

이중층 라이너에서 폭발 재료 분포에 따른 변형 특성 수치해석

문상호¹⁾ · 김시조^{*,1)} · 이창희²⁾ · 이 성³⁾

¹⁾ 안동대학교 기계설계공학과

²⁾ 한양대학교 신소재공학부

³⁾ 국방과학연구소 제4기술연구본부

Numerical Analysis of Deformation Characteristics in the Double-Layer Liner According to Explosive Material Distribution

Sang Ho Mun¹⁾ · See Jo Kim^{*,1)} · Chang Hee Lee²⁾ · Seong Lee³⁾

¹⁾ Department of Mechanical Design Engineering, Andong National University, Korea

²⁾ Division of Materials Science & Engineering, College of Engineering, Hanyang University, Korea

³⁾ The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 7 September 2015 / Revised 29 April 2016 / Accepted 19 August 2016)

ABSTRACT

The development of new concepts of liners is required in order to effectively neutralize the enemy's attack power concealed in the armored vehicles. A multiple-layer liner is one of possibilities and has a mechanism for explosion after penetrating the target which is known as "Behind Armor Effect." The multiple-layer explosive liner should have sufficient kinetic energy to penetrate the protective structure and explosive material react after target penetration. With this in mind, double-layer liner materials were obtained by cold spray coating methods and these material properties were experimentally characterized and used in this simulation for double-layer liners. In this study, numerical simulations in the three different layer types, i.e., single, A/B, A/B/A in terms of the layer location were verified in terms of finite element mesh sizes and numerical results for the jet tip velocity, kinetic energy, and the corresponding jet deformation characteristics were analysed in detail depending on the structure of layer types.

Key Words : Double-Layer Liner(이중층 라이너), Explosive Material(폭발성 재료), Numerical Analysis(수치해석), Jet Velocity(제트 속도), Deformation Characteristics(변형 특성)

1. 서론

성형작약탄은 신관, 화약 및 원추형의 라이너로 구성되어 있는 탄으로 작동 원리는 다음과 같다. 화약이 먼저 폭발하고, 폭발 압력이 원추형의 라이너에 전달되어 라이너가 성형작약탄의 중심축을 따라 일직선으

* Corresponding author, E-mail: sjkim1@andong.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

로 붕괴되면서, 고속의 금속 제트(jet)를 형성한다. 이 제트는 매우 빠른 속도로 목표물을 관통하게 된다. 성형작약탄은 세계 2차 대전을 통해 출현하여 고정 및 기동하는 목표물을 제압하는 강력한 탄체계로 발달되어졌으며, 오늘날 전 세계적으로 매우 다양한 종류의 탄종들이 개발되어져 있다. 최근까지 성형작약탄은 중장갑 전차를 목표로 장갑을 얼마나 뚫는가 하는, 즉, 관통력 관점에서 개발되어져 오고 있다. 그러나 최근 전장은 도심으로 한정되거나 국지전이 되면서 강력한 방호력을 앞세운 전차보다는 기동성이 우수한 경장갑 차량이 운용되고 있고, 병사들은 도심에 밀집해 있는 건물과 같은 인공 방호물에 얽매하여 전투를 수행하고 있다. 이러한 적들을 효과적으로 제압하기 위해서 관통 후 효과 증대에 대한 개발 관점이 추가되고 있다. 미국 등 선진국을 중심으로 빌딩이나 다리와 같은 콘크리트 구조물에 얽매하여 있는 적을 효과적으로 제압하기 위해 기존 구리 라이너 재료 대신 알루미늄과 같은 폭발성이 강한 라이너 재료를 활용하는 연구들이 보고되고 있다. 본 연구에서는 일정 두께를 관통한 후 폭발을 유도할 수 있는 폭발형 라이너의 개념 연구를 시도하고자 한다. 라이너 재료가 일정 두께를 관통한 후 뒤이은 폭발형 라이너 재료가 목표물내로 침입하면서 폭발하는 이중층 라이너 형상을 목표로 하였다. 이중층 라이너는 기존에 관통을 위해 사용하는 단층 구리 라이너 재료 일부분을 줄이고 폭발성 재료를 위치시켜 두 개의 재료로 하나의 라이너를 만들게 된다. 여기서 하나의 재료는 타겟을 관통하는 역할을 수행하며 다른 하나의 재료는 관통 후 내부에서 폭발하는 역할을 수행한다. 관통 후 폭발하는 메커니즘을 가지는 이중층 라이너를 만들기 위해서는 초기 재료 배열이 중요하다. 제트의 선단(jet tip) 부분에 폭발성 재료가 위치하게 되면 타겟에 대한 관통성능은 떨어지게 된다. 그리고 타겟 관통 이전에 폭발이 일어나기 때문에 관통 후 폭발하는 메커니즘을 만들 수 없게 된다. Walters는 구리(copper)와 니켈(nickel) 재료의 이중 접합 라이너를 사용하여 제트로 변형 후 라이너 각 부분의 질량이 어느 위치로 이동하는지 확인하였다^[1,2]. 또한 Hasenberg는 Fig. 1과 같이 분할 윤곽선(partition contour)을 기준으로 제트로 유입되는 라이너의 질량과 슬러그로 유입되는 라이너 질량으로 구분하였다^[3]. 그리고 Curtis은 구리와 알루미늄 배열의 라이너를 사용하여 라이너 변형에 따라서 압력 및 응력 분포를 확인하였다^[4].

이전 연구를 통해서 이중층 라이너의 재료(구리, 알루미늄)를 Fig. 2와 같이 분할 윤곽선을 기준으로 나누었다. 라이너에서 두 재료의 위치와 밀도에 따라서 제트 형상이 결정되므로 초기 라이너의 재료 배열이 중요하게 된다. 구리와 알루미늄 재료 배열에 따라서 Fig. 3과 같은 제트 형상이 생성되었다. 관통을 목적으로 하는 구리 재료가 제트의 선두에 오며 폭발을 목적으로 하는 알루미늄 재료가 뒤 따르는 메커니즘은 case3(알루미늄/구리) 평행한 라이너 배열이 가장 적절한 것으로 판단하였다^[5].

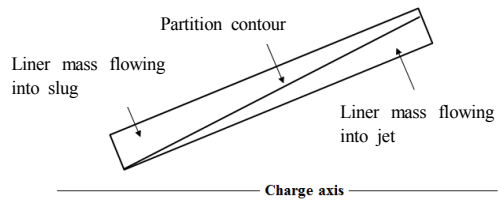


Fig. 1. Mass partition of a conical liner^[3]

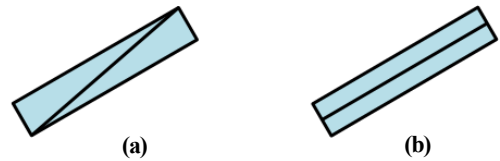


Fig. 2. Two type of double layered liner separated (a) diagonally and (b) horizontally^[5]

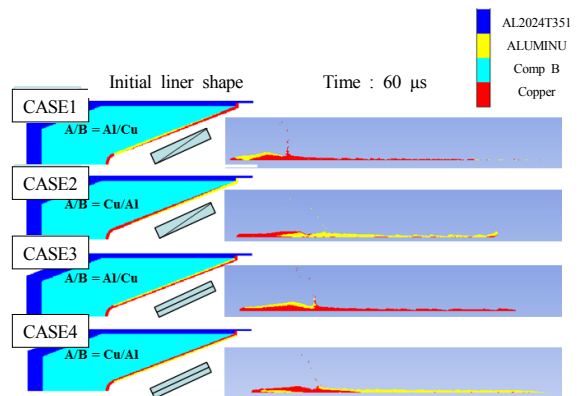


Fig. 3. Typical jet and slug formation patterns for four different cases at 60 μ s^[5]

본 연구에서는 이중층 라이너의 관통적인 측면에서

A/B, A/B/A 타입 이중층 라이너가 타겟을 관통하기에 충분한 에너지를 가지는지 확인 하고자 한다. 비교 수단으로 단층 구리 라이너를 사용하고자 한다. 단층 구리 라이너와 A/B, A/B/A 타입 이중층 라이너가 제트로 변형하는 과정에서 위치, 속도 및 운동에너지의 변화를 비교하고 이에 대한 변형특성을 분석한다. 전산 수치 해석은 상용프로그램 AUTODYN을 사용하였다.

2. 이중층 라이너 물질 충격 거동 모델링

2.1 라이너의 형상 및 경계조건

이중층 라이너는 기준에 관통을 위해 사용하는 라이너 재료에 폭발성 재료를 덧붙이는 개념의 라이너이다. 해석에 사용한 기본적인 단층 구리 라이너는 Fig. 4와 같은 모델을 사용하였다. 라이너의 직경(charge diameter)은 83.82 mm이며, 탄두 직경(warhead diameter)은 90.93 mm이다. 라이너의 두께(liner thickness)는 2.057 mm이며, 이중층 라이너에서 구리와 알루미늄 각 재료의 두께는 1.0285 mm이다. Fig. 5와 Fig. 6은 이중층 라이너의 A/B, A/B/A 타입의 기본적인 해석 형상이다. Fig. 5 A/B 타입 이중층 라이너 구조는 알루미늄 재료가 구리 재료 위에 있으며, Fig. 6 A/B/A 타입 이중층 라이너 구조는 알루미늄 재료가 구리 재료의 내부에 위치하고 있다.

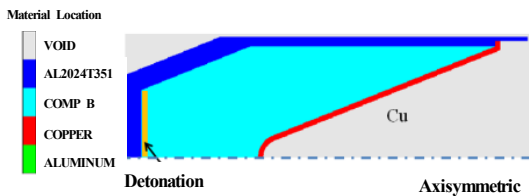


Fig. 4. Numerical simulation model of the single copper liner

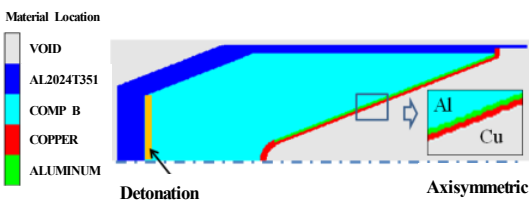


Fig. 5. Numerical simulation model of the A/B type two-layer liner

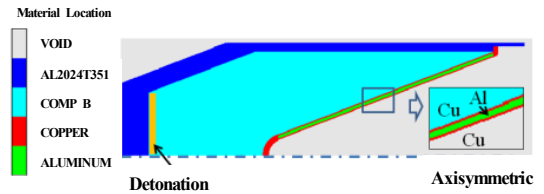


Fig. 6. Numerical simulation model of the A/B/A type three-layer liner

경계조건으로는 2차원 축대칭 모델을 해석에 사용하였으며, 대칭축을 제외한 나머지 부분에는 flow out 조건으로 재료가 해석 경계면으로부터 나갈 수 있도록 하였다. 그리고 1 mm당 요소(mesh)가 4개가 되도록(요소 크기 : 0.25 mm) 설정하여 요소의 밀도 및 개수를 결정하였다. 폭발지점은 단층 구리 라이너, A/B, A/B/A 이중층 라이너 모두 같은 곳에 위치하고 있으며 선(line)으로 폭약(explosive)의 좌측 끝단에 위치시켰다. 이중층 라이너 재료는 알루미늄과 구리를 사용하였으며, 폭약은 Composite B를 사용하였고, 케이스는 AL2024-T351를 사용하였다. 단층 구리 라이너와 A/B, A/B/A 타입 이중층 라이너는 같은 체적을 사용하였고, A/B 타입과 A/B/A 타입 이중층 라이너는 같은 질량의 구리와 알루미늄 재료를 사용하였다.

2.2 재료 모델

해석에서 폭약의 재료는 Composite B를 사용하였으며 재료모델은 JWL(Jones-Wilkins-Lee)을 사용하였고 식 (1)와 같이 표현된다.

$$P = A \left(1 - \frac{w}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{w e}{V} \quad (1)$$

여기서 V 는 비체적(specific volume), e 는 특정 내부 에너지(specific internal energy), A , B , C , R_1 , R_2 , w 는 일정한 매개변수(constant parameter)이다.

상태방정식(equation of state)은 shock 모델을 사용하였으며 방정식은 식 (2)와 같다.

$$P = P_H + \Gamma \rho (e - e_H) \quad (2)$$

여기서 Γ 는 Gruneisen 매개변수(parameter), ρ 는 밀도(density), e 는 내부에너지(internal energy)이다. 그리고 P_H 와 e_H 는 식 (3)과 식 (4)와 같다.

$$P_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{1 - (s - 1)\mu} \quad (3)$$

$$e_H = \frac{1}{2} \frac{P_H}{\rho_0} \left(\frac{\mu}{1 + \mu} \right) \quad (4)$$

강도모델(strength model)은 소성유동응력을 예측하기 위해 사용되고 있는 동적경화모델인 Johnson Cook 모델을 사용하였으며, 식 (5)와 같다.

$$\sigma_y = \left[A + B(\epsilon_p)^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (5)$$

이 식에서 A 는 항복 응력(yield stress), B 는 변형률 경화 상수(strain hardening constant), n 는 변형률 경화 지수(strain hardening exponent), C 는 변형률 속도 상수(strain rate constant), m 는 열 연화 지수(thermal softening exponent)이다. T 는 재료의 온도(material temperature), T_r 는 기준온도(reference temperature), T_m 는 재료의 용융점(melting point temperature)이다. $\dot{\epsilon}_p$ 는 실험 변형률 속도(test strain rate), $\dot{\epsilon}_0$ 는 기준 변형률 속도(reference strain rate)이다.

Table 1은 식 (1)에서 사용한 폭약의 매개변수 값을 보여주고 있다. Table 2는 식 (2)에 상태방정식 매개변수 값을 보여주고 있으며, Table 3은 식 (5)에 강도모델 매개변수 값을 보여주고 있다.

Table 1. JWL EOS of HE^[7]

Density (g/mm ³)	0.1717E-02	R1	4.20
A (MPa)	0.524E+06	R2	1.10
B (MPa)	0.767E+04	W	0.34
V _{CJ} (m/s)	0.798E+04	P _{CJ} (MPa)	0.295E+05

Table 3에서 수치해석에 사용한 알루미늄 재료의 매개변수들은 다음의 실험과정을 통해 얻었다. 저온 분사 코팅(kinetic spray coating)^[6]을 통해서 Fig. 7과 같은 알루미늄 입자를 적층시킨 재료를 얻었다. 알루미늄 적층 재료는, Fig. 8 (a)와 같이 적층된 재료를 가공하여 SHPB(split hopkinson pressure bar) 실험의 시편으로

사용하였으며, Fig. 8 (b)와 같이 가공하여 압축실험과 Gleeble 실험의 시편으로 사용하였다. 낮은 변형률 속도(10⁻³, 10⁻², 10⁻¹ s⁻¹)는 Instron 4485(Instron Corporation, Norwood, MA) 실험 장비를 사용하였으며, 중간 정도의 변형률 속도(1, 10 s⁻¹)는 Gleeble 실험 장비를 사용하였다. 그리고 높은 변형률 속도(1900, 3300 s⁻¹)는 SHPB 실험 장비를 사용하였다.

Table 2. Shock EOS parameters of three different materials

	Case	Liner	
Material	Al2024 T351	Copper	Aluminum
Density (g/mm ³)	0.278E-02	0.893E-02	0.271E-02
Γ	2.00	1.99	2.10
C1 (m/s)	0.532E+04	0.394E+04	0.538E+04
S1	1.338	1.489	1.337
T_r (K)	300.0	300.0	300.0
Specific heat (J/kg·K)	875.0	401.0	910.0

Table 3. Johnson-Cook models parameters for three different materials

	Case	Liner	
Material	Al2024 T351	Copper	Aluminum
Shear modulus (MPa)	0.276E+05	0.460E+05	0.233E+05
A (MPa)	0.265E+03	0.900E+02	0.221E+03
B (MPa)	0.426E+03	0.292E+03	0.798E+02
n	0.340	0.310	0.1953
C	0.015	0.025	0.0073
m	1.000	1.090	1.000
T_m (K)	775.0	1356.0	933.5
Ref. strain rate (1/s)	1.000	1.000	1900

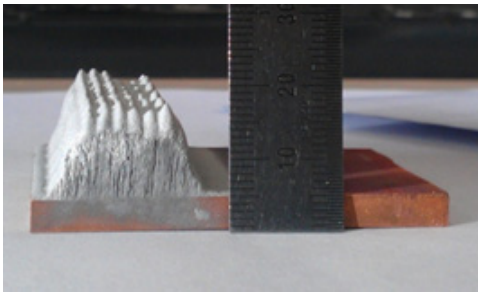


Fig. 7. Aluminum specimen generated by kinetic spray coating

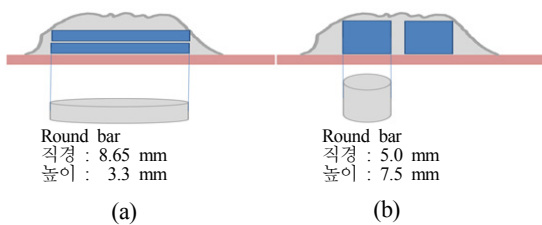


Fig. 8. Specimen dimension for (a) SHPB and for (b) compression and gleeble tests

각 실험을 통해 변형률 속도에 대한 유동응력 변화 곡선은 Fig. 9와 같다. 모든 응력 변형률 선도는 변형률 0에서부터 그래프가 시작하며 데이터 쉽게 비교하기 위해 변형률을 0.1씩 차이를 두어 가시화 하였다. 압축실험과 Gleeble 실험에서는 연화 현상이 나타났으며, SHPB 실험에서는 경화 현상이 나타났다.

여기서 변형률경화(strain hardening) 현상이 일어나는 SHPB 실험 장비는 Fig. 10과 같으며, Fig. 11은 SHPB 실험장비의 모식도를 보여주고 있다. SHPB 실험은 Kolsky가 제안한 탄성과 이론을 이용하였다. 시편에 응력파를 전파시켜 시편을 투과한 응력파의 크기를 이용하여 시편의 응력 및 변형률 관계를 얻어내는 방법을 사용하였다. 입력봉과 출력봉은 마레이징강(maraging steel)으로 직경은 20 mm이다. 각 봉에 strain gage를 부착하여 입력파, 반사파, 투과파의 시간에 대한 변화를 측정하였으며 이를 통해 얻은 데이터를 사용하여 응력-변형률 곡선 데이터를 얻었다. Johnson-Cook 모델 매개변수 도출방법은 다음과 같다. Johnson Cook 모델은 변형률연화(strain softening)를 피팅 하지 못한다. 따라서 Fig. 9의 실험 데이터에서 변형률경화에 해당하는 실험 데이터를 사용하여 탄성영역에 해당하는 기울기로부터 0.2 % offset 방법을 사용하여 탄

성영역의 실험 데이터를 제거한다. 재 가공된 실험데이터로부터 소성 변형률과 변형률 속도에 따른 응력의 관계식, 즉, Johnson Cook 모델의 4개의 파라미터를 비선형회귀분석으로 구하였다.

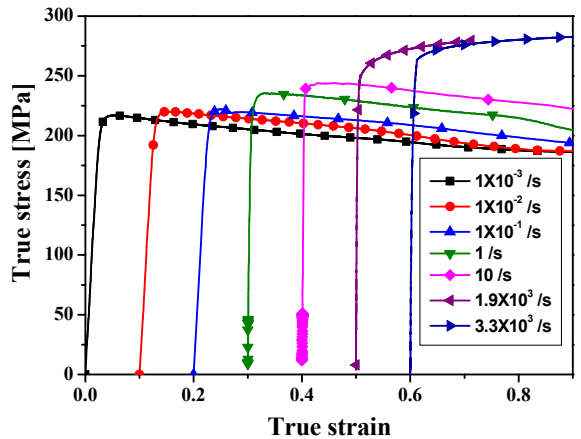


Fig. 9. True stress vs. true strain according to the strain rate

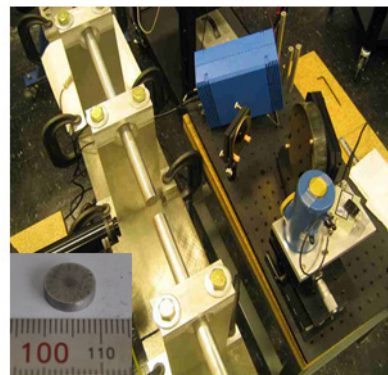


Fig. 10. SHPB test apparatus

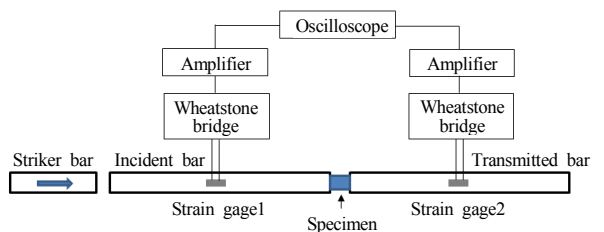


Fig. 11. Schematic diagram of split hopkinson pressure bar

3. 수치 결과 및 분석

3.1 라이너와 제트의 재료 위치 비교

제트의 유동과 변형 특성을 알아보기 위하여 라이너 재료의 유동 형태를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서와 같이 정체지점(stagnation point)을 중심으로 오른쪽으로 제트가 생성되며, 왼쪽으로는 슬러그(slug)가 생성된다. 이들과 관련된 식을 식 (6)에 나타내었다.

$$v_j = v_f + v_s \quad (6)$$

여기서 v_j 는 제트 속도(jet velocity)이며, v_f 는 유동 속도(flow velocity)이고, v_s 는 정체지점 속도(stagnation velocity)이다.

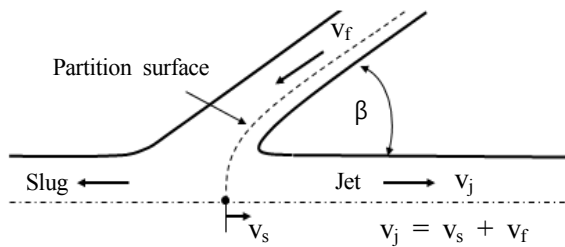


Fig. 12. Flow diagram of liner material^[3]

Fig. 13은 단층 구리 라이너의 시간 경과에 따른 변형 형상을 보여주고 있다. 시간 0 μ s에서는 초기 위치를 보여주고 있다. 시간 10 μ s에서는 Fig. 12에서 보여주는 것과 같이 재료의 정체지점(stagnation point)을 중심으로 오른쪽으로 제트가 생성되며, 왼쪽으로는 슬러그(slug)가 생성된다. 식 (6)에서 보여주는 것과 같이 제트 속도는 유동 속도와 정체지점 속도의 합으로 표현할 수 있다. 20, 30 μ s에서는 유동속도에 의해 라이너의 재료가 정체지점으로 계속 유입되며 제트와 슬러그는 더 크게 생성된다. 40 μ s에서 제트 영역의 재료는 진행방향으로 신장(extension)되며 슬러그는 제트의 진행방향으로 이동한다.

Fig. 14와 Fig. 15는 A/B 타입과 A/B/A 타입 이중층 라이너의 초기 형상과 시간 경과에 따라 생성된 제트에서 구리와 알루미늄 재료 위치를 보여주고 있다.

A/B 타입과 A/B/A 타입 이중층 라이너의 제트 생성 과정은 Fig. 13 단층 구리 라이너와 유사한 변형 거동을 보이고 있으며 알루미늄 재료의 위치는 다음과 같

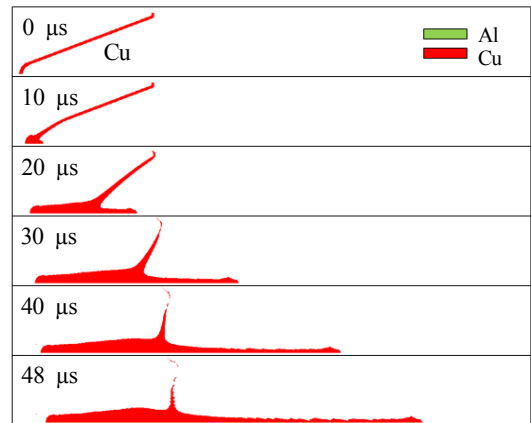


Fig. 13. Deformed shape of the single copper liner

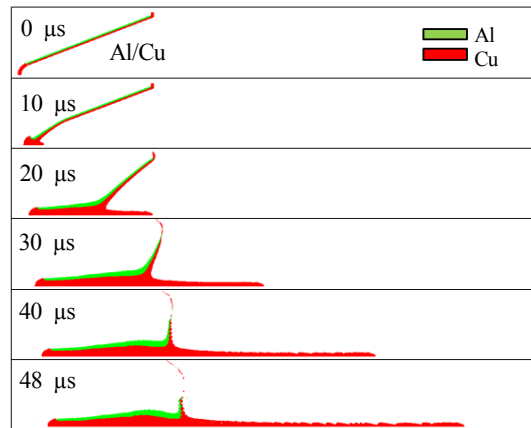


Fig. 14. Deformed shape of the A/B type

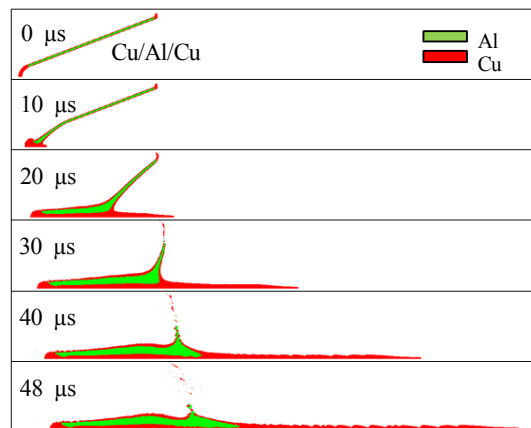


Fig. 15. Deformed shape of the A/B/A type

다. Fig. 14 A/B 타입에서 알루미늄 재료는 슬러그 부분에 위치하면서 구리를 감싸고 있는 형태를 보여주고 있다. Fig. 15 A/B/A 타입은 구리 재료 사이에 알루미늄 재료가 위치하여 구리 재료가 감싸고 있는 형태를 보여준다. 본 연구에서 이중층 라이너는 관통 후 폭발이 목적이므로 폭발성 재료의 위치가 중요하다. 라이너 재료 중 관통을 목적으로 하는 재료는 제트 선두부분에 위치하여야 하며, 폭발을 목적으로 하는 재료는 관통을 목적으로 하는 재료는 뒤에 위치하여야 한다. Fig. 14에서 시간 48 μ s 시점 제트 배열은, 관통을 목적으로 하는 구리 재료는 제트 부분에 위치하며 폭발을 목적으로 하는 알루미늄 재료는 슬러그 부분에 위치하는 것을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 15에서 시간 48 μ s 시점 제트 배열은, 관통을 목적으로 하는 구리 재료는 제트 부분에 위치하며 폭발을 목적으로 하는 알루미늄 재료는 제트 끝 부분과 슬러그 부분에 위치하는 것을 볼 수 있다. A/B 타입과 A/B/A 타입 이중층 라이너는 관통 후 폭발을 일으킬 수 있는 제트의 재료 배열을 생성한 것으로 볼 수 있다. 그리고 알루미늄 재료가 제트 상태에서 타겟을 통과하기 위해서는 제트의 반경방향 두께가 중요하게 된다. 제트 선두부분의 반경 방향 두께는, 단층 구리 라이너는 4.5 mm이며, A/B 타입 이중층 라이너는 3.0 mm이고, A/B/A 타입 이중층 라이너는 1.5 mm이다(선단 끝에서 10 mm까지 제트 길이 중 가장 큰 반경 크기).

타겟 홀(hole)의 직경과 관통자의 직경에 비례하게 되며 아래와 같이 표현할 수 있다⁸⁾.

$$D_T = d_P \frac{v}{v_T} \quad (7)$$

여기서 D_T 는 타겟 홀의 직경(hole diameter), d_P 는 관통자의 직경(projectile diameter), v 는 관통자의 속도(projectile velocity), v_T 는 특성 타겟 재료의 속도매개 변수(characteristic target velocity parameter)이다.

따라서 단층 구리 라이너는 선단 두께가 가장 커서 관통 후 홀 크기가 클 것으로 예상되며, A/B/A 타입 이중층 라이너는 선단 두께가 가장 작아서 관통 후 홀 크기는 가장 작을 것으로 예상된다. 알루미늄 재료가 반응을 하지 않은 상태에서 타겟을 통과하기 위해서는 A/B/A 타입보다 A/B 타입 이중층 라이너가 유리할 것으로 판단된다.

3.2 제트 선단의 속도 및 라이너 위치 비교

Fig. 16는 제트의 선단(tip) 부분의 진행 방향 속도를 시간 경과에 따라 보여주고 있다. A/B 타입 라이너의 선단 속도와 비교하여 A/B/A 타입의 라이너가 가장 높은 속도를 유지하고 있으며 단층 구리 라이너가 가장 낮은 속도를 보여주고 있다. 시간 48 μ s에서 A/B 타입 제트의 선단 속도는 7765 m/s이며, A/B/A 타입 제트의 선단 속도는 8331 m/s이다. 단층 구리 라이너의 선단 속도는 7179 m/s이다. A/B, A/B/A 타입 라이너는 단층 구리라이너 보다 높은 속도를 보이므로 관통에 필요한 충분한 속도를 가지고 있다고 판단된다.

해석모델의 유효성을 확보하기 위해 Bolstad와 Mandell⁹⁾의 연구를 기초로 하여 요소의 크기를 고려하여 해석한 결과를 비교하였다. Table 4는 시간 48 μ s 일 때 요소 크기(0.20 mm, 0.25 mm, 0.33 mm)에 따른 제트의 선단부분의 속도이다. 그리고 데이터를 선형 피팅하여 요소가 매우 작을 때 제트의 예상 선단 속도를 보여주고 있다. 구리 라이너는 요소의 크기가 작아지면 제트의 선단 속도가 증가하는 경향성을 보인다. 단층 구리라이너의 선형 피팅 값은 7647 m/s이며 Simon¹⁰⁾의 Composite B 폭약을 사용한 81.3 mm 라이너 실험에서 선단 속도 7700 m/s와 유사한 결과를 보여주고 있다. 이를 통해서 A/B 타입 라이너의 선단 속도는 8347 m/s, A/B/A 타입 라이너의 선단 속도는 8800 m/s로 예측할 수 있다.

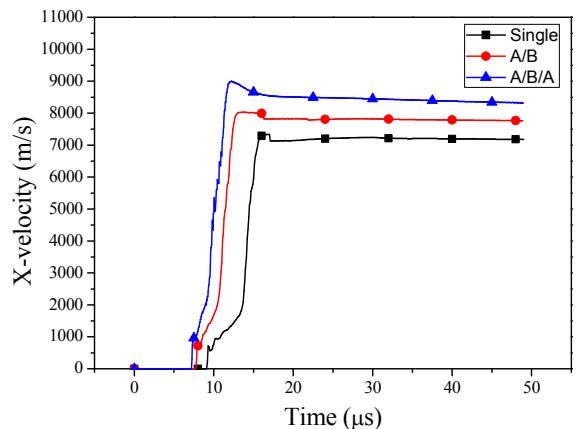


Fig. 16. Jet tip velocity as a function of time

Table 5는 작약 폭발 후 48 μ s 지난 시점에서 제트 선단과 끝부분의 위치를 비교한 것이다. Table 5를 보

면 제트의 선단(jet tip)과 슬러그 끝단(slug tail)의 총 길이는 단층 구리(Single), A/B A/B/A 순으로 증가하며 A/B/A 타입이 A/B 타입과 단층 구리 라이너와 비교하여 진행방향으로 가장 많이 이동하였음을 알 수 있다. 이는 Fig. 16에서도 알 수 있듯이 제트의 선단부분 속도가 단층 구리, A/B A/B/A 순으로 증가면서 폭발 에너지가 운동에너지로 비례하여 증가함을 예측할 수 있다.

Table 4. Numerical prediction of jet tip velocities depending on the mesh sizes for various multi-layer of liners

Mesh size	Jet tip velocity (m/s)		
	Single copper liner	A/B type liner	A/B/A type liner
0.20	7257	8068	8157
0.25	7179	7765	8331
0.33	7010	7803	7858
Linear fitting	7647	8347	8800

Table 5. Location of jet tip and slug tail at 48 μ s

	Jet tip (mm)	Slug tail (mm)	Length (mm)
Single	189.00	-76.75	265.75
A/B type	217.50	-74.50	292.00
A/B/A type	247.50	-73.75	321.25

단층 구리, A/B, A/B/A 타입 라이너에서 제트 내부의 전체적인 속도 분포를 확인하기 위해 제트 길이방향으로 20개의 구간(게이지 간격 단층 구리 : 13.285 mm, A/B 타입 : 14.60 mm, A/B/A 타입 : 16.06 mm)을 만들어 데이터 지점으로 사용하였으며 이를 관찰하였다. Fig. 17는 시간 48 μ s에서 제트 길이를 전체 길이로 나누어 전체 길이를 1로 무차원화 하여 제트의 길이 비를 정의 하였으며 이에 따른 속도분포를 보여주고 있다. 그래프에서 오른쪽은 제트 선단 부분이며 왼쪽은 슬러그 끝 부분이다. A/B/A 타입의 제트가 A/B 타입, 단층 구리 라이너 보다 더 높은 속도 분포를 보여주고 있다. 선단부분의 속도를 비교하면

A/B 타입은 7765 m/s이며, A/B/A 타입은 8331 m/s, 단층 라이너는 7179 m/s 이다. 그리고 슬러그의 속도는 A/B 타입은 513 m/s이며, A/B/A 타입은 515 m/s, 단층 라이너는 434 m/s 이다. Fig. 17에서 슬러그 부분은 거의 일정하므로 상대적으로 변형이 거의 없는 부분으로 이해할 수 있고 이 부분에서 3가지 타입의 경우 서로 변형이 거의 없는 유사한 변형 거동을 보이는 것을 예측할 수 있다. 하지만 무차원 길이가 0.3 이상에서는 슬러그에서 제트로 변형이 점점 증가되는 영역으로 점차 속도가 커지므로 제트 내부에서 상대적인 제트 변형이 크게 일어나는 부분으로 사료된다. 제트 선단에서 속도가 증가되면 가장 좋은 관통효과를 예상할 수 있지만 변형의 정도가 심하면 제트의 안정성에 문제가 발생 할 수 있게 된다. 단층 구리, A/B, A/B/A 타입 라이너의 경우 Fig. 13, 14, 15에 나타난 제트 변형 형상을 보면 제트 안정성에 문제가 없는 결과가 나올 수 있다.

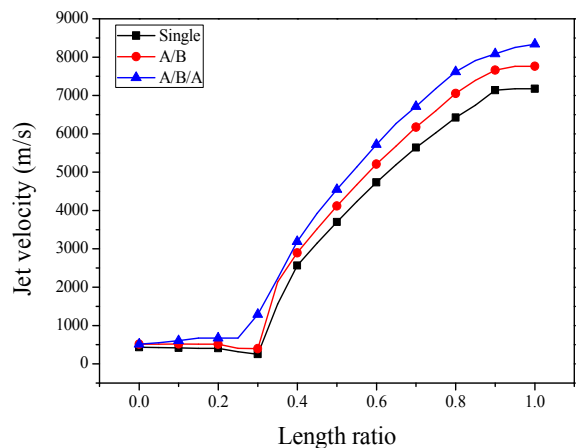


Fig. 17. Jet velocity distribution at 48 μ s

3.3 라이너 재료의 운동에너지 변화

Fig. 18은 시간 경과에 따른 단층 구리 라이너, A/B, A/B/A 이중층 라이너 형상에 대한 제트의 운동에너지 변화를 보여주고 있다. 운동에너지는 AUTODYN 프로그램에서 해석 영역에 있는 각 재료의 운동에너지를 시간 경과에 따라서 데이터를 얻었다. 여기서 식 (8)과 같이 단층 구리 라이너는 구리 재료만의 운동에너지를 보여주고 있으며, A/B와 A/B/A 이중층 라이너는 구리와 알루미늄 재료의 운동에너지 합을 나타낸다.

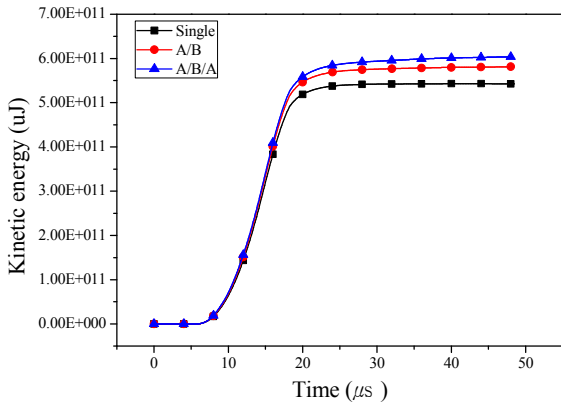


Fig. 18. Kinetic energy as a function of time for three different types, single, A/B, and A/B/A

$$K.E = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad (8)$$

여기서 m_i 와 v_i 는 각 재료의 질량과 속도를 나타내며 n 는 라이너 재료의 수이다.

작약 폭발 후 시간 7 μ s부터 폭발로 인한 높은 압력이 라이너에 전달되어 라이너 변형이 발생하기 시작하였으며 라이너의 운동에너지는 일정한 비율로 상승한다. 시간 20 μ s 지나면서 운동에너지 상승률은 감소하며, 시간 40 μ s 지나면서 일정하게 유지된다. 라이너의 운동에너지변화는 재료의 밀도변화도 영향을 받지만 대부분 재료의 속도변화에 의해서 결정된다. 시간 7 μ s부터 20 μ s까지는 Fig. 13에서 보여주는 것과 같이 작약의 폭발력으로 라이너가 소성변형을 하면서 원추형 중심으로 재료는 모이게 되고 제트 및 슬러그가 생성된다. 이때 라이너는 Fig. 12와 같이 라이너 변형으로 인해 발생하는 유동속도(v_f), 제트가 생성되면서 발생하는 제트속도(v_j), 슬러그 속도로 인해 운동에너지는 급격히 상승하게 된다. 40 μ s 이 후에는 유동속도(v_f)는 대부분 사라지며 제트속도(v_j)와 슬러그의 속도로 인해 운동에너지가 결정되며 일정하게 유지된다. 각 라이너의 운동에너지 최고값은 다음과 같다. A/B 타입 라이너는 5.811E11 μ J, A/B/A 타입 라이너는 6.034E11 μ J, 구리 단층 라이너는 5.425E11 μ J로 A/B/A 타입 라이너의 운동에너지가 가장 높은 것을 볼 수 있다. 그리고 운동에너지 최고값을 Table 4 결과와 같이 Bolstad와 Mandell⁹⁾의 연구를 기초로 요소 크기에 따른 결과를 선형 피팅하여 운동에너지

를 예측하였다. A/B 타입 라이너는 6.542E11 μ J, A/B/A 타입 라이너는 6.590E11 μ J, 구리 단층 라이너는 5.996E11 μ J이다. 이 결과들은 Fig. 16에 나타난 제트 선단에서의 속도 분포와 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 식 (8)와 같이 운동에너지는 속도의 제곱과 A/B A/B/A 각각의 재료 질량에 비례함을 유의하면 이 결과는 타당성이 있는 결과로 판단된다.

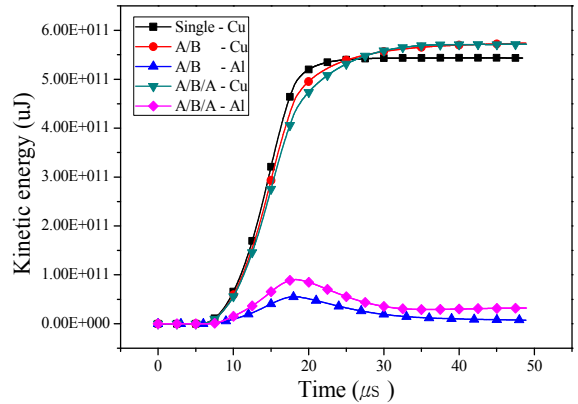


Fig. 19. Kinetic energy of 3 type liner of each materials

이를 조금 더 자세히 분석하기 위하여 A/B, A/B/A 타입 이중층 라이너 각 재료에 대한 운동에너지를 별도로 Fig. 19에 나타내었다. A/B 타입 라이너에서 구리 재료의 운동에너지는 5.738E11 μ J, 알루미늄의 운동에너지는 7.412E9 μ J이다. A/B/A 타입 라이너에서 구리 재료의 운동에너지는 5.716E11 μ J, 알루미늄 재료의 운동에너지는 3.213E10 μ J이다. 그리고 구리 단층 라이너의 운동에너지는 5.434E11 μ J이다. 구리 재료만 비교하면 A/B, A/B/A 타입 라이너가 비슷한 운동에너지를 가지고 있으며 단층 구리 라이너는 보다 낮은 운동에너지를 가지고 있다. 이중층 라이너는 알루미늄 재료가 차지하는 체적으로 인해 초기 단층 구리 라이너 재료의 질량보다 줄어들지만 보다 높은 운동에너지를 보여주고 있다. 알루미늄 재료의 운동에너지는 A/B/A 타입 라이너가 A/B 타입 라이너 보다 더 높은 것을 보여주고 있다. Fig. 19에서 보여주는 단층 구리 라이너와 이중층 라이너의 운동에너지 차이는 알루미늄 재료의 영향인 것을 알 수 있다. 제트에서 밀도가 일정하다고 가정한다면 운동에너지는 속도 크기에 따라서 결정된다. 그리고 제트 속도는 식 (6)와

같이 유동 속도와 정체지점 속도의 함으로 표현할 수 있다. 유동 속도는 라이너의 항복 강도와 관련이 있기 때문에 재료의 물성에 의해서 결정되며, 정체지점 속도는 폭약 종류에 의해서 결정된다. 단층 구리, A/B, A/B/A 라이너 모두 폭약을 동일한 종류로 같은 양을 사용하였으므로 운동에너지에 영향을 주는 요인은 유동 속도에 의한 것이며 구리와 알루미늄 재료의 물성차이에 의한 영향임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 이중층 라이너는 폭발성 재료의 거동이 중요하므로 실험을 통해 얻은 알루미늄 소재의 물성 데이터를 사용하였다. 실험을 통해 얻은 데이터를 사용하여 단층 구리 라이너와 A/B, A/B/A 타입의 이중층 라이너의 변형 거동을 관찰하였다. 이를 통해 세 라이너가 목표물을 관통하기에 충분한 속도와 에너지를 가지는 지에 대하여 수치해석을 통해 알아보았다. 결과를 통해서 아래와 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) A/B와 A/B/A 타입의 라이너가 관통을 목적으로 하는 구리 재료는 제트의 선두부분에 위치하며 폭발을 목적으로 하는 알루미늄 재료는 관통을 목적으로 하는 재료 뒤에 위치하여야 한다. 이를 전산 수치 모사로 그 가능성을 확인 하였으며 관통 후 폭발을 목적으로 하는 점에서는 알맞은 재료 위치를 전산 설계 할 수 있음을 확인하였다. 그리고 알루미늄 재료가 반응을 하지 않은 상태에서 타겟을 통과하기 위해서는 A/B 타입 이중층 라이너가 유리할 것으로 판단된다.
- 2) 이중층 라이너 제트의 속도분포와 변형 거동을 유동속도와 정체속도로 분리하여 그 특성을 알아보았다. 이로부터, 제트의 선단 속도의 비교에서 A/B, A/B/A 라이너가 단층 구리 라이너 보다 높은 속도가 나왔으며, 변형된 라이너의 길이도 더 길게 나왔다. 제트의 선단 속도가 단층 구리, A/B A/B/A 순으로 증가하며 운동에너지도 비례하여 증가함을 예측할 수 있다. 그리고 시간 48 μ s에서 제트의 속도비교를 통해, 슬러그 부분은 속도 변화가 적고 변형이 없는 부분이다. 무차원 길이가 0.3 이상에서는 상대적으로 변형이 커지는 것을 확인할 수 있

었으며, 제트는 안정성 범위에 있음을 관찰하였다.

- 3) 운동에너지 비교에서는, 단층 구리 라이너의 운동에너지 보다 A/B A/B/A 타입 라이너 운동에너지가 높게 나왔다. 이를 통해 이중층으로 두 개의 재료를 사용으로 높은 운동에너지를 생성할 수 있음을 확인하였다. 이는 알루미늄 재료의 물성차이에 의한 영향임을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 기초연구(511155-911084002)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] W. Walters and S. Golaski, "Hemispherical and Conical Shaped-Charge Liner Collapse and Jet Formation," Technical Report, BRL-TR-2781, 1987.
- [2] W. Walters, "Shock Waves in the Study of Shaped Charges," Technical Report, BRL-TR-3258, 1991.
- [3] D. Hasenberg, "Consequences of Coaxial Jet Penetration Performance and Shaped Charge Design Criteria," Master Thesis, Naval Postgraduate School, 2010.
- [4] J. Curtis, F. Smith and A. White, "The Formation and Stretching of Bi-material Shaped Charge Jets," AIP Conference Proceedings, Vol. 1426, pp. 116-119, 2011.
- [5] S. Kim, S. Mun, K. Lee, C. Lee and S. Lee, "Manufacturing and Evaluating for the Two Layer/ Explosive Materials and their Numerical Simulations," Materials Science Forum, Vol. 767, pp. 52-59, 2014.
- [6] J. Won, G. Bae, K. Kang, C. Lee, S. Kim and S. Lee, "Bonding, Reactivity, and Mechanical Properties of the Kinetic-Sprayed Deposition of Al for a Thermally Activated Reactive Cu Liner," Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 23(5), pp. 818-826, 2014.
- [7] B. M. Dobratz and P. C. Crawford, "LLNL

- Explosives Handbook,” UCRL-52997, Rev. 2, 1985.
- [8] G. Wijk, “A Model for Fragmentation of Hard Metallic Targets due to Projectile Perforation,” Weapons and Protection, Scientific Report, FOI-R-1733--SE, 2005.
- [9] J. Bolstad and D. Mandell, “Calculation of Shaped Charge Jet Using MESA-2D and MESH-3D Hydrodynamic Computer Code,” Los Alamos National Laboratory, New Mexico, 1992.
- [10] J. Simon, “The Effect of Explosive Detonation Characteristics on Shaped Charge Performance,” Ballistic Research Laboratories, 1974.