

고분자 재료의 계장화 충격실험에 관한 연구

(Instrumented Impact Testing of Polymers)

우창기 · 이장규 / 인천대학교, 윤종희* / 인천대학교 대학원, 안종성 / 한남대학교

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.

1. 서론

충격 거동의 연구는 높은 변형 속도에서 재료가 동적 하중에 견딜 수 있는 능력을 평가하는데 중요한 역할을 한다. 특히, 고분자 재료의 내충격성 평가는 나무 및 금속, 세라믹 등의 대체 재료 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, 충격형태 등 많은 조건에 따라 달라지기 때문이다.

계장화된 충격 시험기는 주로 금속의 파괴 거동을 조사하기 위하여 시작되었지만 현재에는 금속을 포함한 플라스틱이나 복합재료 등 많은 물질의 충격 특성을 조사하는데 사용되고 있다.

기존에 많이 사용하는 충격 시험방법에는 대표적인 몇가지 종류가 있다. 일반적으로 Izod Test는 Notched Sample을 사용하므로 본질적으로 균열 개시보다는 균열 성장에 요구되는 에너지를 측정하는데 사용된다. 반면에 인장 충격 시험은 단순히 고정된 높은 속도에서 실행하는 인장 시험과 같다. 이 방법은 균열 개시와 균열 성장에 의한 파괴 에너지를 측정하지만 같은 전체 에너지

에서의 연성과 취성 파괴를 구분하지 못한다. 위의 두 가지 방법은 일축 응력 상태에서 실행되지만 실제적인 충격 파괴는 이축 또는 다축 상태에서 발생하는 경우가 대부분이다. 전통적인 충격 시험은 표준화된 조건 하에서 시료의 파괴과정에서 발생하는 전체 에너지만을 얻을 뿐이다.¹⁾

계장화한 충격 시험에서는 시간에 따른 하중의 변화, 시료의 변형 정도, 충격 과정 동안 흡수된 에너지 등을 측정할 수 있으며, 이러한 자료로부터 시료의 다양한 물성을 알아낼 수 있다.

따라서 충격 시험은 사용 조건 하에서 시료의 파괴과정을 자세한 분석을 할 수 있는 계장화한 충격 시험 쪽으로 바뀌어가고 있다.

본 실험에서는 추의 높이와 여러 가지 결함에 의한 충격 거동을 계장화한 충격 실험을 통하여 조사하였다.

2. 실험 및 실험방법

2.1 실험기기

충격 시험기는 자체 제작한 Drop Weight 형태로 하중 센서에서 나오는 전압을 Oscilloscope로 받아들여 컴퓨터로 자료를 처리하도록 되어 있는 장치이다.

충격 시험기에서 자유 낙하 속도는 1.68m/s부터 6.26m/s 까지 나타난다.

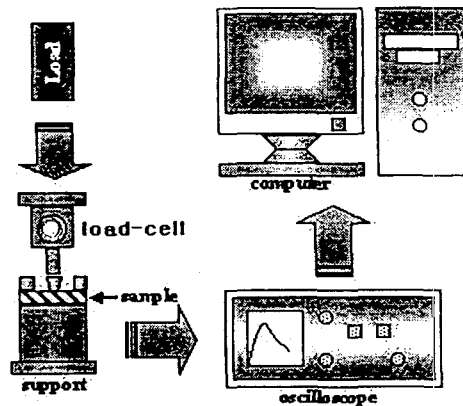


Figure 1. Set of Impact tester

2.2 시편 제작

충격 시료로 GE사의 "Lexan" Polycarbonate Sheet 가 사용되었고 100X 100X3mm 로 절단하여 충격 지지대에 설치할 수 있도록 가공하였다.

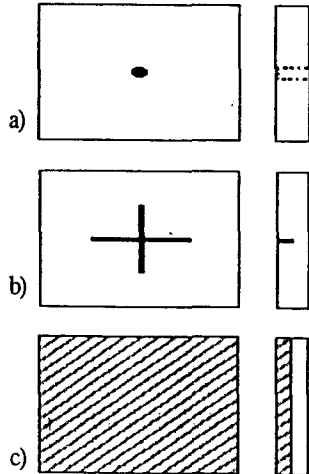


Figure 2. Defect diagram a) pin-hole notch
b) line notch, c) UV-exposed surface

결합의 충격 거동에 미치는 효과를 알아보기 위해 Polycarbonate Sheet에 Pin-hole, Line-notch, UV-radiation를 가하였다.

Pin-hole은 직경 1mm로 Sheet 의 중앙에 위치시켰다.(그림 2a) Line-notch 는 깊이 0.1mm, 길이 60mm이며 + 모양으로 Sheet의 중앙을 통과하도록 하였다(그림 2b) UV는 254nm를 사용하여 24Hrs, 48Hrs, 72Hrs 동안 한 쪽 면만을 노출시켰다(그림 2c)

2.3 충격 실험

높이에 따른 충격거동의 변화를 알아보기 위하여 결합이 포함되지 않는 시료를 대상으로 5Kg 추의 높이를 0.6mm, 0.8mm, 1.0mm, 1.2mm, 1.4mm, 1.6mm, 1.8mm, 2.0mm로 달리하며 수행하였다. 결합이 포함된 시료들의 경우 5Kg 추의 높이는 1.8mm로 고정시켰고, 결합이 있는 면과 없는 면에 각각 충격 응력을 가하여 비교하였다(그림 3)

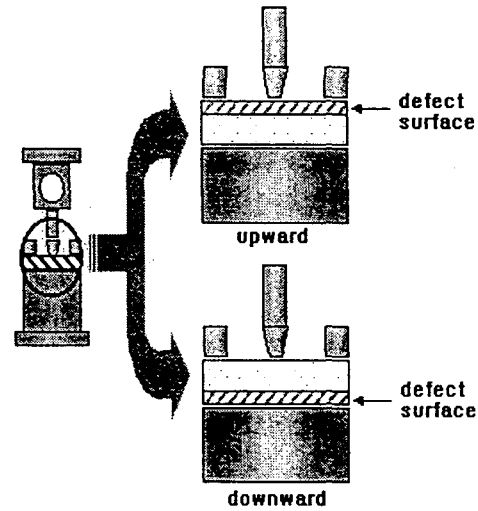


Figure 3. Diagram of Impact side of sample

2.4 충격 해석방법

충격 과정 동안 시료의 변위는 충격 하중과 시간 시간으로부터 산출한다²⁾ 충격하중과 시간 곡선을 등시간 간격 Δt 로 세분하였을 때 i 번째 시간내의 추의 가속도 A_i , V_i , D_i 는 아래의 식들로부터 계산하였다.

$$A_i = \frac{P_i}{m} - g, \quad V_i = V_{i-1} - A_i \Delta t$$

$$D_i = \sum_{j=0}^i V_j \Delta t, \quad D_i = \sum_{j=0}^i \Delta t (V_{j-1} - A_j \Delta t)$$

$$(\text{단 } V_0 = \sqrt{2gh})$$

A_i : i 번째 시간내의 추의 가속도

P_i : i 번째 시간 때에 나타나는 충격하중

$V_i \Delta t$: Δt 시간 동안 추의 이동거리

m : 추의 질량

g : 중력 가속도

또한 하중-변위 곡선으로부터 충격 에너지를 산출해 낼 수 있다.³⁾ 충격 시 Oscilloscope로 나오는 하중-시간 곡선의 면적은 충격(i)이며 충격에너지(E)와 apparent충격 에너지(E_g)는 실제속도와 평균 속도로 아래와 같이 구한다.

$$I = \int P dt$$

$$E = \int PV dt,$$

$$E_a = \bar{V} \int P dt \quad V: \text{평균 속도}$$

\bar{V} 는 충격 바로 전 초기 속도(V_0)와 T_{up} 이 시료를 통과한 후의 속도(V_f)로 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{V} = 1/2 (V_0 + V_f)$$

따라서

$$E = 1/2 (V_0 + V_f) \int P dt$$

$$E = E_a (1 - E_a / 4 E_0)$$

여기서

$$E_a = V_0 \int P dt$$

$$E_0 = 1/2 m V_0^2$$

E_0 : 충격 전의 최고 속도에너지

3. 결과 및 고찰

3.1 높이에 따른 하중의 거동 관찰

높이에 따른 충격 결과는 그림 4,5에 나타내었으며, 이들로부터 구해진 최대 하중, 속도, 변위값들은 표1에서 볼 수 있다.

그림6은 높이에 따른 하중-변위에 대한 곡선을 겹쳐 놓은 것인데 높이가 증가함에 따라 초기 탄성영역의 기울기는 일정하게 나타나지만 전체적인 면적, 즉 충격 에너지는 증가하고 있다.

그림6은 초기에 나타나는 Peak(a)는 무게가 충격을 가할 때 나타나는 응력 파장으로 기계적인 Peak이다. (b)변위 값이 15-20에서 하중-변위의 기울기가 감소하는 것으로 소성 변형이 발생하기 시작하는데 위치임을 알 수 있다 4) (c)지점은 파괴가 일어나지 않고 최대 하중에서 무게가 튀어 오른 것인데 그림5에서 알 수 있듯이 하중의 간격이 점점 작아지는 것으로 보아 최대하중에 접근하였음을 알 수 있다.

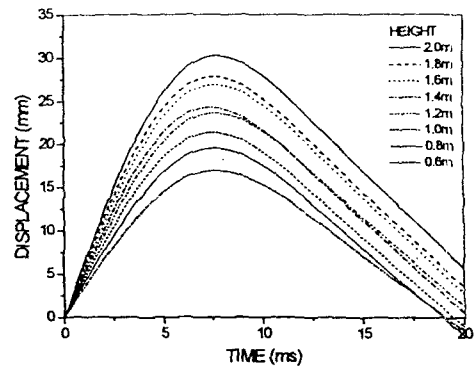


Figure 4. Overlay of all Displacement-Time plot for different height.

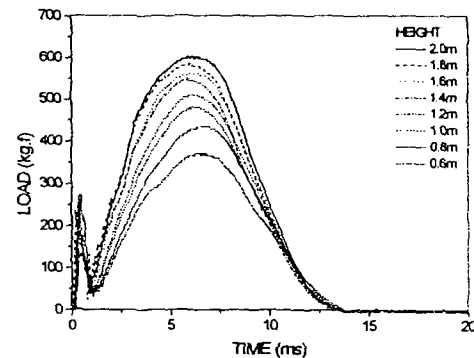


Figure 5. Overlay of all Load-Time plot for different height

Table 1. Maximum Values for different height

높이(m)	Max.Load (kgf)	Max.Disp-lacment (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

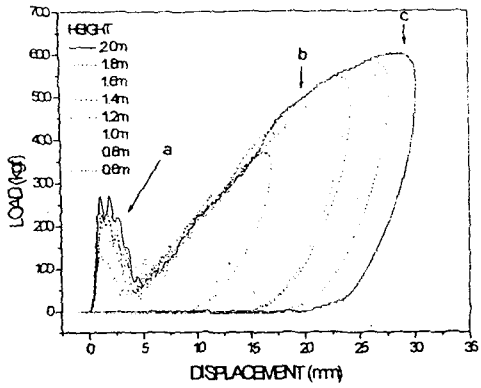


Figure 6. Overlay of all Load-Displacement plot for different height

3.2 결함에 의한 충격 거동관찰

그림 7(a)와 그림8(a)는 결함에 의한 Polycarbonate의 파괴된 모습이다. 그림 8은 연성/취성 재료의 전형적인 P-mode 파괴이다.

그림 8(b)는 Pin-hole의 결함에 응력이 집중되어 일시에 파괴가 일어나므로 급작스러운 충격의 하강이 나타나는 것을 알 수 있다.

그림 7(a)는 Pin-hole로부터 방사형으로 균열이 발생한 형태의 모습을 보여주고 있는데 균열 중의 하나가 길게 자라난 것을 볼 수 있다.

그림 7(b)는 이 시료의 충격과 에너지의 곡선을 보여주고 있다. 그림 8(b)와는 달리 최대 하중은 작지만 파괴가 일어난 후에도 균열 성장이 진행됨으로 인해 하중의 완만한 감소를 보이고 있다. 그림 7과 그림8은 같은 Notch를 주었지만 파괴 형태에 있어서는 상당히 다른 경로를 보여준다는 것을 하중-변위 곡선으로 확실히 알 수 있다.

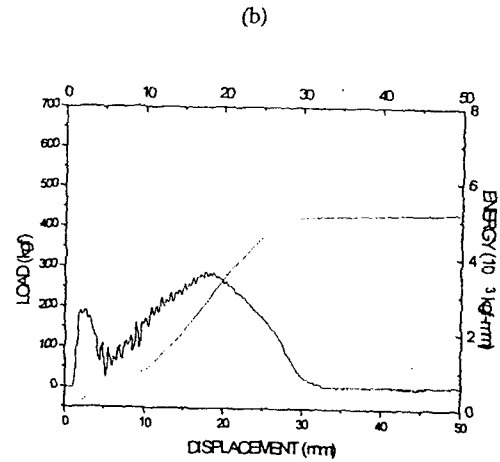
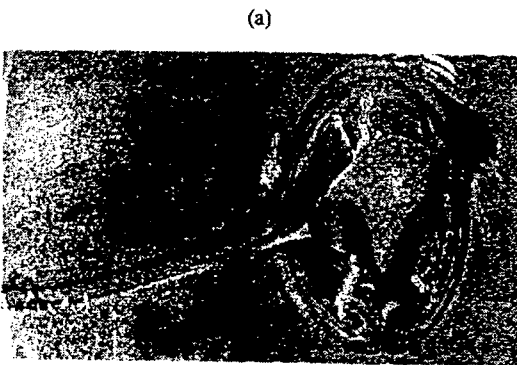


Figure7. (a) Fracture state of polycarbonate for Pin-hole
(b) Load/Energy Profiles for Displacement

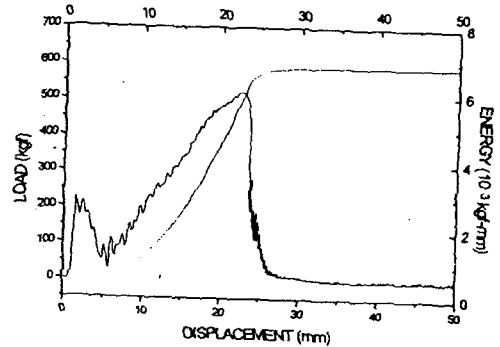
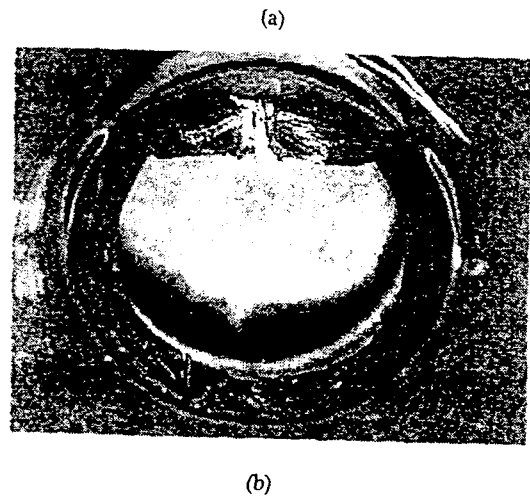


Figure8. (a) Fracture state of polycarbonate for Pin-hole
(b) Load/Energy Profiles for Displacement

Line-notched 시료에서도 Pin-hole에서와 마찬가지로 Notch가 가해진 부분이 위로 향했을 때 하중이 크고, 파괴에 의해 급격한 하강을 보였으며 Notch가 아래로 향했을 때 최대 하중 이후로 균열이 자라고 있는 것을 알 수 있다(그림9)

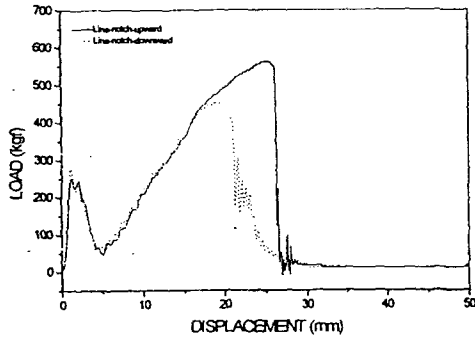


Figure 9. Impact Profiles of Line-notched Sample

3.3 표면의 UV degradation 에 의한 충격 거동 관찰

그림 10은 24Hrs. 동안 UV에 노출 시킨 시료의 충격 곡선이다. 큰 차이는 보이지 않지만 UV에 노출된 면이 아래쪽에 놓였을 때가 하중은 약간 작지만 변위에 있어서는 조금 더 많이 일어난 것을 알 수 있다.

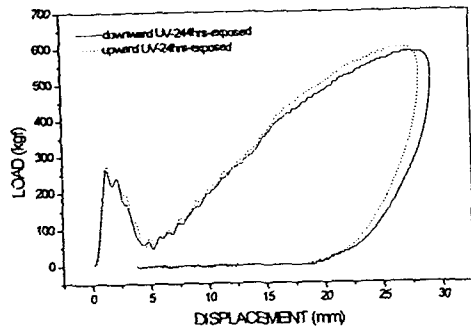


Figure 10. Impact profiles of UV-24hrs-exposed sample.

그림 11에서는 48Hrs. 동안 UV에 노출시켰을 때 UV에 노출된 부분이 아래쪽에 놓였을 때는 파괴가 일어나지 않는 반면에 UV에 노출된 부분이

위쪽에 놓였을 때에는 파괴가 일어났다. 그리고 충격 과정에서 시료가 흡수한 에너지는 UV에 노출된 표면이 아래쪽에 있을 때가 9680Kgfmm이고, 노출된 표면이 위에 있을 때는 8790Kgfmm로 노출된 표면이 아래에 있을 때가 더 크다.

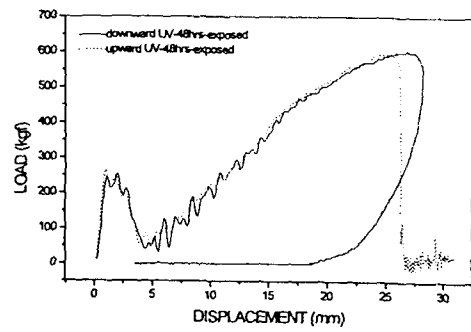


Figure 11. Impact profiles of UV-48hrs-exposed sample.

UV에 72Hrs. 동안 노출시킨 시료에서는 UV에 노출된 면이 아래쪽에 있을 때가 8653Kgfmm으로 UV노출 표면이 위쪽에 있을 때의 7520Kgfmm보다 훨씬 많은 에너지를 흡수한 것을 알 수 있다(그림 12)

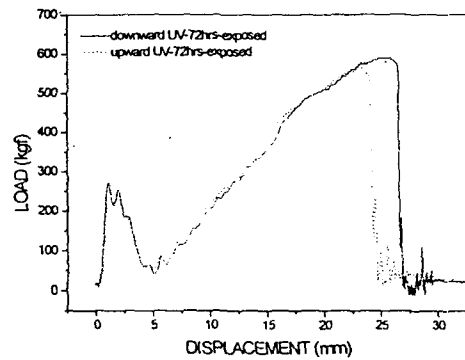


Figure 12. Impact profiles of UV-72hrs-exposed sample.

이와 같은 이유는 Pin-hole이나 Line notch가 있는 시료는 응력이 결합에 집중되는 반면에 UV에 노출된 부분이 아래쪽에 놓였을 경우 넓은 면적의 표면에 균열이 발생하여 집중 응력을 분산시키는 효과를 가져오기 때문이라고 여겨진다.

더구나 그림13에서는 UV에 노출되지 않았던 시료보다 더 많은 에너지를 흡수한 것으로 나타났다.

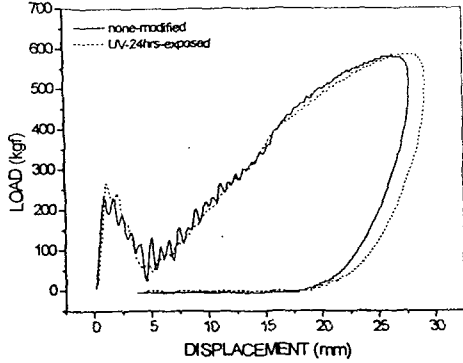


Figure 13. Compare non-modified and UV-24hrs-exposed sample

그림14는 UV에 노출된 표면이 충격에 의하여 발생된 균열을 확대한 모습이다. 그림 15는 편광에 의해 나타난, 응력의 분포된 모습이다. 응력이 집중된 영역은 중심으로부터 반경 약 2.5-3cm 이내로써 균열이 발생된 영역과 일치한다.



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

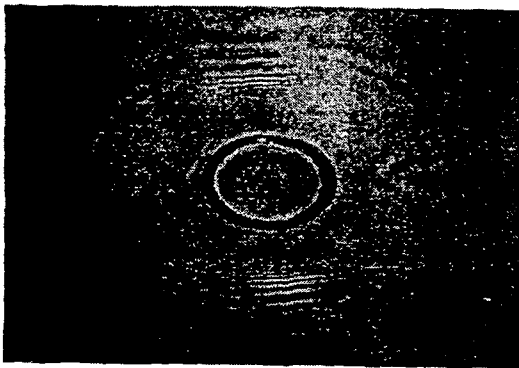


Figure 15. Polarized image of distributed impact-energy

4. 결 론

본 실험에서 Polycarbonate는 전형적인 연성/취성 성질의 고분자이며 상당한 충격에도 견딜 수 있는 물성을 지니고 있음을 확인하였고 계장화한 충격 시험을 통하여 에너지를 흡수하는 과정을 자세하게 알 수 있었다. 특히, 일반적으로 결합에 의해 흡수되는 충격 에너지가 감소되지만 일정량의 UV에 노출시켰을 경우 오히려 증가하는 것을 볼 수 있다.

Polycarbonate의 표면 상태에 따라 외부의 충격에 견딜 수 있는 능력이 상당한 영향을 주고 있는 것을 보여주고 있는데 이를 이용하여 내충격성을 증가시킬 수도 있다는 것을 알 수 있다.

References

1. E. J. Dormier, B. S. Yarmoska, and E. Dan " Evaluation of Linear Polyethylene by Instrumented Impacted Analysis" ANTEC, 1984
2. 홍대환, "Instrumented Falling Weight Tester를 이용한 고분자 재료의 파괴거동 고찰" Lucky Polymer Technology, No. 5, Jun. 1988.
3. L. J. Broutman " Impact Behavior and Testing of Polymers and Composites" L. J. Broutman/SPE Mechanical Behavior and Service Life of Plastics Seminar, November 7, 1990
4. Charles W. Knakal and Donald R. Ireland " Instrumented Dart Impact Evaluation of some Automotive Plastics and Composite" in Instrumented Impact Testing of Plastics and Composite Materials, ASTM, STP 936, 1987

E-mail: yjhcall@hanmail.net

Fracture Mechanics Research Group