

論文

서로 다른 수분율을 갖도록 염수환경에 노출된 복합재 접착체결부의 강도

양현정*, 정문규*, 권진희***, 최진호***

Strength of Composite Single-lap Bonded Joints with Different Saltwater Moisture Contents

Hyeon-Jeong Yang*, Mun-Gyu Jeong*, Jin-Hwe Kweon*** and Jin-Ho Choi***

ABSTRACT

The effect of moisture contents by salt water on the strength of composite single-lap bonded joints is investigated. The specimens were manufactured in an autoclave by secondary bonding and immersed in the 3.5% salt water of 71°C for different durations to get various moisture contents; 0, 0.2, 0.5, 1.0, and 2.0%(saturation). A total of 80 joint specimens were tested for 5 different moisture contents and 2 temperature environments. Test results show that while the joint strengths after the saturation of moisture decrease compared to those of dry ones, the strengths of the pre-saturated joint up to 1.0% of moisture content increase in both room and elevated temperature conditions. It is also shown that the strengths of joints tested in elevated temperature are slightly higher than the strength in room temperature by 2~5% until the moisture content reaches 1%. In contrast, the high temperature strength of the saturated joint is about 5% lower than the room temperature strength.

초 록

본 연구에서는 탄소/에폭시 복합재 단일겹침 접착체결부의 염수 수분율이 체결부의 강도 및 파손모드에 미치는 영향을 연구하였다. 시편은 이차접착 방식으로 제작하였고, 71°C, 3.5% 염수환경에서 수분율 0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0%(포화상태)를 갖도록 노출시켰다. 수분율별 시편은 각 8개씩이고, 두 종류의 시험환경을 고려하여 총 80개의 시편에 대한 시험을 수행하였다. 시험 결과 복합재 체결부의 강도는 수분율이 2%(포화상태)에 도달하면 감소하지만 그 이전 과도상태(약 1% 근처까지)에서는 오히려 증가하는 것으로 나타났다. 또한 수분율 1%까지는 고온 환경에서의 강도가 상온 강도보다 2~5% 가량 높게 나타났다. 그러나 수분 포화된 고온 환경 체결부의 강도는 상온 강도 대비 약 5% 가량 저하되는 것으로 나타났다.

Key Words : 탄소-에폭시(Carbon-epoxy), 단일겹침 접착체결부(Single-lap bonded joint), 이차접착(Secondary bonding), 수분율(Moisture content), 염수침수시험(Salt water immersion test)

1. 서 론

복합재료는 우수한 기계적 특성으로 인해 항공기를 비롯

한 각종 구조물에 광범위하게 사용되어 왔다. 그러나 복합재료는 단순히 높은 비강성과 비강도로 대표되는 기계적 특성만 우수한 것이 아니라 고분자 수지를 사용하는 재료적 특성

접수: 2011년 6월 7일, 게재승인: 2011년 8월 17일

* 경상대학교 항공우주공학과

**+ 경상대학교 항공우주시스템공학과, 항공기부품기술연구소, 교신저자(E-mail:jhkweon@gnu.ac.kr)

*** 경상대학교 기계공학부, 항공기부품기술연구소

으로 인해 금속재료에 비해 뛰어난 내식성을 보이고 있다. 복합재료의 우수한 기계적 특성과 내식성은 복합재료를 조선 해양 구조물에 적용할 수 있게 하는 근거가 되고 있다[1,2].

복합재 구조물의 설계에서 중요한 문제가 되는 것은 부품과 부품을 연결하는 체결부 기술이며 최근 들어 접착방식 체결이 확대되는 추세이다. 복합재 부품의 접착식 체결방법은 기계식 체결방법에 비하여 넓은 면적에 하중을 분포시켜 비교적 균일한 응력분포를 가지게 하는 장점이 있다. 반면에 분해와 조립이 어렵고, 온도, 습도 및 환경적 요인에 의하여 체결력이 약화될 수 있기 때문에 지속적인 연구와 투자를 통해 설계 자료를 체계적으로 구축하여 데이터베이스화하는 것이 중요하다.

지금까지 접착식 체결부에 관하여는 알루미늄-알루미늄 체결부[3], 알루미늄-복합재료 체결부[4], 복합재료-복합재료 체결부[5] 등 다양한 재료에 대한 연구와, 체결부의 제작 방법을 달리한 제작 공정 측면의 연구[6]가 진행되어 왔다. 다른 한편으로는 복합재료에 대한 환경 효과를 고려한 연구도 활발히 이루어져 왔는데, 크게, 복합재료 자체의 특성에 관한 환경 효과 연구[7-15]와 체결부에 대한 환경효과 연구[16-19]로 구분할 수 있다. 복합재 환경효과에 관한 연구 중 탄소섬유 강화 복합재료를 해수, 수돗물 및 증류수에 침수시킨 결과, 침수시간이 길어지면 복합재 자체의 물성 값이 저하된다는 사실이 보고된 바 있다[7-9]. 이러한 사실은 다양한 연구자들의 후속 연구를 통해서도 확인된 바 있지만, 재료의 종류나 재료상수의 종류에 따라 그 정도는 다르게 나타났다[10-15]. Wang 등[17]과 황영은 등[18]은 복합적 환경에서의 접착체결부의 강도는 노출온도와 노출시간에 따라 달리 나타나며, 각 시간별 화학적 변화를 ATR 적외선 분광분석을 통해 연구하였다. 송민규 등[19]은 고온습도 환경 하에서 복합재 체결부의 강도가 상온환경 대비 증가하는 경우도 있으며, 그 원인이 접착제의 물성저하와 층간응력의 관계에 있음을 밝혔다.

지금까지의 환경효과 연구는 재료 자체의 특성 연구가 주를 이루고 있으며, 포화 전 수분율이 탄소/에폭시 접착체결부의 강도 변화에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구는 부족한 실정이다. 고온 침수환경에서 수분율 2% 정도의 포화상태가 되려면 108일 정도의 기간이 필요하지만, 실제 복합재 구조물이 포화상태가 될 때까지 고온 수분 환경에 노출되는 일은 매우 드물다. 대부분의 경우 포화상태 이전, 즉 과도상태 수분율의 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 서로 다른 시간동안 염수 환경에 노출된 탄소/에폭시 단일접착 접착체결부의 강도가 온도 및 수분율 변화에 따라 어떻게 달라지는지를 시험으로 연구하였다. 각 시험의 수분율은 0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0% (포화상태)이고 두 종류의 시험환경(상온, 고온 : 71℃)을 고려하였다.

2. 시험

2.1 시험 제작

본 연구에서 사용된 재료는 Toray사의 일방향 탄소-에폭시 프리프레그(prepreg)인 T700GC-12K-31E/#2510이고, 체결을 위한 접착제는 Henkel사의 EA9696 필름(120℃ 오토클레이브 성형)을 사용하였다. 복합재의 성형 후 한 층(ply)의 평균두께는 0.150 mm이다. 적층판은 총 24층이고, 적층순서는 [45/0/-45/90]_{3S} 이다. 접착제 EA9696의 성형 후 평균두께는 0.106 mm이다. 모든 시편은 오토클레이브를 이용하여 이차접착(secondary bonding) 방법으로 제작하였으며, 성형된 적층판을 접착하기 전에 120번 사포와 아세톤으로 표면처리 작업을 수행하였다.

시험의 형상은 Fig. 1에서 보인 바와 같고, ASTM D5865-01 [20]을 참고하여 제작하였다. 시험의 폭과 겹침 길이는 25.4 mm이다. 시험에 사용된 시험편, Table 1에 보인 바와 같이, 다섯 종류의 수분율(MC; Moisture Content)과 두 종류의 시험온도별로 각각 8개씩, 총 80개이다.

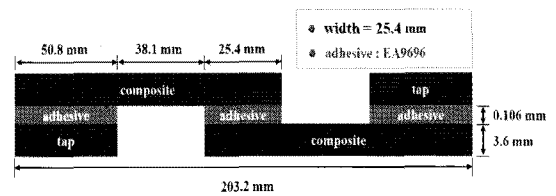


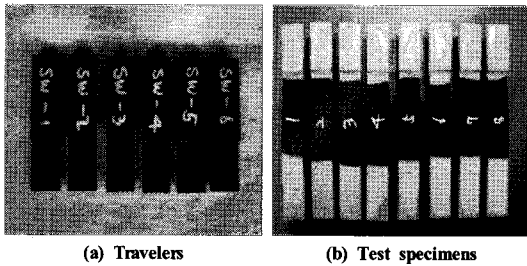
Fig. 1 Configuration of bonded joint.

Table 1 No. of specimens for test

Temp. \ MC(%)	0.0	0.2	0.5	1.0	2.0	Tot.
RT	8	8	8	8	8	80
ET (71℃)	8	8	8	8	8	

2.2 수분율

시험용 시험편과는 별도로 수분율 측정을 위한 트레블러(traveler) 시험편을 사용하였다. 트레블러 시험편은 시험용 시험편과 동일한 방법으로 동일한 형상을 갖도록 제작하되, 탭 부분만 잘라내고 사용한다. 트레블러 시험편과 일반 시험편의 사진을 Fig. 2에 제시하였다. 장시간 염수에 노출된 침수 시험편의 탭 부분에서 잘 일어나는 미끄러짐을 방지하기 위해 모든 시험편은 침수 전 탭 부분에 다목적 고무코팅제인 PERFORMIX사의 PLASTI DIP 페인트를 사용하여 방수코팅 처리를 하였다. 시험편의 흡습을 위해서 사용한 수조는 Fig. 3에 보였고, 온도 제어가 가능한 JS RESEARCH사의 JSWB-30T이다. 모든 시험편은 염수환경에 노출하기 전에 71℃, 상대습도(RH) 0%의 챔버에서 무게변화가 없을 때까지 건조시킨 후, 다시 71℃, 3.5%인 염수환경에 침수시킨다. 시험편을 수조에 담근 후 바로 꺼내어 표면의 물기를 제거한 후 무게를 측정하고 이를 초기무게로 삼는다. 이렇게 하면 실제로 시험편에 스며들지 않고 표면에 남아있는 미세한 수분의 무게를 제외하고 순수한 시험편 속 수분의 무게만을 측정할 수 있게 된다. 수분율이 1%가 될 때까지 매일 무게를 측정하였고, 그 이후에는 7일 간격으로 측정하였다.



(a) Travelers (b) Test specimens

Fig. 2 Configuration of Specimens.

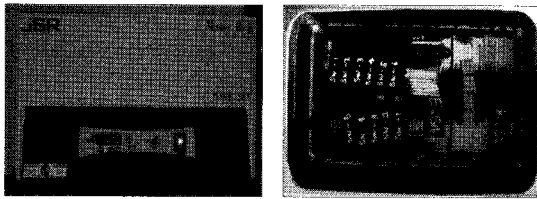


Fig. 3 Saltwater Bath.

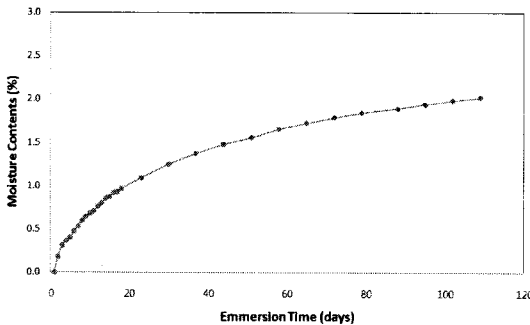


Fig. 4 Moisture content variation in saltwater.

수분율은 ASTM D5229[21]에 따라 식 (1)과 같이 계산되며, 연속적으로 측정된 수분율의 차이가 0.05% 이내에 들어 오면 포화된 것으로 가정한다[22]. 수분율 변화 추이는 Fig. 4에 나타내었다. 수분율 측정에 사용된 저울은 AND사의 GX400제품이며 1/1000 g까지 측정 가능하다. Fig. 4를 보면 염수환경에 노출된 후 108일 정도면 각 시편은 포화상태가 된다. 포화상태에서 평균 수분율은 2.0%이다.

$$MC = \frac{W_i - W_o}{W_o} \times 100\% \quad (1)$$

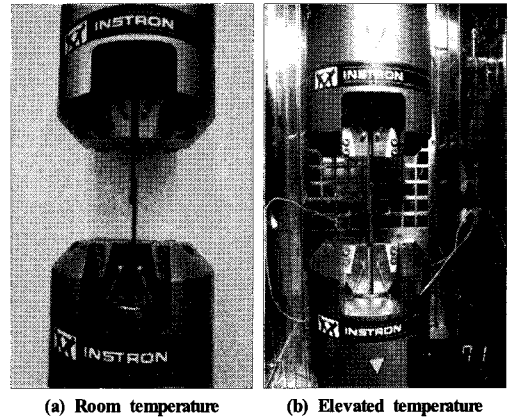
여기서,

W_i = current weight

W_o = initial weight

2.3 시험

시험에 사용한 재료시험기는 Instron 5582이고, ASTM D3165를



(a) Room temperature (b) Elevated temperature

Fig. 5 Test set-up.

참고하여 분당 1.27 mm의 속도로 하중을 가하였다[23]. 시험장치는 Fig. 5에 보였다. 71°C 고온시험에서는, AGATE 규격[22]에 따라 시편을 환경챔버 속에서 시험온도인 71°C까지 올린 후 3분 동안 유지시킨 다음 하중을 가하였다.

3. 결과 및 토론

두 가지 시험 환경과 다섯 가지의 수분율에 따른 체결부의 파손강도를 Fig. 6에 막대그래프로 제시하였다. 체결부의 파손강도는 체결부가 지지하는 최대하중에서 접촉면적을 나눈 값으로 정의하였다. 각 경우에 대한 전형적인 하중-변위 곡선은 Fig. 7에 보였다. 상온(RT; Room Temperature) 시험에서는 수분율에 무관하게 하중-변위 곡선이 파손순간까지 선형적이지만, 고온(ET; Elevated Temperature) 시험에서는 파손하중에 도달하기 전에 비선형성이 나타나는 것을 볼 수 있고, 수분율이 높을수록 더 심해지는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 주로 온도와 습도로 인한 접착제의 열화현상에 기인한 것으로 볼 수 있다. Fig. 8(a)에 보인 바와 같이 접착제만으로 시편을 만들어 상온에서 인장하중을 가한 시험[24]에서는, 수분율이 1%에 도달하기까지 접착제의 인장강성(곡선의 초기 기울기) 저하가 없고 포화상태가 되었을 때에도 미세한 강성저하만 발견된다. 반면에 Fig. 8(b)에 보인 고온 시험의 경우 수분율 0.2%에서부터 접착제에서 현저한 강성저하가 발견된다.

그러나 Fig. 6의 강도 결과에서 알 수 있듯이 접착제의 열화가 항상 체결부 강도저하로 이어지는 것은 아니다. 뒤에서 다시 언급하겠지만 대부분의 경우 복합재 접착체결부의 파손은 접착제에서 발생하지 않고 복합재 모재의 층간분리(delamination) 혹은 층내파손(intra-lamina)으로 발생한다. 따라서 접착체결부의 강도를 논할 때에는, 접착제의 열화가 복합재 모재의 층간응력에 어떠한 영향을 미치는지, 또 환경조건이 복합재 모재의 층간응력과 층간강도 저하에 어떠한 영향을 미치는가를 동시에 고려해야 한다.

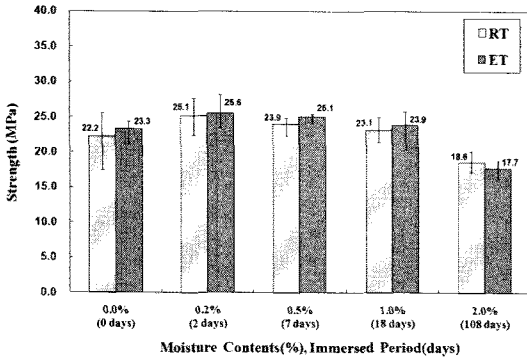
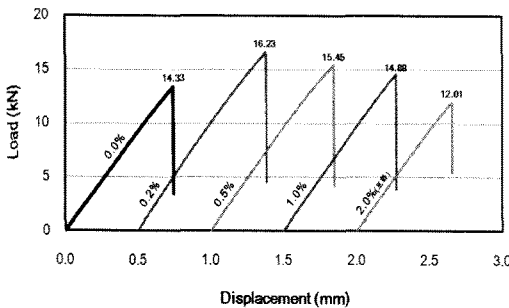
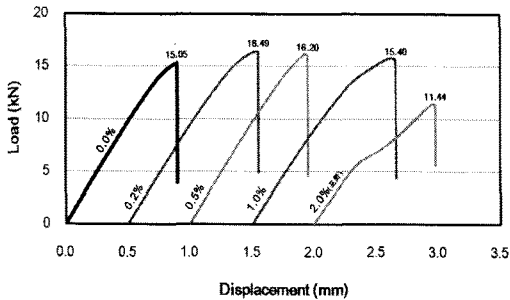


Fig. 6 Strengths of joints.



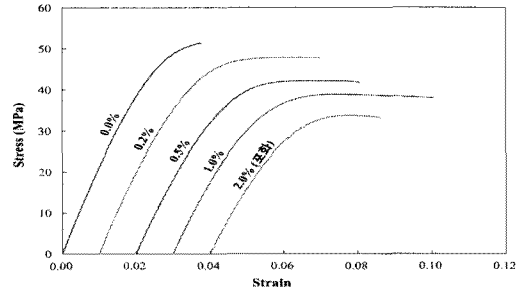
(a) Room temperature



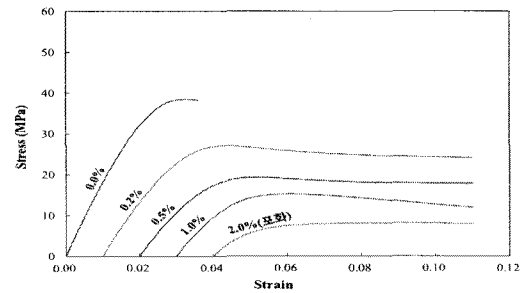
(b) Elevated temperature

Fig. 7 Load-displacement curves.

Fig. 6에 보인 강도시험 결과를 수분율의 관점에서 분석하면, 막 흡수가 시작된 직후 즉 수분율이 0.2% 정도일 때에는 건조한 시편 대비 흡수 시편의 파손강도가 상온과 고온에서 각각 13%와 10% 정도 증가한다. 침수기간이 길어지면서 수분율이 증가함에 따라 파손강도는 서서히 감소하면서 수분율 1%에서는 건조한 시편 대비 강도는 상온과 고온에서 각각 4.1%와 2.6% 정도 높게 나타나지만, 시험 오차 범위 이내의 차이에 불과하다. 그러다가 충분한 시간(108일)이 지나 수분율이 포화상태에 도달하면, 파손강도는 오히려 상온과 고온에서 각각 16%와 24% 가량 감소하는 것을 볼 수 있다. 수분율에



(a) RT test



(b) ET test

Fig. 8 Stress-strain curve of EA9696 in various moisture contents.

다른 파손강도의 변화를 종합해보면 수분율 1%가 건조한 상태 대비 체결부의 강도를 결정하는 기준이 될 수 있을 것으로 판단된다. 실시간으로 환산하면 구조물이 71℃의 염수에 18일 (수분율 1%) 동안 계속 침수되어 있을 경우 체결부의 강도가 침수 이전과 동일한 수준이 되고, 그 이상의 침수에서는 건조한 시편 대비 강도가 더 낮아지게 됨을 의미한다. 이러한 경향은 두 가지의 시험온도 조건 모두에서 공통적으로 나타난다.

온도조건에 따른 상대적 강도를 비교해보면, 수분율 1%까지는 71℃에서의 강도가 상온강도보다 2~5% 정도 높다. 시험 결과의 분산을 고려할 때 온도의 효과는 크지 않은 것으로 판단된다. 그러나 수분율 2%에서는 다른 경우와 달리 접착제의 열화가 심하여 (Fig. 8(b) 참조) 접착제 혹은 접착면의 파손이 발생하고, 이로 인해 상온대비 강도저하(-24%)가 더 크게 나타난다.

수분율이 포화되기 전 체결부의 강도증가 원인이 접착제와 모재의 후경화(post-curing) 효과로 인한 것인지를 확인하기 위해 수분 없이 온도만 동일한 조건을 유지하여 같은 시간동안 챔버에 보관한 후 강도시험을 수행하였다. 그러나 보관 시간에 따른 의미 있는 강도 차이를 발견하지 못하였으며, 이는 강도 증가가 복합재료나 접착제의 후경화 효과로 인한 것이 아님을 의미한다. 또한 사용한 복합재료의 유리전이온도(glass transition temperature)가 132℃인 점을 고려할 때 염수의 온도 71℃는 후경화 효과를 줄 정도의 온도는 아닌 것으로 볼 수 있다.

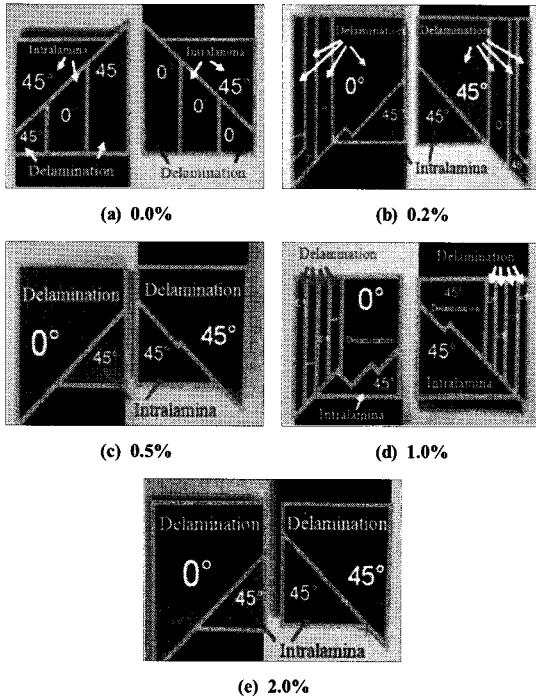


Fig. 9 Failure modes in the RT condition.

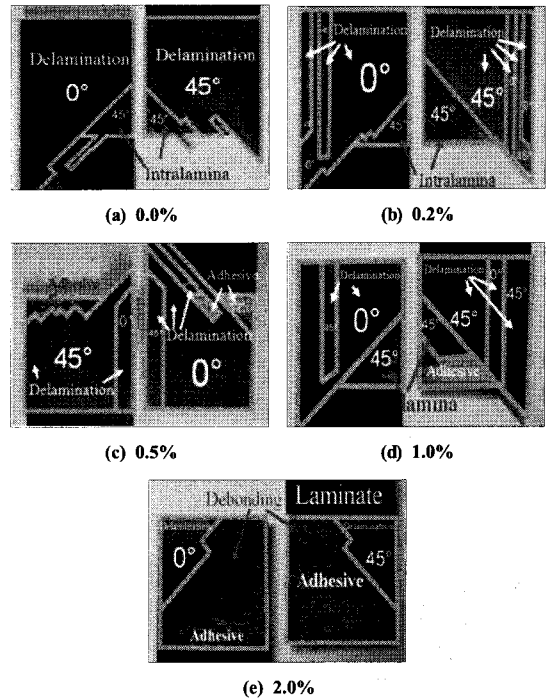


Fig. 10 Failure modes in the ET condition.

따라서 앞에서 언급한 바와 같이 Fig. 6에서 수분율의 차이에 따른 체결부 강도 변화는 다른 원인, 즉 접착제의 열화에 따른 복합재 층간응력 변화와, 수분 및 온도 환경으로 인한 복합재의 층간분리 및 층내 파손강도 변화에서 찾아야 할 것으로 판단된다. 그러나 이 때 주의할 것은 접착제의 열화가 항상 체결부의 강도저하로 연결되는 것은 아니라는 사실이다. Fig. 9와 10에 보인 바와 같이 실제 시험에서 발견되는 접착체결부의 주된 파손모드는 접착제의 파손(cohesive failure)이나 접착면 파손(interfacial failure)이 아닌 복합재 모재 자체의 층간분리 혹은 층내파손이다. 따라서 모재 파손을 일으키는 복합재 체결부에서 접착제의 열화가 두께방향 응력에 어떻게 영향을 미치는지는 재료의 특성을 반영한 정교한 해석적 접근을 통해서만 확인할 수 있다. 접착제에서 적절한 수준의 열화현상은 층간응력을 낮추어서 층간분리를 지연시킨다는 결과가 실험 및 해석으로 보고된 바도 있다 [19,25]. 그러나 지금까지 보고된 여러 연구의 결과를 종합하면, 복합재 체결부 강도에 대한 온도도 환경의 영향은 재료에 따라 크게 달라지므로 특정한 재료에 대한 결과를 다른 재료로 일반화시키는 데에는 신중한 접근이 필요하다.

다시, Fig. 8에 제시된 접착제 상온, 고온 시험결과를 비교하면, 상온과 고온 환경 모두에서 수분율의 증가에 따라 강성과 강도의 저하가 나타나지만, 그 정도는 크게 다르다. 상온 환경에 비해 고온 환경에서의 접착제 특성은 수분율에

따라 크게 달라지는데, 수분율의 증가와 함께 강도와 강성이 동시에 급격히 저하된다. 그러나 Fig. 6과 8의 결과를 연계하여 분석해보면, 수분율 2%인 경우를 제외하면, 접착제의 열화가 체결부의 강도나 파손모드에는 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 가령 접착제의 강성과 강도가 크게 떨어지는 수분율 1% 고온 환경에서도, 여전히 건조한 시편보다 고온 흡습 복합재 체결부의 강도가 더 높게 나타난다. 주된 파손모드 역시 접착제 파손이 아닌 층간분리 혹은 층내 파손이다. 따라서 본 결과를 통해 수분율 1%까지는, 체결부의 강도에 영향을 미치는 핵심인자는 접착제의 열화가 아니라는 분석이 가능하다.

지금까지의 논의를 통해 수분율 2%인 경우를 제외하고는 복합재 접착체결부 강도에 대한 온도의 영향은 미미한 것으로 파악되었고, 접착제의 열화도 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 분석되었다. 따라서 복합재 체결부의 강도에 영향을 미치는 가장 중요한 요인은 수분이며 수분율에 따라 복합재 층간분리가 적절히 지연되기도 하고 빨라지기도 하는 것으로 분석된다. 가령 수분율 1%까지는 복합재 모재 특히 기지(matrix)의 열화 현상(고온의 경우)에도 불구하고 수분의 팽창(swelling)에 의한 내부 압축응력의 영향이 지배적으로 작용하여 층간분리를 억제하는 것으로 판단된다. 그러나 수분율이 2%에 도달하면, 상온의 경우, 기지의 열화에 의해 층간 결합력이 현저히 떨어지면서 수분의 팽창에 의한 압축응력에

도 불구하고 층간분리 혹은 층내파손이 발생한다. Fig. 9(c)와 9(e)를 비교해보면 수분율은 각각 0.5%와 2.0%로 크게 다르고 강도도 각각 23.9 MPa와 18.6 MPa로 다르지만 파손모드는 구분이 힘들 정도로 유사한 것을 볼 수 있다. 파손모드가 완전히 같은데 강도가 다르다는 것은 결국 층간분리 혹은 층내파손 강도가 흡수된 수분에 의해 저하된 것으로 볼 수 있다.

Fig. 10에 보인 고온환경에서의 파손모드도 수분율 1%까지는 상온 파손모드와 대체로 유사하다. 그러나 수분율이 증가하면서 수분의 영향을 빨리 받는 접착면 가장자리에서 부분적인 접착제 파손이 발생하는 점이 상온 파손모드와 다른 점이다. 고온에서 수분율이 2%에 도달하면 접착제의 열화가 심하여 모재의 파손 이전에 접착제 자체의 파손과 접착면 파손이 발생한다.

4. 결론

본 연구에서는 Toray사의 일방향 탄소-에폭시 프리프레그인 T700GC-12K-31E/#2510 복합재 단일겹침 접착제결부 시편을 71℃, 3.5% 염수환경에서 서로 다른 시간동안 침수시킨 후 파손강도를 측정하였다. 상온과 고온 환경 시험 모두에서 수분율 1%까지는 침수된 시편이 건조 시편보다 최고 13%와 10% 정도 높은 강도를 보이고, 수분율이 2%를 넘어 갈 경우에는 16%와 24% 정도 강도가 저하됨을 확인하였다. 온도조건의 측면에서는, 전반적으로 71℃에서의 강도가 상온 강도보다 2~5% 정도 높게 나타내지만 수분율이 2% 이상으로 증가하면 고온 강도가 오히려 더 낮게 나타났다. 상온 시험에서는 수분율과 무관하게 모두 복합재 모재에서 최종파손이 발생하였고, 고온 시험의 경우 수분율 1%까지는 복합재 모재의 층간분리 혹은 층내파손이 주를 이루지만, 수분율이 2%가 되면 접착제 파손 및 계면파손이 크게 나타났다.

후 기

본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부) 재원 한국연구재단의 대학중점연구소 지원 사업(2010-0029689) 및 기초기술연구회가 지원하고 한국항공우주연구원 지원에 관한 DRC 사업의 지원하는 연구과제로 수행된 것이며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1) Kimpara I, "Use of advanced composite materials in marine vehicles," *Marine-structures*, Vol. 4, No. 2, 1991, pp. 117-127.

2) Petrie, E. M., "Adhesives for the assembly of aircraft structures and components: Decades of performance improvement with the new applications of the horizon," *Metal Finishing*, Vol. 106, 2008, pp. 26-31.

3) Kahraman, R., Sunar, M., Yilbas, B., "Influence of adhesive thickness and filler content on the mechanical performance of aluminum single-lap joints bonded with aluminum powder filled epoxy adhesive," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 205, 2008, pp. 183-189.

4) Liljedahl, C. D. M., Crocombe, A. D., Wahab, M. A., Ashcroft, I. A., "Modelling the environmental degradation of adhesively bonded aluminium and composite joints using a CZM approach," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 27, 2007, pp. 505-518.

5) Ávila, A. F., Bueno, P. O., "An experimental and numerical study on adhesive joints for composites," *Composite Structures*, Vol. 64, 2004, pp. 531-537.

6) 김광수, 유재석, 안재모, "일방향 복합재료 Single Lap 접착 조인트의 파손 모드 및 강도I. 실험," 한국복합재료 학회지, 제17권, 제6호, 2004, pp. 14-21.

7) Shen, C.-H. Springer, G. S., "Effects of moisture and temperature on the tensile strength of composite materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 11, 1977, pp. 2-16.

8) Jiming, Z., Lucas, J. P., "The effects of water environment on anomalous absorption behavior in graphite/epoxy composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 53, 1995, pp. 57-64.

9) 김원근, 문창권, "적층형 탄소섬유 복합재료의 기계적 성질에 미치는 수분환경의 영향," 한국해양공학학회지, 제13권, 제 4호, 1999, pp. 8-14.

10) 윤성호, "염수환경에 노출된 유리섬유직물/페놀 복합재의 내구성 평가," 한국복합재료학회지, 제18권, 제4호, 2005, pp. 27-34.

11) 김윤해, 김국진, 한중원, 조영대, 배성열, 문경만, 김동훈, "섬유강화 복합재료의 전단강도에 미치는 흡습의 영향," 한국복합재료학회지, 제21권, 제2호, 2008, pp. 1-7.

12) 문철진, 이청락, 권진희, 최진호, 조맹효, 김태경, "염수 환경에 노출된 고강성 탄소/에폭시 복합재의 물성치 변화 연구," 한국복합재료학회지, 제21권, 제6호, 2008, pp. 1-7.

13) 윤성호, 황영은, 김정석, 윤혁진, Michael R. Kessler, "염수환경에 노출된 철도차량용 탄소섬유/에폭시 복합재의 내구성 평가," 한국철도학회지, 제11권, 제4호, 2008, pp. 357-363.

14) Gu H., "Behaviors of glass fiber/unsaturated polyester composites under seawater environment," *Materials and Design*, Vol. 30, 2009, pp. 1337-1340.

15) 문진범, 김수현, 김천근, "복합재료의 기계적 거동에 염수

- 환경이 미치는 영향에 관한 연구,” 한국복합재료학회지, 제23권, 제1호, 2010, pp. 44-50.
- 16) Parker, B. M., “Some effects of moisture on adhesive-bonded CFRP-CFRP joints,” *Composite Structures*, Vol. 6, 1986, pp.123-139.
 - 17) Wang, C., Huang, Y. D., Xu, H. Y., Liu, W. B., “The durability of adhesive/carbon-carbon composites joints in salt water,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 24, 2004, pp. 471-477.
 - 18) 황영은, 윤성호, “복합적 환경인자의 영향에 의한 접착제의 접착전단강도 및 화학구조 변화,” 한국복합재료학회지, 제24권, 제1호, 2011, pp. 31-50.
 - 19) 송민규, 권진희, 최진호, 김효진, 송민환, 신상준, 변재원, “고온습도 및 저온 환경이 복합재 접착체결부 강도에 미치는 영향 연구,” 한국항공우주학회지, 제38권, 제2호, 2010, pp. 119-128.
 - 20) ASTM D5868-01, “Standard test method for lap shear adhesion for fiber reinforced plastic (FRP) bonding”.
 - 21) ASTM D5229, “Standard test method for moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials”.
 - 22) AGATE WP3.3-033051-134, “Advanced general aviation transport experiments”.
 - 23) ASTM D3165, “Standard test method for strength properties of adhesives in shear by tension loading of single-lap-joint laminated assemblies”.
 - 24) ASTM D638-03, “Standard test method for tensile properties of plastics”.
 - 25) 김광수, 이영무, 김천근, “일방향 복합재료 single lap 접합 조인트의 파손 강도 II,” 복합재료학회지, 제18권 제1호, 2005, pp. 1-9.