

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(11), 907-913(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.11.907

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 펄스 아크 스파크 제트 플라즈마 구동기에 의해 발생된 고속 제트의 효율적 운전 성능 특성에 관한 연구

김영순\*, 신지철\*\*

### Performance Characteristics of a High-Speed Jet Produced by a Pulsed-Arc Spark Jet Plasma Actuator

Young Sun Kim\* and Jichul Shin\*\*

Department of Aerospace Engineering, University of Ulsan, Korea\* ,\*\*

#### ABSTRACT

The performance of a spark jet driven by pulsed-arc plasma was investigated experimentally for various energy input. A high-speed jet (about 330 m/s) was obtained by rapid gas heating produced by 37 mJ of deposited energy per pulse. The peak velocity and penetration distance of the jet were proportional to the deposited power and the deposited energy per pulse, respectively. A smaller orifice diameter produces a higher velocity jet at lower energy levels. For the same deposited energy, higher-current pulses produce a higher jet velocity than higher-pulse-width pulses. A total deposited energy of about 10 mJ per pulse with a pulse duration of about 10  $\mu$ s was found to be the optimum for energy-efficient operation.

#### 초 록

아크 플라즈마에 의해 구동되는 스파크 제트의 다양한 에너지 공급 방법에 따른 효율적 운전 성능 특성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 펄스 당 37 mJ의 주입 에너지에 의한 급속한 기체의 가열에 의해 약 330 m/s의 고속 제트가 발생함을 확인하였다. 제트의 최대 속도와 침투 거리는 각각 주입된 전력량과 펄스 당 주입된 에너지에 비례하였다. 낮은 에너지에서는 오리피스 직경이 작을수록 더 높은 속도의 제트가 발생하였다. 공급 에너지가 같다면 전류를 높인 펄스가 펄스 폭을 높인 펄스보다 높은 속도의 제트를 발생시켰다. 펄스 폭이 약 10  $\mu$ s이고 펄스 당 에너지가 약 10 mJ인 경우가 효율적인 운전보다 더 적합한 것으로 확인되었다.

**Key Words** : Spark Jet(스파크 제트), Flow Control(유동 제어), Plasma Actuator(플라즈마 구동기), Pulsed Arc(펄스 아크), Synthetic Jet(합성 제트)

#### 1. 서 론

항공기나 비행체의 공력 성능은 우선적으로

비행체의 형상이 지배적인 영향을 미친다. 하지만 다양하고 예측이 어려운 비행 조건하에서 공력 성능을 유지하거나 향상시키기 위해서는 부가

† Received : J 23, 2017    Revised : November 6, 2017    Accepted : November 14, 2017

\* Corresponding author, E-mail : sgoo@konkuk.ac.kr

적인 공력 제어 방안이 고려되는 것이 바람직하다. 유동 제어를 이용하는 경우 크게 수동적인 유동 제어와 능동적인 유동 제어로 나눌 수 있다. 수동적인 유동 제어는 와류발생기[1]와 같이 움직임이 없는 구조물을 이용하거나 리블릿[2]과 같이 표면에 구조적인 패턴을 사용하는 방법 등이 사용된다. 능동적인 방법은 구동이 가능한 장치를 추가적으로 설치하여 필요시 작동하도록 하는 것으로, 플랩이나 흡입/분사[3]등이 대표적인 방법이다. 하지만 이와 같은 기존의 유동 제어 장치를 사용하는 경우, 추가적인 하중 증가나 소음 및 진동과 같은 부수적인 악영향을 동시에 고려하여야 한다[4].

능동적인 유동 제어 기법 중 최근에 관심을 받는 방법은 플라즈마를 이용한 것으로 기계적인 능동 유동 제어 기법과 달리 구조가 간단하며 유동 제어기 자체가 기존의 유동에 변화를 주지 않으며 전기적인 에너지를 사용하기 때문에 높은 응답 속도를 가진다는 장점이 있다[5]. 플라즈마 유동 제어 기법은 사용하는 전기 방전의 종류에 따라 유동 제어 특성이 달라지기 때문에 유동의 특성에 맞는 방전의 선택이 필요하다. 본 연구의 관심 대상인 초음속 유동의 제어에서는 주로 기체 가열 효과를 이용한 플라즈마 유동 제어 기법이 사용되는데 이때 사용되는 방전은 주로 직류 방전이 사용된다.

직류 방전은 전류 밀도가 높은 아크 방전을 만들 수 있어 유동 제어에 필요한 가열 효과인 줄(Joule) 가열 효과를 높일 수 있다는 장점이 있다[6]. 줄 가열은 플라즈마 내의 방전 입자들이 전기장에 의해 이동하면서 발생하는 충돌에 의한 기체 가열 효과로써 전류 밀도와 전기장의 곱에 비례한다. 다른 종류의 플라즈마와 마찬가지로 아크 방전 또한 항공우주분야를 포함하여 다양한 분야에서 활용되고 있다[7,8]. 경계층 표면에서 만들어진 고온의 표면 아크 플라즈마는 경계층 내부를 팽창시켜 경계층 두께를 두껍게 하거나 박리 영역을 발생시키는 등의 효과를 얻을 수 있다[9].

본 연구의 대상인 스파크 제트 구동기는 세라믹으로 만들어진 공동(cavity) 내부에서 발생한 비평형 펄스 아크 플라즈마에 의하여 내부 공기가 급속히 가열되면서 발생하는 제트 유동을 만들어내는 장치이다[10]. 스파크 제트의 생성 과정은 Fig. 1과 같이 (b1) 방전/가열과정, (b2) 분출 과정 그리고 (b3) 재흡입 과정의 3 단계로 구분할 수 있다. 각각의 과정들은 뚜렷한 시간적 구분이 없이 연속적으로 발생하고 수 kHz 수준까

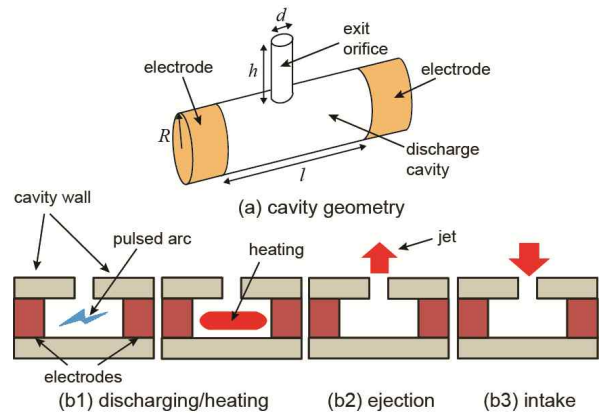


Fig. 1. Structure of spark jet plasma actuator and its operational cycle

지의 반복성을 가지고 제트의 생성이 가능하다. 재흡입 과정에서는 강제적인 기체의 재공급 없이 자연스럽게 발생하는 대류에 의하여 공동 안의 기체가 펄스 발생 이전의 상태로 유지되어야 한다. 따라서 재흡입 과정의 반복성이 스파크 제트의 구동 주파수에 큰 영향을 미친다[11].

스파크 제트의 중요한 성능 지표에는 최대 속도, 침투 거리, 구동 주파수 등이 있다. 여기서 침투 거리는 오리피스의 출구로부터 수직방향으로 제트가 이동한 거리를 의미한다. 최고 속도는 발생하는 추력에 영향을 주고 침투 거리는 초음속 유동에 미치는 영향력과 관련이 있다. 스파크 제트에 공급되는 에너지를 높이면 최대 속도와 침투거리가 향상될 것으로 예상할 수 있다. 하지만 에너지 공급 개시와 더불어 공동 내부의 질량 유출이 시작되기 때문에 스파크 제트의 성능이 공급된 에너지에 단순 비례한다고 기대하기는 어렵다. 본 논문에서는 스파크 방전에 의해 발생된 고속의 제트에 대한 성능 특성을 분석하고, 보다 효율적으로 고속의 제트를 발생시키기 위한 에너지 공급 방법에 대한 연구 결과에 대해서 논의하고자 한다.

## II. 본 론

### 2.1 실험 구성

#### 2.1.1 스파크 제트 구동기

스파크 제트 구동기의 구조는 Fig. 1 (a)에 간단히 설명되어 있다. 공동의 형상은 반지름( $R$ )이 1 mm이고 길이( $l$ )가 3 mm인 원통형이고 하나의 출구 오리피스를 가지고 있다. 공동 내부의 온도는 1,000 K 이상으로 상승할 수 있기 때문에 공동의 재질은 고온에서 견딜 수 있고 절연성이 있

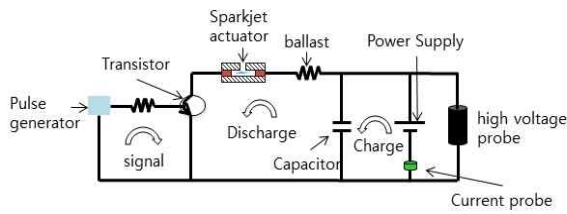


Fig. 2. Electric Circuit Diagram for High Voltage, High Current Pulse Generator

으며 기계 가공이 가능한 알루미늄을 사용하였다. 전극은 공동의 원통부의 직경과 동일한 2 mm의 구리를 사용하였고, 전극 사이의 간격은 공동의 원통 길이와 동일한 3 mm이다. 오리피스의 직경과 길이에 따른 영향을 분석하기 위하여 지름( $d$ )가 각각 1.0, 0.8 및 0.6 mm이고 오리피스의 길이( $h$ )가 각각 2.5와 4.0 mm인 공동에 대한 실험이 수행되었다. 저압의 초음속 비행 환경을 모사하기 위해서 0.1 기압을 유지할 수 있는 진공 챔버 내부에 스파크 제트 구동기가 설치되고 실험이 수행되었다.

### 2.1.2 펄스 아크 발생기

스파크 제트는 수 암페어의 전류를 수 kHz로 공급이 가능한 직류 펄스에 의해 구동이 된다. 따라서 고전압, 고전류, 고주파수 펄스 발생 장치는 스파크 제트 연구에 핵심적인 장비이며 이를 자체 제작하여 본 연구에 활용하였다. 그림 2는 스파크 펄스를 발생시키는 회로도를 보여주는 그림이다. 이 회로는 고전압 전원장치로부터 축전지가 충전되는 충전부, 축전지에 저장된 전하가 방전되면서 스파크 제트를 만들어내는 방전부, 펄스 폭과 주파수를 조절하는 신호부로 나눌 수 있다. 충전부에서는 스파크 제트의 스위치가 꺼져있는 상태에서 직류 전원(15 kV와 20 mA)으로부터 공급된 전하가 고전압 축전지(20 kV-200 nF)로 충전된다. 신호부에서는 555 타이머를 이용한 타이밍 회로로부터 만들어진 펄스 시그널에 의하여 고전압 MOSFET 트랜지스터가 작동된다. 방전부의 트랜지스터 회로가 닫히면 공동 내부의 전극 사이에 고전압이 인가되어 펄스 아크 플라즈마가 발생하고 이에 의해 스파크 제트가 만들어진다. 고전압 측정기(Tektronics P6015A)와 비접촉형 전류측정기(Pearson 2877)를 사용하여 전압과 전류를 실시간으로 측정하였다. 스파크 제트 발생장치의 전단에 설치된 밸러스트 저항(0.25 k $\Omega$  ~ 1.5 k $\Omega$ )은 스파크 펄스로 공급되는 전류량을 제어하고 축전지의 충/방전 시간을 조절하는 용도로 사용이 된다. 본 논문에서 기술된

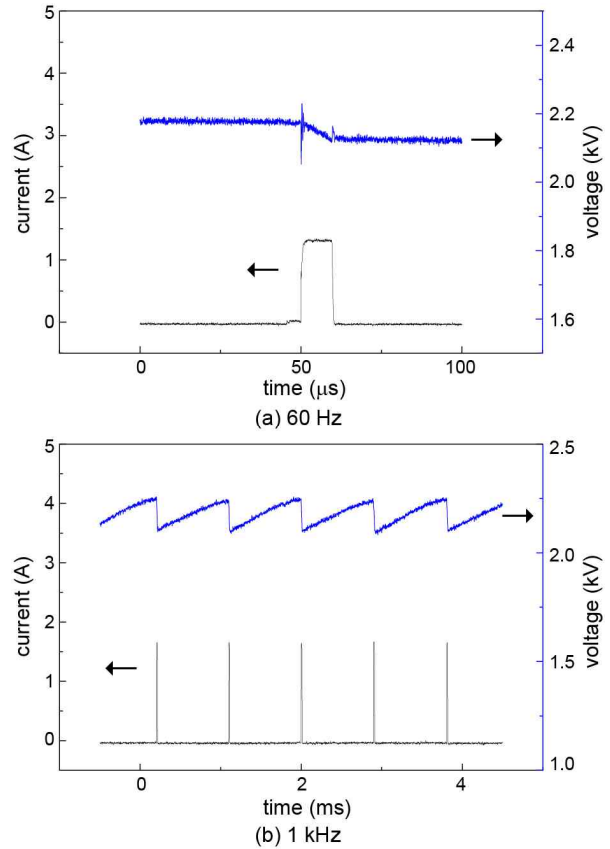


Fig. 3. Current and voltage traces of a spark plasma pulsed at (a) 60 Hz and (b) 1.2 kHz

펄스 당 주입 에너지는 순수하게 공동 내부에 공급된 전기에너지에 따른 스파크 제트의 거동을 분석하기 위하여 밸러스트 저항에서 소모되는 에너지를 제외한 값이 사용되었다.

Figure 3은 펄스 폭이 10  $\mu$ s이고 구동 주파수가 (a) 60 Hz와 (b) 1.2 kHz인 경우 발생하는 펄스 아크 플라즈마의 전류와 전압을 보여주는 그래프이다. Fig. 3 (a)를 보면 펄스 폭인 10  $\mu$ s동안 일정하게 고전류가 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이때 전압은 펄스 플라즈마가 유지되는 동안 감소하고 전류가 차단되면서 다시 이전의 전압 수준으로 회복된다. Fig. 3 (b)의 경우 1.2 kHz의 구동 주파수에서도 일정한 전류 값을 가진 펄스가 반복성 있게 발생되고 있음을 보여준다. 주파수가 높아질수록 트랜지스터의 발열이 상승하고 스파크 공동 내부의 기체 온도가 상승하므로 전류 펄스를 연속적으로 발생시키는데 어려움이 발생한다. 자체 제작된 펄스 발생장치로 약 5 kHz 정도까지는 펄스의 손실이 없이 반복적으로 전류 펄스의 발생이 가능한 것을 확인되었다. 본 연구에서는 펄스 폭을 10  $\mu$ s에서 30  $\mu$ s까지 조절하였

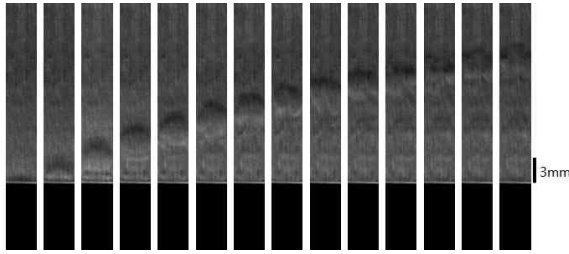


Fig. 4. Time sequence of schlieren images of spark jet

고, 아크 전류는 1.0 A에서 7.5 A까지 조절하였다. 사용된 구동 주파수는 단일 제트의 특성 분석에 집중하고 반복적인 실험에도 전기적인 충격이 발생하지 않도록 하기 위해서 60 Hz에서 실험을 수행하였다.

2.1.3 제트 가시화 및 속도 측정

고속의 스파크 제트를 가시화하고 제트의 이동 속도를 측정하기 위하여 160 kHz의 초고속, 상-고정(phase-locked) 쉐리렌 기법을 사용하였다. 초고속 카메라(Phantom Miro M110)는 펄스 발생기(Quantum composer 9528)에 의하여 아크 펄스와 동기화되었고, 쉐리렌 광원으로는 고출력 LED 광원(>900 mW, Prizmatix UHP-Microscope-LED-630)을 이용하였다. Fig. 4는 스파크 제트가 오리피스를 빠져나가는 순간부터 획득된 연속적인 쉐리렌 이미지를 보여주는 사진으로, 두 이미지간의 시간 간격은 6.25  $\mu$ s이다. 출구 오리피스의 길이와 직경은 각각 2.5 mm와 1.0 mm이며 아크 펄스의 폭은 20  $\mu$ s이고 전류는 3.7 A이다. 제트는 아크 방전이 개시되고 일정 시간 이후에 오리피스 출구에서 관찰이 되었다. 스파크 제트의 속도는 연속적인 쉐리렌 이미지상의 제트 위치의 변화량으로부터 계산되었다. 이렇게 계산된 속도는 제트 전방부의 속도이므로 오리피스 출구에서의 제트의 최고 속도를 의미하는 것은 아니다. 속도 그래프에 사용된 에러 범위는 여러 개의 연속적인 상-고정 이미지로부터 측정된 속도 값을 95% 신뢰도를 가진 student-T 분포에 준하여 계산된 값을 사용하였다.

2.2 실험 결과 및 분석

2.2.1 제트의 거동

Figure 5는 쉐리렌 이미지로부터 측정된 제트 전방부의 위치를 시간에 따른 함수로 표현한 그래프이다. 펄스 폭은 10  $\mu$ s로 동일하고 아크 전류를 조절함으로써 펄스 당 공급된 에너지를 15, 27.5, 32.7 및 37 mJ로 설정하였다. 이 공급된 전

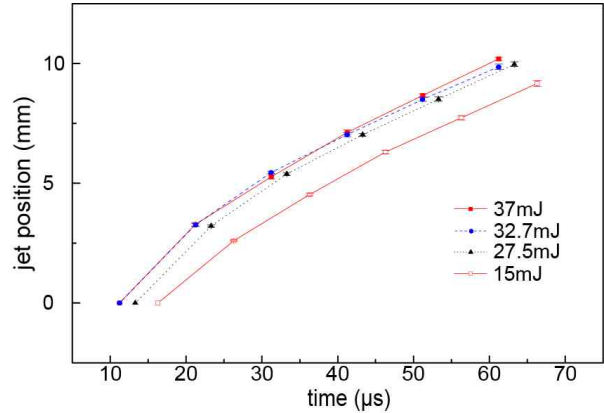


Fig. 5. Time evolution of jet front position for different deposited energy

기에너지 중 일부만이 열에너지로 변환되며 변환 비율을 줄 가열 인자(Joule heating factor)라고 부른다. 유동 제어에서 사용되는 플라즈마의 줄 가열 인자는 대체로 0.1에서 0.3정도로 예상되고 있다. 그림에서 보면 공급에너지가 증가할수록 제트의 분출 시기가 빨라지고, 시간에 따른 제트의 위치가 점점 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보인다. 제트의 분출 시작 시간은 공급된 에너지가 15와 32.7 mJ에 대하여 각각 16.5와 11  $\mu$ s로 확인되었다. 이는 스파크 제트의 응답속도를 의미하는 것으로, 펄스 유지 시간인 10  $\mu$ s보다 늦은 시간이므로 펄스 종료 이후에도 지속적으로 공동 내부의 압력이 상승함을 의미한다. 제트의 분출 시기는 주입된 에너지, 오리피스 직경, 전극 위치 등의 다양한 변수들에 의해 영향을 받는다.

분출된 제트는 서서히 속도가 느려져서 주입 에너지가 32.7 mJ인 경우, 1 cm를 이동하는데 약 50  $\mu$ s가 걸려 제트 전방부의 평균 이동속도가 200 m/s로 측정이 되었다. 초음속 유동과의 상호 작용을 증대시키기 위해서는 제트의 침투 거리가 경계층을 벗어나 자유류까지 도달하는 것이 유리하다. 따라서 Fig. 5에서 보듯이 높은 에너지를 공급하는 것이 유리할 수 있다. 하지만 침투 거리에 비례하여 공동을 빠져나간 공기의 양이 증가하기 때문에 침투거리가 증가하면 재 흡입 과정에 걸리는 시간이 증가하기 때문에 스파크 제트의 구동 주파수가 낮아지는 역효과가 발생한다.

2.2.2 펄스 폭에 따른 제트의 속도 변화

Figure 6은 펄스당 주입 에너지가 37 mJ일 때, 펄스 폭이 각각 10, 20 및 30  $\mu$ s인 경우 제트 전방부의 속도 변화를 보여주는 그래프이다. 펄스 폭이 감소할수록 제트가 발생하는 시간이 빨라지



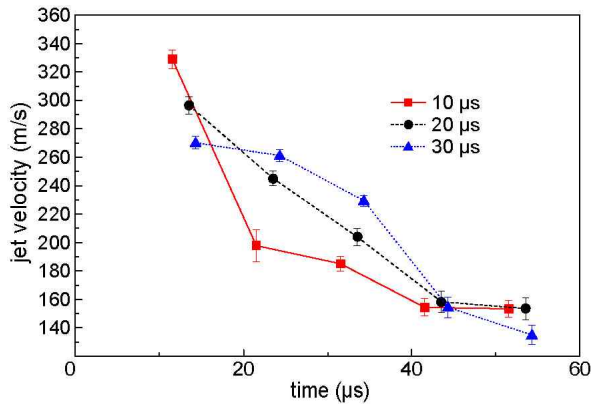


Fig. 6. Time variations of the jet velocity for the pulse widths of 10, 20, and 30  $\mu\text{s}$  with a fixed total energy of 37 mJ per pulse

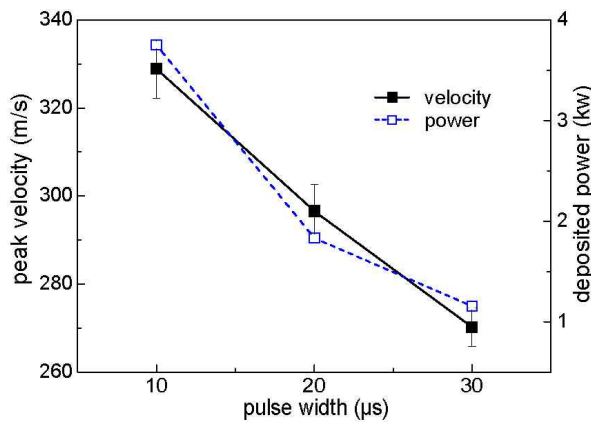


Fig. 7. Correlation between the peak velocity and the deposited power for the cases presented in Fig. 6

고 최대 속도가 높아짐을 알 수 있다. 펄스 당 주입 에너지가 일정할 경우 입력 전력은 펄스 폭에 반비례한다. 따라서 최대 속도는 입력 전력에 비례한다고 할 수 있겠다. 최대 속도는 펄스 폭이 10  $\mu\text{s}$ 일 때 약 330 m/s로 측정되었다. 하지만 펄스 폭이 짧아지면 제트 발생 초기의 속도 감소가 커져 두 번째 측정위치에서의 속도는 첫 번째 측정위치에서와는 반대로 펄스 폭에 비례하여 제트의 속도가 증가함을 알 수 있다. 이는 펄스 폭이 증가함에 따라 보다 긴 시간 동안 에너지의 공급이 유지되어 모멘텀의 급감이 방지되기 때문이다. 초기의 제트 속도와 속도 변화량이 서로 다름에도 불구하고 제트의 침투 거리는 거의 동일하게 측정되었다. 따라서 제트의 최대 속도는 입력 전력에 비례하지만 침투 거리는 입력 에너지에 보다 더 영향을 받는다고 할 수 있겠다.

Figure 7은 Fig. 6의 결과에서 각 펄스 폭에 대한 최대 속도를 추출하여 입력 전력 값과 비교한 그래프이다. 앞서 설명된 바와 같이 제트의 최대 속도와 입력 전력이 상당히 유사한 경향성을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이 결과만을 놓고 본다면 높은 에너지를 보다 짧은 시간에 공급할 때 제트의 성능이 향상될 것으로 기대할 수 있다. 하지만 공급 에너지가 증가할수록 열 손실이 증가하고 줄 가열효과의 감소, 공동 내부의 급속한 밀도 저하로 인한 압력 상승 제한 등이 동시에 발생한다. 이럴 경우 오히려 에너지 효율이 낮아지기 때문에 단순한 공급 에너지의 증가보다는 다양한 변수에 대한 영향이 동시에 고려되어야 하겠다.

### 2.2.3 펄스 전력에 따른 제트의 속도 변화

Figure 8은 펄스 폭이 10  $\mu\text{s}$ 로 고정되고 입력 전력이 각각 3.7, 1.5 및 0.87 kW인 경우 제트의 속도 변화를 보여주는 그래프이다. 전반적인 제트 전방부의 속도 변화의 경향은 Fig. 6의 결과와 비슷하여, 입력 전력이 증가할수록 제트 분출 시기가 빠르고 최대 속도 또한 증가하였다. 하지만 두 번째 속도 측정위치에서의 속도 값들은 Fig. 6에서의 경향과는 다르게 서로 유사한 값을 보이고 있다. 이는 각각의 입력 전력에 대한 펄스폭이 동일하게 10  $\mu\text{s}$ 로써, 제트가 관측되는 최초의 시간 이전에 에너지 공급이 종료되어 점성 소산 효과가 일찍 나타나기 때문이다. 다만 에너지 공급 시간은 동일하지만 초기 생성된 모멘텀의 차이로 인하여, 침투 거리는 입력 전력이 높은 경우, 즉 공급 에너지가 높은 경우에서 길게 측정되었다. 이전 결과에서와 같이 침투 거리와 공급 에너지에 비례하고 최대 속도가 입력 전력

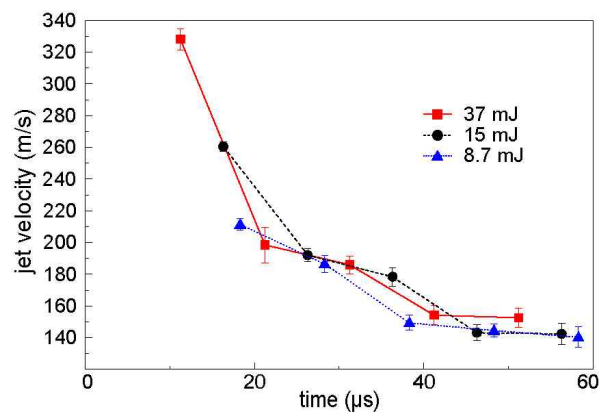


Fig. 8. Time variations of the jet velocity for the deposited energy per pulse of 8.7, 15, and 37 mJ with a fixed pulse width of 10  $\mu\text{s}$

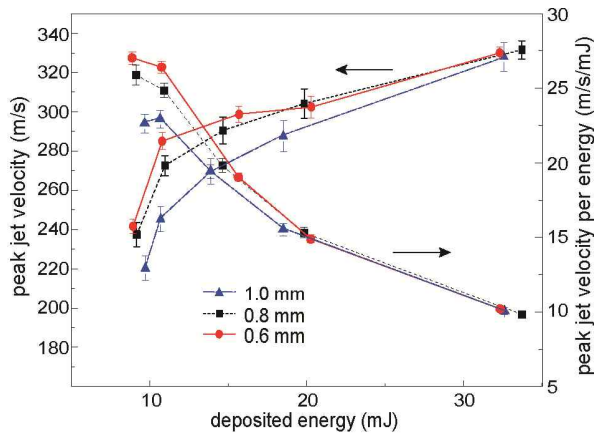


Fig. 9. Variation of peak velocity compared with the peak velocity per pulse energy as a function of the deposited energy

에 비례한다는 것을 다시 한번 설명해 주는 결과가 되겠다.

2.2.4 스파크 제트의 효율적인 운전

줄 가열 효과의 비선형성 때문에 공동 내부에서의 열에너지로의 변환 효율은 입력 에너지의 크기에 선형적으로 비례하지는 않는다. Fig. 9는 오리피스 길이( $h$ )가 2.5 mm로 동일하고 오리피스의 직경( $d$ )가 각각 0.6, 0.8 및 1.0 mm인 경우, 주입 에너지가 증가함에 따른 최대 속도 및 주입 에너지 당 최대 속도의 변화를 보여주는 그래프이다. 펄스의 폭은 10  $\mu$ s로 고정하고 입력 전력을 조절함으로써 펄스 당 에너지 값을 조절하였다.

주입 에너지가 낮은 경우, 전반적으로 속도의 변화량이 크고 오리피스의 직경이 작을수록 출구 속도가 빨라지는 것을 알 수 있다. 오리피스의 직경이 작은 경우 공동 내부의 공기를 가둬두는 효과가 커지기 때문에 보다 높은 압력에서 공기의 분출이 가능하여 최대 속도가 높아지게 된다. 하지만 직경이 작은 경우에는 분출 과정이 끝난 뒤 공기의 재흡입이 상대적으로 어렵고, 발생하는 추력은 일반적으로 출구 면적에 비례하기 때문에 직경이 작은 경우가 스파크 제트의 성능이 좋다고 할 수는 없겠다.

주입 에너지가 높아질수록 초기의 가파른 속도 증가가 점차 둔화되면서 오리피스 직경에 상관없이 속도가 약 330 m/s로 큰 차이를 보이지 않았다. 주입 에너지가 약 10 mJ 정도에서 최대 속도 증가를 보였고 그 이상의 에너지 공급에 대해서는 속도 증가가 큰 폭으로 줄어들어 에너지 효율이 낮아지는 것을 알 수 있다. 낮은 주입 에너지에서는 2.5 mJ의 에너지 증가에 대하여 16% 정도의 속도 증가가 발생하였지만, 높은 주입 에

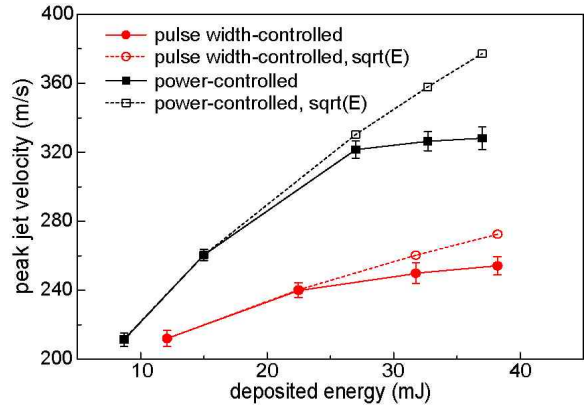


Fig. 10. Comparison of peak velocities achieved by current-controlled arc plasma and pulse width-controlled arc plasma

너지에 대해서는 17.7 mJ의 에너지 증가에도 속도 증가는 10% 정도였다. 주입 에너지 당 최대 속도의 그래프를 보면 주입 에너지가 높아질수록 효율이 급격히 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 위의 결과들로부터 판단해 볼 때, 본 연구에서 사용된 공동에 대해서는 펄스 폭이 10  $\mu$ s이고 주입 에너지가 10 mJ인 경우가 효율 면에서는 가장 유리하다고 할 수 있겠다.

에너지의 조절 방식에 따른 제트의 효율 특성을 분석하기 위하여 Fig. 10에서와 같이 두 가지의 다른 방법으로 주입 에너지를 조절하고 최대 속도의 변화를 비교 관찰하였다. 하나는 펄스폭을 10  $\mu$ s로 고정하고 방전 전류, 즉 입력 전력을 바꾸어 에너지를 조절하였고, 다른 하나는 방전 전류를 고정하고 펄스 폭을 바꾸어 에너지를 조절하였다. 방전 전류를 높여 에너지를 크게 한 경우에서 동일 주입 에너지 대비 최대 속도가 높고, 낮은 주입 에너지에서의 속도 증가폭이 더 크게 나타났다. Fig. 9에서와 마찬가지로 두 경우 모두 주입 에너지가 높아질수록 최대 속도의 변화가 크게 둔화됨을 보여주고 있다. 점선은 각각의 경우에 대하여 에너지 제공근의 경향을 보여주는 그래프이다. 공동 내부의 공기 가열 과정이 정적과정이라고 한다면, 압력은 주입된 에너지에 선형적으로 증가하고 비점성 운동 방정식에 따라 속도는 에너지의 제공근에 비례하게 된다. 낮은 주입 에너지에서는 비슷한 경향을 보이지만 압력이 상승함과 동시에 공기의 유출이 시작되고 열손실을 동반하게 되므로 이론적인 경향보다는 낮은 속도 변화율을 보이게 된다.

III. 결 론

본 연구에서 사용된, 개방 출구를 가진 공동에

서 만들어지는 스파크 제트의 성능 향상을 위해 중요한 것은 공기가 빠져나가기 전에 공동 내부의 압력을 최대한 높게 만드는 것이다. 그 결과, 높은 정체 압력에서 얻어지는 질량 유량과 출구 속도의 증가로 인해 초음속 유동의 제어에서 필요로 하는 추력 및 모멘텀의 크기를 높일 수 있게 된다. 실험 결과에서 보면 펄스 당 주입 에너지가 증가할수록 제트의 최대 속도 및 침투 거리가 길어짐을 알 수 있었다. 하지만 동일한 주입 에너지에 대해서 펄스의 폭이 짧은 경우, 즉 입력 전력이 높은 경우에서 최대 속도가 더 높게 측정되었다. 제트의 분출에 걸리는 최소 시간이 10  $\mu$ s 정도로 관찰되었기 때문에, 펄스 폭이 10  $\mu$ s 이상인 경우에는 밀도의 저하로 인하여 주입 에너지가 압력 상승으로 이어지는 효과가 낮아지기 때문이다. 스파크 제트의 성능을 설명하는 여러 가지 변수들 (제트 속도, 질량유량, 침투 거리, 구동주파수 등)간의 비선형적인 경향성 때문에, 효율적이고 효과적인 스파크 제트를 발생시키기 위해서는 에너지 공급에 있어 여러 가지 인자들을 동시에 고려해야 한다. 본 연구에서 확인된 실험 결과를 볼 때, 펄스폭이 10  $\mu$ s 이고 펄스 당 주입 에너지가 10 mJ인 경우가 운전의 효율면에서 가장 우수한 성능을 보였다. 이 이상의 에너지를 공급하거나 펄스 폭을 높일 경우 에너지 공급량에 비해 속도 증가폭이 낮아져 에너지 효율이 크게 나빠지는 결과를 가져왔다. 보다 더 고성능의 스파크 제트를 효율적으로 발생시키기 위해서는 여러 개의 스파크 제트를 다중 배열하는 등의 추가적인 방안이 모색되어야 할 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2015년 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 부분적인 지원(2015R1D1A1A01058936)을 받고, 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 한국과학기술원 초고속비행체특화센터에서 수행되었습니다.

## References

1) Zaman, K. B. M. Q., Hirt, S. M., and Bencic, T. J., "Boundary Layer Flow Control by an Array of Ramp-Shaped Vortex Generators,"

NASA TM-2012-217437, 2012.

2) Viswanath, P. R., "Aircraft viscous drag reduction using riblets," *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 38, No. 6-7, 2002, pp.571~600.

3) Uruba, V., Jonas, P., and Mazur, O., "Control of a channel-flow behind a backward-facing step by suction/blowing," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, No. 4, 2007, pp.665~672.

4) Godard, G., and Stranislav, M., "Control of a decelerating boundary layer. Part 3: Optimization of round jets vortex generators," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 10, No. 6, 2006, pp.455~464.

5) Laurendeau, F., Chedevergne, F., and Casalis, G., "Transient ejection phase modeling of a Plasma Synthetic Jet actuator," *Physics of Fluids*, Vol. 26, No. 12, 2014, 125101.

6) Raizer, Yu. P., *Gas Discharge Physics*, Springer, New York, N.Y., U.S.A., 1991.

7) Samimy, M., Kearney-Fischer, M., Kim, J.-H., and Sinha, A., "High-Speed and High-Reynolds-Number Jet Control Using Localized Arc Filament Plasma Actuators," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 28, No. 2, 2012, pp.269~280.

8) Ombrello, T., Ju, Y., and Fridman, A., "Kinetic Ignition Enhancement of Diffusion Flames by Nonequilibrium Magnetic Gliding Arc Plasma," *AIAA Journal*, Vol. 46, No. 10, 2008, pp.2424~2433.

9) Leonov, S. B., and Yarantsev, D. A., "Near-Surface Electrical Discharge in Supersonic Airflow: Properties and Flow Control," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 24, No. 6, 2008, pp.1168~1181.

10) Cybyk, B. Z., Grossman, K. R., and Vanwie, D. M., "Spark jet actuators for flow control," *41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, N.V., U.S.A., AIAA 2003-0057, 2003.

11) Lv, Y., Shan, Y., Zhang, J., and Tan, X., "A Numerical Investigation of the Sparkjet Actuator in Multiple-shot Mode," *Procedia Engineering*, Vol. 99, 2015, pp.1514~1525.