



J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 47(2), 90-97(2019)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2019.47.2.90

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

## 플라즈마에 의한 평형 유동을 고려한 스파크제트 액추에이터 유동 해석 프로그램 개발과 추력 특성 연구

김형진<sup>1</sup>, 신진영<sup>2</sup>, 채정현<sup>3</sup>, 안상준<sup>4</sup>, 김규홍<sup>5</sup>

### Research on Flow Analysis Program Development Considering Equilibrium Plasma Flow and Impulse Characterization of Sparkjet Actuator

Hyung-Jin Kim<sup>1</sup>, Jin Young Shin<sup>2</sup>, Jeongheon Chae<sup>3</sup>, Sangjun Ahn<sup>4</sup> and Kyu Hong Kim<sup>5</sup>

Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University<sup>1,2,3,4,5</sup>

Aerospace Institute of Advanced Aerospace Technology<sup>5</sup>

#### ABSTRACT

Sparkjet actuator, also known as plasma synthetic jet actuator (PSJA), is an active flow control device that has possibility of controlling supersonic flow. This actuator utilizes arc plasma to deposit energy onto the gas inside the cavity to raise temperature and pressure. A change in the state of the fluid inside the cavity generates pressure waves and momentum jet, and they are exhausted through out the orifice exit and disturb external flow field. Since the cavity flow is affected by arc plasma, which is an equilibrium plasma and have generated equilibrium flow, the equilibrium state of air should be considered in order to analyze the flow of sparkjet actuator. In this study, numerical program for equilibrium flow was developed for the use of sparkjet actuator analysis. The developed program was validated by comparing the time - accurate jet front positions with the reference result. Then, impulse characteristics of the actuator in the atmospheric quiescent air were explained.

#### 초 록

스파크제트 액추에이터는 플라즈마 합성 제트 액추에이터(plasma synthetic jet actuator, PSJA)라고도 불리는 능동 유동 제어 장치로, 초음속 유동의 제어 가능성이 있어 많은 연구가 진행 중이다. 이 액추에이터는 아크 플라즈마를 이용해 캐비티(cavity) 내부에 에너지를 주입하여 온도와 압력을 상승시킨다. 온도와 압력이 상승한 캐비티에서 오리피스(orifice)를 통해 압력파와 제트가 분출되어 외부 유동에 교란을 준다. 플라즈마의 영향으로 캐비티 유동은 고온, 고압의 평형 유동이 되기 때문에 스파크제트 액추에이터의 유동 해석을 위해선 공기의 평형 상태를 고려해야 한다. 본 연구에서는 평형 유동의 특성을 고려하여 스파크제트 액추에이터 유동 해석을 위한 수치해석 프로그램을 개발했다. 개발된 프로그램의 검증으로 문헌에서 얻을 수 있는 실험 결과와 시간에 따른 제트의 위치를 비교했다. 또한 상온, 상압의 무풍에서 액추에이터의 추력 특성을 분석했다.

† Received : October 8, 2018 Revised : December 19, 2018 Accepted : December 28, 2018

<sup>1</sup> Graduate Student, <sup>2</sup> Graduate Student, <sup>3</sup> Graduate Student, <sup>4</sup> Graduate Student, <sup>5</sup> Professor

<sup>5</sup> Corresponding author, E-mail : aerocfd1@snu.ac.kr

© 2019 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

**Key Words** : Sparkjet Actuator(스파크제트 액추에이터), Plasma Actuator(플라즈마 액추에이터), Equilibrium Flow(평형 유동), Flow Control(유동 제어)

## 1. 서 론

유동 제어 장치는 비행체의 형상에 큰 변화를 주지 않고 공력 성능을 개선할 수 있다는 이점 때문에 많은 연구자에 의해 연구가 되어 왔다. 유동 제어 장치들은 비행체의 항력 감소, 양력 증가, 유동 박리 제어, 조정면 대체 등 다양한 방법으로 활용할 수 있다. 특히, 능동 유동 제어(active flow control) 장치는 수동 유동 제어(passive flow control) 장치와 달리 특정 유동 상황에 국한되지 않고, 비행환경에 따라 선택적으로 작동시킬 수 있기 때문에 보다 효율적인 유동 제어가 가능하다. 대표적인 능동 유동 제어 장치로는 오리피스(orifice)와 캐비티(cavity)로 구성되어, 오리피스를 통해 제트를 분출하는 합성 제트(synthetic jet)가 있다. 제트를 분출하는 방법에 따라 다양한 합성 제트가 있으며 그 중, 아크 플라즈마를 이용해 캐비티 내부의 유동을 가열, 가압하여 분출시키는 스파크제트 액추에이터(sparkjet actuator)가 있다. 플라즈마 합성 제트 액추에이터(Plasma synthetic jet actuator, PSJA)라고도 불리는 스파크제트 액추에이터는 Fig. 1과 같이 캐비티와 오리피스로 구성되어 있으며 캐비티 벽면에 두 개 혹은 세 개의 전극이 있다. 스파크제트 액추에이터의 작동은 크게 세 단계로 나누어진다. 첫 번째는 에너지 주입 단계로 플라즈마를 이용해 캐비티 내부의 온도와 압력을 높이는 과정이다. 전극 사이에 수 kV(kilo Volt)의 전압을 가해주면 아크 플라즈마가 발생하면서 수 A(ampere)의 전류가 흐르게 된다. 이렇게 생성된 플라즈마의 줄가열 에너지(joule heating energy)에 의해 캐비티 내부에 에너지가 주입되어 캐비티 내부 유동의 온도와 압력이 상승한다. 두 번째는 분출 단계로 오리피스를 통해 제트가 분출되는 단계다. 앞서 설명한 에너지 주입 단계의 결과로 캐비티 내부에 수많은 압력파가 형성되고 압력이 증가한다. 이러한 압력파 중 오리피스 출구를 향하는 압력파는 캐비티 외부로 분출되고, 증가한 캐비티 압력에 의해 제트 또한 분출된다. 이렇게 압력파와 제트가 분출되는 모습의 예시가 Fig. 1에 나타나 있다. 마지막 세 번째 단계는 복원 단계로, 캐비티 외부에서 내부로 공기가 들어오는 과정이다. 제트가 충분히 분출된 후에는 캐비티 내부 압력이 외부 압력보다 낮아지게 된다. 자연스럽게 형성된 역압력에 의해 캐비티에 공기가 다시 공급된다. 이와 같은 세 단계가 주기적으로 반복되어 액추에이터가 작동한다. 스파크제트 액추에이터의 구조와 작동 방법의 측면에서 두 가지 장점이 있다. 첫 번째는 구조적으로 간단하며 구동부가 없기 때문에 파손의 위험

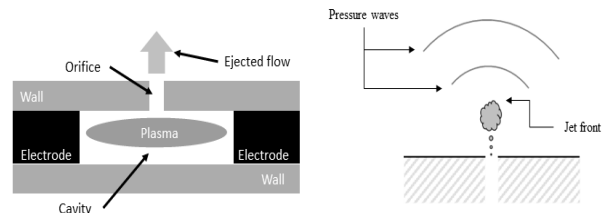


Fig. 1. Schematics of the configuration and operation of the sparkjet actuator

이 적다는 것이다. 두 번째는 작동 과정 중에 인위적인 유량 공급이 없는 zero-net mass flux 장치로 질량이 많이 나가고 복잡한 유압 장치가 필요 없다는 점이다. 이처럼 작동 원리와 구조가 비교적 간단하면서도 제트를 분출하는 원동력이 캐비티의 고온/고압의 유동이기 때문에 제트의 속도가 초음속에 이를 가능성 있을 정도로 성능이 우수하다. 이러한 장점으로 인하여 초음속 유동의 제어 가능성이 언급되고 있으며 많은 연구자가 스파크제트 액추에이터를 연구하고 있다.

스파크제트 액추에이터는 Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory (JHU/APL) 연구팀에 의해 2003년 처음 제안되었다[1]. 이후 다양한 실험적, 수치적 연구들이 많은 연구자에 의해 행해졌다. 수치해석을 이용한 연구들은 Navier - Stokes 방정식을 풀거나 간단한 초음속 노즐 관계식에 질식 조건을 적용하여 오리피스 출구에서 유동의 속도를 예측하는 것이 주를 이뤘다[2,3]. 최근 유럽의 ONERA에서 공기의 평형 상태를 고려하여 Navier - Stokes 방정식을 풀고, 쉘리렌 이미지로 촬영한 제트의 위치를 시간에 따라 비교하였다[4,5]. 하지만 액추에이터가 발생시키는 제트 자체의 특성과 제트가 발생하는 원리에 관한 직접적인 연구는 부족한 실정이다. 또한 기존의 수치해석 방법을 비행체의 유동 제어 연구에 활용하기에는 계산 비용의 한계로 현실적이지 못하다.

본 연구는 스파크제트 액추에이터가 발생시키는 압력파와 제트의 특성을 더욱 세밀하게 연구하여, 비행체의 유동 제어 연구를 위한 스파크제트 액추에이터 모델 개발의 일환으로 수행되었다. 아크 플라즈마에 의한 공기의 평형 상태를 고려하여 스파크제트 액추에이터의 유동 해석을 할 수 있는 프로그램을 개발했다. 문헌에서 얻을 수 있는 실험 연구의 시간에 따른 제트 위치를 비교하여 개발한 프로그램을 검증하고 신뢰성을 확보했다. 캐비티와 제트의 유동 현상을 바탕으로 액추에이터의 추력 특성을 분석했다.

## II. 본 론

### 2.1 물리 모델

#### 2.1.1 지배방정식

본 연구에서는 스파크제트 액추에이터의 정확한 수치해석을 위해 3차원 비정상 평형 Navier - Stokes 방정식을 이용한 유동 해석 프로그램을 개발했다. 플라즈마에 의한 에너지 주입은 에너지 방정식에 생성항으로 입력했다. 보존 형태로 나타낸 지배방정식은 다음의 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial z} = \frac{\partial E_v}{\partial x} + \frac{\partial F_v}{\partial y} + \frac{\partial G_v}{\partial z} + S \quad (1)$$

이때 각각의 벡터  $Q, E, F, G, E_v, F_v, G_v$ 는 다음과 같다.

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho e_t \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$E = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ (\rho e_t + p)u \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ (\rho e_t + p)v \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho uw \\ \rho vw \\ \rho w^2 + p \\ (\rho e_t + p)w \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$E_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{yx} \\ \tau_{zx} \\ -q_x + \tau_{xx}u + \tau_{xy}v + \tau_{xz}w \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

$$F_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{zy} \\ -q_y + \tau_{yx}u + \tau_{yy}v + \tau_{yz}w \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

$$G_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zz} \\ -q_z + \tau_{zx}u + \tau_{zy}v + \tau_{zz}w \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

식 (3)의  $e_t$ 는 total energy로 내부 에너지와 운동 에너지의 합인  $e_t = e_{internal} + e_{kinetic}$ 로 나타낸다. 내부 에너지를 포함한 모든 유동 변수와 수송 변수는 평형 상태의 공기 물성값을 이용하여 구한다. 평형 상태의 공기 물성값은 2.1.2장에서 다룬다. 생성항 벡터  $S$ 는 플라즈마에 의한 주입 에너지를 나타내는 항으

로 구성되어 있다. 플라즈마와 유동의 화학 반응은 공기의 평형 물성값으로 고려되었기 때문에 화학종 연속방정식이나 화학 반응에 의한 에너지 생성항은 고려하지 않았다. 생성항 벡터  $S$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ Q_{plasma} \end{bmatrix} \quad (5)$$

이때  $Q_{plasma}$ 는 플라즈마에 의해 유동으로 주입되는 에너지다. 일반적으로  $Q_{plasma}$ 를 구하기 위해선 플라즈마에 의한 줄 가열 에너지 (Joule heating energy), 복사 손실(radiation loss) 등 다양한 성분을 고려해야 한다. 이는  $Q_{plasma} = Q_{joule} - Q_{rad} = \sigma E^2 - Q_{rad}$ 와 같이 나타낼 수 있으며  $Q_{joule}$ 는 줄 가열 에너지 항,  $Q_{rad}$ 는 복사열에 의한 에너지다. 이때  $\sigma$ 는 플라즈마의 전기 전도도이며  $E$ 는 전기장이다.  $Q_{plasma}$ 를 구하는 방법에 대한 연구도 진행되고 있다[4]. 더욱 간편한 방법으로는 플라즈마의 에너지 전달 효율  $\eta$ 를 도입하여  $Q_{plasma} = \eta Q_{joule}$ 로 나타내기도 한다.  $\eta$ 는 일반적으로 수 퍼센트(%)에서 수십 퍼센트 정도로 알려져 있으며 이에 대한 연구도 진행 중이다[6,7]. 본 연구에서는 계산의 효율성과 간편성을 위해 전기전도도  $\sigma$ 와 전기장  $E$ , 복사 손실 등의 계산을 수행하지 않고 줄가열 에너지에 에너지 전달 효율  $\eta$ 가 적용된 net energy를 생성항  $Q_{plasma}$ 로 입력하였다.

#### 2.1.2 공기 평형 상태 물성치

스파크제트 액추에이터의 캐비티 내부 유동은 플라즈마에 영향을 받는다. 플라즈마에서 발생하는 열이 유동으로 전달되어 캐비티 내부에 압력파가 발생하고 온도가 상승한다. 이때의 플라즈마는 아크 플라즈마로 전자와 무거운 입자의 온도가 같은 평형 플라즈마로 알려져 있다. 이러한 가정 하에서 모든 입자의 열역학적 변수와 소용 수송 변수는 단일 입자로 구성된 유동처럼 모두 같은 값을 적용할 수 있다. 고온의 플라즈마에 의한 평형 유동의 성질을 반영하기 위해서 NASA Reference 1311에서 제공하는 CEA(Chemical Equilibrium with Application) 데이터베이스를 사용했다[8]. 본 연구에서는 순수 공기에 대한 해석만 진행하므로 CEA의 공기 데이터를 사용했다. CEA는 자유에너지 최소화 방법(minimization of free energy formulation)을 이용하여 공기의 평형 물성값을 계산한다. 온도와 압력을 이용하여 다른 물성값을 구할 경우 Gibbs energy minimization 방법을 이용하고, 온도와 밀도를 이용하여 다른 물성값을 구할 경우 Helmholtz energy minimization 방법을 이용한다. 평형 물성값의 자세한 계산 방법은 참고문헌

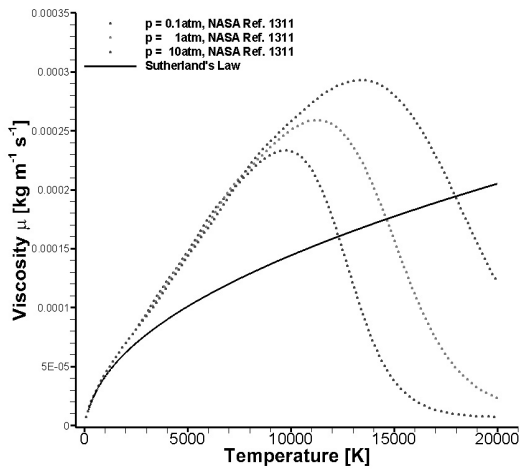


Fig. 2. Viscosity with respect to temperature and pressure calculated by NASA Reference 1311(CEA) and Sutherland's Law

[8]에 나와 있다. 본 연구에서는 CEA에서 제공한 데이터베이스를 이용해 공기의 평형 물성치를 계산하여 table로 만들어 사용했다[9]. CEA의 신뢰할 수 있는 온도 범위의 하한은 150 K으로 이보다 낮은 온도 범위는 Sutherland's Law를 이용했다. Fig. 2와 Fig. 3에 본 연구에서 사용한 CEA의 점성계수와 열전달 계수가 온도와 압력에 따라 나타나 있으며, 비교를 위해 Sutherland's Law로 구한 점성계수와 열전달 계수가 함께 나타나 있다.

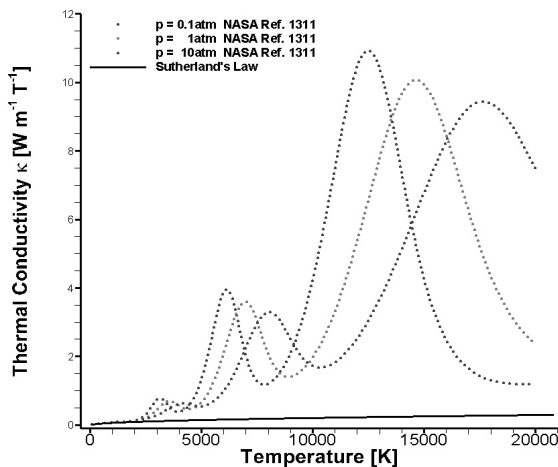


Fig. 3. Thermal conductivity with respect to temperature and pressure calculated by NASA Reference 1311(CEA) and Sutherland's Law

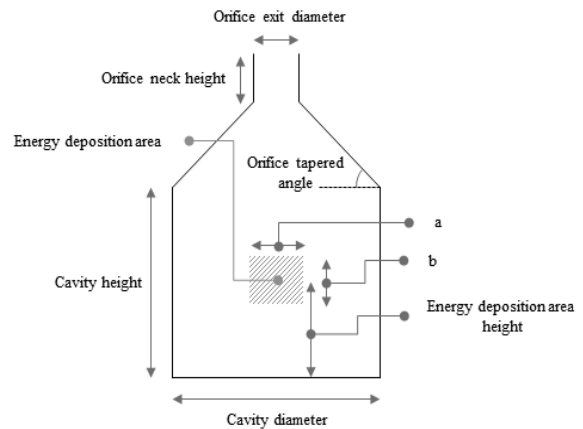


Fig. 4. Cavity geometry and design variables

### 2.1.3 해석 조건 및 수치 기법

무풍에서 단일 펄스로 동작하는 스파크제트 액추에이터의 수치해석을 수행했다. 수치해석은 Fig. 4와 같은 형상에서 진행했으며 각 형상 변수에 대한 수치가 Table 1에 나타나 있다. 이는 참고문헌 [5]에서 수행된 실험에서의 형상과 동일하다. Fig. 5에는 해석에 사용된 격자계가 나타나 있다. 계산 시간 감소를 위해 대칭적인 형상과 유동 현상을 고려하여 전체 형상의 1/4에 해당하는 영역만 계산을 수행했다. 전체 계산 영역의 격자 수는 600,000개 수준에서 결정

Table 1. Design variables of sparkjet actuator

Design variables	Value
Orifice exit diameter	1.0 mm
Orifice neck length	4.0 mm
Orifice tapered angle	45°
Cavity height	4.0 mm
Cavity diameter	4.6 mm
Energy deposition area (a x b)	1.2×1.0 mm

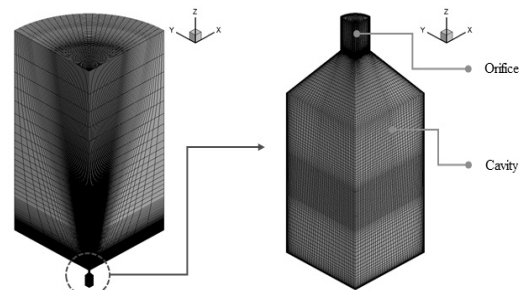


Fig. 5. Grid system of sparkjet actuator



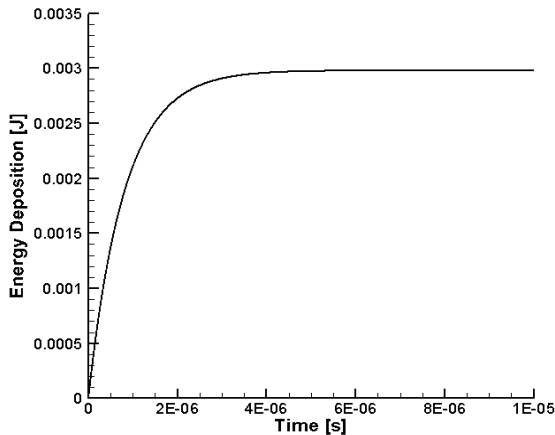


Fig. 6. Time - dependent energy deposition

되었으며 그중 300,000개 정도의 격자가 캐비티에만 사용되었다. 에너지 생성향이 입력되는 영역과 제트가 분출되는 영역은 보다 조밀하게 격자를 구성했다. 본 연구에서는 정렬 격자계를 사용했다. 따라서 복잡한 형상인 전극의 구현은 현실적으로 어려웠기 때문에 생략했다. 참고문헌 [5]에 따르면 전극의 형상은 제트를 포함한 유동 패턴의 대칭성에 영향을 주지 않는다고 보고되고 있다. 초기 조건으로는 상온, 상압의 대기 조건인  $300\text{ K}$ ,  $101,325\text{ Pa}$ 를 적용했다. 에너지 주입 영역은 플라즈마 발생에 따른 에너지 생성향이 입력되는 영역이다. 본 연구에서는 플라즈마의 생성 단계는 생략하고 플라즈마가 완전히 생성된 직후를 가정했다. 따라서, 플라즈마의 고온, 고압의 초기 조건으로 모사를 했으며, 해당 영역엔 플라즈마 초기 조건으로  $3,000\text{ K}$ 을 입력했다[5]. 캐비티 벽면과 외기의 바다 벽면의 경계 조건은 no-slip 조건과 단열 조건을 사용했으며 외기 outflow는 압력 외삽 조건을 이용했다. 에너지 생성향  $Q_{plasma}$ 은 문헌에서 제공한 값과 동일하게  $10\mu\text{s}$  동안  $3\text{ mJ}$ 을 입력했으며 Fig. 6에 나타나 있다.  $3\text{ mJ}$ 의 에너지 생성향은 문헌에 언급된 플라즈마를 발생시키는 전압/전류 조건을 이용해 에너지 전달 효율  $\eta$ 를 역산하면 약 3.5%에 해당하는 양이다. 문헌에는  $10\mu\text{s}$  동안  $1\mu\text{s}$  간격으로 10개의 데이터만 제공되었기 때문에 주어진 점들을 내삽하여 함수를 구성해 사용했다.

앞서 설명한 Navier - Stokes 방정식을 해석하기 위해 AUSMPW+ 공간차분법을 이용했다[10]. AUSMPW+ 기법은 충격파와 벽면 주변에서 진동을 잘 포착하는 장점이 있다. 비록 해석 영역은 상온, 상압이지만 캐비티 내부에서 에너지 주입에 의한 압력파가 발생하고, 캐비티 벽면에 입사/반사하여 매우 복잡한 유동 현상을 보이기 때문에 해당 기법을 이용했다. 또한, 추후에 초음속 평판에서 액츄에이터를 적용한 연구를 계획 중에 있어 이를 대비하여 충격파 포착에 강

점이 있는 공간차분 기법을 사용했다. 시간적분법은 3차 Runge - Kutta 방법을 사용했다.

## 2.2 해석 결과

### 2.2.1 액츄에이터의 제트 특성

스파크제트 액츄에이터는 캐비티 내부의 플라즈마에 의한 에너지 주입으로 캐비티 내부가 고온, 고압으로 되면서 복잡한 유동 현상을 보이게 된다. 고온, 고압으로 형성된 무수한 압력파/반사파로 오리피스를 통해 압력파와 제트를 분출하며 추력이 발생한다. 초기의 압력파, 제트, 추력의 형성 메커니즘은 참고 문헌 [11]에 나와 있다. 본 연구의 해석 결과로 얻은 스파크제트 액츄에이터의 밀도 분포도가 Fig. 7에 나타나 있다. 액츄에이터가 발생시키는 압력파와 제트가 잘 모사된 것을 확인할 수 있다. 해석의 신뢰도는 제트의 시간에 따른 위치(jet position)를 문헌의 실험 결과와 비교하여 확보하였다. 문헌의 실험 연구에서는 쉘리렌 이미지를 통해 제트 위치를 측정했으며, CFD 연구에서는 밀도 분포도에서 변화가 큰 위치를 제트 위치로 선정했다. 자세한 방법은 참고문헌 [5]에 나와 있다. 본 연구에서도 동일하게 밀도 분포도에서 변화가 큰 위치를 제트 위치로 정했으며 부가적으로 z 방향 속도 분포도도 참조했다. Fig. 8에 본 연구와 문헌에서의 시간에 따른 제트 위치가 나와 있으며, 두 값이 실험의 오차범위 내에서 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한, 본 연구의 해석 결과가 문헌의 CFD 해석 결과보다 실험값에 더 근접한 것을 알 수 있다. 문헌의 CFD 결과는 제트 발생 이후부터 약  $30\mu\text{s}$ 까지와  $45\mu\text{s}$ 에서 실험의 오차범위를 벗어난다. 실험 결과의  $25\sim 30\mu\text{s}$  구간과  $35\sim 40\mu\text{s}$  구간에서 보이는 기울기 증가 양상도 잘 일치한다. 이를 근거로 본 연구에서 개발한 스파크제트 액츄에이터 해석 프로그램의 신뢰성을 확보했다고 판단할 수 있다.

분출된 제트의 속력 변화는 캐비티 내부에서 분출되는 압력파에 의해 일어난다. 캐비티 내부의 압력 상승에 의해 초기 제트가 분출된 후에도 캐비티 내부에서 지속적인 압력파/반사파에 의해 복잡한 유동 현상이 나타나고, 이 중 일부가 오리피스로 분출되면서 앞서 가는 제트를 밀어주는 효과가 나타난다. Fig. 8에서  $t = 40\mu\text{s}$  전후의 제트 위치의 기울기가 바뀌어 있는 것을 알 수 있다.  $t = 40\mu\text{s}$  전후의 밀도 분포도가 Fig. 9에 나타나 있다. Fig. 9 왼쪽  $t = 34\mu\text{s}$ 의 밀도 분포도에서는 오리피스 출구를 나온 압력파가 제트 아래에서 위치해 있다. 이후  $t = 42\mu\text{s}$ 의 밀도 분포도는 압력파가 제트를 지났다. 이처럼 압력파가 제트를 지난 전후의 시간에 따른 제트 위치의 기울기가 바뀐 것을 통해 압력파가 제트를 밀어주는 것을 알 수 있다.

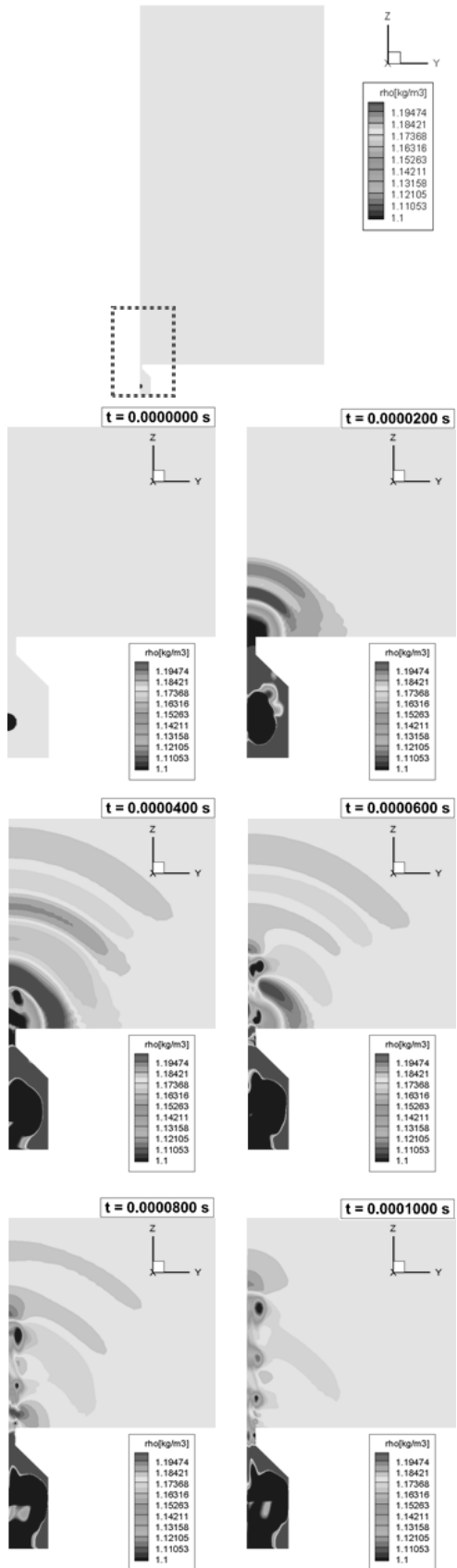


Fig. 7. Density contour

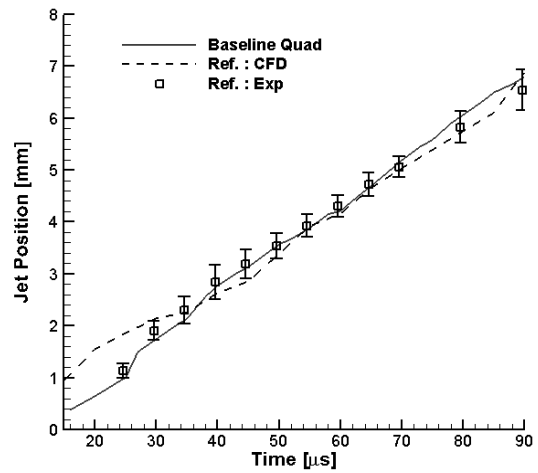


Fig. 8. Jet position with respect to time [5]

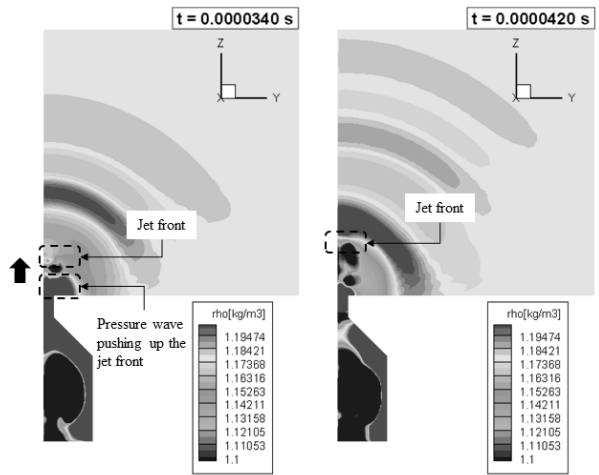


Fig. 9. Density contour at  $t = 34 \mu s$  (left) and  $t = 42 \mu s$  (right)

### 2.2.2 액추에이터 추력 특성

스파크제트 액추에이터에 의한 추력과 충격량이 Fig. 10에 나타나 있다. 추력은 약  $t = 100 \mu s$  이전까지 큰 진폭의 진동 현상을 보이며 약  $0.15 N$ 의 최대값이 나타나고, 이후 점차 진폭이 감소한다. 추력은 모멘텀 성분과 압력 성분을 고려한  $T = \dot{m} V_e + (p_{exit} - p_a)A$ 의 식을 오리피스 출구에서 적분하여 구했다. 앞선 Fig. 7에서 언급했듯 제트가 분출되는 동안에도 지속적으로 압력파가 분출된다. 이런 간헐적인 압력파의 분출이 추력의 진동을 만든다. 약  $t = 200 \mu s$  지점까지 양의 알짜(net) 추력이 발생하고 그 이후부터 0 근처에서 작은 진폭으로 진동한다. 충격량도  $t = 200 \mu s$  근방까지 증가하다가 그 이후부터는 약  $2.20 \mu N$ 에 수렴한다. 이를 통해 스파크제트 액추에이터의 작동이 약  $t = 200 \mu s$ 까지만 유효한 것임을 알 수 있다. 이 시간 이후부터는 제트 분출로 낮

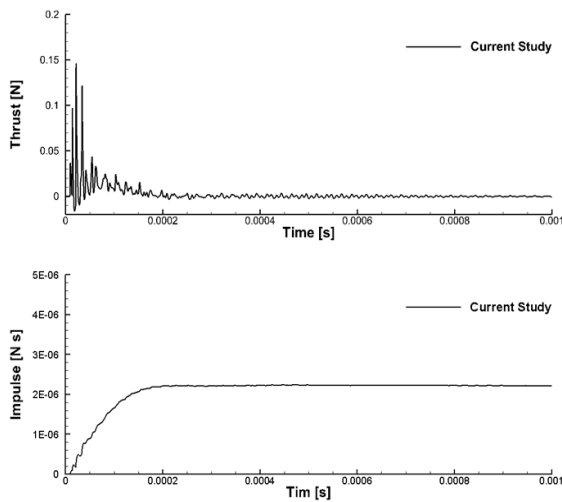


Fig. 10. Thrust(up) and impulse(down)

아진 캐비티 내부의 밀도가 다시 제트 분출 전 단계로 돌아가는 복원 단계로 진입한다. 추력 발생 초기에 일부 음의 추력이 발생한다. 이는 제트 분출 전체의 과정에서 아주 국소적인 부분이고 큰 경향성에서는 압력파와 제트가 분출 중이기 때문에 복원 단계는 아니다. 이러한 음의 추력이 발생하는 원인은 크게 두 가지가 있다. 첫 번째는 오리피스 목의 벽면에서 발생하는 역압력 구배에 의한 유동 박리 현상이다. 두 번째 원인은 제트 분출 후 오리피스 출구 근방에서 발생하는 vortex에 의해 일부 유동이 오리피스 출구 안쪽으로 들어가는 현상 때문이다. 이와 같은 두 가지 원인을 확인할 수 있는  $t = 30 \mu\text{s}$ 에서의 z 방향 속도와 유선이 Fig. 11에 나타나 있다. 해당 시간대는 제트가 분출되고 있으며 추가적인 압력파가 오리피스 목을 타고 올라와 분출되기 직전의 상황이다. 오리피스 벽면에 역압력 구배가 생겨 유동 박리가 일어나는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 오리피스 출구 쪽에서만 나타나는 것이 아니라 오리피스 벽면에서 지속적으로 나타나기 때문에 제트의 모멘텀 손실을 일으킨다. 또한 분출되고 있는 제트의 오리피스 출구 벽면 쪽에서 vortex가 발생하여 제트의 방향과 반대 방향으로 유동이 발생하게 된다. 분출되고 있는 유동의 모멘텀이 충분히 크지 못하기 때문에 제트와 반대 방향으로 발생한 유동 일부가 오리피스 출구 쪽으로 침투하게 된다. 오리피스 출구 쪽에서 일시적으로 캐비티 안쪽으로 흐르는 유동이 발생하지만, 반복적으로 분출되는 압력파에 의해 유동의 방향은 다시 캐비티 밖으로 향하게 되고 전체적인 추력의 추세가 양으로 유지된다.

제트의 추력과 충격량을 증가시키고 추력의 변동성을 줄이기 위해선 압력파의 분출을 최소한으로 줄이고 추력에 영향을 주는 성분 중 제트의 모멘텀 성분을 증가시키는 것이 중요하다. 이를 위한 가장 확

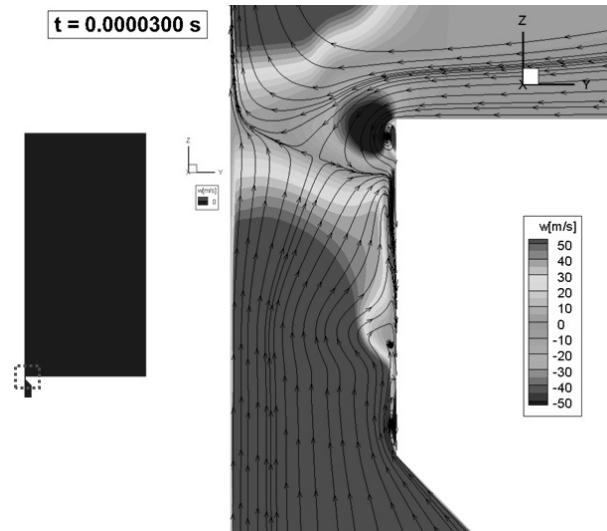


Fig. 11. Z-direction velocity and streamlines

실한 방법은 액추에이터가 분출하는 제트의 속력을 초음속에 이르게 하는 것이라 판단된다. 오리피스 목에서 질식이 일어나 분출 제트가 초음속에 이르게 되면 오리피스 벽면의 유동 박리에 의한 추력 감소가 줄어들 것이다. 또한, 캐비티 내부의 정보가 캐비티 밖으로 전달되지 않게 되고, 반대로 캐비티 외부의 정보도 캐비티 안으로 전달되지 않는다. 따라서 오리피스 출구에서 일시적으로 일어나는 역방향 유동이 발생하지 않게 되어 안정적인 추력과 충격량을 확보하여 스파크제트 액추에이터의 효율을 증가시킬 수 있다. 스파크제트 액추에이터의 제트를 초음속으로 만들기 위한 연구는 현재 진행 중이며, 다음과 같은 방법을 통해 가능할 것으로 예상된다. 먼저 캐비티 내부의 온도와 압력을 더욱 증가시키고, 고르게 분포시켜야 가능할 것으로 보인다. 이는 에너지 주입량 또는 에너지 주입 영역 부피와 캐비티 부피 등과 같은 형상적 요인 등이 영향을 미칠 것으로 예상하며 추가적인 연구가 필요하다.

### III. 결 론

본 연구에서는 초음속 유동 제어의 가능성이 있는 스파크제트 액추에이터에 관한 수치해석 연구를 수행했다. 평형 플라즈마인 아크 플라즈마를 고려할 수 있는 평형 유동 해석 프로그램을 개발했다. 개발한 프로그램을 이용하여 스파크제트 액추에이터 수치해석을 수행하고, 시간에 따른 제트 위치를 문헌의 실험값과 비교했다. 문헌에서 제시한 실험값의 오차 범위 안에서 잘 일치하는 결과를 얻었으며, 문헌의 수치해석 결과보다 높은 정확도를 보였다. 이를 통해 개발한 프로그램의 신뢰도를 확보했으며 추가적인 스파크제트 액추에이터의 해석 연구가 가능할 것으

로 판단된다. 또한, 해석된 연구의 결과를 바탕으로 액추에이터의 제트 유동 특성을 분석했다. 제트가 분출되는 동안에도 간헐적으로 압력파가 분출되고, 이러한 압력파에 의해 추력이 큰 폭으로 진동하며 최대 추력은 약  $0.15 N$ 에 이른다.  $t = 200 \mu s$ 이 지나게 되면 추력은 0 주변에서 작은 폭의 진동을 보이게 되며, 이 때 충격량은 약  $2.20 \mu N$ 으로 수렴한다. 이를 미루어 보아, 해석한 스파크제트 액추에이터의 유효 작동 시간은 약  $200 \mu s$ 임을 알 수 있다. 스파크제트 액추에이터가 작동하는 중간에 음의 추력이 발생하는 경우가 있다. 이는 오리피스 출구 벽면에서 발생하는 유동 박리와 제트의 vortex에 의해 일부 유동이 오리피스 출구 안쪽으로 들어가기 때문이다. 이러한 음의 추력은 스파크제트 액추에이터의 효율을 감소시키는 원인이 된다. 제트의 속력을 초음속으로 만들면 이러한 음의 추력이 해결되고 액추에이터의 성능이 증가할 것으로 예상된다. 그러기 위해선 캐비티 내부의 압력과 온도를 더욱 고르게 만들어야 한다. 이는 파라메트릭 스터디 등을 통한 추가 연구가 필요하다.

본 연구에서 개발한 프로그램으로 확인한 기본적인 추력 특성을 바탕으로 스파크제트 액추에이터의 실제 유동 제어 연구에 활용할 수 있는 모델 개발이 가능할 것으로 판단된다. 궁극적으로, 스파크제트 액추에이터의 유동 특성을 모사할 수 있는 경계조건 모델을 개발할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 한국과학기술원 초고속비행체특화센터에서 수행되었습니다.

## References

- 1) Grossman, K., Cybyk, B., and David, V., "Sparkjet actuators for flow control," *41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Jan. 2003, p. 57.
- 2) Haack, S., Taylor, T., Emhoff, J., Emhoff, J.,

and Cybyk, B., "Development of an analytical SparkJet model," *5th Flow Control Conference*, 2010, pp. 4979.

- 3) Anderson, K. V., and Knight, D. D., "Plasma jet for flight control," *AIAA journal*, Vol. 50, Sept. 2012, pp. 1855~1872.

- 4) Dufour, G., Hardy, P., Quint, G., and Rogier, F., "Physics and models for plasma synthetic jets," *International Journal of Aerodynamics*, Vol. 3, No. 1-2-3, 2013, pp. 47~70.

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

- 6) Popkin, S. H., Cybyk, B. Z., Foster, C. H., and Alvi, F. S., "Experimental Estimation of SparkJet Efficiency," *AIAA Journal*, Vol. 54, No. 6, 2018, pp. 1831~1845.

- 7) Belinger, A., Hardy, P., Barricau, P., Cambonne, J. P., and Caruana, D., "Influence of the energy dissipation rate in the discharge of a plasma synthetic jet actuator," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 44, No. 36, 2011, 365201.

- 8) Gordon, S., and McBride, B. J., "Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications I. Analysis," *NASA Reference Publication 1311*, 1994.

- 9) Bae, J., "Development of Equilibrium Flow CFD Code Using CEA Database and Prediction on Ablation of SiC Coating Nozzle," Master Dissertation, *Seoul National University*, 2017.

- 10) Kim, K. H., and Kim, C., "Accurate, efficient and monotonic numerical methods for multi-dimensional compressible flows Part I: Spatial discretization," *Journal of Computational Physics*, Vol. 208, No. 2, 2005, pp. 527~569.

- 11) Kim, H. J., Chae, J., Ahn, S., and Kim, K. H., "Numerical Analysis on Jet Formation Process of Sparkjet Actuator," *AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2018, p. 1552.