

Ag/PEEK 전도성 서셉터를 활용한 유도용접으로 체결된 비전도성 열가소성 복합재 체결부 구조의 성능평가

하지환* · 강윤주* · 지성하** · 주현우** · 광병수* · 권진희*†

Evaluation of the Performance of Joint Structures in Non-conductive Thermoplastic Composites Bonded by Induction Welding Using Ag/PEEK Conductive Susceptors

Ji-Hwan Ha*, Yun-Ju Kang*, Sung-Ha Ji**, Hyun-Woo Ju**, Byeong-Su Kwak*, Jin-hwe Kweon*†

ABSTRACT: In this study, conductive Ag/PEEK susceptor films were used to induction-weld non-conductive glass fiber/PEEK (GF/PEEK) thermoplastic composites, and the welding performance was evaluated as a function of Ag content. Ag/PEEK films containing 40, 50, and 60 wt.% Ag were fabricated by mixing Ag nanoparticles and PEEK powder, and their electrical conductivity and heating characteristics were evaluated. Both electrical conductivity and heating performance increased with Ag content, with the 60 wt.% Ag/PEEK film exhibiting the highest values of 50,606 S/m and 439.4°C, respectively. Non-destructive inspection and cross-sectional analysis showed that the 50 wt.% condition provided the most uniform weld quality. The specimens welded with the 50 wt.% film exhibited the highest interlaminar and single-lap shear strengths of 18.5 MPa and 12.3 MPa, respectively, corresponding to improvements of 79.6% and 127.7% over those welded using stainless steel mesh. The results demonstrate the applicability of Ag/PEEK conductive susceptors for induction welding of non-conductive GF/PEEK composites.

초 록: 본 연구에서는 전도성 서셉터(Susceptor) Ag/PEEK 필름을 활용하여 비전도성 열가소성 복합재 유리섬유/PEEK를 유도용접하고, Ag의 함량에 따른 유도용접 성능을 평가하였다. Ag 입자와 PEEK 입자를 혼합하여 Ag의 무게분율이 각각 40 wt.%, 50 wt.%, 60 wt.%인 전도성 서셉터를 제작하였으며, 함량 변화에 따른 전기전도도와 발열 특성을 측정하였다. Ag 입자의 함량이 증가할수록 전기전도도와 발열 성능이 향상되는 것을 확인하였으며, Ag 무게분율이 60 wt.%인 Ag/PEEK 필름에서 전기전도도와 최고 온도가 각각 50,606 S/m 및 439.4°C로 가장 높게 나타났다. 비파괴검사 및 단면 분석 결과, 50 wt.% 조건에서 가장 균일한 용접 품질을 나타내었다. 접합강도 평가 결과, 50 wt.% Ag/PEEK 필름을 적용한 시편의 층간 전단강도와 단일겹침 전단강도가 각각 18.5 MPa, 12.3 MPa로 측정되어 가장 우수한 접합 성능을 나타내었다. 이는 스테인리스강 메쉬를 활용하여 유도용접한 경우 대비 각각 79.6% 및 127.7% 향상된 결과로 Ag/PEEK 전도성 서셉터가 비전도성 유리섬유/PEEK의 유도용접 접합에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

Key Words: 유도용접(Induction welding), 비전도성 열가소성 복합재(Non-conductive thermoplastic composite), 전도성 서셉터(Conductive susceptor), 접합강도(Adhesive strength)

Received 2 July 2026, received in revised form 21 July 2026, accepted 22 August 2026

*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

**Korea Aerospace Industries, Ltd.

†Corresponding author (E-mail: jhkweon@gnu.ac.kr)

1. 서 론

최근 열가소성 복합재에 대한 연구가 활발히 수행되며 열가소성 복합재의 접합 및 체결 공정에 대한 연구 또한 큰 주목을 받고 있다. 열경화성 복합재의 체결을 위해서는 볼트, 핀, 리벳을 이용한 기계적 체결이나 접착 방식이 적용되어 왔다. Kwon 등은 복합재료 적층판의 기계적 체결부에서 형상학적 인자와 체결 방식에 따른 응력집중계수 및 체결강도 차이를 분석하였으며, Song 등은 항공용 복합재 단일겹침 접착 체결부에서 제작공정, 겹침길이 및 모재 두께가 파손강도에 영향을 미치는 주요 인자임을 보고하였다[1,2]. 하지만 이러한 방식은 섬유의 연속성을 파괴하고 응력집중을 일으키며, 경화시간이 길어지는 문제점을 갖고 있다[3-6]. 이러한 단점을 극복하기 위해 열가소성 수지의 재성형 특성을 이용한 용접 연구가 활발히 수행되고 있다[7,8].

용접 방식에는 복합재에 전류가 흐를 때 발생하는 저항열을 이용한 저항용접, 고온의 열원을 복합재에 접촉할 때 전도되는 열을 이용한 전도용접 그리고 교류 전자기장에 의해 접합부를 가열하는 유도용접이 있다. 저항용접, 전도용접과 같은 용접방식을 활용하여 복합재를 체결하는 경우 피착재의 섬유배열을 유지하고 가공이 불필요하다는 장점이 있다. 하지만, 이러한 방식은 열을 전달하는 과정에서 프로브와 같은 외부 물체와 접촉하여 표면 손상을 유발할 수 있으며, 접합부 주변 영역까지 열이 전달되어 접합 영역을 통제하기 어렵게 한다[9-12]. 또한, 항공기 동체나 날개와 같이 대형 곡면 구조물에 적용이 어렵다는 단점이 있다. 반면, 유도용접 방식은 코일에 교류 전류가 흐를 때 발생하는 전자기장을 이용하여 열을 생성하여 비접촉식으로 수행되며, 접합 영역에만 국부적인 가열이 가능하다. 또한, 로봇팔과 같은 3차원 이송 장비와 함께 활용하여 곡면 구조물에도 적용할 수 있다는 장점이 있다[13-15].

유도용접은 코일에 교류 전류가 흐를 때 발생하는 전자기장에 영향을 받아 발생하는 열에너지를 열원으로 활용하며, 이때, 열에너지는 와전류(Eddy current)와 히스테리시스 손실(Hysteresis loss) 현상에 의해 발생한다. 와전류는 교류 자기장의 영향을 받아 도체 내부에 유도전류가 흐르게 되고, 도체 내부에서 유도전류가 순환하며 줄(Joule) 열의 형태로 에너지 손실이 발생하는 현상이다. 히스테리시스 손실은 교류 자기장에 의해 자성체에 자화와 탈자화가 반복하여 발생하고, 이 과정에서 발생하는 에너지 손실이 열의 형태로 나타나는 현상이다[16,17]. 와전류와 히스테리시스 손실에 의한 발열 성능을 향상시키기 위해 접합부에 서셉터를 삽입하여 유도용접을 수행하기도 한다. 서셉터를 활용할 경우 낮은 전력으로 효율적이고 안정적인 유도용접을 수행할 수 있으며, 유리섬유와 같은 비전도성 소재에도 유도용접 공정을 적용할 수 있다. 이러한 장점으로 인해

서셉터를 활용한 유도용접에 관한 다양한 연구가 수행되고 있다.

Farahani 등은 Ag, Ni, Fe_3O_4 등을 활용하여 필름 형태의 서셉터를 제안하고 탄소섬유/PPS(CF/PPS)를 피착재로 사용한 유도용접 공정에 적용하여 그 성능을 입증하였다[17]. 그들은 이 연구에서 각 소재에 따른 성능 비교를 위해 전기적 특성을 분석하고 유도용접 환경에서의 발열 거동을 측정하였다. 측정 결과 서셉터의 전기저항률이 낮을 때 우수한 발열 거동을 보이며, 접합강도 또한 우수함을 확인하였다. V.T. Hoang 등은 스테인리스강 메쉬 서셉터의 접합강도 저하 문제를 극복하기 위해 Ag 입자와 PEKK로 구성된 필름형 서셉터를 제안하고 전도성 일방향 CF/PEKK 피착재의 유도용접에 적용하였다. CF/PEKK를 Ag 서셉터 및 스테인리스강 메쉬를 활용하여 유도용접한 결과, Ag 입자를 활용하였을 때 스테인리스강 메쉬 대비 최대 51.5% 향상된 단일겹침 전단강도를 나타냄을 보고하였다[18]. R.G. Martin 등은 Nickel/PEI 서셉터를 적용하여 유리섬유/PEEK 스킨과 PEI 허니컴 코어로 구성된 이중접합계면을 갖는 샌드위치 구조 진공 상태 유도용접 공정을 제시하였다. 유도용접 수행 결과, 스킨 표면의 손상 없이 접합이 이루어졌으며, 6 MPa 수준의 스킨-코어 계면강도를 확인하였다[19].

이와 같이 기존 연구는 열가소성 복합재의 유도용접 및 서셉터 기반 유도용접 공정의 발열 성능과 접합 특성 향상에 주로 초점을 두고 있으며, 피착재와 서셉터의 재료 및 접합계면에 따라 다양한 방식으로 수행되어 왔다[17-25]. 그러나 열가소성 복합재 구조의 적용 범위를 고려하면 유도용접을 전도성 열가소성 복합재에만 한정할 수 없다. 반면, 비전도성 열가소성 복합재는 충분한 유도전류 형성이 어려우므로 접합계면에서 요구되는 발열을 확보하기 어렵다. 따라서 비전도성 열가소성 복합재의 유도용접에서는 서셉터의 전기적 특성, 발열 성능 및 계면의 안정성이 공정 성능을 좌우하는 핵심 인자가 된다. 특히, 상·하부 피착재가 모두 비전도성 소재인 경우에는 피착재 자체의 직접적인 유도가열이 불가능하기 때문에 접합계면의 발열을 담당하는 서셉터의 특성이 중요하다. 반면 PEEK와 같은 고성능 열가소성 수지는 우수한 기계적 물성을 가지지만 높은 공정 온도로 인해 유도용접 공정 적용이 더욱 어렵다.

따라서 본 연구에서는 상·하부 피착재 모두 직접적인 유도가열이 불가능한 비전도성 유리섬유/PEEK 사이에 PEEK 기반의 Ag/PEEK 서셉터를 적용하여 연속 유도용접을 수행하였다. Ag/PEEK 서셉터의 성능을 평가하기 위해 Ag 입자의 무게분율에 따른 전기전도도 및 발열 거동을 측정하였으며, Ag 입자의 분산 상태를 분석하고, 단면 분석 및 접합강도 시험을 통해 유리섬유/PEEK의 유도용접 성능을 평가함으로써 Ag 함량에 따른 전기전도도, 발열 거동, 입자 분산 및 접합강도의 관계를 종합적으로 평가하였다.

2. 재료 및 제작 공정

2.1 비전도성 열가소성 복합재 제작

본 연구에서 유도용접 피착재로 활용할 비전도성 열가소성 복합재 제작을 위해 직조된 유리섬유와 PEEK 필름을 활용하였다. 유리섬유는 EG Composite社の 823 EIT 섬유를 활용하였으며, 필름은 Goodfellow社の EK301076 PEEK를 활용하였다. 활용한 유리섬유와 PEEK는 각각 1.0×10^{-12} S/m, 1.0×10^{-14} S/m의 전기전도도를 가지며, 와전류와 히스테리시스 손실에 의한 발열이 발생하지 않는 소재를 선정하였다. 평판형 피착재 제작을 위해 250 mm×250 mm 크기의 유리섬유 6 층을 적층하고, 각 유리섬유 층을 감싸는 구조로 255 mm×255 mm 크기의 PEEK 필름 7 층을 삽입하였다. 적층 및 이송 과정에서 유리섬유와 PEEK 필름의 비틀림을 최소화하기 위해 인두기를 사용하여 유리섬유와 PEEK 필름을 점용접하였다. 점용접된 유리섬유/PEEK는 핫프레스(Hot-press) 공정을 통해 350°C, 30 bar의 조건에서 10분 동안 성형하였다. 성형된 유리섬유/PEEK의 공칭 두께는 1 mm이다. 핫프레스 공정 특성을 고려하여 수지과잉이 발생한 유리섬유/PEEK의 최외곽 영역은 제거하였으며, 220 mm×220 mm 크기의 내부 영역만을 활용하였다.

2.2 전도성 서셉터 제작

전도성 서셉터 제작을 위해 Ag 입자와 PEEK 분말을 사용하였다. Ag 입자는 US Research Nanomaterials社の US 1038를 사용하였고, 20 nm 직경의 구형 입자로서 6.3×10^7 S/m의 전기전도도를 가진다. PEEK는 Goodfellow社の VICTREX

® 450PF를 사용하였으며, 이는 50 μ m 크기의 분말 형태이다. 전도성 서셉터 제작을 위해 4 g의 PEEK와 Ag 입자를 혼합하고, 환원제로 50 mL의 N, N-dimethylformamide를 첨가하였다. 이때, Ag 입자의 무게분율에 따른 발열 거동 및 용접 성능을 평가하기 위해 40 wt.%, 50 wt.% 그리고 60 wt.%의 비율로 Ag 입자를 혼합하였다. 혼합물을 상온에서 30분 동안 200 rpm으로 자력교반하고 1시간 동안 초음파 처리하여 분산하였다. 분산 후 130°C의 오븐에서 90분 동안 N, N-dimethylformamide를 증발시켰다. 얻어진 Ag/PEEK은 핫프레스 공정을 통해 360°C에서 15분간 11 kN의 힘으로 압력을 가해 필름의 형태로 성형하였다. 가압 시 0.1 mm의 기판을 가열판 가장자리에 배치하여 모든 무게분율의 Ag/PEEK 필름의 두께가 0.1 mm가 되게 하였다. Ag/PEEK 필름의 제작 공정은 Fig. 1에 보였다.

2.3 전자기-열 연성 해석

제작한 비전도성 열가소성 복합재 유리섬유/PEEK와 전도성 서셉터 Ag/PEEK 필름을 이용하여 유도용접을 수행하기에 앞서 공정조건 설정을 위한 전자기-열 연성 해석을 수행하였다. 유도용접에서 접합계면의 발열은 교번자기장에 의해 서셉터 내부에 유도되는 전기장과 전류밀도에 의해 결정된다. 패러데이의 전자기유도 법칙에 따르면 시간에 따라 변화하는 자기선속은 식 (1)과 같이 유도기전력을 발생시킨다.

$$\varepsilon = \frac{d\phi_B}{dt} \quad (1)$$

여기서 ε 는 유도기전력, ϕ_B 는 자기선속을 의미한다. 유도된 전기장에 의해 재료 내부에 형성되는 전류밀도는 식 (2)의 옴(Ohm)의 법칙에 따라 전기전도도에 비례한다.

$$J = \sigma E \quad (2)$$

여기서 J 는 전류밀도, σ 는 전기전도도, E 는 유도전기장을 의미한다. 또한 유도 전류에 의해 발생하는 단위체적당 줄 발열률은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$Q = J \cdot E = \sigma E^2 \quad (3)$$

여기서 Q 는 단위체적당 줄 발열률을 의미한다. 따라서 외부 교번자기장이 인가되더라도 전기전도도가 낮은 유리섬유/PEEK에서는 전류밀도가 충분히 형성되지 않아 유도 발열이 크게 발생하지 않게 된다. 반면 Ag/PEEK 필름은 Ag 입자에 의해 형성된 전도성 경로를 통해 유도전류가 발생할 수 있으며 접합계면에서 줄 발열을 제공하는 서셉터로 작용할 수 있다. 이러한 유도 발열 관계를 바탕으로 인가 주파수, 전류, 코일 형상, 코일-피착재 간 커플링 거리(Coupling

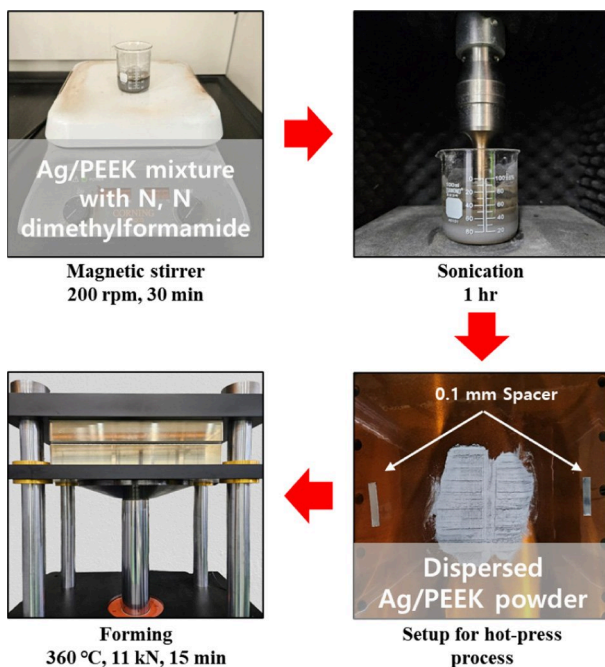


Fig. 1. Manufacturing process of Ag/PEEK film

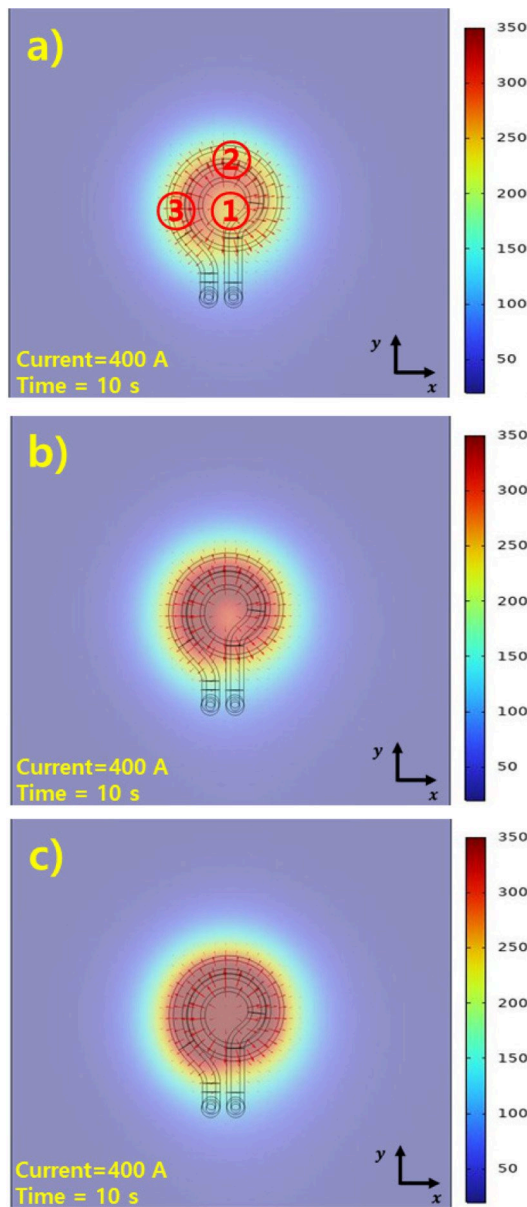


Fig. 2. Simulated thermal behavior of GF/PEEK with Ag/PEEK susceptor with different Ag weight fraction a) 40 wt.%, b) 50 wt.%, and c) 60 wt.%

distance)를 주요 공정변수로 설정하였다. 인가 주파수와 전류는 코일 주변에 형성되는 시간 변화 자기장과 유도전기장의 크기를 결정하며 코일 형상은 자기장 분포와 가열 영역을 결정하고 코일-피착재 간 커플링 거리는 접합면에 도달하는 자기장 세기와 발열 효율에 영향을 준다.

전자기-열 연성 해석 조건은 실제 유도용접 공정에서 사용한 장비의 규격을 고려하여 설정하였다. 인가 주파수와 전류는 각각 250 kHz, 400 A로 설정하였으며, 코일은 실제 공정에 사용한 것과 동일한 직경 23 mm 크기의 팬케이크 (Pancake) 형상을 적용하였다. 또한, 피착재는 두 개의 유리 섬유/PEEK 패널로 구성하였으며, 접합부에는 전도성 서셉

Table 1. Results of induction heating simulation

Item	Location	Temperature (°C)	Magnetic Flux Density (T)
40 wt.%	1	250.4	0.0122
	2	303.5	0.0204
	3	304.8	0.0210
50 wt.%	1	305.5	0.0122
	2	352.9	0.0204
	3	364.3	0.0210
60 wt.%	1	355.6	0.0122
	2	407.6	0.0204
	3	423.7	0.0210

터인 Ag/PEEK 필름을 배치하였다. 해석은 코일을 이동하지 않는 조건으로 설정하였으며, 코일-피착재 간 커플링 거리는 코일과 시편의 직접 접촉을 방지하면서 접합부에 충분한 자기장을 인가하기 위한 최소 이격 조건인 1 mm로 설정하였다.

이러한 조건으로 Ag 함량에 따른 Ag/PEEK 필름의 유도 가열 거동을 비교하기 위해 40 wt.%, 50 wt.%, 60 wt.% Ag/PEEK 필름에 대해 10초 동안 해석을 수행하였다. Fig. 2(a), (b), (c)는 각각 40 wt.%, 50 wt.%, 60 wt.% Ag/PEEK 필름의 해석 결과이다. 모든 조건에서 코일의 형상과 대응되는 발열 영역이 형성되었으며 Fig. 2(a)에 표시한 1~3번 위치에서 추출한 접합부의 온도와 자기장 밀도를 Table 1에 정리하였다. 먼저 자기장 밀도는 Ag 함량과 관계없이 세 개의 위치에서 각각 0.0122 T, 0.0204 T, 0.0210 T로 나타났다. 이는 동일한 코일 형상, 코일-피착재 간 커플링 거리 및 인가 조건에서 자기장 분포가 주로 코일 형상에 의해 결정되기 때문이다. 특히 2, 3번 위치는 1번 위치보다 높은 자기장 밀도를 나타내어 코일 중심 및 인접 영역을 중심으로 고온 영역이 형성되었다. 동일한 자기장 분포 조건에서 접합계면의 온도는 Ag 함량이 증가함에 따라 뚜렷하게 증가하였다. 40 wt.% Ag/PEEK 필름의 경우 1~3번 위치에서 각각 250.4°C, 303.5°C, 304.8°C의 온도를 나타냈으며 모든 위치에서 PEEK의 용융온도에 도달하지 못하였다. 반면 50 wt.% Ag/PEEK 필름에서는 1~3번 위치의 온도가 각각 305.5°C, 352.9°C, 364.3°C로 나타났으며 2, 3번 위치에서 PEEK의 용융온도 이상에 도달하였다. 60 wt.% Ag/PEEK 필름에서는 각각 355.6°C, 407.6°C, 423.7°C의 온도를 나타내어 가장 높은 발열 특성을 나타냈으며 모든 측정 위치에서 PEEK의 용융온도 이상에 도달하였다. 따라서 동일한 유도가열 조건에서 Ag 함량이 증가할수록 서셉터의 발열 성능이 향상되며 특히 50 wt.% 이상에서 접합계면의 PEEK를 용융시킬 수 있는 발열이 발생하는 것으로 판단된다.

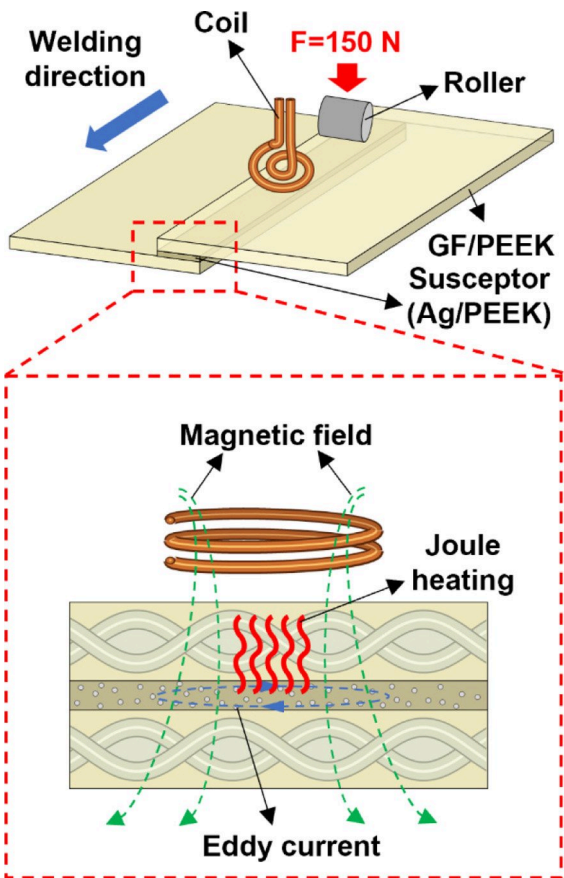


Fig. 3. Schematic of the induction welding process and mechanism

2.4 연속 유도용접 공정 및 접합 시편 제작

본 연구에서 적용한 연속 유도용접 공정과 Ag/PEEK 필름을 활용한 유도용접의 메커니즘을 Fig. 3에 보였다. 연속 유도용접 공정에서는 코일과 롤러가 일정한 간격을 유지한 상태로 용접 방향을 따라 함께 이동한다. 선행하는 코일에 교류 전류가 인가되면 접합부에 교번자기장이 형성되고 이에 의해 전도성 서셉터인 Ag/PEEK 필름 내부에 와전류가 유도된다. 와전류에 의한 줄 발열은 Ag/PEEK 필름을 중심으로 발생하며 생성된 열이 인접한 유리섬유/PEEK의 접합계면으로 전달되어 PEEK를 용융시킨다. 코일의 이동에 따라 용융된 접합부에 후행하는 롤러가 도달하면 롤러의 압축 하중에 의해 밀착과 용착이 이루어진다. 이후 롤러가 통과한 접합부는 가열영역에서 벗어나 냉각되며 용융된 PEEK가 재고화되어 접합부가 형성된다.

유도용접에는 태양인덕션社의 TH-6000 고주파 유도가열기와 직경이 4 mm인 원형 구리관으로 제작된 23 mm 크기의 팬케이크 형상 구리 코일을 사용하였다. 접합 시편은 단일겹침 전단시험을 수행할 것을 고려하여 ASTM D5868 규격에 따라 101.6 mm×101.6 mm 크기의 유리섬유/PEEK 패넌을 25.4 mm×101.6 mm의 겹침영역을 가지도록 배치하고,

접합부에 Ag/PEEK 필름을 전도성 서셉터로 삽입하였다[26]. 유도용접은 2.3절에서 설정한 인가 조건, 코일-피착재 간 커플링 거리를 적용하여 수행하였다. 정적 해석에서 10초 동안 전자기장에 노출된 조건을 실제 유도용접 공정에서도 유사하게 구현하기 위해 코일을 2 mm/s의 속도로 이동시켰다. 이때 롤러를 이용하여 접합부에 150 N의 압축 하중을 가하였으며 가열 중 유리섬유/PEEK 패넌과 Ag/PEEK 서셉터 사이의 접촉을 유지하고 충분히 압착되도록 하였다.

3. 시 험

3.1 주사전자현미경 및 에너지분산분광법 분석

제작한 전도성 서셉터 Ag/PEEK 필름의 미세적 표면 형상, Ag 입자의 분포 상태 및 실제 Ag 함량을 분석하기 위해 주사전자현미경(Scanning electron microscopy, SEM)과 에너지분산분광법(Energy dispersive spectrometer, EDS) 분석을 수행하였다. SEM/EDS 분석에는 Tescan社의 SRO(S8000) 장비를 활용하였다. Ag/PEEK 필름 표면의 SEM 이미지를 통해 Ag 함량 변화에 따른 Ag 입자의 분포 밀도, 입자 간 접촉 및 국부적인 응집 여부를 정성적으로 관찰하였다. EDS 분석은 ASTM E1508 규격을 참고하여 수행하였다[27]. 측정 영역 내 검출 원소는 Ag과 PEEK의 구성 원소인 탄소와 산소로 설정하였고, 연구에 활용한 99.99% 순도의 Ag 입자에 포함된 철, 납, 구리 등의 극소량의 불순물은 발열 성능에 영향을 미치지 않을 것으로 판단하여 검출하지 않도록 설정하였다. 측정을 통해 Ag/PEEK 필름을 구성하는 Ag, 산소, 탄소의 원자량 비와 무게비를 얻었으며, 이를 제작 시 혼합한 Ag 입자의 목표 무게분율과 비교하여 제작성을 평가하였다.

3.2 전도성 서셉터 전기전도도 측정

Ag의 무게분율에 따른 전도성 서셉터의 전기전도도를 평가하기 위해 제작된 Ag/PEEK 필름의 전기전도도를 측정하였다. 전기전도도 측정은 MS Tech社의 M4P-032, 4점 탐침 측정 장비를 사용하여 수행하였으며, ASTM F1529 규격

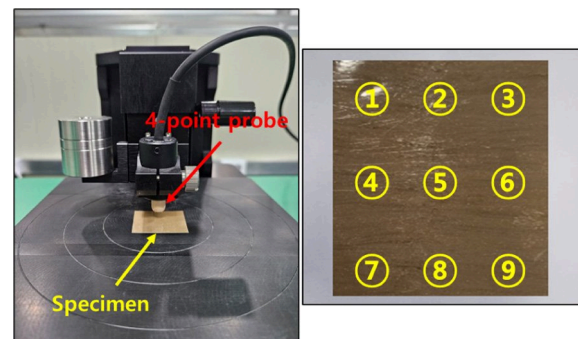


Fig. 4. Setup for 4-point probe test

을 준수하여 수행하였다[28]. 제작한 모든 무게분율의 Ag/PEEK 필름을 대상으로 전기전도도를 측정하였으며, Fig. 4에 나타난 바와 같이 각 무게분율의 Ag/PEEK 필름 표면의 9개 영역에서 전기전도도 값을 측정하였다. 측정값을 바탕으로 Ag의 무게분율이 Ag/PEEK 필름의 전기전도도에 미치는 영향을 평가하였으며, 측정 위치별 전기전도도 값을 비교하여 Ag 입자 분포의 균일성을 평가하였다.

3.3 전도성 서셉터 발열 성능 측정

제작한 전도성 서셉터 Ag/PEEK 필름의 발열 성능을 평가하기 위해 유도가열 환경에 노출시켜 온도변화를 측정하였다. 발열 성능 평가에 활용한 시편은 에지효과를 고려하여 가열 범위보다 충분히 큰 60 mm×60 mm 크기의 Ag/PEEK 필름을 사용하였다. 유도용접 환경과 동일한 조건인 250 kHz, 400 A의 교류 전류를 코일에 인가하였으며, 코일과 Ag/PEEK 필름의 거리는 2 mm로 설정하였다. 이때, 시간에 따른 발열 성능을 측정하기 위해 코일은 정지 상태로 설정하였다. 제작한 모든 무게분율의 Ag/PEEK 필름을 대상으로 발열 성능을 측정하였으며, K-type의 열전대를 사용하여 온도 변화를 측정하였다. 측정 결과를 바탕으로 초기 온도 변화율, 최대 상승 온도를 비교하여 Ag 입자 함량이 발열 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 연구에 활용한 팬케이크 형상 코일의 직경이 23 mm이며 2 mm/s의 이송 속도를 적용하였을 때, 약 10초간 전자기장에 노출되는 것을 고려하여 10초간 가열 시 도달하는 온도를 분석하여 제작한 Ag/PEEK 필름의 활용 가능성을 평가하였다.

3.4 비파괴검사 및 단면 분석

전도성 서셉터 Ag/PEEK를 활용하여 유도용접된 유리섬유/PEEK의 용접 품질을 평가하기 위해 비파괴검사 및 단면 분석을 수행하였다. 비파괴검사는 ASTM E2580 규격을 준수하여 수행하였다[29]. Fig. 5(a)는 비파괴검사 장비의 구성을 나타낸다. 비파괴검사에는 Japan Probe Co., Ltd의 JPR-600C 초음파 장비를 사용하였다. 공칭 중심주파수 400 kHz의 송·수신용 집속형 공기결합 탐촉자를 사용하였다. 송신용 및 수신용 탐촉자의 -6 dB 주파수 대역폭은 각각 128 kHz와 112 kHz이다. 송신 펄스 전압은 200 V로, X 및 Y 방향의

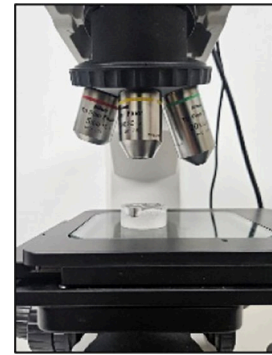


Fig. 6. Setup for cross-sectional microscopy inspection

공간 샘플링 간격은 각각 0.5 mm로 설정하였다. 분석에 활용한 장비는 공기를 매질로 초음파 투과량을 측정하는 장비로서 측정 영역의 최외곽에서 회절 현상이 발생하여 신뢰성이 저하될 수 있다. 이러한 측정 방식을 고려하여 25.4 mm×101.6 mm의 접합 영역 중 최외곽의 2 mm를 제외한 내부 21.4 mm×97.6 mm 영역의 측정 결과를 바탕으로 용접 성능을 분석하였다. 또한, 접합부 주변의 유리섬유/PEEK의 영향을 최소화하기 위해 101.6 mm×101.6 mm 크기의 유리섬유/PEEK를 Ag/PEEK 필름을 활용하여 용접하고 접합부를 제외한 영역의 유리섬유/PEEK는 제거한 시편을 비파괴 검사에 활용하였다. 시편 형상과 분석 영역은 Fig. 5(b)에 나타내었다. 이와 같이 설정한 분석 영역의 C-스캔 결과를 정량적으로 비교하기 위해 ImageJ 프로그램을 이용하여 저투과 영역의 면적 분율을 산출하였다. 저투과 영역을 구분하기 위한 임계값은 0.1565로 설정하였으며, 40 wt.%, 50 wt.% 및 60 wt.% 조건에 동일하게 적용하였다.

단면 분석은 Fig. 6에 나타난 Nikon 社의 DS-Fi3/Eclipse LV 150 광학현미경을 사용하였으며, ASTM E2015 규격을 따랐다[30]. 단면 관찰을 위해 Ag/PEEK 필름을 활용하여 유도용접된 유리섬유/PEEK 접합부를 절단하고 그 단면을 분석하였다. 광학현미경을 이용하여 얻은 접합부 단면 이미지를 바탕으로 Ag/PEEK 필름과 유리섬유/PEEK의 계면 결합, Ag 입자의 분포, 기공을 분석하여 유도용접 성능을 평가하였다.

3.5 접합강도 평가

전도성 서셉터 Ag/PEEK가 접합강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 층간 전단강도 시험과 단일점접 전단강도 시험을 수행하였다. Ag/PEEK 필름을 서셉터로 적용한 유리섬유/PEEK 접합 시편의 접합강도를 무게분율에 따라 평가하기 위해 기존 유도용접 공정에서 많이 활용되는 금속 서셉터인 스테인리스강 메쉬를 서셉터로 적용한 접합 시편을 기준으로 함께 평가하였고, 각 조건에서 5개의 시편에 대해 시험을 수행하였다. 층간 전단강도 시험과 단일점접 전단강도 시험에 사용한 시편의 형상은 Fig. 7에 나타

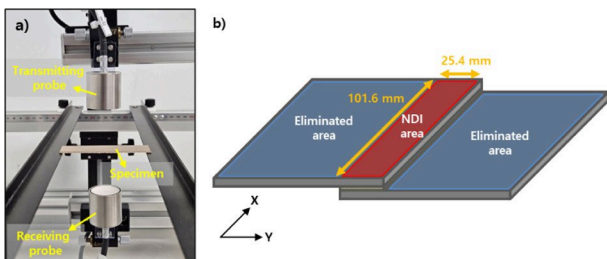


Fig. 5. Non-destructive inspection a) setup and b) geometry of specimen

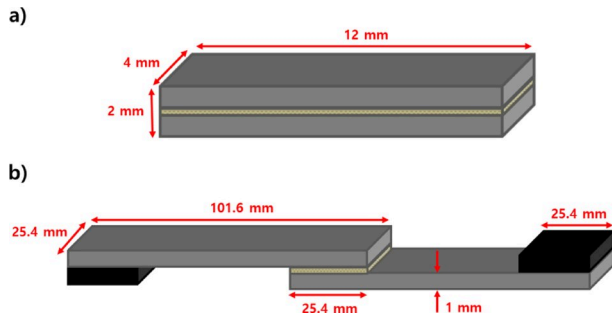


Fig. 7. Geometry of specimen for a) interlaminar shear strength, and b) single-lap shear strength

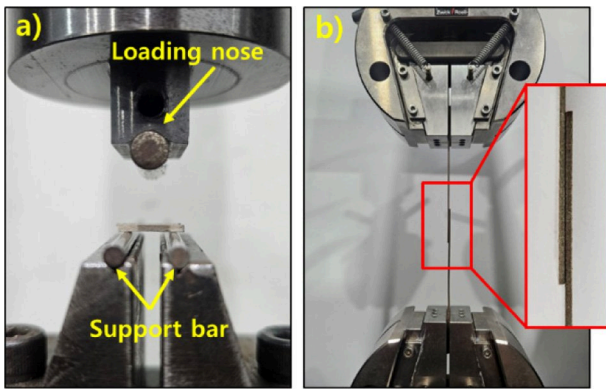


Fig. 8. Test setup for a) interlaminar shear strength and b) single lap shear strength

내었다. Fig. 7(a)는 층간 전단강도 시편의 형상으로 4 mm×12 mm 크기로 준비하였다. Fig. 7(b)는 단일겹침 전단강도 시험 시편이며 25.4 mm×177.8 mm 크기이고 시편의 양 끝에 유리섬유/PEEK 탭을 부착하여 편심 하중과 굽힘 변형을 방지하였다.

접합강도 시험 구성은 Fig. 8에 나타내었다. 층간 전단강도 시험에는 Instron 5582 재료시험기를 사용하였고, ASTM D2344 규격을 준수하였다. 시편 두께 2 mm에 스펀 두께 비 4:1을 기준으로 스펀 길이를 8 mm로 설정하였으며, 하중은 분당 1 mm/min의 속도로 가하였다[31]. 단일겹침 전단강도 시험은 Zwick 社の 10 kN 만능재료시험기를 사용하였으며, ASTM D5868 규격을 따라 13 mm/min의 속도로 하중을 가하였다.

4. 결과 및 토론

4.1 SEM/EDS 분석

Ag/PEEK 필름의 SEM 및 EDS 분석 결과는 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a), (c), (e)의 SEM 이미지에서 Ag 입자는 PEEK 기지 내에 밝은 입자상 영역으로 관찰되었으며 Ag의 함량이 증가함에 따라 필름에 분포하는 밝은 입자 영역이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 40 wt.% Ag/PEEK 필름에서

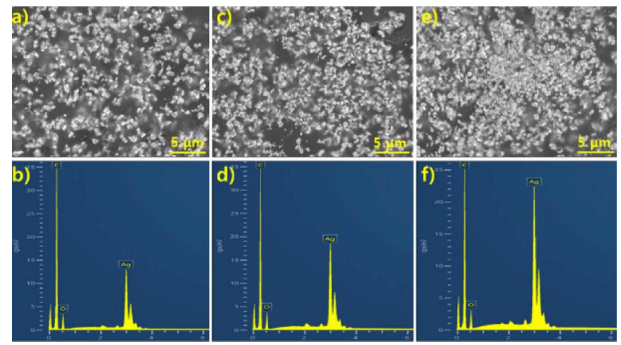


Fig. 9. SEM images and EDS analysis of Ag/PEEK film: (a, b) 40 wt.%, (c, d) 50 wt.%, and (e, f) 60 wt.%

는 Ag 입자가 비교적 낮은 밀도로 분산되어 있으며, 입자 간 간격이 상대적으로 크게 나타났다. 50 wt.% Ag/PEEK 필름에서는 Ag 입자의 분포 밀도가 증가하면서 입자 간 거리가 감소하였고 일부 영역에서는 국부적인 응집이 관찰되었다. 60 wt.% Ag/PEEK 필름에서는 Ag 입자가 더욱 조밀하게 분포하였으며 높은 Ag 함량으로 인해 일부 Ag 응집영역이 형성되었다. 그러나 SEM 관찰 영역 내에서 Ag 입자가 특정 영역에만 편중되거나 Ag가 거의 존재하지 않는 영역은 관찰되지 않아 Ag 입자가 비교적 균일하게 분산되어 있음을 확인하였다. Ag 입자의 국부적인 응집은 금속 나노입자의 높은 표면에너지로 인해 발생하는 입자 간 응집과 관계 있으며[32], 실제 Ag/PEEK 나노 복합재에서도 Ag 함량 증가에 따라 입자응집이 증가하는 것으로 보고되었다[33]. 또한 PEEK 기반 나노 복합재에서 충전재 함량 증가에 따라 용융점도가 증가하고 PEEK 사슬의 유동성이 감소하여[34], 필름 성형 및 재용융 과정에서 형성된 응집체의 분리가 어려워질 수 있다.

Fig. 9(b), (d), (f)의 EDS 분석 결과, 제조된 Ag/PEEK 필름에서 실제 Ag 함량이 목표 조성과 근접하게 제어되었음을 알 수 있다. 40 wt.% Ag/PEEK 필름은 40.8 wt.%, 50 wt.% Ag/PEEK 필름과 60 wt.% Ag/PEEK 필름은 각각 51.4 wt.%, 59.6 wt.%의 Ag 함량을 보였다. 목표 Ag 함량과 EDS 측정값 간의 상대오차는 50 wt.% Ag/PEEK 필름에서 2.9%로 가장 크게 나타났으나, 모든 Ag/PEEK 필름에서 측정된 Ag 함량은 목표 조성과 유사한 수준을 보였다.

4.2 전도성 서셉터 전기전도도 평가

측정 위치에 따른 Ag/PEEK 필름의 전기전도도 측정 결과는 Table 2에 나타내었다. 예상했던 대로 Ag 함량이 증가할수록 우수한 전기전도도를 가지는 것을 확인하였다. 40 wt.% Ag/PEEK 필름과 50 wt.% Ag/PEEK 필름은 각각 평균 32,272 S/m, 41,770 S/m의 전기전도도를 보였다. 60 wt.% Ag/PEEK 필름은 평균 50,606 S/m로 40 wt.% Ag/PEEK 필름 대비 56.8% 높은 결과를 보였다. 그러나, 측정 위치에 따른 전

Table 2. Electrical conductivity of Ag/PEEK film

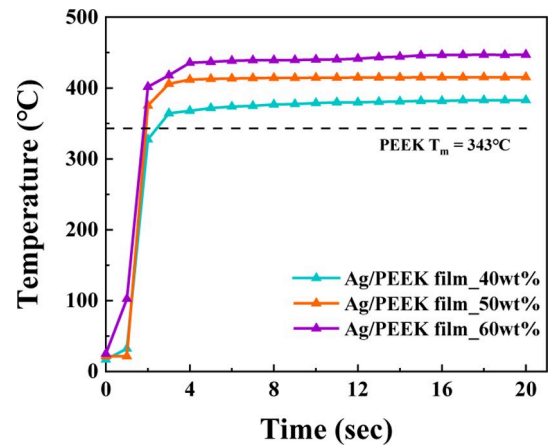
Area	Electrical conductivity (S/m)		
	40 wt.%	50 wt.%	60 wt.%
#1	31,825	40,610	47,302
#2	32,760	39,520	53,891
#3	31,010	42,345	49,674
#4	33,995	44,618	45,978
#5	31,780	43,861	54,403
#6	32,515	42,230	46,120
#7	31,450	42,048	52,309
#8	33,125	41,010	50,782
#9	31,984	39,690	54,996
Average	32,272	41,770	50,606
Error	5.33%	7.1%	9.14%

기전도도는 Ag 입자의 무게분율이 증가할수록 큰 오차를 보였다. 40 wt.% Ag/PEEK 필름은 5.3%, 60 wt.% Ag/PEEK 필름의 경우 최대 9.1%의 오차범위를 보였다. 이는 SEM/EDS 분석 결과와 같이 Ag 입자를 분산하는 과정에서 국부적으로 Ag 입자의 응집 현상이 발생하였기 때문으로 판단된다. 선행연구에 의하면, 전도성 충전제가 고분자 기지 내에 균일하게 분산되지 않고 응집체를 형성할 경우, 시편 내부의 전도 경로와 퍼콜레이션(Percolation) 네트워크가 불균일하게 발달하게 된다. 이로 인해 측정 위치에 따라 입자 간 접촉 상태와 전류 전달경로가 달라질 수 있으며 결과적으로 전기전도도의 편차가 증가할 수 있다[35,36]. 따라서 본 연구에서 Ag 함량 증가에 따라 평균 전기전도도는 증가하였으나 측정 위치에 따른 전기전도도 오차 또한 증가한 것은 국부적인 Ag 입자의 뭉침에 기인한 것으로 판단된다.

또한, Ag/PEEK 필름의 전기전도도 측정에서 더 큰 오차가 발생한 것은 4점 탐침법의 특성과도 관련이 있는 것으로 보인다. 4점 탐침법에서는 일렬로 배열된 네 개의 프로브 중 바깥쪽 두 프로브가 전류를 인가하고 내부의 두 프로브에서 전위차를 측정하여 전기전도도를 산출한다. 따라서 Ag/PEEK 필름의 표면에 분포된 Ag 입자의 양과 분포 형태에 따라 전류 전달경로가 달라질 수 있고 Ag는 PEEK보다 현저히 높은 전기전도도를 가지므로 국부적인 Ag 함량이 높은 영역 또는 응집체의 형성은 전기전도도 값의 편차를 크게 할 수 있다.

4.3 전도성 서셉터 발열 성능 평가

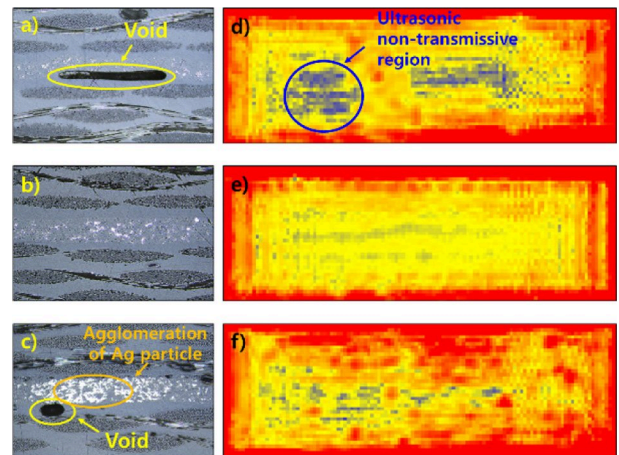
23 mm 직경의 코일을 2 mm/s의 속도로 이송하였을 때 접합부의 한 지점이 약 10초간 전자기장에 노출되는 것을 고려하여 Ag/PEEK 필름의 발열 성능을 평가하였다. 유도가열 환경에서 Ag/PEEK 필름의 발열 거동 평가 결과는 Fig. 10과 같으며, Ag 입자의 함량이 증가할수록 도달 온도가 높

**Fig. 10.** Heating behavior of Ag/PEEK film

아지는 경향을 보였다. 40 wt.% Ag/PEEK 필름과 50 wt.% Ag/PEEK 필름은 10초간 전자기장에 노출되었을 때 각각 377.4°C, 414.3°C에 도달하였다. 60 wt.% Ag/PEEK 필름의 경우 439.4°C에 도달하여 가장 높은 온도를 보였으며, 이는 4.2 절에서 확인한 전기전도도 증가 경향과 일치한다. 모든 무게분율의 Ag/PEEK 필름은 10초 이상 가열하였을 때 PEEK의 용융온도보다 높은 온도에서 발열 거동이 수렴하는 것을 확인하였다. 측정 결과를 바탕으로 제작한 Ag/PEEK 필름이 유리섬유/PEEK의 유도용접 공정에 적용 가능하다고 판단하였다.

4.4 비파괴검사 및 단면 분석 결과

Ag/PEEK 필름을 서셉터로 적용한 유리섬유/PEEK 유도용접 접합부의 비파괴검사 및 단면 분석 결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11(a-c)는 각각 40 wt.%, 50 wt.%, 60 wt.% Ag/PEEK 필름을 적용한 접합부의 단면 이미지를 나타내

**Fig. 11.** Results of cross-sectional microscopy inspection a) 40 wt.%, b) 50 wt.%, c) 60 wt.% and NDI d) 40 wt.%, e) 50 wt.%, f) 60 wt.%

며, Fig. 11(d-f)는 동일 조건에서의 비파괴검사 결과를 나타낸다.

비파괴검사 결과, 50 wt.% Ag/PEEK 필름을 활용한 경우 대부분의 영역에서 균일한 초음파 투과량을 보인 반면, 40 wt.% Ag/PEEK 필름과 60 wt.% Ag/PEEK 필름을 활용한 경우에는 국부적으로 초음파 투과량이 낮은 영역이 식별되었다. C-스캔 결과를 정량적으로 분석한 결과, 저투과 결함 영역의 면적분율은 40 wt.%, 50 wt.% 및 60 wt.% 조건에서 각각 14.6%, 0.6% 및 4.8%로 나타났으며, 50 wt.% 조건에서 가장 낮은 값을 보였다.

단면 분석 결과 40 wt.% 조건에서 국부적인 기공이, 60 wt.% 조건에서는 Ag 입자응집 영역을 동반한 기공이 관찰되었다. 선행연구에 의하면, 열가소성 복합재의 용융 및 압착 과정에서 접합계면의 충분한 용융과 용융수지의 재분배 및 내부 공기 배출이 기공 제거에 중요한 인자이다[37,38]. 따라서 40 wt.% Ag/PEEK 필름의 발열 거동 평가에서 PEEK의 용융온도 이상에 도달하였지만 실제 용접 과정에서는 국부적으로 충분한 용접온도에 도달하지 못하여 기공이 발생한 것으로 판단된다. 반면, 60 wt.% 조건에서 관찰된 기공은 4.1절에서 논의한 바와 같이 Ag 함량 증가에 따른 입자의 응집과 제한된 수지 유동으로 인해 응집영역 주변의 기공이 충분히 제거되지 못하고 잔류한 것으로 판단된다.

4.5 접합강도 평가

4.5.1 층간 전단강도

층간 전단강도 시험 결과는 Fig. 12에 나타내었으며, 층간 전단강도 시험 결과는 비파괴검사 및 단면 분석을 통해 확인한 용접 성능과 일치하였다. 50 wt.% Ag/PEEK 필름을 활용한 경우 18.5 MPa로 가장 높은 층간 전단강도 결과를 보였으며, 스테인리스강 메쉬를 사용한 경우 대비 79.6% 높은 결과를 보였다. 40 wt.% Ag/PEEK 필름과 60 wt.% Ag/PEEK 필름을 사용한 경우 각각 13.2 MPa, 15.8 MPa의 층간 전단강도를 보였다. 4.4절에서 확인된 국부적인 결함은 전

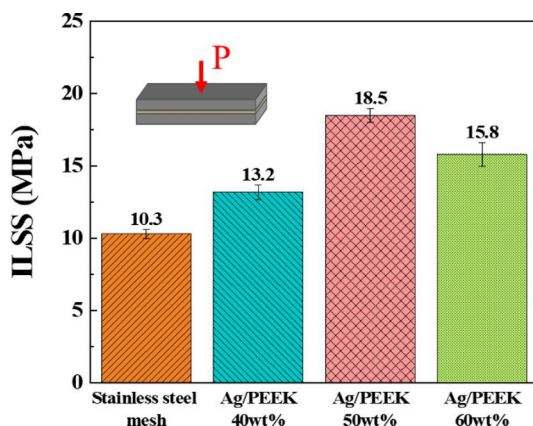


Fig. 12. Interlaminar shear strength of induction welded GF/PEEK with Ag/PEEK film

단 하중 하에서 응력집중을 유발하여 균열의 시작점으로 작용하고, 이로 인해 40 wt.% 및 60 wt.% Ag/PEEK 필름에서 50 wt.% Ag/PEEK 필름 대비 낮은 층간 전단강도가 나타난 것으로 판단된다.

모든 시편은 서셉터가 위치한 접합부에서 층간분리를 보였다. 이는 서셉터와 유리섬유/PEEK 간 계면결합력이 유리섬유/PEEK 내부 층간 결합력보다 낮은 영역에서 파손이 진행되었음을 의미한다. 스테인리스강 메쉬의 열팽창계수는 약 $16.0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 인 반면, PEEK의 열팽창계수는 Tg 이상에서 약 $120 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 로 보고된다. 따라서 스테인리스강 메쉬와 PEEK 사이의 열팽창계수 차이는 냉각 과정에서 계면 잔류응력과 응력집중을 유발할 수 있으며, 이는 접합부 계면파손에 영향을 미칠 수 있다. Ag/PEEK 필름은 PEEK를 포함하고 있어 유리섬유/PEEK와의 계면융착에는 유리하지만, Ag 함량이 증가할수록 Ag 응집영역과 PEEK 기지 사이의 국부적인 열팽창계수 차이 및 응력집중을 증가시킬 수 있다. 따라서 60 wt.% Ag/PEEK 필름에서 나타난 낮은 층간 전단강도는 기공, 입자응집, 수지과잉 영역 감소 및 국부적인 열기계적 불일치가 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

4.5.2 단일접침 전단강도

단일접침 전단시험에 따른 파손면과 전단강도 시험 결과는 각각 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다. 단일접침 전단강도 시험은 층간 전단시험과 유사한 결과를 보였다. 스테인리스강 메쉬를 서셉터로 사용한 경우 5.4 MPa로 나타났으며, 40 wt.%, 50 wt.% 및 60 wt.% Ag/PEEK 필름을 사용한 경우 각각 8.9 MPa, 12.3 MPa 및 10.9 MPa의 단일접침 전단강도를 보였다. 특히, 50 wt.% Ag/PEEK 필름을 사용한 경우 가장 높은 단일접침 전단강도 결과를 보였고, 스테인리스강 메쉬를 사용한 기준군 대비 127.7% 높은 결과를 보였다. 이러한 경향은 앞서 층간 전단강도 결과에서 논의한 바와 같이 Ag/PEEK 필름의 PEEK기반 계면융착 특성과 관련된 것으로 판단된다. 한편,

Lee 등과 Da Silva 등은 접합부의 두께가 증가함에 따라 접합강도가 저하된다고 보고하였다[39,40]. 이 결과를 참고할 때 1 mm 이하의 두께를 가지는 Ag/PEEK 필름을 사용하는 것이 유리섬유/PEEK 유도용접을 수행하여 접합강도를 향상시키는 데 가장 유리할 것으로 예상된다.

ASTM D5573에 따르면 파손모드는 Cohesive failure (COH), Adhesive failure (ADH), Thin-layer cohesive failure (TLC), Fiber tear failure (FT), Light-fiber-tear failure (LFT)로 분류할 수 있다[41]. Fig. 13에서 모든 무게분율의 Ag/PEEK 필름에서 COH와 ADH 파손모드가 관측되었으며, 50 wt.%, 60 wt.% Ag/PEEK 필름의 일부 영역에서는 LFT 파손모드가 관찰되었다. ADH 파손은 Ag/PEEK 필름과 유리섬유/PEEK 사이의 계면 결합이 충분하지 않은 영역에서 발생한 것으로 판단된다. COH는 접합계면에서 일정 수준 이상의 융착

이 형성되었으나, 재고화된 PEEK 고함량층 또는 Ag/PEEK 필름 내부의 상대적으로 약한 영역을 따라 균열이 진행된 결과로 해석된다. 한편, 50 wt.% 및 60 wt.% Ag/PEEK 필름에서 관찰된 LFT는 일부 영역에서 Ag/PEEK 필름과 유리섬유/PEEK 사이의 계면결합력이 유리섬유/PEEK 표면층의 섬유-수지 결합력에 근접하거나 이를 초과했음을 의미한다.

파손모드의 분포와 단일겹침 전단강도를 함께 비교하면 40 wt.% Ag/PEEK 필름에서는 접합면 가장자리를 중심으로 ADH가 지배적으로 나타난다. 이는 계면발열 부족으로 PEEK가 충분히 용융되지 못하여 Ag/PEEK 필름과 유리섬유/PEEK 사이의 계면분리가 우선적으로 진행된 결과로 판단되며, 해당 조건에 나타난 상대적으로 낮은 접합강도와 일치한다. 반면 50 wt.% Ag/PEEK 필름에서는 COH, ADH 및 LFT가 모두 국부적인 작은 영역에 분산되어 나타났다. 이는 접합부 전반에 비교적 균일한 용착이 형성되어 파손경로가 국부적으로 제한되었다고 판단되며 이는 가장 높은 접합강도를 나타낸 결과와 일치한다. 60 wt.% Ag/PEEK 필름에서는 ADH와 LFT가 유사한 면적 수준으로 관찰되며 COH 영역은 상대적으로 작게 나타났다. 일부 영역에서는 계면

결합력이 충분히 형성되어 파손이 유리섬유/PEEK 표면층까지 진행되었으나 다른 영역에서는 Ag/PEEK 필름과 유리섬유/PEEK 사이의 계면분리가 발생했음을 알 수 있다. Fig. 11의 단면 분석에서 확인된 Ag 입자응집과 기공을 고려하면 60 wt.% 조건의 접합강도 저하는 응집체 자체의 직접적인 계면분리에 의한 결과라기보다 강하게 용착된 영역과 취약한 계면영역이 동시에 형성된 불균일한 접합부에서 비롯된 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 전도성 서셉터 Ag/PEEK 필름을 제작하고 활용하여 비전도성 열가소성 복합재 유리섬유/PEEK를 유도용접하고, 용접 성능을 평가하였다. 전도성 서셉터 제작을 위해 전기전도성이 우수한 Ag 입자를 활용하여 Ag/PEEK 필름을 무게분율에 따라 제작하였으며, 피착재로 활용할 비전도성 열가소성 복합재 유리섬유/PEEK를 제작하였다. 제작한 Ag/PEEK 필름과 기준군으로 활용할 스테인리스강 메쉬를 서셉터로 적용하여 유리섬유/PEEK를 유도용접하였다. 유도용접 공정은 코일과 유리섬유/PEEK 간의 거리를 1 mm로 유지하며, 2 mm/s의 속도로 코일을 이동시키며 수행하였다.

제작한 전도성 서셉터의 성능을 평가하기 위해 전기전도도 및 발열 거동을 측정하였다. 측정 결과, Ag 입자의 함량이 증가함에 따라 전기전도도가 상승하였으며, 이로 인해 유도가열 환경에 노출되었을 때 발열 성능이 향상되는 것을 확인하였다. 모든 무게분율의 Ag/PEEK 필름은 10초간 가열하였을 때 PEEK의 용융온도 이상의 온도에 도달하였으며, 60 wt.% Ag/PEEK 필름은 439.4°C까지 도달하여 가장 높은 발열 성능을 보였다.

전도성 서셉터를 활용한 유리섬유/PEEK의 유도용접 성능을 확인하기 위해 비파괴검사, 단면 분석을 수행하고 접합강도를 평가하였다. 비파괴검사 결과, 50 wt.% Ag/PEEK 필름을 활용한 경우 대부분의 접합 영역에서 균일한 초음파 투과 특성을 보였으며 C-스캔을 통해 산출한 저투과 영역의 면적분율은 40 wt.%, 50 wt.% 및 60 wt.% 조건에서 각각 14.6%, 0.6% 및 4.6%로 나타났다.

단면 분석에서는 50 wt.% Ag/PEEK 필름을 활용한 경우 가장 균일하게 용접되었음을 확인하였다. 하지만, 40 wt.% Ag/PEEK 필름과 60 wt.% Ag/PEEK 필름을 활용한 경우 국부적으로 기공이 발견되었다. 중간 전단강도 시험 및 단일겹침 전단강도 시험 결과 또한 50 wt.% Ag/PEEK 필름을 활용한 유리섬유/PEEK에서 각각 18.5 MPa, 12.3 MPa로 가장 우수한 접합강도를 보였으며, 스테인리스강 메쉬를 활용한 경우 대비 각각 79.6% 및 127.7% 높은 결과이다.

본 연구를 바탕으로 전도성 서셉터 Ag/PEEK 필름을 활용하여 비전도성 열가소성 복합재 유리섬유/PEEK의 용접

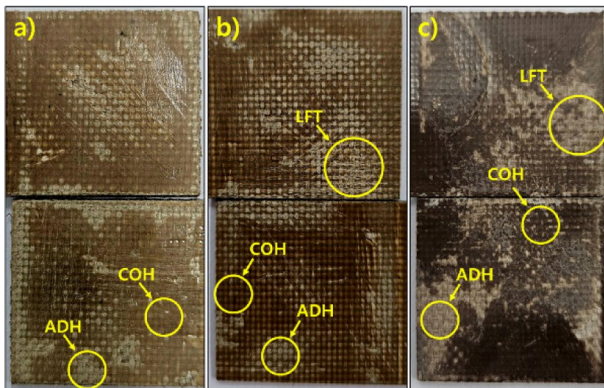


Fig. 13. Failure surface of induction welded GF/PEEK with Ag/PEEK film a) 40 wt.%, b) 50 wt.%, and c) 60 wt.%

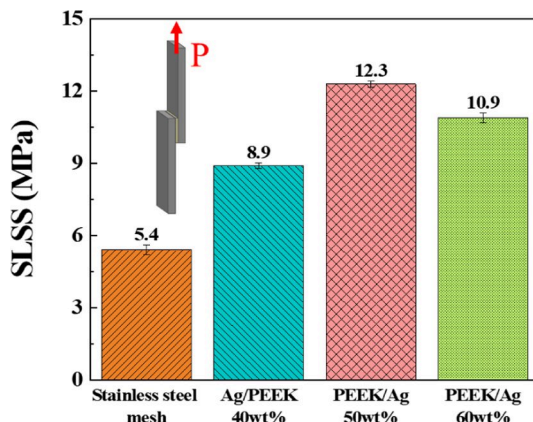


Fig. 14. Single lap shear strength of induction welded GF/PEEK with Ag/PEEK film

성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였으며, 특히 50 wt.% Ag/PEEK 필름은 발열 성능과 접합부 결함 억제 측면에서 가장 적절한 조건으로 나타나 스테인리스강 메쉬 기준군 대비 향상된 접합강도를 보였다. 따라서 Ag/PEEK 필름은 전기전도성이 낮아 직접적인 유도가열이 어려운 비전도성 열가소성 복합재 유도용접을 위한 전도성 서셉터로 활용될 수 있으며 GFRP가 활용되는 차량 및 선박 등의 구조물 접합에도 적용 가능성이 있을 것으로 판단한다. 향후에는 Ag/PEEK 필름의 균질성을 확보하여 일정한 발열 성능을 나타내면서 대량 생산이 가능한 서셉터 제작 공정에 대한 연구를 수행할 계획이다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00397400).

REFERENCES

1. Kwon, J.S., Kim, J.S., and Lee, S.Y., "A Study on Stress Concentration Factor of Composite Laminate Mechanical Joints," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 41, No. 3, 2013, pp. 194-200.
2. Song, M.G., Kweon, J.H., Choi, J.H., Kim, H.J., Song, M.H., and Shin, S.J., "Strength of Composite Single-Lap Bonded Joints with Various Manufacturing Processes for Aircraft Application," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 37, No. 8, 2009, pp. 751-758.
3. Ulus, H., "An Experimental Assessment of Hybrid Bolted/Bonded Basalt Fiber Reinforced Polymer Composite Joints' Temperature-Dependent Mechanical Performances by Static and Dynamic Mechanical Analyses," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 114, 2022, 103120.
4. Lopez-Cruz, P., Laliberté, J., and Lessard, L., "Investigation of Bolted/Bonded Composite Joint Behaviour Using Design of Experiments," *Composite Structures*, Vol. 170, 2017, pp. 192-201.
5. Shishesaz, M., and Hosseini, M., "Effects of Joint Geometry and Material on Stress Distribution, Strength and Failure of Bonded Composite Joints: An Overview," *The Journal of Adhesion*, Vol. 96, No. 12, 2020, pp. 1053-1121.
6. Tang, H., and Liu, L., "A Novel Metal-Composite Joint and Its Structural Performance," *Composite Structures*, Vol. 206, 2018, pp. 33-41.
7. Li, H., Chen, C., Yi, R., Li, Y., and Wu, J., "Ultrasonic Welding of Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites: A Review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 120, No. 1, 2022, pp. 29-57.
8. Liu, Z., Li, Y., Liu, W., Zhou, H., Ao, S., and Luo, Z., "Enhancing the Ultrasonic Plastic Welding Strength of Al/CFRTP Joint via Coated Metal Surface and Structured Composite Surface," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 108, 2023, pp. 227-237.
9. Xiong, X., Wang, D., Wei, J., Zhao, P., Ren, R., Dong, J., and Cui, X., "Resistance Welding Technology of Fiber Reinforced Polymer Composites: A Review," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 35, No. 15, 2021, pp. 1593-1619.
10. Shen, L., Zhang, Y., Zhang, H., Sun, M., Jian, X., and Xu, J., "Strength Evaluation of CF/PEEK Resistance Welding Based on Improved Artificial Neural Network: Interface Failure Mechanism Study under Extreme Service Temperatures," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 297, 2025, 112290.
11. Stavrov, D., and Bersee, H.E.N., "Resistance Welding of Thermoplastic Composites—An Overview," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 36, No. 1, 2005, pp. 39-54.
12. Tijs, B.H.A.H., Doldersum, M.H.J., Turon, A., Waleson, J.E.A., and Bisagni, C., "Experimental and Numerical Evaluation of Conduction Welded Thermoplastic Composite Joints," *Composite Structures*, Vol. 281, 2022, 114964.
13. Ahmed, T.J., Stavrov, D., Bersee, H.E.N., and Beukers, A., "Induction Welding of Thermoplastic Composites—An Overview," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, No. 10, 2006, pp. 1638-1651.
14. Barazanchy, D., and van Tooren, M., "Heating Mechanisms in Induction Welding of Thermoplastic Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 36, No. 2, 2023, pp. 473-492.
15. Banik, N., "A Review on the Use of Thermoplastic Composites and Their Effects in Induction Welding Method," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 9, 2018, pp. 20239-20249.
16. Kwon, Y., Bae, D., and Shon, M., "Comparison of Heating Behavior of Various Susceptor-Embedded Thermoplastic Polyurethane Adhesive Films via Induction Heating," *Composite Research*, Vol. 30, No. 3, 2017, pp. 181-187.
17. Farahani, R.D., and Dubé, M., "Novel Heating Elements for Induction Welding of Carbon Fiber/Polyphenylene Sulfide Thermoplastic Composites," *Advanced Engineering Materials*, Vol. 19, No. 11, 2017, 1700294.
18. Hoang, V.T., Lee, D.S., Kweon, J.H., Kwak, B.S., and Nam, Y.W., "Multifunctional Heating Film as Susceptor for Induction-Welded Single-Lap Carbon Fiber Reinforced Polyetherketoneketone Thermoplastic Composite Joints: Thermal and Mechanical Behavior," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 43, No. 17-18, 2024, pp. 980-994.
19. Martin, R.G., Johansson, C., Tavares, J.R., and Dubé, M., "Manufacturing of Thermoplastic Composite Sandwich Panels Using Induction Welding under Vacuum," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 182, 2024, 108211.
20. Kang, C.S., Yoo, M.H., Seo, M.K., and Choi, B.K., "A Study on the Bonding Process of Carbon Fiber-Thermoplastic Composite Using Induction Heating Technology," *Composite Research*, Vol. 34, No. 6, 2021, pp. 421-425.
21. Baek, I.S., and Lee, S.S., "A Study on the Evaluation Method of Lap Shear Strength for Induction Welding of Thermoplastic Composites Using Tensile Test," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 16, No. 1, 2022, pp. 12-16.
22. Wang, F., Zhang, P., Luo, J., Li, B., Liu, G., and Zhan, X., "Effect

- of Heat Input on Temperature Characteristics and Fusion Behavior at Bonding Interface of CF RTP Induction Welded Joint with Carbon Fiber Susceptor," *Polymer Composites*, Vol. 44, No. 3, 2023, pp. 1586-1602.
23. Martin, R.G., Jonasson, C., Johansson, C., Tavares, J.R., and Dubé, M., "3D-Printing Magnetic Susceptor Filament for Induction Welding of Thermoplastic Composite Sandwich Panels," *Composites Communications*, Vol. 55, 2025, 102321.
24. Mattheß, D., Landgrebe, D., and Drossel, W.G., "Inductive Heating of Glass Fibre-Reinforced Thermoplastics Using Fibre- and Wire-Shaped Stainless Steel Susceptors," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 30, No. 1, 2017, pp. 67-87.
25. Weidmann, S., and Mitschang, P., "Influence of Welding Temperature and Weathering on Inductive Welded Hybrid Joints Made of Steel and TP-FRPC," *Key Engineering Materials*, Vol. 809, 2019, pp. 217-224.
26. ASTM D5868, "Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding," 2017.
27. ASTM E1508, "Standard Guide for Quantitative Analysis by Energy-Dispersive Spectroscopy," 2019.
28. ASTM F1529, "Standard Test Method for Sheet Resistance Uniformity Evaluation by In-Line Four-Point Probe with the Dual-Configuration Procedure," 2002.
29. ASTM E2580, "Standard Practice for Ultrasonic Testing of Flat Panel Composites and Sandwich Core Materials Used in Aerospace Applications," 2024.
30. ASTM E2015, "Standard Guide for Preparation of Plastics and Polymeric Specimens for Microstructural Examination," 2021.
31. ASTM D2344, "Standard Test for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates," 2022.
32. Bokern, S., Getze, J., Agarwal, S., and Greiner, A., "Polymer Grafted Silver and Copper Nanoparticles with Exceptional Stability against Aggregation by a High Yield One-pot Synthesis," *Polymer*, Vol. 52, No. 4, 2011, pp. 912-920.
33. Rivière, L., Lonjon, A., Dantras, E., Lacabanne, C., Olivier, P., and Gleizes, N.R., "Silver Fillers Aspect Ratio Influence on Electrical and Thermal Conductivity in PEEK/Ag Nanocomposites," *European Polymer Journal*, Vol. 85, 2016, pp. 115-125.
34. Silva, S., Barbosa, J.M., Sousa, J.D., Paiva, M.C., and Teixeira, P.F., "High-Performance PEEK/MWCNT Nanocomposites: Combining Enhanced Electrical Conductivity and Nanotube Dispersion," *Polymers*, Vol. 16, No. 5, 2024, 583.
35. Kim, T.G., Kim, J.M., Jang, K.S., and Lee, S.J., "Dispersibility-Tailored Conductive Epoxy Nanocomposites with Silica Nanoparticle-Embedded Silver Nanowires," *Polymer Testing*, Vol. 96, 2021, 107111.
36. Zhang, L., Li, Z., Liu, G., Chen, R., and Guo, S., "Enhancement of the Electrical and Thermal Conductivity of Epoxy-Based Composite Films Through the Construction of the Multi-Scale Conductive Bridge Structure," *Composites Science and Technology*, Vol. 239, 2023, 110074.
37. Saenz-Castillo, D., Martín, M.I., Calvo, S., Rodríguez-Lence, F., and Güemes, A., "Effect of Processing Parameters and Void Content on Mechanical Properties and NDI of Thermoplastic Composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 121, 2019, pp. 308-320.
38. Wu, D., Miao, Q., Dai, Z., Niu, F., and Ma, G., "Effect of Voids and Crystallinity on the Interlaminar Shear Strength of In-situ Manufactured CF/PEEK Laminates Using Repass Treatment," *Composites Science and Technology*, Vol. 224, 2022, 109448.
39. Lee, H.K., Pyo, S.H., and Kim, B.R., "On Joint Strengths, Peel Stresses and Failure Modes in Adhesively Bonded Double-Strap and Supported Single-Lap GFRP Joints," *Composite Structures*, Vol. 87, No. 1, 2009, pp. 44-54.
40. Da Silva, L.F.M., Rodrigues, T.N.S.S., Figueiredo, M.A.V., De Moura, M.F.S.F., and Chousal, J.A.G., "Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength," *The Journal of Adhesion*, Vol. 82, No. 11, 2006, pp. 1091-1115.
41. ASTM D5573, "Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-reinforced-plastic (FRP) Joints," 2019.