

열가소성 유리섬유/PP 복합재의 반구돔 열성형 평가 및 비직교 구성방정식을 이용한 FEM 수치해석

이원오[†]

Half-dome Thermo-forming Tests of Thermoplastic Glass Fiber/PP Composites and FEM Simulations Based on Non-orthogonal Constitutive Models

Wonoh Lee[†]

ABSTRACT: In this work, tensile and in-plane shear tests for thermoplastic glass fiber/polypropylene composites were performed at a thermo-forming temperature and their properties were characterized and mathematically expressed by using the non-orthogonal constitutive model. As for the thermo-forming test, half-dome experiments were carried out by varying the usage of a releasing agent and the weight of holders. As results, the optimum final shape having well-aligned symmetry and no wrinkle formation was obtained when the releasing agent was used, and it was found that the careful control of a holding force is crucial to manufacture the healthy product. Furthermore, FEM simulations based on the non-orthogonal model showed similar final shapes and tendency of wrinkle formation with experimental results, and confirmed that wrinkles increase with less holding force and higher punch force is required under high frictional condition.

초 록: 본 연구에서는 유리섬유/폴리프로필렌 기반의 열가소성 복합재의 열성형 시험 평가를 위해, 성형온도에서의 인장 및 면내 전단 물성 시험을 실시하였고, 이를 비직교 구성방정식을 이용하여 정량화 하였다. 이를 통해 실험값과 잘 일치하는 고온에서의 인장 및 전단 물성값을 수식화하여 얻을 수 있었다. 열성형 시험을 위해 반구돔 시험을 실시하였고, 이형제 사용 유무 및 홀더의 무게를 달리해가며 성형품의 최종형상을 비교하였다. 그 결과 이형제를 사용하면 성형품의 대칭성이 확보되고 주름 개선 효과에 유리하다는 것을 확인하였고, 적당한 힘의 홀딩력 제어가 필수적이라는 것을 알 수 있었다. 더 나아가 비직교 구성방정식이 고려된 열성형 수치해석을 실시하여 실험 결과와 유사한 양상을 확인할 수 있었고, 홀딩력이 낮을 수록 주름이 많아지고, 마찰력이 클수록 더 많은 편치력을 필요로 함을 확인하였다.

Key Words: 반구돔 시험(Half-dome test), 열성형(Thermo-forming), 열가소성 복합재료(Thermoplastic composites), 유한요소해석(FEM simulation), 비직교 구성방정식(Non-orthogonal constitutive equation)

1. 서 론

직물 복합재료는 소재의 무게 대비 뛰어난 강도 및 강성

을 가지기 때문에 충격 에너지 흡수용 헬멧이나, 비행기용 엔진 커버 및 로터 블레이드와 같은 우주 항공 분야 및 풍력 발전기 블레이드와 같은 에너지 분야에서 활발히 이

용되고 있다[1]. 뿐만 아니라 직물 복합재료의 면내전단변형에 의한 높은 성형성에 기인하여 복잡한 형상 및 대량 생산이 요구되는 자동차 분야에서의 배터리 트레이나 트렁크 바닥재 및 외판 등에 응용하고자 노력이 진행되고 있다[2]. 따라서 직물복합재료를 이용한 최종제품의 생산에 있어서 설계 사이클과 비용 감소를 도모하기 위해서는 직물 복합재료의 정확한 기계적 거동을 이해하고 이에 따른 정교한 구성방정식이 요구되며 이에 따른 정교한 성형 기술이 요구된다[3].

일반적인 열가소성 직물 복합재료는 연속 섬유의 다발로 이루어진 토우(Tow)를 직조하고 여기서 열가소성 수지를 함침하거나 교차 직조하여 만들어지고, 이를 이용한 대표적인 성형 방법은 직물복합재료 판재를 가열하여 연화시켜 여기에 외력을 가하는 열성형법(Thermo-forming)이 이용되고 있다[4]. 열성형법은 플라스틱 판재를 가열하여 연화시키고 여기에 외력을 가해 성형하는 방법으로 자동차 외판 같은 판재형 복합재료 부품 제작에 용이하다.

이러한 열성형 공정에서 직물 복합재료의 주된 변형 모드는 면내 전단 변형이다. 따라서 직물 복합재료의 면내 전단 변형의 정확한 이해가 선행되어야 최적의 성형 설계 조건을 찾을 수 있다. 직물 복합재료의 면내 전단 변형의 평가법으로는 주로 편향 인장 시험법(Bias-extension test)과 트렐리스 시험법(Trellis-frame test)이 사용되고 있다[5,6]. 편향 인장 시험법은 인장 방향에 대해 경사(Warp)와 위사(Weft)의 방향이 45도를 이루도록 한 직물 복합재료 사각 시편을 그립에 고정하여 힘과 변형 길이를 측정하는 방법으로 장비 설계의 이점 때문에 널리 이용되고 있다.

열성형 공정의 최적화와 설계를 위한 수치 해석 기법에 사용되는 보다 정교한 구성방정식이 요구되며, 이를 위해 직물복합재료의 정확한 기계적 거동의 이해와 모사가 필요하다[7]. 비록 단일 섬유 자체는 선형 인장 거동을 보이지만 성형 공정 동안 crimp의 interchange에 의해 직물복합재료는 비선형 거동을 보이게 된다. 전단 변형의 경우, shear locking 이후에는 yarn들간의 가로 수축 및 압축에 의한 큰 마찰력에 의해 전단 강도가 기하급수적으로 증가하게 된다.

이러한 비선형 거동을 나타내기 위해, 성형 공정에서의 섬유의 배향각의 변화를 모사할 수 있는 직물복합재료에 대한 비직교 구성방정식(Non-orthogonal constitutive equation)이 개발되었다[8,9]. 비직교 구성방정식 모델에서는 전단 거동에서 인장력 효과가 고려되어 있고, 비선형 전단 강성을 메조 스케일에서의 FEM 수치해석을 통해 그 정확도가 검증된 바 있다.

본 연구에서는 유리섬유/폴리프로필렌(Polypropylene, PP) 열가소성 복합재의 반구돔 열성형 시험을 수행하고, 이를 비직교 구성방정식 기반의 유한요소법(Finite element method, FEM)을 이용한 수치해석을 통해 서로 비교해보고자 한다. 고온 성형 조건에서 인장 및 전단 시험을 시행하여, 물성을 정

량화하고 이를 이용하여 수치해석을 실시하였다. 특히 열가소성 열성형에서 중요한 인자인 마찰 조건 및 홀딩력 조건을 달리하여 비교하였고, 이에 따른 열가소성 복합재의 열성형 공정 인자에 대해 분석하고자 한다.

2. 실험

2.1 사용 재료

본 연구에서 사용된 열가소성 복합재 프리프레그는 TEPEX사의 Dynalite 모델이며 Twill 2/2 형태로 유리섬유가 4장 적층되어 있는 구조이다. 열가소성 고분자 수지는 PP이며, 성형 온도는 약 200도이다. 사용한 재료의 사양과 단면 및 윗면 이미지를 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 물성 시험 조건

본 연구에서 사용된 유리섬유/PP 열가소성 프리프레그의 열성형 온도가 190~210도로 제조사에서 제공되었기 때문에, 여기서는 200도로 물성 평가 및 열성형 온도를 고정하여 연구를 진행하였다. 물성 평가 및 열성형 모두 환경 챔버를 이용하기 때문에 환경 챔버 내에서 시편의 온도가 균일하게 분포하여야 하고, 갑작스런 온도 상승에 대해 시편의 온도가 overshooting하지 않도록 하기 위하여, 100-150-180-200-215도 간격으로 환경 챔버의 온도를 상승시키면서 시편의 온도가 최종적으로 200도에 도달할 수 있도록 설정하였다. 또한 시편 전체적으로 고른 온도 분포를 위하여, 챔버 후방에서 들어오는 열유동이 직접적으로 시편에 분사되지 않도록 가이드 플레이트를 설치하여, 챔버 전체적으로 고른 열 유동이 형성되도록 하였다.

또한 인장 및 전단 시험 시 발생할 수 있는 그립부에서의 슬립을 최소화 하고자, 본 연구에서는 그립부의 길이를 70 mm로 설정하였고, 그립힘은 챔버의 온도 상승 시에는 20 bar, 물성 평가 시에는 40 bar로 변화를 주어 시험하였다. 또한 직물과 그립간의 마찰력을 증대하기 위해 시편의 그립부에 유리섬유/에폭시 복합재료로 만들어진 PCB 기판을 이용하여 2.0 mm 두께의 탭을 사용하였다. 이 탭에 sand paper

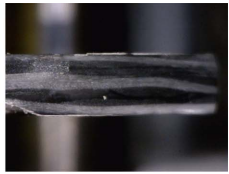
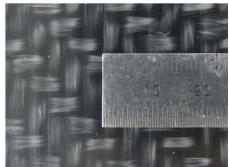
Reinforcement	Fibres	Roving glass	
	Fabric	Twill 2/2	
	Area weight	600 g/m ²	
	Yarn	1200 / 1200 tex	
	Weight rate	50 / 50 %	
Polymer	PP		
Laminate	Density	1.68 g/cm ³	
	Fibre content	47% vol.	
	Thickness	2 mm (0.5 × 4)	
Forming temperature	190 ~ 210 °C		

Fig. 1. Specification and photo images of glass fiber/PP prepregs

를 추가로 부착하여 sand paper 면이 시편면에 마주하도록 하여 물성 시험을 실시하였다.

2.3 인장 및 전단 물성 정량화

시편의 폭과 게이지 길이는 50 mm와 200 mm로 고정하였고, 인장 시 시편의 온도는 200도로 설정하였고, 인장 속도는 열성형 시의 편치 속도를 고려하여 10 mm/min으로 설정하였다. 또한 인장 시험 시 섬유 방향이 인장축과 평행하도록 배치하였고 4회 반복하여 실험하였다.

편향 인장 시험은 직물 복합재료의 비선형 순전단물성을 측정하는 데 사용된다. 직물을 인장 축에 대하여 45도의 방향을 갖도록 시험기에 장착하고 인장 시험을 수행하여 힘과 변위를 얻는다. 사용되는 시편의 크기는 넓은 범위의 순전단 거동 영역을 얻기 위하여 인장 길이 대 폭의 비가 2:1 이상이 되도록 하고 있다. 편향 인장 시험 동안 인장 속도는 일정하게 유지되고 힘과 변위를 측정하고, 계산을 통해 시편의 전단각 측정을 할 수 있다. 여기서는 폭-길이 비가 1:2인 시편을 기준으로 폭은 50 mm, 게이지 길이는 100 mm로 샘플을 준비하였고, 시험 시 시편의 온도는 200 도로 설정하였고, 편향 인장 속도는 열성형 시의 편치 속도를 고려하여 10 mm/min으로 고정하여 3회 실시하였다.

2.4 열성형 시험

Fig. 2에서 보는 바와 같이, 열성형 시험은 온도 환경이 제어 가능한 인장 시험기에서 진행된다. 위 아래 그림 지그에 맞물릴 수 있도록 편치와 압금형에 볼트처리하였고, 상단에는 편치가 고정되고, 하단에는 압금형이 고정되게 된다. 압금형에 상부에 200도로 제어된 열가소성 프리프레그 직물이 놓여지게 되고, 여기에 각기 다른 무게의 다이들을 두어 블랭크 홀딩력을 제어하게 된다. 각 파트 별로 살펴보면 반구형 편치는 길이 75 mm의 실린더형 구조와 인장기에 설치하는 여유 높이를 고려하여 전체 길이는 175 mm로 설

계되었고, 지름은 150 mm로 구성된다. 홀딩 다이는 SUS로 제작될 경우 10 및 15 kgf의 힘이 가해질 수 있도록 높이를 달리하여 디자인되었으며, 이에 따른 다양한 홀딩력에 따른 성형성 평가를 진행하였다. 압금형인 몰드는 곡률단차 7 mm를 주었고, 판재의 두께를 고려하여 150%의 클리어런스를 두었다. 부가적으로 이러한 금형을 인장치구에 고정하기 위해 커넥터를 사용할 예정이며, 유압 그림에 고정시킨 후 금형과 볼트로 결합되어 장비와 금형이 서로 고정되도록 한다. 금형 제작 결과, 금형 간의 간섭(편치와 홀더 간) 없이 안정적으로 편치의 이동이 가능하고, 측정 장비인 인스트론에도 큰 무리를 주지 않고 열성형 시험을 실시할 수 있다는 것을 확인하였다.

열성형 시험은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 아래와 같은 순서로 진행하였다. 우선 편치와 몰드 금형을 인스트론의 챔버내에 그림과 연결하여 장착한 뒤, 유리섬유/PP 열가소성 프리프레그를 350 × 350 mm의 크기로 자른 후 이를 몰드 금형에 위치시킨다. 이후 홀더 금형을 편치 금형과의 간섭이 없도록 프리프레그 위에 올려놓고, 편치를 서서히 내려 프리프레그와 살짝 닿도록 초기 위치를 잡아 zero setting을 한다. 이후 편치 금형을 80 mm 위로 올린 뒤 챔버를 닫고, 챔버의 온도를 215 도로 설정하고 가열한다. 이후 시편이 성형 온도인 200 도에 다 다르면, 편치를 10 mm/min의 속도로 내려 75 mm 하강시켜 열성형을 수행하고, 챔버의 온도를 내려 시편을 고화시킨 후 탈형한다.

2.5 열성형 FEM 수치해석

열성형 수치해석에 사용한 FEM 소프트웨어는 아바커스 6.12-1 Explicit이며, 계산의 편의를 위해 편치, 홀더 및 몰드는 Analytical Rigid Model을 사용하였다. 또한 열성형의 대칭성을 고려하여 프리프레그의 1/4 영역만 수치해석을 수행하였고, 이를 위해 x축과 y축을 따라 대칭 경계조건을 부과하였다. 사용된 절점의 수는 2025개, 요소 수는 1936개이며 S4R shell 요소를 사용하였고, 사용된 적분점 개수는 5개이다. 사용된 물성은 앞서 정량화된 인장 및 전단 강성식을 비직교 구성방정식에 적용하였고, 이를 사용자 서브루틴으로 구성하여 FEM 수치해석에 사용하였다.

성형 해석은 2단계로 이루어 지는데, 1단계에서는 먼저 홀더에 홀딩력을 부과하고, 2단계에서는 편치가 내려와 성형이 이루어진다. 열성형 속도인 10 mm/min를 기준으로 성형 시간은 450초, 홀딩 시간은 10초로 설정하였다. 해석에 사용된 물성은 실험에서 정량화된 값을 기준으로, 비직교 구성방정식을 이용하여 설정하였다. 또한 각 물성에 대해 앞서 실시한 열성형에서 고려했던 것과 마찬가지로 마찰 조건과, 홀딩력을 달리하여 수치해석을 수행하였다. 마찰 조건은 일반적인 프리프레그와 금형과의 마찰계수인 0.3과 이형제가 사용되어 마찰 계수를 낮춘 상황을 가정한 0.15에 대해서 계산을 수행하였다. 또한 홀딩력은 앞서 실험한

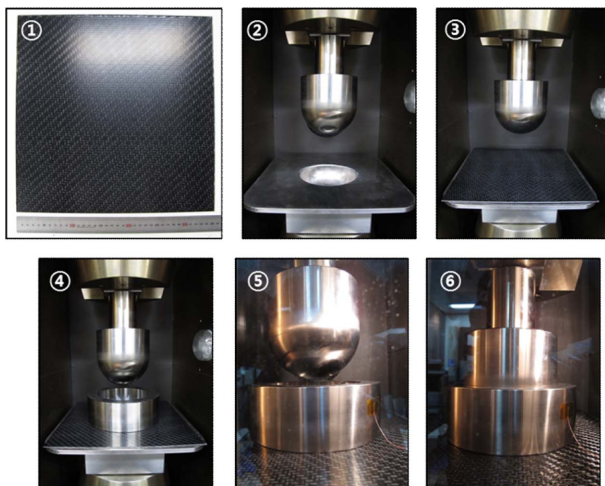


Fig. 2. Stages for thermoforming tests

같은 힘을 고려하여, 마찰계수가 0.3인 경우 10 kg의 홀더 무게를, 마찰계수가 0.15인 경우 10과 15 kg의 홀더 무게에 대해 수치해석을 수행하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 인장 및 전단 물성 정량화

인장 시험 결과 Fig. 3(a)와 같은 결과를 얻었으며, 4회의 실험 모두 재현성이 있게 인장 힘-변형률 곡선을 얻을 수 있었다. 비록 낮은 인장율에서 슬립이 발생해 초기 종료된 시험도 있으나, 열성형 거동에서는 강도가 아닌 강성값을 사용하게 되므로, 인장 강성 계산 시에 유효한 데이터로 사용될 수 있다. 실제 열성형에 사용되는 인장 물성값을 얻기 위해 위에서 사용된 동일한 시편의 크기에 대한 인장시험에 대해 FEM simulation을 실시하였다. 사용된 구조 방정식은 비직교 구성방정식이며, 수치 계산을 위해 사용자 코드인 UMAT을 작성하여 FEM 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 비선형 인장 물성값을 구하였다. 인장 시뮬레이션 결과 식 (1)과 같은 비선형 인장 물성을 얻었으며, 이 물성을 사용하여 수행한 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 Fig. 3(b)에 비교하였다. 해석 결과, 얻어진 인장 물성은 비선형성을 뚜렷하게 보이고 있으며, 이 거동이 제대로 표현되지 않는다면 열성형 해석 시 에러로 작용할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 또한 구해진 인장 물성값이 실험 결과의 에러 범위 안에서 잘 일치하고 있음을 나타내어 주고 있다.

전단 시험 결과 Fig. 4(a)와 같은 결과를 얻었으며, 3회의 실험 모두 재현성이 있는 힘-전단각 곡선을 얻을 수 있었다. 비록 낮은 전단각에서 초기 종료된 시험도 있으나, 열

성형 거동에서는 강도가 아닌 전단 강성값을 사용하게 되므로, 전단 물성 계산 시에 유효한 데이터로 사용될 수 있다. 또한 인장 시험과 달리 매우 낮은 힘이 작용하고 있다는 것을 알 수 있는데, 고분자 수지의 melting에 대해 섬유 변들 간의 마찰이 매우 작다는 것을 의미하며, 이는 향후 열성형 거동에서 매우 작은 힘으로도 쉽게 완제품을 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 실제 열성형에 사용되는 전단 물성값을 얻기 위해 위에서 사용된 동일한 시편의 크기에 대한 편향 인장시험에 대해 FEM simulation을 실시하였다. 인장 시험 시뮬레이션과 마찬가지로 사용된 구조 방정식은 비직교 구성방정식이며, 수치 계산을 위해 사용자 코드인 UMAT을 작성하여 FEM 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 비선형 전단 물성값을 구하였다. 편향 인장 시험 시뮬레이션에는 인장력도 동시에 걸리게 되므로, 앞 절에서 구한 인장 강성값을 함께 고려하여 수치해석을 수행하였다. 편향 인장 시뮬레이션 결과 식 (2)와 같은 비선형 면내 전단 물성을 얻었으며, 이 물성을 사용하여 수행한 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 Fig. 4(b)에 비교하였다. 해석 결과, 얻어진 전단 물성은 비선형성을 뚜렷하게 보이고 있으며, 인장 거동과 마찬가지로 이 거동이 제대로 표현되지 않는다면 열성형 해석 시 에러로 작용할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 또한 구해진 전단 물성값이 실험 결과의 에러 범위 안에서 잘 일치하고 있음을 나타내어 주고 있다.

$$E \text{ (MPa)} = 2,000 + 6.6 \times 10^5 \varepsilon - 2.6 \times 10^7 \varepsilon^2 + 3.1 \times 10^8 \varepsilon^3 \quad (1)$$

$$G \text{ (10}^{-2} \text{ MPa)} = 3.0 + \frac{6.8}{1 + \exp\left(\frac{\gamma - 20}{8.6}\right)} \quad (2)$$

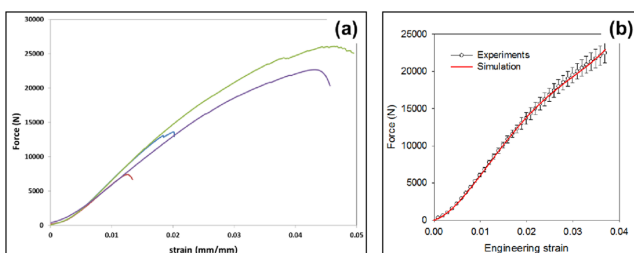


Fig. 3. (a) Experimental and (b) numerical results of tensile tests

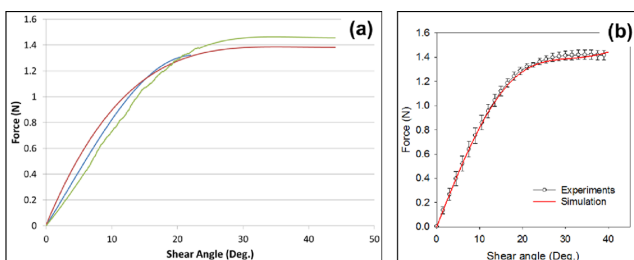


Fig. 4. (a) Experimental and (b) numerical results of bias-extension in-plane shear tests

3.2 열성형 실험 결과

열성형 시험에서는 다양한 공정 변수를 변화 시켜가면서 최종 성형품의 형상을 결정할 수 있다. 여기서는 금형과 프리프레그 간의 마찰 조건과 홀딩력에 따른 변화를 기준으로 실험을 진행하였다. 먼저 이형제의 사용 유무를 통해, 두 가지 다른 마찰 조건에 따른 열성형 실험의 결과를 비교하고자 하였다. 또한 각각의 마찰 조건에 대해 홀딩력을 달리하여 시험하였다. 우선 이형제를 사용한 경우에 대해 홀더 금형의 무게를 10, 15 kg으로 달리하여 98 N, 147 N으로 설정하여 시험을 수행하였다.

10 kg의 홀더에 대해 이형제를 사용하지 않은 높은 마찰 조건의 경우, Fig. 5(a)와 같이 비교적 건전한 형상의 성형품이 얻어지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Dome 형상의 벽면에 수지가 녹지 않은 피와 세로형 주름이 발생한 것을 알 수 있다. 이러한 피는 챔버를 이용한 성형시험에서는 피할 수 없는 것이지만 세로형 주름은 홀딩력과 금형간의 마찰을 제어하면 어느 정도 줄일 수 있다. 이형제를 사용한 Fig. 5(b)를 보면 세로형 주름이 많이 감소됨을 확인할 수 있다. 이

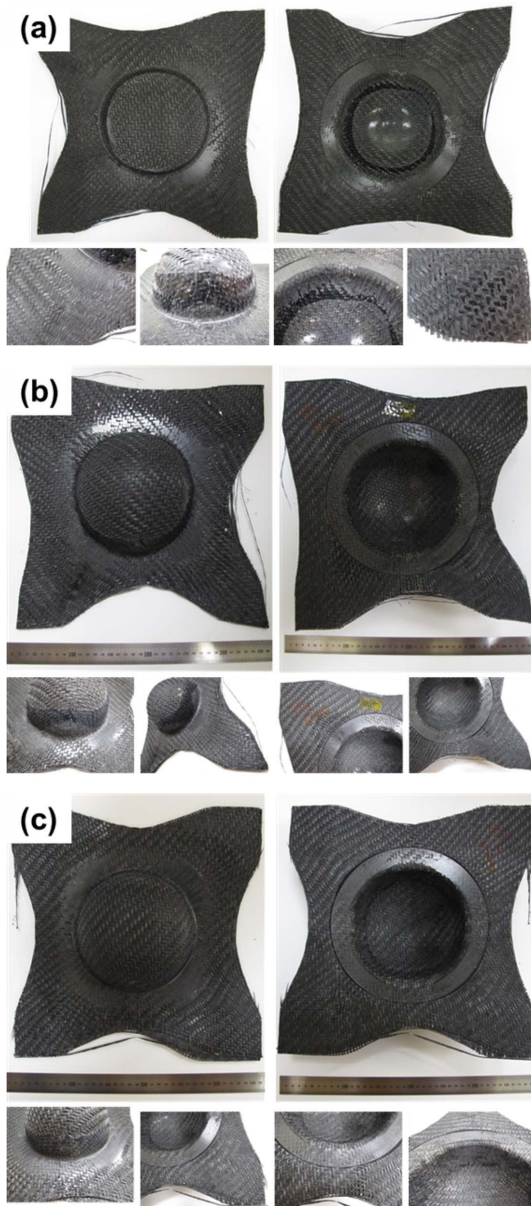


Fig. 5. Experimental results of half-dome thermoforming tests: (a) 10 kg holder and high friction, (b) 10 kg holder and low friction, and (c) 15 kg holder and low friction

는 마찰 조건을 감소시켜 draw-in을 원활하게 해주었기 때문으로 분석할 수 있다. 또한 이형제를 사용하고 홀더의 무게를 15 kg으로 증가시킨 경우(Fig. 5(c)), 가장 대칭성이 뚜렷한 건전한 형태의 성형품을 제조할 수 있으며, 벽면의 주름도 거의 사라진 것을 확인할 수 있다.

3.3 열성형 FEM 수치해석 결과

Fig. 6에 나타난 것처럼, 이형제를 사용하지 않은 경우, dome 형상이 시작되고 draw-in 양이 없는 부위에서 많은 전단 거동을 나타내고 있고, 전단각은 30도에 달했다. 낮은 홀더 무게인 10 kg의 경우, 두 가지 마찰 조건에서 모두 dome의 벽

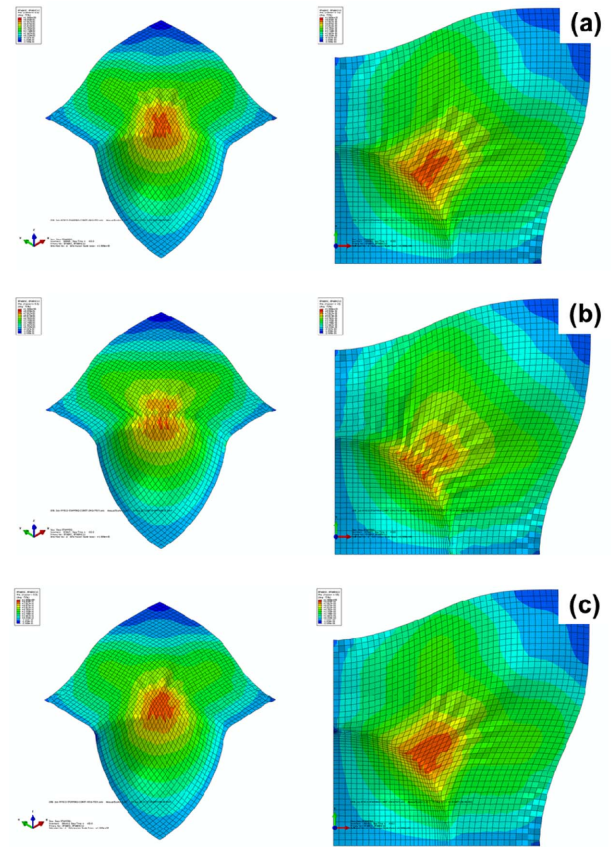


Fig. 6. Simulation results of half-dome thermoforming tests: (a) 10 kg holder and high friction, (b) 10 kg holder and low friction, and (c) 15 kg holder and low friction

면과 홀더 부에서 주름이 관찰되었으나, 낮은 마찰 조건에서 15 kg 홀더를 사용한 경우, 대부분의 주름이 사라져 최적화된 형상을 나타내었다.

3.4 펀치력 비교

Fig. 7에 각 성형시 발생하는 펀치에 걸리는 힘을 도시하였다. 홀더의 무게가 증가할수록, 즉 홀딩력이 커질수록 펀치에 걸리는 힘이 증가하게 되고, 이는 실제 공정 시 비용 상승을 의미한다. 전체적으로 500 N 이하의 힘에서 성형품이 제조됨을 알 수 있고, 이는 공정 변수로서 홀딩력의 제어를 통해 공정 단가를 조절할 수 있다는 의미이다. 더 나아가 너무 높은 홀딩력을 사용하게 되는 경우 높은 펀치력을 요구하게 되는 데 이 때 너무 큰 힘에 의해 프리프레그의 파손을 야기시킬 수도 있기 때문에 적절한 조절이 필요하게 된다.

또한 너무 낮은 홀딩력을 사용할 경우, 낮은 마찰과 낮은 홀딩력에 의해 열성형 시 정확한 지지를 받지 못해 발생할 수 있는 bifurcation에 의해 비대칭적이고, 주름이 다수 나타날 수 있으며, 프리프레그의 들뜸 현상이 발생할 수 있다. 따라서 너무 낮은 홀딩력은 열성형 제품 성형 시 피해

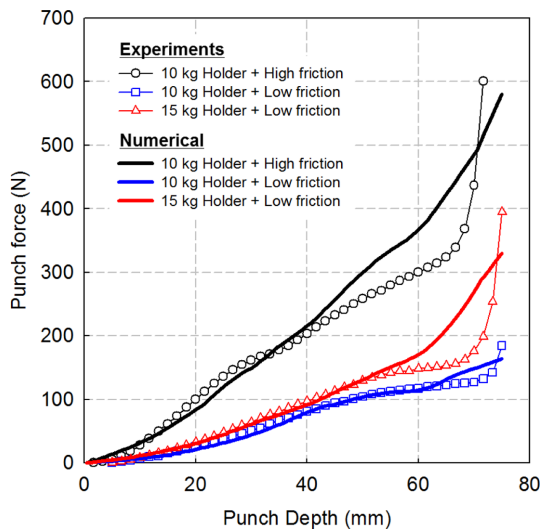


Fig. 7. Experimental and numerical results on punch history

야 할 조건임을 확인할 수 있다.

뿐만 아니라 이형제를 사용함에 따라 금형과 프리프레그 간의 마찰력의 감소를 통해 홀딩력을 줄이고, 이에 따른 펀치에 걸리는 힘을 줄이는 효과를 가져오며, draw-in을 원활하게 해주는 현상을 확인할 수 있다. 홀더의 무게가 15 kg 인 경우에도 200 N 이하의 힘에서도 매우 건전한 형태의 성형품을 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 챔버를 이용하여 열성형 공정을 구현하였기 때문에, 홀더 금형의 온도가 성형품의 melting 온도보다 15~20도 정도 낮을 수 밖에 없는 한계가 있다. 이 때문에, 성형품의 접촉 영역에서의 조기 고화 현상을 막기 어렵다는 문제가 있고, 홀더 금형 형상의 띠가 나타나게 된다. 그러나 이형제 사용을 통한 마찰 감소 및 홀딩력 최적화를 통해 성형품의 벽면에서 발생하는 주름 및 비대칭성이 나타나는 불량 현상을 최소화할 수 있었으며, 이러한 공정 변수 변화는 실제 열성형 공정 시 고려해야 하는 필수 인자임을 확인할 수 있었다.

수치 해석 결과에서도 동일한 마찰 상황에서 홀더의 무게가 증가할수록 펀치력은 증가하였고, 같은 무게에 대해 마찰계수가 클수록 펀치력은 더 크게 나타났다. 실험결과와 비교할 때, 전반적인 펀치력의 절대값은 유사하게 나타난 것으로 보아 비직교 구성방정식에 의한 수치해석 결과가 신뢰도가 있는 것으로 생각할 수 있다.

3.5 실험과 수치해석 결과 비교

위의 수치 해석 결과를 보면 실험 결과와 여러가지 면에서 다른 점을 보이고 있다. 이는 아래와 같은 점들로 해석이 가능하다. 우선 실제 열성형 시 발생했던 상대적으로 낮은 온도를 갖는 금형과의 접촉에 따른 프리프레그의 고화 현상에 따른 물성을 고려하지 않았기 때문에 오차가 발생한 것으로 보인다. 수치해석에 사용된 물성은 프리프레그

의 온도가 200 도인 경우에 대해 인장 시험과 전단 시험을 통해서 구한 것이므로, 이 보다 낮은 온도 이력을 갖는 실제 실험에서의 거동을 정확하게 모사하기가 어렵다. 200도 보다 낮은 온도에서는 인장 및 전단 강성값 모두 증가하게 되므로, 이를 정확히 표현하게 된다면 조금 더 정확한 거동을 나타낼 수 있으리라고 판단한다.

뿐만 아니라 현재 사용한 프리프레그는 4장이 적층된 형태로서 200 도의 성형온도에서 함침되어 있던 수지는 대부분 액화되어 적층된 플라이 간의 접합력이 매우 낮아지게 된다. 그러나 금형과 맞닿아 있는 플라이는 상대적으로 낮은 온도를 갖게 되므로 상대적으로 고화된 상태의 강한 저항력을 갖게 된다. 따라서 적층된 플라이 중 중앙에 있는 플라이들이 슬립될 확률이 커지므로, 이에 따른 열성형 거동이 불균일해 질 수 있다.

6. 결 론

열가소성 복합재 중간재로서 열성형 온도가 비교적 낮은 200도 급의 유리섬유/PP 기반의 복합재를 선정하였고, 프리프레그의 성형온도에서의 인장 및 면전단 물성 정량화를 위해 환경 챔버에서의 온도, 그립 등의 시험 조건을 확보하였고, 이를 바탕으로 열성형 속도인 10 mm/min를 기준으로 인장 시험과 전단 시험을 실시하였다. 시험 결과 인장 강성과 전단 강성값 모두 비선형성을 보였으며, 향후 열성형 시 비선형성이 필수적으로 고려되어야 할 요소임을 확인할 수 있었다. 또한 열성형 물성의 정량화를 위해 기 개발된 비직교 구성방정식을 바탕으로 인장 및 전단 시험에 대해 FEM 수치해석을 수행하였고, 이를 통해 실험값과 잘 일치하는 물성값을 수식화하여 얻을 수 있었다.

열성형 시험을 위해 온도 환경 제어가 가능한 인장 시험 기에서 반구돔 시험을 실시하였고, 이형제 사용 유무 및 홀더의 무게를 달리해가며 성형품의 최종형상을 비교하였다. 그 결과 이형제를 사용하면 성형품의 대칭성이 확보되고 주름 개선 효과에 유리하다는 것을 확인하였고, 적당한 힘의 홀딩력 제어가 필수적이라는 것을 알 수 있었다. 더 나아가 비직교 구성방정식이 고려된 열성형 수치해석을 실시하여 실험 결과와 유사한 양상을 확인할 수 있었고, 홀딩력이 낮을수록 주름이 많아지고, 마찰력이 클수록 더 많은 펀치력을 필요로 함을 확인하였다.

REFERENCES

1. Kong, H., Mouritz, A.P., and Paton, R., "Tensile Extension Properties and Deformation Mechanism of Multiaxial Non-crimp Fabrics," *Composite Structures*, Vol. 66, 2004, pp. 249-259.
2. Long, A.C., Wilks, C.E., and Rudd, C.D., "Experimental Characterisation of the Consolidation of a Commingled Glass/Poly-

- propylene Composite,” *Composites Science and Technology*, Vol. 61, 2001, pp. 1591-1603.
3. Lee, W., Byun, J.-H., and Cao, J., “Non-orthogonal Constitutive Equations for Woven Fabric Textile Composites with Conjoined Tension and Shear Behaviors,” *Proceedings of The Korean Society for Composite Materials 2008 Fall*, 2008, pp. 123-126.
 4. Yu, W.R., Zampaloni, M., Pourboghra, F., Chung, K., and Kang, T.J., “Sheet Hydroforming of Woven FRT Composites: Non-orthogonal Constitutive Equation Considering Shear Stiffness and Undulation of Woven Structure,” *Composite Structures*, Vol. 61, 2003, pp. 353-362.
 5. Harrison, P., Clifford, M.J., and Long, A.C., “Shear Characterization of Viscous Woven Textile Composites: A Comparison between Picture Frame and Bias Extension Experiments,” *Composites Science and Technology*, Vol. 64, 2004, pp. 1453-1465.
 6. Lee, W., Um, M.-K., Byun, J.-H., and Cao, J., “Characterization of In-plane Shear Behaviors of Woven Fabrics by Bias-extension and Trellis-frame Tests,” *The Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 23, 2010, pp. 8-14.
 7. Peng, X.Q., and Cao, J., “A Continuum Mechanics-based Non-orthogonal Constitutive Model for Woven Composite Fabrics,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 36, 2005, pp. 859-874.
 8. Lee, W., Cao, J., Badel, P., and Boisse, P., “Non-orthogonal Constitutive Model for Woven Composites Incorporating Tensile Effect on Shear Behavior,” *International Journal of Material Forming*, Vol. 1, 2008, pp. 891-894.
 9. Lee, W., and Cao, J., “Numerical Simulations on Double-dome Forming of Woven Composites Using the Coupled Non-orthogonal Constitutive Model,” *International Journal of Material Forming*, Vol. 2, 2009, pp. 145-148.