

유리섬유 강화 Polypropylene의 고상굽힘성형시 Spring-back 현상

The Spring-back Phenomena in Solid Phase Bending of Glass Fiber Reinforced Polypropylene

남궁 천(전북대학교 대학원), 김 성 일(전북대학교 기계공학부), 이 중 회(전북대학교 신소재공학부)
Cheon Namgung(Chonbuk Univ.), Seoug-il Kim, Joong-Hee Lee(Chonbuk Univ)

Abstract

An experimental and analytical investigations were undertaken to improve understanding of spring-back phenomena of chopped fiber reinforced thermoplastic composite sheet. The materials tested contained 20, 35, 40 percent by weight of randomly oriented glass fiber in a polypropylene matrix. The simple bending tests were performed at temperatures ranging from 75°C to 150°C with 25°C increment and at punch speed of 1mm/sec and 0.01mm/sec. The sprig-back angle measured in pure bending is compared with the prediction based on the analytical model. Good agreement between experimental and predicted results was observed.

Key Words : 열가소성 복합재료(Thermoplastic Composite), 단순 굽힘(Pure Bending), 스프링백 현상(Spring-Back Phenomena), 고상 성형법(Solid-Phase Forming)

1. 서론

고분자 복합재료는 높은 강성과 강도를 가지면서도 가벼워서 항공기, 자동차, 선박등 여러 산업분야에서 널리 사용되기 시작하였다^[1-3]. 이에 따라 최근에 이르러 이러한 복합재료의 재료거동이나 이 재료를 이용한 성형기술에 대한 연구에 학자들의 많은 관심이 기울여졌다^[4-6]. 특히 복합재료를 이용한 성형방법중 열가소성 복합재료를 이용한 고상성형법(solid-phase forming method)이 새로운 성형방법으로써 관심을 끌고 있는데 이 성형법은 고분자 matrix의 유리전이온도(glass transition temperature)와 용융온도(melting temperature) 사이에서 성형하는 방법이다. 이러한 성형법은 성형온도가 낮아 에너지 소비가 적고 mold의 제작비를 절약할 수 있으며 성형후 제품의 표면이 좋다는 장점 등을 가지고 있다^[7-8].

판재성형에서 가장 흔한 성형공정의 하나가 굽힘인데 이 굽힘으로 인해 판재의 안쪽에는 압축응력

과 바깥쪽에 인장응력이 동시에 발생한다. 그러므로 굽힘시험을 통해 그 재료의 인장 및 압축 성형성을 동시에 측정하고 또한 재료의 spring-back 현상을 연구할 수 있다. 지금까지 많은 연구가들에 의해 굽힘 동안의 판재내부의 응력과 변형을 분포, necking, buckling, 그리고 판재내부의 섬유 이동과 spring-back 현상 등에 대한 연구가 행해졌다. Gardiner^[9]는 판재의 중앙에 중심축이 고정되어 있다고 가정하고, 단지 원주방향의 응력만을 고려한 수학적 해석을 통하여 금속재료의 spring-back 현상을 분석하였다. Queener와 Angelis^[10]는 재료의 응력-변형률 특성과 판재의 두께, 다이의 반지름의 함수로써 금속판재의 굽힘 부분에서의 잔류응력분포 및 spring-back 현상을 예측하는데 많은 진전을 이루었다. 그리고 Bhattacharyya등^[11]은 섬유강화판재의 압축성형성과 성형특성에 영향을 주는 인자들에 대한 이해를 위해 vee-bend test를 행하였다. 하지만 이러한 연구의 대부분이 금속성 판재나 적층 복합재료에 대해 이루어

어진 반면 섬유가 임의의 방향으로 배열-강화된 열가소성 복합재료에 대한 연구는 아직 미비한 실정이다. 한편 spring-back 현상에 대한 이해는 제품의 설계와 내부의 잔류응력, 그리고 제품의 수명을 예측하는데 중요한 정보를 제공한다. 그러므로 본 연구에서는 이러한, 섬유가 임의의 방향으로 배열-강화된, 열가소성 복합재료를 이용하여 단순 굽힘에서의 spring-back 현상을 여러 성형온도, 굽힘속도 및 편치반경에서 실험을 통한 연구를 행하였다. 또한 spring-back 각도를 예측하기 위한 해석적 연구를 행하였다.

2. 실험적 고찰

실험에 사용된 재료는 유리섬유가 임의의 방향으로 배열-강화된 폴리프로필렌 복합재료이다. 유리섬유의 평균 길이와 직경은 각각 12mm와 11 μ m이다. 함유된 유리섬유의 중량비가 각각 20%, 35%, 40%인 3가지 종류의 재료가 사용되었으며 두께는 20%의 경우 3.81mm, 35%와 40%의 경우 2.7mm이다.

고온 chamber를 갖춘 United 인장시험기를 이용하여 굽힘 시험을 행하였다. Fig. 1은 굽힘 시험에 사용된 편치와 다이의 모양이다. 편치와 다이의 치수는 Table 1에 요약하였다. 굽힘에 대한 편치 반경의 영향을 알아보기 위해 4가지 크기의 편치를 사용하였으며, 굽힘 속도의 영향을 고려하여 편치속도 1mm/sec 와 0.01mm/sec의 두 가지 속도에서 굽힘 시험을 행하였다. 또한 온도의 영향을 알아보기 위하여 온도는 75 $^{\circ}$ C에서 150 $^{\circ}$ C까지 25 $^{\circ}$ C씩 증가시켰으며 시편은 시험온도에 이르도록 chamber내에서 40분간 유지한 후 굽힘 시험을 행하였다.

Spring-back angle은 편치의 unloading 전후에 video camera를 통해 capture된 image로 부터 flank 각의 차이에 의해 측정하였다. 단순 굽힘 성형에 있어 편치의 일정 깊이 이상에서 판재의 윗면과 편치의 밑면사이에 gap이 발생하는데 일반적으로 이 gap은 판재의 buckling을 유도한다. 이러한 gap이 없을때의 spring-back 현상을 이해하기 위해 gap 형성이 없는 편치깊이 12.5mm에서 굽힘 시험을 행하였다.

Table 1: Dimensions of punch and die.

Punch Radius (mm)	2.5, 3.5, 5.0, 7.5
Die Profile Radius (mm)	10.0
Die Gap (mm)	41.0
Punch Depth (mm)	12.5

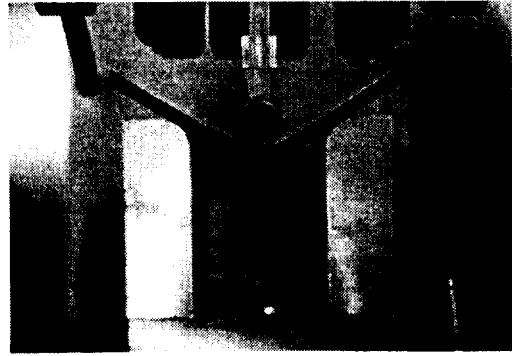


Figure 1: Punch and die used for bending tests.

3. 해석방법

복합재료의 spring-back 각도를 예측하고자 해석적 연구를 행하였다. 여기에 묘사된 해석적 모델은 plain strain의 가정에 근거를 두고, 변형률 ϵ_x 는 판재의 안쪽에서 바깥쪽으로 선형으로 변한다고 가정하였다. 또한 본 연구에 사용된 재료는 비압축성이며, 굽힘 성형동안에 중앙 평면에서의 호의 길이는 변하지 않는다고 가정하였다.

Fig. 2는 본 해석에 사용된 단순 모델로써 편치와 접하는 부분은 소성변형영역으로, 소성영역의 끝부분에서 다이와 접하는 부분까지는 탄성변형영역으로, 그리고 다이와 접하는점 윗쪽으로는 굽힘을 받지 않는 직선영역으로 가정하였다. Spring-back 현상은 소성변형영역과 탄성변형영역에서 함께 일어난다고 가정하였다. 재료의 비압축성에 의한 유동응력과 대칭성 재료에 대한 항복조건으로부터 plain strain에서의 유동응력은 아래 식으로 나타낸다.

$$\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{-1+R}{2R+1}\right)X}$$

여기에서 R 은 비등방성 인자로서 두께 변형률에 대한 너비 변형률의 비율, X 는 단순 인장시험에서의 항복응력을 나타낸다. 굽힘을 만드는데 필요했던

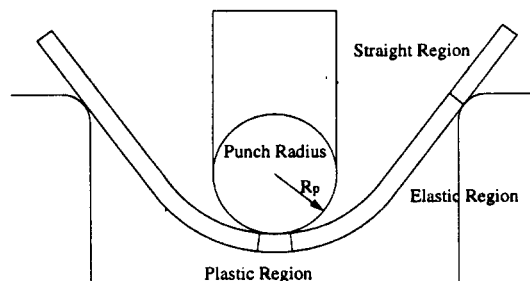


Figure 2: Bending model used for bending analysis.

굽힘 모멘트 M 을 계산하기 위하여 x 방향에서 외부 힘이 없다고 가정했을 때 한 요소에 작용하는 내부 힘은 $dF = \sigma_x w dz$ 로 나타낼 수 있다. 이러한 힘에 기인한 굽힘 모멘트는 $dM = z dF_x = z \sigma_x w dz$ 이다. 그때 전체의 굽힘 모멘트는 다음식으로 구해진다.

$$M = \int_{-h/2}^{h/2} w \sigma_x z dz = 2 \int_0^{h/2} w \sigma_x z dz$$

펀치를 unloading 했을 때, 즉 외부힘이 제거되었을 때 응력의 변화는 모멘트 변화일의키며 다음식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \Delta M &= 2w \int_0^{h/2} \Delta \sigma_x z dz = 2w \int_0^{h/2} E_f \left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_a} \right) z^2 dz \\ &= \frac{w E_f h^3}{12} \left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_a} \right) \end{aligned}$$

여기에서 r_a 와 r_b 는 spring-back 현상이 일어나기 전후의 곡률이다. spring-back 이후 $M - \Delta M = 0$ 이기 때문에 위의 두 식으로부터 r_a 와 r_b 를 구하며 다시 r_a , r_b 와 spring-back 각 θ 와의 기하학적 관계로부터 소성변형역의 spring-back 각 θ_1 를 구한다.

한편 소성변형역과 다이 접촉부분점 사이의 탄성변형역에서의 굽힘 모멘트에 의해 발생하는 탄성역의 변형각 θ_2 는 다음 식에 의해 구해진다[12].

$$\theta_2 = \frac{Ml}{EI}$$

여기에서 l 는 단면의 2차 모멘트를 나타내며 l 은 소성역에서 다이 접촉점까지의 거리를 나타낸다. 따라서 spring-back 각 θ 는 $\theta = \theta_1 + \theta_2$ 로써 구해진다.

4. 결과 및 토의

입의의 방향으로 위치한 유리섬유가 강화된 복합재료는 재료 자체가 가지는 약간의 불균일성으로 인해 Fig. 3에 보인바와 같이 같은 조건에서 반복된 결과치에 약간의 차이를 보인다. Fig. 3은 35%의 재료를 100℃에서 펀치 반경 5mm 일 때 10번의 굽힘 시험을 통하여 측정된 spring-back 각도를 보인다. 그림에서 실선은 평균치를 나타내고 점선은 ±10%의 영역을 나타낸다. 측정된 결과치가 ±10% 영역 내에 분포함을 보인다. 그러므로 본 연구에서는 같은 조건에서 3번의 반복실험을 행하여 결과치를 error bar로 나타내었다.

Fig. 4는 20% 재료의 두 펀치속도 1mm/sec와

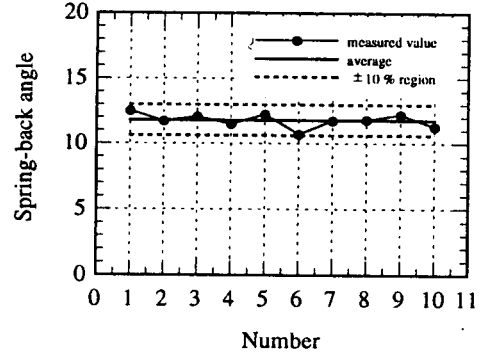


Figure 3: Measured spring-back angles and the mean value for 35% glass composite.

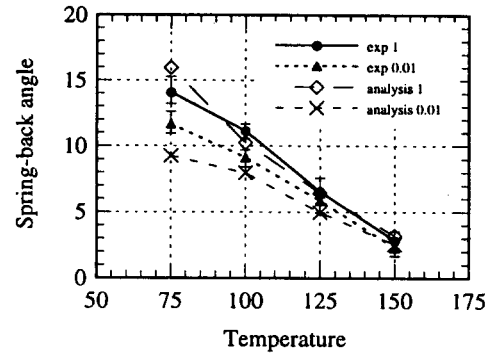


Figure 4: Comparison of computed and experimental spring-back angles for the 20% glass composite at punch radius of 5.0mm and punch speeds of 1mm/sec and 0.01mm/sec.

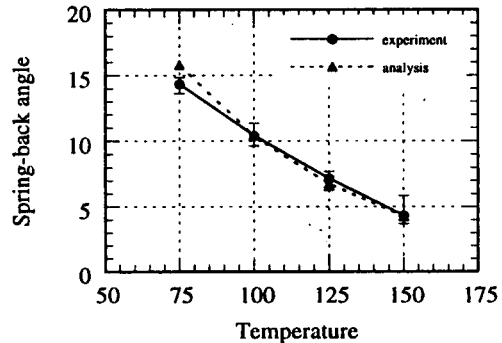


Figure 5: Comparison of computed and experimental spring-back angles for the 35% glass composite at punch radius of 5.0mm and punch speed of 1mm/sec.

0.01mm/sec에서의 계산된 spring-back 각도와 측정된 spring-back 각도를 나타낸다. 계산을 위해 사용된 재료물성치는 기 발표된 결과를 이용하였다[7]. 한편 Fig. 5는 35% 재료의 spring-back 각도를 나타낸다. 대체적으로 실험치와 결과치가 잘 일치함을 보였으며, 온도가 증가할수록 spring-back 각도는 감소하고 펀치 속도가 증가할수록 약간 증가함을 보였다.

Fig. 6은 20% 재료의 펀치 반경이 변함에 따른 spring-back 각도의 측정된 결과치를 보인다. 펀치 반경이 커지면 spring-back 각도가 이론적으로는 커져야 함에도 불구하고 측정된 결과치는 거의 차이를 나타내지 않았다. 이는 Fig.1에서 보는 바와 같이 판재가 굽힘성형시 탄성영역의 변형으로 인해 성형된 판재의 곡률반경이 펀치 반경과 다르기 때문인 것으로 사려된다.

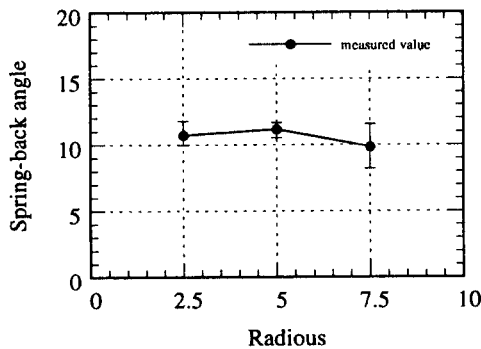


Figure 6: Measured spring-back angles at various punch radii for the 20% glass content material at speed of 1mm/sec.

5. 결론

온도가 증가할수록 그리고 성형 속도가 감소할수록 spring-back 각도는 감소하며, 유리섬유의 함량이 증가할수록 spring-back 각도는 증가함을 보였다. 펀치반경의 크기에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. Spring-back 각을 예측하기 위한 해석적 방법에 의해 얻어진 결과값이 실험결과값과 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있었다. 이러한 실험적 결과치와 이론적 결과치는 이러한 복합재료의 고상성형법에 의한 제품제조를 하고자 할 때 제품을 설계하는데 도움을 주리라 여겨진다.

후기

본 연구는 전북대학교의 신진교수 연구지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

6. 참고문헌

- [1] Bigg, D. M. and Preston, J. R., "Stamping of Thermoplastic Matrix Composites," *Polymer Composites*, Vol. 10, No. 4, pp. 261-268, 1989.
- [2] Crosby, J. M., "Recent Advances in Thermoplastic Composites," *Advanced Materials and Processes Inc. Metal Progress*, pp. 56-59, 1988.
- [3] Fallon, M. R., "Thermoplastic Sheet Stamping: Ready for the Big Time," *Plastic Technology*, pp. 95-103, 1989.
- [4] Tsahalis, D. T., Pandtelakis, S. G. and Schulze, V., "Modeling of the Diaphragm forming Technique Applied to Continuous Fiber Reinforced thermoplastic Composites," *Processing of Polymers and Polymeric Composites*, Vol. 19, pp. 91-101, 1990.
- [5] Michaeli, W. and Jehrke, M., "Diaphragm Forming of Continuous-Fiber Reinforced Thermoplastics Suitable for Medium Scale Production," *Proceedings of the International Conference on Advanced Composite Materials, Minerals, Metals & Materials Soc.(TMS)*, pp. 869-873, 1993.
- [6] Lee, J. H. and Vogel, J. H., "An Investigation of the Formability of Long Fiber Thermoplastic Composite Sheets," *ASME J. Eng. Matls and Tech.*, Vol. 117, No. 1, pp. 127-132, 1995
- [7] Lee, J. H. and Vogel, J. H., "An Investigation of the Necking Instability in Fiber Reinforced Polypropylene," *ASME J. Eng. Matl's and Tech.* Vol. 118, No.1, pp. 80-87, 1996
- [8] Lee, J. H., "A Study on the Long Fiber Reinforced Thermoplastic composite Sheet Forming," Ph. D. Thesis, University of Minnesota, 1995.
- [9] Gardiner, F. J., "The spring back of metals," *Transactions of the ASME*, pp. 1-9, Jan. 1957.
- [10] Queener, C. A. and De Angelis, R. J., "Elastic springback and residual stresses in sheet metal by bending," *Transactions of the ASM*, Vol. 61, pp. 757-768, 1968.
- [11] Bhattacharyya, D., Burt, C. R. and Martin, T. A., "Forming of fibre reinforced thermoplastic sheets," In *Advanced Composites '93: International Conference on Advanced Composite Materials*, pp. 875-882, 1993.
- [12] Timoshenko, S. and Yong, D. H., "Elementals of Strength of Materials," pp. 219-222, 1935.