

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.11.1065>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 고속충돌에 따른 재료 파괴 및 파편의 분산거동 연구

사공재\* · 우성충\*\* · 김진영\*\*\* · 김태원\*\*\*\*†

\* 한양대학교 자동차공학과, \*\* 한양대학교 국방 생존성기술 특화연구센터, \*\*\* 국방과학연구소, \*\*\*\* 한양대학교 기계공학부

### Study on Material Fracture and Debris Dispersion Behavior via High Velocity Impact

Jae Sakong\*, Sung-Choong Woo\*\*, Jin-Young Kim\*\*\* and Tae-Won Kim\*\*\*\*†

\* Dept. of Automotive Engineering, Hanyang Univ.,

\*\* Survivability Technology Defense Research Center, Hanyang Univ., \*\*\* Agency for Defense Development,

\*\*\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received May 2, 2017 ; Revised June 28, 2017 ; Accepted July 10, 2017)

**Key Words:** High Velocity Impact(고속충돌), Debris Dispersion(파편 분산), Smoothed Particle Hydrodynamics(입자완화 유체동역학), Finite Element Method(유한요소법), Fracture(파괴)

**초록:** 본 연구는 고속충돌에 따른 파괴로 인하여 발생한 파편들의 분산거동을 예측하기 위해 고속충돌 실험과 함께 재료거동 모델링 및 수치해석을 수행하였다. 알루미늄 합금과 강철로 각각 구성된 2종류의 위협체 및 표적판에 대해 충돌실험을 수행하였으며 위협체는 약 1 km/s의 속력으로 표적판과 충돌하고, 이 충돌로 인하여 발생한 파편은 알루미늄 합금 관측판에 손상을 유발시키게 하였다. 사용된 소재의 차이에 의해 파편의 분산거동이 상이하였으며 이에 따라 관측판에 형성된 파편의 분산 반경 또한 다름을 확인하였다. 수치해석은 실험과 동일한 조건하에서 수행되었으며 파편으로 인한 파괴 및 손상을 모사하기 위하여 입자완화 유체동역학(smoothed particle hydrodynamics, SPH)기법과 유한요소(finite element, FE) 연계 기법을 적용하였다. 실험 측정된 결과와 해석값을 비교분석한 바, 표적판의 관통부 지름과 관측판 상의 파편 분산반경은 5% 이내의 오차로 잘 일치하였다. 아울러 강철 위협체와 강철 표적판이 충돌한 경우 가장 큰 분산반경을 보임에 따라 타 경우에 비해 가장 위협적임을 알 수 있었다.

**Abstract:** In this study, high velocity impact tests along with modeling of material behavior and numerical analyses were conducted to predict the dispersion behavior of the debris resulting from a high velocity impact fracture. For the impact tests, two different materials were employed for both the projectile and the target plate - the first setup employed aluminum alloy while the second employed steel. The projectile impacts the target plate with a velocity of approximately 1 km/s were enforced to generate the impact damages in the aluminum witness plate through the fracture debris. It was confirmed that, depending on the material employed, the debris dispersion behavior as well as the dispersion radii on the witness plate varied. A numerical analysis was conducted for the same impact test conditions. The smoothed particle hydrodynamics (SPH)-finite element (FE) coupled technique was then applied to model the fracture and damage upon the debris. The experimental and numerical results for the diameters of the perforation holes in the target plate and the debris dispersion radii on the witness plate were in agreement within a 5% error. In addition, the impact test using steel was found to be more threatening as proven by the larger debris dispersion radius.

## 1. 서 론

† Corresponding Author, [twkim@hanyang.ac.kr](mailto:twkim@hanyang.ac.kr)

우 충돌한 구조물에 변형, 관통 및 파괴와 같은 손상이 유발된다. 특히 이러한 위협체가 구조물을 관통할 경우에는, 위협체의 파괴뿐만 아니라 구조물의 관통부에 의하여 다수의 파편이 발생하게 되며 이와 같은 파편들은 구조물 주변에 위치한 또 다른 구조물 또는 사람, 기기들에 2차적인 손상을 가하게 된다. 이와 관련하여 손상 피해를 최소화하기 위해서는 고속충돌로 인한 1차 구조물의 파괴거동 연구뿐만 아니라 충돌로 야기된 파편으로 인해 발생할 수 있는 2차적 손상을 예측하는 것 또한 중요한 과제이다.

고속의 위협체가 표적과 충돌할 경우 발생한 파편들은 속도 및 각도 등의 충돌 조건에 따라 다양한 형상의 파편운(debris cloud)을 형성하며, 이와 같은 충돌 및 파괴에 따른 파편운의 분산거동을 확인하기 위하여 다양한 연구가 수행되어 왔다. Chhabildas 등<sup>(1)</sup>은 원통형상의 알루미늄 위협체와 알루미늄 표적판이 5~11 km/s의 속도로 충돌하였을 때의 파편운 형상을 관측하였으며 결과적으로 파편운의 형상은 위협체의 충돌 각도에 크게 영향 받음을 확인하였다. Chi 등<sup>(2)</sup>은 0.5 mm의 알루미늄 구가 3~5 km/s의 속도로 1 mm 두께의 알루미늄 표적판에 충돌하였을 때의 파편운 형상을 관측하여 파편운의 형상은 충돌속도에 민감하지만  $t/D$  비, 즉 표적판 두께/위협체 지름 비에는 큰 영향을 받지 않는다는 사실을 밝혀내었다. Higashide 등<sup>(3)</sup>은 지름 7 mm의 알루미늄 구와 2 mm 두께의 알루미늄 표적판이 0~60°의 각도로 충돌 하며 생성된 파편운의 분산각도와 각 파편의 질량을 측정하였다. 충돌각도가 증가할수록 크기가 작은 파편이 발생하였으며 이러한 파편들은 넓은 범위에 분산됨을 확인하였다. Zhang 등<sup>(4)</sup>은 4~6 mm의 알루미늄 구와 0.5~3 mm의 알루미늄 표적판이 0~60°의 각도로 충돌할 때 발생하는 파편운을 관측하고, 파편운의 특징을 평가하기 위한 매개변수를 제시하였다.

한편 위협체와 표적판의 1차 파괴에 기인된 2차 구조물의 손상연구와 관련하여, Bohl,<sup>(5)</sup> Piekutowski,<sup>(6)</sup> Ke 등<sup>(7)</sup>이 수행한 실험적 연구에서는 표적판 뒤에 관측판을 배치하고, 이 관측판상에 분산된 파편의 패턴 분석을 수행하였다. 이를 통해 충돌 각도, 위협체 형상 및 표적판의 수 등에 따른 관측판의 관통, 분산 패턴 등을 고찰하였지만, 파편운으로 인한 2차적 손상에 관한 이

론적 연구가 수반되지 않아 여타 조건에 대한 분산예측이 불가능하였다. 이처럼 고속충돌에 따른 1차 파괴 및 2차 구조물의 손상 예측과 관련하여 실험과 이론에 기반한 체계적 예측기법은 현재 국내외적으로 전무한 실정이며 또한 대다수의 연구가 알루미늄간의 충돌에 집중되어 있어, 알루미늄과 다른 특성을 갖는 소재와의 충돌로 인하여 발생한 파편의 분산거동에 관한 연구 또한 매우 미흡한 상황이다.

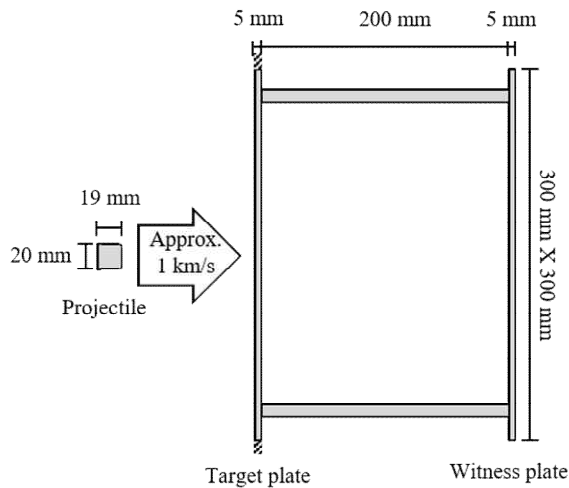
중량에 비해 우수한 강도 및 내부식성을 가지고 있는 알루미늄 합금<sup>(8)</sup>과 강도뿐만 아니라 뛰어난 피로 내구성을 지니고 있는 S45C 강철은<sup>(9)</sup> 그 동안 오랜 경험을 통해 무기소재로 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 이 같은 알루미늄 합금과 강철소재의 서로 다른 물성 차이를 기반으로 고속충돌 시 발생하는 다양한 형태의 파편 분산거동과, 이로 인한 2차 손상에 대해 연구를 수행하였다. 위협체, 표적판 및 관측판으로 구성된 구조물을 대상으로 고속충돌 실험을 수행하였고, 입자완화 유체동역학(SPH)기법과 유한요소(FE) 해석을 연계한 기법을 바탕으로 실험과 동일한 조건에서 수치계산을 수행, 그 결과를 비교하였다. 각 재료들의 충돌 및 파괴 모델링을 기반으로 위협체가 표적판을 관통하며 생긴 관통부의 지름과, 관측판상에 분산된 파편의 분산반경을 분석하였으며 아울러 소재 차이에 따른 파편의 분산거동을 평가하였다. 실험 및 해석결과를 바탕으로 상이한 소재로 구성된 위협체, 표적판 및 관측판의 파괴거동과 손상을 정량적으로 비교할 수 있었으며, SPH-FE 연계 기법 개발을 통해 고속충돌 조건에서의 재료파괴 및 손상, 파편생성 및 전파 등의 관계를 효과적으로 예측할 수 있었다.

## 2. 고속충돌 실험

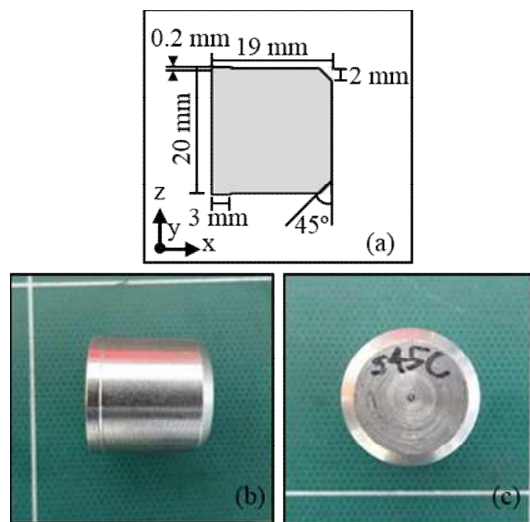
충돌에 따라 발생한 파편으로 인한 2차적 손상을 분석, 고찰하기 위하여 Fig. 1과 같이 구조물을 완성한 후 실험을 수행하였다. 화약을 통하여 추진된 위협체는 약 1 km/s의 속력으로 표적판과 충돌하게 되고 파편을 발생시킨다. 발생한 파편은 표적판의 후면으로 비산되며 관측판에 2차적인 손상을 유발한다. 본 연구에서 채택한 1 km/s 속도대의 충돌은 Backman 등<sup>(10)</sup>이 정의한 고속범위에 속하며 각 속도별 분류는 Table 1과 같다.

**Table 1** Classification of impact velocity ranges<sup>(10)</sup>

Classification		Velocity range
저속	Subordnance	25~500 m/s
고속	Ordnance	500~1300 m/s
	Ultraordnance	1300~3000 m/s
초고속	Hypervelocity	3000 m/s~



**Fig. 1** Schematic of high velocity impact test

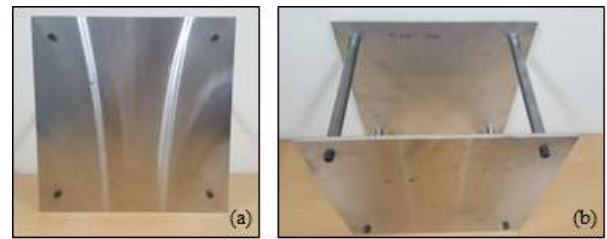


**Fig. 2** Shape of the projectile: (a) dimension, (b) real shape(side view), and (c) real shape (front view)

위협체는 고속충돌 실험장비의 규격에 따라 원통형으로 제작하였으며, 길이와 지름 비는 1:1로 제작하였다. 이탈피와의 체결을 위하여 위협체 하부의 3 mm 부분은 지름보다 0.2 mm 두껍게 가공하였고, 위협체의 상부는 발사관과의 마찰로 인한 손상을 억제하기 위하여 2 mm 모따기

**Table 2** High velocity impact test case

Case	Projectile material	Target plate material	Witness plate material
Case 1	Aluminium	Aluminium	Aluminium
Case 2	Aluminium	Steel	Aluminium
Case 3	Steel	Aluminium	Aluminium
Case 4	Steel	Steel	Aluminium



**Fig. 3** Shape of target and witness plate coupled structure: (a) front view, and (b) top view

(chamfer) 가공하였다. 위협체와 표적판 소재로서 상대적으로 저밀도인 알루미늄 합금은 6061-T6를, 고밀도인 강철은 S45C(AISI 1045)를 각각 사용하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 위협체를 나타낸다.

위협체와 표적판 간의 충돌로 인하여 발생한 파편이 관측판상에 유발하는 손상을 관측하기 위하여 Fig. 3과 같은 표적판 및 관측판 연계 구조물을 구성하였다. 표적판과 관측판 모두 두께 5 mm, 300x300 mm의 크기를 갖는 평판으로 제작하였으며, 관측판은 표적판의 200 mm 뒤에 위치시켜 4개의 강철 환봉을 통하여 체결하였다. 파편 충돌로 인한 손상을 용이하게 식별하기 위하여 관측판 소재로는 저밀도의 6061-T6 알루미늄 합금을 사용하였다. Table 2와 같이 총 4가지의 실험조건을 설정하였으며 이에 따라 위협체 및 표적판 소재 차이에 따른 관통파괴 특성과 그에 따른 파편들의 분산거동을 비교, 평가하였다.

### 3. 고속충돌 해석

#### 3.1 해석기법

변형과 파괴를 수반하는 재료거동 모델링에는 전통적으로 유한요소해석법이 사용되어 왔다. 유한요소법에 기반한 정적파괴 해석 또는 변형량이크지 않은 재료모형 가운데 파손되는 재료부분은 주로 요소 소진(element erosion)을 통하여 제거됨에 따라 파손된 부위의 식별이 용이하다. 그러나

유한요소해석 만으로는 고속충돌 시 발생하는 대변형(large deformation)과 함께 파편의 발생 및 비산 등의 현상을 묘사하는 데에는 한계가 있다. 따라서 이와 같은 고속충돌 현상을 효과적으로 묘사를 위하여 입자완화 유체동역학 기법이 적용되어 왔으며,<sup>(11,12)</sup> 이를 통해 파편의 비산을 포함하는 재료파괴 현상을 적절히 모델링할 수 있다.

연속체를 다수의 요소로 구성하고, 각 요소별 물리량을 기반으로 연속체의 물리량을 계산하는 유한요소법의 지배방정식은 질량, 운동량 및 에너지 보존식으로 구성할 수 있으며 이들은 각각 다음과 같이 표현된다.<sup>(13)</sup>

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

$$\frac{Dv_i}{Dt} = f_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2)$$

$$\frac{DE}{Dt} = \frac{p}{\rho^2} \frac{D\rho}{Dt} + \frac{1}{\rho} s_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (3)$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $v$ 는 속도,  $t$ 는 시간,  $\sigma_{ij}$ 는 Cauchy 응력,  $E$ 는 내부에너지,  $s_{ij}$ 는 편차응력을 나타낸다.

입자완화 유체동역학 기법은 해석 대상을 입자의 집합으로 구성한다. 속도, 밀도와 같은 각 입자의 물리량들은 핵함수(kernel function)라는 보간함수를 통하여 계산된 주위 입자들과의 관계에 의하여 결정된다.<sup>(12,14,15)</sup> 입자완화 유체동역학의 지배방정식은 핵함수를 통하여 근사화되며 이 때의 연속방정식, 운동량 및 에너지 보존식은 각각 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{D\rho_I}{Dt} = -\rho_I \sum_{J=1}^{NP} \left( \frac{m_J}{\rho_J} \right) v_J \cdot \nabla_I W_{IJ} \quad (4)$$

$(1 \leq I \leq NP, 1 \leq J \leq NP)$

$$\frac{Dv_I}{Dt} = -\sum_{J=1}^{NP} m_J \left[ \frac{\sigma_I}{\rho_I^2} + \frac{\sigma_J}{\rho_J^2} \right] \cdot \nabla_I W_{IJ} \quad (5)$$

$(1 \leq I \leq NP, 1 \leq J \leq NP)$

$$\frac{De_I}{Dt} = -\sum_{J=1}^{NP} m_J (v_J - v_I) \cdot \left( \frac{\sigma_I}{\rho_I^2} \right) \cdot \nabla_I W_{IJ} \quad (6)$$

$(1 \leq I \leq NP, 1 \leq J \leq NP)$

여기서,  $v$ 는 입자속도,  $\sigma$ 는 응력,  $e$ 는 입자의 내부에너지,  $W$ 는 핵함수 그리고  $NP$ 는 입자수를

나타낸다. 한편 핵함수  $W$ 는 다음 식 (7)과 같이 표현된다.

$$W = W(\vec{r}, h) \quad (7)$$

이때,  $\vec{r}$ 은 입자간 거리를 나타내고,  $h$ 는 입자완화 거리로, 계산에 포함할 입자들의 범위를 나타낸다. 타 핵함수에 비하여 연산시간이 상대적으로 적게 소요됨에 따라 가장 일반적으로 사용되고 있는 Cubic B-spline 커널함수를 채용하였으며 이는 다음 식 (8)과 같이 표현된다.<sup>(16)</sup>

$$W(\vec{r}, h) = a \times \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3 & 0 \leq q \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-q)^3 & 1 \leq q \leq 2 \\ 0 & q \geq 2 \end{cases} \quad (8)$$

여기서  $q$ 는 상대거리비율로서,  $\frac{r}{h}$ 로 나타낼 수 있으며, 상수  $a$ 는 2차원 문제일 경우  $\frac{10}{7\pi h^2}$ 이며, 3차원의 경우  $\frac{1}{\pi h^3}$ 를 갖는다.<sup>(14)</sup>

### 3.2 재료거동모델

Johnson-Cook 이론<sup>(17)</sup>은 고변형률, 고변형률속도 및 온도의 영향이 고려된 금속재료의 동적거동을 묘사하기 위해 널리 사용되는 모델로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (9)$$

$$T^* = \frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \quad (10)$$

여기서,  $A$ 는 항복응력,  $B$ 는 변형률경화상수,  $n$ 은 변형률경화지수,  $C$ 는 변형률속도 경화지수,  $\varepsilon$ 은 등가소성변형률,  $\dot{\varepsilon}^*$ 은 등가소성변형률속도,  $T$ 는 실제 재료 온도,  $T_m$ 은 재료의 용융온도,  $T_{ref}$ 은 상온,  $m$ 은 재료의 열화지수를 각각 나타낸다.

재료의 동적물성은 압력과 비체적 관계, 충격과 전파속도, 입자속도 및 내부에너지 등과 관련이 있으며 이와 같은 변수들의 관계는 상태방정식을 통하여 정의된다. 본 연구에서는 고속 운동을 하는 고체물질 입자의 에너지보존과 압력, 내부에너지 및 밀도의 관계를 묘사할 수 있는 Mie-Gruneisen의 상태방정식을 이용하였으며, 식 (11)

에 나타내었다.<sup>(18)</sup>

$$p = \frac{\rho_0 C_1^2 u \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) u - \frac{a}{2} u^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1)u - S_2 \frac{u^2}{u+1} - S_3 \frac{u^2}{(u+1)^2} \right]} + (\gamma_0 + au)E \quad (11)$$

여기서,  $E$ 는 단위체적당 입자의 내부에너지로 온도와 비열용량의 곱이며,  $C_1$ 은 음속,  $S_1$ ,  $S_2$ , 및  $S_3$ 는 충격파속도와 입자속도 선도의 기울기 계수,  $\gamma_0$ 는 Gruneisen gamma,  $a$ 는  $\gamma_0$ 의 1차 체적 보정계수,  $u$ 는 재료의 압축률로  $\rho/\rho_0 - 1$ 이며,  $\rho_0$ 는 재료의 초기밀도이다.

Johnson-Cook 이론을 기반으로 한 재료의 파괴는 식 (12)와 같이 정의할 수 있으며, 식 (13)의 손상계수  $D$ 가 1 이상의 값을 가질 때 파괴가 발생한다고 가정하였다.<sup>(19)</sup>

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*] [1 + D_4 \ln \epsilon^*] [1 + D_5 T^*] \quad (12)$$

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon^f} \quad (13)$$

여기서  $\epsilon^f$ 는 파단변형률,  $D_i, i=1, \dots, 5$ 는 각 항의 재료 상수를 나타내며  $\sigma^*$ 은 평균응력을 유효응력으로 나눈 비,  $\Delta \epsilon$ 은 등가소성변형률의 변화량을 나타낸다.

### 3.3 SPH-FE 연계 고속충돌 해석

SPH-FE 연계 고속충돌 해석을 위하여 상용 비선형 해석 소프트웨어인 LS-DYNA(Ver. R8.1.0)를 사용하였다. 직접적인 충돌에 따라 파편을 발생시키는 위협체와 표적판의 중심부는 SPH 입자로 구성하였고, 상대적으로 변형이 적은 그 외의 부분은 해석시간을 고려하여 FE 격자로 구성하였다. 아울러 파편으로 인하여 손상이 발생하는 관측판은 손상부위의 식별을 용이하게 수행하기 위하여 FE 격자로 구성하였다.

위협체는 Fig. 4와 같이 1 mm의 간격으로 배치된 총 5,748개의 SPH 입자로 이루어 졌으며, 실험에서 측정된 것과 동일한 속도로 비행하여 표적판과 충돌하게 된다. 위협체와 충돌하는 표적판의 중심부는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 61,206 개의 SPH 입자로 구성되었으며, 각 입자는 위협체와 마찬가지로 1 mm 간격으로 배치시켰다. SPH 입

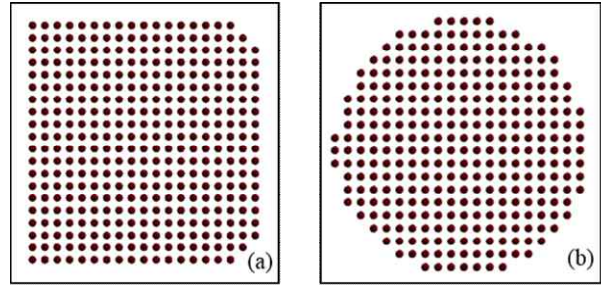


Fig. 4 Projectile consists of SPH particles: (a) side view, and (b) front view

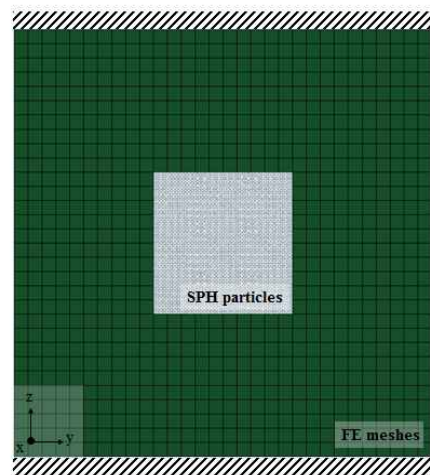


Fig. 5 Target plate consists of SPH particles(center square) and FE meshes(outer square)

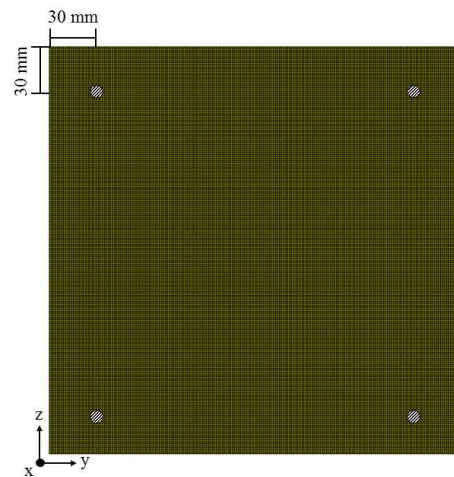


Fig. 6 Witness plate consists of FE meshes

자로 구성된 중심부 이외의 부분은 4,000개의 FE 격자로 구성되었다. 실험과 같이 표적판의 상, 하부를 x, y, z축 전 방향으로 구속하였다. 위협체와 표적판의 충돌로 인하여 발생한 파편이 손상을 가하는 관측판은 총 400,000개의 FE 격자로 구성

하였다(Fig. 6). 각 모서리로부터 y, z축 방향으로 30 mm 떨어진 지점을 구속하였으며, 이는 실험에 사용된 표적판 및 관측판 연계 구조물에서 환봉이 위치한 지점과 일치한다. 해석에 사용된

**Table 3** Material properties, failure parameters and constants of state equation for Al6061-T6<sup>(20)</sup> and S45C<sup>(21)</sup>

Material properties		
Parameter	Al6061-T6	S45C
Density, $\rho$ (g/cc)	2.703	7.0
Shear modulus, $G$ (GPa)	26	80
Yield stress, $A$ (GPa)	0.324	0.553
Hardening constant, $B$ (GPa)	0.114	0.6
Hardening exponent, $n$	0.42	0.234
Strain rate constant, $C$	0.002	0.0134
Thermal exponent, $m$	1.34	1
Melting temperature, $T_{melt}$ (K)	925	1733
Reference temperature, $T_{ref}$ (K)	300	300
Failure parameters		
Parameter	Al6061-T6	S45C
$D_1$	-0.77	0.05
$D_2$	1.45	4.22
$D_3$	-0.47	-2.73
$D_4$	0	0.0018
$D_5$	1.6	0.55
Constants of state equation		
Constant	Al6061-T6	S45C
Bulk sound speed, $C$ (m/s)	5240	3980
Particle-shock velocity slope coefficient, $S_1$	1.4	1.58
Particle-shock velocity slope coefficient, $S_2$	0	0
Particle-shock velocity slope coefficient, $S_3$	0	0
Gruneisen gamma, $\gamma_0$	1.97	1.6
Specific heat capacity, $C_p$ (J/kg-K)	885	450
First order volume correction coefficient, $a$	0	0

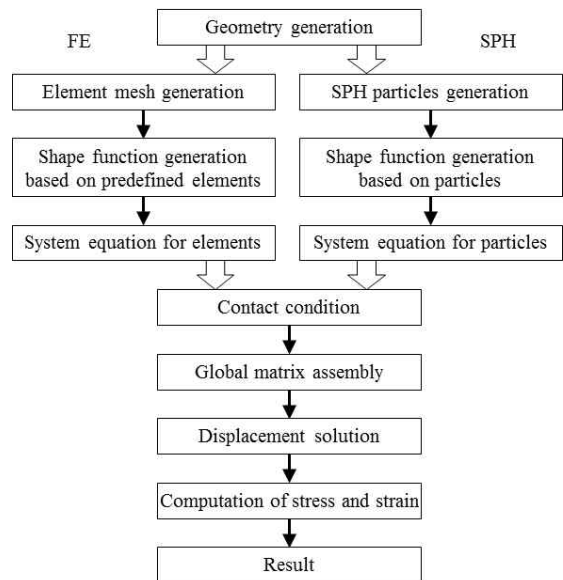
6061-T6 알루미늄 합금과 S45C 소재의 물성값 및 파손상수, 상대방정식 상수는 Table 3과 같다.

Fig. 7은 SPH-FE 연계 해석 과정을 나타내는 흐름도이다. FE 격자와 SPH 입자는 서로 다른 형상함수를 통하여 구성되며 각 SPH 입자는 질량을 갖는 절점으로 취급되어 FE 격자와 연계된다. 본 연구에서는 LS-DYNA 내의 CONTACT\_TIED\_NODES\_TO\_SURFACE\_OFFSET 조건을 적용하여 SPH 입자와 FE 격자를 연계 해석하였다.

### 4. 실험 및 해석 결과

#### 4.1 실험 및 해석결과 검증

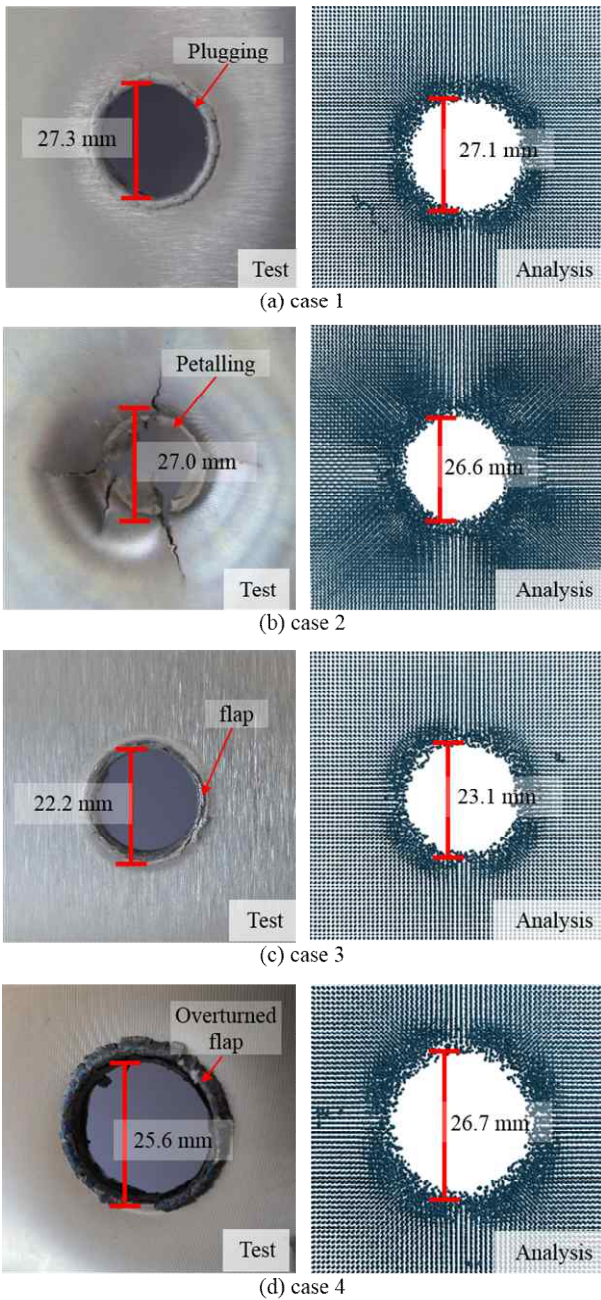
위험체는 표적판과 충돌하여 표적판의 중심부에 원형의 관통부를 형성하게 되고 이에, 해당 부분의 소재뿐만 아니라 파괴된 위험체의 일부 또한 파편화되어 표적판의 후면으로 비산된다. 실험과 해석 결과의 정량적인 비교를 위하여 표



**Fig. 7** The flowchart for SPH-FE coupled analysis<sup>(22)</sup>

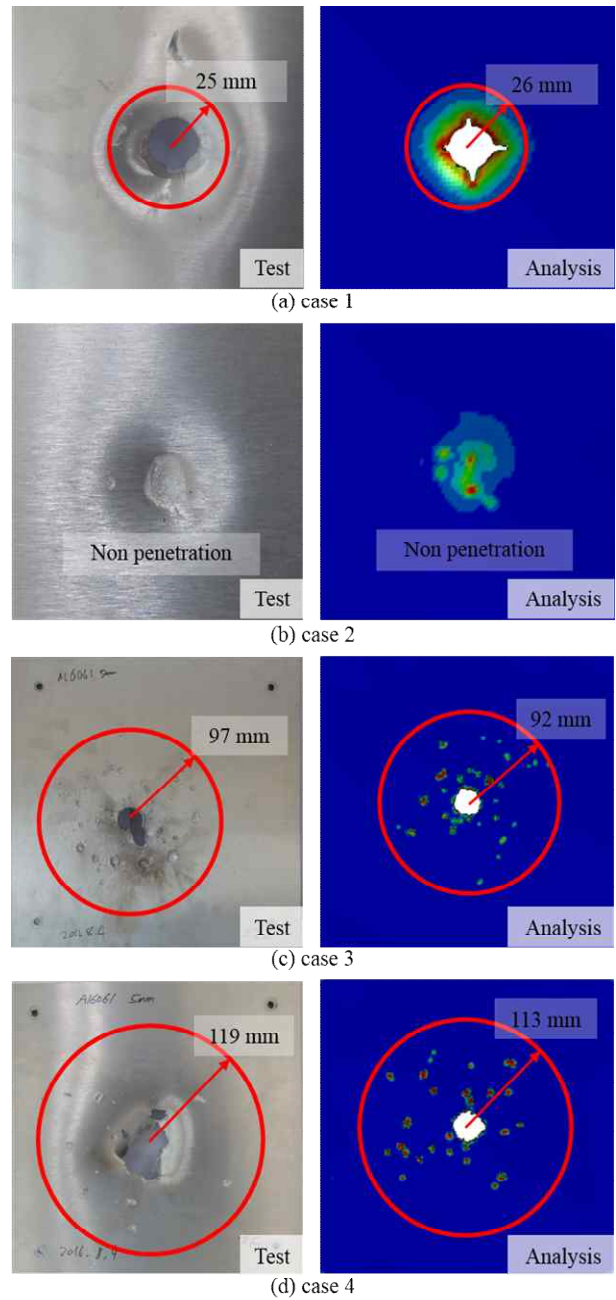
**Table 4** Comparison between experimental and prediction results

Case	Impact velocity (m/s)	Result comparison											
		Target plate perforation hole diameter (mm)			Debris dispersion radius on witness plate (mm)			Projectile length after impact (mm)			Projectile diameter after impact (mm)		
		Test	Prediction	Error (%)	Test	Prediction	Error (%)	Test	Prediction	Error (%)	Test	Prediction	Error (%)
Case 1	923	27.3	27.1	0.1	25	26	3.5	14.3	14.6	0.4	25.9	24.5	5
Case 2	835	27.0	26.6	3	Non penetration	Non penetration	-	Not collected	10.6	-	Not collected	25.1	-
Case 3	995	22.2	23.1	4	97	92	5	Not collected	16.9	-	Not collected	22.5	-
Case 4	1002	25.6	26.7	4	119	113	5	15.6	15.8	1.2	26.8	25.7	4



**Fig. 8** Shape and diameter of perforation hole in the target plate(left: experimental, right: prediction): (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, and (d) Case 4

적판에 형성된 관통부의 지름과 관측판에 형성된 파편의 분산반경 그리고 충돌 후 수거된 위협체의 최대 지름 및 길이를 측정하여 Table 4에 나타내었다. 아울러 각 실험 Case에 대한 표적판 관통부의 형상 및 지름을 Fig. 8에 나타내었고(좌측 : 실험 결과, 우측 : 해석 결과), Fig. 9에는 관측판에 형성된 손상 패턴과 파편 분산반경을 나타내었다(좌측 : 실험 결과, 우측 : 해석 결과).



**Fig. 9** Damage pattern and debris dispersion radius on the witness plate(left: experimental, right: prediction): (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, and (d) Case 4

알루미늄 위협체와 알루미늄 표적판이 충돌한 Case 1의 경우 표적판의 관통부 지름은 27.3 mm로 측정되었고[Fig. 8(a)], 이는 다른 Case에 비하여 가장 큰 값을 보였다. 해석을 통하여 예측된 관통부 지름은 27.1 mm로 실험과 해석 결과값이 오차율 0.1%로 매우 잘 일치하였다. 한편 관측판 상 분산 반경은 25 mm으로 측정되었으며[Fig. 9(a)], 해석 결과 또한 26 mm으로 나타났다. 표적

관과 관측관을 관통한 위협체는 길이가 14.3 mm, 최대 지름이 25.9 mm로 변형되었으며, 해석적으로 예측된 위협체의 길이와 최대 지름 또한 14.6 mm, 24.5 mm로서 실험 결과값과 유사함을 확인하였다. 알루미늄 위협체와 강철 표적판이 충돌한 Case 2는 표적판 관통부 지름이 27.0 mm으로 측정되었고[Fig. 8(b)], 이 때의 해석결과는 26.6 mm로 나타났다. 위협체는 표적판을 관통하였지만 관측관은 관통하지 못하였고, 해석에서도 동일한 현상을 확인 할 수 있었다.

강철 위협체와 알루미늄 표적판이 충돌한 Case 3에서는 표적판 관통부 지름이 22.2 mm으로 측정되어[Fig. 8(c)] 여타 경우에 비하여 가장 작은 값을 나타냈으며, 관측관상 파편 분산반경은 97 mm로 측정되었다[Fig. 9(c)]. 강철 위협체와 강철 표적판이 충돌한 Case 4의 경우 표적판 관통부 지름은 25.6 mm으로 측정되었고[Fig. 8(d)], 이 때의 해석값은 26.7 mm으로 예측되었다. 관측관상 파편 분산반경은 119 mm으로 측정됨에 따라[Fig. 9(d)] 다른 Case에 비하여 가장 넓은 범위에 파편이 분산되었음을 확인하였다. 충돌 후 수거된 위협체는 길이가 15.6 mm, 최대 지름이 26.8 mm로 변형되었으며, 해석을 통하여 예측된 위협체의 길이 및 최대 지름은 각각 15.8 mm 25.7 mm를 보임으로써 오차율 4%가 됨을 알 수 있다.

1 km/s 속도대의 고속충돌임에도 불구하고 표적판 관통부 지름 및 관측관상 파편 분산반경에 관한 실험값과 및 예측값을 정량적으로 비교하였을 때, 최대 오차율 5% 이내로 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 특히 관통부 지름이 Case 1에서 가장 크고, Case 3에서 가장 작았으며 파편 분산 범위는 Case 4에서 가장 넓게 나타남은 밀도 및 강도를 포함한 재료 물성에 기인된 것으로 표적판 및 관측관의 손상분석에서 보다 자세하게 기술하였다. 한편 Table 4에서 표기한 Not collected는 실험 종료 후 시료가 측정 불가 상태임을 의미한다.

#### 4.2 표적판 관통부 분석

위협체의 밀도와 강도가 표적판과 같거나 더 큰 Case 1, 3 및 4의 경우[Fig. 8(a), (c), (d)], 원통형 위협체와 표적판이 충돌함에 따라 변형이 충돌부위에 집중되는 플러깅(plugging) 현상을 확인할 수 있었다. 이는 위협체와 표적판이 충돌한 부분에 급격한 전단응력이 집중되고 이를 통해

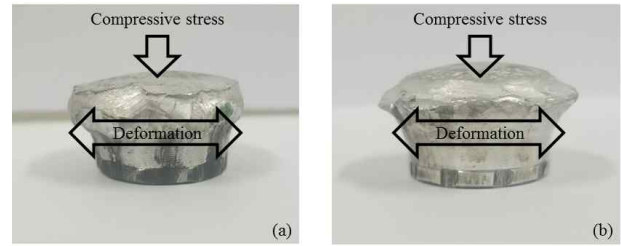


Fig. 10 The direction of projectile deformation: (a) Case 1 and (b) Case 4

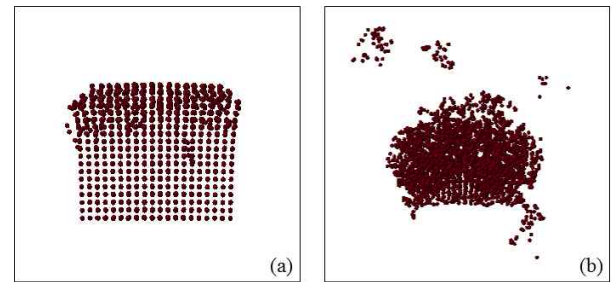


Fig. 11 Numerically determined projectile shape after impact: (a) slightly deformed steel projectile as Case 3, (b) severely deformed and fractured aluminium projectile as Case 2

파괴가 발생하였다는 것을 알 수 있다.<sup>(23)</sup> 한편 원통형 위협체가 충돌할 때 발생하는 일반적인 플러깅 현상과 달리 표적판의 전면(위협체와 충돌한 방향)으로 재료가 밀려나오는 플랩(flap)이 생성되었는데, 이는 위협체의 모서리를 모따기 가공함에 따라 완벽한 원통형을 형성하지 못했기 때문으로 사료된다. 플러깅 현상이 발생한 실험 중, 동일한 소재의 위협체와 표적판이 충돌한 Case 1 및 Case 4의 경우 플랩이 표적판의 가장자리 방향으로 뒤집어진 것을 확인할 수 있었다 [Fig. 8(a), (d)]. 이는 충돌시 위협체가 길이방향으로 압축하중을 받아 측면방향으로 변형하며(Fig. 10), 플랩에 표적판 가장자리 방향으로 하중을 가했기 때문으로 생각된다.

위협체의 밀도와 강도가 표적판에 비하여 큰 Case 3의 경우 표적판의 전면에 플랩이 생성되었으나 Case 1과 4와는 달리 바깥방향으로 뒤집어지지 않은 것을 확인할 수 있었다[Fig. 8(c)]. 이는 위협체가 표적판에 비하여 상대적으로 높은 밀도와 강도를 가져 충돌할 때 큰 변형이 일어나지 않고[Fig. 11(a)] 플랩에 표적판 가장자리 방향으로 큰 하중을 가하지 않았기 때문이다.

표적판의 밀도와 강도가 위협체보다 큰 Case 2의 경우 표적판 후면 방향으로 파열(petalling) 현



상이 발생하였다[Fig. 8(b)]. 파열현상은 독특한 형상의 위협체가 표적판의 방탄한계속도에 근접한 속도로 충돌할 때 발생하는 현상으로서,<sup>(10)</sup> 즉 위협체가 상대적으로 적은 운동에너지를 가지고 표적판과 충돌한 경우이다. 따라서 다른 경우에 비하여 넓은 부위에 변형이 발생하였는데, 이는 강철 표적판에 비하여 상대적으로 저밀도, 저강도의 특성을 갖는 알루미늄 위협체가 충돌시 많은 변형 및 파괴현상을 수반하여[Fig. 11(b)] 충돌부위에 전단응력이 집중되지 못한 채 방사상으로 퍼짐에 따라 표적판의 넓은 부위에 변형과 균열을 유발했기 때문이다.

### 4.3 관측판 손상 분석

알루미늄 위협체와 알루미늄 표적판이 충돌한 Case 1의 경우 표적판을 관통한 위협체는 관측판 역시 관통하였다[Fig. 9(a)]. 또한, 관측판에 형성된 관통부 주위에 파편으로 인한 일부 손상이 발생하였으며, 이 때의 파편 분산 반경은 25 mm로 측정되었다. 관측판에 형성된 관통부는 Case 2의 표적판에 형성된 관측부와[Fig. 8(b)] 유사한 파열현상을 보여, 위협체가 표적판을 관통할 때 많은 운동에너지를 손실하고 방탄한계속도에 근접한 속도로 관측판을 관통했음을 알 수 있다.

표적판의 밀도와 강도가 위협체에 비하여 상대적으로 높은 Case 2의 경우 전술한 바와 같이 위협체는 방탄한계속도에 근접한 속도로 표적판을 관통하였고, 관통시 많은 운동에너지를 소비함에 따라 연이은 관측판의 관통에 실패하고 국부적인 손상만을 유발하였다[Fig. 9(b)]. 아울러 충돌부위 이외에는 파편으로 인한 다른 손상이 발생하지 않은 것으로 미루어 보아 충돌시 발생한 파편은 관측판에 손상을 가하기에 충분한 운동에너지를 갖지 못함을 알 수 있다.

위협체의 밀도와 강도가 상대적으로 높은 Case 3의 경우 큰 변형 없이 표적판을 관통한 위협체는 관측판 또한 관통하였고, 관측판상의 넓은 범위에 다수의 크고작은 손상을 유발하였다. 이를 통하여 위협체가 표적판을 관통할 때 다양한 크기의 파편을 발생시켰으며, 생성된 파편 또한 표적판에 다수의 손상을 유발할 수 있을 정도의 운동에너지를 가지고 있었음을 알 수 있다. 관측판상에서 파편은 충돌지점으로부터 97 mm의 범위에 분산되었다[Fig. 9(c)].

강철 위협체와 강철 표적판이 충돌한 Case 4의

경우 Case 3과 마찬가지로 표적판을 관통한 위협체는 관측판 역시 관통하였고, 관측판상에 다수의 손상을 유발하였다. 파편으로 인한 손상 역시 충돌부위로부터 119 mm의 범위에 분산되어 타 경우에 비하여 가장 넓은 범위에 손상을 가하였다. 이를 통하여 밀도와 강도가 높고 취성이 강한 강철 위협체와 강철 표적판이 충돌하였을 때 가장 넓은 범위에 손상이 발생하고 따라서 가장 위협적인 경우임을 알 수 있다. 아울러 파편으로 인한 위협은 위협체의 소재뿐만 아니라 표적판의 소재와도 밀접한 관련이 있음을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 위협체가 구조물에 충돌하여 발생된 파편이 구조물 주변에 위치한 또 다른 구조물에 가하는 위협을 평가하기 위하여 위협체, 표적판 및 관측판으로 설정한 구조물을 대상으로 고속충돌 실험을 수행하였고, 아울러 SPH-FE 연계 기법을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 표적판 관통부의 형상 및 지름, 관측판에서의 손상 패턴과 파편 분산반경 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 측정된 관통부 지름, 관측판상 파편의 분산 반경 그리고 수거된 위협체의 최대지름 및 길이를 비교하였을 때, 실험 및 해석값이 최대 오차율 5% 이내로 일치함을 확인할 수 있었다. 이 결과로부터, SPH-FE 연계 기법이 고속충돌에 의한 재료파괴 및 손상을 효과적으로 잘 예측할 수 있음을 보였다.

(2) 표적판 관통부의 형상 및 지름 등 결과분석을 통하여 위협체와 표적판 소재 차이에 따른 위협체, 관통부 변형 및 파괴 양상이 상이함을 확인하였다. 위협체의 밀도와 강도가 표적판과 같거나 더 큰 경우 변형이 충돌부위에 집중되는 플러깅 현상이 발생하였으며 특히 위협체와 표적판의 소재가 동일한 경우에는 위협체의 변형으로 인하여 바깥방향으로 뒤집어진 플랩현상을 확인할 수 있었다.

(3) 위협체와 표적판의 소재 차이는 충돌에 따른 파편 생성뿐만 아니라 관측판상의 손상 패턴 및 분산범위에도 영향을 미침을 확인하였다. 위협체 소재의 밀도 및 강도가 표적판에 비하여 상대적으로 낮고 작을 경우 관측판상에는 미미한 손상이 발생한 한편, 취성이면서 고밀도의 강철

위협체와 동일한 소재의 표적판이 충돌하였을 경우, 가장 넓은 범위에 큰 손상이 관측판상에 발생함에 따라 여타 경우에 비해 가장 치명적임을 알 수 있었다.

(4) 고속충돌 및 파괴에 따른 파편의 비산거동 예측은 향후 이와 같은 고속상태에 노출될 수 있는 구조물의 생존성 설계기술 개발에 도움이 될 수 있을 것으로 사료되며 SPH-FE 연계 해석 기법 또한 모델링 및 시뮬레이션 분야에서 효과적인 방안이 될 수 있을 것으로 생각된다.

## 후 기

이 논문은 국방과학연구소 생존성기술 특화연구센터의 사업으로 지원받아 연구되었음(계약번호 UD150013ID)

## 참고문헌 (References)

- (1) Chhabaldas, L. C., Boslough, M. B., Reinhart, W. D. and Hall, C. A., 1994, "Debris Cloud Characterization at Impact Velocities of 5 to 11 km/s," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 309, No. 1, p. 1841.
- (2) Chi, R. Q., Pang, B. J., Guan, G. S., Yang, Z. Q., Zhu, Y. and He, M. J., 2008, "Analysis of Debris Clouds Produced by Impact of Aluminum Spheres with Aluminum Sheets," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, pp. 1465~1472.
- (3) Higashide M., Koura, T., Akahoshi Y. and Harada, S., 2008, "Debris Cloud Distributions at Oblique Impacts," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, pp. 1573~1577.
- (4) Zhang, Q., Chen, Y., Huang F. and Long, R., 2008, "Experimental Study on Expansion Characteristics of Debris Clouds Produced by Oblique Hypervelocity Impact of LY12 Aluminum Projectiles with Thin LY12 Aluminum Plates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, pp. 1884~1891.
- (5) Bohl, W. E., Miller, J. E., Christiansen E. L. and Davis, B. A., 2013, "HVI Ballistic Performance Characterization of Non-Parallel Walls," *Procedia Engineering*, Vol. 58, pp. 1884~1891.
- (6) Piekutowsk, A. J., 2001, "Debris Clouds Produced by the Hypervelocity Impact of Nonspherical Projectile," *International Journal of Impact Engineering* Vol. 26, pp. 613~624.
- (7) Ke, F. W., Huang, J., Wen, X. Z., Ma, Z. X. and Liu, S., 2016, "Test Study on the Performance of Shielding Configuration with Stuffed Layer under Hypervelocity Impact," *Acta Astronautica*, Vol. 127, pp. 553~560.
- (8) Hwang, A. S., Kang, W. G. and Lee, H. C., 2013, "Aluminum Alloys for Next Generation Regional Aircraft Structure," *Proceedings of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 2013 Spring Conference*, pp. 160~163.
- (9) Kim, C. J., 2015, "Vibration Test Method for General S45C Specimen," *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers 2015 Spring Conference*, pp. 9~10.
- (10) Backman, M. E. and Goldsmith, W., 1978, "The Mechanics of Penetration of Projectiles into Targets," *International Journal of Engineering Science*, Vol. 16, pp. 1~99.
- (11) Sakong, J., Woo, S. C. and Kim, T. -W., 2016, "A Study on the Kinetic Energy and Dispersion Behavior of High-velocity Impact-induced Debris using SPH Technique," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 40, No. 5, pp. 457~467.
- (12) Lee, S. S., Seo, S. W. and Min, O. K., 2003, "SPH Parameters for Analysis of Penetration Phenomenon at Hypervelocity Impact of Meteorite," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 27, No.10, pp. 1738~1747.
- (13) Park, S. S. and Noh, M. H., 2006, "Numerical Simulation of High-Velocity Impact of Concrete Using a Coupled Lagrangian and SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) Techniques," *Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers*, 2006 Annual Conference, pp. 863~166.
- (14) Jo, J. H. and Lee, M. S., 2013, "Quantitative Analysis of Debris Clouds of Aluminum Plates with SPH," *Proceedings of the Society of CAD/CAM Conference*, pp. 755~760.
- (15) Seo, S. W., Lee, J. H. and Min, O. K., 2005, "SPH Algorithm for an Elasto-Plastic Contact Analysis on a Rigid Surface with an Arbitrary Shape," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 29, No. 1, pp. 30~37.
- (16) Cho, Y. J., 2011, "Study on Two Dimensional SPH Hydrocode for Large Deformation Problems," Master's Thesis, Sejong University, Seoul, Republic of Korea.
- (17) Johnson, G. R. and Cook, W. H., 1983, "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures," *Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics*, pp. 541~547.

- (18) Zocher, M. A. and Maudlin, P. J., 2000, "An Evaluation of Several Hardening Models Using Taylor Cylinder Impact Data," *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, pp. 1~20.
- (19) Kim, J. T., Cho, C. H., Kim, J. Y. and Kim, T.-W., 2011, "Influence Factor Analysis of Projectile on the Fracture Behavior of Aluminum Alloys Under High Velocity Impact with Latin Square Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 9, pp. 1021~1026.
- (20) Corbett, B. M., 2006, "Numerical Simulations of Target Hole Diameters for Hypervelocity Impacts into Elevated and Room Temperature Bumpers," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 33, pp. 1021~1026.
- (21) Jaspers, S. P. F. C. and Dautzenberg, J. H., 2002, "Material Behaviour in Conditions Similar to Metal Cutting: Flow Stress in the Primary Shear Zone," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 122, pp. 322~330.
- (22) Olleak, A. A. and EL-Hofy, H. A., 2015, "Prediction of Cutting Forces in High Speed Machining of Ti6Al4V using SPH Method," *Proceedings of the 10th ASME 2015 Manufacturing Science and Engineering Conference*, pp. 1~7.
- (23) Tansel, D., 2010, "Ballistic Penetration Of Hardened Steel Plates," Master's Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.