

슬릿 패턴 형상에 따른 Carbon/Epoxy 프리프레그 성형물의 굽힘 강도 특성 및 슬릿 변형량 분석

이성균^{1,2} · 원시태¹ · 윤길상² · 김용대² · 김동언[†]

서울과학기술대학교 대학원 제품설계금형공학과¹

한국생산기술연구원 금형기술그룹^{2,†}

A study on slit opening and flexural strength of carbon/epoxy prepregs with slit patterns

Sung-Gyun Lee^{1,2} · Si-Tae Won¹ · Gil-Sang Yoon² · Yong-Dae Kim² · Dong-Earn Kim[†]

Department of Product Design & Manufacturing Engineering, Seoul National University of Science&Technology¹

Korea Institute of Industrial Technology, Molds&Dies Technology R&D Group^{2,†}

(Received May 10, 2016 / Revised May 30, 2016 / Accepted June 03, 2016)

Abstract: Designed patterns of slit are introduced to the uni-directional (UD) prepreg in order to enhance the formability of the carbon/epoxy composites without wrinkling and laddering. Three different types of the slit alignment along the thickness direction are applied to analyse the deformation behavior during the compression moulding process of laminates. Degrees of the slit open and the mechanical strength are evaluated based on the level of the compaction pressure in the course of forming process. Results have shown that the mechanical strength of laminates having slits could attain at least 80% of the conventional ones without slits. However, further studies are required to identify the direct relevance of the slit alignment in laminate to the mechanical properties.

Key Words: CFRP, Compression Molding, Flexural Strength, Prepreg, Slit Pattern

1. 서 론

최근 지구온난화로 인한 탄소배출량 규제가 증가함에 따라 자동차의 이산화탄소 배출량 규제정책은 더욱 강화되는 추세이다. 이에 대다수의 차량 제작사들은 이산화탄소 배출량 저감을 위해 다양한 노력을 기울이고 있다¹⁾. 차량의 무게는 연비 및 탄소 배출량에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 중요한 인자로 차량 경량화를 위한 다양한 대책이 제시되고 있다.²⁾ 이를 위해 무게가 가볍고 비강도, 비탄성율이 높으며 기타 기계물성이 우수한 섬유강화 플라스틱의 일종인 탄소섬유 복합소재(carbon fiber reinforced plastic, CFRP)를 활용한 차량부품 개발이

꾸준히 이뤄지고 있는 추세이다¹⁻³⁾.

고기능 특성을 갖는 CFRP 부품은 강화 섬유에 수지가 함침되어 반경화 상태인 프리프레그 (prepreg)를 금형에 적층하고, 고온-고압으로 제어되는 용기에서 경화하는 오토클레이브 성형법이 일반적으로 사용된다. 기존 성형법의 낮은 생산성을 극복하기 위하여 금형 내부에 안착된 프리폼에 수지를 강제 주입하여 함침시키는 RTM(resin transfer molding) 성형법이 최근 시도되고 있다. 이러한 성형 공정으로 제작된 부품은 강화섬유가 연속적 배치를 이뤄 뛰어난 기계적 물성을 갖고, 부품 위치별 물성 균일도가 높아 우수한 기계구조재료의 조건을 갖는다. 그러나 연속성 섬유배치의 한계로 인해 3차원의 형상 변화가 심한 부품에 적용하기 위해서는 긴 공정시간으로 인해 높은 공정비용이 요구된다. 복잡형상을 갖는 부품의 성형을 위한 공정으로

¹ 서울과학기술대학교 대학원 제품설계금형공학과

[†] 교신저자 : 한국생산기술연구원 금형기술그룹

E-mail : kdu0517@kitech.re.kr

SMC(sheet molding compound)가 일반적으로 사용된다. SMC 공정은 약 1인치 정도로 절단된 무작위 배치 강화 섬유에 수지가 함침된 반경화성 SMC 시트를 프레스 금형에 넣어 가열·가압하는 방법으로 부품성형이 이뤄진다⁴⁾. 성형공정에서 레진 및 강화섬유의 유동이 발생하여 복잡 형상의 성형이 용이하지만 강화섬유의 분포 및 배향 편차가 존재하여 부품 위치별 물성편차 등의 불량 발생한다⁵⁾.

본 논문에서는 위에서 설명된 두 공정의 단점을 개선하기 위해서 연속 섬유로 이뤄진 프리프레그 시트 일부를 절개하여 압축공정에 적합하도록 성형성이 확보된 준등방 적층구조의 새로운 형태의 프리프레그를 고안하였다. 그러나 재료 물성 측면에서 슬릿은 하나의 결함으로 제품 작동조건에서 파손 발생 개시지점이 되어 성형품의 기계적 물성을 저하시킨다. 성형성 향상과 물성 감소의 상관관계를 분석하기 위하여 프리프레그의 적층 시 적용되는 슬릿 형상 조건에 따라 달라지는 기계적 물성 수준을 관찰하고 슬릿 패턴 및 성형량에 따라 복합소재 성형품의 물성변화를 관찰하였다.

2. 압력 및 온도조건 결정 실험

일반 프리프레그 소재를 기반으로 고온의 금형 내부에서 일정한 표면품질과 강화섬유 부피분율이 확보된 복합소재 부품을 성형하기 위해서 적합한 압력 및 온도와 관련된 주요 경화조건을 실험을 통하여 결정하였다.

2.1. 상온압밀 실험 기반 압력조건 설정

복합소재가 압축됨에 따라 섬유의 부피를 전체 부피로 나눈 비인 강화섬유 부피분율은 증가하게 된다. 본 값이 높아지면 일반적으로 성형품의 물성은 증가하나, 일정 구간을 넘어서게 되면 오히려 물성이 감소하는 경향을 나타낸다⁶⁾. 따라서 압축성형간 성형물이 과하게 퍼지지 않는 압력조건 선정을 위해 상온에서 80x80mm로 절단된 프리프레그를 방향성이 나타나지 않도록 16ply로 적층 후 압축하였다. 또한 변위·하중곡선으로부터 섬유부피분율을 추정할 수 있는 추정 식을 적용하여 최적의 압력 선정을 위한 실험을 진행하였으며, 식은 다음과 같다.

식 (1)⁷⁾의 V_{f0} 는 소재 압축 전 섬유부피분율,

$$V_f = V_{f0} + (V_{f,max} - V_{f0}) \operatorname{Tanh}^n \left(\frac{P}{P^{m_{max}}} \right) \quad (1)$$

$V_{f,max}$ 는 최대 부피분율로 소재회사로부터 제공받은 42%, 65%의 값을 사용하였다. m, n 은 0-1사이의 값을 갖는 조정계수이다.

소재의 압축·하중 그래프 및 식 (1)을 통해 이를 환산한 실험결과를 Fig. 1과 같이 나타냈다. 하중·변위 그래프는 소재가 압축됨에 따라 강화섬유 부피분율의 변화가 발생하며 특정 압축량 이상에서 기울기가 크게 증가하는 경향을 나타냈다. 상기 그래프로부터 적정량의 변형모드를 발생시킬 수 있고 Fiber spreading이 발생하지 않는 수준의 150Kpa의 압력 범위를 선정하여 이후 실험에 반영하였다.

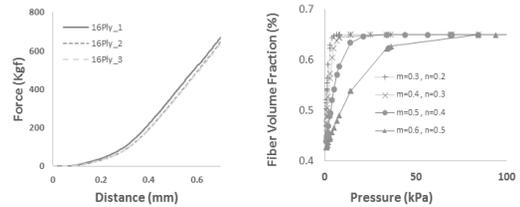


Fig. 1 Curve of Compression test for obtain a Fiber Volume Fraction

2.2. DSC 기반 경화온도 및 시간 설정

시차주사열량계(differential scanning analysis, DSC)는 시료와 기준물질의 열량 변화 차이를 측정하는 장치로, 열경화성 수지의 경화 중 발생하는 열량을 측정하기 위해 활용되는 기기이다. 본 기기를 활용하여 정온상태가 유지되는 금형 내부에서 프리프레그 소재가 형상화 및 고품위 표면을 위한 충분한 유동성이 확보되는지 검증하고, 이를 기반으로 적합한 경화온도 및 성형시간을 결정하였다.

미경화 프리프레그 샘플을 140, 150℃ 로 급속가열 후 유지하는 전 과정에서 발생하는 열량을 DSC 등온주사 과정을 통해 확인하고, 실제 가열된 금형으로 성형할 때의 소재 내·외부 온도 측정을 위해 Fig. 2와 같이 48ply로 적층된 소재 내부에 온도센서를 삽입하여 실시간으로 온도를 측정하였다. 또한, 미경화 프리프레그를 10℃, 20℃/min 으로 250℃ 까지 가열하는 과정에서의 열량변화를 동적주사 과정을 통해 출력된 열량을 기반으로 성형품의 경화도

를 확인하였다. 동적주사 결과 그래프로부터 열량을 통해 경화율(degree of cure)을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{1}{H_T} \int_0^t \left(\frac{dq}{dt} \right) dt \quad (2)$$

여기서 α 는 경화율, H_T 는 DSC로부터 계산된 미경화 시료의 총 반응열을 의미한다. 같은 방법으로 각 150°C/1,5,10min와 190°C/min의 조건으로 성형이 완료된 성형물로부터 채취한 샘플의 열량을 측정하여 해당 값을 시간으로 적분하면 측정 샘플의 경화율을 알 수 있다. 본 실험에서는 상기 식으로 계산된 경화율을 바탕으로 실험 온도를 결정하였다.

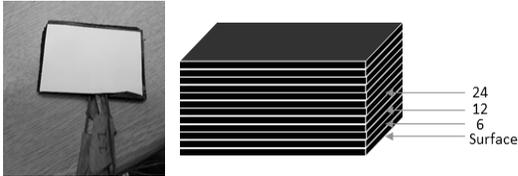


Fig. 2 Prepreg that inserted a thermocouple in plies

등온주사 및 온도측정 실험 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 소재의 급속가열이 완료된 목표온도 도달시점 이후부터 소재 내 함침된 에폭시가 경화를 위한 발열반응을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 소재는 내측과 외측이 모두 고르게 가열되었다. 이로부터 급형으로 인한 가열이 시작된 후 30초의 지연시간이 존재하여 경화반응 이전에 부품형상으로 변형이 가능함을 확인하였다. 경화반응 초기에 관찰되는 흡열반응은 DSC 측정에서 초기 급속 승온과정 중 나타나는 왜곡현상으로 본 실험에는 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다⁸⁾.

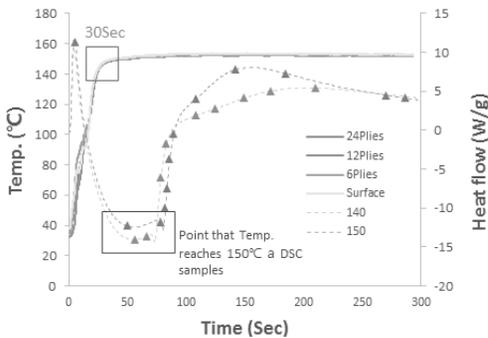


Fig. 3 Curve of temperature measurement & Isothermal DSC scanning

동적주사 실험 결과로부터 150°C에서 5분 이상 경화된 시편의 경화율은 약 98% 수준이었으며, 150°C에서 10분간 경화된 샘플은 100%의 경화율을 나타내었다. 또한, 190°C로 10분간 가열된 시편과 150°C로 10분간 가열된 시편의 반응시 발생한 열량의 차이가 없는 것으로 보아 150°C의 성형온도로 완전 경화가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

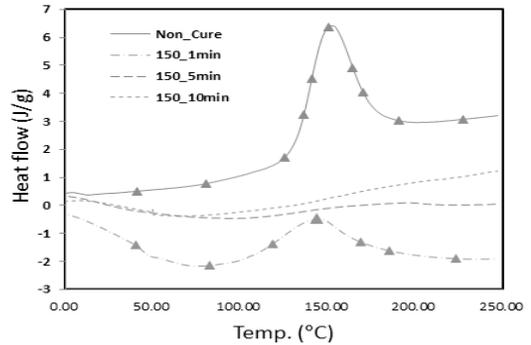


Fig. 4 Curve of dynamic DSC scanning

Table 1 Degree of cure of Cured&Non-Cured Carbon/Epoxy prepreg sample

Condition	Heat-Up rate (°C/min)	Degree of cure (%)
Non cure	10	100 (Base)
	20	
150°C / 1min	10	68.50
	20	71.93
150°C / 5min	10	98.36
	20	98.30
150°C / 10min	10	100
	20	100
190°C / 10min	10	100
	20	100

3. 슬릿 오픈량 측정 및 3점 굽힘시험

3.1. 성형조건

슬릿이 가해진 프리프레그로 제작된 성형물의 슬릿 열림 정도 및 굽힘강도 측정을 위해 가열이 가능한 프레스를 통해 평판형 제품을 성형하였다. 슬릿 패턴의 종류는 Fig. 5와 같으며, 각 슬릿은 5mm 길이로 절개되었고 패턴 간 간격은 5mm로 동일간격을 갖도록 배치하였다. 패턴은 적층 순서에 따라 적

층 후 형상이 달라지도록 구성하였다. 프리프레그 크기 및 적층각도는 압축 금형의 크기와 섬유 이방성을 고려하여 80x80mm, [45, 0 - 45, 90]_{2s*8} (48ply)로 선정하여 이방성을 나타내지 않도록 적층하였으며, 초기두께는 2~3mm로 laminate 내부 UD의 눌림 정도에 따라 다양하게 나타났다. 또한, 성형 압력 및 온도, 가열시간은 상기 실험을 통해 결정된 150Kpa, 150°C/10min로 성형하였다.

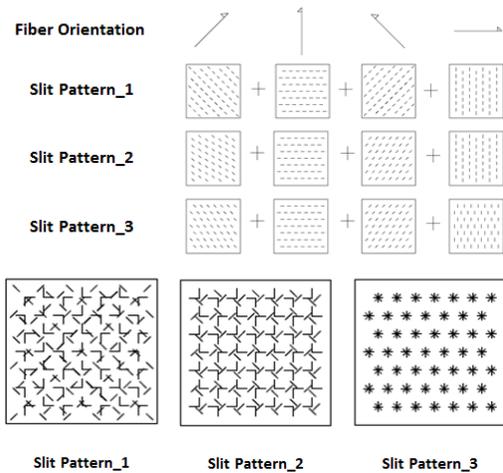


Fig. 5 Schematic diagram of laminate slit patterns type.

성형을 위해 단순 평판압축성형을 하게 될 경우 온도상승 중 에폭시의 점도가 감소하는 시점에서 에폭시가 과하게 흘러나오고 강화섬유 간격이 벌어지는 현상이 발생할 수 있기 때문에, 적층된 프리프레그를 프레임에 넣어 성형할 수 있도록 두께 1.5t의 정사각형 금속 프레임을 제작하였다. 또한 실험 과정에서 상기 프레임의 크기를 80, 85, 90mm로 다르게 적용하여 프레임의 크기 증가에 따라 에폭시가 소재 외부로 유동이 가능하도록 하여 섬유부피분을 증가에 의한 영향력을 함께 관찰 할 수 있도록 실험을 구성하였다.

3.2. 슬릿 오픈량 측정 결과

성형이 완료된 판재형 성형물의 외관을 전자현미경을 통해 40 배율로 측정된 결과를 하기 사진 및 그래프에 나타내었다. 슬릿을 절개한 부분에서 프리프레그가 늘어나며 Fig. 6과 같이 슬릿이 열린 것을 확인할 수 있었다. 그 값을 측정하여 평균값을 낸 결과를 Fig. 7 및 Fig. 8 에 나타내었으

며, 프레임에 크기가 증가함에 따라 슬릿 오픈량이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 슬릿 패턴별 오픈량의 차이는 85mm에서 Slit 1이 Slit 2, 3보다 지점별로 크게 나타났으며, 90mm에서는 그 차이가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 성형 과정에서 프레임을 변위제어가 아닌 압력제어로 제어함에 따라, 소재 가압 시 프레임의 여유 공간으로 섬유가 이동하지 않고 에폭시의 유동만이 발생하여 발생한 결과로 판단된다.

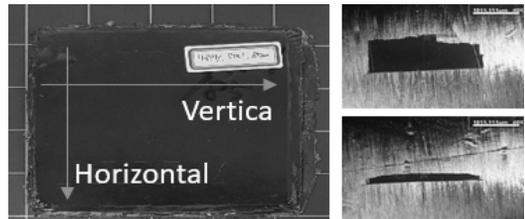


Fig. 6 Cured flat laminate & slit opening distance that cured flat laminate

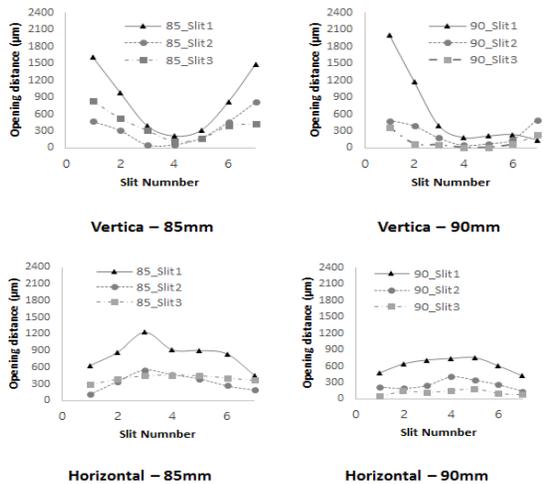


Fig. 7 Curve of slit opening distance in each case

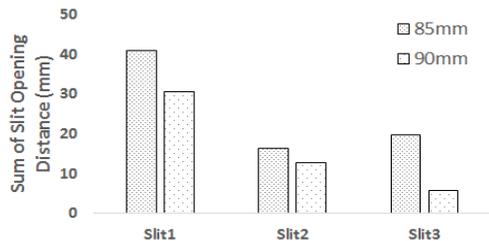


Fig. 8 Graph of total slit opening distance in each case

3.3. 굽힘강도 측정 결과

굽힘강도의 측정을 위해 상기 실험에서 사용한 성형물을 워터젯 가공으로 절단하였다. 3점 굽힘시험은 KS M ISO 14130 규격에 맞춰 수행되었으며, 시험편의 크기 및 관련정보를 Table 2에 도시하였다⁹⁾. 측정은 케이스별로 총 10회씩 반복하였으며, 시험 결과 나온 커브의 최대과단 하중은 단순 및 다층전단이 발생하는 경우 적용할 수 있는 전단강도 계산식을 적용하여 계산하였다.

Table 2 Parameters information of test & specimen size

thickness (mm)	length (L, mm)	Span (l, mm)	width (w, mm)	Head Speed (mm/min)
h (2~3)	10h	5h	5h	1

굽힘강도 측정 결과는 Fig. 9과 같다. 프레임의 크기 증가에 따라 성형물의 굽힘강도는 점차 증가하는 경향을 보였으며, 이는 프레임의 크기 증가로 인해 에폭시가 여유공간으로 유동하며 섬유부피분율이 증가해 나타난 결과로 예측된다. 또한, 슬릿 패턴별 굽힘강도는 슬릿이 없는 일반 시편 대비 약 80~90% 수준 내외로 분포하며 큰 차이를 나타내지 않음을 확인할 수 있었다.

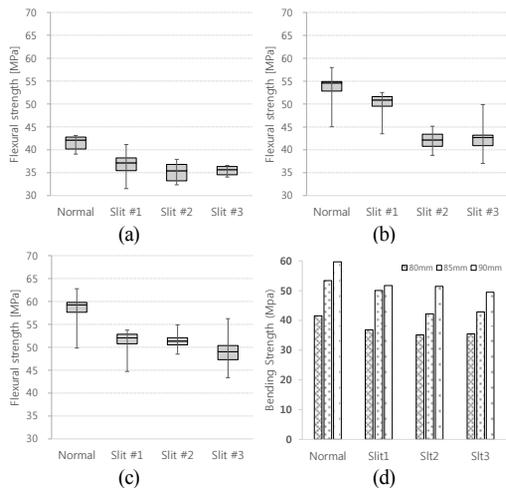


Fig. 9 Flexural strength based on the pattern of slits and the size of frame. (a) 80mm frame, (b) 85mm frame, (c) 90mm frame, (d) average flexural strength of each laminates

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 탄소섬유 복합소재 프리프레그의 성형성 증가를 위해 다양한 형태의 슬릿 패턴을 고안하였으며, 해당 시편의 이방성을 최소화하기 위해 준 등방성 적층 패턴을 적용하였다. 상기 프리프레그의 성형조건 결정을 위해 상온압밀실험 및 DSC측정을 진행하였으며, 결정된 성형조건에 따라 압축성형을 수행하였다. 제작된 시편의 Slit opening 수준을 관찰하고, 시편을 절삭하여 3점굽힘실험 후 굽힘강도 비교를 수행하여 슬릿 패턴이 굽힘강도에 미치는 영향력과 패턴 별 강도변화 수준을 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 정온으로 가열된 금형을 통한 프리프레그 평판압축성형 수행 시, 두께 2~3t 수준의 소재는 내-외측 모두 고르게 가열이 가능하였다. 이때, 금형으로 소재가 유입된 이후 기지재인 에폭시의 점도 저하로 인한 변형구간이 존재하므로 경화 전 압축으로 인한 변형이 가능하다.
- 2) 슬릿이 적용된 프리프레그 성형 시 슬릿 오픈이 발생하며, 슬릿이 오픈된 수준은 지점별로 일부 차이가 존재한다.
- 3) 슬릿이 가해지지 않은 시편 대비 슬릿형 시편의 강도는 약 80~90%의 높은 수준으로 관찰되었으며, 이는 압축성형 중 강화섬유 부피분율 증가에 따른 물성향상으로 판단된다.
- 4) 슬릿 패턴 별 성형물의 굽힘강도는 큰 차이를 나타내지 않았으며, 외관 상 성형물의 변형량 수준 차이 또한 크지 않았다.

상기 결과를 기반으로 슬릿이 가해진 프리프레그의 압축 성형으로 제작된 성형물은 요구 강도를 충족시킬 수 있는 수준으로 제작이 가능함을 확인하였다. 적층패턴 변화에 따른 강도변화가 크지 않다는 결론 도출이 가능했다. 그러나 본 연구에서 관찰된 프레임 크기 변화에 따른 성형품의 물성향상은 수치용해법 및 연소법을 기반으로 정확한 강화섬유 부피분율의 측정이 필요하다고 판단된다. 또한 슬릿 패턴이 준등방성 적층 구조체의 복잡형상 부품제

작의 성형성에 어떤 영향을 미치는가에 대한 분석을 위하여 Yu (2016)¹⁰⁾ 등이 수행한 프리프레그의 에릭슨 시험 및 Harrion (2013)¹¹⁾ 등이 수행한 원형 컵 성형실험을 수행할 예정이다.

후기

본 연구는 2016년도 한국생산기술연구원의 기관 주요사업(복합소재 고속성형 및 물성제어를 위한 금형 개발(1/1), 과제번호 ER160013)의 일환으로 진행된 연구임.

참고문헌

- 1) IRS Global, “자동차 경량화 관련 소재 및 부품 개발 동향과 국내외 참여업체 사업전략”, pp. 46-89, 2013.
- 2) J. Njuguna, “Lightweight Composite Structures in Transport”, Woodhead Publishing, 2016.
- 3) G. Davies, “Materials for Automobile Bodies”, Butterworth-Heinemann, 2012.
- 4) P. Feraboil, E. Peitso, T. Cleveland, “Notched behavior of prepreg-based discontinuous carbon fiber/epoxy system”, Composite Part A, vol.40, pp. 289-299, 2009.
- 5) J. Wulfsberg, A. Herrmann, G. Ziegmann, G. Lonsdorfer, N. Stob, M. Fette, “Combination of Carbon fibre sheet moulding compound and prepreg compression moulding in aerospace industry”, J. of Procedia Eng. , vol.81, pp. 1601-1607, 2014.
- 6) 전성식, 이대길, 김주학 “섬유부피분율에 따른 복합재료의 충격에너지 특성”, 대한기계학회 1998년도 춘계학술대회 논문집, pp. 78-83, 1998.
- 7) John J. Gangloff Jr., S. Sinha, Suresh G. Advani, “A model for tow impregnation and consolidation for partially impregnated thermoset prepreg”, Int. SAMPE Technical Conference, 2011.
- 8) 서안나, 이종현, “열기계적 분석법으로 측정된 레진 포블레이션의 경화 수축 특성”, Korean J. Met. Mater, Vol.50, No.9 , pp. 629-636, 2012.
- 9) 기술표준원, “KS M ISO 14130 : 섬유 강화 플라스틱 복합 재료 - 단봉법에 의한 겹보기 층간 전단 강도의 측정”, 2012.
- 10) Yu Uriya, Jun Yanggimoto, “Erichsen cupping test on thermosetting CFRP sheets”, Int. J. of Mater. Form, 2016.
- 11) P. Harrison, R.Gomes, N.Curado-Correia, “Press forming a 0/90 cross-ply advanced thermoplastic composite using the double-dome benchmark geometry”, Composite Part A, vol.54 pp. 56-69, 2013.