로 식 (1)과 같은 탄성 방정식을 구성할 수 있다. 그리고 행렬 역변환을 통하여 3×3 강성행렬 $[Q]$ 를 갖는 식 (2)를 얻을 수 있다. 여기서 첨자 6은 해당 요소가 본래 6×6 행렬의 구성이었음을 나타낸다.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_6 \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서, $Q_{11} = E_1/\Delta$, $Q_{12} = Q_{21} = \nu_{12}E_2/\Delta$, $Q_{22} = E_2/\Delta$, $Q_{66} = G_{12}$, $\Delta = 1 - \nu_{12}\nu_{21}$

2.3 좌표변환 행렬 및 환원강성 행렬

적층판내의 층마다의 주방향이 다를 수 있으므로 발생응력이나 변형률의 좌표변환 행렬이 필요하다. 그림 3에서 x 축과 y 축은 전체 좌표계를 나타내고, 1축과 2축은 적층판의 각 층에서의 주 방향들을 나타낸다. 변형

들의 정의와 chain rule에 의해 다음과 같은 좌표변환 행렬 식 (3)을 얻을 수 있다.

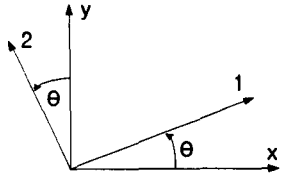


그림 3. 좌표 변환

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, $m = \cos \theta$, $n = \sin \theta$

적층판의 해석을 단순화하기 위해 전체 좌표에서의 각 lamina의 응력-변형률 관계를 이용하여 식 (4)와 같은 방정식을 세운다. 그리고 좌표변환 행렬을 이용하여 식 (4)의 환원강성 행렬 $[\bar{Q}]$ 의 구성을 식 (5)와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (4) \quad [\bar{Q}] = [T]^{-1} [Q] [T]^{-T} \quad (5)$$

2.4 적층판(Laminate plate)의 강성

lamina의 얇은 두께를 고려하면 판으로 간주할 수 있다. 따라서 Kirchhof의 고전판 이론을 사용하여 평면 내 변형률은 두께방향에 대한 선형적인 관계를 갖는 식 (6)과 같은 관계로 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + z \begin{pmatrix} \chi_x \\ \chi_y \\ \chi_{xy} \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서, $\epsilon_x^0, \epsilon_y^0, \gamma_{xy}^0$ 는 중간 평면에서의 변형률로 x, y 의 함수, $\chi_x, \chi_y, \chi_{xy}$ 는 곡률로 x, y 의 함수

두 변수 x, y 의 함수로 변위, 응력, 변형률을 구한다. 그림 4의 힘과 모멘트를 얻기 위해 그림 5에서 적층판의 두께방향에 대해 응력을 적분하면 식 (7)과 같이 표현할 수 있다. 그림 4에서 $N_x, N_y, N_{xy}, M_x, M_y, M_{xy}$ 는 판 요소의 경계에 따라 단위 길이당의 축력, 전단력, 모멘트를 나타내고, 그림 5에서 첨자 k 는 바닥에서부터의 층의 순번, n 은 층의 개수를 나타낸다. 또한 중립축에 $z=0$ 로 놓은 것은 적층판 해석의 단순화를 위한 것이다.

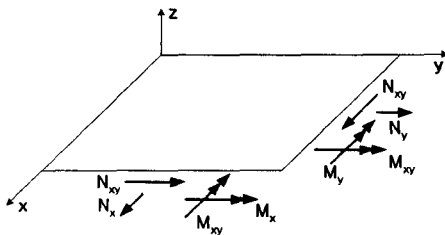


그림 4. 판의 힘과 모멘트

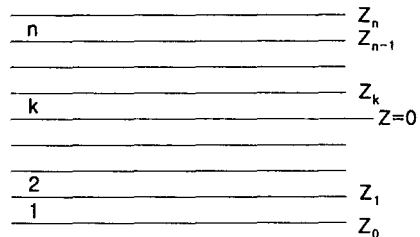


그림 5. n개 층의 기하

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_{k+1}} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix}^k dz, \quad \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_{k+1}} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix}^k z dz \quad (7)$$

식 (4), (5), (6)을 식 (7)에 대입하여 정리하면 적층판 전체에 대한 강성 방정식 (8)을 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} N \\ M \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon^0 \\ \chi^0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

여기서, A, B, D 는 각각 3×3 행렬

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \quad i, j = 1, 2, 6 \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad i, j = 1, 2, 6 \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad i, j = 1, 2, 6 \end{aligned}$$

그림 5와 같은 대칭 적층판에서 등가 탄성계수 및 프아송 비, $E_x, E_y, G_{xy}, \nu_{xy}$ 가 정의될 수 있다. 이러한 물성은 평면내 하중을 받는 실제 적층판과 같이 거동하는 가상적이고 등가적인 직교이방성의 판의 강성을 나타내는 것이다. 식 (7)에 표현된 N, M 이 단위길이당의 힘입을 고려하고 응력 변형을 관계를 이용하면 식 (9)와 같이 물성을 구할 수 있다.

$$E_x = \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{tA_{22}}, \quad E_y = \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{tA_{11}}, \quad G_{xy} = \frac{A_{66}}{t}, \quad \nu_{xy} = \frac{A_{12}}{A_{22}} \quad (9)$$

2.5 Lamina에서의 응력 및 강도비 R

적층판의 등가적인 응력은 식 (8)의 역관계를 이용하면 쉽게 구할 수 있다. 하지만 초점이 되는 적층된 Lamina에서의 응력은 각각의 주 방향이 다르므로 적층판의 등가변형률로(ϵ^0, χ)부터 식 (6)을 이용하여 각 층의 전체좌표에 대한 변형률을 구한 다음 좌표변환과정을 통해 각 층의 주 방향 좌표에 대한 변형률을 구한 후, 식 (2)의 관계를 이용하여 응력을 구해야 한다. 또는 각 층의 전체좌표에 대한 변형률에서 전체좌표에 대한 응력을 구하고 이를 좌표변환하여 각 층의 주 방향에 좌표에 대한 응력으로 구해도 된다. 전자의 방법대로 이를 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{ \sigma_1^k \ \sigma_2^k \ \sigma_6^k \}^T = T^{(k)} \bar{Q}^{(k)} (\epsilon^0 - z \chi) \quad (10)$$

복합재료의 파괴에 대한 다양한 관점의 많은 주제가 있고 복합재료의 파괴에 대한 연구 시에 이러한 많은 매커니즘을 고려해야만 한다. 그 중 폴리머 매트릭스(Polymer-matrix)의 파괴에 대해 가장 일반적으로 사용되는 파괴기준으로 최대응력 기준(Maximum stress criteria)과 Tsai-Wu 기준이 있다. 본 연구에서는 적층판의 파괴에 대해 실험결과와 가장 유사한 것으로 알려진 Tsai-Wu 기준($\sum_j F_{ij} \sigma_i \sigma_j + \sum_j F_j \sigma_j \geq 1$: 파괴)을 적용하였다. 여기서, F_{ij} 와 F_j 는 상수로서 전단변형의 대칭성질(symmetric of shear)과 각각의 조건(각각의 응력이 강도에 이르렀을 때를 고려함)을 기준 식에 적용하여 F_{ij} 와 F_j 연립방정식으로부터 결정될 수 있다. 이를 나타내면 식 (11)과 같다. F_{xy} 에 대해서는 실험식을 사용하였다.

$$F_x = 1/X - 1/X', \quad F_y = 1/Y - 1/Y', \quad F_{xx} = 1/XX', \quad F_{yy} = 1/YY', \quad F_{ss} = 1/S^2 \quad (11)$$

$$F_{xs} = F_{ys} = F_s = 0 \quad (\because \text{전단변형의 대칭성}), \quad F_{xy} = -\frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{XX'YY'}} \quad (\text{실험식})$$

여기서, X, X', Y, Y' 는 각각 섬유방향 인장/압축강도, 섬유직각방향 인장/압축강도

앞에서 살펴본 내용은 계산의 편의성을 위해 강도비, $R (= \sigma_i / (\sigma_i)_{allowable})$ 을 사용하여 나타낼 수 있다. 먼저, $\bar{R} (= 1/R)$ 을 이용하여 Tsai-Wu 식을 \bar{R} 에 관한 2차 방정식으로 나타내고 해를 구한다. 이것을 다시 R 로 나타내면 식 (12)과 같다.

$$R = \frac{1}{2} (b + \sqrt{b^2 + 4a}) \begin{cases} < 1 \text{ 안전} \\ \geq 1 \text{ 파괴} \end{cases} \quad \text{여기서, } a = \sum_i \sum_j F_{ij} \sigma_i \sigma_j, \quad b = \sum_i F_i \sigma_i \quad (12)$$

3. 최적설계 문제의 정식화

적층판을 제작하는 방법에는 여러 가지가 있으나 교량 바닥판과 같은 건설구조물의 경우 대량 생산이 요구되므로 이에 적합한 인발성형법(Pultrusion)을 적용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다. 본 연구도 모태인 “인발성형된 FRP 바닥판의 최적설계”와 같이 인발성형된 적층판에 대한 물성 최적화 연구를 수행하였다. 바닥판 물성 최적화의 문제 정식화도 이러한 제작방법과 일반적인 복합재료 구조체의 설계를 고려하여 정식화하였다.

3.1. 설계변수

복합재료 적층판에는 모든 층이 같은 적층각으로만 이루어져 있는 동일 적층판과 판의 중간면을 기준으로 양쪽의 두께 및 배향각의 대칭성의 유무에 따라 대칭 적층판, 역대칭 적층판, 비대칭 적층판 등으로 크게 4가지로 분류된다. 그 중에서 대칭 적층판은 중간면을 중심으로 기하학적 대칭 및 재료의 물성 값이 대칭이 되는 적층판으로써 복합재료를 성형할 때 열변형에 의한 비틀림을 방지할 수 있고, 앞에서도 언급한 응력해석과 구조설계가 용이하다. 그러므로 특별한 경우가 아니면 대부분 대칭 적층판을 많이 사용한다. 따라서 본 연구에서도 그러한 사항을 고려하였다. 또한 바닥판의 플랜지에서 층마다 일방향 로빙(Unidirectional Roving)이나 무방향성 매트(Random Mat or Continuous Strand Mat)가 사용되는데 일방향 로빙 사이에 무방향성 매트가 항상 들어가도록 고려하였다. 물론 식 (6)에서 두께방향에 대한 층 간의 변형률이 선형을 유지한다는 가정을 했지만 층 간의 연속성을 고려하여 안전 측으로 설계하기 위한 것이다.

본 연구에서는 적층판의 전체 두께는 결정된 상태에서 판의 구성을 결정해야하므로 적층순서, 전체두께에 대한 각 층의 두께 비(tr_k), 각 층의 각(θ_k), 섬유함유율(v_f)을 설계변수로 선정하였다.

3.2. 목적함수

본 연구에서는 적층판 내에 발생할 수 있는 파괴를 고려하여, 파괴의 정도를 앞에서 언급한 강도비로 보고 발생하는 최대의 강도비에 대해 그 값을 최소화하는 것을 목적으로 하였다. 이는 파괴를 최소화 하는 개념으로 섬유함유율이 커지면 강도비가 작아지겠지만 섬유함유율을 어떤 범위 내의 값으로 본다면 그 안에서 파괴의 가능성을 줄이는 방법을 뜻한다.

3.3. 제약조건

FRP 바닥판의 물성최적화에 대한 제약조건으로 『Structural Design of Polymer Composites (EUROCOMP Design Code and Handbook, 1996)』⁽¹²⁾, 『Introduction to Composite Material

Design (Ever J. Babero, 1999)』^⑧등을 기초로 하여 재료파괴, 처짐과 같은 제약조건과 인발성형 제작기술 등을 고려한 제약조건을 고려하였다. 제약조건을 표 1과 같이 나타내었다.

표 1. 인발성형 제작기술 및 물성 최적화를 위한 제약조건

설계제약조건	기호 설명	
인발성형 제작두께	$G_1 = t_{min}/t - 1 \leq 0$ $G_2 = 1 - t_{max}/t \leq 0$	t_{max} = 적층 플라이의 최대 두께 t_{min} = 적층 플라이의 최소 두께
적층수	$G_3 = n/n_{max} - 1 \leq 0$	n : 적층수, n_{max} : 최대 적층수 (미국 $n_{max} \leq 9$)
섬유함유율	$G_4 = V_{f_{min}}/V_f - 1 \leq 0$ $G_5 = V_f/V_{f_{max}} - 1 \leq 0$	$V_{f_{min}}$: 섬유 최소함유율(≥ 0.10) $V_{f_{max}}$: 섬유 최대함유율(≤ 0.65)
FPF (First Ply Failure)	$G_6 = K_{SF} \frac{P}{P_{FPF}} - 1 \leq 0$	K_{SF} : 안전율, P : 작용하중 P_{FPF} : ply가 최초 파괴되는 하중
적층방향각	$G_7 = \theta/90^\circ - 1 \leq 0$ $G_8 = 1 - 90^\circ/\theta \leq 0$	θ : 적층방향각 ($-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)

4. FRP 바닥판 물성의 최적화 기법 및 알고리즘

4.1 최적설계 기법

본 연구에서 사용한 최적화 기법은 최적해의 신뢰성면에서 우수한 기법중에 하나인 ALM (Augmented Lagrange Multiplier) 기법을 사용하였다. 제약조건을 무제약 조건화하여 최적해를 구하는 방법에는 직접법과 간접법이 있는데, 간접법은 제약조건을 목적함수에 포함시킨 새로운 목적함수(의사 목적함수)를 생성하여 최적해를 찾는 방법으로 ALM은 간접법에 속한다. 또한 단일변수함수의 최적해 탐사는 황금분할법을 이용하였다.

4.2 최적설계 알고리즘

기존 논문 “인발성형 FRP 바닥판의 최적설계”에서 사용한 그림 6의 알고리즘에서 물성 최적화 부분을 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 적층판의 강성을 구한 후 적층판의 소요 물성을 검토하고 응력을 검토하는 순으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 그림 7과 같은 알고리즘을 국부최적화 기법들을 부프로그램으로 갖고 있는 ADS^⑦(Automated Design Synthesis)를 이용하여 수행하였다.

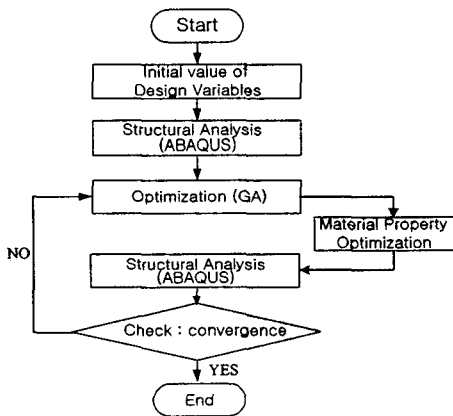


그림 6. 최적설계 알고리즘 흐름도

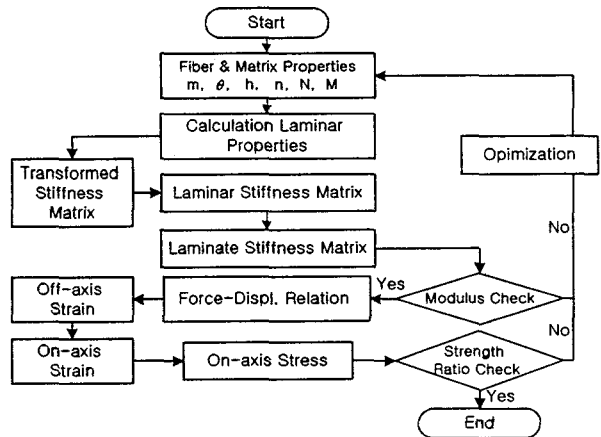


그림 7. 재료구성의 최적설계 흐름도

5. 적용에

전 연구인 “인발성형된 FRP 바닥판 최적설계”에서 1단계 최적화(단면의 기하적 최적화)에서 얻은 단면을 기준으로 하여 각각의 상·하부 플랜지와 복부판에 대하여 물성 최적화를 수행하였다. 대상교량의 형식은 건설교통부에서 발간한 도로설계편람(건설교통부, 2000)의 설계예제로 제시된 교장이 40m, 지점간 거리가 35m, 총 교폭이 12.14m, 2.5m의 간격으로 5개의 강플레이트 거더를 갖는 단순지지 강판형교에 대해 기존의 콘크리트 바닥판을 복합재료 바닥판으로 대체하여 가정된 것이었으며, 최적화 결과 그림 8과 같은 바닥판 단면을 얻었다. 본 연구의 물성 최적화를 수행한 결과 표 2와 그림 12과 같은 결과를 얻었으며 표 2에서 소요물성은 1단계 최적화의 결과이다. 최적화의 수렴도는 그림 9과 같이 나타났으며 수렴성이 우수한 것으로 판단된다. 또한 목적함수와 제약조건에 가장 지배적인 설계변수를 알아보기 위해 목적함수에 대한 섬유함유율과 무방향성 매트 두께비에 대하여 민감도 분석을 수행하여 상부 플랜지와 복부판에 대하여 그림 10과 11로 나타내었다. 그 결과 무방향성 매트의 두께비율에 민감한 것으로 나타났다.

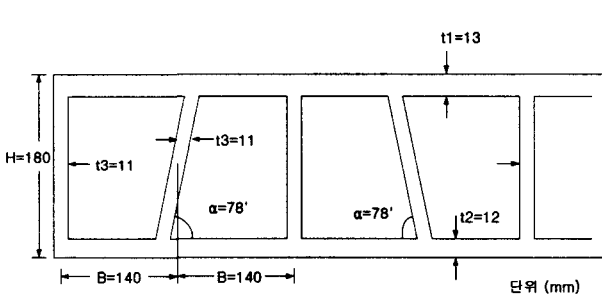


그림 8. 기하적 형상 최적단면

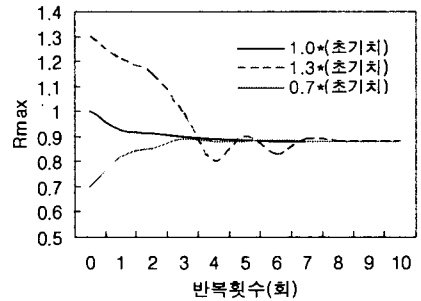


그림 9. 목적함수 수렴이력

표 2. 최적단면에서의 물성 최적화 결과

물성	부재	플랜지 (상부 : 13mm)		플랜지 (하부 : 12mm)		복부판 (11mm)	
		최적값	소요물성	최적값	소요물성	최적값	소요물성
탄성계수(GPa)	E_{11}	25.098	25.098	25.098	25.098	20.374	20.374
	E_{22}	16.671	15.998	16.192	15.998	13.721	11.506
프와송비	ν_{12}	0.270	0.255	0.255	0.255	0.26	0.255
전단계수(GPa)	G_{12}, G_{13}	5.169	3.908	4.692	3.908	8.702	4.892
섬유함유율(%)	V_f	52.99	-	51.11	-	57.19	-
강도비($R \leq 1.0$)	R	0.828	-	0.887	-	0.800	-

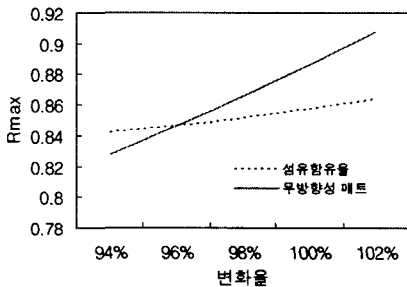


그림 10. 설계변수 민감도(상부 플랜지)

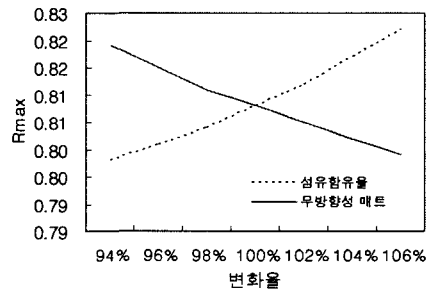


그림 11. 설계변수 민감도(복부판)

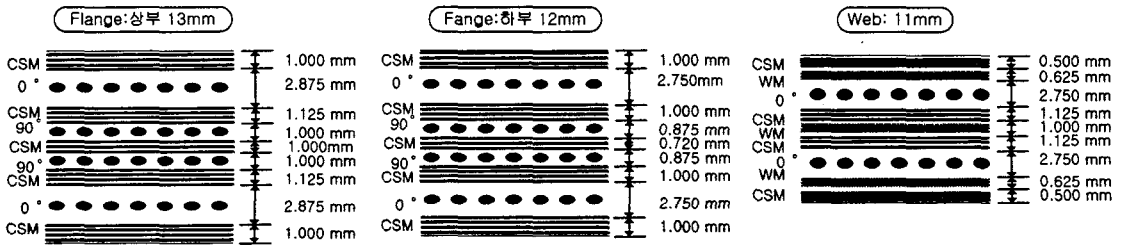


그림 12. 적층단면의 최적설계

6. 결 론

본 연구는 인발성형 FRP 바닥판의 물성을 최적화하기 위한 알고리즘을 개발하였고 적용 예를 통해 최적의 적층판 구성을 결정하였다. 그리고 적층판 구성에 따른 해석을 통하여 다음과 같은 결론들을 얻었다.

- 1) 일반적으로 하중 방향에 따라 일방향 로빙 층에서 강도비가 크게 나타났다.
- 2) 섬유함유율이 증가한다고 해서 강도비가 감소하는 것은 아니다. 적절한 배치가 되어야만 강도비를 감소시킬 수 있다.
- 3) 무방향성 매트가 일방향 로빙 사이에 항상 배치되는 상태에서 적층판의 중앙부 무방향성 매트의 비율이 작아지면 포아슨 비 소요물성을 만족하기 어렵다.
- 4) 일정량의 일방향 로빙이 해당 방향의 소요 물성을 충족시킨 상태에서 무방향성 매트의 양이 섬유함유율 보다 목적함수의 변화에 더 민감한 요소로 나타났다. 이는 적층판 내에 구성 매트의 두께비 변화가 가장 민감한 요소임을 뜻한다.

참고문헌

1. 도로설계편람 (2000), 건설교통부
2. 장수명 합리화 바닥판 개발(II) (2002), 한국건설기술연구원
3. 배하록 (2001), "복합 적층 개단면 보의 최적설계", 인하대학교 석사학위
4. 이성우 (2002), "인발성형 복합소재 교량 바닥판의 설계 및 제작", 전산구조공학회 2002년 봄 학술발표회 논문집
5. 최영민, 조효남(2003), "인발성형된 FRP 바닥판의 최적설계" 2003년 대한토목학회 추계학술발표회
6. Garret N. Vanderplaats(1984), "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design", McGraw-Hill.
7. Garret N. Vanderplaats(1985), "ADS: A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis", Engineering Design Optimization, Inc., Santa Babara, California.
8. Ever J. Barbero(1998), "INTRODUCTION TO COMPOSITE MATERIAL DESIGN" Taylor & Francis
9. Pizhong Qiao, "Analysis and Design Optimization of Fiber-Reinforced Plastic(FRP) Structural Beam", Dissertation, West Virginia University, 1997
10. Salem M. A. (2000). *Optimum design of precast bridge systems prestressed with carbon fiber reinforcement polymers*. MS thesis, Concordia University.
11. Zabinsky, Z. B., Tuttle, M. E., Savic, V., "Optimization of Composite I-beams", Proceedings of the 1999 NSF Design and Manufacturing Grantees Conference, LA, California, January 1999
12. European Structural Polymeric Composites Group (EUROCOM). (1996). Structural design of polymer composites-EUROCOMP design code and handbook. Edited by Clarke, J.L., E & FN Spon, UK.