

## 성형작약탄 금속제트 산란을 위한 대전류 펄스의 수치해석적 연구

박형규\* · 김동규\*\* · 김시우\*\* · 주재현\*\* · 송우진\*\*\* · 김 정†

\* 부산대학교 항공우주공학과, \*\* 국방과학연구소 5 본부 1 부, \*\*\* 부산대학교 부품소재산업협력연구소

### Numerical Analysis of Intense Electric Current Pulse to Disperse Shaped Charge Metal Jet

Hyeong Gyu Park\*, Dong Kyu Kim\*\*, Si Woo Kim\*\*, Jae Hyun Joo\*\*, Woo Jin Song\*\*\*, and Jeong Kim†

\* Dept. of Aerospace Engineering, Pusan Nat'l Univ.,  
\*\* 1<sup>st</sup>-Directorate, 5<sup>th</sup> R&D Institute, Agency for Defense Development.  
\*\*\* Industrial Liaison Innovation Center, Pusan Nat'l Univ.

(Received August 14, 2014 ; Revised September 11, 2014 ; Accepted September 11, 2014)

**Key Words:** Intense Electric Current Pulse(대전류 펄스), Metal Jet(금속제트), Electromagnetic Force(전자기력), RLC Circuit(RLC 회로), ALE Method(ALE 기법), Finite Element Analysis(유한요소해석)

**초록:** 성형작약탄에 의해 발생하는 금속제트에 대전류 펄스가 인가되면 금속제트 내·외부에 전자기장이 형성 되고 생성된 전자기장에 의해 전자기력이 작용하여 금속제트를 분산 및 산란시키게 된다. 대전류 펄스 인가장치는 RLC 회로로 구성되어 있고 두 전극판 사이로 금속제트가 관통되어 진행할 때 대전류 펄스가 흐르게 된다. 본 연구에서는 ALE 기법을 이용한 2 차원 축 대칭 해석을 통해 두 전극판을 통과 할 때의 금속제트 단면 형상을 예측하고, 2 차원 해석 모델에서 얻어낸 금속제트 단면을 3 차원 유한요소 모델로 재구성하여 금속제트에 전류를 직접 인가하였다. 또한, 유한요소해석을 통하여 금속제트에 직접적으로 대전류 펄스를 인가시켜 금속제트의 변형된 형상과 발생하는 전자기력을 계산하였으며, 금속제트의 산란을 일으키는데 영향을 주는 대전류 펄스의 주요 설계변수 특성에 대하여 검증하였다.

**Abstract:** The electromagnetic force induced by an intense electric current pulse, which generates an electromagnetic field around the metal jet originating from a shaped charge, can disperse and scatter the high-speed metal jet. An electric device consisting of an RLC circuit applies an intense electric current pulse that flows in the circuit while the metal jet passes between two electrodes. In this study, the metal jet formation was simulated using the ALE technique in 2-D, and a 3-D finite element model was mapped using 2-D simulation results to induce the electric current directly. The deformed shapes of the metal jet and the electromagnetic force were calculated using a finite element analysis by inducing the electric current directly, and the major parameters of the intense electric current pulse for breaking up the metal jet were examined.

- 기호설명 -

$\vec{A}$  : 벡터 포텐셜

- $E$  : 단위부피당 폭발에너지
- $V$  : 상대부피
- $\sigma$  : 전기전도도
- $\mu$  : 자기투과율
- $\Phi$  : 스칼라 포텐셜

#### 1. 서론

성형작약탄은 탄 기폭시 발생하는 초고속의 금속제트로 전투차량을 공격하는 위협적인 무기로서 지상 장갑차량에 큰 위협이 되고 있기 때문에 선진국에서는 성형작약탄을 방호하기 위한 다양한 연구를 수행하고 있다. 해외의 경우, 독일과 러시아 및 미국 등에서 주요 국가 연구기관 및 대학을

† Corresponding Author, [greatkj@pusan.ac.kr](mailto:greatkj@pusan.ac.kr)  
© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

중심으로 펄스전류에 의한 성형작약탄 금속제트 방호 기술에 대해 실험 및 이론적인 연구가 활발하게 진행 중이다. 특히, 미국, 프랑스, 독일을 중심으로 펄스전류에 의한 성형작약탄 금속제트 방호 기술 개념의 특허 출원 및 등록을 통하여 원천 기술 확보에 주력하고 있다.<sup>(1)</sup> 국내의 경우는 펄스전류를 이용한 성형작약탄 금속제트 성능 감소에 대한 연구가 실험적인 방법으로 진행되고 있으나 수치해석적인 연구는 발표된 사례가 없는 실정이다.<sup>(2)</sup>

초고속 금속제트에 대전류 펄스가 인가되면 금속제트 내·외부에 전자기장이 형성되고 이로부터 전자기력이 작용하여 금속제트를 분산 및 산란시키게 된다. 기본적인 작동원리는 Fig. 1 과 같이 RLC 회로(RLC Circuit)로 구성된 두 전극판 사이로 금속제트가 관통하며 진행 할 때 금속제트도 RLC 회로의 일부가 되어 순간적으로 금속제트에 전류가 흐르게 되고, Fig. 2 와 같이 펄스전류가 금속제트에 작용하면 로렌츠 힘(Lorentz force)이 발생하여, 네킹(Necking, 제트의 직경이 줄어드는 현상)과 산란(Breakup, 제트가 개개의 입자로 끊어지는 현상) 등과 같은 제트 고유의 불안정성이 증대되어 금속제트의 관통력이 감소하게 된다.<sup>(3-5)</sup>

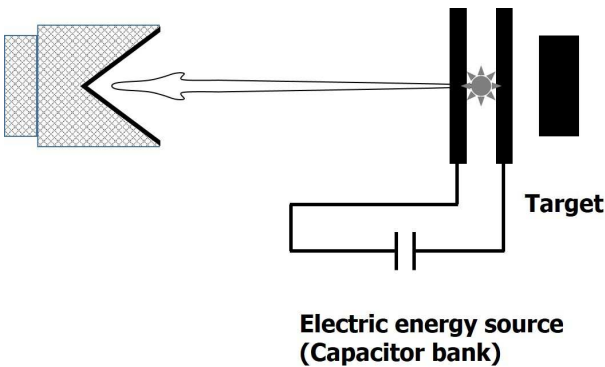


Fig. 1 Schematic diagram of shaped-charge with electric apparatus

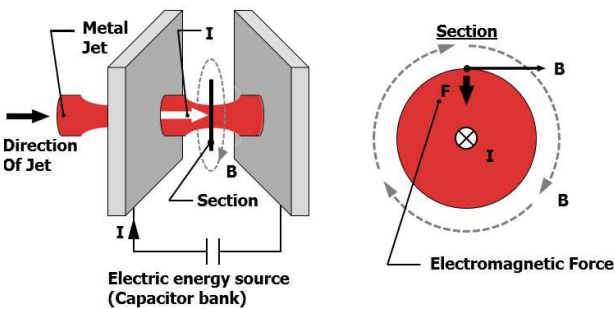


Fig. 2 Schematic diagram of shaped-charge with Lorentz force

성형작약탄의 금속제트 선단은 약 7km/s 의 초고속으로 두 전극판을 통과하는데 제트가 두 전극판 사이에 위치하는 동안 펄스전류가 작용하고 제트가 두 번째 전극판을 빠져나가면 더 이상 제트에 전류가 작용하지 않는다. 이러한 현상을 수치해석으로 묘사하기 위해서는 초고속 제트에 대한 hydrodynamic 해석과 제트에 대한 전자기력 해석의 동시적인 연성해석(Coupled analysis)이 필요하나, 현재 적합한 상용코드가 개발되어 있지 않기 때문에 사용자가 스스로 해결하여야 한다. 본 연구에서는 움직이는 제트에 대한 연성해석의 시작 단계로서 정지상태의 금속제트에 대한 전자기력 해석을 수행하기 위해서 일반적 형상의 성형작약탄을 해석 모델로 선정하고, 고속충돌 및 관통해석에 사용되는 상용코드인 LS-DYNA 를 사용하여 성형작약탄의 폭발 해석을 수행하였으며 이를 통해 계산된 금속제트에 전류를 인가하는 모델을 구축하였다. 성형작약탄의 금속제트 생성을 위하여 ALE 기법(Arbitrary Lagrangian Eulerian method)을 이용하여 해석하였다. 생성된 금속제트의 전류에 의한 거동을 해석하기 위해 앞서 2 차원 축 대칭 해석을 통해 얻은 금속제트를 3 차원 유한요소모델로 맵핑(Mapping)하여 LS-DYNA 에서 지원하는 EM-solver 로 해석을 수행하였다.<sup>(6)</sup> 본 연구에서는 금속제트에 대한 펄스전류의 인가와 이에 따른 제트의 변형거동에 대한 수치적 해석 가능성을 확인하는 것이 주요 목표이다.

## 2. 해석모델 및 해석조건

### 2.1 성형작약탄 금속제트 생성 모델링

본 연구에서는 일반적인 형상의 성형작약탄에 대하여 해석을 수행하였다. 성형작약탄의 형상이 대칭이므로 Fig. 3 과 같이 축 대칭 조건으로 모델링 하였다. 각 파트의 경우, 크게 폭약, 케이스(Case), 라이너(Liner)로 구성 되어 있으며 해석에 사용된 각 파트의 소재는 Table 1 에 나타내었다.

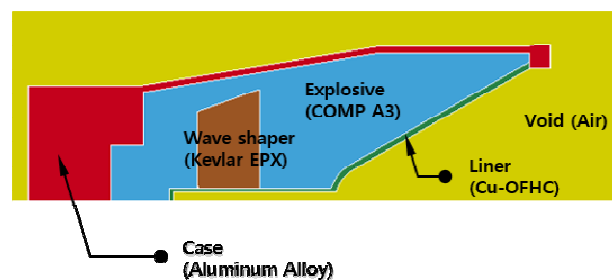


Fig. 3 Modeling of the shaped charge

**Table 1** Materials of parts

Part	Material
Explosive	COMP A-3
Case	AL7075-T6
Liner	COPPER
Wave shaper	Kevlar EPX

**Table 2** Parameters of JWL equation of state

$A$ [GPa]	$B$ [GPa]	$R_1$	$R_2$	$\omega$
611.3	10.65	4.4	1.2	0.32

작약의 폭발 해석을 수행하기 위하여 상태방정식(Equation of State)은 JWL(Jones–Wilkins–Lee) equation 을<sup>(7)</sup> 적용하였으며, 압력은 다음의 식 (1) 과 같이 정의하였다.

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

각 매개변수는 Table 2 에 나타내었다.<sup>(8,9)</sup> 이때,  $E$  는 단위부피당 폭발 에너지이고  $V$  는 상대부피이다.

케이스와 라이너의 경우 작약 폭발로 발생하는 열에 의한 소성거동이 발생하기 때문에 Johnson Cook 강성모델을 적용하였고 물성치는 Table 3 과 같다. Johnson Cook 강성모델에서 유동응력은 식 (2)와 같이 정의하고 있다.<sup>(10)</sup>

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\epsilon}^n) (1 + C \ln \bar{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (2)$$

이때,  $\bar{\epsilon}$  는 등가 소성 변형률이며,  $\bar{\epsilon}^*$  와  $T^*$  은 식 (3), 식 (4)와 같다.

$$\bar{\epsilon}^* = \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \quad (3)$$

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (4)$$

이때,  $\dot{\bar{\epsilon}}_0$  는 준 정적 시험에서의 유효 변형률속도 이고  $T$  는 소재의 온도,  $T_{room}$  은 상온을 나타낸다. 케이스와 라이너에 대한 재료모델의 매개변수는 Table 4 에 나타내었다.

**Table 3** Material properties of Case and Liner

Part	Mass density[g/cm <sup>3</sup> ]	Shear modulus[GPa]	Young's modulus[GPa]
Case	2.81	26.9	71.7
Liner	8.91	46	124.2

**Table 4** Parameters of Johnson cook model

Part	$A$ [MPa]	$B$ [MPa]	$C$	$n$	$m$	$T_{melt}$ [K]
Case	546	678	0.017	0.71	1.61	893
Liner	90	292	0.025	0.31	1.09	1356

**Table 5** Parameters of linear polynomial equation of state

Part	$C_1$ [GPa]	$C_2$ [GPa]	$C_3$ [GPa]	$C_4$	$C_5$
Shaper	8.21	68.9	-12.31	$4.5e^{-7}$	$4.5e^{-7}$

작약 폭발에 의한 충격파의 파형을 조절하기 위한 웨이브 셰이퍼(Wave shaper)는 탄소성체 모델로 적용하였고 성형작약탄의 주변 공기를 이상기체로 가정 하였다. 웨이브 셰이퍼의 밀도는  $1.29\text{g/cm}^3$  이고 공기의 밀도는  $0.001225\text{g/cm}^3$  로 가정하였다. 웨이브 셰이퍼와 성형작약탄 주변 공기에 대한 상태 방정식은 선형다항식으로 아래의 식 (5)와 같이 표현 가능하다.

$$P = C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu) E \quad (5)$$

식 (5)에서  $\mu$  는 식 (6)과 같고 이때,  $\rho$  는 앞서 지정한 초기밀도이고,  $\rho_0$  는 계산구간에서의 순간 밀도이다.

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (6)$$

$$C_4 = C_5 = \gamma - 1 \quad (7)$$

이때, 웨이브 셰이퍼에 대한 상태방정식의 매개변수는 Table 5 와 같고, 공기의 경우  $C_1 \sim C_3$  의 값은 모두 0 이고  $\gamma$  는 1.4 이다.

금속제트의 속도분포를 계산하기 위해 사각형격자(Rectangular grid)를 사용하였고 보다 정밀한 결과값과 제트의 형상을 얻으면서 효율적인 계산

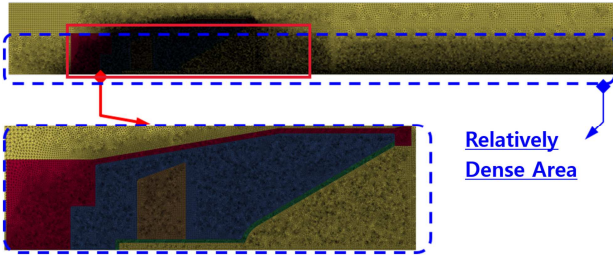


Fig. 4 Discretization of the shaped charge

시간을 위해 Fig. 4 와 같이 인플레이션(Inflation) 기법을 이용하여 성형작약탄과 금속제트가 지나가는 구간인 대칭축 근방에 격자의 밀집도를 고려하여 조밀하게 생성하였다.

2.2 금속제트에 대한 전자기장 해석 방법

본 연구에서 두께 5mm 인 두 전극판을 50mm 간격으로 위치시켜 성형작약탄의 금속제트가 전극판을 통과할 때 금속제트에 작용하는 전자기력과 제트의 변형된 형상을 계산하였다. 금속제트 생성 해석은 Fig. 5 와 같이 금속제트가 라이너 바닥면으로부터 281mm 에 해당하는 위치에 도달 할 때까지 수행하고 그 결과 형상에 전극판의 간격과 두께를 고려하여 전류를 인가할 세그먼트(Segment)를 지정한다. 전자기장 해석을 위한 전류는 사인형태 파형으로 입력하고, 전극판에 속한 절점과 하나의 요소로서 인가한다. Fig. 6 은 입력전류의 파형을 나타내고 있고 입력전류의 파형에 따른 Case 는 Table 6 과 같다. 전극판과 금속제트의 전기전도도는 58.14 mS/m 로 동일하다.

LS-DYNA 에서는 전자기 해석을 위해서 식 (9) 과 같은 라플라스 방정식을 사용한다.

$$\nabla(\sigma \bar{\nabla} \Phi) = 0 \tag{9}$$

이때,  $\sigma$  는 전기전도도를 나타내고  $\Phi$  는 각각의 전압을 나타내는 스칼라 포텐셜이다.

또한, 과도상태의 계산을 위해서 맥스웰 방정식에서 도출한 아래의 식 (10)과 식 (11)을 사용한다.

$$\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \bar{\nabla} \times \left( \frac{1}{\mu} \bar{\nabla} \times \bar{A} \right) + \sigma \bar{\nabla} \Phi = \bar{j}_s \tag{10}$$

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{j} = 0 \tag{11}$$

이때,  $\bar{A}$  는 벡터 포텐셜  $\mu$  는 자기 투과율을 나타내고,  $\bar{j}_s$  는 소스전류밀도(Source current density),  $\bar{j}$  는 전류밀도이다. 위의 두 식이 시스템을 구성

Table 6 Case of analysis

	Maximum current [kA]	Period [ $\mu$ S]
Case 1	350	200
Case 2	350	100
Case 3	100	200
Case 4	100	100

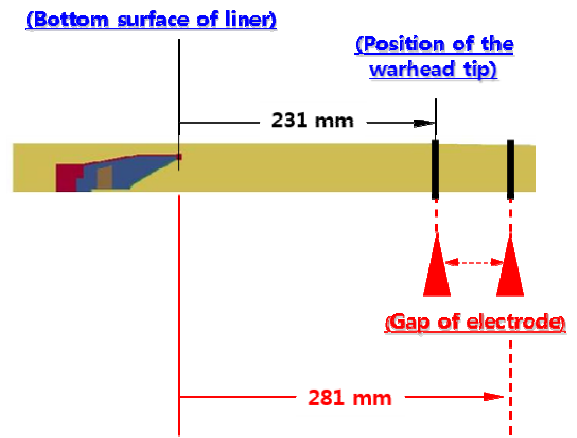


Fig. 5 A 2D FE model for numerical analysis of shaped charge jet

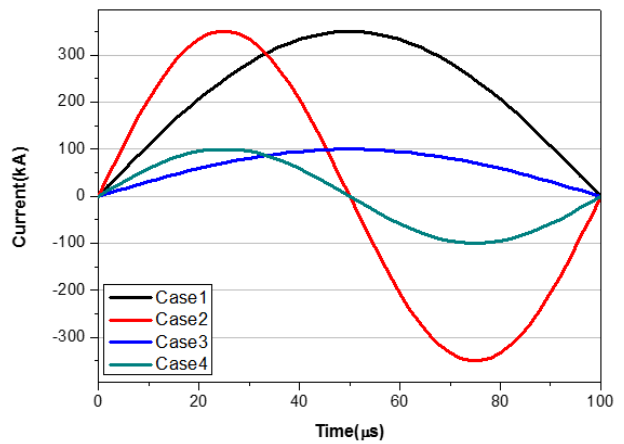


Fig. 6 Waveform of input current

하는 방정식이고,  $\Phi$  와  $\bar{A}$  을 미지수로 하여 방정식을 계산한다. (11~13)

3. 해석결과 및 고찰

3.1 2 차원 금속제트 생성해석 결과

3 차원 금속제트모델에 전류를 인가하기 위해서 제트가 두 번째 전극판의 위치에 해당하는 지점인

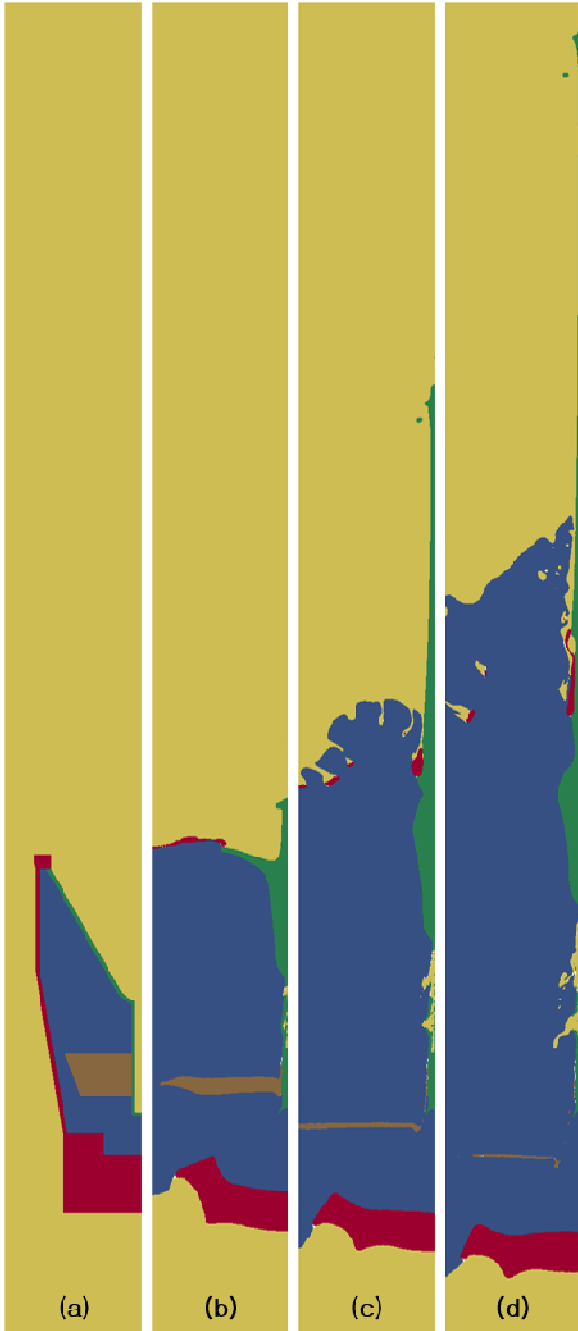


Fig. 7 Geometry of metal jet[(a)  $0 \mu s$ , (b)  $20 \mu s$ , (c)  $40 \mu s$ , (d)  $58 \mu s$ ]

라이너 바닥 면으로부터 281mm 에 해당하는 위치에 도달할 때까지 성형작약탄의 폭발해석을 수행한 결과 Fig. 7 과 같은 형상으로 금속제트가 생성 됨을 알 수 있었고 최초 탄 기폭시점으로부터  $58 \mu s$  가 지난 후에 두 번째 전극판의 위치에 금속제트가 도달함을 알 수 있었다. Fig. 8 은 Fig. 7 의 해석모델을 이용하여 탄 기폭 후 약  $170 \mu s$  까지 해석하여 구한 제트 선단의 위치를 실제 탄에 대한 실험결과와 비

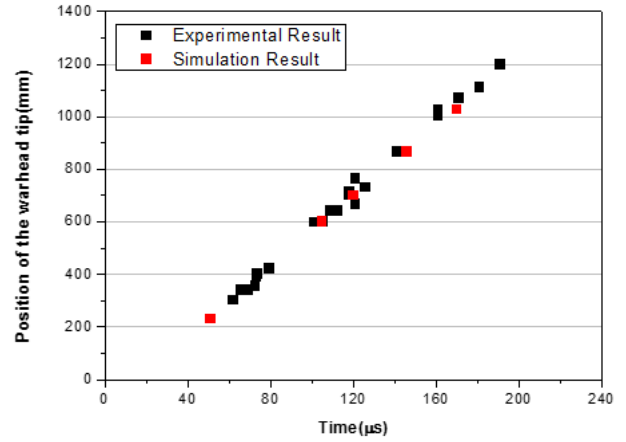


Fig. 8 Validation of the analysis model

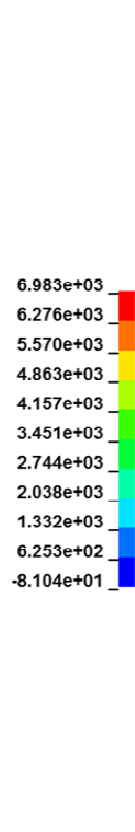


Fig. 9 Velocity of metal jet at  $58 \mu s$

교한 것으로 해석결과가 실험결과의 경향과 잘 일치함을 볼 수 있다. 금속제트가 두번째 전극판 위치에 도달한  $58 \mu s$  에서 제트의 속도분포는 Fig. 9 와 같고 끝 단에서 최고 속도가 약  $7km/s$  임을 알 수 있다.

3.2 생성된 금속제트의 3 차원 모델 및 경계조건  
Fig. 7 의 해석결과에서  $58 \mu s$  에서의 금속제트의

요소로부터 단면 형상을 추출하여 두 번째 전극판에 도달한 금속제트의 3 차원 형상을 Fig. 10 과 같이 3 차원 솔리드 요소(Solid element)로 다시 모델링하였고 전극판에 해당하는 표면에 세그먼트를 지정하여 전류를 인가하였다.

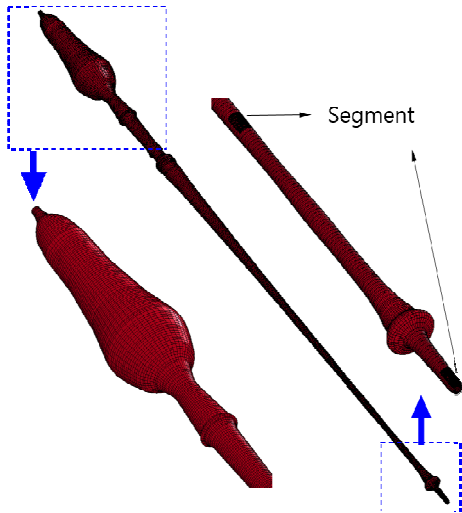


Fig. 10 Finite element model of 3-D solid metal jet

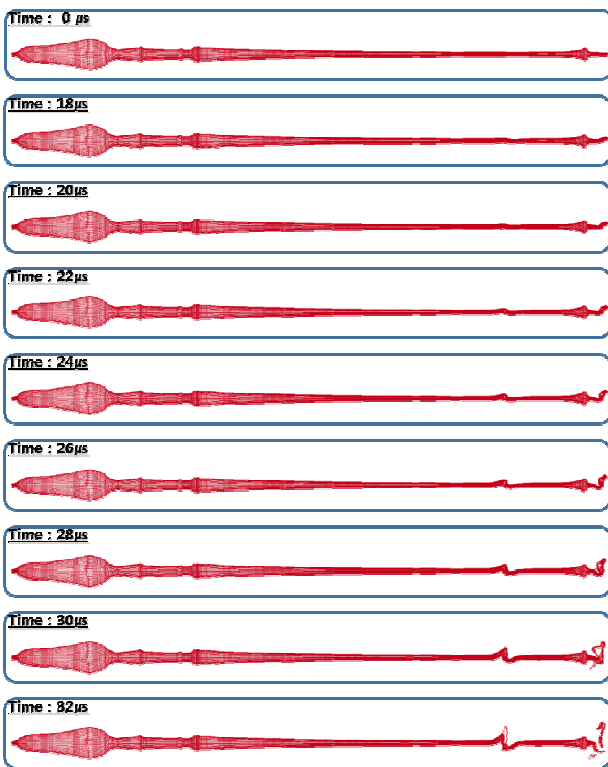


Fig. 11 Result of LS-DYNA analysis for electromagnetic of shaped charge

### 3.3 정지상태의 금속제트에 대한 전류인가 해석 결과

본 연구에서는 움직이는 제트에 대한 연성해석을 위한 첫 단계로서 정지상태의 금속제트에 대한 전자기력 해석을 수행하였다.

금속제트에 대한 전류인가해석 모델의 Case 는 Table 6 과 같이 최대 전류와 전류의 주기를 달리 하여 설정하였다. Fig. 11 에는 Case 1 에 대한 전자기 해석의 결과를 시간에 따라 도시 하였다. 그 결과 전류 작용 후 32  $\mu s$  에서 금속제트의 파단이 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 각 Case 별 파단이 일어나는 시점과 로렌츠 힘의 분포는 Fig. 13 에 나타내었고 파단이 일어나는 지점에서의 로렌츠 힘의 시간에 따른 변화는 Fig. 12 와 같다. Case 1 과 2 를 비교해 보면 동일한 최대 전류를 가진 전류파형의 경우 주기가 짧을수록 파단이 빨리 발생 하고 전류가 인가되는 부위에 가까운 부분에서 파단이 발생하는 것을 알 수 있다. Case 3 과 4 의 경우 150  $\mu s$  에서도 파단이 발생하지 않는다. 이러한 결과를 Case 1 과 비교를 하면 금속제트의 파단은 최대 전류의 크기에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다.

또한, 전류밀도와 자기장밀도 벡터의 곱으로 구해지는 로렌츠 힘은 Fig. 13 에서 알 수 있듯이 금속제트의 직경이 작은 부위에 크게 나타난다. 이로 인해 전류에 의한 금속제트의 파단이 발생하게 됨을 알 수 있고 Fig. 12 에서 Case 2 가 Case 1 보다 로렌츠 힘이 크게 나타난 것은 펄스전류 주기에 따라 요소의 파단 지점에 차이가 생기고 그에 따른 요소의 부피차이가 발생하기 때문이다.

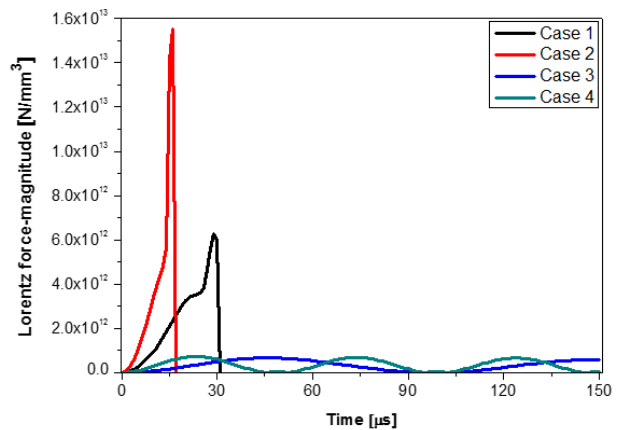


Fig. 12 Lorentz force in metal jet against time

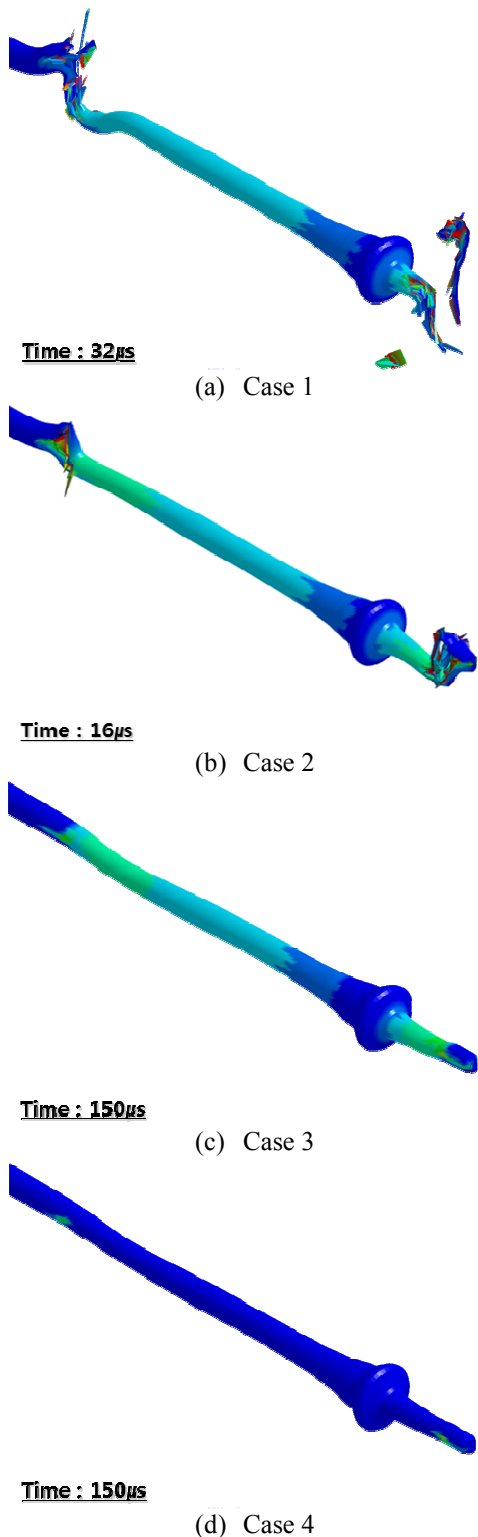


Fig. 13 Distribution of the Lorentz force

#### 4. 결 론

본 논문에서는 펄스전류 작용에 의한 성형작약탄 금속제트 거동에 대한 수치해석을 위해 상용코

드인 LS-DYNA 의 ALE solver 그리고, EM solver 를 활용하여 금속제트 생성해석을 통해 얻은 금속제트에 전류를 인가 시키는 전자기해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 전류밀도와 자기장밀도가 높게 나타나는 금속제트의 직경이 작은 부위에 로렌츠 힘이 집중되어 제트의 파단이 발생한다.

(2) 성형작약탄 금속제트가 전류에 의해 분산 및 산란 작용을 일으키기 위해서는 특정 크기 이상의 최대 전류값을 필요로 하고 금속제트가 전극판 사이를 통과 하기 전에 전자기력을 받아 변형하기 위해서는 제트의 속도와 전극판의 간격을 고려하여 펄스전류의 주기를 설정해야 한다.

한편 본 연구결과를 이용하여 실제 거동하는 금속제트에 대한 펄스전류 작용 결과를 예측할 수 있는 연성해석기법을 개발할 예정이다.

#### 후 기

본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다. (계약번호: UD130013OD) 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) Matrosov, A. D. and Shyvetsov, G. A., 1996, "Experimental Investigation of Current Instability of Shaped-Charge Jets," *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, Vol. 37, No. 4, pp. 464-469.
- (2) Joo J.H., Choi J.H., Kim S.W., Kim D.K. and Kim J.T., 2014, "A Study on the Performance Reduction of Shaped Charge Jet by Pulsed Current," *KIMST 2014 Annual Conference*, pp. 1421~1422.
- (3) Walters William P. and Zukas Jonas A., 1989, "Fundamentals of Shaped Charge," *John Wiley & Sons, New York*, pp. 2~45.
- (4) Chou, P. C. and Flis W. J., 1986, "Recent Developments in Shaped Charge Technology," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol.11, No.4, pp. 99~114.
- (5) Oshima, S., Yamane, R., Moshimaru, Y. and Matsuoka, T., 1987, "The Shape of a Liquid Metal Jet Under a Non-Uniform Magnetic Field," *JSE Int. J*, Vol. 30, No. 261, pp. 437~448.
- (6) Fairlie, G. E., 1998, "The Numerical Simulation of High Explosives Using AUTODYN-2D & 3D," *Institute of Explosive Engineers 4th Biannual Symposium*.
- (7) Lee, E., Finger, M. and Collins, W. 1973, "JWL Equation of State Coefficients for High Explosives," *Lawrence Livermore National Laboratory, University*

- of California, Livermore*, No. UCID—16189.
- (8) Itoh, S., Hamashima, H., Murata, K. and Kato, Y., 2002, "Determination of JWL Parameters from Underwater Explosion Test," *12th Int. Detonation Symp.* San Diego, California. Vol. 281
- (9) Gang, Y., Xu, H. and De'an, H., 2011, "Computer Simulation of Two-Dimensional Linear-Shaped Charge Jet Using Smoothed Particle Hydrodynamics," *Engineering Computations*, Vol. 28, No. 1, pp. 58~75.
- (10) Johnson, G. R. and Cook, W. H., 1985, "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 21, No. 1, pp. 31~48.
- (11) Shvetsov, G. A., Matrosov, A. D., Fedorov, S. V., Babkin, A. V. and Ladov, S. V., 2011, "Effect of External Magnetic Fields on Shaped-Charge Operation," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 38, No. 6, pp. 521~526.
- (12) Oshima, S., Yamane, R., Moshimaru, Y. and Matsuoka, T., 1987, "The Shape of a Liquid Metal Jet Under a Non-Uniform Magnetic Field." *JSE Int. J.*, Vol. 30, No. 261, pp. 437~448.
- (13) Trishin, Yu A., 2000, "Effect of Energy Dissipation on the Shaped-Charge Flow Regime," *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, Vol. 41, No. 4, pp. 577~584.