

Taylor 충격시험에 의한 폴리머재료의 변형거동

박성택[†]·신형섭*·박정수*·최준홍**·김정태**

Deformation Behaviors of Polymeric Materials by Taylor Impact

Sung-Taek Park[†], Hyung-Seop Shin*, Jung-Soo Park*,
Joon-Hong Choi** and Jeong-Tae Kim**

Key Words: Taylor Impact Test(테일러충격 시험), High Speed Photography(고속사진촬영), Deformation Behavior(변형거동), Polymeric Materials(폴리머 재료).

Abstract

The deformation of polymers under high loading-rate conditions will be a governing factor to be considered in their impact-resistant applications such as protective shields and transparent armor. In this paper, the deformation and fracture behaviors of polymeric materials such as PE, PC and PEEK have been investigated by Taylor Impact tests. Taylor cylinder impact tests and high speed photography are introduced to examine the deformation behavior under dynamic loading condition. 20 mm air gun was used to perform the impact experiments. Cylindrical projectiles have been impacted onto a hardened steel anvil at a velocity ranging from 100 to 350 ms⁻¹. Along the barrel line, a photo-sensor which measures the speed of the projectile, four digital cameras which has shutter speed of 1/917,000sec and a rigid anvil were set up. After impact experiments, the shapes of projectiles and images taken using high speed cameras were analysed. Depending on materials adopted, they showed a variety in deformation and fracture behaviors.

1. 서 론

발사체(projectiles)의 충격에 의한 변형은 여러 해 동안 과학자들의 관심 연구가 되어 왔다. 1948년 초 Taylor와 Whiffen는 재료의 동적 응력

강도(dynamic yield strength)에 근거한 고 변형률 속도(high strain-rate)의 영향을 연구하기 위해 원통의 끝이 평평한 금속 발사체의 고속 충격실험을 통한 변형을 연구하였다. Taylor의 시험 결과로 발사체의 최종 모양은 오직 동적 항복 강도, 밀도 그리고 속도에 의해서 결정 되어 진다고 결론지어졌다. 그에 따른 이론적 해석은 Taylor 모델로 잘 알려져 있으며 유사한 Taylor 시험은 재료의 동적 항복 응력을 결정하기 위한 표준 절차가 되었다. 그 후로 많은 연구가 진행되어 금속 재료의 고속 충격하의 변형에 관한 정확한 예측을 할 수 있게 되었다.

그 후 Johnson et al.에 의해서 폴리머 재료(polymeric materials)가 사용 되었다. 폴리머는 금

† 회원, 안동대학교 기계공학부

E-mail : hsshin@andong.ac.kr

TEL : (054)820-5675 FAX : (054)820-5167

* 회원, 안동대학교 대학원 기계공학부

** 회원, 국방과학연구소

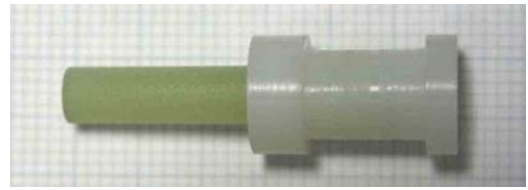
속 재료에 비해 경량이며, 금속 재료에서 고려할 수 있는 탄성과 온도의 영향 그리고 인장 강도의 특성을 관찰할 수 있었다. 그 이유로 최근 많은 연구에 폴리머 재료가 사용 되고 있다.

본 연구는 열가소성 폴리머가 고속으로 타켓(target)에 맞으면서 일어나는 변형, 파괴 현상에 관해 조사하였다. 또한 여러 재료를 사용하여 충격속도에 따른 변형거동을 비교 관찰하였다. 이 조사를 통하여 폴리머 재료의 물질 특성과 발사체 변형시의 폴리머의 유동과 버섯 모양 변형 사이의 관계를 이해하고자 하였다.

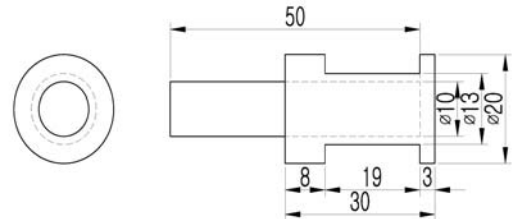
2. 실험방법

본 연구를 수행하기 위해 Fig. 1의 20 mm 에어건을 사용하였다. 압축공기를 사용하는 구경 20 mm 에어건은 고속작동밸브(quick acting valve)방식을 채택하여 발사장치가 간단하고, 안전사고의 위험이 적은 것이 특징이다. 이 장치는 10~15 g의 물체를 최대 400 m/s까지 발사할 수 있도록 설계되어, 본 연구에서 추진하고자하는 폴리머와 같은 경량 재료의 Taylor 시험에 적합한 장치라고 하겠다.

Taylor Impact 시험을 위해, 시판되는 실린더형 폴리머 재료인 PE, PC, PEEK을 사용하였다. 각 재료는 직경(d) 약 10 mm, 길이(l) 50 mm이고 밀도(ρ)는 PE: 0.95 g/cm³, PC: 1.2 g/cm³,



(a) Appearance of sabot assembly



(b) Schematics of sabot assembly

Fig. 2 Projectile and sabot

PEEK: 1.3 g/cm³이다.

20 mm의 배럴 내에서 충격자 재료들을 고속으로 운반하기 위하여 원통형 운반체(sabot)를 사용하였다. 운반체는 가공이 용이하고 경량인 PE를 사용하였다. Fig. 2는 길이 50 mm의 폴리머 충격자를 장착한 운반체의 사진과 모식도를 나타내고 있다. 이 운반체는 20 mm 배럴 내에서 압축 공기가 배출되면서 직경 10 mm의 발사체가 배럴을 타고 추진되어 나아갈 때, 배럴 끝부분에 위치한 스톱퍼에 의해 운반체가 정지하여 충격자만이 타켓에 충돌하도록 하였다.

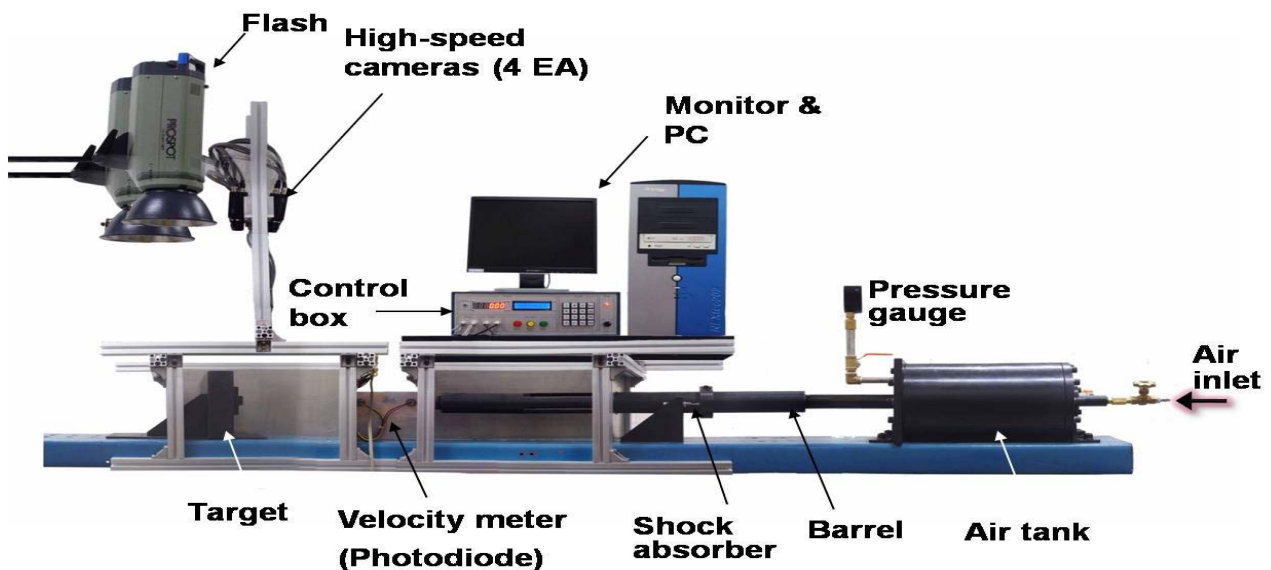


Fig. 1 20 mm air-gun for Taylor impact test of polymeric material

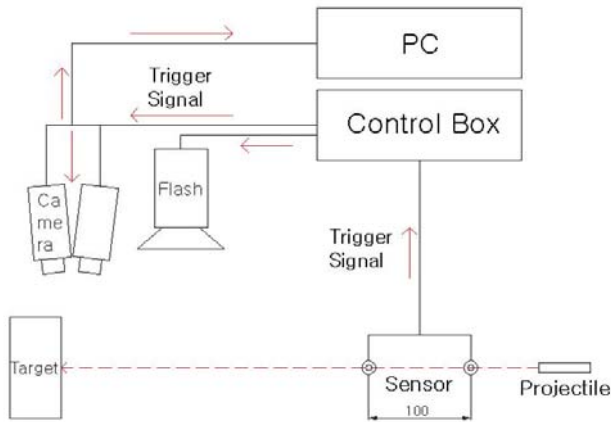


Fig. 3 Schematic illustration for high speed photography

Fig. 3의 모식도에서 보인 바와 같이 충격자의 속도를 측정하기 위해서 배럴 선단에 1쌍의 IR-LED와 Photodiode 10 cm 간격으로 2개소 설치하였다. 속도측정구간(optic sensor)을 통과하는 충격자의 시간을 측정하여 제어부(control-box)에서 속도로 변환되게 하였다. 다음 충격자가 타겟에 맞는 순간을 카메라로 찍는 타이밍의 포착이 중요하다. 정확한 순간을 포착하기 위해서 충격자가 지나기 마지막 포토센서와 타겟의 거리를 정확히 측정하여, 제어부(control-box)에 입력을 하게 되면 먼저 측정된 속도와 타겟까지의 거리를 계산하여서 플래쉬(flash)와 4대로 연계된 고속 카메라(high-speed camera)에 트리거 신호(trigger signal)를 주어 순차적으로 찍히게 하였다.

이 실험에 사용된 고속카메라는 셔터 스피드가 1/917,000 sec이며 해상도는 유효 픽셀 수 782×582로 재료의 고속 변형 거동을 관찰하기에 적합하다. 그리고 조명장치는 본 실험특성에 맞추어 발광 지속 시간이 길면서 발광량이 큰 촬영 전용 플래시를 사용하였다. 두 장비의 초점, 조리개 그리고 광도 3가지 요소의 최적 조합에 의해 시험시 양호한 사진을 얻을 수 있다. 고속 카메라에서 찍힌 4장의 사진은 컴퓨터 Frame Grabber Board를 통해 모니터로 모니터링할 수 있게 하였다. 시험에 사용한 카메라는 4 프레임(frame)의 변형 거동만을 관찰 할 수 있으나 콘트롤 박스의 파라미터(parameter) 설정으로 카메라 촬영 간격(camera shot interval)을 바꾸어서 같은 조건하의 충돌과정 사진을 얻을 수 있었다. 이렇게 모여진

시간의 경과에 따른 사진들을 관찰하여 각 재료의 변형 거동의 특색과 물성치 차이를 이해할 수 있었다.

3. 실험결과 및 고찰

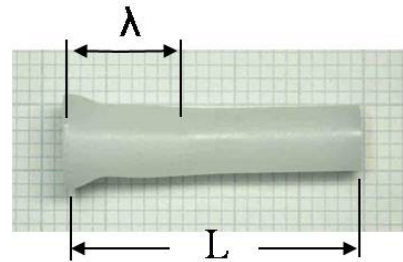
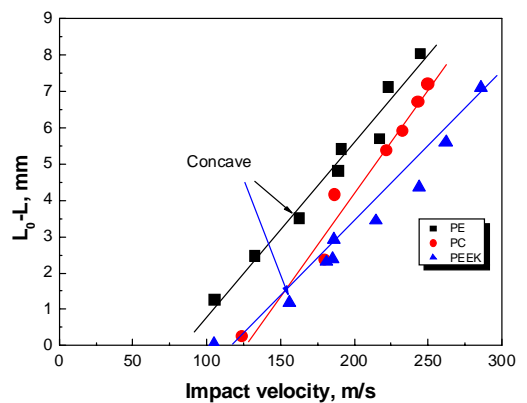
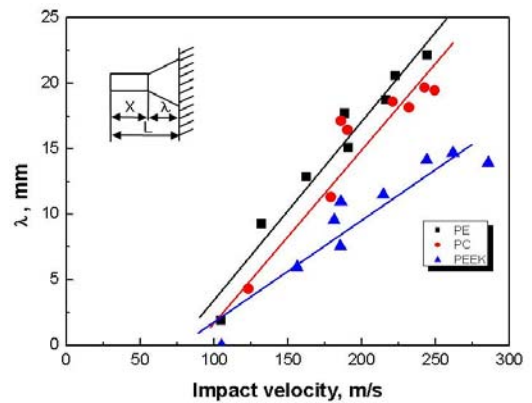


Fig. 4 Change rate in cylinder length. PE at V=186.9 m/s



(a) L0-L rate



(b) Size of λ

Fig. 5 Change rate in cylinder length

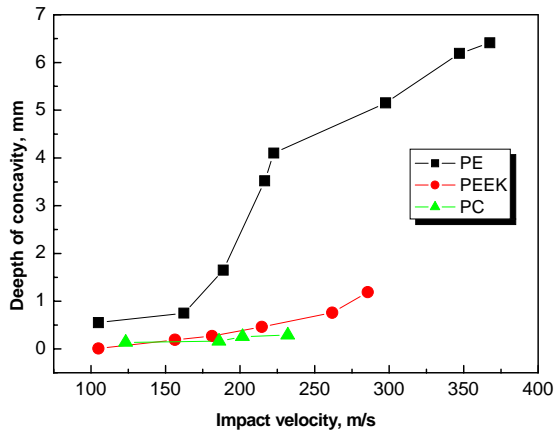


Fig. 6 Depth of concavity

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 충격시험 후에 수거된 충격자에서 처음 길이(L_0)에 대한 변형 후 길이(L)와 충격부 소성 변형량(λ)를 관찰할 수 있다. 이와 같은 변형 거동은 PE, PC, PEEK에서 관찰할 수 있었다. Fig. 5은 각 속도에 대한 폴리머의 변형량을 그래프로 나타내었다. PE는 132 m/s에서 충격면이 mushroom 변형면의 spring-back에 의한 오목한 현상을 나타내지 않았으나, 162 m/s에서는 Fig. 7에서와 같이 충격면이 오목한 현상이 나타나, 이 두 속도 사이에 스프링-백 (spring-back) 현상이 시작 되었다고 볼 수 있다. Fig. 8와 Fig. 9에서 보듯이 충격속도가 높을수록 PE 충격자의 변형량이 커진 후 회복됨을 볼 수 있다. 특히, 충격속도 200 m/s 이상에서는 충격부에서 현저한 버섯머리 형태의 변형 후 spring-back이 일어난 것을 볼 수 있다.

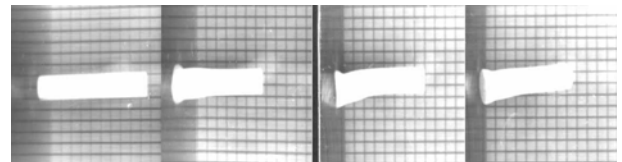
PEEK는 PE와 달리 굳고 단단하며 내충격성과 내열성이 우수한 열가소성 재료이다. 이러한 특성으로 충격 후 길이와 소성 변형량은 다른 재료에 비교하면 작게 나타난다. 또한 충격면이 오목하게 들어간 양은 충격 속도가 증가하여도 매우 적음을 관찰할 수 있었다. Fig. 10와 Fig. 11에서 보듯이 다른 재료에 비하여 최종 변형 길이에서 변형된 부분의 차이 비율이 상대적으로 작음을 볼 수 있다.

한편 PC의 경우는 충격강도가 열가소성 수지 중에서 제일 우수한 재료이며, 강한 열에 의해 유연해지는 성질을 가지고 있다. 이것의 충격 시험에서는 충격면이 오목하게 들어간 현상을 육안으로 확인이 불가능하나 측정 결과 약간의 오목

함을 보이고 있었다. 그리고 다른 재료들과는 달리 충격면을 향한 재료의 단계적 적층 현상을 볼 수 있다. 폴리머들의 충격면이 오목한 깊이를 Fig. 6에서 그래프로 나타내었다.



Fig. 7 Post impact of PE at 298 m/s

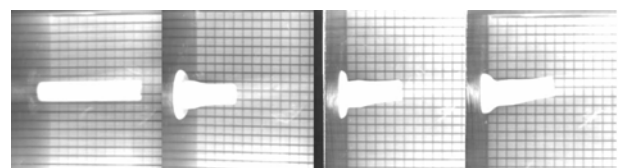


(a)



(b)

Fig. 8 (a) High speed photographs of PE at 189m/s, 100 μ s camera intervals (b) Post impact profile of projectile.

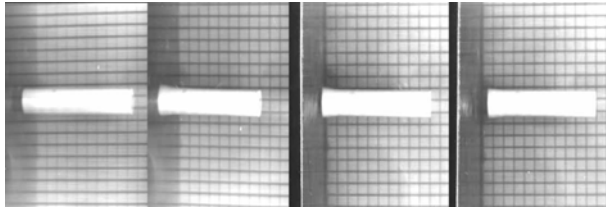


(a)



(b)

Fig. 9 (a) High speed photographs of PE at 250 m/s, 100 μ s camera intervals (b) Post impact profile of projectile.

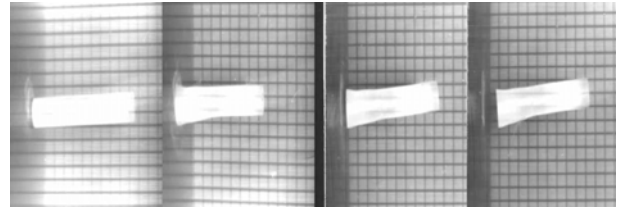


(a)

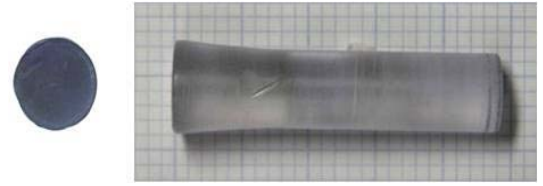


(b)

Fig. 10 (a) High speed photographs of PEEK at 186 m/s, 70 μ s camera intervals (b) Post impact profile of projectile.

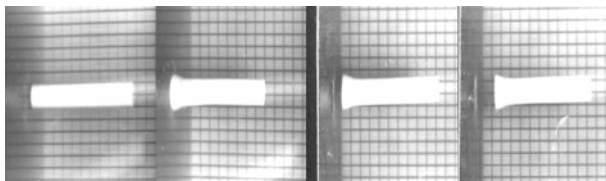


(a)



(b)

Fig. 12 (a) High speed photographs of PC at 179 m/s, 100 μ s camera intervals (b) Post impact profile of projectile

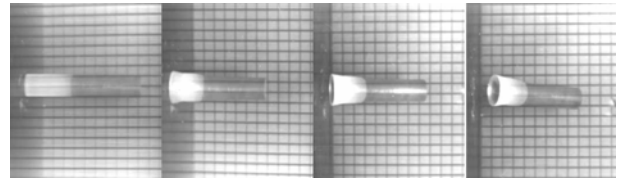


(a)



(b)

Fig. 11 (a) High speed photographs of PEEK at 262 m/s, 70 μ s camera intervals (b) Post impact profile of projectile.



(a)



(b)

Fig. 13 (a) High speed photographs of PC at 232 m/s, 70 μ s camera intervals (b) Post impact profile of projectile.

다음은 폴리머의 고속 카메라 촬영 사진과 충격 후 수거된 충격자의 사진을 비교하면 충격시 폴리머 재료의 충격 변형 거동을 알 수 있다.

폴리머의 Taylor 충격 실험 결과 충격 면의 변형 현상은 중합체의 물리적 특성으로 단지 충격시에 점도가 높아져 변형 되었다고 본다. 폴리머의 충격 거동으로 충격자의 변형은 충격 속도에 강하게 의존되나 각 재료의 특성에 따라 충격에너지 흡수에 따른 변형 모양은 다르게 나타남을

알 수 있다.

결과적으로 실험에 사용된 폴리머 중 충격 속도에 대한 충격 변형을 관찰하면 PEEK의 내충격성이 뛰어남을 알 수 있다.

4. 결 론

고속 카메라를 사용한 연속 사진과 수거된 충격자의 변형 모양의 비교로 부터 Taylor 충격 동안의 각 폴리머의 변형 거동을 이해할 수 있었

다. PE, PC 그리고 PEEK 충격자들은 소성 변형 거동을 나타내었고 그 변형량은 충격속도에 선형적으로 비례 하였다.

1) PE는 고충격 속도에서는 전형적인 버섯모양 거동을 나타내었다. 또한 PE는 다른 재료와 비교하여 충격강도와 내열성이 낮은 관계로 충격시 충격에너지가 충격자의 뒷부분의 변형으로 까지 전파 되었다.

2) PEEK는 PE보다는 적지만 다소의 버섯 모양 거동을 보이고 있다. 특히, 충격시 발생하는 열이 충격면에 고루 전해지지 않았을 때는 충격면의 갈라짐이 발생 하였다. 그리고 260 m/s 내외의 충격 속도에서 충격면의 검은색 원을 관찰 할 수 있다. 이것은 높은 충격 속도에서 발생하는 충격 열에 의한 연소로 변색된 것이라고 추측 된다. 또한 이 속도 이상의 충격에서는 충격면이 어느 정도 녹은 것이 관찰 된다. 이 또한 충격 발열에 의한 현상이라고 추측된다.

3) PC의 경우 PE와 PEEK와는 다르게 아주 적은 량의 스프링-백 현상을 나타내었다. 버섯 모양의 거동 보다는 충격면을 향하여 적층 되는 것을 관찰 할 수 있었다. 그리고 충격면이 타켓과 정면이 아닌 각도에서의 충격시에는 원주상의 찢어짐 현상을 볼 수 있었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 2006년도 기초연구 과제(과제번호: ADD-06-08-01)의 일환으로 수행되었기에 지원에 감사를 드린다.

참고문헌

- (1) S.M. Walley, J.E. Field, P.H. Pope and N.a. Safford, 1991, "The Rapid Deformation Behaviour of Various Polymers," J. Phys. III France Vol 1, pp.1889-1925
- (2) A. Trugutlu, S.T.S. Al-Hassani and M. Akyurt, 1995, "Impact Deformation of Polymeric Projectiles," int. J. Impact Engng Vol. 18, pp.119~127
- (3) J.C.F. Millett, N.K. Bourne and G.S. Stevens, 2006, "Taylor Impact of Polyether Ether Ketone," International journal of Impact Engineering Vol. 32, pp.1086~1094
- (4) Charles E. Anderson, Jr., Arthur E. Nicholls, I. Sidney Chocron, and Raymond A. Ryckman, 2005, "Taylor Anvil Impact," Shock Compression of Condensed matter
- (5) Philip J. Rae and Eric N. Brown, 2005, "The Taylor Impact and Large Strain Response of polyether-ether-ketone(PEEK)," Shock Compression of Condensed matter
- (6) Marc A. Meyers, 1994, Dynamic Behavior of Materials (John Wiley & Sons, United States of America).
- (7) William J. Carter, Sanly P. Marsh, 1995, Hugoniot Equation of State of Polymers (Los Alamos, US).
- (8) Information on <http://www.sv.vt.edu/research/batra-stevens/pent.html>