Hydrodynamic 이론을 이용한 성형작약탄두 제트의 관통 현상에 관한 유한요소 해석

강 영 구^{1*}

¹(주)한화 방산부문 종합연구소

Finite Element Analysis for the Penetration Phenomena of Shaped Charge Jets using Hydrodynamic Theory

Youngku Kang^{1*}

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

Abstract

In this paper, the penetration process of Shaped charge jet(SCJ) was simulated through finite element analysis to obtain physical quantities such as jet incidence velocity, penetration rate, and penetration increment. As a result of applying these physical quantities to the hydrodynamic theory, it was confirmed that the penetration efficiency of the jet with a high incident velocity is higher than that of the following slow jet. This efficiency decreased sharply when the jet was slower than the hydrodynamic limit(HL). On the other hand, the comparison of penetration increment and jet consumption over time showed that the length extension effect should be considered for SCJ's theoretical penetration analysis.

Keywords : shaped charge warhead, jet, finite element method, hydrodynamic theory, hydrodynamic limit, target, penetration, efficiency

1. 서 론

성형작약탄두(shaped charge warhead)는 원통형 케이스에 화약을 충전하고 콘 형태의 구리 라이너(liner)로 전방부를 막은 구조이다. 후방에서 기폭된 화약의 폭발이 전방 구리 라이너에 전파되면 라이너의 정점부로 부터 콘 형태 재료들이 중심축을 향해 모이게 된다. 탄두 중심축에 집중된 라이너 재료들은 초고속 제트(jet)를 형성한다. 이 성형작약탄두 제트(shaped charge jet, SCJ)는 탄두 크기에 비해 우수한 관통 성능을 보이므로, 적 전차 및 두꺼운 방호물을 관통하는데 효과적이다.

초고속 관통현상을 기술하는데 가장 널리 알려진 이론은 Birkhoff(1948)의 hydrodynamic 이론이다. 초고속 관통자와 표적이 충돌한 입사점에는 두 소재의 항복 강도를 초월하는 높은 압력이 발생한다. 따라서 입사점에서의 재료의 거동은 유체와 같다 가정한다. 관통이 증가함에 따라 입사점도 이동하

로, 입사점을 따라 이동하는 좌표계에서 제트 속도와 입사점의 이동 속도(관통률)를 통해 압력을 기술하면 다음과 같다.

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

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

여기서, ρ_j , ρ_t 는 각각 관통자와 표적의 밀도, V , U 는 각각 관통자의 입사 속도와 표적의 관통률이다. 식 (2)의 우변의 분모를 좌변을 분리한 후, 시간에 대해 적분하면, U 와 $V - U$ 의 적분은 각각 관통깊이 P 와 관통에 소모된 관통자의 길이 L 이 되어, 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$P = L \left(\frac{\rho_j}{\rho_t} \right)^{1/2} = L\gamma \quad (3)$$

* Corresponding author:

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

Received January 4 2019; Revised January 21 2019;

Accepted January 22 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.

여기서, $\gamma = (\rho_j / \rho_t)^{1/2}$ 는 관통자와 표적간의 밀도의 비를 나타낸다. 따라서 hydrodynamic 이론은 관통자의 길이와 밀도, 표적의 밀도만으로 초고속 관통 현상을 기술한다.

하지만, 식 (3)은 관통자와 표적의 강도를 고려하지 않기 때문에, 이후 많은 연구를 통해 수정된 이론들이 등장하였다. Eichelberger(1956)는 실험을 통해 단순히 관통자와 표적의 강도에 관련된 항을 추가한 이론을 제시하였다. 반면, Gooch (2001)는 hydrodynamic 이론이 적용 가능한 입사 속도의 하한치, 즉 hydrodynamic limit(HL)의 식별에 대한 연구에서 HL 미만인 SCJ는 강도의 영향을 받음을 보였다. 이들 이론은 강도의 영향은 존재하지만, 특정 속도 이상인 제트에 대해서는 여전히 hydrodynamic 이론이 유효함을 의미한다.

한편, SCJ는 첨단부에서 최대이며 이후로 점차 감소하는 속도 분포를 갖는다. 이는 hydrodynamic 이론의 균일 관통자 속도 가정과 차이가 있다. Abrahamson(1963)은 속도 구배를 고려한 관통 이론을 제시해 SCJ의 관통량은 밀도의 비, 제트 길이 외에도 속도 분포의 적분값에 비례함을 보였다.

비록 hydrodynamic 이론만으로 SCJ의 관통 현상을 완전히 설명하는데 한계를 갖는 것은 분명하지만, HL 이상인 제트의 관통량은 두꺼운 표적의 관통량 중 상당한 부분을 차지하므로 여전히 중요한 이론이다. 하지만, HL의 구분을 통한 SCJ의 관통량 분석은 실험적인 방법으로는 비용 및 안전에 관한 문제로 제약이 따르며, 세밀한 분석에 한계가 따른다. Kang(2018)은 이러한 제약 사항에 대한 대안으로 유한요소해석 기법을 이용한 HL 식별 방법론을 제안하였으나, HL 이상인 초고속 제트의 영역을 식별하는 과정만을 다루었을 뿐, 그 SCJ의 관통량 예측결과를 hydrodynamic 이론과 비교하였을 때 여정합성을 확보하는 과정은 다루지 않았다.

이 논문은 HL 이상인 SCJ의 hydrodynamic 이론의 적용에 대한 고려사항에 대해서 다루었다. 이를 위해 SCJ의 입사속도와 관통물 사이의 효율성을 살펴보고, SCJ의 우수한 관통력을 hydrodynamic 이론으로 다루기 위해 고려해야 할 제트 연장의 효과에 대해서 다루었다. 이를 통하여 SCJ의 관통현상을 유한요소 해석을 통해 예측할 때, 제트 속도 분포 및 연장량을 고려하여야만 hydrodynamic 이론과 보다 잘 일치하는 관통해석 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 유한요소해석 모델 개발

Fig. 1과 같이 Bolstad(1992)의 연구를 통해 알려진 US Army Ballistic Research Laboratory(BRL)의 81mm

Fig. 1 Geometry and finite element modeling of BRL 81 mm shaped charge warhead and target

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

	ρ kg/m ³	D m/s	P_{CJ} GPa	A GPa	B GPa	R_1 -	R_2 -	w -	E J/m ³
OCTOL	1,821	8,480	34.3	748.6	13.38	4.50	1.00	0.38	5.27E9
JWL: $p = A \left(1 - \frac{w}{R_1 v} \right) e^{-R_1 v} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 v} \right) e^{-R_2 v} + \frac{w E}{v}$, $v = \frac{\rho_0}{\rho}$									

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

	ρ kg/m ³	A_0 GPa	B_0 GPa	n -	C_0 -	M -	T_m K	C m/s	S_1 -	γ_0 -
OFHC	8,960	0.092	0.292	0.310	0.025	1.09	1,356	3,940	1.489	2.02
Aluminum	2,810	0.052	0.477	0.520	0.0025	1.61	893	4,596	1.49	2.17
Target(AISI 4340)	7,850	0.553	0.6008	0.234	0.013	1.00	1,733	4,570	1.49	1.954
Target(AISI 1045)	7,850	0.792	0.51	0.260	0.014	1.03	1,793	3,935	1.578	1.69
Johnson-Cook: $\sigma_y = (A_0 + B_0 \epsilon_p^n) \left(1 + C_0 \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\epsilon_0} \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right)$, Mie-Grüneisen: $p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left\{ 1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu \right\}}{\{ 1 - (S_1 - 1) \mu \}}$, $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$

Fig. 2 Penetration process of BRL 81mm shaped charge jet for AISI 4340 target

성형작약탄두의 제원을 이용하여 유한요소해석 모델을 개발하였다. 이 성형작약탄두의 세부 제원과 물성 데이터를 Table 1과 2에 나타내었다. 해석은 LS-DYNA 971 R8의 Eulerian 요소를 이용해 수행되었다. 원통형 탄두 형상을 고려하여 축대칭 요소를 사용하였다. 제트가 형성되고 관통이 이루어지는 중심축 주변의 요소 크기를 1.0mm로 설정하였고, 반경 방향 좌표가 증가함에 따라 점차 큰 요소가 분포하도록 하였다. 중심축 주변의 요소 크기별로 수렴성을 비교한 Kang(2018)은 이

영역이 0.5mm 크기로 모델링될 경우 가장 효율적임을 보인바 있다. 본 연구는 이 영역의 요소 크기를 보다 크게 설정한 대신, time step을 solver가 자동으로 계산한 최소의 time step의 0.1배인 time step이 적용되도록 하였다.

표적-탄두 사이 이격 거리(stand off distance, SD)를 2 CD(charge diameter, 1 CD=81mm)로 설정하였다. 이와 같이 형성된 제트가 AISI 4340 표적을 관통하는 과정을 Fig. 2에 나타내었다. 해석을 통해 얻은 최종 관통 깊이는 4.77 CD로 DiPersio(1965)의 시험결과인 4.6~4.9CD의 범위 내에 들었다. 표적 관통 직전까지 형성된 SCJ의 최대 속도는 7.96 km/s로 Bolstad(1992)의 연구 결과(8.3km/s) 대비 약 3.98%의 차이를 보였다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 해석 모델은 최종 관통량과 관통 직전 첨단부의 최대 속도의 측면에서 이전의 동일 탄두에 대한 이전 연구들과 비교하여 신뢰성을 확보하였다.

2.2 Hydrodynamic limit(HL) 속도 범위 식별

HL 이상인 제트에 의한 관통 현상을 조사하기 위하여 Kang(2018)의 방법론을 도입하였다. 이 방법론은 동일한 성형작약 탄두가 밀도는 같지만 강도가 다른 두 표적(AISI 1045, AISI 4340)을 각각 관통하는 상황을 비교한다. 먼저, SCJ 전반부의 HL 이상인 제트의 관통량은 밀도의 비 γ 의 영향을 받고 강도의 영향을 받지 않으므로 밀도가 같은 두 표적은 동일한 양만큼 관통된다. 하지만, HL 이후의 관통량은 강도의 영향을 크게 받으므로, 강도가 다른 두 표적 사이의 관통량에는 차이가 발생한다. Hydrodynamic 이론이 초고속 관통현상을 밀도의 비 γ 에 의해 기술하므로 이 차이가 발생하는 시점을 HL이라 식별한다.

Fig. 3 Comparison of penetration depth between AISI 1045 and AISI 4340 targets

Table 3 SCJ incidence velocity, increase of penetration and jet element length compared with time, AISI 1045 target

Time μs	V km/s	ΔP mm	ΔL mm	ζ_i -
0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	6.26	0.00	0.00	0.00
20	8.05	0.00	0.00	0.00
30	8.03	0.00	0.00	0.00
40	7.99	0.00	0.00	0.00
43	7.97	0.00	0.00	0.00
44	7.96	0.50	2.00	4.00
50	7.41	22.00	23.00	0.09
60	6.57	33.00	34.00	0.70
70	5.86	30.00	33.00	1.13
80	5.25	26.00	30.00	1.27
90	4.83	24.00	29.00	1.25
100	4.48	22.00	27.00	1.32
110	4.19	20.00	27.00	1.35
117	4.02	13.00	19.00	2.08
118	3.99	2.00	5.00	9.50
120	3.95	3.00	7.00	1.67
130	3.73	17.00	25.00	0.41
140	3.53	16.00	25.00	1.56
150	3.36	15.00	25.00	1.67
160	3.21	14.00	24.00	1.79
170	3.05	13.00	25.00	1.85
180	2.92	12.00	28.00	2.08
190	2.76	12.00	33.00	2.33
200	2.66	10.00	34.00	3.30
210	2.58	10.00	30.00	3.40
220	2.49	10.00	31.00	3.00
230	2.35	10.00	40.00	3.10
240	2.29	8.00	34.00	5.00
250	2.21	8.00	33.00	4.25
260	2.15	8.00	34.00	4.13
270	2.07	7.00	36.00	4.86
280	1.98	6.00	37.00	6.00
290	1.91	6.00	37.00	6.17
300	1.81	5.00	45.00	7.40
310	1.72	5.00	51.00	9.00
320	1.67	4.00	45.00	12.75
330	1.62	4.00	39.00	11.25
340	1.57	3.00	42.00	13.00

Table 4 SCJ incidence velocity, increase of penetration and jet element length compared with time, AISI 4340 target

Time μs	V km/s	ΔP mm	ΔL mm	ζ_i -
0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	6.26	0.00	0.00	0.00
20	8.05	0.00	0.00	0.00
30	8.03	0.00	0.00	0.00
40	7.99	0.00	0.00	0.00
43	7.97	0.00	0.00	0.00
44	7.96	0.50	2.00	4.00
50	7.41	22.00	28.00	1.27
60	6.56	33.00	34.00	1.03
70	5.85	30.00	32.00	1.07
80	5.24	26.00	30.00	1.15
90	4.81	23.00	29.00	1.26
100	4.47	22.00	27.00	1.23
110	4.18	19.00	27.00	1.42
117	4.02	11.00	17.00	1.55
118	4.00	2.00	4.00	2.00
120	3.93	5.00	1.00	0.20
130	3.71	19.00	25.00	1.32
140	3.51	15.00	25.00	1.67
150	3.33	15.00	25.00	1.67
160	3.13	13.00	31.00	2.38
170	2.99	13.00	31.00	2.38
180	2.81	12.00	39.00	3.25
190	2.71	11.00	37.00	3.36
200	2.61	10.00	36.00	3.60
210	2.53	9.00	30.00	3.33
220	2.44	10.00	32.00	3.20
230	2.25	8.00	53.00	6.63
240	2.18	8.00	47.00	5.88
250	2.12	7.00	38.00	5.43
260	2.06	6.00	36.00	6.00
270	1.98	6.00	38.00	6.33
280	1.85	5.00	47.00	9.40
290	1.73	5.00	70.00	14.00
300	1.69	4.00	42.00	10.50
310	1.62	4.00	44.00	11.00
320	1.56	2.00	41.00	20.50
330	1.49	2.00	43.00	21.50
340	1.42	2.00	42.00	21.00

이 방법론을 본 연구의 성형작약탄두 해석모델에 적용한 결과를 Fig. 3에 정리하였다. SCJ가 표적에 최초로 입사하는 시점은 $44\mu\text{s}$ 였다(Fig. 2(b), Fig. 3(a)). 이후 AISI 1045와 AISI 4340 두 표적의 관통량 증가 및 입사 제트 속도 변화는 $117\mu\text{s}$ 까지는 거의 동일하였다(Fig. 3(a), Table 3, 4). 하지만 이후로, 입사속도 V 가 4.0km/s 미만인 제트가 입사되면서 부터 두 표적의 관통량 증분에 차이가 발생하기 시작하

였다(Fig. 3(b), Table 3, 4). 이 시점까지의 관통량(P_{HL})은 AISI 1045 표적에서 $2.35\text{CD}(190.5\text{mm})$, AISI 4340 표적에서 $2.30\text{CD}(186.5\text{mm})$ 로 유사하였다(평균 2.33CD). 하지만, 최종 관통량(P_{total})은 AISI 1045 표적에서 $5.11\text{CD}(414\text{mm})$, AISI 4340 표적에서 $4.77\text{CD}(386.5\text{mm})$ 였다.

두 강도가 다른 두 표적에서 발생된 최종 관통량의 차이가 28mm 로, 전체 관통량과 비교할 때 적은 수준이지만, HL 이

전과 이후의 관통현상을 지배하는 주요 인자가 각각, 밀도와 강도라는 점을 구별할 수 있는 점에서 이 구분 방법은 물리적인 의미를 갖는다.

해석결과로 식별된 HL 이상인 SCJ의 길이 L_{HL} 를 hydrodynamic 이론에 적용해 계산된 관통량(P_{HL}^*)을 산출하여 보았다. 반대로, 해석 결과로부터 얻은 P_{HL} 을 얻는데 필요한 SCJ의 길이(L_{HL}^*)도 hydrodynamic 이론에 계산하여 비교해 보았다. Fig. 2(e)에 나타낸 바와 같이 관통 직전까지 형성된 SCJ에서 $L_{HL}=1.41CD(114.5mm)$ 였다. 라이너와 표적 간의 밀도의 비는 $\gamma=(\rho_j/\rho_t)^{1/2}=1.07$ 이므로, 이를 hydrodynamic 이론에 적용하여 계산된 관통량은 $P_{HL}^*=(1.07)\times(1.41CD)=1.51CD$ 이다. 이는 해석 결과의 P_{HL} 보다 0.81CD 적은 결과이다. 이와는 반대로 해석을 통해 얻은 관통량 P_{HL} 과 밀도의 비 γ 를 통해 필요한 이론적 제트의 길이는 $L_{HL}^*=(2.30CD)/(1.07)=2.15CD$ 이다. 이는 입사 전 측정된 HL 이상인 제트의 길이에 비해 0.94CD 더 긴 결과이다.

이와 같이 표적 입사 전의 제트의 길이를 이용해 계산한 관통량은 해석 결과와 큰 차이를 보였다.

2.3 제트 입사속도 효율 분석

유한요소해석을 통해 관통량 증분, 입사 제트 속도와 관통률의 물리량을 얻을 수 있었다. 하지만 앞 절에 보인 hydrodynamic 이론에 의한 관통량 계산이 유한요소해석 결과와는 큰 차이를 보였다. 본 절은 유한요소해석을 통해 얻은 시간별 관통량 증분을 분석하여 제트 입사 속도의 효율의 분석을 다룬다.

먼저, 시간 구간 $\Delta t_i (=t_i - t_{i-1})$ 사이의 유한요소 해석 결과의 관통량 증분과 제트 소모량을 각각, $\Delta P_i (=P_i - P_{i-1})$ 와 $\Delta L_i (=L_i - L_{i-1})$ 로 정의한다. 여기서, 하첨자는 관통이 이루어진 시점을 의미한다. 시간 t_i 에서 관통률 U_i^* 는 다음과 같다.

$$U_i^* = \frac{\Delta P_i}{\Delta t_i} \quad (4)$$

Fig. 4 Comparisons of U, U*, V, V* for AISI 1045, AISI 4340 targets and jet incidence velocity efficiencies

위첨자 '*'는 유한요소 해석을 통해 얻은 물리량을 이용한 이론적 계산값을 의미한다.

식 (4)를 식 (2)에 대입하여 정리하면 관통량 증분에 해당하는 hydrodynamic 이론에 상응하는 제트 입사속도 V_i^* 를 계산할 수 있다.

$$V_i^* = U_i^* \left\{ 1 + \left(\frac{\rho_i}{\rho_j} \right)^{1/2} \right\} = \frac{P_i - P_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 유한요소 해석 결과의 U_i , V_i 와 비교하면, hydrodynamic 이론상의 물리량과 유한요소 해석 결과의 물리량 사이의 효율을 구할 수 있다.

$$\eta_i^U = \frac{U_i^*}{U_i} \quad (6)$$

$$\eta_i^V = \frac{V_i^*}{V_i} \quad (7)$$

$\eta_i^V < 1.0$ 이면, 유한요소 해석 결과로 얻은 제트 입사 속도 값이 hydrodynamic 이론상의 계산 값에 비해 과다함을 의미한다. 즉, 입사 제트의 속도가 높음에도 불구하고, 그 관통량 증분은 이론적 계산 값에 미치지 못함을 의미한다.

Fig. 4(a)~(b)에 U_i^* , U_i 와 V_i^* , V_i 를 표적 소재별로 비교하였다. 관통량 증분을 통해 직접 계산된 U_i^* 는 U_i 와 전 시간에 걸쳐 잘 일치하였다. 하지만, V_i^* , V_i 의 비교는 HL 제트 영역이 모두 소진된 117 μ s 이후 큰 차이가 생기기 시작했다.

η_i^V 를 강도가 다른 두 표적에 대해 비교한 결과를 Fig. 4(c)에 나타내었다. P_{HL} (186.5mm)에 이르기 전까지는 효율의 저하가 완만했던 것에 비해 P_{HL} 를 넘어선 후 급격히 저하되었다. 특히, P_{HL} 이후 AISI 1045 표적이 AISI 4340 표적에 비해 완만히 감소하였다. 이는 HL 이후로는 표적 강도의 영향이 크게 작용

하여 강도가 큰 AISI 4340 표적에서 더 큰 효율 감소가 일어났기 때문이다.

η_i^V 는 관통 전 과정에 걸쳐 1 미만이었는데, HL이상인 고속 제트일지라도, 속도가 낮아짐에 따라 효율도 조금씩 낮아지는 결과를 보였다. 이는 유한요소해석 결과의 SCJ의 입사속도가 발생된 관통량 증가에 필요한 이론적 속도보다 높음을 의미한다.

하지만, 주의 깊게 살펴봐야 할 점은 해석 결과의 제트 입사 속도 효율이 낮음에도 불구하고 해석 결과의 P_{HL} 은 이론상의 계산치 P_{HL}^* 에 비해 높은 점이다. 이점에 대해서는 이어지는 절의 제트 소모량과 관통량에 대한 비교를 통하여 살펴보고자 한다.

2.4 관통량 증분과 소모 제트량 사이의 효율 분석

Hydrodynamic 이론은 관통자가 표적에 입사 하기 전의 길이를 관통량을 결정하는 중요한 인자로 다룬다. 따라서, 속도 분포가 일정하지 않은 SCJ의 시간 별 입사 제트의 길이는 관통량 분석에 중요한 인자이다.

SCJ는 첨단부에서 최대이며 이후로 감소하는 속도 분포를 갖는다. 위치에 따라 변화하는 속도 분포에 의해 SCJ의 각 부분 별 제트 요소들은 관통으로 소모되어 버리기 전까지 시간의 경과에 따라 연장된다. 이에 대한 도식적 예시를 Fig. 5에 나타내었다. 시간 $t=44\mu$ s일 때, AISI 1045 표적에 아직 도달하지 않은 속도 범위 4.857~4.484km/s인 SCJ의 부분 요소 A 를 고려하기로 한다. 이 시점의 부분 요소 A 의 길이는 $\Delta L_t^A = 9\text{mm}$ 로 표현된다. $t=90\mu$ s일 때, A 가 입사점에 도달하였다. 이때의 길이는 $\Delta L_t^A = 29\text{mm}$ 로 20mm 연장되었다. $t=100\mu$ s에 A 는 완전히 소모되었다. A 가 소모되면서 표적에 생긴 관통량 증분은 24mm였다.

Table 3, 4에 유한요소 해석 결과의 표적 입사 속도와 관통량 증분을 시간 간격 10 μ s 마다, 그리고 HL 시점 전후로 정리하였다. SCJ의 모든 입자가 등속도 운동을 한다고 가정할 때,

Fig. 5 Schematic representation for extension of jet length at incidence

시간 t_i, t_{i+1} 일 때 표적에 입사하는 제트의 속도는 각각 V_i, V_{i+1} 이다. 따라서, 시간 $t_i \sim t_{i+1}$ 동안 소모된 제트의 길이 ΔL_i 는 t_i 시점일 때의 입사속도 V_i, V_{i+1} 인 제트의 상대 위치이다. 동일한 방법으로, 시간 $t_i \sim t_{i+1}$ 동안의 관통량 증분 ΔP_i 는 t_i 시점에서의 입사점과 t_{i+1} 시점에서의 입사점 사이의 상대 위치이다.

입사 제트의 소모량과 관통량 증가에 대한 비율을 다음과 같이 정의 하였다.

$$\zeta_i = \frac{\Delta L_i}{\Delta P_i} \quad (8)$$

ζ_i 는 $1/\gamma=0.93$ 와 같은 값일 때, hydrodynamic 이론에 일치한다. $\zeta_i \gg 1/\gamma$ 인 경우는 소모된 제트 길이에 비해 관통량 증분이 매우 적은 경우를 의미한다.

Fig. 6에 Table 3, 4의 AISI 1045, AISI 4340 표적에 대한 ζ_i 의 변화를 나타내었다. P_{HL} 에 이르기 전까지의 ζ_i 는 1.0 으로부터 표적 소재에 따라 1.3~1.5 수준까지 증가하였다. 이어지는 P_{HL} 이후의 관통 현상에서는 ζ_i 가 점차 크게 증가하였다. 이는 Table 3, 4에서 볼 수 있듯, HL 이후의 입사 제트의 길이 ΔL_i 는 이전의 것에 비해 짧지 않음에도 관통량 증분 ΔP_i 는 점차 적었기 때문이다. 즉, 표적 강도의 영향에 의한 관통 저항력이 커짐에 따라 소모량 대비 관통량 증가가 감소했기 때문이다.

HL 이상인 제트의 총 소모량을 계산하면, 약 2.46 CD (=199mm)에 이른다. 2.2절에 언급한 입사 전 형성된 HL 이상인 SCJ 영역의 길이가 1.41CD에 비해서는 소모량이 크게 늘어난 것을 알 수 있다. 그리고 hydrodynamic 이론에 이 제트 소모량을 적용하여 관통량을 계산한 결과, $1.07 \times 2.46CD = 2.63CD$ 로 해석결과로 얻은 P_{HL} 인 인 2.33CD 보다 0.13CD

Fig. 6 Comparison of ζ for AISI 1045, AISI 4340 targets

가량 더 길었다. 특히, 표적에 최초 입사하기 전의 길이를 바로 hydrodynamic 이론에 적용한 결과에 비해 더 유사한 결과를 보였다. 즉, hydrodynamic 이론을 SCJ의 관통현상에 적용하기 위해서는 SCJ의 부분 요소의 시간에 따른 연장량을 반드시 고려해야함을 의미한다.

또한, 이상의 논의로부터 발견할 수 있는 점은, HL 이상인 제트에 대하여, 앞선 제트의 소모로 만들어진 crater 깊이는 후속 제트가 연장될 수 있는 공간의 역할을 하는 것으로 판단된다. 아직 소모되지 않은 SCJ 요소가 공간을 이동하는 동안 더 연장 되면서 보다 큰 관통력을 얻을 수 있기 때문이다. 이는 SCJ의 관통량이 탄두-표적 사이 이격거리가 적절히 멀 때 증가하는 것과 일치하는 결과이다.

따라서, 성형작약탄두의 보다 큰 관통량을 얻기 위해서는 제트 첨단부의 속도를 향상시킬 수 있는 설계가 필요하다. Fedorov(2015)와 Kang(2018)은 라이너 정점부가 얇아질 수록 첨단부 속도가 증가함을 보인바 있다.

3. 결 론

본 연구는 SCJ의 입사속도 및 길이 연장효과가 표적 관통 현상에 미치는 영향을 다루었다. 유한요소 해석을 통해 예측된 시간에 따른 관통량 증분을 hydrodynamic 이론에 적용하여 제트 입사 속도의 효율을 분석한 결과, HL 이상의 초고속 제트 영역일지라도 속도 감소에 따라 완만한 효율의 감소가 발생한 반면, HL 이하의 제트에 대해서는 급격한 감소가 있음을 확인하였다. 특히, AISI 1045 와 AISI 4340 표적에 대한 관통량 비교를 통해 HL 이전 제트의 효율 감소는 표적의 강도 차이에 큰 영향을 받지 않은 반면, HL 이후로는 강도가 큰 표적에서 더 급격한 감소가 발생하였다.

또한, 표적에 입사하기 직전의 HL 이상인 제트의 길이를 hydrodynamic 이론에 적용한 경우 유한요소 해석으로 예측된 해당 제트의 관통량 P_{HL} 에 크게 못 미쳤다. 하지만, 속도 구배에 의해 연장된 제트 길이와 관통 깊이 증분을 매 시간 별로 hydrodynamic 이론에 적용하여 누적한 경우 유한요소 해석을 통해 예측한 P_{HL} 과 비교적 잘 일치하였다. 그리고 앞선 제트에 의해 표적에 형성된 crater는 후속 제트의 길이 연장이 이루어질 수 있는 공간으로서의 역할을 함으로써 보다 많은 관통량 증가에 기여하는 것으로 나타났다.

References

Abrahamson, G.R., Goodier, J.N. (1963) Penetration by Shaped Charge Jets of Nonuniform Velocity,

- J. Appl. Phys.*, 34(1), pp.195~199.
- 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.
- Fedorov, S.V., Bayanova, Y.M., Ladov, S.V.** (2015) Numerical Analysis of the Effect of the Geometric Parameters of a Combined Shaped-charge Liner on the Mass and Velocity of Explosively Formed Compact Elements, *Combust., Explos., & Shock Waves*, 51(1), pp.130~142.
- 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. J. 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.

요 지

본 논문은 Shaped charge jet(SCJ)의 관통 과정을 유한요소해석을 통해 모사하여 제트 입사속도, 관통률 그리고 관통량 증분과 같은 물리량들을 획득하였다. 이 물리량들을 hydrodynamic 이론에 적용하여 입사 제트 속도의 효율을 분석한 결과, 입사 속도가 빠른 제트의 관통 효율은 이어지는 느린 제트에 비해 높은 것을 확인하였다. 이 효율은 hydrodynamic limit (HL) 미만인 제트인 경우 큰 폭으로 감소하였다. 한편, 시간에 따른 관통량 증분과 제트 소모량의 비교는 SCJ의 이론적인 관통현상 분석을 위해서는 길이 연장 효과를 고려해야함을 보였다.

핵심용어 : 성형작약탄두, 제트, 유한요소법, hydrodynamic 이론, hydrodynamic limit, 표적, 관통, 효율