

## 論文

## 동시 경화법으로 제조된 T800/에폭시 복합재료-알루미늄 단면접치기조인트의 성형압력 및 부가압력에 따른 접착강도에 관한 연구

손대성\*, 배지훈\*, 장승환\*<sup>+</sup>

### A study on the bonding strength of co-cured T800/epoxy composite-aluminum single lap joint according to the forming and additional pressures

Dae-Sung Son\*, Ji-Hun Bae\*, and Seung-Hwan Chang\*<sup>+</sup>

#### ABSTRACT

In this paper, the bonding strengths of co-cured T800 carbon/epoxy composite-aluminum single lap joints with and without additional pressures were investigated using the pressure information induced by the fiber tension during a filament winding process. The specimens of all the tests were fabricated by an autoclave vacuum bag de-gassing molding being controlled forming pressures (absolute pressures of 0.1MPa, 0.3MPa and 0.7MPa including vacuum). A special device which can act uniform additional pressures on the joining part of the single lap joint specimen was designed to measure the bonding strengths of composite-aluminum liners of type III hydrogen pressure vessel fabricated by a filament winding process. After the three different additional pressures (absolute pressures of 0.1MPa, 0.3MPa and 0.7MPa) were applied to the specimens the effect of the additional pressures on the bonding strengths of the co-cured single-lap joints were evaluated.

#### 초 록

본 논문에서는 필라멘트 와인딩 시 장력에 의해 복합재료에 발생한 압력 정보를 이용하여 동시경화법으로 제조된 T800 탄소섬유/에폭시 복합재료-알루미늄 단면접치기 접착조인트의 접착강도를 부가압력의 크기에 따라 측정하였다. 실험시편은 오토클레이브 진공백 성형을 통해 성형압력 (절대압력 0.1MPa, 0.3MPa, 0.7MPa)을 조절하여 제작하였다. 접착강도를 측정하기 위하여 인장실험이 실시되었으며, 필라멘트 와인딩 공정에 의해 제조된 Type III 수소저장용기의 복합재료-알루미늄 라이너의 계면 접착강도를 측정하기 위해 단면접치기 접착조인트의 접착부에 일정한 압력을 가해줄 수 있는 압력부가 장치를 설계하였다. 적층된 복합재료에 가해지는 부가압력이 접착강도에 미치는 영향을 확인하기 위해 서로 다른 세 종류의 부가압력 (절대압력 0.1MPa, 0.3MPa, 0.7MPa)을 시편에 부가하여 접착강도를 측정하고, 그 결과를 비교하였다.

**Key Words** : 동시경화 접착법(co-cure bonding), 단면접치기 접착조인트(single lap joint), 성형압력(forming pressure), 부가압력(additional pressure)

#### 1. 서론

섬유강화 복합재료는 우수한 비강도, 비강성, 높은 감쇠능

및 낮은 열팽창계수 등의 특성을 가지고 있기 때문에 기존의 금속재료를 대체하여 자동차, 전자기기 등 일반 산업을 비롯하여 군사와 우주항공 산업 분야까지 널리 활용되고 있다[1].

접수: 2011년 7월 25일, 수정: 2011년 10월 6일, 게재승인: 2011년 10월 12일

\* 중앙대학교 기계공학부

\*+ 중앙대학교 기계공학부 교수, 교신저자(E-mail:phigs4@cau.ac.kr)

복합재료의 광범위한 적용으로 인해 복합재료간의 접합 혹은 이종재료간의 접합문제는 매우 중요한 문제로 대두되었다[2].

복합재료의 접합방법에는 크게 접착제에 의한 접합법과 기계적 접합법으로 나눌 수 있으며, 특히 접착제를 이용한 접합법은 넓은 면적에 하중을 분포시킬 수 있고, 구멍가공이 필요 없으므로 복합재료의 강도저하를 방지할 수 있다[3]. 접착제를 이용한 접합법 중 복합재료의 성형과정에서 생성되는 잉여수지에 의한 이종재료간 접착법을 동시경화 접착법 이라고 한다. 본 논문에서는 단면접지기 접착조인트를 다양한 성형압력을 이용하여 동시경화법으로 제작한 후 동일한 부가압력을 가하여 접착부의 접착강도를 측정하였다.

복합재료 구조의 대표적인 대량생산 공정 중 필라멘트 와인딩 공정은 그 쓰임이 다양하여 활발히 연구되고 있지만, 성형된 제품의 물성이 그 제조 과정에 상당히 민감하게 영향을 받는다는 단점이 있다[4]. Cohen[5]은 복합재료 압력용기의 성능에 영향을 미치는 주요 변수로 장력을 선정하였을 정도로 제조 과정에서 와인딩 장력은 가장 중요한 변수이며, 이는 성형된 재료의 강성과 강도의 변화를 야기시킨다. 특히 알루미늄 라이너에 탄소섬유를 와인딩하여 제작하는 Type III 수소저장용기의 경우 대부분의 하중을 복합재료가 지지하기 때문에 와인딩 장력에 따른 성능의 차이가 크다[6]. 필라멘트 와인딩 공정에서 장력은 직전까지 와인딩 된 복합재료 층에 압력을 가하여 압밀을 유도하게 되며, 압밀에 의해 발생된 압력은 장력의 크기와 밀접한 관계를 가진다 [7]. 따라서 압밀에 의한 압력은 복합재료와 알루미늄 라이너 계면의 접착강도에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

본 논문에서는 2000개의 탄소섬유 다발로 구성된 하나의 토우 (폭 3.3mm, 두께 0.23mm)에 22.25N의 장력을 부가해 직경 57.7mm 맨드릴에 와인딩 된 복합재료 구조물의 접착강도를 실험적으로 구하기 위해 선행연구자들의 연구 결과[8]를 참고하여 단면접지기 조인트 시편의 성형압력을 0.1MPa, 0.3MPa 그리고 0.7MPa (절대압력)로 정하였다. 각 성형압력 따라 4개의 시편을 제작한 후 인장실험을 통해 성형압력에 따른 복합재료-알루미늄 단면접지기 접착조인트의 접착강도를 측정하였다. 또한 필라멘트 와인딩 공정 중 발생한 압밀에 의한 압력이 접착강도에 미치는 영향을 확인하기 위해 각 성형압력으로 성형된 시편에 성형압력과 동일한 수준의 부가압력 (절대압력 0.1MPa, 0.3MPa, 0.7MPa)을 가해 주어 부가압력이 가해지지 않은 결과와 비교했다. 본 연구에서 측정된 결과값은 동일한 탄소섬유 (T800 탄소섬유)를 사용하여 필라멘트 와인딩 공정으로 제작되는 차량용 Type III 수소저장용기의 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 시편제작 및 실험방법

### 2.1 압력부가 장치

접착부 부가압력이 T800 탄소섬유/에폭시 복합재료-알루미늄 단면접지기 접착조인트의 접착강도에 미치는 영향을 확인하기 위해 시편의 접착부에 부가압력을 가해줄 수 있는 장치를 설계하여 제작하였으며, 이 장치를 이용하여 서로 다른 세 종류의 부가압력 (절대압력 0.1MPa, 0.3MPa, 0.7MPa)을 시편의 접착부에 가해주었다. 본 장치는 Fig. 1 (a)와 (b)에서 보이는 바와 같이 접착부에 가해지는 압력을 측정하기 위한 에폭시 블럭, 강철 자켓, 시편 접착용 평판 및 조절용 나사 등으로 구성되어있다. 단면접지기 접착조인트 시편을 본 압력부가 장치의 빈 공간에 끼워 넣은 후 조절용 나사를 이용하여 시편 접착용 평판을 시편의 접착부에 밀착시켜 압력을 부가하는 방식을 이용하였다 (Fig. 1 (c)). 접착부에 가해지는 압력을 측정하기 위해 에폭시 블럭 좌/우측 면에는 스트레인 게이지를 각각 부착하여 조절용 나사를 조임에 따라 발생하는 에폭시 블럭의 변형률을 측정하여 평균값을 사용하였다. 정확한 변형률 측정을 위해 에폭시 블럭의 재료를 이용한 인장시편을 제작하여 인장실험을 수행 한 후 얻은 응력-변형률 곡선을 이용하여 특정 변형률에서 얻을 수 있는 부가압력을 계산하였다. 각 부가압력에 대응하는 변형률은 Table 1에 제시하였다.

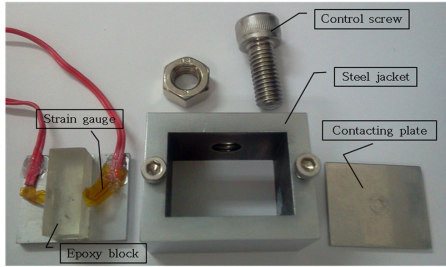
Table 1 Strains corresponded to additional pressures

Additional pressure (MPa)	Strain
0.1	-0.00019
0.3	-0.00057
0.7	-0.00135

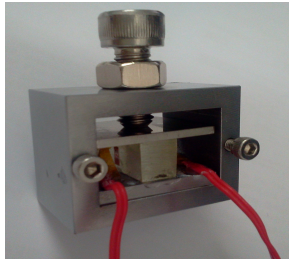
### 2.2 시편제작

본 실험에서는 한국 카본 사의 MCU200ns (일방향 T800탄소섬유/에폭시)와 알루미늄 (6061-T61)을 사용하여 시편을 제작하였다. 복합재료 부분은 0° 방향의 프리프레그 12장을 적층하여 두께 2mm, 접착폭 25mm, 접착길이 20mm로 제작하였다 (Fig. 2 참조). 복합재료 적층각도의 결정은 실제 수소저장용 압력용기의 와인딩 패턴과 사용중인 압력용기에 발행하는 응력의 분포를 고려하여 결정하였다. 실험에 사용한 복합재료 (MCU200ns)의 기계적 물성치는 Table 2에 제시하였다. 또한 복합재료와 알루미늄의 접착부분의 표면처리를 위해 사포 (#220)를 사용하여 인위적으로 표면 거칠기를 높여 시편을 제작하였다. T800 탄소섬유/에폭시 복합재료의 성형과정은 진공백 성형 (Vacuum bag de-gassing molding)방법으로 오토클레이브 (Autoclave)를 이용하여 70분간 135°C로 온도를 상승시킨 후 100분간 유지하는 성형사이클을 사용하였으며, 표준실험규격 (ASTM D1002-01, D5868-01)을 참고하여 인장실험을 실시하였다.

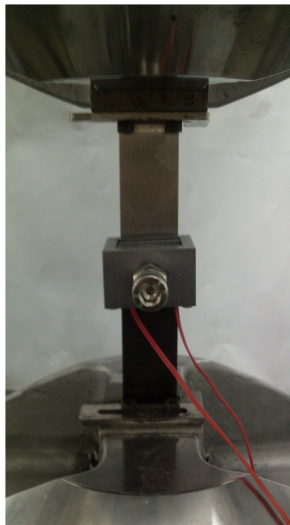
복합재료와 알루미늄 끝부분에 동일한 두께의 상대재료로 제작된 탭 (Tab)을 부착하여 인장실험 시 편심에 의한 굽힘 모멘트를 최소화 하였다. 탭은 3M사의 DP-460 공업용 접착제를 이용하여 접착하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1 Additional pressure device; (a) component details of the additional pressure device, (b) additional pressure device, (c) specimen attached by the additional pressure device.

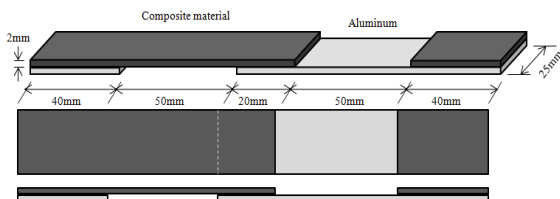


Fig. 2 Shape of the co-cured single lap joint specimen.

Table 2 Mechanical properties of the T800 carbon/epoxy composites[9]

Mechanical Properties	Value
$E_1$	161.3 GPa
$E_2, E_3$	8.820 GPa
$G_{12}, G_{13}$	5.331 GPa
$G_{23}$	2.744 GPa
$\nu_{12}, \nu_{13}$	0.33
$\nu_{23}$	0.45
$X_1$	2300 MPa
$Y_1$	30 MPa
Density	1,580 kg/m <sup>3</sup>

준비된 시편을 이용하여 각 성형압력 (절대압력 0.1MPa, 0.3MPa, 0.7MPa)에 대해 부가압력의 유무에 따라 만능시험기 (MTS 810, USA)를 사용하여 인장실험을 수행하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 성형압력 및 부가압력에 따른 접착강도

성형압력 0.1MPa로 제작된 시편의 인장실험 결과를 부가하중의 유무에 따라 측정 후 비교하여 나타내었다.

Table 3 The bonding strengths of the co-cured single lap joints with and without the additional pressure at the forming pressure of 0.1MPa

No	Without additional pressure	With additional pressure
	Strength (MPa)	Strength (MPa)
1	3.39	6.60
2	3.14	5.73
3	3.13	5.80
4	3.03	6.84
Mean	3.17	6.24
SD	0.15	0.56

\*SD represents the standard deviation

성형압력 0.3MPa로 제작된 시편의 인장실험 결과를 부가하중의 유무에 따라 측정 후 비교하여 나타내었다.

Table 4 The bonding strengths of the co-cured single lap joints with and without the additional pressure at the forming pressure of 0.3MPa

No	Without additional pressure	With additional pressure
	Strength (MPa)	Strength (MPa)
1	7.79	10.20
2	5.99	10.62
3	7.75	10.52
4	5.08	11.63
Mean	6.65	10.74
SD	1.34	0.62

\*SD represents the standard deviation

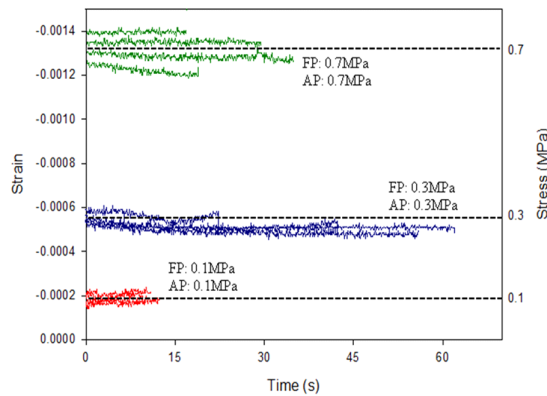
마지막으로, 성형압력 0.7MPa로 제작된 시편 인장실험의 결과를 부가하중의 유무에 따라 측정된 후 비교하여 나타내었다.

**Table 5** The bonding strengths of the co-cured single lap joints with and without the additional pressure at the forming pressure of 0.7MPa

No	Without additional pressure Strength (MPa)	Without additional pressure Strength (MPa)
1	6.34	11.18
2	5.41	9.66
3	6.65	10.51
4	5.23	10.37
Mean	5.90	10.43
SD	0.69	0.62

\*SD represents the standard deviation

한편, 인장실험 과정에서 조절용 나사의 풀림 현상에 의해 시편에 가해지는 부가압력의 변화여부를 확인하기 위해 에폭시 블럭에 장착된 스트레인 게이지로 측정된 변형률을 확인하였다. Fig. 3은 부가압력 (0.1MPa, 0.3MPa, 0.7MPa)이 가해진 시편의 인장실험 중 에폭시 블럭에 발생한 변형률을 측정된 결과이다. 여기서 FP와 AP는 각각 성형압력과 부가압력을 나타낸다.



**Fig. 3** Generated strains at the joint during the test.

위 그래프에서 얻은 변형률 데이터를 통해 인장실험 과정에서 시편의 파단 시점까지 실제로 시편의 접합부에 가해진 부가압력을 계산하면 Table 6과 같다.

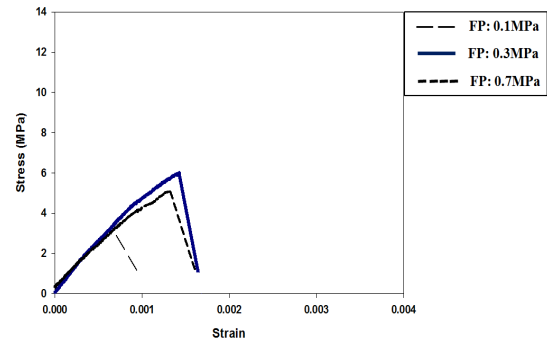
계산결과 성형압력 0.7MPa, 부가압력 0.7MPa의 경우 다른 압력조건에 비해 상대적으로 큰 편차를 보이긴 했으나 전반적으로 그 변화폭이 크지 않은 것으로 판단되며, 결과적으로 조절용 나사가 풀리지 않고 부가압력이 어느 정도 일정하게 유지되어 실험의 결과값이 타당하다고 판단된다.

위 결과들로부터 T800/에폭시 복합재료-알루미늄 단면접치기 접착조인트의 접착강도는 부가압력을 가해주었을 경우에 부가

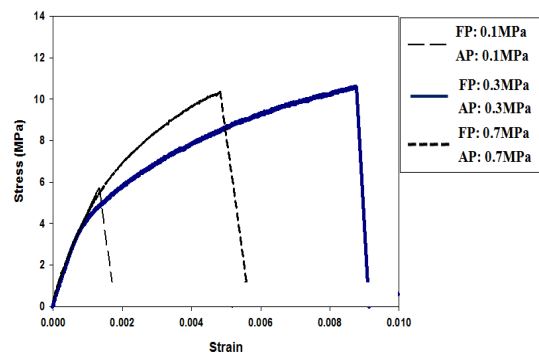
압력이 없는 경우보다 평균적으로 약 1.7배의 강도를 가짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 실제 수소저장용 압력용기의 설계를 위한 해석에 유익한 정보를 제공할 것으로 판단된다. 시편의 인장실험 결과를 통해 얻어진 응력-변형률 선도는 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다.

**Table 6** Generated additional pressures acting on the specimens

No	Average Strain	Actual additional pressure (MPa)
FP: 0.1MPa AP: 0.1MPa	1	0.09
	2	0.09
	3	0.10
	4	0.11
		SD: 0.01
FP: 0.3MPa AP: 0.3MPa	1	0.29
	2	0.27
	3	0.27
	4	0.26
		SD: 0.01
FP: 0.7MPa AP: 0.7MPa	1	0.62
	2	0.70
	4	0.66



**Fig. 4** Stress-strain relationships without additional pressures.



**Fig. 5** Stress-strain relationships with additional pressures.

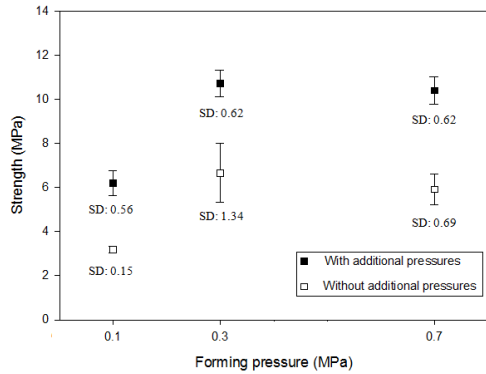


Fig. 6 Bonding strengths according to the forming and additional pressures.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 단면접지기 접착조인트의 성형압력이 같아 하더라도 부가압력의 유무에 따라 접착강도의 차이가 큰 것을 알 수 있다. 그리고 일정 수준까지 성형압력이 증가함에 따라 접착강도가 증가하지만 성형압력 0.3MPa인 경우와 0.7MPa인 경우의 접착강도 차이는 미미함을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 선행연구 결과[10]와 동일한 경향이며, 이러한 결과를 통해 적절한 수준의 부가압력이 압력용기 구조의 접착강도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

### 3.2 접착부 파단면 관찰

Fig. 7은 인장실험을 통해 파단된 시편의 접착면을 현미경을 이용하여 관찰한 사진이다. 부가압력이 가해졌을 때, 접착강도가 가장 낮은 경우 (성형압력0.1MPa, 부가압력0.1MPa)와 가장 높은 경우 (성형압력0.3MPa, 부가압력0.3MPa)를 비교해 보았다. 전자의 경우에는 시편의 알루미늄 표면에 복합재료 층이 거의 존재하지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 낮은 성형압력에 의해 동시경화법으로 접착된 계면에서 에폭시 수지가 효과적으로 분포하지 않은 것에 기인한 것으로 판단되며, 특히 낮은 수준의 부가압력이 복합재료와 알루미늄 접착부에 발생한 필층력 (Peel stress)을 충분히 억제하지 못하여 강도저하가 발생된 것으로 추정된다. 이에 반해 후자의 경우에는 성형과정 중 접착계면에 에폭시 수지가 사포에 의해 거칠어진 알루미늄 표면의 골 부분까지 원활히 도포되고, 높은 성형압력에 의해 복합재료가 표면처리 된 알루미늄 표면에 효과적으로 압밀이 되어 이중재료의 접착계면의 접착강도를 향상시켰으며, 높은 수준의 부가압력이 접착부에 발생한 필층력을 효과적으로 억제한 것에 기인하는 것으로 판단된다.

이상의 실험결과로부터, 성형압력과 부가압력이 적절한 수준일 경우 접착 계면의 강도를 증가시킬 수 있다는 것을 실험적으로 확인하였다. 하지만 접착강도의 경향은 성형압력이나 부가압력에 선형적으로 비례하지는 않으며, 일정 압력 이상에서는 접착부의 상태가 유지되어 접착강도의 크기가 일정하게 유지되는 것으로 판단된다.

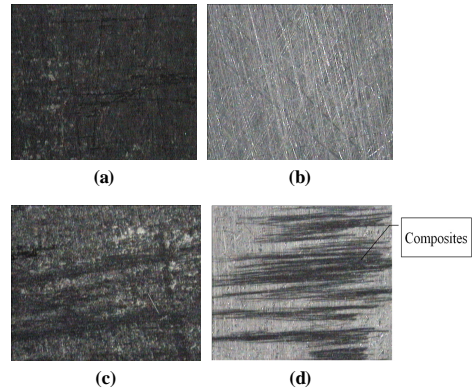


Fig. 7 Micrographs of the cross-sections of the co-cured single lap joints; (a) composite surface (FP: 0.1MPa, AP: 0.1MPa), (b) aluminum surface (FP: 0.1MPa, AP: 0.1MPa), (c) composite surface (FP: 0.3MPa, AP: 0.3MPa), (d) aluminum surface (FP: 0.3MPa, AP: 0.3MPa).

## 4. 결 론

본 논문에서는 2000개의 탄소섬유 다발로 구성된 하나의 토우 (폭 3.3mm, 두께 0.23mm)에 22.25N의 장력을 부가해 직경 57.7mm 맨드렐에 와인딩 된 복합재료 구조물의 접착강도를 예측하기 위해 선행연구자들의 연구 결과[8]를 참고하여 0.1MPa, 0.3MPa, 0.7MPa의 성형압력을 가지는 단면접지기 접착조인트 시편을 제작하였다. 특히 알루미늄 라이너에 탄소섬유를 와인딩 하여 제작하는 Type III 수소저장용기의 경우에 장력은 직전까지 와인딩 된 복합재료 층에 압력을 가하여 압밀을 하게 된다. 압밀에 의한 압력은 복합재료와 알루미늄 라이너 계면의 접착강도에 영향을 미칠 것으로 판단되기 때문에 정해진 성형압력을 적용하여 동시경화법으로 단면접지기 접착조인트 실험시편을 제작 후 인장실험을 통해 성형압력에 따른 복합재료-알루미늄 단면접지기 접착조인트의 접착강도를 측정하였다. 또한 실제 필라멘트 와인딩 공정으로 제작된 압력용기의 상황을 모사하기 위해 각 성형압력으로 성형된 시편에 성형압력과 동일한 수준의 부가압력 (절대압력 0.1MPa, 0.3MPa, 0.7MPa)을 가해주어 부가압력이 가해지지 않은 결과와 비교하였다.

실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 필라멘트 와인딩 공정에 의해 제조된 Type III 수소저장용기의 복합재료-알루미늄 라이너의 계면 접착강도를 단면접지기 접착조인트시편으로 예측하기 위해 시편의 접착부에 일정한 압력을 가해줄 수 있는 압력부가장치를 설계하여 제작하였으며, 실험결과 인장실험 중 시편의 접착부에 비교적 균일한 압력을 가하는 것을 확인하였다.
- 2) T800/에폭시 복합재료-알루미늄 단면접지기 접착조인트의 접착강도는 부가압력을 가해주었을 경우 부가압력이 없는 경우보다 평균적으로 약 1.7배의 높은 강도를 가짐

을 확인하였다.

- 3) 접착강도의 경향은 성형압력이나 부가압력에 선형적으로 비례하지는 않으며, 일정 압력 이상에서는 접착강도의 크기가 일정하게 유지되는 것으로 판단된다.

압력용기 접착부의 접착강도를 직접적인 실험을 통하여 확인하기에는 여러가지 여건상 어려움이 많다. 본 연구에서 사용된 시편은 실제 Type III 압력용기의 제작에 사용되는 섬유로 구성된 프리프레그 타입의 복합재료와 알루미늄으로 제작되었으며, 압력부가 장치를 개발하여 실제 압력용기의 계면에 작용하는 압력을 단면접치기 시편 실험에 적용시켰다. 그리하여 필라멘트 와인딩 공정 시 복합재료의 와인딩 장력에 의한 압밀이 강도에 미치는 영향력을 간접적으로 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 필라멘트 와인딩 공정으로 제작된 차량용 Type III 수소저장용기의 설계에 중요한 정보를 제공할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부의 신재생에너지기술개발사업 중 (주)이엔케이에 의해 지원된 “FCV용 Type III 수소저장용기 (70Ma급)의 재료물성 평가,” 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

- 1) Lee, D.G., and Seo, N.P., *Axiomatic design and fabrication of composite structures*, Oxford, 2006.
- 2) Reinhart, T.J., 1987, *Composite*, ASM International, pp. 475-495.
- 3) Vinson, J.R., and Sierakowski, R.L., 1987, *The Behavior of Structure Composed of Composite materials*, MARTINUS NIJHOFF PUBLISHERS, chap. 8.
- 4) 윤성오, 김준영, 황태경, “필라멘트 와인딩 복합재의 기계적 특성과 와인딩 시 공정변수와의 관계에 대한 실험적 고찰,” 한국추진공학회지, Vol. 3, No. 2, 1999, pp. 56-65.
- 5) Cohen, D., “Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength,” *Composites Part A*, Vol. 28, No. 12, 1997, pp. 1035-1037.
- 6) Cai, Z., Gutowski, T., and Allen, S., “Winding and Consolidation Analysis for Cylindrical Composite Structures,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 9, 1992, pp. 1374-1399.
- 7) Hahn, H.T., Kempner, E.A., and Lee, S.S., “The stress development during filament winding of thick cylinders,” *Composites Manufacturing*, Vol. 4, No. 3, 1993, pp. 147-156.
- 8) Banerjee, A., Sun, L., Mantell, S.C., and Cohen, D., “Model and experimental study of fiber motion in wet filament winding,” *Composites Part A*, Vol. 29, No. 3, 1998, pp. 251-263.
- 9) Kim, C.U, Hong, C.S, Kim, C.G, and Kim, J.Y, “Optimal design of filament wound type 3 tanks under internal pressure using a modified genetic algorithm,” *Composite Structures*, Vol. 71, 2005, pp. 16-25.
- 10) 박명길, 조성겸, 장승환, “성형 압력에 따른 T800 탄소 섬유/에폭시 복합재료의 평면 내·외 물성 변화에 대한 연구,” 한국복합재료학회지, 제23권 제6호, 2010, pp. 61-66.