

3-차원 보강 복합재 체결부의 피로강도 특성 연구

김지완* · 안우진* · 서경호* · 최진호*[†]

A Study on the Fatigue Strength of the 3-D Reinforced Composite Joints

Ji-Wan Kim*, Woo-Jin An*, Kyeong-Ho Seo*, Jin-Ho Choi*[†]

ABSTRACT: Composite lap joints have been extensively used due to their excellent properties and the demand for light structures. However, due to the weak mechanical properties in the thickness direction, the lap joint is easily fractured. Various reinforcement methods that delay fracture by dispersing stress concentration have been applied to overcome this problem, such as z-pinning and conventional stitching. The Z-pinning is reinforcement method by inserting metal or carbon pin in the thickness direction of prepreg, and the conventional stitching process is a method of reinforcing the mechanical properties in the thickness direction by intersecting the upper and lower fibers on the preform. I-fiber stitching method is a promising technology that combines the advantages of both z-pinning and the conventional stitching. In this paper, the static and fatigue strengths of the single-lap joints reinforced by the I-fiber stitching process were evaluated. The single-lap joints were fabricated by a co-curing method using an autoclave vacuum bag process and I-fiber reinforcing effects were evaluated according to adherend thickness and stitching angle. From the experiments, the thinner the composite joint specimen, the higher the I-fiber reinforcement effect, and I-fiber stitched single lap joints showed a 52% improvement in failure strength and 118% improvement in fatigue strength.

초 록: 복합재 체결부는 뛰어난 물성과 가벼운 구조의 수요로 널리 사용되고 있다. 하지만 두께 방향의 취약한 물성으로 인해 체결부 파손이 쉽게 발생한다. 이를 극복하기 위하여 체결부 끝단의 집중되는 응력을 완화시켜주는 Z-피닝, 스티칭 등 다양한 공법들이 적용되고 있다. Z-피닝 공법은 프리프레그의 두께 방향으로 금속 핀이나 카본 핀을 적용하여 보강하는 공법이고, 스티칭 공법은 프리폼에 상부 및 하부 섬유를 교차시켜 두께방향으로 기계적 강도를 향상시키는 방법이다. I-fiber 스티칭 공법은 Z-pinning 공법과 Stitching 공법을 보완한 유망한 공법이다. 본 논문에서는 I-fiber 스티칭 공법으로 보강된 Single-lap joint 시편을 오토클레이브 진공백 성형법으로 제작하여, 모재의 두께와 스티칭 각도에 따른 인장강도 및 피로강도 특성을 평가하여, I-fiber 보강 복합재 체결부 구조물의 보강효과를 검증하였다. 실험결과, 복합재 체결부의 두께가 얇을수록 I-fiber 보강효과가 더 높게 나타났으며 I-fiber로 보강된 복합재 체결부는 파손강도에서 약 52%, 피로강도에서 약 118% 우수한 특성을 나타냄을 확인하였다.

Key Words: I-fiber 스티칭(I-fiber stitching), 단일 겹치기 이음(Single-lap joint), 파손강도(Failure strength), 피로강도(Fatigue strength)

1. 서 론

복합재는 기존 금속재에 비해 우수한 기계적, 화학적 특성뿐만 아니라 높은 비강성 및 비강도를 가지므로 고효율을 요구하는 구조에 대하여 기존 금속재의 대체재로서 주목받고 있다. 과거 항공 산업에서의 복합재는 주로 조종면이나 착륙장치 도어와 같은 이차구조물에 적용되었지만, 복합재료 설계기술의 발달과 시험 데이터베이스 구축으로 윙 스킨, 동체 등 주구조물에도 적용이 확대되고 있다. 항공기 구조에 일반적으로 적용되는 적층 복합재는 섬유가 배열되어 있는 면내 방향의 물성은 우수하나 섬유가 적층된 방향, 즉, 복합재의 두께 방향으로의 섬유가 배열되지 않기 때문에 매우 취약한 물성을 가진다. 이러한 특징 때문에 적층 복합재는 두께 방향 하중에 의해 복합재의 층이 분리되는 파손이 쉽게 발생한다. 층간 분리가 발생한 복합재 구조물은 면내 방향의 물성 손실이 발생하여 구조적 성능을 유지하기 어렵다. 이를 극복하기 위해 다양한 연구자들에 의해 복합재 3차원 보강 공법들이 개발되었으며, Z-피닝, 스티칭, 터프팅이 대표적인 예이다[1-7].

최근 Z-피닝과 기존 스티칭 공법을 보완한 I-fiber 스티칭 공법이 제안되었고 많은 연구가 이루어지고 있다[8-16]. Kim[8]은 I-fiber 스티칭 공정의 밀도변화에 따른 pull-off 파손하중의 변화를 확인하였으며, An[9,10]은 RTM (Resin Transfer Molding) 공정과 진공백 성형공정으로 제작된 체결부 시편의 파손하중을 평가하였으며, 보강섬유의 간격별로 보강효과 및 파손모드를 분석하였다. Tapullima[11-13]은 I-fiber 스티칭으로 보강된 DCB 및 unit-cell 시편의 mode I, II 파손모드에 따른 보강효과를 평가하였으며, 다양한 해석기법을 통해 파손하중을 예측하였다. Song[14]과 Choi[15]는 체결부의 두께 및 보강섬유의 각도 등 다양한 공정변수를 선정하여 체결부의 인장강도를 평가하였다. Kim[16]은 보강밀도에 따른 복합재 패널의 충격특성을 평가하였다.

본 논문에서는 I-fiber 스티칭 공법으로 보강된 Single-lap joint 시편을 오토클레이브 진공백 성형법으로 제작하여, 모재의 두께와 스티칭 각도에 따른 인장강도 및 피로강도 특성을 평가하여, 3차원 보강 복합재 체결부 구조물의 보강효과를 검증하였다.

2. 시편 제작

3차원 보강 복합재 체결부 구조물의 강도특성을 평가하기 위하여 본 논문에서는 체결부 시편편 규격 ASTM D5868을 참고하여 Fig. 1과 같이 제작하였다. Fig. 2는 I-fiber 스티칭 공정을 설명한 개략도로서, 중공바늘과 공압을 이용하여 탄소섬유를 불연속적으로 모재에 수직으로 배치시키는 공법이다[8].

체결부 시편 제작에 사용한 소재는 SK케미칼 사의 일방

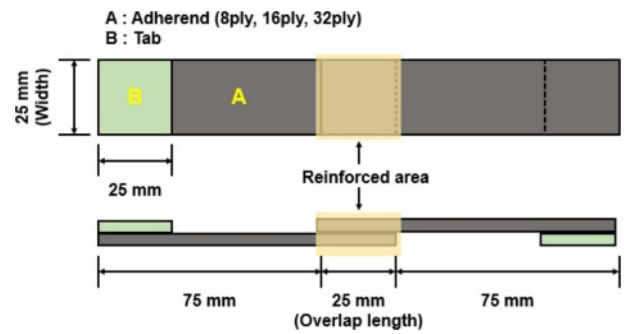


Fig. 1. Single-lap joint specimen configuration

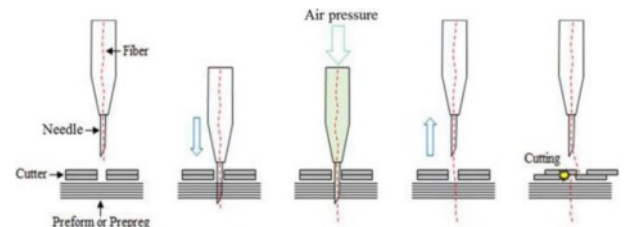


Fig. 2. I-fiber stitching process

Table 1. Material properties of TANSOME H2550

| Property | Symbol | Value |
|------------------------------------|--------|-----------|
| Elastic modulus in Fiber-direction | E_1 | 250 GPa |
| Strength in Fiber-direction | X_T | 5,516 MPa |

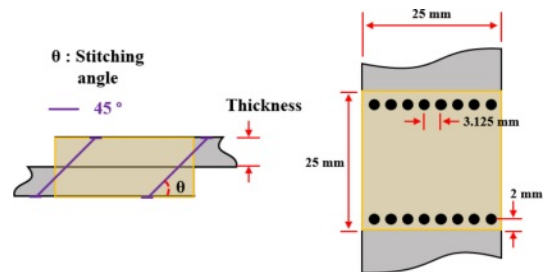


Fig. 3. Schematics of stitching pattern and angle

Table 2. Test matrix of composite joint specimen

| Specimen ID | Adherend stacking sequence | Adherend thickness(t) | Stitching angle |
|-------------|---|-----------------------|-----------------|
| 2_Un | [0/45/90/-45] _S (8 ply) | 1 mm | - |
| 2_S | | | 45° |
| 4_Un | [0/45/90/-45] _{2S} (16 ply) | 2 mm | - |
| 4_S | | | 45° |
| 8_Un | [0/45/90/-45] _{4S} (32 ply) | 4 mm | - |
| 8_S | | | 45° |

향 탄소/에폭시 프리프레그 USN-125B이고, Stitching용 보강섬유는 효성첨단소재(주)의 H2550 6K 탄소섬유이며, 재

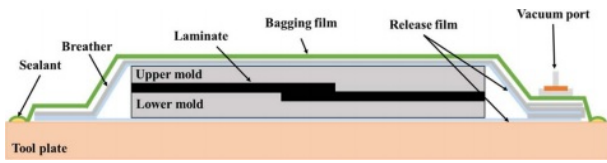


Fig. 4. Autoclave vacuum bag process

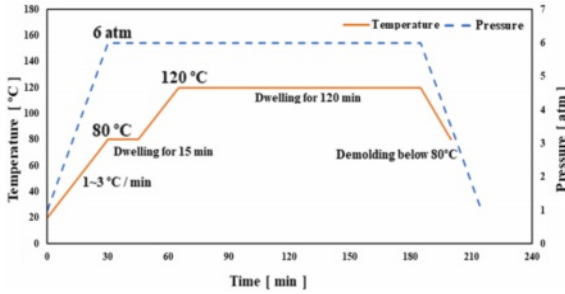


Fig. 5. Cure cycle of the composite joint specimen

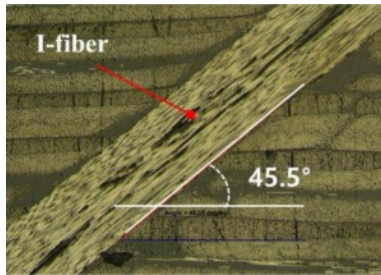


Fig. 6. Cross-section of stitched I-fiber (45 degree)

료의 물성치는 Table 1과 같다. 보강섬유를 삽입하기 위하여 공업용 중공 바늘을 사용하였으며, 19G(Internal diameter: 0.73 mm, External diameter: 1.06 mm) 규격의 바늘을 사용하였다.

각 모재의 적층패턴은 준등방성 [0/45/90/-45]_{ns}로서, 8, 16, 32 ply로 적층하여 시편을 제작하였으며, 체결부의 겹침 폭과 길이는 25 mm로 고정하였다. Stitching 패턴과 각도는 Fig. 3에 나타나 있으며, 체결부 양끝단에 보강섬유를 8개씩 3.125 mm 간격으로 삽입하였으며, 섬유의 삽입각도는 45도이다. 시험에 사용한 시험편의 종류는 Table 2에 요약되어 있다.

Fig. 4는 체결부 시편을 제작하기 위한 공정을 나타내었으며, 오토클레이브 진공백 성형법을 사용하였다. 경화는 모재 사이에 별도의 접착필름을 삽입하지 않고 모재의 잉여수지로 접착이 이루어지는 Co-curing 공법을 사용하였으며, 경화사이클은 Fig. 5와 같다.

제작된 복합재 패넬은 다이아몬드 휠 절단기로 25 mm 간격으로 절단하였다. I-fiber 스티칭 보강섬유의 섬유 삽입각도를 평가하기 위하여 제작한 시편의 수직단면을 Nikon사의 Eclips LV 150L 광학현미경을 이용하여 50배율로 촬영하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이, 보강섬유의 삽입각이 45.5도로 측정되어, 섬유가 비교적 잘 배열되어 있음을 확인할

수 있었다.

3. 인장 및 피로시험

3.1 인장시험

Fig. 7은 I-fiber 스티칭 공법이 적용된 체결부 시편의 인장시험 모습이다. 시험은 MTS사의 E45 만능시험기를 이용



Fig. 7. Tensile test of joint specimen

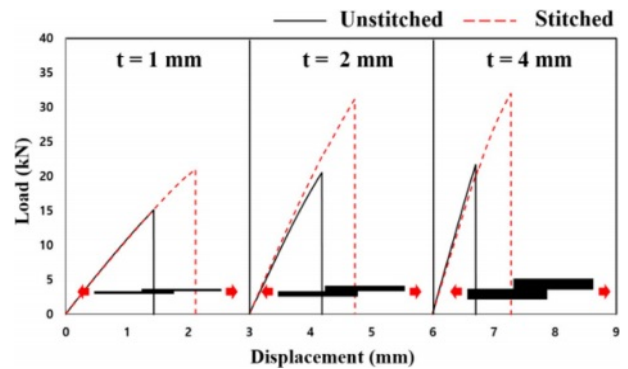


Fig. 8. Typical load-displacement curves

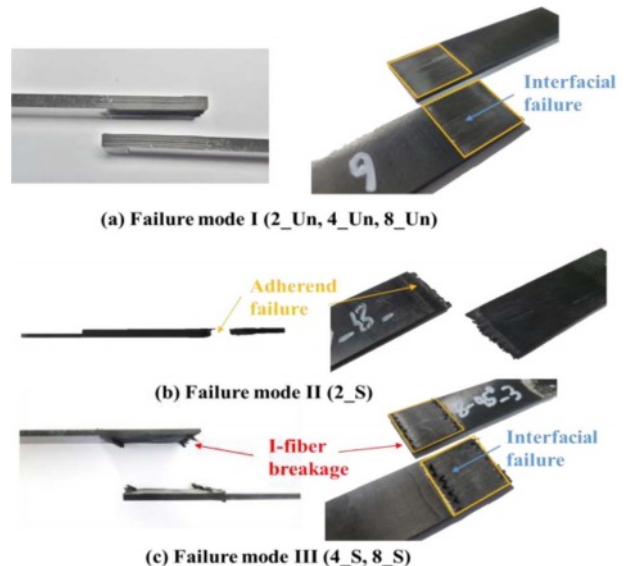


Fig. 9. Failure modes of tensile tests

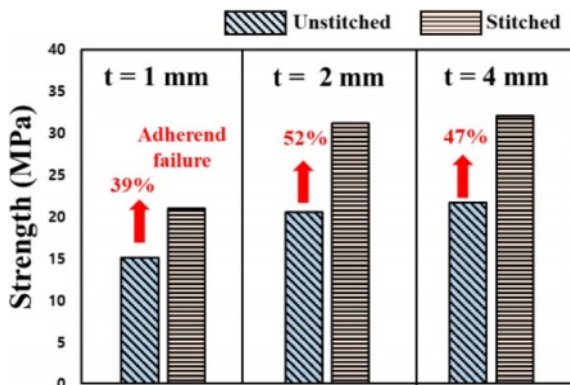


Fig. 10. Strengths of composite single lap joints

하였으며, 분당 1.27 mm 크로스헤드 변위 제어로 수행하였다[10].

Fig. 8은 제작된 복합재 Single-lap joint 시편의 하중-변위 그래프로서, 최대하중에 도달한 후 급격한 하중저하 현상이 나타남을 볼 수 있으며, I-fiber 스티칭 공법의 유,무에 관계없이 시편의 강성값이 유사함을 볼 수 있다.

Fig. 9는 복합재 Single-lap joint 시편의 인장시험 후 파손 모드를 나타낸다. I-fiber 스티칭 공법이 적용되지 않은 모든 시편에서는 Fig. 9(a)와 같이 모재와 모재사이의 계면파손이 발생하였다. 모재의 두께가 가장 얇은 1 mm 시편에 보강공법을 적용한 시편에서는 Fig. 9(b)와 같이 모재의 파손이 발생하였으며, 모재의 두께가 2 mm, 4 mm인 시편에서는 모재와 모재 사이의 계면파손과 I-fiber 섬유파손이 발생되었다.

Fig. 10은 모재평균 파손강도를 나타낸 그래프로서, 파손 강도는 파손하중을 체결부 면적(25×25 mm)으로 나눈값으로 정의하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 모재의 두께가 1, 2, 4 mm일 때 보강을 하지 않은 시편 대비 각 39, 52, 47%의 강도가 증가하였다. 모재의 두께가 1 mm 시편은 파손모드에서 분석한 바와 같이 모재파손으로 인해 보강효과를 정확히 평가할 수 없었으며, 모재가 파손되지 않는다면 더 높은 보강효과를 나타낼 것으로 판단된다.

3.2 피로시험

I-fiber 스티칭 공법이 적용된 체결부 시편의 피로시험을 수행하여 피로강도와 파손모드를 분석하였다. 시험은 Instron사의 INSTRON 8801 피로시험기를 사용하였으며, 응력비 R은 0.1, 주파수는 5 Hz로 고정하여 피로시험을 진행하였다.

Fig. 11, 12, 13은 피로시험 후, 모재 두께가 1, 2, 4 mm인 시편들의 S-N 선도를 나타낸 그래프이다. 모든 시험조건에서 스티칭이 적용된 시편의 피로강도가 높은 것을 확인할 수 있었으며, 100만 cycle에 대한 피로강도는 각 하중 단계에서 테스트를 수행 후 로그함수를 사용하여 추세선을 통해 결정하였다.

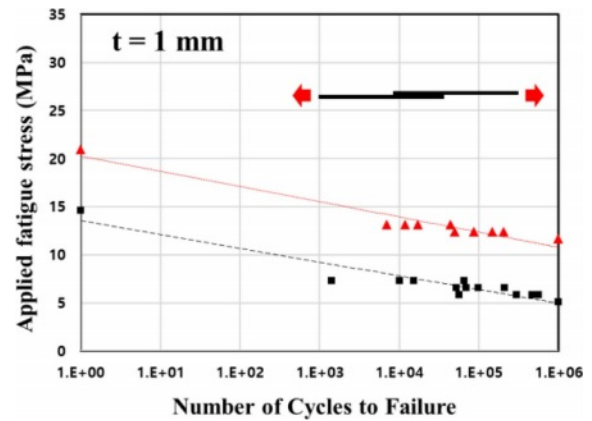


Fig. 11. S-N curves of single lap joint (t = 1 mm)

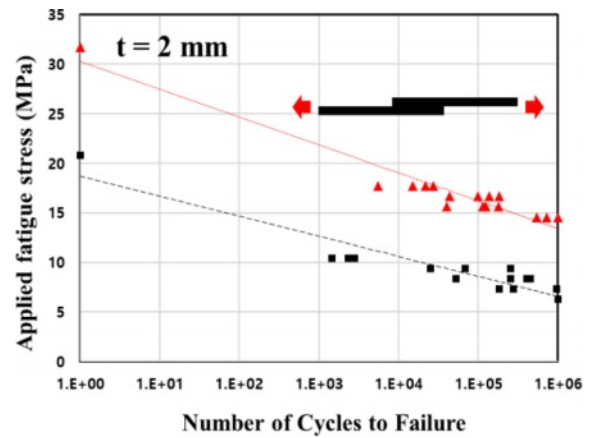


Fig. 12. S-N curves of single lap joint (t = 2 mm)

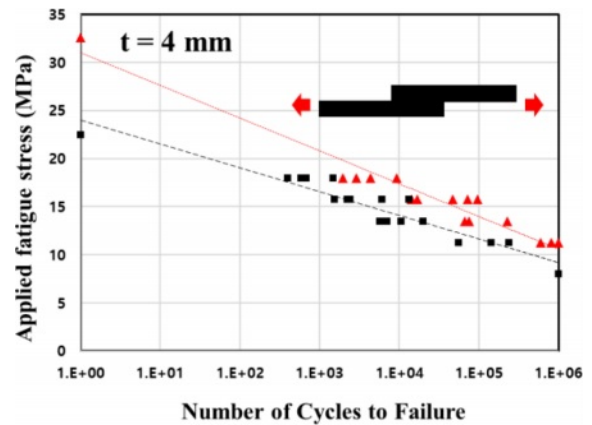


Fig. 13. S-N curves of single lap joint (t = 4 mm)

모재의 두께가 1 mm인 시편의 경우, 보강을 하지 않은 시편의 피로강도는 4.95 MPa이었으며, I-fiber로 보강한 시편의 피로강도는 10.78 MPa으로 나타나, 약 118 %의 피로강도 증가를 확인할 수 있었다.

모재의 두께가 2 mm인 시편의 경우, 보강을 하지 않은 시편의 피로강도는 6.56 MPa, I-fiber로 보강한 시편의 피로강

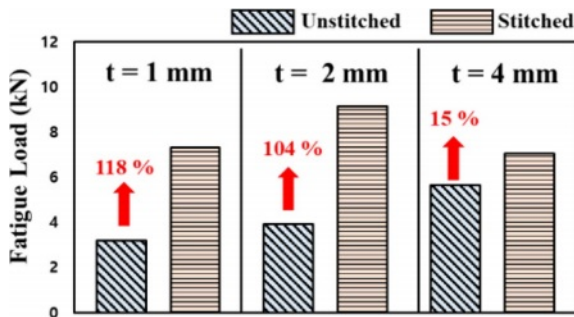


Fig. 14. Fatigue strength of joint specimen (10^6 cycles)

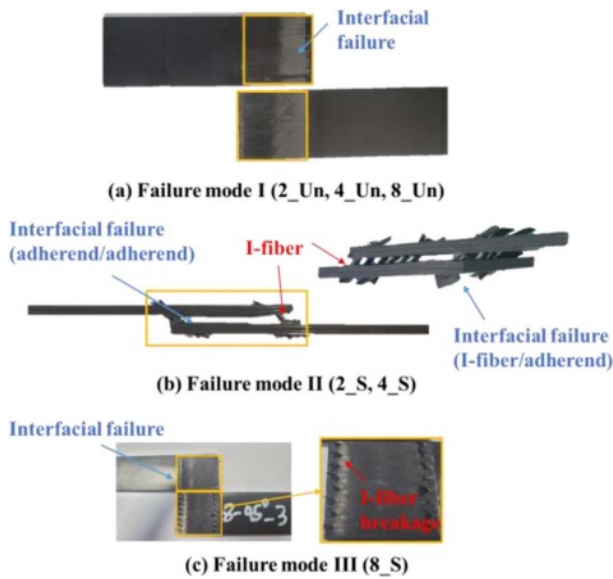


Fig. 15. Failure modes of fatigue tests

도는 13.41 MPa로 나타나, 약 104%의 피로강도 증가를 확인할 수 있었다.

모재의 두께가 4 mm 시편의 경우, 보강을 하지 않은 시편의 피로강도는 9.18 MPa, I-fiber로 보강한 시편의 피로강도는 10.58 MPa로 평가되어, 약 15%의 피로강도 증가를 확인할 수 있었다.

Fig. 14는 I-fiber 스티칭 공법으로 보강된 체결부 시편의 피로 파손모드를 나타낸다. Fig. 15(a)는 I-fiber 스티칭 공법이 적용되지 않은 시편의 파손모드로서, Fig. 9(a)의 체결부 파손시험의 파손모드와 동일한 모재와 모재 사이의 계면 파손이 발생하였다. Fig. 15(b)는 모재의 두께가 1 mm, 2 mm 인 시편의 파손모습으로, Fig. 9(b)와 같은 모재 파손이 발생되지 않았으며, 모재와 모재 사이 및 I-fiber와 모재 사이의 계면파손이 발생된 것을 확인할 수 있었다. 이는 복합재 모재 자체의 피로강도가 인장강도의 80% 이상으로 매우 높아[17] 모재의 피로파손이 발생되지 않은 것으로 추정된다. Fig. 15(c)는 모재의 두께가 4 mm인 시편의 파손모습으로, 모재와 모재 사이의 계면파손과 I-fiber 섬유파손이 발

생되었다. 이는 체결부 파손시험의 파손모드인 Fig. 9(c)와 동일한 파손모드로 볼 수 있으며, 복합재 모재의 두께가 두꺼울 경우, I-Fiber와 모재 사이의 계면면적이 넓어 계면파손이 발생되지 않고 I-Fiber 섬유의 파손이 발생된 것으로 추정된다.

4. 결 론

본 논문에서는 I-fiber stitching 공법을 적용한 Single-lap joint 시편을 제작하고 보강 유무에 따른 파손강도 및 피로강도 특성을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) I-fiber 스티칭 공법으로 보강된 체결부 시편은 보강하지 않은 시편 대비 파손강도가 약 52% 향상되었다.
- 2) 복합재 체결부의 두께가 얇을수록 I-fiber 보강효과가 더 높게 나타났으며, 모재의 두께가 1 mm 시편에서 I-fiber로 보강된 체결부 시편의 피로강도가 약 118% 향상되었다.

후 기

본 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2017R1A5A1015311).

REFERENCES

1. Wang, P., Geng, X., Zhao, C., and Zhang, R., "An Investigation of the Stitching Effect on Single Lap Shear Joints in Laminated Composites", *Science Engineering Composite Materials*, Vol. 26, 2019, pp. 509-516.
2. Andrew, F., Xiaohu, C., Xiao, H., and Li, C., "Failure Analysis of Adhesively Bonded GFRP/aluminum Matrix Single Composite Lap Joint with Cold Worked Penetrative Reinforcements", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 161, 2019, pp. 96-106.
3. Fu, M., Fang, G., Liu, S., Wang, B., Zhou, Z., and Liang, J., "Failure Analysis of 2D C/SiC Composite z-pinned/bonded Hybrid Single-lap Joints", *Ceramics International*, Vol. 46, No. 13, 2020, pp. 21216-21224.
4. Ito, A., Hayashi, Y., and Sugimoto, S., "Experimental Investigation of Interlaminar Mechanical Properties on Carbon Fiber Stitched CFRP Laminates", *Advanced Composite Materials*, Vol. 16, No. 2, 2007, pp. 95-113.
5. Yoshimura, A., Nakao, T., and Takeda, N., "Improvement of Out-of-Plane Impact Damage Resistance of CFRP Due to Through-the-Thickness Stitching", *Advanced Composite Materials*, Vol. 18, No. 2, 2009, pp. 121-134.
6. 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, 2012, pp. 625-634.
7. Son, H.G., Park, Y.B., Kweon, J.H., and Choi, J.H., "Fatigue Behavior of Metal Pin-reinforced Composite Single-lap Joint in a Hygrothermal Environment", *Composite Structures*, Vol. 108,

- 2014, pp. 151-160.
8. Kim, C.H., Jo, D.H., and Choi, J.H., "Failure Strength of Composite T-joints Prepared Using a New 1-thread Stitching Process", *Composite Structures*, Vol. 178, 2017, pp. 225-231.
 9. An, W.J., Kim, C.H., Choi, J.H., and Kweon, J.H., "Static Strength of RTM Composite Joint with I-fiber Stitching Process", *Composite Structures*, Vol. 210, 2019, pp. 348-353.
 10. An, W.J., Park, G.Y., and Choi, J.H., "Process Variables of I-fiber Stitching in Mode I Failure", *Composite Structures*, Vol. 240, 2020, 112082.
 11. Jonathan, T., Kim, C.H., and Choi, J.H., "Analysis and Experiment on DCB Specimen Using I-fiber Stitching Process", *Composite Structures*, Vol. 220, 2019, pp. 521-528.
 12. Jonathan, T., Song, S.H., Kweon, J.H., and Choi, J.H., "Characterization of Mode II Specimen Using I-fiber Stitching Process", *Composite Structures*, Vol. 255, 2021, 112863.
 13. Tapullima, J., Park, G.Y., Yoon, D.H., and Choi, J.H., "Unit Cell FEM Analysis Using I-fiber Single Stitch with Different Thickness", *Composite Research*, Vol. 34, No. 1, 2021, pp. 30-34.
 14. Song, S.H., Back, J.T., An, W.J., and Choi, J.H., "Static Strength of Composite Single-lap Joints Using I-fiber Stitching Process with Different Stitching Pattern and Angle", *Composite Research*, Vol. 33, No. 5, 2020, pp. 296-301.
 15. Choi, S.H., Song, S.H., An, W.J., and Choi, J.H., "A Study on the Strength Characteristics and Failure Detection of Single-lap Joints with I-fiber Stitching Method", *Composite Research*, Vol. 34, No. 5, 2021, pp. 317-322.
 16. Kim, C.H., Sim, H.W., An, W.J., Kweon, J.H., and Choi, J.H., "Impact Characteristics of Composite Panel Stitched by I-fiber Process", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 127, 2019, 105644.
 17. Feng, Y.P., Tang, H.J., Li, C.G., Ma, X.M., and Xie, M.L., "The Fatigue Behavior of Carbon Fiber-reinforced Composite T300/Epoxy under Tension-tension and Bending Fatigue Loading", *Advanced Materials Research*, Vol. 941-944, 2014, pp. 1522-1527.