한국정밀공학회지 제 43 권 제 10 호 pp. 1087-1095 October 2026 / 1087
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 43, No. 10, pp. 1087-1095 http://doi.org/10.7736/JKSPE.026.00045
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

레이저 미세 패턴 가공과 플라즈마 표면처리를 이용한 금속-플라스틱 하이브리드 구조물의 접합강도 향상

Enhancement of Bonding Strength in Metal-plastic Hybrid Structures by Laser Micro-patterning and Plasma Surface Treatment

이호상[1,#]
Ho-Sang Lee[1,#]

1 한국교통대학교 항공기계설계학과 (Department of Aeronautical & Mechanical Design Engineering, Korea National Univ. of Transportation)
Corresponding Author / E-mail: lhs@ut.ac.kr, TEL: +82-43-841-5371
ORCID: 0000-0003-3392-1087

KEYWORDS: Bonding strength (접합강도), Metal-plastic hybrid structure (금속-플라스틱 하이브리드 구조), Laser processing (레이저 가공), Plasma treatment (플라즈마 처리), Insert injection molding (인서트 사출성형)

Integrating metals and plastics is essential for lightweight structures and efficient assembly in industries such as automotive and IT device manufacturing. This study investigated how laser micro-patterning enhances the interfacial bonding strength between these dissimilar materials in metal insert injection molding. Galvanized high-strength steel and polyphenylene sulfide (PPS) reinforced with 40% glass fiber were used as the metal and plastic materials, respectively. Four micro-patterns—circular, square, diamond, and hexagonal—were machined by laser on the bonding area at the end of the steel sheet. The effect of pattern spacing on bonding strength was evaluated by tensile shear tests on injection-molded specimens. The combined effect of laser processing and plasma surface treatment was also examined. For the square pattern, wider pattern spacing increased the bonding strength 2.2-fold, and for the hexagonal pattern the increase was 1.4-fold. Combining laser micro-patterning with plasma treatment enhanced the bonding strength by factors of 1.4 to 2.3. The effect of plasma treatment was greater for the square and diamond patterns than for the circular geometry.

Manuscript received: May 19, 2026 / Revised: July 23, 2026 / Accepted: July 26, 2026
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2026

1. 서론

금속과 고분자의 접합기술은 자동차, IT 기기 등 전반적인 산업에서 경량화, 조립공정 단순화 등을 위해 대단히 중요하다. 기존에는 나사를 사용하여 기계적으로 접합하거나, 접착제를 사용하여 금속과 고분자를 접합하였다. 그러나 기계적 접합은 구멍을 뚫어야 하고, 접착제 접합은 경화 공정이 필요하기 때문에 이러한 방법은 시간이 많이 소요되며 대량 생산에 적합하지 않은 단점이 있다. 다른 방법으로 레이저[1-3], 마찰[4-6], 초음파[7-9] 등을 이용한 국부 가열 방식에 의한 금속-고분자 겹침 접합방식이 현장에서 사용되고 있다. 최근에는 공정 단순화 및 생산성 향상을 고려하여, 금속 인서트를 활용한 사출성형 직접 접합에 대한 관심이 높아지고 있다. 표면처리를 통해 금속 표면에 미세 구조를 형성하고 금형에 인서트하며, 용융된 고분자를 사출성형하여 금속과 고분자의 하이브리드 접합부가 기계적 맞물림에 의해 접합되는 방식이다. 이 방법은 복잡한 형상의 고분자 부품을 금속과 용이하게 접합할 수 있으며, 자동차, IT 기기 등 다양한 분야에 응용할 수 있다. 금속 표면에 미세 구조를 형성하는 방법에 따라 마이크로 스케일 가공[10-12], 프라이머 도포[13], 화학적 변형[14] 등 크게 3가지로 구분할 수 있다.

Kimura 등은 화학공정을 사용하여 금속 표면에 20 nm 크기의 다수 기공을 형성시키고, 인서트 사출성형에서 공정조건이

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

접합강도에 미치는 영향을 고찰하였다[15]. 사출성형 시편을 130°C에서 4시간 동안 어닐링하여 잔류응력을 제거하고, 인장 전단시험을 수행하였으며, 그 결과 보압이 증가하면 접합강도가 커지고, 사출속도가 증가하면 전단강도가 크게 감소하였으며, 약 16 MPa 수준의 접합강도를 구현하였다. Kajihara [16]는 높은 보압이 고분자의 침투성을 향상시켜 접합강도를 높인다고 발표하였으며, Taki [17]는 사출온도가 높을수록 접합강도가 높아진다고 보고하였다.

Zhao 등[18] 은 펄스 레이저 가공기를 이용하여 Al합금 평판의 접합부에 깊이 75 μm, 직경 50 μm, 간격 60 μm인 딤플을 가공하였으며, 유리섬유 30% 함유된 PBT를 사용하여 금속 인서트 사출성형 실험을 통해 보압크기와 사출온도가 고분자의 침투 깊이를 깊게 하고, 금속표면과의 접촉을 강화하여 20 MPa 수준의 접합강도를 구현하였다.

Kim 등[19] 은 레이저 가공을 이용하여 합금화용융아연도금 시편의 표면에 다양한 형태의 미세 그루브를 형성한 뒤 유리섬유 50% 함유된 PA6를 이용한 인서트 사출성형을 수행하였다. 깊이 100 μm, 간격 140 μm인 다이아몬드 형상의 그루브에서 접합강도가 가장 높게 나타났으며, 금형온도가 증가할수록 접합강도가 높아짐을 발표하였다.

지금까지 수행된 대부분의 연구는 금속 접합부 영역에 대한 다양한 독립적인 표면처리 방법이 접합강도에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 본 연구에서는 레이저 가공 정밀도를 고려한 패턴 사이의 간격이 접합강도에 미치는 영향을 분석하고, 레이저 가공과 플라즈마 표면처리를 동시에 수행할 경우 접합강도의 변화를 고찰하였다. 또한 SEM과 EDS 분석을 통해 인장시험에 의한 접합부 파단면에 잔류하고 있는 소재의 형태와 성분을 파악하고, 접합부 파단 메커니즘을 분석하였다.

2. 실험

2.1 소재

금속 플라스틱 접합강도 실험을 위해 사용한 금속은 용융아연도금고장력 강판(SGAFC 590, Hyundai steel)이고, 플라스틱은 40%의 유리섬유가 포함된 PPS (1140A6, Polyplastics USA)이며. 강판과 플라스틱의 인장강도는 각각 652, 210 MPa이다. ISO 19095규격을 적용하여 강판과 플라스틱의 시편 크기는 Fig. 1과 같이 각각 18 mm × 45 mm × 1.2 mm, 10 mm × 45 mm × 3 mm이며, 접합부 영역은 10 mm × 5 mm이다.

2.2 미세 패턴 레이저 가공 및 플라즈마 처리

강판의 끝 부분에 위치한 접합부 영역(10 mm × 5 mm)에 피코초 레이저 가공기(μ-Lab-S1, Kortherm)를 이용하여 원형, 사각형, 다이아몬드형, 육각형 등 4가지 종류의 미세 패턴을 1차 가공하였으며, 레이저 가공기 주요 사양은 레이저 파워 500 W, 파장 355 nm, 펄스 폭 12 ps, 반복 주파수 300 kHz, 빔 크기

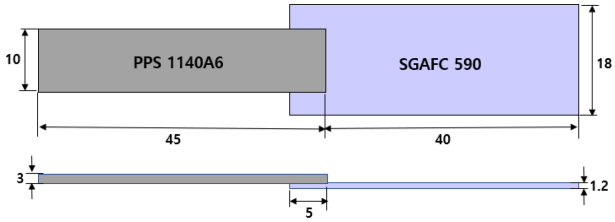


Fig. 1 The geometry of the joint part of SGAFC 590 and PPS 1140A6

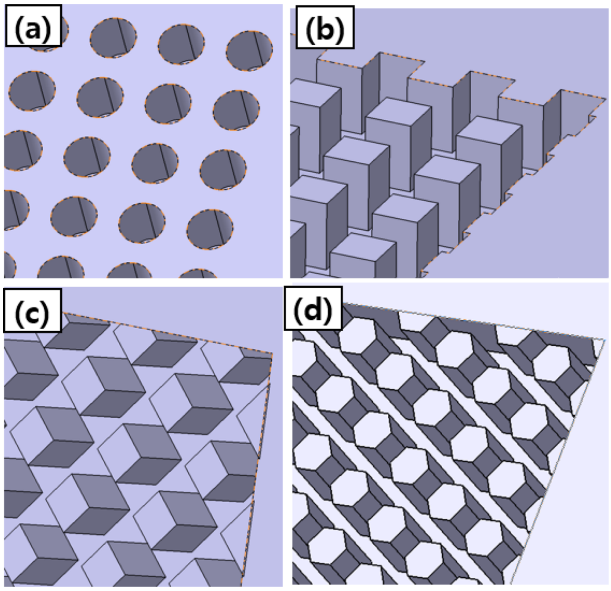


Fig. 2 1st Patterns of laser surface texturing: (a) Circle, (b) Rectangular, (c) Diamond, (d) Hexagon

20 μm이며, 스캔속도는 100 mm/s이다. 레이저 가공한 시편은 초음파세척기를 사용하여 클리닝하였다.

Fig. 2는 1차 가공 패턴을 나타낸 것으로 원형 패턴은 직경 100 μm, 깊이 150 μm, 원 사이의 간격 50 μm로서 음각 가공하였고, 사각형 및 다이아몬드형 패턴은 변의 길이 75 μm, 깊이 110 μm, 간격 75 μm로 양각 가공하였다. 또한 육각형 패턴은 변의 길이 69 μm, 깊이 200 μm, 간격 80 μm로 양각 가공하였다.

레이저 패턴 가공과 함께 플라즈마 표면처리가 접합강도에 미치는 효과를 확인하기 위하여 원형, 사각형, 다이아몬드형, 육각형 등 4가지 종류의 1차 레이저 가공 패턴 시편과 에칭 시편에 각각 플라즈마 표면처리를 수행하였다. 이때 진공 플라즈마 장비(AVP -125G-2-T, AETP)를 사용하였으며, 진공도 0.4 torr, 출력 1,000 W, 노즐 높이 420 mm, CDA (Clean Dry Air) Gas 유량 100 sccm, 표면처리 시간 10분을 적용하였다.

2.3 사출금형 설계

금속 인서트 사출성형 실험을 수행하기 위하여 Fig. 3과 같이 스프루(길이 72 mm, 지름 3.5–7.275 mm), 러너(길이 14.4 mm, 지름 5 mm), 게이트(길이 3.07 mm, 깊이 1.5 mm, 폭 3.9–5 mm)로 구성된 사출금형을 설계하였다. 또한 사출성형 공정에서

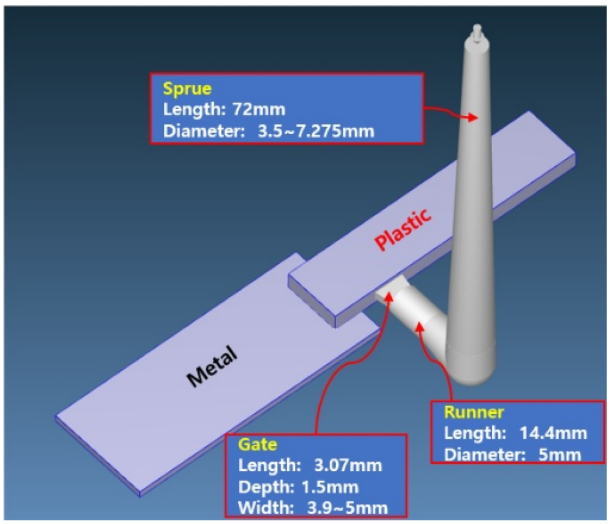


Fig. 3 Schematics of sprue, runner and gate

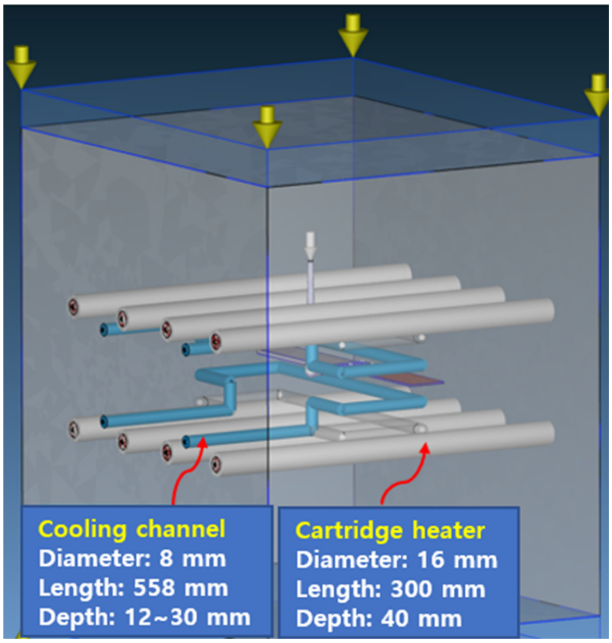


Fig. 4 Layout of cartridge heaters and cooling channels

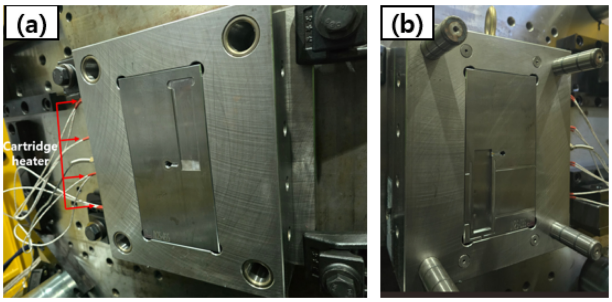


Fig. 5 Photograph of (a) Stationary mold and (b) Movable mold

수지가 미세 패턴 안으로 침투할 수 있도록 금형을 가열하기 위하여 Fig. 4와 같이 상측과 하측에 각각 4개의 카트리지 히터를 설치하고, 또한 냉각채널을 상측과 하측에 각각 1개씩 설치하였다. Fig. 5는 금속 인서트 사출성형 실험을 위해 제작한 고정측 금형과 가동측 금형을 나타낸다.

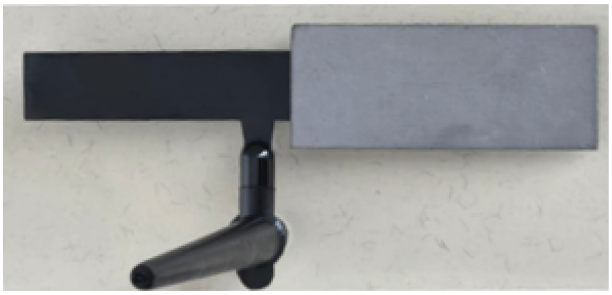


Fig. 6 Photograph of metal insert molded specimen

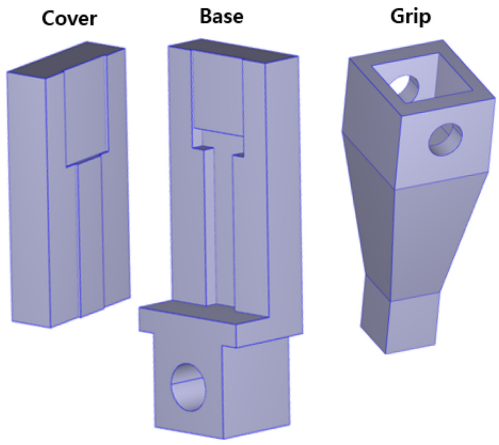


Fig. 7 Schematics of jig for bonding strength test

2.4 금속 인서트 사출성형

핫 플레이트(PC-6200, Corning)를 이용하여 120°C로 가열한 고장력강판을 금형의 고정측에 인서트하고, 전동식 사출성형기(Roboshot α-S250iA, FANUC)를 사용하여 PPS 수지를 사출성형하였다. 성형조건은 수지온도 307°C, 금형온도 150°C, 사출속도 20 mm/s, 보압크기 25 MPa, 보압시간 2초이며, Fig. 6은 금속 인서트 사출성형 시편을 나타낸다.

2.5 접합강도 측정

금속과 플라스틱의 두께가 각각 1.2, 3 mm로 서로 다르기 때문에 인장 전단시험 과정에서 발생하는 굽힘모멘트를 방지하기 위하여 Fig. 7과 같이 커버, 베이스, 그립으로 구성된 지그를 설계하였다. 시편의 플라스틱 파트를 지그의 베이스에 삽입하고 커버를 이용하여 고정시킨 후 베이스 하단부에 그립을 핀으로 연결하여 인장시험기에 장착하였다.

Fig. 8과 같이 인장시험기(AUTOGRAPH AGX-1kNVD, Shimadzu)를 사용하였으며, ISO 19095 시험 규격에 따라 10 mm/min의 일정한 크로스헤드 속도로 시편이 파단될 때까지 인장하여 최대 접합력을 측정하고, 접합강도(접합력/접합부 면적)를 계산하였다.

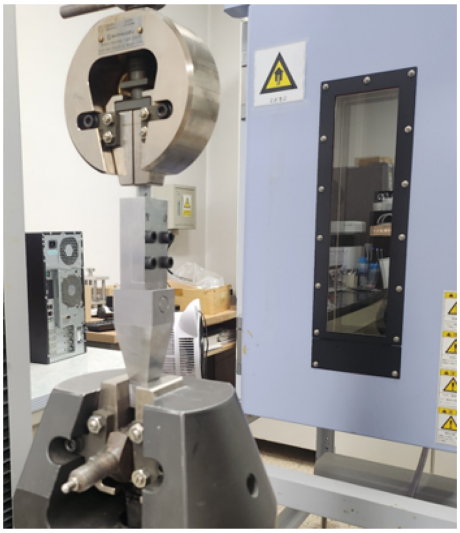


Fig. 8 Tensile test for bonding strength

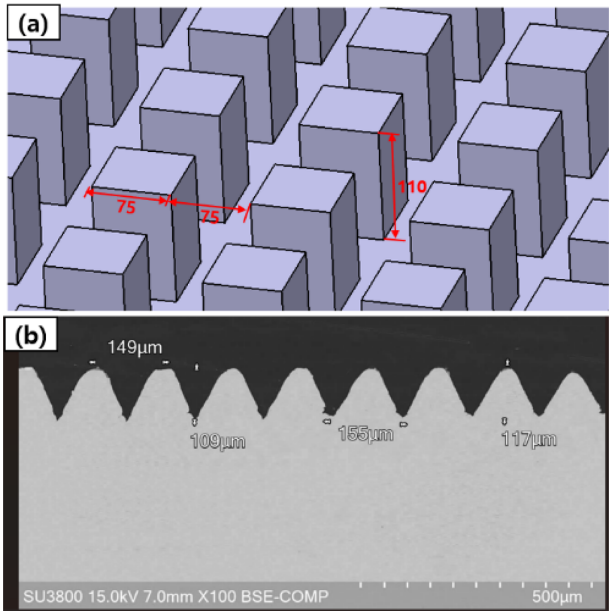


Fig. 9 1st rectangular pattern: (a) Design, (b) Measurement (×100)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 레이저 가공 패턴 형상

1차 레이저 가공 패턴 형상을 확인하기 위하여 시편제작기(TechCut5x, Allied High Tech Products)를 사용하여 단면을 절단하고, 3D 금속현미경(MM-400 Stand, Nikon)으로 패턴 형상을 측정하였다. Figs. 9와 10은 각각 1차 가공한 사각형과 육각형 패턴에 대한 설계와 측정 결과를 비교한 것이다. 레이저 가공 치수는 설계와 유사하지만 패턴 형상이 설계와 같이 직각으로 가공되지 못함을 알 수 있다. 특히 사각형 패턴의 경우 골부분이 V 홈 형태로 가공되어 있음을 볼 수 있다. 사각 및 육각 패턴의 깊이인 110, 200 μm에 비해 패턴 사이의 간격이 각각

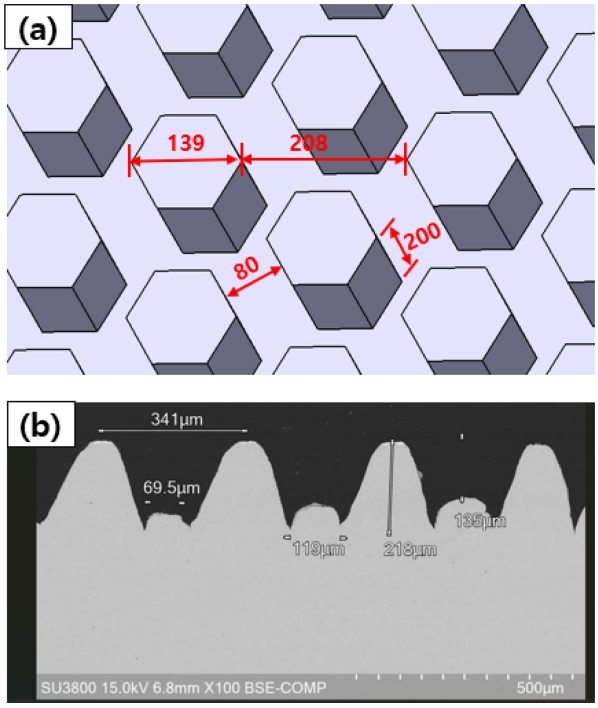


Fig. 10 1st hexagon pattern: (a) Design, (b) Measurement (×100)

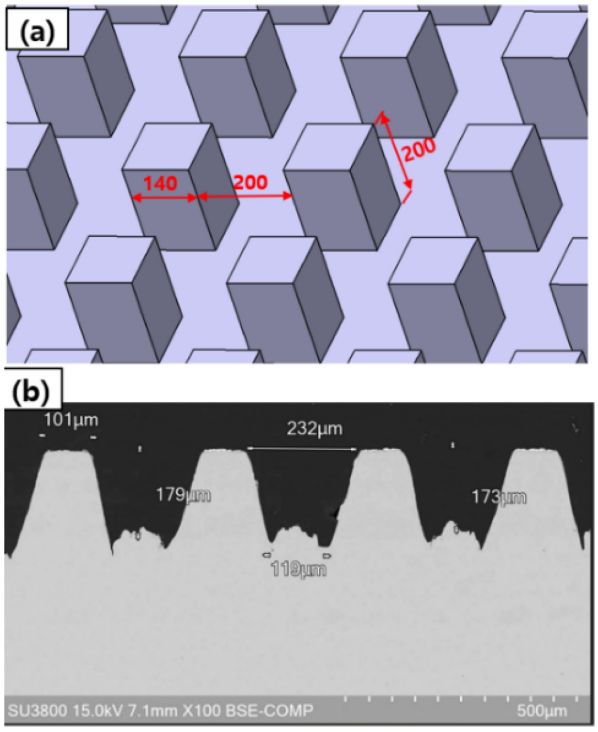


Fig. 11 2nd rectangular pattern: (a) Design, (b) Measurement (×100)

75, 80 μm로서 매우 작기 때문에 가우시안 빔의 불균일한 에너지 분포[20]에 의해 발생한 테이퍼링 현상에 기인한 것으로 판단된다.

사용한 레이저 가공기의 빔 특성을 고려하여 패턴 사이의 간격을 깊이의 2/3이상 크게 설계하는 것이 필요한 것으로 판단하고,

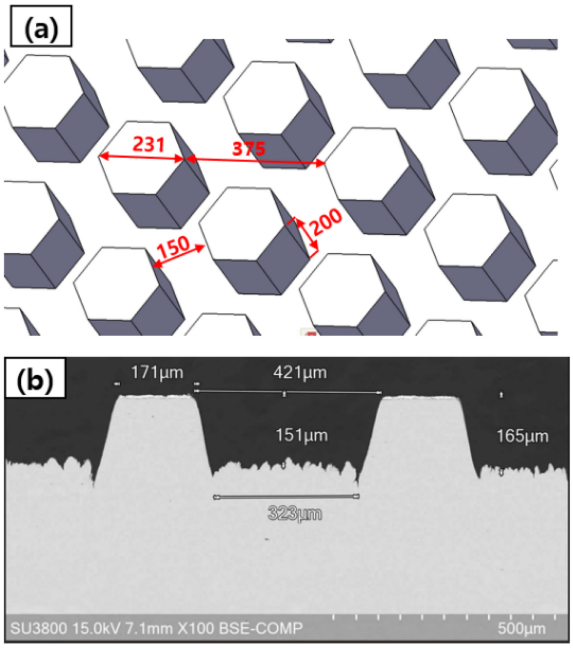


Fig. 12 2nd hexagon pattern: (a) Design, (b) Measurement (×100)

사각형과 육각형 패턴의 크기를 수정하여 2차 가공을 수행하였다. 2차 가공을 위한 사각형 패턴은 변의 길이 140 μm, 깊이 200 μm, 간격 200 μm, 그리고 육각형 패턴은 변의 길이 115 μm, 깊이 200 μm, 간격 150 μm로 각각 양각 가공하였다. Fig. 11은 2차 가공한 사각형 패턴에 대한 설계와 측정결과를 비교한 것으로 설계에서 패턴 사이의 간격을 깊이와 동일한 200 μm로 증가시킨 결과 Fig. 9와 다르게 골 부분에서 119 μm의 공간이 형성되고, 수지 침투 면적이 약 3.8배 증가하였다. 또한 2차 가공한 육각형 패턴에서는 간격을 깊이의 2/3수준인 150 μm로 증가시킨 결과 Fig. 12에서 나타난 바와 같이 설계와 유사한 가공 치수를 얻을 수 있으며, 매우 평탄한 골 부분이 형성되어, 수지 침투 면적이 약 1.5배 증가하였다.

3.2 접합강도

3.2.1 1차 가공 패턴

원형, 사각형, 다이아몬드형, 육각형 등 4가지 종류의 1차 패턴을 각각 3개씩 레이저 가공하고, 가공된 시편을 금형에 인서트하여 사출성형하였다. Fig. 13은 인장시험을 통해 측정한 접합강도를 나타낸다. 육각형 패턴의 경우 접합강도 편차는 13%로 가장 낮고, 평균값은 34.8 MPa로 가장 높았으며, 나머지 패턴의 경우 접합강도 편차는 24–36%이고, 평균값은 15.3–20.3 MPa로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 사각형과 다이아몬드형 패턴이 원형 패턴에 비해 접합강도가 다소 낮은 원인은 Fig. 9에서 고찰한 바와 같이 1차 가공한 패턴 형상이 직각이 아닌 테이퍼진 삼각형 형상으로서 골 부분이 V자형 홈 모양으로 가공되어 사출성형 공정에서 수지가 제대로 침투하지 못한데 기인한 것으로 판단된다. 반면에 육각형 패턴의 경우에는 골 부분의 간격이 넓어 수지의 침투가 상대적으로 원활하고 안정적이기 때문에,

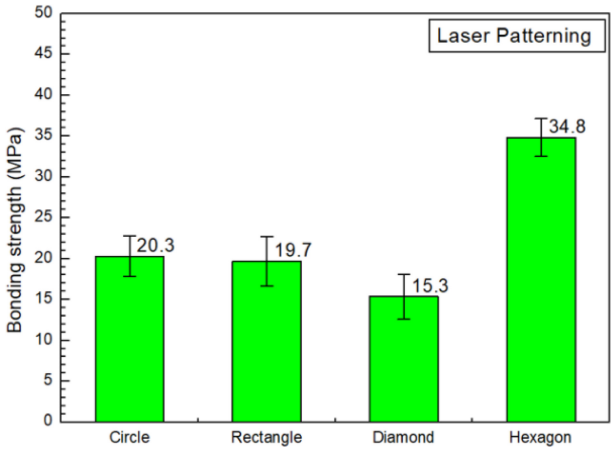


Fig. 13 Bonding strength under 1st laser texturing patterns

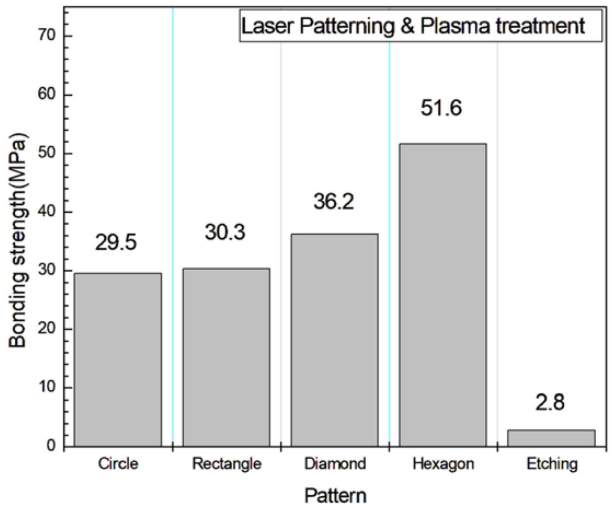


Fig. 14 Bonding strength for 1st laser patterns with plasma treatment

시편간 접합강도 편차가 상대적으로 작으며, 높은 접합강도를 나타낸 것으로 판단된다.

레이저를 사용한 1차 미세패턴 가공 이후 진공 플라즈마 표면처리를 수행한 강판을 인서트 사출성형한 시편에 대해 접합강도를 측정하였다. Fig. 14에서 나타난 바와 같이 플라즈마 표면처리를 통해 접합강도가 1.4–2.3배 높아졌다. 특히, 원형 패턴에 비해 사각형과 다이아몬드형 패턴에서 플라즈마 처리의 효과가 각각 1.2배, 3.0배 크게 나타났다. 그 이유는 표면 에너지 활성화를 통해 앞에서 기술한 V자형 홈 형상을 갖는 골 부분으로 수지의 침투가 더욱 원활하게 이뤄진데 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 15는 플라즈마 표면처리가 이뤄진 사각형과 육각형 패턴에 대해 파단된 금속 접합면을 나타낸 것이다. 사각형과 육각형 패턴의 금속 접합면에서 접합부 면적 대비 PPS 잔류 비율은 각각 12.6%, 60.6%로 나타났다. 따라서 사각형에 비해 육각형 패턴의 그루브 안에 더 많은 PPS가 침투하고 접합강도가 더욱 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

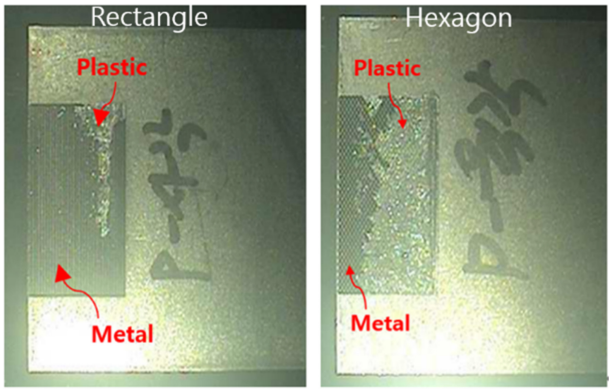


Fig. 15 Top view of the metal fracture surface in the joint area (×20)

본 실험을 통해 육각형 패턴의 레이저 가공과 플라즈마 표면처리를 병행할 경우 접합강도를 51.6 MPa까지 높일 수 있음을 알 수 있다. 다만 플라즈마 표면처리의 효과는 레이저 가공 패턴의 형상과 크기에 따라 크게 달라질 수 있는 있을 것으로 판단된다.

3.2.2 2차 가공 패턴

패턴 사이의 간격을 증가시켜 2차 가공한 사각형과 육각형 패턴을 적용한 강판을 인서트 사출성형하고, 인장시험을 통해 접합강도를 측정하였다. Fig. 16은 1차와 2차 가공 패턴의 접합강도를 비교한 것이다. 사각형 패턴은 2.2배 증가한 43.4 MPa, 육각형 패턴은 1.4배 증가한 47.4 MPa로 접합강도가 크게 증가하였다. 특히, 2차 가공한 사각형 패턴의 경우 접합강도 편차는 1차 가공의 30%에서 6%로 크게 감소하였으며, 또한 1차 가공한 육각형 패턴보다 오히려 더 높은 접합강도를 나타냈다. 그 원인은 Fig. 11에서 고찰한 바와 같이 2차 가공한 사각형 패턴의 골 부분에서 119 μm의 공간이 균일하게 확보되어 사출성형 공정에서 PPS 수지가 골 안쪽 부분까지 원활하게 침투하였기 때문으로 판단된다. 실험을 통해 1차 및 2차 가공 모두 육각형이 사각형 패턴에 비해 접합강도 향상에 더욱 유리한 것으로 나타났다.

3.3 파단면 분석(1차 가공 패턴)

1차 가공 패턴에서의 접합부 영역 파단 메커니즘을 파악하기 위하여 인장시험 이후 파단된 접합면에 대해 주사전자현미경(SU3800, Hitachi)을 사용하여 SEM (Scanning Electron Microscope) 분석과 에너지 분산 X선 분광(EDS, Energy Dispersive X-ray Spectroscope) 분석을 실시하였다. Fig. 17은 사각형 패턴에 대해 파단된 접합면을 나타낸 것으로 금속부 패턴 사이에 소량의 PPS가 붙어 있음을 볼 수 있다. 인장시험 과정에서 하중이 접합부 결합력을 초과하면 그루브에 채워진 PPS가 그루브 사이를 관통하며 파단이 일어남을 알 수 있으며, Fig. 18에서 금속 표면에 아주 미세한 탄소 신호가 검출됨을 볼 수 있다.

한편, 육각형 패턴의 경우 그루브 안으로 깊이 침투해 있는 PPS가 인장응력을 받게 되어 금속 안에서 부러지는 현상이 발생하게 된다. 이로 인해 Fig. 19에서 보는 바와 같이 금속 강판의

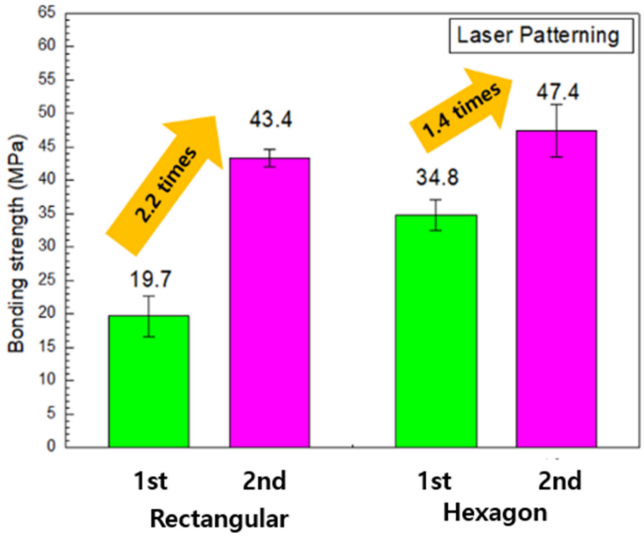


Fig. 16 Comparison of bonding strengths between 1st and 2nd patterns

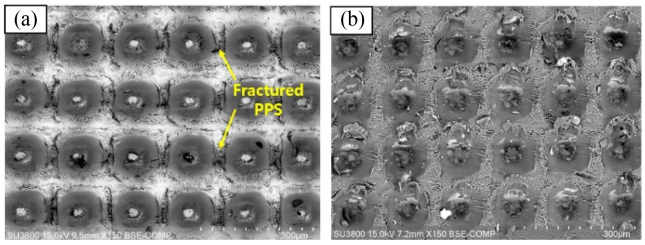


Fig. 17 Top-sectional SEM images for rectangular pattern (×150): (a) Metal, (b) Plastic

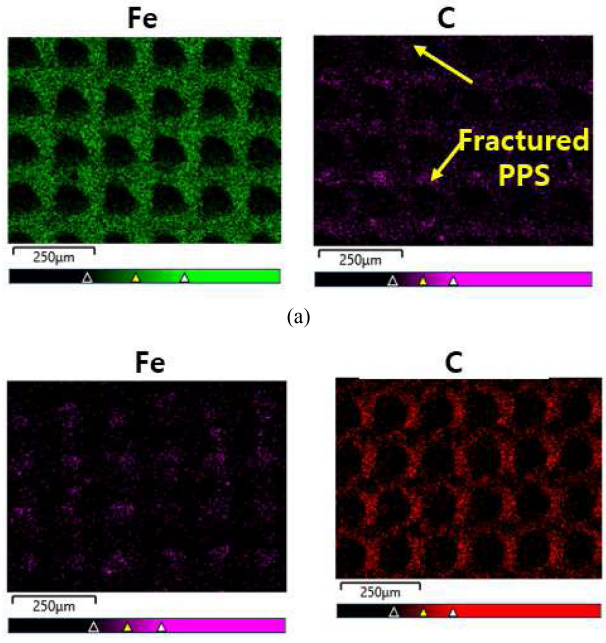


Fig. 18 EDS elemental distribution maps for rectangular pattern (Scale bar: 250 μm): (a) Metal, (b) Plastic

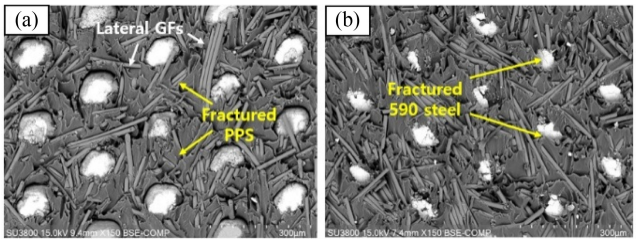
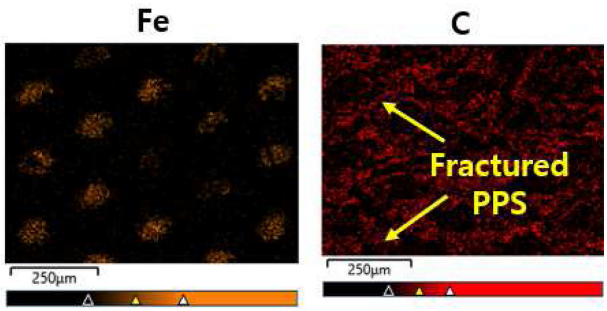
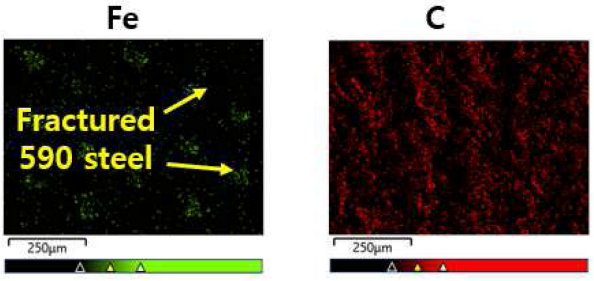


Fig. 19 Top-sectional SEM images for hexagon pattern (×150): (a) Metal, (b) Plastic



(a)



(b)

Fig. 20 EDS elemental distribution maps for hexagon pattern (Scale bar: 250 μm): (a) Metal, (b) Plastic

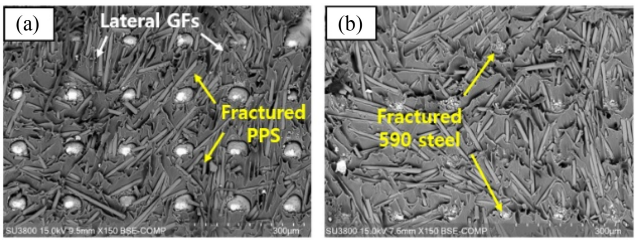
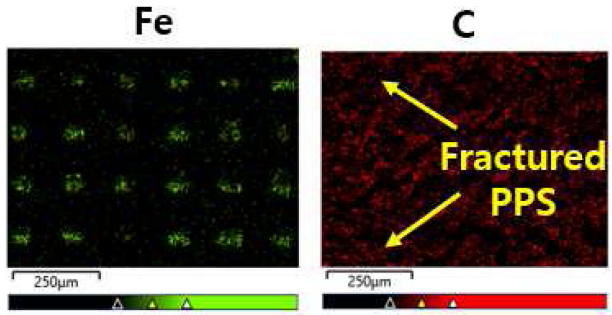


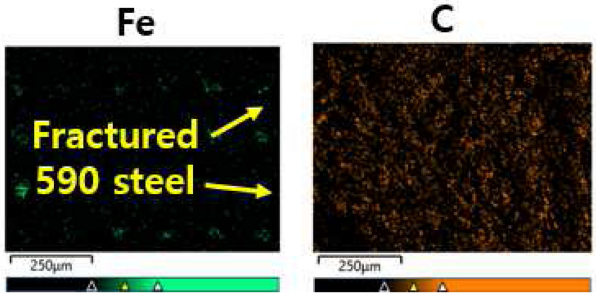
Fig. 21 Top-sectional SEM images for rectangular pattern with plasma treatment (x150): (a) Metal, (b) Plastic

그루브 안에 유리섬유와 함께 PPS가 다수 부러진 상태로 남아 있음을 알 수 있으며, Fig. 20을 통해 금속 표면에서 상당량의 탄소 신호가 검출됨을 볼 수 있다.

Fig. 21은 사각형 패턴에 플라즈마 표면처리를 한 경우에 대한 파단면 SEM분석 결과이다. 플라즈마 처리로 인해 사출성형 공정에서 PPS가 그루브 골 부분까지 침투하고 금속 강판의



(a)



(b)

Fig. 22 EDS elemental distribution maps for rectangular pattern with plasma treatment (Scale bar: 250 μm): (a) Metal, (b) Plastic

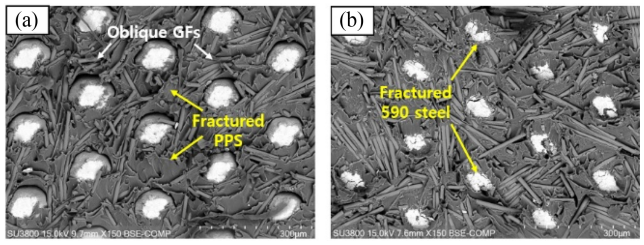


Fig. 23 Top-sectional SEM images for hexagon pattern with plasma treatment (×150): (a) Metal, (b) Plastic

그루브 안에 유리섬유와 함께 PPS가 다수 부러진 상태로 남아 있으며, 금속 표면에서 많은 탄소 신호가 검출되고 있음을 Fig. 22에서 확인할 수 있다. 결국 앞에서 고찰한 바와 같이 플라즈마 표면처리를 할 경우 사각패턴의 접합강도는 19.7에서 30.3 MPa로 증가하는 것으로 나타났다.

육각형 패턴에 플라즈마 표면처리를 한 경우 Fig. 23에서 보는 바와 같이 강판의 파단면에서 다량의 부러진 유리섬유가 파단면과 수직방향으로 경사지게 배향하고 있으며, Fig. 24의 강판 표면에서 다량의 탄소 신호가 검출되고 있다. 이러한 경향은 플라즈마 처리를 하지 않은 육각형 패턴에 대한 결과인 Fig. 19에서 부러진 많은 유리섬유들의 배향이 파단면과 평행한 전단방향으로 분포되어 있는 것과 대비되는 결과이다. 결과적으로 플라즈마 처리를 통해 전단방향으로의 강도가 높아지고, 접합강도가 34.8에서 51.6 MPa로 증가한 것으로 판단된다.

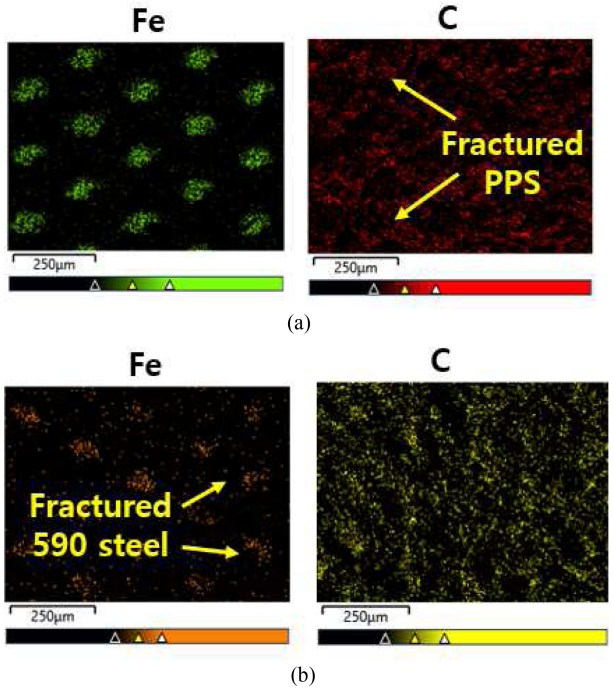


Fig. 24 EDS elemental distribution maps for hexagon pattern with plasma treatment (Scale bar: 250 μm): (a) Metal, (b) Plastic

4. 결론

강판 표면에 미세 패턴을 레이저 가공하고, 인서트 사출성형과 인장 전단시험을 통해 금속과 플라스틱 사이의 접합강도에 대해 실험적으로 고찰하였으며, 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

레이저 가공기의 빔 특성을 고려하여 패턴 설계에서 패턴 사이의 간격을 깊이의 2/3이상 크기로 설계하여 가공된 패턴의 골 부분에서 충분한 공간을 확보하고, 사출성형 공정에서 수지가 골 안쪽 부분까지 원활하게 충전되도록 하는 것이 접합강도를 높이기 위해 중요함을 알 수 있었다.

사각형 패턴의 경우 패턴 사이의 간격을 75에서 200 μm로 증가시켰을 때 접합강도는 19.7에서 43.4 MPa로 2.2배 증가하였다.

육각형 패턴의 경우 패턴 사이의 간격을 80에서 150 μm로 증가시켰을 때 접합강도는 34.8에서 47.4 MPa로 1.4배 증가하였다.

미세 패턴을 레이저 가공하고, 동시에 플라즈마 표면처리를 실시한 경우 접합강도가 1.4–2.3배 증가했으며, 원형 패턴에 비해 사각형과 다이아몬드형 패턴에서 플라즈마 처리효과가 각각 1.2배, 3.0배 크게 나타났다.

SEM분석 및 EDS분석을 통해 육각형 패턴에 플라즈마 표면처리를 한 경우 강판의 파단면에서 다량의 부러진 유리섬유가 파단면과 수직방향으로 경사지게 배향하고 있었으며, 강판 표면에서 다량의 탄소 신호가 검출됨을 확인할 수 있었다.

육각형이 사각형 패턴에 비해 접합강도 향상에 더욱 유리한 것으로 나타났으며, 육각형 패턴의 크기, 간격, 깊이를 최적화할 경우 접합강도를 더욱 높일 수 있을 것이다.

뿐만 아니라 향후 플라즈마 표면처리 조건 최적화, 가우시안 빔을 보완하기 위한 Top-hat 빔 기술개발 등 추가적인 연구를 통해 접합강도를 더욱 높일 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 산업통상부 신산업 대응 차세대 공통·핵심 뿌리기술 개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(No. RS-2025-23323686).

REFERENCES

1. Katayama, S., Kawahito, Y., (2008), Laser direct joining of metal and plastic, Scripta Materialia, 59(12), 1247-1250.
2. Rodríguez-Vidal, E., Lambarri, J., Soriano, C., Sanz, C., Verhaeghe, G., (2014), A combined experimental and numerical approach to the laser joining of hybrid Polymer–Metal parts, Physics Procedia, 56, 835-844.
3. Jung K.-W., Kawahito Y., Takahashi M., Katayama S., (2013), Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to aluminum alloy, Journal of Laser Applications, 25(3), 032003.
4. Nagatsuka, K., Yoshida, S., Tsuchiya, A., Nakata, K., (2015), Direct joining of carbon-fiber–reinforced plastic to an aluminum alloy using friction lap joining, Composites Part B: Engineering, 73, 82-88.
5. Shahmiri, H., Movahedi, M., Kokabi, A., (2017), Friction stir lap joining of aluminium alloy to polypropylene sheets, Science and Technology of Welding and Joining, 22(2), 120-126.
6. Amancio-Filho S. T., Bueno C., Dos Santos J. F., Huber N., Hage Jr E., (2011), On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber-reinforced polymer composite hybrid structures, Materials Science and Engineering: A, 528(10-11), 3841-3848.
7. Wagner G., Balle F., Eifler D., (2013), Ultrasonic welding of aluminum alloys to fiber reinforced polymers, Advanced Engineering Materials, 15(9), 792-803.
8. Balle F., Wagner G., Eifler D., (2009), Ultrasonic metal welding of aluminium sheets to carbon fibre reinforced thermoplastic composites, Advanced Engineering Materials, 11(1-2), 35-39.
9. Yeh R.-Y., Hsu R.-Q., (2016), Development of ultrasonic direct joining of thermoplastic to laser structured metal, International Journal of Adhesion and Adhesives, 65, 28-32.
10. Ramani, K., Moriarty, B., (1998), Thermoplastic bonding to metals via injection molding for macro-composite manufacture, Polymer Engineering & Science, 38(5), 870-877.
11. Ramani, K., Zhao, W., (1997), The evolution of residual stresses in thermoplastic bonding to metals, International Journal of Adhesion and Adhesives, 17(4), 353-357.

12. Ramani, K., Tagle, J., (1996), Process-induced effects in thin-film bonding of PEKEKK in metal-polymer joints, Polymer Composites, 17(6), 879-886.

13. Sasaki, H., Kobayashi, I., Sai, S., Omoto, T., Mori, K., (1998), Direct adhesion of nylon resin to stainless steel plates coated with triazine thiol polymer by electropolymerization during injection-molding, Japanese Journal of Polymer Science and Technology, 55(8), 470-476.

14. Berry, D. H., Namkanisorn, A., (2005), Fracture toughness of a silane coupled polymer-metal interface: Silane concentration effects, The Journal of Adhesion, 81(3-4), 347-370.

15. Kimura, F., Kadoya, S., Kajihara, Y., (2016), Effects of molding conditions on injection molded direct joining using a metal with nano-structured surface, Precision Engineering, 45, 203-208

16. Kajihara, Y., Tamura, Y., Kimura, F., Suzuki, G., Nakura, N., Yamaguchi, E., (2018), Joining strength dependence on molding conditions and surface textures in blast-assisted metal-polymer direct joining, CIRP Annals, 67(1), 591-594.

17. Taki, K., Nakamura, S., Takayama, T., Nemoto, A., Ito, H., (2016), Direct joining of a laser-ablated metal surface and polymers by precise injection molding, Microsystem Technologies, 22(1), 31-38.

18. Zhao, S., Kimura, F., Kadoya, S., Kajihara, Y., (2020), Experimental analysis on mechanical interlocking of metal–polymer direct joining, Precision Engineering, 61, 120-125.

19. Kim, Y., Park, C., (2025), Effects of laser surface texturing and injection molding parameters on the direct joining of AHSS and PA 6, Journal of Welding and Joining, 43(1), 92-102.

20. Le, H., Penchev, P., Henrottin, A., Bruneel, D., Nasrollahi, V., Ramos-de-Campos, J. A., Dimov, S., (2020), Effects of top-hat laser beam processing and scanning strategies in laser micro-structuring, Micromachines, 11(2), 221.



Ho-Sang Lee
Emeritus Professor in the Department of Aeronautical & Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation. His research interest is mold engineering.
E-mail: lhs@ut.ac.kr