

◆ 특집 ◆ 최신 정밀 설계재료 기술 III

투명 폴리카보네이트 판재의 고온 인장 거동에 관한 연구

A Study on Tensile Behavior of Transparent Polycarbonate (PC) Plate in the High Temperature

이호진¹, 안동규^{2,✉}
Ho Jin Lee¹ and Dong-Gyu Ahn^{2,✉}

¹ 조선대학교 일반대학원 (Graduate School, Chosun Univ.)

² 조선대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chosun Univ.)

✉ Corresponding author: smart@chosun.ac.kr, Tel: +82-62-230-7043

Manuscript received: 2013.11.22 / Received: 2013.12.29 / Accepted: 2013.12.10

Recently, several researchers made their endeavor to manufacture the photobioreactor(PBR) with characteristic shapes form vacuum and blow forming process. Hence, behaviors of the transparent polycarbonate(PC) plate in the high temperature region should be examined to obtain the desired PBR case via vacuum and blow forming processes. The aim of this paper is to investigate tensile behavior of PC plate in the high temperature. Various tensile tests were performed using high temperature tensile testing machine. The influence of tensile speed, thickness and ambient temperature on tensile behavior in the high temperature was examined. The flow stress and tensile strength augmented when the tensile speed increased. In order to obtain proper flow curves with strain rate effects for different temperature of specimen, G'sell-Jonas model was adopted. The material constants of the G'sell-Jonas model were estimated. The flow curves of the PC plate considering the tensile speed, specimen thickness and temperature were obtained.

Key Words: Transparent polycarbonate plate (투명 폴리카보네이트 판재), Tensile behavior (인장 거동), Properties in the high temperature (고온 물성), G'sell-Jonas model (G'sell-Jonas 모델), Flow curve (유동곡선)

기호설명

t = initial thickness of specimen

σ = true stress

ε = true strain

v = tensile speed

K = scale factor

w = viscoelastic coefficient

h = strain hardening coefficient

m = strain rate sensitivity

l_0 = initial length of specimen

T_g = glass transition temperature

T_a = ambient temperature

1. 서론

플라스틱 재료(Plastic materials)는 분자결합 방법에 따라 열가소성 수지(Thermoplastic resin) 및 열경화성 수지(Thermosetting resin)로 분류된다. 열가소성 수지의 가장 큰 특징은 가열 시 연화단계를

거쳐 유동성을 갖게 되며 냉각 시 가열전의 상태로 돌아가는 것이다.¹ 투명 폴리카보네이트(Polycarbonate) 판재는 열가소성 수지를 압출하여 제작되는 판재로서 광학적, 기계적 및 표면의 오염방지 특성이 좋아 미세조류대량생산을 위한 평판형 광생물 반응기 케이스 제작에 사용되고 있다.² 특히, 최근 진행되는 연구에서는 진공 성형(Vacuuming forming) 공정 및 블로우 성형(Blow forming) 공정을 이용하여 특정형상을 가지는 평판형 광생물 반응기 케이스 제작에 노력을 기울이고 있다.^{3,4} 진공 성형 및 블로우 성형 공정은 고온의 플라스틱 판재를 이용한다. 따라서, 진공 성형 및 블로우 성형 공정을 통하여 원하는 형상의 평판형 광생물 반응기 케이스 제작을 하기 위해서는 투명 폴리카보네이트 판재의 고온인장 거동에 관한 연구가 필요하다.⁵⁻⁸

선행연구들에서는 Schoßig등 이 유리섬유로 강화된 열가소성 플라스틱(Glass fiber reinforced thermoplastic) 재료의 높은 변형속도에서의 기계적 특성에 대해 연구하였다.⁹ 이 연구에서는 폴리프로필렌(Polypropylene) 과 폴리부텐-1(Polybutene-1) 판재의 단축인장 실험결과를 G'sell 모델을 이용하여 도출하였다. Rezgui등 은 시편의 온도 및 인장속도에 따른 저밀도 강화 폴리프로필렌(Low density reinforced polypropylene)의 변형특성에 대해 연구하였다. 그들의 연구에서는 영하 이하의 저온에서부터 유리전이온도 이상의 고온까지 다양 온도영역에서 재료의 특성을 분석하였다.^{10,11}

이 연구에서는 투명 폴리카보네이트 판재의 고온 인장 거동을 실험적으로 분석하고자 한다. 이를 위하여 판재두께, 인장속도 및 온도가 투명 폴리카보네이트 판재 인장 거동에 미치는 영향을 분석/고찰하였다. 또한 투명 폴리카보네이트 판재의 고온 인장 거동을 모델링하기 위하여 각 온도 및 두께별 변형율 속도 영향이 고려된 G'sell-Jornas 모델의 상수를 도출하였다.

2. 고온 인장 실험

인장속도, 재료두께 및 분위기 온도에 따른 투명 폴리카보네이트 판재 인장 거동 변화를 분석하기 위하여 고온 인장 실험을 수행하였다. 고온 인장 실험에 사용된 시편은 표준급 폴리카보네이트 판재인 ㈜ 아이에스 옵틱스사의 투명 폴리카보네이트 판재(ISP-0009)를 이용하여 ASTM D 638 (Type

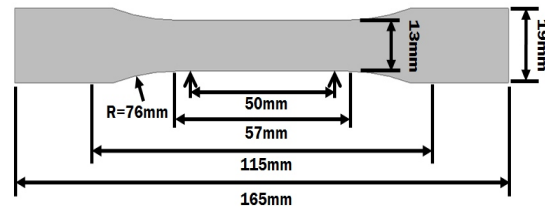


Fig. 1 Design of specimens for tensile test in the high temperature

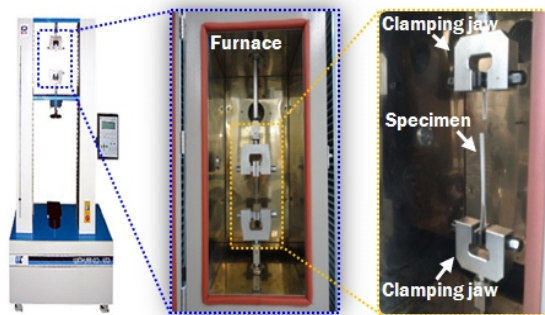


Fig. 2 Experimental set-up for high temperature tensile test

Table 1 Experimental condition of tensile test in the high temperature

t (mm)	T _a (°C)	V (mm/min)
3.0	20 - 175	10 - 250
4.5	20 - 175	10 - 250

1) 규격에 따라 Fig. 1과 같이 제작하였다.¹² 실험에 사용된 폴리카보네이트 판재의 유리전이온도(Glass transition temperature)는 150 °C 이다.

고온 인장 실험을 위해 가열된 노 온도는 2 분간 가열하여 실험온도에 도달하게 한 후, 3분간 온도를 유지시켜 시편 내부온도가 가열 노 내부온도와 동일하게 되도록 하였다. 고온 인장 실험에서는 Fig. 2와 같은 UTM WL 2100 A 인장 시험기를 사용하였다. 고온 인장 실험의 시편 표점거리는 115 mm 였다.

고온 인장 실험에 적용된 실험조건은 Table 1과 같다. 이 연구에서는 3가지 실험 변수를 조합하여 총 36가지 조건에 대하여 108 회의 고온 인장 실험을 수행하였다. 실험에 적용된 인장속도, 실험온도 및 시편두께는 각각 10 - 250 mm/min, 20 - 175 °C 및 3.0 - 4.5 mm 였다.

3. 인장속도가 고려된 재료변형 모델링 방법

G'sell-Jonas 모델은 등방성 비선형 점탄성 특성과 무정형 또는 준결정성 고분자들의 거동을 표현하는데 사용되는 구성 방정식이다.¹³ 투명 폴리카보네이트 판재의 거동을 모델링하기 위하여 각 온도 및 두께 별 인장속도가 고려된 재료변형 모델 상수를 도출 하였다. 재료변형 모델 상수 도출은 고온 인장 실험결과를 통해 도출된 진응력 - 진변형률 값을 G'sell-Jonas 모델 상수 도출 프로그램인 ESI 사의 Optimizer G'sell 상용 프로그램에 적용시켜 도출하였다.¹⁴

G'sell-Jonas 모델은 일정한 변형률 속도를 제어하는 조건에서 만들어진 구성방정식이다. 그러나 얇은 플라스틱 판재를 이용한 단축인장시험은 시편 가열 시 뒤틀림이 발생하여 일정한 변형률 속도를 제어하기 어렵다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 Kim 등이 제안한 변형된 G'sell-Jonas 모델 구성 방정식을 사용하였다.^{15,16} 변형된 G'sell 모델 구성 방정식은 변형률 속도 대신 인장속도를 사용하며 식(1)과 같다.

$$\sigma = k[1 - \exp(-w\varepsilon)]\exp(h\varepsilon^2)\left(\frac{v}{l_0 \cdot \exp(\varepsilon)}\right)^m \quad (1)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 실험온도에 따른 인장특성 변화

투명 폴리카보네이트 판재의 고온 인장 실험 결과를 이용하여 실험온도에 따른 인장특성을 비교하였다. 시편두께 및 인장속도에 따른 실험온도-인장강도 선도는 Fig. 3과 같다. 실험결과 실험온도, 시편두께 및 인장속도가 각각 20°C, 4.5 mm 및 250 mm/min 조건에서 인장강도가 105 MPa로 가장 높게 관찰되었으며 실험온도, 시편두께 및 인장속도가 각각 175 °C, 3.0 mm 및 10 mm/min 조건에서 인장강도가 0.07 MPa로 가장 낮게 관찰되었다. 시편두께 및 인장속도가 동일할 경우 실험온도가 20 °C 일 때 인장강도가 가장 높으며 실험온도가 증가할수록 인장강도가 감소 함을 알 수 있었다. 특히 시편두께 및 인장속도가 3.0 mm 및 10 mm/min 인 조건에서 실험온도를 20°C에서 175 °C로 상승시킬 경우 인장강도가 1000⁻¹ 수준으로 크게 감소함을 관찰하였다. 실험온도 상승에 따른 인장강도 감소율을 고찰한 결과 시편두께, 실험온도에 따라

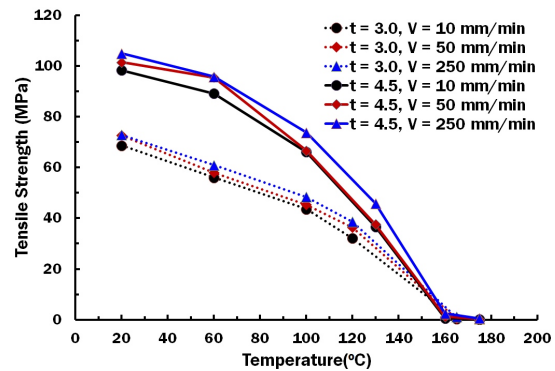


Fig. 3 Ambient temperature - tensile strength curves for different specimen thicknesses and tensile speeds

인장강도 감소율이 변함을 알 수 있었다. 시편두께 4.5 mm의 경우 실험온도 60°C에서 인장강도 감소율이 9 %에서 30 % 수준으로 증가한 후 실험온도 160°C에서 약 98 % 수준으로 증가하였다. 그러나 시편두께 3.0 mm의 경우에는 실험온도 120°C 까지 인장강도 감소율이 20 % 수준으로 유지되다가 실험온도 165°C에서 인장강도 감소율이 99 % 수준으로 증가하였다.

이 결과를 통하여 투명 폴리카보네이트 판재는 판재온도가 상승함에 따라 인장강도가 감소함을 알 수 있었다. 특히 판재가 유리전이온도 이상 가열 될 경우 인장강도가 현저히 감소하므로 투명 폴리카보네이트 판재를 이용한 성형 시 유리전이온도 이상에서 성형을 수행 해야 함을 알 수 있었다. 또한 성형공정 중 냉각이나 외부 조건의 접촉에 의하여 시편이 국부적으로 유리전이온도 이하로 냉각될 경우 그 영역의 유동응력이 급격히 상승함으로 제품 성형성이 현저히 떨어질 것으로 사료된다.

4.2 인장속도에 따른 인장특성 변화

투명 폴리카보네이트 판재의 고온인장 실험 결과를 이용하여 인장속도에 따른 인장특성을 비교하였다. Fig. 4와 5는 각각 유리전이온도 이전 영역 시편의 인장속도에 따른 인장강도 선도 및 유리전이온도 이상 영역 시편의 인장속도에 따른 인장강도 선도이다.

실험온도가 유리전이온도 미만이며 시편두께 및 실험온도가 동일한 조건에서 인장속도를 증가시킬 경우 모든 실험조건에서 인장강도가 증가하였다. 가장 높은 인장강도 증가율은 시편두께 및

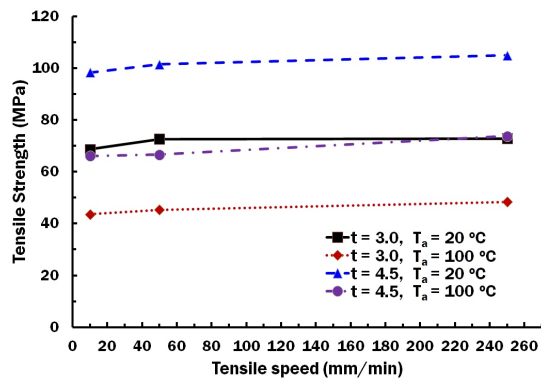


Fig. 4 Tensile speed - tensile strength curves for different specimen thicknesses and ambient temperatures (ambient temperature < T_g)

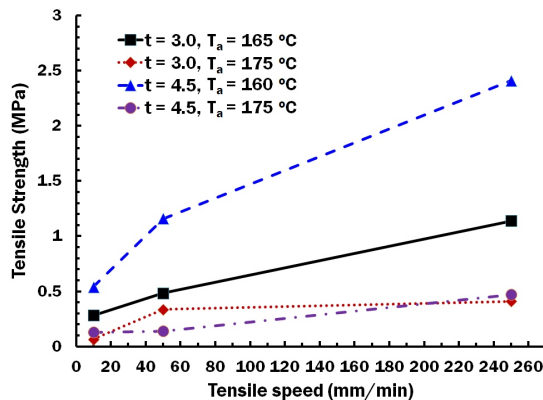


Fig. 5 Tensile speed - tensile strength curves for different specimen thicknesses and ambient temperatures (ambient temperature > T_g)

실험온도가 각각 4.5 mm 및 100 °C 조건에서 인장속도가 50 mm/min에서 250 mm/min으로 증가할 때 10.7 %로 관찰되었다. 가장 낮은 인장강도 증가율은 시편두께 및 실험온도가 각각 3.0 mm 및 20 °C 조건에서 인장속도가 50 mm/min에서 250 mm/min으로 증가할 때 0.3 %로 관찰되었다.

실험온도가 유리전이온도 이상이며 시편두께 및 실험온도가 동일한 조건에서 인장속도를 증가시킬 경우 모든 실험조건에서 인장강도가 증가하였다. 가장 높은 인장강도 증가율은 시편두께 및 실험온도가 각각 3.0 mm 및 175 °C 조건에서 인장속도가 10 mm/min에서 50 mm/min으로 증가할 때 410.6 %로 관찰되었다. 가장 낮은 인장강도 증가율은 시편두께 및 실험온도가 각각 3.0 mm 및 175 °C

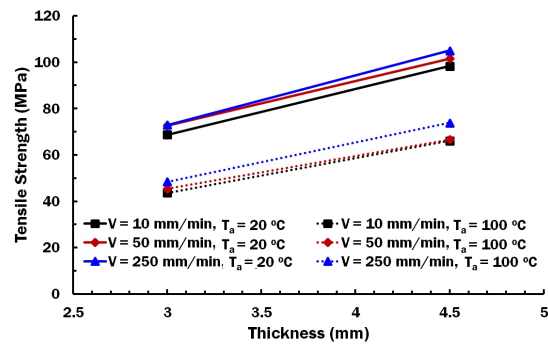


Fig. 6 Specimen thickness - tensile strength curves for different ambient temperatures and tensile speeds (ambient temperature < T_g)

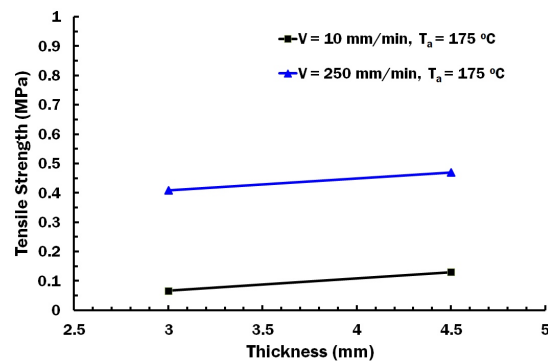


Fig. 7 Specimen thickness - tensile strength curves for different ambient temperatures and tensile speeds (ambient temperature > T_g)

조건에서 인장속도가 50 mm/min에서 250 mm/min으로 증가할 때 21.4 %로 관찰되었다.

투명 폴리카보네이트 판재는 인장속도가 상승함에 따라 인장강도가 증가함을 알 수 있었다. 유리전이온도 이상 구간에서 인장속도에 따른 인장강도 증가율이 높음을 알 수 있었으며 인장속도 증가에 따른 인장강도 증가율은 시편두께 3.0 mm에서 더 높음을 알 수 있었다. 이와 같은 결과에 근거하여 투명 폴리카보네이트 판재를 이용하여 원하는 성형결과를 얻기 위해서는 성형공정 중 재료의 인장속도가 고려되어야 함을 알 수 있었다.

4.3 시편두께에 따른 인장특성 변화

투명 폴리카보네이트 판재의 고온인장 실험 결과를 이용하여 시편두께에 따른 인장특성을 비교하였다. Fig. 6과 7은 각각 유리전이온도 이전 영역

시편의 시편두께에 따른 인장강도 선도 및 유리전이온도 이상 영역 시편의 시편두께에 따른 인장강도 선도이다.

실험온도가 유리전이온도 미만이며 인장속도 및 실험온도가 동일한 조건에서 시편의 두께를 증가시킬 경우 모든 실험조건에서 인장강도가 증가하였다. 가장 높은 인장강도 증가율은 인장속도 및 실험온도가 각각 250 mm/min 및 100 °C 조건에서 52.5 %로 관찰되었다. 가장 낮은 인장강도 증가율은 인장속도 및 실험온도가 각각 50 mm/min 및 20 °C 조건에서 39.7 %로 관찰되었다.

실험온도가 유리전이온도 이상이며 인장속도 및 실험온도가 동일한 조건에서 시편의 두께를 증가시킬 경우 모든 실험조건에서 인장강도가 증가하였다. 가장 높은 인장강도 증가율은 인장속도 및 실험온도가 각각 10 mm/min 및 175 °C 조건에서 97.0 %로 관찰되었다. 가장 낮은 인장강도 증가율은 인장속도 및 실험온도가 각각 250 mm/min 및 175 °C 조건에서 14.9 %로 관찰되었다.

투명 폴리카보네이트 판재는 판재두께가 두꺼워짐에 따라 인장강도가 증가함을 알 수 있었다. 유리전이온도 이상에서 판재의 두께 증가에 의한 인장강도 증가율이 높음을 알 수 있었다.

이와 같은 결과에 근거하여 투명 폴리카보네이트 판재를 이용하여 원하는 성형결과를 얻기 위해서는 판재의 초기 두께에 따른 인장거동을 고려해야 함을 알 수 있었다.

4.4 인장속도가 고려된 재료 상수 도출 및 고찰

고온 인장 실험 결과로부터 도출된 진응력 - 진변형률 값을 이용하여 인장속도가 고려된 재료 상수를 온도 및 두께에 따라 도출하였다. 재료 상수 도출에는 3장의 Optimizer G'sell 프로그램을 사용하였다. 도출된 재료 상수는 각각 k , m , w 및 h 이며 그 값은 Table 2와 같다.

실험온도 및 시편두께에 따른 투명 폴리카보네이트 판재의 비례상수 k 의 선도는 Fig. 8과 같다. 비례상수 값은 동일한 실험조건에서 시편의 두께가 두꺼워질 경우 증가함을 관찰하였다. 시편두께 3.0 mm의 경우에는 판재의 유리전이온도까지 선형으로 감소하였으나 시편두께 4.5 mm의 경우에는 실험온도 60 °C 이상에서 감소율이 증가하였다.

실험온도 및 시편 두께에 따른 투명 폴리카보네이트 판재의 점탄성 계수 w 의 선도는 Fig. 9와 같다. 점탄성 계수 값은 동일한 실험조건에서 시

Table 2 G'sell parameters of PC plate according to initial thickness and temperature of specimens

t (mm)	T_a (°C)	k (MPa)	m	w	h
3.0	20	68.34	0.02	24.82	1.93
	60	54.78	0.03	26.01	1.78
	100	39.00	0.02	14.51	1.81
	120	28.44	0.01	49.79	2.03
	165	1.74	0.32	9.78	0.20
	175	0.02	0.15	37.13	0.02
4.5	20	85.99	0.01	46.74	1.98
	60	85.90	0.009	47.72	1.80
	100	64.64	0.01	54.11	1.21
	130	27.29	0.023	85.40	1.75
	160	14.02	0.474	3.21	0.55
	175	0.66	0.39	40.75	0.01

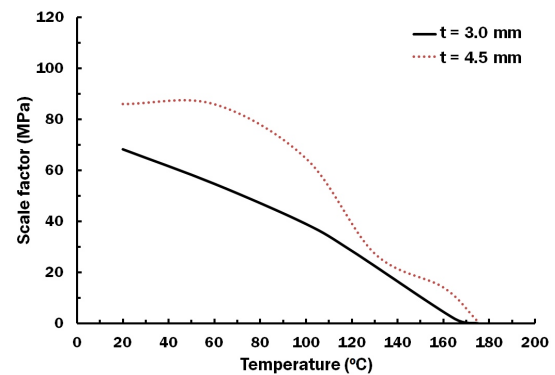


Fig. 8 Temperature - scale factor curves for different specimen thicknesses

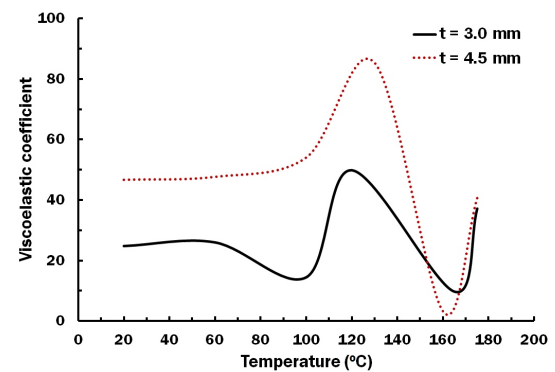


Fig. 9 Temperature - viscoelastic curves for different specimen thicknesses

편의 두께가 두꺼워질 경우 증가함을 관찰하였다. 또한 점탄성 계수는 유리전이온도 미만 구간에서

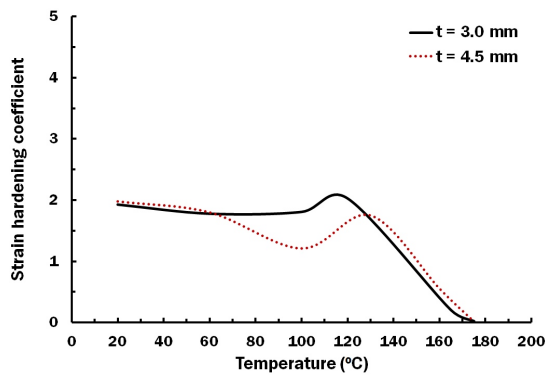


Fig. 10 Temperature - strain hardening coefficient curves for different specimen thicknesses

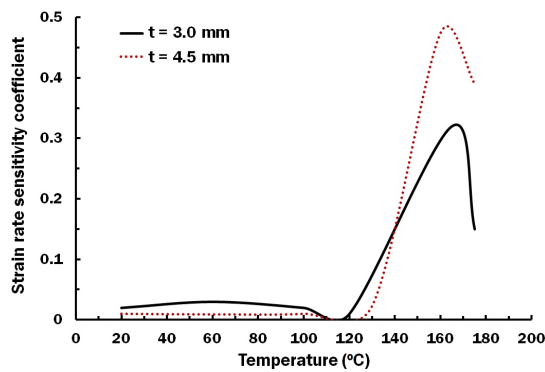


Fig. 11 Temperature - strain rate sensitivity coefficient curves for different specimen thicknesses

급격히 증가하였다가 유리전이온도 이상 구간에서 감소하며 175 °C에서는 다시 증가하였다.

실험온도 및 시편 두께에 따른 투명 폴리카보네이트 판재의 변형경화 계수 h 의 선도는 Fig. 10과 같다. 변형경화 계수는 시편두께에 의한 영향이 적으며 시편온도 120 °C 인근에서 급격히 감소함을 알 수 있었다.

실험온도 및 시편 두께에 따른 투명 폴리카보네이트 판재의 변형률 속도 민감도 m 의 선도는 Fig. 11과 같다. 변형률 속도 민감도는 유리전이온도 부근에서 급격히 증가함을 알 수 있었다.

4.5 재료 상수를 이용한 고온 진응력 - 진변형률 선도 예측

Table 2의 재료상수와 식(1)의 G'sell 모델 구성 방정식을 이용하여 온도 및 인장속도 영향이 고려된 투명 폴리카보네이트 판재의 진응력 - 진변형

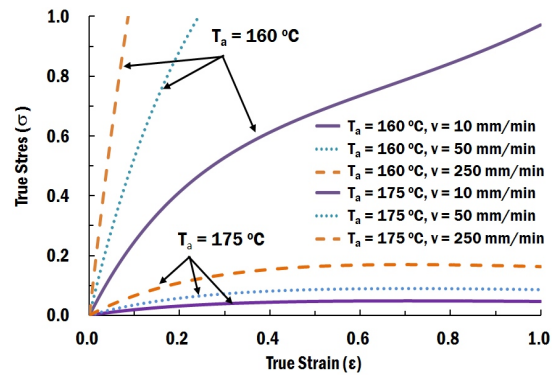


Fig. 12 Flow curves for different ambient temperatures and tensile speeds ($t = 3.0$ mm)

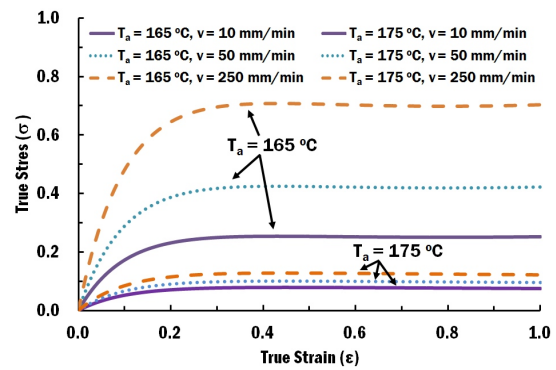


Fig. 13 Flow curves for different ambient temperatures and tensile speeds ($t = 4.5$ mm)

률 선도를 예측할 수 있었다. Fig. 12 및 13는 각각 두께 3.0 mm와 4.5 mm에 대한 유리전이온도 이상에서의 온도 및 변형률 속도 영향이 고려된 진응력 - 진변형률 선도이다. 본 연구에서 도출된 투명 폴리카보네이트 판재에 대한 온도 및 변형률 속도 영향이 고려된 진응력 - 진변형률 상관 관계를 이용하여 진공 성형 해석을 위한 기초 데이터를 확보할 수 있었다.

5. 결론

투명 폴리카보네이트 판재의 고온 영역에서의 인장 거동을 분석하기 위하여 단축 고온 인장 실험을 수행하였다. 실험결과를 분석/고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 인장속도, 판재의 온도 및 두께가 인장특성에 미치는 영향을 도출할 수 있었다. 온도가 증

가할수록 인장강도는 감소하며 특히 판재가 유리천이온도 이상으로 가열될 때 인장강도가 현저히 감소함을 알 수 있었다. 또한 인장속도 및 판재두께가 증가함에 따라 인장강도가 증가함을 알 수 있었다. 또한 유리천이온도 이상에서는 인장속도가 인장강도에 미치는 영향이 판재두께가 인장강도에 미치는 영향보다 큼을 알 수 있었다. 그러나 유리천이온도 이하에서는 인장속도보다 판재두께가 인장강도에 미치는 영향이 큼을 알 수 있었다. 이 결과들로부터 투명 폴리카보네이트 판재를 이용한 성형해석을 위해서는 인장속도, 성형온도 및 판재두께가 모두 고려되어야 됨을 알 수 있었다.

둘째, 변환된 G'sell-Jonas 모델 구성 방정식을 이용하여 인장속도가 고려된 재료변형 모델상수를 온도 및 두께에 따라 도출/고찰하였다. 투명 폴리카보네이트 판재의 재료상수는 온도 및 두께에 의존적임을 알 수 있었다. 또한 도출된 재료상수를 이용하여 온도 및 변형률 속도 영향이 고려된 진응력 - 진변형률 선도를 예측하여 진공 성형 해석을 위한 기초 데이터를 확보할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구 사업 지원을 받아 수행된 것임(2012R1A1A4A01013986).

참고문헌

1. Mark, J. E., "Polymer Data Handbook," Oxford University press, 1999.
2. Ahn, D. G., Cho, C. G., Jeong, S. H., and Lee, D. G., "Design of Photobioreactor for Mass Production of Microalgae," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 28, No. 2, pp. 140-153, 2011.
3. Kim, Y. H., Lee, J. M. and Hong, S. S., "Optimal Design of Superplastic Forming Process," J. Mater. Proc. Tech. Vol. 112, No. 2-3, pp. 166-173, 2001.
4. Kim, J. T., Ahn, D. G., Park, J. R., Park, J. W., and Jeong, S. H., "Recent Trends of the Development of Photobioreactors to cultivate Microalgae," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 28, No. 2, pp. 125-132, 2011.
5. Johnson, G. R., and Cook, W. H., "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 21, No. 1, pp. 31-48, 1985.
6. Giménez, E., Lagarón, J. M., Cabedo, L., Gavara, R., and Saura, J. J., "Study of the Thermoformability of Ethylene-Vinyl Alcohol Copolymer Based Barrier Blends of Interest in Food Packaging Applications," Journal of Applied Polymer Science, Vol. 91, No. 6, pp. 3851-3855, 2004.
7. Gimenez, E., Lagaron, J. M., Maspocho, M. L., Cabedo, L., and Saura, J. J., "Uniaxial Tensile Behavior and Thermoforming Characteristics of High Barrier EVOH-Based Blends of Interest in Food Packaging," Polym. Eng. Sci., Vol. 44, No. 3, pp. 598-608, 2004.
8. Melick, H. G. H., Govaert, L. E., and Meijer, H. E. H., "On the origin of strain hardening in Glassy Polymers," Polymer, Vol. 44, No. 8, pp. 2493-2502, 2003.
9. Schoßig, M., Bierögel, C., Grellmann, W., and Mecklenburg, T., "Mechanical Behavior of Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Materials Under High Strain Rates," Polymer Testing, Vol. 27, No. 7, pp. 893-900, 2008.
10. Rezgui, F., G'sell, C., Dahoun, A., Hiver, J. M., and Sadoun, T., "Plastic Deformation of Low-Density Polyethylene Reinforced With Biodegradable Polylactide, Part 1: Microstructural Analysis and Tensile Behavior at Constant True Strain-Rate," Polym. Eng. Sci., Vol. 51, No. 1, pp. 117-125, 2011.
11. Rezgui, F., G'sell, C., Dahoun, A., Hiver, J. M., and Sadoun, T., "Plastic Deformation of Low-Density Polyethylene Reinforced With Biodegradable Polylactide, Part 2: Creep Characterization and Modeling," Polym. Eng. Sci., Vol. 51, No.1, pp. 126-132, 2011.
12. ASTM No. D638-10 "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics," 2010.
13. G'sell, C., Aly-helal, N. A., and Jonas, J. J., "Effect of Stress Triaxiality on Neck Propagation During the Tensile Stretching of Solid Polymers," J. Mater. Sci., Vol. 18, No. 6, pp. 1731-1742, 1983.
14. Yoo, Y. G. and Lee, H. S., "Effects of Processing Conditions on Thickness Distribution for a Laminated Film during Vacuum-Assisted Thermoforming," Trans. Mater. Process., Vol. 20, No. 3, pp. 250-256,

- 2011.
15. G'sell, C., Jonas, J. J., and Mater, J., "Determination of the Plastic Behavior of Solid Polymers at Constant True Strain Rate.," J. Mater. Sci., Vol. 14, No. 3, pp. 583-591, 1979.
 16. Kim, G. Y., Lee, K. G., and Kang, S. S., "Prediction of the Film Thickness Distribution and Pattern Change during Film Insert Thermoforming," Polym. Eng. Sci., Vol. 49, No. 11, pp. 2195-2203, 2009.