

# 우레탄 폼 코어 샌드위치 구조물의 굽힘강도 및 피로특성 (Bending Strength and Fatigue Characteristics of Urethane Form Core Sandwich Structure)

김재훈, 이영신(충남대), 박병준, 김덕희\*, 김영기(충남대 대학원)

## 1. 서론

복합재료는 비강도, 비강성이 우수한 재료로 경량화 및 고기능화를 요구하는 공업 구조물에 다양하게 사용되고 있으며 계속적으로 그 활용이 크게 기대되는 재료이다. 특히 철도 구조체, 복합재 냉동 컨테이너, 선체 및 건축재의 내외장재 재료로 샌드위치 복합 재료 적용에 대한 관심이 증대되어, 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1, 2].

본 연구는 한국화이바(주)에서 철도 차량 사이드 패널 및 플로어 패널, 컨테이너 재료로 개발중인 3D 샌드위치 복합재료를 대상으로 하여 정적 굽힘 강도 및 굽힘 피로 강도를 시험 평가하였다. 특히 샌드위치 복합 재료의 스티칭(stitching)에 의한 효과와 격막 구조물에 의한 보강 효과를 평가하여 기존의 구조보다 더욱 안정적이고 고강도인 샌드위치 복합재를 개발하여 실용 구조물에 적용하는 것을 그 목적으로 연구하였다.

## 2. 시험방법

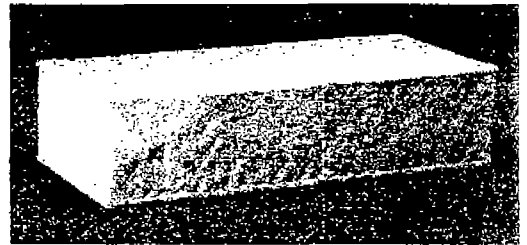
### 2.1 시험편 제작

본 연구에서 사용한 시험편은 3가지 종류로 Fig. 1 과 같다. Fig. 1 (a)는 스티칭 및 스티프너가 없는 재료로 일정한 두께와 길이, 폭을 가진 고품 폴리우레탄 폼의 양면에 유리 섬유 직물을 적층시킨 후 스킨(skin)의 상하면에 레진 시트(resin sheet)를 붙이고 원하는 강도만큼 강화 섬유를 적층한 후 핫프레스(hotpress)로 경화시켜 제작하였다. Fig. 1 (b)는 (a)와 같은 방법으로 제작하지만 유리 섬유를 적층시킨 후 일정한 간격으로 스티칭하고 강화 섬유를 적층한 후 경화시켜 제작하였다. Fig. 1 (c)는 (a)와 같은 샌드위치 복합 재료를 스티프너(stiffener)에 의하여 보강한 시험편이다.

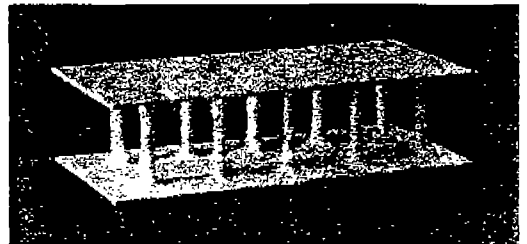
### 2.2 시험 방법

샌드위치 복합재료의 정적 굽힘 시험은 ASTM C-393에 준하여 시험하였다[3]. 정적 굽힘 시험에 사

용한 피로 시험기는 Shimadzu사의 피로 시험기(Model EHF-ED10)이다. 정적 굽힘 시험은 변위를 0.5mm/min으로 제어하여 시험하였다.



(a) Nonstitched sandwich specimen



(b) Stitched sandwich specimen



(c) Stiffened sandwich specimen

Fig. 1 Configuration of specimens

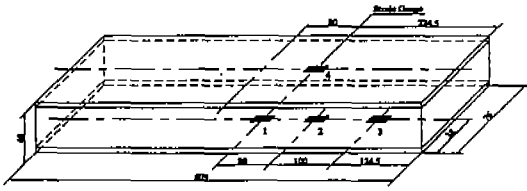


Fig. 2 Dimensions and strain measurement sites of specimens

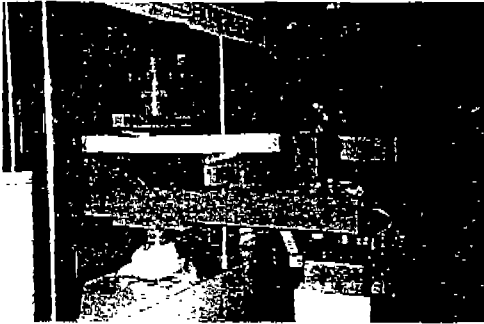


Fig. 3 Configuration of experimental setup

특히 굽힘 하중에 의한 변형률을 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 시험편 상부 스킨에 스트레인게이지를 부착하였다. 게이지 부착위치는 시험편 상부 표면에만 곳(게이지 4), 시험편 하단부 표면의 세 곳(게이지 1, 게이지 2, 게이지 3)을 택하였다. 스트레인게이지에 의하여 출력된 신호는 strain indicator(model P3500)와 switch and balance unit(model SB100)을 이용하여 변형률로 산출하였다.

굽힘 피로 시험은 하중 제어 방식으로 정적 굽힘 시험에 의한 최대 하중의 20%의 범위에서 정현파 3.5Hz로 시험하였다. 피로 특성은  $10^5 \sim 10^6$  사이클까지 피로 하중을 가한 후 시험을 종료시키고 정적 굽힘 시험을 수행함으로써 피로 하중에 의한 굽힘 강도 저하 및 피로 특성을 평가하였다.

Fig. 3은 정적 굽힘 시험 및 피로 시험에 사용된 시험 치구 및 시험 형상을 보여 주고 있다. 양단 지지 거리는 457.2mm로 일정하게 유지하였다.

### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3.1 정적 굽힘 시험 결과

Fig. 4는 세가지 시험편에 대한 정적 굽힘 시험 결과이다. 스티칭에 의하여 굽힘 강도가 약간 향상되는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 스티프너에 의하여 보강된 시험편의 경우 다른 시험편에 비하여 7~8배 이상 굽힘 강도가 향상되었다.

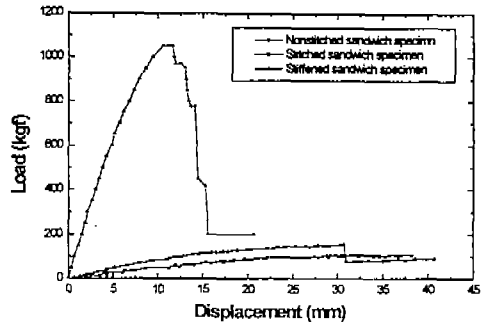
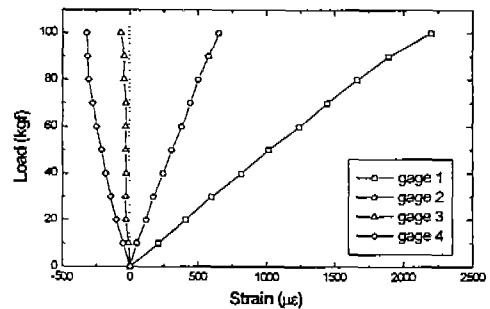


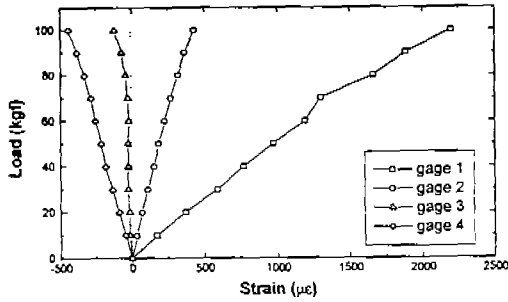
Fig. 4 Load-displacement curves for bending test

Fig. 5는 세가지 재료를 탄성 범위내에서 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정된 결과들이다. 스티칭이 되지 않은 시험편과 스티칭된 시험편은 변형률이 거의 차이를 보이지 않는 것을 볼 수 있다. 그러나 스티프너에 의하여 보강된 재료는 다른 두 재료에 비하여 게이지 1에서는 약 35%, 게이지 2에서는 47%, 게이지 4에서는 71% 정도로 굽힘 변형률이 적게 발생하고 있다. 따라서 샌드위치 복합 재료의 굽힘 강도 향상은 스티칭에 의한 효과보다는 스티프너에 의한 보강 효과에 의하여 지배적으로 증가함을 알 수 있다. 상부 스킨과 하부 스킨의 동일한 위치의 게이지 2, 게이지 4에서 굽힘 변형률을 비교해 보면 스티칭된 재료 및 스티프너에 의하여 보강된 재료는 상부와 하부 스킨에서 비교적 동일한 변형률을 갖는 것을 볼 수 있다. 그러나 스티칭이나 스티프너가 없는 재료는 변형률이 약 2배 정도의 차이가 있었고, 시험 시 상부 스킨 변형과 하부 스킨 변형이 육안으로 판단할 수 있을 만큼 차이를 보이며 변형하는 특징을 관찰할 수 있었다.

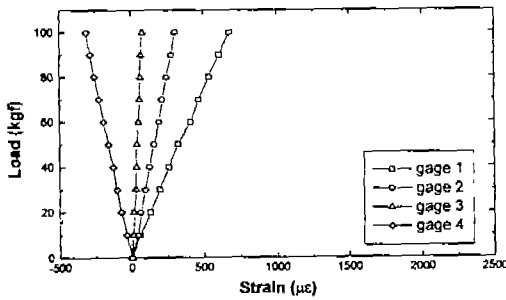
결국 샌드위치 복합재료의 굽힘 강도 향상은 스티프너에 의한 보강 효과가 지배적이며, 스티칭에 의해서는 하중점 변위를 감소시키는 것을 알 수 있었다.



(a) Nonstitched sandwich specimen



(b) Stitched sandwich specimen



(c) Stiffened sandwich specimen

Fig. 5 Load-strain curves for bending test

### 3.2 굽힘 피로 시험 결과

Fig. 6, 7은 스티칭하지 않은 시험편에 대한 굽힘 시험 결과와 최대 하중의 20% 범위인 0~22kgf에서 굽힘 피로 하중을  $10^5$ ,  $5 \times 10^5$  및  $10^6$  사이클 가한 후 시험을 중단하고 정적 굽힘 시험을 수행한 결과들을 비교한 것이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이  $10^5$ 사이클의 피로하중을 받은 시험편의 경우 약 10%의 굽힘 강도가 저하되었고,  $5 \times 10^5$  사이클의 피로하중을 받은 시험편의 경우 약 30%,  $10^6$ 사이클의 피로하중을 받은 시험편은 약 35%의 굽힘 강도가 저하되었다. 이는 우레탄 폼이 피로 하중을 받아서 에이징(aging)이 발생하여 피로 특성의 저하를 가져오는 것으로 판단된다. Fig. 7은 게이지 2에서 굽힘 하중 증가에 따른 변형률의 변화를 나타낸 그래프이다.  $5 \times 10^5$  사이클을 받은 시험편의 경우 다른 두 시험편에 비하여 동일한 하중에 대해 변형률이 크게 발생하였으며, 하중-변형률 선도의 비선형성이 나타나는 시점은 피로 하중을 많이 받은 것일수록 낮은 하중에서 발생하였다.

Fig. 8은 스티칭한 시험편의 정적 굽힘 시험 결과와 최대 하중의 20%의 범위인 0~30kgf로 각각  $10^5$ ,  $3 \times 10^5$  및  $5 \times 10^5$  사이클의 피로하중을 가한 후 정적 굽힘 시험을 수행한 시험결과이다.  $10^5$ 의 피로하중을

받은 시험편의 경우 약 29%의 강도가 저하되었다. 그러나  $3 \times 10^5$ 의 피로하중을 받은 시험편은 35%,  $5 \times 10^5$  사이클의 피로하중을 받은 시험편은 38%의 강도 저하가 발생하였다. 이는 스킨과 폼의 접착을 강화하기 위한 스티칭사 강화용 레진이 피로하중을 받아 폴리 우레탄 폼 자체에서 수지의 파손으로 인한 스티칭된 부분이 파손되어 폴리 우레탄 폼의 자체결합이 되어

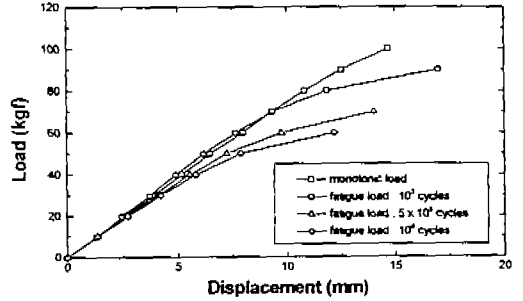


Fig. 6 Load-displacement curves of nonstitched sandwich specimen

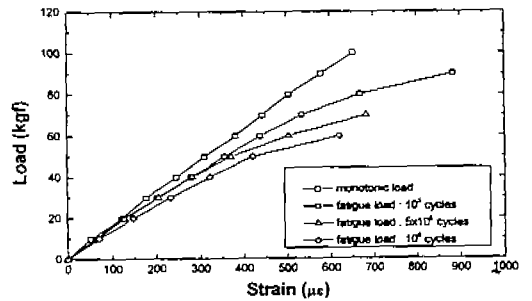


Fig. 7 Load-strain curves of nonstitched sandwich specimen at gage 2

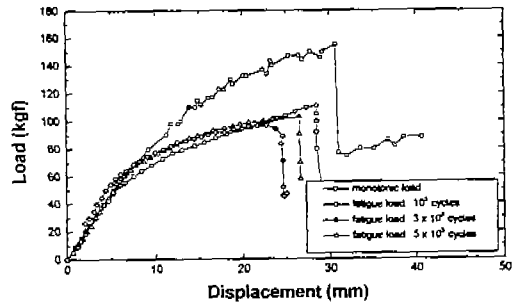


Fig. 8 Load-displacement curves of stitched sandwich specimen

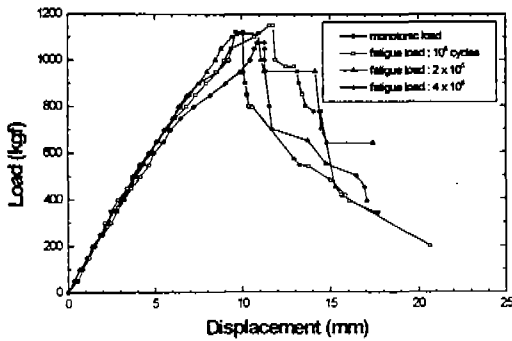


Fig. 9 Load-displacement curves of stiffened sandwich specimen

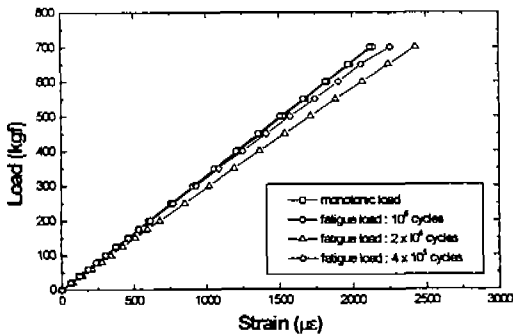


Fig. 10 Load-strain curves of stiffened sandwich specimen at gage 2

굽힘 강도가 낮은 피로 사이클에서도 크게 저하된 것으로 판단된다.

Fig. 9, 10은 스티프너에 의하여 보강된 시험편의 굽힘 시험 결과와 최대 하중의 20% 범위인 0~210kgf에서  $10^5$ ,  $2 \times 10^5$  및  $4 \times 10^5$  사이클로 굽힘 피로 하중을 가한 후 정적 굽힘 시험을 통하여 얻은 결과를 비교한 그래프이다.

단순 굽힘 시험 결과와 각각의 피로 하중을 가한 후의 정적 굽힘 시험 결과와 큰 차이가 없음을 볼 수 있다.  $4 \times 10^5$  사이클의 굽힘 피로 하중을 받은 시험편의 경우 정적 굽힘 시험에 의한 강도의 93% 정도 나타났으며 피로하중에 의하여 굽힘 강도는 약 7% 정도 감소하고 있다. Fig. 9는 게이지 2에서 하중 증가에 따른 변형률의 변화를 나타낸 그래프이다.  $10^5$  사이클의 피로 하중을 받은 시험편의 굽힘 하중에 대한 변형률은 굽힘 시험 결과와 비교하여 큰 영향이 없는

것을 알 수 있다. 그러나  $2 \times 10^5$  및  $4 \times 10^5$  피로 하중을 받은 시험편의 경우 정적 굽힘 시험에 의한 결과에 비하여 약간 변형률이 증가하고 있다.

이상의 결과에서와 같이 최대 하중의 20% 정도 피로 하중을 받는 경우 스티칭 및 스티프너가 없는 시험편은 우레탄 폼의 에이징으로 인한 피로 특성의 큰 감소를 볼 수 있었고, 스티칭된 시험편의 경우 적은 사이클의 피로 하중을 받은 후에도 스티칭 수지의 파손으로 사료되는 굽힘 강도의 급격한 저하가 발생하였다. 그러나 스티프너에 의하여 보강된 재료의 경우 피로 특성의 감소는 비교적 미미하였다.

#### 4. 결론

우레탄 폼 코아 샌드위치 복합재료에 스티칭 및 스티프너에 의하여 보강한 시험편을 굽힘 시험 및 피로 시험 후 정적 굽힘 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 보강되지 않은 우레탄 폼 코아 샌드위치 복합재료는 피로하중을 받으면, 우레탄 폼 코아의 에이징에 의하여 굽힘강도가 감소한다.
2. 우레탄 폼 코아 샌드위치 복합재료는 스티칭에 의하여 굽힘 강도가 25% 정도 향상되고, 스티프너에 의한 보강에 의해서는 7배 이상 증가시킬 수 있다.
3. 우레탄 폼 코아 샌드위치 복합재료는 스티칭에 의하여 굽힘 강도는 향상되나, 피로하중에 대하여는 스티칭 수지의 파손으로 인한 굽힘 강도가 감소한다.
4. 우레탄 폼 코아 샌드위치 복합재료에 스티프너가 보강됨에 따라 보강되지 않은 구조물에 비하여 피로 하중에 대한 굽힘 강도의 저하를 방지할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 한국화이바(주) 및 한국학술진흥재단의 연구비 지원에 의해 수행된 연구의 일부분입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. R. F. Gibson, Principles of Composite Material Mechanics, McGraw-Hill Inc., 1994, pp. 1~33.
2. C. Burchardt, Fatigue of Sandwich Structures with Inserts, Composite Structures, Vol. 40, Nos. 3~4, 1998, pp. 201~211
3. ASTM, C393-94, Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions, 1996, pp. 21~24