

고분자 재료의 계장화 충격실험에 관한 연구

최선웅*, 우창기⁺, 윤종희⁺⁺

(논문접수일 2004. 6. 9, 심사완료일 2004. 7. 2.)

Instrumented Impact Testing of Polymers

Sun-Woong Choi*, Chang-Ki Woo⁺, Joung-Hwi Yoon⁺⁺

Abstract

Impact behavior of polycarbonate in various defect state was investigated using an instrumented impact tester. A method of analyzing raw impact data was developed and successfully demonstrated the impact behavior in terms of load-displacement and energy-displacement curves. This technique was shown to be capable of separating defect, no-defect initiated fractures as well as their propagation behaviors.

Key Words : Impact(충격), Impact energy(충격에너지), Izod test(아이조드 시험), Instrumented(계장화)

1. 서론

충격거동의 연구는 높은 변형속도에서 재료가 동적하중에 견딜 수 있는 능력을 평가하는데 중요한 역할을 한다. 특히 고분자 재료의 내충격성 평가는 나무, 금속 및 세라믹 등의 대체재료 개발에 매우 유용하게 이용된다. 하지만 내충격성 평가에 있어서 얻어진 자료들은 상대적인 값일 뿐이지 역학적 측면에서 절대적인 값이 될 수 없다. 왜냐하면 고분자 재료의 내충격성은 재료의 구조, 주위조건 및 충격형태 등 많은 조건에 따라 달라지기 때문이다.

계장화된 충격시험기⁽¹⁾는 주로 금속의 파괴거동을 조사하기 위해 시작되었지만 현재에는 금속을 포함한 플라스틱

이나 복합재료 등 많은 물질의 충격특성을 조사하는데 사용되고 있다. 기존부터 많이 사용되어 오는 충격시험방법에는 여러 종류가 있으나, 일반적으로 아이조드 시험(Izod test)은 노치시험편(notched sample)을 사용하므로 본질적으로 균열개시보다는 균열성장에 요구되는 에너지를 측정하는데 사용된다.

반면에 인장 충격시험은 단순히 고정된 높은 속도에서 실행하는 인장시험과 같다. 이 방법은 균열개시와 균열성장에 의한 파괴에너지를 측정하지만, 같은 전체 에너지에서의 연성과 취성 파괴를 구분하지 못한다. 위의 두 가지 방법은 일축응력 상태에서 실행되지만 실제적인 충격파괴는 이축 또는 다축 상태에서 발생하는 경우가 대부분이다.

* 한남대학교 고분자공학과
+ 교신저자, 인천대학교 기계공학과 (woerwck@incheon.ac.kr)
주소: 402-749 인천광역시 남구 도화동 177번지
++ 인천대학교 대학원 기계공학과

전통적인 충격시험은 표준화된 조건 하에서 시료의 파괴 과정에서 발생하는 전체 에너지만을 얻을 뿐이다⁽²⁾. 계장화한 충격시험에서는 시간에 따른 하중의 변화, 시료의 변형 정도, 충격과정동안 흡수된 에너지 등을 측정할 수 있으며, 이러한 자료로부터 시료의 다양한 물성을 알아낼 수 있다.

따라서 충격시험은 사용조건 하에서 시료의 파괴과정을 자세한 분석을 할 수 있는 계장화한 충격시험 쪽으로 바뀌어가고 있다. 본 실험에서는 추의 높이와 여러 가지 결함에 의한 충격거동을 계장화한 충격실험을 통하여 조사하였다.

2. 실험 및 실험 방법

2.1 실험기기

충격시험기는 자체 제작한 Drop Weight 형태로써 하중 센서에서 나오는 전압을 오실로스코프로 받아들여 컴퓨터로 자료를 처리하도록 되어 있는 장치이다. 자체 제작한 충격시험기에서의 자유낙하속도는 1.68 ~ 6.26m/s의 범위까지 조절가능하다.

2.2 시편 제작

충격 시료는 GE사의 Lexan 폴리카보네이트 시트(poly-carbonate sheet)가 사용되었고, 100×100×3(t)mm로 절단하여 충격 지지대에 설치할 수 있도록 가공하였다. 결함이 충격거동에 미치는 효과를 알아보기 위하여 폴리카보네이트 시트에 Pin-hole, Line-notch, UV-radiation을 가하였다.

Pin-hole은 직경 1mm로 시트의 중앙에 위치시켰고(Fig.

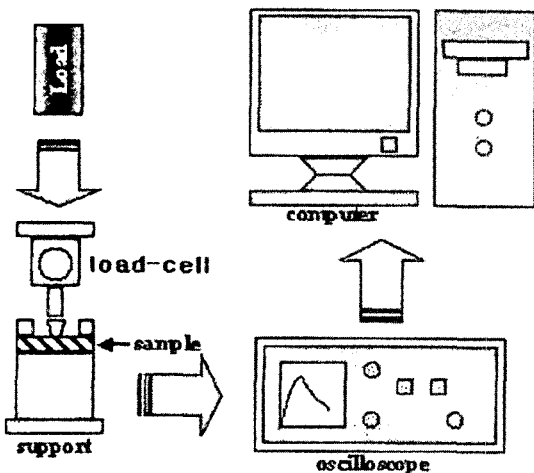


Fig. 1 Set of impact tester

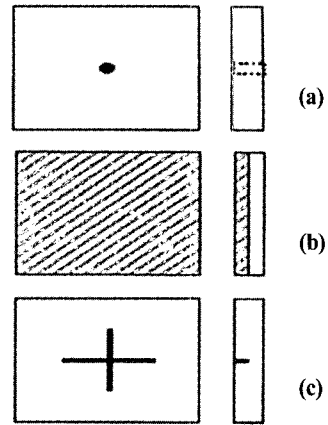


Fig. 2 Defect diagram (a) pin-hole notch, (b) line-notch, and (c) UV-expose surface

2(a)), Line-notch는 깊이 0.1mm, 길이 60mm의 “+” 모양으로 시트의 중앙을 통과하도록 하였으며(Fig. 2(b)), UV는 254mm를 사용하여 24, 48 및 72시간 동안 한 쪽 면만을 노출시켰다(Fig. 2(c)).

2.3 충격 실험

높이에 따른 충격거동의 변화를 알아보기 위하여 결함이 없는 시료를 대상으로 5kg추의 높이를 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 및 2.0mm로 달리하며 수행하였다. 결함이 포함된 시료들의 경우 5kg추의 높이는 1.8mm로 고정시켰고,

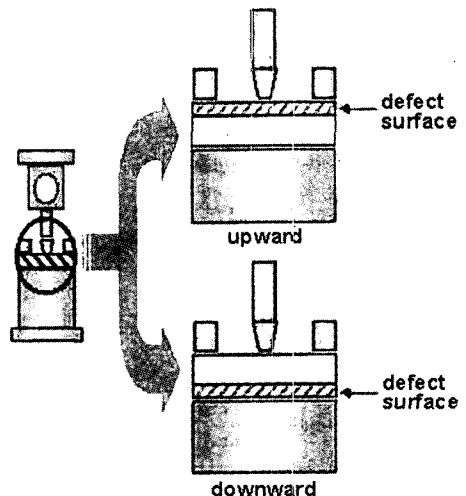


Fig. 3 Diagram of impact side of sample

결합이 있는 면과 없는 면에 각각 충격응력을 가하여 비교 하였다(Fig. 3).

2.4 충격 해석방법

충격과정동안 시료의 변위는 충격하중과 시간으로부터 산출한다. 충격하중과 시간 곡선을 등 시간 간격 Δt 로 세분 하였을 때 i 번째 시간 내의 추의 가속도 A_i , V_i 및 D_i 는 아래의 식들로부터 계산하였다.

$$\begin{aligned}
 A_i &= \frac{P_i}{m} - g \\
 V_i &= V_{i-1} - A_i \Delta t \\
 D_i &= \sum_{j=0}^i V_j \Delta t \\
 D_i &= \sum_{j=0}^i \Delta t (V_{j-1} - A_j \Delta t) \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서 A_i 는 i 번째 시간 때의 추의 가속도, P_i 는 i 번째 시간 때에 나타나는 충격하중, $V_i \Delta t$ 는 Δt 시간 동안 추의 이동거리, m 은 추의 질량, g 는 중력가속도이다.

또한 하중-변위 곡선으로부터 충격에너지를 산출해 낼 수 있다⁽³⁾. 충격 시 오실로스코프로 나오는 하중-시간 곡선의 면적은 충격 (I)이며, 충격에너지 (E)와 유효충격에너지 (E_a)는 실제속도와 평균속도로 아래와 같이 구한다.

$$\begin{aligned}
 I &= \int P dt \\
 E &= \int P V dt \\
 E_a &= \bar{V} \int P dt \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서 \bar{V} 는 충격 바로 전 초기속도 (V_0)와 팁(tup)이 시료를 통과한 후의 속도 (V_f)로 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{V} = \frac{1}{2} (V_0 + V_f) \quad (3)$$

따라서,

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{1}{2} (V_0 + V_f) \int P dt \\
 &= E_a \left(1 - \frac{E_a}{4E_0} \right) \quad (4)
 \end{aligned}$$

이 되고, 여기서 $E_a = V_0 \int P dt$, $E_0 = \frac{1}{2} m V_0^2$ 이며, $V_0 = \sqrt{2gh}$, E_0 는 충격 전의 최고 속도에너지이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 높이에 따른 하중의 거동 관찰

높이에 따른 충격 결과를 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었으며, 이들로부터 구해진 최대하중, 속도, 변위 값들은 Table 1에서 볼 수 있다.

Fig. 6은 높이에 따른 하중-변위에 대한 곡선을 겹쳐 놓은 것인데, 높이가 증가함에 따라 초기 탄성영역의 기울기는 일정하게 나타나지만 전체적인 면적, 즉 충격에너지는 증가하고 있다.

Fig. 6에서 초기에 나타나는 피크 a지점은 무게가 충격을 가할 때 나타나는 응력 파장으로 기계적인 피크이고, b지점

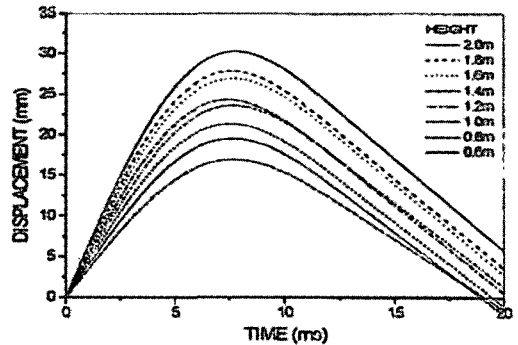


Fig. 4 Overlay of all displacement-time plot for different height

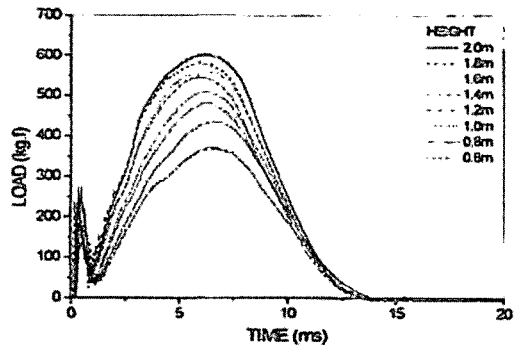


Fig. 5 Overlay of load-time plot for different height

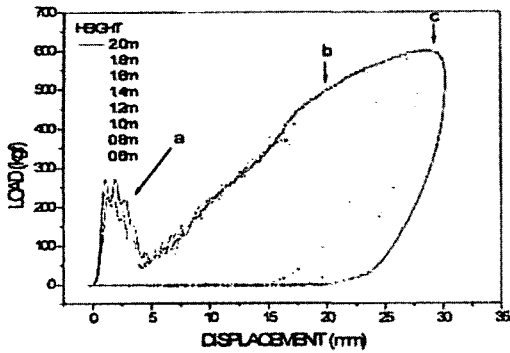


Fig. 6 Overlay of all load-displacement plot for different height

Table 1 Maximum values for different height

Height (m)	Max. load (kgf)	Max. displacement (mm)	Max. velocity (m/s)
0.6	370	19.91	3.43
0.8	433	19.53	3.96
1.0	480	21.32	4.42
1.2	509	23.61	4.85
1.4	549	24.29	5.24
1.6	561	26.89	5.60
1.8	584	27.81	5.94
2.0	601	30.22	6.26

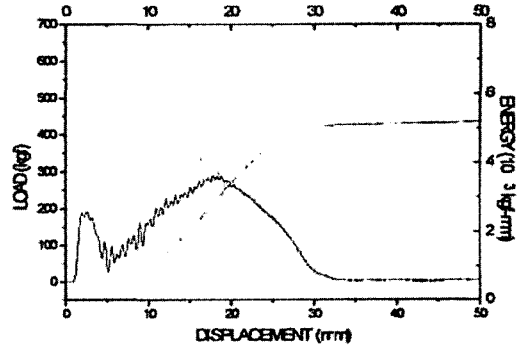
은 변위 값이 15~20에서 하중-변위의 기울기가 감소하는 것으로 소성변형이 발생하기 시작하는 위치임을 알 수 있다⁽⁴⁾. 또한, c지점은 파괴가 일어나지 않고 최대하중에서 무게가 튀어 오른 것인데, Fig. 5에서 알 수 있듯이 하중의 간격이 점점 작아지는 것으로 보아 최대하중에 접근하였음을 알 수 있다.

3.2 결함에 의한 충격거동 관찰

Fig. 7(a)와 Fig. 8(a)는 결함에 의한 폴리카보네이트의 파괴된 모습이다. Fig. 8은 연성/취성 재료의 전형적인 P-모드 파괴이다. Fig. 8(b)는 Pin-hole의 결함에 응력이 집중되어 일시에 파괴가 일어나므로 급작스러운 충격의 하강이 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 7(a)는 Pin-hole로부터 방사형으로 균열이 발생한 형태의 모습을 보여주고 있는데 균열 중의 하나가 길게 자라난 것을 볼 수 있다. Fig. 7(b)는 이

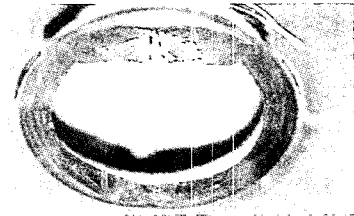


(a)

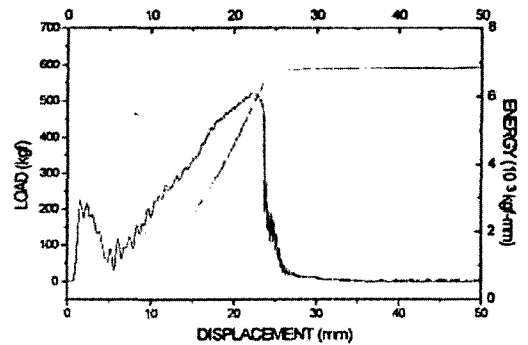


(b)

Fig. 7 (a) Fracture state of polycarbonate for pin-hole
(b) Load/energy profiles for displacement



(a)



(b)

Fig. 8 (a) Fracture state of polycarbonate for pin-hole
(b) Load/energy profiles for displacement

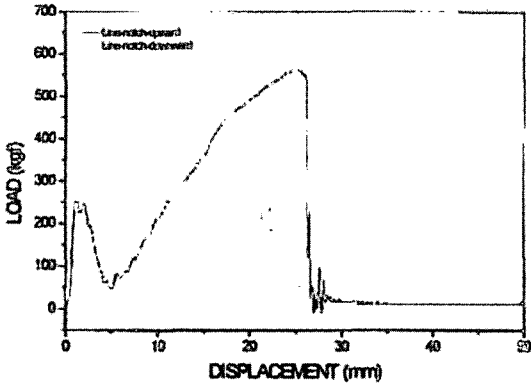


Fig. 9 Line-notched sample impact profile

시료의 충격과 에너지의 곡선을 보여주고 있다. Fig. 8(b)와 달리 최대하중은 작지만 파괴가 일어난 후에도 균열성장이 진행됨으로 인해 하중의 완만한 감소를 보이고 있다. Fig. 7과 Fig. 8은 같은 노치를 주었지만 파괴형태에 있어서는 상당히 다른 경로를 보여준다는 것을 하중-변위 곡선으로 확실히 알 수 있다.

Line-notched 시료에서도 Pin-hole에서와 마찬가지로 노치가 가해진 부분이 위로 향했을 때 하중이 크고, 파괴에 의해 급격한 하강을 보였으며 노치가 아래로 향했을 때 최대 하중 이후로 균열이 자라고 있는 것을 알 수 있다(Fig. 9).

3.3 표면의 UV degradation에 의한 충격거동 관찰

Fig. 10은 24시간 동안 UV에 노출시킨 시료의 충격곡선이다. 큰 차이는 보이지 않지만 UV에 노출된 면이 아래쪽에 놓였을 때가 하중은 약간 작지만 변위에 있어서는 조금 더 많이 일어난 것을 알 수 있다.

Fig. 11에서는 48시간 동안 UV에 노출시켰을 때 UV에 노출된 부분이 아래쪽에 놓였을 때는 파괴가 일어나지 않는 반면에 UV에 노출된 부분이 위쪽에 놓였을 때에는 파괴가 일어났다. 그리고 충격과정에서 시료가 흡수한 에너지는 UV에 노출된 표면이 아래쪽에 있을 때가 9,680kgf-mm이고, 노출된 표면이 위에 있을 때는 8,790kgf-mm로 노출된 표면이 아래에 있을 때가 더 크다.

UV에 72시간 동안 노출시킨 시료에서는 UV에 노출된 면이 아래쪽에 있을 때가 8,653kgf-mm으로 UV 노출표면이 위쪽에 있을 때의 7,520kgf-mm보다 훨씬 많은 에너지를 흡수한 것을 알 수 있다(Fig. 12). 이와 같은 이유는 Pin-hole이나 Line-notch가 있는 시료는 응력이 결함에 집

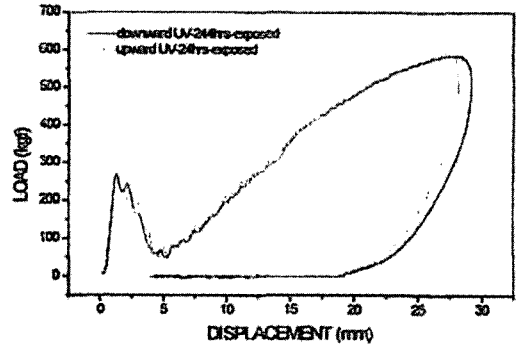


Fig. 10 Impact profiles of UV-24hrs-exposed sample

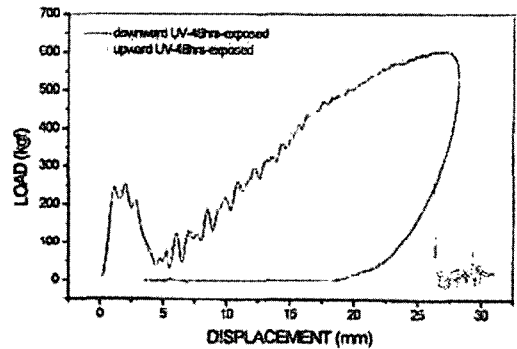


Fig. 11 Impact profiles of UV-48hrs-exposed sample

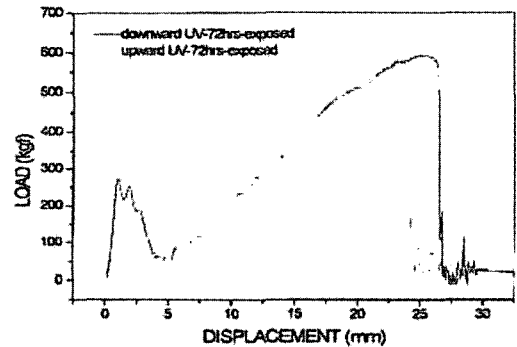


Fig. 12 Impact profiles of UV-72hrs-exposed sample

중되는 반면에 UV에 노출된 부분이 아래쪽에 놓였을 경우 넓은 면적의 표면에 균열이 발생하여 집중응력을 분산시키는 효과를 가져오기 때문이라고 여겨진다.

더구나 Fig. 13에서는 UV에 노출되지 않았던 시료보다 더 많은 에너지를 흡수한 것으로 나타났다.

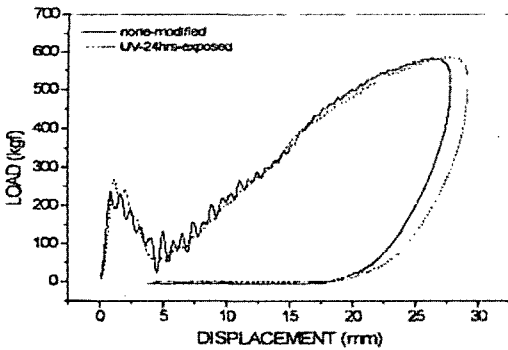


Fig. 13 Compare non-modified and UV-24hrs-exposed sample

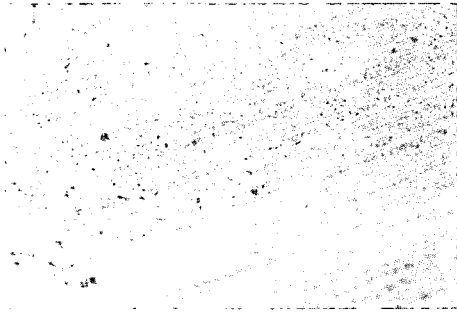


Fig. 14 Impacted surface of UV-48hrs-exposed sample

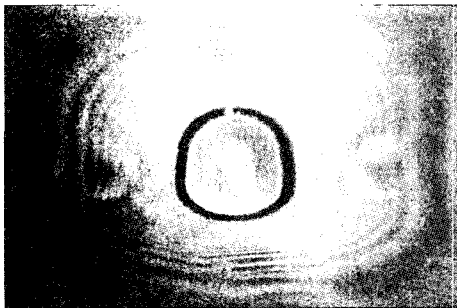


Fig. 15 Polarized image of distributed impact energy

Fig. 14는 UV에 노출된 표면이 충격에 의하여 발생된 균열을 확대한 모습이다. Fig. 15는 편광에 의해 나타난 응력

분포의 모습이다. 응력이 집중된 영역은 중심으로부터 반경 약 2.5~3cm 이내로써 균열이 발생된 영역과 일치한다.

4. 결론

본 실험에서 폴리카보네이트는 전형적인 연성/취성 성질의 고분자이며 상당한 충격에도 견딜 수 있는 물성을 지니고 있음을 확인하였고, 계장화한 충격시험을 통하여 에너지를 흡수하는 과정을 자세하게 알았다. 일반적으로 결함에 의해 흡수되는 충격에너지는 감소되지만, 일정량의 UV에 노출시켰을 경우 오히려 증가하는 것을 볼 수 있다.

폴리카보네이트의 표면상태에 따라 외부의 충격에 견딜 수 있는 능력이 상당한 영향을 주고 있는 것을 보여주고 있는데 이를 이용하여 내충격성을 증가시킬 수도 있음을 알 수 있다.

참고 문헌

- (1) Ireland, D. R., 1974, "Procedures and Problems Associated with Reliable Control of the Instrumented Impact Test," *ASTM STP 563, Instrumented Impact Testing, American Society for Testing and Materials.*
- (2) Dormier, E. J., Yarnoska, B. S., and Dan, E., 1984, "Evaluation of Linear Polyethylene by Instrumented Impacted Analysis," *ANTEC.*
- (3) Broutman, L. J., 1990, "Impact Behavior and Testing of Polymers and Composites," *Broutman, L. J./SPE Mechanical Behavior and Service Life of Plastics Seminar.*
- (4) Knakal, C. W., and Ireland, D. R., 1987 "Instrumented Dart Impact Evaluation of some Automotive Plastics and Composite," *ASTM STP 936, Instrumented Impact Testing of Plastics and Composite Materials.*