

研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2013.17.2.031>

열습환경을 고려한 핀 체결부 복합재 파괴거동

김찬규* · 황영은** · 윤성호***†

Failure Behavior of Pin-jointed Composites under
Hygrothermal Environments

Changyu Kim* · Youngeun Hwang** · Sungho Yoon***†

ABSTRACT

This research analyzed the acoustic emission signals collected from the pin loading tests and investigated the effect of hygrothermal exposure on the fracture behavior of the pin-jointed carbon fiber/epoxy composites. The composite specimens include: the Base specimen that has not been exposed to any environments, the RT specimen that has been immersed in room temperature water, and the HT specimen that has been immersed in high temperature water. According to the pin loading test, the RT and the HT specimens showed 2.2% and 13% decreases in the bearing strength compared to the Base specimen, respectively. The analysis of the acoustic emission signals showed different fracture acceleration points for three types of the specimens. Furthermore, for the RT and the HT specimens, the event from the matrix crack signals in the composites decreased. This shows the effect of the hygrothermal conditions on the acoustic emission signals. Additionally, upon investigating the fracture behaviors of the pin-jointed composites, the exposing specimens to hygrothermal environments decreases the interfacial characteristics of the composites.

초 록

본 연구에서는 열습환경에 노출된 탄소섬유/에폭시 복합재의 핀 체결부에 대해 핀 하중시험을 수행하고 수집된 음향방출신호를 분석하여 열습환경이 복합재 핀 체결부의 파괴거동에 미치는 영향을 조사하였다. 이때 시편은 환경조건에 노출되기 전의 시편(Base), 상온침수환경에 노출된 시편(RT), 고온침수환경에 노출된 시편(HT)으로 구분하였다. 연구결과에 의하면 RT 시편과 HT 시편의 베어링 강도는 Base 시편에 비해 각각 2.2%와 13% 감소하였다. 음향방출신호의 경우 시편 종류에 따라 파손이 가속화되는 시점이 달라짐을 나타내었으며 RT 시편과 HT 시편은 Base 시편에 비해 모재균열에 의한 이벤트가 감소하는 경향이 나타났다. 이로 미루어 판단하면 열습환경은 복합재 핀 체결부의 음향방출신호 뿐 아니라 계면특성의 저하도 초래함을 알 수 있었다.

Key Words: Pin-jointed Composites(핀 체결부 복합재), Acoustic Emission Signals(음향방출신호), Hygrothermal Environments(열습환경), Bearing Strength(베어링 강도)

접수일 2013. 1. 28, 수정완료일 2013. 3. 4, 게재확정일 2013. 3. 8

* 학생회원, 금오공과대학교 대학원 기계공학과

** 정회원, 금오공과대학교 대학원 기계공학과

*** 종신회원, 금오공과대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail: shyoon@kumoh.ac.kr

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 섬유와 수지의 종류, 섬

유의 패턴, 제작공정 등 다양한 변수에 따라 목적에 맞는 적합한 재료를 만들 수 있는 장점을 가지고 있을 뿐 아니라 비강성, 비강도, 내열성, 내부식성, 절연성 등 여러 가지 우수한 특성으로 인해 자동차, 우주항공, 건설, 선박, 군수산업 등 산업 전반에 걸쳐 널리 적용되고 있다.

최근에는 필라멘트 와인딩 공정을 통해 적층 각도를 달리한 적층패턴을 가지는 원통형 복합재를 제작하여 내압성, 경량화, 내고온성 등의 설계조건에 부합되는 추진기관 조립체의 연소관으로도 적용되고 있다. 원통형 복합재 연소관은 추진기관의 각 부품들과 조립을 위해서는 조립 특성상 핀 체결 방법이 적용된다. 이때 연소관에 적용되는 복합재 핀 체결부에는 복잡한 적층패턴과 형상으로 인해 각 층마다 다양한 파손모드가 나타날 수 있기 때문에 연소관의 구조적 안전성을 확보하기 위해서는 핀 체결부의 파괴거동이 정확히 조사되어야 한다.

지금까지 복합재 핀 체결부에 대한 기계적 특성 평가 및 음향방출법을 적용한 파괴거동 분석 등이 수행되어 왔다. Liu 등[1]은 탄소섬유/에폭시 복합재를 적용하여 원공을 가진 다양한 적층패턴의 시편을 제작하고 인장시험을 통해 음향방출신호를 수집하였다. 이들은 수집된 음향방출신호를 분석하여 복합재 시편에서의 섬유/수지 간의 계면분리, 층간분리, 섬유파손 등의 다양한 파손모드를 조사하였다. Qi 등[2]은 일방향 탄소섬유 복합재와 크로스플라이(cross-ply)로 강화된 복합재에 대해 음향방출법을 적용한 인장시험을 수행하였다. 이들은 음향방출신호로부터 획득한 주파수를 분석하여 웨이브렛(wavelet) 등급에 따른 복합재의 파손모드를 조사하였다. Xiao 등[3]은 탄소섬유/에폭시 복합재에 대한 기계적 체결부의 베어링 강도와 파손거동을 분석하고 음향방출법을 통해 얻은 누적히트수와 파손거동과의 관계를 조사하였다. 이들은 누적히트수와 파손단면 촬영에 의해 파손시작(damage onset), 파손성장(damage growth), 부분파손(local fracture), 전체구조파손(total structure fracture)으로 파손단계를 구분하고 각 층에서의 파손모드를 조사하였다. Nam 등[4]은 $[0/90]_{6s}$ 과 $[0_2/90_2]_{3s}$ 의 적층

패턴을 가지는 흡습된 CFRP 복합재의 파괴거동과 신뢰성 평가를 수행하였다. 이들은 흡습율이 증가할수록 낮은 진폭의 이벤트가 감소하고 SEM 사진을 통해 수분의 영향으로 수지와 섬유의 계면손상이 촉진됨을 확인하였다. Kapti 등[5]은 폭/직경 비를 달리한 복합재 핀 체결부에 대해 실험과 유한요소해석을 수행하여 해석의 타당성을 검증하였다. 이들은 폭/직경 비에 따라 파손모드가 다르게 나타나며 유한요소해석과 실험을 통해 얻은 베어링 강도가 서로 유사함을 보였다.

복합재의 핀 체결부의 구조적 안전성을 확보하기 위한 설계, 해석, 시험평가 기법 등은 많은 선행연구를 통해 비교적 잘 정립되어 있다. 그러나 복합재가 적용된 추진기관 조립체를 장기간 보관하는 경우 자외선, 비/눈, 바람, 극저온과 고온 등과 같은 자연환경조건에 노출되면 강화섬유와 수지, 강화섬유와 수지 간의 계면특성이 환경인자에 의해 영향을 받기 때문에 장기 성능시험 및 신뢰성 평가에 대해서는 체계적인 연구가 수반되어야 한다. 특히 수분은 복합재의 수지 구조를 약화시키고 팽윤(swelling)에 의한 섬유와 수지 간의 서로 다른 응력 유발로 인해 계면결합을 약화시키고 가수분해 및 가수화 작용으로 수지 열화(degradation) 및 계면 침식을 유발시켜 복합재의 특성 변화에 큰 영향을 미친다[6, 7]. 따라서 연소관에 적용된 복합재의 장기적인 성능 평가를 위해서는 수분환경이 고려된 복합재의 파괴거동에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 원통형 복합재의 핀 체결부 시편에 대해 침수환경시험을 수행하여 침수환경에서 노출시간에 따른 수분흡수율을 조사하고 핀 하중시험을 통해 핀 체결부의 베어링 강도를 평가하였다. 또한 실시간 수집된 음향방출신호를 분석하여 열습환경이 복합재 핀 체결부의 파손거동에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

21 시편 제작

원통형 복합재는 에폭시 수지(Epon 826, Hexion, USA)에 함침시킨 탄소섬유(T800, Toray, Japan)를 적용한 필라멘트 와인딩 공법과 일방향 프리프레그(CU150NS, 한국화이바) 적층 공법을 병행하여 제작하였다. 이때 일방향 프리프레그는 원통형 복합재의 축방향 하중지지능력을 보강하기 위한 용도로서 규정된 위치들에 적층하고 그 위에 수지에 함침시킨 탄소섬유를 연속적으로 와인딩하였다.

복합재 연소관의 적층패턴은 $\pm 10^\circ$, 90° , $\pm 45^\circ$, 0° 로 구성되어 있으며 $\pm 10^\circ$ 와 90° 는 필라멘트 와인딩 공법이 적용되고 $\pm 45^\circ$ 와 0° 는 일방향 프리프레그 적층공법이 적용되었다. 특히 $\pm 10^\circ$ 는 총 4층으로 전체 두께는 1.92 mm, 90° 는 총 24층으로 전체 두께는 5.76 mm, $\pm 45^\circ$ 는 총 12층으로 전체 두께는 2.88 mm, 0° 는 총 32층으로 전체 두께는 3.84 mm로 되어있다. 필라멘트 와인딩 공법과 일방향 프리프레그 적층공법에 의해 멘드렐에 감겨진 원통형 복합재는 회전축을 가진 오븐을 이용하여 40°C 에서 15시간, 65°C 에서 4시간, 90°C 에서 4시간, 150°C 에서 6시간의 성형 조건을 적용하여 제작되었다.

Figure 1에는 원통형 복합재와 원통형 복합재로부터 채취한 핀 체결부 시편의 형상 및 제원이 나타나 있다. 이때 원통형 복합재의 원공들은 연소관 조립시 핀 체결이 이루어지는 부분으로

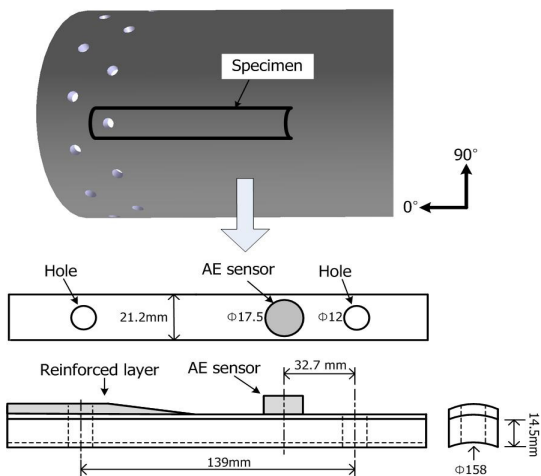


Fig. 1 Configuration of pin-jointed specimen

조립 규격에 따라 위치되어 있다. 핀 하중 시험시에 한 쪽 원공의 파손을 유도하기 위해 다른 한 쪽 원공이 있는 시편의 두께층을 직조 형태의 프리프레그(CF3327, 한국화이바)와 수지가 함침된 탄소섬유를 와인딩하여 보강하였다. 본 연구에 적용된 핀 체결부 시편은 각 위치에 있는 원공들을 기준으로 채취하였다.

2.2 침수시험

자연환경에서는 온도 뿐 아니라 수분환경도 고려되어야 하기 때문에 보다 극심한 자연환경 조건을 적용하기 위해 고온침수조건을 복합재 시편에 적용하였다. 실제 원통형 복합재의 경우 원통 두께방향으로 수분흡수가 일어난다. 본 연구에서는 시편 절단면에 기밀 처리를 하지 않아 시편 두께 방향 뿐 아니라 시편 측면을 통해서도 수분흡수가 일어나기 때문에 실제보다 더 극심한 환경조건이 가해지도록 하였다.

Figure 2에는 온도제어가 가능한 오븐을 이용한 침수시험장치가 나타나 있다. 이때 핀 하중 시편은 수조 내 증류수에 완전히 침수되어 있는 조건을 적용하였다.

환경조건을 적용하지 않은 시편은 Base 시편, 오븐 내 분위기 온도가 25°C 인 환경에서 침수를 적용한 시편은 RT 시편, 분위기 온도가 75°C 인 환경에서 침수를 적용한 시편은 HT 시편으로

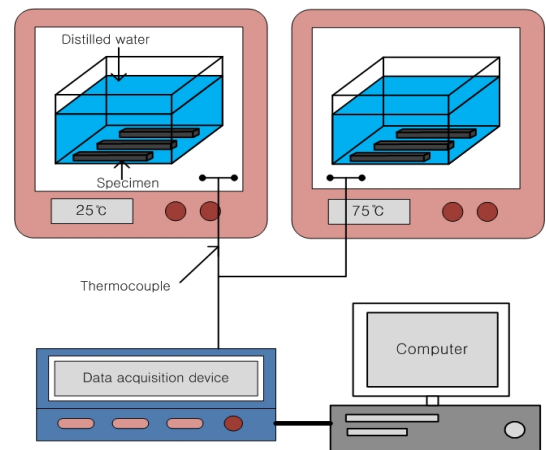


Fig. 2 Distilled water immersion test using oven for pin-jointed specimens

구분하였다. RT 시편과 HT 시편에 가해진 침수 환경조건은 최대 20일이며 HT 시편에 적용된 온도는 에폭시 수지가 유리상태(glassy state)로 유지되는 온도 범위와 실제 운용시 극심한 자연 환경조건을 고려하여 설정하였다.

RT 시편과 HT 시편의 수분흡수율을 측정하기 위해 노출시간에 따른 시편의 무게를 측정하였다. 시편의 무게는 정밀전자저울(AR2140, OHAUS, USA)을 사용하여 측정하였으며 시편의 무게를 측정하기 전에 시편의 표면에 있는 잔류 수분을 보푸라기의 발생이 없는 고운 천(KIM-TECH Science wipers, Kimberly-Clark, USA)을 사용하여 제거하였다. 수분흡수율은 각 3개씩의 RT 시편과 HT 시편에 대해 Eq. 1을 적용하여 계산하였다.

$$M_w = \frac{W_f - W_o}{W_o} \times 100 \quad (1)$$

여기에서 M_w 는 시편의 수분흡수율, W_f 는 침수 후의 시편 무게, W_o 는 침수 전의 시편 무게이다.

2.3 핀 하중 및 음향방출 시험

Figure 3에는 복합재 핀 체결부의 핀 하중 시험을 위한 하중시험장치(Z100/Zwick, Zwick/

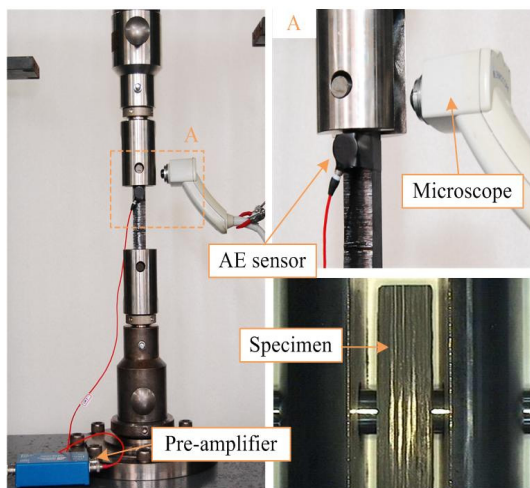


Fig. 3 Set up of pin-loading test

Roell, Germany)와 시편의 음향방출신호를 획득하기 위한 장치가 나타나 있다. 핀 하중 시험은 Double-shear 방식을 적용하였으며 체결 핀(직경: 11.98 mm)을 사용하여 시편 원공(직경: 12.00 mm)과의 공차가 없도록 하였다. 하중은 변위제어하에서 1.0 mm/min로 가하였다. 복합재 내부에서 발생하는 탄성파를 획득하기 위해 Fig. 3에 나타난 바와 같이 곡률 형태를 가진 핀 체결부 시편의 바깥면 아래쪽에 접촉매질인 진공그리스를 사용하여 AE 센서(R15, PAC, USA)를 부착하고 프리앰프에서 신호를 증폭한 다음 AD 보드(AEDSP-32/16B, PAC, USA)를 통해 자료를 수집하였다. 이때 노이즈에 의해 발생하는 신호는 임계값을 45 dB로 적용하여 제거하였다. 또한 실체현미경을 사용하여 실시간으로 시편의 파손거동을 관찰하였다. 핀 하중 시험을 위해 각각 3개씩의 Base 시편, RT 시편, HT 시편을 적용하였다. 핀 하중 시험은 시편이 파손에 이를 때까지 진행하였으며 하중시험장치의 하중센서로부터 획득한 하중신호를 이용하여 Eq. 2를 통해 베어링 강도 S 를 구하였다.

$$S = \frac{P}{d \times t} \quad (2)$$

이때 P 는 파손하중, d 는 원공 직경, t 는 시편의 두께이다.

3. 시험 결과

3.1 흡수시험 결과

Figure 4에는 RT 시편과 HT 시편의 노출시간에 따른 수분흡수율이 나타나 있다. 여기에서 보면 RT 시편의 수분흡수율은 노출시간이 1일이 경과되면 0.07%로 나타나고 노출시간이 7일이 경과되면 0.12%로 나타났다. 노출시간이 길어져 20일이 되면 수분흡수율은 0.18%로 나타났다. RT 시편의 경우 노출시간이 증가할수록 시편 내 수분흡수가 완만하게 진행되는 양상을 나타낸다. HT 시편의 수분흡수율은 노출시간이 1일인 경

우 0.28%로 나타나고 5일인 경우 0.61%, 12일인 경우 0.92%, 20일인 경우 1.13%로 나타났다. HT 시편의 수분흡수율은 노출시간이 20일이 경과하여도 각각 평형상태에 도달하지 않으며 노출시간이 길어지더라도 지속적으로 수분흡수가 진행될 것으로 판단된다. HT 시편의 경우 RT 시편과 달리 노출초기에 시편 내 수분흡수가 빠르게 진행된다. 또한 RT 시편의 경우 노출시간이 길어질수록 수분흡수율의 증가 정도가 미미하지만 HT 시편의 경우 노출시간이 증가할수록 시편 내 수분흡수가 계속 진행되어 수분흡수율이 증가하는 양상을 나타낸다. 침수환경에 노출된 핀 체결부 시편의 수분흡수율은 분위기 온도에 따라 매우 큰 차이를 나타내는데 이는 온도 영향이 복합재 내의 수분 확산에 영향을 미치기 때문이다[9].

일반적으로 복합재의 강화섬유에 수분이 흡수되는 정도는 매우 미미하기 때문에 수지와 섬유 간의 계면이나 수지 자체에서 수분흡수가 진행된다. 복합재가 침수환경에 노출되면 수분은 수지의 팽창을 유발시키고 섬유와 수지 사이의 계면 특성을 감소시킨다. 수지의 팽창 및 계면 특성 저하의 정도는 높은 온도가 적용된 침수환경에서 더욱 더 심화된다. 이때 수지의 팽창 및 계면 특성 저하는 복합재의 수분흡수율을 높이는 요인으로 고온침수환경에 노출된 경우의 수분흡수율이 상온침수환경보다 더 높게 나타난다[10, 11].

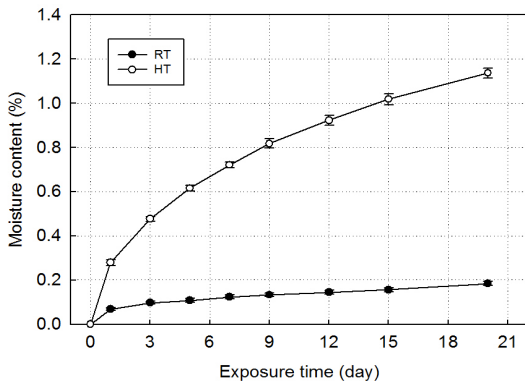


Fig. 4 Moisture contents of carbon fiber/epoxy composites exposed to hygrothermal environments

3.2 핀 하중 시험 결과

Figure 5에는 Base 시편, RT 시편, HT 시편에 대해 핀 하중 시험을 수행하여 수집한 응력-시간 선도와 음향방출 신호에서 얻은 누적히트수-시간 선도가 나타나 있다. 이때 응력-시간 선도를 보면 베어링 강도는 평균 257.8 MPa이고 표준편차는 12.7 MPa, RT 시편의 경우 평균 252.2 MPa이고 표준편차는 1.8 MPa, HT 시편의 경우 평균 224.4 MPa이고 표준편차는 5.2 MPa로 나타났다. RT 시편의 베어링 강도는 Base 시편에 비해 2.2% 정도 감소하고 HT 시편의 베어링 강도는 Base 시편에 비해 13.0% 정도 감소하였다. RT 시편의 경우 수분흡수율이 0.18%이며 Base 시편에 비해 베어링 강도의 저하 정도가 작지만 HT 시편의 경우 수분흡수율이 1.14%로 침수환경에 적용된 온도가 높을수록 고분자 수지의 연성화가 촉진되어 섬유와 수지 간의 계면특성 저하 정도가 더 심화되었기 때문에 베어링 강도의 저하에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다[11, 12].

누적히트수-시간 선도를 보면 낮은 응력에서는 누적히트수가 서서히 증가하다가 응력이 200 MPa인 지점부터 누적히트수가 급격하게 증가하는 양상이 나타났다. 또한 Base 시편에 비해 RT 시편의 누적히트수가 더 낮게 나타났고 고온침수환경이 가해진 HT 시편의 누적히트수가 Base 시편과 RT 시편에 비해 크게 감소하였다. 또한 누적히트수의 초기 기울기를 보면 Base 시편이

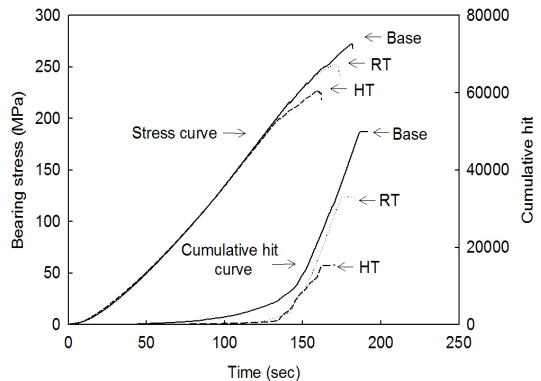


Fig. 5 Results of pin-loading test and acoustic emission signals for composites exposed to hygrothermal environments

높고 RT 시편과 HT 시편은 낮게 나타나는데 이는 시편의 연성화에 의해 탄성파가 발생하는 이벤트 수가 감소하기 때문이다.

Figure 6에는 Base 시편, RT 시편, HT 시편에 대해 시간에 따른 음향방출 에너지가 나타나 있다. 여기에서 점선을 표시한 A는 누적히트수 선도의 기울기가 높아지는 시점을 나타낸다. Base 시편 선도를 보면 누적히트수가 낮은 기울기일 때 모재균열에 의한 2000 J 이하의 에너지 방출이 간헐적으로 발생하지만 RT 시편과 HT 시편의 경우에는 수지의 연성화로 인해 누적히트수가 급격히 증가하기 전까지는 방출된 에너지가 거의 나타나지 않는다. 또한 최종파손이 발생할 때의 음향방출에너지는 Base 시편의 경우는 30692 J이고, RT 시편의 경우는 27724 J, HT 시편의 경우는 8763 J의 에너지가 방출되어 노출온도가 고온일수록 낮은 에너지 값이 나타났다.

Figure 7에는 Base 시편, RT 시편, HT 시편에 대해 시편의 원주방향 측면에서 촬영한 파손사진이 나타나 있다. 이때 각 시편의 파손모드를 보면 Base 시편과 RT 시편은 90°층과 45°층에서 net-tension 모드가 지배적으로 나타났다. 그러나 고온침수환경에 노출된 HT 시편은 90°층과 45°

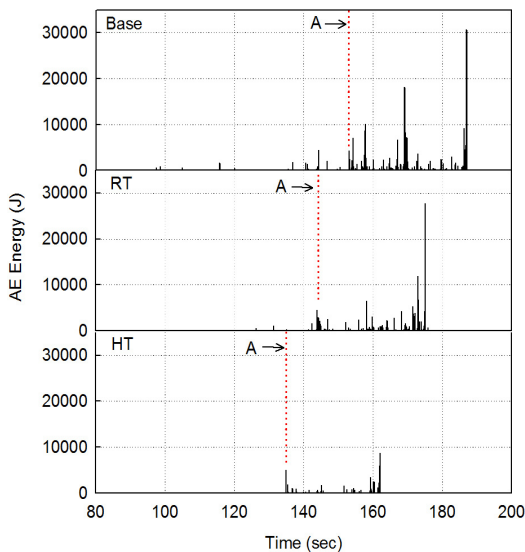


Fig. 6 Test results of pin-loading test and acoustic emission signals

층에서 net-tension 모드가 발생하기 전에 0°층과 90°층에서 층간분리가 먼저 발생하고 최종적으로 90°층과 45°층에서 net-tension 모드로 파손된다.

환경조건에 따라 각 층에서의 파손모드가 다르게 나타나는데 이러한 파손모드를 명확하게 조사하기 위해 시편 길이방향의 측면에서 파손모드를 관찰하였다. Fig. 8에는 각 시편의 길이방향 측면에서 촬영한 파손사진이 나타나 있다. 여기에서 보면 Base 시편의 경우 층간분리가 발생하면서 90°층에 부분적인 net-tension 모드가 관찰되었다. 또한 0°층은 Section A와 같이 shear-out 모드와 bearing 모드, 90°층과 45°층에서는 net-tension 모드가 동시에 발생하면서 파손되었다. RT 시편의 경우도 Base 시편에서와

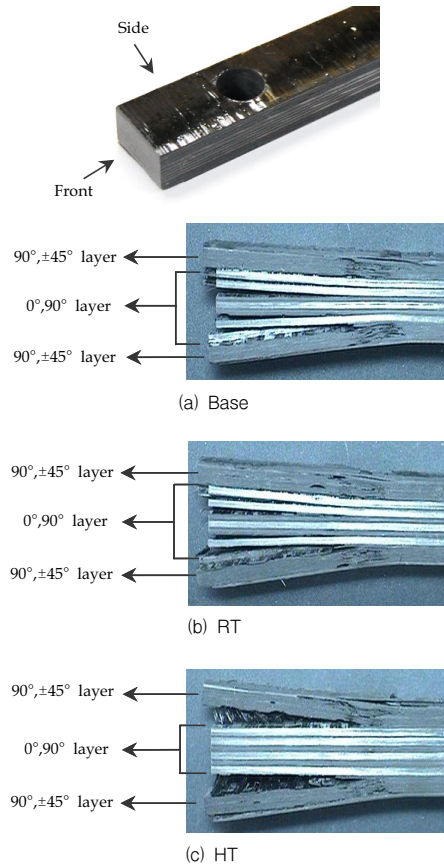


Fig. 7 Photographs of failure modes for pin-jointed composite specimens (Side view)

같이 유사한 파손모드가 나타났지만 Section B를 보면 Base 시편과 달리 층과 층 사이에 섬유들이 관찰되었다. 이는 수분의 영향으로 인한 수지에 열화현상이 발생하여 일부 섬유들이 관찰되는 것으로 판단된다. HT 시편의 파손사진을 보면 90°층과 45°층에서는 Base 시편 및 RT 시편과 유사하게 net-tension 모드로 파손되었지만 이와 달리 0°층에서는 bearing 모드만이 관찰되었다. 특히 Section B와 C를 서로 비교해 보면 HT 시편은 층과 층 사이에 섬유가 노출된 정도가 RT 시편에 비해 더 심하게 나타났다. 이는 수분흡수 결과에서 알 수 있듯이 HT 시편은 RT 시편보다 수분흡수율이 6배 이상 높게 나타나 HT 시편의 경우가 수지의 열화 현상이 RT 시편에 비해 더 심화되어 층간에서 섬유 노출 정도가 더 크게 나타났다. 이러한 수지의 열화 현상은 층간 접착력을 약화시키기 때문에 90°층에서 0°층으로 하중을 충분히 전달하지 못하게 된다. 따라서 HT 시편은 RT 시편에 비해 수지의 열화 (degradation) 현상이 더욱 더 촉진되어 HT 시편의 베어링 강도가 가장 낮게 나타나는 것으로 판단된다.

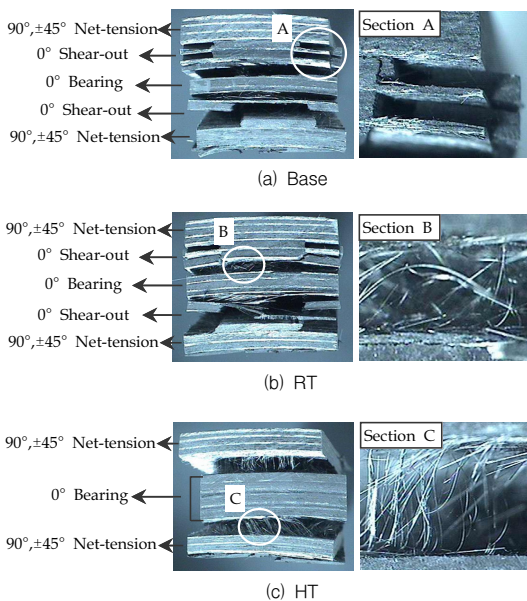


Fig. 8 Photographs of failure modes for pin-jointed composite specimens (Front view)

4. 결 론

본 연구에서는 열습환경에 노출된 탄소섬유/에폭시 복합재의 핀 체결부에 대한 핀 하중 시험과 음향방출시험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 베어링 강도는 RT 시편의 경우 Base 시편에 비해 2.2%, HT 시편의 경우 Base 시편에 비해 13.0% 낮게 나타났다. 상온침수환경은 복합재 기계적 체결부의 베어링 강도에 크게 영향을 미치지 않지만 수분과 고온이 동시에 작용할 경우 수분흡수율이 높게 나타나고 베어링 강도의 저하에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.
- (2) 음향방출시험에서 얻은 누적히트수를 통해 기계적 체결부의 파손이 급격히 진전되는 시점을 찾을 수 있었고 누적히트수가 급격히 증가하는 시점은 환경조건에 따라 다르게 나타남을 알 수 있었다. 또한 누적히트수와 에너지 분포를 분석한 결과를 통해 흡수된 시편이 Base 시편에 비해 초기 하중에서 모재 균열에 의한 이벤트가 감소하는 경향이 나타나 열습환경이 음향방출신호에 영향을 미침을 확인하였다.
- (3) Base 시편과 RT 시편은 0°층에서 shear-out 모드와 bearing 모드가 복합적으로 나타나 각 층에서 하중을 효과적으로 전달하지만 HT 시편은 계면손상이 유발되어 베어링 강도가 크게 저하됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 핵심기술 연구개발 과제 (과제명 : 내고온 경량 복합재연소관 기술) 의 지원을 받아 수행되었음.

참 고 문 헌

1. Liu, P. F., Chu, J. K., Liu, Y. L., and Zheng, J. Y., "A Study on the Failure Mechanisms of Carbon Fiber Epoxy Composite Laminates using Acoustic Emission," *Materials and Design*, Vol. 37, 2012, pp.228-235
2. Qi, G., Barhorst, A., Hashemi, J., and Kamala, G., "Discrete Wavelet Decomposition of Acoustic Emission Signals from Carbon-fiber Reinforced Composites," *Composite Science and Technology*, Vol. 57, No. 4, 1997, pp.389-403
3. Xiao, Y. and Ishikawa, T., "Bearing Strength and Failure Behavior of Bolted Composite Joints (Part I: Experimental Investigation)," *Composite Science and Technology*, Vol. 57, No. 7-8, 1997, pp.389-403
4. Nam, K. W. and Kim, S. J., "Fracture Behavior using AE Method and Reliability Assessment of CFRP Based on Absorbed Moisture," *The Korean Society of Ocean Engineers*, Vol. 10, No. 4, 1996, pp.38-50
5. Kapti, S., Sayman, O., Ozen, M., and Benli, S., "Experimental and Numerical Failure Analysis of Carbon/Epoxy Laminated Composite Joints under Different Conditions," *Materials and Design*, Vol. 31, No. 10, 2010, pp.4933-4942
6. Nakai, A., Ikegaki, S., Hamada, H., and Takeda, N., "Degradation of Braided Composites in Hot Water," *Composites Science and Technology*, Vol. 60, No. 3, 2000, pp.325-331
7. Brahim, H. B. and Kallel, A., "Micromechanical Characterization of Dry and Aged Pultruded Composite Containing Fillers," *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 114, No. 15, 2009, pp.584-587
8. ASTM D5961, *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials, Vol. 15.03, 2001
9. Daly, H. B., Brahim, H. B., Hraied, N., Harchay, M., and Boukhili, R., "Investigation of Water Absorption in Pultruded Composites Containing Fillers and Low Profile Additive," *Polymer Composites*, Vol. 23, No. 4, 2007, pp.355-364
10. Xiao, G. Z. and Shanahan, M. E. R., "Swelling of DGEBA/DDA Epoxy Resin during Hygrothermal Aging," *Polymer*, Vol. 14, No. 14, 1998, pp.3253-3260
11. Rege, S. K. and Lakkad, S. C., "Effect of Salt Water on Mechanical Properties of Fibre Reinforced Plastics," *Fibre Science and Technology*, Vol. 19, No. 4, 1983, pp.317-324
12. Bradley, W. L. and Grant, T. S., "The Effect of the Moisture Absorption on the Interfacial Strength of Polymeric Matrix Composites," *Materials Science*, Vol. 30, No. 21, 1995, pp.5537-5542