

# 진공성형 제작 모델 복합소재 바닥판의 실험적 휨 거동특성 분석

## Flexural Characteristics of Model Composite Deck Fabricated with VARTM

이 성 우†

Lee, Sung-Woo

(논문접수일 : 2005년 1월 6일 ; 심사종료일 : 2005년 9월 10일)

### 요 지

최근 경량, 고강도, 내부식, 고내구성 특성 등의 여러 가지 이점이 있는 복합소재 교량 바닥판에 대한 관심이 고조되고 있다. 본 연구에서는 유리섬유와 불포화 폴리에스터를 사용하여 진공성형제조기법으로 파형코어 복합소재 모델 바닥판을 제작하였다. 모델 바닥판은 제형, 박스형, 삼각형 단면을 고려하였고, 각각 강축과 약축에 대한 시험 모델에 대하여 3점 휨 시험을 실시하였다. 시험 결과로부터 얻은 하중-변위곡선, 하중-변형률 곡선, 파괴모드 등을 분석하여 복합소재 바닥판의 휨 거동특성을 파악하고자 하였으며, 파형코어 복합소재 바닥판을 교량 바닥판으로 적용할 수 있는 가능성을 검토하였다. 또한 등가 중량으로 환산한 강축과 약축 모델에 대해 휨 거동 특성을 비교하여 가장 효과적이고 경제적인 단면을 찾고자 하였다.

**핵심용어** : 복합소재 모델 데크, 파형단면, 진공성형제조, 강축 휨시험, 약축 휨시험

### Abstract

Recent days composite bridge deck is gaining attraction due to many advantages such as light weight, high strength, corrosion resistance, and high durability. In this study, composite deck models of hat, box and triangular section type were fabricated with VARTM process. For these models, three point flexural tests were carried out both in strong and weak axis. The experimental results were compared with each other to determine efficient section profile. It has been demonstrated that composite sandwich deck has strong potentials to be used as bridge deck in the new construction and rehabilitation works.

**keywords** : composite model deck, polygonal profile, VARTM, strong axis flexural test, weak axis flexural test

## 1. 서 론

기존의 교량 바닥판은 대부분 콘크리트로 시공되고 있다. 그러나 콘크리트의 열화, 철근의 부식 등으로 유지관리 및 내구성에 문제가 발생하고 있어 새로운 재료를 이용한 교량 바닥판의 개발 필요성이 대두되었다. 복합소재를 이용한 파형코어 샌드위치 바닥판은 콘크리트 바닥판 중량의 1/5수준의 경량이어서 내하력을 증진시켜 줄 수 있고, 보다 경제적으로 하부구조를 건설할 수 있게 해준다. 또한 복합소재 바닥판은 부식 문제의 해결과 유지관리비를 크게 절감시킬 수 있으므로 이에 대한 개발의 필요성이 인지되었다(Eckel, 1998; Brown 등, 1999).

본 연구의 복합소재 모델 바닥판의 구조는 얇고 강하나 밀도가 큰 면재와 두껍고 강도가 낮으며 밀도가 적은 심재로 구성되어 단면 이차모멘트를 증가시킬 수 있으므로 큰 강성

을 가진다.

모델 바닥판은 진공성형기법인 VARTM(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)제조법(이성우, 2000)으로 제작하였다. 제작된 바닥판 모델에 대해 3점 휨 시험을 통하여 휨 거동특성과 파괴모드를 분석하고 그 사용성을 검토하였다. 복합소재 샌드위치 바닥판의 휨 시험은 제형단면(hat type), 박스형 단면(box type), 삼각형 단면(truss type)모델의 강축과 약축에 대해 실시하였다.

## 2. 파형코어 복합소재 모델 바닥판의 제작

### 2.1 복합소재 스트립시편의 인장시험

VARTM에 의해 성형된 파형코어 복합소재 샌드위치 데

† 책임저자, 정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수  
전화: 02-910-4696 ; Fax: 02-918-1979  
E-mail : swlee@kookmin.ac.kr

• 이 논문에 대한 토론을 2006년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2006년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

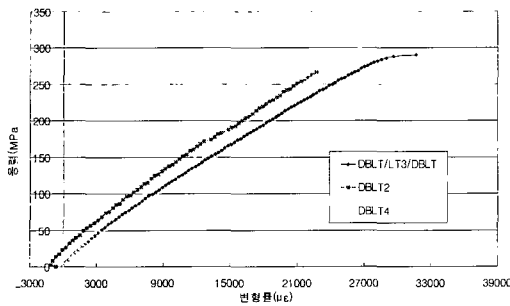


그림 1 복합소재 스트립시편의 응력-변형률 곡선

크에서 면재와 파형코어의 역학적 특성을 알기 위해 ASTM의 인장시험 규격에 맞는 시편을 제작하였다. 시편의 탭은 에폭시판을 사용하였다. 시편은 동일산자에서 생산되는 유리섬유직포와 불포화 폴리에스터 레진을 이용하여 [DBLT 1150/LT1000<sub>3</sub>/DBLT1150], [DBLT1150<sub>2</sub>], [DBLT 1150<sub>4</sub>]의 세 가지 경우로 제작하였다. DBLT1150, LT1000은 유리섬유를 직조하여 만들었으며, DBLT1150은 [0°/+45°/90°/-45°]의 방향으로 1150g/m<sup>2</sup>의 섬유를 각 방향별로 배열하여 직조한다. LT1000섬유는 [0°/90°]의 방향으로 1100g/m<sup>2</sup>의 섬유를 각 방향별로 배열하여 직조한다. 표 1에는 복합소재 스트립시편의 역학적 특성을 보여주고 있으며, 그림 1은 복합소재 스트립시편의 응력-변형률 곡선을 나타내고 있다. 표 1에서의 해석치는 적층판 해석 프로그램인 ESAComp (European Space Agency, 2000)에 의해 계산된 값이다. ESAComp에서는 적층 설계에 따라 방향별 섬유량과 수치 물성치를 입력하면 혼합법칙에 의해 탄성계수를 구한다.

인장시험결과 파형코어에 해당하는 [DBLT1150<sub>2</sub>], [DBLT 1150<sub>4</sub>]시편은 해석과 잘 맞지만 면재에 해당하는 [DBLT 1150/LT1000<sub>3</sub>/DBLT1150]의 경우 해석치와 다소 차이가 있음을 알 수 있었다.

## 2.2 모델 바닥판의 단면형상

본 연구에서는 그림 2와 같이 세 가지의 파형코어 형상을 가진 샌드위치 바닥판을 고려하였다.

세 가지 형상의 바닥판에 대해 강축시험 모델의 경우 지간을 100cm로 동일하게 하였고, 셀의 수가 최대한 일치하도록 바닥판의 크기와 섬유의 양을 정하였다. 약축 모델의 경우 강축의 경우와 같은 크기의 셀로 제작하고, 폭이 30cm, 지간이 100cm가 되도록 제작하였다. 본 연구에서는 편상 제형단면의 강축 모델을 HS, 박스형단면의 강축 모델을 BS, 삼각형단면의 강축 모델을 TS라 하고, 제형단면의 약축 모델을 HW, 박스형단면의 약축 모델을 BW, 삼각형단면의 약축 모델을 TW로 기술하도록 한다.

표 1 복합소재 스트립시편의 역학적 특성

복합소재 스트립시편	인장탄성계수 (실험치) [MPa]	인장탄성계수 (해석치) [MPa]	실험치 / 해석치	인장강도 [MPa]
[DBLT1150/LT1000 <sub>3</sub> /DBLT1150]	1.30e4	1.95e4	0.66	290
[DBLT1150 <sub>2</sub> ]	1.39e4	1.50e4	0.93	266
[DBLT1150 <sub>4</sub> ]	1.57e4	1.63e4	0.96	314

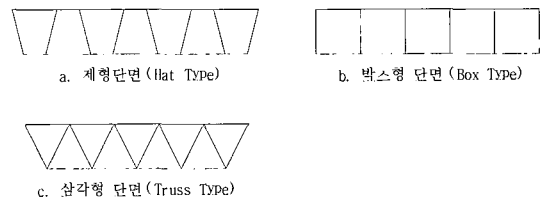


그림 2 모델 바닥판의 파형코어 단면형상

## 2.3 복합소재 파형코어 모델 바닥판의 제작

샌드위치 바닥판을 제작하는데 사용된 면재와 파형코어는 동일산자 제품의 다축 유리섬유 직포(multiaxial stitched fabric)를 사용하여 가장 적합한 섬유배열로 적층하였고, 코어용의 우레탄 폼은 한비산업 제품의 밀도 750N/m<sup>3</sup>인 폴리 시아누레이트 우레탄(poly-cyanurate-urethane)을 사용하였다.

### 2.3.1 제형단면 복합소재 모델의 제작

제형단면의 웨브는 DBLT1150 [0°/+45°/-45°/90°] 직포를 4겹 사용하였으며, 상하면재는 DBLT1150 [0°/+45°/-45°/90°] 한 겹, LT1000[0°/90°] 세 겹, DBLT 1150 [0°/+45°/-45°/90°] 한 겹을 사용하였고, 0°방향이 종방향과 일치하도록 배열하였다. 그림 3에는 제형단면의 형상을 보여주고 있다.

사진 1에는 VARTM공법을 이용한 제형단면 복합소재 바닥판의 제작과정을 보여주고 있다. 강축 모델 HS의 경우 셀

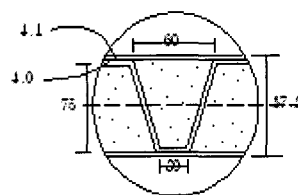


그림 3 제형단면의 형상

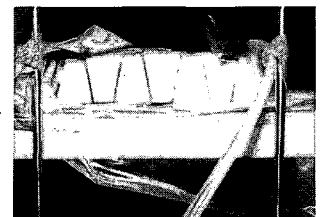


사진 1 제형단면의 제작과정

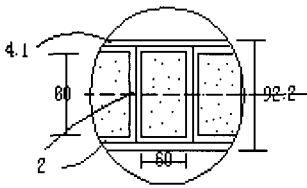


그림 4 박스형단면의 형상

사진 2 박스형단면의 제작과정

5개로 구성하여 폭은 30cm, 지간은 100cm가 되도록 제작하였고, 약축 모델 HW의 경우 셀은 총 24개로 구성하였고, 지간은 100cm, 폭은 30cm가 되도록 제작하였다.

2.3.2 박스형단면 복합소재 샌드위치 바닥판의 제작

사각형 형태를 가진 박스형 단면의 경우 웨브는 DBLT 1150 [0°/+45°/-45°/90°] 2겹으로 사면을 감쌌으며, 상하면재는 DBLT1150 [0°/+45°/-45°/90°] 한 겹, LT 1000[0°/90°] 세 겹, DBLT1150 [0°/+45°/-45°/90°] 한 겹을 사용하였다. 섬유 배열은 제형단면과 마찬가지로 0°방향이 종방향과 일치하도록 배열하였다. 그림 4에는 박스형단면의 형상을 보여주고 있으며, 사진 2에는 박스형단면의 제작과정을 보여주고 있다. 강축 모델 BS의 경우 셀 5개로 구성하여 폭이 33cm, 약축 모델의 경우 셀은 총 17개로 구성하였고, 지간이 100cm가 되도록 제작하였다.

2.3.3 삼각형단면 복합소재 샌드위치 바닥판의 제작

트러스 형태를 가진 모델 삼각형 단면의 경우 웨브는 DBLT1150 [0°/+45°/-45°/90°] 2겹으로 삼면을 감쌌으며, 상하면재는 DBLT1150 [0°/+45°/-45°/90°] 한 겹, LT1000[0°/90°] 세 겹, DBLT 1150 [0°/+45°/-45°/90°] 한 겹으로 제형단면과 박스형 단면과 같이 총 다섯 겹을 사용하였다. 마찬가지로 0°방향이 종방향과 일치하도록 배열하였다. 그림 5에는 삼각형단면의 형상을 보여주고 있으며, 사진 3에는 삼각형단면의 제작과정을 보여주고 있다.

강축 모델 TS의 경우 셀 5개로 구성하여 폭이 33cm, 지간은 100cm가 되도록 제작하였다. 약축 모델 TW의 경우 셀은 총 21개로 구성하였고, 지간은 100cm가 되도록 제작하였다.

3. 복합소재 샌드위치 바닥판 모델 휨 시험

제작된 복합소재 바닥판 모델 시험체에 대해 단순지점 조건으로 3점 휨 시험을 수행하였다. 파괴코어의 모양에 따른

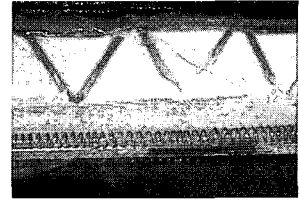
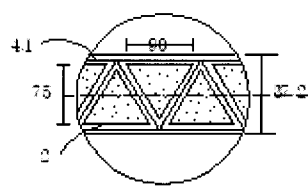


그림 5 삼각형단면의 형상

사진 3 삼각형단면의 제작과정

구조적인 특성을 알기 위해 하중-변위 관계로부터 강성을 비교하여 가장 효과적인 단면을 알고자 하였다. 하중-변형률 관계로부터 얻은 최대 인장응력 및 압축응력과 파괴하중, 파괴모드를 토대로 복합소재 샌드위치 보의 휨 거동을 파악하였다. 하중을 재하하기 위한 로드셀은 보의 중앙에 설치하였고, 중앙의 처짐을 측정하기 위해 보의 중앙 하단에 변위계(LVDT)를 설치하였다. 보의 경계조건은 단순지점으로 하였으며, 하중은 선하중으로 재하하였다.

3.1 강축 모델의 시험결과 및 파괴모드

표 2는 강축으로 제작된 세 가지 단면의 복합소재 샌드위치 바닥판의 휨 실험 결과를 보여주고 있다. 표에는 각 모델의 단면이차모멘트와 총 중량, 파괴하중 및 최대 변위와 극한인장 변형률을 수록하고 있다. 그림 6에는 강축시험모델의 게이지 위치를 보여주고 있다.

표 2 강축 모델의 파괴하중과 최대변위

모델	지간 [cm]	지간/높이 [L/h]	단면이차모멘트 [Cm <sup>4</sup> ]	총중량 [N]	파괴하중 [kN]	최대 변위 [mm]	극한인장 변형률 [με]
HS	100	11.53	572	154	92	21.35	9,851
BS	100	10.90	836	165	113	19.48	9,008
TS	100	11.53	690	169	85	17.61	7,363

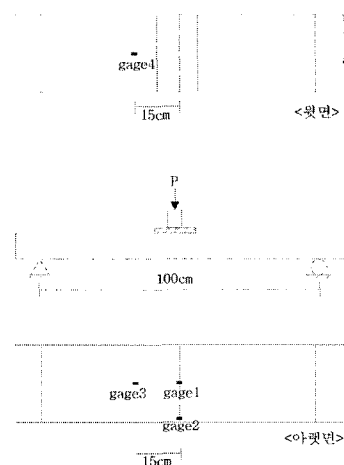


그림 6 강축시험모델의 게이지 위치

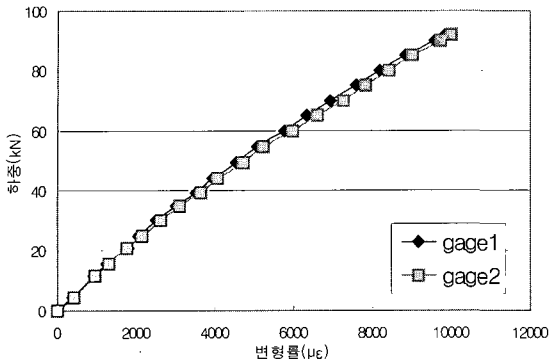


그림 7 HS의 gage1과 gage2의 하중-변형률 관계

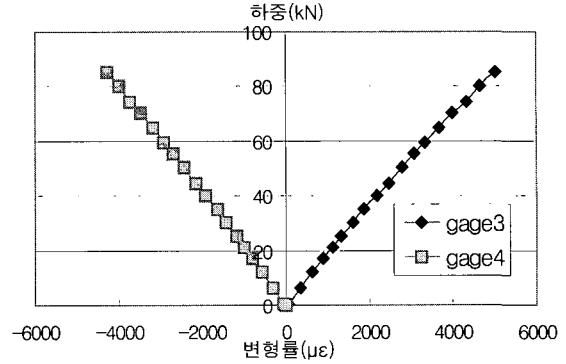


그림 8 HS의 gage3과 gage4의 하중-변형률 관계

3.1.1 제형단면 강축 모델(HS)

그림 7~8에는 HS에 부착된 각 게이지의 하중-변형률 관계를 보여주고 있다. 그림 7에서 보는 것과 같이 게이지1과 게이지2는 거의 같은 변형률 값을 나타내는 것을 알 수 있으며 이는 실험 중에 비틀림이 발생하지 않았기 때문으로 판단된다. 모델의 압축부와 인장부의 같은 위치에 부착한 게이지 3과 4는 그림 8에서 보는 바와 같이 그 거동은 비슷하지만 압축과 인장변형률의 차이가 약간 있는 것으로 보여진다. 모델 HS의 파괴하중은 92kN이며, 강성은 44.4kN/cm, 최대 인장 변형률은 9,851 $\mu\epsilon$ 이다.

그림 8에 나타난 그래프로부터 파괴시의 인장부 변형률 7,284 $\mu\epsilon$ 과 압축부변형률 6,196 $\mu\epsilon$ 로부터 중립축을 구한 결과 계산된 중립축( $c_1=c_2=4.36\text{cm}$ )과 약간의 차이가 있었다. 이는 VARTM에 의해 제작하는 과정에서 발생한 오차라고 추정된다. 표 3에는 시험과 해석에 의해 구해진 파괴시 응력을 비교하여 보여주고 있다.  $E_{(1)}$ 은 시편실험에 의한 실험값을,  $E_{(2)}$ 는 ESAComp를 통한 해석값을,  $\sigma_{(1)}$ 는  $\sigma = E \cdot \epsilon$ 에서  $E_{(1)}$ 으로부터 구한 응력값을,  $\sigma_{(2)}$ 는  $\sigma = E \cdot \epsilon$ 에서  $E_{(2)}$ 로부터 구한 응력값을,  $\sigma_{(3)}$ 는  $\sigma = (M \cdot c) / I$ 로부터 구한 응력값을 나타낸 것이다.

표 3 HS의 휨 파괴시 응력

구분	파괴 하중 [kN]	변형률 [ $\mu\epsilon$ ]	탄성 계수 $E_{(1)}$ [MPa]	탄성 계수 $E_{(2)}$ [MPa]	응력 $\sigma_{(1)}$ [MPa]	응력 $\sigma_{(2)}$ [MPa]	응력 $\sigma_{(3)}$ [MPa]
압축부	92	6,196	1.30e4	1.95e4	80.6	120.1	112.6
인장부	92	7,284	1.30e4	1.95e4	94.7	142	132.3

3.1.2 박스형단면 강축 모델(BS)

그림 9~10에는 BS 시험체의 하중-변형률 관계를 보여주고 있다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 게이지1과 게이지2는 거의 같은 변형률 값을 나타내는 것을 볼 수 있으며, 모델의 압축부와 인장부 같은 위치에 부착한 게이지 3과 4는 그림 10에서 보는 바와 같이 거의 같은 변형률 값으로 변하는 것을 볼 수 있다. 표 4에는 BS 시험체에 대한 파괴시 응력을 비교하여 보여주고 있다. 모델 BS의 파괴하중은 112.6kN이며 강성은 60.4kN/cm, 최대인장 변형률은 9,008 $\mu\epsilon$ 이다.

그림 10에 나타난 그래프로부터 파괴시의 인장부 변형률 6,457 $\mu\epsilon$ 과 압축부변형률 4,929 $\mu\epsilon$ 로부터 중립축을 구한 결과 계산된 중립축( $c_1=c_2=4.585\text{cm}$ )과 약간의 차이가 있었다. 이는 제형단면과 마찬가지로 VARTM에 의해 제작하

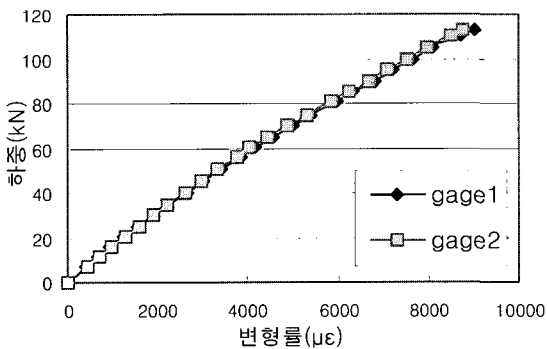


그림 9 BS의 gage 1과 gage2의 하중-변형률 관계

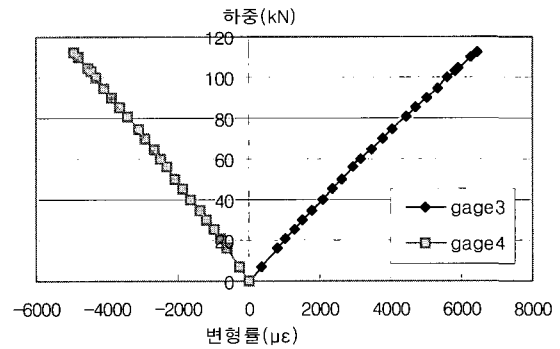


그림 10 BS의 gage3과 gage4의 하중-변형률 관계

표 4 BS의 휨 파괴시 응력

구분	파괴 하중 [kN]	변형률 [ $\mu\epsilon$ ]	탄성 계수 $E_{(1)}$ [MPa]	탄성 계수 $E_{(2)}$ [MPa]	응력 $\sigma_{(1)}$ [MPa]	응력 $\sigma_{(2)}$ [MPa]	응력 $\sigma_{(3)}$ [MPa]
압축부	11.26	4,929	1.30e4	1.95e4	64.1	96.1	93.6
인장부	11.26	6,457	1.30e4	1.95e4	83.9	125.9	122.6

표 5 TS의 휨 파괴시 응력

구분	파괴 하중 [kN]	변형률 [ $\mu\epsilon$ ]	탄성계수 $E_{(1)}$ [MPa]	탄성계수 $E_{(2)}$ [MPa]	응력 $\sigma_{(1)}$ [MPa]	응력 $\sigma_{(2)}$ [MPa]	응력 $\sigma_{(3)}$ [MPa]
압축부	85.3	4,284	1.30e4	1.95e4	55.7	83.5	87.0
인장부	85.3	5,013	1.30e4	1.95e4	65.2	97.8	101.7

표 6 파괴하중일 때의 응력 비교

모델	파괴하중 [kN]	변위 [mm]	C1 [cm]	C2 [cm]	압축응력 [MPa]	인장응력 [MPa]
HS	91.8	21.35	4.01	4.71	160.8	189.1
BS	112.6	19.48	3.97	5.20	133.7	175.1
TS	85.3	17.61	4.02	4.70	124.2	145.3

표 7 사용하중(파괴하중/2)일 때의 응력비교

모델	파괴하중/2 [kN]	변위 [mm]	C1 [cm]	C2 [cm]	압축응력 [MPa]	인장응력 [MPa]
HS	44.0	8.09	4.01	4.71	77.1	90.8
BS	55.8	8.48	3.97	5.20	66.3	86.8
TS	44.8	8.09	4.02	4.70	65.3	76.3

는 과정에서 발생한 오차라고 추정된다.

### 3.1.3 삼각형단면 강축 모델(TS)

그림 11~12에는 TS에 부착된 각 게이지의 하중-변형률 관계를 보여주고 있다.

그림 11에서 볼 수 있듯이 모델 TS의 경우 게이지1과 게이지2는 거의 같은 변형률 값을 나타내는 것을 볼 수 있으며 모델의 압축부와 인장부 같은 위치에 부착한 게이지 3과 4는 그림 12에서 보는 바와 같이 다른 모델의 경우와 마찬가지로 거의 같은 변형률 값으로 변하는 것을 볼 수 있다. 모델 TS의 파괴하중은 85.3kN으로 다른 모델에 비해 가장 작은 파괴하중을 가지며, 강성은 45.7kN/cm, 최대인장 변형률은 7,363 $\mu\epsilon$ 이다. 그림 12에 나타난 그래프로부터 파괴시의 인장부 변형률 6,457 $\mu\epsilon$ 과 압축부 변형률 4,929 $\mu\epsilon$ 로부터 중립축을 구한 결과 계산된 중립축( $c_1=c_2=4.585$ cm)과 약간의 차이가 있었다. 이 또한 VARTM에 의해 제작하는 과정에서 발생한 오차라고 추정된다.

표 5에는 삼각형단면 강축 모델 TS의 응력을 실험과 해석, 계산에 의한 값과 비교하고 있다. 모델 TS도 HS와 마찬가지로  $\sigma_{(2)}$ 값이 응력  $\sigma_{(3)}$ 와 흡사한 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 따라서 면재와 같은 적층판으로 제작된 시편 (DBLT/LT<sub>3</sub>/DBLT)로 실험한 시편실험의 경우 실제 샌드위치 모델의 면재 탄성계수와 차이가 많기 때문에 시편실험에 의한 값보다는 해석에 의한 탄성계수값이 정확하다고 사료된다.

### 3.1.4 세 가지 모델의 응력값 비교

모델 상하면의 하중-변형률 관계로부터 세 가지 모델의 응력값을 비교하였다. 표 6에는 각 모델의 파괴하중과 변위, 표 7에는 파괴하중의 50%를 사용하중이라고 간주하여 그때의 변위와 응력값을 정리하였다. 표 6~7에서 응력값은 중앙부에서의 응력을 계산한 것이다.

강축 모델의 경우 인장부의 면재가 파괴되기 이전에 압축부의 면재에서 파괴가 일어났기 때문에 얇은 복합소재판의 경우 압축에 약한 점을 보여주고 있다. 따라서 각 모델의 파

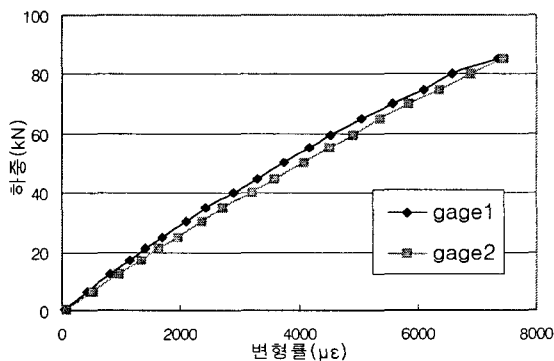


그림 11 TS의 gage1과 gage2의 하중-변형률 관계

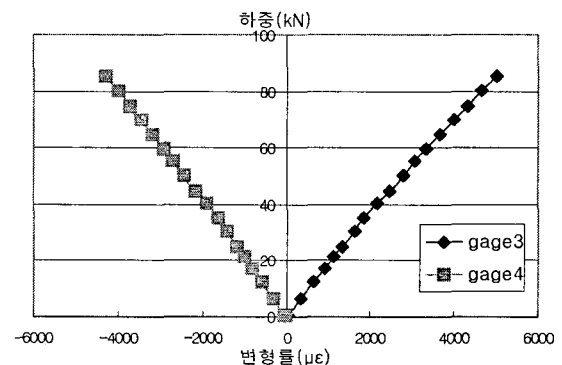


그림 12 TS의 gage3과 gage4의 하중-변형률 관계

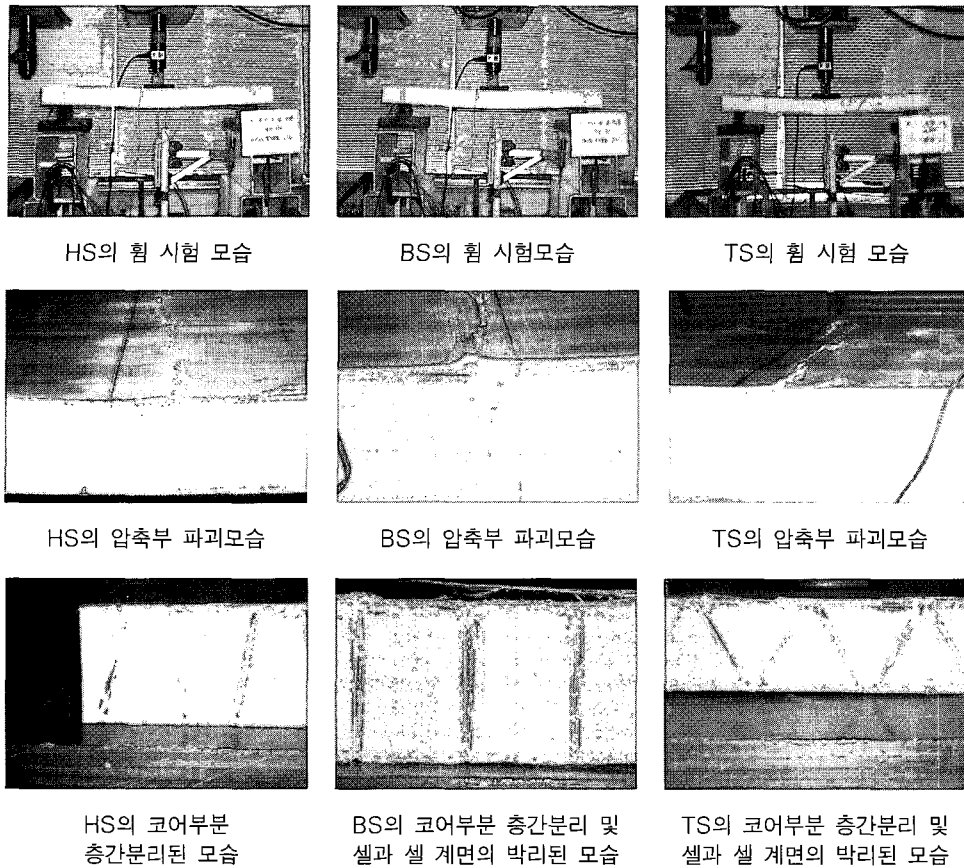


사진 4 강축 모델의 시험모습 및 파괴모드

피강도는 압축응력에 의해 좌우된다고 할 수 있다. 압축파괴 응력의 경우 제형단면이 가장 큰 응력을 보여주고 있으며 삼각형단면이 가장 작은 압축파괴응력을 보여주고 있다. 이는 제형단면의 경우 높은 응력에서 파괴되기 때문에 가장 유리한 단면이며 삼각형단면의 경우 가장 비효율적인 단면이라고 사료된다. 그러나 사용하중하에서 세 단면을 비교하였을 때 VARTM에 의한 제작상의 오차와를 감안하여 세 단면의 응력값의 차이는 크지 않다고 간주할 수 있으므로 강축의 경우 단면형상에 크게 좌우되지 않음을 알 수 있었다.

비교하고자 한다. 세 개의 모델이 같은 중량/부피를 가질 경우 하중-변위 관계로부터 강성과 강도가 가장 큰 단면을 알고자 하였다. 세 가지 모델의 실험결과를 동일한 중량/부피로 환산하여 비교, 분석하였다.

표 8은 세 가지 모델의 중량과 부피를 나타내고 있다. 세 개의 모델 중에서 중량/부피가 가장 작은 제형단면을 기준으로 박스형단면과 삼각형단면이 제형단면의 중량/부피가 같은 값을 가질 때 하중-변위관계를 도시하였다. 그림 13은 세 개의 단면의 환산된 하중-변위관계를 보여주고 있다. 파괴하

### 3.2 강축 모델의 상대적인 하중-변위관계

강축 모델 HS, BS, TS의 휨 실험 결과를 통하여 가장 최적의 단면형상을 얻기 위해 하중-변위 관계로부터 세 단면을

표 8 모델의 중량과 부피

시편	중량(N)	부피(cm <sup>3</sup> )	중량/부피[/(cm <sup>3</sup> )]
HS	154	7.230	2.13e-2
BS	165	7.048	2.34e-2
TS	169	7.230	2.34e-2

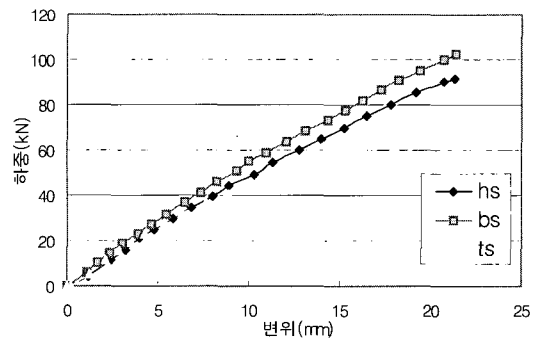


그림 13 중량기준으로 환산된 하중-변위관계

표 9 세 가지 모델의 강성(하중/변위) 비교

모델	하중/변위 (사용하중 이하) [kN/cm]	BS 대비 강성비 (사용하중 이하)	하중/변위 (사용하중 이상) [kN/cm]	BS 대비 강성비 (사용하중 이상)	파괴 하중 [kN]	BS 대비 파괴하 중
HS	55.2	0.931	39.5	0.916	91.8	0.896
BS	59.3	1.0	43.1	1.0	102.5	1.0
TS	56.4	0.951	37.6	0.871	77.8	0.847

중에 가까울수록 이들의 강성은 저하되며, 그 중에서도 삼각형단면의 강성저하가 다른 단면들에 비해 약간 크다. 또한 삼각형단면의 경우 파괴하중이 가장 작게 나타났기 때문에 강도가 가장 작은 단면임을 볼 수 있다.

표 9에는 같은 비용으로 파형코어 샌드위치 보가 강축으로 제작될 경우, 중량기준으로 환산된 세 가지 모델의 하중-변위관계로부터 얻은 강성(하중/변위)을 나타내었다. 그림 13에서는 세 가지 단면 모델의 중량/부피가 같을 경우, 즉 같은 비용으로 제작될 경우의 하중-변위관계를 보여주고 있다. 사용하중을 파괴하중/2라고 간주하였을 때, 사용하중 이하일 때의 세 가지 모델의 강성은 거의 비슷하지만 그 크기는 박스형단면 > 삼각형단면 > 제형단면임을 알 수 있다. 그러나, 가장 선형적이고 강성과 강도가 큰 단면은 박스형단면임을 알 수 있다.

### 3.3 강축 모델의 파괴모드

강축 모델의 경우 세 가지 단면의 파괴모드는 모두 압축파괴를 보여주었으며 인장부 파괴는 볼 수 없었고 거의 탄성적인 거동을 하였다. 세 가지 모델 모두 압축좌굴파괴가 일어난 것을 볼 수 있는데 얇은 복합소재판의 경우 인장에는 강하나 압축에는 약한 성질 때문이라고 사료된다. 사진 4에서는 강축 모델의 파괴모드를 보여주고 있다. 세 가지 모델은 모두 압축부 면재에서 압축파괴가 일어났고 파괴단면에서 볼 수 있듯이 압축부 면재와 파형코어에서 적층간 분리가 일어난 것을 볼 수 있다. 또한 국부적으로 파형코어에 주름이진 것을 볼 수 있는데, 이는 우레탄 심재가 면재나 파형코어의 좌굴을 잡아주는 역할을 하지만 VARTM공정의 경우 제작과정에서 우레탄코어와 파형코어의 완전접착이 이루어지지 않아서 발생한 경우라고 생각된다.

### 3.4 약축 모델의 시험결과 및 파괴모드

약축 모델의 경우 세 개의 모델 모두 선형적인 거동 이후 항복하였으며 항복 이후 비선형 거동을 보여주었다. 표 10

표 10 약축 휨 실험의 경우 단면에 대한 파괴하중, 강성, 변형률

모델	지간 [cm]	지간/높이 [L/h]	총중량 [N]	항복하중 [kN]	파괴하중 [kN]	극한인장 변형률( $\mu\epsilon$ )
HW	100	11.53	156	14.1	27.4	4696
BW	100	10.90	149	12.6	23.2	8384
TW	100	11.53	165	17.3	22.5	2908

은 약축 모델의 휨 실험에 의한 결과를 보여주고 있다. 표에는 각 모델의 항복하중, 파괴하중, 최대변위 및 최대인장 변형률을 나타내고 있다.

강성의 경우 강축과 비교했을 때 제형단면인 HW는 강축 모델 HS의 30%를 보였고, 박스형 단면 BW는 강축 모델 BS 강성의 17%밖에 발휘하지 못하였으나, 삼각형 단면의 모델 TW의 경우 강축 모델 TS강성의 65%나 발휘하였다. 또한 약축 모델의 경우 항복하중을 기준으로 볼 때 강축 모델의 약 10~20%, 파괴하중을 기준으로 볼 때 20~30%의 하중 밖에 견디지 못하는 것을 볼 수 있다.

#### 3.4.1 제형단면 약축 모델(HW)

그림 14에서는 HW의 게이지 위치를 보여주고 있다. 모델 HW의 경우 다른 모델의 경우와는 달리 개단면으로서 사다리꼴의 좁은 면에 하중을 가하였다. 다음의 그림 15에서 보는 바와 같이 중앙에 부착한 게이지 1의 경우 파형코어와 인장부 면재가 접하지 않는 부분으로서 거의 선형적으로 변화하는 것을 볼 수 있고, 인장부 면재와 파형코어가 접착된 부분에 부착한 게이지 2의 경우 선형에서 비선형으로 변화하는 것을 볼 수 있다. 이는 게이지 2가 접착된 부분의 경우 하중이 재하되면서 항복한 뒤 파형코어와 인장부면재에서 게면박리 현상이 일어나기 때문인 것으로 사료된다.

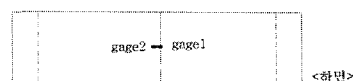
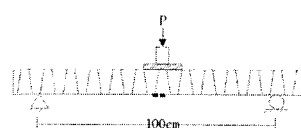


그림 14 HW의 게이지 위치

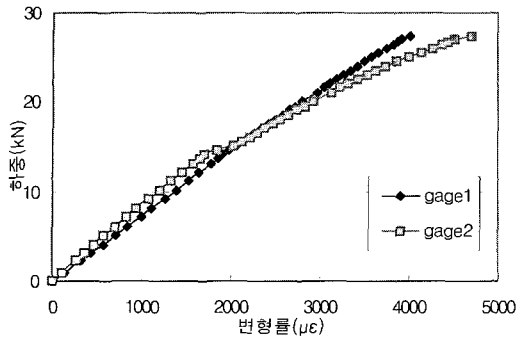


그림 15 HW의 gage1과 gage2의 하중-변형률 관계

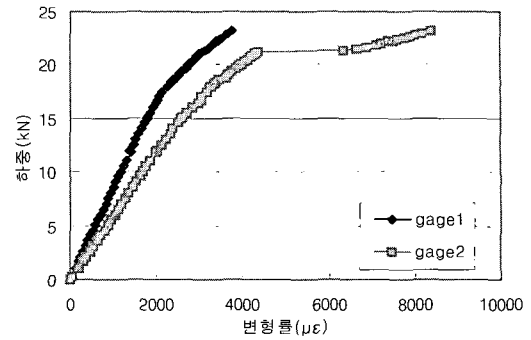


그림 16 BW의 gage1과 gage2의 하중-변형률 관계

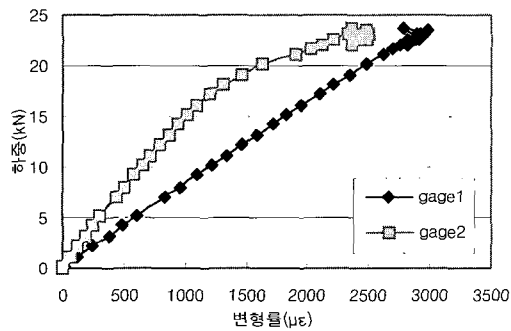


그림 17 TW의 gage1과 gage2의 하중-변형률 관계

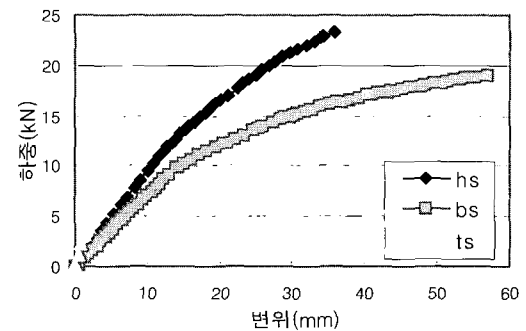


그림 18 중량기준으로 환산된 하중-변위곡선

### 3.4.2 박스형단면 약축 모델(BW)

BW의 경우 게이지 부착위치는 제형단면 약축 모델과 동일하며, 박스모양의 면에 해당하는 부분에 하중을 재하하였으며 그림 16에서는 게이지 1과 2의 하중-변형률 관계를 보여주고 있다. 게이지 1과 게이지 2는 항복 이후 비선형 거동을 보여주고 있으며, 게이지 2의 경우 21kN에서 갑자기 변형이 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 인장부 면재와 파형코어의 계면박리로 인한 것으로 사료된다.

### 3.4.3 삼각형단면 약축 모델(TW)

모델 TW의 경우 게이지 부착위치는 제형단면 약축 모델과 동일하며, 삼각형의 꼭지점 부분에 하중을 재하하였으며 그림 17에는 게이지 1과 게이지 2의 하중-변형률 관계를 보여주고 있다. 인장부 면재와 파형코어가 접촉된 중앙부에 부착한 게이지 1의 경우 선형적인 거동을 보여주고 있으며, 삼

각형 파형코어와 파형코어가 만나는 부분에 부착된 게이지 3의 경우 항복하중 이후 비선형으로 거동하는 것을 볼 수 있다. 이는 제형단면과 마찬가지로 항복 이후 인장부의 면재와 파형코어간의 박리가 진행됨으로서 나타나는 현상이라고 사료된다.

### 3.5 약축 모델의 상대적인 하중-변위 관계

약축 모델 HW, BW, TW의 힘 실험 결과를 통하여 약축으로 가장 효과적인 단면을 얻기 위해 하중-변위관계로부터 세 단면을 비교하고자 한다. 약축 모델의 경우에는 중량/부피를 기준으로 비교하였다. 강축 모델과 마찬가지로 중량/부피는 변위에 반비례한다고 가정하고, 각 단면의 실험에 의한 변위를 같은 중량/부피를 가질 경우의 변위로 환산하여 두 개의 변위를 비교, 분석하였다. 표 11에는 세 가지 모델의 중량과 부피를 나타내고 있다. 세 개의 모델 중에서 중량/부피가 가장 작은 삼각형단면을 기준으로 제형단면과 박스형단면이 삼각형단면과 같은 중량을 가질 경우 하중-변위관계를 구하였다.

그림 18에서는 세 가지 단면의 모델이 중량/부피가 같은 경우, 즉 같은 비용으로 제작될 경우의 하중-변위관계를 보여주고 있다. 박스형단면의 경우 가장 낮은 강성을 보여주고

표 11 약축 모델의 중량과 부피

모델	중량[N]	부피[cm <sup>3</sup> ]	중량/부피[N/cm <sup>3</sup> ]
HW	153.6	7.532	2.04e-2
BW	146.4	6.969	2.1e-2
TW	162.0	9.379	1.73e-2



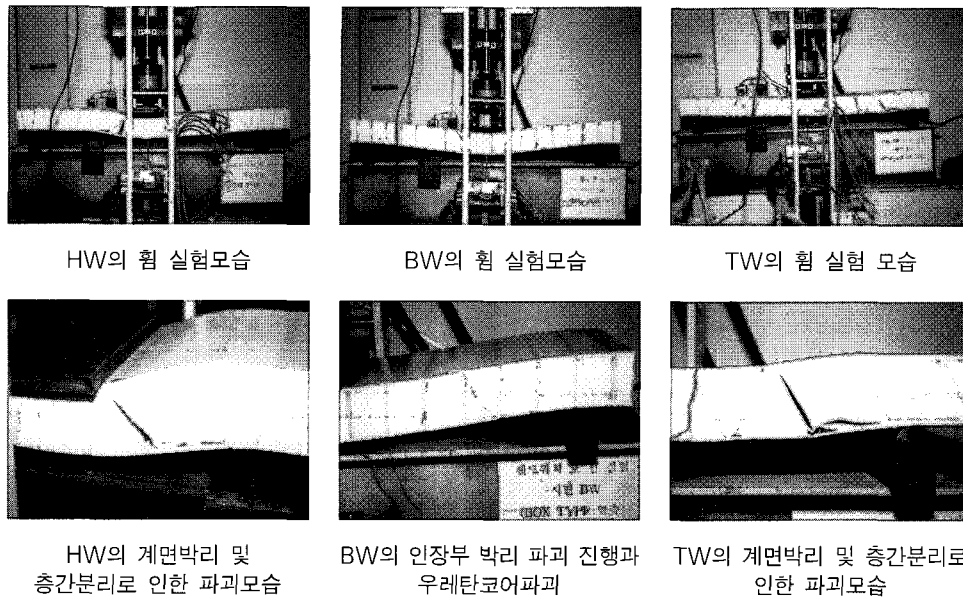


사진 5 약축 모델의 실험모습 및 파괴모드

있으며, 제형단면과 박스형단면의 경우 항복 후에도 항복하중의 두 배에 가까운 파괴하중을 보여주는 상당히 연성적인 거동을 보여주고 있다. 다른 단면에 비해서 월등히 큰 강성을 보여주고 있는 삼각형 단면의 경우 거의 선형적인 거동을 하며 항복하중과 파괴하중의 차이가 거의 없는 취성적인 성격을 보여주고 있다. 표 12에는 세 가지 모델의 강성(하중/변위)을 보여주고 있다. 삼각형단면의 강성은 선형구간에서 26.5kN/cm를 보여주고 있으며, 제형단면과 박스형단면은 삼각형단면 강성의 25~35% 밖에 발휘하지 못하는 것을 볼 수 있다. 또한 항복하중의 경우에도 삼각형단면은 다른 단면에 비해서 2배에 가까운 강도를 보여준다. 그러나 세 단면의 파괴하중의 경우 거의 같은 값을 보여주고 있는데, 이는 제형단면과 박스형단면의 연성적인 거동을 증명해주므로 같은 비용으로 파형코어 복합소재 샌드위치 보를 약축으로 제작할 경우 삼각형단면이 가장 효과적인 단면임을 알 수 있다.

### 3.6 약축 모델의 파괴모드

사진 5에는 각 약축 모델의 처짐 모습과 파괴모드를 보여

표 12 세 가지 모델의 강성(하중/변위)

모델	선형구간에서의 하중/변위 [kN/cm]	TW 대비 강성비	항복 하중 [kN]	TW 대비 항복 하중비	파괴 하중 [kN]	TW 대비 파괴 하중비
HW	9.46	0.357	11.08	0.58	23.3	0.985
BW	7.13	0.269	9.88	0.517	19.1	0.809
TW	26.5	1.0	9.10	1.0	23.6	1.0

주고 있다. 약축 모델은 압축부나 인장부에서의 파괴는 볼 수 없었으며 모두 인장부의 면재와 파형코어의 계면박리로 인해 파괴가 진전됨을 볼 수 있었다. 면재와 파형코어의 계면박리의 진행으로 인해 우레탄 코어가 파괴되었다고 사료된다. 초기균열은 모델의 제작 시 수지가 많이 채워질 수 있는 면재와 파형코어 사이의 틈에서 시작되어 수지가 인장을 받아 수지가 파괴되기 때문에 주로 인장부에서 계면박리 현상이 일어난다고 사료된다. 약축 모델의 파괴모드는 면재와 파형코어간의 박리, 셀과 셀 계면에서의 박리, 우레탄 코어와 파형코어간의 박리가 발생하며, 인장부에서 발생된 박리는 파형코어를 따라서 점차 압축부로 진행되어 감을 볼 수 있다. 약축 모델의 경우 힘을 받는 부재인 면재는 강도를 완전히 발휘하기 이전에 파형코어와의 계면에서 박리파괴가 일어나고, 파괴된 취약부분에서부터 균열이 진전되어 우레탄 코어의 파괴와 압축부의 박리현상을 초래할 수 있다. 보다 자세한 시험결과는 참고문헌 5를 참조하기 바란다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 VARTM공정에 의해 제작된 사다리꼴, 사각형, 삼각형 형상을 가진 파형코어 복합소재 바닥판 모델 시험체에 대해 각각 강축과 약축으로 3점 휨시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 강축 모델의 경우 같은 중량/부피를 가진 단면이 서로 다른 형상의 바닥판을 제작한다고 했을 때 다른 단면

에 비해 박스형단면은 강성과 강도가 약간 크고, 삼각형단면은 강성저하가 조금 크지만, 파괴하중/2을 사용하중이라고 보았을 때 사용하중 이하에서 세 단면의 강성은 서로 5~7% 차이를 보이므로 강축의 강성은 단면의 형상에는 크게 좌우되지 않음을 알았다.

- 2) 본 연구의 시험체에서 강축 모델의 파괴는 압축부 면재의 압축좌굴파괴가 지배적이었음을 알았다. 따라서 향후 압축부를 더 두껍게 설계된 모델에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 파괴단면을 절단하였을 때 면재와 파형코어, 파형코어와 우레탄코어간의 계면 박리 또한 볼 수 있었다. 따라서 이에 대한 개선도 필요한 것으로 사료된다.
- 3) 약축 모델의 경우 같은 중량/부피로 서로 다른 형상의 파형코어를 가진 바닥판을 제작한다고 할 때, 삼각형 단면이 강성과 강도가 큰 효과적인 단면이라는 것을 알 수 있었다.
- 4) 약축 모델의 파괴모드는 인장부 면재와 파형코어의 계면박리파괴가 지배적이었다. 따라서 이에 대한 개선방안도 연구되어야 할 것으로 사료된다.
- 5) 본 연구에서 고려한 모델에서는 약축 모델의 경우 강축 모델에 비해서 약 20%의 강도밖에 발휘하지 못하는 것을 알았고, 강축에 비해 상대적으로 크게 취약함을 알았다. 따라서 약축에 대한 보다 큰 강도가 요구될 경우 단면설계가 개선되어야 할 것으로 사료된다.
- 6) 결론적으로 강축은 단면형상의 변화에 따라 강성과 강도차이가 크지 않고, 약축은 삼각형형상의 강성과 강도가 상대적으로 아주 크므로 삼각형단면의 테크형상이 바람직한 것으로 평가된다.

## 감사의 글

본 연구는 국민대학교의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- 이성우(2000) 복합소재 구조물 제작을 위한 VARTM 제조공정도입 및 건설분야 활용기법 연구개발, 국민대학교 구조안전연구소 연구보고서, KMU/SSRC.
- 주성애(2000) 토목구조용 파형코어 복합소재 샌드위치 구조의 휨 거동특성, 국민대학교 석사학위논문.
- Brown, R. Dr., Zureick, A.H. (1999) Lightweight Fiber Reinforced Plastic Decking, Proceedings, Marine Platform Technology Program.
- Eckel, D.A.(1998) A Theoretical and Experimental Study of the Behavior of Sandwich Bridge Decks Composed of Composite Materials, Reserach Report, Center for Composite Materials University of Delaware.
- European Space Agency(2000) ESAComp-The Composites Design Software, Compoengineering Inc, Finland.