

요철핀으로 보강된 복합재 모자형 체결부 구조의 강도 연구

곽병수* · 김동관** · 권진희*†

Pull-off Strength of Jagged Pin-reinforced Composite Hat Joints

Byeong-Su Kwak*, Dong-Gwan Kim**, Jin-Hwe Kweon*†

ABSTRACT: The effect of stainless steel jagged-pin reinforcement on the pull-off strength of the composite hat-joint was studied by the test. The pins were physically and chemically surface-treated and inserted in the thickness direction over the interface where the skin and stiffener meet. The specimens including the jagged-pins were made by co-curing process. Diameters of the jagged-pins were 0.3, 0.5 and 0.7 mm. The pin areal densities were set to 0.5 and 2.0% based on the interface area where the skin and stiffener meet. The specimens using 0.3 mm diameter normal (un-jagged) pins with 2.0% areal density were additionally fabricated and tested to investigate the pin shape effect on the pull-off strength. The pull-off strengths of specimens reinforced with 0.5% areal density by 0.3, 0.5, and 0.7 mm diameter pins were 45, 19 and 9% higher than those of un-reinforced specimens, respectively. In case with 2.0% pin areal density, the strengths were 127, 45, and 11% higher than those of un-reinforced specimens, respectively. The test results show that the higher pin areal density results in the higher strength when the pin diameter is the same. When the pin areal density is the same, the smaller pin diameter leads to higher strength. When the joints using jagged-pins and normal pins in 2.0% areal density with 0.3 mm diameter, the joints of jagged-pins showed the 64% higher strength. From the results of this study, it was confirmed that jagged-pin reinforcement can be an effective method for improving the pull-off strength of composite hat-joint.

초 록: 스테인리스 강으로 제작된 요철핀의 보강이 복합재 모자형 체결부의 풀오프 강도에 미치는 영향을 시험으로 연구하였다. 요철핀에는 물리적, 화학적 표면처리를 수행하였고, 체결부의 외피와 보강재가 만나는 영역에 두께방향으로 핀을 삽입하였다. 모자형 체결부 시편은 요철핀을 포함하여 일체성형으로 제작하였다. 사용된 요철핀의 지름은 0.3, 0.5, 0.7 mm로 세 가지이다. 핀의 삽입밀도는 외피와 보강재가 만나는 면적 기준으로 0.5, 2.0% 두 가지이다. 요철핀과 일반핀의 효과를 비교하기 위하여 0.3 mm 일반핀을 2.0% 밀도로 삽입한 시편을 추가로 제작하여 시험을 수행하였다. 0.3, 0.5, 0.7 mm의 요철핀을 0.5%의 밀도로 삽입한 시편의 강도는 보강되지 않은 시편 대비 각각 45, 19, 9% 높게 나타났고, 2.0% 밀도의 경우 강도는 각각 127, 45, 11% 높게 나타났다. 시험 결과 지름이 동일할 경우 밀도가 높을수록, 밀도가 동일할 경우 지름이 작을수록 보강효과가 더 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 요철핀과 일반핀의 효과를 비교한 결과 2.0% 밀도로 0.3 mm 직경의 핀을 이용하여 보강할 경우, 요철핀 보강 시편이 일반핀 보강 시편보다 64% 높은 강도를 보였다. 본 연구의 결과로부터 요철핀 보강이 복합재 모자형 체결부의 풀오프 강도 향상을 위한 효과적인 방법이 될 수 있음을 확인하였다.

Key Words: 복합재료(Composite materials), 모자형 체결부(Hat-joint), Z-피닝(Z-pinning), 요철핀(Jagged pin)

Received 12 October 2018, received in revised form 5 December 2018, accepted 11 December 2018

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Graduate School, Gyeongsang National University

*†School of Mechanical and Aerospace Engineering, Graduate School, Gyeongsang National University,
Corresponding author (E-mail: jhkweon@gnu.ac.kr)

**Lightweight Automotive Components Development Team, LG Hausys

1. 서 론

높은 비강도 및 비강성 뿐만 아니라 고인성, 고내구성, 내부식성 등의 다양한 특성을 가지는 복합재료는 항공산업 뿐만 아니라 자동차, 선박, 레저 산업 등에서도 활발하게 적용되고 있다. 일반적인 복합재 구조는 얇은 프리프레그를 적층하여 오토클레이브에서 제작하며, 이 공정으로 제작된 복합재 구조가 상대적으로 우수한 강도 및 강성을 지닌다. 하지만, 적층공정의 특성상 면내 방향으로는 하중을 지지하는 보강재인 섬유가 배치되지만 두께방향으로는 그렇지 않다. 따라서, 복합재료의 가장 치명적인 단점 중 하나는 상대적으로 두께방향강도가 면내방향에 비해 낮다는 것이다.

이러한 태생적 난제를 해결하기 위해 두께방향으로 섬유를 배치하는 니팅(Knitting), 위빙(Weaving), 브레이딩(Braiding)과 같은 복합재 구조 제작기술들과 관련한 연구가 진행되고 있다[1-4]. 그러나 이러한 3차원 보강 공정은 두께방향으로 섬유를 배치하여 두께방향강도를 증가시킨다는 장점이 있으나, 면내 방향에 배치되는 섬유를 회계 함으로써 면내방향의 물성을 저하시킨다는 단점이 있다. 또한, 이러한 방법을 이용하기 위해서는 프리폼(Preform) 형태로 직조 후 별도로 수지를 주입해야 하므로 이미 수지를 포함하고 있는 프리프레그에는 적용하기 어렵다[5].

프리프레그를 사용하면서 면내물성 저하를 최소화할 수 있는 두께방향 보강 방법으로 Z-피닝 기술이 제시되었다. Z-피닝 공법은 적층판의 층간분리 저항성, 내충격성을 증가시킬 수 있는 기술로서, 경화 전 적층판에 직경이 작은 금속핀 혹은 탄소섬유 핀을 삽입하여 두께방향 강도를 보강하는 기술이다. 본 기술의 가장 큰 특징은 오토클레이브 공정을 사용할 수 있다는 점인데, 이로 인해 고성능 복합재 구조 제작에도 적용할 수 있다는 것이다. 이러한 우수성을 가진 Z-피닝 공법은 많은 연구자들의 관심사항이 되었고, 다양한 연구가 진행되어 왔다[6-9].

Francesconi 등[6]은 Z-핀이 복합재 적층판의 내충격성에 미치는 영향을 확인하기 위해 핀이 삽입된 적층판의 저속 충격시험을 수행하여 핀이 삽입되지 않은 경우와 비교하였다. 시험 결과, Z-핀은 높은 에너지의 충격 하에서 층간분리의 발생을 저지할 수는 없었으나 층간분리의 크기를 감소시킨다는 것이 확인되었다. Pingkarawat 등[7]은 Z-핀으로 보강된 복합재 적층판의 모드 I 파괴인성 및 피로 성능에 대해 연구하였다. 반복하중 하에서 균열성장의 속도는 Z-핀의 삽입밀도에 따라 급격히 감소하였으며, 또한 Z-핀이 길어지거나 직경이 감소하여도 균열성장의 속도가 감소하였다. Hoffmann 등[8]은 원형 또는 직사각형 단면을 가지는 Z-핀으로 보강된 적층판의 정적 및 피로 압축특성에 대해 연구하였다. 삽입된 Z-핀은 적층판의 압축강성에는 큰 영향을 끼치지 않았으나, 압축강도를 크게 저하시켰다. 최근에는 Z-핀을 두께방향강도 보강에만 국한시키지 않고,

층간분리 파손의 발생을 감지하는 용도로 사용한 논문이 발표되기도 하였다[10,11].

Z-피닝 공법은 적층판의 양면에서 수행될 필요가 없다는 공법의 특성 때문에 일체성형(Co-curing) 및 동시접착(Co-bonding)으로 제작되는 복잡한 형상의 복합재 체결부 구조에도 적용이 가능하다. 이에 따라 체결부 구조에 Z-피닝 공법을 적용하여 연구를 수행한 논문이 다수 발표되었다[12-21]. Koh[12-15], Park[16], Li[17] 등은 T형 체결부 구조의 외피-보강재 겹침부를 Z-핀으로 보강하여 다양한 연구를 수행하였다. Ko[18], Son[19], Lee[20] 등은 단일겹침 체결부 구조를 Z-핀으로 보강하여 다양한 환경에서 강도평가를 수행하였다.

항공기에 적용되는 스트링거는 모자형, I-형, Y-형, Z-형 등 다양한 형상으로 제작이 되지만 모자형 스트링거가 가장 많이 사용된다. 하지만 체결부 구조에 Z-피닝 공법을 적용한 논문의 대부분은 T형 체결부 구조에만 집중되어 있으며, 모자형 체결부 구조에 Z-핀을 적용한 연구는 매우 제한적이다. Ji 등[21]이 수행한 선행연구에서는 화학적 표면처리를 한 0.5 mm 지름의 일반핀을 삽입밀도를 0.25, 0.5, 2.0, 4.0%로 달리하여 모자형 체결부 구조의 외피-보강재 겹침부에 삽입하고 정적 및 피로강도를 획득하기 위한 시험을 수행하였다. 하지만 선행연구에서는 핀의 지름을 0.5 mm로 고정하였고, 화학적 표면처리만 수행된 일반핀을 채택하였다. 따라서, 핀의 지름 및 삽입밀도가 모자형 체결부 구조의 강도에 끼치는 영향을 확인하기 위한 연구를 수행할 필요를 확인하였다. 본 연구는 선행연구의 연장선으로 일체성형 공법으로 제작된 모자형 체결부 구조에 Z-핀을 삽입하고, 핀의 지름 세 가지(0.3, 0.5, 0.7 mm), 삽입밀도 두 가지(0.5, 2.0%)에 대한 시험을 수행하였다. 또한 본 연구에서는 물리적 표면처리와 화학적 표면처리가 모두 수행된 요철핀(Jagged Pin)을 채택하였기 때문에, 일반핀 대비 요철핀의 효과를 확인하기 위하여 0.3 mm 직경의 일반핀을 2.0% 밀도로 삽입한 시험의 시험도 수행하였다.

2. 시 험

2.1 Z-핀

Z-핀은 적층판에 삽입되어 핀과 적층판 사이의 마찰력과 접착력을 통해 하중을 지지한다. 따라서 더 높은 마찰력과 접착력을 확보하기 위해서는 적층판과 핀 사이의 접착면적을 증가시켜야 한다. 본 연구의 목적은 접착면적을 높이기 위해 핀의 표면을 기계적으로 변형시킨 요철핀이 풀오프(Pull-off) 하중을 받고 있는 모자형 체결부 구조의 파손강도에 미치는 영향을 확인하는 것이다. 물리적 표면처리로는 단조공법을 사용하여 금속핀의 표면에 일정한 간격으로 원형의 마크(Mark)를 생성하였다. 물리적 처리의 효과를 확인하기 위하여 광학현미경을 이용해 핀의 표면을

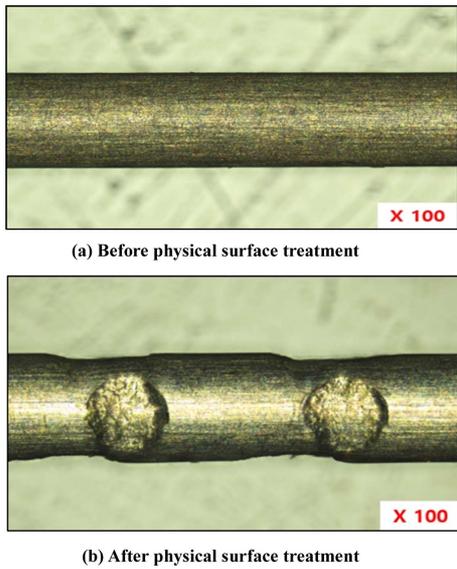


Fig. 1. Microscopic images of surface for 0.3 mm diameter Z-pin

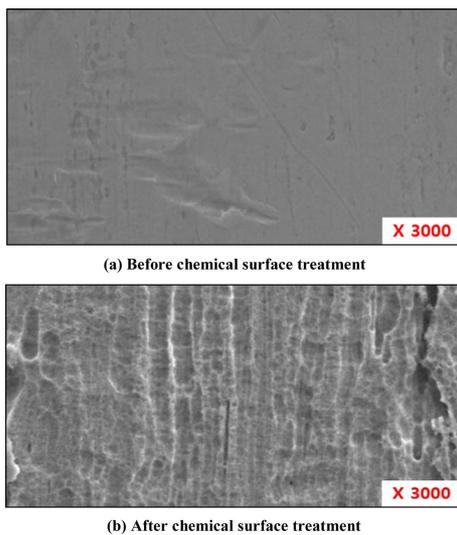


Fig. 2. SEM images of surface for Z-pin

확인하였고 Fig. 1에 물리적 처리 전, 후 0.3 mm 지름의 핀을 100배 확대한 모습을 제시하였다. 그림과 같이 물리적 처리 후 핀의 표면은 움푹 파인 형상을 나타내며, 이는 핀과 복합재 적층판 사이의 접촉면적을 확대하고 마찰력을 증가시키는 효과를 발생시킨다. 물리적 표면처리 이후 염산과 질산을 3:1의 비율로 섞은 왕수(Aqua Regia) 용액에 핀을 담근 후 5분 뒤에 건져내는 화학적 표면처리를 수행하였다[22]. 이러한 화학적 표면처리는 핀의 표면을 부식시켜 접촉면적을 넓히고 마찰력을 증가시키는 효과가 있다. 화학적 표면처리가 핀의 표면에 미치는 영향을 확인하기 위하여 화학적 처리 전과 후 핀의 표면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였으며, 그 결과는 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 시편제작

모자형 체결부의 형상과 자세한 치수는 Fig. 3에 나타내었다. 시편의 형상은 선행연구[21]에서와 동일하지만 선행연구에서는 요철이 없는 일반핀을 사용한 반면 본 연구에서는 물리적 표면처리가 추가된 요철핀을 사용한다. 따라서 Z-핀의 삽입공정은 선행연구와 동일하다. 시편의 길이는 200 mm, 폭은 50 mm이며, 핀이 삽입되는 외피와 보강재가 겹치는 좌우 영역의 길이는 각각 20 mm이다. 시편 제작에 사용된 프리프레그는 SK 케미컬사의 일방향 탄소-에폭시 프리프레그인 USN-125B이고, 단순 평판인 외피와 모자형 보강재 적층판의 적층순서는 각각 [45/90/-45/0/45/0/-45]₂₅, [45/0/0/-45/90]₂₅이다. 성형 몰드는 알루미늄으로 제작하였으며, 몰드 표면의 경도를 향상시키기 위해 하드 아노다이징(Hard Anodizing) 처리를 하였다. 시편의 제작 과정은 Fig. 4에 보였다. 먼저 이형 처리된 성형 몰드에 보강재에 해당하는 프리프레그를 적층한 후 이형필름으로 감싼 고무몰드를 넣어 외피와 보강재 사이의 빈 공간을 메꾸어 준다. 이 때 프리프레그를 둥글게 말아서 만든 필러(Filler)를 외피와 보강재가 만나는 영역에 위치시킨다. 필러는 외피와 보강재가 만나는 빈 공간을 채워주어 외피와 보강재

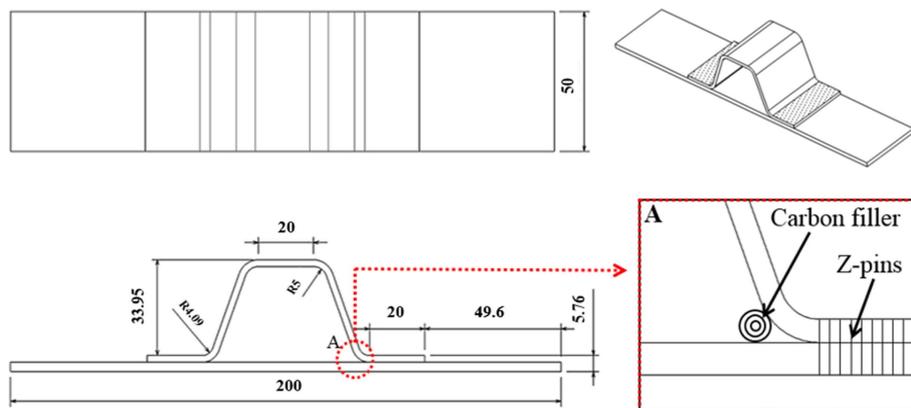


Fig. 3. Specimen configuration (unit : mm) [21]

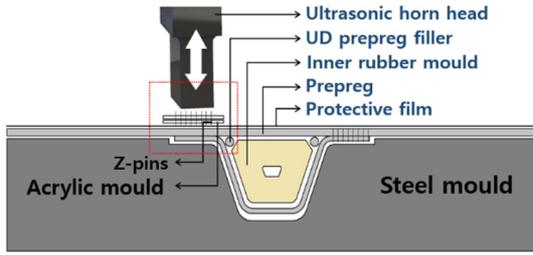


Fig. 4. Conceptual diagram for making specimen [21]

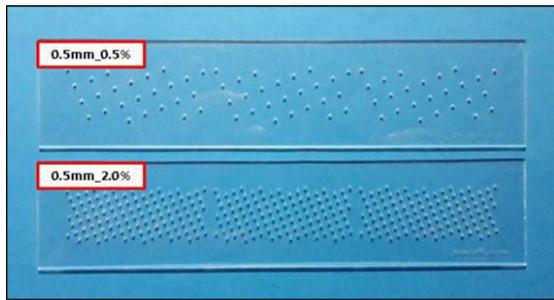


Fig. 5. Typical acrylic mould for Z-pinning

가 만나는 영역에서 섬유 접합의 휘어짐을 최소화하는 효과를 만든다. 그 후 외피에 해당하는 프리프레그를 적층한다. 외피의 프리프레그를 적층할 때 마지막 4장의 프리프레그를 제외하고 적층을 한 후 Z-핀의 삽입을 시작한다.

Z-핀을 삽입하는 공정은 다음과 같다. 우선 핀을 적층판과 수직방향으로 삽입하기 위해 핀을 수직으로 배치한다. 핀의 고정 및 배치에는 Fig. 5에 보인 구멍이 가공된 아크릴 평판을 두 장 겹쳐 사용한다. 한 장의 아크릴 평판이 아닌 두 장을 사용한 이유는 단계적으로 핀을 삽입하여 핀이 수직으로 잘 삽입되도록 하여 핀의 기울어짐과 복합재 적층판의 손상을 최소화하기 위함이다. 핀의 삽입에 사용한 초음파 장치는 BRANSON 사의 핸드건(Hand Gun) 형태의 2000LP 모델이다. 핀을 아크릴 평판에 고정한 후 초음파장치를 이용하여 핀을 일정 깊이로 삽입하였고, 아크릴 평판을 한 장씩 제거하며 핀을 끝까지 단계적으로 삽입한다. Fig. 6은 패널에 삽입된 핀을 나타낸다. 그림과 같이 섬유의 0° 방향과 이루는 각도가 22.5°가 되도록 핀을 삽입하였다. 만약 Z-핀이 섬유의 방향과 일직선상으로 배치되면 잉여 레진 영역(Resin Rich Zone)이 연속적으로 생성되어 서로 연결되는 레진 채널(Resin Channel)이 발생할 가능성이 높다[5]. 이러한 레진 채널은 균열의 시작점이 되거나 균열진전의 통로가 될 수 있으므로 반드시 피해야 한다. 본 연구에 사용된 모자형 체결부 시편은 0°, 90°, 45°, -45°의 프리프레그로 구성되어 있기 때문에, 핀의 배치와 섬유의 방향이 이루는 각도가 22.5°가 되면 모든 층에서 핀의 배치가 섬유의 방향과 일치하지 않으므로 레진채널을 방지할 수 있다[21]. 핀의 삽입밀도는 삽입된 핀의 단면적의 총합을 외피-보강

Table 1. Test matrix

Pin type	Pin diameter (mm)	Pin areal density (%)	No. of specimens
Jagged pin	0.3	0.5	5
		2.0	5
	0.5	0.5	5
		2.0	5
	0.7	0.5	5
		2.0	5
Normal pin	0.3	2.0	5
Total			35

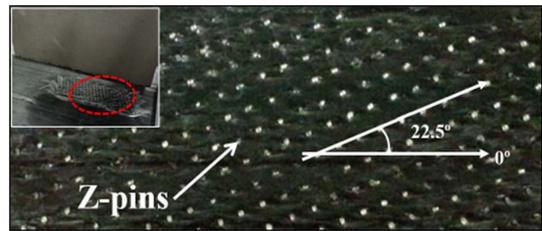


Fig. 6. Z-pins arrangement

재 겹침부의 면적으로 나눈 값으로 정의하였으며, 본 연구에서는 0.5%, 2.0% 밀도로 핀을 삽입하였다.

핀의 삽입이 완료된 후 적층하지 않았던 4장의 프리프레그를 마저 적층한다. 핀이 삽입된 적층판을 경화할 때 핀이 완전히 적층판 속으로 삽입되지 않을 경우, 핀은 오토클레이브에서 적층판에 가해지는 압력을 완화시키는 효과를 유발할 가능성이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 핀의 삽입이 완료된 적층판에 추가 프리프레그를 적층해 주는 것이다. 추가 4장의 프리프레그까지 적층이 완료된 패널을 오토클레이브에서 성형하였고, 성형 후 패널을 시편단위로 가공하였다.

시험에 관한 자세한 사항은 Table 1에 제시하였다. 핀의 삽입밀도(0.5, 2.0%)와 핀의 지름(0.3, 0.5, 0.7 mm)을 변수로 설정하고, 각 종류 당 5개씩 시편을 제작하였다.

추가적으로 물리적 요철 처리 효과를 확인하기 위하여, 화학적 표면처리만 수행한 0.3 mm 지름의 일반핀을 2.0% 밀도로 삽입한 시편 5개를 제작하여, 총 35개의 시편의 시험을 수행하였다.

2.3 시험 절차

Fig. 7에 보인 풀오프 시험을 위한 치구와 시험 절차는 선행연구[21]에서와 동일하다. 시험 치구는 크게 상부치구와 하부치구로 구성된다. 상부치구는 시편에 풀오프 하중을 직접적으로 가하는 역할을 수행하기 위해 모자형 보강재를 들어 올리도록 설계되었다. 하부치구는 시편의 양쪽을 고정지지하도록 설계되었으며, 시험이 진행될 때 실제 변

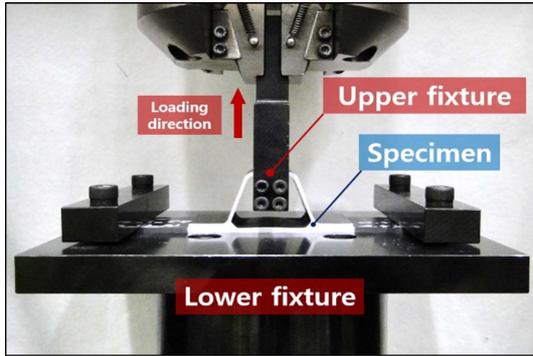


Fig. 7. Test set-up and fixtures

형하는 시편의 길이는 160 mm로 설정하였다. 고정지지조건 부여를 위해 볼트를 체결할 때 모든 시편에서 동등한 시험조건을 유지하기 위한 목적으로 토크렌치를 이용하여 200 Kgf-cm의 일정한 토크를 가하였다. 시험에 사용된 장비는 100 kN 용량의 만능시험기 Instron 5582이며, 하중속도는 분당 1.5 mm로 설정하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 핀밀도 0.5%인 경우

핀의 삽입밀도 0.5%에서 삽입된 핀의 지름이 모자형 체결부의 강도 및 파손거동에 미치는 효과를 확인하기 위하여 지름 세 가지(0.3, 0.5, 0.7 mm)의 핀을 삽입한 체결부 시험을 수행하였다. 각 경우의 시험 결과는 핀이 삽입되지 않은 경우(No Pin)의 강도값과 비교하였다. Fig. 8은 삽입밀도 0.5%에 대한 대표적인 하중-변형 곡선들을 나타낸다. 핀이 삽입되지 않은 시편의 경우 하중과 변형은 대체로 선형적으로 증가하다가 임계하중에 도달하면 Fig. 9(a)에 제시한 바와 같이 한꺼번에 외피와 보강재가 분리되면서 최종파손에 도달하게 된다. 0.3 mm 핀의 경우에도 하중-변형 곡선은 핀 보강이 없는 경우와 큰 차이가 없다. 그러나 핀이

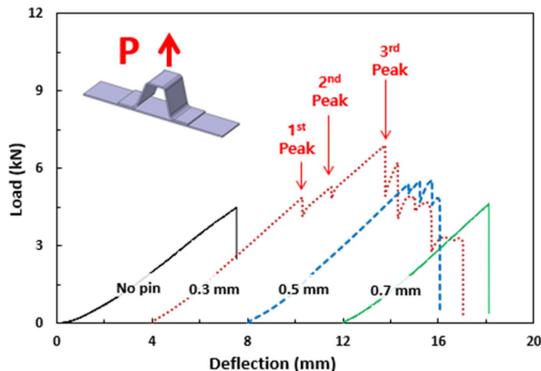


Fig. 8. Load-deflection curves of hat joint Z-pinned with 0.5% density

없는 경우보다 더 높은 하중을 지지하다가 최종파손 전에 국부적 손상을 나타내는 피크가 나타난다. 첫 번째 나타나는 피크에 해당하는 초기균열은 Fig. 9(b)에 보였다. 이 균열은 보강재가 휘어지기 시작하는 외피와 보강재의 접침부 끝단에서 발생하였다. 그러나 초기균열 이후에도 Z-핀의 보강효과로 인하여 지지하중은 더 증가한다. 이후 또 한번의 작은 피크를 보인 후 최종파손이 발생한다. Fig. 9(b)의 2번째 사진은 최대하중 직후 즉 세 번째 피크 후의 형상이며 외피와 보강재 접침부 일부영역에 접촉라인을 따라 파손이 발생한 것을 알 수 있다. 최대지지하중 이후에도 손상의 진전을 나타내는 여러 번의 피크가 더 발생하고 최종적으로 외피와 보강재가 완전히 분리되는 최종파손에 도달한다. 균열이 진전됨에 따라 보강재에 삽입되어 있던 핀은 단계적으로 뽑혔으며, Fig. 9(b)에 보인 바와 같이 보강재에 삽입되어 있던 모든 핀이 뽑히며 외피와 보강재가 완전히 분리되는 최종파손을 나타냈다. 최종 분리 후 핀은 두께가 두꺼운 외피에 박혀 있는 형태이다.

0.5 mm의 핀이 0.5% 밀도로 삽입된 경우에도 하중-변형 곡선에서 초기균열을 나타내는 피크가 발생하였으며 초기균열이 발생한 위치와 초기균열의 형상은 0.3 mm 핀의 경우와 유사하였다. 초기균열 이후 2번의 피크가 추가적으로 발생하였으나 의미 있는 지지하중의 증가는 나타나지 않았다. 최종파손모드도 0.3 mm 핀 보강의 경우와 유사하게 접침부의 외피와 보강재가 완전히 분리되는 모양으로 나타났고 파손의 과정은 Fig. 9(c)에 나타내었다.

0.7 mm의 핀이 0.5% 밀도로 삽입된 경우에는 0.3, 0.5 mm 핀을 보강한 경우와 달리 대부분 시편의 하중-변형 곡선상에 피크가 나타나지 않았다. 피크가 나타난 경우도 있었으나, 피크가 나타나더라도 지지하중의 감소는 거의 나타나지 않았다. 보강핀이 없는 경우와 유사하게 하중이 선형적으로 증가하다 임계하중에 도달하였을 때 최종파손이 발생하였다. 피크의 발생유무에 관계없이 최종파손모드는 유사하였으며, 최종파손은 Fig. 9(d)에 보인 바와 같이 접침부의 외피와 보강재가 완전히 분리되는 모습으로 나타났다.

본 연구에서 체결부 구조의 강도는 하중-변형 곡선상의 최대하중을 외피와 보강재가 접착되어 있는 영역의 면적으로 나눈 값으로 정의하였다. 또한 초기균열응력은 초기균열이 발생한 지점의 하중을 전체 접착면적으로 나눈 값으로 정의하였다. 0.5% 밀도로 요철핀이 삽입된 구조의 강도, 초기균열응력 및 핀과 적층판 사이의 계면면적을 Fig. 10에 나타내었다. 핀을 사용하지 않은 시편의 강도는 1.66 MPa인데, 이 경우에는 초기파손이 최종파손이므로 초기균열응력도 1.66 MPa이 된다. 0.5%의 밀도로 0.3, 0.5, 0.7 mm 지름의 요철핀을 삽입한 시편의 강도는 각각 2.42, 1.97, 1.81 MPa로 나타났으며, 이는 무보강 시편 대비 각각 46, 19, 9% 증가된 값이다. 핀의 지름이 작을수록 강도는 높게 나타나는 경향을 보인다. Z-피닝 공법은 삽입된 핀과 적층판 사이의

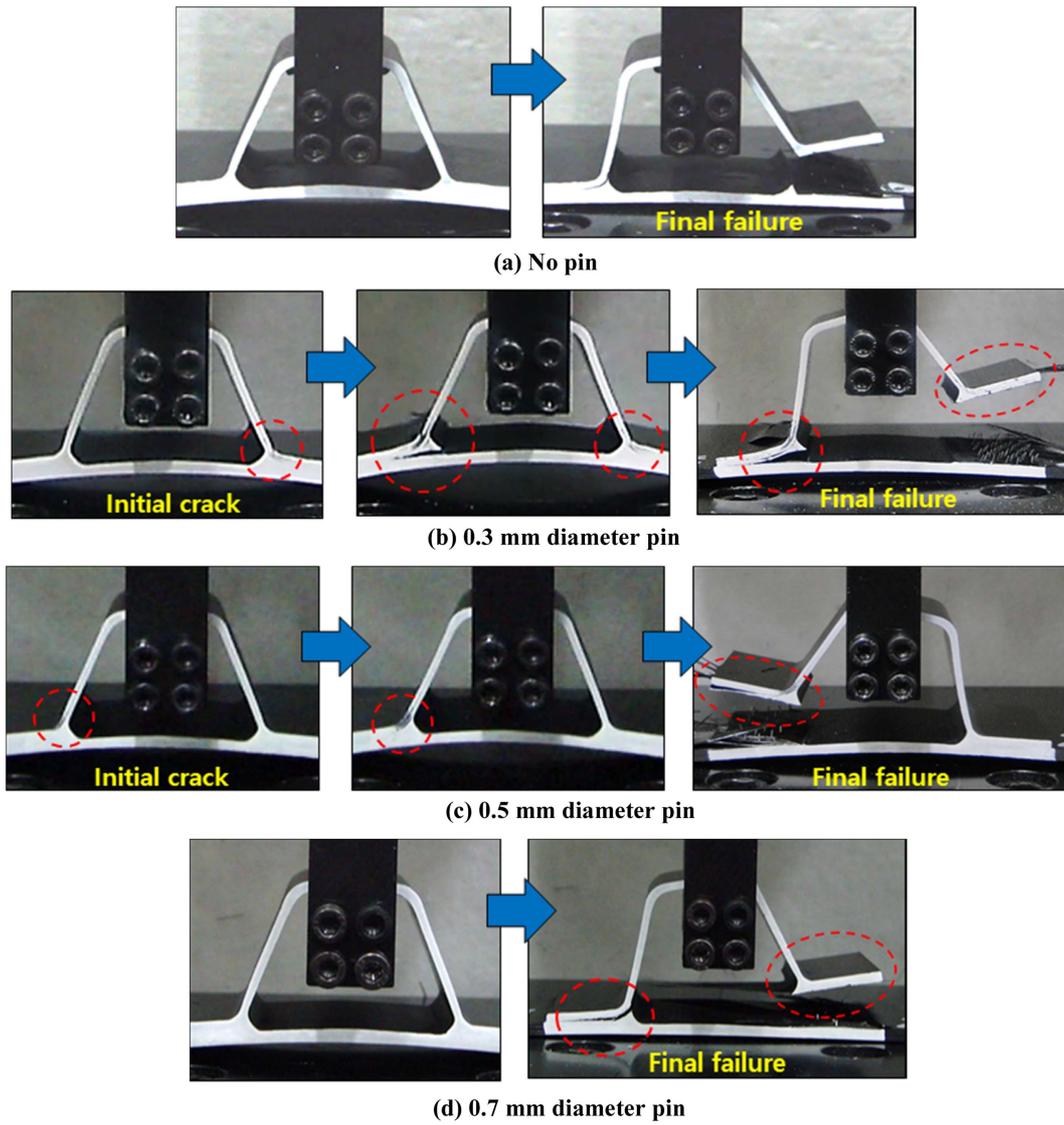


Fig. 9. Failure development of hat joint with 0.5% Z-pin density

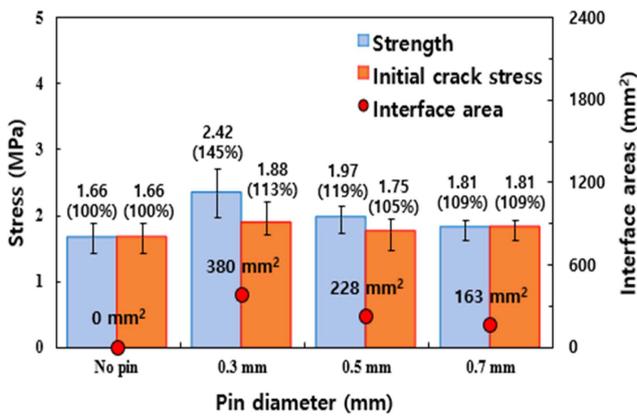


Fig. 10. Failure strength and bonded area between laminate and Z-pin (0.5% density)

마찰력과 접착력을 통해 두께방향 강도를 증가시킨다. 따라서 동일한 밀도 조건에서는 핀의 지름이 작을수록 더 많은 핀이 적층판에 삽입되기 때문에 핀과 적층판이 접착하는 계면이 커지고 이는 0.3 mm의 핀으로 보강한 시편의 강도가 가장 높은 원인이 된다.

초기균열응력을 살펴본 결과, 핀의 지름이 0.3, 0.5, 0.7 mm로 증가하였을 때 평균 초기균열응력은 각각 1.88, 1.75, 1.81 MPa로 나타났다. 핀의 지름이 0.7 mm인 경우 대부분의 시편에서 초기균열이 발생하지 않았기 때문에, 초기균열응력은 시편의 강도와 같다. 무보강 시편과 비교하였을 때 초기균열응력 증가율은 13, 5.4, 9.0%에 불과하다. 무보강 시편 대비 초기균열응력이 증가하였지만 차이는 크지 않으며, 핀의 지름에 따라 뚜렷한 경향도 나타나지 않는다. 이는 초기균열이 발생하는 위치와 관련이 있다. 초기균열

은 항상 외피와 보강재의 접침이 끝나는 안쪽 영역에서 발생하는데 이 끝단은 보강핀을 배치하지 않은 영역이다. 따라서 이 영역은 보강핀의 영향을 크게 받지 않고 모드 I 형태의 하중을 받게 되며, 이러한 현상이 초기균열응력 시험 결과의 원인으로 판단된다.

3.2 핀밀도 2.0%인 경우

핀의 밀도를 2.0%로 올린 다음 앞에서와 동일하게 요철 핀의 지름을 세 가지(0.3, 0.5, 0.7 mm)로 변경하면서 시험을 수행하였다. Fig. 11에 핀밀도 2.0%에 대한 대표적인 하

중-변형 곡선을 보였다. 0.5 mm와 0.7 mm 핀으로 보강한 경우 최종파손하중이 증가하기는 하였으나 하중-변형 곡선의 전체적 형태는 밀도 0.5%인 경우와 크게 다르지 않다. 그러나 0.3 mm 핀으로 보강한 경우의 하중-변형 곡선은 앞의 경우와 크게 다르다. 초기균열이 나타나는 하중도 높지만 초기균열 후 최종파손에 도달하기까지 거의 2배 정도의 하중을 지지한다. 하중-변형 곡선에서 보이는 여러 개의 작은 피크들은 균열이 진행되면서 밀도가 높은 보강핀에 의해 지속적으로 저항을 받고 있음을 보여준다. Fig. 12에 핀 직경에 따른 파손양상을 나타내었다. Fig. 12(a)에는 보강핀이 균열의 성장 저항구조의 역할을 충분히 했음을 잘 보여준다. 만약 보강핀이 없었다면 한번 시작된 균열은 불안정하게 성장하여 하나 혹은 두 개의 깨끗한 파손면을 보이게 된다. 그러나 사진에 제시된 파손양상을 보면 보강재의 광범위한 영역에서 층간분리를 비롯한 복잡한 형태의 파손이 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 보강핀이 균열의 성장을 막기 때문에 균열이 인접한 다른 층으로 이동하면서 진행되는 것을 의미하고 결과적으로 최종파손을 지연시키는 역할을 하게 된다. 최종파손모드는 보강핀 밀도가 낮았던 앞의 경우와 마찬가지로 보강재에 삽입되어 있던 핀이 모두 빠지며 외피와 보강재가 분리되는 형태로 나타났다.

2.0% 밀도로 핀이 삽입된 구조의 강도, 초기균열응력 및 핀과 적층판 사이의 계면면적을 Fig. 13에 나타내었다. 2.0%의 밀도로 0.3, 0.5, 0.7 mm 지름의 핀을 삽한 시편의 강도는

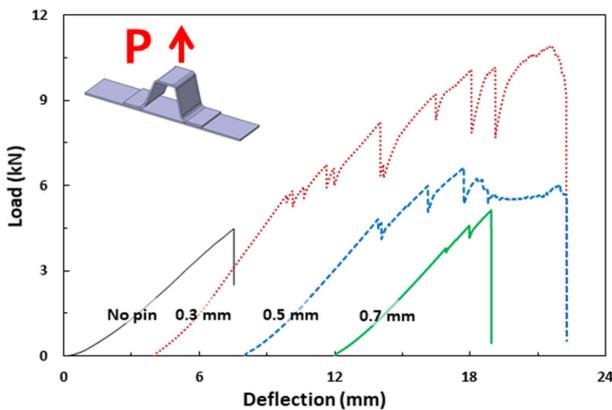


Fig. 11. Load-deflection curves of hat joint Z-pinned with 2.0% density

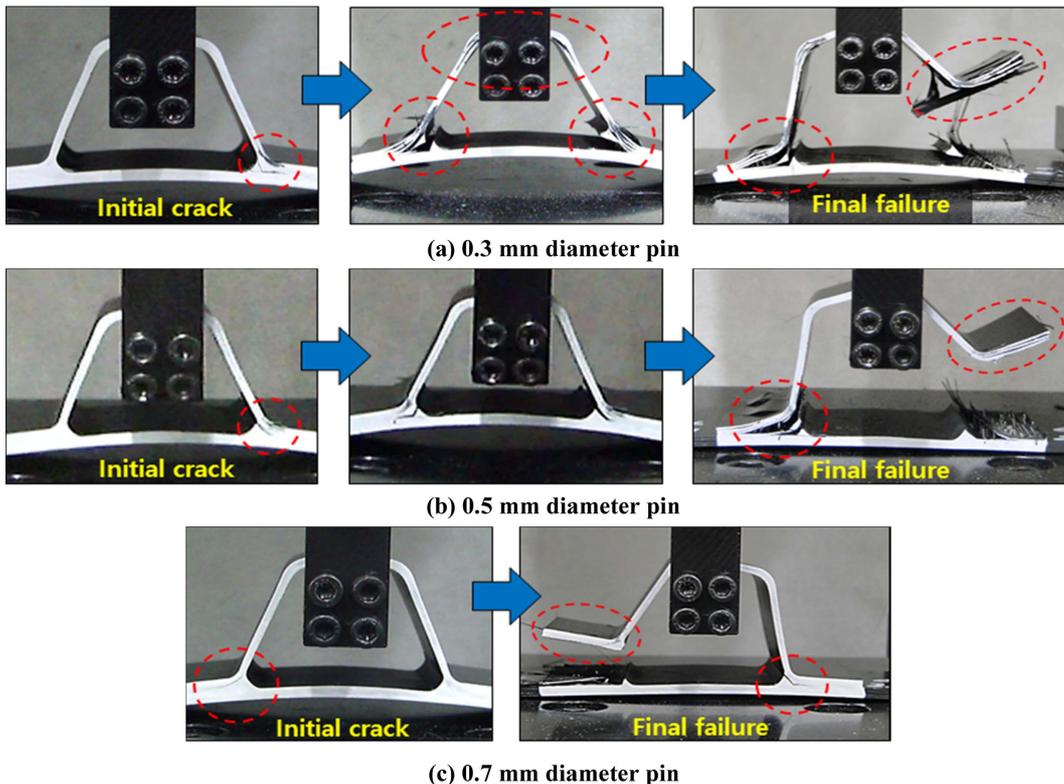


Fig. 12. Failure development of hat joint with 2.0% Z-pin density

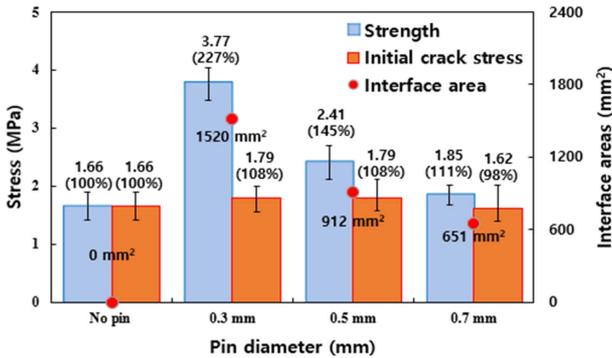


Fig. 13. Failure strength and bonded area between laminate and Z-pin (2.0% density)

각각 3.77, 2.41, 1.85 MPa로 나타났으며, 이 값은 무보강 시편 대비 각각 127, 45, 11% 증가된 값이다. 세 경우 모두 10%가 넘는 높은 강도 증가를 보였으며 특히 0.3 mm 핀 보강 시편의 경우 무보강 시편의 강도보다 2.27배 높은 강도를 보였다. 이미 언급한 바와 같이 이러한 강도 증가는 복합재와 보강핀 계면면적의 증가와 연결되어 있다. 초기균열응력의 경우 앞서도 설명한 바와 같이 보강핀의 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다.

3.3 핀 요철의 효과

본 연구에서는 단조공법으로 핀의 표면에 Mark를 생성하는 물리적 표면처리 후 왕수를 이용한 화학적 표면처리를 한 요철핀을 사용하였다. 그러나 만약 요철이 없이 화학적 표면처리만 수행한 일반핀으로 보강한 경우 보강효과가 어느 정도인지를 파악하기 위한 추가 시험을 수행하였다.

Fig. 14에 지름 0.3 mm, 밀도 2.0%의 요철핀과 비요철 일반핀으로 보강한 체결부에 대한 시험 결과를 제시하였다. 0.3 mm의 요철이 없는 일반핀으로 보강한 경우 초기파손 후 추가적인 하중지지는 약 19%에 불과하다. 그러나 앞서도 살펴본 바와 같이 요철핀을 사용한 경우에는 초기피크 후에도 약 2배까지 추가적인 하중을 지지한다. 최종파

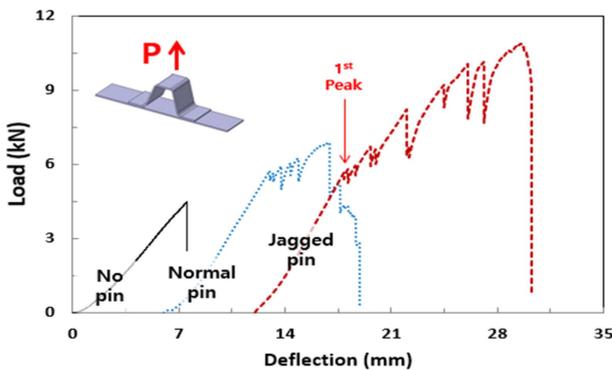


Fig. 14. Load-deflection curves of hat joint Z-pinned by 0.3 mm diameter pins with 2.0% density

손강도는 일반핀을 사용한 체결부의 값을 100%로 했을 때 요철핀의 강도는 164%로 나타났다. 이러한 결과는 층간분리 등의 파손방지를 위해 복합재 적층판에 Z-핀 보강을 할 때, 핀에 물리적 변형을 가하여 요철을 생성하는 것이 마찰력이나 접촉면적 증가의 측면에서 중요하며, 이것이 구조물 강도증가에 큰 영향을 미침을 보여주는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 물리적, 화학적 표면처리를 한 요철핀으로 보강한 복합재 모자형 체결부 구조의 풀오프 강도시험을 수행하였다. 핀의 직경, 밀도와 요철의 효과를 주요 인자로 설정하였다. 핀의 삽입밀도를 0.5%로 하고, 보강 요철핀의 지름을 0.3, 0.5, 0.7 mm로 했을 때 최종파손강도는 각각 2.42, 1.97, 1.81 MPa 으로, 무보강 시편 대비 각각 45, 19, 9% 증가하였다. 핀의 지름이 작을수록 보강효과가 높게 나타나는데 이는 핀과 적층판 사이의 계면면적이 커지기 때문으로 판단된다. 핀의 밀도를 2.0%로 높였을 때 0.3, 0.5, 0.7 mm 보강핀을 사용한 시편의 최종파손강도는 각각 3.77, 2.41, 1.85 MPa으로 무보강 시편 대비 127, 45, 11% 증가하였다. 삽입밀도 0.5%의 경우와 마찬가지로 핀의 지름이 작을수록 보강효과가 높게 나타났다. 핀의 밀도가 2.0%인 경우의 강도가 0.5%인 경우보다 높게 나타났으나 핀의 직경이 커질수록 밀도의 강도 증가 효과는 낮아지는 것으로 나타났다. 이것은 핀의 직경이 커질 경우 핀 주변에서의 잉여수지층이 커지게 되고 핀을 삽입하는 과정에서 발생하는 섬유와 손상도 많아지기 때문으로 판단된다. 0.3 mm 직경의 요철핀과 비요철 일반핀의 효과를 비교한 결과 요철핀을 사용한 체결부의 강도가 64% 더 높게 나타나, 요철로 인한 계면면적과 마찰력 증가가 Z-핀의 보강효과의 주 원인인 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 Z-핀으로 보강된 모자형 체결부 구조의 정하중 시험을 통해 보강효과를 확인하였다. 향후 반복적인 하중 하에서 보강효과를 확인하기 위한 피로시험을 수행하여 Z-핀으로 보강된 모자형 체결부 구조의 피로특성을 확인할 계획이다.

후 기

본 연구는 2018년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2017R1A5A1015311).

REFERENCES

1. Vuure, A.W.V., Ko, F.K., and Beevers, C., "Net-shape knitting for complex composite preforms," *Textile Research Journal*, Vol. 73, No. 1, 2003, pp. 1-10.

2. Wang, Z., Bai, J., Sobey, A., Xiong, J., and Shenoi, A., "Optimal design of triaxial weave fabric composites under tension," *Composite Structures*, Vol. 201, 2018, pp. 616-624.
3. Zheng, Y., and Sun, Y., "Tensile response of carbon-aramid hybrid 3D braided composites," *Materials & Design*, Vol. 116, 2017, pp. 246-252.
4. Zhou, H., Hu, D., Gu, B., and Sun, B., "Transverse impact performance and finite element analysis of three dimensional braided composite tubes with different braiding layers," *Composite Structures*, Vol. 168, 2017, pp. 246-259.
5. Mourits, A.P., "Review of z-pinned composite laminates," *Composites: Part A*, Vol. 38, No. 12, 2007, pp. 2383-2397.
6. Francesconi, L., and Aymerich, F., "Effect of z-pinning on the impact resistance of composite laminate with different layups," *Composites: Part A*, Vol. 114, 2018, pp. 136-148.
7. Pingkarawat, K., and Mouritz, A.P., "Improving the mode-I delamination fatigue resistance of composites using z-pins," *Composites Science and Technology*, Vol. 92, 2014, pp. 70-76.
8. Hoffmann, J., and Scharr, G., "Compression properties of composite laminates reinforced with rectangular z-pins," *Composites Science and Technology*, Vol. 167, 2018, pp. 463-469.
9. M'membe, B., Gannon, S., Yasaee, M., and Hallett, S.R., and Partridge, I.K., "Mode II delamination resistance of composites reinforced with inclined Z-pins," *Materials & Design*, Vol. 94, 2016, pp. 565-572.
10. Zhang, B., Allegri, G., Yasaee, M., Hallett, S.R., and Partridge, I.K., "On the delamination self-sensing function of Z-pinned composite laminates," *Composites Science and Technology*, Vol. 128, 2016, pp. 138-146.
11. Pegorin, F., Pingkarawat, K., and Mouritz, A.P., "Electrical-based delamination crack monitoring in composites using z-pins," *Composites: Part A*, Vol. 104, 2018, pp. 120-128.
12. Koh, T.M., Feih, S., and Mouritz, A.P., "Experimental determination of the structural properties and strengthening mechanics of z-pinned composite T-joints," *Composite Structures*, Vol. 93, No. 9, 2011, pp. 2222-2230.
13. Koh, T.M., Isa, M.D., Feih, S., and Mouritz, A.P., "Experimental assessment of the damage tolerance of z-pinned T-stiffened composite panels," *Composites: Part B*, Vol. 44, No. 1, 2013, pp. 620-627.
14. Koh, T.M., Isa, M.D., Chang, P., and Mouritz, A.P., "Improving the structural properties and damage tolerance of bonded composite joints using z-pins," *Journal of Composite Materials*, Vol. 46, No. 26, 2012, pp. 3255-3265.
15. Koh, T.M., Feih, S., and Mouritz, A.P., "Strengthening mechanics of thin and thick composite T-joints reinforced with z-pins," *Composites: Part A*, Vol. 43, No. 8, 2012, pp. 1308-1317.
16. Park, Y.B., Lee, B.H., Kweon, J.H., Choi, J.H., and Choi, I.H., "The strength of composite bonded T-joints transversely reinforced by carbon pins," *Composite Structures*, Vol. 94, No. 2, 2012, pp. 625-634.
17. Li, M., Chen, P., Kong, B., Peng, T., Yao, Z., and Qiu, X., "Influences of thickness ratios of flange and skin of composite T-joints on the reinforcement effect of Z-pin," *Composites: Part B*, Vol. 97, 2016, pp. 216-225.
18. Ko, M.G., Kweon, J.H., and Choi, J.H., "Fatigue characteristics of jagged pin-reinforced composite single-lap joints in hygrothermal environments," *Composite Structures*, Vol. 119, 2015, pp. 59-66.
19. Son, H.G., Park, Y.B., Kweon, J.H., and Choi, J.H., "Fatigue behaviour of metal pin-reinforced composite single-lap joints in a hygrothermal environment," *Composite Structures*, Vol. 108, 2014, pp. 151-160.
20. Lee, B.H., Park, Y.B., Kweon, J.H., Choi, J.H., Choi, I.H., and Chang, S.T., "Strength of stainless steel pin-reinforced composite single-lap joints," *Composite Research*, Vol. 25, No. 3, 2012, pp. 65-69.
21. Ji, H., Kweon, J.H., and Choi, J.H., "Fatigue characteristics of stainless steel pin-reinforced composite hat joints," *Composite Structures*, Vol. 108, 2014, pp. 49-56.
22. Reynolds, A.P., Tang, W., Gnaupel-Herold, T., and Prask, H., "Structure, properties, and residual stress of 304L stainless steel friction stir welds," *Scripta Materialia*, Vol. 48, No. 9, 2003, pp. 1289-1294.