

유리 섬유 강화 열가소성 복합재료의 1축 인장시 재료거동에 대한 연구

이 중 희*

A Study on the Material Behavior of Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Composite in Uniaxial Tension.

J. H. Lee*

ABSTRACT

Glass fiber reinforced polymeric composites hold considerable promise for increased use in low cost high volume applications because of the potential for processing by solid phase forming. Unfortunately, because of the wide variety of such materials, inherent variability in properties, and complex temperature and strain rate dependence, large strain behavior of these materials has not been well characterized. Of particular importance is failure during processing due to localized necking instability, and it is this phenomenon that is primary focus of this study. The strain rate and temperature dependence is used to predict limiting tensile strains, based on Mackinack imperfection theory. Excellent correlation was obtained between theory and experiment, and the results are summarized in the limit strains as a function of temperature and strain rate.

Key Words: Thermoplastic Composite(열가소성 복합재료), Strain Rate Sensitivity(변형 속도 민감도), Necking Instability(넥킹 불안정성), Limit Strain(한계 변형률), Solid-Phase Forming(고상 성형)

1. 서 론

유리 섬유 강화 열가소성 복합재료는 가벼울 뿐만 아니라 비교적 높은 강성 및 강도를 가지고 있어서 여러 산업 분야에서, 특히 자동차, 항공기, 조선 산업에서 가장 중요한 재료중의 하나가 되었다⁽¹⁻³⁾. 그 결과 최근에는 그러한 복합재료에 대한 재료 거동이나 성형 기술에 대한 연구에

많은 관심이 집중되었다⁽⁴⁻⁶⁾. 열가소성 복합재료에 사용될 수 있는 성형 방법 중 하나는 고상 성형(solid-phase forming)이라 하겠다. 고상 성형은 제품을 그 polymer matrix의 용융온도(melting temperature)와 유리성 천이온도(glass transient temperature) 사이에서 성형하는 것이다⁽⁷⁾. 이러한 고상 성형의 가장 큰 장점은 제품의 표면이 좋고 비교적 짧은 공정 시간을 갖는다는 것

* 전북대학교 기계공학부

이다.

한 재료가 복잡한 성형에 견딜 수 있는 능력을 나타내는 성형성에 관한 정보는 판재 성형에 있어 아주 중요하다 하겠다. 판재의 성형동안 판재가 안정성(stability)을 잃고 파괴(fracture)되었을 때, 금속성 판재 성형에 있어서 흔히 행해지는 것은 그때의 변형률(strain)이 그 재료의 성형 한계(forming limit)를 초과하지 않도록 재 설계하거나 제조 방식을 바꾸는 것이다. 이러한 시행착오법에 의한 설계는 많은 경비와 시간이 소요되므로 이러한 방법을 회피하기 위해 판재 성형시 발생하는 판재의 파괴 현상에 대한 많은 연구가 행해졌다. Swift⁽⁸⁾와 Hill⁽⁹⁾에 의해 금속성형에 있어서의 국부 넥킹 이론(localized necking theory)이 유도되었고, Keeler와 Backofen⁽¹⁰⁾은 음의 minor strain 영역에서와 같은 방법으로 양의 minor strain 영역에서도 국부 넥킹이 발생할 수 있다는 것을 실험적으로 보였다. Mackinack과 Kuczynski⁽¹¹⁾는 넥킹이 판재 자체가 가지는 취약한 부분으로부터 시작된다는 가정 하에 국부 넥킹 이론을 전개하였다.

유사한 문제들이 열가소성 재료의 성형이나 large deformation에서도 제기되었다. 많은 열가소성 재료의 경우, large deformation에서 관찰된 재료의 거동은 금속성 물질과는 상당히 다르다⁽¹²⁾. Vincent⁽¹³⁾는 고분자 물질에서 안정된 neck의 확산과 관련하여 large strain behavior를 설명하는데 큰 기여를 했으며, Nimmer⁽¹²⁾는 폴리카본네이트(polycarbonate)의 인장 시험에 있어 전형적인 안정된 neck의 확산을 예측하기 위해 finite strain continuum mechanics 방법을 이용하였다.

금속성 판재나 열가소성 재료의 판재 성형과는 다르게 열가소성 복합재료 판재에 대한 넥킹 불안정성(necking instability)에 대해서는 아주 적은 연구만이 행해졌다. Okine등⁽¹⁴⁾은 drawing에 있어서의 불연속성 섬유가 일 방향으로 보강된 열가소성 복합재료의 drawability를 실험적으로 연구하였고, Lee와 Vogel⁽¹⁵⁾은 cup forming에 있어서의 넥킹에 대해 실험적으로 연구하였다. 그러나 열가소성 복합재료의 고상 성형법이 실제 이용되기 위해서는 아직 이 분야에 많은 연구가 필요하다 하겠다.

본 연구의 목적은 열가소성 복합재료에 고상 성형법이 이용될 수 있는지와 이러한 재료의 1축 인장에서 발생하는 국부 넥킹 현상의 특성을 파악하는데 있다. 이를 위해 여러 실험 조건에서의 인장 시험을 통해 국부 넥킹 불안정성을 파악하고 Mackinack 이론을 이용하여 여러 조건에서의 넥킹을 예측하고자 한다.

2. 실험적 고찰

실험에 사용된 재료는 AHLSTROM 회사에서 제공된 임의의 방향으로 유리 섬유가 보강된 폴리프로필렌(polypropylene) 복합재료(RTC-C-4000-20 B, RTC-C-3000-40 B)이다. 평균 유리 섬유의 길이와 직경은 각각 12 mm와 11 μ m이다. 폴리프로필렌 matrix의 유리 성 천이온도 및 용융온도는 -10°C 와 165°C 이다. 사용된 유리 섬유 강화 복합재료 판재는 유리 섬유를 중량 비로 20%와 40% 함유한 것이다. 판재의 두께는 유리 섬유의 함유량이 20%인 재료는 3.81 mm이고, 40%인 재료는 2.54 mm이다.

각 시편은 실험 전에 원하는 온도에 이르게 하기 위해 오븐에 40분간 유지한 다음 실험을 행하였다. 시편을 가열하는 동안에 시편의 열팽창에 의한 응력 축적을 방지하기 위해 아래쪽 grip을 풀어 두었다. 실험 온도는 재료 거동에 미치는 온도의 영향을 연구하기 위해 75°C 로부터 150°C 까지 25°C 씩 증가하면서 실험을 행하였고, 변형 속도(Strain Rate)가 미치는 영향을 파악하기 위해 10^{-1}sec^{-1} 과 10^{-4}sec^{-1} 의 변형 속도에서 실험을 행하였다.

변형 속도 민감도(strain rate sensitivity)는 재료의 성형성에 아주 밀접한 관계가 있기 때문에 재료 거동에 영향을 미치는 중요한 인자 중의 하나일 것으로 여겨진다. 그러므로 변형 속도 민감도는 다음과 같은 3개의 초기 변형 속도에서 Fig. 1에 보인 것처럼 변형 속도에 급변화를 줌으로써 측정하였다(10^{-1}sec^{-1} 에서 1sec^{-1} 로, 10^{-3}sec^{-1} 에서 10^{-1}sec^{-1} 로, 10^{-5}sec^{-1} 에서 10^{-4}sec^{-1} 로). 변형 속도와 온도와의 사이의 상호관계를 파악하기 위해 변형 속도 민감도 측정은 각 온도에서 행하였다.

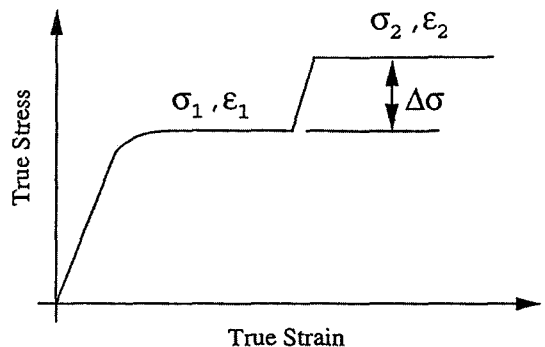


Fig. 1 The method for determining strain rate sensitivity q by changing an abrupt strain rate during a test.

3. 이론적 고찰

인장-변형률 선도에서 아래쪽으로 구부러진 부분이 넥킹의 시작을 유도하고⁽¹³⁾, 넥킹 또한 그 재료의 변형 속도 민감도에 의해 매우 강한 영향을 받는다^(16,17). 본 연구에서는 1축 인장에서의 넥킹과 변형 속도 민감도와의 관계는 Mackinack 불완정성 이론(Mackinack imperfection theory)을 이용하여 예견하였다⁽¹¹⁾. 홈 모양의 불균일성을 갖는 시편에서 그 홈단면 및 홈 밖의 단면에서의 힘의 평형 조건은 다음과 같다:

$$\sigma_b A_b = \sigma_a A_a \quad (1)$$

여기에서 A_a 와 A_b 는 홈과 홈 바깥쪽의 효과적인 단면적(effective cross sectional area)을 의미한다. 이러한 효과적인 단면적은 유리 섬유들의 불균일성 및 그 밖의 불완전성뿐만 아니라 실제적인 두께의 변화를 포함하고 있다. 그 홈 지역이 초기의 효과적인 단면적 A_{a0} 와 홈 바깥 지역의 효과적인 단면적이 A_{b0} 를 갖는다면 그때의 불균일성(inhomogeneity) f 는 A_{a0}/A_{b0} 로써 정의된다.

실험결과로부터 알 수 있는 바와 같이 재료거동은 응력이 최고치에 도달한 후에 아주 적은 변형 연화 현상(strain softening) 또는 경화 현상(strain hardening)을 보이기 때문에 여기서 넥킹 분석을 위해 이러한 연화 또는 경화 현상을 무시하고 응력이 변형률에 의존하지 않는 것으로 간주했다. 변형 속도와 점성계수 η 와의 관계는 Sadd에 의해 제안된 것처럼 지수 적으로 변한다고 가정하면⁽¹⁸⁾:

$$\eta = \eta_0 \dot{\epsilon}^q \quad (2)$$

여기에서 변형 속도 민감도 q 값은 온도와 변형 속도의 함수로 가정하였고, η_0 는 재료의 초기 점성계수이다. 응력(flow stress)은 변형 속도에 따라서 증가하고 그때의 응력은 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽¹⁹⁾.

$$\sigma = \frac{\eta}{E_r} \dot{\epsilon} = \frac{\eta_0}{E_r} \dot{\epsilon}^{q+1} \quad (3)$$

여기에서 E_r 은 (탄성계수 E_0 + 변형 경화 또는 연화 계수 H_s (탄성계수 E_0))를 의미한다⁽¹⁹⁾. 식 (1)과 (3)으로부터 한계 변형률은 ϵ_b^* 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_b^* = -(q+1)\ln(1-f^{\frac{1}{q+1}}) \quad (4)$$

여기에서 한계 변형률 ϵ_b^* 는 Neck에서의 변형률이 무한대로 감에 따라 neck 밖에서의 변형률을 의미한다.

4. 결과 및 토의

Fig. 2는 20% 유리섬유 강화 복합재료의 125 °C에서 얻어진 응력-변형률 선도이다. 재료의 방향성을 파악하기 위해 두 방향에서 채취한 시편으로 실험이 행해 졌으며 실험결과 일관성 있는 방향에 대한 특성은 거의 보이지 않았다. Fig. 2에서 점들은 실험적 결과이고 그리고 선은 계산된 결과를 나타낸다⁽¹⁹⁾. 실험에서 얻어진 결과로부터 Levenberg- Marquardt의 비선형 최소사승법⁽²⁰⁾을 이용하여 점성계수 η 가 구해졌으며 결과는 Table 1에 나타

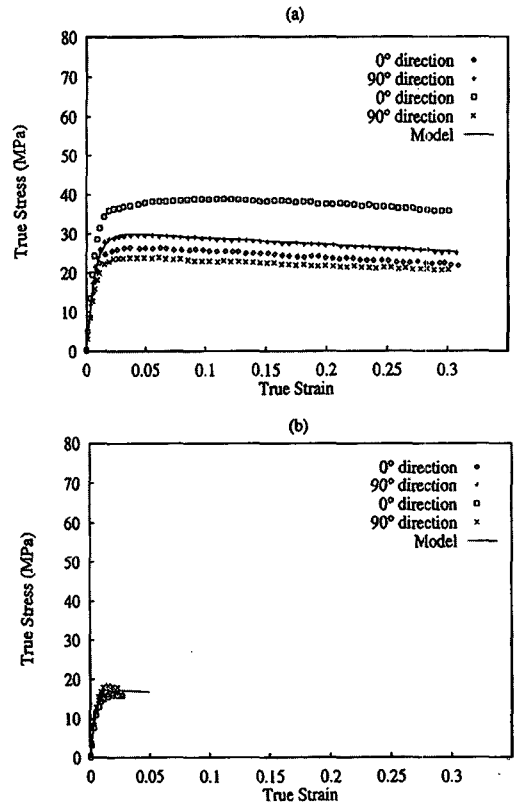


Fig. 2 Stress-strain response for the 20% glass composite at 125 °C and: (a) 10⁻¹ sec⁻¹ and (b) 10⁻⁴ sec⁻¹.

Table 1. Material constant for glass fiber reinforced polypropylene.

Glass (%)	Temp (°C)	$\dot{\epsilon}$ (sec ⁻¹)	E_0 (MPa)	H_0 (MPa)	η (MPa·s)
20	75	0.1	3136.4	-6.2	895
20	75	0.0001	2934.1	-6.2	280682
20	125	0.1	2493.2	0.2	221
20	125	0.0001	2053.9	0.2	120190
40	75	0.1	5992.2	-41.9	1049
40	75	0.0001	5756.8	-41.9	384762
40	125	0.1	4950.3	-15.6	275
40	125	0.0001	4544.2	-15.6	196417

내었다. 탄성계수 E_0 는 인장-변형을 곡선의 초기의 기울기 값으로부터 구해졌고 변형 경화 또는 연화 계수 H_0 는 변형률이 큰 영역(large strain)에서 얻어졌다.

75 °C와 125 °C에서 시험한 시편을 Fig. 3에서 보이고 있다. 그림에서 보인바와 같이 변형 속도 10^{-1} sec^{-1} 과 온도 75 °C에서 시험한 시편은 초기 변형 상태에서 파괴되었고, 변형 속도 10^{-4} sec^{-1} 과 온도 125 °C의 경우는 비교적 초기 변형 상태에서 국부 넥킹(localized necking)이 발생함을 보인다. 그러나 그와는 반대로 변형 속도 10^{-1} sec^{-1} 와 온도 125 °C 조건에서는 어떠한 국부 넥킹도 일어나지 않고 변형률 35% 이상 변형시킬 수 있음을 보인다.

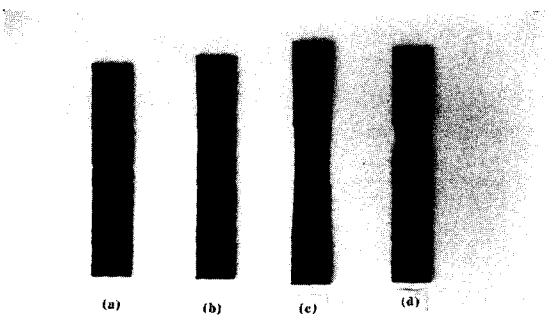


Fig. 3 Tested specimens(20% glass) at (a) 10^{-1} sec^{-1} and 75°C, (b) 10^{-4} sec^{-1} and 75°C, (c) 10^{-1} sec^{-1} and 125°C, and (d) 10^{-4} sec^{-1} and 125°C

4-1. 변형 속도 민감도(Strain Rate Sensitivity)

20%와 40% 유리 섬유 강화 복합재료의 변형 속도 급변화 시험을 통해서 얻어진 점성계수와 변형 속도 의존도를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 점성

Table 2. Measured strain rate sensitivity constant q

Glass (%)	Temp (°C)	Strain rate (sec ⁻¹)		
		$10^{-5} \rightarrow 10^{-4}$	$10^{-3} \rightarrow 10^{-2}$	$10^{-1} \rightarrow 10^0$
20	75	-0.906	-0.868	
20	100	-0.947	-0.859	-0.910
20	125	-0.953	-0.904	-0.803
20	150	-0.965	-0.916	-0.835
40	75	-0.938	-0.845	
40	100	-0.972	-0.855	-0.883
40	125	-0.978	-0.923	-0.853
40	150	-0.985	-0.924	-0.876

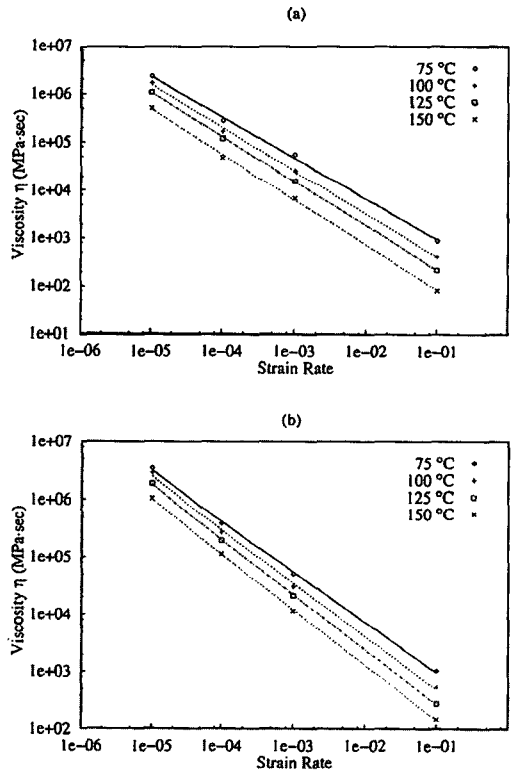


Fig. 4 Dependence of viscosity η on strain rate for (a) 20% and (b) 40% glass composites.

계수 η 값은 대수-대수(log-log) 좌표 계에서 변형 속도가 증가함에 따라 거의 선형적으로 감소한다. 그러나, 성형 한계 변형률은 변형 속도 민감도의 작은 변화에도 크게 영향을 받기 때문에 그들은 변형 속도 급변화 시험에서 얻어진 국부적인 q 값을 가지고 구해졌다. 만약 두 변

형 속도 $\dot{\epsilon}_1$ 와 $\dot{\epsilon}_2$ 에서의 응력(flow stress) σ_1 와 σ_2 를 같은 변형률에서 비교함으로써 변형 속도 민감도는 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$q = \frac{\ln(\sigma_2/\sigma_1)}{\ln(\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1)} - 1 \quad (5)$$

Table 2는 여러 온도와 변형 속도에서 측정된 변형 속도 민감도 q 값을 보이며, 표에 보인바와 같이 변형 속도 민감도는 온도 및 변형 속도와 아주 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 변형 속도 민감도는 그 값에 있어서는 작은 차이를 보일 지라도 이러한 작은 차이는 상당히 다른 한계 변형률 값을 예견한다. 변형 속도가 증가함에 따라 최대 변형 속도 민감도는 고온 쪽에 존재하는 것으로 관찰되었고, 그 경향은 20%와 40% 복합재료에서 모두 유사하게 나타났다. 이러한 최대 변형 속도 민감도를 보이는 성형조건은 식(4)에서 알 수 있듯이 넥킹을 피할 수 있는 최적 조건에 해당한다.

4-2. 넥킹(Necking)

인장 시험 결과는 국부 넥킹(localized necking)이 온도와 변형 속도에 아주 밀접한 관계가 있음을 보인다. Fig 5는 각 재료의 실험적 결과뿐 아니라 $f = 0.99$ 일 때 예측되어진 한계 변형률(limiting strain) ϵ_b^* 값을 보인다. 실제 복합재료에 있어서 불균일선 f 는 유리 섬유 성분, 방향 및 실제적인 두께 변화와 같은 측정하기 어려운 요소들에 기인하기 때문에 여기서 f 는 실험결과와 적절한 관계를 얻을 수 있는 값이 선정되었다. 여기에 나타난 실험결과는 4번의 실험치의 평균값이다.

실험결과와 이론적 결과는 서로 아주 잘 일치함을 알 수 있으며, 이는 관찰된 변형 속도 민감도와 성형성이 아주 밀접한 관계에 있음을 보이는 것이라 하겠다. 이러한 결과로부터 주어진 성형 온도에 해당하는 적절한 성형 속도를 택함으로써 최상의 한계 변형률을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

성형 온도가 증가함에 따라서 최적의 변형 속도 또한 증가하는 추세를 보이며, 사용된 두 재료 모두에서 유사한 경향을 보였다. 낮은 온도와 높은 변형 속도에서 또는 높은 온도와 낮은 변형 속도에서는 대체로 저조한 성형성을 보인 반면, 적절한 변형 속도를 선택함으로써 시험된 온도 범위에서 30%로부터 60%에 이르는 비교적 높은 한계 변형률이 얻어졌다.

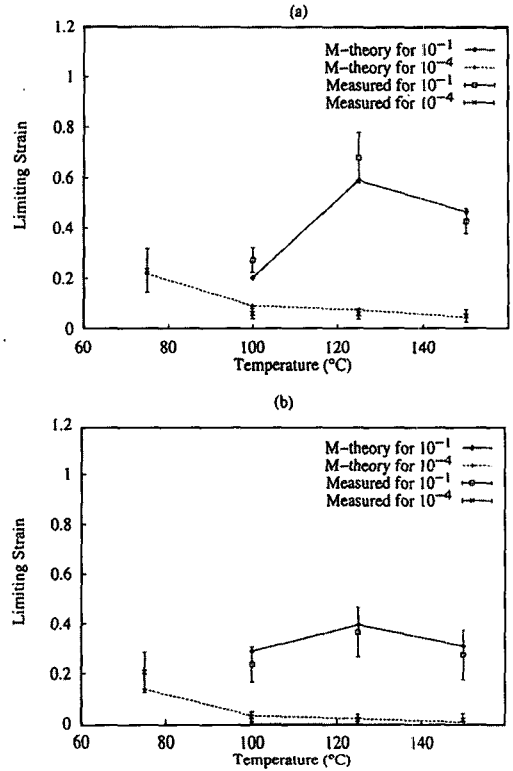


Fig. 5 Predicted and measured limiting strains ϵ_b^* ($f=0.99$) for (a) 20% and (b) 40% glass composites.

5. 결 론

유리섬유 강화 열가소성 복합재료는 비교적 높은 변형 속도 민감도 보이며, 이로 인해 국부 넥킹은 온도와 변형 속도에 아주 밀접한 관계를 가지면서 어떤 조건들 하에서는 높은 변형률에 이르기까지 발생이 지연되었다. Marciniak 불완전성 이론이 한계 변형률을 계산하기 위해 사용되었으며, 이론적 결과와 실험적 결과가 아주 잘 일치함을 보였다. 성형 한계 변형률선도는 재료의 거동에 있어서의 성형 온도와 성형 속도의 영향을 보일 뿐 아니라 최적의 성형 조건을 선택하는 도구로써 사용되어 질 수 있다. 보다 많은 실험적 데이터 및 연구가 신뢰성 있는 성형 한계 변형률선도의 작성을 위해서는 필요할 지라도 본 연구에서 얻어진 선도는 최적의 성형 한계 변형률의 일반적인 특성을 명확히 보여준다 하겠다. 이러한 이론과 실험적인 연구를 통해서 본 연구에 사용된 유리 섬유 강화 복합재료는 적절한 성형 온도와 성형 속도에서 고상

성형에 아주 적합하다고 할 수 있다. 아울러 여기에서 언급되고 관찰된 바와 같은 복잡한 온도와 변형 속도 민감도 관계 등을 보다 명확히 설명하기 위해 앞으로의 보다 많은 연구가 필요하다 하겠다.

참 고 문 헌

1. Bigg, D. M. and Preston, J. R., "Stamping of Thermoplastic Matrix Composite", *Polymer Composites*, Vol. 10, pp. 261-268, 1986.
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. Smiley, A. J., and Pipes, R. B., "Analysis of the Diaphragm Forming of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastics", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 1, pp. 298-321, 1988.
5. Tsalhalis, D. T., Pantelakis, 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.
6. 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*, Warrendale, PA, Minerals, Metals & Materials Soc. (TMS), pp. 869-873, 1993.
7. Bigg, D. M., Hiscock, D. F., Preston, J. R., and Bradbury, E. J., "Thermoplastic Matrix Sheet Composites", *Polymer Composites*, Vol. 9, pp. 222-228, 1988.
8. Swift, H. W., "Plastic Instability under Plane Stress", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 1, pp. 1-18, 1952.
9. Hill, R., "On Discontinuous Plastic States with Special Reference to Localized Necking in Thin Sheets", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 1, pp. 19-30, 1952.
10. Keeler, S. P. and Backofen, W. A., "Plastic Instability and Fracture in Sheets in Sheets Stretched Over Rigid Punches", *Transactions of the ASM*, Vol. 56, pp. 25-47, 1963.
11. Marciniak, Z. and Kuczynski, K., "Limit Strains in the Processes of Stretch-Forming Sheet Metal", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 9, pp. 609-620, 1967.
12. Nimmer, R. P., "Predicting Large Strain Deformation of Polymers", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 27, pp. 16-24, 1987.
13. Vincent, P. I., "The Necking and Cold-Drawing of Rigid Plastics", *Polymer*, Vol. 1, pp. 7-19, 1960.
14. Okine, R. K., Edison, D. H., and Little, N. K., "Properties and Formability of an Aligned Discontinuous Fiber Thermoplastic Composite Sheet", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 8, pp. 70-90, 1990.
15. Lee, J. H. and Vogel, J. H. "An Investigation of the Formability of Long Fiber Thermoplastic Composite Sheets", *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 117, pp. 127-132, 1995.
16. Hart, E. W., "Theory of Tensile Test", *ACTA Metallurgica*, Vol. 15, pp. 351-355, 1967.
17. Becker, R. and Needleman, A., "Effect of Yield Surface Curvature on Necking and Failure in Porous Plastic Solids", *ASME J. Applied Mechanics*, Vol. 53, pp. 491-499, 1986.
18. Sadd, M. H., and Morris, D. H., "Rate-Dependent Stress-Strain Behavior of Polymeric Materials", *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 20, pp. 421-433, 1976.
19. Lee, J. H. "A Study on the Long Fiber Reinforced Thermoplastic Composite Sheet Forming", Ph.D thesis, University of Minnesota, 1995.
20. Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P., "Numerical Recipes in FORTRAN", Press Syndicate of the University of Cambridge, New York, NY, 1992.