

技術論文

복합재료 원통셸의 간이 제작법

한병기* · 유택인** · 이성희*** · 이재원****

Lab. Manufacturing Technique of Cylindrical Shell
with Laminated Composite

B.K. Han*, T.I. Yu**, S.H. Lee*** and J.W. Lee****

ABSTRACT

In this study, the mold which can manufacture the cylindrical shells with laminated composite in the laboratory was designed. Cylindrical composite shells are generally manufactured by filament winding or autoclave manufacturing molding method. Comparing the fabrication method adopted in this study to filament winding or autoclave method, it is shown that cylindrical composite shells manufactured by present manufacturing method relatively has more simplicity, lower cost, higher fiber volume proportion and lower void content than previous manufacturing method.

초 록

본 연구에서는 실험실 수준에서 복합재료를 사용하여 원통셸을 제작할 수 있는 금형을 직접 설계 제작하였다. 복합재 원통셸은 일반적으로 필라멘트 와인딩법이나 오토 클레이브 방법으로 제작된다. 본 연구에서 제시된 제작 방법을 이용하여 복합재 원통셸을 제작할 경우 기존의 방법에 비해 제작이 보다 간단하고 비용이 저렴하며, 금속현미경과 주사현미경으로 제작된 시편의 단면을 촬영한 결과 높은 섬유 체적률 및 적은 기공이 발생되었음을 알 수 있다. 따라서 이러한 결과는 실험실에서 손쉽게 고품질의 복합재 원통셸을 제작하는 성형법 연구에 기여할 것이다.

1. 서 론

원통셸 구조 부재는 항공우주, 해양선박 등의 수송장비와 산업설비 등에 유용하게 쓰이고 있으며 토목, 건축 분야에서 하중지지용 일차 구조부재로도 널리 사용되고 있다. 또한 복합재료는 비강도, 비강성이 등방성

재료에 비하여 우수하므로 이를 이용한 구조물 설계는 기술자에게 많은 관심의 대상이 되고 있다. 따라서 효율적인 경량설계를 위하여 신소재 개발 및 응용에 대한 많은 연구가 이루어져 왔으며, 특히 복합재료의 경우 물성 및 기계적 거동의 복잡한 특성 때문에 효율적인 설계방법에 대하여 아직도 많은 연구가 진행되고

* 홍익대학교
** 한국산업기술대
*** 홍익대학교 과기원
**** 삼성중공업

있다. 이러한 재료를 구조부재로서 효율적으로 사용할 수 있도록 설계하기 위해서는 응력 및 안정성 해석과 함께 진동특성에 대한 해석도 이루어져야만 한다. 특히 최근에는 이러한 특성을 이용한 복합재 원통셀을 로봇 팔에 적용시켜 상당한 경량화 효과와 우수한 진동특성을 얻을 수 있다는 연구 결과들이 발표되고 있다[1~3].

한편 산업용 파이프, 압력용기 및 미사일 발사 튜브와 모터 케이스에 사용되고 있는 복합재 원통셀은 일반적으로 성형 비용 및 작업성이 우수한 필라멘트와 인딩 성형법으로 제작된다. 이 방법은 다량 생산할 수 있는 장점을 가지고 있는 반면, 제작법의 특성상 맨드릴 제거, 적층각 조절 및 섬유 채적율에 한계가 있다. 그래서 높은 강성을 요구하는 항공우주 산업에 사용되는 고품질의 복합재 원통셀은 오토클레이브 성형법을 사용하여 제작한다. 그러나 이 성형법은 생산성이 낮고 제작비용이 높은 단점이 있다. 그러므로 복합재 적층각에 따른 복합재 원통셀 특성연구를 위해서는 위의 제작 장점들을 가지고 있는 새로운 성형법을 필요로 하게 된다. 그래서 기존 연구자들은 연구용 복합재 원통셀 제작을 맨드릴에 프리프레그를 적층하여 hot press(miniclave)나 autoclave에서 성형하는 방법을 택하였다. 즉, Kim[4,5]은 hot press (miniclave)를 이용하여 양질의 복합재 튜브를 성형하기 위한 분할형 금형의 설계와 성형법을 제시하였고, 수지(resin)손실이 적게 발생함을 보였다.

한편 정정화[6]등은 성형중에 프리프레그 사이의 미끄러짐 현상을 정량적으로 해석하고 이를 줄일 수 있는 방법을 실험적으로 제시하였다. 원통셀 형상의 경우 성형시 발생하는 잔류응력에 대한 영향을 연구하기 위해 제작된 원통셀을 링 형상으로 절단한 후, 이 링을 절단할 때 겹쳐지거나 벌어지는 양으로부터 잔류응력의 크기를 구하는 연구[7]도 있다.

따라서 본 연구에서는 구조용 부재로 널리 사용되고 있는 복합재 원통셀의 좀 더 조직적인 연구를 위해 다양한 적층순서를 갖는 균질하고 양호한 시편을 실험실에서 손쉽게 해결할 수 있는 성형법을 제시하고, 더불어 제작된 금형으로 섬유강화 복합재 원통셀을 제작하는 기술을 정립하고자 한다. 이를 위해 금형 재료는 열전달이 우수한 알루미늄 합금 재료를 선택하였으며, 복합재 성형에 필요한 온도/압력조건을 얻기 위한 금형 가열 장치와 가압 장치는 hot press를 이용하는 방법 대신 쉽게 구할 수 있는 열선 및 공기압축기를 사용하

였다. 또한 성형중 과다 수지와 발생된 가스를 쉽게 배출시킬 수 있도록 진공처리 하여 고가장비인 autoclave에서 이루어지는 제반 과정들을 모두 만족시킬 수 있도록 함으로써 비교적 양호한 시편을 간단하고 저렴하게 제작할 수 있게 하였다. 제작된 복합재 원통셀 시편의 성형 상태 확인을 위해 금속현미경과 주사현미경으로 단면을 촬영하여 제시하였다.

2. 금형제작

본 연구에서 제안하고 있는 금형의 특징은 금형 외주에 전열선을 창착하고 열전대로 금형의 온도를 측정하면서 금형온도를 제어할 수 있도록 한 것이다. 금형의 내부에 삽입된 실리콘 고무튜브에 공기압을 가하여 적층 소재가 금형에 밀착되도록 하였으며, 금형 측면에서는 진공 펌프로 흡입하여 성형중 발생하는 가스와 과다수지를 배출할 수 있도록 하였다. 이 방법은 일종의 미니클레이브 방법으로써 오토클레이브 방법과 유사한 성형 조건을 가지며, 오토클레이브 방법보다는 제작비가 저렴하다. 따라서 양질의 복합재 원통셀을 임의의 적층순서로 제작이 용이하므로 소량생산 및 실험실에서의 시편제작에 유용하다.

2.1 금형설계 및 제작

금형은 복합재의 경화사이클(cure cycle) 과정 중 가해지는 공기압과 진공 부하에 안전하고 성형작업이 편리하도록 설계하였다. 즉, 성형 공정 과정에서 수지의 화학반응과 부품 상호간의 특성 때문에 복합재 원통셀의 치수와 형상이 변형되지 않도록 금형을 설계하였으며 내구성을 갖도록 제작하였다. 성형 후에는 성형 제품의 탈형이 용이하도록 분할 금형으로 설계하였다. 금형의 소재는 알루미늄합금(2024-T4)이며, 제작된 금형의 외관을 Fig. 1(a)에서 보여주고 있다. 그리고 금형의 각 부위에 대한 명칭과 세부적인 구성도는 Fig. 1(b)과 같다. 금형 본체는 섬유와 수지의 양호한 접착을 위하여 금형의 내부에 삽입된 실리콘 튜브에 공기압축기로 내압이 가해지고, 경화중 화학반응 등으로 인하여 발생된 가스를 적층 소재 내부에서 제거하기 위해 진공 펌프로 흡입하여 진공처리가 되도록 하였다. 이때 원통셀의 용이한 탈형을 위해서 분할 제작된 금형은 볼트로 체결하여 밀착 조립할 수 있도록 하였다. 또한 측면과 금형 본체가 접하는 부분에 고무판을 설치하여 밀폐가 잘 되도록 하였으며, 양쪽 측면에는 진

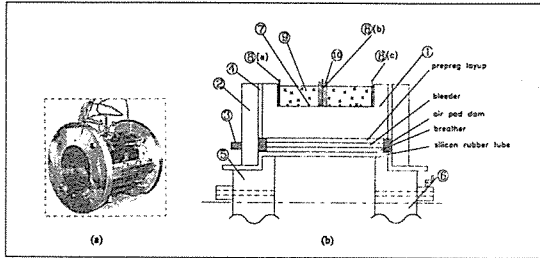


Fig. 1. Photograph and schematic diagram of mold (1) main mold, (2) side plate, (3) vacuum vent nipple, (4) silicon rubber plate, (5) air valve block, (6) exhauster air block, (7) band type heater, (8) thermocouple (a) temperature indicator thermocouple (b) temperature regulator thermocouple (c) spare parts, (9) thermal insulation material, (10) power line)

공을 위한 벤트 니플을 서로 대각선 방향으로 설치하여 금형 내부의 진공처리가 잘 되도록 하였다. 공압 블록과 배기 블록은 실리콘 고무튜브에 삽입되어 공기압이 가해질 때 양쪽 측판에 밀착되도록 설계하였다. 금형의 온도를 상승시키기 위해 밴드형 히터를 금형의 원주방향으로 감아 전열이 되도록 하였다.

2.2 성형공정

복합재 원통셀을 제작하기 위한 성형 공정은 다음과 같다. 제작하고자 하는 적층각으로 프리프레그를 제단한 후 맨드릴(mandrel)에 원하는 순서로 적층하였다. 적층된 시편을 이형 처리된 금형에 삽입한 후 맨드릴 내부에 실리콘 튜브를 위치시켰다. 그리고 맨드릴을 제거한 후 측면판을 조립하였다. 조립이 완성되면 가압과

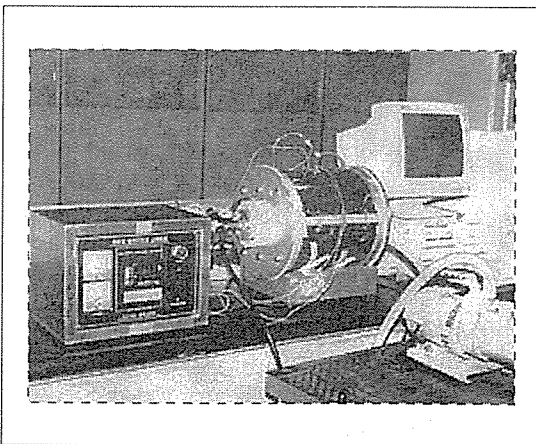


Fig. 2. Photograph of mold setup

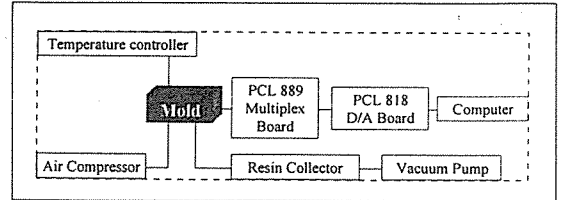


Fig. 3. Schematic diagram of manufacturing setup for cylindrical composite shell

함께 온도사이클에 따라 열을 가하면서 성형과정을 시작하였다. Fig. 2는 복합재 원통셀 성형을 위한 전체 장치구성을 보여준다. 이를 도표로 나타내면 Fig. 3과 같다.

온도 사이클은 복합재의 성형성과 결합 발생에 큰 영향을 미치므로 중요한 성형 조건으로 다루어져야 된다. 본 금형에서는 마이크로 프로세서가 내장된 AC 110V, 2KW 용량의 열선을 PID Auto Tuning 방식의 자동 온도 조절기를 사용하여 제어하였으며, 금형의 온도 측정을 위하여 열전대(thermocouple : K-type)를 부착하였고, 제어기에 피드백(feedback)되도록 하였다. 적층 소재가 잘 밀착되도록 공기 압축기(air compressor)를 이용하여 실리콘 고무 튜브에 내압을 가해 주었다. 그리고 압력 조절 밸브를 통해 일정한 압력이 유지되도록 하였다. 본 제품 성형에 사용된 공기 압축기는 최고 사용 압력이 $11 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$ 이고 내용적은 220l이다. 적층 작업중 적층 소재 사이의 공기나 성형 공정중 수지의 화학반응에서 발생된 가스 및 과다 수지를 배출하기 위해 진공 펌프(ULVAC G-50S형 : pumping speed 50-60 l/min, ultimate press 7×10^{-2} Torr, oil capacity 380 ml)를 사용하였다. 또한 배출되는 수지로 인하여 호스가 막히는 것을 방지하기 위해 수지 수집기(resin collector)를 금형과 진공 펌프 사이에 있는 호스 중간에 설치하였다. 원통셀 성형시 사용된 실리콘 튜브는 사용온도에서 충분한 기능을 발휘하는 재료로서 직경 128 mm, 두께 2 mm이다. 복합재 원통셀의 적층에 있어 맨드릴의 치수 선정은 구겨짐이나 변형이 발생되지 않은 양호한 원통셀 시편 제작에 중요한 인자가 되므로, 본 연구에서는 제작하고자 하는 원통셀 직경에 적합한 직경 140 mm 플라스틱 PVC 파이프를 사용하였다. 그러나 일정크기의 금형에 맞는 맨드릴은 금형 내경보다 훨씬 작은 맨드릴이라도 플렉스인 천을 감아줌으로써 맨드릴의 크기조절은 가능하고, 적층에 앞서 맨드릴과 적층 프리프레그 사이에는 수지흡수를 위한 bleeder가 들어가기 때문에 맨드릴

표면이 매끄럽지 않아도 적층된 프리프레그를 빼내는 데는 문제가 되지 않았다.

한편, 복합재 원통셀은 성형중 치수 변화가 생기므로 실제 각 층마다 재단되는 프리프레그의 길이를 다르게 하였다. 즉, 처음으로 시험 성형한 복합재 원통셀의 내면과 외면에서 겹침 길이를 측정한 후 이를 기준으로 프리프레그를 재단할 때 각 층에 비례해서 길이변화를 주어 재단하였다. 또한 프리프레그를 맨드릴 표면에 감을 때 각 층의 이음새 부분이 겹치지 않도록 이음새 부분을 맨드릴의 원주방향으로 일정각 만큼 이동시켜 원주상에 이음새부분이 등간격으로 배치되도록 하였다.

3. 복합재 원통셀 제작 및 검사

본 연구에서 복합재 원통셀을 제작하기 위해 사용된 프리프레그는 (주)선경인더스트리 USN125 탄소섬유/에폭시수지 프리프레그로써 두께 $t = 0.125 \text{ mm}$ 이며, 중량 0.197 kg/m^2 , 섬유중량 0.125 kg/m^2 , 수지중량 0.72 kg/m^2 이다. 이에 대한 물성치를 Table 1에 제시하였으며 성형에 필요한 bleeder 등의 재료는 AIRTECH International 사의 제품을 사용하였고, 그 내용은 Table 2에서와 같다. 프리프레그 16장을 적층하여 전체 두께가 약 2 mm가 되도록 시편을 성형하였고, 모든 시편의 적층순서는 중립면을 기준으로 하여 대칭적으로 적층하였다. 적층된 시편을 경화시키기 위해 프리프레그 제조회사에서 제시하는 경화조건 및 경화사이클에 따라 프리프레그를 경화시켰으며, 본 연구에 사용한 경화사이클을 Fig. 4에서 보여주고 있다. 그 림에서 점선은 경화사이클의 온도를 얻기 위해 외부에서 가해야 할 온도를 나타낸다. 이때 금형은 항상 일정 공기압이 유지되는 항온실습실에서 2차에 걸친 정압장치(regulator)를 통과한 압축공기($7.03 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$)로 가압되며, 압력의 측정은 압축공기 라인에 부착된 압력 게이지를 이용하였다. 이와 같은 압력 하

에서 금형은 분당 3°C 씩 승온되며 80°C 에 도달하면 30분간 유지시켰다. 그 후 다시 120°C 까지 승온되어 120분을 유지한 다음 냉각과정을 거쳤다. 금형의 냉각 과정은 먼저 전원을 차단하고 배기블록의 밸브를 약간 열어 내부의 고온공기를 대기 중으로 배출하면서 단열재를 탈착하며, 단열재가 제거된 금형에 물을 적신 냉각포를 금형 외면과 측면을 덮고 압축공기를 분출시켜 냉각시켰다. 금형의 최고온도 120°C 에서 60°C 로 강하시키는데 약 35분이 소요되었으며, 이때 냉각율은 온도상승율과 거의 동일한 값을 나타냈다. 이러한 전반적인 냉각과정은 기존의 성형방법에 비해 다소 원시적이므로 개선의 여지가 있다고 사료된다. 마지막으로 성형이 완료된 원통셀은 금형을 조립한 역순으로 상하 금형을 분리하여 시편을 탈형하였다.

한편, 양단이 절단가공된 각각의 시편에 대한 적층순서, 길이, 반경 및 두께를 Table 3에 제시하였다. 제작된 시편의 종류는 크게 적층 방법에 따라 직교적층[$2/(\theta-90)_2$]_{2S}과 사교적층[$\theta_2/-\theta_2$]_{2S}으로 구분되며, 적층수는 16장과 8장의 두 가지로 하였다. 이렇게 제작된 시편들을 Fig. 5에서 보여주고 있다. 제작된 시편 중 직교적층 원통셀은 미끄러짐 현상으로 성형전의 적층각과 차이를 보였고, 사교적층 원통셀은 적층 순서에 따라 길이 변화를 보였다. 성형 전후의 길이 변화 비교를 Table 4에서 보여주고 있으며, 성형된 후의 원통셀 시편 길이는 시편 양단이 절단가공 되지 않은 원통셀의 평균길이를 나타낸 것이다. 적층각이 증가할수록 길이방향 수축량이 증가함을 볼 수 있었다. 셀의 두께도 길이방향 수축량이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있었다. Table 5는 직교적층 원통셀의 안쪽면과 바깥쪽면에서 미끄러짐각을 나타낸 것이다. 미끄러짐각은 적층각에 따라 차이를 보이고 있으며, [45₂/-45₂]_{2S} 적층에서는 미끄러짐 현상이 없음을 관찰할 수 있었다. 따라서 적층각이 미끄러짐각에 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 또한 미끄러짐 현상은 원통셀 바깥면이 안

Table 1. Material properties of prepreg USN125

E_{11}	111	GPa
E_{22}	7	GPa
G_{12}	4.7	GPa
ν	0.28	
ρ	1500	kg/m^3
G_{13}	4.7	GPa
G_{23}	2.5	GPa

Table 2. Sub-materials for manufacturing cylindrical composite shell

Item	Specification
Air pad dam	Air weave super 10
Bleeder	Release ply G
Breather	Air weave SS
Release Liquids	Release-all 50

Table 3. Configurations of manufactured specimen
(a) : $[\theta_2/(\theta-90)_2]_{2S}$

Specimen	Stacking sequence	Length	Radius	Thickness
SC15A	$[15_2/-75_2]_{2S}$	234	74.33	1.84
SC15B	$[15_2/-75_2]_{2S}$	234	74.34	1.83
SC15C	$[15_2/-75_2]_{2S}$	232	74.30	1.83
SC30A	$[30_2/-60_2]_{2S}$	235	74.36	1.83
SC30B	$[30_2/-60_2]_{2S}$	227	74.35	1.80
SC30C	$[30_2/-60_2]_{2S}$	231	74.30	1.83
SC45A	$[45_2/-45_2]_{2S}$	231	74.33	1.79
SC45B	$[45_2/-45_2]_{2S}$	230	74.34	1.83
SC45C	$[45_2/-45_2]_{2S}$	236	74.34	1.82
SC60A	$[60_2/-30_2]_{2S}$	236	74.32	1.86
SC60B	$[60_2/-30_2]_{2S}$	228	74.35	1.80
SC60C	$[60_2/-30_2]_{2S}$	232	74.30	1.83
SC75A	$[75_2/-15_2]_{2S}$	235	74.31	1.84
SC75B	$[75_2/-15_2]_{2S}$	230	74.26	1.89
SC75C	$[75_2/-15_2]_{2S}$	224	74.36	1.83

unit : mm

(b) : $[\theta_2/-\theta_2]_{2S}$

Specimen	Stacking sequence	Length	Radius	Thickness
SA15A	$[15_2/-15_2]_{2S}$	257	75.00	1.80
SA15B	$[15_2/-15_2]_{2S}$	239	75.50	1.80
SA30A	$[30_2/-30_2]_{2S}$	245	75.50	1.83
SA30B	$[30_2/-30_2]_{2S}$	246	75.50	1.83
SA45A	$[45_2/-45_2]_{2S}$	258	75.48	1.95
SA45B	$[45_2/-45_2]_{2S}$	260	75.48	1.94
SA60A	$[60_2/-60_2]_{2S}$	232	75.50	1.98
SA60B	$[60_2/-60_2]_{2S}$	224	75.50	1.98
SA75A	$[75_2/-15_2]_{2S}$	226	75.00	2.02

unit : mm

(c) : $[\theta_2/-\theta_2]_S$

Specimen	Stacking sequence	Length	Radius	Thickness
SA15M	$[15_2/-15_2]_S$	238	74.30	0.92
SA30M	$[30_2/-30_2]_S$	235	74.37	0.96
SA45M	$[45_2/-45_2]_S$	228	74.37	0.96
SA60M	$[60_2/-60_2]_S$	227	74.39	1.00
SA75M	$[75_2/-75_2]_S$	230	74.39	1.00

unit : mm

Table 4. Length variations of manufactured specimens : $[\theta_2/-\theta_2]_{2S}$

Specimen	Stacking sequence	Stacking length	Specimen length	Length variation	Variation rate(%)
SA15A	$[15_2/-15_2]_{2S}$	260	260	0	0
SA15B	$[15_2/-15_2]_{2S}$	260	262	+2	0.77
SA30A	$[30_2/-30_2]_{2S}$	260	257	-3	1.15
SA30B	$[30_2/-30_2]_{2S}$	260	255	-5	1.92
SA45A	$[45_2/-45_2]_{2S}$	260	258	-2	0.77
SA45B	$[45_2/-45_2]_{2S}$	260	260	0	0
SA60A	$[60_2/-60_2]_{2S}$	260	238	-22	8.46
SA60B	$[60_2/-60_2]_{2S}$	260	239	-21	8.08
SA75A	$[75_2/-75_2]_{2S}$	260	231	-29	11.15

unit : mm

Table 5. Sliding angle of manufactured cylindrical shell : $[\theta_2/-\theta_2]_{2S}$

Specimen number	Stacking sequence	Sliding angle(deg)	
		outside	inside
SC15A	$[15_2/-75_2]_{2S}$	+6	+4
SC15B	$[15_2/-75_2]_{2S}$	+13	+6
SC15C	$[15_2/-75_2]_{2S}$	+7	+2
SC30A	$[30_2/-60_2]_{2S}$	+2	0
SC30B	$[30_2/-60_2]_{2S}$	+4	0
SC30C	$[30_2/-60_2]_{2S}$	+3	0
SC45A	$[45_2/-45_2]_{2S}$	-1	0
SC45B	$[45_2/-45_2]_{2S}$	0	0
SC45C	$[45_2/-45_2]_{2S}$	-1	0
SC60A	$[60_2/-30_2]_{2S}$	-2	0
SC60B	$[60_2/-30_2]_{2S}$	-5	0
SC60C	$[60_2/-30_2]_{2S}$	-7	+2
SC75A	$[75_2/-15_2]_{2S}$	-7	+4
SC75B	$[75_2/-15_2]_{2S}$	-9	+4
SC75C	$[75_2/-15_2]_{2S}$	-8	+4

쪽면보다 크게 나타났으며, 이는 원통셸 바깥면이 금형과 접촉하여 열을 전달받고 있는 반면, 원통셸 안쪽면은 수지 흡수제인 브레더와 접촉하고 있으므로, 구성물 간 재료의 접촉 마찰계수 및 열팽창계수가 섬유의 미끄러짐 각에 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 또한 댐 재료, 호스, 수지 집진기 등에서 수지의 흡착상태를 관찰한 결과, 시편은 작은 수지의 손실을 보이고 있음을 알 수 있었다. Fig. 6은 적층각 $[45_2/-45_2]_{2S}$ 으로 제작된 시편 단면의 금속현미경 사진을 보여주고 있으며, (a)는 50배율의 사진으로써 각 층이 동일 적층각으로 2플라이씩 8개층이 중첩면에 대해 대칭 적층되어 있음

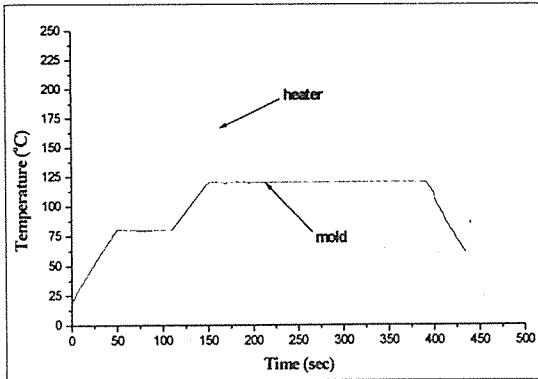


Fig. 4. Mold temperature corresponding to heat source

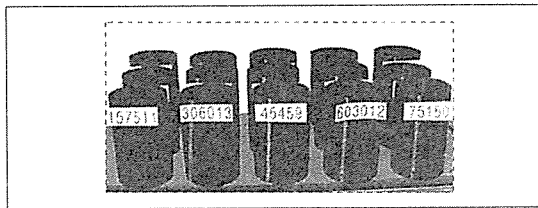
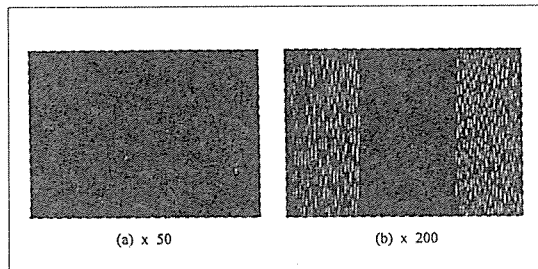


Fig. 5. Photograph of manufactured specimens

Fig. 6. Metaloscope photograph of graphite/epoxy specimen with the stacking sequence of $[45_2/-45_2]_{2s}$

을 볼 수 있다. (b)는 200배율의 사진으로써 적층각에서 30도 벗어난 파단면을 나타낸 것으로써 한쪽 방향의 섬유는 타원형 단면을 보여주고 있다. Fig. 7은 섬유

와 기지재간의 접착상태를 확인하기 위해 투과전자현미경(TEM)에 의해 촬영된 SA75A 원통셀에 대한 미소조직사진이다. 사진에서 관찰되는 바와 같이 섬유 사이에 판상의 기지재는 성형공정 중 수지의 화학반응이 양호하게 이루어진 계면접착 상태를 나타내고 있음을 보여주고 있다.

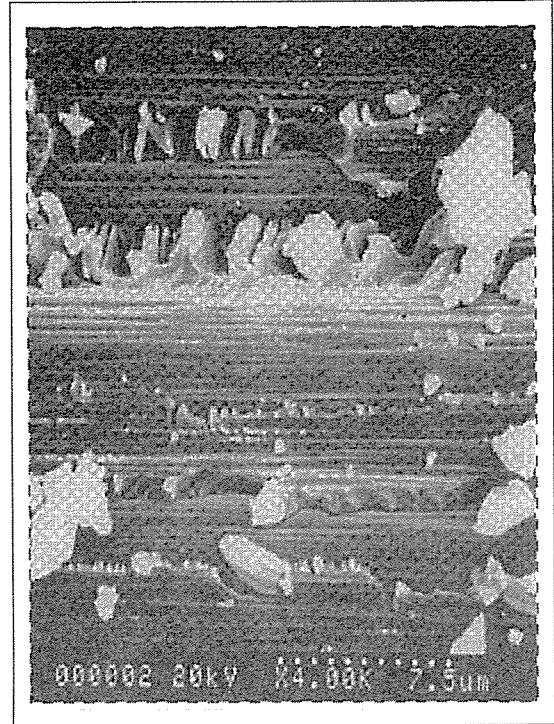
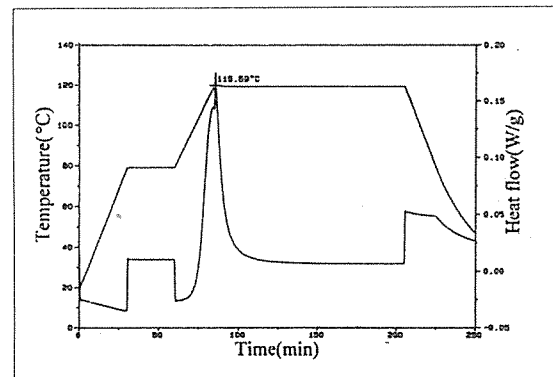
Fig. 7. TEM photograph of graphite/epoxy specimen with the stacking sequence of $[75_2/-75_2]_{2s}$ 

Fig. 8. Curing curve of DSC for prepreg

4. 고 찰

복합재 원통셀의 성형은 성형 조건이 다양하고 복잡하며, 성형 조건에 따라 제품 특성에 민감하게 영향을 준다. 본 복합재 원통셀 성형법은 일종의 미니 클레이

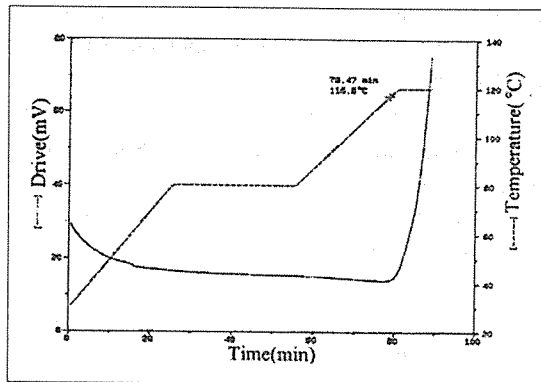


Fig. 9. Curing curve of DMA for prepreg

브 성형법으로써 성형에 이용한 경화 사이클은 프리프레그 제조회사에서 제시된 것을 이용하였으며, 설계 제작된 금형을 이용하여 29개의 시편을 제작하였다. 성형된 시편을 적층 소재와 비교하여 볼 때, 사교 적층 원통셀은 적층각에 따라 길이와 두께에 차이가 있었고, 적층각이 45° 이상으로 커지면 급격하게 길이 방향 수축량이 증가하면서 셀의 길이가 짧아지며 두께는 증가하였다. 반면에 직교 적층 원통셀은 두께와 길이의 변화가 매우 적게 발생되었지만 셀의 길이방향에 대해 원주방향으로 프리프레그의 일정각도 미끄러짐 현상이 발생하였다. 미끄러짐 양은 적층각 45° 부근에서 최소가 됨을 볼 수 있었다. 성형 공정중 복합재료는 수지의 화학반응에 따른 수축, 수지와 섬유재의 열팽창계수의 차이, 적층각도가 다른 프리프레그 사이의 미끄러짐, 경화조건 등 열적·기계적 특성의 차이로 인하여 치수변화가 발생된 것으로 생각된다. 본 제작 방법중 사교적층인 $[75_2/-75_2]_{2S}$ 원통셀의 성형은 길이 방향의 중앙 부분에서 금형과 접촉되지 않은 브리징(bridging)현상이 발생되었다. 이는 성형중 적층 소재가 길이 방향으로 수축량이 크고, 섬유방향으로 수지의 길이 방향 유동이 억제되어 가스 분출이 어렵기 때문이라고 판단된다. 제조회사에서 제시된 경화 사이클의 적합성을 검증하기 위하여 프리프레그 수지의 특성 변화를 측정하였다. 수지의 특성 변화 측정은 경화 정도를 파악하기 위해 경화 과정에서 발열량을 측정하여 온도 변화에 따라 재료가 반응하여 열을 흡수 또는 방출하는 양과 정도를 파악하는 DSC(Differential Scanning Calorimeter) 시험분석을 하였다. Fig. 8은 DSC 시험결과를 나타낸 것으로 유리 온도에 따른 경화도를 보면 2단계 승온 구간인 80-120°C 사이에서 발열량이

급격히 증가함을 볼 수 있다. 즉, 이 구간에서 경화가 매우 활발하게 이루어지고 있음을 알 수 있다. 한편, 재료의 온도변화에 따라 강성과 점도 및 감쇠(loss factor)에 관련되는 특성을 찾기 위한 실험으로 재료에 온도 변화를 주면서 진동을 가해 진폭과 공진 주파수를 찾아 특성을 규명하는 DMA(Dynamic Mechanical Analysis) 시험을 하였으며 그 결과를 Fig. 9에서 보여주고 있다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 초기 구간에서는 수지의 점도가 계속 저하되다가 2단계 평행 온도인 120°C 바로 직전에 경화 반응이 매우 활발하게 진행되면서 강성이 높아짐을 알 수 있다. DSC 및 DMA시험을 통하여 분석한 결과, 소재는 2단계 승온 상태에서 경화가 이루어짐을 알 수 있었다. 브리징 현상이 발생한 사교적층 $[75_2/-75_2]_{2S}$ 의 시편 제작은 경화 사이클에서 120°C 초기압력을 $5 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$ 로 낮추어 20분간 유지시킨 후, 다시 초기압력 $7 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$ 가 가해지도록 성형하였다. 본 성형방법에 의해서 75°이상의 큰 사교적층 원통셀의 성형은 경화 과정중 압력 조건의 변화를 주면 성형이 가능할 것으로 판단되었다. 또한 본 성형법으로 제작된 복합재 원통셀의 경우는 적층각의 변화에 따라 셀이 원주방향으로 수축하려는 후프 잔류 응력(hoop residual stress)가 발생할 수 있음을 확인하였다. 예로써 $[75_2/-75_2]_{2S}$ 로 적층된 원통셀 시편을 길이 방향으로 폭 15mm 링 형상으로 잘라서 원주상의 한 부분을 절단했을 때, 자른 부분이 약 10mm 겹쳐지는 인장 잔류 응력이 존재함을 확인하였다. 이는 성형과정 중 적층각 변화에 따른 열팽창계수 및 수지유동의 차이 때문이라고 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 임의의 적층각을 갖는 복합재 원통셀 제작이 가능한 금형 설계 제작 방법을 제시하였으며, 제시된 금형으로 사교적층 원통셀과 직교적층 원통셀을 제작하였다. 본 성형법으로 제작된 시편 특성을 요약하면 다음과 같다.

(1) 다양한 적층순서를 갖는 균질하고 양호한 시편을 손쉽게 제작할 수 있는 성형법을 제시하였고, 더불어 제작된 금형으로 실험실에서 섬유 강화 복합재 원통셀을 제작할 수 있는 기술을 정립하였다.

(2) 고가 장비인 autoclave에서 이루어지는 제반 과정들이 모두 수행되므로 비교적 양호한 시편을 간단하고 저렴하게 제작할 수 있었다.

(3) 제작된 시편을 검사한 결과 성형 과정에서 적층각 변화에 따라 사교적층 원통셀은 적층각이 증가할수록 길이 방향 수축으로 인해 길이가 짧아지면서 두께가 증가하고, 직교 적층원통셀은 미끄러짐 현상이 발생되며 적층각 45°에서 최소가 됨을 확인하였다. 또한 시편의 적층각에 따라 후프방향으로 인장 잔류 응력이 존재함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Choi, S.B. Magolan, and A., "An Experimental and Theoretical Investigation of the Static and Elastodynamic Responses of An Industrial Robotic Manipulator Featuring a Graphite/Epoxy Composite Arm, Michigan State Univ., 89 AMR-8B-5, pp.1~11.
2. 정광섭, 김기수, 이대길, 박윤근, "탄소섬유 에폭시 복합재료를 이용한 Anthropomorphic형 로봇 팔의 개발", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(I), 1992, pp.542~547.
3. 김현수, 조치룡, 전의진, "복합재료 Robot Arm개발", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 1991, pp.267~270.
4. Lee, D.G., Kim, K.S. and Kwak, Y.K., "Manufacturing of a Scara Type Direct-Drive Robot with Graphite Fiber Epoxy Composite Material", Robotica 9, 1991, pp.219~229.
5. Kim, B.S. and Terry F. Lehnhoff, "Polymeric Composite Tube Fabrication", Journal of Engineering Materials and technology, Vol.117, April 1995, pp.236~238.
6. 정정화, 최홍섭, 엄용성, 남재도, "복합재료 성형 구조물에 대한 치공구의 영향", 한국복합재료학회 추계학술대회 논문집, 1994, pp.95~99.
7. Gabrys, C.W. and Bakis, C.E., "Fabrication of Thick Filament Wound Carbon Epoxy Rings Using in-situ curing:Manufacturing and Quality" Proceedings of the American Society for Composites, Ninth Technical Conference, 1994, pp.1090~1097.
8. 한병기, "비틀림을 받는 복합재 원통셀의 해석", 홍익대학교 논문집 제22집, 1990, pp.407~ 421.
9. Simites, G. J. and Han, B.K., "Analysis of Anisotropic Laminated Cylindrical Shells Subjected to Destabilizing Load(part 1: Theory and Solution Procedure)", J. of Composite Structure, Vol.19, 1991, pp.183~205.
10. Han, B.K. and Simites, G. J., "Analysis of Anisotropic Laminated Cylindrical Shells Subjected to Destabilizing Load(part 2: Numerical Results)", J. of Composite Structure, Vol.19, 1991, pp.183~205.
11. 한병기, 유택인, 이성희, 이재원, "복합재 원통셀의 제작 및 진동해석", 대한기계학회 추계학술대회논문집(I), 1995, pp.362~366.
12. 유택인, "복합재 원통셀 제작기술 및 안정성평가에 관한 연구," 홍익대학교 대학원 박사학위 논문, 1996.