

# 섬광 X선과 잔류관통깊이 분석을 통한 성형작약탄 제트에 대한 펄스전류 효과

주재현<sup>\*,1)</sup> · 최준홍<sup>1)</sup> · 김동규<sup>1)</sup> · 김시우<sup>1)</sup> · 김정태<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제5기술연구본부

## The Effect of High Current Pulse against Shaped Charge Jet by Flash X-Ray and Residual Penetration Depth

Jaehyun Joo<sup>\*,1)</sup> · Joonhong Choi<sup>1)</sup> · Dongkyu Kim<sup>1)</sup> · Siwoo Kim<sup>1)</sup> · Jeongtae Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 16 March 2015 / Revised 4 August 2015 / Accepted 14 August 2015)

### ABSTRACT

In this paper, the effect of high voltage current pulse against shaped charge jet was analyzed through the visualization of jet behavior using flash X-ray and comparison of depth of penetration(DOP) into RHA(Rolled Homogeneous Armor) witness plates. The behavior of jet particles has been acquired using a flash X-ray equipment when current pulse was applied into the metal jet of a shaped charge(SC) warhead. Typical results such as jet breakup and radial jet dispersion, which are due to electromagnetic pressure by current pulse, have been obtained. Dozens of penetration experiments using a shaped charge with 55 mm diameter were performed according to various combinations of major parametric variables such as electrode spacing, standoff distance from SC warhead to electrode, and charge voltage. Subsequently, interrelations between major parametric variables and DOPs into RHA were analyzed.

Key Words : Current Pulse(펄스전류), Shaped Charge Warhead(성형작약탄), Metal Jet(금속제트), Flash X-ray(섬광 X-선), Depth of Penetration(관통깊이)

### 1. 서론

성형작약탄은 목표물에 충돌시 초고속 금속제트를 발생시켜 목표물의 장갑(armor)을 관통하여 파괴하는

탄으로 대구경 대전차 미사일, 중구경 대전차 로켓탄 등에 활용되고 있다. 이러한 성형작약탄을 방호하기 위한 장갑으로는 폭발형 반응장갑, 비활성 반응장갑 등이 있는데 이들은 화학 및 비활성 물질 등을 이용하여 금속 비행판을 제트와 충돌시키거나 국부적으로 팽창시켜 제트의 관통성능을 감소시키는 개념이다.<sup>[1]</sup> 이러한 개념과는 달리 금속제트(주로 구리 소재)가 전

\* Corresponding author, E-mail: jhjoo@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

도성임을 이용하여 고전압 펄스전류를 제트에 작용시키는 새로운 방법이 전기 장갑(electric armor) 이라는 이름으로 연구되고 있다. 본 연구에서는 후자의 방법과 같이 전기에너지를 이용하여 제트의 관통성능을 감소시킬 수 있는 실험을 수행하였다. 문헌<sup>[2,3]</sup>에서 보면 펄스전류가 제트에 작용시 제트 입자 붕괴(breakup)의 조기 발생과 반경방향 팽창이 발생하는 것으로 발표되었는데 본 연구에서도 섬광 X선(flash X-ray)을 사용하여 이러한 펄스전류에 의한 효과를 분석하였고 주요 설계변수와 실험에서 측정된 장갑 입증판에 대한 잔류관통깊이 간의 상관관계를 분석하였다.

## 2. 실험 시스템 구성

### 2.1 실험 개념 및 장치 구성

성형작약탄 제트에 대한 펄스전류 효과분석 실험을 위한 실험개념도는 Fig. 1과 같다.

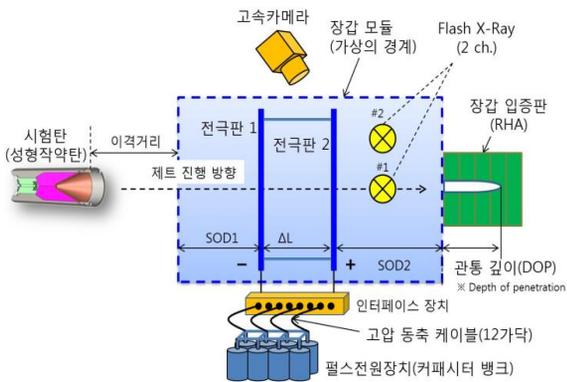


Fig. 1. Configuration of the experimental setup

Fig. 1에서 전극판 1과 전극판 2는 5 mm 두께의 steel 소재로 제작되었으며 일정한 간격을 갖고 연속하여 배열되어 있고 인터페이스 장치에 의해 펄스전원장치와 연결되어 있어서 고전압으로 충전된다. 성형작약탄은 전극판 1 앞에 일정한 이격거리를 두고 설치되며 제트 진행방향은 점선 화살표로 표시하였다. 본 연구에서는 제트에 대한 펄스전류 효과 입증을 위해 제트 거동 분석에 사용되는 보편적인 방법인 섬광 X선과 보조적으로 고속카메라를 이용하여 전극판 사이의 현상을 관찰하였다. 전체 시스템에 대한 성능분석을 위해 전극판 2 뒤에 일정한 거리를 두고 장갑(RHA :

Rolled Homogeneous Armor) 입증판을 설치하여 잔류 제트에 의한 관통깊이를 측정하였다. 실험조건 구성을 위해 전극판 1과 전극판 2는 점선으로 표시된 장갑 모듈의 가상의 경계 내에서 SOD1(standoff distance, 위협탄과의 이격거리)과 ΔL(전극판 간격)을 변화시키면서 다양하게 배열하였다. 전기에너지의 크기에 따른 성능 분석을 위해 펄스전원장치의 충전전압은 5 kV ~ 30 kV 사이에서 5 kV 단위로 운용하였다.

### 2.2 시험탄 및 펄스전원장치

본 연구에서 사용한 시험탄은 화약직경(CD : Charge Diameter)이 55 mm, 장약이 Comp-B 285g 인 성형작약탄(Fig. 2)으로 실제 위협탄의 관통성능을 모의한 탄이다. 시험탄은 실제 위협탄과 동등한 관통성능을 내기 위해 Fig. 1과 같이 일정한 이격거리를 두고 설치된다.

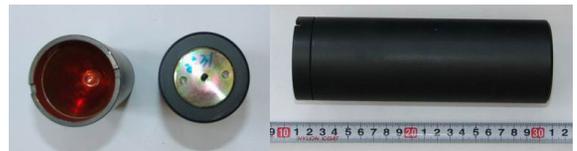


Fig. 2. A shaped charge warhead used in the experiment



Fig. 3. The pulsed power system

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 펄스전원장치로서 설정된 성능요구조건을 만족하도록 정격용량이 50 μF, 40 kV, 40 kJ인 커패시터 12개를 병렬 연결하여 제작되었고 절연과피 방지와 역전압에 의한 커패시터 수명 단축을 방지하기 위해 약 30 kV까지만 충전하여 사용하였다. 30 kV 충전시 에너지는  $E = 1/2 * CV^2 = 1/2 * 600 \mu F * (30 kV)^2 = 270 kJ$  이다. 펄스전원장치

는 운반과 설치를 고려하여 2개의 모듈로 구성하였으며 1개 모듈에는 커패시터 6개를 1열에 3개씩 2열로 배열하였다.

본 실험에서는 전체 시스템의 전기적 특성을 분석하기 위해 데이터 획득 시스템(High Volt 사의 AD3000)으로 총 8채널의 전압 및 전류 데이터를 계측하였다. 전압은 전압 프로브를 이용하여 커패시터 뱅크, 인터페이스 장치, 전극판 양단 등 3군데서 측정하였고 전류는 Fig. 3에서 보듯이 로고스키 코일의 길이 제한으로 인해 3개의 고전압 케이블 당 1개씩 감아서 총 4개의 로고스키 코일로 전류를 계측하여 이들 전류파형을 합하여 총 전류를 획득하였다. Fig. 4는 본 실험 중에서 최대 충전전압 조건인 30 kV 충전실험( $\Delta L = 200$  mm, SOD1 = 100 mm)에서 획득한 전압(전극판 사이) 및 전류 측정결과의 한 예이다. Fig. 4에서 전류 최대치는 약 600 kA, 펄스전류의 첫 번째 반주기는 약 89  $\mu$ s 이다.

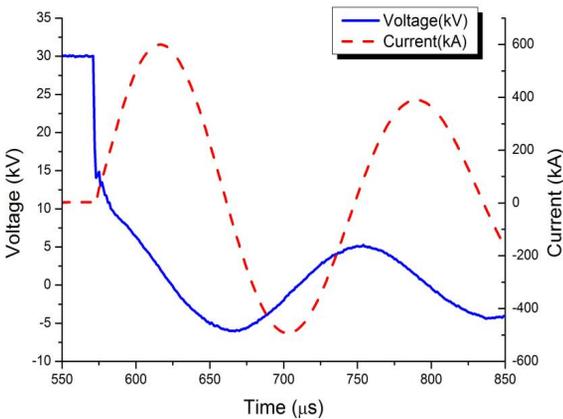


Fig. 4. A typical voltage and current curves measured from an experiment for 30 kV charging

Fig. 4의 실험조건에 대하여 시험탄에 대한 제트특성실험<sup>[4]</sup>에서 획득한 제트 선단 및 후미 위치 곡선에 전극판 1과 전극판 2의 위치를 함께 표시하고 여기에 Fig. 4의 전류곡선을 대입하면 Fig. 5와 같다. Fig. 4에서 X축의 시간은 탄 기폭과 연동된 시간이 아니기 때문에 Fig. 4의 전류곡선을 Fig. 5에 대입시 전류곡선의 전류 상승 시작 시점이 Fig. 5에서 제트가 전극판 2에 도달하는 시점( $t_1$ )이 되도록 하였다. Fig. 5에서 펄스전류가 제트에 작용하는 시간( $\Delta t$ )은 제트 선단이 전극판 2에 도달하는 시점인  $t_1$ 부터 제트 후미가 전극판 1을

이탈하는 시점인  $t_2$ 까지 이다. 제트특성실험<sup>[4]</sup>에서 구한 탄 기폭후 시간경과에 따른 제트 선단 및 후미에 대한 위치 식을 이용하여 Fig. 5에서  $t_1$ ,  $t_2$ 를 계산하면 각각 76.8  $\mu$ s와 122.7  $\mu$ s로 펄스전류가 제트에 작용하는 시간은 약 46  $\mu$ s( $\Delta t = t_2 - t_1 = 122.7 - 76.8 = 45.9$   $\mu$ s) 정도임을 알 수 있다. Fig. 5에 표시된 전류 곡선은 Fig. 4의 전류 파형의 첫 번째 반주기로 제트에 대한 펄스전류 작용시간( $\Delta t$ )이 펄스전류의 첫 번째 반주기보다 작음을 알 수 있다. Fig. 5에서 보듯이 전원장치에서 생성된 펄스전류 중 제트에 영향을 주는 부분은 첫 번째 반주기 이므로 제트에 대한 영향을 증대시키기 위해 펄스 전류의 첫 번째 반주기 펄스 파형이 매우 중요함을 알 수 있다.

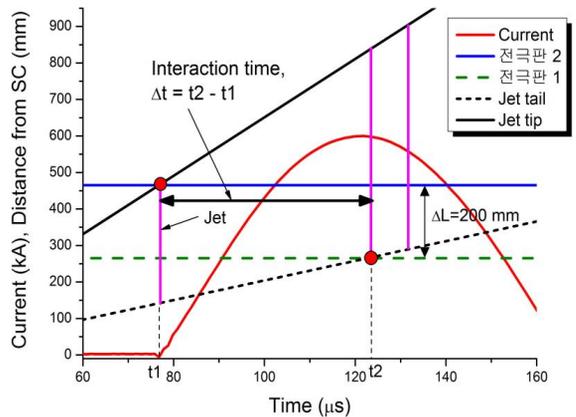


Fig. 5. Comparison of current curve and interaction time for an experiment with  $\Delta L = 200$  mm, SOD1 = 100 mm and 30 kV charging

### 2.3 고속카메라 촬영 결과

제트가 전극판 2에 접촉되기 전 아크(arc)에 의한 플라즈마가 발생하여 전기장갑의 효과에 영향을 주는지 분석하기 위해 고속 카메라를 이용하여 제트가 전극판 사이를 관통하는 순간을 촬영하였다. 본 실험에서 사용된 고속 카메라의 기종은 Phantom V710이고 약 28만 fps(frame per second)(사진 간 간격은 약 3.6  $\mu$ s, 해상도는 256 × 64 픽셀)로 촬영하였다. 초기 촬영시 제트에 의한 섬광과 화염이 강하여 전극판 사이의 현상 관찰이 용이하지 않았다. Laser diode 광원을 flash로 하고 기타 섬광은 간섭필터(interference filter)로 제거하여 제트 이미지를 개선하고자 하였으나 크게 개선되지는 않았다.

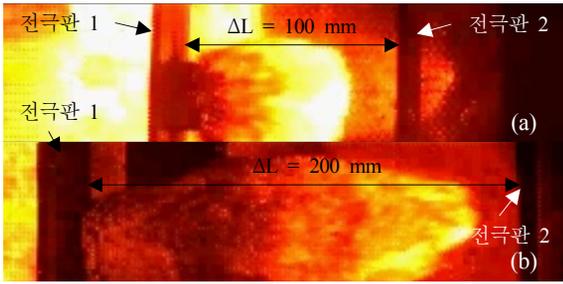


Fig. 6. Selected photographs displaying jet propagation between electrodes (a)  $\Delta L = 100$  mm; (b)  $\Delta L = 200$  mm

Fig. 6은 본 실험에서 고속 카메라로 촬영한 사진의 일부로 (a)는 전극판 간격이 100 mm, (b)는 전극판 간격이 200 mm일때 충전전압이 20 kV인 조건에서 제트가 전극판 2에 도달하기 전의 전극판 내부의 현상으로 강한 섬광, 화염 및 미세한 파편 등이 발생하고 있으며 이들로 인해 제트 거동은 잘 식별되지 않음을 알 수 있다. 고속 카메라 촬영 실험을 통해 초고속 제트의 거동을 분석하기 위해서는 화염, 섬광, 먼지 등을 투과할 수 있는 섬광 X선이 적절함을 확인하였다.

### 3. 섬광 X선 실험 결과 분석

#### 3.1 섬광 X선 실험

펄스전류의 작용에 의한 제트 거동 변화를 섬광 X선을 이용하여 획득하기 위해 Fig. 7과 같이 Flash X-ray tube head(2ch)와 X-ray 필름이 설치된 X-ray 필름 카세트를 배열하였다.

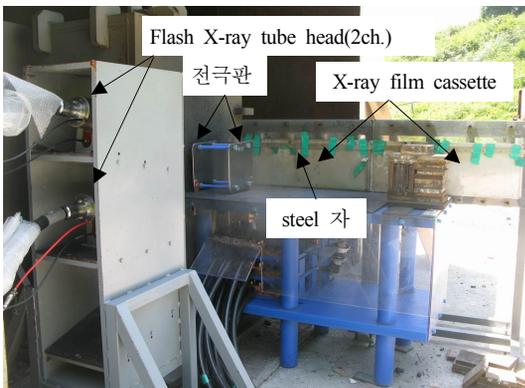


Fig. 7. Setup for flash X-ray experiment

Fig. 7에서 전극판 통과 전후의 제트의 거동을 관찰하여야 하므로 전극판 2 후방으로 1 m 정도의 충분한 공간을 확보하였다.

섬광 X선 실험에서 획득한 X-ray 필름 분석시 object (제트)와 X-ray 필름사이의 거리인 FTOD(Film To Object Distance)에 의한 제트 위치 오차를 보정하여야 하므로 실제 제트에 대한 섬광 X선 실험전에 FTOD 오차 분석 실험을 수행하였다. 본 실험에서 사용된 섬광 X선 장비는 Scandiflash사의 Model 300(최대출력: 300 kV, 최대전류: 10 kA, pulse width: 2 ns)이다. 본 실험에서는 섬광 X선 트리거를 탄 기폭과 연동시키기 위해 미리 꼬아놓은 두 가닥의 에나멜선을 탄에 감아서 탄 기폭시 폭압에 의해 두 에나멜선의 피복이 벗겨지면서 서로 단락(short)될 때의 신호를 X-ray 트리거 입력신호로 이용하는 방법을 적용하였다.

#### 3.2 X-ray 사진 분석

DOP 감소 효과가 큰 실험조건에 대하여 섬광 X선 실험을 수행한 결과 Fig. 9, Fig. 10과 같이 펄스전류의 작용으로 제트가 작은 입자들로 분리되고 제트입자의 형상이 제트 반경방향으로 팽창하는 현상을 관찰하였다. 이는 문헌<sup>[2,3]</sup>에서 발표된 내용과 유사한 결과로 전기장압의 작동 원리가 정상적으로 구현되고 있음을 보여준다.

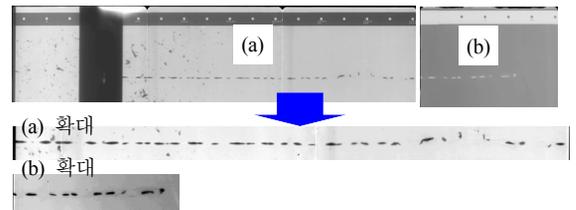


Fig. 8. A radiograph taken at 110  $\mu$ s after detonation of a shaped charge without high current( $\Delta L = 200$  mm, SOD1 = 100 mm)

Fig. 8과 Fig. 9는 각각  $\Delta L = 200$  mm, SOD1 = 100 mm 조건에서 제트에 전류를 부과하지 않은 경우와 최대 30 kV로 충전하여 펄스전류를 제트에 부과한 경우로써 제트에 전류를 부과하지 않은 경우 시간이 경과함에 따라 자연적으로 제트 붕괴(breakup)가 발생하여 작은 입자들로 분리되었지만 제트의 직경은 그대로 유지되면서 제트입자 자체는 변형이 발생하지 않고 거의 직선의 대열을 이루어 전방으로 진행하고 있

다. 제트 입자의 모양도 인장으로 인한 necking에 의해 끊김으로 제트 입자 모양이 타원형이다. 반면 제트에 펄스전류를 부과한 경우인 Fig. 9에서는 전극판 2를 관통하기 전후의 제트입자 형상 (a), (b), (c)의 확대사진을 보면 (a)와 (b)에서는 Fig. 8과 달리 제트입자의 양 끝단이 둥근 형태가 아니라 칼로 자른 듯이 끊어진 사각형 모양으로 이것은 전자기력에 의한 제트입자의 강제적인 분리가 발생하였음을 알 수 있다. Fig. 9에서 (b) 와 (c)는 (a)에 비해 30  $\mu$ s 경과된 시점으로 펄스전류 상승에 따른 전자기력이 증가로 인해 제트 입자의 불안정성이 크게 증가하였다. (c)에 대한 확대사진에서 제트는 반경방향으로 팽창하여 링(ring) 모양으로 변하면서 부피가 증가하여 어떤 경우는 혼적만 겨우 보이는 정도로 변한 것을 볼 수 있다. 이것은 해외연구 결과<sup>12,3)</sup>에서 제시한 제트 변형 거동과 거의 일치하는 것으로 펄스전류 작용에 의한 전형적인 효과이다.

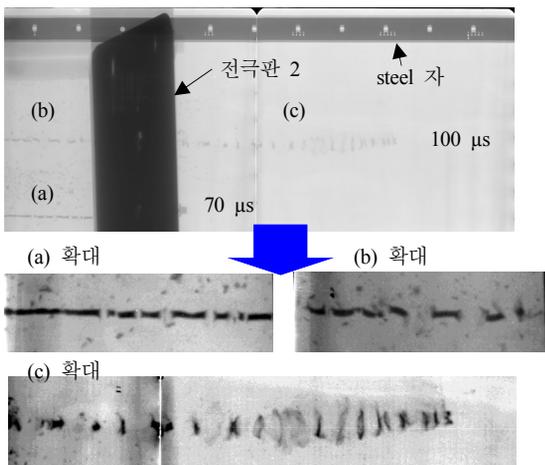


Fig. 9. A radiograph taken at 70  $\mu$ s and 100  $\mu$ s after detonation when current pulse was applied to jet at 30 kV charging( $\Delta L = 200$  mm, SOD1 = 100 mm)

Fig. 10은  $\Delta L = 200$  mm, SOD1 = 100 mm, 20 kV 충전 조건에 대한 결과로서 전극판 2를 통과한 후 제트 형상이 Fig. 8의 전류 미부과시의 제트 거동과 달리 제트 입자 붕괴(breakup)가 시간 경과에 따른 자연스러운 분리가 아니라 전자기력에 의해 강제로 절단된 듯한 모습과 제트 입자의 반경 방향 팽창 등 Fig. 9와 유사한 펄스전류 효과를 확인할 수 있다.

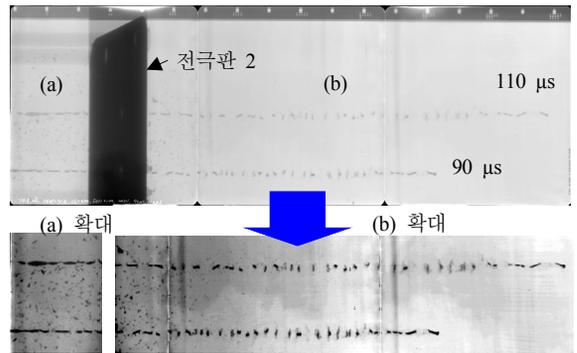


Fig. 10. A radiograph taken at 90  $\mu$ s and 110  $\mu$ s after detonation when current pulse was applied to jet with charging 20 kV( $\Delta L = 200$  mm, SOD1 = 100 mm)

#### 4. 잔류관통깊이 결과 분석

##### 4.1 실험 과정

본 연구에서는 전극판 간격( $\Delta L$ ), 탄과 전극판 사이 거리(SOD1), 충전전압 등의 주요 변수 조합시 다양한 실험조건 도출이 가능하고 이들 실험조건에 대한 정량적인 평가를 위해 실험조건별로 장갑에 대한 잔류관통깊이(DOP)를 측정하였다. 고전압 충전 실험의 경우는 성형착약탄 기폭과 펄스전원 작동이 동시에 이루어지는 실험 특성상 한 번에 많은 실험을 수행하기 힘든 점이 있으나 주어진 일정 내에서 가능한 한 다양한 설계변수 조합경우에 대한 실험결과 확보를 위해 많은 경우 실험조건당 관통실험을 1회씩만 수행하였다. 반면 0 kV 실험의 경우는 전원장치 설치없이 실험이 가능하여 전압충전실험에 비해 제한이 덜하므로 일부 경우를 제외하고 대부분 최소 3회의 관통 실험을 수행하였다.

본 연구에서 DOP 측정을 위하여 Fig. 1의 개념과 같이 실험조건에 따라 SOD1, SOD2 등 이격거리를 두고 장갑모듈과 장갑관통깊이 측정을 위한 장갑 입증판을 설치하였다. 장갑 입증판은 두께가 25.4 mm인 RHA 판재를 제트 진행방향으로 충분히 배열하였다.

Fig. 11 (a)는 실험후 제트에 의해 관통된 장갑모듈과 장갑(RHA) 입증판을 회수하여 배열한 모습이며 각 실험조건에 대한 시스템 성능분석을 위해 관통된 장갑 입증판의 관통깊이를 측정하였다. 관통된 장갑 입증판의 마지막장은 부분관통(partially penetrated)된 경우 정

확한 관통깊이 측정을 위해 Fig. 11 (b)와 같이 관통 구멍을 중심으로 장갑 입증판을 절단하였다.

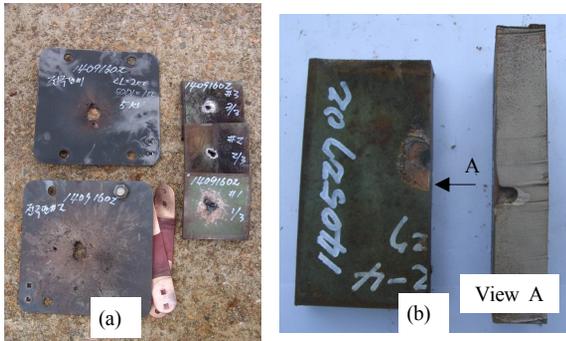


Fig. 11. (a) The penetrated electrodes and RHA witness plates recovered after test, (b) a cutting section view of a residual penetration hole of the last partially penetrated RHA plate

#### 4.2 설계변수와 DOP간 상관관계 분석

Fig. 1에서 보듯이 전극판 간격( $\Delta L$ )과 SOD1을 변화 시킴에 따라 장갑모듈 내에서 다양한 전극판 배열이 가능하고 충전전압에 따라 전기에너지 크기가 달라지므로 Fig. 12에서 보는바와 같이 제트에 대한 펄스전류 부과 실험에서 획득한 장갑관통깊이(DOP)에 대한 이러한 설계변수들의 영향을 분석할 필요가 있다.

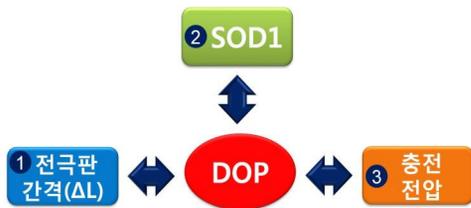


Fig. 12. The main variables that affect the DOP in this experiment

첫 번째로 전극판 간격과 DOP 결과와의 상관관계를 Fig. 13과 같이 비교하였다. 전극판 간격 변화에 따른 효과를 비교하기 위해선 전극판 1의 위치는 고정되어 있고 전극판 2의 위치만 변경되어야 한다. Fig. 13은 SOD1 = 100 mm, 즉 전극판 1이 장갑모듈 내에서 전방에서 100 mm 지점에 위치할 때 전극판 간격에 따른 DOP 비교 결과이다. 그래프에서 Y축은 본 실험에서 구한 DOP를 Fig. 1의 배열에서 전극판을 설

치하지 않은 경우의 DOP에 대한 비율로 표시하였다. Fig. 13에서  $\Delta L = 50$  mm에서는 전류 효과가 불분명하다가  $\Delta L = 100$  mm 이상에서 전류 미부과시(0 kV 충전)에 비해 전류 부과시 DOP가 감소하여 전류효과가 나타남을 알 수 있다. Fig. 13에서 전류 부과시  $\Delta L$ 의 증가에 따라 DOP가 감소 또는 증가의 단조적인 경향을 보이기보다는 감소후 증가 등의 복합적인 경향을 나타낸다. 단 앞서 언급한 바와 같이 본 실험에서 일부 경우를 제외하고는 고전압 충전 경우 대부분 1회의 관통실험 결과이므로 DOP 변화 경향을 단정하기에에는 불충분한 면이 있다.

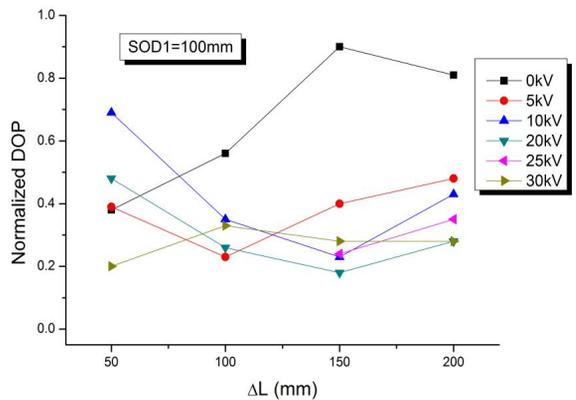


Fig. 13. DOP variation according to electrode gap( $\Delta L$ ) for SOD1 = 100 mm

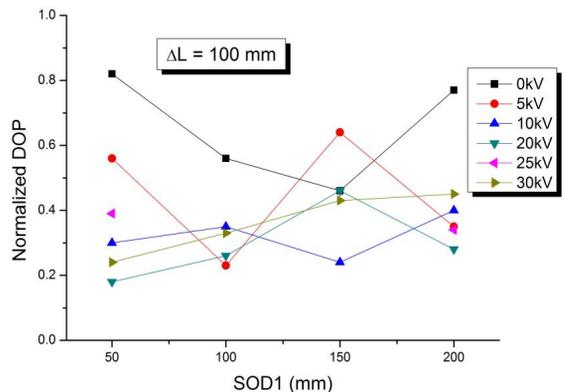


Fig. 14. DOP variation according to SOD1 for  $\Delta L = 100$  mm

다음으로 SOD1과 DOP 간의 상관관계를 Fig. 14와 같이 비교하였다. Fig. 14는 전극판 간격이 100 mm 일

때의 SOD1에 따른 DOP 결과로서  $\Delta L$ 과 DOP간 상관관계처럼 SOD1과 DOP 간에 비례, 반비례 등의 규칙적인 관계는 찾기 힘들다. Fig. 14에서 보듯이 SOD1 = 150 mm에서는 전류 미부과시 보다 전류 부과시의 DOP가 더 큰 경우도 있어서 전류효과가 불분명하지만 다른 SOD1에서는 전류효과가 있는 것으로 나타났다. 본 실험의 시험탄은 실제 위협탄의 최대 관통력을 모의한 탄으로 최적 SOD 이후 SOD가 더 증가하면 제트 붕괴(breakup)로 인한 제트의 불안정성 증가 및 탄 자체의 특성으로 인해 탄 관통력 편차가 커지는 경향을 나타낸다. Fig. 13과 Fig. 14에서 전류가 작용하지 않는 경우(0 kV)의 DOP가 설계변수 조건에 따라 변화하는 것은 이러한 시험탄의 특성에 기인하는 것으로 설계변수에 의한 영향은 아닌 것으로 판단된다. 또한 Fig. 13과 Fig. 14에서 전류효과가 나타난  $\Delta L$ , SOD1 영역에서 충전전압(충전 에너지) 증가에 따라 DOP가 반드시 비례하여 감소하지 않는데 이것은 전류효과와 큰 이격거리에 따른 시험탄의 관통력 편차가 복합적으로 작용하여 데이터가 산란된 것으로 볼 수 있다.

마지막으로 충전전압과 DOP 간의 상관관계를 그래프로 나타내면 Fig. 15와 같다. Fig. 15에서 보듯이  $\Delta L$  = 100 mm에서는 충전전압 증가에 따른 DOP 감소가 규칙적이지 않고 복잡한 경향을 보이고 있다.  $\Delta L$  = 100 mm에 비해  $\Delta L$  = 200 mm에서는 충전전압 증가에 따른 DOP 감소 경향이 나타남을 볼 수 있다.  $\Delta L$  = 200 mm에서 SOD1 = 50 mm 조건은 5 kV 충전시 이미 최소 DOP에 거의 도달하였으며 SOD1 = 100 mm 조건은 20 kV 이상에서는 더 이상 DOP가 감소하지 않으므로 20 kV 이상 충전은 불필요함을 알 수 있다. Fig. 13 ~ Fig. 15에서 일부조건(예: 15 kV 충전)에서 생략된 점들은 실험이 수행되지 않은 조건이다. 본 실험은 화약직경이 55 mm인 반면 해외의 경우 화약직경이 90 mm 이상인 성형작약탄에 대해서도 전류효과에 대한 연구결과<sup>15)</sup>를 발표한 바 있으며, 특히 러시아<sup>16)</sup>의 경우 70 mm ~ 150 mm 화약직경의 성형작약탄에 대해서 충전에너지를 증가시킨 경우 장갑 관통깊이가 감소하는 결과를 발표한 바 있다. 한편 본 연구와 관련하여 상용코드인 LS-DYNA에 전자기력 해석을 결합하여 성형작약탄 제트에 대한 전류 인가 수치해석을 수행한 연구 결과<sup>17)</sup>가 발표된 바 있으나 제트가 실제로 거동하는 조건에서의 전류 효과 해석을 위해 추가 연구 중에 있다.

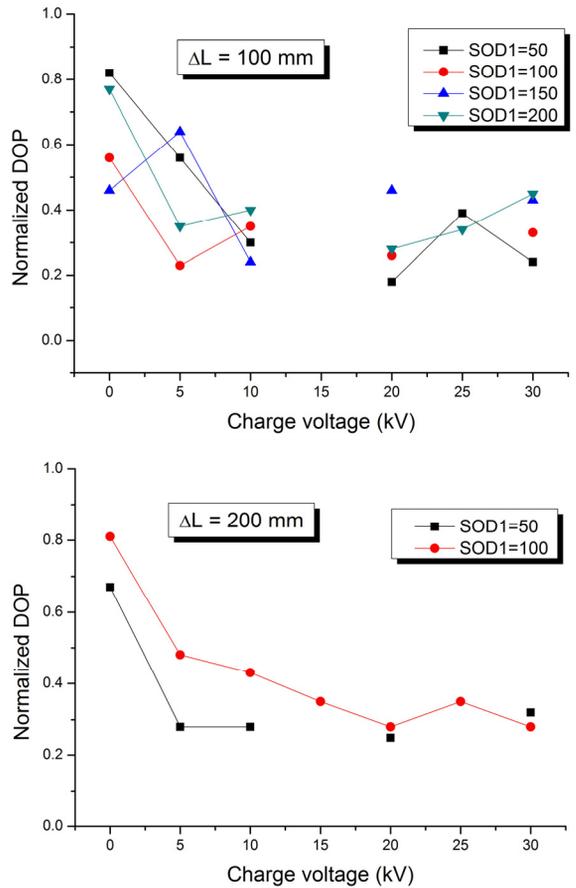


Fig. 15. DOP variation according to charge voltage for  $\Delta L$  = 100 and 200 mm

## 5. 결론

본 연구에서 화약직경이 55 mm인 성형작약탄을 대상으로 실험한 결과 고전압 펄스전류를 성형작약탄 제트에 작용시키면 제트의 관통성능이 감소함을 확인하였다.

섬광 X선 실험에서는 해외연구결과와 유사하게 전류인가 후에 제트입자들이 칼로 자른 듯이 강제적으로 붕괴(breakup)되고 제트가 전극판 2를 관통한 뒤에는 반경방향으로 팽창되는 등의 펄스전류에 의한 전형적인 효과를 확인하였다.

전극판 간격, 탄과 전극판 사이 거리(SOD1), 충전전압 등의 주요 설계변수와 장갑 관통깊이(DOP) 간의 상관관계를 분석한 결과 전극판 간격 및 SOD1과 DOP

간에는 각각 비례, 반비례 등의 규칙적인 상관관계가 성립하지 않았다. 충전전압과 DOP 간 관계에서는  $\Delta L = 200$  mm에서 충전전압 증가에 따른 DOP 감소 경향과 SOD1 조건별로 5 kV에서의 DOP 감소 및 20 kV 이상 충전 불필요함 등을 확인하였다. 전류가 작용하지 않는 경우(0 kV)에 설계변수 변화에 따른 DOP 차이가 발생한 것과 동일 조건에서 충전전압 증가에 따라 DOP가 반드시 비례하여 감소하지는 않은 것은 본 실험에서 설정된 큰 이격거리에 의한 시험탄의 관통력 편차에 의한 데이터 산란으로 판단된다. 본 실험은 설계변수 분석 우선으로 수행되어 동일한 조건에 대한 실험횟수가 불충분한 점이 있으므로 본 실험에서 도출된 결론은 제한적으로 적용되어야 한다.

## References

- [1] J. H. Joo, J. H. Choi, H. J. Lee and C. H. Lee, "Protection against Shaped Charge by Reactive Armors Containing Energetic and Inert Materials," 27<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics, pp. 1433-1442, April, 2013.
- [2] P. Appelgren et. al., "Radial Jet Dispersion Due to Current Interaction in an Electric Armour Application," 24<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics, pp. 935-943, 2008.
- [3] M. Wickert, "Electric Armor against Shaped Charge : Analysis of Jet Distortion with Respect to Jet Dynamics and Current Flow," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 43, No. 1, pp. 426-429, 2007.
- [4] J. H. Joo, J. H. Choi, H. J. Lee, S. W. Kim, "An Experimental Analysis(I) for Characteristics of Metal Jet of Some Threats against Electric Armor", ADDR-519-131356, Agency for Defense Development, 2013.
- [5] S. V. Fedorov et. al., "Prediction of the Penetrating Power of Metallic Shaped Charge Jets Subjected to an Intense Electric Current Pulse", Technical Physics, Vol. 48, No. 7, pp. 829-836, 2003.
- [6] M. J. van de Voorde et al., "Defeating The RPG7 Threat by Using Electric Power in Reactive Armour Applications", 23rd International Symposium on Ballistics, pp. 1141-1147, 2007.
- [7] Hyeong Gyu Park, Dong Kyu Kim, Si Woo Kim, Jae Hyun Joo, Woo Jin Song, and Jeong Kim, "Numerical Analysis of Intense Electric Current Pulse to Disperse Shaped Charge Metal Jet", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 39, No. 1, pp. 55-62, 2015.