

論文

복합재-알루미늄 양면겹치기 조인트를 이용한
접착제의 극저온 물성 평가

강상국*, 김명곤*, 김천곤**, 공철원**

Evaluation of Cryogenic Performance of Adhesives Using Composite-Aluminum
Double Lap Joints

Sang-Guk Kang*, Myung-Gon Kim*, Chun-Gon Kim**, Cheol-Won Kong**

ABSTRACT

In the development of a cryogenic propellant tank, the proper selection of adhesives to bond composite and metal liner is important for the safety of operation. In this study, 3 types of adhesives were tested for the ability to bond CFRP composites developed for cryogenic use and aluminum alloy (Al 6061-T6) for lining the tank using double-lap joint specimens. The double-lap joint specimens were tested inside an environmental chamber at room temperature and cryogenic temperature (-150°C) respectively to compare the bond strength of each adhesive and fracture characteristics. The material properties with temperature of component materials of double-lap joints were measured. In addition, ABAQUS was used for the purpose of analyzing the experimental results.

초 록

극저온 추진제 탱크를 개발하는 과정에서 복합재와 알루미늄 라이너를 접합하기 위한 접착제의 선택은 탱크의 안전성과도 직결된 매우 중요한 문제이다. 따라서 적합한 극저온용 접착제를 선택하기 위해 3종류의 접착필름이 선정되었으며 극저온용으로 개발된 탄소섬유/에폭시와 라이너 재료로 사용되는 알루미늄으로 구성된 양면 겹치기 조인트 시편을 제작하였다. 제작된 시편을 극저온 환경챔버를 사용하여 상온과 -150°C에서 인장실험을 수행하여 각 접착제의 접착강도를 비교하였으며 파손 특성을 분석하였다. 또한 양면 겹치기 조인트 시편의 각 구성재료의 온도에 따른 기계적 물성변화를 측정하였으며 이를 이용하여 ABAQUS를 통한 유한요소해석을 수행하여 양면 겹치기 조인트 시편의 인장시험결과를 분석하였다.

Key Words : 양면 겹치기 조인트(double-lap joint), 극저온 환경(cryogenic environment), 접착제(adhesive)

1. 서 론

우주기술의 중요성이 증가함에 따라 각국에서는 자체적으로 발사체 기술을 보유하기 위한 다양한 연구를 활발히 진행하고 있

다. 특히 발사체 무게의 대부분을 차지하는 추진제 탱크의 경량화는 많은 연구자들의 관심분야이며 이를 위해 비강성, 비강도가 우수한 복합재료를 탱크재료를 대체하기 위한 연구가 많이 진행되어 왔다[1-3]. 하지만 복합재 탱크가 극저온 상태의 추진제를 저장

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공

** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공, 교신저자(E-mail:cgkim@kaist.ac.kr)

** 한국항공우주연구원 구조그룹

할 경우 보강섬유와 모재간의 열팽창계수의 차이로 인해 모재에서 미소균열이 발생하기 쉬우며 이것이 확대되어 연료의 누수로 이어질 수도 있는 단점을 가진다[4-5]. 따라서 복합재 단독으로 탱크에 적용하기에는 아직까지 어려운 부분이 많아 금속 라이너와 함께 사용되는 경우가 많다[6].

이러한 추진제 탱크의 성형 과정에서 금속 라이너와 복합재 사이에는 필름 혹은 액상 타입의 접착제가 사용된다. 하지만 극저온 탱크의 성형이 끝나고 가압상태의 극저온 추진제를 저장할 경우, 복합재와 금속 라이너 사이의 접착제 층은 극심한 열응력 차이로 인해 분리될 수도 있으며 이것은 탱크의 안전성에 심각한 타격을 주게 된다. 따라서 복합재 추진제 탱크를 제작하기 이전에 극저온에 적합한 접착제를 선정하기 위한 연구가 선행되어야 한다.

일반적으로 접착제의 접착강도를 평가하기 위해 단면 겹치기 조인트(single-lap joint) 혹은 양면 겹치기 조인트(double-lap joint)의 인장시험 방법이 많이 사용된다. Jianmei 등[7]은 양면 겹치기 조인트 시편의 실험을 통해 몇 가지 종류의 접착제로 저온에서의 접착강도 비교를 수행하였으며 접착두께와 굽힘 하중이 조인트 접착 강도에 미치는 영향을 유한요소해석을 통해 분석하였다. Tong[8]은 Tsai와 Norris 등 기존의 파손예측식을 수정하여 양면 겹치기 조인트 시편의 접착강도를 예측하고 접착제의 소성변형을 고려한 해석을 수행하였다. Sawa 등[9]은 양면 겹치기 조인트의 유한요소해석을 통해 피접착물의 강성과 항복응력, 조인트 길이 등이 조인트 접착 강도에 미치는 영향을 연구하였다. Schoeppner[10] 등은 변분법(variational method)을 이용하여 양면 겹치기 조인트 시편의 점진적인 파손 해석을 수행하여 응력장(stress field)을 예측하였으며 실험결과와 많은 부분이 일치하는 것을 확인하였다. Takayuki 등[11]은 경화온도가 다른 접착제로 이루어진 양면 겹치기 조인트 시편에 대해 저온에서의 인장시험을 수행하여 접착강도를 비교, 평가하였다. Weitsman[12]은 변분법을 이용하여 양면 겹치기 조인트의 온도변화가 있을 경우에 대해 접착제의 탄성, 점탄성을 고려한 잔류열응력(residual thermal stress) 해석을 수행하였다. Roy 등[13]은 수분과 온도가 양면 겹치기 조인트 시편에 미치는 영향을 측정, 분석하였다. Rastogi 등[14]은 알루미늄과 복합재로 이루어진 양면 겹치기 조인트 시편의 3차원 열 응력장을 유한요소해석을 통해서 구했으며 조인트의 가장자리 구석 부분이 균열이 시작되는 지점임을 검증할 수 있었다. 하지만 대부분의 연구에서는 상온에서의 접착강도에 대한 해석과 실험이 수행되었으며 극저온에서의 접착강도에 대한 연구는 많이 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되는 3종류의 접착 필름을 선정하였으며 ASTM D3528을 참고하여 극저온용으로 개발된 Graphite/Epoxy와 라이너 재료로 사용되는 알루미늄(AI6061-T6)으로 양면 겹치기 조인트 시편을 제작하였다. 제작된 시편을 극저온 환경챔버를 사용하여 상온과 -150°C에서 인장시험을 수행하여 각 접착제의 접착강도를 비교하였으며 파손 특성을 분석하였다. 또한 양면 겹치기 조인트 시편의 각 구성 재료의 저온 물성을 측정하여 온도에 따른 거동을 관찰하였다. 또한 ABAQUS

를 사용한 유한요소해석 수행을 통해 양면 겹치기 조인트의 파손 과정을 추론하였다.

2. 실험과정

2.1 양면 겹치기 조인트 시편의 제작

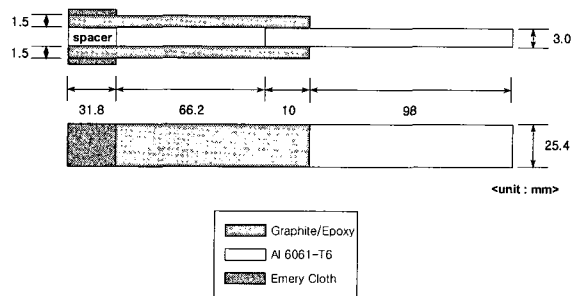


Fig. 1 Geometry of double-lap joint specimen.

양면 겹치기 조인트 시편은 ASTM D3528을 참조하여 Fig. 1과 같은 형태로 제작하였다. 바깥쪽 피접착물(outer adherend)로 사용된 Graphite/Epoxy 복합재료는 극저온용으로 개발된 소재이며 안쪽 접착물(inner adherend)인 알루미늄 6061-T6은 일반적으로 금속 라이너로 많이 사용되는 재료이다. 조인트 길이는 10mm이며 접착면은 사포(#400)를 사용하여 복합재와 알루미늄 모두 동일한 조건으로 연마한 후에 접착제를 부착하였다. 또한 복합재 부분에서 그림이 물려지는 부분은 극저온 인장시험을 위해 연마포(emery cloth)를 탭으로 부착하였다. 스페이서(spacer)는 바깥쪽 피접착물인 복합재 사이의 공간을 유지하는 역할을 하며 안쪽 접착물인 알루미늄과 두께방향의 열변형 차이로 인한 굽힘 응력(bending stress)이 생기지 않도록 동일한 재료인 알루미늄을 사용하였다.

복합재와 알루미늄 사이에 삽입되는 접착제는 (주)한국화이바의 Bondex606, Loctite사의 EA9696, Cyanamid사의 FM73의 세 종류이다. 이들의 성형온도는 실제 복합재 탱크의 제작성을 고려하여 복합재료와 같은 성형온도인 130°C를 가지는 것으로 선정하였다.

2.2 양면 겹치기 조인트의 인장시험을 통한 접착강도 평가

접착제 성형이 끝난 세 종류의 양면 겹치기 시편을 사용하여 상온과 극저온에서 접착강도를 비교하기 위한 인장시험을 수행하였다. Fig. 2와 같이 극저온 환경 챔버를 사용하여 상온과 -150°C에서 각각 6개의 시편을 사용하여 물성을 취득하였다. 인장시험을 위해 일반적인 쐐기형태(wedge type)의 그림을 사용하였으며 인장시험의 속도는 상온과 -150°C에서 모두 ASTM D3528을 참조하여 1.27mm/min으로 하였다. -150°C에

서 시험을 수행하기 위해서는 그림으로부터 시편이 미끄러지는 것을 방지하기 위해 약간의 초기하중을 부가하며 -150°C의 열평형에 도달한 이후에 인장시험을 수행하였다.

2.3 양면 겹치기 조인트 구성 재료의 저온물성 측정

양면 겹치기 조인트 시편을 구성하고 있는 피접착물인 Graphite/Epoxy와 알루미늄 그리고 세 종류의 접착제에 대해 저온에서의 인장 강성 및 강도, 열팽창계수를 취득하였다. 복합 재료는 ASTM D3039를 참조하여 시편을 제작, 실험을 수행하였다. 또한 벌크(bulk) 접착제 시편은 ASTM D638, 알루미늄은 ASTM B557의 규격에 따라 독본(dog-bone) 형태로 Fig. 3과 같이 제작하였다. 세 종류의 접착제 시편은 FM73은 갈색, Bondex606은 노란색, EA9696은 청록색을 각각 띠고 있어서 외관상으로 구분하기가 용이하였으며 각 시편의 두께는 2mm 내외이다. 제작된 접착제와 알루미늄 시편을 극저온 환경 챔버를 사용하여 상온, -50°C, -100°C, -150°C에서 각각 인장시험을 수행하여 인장 강성과 강도의 변화를 관찰하였다. 또한 티타늄 실리케이트(titanium silicate)를 더미 게이지(dummy gauge)로 사용한 하프브리지 회로(half bridge circuit)를 통해 열변형을 측정하여 각 온도에서의 열팽창계수를 취득하였다. 이렇게 취득한 물성을 사용하여 4절에서 유한요소해석을 수행하였다.

3. 토 의

3.1 양면 겹치기 조인트의 인장시험결과

상온과 -150°C에서의 대표적인 하중-변위 곡선은 Fig. 4와 같다. -150°C에서의 접착강도가 더 높은 것을 확인할 수 있으며 접착제별 강도비교는 3.1절에 나타나 있다. 또한 3.2절에서는 양면 겹치기 조인트 시편의 파손형상을 관찰하여 파손모드를 구분하였다.

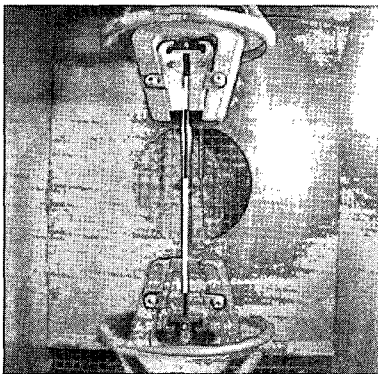


Fig. 2 Tensile test of double-lap joint specimen in environmental chamber.

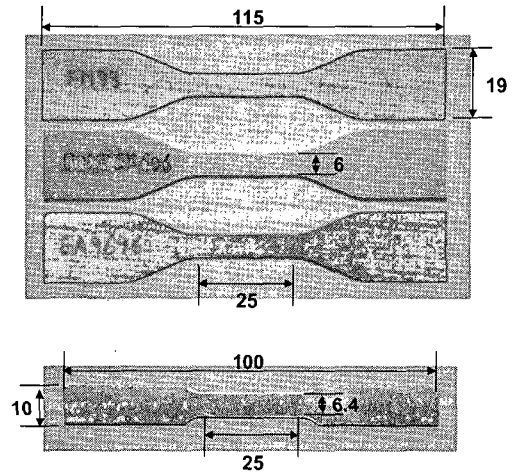
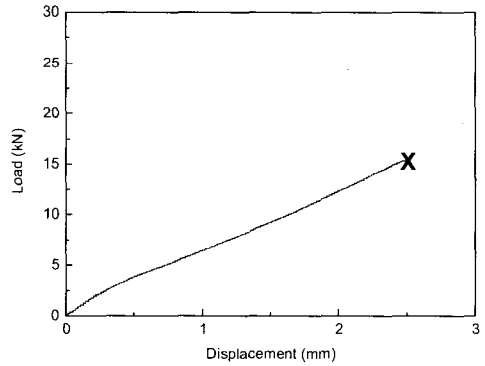
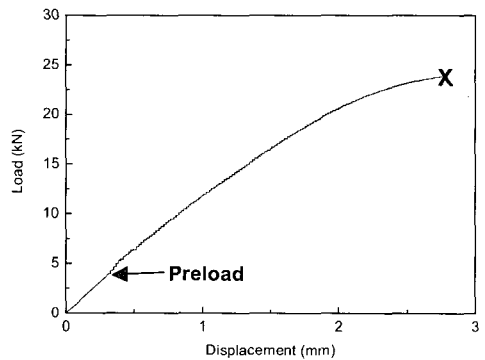


Fig. 3 Bulk adhesive specimens and aluminum specimen.



[25 °C]



[-150 °C]

Fig. 4 Typical load-displacement curve of double-lap joint at RT and CT.

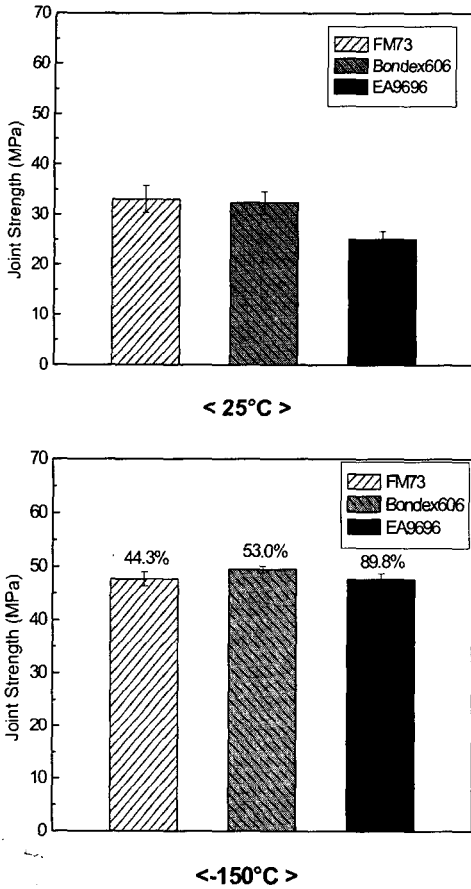


Fig. 5 Experimental results of double-lap joint specimens at RT and CT.

접착제가 다른 세 종류의 양면접치기 조인트 시편의 인장 시험결과가 Fig. 5에 그리고 정량적인 수치가 Table 1에 나타나 있다. 상온에서는 FM73과 Bondex606이 비슷한 접착 강도를 보였으며 상대적으로 EA9696은 낮은 접착 강도를 보였다. -150°C에서 세 종류의 양면 접치기 조인트 시편은 모두 상온에 비해 접착강도가 증가하였으며 Bondex606이 가장 우수한 접착강도를 보였다. 상온 결과와 비교했을 때, FM73의 경우 44.3%, Bondex606의 경우 53.0%, EA9696의 경우 89.8%의 증가율을 보였다. 이처럼 저온에서의 접착강도 증가 요인은 접착제의 강도 증가에 기인한 것으로 판단되며 3.3절의 접착제 인장시험결과로부터 이러한 사실을 확인할 수 있다.

또한 상온에서 가장 우수한 접착강도를 보였던 FM73이 저온에서도 가장 우수한 접착강도를 보이는 것은 아니며 따라서 저온환경에서 접착제를 적용하기에 앞서 저온에서의 접착 특성을 파악하는 것이 선행되어야 한다.

Table 1 Joint strengths of double-lap joint specimens at RT and CT

(unit : MPa)

	FM73	Bondex606	EA9696
25°C	33.0 ± 2.64	32.4 ± 2.19	25.1 ± 1.47
-150°C	47.7 ± 1.36	49.5 ± 0.55	47.7 ± 1.06

Table 2 Material properties of Graphite/Epoxy at RT and CT

	E ₁ (GPa)	S ₁ (MPa)	E ₂ (GPa)	S ₁ (MPa)
RT	143.6	2930	8.87	53.7
-150°C	161.3	2869	11.9	66.5

	G ₁₂ (GPa)	S ₁₂ (MPa)	α ₁ (με/°C)	α ₂ (με/°C)
RT	4.50	65.1	-1.19	26
-150°C	7.49	131.9	1.46	17.6

3.2 양면 겹치기 조인트의 파손모드 및 파손 과정

Fig. 6에는 양면 겹치기 조인트 시편의 대표적인 파손모드 세 종류가 나타나 있다. 즉, 접착제 층이 피접착물과 깨끗이 분리된 접착제 파손(adhesive failure), 접착제 층 내에서 파손이 발생하는 cohesive 파손, 복합재 층 내에서 파손이 발생하는 delamination 파손의 세가지 모드이다. Fig. 7에는 FM73 양면 겹치기 조인트 시편의 알루미늄 접착 부위의 상온과 -150°C에서의 파손형상이 나타나 있으며 세가지 파손모드가 모두 관찰됨을 알 수 있다. 세 종류 접착제의 양면 겹치기 조인트 시편 모두 상온과 -150°C에서 파손형상은 큰 차이가 없었다. 다만 -150°C 파손형상의 경우 접착제 층의 잔해가 접착 부위에서 상대적으로 많이 관찰되었다.

Fig. 7로부터 파손 과정을 추론해보면 먼저 접착 부분에서 알루미늄과 접착제 층 사이에서 균열이 발생하여(adhesive failure) 접착제 층을 가로질러서 균열이 진전(cohesive failure)한다. 최종적으로 복합재 표면층(surface ply)까지 균열이 진전하여 보강섬유와 함께 복합재 한 층이 떨어져 나가면서(delamination failure) 양면 겹치기 조인트 시편의 최종 파손이 발생하게 된다.

3.3 양면 겹치기 조인트 구성재료의 저온물성 측정

Table 2에는 측정된 Graphite/Epoxy의 온도에 따른 기계적 물성이 나타나 있다. 저온에서는 강성과 강도가 대체로 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 저온에서 섬유와 모재의 취성(brittleness) 증가를 반영한다.

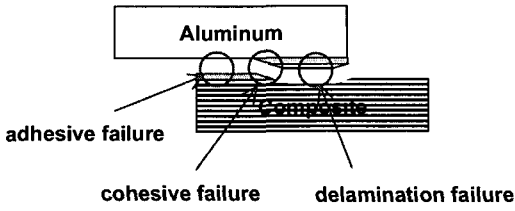


Fig. 6 Typical fracture modes of double-lap joint specimen.

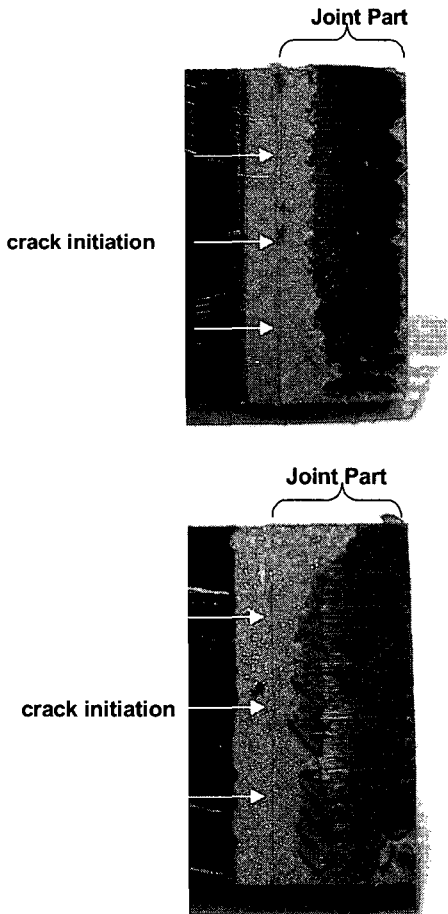


Fig. 7 Fracture surface of FM73-inserted double-lap joint specimen at RT and CT.

EA9696 벌크 접착제 시편의 온도에 따른 응력-변형을 곡선이 Fig. 8에 나타나 있다. 온도가 감소함에 따라 곡선의 기울기가 증가하는 것을 알 수 있으며 이 결과로부터 저온에서의 접착제의 취성(brittleness) 증가로 인한 강성의 증가를 확인할 수 있다. 강도 또한 상온에 비해 증가하는 것을 확인할 수 있으며 이것은 앞에서 설명한 양면 접치기 조인트의 저온에서의 접착강도 증가의 가장 큰 원인으로 사료된다.

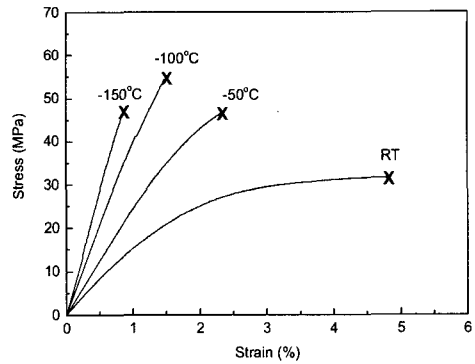


Fig. 8 Typical stress-strain curve of bulk adhesives at different temperature (EA9696).

Table 3 Stiffness and strength of 3 adhesives and aluminum at various temperatures

(a) Stiffness (unit: GPa)

	RT	-50°C	-100°C	-150°C
Bondex606	2.8	3.6	5.0	6.3
EA9696	1.9	2.4	3.9	5.5
FM73	2.5	3.2	4.5	5.5
Aluminum	68.5	70.6	74.1	72.0

(b) Strength (unit: MPa)

	RT	-50°C	-100 °C	-150°C
Bondex606	39.4	47.8	43.1	49.3
EA9696	33.9	50.0	53.8	46.4
FM73	45.7	73.3	54.0	57.4
Aluminum	294.6	313.5	321.3	350.5

Table 3에는 접착제와 알루미늄의 온도에 따른 강성, 강도를 비교한 결과이다. 접착제 중에서는 강성의 경우 Bondex606이, 강도의 경우는 FM73이 모든 온도에서 가장 높은 값을 보였다. Table 3에서 알루미늄의 강도는 항복응력(yield strength)을 의미한다. Fig. 9에는 각 재료의 열팽창계수를 측정된 결과가 나타나 있으며 EA9696이 모든 온도범위에서 가장 높은 값을 가짐을 확인할 수 있다.

3.4 양면 접치기 조인트 접착 강도와 벌크 접착제의 강도 비교

Fig. 10은 상온과 -150°C에서 양면 접치기 조인트 강도와 벌크 접착제 시편의 강도를 비교한 결과이다. 상온에서는 양면 접치기 조인트 강도가 벌크 접착제 시편의 강도에 미치지 못하는 결과를 보였다. 이에 반해 -150°C에서는 FM73을 제외하고는 양면 접치기 조인트 강도가 벌크 접착제 시편의 강도와

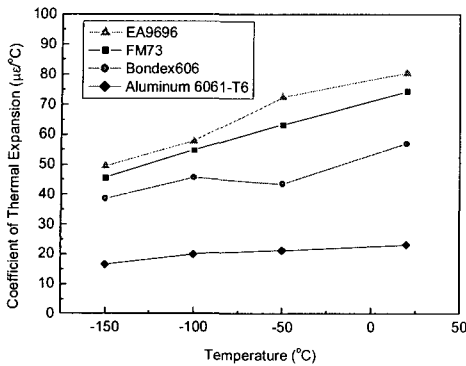


Fig. 9 Coefficients of thermal expansion of 3 adhesives and aluminum.

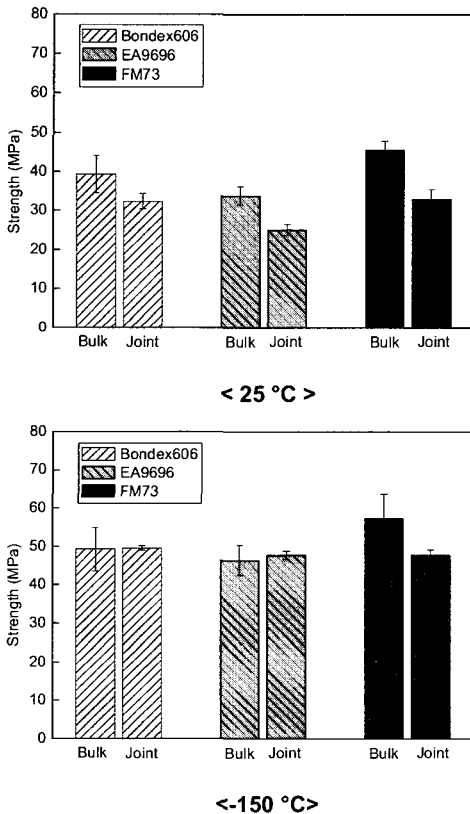


Fig. 10 Comparison of double-lap joint strength and bulk adhesive strength at RT and CT.

비슷한 결과를 보임을 확인할 수 있다. 따라서 접착제 벌크 시편의 강도가 우수하다고 해서 반드시 접착강도도 우수하다고 보장할 수는 없으며 접착제를 적용하기 이전에 반드시 온도와 피접착물 종류 등 실제 운용환경에서의 접착성능을 확인하기 위한 선행연구가 수행되어야 한다.

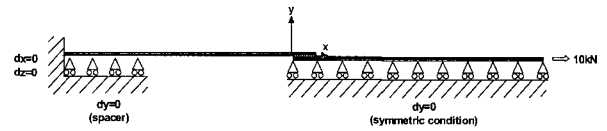


Fig. 11 Half model of double-lap joint and boundary condition for FEA.

4. 유한요소해석

양면 겹치기 조인트의 -150°C에서의 조인트 부분의 응력 분석을 통해 파손과정을 살펴보기 위한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. MSC/PATRAN 2003을 사용하여 모델링 및 경계조건 등을 포함한 전처리 과정과 응력 및 변형률 등의 분석을 위한 후처리 과정을 수행하였으며 구조해석은 ABAQUS 6.4를 사용하였다.

Fig. 11에서와 같이 양면 겹치기 조인트의 하프모델에 대해 경계조건과 하중을 부가하였다. 접착제는 FM73이 사용되었다. 스페이스(spacer)의 역할을 고려하여 이 부분의 y방향 변위를 구속하였으며 안쪽 피접착물인 알루미늄의 하단면은 알루미늄 두께방향의 중간선을 따라 절반을 나는 것이므로 대칭 조건(symmetric condition)을 부가하였다. 초기 온도 20°C의 상태에서 모든 노드에 대해 -150°C의 온도를 부가하였으며 알루미늄의 한쪽 단면에 10kN의 기계적 하중을 부가하였다. 사용한 요소는 8절점 고체요소(solid element)이며 전체 노드 11429개, 전체 요소 9400개를 사용하였다. 또한 해석에 사용한 물성값은 앞에서 수행된 실험결과에서 -150°C의 값을 사용하였다. 이상의 조건으로부터 온도가 내려가는 과정 동안에 복합재, 알루미늄, 접착제에서 발생한 열응력과 기계적 하중에 의해 발생한 응력을 동시에 얻을 수 있다.

유한요소해석결과 접착제 층의 σ_{yy} 와 σ_{xy} 가 Fig. 12에 나타나 있다. 접착제층이 알루미늄의 자유 가장자리와 맞닿는 곳인 $x=0$ 에서 σ_{xy} 의 절대값은 높지만 균열의 생성 및 진전과 관계되는 벗김 응력(peel stress)인 σ_{yy} 는 낮다. 하지만 반대로 $x=10$ 에서는 σ_{xy} 의 절대값은 낮지만 σ_{yy} 가 상대적으로 훨씬 더 큰 값을 가진다. 이러한 이유로 인해 균열이 $x=10$ 에서 시작되는 것으로 판단된다. 이와 같은 결과로 3.2절의 양면 겹치기 조인트 시편의 파손 과정이 발생한 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 극저온에 적합한 접착필름을 선정하기 위해 3종류의 접착필름에 대해 ASTM D3528을 참고하여 복합재료와 알루미늄으로 이루어진 양면 겹치기 조인트 시편을 제작하였다. 제작된 시편을 극저온 환경 챔버를 사용하여 상온과 -150°C에서 인장실험을 수행하여 각 접착제의 접착강도를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

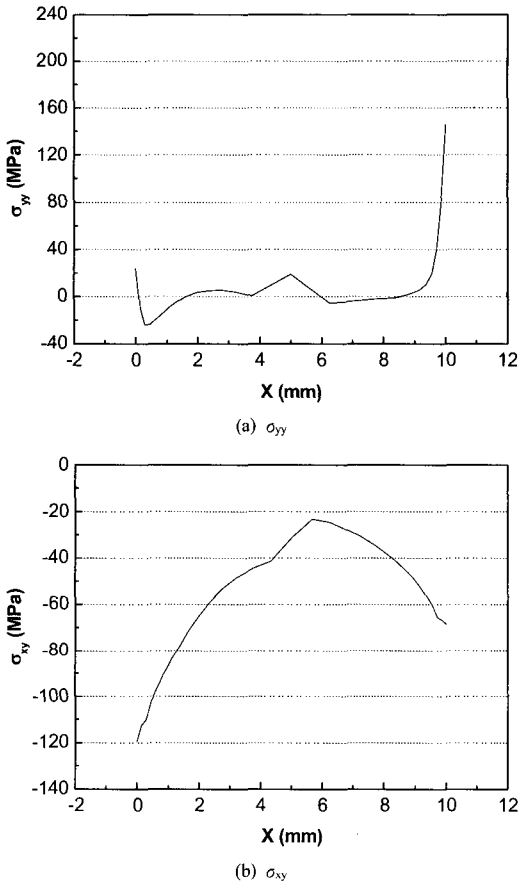


Fig. 12 Stress distribution (σ_{yy} and σ_{xy}) of the adhesive layer.

(1) -150°C에서 세 종류의 양면 접치기 조인트 시편은 모두 상온에 비해 접착강도가 증가하였으며 Bondex606이 가장 우수한 접착강도를 보였다. 저온에서의 접착강도 증가 요인은 접착제의 강도 증가에 기인한다. 또한 상온에서 가장 우수한 접착강도를 보였던 FM73이 저온에서도 가장 우수한 접착강도를 보이는 것은 아님을 알 수 있다. 따라서 저온환경에서 접착제를 적용하기에 앞서 저온에서의 접착 특성을 파악하는 것이 필요하다.

(2) 상온에서는 양면 접치기 조인트 강도가 벌크 접착제 시편의 강도에 미치지 못하는 결과를 보였다. 하지만 -150°C에서는 양면 접치기 조인트 강도가 벌크 접착제 시편의 강도와 비슷한 결과를 보였으며 FM73은 양면접치기 강도가 벌크 접착제 시편의 강도에 미치지 못했다. 따라서 접착제 벌크 시편의 강도가 우수하다고 해서 반드시 접착강도도 우수하다고 보장할 수는 없으며 접착제를 적용하기 이전에 반드시 온도와 피접착물 종류 등 실제 운용환경에서의 접착성능을 확인해야 한다.

(3) 양면 접치기 조인트 시편은 상온과 -150°C에서 세가지의 파손모드가 모두 나타났다. 또한 상온과 -150°C에서의 파손형상은 큰 차이가 없었다. 다만 -150°C 파손형상의 경우 접착제 층의 잔해가 접착 부위에서 상대적으로 많이 관찰되었다. 파손 과정은 먼저 접착 부분에서 알루미늄과 접착제 층 사이에서 균열이 발생하여 접착제 층을 가로질러서 균열이 진전한다. 최종적으로 복합재 표면층까지 균열이 진전하여 보강 섬유와 함께 복합재 한 층이 떨어져 나가면서 양면 접치기 조인트 시편의 최종 파손이 발생하게 된다.

참고문헌

- 1) G. Vendroux, M. Auberon, J. Dessaut, "Cryogenic Composite Tanks: Structural analysis and manufacturing concepts," *42nd International SAMPE Symposium*, 1997, pp. 828-838.
- 2) R. Heydenreich, "Cryotanks in Future Vehicles," *Cryogenics*, Vol. 38, 1998, pp. 125-130.
- 3) A. Pasquier, V. Peypoudat, Y. Prel, "Liquid Hydrogen Composite Tank for Two Stages To Orbit Reusable Launch Vehicle," *23rd International Symposium on Space Technology and Science*, 2002.
- 4) B. W. Grimsley, R. J. Cano, N. J. Johnson, A. C. Loos, W. M. McMahon, "Hybrid Composites for LH2 Fuel Tank Structure," *International SAMPE Technical Conference Series*, Vol. 33, 2001, pp. 1224-1235.
- 5) K. S. Whitley, T. S. Gates, "Thermal/mechanical Response and Damage Growth in Polymeric Composites at Cryogenic Temperatures," *Structures, structural dynamics, and materials conference; 10th AIAA/ASME/ASCE/AHS adaptive structures forum, 4th AIAA non-deterministic approaches forum, 3rd AIAA gossamer spacecraft forum*, 2002.
- 6) T. Shimoda, Y. Morino, T. Ishikawa, T. Morimoto, S. Cantoni, "Study of CFRP Application to Cryogenic Fuel Tank for RLV," *Proceeding of the Japan International SAMPE Symposium*, Vol. 7, 2001, pp. 275-278.
- 7) J. He, T. Shimoda, Y. Morino, S. Mizutani, "Cryogenic Bond Strength of Adhesives for CFRP Liquid-Propellant Tanks of RLV," *23rd International Symposium on Space Technology and Science*, 2002.
- 8) L. Tong, "An Assessment of Failure Criteria to Predict the Strength of Adhesively Bonded Composite Double Lap Joints," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 16, No. 8, 1997 pp. 698-713.
- 9) T. Sawa, H. Suga, "Finite-element Stress Analysis of

- Double-lap Adhesive Joints," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 10, No. 12, pp. 1255-1271, 1996.
- 10) G. A. Schoeppner, A. K. Roy, S. L. Donaldson, "Damage Progression in Bonded Composites Double-lap Joints," *Structures, structural dynamics and materials conference*, 1996, pp. 1594-1604.
 - 11) T. Shimoda, J. He, "Cryogenic Mechanical Performance of Film Adhesive as applied for Aluminum-lined CFRP Propellant Tanks," *24th International Symposium on Space Technology and Science*, 2004.
 - 12) Y. Weitsman, "Residual Thermal Stresses in a Symmetric Double-lap Joint," *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 3, No. 4, 1980, pp. 521-535.
 - 13) A. K. Roy, S. L. Donaldson, "Moisture and Temperature Effects on Bonded composite Double-lap Shear Specimens," *Advanced materials: development, characterization processing, and mechanical behavior*, 1996, pp. 73-74.
 - 14) N. Rastogi, S. R. Soni, A. Nagar, "Thermal Stresses in Aluminum-to-composite Double-lap Bonded Joints," *Advances in Engineering Software*, Vol. 29, No. 3-6, 1998, pp. 273-281.
 - 15) 김명곤, 강상국, 김천곤, 공철원, "극저온 환경에서 탄소섬유강화 복합재의 인장물성에 관한 연구," *한국복합재료학회지*, 제17권, 제6호, 2004, pp. 52-57.