

Interlocking 구조를 가지는 금속-복합소재 접합 특성에 관한 연구

김무선

한국철도기술연구원 도시철도연구소

A study on adhesion property between metal and composite material with interlocking structure

Moo-Sun Kim

Urban Railroad Research Department, Korea Railroad Research Institute

요약 본 연구에서는 금속(알루미늄 합금)과 탄소섬유 복합소재를 대상으로 하여 두 소재의 접합면에 interlocking 구조를 조성한 후 두 소재 간의 접합 특성을 시험 분석하였다. 접합시편은 single lap joint 시편으로 제작하였으며, interlocking 구조를 생성하기 위한 방법으로 금속 3D 프린팅 공정 기술 중의 하나인 SLM 기술을 이용하여 금속 시편을 제작하였다. Interlocking 구조물은 사각 단면을 가지는 블록을 일정 간격으로 반복하여 금속 접합면 위에 제작하였으며, 접합면 상부에 복합소재 프리프레그를 적층한 후 오토클레이브 공법으로 최종 접합시편을 제작하였다. 제작된 시편을 대상으로 접합응력 측정시험을 진행하였으며 그 결과값을 일반 평면 접합면을 가지는 대조군과 비교한 결과 약 7.4 %의 접합강도 향상 효과가 있음을 확인하였다. 그리고 수치해석을 진행하여 접합면의 응력 분포에 대한 결과를 분석하였다.

Abstract The bonding characteristics between the metal (aluminum alloy) and carbon fiber composite materials were analyzed when the interlocking structure on the bonding surface of the metal was formed artificially. The test specimens were manufactured as the single-lap-joint test type. The metal part of the specimen was manufactured using SLM technology, which is one of the metal 3D printing technologies, to produce an interlocking structure. The interlocking structure was fabricated on the metal bonding surface by repeating blocks of a rectangular cross-section at regular intervals. After laminating the composite material prepreg on the metal bonding surface, the final joint specimen was produced using an autoclave process. The single-lap-joint test was performed to obtain the adhesion strength, and the result was compared with the control group having a plane bonding surface. The results revealed an approximately 7.4 % improvement in adhesion strength. Numerical analysis was carried out to analyze the stress distribution of the bonding surface.

Keywords : Adhesion Property, Composite, Hybrid Material Joint, Interlocking Structure, Single-lap Joint Test

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(PK2203D2)의 연구비 지원으로 수행되었음

*Corresponding Author : Moosun Kim(Korea Railroad Research Institute)

email: mskim@krri.re.kr

Received August 31, 2022

Revised October 13, 2022

Accepted November 4, 2022

Published November 30, 2022

1. 서론

현대의 교통 수단은 에너지 효율을 높이기 위한 방안으로 경량화 기술을 지속적으로 적용하고 있다. 이는 항공, 자동차, 철도, 선박 등에서 경량화를 목적으로 다양한 소재가 검토되고 적용되는 이유 중의 하나이다.

차량 구조체의 경량화 방안으로는 효율적인 설계 적용과 경량화 소재 적용 등의 방안이 있다.

일반적으로 차량 등에 적용하는 대표적인 경량화 소재에는 알루미늄, 마그네슘, 고강도 합금과 함께 유리섬유 및 탄소섬유를 적용하는 복합소재 등을 고려할 수 있다. 대표적인 예로 철도차량의 경우 알루미늄 사용과 더불어 복합재료를 적용하기 위한 많은 연구가 현재까지 진행되어 왔다.

차량 전체를 복합소재로 제작하는 경우 뛰어난 경량화 특성을 가지게 되지만 복잡한 제조공정과 높은 제작 비용 등의 문제가 발생한다. 따라서 제작 및 비용 등을 고려한 효율적인 소재 적용을 위해 금속 구조체와 함께 복합소재를 부분적으로 적용하는 하이브리드 소재 적용을 검토하기도 한다.

이 경우 금속과 복합소재간의 기계적 물성과 열특성 등의 차이로 인한 내구성의 문제가 발생할 수 있기 때문에 두 소재간의 접합 특성에 관한 기술 적용이 필요하다.

금속과 고분자를 모재로 한 복합소재간의 접합은 기계적 체결 방법을 통하여 이종소재간의 접합을 진행하는 것이 일반적인 형태이다.

이 때 기계적 체결을 위해 홀가공시 복합소재 특성에 의해 홀가공 공구의 내구성이 문제가 될 수 있으므로, 이런 문제점을 극복하기 위해 접착제 사용과 같은 접합기술에 관한 많은 연구가 진행 중에 있다.

접착제를 이용한 접합 관련 연구로, Gude 등[1]은 CFRP 접합면을 플라즈마 처리하고 카본 나노 필러가 첨가된 접착제를 적용할 때 수분흡수가 접합강도에 미치는 영향을 시험적으로 분석하였다. 그리고 Song 등[2]은 온도 및 습도 등 환경 요인이 복합소재 접합특성에 미치는 영향을 연구하였다.

Kim[3]은 알루미늄 표면처리 방법으로 기계적 처리 및 플라즈마 처리방법에 따른 복합소재와의 접합 특성에 관한 분석을 진행하였다. On 등[4]은 접착제 내부에 메타 아라미드 나노섬유를 함침 했을 때의 접합강도에 관한 연구를 수행하였다.

Graziosi 등[5]은 3D 프린팅으로 금속 접합부를 빙형태로 제작하고 그 내부에 복합소재를 함침하는 방식으로

제작한 접합시편 대상으로 접합특성을 분석하였다. 그리고 Ramaswamy 등[6]은 interlocking 구조물이 포함된 금속-복합소재 접합시편을 대상으로 접합력의 동적 특성을 연구하였다.

본 연구에서는 알루미늄 합금 시편의 접합면에 사각단면의 블록을 적용하고 복합소재 시편과의 접합시편을 제작하여 single lap joint test를 진행함으로써 interlocking 구조물이 접합 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

또한 평면 형태의 접합 시편을 대조군으로 할 때 각 접합특성을 비교하였다. 그리고 구조해석을 통해 접합시편의 내부 응력 분포를 계산함으로써 interlocking 구조물의 효과를 분석하였다.

2. 본론

2.1 접합 시편 제작

Interlocking 구조 효과를 고려한 접합시험을 진행하기 위해 알루미늄 합금과 CFRP 소재를 대상으로 시편 제작을 진행하였다. 먼저 알루미늄 합금 시편은 금속 3D 프린팅 기술인 SLM (Selective Laser Melting) 공정 기술로 제작하였다.

SLM은 구조물 제작 베이스 플레이트에 금속 파우더를 얇은 층으로 적층한 후 레이저를 조사하여 해당 영역을 용착하는 방식을 반복함으로써 3D 입체 구조물을 제작하는 공정기술이다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 SLM 기술의 주요 공정 파라미터로 레이저 출력, 레이저 스캔 속도, 레이저 트랙간의 거리, 적층 두께 등을 고려할 수 있다.

SLM 기술은 구조물 위에 임의 형상의 미세 구조물을 제작할 수 있는 기술로서 본 연구에서는 독일 EOS 社의 M290모델 (레이저 최대출력 400W, 스캔스피드 7m/s)을 활용하였으며 알루미늄 합금 소재인 동사의 AlSi10Mg 소재 (평균 밀도 2.67g/cm³)을 사용하였다.

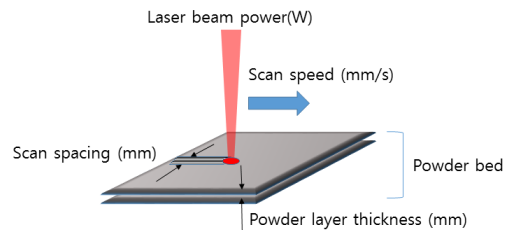


Fig. 1. Schematic diagram of SLM process

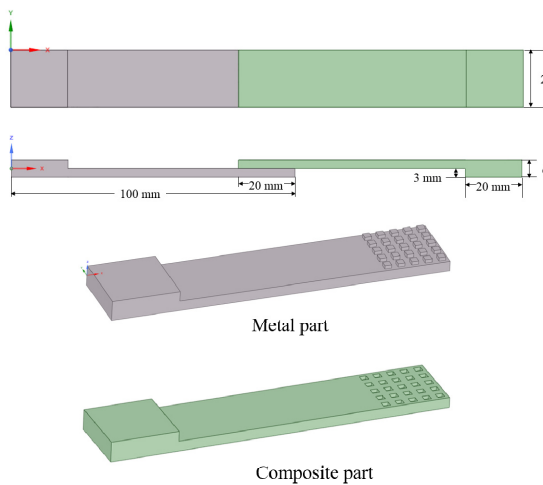


Fig. 2. Specification of test specimen for single lap joint test and shape of each material part

시편 규격은 Fig. 2에 나타내었다. 금속 시편의 접합면 위에 2mmX2mmX1mm 크기의 블록을 일정 간격으로 25개를 배열한 후 3D 프린팅으로 제작한다. 최종 접합 시편은 제작된 금속 시편의 접합면을 아세톤으로 세척한 후 그 위에 탄소 프리프레그 (TB카본社 CPF-3327)를 적층하고 오토클레이브 공정을 적용하여 제작하였다.

복합소재의 경화조건은 3 °C/min 승온 조건으로 90 °C에서 30분, 120 °C에서 90분 유지하였으며 3 bar의 가압조건을 적용하였다.

Fig. 3에 3D 프린팅으로 제작한 금속 시편 접합면의 확대 단면과 금속-복합소재 최종 접합시편을 나타내었다.

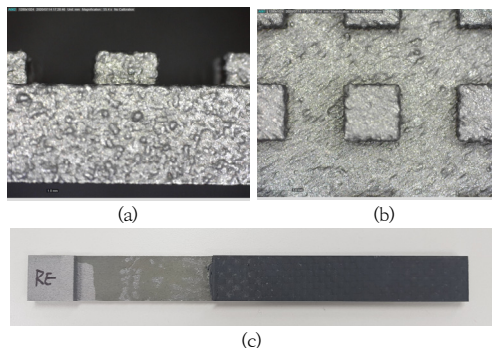


Fig. 3. (a) Cross section and (b) upper surface of interlocking structure of metal part and (c) final test specimen

Interlocking 구조물이 포함된 접합 시편 시험군과 함께 평면 접합면을 가지는 접합 시편을 대조군으로 제작하였다. 두 시험편 모두 접합면에 별도의 접착제를 사용하지 않았으며, 프리프레그 내부의 레진에 의해 자체적으로 접합되는 방식을 적용하였다.

2.2 Single-lap-joint 시험

제작된 접합 시편을 대상으로 접합특성을 평가하기 위한 single-lap-joint 시험을 진행하였다.

시험은 Instron (USA)社의 5969 장비를 사용하여 상온에서 진행하였으며, ASTM D1002 [7] 규격을 따랐다. 하중속도는 1.0 mm/min 로 진행하였으며 시험군과 대조군 별로 5개 시편을 대상으로 최대값과 최소값을 제외한 평균값을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

Single-lap-joint 시험을 진행한 후 접합면이 분리된 시편을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4 (a)는 interlocking 구조물이 있는 시편의, (b)는 평면 접합면을 가지는 시편의 각 파단면이다.

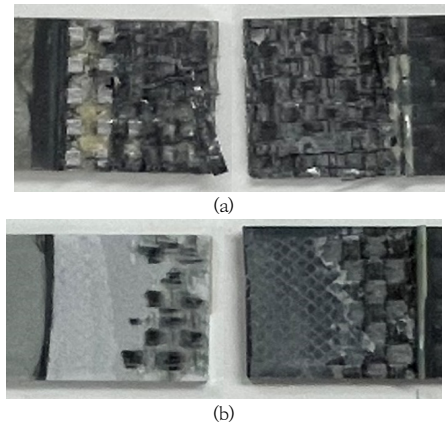


Fig. 4. Fractured surface of specimen with (a) interlocking structure and (b) plane surface

두 시험편 종류 모두 복합소재 적층 부위의 박리 또는 파손에 의해 접합면이 파단되었음을 알 수 있다. 먼저 interlocking 구조를 가지는 시험군 파단면에서는 금속 접합면 오른쪽에 탄소섬유 복합재 찢김 잔여물이 있으며, 왼쪽에는 상대적으로 많은 양의 레진 잔여물이 남아

있다.

대조군 시편에서는 박리된 일부 탄소섬유 층이 금속 접합면에 남아있는 반면, 금속 접합면 왼쪽 영역에는 상대적으로 깨끗한 파단 특성을 보여준다.

이는 접합특성 시험시 인장 및 전단 응력이 대조군의 경우 복합소재 레이어 사이 넓은 층간에 집중적으로 작용하는 반면, 시험군에서는 interlocking 효과에 의해 레이어 층간뿐만 아니라 레이어 내부에서도 강한 응력이 작용한 결과이다.

시험군 파단면의 금속 접합면에서 레진이 풍부한 영역이 생성된 이유는 탄소 프리프레그의 직조 특성으로부터 기인한 것으로 판단된다. 즉 금속 시편과 복합소재 시편의 접합 공정 진행시, plain 형태로 직조된 프리프레그에 블록 형태 구조물이 침투하면서 직교형태의 균일하게 분포된 섬유 다발이 블록 구조물의 주변으로 밀려나게 되며, 그 영역에서 불균일한 섬유 밀도 환경이 조성된다.

그 후 금속 시편 위에 적층된 복합소재 경화를 진행하기 위해 오토클레이브 공정을 거치면서 3 bar의 주변 가압조건과 프리프레그 내부 진공압에 따른 프리프레그 레진의 흐름은 블록 구조물 주변에 섬유가 채워지지 않은 영역으로 채우게 된다. 따라서 블록 구조물 주변에 레진 양이 상대적으로 많은 영역이 생성된다.

다음으로 두 시험편의 접합 물성을 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 시험군의 접합강도는 interlocking 구조물을 접합면에 투여함으로써 대조군과 동일한 접합 표면적을 가정하여 계산하였다.

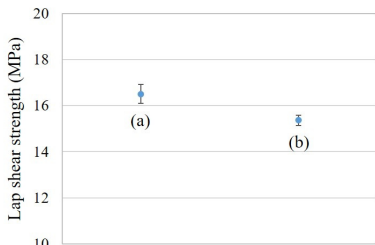


Fig. 5. Lap shear strength of specimen with (a) interlocking structure and (b) plane surface

비교 결과로부터 interlocking 구조물을 가지고 있는 시험군이 평면 접합면을 가지는 대조군 대비하여 접합 강도가 약 7.4 % 증가하였음을 알 수 있다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 대조군은 상대적으로 물성이 낮은 복합소재 레이어 층간에 응력이 집중되어 박리가 발생하는 반면, interlocking 구조 시험군에서는 접합 표면적의

증가와 더불어 기계적 구속 효과가 함께 작용함으로써 접합 강도가 높아지게 된다.

Fig. 6에는 각 시편의 변위-하중 변화를 비교 도시하였다.

그림에서 보는 바와 같이 접합면 파단이 발생하는 변위는 대조군에 비해 Interlocking 구조 시험군에서 더 높다.

시험군의 변위-하중 곡선 구간 사이에서 변곡점들이 발생함을 확인 할 수 있는데 이는 접합면에 배열된 interlocking 구조물 요소들과 복합소재 접합면이 순차적으로 파단되면서 부분적인 응력완화가 발생한 것으로 판단된다.

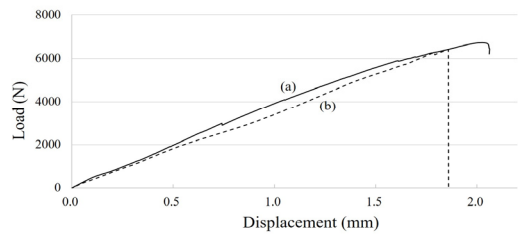


Fig. 6. Comparison of Displacement-Load curve of specimens with (a) interlocking structure and (b) plane surface

다음으로 single lap joint 시험시 응력 분포 분석을 위해 상용해석툴인 Ansys를 활용하여 3D FEA(Finite Element Analysis)를 진행하였다. 모델링은 Fig. 2의 접합시편 형상을 기반으로 진행하였으며, 접합특성 시험의 인장 조건을 구현하기 위해 경계조건으로 금속 시편 끝단 20mm 영역의 고정 및 복합소재 시편 끝단에서 시편 길이 방향으로 1mm 변위를 고려하였다. Fig. 7에 시험군과 대조군의 복합소재 접합면에서 발생하는 전단응력과 수직응력(σ_{zz}) 분포를 도시하였다.

두 시편 모두 복합소재 시편 끝단에서 최대값의 전단응력과 수직응력이 작용함을 확인할 수 있다. 이는 금속-복합소재 접합시편에서 초기 파단이 복합소재 끝단으로부터 시작되는 현상[6]의 원인으로 고려할 수 있다.

동일한 변위 구속 조건에서 복합소재 접합부위 표면에 작용하는 전단응력은 두 시편군 모두 유사한 형태를 보이는 반면 두 시편군의 수직응력 분포에서는 시험군이 대조군 대비하여 약 15% 정도 낮은 값을 가진다. 이는 interlocking 구조가 전단응력 변화에는 큰 영향을 미치지 않지만, 접합면 파단에 미치는 수직 응력에 대한 간접 효과가 발생하여, 이로 인해, 접합면 끝단에서 발생하는 파단을 늦추는 것으로 판단된다.

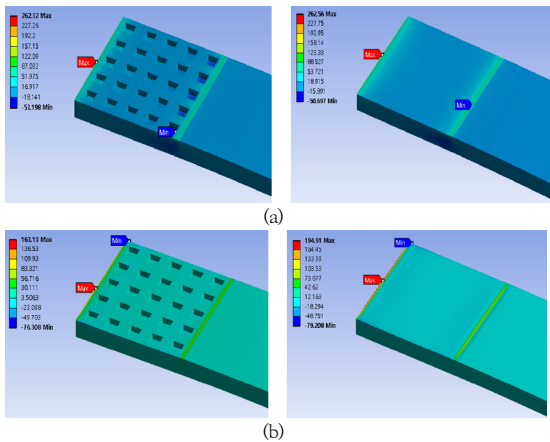


Fig. 7. Comparison of (a) shear stress and (b) normal stress (σ_{zz}) distribution on composite adherend surface of specimens with interlocking structure (left) and plane surface (right)

4. 결론

본 연구에서는 알루미늄과 CFRP를 모재로 하여 두 소재간 접합면에 interlocking 구조를 적용하였을 때의 접합특성 분석을 위해 시험 및 해석을 진행하였다. Interlocking 구조 효과를 구현하기 위해 알루미늄 시편을 3D 프린팅 기술인 SLM 공정 기술을 활용하여 제작하면서, 금속 접합면 위에 사각 블록을 일정 간격으로 배열하여 제작하였다. 그리고 완성된 금속 시편 위에 탄소섬유 프리프레그를 적층하여 오토클레이브 기법으로 최종 접합시편을 제작하였다.

접합특성 확인은 single-lap-joint 시험으로 진행하였으며, interlocking 구조물의 시험군과 평면 접합면의 대조군을 대상으로 진행한 시험과 해석으로부터 다음과 같은 결과를 확인하였다.

1. 시험군과 대조군 모두에서 복합소재 적층 부위의 파단이 발생하였으며, 시험군의 금속 시편에 탄소섬유 복합재의 잔여물과 레진이 집중되어 남겨진 영역을 확인하였다. 레진이 집중된 영역은 interlocking 구조물 형태로 인해 그 위에 적층된 복합소재 내부의 섬유 밀도가 간섭받으면서 생성된 공간에 레진이 집중된 것으로 판단된다.
2. Interlocking 구조물 효과로 시험군이 대조군 대비하여 약 7.4% 증가한 접합 강도를 보였다. 이는 interlocking 효과로 인한 접합 표면적 증가와 기

계적 구속 효과가 동시에 작용한 결과이다.

3. 시험군의 변위-하중 곡선 구간에서 보여지는 변곡점들은 interlocking 구조물의 접합면에서 순차적으로 발생하는 파단을 보여준다.
4. 시험군과 대조군의 응력 해석결과로부터 접합면의 끝단에 작용하는 최대 전단응력은 유사한 값을 보이는 반면 끝단의 최대 수직응력은 시험군이 약 15% 낮은 값을 보였다. 이는 접합면 파단을 늦추는 효과로 작용한다.

이번 연구에서 진행한 응력 수치해석은 접합면 조건을 균일한 섬유 밀도 등의 이상적 조건으로 가정하여 진행하였다. 그러나 실제 파단면에서 레진이 집중된 영역이 발생한 바와 같이, 좀 더 정확한 수치 해석 결과 도출을 위해 섬유 밀도 변화 등의 고려가 필요하며, 레진 충전이 완료되지 않은 보이드 영역에 대한 고려 또한 필요할 것이다.

References

- [1] M.R.Gude, S.G.Prolongo, A.Urena, "Hygro thermal ageing of adhesive joints with nanoreinforced adhesives and different surface treatments of carbon fibre/epoxy substrates", International Journal of Adhesion & Adhesives, vol.40, pp.179-187, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.09.005>
- [2] M.Song, J.Kweon, J.Choi, H.Kim, M.Song, S.Shin, J.Byun, "Hygrothermal Effect on the Strength of Carbon/Epoxy Composite Single-Lap Bonded Joints", Journal of The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, vol.38, no.2, pp.119-128, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2010.38.2.119>
- [3] M. Kim, "A Study on adhesion properties between composite material and aluminum according to the physical surface treatment technique" Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol.21, no11, pp.334-339, 2020. DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.11.334>
- [4] S.Y.On, M.S.Kim, S.S.Kim, "Effects of post-treatment of meta-aramid nanofiber mats on the adhesion strength of epoxy adhesive joints", Composite Structures, vol.159, pp.636-645, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.016>
- [5] S. Graziosi, F. Cannazza, M. Vedani, A. Ratti, F. Tamburrino, M. Bordegoni, "Design and testing of an innovative 3D-printed metal-composite junction", Additive Manufacturing, vol.36, 101311, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101311>

- [6] K. Ramaswamy, R. M. O'Higgins, M. C. Corbett, M. A. McCarthy, C. T. McCarthy, "Quasi-static and dynamic performance of novel interlocked hybrid metal-composite joints", *Composite Structures*, vol. 253, 112769, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112769>
- [7] ASTM D1002-10, Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal), ASTM, International, West Conshohocken, PA, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1520/D1002-10R19>
-

김 무 선(Moosun Kim)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 (공학석사)
- 2008년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부 (공학박사)
- 2008년 7월 ~ 2012년 8월 : 현대 자동차 남양연구소 책임연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

〈관심분야〉

적층기법, 최적화, 열유동 및 구조 해석