

# 입자법을 이용한 축대칭 탄자의 관통거동 수치해석 연구

A Study on Numerical Perforation Analysis of Axisymmetric Bullet  
by the Particle Method

김용석\*                      김용환\*\*  
Kim, Yong-Seok              Kim, Yong-Hwan

## ABSTRACT

A modified generalized particle algorithm, MGPA, was suggested to improve the computational efficiency of standard SPH method in numerical analysis of high speed impact behavior. This method uses a numerical failure mechanism than material failure models to describe the target penetration. MGPA algorithm was more effective to describe the impact phenomena and new boundaries produced during the calculation process were well recognized and treated in the target penetration problem of a bullet. When bullet perforation problems were analyzed by this method, MGPA algorithm calculation gives the stable numerical solution and stress oscillation or particle penetration phenomena were not shown. The error range in ballistic velocity limit is less than 2~13% for various target thickness.

주요기술용어(주제어) : Smoothed Particle Hydrodynamics(입자완화 유체동역학), Hydrocode(유체동역학 프로그램), Rod Impact(봉충돌), Particle Method(입자법), Elastic-Plastic Analysis(탄소성 해석), Ballistic Limit Velocity(탄도한계속도), Steel Plate Perforation(철판 관통)

## 1. 머리말

1977년 Lucy<sup>[1]</sup>와 Monaghan<sup>[2]</sup>이 수치개념을 창안한 완화입자 유체동역학(SPH : Smoothed Particle Hydrodynamics)의 해석 방법은 요소를 사용하지 않고 라그랑지(Lagrange) 좌표계에서 속도나 응력, 밀도와 같은 물리량들을 독특한 커널근사법을 사용하여 외연적 방법으로 시간에 따른 적분계산을 수행하는 것이

다. 이 알고리즘을 사용하면 요소 재구성(Remeshing)을 하지 않고도 대변형 해석이나 두 물체간의 충돌 거동을 수치적으로 해석하는데 있어서 기존의 유한요소법이나 유한차분법에 비하여 손쉽게 프로그램을 구현할 수 있기 때문에 하이드로코드 연구자들에게 초고속 충돌문제 해석을 할 때 아주 유용한 도구로 인정받았다<sup>[3]</sup>.

이 방법은 1990년에 Libersky<sup>[4]</sup>에 의하여 충돌속도가 약 2km/s 이하에서 재료의 소성변형이 전체 변형에 많은 영향을 미치는 고체 문제에도 적용되었다. 이로서 SPH의 응용범위는 천체물리학이나 유체동역학뿐만 아니라, 충돌속도 측면에서 수백 m/s 이하에서 재료의 압축효과를 고려하지 않아도 큰 문제가 없는

† 2008년 10월 7일 접수~2008년 11월 28일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

\*\* 충남대학교(Chungnam National University)

주저자 이메일 : kys1893@hanafos.com

고체 문제까지 획기적으로 넓어졌으나 더불어 많은 문제점들도 발생하였다.

이러한 문제점들에는 SPH 수치알고리즘이 본래 가지고 있는 특징으로 인장응력 구역에서 입자간의 인장력을 적절히 증가시켜 주지 못해 수치파괴를 유발시키는 인장불안정(Tensile Instability)현상과 자유경계면 근처나 이종재료간의 충돌 경계면에서 커널근사 계산의 정확도가 떨어진다는 점이다. 그리고 저속 충돌 해석에서는 충돌면이 분리될 때 필요한 충돌알고리즘의 개발이 필요하고, 실제 문제에서 적용되어야 할 여러 가지 경계조건의 처리 등이 부가적으로 해결되어야 할 문제점으로 나타났으며, 최근 몇 년간에 걸쳐 이들에 대한 많은 성과들이 있었다.

1999년 Chen<sup>[5]</sup>은 기존의 커널근사식을 테일러 급수로 전개하여 구한 CSPH(Corrective SPH) 근사식과 일부 경계조건의 처리방법을 제안하고 열전달 문제에 적용하여 정확도의 개선 효과를 얻었다. 2000년 Libersky는 근사해의 정확도를 높이고 수치불안정 및 경계조건을 효율적으로 처리하기 위해서 입자속도점과 응력점으로 구분하고, 이동최소자승법을 접목한 NSPH(Normalized SPH)<sup>[6]</sup> 근사법을 고안하여 몇 가지 1차원충돌문제와 봉충돌거동 해석에 적용하였다. 또한 같은 해에 Johnson은 자신이 발표한 커널정규화 개념을 활용하여 가중함수를 입자간의 거리와 크기, 방향을 고려하여 3가지 함수식의 곱으로 정의하여 도함수를 구하는 일반화된 입자 알고리즘(GPA : Generalized Particle Algorithm)도 발표하였다<sup>[7]</sup>.

또한 김<sup>[8]</sup> 등은 GPA 알고리즘의 근사계산 방법을 수정 보완한 MGPA법을 제안하고 재료의 탄소성 거동이 중요한 1차원 봉충돌 문제와 2차원 평판 충돌문제에 적용하여 SPH 방법에서 발생한 충돌면에서 응력파의 진동현상이 제거되며 안정적인 해석이 가능함을 보였다.

본 연구에서는 MGPA 근사식의 유도개념을 활용하여 축대칭 좌표계에서 수식을 유도하고 인공점성 및 시간에 따른 계산순서와 경계조건 처리 방법을 제안한다. 그리고 이 제안된 방법을 이용하여 원통형 탄자가 여러 두께별 철판 관통 거동을 해석하고 또한 탄자의 형상이 반구형, 콘형에 따라 일정한 두께의 철판에 수직으로 충돌할 때 탄도한계속도와 잔류속도

등을 예측해보고 이 방법의 유용성을 알아본다.

## 2. 축대칭 수식화

### 가. 지배 방정식

x-축을 대칭축으로 하고 y-축을 반경방향으로 좌표계를 선정하면 재료내의 임의의 점에서 변형률속도 텐서와 회전벡터의 성분( $\omega$ )은 아래와 같이 주어진다.

$$\dot{\epsilon}_{xx} = \frac{\partial v_x}{\partial x} \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_{yy} = \frac{\partial v_y}{\partial y} \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_{tt} = \frac{v_y}{y} \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$\omega = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \quad (5)$$

여기서  $v_x$  및  $v_y$ 는 속도성분이며, 체적변형률속도( $\dot{\epsilon}_v$ )은 식 (1)과 식 (2), 식 (3)을 합한 것이다. 또한 x, y 방향의 가속도 성분  $a_x$ ,  $a_y$ 는 다음과 같다.

$$a_x = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\sigma_{xy}}{y} \right) \quad (6)$$

$$a_y = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\sigma_{yy} - \sigma_{tt}}{y} \right) \quad (7)$$

여기서  $\sigma_{xx}$  및  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{tt}$ ,  $\sigma_{xy}$ 는 응력 텐서의 성분이다.

### 나. 입자근사 수식화

위의 지배방정식에서 공간 도함수를 계산하기 위한 MGPA 입자 근사식은 아래와 같이 정의한다. 즉 식

(8)의 함수  $f$  대신에 속도 성분  $v_x$  나 응력 성분  $\sigma_{xx}$  를 대입하면 각 항의 도함수를 구할 수 있게 되며, 식 (3,6,7)의 도함수가 아닌 항은 직접 I입자값을 대입하여 얻는다.

$$\frac{df}{dx_I} = \left[ \frac{\sum_{J=1}^N (f_J - f_I)(x_J - x_I) W'_{IJ}/r_{IJ}}{\sum_{J=1}^N (x_J - x_I)^2 W'_{IJ}/r_{IJ}} \right] \quad (8)$$

여기서  $W'_{IJ}$ 는 아래의 식 (9)에 주어진 3차스플라인 가중함수에서 입자간의 거리에 대한 무차원 매개변수  $q$ 에 대한 미분을 나타내며,  $r_{IJ}$ 는 I입자와 J입자간의 거리이다. 그리고  $y$ -방향의 도함수 값은 식(8)에서  $(x_J - x_I)$  대신에  $(y_J - y_I)$ 로 대체하여 쉽게 구할 수 있다. 이렇게 도함수를 구하게 되면 공간 차원이 2차원 이상의 경우에 CSPH 및 NSPH 근사방법은 도함수를 계산하기 위해서 자코비안 행렬의 역행렬을 매번 계산해야 하는 것에 비하여 고차원 문제로 갈수록 대폭적인 계산시간의 절감을 기대할 수 있다. 다양한 해석 적용하는 가중함수는 아래와 같다.

$$W_{IJ} = \frac{10/7\pi}{h_{IJ}^2} \begin{cases} (1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3) & 0 \leq q \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-q)^3 & 1 \leq q \leq 2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

여기서  $q = |x - x_I|/h_{IJ}$ 이며,  $h_{IJ}$ 는 완화길이로서 보통 바로 인접한 이웃입자간의 거리와 같게 하나 여기서는 GPA 방법에서 제안한 I, J 입자의 평균직경에 매개변수  $\alpha (0.8 \leq \alpha \leq 1.5)$ 를 곱하여 취한다. 재료의 경계내부에 정방향으로 입자가 배열될 경우  $\alpha$  값에 따라 이웃입자(J)의 수는 약 8개에서 24개까지 변할 수 있게 된다. 응력중분 및 외연적 시간 적분 방법은 유한요소법과 동일하므로 여기서는 생략한다.

다. 인공 점성

입자법에서 사용하는 인공점성은 크게 2종류로 대별된다. 각 위치에서의 체적변형률속도( $\dot{\epsilon}_v$ ) 성분

라 주어지는 Nodal 점성과 상호 작용하는 입자간의 변형률 속도에 의해 결정되는 Bond 점성이 있다. 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용하는 Bond 점성을 아래 식과 같이 적용하였다.

$$Q_{IJ} = -C_L \rho_I c_I h_{IJ} |\dot{\epsilon}_{IJ}| - C_Q \rho_I h_{IJ}^2 \dot{\epsilon}_{IJ}^2 \quad (10)$$

여기서  $C_L, C_Q$ 는 점성계수로서 각각 0.2와 4.0이고,  $\rho_I$ 는 밀도,  $c_I$ 는 음속을 나타내고  $\dot{\epsilon}_{IJ} = (V_J - V_I)/r_{IJ}$ 이며,  $V_I, V_J$ 는 I에서 J입자 방향으로의 속도 성분이다. 이 인공점성은 가속도를 계산할 때 식 (6)의 첫째항  $\sigma_{xx}$ 와 식 (7)의 둘째항  $\sigma_{yy}$ 에 더하여 진다.

라. 경계 조건

입자법으로 충돌문제를 해석할 때 경계조건은 크게 3가지로 대별된다. 즉 충돌경계면과 자유경계면, 대칭경계면이 존재한다. 이 때 충돌면은 입자법의 최대장점인 이웃입자를 상호간에 취하므로 경계조건의 적용이 자연스럽게 이루어진다. 자유경계는 해석초기에 존재하는 것과 계산이 진행되면서 파단면이 생성되면 추가되기도 한다. 따라서 계산 도중에 자유경계면의 추가는 계산에 중요한 영향을 미친다. 경계입자를 인식하는 방법은 Libersky가 제안한 방법<sup>[6]</sup>에 따라 아래의 식과 같이 정한다.

$$(N_x)_I = \sum_{J=1}^N (x_J - x_I) W'_{IJ}/r_{IJ} \quad (11)$$

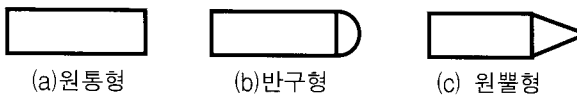
$$(N_y)_I = \sum_{J=1}^N (y_J - y_I) W'_{IJ}/r_{IJ} \quad (12)$$

재료 내부의 입자에서는 식 (11) 및 식 (12)의 값이 거의 0 가까운 값을 갖는 반면 경계입자는 대체로 0.2 이상의 값을 갖는다. 또한 이 값은 경계의 법선벡터 성분을 나타낸다. 따라서 자유경계조건을 부가하는 방법은 이 법선방향으로 응력텐서를 회전하여 법선성분의 응력을 0으로 셋팅하고 다시 전체좌표계 방향으로 응력텐서를 회전하여 적용한다. 그리고 축대칭 경계면은 유명입자를 생성하고  $y$ -축 방향의 속도 성분을 음수로 대입하여 처리한다.

### 3. 수치 해석

#### 가. 해석 모델

입자법의 해석 장점을 최대한 살리기 위해서 충돌로 재료가 일부 파괴되는 현상이 있는 것을 선정하였다. 해석 대상은 참고문헌[9,10]에 실험결과가 자세하게 있는 것으로 선정해 보았다. 첫째로 그림 1의 원통형 탄자(직경 20mm, 질량 197g)가 철판 두께 6, 8, 10, 12, 16, 20mm의 크기에 충돌하여 관통할 때 충돌 속도를 조정하여 철판의 관통 후 잔류속도가 거의 0인 탄도한계속도를 구하는 문제이며, 둘째로 탄자의 직경 및 질량은 동일하나 형상이 그림 1과 같이 원통형(80mm)과, 반구형(83mm), 원뿔형(98mm)인 탄자가 철판 표적에 초당 수 백 미터의 속도로 충돌하는 문제를 모델로 한다. 탄자는 고강도 공구강이며, 표적은 12mm 두께의 철판으로 직경 132mm이다. 입자는 재료 경계의 내부에 길이 1.0mm의 정방형으로 배열시키고 반구형 및 원뿔형은 최대한 경계면과 유사하게 만들어 입자 수는 원통형이 800개, 반구형이 819개, 원뿔형이 846개이다. 표적은 모든 경우에 입자가 792개로 모델링 하였다. 재료 물성은 선형가공경화 탄소성모델로 표 1에 나타나 있으며, 파괴모형을 고려하지 않았다.



[그림 1] 탄자의 형상 모델

[표 1] 표적과 탄자의 재료 물성

구분	탄성계수 (GPa)	포아송비	항복강도 (MPa)	탄젠트계수 (MPa)
표적	200	0.3	490	450
탄자	204	0.3	1,900	15,000

#### 나. 해석 결과

첫째 문제의 수치 해석은 표적 각 두께별로 탄도한계속도와 관통 후의 잔류속도를 알기 위해서 수행되었다. 탄도한계속도 근방에서의 관통 여부를 결정하는

인자로서는 탄자의 충돌속도를 증가 시켜가면서 아래 (13)식과 같은 탄자의 평균속도가 적어도 0.0 이상을 유지해야 하고, (14)식으로 표현되는 탄자의 평균변위가 계속적으로 증가해야 하는 두 가지 조건으로부터 구하였다.

$$\bar{V}_B = \frac{\sum m_{BI} v_{BI}}{\sum m_{BI}} \quad (13)$$

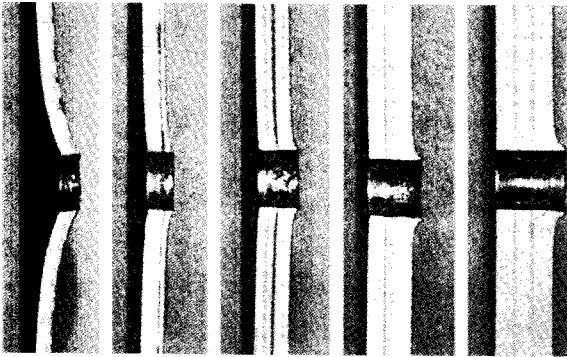
$$\bar{d}_B = \frac{\sum m_{BI} d_{BI}}{\sum m_{BI}} \quad (14)$$

여기서  $m_{BI}$ ,  $v_{BI}$ ,  $d_{BI}$ 는 탄자 입자 I의 질량, 속도, 변위이다. 또한 이 조건을 만족하고 관통이 되면 잔류속도는 시간의 경과에 따라 변화가 미미하기 때문에 (13)식으로 바로 구할 수 있게 된다.

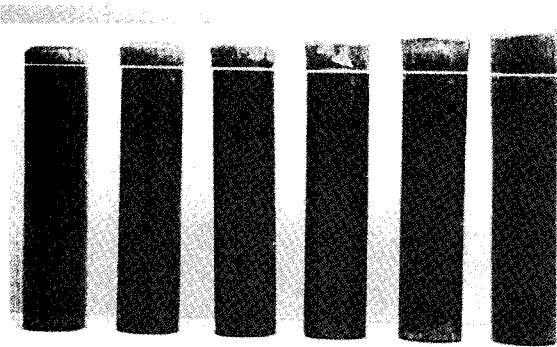
이렇게 표적의 각 두께별로 계산한 결과가 표 2에 최종 정리되어 있다. 이 문제의 수치해석에서 표적 두께가 6.0mm와 8.0mm를 제외한 모든 경우에서 그림 2, 3에 나타난 실험 후 표적 두께별로 나타난 시편의 사진 형상과 수치해석에서 얻은 탄자와 표적의 절단된 부분(plug)이 아주 닮았으며, 탄도한계속도도 표 2와 그림 4에 나타난 것과 같이 계산 오차가 약 4% 이내로 잘 일치한다. 표적의 두께가 상대적으로 얇은 경우는 표적에서 절단된 plug 부분이 수치해석에서는 탄자의 직경보다는 크게 파괴가 발생하였다. 그리고 표적의 파괴 모드도 순수한 전단모드에서 약간의 인장이 혼합된 모드를 보였는데 이 영향으로 탄도한계속도는 실험치보다 약 10% 이상의 차이를 보인 것으로 사료된다.

[표 2] 표적 두께별 탄도한계속도의 비교

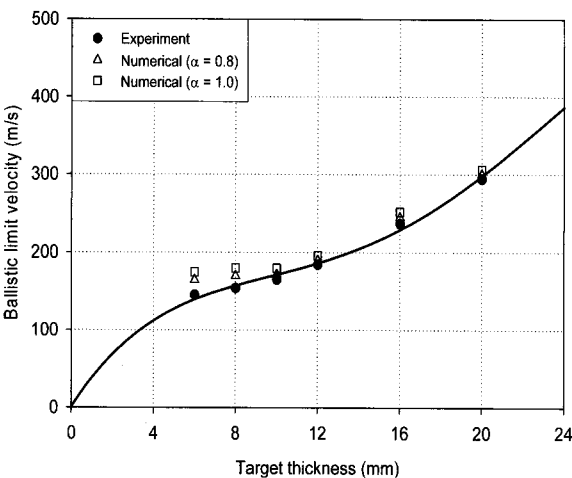
Ballistic limit velocity	Target thickness(mm)					
	6.0	8.0	10.0	12.0	16.0	20.0
Experimental <sup>[9]</sup>	145.5	154.3	165.3	184.5	236.9	293.9
Numerical( $\alpha=0.8$ )	165	170	172	190	245	300
Error(%)	13.4	10.2	4.1	3.0	3.4	2.1
Numerical( $\alpha=1.0$ )	175	180	180	196	252	306
Error(%)	20.3	16.7	8.9	6.2	6.4	4.1



[그림 2] 철판 두께별로 원통형 탄자가 표적인 철판을 관통한 후의 표적단면 형상<sup>[9]</sup>



[그림 3] 철판 두께별로 원통형 탄자가 철판을 관통한 후의 탄자와 Plug 모습<sup>[9]</sup>



[그림 4] 철판 두께별로 원통형 탄자가 철판을 관통할 때 탄자한계속도

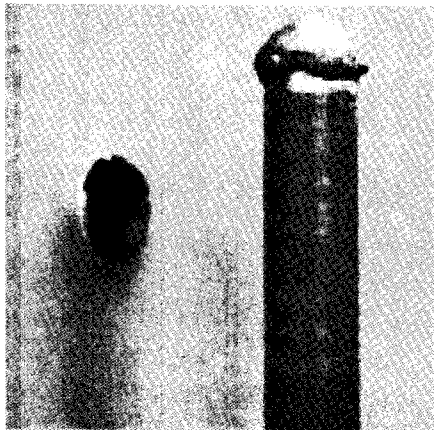
그리고 영향구역의 크기와 관련된 파라메타  $\alpha$ 를 조정하면서 수치해석을 수행한 결과  $\alpha$ 값이 0.7보다 작아지면 수치불안정 현상이 발생하여 해석이 불가능한 경우가 발생하였고, 1.3 보다 증가하면 정확도가 급격히 감소하는 경향을 보였다.  $0.8 \leq \alpha \leq 1.0$  범위에서 대체로 양호한 수치계산이 가능하고  $\alpha=0.8$  일 때 실험치에 가장 근접한 결과를 나타내었으며 계산치의 오차는 약 2~13% 이내였다. 또한 탄자의 관통시간은 표적의 두께에 따라 큰 변화 없이 약  $100\mu\text{s}$ 에서  $150\mu\text{s}$  범위로서 한계속도에 가까울수록 관통시간이 증가하는 실험결과와 부합하며 탄자가 완전히 표적을 관통할 때까지의 변위는 표적이 국부적으로 소성 변형이 이루어지면서 표적의 두께에 따라 큰 차이를 보였다.

대체로 탄도한계속도는 재료 물성이 동일할 경우 표적의 파단 모양에 지배적인 영향을 받기 때문에 수치 해석 문제에서 파단이 일어날 때까지 탄자와 표적의 소성 변형량과 파단 모드가 중요한 요소가 된다. 이 영향을 알아보기 위하여 그림 5에 보이는 탄자 형상별로 표적관통 거동을 해석 하였다. 특정 속도에서 탄자가 철판을 관통하는 모습이 그림 6, 7, 8에 잘 나타나 있다.

우선 원통형 탄자는 그림 9에서 처럼 충돌속도가 180, 190, 200, 210, 220, 250, 300(m/s)로 표적에 충돌할 경우를 해석하였다. 그림 6의 원통형 탄자의 표적 파단모양은 그림 5의 (a)가 아주 유사하고, 각각의 충돌속도에서 잔류속도를 구하여 탄도한계곡선을 구한 결과는 그림 9와 같으며 탄도한계속도는 실험치 184.5m/s 보다 약간 높은 190m/s를 보였으며, 탄자의 잔류속도 해석치는 실험치 보다 약 12m/s 정도 작다. 반구형 탄자는 그림 10에서 처럼 충돌속도 260, 270, 280, 290, 310, 350, 400(m/s)에 대해 각각 해석했으며, 충돌속도 350 m/s에서 파단모양은 그림 7과 같으며, 그림 5의 (b)와 비교적 유사하다. 그러나 표적의 파단부 주변이 실험 결과와는 달리 확공된 형상을 보이고 있다. 탄도한계곡선은 그림 10과 같으며 탄도한계속도는 실험치 292.1m/s 보다 작은 265m/s를 보였다. 원뿔형 탄자의 경우는 충돌속도 260, 270, 280, 290, 300, 320, 350, 400(m/s)에 대해 각각 해석한 결과 파단모양 그림 8은 실험결과인 그림 5의 (c)



(a) 원통형

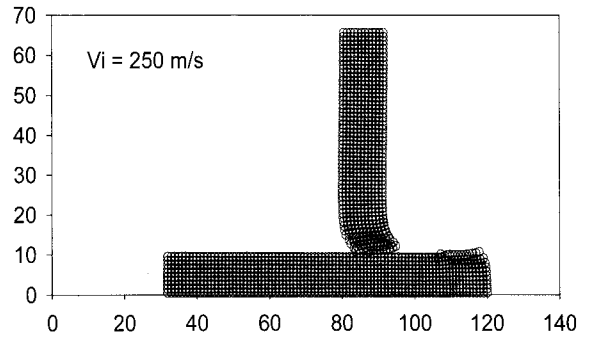


(b) 반구형

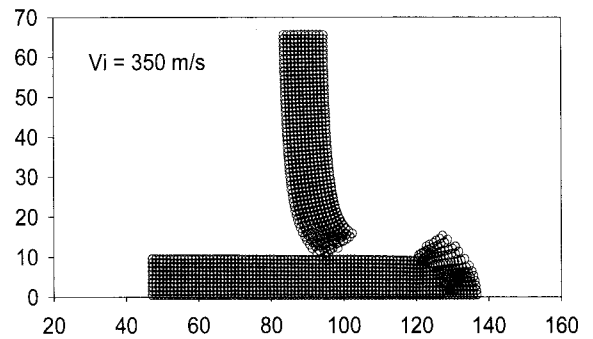


(c) 원뿔형

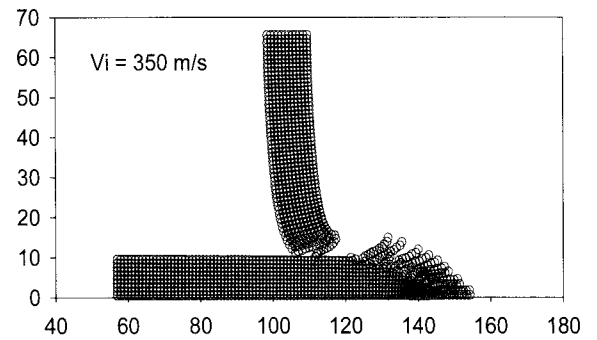
[그림 5] 실험결과 표적판재의 관통형상<sup>[10]</sup>



[그림 6] 원통형 탄자의 판재 관통형상

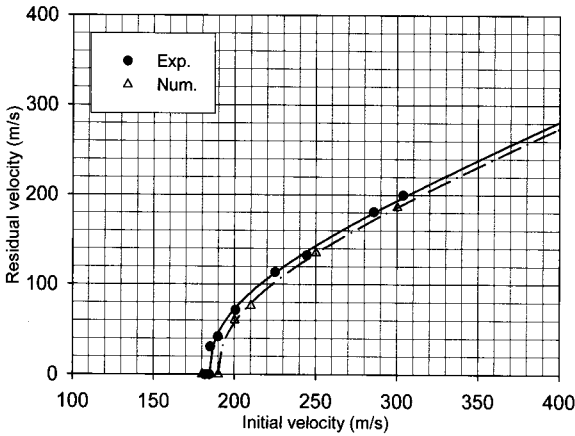


[그림 7] 반구형 탄자의 판재 관통형상

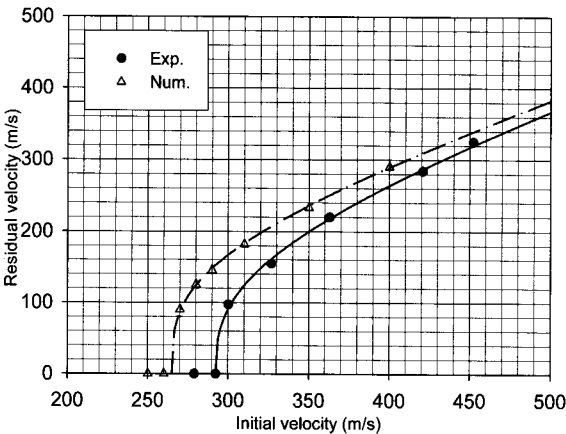


[그림 8] 원뿔형 탄자의 판재 관통형상

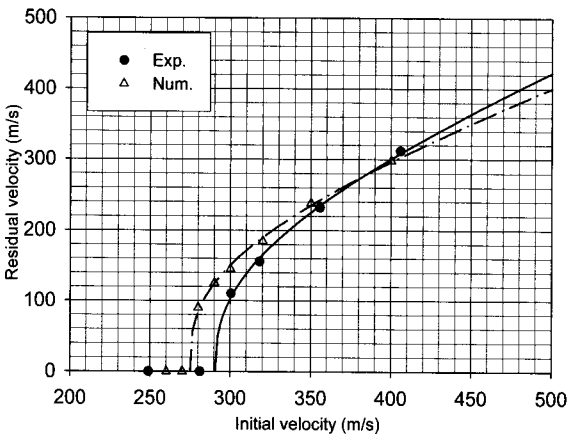
와 상당한 차이를 보인다. 이것의 탄도한계곡선은 그림 11에 나타나 있으며, 해석에서 구한 탄도한계속도는 276m/s로 오히려 실험값 290.6m/s보다는 작은 값을 보였다. 이러한 수치해석 결과로 보아 본 MGPA 입자법을 개선하기 위해서는 재료의 파괴모델을 해석에 반영하는 것을 고려한 추가적인 대책을 세울 필요가 있어 보인다.



[그림 9] 원통형 탄자의 탄도한계 곡선



[그림 10] 반구형 탄자의 탄도한계 곡선



[그림 11] 원뿔형 탄자의 탄도한계 곡선

#### 4. 맺음말

본 연구에서 축대칭 탄자의 충돌 관통 거동을 수치 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, MPGA를 적용, 축대칭 탄자가 철판을 관통하는 문제의 해석할 때 재료의 구성식에 파괴모델을 사용하지 않고도 탄자의 관통해석이 가능하며, 탄도한계속도를 구할 수 있음을 보였다.

둘째, 철판 표적 두께별 탄도한계속도를 시험치와 비교한 결과 오차는 약 2~13% 이내였으며, 두께가 얇을수록 오차가 증가하였다.

셋째, 원통형 탄자는 과단모양과 과단부 근방의 소성 변형도 실험 결과와 아주 유사하고 더불어 탄자의 한계속도 및 잔류속도 값도 반구형이나 원뿔형에 비하여 가장 잘 일치한다. 이로서 과단모양과 탄도한계가 아주 밀접한 관계가 있음을 확인하였다.

넷째, MGPA 수치알고리즘에서 보다 실제적인 문제를 신뢰성 있게 해석하기 위해서는 수치 파괴모델의 적용 같은 개선 노력이 필요할 것으로 사료된다.

#### 참고 문헌

- [1] L. B. Lucy, "A Numerical Approach to the Testing of the Fission Hypothesis", *Astron. J.*, Vol. 82, pp. 1013~1024, 1977.
- [2] R. A. Gingold and J. J. Monaghan, "Smoothed Particle Hydrodynamics : Theory and Application to Non-Spherical Stars", *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, Vol. 181, pp. 375~389, 1977.
- [3] W. Banz, "Smooth Particle Hydrodynamics : A Review", *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics*, Preprint No. 2884, 1989.
- [4] L. D. Libersky and A. G. Petschek, "Smooth Particle Hydrodynamics with Strength of Materials, *Advances in the Free-Lagrange Method*", *Lecture Notes in Physics*, Vol. 395, pp. 248~257, 1990.
- [5] J. K. Chen, J. E. Beraun and T. C. Carney,

- “A Corrective Smooth Particle Method for Boundary Value Problems in Heat Conduction”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 46, pp. 231~252, 1999.
- [6] P. W. Randles and L. D. Libersky, “Normalized Smooth Particle Hydrodynamics with Stress Points”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 48, pp. 1445~1462, 2000.
- [7] G. R. Johnson, R. A. Stryk and S. R. Beissel, “A Generalized Particle Algorithm for High Velocity Impact Computations”, *Computational Mechanics*, Vol. 25, pp. 245~256, 2000.
- [8] 김용환, 김용석, “수정 GPA법을 이용한 충돌거동의 수치해석에 대한 연구”, *한국정밀공학회지*, 제21권, 제1호, pp. 189~196, 2004.
- [9] T. Borvik, O. S. Hopperstad, M. Langseth and K. A. Malo, “Effect of Target Thickness in Blunt Projectile Penetration of Weldox 460 E Steel Plates”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, pp. 413~464, 2003.
- [10] T. Borvik, M. Langseth and K. A. Malo, “Perforation of 12mm Thick Steel Plates by 20mm Diameter Projectiles with Flat, Hemispherical and Conical Noses. Part I : Experimentally Study”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 27, pp. 19~35, 2002.