

'12 춘계학술대회 우수 논문

금속 핀으로 보강된 복합재 단일겹침 체결부의 강도 연구

이병희*, 박용빈*, 권진희**, 최진호***, 최익현****, 장성태*****

Strength of Stainless Steel Pin-reinforced Composite Single-lap Joints

Byeong-Hee Lee*, Yong-Bin Park*, Jin-Hwe Kweon**, Jin-Ho Choi***,
Ik-Hyeon Choi****, and Sung-Tae Chang*****

ABSTRACT

The main objective of this study is to investigate the effect of metal z-pinning on the failure behavior of cocured composite single-lap joints. Three different pin diameters (0.3, 0.5, and 0.7 mm) and three pin areal densities (0.5, 2.0, and 4.0%) were examined. The specimens were fabricated by T700-12K-31E#2510 unidirectional prepreg from Toray. Stainless steel pins were used for z-pinning. Test results showed that except one case with extremely low pin density of 0.5%, all other z-pinned joints exhibited lower initial crack stresses than those of the unpinned joint. However the ultimate strength of the z-pinned joint increased up to 45% at most. Furthermore, even after the complete failure of the joint, the z-pins sustained the carried load to a certain degree experiencing large deformation and provided the stable fracture behavior for the composite joint.

초 록

본 논문에서는 금속 핀으로 보강된 일체성형 복합재 단일겹침 체결부에 대해, 보강 핀이 체결부의 파손거동에 미치는 영향을 시험으로 연구하였다. 핀의 지름(0.3, 0.5, 0.7 mm)과 밀도(0.5, 2.0, 4.0%)를 달리하여 총 6종류의 시편을 제작하였다. 복합재료와 보강핀은 각각 Toray사의 일방향 탄소-에폭시 프리프레그 T700-12K-31E#2510와 스테인리스 강이다. 핀 밀도가 매우 낮은 한 경우(0.5%)를 제외하고는, 모든 체결부에서 두께방향 핀의 보강으로 인해 초기균열의 발생이 더 빨라지는 것으로 나타났다. 그러나 극한강도는 최대 45%까지 증가하고, 특히 접착면의 완전한 분리 후에도 대변형 상태에서 핀이 추가적인 하중을 지지함으로써, 구조물이 안정적 파괴거동을 갖도록 하는 것을 확인하였다.

Key Words : Z-피닝(z-pinning), 단일겹침 체결부(single-lap joint), 파손강도(failure strength), 일체성형(co-curing)

1. 서론

복합재료의 기계적 특성이 개선되고, 제작기술 또한 발달하면서 복합재료는 이차구조물뿐만 아니라 항공기의 주구조물에 까지 적용이 확대되고 있다. 이 경우 복합재 구조물의

설계에서 가장 유의해야 할 부분은 체결부(joint)이며 체결부의 강도예측에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다[1-3]. 특히 최근 들어 항공기 제작기술이 발달하면서 복잡한 형상의 구조를 한꺼번에 제작하는 일체성형(co-curing) 공법에 관한 연구가 증가하고 있다[4,5]. 일체성형 공법으로 제작된 체결부

2012년 춘계학술대회 우수논문(무심사)

* 경상대학교 대학원 항공우주공학전공

**+ 경상대학교 항공우주시스템공학과, 항공기부품기술연구소, 교신저자(E-mail:jhkweon@gnu.ac.kr)

*** 경상대학교 기계공학부, 항공기부품기술연구소

**** 한국항공우주연구원

***** 경상대학교 항공기부품기술연구소

는 접착 체결부의 한 종류로서 응력집중을 줄일 수 있고, 체결재(fastener)의 무게를 줄일 수 있다. 그러나 체결재가 없는 일체형 체결부는 두께방향의 파손에 취약하다는 단점이 있다 [6]. 복합재 적층판이 두께방향으로 인장이나 전단응력을 받게 되면 기지에 의해 접착되어 있는 층과 층사이의 면이 떨어지는 층간분리(delamination)가 쉽게 발생할 수 있다. 이러한 층간분리는 복합재 적층 구조물의 굽힘 및 압축하중 지지 능력을 저하시키게 된다. 따라서 일체형 제작방법이 항공기 주구조물에 신뢰성 있게 사용되기 위해서는 층간분리 파손을 방지할 수 있는 대책이 필요하다.

이러한 문제의 해결책으로 두께 방향 층간강도를 보강하려는 새로운 기술들이 꾸준히 개발되고 있다. 니팅(knitting), 위빙(weaving), 브레딩(braiding), 스티칭(stitching), 터프팅(tufting), z-피닝(pinning) 등이 그 예이다[7-11]. 이러한 방법 중 프리프레그(prepreg)를 이용하여 제작하는 구조물에 적용하기 가장 용의한 것이 z-피닝 기술이다[11]. Z-피닝 기술은 두께방향으로 금속 혹은 탄소섬유 핀을 삽입하여 복합재의 층간강도를 향상시키는 기술이다. Z-피닝 기술을 사용하면 보강섬유의 손상을 최소화하고, 간단하게 국부적인 보강을 할 수 있다.

항공기에서 두 판재를 연결하는데 흔히 사용되는 방법이 겹침접착(lap bonding)이다. 이러한 겹침 체결부는 대부분 접착면의 분리나 모재의 층간분리에 의한 파괴가 발생한다. 그러므로 앞에서 소개한 z-피닝이 겹침 체결부의 전단강도 개선에 기여할 수 있는지를 연구하는 것은 의미 있는 작업이 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 스테인리스강(stainless steel) 핀의 지름과 면적밀도를 달리하면서 총 6종, 36개의 탄소/에폭시 일체성형 단일겹침 시편을 제작하여 z-피닝이 체결부의 접착분리 혹은 층간분리 파손에 미치는 영향을 체계적으로 연구하고자 한다. 결과는 초기균열의 발생응력, 극한강도, 파손 후 하중전달에서의 핀의 역할 등의 측면에서 분석한다.

2. 시편 제작 및 시험

본 연구에서 사용된 시편의 형상은 Fig. 1에 보인 바와 같다. 삽입되는 핀의 지름 3종류($d=0.3, 0.5, 0.7$ mm / 면적밀도 $\rho=2.0\%$)와 삽입 핀의 면적밀도 3종류($\rho=0.5, 2.0, 4.0\%$ / $d=0.5$ mm)를 고려하여 총 6종류, 32개의 시편을 제작하였다.

시편 제작에 사용된 재료는 Toray사의 일방향 프리프레그 T700GC-12K-31E/#2510이고, 일체성형 방식으로 시편의 탭까지 동시에 성형하였기 때문에 별도의 접착제를 사용하지 않았다. 적층판은 총 24층이며, 적층순서는 [45/0/-45/90]_{3S} 이다. 본 연구에서는 수정된 UAZ(Ultrasonically Assisted Z-fibre) 기술을 적용하여 복합재에 z-핀을 삽입하였다. 두께방향보강을 위해 사용한 초음파 장비는 Branson 사의 초음파 핸드건 용착기 2000LPt 이며, 체결부의 겹침부에 스테인리스강 핀을 삽입하였다.

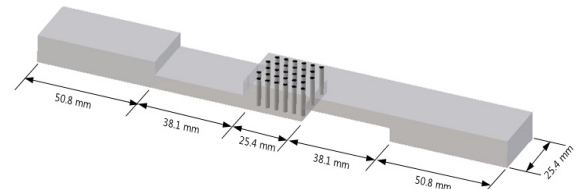


Fig. 1 Configuration of z-pinned single-lap joint.

시험은 100 kN 재료시험기인 Instron 5582을 사용하였으며 ASTM D1002-1[12], D5868-01[13] 규격을 참고하여 분당 1.27 mm의 속도로 하중을 가하였다.

3. 시험 결과

3.1 파손 모드

단일겹침 체결부의 정적시험 결과, 주로 복합재 모재의 첫 번째 및 두 번째 층의 층간분리 파손과 층내분리 파손(intra-lamina failure)이 복합적으로 나타났다. 체결부의 파손은 접착영역의 끝단에서 시작되어 접착면 전체로 전파된다. 핀으로 보강된 체결부의 경우 초기 파손 후에도 보강 핀이 전단하중의 형태로 인장하중을 지지하므로, 추가적인 하중을 지지하는 경우도 발견되었다. 그 경우 핀이 휘어지고 뺏히면서 최종파손에 이르게 된다.

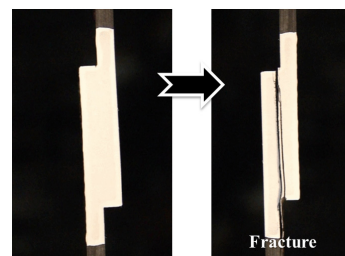
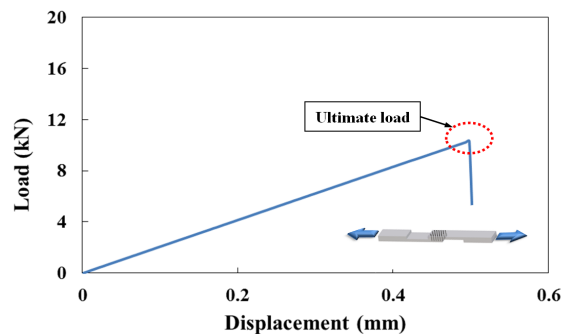


Fig. 2 Typical failure mode (no pin).

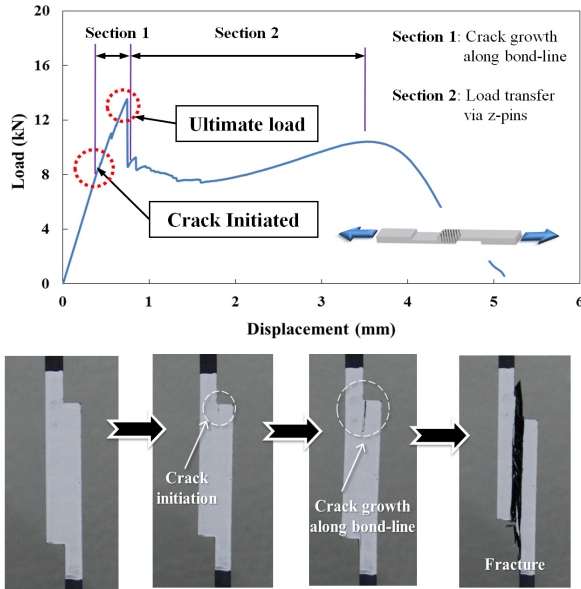


Fig. 3 Typical failure mode ($d=0.7\text{ mm} / \rho=2.0\%$).

파손모드는 핀의 면적밀도에 따라 크게 3가지로 나타났다. Fig. 2는 핀이 없는 경우에 대한 하중-변위 곡선과 파손의 진행과정을 보인 그림이다. 핀이 삽입되지 않은 체결부의 경우, 발견 가능한 초기균열(initial crack)이 발생함과 동시에 접착면 전체로 불안정하게 균열이 전파되면서 최종 파손에 이르렀다. 이러한 파손모드는 0.5 mm 지름의 핀이 0.5%의 밀도로 삽입되었을 경우도 대부분 유사하게 나타났다.

Fig. 3에 보인 두 번째 전형적인 파손모드는 0.7 mm 지름의 핀을 2.0%의 밀도로 삽입하였을 때의 경우이다. 첫 번째 파손모드와 달리 초기균열이 발생하더라도 곧바로 최종 파손으로 이어지는 것이 아니라 핀이 균열의 진행을 막음으로써 파손이 서서히 접착면 전체로 진행되었다. 균열이 접착면 전체로 진행된 후에도 핀이 전단하중의 형태로 최고하중의 74.5%까지 하중을 지지한다. 시험에서의 최고하중은 균열이 접착면 전체로 전파되는 순간에서 나타났다. 균열이 접착면 전체로 전파되고 난 후에도 핀이 하중 지지능력을 완전히 상실하는 것은 아니지만 최고 파손하중까지 회복하지는 못하였다. 이러한 파손모드는 핀의 지름에 관계없이 핀의 삽입밀도가 2.0%인 모든 시편에서 동일하게 나타났다.

Fig. 4에 보인 세 번째 전형적인 파손모드는 0.5 mm 지름의 핀을 4.0%의 핀 밀도로 삽입한 시편이다. 앞의 두 번째 파손거동과 유사하나, 접착면에 완전히 분리된 후에도 삽입된 핀에 의해 최고 지지하중과 거의 같은 수준의 인장하중을 지탱한다. 이는 금속재료의 소성변형과 비슷한 거동인데, 핀의 삽입에 의해 구조물의 갑작스런 파손을 방지할 수 있다는 가능성을 보여준다.

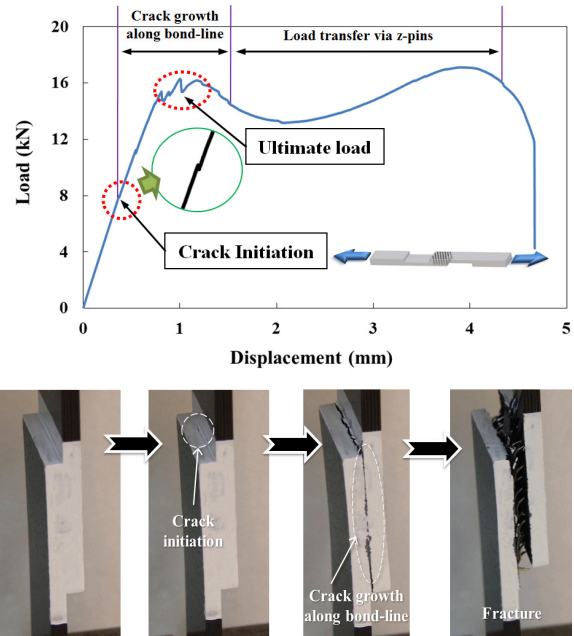
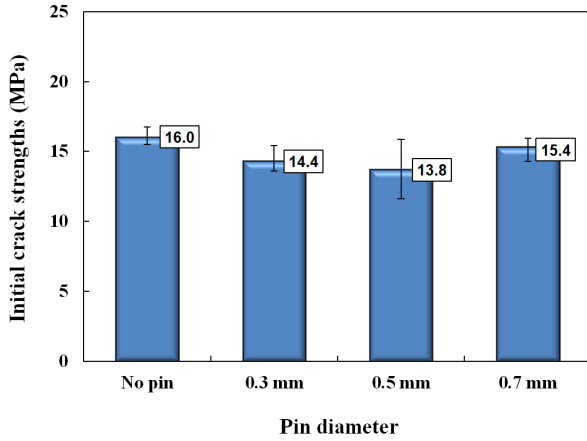
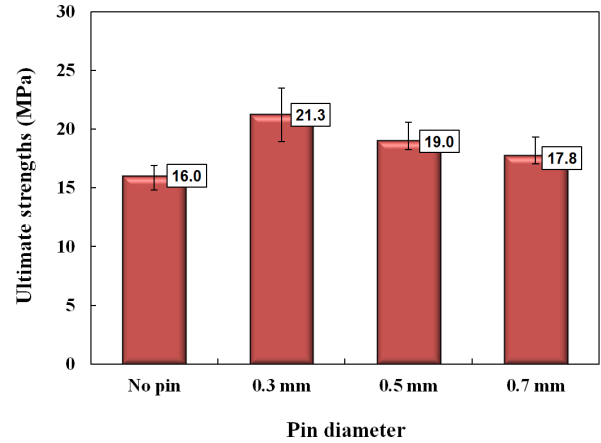
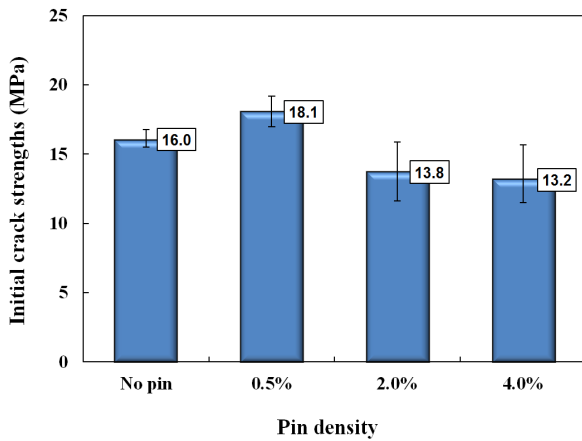
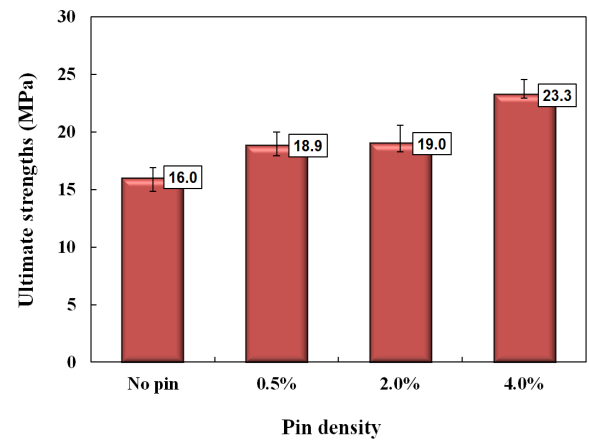


Fig. 4 Typical failure mode ($d=0.5\text{ mm} / \rho=4.0\%$).

3.2 초기균열응력

단일접합 체결부의 초기균열응력(initial crack stress)은 육안에 의해 식별 가능한 균열이 최초로 발생할 때의 응력으로 정의하였다. 또한 이 초기균열응력은 하중-변위 곡선 상에서 식별 가능한 작은 피크(peak)로도 나타난다. Fig. 5는 핀 지름에 따른 초기균열응력의 변화를 보인 것이다. 단일접합 체결부에 삽입된 핀의 밀도가 2.0%일 때, 0.3, 0.5, 0.7 mm로 핀의 지름을 달리하면 초기균열응력은 각각 14.4, 13.8, 15.4 MPa로, 핀이 삽입되지 않은 체결부 대비 89.5, 85.7, 95.7% 수준을 보였다. 핀이 없는 경우에 비해 전반적으로 초기균열응력이 낮아지는 것은 삽입된 핀의 면적만큼 접착면적이 줄어들었기 때문으로 볼 수 있다. 삽입된 핀은 전단변형이 진행되면서 시편에 가해지는 인장하중을 지지하는데 기여할 수 있다. 그러나 초기균열은 전단변형 초기에 발생하기 때문에, 두께방향으로 삽입된 핀이 초기균열 발생을 지연시키는 효과보다는 접착면적의 감소에 더 큰 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다. 핀의 지름에 따라 초기균열응력의 평균값이 달라지지만 데이터의 분산을 고려할 때 의미 있는 경향을 가진다고 보기는 어렵다.

Fig. 6은 핀 밀도에 따른 초기균열응력의 변화를 보인 것이다. 핀의 지름을 0.5 mm로 고정하고, 핀의 면적밀도를 0.5, 2.0, 4.0%로 변화시켰을 때 초기균열응력은 각각 18.1, 13.8, 13.2 MPa로 핀이 삽입되지 않은 체결부 대비 112.7, 85.7, 82.5% 수준을 보였다. 밀도가 0.5%인 경우를 제외하면 2.0, 4.0% 인 경우 모두 초기균열이 핀이 없는 경우에 비해

Fig. 5 Effect of pin diameter on initial crack stress ($\rho=2.0\%$).Fig. 7 Effect of pin diameter on ultimate strength ($\rho=2.0\%$).Fig. 6 Effect of pin areal density on initial crack strength ($d=0.5$ mm).Fig. 8 Effect of pin areal density on ultimate strength ($d=0.5$ mm).

더 낮은 응력에서 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 밀도가 0.5% 인 경우, 핀이 없는 체결부보다 13% 가량 초기균열응력이 상승하는 특이한 현상이 나타났다. 추가적인 연구가 필요하겠지만, 핀 밀도가 일정 수준 이하로 낮아지면 체결부의 접촉면적 감소 효과보다는 핀 삽입으로 인한 체결부의 보강 효과가 더 크게 나타나는 것으로 보인다.

3.2 극한강도

단일겹침 체결부의 극한강도는 시편이 최종 파손에 도달할 때까지 견딜 수 있는 가장 높은 응력으로 정의하였다. Fig. 7은 핀 지름에 따른 파손강도의 변화를 보인 그래프이다. 파손강도는 앞의 초기균열응력과는 다른 결과를 보인다. 삽입된 핀의 밀도가 2.0%일 때, 0.3, 0.5, 0.7 mm로 핀의 지름을 달리하면 극한강도는 각각 21.3, 19.0, 17.8 MPa로, 핀이 삽입되지 않은 체결부 대비 32.8, 18.7, 11.0% 증가한다.

Fig. 8은 핀 밀도에 따른 파손강도 결과이다. 핀 밀도가 0.5, 2.0, 4.0%로 증가할 경우 최종 파손강도는 각각 18.9, 19.0, 23.3 MPa로, 핀이 삽입되지 않은 체결부 대비 17.5, 18.7, 45.3% 증가하였다.

핀 지름과 핀 삽입밀도에 대한 효과를 종합해볼 때, 파손강도는 삽입되는 핀과 복합재 모재의 총 접촉면적과 밀접한 관계가 있는 것을 알 수 있다. 동일한 핀 밀도일 경우 핀의 지름을 작게 하고, 같은 지름일 경우 고밀도로 삽입하면 핀과 복합재 모재의 총 접촉면적이 증가하고 이에 따라 파손강도 역시 증가한다.

4. 결론

본 논문에서는 금속 핀으로 보강한 복합재 단일겹침 체결

부의 파손강도에 대한 시험을 수행하였다. 핀의 지름에 따라 3종류, 핀의 밀도에 따라 3종류 등 총 6종류의 시편을 제작하고 시험을 수행하였다. 시험 결과 육안으로 관찰 가능한 수준의 균열이 처음으로 발생하는 초기균열응력은 핀을 삽입하지 않은 경우보다 10% 가량 감소하였으나, 최고 지지하중을 기준으로 한 파손강도는 최대 45%가 증가하였다. 낮은 핀 밀도를 가지는 체결부($d=0.5\text{ mm} / \rho=0.5\%$)의 경우는 초기균열응력과 파손강도가 모두 증가하였다. 본 연구의 결과로부터 초기균열응력을 설계기준으로 설정할 경우, 낮은 밀도로 핀을 삽입하게 되면 높은 설계허용치를 획득할 수 있음을 알 수 있었다. 전체적으로는 핀과 복합재의 접착면적을 늘리면 파손강도가 향상될 뿐만 아니라 접착면의 분리 후에도 파손하중에 가까운 하중을 지지할 수 있어서, 구조물의 수리를 위한 시간적 여유를 확보하는 데에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2011년 정부(교육과학기술부) 재원 한국연구재단의 대학중점연구소 지원 사업(2011-0031383) 및 기초기술연구회가 지원하고 한국항공우주연구원(주)이 주관하는 DRC 사업의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

- 1) 김광수, 이영무, 김천근, “일방향 복합재료 single lap 접합 조인트의 파손 강도 II,” 복합재료학회지, 제18권 제1호, 2005, pp. 1-9.
- 2) Kim, K.S., Yoo, J.S., Yi, Y.M., and Kim, C.G., “Failure mode and strength of uni-directional composite single-lap bonded joints with different bonding methods,” *Composite Structures*, Vol. 72, No. 4, 2006, pp. 477-485.
- 3) 김태환, 성명수, 권진희, 최진호, “탄소 복합재-알루미늄

단일겹침 접착 체결부의 강도에 관한 인자연구,” 한국복합재료학회지, 제20권 제5호, 2007, pp. 34-42.

- 4) 김건희, 임도완, 최진호, 권진희, 이태주, 송민환, 신상준, “모자(Hat)형 보강재를 가진 복합재 패널의 제작과 평가,” 한국복합재료학회지, 제23권 제2호, 2010, pp. 31-39.
- 5) Shin, K.C., Lim, J.O., and Lee, J.J., “The manufacturing process of co-cured single and double lap joints and evaluation of the load-bearing capacities of co-cured joints,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 138, No. 1-3, 2003, pp. 89-96.
- 6) Jones, R.M., *Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed., Taylor & Francis Inc., New York, 1999, pp. 417-422.
- 7) Jain, L.K., and Mai, Y.W., “Determination of mode II delamination toughness of stitched laminated composites,” *Composites Science and Technology*, Vol. 55, No. 3, 1995, pp. 241-253.
- 8) Mouritz, A.P., and Cox, B.N., “A mechanistic approach to the properties of stitched laminates,” *Composites: Part A*, Vol. 31, No. 1, 2000, pp. 1-27.
- 9) Mouritz, A.P., Leong, K.H., and Herszberg, I., “A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites,” *Composites: Part A*, Vol. 28, No. 12, 1997, pp. 979-999.
- 10) Stickler, P.B., Ramulu, M., and Johnson, P.S., “Experimental and numerical analysis of transverse stitched T-joints in bending,” *Composite Structures*, Vol. 50, No. 1, 2000, pp. 17-27.
- 11) Mouritz, A.P., “Review of z-pinned composite laminates,” *Composites: Part A*, Vol. 38, No. 12, 2007, pp. 2383-2397.
- 12) ASTM D1002-01, “Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading(metal-to-metal)”.
- 13) ASTM D5868-01, “Standard test method for lap shear adhesion for fiber reinforced plastic (FRP) bonding”.