

우레탄 폼 코아 샌드위치 구조물의 피로특성에 미치는 스티칭 사의 영향

김재훈*, 이영신*, 박병준**, 김영기**, 김덕회**

Effects of Stitching Thread on Fatigue Characteristics of Polyurethane foam Cored Sandwich Structure

Jae Hoon Kim*, Young Shin Lee*,

Byoung Jun Park**, Young Gi Kim**, Duck Hoi Kim**

Key Words : Sandwich Structure(샌드위치 구조물), Fatigue Characteristics(피로특성), Stitching Thread(스티칭사), Delamination(층간분리), Stiffness Degradation(강성 감소), Bending Test(굽힘 시험)

Abstract

The effects of stitching thread on fatigue characteristics of polyurethane foam cored sandwich structures are investigated. Fatigue test and static test, being used in four point bending test, are performed with various diameters and distances of stitching thread. The Results show that the maximum load for bending tests is similar to each other, but after 10^6 fatigue cycles, the stiffness degradation of the stitching thread diameter $\phi 3\text{mm}$ specimen is a much larger than that of the $\phi 5\text{mm}$ specimen.

1. 서 론

폼 코아 샌드위치 복합재료는 우수한 비강성, 비압축특성, 내부식성, 흡열 및 흡음 특성을 지니고 있어 냉동 컨테이너, 건물의 내장재, 소형 보트 패널로 사용이 증대되고 있다[1-3]. 폼 코아 샌드위치 복합재료는 장시간 사용되면 스킨과 폼의 층간분리(delamination) 및 폼의 강성이 감소하는 문제가 발생된다. 복합재료 샌드위치 구조물 제작시 표면, 코아 및 스킨(skin)을 관통하여 섬유로 베멘 후 레진과 함께 경화시키는 스티칭 방법을 이용하면 이런 약점들을 극복할 수 있으므로, 스티칭된 샌드위치 복합재료에 대한 기계적 특성에 대한 정량적인 시험 평가가 요구된다. Mouritz[4], Yoon[5]등은 샌드위치 복합재료를 스

티칭하면 폼 코아의 탈락 방지뿐만 아니라 충격 하중에 대하여 현저한 효과가 있는 것을 입증하였다. Bathgate등[6]은 하중 방향에 따라 탄소 섬유 혹은 무명실(cotton)을 이용하여 스티칭하면 크리프(creep) 변형을 감소시킨다고 보고하였다. 그러나 스티칭된 폼 코아 샌드위치 복합재료의 피로 특성에 대하여는 아직 많은 연구가 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구는 스티칭된 폼 코아 샌드위치 복합재료의 정적 강도 및 피로 특성에 대하여 연구하였다. 특히 샌드위치 구조물의 스티칭사에 대한 지름의 굵기 및 간격을 변화시켜서 정적 강도 및 피로 특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결과들은 기존의 구조보다 더욱 안정적이고 고강도인 샌드위치 복합재료를 개발하여 실용 구조물에 적용하는 데 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

* 충남대학교

** 충남대학교 대학원

2. 시험방법

2.1 시험편 제작

본 연구에서 사용한 시험편은 Fig. 1과 같다. 일정한 두께와 길이, 폭을 가진 고휘 폴리우레탄 폼의 양면에 유리 섬유 직물을 적층시킨 후 스티칭사의 지름이 3mm인 시험편은 50×50 mm간격으로 유리 섬유실을 에폭시 수지를 이용하여 스티칭하고, 스티칭사의 지름이 5mm인 시험편은 각각 50×50, 50×75, 50×100 mm간격으로 유리 섬유실과 폼시 수지를 이용하여 스티칭하고 강화섬유를 적층한 후 경화시켜 제작하였다.

2.2 시험 방법

샌드위치 복합재료의 정적 굽힘 시험은 ASTM C-393에 준하여 시험하였다[7]. 정적 굽힘 시험에 사용한 시험기는 Shimadzu사의 전기 유압식 피로 시험기(Model EHF-ED10)이다. 시험기에 부착된 로드셀(load cell)은 최대용량 500kg_r 로드셀(load cell)을 사용하였다. 정적 굽힘 시험은 변위를 0.5mm/min으로 제어하여 4점 굽힘 시험으로 수행하였다. 굽힘 하중에 의한 변형률을 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 시험편 상하 스킨에 스트레인 게이지를 부착하였다. 시험에 사용한 스트레인 게이지는 KYOWA KFG-5-C1-11로써 게이지 길이(gage length)가 5mm인 것을 이용하였다.

게이지 부착위치는 시험편 상부 표면에 두 곳(게이지 1, 게이지 2), 시험편 하단부 표면의 세 곳(게이지 3, 게이지 4, 게이지 5)을 선택하였다.

스트레인게이지에 의하여 출력된 신호는 strain indicator (Model P3500)와 switch and balance unit (Model SB10)을 이용하여 변형률로 산출하였다.

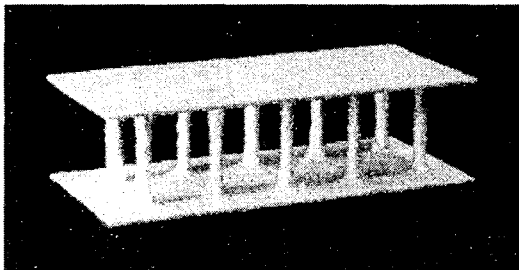


Fig. 1 Configuration of specimen

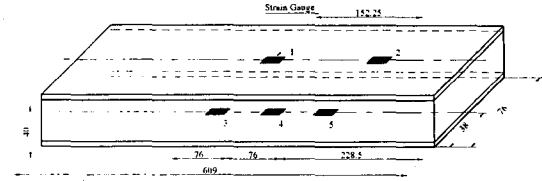


Fig. 2 Dimensions and strain measurement sites of specimen

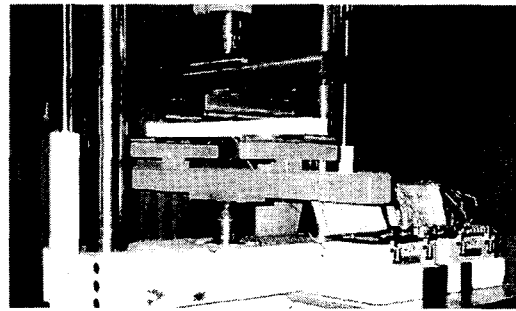


Fig. 3 Configuration of experimental setup

굽힘 피로 시험은 하중 제어 방식 4점 굽힘 시험으로 응력비 $R=0.1$, 주파수 $f=3\text{Hz}$ 에서 수행하였다. 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. 상부의 굽힘 작용점 사이의 거리와 하부의 양단 지지 거리는 각각 152mm와 457.2mm로 일정하게 유지하였다. 또 각각의 지지점과 하중포인트에는 고무패드를 부착하여 집중하중으로 인한 시험편의 파손을 방지하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 정적 굽힘 시험 결과

Fig. 4는 스티칭사의 지름이 3mm이고 간격이 50×50 mm인 시험편, 스티칭사의 지름이 5mm이고 간격이 각각 50×50, 50×75, 50×100 mm인 네 종 시험편에 대한 정적 굽힘 시험 결과이다. 각각의 시험편에 대한 최대하중이 유사한 값을 보이고

있어 스티칭사의 간격과 굵기 변화는 시험편의 굽힘 강도에 미소한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그러나 스티칭사의 지름이 5mm이고 스티칭사의 간격이 50 mm인 시험편의 강도가 가장 크게 나타나고, 일정시간동안 큰 강도를 유지하는 것으로 보아 스티칭사가 강도에 영향을 미치는 것으로 판단되고 갑자기 하중이 감소되는 부분은 하중을 지탱하고 있던 스티칭사가 파손되어 우레탄 폼 코어에 전달되는 하중이 갑자기 증가하면서 나타나는 현상으로 판단된다. 스티칭 간격이 100 mm인 시험편은 폼 코어의 전단 및 폼과 스킨사이의 층간분리(delamination)가 다른 시험편에 비해서 2배 이상 빨리 발생하였고, 시험편의 전단이 두 곳에서 발생하였다. 이는 스티칭사의 간격이 넓어짐에 따라 스티칭사의 효과가 현저히 감소되어 폼 코어에 전달되는 하중이 커지기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다.

Fig. 5는 스티칭사의 굵기 3mm 및 간격 50x50 mm의 샌드위치 시편에 대하여, 탄성 범위 내에서 스트레인게이지를 부착하여 변형률을 측정하여 얻은 하중-변형률 곡선을 나타낸 것이고, Table 1은 4종류의 시편에 대하여 최대하중 80kgf에서의 변형률을 측정하여 얻은 결과들이다. 스티칭사의 지름 3mm인 시험편의 변형률은 동일 간격의 지름 5mm인 시험편의 결과와 비교하여, 게이지 1에서 15.5%, 게이지 2에서 33.5%, 게이지 3에서 17.2%, 게이지 4에서 5%, 게이지 5에서 37.8%정도 각각 감소하였다. 또한 스티칭사의 간격이 100mm인 시험편과 비교해도 큰 변형률을 나타내는 것으로 보아 샌드위치 복합재료의 굽힘 강성은 스티칭사의 간격보다는 스티칭사의 지름 굵기에 영향을 크게 받음을 알 수 있다.

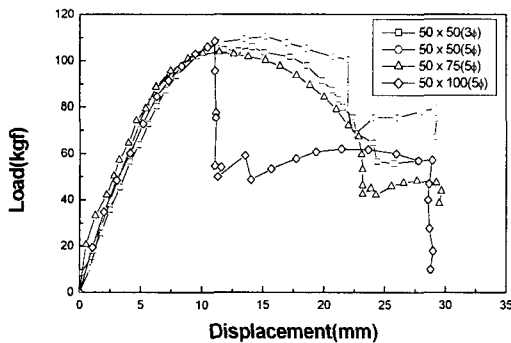


Fig. 4 Load-displacement curves for static bending test

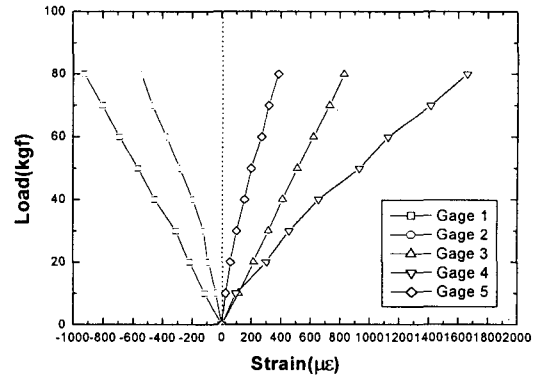


Fig. 5 Load-strain curves of bending test for sandwich specimen. of stitching diameter 3φ mm and distance 50x50 mm

Table 1 Strains for 4 kinds of specimens at maximum load $P_{max} = 80 \text{ kgf}(\text{unit} : \mu \epsilon)$

Specimen	50×50 (3φ)	50×50 (5φ)	50×75 (5φ)	50×100 (5φ)
Gage 1	-999	-844	-868	-926
Gage 2	-639	-425	-501	-547
Gage 3	883	731	799	825
Gage 4	1751	1663	1714	1658
Gage 5	546	340	334	382

상부 스킨과 하부 스킨의 동일한 위치에서의 변형률을 비교해 보면 모든 재료에 대해서 상부 스킨이 하부 스킨보다 변형률이 대략 20%크게 나타났다. 이는 상부 스킨에 하중이 작용할 때 상부스킨과 하부스킨을 연결하는 우레탄 폼 코어가 일정 하중을 흡수함으로써 하부스킨에 전달되는 하중의 크기를 감소시켜 일어나는 현상으로 판단된다.

3.2 굽힘 피로 시험 결과

Fig. 6은 스티칭사의 지름이 3mm이고, 간격이 50×50 mm인 시험편에 대하여, $P_{max}=20\text{kgf}$, 응력비, $R=0.1$ 주파수, $f=3\text{Hz}$ 로 굽힘 피로 하중을 10^5 , 5×10^5 및 10^6 사이클로 가한 후 시험을 중단하고 정적 굽힘 시험을 수행하여 얻은 하중-변위 선도의 결과들을 비교한 것이다.

그림에서 10^5 사이클의 피로하중을 받은 시험편

의 경우 7.6% 굽힘 강도가 저하되었고, 5×10^5 사이클의 피로하중을 받은 시험편의 경우 11.5%, 10^6 사이클의 피로하중을 받은 시험편은 12.4%의 굽힘 강도가 저하되었다. 이는 우레탄 폼이 피로하중을 받아 에이징(aging)이 발생하여 피로 특성의 감소를 가져오는 것으로 사료된다.

Table 2는 4종류의 시험편에 대하여 최대하중 $P_{max}=20\text{kgf}$, $R=0.1$ 에서 피로하중을 10^5 , 5×10^5 및 10^6 사이클 가한 후 시험을 중단하고 정적 굽힘 시험을 수행하여 얻은 최대 하중을 나타낸 것이다. 여기서 스티칭사의 지름과 간격이 각각 5mm와 50×50 mm인 시험편은 10^5 의 피로하중을 받은 시험편의 경우 3.8%, 5×10^5 사이클의 피로하중을 받은 시험편은 10.7%의 강도 감소가 발생하였고, 10^6 사이클의 피로 하중을 받은 시험편은 정적 굽힘강도보다 12.9%의 강도 감소가 발생하였다. 또 스티칭사의 지름과 간격이 각각 5mm와 50×7 mm인 시험편의 굽힘시험 결과는 10^5 의 피로하중을 받은 시험편의 경우 8.9%, 5×10^5 사이클의 피로하중을 받은 시험편은 9.9%, 10^6 사이클의 피로하중을 받은 시험편은 10.2%의 강도 감소가 발생하였다. 또한 스티칭사의 지름과 간격이 각각 5mm와 50×100 mm인 시험편에 대한 굽힘 시험 결과는 각각의 피로 하중 사이클에 대하여 정적 굽힘 강도보다 6.3%, 14.1% 및 14.9% 정도 감소하였다.

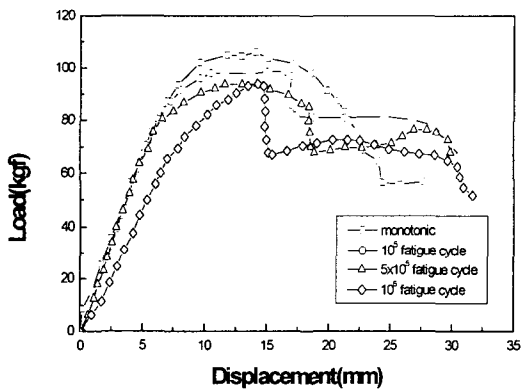


Fig. 6 Load-displacement curves of 3Φ (50 × 50) sandwich specimen under monotonic and after fatigue cycles.

Table 2 Maximum loads of specimens after each fatigue cycles(unit : kgf)

Specimen	50×50 (3Φ)	50×50 (5Φ)	50×75 (5Φ)	50×100 (5Φ)
Monotonic	106.2	110.6	103.8	108.5
10^5	98.1	106.4	94.5	101.7
5×10^5	94	98.8	93.5	93.2
10^6	93	96.3	93.2	92.3

3.3 강성감소율(Stiffness Degradation)

샌드위치 구조물의 피로 사이클에 따른 각각의 시험편들의 변위를 이용하여 다음과 같은 식[8]을 사용하여 강성감소율을 계산하였다.

$$SD = \left[\left(\left(\frac{\Delta P}{\Delta \delta} \right)_{\text{final cycle}} - \left(\frac{\Delta P}{\Delta \delta} \right)_{\text{first cycle}} \right) / \left(\frac{\Delta P}{\Delta \delta} \right)_{\text{first cycle}} \right] \times 100$$

여기서,

ΔP = difference between maximum and minimum load

$\Delta \delta$ = displacement of the specimen due to ΔP

Table 3은 샌드위치 시험편의 스티칭사의 굽기 및 간격의 변화에 따른 네 종류에 대하여 일정하중에서 10^6 사이클까지 피로시험 과정동안의 시험편의 처짐의 변화를 통하여 강성 감소율을 구하여 얻은 결과들이다. 스티칭사의 지름 3mm인 시험편에서 굽힘강성의 감소가 크게 나타나고 있다. 이는 스티칭사의 지름이 굽힘강성에 크게 영향을 주는 것으로 판단된다. Fig. 7은 4종류의 시험편에 대하여 피로 사이클에 따른 처짐의 변화를 나타낸 것이다. 스티칭사의 지름 3mm인 시험편에서 변위의 폭이 가장 크게 나타났고, 스티칭사의 간격 100mm인 시험편은 처짐의 변화가 심하게 나타났다. 이는 우레탄 폼 코어 속의 스티칭사가 피로 하중에 의하여 손상되어 발생하는 것으로 사료된다.

Table 3 Stiffness degradations after 10^6 fatigue cycles(%)

Specimen	50×50(3Φ)	50×50(5Φ)	50×75(5Φ)	50×100(5Φ)
SD(%)	17.4	1.76	2.17	7.55

참고 문헌

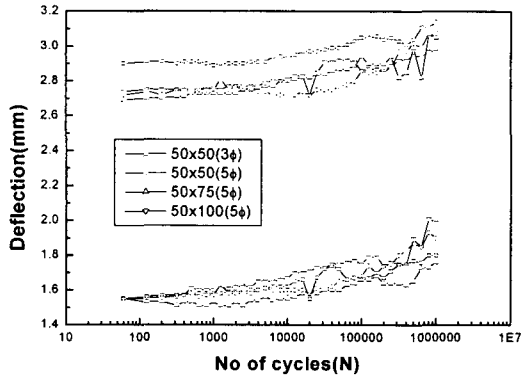


Fig. 7 Cycle-deflection curves of sandwich specimens during 10^6 fatigue cycles

4. 결론

우레탄 폼 코어 샌드위치 복합재료의 스티칭효과를 알아보기 위하여 스티칭사의 지름과 스티칭간격을 변화하여 정적 굽힘 시험을 수행하였다. 또한 피로시험 후 정적 굽힘 시험을 수행하여 굽힘강도 및 강성의 감소현상을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 스티칭사 간격과 스티칭사 지름을 변화시킨 우레탄 폼 코어 샌드위치 구조물의 정적굽힘 시험의 최대 강도는 비슷한 값을 보이나, 스티칭사의 지름이 5mm이고 간격이 50×100 mm인 시험편은 폼 코어의 전단과 폼과 스킨 사이의 층간분리(delamination)가 다른 시험편에 비하여 빨리 발생한다.

2. 상부스킨과 하부스킨사이의 동일한 위치에서 변형률은 상부스킨에 전달되는 하중이 하부스킨에 전달되는 과정에서 우레탄 폼 코어가 굽힘하중을 흡수하여 상부스킨이 20% 정도 크게 나타난다.

3. 피로하중을 받음에 따라 동일 간격의 스티칭사 지름이 3mm인 시편의 강성감소가 5mm인 시편보다 크게 발생한다. 또한 스티칭사의 동일한 굽기에서 간격이 큰 시편일수록 강성 감소가 크게 나타난다.

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. R. A. Sheno, S. D. Clark and H. G. Allen, " Fatigue Behaviour of Polymer Composite Sandwich Beams" , Journal of Composite Materials Vol. 29, No. 18, 1995, pp. 2423~2445.
4. A. P. Mouritz, "The Damage to Stitched GRP Laminates by Underwater Explosion Shock Loading", Composites Science and Technology, Vol. 55, 1995, pp. 365~374.
5. S. H. Yoon, S. C. Lee, S. H. Cho, B. J. Park and J. M. Cho, "Low Energy Impact Behaviors of Nonstitched and Stitched Foam Cored Sandwich Structures", Proc. of ICCM 12 Pap. 869, 1999, p. 373.
6. R. G. Bathgate, C. H. Wang and Feiyi Pang, "Effects of Temperature on the Creep Behaviour of Woven and Stitched Composites", Composite Structures, Vol. 38, No.1-4, pp. 435~445.
7. ASTM, C393-94, Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions, 1996, pp. 21~24
8. H. Judawisastra, J. Ivens, I. Verpoest, Bending Fatigue Behaviour of Pur-epoxy and Phenolic 3D Woven Sandwich Composites, Mechanics of Sandwich Structures, 1998, pp. 287~294