초고속 관통의 강도 무관성에 관한 연구

강 영 구^{1*}

¹(주)한화 방산부문 종합연구소

A Study on the Strength Irrelevance of Hypervelocity Penetration

Youngku Kang^{1*}

¹Hanwha Corp. Defense R&D Center, Daejeon, 34101, Korea

Abstract

The penetration depth of a hypervelocity jet exceeding 4 km/s is described by the density ratio of the jet and the target. In the case of the same density, the difference in strength between the targets does not affect the penetration depth difference. This study focuses on the "strength irrelevance" of such a hypervelocity jet. For this purpose, the change of crater pressure caused by shaped charge jet(SCJ) was calculated by finite element analysis and the possibility of polymorphic phase transition of steel material was investigated. Hypervelocity jets were found to cause polymorphic phase transitions in the steel target craters, and the decrease in the fracture toughness of the target is predicted as the cause of the strength irrelevance.

Keywords : hypervelocity jet, penetration phenomenon, strength irrelevance, shaped charge warhead, finite element method, phase transition

1. 서 론

초당 수 킬로미터의 속도로 충돌하는 초고속 관통 현상에 관한 연구는 방위산업 또는 항공 우주산업에서 활발히 이루어지고 있는 기초 연구분야이다. 이 현상에 관한 오래된 대표적 이론은 Birkhoff 등(1948)에 의해 제안되었다. 이 이론은 관통자가 높은 속도로 표적에 충돌할 때, 관통자의 길이 소모량과 표적의 관통량의 비가 둘 사이 밀도와 관련 있음을 기술한다. 특히 초고속 관통자가 충돌한 지점을 식 (1), (2)와 같이 유체의 거동으로 가정하여 이론을 전개하였기 때문에 초고속 관통에 관한 유체역학적 이론(hydrodynamic theory)로 알려져 있다.

$$\frac{1}{2} \rho_t U^2 = \frac{1}{2} \rho_j (V - U)^2 \quad (1)$$

$$P = L \left(\frac{\rho_j}{\rho_t} \right)^{1/2} = L \gamma \quad (2)$$

여기서, ρ_j , ρ_t 는 각각 관통자와 표적의 밀도, V , U 는 각각 관통자의 입사 속도와 표적의 관통률, P 는 관통량, L 은 소모된 관통자 길이, 그리고 $\gamma = (\rho_j / \rho_t)^{1/2}$ 는 관통자와 표적간의 밀도의 비를 나타낸다.

유체역학적 이론은 관통자와 표적의 강도를 고려하지 않는다. 그럼에도 불구하고 특정 속도 이상인 경우에 한하여 유체역학적 이론의 타당성이 확인되었다. Eichelberger(1956)는 강도의 영향을 고려한 수정된 유체역학적 이론을 제시하면서 동일한 성형작약탄두 제트(shaped charge jet, SCJ)가 합금강과 연강 표적을 각각 관통한 결과, 관통 시작 후 일정 시점까지는 관통 깊이의 차이가 없음을 보였다. Gooch 등(2001)은 SCJ 가운데 유체역학적 이론이 성립되는 속도 하한치(hydrodynamic limit, HL)보다 빠른 제트의 관통 깊이는 밀도의 비 $\gamma = (\rho_j / \rho_t)^{1/2}$ 에 의해 기술될 수 있음을 보였다. Kang과 Jeon(2018)은 유한요소해석을 이용한 SCJ 관통 현상의 연구를 통해 속도 4km/s 이상인 SCJ의 관통량은 AISI

* Corresponding author:

Tel: +82-42-336-0571; E-mail: ykkang8063@gmail.com

Received May 8 2019; Revised May 16 2019;

Accepted May 17 2019

©2019 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1045, AISI 4340 두 표적에 대하여 동일한 관통 깊이를 보임을 확인하였다.

HL 이상인 제트의 관통량은 SCJ의 전체 관통량 가운데 일부분을 차지할 뿐이다. 하지만, 방호 구조물을 HL 이상인 제트의 관통 깊이보다 더 두껍게 설계할 수 있는 경우는 상당히 제한적이므로 HL 이상인 초고속 관통 현상의 연구가 필요하다. Kang(2019)은 SCJ의 시간에 따른 관통량 증가와 제트 소모량을 비교하여 HL 속도 이상인 제트의 관통 효율이 90% 이상인 반면, 그 이후의 제트 영역에서는 급격히 감소함을 보였다. 그리고 이 원인을 SCJ의 속도 분포에 따른 길이 연장 효과가 유체역학적 이론에 반영된 것으로 분석하였다. 하지만, HL 이상의 초고속 SCJ의 관통량이 표적의 강도 차이의 영향을 받지 않는 원인에 대해서는 알려진 바가 없다.

2. 본 론

이 장에서는 성형작약탄두 제트(SCJ)의 강도 무관성의 원인에 관한 논의를 다룬다. 이를 위해 유한요소해석을 이용해 계산된 크레이터 압력과 polymorphic 상변이의 발생 가능성 및 그 범위에 대하여 고찰하였다.

2.1 BRL 81mm 성형작약탄두의 철강 표적 관통에 대한 강도 무관성 범위

본 연구에 이용된 BRL 81mm 성형작약탄두와 표적의 유한요소해석 모델, 물성 데이터들을 Fig. 1 및 Table 1과 2에 나타내었다. 해석의 효율성을 위하여 2차원 축대칭 모델을 적용하여 대칭 축을 가로지르는 물질 이동이 없도록 경계조건을

Fig. 1 Finite element model of BRL 81mm shaped charge warhead and target

부여하였다.

이 성형작약탄두는 OCTOL 고폭 화약으로 충전되어 있으며 후면 중심에 기폭점을 갖는다. 화약의 폭발 압력파는 OFHC 라이너의 정점(apex)에 가장 먼저 도달한다. 라이너는 이 압력을 통해 변형되며, 성형작약탄두 제트(shaped charge jet, SCJ)가 형성된다. SCJ의 형성 및 관통 과정은 LS-DYNA 971 R8.0 버전의 Eulerian 정식화를 이용해 모사되었다.

이와 같이 설정된 SCJ 관통 모델의 정합성은 최종 관통량과 제트의 최대 속도에 대한 연구를 통해 판단하였다. 시간 증분(time step, Δt)은 LS-DYNA에서 매 계산 사이클마다 산출된 시간 증분의 0.2배로 설정하여 해석의 수렴성을 확보하였다. SCJ가 형성되고 이동하는 중심축 주변의 대표 요소 크기(representative element size, Δh)는 가로와 세로를

Table 1 Parameters of the Jones-Wilkins-Lee equation of state

	Unit	OCTOL
ρ_0	kg/m ³	1,821
D	m/s	8,480
A	GPa	748.60
B	GPa	13.38
R_1	-	4.50
R_2	-	1.00
w	-	0.38
E	J/m ³	5.27E+09

Jones-Wilkins-Lee:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v} \right) e^{-R_1 v} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v} \right) e^{-R_2 v} + \frac{\omega E}{v}, \quad v = \frac{\rho_0}{\rho}$$

Table 2 Material parameters of the Johnson-Cook constitutive equation and the Mie-Grüneisen equation of state

	Unit	Liner (OFHC)	Body (Aluminum)	Target (AISI 4340)	Target (AISI 1045)
ρ_0	kg/m ³	8,960	2,810	7,850	7,850
A_0	GPa	0.092	0.052	0.553	0.792
B_0	GPa	0.292	0.477	0.6008	0.510
n	-	0.310	0.520	0.234	0.260
C_0	-	0.025	0.0025	0.013	0.014
M	-	1.090	1.610	1	1.030
T_m	K	1,356	893	1,733	1,793
C	m/s	3,940	4,596	4,570	3,935
S_1	-	1.489	1.490	1.490	1.578
γ_0	-	2.020	2.170	1.954	1.690

Johnson-Cook: $\sigma_y = (A_0 + B_0 \epsilon_p^n) \left(1 + C_0 \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right\}$,
Mie-Grüneisen: $p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left\{ 1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu \right\}}{\{ 1 - (S_1 - 1) \mu \}}$, $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$

균일하게 1.0mm로 설정하였고, 이 영역에서 멀어질수록 점차 증가하도록 모델링하였다. Fig. 2(a)~(c)에 나타낸 AISI 4340 표적 관통 해석 결과 관통 직전 SCJ의 최대 속도는 7.96km/s였으며, 최대 관통깊이는 4.77 CD(386.5mm)로 나타났다. 최대 속도가 Bolstad와 Mandell(1992)이 예측한 8.30km/s 대비 약 3.98%의 차이를 보였고, DiPersio (1965)의 실험 결과인 4.60~4.90 CD 범위에 포함되었으므로 정합성을 확보한 것으로 판단되었다.

본 연구는, 표적의 밀도가 동일할 때 HL 속도 이상인 SCJ의 관통량이 표적 강도 차이에 영향을 받지 않는 원인에 관한 연구를 다룬다. 유한요소법을 이용한 SCJ 관통 해석을 통해 표적 크레이터 주변의 압력 변화를 조사하였다. 이를 재료 과학 분야의 관련 연구들과 비교하였다. 그 결과 높은 압력에 의한 polymorphic 상변이로 크레이터 주변의 파괴 인성(fracture toughness)이 감소된 것을 그 원인으로 예측하였다.

추가적으로 강도가 다른 AISI 1045 표적의 관통 해석 결과와 비교하여 속도가 4.0km/s(HL) 이상인 SCJ의 관통량은

Fig. 2 Penetration stages of BRL 81mm shaped charge jets for AISI 1045(upper part) and AISI 4340(lower part) target(contour unit: mm/ms)

표적 사이의 강도 차이에 무관함(2.0mm 이하)을 확인하였다 (Fig. 2(b)). 하지만, 이후로는 관통량의 차이가 증가하여 최종적으로 27.5mm의 관통량 차이가 발생했다(Fig. 2(c)) 본 연구는 이러한 현상을 동일 밀도를 갖는 철강 표적을 관통하는 OFHC 초고속 제트의 'Steel-OFHC 강도 무관성(Steel-OFHC strength irrelevance)' 또는 본 논문에 한하여 간단히 '강도 무관성'으로 부르기로 하였다. 그리고 이 범위는 최전방 7.96km/s인 지점($t = 44\mu s$ 에 표적에 입사)으로 부터 4.0 km/s인 지점($t = 116\mu s$ 에 표적에 입사)까지로 길이는 114.5 mm인 영역이다.

2.2 SCJ에 의한 크레이터 압력 분포

Fig. 3은 해석 결과로부터 표적 크레이터 바닥면에 형성 되는 압력의 변화를 시간에 따라 나타낸 것이다. 최고 속도인 제트가 표적에 충돌한 시점($t = 44\mu s$)의 압력, p_0 는 AISI 1045, AISI 4340 표적에서 각각 53.79GPa, 54.23GPa이었다. 이후 급격히 감소하였으며, 강도 무관성의 한계에 도달한 시점 ($t = 116\mu s$)의 압력 p_L 은 AISI 1045, AISI 4340 표적에서 각각 13.62GPa, 14.28GPa였다.

Fig. 4와 5에 SCJ 충돌에 의한 시간 별 크레이터 주변의 압력 분포를 13~50GPa 범위만 나타내었다. 강도 무관성의 한계에 이르기 전의 크레이터 주변 압력 분포는 크레이터 바닥 면에서 최대였다. 그리고 거리에 따라 점차 감소하여 일정 거리 (d_L)에서 p_L 미만으로 감소하였다. d_L 은 표적에 충돌하는 SCJ의 속도의 감소에 따라 좁아졌으며, 강도 무관성 한계에서는 $d_L \leq 1$ 로 나타났다.

Fig. 3 Crater maximum pressure variation of AISI 1045 and AISI 4340 targets

(a) $t=50\mu s$: jet velocity 7.42km/s, $d_L=11.9$ mm (b) $t=70\mu s$: jet velocity 5.86km/s, $d_L=5.0$ mm (c) $t=116\mu s$: jet velocity 4.02km/s, $d_L < 1.0$ mm**Fig. 4** Pressure distribution above 13GPa around craters generated in AISI 1045 target(Unit:GPa)

2.3 Polymorphic 상변이와 강도 무관성의 관계

Bancroft 등(1956)는 철강(iron) 재료에 약 13GPa의 압력이 가해지면 본래 α 상(phase)인 체심입방격자(body centered cubic, BCC) 결정 구조가 ϵ 상인 육방조밀격자(hexagonal closed packed, HCP) 결정 구조로 변이되는 polymorphic ($\alpha \rightarrow \epsilon$) 상변이 현상을 발견하였다. 각 결정 구조의 슬립계(slip system)의 수가 많을수록 재료는 보다 큰 연성을 갖는다. BCC 결정구조는 48개의 슬립계를 갖는 반면, HCP의 경우 3개의 슬립계를 갖는다. 따라서, $\alpha \rightarrow \epsilon$ 상변이를 통해 재료의 취성(brittleness)은 증가한다.

초고속 관통 현상이 polymorphic 상변이를 일으키는 것은 Moritoh 등(2003)의 연구로 확인되었다. 이들의 연구는 초고속 관통자의 충돌에 의해 완전히 관통되지 않은 크레이터

(a) $t=50\mu s$: jet velocity 7.41km/s, $d_L=9.2$ mm (b) $t=70\mu s$: jet velocity 5.85km/s, $d_L=5.4$ mm (c) $t=116\mu s$: jet velocity 4.02km/s, $d_L < 1.0$ mm**Fig. 5** Pressure distribution above 13GPa around craters generated in AISI 4340 target(Unit:GPa)

주변의 결정 구조와 생성된 균열의 특성을 조사하였다. 그 결과 크레이터 바닥면 이하의 영역에서 $\alpha \rightarrow \epsilon$ 상변이의 발생과 이에 따른 부피 변화로 생긴 다수의 반경 방향 균열을 확인하였다.

본 연구의 유한요소해석 결과 SCJ에 의해 크레이터 주변에 13GPa($\alpha \rightarrow \epsilon$ 상변이의 발생 압력) 이상의 높은 압력이 발생한 시점은 제트 속도 4km/s 이상으로 식별된 강도 무관성 한계와 일치하였다. 따라서, 4km/s 이상의 초고속 SCJ가 만든 크레이터 주변 영역에는 $\alpha \rightarrow \epsilon$ 상변이가 일어날 가능성이 높다. 이 상변이가 일어난 크레이터 주변 영역은 높은 취성을 갖게 된다. 그러므로 표적은 본래 파괴 인성(fracture toughness)을 잃어 후속 SCJ의 충돌에 대한 충격 에너지 흡수 능력을 상당히 잃게 될 것으로 예상된다.

Fig. 4와 5에서 SCJ가 형성한 크레이터 주변 압력 분포를 통해 충돌 제트 속도가 빠를수록 크레이터 바닥면 이하의

영역에서 13GPa 이상인 영역이 더 깊음을 보여준다. 이를 통해 빠른 제트는 보다 깊은 영역의 취성을 증가시킬 수 있을 것으로 예측된다. 즉, 강도 무관성 한계 이상인 SCJ가 후속 제트의 충돌 속도 감소에도 불구하고 높은 관통 효율을 유지할 수 있는 이유도 polymorphic 상변이와 관련이 있는 것으로 판단된다.

하지만, 강도 무관성의 한계인 속도 4.02km/s인 SCJ는 오직 크레이터 바닥면($d_L \approx 0$)에서만 13GPa 수준의 압력을 일으켰다. 이상의 논의를 바탕으로 이 크레이터 이후로는 표적 재료 본래의 파괴 인성이 SCJ의 관통에 저항할 수 있을 것으로 예상된다. 바로 이 점이 속도 4km/s 이하인 SCJ의 관통 특성이 표적의 밀도가 동일한 경우 강도 차이에 영향을 받는 원인으로 판단된다.

3. 결 론

본 연구는 유한요소해석을 이용하여 4km/s 이상인 성형작약탄두 제트(SCJ)가 AISI 1045, AISI 4340 소재 표적에 13GPa 이상의 높은 압력을 일으키는 것을 확인하였다. 약 13GPa의 압력은 철강 소재에 $\alpha \rightarrow \epsilon$ 상변이를 일으킨다는 Bancroft 등(1956)을 참조할 때 4km/s 이상인 SCJ는 steel 표적에 $\alpha \rightarrow \epsilon$ 상변이를 일으킬 수 있다. 이 상변로 재료의 취성이 커지므로 해당 부분은 파괴 인성(fracture toughness)을 상실하게 된다. 이러한 관계가 동일한 밀도인 표적들의 강도 차이가 초고속 SCJ의 관통 깊이에 영향을 주지 않는 강도 무관성과 관련이 있는 것으로 판단된다.

References

- Bancroft, D., Peterson, E.L., Minshall, S. (1956) Polymorphism of Iron at High Pressure, *J. Appl. Phys.*, 27(3), pp.291~298.
- Birkhoff, G., MacDougall, D.P., Pugh, E.M., Taylor, S.G. (1948) Explosives with lined Cavities, *J. Appl. Phys.*, 19(6), pp.563~582
- Bolstad, J., Mandell, D. (1992) Calculation of a Shaped Charge Jet (king MESA-2D and MESA-3D Hydrodynamic Computer Codes, Los Alamos National Laboratory, University of California for the United States Department of Energy.
- DiPersio, R., Simon, J., Merendino, A. (1965) Penetration of Shaped-charge Jets into Metallic Targets, US Army Ballistic Research Laboratory, BRL.
- Eichelberger, R. J. (1956) Experimental Test of the Theory of Penetration by Metallic Jets. *J. Appl. Phys.*, 27(1), pp.63~68.
- Gooch, W.A., Burkins, M.S., Walters, W.P., Kozhushko, A.A., Sinani, A.B. (2001) Target Strength Effect on Penetration by Shaped Charge Jets, *Int. Jo. Impact Eng.*, 26(1-10), pp.243~248.
- Kang, Y., Jeon, J. (2018) Finite Element Analysis of the Impact of Liner Thickness and Hydrodynamic Limit on the Penetration Depth of a Shaped Charge Warhead, *J. Mech. Sci. & Technol.*, 32(12), pp.5797~5805.
- Kang, Y. (2019) Finite Element Analysis for the Penetration Phenomena of Shaped Charge Jets using Hydrodynamic Theory, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 32(2), pp.133~140.
- Moritoh, T., Matsuoka, S., Ogura, T., Nakamura, K.G., Kondo, K.I., Katayama, M., Yoshida, M. (2003) Dynamic Failure of Steel under Hypervelocity Impact of Polycarbonate up to 9km/s, *J. Appl. Phys.*, 93(10), pp.5983~5988.

요 지

속도 4km/s 이상인 초고속 제트의 관통 깊이는 제트와 표적의 밀도 비를 통해 기술된다. 반면에 동일한 밀도인 경우 표적들 사이의 강도 차이는 관통 깊이 차이에 영향을 주지 않는다. 본 연구는 초고속 제트의 “강도 무관성”에 관한 연구를 다룬다. 이를 위해 초고속 성형작약탄두 제트(SCJ)에 의해 발생된 크레이터 압력의 변화를 유한요소해석을 통해 계산하고, 철강 소재의 polymorphic 상변이 발현 가능성을 조사하였다. 결과적으로 초고속 제트는 표적 크레이터에 polymorphic 상변이를 일으킬 수 있고, 이로 인한 표적의 파괴 인성 저하가 강도 무관성의 원인으로 예측된다.

핵심용어 : 초고속 제트, 관통 현상, 강도 무관성, 성형작약탄두, 유한요소법, 상변이