힘을 받는 조립형 FRP 박스부재의 최적단면검토

Optimum Design of Modular FRP Box Member to Bending Moment

곽계환^{*†} · 김경숙^{**} · 김호선^{***}

Kwak, Kae Hwan · Kim, Kyung Suk · Kim, Ho Sun

ABSTRACT

Fiber Reinforced Polymer (FRP)s have various advantages for construction material in that they are noncorrosive and very strong. FRPs are economical and effective for management and maintenance when applied to footbridge, beam or deck of the bridge, girder, and marine structure. For safety, optimal design for standard modulation of the cross section is necessary. Conditions of optimum are possibilities of domestic production, modular assembly, and structure materials cast in compressed area.

Keywords: Design optimization; finite element analysis of FRP; FRP box member

1. 서 론

FRP (Fiber Reinforced Polymer)는 비부식이며 고강도 재료이기에 건설부재의 재료로 활용하는데 매력 있어 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이중에서 인도교, 건축구조물의 보나 바닥판, 교량의 거더, 그리고 해양구조물 등에 적용함으로써 경제 적이며 유지관리에 효율성을 높이는 데 적격이라고 사료된다. 그래서 소요단면의 규격화를 모듈화하는 단면을 제안하였으며, 단 면을 최적화 설계함으로써 안전성의 확보를 본 연구의 목표로 한다.

건설구조물 중 가장 중요한 부분인 거더에 대한 적용연구가 전무한 실정에서 Kwak et al. (2008)은 국내 제작 가능한 FRP 모듈형 박스부재를 개발하여 구조물의 휨부재에 적용하고자 FRP 모듈형 박스단면을 설계, 제작하여 휨실험을 실시하였다. 또한, Kwak et al. (2008)은 상부에 콘크리트를 충전한 FRP 박스부 재의 휨 및 전단실험을 수행하여 그 성능을 입증하였으며, 이로써 FRP를 보수·보강재 및 철근의 대체가 아닌 구조물 자체로서 FRP의 적용 가능성을 검증하였다.

휨 부재에 적용할 FRP 모듈형 박스부재의 최초 설계 시 다

음 여건을 고려하였다. 첫 번째, 국내에서 생산 가능한 단면 (소형단면)이어야 되며, 두 번째, 소형단면으로부터 대형단면으로 조립이 용이하도록 요철을 도입하였다. 세 번째, 경제적인 단면 (내부 중공 처리)과 네 번째, 단일 모듈 시 압축부에 구조부재를 충전 할 수 있는 단면, 그리고 마지막으로 구조적 취약부인 웹과 플랜지가 만나는 부분에 요철을 배열하여 박스 부재를 설계하였다. 최초 제안된 단면은 수심 200 m에서의 수압을 견딜 수 있는 갑오징어 뼈의 미세구조와 그 생미네랄화 (biomineralization) 과정에서 아이디어를 얻은 (Birchall et al., 1983; Mann, 1989) 단면으로서, Fig. 1과 같다. 아래와 같은 단면의 FRP 박스 부재를 실 구조물에 적용하기에 앞서 이상적인 단면여부의

Fig. 1 A design drawing of FRP box member

* 원광대학교 토목환경공학과

** 전북대학교 분자생물학과

*** 원광대학교 대학원 토목환경공학과

† Corresponding author Tel.: +82-63-850-6720

Fax: +82-0505-850-6867

E-mail: kkh6720@wku.ac.kr

2011년 2월 28일 투고

2011년 5월 17일 심사완료

2011년 5월 18일 게재확정

검토가 필요하므로, 이를 본 연구에서 수행하고자 유한요소 해석을 이용하여 힘을 받는 FRP 박스부재의 최적단면을 검토하였다.

II. 최적설계 기본이론

FRP 부재의 제작에 있어 단면의 크기를 결정하는 것은 제작업체의 규모이다. 즉, 제작업체가 대형화 될수록 섬유 공급하는 Roving공간을 확보할 수 있고 이는 대형 단면의 생산이 가능하게 된다 (Fig. 2). 그러나 국내 업체의 규모는 제한적이므로 최적화 설계 시 제약조건으로 단면의 치수를 10 % 내외로 결정하였다.

힘 부재의 파괴는 최대 응력이 좌우하게 되며 FRP 박스부재 역시 최대응력이 최소가 될 수 있는 단면과 변형이 최소가 될 수 있는 단면으로 결정하고자 하였다. 기본 설계 내용 중 대형화 모듈 조립을 위한 요철은 최적화 수행 대상에서 제외하였으며, FRP 박스부재의 상부 충전효과를 확인 하였으므로 (Kwak et al., 2008) 상부에 충전이 된 상태로 해석을 수행하였다.

충진형 FRP 힘 부재는 압축파괴에 비하여 인장파괴가 지배적이므로 (Kim, 2009), 본 연구에서는 이와 같은 기본 설계개념을 수렴하고 목적함수인 응력과 변형이 최소가 되는 인장부의 단면을 결정하고자 하였다. 즉 부피 (V_{FRP})의 변화를 제한하고 최대 응력 (σ_{max})과 최대 변형률 (ϵ_{max})이 최소화 되도록, 파라미터 1 (Parameter 1, 이하 P1)은 하단부의 중공 높이 (Down Height; 이하 D_H)와 파라미터 2 (Parameter 2, 이하 P2)는 하단부의 중공 폭 (Down Breadth; 이하 D_B), 파라미터 3 (Parameter 3, 이하 P3)은 좌측 하단부 (Left Down; 이하 L_D), 파라미터 4 (Parameter 4, 이하 P4)는 우측 하단부(Right Down; 이하 R_D), 마지막으로 파라미터 5 (Parameter 5, 이하 P5)는 플랜지 하단부 (Flange Down, 이하 F_D)를 결정하는 문제로 정의하였다. 이를 바탕으로 최적설계문제를 정식화하면 다음과 같다.

Fig. 2 Pultruded course of FRP box member

$$\begin{aligned} \text{Find} & \quad \{D_H, D_B, L_D, R_D, H_D\} \\ \text{Minimizing} & \quad \{V_{FRP}\} \\ \text{subject to} & \quad \sigma_{max} \leq \sigma_0 \\ & \quad \epsilon_{max} \leq \epsilon_0 \\ & \quad 117.0 \text{ mm} \leq D_H \leq 143.0 \text{ mm} \\ & \quad 112.5 \text{ mm} \leq D_B \leq 137.5 \text{ mm} \\ & \quad 9.0 \text{ mm} \leq L_D \leq 11.0 \text{ mm} \\ & \quad 9.0 \text{ mm} \leq R_D \leq 11.0 \text{ mm} \\ & \quad 11.7 \text{ mm} \leq H_D \leq 14.3 \text{ mm} \end{aligned}$$

위와 같이 제한된 부피에서 응력과 변형이 최소가 되는 하부 인장부 두께를 기존 두께의 10 % 내외의 범위에서 최적설계를 수행하였다. 최적화는 ANSYS Workbench의 실험계획법 (Design of Experiment) 중 반응표면 (Response Surface)을 이용한 Goal-Driven Optimization (GDO)를 이용하였다.

1. 실험계획법

실험계획법이란 영국의 수학자 R.A.피셔에 의해 제안되어, 실험에 대한 계획방법을 의미하는 것으로, 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라고 정의할 수 있다. 따라서 하나의 실험계획법을 짰다고 하는 것은 해결하고자 하는 문제에 대하여 인자를 선정하고, 실험방법을 택하여 실험순서를 정하고, 실험 후 얻어지는 데이터에 대한 최적분석방법을 선택하였다는 의미이다 (Park, 2005).

이 실험계획법은 농산물 품질의 양부나 비료 효과의 차이 등 농업시험의 계획과 그 자료에 대한 해석에서부터 발전하였고, 오늘날 생물학·의약학·공학·심리학 등 과 추측통계학이나 공장 실험 등에 널리 이용되고 있다.

자연과학 뿐 만 아니라 사회과학에 있어서도 실험은 중요한 연구수단의 하나이지만, 종래에는 실험계획에 있어 특히 고려되는 하나의 조건만을 변화시키고, 실측치에 영향을 미치는 그 밖의 많은 요소를 일정하게 유지함으로써 고찰해야 할 인자의 효과를 측정하는 방법이 취해져 왔다. 이와 같은 실험계획이 가능한 것은 극히 제한된 문제뿐이었다. 이를 극복하기 위하여 고안된 것이 실험계획법이다. 피셔는 농사시험에 있어서 시험지를 여러 개의 균일화된 지구로 분할하고, 그 지구를 다시 세분하여 그들 각 소지구에 어떤 품종을 심을 것인가, 또 어떤 비료를 쓸 것인가를 무작위로 결정하고, 각 지구에 같은 방식의 실험을 충분하게 되풀이하는 방법을 채용하였다 (Song, 2006).

2. 반응표면법

반응표면은 여러 개의 설계변수 $x_1, x_2, \dots, x_k$ 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수 y 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 함수관계를 적절한 수학식으로 표현한 것을 말한다. 실제로는 이러한 함수 관계가 존재하는 경우는 극히 드물며, 설계변수와 반응변수와의 관계를 정확하게 표현하는 것은 거의 불가능하다. 또한 실제로 반응함수가 부분적으로 알려져 있다 하더라도 실용성이 매우 적은 전도로 복잡한 함수의 형태를 위하는 경우가 대부분이다. 일반적으로 반응표면 생성 시 사용되는 회귀모델로는 식 (1)의 1차 회귀모델 (First order regression model)과 식 (2)의 2차 회귀모델 (Second order regression model)이 있다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i \quad (1)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i \leq j}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

III. FRP 박스 부재의 유한요소 해석

FRP 박스부재의 최적화를 수행하기 위해 앞서 유한요소 해석을 수행하였다. 해석은 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS Workbench V12를 이용하여 해석을 수행하였으며, FRP의 이 방향 재료 물성치를 적용하기 위하여 3차원으로 모델링 하였다. 해석 모델은 100 mm로 절단된 단면에 도로교설계기준의 보도교 중앙의 최대 모멘트를 적용하였다. 이때 해석에 사용된 FRP 재료 물성치는 Table 1과 같다.

해석모델은 Fig. 3과 같으며, 하중조건은 하단부 고정에 상단

부에 모멘트 하중을 적용하였다. 압축부에는 완전 충전조건을 적용하였으며, 인장부인 하단부에는 중공조건을 적용하여 해석을 수행하였다.

힘을 받는 FRP 박스 부재의 해석결과는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타났다. 최대응력은 인장부에 93.21 MPa로 나타났으며, 압축부에는 응력이 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 최대변형률은 인장부에 3,615.7 Microstrain이 발생되었으며, 인장부가 압축부에 비하여 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이때의 FRP 박스 부재의 부피는 6394.0 cm³이며 본 연구에서

Fig. 3 Modeling of FRP box

Fig. 4 Stress analysis result of FRP box

Fig. 5 Strain analysis result of FRP box

Table 1 Material properties of FRP

Material Properties		Flange	Web
Young's Modulus (MPa)	E1	35,120	34,160
	E2	18,650	17,169
Shear Modulus (MPa)	G12	3,540	3,210
	G13	3,540	3,210
	G23	350	350
Poisson's Ratio	Nu12	0.3	0.3
Tensile Strength (MPa)	σ_1	395.4	311.3
	σ_2	136.3	131.7
Compressive Strength (MPa)	σ_1	-416.9	-402.8
	σ_2	-136.8	-106.7
Shear Strength (MPa)	τ	71.8	68.4

는 제한된 조건에서 부피 즉, 단면이 제한되면서 응력과 변형률이 최소가 되는 최적점을 찾고자 하였다.

IV. FRP 박스 부재의 최적 설계

FRP 박스부재의 최적설계를 위하여 문제의 정의를 위해 설계인자와 제약조건을 고려하여 범위를 산정후, 실험계획법을 통해 효율적인 실험을 할 수 있는 범위를 설정하게 된다. 이 실험점에서 식 (1)과 식 (2)에 의한 수치해석을 수행하여 반응표면을 생성하고, 각 설계인자들의 변화에 따른 목적함수 값들을 얻게된다 (Kong, 2008). 이러한 과정을 Fig. 6에 나타내었다.

FRP 박스 부재의 최적설계를 수행하고자 목적함수를 두 가지의 경우로 나누어 최적화를 수행하였다. 첫 번째는 제한된 부피에서 응력이 최소가 되는 경우와 두 번째는 제한도니 부피에서 변형률이 최소가 되는 경우로 나누었다. 각각의 경우에서 부피를 최소화할 경우, 응력을 최소화할 경우, 변형률을 최소화할 경우로 나누어 최적화를 수행하였다.

1. 목적함수 변화에 따른 최적설계(부피, 응력)

부피와 응력을 목적함수로 정의했을 경우의 민감도는 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 부피는 D_B에 의한 영향이 가장 높게 나타났으며, F_D에 의한 영향이 가장 낮게 나타났다. 또한, 응력은 D_H에 의한 영향이 가장 높게 나타났으며, L_D에 의한 영향은 가장 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 8은 최적화 수행에서 사용된 샘플들의 값을 나타

Fig. 7 Sensitivities of volume and stress

Fig. 8 Tradeoff chart of volume and stress

Fig. 6 Process of application design optimization

낸 트레이드오프 그림으로서, 파란색에 가까울수록 상대적으로 최적의 값을 나타낸다. Fig. 9~Fig. 11은 각각의 매개변수에 따른 반응표면을 나타내었다.

가. 부피를 최소화할 경우

ANSYS Workbench의 GDO는 각 목적함수의 중요도에 따른 3가지의 최적해를 제안해준다. 제한된 조건에서 응력의 변화를 무시하고 부피를 최소화 한 경우는 Table 2와 같이 A의 경우 부피는 6,141.4 cm³으로서 3.96 % 감소하였으며, 응력 또한 90.01 MPa으로서 3.43 % 감소하였다. B의 경우 부피는 6,061.1 cm³으로서 5.21 % 감소하였고, 응력은 94.36 MPa로서 1.23 % 증가하였다. 그리고, C의 경우 부피는 6,061.7 cm³으로서 5.19 % 감소하였으며, 응력은 95.31 MPa로서 2.24 % 증가하였다. 아래 Fig. 12는 각각의 경우에 따른 샘플 그림으로서 샘플링 점을 하나의 선으로 연결하여 표현한 것으로 굵은 선은 프로그램 내에서 제안한 최적해를 가르킨다.

Fig. 9 Response chart of volume by P1 and P2

Fig. 10 Response chart of volume by P2 and P3

Fig. 11 Response chart of volume by P4 and P5

나. 부피와 응력을 최소화할 경우
제한된 부피에서 응력을 최소화 한 경우는 Table 3과 같이

Table 2 Optimal solution in volume the minimum case

	P1 (mm)	P2 (mm)	P3 (mm)	P4 (mm)	P5 (mm)	Volume (cm³)	Stress (MPa)
A	136.01	113.40	10.04	10.00	13.26	6,141.4	90.01
B	131.33	114.23	9.91	9.97	12.98	6,061.1	94.36
C	126.65	112.64	10.02	10.02	12.75	6,061.7	95.31

Fig. 12 Samples chart in volume the minimum case

Table 3 Optimal solution in volume and stress the minimum case

	P1 (mm)	P2 (mm)	P3 (mm)	P4 (mm)	P5 (mm)	Volume (cm³)	Stress (MPa)
A	139.38	113.04	10.05	10.36	13.77	6,538.3	79.68
B	142.71	113.03	9.47	10.37	13.49	6,659.0	77.49
C	131.64	112.54	10.22	9.88	13.52	6,206.0	88.94

Fig. 13 Samples chart in volume and volume the minimum case

A의 경우 부피는 6,538.3 cm³으로서 2.25 % 증가하였으며, 응력은 79.68 MPa으로서 14.52 % 감소하였다. B의 경우 부피는 6,659.0 cm³으로서 4.14 % 증가하였고, 응력은 77.49 MPa으로서 16.87 % 감소하였다. 그리고, C의 경우 부피는 6,206.0 cm³으로서 2.94 % 감소하였으며, 응력은 88.94 MPa으로서 4.58 % 감소하였다. 아래 Fig. 13은 각각의 경우에 따른 샘플 그림을 나타내었다.

다. 희귀 모형식 제안

각 파라미터의 변화에 따른 부피와 응력의 변화에 관하여 최적화 해석을 수행하였다. 해석 결과 중 최적화 구간과 이에 따른 최적화 모형식을 Fig. 14와 Table 4에 제시하였다. 최적화 모형 I식은 지수, 모형 II식은 2차 다항식, 모형 III식은 3차 다항식, 모형 IV식은 로그, 그리고 모형 V식은 거듭제곱으로 총

Fig. 14 Optimal threshold by volume and stress

Table 4 Prediction equation by volume and stress

Model	Type	Prediction Equation	R-Square
I	Exponent	$y = 3.0206e^{-202.1x}$	0.9645
II	Polynomial (Degree 2)	$y = 26046x^2 - 547.48x + 3.2835$	0.9773
III	Polynomial (Degree 3)	$y = -0.0000001x^3 + 281964x^2 - 2600.9x + 8.6771$	0.9917
IV	Log	$y = -1.013\ln(x) - 4.2822$	0.9781
V	Involution	$y = 0.0002x^{-1.614}$	0.9491

5개의 최적화 모형식을 나타냈으며, 모형식의 정확도를 분석하기 위하여 R-Square를 검토하였다. R-Square를 검토한 결과 3차 다항식이 0.9917로서 가장 비슷한 경향을 나타내었다.

2. 목적함수 변화에 따른 최적설계(부피, 변형률)

부피와 변형률을 목적함수로 정의했을 경우의 민감도는 Fig. 15에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 부피는 D_B에 의한 영향이 가장 높게 나타났으며, F_D에 의한 영향이 가장 낮게 나타났다. 또한, 변형률은 D_H에 의한 영향이 가장 높게 나타났으며, L_D에 의한 영향은 가장 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 16은 트레이드오프 그림이며, Fig. 17~Fig. 18은 각각의 매개변수에 따른 반응표면을 나타내었다.

가. 부피를 최소화할 경우

제한된 조건에서 변형률의 변화를 무시하고 부피를 최소화한 경우는 Table 5와 같이 A의 경우 부피는 6,141.4 cm³으로서 3.96 % 감소하였으며, 변형률 또한 3,502.5 Microstrain으로서 3.13 % 감소하였다. B의 경우 부피는 6,147.7 cm³으로서 3.85 % 감소하였고, 변형률은 3,524.2 Microstrain으로서 2.53 % 감소하였다. 그리고, C의 경우 부피는 6,099.3 cm³으

Fig. 15 Sensitivities of volume and strain

Fig. 16 Tradeoff chart of volume and strain

Fig. 17 Response chart of stress by P1 and P2

로서 4.61 % 감소하였으며, 응력은 3,610.8 Microstrain으로서 0.14 % 감소하였다. 아래 Fig. 19는 각각의 경우에 따른 샘플 그림을 나타내었다.

Fig. 18 Response chart of stress by P2 and P3

Table 5 Optimal solution in volume the minimum case

	P1 (mm)	P2 (mm)	P3 (mm)	P4 (mm)	P5 (mm)	Volume (cm ³)	Strain (Micro strain)
A	136.01	113.40	10.04	10.00	13.26	6,141.4	3,502.5
B	132.64	112.69	10.06	9.65	13.11	6,147.7	3,524.2
C	129.15	112.72	9.72	10.14	12.96	6,099.3	3,610.8

Fig. 19 Samples chart in volume the minimum case

나. 부피와 변형률을 최소화할 경우

제한된 부피에서 변형률을 최소화 한 경우는 Table 6과 같이 A의 경우 부피는 7,873.6 cm³으로서 23.14 % 증가하였으며, 변형률은 2,292.0 Microstrain으로서 36.61 % 감소하였다. B의 경우 부피는 7,893.4 cm³으로서 23.45 % 증가하였고, 변형률은 2,333.3 Microstrain으로서 35.47 % 감소하였다. 그리고, C의 경우 부피는 7,895.7 cm³으로서 23.49 % 감소하였으며, 변형률은 2,393.7 Microstrain으로서 33.80 % 감소하였다. 아래 Fig. 20은 각각의 경우에 따른 샘플 그림을 나타내었다.

다. 회귀 모형식 제안

각 파라미터의 변화에 따른 부피와 변형률의 변화에 관하여 최적화 해석을 수행하였다. 해석 결과 중 최적화 구간과 이에 따른 최적화 모형식을 Fig. 21과 Table 6에 제시하였다. 각각의 경우에 따른 R-Square를 검토한 결과 3차 다항식이 0.9925로서 가장 비슷한 경향을 나타내었다.

Table 6 Optimal solution in volume and strain the minimum case

	P1 (mm)	P2 (mm)	P3 (mm)	P4 (mm)	P5 (mm)	Volume (cm ³)	Strain (Micro strain)
A	141.30	112.61	10.37	10.90	14.16	7,873.6	2,292.0
B	137.22	113.13	9.01	9.42	14.17	7,893.4	2,333.3
C	131.98	112.64	9.10	9.17	14.13	7,895.7	2,393.7

Fig. 20 Samples chart in volume and strain the minimum case

Fig. 21 Optimal threshold by volume and strain

Table 7 Prediction equation by volume and strain

Model	Type	Prediction Equation	R-Square
I	Exponent	$y = 0.0099e^{-173.6x}$	0.9610
II	Polynomial (Degree 2)	$y = 94.674x^2 - 1.9761x + 0.0121$	0.9793
III	Polynomial (Degree 3)	$y = -34666x^3 + 946.14x^2 - 8.822x + 0.0301$	0.9925
IV	Log	$y = -0.004\ln(x) - 0.0148$	0.9476
V	Involution	$y = 0.000003x^{-1.389}$	0.9799

3. 최적점 적응 유한요소 해석

ANSYS Workbench의 GDO에서 제안해준 목적함수는 계산에 의한 수치이므로 이를 검증하기 위해 수치를 재 적용하여 유한요소를 수행하여 검증을 해주어야 한다. FRP 부재의 설계를 지배하는 요인은 응력이 아닌 처짐에 의한 사용성 검토가

중요한 요소로 작용하게 되므로 (Ji et al., 2003), 본 연구에서는 제한된 부피에서 변형률이 최소가 되는 Table 6의 경우에서 B의 최적점을 적용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 최

Fig. 22 Final design drawing of FRP box member

Fig. 23 Final modeling of FRP box

Fig. 24 Final analysis result of FRP box

종 제안한 해석 단면은 Fig. 22와 같고, 해석모델은 Fig. 23에 나타냈으며, 해석결과는 Fig. 24와 같다. GDO에서 제안해준 목 적함수가 부피는 6,147.7 cm³, 변형률은 3,524.2 Microstrain 이었으나, 실제 해석결과 부피는 5,979.3 cm³, 변형률은 3,758.6 Microstrain으로 부피는 6.49 % 감소하였고, 변형률은 3.95 % 증가하였다.

V. 요약 및 결론

FRP 모듈형 박스 부재의 형상 최적설계를 수행한 결과는 다음과 같다.

1. 민감도 해석 결과, 부피는 D_B에 의한 영향이 가장 높게 나타났으며, F_D에 의한 영향이 가장 낮게 나타났다. 또한, 응력과 변형률은 D_H에 의한 영향이 가장 높게 나타났으며, L_D에 의한 영향은 가장 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

2. 부피와 응력 검토 결과, 부피를 최소화 할 경우 부피가 3.96 % 감소하였을 때, 응력도 3.43 % 감소하였으며, 부피가 5 % 이상 감소하였을 경우 응력은 증가하는 경향을 나타내었다.

3. 부피와 응력 검토 결과, 부피와 응력을 최소화 할 경우 부피가 2.94 % 감소하였을 때, 응력이 4.58 % 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 응력이 14 % 이상 감소할 경우 부피는 증가하는 경향을 나타내었다.

4. 부피와 변형률 검토 결과, 부피를 최소화 할 경우 부피가 3.85 % ~ 4.61 % 감소하였을 때, 변형률도 0.14 % ~ 3.13 % 감소하는 것을 확인 하였다.

5. 부피와 변형률 검토 결과, 부피와 변형률을 최소화 할 경우 변형률이 33.80 % ~ 36.61 % 감소할 경우 부피는 23.14 % ~ 23.49 % 증가하는 경향을 나타내었다.

6. 각 파라미터의 변화에 따른 최적화 구간과 이에 따른 최적화 모형식을 검토한 결과 부피와 응력은 3차 다항식의 R-Square가 0.9917로서 가장 근사한 결과를 나타냈으며, 부피와 변형률은 3차 다항식의 R-Square가 0.9925로서 가장 근사한 결과를 나타냈다.

부피와 변형률 검토 결과에서 부피를 최소화 할 경우의 B를 적용하여 해석을 수행한 결과, 부피는 6.49 % 감소하였으며 (제작비 감소), 변형률은 3.95 % 증가한 3,758.6 Microstrain으로 조사되었다. 이는 선행연구 (Kwak et al., 2008)에서 수행한 최대 인장 극한변형률 (10,185 Microstrain)의 50 % 미만이므로 최적설계에 적용할 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 FRP 박스부재는 최적화 형상임을 입증한다.

본 연구는 2011년도 원광대학교 교비 지원에 의해 연구되었습니다.

REFERENCES

1. Birchall, J. D., and N. L. Thomas, 1983. On the architecture and function of cuttlefish bone. *J. Mat. Sci* 18: 2081-2086.
2. Ji, H. S., B. J. Son, K. S. Chun, and S. Y. Chang, 2003. An Experimental Study on the Behaviour of Modular FRP Decks. *Korean society of civil engineers*: 414-419 (in Korean).
3. Kwak, K. H., B. K. Sung, S. M. Jung, and H. S. Jang, 2008. A Study on Fracture Behavior for FRP Composite Girder Filled with Concrete. *Korea Concrete Institute* 50(1): 59-66 (in Korean).
4. Kwak, K. H., H. S. Jang, W. J. Kim, and H. O. Kim, 2008. A Study on Shear Strength Test for FRP Girder of Filled Concrete. *Computational Structural Engineering Institute of Korea* 21(4): 364-374 (in Korean).
5. Kim, W. J., 2009. An Experimental Study on Durability and Flexural Fracture Behavior of FRP Member. Ph. D. Wonkwang University (in Korean).
6. Kong, H. K., 2008. Optimal Design for Butterfly Valve of Extra-Large Concentric Type using Respond Surface Method. MA. Donga University (in Korean).
7. Mann, S., J. Webb, and R. J. P. Williams, 1998. *Biom mineralization: Chemical and Biochemical Perspectives*.
8. Park, S. H., 2005. *Modern Design of Experiments*. MinYoung (in Korean).
9. Song, C. O., 2006. Sequential DOE Based Topology Optimization. MA. Yonsei University (in Korean).