

플라즈마분사장치의 초음속분출구에서 기체흐름특성량분포

김문옥, 채광일, 김철민

핵융합플라즈마에 의한 에너지개발에서 중요하게 나서는 문제는 플라즈마를 핵융합시킬수 있는 온도까지 가열하는것이다. 플라즈마가열방법의 하나인 중성립자입사가열방법에서 높은 에너지의 중성립자속은 중수소나 초중수소이온과 같은 이온원천들로부터 전하교환에 의하여 얻을수 있으며 이로부터 중성립자입사에 의한 플라즈마가열을 실현하는데서 이온원천형성은 선차적인 문제로 제기되게 된다.

우리는 이온원천형성을 위한 플라즈마분사장치의 초음속분출구에서 기체흐름특성과라메터들을 평가하였다.

1. 초음속분출구의 기하학적형태 및 기본방정식

플라즈마분사장치의 분출구에서는 높은 압력과 속도, 고온흐름을 동반하므로 그림 1에서와 같이 원형자름목을 가지는 라발노즐형태로 설정하였다. 분출구의 직선 7mm구간은 절연체재료로 만들었다.

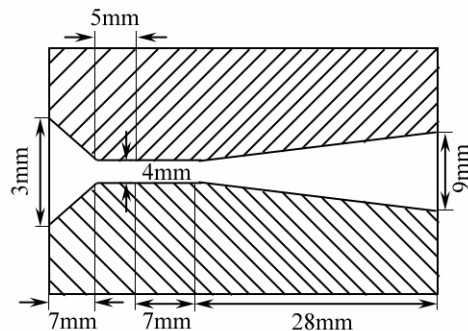


그림 1. 플라즈마분사장치에서 초음속 분출구의 기하학적형태

초음속분출구에서 기체흐름과정이 단열이고 점성이 무시된다고 하면 기체흐름특성은 압축성기체의 정상1차원등엔트로피관계식에 의하여 결정된다.[1]

$$\begin{aligned} P_0 / P &= [1 + (\gamma - 1)M^2 / 2]^{\gamma(\gamma-1)} \\ \rho_0 / \rho &= [1 + (\gamma - 1)M^2 / 2]^{1/(\gamma-1)} \end{aligned} \quad (1)$$

$$T_0 / T = 1 + (\gamma - 1)M^2 / 2$$

여기서 P_0 , ρ_0 , T_0 과 P , ρ , T 는 각각 탱크와 분출구의 압력, 밀도, 온도이다.

분출구질량흐름량을 고려하면 자름면면적 A_1 , A_2 와 흐름의 마흐수 M_1 , M_2 사이에 다음의 관계식을 설정할수 있다.

$$A_1 / A_2 = (M_1 / M_2) \cdot \{ (1 + [(\gamma - 1)M_1^2 / 2]) / (1 + [(\gamma - 1)M_2^2 / 2]) \}^{(\gamma+1)/[2(\gamma-1)]} \quad (2)$$

분출구목의 자름면면적 A^* 및 출구의 자름면면적 A 와 흐름의 마흐수사이의 관계식은 초음속흐름인 경우 근사적으로 다음과 같이 표시할수 있다.

$$M = 1 + 1.2(A / A^* - 1)^{1/2}, \quad (1.0 < A / A^* < 2.9) \quad (3)$$

분출구에서 초음속흐름은 출구압력 P_E 와 탱크의 압력 P_0 의 비가 한계값

$$P_E / P_0 < \{ 1 - [(\gamma - 1) / 2] / [1 - (\gamma - 1) / 2] \}^{\gamma/(\gamma-1)}$$

을 만족시킬 때 실현된다.

일반적으로 플라스마노즐에서 기체흐름은 고온 및 이온화된 흐름이며 류동과정에 압축성을 동반한다.

3차원정상압축성란류에 대한 기본방정식은 다음과 같다.

$$\text{런속방정식: } \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4)$$

$$\text{운동방정식: } \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} \quad (5)$$

여기서 ρ 는 기체밀도, \vec{v} 는 기체의 속도, P 는 압력, \vec{g} 는 중력, $\bar{\bar{\tau}} = \mu[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - 2\nabla \cdot \vec{v}I/3]$ 이다.

$$\text{에네르기방정식: } \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + P)) = \nabla \cdot [k_{\text{ef}} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\bar{\bar{\tau}}_{\text{ef}} \cdot \vec{v})] \quad (6)$$

여기서 k_{ef} 는 유효전도계수, J_j 는 j 매질의 확산흐름량, E 는 전에네르기, h 는 엔트로피, $\bar{\bar{\tau}}_{\text{ef}}$ 는 란류점성계수이다.

우리는 란류모형[2]으로 $k-\varepsilon$ 모형(2방정식모형)과 Spalart-Allmaras모형(1방정식모형)을 리용하였다.

2. 계산결과 및 분석

노즐입구에서 기체압력은 절대압력으로서 $P_0 = 1\text{MPa}$, 출구압력 $P_E = 0.1\text{MPa}(300\text{K})$ 이며 흐름벽들은 모두 단열부착조건을 주었다. 작업매질은 공기이고 노즐입구에서 기체온도는 우리의 경우 $T_0 = 5\,000\text{K}$, 거칠음상수는 0.5로 하였다.

흐름마당의 대칭성을 고려하여 그림 1의 모형을 대칭면을 기준으로 하여 한쪽 부분만 선정하고 자름면에 대해서는 면대칭조건을 주었다. 이때 흐름계산구역을 65 000~70 000 개의 4각형요소들로 분할하고 노즐의 목부분에서는 마디점수를 보다 조밀하게 하였다.

노즐내부에서 계산그물의 수가 68 000개이상일 때 두 모형에 의한 계산결과가 일치하였다. 계산결과는 그림 2, 3과 같다.

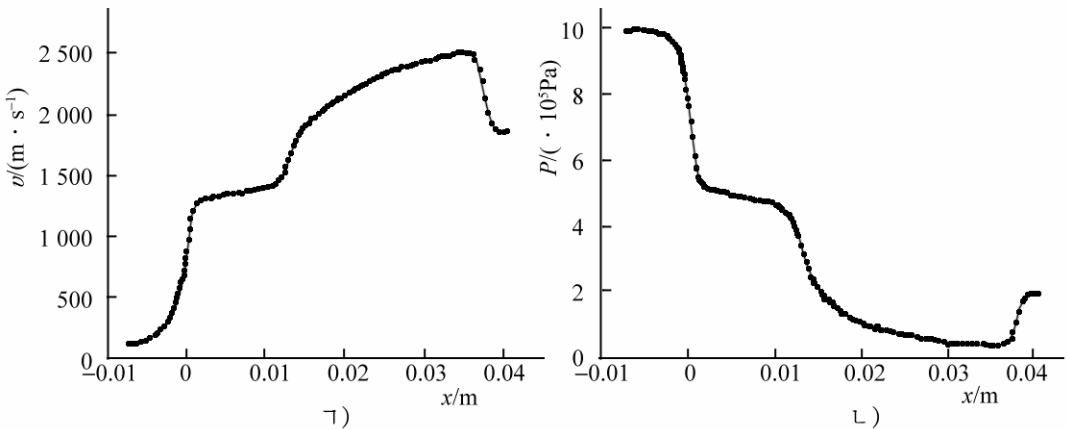


그림 2. 분출구의 축상에서 계산결과

ㄱ) 속도, ㄴ) 압력

그림 2에서 보는바와 같이 노즐의 1목에서부터 흐름속도가 음속이상으로 증가하기 시

작하며 다시 2목에서 증가하다가 노즐의 출구에서 속도가 감소하게 된다. 이것은 노즐출구에서 경계조건으로부터 압축비약면이 형성되는것과 관련된다.

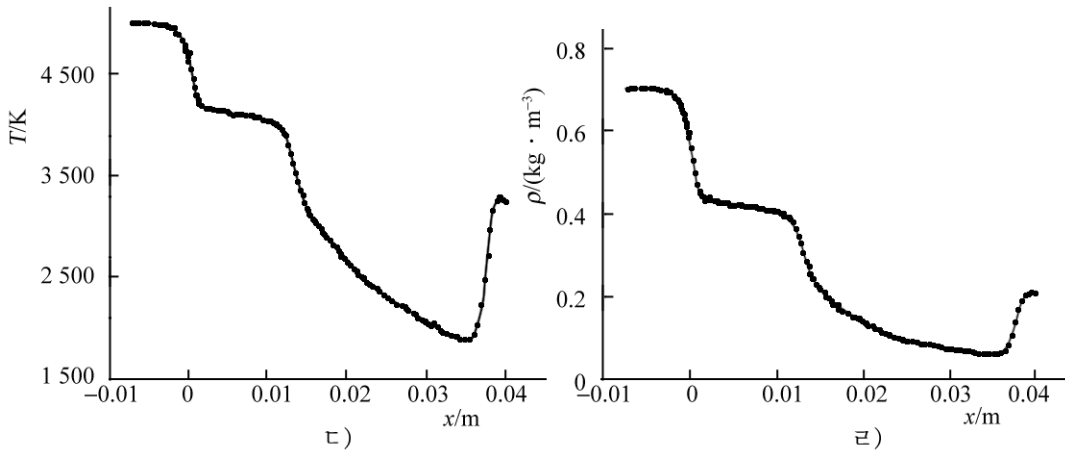


그림 3. 분출구의 축상에서 계산결과

ㄱ) 온도, ㄴ) 밀도

그림 2, 3에서 보는바와 같이 분출구의 이음목들에서 특성량들의 변곡특성이 나타나는 것은 팽창파 및 압축파의 형성과 관련된다.

노즐입구로부터 기체압력은 점차 떨어지기 시작하며 출구에서는 거의 대기압에 도달한다. 초음속흐름이 각점근방에서 회전할 때 팽창파가 발생하며 각점에서의 팽창은 기체흐름의 마흐수를 증가시킨다. 즉 분출구에서 기체의 압력, 온도, 밀도는 팽창파를 통과할 때 감소하게 된다.

얻어진 특성량들의 분포경향성은 라발노즐형태의 호광플라즈마장치에서 흐름마당특성에 대한 선행연구결과[3]와 잘 일치한다.

맺 는 말

플라즈마분사장치의 초음속분출구에서 기체흐름특성을 연구하기 위한 기본방정식계를 구성하고 계산모형을 설정하여 분출구의 축상에서 기체의 흐름속도, 압력, 온도, 밀도분포특성을 결정하였다.

참 고 문 헌

- [1] V. Champane et al.; Modeling Simul. Mater. Sci. Eng., 13, 1119, 2005.
- [2] F. M. White; Fluid Mechanics, University of Rhode Island, 578~583, 2000.
- [3] S. Ghorui et al.; Pramana Journal of Physics, 80, 4, 685, 2013.

주체105(2016)년 6월 5일 원고접수

Distribution of Gas Flux Characteristics Quantities in Supersonic Speed Nozzle of Plasma Jet

Kim Mun Ok, Chae Kwang Il and Kim Chol Min

We composed the main equation systems for studying the gas flux characteristics in supersonic speed nozzle of plasma jet and determined the gas flux parameters.

Key words: plasma jet, supersonic speed nozzle, gas flux