

## 特輯

## 신소재의 Reliable joining 및 Repair 기술(국가지정 연구실 소개)

이대길\*

## 1. 연구의 필요성

높은 비강성과 비강도 및 우수한 감쇠특성으로 널리 사용되기 시작한 신소재 복합재료는 공작기계의 초고속 회전축, 로봇 매니퓰레이터 등의 정밀 기계부품으로부터 비행기, 우주선 동체, 인공위성 및 고압선용 철탑, 건물, 교량의 유지/보수에까지 많은 산업분야에서 이용되고 있다. 일반적으로 섬유강화 복합재료와 같은 신소재를 적용한 기계 혹은 건축 구조물을 제작할 때, 후가공이 필요하지 않도록 정형 가공 (Net-shape manufacturing)으로 제조하는 것이 바람직하지만, 전체를 단품으로 제조하는 것이 불가능하거나 비경제적인 경우가 많기 때문에 제품 간의 접합 (Joining)이 필요하다. 일반적으로 접합부는 가장 취약한 부분이고 접합부를 가지는 제품의 구조적 효율은 접합부에 의해 결정되므로, 접합부의 설계와 제작은 매우 중요한 연구분야이다.

신소재의 접합에 대하여 수행된 연구는 다음과 같다. 미국 더글러스 항공회사의 경우 80년대부터 PABST (Primary Adhesively Bonded Structure Technology)를 이용하여 접합부 설계를 위한 프로그램을 개발하여 왔고, 미국 공병대 연구소는 섬유 강화 복합재료를 접착하여 구조물의 보강 및 수리 공사를 수행하고 있다. 또한, 미국의 포드사, GM사와 독일의 BMW사는 중량감소와 연비향상을 위하여 복합재료 동력전달축과 유니버설 조인트를 접합한 일체형 동력전달축을 사용하고 있다. 하지만, 이러한 핵심 기술에 관한 연구 결과는 국방과 기업기밀에 관련되기 때문에 공개되지 않고 있으며, 여러 가지 가혹한 환경 하에서의 연구가 어려워, 접착제 접합부의 체계적인 설계를 뒷받침할 수 있는 데이터베이스가 충분하지 못한 실정이다. 국내의 경우, 피접착체의 표면처리상태에 따른 접합부의 기계적 특성에 관한 연구와 동시경화 접합부에 관한 연구, 온도/습도 조건 및 가혹 환경 하에서 복합재료 접합부의 강도 변화를 연구하여 접착제 접합부의 전용 유한요소 해석 프로그램을 개

발한 예가 있다. 그리고 후륜구동 자동차의 동력전달축의 Reliable design 및 접합 실용화 연구가 마무리 단계에 있으며, LCD 패널 운반용 로봇 End effector 등에 사용되는 샌드위치 구조의 최적 접합을 위한 공정을 개발 하였다. 또한, 반도체 제조용 초고속 스펀들의 구성요소인 금속 피접착체와 복합재료 축을 조립하기 위하여 접착제 접합을 적용하는 연구와 하수관 보수/보강 공사에 복합재료 접합기술을 이용하는 연구를 수행 성공하였다.

신소재 복합재료에 적용되는 접합부에 관한 여러 연구가 국내외에서 수행되어 왔지만, 아직까지 실제 설계 및 제작에서는 실험적인 방법에 의존하여, 신제품을 개발할 때마다 단편적인 실험과 시행착오를 반복하고 있는 실정이다. 따라서 복합재료 접합부 설계에 관한 신뢰성 있는 통계적 접근이 부족한 실정이며, 보다 효율적인 설계를 위하여 복합재료 피접착체의 각층 (Ply)의 물성 변화를 포함하는 전용 해석프로그램을 개발하고, 지금까지 수행된 연구 결과를 추가 보완하는 데이터베이스를 구축하여, 접합부 설계/제작 및 유지/보수 프로세스에 관한 전문가 시스템 개발이 필요하다.

## 2. 연구실 현황

이대길 한국과학기술원 기계공학과 교수의 지도하에 신소재응용 기계연구실 박사과정 11명, 석사과정 4명이 연구개발 인력으로 참여하고 있다. 이들 연구인력은 다년간에 걸친 복합재료 구조물 및 접합부의 설계/해석 관련 연구를 통하여 다수의 논문과 특허를 보유하고 있다. 본 연구실이 보유하고 있는 주요 장비로는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 복합재료를 성형하기 위한 오토클레이브 (Autoclave), RTM (Resin transfer molding)장비, RIM (Resin injection molding), Hot press, 초정밀 가공을 위한 CNC 연삭기, 접착제 및 복합재료의 경화도 측정을 위한 유전율 측정장치, 접합부 및

\* 한국과학기술원 기계공학과, 교신저자(E-mail:dglee@cais.kaist.ac.kr)

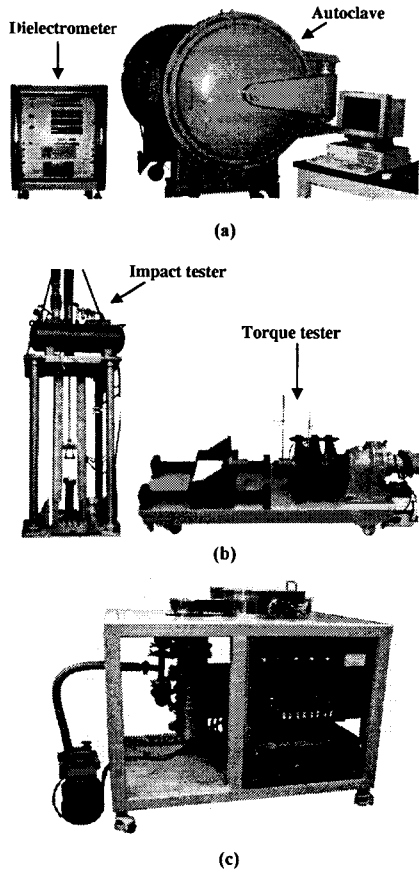


Fig. 1 Equipments: (a) Dielectrometer and autoclave; (b) Impact tester and torque tester; (c) Plasma treatment equipment.

복합재료의 정적 물성 측정을 위한 인장시험기 (Instron), 비틀림 시험기, 복합재료 구조물 및 접합부의 동적 물성 측정 위한 충격 시험기, 피접착체의 표면처리를 위한 플라즈마 표면처리 장치 및 UV 표면처리 장치 등이 있으며, 이를 바탕으로 복합재료 구조 및 접합부의 설계에서 성형, 실험을 수행할 수 있는 능력을 보유하고 있다.

### 3. 주요 연구 내용

본 연구실에서는 신소재의 Reliable joining 및 Repair 전문가 시스템 개발을 위하여 다음과 같은 연구를 수행하고 있다.

- 접합부와 Repair에 대한 데이터 베이스 구축
- Surface science를 이용한 접합면의 계면 결합력 정량화 및 접합 계면 모델 정립

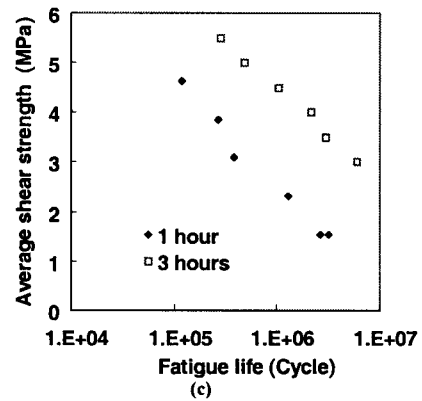
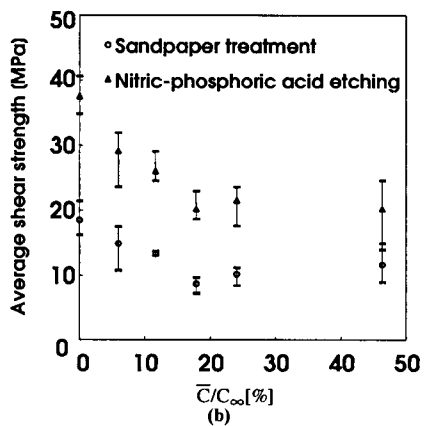
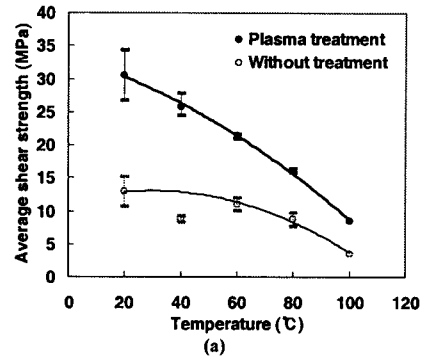


Fig. 2 Average shear strength of adhesive joint: (a) Effect of plasma treatment (DP460 adhesive); (b) Effect of moisture (IPC09923 adhesive); (c) Effect of curing time at 80°C (IPC09923 adhesive).

- Damage mechanics에 기초하여 파손된 구조물의 손상도를 추정하는 기술 확보
- 신소재 구조물의 접합부 파괴모델 정립 및 Damage mechanism 규명
- Surface science를 고려한 접합부용 해석 프로그램 개발
- 실제 구조물에서의 적용

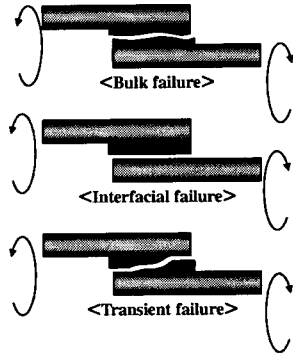


Fig. 3 Failure model of adhesive joint.

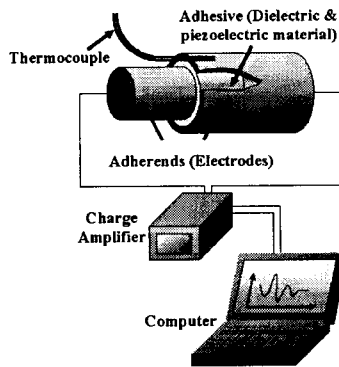


Fig. 4 Equipment for measuring fatigue damage of adhesive joints using piezoelectricity.

### 3.1 접합부의 물성 시험

접착제 (Adhesive)를 이용한 접착제 접합부 (Adhesive joint)의 경우 볼트나 리벳을 이용한 기계적 접합부 (Mechanical joint)에 비해 상대적으로 넓은 면적에 하중을 분포시키고 구멍 가공이 필요하지 않기 때문에 우수한 피로 특성을 가지며, 구조물의 무게를 거의 증가시키지 않는 장점을 가지고 있다. 하지만, 접착제 접합부의 물성은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 피접착체 (Adhesion)의 표면처리 상태, 사용환경, 제작 조건에 따라 영향을 많이 받는다. 본 연구실에서는 신뢰성 있는 접착제 접합부의 설계를 위하여 UV, 플라즈마, 샌드블래스팅 (Sandblasting) 및 화학적 표면 처리에 따른 물성시험, 온도 및 접합부의 비수분 농도에 따른 물성시험, 경화조건에 따른 접합부의 물성시험을 수행하고 있다.

### 3.2 접합계면 모델

접착제 접합부의 파괴 형상은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 계면 파괴 (Interfacial failure), 트랜지언트 파괴 (Transient failure), 체적 파괴 (Bulk failure)의 3가지 형태로

구분된다. 일반적으로 접착제 접합부는 피접착체와 접착제 사이의 계면이 취약하기 때문에 계면 파괴가 발생하지만 적절한 표면처리 방법을 이용하면 접합부의 접착강도가 증가하게 되고, 파괴 형상 또한 계면 파괴로부터 트랜지언트 파괴를 거쳐 체적 파괴로 변하게 된다. 본 실험실에서는 계면 파괴 및 체적 파괴 모델과 통계적 기법을 이용한 트랜지언트 파괴 모델에 대하여 연구를 수행하고 있다.

### 3.3 구조물의 손상 추정

Fig. 4와 같이 전도성 피접착체 접합부는 접착제의 piezoelectric 성질을 이용하여 접합부의 전기 전하량을 측정할 수 있으며, Fig. 5에서 보는 바와 같이 전기 전하량은 접합부의 피로손상 정도에 따라 증가하는 경향을 갖는다. 이로부터 접합부의 손상을 실시간으로 추정할 수 있으며, 본 실험실에서는 피로 하중에 의해 손상된 접합부의 유지 보수 시점 결정을 위하여 piezoelectricity를 이용한 손상 추정 기술을 연구하고 있다.

### 3.4 실제 구조물에서의 적용 및 repair

본 실험실에서는 접착제 접합부의 물성 시험 및 손상 추정 기술에 대한 연구를 바탕으로 Fig. 6에서 보는 바와 같이 복합재료 고속 스피들 (Spindle), 복합재료 로봇 핸드, 복합재료 동력 전달축 (Drive shaft), 초고속 CNC 머시닝센터 (Machining center)의 샌드위치 구조 (Sandwich) 및 복합재료 보링바 (Boring bar)와 같은 실제 구조물에 접착 접합부를 적용하기 위한 연구를 수행하고 있다. 또한 Fig. 7의 노후된 하수관의 비굴착 보수 방법과 같은 파손된 구조물의 유지보수에 대한 연구도 수행하고 있다.

## 4. 기대성과 및 향후계획

재료산업의 발달로 기존 재료보다 우수한 각종 신소재들이 개발되고 있었으며, 이러한 신소재들은 항공기, 우주선 동체, 인공위성, 로봇 매니퓰레이터, 정밀 공작기계 등으로부터 테니스 라켓, 골프채 등의 생활용품에 이르기까지 다양한 분야에 사용되고 있다. 이러한 신소재의 응용분야 중 첨단기기 및 장비들은 금속과 같은 기존재료에 우수한 특성을 가지는 신소재를 보강하여 그 성능을 향상시켜 왔다. 따라서 다양한 재료 간의 접합기술은 첨단기기 및 장비제작을 위한 핵심 기술로 제작조건을 고려한 접합기술의 개발이 필요하다. 또한, 구조물의 취약부분인 접합부는 열, 수분, 자외선과 같은 환경변수의 영향을 받기 때문에, 장비의 적절한 보수 시점을 찾기 위해서는 실시간 손상 추정 기술 및 유지보수 기술의 개발이 필수적이다. 본 실험실에서 연구하고 있는 신소재의 Reliable joining 및 Repair

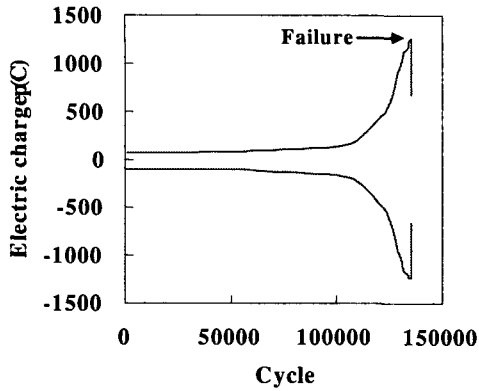


Fig. 5 Electric charge according to fatigue cycle.

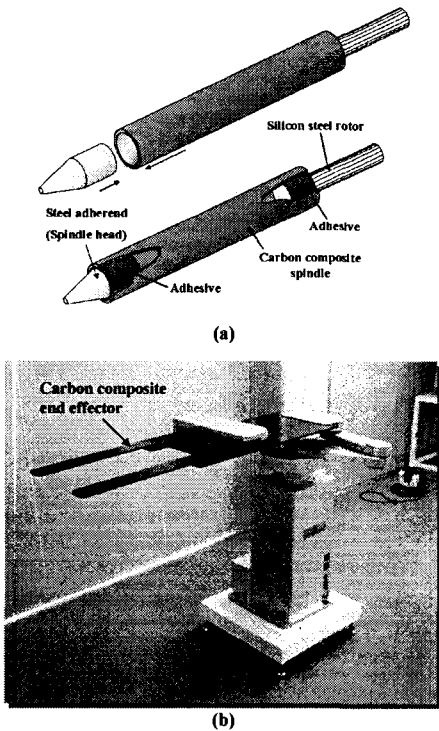


Fig. 6 Application of adhesive joint: (a) High speed composite spindle; (b) Carbon composite end effector.

기술 개발이 완료되면 다양한 구조물 접합부를 체계적으로 설계하고 유지 보수할 수 있는 기반이 마련되기 때문에 첨단기기 및 장비의 성능을 크게 향상시키고 장비의 유지보수 비용을 낮출 수 있을 것으로 기대된다.

향후에는 기존의 연구성과를 바탕으로 접합부의 파괴모델을 정립하고 Damage mechanism 규명에 대한 연구를 수행할 예정이며, 최종적으로는 Surface science를 바탕으로

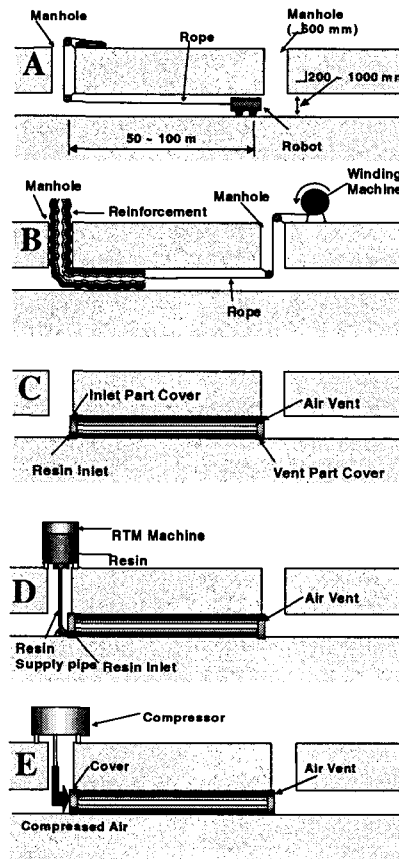


Fig. 7 Repairing process of sewer pipe.

하는 접합부용 해석 프로그램과 실시간 손상 추정 및 유지 보수 기술로부터 접합부 설계 및 보수 전문가 시스템을 개발할 계획이다.

### 5. 맺음말

신소재 복합재료에 적용되는 접합부에 관한 연구가 국내외에서 수행되어 왔지만, 아직까지 실제 설계 및 제작에서는 실험적인 방법에 의존하여, 신제품을 개발할 때마다 단편적인 실험과 시행착오를 반복하고 있는 실정이다. 따라서 복합재료 접합부 설계에 관한 신뢰성 있는 통계적 연구가 필요하며 이로부터 신소재 접합부의 설계 및 유지보수 전문가 시스템 개발이 완료되면, 다양한 분야에서 구조물의 취약부인 접합부에 대한 체계적인 설계, 제작 및 유지보수가 가능해져 새로운 첨단 기기 및 장치의 개발에 크게 기여할 것으로 사료된다.