

이종소재인 CFRP와 알루미늄의 접착력 향상을 위한 Bead의 영향 평가

신동우*[†] · 김진재* · 이종혁* · 권일준* · 박성민*

Evaluation on the Effect of Beads for Adhesive Improvement of CFRP and Aluminum

Dong-Woo Shin*[†], Jin-Jae Kim*, Jong-Hyuk Lee*, Il-Jun Kwon*, Sung-Min Park*

ABSTRACT: In this paper, we investigated the application method and properties of 0.1 mm, 0.2 mm and 0.3 mm beads, which can secure a certain thickness due to the molding stability of joint surfaces of different materials (aluminum and composite). In order to verify this, the influence was evaluated according to the thickness of the adhesive in the Double lap test and the FEM simulation. As a result, it was confirmed that as the content of the bead of the adhesive increased more than 1%, the strength of the adhesion increased and the elongation decreased. We confirmed as the size of the bead became larger, the rigidity became lower and the elongation increased.

초 록: 본 논문에서는 알루미늄과 복합재료에 대한 이종소재 접합면의 성형안전성을 위해 일정한 두께를 확보할 수 있는 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm bead의 적용 방법과 물성변화에 대해 연구하였고, 이를 검증하기 위해 더블랩 시험과 FEM 시뮬레이션으로 접착제의 두께에 따라 미치는 영향을 평가하였다. 그 결과, 접착제에 bead의 양을 1% 이상 함량이 증가함에 따라 접착 소재의 강도가 높아지고 신율이 감소함을 확인하였고, bead의 크기가 커질수록, 강성은 낮아지고, 신율은 증가함을 확인하였다.

Key Words: 복합재료(Composite materials), 알루미늄(Aluminum), 접착(Adhesion), 비드(Bead)

1. 서 론

최근 건강에 대한 관심이 늘어나며 자전거의 이용과 스포츠 활동이 늘어나고 있다. 이에 소비자들의 기호는 무거운 스틸 프레임 자전거보다는 알루미늄, 마그네슘[1,2]으로 이동했고 최근에는 탄소섬유 복합소재 자전거로 관심이 높아지고 있다.

최근 스포츠 산업에서 경량화는 경기력 향상에 가장 중요한 요인이기 때문에 높은 비강도와 비강성을 가지고, 피로수명이 길며, 환경 안전성이 우수한 탄소복합소재의 사용이 늘어 나고 있다[3,4].

하지만 복합소재의 특성상 가공이 어렵고 마모에 취약하다는 특성상 일부 결합력을 요구하거나 구동부품에는 AI이 적용되며, CFRP와 AI이 접착제로 접합 가공의 중요성이 매우 높기 때문에 이를 위해 접착제면의 연구와 접착제의 성능평가에 대한 다양한 연구가 진행되고 있었다[5-7].

접착제는 고인성을 요구하는 곳에는 우레탄 또는 고무 계열의 접착제가 사용되고 있으며, 고강성을 요구하는 소재에는 에폭시 계열의 접착제가 적용되고 있다[8,9].

본 논문에서는 자전거의 특성상 고강성을 확보할 수 있는 에폭시 접착제를 사용하였으며, 접착두께의 형성 및 이종소재의 균일한 접착력을 유지시켜 주기 위해 Bead를 적

Received 13 July 2017, received in revised form 31 August 2017, accepted 31 August 2017

*Korea Dyeing&Finishing Technology Institute, Daegu, Korea

*[†]Affiliation, Corresponding author (E-mail: zeroa1@dyetec.or.kr)

용하였다[10].

본 논문에서는 접착제의 물성에 영향을 주는 bead를 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm로 달리하여 접착소재에 대한 영향을 평가하는 실험을 진행하였고 이에 대해 FEM 시뮬레이션으로 두께에 대한 영향을 평가하였다.

2. 본 론

본 연구에서는 CFRP와 알루미늄의 이종소재 접합을 위하여 Fig. 1과 같이 접착을 위한 수지를 배합하였다. 수지의 배합과정 중 유리 성분의 bead를 추가하였고, bead를 통해 접착제의 강도 및 접착두께를 설정할 수 있도록 하였다.

Fig. 2와 같이 접착제를 적용한 시편(a)와 접착제의 고유한 물성을 알 수 있도록 실리콘 몰드를 통해 ASTM D 638 시험규격으로 제작한 접착제 벌크 인장시편(b)을 제작하였다.

2.1 접착 시편 제작조건

접착제 제작 과정은 Fig. 1과 같이 HUNTSMAN 사의 주재(에폭시) AW 106와 경화제 HV 953 U 제품을 사용하였다. 에폭시에 bead를 추가하고 점도를 추가하기 위해 Acetone을 추가하였고 Ultrasonic을 통해 혼합하였다.

그 후에 상온(23도)에서 질량이 100 g이 될 때까지 약 24 시간 동안 건조하였다.

bead는 KOSPOL 사의 Adhesive Bead Prototype 제품을 사용하였고, 성분은 E-Glass 성분으로 직경이 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm의 3가지의 프로토 타입의 bead를 적용하였으며, 전반적인 내용을 Table 1에 나타내었고, 광학현미경을 통해 관찰하면, Fig. 3와 같이 작은 알갱이 형태인 것을 확인할 수

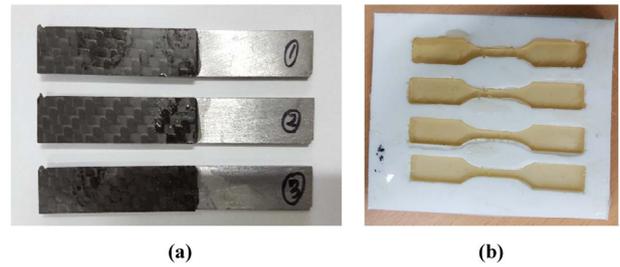


Fig. 2. Specimen for (a) Double lap and (b) Tensile test

Table 1. The property of bead for making adhesive thickness

Maker	KOSPOL
Product name	Adhesive Bead Prototype
Material composition	E-Glass (54%SiO ₂ -15%Al ₂ O ₃ -12%CaO)
Size (mm)	0.1, 0.2, 0.3

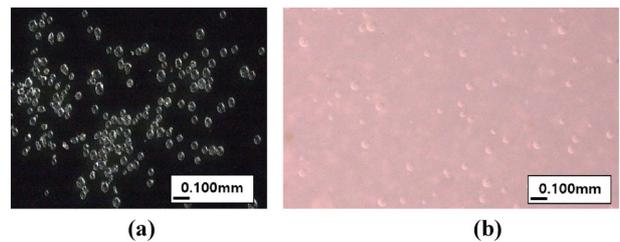


Fig. 3. The shape of beads (0.1mm) for (a)the Bead (b)Mixed Epoxy & Bead

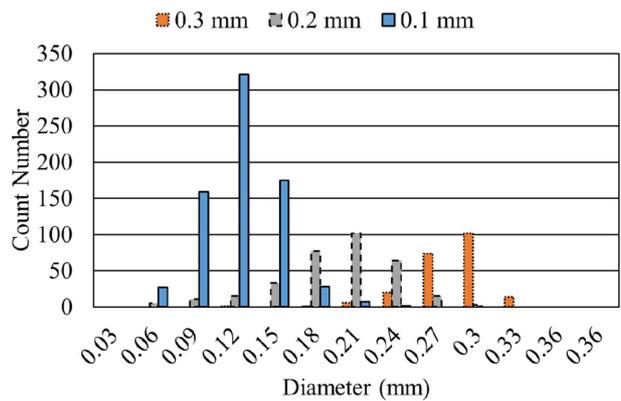


Fig. 4. The size distribution of each specimen

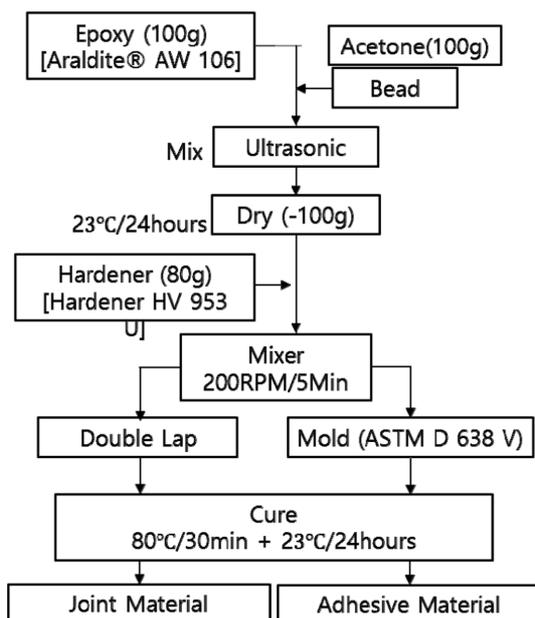


Fig. 1. Diagram of making specimen process

있다. 해당 bead에 대해 약 0.01 g(0.1 mm 기준으로 약 800 개)에 대해 크기를 3회 반복하여 측정된 결과 Fig. 4와 같이 bead가 크기별로 정규분포 형태를 나타냄을 확인할 수 있다.

접착공정(Joint)은 시편에 적용하였으며, 접착성능 확인을 위한 시편은 통상 싱글랩(Single lap), 더블랩(Double lap), DCB(Double Cantilever Beams) 등 다양한 실험을 통해서 하고 있으나[6,7,10], 본 연구에서는 쉽게 제작할 수 있으면서 비틀림에 의한 응력 발생이 적은 더블랩(Double lap) 시편

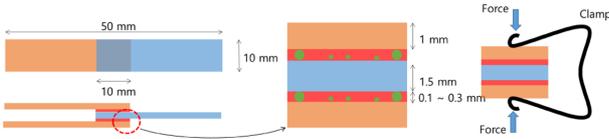


Fig. 5. Schematic of Double lap specimen

을 적용하였으며 향후 적용할 시험 장비의 사양이 10kN 인 점을 감안하여 시편의 크기는 표준 ASTM 규격대비 1/4 로 축소된 모델을 사용하였다.

시편은 Fig. 5와 같이 중앙에는 두께 1.5 mm의 CFRP를 넣었고, 위아래에는 두께 1 mm의 Al-6061 판재를 사용하였다. 각 시험편 사이에는 Bead를 넣은 접착제를 사용하여 접합하였고, 시험편에 균일한 압력을 가하기 위하여 클램프를 사용하였다. 그 후에 80도에서 30분간 경화하였고, 상온에서 24시간 방치하여 후 경화 과정이 일어나도록 유도하였다.

본 시험편 제작 과정에서 클램프에 의해 내부의 유리 bead가 파괴되어 요구되는 시편의 두께에 영향이 있는지 확인하기 위해 E-Glass 소재에 대한 압축시험과 전산해석을 진행하였다.

3. 실험 및 결과

3.1 접착시험과 접착제 물성시험

접착제만의 물성 비교와 FEM시뮬레이션으로 더블랩 시험을 해석하기 위하여 Table 2와 같은 인장시험기를 사용하였으며, Fig. 6과 같이 접합한 시편(Double lap) 및 접착제 벌크소재(ASTM D 648)에 대해 인장시험을 진행하였다.

Table 2. Condition of tensile test

Maker	SHIMADZU
Product name	AG-250kNX
Capacity (precision)	10 Ton (0.01%)
Speed	5 mm/min

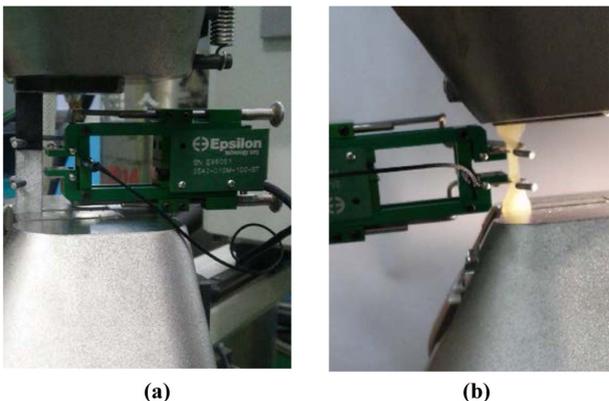


Fig. 6. Tensile test for (a) Double lap and (b) Adhesive material

Table 3. Specimen

Clamp Sample	Material : Steel Size : 20 × 20 × 37(or 27)mm Make : Peace (KOREA)
Bead Sample	Material : E-Glass Size : 10Ø × 2mm Make : KOSPOL (KOREA)

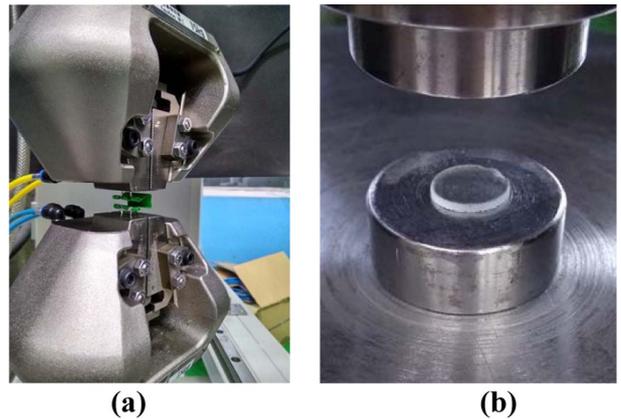


Fig. 7. Test methods for (a) Clamp Tensile test and (b) E-Glass Compression test

Fig. 5와 같이 더블랩 시험편 제작 시에는 어느 정도 압력을 가해주어야 하나, 두께 설정에 사용된 bead가 파괴되어 계획하지 않은 두께로 생성될 수 있다. 따라서 Table 3과 같은 소재에 대해 Fig. 7(a)와 같이 클램프에 대한 인장시험과 Fig. 7(b)와 같이 bead 소재로 적용한 동일한 E-Glass소재에 대한 압축시험을 진행했다.

3.2 전산해석 조건

전산해석은 bead의 클램프에 대한 전산해석과 접착제 물성에 대한 전산해석을 진행하였으며, 전산해석에 사용된 물성은 Table 4와 같이, Adhesive, Aluminum(T-6061), CFRP, E-Glass가 적용되었다. 각 데이터는 상용 소프트웨어인 ANSYS와 각 제조사에서 제공하는 물성을 이용하였다.

Table 4. Property of materials

No	①	②	③	④
Materials	Adhesive	Aluminum	CFRP	E-Glass
Modulus (GPa)	7.3	71.7	59.1	45
Poisson's ratio	0.40	0.33	XY:0.04 YZ: 0.3 XZ: 0.3	0.3
Density (kg/m ⁻³)	1300	2770	1490	2000

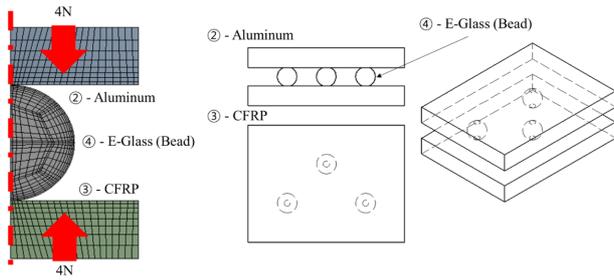


Fig. 8. Boundary condition of Clamp compression

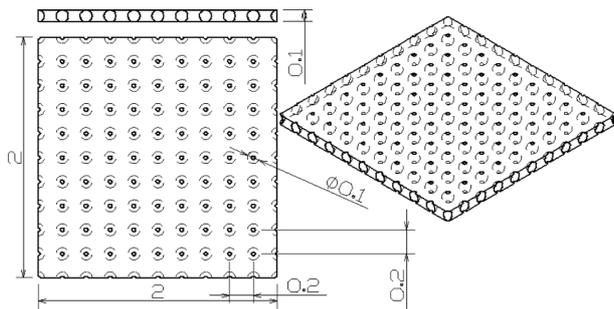


Fig. 9. Pitch of Bead (at 0.1 mm)

Table 5. Weight percent of Bead

Bead Size (mm)	Pitch (mm)	Percent of weight (%)	The Number of Beads (Area: 100 mm ²)
0.1	0.3	11.24	1156 (34×34)
	0.4	5.99	676 (26×26)
0.2	0.6	11.46	289 (17×17)
	0.7	9.17	225 (15×15)
0.3	0.8	14.77	169 (13×13)
	0.9	9.49	144 (12×12)

3.2.1 클램핑 공정 전산해석 조건

Fig. 8은 클램프 하중에 대한 영향을 평가하기 위해 그림의 왼쪽편과 같이 Axisymmetric 형태의 전산해석 모델을 설정하였으며, 상부의 Al과 하부의 CFRP를 적용하여 bead의 접촉면적을 확인하고자 하였다. 클램프 하중은 약 24 N이 적용하는 것을 가정하였으며 그림의 왼쪽에서 보는 바와 같이 평행을 유지하기 위해 3개의 bead가 지지할 때를 가정하여 분포하중인 4N(합계 8N)을 상하 방향으로 적용하였다.

접착면에 적용되는 bead의 간극은 Fig. 9에서 보는 바와 같이 CATIA를 사용하여 bead와 접착두께를 모델링 하고, Table 4의 밀도 값을 적용하여, Table 5와 같이 bead의 종류에 따라 중량이 10%에 해당하는 bead의 간격과 100 mm² 당 수량을 확인하였다.

3.2.2 더블랩 시편 전산해석 조건

Fig. 9를 바탕으로 접착제에 bead를 적용했을 때의 영향

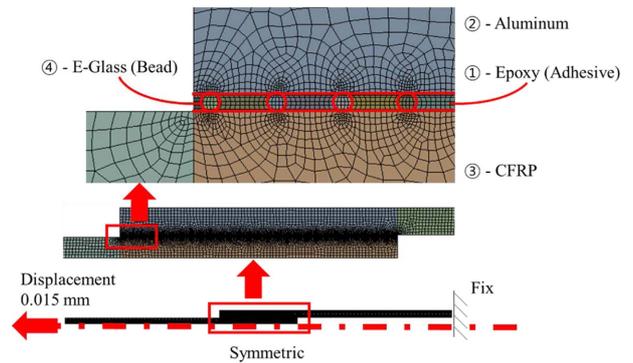


Fig. 10. Boundary condition of Double lap tensile

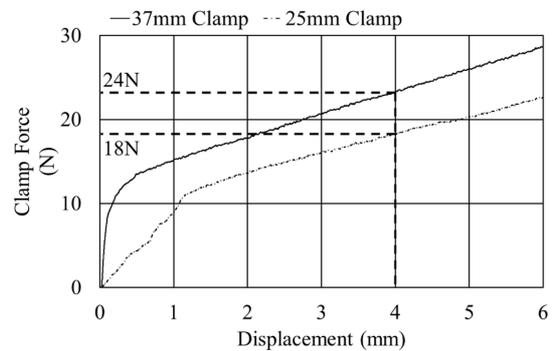


Fig. 11. Result of tensile test of Clamp

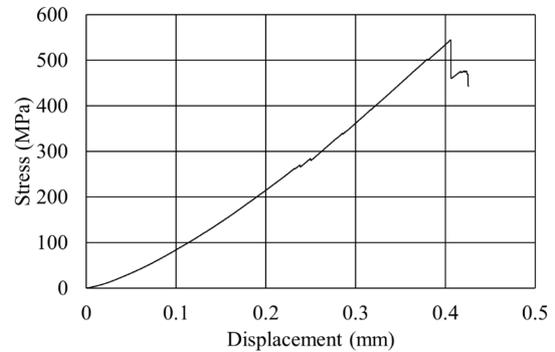


Fig. 12. Result of compression test of Bead

을 평가하기 위한 해석모델을 Fig. 10과 같이 더블랩 해석 모델을 생성하였으며, 2D Plane Strain으로 설정하였으며, 상하 방향이 대칭인 점을 고려하여 Symmetric 조건을 적용하였고, 기존의 자료의 내용을 참고하여 적용하였다[11,12].

3.3 접착제 성형조건에 대한 실험 결과

3.3.1 클램프 압력 - Bead 강도

클램프의 인장시험 결과 Fig. 11과 같이 접착제의 클램프 두께인 4 mm에서 폭이 37 mm인 클램프가 약 24 N이 적용됨을 확인할 수 있었다. bead 소재를 압축시험한 결과 Fig. 12에서와 같이 약 550 MPa에서 파단됨을 확인할 수 있었다.

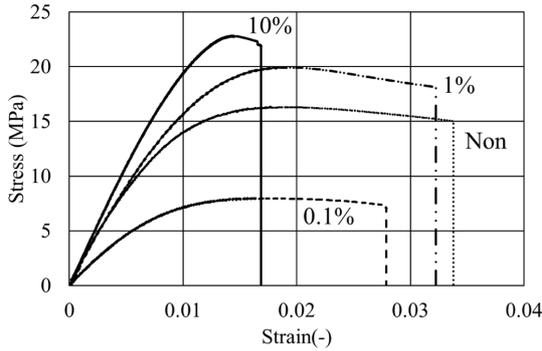


Fig. 13. The Result of adhesive material tensile test

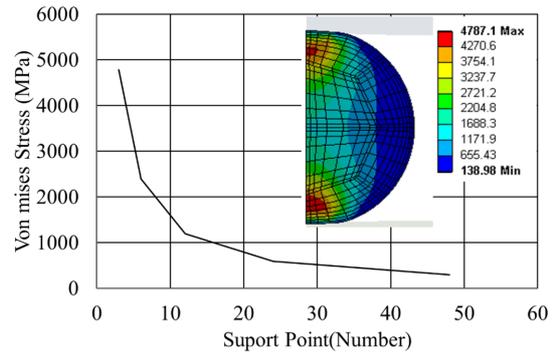


Fig. 15. Result of Clamp compression simulation

3.3.2 접착제 물성

bead의 양을 각각 0%, 0.1%, 1%, 10%로 달리 첨가하여 인장시험 한 결과 Fig. 13과 같이, bead의 함량이 1%가 넘어서면 신율은 줄고, 탄성계수와 인장강도는 높아지는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 원인은 첨가된 bead가 강화제 역할을 하기 때문인 것으로 판단되며, 단 0.1% 일 때는 접착면에 bead의 첨가량이 극히 적기 때문에 bead가 결합의 원인으로 작용하는 것으로 예상된다. Fig. 13의 0% 함유량의 실험 결과는 탄성계수만을 추출하여 FEM 시뮬레이션에 적용하였다.

3.3.3 Bead의 크기에 따른 시험 결과

bead의 크기를 Non, 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm로 달리한 더블랩 시험결과를 Fig. 14에 나타내었다. 시험 결과 bead의 크기에 따라 전단강도는 큰 차이를 나타내지는 않았으나, 강성과 신율에는 차이가 발생함을 확인하였다. 즉, bead의 크기가 커짐에 따라 강성은 감소하며 신율은 증가함을 확인하였다.

3.4 전산해석 결과

3.4.1 클램핑 공정 전산해석 결과

클램핑 공정에 대한 전산해석 결과 응력분포를 Fig. 15에 나타내었다. 클램핑 공정에서 구의 접촉부분에서 어느 정

도 떨어진 곳에서 응력이 발생함을 확인하였다. 또한, 이전의 E-Glass의 최대 파괴 강도가 약 500 MPa 정도임을 감안하면 클램핑 공정에서 bead의 양은 약 40개 이상이 되어야 함을 확인할 수 있었다.

bead의 함유량이 10%일 때 Table 5에서 보여지듯이 최소 144개를 확보하게 되므로 접착공정에서 비드의 두께 확보에는 문제가 없음을 확인할 수 있었다.

3.4.2 더블랩 전산해석 결과

전산해석 결과 접착부의 변형과 구속부분의 하중값을 관찰한 결과 0.015 mm의 강제변위를 적용했을 때 변형 및 지지점의 반력은 Fig. 16에서 볼 수 있듯이, bead의 크기가 커질수록 강성이 떨어짐을 확인할 수 있었다.

응력이 받는 부분에 대한 정밀한 해석을 위해 Fig. 17(a), (b)와 같이 등고선으로 전단응력을 표현했을 때, bead를 추가함에 따라 bead 부분의 응력이 높게 발생하고, bead가 없는 부분에서는 응력이 낮게 발생함을 알 수 있었다. 접착제의 최대 응력이 Fig. 13과 같이 약 20 MPa이고, bead의 최대 압축 응력이 Fig. 12와 같이 500 MPa임을 고려하기 위해 Fig. 17(c)와 같이 접착부의 중앙부의 응력을 분석하였다.

bead가 추가되지 않은 부분에서는 접착부 양 끝 단에서 가장 많은 응력이 받고, 중앙부에서 매우 낮은 응력을 확인

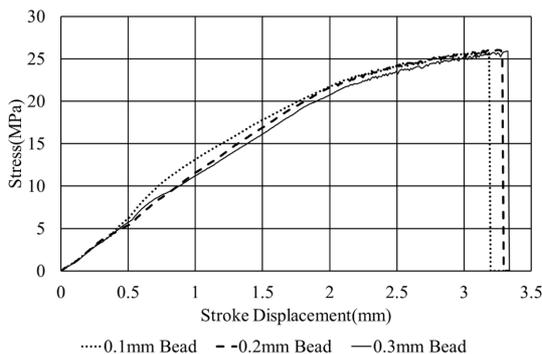


Fig. 14. Result of Double lap test according to the size of Beads

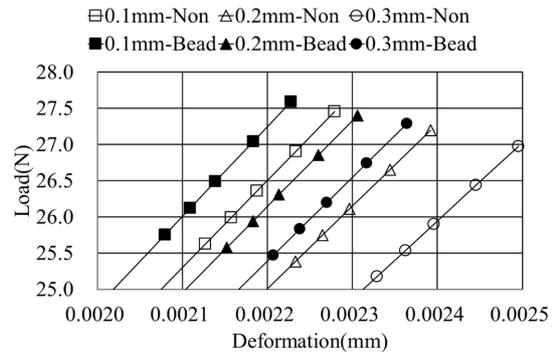


Fig. 16. Result of simulation according to Bead size and Adhesive thickness

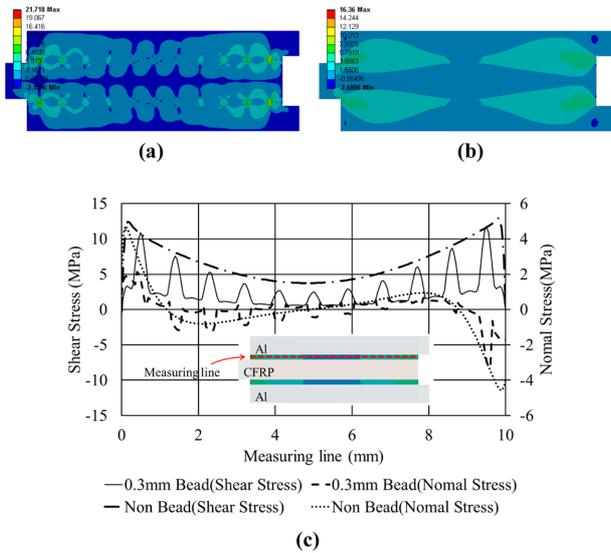


Fig. 17. Result of FEM simulation, (a) Contour of shear stress with 0.3 mm Bead, (b) Contour of shear stress without Bead, (c) The graph for Double lap simulation

할 수 있었으나, bead가 적용된 접착 면에서는 bead가 적용된 부분에서 높은 응력을 나타냈다.

bead가 없을 때는 접착제에 적용되는 전단응력은 약 12 MPa 정도이나, bead가 추가됨에 따라 접착제가 받는 전단응력은 약 3 MPa 정도로 4배 정도 낮아진 것을 확인하였다.

3.5 전산해석 결과와 시험의 비교

본 논문에서는 bead의 유무 차이에 대한 결과는 Fig. 16에 나타내었고, 전산해석은 그중에서 하나인 bead 없이 두께 0.1 mm로 형성된 것을 선택하여 경향을 파악하였다. 전산해석과 실험을 비교한 결과를 Fig. 18에 나타내었다. 접착제는 bead 없이 0.1 mm로 형성한 결과를 이용하였고, 전산해석한 결과와 실제 시편을 만들어 시험한 결과(Double lap joint test)를 비교하면 탄성계수 값의 오차 2.47% 수준으로 거의 일치한다는 것을 검증하였다.

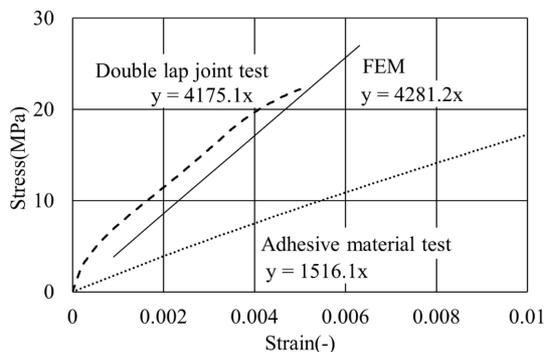


Fig. 18. Comparison of simulation and experimental result

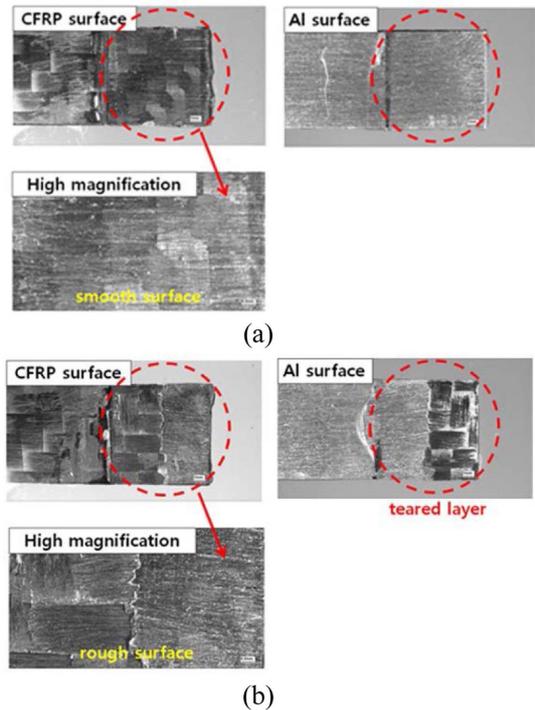


Fig. 19. Result of optical microscope for fracture area of (a) smooth surface and (b) rough surface

3.6 시편에 대한 계면 분석

더블랩 시험 후에 나타나는 시편의 계면을 분석하기 위하여 광학 현미경을 사용하였다. Fig. 19에 시험 후에 CFRP와 Al의 파단면을 측정된 결과를 나타내었다. Fig. 19(a)는 bead가 없이 접착제만으로 접합시킨 후 시험한 결과이다. 그림에서도 알 수 있듯이 CFRP와 Al 모두 파단면이 매끈한 것을 볼 수 있다. 이는 전단하중 시 낮은 하중에도 접착면이 쉽게 분리되는 것을 의미한다. 반면에 Fig. 19(b)는 bead를 사용하여 0.3 mm의 두께를 형성하여 시험한 결과이다. 그림에서도 알 수 있듯이 CFRP 표면에서 층간 박리현상과 거친 표면이 보인다. 또한, CFRP에서 박리된 층이 Al 표면에서 관찰되는 것을 확인하였다. 이로 인해 전단 하중 시 계면의 우수한 강도로 인해 접착면이 쉽게 분리되지 않는 것으로 사료된다. 시편에 대한 계면 분석에서도 bead를 사용할 시에는 균일한 접착제 두께를 형성하여 사용하지 않았을 때보다 더 좋은 접착능력을 보여준다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 자전거를 설계 및 제작할 시에 사용하는 접합과 관련되어 균일한 접착면을 형성하여 접착력의 신뢰성을 확보하기 위하여 지름 0.1, 0.2, 0.3 mm의 원형 bead를 사용하여 CFRP와 Al을 접착하여 더블랩 실험을 통해 bead의 영향을 비교하였다. 또한, 실험결과에 대한 원인을 파악

하기 위하여 광학 현미경으로 파단면을 촬영하였다. 더불어, 접착면의 두께가 더블랩 실험에서 어떠한 영향을 미치는지에 대해 알아보기 위하여 FEM 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 접착제에 G-Glass 10% 를 적용했을 때 100 mm² 당 bead의 수량을 예측할 수 있었으며, 크기가 0.1 mm일 때는 약 1156~676개, 0.2 mm는 289~225개, 0.3 mm는 169~144개 정도로 예상된다.

2. 만약 bead가 100 mm²당 약 40개 이하가 산포된다면 접착제 성형공정에서 bead가 파괴되어 원하는 두께를 형성하지 못할 수도 있으나 본 실험에서는 이러한 문제가 발생하지 않는 범위로 판단된다.

3. 접착제 원소재에 bead를 0%, 0.1%, 1%, 10%로 달리 적용했을 때 1% 이상 함량이 증가함에 따라 접착 소재의 강도가 높아지고 신율이 떨어짐을 실험으로 확인할 수 있었다.

4. 접착소재의 물성 시험결과를 상용 해석 소프트웨어인 ANSYS를 이용한 Plane strain 해석에 적용하였을 때, 강성(탄성계수)이 높아짐을 확인하였으며, 이는 실험에서의 결과와 오차율 2.47%로 준수한 결과를 나타내었다.

5. bead의 크기를 지름 0.1, 0.2, 0.3 mm로 달리 적용 했을 때 전단강도는 큰 차이를 나타내지는 않았으나, 지름이 커질수록 강성은 낮아지고, 신율은 증가함을 확인하였다.

6. 이를 전산해석을 통해 분석해본 결과 bead를 적용하여 접착제의 두께가 증가할수록 신율은 증가하고 강성은 줄어들어 실험과 해석의 경향이 일치하는 것을 확인하였다.

이상의 결과에서, 이종소재의 접합을 위한 접착제를 사용할 시에는 bead의 크기는 작을수록 높은 강도를 확보할 수 있으며, bead가 접착 두께만을 유지하는 것이 아닌 강화제 역할을 하여 접착성능을 높일 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 접착제의 인장실험 데이터를 이용하여 더블랩 시험을 해석한 결과 탄성계수 값의 오차가 2.47% 수준으로 나타났다. 이를 바탕으로 이종소재의 접합 시에 해석을 통해 경향을 파악할 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 bead가 있는 경우와 LEFM, VCCT, CZM과 같은 파괴 물성을 적용한 해석이 추가로 진행되어야 한다는 것과 실제 제품으로 적용하기 위해서는 피로 성능, 충격성능, 내열성 등 다양한 부분의 물성연구가 필요하다는 것은 한계로 보인다.

후 기

본 연구는 스포츠산업기술개발사업 연구개발 사업(과제번호: s072015r1032015A0)이 지원하는 연구과제로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- (Korean Journal) Deetz, J., "The Use of Wrought Magnesium in Bicycles", *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, Vol. 57, No. 5, 2005, pp. 50-53.
- (Korean Journal) Cicero, S., Lacalle, R., Cicero, R., Fernandez, D., and Mendez, D., "Analysis of The Cracking Causes in An Aluminum Alloy Bike Frame", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 18, 2011, pp. 36-46.
- (Korean Journal) Ko, H.Y., Shin, K.B., and Kim, J.S., "A Study on Improving the Fatigue Life for a Woven Glass Fabric/Epoxy Laminate Composite Applied to Railway Vehicles", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 34, No. 2, 2010, pp. 203-209.
- (Korean Journal) Hong, S.W., Ahn, S.S., Koo, J.M., and Seok, C.S., "Analysis of Characteristics of CFRP Composites Exposed Under High-Temperature and High-Humidity Environment for a Long Period", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 36, No. 8, 2012, pp. 889-895.
- (International Journal) Zhang, K., Yang, Z., and Li, Y., "A Method for Predicting the Curing Residual Stress for CFRP/Al Adhesive Single-lap Joints", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 46, No. 1, 2013, pp. 7-13.
- (Korean Journal) Park, S.-O., "Fatigue Crack Growth Properties of Epoxy Adhesives under Mode I Loading", *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 15, No. 1, 2013, pp. 5-13.
- (Korean Journal) Lee, J.-H., and Cho, J.-U., "A Comparative Study of Fatigue Fracture Behavior on the Specimens of DCB and TDCB Aluminum Foams with Mode III Type", *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 18, No. 1, 2016, pp. 70-75.
- (Korean Journal) Shon, M.-Y., "Evaluations of Lap Shear and Peel Strength for Epoxy and Polyurethane Adhesive Bonded Triplex Sheets at Cryogenic Temperatures", *Composites Research*, Vol. 24, No. 3, 2011, pp. 39-45.
- (Korean Journal) Kim, D., Kim, S., Park, Y.-I., Kim, Y.C., and Lim, C.-S., "The Physical Properties Analysis of Epoxy Resins Incorporated with Toughening Agents", *Journal of Adhesion and Interface* Vol. 16, No. 3, 2015, pp. 101-107.
- (Korean Journal) Kwon, J.W., and Lee, D.G., "The Effects of Surface Roughness and Bond Thickness on the Fatigue Life of Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joints", *Journal of Mechanical Science and Technology, Composites Research*, Vol. 24, No. 8, 2000, pp. 1968-1977.
- (Book) Federal Aviation Administration, "Methods of analysis and Failure Predictions for Adhesively Bonded Joints of Uniform and Variable Bondline Thickness", U.S. Department of Transportation, USA, 2005.
- (Korean Journal) Park, C.G., Choi, Y., Kang, B.Y., and Kim, E.G., "A Study on the Development of the Split-Type Carbon Composite Bicycle Frames", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 34, No. 2, 2017, pp. 139-143.