

경화공정 및 수분흡수에 따른 복합재료 하니콤 샌드위치 패널의 접합강도특성 연구

최흥섭* · 전흥재** · 남재도***

(2000년 4월 22일 접수)

Bondline Strength Evaluation of Honeycomb Sandwich Panel For Cure Process and Moisture Absorption

Heung Soap Choi, Heoung Jae Chun and Jae Do Nam

Key Words : Nomex Honeycomb(노멕스 하니콤), Cocure(일체성형), Precure(다단계성형), Moisture Absorption(수분 흡수), Composite(복합재료), Repair(수리), Bondline Strength(접합강도)

Abstract

In this paper, through a series of comparative experiments, effects of two different cure processing methods, cocure and precure, on the mechanical properties of honeycomb core materials for aircraft applications are considered. Mass of moisture accumulated into the closed cells of the sandwich panel specimen from the measured mass of moisture diffused to the full saturation state into the elements(skin, adhesive layer, Nomex honeycomb), consisting the honeycomb sandwich specimen has been calculated. Water reservoir of 70 °C was used to have specimens absorb moisture to see the influence of moisture absorbed into the sandwich panel on its mechanical properties. For the repair condition holding for 2 hours at 177 °C(350 °F) temperature, a pressure due to the vapor expansion in each cell of the sandwich panel, which may result in the local separation of the interface between laminated skin and the surface of the honeycomb, has been estimated by vapor pressure-temperature relation from the thermodynamic steam table and compared to the pressure from the ideal gas state equation. The bonding strengths of the laminated skins on the flat surface of the Nomex honeycomb have been compared by the flatwise tension test and climbing drum peel test performed at room temperature for dry, wet and wet-repair specimens, respectively.

1. 서론

복합재료는 서로 다른 물성을 갖는 두 가지 이상의 단일 재료를 혼합하여 각 재료가 갖고 있는 장점을 최적화 할 수 있도록 개발된 소재이다. 이러한 복합재료는 기존의 금속재료에서는 얻을 수 없는 높은 비강도(specific strength), 비강성(specific stiffness), 부식과 피로에 대한 높은 저항력, 매끈한 표면에 의한 항력감소 및 낮은 열 팽창계수, 설계 시에 재단(tailoring)의 용이성 등의

많은 장점 등을 갖고 있어 현대적인 항공기용 구조물의 성형/제작에 있어 그 응용이 급격히 확대되고 있다. 탄소섬유/에폭시(carbon fiber/epoxy) 등의 복합재료를 외피(skin)로 하고 노멕스(Nomex)나 알루미늄 하니콤(honeycomb)을 심재(core material)로 하는 샌드위치 구조물의 사용이 항공 우주산업과 같은 무게 감소가 중요한 비용 절감 요소가 되는 운송산업에서 크게 늘고 있는데 이는 지나친 무게의 증가 없이 얻을 수 있는 샌드위치 패널(panel) 구조물의 높은 굽힘 강도 및 강성, 높은 단열 및 방음, 내화(fire resistance) 효과, 단위면적당 보강재 무게의 다양한 조절 특성, 표면에 인서트를 부착(insert fitting) 하기 위해 두꺼운 구

* 회원, 주대한항공, 한국항공기술연구원
E-mail : hschoi@hotmail.com
TEL : (042)868-6251 FAX : (042)868-6128
** 회원, 연세대학교 기계·전자공학부
*** 성균관대학교 고분자공학과

조물이 필요한 경우 등의 여러 장점 등을 복합적으로 활용할 수 있기 때문이다.⁽¹⁻³⁾ 특히 복합재료 샌드위치 구조물의 심재로는 많은 수분을 흡수하는 특성으로 인해 그 사용이 일부 제한되고 있음에도 불구하고 외부 충격(impact)⁽⁴⁾시 많은 충격에너지를 흡수하며 높은 인장강도 등 기계적 물성이 우수한 노멕스 하니콤⁽⁴⁾이 현재 항공기용 뿐만 아니라 건축, 조선, 스포츠 등 각 분야에서 널리 사용되고 있다.

복합재료 적층판을 지칭하는 외피는 힘을 전달하는 섬유와 섬유를 지지 보호하는 고분자 수지로 이루어져 있으며 샌드위치 구조물에서 굽힘 하중을 지탱할 수 있어야 하며 반면에 심재는 전단하중을 지탱하고 하중을 외피에 전달하며 좌굴(buckling)과 압착(crushing)에 대한 저항을 갖고 있어야 한다. 그러므로 샌드위치 복합재료 구조물의 구조적 안정성은 심재와 외피간의 접착특성에 의해 크게 영향 받으므로 이에 대한 적용된 공정 방법에 대한 기계적인 접착특성의 실험적 평가가 요구되어 지고 있다.

복합재료 샌드위치 구조물을 성형/제작하는 방법으로는 그 제작 공정상 단 한 번의 오토클레이브(autoclave) 경화 공정에 의해 구조물을 제작하는 일체성형(cocure)공정과 1 차적으로 경화된 외피 등의 부분품을 접착제에 의해 2 차적으로(필요시 3 차 이상) 경화하는 다단계성형(precure)공정으로 구분할 수 있다.⁽⁵⁾

고온에서 장시간의 경화공정을 거치는 에너지 소비가 큰 복합재료구조물의 제작특성상 가격 경쟁력을 확보하기 위해서 점차 기존의 다단계성형에서 일체성형 공정으로 전환되는 추세에 있다. 일체성형 공정을 사용하여 얇은 외피를 갖는 샌드위치 구조물을 제작하는 경우에는 오토클레이브 압력에 노출된 면에서 압력에 의해 프리프레그(prepreg)가 하니콤 셀(cell) 내부로 약간씩 밀려들어가는 현상(telegraphing)이 관찰되고 있다. 이로 인해 일체성형 공정에서는 다단계성형 공정에 의해 2 차 접합된 샌드위치 구조물에 비해 상대적인 압축강도의 차이를 예상할 수 있다. 한편 하니콤 샌드위치 구조물의 접합강도 저하는 부적절한 수지 또는 접착제의 사용, 하니콤면의 불균일 또는 국부적인 좌굴 등에 기인한 접합면에서의 불완전한 윗렛(fillet) 형성, 윗렛은 형성이 되었으나 오염된 셀로 인한 접합불량 등등의 여러 요인에 의해 발생할 수 있으며 이밖에 환경요인으로서 수분 침투로 인한 윗렛의 강도저하, 분리 및 미세 균열로 인한 접합강도의 저하를 예상할 수 있다.⁽⁶⁾

특히 각 공정에 따른 경화된 적층판과 접착제 또는 프리프레그와 접착제와의 접합 강도(bonding strength) 및 구조에는 서로 차이가 있어 전자의 경우에는 외피와 접착제간에 분자간 인력이나 외피의 오목면에 접착제의 수지가 들어가 경화되는 내부잠김(inter-locking) 등의 기계적인 결합(mechanical bonding)이, 후자의 경우에는 프리프레그와 접착제의 수지가 서로 섞여서 반응에 참여하여 외피와 피접착면 사이에는 화학적 접합층(chemical bonding interphase)이 형성된다고 알려져 있다.⁽⁷⁾

이와 같이 서로 다른 공정 방법의 선택에 따라 피접착제간의 접합 구조(mechanism)가 서로 크게 달라 전체 하니콤 샌드위치 구조물의 기계적 특성에도 영향을 미치게 되므로 복합재료의 성형 제작에서 뿐만 아니라 사용 중 손상된 복합재료 구조물의 수리(repair)에 있어서 수리된 구조물의 강도에 영향을 줄 수 있어 이에 대한 실험적 분석이 요구되고 있다.

한편 고분자 복합재료는 수분을 흡수하는 것으로 잘 알려져 있고⁽⁸⁾ 또한 노멕스 하니콤을 심재로 한 판넬로 구조물을 제작하는 경우에는 수분의 외피를 통한 확산작용, 모세관 현상에 의한 균열 내부로의 침투 등으로 인해 하니콤 안으로 수분(moisture)이 축적되어 복합재료의 무게절감 효과를 상쇄시켜 오히려 무게가 늘어나는 경우가 비일비재 하여 최근에는 대형구조물의 경우 하니콤의 사용 대신 다중 리브(multi-rib)를 내부 심재로 한 구조물로 대체되고 있는 추세이다. 특히 하니콤 내부에 축적된 수분이 결빙과 해빙(freezing and thawing)의 열역학적인 반복 싸이클(cycle)을 받는 경우에는 하니콤의 내벽에 균열이 생겨 하니콤 셀에 축적된 수분이 이웃한 하니콤 셀로 이동하는 경우가 있어 수분에 의한 손상영역이 확산되는 것으로 보고되고 있다.⁽⁹⁾

특히 힘을 전달하는 구조적 기능 뿐만 아니라 기능적 성능이 중요한 민항기의 레이돔(radome)^(9,10)의 경우에는 하니콤으로 많이 제작되고 있는데 이러한 레이돔 내부로의 수분확산은 비구름 층으로의 오판 등 그릇된 기상정보를 조종사에게 제공할 가능성이 있어 항공기의 안전운항에 걸림돌이 되고 있는 실정이다. 그러므로 하니콤 내부에 수분 축적^(11,12) 또는 수분으로 인한 손상 등이 발견 되는 경우에는 수분을 제거 또는 손상부위를 교체하는 수리작업을 해주어야 한다.⁽¹³⁾

보통 이러한 수리작업에는 수리작업 공정절차

상에 복합재료 보강판 및 접착제등의 경화에 열을 가하는 열 경화공정 등을 거쳐야 한다. 이 경우에는 제거된 손상부위는 잘 건조되어 수리가 구조적으로 잘 이루어 지고 있으나 수분이 축적된 이웃의 손상되지 않은 하니콤에서는 경화온도에서 발생한 증기압력⁽¹⁴⁾에 의해 외피와 하니콤 사이에서 접착면의 분리(debonding)등이 자주 발생하여 수리작업자에게 곤욕을 주고 있는 실정이다.

본 연구에서는 이러한 두 가지 공정 방법에 따른 접합 구조의 차이에서 오는 기계적 접합 특성을 연구하기 위하여 각 경화 공정에 따라 제작된 샌드위치 시편에 대해 평면인장/압축시험(Flatwise Tension /Compression Test, 'FTT /FCT' 라 칭함) 및 Climbing Drum Peel Test(이하 'DPT' 라 칭함) 등을 수행하였다.⁽¹⁵⁻¹⁷⁾ 또한 하니콤 판넬 내부에 축적된 수분이 하니콤 샌드위치 복합재료 내부로 확산(diffusion) 축적되는 거동과 수분이 침투되었을 때 흡수된 수분과 손상수리 시에 가해주는 온도로 인해 발생하는 내부 증기압력을 산정하여 이로 인한 하니콤 판넬의 접합강도의 특성 변화를 실험적으로 비교 평가하였다.

2. 실험

2.1 시편제작

복합재료 구조물의 실제 제작에 사용되는 다단계성형 공정과 일체성형 공정의 비교 평가를 위한 실험에 사용된 177℃(350°F) 고온용 소재는 Hexcel 사 제품으로 항공기 제작사인 Douglas 사에 소재 규정(Douglas Material Specification; DMS)에 등재된 DMS2224⁽¹⁸⁾(type 2, class W, grade 4) 탄소섬유/에폭시 직물형 프리프레그와 American Cyanamid 사의 필름형 에폭시인 접착제 DMS2177⁽¹⁹⁾을 사용하였다. 그리고 심재로는 Hexcel 사의 DMS1974P(type 3, class 2, grade A, density 80.1 kg/m³(5 lbs/ft³))인 노멕스 하니콤을 사용하였다.

복합재료 샌드위치 구조물은 적용된 경화 공정(cure process) 방법에 따라 구조물의 열 및 기계적 특성이 서로 다르게 나타날 수 있으므로 각각의 공정 방법에 따라 일반적으로 사용되는 소재와 경화 조건은 서로 차이가 있다. 즉 177℃ 온도 및 586.1kPa(85psi) 압력에서 복합재료 샌드위치 구조물의 부분품인 외피, 스파(spar) 또는 리브 등을 1차로 경화한 후 접착제를 사용하여 조립 후 2차적으로 최종 경화/제작하는 다단계 성형 공정에

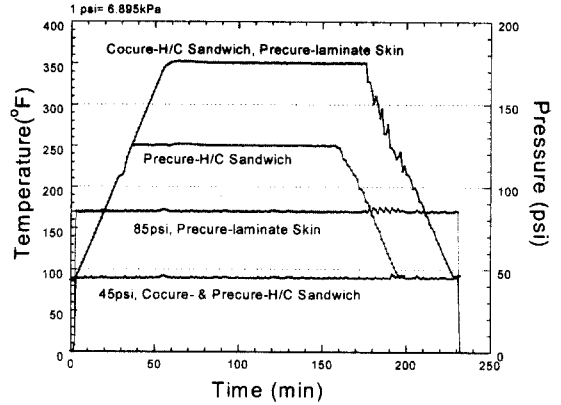


Fig. 1 Autoclave cure cycles for cocure/precure laminate or sandwich panels (°F=1.8℃+32, 1 psi= 6.895 kPa)

서는 2 차 접착(secondary bonding) 공정 시 발생할 지도 모르는 부분품들의 변형(distortion or deformation)을 막기 위하여 1 차 경화보다 낮은 온도 121℃(250°F) 및 압력 310.3kPa(45psi)에서 작업이 진행되는 것이 일반적이다. 반면에 일체성형 공정의 적용 시에는 177℃ 경화온도 조건에는 변형이 없이 공정 도중에 압력에 의한 심재 압착(core crush) 등의 치수 불량 및 변형을 극소화하기 위해서 상대적으로 낮은 압력인 310.3kPa 하에서 성형이 수행되고 있다.

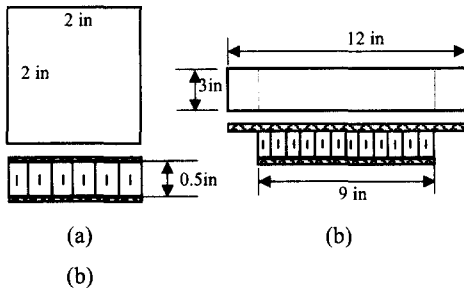
본 연구에서 사용된 다단계성형 시편은 DMS2224 프리프레그 2 장으로 적층(DPT 용) 또는 3 장(FTT 용)으로 적층한 후 177℃, 586.1kPa 에서 경화 시킨 적층판을 노멕스 하니콤(정육방형, 높이 1.27cm(0.5 in))의 양면에 외피로 보강하기 위하여 1 장의 DMS2177 접착제 필름을 외피와 하니콤 심재의 접착면 사이에 적층 하였으며, 310.3kPa 압력을 유지하면서 상온에서 121℃ 경화 온도까지 2.78℃/min(5°F/min)로 승온하고, 121℃ 에서 2 시간 경화 시킨 후 상온까지 2.78℃/min 로 냉각시키는 오토클레이브 환경 조건하에서 2 차 경화로 접합/제작을 하였다 (Fig. 1 참조). 경화 공정 방법에 따른 전체 복합재료 구조물의 기계적 물성이나 강도 등의 차이는 주로 복합재료 구조물을 구성하는 각 부재들의 적층판과 적층판 등의 면과 면 사이 또는 면과 하니콤과 같은 보강용 심재와의 접합 강도의 차이에 기인한다고 유추할 수 있다.

다단계성형시편의 경우 접착면에서의 미시적인

Table 1 Dimensions and cure conditions for moisture absorption test specimens

| Specimen | Width x Length x (Thickness) (ply numbers) | Cure condition |
|-----------|--|------------------------------|
| Skin | 3in x 3in x (2, 3plies) | 350°F, 85psi |
| Nomex H/C | 2in x 2in x (0.5in) | - |
| Adhesive | 2in x 2in x (1 film) | 350°F, 45psi |
| DPT | H/C: 3in x 9in x 0.5in Skin: 3in x 9in x (2plies), 3in x 12in x (2plies) | Cocure/ Precure condition |

1 in = 25.4 mm, 1psi = 6.895 kPa, 350°F = 177°C

**Fig. 2** Schematic shapes of (a) flatwise tension/compression and (b) drum peel test specimens, (1 in = 2.54cm)

돌출부의 기계적 잠김 정도가 접합 강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 적층판의 접착면의 표면을 3M 사의 샌드페이퍼(sand paper, Grit #320)로 연마한 경우와 연마를 전혀 하지 않은 경우로 나누어 접착면의 표면 거칠기를 서로 달리하여 제작하였다. 본 실험에서 사용된 노맥스 하니콤은 심재 가공이나 적층 시에 생기는 표면의 기름기나 기타 불순물을 제거하기 위해서 적층 전 2 시간 전에 모두 증기유분제거(vapor degreasing)처리 하였다. 다단계성형 용으로 미리 1 차 경화 시킨 모든 적층판의 접착 대상면을 샌드페이퍼로 고르게 연마한 후 MEK(Methyl Ethyl Ketone, MEK)를 사용하여 손 접촉 등에 의한 미세 기름 등과 같은 실험 결과에 영향을 미칠 수 있는 접합 표면의 불순물들을 제거하였다.

본 연구에서 사용한 각각의 시편은 제작 공정 방법 및 기계적 시험 방법 등의 차이에 따라 일체성형 공정에 의해 제작된 시편은 CO-로 지칭하고 다단계성형에 의해 2 차 접합 경화하여 만든 시편 중 하니콤과 접합시 접합면이 되는 외피의 한면을 연마한 경우는 SP-로, 연마하지 않은 시편의 경우에는 NSP-로 표현하고, 시험 방법에 따라

FTT(FCT) 시험인 경우 -FT(-FC)로, DPT 시험에는 -DP 로 표시하여 분류하였다. 그리고 수분이 기계적 강도에 미치는 영향을 보기 위해서, 제작된 DPT 시편을 추가로 70°C(158°F) 물 속에서 40 일간 수분을 흡수시킨 시편은 W 으로 표시하였고 이를 다시 수리조건 온도인 177°C에서 2 시간 방치한 시편은 W,R 이라 지칭하였다. 이들 시편의 치수 및 형상은 Table 1 과 Fig. 2 에 도시하였다.

2.2 하니콤 구조물의 수분흡수 거동

노맥스 하니콤을 사용하는 항공기용 샌드위치 구조물의 최대 단점은 샌드위치 구조물 내부로의 수분 축적과 이로 인한 구조물의 강도 저하 및 손상 부위 수리시의 여러 어려움을 야기하는데 있다. 국부적으로 손상된 부분은 적절한 수리 절차에 의해 복원/보강되는데 주로 작업의 특성상 전열고무판(hot blanket)을 사용하여 외피의 경화 온도(탄소 섬유/에폭시의 경우 177°C)에서 경화를 하게 된다. 손상 부위 주변으로 수분이 축적된 상태에서 수리를 하는 경우에는 수리 전 잘 건조된 손상부위에서는 이상이 없으나 손상 부분의 주위에서는 하니콤 셀 내부의 수분이 경화온도에서의 증기압(vapor pressure)에 의해 팽창되어 심한 경우 접합면의 분리가 나타나 불룩하게 튀어나오는 것이 관찰되고 있다. 본 연구에서는 하니콤 샌드위치 구조물 내부로의 정상적인 확산에 의한 수분축적을 실험적으로 접근하기 위해서 앞에서 언급한 DPT 용 다단계성형/ 일체성형 시편을 70°C 항온 수조(water bath) 속에서 약 40 일간 수분을 흡수시키면서 수분흡수 거동을 관찰하였다. 이들 수분을 흡수한 시편에 대해 상온에서 앞에서 언급한 접합강도 시험을 수행하여 수분이 미치는 영향을 알아보고 또한 수분을 흡수한 시편을 수리 온도 조건을 모사한 177°C에서 2 시간 방치하여 내부 증기압이 접합면의 접합특성에 미치는 영향을 관찰하였다 (Fig. 3 참조). 시편의 질량변화는 스위스 OHAUS 사의 정밀 전자저울(모델명 AP210-0, 오차 0.0001g)을 사용하여 측정하였으며 하니콤 샌드위치 DPT 시편은 수조에서 꺼내어 즉시 압축공기로 측면의 수분을 불어내어 충분히 제거한 후 1 분 경과 후에 가능한 빠른 시간 안에 무게를 측정한 후 다시 수조에 넣어 수분흡수를 지속하였다.

2.3 기계적 강도시험

필름형 접착제를 사용하여 일체성형 와 다단계성형공정에 따라 각각 제작된 복합재료 외피와 노맥스 하니콤과의 접착면의 접합 강도는 FTT/FCT

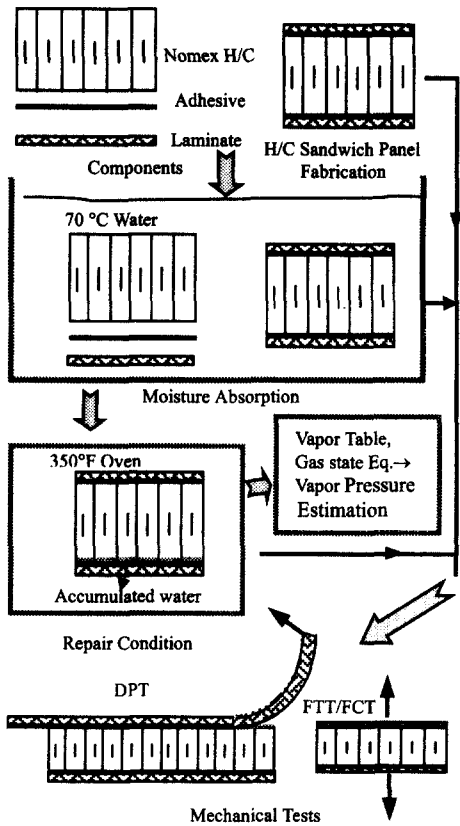


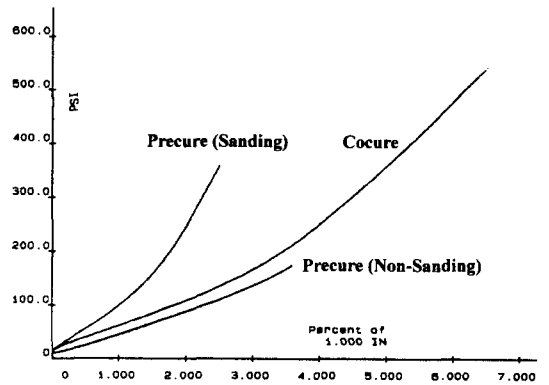
Fig. 3 Schematic diagram for moisture absorption and mechanical tests for H/C sandwich panels

Table 2 Dimensions for bondline strength test and test specifications

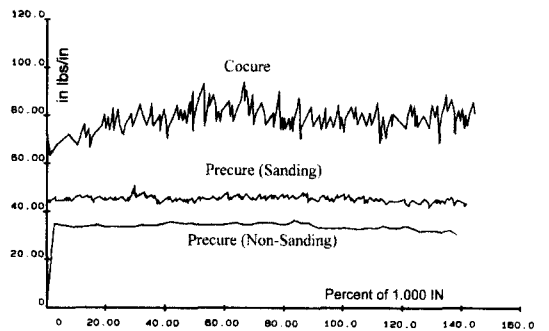
| Specimens | Width x Length x Thickness (ply numbers) | Cross Head Speed | Test specification (ASTM) |
|-----------|--|------------------|---------------------------|
| FTT | H/C: 2in x 2in x 0.5in | 0.5mm/min | C297-94 |
| FCT | Skin: 2in x 2in x (3plies) | | C365-94 |
| DPT | Same as Table 1 | 25mm/min | C1781-93 |

1 in = 25.4 mm

와 DPT 등의 기계적 강도 시험을 통하여 비교 평가하였다. FTT, FCT 및 DPT는 각각 ASTM 규정에 따라 10.3ton 인장 하중 용량의 United Calibration사의 인장 시험기(모델명 SFM-30)를 사용하여 수행하였고 파단면의 특성을 보기 위하여 접착면의 파단면 및 절단면의 특색을 관찰하였다. 각 시험 조건에 대해 5 개 이상의 시편을 준비하였다. Table 2는 시편의 치수 및 인장 및 압축속도와 박리(peeling) 속도를 표시한다.



(a)



(b)

Fig. 4 Typical (a) load per unit area-displacement curve by flatwise tension test and (b) peeling torque per unit width-displacement curve by climbing drum peel test for honeycomb sandwich specimens (1in=2.54cm, 1psi =6.895 kPa, 1in·lbs/in=4.448 m·N/m)

3. 결과 및 고찰

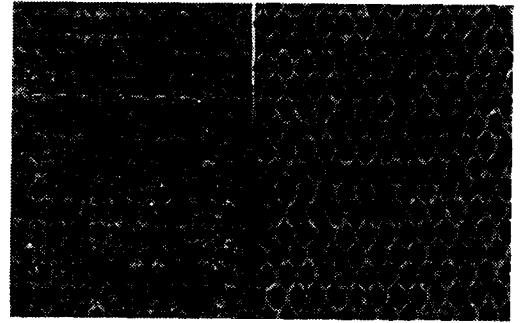
Fig. 4(a)는 일체성형 및 다단계성형 공정에 의해 제작된 FTT 시편의 상온시험에서 얻어진 전형적인 시편의 하중방향 단위 면적당 힘-변형 그림이다. 일체성형 시편의 경우 성형 공정상 프리프레그의 수지와 접착제의 수지가 서로 융합하여 접합면에서의 휠렛 형성이 매우 양호하므로 가장 큰 접합인장 강도값 또는 박리저항(peeling resistance) 값을 보이고 있으며 다단계성형 공정에 의한 시편보다는 높은 강도를 나타내므로 복합재료의 접착 공정에는 일체성형 공정이 강도면에서 우수함을 알 수 있다.

한편 일체성형인 경우에는 프리프레그 외피가

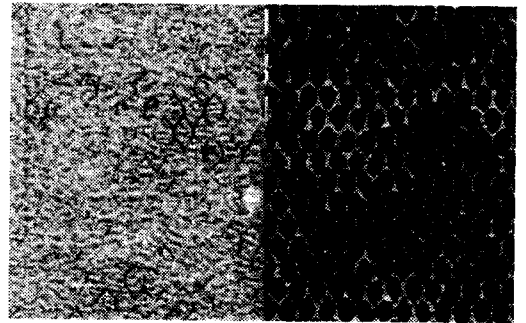
경화온도 중에 외부 압력에 의해 하니콤 내부로 약간 밀려 들어가는 현상으로 인해 하니콤의 형태가 다단계성형 때 보다는 미세한 변형이 가해져 있는 상태이기 때문에 인장시 강성값은 다단계성형 시편보다 저하되는 것으로 판단되고 있다. 연마하지 않은 다단계성형 시편의 경우에는 아주 저조한 상태의 fillet 형성이 하니콤이 손상되지 않은 상태보다 강성값에 영향을 주기 때문에 강성값과 강도값이 모두 최저임을 알 수 있다

Fig. 4(b)는 경화공정의 차이를 갖는 DPT 시편에 대한 상온에서의 전형적인 단위 폭당 박리토크-변형 선도를 보여주고 있다. 일체성형 시편의 경우 외피를 분리하는데 필요한 단위 폭당 평균 박리력(peeling force)가 가장 크며 박리 균열 선단(peeling crack tip)에서 균열이 진전(propagation)에 필요한 에너지는 셀의 단면형상에 따라 형성된 휠렛(Fig. 5(a)참조)을 분리시키는데 영향을 받아 박리력의 평균값에서 아주 날카로운 변동(fluctuation)을 갖는 톱니형의 힘-변형 선도를 볼 수 있다. 다단계성형 시편에서는 휠렛 형성이 불완전하므로 이러한 날카로운 톱니형상의 변동은 상대적으로 무디어져서 연마한 시편의 경우에는 불완전한 휠렛을 떼어내는데 필요한 에너지의 변동폭이 작아 약한 톱니형상이 나타나고(Fig. 5(b)참조) 연마하지 않은 시편에서는 휠렛이 떨어지기보다는 주로 외피와 접착제의 기계적인 경계층이 분리됨으로 변동은 거의 나타나지 않음을 관찰할 수 있다 (Fig. 5(c)참조).

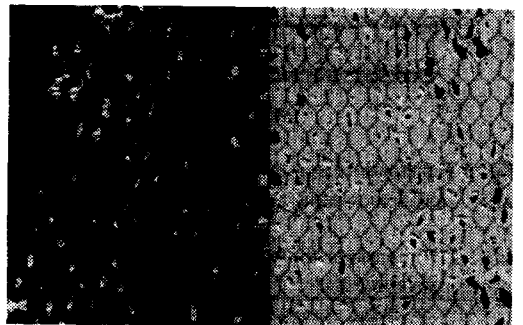
Fig. 5는 DPT 실험 후 파단면을 관찰한 것으로 일체성형 시편의 경우 프리프레그의 에폭시 수지와 접착제가 서로 융합 경화하여 강한 화학적 결합양상을 보이고 휠렛이 전체 접합단면에서 잘 형성되어 있음을 알 수 있다. 파단면 또한 셀 단면과 휠렛 결합 부위에서 휠렛이 뿌리째 뽑히는 바람직한 파단면을 볼 수 있다. 반면에 다단계성형 연마한 시편의 경우에는 적층판과 접착제가 기계적인 결합에 의해 양호하게 결합되어 있으며 접착제 층과 하니콤 접합면에서는 휠렛이 일체성형 시편보다는 다소 약하게 형성되어 휠렛 일부분에서 파단 되는 경향을 보이고 있어 일체성형 시편 다음으로 우수한 결합을 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고 연마하지 않은 다단계성형 시편의 경우에는 접착제의 휠렛 부분에서보다는 적층판과 접착제의 결합이 양호하지 못해 이 부분에서 분리가 일어남을 볼 수 있다. 즉 확대경을 이용한 파단면을 살펴보면 일체성형 시편은 접착제와 수지가 융



(a)



(b)

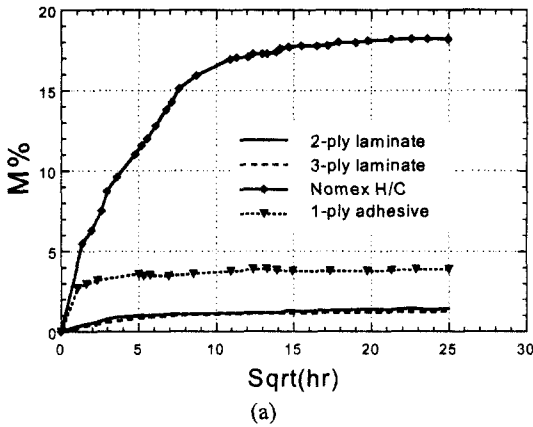


(c)

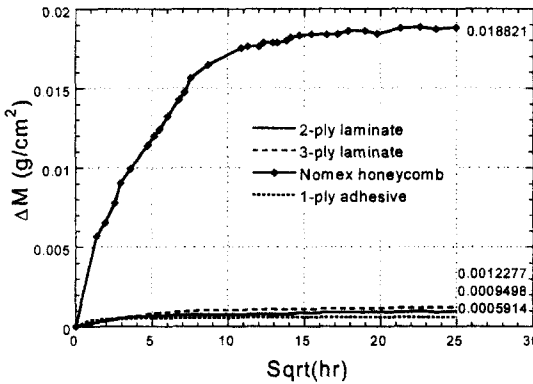
Fig. 5 Fractography of debonded bondline surfaces of the climbing drum peel test specimen for ;(a) cocure (b) precure sanding (c) precure non-sanding sandwich panel

합된 부분의 내부에서 파괴가 진행된 바람직한 접착 층간파단(cohesive failure)을 보인 반면 다단계성형 연마 시편은 접착제와 하니콤 셀 사이에서 휠렛 부분이 파괴된 모습을 나타내고 있으며 연마하지 않은 시편은 접착제와 적층판이 파단 되는 경계면 파단(interfacial failure)을 나타냈다.

Fig. 6은 복합재료 하니콤 샌드위치 구조물을 구성하는 각 부품인 DMS 2224 2장(ply) 또는 3장의 적층판 외피, 노멕스 하니콤 및 이를 결합하는 177℃ 경화용 필름형 접착제 1장에 대한 70℃ 물



(a)

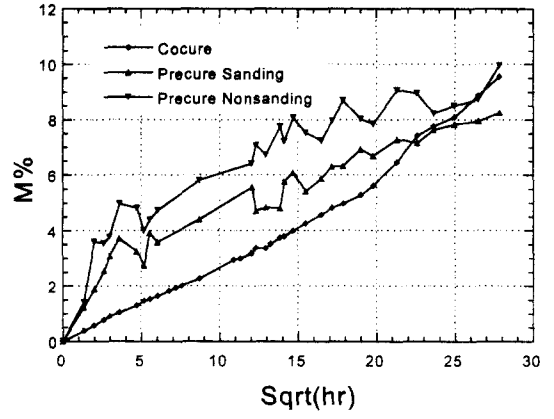


(b)

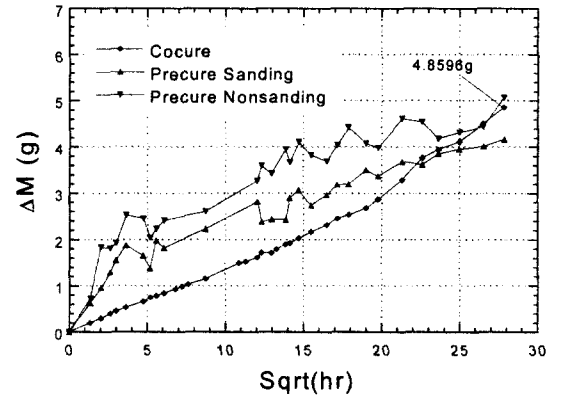
Fig. 6 Moisture absorption behavior of Nomex honeycomb sandwich panel elements ; (a) M% (b) mass of absorbed moisture per unit square centimeter of the surface

에서의 (a) 수분흡수량% 및 (b) 단위 면적 당 흡수된 수분의 질량을 도시한 것으로 하니콤과 접착제, 외피 모두 약 100 시간 이후에는 거의 포화 수분흡수량%에 접근하는 것을 알 수 있다. 노멕스 하니콤의 경우 내부 셀 벽면이 차지하는 면적으로 인해 단위 면적당의 수분 흡수량이 가장 크며 에폭시로 구성된 접착제도 섬유가 함침된 복합재료 외피보다 많은 양의 수분을 흡수함을 알 수 있다.

Fig. 7 은 각 경화공정에 대해 제작된 3 가지 DPT 시편의 70°C 물속에서의 수분흡수 거동을 도시한 것으로 7(a)는 시편 내에 흡수된 수분의 무게와 시편의 수분흡수 전의 초기 건조 무게에 대한 %비를 도시한 것이고 7(b)는 이때 흡수된 수분의 질량이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 하니콤 시편을 구성하는 외피, 하니콤, 접착제가 거의 수분을 더 이상 흡수하지 않는 상태인 포화 수분흡수



(a)



(b)

Fig. 7 Moisture absorption behavior of DPT specimens with different cure process and/or surface conditions ; (a) M% (b) ΔM

상태에 도달하기 시작하는 시점(Fig. 6에서 약 400 시간 지점) 이후에도 Fig. 7의 각 시편은 계속 수분을 흡수하기 때문에 이로부터 샌드위치 구조물을 구성하는 각 부분품이 충분히 포화 수분 흡수 상태에 도달한 후에는 하니콤 샌드위치 구조물의 내부 셀 안으로 수분이 축적됨을 유추할 수 있다. 한편 경화공정에 따른 수분흡수 거동을 살펴보면 일체성형 시편은 하니콤 심재가 접착제에 의해 완벽하게 밀봉되어 있어서 수분이 확산에 의해 시편에 축적되는 것으로 가정할 수 있는 약 400 시간 경과 후까지 큰 변동 없이 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있고 400 시간 이후에는 본격적으로 하니콤 셀 내부로 축적되어 쌓이는 경향을 보이고 있다. 반면에 다단계성형시편의 경우에는 일체성형 시편에 비해 불완전한 접합특성으로 인하여

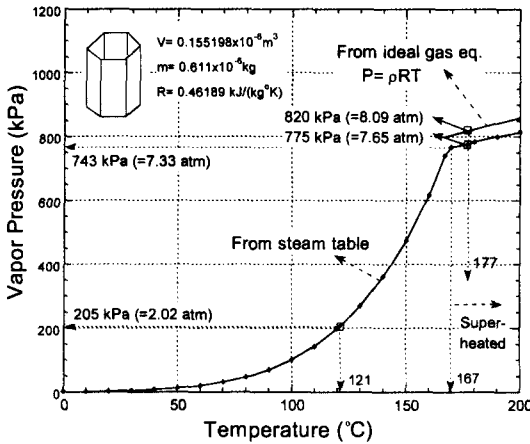


Fig. 8 Comparison of vapor pressure in the honeycomb cells of cocured DP specimen, estimated by the thermodynamic steam table and the ideal gas equation

수분흡수 초기부터 선형이 아닌 심한 측정 오차를 수반하는 변동이 발생하나 전반적인 거동은 점선과 같은 점진적으로 내부에 수분이 축적되어 쌓이는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 수분이 축적되는 양은 전반적으로 다단계성형시편이 일체성형 시편보다 많은 수분을 흡수하며 다단계성형시편은 외피쪽 접합면을 연마하지 않은 시편이 연마 처리한 시편에 비해 많은 수분을 흡수함을 알 수 있다. 또한 일체성형 시편은 전술한 바와 같이 외피와 하니콤 사이의 양호한 윗렛 형성에 기인한 우수한 밀봉 특성으로 수분흡수 초기부터 약 400 시간까지는 수분흡수가 가장 적음을 볼 수 있다. 한편 오토클레이브 공정 중에 적용되는 여러 조건 중 진공(vacuum)에 의하여 성형 후에도 하니콤 샌드위치 구조물의 내부 셀 안에는 진공이 유지되는 것으로 알려져 있다.⁽²⁰⁾ 특히 일체성형 시편의 경우에는 셀 내부로 축적이 이루어지기 시작하는 시점으로 판단되는 400 시간 이후에도 셀 내부의 진공이 계속 유지되어 수분의 축적이 촉진된다고 볼 수 있으므로 수분흡수 후반기에는 다단계성형 시편보다 많은 수분이 축적되는 것이라고 추측할 수 있다. 반면에 접합이 상대적으로 불량한 다단계성형시편에서는 400 시간 이후부터는 수분이 축적되는 기울기가 작아짐을 알 수 있는데 내부의 진공도가 상대적으로 약화 소멸되기 때문이라고 사료되고 있다.

Fig. 7(b)에 도시된 DPT 시편에 흡수된 수분량에서 Fig. 6(b)에서 계산 가능한 각 부분품의 면적에 대해 흡수된 포화 수분량을 공제해 줌으로써

각 부분품 내부로는 확산에 의해 더 이상 수분이 흡수되지 않는 포화 상태에 도달한 시점이라 가정할 수 있는 400 시간 이후 수분흡수 종결시점까지의 시편 내부의 하니콤 셀 안에 축적된 수분량을 산정할 수 있다. 이때 복합재료 외피, 하니콤, 접착제에 축적되는 각각의 포화 수분흡수량 %는 하니콤 샌드위치 구조물에 적용된 경화공정에 무관하다고 가정하였다. 셀 1 개의 내부 부피, 셀 1 개 안에 축적된 수분의 양, 온도 등을 알면 증기압 표로부터 시점 t에서의 셀 내부의 압력을 평가할 수 있다. 즉 Fig. 6의 각 요소 구성물의 포화상태 수분 흡수량과 Fig. 7의 일체성형 시편의 시험 종점에서의 수분 흡수량으로부터 높이가 0.5 in 인 한 개의 하니콤 셀 내부로 흡수된 수분의 양을 계산하면 약 0.000610 g/cell 이다 (부록 참조). 그리고 하니콤 셀을 구성하는 벽의 두께는 0.1 mm 이고 단위 하니콤 면적 당 하니콤 벽 두께가 차지하는 면적비는 약 0.0695 이므로 셀 1 개의 내부 부피는 약 0.155197 cm³/cell 으로 계산할 수 있다. 하니콤의 내부에 축적된 수분이 내부 증기압력에 미치는 영향은 수리 온도 조건이 단시간 안에 주어진다 가정 하에 수리 온도 T가 177°C라 하면 셀 1 개에서의 증기압력 P를 열역학적 증기표⁽²¹⁾(steam table)를 참조하여 구하면 이온도 영역에서는 과열상태(super heated state)로 증기압력은 약 775 kPa(약 7.65 기압)으로 얻어진다. 이때 증기표에 의해 얻어진 셀 내부에 축적된 수분의 압력-온도곡선(Fig. 8)에 의하면 약 167°C에서 과열상태가 시작됨을 알 수 있다.

한편 열역학적 증기표를 사용하지 않고, 수리 온도조건이 주어지는 경우 셀 안의 수분은 대부분 고온의 수리온도(177°C)에서 과열상태에 있으므로 공기에 의한 분압(partial pressure)이 없고 수증기는 이상기체(ideal gas) 거동을 따른다고 가정하여 Eq.(1)의 이상기체 상태방정식에 대입하면 P=818.55 kPa (= 8.08 기압)의 압력이 산정되어 열역학적 증기표에 의한 압력값보다 약간 높게 산정되었다.

$$P = \rho RT \tag{1}$$

여기서 R은 수증기에 대한 비기체상수(specific gas constant)로서 R= 0.46189 kJ/kg·K, ρ는 수증기밀도 ρ = m/V = 3.9369 kg/m³, T는 켈빈(Kelvin)온도로서 T= 177°C = 450.15°K를 사용하였다.

Fig. 9는 손상된 하니콤 구조물에 전열고무판

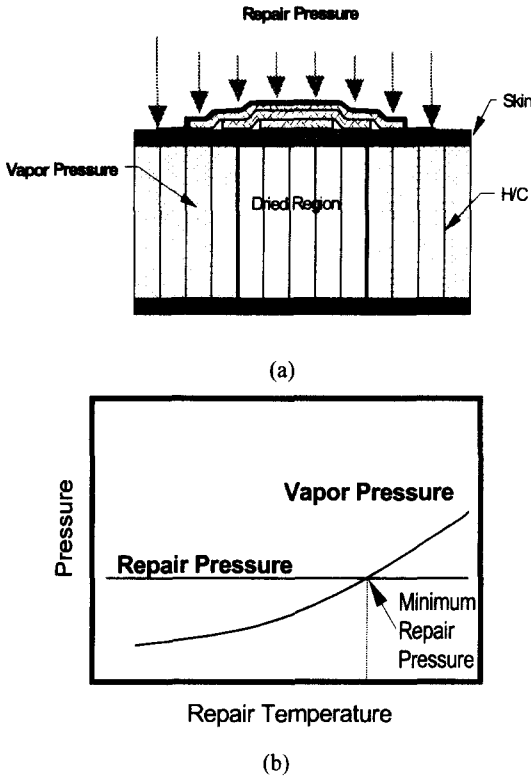


Fig. 9 Schematic diagrams for (a) repair of sandwich structure and (b) definition of minimum repair pressure

경화도구를 사용하여 수리용 보강판(patch)을 붙이는 그림으로 손상부위 주변의 손상되지 않았으나 수분이 내부에 축적된 부위에도 수리경화공정을 적용하는 경우에는 수리온도를 감안한 내부증기압을 전술한 바와 같이 산정하여 이를 상쇄할 수 있는 최소 수리 압력(minimum repair pressure)을 인위적으로 가하여 주어야 바람직한 수리 결과를 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 10 은 건조상태 시편(D), Fig. 7 의 수분흡수 시험 종점까지 수분을 흡수한 시편(W)과 이들 시편의 일부를 177°C에서 2 시간 방치하는 수리온도조건을 적용(W,R)한 후 각각에 대해 FTT 를 행한 상온에서의 시험 결과이다. 이들 각각의 조건의 경우 모두 일체성형 시편, 다단계성형 연마 시편, 연마하지 않은 시편의 순서로 접합강도가 작아짐을 알 수 있다.

각 경화조건에서 건조상태, 수분흡수상태, 수리온도조건을 적용한 상태의 순서로 접합강도가 작아짐을 볼 수 있다. 특히 수리조건을 적용하는 경우에는 앞서 언급한 바와 같은 수분의 팽창압력에

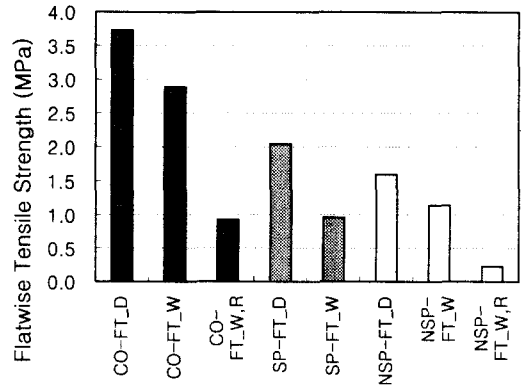


Fig. 10 Flatwise tensile test for honeycomb sandwich structure

의한 접합면의 손상에 의해 접합강도의 저하가 관찰되고 있다. 하니콤 내부 셀 안에 축적된 수분이 177°C 수리온도 조건에 노출되는 경우에는 다단계성형 연마한 시편의 경우에는 복합재료 적층판 외피가 셀 내부의 수분의 팽창압력에 의해 접합면이 분리되어 외피가 통겨져 나갔으며 반면에 연마하지 않은 시편의 경우에는 약하고 불완전한 접합면의 특성에 의해 수리온도 조건에 노출되어 서서히 증가하는 내부 증기압이 노출 초기부터 셀 외부로 서서히 소산되어 압력이 약화되므로 연마한 시편의 경우와 같은 급격한 분리가 나타나지 않고 외부 상태도 노출전과 같은 모양을 유지하고 있어 외관상의 변화는 관찰되지 않았다.

연마한 시편의 경우와 같은 현상은 대한항공 정비본부에서 수행하고 있는 다양한 수리, 유지/보수작업 중 실제 항공기의 손상된 복합재료 하니콤 구조물의 전열고무판을 사용한 수리에 있어 수리부분에 인접하고 손상되지 않았으나 내부 셀 안에 수분이 축적되어 있고 177°C 수리온도 조건에 노출된 부분에서 순간적인 분리음과 함께 외피가 볼록해지는 현상이 보고되고 있다. 반면에 상당히 우수한 접합면 특성을 보이고 있는 일체성형 시편의 경우에는 외피의 폭발적인 분리현상이 나타나지 않고 내부의 팽창하는 증기압을 견디나 외관상 국부적으로 볼록해지는 현상이 나타났다. 이와 같은 내부 증기압에 의한 접합면의 상태변화는 Fig. 11 의 DPT 시편의 경우에서도 유사하게 관찰되었으며 심한 국부적인 분리가 관찰되어 DPT 시험은 무의미하므로 수리온도조건 시편에 대한 결과는 생략하였다.

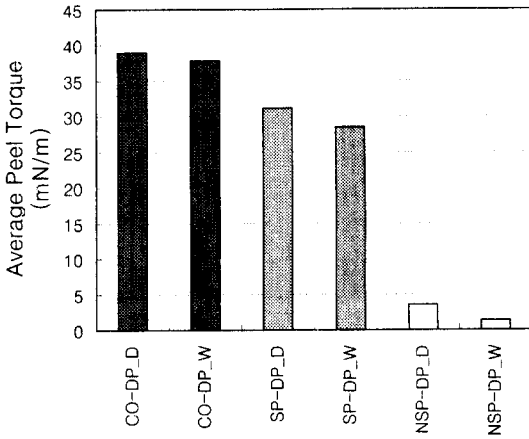


Fig. 11 Drum Peel Test result for dry/wet environmental conditions and cocure/precure cure conditions

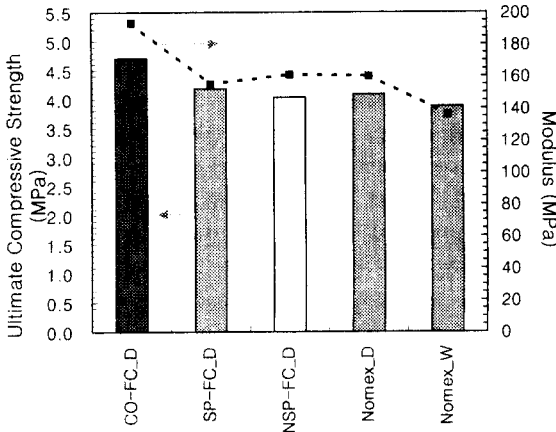


Fig. 12 Mechanical behavior of honeycomb sandwich panels under flatwise compression test

Fig. 11 과 같이 DPT 시편의 결과는 Fig. 10 의 FTT 결과와 유사하여 일체성형 시편의 단위 폭당 박리 토크(peeling torque)가 가장 커 접합강도가 다단계성형시편에 비해 우수하나 연마하지 않은 다단계성형시편은 박리 토크가 매우 작아 접합이 불량함을 알 수 있다. 반면에 연마한 다단계성형시편은 일체성형 시편에 비해 약 20% 저하된 값을 보이고 있다. 수분을 흡수한 시편의 경우에는 박리토크의 값이 약간 저하하는 경향을 볼 수 있다.

Fig. 12 는 Fig. 10 에 사용된 FTT 시편과 같은 적층 및 공정조건으로 제작된 시편과 노멕스 하니콤 원자재에 대한 상온에서의 평면압축 시험 결과이다. 이때 일체성형 공정으로 제작된 샌드위치 시편은 다단계성형 시편에 비해 우수한 압축강도

및 강성특성을 보이고 있으나 다단계성형 시편의 경우에는 접착 표면 처리에 거의 영향이 없이 압축강도와 강성이 서로 유사하며 외피가 없고 수분을 흡수하지 않은 하니콤만의 압축강도와 강성값과 대동소이한 값을 보이고 있다.

일체성형 시편의 경우 치공구 면에 접하지 않은 다른 면에서 나타나는 Telegraphing 현상으로 인해 압축강도의 저하를 예상할 수 있으나 외피와 하니콤 면과의 접합부에서 볼 수 있듯이 다단계성형시편보다 양호한 휠렛 형성이 압축강도 및 강성의 향상에 일조 함을 유추할 수 있다. 한편 수분을 흡수한 하니콤만의 압축강도와 강성은 수분을 흡수하기 전의 값에 비해 약간 저하됨을 볼 수 있다.

4. 평가 및 결론

본 연구에서는 복합재료 하니콤 샌드위치 구조물의 제작공정으로 사용되는 일체성형 및 다단계성형공정 등 적용 공정의 차이에 따른 샌드위치 구조물의 외피와 하니콤과의 접합강도 특성을 수분흡수 시험 및 기계적 시험을 통하여 분석하였다 또한 하니콤 손상된 샌드위치 구조물의 수리시 적용하는 수리 온도조건 및 흡수된 수분이 접합강도에 미치는 영향을 고찰하였다.

일체성형 시편은 외피와 하니콤과의 접합이 접착제와 프리프레그의 수지가 경화반응에 참여하여 가장 우수한 휠렛이 형성됨을 관찰할 수 있으며 이러한 화학적 결합에 의해 밀봉특성이 양호하므로 수분의 흡수거동은 변동이 없는 선형적인 증가를 보이고 있다. 반면에 다단계성형 공정은 외피와 접착제 간의 기계적인 결합에 기인한 미약한 휠렛 형성이 관찰되고 있으며 이로 인한 일체성형 공정에 비해 약한 접합강도 특성을 볼 수 있고 수분흡수 시에도 불완전한 기계적 결합 특성에 의해 접합면에서 국부적인 분리가 나타나 수분흡수증가 폭선에서 변동특성을 확인할 수 있다. 그러나 일체성형 시편이 다단계성형시편에 비해 접합면의 우수한 밀봉효과로 시험 초기에는 하니콤 내부로의 수분 축적량이 적으나 상당한 시간경과 후에는 상대적인 진공의 지속적인 유지에 의해 축적량이 더 많은 것으로 사료된다. 복합재료 내부로 침투한 수분은 복합재료 외피와 하니콤 접합면에서의 박리저항, 접합 인장 강도 및 압축강도를 저하시키며 접합강도는 강도는 일체성형 공정에 의해 접합될 때 수분 등의 환경조건 하에서도 가장 우수함을 확인할 수 있었다.

결론적으로 일체성형 경화 공정에 의해 제작된 구조물은 다단계성형 경화 공정에 의한 것보다 우수한 기계적 접착 물성과 수분흡수 거동을 보이고 있으며 특히 손상 후 수리공정을 적용할 때 가하는 수리온도 조건에서 타 공정에 비해 안정적임을 확인할 수 있어 하니콤 샌드위치 구조물의 제작에는 일체성형 공정이 경제적 측면뿐만 아니라 접합강도 특성에서도 양호함을 알 수 있었다. 또한 수분이 축적된 하니콤 샌드위치 구조물의 수리시에는 하니콤 셀 내부증기압의 발생을 염두에 두어 수리표면에 내부증기압에 의한 힘을 상쇄할 수 있는 적절한 수리압력(repair pressure)을 가하여 수리도중의 외피의 분리를 방지하는 조치가 필요함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구에 사용된 하니콤시편의 제작에 협조를 주신 대한항공 항공우주사업본부(김해) 연구개발팀에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Vinson, J.R., 1999, *The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials*, Technomic Pub..
- (2) Niu, M.C.Y., 1992, *Composite Airframe Structures-Practical Design Information and Data*, Hong Kong Conmilit Press.
- (3) Douglas Aircraft Company, 1977, *Core Material: Aromatic Polyamide Paper/Phenolic Resin*, DMS1974, DAC.
- (4) 박인경, 안영선, 남재도, 최홍섭, 1999, "복합재료/하니콤 샌드위치 구조물의 반복충격에 의한 손상 연구," 한국고분자학회 99' 춘계학술대회 초록집.
- (5) 엄용성, 정정화, 안규중, Seferis, J.C., 1994, "Cocure 공정용 프리프레그의 특성분석," 한국복합재료학회, 94' 춘계학술발표대회 논문집, 서울대학교.
- (6) Armstrong, K.B. and Barret, R.T., 1998, *Care and Repair of Advanced Composites*, Society of Automotive Engineers, Inc..
- (7) Yosomiya, R. & Morimoto, K. et al., 1990, *Adhesion and Bonding in Composites*, Marcel Dekker.
- (8) Choi, H.S., Ahn, K.J., Chun, H.J. and Nam, J.D., Sep. 2000, "Hygroscopic Aspects of Epoxy/Carbon Fiber Composite Laminates in Aircraft Environments," Accepted for Publication at *Composites Part A*.
- (9) Weibel, Nicolas 1996, *Close Cell Thermoplastic Sandwich Core Foam Material For Radome Application; Comparative Study between: AIREX R82.110, ROHACELL 71HF and DIVINYCELL HT90(Performed by Korean Air-EPFL co-work)*, Diploma Thesis, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne.
- (10) Walton, J.D., 1970, *Radome Engineering Handbook-Design and Principles*, Marcel Dekker Inc., NewYork.
- (11) Garrett, R.A., Bohlmann, R.E. and Derby, E.A., 1978, "Analysis and Test of Graphite/Epoxy Sandwich Panels Subjected to Internal Pressures Resulting from Absorbed Moisture," *Advanced Composite - Materials-Environmental Effects*, ASTM STP 658, pp. 234~253.
- (12) Brayden, T.H., Ayres, T.K. and Darrow, D.C., 1989, "Estimation of Adsorbed Moisture Using a Freundlich Adsorption Isotherm," *34th International SAMPE Symposium*, pp. 1385~1394.
- (13) 최홍섭, 유원재, Lanz, R., 전홍재, 남재도, "Repair Characteristics of Honeycomb Panels with Carbon Fiber/Epoxy Composite Skins for Structure Usage," 한국복합재료학회, 98' 춘계학술발표대회 논문집, 건국대학교.
- (14) 하종민, 최홍섭, 정기모, 안규중, 1995, 환경변화에 따른 H/C 샌드위치 구조물의 특성분석, 한국복합재료학회, 95' 춘계학술발표대회 논문집, 충남대학교.
- (15) Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions, *Annual Book of ASTM D297-94*.
- (16) Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores, *Annual Book of ASTM C365-94*.
- (17) Standard Test Method for Climbing Drum Peel Adhesives, *Annual Book of ASTM D1781-93*.
- (18) Douglas Aircraft Company, 1989, Carbon Epoxy Prepreg-Impact Resistant, 350°F Cure, DMS2224, DAC.
- (19) Douglas Aircraft Company, 1989, 250°F Service Application, DMS2177, DAC.
- (20) Renn, D.J., Tulleau, T. and Seferis, J.C., Curran, R.N. and Ahn, K.J., Oct. 1995, "Composite Honeycomb Core Crush in Relation to Internal Pressure Measurement," *Journal of Advanced Materials*, pp. 31~40.
- (21) Van Wylen, G.J. and Sonntag, R.E., 1986, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, 3rd Ed., Wiley.

부록 : 하니콤 내부 증기압력 산정

1. 노맥스 하니콤 샌드위치 판넬을 구성하는 각 구성물의 포화상태 수분흡수량
 - Nomex H/C: 0.4857g/(2in x 2 in)=0.01882091 g/cm²
 - 1 ply adhesive : 0.0012277 g/cm²
 - 2-ply woven ply laminate: 0.0524g/(7.462cm x 7.395cm)=0.00094958 g/cm²

2. 포화상태의 일체성형 DPT 시험편에 흡수된 수분흡수량(Fig. 7 참조)
 - total mass of moisture in laminate with area of two 2-ply woven fabric laminate skins(9 in+12 in) x 3in = $63 \text{ in}^2 \times (6.4516 \text{ cm}^2/\text{in}^2) \times 0.00094958 \text{ g/cm}^2 = 0.38596 \text{ g}$
 - total mass of moisture in adhesive with area of 2 x (9in x 3in) = $54 \text{ in}^2 \times (6.4516 \text{ cm}^2/\text{in}^2) \times 0.0012277 \text{ g/cm}^2 = 0.42771 \text{ g}$
 - total mass of moisture in H/C with area of 9in x 3in = $27 \text{ in}^2 \times (6.4516 \text{ cm}^2/\text{in}^2) \times 0.01882091 \text{ g/cm}^2 = 3.27847 \text{ g}$
 - total saturated mass in cocure DPT specimen with no moisture accumulation in cells = $0.38596 \text{ g} + 0.38596 \text{ g} + 3.27847 \text{ g} = 4.05039 \text{ g}$
3. 일체성형 DPT 시험편의 최종 수분흡수량(Fig. 7 참조) = 4.8596g
4. 9in x 3 in 하니콤안에 축적된 수분의 질량 = $4.8596 \text{ g} - 4.05039 \text{ g} = 0.80921 \text{ g}$
5.
 - 하니콤의 단위 면적당 평균 셀 개수 = $49.125 \text{ cells/in}^2$
 - 일체성형 DPT 시험편의 하니콤셀 개수 = $(9 \text{ in} \times 3 \text{ in}) \times 49.125 \text{ in}^2 = 1326.375 \text{ cells}$
6. 각 셀내부에 축적된 평균수분질량, m = $0.80921 \text{ g} / 1326.375 \text{ cells} = 0.000610 \text{ g/cell}$
7. 셀 내부 체적 (V) 계산
 - 평균 셀체적: $0.5 \text{ in} \times 9 \text{ in} \times 3 \text{ in} / 1326.375 \text{ cells} = 0.01017812 \text{ in}^3/\text{cell} = 0.16678945 \text{ cm}^3/\text{cell}$
 - 하니콤 셀의 벽두께 = 0.1mm
 - 단위 하니콤 면적당 벽단면적의 비 = 0.0695
 - 벽두께 0.1mm 를 고려한 단위셀 내부체적, $V = 0.16678945 \text{ cm}^3/\text{cell} \times (1 - 0.0695) = 0.155198 \text{ cm}^3/\text{cell}$
8. 한 개의 셀 내부 체적 $V = 0.155198 \text{ cm}^3$ 안에 축적된 수분($m = 0.000610 \text{ g}$)에 의해 Kelvin 온도 T에서의 셀 내부 증기압력 P는 증기표 또는 이상기체 상태방정식 Eq.(1)으로 산정할 수 있다.