

얇은 표적체판에 천공하는 PELE의 파괴 메커니즘 수치시뮬레이션[§]조 종 현* · 이 영 신*[†]

* 충남대학교 기계설계공학과

Numerical Simulation of Failure Mechanism of PELE Perforating Thin Target Plates

Jong Hyun Jo* and Young Shin Lee*[†]

* Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received May 17, 2012 ; Revised August 17, 2012 ; Accepted August 20, 2012)

Key Words: Penetrator with Enhanced Lateral Effect(PELE: 횡방향 관통 효율 강화 탄체)

초록: 횡방향 관통 효율 강화 탄체(PELE)는 기폭장치가 없는 새로운 개념의 발사체이다. PELE는 배면이 닫혀있는 고밀도 피복과 저밀도 충전재로 구성되어있다. PELE의 폭발 특성을 연구하기 위해 AUTODYN-3D code를 이용하여 발사체와 표적체의 모델을 구축하였다. PELE의 의해 알루미늄-2024 합금 표적체를 천공하는 과정을 시뮬레이션으로 구현하였으며 또한 다양한 내부 충전재에 의해 분산되는 표적체의 파편 특성도 연구하였다. PELE 파편의 유한요소해석은 AUTODYN-3D code의 추계학적 파괴기준을 사용하여 구현되었다. 내부 충전재의 팽창으로 인해 파편은 속도를 얻으며 횡방향으로 분산된다. 따라서 손상영역의 범위가 증강한다. 관통 및 횡방향 분산 과정에서 생성되는 파편은 내부 충전재의 충격 압력에 따라 그 양과 형태가 다른 것으로 나타났다.

Abstract: Penetrator with enhanced lateral effect (PELE) is a novel projectile that does not require dynamite and a fuse. It comprises a high-density jacket that is closed at its rear end and filled with a low-density filling material. To study the explosion characteristics of PELE using AUTODYN-3D code, the calculation models of the projectile body and the bullet target were developed and the process of penetrating an aluminum-2024 alloy target using PELE was simulated. The scattering characteristics after PELE penetrated the aluminum-2024 alloy target were studied for different filling materials. The explicit finite element analysis of PELE fragmentation was implemented with the stochastic failure criterion in AUTODYN-3D code. As the filling expanded, the fragments gained velocity and dispersed laterally, increasing the damage area considerably. The number and shape of PELE fragments differed depending on the impact pressure of the filling that fragmented during the penetration and lateral dispersion processes.

1. 서 론

횡방향 관통 효율 강화 탄체(PELE)는 강 또는 텅스텐 합금과 같은 고밀도 피복과 알루미늄 또는 폴리에틸렌과 같은 저밀도 충전 재료로 제작되는 KE-발사체의 새로운 유형이다. 이것은 어떠한 기폭장치 없이 축 속도를 반경 속도로 변환하기 위해 유체역학적 압력을 사용하는 유일한 발사체 유

형이다. PELE에 관한 첫 번째 실험은 1996~1997년 ISL(French-German Research Institute of Saint-Louis)에서 수행되었으며 이 발사체 유형의 일부 특성에 대한 간략한 설명은 2004년에 출판되었다.⁽³⁾ Paulus는 900~3000 m/s의 속도 범위에서 다수의 실험을 수행하였으며 실험적 데이터의 물리적 매개변수를 연구하였다.⁽⁴⁾ Jiang은 PELE에 의해 생성되는 파편 해석을 위해 ELS(energy-limited spall)을 기반으로 해석적 모델을 제안하였으며 AUTODYN code을 통해 수치해석을 수행하였다.⁽⁵⁾

고속 충격에 관한 국내의 연구사례로는 이승규 외 연구자들에 의해 고속충격을 받는 다층 복합 패널의 시간-주파수 응답특성을 연구하였고⁽⁶⁾ 김

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계 학술대회(2012. 5. 10.-12., 제주 휘닉스아일랜드) 발표논문임

† Corresponding Author, leeys@cnu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

영훈 등은 SPH 을 이용하여 초고속 파편에 의해 생성되는 운동에너지를 흡수하는 다층판 구조의 최적설계를 하였다.⁽⁶⁾

본 논문은 PELE 의 관통과정을 수치해석으로 구현하는 절차를 기술하며 다양한 충전재에 따른 충격거동과 파괴메커니즘을 설명한다.

2. PELE 충격거동의 현상학적 설명

2.1 PELE 모델

PELE 는 내부의 저밀도 충전재(Filling)와 충전재를 둘러싸고 배면이 단혀있는 고밀도 피복(Jacket)으로 구성되어있다. Fig. 1 은 형상의 이해를 돕고자 참고문헌[2]에서 인용되었다. Fig. 1과 같이 둘러싸여진 피복에 의해 충전재의 밀폐와 압축의 결과로 높은 압력이 충격에 의해 내부에서 발생하도록 설계되어져 있다. PELE 의 단혀있는 배면은 충전재에서 발생하는 압력을 뒤에서 추진되는 쪽으로 전달하는 기능을 한다.

2.2 PELE 의 충격거동 특성

PELE 의 충격거동은 주요 3 가지 단계로 분류할 수 있으며 첫 번째 단계는 매우 짧은 단계로서 피복과 충전재의 서로 다른 운동에너지에 의해 지배된다. 밀폐와 압축의 결과로 높은 압력이 충전재에서 발생하고 이 압력은 피복을 반경방향으로 팽창시킨다. 충격에 의해 피복의 변형이 파괴한계에 도달하면 피복 전체에 반경방향으로 균열이 발생하며 이는 곧 파편으로 분산된다. 이러한 과정은 충전재가 삽입되어있지 않은 일반적인 Rod 의 충격 거동에 따른 파괴와는 다른 것이다.

PELE 의 충격거동에서 볼 때 발사체의 길이 대 직경 비율과 같은 단순한 특성의 의미는 사라지게 된다. 반면, 발사체 또는 표적체에 대한 재료, PELE 형상의 변화 또는 충격 속도 등이 중요한 인자가 되어 충격거동에 상당한 영향을 미친다. 특히 내부 충전재의 압력 상승은 짧은 시간 동안 축력의 많은 에너지를 파편의 비행방향을 변경시키며 반경의 속도로 변환 된다.^(1,2) 이러한 충격거동을 자세히 이해하기 위하여 PELE 의 천공과정을 AUTODYN-2D code 를 사용하여 구현하였다.

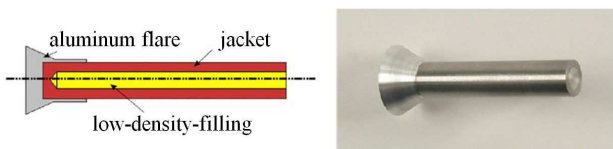


Fig. 1 Longitudinal section of a PELE⁽²⁾

Fig. 2 는 PELE 의 시뮬레이션 2D 모델링을 보여준다. 발사체의 전체 길이는 300 mm 이며 피복과 충전물의 해당 반경은 30 mm 와 20 mm 이다. 30 mm 두께의 표적체(Target) 재료는 Al-2024 alloy 이며 발사체의 피복 및 충전재는 각각 Steel-4340 과 폴리에틸렌이다. 시뮬레이션에 300 mm 의 얇은 표적체를 적용한 이유는 충격에 의해 PELE 의 거동특성을 자세히 연구하기 위해서이다. 본 연구는 PELE 발사체의 충격특성에 대한 선행연구이기 때문에 얇은 표적체를 적용하였다. 따라서 본 연구의 모든 시뮬레이션에 30 mm 의 표적체 두께를 적용하였고 표적체 두께에 대한 충격 특성은 언급하지 않았다.

발사체는 1100 m/s 의 초기 속도로 관통하게 된다. 총 11 개의 게이지를 충전재 내부에 설정하여 시간에 따른 압력 데이터를 얻었고 내부압력의 이동을 관찰할 수 있었다. Fig. 3 은 충격거동의 시뮬레이션 결과이다. 충격거동의 대략적인 설명을 위

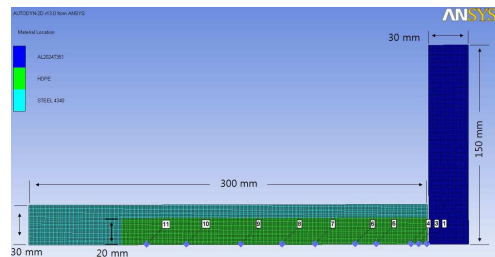


Fig. 2 Dimensions and modeling in axi-symmetric model in AUTODYN-2D simulation

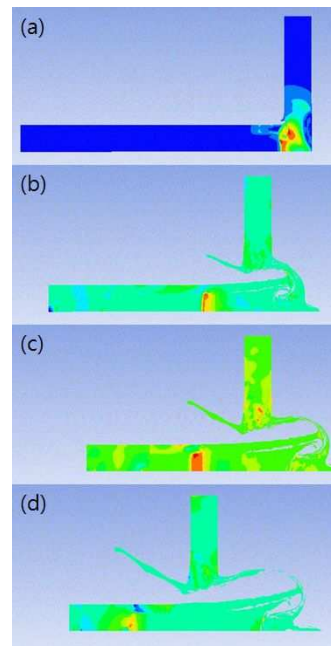


Fig. 3 Pressure distribution of PELE in during perforation: (a) 7.24 μs, (b) 76.49 μs, (c) 114.90 μs, (d) 152.80 μs

하여 측정 시간은 총 4 단계로 측정을 하였다. Fig. 3(a)~(d)는 충격거동 동안 측정시간에 따른 충전재의 최대압력 분포 및 이동을 확인할 수 있었다. 이러한 충격거동의 중요한 인자는 탄성과 소성과 등 충격에 의해 발생된 압력이다. 충격의 시작부분에 영향을 받는 유일한 영역은 발사체와 표적체 사이의 접촉구간이다. 표적체와 발사체의 역방향으로 전파되는 두 개의 충격파가 생성되고 이러한 압력파는 짧은 시간에 표적체의 배면에 도달한다. 이 압력파는 다시 역방향으로 반영되며 PELE와 표적체의 접촉영역 쪽으로 탄성파의 일종으로써 용적변화를 일으키며 소멸상태로 전파하는 희박파로 확산된다. 또한 결과는 압력이 오직 충전재에서만 확산되는 것을 보여준다. 그 이유는 압력이 관에 갇힌 것처럼 피복에 잠겨 측면으로부터 희박파에 의해 감쇠되기 때문이다.

3. PELE 충격 파괴메커니즘

3.1 PELE-3D 모델링 및 파편구현 절차

실질적인 PELE의 충격거동을 구현하는데 2D 코드 시물레이션으로는 한계가 있다. 특히 충전재의 내부압력에 의한 피복의 균열 및 파괴와 충격거동의 생산물인 동적 파편구현이 어렵다. 본 단락에서는 AUTODYN-3D를 이용하여 실질적인 충격거동 및 파편을 구현하는 방법 및 절차를 기술 하겠다. 충격거동에 의한 동적 파편은 추계학적(stochastic) 파괴기준으로 구현되었다.⁽⁹⁾

추계학적 파괴기준은 실제 재료는 파괴와 균열을 야기시키는 미세한 결함을 보유하고 있다는 가정 아래 재료의 파괴 응력 또는 파괴 변형률을 임의로 추출하여 수치적으로 구현하는 기법이다. 표적체 Al-2024와 발사체 피복 Steel-4340 재료에 각

각 430 MPa와 720 MPa의 주 파괴응력 값이 적용되었으며 그 밖에 구성방정식은 Table 1에 보여진다. Fig. 4(a)는 PELE의 충전재와 피복이 분리된 모습이고 Fig. 4(b)는 전체적으로 구현된 3D 모델링이다. 이는 본 논문의 모든 시물레이션에 적용되었다. 본 연구에서 수행된 충격거동은 AUTODYN-3D의 절점탈락기능(erosion)을 사용하여 구현되었다. 절점탈락기능이란 하나의 요소가 충격에 의해 변형이 발생할 때 그 변형률이 변형 한계에 도달하면 삭제되어 해석을 계속 진행할 수 있도록 하는 기능이다.⁽⁹⁾ 또한 본 논문은 Lagrange, ALE, Shell, Beam 및 비정렬 격자체의 충격해석을 구현하기 위해 적용되는 접촉 알고리즘을 사용하였다. 구체적으로 External Gap으로 요소의 선형 및 각 운동량을 보존하는 알고리즘이다. Fig. 5는 요소 사이의 Gap 크기를 보여주며 녹색으로 표시되어 있는 부분이 요소표면구간의 접촉감지영역으로 각 요소의 Gap이다. 이러한 모든 접촉감지영역의 노드는 관통의 깊이에 비례하여 가해지는 힘에 의해 격퇴되는 원리로 충격해석을 수행한다. Gap의 크기는 요소간의 상호작용에 관련된 부분으로 가장 작은 요소면의 1/10에서 1/2의 범위에 있어야 한다. 본 논문의 시물레이션은 150%의 절점탈락기능 값을 설정하였고 발사체의 표적체의 상호작용 Gap 크기는 0.044 mm이다.

Fig. 6은 동일한 절점탈락기능에 격자의 크기 차이에 따른 표적체의 파편 형상 결과이다. 격자의 크기를 조밀하게 하면 현실적인 동적 파편을

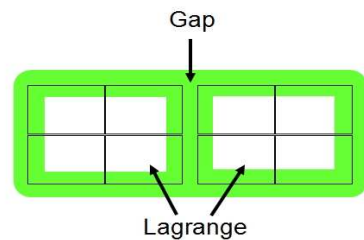


Fig. 5 The contact detection zone of a surface segment

Table 1 Material constitutive model in simulation

Structure	EOS	Strengthen model	Failure model
Filling	Linear	Johnson-Cook	Principal stress
Jacket	Linear	Von-Mises	-
Target	Shock	Johnson-Cook	Principal stress

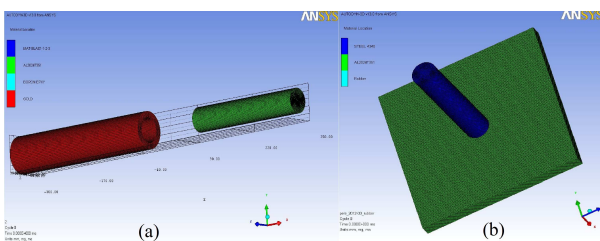


Fig. 4 Modeling of AUTODYN-3D simulation

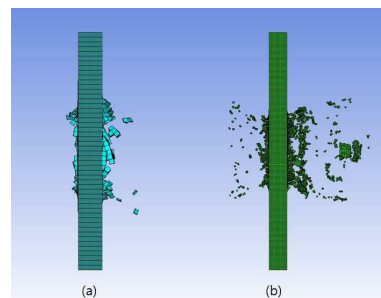


Fig. 6 Effect of the mesh on numerical simulation: (a) mesh size : 6 mm, (b) mesh size : 1.5 mm

구현할 수 있다. 하지만 너무 조밀하게 하면 요소 파괴에 의한 절점탈락이 쉽게 되므로 이들의 관계를 적절히 조합할 필요가 있다. 본 연구에서 수행된 시뮬레이션에 적용된 요소의 수와 크기는 충돌 및 충격해석에서 해석결과에 영향을 미치는 중요한 매개변수이다. 본 연구에서는 해석 매개변수를 결정할 때 두 가지를 고려하였다. 첫 번째는 충전재에서 발생하는 최대내부압력이 충격파에 대한 이론적 접근에서 계산된 최대내부압력과 일치 하는지, 두 번째는 충격속도에 따라 표적체에서 발생하는 파편의 수가 수렴하는지를 고려하였다. 이 두 가지를 고려하여 요소의 크기 및 개수를 정하여 본 시뮬레이션을 수행하였다.

앞서 언급한 절차에 의해 PELE의 관통 시뮬레이션이 수행되었으며 전체적인 충격거동이 Fig. 7에 보인다.

Fig. 7과 같이 각 시간에 따라 총 3 단계로 충격 거동현상이 보인다. 충격거동에 의해 충전재에서 높은 내부압력이 발생하며 그 압력이 피복에 전달되어 반경방향으로 파열된다. 파열된 피복은 반경 방향으로 팽창되며 이러한 거동은 표적체에서 발생하는 파편을 반경방향으로 분산 시킨다. 이러한 충격거동의 주요인인 충전재에서 발생하는 내부압력의 자세한 결과는 3.2 단락에 기술하였다.

3.2 충격파에 대한 이론적 접근

PELE의 이러한 충격거동은 특정 단순화된 조건에서 물리적 모델로 설명될 수 있다. 충격에 의해 생성된 두 충격파는 약한 것으로 간주되며 이는 충격속도가 재료의 음속보다 작다는 것을 의미한다. 이러한 가정에서 Recht와 Ipson의 모델은 PELE 충격거동 과정 중 압력 상승의 필수적인 물리적 방정식을 도출하였다.⁽⁴⁾ 방정식의 자세한 유도는 참고문헌[7,8]에서 찾을 수 있다. 얇은 판에 천공하는 PELE 발사체의 충격은 높은 온도와 thin fluid zone을 야기시키는 발사체와 표적체 사이의

경계영역에서 높은 압력 P 를 생산한다. 피복, 충전물 그리고 표적체는 비압축성으로 가정되며 충격거동은 강체와 소성으로 정의된다. 또한 그것은 충전물의 압력 파동이 압력과 지속시간에 의해 정의된 직사각형처럼 형성된 것으로 추정되고 있다. 충격 압력 P 는 운동량 보존에서 유추할 수 있다. 참고문헌[7,8]에 따라 압력 P 에 대한 방정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$P = v_0 \frac{\rho_F U_F \rho_T U_T}{\rho_F U_F + \rho_T U_T}$$

ρ : density
 U : shock velocity

v_0 : impact velocity
 F : filling
 T : target

발사체와 표적체 사이의 경계면 속도 v_I 는 다음 식 (2)로 계산된다.

$$v_I = v_0 \frac{\rho_F U_F}{\rho_F U_F + \rho_T U_T}$$

충격파 속도 U_F 와 U_T 는 다음 식 (3)과 같이 해당 음속인 c_F 와 c_T 로 대체된다.

$$c_F = \sqrt{\frac{K_F}{\rho_F}} \quad \text{and} \quad c_T = \sqrt{\frac{K_T}{\rho_T}}$$

여기서 K_F 와 K_T 는 충전물과 표적체의 해당 체적 계수이다. 따라서 식 (1)과 (2)는 다음과 같다.

$$P = v_0 \frac{\rho_F c_F \rho_T c_T}{\rho_F c_F + \rho_T c_T}$$

$$v_I = v_0 \frac{\rho_F c_F}{\rho_F c_F + \rho_T c_T}$$

충격 거동 동안 압력지속 시간 t_p 는 다음 식 (6)에 의해 주어진다.

$$t_p = \frac{2x_T}{c_i + v_I}$$

여기서 x_T 는 표적체 두께이다. 위의 방정식은 PELE의 충격 거동의 압력상승 단계를 설명할 수 있으며 시뮬레이션 결과와 비교되었다. Table 2은 시뮬레이션에 적용된 재료 물성치를 나타낸다.

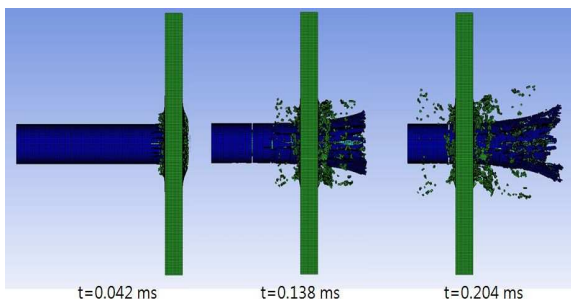


Fig. 7 Evolution of the PELE at 1100 m/s

Table 2 Physical properties for materials

Structure	Material	Density [g/cm ³]	Bulk Modulus [GPa]	Shear Modulus [GPa]	Impact velocity [m/s]
Filling	Polyethylene	0.95	1.5	0.321	1100
	Polyurethane	1.265	0.49	0.005	
	Polycarbonate	1.2	3.23	1	
	Rubber	1	0.1	0.002	
Jacket	Steel-4340	7.83	167.4	81.8	
Target	Al-2024	2.785	89.37	27.6	-

Table 3 Analytical prediction and numerical data of PELE with various filling materials

Structure	Material	P [GPa]		t _p [ms]	
		Eq[4]	simulation	Eq[4]	simulation
Filling	Polyethylene	1.2200	1.0700	0.0104	0.0200
	Polyurethane	0.8240	0.8030	0.0105	0.0190
	Polycarbonate	1.9200	1.7000	0.0104	0.0170
	Rubber	0.3300	0.2310	0.0105	0.0109

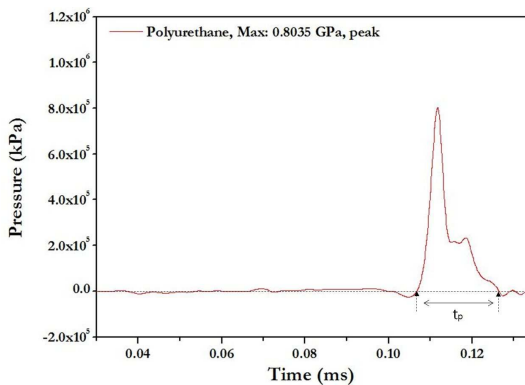


Fig. 8 Result of impact pressure with polyurethane as filling material

Fig. 8은 다양한 충전재 중 하나인 폴리우레탄의 충격거동에 따른 시물레이션 압력데이터 결과값의 선도이다. 최대 peak 값이 충전재의 최대충격압력이며 압력이 다시 0이 되는 구간까지가 압력지속 시간이다. 이러한 접근방식으로 각 충전재의 압력 및 압력지속 시간 결과를 구했으며 그 비교는 Table 3에 정리하였다. Table 3은 앞서 언급한 방정식 (4)와 (6)에 의한 각 충전재의 내부 압력결과와 압력 지속시간을 시물레이션에서 추출한 결과와 비교한 것이다. 초고속 충격 거동임을 감안하면 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 압력 지속 시간은 약 0.008 ms 정도 차이가 발생하는데 이는 발사체와 표적체 사이의 거리에 따른 경계면 속도 차이로 보여진다. 하지만 측정된 충격압력과 압력 지속시간 사이의 내부에너지 총합을 구하면 방정식에 의해 계산된 값과 일치하였다.

충격압력은 재료의 강도와 탄성체적 계수 값에 의해 주로 결정된다. 탄성체적 계수 값이 높을수록 강한 충전재고 그에 따른 최대 충격압력은 작게 발생함을 볼 수 있었다.

3.3 속도 및 충전재에 따른 파괴형상과 파편

속도가 1100 m/s로 유질될 때 각 충전재에 따른 충격압력은 앞 단락에서 계산되었다. 내부 충격압력과 충격속도에 따른 발사체 피복의 파괴형상과 파편의 양 등 상관관계를 도출하기 위해 시물레이션이 수행되었다.

발사체는 900, 1100, 1300 m/s의 충격속도로 충전재에 따라 각각 시물레이션이 수행되었으며 그 결과로서 발생한 파편의 수를 Table 4에 정리하였다. Table 4에 기술한 파편은 파편질량 0.1 g을 기준으로 큰 파편과 미소파편으로 분류되었다. Fig. 9는 1100 m/s의 충격속도에 의한 피복의 옆면과 앞면 파괴형상이다. 충전재의 충격압력은 반경방향으로 피복에 전달되어 반경방향으로 균열 및 파열되어 부서진다. 폴리카보네이트의 충전재를 사용하였을 때 피복의 반경방향으로 균열 수가 가장 많이 발생하였다. 반면 고무의 경우 균열 수가 상대적으로 적었고 발사체의 형상을 거의 유지하였다. 이러한 결과는 참고문헌[2]에서 실험으로 수행된 PELE의 충격거동과 동일한 결과로서 상대적으로 강도가 높은 충전재가 높은 충격압력을 생성하고 이러한 충격압력이 피복의 파괴형상에 영향을 미치기 때문이다. 또한 충격압력에 따른 파편의 양도 달랐다. 이러한 결과는 충전재의 충격압력에 따른 피복의 파괴메커니즘에 대한 적절한 관계를 볼 수 있었다. 충격압력뿐만 아니라 충격속도 또한 PELE 발사체의 충격거동에 영향력 있는 매개변수 중 하나이다.

이론적으로 식 (1)과 (4)는 압력 P가 충격속도와 함께 선형적으로 증가하는 것을 보여준다. 결과적으로 충격속도의 증가는 피복 파열을 상승시키고 이는 파편 개수의 증가와 파편의 평균질량을 감소시켰다. 예를 들어 폴리에틸렌 충전재 PELE인 경우, 충격속도 900 m/s일 때 큰 파편 및 미소파편 수의 합계는 23043개이고 1100 m/s일 때 33,879개, 1300 m/s일 때 50,507개로 충격속도의 상승에 따라 파편의 개수가 급격히 증가하였다. 또한 충격속도 900 m/s일 때 큰 파편의 평균질량은 74.2 g이고, 미소파편은 0.026 g이며 1300 m/s일 때 큰 파편의 평균질량은 65.9 g, 미소파편은 0.019 g로 충격속도가 증가함에 따라 파편이 더

Table 4 The number of fragments with applied velocity and different filling materials

	Polyethylene			Polyurethane			Polycarbonate			Rubber		
	Impact velocity [m/s]											
	900	1100	1300	900	1100	1300	900	1100	1300	900	1100	1300
Number of big fragments	234	209	198	291	265	244	217	299	249	161	172	197
Total mass [g]	17377	17194	17017	17487	17250	17268	17460	17246	17019	17305	17161	16989
Number of small fragments	22809	33670	50309	31578	46610	44421	21655	30791	39562	52445	69565	90075
Total mass [g]	602	785	962	592	829	811	599	813.4	1041	694.5	838	1011

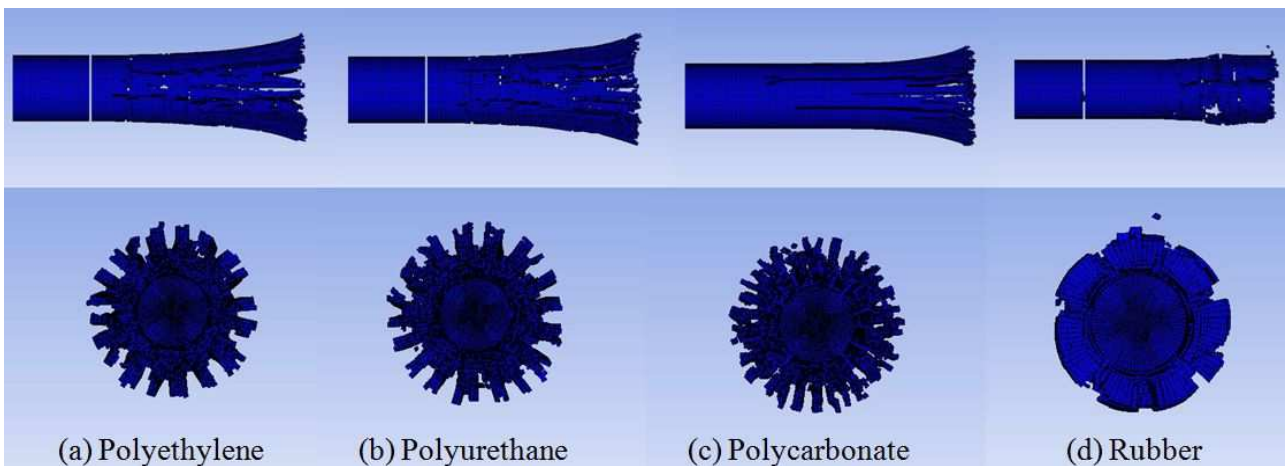


Fig. 9 Effect of applied filling materials on the PELE projectile at 1100 m/s

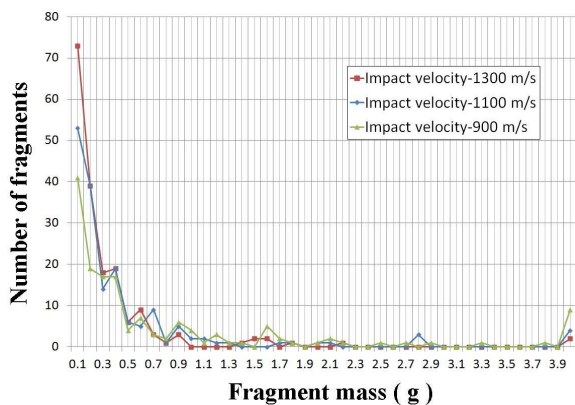


Fig. 10 Comparison of the number of fragments obtained by rubber filling with various impact velocities

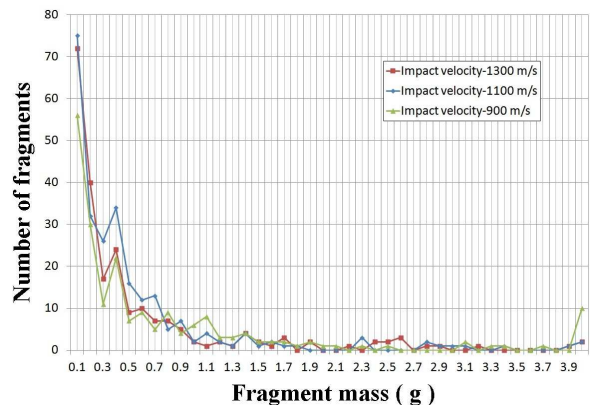


Fig. 11 Comparison of the number of fragments obtained by polycarbonate filling with various impact velocities

작고 균일하게 발생하였다.

Fig. 10, 11 은 각각 고무와 폴리카보네이트 충전재를 사용하였을 때 발생한 파편의 질량에 따른 파편 수를 나타낸 분포도다. 분포도는 미소파편을 제외한 큰 파편만을 정리한 것이다.

충격거동 후 주로 발생하는 파편 질량 범위는 0.1~0.4 g 이다. 고무의 충전재를 사용하였을 경우 충격속도가 증가함에 따라 질량이 작은 파편 수는 증가하였다. 특히 2.3 g 이상의 파편은 1300 m/s 의 충격속도에서 발생하지 않았다. 폴리카보네이트

충전재를 사용하였을 경우에도 Fig. 10 에서 보는 바와 같이 대체로 충격 속도가 높을수록 질량이 작고 균일한 파편 수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 충격속도 증가에 따른 파편 수의 증가는 충격거동 이후 남아있는 발사체와 표적체의 총 질량 비교로도 고찰할 수 있다. 고무의 경우 표적체와 발사체의 충돌 이전의 총 질량이 18001.4 g 이고 충격속도가 900, 1100, 1300 m/s 로 증가함에 따라 충격거동 이후 남아 있는 발사체와 표적체의 총 질량은 각 17130.0, 17060.0, 16930.0 g 이다. 이와 같은 결

과는 충격속도가 증가함에 따라 질량이 작고 균일한 파편의 수가 증가함을 볼 수 있었으며 Fig. 10, 11 의 두 분포도를 비교함으로써 앞서 확인되었던 충격압력에 따른 파편의 정량화도 할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 얇은 판에 천공하는 PELE 의 충격 거동을 수치해석으로 구현하는 절차를 기술하고 충격압력과 충격속도에 의해 생성되는 파괴메커니즘과 파편 사이의 관계를 해석하였다.

(1) 천공하는 PELE 충격거동을 수치시뮬레이션으로 구현하는 방법 및 절차를 기술하고 유체역학적인 압력을 묘사하였다.

(2) PELE 의 충격거동에 영향을 미치는 충전재의 최대 충격압력을 수치해석과 해석적 이론으로 구하였고 상당한 일치점을 보였다.

(3) 상대적으로 강도가 높은 충전재가 높은 충격압력을 생성하고 이러한 충격압력은 피복의 균열 수를 증가시켰다. 또한 충격압력의 증가에 따라 최종적으로 생성되는 파편의 수도 증가시켰다.

(4) 충격속도는 내부압력과 함께 선형적으로 증가하며 결과적으로 충격속도의 증가는 질량이 작고 균일한 파편의 개수를 증가시켰다.

참고문헌

(1) Paulus, G., Chanteret, P. and Wollmann, E., 2004,

"PELE:A New Penetrator Concept for Generating Lateral Effects," *Proceedings of the 21st International Symposium on Ballistics*, Vol.1, pp. 104~110.

(2) Paulus, G. and Schirm, V., 2006, "Impact Behavior of PELE Projectiles Perforating Thin Target Plates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.33, pp. 566~579.

(3) Jian-wei, J., Mou, Z., Jian-bing, M. and Shu-you, W., 2011, "Study on Fragmentation of PELE Against Thin Targets," *Journal of Beijing Institute of Technology*, Vol.20, No.2, pp.168~172.

(4) Recht, R. F. and Ipson, T. W., 1963, "Ballistic Perforation Dynamics," *Trans of ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol.30, No 3, pp. 384~390.

(5) Lee, S., Kim, Y., Koo, M., Gimm, H. and Yoo, H., 2010, "Hilbert-Huang Transform(HHT) Transient Analysis of Composite Panel Undergoing High-Velocity Impact," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.24(12), pp. 2395~2400.

(6) Kim, Y., Yoo, J. and Lee, M., 2012, "Optimal Design of Spaced Plates Under Hypervelocity Impact," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.26(5), pp. 1567~1575.

(7) Paulus, G., 2004, "Geschoss mit Erhohter Lateralwirkung (PELE). Eine Theorie der Lateralwirkung Beim Durchschlag Einer Dunnen Platte," ISL- Report R 115/2004.

(8) Zukas J.A., Editor. 1990, *High Velocity Impact Dynamics*. New York: Wiley.

(9) WWW1.ANSYS.COM, 2011, "ANSYS/AUTODYN-3D,"12.1 User's Manual, Material Models Chapter.