

3D 프린팅 된 금속-고분자 맞물림 구조의 유도 가열 공정을 이용한 접합 기술 연구

육주찬*, 김영서*, 박석희*[#]

*부산대학교 기계공학부

A Study on Joining Technology of 3D Printed Metal-polymer Interlocking Structures Using an Induction Heating Process

Ju-Chan Yuk*, Yeong-Seo Kim*, Suk-Hee Park*[#]

*School of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received 22 December 2021; received in revised form 19 January 2022; accepted 28 January 2022)

ABSTRACT

The demand for metal-polymer joining technology have been increasing, especially in the industrial fields of automotive and aerospace, which require the manufacturing of various lightweight parts. Conventional joining processes have technical hurdles on aspects such as thermal degradation, need for chemical surface treatment, or complicated process settings. These issues can be alleviated by employing interlocking structures for the metal-polymer joined interface. In this study, we joined 3D-printed metal and polymer parts, which were featured with 3D-printed interlocking structures at their interface. By using high frequency induction heating, the joined region could be locally heated to reduce the thermal degradation and distortion of polymer parts. In addition, through the adjustment of interface morphologies and compression conditions, the polymer flow could be optimized to completely fill the interlocking grooves on metal parts, thereby achieving high joining strength. This suggests feasible guidelines for manufacturing metal-polymer joined structures involving 3D-printed architectures.

Keywords : High Frequency Induction Heating(고주파 유도 가열), Interlocking Structure(맞물림 구조), 3D Printing(3D 프린팅)

1. 서 론

전 세계적으로 환경문제와 관련하여 연비 개선 및 배기가스의 감축은 자동차, 항공, 우주 등의 산업에서 친환경을 넘어 반드시 해결해야 하는 과제가 되었다. 따라서 여러 산업 분야에서 부품

경량화는 큰 화두이다. 특히 자동차는 차체 무게 10%를 줄이면 연비는 6% 개선이 되며 전기차의 경우 배터리 용량의 한계로 인해 주행거리를 늘리기 위한 경량화는 필수이다^[1]. 이러한 경량화에 대한 니즈로 인해 고장력강, Ti, Al, Mg 등 경량 금속과 더불어 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)는 높은 비강도 및 비강성을 가지고 있어 자동차, 항공 산업에서 널리 활용되어왔다^[2]. 일반적으로 경량 금속의 경우 고분자에 비해 높은 무

Corresponding Author : selome815@pusan.ac.kr

Tel: +82-51-510-2894

게 및 제한된 가공성의 단점을 가지고 있으며, 고분자의 경우는 낮은 강도의 문제점을 가지고 있다. 따라서 단일 소재가 갖는 재료적 특성의 한계를 상호 보완하기 위해 금속-고분자를 접합하는 기술이 활발히 사용되고 있다^[2-3]. 현재까지의 금속과 고분자의 접합 기술들은 기계적 체결, 접착제, 레이저, 초음파, 마찰열을 이용한 공정들을 주로 활용해왔다. 그러나 기계적 체결과 접착제를 이용한 공정은 응력 집중, 사전 표면처리, 추가적인 무게 증가, 갈바닉 부식 및 사용 환경에서의 열화 등의 문제가 존재한다^[4]. 또한, 레이저 용접 공정의 경우 고가의 레이저 장비와 클램핑 장치 기술이 요구되며, 초음파 용접은 장비 구성이 비교적 복잡하며 접합 면적 및 형상의 제약이 존재한다. 마찰교반용접은 낮은 접합 강도 및 접합부의 형상이 제한된다는 단점을 가지고 있다. 여기까지 나열한 공정들은 성형 후 접합에 해당하는 방법이며, 이와는 별개로 성형 중 접합공정(in-situ type)으로 IMDJ(Injection Molded Direct Joining) 기술이 있다^[5]. 이 기술은 금속 몰드에 화학적 표면처리를 통해 형성된 미세요철구조에 사출 공정에 의한 고분자 용융체의 침투로 접합이 된다. 하지만 이러한 공정은 화학적 에칭 및 레이저 가공 등 특수한 표면처리가 필요하다. 한편 맞물림 구조(interlocking structure)를 이용한 이종 재료의 결합은 자연에서 주로 관찰되며 취성을 갖는 재료와 연성을 갖는 재료를 상호 접합하여 인성이 향상되었음이 확인되었다^[6]. 따라서 이러한 맞물림 구조는 금속, 고분자 및 세라믹 재료의 접합 기술 전반에 걸쳐 활용되고 있다. 예를 들어 두 유리의 접합을 위해 유리 계면에 맞물림 구조를 형성하는 연구와^[7], 금속과 고분자를 이종 접합하기 위한 맞물림 구조 연구 등이 보고된 바 있다^[8]. 금속-고분자 이종 접합 연구에서는 금속 3D 프린팅 공정으로 제작된 맞물림 구조 위에 고분자를 3D 프린팅으로 출력 후 압축 공정을 통해 접합 구조물을 제작하였으며 금속의 여러 계면 구조에 따른 접합 강도를 비교하였다. 그러나 기존 연구에서는 고분자의 초기 형태에 따른 고분자의 침투 양상 및 접합 공정 조건에 따른 고분자의 유동 특성과 기계적 물성에 관한 연구가 부족하다. 따

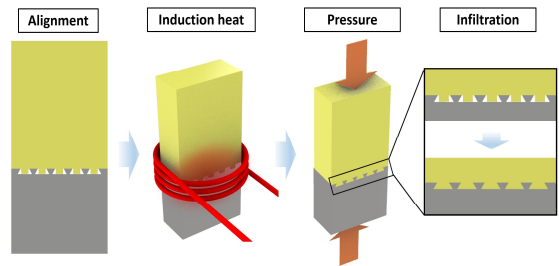


Fig. 1 Schematic illustration of metal-polymer joining process using induction heating

라서 본 연구에서는 금속의 계면 구조가 아닌 고분자의 계면 구조에 따른 접합의 형태를 비교하였으며 접합 조건에 따른 접합 강도의 영향을 분석하였다. 또한 확립된 조건을 바탕으로 금속의 맞물림 각도에 따른 접합 강도의 경향성을 파악하였으며 금속-고분자 접합 시편과 고분자 시편과의 물성을 비교했다.

2. 재료 및 방법

2.1 고주파 유도 가열을 통한 접합 공정

접합 공정을 수행하기 위해 먼저 금속과 고분자의 계면을 나란히 정렬하였다(Fig. 1). 그 후 고분자에 열과 압력을 가하는 공정을 통해 계면이 적절히 변형되어 맞물리게 한다. 이러한 접합 공정은 시편의 불필요한 열변형을 최소화하기 위하여 전체가 아닌 금속-고분자 계면만을 가열하는 수단이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 고주파 유도 가열기를 사용하였다. 고주파 유도 가열기는 코일에 흐르는 고주파 전류에 의해 발생하는 유도 자기장이 코일 사이에 있는 전도체를 지나면서 코일 내부에 있는 전도체에 유도전류가 발생한다. 이때 전도체에 와류(eddy current)가 발생하여 전류 손실에 의한 열이 발생한다^[9]. Fig. 1에서와 같이 금속-고분자 계면 주변에서 고주파 유도 가열의 원리로 금속 파트에 열을 가하면 두 소재가 맞닿는 면을 통하여 열전도가 일어나 고분자는 유동성을 가지게 된다. 본 연구에서 사용한 금속은 Ti6Al4V를, 고분자는 ABS(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)를 사용하였으며 ABS의 유리전이온도(glass transition temperature)는 약 100°C이다^[10]. 따라서 본 연구에서는 적절한 유

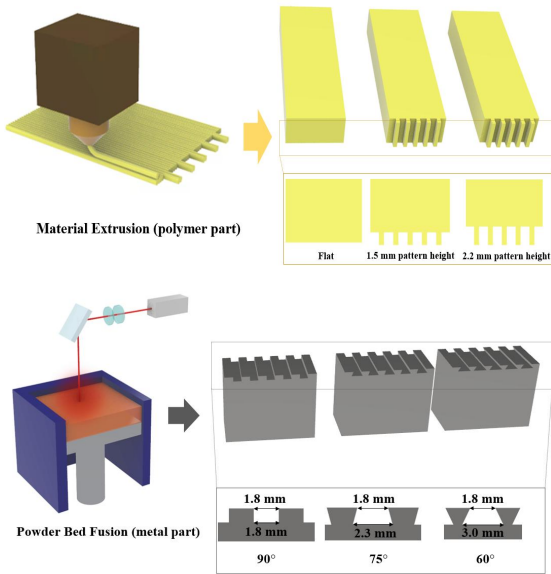


Fig. 2 Fabrication of metal and polymer specimens using additive manufacturing processes

동성을 갖도록 가열 온도 120°C 에서 접합 공정을 진행하였다. 그리고 압축 조건에 따른 접합 강도를 비교하는 실험은 서보 모터 방식의 속도 제어를 통해 진행했다.

2.2 3D 프린팅을 통한 시편 제작

본 연구에서 사용한 금속-고분자 시편은 각각 분말베드용융(PBF, Powder Bed Fusion) 공정을 통해 Ti6Al4V 파트를 제작했으며 재료 압출(ME, Material Extrusion) 공정으로 ABS 파트를 제작하였다. 프린팅 속도는 60mm/s, 프린팅 온도 260°C, 베드 온도 110°C, 층 높이 0.2mm, 노즐 직경 0.4mm, infill density 100%의 조건으로 출력했으며 출력 방향은 시편에 인장, 압축이 가해지는 것을 고려해 인장, 압축 방향과 나란한 방향으로 출력하였다. 계면의 형태에 따라 접합 성능이 달라지는 것을 관찰하기 위해 Ti6Al4V 파트의 맞물림 각 (interlocking angle)을 90°, 75°, 60° 세 종류로 제작하였고, ABS 파트는 계면의 패턴의 유무, 패턴의 높이를 달리하여 세 종류의 시편을 제작했다. 시편의 크기는 Ti6Al4V 파트는 폭 20mm 두께 10mm, 높이가

며 패턴의 높이 1mm 및 패턴 간의 거리는 1.8mm이다. 그리고 ABS 파트의 폭은 20mm, 두께 10mm, 높이가 70mm 및 패턴 간의 거리는 1.8mm로 제작했다.

2.3 접합 후 시편의 단면 관찰

접합 후 고분자 유동이 계면 바깥으로 흘러나오기 때문에 침투(infiltration) 양상을 관찰하기 어렵다. 따라서 고분자 유동이 금속의 계면 형상을 따라 적절히 이루어 졌는지 확인하기 위해 접합 후 다이아몬드 절단기를 사용하여 시편의 단면을 관찰하였다. 접합 후 접합된 시편이 충분히 식을 때까지 기다린 후 단면을 관찰하였다. 접합된 시편의 냉각은 상온 상태에서 진행되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 초기 형상에 따른 접합 후 형상 왜곡

본 연구에서는 3D 프린팅을 통해 형성된 계면 미세 패턴 형상의 변화에 따른 접합 특성을 관찰하였다. 금속 계면과 요철 없이 평면으로 접촉하는 고분자 시편, 금속의 패턴 부피와 일치하는 고분자 시편과 고분자의 계면 패턴이 금속의 패턴 부피보다 더 큰 시편에 대해 접합을 수행하였다(Fig. 3). 세 종류의 시편 모두 온도는 120°C, 압축 하중 속도 18mm/min, 압하량은 1.5mm으로 하였다. 우선 고분자의 계면 형상이 평면일 때 심한 형상 왜곡을 확인할 수 있다(Fig. 3(a)). 이는 계면 형상 패턴 돌출부가 금속 패턴 함몰부에 침투하는 과정에서 추가적인 유동이 발생하여 계면 바깥으로 흐르는 현상이다. 다음으로 금속의 패턴과 비슷한 부피를 갖도록 고분자 패턴의 높이를 1.5mm로 제작하였다. 접합 결과 계면 형상이 평면보다는 패턴이 있을 때 좌우로 고정이 되어 전체적인 형상왜곡은 감소하였으나 여전히 계면 바깥으로의 추가유동은 발생하였다(Fig. 3(b)). 이러한 추가유동을 완화하기 위해 계면 금속의 함몰 패턴 부피보다 크도록 고분자의 돌출 패턴 높이를 2.2mm로 제작하였으며 접합 결과 형상 왜곡이 크게 감소하였다(Fig. 3(c)). 세 종류

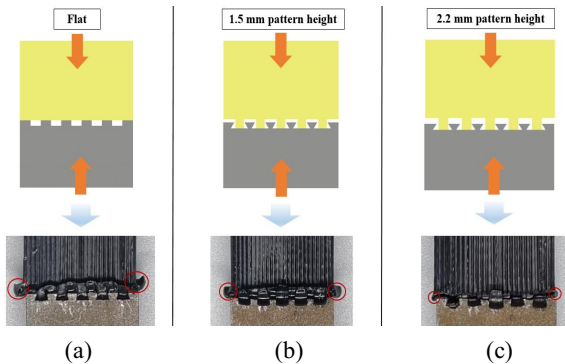


Fig. 3 Results of metal-polymer joined specimens with different interfacial patterns

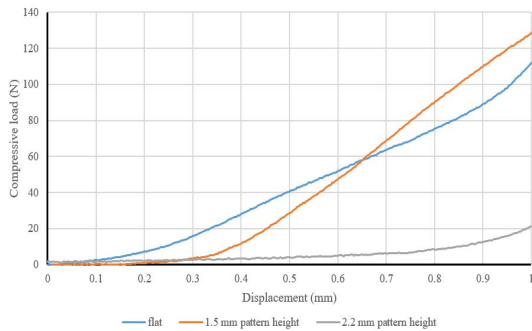


Fig. 4 Compressive load-displacement curves for metal-polymer joined specimens with different interfacial patterns

시편의 접합 공정 중에 기록된 압축 하중-변위 그래프를 비교하였을 때, 패턴 길이가 2.2mm인 시편의 경우 압축 하중이 다른 시편의 접합공정에 비하여 현저히 작은 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 4). 이렇게 접합 과정 중 상대적으로 작게 유지되는 압축 하중이 접합 계면에서의 과도한 유동이 일어나지 않게 하는 것으로 판단된다.

3.2 공정 조건에 따른 접합 후 계면 형태 및 접합 강도 비교

기존의 접합 공정 연구에서 열, 압력 및 시간과 같은 공정 변수를 조절하여 접합의 상태를 비교하는 연구들이 수행되었다^[11]. 충분하지 않은 열 및 압력 에너지로 인해 고분자의 유동이 채워지

지 않아 빈 공간이 형성되거나, 에너지가 과해서 열화나 수축이 일어나는 경우가 있었다. 따라서 본 연구에서는 압축 조건에 따른 접합 강도를 측정했으며 접합 후 침투 양상을 관찰했다. 압축 조건에 따른 강도를 비교하기 위해 압축 속도 및 시간을 제외한 다른 조건들은 동일한 환경에서 접합을 했다. 온도 120°C, 시험 횡수는 각 조건을 4번 시행했으며 금속 계면의 맞물림 각도는 75°이다. 압축 조건은 3가지의 다른 속도 18mm/min, 4.5mm/min, 2.25mm/min에 대해 접합 후 인장 시험을 진행했다. 압하량은 세 가지 속도의 시편 모두 동일하게 1.5mm으로 하였다. 실험 결과 압축 속도가 높은 18mm/min 에서 인장 강도가 가장 높은 것으로 나타났다(Fig. 5). 압축 속도를 빠르게 할 경우 짧은 시간에 동일한 변위를 가지기 때문에 더 큰 압축 힘이 가해진다. 따라서 계면에 있는 고분자는 압축 속도가 작은 경우에 비해 짧은 시간에 더 큰 압력과 변형률을 받게 된다. 이는 전단 박화(shear thinning)현상과 비슷한 경향을 보인다. 전단 박화 현상은 플라스틱 수지와 같은 비뉴턴 형 유체에 대해 전단력의 속도가 클수록 전단 변형률이 증가하여 고분자들이 흐름 방향으로

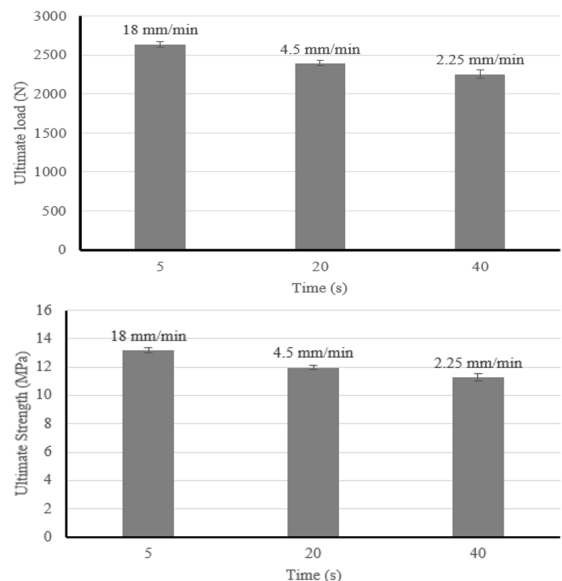


Fig. 5 Results of tensile tests of specimens joined at different compression conditions

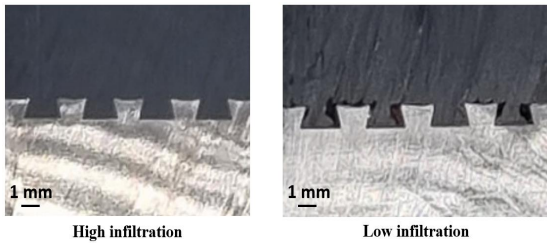


Fig. 6 Cross-section of interface after joining

배향되어 접성이 낮아져 유동성이 향상되는 현상이다^[12]. Fig. 6은 다이아몬드 절단기로 접합 후 시편을 자른 단면으로, 침투가 높은 시편과 침투가 낮은 시편은 각각 압축 속도 18mm/min, 2mm/min의 압축속도로 접합하였다. 따라서 압축 속도가 높을 때 높은 유동성으로 인해 침투가 잘 되는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 동일 온도 및 변위 조건에서 압축 조건을 달리했을 때 고분자의 유동 특성을 접합 계면의 단면과 접합 강도를 통해 비교할 수 있었다.

3.3 맞물림 각도에 따른 접합 강도 비교

계면의 형상에 따라 계면에서의 응력 분포가 달라지며 이에 따라 접합 성능이 결정된다. 본 연구에서는 맞물림 구조에서 패턴의 측면각도(맞물림 각도)에 변화를 주어 접합 시편의 인장 강도를 비교하였다. 3.2절의 결과를 참고하여 고분자 파트의 계면 패턴의 높이는 금속 파트의 패턴 높이보다 길게 제작되었으며, 압축 속도는 18mm/min의 조건에서 접합을 진행했다. 그리고 금속 시편은 맞물림 각도 90°, 75°, 60°으로 제작하였으며, 맞물림 각도에 대한 형상은 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 또한 접합 강도는 인장 하중을 Ti6Al4V 파트와 ABS 파트의 계면 전체를 투영한 면적 200mm²으로 나누어 계산하였다. 접합 후 인장 시험 결과 60° 패턴 시편의 접합 강도가 가장 높았다(Fig. 7). 또한 인장 후 Ti6Al4V 파트의 계면 모습을 통해 파단 양상을 관찰한 결과 90° 패턴 시편은 고분자 패턴의 파손 없이 탈락하였다. 이는 직사각형 계면에서 단순 전단응력이 주로 작용하기 때문이다. 그리고 본 연구에서는 추가적인 표면처리 및 접착제를 첨가하지 않

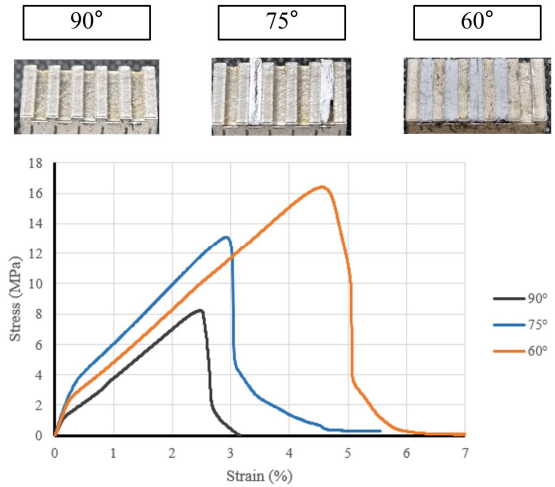


Fig. 7 Comparison of joining strength depending on change of interlocking angles

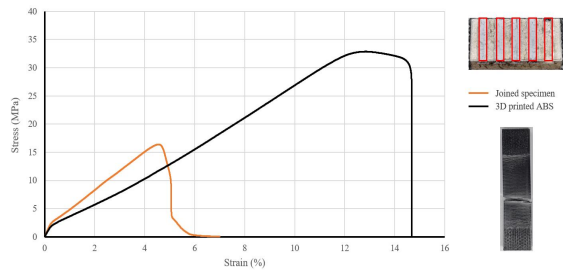


Fig. 8 Comparison between joining strength of specimen considering effective area and tensile strength of 3D printed ABS

았음에도 90° 패턴 시편의 접합 강도가 7MPa 수준을 보이는 것은 PBF 공정으로 제작된 금속 시편에 마이크로 크기의 구멍이 형성되어 macro 구조의 맞물림뿐만 아니라 micro 구조의 맞물림이 이루어진 것에 기인한다. 맞물림 각 75° 시편에서는 패턴 중 일부 파손 및 변형이 되어 탈락되었으며, 60° 시편은 패턴 대부분이 파단이 일어났다. 90° 시편은 계면의 단순 전단응력 분포이지만 맞물림 각도 75°, 60°의 역사다리 꼴 패턴에서는 압축과 전단의 조합으로 응력이 발생한다^[6]. 따라서 맞물림 각도가 감소하면서 접합 강도가 증가하는 경향은 계면에서의 응력 분포 변화로 인해 접합 강도가 증가한 것을 알 수 있다.

3.4 3D 프린팅 된 시편과 접합 시편의 인장 강도 비교

고주파 유도 가열 및 가압 공정을 통해 접합된 시편과 3D 프린팅 공정으로 제작한 ABS 파트의 인장 강도를 비교하였다(Fig. 8). 접합 시편은 맞물림 각도 60° 시편을 사용하였다. 접합 강도는 3.3절과 마찬가지로 인장 하중을 Ti6Al4V 파트와 ABS 파트의 계면 전체를 투명한 면적 200mm²으로 나누어 계산하였다. 그리고 3D 프린팅 공정으로 제작한 ABS 시편의 인장 강도를 측정하였다. 시편의 크기는 접합 시편과 동일한 크기로 폭 20mm, 두께 10mm, 길이 75mm이다. 인장 시험 결과 중앙에서 파단이 일어났으며, 인장 강도는 32MPa으로 접합된 시편과 ABS 시편의 인장 강도 비율은 약 50%이다. 즉 고분자와 금속의 수직 방향 계면 면적 비율과 강도 비율이 유사한 것으로 보아 공정 변수 조절 및 계면 설계가 적절히 이루어졌음을 확인했다.

4. 결 론

이종 소재 접합 기술은 기존의 접착제 및 나사, 리벳을 이용한 접합 공정의 한계를 뛰어 넘기 위해 많은 연구들이 이뤄지고 있다. 본 연구에서 제시한 접합 공정은 추가적인 표면처리 없이 3D 프린팅 공정으로 제작된 맞물림 구조에 의해 금속-고분자 접합이 적절히 이루어졌다. 금속의 계면 구조가 아닌 고분자의 계면 형상에 따른 접합 후 형상에 대해 비교 및 분석하였으며 압축 조건에 따른 접합 후 계면의 단면 관찰 및 접합 강도를 측정하였다. 그리고 맞물림 각도에 따른 접합 강도의 경향을 도출했으며 특히 맞물림 각 60°의 접합 시편에 대해 3D 프린팅 공정으로 출력한 ABS 시편과 비교하였다. 접합 시편의 인장 강도가 고분자 시편의 50% 수준이었으며 이는 접합 계면에서 고분자 시편의 인장 방향의 면적이 약 50% 감소한 것에 기인한다. 따라서 추후 계면에서의 금속, 고분자의 면적 비율을 조절하여 고분자의 강도를 향상 시킬 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 도출한 접합 조건 및 계면의 설계를 통해 접합의 신뢰성과 성능을 향상 시킬 수 있었으며 앞으로의 3D 프린팅 된 부품

의 접합 기술 연구에 관한 기초적 연구로서 활용될 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2021년도 부산대학교 기계기술연구원의 연구회 지원사업 연구비와 2020학년도 부산대학교 BK21 FOUR 대학원혁신지원사업 지원으로 이루어졌음

REFERENCES

1. Park, Y., "The advent of the era of material diversification and the light-weight needs of the future society," FUTURE HORIZON, Vol. 37, pp. 12-15, 2018.
2. Kah, P., Suoranta, R., Martikainen, J., Magnus, C., "Techniques for joining dissimilar materials: metals and polymers," Journal of Reviews on advanced materials science, Vol. 36, pp. 152-164, 2014.
3. Pramanik, A., Basak, A. K., Dong, Y., Sarker, P. K., Uddin, M. S., Littlefair, G., Dixit, A. R., Chattopadhyaya, S., "Joining of carbon fibre reinforced polymer(CFRP) composites and aluminium alloys," Journal of Composites : Part A, Vol. 101, pp. 1-29, 2017.
4. Kim, Y., Bang, H. S., "Recent Joining Techniques of CFRP to Metal Using Welding Process," Journal of Welding and Joining, Vol. 36, pp. 27-38, 2018.
5. Kimura, F., Kadoya, S., Kajihara, Y., "Effects of molding conditions on injection molded direct joining using a metal with nano-structured surface," Precision Engineering, Vol. 45, pp. 203-208, 2016.
6. Lin, E., Li, Y., Ortiz, C., Boyce, M. C., "3D printed, bio-inspired prototypes and analytical models for structured interfaces with geometrically-tuned deformation and failure behavior," Journal of the Mechanics and Physics

- of Solids, Vol. 73, pp. 166-182, 2014.
7. Yadav, U., Coldren, M., Bulusu, P., Sain, T., Ghosh, S., "Interface fracture of micro-architected glass: Inverse identification of interface properties and a novel analytical model," *Mechanics of Materials*, Vol. 137, pp. 103-107, 2019.
 8. Chueh, Y. H., Wei, C., Zhang, X., Li, L., "Integrated laser-based powder bed fusion and fused filament fabrication for three-dimensional printing of hybrid metal/polymer objects," *Additive Manufacturing*, Vol. 31, No. 100928, 2020.
 9. Mun, S. P., Kim, C. R., Kwak, D. K., Kim, C. S., Nakaoka, M., "Character of Induction Heating ZCS PWM SEPP High Frequency Inverter," *Journal of Power Electronics*, Vol. 11, pp. 133-135, 2007.
 10. Rahman, M., Schott, N. R., Sadhu, L. K., "Glass Transition of ABS in 3D Printing," *Proc. of the 2016 COMSOL Conference*.
 11. Lambiase, F., Scipioni, S. I., Lee, C. J., Ko, D. C., Liu, F. A., "A state-of-the-Art Review on advanced Joining process for metal-composites and Metal-Polymer Hybrid Structures," *Materials*, Vol. 14, No. 14, 2021.
 12. Wilkes, G. L., "An overview of the basic rheological behavior of polymer fluids with an emphasis on polymer melts," *Journal of chemical education*, Vol. 58, No. 11, 1981.