

슬리브드 폴리머 발사체의 충격시 벌징 거동 패턴에 미치는 코어 재료의 영향

박성택*·정윤철*·신형섭†

Influences of Core Materials during Impact The Bulging Behavior of Sleeved Polymer Projectiles

Sung-Taek Park, Yoon-Chul Jung and Hyung-Seop Shin

Key Words: Sleeved projectile(슬리브드 발사체), Bulging(벌징), Core material(코어 재료), Taylor impact test(테일러 충격시험),

Abstract

In the present study, the deformation behavior of both of metal and polymer combination on impact was investigated. They have showed a different deformation behavior when the co-axially combined projectile was impacted on rigid target. The theory according to Taylor's simplified approach assumes an ideally rigid-plastic material model exhibiting rate-independent behavior and simple one-dimensional wave propagation concepts that neglect radial inertia. In the case of impact with polymeric materials, elastic strain in general are not negligible compared with plastic strain; and the rigid-plastic material behavior assumed by Taylor for metallic materials cannot be applied any more. Since, the sleeve and the core materials have widely different mechanical properties, they will produce a significant difference of mechanical impedance with each other. Therefore these impedance mismatch influences on the deformation behavior sleeved polymer projectile on impact. As a result, sleeved projectiles will generate a very interesting impact behavior. Therefore, the according to sleeved metal material and core polymer material can see expected. The objective of this study was to investigate the factors which influences on deformation behavior pattern of sleeve materials surface.

1. 서 론

발사체의 동적 충격거동을 조사하기 위한 연구는 오래전부터 많은 관심이 되어왔고 수행되고 있다. 특히, 단일의 재료를 사용한 고속에서의 동적거동 시험이 수행되어왔다⁽¹⁾⁽²⁾. 이 시험에서는 금속, 세라믹 그리고 폴리머 재료를 사용한

시험이 있다. 본 연구는 경량 폴리머 재료 외부에 연성의 성질을 가지는 금속 재료를 끼워 서로 다른 기계적 임피던스를 가진 재료의 고 변형률 하에서의 변형 거동을 관찰하기 위한 연구이다. 본 실험을 수행하기에 앞서 폴리머 재료의 고속 충격 거동 과정의 이해가 필요하다. 폴리머 재료는 $5 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$ 의 변형속도를 가졌으며, 항복 강도를 측정된 결과 정적 하중하에서의 항복 강도는 재료에 따라 평균 약 7 ~ 1.5배의 차이를 보였다⁽³⁾. 이 결과는 고속 충격변형하에서 폴리머 재료는 소성경화에 의한 동적 항복강도의 상승이 일어났음을 알 수 있다. 그리고 각 폴리머에서는 충격시 특징적인 변형과 파괴 거동을 시험 후의 발사체의 관찰과 충격 동안에 촬영된

* 학생회원, 안동대학교 대학원 기계설계공학과

† 대표저자, 안동대학교 기계공학부

E-mail : hsshin@andong.ac.kr

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

고속 사진 촬영기를 통해 알 수 있다. 일반적으로 연성의 폴리머 발사체는 충격속도에 따라 충격면에서 뒷부분으로 향한 점진적 압축에 의해 발사체 축 변형이 발생한다. 이러한 폴리머의 변형거동은 폴리머를 씌운 슬리브 재료에 영향을 미친다. 슬리브 발사체는 내부는 저밀도의 폴리머 외부는 고밀도의 연성 금속으로 구성된다. 이 발사체는 고속의 충격시 충격면의 벌어짐(bulging)이 발생하게 된다. 이것은 슬리브 자체의 동적변형에 의한 벌징효과도 있지만 내부 폴리머는 이 효과를 촉진시켜주는 작용을 한다. 다양한 두 재료의 결합은 몇 가지의 변형 양상을 보인다.

본 연구는 이러한 상호작용(interaction)을 가지는 슬리브 발사체의 충격시 발생하는 변형거동 패턴을 조사한다.

2. 실험 방법

2.1 실험 장치

본 시험을 수행하기 위해 small chamber air-gun 이 사용된다. 이 장치는 압축공기를 이용하여 발사체를 추진시킨다. 직경 13 mm 배럴(barrel)내의 발사체는 고속 작동밸브(quick acting valve)를 이용하여 순간적인 압력의 분출로 가속되어 타겟(target)에 충돌하게 된다. 타겟은 S45C로, 충격부면적은 180 × 160 mm이다. 배럴의 끝부분에는 속도 측정 센서를 장착하여 발사체의 순간 속도를 측정하게 된다. 측정된 충격속도와 배럴 끝단에서 타겟까지의 거리를 사용하여 발사체가 타겟에 충격시 4대로 구성된 디지털 카메라 촬영장치

가 순차적으로 정해진 μs 시간 간격으로 변형하는 발사체를 촬영하게 된다. 타겟과 배럴 끝단 즉, 발사체의 출구 주위에 스티로폼 판재를 부착하여 충격 후 발사체의 부가적 충동으로 인한 변형을 감소시키고자 하였다. 충격시험 동안 촬영된 4장의 발사체 변형거동 사진으로부터 충격 후 경과시간에 따른 슬리브 발사체의 변형 및 파괴 거동을 관찰하였다. 아울러 충격 후 회수된 시험편의 형상 및 치수를 측정하였다.

2.2 발사체

충격 시험에 사용된 슬리브 발사체 재료의 특성은 Table 1에 나타내었다. 코어(core)의 폴리머와 슬리브 재료와의 기계적 특성의 차가 큰 것을 알 수 있다. 발사체의 치수는 Fig. 1에 나타내었다. 슬리브의 직경은 13 mm이며 두께 1.5 mm로 뒷면이 막힌 형상이다. 슬리브에 채워지는 내부 충전재(core material)는 직경 10 mm, 길이 30 mm의 실린더 형이다. 충전되는 폴리머는 열박음에 의해 슬리브에 결합된다. 결합된 발사체의 충격면은 폴리싱(polishing) 처리를 하였다. 본 실험 장비는 압축한계에 따라 질량에 따른 슬리브 발사체의 속도한계성을 가진다.

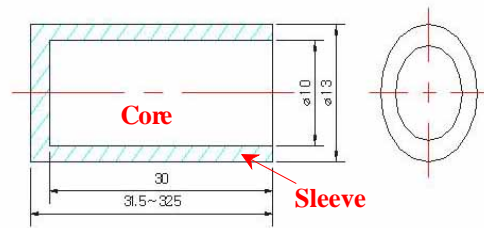


Fig. 1 Geometry of sleeved projectile

Sample designation	Density (g/cm ³)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)	Sound velocity C ₀ (m/sec)	Mechanical impedance, ρC ₀ (x10 ³ kg/m ² sec)
PE (HD)	0.95	2.2	0.43	10.9	1,522	1,446
PC	1.20	6.4	0.38	55.0	2,309	2,771
PEEK	1.30	11.8	0.35	93.8	3,013	3,917
Silicon	1.23	0.01	0.38	3.95	90	111
NBR	1.40	—	—	—	—	—
A6061	2.75	72	0.30	200	5,117	14,072
SUS304	7.85	200	0.29	300	5,048	39,627

Table 1 Mechanical properties of materials used for sleeved projectiles

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 A6061이 슬리브 된 폴리머 발사체

A6061 슬리브만의 발사에서 충격면의 벌어짐 형상은 Fig.2 에 보인 것과 같다. 이 사진에서 보는바와 같이 A6061 슬리브는 충격시 충격면에서의 압축이 시작되어 벌징이 발생하고 높은 속도에서는 충격면의 입자들이 떨어져 나가게 된다. 이러한 충격변형 성질을 갖는 슬리브에 폴리머가 구속될 경우의 결과를 연구하기 위해 PE, PC, PEEK, SILICON 그리고 NBR 을 열박음하여 충격시험을 수행하여 Fig. 3~8의 변형거동 사진을 촬영하였다. 각 사진에서 선간의 거리는 2.5 mm 이다. 약 300 m/s 이하의 속도에서 발사체의 슬리브 변형거동은 슬리브만의 충격 거동과 유사하게 보인다. 각 사진의 마지막 사진에서 충격면과 타켓 사이에서 폴리머가 나온 것을 관찰할 수 있다. 이 현상은 두 가지 경우로 추측할 수 있다. 첫째는 발사체의 변형된 부분에서 폴리머의 탄성 회복에 의해 폴리머의 변형된 충격면이 원상태로 돌아오는 과정에서 변형되지 않은 뒷부분과 결합된 슬리브를 뒤로 밀어내는 경우다. 일반적으로 슬리브 금속은 강-소성재료로 탄성의 영향은 거의 무시된다. 하지만 폴리머의 경우 탄-소성에 의한 영향을 많이 받는 재료로 충격 후 탄성 회복을 하기 때문이다⁽⁴⁾. 두 번째 경우로는 슬리브 발사체의 서로 다른 밀도에 의해 타켓과의 충격에서 서로 다른 변형거동시간으로 충격면이 벌어진 후 슬리브 재료는 코어 폴리머 재료보다 먼저 리바운드가 시작되어 폴리머가 슬리브에서 빠져 나왔다고 볼 수 있다. 이 현상은 두 재료의 기계적 특성에 의한 결과라고 본다⁽⁵⁾. Fig. 5~8의 사진에서 약 300 m/s 이상의 속도에서는 슬리브가 찢어지면서 벌어지는 거동을 보이고 있다. 내부 폴리머에 의한 충격면 확장에 의해 1차적 찢어짐 벌징이 보이고, 충격면 뒤의 압축에 의한 부풀림에 의한 2차 벌징에 의해 슬리브 충격면은 타켓의 반대 방향으로 향하게 된다. PE 또는 실리콘과 같은 점성이 큰 코어는 충격 속도에 따라 충격면의 벌징 확장이 커지게 되어 충격면의 벌징 또는 개화를 촉진시킴을 관찰 할 수 있다. 그러므로 코어 충격면의 벌징은 슬리브의 벌어짐에 영향을 준다고 본다.

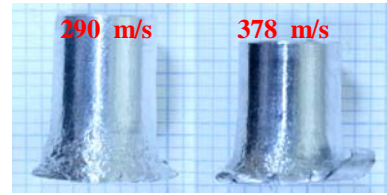


Fig. 2 Deformation of A6061 sleeve projectile

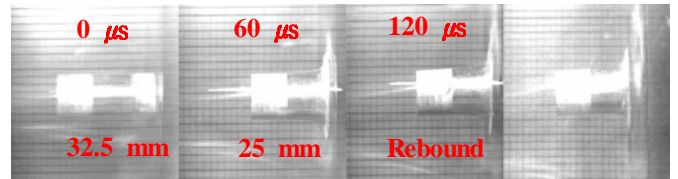


Fig. 3 High speed photographs of A6061 sleeved PC at 272 m/s. 60 μ s time intervals

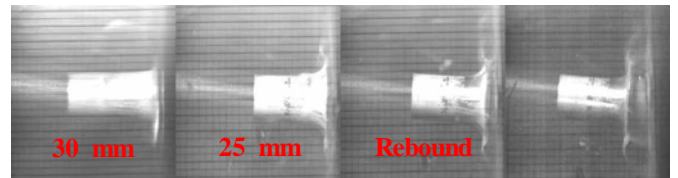


Fig. 4 High speed photographs of A6061 sleeved PEEK at 291 m/s. 60 μ s time intervals

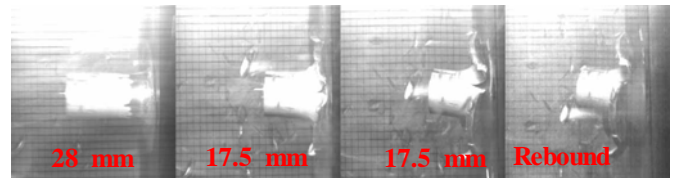


Fig. 5 High speed photographs of A6061 sleeved PE at 325 m/s. 60 μ s time intervals

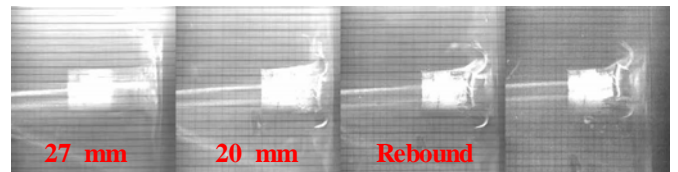


Fig. 6 High speed photographs of A6061 sleeved PC at 325 m/s. 60 μ s time intervals

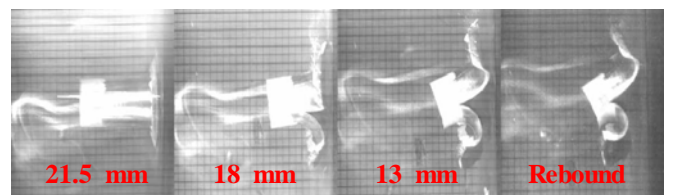


Fig. 7 High speed photographs of A6061 sleeved NBR at 325 m/s. 60 μ s time intervals

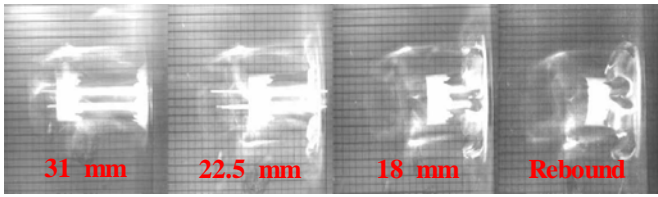


Fig. 8 High speed photographs of A6061 sleeved SILICON at 325 m/s. 60 μ s time intervals

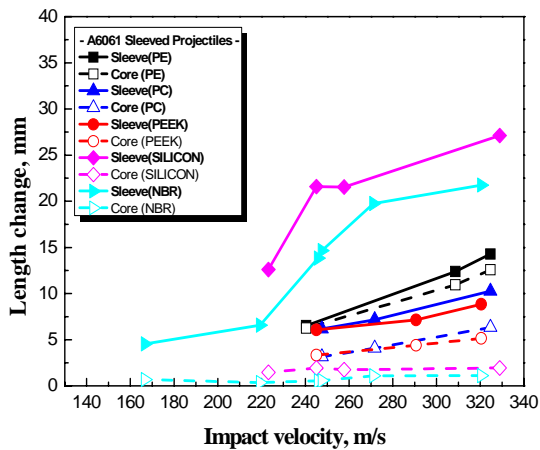


Fig. 9 Length change of sleeved projectiles

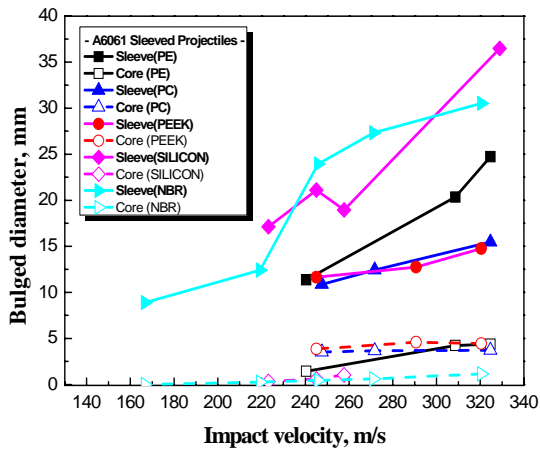


Fig. 10 Bulged diameter of sleeved projectiles

그러나 슬리브 충격면의 벌징이 폴리머 충격면의 벌징에 의해 확장되는지 또는 폴리머 충격면 뒤의 부풀림 부분의 영향에 의해 확장되는지는 본 고속 카메라 사진으로 확인 할 수 없다. 충격거동 후 회수된 발사체는 각 고속 사진 자료의 마지막 부분에서 보이는 것과 같이 폴리머 코어가 슬리브에서 빠져나온 것을 볼 수 있다. 각 사진

들을 자세히 관찰하면 충격 후 슬리브의 직경이 뒤 방향으로 가면서 두툼해진 것을 관찰할 수 있다. 이 현상으로 보면 앞전의 추측에서 두 번째의 가정이 현실성이 있다고 본다. 폴리머의 압축에 의한 변형이 크고 충격 속도가 높을수록 충격면의 확장은 크게 나타나며 이 충격면 뒤의 압축된 부풀림도 커짐을 이전의 폴리머 실험에서 관찰한바 있다⁽⁵⁾. 이 현상은 A6061 슬리브 내에서 발생되며 그 결과는 Fig. 5~8과 같이 슬리브의 파괴거동을 관찰할 수 있다. 고무재질의 실리콘 (silicon)과 NBR은 충격변형력이 큰 재질이며 충격 후 원상태로 돌아오는 탄성복원력이 뛰어난 재질이다. 이러한 고무의 영향을 받은 A6061 슬리브는 Fig. 2에서 본 슬리브의 충격변형거동의 예상과는 다른 파괴거동이 일어났다. 코어 폴리머의 큰 변형이 슬리브 재료의 벌징 또는 파괴를 일으킬 수 있다는 증거이다.

각 충격 속도에 따른 발사체의 변형은 얼마나 되는지를 회수된 발사체로 측정하였다. 그 결과는 Fig. 9,10에 나타내었다. 실선은 발사체의 슬리브부분이며 점선은 슬리브에 구속된 폴리머이다. 폴리머만의 충격시험에서 변형거동 경과 시간, 길이 변형 크기 그리고 탄성 회복은 PE > PC > PEEK 의 순서이다. Fig. 9의 폴리머 코어의 변형 또한 이와 같은 순서로 측정된다. 그러나 각 폴리머에 슬리브드 된 A6061과의 상관관계를 보면 PE는 슬리브의 길이 변형과의 차이가 작은 것을 볼 수 있지만 세 재료 중 변형이 큰 것을 볼 수 있고 고무재질의 코어는 예상한 바와 같이 슬리브의 변형에 영향을 주었고 코어 폴리머의 변형은 거의 나타나지 않았다. 하지만 실리콘의 경우 고속에서 벌어짐이 심해지면 찢어짐이 발생하였으나 형상은 원 상태로 복구되었다. Fig. 10의 충격면의 벌어진 직경 또한 두 재료 사이의 차이는 PE에서 작은 것을 보이고 있다. 코어 폴리머가 충격에 의해 슬리브가 변형된 만큼 변형하였다면 탄성회복에 의해 슬리브와의 길이변형 차가 나타난다. 이전의 폴리머의 충격시험에서 알 수 있듯이 이 차는 PE, PC, PE 중 PE 에서 크게 나타날 것이라 예상되었으나, 시험 후 발사체의 측정 결과는 예상과는 다름을 보인다. 이 결과는 슬리브드 발사체의 충격시 폴리머에 의한 탄성이 발사체 전체에 작용할 것이라는 추측 때문이라고 본다. 하지만 폴리머가 금속에 슬리브된 상태의 발

사체는 하나의 강체로 봐야한다. 그리고 이 발사체가 충격했을 때 변형된 부분만을 폴리머와 금속의 거동으로 해석하여야 한다고 본다. 변형된 부분만의 PE 코어의 거동을 해석한다면 충격시 충격면의 평면 확장에 의해 길이가 급격히 줄어들게 되고 확장된 상태에서 탄성회복이 일어난 결과 슬리브와 폴리머의 차이가 작아 졌다고 본다. 그러나 PC와 PEEK는 충격시 PE와 같이 충격면의 확장보다는 충격면에서 변형된 부분까지 압축에 의한 변형으로 이 압축 에너지는 발사체의 리바운드시 탄성회복을 만드는 에너지로 변환된다고 본다.

3.2 SUS304가 슬리브 된 폴리머 발사체

SUS 304의 슬리브 발사체 충격시험의 결과는 Fig. 11와 같다. 초기에는 여는 재료와 같이 충격면에서 축 방향 압축이 시작되어 부풀어 오르는 순간 충격면이 밖으로 밀고 나갈 때 충격면으로부터 전단 파괴가 발생된 것을 관찰 할 수 있다. 이러한 파괴거동을 보이는 스테인리스 슬리브 발사체에 코어를 결합하여 거동을 관찰하였다. Fig. 12~16은 각 폴리머와 결합된 스테인리스 발사체의 충격에 의한 변형거동 자료이다. 각 실험은 거의 비슷한 속도에서 수행되었다. 각 충격 과정에서 발사체는 초기의 직경보다 점점 두툼해져 보인다. 이것은 충격에 의한 압축이 벌써 발사체의 뒷부분까지 퍼졌다는 것을 말한다. 그러나 충격면의 파괴거동을 나타내는 것은 PE, SILICON 그리고 NBR에서 관찰 할 수 있었다.

실험 후의 각 발사체의 변형을 측정된 결과는 Fig. 17,18에 나타내었다. 초기의 속도에서 폴리머, 고무 그리고 슬리브 발사체는 각 재료에 따라 동일한 변형을 하고 있으나 속도가 커질수록 PE, 실리콘 그리고 NBR은 슬리브의 변형에 영향을 준다는 것을 볼 수 있다.

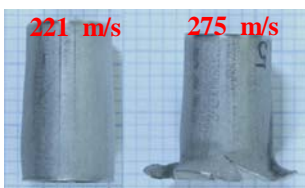


Fig. 11 Deformation of SUS304 sleeve projectile

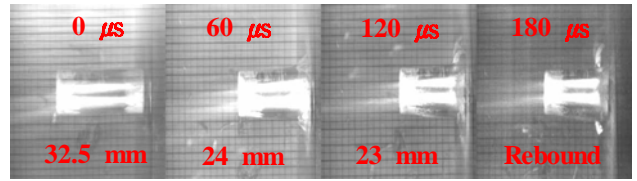


Fig. 12 High speed photographs of SUS304 sleeved PE at 248 m/s.

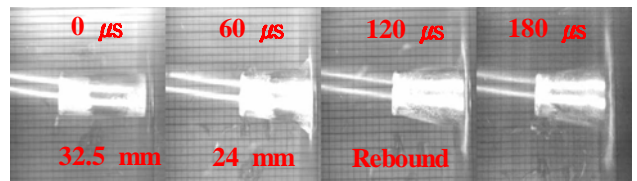


Fig. 13 High speed photographs of SS400 sleeved PC at 245 m/s.

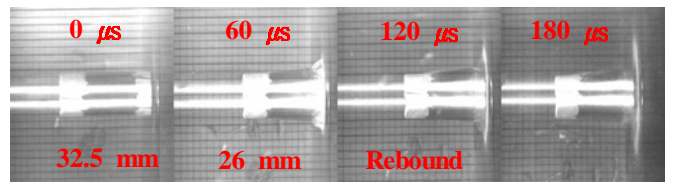


Fig. 14 High speed photographs of SS400 sleeved PEEK at 245 m/s.

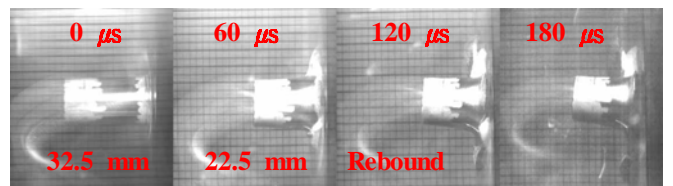


Fig. 15 High speed photographs of SUS304 sleeved SILICON at 248 m/s.

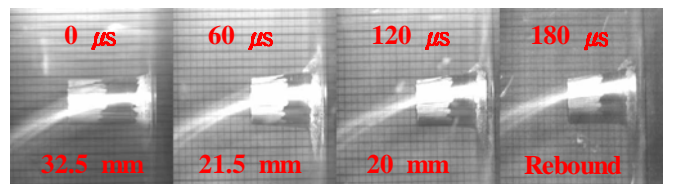


Fig. 16 High speed photographs of SUS304 sleeved NBR at 243 m/s.

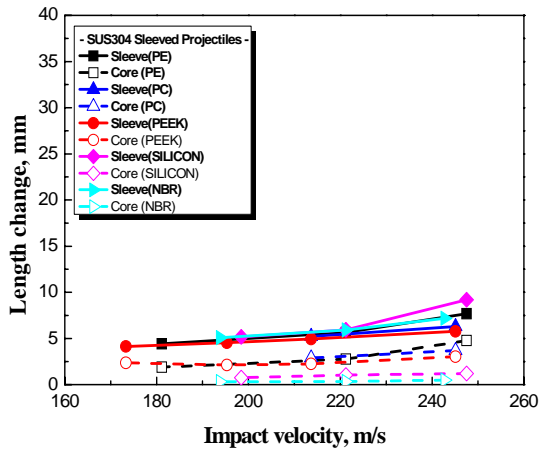


Fig. 17 Length change of sleeved projectiles

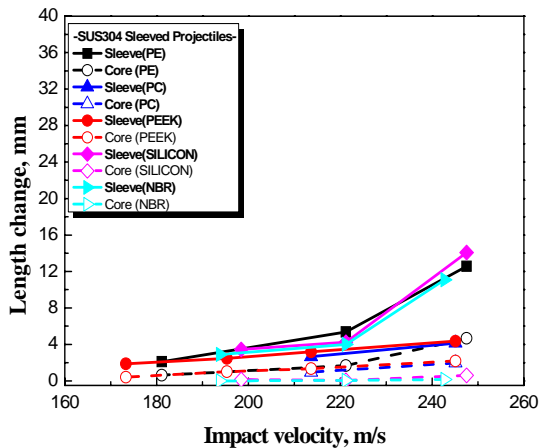


Fig. 18 Bulged diameter of sleeved projectiles

4. 결론

본 연구는 슬리브를 씌운 폴리머 발사체의 Taylor 충격시험에 의한 슬리브의 변형 패턴과 내부 코어 폴리머의 변형을 조사하였다.

- 1) A6061의 슬리브는 폴리머와 결합되지 않은 충격에서 충격면에서부터 압축이 진행되어 길이가 축소되었으나, 폴리머가 구속된 발사체는 폴리머의 변형에 의해 충격면에서 확장과 다방향으로의 찢어짐으로 길이를 변형시킨다.
- 2) SUS304와 같은 밀도가 큰 슬리브의 충격실험은 속도가 높을수록 폴리머의 변형에 의한 슬리브의 벌징효과를 기대할 수 있으나 저밀도

의 금속보다는 큰 벌징효과를 기대할 수 없다.
3) 슬리브 발사체는 서로 다른 기계적 특성으로 인하여 충격 후의 리바운드 거동 시간의 차이가 있음을 보인다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다. (계약번호: UD060026AD)

참고문헌

- (1) Medin, G., Olsson, E., Sjo, L. and Lundgren, R., Reactive armor arrangement, US patent No. 4,881,448 (1989).
- (2) Taylor, G., 1948, "The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress," Proc. R. Soc., A194, pp. 289~299
- (3) Shin, H. S., Park, S. T., Kim, S. J., Choi, J. H. and Kim, J. T., 2008, "Deformation Behaviors of Polymeric Materials by Taylor Impact," *Int. J. Modern Physics B*, Vol. 22, pp. 1235-1242
- (4) Huchings, I. M, 1979, Estimation of Yield Stress in Polymers at High Strain-rates using G. I. Taylor's Impact Technique," *J. Mech. Phy. Solids*, Vol. 26, pp. 289-301
- (5) Paulus, G. and Schirm, V., 2006, "Impact Behavior of PELE Projectiles Perforating Thin Target Plates," *International Journal of Impact AXEngineering*, Vol. 33, pp. 566~579
- (6) Campbell, J. C., Vignjevic, R. and Bourne, N. K., 2007, "A Numerical Investigation of Sleeved Taylor Anvil Specimens," *Shock Compression of Condensed Matter*, cp955, pp. 631~634