

## 플라즈마열분해장치분사노즐에서의 열분포특성

안명진, 장광남

위대한 수령 김일성동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《과학자들은 우리 나라의 현실이 요구하는 문제를 연구하여야 하며 우리 인민에게 필요한것을 만들어 내기 위하여 노력하여야 합니다.》(《김일성전집》 제35권 374페이지)

원자력공업, 금속공업, 전자공업을 비롯한 인민경제의 여러 부문들에서 널리 리용되고 있는 산화지르코늄과 같은 금속산화물들은 환원용융법[3], 플라즈마열분해법[1, 4], 침전법 등 여러가지 방법으로 합성한다. 그중에서 플라즈마열분해법은 생산공정이 간단하고 거둠률이 높은 우점이 있다.

우리는 플라즈마열분해장치의 분사노즐에서의 열분포특성을 모의하고 플라즈마화염분출때 분사노즐의 열력학적안정성조건을 확정하였다.

### 1. 이론적고찰

플라즈마분사과정을 모의하기 위하여 많은 모형들이 제기되였다.[2]

직류플라즈마발생장치인 경우 노즐에서 화염의 흐름속도와 온도가 높으며 반경방향의 온도와 속도구배가 매우 심하고 기체밀도가 작다. 가열된 플라즈마기체의 흐름형태는 중심 부분에서는 류선형모양, 변두리부분에서는 막흐름모양이다. 플라즈마분사기체와 주위공기 사이의 속도차가 큰것으로 하여 공기흐름은 플라즈마불길쪽으로 심하게 쏠리면서 란류가 발생한다.

일반적으로 란류는 속도마당의 요동으로 특징지어지는데 이때 운동량, 에너지, 물질농도와 같은 량들도 요동하게 된다.

규모가 작고 주파수가 큰 요동들은 계산에서 직접 모의하기가 매우 어려우므로 현실에서는 시간에 의존하는 기본방정식들을 레이놀즈평균하여 평균성분과 요동성분들이 포함된 방정식으로 수정하여 풀이한다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

식 (2)는 비정상나비에-스톡스방정식과 같은 일반형태를 가지며 변수들은 평균값들을 나타낸다. 식의 오른변 마지막항  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 는 란류효과를 특징짓는 레이놀즈응력항이다.

식 (2)가 완전히 닫기도록 하자면 레이놀즈응력항을 모형화해야 하는데 그러한 모형들 중의 하나가  $k-\varepsilon$  모형이다.  $k-\varepsilon$  모형은 레이놀즈응력이 평균속도구배에 비례한다고 가정하는 회리-점성모형으로서 플라즈마분사를 모의하는데 일반적으로 리용된다.

란류열수송은 란류운동량전달에 대한 레이놀즈의 상사개념을 리용하여 모형화할수 있다. 모형화된 에네르기방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_j} - \sum_l h_l J_l + u_i(\tau_{ij})_{\text{eff}}\right) + S_h \quad (3)$$

여기서  $E$ 는 총에네르기,  $k_{\text{eff}}$ 는 유효열전도도,  $J_l$ 은  $l$ 종물질의 확산흐름속,  $(\tau_{ij})_{\text{eff}}$ 는 편차응력텐소르,  $S_h$ 는 열복사와 화학반응 등에 의한 보충적인 열원천향이다.

식 (3)의 오른변 첫 세 항들은 각각 열전도, 물질확산, 점성산일로 인한 에네르기전달을 나타낸다.

플라즈마열분해장치에서 발생하는 플라즈마불길의 온도는 매우 높으며 전극들에 센 전류가 흐르므로 높은 온도로 가열된다. 따라서 열전도와 대류뿐만아니라 플라즈마화염과 전극으로부터의 복사열전달효과를 반드시 고려해야 한다.

복사열전달방정식에서 열복사에네르기는  $S_h$ 에 복사원천향으로 포함된다.

## 2. 모의결과와 분석

모의에 리용한 플라즈마열분해장치노즐의 모양은 원기둥이며 재료는 적동이다. 노즐에는  $120^\circ$  간격으로 공기를 주입하는 3개의 원료주입통로와 물랭각통로가 있다. 노즐의 윗부분에 흑연으로 된 음극이 설치되어있는데 음극과 노즐사이의 간격은 3~5mm이다.

반응함에는 원기둥모양의 흑연양극이  $120^\circ$  간격으로 노즐의 중심축에 수직인 평면에 놓이도록 설치되어있다. 노즐출구면으로부터 양극윗면까지의 거리는 25mm정도이며 양극끝점들사이의 공간의 크기는 그 공간을 원이라고 볼 때 직경이 20~25mm정도이다.

열분해장치를 동작시키면 강한 플라즈마기체가 음극과 양극사이공간으로 분사된다. 이때 노즐의 출구면에서 플라즈마기체의 중심부온도는 10 000~12 000°C까지 높아지며 중심에서 반경방향으로 가면서 온도가 급격히 낮아진다. 높은 온도의 플라즈마분사기체와 심하게 가열된 전극들로 하여 노즐은 강한 열부하를 받게 되므로 물과 공기로 랭각시킨다.

플라즈마불길발생조건은 표 1과 같다.

모의에 리용한 대표적인 물질들의 특성은 표 2와 같다.

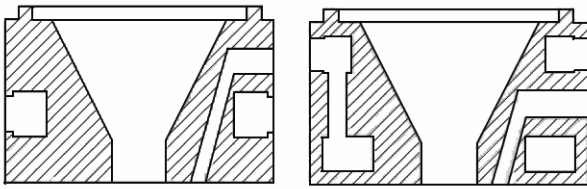
표 1. 플라즈마불길발생조건

파라메터	값
노즐출구직경/mm	12
원료주입구직경/mm	6
원료주입통로의 출구직경/mm	2.5
물랭각통로의 입출구직경/mm	7~8
플라즈마기체물질	공기
플라즈마주입속도/(m·s <sup>-1</sup> )	10~50
방전전류/A	500
전압/V	150
수송기체물질	공기
수송기체속도/(m·s <sup>-1</sup> )	1~10

표 2. 모의에 리용한 물질들의 특성

특성	공기	물	동	흑연	철
밀도	1.225	1 000	8 978	1 600	8 030
비열	1 006.43	4 182	381	1 200	502.48
열전도도	0.024 2	0.6	387.6	130	16.27
점도	1 789 4·10 <sup>-5</sup>	1.003·10 <sup>-3</sup>	—	—	—
흡수결수	0	299.6	—	—	—
	/m <sup>-1</sup>				

우리는 모의에서 두가지 구조의 노즐들을 리용하였다. 노즐의 자름면도는 그림 1과 같다.



노즐 1

노즐 2

그림 1. 노즐의 자름면도

노즐 1에는 물랭각통로가 1개 있으며 노즐 2에는 노즐윗부분과 아래부분에 물랭각통로가 있고 직경이 3.5~4mm인 9개의 원기둥모양의 구멍들로 련결되어있다.

노즐의 랭각에 미치는 플라즈마기체와 수송기체, 물흐름속도의 영향을 평가

한 결과 플라즈마기체와 수송기체의 흐름속도는 노즐의 랭각에 거의나 영향을 미치지 못한다는것을 알수 있다. 노즐랭각에 결정적인 영향을 미치는것은 물의 흐름속도이다.

노즐에서 플라즈마불길이 분사될 때 노즐의 원추형가동면과 원기둥형가동면의 사궤구역에서 온도가 제일 높는데 이 구역은 노즐의 출구면으로부터 7~10mm 높이에 있는 노즐가동면구역이다.

이 구역에서 노즐의 중심으로부터 반경방향으로 가면서 나타나는 온도분포특성은 그림 2와 같다.

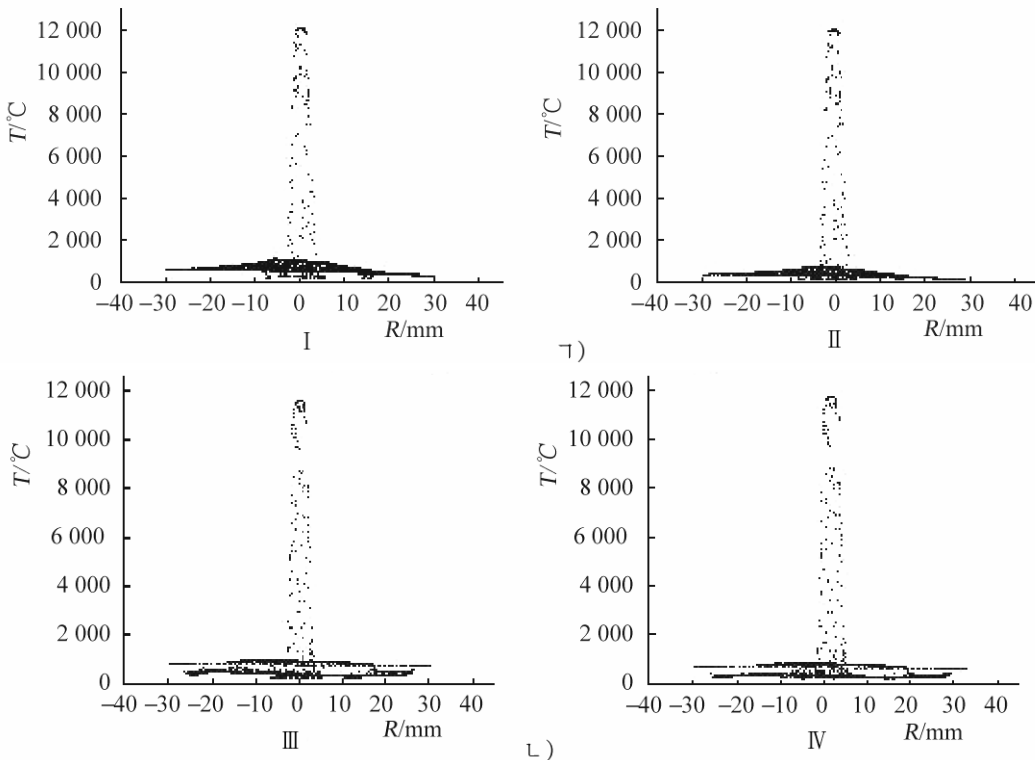


그림 2. 노즐의 중심으로부터 반경방향에 따르는 온도분포

Ⅰ) 노즐 1, Ⅱ) 노즐 2

Ⅲ, Ⅳ는 랭각수흐름속도가 각각 9, 10, 2, 3L/min인 경우

그림 2에서 보는바와 같이 노즐 1에서는 반경방향으로 6mm 되는 구역의 온도가 랭각수흐름속도가 9L/min일 때 동의 녹음점보다 높으며 10L/min일 때 동의 녹음점보다 낮다.

노즐 2에서는 반경방향으로 6mm 되는 구역의 온도가 랭각수흐름속도가 2L/min일 때 동의 녹음점보다 높고 3L/min일 때 동의 녹음점보다 낮다.

노즐 1에서는 랭각수흐름속도가 9L/min일 때 가장 큰 열부하를 받는 노즐가동면의 온도가 1 114~1 332°C, 10L/min일 때 611~806°C이며 노즐 2에서는 랭각수흐름속도가 2L/min일 때 865~1 000°C, 3L/min일 때 745~865°C이다.

노즐 1에서는 랭각수흐름속도가 10L/min일 때 가장 큰 열부하를 받는 노즐가동면의 온도가 동의 녹음점보다 25~40% 낮으며 노즐 2에서는 3L/min일 때 동의 녹음점보다 15~30% 낮다. 따라서 노즐은 안정하게 동작할수 있다.

모의결과는 실험과도 일치한다.

## 맺 는 말

플라즈마분사노즐 1에서는 랭각수흐름속도를 10L/min, 노즐 2에서는 3L/min으로 보강해줄 때 노즐이 열력학적으로 안정하다.

플라즈마기체와 수송기체의 흐름속도는 플라즈마불길의 폭과 길이는 변화시키지만 노즐의 랭각에는 거의 영향을 주지 못한다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. P. S. Badwal et al.; Science and Technology of Zirconia V, Elsevier, 535~854, 1993.
- [2] Hongbing Xiong; Three-Dimensional Simulation of Plasma Spray with Particle Melting and Oxidation, Stony Brook University, 150~171, 2004.
- [3] S. Devic et al.; Ironmaking and Steelmaking, 30, 1, 57, 2003.
- [4] Alexander Fridman; Plasma Chemistry, Oxford University, 477~479, 2008.

주체106(2017)년 1월 5일 원고접수

## Thermal Distribution Characteristics in the Spraying Nozzle of the Plasma Thermal Dissociation Apparatus

*An Myong Jin, Jang Kwang Nam*

We confirmed the thermodynamic stability condition of spraying nozzle during the plasma flame jetting based on the simulation of the thermal distribution characteristics in the spraying nozzle of plasma thermal dissociation apparatus. The flow rate of cooling water must be 10L/min in the nozzle 1 and 3L/min in the nozzle 2.

Key words: plasma thermal dissociation apparatus, nozzle, thermodynamic stability