

論文

우레탄 폼 코아 샌드위치 구조물의 정적 및 피로 특성

김재훈* · 이영신* · 박병준** · 김덕희*** · 김영기***

Static and Fatigue Characteristics of Urethane Foam Cored Sandwich Structures

J. H. Kim*, Y. S. Lee*, B. J. Park**, D. H. Kim*** and Y. G. Kim***

ABSTRACT

The static and fatigue characteristics of polyurethane foam cored sandwich structures are investigated. Three types of the specimens with the glass fabric faces and the polyurethane foam core are used; non-stitched, stitched, and stiffened sandwich specimen. Especially additional structural reinforcements with the twisted polyester and glass fiber for thickness direction are made to stitched sandwich structure panel to minimize the delamination of structure which is stitched the upper and lower faces through the core and the resin is impregnated into stitched fiber with the characteristics of low viscosity of resin at resin flow temperature and cured together with during the curing process.

Bending strength of stitched specimen which is 50 mm×50 mm pitched is improved by 50 % as compared with non-stitched specimen and stiffened specimen is improved 10 times more than non-stitched structure. After fatigue testing of 10^6 cycles by 20% of ultimate load under monotonic load, the bending fatigue strength of non-stitched specimen is decreased by 27% of monotonic bending strength, 39% for stitched structure and 20% for stiffened specimen. To verify the aging effect of polyurethane form core, Ultrasonic C-scanning equipment is used to detect the damage of skin laminate alone after fatigue test. From results of UT C-scan images, there is no defect that can be damaged occurred during fatigue test. It is concluded that the decrease of bending strength for foam cored sandwich specimen is caused by the decrease of stiffness due to the aging of polyurethane foam core during fatigue cycles.

초 록

폴리 우레탄 폼 코아 샌드위치 복합재료의 정적 및 피로 특성에 대하여 연구하였다. 유리 섬유강화 스킨과 중합의 폼 코아를 갖는 비스티칭, 스티칭, 스티프너의 세 종류 시편이 사용되었다. 특히 스티칭 샌드위치 구조는 두께 방향에 대하여 폴리에스터와 유리섬유를 꼬아서 부가적인 구조 보강이 코아의 상하 표면을 통하여 웨넨 구조로 층간분리를 최소화하기 위해 샌드위치 구조 패널을 스티칭하여 만들고 수지는 수지의 유동 온도에서 수지의 낮은 점도 특성을 이용하여 스티칭 섬유에 침투시켜 함께 경화하였다.

* 충남대학교 기계설계공학과

** 한국화이버 첨단복합재료연구소

*** 충남대학교 기계설계공학과 대학원

스티칭 섬유가 50×50 mm의 간격으로 스티칭된 시편 및 스티프너 시편의 굽힘강도는 비스티칭 시편과 비교하여 각각 50% 및 10배 이상으로 향상되었다. 최대 하중의 20% 크기로 10⁶ 피로 사이클을 받은 후, 비스티칭 시편의 굽힘 피로강도는 정적 굽힘강도와 비교하여 27% 까지 감소되었고, 스티칭된 시편은 39%, 그리고 스티프너에 의하여 보강된 시편은 20% 정도 감소되었다. 폴리우레탄 폼 코아의 에이징 효과를 입증하기 위해, 피로 시험 후 샌드위치 시편의 표면 적층의 손상은 초음파 C-scan 장비를 사용하여 검출하였다. 초음파 C-scan 결과로부터 피로 시험동안 손상 받은 어떤 결함도 없었다. 이는 피로 사이클동안 폼 코아 샌드위치 구조에 대한 굽힘강도의 감소는 폴리우레탄 폼이 에이징되어 발생하는 것을 의미한다.

1. 서 론

복합재료는 경량화 및 고기능화를 요구하는 공업 구조물에 다양하게 사용되고 있으며 계속적으로 그 활용이 크게 기대되는 재료이다. 특히 구조 부재에서 샌드위치 구조물은 무게에 비하여 높은 강성 및 강도를 지니고 있으며, 비압축성, 내부식성, 흡열 및 흡음 특성을 지니고 있기 때문에 우주 비행선, 항공기 구조, 선박, 기차, 차량, 냉동 컨테이너, 건물의 내장재, 소형 보트의 패널(panel)로 사용이 증대되고 있다[1-4]. 최근 일본에서는 신간선의 시작 차(prototype car)에 기존의 스테인레스강 혹은 알루미늄 압출재를 대신하여 알루미늄·히니컴재·카본섬유를 사용한 복합재료 샌드위치 구조에 대한 연구를 수행하고 있다[5]. 본 연구는 최근 국내에서 개발되어 냉동 컨테이너 패널에 적용하였고 철도 차량용 사이드 패널(side panel) 및 지붕 패널(roof panel) 재료로 연구 중인 폴리우레탄 폼 코아 샌드위치 복합재료(foam cored sandwich composite)를 대상으로 하여 정적 굽힘 강도 및 굽힘 피로 특성을 시험 평가하고자 한다.

폼 코아 샌드위치 복합 재료는 오랜 기간 동안 사용 하면 스킨과 폼의 층간분리(delamination) 및 폼의 강성 감소로 인한 손상이 발생된다. 그래서 스킨(skin)과 코어(core)를 유리 섬유로 교체하여 수지로 경화시킨 스티칭 방법을 사용하면 이런 약점들을 극복할 수 있으므로 스티칭된 샌드위치 복합재료에 대한 연구들이 급증하고 있다. Shenoi[3]등은 세 가지 다른 폼 코아를 사용한 샌드위치 빔의 정적 및 피로특성에 관한 연구에서 파손 모드들은 코어 전단 및 스킨 파손에 관련되어 있고, 피로 거동은 주파수, 온도, 코어의 밀도, 및 응력비에 의해 영향을 받는다고 하였다. Theulen[6]등은 복합재료 샌드위치 패널의 굽힘 강성과 강도에 대한 최적화 연구에서 PVC 코어와 유리섬유 강화 스킨으로 제작된 샌드위치 구조물을 4점 굽힘

시험을 수행하여 패널의 굽힘 강성에 대한 코아와 스킨의 최적 하중비는 대략 2 이고 굽힘 강도에 대한 하중비는 대략 1 이라고 보고하였다. Burmen[7]등은 폼 코아 샌드위치 구조에서 두 종류의 폼 코아에 역점을 두고 피로 손상 개시와 성장에 대한 기초적인 물리적 거동 및 응력-수명 선도에 대한 응력비의 영향을 조사하였다. 그리고 피로시험에 대한 시험법을 개발, 분석하고 입증하였다. Clark[8]등은 샌드위치 빔의 피로 거동에 대한 연구에서 하중 조건에 따른 피로 강성 감소의 모델을 제시하였으며, 폼 코아 재료의 퇴화에 의해 강성이 지배된다고 제안하여 실험 데이터와 비교하였다. 특히 Yoon[9] 등은 본 연구에서 사용한 동일 재료를 이용하여 스티칭을 하면 폼과 코아의 층간분리 방지뿐만 아니라 저속 충격에 대하여 우수한 특성이 있음을 실험을 통하여 입증하였다.

폼 코아 샌드위치 복합재료를 구조물에 적용하기 위해서는 이들 구조물들이 정적 설계 하중에 대하여 잘 견딘다고 할 지라도 피로 하중을 받으면 손상 및 강도가 감소하는 것을 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서 사용된 시편의 경우에도 폼 코아 샌드위치 복합재료에 스티칭 혹은 격막 구조물에 의한 보강 효과를 고려한 정적 강도 및 동적 피로 강도를 평가하여 실용 구조물에 적용하기 위한 기초 자료를 얻기 위한 것이다.

2. 시험방법

2.1 시험편 제작

본 연구에서 사용한 시편은 3가지 종류로 Fig. 1과 같다. Fig. 1 (a)는 비스티칭(non-stitched) 시편으로 일정한 두께와 길이, 폭을 가진 밀도가 낮고 고체 형상의 폴리우레탄 폼의 양면에 유리 섬유 직물을 적층시킨 후 스킨(skin)의 상하면에 수지 시트(resin sheet)를 붙이고 원하는 강도만큼 강화 섬유를 적층한 후 핫

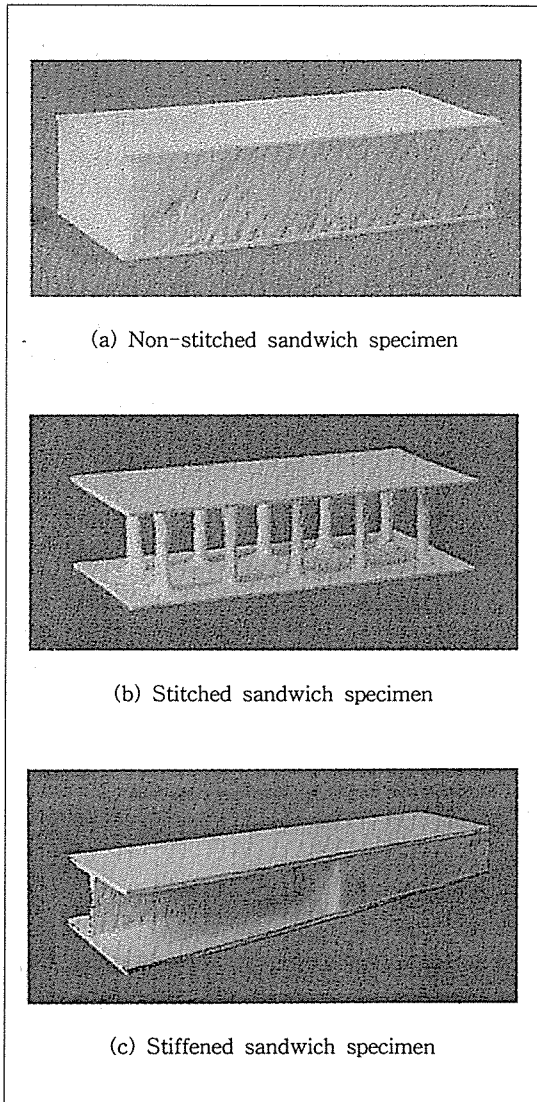


Fig. 1. Configuration of specimens

프레스(hotpress)로 경화시켜 제작하였다. Fig. 1 (b)는 스티칭(stitched)시편으로 (a)와 같은 방법으로 제작하지만 유리 섬유 직물을 적층시킨 후 50×50 mm 간격으로 유리 섬유 실(glass fiber thread)과 에폭시 수지를 이용하여 스티칭(stitching)하고 강화 섬유를 적층한 후 경화시켜 제작하였다. Fig. 1 (c)는 스티프너(stiffened)시편으로 (a)와 같은 샌드위치 복합 재료를 스킨과 동일한 유리 섬유를 이용하여 스티프너(stiffener)로 보강하여 성형한 시편이다. 모든 샌드위치 시

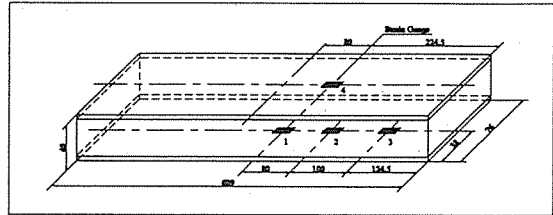


Fig. 2. Dimensions and strain measurement sites of specimens

편들은 (주)한국화이버에서 제작되었다.

2.2 시험 방법

샌드위치 복합재료의 정적 굽힘 시험은 ASTM C-393에 준하여 시험하였다[10]. 정적 굽힘 시험에 사용한 피로 시험기는 Shimadzu사의 피로 시험기(Model EHF-ED10)이다. 시험기에 부착된 로드셀(Load Cell)은 스티프너에 의하여 보강된 시편은 최대 10000kg인 로드셀(Load Cell)을 사용하였고, 다른 시편은 최대 500kg인 로드셀을 사용하였다. 정적 굽힘 시험은 변위를 0.5mm/min로 제어하여 시험하였다. 특히 굽힘 하중에 의한 변형률을 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 시편 상부 스킨에 스트레인게이지를 부착하였다. 시험에서 선정 한 스트레인게이지는 KYOWA KFG-5-120-C1-11로써 게이지 길이(gage length)가 5mm인 것을 사용하였다. 게이지 부착위치는 시편 상부 표면에 한 곳(게이지 4), 시편 하단부 표면의 세 곳(게이지 1, 게이지 2, 게이지 3)을 선택하였다. 스트레인게이지에 의하여 출력된 신호는 Strain indicator(Model P3500)와 Switch and balance unit(Model SB100)를 이용하여 변형률로 산출하였다.

굽힘 피로 시험은 하중 제어 방식으로 정적 굽힘 시험에 의한 최대 하중의 20%의 범위에서 파형을 정현파 3Hz로 $10^5 \sim 10^6$ 사이클 범위에서 피로 하중을 가한 후 시험을 종료시키고, 정적 굽힘 시험을 수행함으로써 피로 하중에 의한 굽힘 강도 감소 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. 비스티칭 샌드위치 복합재료의 경우 피로 시험 후 굽힘 강도 감소 원인을 규명하기 위하여 초음파와 C-scan 장비를 이용하여 스킨의 손상 여부를 평가하였다. 또한 피로 하중에 의한 스티칭 수지의 파손 여부를 평가하기 위하여 각

스티칭 섬유가 50×50 mm의 간격으로 스티칭된 시편 및 스티프너 시편의 굽힘강도는 비스티칭 시편과 비교하여 각각 50% 및 10배 이상으로 향상되었다. 최대 하중의 20% 크기로 10⁶ 피로 사이클을 받은 후, 비스티칭 시편의 굽힘 피로강도는 정적 굽힘강도와 비교하여 27% 까지 감소되었고, 스티칭된 시편은 39%, 그리고 스티프너에 의하여 보강된 시편은 20% 정도 감소되었다. 폴리우레탄 폼 코아의 에이징 효과를 입증하기 위해, 피로 시험 후 샌드위치 시편의 표면 적층의 손상은 초음파 C-scan 장비를 사용하여 검출하였다. 초음파 C-scan 결과로부터 피로 시험동안 손상 받은 어떤 결함도 없었다. 이는 피로 사이클동안 폼 코아 샌드위치 구조에 대한 굽힘강도의 감소는 폴리우레탄 폼이 에이징되어 발생하는 것을 의미한다.

1. 서 론

복합재료는 경량화 및 고기능화를 요구하는 공업 구조물에 다양하게 사용되고 있으며 계속적으로 그 활용이 크게 기대되는 재료이다. 특히 구조 부재에서 샌드위치 구조물은 무게에 비하여 높은 강성 및 강도를 지니고 있으며, 비압축성, 내부식성, 흡열 및 흡음 특성을 지니고 있기 때문에 우주 비행선, 항공기 구조, 선박, 기차, 차량, 냉동 컨테이너, 건물의 내장재, 소형 보트의 패널(panel)로 사용이 증대되고 있다[1-4]. 최근 일본에서는 신간선의 시작 차(prototype car)에 기존의 스테인레스강 혹은 알루미늄 압출재를 대신하여 알루미늄·허니컴재·카본섬유를 사용한 복합재료 샌드위치 구조에 대한 연구를 수행하고 있다[5]. 본 연구는 최근 국내에서 개발되어 냉동 컨테이너 패널에 적용하였고 철도 차량용 사이드 패널(side panel) 및 지붕 패널(roof panel) 재료로 연구 중인 폴리우레탄 폼 코아 샌드위치 복합재료(foam cored sandwich composite)를 대상으로 하여 정적 굽힘 강도 및 굽힘 피로 특성을 시험 평가하고자 한다.

폼 코아 샌드위치 복합 재료는 오랜 기간 동안 사용하면 스킨과 폼의 층간분리(delamination) 및 폼의 강성 감소로 인한 손상이 발생된다. 그래서 스킨(skin)과 코어(core)를 유리 섬유로 껴매어 수지로 경화시킨 스티칭 방법을 사용하면 이런 약점들을 극복할 수 있으므로 스티칭된 샌드위치 복합재료에 대한 연구들이 급증하고 있다. Sheno[3]등은 세 가지 다른 폼 코어를 사용한 샌드위치 빔의 정적 및 피로특성에 관한 연구에서 파손 모드들은 코어 전단 및 스킨 파손에 관련되어 있고, 피로 거동은 주파수, 온도, 코어의 밀도, 및 응력비에 의해 영향을 받는다고 하였다. Theulen[6]등은 복합재료 샌드위치 패널의 굽힘 강성과 강도에 대한 최적화 연구에서 PVC 코어와 유리섬유 강화 스킨으로 제작된 샌드위치 구조물을 4점 굽힘

시험을 수행하여 패널의 굽힘 강성에 대한 코어와 스킨의 최적 하중비는 대략 2 이고 굽힘 강도에 대한 하중비는 대략 1 이라고 보고하였다. Burmen[7]등은 폼 코아 샌드위치 구조에서 두 종류의 폼 코아에 역점을 두고 피로 손상 개시와 성장에 대한 기초적인 물리적 거동 및 응력-수명 선도에 대한 응력비의 영향을 조사하였다. 그리고 피로시험에 대한 시험법을 개발, 분석하고 입증하였다. Clark[8]등은 샌드위치 빔의 피로 거동에 대한 연구에서 하중 조건에 따른 피로 강성 감소의 모델을 제시하였으며, 폼 코아 재료의 퇴화에 의해 강성이 지배된다고 제안하여 실험 데이터와 비교하였다. 특히 Yoon[9] 등은 본 연구에서 사용한 동일 재료를 이용하여 스티칭을 하면 폼과 코아의 층간분리 방지뿐만 아니라 저속 충격에 대하여 우수한 특성이 있음을 실험을 통하여 입증하였다.

폼 코아 샌드위치 복합재료를 구조물에 적용하기 위해서는 이들 구조물들이 정적 설계 하중에 대하여 잘 견딘다고 할 지라도 피로 하중을 받으면 손상 및 강도가 감소하는 것을 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서 사용된 시편의 경우에도 폼 코아 샌드위치 복합재료에 스티칭 혹은 격막 구조물에 의한 보강 효과를 고려한 정적 강도 및 동적 피로 강도를 평가하여 실용 구조물에 적용하기 위한 기초 자료를 얻기 위한 것이다.

2. 시험방법

2.1 시험편 제작

본 연구에서 사용한 시편은 3가지 종류로 Fig. 1과 같다. Fig. 1 (a)는 비스티칭(non-stitched) 시편으로 일정한 두께와 길이, 폭을 가진 밀도가 낮고 고체 형상의 폴리우레탄 폼의 양면에 유리 섬유 직물을 적층시킨 후 스킨(skin)의 상하면에 수지 시트(resin sheet)를 붙이고 원하는 강도만큼 강화 섬유를 적층한 후 핫

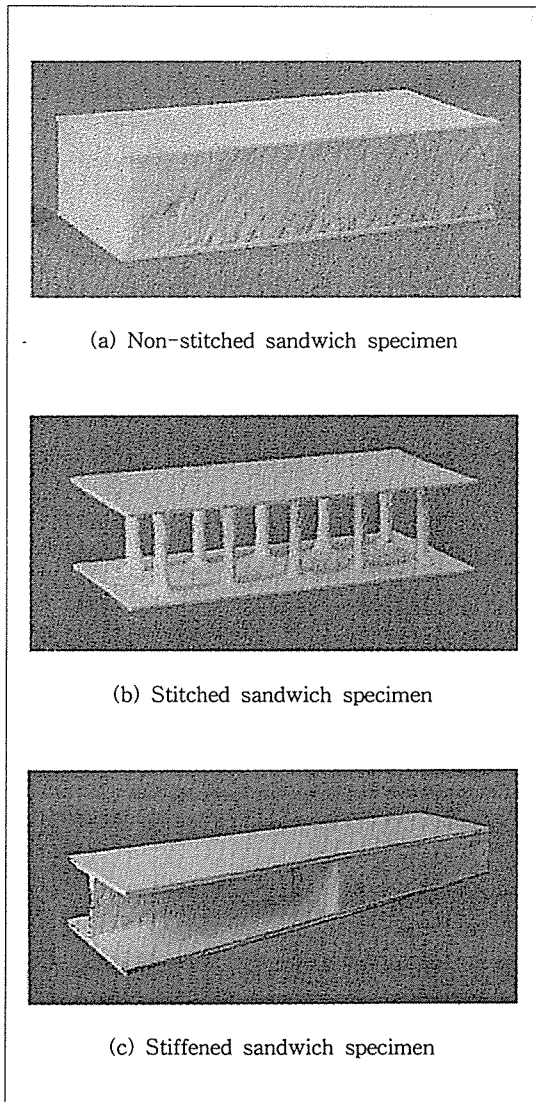


Fig. 1. Configuration of specimens

프레스(hotpress)로 경화시켜 제작하였다. Fig. 1 (b)는 스티칭(stitched)시편으로 (a)와 같은 방법으로 제작하지만 유리 섬유 직물을 적층시킨 후 50×50 mm 간격으로 유리 섬유 실(glass fiber thread)과 에폭시 수지를 이용하여 스티칭(stitching)하고 강화 섬유를 적층한 후 경화시켜 제작하였다. Fig. 1 (c)는 스티프너(stiffened)시편으로 (a)와 같은 샌드위치 복합 재료를 스킨과 동일한 유리 섬유를 이용하여 스티프너(stiffener)로 보강하여 성형한 시편이다. 모든 샌드위치 시

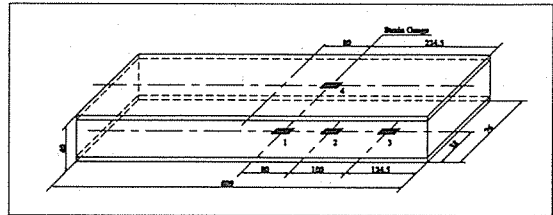


Fig. 2. Dimensions and strain measurement sites of specimens

편들은 (주)한국화이버에서 제작되었다.

2.2 시험 방법

샌드위치 복합재료의 정적 굽힘 시험은 ASTM C-393에 준하여 시험하였다[10]. 정적 굽힘 시험에 사용한 피로 시험기는 Shimadzu사의 피로 시험기(Model EHF-ED10)이다. 시험기에 부착된 로드셀(Load Cell)은 스티프너에 의하여 보강된 시편은 최대 10000kg인 로드셀(Load Cell)을 사용하였고, 다른 시편은 최대 500kg인 로드셀을 사용하였다. 정적 굽힘 시험은 변위를 0.5mm/min로 제어하여 시험하였다. 특히 굽힘 하중에 의한 변형률을 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 시편 상부 스킨에 스트레인게이지를 부착하였다. 시험에서 선정 한 스트레인게이지는 KYOWA KFG-5-120-C1-11로써 게이지 길이(gage length)가 5mm인 것을 사용하였다. 게이지 부착 위치는 시편 상부 표면에 한 곳(게이지 4), 시편 하단부 표면의 세 곳(게이지 1, 게이지 2, 게이지 3)을 선택하였다. 스트레인게이지에 의하여 출력된 신호는 Strain indicator(Model P3500)와 Switch and balance unit(Model SB100)를 이용하여 변형률로 산출하였다.

굽힘 피로 시험은 하중 제어 방식으로 정적 굽힘 시험에 의한 최대 하중의 20%의 범위에서 파형을 정현파 3Hz로 $10^5 \sim 10^6$ 사이클 범위에서 피로 하중을 가한 후 시험을 종료시키고, 정적 굽힘 시험을 수행함으로써 피로 하중에 의한 굽힘 강도 감소 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. 비스티칭 샌드위치 복합재료의 경우 피로 시험 후 굽힘 강도 감소 원인을 규명하기 위하여 초음파와 C-scan 장비를 이용하여 스킨의 손상 여부를 평가하였다. 또한 피로 하중에 의한 스티칭 수지의 파손 여부를 평가하기 위하여 각

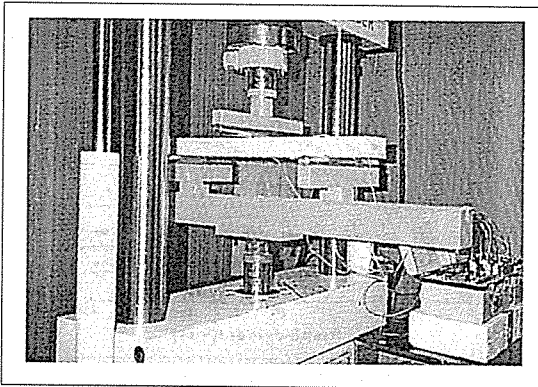


Fig. 3. Configuration of experimental setup

각의 피로 사이클을 가한 후 우레탄 폼을 제거하고 사진기를 이용하여 근접 촬영하여 스티칭 수지의 파손을 관찰하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 정적 굽힘 강도 특성

Fig. 4는 세 종류의 시편에 대한 정적 굽힘 시험을 수행하여 얻은 하중-변위 선도를 나타낸 것이다. 스티칭 샌드위치 시편은 굽힘 강도가 비스티칭 샌드위치 시편 보다 50% 정도 향상되는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 스티프너 샌드위치 시편의 경우 다른 시편에 비하여 10배 이상 굽힘 강도가 향상되었다. 정적 굽힘 시험시 비스티칭 및 스티칭 시편의 경우, 변위는 증가하지만 가해지는 하중은 증가하다 최대값에 이르면 하중은 다시 감소하고 있으며 시편은 파단되지 않고 변위만 증가되었다. 따라서 본 시험에서는 변위 증가에 따라 하중이 증가하다 감소하는 부분을 최대 하중으로 정의하였다. Table 1은 세 종류의 시편에서 정적 굽힘 시험에 대한 최대 하중을 나타낸 것이다.

Fig. 5는 세 종류의 시편을 탄성 범위 내에서 시편의 상하면에 스트레인게이지를 부착하여 하중 $P=100\text{kgf}$ 까지 구한 하중-변형률에 대한 결과들이다. 비스티칭 시편과 스티칭 시편은 변형률이 유사한 값을 보이고 있다. 그러나 스티프너 시편은 스티칭하지 않은 시편과 비교하여 게이지 1에서는 약 69%, 게이지 2에서는 53% 정도로 굽힘 변형률이 적게 발생하고, 게이지 4에서는 동일한 값을 갖는다. 따라서 샌드위치 복합 재료의 굽힘 강도 향상은 스티칭에 의한 효과보다

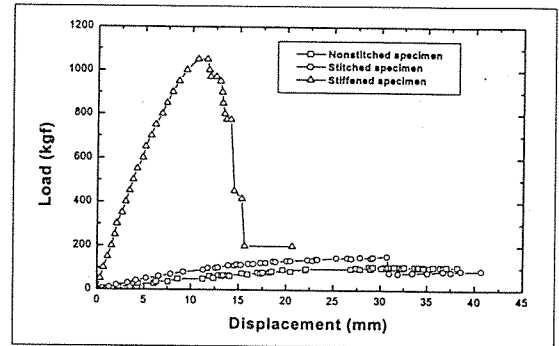


Fig. 4. Load-displacement curves for bending test

Table 1. Maximum loads(P_{max}) of specimens for static bending test

Specimen	Maximum load(kgf)
Non-stitched specimen	105
Stitched specimen	150
Stiffened specimen	1,050

Table 2. Maximum strains at gage positions for three types of specimens

Position of Strain gage	Strain of Non-stitched ($\mu\epsilon$)	Strain of Stitched ($\mu\epsilon$)	Strain of Stiffened ($\mu\epsilon$)
Gage 1	2167	2199	679
Gage 2	652	431	306
Gage 3	-61	-121	80
Gage 4	-311	-442	-311

는 스티프너에 의한 보강 효과에 의하여 지배적으로 증가되고 있다. 상부 스킨과 하부 스킨의 동일한 위치의 게이지 2, 게이지 4에서 굽힘 변형률을 비교해 보면 스티칭 시편 및 스티프너 시편은 상부와 하부 스킨에서 비교적 동일한 변형률을 갖는다. 그러나 비스티칭 시편은 변형률이 하단부 2번 게이지에서 약 2배 정도 크게 나타나고 있으며, 시험 시 상부 스킨 변형과 하부 스킨 변형이 육안으로 판단할 수 있을 만큼 굽힘 변형의 차이를 보이는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 코아 재료로 사용한 우레탄 폼이 압축하중을 받아 큰 압축 변형률이 발생하기 때문에 하부 스킨의 변형이 크게 발생하는 것으로 판단된다. Table 2는 각각의 시편들에 대해서 게이지 1, 2, 3, 4에 대한 스트레인의 최대값을 나타낸 것이다.

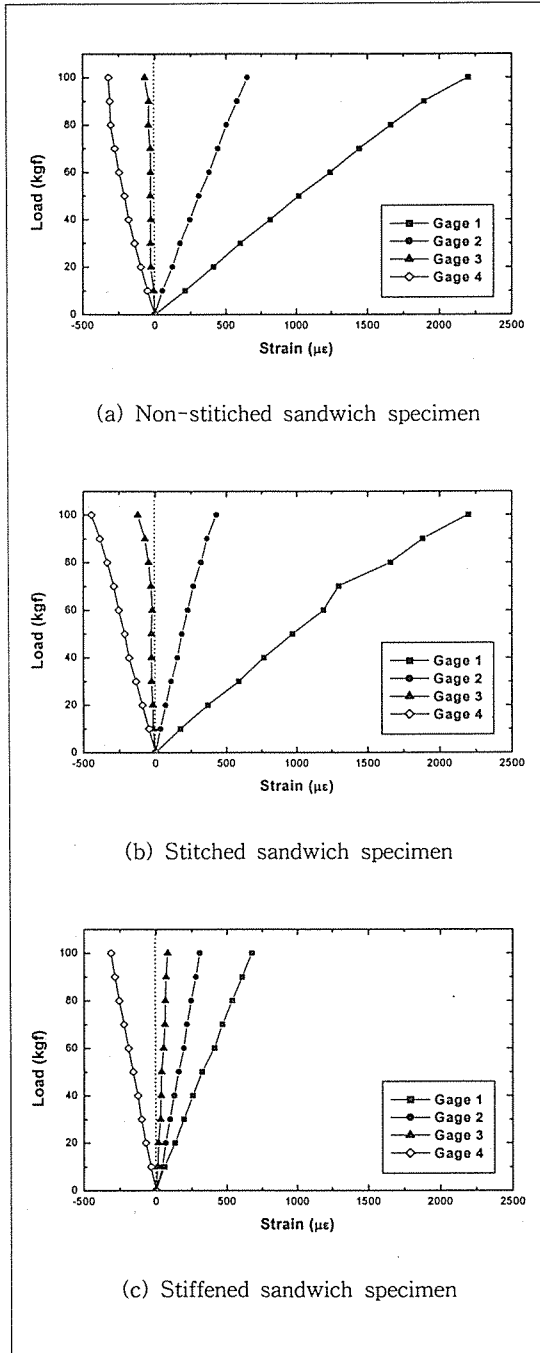


Fig. 5. Load-strain curves for bending test

결국 샌드위치 복합재료의 굽힘 강도 향상은 스티프

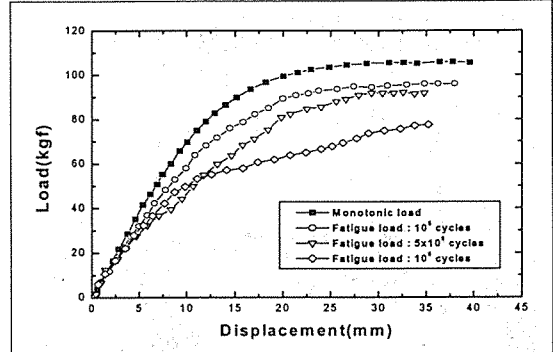


Fig. 6. Load-displacement curves of non-stitched sandwich specimen

네에 의한 보강 효과가 지배적이며, 스티칭에 의해서 굽힘 강도는 미소하게 증가하나 하중점 변위는 감소하고 있다[11].

3.2 굽힘 피로 강도 특성

Fig. 6은 정적굽힘 결과 및 정적 굽힘에서 최대 하중의 20%를 취하여 $P_{max}=20\text{kgf}$, 응력비 $R=0.1$ 에서 굽힘 피로 하중을 $N=10^5$, 5×10^5 및 10^6 사이클까지 가한 후, 피로시험을 중단하고 정적 굽힘시험하여 얻은 비스티칭 시편에 대한 하중-변위 선도를 나타낸 것이다. 정적 굽힘강도와 비교하여 피로하중을 10^5 사이클 받은 시편의 최대 굽힘강도는 약 10% 감소되었고, 5×10^5 사이클의 피로하중을 받은 시편은 약 15%, 10^6 사이클의 피로하중을 받은 시편은 약 27% 감소되었다. 하중-변위 선도에서 최대 하중에 이를 때 급격히 하중이 감소하는 현상이 발생되지 않고 변위만 크게 나고 있다. 이는 비스티칭 시편의 경우 폼의 전단이나 폼과 스킨의 층간분리(delamination), 스킨의 파손이 발생하지 않기 때문이다.

Fig. 7은 비스티칭 시편에 대하여 최대하중 $P_{max}=20\text{kgf}$, 응력비 $R=0.1$ 에서 피로하중을 $N=10^5$, 5×10^5 및 10^6 사이클까지 가한 후, 피로시험을 중단하고 스트레인 게이지를 상하면에 부착하여 게이지점 2에서 정적 굽힘시험으로 얻은 하중-변형을 선도이다. 정적시험과 비교하여 피로사이클이 증가할수록 하중 및 강성이 떨어지고 있고, 피로하중을 10^6 사이클까지 받은 시편의 굽힘 변형률은 다른 세 시편에 비하여 동일 하중에서 크게 나타났다. 또한 하중-변형률 선도의 비선형성이 나타나는 시점은 피로 하중을 많이 받은 것일수록 낮은 하중에서 발생하였다. 이는 우레탄 폼이 피로

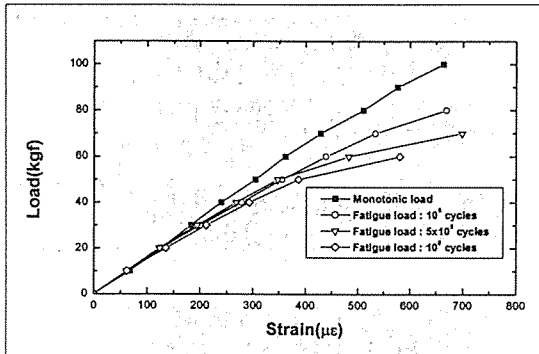


Fig. 7. Load-strain curves of non-stitched sandwich specimen at gage 2

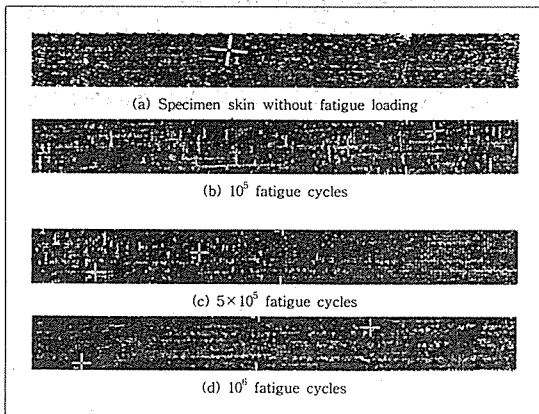


Fig. 8. Ultrasonic C-scan images for skins of non-stitched sandwich specimen after fatigue loading

하중을 받은 반복수의 증가에 따라 에이징되는 정도가 커지기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8은 비스티칭 시편의 피로 하중에 의한 굽힘 강도 감소 원인을 평가하기 위하여 초음파 C-scan을 이용하여 시편의 스킨부를 나타낸 사진이다. 사진에서 피로 하중을 받지 않은 시편의 표면인 (a)와 각각의 피로하중을 받은 다른 시편의 표면과는 차이가 없고 하중점이 위치한 시편 스킨의 중앙부와 양 지지점에서 피로 하중에 의한 손상은 발견되지 않았다. 국부적으로 존재하는 미미한 dB의 차이는 스킨을 제조할 때 미소 결함 및 피로 시험 후 C-scan하기 위하여 폼을 스킨에서 제거시킬 때 스킨에 일부 남아 있는 폼이 나타난 것으로 사료된다. 따라서 굽힘 강도 20% 정도의 피로 하중하에서 비스티칭 샌드위치 시편의 스킨에서 손상은 발생되지 않았고, 피로 하중에 의한 굽힘 강도의 감

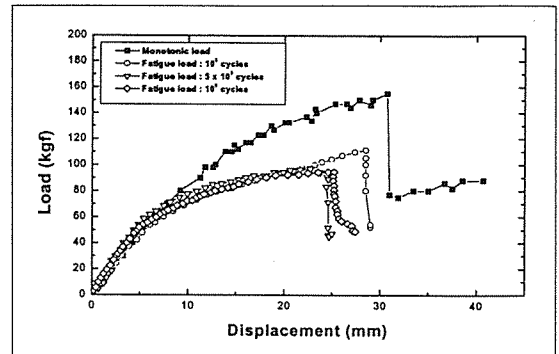


Fig. 9. Load-displacement curves of stitched sandwich specimen

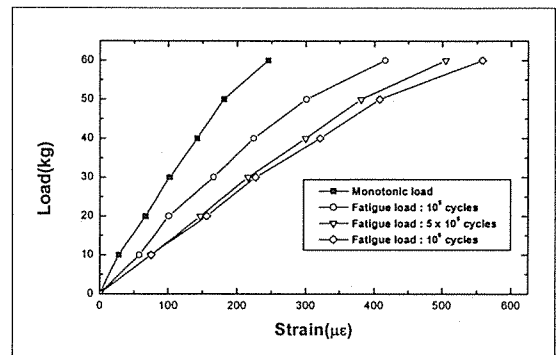


Fig. 10. Load-strain curves of stitched sandwich specimen at gage 2

소는 폼의 에이징에 의하여 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 9는 정적 굽힘에서 최대 하중의 20%를 취하여 $P_{max}=30\text{kgf}$, 응력비 $R=0.1$ 에서 피로 굽힘 하중을 $N=10^5$, 5×10^5 및 10^6 사이클까지 가한 후, 피로시험을 중단하고 정적 굽힘시험하여 얻은 스티칭 시편에 대한 하중-변위 선도를 나타낸 것이다. 정적굽힘과 비교하여 피로하중을 받은 시편은 일정하중 이상에서 급격히 떨어지면서 강도 및 강성이 감소하고 있다. 세 종류의 피로하중을 받은 시편은 최대 하중점이 약간 차이를 보이고 전반적인 경향은 유사하였다. 피로하중을 $N=10^5$ 사이클 받은 시편의 경우 최대 하중이 약 29% 정도 감소되었고, 5×10^5 사이클의 피로하중을 받은 시편은 38% 그리고 10^6 사이클의 피로 하중을 받은 시편은 39% 정도의 굽힘 강도가 감소하였다. 따라서 비스티칭 시편보다 약간의 강도만 향상되었다.

Fig. 10은 스티칭 시편에 대하여 최대하중 $P_{max}=30\text{kgf}$, 응력비 $R=0.1$ 에서 피로하중을 $N=10^5$, $5 \times$

10^5 및 10^6 사이클까지 가한 후, 피로시험을 중단하고 스트레인 게이지를 상하면에 부착하여 게이지점 2에서 정적 굽힘시험으로 얻은 하중-변형을 선도이다. 정적굽힘과 비교하여 피로하중을 받은 시편이 큰 변형률을 나타내고 사이클 수의 증가에 따라 변형률이 커지고 있다. 이는 피로 사이클이 증가함에 따라 샌드위치 구조물의 강도를 보강해 주던 스티칭 실을 감싸고 있는 에폭시 수지가 손상되어 변형률이 커지는 것으로 사료된다.

Fig. 11은 피로 사이클 증가에 따른 굽힘 강도 감소의 원인을 파악하기 위하여 각각 $N=10^3, 5 \times 10^3, 10^4, 5 \times 10^4, 10^5$ 사이클로 피로 하중을 가한 후 우레탄 폼을 제거하고 스티칭실을 관찰한 결과이다. 사진에서 볼 수 있듯이 피로 사이클이 증가할수록 스티칭실 수지의 파손된 양이 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 수지로 싸여져 있는 유리 섬유는 피로 사이클을 받은 모든 시편에서 파손되어 있었다. 또한 10^5 사이클의 피로 하중을 받은 시편의 수지는 대부분 파손되어 있고 스티칭실 또한 파손되어 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 스티칭 시편의 경우 스티칭실을 감싸고 있는 에폭시 수지가 취성의 특성을 지니고 있기 때문에 동적 피로 하중에 대하여는 취약한 것으로 판단된다.

Fig. 12 및 13은 각각 스티프너 시편에 대하여 정적 및 피로하중 하에서 구한 하중-변위 선도 및 정적시험에서 최대 하중의 20%를 취하여 $P_{max}=210\text{kgf}$, 응력비 $R=0.1$ 에서 $N=10^5, 5 \times 10^5$ 및 10^6 사이클까지 피로시험 후, 피로시험을 중단하고 스트레인 게이지를 상·하면에 부착하여 게이지점 2에서 정적 굽힘시험으로 얻은 하중-변형을 선도이다. Fig. 12에서 단순 굽힘 결과와 피로 하중을 가한 후에 굽힘 결과와는 미소한 차이가 있음을 알 수 있다. 굽힘 피로하중을 5×10^5 사이클 받은 시편의 굽힘강도는 정적 굽힘 시험에 의한 강도의 93%정도로 굽힘 강도가 대략 7% 감소되었고, 10^6 사이클의 굽힘 피로 하중을 받은 시편은 20% 감소되었다.

Fig. 13은 게이지 2에서 하중 증가에 따른 변형률의 변화를 나타낸 것이다. 10^6 사이클의 피로 하중을 받은 시편의 굽힘 하중에 대한 변형률은 굽힘 시험 결과와 비교하여 큰 차이 없이 미소한 변형률의 증가가 발생하고 있다.

Fig. 14는 피로하중을 $N=5 \times 10^5$ 사이클을 가한 후, 샌드위치 구조 시편의 강성변화를 알아보기 위하여 피로하중 사이클 변화에 대한 굽힘 처짐의 변위를 나타

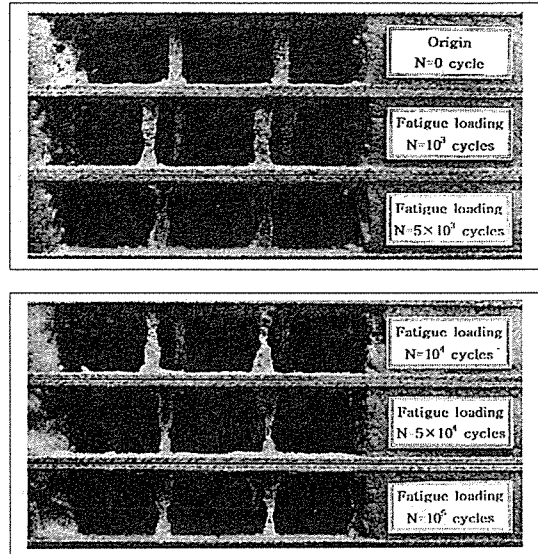


Fig. 11. Photos of stitched reinforced thread after fatigue loading.

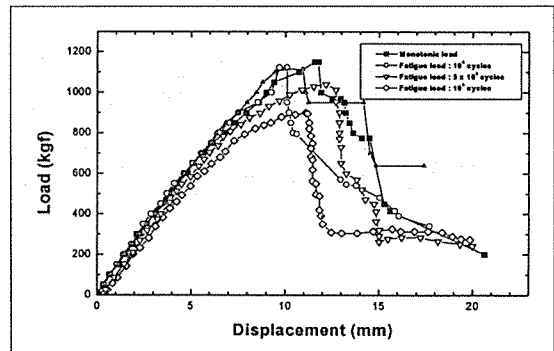


Fig. 12. Load-displacement curves of stiffened sandwich specimen

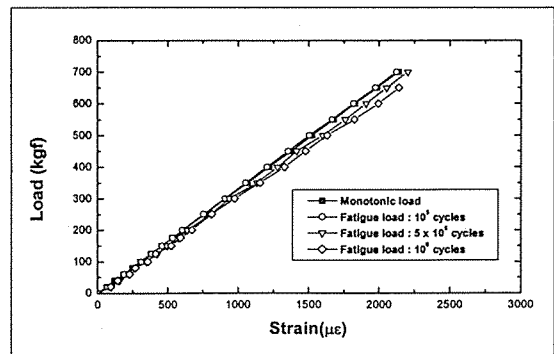


Fig. 13. Load-strain curves of stiffened sandwich specimen at gage 2

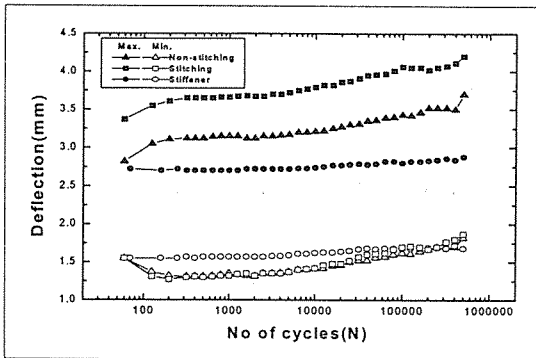


Fig. 14. Cycle-deflection curves of three kind of specimens after fatigue loading $N=5 \times 10^5$ cycles

낸 것이다. 스티프너 시편은 최대 하중에서 변위가 사이클수 증가에 따라 미소하게 증가하고 있으나 비스티칭 및 스티칭 시편들은 피로하중 사이클수의 증가에 따라 점진적으로 처짐 변위가 동일한 경향으로 증가하고 있다. 따라서 샌드위치구조 시편의 스티칭의 효과는 반복 피로 하중에 대하여 비스티칭 시편과 비교하여 강성에 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

이상의 결과에서와 같이 최대 하중의 20% 정도 피로 하중을 받는 경우 비스티칭 시편은 우레탄 폼의 에이징으로 인한 피로 특성의 큰 감소를 볼 수 있었고, 스티칭 시편의 경우 적은 사이클의 피로 하중을 받은 후에도 스티칭 수지의 파손으로 인한 굽힘 강도의 급격한 감소가 발생하였다. 그러나 스티프너 시편의 경우 피로 특성은 비교적 미소하게 감소하였다.

본 연구는 우레탄 폼 코아 샌드위치 복합 재료를 철도 차량에 적용하기 위한 기초적 연구이며, 현재 스티칭사의 간격 및 두께 변화에 대한 시험적 연구가 수행 중이며 궁극적으로 현재의 강도를 유지하면서 경량화 소재인 폼 코아 샌드위치 복합 재료를 경전철과 같은 철도 차량에 적용하기 위하여 지속적인 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

우레탄 폼 코아 샌드위치 복합재료에 스티칭 및 스티프너에 의하여 보강한 시편을 정적 굽힘 시험 및 피로 하중을 부하 후 정적 굽힘 시험을 수행하여 피로 하중에 의한 굽힘 강도 감소를 분석하여 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 복합재료에 스티칭을 하면 굽힘 강도는 향상되나 피로하중에 대하여는 스티칭 수지의 파손으로 인하여 보강 효과를 얻을 수 없다.

(3) 보강되지 않은 시편과 스티칭된 시편의 피로에 따른 처짐을 비교해 보면 후자가 전자보다 처짐이 더 크게 발생함을 발견할 수 있는데, 이것을 통해 스티칭은 피로하중에 대해서는 보강효과를 얻을 수 없음을 알 수 있고 이는 스티칭시 발생하는 섬유의 손상과 폼 코아의 손상에 의한 것으로 사료된다.

(4) 스티프너에 의하여 연속적으로 보강된 경우 굽힘 강도는 크게 향상되며, 피로 하중에 대하여도 우수한 특성을 지닌다.

(5) 스티프너에 의하여 연속적으로 보강된 시편은 사이클수가 증가함에 따라서 처짐의 변화가 없으나 다른 시편들은 폼의 에이징으로 인해서 처짐이 증가한다.

후 기

본 연구는 기계공학연구(1998-018-E00009)의 "3D 복합재료 샌드위치 구조물의 철도차량 구조체 적용성 평가"에 대한 연구 결과의 일부로써 한국학술진흥재단 및 한국화이버(주)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. Gibson, R. F., Principles of Composite Material Mechanics, McGraw-Hill Inc., 1994, pp. 1~33.
2. Burchardt, C., "Fatigue of Sandwich Structures with Inserts", Composite Structures, Vol. 40, Nos. 3~4, 1998, pp. 201~211.
3. Sheno, R. A., Clark, S. D., and Allen, H. G., R. "Fatigue Behaviour of Polymer Composite Sandwich Beams", Journal of Composite Materials, Vol. 29, No. 18, 1995, pp. 2423~2445.
4. Judawisastra, H., Ivens, J., and Verpoest, I., "The Fatigue Behavior and Damage Development

of 3D Woven Sandwich Composites", Composite Structures, Vol. 43, 1998, pp. 35~45.

5. 장경수, 백남옥, 김기환, 세계의 고속철도, 골든 벨, 서울, 1999, pp. 26~90.

6. Theulen, J. C. M., and Peijs, A. A. J. M., "Optimization of the Bending Stiffness and Strength of Composite Sandwich Panels", Composite Structures, Vol. 17, 1991, pp. 87~92.

7. Burmen, M., and Zenkert, "Fatigue of forw core sandwich beams-1 undamaged specimens", International J. of Fatigue, Vol. 19, N0.7, 1997, pp. 551-561.

8. Clark, S.D., Shenoi, R.A., and Allen, H. G., "Modelling the Fatigue Behaviour of Sandwich Beams under Monotonic 2-Step and Block-loading Regimes", Composites Science and Technology, Vol. 59, 1999, pp. 471~486.

9. Yoon, S. H., Lee, S. C., Cho, S. H., Park, B. J., and Cho, J. M., "Low Energy Impact Behaviors of Nonstitched and Stitched Foam Cored Sandwich Structures", Proc. of ICCM 12 Pap. 869, 1999, p. 373.

10. ASTM, Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions, ASTM C393-94, 1996, pp. 21~24.

11. 김재훈, 이영신, 박병준, 김덕희, 김영기, "우레탄 폼 코아 샌드위치 구조물의 굽힘강도 및 피로특성, 한국복합재료학회 춘계학술발표대회 논문집", 1999, pp. 176~179.