

유리섬유 복합소재 데크의 휨 거동 특성

Flexural Characteristics of GFRP Composite Deck

주 성 애 *

Joo, Sung Ae

이 성 우 **

Lee, Sung Woo

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 sandwich deck models of hat, box, and triangular section type were fabricated by VARTM process. For those models, three point flexural test was carried out both in strong and weak axis. The experimental results are compared with each other to determine efficient section type. Also finite element analysis was performed and compared with experiments to verify analysis model. It has been demonstrated that composite sandwich deck can be used as bridge deck in the new construction and rehabilitation work.

1. 서 론

기존의 교량의 상판은 대부분 콘크리트 상판으로 시공되고 있다. 그러나 콘크리트의 열화, 철근의 부식 등으로 유지관리 및 내구성에 문제가 발생하고 있어 새로운 재료를 이용한 교량 상판의 개발 필요성이 대두되었다. 복합소재를 이용한 파형코어 샌드위치 상판은 콘크리트 상판 중량의 1/5수준의 경량이어서 내하력을 증진시켜 줄 수 있고 보다 경제적으로 하부구조를 건설할 수 있게 해준다. 또한 복합소재 상판은 부식 문제의 해결과 유지관리비를 크게 절감시킬 수 있으므로 이에 대한 개발의 필요성이 인지되었다.

본 연구의 복합소재 데크의 구조는 얇고 강하나 밀도가 큰 면재와 두껍고 강도가 낮으며 밀도가 작은 심재로 구성되어 단면이차 모멘트를 증가시킬 수 있으므로, 큰 강성과 강도를 가진다.

본 논문에서는 복합소재 제조방법 중 진공성형 기법인 VARTM(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)제조법[1]으로 제작하였다. 제작된 복합소재 샌드위치 데크 모델에 대해 3점 휨 실험을 통하여 휨 거동특성과 파괴모드를 분석하고 그 사용성을 검토하고자 하였다.

복합소재 샌드위치 데크의 휨 실험을 위한 모델은 6가지로서 파형코어의 단면이 각각 제형단면(Hat Type), 박스형 단면(Box Type), 삼각형 단면(Truss Type)에 대해 각각 강축과 약축에 대한 시험모델을 제작하였으며 이에 대한 실험을 실시하였고, 유한요소해석을 통해 해석모델도 검증하였다.

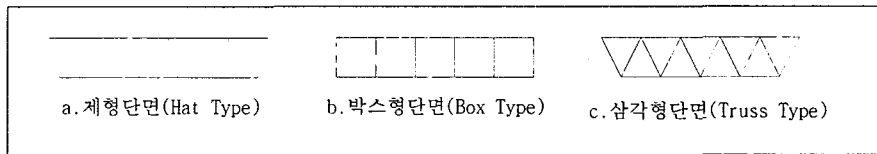
* 국민대학교 건설시스템공학부 공학석사

** 국민대학교 건설시스템공학부 교수

2. 파형코어 복합소재 샌드위치 데크의 제작

2.1 파형코어의 단면

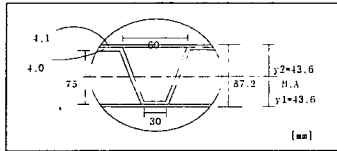
본 연구에서는 참고문헌 2를 참조하여 [그림 1]과 같이 세 가지 형태의 파형코어 형태를 가진 샌드위치 데크를 고려하였다. 위의 세 가지 형태의 데크는 강축모델의 경우 지간을 100cm로 동일하게 하였고, 셀의 수가 최대한 일치하도록 데크의 크기와 섬유유 양을 정하였다. 약축모델의 경우 강축의 경우와 같은 크기의 셀로 제작하고, 폭이 30cm, 지간이 100cm가 되도록 제작하였다. 본 연구에서는 편의상 제형단면의 강축모델을 HS, 박스형단면의 강축모델을 BS, 삼각형단면의 강축모델을 TS라 하고, 제형단면의 약축모델을 HW, 박스형단면의 약축모델을 BW, 삼각형단면의 약축모델을 TW라 정의하도록 한다.



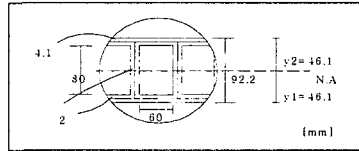
[그림 1] 파형코어 단면의 모습

2.2 복합소재 파형코어 샌드위치 데크의 제작

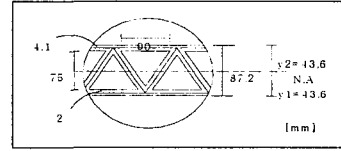
샌드위치 데크를 제작하는데 사용된 면재와 파형코어는 동일산자 제품의 다축 유리섬유 직포(multi-axial stitched fabric)를 사용하여 가장 적합한 섬유배열로 적층하였고, 우레탄 폼은 한비산업 제품의 밀도 75kgf/m³의 폴리 시아누레이트 우레탄(Poly - Cyanurate - Urethane) 코어를 사용하였다. 각 모델의 제작 과정과 모델 제작에 사용된 적층판의 시편실험결과는 참고문헌[2]를 참조하기 바란다.



[그림 2] 제형단면의 형상



[그림 3] 박스형단면의 형상



[그림 4] 삼각형단면의 형상

[그림 2~4]는 세가지 모델의 복합소재 데크 형상을 보여주고 있다. 강축모델의 경우 HS, BS, TS 모두 셀이 5개가 되도록 제작하였으며, 약축모델의 경우 HW는 24개, BW는 17개, TW의 경우 21개의 셀을 가지도록 제작하였고, 여섯 개의 모델 모두 지간은 100cm가 되도록 하였다.

3. 파형코어 복합소재 샌드위치 데크의 휨 실험

파형코어의 형상이 제형단면, 박스형 단면, 삼각형 단면 등 세 가지 형태로 제작한 복합소재 샌드위치 데크를 단순지점으로 3점 휨 실험을 수행하였고, 하중은 선하중으로 재하하였다. 파형코어의 모양에 따른 구조적인 특성을 알기 위해 하중-변위 관계로부터 강성을 비교하여 가장 효과적인 단면을 알고자 하였으며, 하중-변형률 관계에서는 최대 인장응력과 압축응력을, 실험을 통해 파괴하중, 파괴모드를 토대로 복합소재 샌드위치 보의 휨 거동을 관찰하였다.

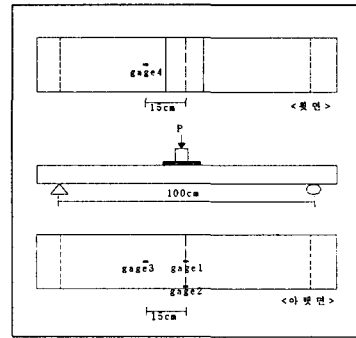
3.1 강축모델의 실험결과

[표 1]는 강축으로 제작된 세가지 단면의 복합소재 샌드위치 데크의 휨 실험 결과를 보여주고 있다[3]. 각 모델의 단면이차모멘트와 총중량, 파괴하중 및 최대 변위와 극한 인장변형률을 나타내고 있다. [그림 5]에는 강축시편모델

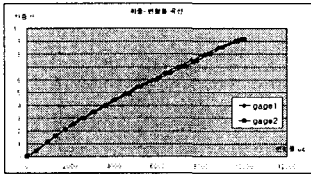
의 게이지 위치를 보여주고 있다.

[표 1] 강축모델의 파괴하중과 최대변위

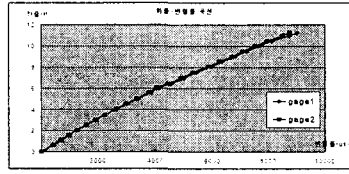
모델	지간 [cm]	지간/높이 [L/h]	단면이차모멘트 [cm ⁴]	총중량 [kgf]	파괴하중 [kgf]	최대변위 [mm]	극한인장변형률 [$\mu\epsilon$]
HS	100	11.53	572	15.4	9180	21.35	9851
BS	100	10.9	836	16.5	11260	19.48	9008
TS	100	11.53	690	16.9	8530	17.61	7363



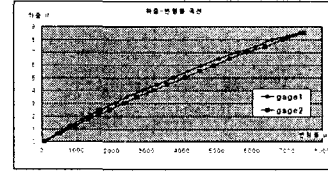
[그림 5] 강축시험모델의 게이지 위치



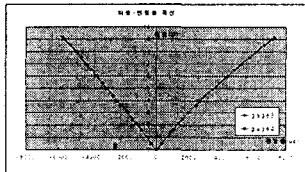
[그림 6] HS의 gage1과 gage2의 하중-변형률



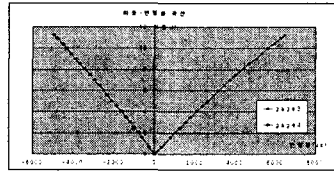
[그림 7] BS의 gage1과 gage2의 하중-변형률 관계



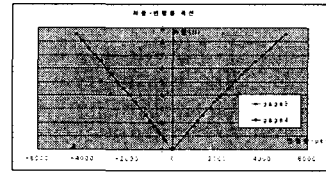
[그림 8] TS의 gage1과 gage2의 하중-변형률 관계



[그림 9] HS의 gage3과 gage4의 하중-변형률 관계



[그림 10] BS의 gage3과 gage4의 하중-변형률



[그림 11] TS의 gage3과 gage4의 하중-변형률 관계

[그림 6~8]은 각 강축모델에 부착된 게이지 1과 2의 하중-변형률 관계를 보여주고 있으며 [그림 9~11]은 게이지 3과 4의 하중-변형률 관계를 보여주고 있다. [그림 6~8]에서 보는 것과 같이 게이지1과 게이지2는 거의 같은 변형률 값을 나타내는 것을 볼 수 있으며 이는 실험 중에 비틀림이 발생하지 않았다는 것을 알 수 있다. 모델의 압축부와 인장부의 같은 위치에 부착한 게이지 3과 4는 [그림 9~10]에서 보는바와 같이 그 거동은 비슷하지만 압축과 인장변형률의 차이가 약간 있는 것으로 보여진다.

4) 세가지 모델의 응력값 비교

모델 상하면의 하중-변형률관계로부터 세가지 모델의 응력값을 비교하였다. [표 2]에는 각 모델의 파괴하중과 변위, [표 3]에는 파괴하중의 50%를 사용하중이라고 간주하여 그 때의 변위와 응력값을 정리하였다. [표 2~3]에서 응력값은 중앙부에서의 응력을 계산한 것이다. 각 모델의 중립축과 응력값은 참고문헌[2]를 참조바란다. 강축모델의 경우 인장부의 면재가 파괴되기 이전 압축부의 면재에서 파괴가 일어났기 때문에 각 모델의 파괴강도는 압축응력에 의해 좌우된다고 할 수 있다. 압축파괴응력의 경우 제형단면이 가장 큰 응력을 보여주고 있으며 삼각형단면이 가장 작은 압축파괴응력을 보여주고 있기 때문에 제형단면의 경우가 효과적인 단면이라고 볼 수 있지만, 사용하중 하에서 세 단면을 비교하였을 때 VARTM에 의한 제작상의 오차와를 감

안하여 세 단면의 응력값의 차이는 크지 않다고 간주할 수 있으므로 강축의 경우 단면형상에 크게 좌우되지 않음을 알 수 있다.

【표 2】 파괴하중일 때의 응력 비교

모델	파괴 하중 [kgf]	변위 [mm]	C1 [cm]	C2 [cm]	압축응력 [kgf/cm ²]	인장응력 [kgf/cm ²]
HS	9180	21.35	4.01	4.71	1608.10	1890.60
BS	11260	19.48	3.97	5.20	1336.80	1750.90
TS	8530	17.61	4.02	4.70	1242.40	1452.60

【표 3】 사용하중(파괴하중/2)일 때의 응력비교

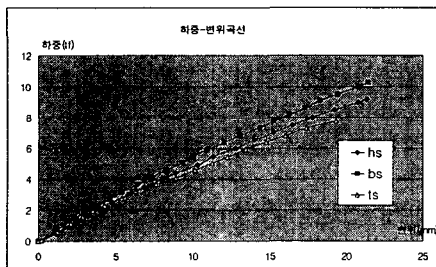
모델	파괴 하중/2 [kgf]	변위 [mm]	C1 [cm]	C2 [cm]	압축응력 [kgf/cm ²]	인장응력 [kgf/cm ²]
HS	4400	8.09	4.01	4.71	770.8	907.7
BS	5580	8.48	3.97	5.2	662.5	867.7
TS	4480	8.09	4.02	4.7	652.5	762.9

3.2 중량 기준으로 한 강축모델의 상대적인 하중-변위관계

【표 4】 모델의 중량과 부피

시편	중량 [kgf]	부피 [cm ³]	중량/부피 [kgf/cm ³]
HS	15.4	7230	2.13E-3
BS	16.5	7048	2.34E-3
TS	16.9	7230	2.34E-3

【표 4】에 세 가지 모델의 중량과 부피를 나타내고 있다. 세 개의 모델 실험 결과에서 중량/부피가 가장 작은 제형단면을 기준으로 박스형단면과 삼각형 단면이 제형단면의 중량/부피가 같은 값을 가질 때 하중-변위관계를 도시하였다. [그림 12]는 세 개의 단면의 환산된 하중-변위관계를 보여주고 있으며 이를 통하여 각 모델이 같은 중량/부피를 가질 경우 가장 강성과 강도가 큰 단면을 알고자 하였다.



【그림 12】 중량기준으로 환산된 하중-변위관계

파괴하중에 가까울수록 이들의 강성은 저하되며 그 중에서도 삼각형단면의 강성저하가 다른 단면들에 비해 약간 크고 강도가 가장 작다. 【표 5】는 중량기준으로 환산된 세가지 모델의 하중-변위관계로부터 얻은 하중/변위(stiffness)를 나타내었다. 사용하중을 파괴하중/2라고 간주하였을 때 사용하중 이하일 때의 세가지 모델의 강성은 거의 비슷하지만 그 크기는 박스형단면 > 삼각형단면 > 제형단면임을 알 수 있지만 사용하중에서 그 하중/변위 차이는 크지 않다고 간주된다.

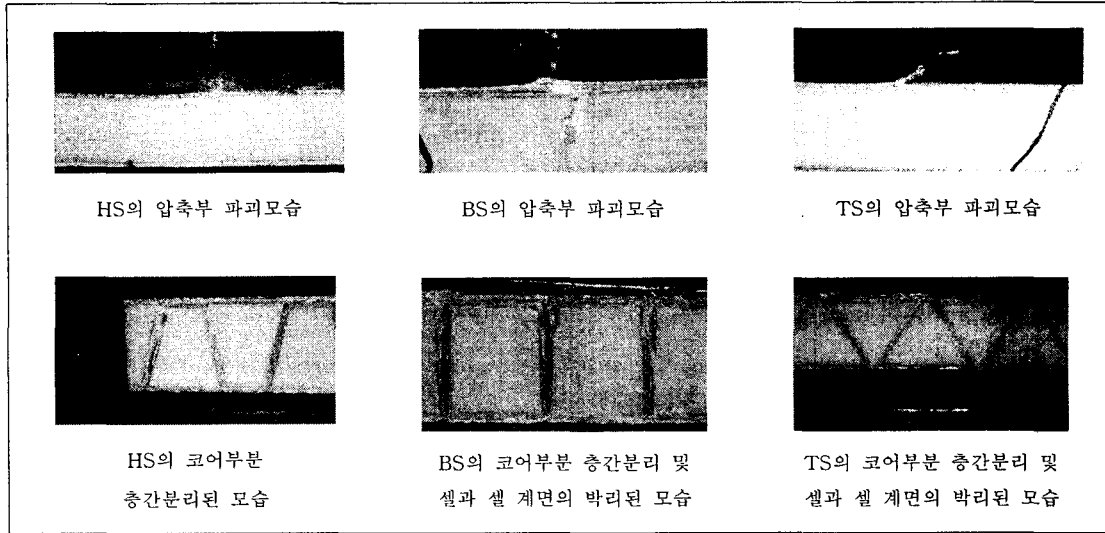
【표 5】 세가지 모델의 하중/변위(stiffness) 비교

모델	사용하중이하 하중/변위[kgf/cm]	사용하중이하 하중/변위비	사용하중이상 하중/변위[kgf/cm]	사용하중이상 하중/변위비	파괴하중[kgf]	파괴하중비
HS	5519	0.931	3950	0.916	9180	0.896
BS	5929	1.0	4312	1.0	10246	1.0
TS	5640	0.951	3757	0.871	7776	0.847

3.3 강축모델의 파괴모드

【사진 1】은 강축모델의 파괴모드를 보여주고 있다. 세가지 모델은 모두 압축부 면제에서 압축파괴가 일어났고 파괴단면에서 볼 수 있듯이 압축부 면제와 파형코어에서 적층간 분리가 일어난 것을 볼 수 있다. 이는 복합소재의 인장에는 강하나 압축엔 약한 성질 때문이라고 사료된다. 또한 국부적으로 파형코어에 주름이 진 것을 볼 수 있는데, 이는 우레탄 심재가 면제나 파형코어의 좌굴을 잡아주는 역할을 하지만 VARTM공정의

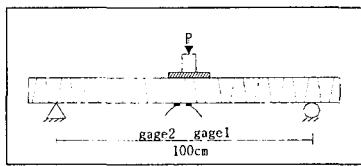
경우 제작과정에서 우레탄코어와 파형코어의 완전접착이 이루어지지 않아서 발생한 경우라고 생각된다.



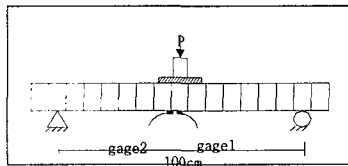
[사진 1] 강축모델의 실험모습 및 파괴모드

3.4 약축모델의 실험결과 및 파괴모드

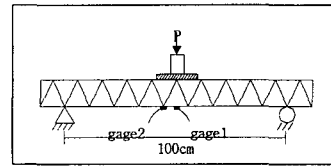
약축모델의 경우 세 개의 모델 모두 선형적인 거동 이후 항복하였으며 항복 이후 비선형 거동을 보여주었다.



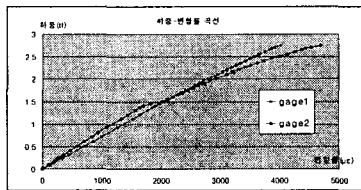
[그림 13] HW의 게이지 위치



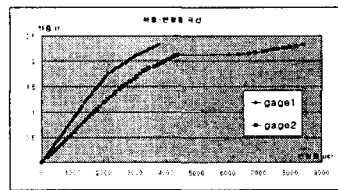
[그림 14] BW의 게이지 위치



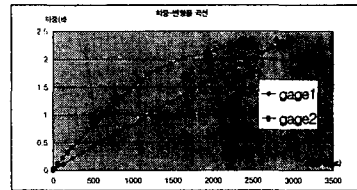
[그림 15] TW의 게이지 위치



[그림 16] HW의 gage1과 gage2의
하중-변형률 관계



[그림 17] BW의 gage1과 gage2의
하중-변형률 관계



[그림 18] TW의 gage1과 gage2의
하중-변형률 관계

[표 6]은 약축모델의 휨 실험에 의한 결과를 보여주고 있다. 하중/변위의 경우 강축과 비교했을 때 제형단면인 HW는 강축모델 HS의 30%를 보였고, 박스형 단면 BW는 강축모델 BS 강성의 17%밖에 발휘하지 못하였으나 삼각형 단면의 모델 TW의 경우 강축모델 TS강성의 65%나 발휘하였다. 또한 약축모델의 경우 항복하중을 기준으로 볼 때 강축모델의 약 10~20%, 파괴하중을 기준으로 볼 때 20~30%의 하중 밖에 견디지 못하는 것을 볼 수 있다. [그림 13~15]은 각 약축모델의 게이지 위치를 보여주고 있으며 [그림 16~18]은 하중-변형률 관계를 보여주고 있다. 중앙에 부착한 게이지 1의 경우 파형코어와 인장부 면재가 접하지 않는 부분으로서 거의 선형적으로 변화하는 것을 볼 수 있고, 인장부 면재와 파형코어가 접착되거나 경계면 부분에 부착

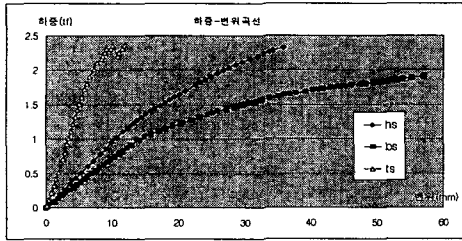
[표 6] 약축 휨 실험결과

모델	지간 [cm]	지간/높이 [L/h]	총중량 [kgf]	항복 하중 [kgf]	파괴 하중 [kgf]	극한인장 변형률 [$\mu\epsilon$]
HW	100	11.53	15.6	1408	2743	4696
BW	100	10.9	14.9	1256	2320	8384
TW	100	11.53	16.5	1727	2252	2908

한 게이지2의 경우 선형에서 비선형으로 변화하는 것을 볼 수 있다. 이는 게이지 2가 접착된 부분의 경우 하중이 재하되면서 항복한 뒤 파형코어와 인장 부면재가 계면박리 현상이 일어나기 때문인 것으로 사료된다

3.5 중량을 기준으로 한 약축모델의 상대적인 하중-변위 관계

약축모델의 휨 실험 결과를 통하여 가장 최적의 단면을 얻기 위해 하중-변위관계로부터 세 단면을 비교하고자 한다. 약축모델 또한 강축모델과 같이 중량/부피를 기준으로 비교하였다. [표 7]에 세가지 모델의중량과 부피를 나타내고 있다. 세 개의 모델 중에서 중량/부피가 가장 작은 삼각형단면을 기준으로 제형단면과 박스형단면이 삼각형단면과 같은 중량을 가질 경우 하중-변위관계를 도시하였으며 [그림 19]와 같다.



[그림 19] 중량기준으로 환산된 하중-변위곡선

박스형단면의 경우 가장 낮은 강성을 보여주고 있으며, 제형 단면과 박스형단면의 경우 항복 후에도 항복하중의 두 배에 가까운 파괴하중을 보여주는 연성적인 거동을 보여주고 있다. 다른 단면에 비해서 월등히 큰 강성을 보여주고 있는 삼각형 단면의 경우 거의 선형적인 거동을 하며 다른 단면에 비해 취성적인 면을 볼 수 있다. [표 8]에는 세가지 모델의 하중/변위(stiffness)를 보여주고 있다. 삼각형단면의 강성은

선형구간에서 2647kgf/cm를 보여주며 HW과 BW는 TW 강성의 25~35% 밖에 발휘하지 못하는 것을 볼 수 있으며 항복하중의 경우에도 TW는 다른 단면에 비해서 2배에 가까운 강도를 보여준다.

[표 7] 약축모델의 중량과 부피

모델	중량 [kgf]	부피 [cm ³]	중량/부피 [kgf/cm ³]
HW	15.36	7532	2.04E-3
BW	14.64	6969	2.1E-3
TW	16.2	9379	1.73E-3

그러나 파괴하중의 경우 거의 같은 값을 보여주고 있는데 이는 제형단면과 박스형단면의 연성적인 거동을 증명해주므로 같은 비용으로 파형코어 복합소재 샌드위치 보를 약축으로 제작할 경우 삼각형 단면이 가장 효과적인 단면임을 알 수 있다.

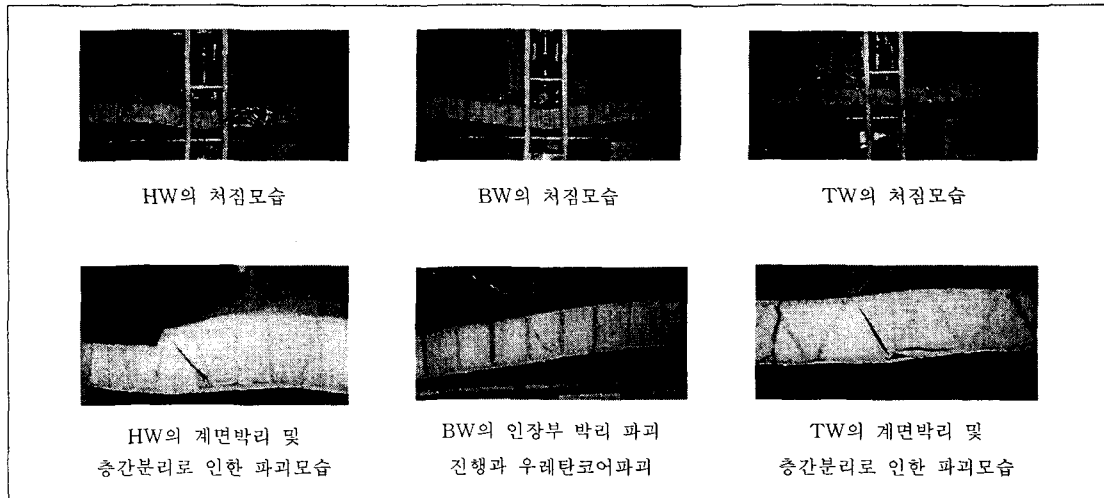
[표 8] 세가지 모델의 하중/변위(stiffness)

모델	선형구간에서의 하중/변위[kgf/cm]	하중변위비	항복하중[kgf]	항복하중비	파괴하중[kgf]	파괴하중비
HW	946	0.357	1.108	0.58	2.327	0.985
BW	713	0.269	0.988	0.517	1.911	0.809
TW	2647	1.0	0.910	1.0	2.362	1.0

3.6 약축모델의 파괴모드

[사진 2]에는 각 약축모델의 처짐 모습과 파괴모드를 보여주고 있다. 약축모델은 모두 인장부의 면재와 파형 코어의 계면박리로 인해 파괴가 진전됨을 볼 수 있었다. 면재와 파형코어의 계면박리의 진행으로 인해 우레탄 코어가 파괴되었다고 사료된다. 초기균열은 모델 제작 시 수지가 많이 채워질 수 있는 면재와 파형코어 사이 틈에서 시작되어 인장을 받은 수지가 깨어지기 때문에 주로 인장부에서 계면박리 현상이 일어난다고 사료된다. 약축모델의 파괴모드는 면재와 파형코어간의 박리, 셀과 셀 계면에서의 박리, 우레탄 코어와 파형 코어간의 박리가 발생하며, 인장부에서 발생한 박리는 파형코어를 따라서 점차 압축부로 진행되어 감을 볼

수 있다. 약축 모델의 경우 면재는 강도를 완전히 발휘하기 이전에 파형코어와의 계면에서 박리파괴가 일어나고 파괴된 부분에서부터 균열은 진전되어 우레탄 코어의 파괴와 압축부의 박리현상을 초래할 수 있다[2].

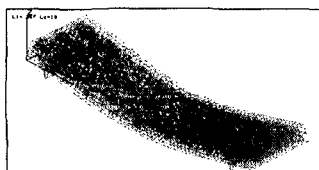


[사진 2] 약축모델의 파괴모드

4. 파형코어 복합소재 샌드위치 데크의 휨 해석

본 장에서는 본 연구에서 수행한 실험의 결과와 해석을 비교하고 이를 토대로 파형코어 복합소재 샌드위치 보의 거동을 분석하고자 한다. 구조해석 프로그램은 COSMOS/M을 사용하였다. 해석에 사용된 면재와 파형코어의 요소는 적층이 가능한 4절점 쉘 요소인 SHELL41(Linear composite quadrilateral plate and shell) 요소를 사용하였고, 우레탄 코어는 솔리드요소인 SOLID를 사용하였다. 해석에 사용된 적층판의 물성치와 시편의 모델링은 시편실험 결과를 적용하였으며, 면재와 파형코어는 완전히 접착되어 일체로 거동한다고 가정하여 선형해석을 하였다. 약축시편의 경우 선형거동 이후 비선형거동을 하므로 선형구간만 유한요소해석하여 비교하였다. 지점조건은 단순지점으로 하였고 지간은 100cm로 하였다. 하중재하는 시편 중앙에서 폭 5cm 만큼의 요소에 압력(pressure)을 가하였다. 해석에 사용된 물성치는 참고문헌[2]를 참조바란다.

4.1 샌드위치 데크 모델의 유한요소해석 결과분석

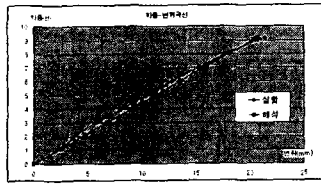


[그림 20] 복합소재 샌드위치 데크 모델의 처짐모습

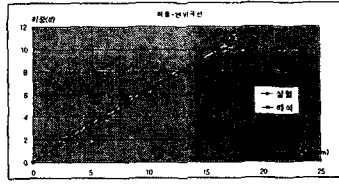
[그림 20]은 해석모델의 처짐모습을 보여주고 있으며 [그림 21~23]은 강축모델의 하중-변위관계를, [그림24~26]은 약축모델의 하중-변위관계를 실험과 해석결과와 비교하고 있다. 해석에 사용된 적층판의 물성치는 참고문헌[2]를 참조하기 바란다.HS와 TS의 경우 단면의 양 끝부분 셀이 반으로 잘려 있으며 그 부분은 국부적으로 처짐이 크고, 제형단면의 경우 파형코어와 접하지 않는 면재 또한 파형코어와 접하여 있는 면재에 비해서 처짐이 약간 크게 나타났다. 이러한 현상은 하중이 직

접적으로재하되는 압축부의 면재에만 나타났다. 실험과 해석결과 HS의 오차는 약 2~10%를, TS은 4~18%를, BS의 경우 약 2~12%정도를 보이며 국부적인 과대처짐을 볼 수 없었다. 약축모델의 경우 강축모델과는 달리 하중재하 단면에서 국부적인 과대처짐은 발생하지 않았다. HW의 경우 실험과 해석 오차가 크게 나타나 약 25%에 이르는 것을 볼 수 있다. 이는 다른 모델과는 달리 개단면이며 강축모델과는 달리 변단면이기 때문인 것으로 사료된다. BW의 경우 실험과 해석의 하중-변위관계 또한 거의 일치하는 것을 볼 수 있으며 오차는

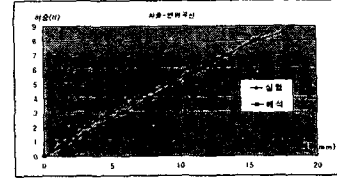
약 2~4%인 것으로 보인다. TW 경우 실험과 해석의 오차는 약 7~14%를 보인다.



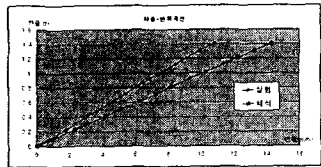
[그림 21] HS의 하중-변위관계



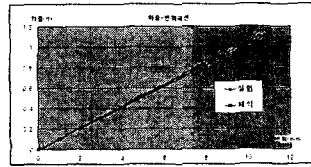
[그림 22] BS의 하중-변위관계



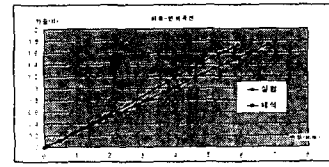
[그림 23] TS의 하중-변위관계



[그림 24] HW의 하중-변위관계



[그림 25] BW의 하중-변위관계



[그림 26] TW의 하중-변위관계

5. 결론

본 논문에서는 VARTM공정을 통해 파형코어 복합소재 샌드위치 데크를 강축과 약축으로 각각 단면이 다른 사다리꼴, 사각형, 삼각형 형상을 가진 세 개의 모델을 제작하여 하중-변위관계, 하중-변형률 관계를 유한요소해석을 통하여 비교분석 하여 다음과 같은 결론을 도출하였다. 강축모델의 경우 같은 중량/부피를 가진 단면이 서로 다른 샌드위치 데크를 제작한다고 했을 때 파괴하중/2을 사용하중이라고 보았을 때 사용하중 이하에서 세 단면의 강성은 5~7% 차이를 보이므로 강축의 강성도는 단면의 형상에는 크게 좌우되지 않음을 알았다. 또한 강축모델의 파괴는 압축부 면재의 압축파괴가 지배적이었음을 알아 압축부를 더 두껍게 설계된 모델에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 약축모델의 경우 같은 중량/부피로 서로다른 형상의 파형코어를 가진 데크를 제작한다고 할 때 삼각형단면이 강성과 강도가 큰 효과적 단면이라는 것을 알 수 있었다. 약축모델의 파괴모드는 인장부 면재와 파형코어의 계면박리파괴가 지배적이었다. 따라서 이에 대한 개선방안도 연구되어야 할 것으로 사료된다. 본 연구에서 고려한 모델에서는 약축모델의 경우 강축모델에 비해서 약 20%의 강도밖에 발휘하지 못하는 것을 알았고 강축에 비해 상대적으로 크게 취약함을 알았으므로 약축에 대한 보다 큰 강도가 요구될 경우 단면설계가 개선되어야 할 것으로 사료된다. 결론적으로 강축은 단면 형상에 따라 강성과 강도차이가 크지 않고 약축은 삼각형형상의 강성과 강도가 상대적으로 아주 크므로 삼각형단면의 데크형상이 바람직한 것으로 평가된다. 휨 실험에 대한 유한요소해석에서 해석값이 실험값과 약 5% 정도의 오차 범위 내에서 잘 근접하므로 본 연구의 해석모델은 적절한 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. 이성우, "복합소재 구조물 제작을 위한 VARTM 제조공정도입 및 건설분야 활용기법 연구개발", 구조안전 연구 보고서, KMU/SSRC, 2000
2. 주성애, 토목구조용 파형코어 복합소재샌드위치 구조의 휨 거동특성, 국민대학교 석사학위논문, 2000
3. Douglas A. Eckel II, A Theoretical and Experimental Study of the Behavior of Sandwich Bridge Decks Composed of Composite Materials, University of Delaware Center for Composite Material, 1998
4. Richard Brown, Dr. Abdul-Hamid Zureick, "Lightweight Fiber Reinforced Plastic Decking", Marine Platform Technology Program, 1999