

표면 처리에 따른 알루미늄-탄소 섬유 복합재료 접합부의 부식 열화 및 전단 물성 분석

신대용* · 한재영* · 김경태* · 이준석*† · 안현철*†

Analysis of Corrosion Degradation and Shear Properties of Aluminum/ Carbon Fiber-Reinforced Composite Dissimilar Joints according to Surface Treatments

Daeyong Shin*, Jaeyoung Han*, Gyeongtae Kim*, Joon Seok Lee*†, Hyunchul Ahn*†

ABSTRACT: In this study, the bonding strength of CFRP/Al hybrid joints was investigated according to different aluminum surface treatments. Also, their accelerated degradation behavior was analyzed under a galvanic corrosion environment induced by the potential difference between carbon fiber and aluminum. Single Lap Shear (SLS) specimens were made in accordance with the ASTM D5868 standard, applying three surface treatment variables: sanding, anodizing, and resin pre-coating (RPC). The bonding reliability was evaluated by measuring the changes in shear strength before and after exposure to the corrosive environment. Furthermore, the microstructural changes at the adhesive interface were observed using Scanning Electron Microscopy (SEM) to interpret the degradation and failure mechanisms associated with each treatment. The results demonstrated that the anodizing process exhibited the superior performance in terms of shear strength retention after degradation. This suggests that anodizing is a highly effective surface treatment strategy for enhancing the environmental durability of CFRP/Al hybrid structures.

초 록: 본 연구에서는 CFRP/Al 이종소재 접합부에서 알루미늄 표면처리 방식에 따른 접합 강도 및 탄소섬유와 알루미늄 간의 전위차로 유발되는 갈바닉 부식(Galvanic corrosion) 환경에서의 가속 열화 거동을 비교 분석하였다. ASTM D5868 규격에 따라 단일 겹침 전단(SLS, Single Lap Shear) 시편을 제작하였으며, 알루미늄 표면처리는 샌딩(sanding), 아노다이징(anodizing), 레진 프리코팅(RPC, resin pre-coating) 세 가지 변수를 적용하였다. 열화 실험을 통해 부식 환경 노출 전후의 전단 강도 변화를 측정함으로써 표면처리 방식에 따른 접합 신뢰성을 평가하였다. 또한 주사전자현미경을 이용하여 열화 전·후 접착 계면의 미세 구조 변화를 관찰하고, 표면처리 방식에 따른 열화 및 파손 거동을 해석하였다. 연구 결과, 아노다이징 공법이 열화 후 전단강도 유지율 측면에서 가장 우수한 성능을 보였으며, 이는 CFRP/Al 이종소재 접합 구조에서 환경 내구성 향상을 위한 효과적인 표면처리 방법임을 시사한다.

Key Words: 이종 소재 접합(Dissimilar joint), 표면처리(Surface treatment), 갈바닉 부식(Galvanic corrosion), 침지시험(Immersion test), 전단강도(Shear strength)

1. 서 론

우주항공 및 자동차를 비롯한 다양한 산업 분야에서 금속 소재, 특히 알루미늄이나 스테인리스강이 구조 재료로 널리 사용되어 왔다. 최근에는 경량화, 내식성, 피로 파괴 저항성 및 치수 안정성 등의 요구가 증가함에 따라, 이러한 금속 소재는 점차 탄소섬유 강화 복합재료(CFRP)로 대체되어 활용되고 있다. 그러나 모든 부품을 탄소섬유 강화 복합재료로 제작하는 것은 기술적이나 경제적 측면에서 비효율적이기 때문에, 실제 산업 현장에서는 금속과 복합재료를 결합한 이종 소재 접합 구조가 널리 적용되고 있다[1]. 이와 같은 이종 소재 접합 구조에서는 서로 다른 물성을 갖는 재료 간의 결합이 이루어지므로, 접합부의 성능이 구조 전체의 신뢰성을 좌우하는 핵심 요소로 작용한다. 이러한 접합부의 성능을 평가하기 위해 다양한 기계적 특성이 활용되고 있으며, 그 중에서도 전단강도는 접합 성능을 정량적으로 비교하고 평가하는 대표적인 지표로 널리 사용되고 있다. 이에 따라 다수의 선행 연구에서는 초기 전단강도를 기준으로 이종 접합부의 성능을 판단해 왔으며, 전단강도는 이종 소재 접합 성능을 평가하는 대표적인 지표로 활용되고 있다[2]. 한편, CFRP/Al 이종 접합을 위한 방법으로는 기계적 체결, 용접 기반 공정, 그리고 접착 접합 등 다양한 방식이 있으며, 이 중 접착 접합은 이종 재료 간의 열적, 기계적 물성 차이에 따른 국부 응력 집중을 완화하고, 하중을 접합부 전반에 분산시킬 수 있는 장점으로 인해 이종 접합 구조에서 널리 활용되고 있다. 그러나 단순히 초기 전단강도만을 기준으로 접합 성능을 평가하는 접근은 실제 사용 환경에서 요구되는 장기적인 신뢰성을 충분히 반영하는 데 한계가 있는 것으로 보고되고 있다[3]. 따라서 장기 신뢰성을 확보하기 위해서는 실제 운용 환경에서 접합부 성능에 영향을 미칠 수 있는 다양한 열화 요인을 고려한 평가가 필요하다. CFRP/Al 이종 접합 구조의 경우 온도, 습도, 화학적 환경 등 복합적인 외부 요인이 작용할 수 있으며, 탄소섬유의 높은 전위와 알루미늄의 낮은 전위 차이로 인해 수분이나 염분이 침투할 경우 전기화학적 회로가 형성되며, 이로 인해 알루미늄의 산화가 급격히 촉진되는 갈바닉 부식은 이종 접합부의 신뢰성을 위협하는 주요 요인이다. 특히 염화물 기반 환경에서 유발되는 갈바닉 부식은 CFRP의 높은 전위와 알루미늄의 낮은 전위 차이에 의해 접합부 인근 알루미늄의 열화를 촉진하여 기계적 성능 저하로 이어질 수 있는 주요 요인으로 보고되고 있다[4]. 본 연구에서는 CFRP/Al 이종 접합에 적용 가능한 대표적인 알루미늄 표면처리 방식인 샌딩, RPC, 그리고 아노다이징 처리를 대상으로 갈바닉 부식 유도 환경에서의 접합 성능을 비교, 분석하고자 한다. 각 표면처리 방식에 대해 초기 전단강도를 평가한 후, 염화 나트륨 수용액 침지 기반 열화 시험을 수행하여 갈바닉 유도 열화가 접합부의 전단강도 유지율 및

파괴 거동에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 재료 및 실험

2.1 실험 재료

본 연구에서는 복합재료로 탄소섬유 능직 프리프레그(Toray 3K Carbon)를 사용하였으며, 금속으로는 3 mm 두께의 알루미늄 합금(Al 5052, Yong Jie New Material Co., Ltd., China)을 사용하였다. 필플라이(PNPR-86, Jiaying sunny frp industries Co., Ltd., China)로는 Nylon 66 직물을 사용하였으며, 에폭시 접착제(3M™ DP460)를 이용하여 CFRP와 Al을 부착하였다. 양극 산화 처리 공정에서는 Sodium hydroxide beads(NaOH, above 97 wt.%, AR, Daejung Chemicals & Metals Co., Ltd., Korea), Nitric acid (HNO₃, 68-70 wt.%, Extra pure, Samchun Chemicals Co., Ltd., Korea), Sulfuric acid (H₂SO₄, 95-98 wt.%, AR, Sigma-Aldrich Co., USA)를 사용하였다. RPC 과정에서는 Acetone, Epoxy(YD 128)를 사용하였다. 갈바닉 부식 환경 조성을 위해 Sodium chloride를 사용하였다. CFRP, Al의 기계적 특성은 Table 1에 정리하였다.

2.2 시편 제조 및 실험

CFRP는 능직 프리프레그를 12장을 적층하여 압축 성형 공법을 이용하여 CFRP 시편을 제작하였다. 시편은 ASTM D5868 규격에 따라 성형하였으며, 제작 과정에서 필플라이를 적용하여 표면 거칠기를 부여하여 접착 계면에서의 기계적 맞물림 향상을 기대하였다.

이와 같은 조건으로 제작된 CFRP 판의 최종 두께는 약 3 mm이며, 이후 실험에 사용하기 위해 25 mm × 25 mm의 접합부를 목적으로 25 mm × 100 mm 크기로 절단하였다. 알루미늄 처리의 경우 샌딩 처리는 알루미늄 표면의 물리적 거칠기를 증가시켜 접착 계면에서의 기계적 맞물림을 증가시키는 전처리 공정이다[5]. RPC 처리는 저점도의 에폭시 수지를 이용하여 알루미늄 표면의 미세 공극 내 수지 침투 및 계면 연속성을 확보하는 보조 계면 제어 공정이다[6]. 아노다이징 처리는 알루미늄 표면에 다공성 산화 피막을 형성함으로써 접착제의 기공 침투를 유도하는 표면처리 방법이다[7]. 아노다이징 공정에 대한 내용은 Fig. 1에 개략적으로 나타냈다. 제조된 CFRP 시편과 알루미늄 시편을 사용하여 단일 겹 전단(single lap shear, SLS) 시험용 시편을

Table 1. Mechanical properties of Al 5052 alloy and CFRP

	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Yield Strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Fiber Volume Fraction (%)
Al	226	8.8	202	70	-
CFRP	896	1.5	-	80	50.57



Fig. 1. Schematic illustration of the anodizing process for aluminum surface treatment

제작하였다. SLS 시험용 시편은 접착부의 전단 거동을 평가하기 위해 ASTM D5868 규격에 의거하여 제작하였다. 제작된 시편은 알루미늄 표면처리 방식에 따라 CFRP/Al, CFRP/ RPC, CFRP/Anodizing의 세 가지 유형으로 구분하였다.

염화물 환경에서의 CFRP/Al 접착 접합 열화 거동을 평가하기 위해 침지 시험을 진행하였다. 본 연구에서는 갈바닉 부식을 가속화하는 조건으로 해수 농도에 해당하는 3.5 wt.% NaCl 용액을 사용하였다. 이는 ISO 11130에서 제시하는 해양 환경 조건을 반영한 것으로, 실제 염화물 환경을 모사하기 위한 농도 설정이다. 본 연구에서는 60°C 조건에서 1주일간 침지 시험을 수행하였다. 이러한 조건은 ISO 9227 규격에 기반한 염화물 기반 가속 부식 시험 개념과 부합하는 조건이다. CFRP/Al 접착 접합은 염수 환경에 노출 시, 전위차가 큰 두 재료 간의 갈바닉 커플 형성으로 초기 단계에서도 알루미늄/접착제 계면에서 부식이 개시되며, 이로 인해 접합 강도의 저하가 시작되는 것으로 보고되고 있다[8]. CFRP/Al 이종 접합 시편의 접합 성능을 평가하기 위해 ASTM D5868 규격 하에 만능재료시험기를 이용한 전단강도 시험을 수행하였다. 초기 전단 강도 및 열화 후 전단강도를 측정하였다. 접합 계면 및 표면처리에 따른 미세 구조 변화를 관찰하기 위해 주사전자현미경(SEM)을 이용하였다.

3. 실험 결과

3.1 이종 접합 전단강도 특성

CFRP/Al 이종 접합 시편에 적용된 표면처리 방식에 따라 나타나는 초기 전단강도 특성을 비교하고, SEM 관찰을 통해 접착 계면의 초기 구조적 특징을 분석하였다. 이를 통해 각 표면처리 방식이 초기 접합 성능에 어떠한 형태로 기여하는지를 미세구조 관점에서 고찰하고자 한다. 처리별 초기 전단 강도는 Fig. 2에 정리하였다.

샌딩 처리된 CFRP/Al 이종 접합 시편의 초기 전단강도를 평가한 결과, 26.5 ± 2.8 MPa로 측정되었으며, 반복시험에서 상대적으로 큰 편차를 보인다. 이는 샌딩 처리에 의해 형성된 표면 거칠기가 초기 접합 성능 확보에 일정 수준 기여하고 있으나 수작업 혹은 공정 조건의 미세한 차이에 따른 표면 개질의 불균일성이 성능 편차를 유발할 수 있다고 판단된다. 샌딩 처리된 알루미늄 표면 관찰 결과, Fig. 3(A) 및 (B)와 같이 알루미늄에 형성된 선형 요철과 국부적인 홈 구

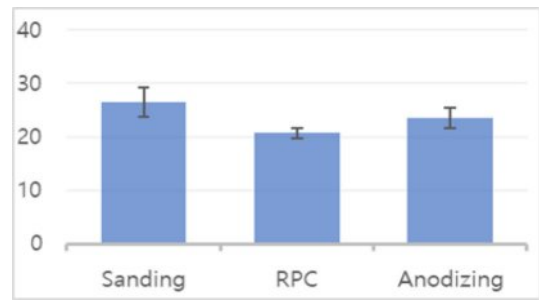


Fig. 2. Shear strength of CFRP/Al joints according to bonding method

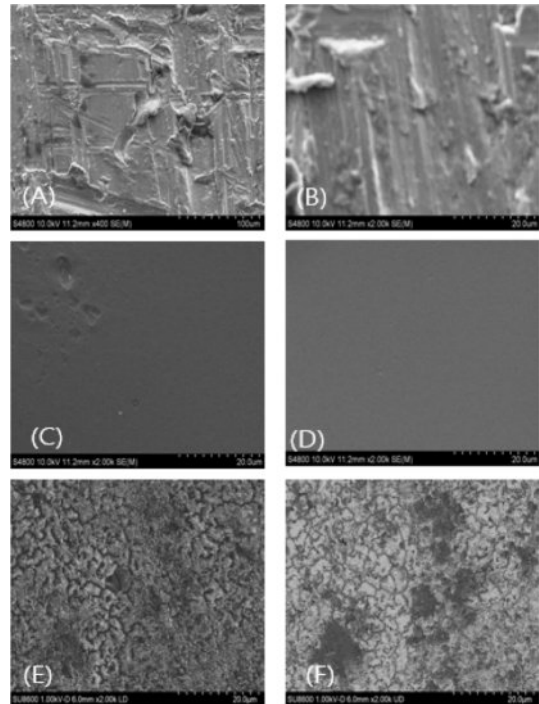


Fig. 3. Initial state of treated Al surface. (A)(B) Sanding, (C)(D) RPC, and (E)(F) Anodizing

조가 확인되었다. 이러한 표면 형상은 접착 계면에서 접착제가 요철 사이로 침투, 기계적 맞물림을 유도할 수 있는 구조적 특징으로 작용하며, 초기 전단 하중 작용 시 하중 전달 거동에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 이와 유사하게 선행된 연구에서도 기계적 연마에 의해 형성된 요철 구조는 접착제의 국부적 침투를 유도하여 초기 하중 전달 시 물리적 고정 효과를 제공하는 것으로 알려져 있으며, 이러한 기계적 맞물림 효과는 화학적 결합이 제한적인 경우에도 초기 전단강도 확보에 유효한 역할을 수행한다[9]. RPC 처리된 CFRP/Al 이종 접합 시편의 초기 전단강도는 20.7 ± 1.0 MPa로 측정되었으며 반복 시험 전반에서 높은 균일성이 관찰되었다. 이는 알루미늄 표면에 코팅된 RPC층이 접합에 사용된 에폭시와 유사한 성분으로 구성되어 두 층 사이의 계면 결합력과 상용성이 향상되었기 때문이다. 초기 전

단 강도는 비교적 낮은 값을 보이나, 계면 형성 과정에서 발생하는 성능 편차를 최소화하여 공정 안정성을 확보 가능할 것이라 판단된다.

RPC 처리된 알루미늄 표면을 관찰한 결과, Fig. 3(C) 및 (D)와 같이 표면 전반이 비교적 평탄한 형상을 나타내었으며 일부 영역에서는 저점도 에폭시 수지가 미세 공극을 부분적으로 충전한 흔적이 확인되었다. 저점도 수지를 이용한 레진 프리코팅 공정은 알루미늄 표면의 미세 공극을 사전에 봉합함으로써 접착제의 유효 접촉 면적을 증가시키고, 계면 연속성을 향상시켜 초기 접합 강도를 증대시키는 효과를 갖는 것으로 보고되고 있다[6]. 아노다이징 처리된 CFRP/Al 이종 접합 시편의 초기 전단강도는 23.5 ± 1.9 MPa로 측정되었다. 다른 표면 처리 방식 대비 높은 강도 수준과 반복 시험에서도 비교적 안정적인 수치를 유지하였다. 이는 아노다이징 처리에 의해 형성된 나노미터 수준의 정밀한 표면 구조가 초기 접합 성능 확보에 효과적으로 기여하였음을 의미한다. 아노다이징 처리된 알루미늄 표면을 관찰한 결과, Fig. 3(E) 및 (F)와 같이 표면 전반에 걸쳐 미세한 다공성 산화 피막 구조가 균일하게 형성된 것이 확인되었다. 이러한 다공성 구조는 접착제가 기공 내부로 침투할 수 있는 미세 경로를 제공함으로써 기계적 맞물림 효과를 극대화하는 역할을 수행한 것으로 판단된다. 다공성 산화 피막을 갖는 아노다이징 알루미늄 표면은 접착제의 젖음성과 침투성을 동시에 향상시키며, 이에 따라 기계적 앵커링 효과가 크게 증대되어 초기 전단강도가 향상되는 것으로 보고되고 있다[10]. 또한 아노다이징 공정을 통해 형성된 산화층은 표면 에너지를 증가시켜 접착 계면에서 보다 안정적인 초기 결합 상태를 형성하는 데 기여한다[8].

3.2 열화 전단강도 특성

염화물 환경에서의 갈바닉 부식은 CFRP/Al 이종 접합 구조에서 접착 계면의 안정성을 저하시킬 수 있는 대표적인 열화 인자로 알려져 있다. 특히 염수 또는 염수분무 환경에서는 알루미늄 표면 산화막의 변화와 함께 접착 계면을 통한 수분 및 염 이온의 침투가 가속되며, 이로 인해 접착 강도의 저하가 발생할 수 있다[11]. 이종 접합 조건에 따른 열화 후 표면처리별 전단강도는 Fig. 4에 나타냈으며 이에 따른 각 표면처리 방식별 열화 전후 강도 비교 결과를 Fig. 5에 종합하여 나타내었다.

샌딩 처리된 시편의 경우, 열화 후 전단강도는 14.4 ± 3.7 MPa로 측정되어 초기 대비 뚜렷한 감소 경향을 보였다. 세 가지 표면처리 방식 중 가장 큰 폭으로 하락하였으며, 열화 전과 비교해 약 44.3%의 급격한 저하율을 보였다. Fig. 5(A)와 (B) 같이 SEM 관찰 결과, 연마 방향을 따라 형성되었던 선형 요철 구조의 경계면이 불분명해지거나 국부적으로 거칠기가 변화한 양상이 확인되었다. RPC 처리된 시편의 경우, 열화 후 전단강도는 평균 17.0 ± 2.0 MPa로 열화 전 대

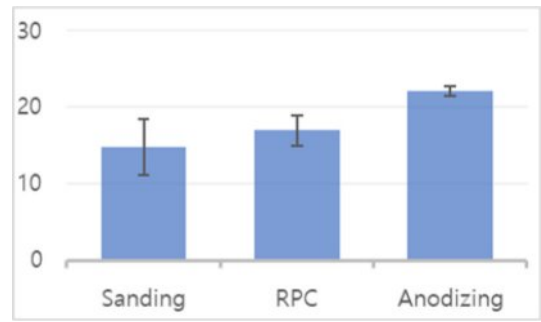


Fig. 4. Shear strength of CFRP/Al joints with sanding, RPC, Anodizing after hydrothermal aging

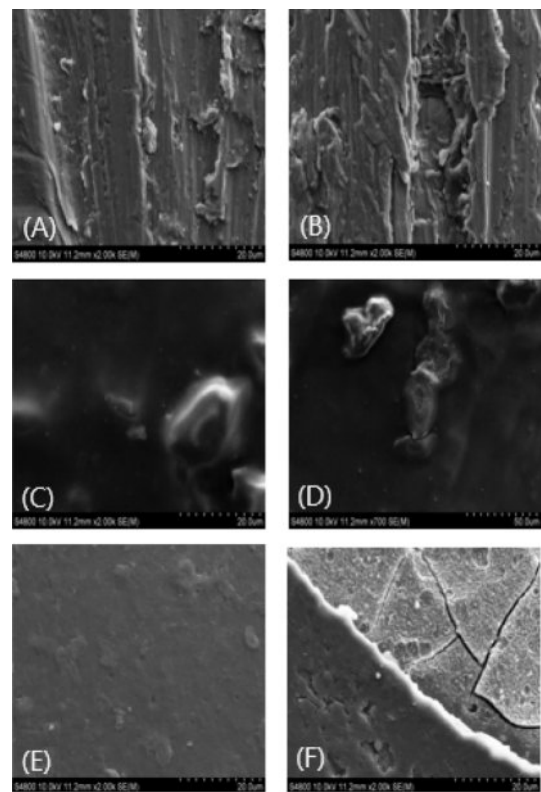


Fig. 5. Al surface structure after aging (A)(B) Sanding, (C)(D) RPC, (E)(F) Anodizing

비 전단강도 감소율은 약 18.3%로 측정되어 샌딩 대비 비교적 양호한 유지율을 보였다. Fig. 5(C)와 (D)에서 확인되듯이 열화 후에도 일부 저점도 수지 층이 알루미늄 표면의 미세 구조를 여전히 피복하고 있는 상태가 관찰되었으며, 이러한 계면의 물리적 연속성이 열화 후에도 강도 분포의 균일성을 유지하는 데 기여한 것으로 판단된다. 아노다이징 처리된 시편의 경우, 열화 후 전단강도는 22.1 ± 0.6 MPa로 나타나 세 가지 표면처리 방식 중 가장 높은 강도 수준을 유지하였다. 열화 전 대비 감소율은 약 6%로 가장 작은 값을 보였다. 이는 Fig. 5의 (E) 및 (F)에서 관찰되는 바와 같이 나노 다공성 산화 피막의 구조적 건전성이 가혹 환경 노

출 후에도 효과적으로 유지되었기 때문으로 판단된다.

3.3 이종 접합의 열화 전단 거동

염화물 환경에 노출된 CFRP/Al 이종 접합 시편은 갈바닉 부식으로 인해 표면처리 방식에 따라 상이한 전단강도 감소 및 유지율 거동을 보였다. 제시된 SEM 관찰 결과와 열화 환경에서 노출 후 이종 접합부의 파괴 단면을 관찰하여, 표면처리 방식 별 전단강도 열화 거동을 계면 열화 진행 양상 관점에서 해석하였다. 샌딩 처리된 시편의 경우 기계적 연마에 의해 형성된 표면 요철 구조가 초기 접합 단계에서는 접착 계면에서 기계적 맞물림을 통해 하중 전달에 기여한 것으로 해석된다. 그러나 이러한 요철 구조는 개방된 형태를 가지며, 탄소섬유와 알루미늄 간의 갈바닉 커플 형성으로 인해 염화물 환경에 노출될 경우 요철 내부를 따라 수분 및 염 이온이 접착 계면으로 침투할 가능성이 존재한다. 이와 같은 개방형 표면 구조가 장시간 염 환경 노출 시 접착 계면 열화에 상대적으로 취약할 수 있음을 보고된 바 있다[8]. 열화 진행 후 샌딩 시편의 경우 Fig. 6(A)에서 확인되듯이 파손은 주로 계면 박리 양상으로 관찰되었다. 이는 열화 과정에서 갈바닉 부식으로 인해 수분과 염이 샌딩 요철 사이로 침투해 계면 결합력을 우선적으로 약화시키고, 이로 인해 접착 계면의 결합력이 약해져 응력 집중으로 인한 국부적인 박리가 발생한 것으로 판단된다.

RPC 처리된 시편은 저점도 수지층이 탄소섬유와 알루미늄 사이의 직접적인 접촉을 차단하는 물리적 격리막 역할을 수행한 것으로 분석된다. 열화 환경에 노출된 이후에도 RPC공정에 의해 형성된 수지층이 접착 계면에 잔존함으로써, 염환경에서의 수분 및 염 이온 침투가 즉각적으로 계면으로 진행되는 것이 아닌 일정 수준 지연되는 경향을 보였다. 선행 연구에서도 저점도 수지를 이용한 RPC 처리가 접착 계면의 연속성을 향상시키고, 염 환경 하

에서 계면 손상 진행을 완화하는 데 기여할 수 있음을 보고하고 있다[6]. Fig. 6(B)의 파괴 단면에서는 알루미늄 표면과 CFRP 측 모두에 접착제가 잔존하는 혼합 파손 형태를 보였다. 아노다이징 처리된 시편은 열화 시험 후에 가장 높은 전단강도 유지율을 나타냈으며, 이는 아노다이징 공정을 통해 형성된 산화알루미늄 피막의 구조적 안정성과 밀접한 관련이 있는 것으로 해석된다. 아노다이징 표면에 형성된 다공성 산화막은 접착제가 기공 내부를 침투할 수 있는 구조를 가지며, 이러한 필링 효과는 산화층 내부 기공을 따라 접착제가 물리적으로 고정되는 구조를 형성함과 동시에, 계면 내 미세 공극을 감소시키는 역할을 수행한다. 이에 따라 산화막이 염 이온의 침투를 차단하여 알루미늄 기재를 보호하는 화학적 장벽 역할 또한 수행한다[12]. Fig. 7(C)에서 보듯 파손이 알루미늄 계면이 아닌 접착제 내부 또는 CFRP 측으로 확장되는 응집 파손 및 섬유 인발 경향이 뚜렷하게 관찰되었다. 이는 갈바닉 환경에서도 알루미늄 표면의 다공성 산화막 내부에 접착제가 여전히 견고하게 충전 되어 박리가 억제되었으며, 결과적으로 계면 강도가 접착제 자체의 강도보다 높게 유지되었음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 CFRP/Al 이종 접합 구조에서 알루미늄 표면처리 방식이 초기 전단강도 및 염화물 환경 열화 후 전단강도 거동에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 샌딩, RPC, 아노다이징의 세 가지 표면처리 기법을 적용하여 초기 접합 성능, 열화 후 강도 유지 특성, 그리고 파손 양상을 종합적으로 평가하였다. 초기 전단강도 평가 결과, 아노다이징 처리 시편이 가장 안정적이고 균일한 전단강도를 나타냈다. 샌딩 처리는 기계적 맞물림에 기반하여 강도를 확보하였으며, RPC 처리는 계면 연속성 향상에도 불구하고 초기 강도 수준은 상대적으로 낮게 확인되었다. 염화물 환경 열화 시험에서는 아노다이징 시편은 가장 높은 전단강도 유지율을 기록하며 우수한 내구성을 입증한 반면, 샌딩 시편은 가장 급격한 강도 저하를 보였다. RPC 시편은 수지층이 형성하는 물리적 격리 구조로 인해 계면 손상 진행이 일정 수준 지연되는 경향을 보였다. 파손 양상 분석 결과, 샌딩 시편에서는 알루미늄과 접착제 사이에서 발생하는 지배적인 계면 박리가 관찰되었으며, RPC 시편의 경우 혼합파손 형태가 나타났다. 반면 아노다이징 시편은 접착제 내부 또는 CFRP의 섬유 인발이 관찰되어 열화 시험 후에도 계면 결합력이 안정적으로 유지된 것으로 판단된다. 이러한 결과는 아노다이징 공정을 통해 형성된 나노 다공성 산화막 구조는 접착제의 침투 및 고정을 통해 기계적 앵커링 효과와 화학적 장벽 효과를 동시에 제공함으로써, 갈바닉 부식 환경에서도 계면 안정성을 효과적으로 유지하는 것으로 나타났다. 본 연구 결과는 환경 내구성을 고려한 CFRP/Al 이

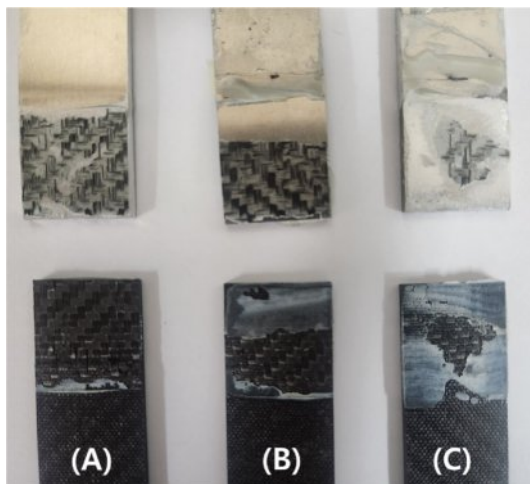


Fig. 6. Failure surface after corrosion. (A) Sanding, (B) RPC, (C) Anodizing

중 접합 구조의 설계 및 표면처리 공정 선택에 있어 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 국제공동기술개발사업(P0030517)의 지원으로 수행되었으며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- Jang, Y.Y., Ha, J.C., Lee, D., Lee, Y., Nam, S.Y., Yang, S.B., and Kwon, D.J., "Dissimilar Material Bonding Technology for Lightweight Future Mobility: A Review," *Polymer Testing*, Vol. 129, 2023, Article No. 108281.
- Han, S., Guang, X., Li, Z., and Li, Y., "Joining Processes of CFRP-Al Sheets in Automobile Lightweighting Technologies: A Review," *Polymer Composites*, Vol. 43, No. 12, 2022, pp. 8622-8633.
- Borrie, D., Al-Saadi, S., Zhao, X.L., Raman, R.K.S., and Bai, Y., "Bonded CFRP/steel Systems, Remedies of Bond Degradation and Behaviour of CFRP Repaired Steel: An Overview," *Polymers*, Vol. 13, No. 9, 2021, Article No. 1533.
- Zheng, G., He, Z., Wang, K., Liu, X., Luo, Q., Li, Q., and Sun, G., "On Failure Mechanisms in CFRP/Al Adhesive Joints after Hygrothermal Aging Degradation Following by Mechanical Tests," *Thin-Walled Structures*, Vol. 158, 2021, Article No. 107184.
- Kwon, D.J., Kim, J.H., Kim, Y.J., Kim, J.J., Park, S.M., Kwon, I.J., Shin, P.S., DeVries, L.K., and Park, J.M., "Comparison of Interfacial Adhesion of Hybrid Materials of Aluminum/carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites with Different Surface Roughness," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 170, 2019, pp. 11-18.
- Hu, Y., Yuan, B., Cheng, F., and Hu, X., "NaOH Etching and Resin Pre-coating Treatments for Stronger Adhesive Bonding between CFRP and Aluminium Alloy," *Engineering*, Vol. 178, 2019, Article No. 107478.
- Huang, Y., Sarkar, D.K., and Chen, X.G., "Superhydrophobic Aluminum Alloy Surfaces Prepared by Chemical Etching Process and Their Corrosion Resistance Properties," *Applied Surface Science*, Vol. 356, 2015, pp. 1012-1024.
- Schanz, J., Nester, S., Meinhard, D., Pott, T., Riegel, H., De Silva, A.K.M., Harrison, D.K., and Knoblauch, V., "Adhesively Bonded CFRP/Al Joints: Influence of the Surface Pretreatment on Corrosion during Salt Spray Test," *Materials and Corrosion*, Vol. 73, No. 2, 2022, pp. 158-170.
- Kobayashi, S., Yanagisawa, K., Osada, T., and Morimoto, T., "Effect of Corrosion on Mechanical Properties for CFRP/aluminum Adhesive Joints under a Salt Spray Environment," *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 10, No. 3, 2023, Article No. 23-00203.
- Zhang, Z., Shan, J.G., Tan, X.H., and Zhang, J., "Effect of Anodizing Pretreatment on Laser Joining CFRP to Aluminum Alloy A6061," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 70, 2016, pp. 142-151.
- Håkansson, E., Hoffman, J., Predecki, P., and Kumosa, M., "The Role of Corrosion Product Deposition in Galvanic Corrosion of Aluminum/Carbon Systems," *Corrosion Science*, Vol. 114, 2017, pp. 10-16.
- Ge, Z., Hu, Q., Pang, K., Zhu, Y., and Hou, X., "Significantly Improves the Mechanical Strength of Aluminum Alloy Adhesive Joint Through Electrochemical Pretreatment in Environmentally Friendly Medium," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 133, 2025, pp. 592-606.