

論文

고온습도 및 저온 환경이 복합재 접착 체결부 강도에 미치는 영향 연구

송민규*, 권진희**, 최진호**, 김효진***, 송민환****, 신상준****, 변재현*****

Hygrothermal Effect on the Strength of Carbon/Epoxy
Composite Single-Lap Bonded Joints

Min-Gyu Song*, Jin-Hwe Kweon**, Jin-Ho Choi**, Hyo-Jin Kim***

Min-Hwan Song****, Sang-Joon Shin**** and Jai-Hyun Byun*****

ABSTRACT

The hygrothermal effect on the strength of composite single-lap bonded joints were investigated. The specimens were manufactured in four different manufacturing methods and tested in three different environmental conditions. An interesting result is that the strengths of the joints in the elevated temperature and wet (ETW) conditions were found to be 11 ~ 23% higher than those in the room temperature and dry (RTD) environment. In contrast, the strengths of the joints in the cold temperature and dry (CTD) condition decrease by 8 ~ 21% compared to those in the RTD environment except for cobonded joint. The difference in the strength by testing environments is mainly attributed to the change of the material properties of adhesive by temperature and moisture.

초 록

본 논문에서는 다양한 방법으로 제작된 복합재 접착 체결부의 강도에 대한 온도 및 습도 환경의 영향을 연구하였다. 시편은 두 가지 종류의 일체성형 방법 외에 동시접착 및 이차접착 등 총 네 가지 방법으로 제작하였고, 상온건조, 고온습도 및 저온건조 환경 등 세 가지 환경에서 강도시험을 수행하였다. 전체적으로 고온습도 환경에서의 파손강도가 상온 환경에 비해 11~23% 가량 높게 나타났고, 저온 환경에서의 파손강도는 동시접착 체결부를 제외하고는 8~21% 가량 상온 강도보다 낮게 나타났다. 시험 환경에 따른 체결부의 강도 차이는 환경에 따른 접착제의 물성 변화가 주 원인인 것으로 분석되었다.

Key Words : Strength(강도), Bonded joint(접착 체결부), ETW(고온습도), CTD(저온건조)

I. 서 론

복합재료가 항공우주분야에서 금속을 대체하는 재료로 자리매김함에 따라 복합재 구조설계를 위한 신뢰성 있는 데이터베이스의 구축이 중요한 문제로 대두되고 있다. 그 중에서도 체결부(joint) 강도에 대한 설계허용치 데이터의 확보는 가장 시급한 현안이다.

복합재료의 접합을 위해서는 일반적으로 기계

† 2009년 10월 27일 접수 ~ 2010년 1월 15일 심사완료

* 정회원, 경상대학교 대학원 항공우주공학과

** 정회원, 경상대학교 항공기부품기술연구소
교신저자, E-mail : jhkweon@gnu.ac.kr

경남 진주시 가좌동 900번지

*** 정회원, 한국폴리텍 항공대학 항공정비과

**** 정회원, 한국항공우주산업(주)

***** 정회원, 경상대학교 산업시스템공학부

적 체결과 접착 체결의 두 방법이 사용된다. 기계적 체결에서는 볼트나 리벳 혹은 핀 등을 사용하게 되고, 체결재의 설치를 위해 구멍을 뚫게 된다. 이러한 체결재 구멍이 응력집중을 일으키는 원인이 된다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 그럼에도 불구하고 항공기 등의 주구조물에 기계적 체결방법이 많이 사용되는 것은 분해조립이 용이하고 손상의 진행이 점진적이기 때문이다. 반면에, 접착방식의 가장 큰 강점은 응력집중을 줄일 수 있고, 체결재로 인한 무게를 절감할 수 있다는 것이다. 최근 들어 접착제의 성능이 개선되면서 항공기 등의 주구조물을 접착방식으로 제작하는 사례가 늘고 있다. 국내에서도 현재 한국항공에서 개발 중인 단발피스톤프롭 항공기, KC-100의 경우 주요 구조물을 기계적 체결재 없이 접착방식으로만 제작하고 있다.

학문적 측면에서 복합재 접착 체결부 강도에 대한 연구는 접착방법, 겹침길이, 모재의 종류 등의 관점에서 이미 다수의 연구자들에 의해 수행되어 왔다[1-6]. 복합재 구조물을 실제로 사용할 때 고려해야 할 또 다른 변수는 온도와 습도이다. 복합재의 기계적 특성은 온도나 습도에 따라 크게 달라지기 때문이다.

Delasi 등[7]은 수분이 탄소/에폭시 및 보론(Boron)/에폭시 복합재료의 재료특성에 미치는 영향을 연구하였다. Ishai 등[8]은 유리섬유 복합재료를 뜨거운 물에 노출시킨 경우와 노출 후 다시 건조시킨 경우에 재료의 기계적 특성이 어떻게 달라지는지를 연구하였다. 이 연구에서 저자들은 수지에 따라서는 젖은 시편의 인장강도가 건조한 시편의 강도보다 높은 경우도 있음을 보고하였다. Liao 등[9]은 인발공정(pultrusion)으로 제작된 유리/비닐(glass/vinyl) 복합재료를 여러 온도의 물속에 노출시킨 후, 재료의 강도와 강성이 저하됨을 보고하였다. Suh 등[10]은 탄소/에폭시 복합재료의 수분흡수량을 계산하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. Walker[11]는 -129, 21, 177°C의 세 온도에서 탄소/에폭시(IM7/PETI5) 복합재료에 대한 압축시험을 수행하여, 고온 환경이 재료의 압축강도를 저하시키는 반면, 저온 환경은 압축강도를 오히려 증가시킨다고 보고하였다. Shimokawa 등[12]은 G40-800/5260 탄소/비스말레이마이드(bismaleimide) 복합재료에 대하여 상온과 150°C에서 정하중 및 피로하중에 대한 인장, 압축 시험을 수행하고, 정적강도뿐만 아니라 피로강도 역시 온도의 영향을 받으며, 섬유보다는 주로 기지의 특성이 큰 영향을 미친다고 보고하였다. Bismarck 등[13]과 Kim 등[14]도 탄소/PEEK 복합재료 및 유리섬유 복합재료의

기계적 특성이 습도환경에 노출된 후 저하된다는 것을 보고하였다.

재료 자체의 특성이 아닌 체결부의 기계적 특성과 관련하여서는 Parker[15,16]의 연구가 있다. 그는 온도와 습도가 보론 복합재 접착 체결부의 강도를 저하시킨다고 보고하였다. Ashcroft 등[17]은 탄소섬유 복합재 접착 체결부에 대한 시험을 통해 수지에 따라서는 습도와 온도가 체결부의 강도를 증가시키는 경우도 있음을 보고하였다. Zhang 등[18]은 유리섬유 복합재 접착 체결부에 대한 연구를 통해 습도와 온도가 체결부의 피로 및 파괴 특성에도 영향을 미친다는 사실을 보고하였다.

이상의 연구들을 종합해보면 지금까지의 연구는 주로 수분이나 온도가 재료 자체의 기계적 특성에 미치는 영향을 연구하는데 집중되어 있고, 접착 체결부의 강도에 대한 연구는 제한적인 것을 알 수 있다. 특히 온도와 습도의 효과를 동시에 연구한 결과는 찾아보기 어렵다. 또한 복합재 접착 체결부의 강도에 대한 온도 및 습도의 효과는 기지재료에 따라 크게 달라지게 되므로 구조물의 설계에 필요한 데이터는 사용하는 재료별로 각각 획득하여야 한다.

저자들은 선행 연구[19]에서 복합재 접착 체결부의 제작방법이 체결부의 강도에 미치는 영향을 연구하여 보고한 바 있다. 본 논문은 앞선 연구의 후속 연구로서, 서로 다른 네 가지 방법으로 제작된 복합재 접착 체결부의 강도가 온도 및 습도 환경에 따라 어떻게 달라지는지를 시험적으로 연구하였다. 시편은 두 가지 종류의 일체성형(cocure) 방법 외에 동시접착(co-bonding) 및 이차접착(secondary bonding) 등 총 네 가지 방법으로 제작하였고, 상온건조(RTD, Room Temperature & Dry), 고온습도(71°C, 수분포화, ETW, Elevated Temperature & Wet) 및 저온건조(-54°C, CTD, Cold Temperature & Dry) 등 세 가지 환경에서 강도시험을 수행하였다. 재료는 CYCOM 5276-1/G40-800-24K 탄소/에폭시 복합재료이고, 접착제는 필름 형태의 고온경화용 접착제인 Cytec사의 FM300K를 사용하였다. 또한, 접착제의 물성 저하가 체결부의 응력분포 및 손상영역에 미치는 영향을 유한요소법을 사용하여 분석하였다.

II. 시 험

2.1 시편 제작

앞에서 언급한 바와 같이 본 연구에서 시편은 총 네 가지 방법으로 제작되었고 각각은 CCN

(접착제 없이 일체성형), CCA(접착제를 사용한 일체성형), COB(동시접착), SEB(이차접착)로 명명하였다. 접착제가 없는 일체성형 방법은 접착제를 사용하지 않고 프리프레그의 수지만을 이용하여 원하는 형상으로 프리프레그를 성형하는 방법이다. 접착제가 있는 일체성형 방법은 프리프레그 상태인 두 적층판 사이에 별도의 접착제를 삽입하여 성형하는 방법이다. 동시접착 방법은 먼저 성형된 적층판과 성형되지 않은 프리프레그 층 사이에 접착제를 추가하여 성형하는 방법이다. 이차접착 방법은 각각의 성형된 적층판을 접착제를 이용하여 접착하는 방법이다[19].

체결부의 형상은 Fig. 1에 보인 바와 같다. 항공기용 일방향 탄소섬유 복합재료 CYCOM 5276-1/G40-800-24K의 재료상수는 시험으로 결정하였고, $E_1=158.4$ GPa, $E_2=9.1$ GPa, $G_{12}=5.5$ GPa, $\nu_{12}=0.298$, $X_T=2790$ MPa, $Y_T=90$ MPa, $S_{12}=170$ MPa이다. 여기서 하첨자 1은 섬유방향, 2는 섬유에 수직인 방향이다. X_T , Y_T 는 각각 1, 2 방향 인장강도, S는 전단강도를 의미한다. 복합재의 성형 후 한 층(ply)의 평균두께는 0.191 mm 이고, 적층순서는 [45/0/-45/90]_{3S}이다. 본 연구에 앞서 시험으로 구한 필름 접착제 FM300K의 물성치는 $E=3.1$ GPa, $S=58.3$ MPa, $\nu=0.382$ 이고, 각 제조방법에 따른 접착제 층의 평균두께는 Table 1에 나타내었다.

모든 시편은 별도로 제작된 몰드를 사용하여 오토클레이브에서 성형하였고, 성형된 적층판에 접착제를 사용할 경우 #120번 사포와 아세톤으로 표면처리 작업을 수행하였다. 시편의 폭과 겹침길이는 25.4 mm이다.

접착 체결에서 잉여 수지에 의한 필렛(fillet)이 강도에 영향을 미칠 수 있다. 그러나 필렛의 크

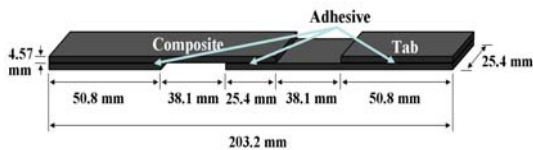


Fig. 1. Configuration of a bonded joint

Table. 1. No. of specimens for various environmental conditions

	CTD	RTD	ETW	Adhesive thickness(mm)
CCN	7	14	7	-
CCA	6	7	7	0.090
SEB	7	14	7	0.092
COB	11	7	7	0.089

기는 성형방법에 따라 크게 달라진다. 일체성형의 경우 필렛의 크기가 매우 작은 반면 이차성형에서는 비교적 크게 나타나게 된다. 따라서 선행연구[19]에서와 같이 시험 결과의 일관성 유지를 위해 인위적으로 필렛이 생기지 않도록 시편을 제작하였다.

시험에 사용된 시편의 개수는 Table 1에 보였다. 이와는 별도로 수분율(moisture contents, %) 측정을 위해 트레블러(traveler) 시편을 사용하였다. 트레블러 시편은 각 제조방법에 따라 각각 7개씩, 총 28개를 제작하였다. 트레블러 시편의 형상은 실제 시편의 형상과 동일하게 제작하였다. 그러나 시편의 탭 부분은 모재와 다른 유리섬유(GEP215) 복합재료를 사용하였기 때문에 포화수분율이 달라질 수 있으므로 탭부분은 절단하였다. 시편의 흡습을 위해서 사용한 수조는 온도 제어가 가능한 JS RESEARCH(대한민국)사의 JSWB-30T이다. 모든 ETW 시편은 오븐에서 완전히 건조시킨 후 수조에 담근다. 수조에 담근 후에는 바로 꺼내어 표면 습기를 제거한 후 무게를 측정하고 이를 기준무게로 삼는다. 이렇게 하면 실제로 시편에 스며들지 않고 표면에 남아있는 수분의 무게를 제외하고 순수한 시편 속 수분의 무게만을 측정할 수 있게 된다. 무게 측정시 표면습기는 상온에서 6기압의 에어건으로 1분간 제거하였다. 7일 간격으로 수분율을 측정하고, 연속으로 측정한 두 번의 수분율 차이가 0.05% 이내에 들어오면 포화된 것으로 가정한다[20]. 각 시편의 수분율 변화 추이는 Fig. 2에 나타내었다. 수분율 측정에 사용된 저울은 AND(일본)사의 GX400 제품이며 1/1000 g까지 측정 가능하다. 그림을 보면 약 6주 정도 침수 후에 각 시편의 수분은 포화상태가 된다. 수분율은 0.63~0.64% 범위에 있다.

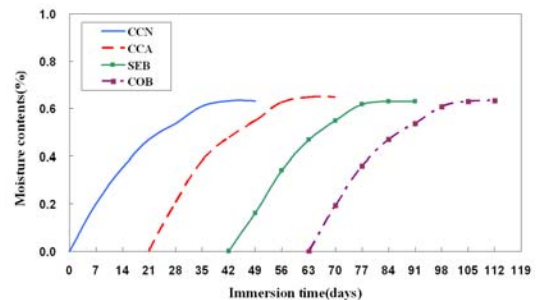


Fig. 2. Moisture content variation of traveler specimens for various manufacturing method

2.2 체결부 시험

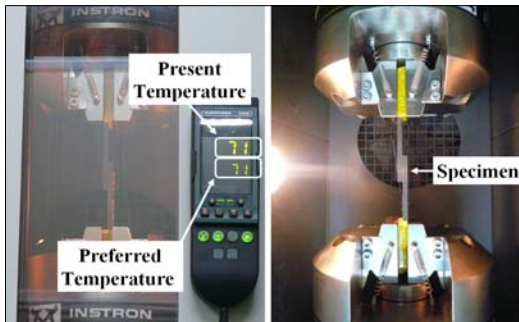
재료시험기는 Instron 8801를 사용하였고, 시험온도는 상온, 71°C, -54°C 이다. 하중은 ASTM D5868-01을 참고하여 변위제어로 분당 1.3 mm의 속도로 가하였다. 시험에 사용한 환경챔버는 액화 이산화탄소를 기화하여 온도를 낮추는 방식을 사용하는 Instron 3119-409이다. 환경챔버의 온도는 챔버 내에 부착되어 있는 열전대를 통해 측정하며 ±2°C의 오차 범위를 갖는다. 시험 장치는 Fig. 3에 보였다.

고온습도(ETW) 시험의 절차는 다음과 같다.

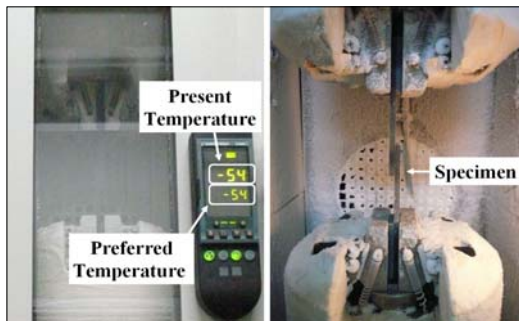
1. 수분율이 포화상태에 도달할 때까지 시편을 71°C 수조에 보관한다.
2. 수조에서 시편을 꺼내어 시험기의 환경챔버에 설치한다.
3. 정해진 온도(71°C)에 도달 후 3분 동안 안정화 시간을 갖는다.
4. 하중을 가한다.

저온(CTD) 시험을 위한 절차는 다음과 같다.

1. 시편을 시험기의 환경챔버에 설치한다.
2. 정해진 온도(-54°C)에 도달 후 3~5분 동안 안정화 시간을 갖는다.
3. 하중을 가한다.



(a) ETW condition



(b) CTD condition

Fig. 3. Test set-ups

III. 시험 결과 및 토론

세 가지 환경조건 즉 RTD, ETW, CTD 환경에서 네 가지 제작방법 즉 CCN, CCA, SEB, COB으로 제작된 체결부 시편에 대한 강도시험 결과를 Fig. 4에 막대그래프로 제시하였다. 체결부 강도는 체결부가 지지하는 최대하중에서 접촉면적을 나눈 값으로 정의된다. 시편의 수는 각 조건별로 7개를 기본으로 하고, 일부 시편의 경우 추가적인 시험을 수행하였다. RTD 환경에서의 전형적인 파손 모드는 Fig. 5에 제시하였다. CCN 체결부에서는 주로 층간분리(delamination)가 발생하고 부분적으로 층내분리(intra-laminar failure)가 발견되는 것을 볼 수 있다. SEB와 CCA 체결부에서도 비슷한 형태의 파손을 볼 수 있지만, CCA에서는 부분적으로 접착제와 모재의 접착분리(debonding)에 의한 계면파손(interfacial failure)이 발견되고 있다. COB 체결부의 파손양

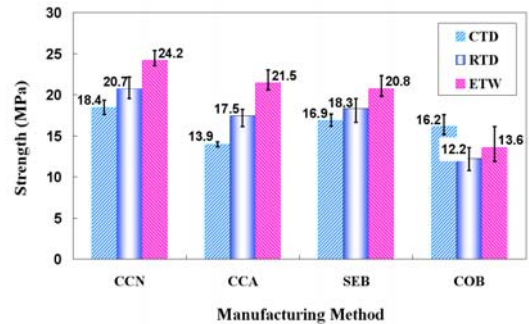


Fig. 4. Strengths of the bonded joints tested in the RTD, ETW and CTD conditions

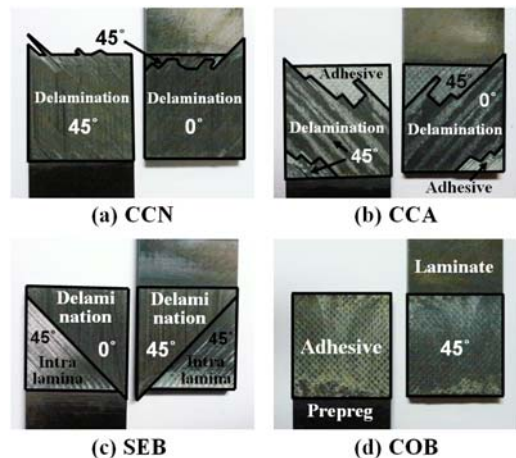


Fig. 5. Failure modes of the bonded joints in RTD condition

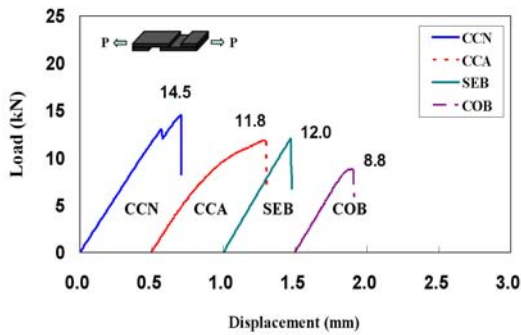


Fig. 6. Typical load-displacement curves of the bonded joints in RTD condition

상은 다른 세 경우와 전혀 다르다. 그림에 보인 바와 같이 주된 파손은 접착제와 모재의 접착분리이다. 시험의 결과로부터 COB 체결부에서 접착제와 모재 즉 복합재 적층판 사이의 접착력이 크게 저하되었다는 것을 알 수 있다.

전형적인 하중-변위 곡선은 Fig. 6에 제시하였다. CCA의 경우를 제외하면 대체로 파손 직전까지 선형적인 거동을 보이는 것을 볼 수 있다. 별도의 접착제층을 추가하여 일체성형한 CCA의 경우 최대지지하중의 약 50% 근처에서부터 무시할 수 없을 정도의 비선형성이 나타나고 있다.

다시 Fig. 4의 파손강도 그래프를 살펴보면, ETW 환경에서, 제작공정에 따른 체결부 파손강도의 경향은 RTD 조건에서와 유사하다. 그러나 미세하지만 CCA의 파손강도가 SEB의 강도보다 높게 나타나는 것이 다른 점이다. COB 체결부의 강도가 다른 세 경우에 비해 현저히 낮은 것은 동일하다. 특히 CCN과 비교하면 COB의 강도는 56%에 불과하다. 동일한 제작방법에 대해 ETW와 RTD 환경에서의 파손강도를 비교해보면 흥미로운 결과가 발견된다. 네 가지 제작방법 모두에서, 71°C의 물속에서 수분이 포화된 ETW 환경 체결부의 파손강도가 상온 환경 체결부의 강도에 비해 최소 11%(COB)에서 최대 23%(CCA)까지 높게 나타난다. 일반적으로 고온습도 환경은 접착강도를 저하시키는 것으로 알려져 있지만 재료에 따라서는 그렇지 않은 경우도 있다는 것은 이미 보고된 바 있다[17,21,22]. ETW 환경에서 더 높은 강도를 보이는 현상의 원인은 온도와 습도에 따른 고분자 재료(기지 및 접착제)의 열화(degradation) 현상과 관련된 것으로 추측된다. 참고문헌 [23]에 의하면 접착 체결부에서 접착제가 너무 강할 경우 오히려 모재에서의 층간분리를 촉진하며 접착제가 적당한 강성을 가질 때 체

결부의 파손강도가 최대가 된다는 현상이 보고되어 있다. 본 시험의 경우에도 온도와 습도에 의해 접착제가 열화되면서 모재의 층간분리 파손을 지연시키는 효과가 발생한 것으로 판단된다. 이에 대하여는 다음 장의 유한요소해석에서 자세히 검토한다.

ETW 조건에서의 전형적인 파손모드는 Fig. 7에 제시하였다. CCN에서는 층간분리와 층내분리가, COB에서는 접착분리 파손이 주로 나타나는데, 이는 RTD 환경에서와 유사한 결과이다. 그러나 파손하중이 높아진 것으로 볼 때 파손모드는 동일하다고 하더라도 이러한 파손의 발생 시점이 지연된 것으로 볼 수 있다. CCA의 경우 RTD에서와 유사하지만 접착분리면적이 약간 더 넓어진 것을 볼 수 있는데 같은 조건의 다른 시험에서도 유사한 경향이 나타났다.

파손모드가 가장 극적으로 달라진 것은 SEB이다. RTD 환경에서는 층간분리가 주된 파손모드였으나 ETW에서는 접착제층이 전단에 의해 파손되는 순수 접착제 파손(cohesive failure)이 나타나고 있다. 동일한 조건의 다른 시험에서도 거의 유사한 파손이 발생하였다. 파손강도와 연결하여 특이한 것은 접착제 파손이 발생하였음에도 불구하고 층간분리 파손이 나타난 CCN 체결부보다 강도값이 낮다는 것이다. 만약 접착제층이 상온에서의 접착강도를 유지하였다면 접착제 파손시의 파손강도는 36.8 MPa 근처여야 한다[24]. 그러나 시험에서의 파손강도는 RTD 강도 18.3 MPa보다는 높지만 재료 자체의 전단강도에

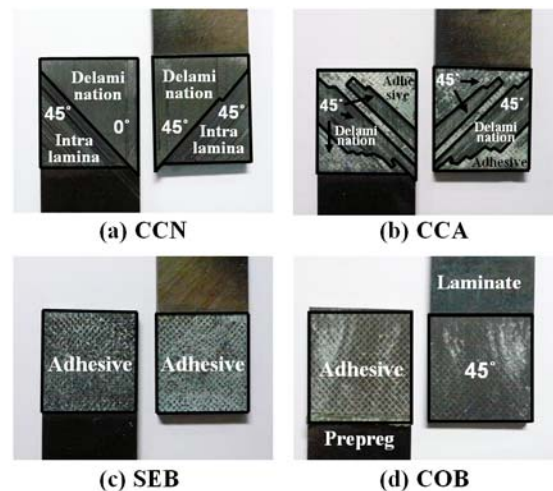


Fig. 7. Failure modes of the bonded joints in ETW condition

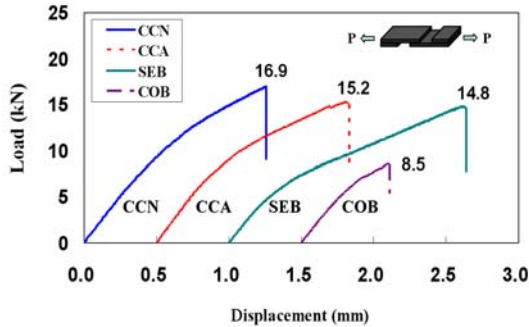


Fig. 8. Typical load-displacement curves of the bonded joints in ETW condition

는 못미치는 20.8 MPa로 나타났다. 이로 미루어 볼 때 ETW 환경이 접착제 자체의 재료강성과 강도는 저하시켰지만, 이로 인해 모재의 층간분리 파손을 지연시켰다는 추론이 가능하다.

ETW 환경에서의 전형적인 체결부 하중-변위 곡선은 Fig. 8에 제시하였다. RTD 조건에서의 시험 결과와 가장 크게 달라진 것은 하중-변위 곡선의 비선형성이다. 특히 복합재 층간분리에서 접착제층 파손으로 파손모드가 완전히 달라진 SEB 체결부의 경우 RTD 조건에서는 거의 완전한 선형 곡선이었으나, ETW에서는 파손하중의 약 30% 근처에서부터 곡선의 기울기가 급격히 달라지는 것을 볼 수 있다. 그림에 보인 하중-변위 곡선의 비선형성 또한 온도와 수분으로 인한 재료의 열화현상을 반영한 것으로 볼 수 있다.

다시 Fig. 4에서 -54°C 즉 CTD 조건에서의 파손강도를 살펴보면, CTD 조건에서도 최대 강도 (18.4 MPa)는 CCN 체결부에서 나타나는데 이는 RTD나 ETW에서와 같은 현상이다. SEB 체결부의 강도(16.9 MPa) 역시 RTD(18.3 MPa)에 비해 약간 낮고 동일한 환경조건에서의 CCN보다 약 18% 가량 낮게 나타난 점은 다른 환경조건에서의 경향과 다르지 않다. 그러나 CCA와 COB 체결부의 경우 다른 두 환경조건 즉 RTD와 ETW에서의 결과와 크게 다르다. 우선 CCA의 경우 RTD와 ETW 환경에서는 SEB 체결부의 강도와 최대 4.4% 정도의 차이로 매우 비슷하였다. 그러나 CTD 환경에서 CCA 체결부의 강도는 13.9 MPa로서 SEB 체결부의 강도에 비해 18%나 낮다. 또 다른 특이한 결과는 COB 체결부에서 나타난다. RTD나 ETW 환경에서 COB 체결부의 강도는 모든 제작방법들 중 현저한 차이를 보이면서 가장 작은 값을 보였다. 그러나 CTD 환경에서 COB 체결부의 강도는 16.2 MPa로서 CCA

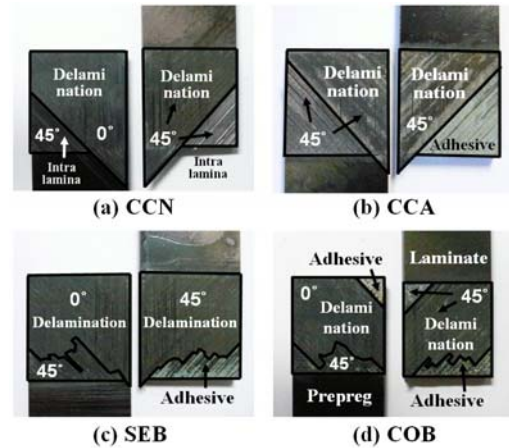


Fig. 9. Failure modes of the bonded joints in CTD condition

보다 높고 SEB와 거의 동일한 강도를 보이고 있다. CTD 환경에서만 COB 체결부의 강도가 상대적으로 높게 나타나는 현상이 시험의 오류에서 비롯된 것인지를 확인하기 위해 시편을 추가로 제작하여 총 11개의 시편에 대해 시험을 수행하였으나 그 결과는 동일하였다. CTD 조건에서 COB 체결부의 파손양상 역시 RTD나 ETW 조건에서와는 크게 다르다.

CTD 환경에서의 제작방법에 따른 체결부의 파손양상을 Fig. 9에 제시하였다. 다른 두 조건 즉 RTD와 ETW 환경에서 COB 체결부는 접착제와 복합재 모재의 접착분리에 의한 파손이 발생하였고, 파손강도도 가장 낮게 나타났다. 그러나 Fig. 9(d)에 보인 바와 같이 CTD 환경에서는 COB 체결부가 주로 층간분리 현상에 의해 파손되었다. RTD나 ETW 환경 시험에서 층간분리는 일체성형이나 이차접착 체결부에서만 나타났었다. 이러한 파손모드의 차이가 CTD 환경에서 COB 체결부의 파손강도를 높게 만드는 주 원인으로 볼 수 있다. 환경의 측면에서는, -54°C 의 저온 환경이 접착제와 모재의 접착력을 증가시킨 반면, 복합재 모재의 층간분리 강도를 저하시켰기 때문에 분석해볼 수 있다. CTD 환경에서 제작방법을 달리한 각 체결부의 하중-변위 곡선은 Fig. 10에 보였다. 파손강도가 낮은 CCA는 파손 시점까지 선형성이 강한 반면 다른 세 체결부에서는 파손강도 이전에 기울기가 줄어드는 현상이 발생하고 있다.

각각의 체결방법, 온도 및 습도에 대한 파손모드, 하중에 대한 결과를 Table. 2에 요약하여 나타내었다.

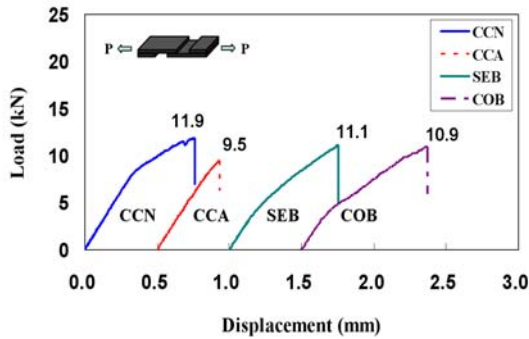


Fig. 10. Typical load-displacement curves of the bonded joints in CTD condition

Table. 2. Summary of results

		CCN	CCA	SEB	COB
CTD	Failure Mode	Delamination + Intralaminar	Delamination + Interfacial Failure	Delamination + Interfacial Failure	Delamination + Interfacial Failure
	Strength (MPa)	18.4	13.9	16.9	16.2
RTD	Failure Mode	Delamination	Delamination + Interfacial Failure	Delamination + Intralaminar	Interfacial Failure
	Strength (MPa)	20.7	17.5	18.3	12.2
ETW	Failure Mode	Delamination + Intralaminar	Delamination + Interfacial Failure	Cohesive Failure	Interfacial Failure
	Strength (MPa)	24.2	21.5	20.8	13.6

IV. 유한요소해석

앞의 시험에서 접착제의 열화가 복합재 모재의 층간분리를 지연시키는 효과가 있는 것으로 추측하였다. 따라서 본 연구에서는 접착제에 대한 재료시험을 통해 환경에 따른 재료특성의 열화 정도를 파악하고, 재료의 열화가 복합재의 층간분리 파손에 미치는 영향을 유한요소해석으로 연구하였다.

Fig. 11에 모재와 접착제 모두 3차원 고체요소를 사용하여 모델링한 이차접착 단일접침 체결부에 대한 유한요소모델을 보였다. 유한요소해석을 위해 복합재 모재는 보강섬유와 기지로 구성된 직교이방성(orthotropic) 층과, 층과 층 사이의 등

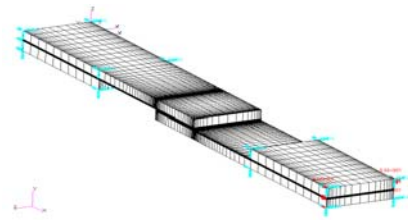


Fig. 11. Finite element model of a SEB single-lap joint

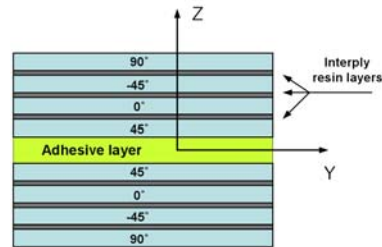


Fig. 12. Cross section of finite element model of single-lap joint

방성 기지층(isotropic interply resin layer)의 조합으로 가정하였다. 직교이방성층과 등방성 층간층의 개념은 Fig. 12에 제시하였다. Fenske 등 [25]의 연구 결과를 바탕으로 층간층의 두께는 직교이방성층 두께의 1/10로 가정하였다. 사용한 유한요소 프로그램은 MSC.Marc이고, 재료비선형을 고려한 비선형 해석을 수행하였다.

Fig. 13은 사용된 접착제 FM300K의 환경조건에 따른 응력-변형률 곡선을 보인 것이다. RTD 조건에서는 파손 직전의 일부 영역을 제외하고 대체로 선형적인 곡선을 보이고 있다. CTD 조건에서는 재료의 취성이 증가하여 파손까지 선형적인 거동을 보이고 있다. ETW 조건에서는 재료의 비선형적 거동이 두드러지게 나타나고 있다.

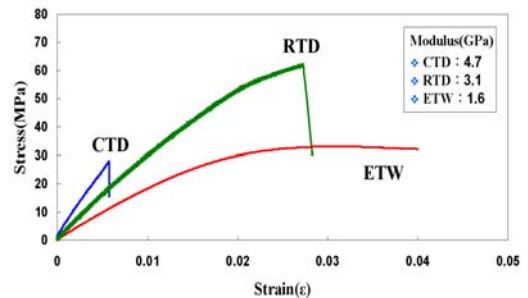


Fig. 13. Typical stress-strain curve of FM300K in various environmental condition

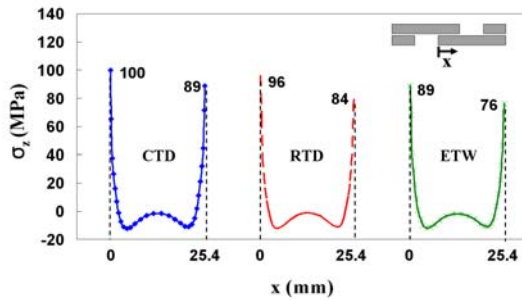


Fig. 14. σ_z distribution at the mid-plane of the 45° layer next to adhesive

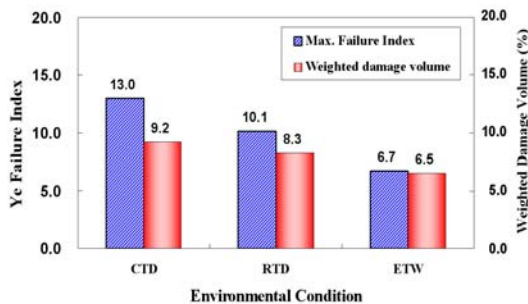


Fig. 15. Ye maximum failure indices and weighted damage volumes

체결부 시험에서 단일접합에서는 복합재 층에서의 층간분리 혹은 층내분리가 주된 파손모드였다. 따라서 본 해석에서는 접착제 내부에서의 응력 대신 접착제와 인접한 모재의 최초 45°층에서의 두께방향 응력 σ_z 를 살펴보았다. Fig. 14에, 세 가지 환경조건에 대하여 동일한 하중(RTD 조건의 SEB 체결부의 평균 파손하중 12.1 kN)을 가했을 때, 모재의 최초 45°층의 중립면에서 중앙선을 따라 길이방향으로 응력 σ_z 의 분포를 보였다. 접합영역 중앙부분에서의 응력은 대체로 비슷하지만, 접합영역의 끝단에서 최대응력은 CTD, RTD, ETW의 순서로 100, 96, 89 MPa로 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 시험에서 파손이 주로 접합영역의 끝단 균열로 시작된다는 점을 고려할 때 시험에서 CTD, RTD, ETW 순서로 접착강도가 증가하는 현상은 이 해석 결과로부터 설명된다.

Fig. 15는 Ye의 층간분리 파손식[25]을 접착제에 인접한 45도층에 적용했을 때의 최대파손지수와, 접착제와 인접한 45, 0, -45, 90도층에서의 손상영역[26]을 보인 것이다.

Ye의 파손식은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \frac{\sigma_{33}^2}{Z^2} + \frac{\tau_{13}^2}{S_{13}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{23}^2} = 1 & (\sigma_{33} \geq 0) \\ \frac{\tau_{13}^2}{S_{13}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{23}^2} = 1 & (\sigma_{33} < 0) \end{cases}$$

여기서 분자에 있는 항들은 재료주축에서의 응력 성분이고, 분모의 각 항들은 응력 성분에 해당하는 허용치이다.

Ye 기준식에 의한 45도층의 최대파손지수를 보면 CTD 조건 13.0, RTD 조건 10.1, ETW 조건 6.7로 CTD 조건의 파손지수가 가장 높고 그 다음으로 RTD, ETW 순서이고, 이는 두께방향 응력 분포경향과 잘 일치하는 결과이다.

Nguyen등 [27]이 제시한 손상영역 방법은 체결부의 형상과 국부적인 파손지수의 크기를 고려하여 손상영역을 계산하고, 손상영역이 기준치를 초과하면 구조물이 파손에 도달했다고 판단하는 방법이다. Fig. 14의 손상영역 계산 결과를 보면 CTD 조건에서 9.2로 가장 높고, RTD 조건(8.3), ETW 조건(6.5) 순서로 나타나고 있다. CTD 조건을 100%로 가정하였을 때, RTD 조건은 90%, ETW 조건은 71%이다. ETW 조건에서 손상이 가장 적게 발생함을 의미한다.

이차접착 시편에 대한 이상의 해석 결과로부터 접착제의 수분흡수로 인한 열화가 접착 체결부의 파손하중 증가에 실제로 영향을 미친다는 시험 결과를 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 복합재 접착 체결부 강도에 대한 온도 및 습도환경의 영향을 시험적으로 연구하였다. 상온건조(RTD), 고온습도(ETW) 및 저온건조(CTD)의 세 가지 환경에서 제작방법을 달리 한 네 종류(CCN, CCA, SEB, COB)의 체결부에 대한 시험을 수행하였다. 시험 결과 ETW 조건에서 체결부의 강도가 RTD 환경에서의 강도보다 11 ~ 23% 정도 더 높게 나타나는 흥미로운 사실을 발견하였다. 반면에 저온환경 즉 CTD 조건에서의 강도는 한 경우를 제외하고는 RTD 조건에 비해 평균 8 ~ 21% 가량 낮게 나타났다. 시험으로 측정된 상온, 저온, 고온습도 환경에서의 접착제 물성치를 사용한 유한요소해석의 결과, ETW 및 CTD 환경에서의 체결부 강도는 환경에 따른 접착제의 물성치 변화로 인한 것임을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원사업(2009-0094015)과 지식경제부 항공우주부품개발사업의 지원으로 수행된 것임을 밝힙니다. 또한 연구를 위해 협조해주신 한국항공우주산업에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Shin, K. C., Lee, J. J., Lee, D. G., "A study on the lap shear strength of a co-cured single-lap joint", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 14, 2000, pp. 123-139.
- 2) Li, G., Pang, S. S., Woldesenbet, E., Stubblefield, M. A., Mensah, P. F., Ibekwe, S. I., "Investigation of prepreg bonded composite single lap joint", *Composites: Part B Engineering* Vol. 32, 2001, pp. 651-658.
- 3) Kayupov, M., Dzenis, Y. A., "Stress concentration caused by bond cracks in single-lap adhesive composite joints", *Composite Structures*, Vol. 54, 2001, pp. 215-220.
- 4) Ávila, A. F., Bueno, P. O., "An experimental and numerical study on adhesive joints for composites", *Composite Structures*, Vol. 64, 2004, pp. 531-537.
- 5) Kim, K. S., Yoo, J. S., Yi, Y. M., Kim, C. G., "Failure mode and strength of uni-directional composite single lap bonded joints with different bonding methods", *Composite Structures*, Vol. 72, 2005, pp. 477-485.
- 6) Seong, M. S., Kim, T. H., Nguyen, K. H., Kweon, J. H., Choi, J. H., "A parametric study on the failure of bonded single-lap joints of carbon composite and aluminum", *Composite Structures*, Vol. 86, 2008, pp. 135-145.
- 7) Delasi, R., Whiteside, J. B., "Effect of moisture on epoxy resins and composites", *Advanced composite materials-environmental effects*, ASTM STP No. 658, Philadelphia, U.S.A., 1978, pp. 2-20
- 8) Ishai, O., Arnon, U., "Instantaneous effect of internal moisture conditions on strength of glass-fiber-reinforced plastics", *Advanced composite materials-environmental effects*, ASTM STP 569, Philadelphia, U.S.A., 1978, pp. 267-276.
- 9) Liao, K., Schultheisz, C. R., Hunston, D. L., "Effects of environmental aging on the properties of pultruded GFRP", *Composite: Part B*, Vol. 30, 1999, pp. 485-493.
- 10) Suh, D. W., Ku, M. K., Nam, J. D., "Equilibrium water uptake of epoxy/carbon fiber composites in hygrothermal environmental conditions", *Journal of Composite materials*, Vol. 35, 2001, pp. 264-278.
- 11) Walker, S. P., "Thermal effect on the compressive behavior of IM7/PET15 Laminates", *Journal of Composite materials*, Vol. 38, 2004, pp. 149-162
- 12) Shimokawa, T., Kakuta, Y., Hamaguchi, Y., Aiyama, T., "Static and fatigue strength of a G40-800/5260 carbon fiber/Bismaleimide composite material at room temperature and 150°C", *Journal of Composite Materials*, Vol. 42, 2008, pp. 655-679.
- 13) Bismarck, A., Hofmeier, M., Dörner, G., "Effect of hot water immersion on the performance of carbon reinforced unidirectional poly(ether ether ketone)(PEEK) composites: Stress rupture under end-loaded bending", *Composites: Part A*, Vol. 38, 2007, pp. 407-426.
- 14) Kim, H. Y., Park, Y. H., You, Y. J., Moon, C. K., "Short-term durability test for GFRP rods under various environmental conditions", *Composite Structures*, Vol. 83, 2008, pp. 37-47.
- 15) Parker, B. M., "Some effects of moisture on adhesive-bonded CFRP-CFRP joints", *Composite Structures*, Vol. 6, 1986, pp. 123-139.
- 16) Parker B. M., "The strength of bonded carbon fibre composite joints exposed to high humidity", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 10, 1990, pp. 187-191.
- 17) Ashcroft, I. A., Hughes, D. J., Shaw, S. J., "Adhesive bonding of fiber reinforced polymer composite materials", *Assembly Automation*, Vol. 20, 2000, pp. 150-161.
- 18) Zhang, Y., Vassilopoulos, A. P., Keller, "Environmental effects on fatigue behavior of adhesively-bonded pultruded structure joints",

Composites Science and Technology, Vol. 69, 2009, pp. 1022-1028.

19) 송민규, 권진희, 최진호, 김효진, 송민환, 신상준, "항공용 복합재 단일접침 접착 체결부의 제작공정에 따른 강도 연구", 한국항공우주학회지, 제37권 제8호, 2009, pp. 751-758.

20) ASTM D5229, "Standard test method for moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials".

21) MIL-HDBK-17-1F. Volume 1. Polymer matrix composites guidelines for characterization of structure materials.

22) Tomblin, J., Seneviratne, W., "Laminate statistical allowable generation for fiber-reinforced composite materials; Lamina Variability Method", DOT/FAA/AR-06/53, 2009.

23) 김광수, 이영무, 김천곤, "일방향 복합재료

single lap 접합 조인트의 파손 강도 II", 복합재료학회지, 제18권 제1호, 2005, pp. 1-9.

24) FM 300 High-Shear Strength Modified Epoxy Film Adhesive Datasheet.

25) Fenske, M. T. and Vizzini, A. J., "The inclusion of in-plane stresses in delamination criteria", Journal of Composite Science and Technology, Vol. 35, 2001, pp. 1325-1342.

26) Ye, L., "Role of matrix resin in delamination onset and growth in composite laminates", Journal of Composite Science and Technology, Vol. 33, 1988, pp. 257-277.

27) Nguyen, K. H., Kweon, J. H. and Choi, J. H., "Failure Load Prediction by Damage Zone Method for Single-lap Bonded Joints of Carbon Composite and Aluminum", Journal of Composite Materials, Vol. 43, No. 25, 2009, pp. 3031-3056.