

강체 충격자가 납 표적에 충돌할 때의 침투특성 연구

A Study on the Penetration Characteristics of the Rigid Impactor into the Lead Target

이 영 신*	강 근 희**	최 병 두**
Lee, Young-Shin	Kang, Kun-Hee	Choi, Byung-Doo
박 관 진**	정 수 경**	오 증 수**
Park, Kwan-Jin	Chung, Soo-Kyung	Oh, Jong-Soo

요 지

강체 충격자가 납 표적에 33m/s ~ 141m/s의 속도로 충돌할 때의 침투특성을 연구하기 위하여 Johnson 이론식을 이용한 이론해석과 AUTODYN 코드를 이용한 수치해석 및 실험장치를 이용한 실험측정을 실시하고 그 결과들을 비교 분석하였다. 실험장치로는 가스압력식 발사장치를 설계 제작하였으며, 실험용 충격자로는 충돌부위 형상이 반구형인 반구형 충격자와 원추형인 원추형 충격자 2종류를 사용하였다. 또한, 납새료에 대한 동적 유동응력을 얻기 위하여 홉킨슨 압력봉실험을 수행하였다. 침투특성에 관한 연구결과, 이론적 해석결과와는 저속 충돌범위(반구형 충격자 : 53m/s, 원추형 충격자 : 73m/s)에서 실험결과치와 93% 이상 잘 일치하였으며, 수치해석결과와는 전체적인 충돌속도 범위에서 반구형 충격자인 경우 73% 이상, 원추형 충격자인 경우 86% 이상 일치하였다.

핵심용어 : 강체 충격자, 납표적, 침투깊이

Abstract

The penetration characteristics of the rigid impactor into the lead target in the impact velocity range from 33m/s to 141m/s is studied theoretically by Johnson theory, calculated numerically by the AUTODYN code and investigated experimentally. The experimental results of the penetration depth are compared with the theoretical and numerical results. An experimental firing apparatus using the compressed N₂-gas is manufactured and the hemispherical and conical impactors are used for the test. The split Hopkinson bar tests are performed to obtain the dynamic flow stresses of the lead material. As a result, the experimental results agree well with theoretical results over 93% in the low velocity impact region (hemispherical impactor : 33~53m/s, conical impactor : 33~73m/s) and the numerical results agree with experimental results over 73% in case of the hemispherical impactor and over 86% in case of the conical impactor in the impact velocity range from 33m/s to 141m/s.

Keywords : rigid impactor, lead target, penetration depth

* 정회원·충남대학교 기계설계공학과, 교수
** 국방과학연구소, 1-2부

• 이 논문에 대한 토론을 1999년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1999년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

오래전부터 충격역학에 관한 연구는 군용장비의 관통특성 평가와 방호측면에서 많은 실험과 이론적인 해석이 수행되어 왔다. 그리고, 최근에는 산업이 발달하면서 군용물품뿐만 아니라 많은 상용장비의 보호와 인명 보호측면에서 충돌시 피충돌체는 물론 충돌하는 물체(충격자)내부의 손상 크기의 판단이 상당한 관심사가 되고 있으며, 이를 위하여 충격거동에 관한 많은 연구들이 수행되고 있다.

Goldsmith와 Finnegan^(1,2)은 알루미늄판과 합금강판에 강구가 충돌시의 침투 및 관통현상과 원통형 충격자가 표적에 수직 및 경사 충돌시의 현상에 관하여 이론적 및 실험적 고찰을 하였고, Awerbuch와 Bodner⁽³⁾는 금속판 표적에 충격자가 수직으로 관통할 때의 수학적 모델을 개발하였다. 그리고, Wu와 Goldsmith^(4,5)는 40m/s의 속도로 이동하는 표적에 원통형 충격자가 50~500m/s의 속도로 수직충돌할 때의 충격자의 관통궤적에 대하여 실험하였으며, 이를 해석적 결과와 비교한 결과가 잘 일치함을 확인하였다. 국내에서는 이^(6,7) 등이 얇은 복합표적에 200~300m/s의 속도를 갖는 원추형 탄환이 수직으로 충돌할 때 충격자의 관통이력과 임계 탄속에 관하여 DYNA-2D를 이용하여 수치해석하였으며, 충격자의 형상 및 재질 변화에 따른 펄스형성에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 강체 충격자가 연성 재료인 납 표적에 충돌할 때의 침투깊이에 관하여 W. Johnson⁽⁸⁾이 제시한 이론해석을 적용하였으며, 이에 필요한 동적유동응력값을 홉킨슨 압력봉 실험을 통하여 구하였다. 또한, 충격실험장치를 제작하고 충격실험을 통하여 얻어진 침투깊이에 관한 실험 결과와 상용 충격해석프로그램을 이용하여 얻은 수치해석 결과를 이론해석 결과와 함께 비교하므로써, 침투깊이의 연구에 대한 수치해석의 유용성과 적용범위를 얻고자 한다. 수치해석은 충격실험을 수행하지 못한 충돌속도 범위에 대한 침투깊이를 예측하는데 사용되므로써 유용성이 있을 것으로 기대된다.

2. 해석이론

강체 충격자가 반 무한판으로 간주될 수 있는 연성재료에 저속으로 충돌 할 경우에는 충돌속도뿐만 아니라 충격자 및 피충격체의 기계적 물성치와 충돌부위의 기하학적인 형상 역시 중요한 관계가 있다. Fig.1(a)는 질량이 m 인 구형(spherical) 충격자가 초기 충돌속도 v_0 로 반 무한판의 평면에 충돌하는 경우이며, 이때 충격자의 침투깊이에 대하여 다음과 같은 운동방정식을 고려할 수 있다⁽⁸⁾.

$$mv \frac{dv}{dz} = -\bar{Y} \pi r^2 \tag{1}$$

여기서 \bar{Y} 는 재료가 10%이상 신장된 후의 금속의 동적유동응력(Y)의 3배인 평균 저항압력(mean pressure of resistance)이며, v 는 충격자의 선단이 거리 z 만큼 침투했을 때의 충격자의

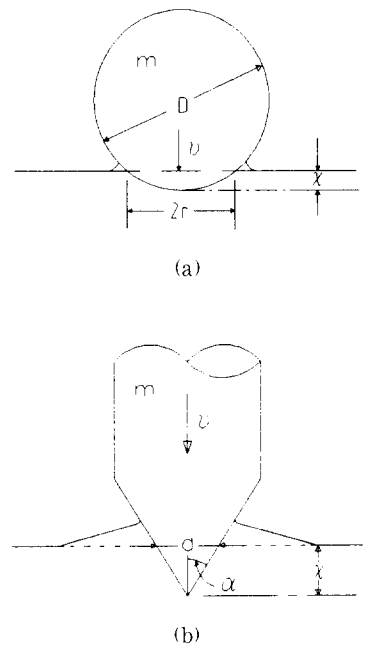


Fig. 1 Penetration on the flat surface of the semi-infinite block

속도이고, r 은 침투깊이에 따른 반경이다. 식 (1)에서 침투 깊이 χ 가 반구의 직경 D 에 비해 작을 경우에는 $r^2 \approx D\chi$ 로 가정할 수 있으며, 속도 v 가 0일 때의 최종 침투깊이 χ_0 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\chi_0 = (m/\bar{Y}\pi D)^{\frac{1}{2}} v_0 \quad (2)$$

Fig. 1 (b)와 같이 충돌부위의 각도가 2α 인 원추형 (conical) 충격자가 충돌할 경우의 운동방정식은 다음 식과 같이 표현된다.

$$m \frac{d^2\chi}{dt^2} = mv \frac{dv}{d\chi} = -\bar{Y} \frac{\pi d^2}{4} \quad (3)$$

여기서 d 는 충격자 선단이 침투되었을 때의 침투직경을 나타낸다. 식 (3)에서 $d/2 = \chi \tan \alpha$ 를 대입하여 적분한 후, 속도 v 가 0일 때의 최종 침투깊이 χ_0 를 구하면 다음 식과 같이 된다.

$$\chi_0 = \left[\frac{3}{2} \frac{mv_0^2}{\bar{Y}\pi \tan^2 \alpha} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

3. 충격실험

본 연구에서는 두 종류의 실험을 수행하였다. 첫 번째는 이론해석에서 사용된 납 표적의 침투깊이 계산에 필요한 동적유동응력 (Y)을 획득하기 위하여 홉킨슨 압력봉실험을 수행하였으며, 두 번째로 납 표적의 침투깊이를 측정하기 위한 충격실험을 수행하였다.

3.1 홉킨슨 압력봉 실험

홉킨슨 압력봉 실험은 $10^3 \sim 10^4/\text{sec}$ 의 변형률 속도 범위에서의 재료의 특성을 측정하기 위하여 폭넓게 사용되는 실험방법으로서, 그 개략도는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 충격봉 (impact bar)이 입력봉 (incident bar) A면에 탄성충돌을 하게 되면 입력봉 내부에는 변형률 $\epsilon_r(t)$ 를 갖는 탄성압축파 (elastic compression wave)가 발생한다. 이

압축파가 입력봉의 다른 끝인 B면에 도달하게 되면 시편 (specimen)과 임피던스 (impedance) 차이에 의하여 시편은 소성변형을 하게되며, 압축파의 일부는 변형률 $\epsilon_R(t)$ 을 갖는 탄성인장파로 반사되고 나머지는 변형률 $\epsilon_T(t)$ 를 갖는 탄성압축파로 투과된다. 입력봉에서 ϵ_R 을 측정하여 변형률속도와 변형률을 결정하고 출력봉 (transmit bar)에서 ϵ_T 를 측정하여 응력을 결정하므로써 동적 하중상태에서 시편의 응력-변형률 선도를 얻을 수 있다. Fig. 2에서 V_0 는 충격봉의 충돌속도이고, P_1 과 P_2 는 각각 입력봉과 출력봉의 단면에 작용하는 하중을 나타내며, S_1 과 S_2 는 스트레인 게이지이다.

홉킨슨 압력봉 실험에 사용한 납 재료 시편은 직경 10mm, 높이 5mm인 원통형 시편으로서 길이 방향에 대하여 압축 충격시에 좌굴 현상이 발생되지 않도록 시편 양쪽 단면의 평행 공차를 0.02mm 이내, 원주 외면의 진직도 공차를 0.01mm 이내가 되도록 가공하였다. 본 실험에 사용한 충격봉과 입력봉 및 출력봉은 일반 탄소강으로 직경이 20mm이고, 길이는 충격봉이 300mm, 입력봉과 출력봉이 1,500mm이며, 충격봉은 공압장치를 이용하여 7~10m/s의 속도로 발사하였다.

이상과 같은 실험조건에서 입력봉과 출력봉에 부착된 스트레인 게이지에 의해 얻어진 납 시편의 평균 변형률속도는 1,564/sec이었다. 또한 이때의 응력-변형률선도가 Fig. 3에 정적 압축 실험결과 얻어진 응력-변형률선도와 함께 나타나 있다. Fig. 3에서 점선곡선은 2회의 동적시험결과 (과형곡선)를 식 $\sigma = 8.1141 \ln(\epsilon) + 45.244$ 의 로그함수로 커브피팅 (curve fitting)한

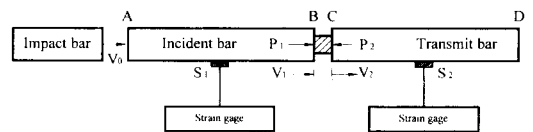


Fig. 2 The schematic diagram of the split Hopkinson bar test

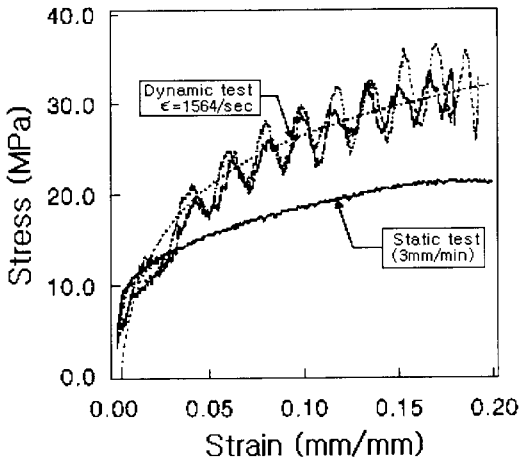


Fig. 3 Comparison of the dynamic and static true stress-strain curves of the lead material

결과이며, 이로부터 식 (2)와 (4)에서의 \bar{Y} 를 구하기 위하여 변형률이 10% (0.10)일 때의 동적유동응력 (\bar{Y}) 값으로 26.5 MPa를 결정할 수 있다.

3.2 충격시편

연성재료에 대한 충격자의 침투특성을 연구하기 위하여 재 가공성이 용이한 납 재료를 표적모델로 사용하였다. 납 표적의 형상은 절두된 원추형상으로 제작하였으며, 충격자와 접촉되는 면의 직경은 130mm이고, 높이는 다양한 충돌속도에 따라 90~145mm까지 3단계로 제작하였다. 또한, 절두된 원추의 밑면은 134~137mm 범위에서 제작하였으며, 납 표적의 무게는 10~20kg이었다. 충격자의 충돌부위 형상은 반구형과 원추형 2종으로 제작하였다. 충격자의 충돌부위는 마레이징강 (maraging steel)으로 제작하였으며, 뒷부분에 알루미늄 실린더로 제작된 몸체를 부착하였다. 충격자의 전체길이는 165mm인 알루미늄 몸체를 포함하여 반구형 충격자가 202.6mm, 원추형 충격자가 210.8mm이며, 알루미늄 몸체의 직경은 50mm이다. 반구형 충격자의 충돌부위 반경은 24.6mm이며, 원추형 충격자의 충돌부위 원추각은 90°이다. 충격자의 무게는 반구형과 원추형 모두 1.06kg

이다. Fig. 4는 충격실험에 사용된 두 종류의 충격자 형상을 나타낸 것이다.

3.3 실험장치

충격자를 추진시켜 주기 위한 실험장치로는 Fig. 5와 같은 가스 압력식 발사장치를 설계하여 제작하였으며, 추진가스로는 10MPa의 질소가스를 사용하였다. 시험방법은 다음과 같다. 먼저 압력탱크 (pressure tank)에 충격자 (impactor)를 장착하고 고압의 질소가스를 공급한다. 압력탱크에 부착되어 있는 발사밸브를 순간적으로 작동시켜 충격자를 추진시킨다. 추진된 충격자는 총렬 (gun tube)을 따라 가속되며, 표적상자 (target box)내에 설치되어 있는 납표적에 충돌하게 된다. 이때 추진된 충격자의 속도는 표적상자에 장착되어 있는 속도측정장치에서 측정된다. 본 실험에서는 납 표적에 수직인 방향으로 반구형 및

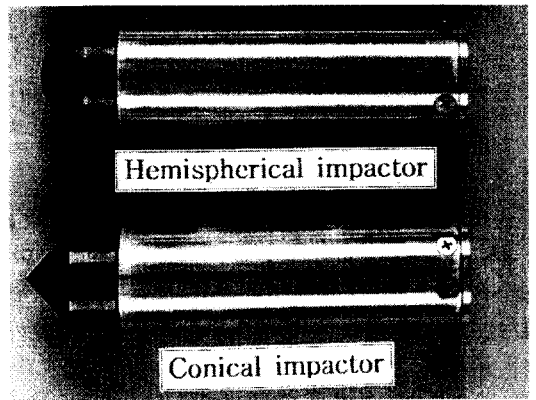


Fig. 4 Photograph of the hemispherical impactor and the conical impactor

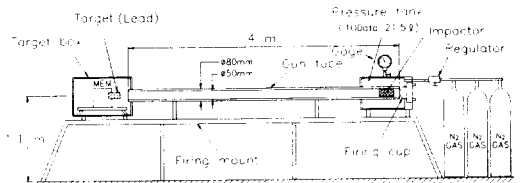


Fig. 5 The schematic diagram of the experimental apparatus

원추형 충격자 모두 다양한 측정속도 (33m/s, 53m/s, 73m/s, 93m/s, 117m/s 및 141m/s)로 실험하였으며, 실험 후 납 표적의 침투깊이를 측정하였다.

4. 수치해석

침투깊이에 대한 수치해석에는 유한차분법을 이용한 AUTODYN 코드⁹⁾를 이용하였다. AUTODYN 코드에서는 4절점 사각형요소만을 제공하며, 충격자와 납 표적의 접촉면은 두 개의 라그랑지안 연산자 사이가 0.05mm의 일정한 간격(gap)이 유지되는 조건을 적용하였다. 충격자와 표적은 2차원 축 대칭으로 모델링하였으며, 충격자의 전체 요소 수는 30×5개, 납 표적의 전체 요소 수는 60×14개로 모델링 하였다. 경계조건은 축 대칭 부위와 표적의 한쪽만을 완전 고정하였다. 해석에서 사용된 시간 간격은 코드에서 자동적으로 적용되며, 초기 시간간격은 0.2 μ sec가 적용되었다. AUTODYN 코드에서 재료의 힘과 변형률 관계를 규정하기 위한 구성 방정식은 재료의 물성에 적용되며, 각각의 재료에 적용된 물성치는 Table 1과 같다. Table 1에서 보논바와 같이 표적 재료인 납과 충격자를 구성하고 있는 마레이징강 및 알루미늄 재료에 대해서 실험치와 연결될 수

있도록 Linear 상태방정식을 사용하였으며, 각 재료의 구성방정식은 Vonmises 강성모델을 인용하였다. 충격자는 납 표적에 대하여 수직방향으로 33m/s, 53m/s, 73m/s, 93m/s, 117m/s 및 141m/s의 속도로 충돌하는 것을 고려하여 계산하였다. Fig. 6은 반구형 및 원추형 충격자가 93m/s의 속도로 납 표적에 충돌하였을 때의 최종적인 침투 현상을 보여 주고 있다. 또한, 납재료에 대한 홉킨슨 압력봉 실험 결과에서 얻어진 평균 변형률 속도(1,564/sec)에서의 평균 동적 유동응력값(26.5 MPa)의 타당성을 분석하기 위하여 AUTODYN 코드를 이용시 납표적 표면으로부터 44mm 위치한 곳에서의 시간에 따른 변형률속도를 계산하였으며, 이를 그래프로 나타내면 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 수치해석에 의한 납표적의 시간에 따른 변형률속도 변화를 고찰해 보면 평균 변형률속도는 실험치(1,564/sec)와 근접하는 것으로 판단되며, 이는 실험으로부터 얻어진 평균 유동응력값과 평균 변형률속도의 타당성을 나타내는 것이다.

5. 결과 및 고찰

연성재료인 납 표적에 반구형 및 원추형 강체 충격자가 충돌할 때 충돌속도 변화에 따른 납 표

Table 1 Mechanical properties of materials

Materials	Lead	Maraging steel	Aluminum
Density (g/cm ³)	11.34	7.83	2.8
Yield strength (MPa)	26.5	1,978.0	100.0
Shear modulus (GPa)	8.6	81.8	34.0
Bulk modulus (GPa)	40.0	159.0	70.0

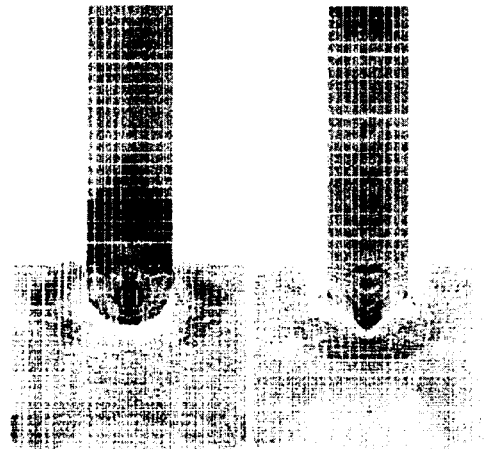


Fig. 6 Penetration configure of the rigid impactor into the lead target by the AUTODYN code

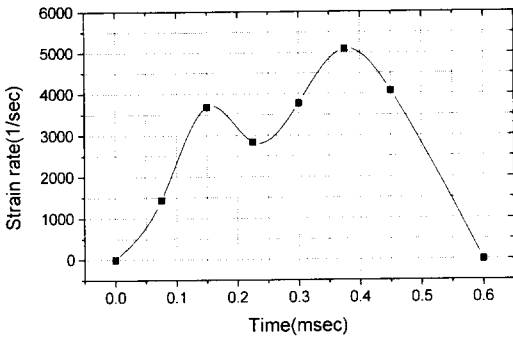


Fig. 7 Strain rate - time curve of the lead target at impact velocity of 93 m/sec

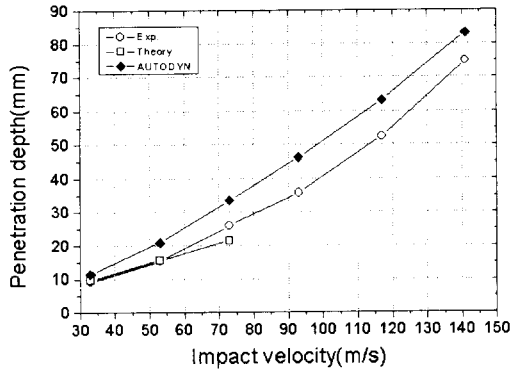


Fig. 8 Comparison of the penetration depth of the hemispherical impactor into the lead target

적의 침투깊이에 대하여 이론적 해석결과와 충격 실험결과 그리고 상용코드를 이용한 수치계산 결과를 비교 분석하였다.

5.1 반구형 충격자의 침투특성

Table 2와 Fig. 8은 반구형 충격자가 납 표적에 충돌할 때의 충돌속도에 따른 표적 침투깊이에 대한 실험과 이론해석 및 수치계산 결과를 나타내며, 여기에서의 실험치는 모두 3회 이상의 실험 결과에 대한 평균값이다.

Table 2 및 Fig. 8에서 충돌속도 53m/s까지는 이론적인 계산치와 실험치가 95% 이상 아주 잘 일치하고 있으며, 충돌속도 73m/s에서는 이론계산치가 실험치보다 약 17% 정도 적은 값으로 나타났다. 이러한 결과로 볼 때 반구형 충격자의 침투깊이에 대하여 Johnson⁸⁾이 제시한 이론식은

충돌속도 53m/s 이하의 범위에서 적용됨을 알 수 있었다. 참고로, 충돌속도 73m/s에서의 침투깊이는 26.0mm로 식 (1)에서 $r^2 \approx D\chi$ 로 가정할 수 없는 범위가 된다.

또한, 침투깊이에 대한 실험치와 AUTODYN 코드에 의한 수치계산치를 비교해 보면 충돌속도에 따라 73~90%까지 일치하고 있음을 알 수 있다.

5.2 원추형 충격자의 침투특성

Table 3과 Fig. 9는 원추형 충격자가 납 표적에 충돌할 때의 충돌속도에 따른 표적 침투깊이에 대한 실험과 이론해석 및 수치계산 결과를 나타내며, 여기에서도 실험결과치는 모두 3회 이상의 충격실험에 대한 평균값들이다.

Table 3 및 Fig. 9에서 보면 충돌속도 73m/s가

Table 2 Comparison of experimental, theoretical and numerical results of the penetration depth at the various velocities of the hemispherical impactor

Impact analysis	Impact velocity (m/s)					
	33	53	73	93	117	141
Exp.	9.2	15.3	26.0	35.7	52.5	74.7
Theory	9.7	15.6	21.5	-	-	-
AUTODYN	11.5	20.9	33.5	46.3	63.1	83.2

Table 3 Comparison of experimental, theoretical and numerical results of the penetration depth at the various velocities of the conical impactor

Impact analysis	Impact velocity (m/s)					
	33	53	73	93	117	141
Exp.	17.7	24.8	34.3	43.2	58.2	72.2
Theory	19.1	26.2	32.4	-	-	-
AUTODYN	20.1	27.3	36.3	50.1	60.4	77.3

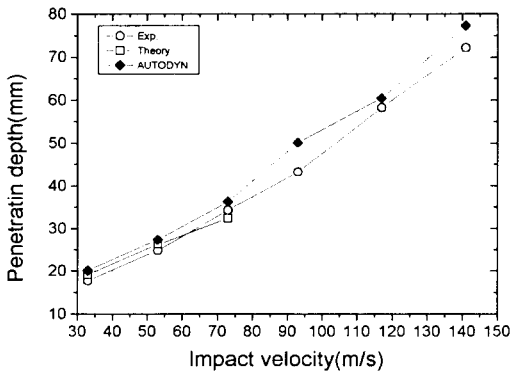


Fig. 9 Comparison of the penetration depth of the conical impactor into the lead target

지는 이론적인 계산치와 실험결과치가 93% 이상 잘 일치하고 있으며, 이러한 결과로 볼 때 원추형 충격자의 침투깊이에 대하여 Johnson⁸⁾이 제시한 이론식은 충돌속도 73m/s까지 잘 일치함을 알 수 있었다. 이때의 침투깊이는 34.3mm이다.

또한, 실험치와 AUTODYN 코드에 의한 수치계산치를 비교해 보면 충돌속도에 따라 86 ~ 96%까지 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과로 볼 때 원추형 충격자의 침투깊이에 대한 AUTODYN 코드의 계산결과는 반구형 충격자인 경우와는 달리 실험치와 잘 일치함을 알 수 있었다. Fig. 10은 93m/s, 117m/s 및 141m/s의 충돌

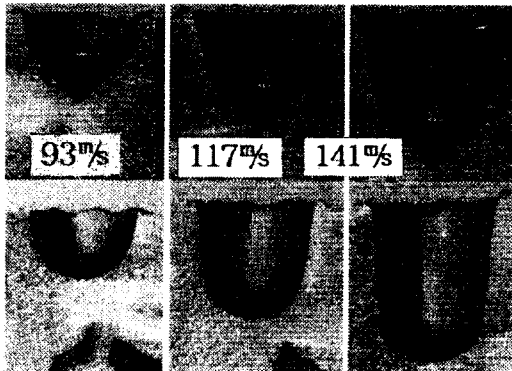


Fig. 10 Cross sections of the penetrated lead targets by the conical and the hemispherical impactors

속도에서 침투된 납 표적 시편을 절단하여 나타낸 형상이다.

6. 결 론

반구형 충격자와 원추형 충격자가 연성재료인 납 표적에 33~141m/s의 속도로 충돌할 때 충격자의 침투깊이를 실험 측정하였으며, Johnson⁸⁾이 제시한 이론식에 의한 해석결과와 AUTODYN 코드에 의한 수치계산 결과와를 비교 분석하였다. 본 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 저속충돌시의 반 무한관 표적침투에 대하여 Johnson이 제시한 이론식은 반구형 충격자의 경우에는 충돌속도 53m/s까지 95% 이상 아주 잘 일치 하였으며, 원추각이 90°인 원추형 충격자의 경우에는 충돌속도 73m/s까지 93% 이상 잘 일치하였다.

2) 강제충격자가 연성재료인 납표적에 충돌할 때 충격자의 침투깊이에 대하여 AUTODYN 코드를 이용한 수치계산 결과 반구형 충격자인 경우에는 73% 이상 일치하였으며, 원추형 충격자인 경우에는 86% 이상 잘 일치하였다.

3) 납재료에 대한 홉킨슨 압력붕실험 결과 얻어진 평균 동적 유동응력값을 수치 해석에 적용한 결과, 침투깊이에서 실험치와 27% 까지 차이가 나타났으며, 이는 구성방정식을 완전 소성체로 단순화한 결과로 판단되는 바, 실제에 근접한 구성방정식을 적용한다면 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. W. Goldsmith and S. A. Finnergan, 1971, "Penetration Process in Metal Targets At and Above Ballistic Velocities". *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.13, pp.843~866.
2. W. Goldsmith and S. A. Finnergan, 1986, "Normal and Oblique Impact of Cylindro-

- Conical Projectiles on Metallic Plates", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp.83~105.
3. J. Awerbuch and S. R. Bodner, 1974, "Analysis of The Mechanics of Perforation of Projectiles in Metallic Plates", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 10, No. 6, pp.671~684.
 4. E. Wu and W. Goldsmith, 1990, "Normal Impact of Blunt Projectiles on Moving Targets ; Experimental Study", *International Journal of Impact Engineering*, Vol.9, No.4, pp.389~404.
 5. E. Wu and W. Goldsmith, 1990, "Normal Impact of Blunt Projectiles on Moving Targets ; Analytical Considerations", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp.405~432.
 6. 이영신, 오종수, 강근희, 1995, "복합표적에 대한 원추형 탄환의 관통이력 연구", 대한기계 학회 1995년 춘계 학술대회 논문집 (I), pp.538~543.
 7. 이영신, 김동진, 강근희, 오종수, 1998, "충격자의 형상 및 재질 변화에 따른 펄스형 성에 관한 연구", 대한기계 학회논문집, 제22권, 제1호, pp.52~63.
 8. W. Johnson, 1972, *Impact Strength of Materials*, Edward Arnold, London
 9. Century dynamics, 1997, *AUTODYN Interactive Non-Linear Dynamics Analysis Software*, Theory manual Revision 3.0, Century Dynamics, Inc., California
- (접수일자 : 1998. 2. 27)