

< 학술논문 >

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.5.457>

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

SPH 기법을 이용한 고속충돌 파편의 운동에너지와 분산거동 연구

사공재* · 우성충** · 김태원***†

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

A Study on the Kinetic Energy and Dispersion Behavior of High-velocity Impact-induced Debris Using SPH Technique

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

*Dept. of Automotive Engineering, Hanyang Univ.

**Survivability Technology Defense Research Center, Hanyang Univ.

***School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.

(Received October 30, 2015 ; Revised March 30, 2016 ; Accepted March 31, 2016)

Key Words: High-velocity Impact(고속 충돌), Smoothed Particle Hydrodynamics(입자완화 유체동역학), Debris(파편), Dispersion Radius(분산반경)

초록: 본 연구에서는 입자완화 유체동역학기법을 이용하여 고속충돌에 의해 생성된 파편 및 파편운의 분산거동을 고찰하였다. 충격구와 표적판은 모두 알루미늄 소재를 대상으로 하였으며 해석을 통해 예측한 파편운의 장축 및 단축의 길이와 참고문헌의 실험값을 비교하여 기법의 타당성을 검증하였다. 검증된 SPH 기법을 기반으로 1.5~4 km/s의 속도 범위에서 고속충돌 및 파괴 해석을 수행하였으며 이에 따른 파편의 분산 거동을 운동에너지 관점에서 평가하였다. 표적판 뒤에 배치된 관측판상에 분포된 파편의 최대 분산반경은 충돌속도가 증가함에 따라 증가하였다. 충돌시 발생하는 파편의 분산 거동을 바탕으로 손상범위 예측을 위한 경험식을 도출하였고, 파편 운동에너지의 95%는 최대분산반경의 50% 이내에 집중됨을 확인하였다.

Abstract: In this study, we investigate the dispersion behavior of debris and debris cloud generated by high-velocity impacts using the smoothed particle hydrodynamics (SPH) technique. The projectile and target plate were made of aluminum, and we confirm the validity of the SPH technique by comparing the measured major and minor axis lengths of the debris cloud in the reference with the predicted values obtained through the SPH analysis. We perform high-velocity impact and fracture analysis based on the verified SPH technique within the velocity ranges of 1.5~4 km/s, and we evaluate the dispersion behavior of debris induced by the impact in terms of its kinetic energy. The maximum dispersion radius of the debris on the witness plates located behind the target plate was increased with increasing impact velocity. We derive an empirical equation that is capable of predicting the dispersion radius, and we found that 95% of the total kinetic energy of the debris was concentrated within 50% of the maximum dispersion radius.

1. 서론

인류의 우주개발이 시작된 이후, 지구 궤도상에 다수의 인공위성이 발사되었으며, 폐기된 위

성과 분리된 로켓 동체 등에서 파생되거나 우주 구조물의 충돌 또는 폭발로 인해 발생된 파편은 기존 우주구조물과의 또 다른 충돌위험을 야기하고 있다.⁽¹⁾ 일반적으로, 이들 파편의 직경은 1~10 mm 정도이며 약 1~7 km/s의 속도로 지구궤도를 선회하고 있어 그 크기가 상대적으로 작다 하더

† Corresponding Author, twkim@hanyang.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Classification of impact velocity ranges⁽³⁾

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~

라도 충돌 시 구조물에 심각한 손상을 초래할 수 있다.⁽²⁾ 한편 Backman 등⁽³⁾은 충돌속도의 범위를 Table 1과 같이 4가지 영역으로 구분하였다. 본 연구에 적용된 속도 범위(1.5~4 km/s)는 고속 및 초고속(Ultraordnance~Hypervelocity) 범위를 모두 포함한다.

전술한 바와 같이 고속 또는 초고속 충돌의 위험성을 안고 있는 우주구조물의 건전성 및 신뢰성 확보를 위해 이들의 충돌에 관한 많은 연구가 진행되고 있음에도 불구하고 실질적인 시험은 매우 어려운 실정이며 따라서 모사시험이 실험적 연구의 주류를 이루고 있다. Whipple은⁽⁴⁾ 구조체를 이루는 핵심 부품의 일정 거리 뒤에 완충재(bumper)라 불리우는 평판을 설치하여 충돌로 인해 발생하는 구조체 부품의 손상을 완화시키고자 시도하였다. 결과적으로 완충재와 우주파편의 충돌은 1차적으로 완충재의 손상을 야기시킬 뿐만 아니라 이로 인하여 발생한 파편은 충돌속도 및 각도에 따라 다양한 형상의 파편운(debris cloud)을 형성하게 되고 따라서 완충재 후방 구조물에 2차 위협이 됨을 확인하였다. Piekutowski⁽⁵⁾는 다양한 표적판 두께/충격구 지름(t/D)비 및 충돌속도에 따른 알루미늄 충격구와 표적판의 충돌 실험을 통하여 충돌속도가 동일할 경우, 유사한 t/D 비를 갖는 충돌은 유사한 형상의 파편운을 형성한다고 밝힌 바 있다. Poormon 등⁽⁶⁾은 알루미늄 및 카드뮴 재질의 충격구와 알루미늄 표적판 간 초고속 충돌(2~7 km/s) 실험을 통하여 재료별 파편운 형상을 비교하였고, 동일한 t/D 비를 가지는 알루미늄과 카드뮴 충격구는 재질이 다르더라도 알루미늄 충격구의 충돌속도가 카드뮴에 비해 2배 빠를 경우 비슷한 형상의 파편운을 야기한다고 보고하였다. Zhang 등⁽⁷⁾은 알루미늄 충격구와 표적판의 초고속 충돌(4~6 km/s) 실험에 따라 충돌 각도별로 발생하는 파편운을 분석하였으며 이 같은 파편운 분석을 위하여 파편운의 장축 및 단축 등의 변수를 설정하였다.

한편, 실험적 방법으로 파편운의 거동을 분석하기 위해서는 고가의 장비 운용과 함께 많은 시간과 비용이 소요되며 따라서 결과 분석 및 확보에 실질적인 어려움이 존재한다.⁽⁸⁾ 결과적으로 이를 극복하기 위한 대안으로 충돌 및 파괴 이론에 기반한 해석적 연구가 주류를 이루고 있다. 그 중에서도 특히 초고속 충돌로 인하여 발생하는 대변형(large deformation) 현상과, 충돌 과정에서 발생하는 에너지 생성 및 유체 거동을 모사할 수 있는 입자완화 유체동역학(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 기법이 이와 같은 초고속 충돌 모사에 효과적으로 적용되고 있다.⁽⁹⁾ Jo 등⁽⁸⁾은 참고문헌의 실험결과와 비교를 통하여 검증한 SPH 기법을 적용하여 알루미늄 구와 알루미늄 표적의 충돌로 인하여 발생하는 파편운의 형상을 충돌 각도, 충돌 속도 및 표적 두께에 따라 분석하였다. Lee 등⁽⁹⁾은 참고문헌의 실험결과를 통하여 SPH기법의 타당성을 검증하고, 이를 이용하여 인공점성계수, 핵함수 완화길이, 입자수, 시간증분 등 매개변수에 따른 파편운의 크기를 분석하였다.

실질적으로 피충돌 구조물의 안전성 확보와 관련하여 파편운의 위험이 구조물의 손상에 미치는 영향은 매우 중요함에도 불구하고 종래의 연구는 대부분 파편운의 형상 분석에 집중되었으며, 따라서 1차 충돌로 인해 형성된 파편운이 야기할 수 있는 2차 손상에 초점을 둔 연구는 국내외적으로 전무한 실정임을 확인하였다.

본 연구에서는 참고자료를 통해 획득한 실험결과⁽⁷⁾와 SPH 기법을 바탕으로 한 재현해석 결과를 비교하여 적용기법의 타당성을 검증하였다. 이후, 검증된 SPH 기법을 적용하여 초고속 충돌에 따라 생성된 파편이 2차 구조물(본 연구에서는 관측판을 대상으로 함)에 충돌할 때 야기되는 위협 범위를 파편운의 분산반경 및 운동에너지 관점에서 평가하였다. 또한 충돌시 발생하는 파편이 가지는 총 운동에너지를 바탕으로 분산거동 경험식을 제안하였으며 이를 통해 피충돌 구조물의 치명적 손상범위를 예측하였다.

2. 충돌 해석

2.1 SPH 기법

SPH 기법^(1,8,9)은 해석 대상을 입자의 집합으로

구성하고 핵함수를 통하여 주변 입자의 속도, 밀도 등을 이용하여 임의 입자의 집합에서 물리량을 결정하는 순수 라그랑지안 수치해석 기법이다.⁽⁸⁾ 이와 같은 이유로, SPH 기법은 초고속 충돌시 발생하는 대변형 문제에 대한 해석에 적용이 가능하며 또한 파괴현상으로 인해 파편이 발생하는 현상을 모사하는 데 적합하다. SPH 지배방정식은 연속방정식, 운동량 보존식, 에너지 보존식으로 구성되어 있으며 다음과 같이 각각 표현된다.

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot v \quad (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \sigma \quad (2)$$

$$\frac{De}{Dt} = -\left(\frac{\sigma}{\rho}\right) \nabla \cdot v \quad (3)$$

여기서, ρ 는 밀도, t 는 시간, v 는 입자속도, σ 는 응력, e 는 입자의 내부에너지를 나타낸다.

한편 연속체를 유한개 입자의 합으로 근사화하고 각 입자에 대한 물리량을 커널함수(Kernel function)를 통해 근사화하는 입자완화 유체동역학을 사용하게 되면 위의 식 (1)~(3)은 다음 식 (4)~(6)과 같이 표현된다.⁽¹⁾

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

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

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

여기서, W 는 커널함수 그리고 NP 는 입자수를 나타낸다. 커널함수 W 는 다음 식 (7)과 같이 표현된다.

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

이때, \vec{r} 은 입자간 거리를 나타내고, h 는 커널 반지름을 나타낸다. SPH 기법에 있어 가장 널리 사

용되고 있는 Cubic B-spline 커널함수를 채용하였으며 이는 다음 식 (8)과 같이 표현된다.⁽¹⁰⁾

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

여기서 q 는 $\frac{\vec{r}}{h}$ 이며, a 는 2차원 문제일 경우 $\frac{10}{7\pi h^2}$ 이며, 3차원의 경우 $\frac{1}{\pi h^3}$ 이다.

2.2 Johnson-Cook 모델

Johnson-Cook이론⁽¹¹⁾은 고변형률, 고변형률속도 및 온도 영향을 고려하여 금속재료의 동적거동을 모사하기 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, ε 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.

고변형률속도 등의 상황에서는 내부의 소성일이 열로 변환되고 이는 다음과 같이 표현된다.⁽¹²⁾

$$\Delta T = \frac{\bar{\sigma} \bar{\varepsilon}^p}{\rho} C_v \quad (11)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 유효응력 $\bar{\varepsilon}^p$ 는 유효소성변형률, ρ 는 밀도, C_v 는 비열용량을 나타낸다.

재료의 동적물성은 압력-비체적 관계, 충격과 전파속도, 입자속도, 내부에너지 등과 관련이 있다. 정적상태의 구성방정식을 대체하는 상태방정식의 상수는 초고속 충돌 실험을 바탕으로 충격과 전파속도, 입자속도를 측정하게 되고 이를 통해 결정된다. 본 연구에서는 초고속 운동을 하

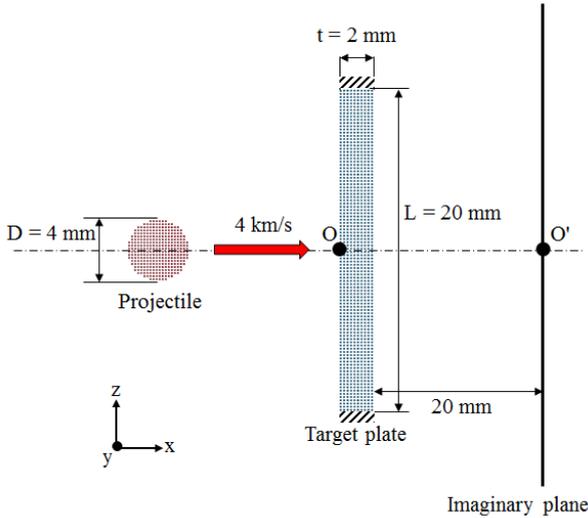


Fig. 1 Schematic of impact analysis using a SPH

는 입자의 에너지보존, 압력, 내부에너지 및 밀도의 관계를 모사할 수 있는 Mie-Gruneisen의 상태 방정식을 이용하였으며, 식 (12)에 나타내었다.⁽¹³⁾

$$p = \frac{\rho_0 C^2 u \left[1 + \left(\frac{1-\gamma_0}{2} \right) u - \frac{a}{2} u^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1)u - S_2 \frac{u^2}{u+1} - S_3 \frac{u^2}{(u+1)^2} \right]} + (\gamma_0 + au)E \quad (12)$$

여기서, E 는 단위체적당 입자의 내부에너지, C 는 음속, S 는 엔트로피, γ_0 는 Gruneisen gamma, a 는 γ_0 의 1차 체적 보정계수, u 는 재료의 압축률이다.

2.3 SPH 기법을 이용한 충돌 해석

적용기법의 타당성을 검증하기 위하여 Zhang 등⁽⁷⁾이 수행한 실험과 동일한 조건에서 3차원 충돌 해석을 수행하고 그 결과를 실험결과와 비교하였다. 상용 수치해석 프로그램인 LS-DYNA를 이용하였으며, Fig. 1은 SPH 기법을 이용한 충돌 해석의 개략도를 나타낸다. 직경 4 mm의 알루미늄(LY12) 충격구가 4 km/s의 속도로 두께, 너비 및 높이가 각각 2 mm, 20 mm, 20 mm인 표적판에 충돌하는 조건으로 구성하였으며 충격구의 입자는 4,224개 그리고 표적판의 입자는 100,000 개로 설정하였다. 충격구의 진행 방향을 x축으로 하였고, 표적판의 폭, 높이 방향을 각각 y축, z축으로 설정하였다. 표적판의 각 가장자리는 x, y, z방향 모두 구속되어 있다. 충격구-표적판 간 충돌 후 생성된 파편들의 분산 범위를 예측하기 위해 표

Table 2 Material properties of Al2024⁽¹⁴⁾

Material properties	Value
Density	2.785 x 10 ⁻⁶ kg/mm ³
Shear modulus	27.6 GPa
Yield stress	0.265 GPa
Hardening constant	0.426 GPa
Hardening exponent	0.34
Strain rate constant	0.015
Thermal exponent	1
Melting temperature	775 K
Reference temperature	300 K
Specific heat capacity	875 J/kg-K

Table 3 Constants and corresponding values of Al2024 used in the equation of state⁽¹⁴⁾

Constant	Value
Bulk sound speed	5328 m/s
Particle-shock velocity slope	1.338
Gruneisen gamma	2

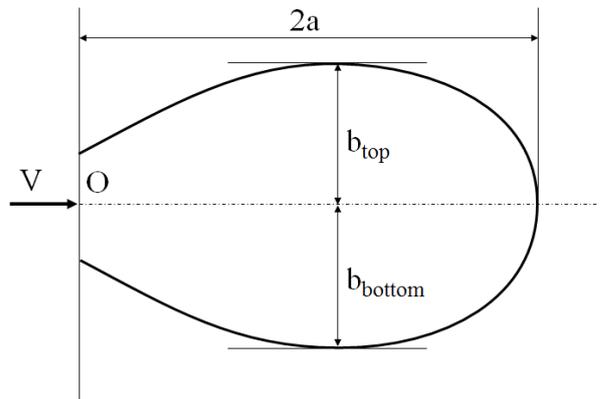


Fig. 2 Schematic view of characteristic parameters for debris cloud analysis

적판으로부터 x방향으로 20 mm 떨어진 위치에 관측판으로 설정된 가상평면을 위치시키고 이 관측판을 관통하는 모든 파편의 위치 좌표와 속도를 구하였다. Fig. 1에서 O는 충격구와 표적판의 충돌이 발생하는 지점이며 O'은 관측판의 원점으로, O와 동일한 x축상에 존재한다.

Table 2는 충격구 및 표적판에 사용된 재료의 물성을 나타내며 Table 3은 상태방정식에 사용된 상수와 그 값을 나타낸다. 상기 물성 및 상수값들은 Hayhurst⁽¹⁴⁾ 등이 수치해석 프로그램인 AUTODYN에 적용한 값들이지만, John⁽¹⁵⁾ 등이 수행한 연구 결과에 따르면 동일한 조건에서 SPH 기법을 사용하여 해석한 LS-DYNA와 AUTODYN의 결과는 유사함을 보이므로 본 논문에서는 상

기 물성 및 상수들을 LS-DYNA에 적용하였다. LY12의 경우 Al2024와 동일한 조성으로 구성되어 있으며 따라서 해석에는 Al2024의 물성을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 SPH 기법의 타당성 검증

Fig. 2는 파편운 분석을 위하여 설정한 변수를

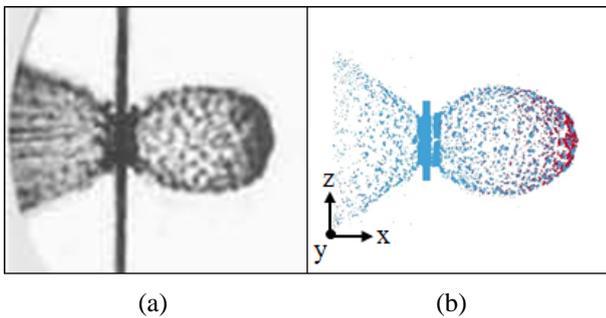


Fig. 3 Side views of debris clouds produced by impact of a spherical projectile into a target plate at 16.42 μ s. Impact velocity is 4.28 km/s and t/D ratio is 0.5: (a) experimental and (b) prediction

나타낸 것으로 여기서 V 는 충격구의 속도, $2a$ 는 파편운이 타원형으로 형성된다고 가정할 때 장축의 길이, b_{top} 과 b_{bottom} 은 각각 파편운 진행 방향과 표면윤곽 사이의 최대 수직 거리를 나타낸다.

Fig. 3은 충돌 후 16.42 μ s 지난 시점에서 촬영한 실험 결과 및 해석 결과를 나타내며 Table 4는 이 때 실험을 통하여 측정된 변수와 해석을 통하여 예측된 값을 비교하고 있다. 매우 빠른 속도로 물체가 충돌할 때 나타나는 타원체 형상의 파편 비산은 Fig. 3과 같이 유사하게 예측됨을 확인하였다. 또한 Table 4의 결과로부터 SPH 기법을 통한 예측값은 참고문헌의 실험값과 최소 2.2에서 최대 6.7 % 오차 범위 내에서 일치함을 알 수 있었다. 이와 같은 오차에는 여러 가지 요인이 있을 수 있으나 실제 실험에 사용된 재료의

Table 4 Comparison of experimental and predicted parameter values

Parameter	Experimental value (mm)	Predicted value (mm)	Error (%)
2a	42.21	41.25	2.2
b_{top}	15.03	14.13	5.9
b_{bottom}	15.01	13.99	6.7

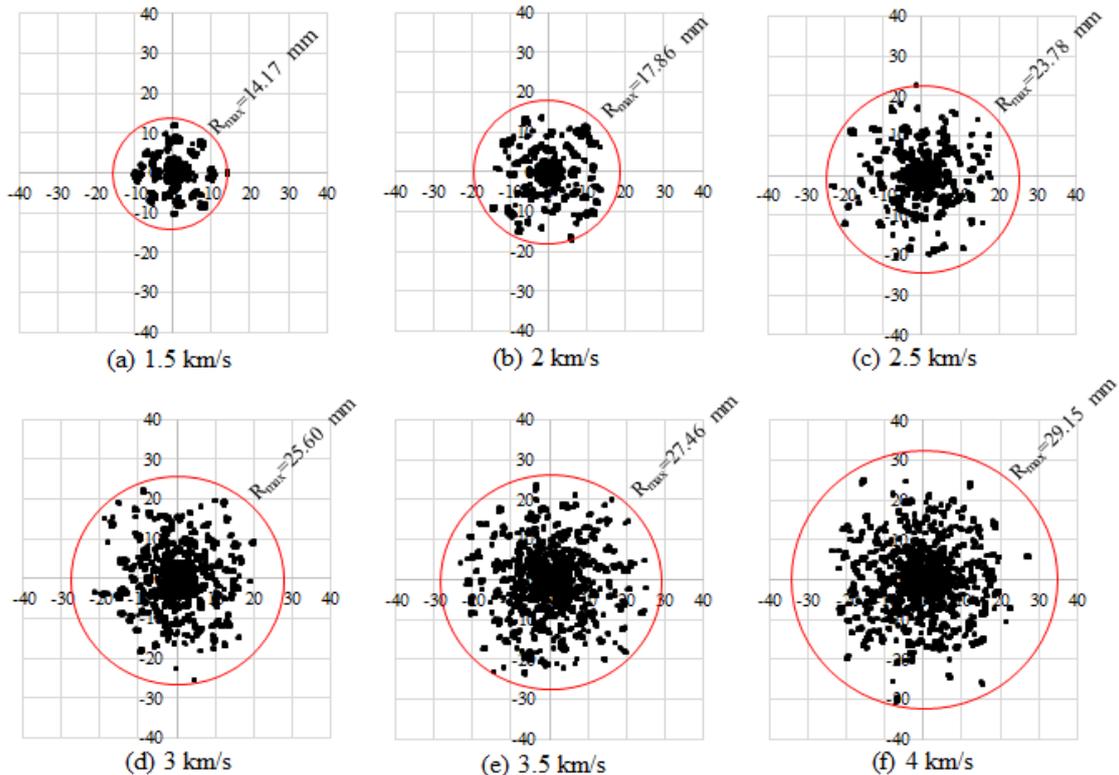


Fig. 4 The dispersion patterns and maximum dispersion radii of particles distributed on the witness plate according to the impact velocity

정확한 물성이 공개되지 않아 타 참고문헌⁽¹⁴⁾의 재료를 사용한 것이 주된 원인으로 사료된다. 그림에도 불구하고 상기 오차는 초고속 충돌 해석을 수행한 타 연구사례의 경우, 최대 28%까지 오차가 발생함을 감안하면,^(16,17) SPH 기법을 초고속 충돌 해석에 적용하기에 타당함으로 사료된다.

3.2 파편운의 최대 분산반경

충격구와 표적판 간의 충돌로 야기된 파편에 의한 2차 손상 범위를 평가하기 위하여 표적판으로부터 20 mm 떨어진 위치에 설정된 관측판을 지나는 파편들의 위치좌표 및 속도를 각각 계산하였다. 이때 관측판의 원점(Fig. 1의 O' 지점)으로부터 가장 멀리 떨어져있는 파편까지의 거리를 최대 분산반경(R_{max})으로 정의하였다.

Fig. 4는 충돌속도 증가에 따라 관측판에 분포된 파편의 분산 패턴 및 최대 분산반경을 나타낸다. 이를 통해 알 수 있듯이, 충돌속도가 증가함에 따라 최대 분산반경은 증가하며 점차 넓은 범위에 걸쳐 파편이 분산되고 있음을 확인하였다.

Fig. 5는 충돌속도 증가에 따른 파편의 최대 분

산반경을 나타낸 그래프이다. 전술한 바와 같이 충돌속도가 증가함에 따라 최대 분산반경 또한 증가하는 경향을 보였다. 특히, 2~2.5 km/s 속도 범위에서 상대적으로 현저히 증가함을 확인할 수 있었으며, 해당 구간을 보다 상세히 해석한 결과 약 2.1~2.2 km/s 구간에서 파편의 분산반경이 가장 크게 증가하였다. 이는 Andrew⁽¹⁸⁾가 밝힌 충격

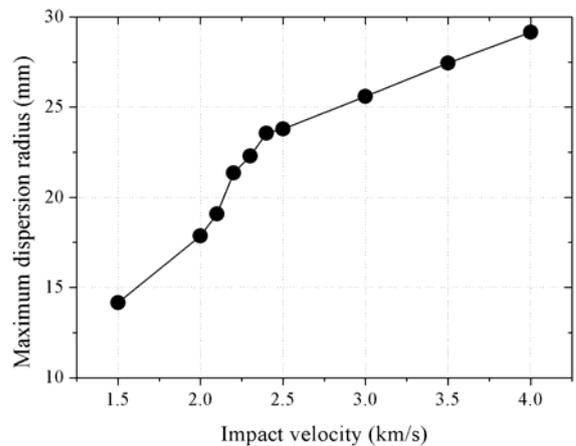


Fig. 5 The maximum dispersion radius of particles with impact velocity

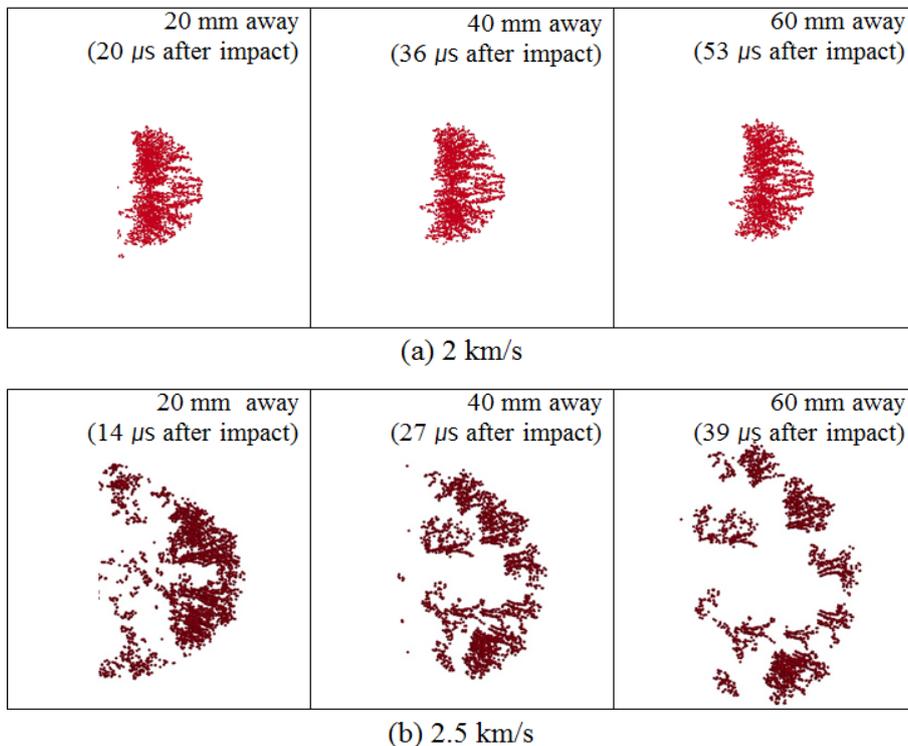


Fig. 6 Shapes of smashed projectiles at 20, 40 and 60 mm away from impact locations: (a) initial velocity = 2 km/s and (b) initial velocity = 2.5 km/s

구의 파괴현상을 통하여 설명 될 수 있다. 즉, 다양한 속도의 충돌 실험을 통하여 0.16 이상의 t/D 비를 갖는 알루미늄 충격구와 동일 재질의 표적판이 충돌할 경우 충격구 후면(진행방향과 반대 방향)에서 폭렬(spall) 손상이 발생하게 되고 따라서 충격구가 파편화되는 임계속도가 약 2.6 km/s 라는 사실을 밝혔다. 즉, 충돌속도가 폭렬 손상 임계속도인 2.6 km/s 이상에서는 충격구의 전면뿐만 아니라 후면에서도 손상에 의한 파편이 발생하지만 2.6 km/s 이하의 속도에서는 충격구의 후면이 완전 파괴되지 않음을 의미한다. 본 연구에서 2.5 km/s의 충돌속도에서 최대 분산반경의 증가량이 상대적으로 높은 이유 또한 0.5의 t/D 비를 갖는 알루미늄 충격구와 동일 재질의 표적판이 상기와 같은 폭렬 손상 임계속도에 가까운 속도로 충돌하였기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 6은 충격구가 표적판에 각각 2 km/s와 2.5 km/s로 충돌 했을 때 충돌지점으로부터 동일한 거리(20, 40 그리고 60 mm 떨어진 지점)에서의 충격구의 파괴된 형상을 비교한 그림이다. Fig. 6(a)을 통해 알 수 있듯이, 충돌속도 2 km/s인 경우 충격구의 형상은 충돌 후 충돌지점으로부터 거리가 멀어짐에도 불구하고 완전히 분산되지 않고 형상을 유지한 반면, 충돌속도 2.5 km/s인 경우 충격구의 형상은 충돌 후 충돌지점으로부터 거리가 멀어짐에 따라 다수의 파편으로 나누어져 분산되고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 폭렬 손상 임계속도에 근접한 2.5 km/s 이상의 충돌속도에서는 충격구가 후면까지 완전히 파괴, 분산됨에 따라 전체 파편이 분산되는 범위가 상대적으로 넓어진 것으로 판단된다.

3.3 파편의 운동에너지

공간상에 분산되는 파편운이 실제적으로 구조물에 미치는 영향은 파편운의 최대 분산반경 뿐만 아니라 각 파편이 가지고 있는 운동에너지와 밀접한 연관이 있다. 충격구와 표적판의 충돌로 인하여 발생한 파편의 실제적인 위협을 평가하기 위하여 충격구와 표적판으로부터 발생하여 관측판을 지나는 모든 파편의 운동에너지 합을 파편의 총 운동에너지로 정의하고 다음과 같이 표현하였다.

$$KE_{total} = \sum_i^N \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad (13)$$

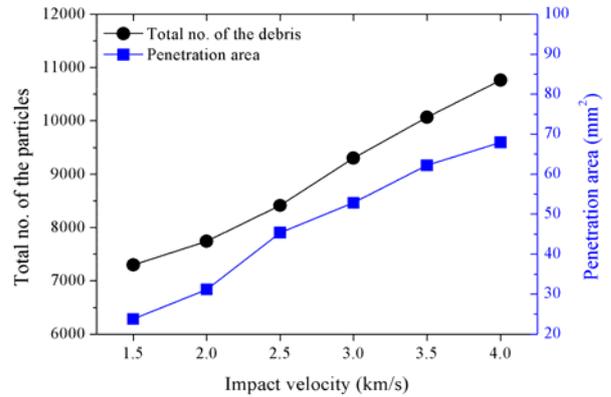


Fig. 7 Total number of the particles generated by projectile and target plate(left y axis), and the penetration area(right y axis) with impact velocity

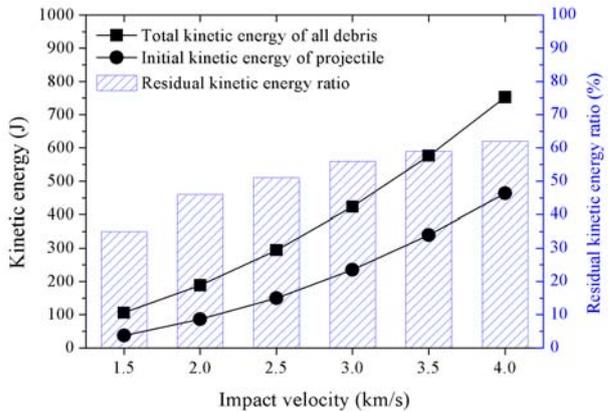


Fig. 8 Comparison of the initial kinetic energy of the projectile and total kinetic energy of all particles(left y axis), and residual kinetic energy(right y axis) with impact velocity

여기서 N 은 표적판을 지나는 파편의 총 개수, m_i 는 각 파편의 질량, v_i 는 각 파편의 진행방향 속도를 나타낸다.

Fig. 7 좌측 y축은 충돌속도 증가에 따라 관측판을 지나는 모든 파편수를 나타낸다. 충돌속도가 증가함에 따라 관측판을 지나는 총 파편수는 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있으며 이와 같은 현상을 확인하기 위하여 충돌속도에 따라 표적판에 형성된 관통 면적을 계산하였고 Fig. 7 우측 y축은 그 결과를 나타내고 있다. 결과에서 알 수 있듯이, 충돌속도가 증가함에 따라 표적판에 생성된 관통 면적도 증가하였고 따라서 관통 면적의 증가로 인해 발생된 파편의 수도 증가하게 된다.

Fig. 8 좌측 y축은 충돌 전 충격구의 초기 운동

에너지와 관측판을 지나는 모든 파편의 총 운동 에너지(KE_{total})를 충돌속도 증가에 따라 나타낸 그래프이다. 충격구의 초기 운동에너지와 관측판을 지나는 파편의 총 운동에너지는 충돌속도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으며 충격구의 초기 운동에너지의 증가율이 더 크을 알 수 있다. 초기 충격구가 지나는 운동에너지가 충돌을 통하여 손실된 정도를 고찰하기 위하여 파편의 총 운동에너지와 충격구의 초기 운동에너지 비를 잔류 운동에너지 비로 정의하고 그 결과를 Fig. 8 우측 y축에 나타내었다. 충돌속도 1.5 km/s의 경우 초기 충격구 운동에너지의 약 35%가 충돌 후 파편의 총 운동에너지로 전환되었고, 약 65%가 손실되었다. 반면 충돌속도 4 km/s의 경우 충돌 후 파편의 총 운동에너지로 전환된 초기 운동에너지의 비율은 약 62%였으며, 38%의 초기 운동에너지만이 손실되었다. 이는 충돌속도가 증가함에 따라 상대적으로 많은 비율의 초기 운동에너지가 파편의 총 운동에너지로 전환되며, 에너지의 손실률은 상대적으로 적어짐을 의미한다. 충격구와 표적판간 충돌 시 손실되는 에너지는 충돌방향과 역방향으로 비산하는 파편의 운동에너지와 충돌하는 동안 발생한 열에너지 및 소음 등으로 소산되게 된다.

3.4 손상 범위 예측

관측판 원점을 기준으로 하여 임의의 분산반경 $R(0 \leq R \leq R_{max})$ 을 반지름으로 하는 동심원을 설정하고 각 동심원을 지나는 모든 파편 운동에너지의 합을 누적 운동에너지(KE_A)로 정의하였고 이는 다음과 같이 표현된다.

$$KE_A = \sum_i^{N_R} \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad (14)$$

여기서 N_R 은 R 을 반지름으로 하는 원을 지나는 파편의 총 개수, m_i 는 각 파편의 질량, v_i 는 각 파편의 진행방향 속도를 나타낸다.

Fig. 9는 분산반경에 따른 누적 운동에너지를 나타낸 그래프이다. 누적 운동에너지는 모든 충돌속도에서 분산반경이 증가함에 따라 급격히 증가하다 일정 값으로 수렴하는 경향을 보였다. 충돌속도에 따른 누적 운동에너지를 정량적으로 비교하기 위하여 분산 반경비(R_R) 및 누적 운동에

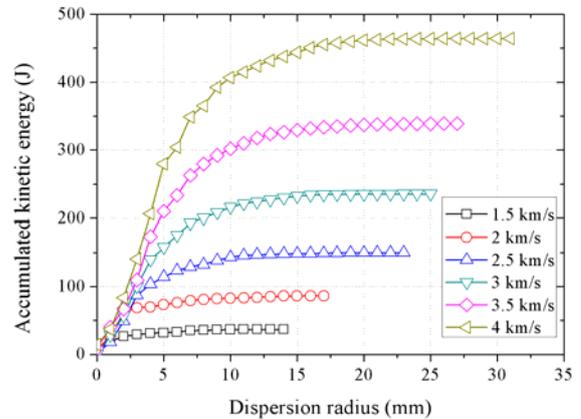


Fig. 9 Accumulated kinetic energy and dispersion radius according to the impact velocity

너지비(KE_R)를 설정하였다.

분산 반경비는 임의의 분산반경(R)과 최대 분산반경(R_{max})의 비로 나타내어지며 다음식과 같이 나타낸다.

$$R_R = \frac{R}{R_{max}} \quad (0 \leq R_R \leq 1) \quad (15)$$

여기서 R_R 은 분산 반경비, R 은 분산반경, R_{max} 는 최대 분산반경을 각각 의미한다.

한편 운동에너지비는 각 분산반경에 따른 누적 운동에너지를 파편 총 운동에너지로 나눈 비율로서 다음과 같이 표현된다.

$$KE_R = \frac{KE_A}{KE_{max}} \quad (16)$$

여기서 KE_A 는 누적 운동에너지, KE_{max} 는 파편의 총 운동에너지를 나타낸다.

Fig. 9의 분산반경별 누적 운동에너지를 상술한 분산 반경비에 따른 누적 운동에너지비로 환산하여 나타낸 결과는 Fig. 10과 같다. 그래프를 통해 알 수 있듯이 충돌속도와 관계없이 분산 반경비에 따른 누적 운동에너지비는 유사한 거동을 나타냈다. 이를 바탕으로 각 곡선의 평균값을 구한 평균 누적 운동에너지비와 분산반경비의 관계를 ORIGIN® 프로그램의 Polynomial curve fitting 방법을 통하여 아래와 같은 경험식을 구하였다.

$$KE_R = -3.79R_R^4 + 11.33R_R^3 - 12.7R_R^2 + 6.4R_R - 0.25 \quad (17)$$

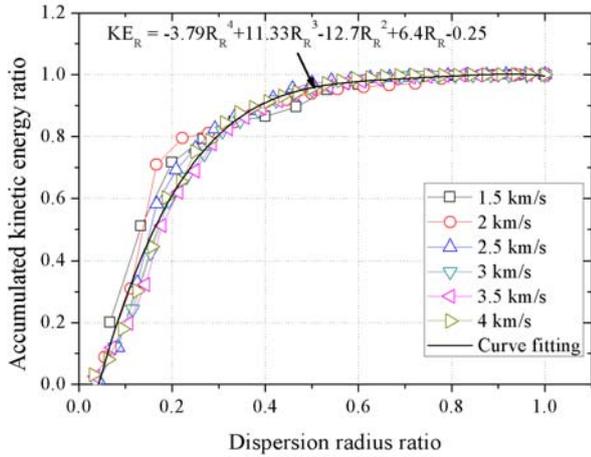


Fig. 10 The relation between the accumulated kinetic energy ratio and the dispersion radius ratio according to the impact velocity

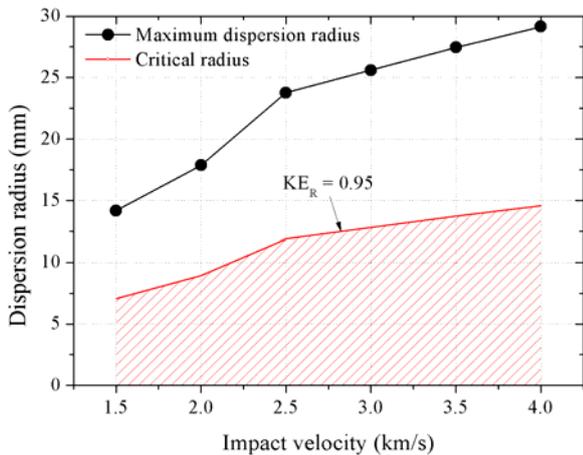


Fig. 11 Maximum dispersion radius and critical radius with impact velocity

여기서 KE_R 은 누적 운동에너지비, R_R 은 분산반경비를 각각 나타낸다. 각 충돌속도별 분산반경비에 따른 누적 운동에너지비 곡선은 상기 식 (17)의 경험식을 통하여 예측된 곡선과 평균 2%의 오차를 보이며 유사한 거동을 나타내었다.

식 (17)을 통하여 지름 4 mm의 알루미늄 충격구가 1.5~4 km/s 사이 임의의 속도로 2 mm 두께의 알루미늄 표적판과 충돌할 경우, 이로 인하여 발생하는 파편의 운동에너지가 집중되는 범위가 예측 될 수 있으며 즉, 파편 총 운동에너지의 약 95%는 최대 분산반경의 50% 이내에 집중되고 따라서 관측판 상의 파편이 분산되는 범위 중 이 범위 내에서 상대적으로 치명적 손상이 발생함을 예상 할 수 있다. 이와 같은 치명도 선도를 Fig. 11에 나타내었다. 경계를 기준으로 빗금영역에서

파편 운동에너지의 95%가 집중되어 치명적인 손상이 발생할 것으로 예측되며, 선도 상부의 영역은 5%의 적은 파편 운동에너지가 상대적으로 넓은 범위에 분산되어 파편에 의한 2차 손상은 크지 않을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 SPH 기법을 적용하여 동일한 재료로 구성된 충격구와 표적판 간의 고속충돌 해석을 수행하였다. 이에 해석기법의 타당성을 검증하기 위하여 참고자료를 통해 획득한 실험 결과와의 비교, 분석을 수행하였으며, 검증된 해석 기법을 바탕으로 다양한 속도 범위(1.5~4 km/s)에서 충돌 해석을 수행하고 이 때 발생하는 파편의 거동을 분산반경 및 운동에너지 관점에서 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) SPH 기법을 알루미늄 충격자와 알루미늄 표적판간의 충돌에 적용하고 기존 수행된 실험값과 비교한 결과 2.2~6.7% 오차 범위 내에서 일치함을 확인하였다.

(2) 충격구와 표적판의 충돌로 인하여 발생한 파편의 최대 분산반경은 충돌속도가 증가함에 따라 증가하였고, 충격구가 완전 파괴되어 파편화되는 폭발 손상 임계속도(2.5 km/s)에서는 타 충돌속도에 비하여 상대적으로 높은 최대 분산반경의 증가량을 보였다.

(3) 충돌속도가 증가함에 따라 표적판의 관통면적이 증가하였고, 또한 충돌속도가 증가함에 따라 잔류 운동에너지비도 증가하여 충돌속도 4 km/s인 경우 62%가 됨을 확인하였다. 따라서 상당 부분의 초기 운동에너지가 파편의 운동에너지로 전환되어 관측판에 발생하는 2차 손상 및 위험이 증가함을 추정할 수 있다.

(4) 지름 4 mm의 알루미늄 충격구가 1.5~4 km/s 사이 임의의 속도로 2 mm 두께의 알루미늄 표적판과 충돌할 때 발생한 파편의 총 운동에너지의 일정 비율이 집중되는 범위를 예측하는 경험식을 도출하였다. 경험식을 통하여 충돌시 발생한 파편 총 운동에너지의 95%는 최대 분산반경의 50% 이내에 집중됨을 확인하였다. 따라서 이와 같은 기법을 통해 파편에 의한 치명적 손상이 예상되는 범위를 예측할 수 있다.

(5) 본 연구를 통해서 충돌속도에 따른 파편의

최대 분산반경과 손상범위를 예측 할 수 있음을 보였고 이와 같은 방법을 향후 충격자의 재질 및 형상, 충돌 각도와 같은 다양한 충돌 조건에 적용하여 파편운의 2 차 위협 범위 및 파편에 의한 손상범위 등을 예측할 수 있을 것으로 사료 된다.

후 기

이 논문은 국방과학기술 생존성기술 특화연구센터의 사업으로 지원받아 연구되었음(계약번호 UD150013ID).

참고문헌 (References)

- (1) Kang, P. S., Im, C. K., Youn, S. K., Lim, J. H. and Hwang, D. S., 2012, "A Study on the Damage of Satellite Caused by Hypervelocity Impact with Orbital Debris," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 40, No. 7, pp. 555~563.
- (2) Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, 2006, "IADC Observation Campaigns," *43rd Session of UNCOPUOS S&T SC*, 2006.
- (3) 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.
- (4) Whipple, F. L., 1947, "Meteorites and Space Travel," *Astronomical Journal*, No. 1161, p. 131.
- (5) Piekutowski, A. J., 1997, "Effects of Scale on Debris Cloud Properties," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 20, pp. 639~650.
- (6) Poorman, K. L. and Piekutowski, A. J., 1995, "Comparisons of Cadmium and Aluminum Debris Clouds," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 17, pp. 369~648.
- (7) 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.
- (8) Jo, J. H. and Lee, Y. S., 2013, "Quantitative Analysis of Debris Clouds of Aluminum Plates with SPH," *Proceedings of the Society of CAD/CAM Conference*, pp. 755~760.
- (9) 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.
- (10) Cho, Y. J., 2011, "Study on Two Dimensional SPH Hydrocode for Large Deformation Problems," Master's Thesis, Sejong University, Seoul, Republic of Korea, pp. 4~23.
- (11) 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.
- (12) Jutras, M., 2008, "Improvement of the Characterisation Method of the Johnson-Cook Model," Master's Thesis, Université Laval, Quebec, Canada, pp. 11~20.
- (13) 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.
- (14) Hayhurst, C. J., Livingstone, I. H., Clegg, R. A. and Fairlie, G. E., 1998, "Numerical Simulation of Hypervelocity Impacts on Aluminum and Nextel/Kevlar Whipple Shields," *Proceedings of the Hypervelocity Shielding Workshop*, pp. 1~13.
- (15) John, F. E., Anne, K. P., Øyvind, F., Siri, K., Stian, S., Eva, F., Jan, A. T., Cato, D. and Gard, Ø., 2014, "Experimental and Numerical Study of the Fragmentation of Expanding Warhead Casings by Using Different Numerical Codes and Solution Techniques," *Defence Technology*, Vol. 10, pp. 161~176.
- (16) Corvonato, E., Destefanis, R. and Faraud, M., 2001, "Integral Model for the Description of the Debris Cloud Structure and Impact," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 26, pp. 115~128.
- (17) Dechant, L. J., 2004, "An Analytical Solution for

Unconfined, Unsteady, Inviscid Jets; with Applications to Penetration Problem Debris Cloud Formation,” *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 48, pp. 201~213.

(18) Piekutowski, A. J., 1995, “Fragmentation of a Sphere Initiated by Hypervelocity Impact with a Thin Sheet,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 17, pp. 627~638.