

경량 박판을 관통하는 강구의 잔류속도 연구

Study on Residual Velocity of Steel Sphere Perforating Light Weight Thin Plate

송민철*

Song, Min-Cheol

ABSTRACT

In this paper, the experiments have been conducted to measure the residual velocity for 3.5g steel ball perforating light weight metal plates of aluminum alloy and magnesium alloy. Non-contact electro-magnetic sensors were used to measure the velocity of steel ball before/after perforating plates. The thicknesses of specimens used were about 2.8mm and 4.8mm. The impact velocities of steel ball were from 662m/s to 3594m/s. With same conditions, numerical analysis using Autodyn 2D has been conducted. The results of numerical analysis corresponded with those of experiments. Also, It is suggested that the difference between the residual velocity of experiment or numerical analysis and that of THOR experimental equation of BRL grew smaller as the impact velocity were increased.

주요기술용어(주제어) : perforation experiment(관통실험), residual velocity(잔류속도), light weight thin plate(경량박판), THOR equation(THOR 실험식), numerical analysis(수치해석)

1. 머리말

파편 탄두(fragment warhead)의 위력(lethality)을 평가하기 위한 주요 과정 중 하나는 관재에 대한 파편의 관통 특성 해석이며, 이를 파편 피해과정(damage process) 해석이라 한다.^[1] 이는 파편 탄두에서 생성된 파편이 표적의 외부 구조를 관통하여 내부구성품(internal component)에 도달하는 순간의 파편의 특성을 예측하는 과정이며 이를 통해 구성품에 미치는 파편의 영향을 분석하고 궁극적으로 표적시스템 전체에 대한 파편 탄두의 위력을 평가하게 된다. 일반

적으로 구성품에 대한 파편의 피해는 파편의 속도(velocity), 질량(mass) 등의 변수에 대한 확률값으로 제시된다.^[2] 따라서 표적의 외부 구조를 관통하여 내부구성품에 도달하는 파편의 속도, 질량을 정확하게 분석, 예측하는 것은 특정 표적에 대한 탄두의 위력 평가 나아가서는 무기 체계의 위력 평가의 신뢰도를 향상시키게 된다. 이를 위한 관통 해석 방법으로는 일반적으로 실험적 방법(experimental method), 해석적 방법(analytic method) 그리고 수치해석적 방법(numerical method) 등을 사용한다.^[3] 실험적 방법의 대표적인 것이 THOR식이다.^[4] 이 식은 관심 있는 재료의 충돌자 및 판재를 선정하여 수많은 실험을 통하여 만들어진 실험식이다. 실험적 방법은 실제로 사용되는 재료를 가지고 실제 상황을 가정한 실험을 통한 결과이기 때문에 정확하다는 장점을 지니지만 많

† 2005년 6월 2일 접수~2005년 9월 9일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : mincheol@add.re.kr

은 비용을 필요로 하고 실험에서 고려되지 않은 상황에 있어서의 적용 가능성에 대한 판단의 불확실성을 내포한다. 해석적인 방법은 발생할 수 있는 피해양상 (damage mode)을 가정하고 일반적인 운동량 보존법칙(momentum conservation law)과 에너지 보존 법칙(energy conservation law)을 적용하여 현상을 기술한다.^[5,6] 대체적으로 해석적인 방법의 결과도 비교적 단순한 표현식으로 전개되어 광범위하고 편리한 사용이 장점이 있지만, 실제 문제에서의 적용을 위해서는 추가적인 정확도 확보 과정이 요구된다. 최근에는 컴퓨터 계산능력의 비약적인 발전과 함께 수치해석적 방법이 실험적 방법에서 발생하는 고비용과 해석적 방법에서 발생하는 정확성의 문제를 보완하기 위해 많이 이용된다. 수치해석은 기본 지배방정식을 적용하여 시간증분에 대하여 연속적인 계산을 하는 방법으로 결과의 정확도는 해석에서 필요로 하는 재료물성에 많이 좌우된다. 복잡한 문제에서는 수치해석 방법과 실험적 방법을 동시에 사용함으로써 비용의 절감과 정확도 및 신뢰성의 향상을 도모하게 된다.

본 논문에서는 실험적 방법과 수치해석적 방법을 이용하여 항공기 재료로 많이 사용되는 알루미늄 합금(aluminum alloy)과 마그네슘 합금(magnesium alloy)의 경량(light weight) 판재를 관통하는 강구 (steel ball)의 잔류속도(residual velocity)를 측정, 계산하고 분석하였다. 두 종류 판재 모두 2.8mm, 4.8mm의 두 가지 두께에 대하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 충돌자는 3.5g의 질량을 갖는 강구이며 실험을 통하여 판재를 관통한 후의 강구의 잔류속도를 다양한 충돌속도에서 측정하여 그 결과를 수록하였다. 또한 실험과 같은 초기조건에 대하여 비선형 전산해석 코드인 Autodyn 2D Ver. 5.0을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 통해 계산한 강구의 잔류속도를 수록하고 실험결과와 비교하였다. 한편, 실험식으로써 현재 많이 이용되고 있는 THOR식을 이용하여 계산한 강구의 잔류속도 값을 실험 및 수치해석 결과와 비교하여 차이점을 확인하고 충돌속도에 따른 잔류속도의 영향을 강구의 정적 재료물성(material property)과 관련하여 분석하였다.

2. 실험

가. 재료물성 측정

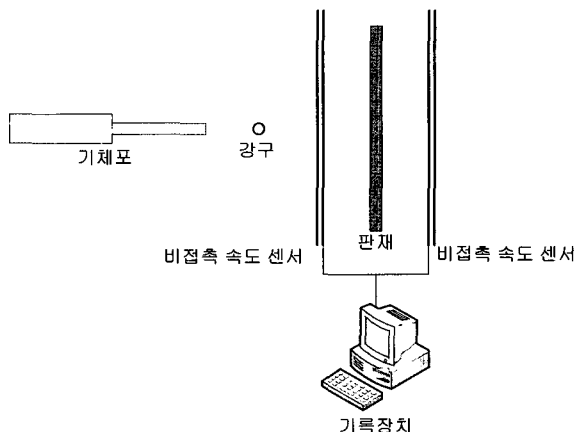
실험에 사용한 강구 및 판재의 물성 측정을 위해 인장시험을 실시하였다. 인장시험으로부터 측정된 물성은 탄성계수(Young's modulus), 항복강도(yield strength) 그리고 인장강도(tensile strength)이며 측정 결과가 표 1에 수록되어 있다. 강구의 경우 봉재 시편을 사용하여 세 번의 인장시험을 실시하였고, 판재들의 경우 판재 시편을 이용하여 각각 네 번의 시험을 수행하였다. 표 1은 다수 시험의 산술 평균값이다.

[표 1] 실험재료 물성

	밀도 (g/cm ³)	탄성계수 (GPa)	항복강도 (Mpa)	인장강도 (Mpa)
강구	7.81	200	353	638
Al합금	2.8	72	353	456
Mg합금	1.79	39.2	180	265

나. 실험장치 및 방법

기체포(gas gun)에서 발사된 강구가 판재를 관통하기 전/후의 속도를 측정하기 위해 비접촉 전자기 속도 센서(non-contact electro-magnetic velocity sensor)를 사용하였다. 판재의 전/후면 방향에 설치된 센서를 통하여 충돌 전/후 속도를 측정하였다. 속도



[그림 1] 관통 실험 장치 개략도

는 센서 사이의 거리와 수신한 신호의 시간차를 고려하여 결정된다. 1mm 수준의 거리 측정과 1μs 수준의 시간 측정에 의해 속도를 결정하게 되며, 속도 정확도는 3~5% 이내로 알려져 있다. 실험장치의 개략도는 그림 1과 같다.

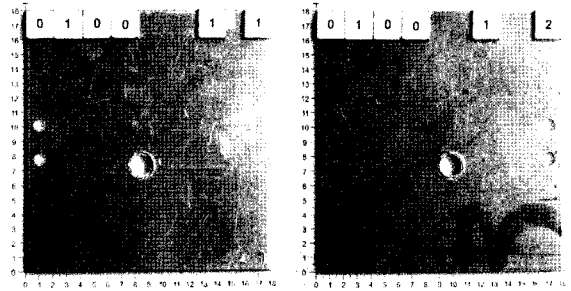
다. 실험조건 및 결과

1) 알루미늄 합금 판재

알루미늄 합금 판재에 대한 강구의 잔류 속도를 측정하기 위해 다양한 충돌 속도에 대하여 실험을 수행하였다. 알루미늄 합금 판재에 대하여 수행된 실험 횟수는 총 9회이다. 실험에 사용된 알루미늄 합금 판재의 두께는 2.8mm와 4.8mm이고, 사용된 판재의 크기는 180mm×180mm이다. 2.8mm 판재에 대하여 최소 662m/s에서 최대 3470m/s의 충돌속도(V) 영역에서 4회의 실험이 수행되었고, 4.8mm 판재에 대하여 최소 764m/s에서 최대 3086m/s의 충돌속도 영역에서 5회의 실험이 수행되었다. 매 실험마다 실험에 사용된 강구의 질량과 판재의 두께를 측정하였으며 이 값이 표 2에 제시되어 있다. 이들 조건들에 대하여 그림 1의 장치를 이용하여 측정된 강구의 충돌속도 및 잔류속도(V_r) 결과가 표 2에 나타나 있다. 측정된 잔류속도값은 2.8mm 두께의 경우 최소 548m/s에서 최대 3196m/s이며, 4.8mm 두께의 경우 최소 573m/s에서 최대 2755m/s이다.

[표 2] Al합금 판재 관통실험 결과

실험 번호	판재 두께 (mm)	강구 질량 (g)	충돌 속도 (m/s)	잔류 속도 (m/s)	V_r/V
45	2.76	3.51	662	548	0.83
49	2.83	3.50	1474	1384	0.94
50	2.75	3.50	1738	1628	0.94
97	2.75	3.57	3470	3196	0.92
152	4.83	3.56	764	573	0.75
151	4.91	3.56	966	801	0.83
150	4.89	3.56	1502	1256	0.84
100	4.90	3.56	2148	1865	0.87
101	4.85	3.56	3086	2755	0.89



[그림 2] 관통실험 후 판재 전/후면 상태 (실험번호100)

알루미늄 합금 판재에 대한 실험 중 실험번호 100의 실험 후 판재의 전/후면 모습이 그림 2와 같다.

알루미늄 판재에 대한 표 2의 실험 결과로부터는 충돌속도 증가에 따른 속도감소량(이하 속도감소량)의 추세를 명확히 확인할 수 없는데, 이는 충돌속도 증가에 따라 발생하는 임의적인 파편의 쪼개짐, erosion, 전단 질량 손실(extrusion shear mass loss) 등에 의한 강구의 질량 손실과 관련이 있으며, 앞에서 기술한 속도 측정의 오차에 기인하는 측면도 있다. 그럼에도 불구하고, 충돌속도에 대한 잔류속도비(이하 잔류속도비, V_r/V)는 충돌속도가 증가함에 따라 증가하는 추세를 미약하게나마 확인할 수 있다.

2) 마그네슘 합금 판재

마그네슘 합금 판재에 대한 강구의 잔류 속도를 측정하기 위해 다양한 충돌속도에 대하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 마그네슘 합금 판재의 두께는 2.8mm와 4.8mm이고 판재의 크기는 180mm×180mm 이다. 2.8mm 두께의 경우 최소 890m/s에서 최대 3594m/s의 충돌속도 영역에서 6회의 실험이 수행되었고 4.8mm 두께의 경우 최소 710m/s에서 최대 2577m/s의 충돌속도 영역에서 5회의 실험이 수행되었다. 매 실험마다 실험에 사용된 강구의 질량과 판재의 두께를 측정하였으며 표 3에 이 값이 제시되어 있다. 또한 실험에서 측정된 충돌속도와 잔류속도값이 표 3에 제시되어 있다. 측정된 잔류속도는 2.8mm 두께의 경우 809m/s에서 3403m/s이며 4.8mm 두께의 경우 627m/s에서 2328m/s이다.

마그네슘 판재에 대한 표 3의 실험에서도 알루미늄

[표 3] Mg합금 판재 관통실험 결과

실험 번호	판재 두께 (mm)	강구 무게 (g)	충돌 속도 (m/s)	잔류 속도 (m/s)	V_r/V
1376	2.76	3.57	890	809	0.91
1377	2.80	3.58	1068	967	0.91
1375	2.84	3.57	1672	1545	0.92
1296	2.90	3.58	2502	2416	0.97
1297	2.99	3.58	3010	2928	0.97
1330	2.86	3.57	3594	3403	0.95
1384	4.77	3.60	710	627	0.88
1388	4.86	3.58	1058	935	0.88
1389	4.89	3.58	1319	1198	0.91
1385	4.81	3.58	1486	1305	0.88
1304	4.74	3.58	2577	2328	0.90

늄 판재와 마찬가지로의 경향을 보인다. 즉, 충돌 속도가 증가함에 따라 발생하는 임의적인 파편의 쪼개짐, erosion, 전단 질량 손실(extrusion shear mass loss) 등에 의한 강구의 질량 손실과 실험오차에 기인하여 충돌속도 증가에 따른 속도감소량의 명확한 추세를 확인이 어렵다. 하지만, 마그네슘 판재의 경우에서도 충돌속도가 증가함에 따라 잔류속도비가 증가하는 추세를 미약하나마 확인할 수 있다.

3. 수치해석

일반적으로 하중을 받는 재료의 거동에 대한 수치해석은 라그랑지(lagrange)해법을 사용하지만 대변형(large deformation)을 수반하는 관통 문제에서는 라그랑지해법에서 발생하는 요소 비틀림(mesh distortion) 문제가 없는 오일러(Euler)해법을 주로 사용한다. 그러나 오일러 해법은 요소와 요소사이의 재료이동으로 인하여 정확한 자유표면(free surface)의 추적이 어렵고 전 영역에 설정된 요소로 인해 많은 계산시간을 필요로 하는 단점을 지닌다. 한편 ALE(Arbitrary Lagrange Euler)해법은 1970년대에 개발된 방법으로 설정된 요소를 단계마다 임의적 혹은 정의된 방법에

의해 재설정하여 라그랑지 해법이 갖는 요소 비틀림을 지연시키고 오일러 해법이 요구하는 전 영역에 걸친 요소 설정을 요구하지 않는다.^[7]

이런 이유로 본 연구에서는 대변형 해석 하이드로코드인 Autodyn 2D의 ALE해법을 이용하여 판재를 관통한 강구의 잔류 속도를 계산하였다.

가. 해석조건

강구의 관통 해석은 2차원 축대칭(axial symmetry)으로 수행되었고, ALE 해법의 적용을 위하여 1cycle마다 Autodyn 2D에서 지원하고 있는 등포텐셜(equipotential) 운동 구속조건(motion constraint)을 이용하여 요소를 재배치(rezoning)하였다. 하지만 ALE해법을 사용한다 하더라도 관통 현상은 요소 비틀림을 수반하기 때문에 이의 해결방법으로 Instant geometric strain 300%의 요소 소진(mesh erosion) 방법을 사용하였다. von Mises 강도 조건을 적용하기 위해 표 1의 인장시험 결과를 이용하였다. 한편, 하이드로코드 해석을 위해서는 응력과 변형율의 정수압 성분 사이의 관계를 기술하는 EOS(Equation Of State)가 필요하며, 이에 따라 강구의 경우 Linear EOS, 판재의 경우 Autodyn 2D 라이브러리를 참조한 Shock EOS를 사용하였으며 그 값은 표 4와 같다.^[8]

[표 4] 수치해석에 사용한 EOS

	EOS			
	Linear	Shock		
	Bulk modulus (Gpa)	Gruneisen coefficient	C1 (m/s)	S1
강구	167	-	-	-
Al 합금	-	2.0	5328	1.338
Mg 합금	-	1.13	4510	1.251

나. 해석과정

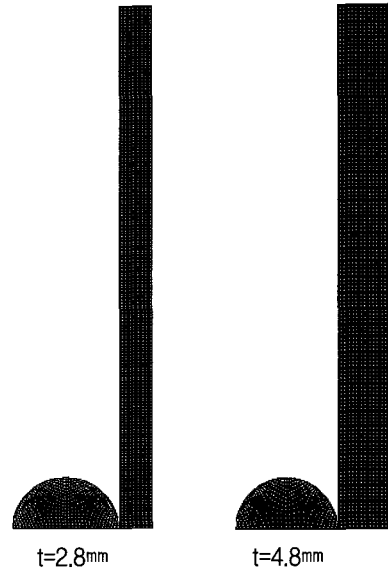
강구의 잔류속도에 대한 실험값과 해석값의 비교를 위해 실험결과를 획득한 모든 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 매 해석마다 실험시 측정된 강구의

지름과 판재 두께를 개별적으로 적용하였다. 잔류속도를 계산하기 위한 해석에 사용한 요소망은 그림 3과 같다. 실험에서는 한번의 길이가 180mm인 사각 판재를 사용하였으나, 해석에서는 2차원 해석의 특성상 원형 판재로 모델링하였다. 문헌에 따르면 후판(thick plate)의 관통 문제에서 경계 효과(edge effect)를 무시하기 위한 판재의 횡방향 크기는 강구 지름의 15배 이상이어야 하고, 박판의 관통 경우에는 단지 강구 지름의 몇 배 수준 이상이어야 하는 것으로 알려져 있다.^[9] 이를 기초로 하여 경계의 영향을 무시할 수 있으면서 과도한 요소의 생성을 억제하기 위해 해석 모델에서는 판재 길이를 49mm로 제한하였다. 이 경우 판재는 지름이 98mm 인 원형 판재가 된다. 해석에서 사용된 강구의 최대 지름은 9.58mm 인데, 이 경우라 하더라도 판재의 지름은 강구 지름의 열 배 이상이므로 해석에 사용된 모델에서 경계의 영향을 무시할 수 있고, 따라서 실험과 경계조건에 있어 상이함을 보이지 않는다고 판단할 수 있다.

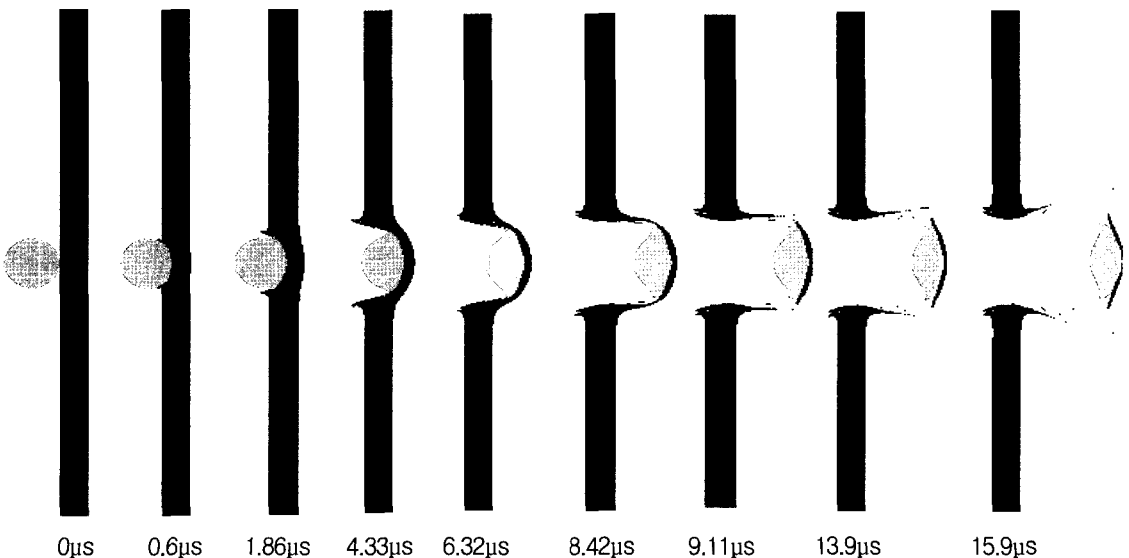
해석에 사용된 요소 개수는 강구의 경우 1800개, 2.8mm 판재의 경우 6000개, 그리고 4.8mm 판재의 경우 9000개이다. 모든 경우에 대하여 사각형 요소를 사용하였다.

위 요소망을 이용한 해석과정이 그림 4와 같으며,

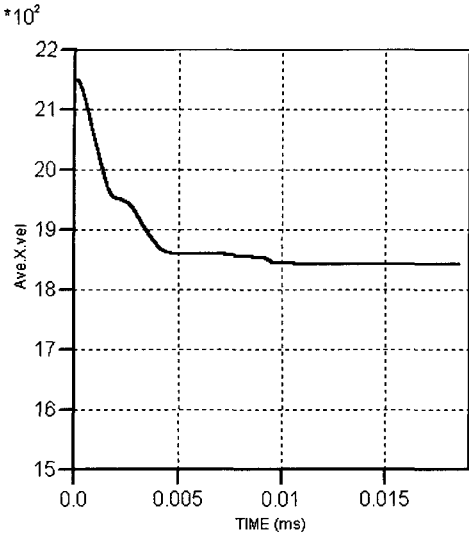
이는 대칭축에 대한 거울 이미지(mirror image)이다. 해석 과정을 거치게 되면 궁극적으로 그림 5와 같이 강구의 모든 요소에 대한 평균속도 변화 그래프를 얻게 되고 이를 이용하여 강구의 잔류속도를 계산하게 된다. 이 잔류속도값은 강구 모델을 구성하는 모든 요소들에 대한 속도성분의 평균값이다. 속도 변화 그



[그림 3] 해석 모델의 요소망



[그림 4] 잔류 속도 계산을 위한 수치해석 과정(해석번호 100)



[그림 5] 강구의 속도 변화

래프에서의 최대값은 강구의 초기 충돌속도이며 최소값은 강구의 잔류속도가 된다.

다. 해석결과

이와 같은 과정을 통해 계산한 알루미늄 합금 판재 및 마그네슘 합금 판재에 대한 강구의 잔류속도가 표 5 및 표 6과 같다.

알루미늄 합금 판재에 대한 수치해석 결과는 2.8mm 두께의 경우 최소 558m/s에서 최대 3217m/s의 잔류

[표 5] Al 합금 판재의 수치해석 결과

해석 번호	판재 두께 (mm)	강구 질량 (g)	충돌 속도 (m/s)	잔류 속도 (m/s)	V_r/V
45	2.76	3.51	662	558	0.84
49	2.83	3.5	1474	1349	0.92
50	2.75	3.5	1738	1604	0.92
97	2.75	3.57	3470	3217	0.93
152	4.83	3.56	764	545	0.71
151	4.91	3.56	966	762	0.79
150	4.89	3.56	1502	1265	0.84
100	4.90	3.56	2148	1842	0.86
101	4.85	3.56	3086	2627	0.85

속도를 나타내며, 4.8mm 두께의 경우 545m/s에서 최대 2627m/s의 잔류속도를 나타낸다. 알루미늄 판재 해석 결과를 보면 151번 해석 결과를 제외하고 충돌 속도가 증가함에 따라 속도감소량이 증가하는 경향을 보인다. 속도감소량이 증가하는 원인은 수치해석에서 요소소진기법(Instant geometric strain 300%)을 적용하였기 때문인 것으로 판단된다. 요소소진기법이란 특정 기준에 이르는 요소를 제거하는 것이며, 충돌속도가 증가함에 따라 소진되는 요소량이 판통 저항성에 영향을 주고 결과적으로 속도감소량을 결정하게 된다. 해석의 경우 충돌속도가 증가함에 따라 강구의 변형률이 증가되어 소진되는 요소량이 증가하는 반면, 전단면에서의 변형률은 충돌속도가 증가된다 하더라도 크게 증가하지 않기 때문에 요소소진량은 크게 증가하지 않고 결과적으로 판통 저항성을 높이는 것처럼 나타난다. 하지만, 잔류속도비의 경우 실험에서처럼 충돌속도 증가에 따라 잔류속도비가 증가하는 추세를 확인할 수 있다.

마그네슘 합금의 경우 2.8mm 두께에서 최소 842 m/s, 최대 3439m/s를 나타내며, 4.8mm 두께에서 최소 624m/s, 최고 2386m/s를 나타낸다. 마그네슘 판재의 해석 결과에서도 알루미늄 판재에서와 같이 충돌속도에 따라 속도감소량이 증가하는 경향을 보이며, 이

[표 6] Mg 합금 판재의 수치해석 결과

해석 번호	판재 두께 (mm)	파편 무게 (g)	충돌 속도 (m/s)	잔류 속도 (m/s)	V_r/V
1376	2.76	3.57	890	842	0.95
1377	2.80	3.58	1068	1017	0.95
1375	2.84	3.57	1672	1599	0.96
1296	2.90	3.58	2502	2392	0.96
1297	2.99	3.58	3010	2873	0.95
1330	2.86	3.57	3594	3439	0.96
1384	4.77	3.6	710	624	0.88
1388	4.86	3.58	1058	967	0.91
1389	4.89	3.58	1319	1208	0.92
1385	4.81	3.58	1486	1367	0.92
1304	4.74	3.58	2577	2386	0.93

역시 요소소진기법에 원인이 있다고 판단할 수 있다. 마그네슘 판재에서도 충돌속도가 증가함에 따라 잔류속도비가 증가하는 경향을 보임을 확인할 수 있다. 다만 2.8mm의 판재에서 잔류속도비 값이 포화 (saturation)상태처럼 나타나는데, 이는 강도가 약한 박판의 경우에 있어 잔류속도 예측의 단순성을 내포한다고 할 수 있다.

4. 고찰

가. 실험 및 수치해석 결과 비교

강구의 잔류속도와 잔류속도비에 대한 실험 및 해석의 비교 결과가 표 7 및 표 8에 제시되어 있다. 알루미늄 합금 판재의 경우 해석값의 충돌속도(V)에 대한 잔류속도비(V_r/V)가 실험값에 대하여 갖는 오차는 2.8mm 두께의 경우 최대 2.5%이며, 4.8mm 두께의 경우 최대 4.9%이다. 마그네슘 합금 판재의 경우 충돌속도에 대한 잔류속도비(V_r/V) 오차는 2.8mm 두께의 경우 최대 5.2%이며 4.8mm 두께의 경우 최대 4.8%이다. 3~5% 이내로 알려진 속도 오차를 고려하면 해석결과는 실험결과와 잘 상응하는 것으로 볼 수 있다. 이 결과를 토대로 할 때 수치해석을 이용한 경량 박판에 대한 강구의 잔류속도 계산은 합당

[표 7] Al 합금 판재 실험/해석 결과 비교

실험/해석 번호	충돌속도 (m/s)	잔류속도 (m/s)		V_r/V		
		실험	해석	실험	해석	오차
45	662	548	558	0.83	0.84	0.018
49	1474	1384	1349	0.94	0.92	0.025
50	1738	1628	1604	0.94	0.92	0.015
97	3470	3196	3217	0.92	0.93	0.007
152	764	573	545	0.75	0.71	0.049
151	966	801	762	0.83	0.79	0.049
150	1502	1256	1265	0.84	0.84	0.007
100	2148	1865	1842	0.87	0.86	0.012
101	3086	2755	2627	0.89	0.85	0.046

[표 8] Mg 합금 판재 실험/해석 결과 비교

실험/해석 번호	충돌속도 (m/s)	잔류속도 (m/s)		V_r/V		
		실험	해석	실험	해석	오차
1376	890	809	842	0.91	0.95	0.041
1377	1068	967	1017	0.91	0.95	0.052
1375	1672	1545	1599	0.92	0.96	0.035
1296	2502	2416	2392	0.97	0.96	0.010
1297	3010	2928	2873	0.97	0.95	0.019
1330	3594	3403	3439	0.95	0.96	0.011
1384	710	627	624	0.88	0.88	0.005
1388	1058	935	967	0.88	0.91	0.034
1389	1319	1198	1208	0.91	0.92	0.008
1385	1486	1305	1367	0.88	0.92	0.048
1304	2577	2328	2386	0.90	0.93	0.025

하며 실험에 소요되는 비용과 시간을 감소시킬 것으로 기대된다. 하지만 판재의 비중이 증가하거나, 판재의 두께가 두꺼워지는 경우와 다른 재질 충돌자의 잔류속도에 대한 연구는 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

나. THOR 식

THOR식은 미국 BRL에서 개발한 실험식이다. 이는 주로 1500m/s 이하의 충돌속도에서 실험을 수행하고, 최소자승법(least square method)을 적용하여 생성한 추세선을 수식화한 것이다. THOR식에 따르면 알루미늄 합금 판재와 마그네슘 합금 판재에 대하여 m grains의 질량을 갖는 강구가 V ft/sec의 충돌속도로 t in의 두께를 갖는 판재를 관통할 때의 관통 후 강구의 잔류 속도(V_r)는 다음의 식으로 계산할 수 있다.^[4]

▷ 알루미늄 합금 :

$$V_r = V - 10^{4.872} t^{1.029} m^{-0.386} V^{-0.139} \quad (1)$$

▷ 마그네슘 합금 :

$$V_r = V - 10^{4.596} t^{1.092} m^{-0.442} V^{-0.087} \quad (2)$$

[표 9] THOR 실험재료 물성

	밀도 (g/cm ³)	탄성계수 (GPa)	항복강도 (Mpa)	인장강도 (Mpa)
강구	7.87	205	350	420
Al합금	2.78	73.1	345	483
Mg합금	1.83	45	145	275

[표 10] THOR식을 활용한 Al합금 판재 결과

해석 번호	판재 두께 (mm)	강구 질량 (g)	충돌 속도 (m/s)	잔류 속도 (m/s)	V_r/V
45	2.76	3.51	662	473	0.71
49	2.83	3.5	1474	1296	0.88
50	2.75	3.5	1738	1562	0.90
97	2.75	3.57	3470	3303	0.95
152	4.83	3.56	764	453	0.59
151	4.91	3.56	966	660	0.68
150	4.89	3.56	1502	1206	0.80
100	4.90	3.56	2148	1860	0.87
101	4.85	3.56	3086	2806	0.91

THOR 과제에 실험에 사용된 재료의 물성은 강구의 경우 SAE 1020이고 알루미늄 합금 판재의 경우 Al 2024 T3, 마그네슘 합금 판재의 경우 AZ92이다.^[4] 이를 기초로 조사한 SAE 1020 및 알루미늄 2024T3, 마그네슘 합금 AZ92의 물성은 표 9와 같다.^[10]

(1), (2)식을 적용하여 실험 및 해석조건과 같은 경우에 대하여 계산한 강구의 잔류속도와 잔류속도비는 표 10 및 표 11과 같다.

표 10과 표 11의 결과를 보면 알루미늄 판재와 마그네슘 판재에서 모두 충돌속도가 증가함에 따라 속도감소량이 감소하는 것으로 나타나고, 이는 고전적인 관통이론에 부합하는 결과이다. 이러한 결과는 THOR식 개발을 위해 수행한 실험이 주로 상대적인 저속 충돌 영역(1500m/s 이하)에서 수행되어 강구의 질량 손실을 무시할 수 있었기 때문이다. 한편, THOR식의 결과에서도 충돌속도가 증가함에 따라 잔류속도비가 증가하는 경향은 유지된다.

[표 11] THOR식을 활용한 Mg합금 판재 결과

해석 번호	판재 두께 (mm)	파편 무게 (g)	충돌 속도 (m/s)	잔류 속도 (m/s)	V_r/V
1376	2.76	3.57	890	797	0.90
1377	2.80	3.58	1068	977	0.91
1375	2.84	3.57	1672	1584	0.95
1296	2.90	3.58	2502	2417	0.97
1297	2.99	3.58	3010	2926	0.97
1330	2.86	3.57	3594	3511	0.98
1384	4.77	3.6	710	540	0.76
1388	4.86	3.58	1058	893	0.84
1389	4.89	3.58	1319	1157	0.88
1385	4.81	3.58	1486	1326	0.89
1304	4.74	3.58	2577	2424	0.94

다. 충돌속도 증가에 대한 경향 분석

앞서 부분적으로 언급되었지만, 충돌속도가 증가함에 따라 실험, 해석 그리고 THOR식의 속도감소량 경향이 상이하게 나타난다. 이는 관통 중간에 발생하는 강구의 질량 손실과 관련된다. 운동량 보존과 에너지 보존 법칙을 적용한 고전적인 관통이론에 따르면 판재에 수직 관통하는 강구의 잔류식은 식 (3)과 같이 기술된다.^[3]

$$V_r = \frac{\sqrt{V - V_{50}}}{1 + m/M_r} \tag{3}$$

여기서, V_{50} : ballistic limit

m : 판재에서 생성되는 질량

M_r : 강구의 잔류 질량

이 식에 따르면 erosion, 전단 질량 손실(extrusion shear mass loss) 등에 의한 강구의 질량 손실이 무시되는 충돌속도 영역에서는 충돌속도가 증가함에 따라 속도감소량이 감소하게 된다. 하지만 erosion, 전단 질량손실, 강구의 쪼개짐 등에 의해 질량 손실이 수반되는 순간에는 속도감소량이 증가하게 된다. 따라서 질량손실을 포함하지 않은 THOR식의 경우 속

도감소량은 점점 감소하였고, 실험에서는 임의적으로 발생한 질량손실과 속도 오차로 인하여 명확한 추세 확인이 어려웠다. 그리고 해석에서는 속도가 증가함에 따라 변형률 기준을 만족하는 강구 요소의 소진으로 인해 속도감소량이 증가하게 되었다.

하지만, 세 경우 모두 충돌 속도가 증가함에 따라 잔류속도비가 증가하는 추세는 유지되고 있기 때문에, 속도감소량의 추세가 박판을 관통하는 강구의 잔류속도 예측에 심각한 문제를 야기하지 않는 것으로 판단된다.

라. 잔류속도비에 미치는 정적 강도의 영향

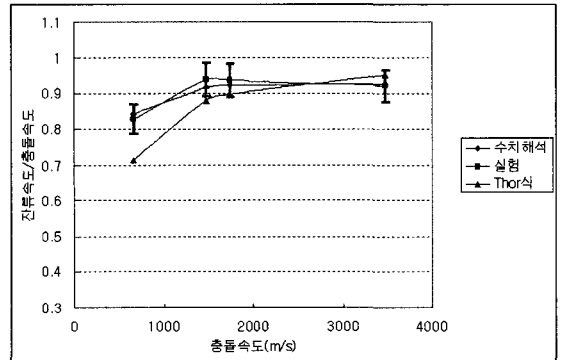
표 3~표 6과 표 10~표 11로부터 충돌속도에 대한 실험, 해석, THOR식의 잔류속도비(V_r/V) 비교 그래프를 그림 6~그림 9와 같이 얻을 수 있다. 그래프에는 실험결과에 대한 5%의 예러범위가 설정되어 있다. 그림 8의 2.8mm 두께의 마그네슘 합금 판재의 경우 THOR식과의 차이가 가장 적은 것으로 나타났다. 이는 강도와 기하학적 수치가 가장 작은 경우이다. 그리고 대부분의 경우 1500m/s 이하에서 THOR 식과의 차이가 상대적으로 크게 나타난다. 일반적인 관통이론에 따르면 충돌시의 응력파(stress wave)가 동적항복강도(dynamic flow strength)를 초과하면 재료의 전단강도(shear strength)는 무시될 수 있다.^[11] 재료의 고압거동은 응력의 정수압(hydrostatic stress)성분인 EOS에 의해 지배받으며, 응력의 편차 성분의 결과인 정적 강도의 영향이 줄어든다는 것이다. 한편, Linear EOS는 식 (4)와 같이 기술된다.^[8]

$$p = K(\rho/\rho_0 - 1) \quad (4)$$

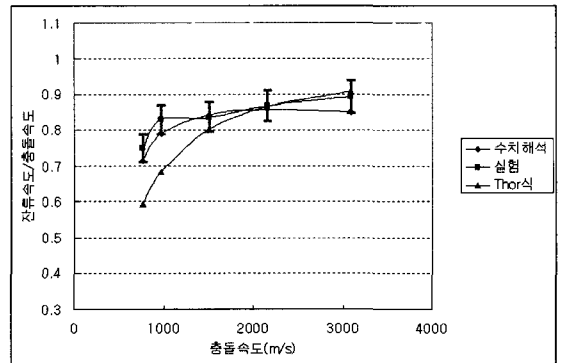
여기서, p : 압력,
 ρ : 밀도, ρ_0 : 초기밀도,
 K : 체탄성계수

이를 기초로, 상대적 저속의 충돌속도에서는 정적 강도 차이에 의해 잔류속도비의 차이가 상대적으로 크지만, 충돌속도가 증가하면서 정적 강도보다는 체탄성계수와 밀도의 영향이 커지면서 잔류속도비의 차이가 작아짐을 확인할 수 있다.

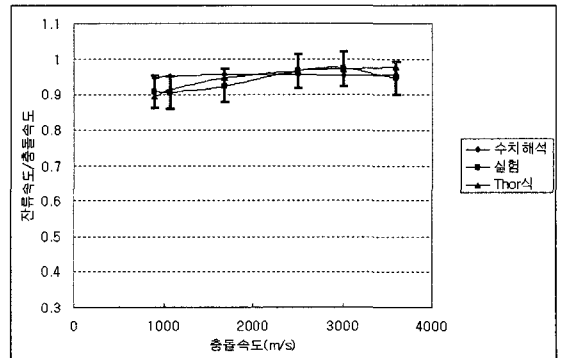
이는 실질적인 문제에서의 기존 모델의 적용 가능성을 판단할 때에 있어 충돌속도를 주요 고려 대상으로 해야 하는 예가 될 수 있다. 박판에 대한 강구의 관통 잔류속도 추정에서 기존 모델에서 사용하고 있는 강구 및 판재의 정적 강도가 다르다 하더라도 유



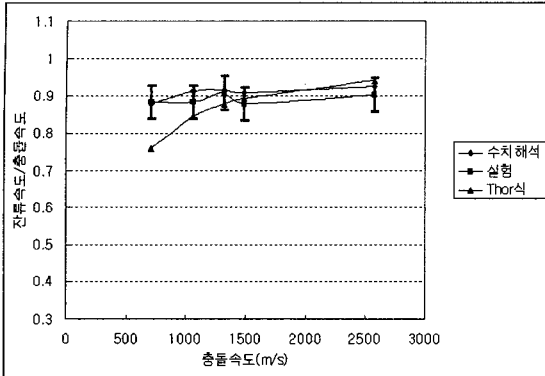
[그림 6] Al 합금 판재 t=2.8mm



[그림 7] Al 합금 판재 t=4.8mm



[그림 8] Mg 합금 판재 t=2.8mm



[그림 9] Mg 합금 판재 t=4.8mm

사한 EOS를 지니게 된다면 1500m/s이상의 고속 충돌에 있어서는 기존 관통 모델의 적용이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 재료의 비중이 커지거나 판재의 두께가 두꺼워지는 경우에 대해서는 실험 결과와 해석 결과의 비교 경우와 같이 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

5. 맺음말

본 연구에서는 2.8mm와 4.8mm의 알루미늄 합금 및 마그네슘 합금에 대한 강구의 잔류속도 측정 실험과 수치해석을 수행하고 그 결과를 수록하였다. 실험결과와 해석결과의 비교를 통해 충돌속도에 대한 잔류속도비의 결과와 경향을 분석하였다. 또한, 다수의 위력/취약성 코드에서 적용하고 있는 THOR식과의 비교를 통해 탄두 파편 재질의 정적 특성 변화에 따른 잔류속도비 특성을 예측할 수 있었다. 이를 다음과 같이 정리할 수 있다.

첫째, 실험과 수치해석의 잔류속도비 오차와 측정속도 오차를 고려할 때, 경량 금속 박판을 관통하는 강구의 잔류속도 예측을 위한 수치해석의 적용은 타당하다.

둘째, 충돌속도에 따른 속도감소량의 변화는 관통 과정에서 발생하는 강구의 질량손실과 관련이 있지만, 박판의 경우 이의 영향을 적게 받아 충돌속도가 증가함에 따라 잔류속도비가 증가한다.

셋째, 같은 재질이지만 정적 물성이 다른 탄두 파

편들의 잔류속도 예측을 위한 실질적인 문제에서 기존 모델의 적용 가능성은 충돌속도에 의존하여 차이를 보이지만, 일반적으로 탄두 파편이 운용되는 1500m/s이상에서는 정적 물성의 차이가 잔류속도에 크게 영향을 미치지 아니함을 해석 결과와 고압 거동 해석에 적용되는 EOS의 대표식을 통해 확인할 수 있다.

참고 문헌

- [1] 문의만, “탄두 효과분석 기술현황 분석”, 제11차 유도무기학술대회 논문집.
- [2] COVART II-A Simulation Program for Computation of Vulnerable Areas and Repair Times-User Manual, 61 JTCG/ME-B-KS-84-3.
- [3] Jonas A. Zukas, “High Velocity Impact Dynamics”, John Wiley & Sons, 1990.
- [4] Project THOR Technical Report NO. 47, Ballistic Research Laboratory. 1961.
- [5] M. E. Backman and W. Goldsmith, “The Mechanics of Penetrating of Projectiles”, Int. J. Engng Sci. Vol. 16. 1~99.
- [6] J. Awerbuch and S. R. Bodner, “Analysis of The Mechanics of Perforation in Metallic Plates”, Int. J. Solids and Struct. Vol. 10. 671~684.
- [7] Harlow, F. H and Amsden, A. A, “A Numerical Fluid Dynamics Calculation Method for all Flow Speeds”, J. Comp. Phys. Vol. 8. 197~213.
- [8] Autodyn Theory Manual, Century Dynamics.
- [9] D. L. Littlefield, C. E. Anderson, Y. Partom and S. J. Bless, “The Penetration of Steel Targets Finite in Radial Extent”, Int. J. Impact Engng., Vol. 23, 663~674.
- [10] www.matweb.com, Automation Creations, Inc.
- [11] Marc Andre Meyers, “Dynamic Behavior of Materials”, John Wiley & Sons, 1994.