

열가소성 복합재료의 Deep-drawing시 재료거동의 미시적 관찰

Microscopic observation of the material behavior of thermoplastic composite in deep-drawing

정광진, 윤기호, 이중희
(전북대학교 자동차신기술연구소)

1. 서론

유리섬유가 보강된 고분자 복합재료는 가볍고, 높은 강도와 강성을 갖고 있어 여러 산업에서 금속재료를 대체하는 재료로서 사용이 증가하고 있다[1-5]. 이러한 섬유보강 고분자 복합재료는 주로 사출성형, 압축성형 등의 방법으로 제조되고 있는데, 사출성형(injection molding)에 의한 성형은 공정 cycle이 짧은 반면에 고가의 장비가 필요하며, 설치가 비싸고 긴 섬유로 보강된 복합재료의 경우 점도가 높아지게 되어 성형이 어려운 단점을 가지고 있다. 한편, 고분자 복합재료의 성형에 가장 널리 사용되고 있는 압축성형(compression molding)은 장비가 단순하고 긴 섬유가 보강된 복합재료의 성형이 가능하지만, 재료를 용융온도(melting temperature) 이상으로 가열하여 성형하기 때문에 긴 공정시간과 고가의 금형 제작비등을 단점으로 들 수 있다. 이러한 단점들을 극복하는 성형 기술로써, 금속성 판재제품의 제조에 사용되는 기술을 응용한 고상성형(solid-phase forming)의 연구가 대두되게 되었다[6,7]. 판재 형태의 재료를 용융온도와 유리전이온도(glass transition temperature) 사이의 온도로 가열하여 성형하는 고상성형은 자동차 범퍼, 후드 등 판재형 제품을 제작하는데 사용될 수 있는 기술로서 공정시간이 비교적 짧고, 제조공정이 간단하며, 설치가 적고, 최종 성형품이 양질의 표면을 갖는다[6,8]. 그리고 재료를 용융온도까지 가열하지 않아도 되기 때문에 에너지 소비 측면에서도 장점을 가지고 있다[6].

본 연구에서는 고상성형에서 판재성형시 일어나는 압축-인장모드의 변형에서 재료거동을 살펴보기 위한 Deep-drawing시험에서의 재료의 성형성 및 성형동안의 미시적 변화에 대해 관찰하였다.

2. 실험

2.1 Deep-drawing 시험

열가소성 복합재료의 압축-인장모드 성형에서의 재료거동을 파악하기 위해 cup-forming 시험을 행하였다. 시험에 사용된 재료는 직경과 길이가 각각 11 μ m와 12mm인 유리 섬유가 임의의 방향으로 배열된 polypropylene판재로서, 유리섬유의 중량비가 20%, 30%, 그리고 40%를 함유하고 있는 Finland의 Alhstrom사에서 제작된 RTC-C-4000-20, RTC-C-3000-30, RTC-C-3000-40을 사용하였다.

성형온도 및 성형속도의 변화에 따른 복합재료의 성형성을 파악하기 위해 성형온도는 100 $^{\circ}$ C, 125 $^{\circ}$ C와 150 $^{\circ}$ C에서 성형시험을 행했고, 성형속도는 0.1mm/sec, 1mm/sec, 10mm/sec에서 실험을 행하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용한 punch와 die의 형상을 보이며, 형상의 크기는 Table 1에 요약하였다. 성형시험을 위하여 hydraulic press를 사용하였으며, 펀치와 다이, 그리고 blank holder에 heater를 설치하고 자동 온도조절장치를 이용하여 computer에서 조정하였다. 또 blank holding pressure와 펀치의 위치 및 속도 조절을 위하여 servo-valve와 linear scale을 설치하여 성형과정을

computer로 제어하였다.

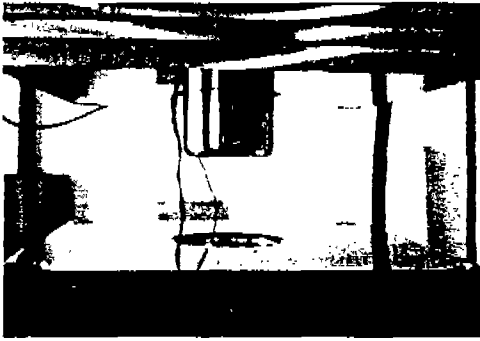


Figure 1. Punch and die geometry used for cup forming test.

Table 1. Punch and die geometry used for cup forming test.

Punch radius (mm)	50
Punch profile radius (mm)	10
Die radius (mm)	56
Die profile radius (mm)	10
Clearance (mm)	6

복합재료 판재를 oven에서 약 30분간 예열한 다음 원하는 온도로 맞춰진 blank holder 안에서 달혀진 상태로 10분간 유지한 후 성형시험을 행하였다. 한편 성형된 cup 부분의 밀면 부분은 거의 변형이 일어나지 않고 옆면부분에서 대부분의 소성변형이 일어나기 때문에 밀면부분의 복합재료는 옆면부분이 변형될 때 인장력에 충분히 견딜 수 있어야만 할 것이다. 그러므로 옆면부분과 밀면부분에서 일정온도로 유지하는 것보다는 어느 정도 온도차이를 두는 것이 바람직할 것이다. 그러므로 본 연구에서도 펀치와 펀치 밀면의 온도를 blank holder의 온도보다 약 20℃ 낮게 유지하였다.

각 성형온도와 성형속도에서 성형한계선도 (forming limit diagram)를 찾기 위해 blank의 크기가 작은 것부터 성형시험을 행하고 점차 blank의 크기를 증가하면서 성형시험을 행하

였다. 성형된 part의 strain 분포를 자동 strain 측정장치를 이용하여 측정하였으며 측정된 strain상태에서 wrinkling 발생지역과 necking 발생지역, safe지역으로 나누었다. 이를 통하여 전 영역에서 wrinkling과 necking이 발생하지 않는 성형 안전지역(forming safe region)을 구하였다. Cup forming을 위하여 사용된 blank의 크기와 펀치의 깊이는 Table 2에 요약하였다.

Table 2. Blank size and punch depth for cup forming test.

Glass content (%)	Blank diameter (mm)	Punch depth (mm)
20	190, 200, 210	45, 55, 60
30	175, 185, 195	40, 45, 50
40	175, 185, 195	40, 45, 50

2.2 성형된 part의 미시적 관찰

유리섬유 강화 polypropylene 복합재료를 cup forming하였을 때 일부 유리섬유의 파괴 현상과 유리 섬유와 matrix 사이의 분리 현상 (debonding), fiber buckling, fiber break 및 기공형성 등이 일어날 것으로 예측되며, 이는 제품의 기계적 특성에도 큰 영향을 미칠 것으로 여겨진다. 이러한 미시적인 거동을 살펴보기 위해 성형된 part에서 시편을 채취하여 현미경을 이용하여 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2는 유리섬유가 30% 함유된 시편의 성형시 cup에 발생하는 wrinkling과 necking을 나타낸다. Fig. 3은 wrinkling이 발생한 지역의 단면을 보여주는 사진이며, 이들의 발생으로 인해 재료의 표면이 나빠지거나 재료내부의 fiber의 파괴 및 buckling 등으로 인하여 재료의 성능이 저하되어 제품이 취약하게 될 것이다. Fig. 4는 necking이 일어난 지역의 표면을 현미경을 통해 관찰한 것으로서 necking

으로 인해 재료가 인장되면서 fiber가 일정방향으로 놓이게 되고, 나아가 fiber가 파괴되거나, 수지와 fiber사이의 debonding 그리고 수지의 찢어짐 등이 일어남을 알 수 있다.

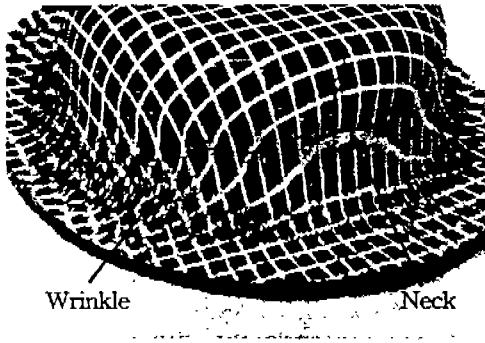


Figure 2. Wrinkle and neck on formed parts for 30% glass content composite.



Figure 3. Cross-section of the wrinkled region of the formed part.

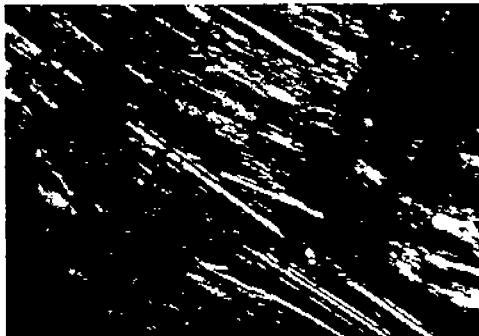


Figure 4. Micrograph of the formed part in the neck.

성형시험을 통하여 얻은 결과로부터 성형 조건에 따른 재료의 성형 한계영역을 알아보기 위해 성형된 각 부분에서 necking이나 wrinkling이 일어났는지를 확인 후 necking이 일어난 지점과 wrinkling이 일어난 지점, 그리고 안전한 지역 등으로 구분하여 측정된 strain 상태를 major와 minor strain으로 나타내었다. Fig. 5, Fig. 6은 유리섬유의 함유량이 20%인 재료를 100°C에서 성형했을 때 얻어진 성형한계선도로서 펀치의 속도에 따라 한계영역이 달라짐을 알 수 있다. 즉 성형 속도가 느릴 때에는 major strain이 약 35% 되는 지점부터 neck이 발생함을 보이나 빠른 속도에서는 약 50% 이상의 strain에서 neck이 시작됨을 보인다. 아울러 결과의 그림에서 알 수 있듯이 major strain과 minor strain 비율이 어느 임계값 이상에서는 wrinkling도 잘 일어나지 않는 안전한 지역이 존재함을 보인다.

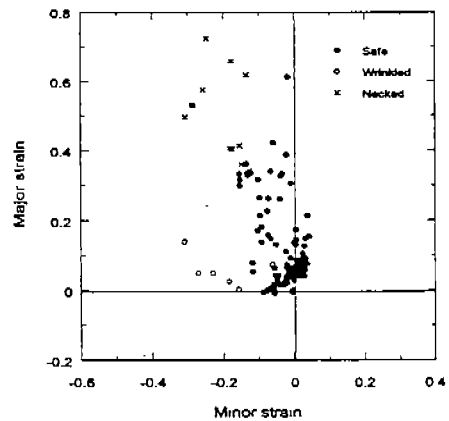


Figure 5. Forming limit diagram for 20% glass reinforced polypropylene formed at 100°C and 0.1mm/sec.

후기

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비 (신소재분야)에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] D. M. Bigg and J. R. Preston, "Stamping of Thermoplastic Matrix Composites", *Polymer Composite*, 10(4): 1989, pp. 261-268.
- [2] Jane M. Crosby, "Recent Advances in Thermoplastic Composites", *Advanced Material and Processes*, 1968, pp. 225-230
- [3] Michael R. Fallon, "Thermoplastic Sheet Stamping : Ready for the Big Time", *Plastic Technology*, 1989, pp. 95-103.
- [4] D. Maass and J. Bertolet, "Forming Thermoplastic Composites", Technical Report EM86-714, S.M.E. Technical Paper, 1986.
- [5] J. D. Muzzy, X. Wu, and J. S. Colton, "Thermoforming of High Performance Thermoplastic Composites", *ANTEC*, 1989, pp. 1465 - 1470.
- [6] J. H. Lee and J. H. Vogel, "An Investigation of the Formability of Long Fiber Thermoplastic Composite Sheet", *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of ASME*, 1995, 117:127-132.
- [7] J. H. Lee and J. H. Vogel, "An Investigation of the Necking Instability in Fiber Reinforced Polypropylene", *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of ASME*, Jan. 1996, 118:80-87.
- [8] D. M. Bigg, D. F. Histock, J. R. Preston, and E. J. Bradbury, "Thermoplastic Matrix Sheet Composites", *Polymer Composites*, 1988, 9(3):222-228.

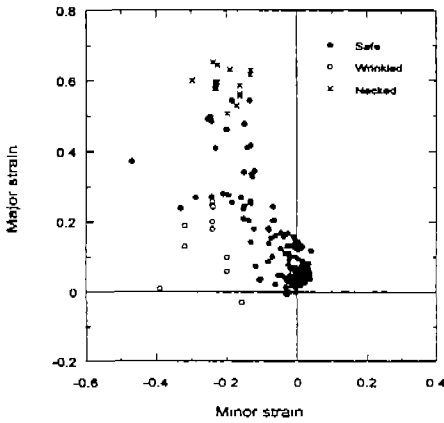


Figure 6. Forming limit diagram for 20% glass reinforced polypropylene formed at 100°C and 10mm/sec.

4. 결과

열가소성 복합재료의 압축-인장모드 성형에서의 재료거동을 파악하기 위한 cup-forming 시험을 통하여 다음의 결과를 얻었다.

1. 유리섬유 함유량이 20%인 재료의 경우 necking을 피할 수 있는 우수한 성형성을 보이며, 30%와 40%로 유리섬유의 함유량이 증가함에 따라 성형성이 감소하였다.
2. 성형속도가 증가함에 따라 necking에 대한 성형성은 증가함을 보인다.
3. Wrinkling을 피할 수 있는 성형성은 유리섬유 함유량이 증가함에 따라서 감소하였으며 성형속도에 대한 영향은 크지 않았다.
4. 여러 strain 레벨까지 고상 성형한 시편의 현미경 관찰을 통하여 성형 동안의 재료의 미세 거동을 파악하였으며, 변형은 유리섬유와 matrix 사이의 계면에서의 아주 국부적인 수지의 소성 변형이나, fiber의 파괴, 또는 수지와 fiber사이의 debonding, 수지의 찢어짐 등과 같은 현상이 일어나면서 변형이 진전되었다.