

유리섬유 강화 열가소성 복합재료의 2축 인장성형시 재료거동에 관한 연구

이중희*, 류성기**

A Study on the Material Behavior of Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Composite in Biaxial Stretch Forming

Joong-Hee Lee* and Sung-Ki Lyu**

ABSTRACT

The object of this study was to investigate the feasibility of solid-phase forming of the composites and to characterize the material behavior in the biaxial stretch forming. The materials tested contained 20%, 30%, and 40% glass fibers by weight in a polypropylene matrix. Biaxial stretch forming tests were performed at three forming speeds of 10mm/sec, 1mm/sec, and 0.1mm/sec and at four forming temperatures of 75°C, 100°C, 125°C, and 150°C to investigate effects of forming speed and forming temperature. The microscopic observation of a formed part was conducted at various strain levels to characterize the material behavior. The strain distribution on a formed part was measured and displayed on the formed geometry with a contour display. The material behavior of the composite in the biaxial stretch forming was strongly influenced by the forming conditions.

Key Words : Thermoplastic Composite(열가소성 복합재료), Solid-phase Forming(고상성형), Biaxial Stretch Forming(2축 인장성형), Formability(성형성), Necking(넉킹)

1. 서론

유리섬유가 보강된 열가소성 복합재료는 가벼우면서도 높은 강도와 강성을 가지고 있어 항공기, 조선 및 자동차 산업에서 널리 사용되기 시작하였다⁽¹⁻⁴⁾. 또한 열가소성 복합재료는 열경화성 재료에 비해 일반 상온에서 보관이 쉽고 제조 공정이 짧으며, 재료를 반복적으로 녹일 때 비교적 그들의 분자구조에 많은 변화를 주지 않기 때문에 재활용 할

수 있다는 장점을 가지고 있다⁽⁵⁻⁸⁾. 이로 인해 최근 에 이러한 재료의 성형방법이나 재료거동에 관한 많은 연구가 수행되었다. 그러나 연구의 대부분은 짧은 유리섬유가 보강된 복합재료나 유리섬유가 일정한 방향으로 강화된 복합재료에 대해 행하여졌으며, 비교적 긴 유리섬유가 임의의 방향으로 강화된 복합재료에 대한 연구는 아직 미진한 실정이다.

긴 유리섬유가 강화된 복합재료는 짧은 유리섬유가 강화된 복합재료에 비해 인장 및 충격 강도가

* 전북대학교 신소재공학부, 자동차부품·금형기술혁신센터
** 경상대학교 기계설계공학과, 항공부품기술연구센터

우수하다. 이러한 열가소성 복합재료 중 가장 널리 사용되는 재료는 비교적 긴 유리섬유(약 10~20mm)가 임의의 방향으로 강화된 폴리프로필렌이다.

짧은 유리섬유가 강화된 복합재료의 제품제조에 사용되는 사출성형(injection molding)은 긴 유리섬유가 강화된 재료에 대해선 재료 자체가 가지는 높은 점성으로 인해 사용되기가 어렵다. 이로 인해 현재 가장 많이 사용되고 있는 제조기술은 복합재료를 용융온도 이상으로 가열하여 제품을 제조하는 압축성형법(compression molding)이다. 압축성형법은 재료를 용융온도 이상으로 가열하기 때문에 비교적 공정시간이 길고 에너지 소비가 많으며, 고가의 mold의 제작비 등의 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 단점을 극복할 수 있는 새로운 제조기술이 요구되며, 금속성 판재제품의 제조에 사용되는 판재 성형법(sheet forming)을 이러한 재료에 적용하고자 하는 노력이 Lee와 Vogel에 의해 시도되었다⁽⁹⁻¹⁰⁾. 이러한 연구를 통하여 복합재료를 용융온도(melting temperature)와 유리전이온도(glass transient temperature) 사이의 온도로 가열하여 성형하는 고상성형법(solid phase forming)의 가능성을 deep drawing시험을 통하여 제시하였다.

고상성형법은 비교적 짧고 간단한 제조공정을 가질 뿐 아니라 성형된 제품이 아주 좋은 표면을 가진다는 특성을 가지고 있다⁽¹¹⁻¹³⁾. 이러한 고상성형법이 실제 산업에서 실용화되기 위해서는 여러 성형 모드에서의 재료를 안전하게 성형할 수 있는 재료의 성형성이 파악되어야 하며, 성형할 때 일어날 수 있는 유리섬유와 matrix의 debonding, 유리섬유의 파괴, 유리섬유의 이동, void 증가 등의 재료 내부 조직 변화는 제품의 기계적 성질의 저하를 초래할 수 있어 이들에 대한 연구가 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 임의의 방향으로 유리섬유가 강화된 열가소성 복합재료의 2축 인장성형모드에서의 고상 성형시험을 행하고, 성형동안의 재료거동을 현미경을 통해 미시적으로 관찰하였다.

2. 2축 인장성형시험

유리섬유 강화 열가소성 복합재료의 2축 인장 모드에서의 고상성형의 가능성을 파악하고 성형동안의 재료거동을 살펴보기 위해 2축 인장성형시험을 행하였다. 2축 인장성형시험을 위하여 본 연구에서는 반구형(hemispherical) 펀치를 가지고 성형시

험을 행하였다. 실험을 위하여 유압식 프레스를 사용하였으며, 펀치의 속도제어를 위해 linear encoder를 사용하였으며, blank holding 압력은 load cell과 servo valve를 사용하여 computer로 제어하였다. Fig.1은 사용된 장치를 보이며, Fig.2는 펀치와 다이의 형상을 나타내고, 그 형상의 크기는 Table 1에 요약하였다.

복합재료의 성형 동안의 조직 변화에 대한 성형 속도의 영향을 연구하기 위해 펀치속도가 0.1mm/sec, 1mm/sec 및 10mm/sec일 때 성형시험을 행하였으며, 변형률(strain) 정도에 따른 조직 변화를 살펴보기 위해 두 펀치 깊이 30mm와 50mm에서 성형을 행하였다. 성형온도의 효과를 파악하기 위해 성형은

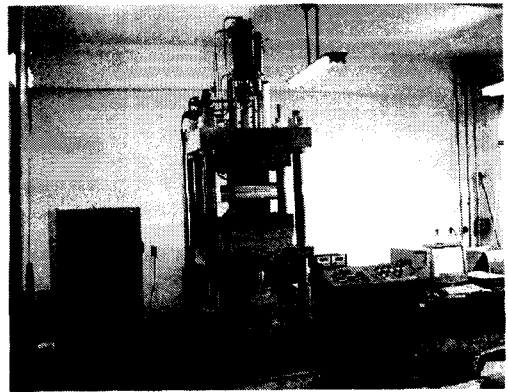


Fig.1 A photograph of experimental apparatus used for the biaxial stretch forming test.

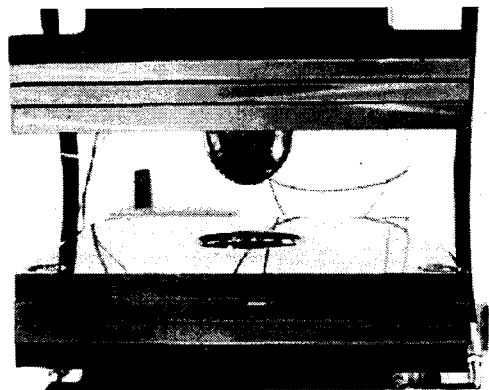


Fig.2 A photograph of punch and die used for the stretch forming.

Table 1 Punch and die geometry used for the stretch forming tests.

Punch radius (mm)	50
Die radius (mm)	56
Die profile radius (mm)	10
Clearance (mm)	6
Punch depth (mm)	30, 50

도를 75℃에서 150℃까지 25℃씩 증가하면서 시험을 행하였다. 성형온도 조절을 위하여 blank holder, punch 및 blank 밑 부분에 heater를 설치하여 시편을 원하는 온도로 가열하였다. 시편이 원하는 온도에도달할 수 있도록 하기 위해 약 30분간 blank holder가 단혀진 상태로 유지한 후 성형시험을 행하였다.

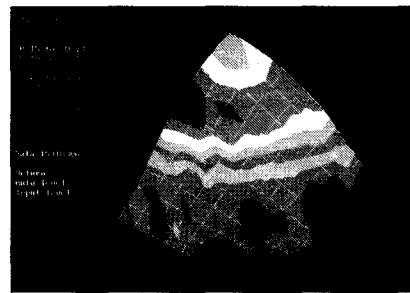
2축 인장성형시험을 위하여 사용된 재료는 Ahlstrom(Filand) 회사에서 제공한 유리섬유가 20%, 30% 및 40% 함유된 폴리프로필렌(RTC-C-400-20-B, RTC-C-3000-30-B, RTC-C-3000-40-B) 복합재료로써 wet processing 방법에 의해 제조된 consolidate된 판재이다. 사용된 복합재료는 직경과 길이가 각각 11 μm와 12.7mm인 유리섬유가 강화되어 있고, 사용된 matrix의 유리전이온도(glass transient temperature)와 용융온도(melting temperature)는 각각 -10℃와 165℃이다. 복합재료 판재의 두께는 유리섬유 함유량이 20%인 경우에는 3.81mm이고, 함유량이 30%와 40%인 경우에는 2.54mm이다.

2축 인장성형시험을 위하여 300mm×300mm인 직사각형의 blank를 제작하였고, 성형시험 후 성형된 부품에서의 변형률 측정을 위하여 판재의 한쪽 면에 특수잉크를 사용하여 5mm×5mm 정사각형의 모눈을 인쇄한 다음 성형하였다. 성형된 부품의 변형률은 변형률 자동 측정기를 이용하여 측정하였다. 성형된 부품을 중앙의 turn table 위에 올려놓고 윗부분에 장착되어 있는 video camera를 이용하여 두 각도에서 성형품의 영상을 잡는다. 얻어진 영상을 digitize하여 3차원적인 geometry를 계산하여 변형률을 구하였고, 측정된 변형률은 3차원적인 geometry 위에 color contour로써 나타내었다.

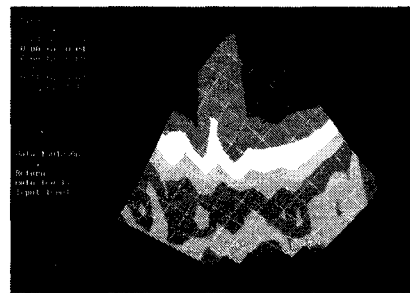
3. 결과 및 고찰

유리섬유 강화 열가소성 복합재료를 2축 인장

고상성형 했을 때의 재료의 조직변화를 관찰하기 위해 성형시험을 행하였다. Fig.3은 유리섬유 함유량이 40%인 재료를 성형온도 150℃에서 펀치속도 10mm/sec로 펀치깊이 30mm 까지 성형한 성형품의 변형률을 변형률 자동측정기(automated strain measurement system)로 측정한 결과를 color contour로 나타낸 것이다. 그림에서 (a)는 major 변형률을 나타내고, (b)는 minor 변형률을 나타낸다. 이를 통해 성형품의 변형률 분포를 한눈에 쉽게 알 수 있으며, 이를 이용하여 가능한 균일한 변형률 분포를 보이는 최적의 성형조건을 선택할 수 있다.



(a)



(b)

Fig.3 Measured (a) major strain and (b) minor strain contour on a formed part for 40% material.

Fig.4는 펀치속도가 10mm/sec일 때 125℃에서 펀치깊이가 50mm의 성형조건에서 유리섬유의 함유량이 다른 복합재료의 성형품을 보인다. (a)의 경우 유리섬유 함유량이 20%인 재료의 성형품으로 necking이 전혀 발생하지 않았으며, (b)의 경우는 30%재료로써 중앙 부위에 diffuse necking이 발생하지만 파단은 일어나지 않았다. (c)의 경우는 40%재료로써 necking이 진전되어 파단이 일어남을 보인다. 이러한 결과로부터 유리섬유의 함유량이 증가

하면 복합재료의 2축 인장에서 성형성이 저하됨을 알 수 있다. 이는 유리섬유의 함유량이 증가할수록 유리섬유 주위에 있는 수지의 양이 적어 상대적으로 수지의 소성변형이 빠르게 진전되고 이로 인해 재료의 성형성이 저하되는 것으로 여겨진다.

Fig.5는 125℃에서 유리섬유 함유량이 30%인 재료를 펀치 깊이가 30mm일 때 여러 성형속도에서 성형했을 때의 성형품의 단면을 보이는 것으로 (a)의 펀치속도가 10mm/sec인 경우에는 비교적 두께가 균일하게 잘 성형되었고, (b)의 펀치속도가 1mm/sec인 경우에는 diffuse necking이 발생하여 약간 두께가 불균일하게 되고, (c)의 0.1mm/sec에서는 necking이 심화되어 두께의 변화가 심하게 된다. 즉 시험된 성형속도 범위 내에서는 성형속도가 빠를수록

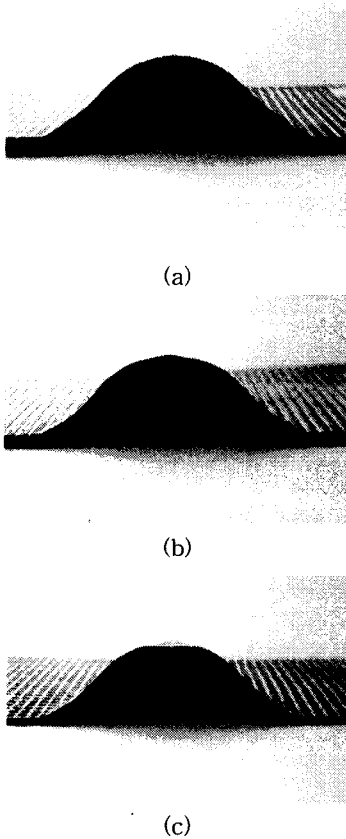


Fig.4 Photographs of the cross section of formed parts at the punch speeds of (a) 10mm/sec, (b) 1mm/sec, and (c) 0.1mm/sec for 30% glass content.

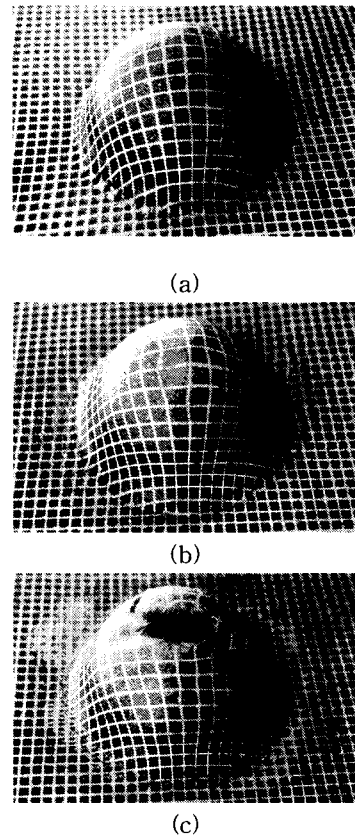


Fig.5 Biaxial stretch formed parts at the punch depth of 50mm and the forming temperature of 125℃ for (a) 20%, (b) 30%, and (c) 40% glass contents.

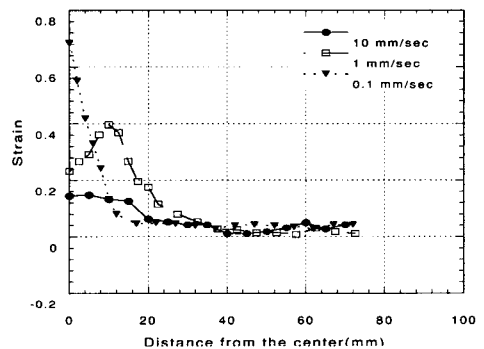


Fig. 6 Measured thickness strain along the radial section from the center on a formed part.

성형성이 좋은 것을 알 수 있다. 이때 측정된 두께 방향의 변형률을 Fig.6에 나타내었다. 그림은 성형된 part의 중앙에서부터 반경방향으로의 측정된 길

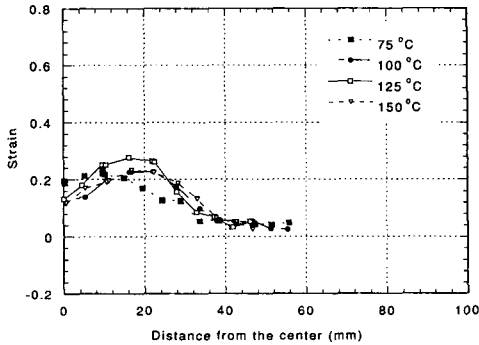
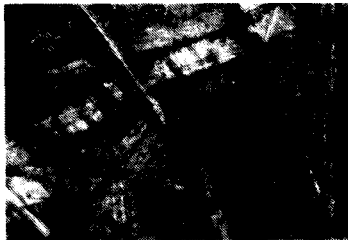
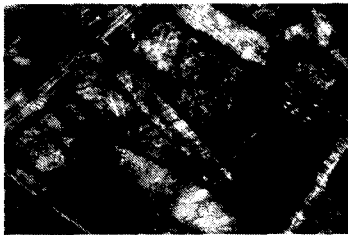


Fig.7 Measured major strain along the radial section from the center at various forming temperatures.



(a)



(b)



(c)

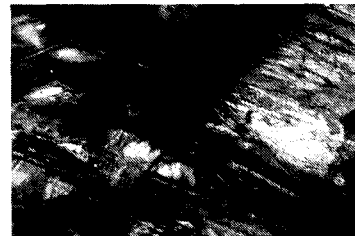
Fig.8 Micrographs of form parts at punch speeds of (a) 10mm/sec, (b) 1mm/sec, and (c) 0.1mm/sec.

이와 변형률을 나타낸 것으로, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 두께 방향의 변형은 성형속도가 가장 빠른 10mm/sec에서 가장 균일하며, 속도가 느려짐에 따라서 necking이 발생하여 두께의 변화가 커짐을 알 수 있다. Fig. 7은 유리섬유 함유량이 20%인 복합재료의 펀치속도가 10mm/sec일 때 여러 성형온도에서 성형한 시편의 major strain 분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 시험된 온도 범위에서 온도가 성형성에 미치는 효과는 크지 않음을 알 수 있으며, 관찰된 약간의 차이는 복합재료 자체의 불균일성과 온도효과와의 혼합에 의해 기인된 것이기 때문에 온도효과만의 일관성 있는 경향을 나타내지 않음을 보인다.

2축 인장성형동안의 성형된 part에서 재료의 미세거동을 살펴보기 위해 성형된 part에서 시편을 채취하여 금속현미경을 통해 조직을 관찰하였다. 성형된 시편 조직의 변화는 성형조건에 따라 매우 다르게 나타났으며, 이들의 결과는 Fig.8에 나타내었다. Fig.8은 유리섬유의 함유량이 30%인 재료를 150°C에서 성형했을 때 성형속도에 따른 조직의 변화를 나타낸 것으로 펀치의 속도가 10mm/sec에서는 유리섬유와 matrix 사이에 미세 소성변형이 전 영역에 걸쳐 고르게 발생하였으며, 펀치속도가 1mm/sec에서는 소성변형이 보다 국부적으로 발생하



(a)



(b)

Fig.9 Micrographs of form parts at punch depth of (a) 30mm and (b) 50mm.

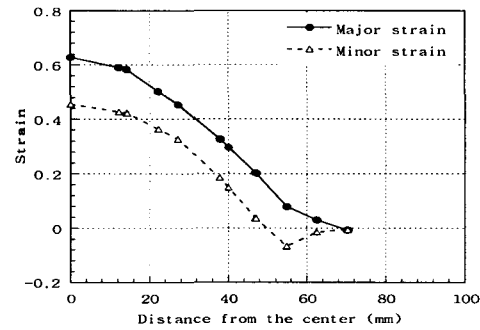
여 진전되어 가는 것을 보이며, 0.1mm/sec에서는 이러한 소성 변형역이 아주 국부적인 곳에서 발생하여 빠른 속도로 발전하여 유리섬유와 matrix사이에서 debonding 및 matrix의 미세한 찢어짐이 발생함을 보인다. 이로 인해 이러한 조건에서 성형된 성형품의 기계적 성능저하와 표면의 품질저하가 초래될 것으로 여겨진다. Fig.9는 125°C에서 펀치속도가

10mm/sec일 때 성형한 시편의 현미경 사진을 보이는 것으로 (a)의 경우는 펀치 깊이가 30mm일 때를 나타내며, (b)는 펀치 깊이가 50mm일 때를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 소성 변형은 주로 유리섬유의 길이방향을 따라서 진전되며, 펀치 깊이가 깊어져 변형률이 증가하면서 소성변형역은 점점 확산되어 가면서 유리섬유의 debonding과 matrix의 찢어짐이 확산되어 감을 보인다. 고상성형법을 통하여 성공적인 성형품을 얻기 위해서는 유리섬유의 debonding과 matrix의 찢어짐 등이 발생하는 성형 조건은 반드시 피해야만 할 것이다. 특히 유리섬유의 함유량이 증가함에 따라서 유리섬유를 둘러싸고 있는 matrix의 양이 상대적으로 적게되어 소성 변형에서 debonding 및 matrix의 찢어짐의 형태로 더욱 쉽게 발전되어 성형가능 변형률이 줄어들게 된다. 이로 인해 유리섬유 함유량이 증가함에 따라서 재료의 성형성은 감소함을 나타낸다. Fig.10은 125°C에서 10mm/sec로 성형했을 때 유리섬유 함유량에 따른 측정된 변형률 분포를 나타낸 것으로 유리섬유의 함유량이 증가함에 따라 변형률의 최고치가 증가함을 보인다. 그림에서 (a)는 유리섬유 함유량이 20%인 경우이고, (b)와 (c)는 각각 30%와 40% 재료를 나타낸다. 유리섬유의 함유량이 증가함에 따른 변형률 최고치가 증가와 변형률의 급격한 변화를 보이며, 이는 성형품의 변형률 분포가 불 균일하게 되어 제품이 취약하게 될 것으로 여겨진다.

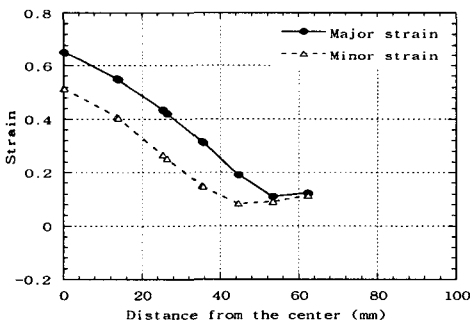
4. 결론

유리섬유 강화 열가소성 복합재료의 고상성형의 가능성을 파악하기 위한 2축 인장성형시험과 현미경을 통한 성형된 재료의 미시적 관찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

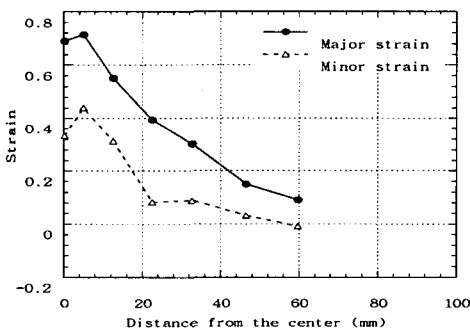
- 1) 2축 인장 고상성형에서 유리섬유의 함유량이 증가함에 따라 성형성은 저하된다.
- 2) 성형온도가 성형성에 미치는 영향은 매우 적었으며, 반면 성형속도는 성형성에 매우 큰 영향을 미치며 성형속도가 증가하면 시험된 모든 유리섬유 함유량에서 성형성이 향상된다.
- 3) 재료의 미시적 관찰을 통하여 열가소성 복합재료의 고상성형시 재료거동에 대해 파악하였으며, 성형초기에는 유리섬유를 따라 섬유 근처에서 수지의 소성변형이 시작되어 변형률이 증가함에 따라 점차 확산되어 가면서 섬유와 수지의 debonding과



(a)



(b)



(c)

Fig.10 Measured major and minor strains for (a) 20%, (b) 30%, and (c) 40% glass contents.

수지의 찢어짐으로 발전된다.

4) 빠른 성형속도에서는 소성변형이 전 영역에 걸쳐 거의 고르게 발생하나, 느린 성형속도에서는 국부적인 곳에서 소성변형영역이 발생하여 빠른 속도로 진전되어간다.

후기

본 연구과제는 한국과학재단의 국산연구기기 활용사업 연구비(과제번호:97-08-05-01-022, 장비명: 금속현미경 및 측정장치)에 의해 수행되었으며, 이에 관계자께 감사드립니다.

참고문헌

1. Jane M Crosby, "Recent Advances in Thermoplastic Composites," *Advanced Material and Processes*, pp. 225-230, May 1968.
2. D. M. Bigg and J. R. Preston, "Stamping of Thermoplastic Matrix Composites," *Polymer Composite*, Vol. 10, No. 4, pp. 261-268, 1989.
3. A. J. Ortega, "Automotive Glass-Fiber Reinforced Plastics," *SPE Journal*, Vol.25, pp. 76-78, Aug. 1969.
4. W. E. Soll, "Behavior of Advanced Thermoplastic Composite in Forming," M. S. Thesis, MIT, 1987.
5. J. D. Muzzy and A. C. Kays, "Thermoplastic vs Thermosetting Structural Composites," *Polymer Composites*, Vol. 15, No. 13, pp. 169-172, 1984.
5. L. J. Broutman and S. Kalpakjian, and J. Chawla, "Deep Drawability of Biaxially Rolled Thermoplastic Sheets," *Polymer Engineering and Science*, Vol.12, No.2, pp.150-156, 1972.
7. A. J. Smiley and R. B. Pipes, "Analysis of the Diaphragm Forming of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastics," *Journal of thermoplastic Composite Materials*, Vol. 1, pp. 298-321, 1988.
8. A. Dutta and M. Cakmak, "Instrumented Thermoforming of advanced Thermoplastic Composites III: Relative Performance of Various Prepregs in Forming Double Curvature Parts," *Polymer Composites*, Vol. 12, No.3, pp. 354-369, Oct. 1991.
9. 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*, Vol. 117, pp. 127-132, Jan. 1995.
10. J. H. Lee and J. H. Vogel, "Biaxial Stretch Forming of Thermoplastic Composite Sheets," *27th International SAMPE Technical Conference, Diversity into the Next Century*, Vol. 25, pp. 750-759, Oct. 1995.
11. T. A. Martin, D. Bhattacharyya, and R. B. Pipes, "Deformation Characteristics and Formability of Fiber-Reinforced Thermoplastic Sheets," *Composites Manufacturing*, Vol. 3, pp. 365-372, 1992.
12. M. Ericson and L. Berglund, "Deformation and Fracture of Glass-Mat-Reinforced Polypropylene," *Composites Science and Technology*, Vol. 43, pp. 269-281, 1992.
13. 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*, Vol. 118, pp. 80-87, Jan. 1996.