

고상 廢棄物處理를 위한 플라즈마 토치에 관한 研究

*朴 賢 緒

全州大學校 環境시스템科

The Study of Plasma Torch for Solid Waste Treatment

*Hyun-Seo Park

Department of Environmental system, Jeonju University

요 약

본 연구에서는 고상폐기물(소각재) 처리를 위해 중간 전극(IEI, Inter-Electrode Insert)이 있는 button 형태의 고품체형 고출력 토치를 개발하였고 폐기물처리 플라즈마설비에 적용하여 운전특성을 얻었다.

본 연구의 토치 실험 결과 비이송형 모드에서는 가스량의 증가에 따라 전압이 증가하였고, 이송형 모드에서는 가스량 변화에는 영향이 없었으나 토치와 바닥면과의 거리, 슬래그의 성분 그리고 용융 슬래그의 체적에 따라 전압의 변화가 발생하였다. 특히 아크전압이 슬래그내의 total Fe 함량이 10% 내외에서 안정적으로 유지되었으며, 전기전도도 계산결과 $0.05\sim 0.25\ \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 범위로 나타났다. 본 연구의 토치 효율은 75~85%로 나타났으며, 마모율은 $2\times 10^{-6}\sim 6\times 10^{-6}$ kg/s의 범위로 나타났다.

주요어 : 플라즈마, 토치, 이송형 모드, 비이송형 모드

Abstract

A solid-state high power torch with inter-electrode insert (IEI) was developed to treat solid waste (for example, incinerated ash), and its operation characteristics were obtained in the plasma facility test for waste treatment. According to torch test from this study, at the non-transferred mode voltage is increased by gas volume proportionally, and at the transferred mode it is not affected by gas volume. But distance between torch-end and bottom of reactor, slag composition and volume of molten slag are affected to voltage change. Especially arc voltage is sustained stable at the range of 10% of total Fe in slag. In addition, Electrical conductivity is $0.05\sim 0.25\ \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$, torch efficiency is 75~85% and Erosion rate is $2\times 10^{-6}\sim 6\times 10^{-6}$ kg/s.

Key words : plasma, torch, transferred mode, non-transferred mode

1. 서 론

최근 산업 발달의 고도화에 따라 양산된 다양한 유해 폐기물과 생활수준 향상으로 인한 생활 폐기물의 증가로 중금속 및 침출수에 의한 토양과 주변 환경의 오염이 가속화되는 매립에 의한 폐기물의 처리는 한계에 다다르게 되었고, 이로 인한 심각한 매립지의 부족난과 환경오염 물 처리가 전세계적인 사회문제로 대두되고 있다. 이에

따른 부분적인 해소책으로 소각에 의한 부피축소로 폐기물을 감량하는 방법을 현재 사용하고 있으나 이 과정에서 불완전 연소에 의해 다이옥신과 같은 유독가스를 배출하는 새로운 2차적인 환경문제가 직면하게 되었다. 이와 같이 매립과 소각에 의한 폐기물 처리에서 나타난 문제점을 획기적으로 개선할 수 있는 방법으로 설치가 간단하면서도 많은 양의 유해폐기물을 단시간에 처리할 수 있는 초고온, 고열 플라즈마에 의한 폐기물 처리 방법이 관심을 끌게 되었다.¹⁻³⁾ 열플라즈마는 온도가 매우 높아서 유기 화합물들을 빠르고 완전하게 분해할 수 있

*2004년 7월 14일 접수, 2005년 1월 3일 수리

*E-mail: hnsepark@jeonju.ac.kr

고, 무기물들을 녹여서 부피를 감소시킨 후 유리화를 시킬 수가 있다. 열플라즈마 발생 장치인 플라즈마 토치에서는 화학 반응을 원활하게 시켜주기 위해 모든 종류의 기체를 플라즈마 기체로 사용할 수 있으며, 이 때 열의 밀도가 매우 높고 사용기체의 양이 매우 작아서 시스템의 크기가 작아지며, 전기를 에너지원으로 사용하므로 무오염원이고 운전의 시작과 종료가 매우 쉽다는 장점이 있다. 그러나, 경제적인 면에서 전기를 원료로 사용하므로 운전비가 비싸다는 단점을 가지고 있다.⁶⁾ 세계적으로 열플라즈마를 이용해 유해 폐기물을 처리하는 현황을 살펴보면,⁷⁾ 유해 유기 화학폐기물을 처리하는 경우 프랑스의 EDF(Electricite de France), Spie-Batignolles와 Ciments Lafarge사 등이 협력해 Aerospatiale 플라즈마 토치⁸⁾을 사용하여 고체 화학 폐기물들을 처리하기 위한 GIE INCIDIS 과제를 수행 중에 있고, 스위스의 Plasmox사에서는 0.3MW급의 비이송식 토치와 1.2MW급의 이송식 토치를 사용하여 고체 유해 화학 폐기물들을 양극 면에서 회전시키면서 유해 폐기물들을 처리하고 있으며, 스웨덴의 Scanarc에서는 SKF^{4,5)} 토치를 사용해 PCDD를 안정된 원소로 열분해 시키는 방법을 연구 중이다.

유해 폐기물들의 열분해, 유리화와 재활용에 사용되는 플라즈마 토치는 플라즈마의 발생 방법에 따라 이송식 플라즈마 토치와 비이송식 플라즈마 토치로 나눌 수 있다. 이송식 토치는 아크를 형성시키기 위한 전극중 하나가 토치 밖에 존재하는 형태를 말하며, 열효율이 비교적 높고 아크가 토치 외부에 발생하므로 처리 대상물 근처에서 온도가 매우 높다는 장점을 가지고 있다.

고출력을 얻을 수 있기 위해서는 운전 전압이나 전류를 증가시켜야 하는데, 전류를 증가시키는 경우 플라즈마의 온도가 높아지고 불꽃의 길이가 길어져서 폐기물에 열량을 충분히 공급해줄 수 있다는 장점이 있으나,

아크점이 받는 전류밀도의 증가로 인한 전극의 침식이 커짐과 동시에 아크 칼럼의 확장으로 전극 벽면으로의 열 손실이 커지게 되어 열효율이 떨어지게 되는 단점도 가지게 된다. 따라서, 고효율과 고출력을 동시에 얻기 위해서는 운전전압의 증가가 바람직하는데 운전 전압의 증가는 플라즈마 기체의 유량의 증가, 노즐직경의 증가 혹은 토치 높이의 증가를 통해 얻을 수 있다.

이에 본 연구에서는 고상폐기물(소각재 등) 처리를 위해 중간 전극(IEI, Inter-Electrode Insert)이 있는 button 형태의 고히체형 고출력 토치를 개발하고 폐기물처리 플라즈마설비에 적용하여 토치의 전류, 전압변화 및 토치의 효율, 전극의 마모특성과 비이송식 토치와 이송식 토치의 운전특성을 실증실험을 통하여 조사하였다.

2. 실험 방법

소각재 용융 고형화 처리에 사용된 플라즈마 토치의 기본구조는 Fig. 1과 같이 아크 방전을 일으키는 button 형태와 hollow 형태가 결합된 텅스텐 음극부와 플라즈마 가스 공기중의 산소성분에 의해 텅스텐 표면에 산화막 형성을 방지하기 위해 음극보호가스를 주입할 수 있도록 그리고 토치 ignition을 용이하게 하기 위한 중간 전극과 양극노즐전극 및 주입링에 의해 접선 방향으로 토치 내로 플라즈마 기체를 공급하는 기체 주입부의 네

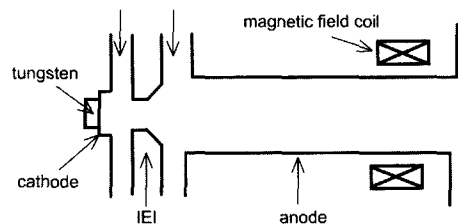


Fig. 1. A schematic diagram of transferred plasma.

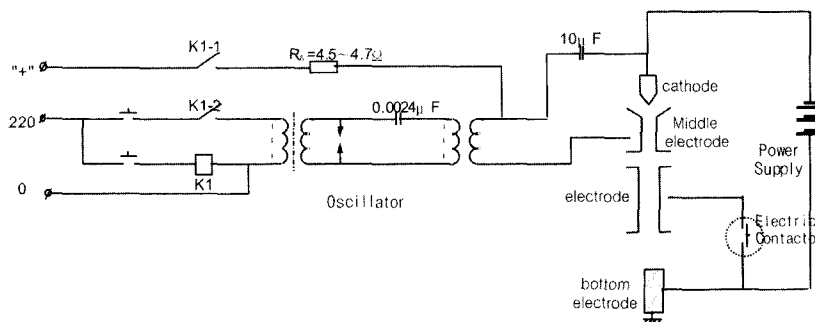


Fig. 2. Schematic drawing of connection of electric circuit.



Photo 1. Plasma torch.

부분으로 구성되어 있다. 아크 기체는 링을 통하여 주입되며 아크를 안정화시키기 위해 vortex 형태로 주입시킨다. 아크는 음극과 중간전극의 거리가 가장 가까운 곳에서 Fig. 2에 보인 고전압, 고주파 발생장치인 oscillator에 의해 점화되고, 운전 전류와 사용 아크 기체의 유량에 따라 음극점과 양극점이 결정되어 아크 방전이 유지가 되며, 이 때 주입된 기체는 음극점과 양극점 사이에서 아크에 의해 가열되고 이온화된 후, 토치 양극의 바깥쪽으로 불꽃이 제트 형태로 방출된다. 소각재 용융 플랜트에 장착시 바닥면의 용융이 일정정도 진행된 후에 바닥면과의 거리를 적절히 유지한 상태에서 이송형 모드로 전환을 시켰다. 이송식 토치의 플라즈마 특성을 실험적으로 찾기 위해 전류-전압 특성, 열효율, 전극마모율 등으로 분류하여 실험을 실시하였다. Photo 1은 본 실험에서 사용된 torch이다.

3. 실험 결과

3.1. 전류-전압 특성 변화

Fig. 3과 Fig. 4는 플라즈마 시스템 운전시에 측정된 토치 전류-전압 특성곡선과 플라즈마 가스 공기량 변화에 대한 아크 전압변화 그래프이다. 이송형 모드로 전환을 위해 비이송형 모드에서 용융로 바닥면과 토치 양극 노즐전극 끝부분과의 거리를 130 mm를 유지하면서 토치 출력 150 kW(450V×330A)으로 토치점화후 전압증가(450V→600V)하면서 이송형 모드로 전환하였다. Fig. 3은 적은 플라즈마 가스량에서 이송형 모드로 전환되어 450V에서 이송형 모드가 형성되었고 용융로 바닥의 슬래그층의 용융 상태에 따라 플라즈마 가스량과 토치 높이를 조절한 결과 일정 토치높이에서 전류에 대한 아크 전압의 변화를 나타내었다. 토치 ignition 직후에 플라즈마 가스량 변화에 따른 아크전압 변화를 관찰하기 위해 가스량을 일정하게 증가시켜본 결과 Fig. 4에 나타난바와 같이 아크전압은 선형적으로 증가하였다. 가스량이 증가하는 경우 토치 내부에서 플라즈마 가스에 의한 aerodynamic force가 증가하여 양극노즐의 아크점을 노

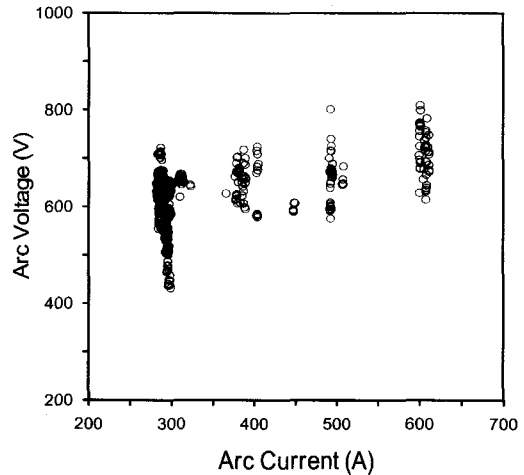


Fig. 3. Voltage-current characteristics of plasma torch of actual proof plasma system.

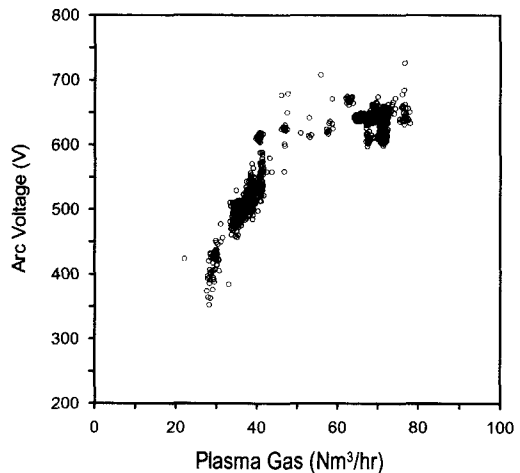


Fig. 4. Dependency of plasma arc voltage on the air gas flowrate.

즐출구 쪽으로 밀어내게 되어 아크를 유지하기 위해 형성된 아크길이가 증가하게 되어 전압이 증가하였다.

비이송형 모드에서는 가스량이 증가하는 경우 전압이 증가하였지만 이송형 모드에서는 가스량 변화에 영향이 없는 것처럼 나타났다. 그러나 이송형 모드에서 아크전압의 변화는 매우 복잡하여 플라즈마 가스량, 토치와 바닥면과의 거리, 슬래그의 성분, 그리고 용융슬래그 체적에 의존함을 알 수 있다.

3.2. Slag 성분에 따른 특성 변화

Fig. 5에 슬래그 성분과 아크전압과의 상호관계 그래

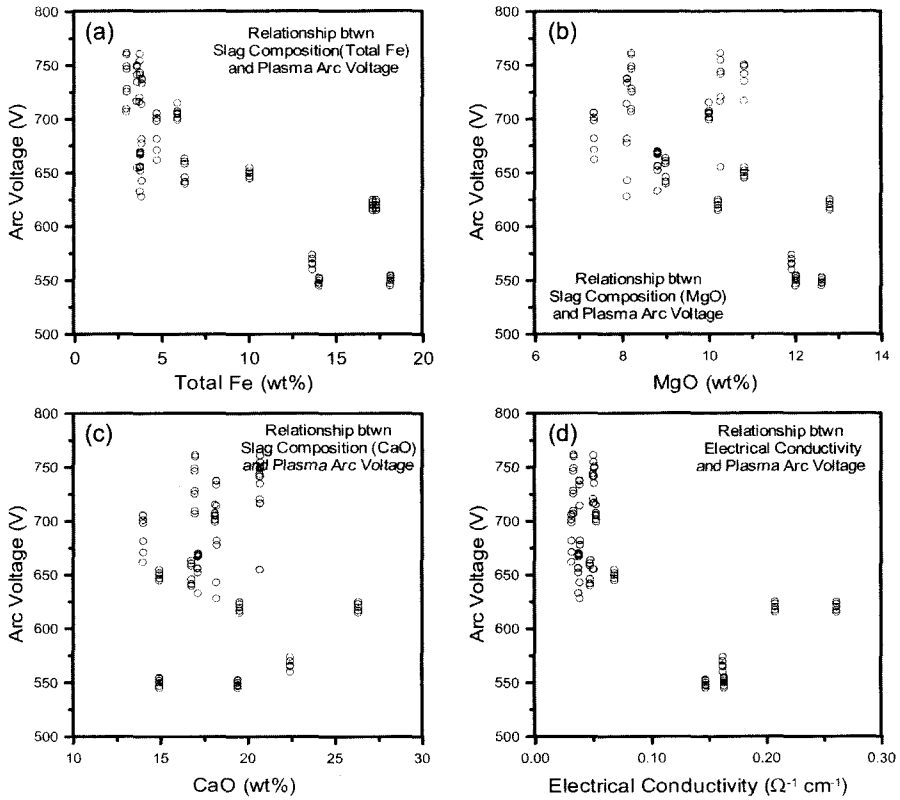


Fig. 5. Relationship between slag composition and torch arc voltage. (a) Arc voltage vs. weight % of total Fe, (b) Arc voltage vs. weight % of MgO, (c) Arc voltage vs. weight % of CaO, (d) Arc voltage vs. electrical conductivity.

프에서 보여주듯이 아크전압은 슬래그내의 total Fe 함량에 크게 의존하지만 슬래그의 주성분인 CaO에는 연관관계가 없는 것으로 나타났다. 운전중 샘플링한 슬래그 성분을 근거로 슬래그의 전기전도도를 계산한 결과 0.05~0.25 Ω⁻¹cm⁻¹범위로 나타났다. 슬래그의 전기전도도가 토치 아크전압에 주요한 변수중에 하나이므로 안정적인 이송형 모드를 유지하기 위해서는 total Fe 함량을 일정비율(~10%) 이상 유지하여야 한다.

3.3. 가스유량 변화에 따른 전류 전압 특성

Fig 6과 Fig. 7은 슬래그 용융면과 토치 출구 끝부분과의 거리를 일정하게 유지하고 플라즈마 가스량을 변화시키면서 아크 전압의 변화를 관측한 그래프이다. 동일한 가스량을 토치에 주입하였을 경우 토치 높이 110 mm와 135 mm 사이의 전압 차이는 40~50V의 차이를 나타내었다. 특히 110 mm 높이에서 가스량이 60 Nm³/hr이하 영역에서는 아크전압 변화의 극점이 존재하는 현상이 관측되었다. 플라즈마 가스량을 60Nm³/hr로

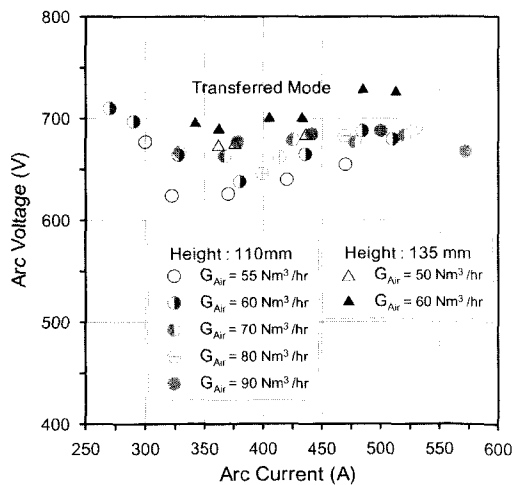


Fig. 6. Voltage-current characteristics of plasma torch according to torch height and gas flowrate.

운전하는 경우 아크전류가 360A이하 영역에서는 아크 전류를 증가시키면 전압이 감소하므로 토치 출력은 감

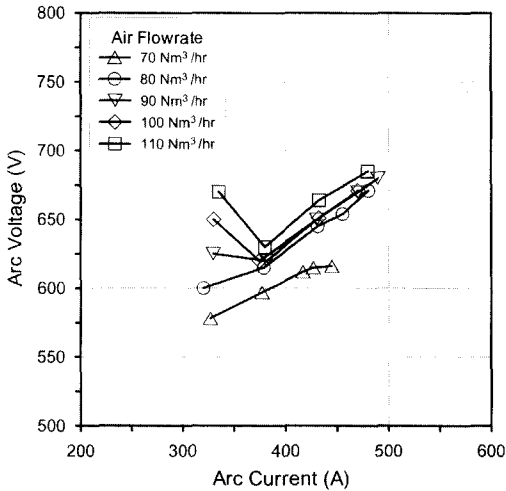


Fig. 7. Voltage-current characteristics of plasma torch according to the gas flowrate.

소하는 경향을 보이다가 360A 이상에서는 전류증가에 비례하여 전압도 상승하여 토치출력 증가로 이어진다. 이러한 현상은 토치의 장시간 운전후 바닥 슬래그 전 영역의 용융이 이루어진 상태에서는 Fig. 7에서 보여 주듯이 현저하게 나타났다.

3.4. Torch의 효율 특성

플라즈마 토치의 성능은 다른 어떤 특성보다도 토치에 인가된 전기적 에너지가 플라즈마 가스로 전달되는 열 에너지로의 전환 효율에 의해 결정된다. 열 에너지로의 전환 효율은 냉각수에 의해 냉각되고 있는 전극 내부면과 고온으로 가열된 플라즈마 가스와의 상호작용에 의존한다. 따라서 효율적인 플라즈마 토치의 디자인

은 플라즈마가 형성되어 존재하는 전극내부면과 플라즈마 영역 사이의 열전달 특성을 필요로 한다. 특히 토치 내부 가스의 평균온도가 전극재질로 사용되는 대부분 물질의 용융온도 보다 상당히 높을 때 열전달 특성은 중요하다.

Fig. 8은 소각재 용융 고정화 파일럿 플랜트 실험에서 토치 운전 데이터를 통해 얻어진 토치 효율 그래프이다. 이때 토치효율은 다음의 경험식¹⁰⁾을 이용하였다.

$$\frac{1-\eta}{\eta} = A \cdot \left(\frac{I^2}{Gd}\right)^m \cdot \left(\frac{G}{d}\right)^n \cdot (pd)^q \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^r$$

η : Torch efficiency,

I : Current,

G : Total gas consumption,

d : diameter of the electric arc chamber,

p : Pressure at the electric arc chamber,

l : Length of electric arc chamber,

A, m, n, q, r : The constant determining by experiment.

운전모드중 이송형 모드에서의 토치 효율은 75~85% 범위의 값을 나타내었다. 이 경우 토치의 운전은 소각재 용융을 위해 용융로 내부에 장착되어 있는 상태이므로 운전중 용융로 내부의 온도가 1,400°C 내외로 유지되고 있음을 고려하면 토치 자체의 열효율은 이보다 높을 것으로 예상된다. 토치 냉각수의 온도증가는 토치 입력 전력중 냉각수로 전달되는 에너지량과 용융로 내부에 축적된 열에너지에 의해 토치 외부물체를 통해 냉각수를 가열하는 에너지량이 더해진 값이므로 토치 자체의 열효율보다 낮게 계산된 것으로 사료된다.

3.5. 토치 전극 마모 특성 변화

Fig. 9는 양극노즐의 아크 전류변화에 따라 shunting을 통한 thermal flow와의 관계를 나타내고 있다. 측정 결과는 대기압에서 알곤 가스를 플라즈마 가스로 사용하고 전극재질을 구리를 사용한 경우로 구리전극은 일정량의 냉각수에 의해 냉각되어지고 있다. 측정결과에서 보여주듯이 전류 40A~600A 영역에서 구리전극로의 열흐름은 선형 증가한다. 이를 수식으로 표현하면

$$Q_{th} = U_{eq} \cdot I$$

여기서 Q_{th} 는 전극으로의 열흐름, U_{eq} 는 전극으로 열흐름의 전압 등량, I 는 아크전류값이다(공기와 질소

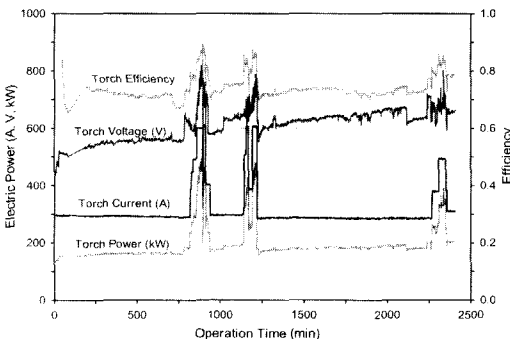


Fig. 8. Variations of torch current, voltage, power and efficiency.

의 경우 U_{eq} 는 12V, 알곤의 경우 6V). 따라서 동일한 전력을 토치에 가했을 때 양극전극으로의 열전달 비율이 공기를 플라즈마 가스로 사용할 때 알곤을 플라즈마 가스로 사용했을 때에 비해 2배 높은 값을 보인다. 이는 입력 전력중에 플라즈마 가스의 에너지 전달 즉 가스의 여기 및 이온화율이 줄어들고 전극으로의 에너지 전달이 증가함으로 전극마모를 증가시킨다. Fig. 10은 다양한 플라즈마 가스와 음극재질에 따라 음극점에서의 heat flow를 나타내었다. 음극재질로 텅스텐을 사용하는 경우 전류의 모든 영역에서 알곤을 사용하는 경우보다 heat flow가 높은 값을 유지함을 알 수 있다. 이는 음극점에서 아크전류 밀도에서도 차이가 있음을 예측할 수 있다. 텅스텐 음극에 공기를 플라즈마 가스로 사용하는 경우 전류밀도 $j=1.54 \times 10^8 \text{ A/m}^2$, 알곤을 플라즈마 가스로 사용하는 경우 $j=7.55 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ 이고 이는 텅

스텐 마모율에 1.5~2배 정도이다. 이는 플라즈마 가스로 사용된 공기중의 산소 성분에 의해 음극표면 즉 텅스텐이 산화물 형태로 물성이 변화하여 아크에 의한 열충격을 견디지 못하고 마모가 쉽게 진행되기 때문이다. 따라서 전극 표면에 산소 성분의 비율이 증가할수록 전극 마모는 급속하게 진행되므로 산소성분의 접근을 방해할 수 있는 적절한 중간매질이 필요하다. 이에 적합한 매질은 불활성이고 이온화율이 높은 알곤, 질소 등이 적절하다. 특히 알곤을 사용하는 경우 전극보호 측면에서는 질소에 비해 유리하지만 가격이 비싸므로 질소가 일반적으로 많이 사용되고 있다. Fig. 11과 Fig. 12에 플라즈마 가스로 공기를 사용하는 경우에 음극보호 가스로 알곤과 질소를 사용할 때 보호가스의 양, 즉 플라즈마 가스 공기에 대한 비율 변화에 따라 음극 표면에서 산소성분의 존재량을 측정된 결과이다. 두 경우 모

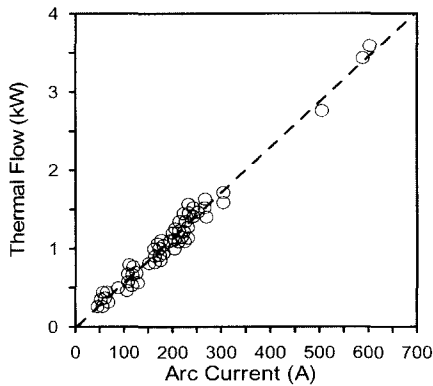


Fig. 9. Thermal flow through the anode spot (operating gas-Ar).

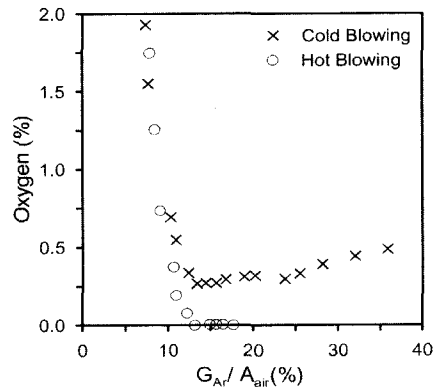


Fig. 11. Oxygen content at the gas-protecting cathode surface(shield gas-Ar, arc current-250A).

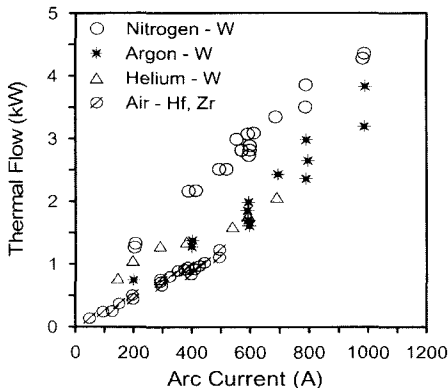


Fig. 10. Heat flow through the cathode spot depending on current for various gas and cathode materials.

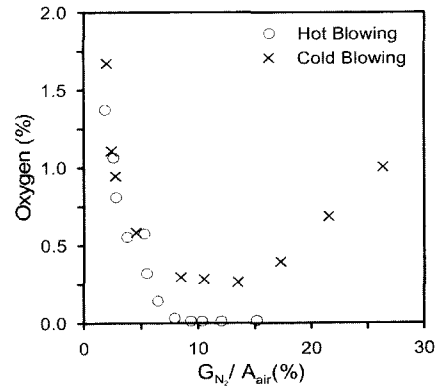


Fig. 12. Oxygen content at the gas-protecting cathode surface(shield gas-N₂, arc current-250A).

두 음극보호 가스량이 플라즈마 가스량의 15% 내외의 값일 때 음극전극 표면으로의 산소의 침투를 방지할 수 있다.

본 연구의 플라즈마 토치의 경우 양극노즐전극의 마모율이 $2 \times 10^{-6} \sim 6 \times 10^{-6}$ kg/s의 범위에서 분포함이 측정되었다. 안전모드에서 운전할 수 있는 전극두께를 고려하고 최대 마모율(6×10^{-6} kg/s)을 적용하여 운전수명을 최소한 1000시간으로 예측하였다. 그러나 실제운전에서 전극마모는 운전초기 용융로 내부온도 및 바닥면의 용융을 위해 비이송형 모드 운전시에 대부분 일어나기 때문에 전극마모를 줄이는 가장 효과적인 방안으로 이송형 모드로의 전환전 시간을 최소화 시켜야만 한다. 이에 본 실험에서는 양극노즐전극의 마모를 최소화하기 위해 빠른 시간 내에 이송형 모드로 전환할 수 있도록 용융로 바닥면에 바닥전극이 위치하고 있는 영역에 금속성 물질을 배치하여 곧바로 이송형 모드로 전환 가능하도록 하였다. 이 경우 전극마모는 전혀 일어나지 않았다. 또한 모드전환을 수행한 후에 노즐전극과 연결되어 있는 전원라인을 콘택터(Fig. 2)를 사용하여 차단하였더니 80시간 운전 후에도 전극마모는 전혀 일어나지 않고 초기 장착시의 형태를 그대로 유지하였다. 이를 통해 양극노즐전극의 마모는 운전초기 비이송형 모드 운전시에 대부분 일어남을 확인하였고 이후 운전시작과 동시에 이송형 모드로 운전을 수행할 경우 양극노즐전극의 마모는 전혀 일어나지 않으므로 반영구적으로 사용이 가능하다. 그러나 음극전극의 마모는 Fig. 13에서 보여주듯이 양극전극의 마모율과 마찬가지로 전류에 비례하는 경향을 보이고 있다. 특히 음극전극의 경우 아크의 음극점이 양극점에 비해 전류밀도가 매우 높기 때문에 텅스텐 합금을 전극재료로 사용하여 전극 사용시간의 증가를 도모하였다. 본 실험결과 음극전극의 마모율이 2×10^{-8} kg/s로 나타났으나 양극노즐전극과 달리 음극전극의 마모율을 현저히 줄일 수 있는 방안은 없으므로 지금까지의 토치 운전을 통해 획득한 전극 마모율을 기초로 하여 토치 운전특성에 영향을 주지 않는 범위 내에서 장기간 사용할 수 있는 방안을 고려해야만 한다. 이를 위해 외부에서 관측될 수 있는 신호를 통해 음극전극의 마모상태를 모니터링 할 수 있는 방안으로 음극전극과 중간전극 사이의 전압변화를 관측하고 운전이 끝난 후에 음극전극 마모 정도를 측정하여 음극전극-중간전극 사이의 전압값과 음극전극 마모 정도의 연관관계를 관측하였다. 새로운 음극전극을 사용하여 운전시에 음극전극과 중간전극 사이의 전압값은 $50V \pm 1V$ 정

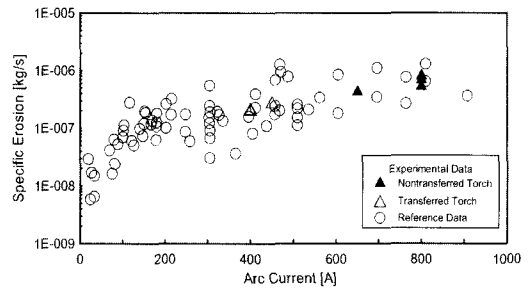


Fig. 13. Dependency of the specific erosion of Cu tube anode on the arc current.

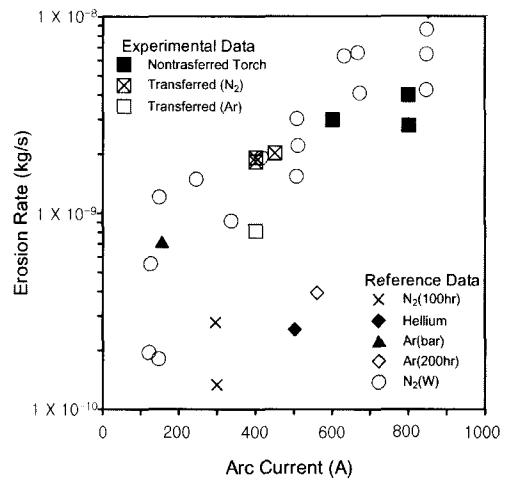


Fig. 14. Dependency of the specific erosion of W cathode from the arc current.

도를 일정하게 유지하지만 토치 운전시간이 증가함에 따라 음극전극과 중간전극 사이의 전압값은 증가하는 경향을 보였다. 그러나 일정운전시간이 지나면 음극전극과 중간전극 사이의 전압값의 변화량이 큰 폭으로 증가하는데 이는 음극전극의 형상이 구리몸체에 텅스텐이 삽입되어 있는 형상이고 마모는 주로 텅스텐에서 이루어지므로 중간전극과 텅스텐 사이의 거리가 증가하여 음극전극과 중간전극 사이의 전압값이 증가하다가 일정 시간이 지나면 텅스텐 음극과 중간전극 사이에 안정적인 아크를 유지하지 못하고 텅스텐을 둘러싸고 있는 음극전극과 중간전극 사이에 shunting이 일어나는 현상으로 판단된다. 음극전극과 중간전극 사이의 전압 변동값이 토치 운전 전압-전류값에 따라 다르지만 15V이상 일어나면 음극전극에 비정상적인 shunting이 일어남을 예측할 수 있다.

4. 결 론

플라즈마 토치의 전류-전압 특성 및 열효율, 마모율에 대한 실증실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 플라즈마 토치의 이송형 모드에서 열효율은 75~85%로 나타났다.
2. Torch의 수명 측면에서 양극노즐 전극의 경우 마모율이 $2 \times 10^{-6} \sim 6 \times 10^{-6}$ kg/s로 측정되었으며 음극노즐의 경우 2×10^{-8} kg/s로 나타났다. 이를 토치 구리전극의 중량으로 비교하여 보았을 경우 1000 hr 이상 사용이 가능한 것으로 나타났다.
3. 비이송형 모드에서 가스량이 증가하는 경우 전압이 증가하였으며, 비이송형 모드에서는 가스량 변화에는 크게 영향이 없었으나 토치와 바닥면과의 거리, 슬래그 성분 등에 따라 전압이 변화함을 알 수 있었다.
4. 토치의 start 전압은 비이송 모드에서 330A, 450V로 유지되며 이송형 모드로 전환과 함께 전압이 증가하였고 토치의 높이 조절과 슬래그 성분 조절로 인하여 전압을 변화할 수 있었다.
5. 슬래그 성분중에 total Fe 함량이 10% 유지시킴으로써 슬래그의 전기전도도($0.05 \sim 0.25 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$)를 증가시키는 효과가 있었으며, 비이송형 모드에서 이송형 모드로 전환시 유리한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Toshio Adachi and Susumu Hiratake, 1982: Device for the Pulverization of Radioactive Wastes, U.S. Patent 4,326,842.

2. Inge Faldt and Lief Bjorklund, 1984: Method and Apparatus for Thermal Decomposition of Stable Compounds, U.S. Patent 4,479,443.
3. Maurice G. Fey and Joseph W. George, 1986: Electric Arc Heater Process and Apparatus for the Decomposition of Hazardous Materials, U.S. Patent 4,582,004.
4. Sven Santein and Jan Thornblom, 1985: Method and Plant for Conversion of Waste Material to Stable Final Products, U.S. Patent, 4,508,040.
5. Lars Bentell and Jarl Martensson, 1986: Method of Destroying Hazardous Wastes, U.S. Patent 4,615,285
6. Qing-Yuan Han, 1996: Thermal Plasma Treatment of Organic Liquids, Ph. D. Dissertation, University of Minnesota, Minneapolis.
7. Benocci, R., Bonizzoni, G. and Sindoni, E., 1995: Thermal Plasma for Hazardous Waste Treatment, (World Scientific, London).
8. Pierre Pasquini, Maxime Labort, Jean-Pierre Serrano, and Didier Pineau, 1989: Plasma Torch Having a Longitudinally Mobile Arc Root and Process for Controlling the Displacement thereof, U.S. Patent 4,847,466.
9. Solenenko, O. P. and Zhukov, M. F., 1994: Thermal Plasma and New Material Technology, Cambridge Interscience Publishing, Great Britain.
10. Zhukov, M. F., 1994: Linear direct current plasma torches, Institute of Thermophysics, Novosibirsk, Russia.

朴 賢 緒

- 현재 전주대학교 환경시스템학과 교수
 - 본 학회지 제13권 제1호 참조
-