

## 방사성폐기물 용융 토치 내부 플라즈마 거동 해석

박승철, 최진수, 이지훈, 조항래, 김천우

한수원(주) 중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로 1312-70

scpark@khnp.co.kr

### 1. 서론

가연성과 비가연성이 혼재된 폐기물의 경우 고온에서 용융하여 무기물 고화체로 생성하는 것이 최적의 처리방안으로 판단된다. 그리고 철재나 콘크리트 등 비가연성 폐기물의 용융은 고온 고밀도의 열을 손쉽게 얻을 수 있는 DC Arc Plasma를 사용하는 Plasma Torch Melter(PTM) 시스템을 이용한다. Fig. 1은 KHNP가 개발 운영중인 500kW급 PTM 시스템의 개념도이다.

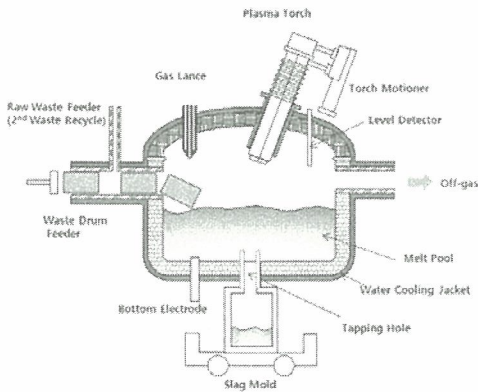


Fig. 1. Conceptual Diagram of KHNP PTM System.

그러나 기존 PTM 시스템의 열원 발생 장치인 토치를 이용하여 방사성폐기물을 드럼 단위로 용융처리 하기 위해서는 전기용량, 장기간 운전 안전성, 열효율 등 관점에서 토치성능의 개선이 필요하다. 특히 기존 토치 전방전극의 노즐부는 Oxygen Free Copper(OFC) 재질로서 고전류, 고전압, 고온, 고도의 화학반응성을 갖는 플라즈마 분위기에 항상 노출되어 있어서 비정상 아킹(side arcing)으로 잦은 손상을 입어 주어진 수명기간 사용하기 어렵고, 전극 내부에 냉각수를 흘려보내야만 하는 조건이기 때문에 토치의 열효율이 매우 낮다는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 기존 고가(高價)의 OFC 노즐을 수명기간 동안 교체 없이 사용하기 보다는 수시로 교체할 수 있는 소모성 graphite 재질

로 개선하고, 전극 내부 형상을 개선하였으며, 토치 내부 플라즈마 거동의 해석을 통해 개선 토치의 운전 안전성 및 열효율을 평가하고자 하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 토치내부 플라즈마 거동해석 방법

플라즈마 유체는 내부의 전자(혹은 이온) 밀도, 엔탈피 등에 의해 그 특성이 결정되며, 이는 전극 내부의 형상, 인가한 전기 출력(전류, 전압), 플라즈마 가스 유량(swirl, 난류여부), 전극외부 혹은 플라즈마 자체에서 유기된 전자기장 등에 의해 지배된다. 또 이런 플라즈마의 거동은 Magneto Hydro Dynamics(MHD)에 의해 해석할 수 있다. Fig. 2는 플라즈마 토치 전극의 내부형상(a) 및 전산해석 영역(b)을 각각 나타낸다.

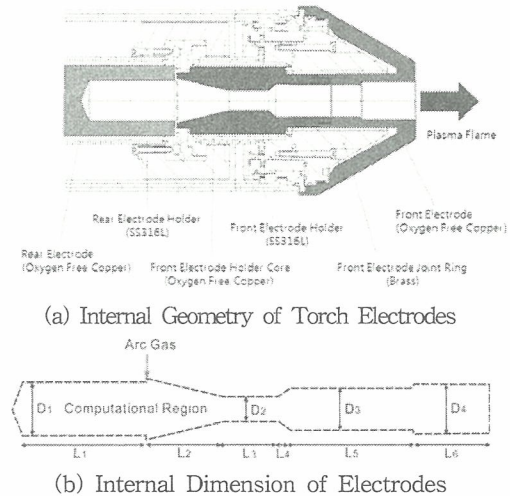


Fig. 2. MHD Calculation Region of Electrodes.

토치 내부 플라즈마 거동해석을 위한 전제조건 및 가정조건은 아래와 같았다.

- 전기 전도성을 띄는 하나의 전자기유체로서의 열물성치는 온도의 함수
- 정상 상태(steady state)의 층류 및 난류

- 온도장 및 속도장은 2차원 축을 중심으로 대칭
- 변위전류를 무시한 2차원 전자기장
- 점성에 의한 소산 및 점력에 의한 영향은 무시
- Local Thermal Equilibrium(LTE)
- 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식은 전류연속 방정식 및 맥스웰방정식과 결합하여 유도
- Arc로부터 유기되는 자기장의 세기는 계산된 전류밀도로 부터 암페어 법칙을 이용하여 구함
- 운동량 방정식의 로렌츠힘은 전류밀도와 자기장의 세기의 벡터 곱으로 부터 계산
- K-ε 난류모델을 지배방정식에 포함

토치 내부 플라즈마의 거동 해석을 위해 사용한 MHD 프로그램은 DCPTUN이다. 계산영역에서 MHD 유체로서 플라즈마의 거동해석을 위해 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식을 전류 연속방정식 및 맥스웰 방정식과 결합하여 사용하였다. 또한, 계산된 전류밀도로부터 암페어 법칙을 이용하여 아크로부터 유기되는 자기장 세기를 구하고 이 둘을 벡터 곱하여, 운동량 방정식의 로렌츠 힘 계산에 사용하였다. 이외에 플라즈마의 난류 효과를 고려하기 위하여 K-ε 난류 모델의 지배 방정식을 포함시켰으며, 정상상태의 2차원 축대칭인 원통형 좌표계 (r, θ, z)에서 이들 각 유체방정식들을 다음과 같이 표현하였다.

○ 질량 연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v) = 0$$

○ 운동량 보존방정식

- 축 (z)방향

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial z} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial z} + j_r B_\theta - \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \tau_{rz}) + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right)$$

- 반경 (r)방향

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial z} + \rho v \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} - j_r B_\theta - \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \tau_{rr}) - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right) + \frac{\rho v_\theta^2}{r}$$

- 회전 (θ)방향

$$\rho u \frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \rho v \frac{\partial v_\theta}{\partial r} = -j_r B_z + j_z B_r - \left( \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}(r^2 \tau_{r\theta}) + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} \right) - \frac{\rho v v_\theta}{r}$$

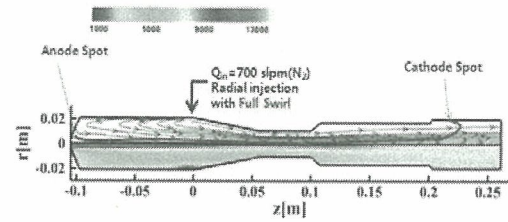
○ 에너지 보존방정식

$$\rho u \frac{\partial h}{\partial z} + \rho v \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{j_z^2 + j_r^2}{\sigma} + \frac{5k_B}{2e} \left( \frac{j_z}{c_o} \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{j_r}{c_o} \frac{\partial h}{\partial r} \right) - S_z + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\kappa}{c_o} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\kappa}{c_o} \frac{\partial h}{\partial r} \right) + v_r \frac{\partial p}{\partial r} + v_z \frac{\partial p}{\partial z}$$

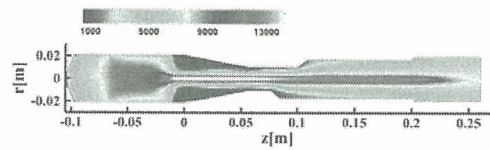
2.2 토치내부 플라즈마 거동해석 결과

토치 운전 출력/전류:500kW/500A, 플라즈마 가스 유량:700slpm(N<sub>2</sub>), swirl 등 대표적 조건에서 토치 전

극내부(개선 전, 개선 후)에서 유체의 속도장, 온도장 등을 해석하였다. Fig. 3의 (a), (b)는 개선전 토치(OFC 노즐)와 개선 후 토치(graphite 노즐)의 MHD 해석 결과의 한 예를 각각 보여준다.



(a) MHD Calculation for Existing Torch(OFC Nozzle)



(b) MHD Calculation for Improved Torch(Graphite Nozzle)

Fig. 3. Behavior of Plasma inside Torch Electrodes.

기존토치 대비 재료변경(OFC→Graphite) 및 전극 내부 형상 변경 후 플라즈마 거동을 해석한 결과 다음과 같이 평가되었다.

- 열효율 개선 : 16.5%(수냉각 제거)
- 효과 : 20% 비용절감

그러나 비정상 아킹으로 인한 운전안전성 개선효과 및 graphite 재질 노즐의 수명 등에 대해서는 실제 개선토치를 바탕으로 실제 폐기물 용융시험을 일정 시간 수행한 후이나 그 결과를 바탕으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 결론

고가의 OFC 재질을 graphite 재질로 개선한 플라즈마 토치 내부 플라즈마 거동을 해석한 결과 열효율, 전극비용이 각각 16.5% 및 20%가 개선된 것으로 평가되었다. Graphite재질 노즐의 수명 및 장기 운전안전성 등 추가적 성능에 대해서는 실제폐기물을 바탕으로 실증시험 한 후에 평가할 예정이다.

4. 참고문헌

[1] KHNP, 박승철 등, 신개념 플라즈마 토치 핵심부품 설계해석 보고서(2011).