

탄소 섬유 강화 플라스틱과 금속의 접합에서 표면 패턴에 따른 접합 강도 영향

김지훈^a, 정성균^b, 김주한^{b*}

Influence of Bonding Strength on Surface Pattern in Bonding of Carbon Fiber Reinforced Plastic and Metal

Ji-Hun Kim^a, Seong-Kyun Cheong^b, Joohan Kim^{b*}^a Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science & Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea^b Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science & Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	12	June	2017
Revised	25	July	2017
Accepted	27	July	2017

Keywords:

CFRP
Prepreg
Shear stress
Surface treatment

ABSTRACT

The effect of the surface profile on CFRP and aluminum metal bonding was studied. A small number of steps were made on the aluminum surface, and the shear stress and elongation were measured using a shear test after bonding with an autoclave method. As the number of surface steps increased, the shear stress and elongation increased. The surface bonding strength increased because of the effect of the mechanical and chemical bonding. When the number of effective stages was exceeded, the shear strength decreased again due to the aspect ratio of the step and the reduction of the penetration effect of the resin into the groove.

1. 서론

복합재료란 두 종류 이상의 재료를 섞어 원래의 상을 유지하면서 원래의 소재보다 우수한 성능을 갖도록 한 재료를 말한다. 탄소섬유 강화플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastic)은 탄소섬유(CF)를 강화재료 하는 플라스틱계 복합재이다. CFRP는 경량 구조용 재료로서 뛰어난 특성이 있다. 철강과 비교했을 때 6배의 비강도(specific strength)와 3배의 비탄성률(specific modulus)을 갖고 있으며, 내식성(corrosion resistance), 피로수명(fatigue), 내마모성(wear resistance) 등의 기계적, 화학적 특성 또한 우수하다^[1]. 최근 항공 및 자동차 사업에서는 CFRP를 주재료로 하여 기존

기체나 자체 보다 30% 이상의 중량 감소를 보고하고 있다^[2].

그러나 기계적 일을 하거나 높은 열을 받는 부분은 여전히 금속을 사용해야 하는 제한이 있다^[3]. 이러한 이유로 플라스틱과 금속으로 구성된 복합 부품의 제작이 필요하며 이에 금속과 플라스틱의 이중 접합 또는 결합에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다(Fig. 1). 이러한 공정의 대표적인 예로는 볼트와 너트 등을 이용한 기계적 체결방식이 있다. 그러나 이 방법은 응력집중과 부속부품의 증가로 인한 중량화, 구조적 문제점을 일으킬 수 있다^[4]. 접착제를 이용한 방법에서의 문제점은 낮은 점도와 온도가 높은 부분에서의 서로 다른 열팽창계수와 용융점에 의해 금속과 플라스틱이 분리되는 것이다^[5]. 금속과 탄소섬유를 높은 온도로 합성시키는 화학적 결합은 섬유의 파

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6305

Fax: +82-2-949-1458

E-mail address: joo Hankim@seoultech.ac.kr (Joohan Kim).

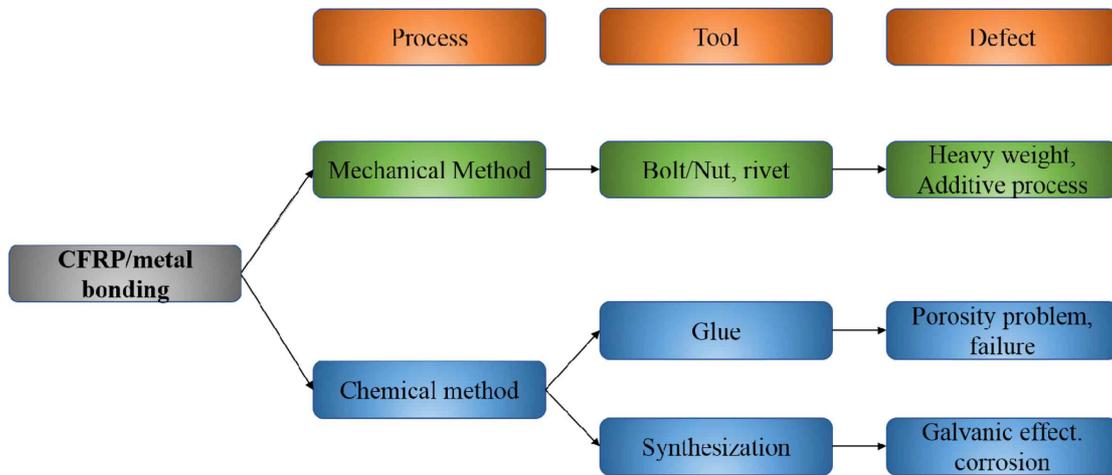


Fig. 1 Characteristics of conventional methods in CFRP/metal bonding

피와 수지의 기화현상에 의한 기공형성이 문제된다⁶⁾. 또한 CFRP와 알루미늄의 접합의 경우 갈바니 효과에 의해 부식이 매우 빠르게 되어 쉽게 분리가 될 수 있다. 이를 방지하기 위해 접합 전 에칭처리 및 아노다이징과 같은 화학처리를 한다. 그러나 대량생산에 적합하지 않아 저비용의 표면처리 기술이 요구된다⁷⁾. 표면처리를 통한 접합 중 표면의 요철에 의한 기계적 결합이 있다⁸⁾. 금속과 플라스틱 두 재료의 수지계 경화공정을 통한 접합에 있어 표면에 적당한 요철을 만들면 요철에 침투한 수지에 의해 전단강도가 향상될 수 있다⁹⁾. 본 연구에서는 경량구조물에 쓰이는 알루미늄과 CFRP와의 접합에 있어 전단강도 향상을 위하여 오토클레이브 공정을 통한 이중접합에 있어서 표면 패터닝의 영향을 분석하여 인장강도와 연신율의 변화를 정량화 하였으며 최적의 패터닝 공정을 제시하였다.

2. 이론

2.1 프리프레그

FRP는 제조방법에 따라 미세적 구조와 내부 잔류응력이 변화하기 때문에 그 기계적 성질도 크게 영향을 받는다¹⁰⁾. 제조 방법으로는 개방적 성형과 밀폐적 성형으로 크게 분류되는데, 오토클레이브는 개방적 성형방법으로 사전에 만들어진 프리프레그를 소정의 배향각으로 적층하여 진공백으로 감싸 오토 클레이브 안에서 소정의 압력과 온도로 경화시키는 방법을 말한다¹¹⁾. 프리프레그란 복합재료 성형품을 얻기 위한 중간 재료로서 직물 형태의 강화섬유에 수지를 미리 함침시킨 시트이다¹²⁾. 일반적으로 복합재료의 기계적 물성은 복합재료가 가지고 있는 접합구조에 크게 의존하기 때문에 프리프레그의 적층방식을 통해 원하는 물성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 프리프레그의 적층방식 표기는 Fig. 2와 같이 각도로 표현되는데 그 각도에 따라 다른 물성을 보인다¹³⁾. 섬유 방향으로는 높은 인장강도와 음의 팽창계수를 가지며 그 수직방향

으로는 낮은 인장강도와 양의 팽창계수를 갖는다. 복합재의 강도는 섬유와 수지의 체적비에 의존한다. 강도 및 탄성계수 같은 물성 C 는 $v_f \cdot C_f + v_m \cdot C_m$ 으로(v_f, v_m : 섬유 및 수지의 체적비, C_f, C_m : 섬유 및 수지의 물성) 표기될 수 있는데 물성값 C 가 높은 섬유의 체적비가 클수록 복합재의 강도가 커지게 되므로 수지의 체적비를 줄이는 반면 섬유의 체적비를 늘려야 한다. 이러한 원리로 Fig. 3과 같이 높은 온도와 압력을 이용하여 수지를 배수시키는 오토클레이브 공법이 있다. 오토클레이브를 이용한 일반적인 공정에 있어 수지를 경화의 온도 프로파일이 Fig. 4와 같이 적용되었다¹⁴⁾. 이 공정에 있어 5-6 atm의 공압은 내부 온도가 100°C에 도달했을 때 가해지며 이 때 수지의 배수가 가속된다.

2.2 기계적 접합

재료의 접합 시 표면 거칠기 또는 표면 처리는 인장강도에는 큰

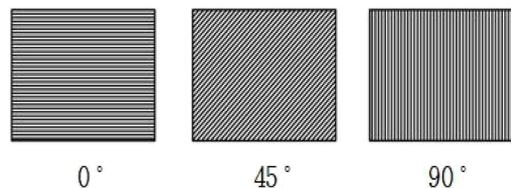


Fig. 2 Notation of prepreg fiber direction

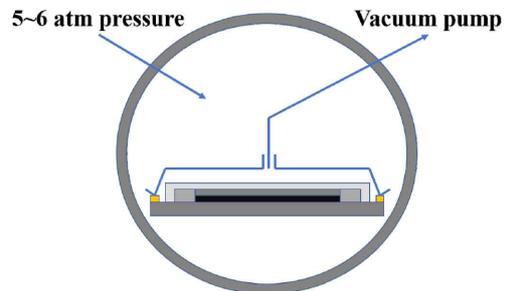


Fig. 3 Schematic of CFRP molding chamber of Auto Clave

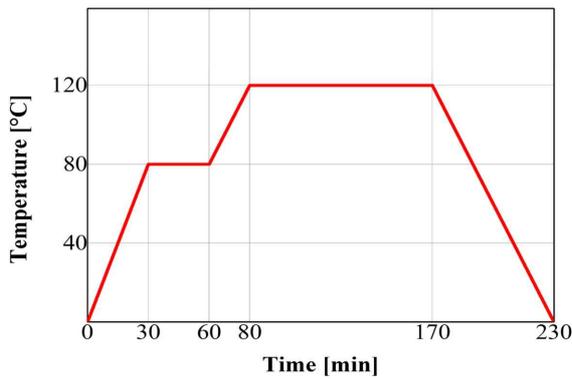


Fig. 4 CFRP curing temperature cycle

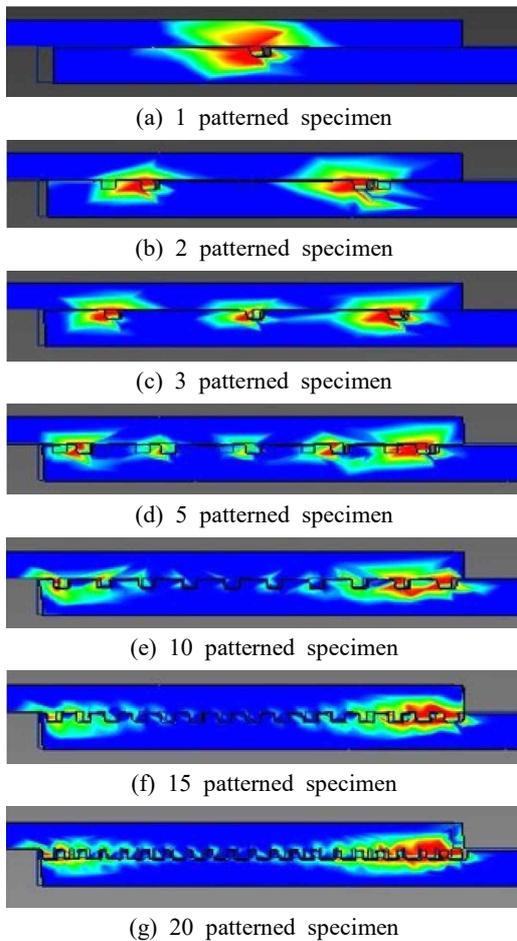


Fig. 5 Simulation results of shear stress distribution

영향이 없으나 전단강도는 이에 크게 의존한다^[15]. 이는 접착력에 상관없이 거칠기라는 표면 구조에 의해 물리적 간섭이 일어나기 때문이다. 이와 같은 이유로 전단응력을 향상시키기 위해선 표면을 가공해 간섭이 잘 일어나도록 모델링 하는 것이 중요하며 그 한 가지 방법으로 인장방향에 수직인 요철이 적용될 수 있다. 접합에 있어 요철의 개수와 전단강도의 상관관계를 시뮬레이션(autodesk inventor)을 통해 확인하였고 그 결과를 Fig. 5와 같이 얻을 수 있었다. 이 결과는 인장방향에 수직인 요철의 개수에 따른 전단응력

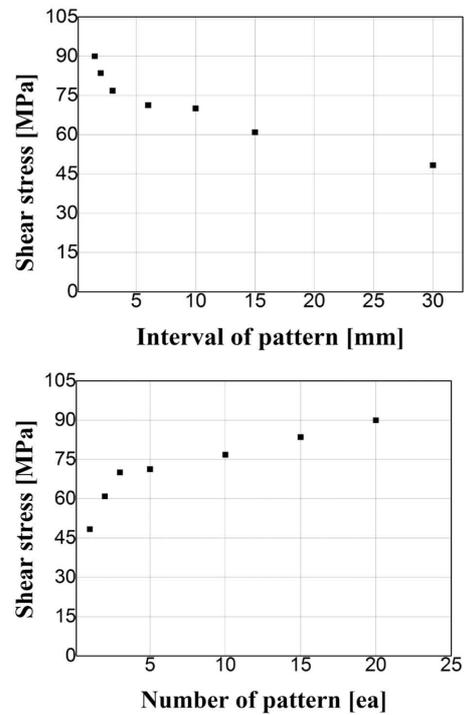


Fig. 6 Simulation result of Pattern vs Shear stress

Table 1 Properties of Al5052

Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Poisson's Ratio	Elastic Modulus (GPa)
228	12-18	0.33	70.3

Table 2 Properties of prepreg

Total Wt (g/m ²)	FAW (g/m ²)	Tensile strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)
187	125	2686	128.3

의 분포이다. 요철의 개수가 증가할수록 응력이 분산되어짐을 알 수 있고 접합면의 양 끝에 응력이 집중되는 것을 확인할 수 있다. 패턴의 간격 또는 패턴의 개수에 따른 응력집중부의 전단응력과 항복강도가 Fig. 6과 같이 얻어졌다. 1 단의 경우 응력 집중에 의해 높은 전단응력을 받게 되어 항복응력이 낮지만 단이 증가할수록 단면모멘트의 증가와 응력분산에 의해 전단응력이 감소하여 항복 응력이 상승한다. 그러나 단수의 증가에 따라 특정 지점에서 항복 강도가 감소하게 되는데 그 이유는 단의 개수의 증가에 따라 단의 세장비가 커지며 이에 의해 각 단의 응력 집중에 의한 강도가 저하 되기 때문으로 설명되어 질 수 있다.

3. 실험

Al5052는 우수한 용접성과 높은 비강도로 자동차 부품에 널리

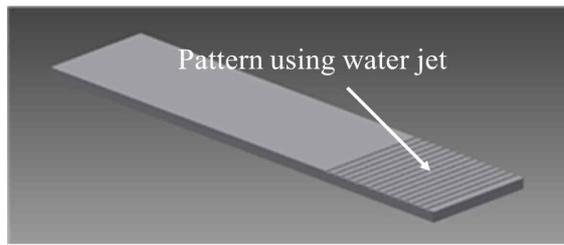


Fig. 7 Schematic of the patterned specimen by water jet

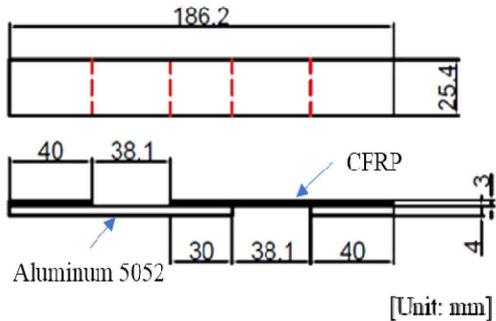


Fig. 8 ASTM D1002-01 [58], ASTM D5868-01 [59] FRP-based single overlapping shear specimen

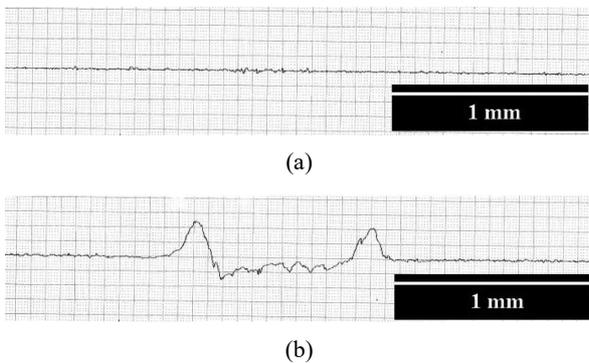


Fig. 9 Scanning of (a) No-treated specimen surface and (b) water jet treated specimen surface

사용되고 있다. 본 연구에 사용된 Al5052는 4 mm 두께로 기계적 특성은 Table 1에 나타나있다. CFRP제작에 사용된 프리프레그 (SKchemicals; USN 125B)는 평직섬유에 수지 함유율이 33%인 복합재료이다. 프리프레그의 두께는 0.120 mm로 Table 2에 기계적 물성을 나타냈다. 절삭가공에 앞서 연마지로 알루미늄의 표면을 연삭했으며 에탄올을 이용하여 불순물을 제거했다 요철부에 수지가 충분히 확산될 수 있는 구조를 선택함에 있어서 수압절단기를 이용한 절삭가공을 선택하였으며 Fig. 7과 같이 금속에 다단 요철부를 형성하였다. 오토클레이브 경화공정의 열팽창을 줄이기 위해 성형틀을 이용하였으며 테플론 계열의 필름을 이용하여 성형 틀과의 접합을 방지했다. 시험편은 복합재/금속 인장 시험기 규격 Fig. 8의 ASTM D1002-01 [58]과 ASTM D5868-01 [59]를 참고하여 제작하였다. 이러한 방법을 통해 0, 3, 5, 6, 10, 15, 20, 25단이

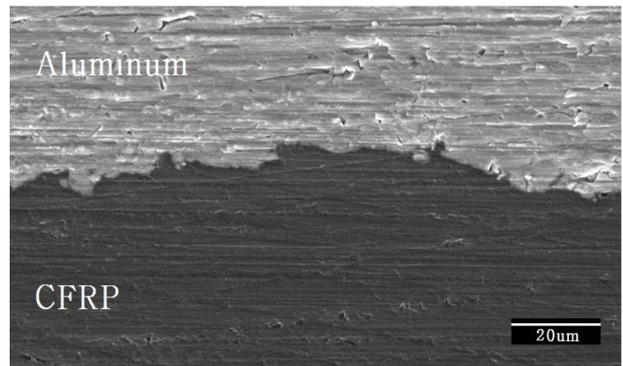
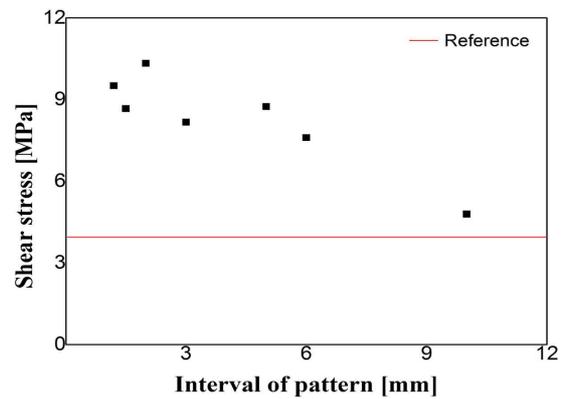
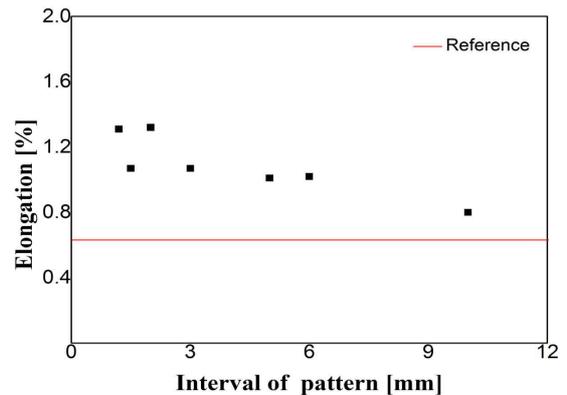


Fig. 10 SEM image of the specimen cross-section



(a) Interval of patterns vs shear stress



(b) Interval of patterns vs elongation

Fig. 11 Shear and elongation tests

형성된 시험편을 인장하였다.

4. 실험결과 및 고찰

단이 없는 상태에서 접합된 시편의 측정된 전단강도는 3.79 MPa 이었으며 가장 높은 강도를 보인 15단의 경우 10.70 MPa을 얻을 수 있었다. 패턴 개수의 증가에 따라 전단강도는 증가되었다. 요철 표면의 형성에 따른 영향을 확인하기 위해 표면의 프로파일을 스캔하여 확인하였다(Fig. 9). 단이 없는 표면의 거칠기(R_a)는

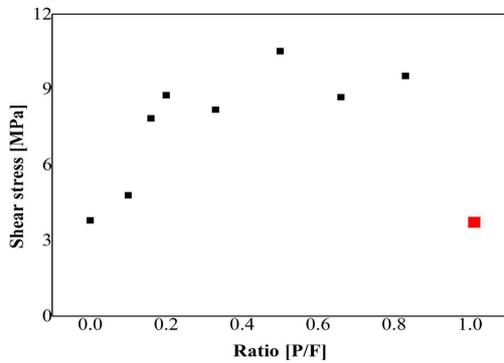


Fig. 12 Aspect ratio vs shear stress

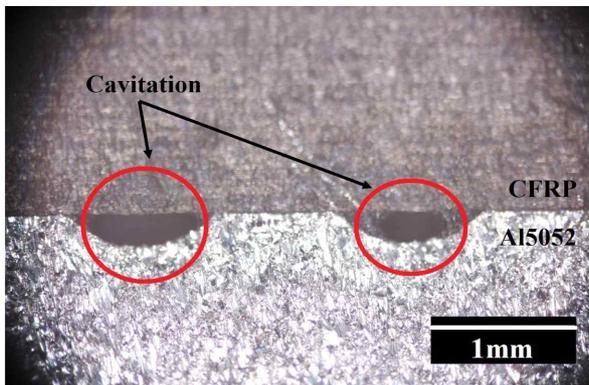
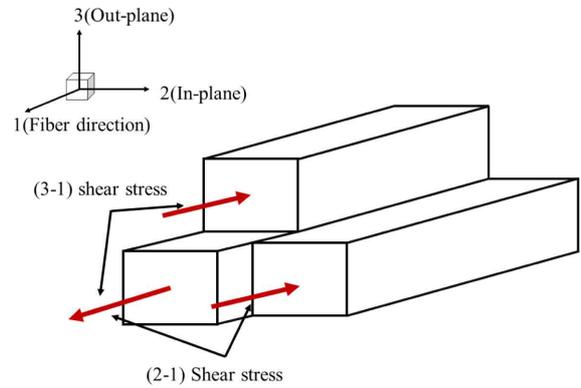
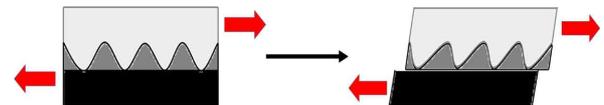


Fig. 13 Cavitation defects in the pattern

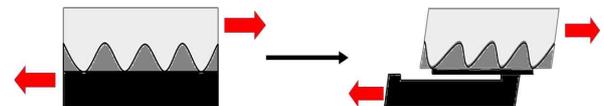
0.74 μm , 수압 절단기에 의해 형성된 표면의 거칠기(R_a)는 8.47 μm 을 보였으며 수압절단기에 의해 쇠가시(Burr)가 형성된 것을 알 수 있다. 접합면의 단면을 주사전자 현미경으로 관찰한 결과 Fig. 10과 같이 금속의 요철에 수지가 충분히 침투하여 접촉면적이 넓어졌으며 보다 강한 기계적 결합이 일어난 것으로 확인하였다. 단일 점침 전단 시험편의 인장 결과가 Fig. 11과 같이 얻어졌다. 결과 그래프에서 패턴의 간격이 좁아질수록 전단강도가 향상되는 것이 확인되었다. 단, 어느 정도부터는 그 값이 수렴하는 결과를 보이는데 이는 전체적인 응력분산보다 국부적 응력집중이 더 큰 요소로 작용하는 것이 원인으로 보인다. 수압절단기에 의해 생성되는 패턴의 폭은 1 mm정도인데 패턴의 폭을 접합면의 폭으로 나누는 세장비로 표현하게 되면 Fig. 12와 같이 얻어진다. 패턴이 없는 경우 세장비가 0이며 패턴의 개수가 증가할수록 세장비 1에 가깝게 해석된다. 이러한 기준으로 전단강도는 세장비로 분석될 수 있다. 실험 결과를 적용하였을 때 세장비가 0.5 근처에서 가장 큰 전단강도를 보였다. 알루미늄의 요철에 침투한 수지는 경화되어 전단강도를 향상시키나 Fig. 13과 같이 충분히 침투하지 못해 기공이 형성된 경우엔 낮은 전단강도를 보였으며 실제 파단이 일어나는 부분은 CFRP와 금속의 경계에서 일어나 Fig. 14와 같이 파괴가 일어나는 것으로 예측된다. 프리프레그를 적용하여 만들었기 때문에 전단강



(a) Notation of stress mode

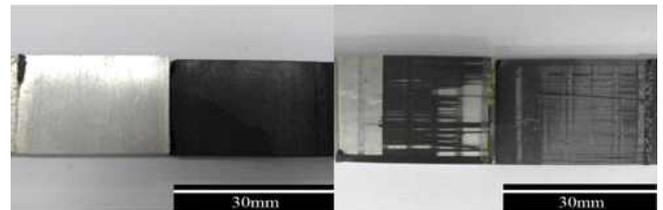


(b) (3-1) Shear fracture



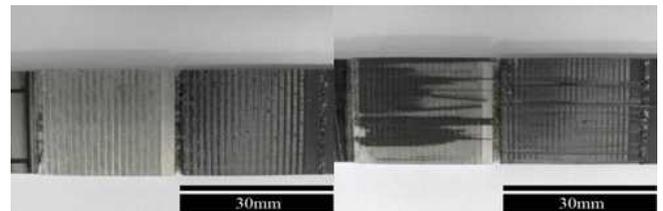
(c) (2-1) & (3-1) Shear fracture and (1-1) Tensile fracture

Fig. 14 CFRP/aluminum shear specimen fracture modes



(a) baseline

(b) 6 patterned



(c) 20 patterned

(d) 25 patterned

Fig. 15 Fracture of bonding surface

도는 (3-1)전단 그리고 (2-1)전단으로 나뉘게 된다. 파단 후 CFRP와 알루미늄의 접합면의 형상이 Fig. 15와 같이 관찰되었다. 표면 패턴이 존재하지 않을 경우 알루미늄과 탄소섬유/에폭시의 화학적 접합이 지배적이기 때문에 섬유상 파괴가 일어나지 않았으나 패턴이 존재할 경우엔 응력집중에 의해 섬유의 인장 파괴와 전단 파괴 및 층간 파괴가 일어나는 것으로 보인다. 이로 미루어 보았을 때 CFRP의 전단강도 또한 접합 전단강도에 영향을 미친 것으로 판단할 수 있다.

5. 결 론

CFRP와 금속의 결합에 있어 표면의 표면형상에 따른 접합부위의 전단 강도에 대한 연구를 수행하였으며 단에 의한 기계적 접합 시 단의 간격이 전단강도에 영향을 주고 있음을 확인하였다. 전산 모사를 통해 그 영향을 예측하였으며 실험을 통해 단의 개수에 의한 전단강도의 변화를 실험적으로 확인하였다. 실험적으로 전단 강도 증가의 경향은 단수의 개수에 의해 어느 수준까지 유지되었다. 하지만 유효한 단의 개수 이상에서는 전단강도가 다시 감소하는 경향을 보였다. 단의 개수가 많을수록 수지의 함침량의 증가를 예측할 수 있으며 이에 의한 전단강도의 향상을 예상할 수 있으나 수지가 요철부에 충분히 침투되지 못할 경우에는 기공 등에 의한 결합발생의 위험이 증가할 수 있다.

Acknowledgement

본 연구는 서울과학기술대학교 2017 교내연구지원사업의 지원을 받음.

References

- [1] Son, Y., Do, M. D., Choi, H. J., 2017, End Effectors and Flexible Fixtures for Rapidly Holding Freeform-Surface CFRP Workpieces, *Journal of the KSPE*, 34:4 243-246.
- [2] Fuchs, A. N., Schoeberl, M., Tremmer, J., Zaeh, M. F., 2013, Laser Cutting of Carbon Fiber Fabrics, *Physics Procedia*, 41 372-380.
- [3] Avgoulas, E. I., Sutcliffe, M. P., 2016, Biomimetic-Inspired CFRP to Perforated Steel Joints, *Composite Structures*, 152 929-938.
- [4] Kim, T. Y., Kim, H. S., Shin, H. G., 2014, Investigation into the Drilling Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) with Variation of the Stacking Sequence Angle, *Journal of the KSMTE*, 23:3 250-258.
- [5] Nagatsuka, K., Yoshida, S., Tsuchiya, A., Nakata, K., 2015, Direct Joining of Carbon-Fiber-Reinforced Plastic to an Aluminium Alloy Using Friction Lap Joining, *Composites*, B:73 82-88.
- [6] Tan, X., Zhang, J., Shan, J., Yang, S., Ren, J., 2015, Characteristics and Formation Mechanism of Porosities in CFRP During Laser Joining of CFRP and Steel, *Composites*, B:70 35-43.
- [7] Lee, M. S., Kim, H. H., Kang, C. G., 2013, Effect of Surface Roughness of Al5052/CFRP Composites on the Adhesion and Mechanical Properties, *Composites Research*, 26:5 295-302.
- [8] Lambiase, F., Ko, D. C., 2016, Feasibility of Mechanical Clinching for Joining Aluminium AA5082-T6 and Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets, *Materials and Design*, 107 341-352.
- [9] Rhee, K. Y., Yang, J. H., Choi, N. S., 2002, A Study on the Curing Method to Improve Bonding Strength of Aluminum/CFRP Composites, *International Journal of Automotive Technology*, 10:3 130-135.
- [10] Sim, J. H., Kim, J. H., Park, S. M., Koo, K. H., Jang, K. W., Bae, J. S., 2017, Mechanical Characteristics of CF Laminated Prepreg with UV-thermal Dual Curable Epoxy Resin, *Textile Coloration and Finishing*, 29:1 37-44.
- [11] Lusic, M., Schneider, K., Hornfeck, R., 2016, A Case Study on the Capability of Rapid Tooling Thermoplastic Laminating Moulds for Manufacturing of CFRP Components in Autoclaves, *Procedia CIRP*, 50 390-395.
- [12] Park, Y., Hwang, T. K., Chung, S., Park, N., Jang, J. Y., Nah, C., 2017, Recent Research Trends in Carbon Fiber Towpreg for Advanced Composites, *Journal of the KSPE*, 21:2 94-101.
- [13] Kang, M. S., Park, H. S., Choi, J. H., Koo, J. M., Seok, C. S., 2012, Prediction of Fracture Strength of Woven CFRP Laminates According to Fiber Orientation, *Transactions of the KSME*, A36:8 881-887.
- [14] Jeong, J. S., 2014, A Study on the Fracture Characteristics of Z-pinned Carbon Fiber Reinforced Composites, A Thesis for a Doctorate, Seoul National University of science and technology, Republic of Korea.
- [15] Chi, C. H., Yang J. H., 2001, Effect of Graphite/Epoxy (CFRP) Surface Treatment on the Shear Strength of CFRP/Metal Composites, *Journal of The Korean Institute of Surface Engineering*, 34:3 225-230.