



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

스파크제트 액츄에이터의 방전조건 변화에
따른 제트유동에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Jet Flow Produced by
Sparkjet Actuator under Various Discharge
Conditions

울 산 대 학 교 대 학 원
항 공 우 주 공 학 전 공
이 병 수

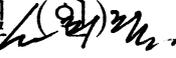
스파크제트 액츄에이터의 방전조건 변화에
따른 제트유동에 관한 실험적 연구

지도교수 신지철

2018년 8월

울산대학교 대학원
항공우주공학전공
이병수

이 병 수 의 공학석사학위 논문을 인준함

심사위원	이	상	욱	
심사위원	신	지	철	
심사위원	장	경	식	

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

울 산 대 학 교 대 학 원

2018년 8월

스파크제트 액츄에이터의 방전조건 변화에 따른 제트유동에 관한 실험적 연구

울산대학교 기계공학부
항공우주공학 전공
이 병 수

초 목

방전조건변화 및 오리피스의 길이변화가 스파크제트 발생기의 제트특성에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 방전조건변화에 대한 실험은 방전위치의 변화에 대한 실험과 dual spark를 통해 동일 에너지를 포괄적인 영역에 주입하였을 때 제트속도의 변화를 관찰하는 실험으로 나누어 수행하였다.

실험은 고고도 저압환경을 모사하기 위해 0.1기압으로 압력이 유지되는 챔버 내부에 액츄에이터를 설치하였고 그 아래에 고 주파수 동하중 센서를 설치하여 제트에 의한 추력을 직접적으로 계측 가능하도록 하였다. Dual spark 방전은 기존 $10\mu s$ 의 주입펄스를 $5\mu s$ 씩 나누어 δt 의 시간간격을 갖고 각각의 전극에 순차적으로 주입하거나 overlap 시켰다.

측정된 제트의 속도는 출구 수렴부의 길이가 짧을 때, 방전위치가 높을 때 더욱 빠르게 측정되었으며 이와 반대로 제트의 추력과 충격량은 수렴부의 길이가 길 때, 방전위치가 낮을 때 더욱 높게 측정되었다.

Dual spark 실험 결과 single spark를 통해 동일한 에너지를 일정 영역에 주입하는 것 보다 넓은 영역에 주입하였을 때 제트 속도가 전반적으로 빠르게 측정되는 것을 알 수 있었으며 시간간격 없이 동시에 주입하는 방법보다 시간간격을 가지고 순차적으로 에너지를 주입하는 방법을 사용했을 때 제트의 최대속도가 보다 높아지는 경향을 나타냈다.

목 차

국 문 요 약	iv
목 차	v
그 립 목 차	vii
1. 서 론	1
1.1 Sparkjet actuator	1
1.2 연구 동향	3
1.3 연구 동기	4
2. 본 론	5
2.1 실험 개요	5
2.2 실험 환경	6
2.3 실험 구성	6
2.3.1 저압 환경 구성	6
2.3.2 신호 계측 장비 구성	7
2.3.3 고전압 직류 회로 구성	7
2.3.4 유동 가시화 실험 구성	8
2.3.5 액츄에이터 모델 제작	9
3. 실험 결과	13
3.1 액츄에이터에 대한 기초실험 수행	13
3.1.1 제트 가시화 및 초기속도 측정 실험 결과	13
3.1.2 제트 추력신호 수집 결과	15
3.2 Cavity 수렴영역 길이 변화에 따른 실험	16
3.2.1 수렴영역 길이 변화에 따른 제트 속도 변화	16
3.2.2 수렴영역 길이 변화에 따른 제트 추력 변화	17
3.3 방전위치 변화에 따른 실험 결과	18
3.3.1 방전위치 변화에 따른 제트 속도 변화	18
3.3.2 방전위치 변화에 따른 제트 추력 변화	19
3.3.3 제트 충격량 측정 결과	20
3.4 Dual spark 방전에 따른 제트 속도 변화 실험	21
3.4.1 Dual spark에 의한 제트속도 변화 비교 (Concurrent)	22
3.4.2 Dual spark에 의한 제트속도 변화 비교 ($\delta t = 2$)	22
3.4.3 Dual spark에 의한 제트속도 변화 비교 ($\delta t = 4$)	23
3.4.4 Dual spark에 의한 제트속도 변화 비교 ($2\mu s$ overlap)	24
3.4.5 방전 순서에 대한 방전 조건별 제트속도 비교	25

4. 결 론	28
참 고 문 헌	31
영 문 요 약	33
부 록	34

그 립 목 차

1. Fig. 1 DBD 액츄에이터 구성도& Induced flow의 Schlieren 이미지	1
2. Fig. 2 Sparkjet Actuator 동작 사이클	2
3. Fig. 3 PSJA에서 분출되는 제트의 schlieren 이미지	3
4. Fig. 4 실험 수행환경 사진	6
5. Fig. 5 사용된 계측장비 사진 및 동 하중센서 설치 사진	7
6. Fig. 6 고전압 직류 펄스방전 회로도	8
7. Fig. 7 Schlieren Imaging 실험 구성 사진	9
8. Fig. 8 Z-type Schlieren 구성도	9
9. Fig. 9 액츄에이터 단면도와 설계치수	10
10. Fig. 10 제작된 액츄에이터 모델 사진	10
11. Fig. 11 Single spark & Dual spark 실험모델 단면도 및 제원	11
12. Fig. 12 제작된 Single spark & Dual spark 액츄에이터 모델	11
13. Fig. 13 펄스 제어 개념도	12
14. Fig. 14 Dual spark 순서 제어 개념도	12
15. Fig. 15 제트 분출 초기 Schlieren 이미지 (45mJ)	14
16. Fig. 16 수렴영역 길이 별 방전위치에 따른 제트 분출 시기변화 (45mJ)	14
17. Fig. 17 수렴영역 길이 별 방전위치에 따른 제트 초기속도 변화 (45mJ)	15
18. Fig. 18 스파크제트 액츄에이터 펄스 시그널 & 추력 시그널 (86mJ)	16
19. Fig. 19 수렴부 길이 변화에 따른 제트 최대 속도변화 그래프.....	17
20. Fig. 20 수렴부 길이 변화에 따른 제트 최대 추력 변화	18
21. Fig. 21 방전위치 변화에 따른 제트 최대속도 변화	19
22. Fig. 22 방전위치 변화에 따른 제트 최대추력 변화	19
23. Fig. 23 방전위치 별 주입에너지 변화에 따른 제트의 충격량 그래프	20
24. Fig. 24 방전위치별 시간에 따른 제트 충격량 그래프 (86mJ)	21
25. Fig. 25 Dual spark에 의한 제트속도 변화 비교 (Concurrent)	22
26. Fig. 26 Dual spark에 의한 제트속도 변화 비교 ($\delta t = 2$)	23
27. Fig. 27 Dual spark에 의한 제트속도 변화 비교 ($\delta t = 4$)	24
28. Fig. 28 Dual spark에 의한 제트속도 변화 비교 ($2\mu s$ overlap)	25
29. Fig. 29 Upstroke 방전에 대한 조건별 제트속도 비교 그래프	26
30. Fig. 30 Downstroke 방전에 대한 조건별 제트속도 비교 그래프	26
31. Fig. 31 시간에 대한 제트 속도변화 ($\tau_1 = 8\mu s, \tau_2 = 2\mu s$)	27

1. 서론

1.1 Sparkjet Actuator

플라즈마 액추에이터를 이용한 유동 제어는 능동적 유동제어 방법 중 한가지로 전기적 방전으로 생성되는 플라즈마의 joule-heating 효과에 의해 발생하는 제트를 활용하는데 기초를 두고 있으며 발생된 제트를 유동 방향으로 분출시키거나 유동에 수직하게 분출시켜 유동제어의 효과를 얻을 수 있다. 이 액추에이터는 구조가 매우 간단하고 가벼우며 대상의 표면에 돌출되지 않게 장착이 가능하다. 더불어 액추에이터로부터 발생하는 제트의 응답성이 굉장히 빠르기 때문에 아음속 및 초음속유동에 대한 유동 제어방안으로 해외에서 활발히 연구되고 있으나 국내는 아직 미미한 실정이다.

플라즈마 액추에이터는 크게 유전체를 전극평판 사이에 두고 글로우 방전을 활용하는 DBD (Dielectric Barrier Discharge) 액추에이터와 직류 아크방전을 활용하는 AD (Arc Discharge) 액추에이터 두 가지 종류로 나눌 수 있다.

DBD 액추에이터는 유동제어가 필요한 대상의 표면에 장착되며 표면 글로우 방전을 통해 발생하는 induced flow를 free stream과 동일한 방향으로 흘러보내 경계층 및 박리현상을 제어한다. 하지만 발생하는 induced flow의 속도가 낮아 아음속 영역에서의 방안으로 연구되거나 NS-DBD (Nano Second Dielectric Barrier Discharge)의 형태로 응용되어 연구되고 있다.

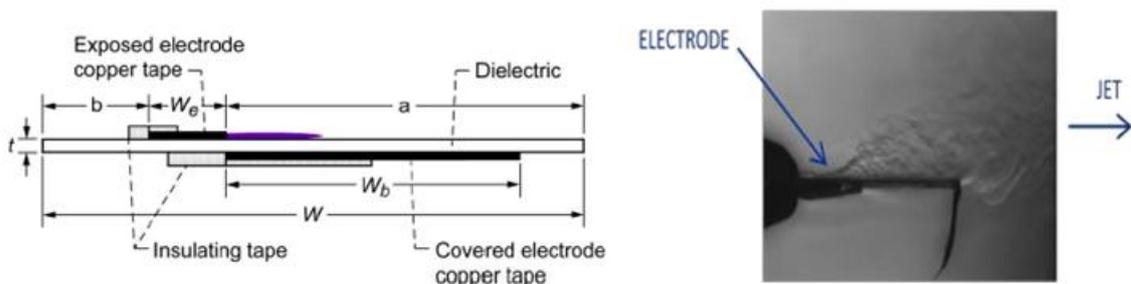


Fig. 1 DBD 액추에이터 구성도& Induced flow의 Schlieren 이미지

Fig.1 은 DBD 액추에이터의 구성도와 발생하는 induced flow의 schlieren 이미지를 나타낸다[1]. 그림에서 보이는 induced flow의 방향을 free stream의 방향과 동일하게 흘려보내 경계층 및 박리를 제어한다.

본문에 연구된 sparkjet actuator는 AD 액추에이터의 일종으로 2003년 Johns Hopkins 대학의 Cybyk 등에 의해 처음으로 연구되었으며[9] PSJA(Plasma Synthetic Jet Actuator)로도 불린다. 직류 아크 방전을 활용하며 DBD 액추에이터 처럼 표면방전을 사용하지 않고 방전 효과를 높이기 위해 공동(cavity) 내부에 전기적 에너지를 주입한다. Fig. 2는 sparkjet actuator의 동작 순서를 도시화한 그림이다. Cavity 내부에서 일어나는 방전으로 인해 공동 내부의 공기는 급격하게 가열, 팽창하게 되며 이윽고 오리피스 밖으로 제트가 분출되게 된다. 이때 발생하는 제트의 속도는 수십 혹은 수백 m/s 수준으로 높은 모멘텀을 가지고 있으며 수 kHz의 주파수대에서 작동이 가능하기 때문에 아음속 영역 뿐 아니라 초음속 영역에서의 유동제어방법 중의 하나로 활용 될 수 있는 가능성이 있다고 평가되고 있으며 관련 연구 또한 진행 중이다. 제트 분출 이후 일어나는 회복단계는 제트 분출이후 공동 내부와 외기의 압력차이로 인해 자연적으로 일어나기 때문에 별도의 공기 주입장치가 필요 없다.

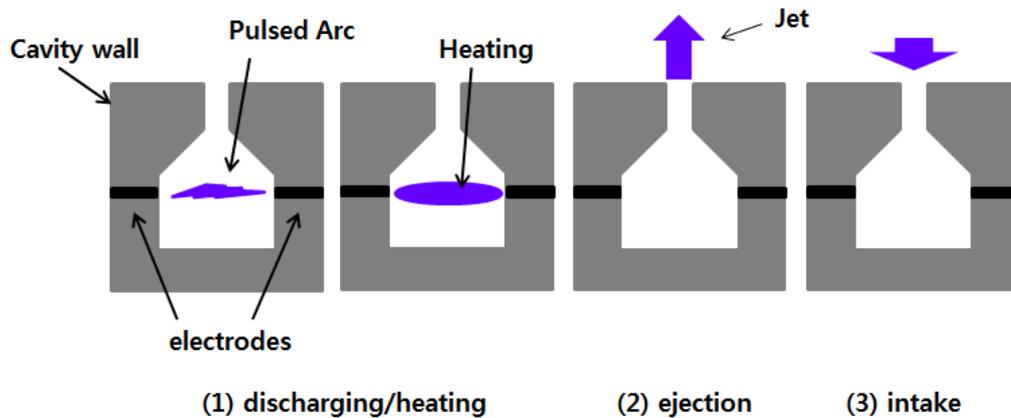


Fig. 2 Sparkjet Actuator 동작 사이클

Fig. 3은 AD 액추에이터에 속하는 PSJA에서 분출되는 제트의 schlieren 이미지 예시 이다[2]. 방전 이후 액추에이터 출구로부터 형성되는 충격파의 모습과 이후 분출되는 제트의 모습을 확인할 수 있다.

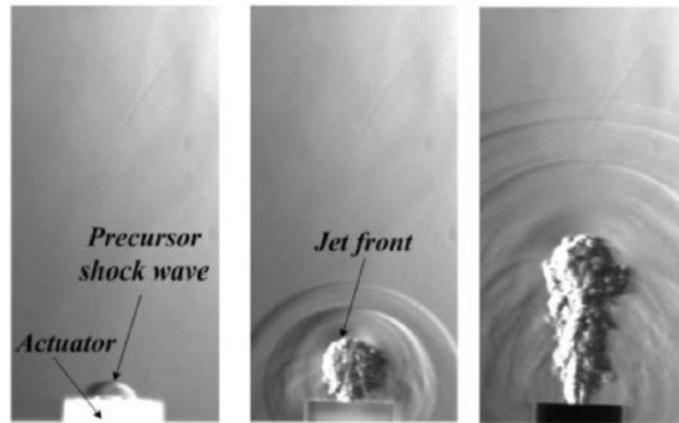


Fig. 3 PSJA에서 분출되는 제트의 schlieren 이미지

1.2 연구 동향

Sparkjet actuator는 미국과 중국을 중심으로 하여 해외에서 연구가 활발히 진행되고 있으며 cavity 형상에 대한 실험과 효율증가를 위한 실험, 그리고 실제 유동을 제어하는 실험 등 다양한 방면에서 연구가 활발히 진행되고 있다.

2016년 네덜란드 Delft University의 Haohua Zong과 Marios Kotsonis는 오리피스 형상이 제트의 성능에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였다[3]. Trigger electrode가 포함된 액추에이터에 대해서 오리피스의 형상은 3mm의 지름을 가진 원형 오리피스 모델과 1mm의 단축과 7.3mm의 장축을 가진 slot 오리피스 모델 두 가지에 대해 실험을 수행하였으며 오리피스의 깊이는 서로 같았다. 제트의 속도는 round 오리피스보다 slot 오리피스일 경우 비교적 느렸으나 제트 속도 유지와 영향 영역의 크기는 slot 오리피스를 사용 할 경우 보다 크게 나타났다.

같은 해 Zhibo Zhang 등은 액추에이터의 효율을 증가시키기 위한 방안으로 11개의 전극에 relay형식의 방전을 가한 multi-channel discharge에 대한 연구를 수행하였다. 연구 결과로 기존 두 개의 전극을 이용한 방전보다 3배 높은 77%의 방전효율을 보였으며 47%상승된 제트속도를 나타냈다[4].

2015년 ONERA 에서는 PSJA를 이용해 40m/s 이하의 아음속 유동에 설치된 NACA-0015 익형의 박리를 제어하는 실험을 수행하였으며 항력을 20% 감소시키는 결과를 얻어냈다[5]. 더불어 2014년 T. Emerick 등은 초음속 풍동 내에서 Mach 1.5의 초음속 유동에 PSJA의 제트를 분사시켜 발생하는 경사충격파의 파각을 43°에서 5°정도 증가시키는 결과를 도출했다[6].

1.3 연구 동기

Sparkjet actuator 는 직류 펄스방전에 의한 플라즈마의 joule-heating에 의한 가열 효과로 발생하는 제트를 활용하는 것에 그 기반을 두고 있다. 따라서 동일에너지를 cavity 내부에 주입한다 하더라도 방전 위치를 포함한 방전조건에 변화는 액츄에이터 자체의 제트성능에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다.

본 연구는 동일한 에너지를 cavity에 주입하였을 때 다양한 방전조건에 변화로 인해 변화하는 제트의 특성을 관찰하고 추후 응용연구에서 목적에 맞는 방전위치 및 조건을 제시 할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다. 더불어, sparkjet actuator를 주제로 관련 연구가 국외에서 많이 수행되었으나 아직 발생하는 제트의 추력이 직접적으로 측정된 사례가 드물어 방전조건 변화에 따라 변하는 제트의 속도와 추력데이터를 동시에 제시할 수 있다면 분출되는 제트의 추력범위를 대략적으로나마 추측하는 것과 동시에 액츄에이터에 대해 좀 더 넓은 해석이 수행 가능할 것으로 생각된다.

본문에 연구된 dual spark 방전의 경우 서로 다른 위치에서 방전이 일어남으로 인해 cavity 내부에서 형성되는 압력과의 교란을 단일 전극을 이용한 방전에 비해 보다 크게 유도할 수 있으며 발생하는 제트의 속도가 향상되는 효과를 기대할 수 있다[6]. 앞서 언급한 대로 relay 형식의 방전을 활용하여 액츄에이터 바닥에서 보다 포괄적인 영역에 대해 에너지를 주입하는 비슷한 방안이 연구 된 바 있으나 이는 방전과 방전 사이 시간을 자유자재로 조절하지 못하고 방전구역이 바닥에 국한되어 있기 때문에 전체적인 cavity volume에 대해서 보다 효과적으로 joule-heating 을 가할 수 있는 방안이라고 생각하며 이와 같은 이유로 연구에 임하였다.

2. 본 론

2.1 실험 개요

본 연구의 목적은 동일한 액츄에이터 형상과 방전조건에 따라 액츄에이터로부터 분출되는 제트의 특성을 관찰하고 이후의 연구 수행에서 작동환경에 맞는 방전조건을 제시할 수 있도록 하는 것이다.

액츄에이터의 body 는 공동 내부의 직류 아크 방전으로 인하여 발생하는 고온, 고압 환경을 견디며 기계 가공이 가능한 세라믹 재료(Al_2O_3)로 제작되었다. cavity의 형상은 제트의 분출과 액츄에이터의 흡입과정에 유리하게 작용 할 수 있도록 orifice 출구로 이어지는 수렴부가 존재하는 형상으로 만들어 졌으며 내부 기체를 추가적으로 보충하는 seeding line 은 고려되지 않았다.

Sparkjet actuator는 cavity에 갇혀있는 내부 기체를 단시간에 가열시켜야 하는 이유로 방전 전압과 전류가 비교적 높은 편이다. 실험 시 특정 주파수를 가지고 반복적인 방전을 가하는 것은 액츄에이터의 가열을 초래하고 흡입과정으로 재 공급된 내부공기의 밀도를 달라지게 하며 cavity 내부 전극표면의 부식을 가속화 시킬 가능성이 있다. 이런 이유로 본 실험에서는 펄스 주파수에 대한 영향을 배제하고 최대한 동일한 실험 조건에서 데이터를 수집하기 위하여 single pulse설정으로 실험이 진행되었으며 펄스폭은 $10\mu s$ 로 고정되었다.

Sparkjet actuator의 제트 특성은 평행 광 내부에 밀도 변화가 나타날 시 빛이 굴절되는 특징을 활용하는 schlieren 기법을 이용한 광학적 진단과 각종 센서들을 활용하여 수집되는 전기적 신호를 분석하여 파악하였다. 제트의 발생시간이 μs 단위로 매우 낮고 출구속도가 수십~수백 m/s 수준으로 굉장히 빠르기 때문에 초고속 카메라와 고 주파수 LED를 이용하여 고속 schlieren imaging 이 가능하게 광학적 기법을 구성하였으며 사용된 센서들 또한 최소 100kHz 이상의 고 주파수에서 동작이 가능한 센서들을 선별 하였다.

액츄에이터의 형상변화에 따른 실험은 두 가지 길이의 수렴부에 대해서 수행되었으며 방전조건변화에 따른 실험은 바닥으로부터의 방전위치 변화에 대한 실험과 동일 에너지를 cavity 체적 중심에 단일 방전으로 주입하는 방법과 $10\mu s$ 의 펄스폭을 $5\mu s$ 로 나누어 체적 중심의 상부와 하부에 Δt 의 시간간격을 갖고 순차적으로 주입하는 방법을 비교하는 실험 두 가지를 수행하였다. 이렇게 cavity 내부 서로 다른 위치에 동일 에너지를 나누어 주입하는 방법은 cavity 내부 공기를 보다 균일하게 가

열 시킬 수 있으며 동시에 cavity 내부 압력과의 교란효과를 보다 크게 하여 균일한 압력상승을 야기할 수 있으므로 액추에이터의 효율이 좀 더 증가 할 수 있을 것이라 기대 할 수 있다.

2.2 실험 환경

실험은 schlieren 기법에 의한 광학적 실험과 전기적 신호를 수집하는 것이 하나의 시스템으로 동작되도록 설계 되었으며 이미지 촬영과 펄스 및 제트에 의한 신호의 계측이 동시에 수행된다. Fig. 4는 전체적인 실험 수행 환경을 보여주는 사진이다. 사진에 도시되었듯이 액추에이터를 중심으로 동작회로와 광학 시스템, 센서들이 준비 되어 있는 모습을 볼 수 있다.

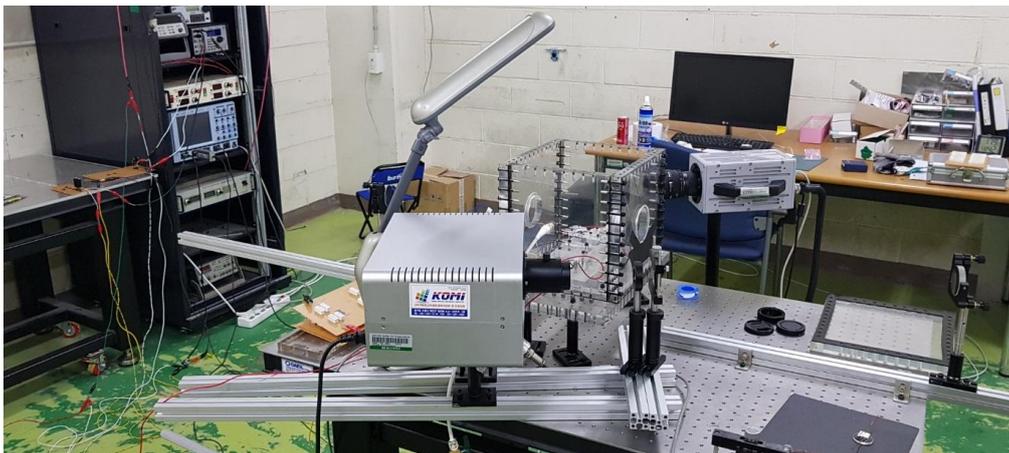


Fig. 4 실험 수행환경 사진

2.3 실험 구성

2.3.1 저압 환경 구성

실험은 고고도 저압환경과 초음속영역에서의 동작능력 파악하는 것을 목표로 하고 있기 때문에 아크릴로 제작된 진공챔버 내부에 액추에이터를 설치하였고 0.1atm 대의 낮은 기압을 유지하도록 하였다. 진공챔버 내부의 압력은 밸브의 개폐를 조절하여 통제가 가능하며 유동 가시화 실험을 위하여 두 개의 optical window를 서로 평행하게 배치하였다. 전자기장에 의한 신호교란을 최소화 시키고자 전선과 동하중 센서의 선은 최대한 이격시켜 서로 반대편에 배치하였다.

2.3.2 신호 계측 장비 구성

액추에이터를 작동 시키는 회로는 수kV의 높은 전압과 수A의 전류를 인가하고 오리피스 출구근처에서 관찰 할 수 있는 제트는 μs 단위의 시간대에서 관찰되기 때문에 계측 장비들은 고전압과 고 주파수대에서 사용 가능한 항목들을 기준으로 고려하였다. 전압을 측정하기 위하여 고전압 프로브(Tektronics P6015A)를 커패시터 양단에 설치하였으며 전류는 자기 유도 방식을 활용한 전류 측정기(Pearson current monitor 2877)를 회로의 그라운드에 연결하여 전체적인 전류 흐름을 계측 할 수 있도록 하였다. 두 측정기는 오실로스코프(LeCroy waveRunner 6050)에 연결되어 펄스마다 사용된 전류와 전압을 도시해 주었고 이를 바탕으로 방전 시 주입된 에너지를 구하였다. 실험에 사용된 액추에이터로부터 발생하는 제트는 펄스 주입 직후부터 $100\mu s$ 라는 짧은 시간 이내에 동작 사이클 1회가 종료되는 것으로 예상되어 고 주파수 동 하중센서(Piezotronix 209C02)를 액추에이터 아래에 설치하여 제트 발생 중의 전체적인 추력 시그널을 오실로스코프로부터 받아 볼 수 있게 하였다.

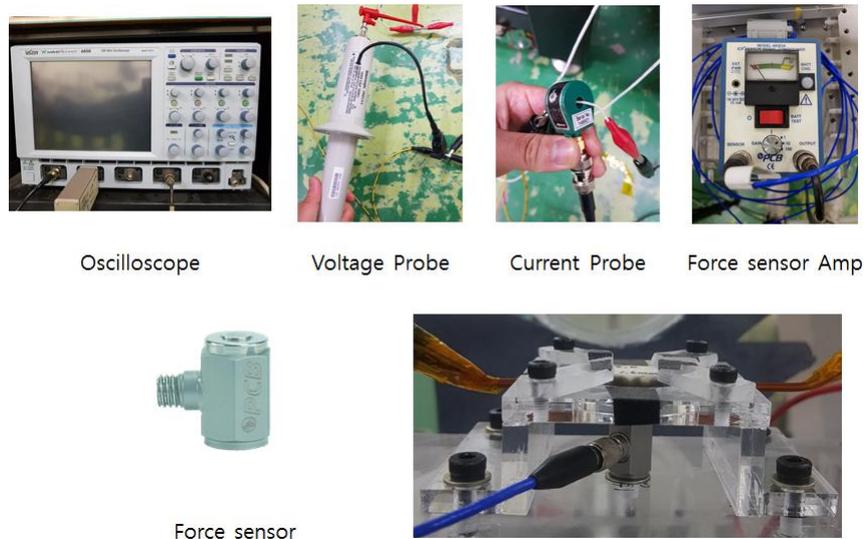


Fig. 5 사용된 계측장비 사진 및 동 하중센서 설치 사진

2.3.3 고전압 직류 회로 구성

액추에이터 동작을 위한 회로는 전하를 충전하는 고전압 커패시터(3000-4000V, $0.33\mu F$), 펄스 신호를 받아 회로를 작동시키는 MOSFET 트랜지스터(2.5kV-5A), 주입에너지 조절을 위한 ballast resistor, 펄스 시그널을 주입하는 pulse generator 네

가지로 구성되어있다.

Fig. 6은 실험에 사용 된 회로를 도시한 그림이다. power supply의 전원을 켜면 고전압 커패시터가 충전되며 이후 pulse generator로부터 펄스 신호를 MOSFET 트랜지스터로 보내주게 된다. 발생된 펄스 신호가 MOSFET 트랜지스터에 닿으면 회로가 닫히게 되고 액추에이터 내부에 방전이 일어나게 된다. Dual spark 실험 시에는 power supply에 두 쌍의 커패시터와 MOSFET 트랜지스터를 병렬로 연결하여 각 전극에 전류를 주입할 수 있게 하였으며 이외 동작 매커니즘은 같다.

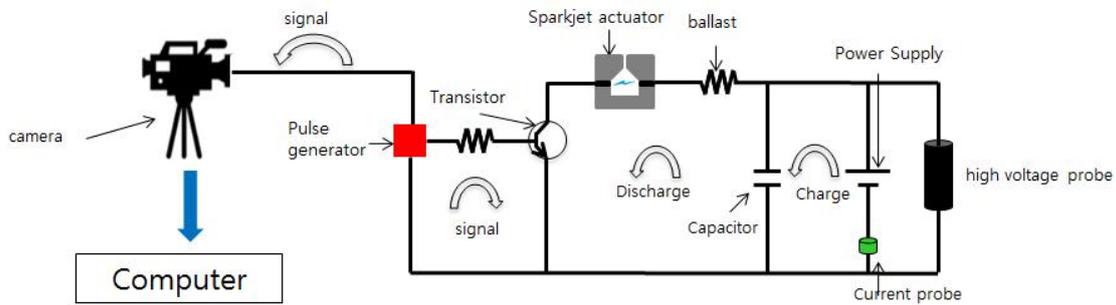


Fig. 6 고전압 직류 펄스방전 회로도

2.3.4 유동 가시화 실험 구성

액추에이터로부터 분출되는 제트 유동은 z-type Schlieren 기법을 활용하여 촬영하였다. 광원으로 나온 빛을 오목거울에 투사시키고 특정 각도로 반사시키면 평행 광을 만들 수 있게 된다. 이 평행 광 내부에서 공기의 밀도변화가 생길 경우 관찰되는 빛의 음영 차이를 활용하여 이미지를 획득할 수 있게 된다. 실험에 사용된 초고속 카메라는 pulse generator에 연결되어 에너지 주입펄스와 동기화 되었다. 제트의 이미지는 제트속도가 가장 빠르게 측정되는 오리피스 출구 근처에서 촬영을 시작할 수 있도록 에너지 주입펄스와 동기화 시킨 촬영시간에 수 μs 의 지연시간을 주었고 이는 제트가 분출되기 시작하는 시점과 동일하다. 이미지 촬영 시간간격은 10 μs 로 설정하였고 카메라 렌즈의 f-number 는 11로 설정하였다. 촬영된 이미지는 Image J 소프트웨어를 사용하여 background 이미지와 subtraction 시켜 제트의 거동이 보다 선명하게 보일 수 있도록 후처리 하였다. 제트의 속도는 이렇게 촬영된 이미지에서의 jet front의 좌표를 이용하여 산출하였고 95% 신뢰구간의 student-t 분포를 이용하여 error range를 계산하였다.

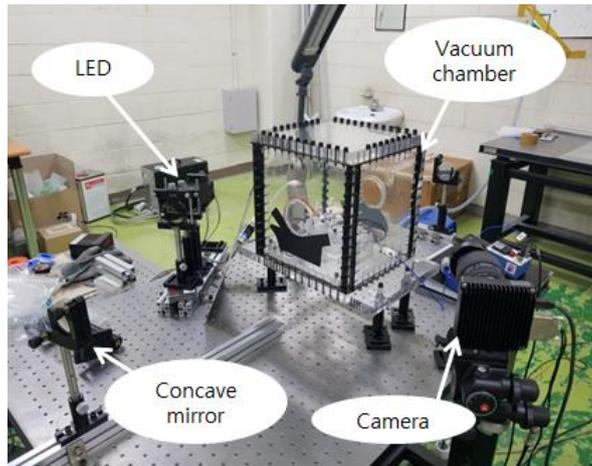


Fig. 7 Schlieren Imaging 실험 구성 사진

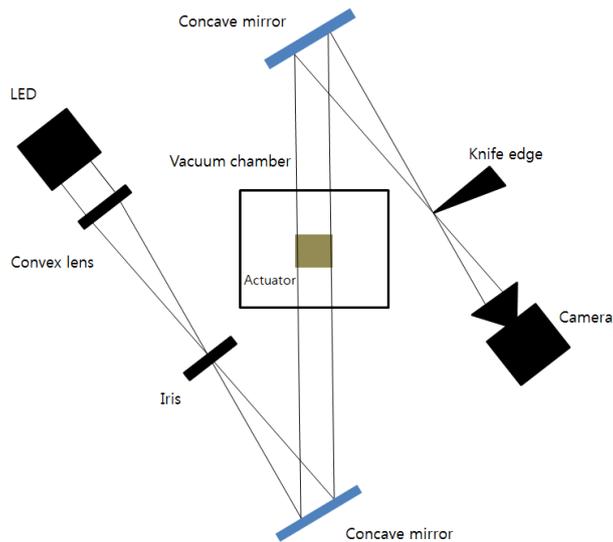


Fig. 8 Z-type Schlieren 구성도

2.3.5 액츄에이터 모델 제작

수렴부 길이와 방전위치 변화모델

실험에 사용된 액츄에이터는 공통적으로 내부 공기의 원활한 질량 방출과 재 흡입 과정이 수월하도록 cavity내부에서 오리피스로 이어지는 수렴부 영역이 고려되었다. 전극으로는 지름 2mm 의 구리선이 사용되었고 액츄에이터 아래에는 optical

window를 대어서 방전모습과 전극의 부식을 관찰 할 수 있도록 하였다. 액추에이터 body 는 cavity 내부 방전에 의한 고온, 고압의 환경을 견디기 위해 알루미늄 세라믹 재료로 제작되었다. 설계변수는 바닥으로부터의 전극의 위치와 오리피스 수렴부의 길이변화 두 가지이다. 수렴부의 길이는 0.5mm 와 1mm 두 가지종류, 바닥으로부터의 방전위치는 1.6mm, 1.8mm, 2mm 세 가지로 총 여섯 개의 액추에이터 모델이 제작되었다.

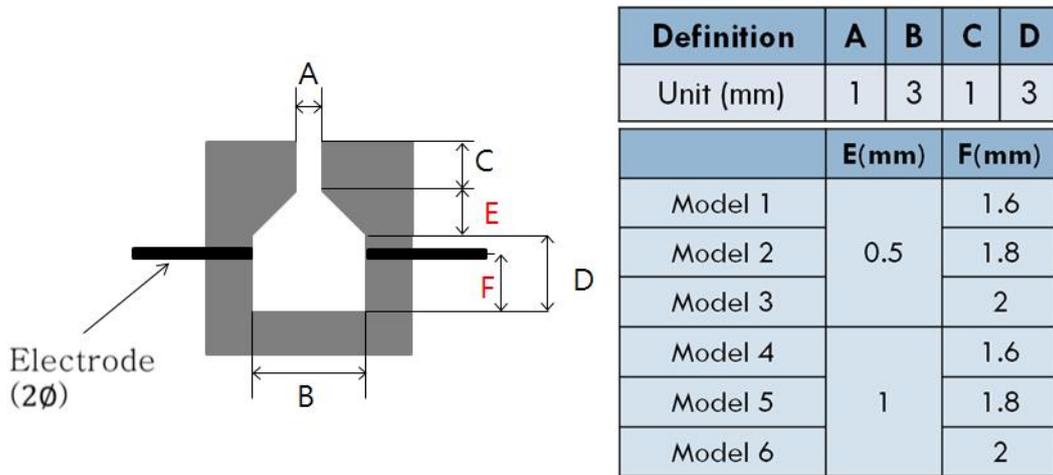


Fig. 9 액추에이터 단면도와 설계치수

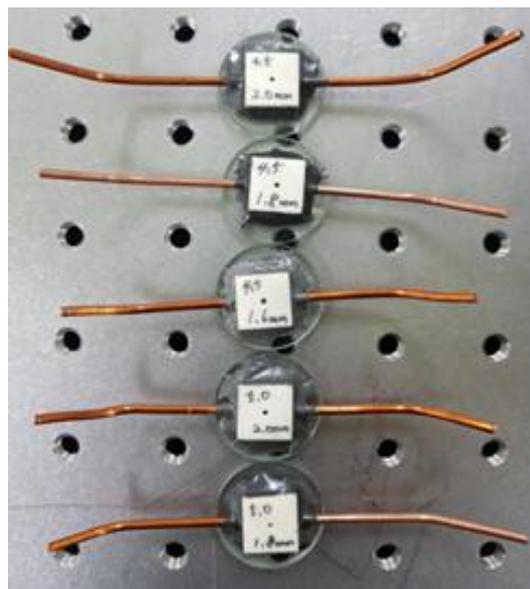


Fig. 10 제작된 액추에이터 모델 사진

Dual Spark & Single Spark 비교 모델

Dual spark 방전실험의 경우 dual spark 방전에 대한 액츄에이터 모델과 제트특성을 비교할 single spark 모델 두 가지가 제작되었다. 제작된 액츄에이터 모델은 기존의 cavity 높이보다 1mm 긴 4mm 의 높이를 가진다. 전극의 지름은 1mm 로 고정되었으며 비교를 위한 single spark 모델의 경우 바닥으로부터 2mm 떨어진 cavity 높이의 중앙에 전극이 위치하며 dual spark 모델의 경우 바닥으로부터 1mm 와 3mm 떨어진 지점에 각각 한 쌍의 전극이 위치한다. 나머지 오리피스 지름, 오리피스 길이, cavity 내부지름은 이전에 제작된 모델과 치수가 동일하다.

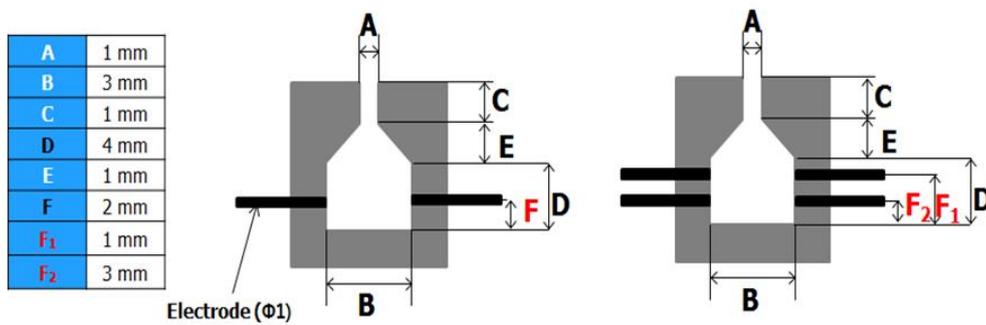


Fig. 11 Single spark & Dual spark 실험모델 단면도 및 제원

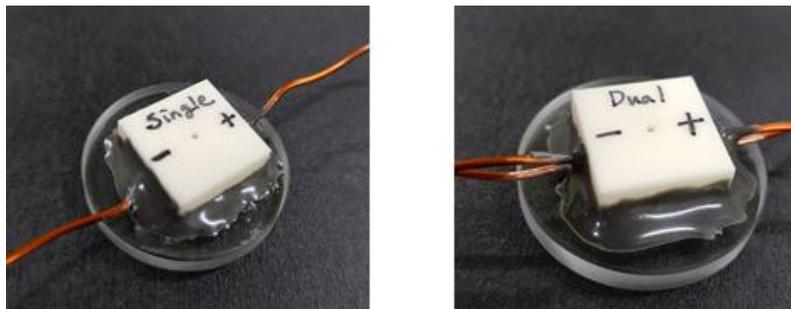


Fig. 12 제작된 Single spark & Dual spark 액츄에이터 모델

Dual Spark 방전 실험 개요

Fig. 13 은 dual spark 방전실험을 위한 펄스 제어 개념도를 나타낸 것이다. 모든 단일전극 모델에 사용되는 펄스폭은 $\tau_1 + \tau_2$ 로 생각할 수 있으며 펄스폭은 $10\mu\text{s}$ 이

다. Dual spark 모델에 사용되는 펄스는 Fig. 13에 도시된 것처럼 기존 $10\mu s$ 길이의 펄스를 τ_1 과 τ_2 로 나누었으며 각각의 펄스폭은 $5\mu s$ 로 같게 설정하고 펄스사이 시간 간격인 δt 는 $0, 2\mu s, 4\mu s$ 세 가지로 설정하였다. 방전순서는 아래에서 위 순서로 방전되는 upstroke 방전과 위에서 아래 순서로 방전되는 downstroke 방전 두 가지에 대하여 실험을 수행하였고 이후 single spark 모델과의 제트속도 차이를 비교하였다.

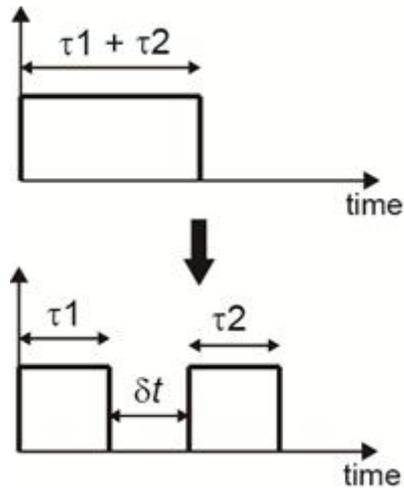


Fig. 13 펄스 제어 개념도

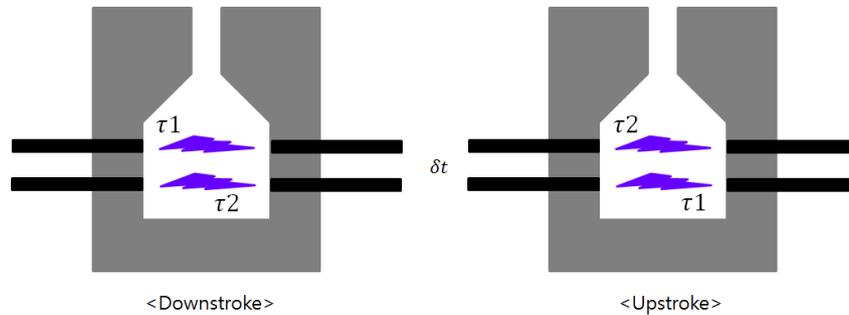


Fig. 14 Dual spark 순서 제어 개념도

3. 실험 결과

3.1 액츄에이터에 대한 기초실험수행

CCD 카메라와 펄스 발생기와 동기화 시킨 LED 광원을 사용하여 56mJ의 에너지를 액츄에이터에 주입하였을 때 분출되는 제트의 모습을 관찰하고 오리피스 출구 근처에서의 초기속도를 측정해 보았다. 이미지 촬영은 제트가 오리피스 출구 밖으로 분출되기 시작하는 시간과 CCD 카메라의 촬영 시작시간을 동기화 시킨 후 double shot 모드를 활용하여 카메라의 노출시간에 맞추어 펄스화 된 빛을 주입하였다.

앞서 언급한대로 제트의 추력측정은 액츄에이터 아래에 압전효과에 기반한 고 주파수 동 하중센서를 설치하였고 오실로스코프에 연결하여 신호를 수집 할 수 있게 하였다.

3.1.1 제트 가시화 및 초기속도 측정 실험 결과

Fig. 15은 수렴영역 길이 0.5mm, 액츄에이터 바닥으로부터의 방전위치는 2mm인 액츄에이터 모델에 45mJ의 에너지를 주입하였을 때 제트의 분출 초기 schlieren 이미지이며 두 이미지 사이의 시간 간격은 $4\mu s$ 이다. 에너지 주입 이후 일정 시간이 흐른 뒤 오리피스 출구 근처에서 내부 공기 질량의 유출이 시작되는 것을 관찰 할 수 있으며 이후 버섯형태의 온전한 제트 모양으로 성장하는 것을 관찰 할 수 있었다.

Fig. 16은 수렴영역 길이 별 방전위치에 따른 제트의 분출 시기 변화를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 수렴영역의 길이가 길수록 방전위치 전 범위에서 제트의 분출 시기가 늦게 측정되었으며 또한 방전위치가 액츄에이터 바닥과 가까워질수록 제트의 분출 시기가 늦어지는 경향이 나타났다.

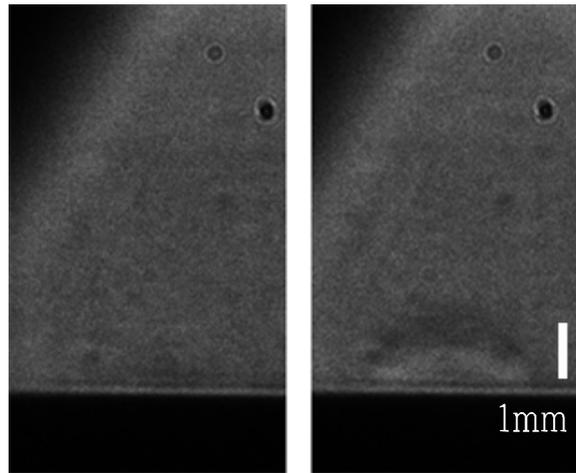


Fig. 15 제트 분출 초기 Schlieren 이미지 (45mJ)

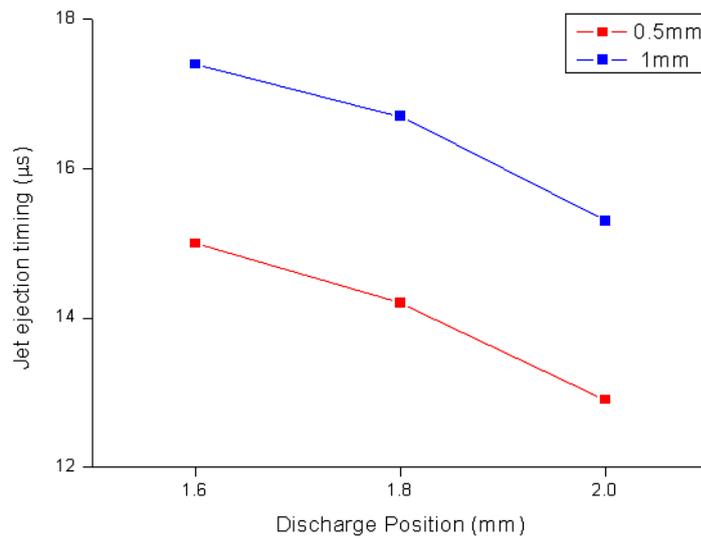


Fig. 16 수렴영역 길이 별 방전위치에 따른 제트 분출 시기변화 (45mJ)

Fig. 17은 수렴영역 길이 별 방전위치에 따른 제트의 초기속도 변화를 나타낸 그래프이다. 수렴영역 길이가 길수록 방전위치 전 영역에서 제트의 초기속도가 낮게 측정되었으며 방전위치가 액츄에이터 바닥과 가까워질수록 속도가 낮아지는 경향이 나타났다. 45mJ의 에너지를 주입하였을 때 수렴영역 길이가 짧은 액츄에이터의 경우 210m/s 전후의 초기 제트속도를 보였으며 수렴영역 길이가 긴 액츄에이터의 경우 150m/s 영역대의 제트 초기속도를 보였다.

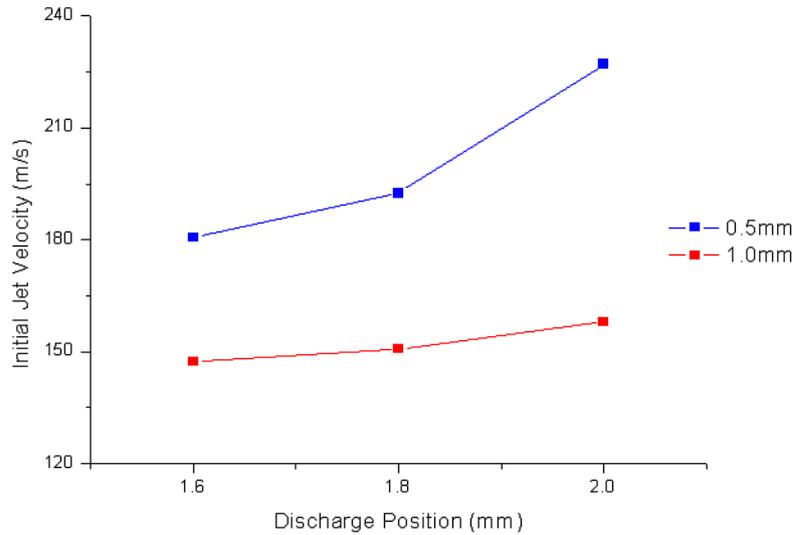


Fig. 17 수렴영역 길이 별 방전위치에 따른 제트 초기속도 변화 (45mJ)

본 실험을 통하여 방전위치가 오리피스 출구와 가까워질수록 제트의 속도가 빠르게 측정되는 것을 알 수 있었으나 제트의 위치가 빠르게 측정된다고 하더라도 출구와 가까운 위치에서의 방전으로 인해 제트가 분출되기 시작하는 시점에 cavity 내부의 압력이 균일하게 증가하지 않을 가능성이 있다고 생각했으며 이는 추력 값에 영향을 미칠 것이라 판단되었다. 이런 이유로 이후 실험에서는 동 하중센서를 이용하여 추력측정과 이미지 촬영이 동시에 수행되었다.

3.1.2 제트 추력신호 수집 결과

Fig. 18은 sparkjet actuator에서 분출되는 제트에 의한 추력시그널 데이터이다. 시그널 수집에 사용된 액츄에이터 모델은 1mm의 수렴영역과 바닥으로부터 1.6mm 지점에서 방전이 일어나도록 제작된 모델이며 86mJ의 에너지가 주입되었다.

도시된 그림에서 볼 수 있듯이 제트에 의한 추력은 펄스 주입시작과 동시에 상승하지 않고 펄스 주입직후 $5\mu s$ 정도 이후의 시점에서 상승하는 것으로 나타났다. 이는 schlieren 기법에 의해 촬영된 jet front의 모습이 오리피스 출구에 나타나기 시작하는 시점과 유사한 모습을 보였다. 수집된 시그널은 에너지주입 직후 대략 $60\mu s$ 시점까지 그 값이 선형적으로 변하지 않고 수십kHz 주파수 대역으로 진동하는 특성을 보였으며 그 이후 시그널이 전체적으로 진동하며 zero 값으로 수렴되는 경향을 보였다.

이로 인하여 실험적으로 관측은 어렵지만 schlieren 기법으로 관찰된 제트에 대응하는 추력의 첫 피크 값 이후 수십 μs 시점까지 제트는 지속적으로 뽑어져 나온다는 것을 알 수 있으며 시그널이 값을 유지하지 않고 진동하는 특성을 띄는 것으로 보아 제트가 방출되는 시간동안 오리피스 내부에서 제트가 방출되는 힘과 국부적인 suction 현상이 함께 일어난다고 생각해 볼 수 있다. 실험에 사용된 액츄에이터 모델의 전반적인 추력은 수십 mN 범위인 것으로 나타났다.

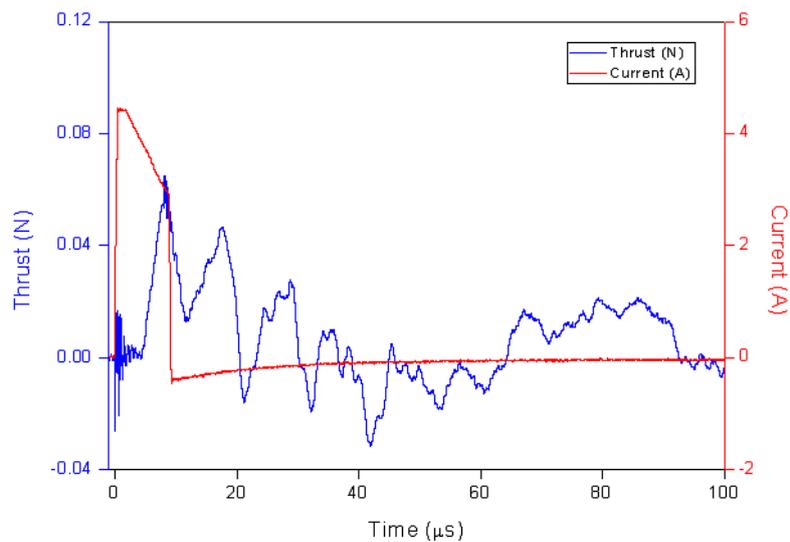


Fig. 18 스파크제트 액츄에이터 펄스 시그널 & 추력 시그널 (86mJ)

3.2 Cavity 수렴영역 길이 변화에 따른 실험

제트 초기속도측정실험과 달리 CCD 카메라 대신 초고속 카메라를 사용하여 제트의 분출시기에서부터 소멸하는 시기까지 좀 더 포괄적인 시간대에서 제트의 이미지를 수집하였다. 실험에 사용된 액츄에이터 cavity의 수렴영역은 0.5mm 와 1mm 두 가지이며 액츄에이터 바닥으로부터의 방전위치는 2mm로 동일한 모델을 사용하였다. 좀 더 포괄적인 영역대의 주입에너지에 대한 제트의 특성을 파악하기 위하여 17mJ부터 최대 86mJ까지 8종류 크기의 에너지를 주입하며 실험을 수행하였다.

3.2.1 수렴영역 길이 변화에 따른 제트 속도 변화

Fig. 19는 주입에너지 변화에 따른 제트의 최대속도변화를 오리피스 수렴부 길이 별로 도시화한 그래프이다. 비교된 두 모델의 방전위치는 액추에이터 바닥으로부터 2mm 떨어진 모델을 사용하였다. 그래프에서 볼 수 있듯이 수렴부의 길이가 짧은 모델의 최대 제트 속도가 전반적으로 더 빠른 것을 알 수 있다.

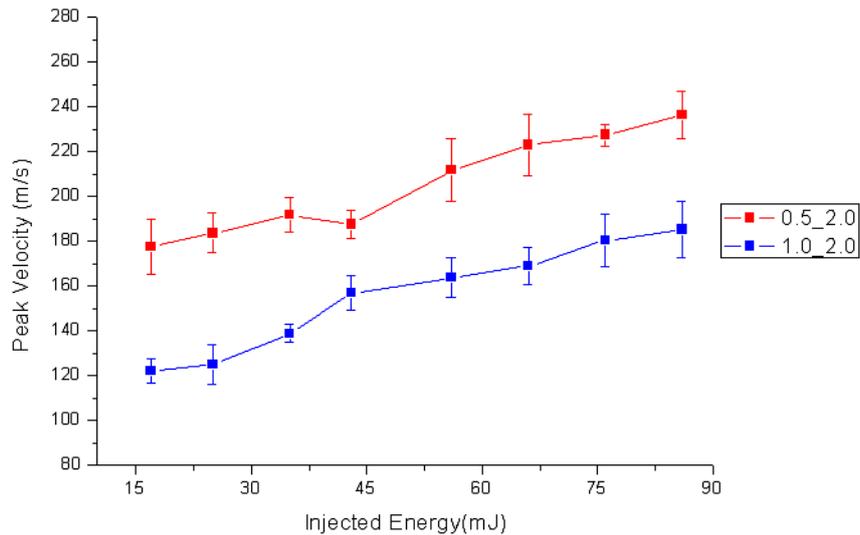


Fig. 19 수렴부 길이 변화에 따른 제트 최대 속도변화 그래프

이는 액추에이터 수렴부의 길이가 짧아지며 액추에이터 내부에서 생성된 제트가 보다 빨리 외부로 분출 될 수 있었고 동시에 액추에이터 내부 cavity 체적이 감소하였기 때문인 이유로 생각 할 수 있다. 그래프의 추세를 보았을 때 두 액추에이터 모두 주입에너지가 증가함에 따라 최대 제트속도도 비교적 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

3.2.2 수렴영역 길이 변화에 따른 제트 최대추력 변화

Fig. 20은 주입에너지 변화에 따른 제트의 최대추력 변화를 오리피스 수렴부 길이 별로 도시화한 그래프이다. 제트 최대속도 측정결과와는 반대로 수렴부의 길이가 긴 액추에이터 모델에서의 제트 최대추력이 전체적으로 더욱 높게 측정되었다. 이는 수렴부의 길이가 길어짐에 따라 제트가 액추에이터 외부로 방출되는 시점이 느려졌고 이로 인하여 내부 공기질량의 방출 시점과 cavity 내부 압력증가로 인한 제트 발생 시점이 비교적 비슷해졌기 때문인 것으로 생각 할 수 있다. 그래프의 추세는 제트 최대속도 측정결과와 마찬가지로 주입에너지가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다.

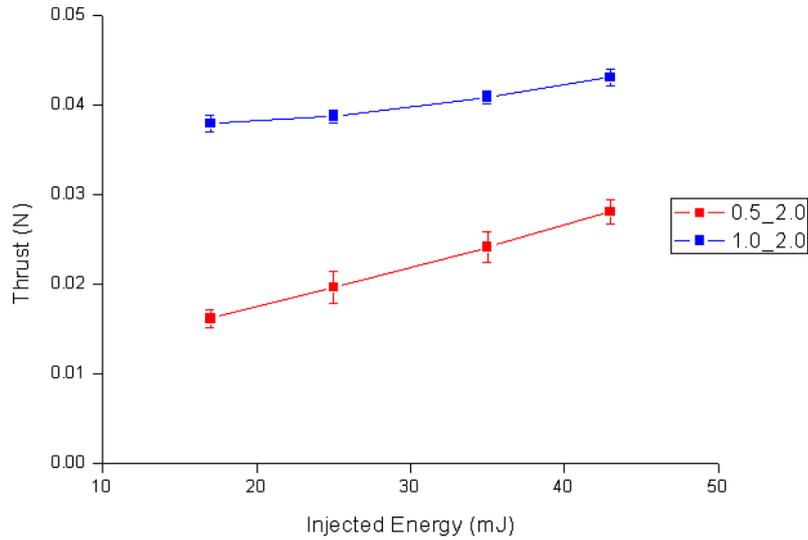


Fig. 20 수렴부 길이 변화에 따른 제트 최대 추력 변화

3.3 방전위치 변화에 따른 실험 결과

방전위치 변화가 제트의 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 앞선 실험에서 추력이 비교적 높게 측정된 cavity 수렴영역이 1mm 인 모델을 바탕으로 액츄에이터 바닥으로부터 1.6mm, 1.8mm, 2mm 떨어진 지점의 방전위치에 대해 실험을 수행하였다.

3.3.1 방전위치 변화에 따른 제트 최대속도 변화

Fig. 21은 주입에너지 변화에 따른 제트의 최대속도를 방전위치별로 나타낸 그래프이며 실험에서 수렴부 영역의 길이는 1mm 인 모델로 고정하였다. 세 가지 방전위치 모두 주입에너지가 증가함에 따라 제트의 최대속도 또한 증가하는 경향을 보였으나 그 기울기는 점점 감소하는 것으로 나타났다. 제트의 전반적인 최대속도는 방전위치가 액츄에이터 바닥으로부터 멀어질수록, 즉, 오리피스와 가까워질수록 높게 측정되었다.

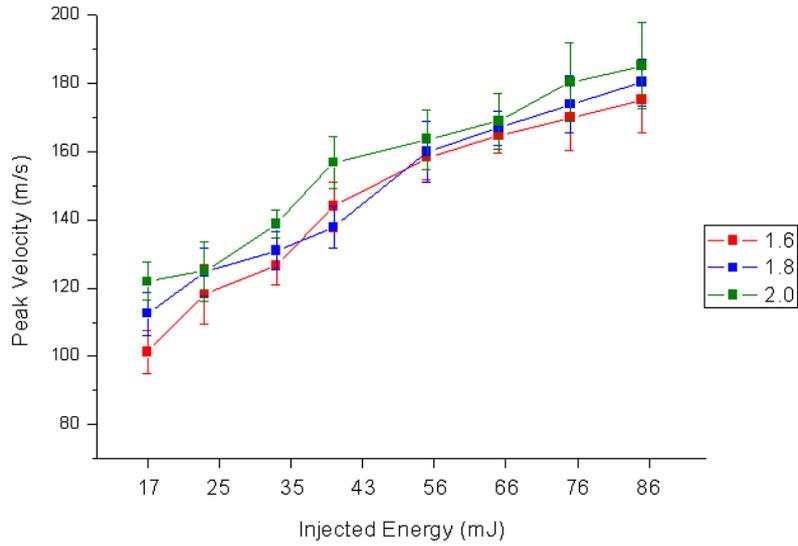


Fig. 21 방전위치 변화에 따른 제트 최대속도 변화

3.3.2 방전위치 변화에 따른 제트 최대추력 변화

Fig. 22는 주입에너지 변화에 따른 제트의 최대 추력변화를 방전위치별로 도시한 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 주입에너지가 증가함에 따라 최대 제트의 최대 추력도 증가하는 경향을 보였으며 방전위치가 낮은 모델에서의 기울기가 높은 모델의 기울기보다 보다 크게 측정되었다.

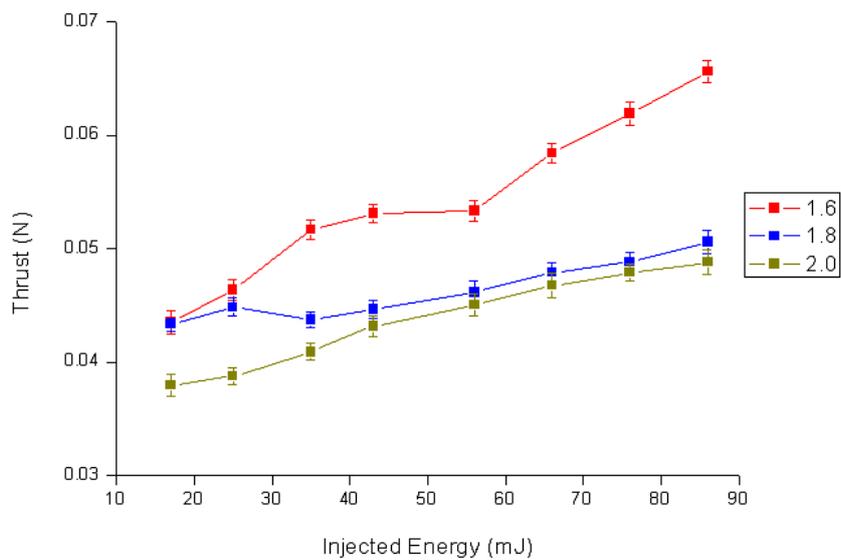


Fig. 22 방전위치 변화에 따른 제트 최대추력 변화

최대 속도 측정결과와는 반대로 방전위치가 액츄에이터 바닥과 가까울수록 추력이 높게 측정되었다. 수렴부 길이 변화에 따른 실험에서도 언급 하였듯이 이와 같은 결과는 제트의 속도가 증가하기 시작하는 시점과 내부 질량방출이 시작되는 시점의 시기가 비교적 비슷해졌기 때문인 것으로 추측할 수 있다.

3.3.3 제트 충격량 측정 결과

주입에너지 변화에 따른 제트의 충격량 변화

Fig. 23은 주입에너지 변화에 따른 제트의 충격량을 방전위치별로 도시화한 그래프이다. 그래프의 각 포인트들은 추력데이터를 바탕으로 추력의 진동이 감소하기 시작하는 부분인 펄스 주입 직후 $50\mu s$ 까지 적분된 값을 나타낸 것이다.

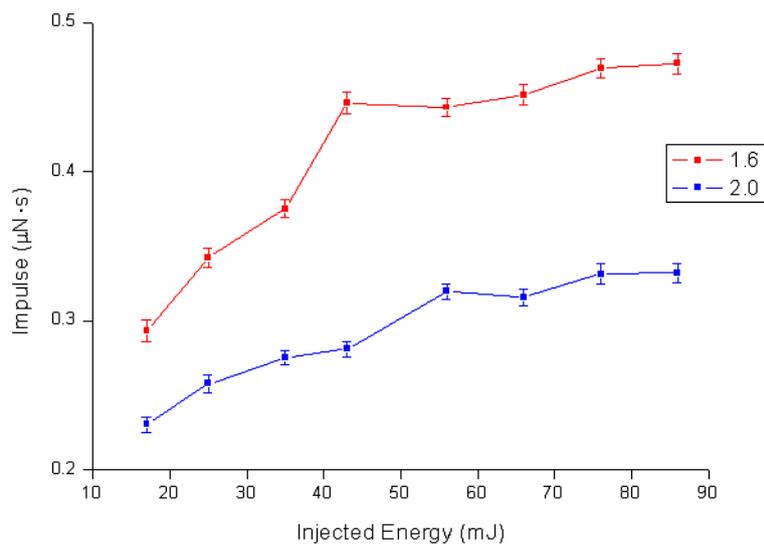


Fig. 23 방전위치 별 주입에너지 변화에 따른 제트의 충격량 그래프

두 방전위치 모두 주입에너지가 증가함에 따라 충격량도 증가하는 추세를 보였으나 그 기울기는 점차 감소하는 것으로 나타났으며 실험에 사용된 액츄에이터 모델에 대해서 90mJ 이상의 에너지를 주입하더라도 그 효율은 점차 감소할 것으로 추측할 수 있겠다. 방전위치가 낮은 경우 실험에 사용된 모든 에너지 범위에서 충격량이 높게 측정되었으며 이는 앞선 추력측정 결과와 같은 경향을 보였다.

시간에 따른 제트의 충격량 변화

Fig. 24는 86mJ 의 에너지를 주입하였을 때 시간변화에 따른 제트의 충격량 변화를 방전위치별로 도시화한 그래프이다. 두 방전위치 모두 관찰 시점 초기에 기울기가 급격히 증가하였고 시간이 지남에 따라 서서히 감소하며 30 μ s 부근에서 안정화되어가는 것을 볼 수 있다. 추력측정 결과와 마찬가지로 방전위치가 낮을수록 충격량 그래프의 초기 기울기와 충격량 값이 커지는 것을 확인 할 수 있었으며 방전위치가 낮을수록 펄스 당 mass outflow 가 높아진다고 추측 할 수 있겠다.

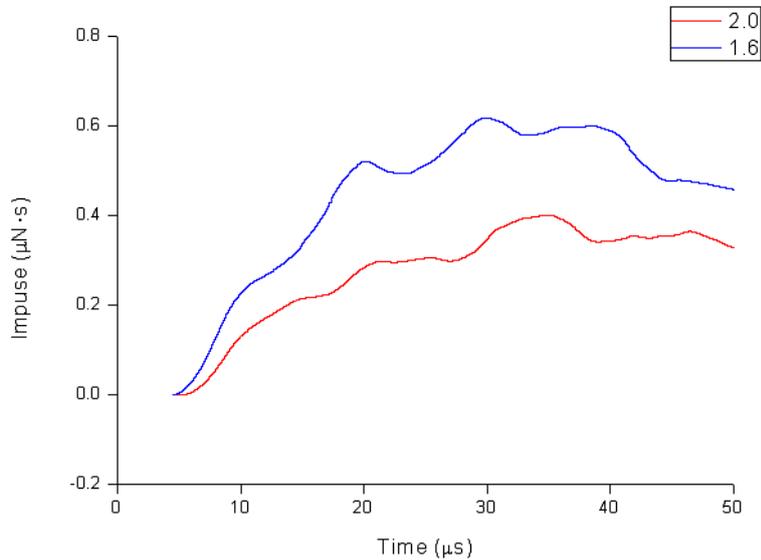


Fig. 24 방전위치별 시간에 따른 제트 충격량 그래프 (86mJ)

3.4 Dual spark 방전에 의한 제트 속도변화 비교 실험

55mJ의 동일한 주입에너지로 두 펄스를 동시에 주입시키는 경우와 $\delta t = 2$, $\delta t = 4$ 의 시간간격을 가지는 경우, 그리고 τ_1 과 τ_2 가 2 μ s 겹치는 overlap 펄스에 의한 제트 속도를 single pulse(10 μ s)에 의한 제트속도와 비교하였다. $\delta t = 2$, $\delta t = 4$, overlap 펄스에 대해서는 upstroke와 downstroke 두 종류의 방전 순서를 고려하여 실험을 수행하였으며 모든 케이스의 τ_1 과 τ_2 펄스시간은 5 μ s로 고정되었다.

3.4.1 Dual spark에 의한 제트속도 변화 비교 (Concurrent)

Fig. 25 은 55mJ의 동일 에너지를 주입하였을 때 single spark와 $\delta t = 0$ 인 dual spark에 의해 측정된 제트 속도를 비교한 그래프이다. 먼저, single spark에 의한 제트의 초기속도는 140m/s 정도로 측정되었으며 이후 비교적 선형적으로 줄어드는 추세를 나타냈다. 제트의 거동을 관측한 전 시간대에서 dual spark에 의한 제트속도는 single spark 보다 높게 측정되었으며 최대 제트속도는 15m/s 정도 크게 측정되었다. 초기 제트의 최대속도 시점 이후 제트의 속도는 single spark의 경우 지속적으로 줄어드는 경향을 보였으나 dual spark의 경우 에너지 주입 이후 $60\mu s$ 까지 제트 속도 감소율이 보다 적은 것을 확인 할 수 있었다.

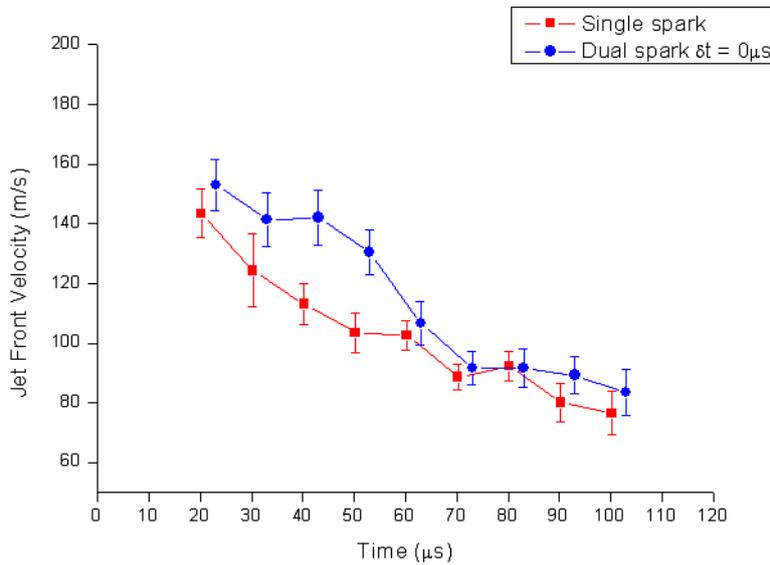


Fig. 25 Dual spark에 의한 제트속도 변화 비교 (Concurrent)

3.4.2 Dual spark에 의한 제트속도 변화 비교 ($\delta t = 2$)

Fig. 26은 single spark에 의한 제트속도와 $\delta t = 2$ 인 dual spark에 의한 제트속도를 비교한 그래프이다. 두 종류의 dual spark방전에 의한 제트속도 모두 single spark에 의한 제트속도보다 높게 측정되었으며 제트의 최대속도는 30m/s 정도 크게 측정되었다. Upstroke 방전의 경우 다른 두 가지의 방전에 의한 제트속도보다 감소폭이 큰 경향이 나타났으며 $60\mu s$ 이후 single spark에 의한 제트에 비해 속도가 떨어지는 경향이 나타났다. 이에 비해 downstroke 방전을 사용했을 경우 데이터를 수집한 전 시간대에서 제트의 속도가 다른 조건에 비해 보다 높게 유지되는 경향을 보

였다.

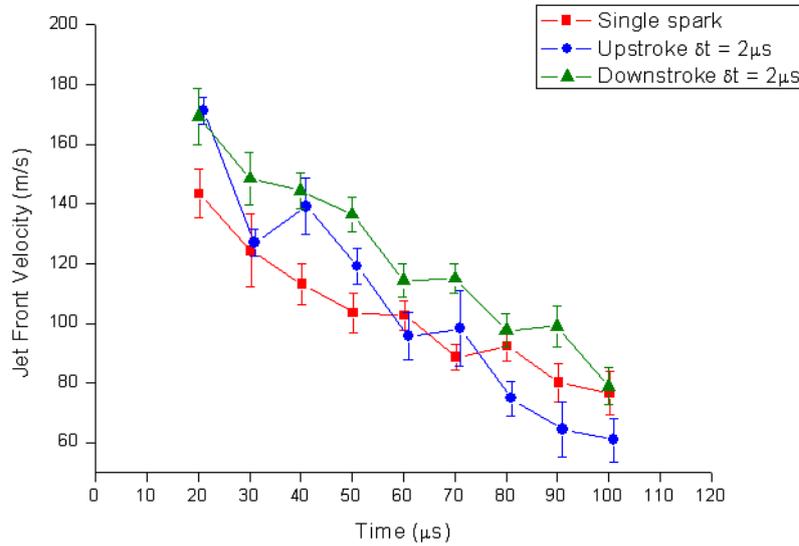


Fig. 26 Dual spark에 의한 제트속도 변화 비교 ($\delta t = 2$)

3.4.3 Dual spark에 의한 제트속도 변화 비교 ($\delta t = 4$)

Fig. 27은 single spark에 의한 제트속도와 $\delta t = 4$ 인 dual spark에 의한 제트속도를 비교한 그래프이다. 앞서 언급한 $\delta t = 2$ 일 때의 결과와 마찬가지로 두 가지 순서 모두 single spark 보다 높은 제트속도를 보였으며 전체 데이터 수집 시간영역에서 downstroke 방전의 제트속도가 가장 높게 측정되었으나 제트분출시점은 single spark에 비해서 조금 느려지는 경향을 보였다. Upstroke 방전의 경우 $\delta t = 2$ 의 결과 보다 제트속도의 감소폭이 줄어들었고 $80\mu s$ 이후 single spark와 같은 속도로 점차 감소하는 모습을 보였다.

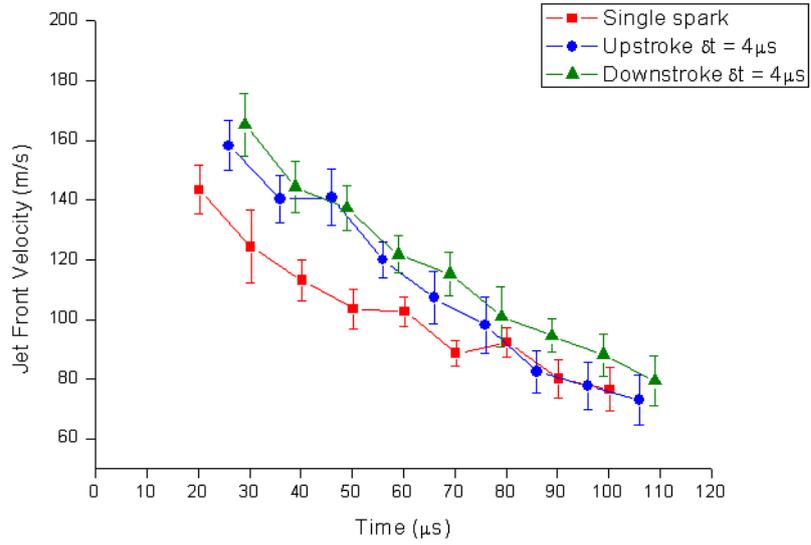


Fig. 27 Dual spark에 의한 제트속도 변화 비교 ($\delta t = 4$)

3.4.4 Dual spark에 의한 제트속도 변화 비교 ($2\mu s$ overlap)

Fig. 28은 τ_1 과 τ_2 가 $2\mu s$ 의 시간동안 겹친 overlap 펄스에 의한 제트 속도를 single spark와 비교한 그래프이다. 두 가지 dual spark에 의한 제트속도는 전체 데이터 수집 시간 내에서 서로 비슷하였으나 downstroke 방전의 경우가 $5m/s$ 정도 더 빠르게 측정되었다. Downstroke 방전에서 $\delta t = 2$ 와 $\delta t = 4$ 의 경우에는 전 시간대에서 제트의 속도가 가장 높은 경향이 있었으나 overlap 펄스의 경우 $80\mu s$ 이후에서는 upstroke 및 single spark 와 같은 제트속도 및 감소폭을 띄는 것을 볼 수 있었다.

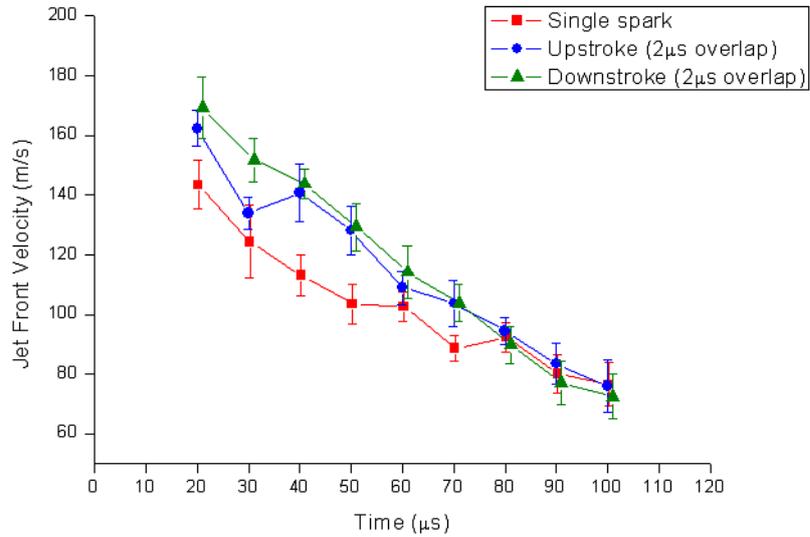


Fig. 28 Dual spark에 의한 제트속도 변화 비교 ($2\mu s$ overlap)

3.4.5 방전 순서에 대한 방전 조건별 제트속도 비교

Fig. 29와 Fig. 30은 각각 upstroke와 downstroke방전에 대해 방전 조건별로 제트의 속도를 비교할 수 있도록 도시화한 그래프이다. 전반적으로 두 가지 방전 순서 모두 비슷한 경향을 나타냈다. 두 가지 방전 순서 모두 실험에 사용된 cavity 형상에 대해서 모든 방전 조건별 최대속도는 170m/s 정도로 비슷한 경향을 보였고 비교적 선형적으로 감소하는 추세를 보였다. Upstroke 방전의 경우 공통적으로 데이터 수집 시간대 초기 제트의 최대속도 시점 이후 $30 \sim 40\mu s$ 부근에서 제트의 속도가 다시 가속되는 구간이 존재하는 것을 관찰 할 수 있었으며 downstroke 방전의 경우 전 시간대에서 제트의 속도 및 감소폭이 비슷한 것으로 관찰되었다.

추가적으로 $\delta t = 2$ 의 조건에서 $\tau_1 = 8\mu s$, $\tau_2 = 2\mu s$ 인 서로 다른 길이의 펄스에 대해서도 실험을 수행하였으며 upstroke 순서로 에너지를 주입했다. Fig. 31에서 볼 수 있듯이 제트의 최대속도는 166m/s 정도로 다른 조건들과 비슷했고 감소폭도 마찬가지로 다른 dual spark 조건과 비슷한 경향을 보였다.

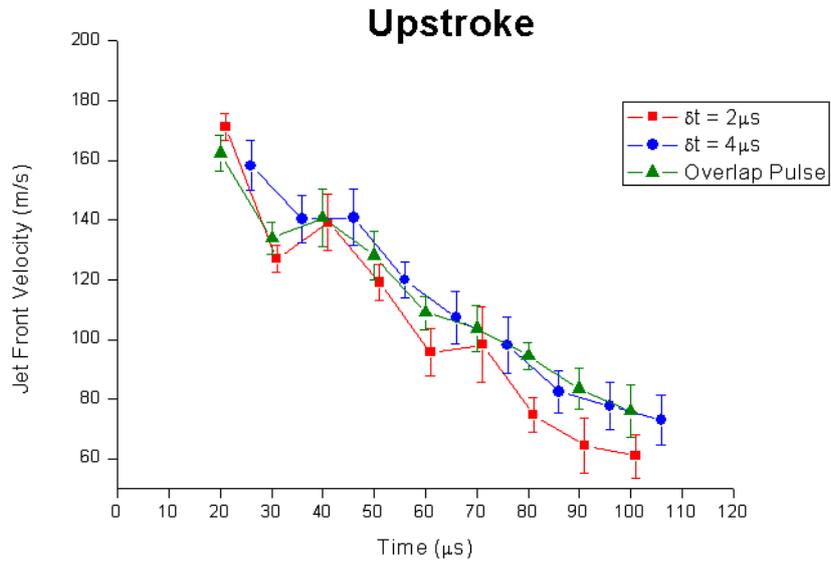


Fig. 29 Upstroke 방전에 대한 조건별 제트속도 비교 그래프

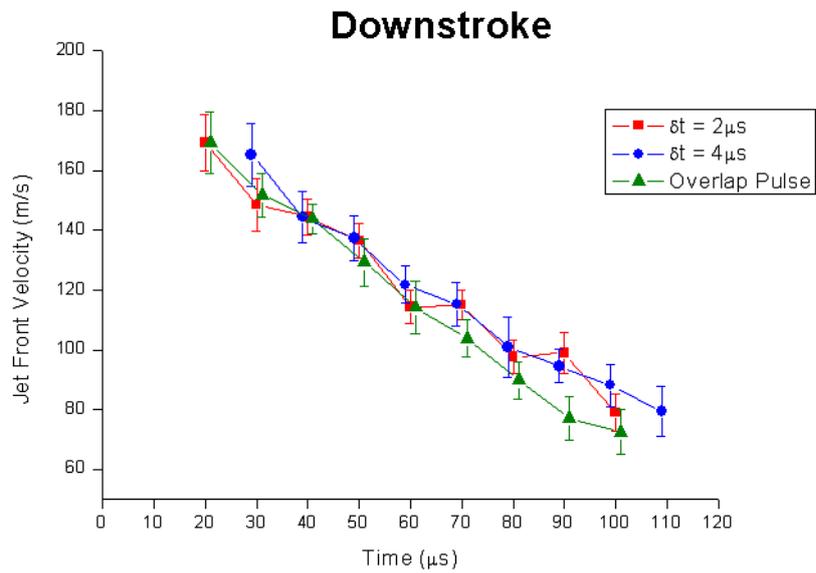


Fig. 30 Downstroke 방전에 대한 조건별 제트속도 비교 그래프

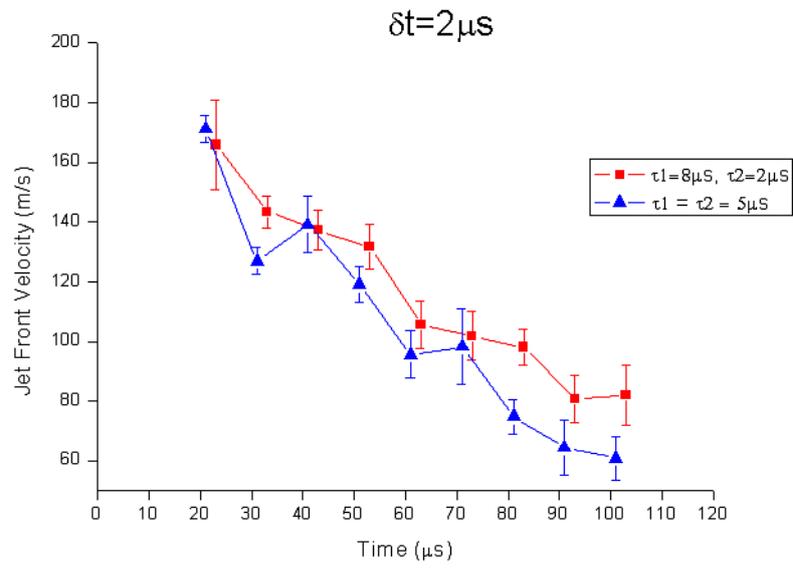


Fig. 31 시간에 대한 제트 속도변화 ($\tau_1 = 8\mu s, \tau_2 = 2\mu s$)

4. 결 론

아음속 및 초음속 유동 제어 목적으로 연구되고 있는 스파크제트 액츄에이터의 동작환경에 맞는 형상변수와 방전 조건을 제시할 수 있도록 수렴부가 고려된 액츄에이터 형상에 대해 제트 속도와 추력측정을 중심으로 실험을 수행하였다. 실험은 서로 다른 두 가지 길이의 수렴 부 길이와 세 가지 종류의 방전위치에 대하여 수행되었으며 동일한 에너지를 주입조건에서 single spark와 순차적 dual spark에 의한 제트 속도의 변화를 비교하기 위한 실험들을 수행하였다. 본 실험은 0.1기압을 유지하는 자체제작 진공 챔버 내에서 수행되었다.

액츄에이터에 대한 기초실험 수행

Z-type Schlieren에 의한 제트 이미지를 화소가 높은 CCD 카메라를 이용해 촬영하였고 45mJ의 에너지를 주입하여 대략적인 제트의 속도를 가늠할 수 있었다. 제트의 속도는 cavity 수렴영역의 길이가 짧을수록, 방전위치가 오리피스 출구와 가까워질수록 증가하는 경향을 보였다. 실험을 통하여 cavity 수렴영역의 길이와 방전위치 변화로 인해 제트의 분출시점과 cavity 내부 압력이 균일하게 증가하는 시점이 달라 제트의 추력에 영향을 미칠 수 있을 것이라 판단하는 계기가 되었다.

액츄에이터로부터 분출되는 제트의 추력은 펄스 주입직후 증가하지 않고 $5\mu s$ 후에 증가하기 시작하였으며 schlieren 상의 제트 분출시점과 추력이 최댓값을 나타내는 시점이 비슷했다. 제트의 추력은 선형적으로 증가하거나 감소하지 않고 진동하는 특성을 띄었으며 실험에 사용된 cavity 모델에 대해서 $50\mu s$ 이후 진동이 사라지며 신호가 0으로 수렴하는 경향을 보였다. 추력의 범위는 수십 mN 단위인 것으로 측정되었다.

수렴영역 길이 변화에 따른 제트 특성 변화

액츄에이터 바닥으로부터 2mm 떨어진 동일한 방전위치를 가지고 서로 다른

cavity 수렴영역 길이를 가진 두 액츄에이터 모델에 대해서 주입에너지를 변화시켜 가며 실험을 수행하였다. 주입에너지가 증가 할수록 두 액츄에이터 모델 모두 제트의 속도 및 추력이 증가하는 경향을 보였다. 제트의 속도는 수렴영역 길이가 짧은 모델에서 평균적으로 50m/s 정도 빠르게 측정되었으나 추력은 수렴영역의 길이가 긴 모델에서 보다 높게 측정되었으며 이는 수렴영역 길이 증가로 인해 제트 분출시점이 지연되는 효과를 가져와 내부공기 질량이 분출되는 시점과 내부 압력이 비교적 균일하게 증가된 시점이 서로 비슷해 졌기 때문이라고 생각 할 수 있다.

방전위치 변화에 따른 제트 속도 변화

Cavity 수렴영역이 1mm 인 모델의 서로 다른 세 가지 방전위치에 대해 제트 속도와 추력을 측정하는 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 세 가지 방전위치모두 주입에너지가 증가함에 따라 제트의 속도가 증가하는 경향을 보였으나 그 기울기는 차차 감소하였다. 분출되는 제트의 속도는 방전위치가 액츄에이터 바닥으로부터 멀어질수록, 즉, 오리피스와 가까워질수록 빠르게 측정 되었다.

이와 반대로 제트의 추력은 방전위치가 액츄에이터 바닥과 가까울수록 크게 측정 되었다. 수렴영역길이 변화에 대한 실험결과와 마찬가지로 이는 방전위치가 낮아짐에 따라 제트의 분출시점이 지연되어 cavity 내부의 압력이 균일하게 증가된 시점과 비슷해지기 때문인 것으로 생각 할 수 있다.

제트의 충격량은 수집된 추력데이터를 바탕으로 펄스 주입 이후 $50\mu s$ 까지 적분을 통해 계산되었다. 주입에너지가 증가함에 따라 모든 방전위치에서 충격량이 증가하였으나 그 기울기는 감소하였다. 이는 90mJ 이상의 에너지를 cavity 내부에 주입하더라도 그 효율이 감소할 것이라 생각 할 수 있다. 시간에 대한 충격량 그래프로 보아 제트추력의 영향은 $30\mu s$ 부근에서 서서히 감소하는 것으로 나타났다. 방전위치가 낮은 모델의 경우 초기 충격량 증가와 측정된 전 시간대에서 충격량이 높게 측정되었으며 이는 방전위치가 낮을수록 펄스 당 mass outflow 가 높다고 분석할 수 있다.

에너지 주입 특성 변화에 따른 제트 특성 변화

동일한 cavity 형상에 대하여 동일 에너지를 고정된 영역에 주입하는 single spark 방전과 보다 포괄적인 영역에 나누어 주입하는 dual spark방전에 의한 제트속도를 비교하는 실험을 수행하였다. 두 펄스사이 시간간격 $\Delta t = 0$ 인 경우 제트의 최대속

도가 single spark보다 10m/s 정도 향상되는 경향을 보였으며 에너지 주입이후 60 μ s까지 제트속도 감소율도 비교적 적게 나타났다.

시간간격 $\delta t = 2$ 인 경우 upstroke와 downstroke 두 가지 순서 모두 제트의 최대속도가 single spark에 비해 30m/s 정도 향상되는 경향을 보였다. Upstroke 방전의 경우 제트의 초기속도는 single spark 보다 크게 측정되었으나 시간이 지날수록 낮아지는 경향을 보였으며 downstroke 방전의 경우에는 전 시간대에서 single spark의 제트속도보다 크게 측정되었다.

$\delta t = 4$ 인 경우에도 제트의 최대속도는 single spark 에 비해 크게 측정되었으나 그 값은 $\delta t = 2$ 인 경우와 크게 다르지 않았으며 제트의 분출 시기가 조금 느려지는 경향이 나타났다. 마찬가지로 downstroke 방전의 경우 전 시간대에서 제트의 속도가 크게 측정되었으며 upstroke 방전의 경우 $\delta t = 2$ 일 때와 다르게 single spark 보다 제트의 속도가 낮아지는 구간은 관찰되지 않았다.

Overlap 펄스 방전의 경우에도 upstroke와 downstroke 방전 모두 single spark 보다 제트의 최대속도가 높은 경향을 보였으며 시간이 지날수록 감소되는 경향도 비슷하게 나타났다.

$\delta t = 2$, $\delta t = 4$ 와 overlap 펄스의 방전순서별로 제트를 비교했을 때 제트의 최대속도는 두 방전순서 모두 비슷했으며 모든 upstroke 방전에서 제트가 다시 가속되는 구간이 관찰되었다. 서로 다른 길이의 r_1 과 r_2 에 의한 제트속도 또한 δt 의 시간간격을 가진 다른 dual spark에 의한 제트속도와 비슷한 수준으로 측정되었으며 감소폭 또한 비슷했다.

결과를 종합해보았을 때 dual spark를 통해 에너지를 주입할 때 방전사이 시간간격 없이 주입하는 방법보다 특정 시간간격을 갖고 순차적으로 주입하거나 overlap 시키는 방법이 제트의 최대속도를 증가시키는데 유리하다고 판단 할 수 있으며 downstroke 방전순서를 사용 했을 때 시간대비 전체적인 제트속도를 향상 시킬 수 있을 것이라 생각할 수 있다.

참고 문헌

1. David E. Ashpis, Matthew C. Laun "Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasma Actuators Thrust-Measurement Methodology Incorporating New Anti-Thrust Hypothesis" AIAA SciTech 13-17 January 2014 52nd Aerospace Sciences Meeting
2. Hao-hua Zong, Wei Cui, Yun Wu, Zhi-bo Zhang, Hua Liang, Min Jia, Ying-hong Li "Influence of capacitor energy on performance of a three-electrode plasma synthetic jet actuator" Sensors and Actuators A 222(2015) 114-121
3. Haohua Zong, Marios Kotsonis "Effect of slotted exit orifice on performance of plasma synthetic jet actuator" Experiments in Fluids, 58:17, (March-2017)
4. Zhibo Zhang, Yun Wu, Min Jia, Huimin Song, Zhengzhong Sun, Haohua Zong "The multichannel discharge plasma synthetic jet actuator" Sensors and Actuators A 253 (2017) 112-117
5. D. Caruana, F. Rogier, G. Dufour, C. Gleyzes "The Plasma Synthetic Jet Actuator, Physics, Modeling and Flow Control Application on Separation" AerospaceLab, 2013, p. 1-13.
6. T. Emerick, M. Y. Ali, C. Foster, F. S. Alvi, S. Popkin "SparkJet characterizations in quiescent and supersonic flow fields" Experiments in Fluids (2014) 55:1858
7. David E. Ashpis, Matthew C. Laun "Characterization of DBD Plasma Actuators Performance without External Flow-Part I : Thrust-Voltage Quadratic Relationship in Logarithmic Space for Sinusoidal Excitation, 47th AIAA Plasmadynamics and Lasers (June-2016)
8. K H Cheah, K S Low "Torsional thrust stand for characterization of microthrusters" Materials Science and Engineering 152 (2016) 012019
9. Cybyk, B. Z., Grossman, K. R., and Wilerson, J. T "Single Pulse Performance of the Sparkjet FlowControl Actuator," AIAAPaper 2003-57, 2003.
10. Ryan Durscher, Subrata Roy "Evaluation of thrust measurement techniques for dielectric barrier discharge actuators" Experiments in Fluids 53:1165-1176 (2012)
11. Jin Di, Cui Wei, Li Yinghong, Li Fanyu, Jia Min, Sun Quan, Zhang Bailing "Characteristics of pulsed plasma synthetic jet and its control effect on supersonic

- flow" Chinese Journal of Aeronautics, (2015), 28(1):66-76
12. B. R. Greene, N. T. Clemens, P. Magari, D. Micka "Control of mean separation in shock boundary layer interaction using pulsed plasma jets" Shock Waves September 2015, Volume 25, Issue 5, pp495-505
 13. ZHOU Yan, XIA ZhiXun, LUO ZhenBing, WANG Lin "Effect of three-electrode Plasma synthetic jet actuator on shock wave control" January 2017, Vol.60, No.1 : 146-152
 14. Hao-hua Zong, Yun Wu, Min Jia, Hui-min Song, Hua Liang, Ying-hong Li, Zhi-bo Zhang "Influence of geometrical parameters on performance of plasma synthetic jet actuator" Journal of Physics, 49(2016), 025504 (12pp)
 15. Yinghong Li, Jian Wang "Investigation on Oblique Shock Wave Control by Surface Arc Discharge in a Mach 2.2 Supersonic Wind Tunnel" Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research, July 27th (2011)
 16. Zheng Li, Zhiwei Shi, Hai Du, Zhikun Sun, Guangyin Li "Aerodynamic Actuation Characteristic Research of Array Plasma Synthetic Jet Actuator" 2017 8th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering 484-488
 17. F. Chedevergne, O. Leon, D. Caruana "Experimental and numerical response of a high-Reynolds-number $M=0.6$ jet to a Plasma Synthetic Jet actuator" Interational Journal of Heat and Fluid Flow 56 (2015) 1-15
 18. F. Laurendeau, F. Chedevergne, G. Casalis "Transient ejection phase modeling of a Plasma Synthetic Jet actuator" Physics of Fluids 26, 125101 (2014)
 19. Haohua Zong, Yun Wu, Huimin Song, Min Jia "Efficiency Characteristic of Plsama Synthetic Jet Actuator Driven by Pulsed Direct-Current Discharge" AIAA Journal, Vol. 54, No. 11 (2016), pp. 3409-3420.
 20. Yoshinori Takao, Koji Eriguchi, Kouichi Ono "A miniature electrothermal thruster using microwave-excited microplasmas:Thrust measurement and its comparison with numerical analysis" Journal of applied physics 101, 123307 (2007)
 21. 김영순, 신지철 "펄스 아크 스파크 제트 플라즈마 구동기에 의해 발생된 고속 제트의 효율적 운전 성능 특성에 관한 연구" J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(11), 907-913(2017)

Experimental Study on Jet Flow Produced by Sparkjet Actuator under Various Discharge Conditions

Byoungsoo Lee

Department of Mechanical and Aerospace Engineering

University of Ulsan, Korea

ABSTRACT

Experimental study on jet performance of sparkjet actuator under various discharge condition was performed. Discharge condition was divided by two different ways which were change of discharge position and observe jet velocity due to dual spark that makes more large heating area.

Actuator was installed in vacuum chamber with 10% of atmospheric pressure to describe high altitude environment. High frequency dynamic force sensor was set up under the actuator to measure thrust force caused by jet ejection.

Jet front velocity was increased when discharge position goes higher from actuator bottom but thrust force was increased when discharge position goes lower.

In results of dual spark experiment, making large heating area by dual spark discharge could be consider as the way of increasing jet front velocity with same amount of injected energy used in single spark discharge.

부 록

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 한국과학기술원
초고속비행체특화센터에서 수행되었습니다.

This work was conducted at High-Speed Vehicle Research Center of KAIST
with the support of Defense Acquisition Program Administration (DAPA) and
Agency for Defense Development (ADD).