

플라즈마에 의한 초음속 유동 변화 해석

박슬기* · 조형희** · 송지운*

Numerical analysis of plasma effect on fluid flow in a supersonic flow

Sulki Park* · Hyung Hee Cho** · Jiwoon Song*

ABSTRACT

A numerical analysis of the effect of plasma on flow characteristics in supersonic flow is studied. It is shown that change of direction and velocity magnitude of flow is appeared different in relative direction of plasma and fluid flow. The case of that direction of electrons, which are same with flow direction, the flow is accelerated, and the case of opposition, the flow is decelerated.

초 록

본 연구에서는 플라즈마에 의한 초음속 유동장의 변화를 수치해석을 이용하여 분석하였다. 플라즈마의 방향을 유동에 평행한 방향과 가로지르는 방향 두 가지 경우에 대한 해석을 통하여 플라즈마가 초음속 유동장의 방향과 유동의 속도 변화에 주는 영향을 알아보았다. 해석 결과 전기장의 크기와 공간별 차이에 따라서 유동장의 방향 및 속도 변화가 다르게 나타났다. 전기장의 방향에 따라 전자가 유동장과 같은 방향으로 가속되는 경우 유동의 속도가 증가하였으며, 반대인 경우에는 유동의 속도가 감소된다는 것을 확인할 수 있었다.

Key Words: Plasma(플라즈마), Flow Control(유동제어), Relative Direction of Plasma and Flow(플라즈마와 유동의 방향), Supersonic flow(초음속), Numerical Analysis(수치해석)

1. 서 론

초음속 유동장 내에서는 아음속과 다르게 충격파가 발생하기 때문에 물체의 형태 변화가 용이하지 않고, 아음속 유동에 비해 초음속 유동

의 속도와 방향을 제어하는 것은 에너지 소모가 많이 든다. 따라서 초음속 유동을 제어하는 방법으로는 형태의 변화를 이용해 수직 충격파를 경사 충격파로 바꾸거나 앞단의 공기를 가열하여 유동을 제어하는 방법이 사용되어져 왔다. 이 방법들 이외에 최근에 플라즈마를 이용해 초음속을 제어하는 방법이 제안되었다.

Daniel Bivolaru, Spencer P. Kuo는 마하수 2.5인 유동에서 cone 형상의 물체의 앞단에 플라

* 연세대학교 일반대학원 기계공학과

** 정희원, 연세대학교 기계공학과
연락처, E-mail: hhcho@yonsei.ac.kr

즈마를 발생시켜 경사 충격과의 변화를 관찰하였다.[1] 또한 S.P.Kuo는 경사 충격과의 크기, 방향을 제어하는 실험과 수치해석을 동시에 진행하여 플라즈마가 유동장에 영향을 주는 주요한 원인이 운동량 전달임을 입증하였다. [2,3] 운동량 전달이 플라즈마가 유동장의 변화를 일으키는 주요한 원인이라는 연구는 J. Reece Roth에 의해 아음속에서도 제안되었다. [4]

위의 실험과 해석 결과들에 따르면 플라즈마는 초음속 유동 제어에 효과적이다. 그러나 위와 같은 연구들은 모두 플라즈마가 유동장 내에 수직으로 위치하는 경우에 대한 실험과 해석으로서 플라즈마와 유동장 사이의 상대적 방향성에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 플라즈마와 유동의 상대적 방향의 차이에 따른 유동장의 특성 변화에 대한 수치적 해석을 수행해 보고자 한다.

2. 플라즈마에 의한 유동 변화 해석

2.1 해석 모델

Figure 1에서와 같이 초음속 유동장내에 유동의 방향과 평행하게 플라즈마 형성부가 놓여 있는 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 플라즈마 형성부는 가운데 전극에 0V가 가해지는 음전압부와 음전압부 양 옆으로 2mm 떨어진 위치에 4000V가 가해지는 양전압부로 구성되어 있으며 각 전극의 폭은 1mm로 동일하게 설정하였다.

입구 유동은 $Ma_0=2.5$, $V_0=570m/s$, $P=0.2atm$, $Temp=135K$ 로 균일하다고 가정하였으며, 유동의 방향은 x방향과 z방향에 평행한 두 가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

유동장의 방향을 변화시키는 주요 메카니즘은 이온, 전자와 중성 분자간의 운동량 전달이다.[2-4] 또한 전기장에 의해 가속되는 전자의 속도는 이온이나 중성분자의 속도 보다 크고, 이온과 중성분자의 속도는 비슷하며, 전자와 중성 분자사이의 운동량 전달이 전자와 이온, 또는 이온과 중성 분자 사이의 운동량 전달보다 더욱 빠르고 많이 일어나게 된다.[3]

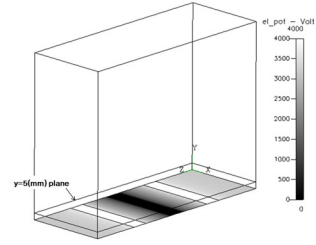


Fig 1 The schematic diagram for the numerical modeling

2.2 플라즈마에 의한 유동 변화 해석

플라즈마에 의해 발생된 전자와 이온, 유동내 중성 분자간의 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\vec{F}_n = \vec{F}_{en} + \vec{F}_{in} \quad (1)$$

$$\vec{F}_e = \vec{F}_{ei} + \vec{F}_{en} - en_e \vec{E} \quad (2)$$

$$\vec{F}_i = \vec{F}_{ie} + \vec{F}_{in} + en_i \vec{E} \quad (3)$$

n_e : 전자의 개수, n_i : 이온의 개수, \vec{E} : 전기장(V/m)

전자, 이온, 중성 분자 사이의 상호 관계를 나타내는 $\vec{F}_{a,b}$ 형태의 성분은 a 성분의 질량과 a와 b의 충돌 주기, 그리고 a와 b의 속도차의 곱으로 계산되고 Eq. 2와 Eq. 3의 마지막 항은 전기장에 의해 전자와 이온이 받는 힘을 나타낸다.

중성 분자의 수보다 전자와 이온의 개수가 매우 적기 때문에 Eq. 2와 Eq. 3의 좌변 항은 무시할 수 있으며 해석 모델에서 설명되어 있는 가정을 적용하여 해석하였다.[2] 그 결과 Eq. 1을 유동이 플라즈마가 만들어진 공간을 통과하는 시간 t_n 에 대하여 적분하면 플라즈마에 의해 변화된 유동의 속도에 대한 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$\vec{V}(t_n) = \vec{V}(0) + \frac{n_0 m_e f_{en} t_n}{n_n m_n} \times \exp(-\eta[1 - \gamma^{-2.65}]) \times [\vec{v}_e - \vec{V}(0)] \quad (4)$$

\vec{V} : 유동 속도, n_0 : 전자의 최대 밀도, m_e : 전자 질량, f_{en} : 전자와 중성분자의 충돌 주기, n_n : 중성 분자 개수, m_n : 중성분자 질량, η : 이온화 횟수, γ : 최대 전기장 강도와 위치별 전기장 강도 비율,

v_e :전자 속도

2.3 해석 결과

Figure 2는 플라즈마 발생 부에서 y축으로 5mm 떨어진 지점($y=5\text{mm}$)에서의 전기장의 크기이다. 이는 상용프로그램인 CFD-ACE를 사용하여 해석하였다.

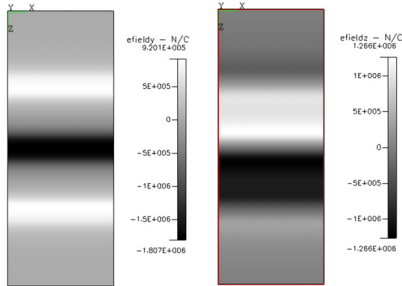


Fig 2 Electric field distribution at $y=5\text{mm}$ (left-y direction, right-z direction)

Figure 2의 해석결과와 같이 전극이 x축에 평행하므로 x 방향으로 전기장의 변화는 없다. 따라서 z방향으로 자른 위치(위치: $y=5\text{mm}$ 평면에서 $x=2.5\text{mm}$ 인 지점의 선 성분 - $z=0\sim 14\text{mm}$)에서 전기장 크기와 Eq. 4를 이용하여 해석을 수행하였다.

유동의 속도성분이 $V=(x,y,z)=(570,0,0)(\text{m/s})$ 로 플라즈마 생성 방향(양극과 음극의 배치방향:z축과 평행)을 가로 지르는 경우 방향별 전기장의 크기와 플라즈마에 의해 변화된 각 방향별 속도와 초기 속도($V_0=570\text{m/s}$)의 비율은 Fig 3과 Fig 4에 나타나 있다. 전기장의 세기가 클수록 전자의 속도가 비례하여 증가하므로 전기장 세기와 속도의 변화 비율 또한 비례한다. 또한 본래 속도 성분이 없던 y방향과 z방향으로의 속도 성분이 전자와의 운동량 전달에 의해 생성된 것을 확인할 수 있다. 유동장의 마하수의 변화 비율과 전기장의 크기($\vec{E} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$)에 대한 해석 결과는 Fig 5와 같다.

유동의 속도성분이 $V=(0,0,570)(\text{m/s})$ 으로 플라즈마 생성 방향과 평행한 경우에 대한 유동장의 속도 변화 비율과 전기장 크기, 마하수의 변화

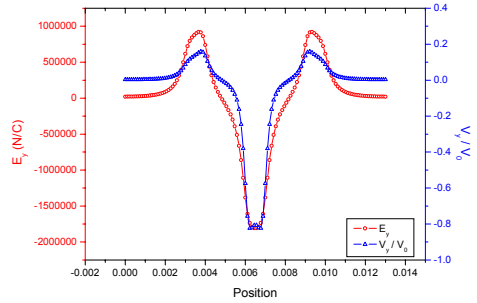


Fig 3 Electric field distribution and ratio V_y to V_0 when incoming flow direction is parallel with x axes (V_y : y direction velocity changed by plasma)

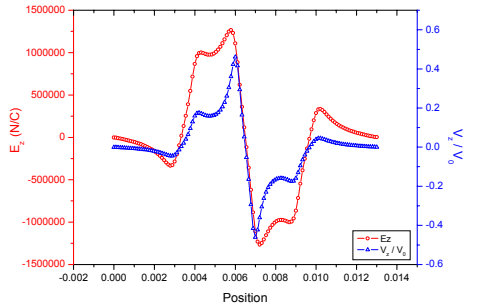


Fig 4 Electric field distribution and ratio V_z to V_0 when incoming flow direction is parallel with x axes (V_z :z direction velocity changed by plasma)

비율에 대한 결과는 Fig 6, Fig 7, Fig 8과 같다.

y방향과 z방향으로의 전기장의 크기와 속도 변화 비율은 유동이 플라즈마를 가로지르는 경우와 비슷한 양상을 보이거나 그 크기의 절대치의 차이에 의해 유동장 전체의 마하수의 변화 양상은 플라즈마를 가로지르는 경우(Fig 5)와 플라즈마와 평행한 경우(Fig 8)가 현저한 차이를 보인다.

3. 결론

1) 전기장의 크기와 전자의 속도가 비례하므로

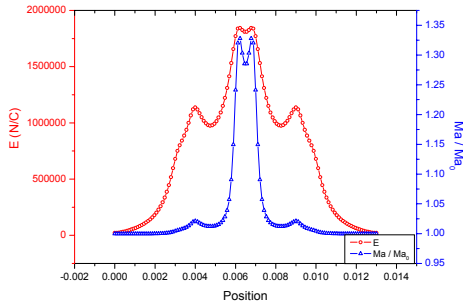


Fig 5 Electric field distribution and ratio Ma to Ma_0 when incoming flow direction is parallel with x axes (Ma : Ma number changed by plasma, Ma_0 : initial Ma number=2.5)

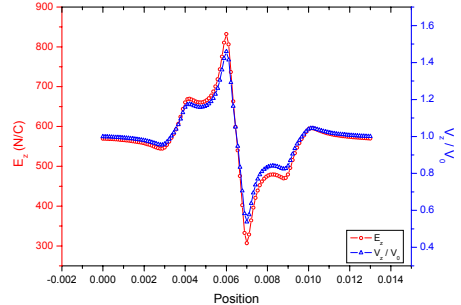


Fig 7 Electric field distribution and ratio V_z to V_0 when incoming flow direction is parallel with z axes

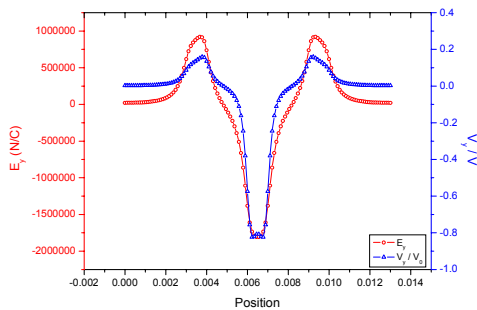


Fig 6 Electric field distribution and ratio V_y to V_0 when incoming flow direction is parallel with z axes

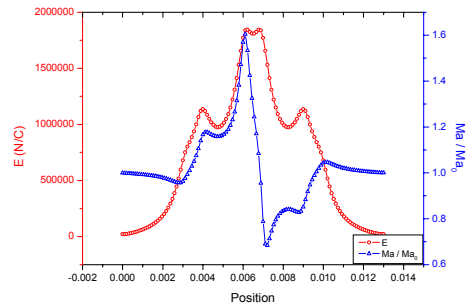


Fig 8 Electric field distribution and ratio Ma to Ma_0 when incoming flow direction is parallel with z axes

속도 변화 비율 또한 전기장의 크기와 비례한다.

- 2) 플라즈마의 생성 방향에 따라 전자의 가속 방향이 정해지고 이에 따라 유동의 방향 변화가 일어나므로 유동의 방향과 플라즈마의 생성 방향에 따라 마하수의 변화 양상은 현저한 차이를 보인다.
- 3) 따라서 전자의 가속 방향과 유동의 방향에 따라 유속의 가속과 감속을 조절할 수 있다.

참고 문헌

1. Daniel Bivolaru, S.P. Kuo, "Observation of supersonic shock wave mitigation by a plasma aero-spike", Physics of plasma, February 2002, pp.721~723
2. S. P. Kuo, Steven S. Kuo, "A Physical mechanism of nonthermal plasma effect on shock wave", Physics of plasmas, 2005
3. Spencer P. Kuo, "Plasma mitigation of shock wave: experiments and theory", Shock wave, 2007
4. J. Reece Roth, "Aerodynamic flow acceleration using piezoelectric and peristaltic electrohydrodynamic effects of a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma, Physics of plasmas, May 2003