

## 이중층 라이너의 폭발 재료 온도 분포 수치해석

문상호<sup>1)</sup> · 김시조<sup>\*,1)</sup> · 이창희<sup>2)</sup> · 이 성<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> 안동대학교 기계설계공학과

<sup>2)</sup> 한양대학교 신소재공학부

<sup>3)</sup> 국방과학연구소 제4기술연구본부

### Numerical Analysis of Temperature Distribution of the Explosive Material in the Double-Layer Liners

Sang Ho Mun<sup>1)</sup> · See Jo Kim<sup>\*,1)</sup> · Chang Hee Lee<sup>2)</sup> · Seong Lee<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Mechanical Design Engineering, Andong National University, Korea

<sup>2)</sup> Division of Materials Science & Engineering, College of Engineering, Hanyang University, Korea

<sup>3)</sup> The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 8 September 2015 / Revised 26 January 2016 / Accepted 25 March 2016)

#### ABSTRACT

The development of new concepts of liner is of great importance to effectively neutralize the enemy's attack power concealed in the protective structure or armored vehicles. A double layer liner has a combination of two different materials, one for penetration of target and the other for explosion after penetration. Therefore, it is of great importance to understand the temperature distribution before impact which should be lower than the explosive temperature of pure explosive material of the liner used. In this study, two different liner materials were obtained using cold spray coating and these material properties were characterized by DSC experiments. Numerical computations were done and the effect of temperature distribution and changes over time at each point of the explosive material depending on the layer types of the liner were discussed and analysed in the jet state.

Key Words : Double-Layer Liner(이중층 라이너), Explosive Material(폭발성 재료), Numerical Analysis(수치해석), Temperature Distribution(온도 분포)

#### 1. 서론

성형작약탄은 신관, 화약, 및 원추형의 라이너로 구

성되어 있는 탄으로 작동 원리는 다음과 같다. 화약이 먼저 폭발하고, 폭발 압력이 원추형의 라이너에 전달 되어 라이너가 성형작약탄의 중심축을 따라 일직선으로 붕괴되면서, 고속의 금속 제트(jet)를 형성한다. 이 제트는 매우 빠른 속도로 목표물을 관통하게 된다. 성형작약탄은 세계 2차 대전을 통해 출현하여 고정 및

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

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 위해 관통 후 효과 증대에 대한 개발 관점이 추가되고 있다. 미국 등 선진국을 중심으로 빌딩이나 다리와 같은 큰 크리트 구조물에 얽매하여 있는 적을 효과적으로 제압하기 위해 기존 구리 라이너 재료대신 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. 선단 라이너 재료가 일정 두께를 관통한 후 뒤이은 폭발형 라이너 재료가 목표물내로 침입하면서 폭발하는 이중층 라이너 형상을 목표로 하고 있다. 라이너의 폭발성을 부여하기 위해서는 기존의 구리 라이너에 폭발력이 강한 재료를 붙이는 개념의 이중층 라이너를 고려하였다. 이중층/폭발성 라이너의 필요한 조건으로 라이너 접합층은 높은 접합력으로 라이너의 소성변형을 수용하여야 하며, 관통시에는 산소 및 반응성 금속과 접촉하여 폭발 반응을 일으켜야 하는 요구를 충족시켜야 한다.

이중층 라이너로 형성된 제트가 목표물을 관통하는 과정에서 관통적인 측면뿐만 아니라 재료의 폭발적인 측면 고려도 매우 중요하다. 작약 폭발 후 제트를 생성하는 과정에서 재료는 높은 변형률 속도(strain rate)가 작용하게 되고 이로 인한 소성 에너지 증가로 온도가 상승하게 된다. 관통 후 폭발 효과를 극대화하기 위해서는 관통 전 제트의 폭발성 재료 온도는 폭발 온도 이하로 제어되어야 한다. 따라서 제트의 높은 온도 상승은 폭발성 재료가 목표물을 통과하기 전에 폭발을 일으킬 수 있는 요인이 될 수 있으므로 온도가 중요한 변수로 작용하게 된다. 이와 관련한 라이너 재료의 온도변화에 대한 연구는 많이 이루어져 왔다. Von Holle와 Trimble는 실험을 통해서 구리 제트의 온도를 432 °C로 예상을 했으며<sup>[1]</sup>, Molinari는 Lagrangian 해석을 통해 시간 54  $\mu$ s에서 구리 제트 온도는 540-1240 (K)라는 결론을 얻었으며<sup>[2]</sup>, Chen은 Eulerian 해

석을 통해 시간 40  $\mu$ s에서 구리 제트 온도는 350-850 (K)라는 결론을 얻었다<sup>[3]</sup>. Walters와 Zukas는 알루미늄 제트 온도를 수치해석을 통해 400-600 (K)로 예상하였다<sup>[4]</sup>.

본 연구에서는 제트를 생성하는 과정에서 폭발성 재료의 반응을 확인하기 위해 폭발성 재료는 알루미늄 재료를 사용하며 저온 분사 코팅을 통해 만든 시료의 응력-변형률 선도 데이터를 수치해석에 사용하여 폭발성 재료의 내부 온도 분포를 확인하고자 한다. 그리고 폭발성 재료의 반응온도는 DSC(Differential Scanning Calorimetry) 실험에서 발열 반응을 일으키는 온도 중 낮은 값을 기준으로 하였다. 본 연구에서는 상용프로그램 AUTODYN V11.0을 사용하였으며, 제트 상태에서 폭발성 재료의 온도분포와 시간 경과에 따른 온도 변화를 확인하여 목표물 충돌 전 폭발 가능성에 대해 수치해석으로 분석하고자 한다.

## 2. 이중층 라이너 물질 충격 거동 모델링

### 2.1 라이너의 형상 및 경계조건

이중층 라이너는 기존에 관통을 위해 사용하는 라이너 재료에 폭발성 재료를 덧붙이는 개념의 라이너이다. Fig. 1과 2는 A/B, A/B/A 타입 이중층 라이너 모델이다. Fig. 1 A/B 타입 라이너는 알루미늄 재료(A)가 구리 재료(B) 위에 있으며, Fig. 2 A/B/A 타입 라이너는 알루미늄 재료(B)가 구리 재료(A)의 내부에 위치하고 있다. 라이너에서 두 재료의 위치와 밀도에 따라서 제트의 형상이 결정된다.

해석에서는 상용프로그램 AUTODYN에 Eulerian 기법을 사용하였다. 라이너의 형상은 Fig. 1과 2 같은 원뿔형(conical shape) 형상으로, 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. 계산 영역은 Fig. 3와 같이 초기 라이너가 있는 영역(230 mm × 100 mm)과 생성된 제트가 추진하는 영역(370 mm × 30 mm)이다. 경계조건으로는 2차원 축대칭 모델을 해석에 사용하였고, 해석 영역에서 대칭축을 제외한 경계 부분에는 flowout 조건으로 재료가 해석 경계면으로부터 나갈 수 있도록 하였다. 그리고 해석에 사용된 요소의 크기는 0.25 mm로 설정하였다. Fig. 1과 2를 보면 폭발지점은

선으로 폭약(explosive)의 좌측 끝단 같은 지점에 위치시켰다. 라이너는 알루미늄과 구리를 사용하였으며, 폭약은 Composite B를 사용하였고, 케이스는 Al2024T351 재료를 사용하였다. 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.

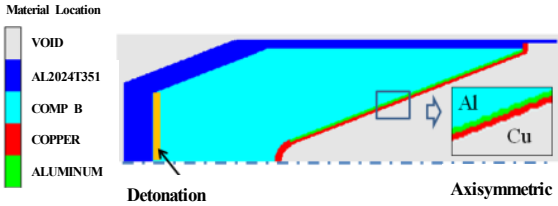


Fig. 1. Numerical simulation model of the A/B type liner

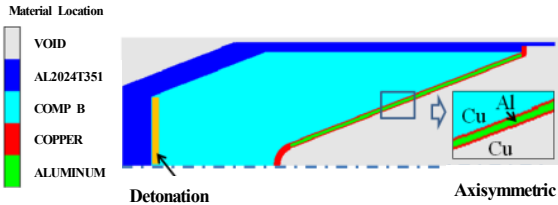


Fig. 2. Numerical simulation model of the A/B/A type liner

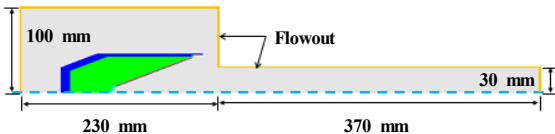


Fig. 3. Computation domain and boundary condition

## 2.2 재료 모델

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

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

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  $\Gamma$ 는 Gruneisen 매개변수(parameter),  $\rho$ 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 동적경화모델인 Johnson Cook 모델을 사용하였으며, 식 (5)와 같다.

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

이 식에서  $A$ 는 항복 응력(yield stress),  $B$ 는 변형률 경화 상수(strain hardening index),  $C$ 는 변형률 속도 상수(strain rate index),  $m$ 는 열 연화 상수(thermal softening index)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 상태방정식에서 사용한 매개변수 값을 보여주고 있으며, Table 3는 식 (5)에서 사용한 강도모델의 매개변수 값을 보여주고 있다. Table 3에서 알루미늄 재료의 매개변수들은 다음의 실험과정을 통해 얻었다. 저온 분사 코팅(kinetic spray coating)<sup>[5]</sup>을 사용하여 Fig. 4와 같이 알루미늄 입자를 적층시킨 재료를 얻었다. 이때 알루미늄 입자가 산소 및 온도 상승으로 인한 반응을 하지 않는 온도 범위에서 공정인자를 찾았으며 적층 재료를 만들었다. 알루미늄 적층 재료는 SHPB(split hopkinson pressure bar) 실험을 통해 응력-변형률 곡선 데이터를 얻었으며, 이 실험 데이터를 식 (5)에 있는 Johnson Cook 모델에 피팅하여 매개변수들을 도출 하였다<sup>[6]</sup>.

Table 1. JWL EOS of HE

|                              |            |                        |           |
|------------------------------|------------|------------------------|-----------|
| Density (g/mm <sup>3</sup> ) | 0.1717E-02 | R1                     | 4.20      |
| A (MPa)                      | 0.524E+06  | R2                     | 1.10      |
| B (MPa)                      | 0.767E+04  | W                      | 0.34      |
| V <sub>C-J</sub> (m/s)       | 0.798E+04  | P <sub>C-J</sub> (MPa) | 0.295E+05 |

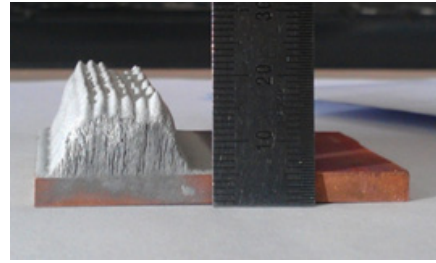


Fig. 4. Aluminum specimen generated by kinetic spray coating methods<sup>[6]</sup>

Table 2. Shock EOS parameters of three different materials

| Material                     | Case        | Liner     |           |
|------------------------------|-------------|-----------|-----------|
|                              | Al2024 T351 | Copper    | Aluminum  |
| Density (g/mm <sup>3</sup> ) | 0.278E-02   | 0.893E-02 | 0.271E-02 |
| $\Gamma$                     | 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

| Material               | Case        | Liner     |           |
|------------------------|-------------|-----------|-----------|
|                        | 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      |

### 2.3 폭발성 재료의 반응

본 연구에서는 폭발성 재료로 순수 알루미늄 입자를 적층 시킨 재료를 사용하고 있다. 라이너가 체트로 변형하거나 체트가 신장되는 과정에서 변형률 속도는 높아지게 된다. 급속한 소성 변형은 온도 상승으로 이어지며 폭발이 일어날 수 있는 위험성을 가지고 있다. 그러므로 체트의 생성과정에서 폭발성 재료의 온도변화에 대한 안정성 확인을 필요로 한다. Fig. 5는 알루미늄 재료의 반응성을 확인하기 위한 DSC 분석 데이터이다. 저온 분사 코팅을 이용하여 시료를 만들었으며 DSC 실험을 통해 발열량을 측정하였다. 실험은 산소가 공급된 상태에서 측정을 하였다. 실험 조건은 저온 분사 코팅 공정에서 사용한 알루미늄 입자의 평균 크기가 20  $\mu\text{m}$  보다 큰 것과 작은 것 두 가지 시편 재료를 사용하였으며, 가열속도(heating rate)는 10, 50 K/min 두 가지를 사용 하였다. Fig. 5 실험결과는 가열속도가 높으며(50 K/min) 분말의 크기가 작을수록(20  $\mu\text{m}$  이하) 큰 발열 반응이 일어났다. 가열속도 50 K/min은 645  $^{\circ}\text{C}$ 에서 첫 번째 발열반응이 일어났으며,

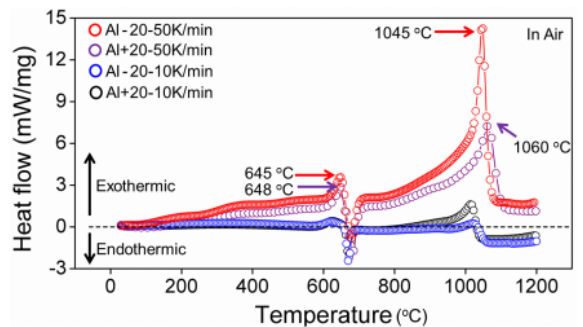


Fig. 5. DSC thermogram for each aluminum powder under atmospheric conditions and different heating rate(10 and 50 K/min)<sup>[5]</sup>

1045 °C에서 두 번째 발열반응이 일어났다<sup>[5]</sup>. 실제 제트에서는 변형률 속도가 높기 때문에 가열 속도는 실험에서 사용한 것 보다 높은 것으로 생각되며, 높은 발열반응이 일어날 것으로 판단된다. 본 연구에서는 폭발성 재료의 반응 온도 기준을 실험 결과를 통해서 얻은 데이터로 발열반응이 나타나는 가장 낮은 온도 645 °C(918 K)를 사용하며 목표물 관통 전 폭발 가능성에 대해 수치 분석을 수행하고자 한다.

### 3. 결 과

#### 3.1 알루미늄 재료의 온도 분포

Fig. 6와 7은 시간 48 μs 시점에서 A/B, A/B/A 타입 알루미늄 재료의 온도 분포를 각각 보여주고 있다. Fig. 6에서 A/B 타입 라이너 폭발성 재료의 온도 분포 중 최고 온도는 609.5 K이며, 구리 재료가 접촉하는 부분에서 높은 온도 분포를 보여주고 있다. Fig. 7은 A/B/A 타입 라이너 폭발성 재료의 온도 분포이다. 최고 온도는 850.6 K이며, Fig. 6와 같은 경향성을 보여주고 있다. A/B 타입과 비교하여 A/B/A 타입에서 제트가 높은 온도 분포를 보이고 있지만 두 경우 모두 Fig.

5 실험을 통해 얻은 DSC 반응 온도 645 °C(918 K) 보다 낮으므로 목표물 관통 전 폭발이 이루어지지 않을 것으로 판단된다. 제트 생성 후 알루미늄 재료는 슬러그의 부분으로 이동하게 된다. 슬러그 부분의 재료는 속도의 차이가 거의 없고 일정해서 변형률이 낮은 상태이다. 슬러그 부분에 있는 알루미늄 재료 온도는 소성 변형이 작아 낮으며 이를 수치 결과로 확인 할 수 있었다.

#### 3.2 시간 경과에 따른 알루미늄 재료의 온도변화

라이너에서 제트를 생성하는 과정에서 재료는 높은 압력과 변형을 일으키게 된다. 그래서 시간 경과에 따른 재료의 거동 분석이 필요하다. Fig. 8은 A/B 타입 라이너에서 알루미늄 재료의 시간경과에 따른 온도변화를 보여주고 있으며 Fig. 6에 16, 43, 78번을 데이터 측정지점으로 사용하였다. A/B 타입 라이너에서 알루미늄 재료의 세 지점 온도변화는 다음과 같다. 세 지점 모두 충격파에 의해 온도가 급격하게 상승하였으며, 유동속도(flow velocity)가 발생하면서 온도는 감소하였다. 그리고 정체지점을 지나면서 온도가 다시 상승하게 된다. 측정지점 16, 43번은 슬러그 부분에 위치하며 온도는 감소 후 일정하게 유지되는 경향성을 보이고, 측정지점 78번은 슬러그와 제트 꼬리 사이에 위치하며 온도가 천천히 상승 후 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 슬러그에 있는 측정지점 16, 43번은 제트가 변형이 끝나면서 온도는 일정하게 유지된다. 측정지점 78번은 제트와 슬러그 중간에 위치하며 변형이 끝나면 온도가 상승 후 일정하게 유지되는 제트의 온도 거동을 보인다.

라이너에서 제트로 변형하는 동안 폭발성 재료의 온도 변화는 중요하기 때문에 Fig. 8과 12에 나타나는 급격한 온도 변화에 대해서도 분석이 되어야 한다. Fig. 8에서 측정지점 16번 결과를 보면 첫 번째 피크 지점 시간은 8.40 μs이며 온도는 669.89 K이고, 두 번째 피크지점 시간은 13.50 μs이며 온도는 611.71 K이다. 첫 번째로 온도가 높게 나타난 피크지점은 Fig. 9에서 압력이 높게 나타나는 지점이다. 작약 폭발력이 전파되면서 라이너에 순간적으로 높은 힘이 작용하게 된다. 외부의 순간적인 힘으로 인해 재료의 변형률 속도는 급격하게 상승하게 되며 이로 인해 온도가 상승하였다. 두 번째로 온도가 높게 나타난 피크지점은 Fig. 10과 같이 정체지점(stagnation point)을 지나고 있을 때이다. 정체지점은 Fig. 11에서 보여주는 것과 같

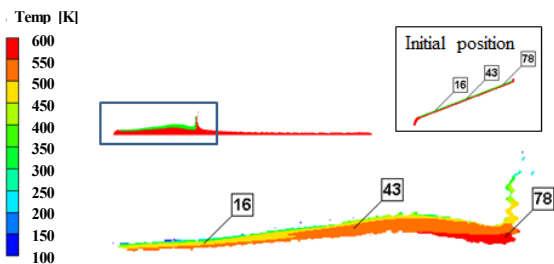


Fig. 6. Temperature distribution of aluminum material in the A/B type at 48 μs

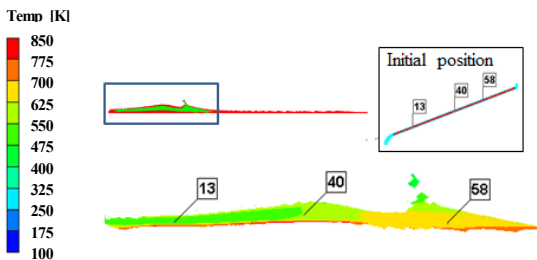


Fig. 7. Temperature distribution of aluminum material in the A/B/A type at 48 μs

이 유동 속도( $v_f$  : flow velocity)에 의해서 원추 방향으로 재료가 모이면서 발생하게 된다. 라이너 재료가 정체되는 지점으로 모이면서 압축력이 발생하게 되고 인해 높은 밀도와 압력을 유지하게 된다. 이러한 관계는 Fig. 11에서 나타낸 유동 다이어그램을 통해 이해할 수 있다. 즉, 정체지점을 중심으로 라이너 붕괴는 제트와 슬러그를 형성한다. 유동 속도에 의해서 원추 방향으로 재료가 모이면서 제트는 앞으로 전진하고, 슬러그는 뒤로 물러나는 상대 속도를 가지게 된다. 이제 방향으로 작용하는 유동의 중심점에서는 높은 압력이 작용하게 되고 폭발성 재료가 정체지점을 통과할 때 가장 큰 압력 피크를 가지게 된다. 이후 온도 분포는 게이지 위치에 따라 압력의 급상승에 따라 온도가 급상승한 후 감소하다가 재료 위치에 따라, 즉 재료가 정체지점 앞과 뒤에 존재 유무에 따라 온도가 상승, 하강 또는 계속 상승의 경향을 보이게 된다.

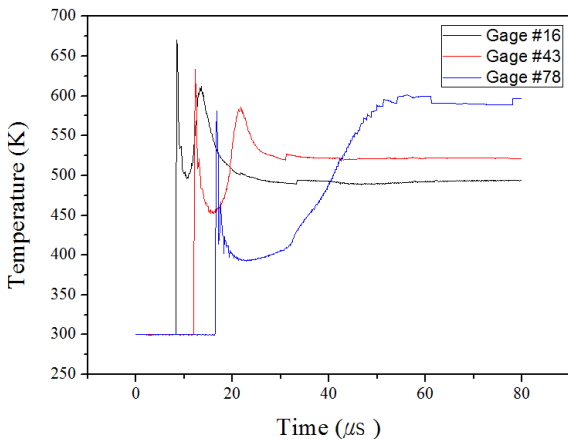


Fig. 8. Temperature variation of aluminum material in terms of time in the A/B type liner

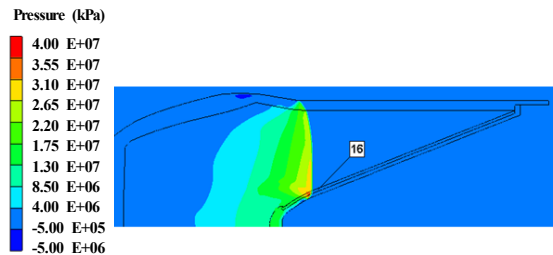


Fig. 9. Pressure counter of the A/B type liner after explosion at 8 μs

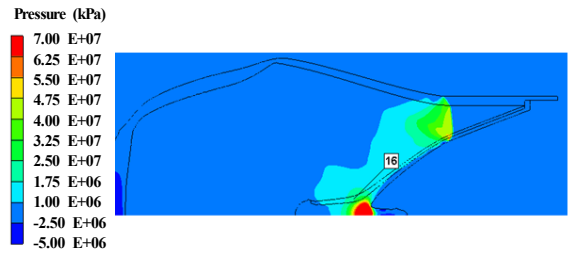


Fig. 10. Pressure counter of the A/B type liner after explosion at 14 μs

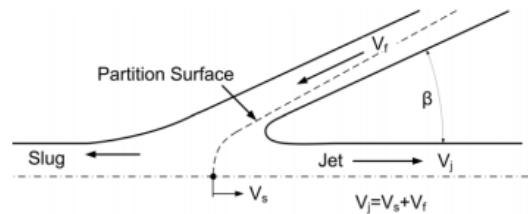


Fig. 11. Flow diagram of liner material<sup>[7]</sup>

Fig. 12는 A/B/A 타입 라이너 중 알루미늄 재료의 시간경과에 따른 온도변화를 보여주고 있으며 Fig. 7에서 13, 40, 58번을 데이터 측정지점으로 사용하였다. 온도는 급격하게 상승 후 유동응력에 의해서 감소하며 정체지점을 지나면서 다시 온도가 상승하는 형태로, Fig. 8에 나타나는 A/B 타입 라이너 결과와 유사한 경향을 보이고 있다. 온도는 정체지점을 지나면서 두 가지 형태로 나누워지게 된다. 온도는 측정지점 13, 40번과 같이 감소 후 일정하게 유지되는 경향성을 보이는 것과, 측정지점 58번과 같이 상승 후 일정하게 유지되는 경향성을 볼 수 있다. 이는 앞서서도 분석하였듯이, 온도가 감소 후 유지되는 경향성을 보이는 것은 슬러그 영역에 있는 재료의 온도 형태이며, 온도가 증가 후 유지되는 경향성을 보이는 것은 제트 영역에 있는 재료의 온도 형태이다. 이 두 가지 형태를 사용하여 제트와 슬러그의 영역을 구분할 수 있다.

Fig. 13는 A/B/A 타입 라이너 중 알루미늄 재료의 시간경과에 따른 압력변화이며 Fig. 12의 온도 변화와 연관성이 있다. Fig. 12와 13에서 측정지점 13번은 시간 8.5 μs에서 온도와 압력이 급격하게 상승하며, 시간 13 μs에서 다시 온도와 압력이 상승하게 된다. 이처럼 온도와 압력이 상승하는 시간대가 동일한 것을 볼 수 있다. 그리고 시간 23.7 μs 이 후 온도는 일정하게 유지되며 압력은 낮아 졌다. 압력에 따라서 온도

가 변화하게 되는데, 높은 압력이 작용하는 지점에서는 높은 온도를 보이며 높은 압력에서 낮은 압력으로 압력이 낮아지는 동안에도 온도는 상승하였다. 재료가 낮은 압력을 받는 상태에서는 온도변화가 낮아졌으며 일정한 온도를 유지하게 된다.

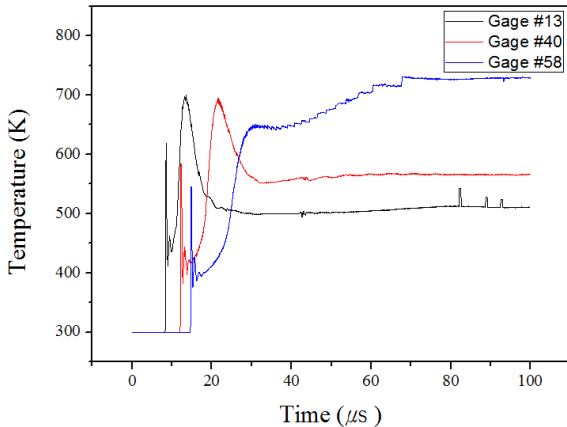


Fig. 12. Temperature variation of aluminum material in terms of time in the A/B/A type liner

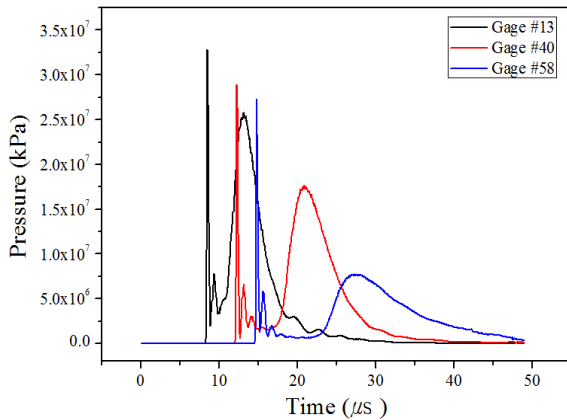


Fig. 13. Pressure variation of aluminum material in terms of time in the A/B type liner

선행된 연구 중에서 심사 중에 있는 ‘이중층 라이너에서 폭발 재료 분포에 따른 변형 특성 수치해석<sup>[8]</sup>’의 해석모델의 유효성을 확보하기 위해 Bolstad와 Mandell의 연구<sup>[9]</sup>를 기초로 하여 요소의 크기에 따라서 결과를 비교하고 있다. 본 연구 또한 알루미늄 재료의 요소 크기에 따른 온도변화를 확인하고자 한다. Table 4

는 Fig. 8, 12 데이터와 같이 각 측정지점의 최종온도 값을 요소 크기(0.20 mm, 0.25 mm, 0.33 mm)에 따라서 나타낸 것이다. 그리고 각 측정지점 데이터를 선형 피팅하여 얻은 예상 온도를 보여주고 있다. A/B 타입 라이너에서 측정지점 16번은 요소 크기가 0.33 mm일 때는 온도는 482.82 K이며, 0.25 mm일 때는 493.92 K, 0.20 mm일 때는 509.67 K이다. 해석에 사용한 요소 크기가 작아지면 온도가 증가하는 경향을 보인다. 또한 측정지점 43, 78도 같은 경향성을 보이고 있다. 그러나 A/B/A 타입 라이너는 측정지점 58와 같이 0.20 mm와 0.25 mm의 온도를 비교하면 요소 크기가 커도 높은 온도를 보이는 경우가 있다. 측정지점 58의 경우 2 ~ 3 K로 온도의 편차가 크지 않아 일정한 값으로 수렴하고 있음을 알 수 있다. 각 측정지점에서 온도 차이는 30 K 이내로 온도의 차이가 크지 않다. 그러나 선형 피팅 결과와 요소크기 0.33 mm 결과의 차이는 약 80 K이며 요소 크기에 따라서 편차가 큰 것을 볼 수 있다. Table. 4와 같이 피팅을 통해 얻은 온도 데이터가 Fig. 5에서 기준으로 한 반응 온도 918 K 보다 낮으므로 타겟과 충돌 전에는 안정한 상태로 판단 된다.

Table 4. Mesh size study focusing on the calculated temperature of aluminum material in the A/B and A/B/A type liner

|  |                | Temperature (K)          |          |          |
|--|----------------|--------------------------|----------|----------|
|  | Mesh Size (mm) | Gage #16                 | Gage #43 | Gage #78 |
|  |                | A/B type liner (80μs)    | 0.20     | 509.67   |
|  | 0.25           | 493.92                   | 521.15   | 597.08   |
|  | 0.33           | 482.82                   | 516.71   | 594.87   |
|  | Linear fitting | 547.53                   | 580.69   | 632.44   |
|  | Mesh Size (mm) | Gage #13                 | Gage #40 | Gage #58 |
|  |                | A/B/A type liner (100μs) | 0.20     | 505.67   |
|  | 0.25           | 510.90                   | 566.62   | 728.99   |
|  | 0.33           | 493.97                   | 557.64   | 727.06   |
|  | Linear fitting | 526.73                   | 596.74   | 725.07   |

#### 4. 결론

본 연구에서는 A/B, A/B/A 타입의 이중층 라이너를 사용하여 목표물 충돌 전 제트 생성 과정에서 폭발성 재료가 압력과와 소성 변형으로 인한 폭발 가능성에 대한 안전성 문제에 대하여 수치해석을 통해 알아보았다. 폭발성 재료의 물성치와 반응온도는 실험을 통하여 얻은 데이터를 사용하였다. 수치해석 결과를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 알루미늄 재료 중 구리 재료와 접합되어 있는 부분의 온도가 높게 나타났으며, A/B 타입 보다 A/B/A 타입 알루미늄 재료의 온도가 높게 나타났다. A/B, A/B/A 타입 라이너 모두 DSC 반응 온도 645 °C (918 K) 보다 낮으므로 목표물 충돌 전 후 폭발이 없는 안정한 상태로 판단되었다. 이는 정체지점 유동 분석을 통해 제트 생성 후 알루미늄 재료는 변형이 거의 없는 슬러그 부분에 위치하고 있어 상대적으로 소성 변형에 의한 추가 온도 상승이 적어 낮은 온도를 유지하고 있는데 기인함을 확인하였다.
- 2) 시간 경과에 따른 알루미늄 재료의 온도 변화는 발열반응을 일으키는 기준 온도보다 낮으므로 안정한 것을 판단된다. 알루미늄 재료는 약간의 폭발로 인한 전파된 압력과와 정체지점을 지날 때 발생하는 압축력으로 인해 높은 온도 상승을 보여주었다. 그리고 재료에 작용하는 압력과 온도는 재료에 높은 압력이 작용하면 온도는 상승하며 압력이 낮아지면 온도변화가 낮아져서 일정한 온도를 유지하는 상호 비례 관계를 보이고 있음을 확인하였다. 또한 요소 크기에 따른 온도 데이터를 사용하여 최종 온도를 예측할 수 있었으며 제트 생성과정에서 알루미늄 재료의 반응온도 보다 낮으므로 안정한 상태를 확인하였다.
- 3) 폭발성 재료가 제트 영역에 있으면 제트 생성 과정에서는 높은 온도가 작용하게 되며 폭발할 수 있는 가능성이 있다. 그러나 폭발성 재료가 슬러그 영역에 있으면 제트 영역보다 안정적으로 제트를 만들 수 있고 관통 중에 관통물과 추가 충돌로 소성변형과 마찰에 의해 관통중이나 관통 후 폭발을 예상할 수 있다. 본 연구는 이러한 관통 후 폭발(Behind Armor Effect)을 극대화하기 위한 기초 연구로 응용

될 수 있다.

#### 후 기

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

#### References

- [1] W. G. Von Holle and J. J. Trimble, "Temperature Measurement of Shocked Copper Plates and Shaped Charge Jets by Two-color ir Radiometry," *Journal of Applied Physics*, Vol. 47, No. 6, pp. 2391-2394, 1976.
- [2] J. F. Molinari, "Finite Element Simulation of Shaped Charge," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 38, pp. 921-936, 2002.
- [3] Q. Chen and K. Liu, "A High-Resolution Eulerian Method for Numerical Simulation of Shaped Charge Jet Including Solid-Fluid Coexistence and Interaction," *Computer and Fluids*, Vol. 56, pp. 92-101, 2012.
- [4] W. P. Walters and J. A. Zukas, "Fundamentals of Shaped Charges," Wiley, New York, 1989. and Soft Cover Edition(with Corrections), CMC Press, Baltimore, 1998.
- [5] 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, pp. 818-826, 2014.
- [6] 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.
- [7] D. Hasenberg, "Consequences of Coaxial Jet Penetration Performance and Shaped Charge Design Criteria," Master Thesis, Naval Postgraduate School, 2010.
- [8] S. Mun, S. Kim, C. Lee and S. Lee, "Numerical



Analysis of Deformation Characteristics in the Double-Layer Liner According to Explosive Material Distribution,” Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Under Review.

[9] J. Bolstaad and D. Mandell, “Calculation of Shaped Charge Jet Using MESA-2D and MESH-3D Hydrodynamic Computer Codes,” Los Alamos National Laboratory, New Mexico, 1992.