

플라즈마 폐기물 처리 기초기술 개발 (Basic Studies on the Plasma Waste Treatment)

이홍식*, 조주현, 최영록, 김종수, 조정구, 임근희
(한국전기연구소)

H. S. Lee, J. H. Cho, Y. W. Choi, J. S. Kim, J. K. Cho, K. H. Rim
(Korea Electrotechnology Research Institute)

High temperature arc plasma technologies are recently being developed in Europe, Japan and United States as one of the treatment schemes of municipal wastes, industrial wastes and vitrification of low level radioactive wastes. An experimental plasma melting furnace, a transferred type plasma torch and 100kW class power supply have been made. Operation of this system and some basic experimental results for solid wastes treatment are reported.

1. 서론

세계적으로 경제규모와 인구 등 소비규모는 해가 갈수록 커지고 있고 그에 비례하여 발생하는 폐기물의 처리는 대부분 매립 또는 도시근교에 설치된 소각장에서 소각하여 처리하고 있다. 소각로에서 나오는 소각재의 양은 전체 폐기물 양의 10%에 달할 정도로 많고 더우기 소각재에는 염소 성분, 다이옥신, 중금속 등 독성 성분들로 오염되어 있어 그냥 매립할 수도 없는 실정이다. 따라서 각 나라마다 참고체 폐기물의 처리를 통하여 환경오염도 줄이면서 폐기물의 에너지화, 재생자원화 또는 감용 일반폐기물화의 방안을 찾고 있다. 이와 같은 도시 폐기물 및 산업폐기물, 저준위 방사성 폐기물 등의 감용(減容) 유리화(vitrification) 처리방법중의 하나로 초고온의 아크 플라즈마를 이용하는 기술이 최근 유럽, 일본, 미국 등에서 개발되고 있다.

플라즈마 가열을 폐기물처리에 적용할 경우 가열원으로서의 특징에 서 적용상의 이점은 다음과 같다.

1) 5,000도 이상의 초고온을 용이하게 발생할 수 있어 폐기물 중의 유기성분들은 열분해되고 비휘발성 무기성분은 용융 냉각되어 안정한 고화체로 된다.

2) 에너지 밀도가 높아서 처리속도가 빠르며 플랜트를 소형화 할 수 있다.

3) 가열 에너지가 가열에 의하여 생기는 화학반응에 영향을 받지 않는다.

4) 가열 에너지의 제어와 관리가 용이하다.

5) 배기 가스가 적어서 입경이 작은 분진형태의 폐기물 처리가 용이하고 또 배기ガス 처리설비의 경비절감이 가능하다.

위의 목적에 이용할 참고체 폐기물 처리 실험용 플라즈마 용융로와 100kW(500V, 400A)급의 이행형 플라즈마 토치 및 전원장치를 설계, 제작하고 철, 금속류의 용융실험과 비금속, 흑연 등 참고체 물질의 용융 유리화 실험을 행하였다.



그림1 설계된 용융로용 이행형 플라즈마 토치 전체모습

2. 실험장치의 설계 및 제작

1) 100 kW급 플라즈마 토치의 제작

플라즈마 용융 실험을 위한 토치는 용융로 속에 상당히 긴 부분이 들어 가며로 내부의 분위기 온도는 문헌[1]에 의하면 약 800°C로 예상되므로 냉각이 특별히 문제가 된다. 또한 용융로 내에서의 상하운동이 자유롭게 되도록 하기 위하여 냉각수관이나 전력용 단자, 가스 주입구를 모두 토치의 가장 끝 부분으로 모아서 토치 제작의 옆면은 평평한 스테인레스 금속부만 남도록 설계하였다. 용극 외부로 플라즈마 가스 유입을 위한 원통을 붙이고, 그 바깥으로 냉각수 유입원통 또 그 바깥으로 냉각수 유출 원통이 붙는 3중원통형으로 조립이 용이한 구조로 설계하였다. 용극 헬더 맨 위로부터 16 cm 아래 부분에 토치를 접기위한 턱을 두었다. 용극은 수명이 다른 경우 분해 조립이 가능한 구조이면서 냉각 효율이 좋은 구조로 설계하였고 용극 및 노즐의 수령각도는 60°로 하였다. 용극 맨의 재질은 텅스텐으로 하였고 굽기는 8mmΦ로 하였다. 노즐부분은 맨 바깥 쪽 원통(재질:SUS)과 분해조립이 가능하게 하였고 재질은 열전도도가 좋은 구리를 선택하였다.

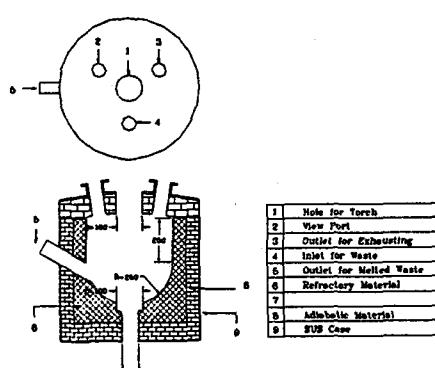


그림 2 플라즈마 용융 실험로의 설계 형상

2) 플라즈마 용융 실험로의 제작

참고체 폐기물의 용융 및 유리화 실험을 하기 위한 실험로를 제작하였다. 그 설계형상은 그림 2와 같다. 용탕이 닿는 부위의 내화재로는 마그네시아를 사용하였고 양극과 토본체의 품세는 내화 캐스터블로 메꾸었다. 실험로는 용탕의 배출을 위하여 공암으로 45도 기울일 수 있는 구조로 하였고 토치는 전동으로 1m정도 상하로 움직일 수 있게 하였다. 또한 배기자를 위한 엑스트 및 배기 팬을 설치하고 회식공기 주입밸브를 두어 고온 배기ガ스의 냉각을 할 수 있게 하였다. 토치의 용극과 양극은 수도打压로 냉각하도록 하였고 토치의 제작 부분은 특별히 몰링크와 펌프를 써서 냉각수를 순환시키도록 하였고 예고없는 정전, 펌프

의 운전중 이상발생 등 불의의 사고에 대비하기 위하여 수도물로도 냉각할 수 있도록 비상시를 대비하였다.

3. 플라즈마 용융 실험 및 검토

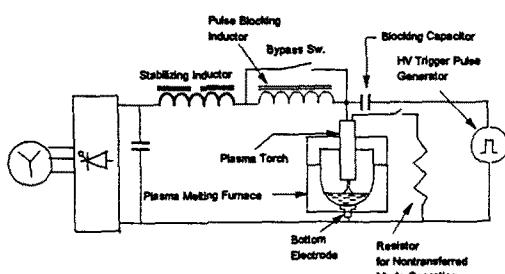
1) 아크 플라즈마의 발생 및 전압-전류 특성조사

가. 이행형 아크의 점화

아크 플라즈마를 비이행형으로 점화하는 것은 쉽다. 이행형으로 직접 점화 하자면 토치의 음극을 양극 가까이 근접시킨 후에 플라즈마 가스를 흘리면서 고전압 펄스 또는 고주파로 트리거하여 점화하는 방법이 있다. 그러나 이 방법은 음극과 양극의 거리를 바깥에서 정확히 모니터 할 수 있어야하며 양극에 놓인 물질이 평면이 아니거나 용탕과 같이 위험한 물질일 경우에는 정확한 간격 확보가 어려운 등 실용상 곤란한 점이 많다. 따라서 비이행형으로 점화한 다음 토치를 피가열 물체에 근접시켜 이행시키는 것이 확실한 방법임을 알 수 있었다. 아크가 잘 이행 되게하기 위하여 비이행형 회로에 저항(1Ω , $10[\text{kW}]$)을 제작하여 삽입하였다. 비이행형 pilot arc는 전류크기 약 $100[\text{A}]$ 에서 점화하였고 비이행형에서 이행형으로의 모드전환은 전원에서 모니터하는 전극간 전압의 급격한 저하로 외부에서 감지할 수 있다. 아크가 이행되고 나면 비이행형 회로는 차단시켜버리고 운전한다. 처음부터 음극과 양극상의 피가열 물질과의 거리를 약 $2[\text{cm}]$ 정도 이하로 띄어 놓고 트리거한 경우 끈바로 이행형으로 자동전환됨을 확인할 수 있었다.

나. 전압-전류 특성

무부하 전압이 $500[\text{V}]$ 로서 아크전류 $300[\text{A}]$ 에서 아크 길이 $20[\text{cm}]$ 이상까지 실험하였다. 아크 길이 몇 가지에 대하여 전류를 변화시켜면서 아크 전압변동을 관찰한 결과를 그림 4에 나타내었다. 아크 전압은 아크의 길이에 대하여 대체로 선형적으로 증가하게 되는데 따라서 그래프 상에서 아크 길이 영(零)인 경우의 전압을 추정할 수 있다. 이 전압은 아크의 전극강하분에 해당한다고 볼 수 있고 그림 5에서 볼 때 전극강하는 $20[\text{V}]$ 정도임을 알 수 있다.



Scheme of the Arc Plasma Melting System

그림 3 실험장치 구성도

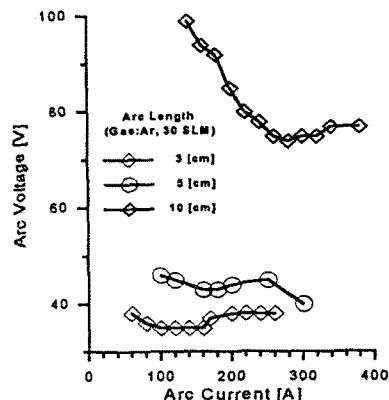


그림 4 대기압 아르곤 아크의 전압-전류 특성곡선

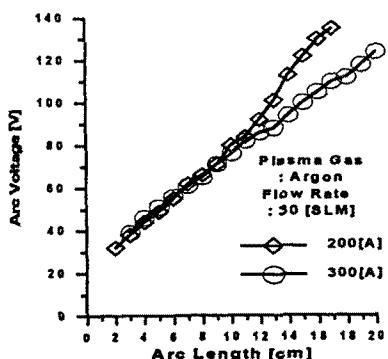


그림 5 대기압 아르곤 아크의 아크 길이에 따른 아크전압의 변화

2) 고체 재료의 용융실험

가. 금속, 비금속 혼합물의 용융실험

사진 1은 금속 조각(철4.2[kg]), 세라믹 조각 9[g], 물 1[kg], 시멘트 조각 0.2[kg], 나무 16[g]등의 금속,비금속 혼합물을 미리 넣고 아크 길이 $10[\text{cm}]$, 전류 $300[\text{A}]$, 아르곤 가스 공급 속도 $30[\text{slm}]$ 에서 시작하여 55분 후에 처음 넣었던 물질이 모두 용탕이 되었고 아크 길이를 $17[\text{cm}]$ 로 늘리고 철 1.1[kg], 물병이 1[kg]을 추가 부입하여 1시간 더 용융실험한 후의 모습을 보여 주고 있다. 2시간 실험 후의 두경을 열고 측정한 로 내벽 온도는 약 200°C 였다. 중간 사진은 실험 직후의 용탕이 식어 가고 있는 모습이며 맨 아래 사진은 식은 후의 모습이다. 토치를 들릴 수 없어 피가열 물질을 넓게 끌고투 녹일 수 없었다.

나. 불연성 비금속 재료의 용융실험

흙,모래,자갈 등의 불연성 비금속 부도체 재료의 용융실험을 행하였

다. 처음에 양극(노저전극)과 토치간에 이행 아크를 발생시켜 놓고 아크길이를 15[cm], 아크전압 100[V], 전류 300[A]로 유지한 상태에서 자갈, 흙, 모래 등을 조금씩 투입하여 용탕의 양을 계속 증가시켰다. 필터를 통하여 육안으로 관찰한 결과 점성이 아주 커 보이는 용탕이 생성되었고 용탕에 떨어진 자갈, 틀 등을 용탕 위에 떠다니면서 점점 용탕 속으로 빠져 들어가는 모습을 볼 수 있었다. 아크길이는 변동이 없으나 용탕이 증가함에 따라 아크전압이 상승하는 것을 관찰할 수 있었는데 이것은 저항이 큰 용탕 내부의 전압강하분이 추가된 것으로 보인다. 비금속 불연성 재료의 용융후 굳은 것을 보면 검은 색의 유리와 같은 성상으로 변해 있는 것을 확인할 수 있었다. 사진 2는 불연성 비금속 재료의 용융후 굳은 것을 깨뜨린 조각들의 모습이다. 흙과 자갈이 유리화 된 것을 알 수 있다.

4. 결론

초고온 플라즈마를 효율적으로 발생시킬 직류 이행형 플라즈마 토치와 부하조건에 맞는 전원장치, 수냉 노저전극이 부착된 플라즈마 용융로의 운용시 상정사고를 고려한 설계제작을 행하고 고체 재료의 용융실험을 통하여 플라즈마에 의한 고체 폐기물의 용융고화에 의한 용적의 감소, 유리화를 위한 기초가 되는 플라즈마 소각용융 시스템의 설계 및 운전기술을 습득하였다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 플라즈마 토치는 100 kW급 운전을 목표로 용융로 속을 승강할 수 있게 설계, 제작하였다.

2) 전원장치는 무부하전압 500 V, 최대전류 500 A를 목표로 설계, 제작하였다.

3) 아크의 점화는 비이행형으로 시작하여 토치를 피가열물에 근접시켜 이행시킨 후 이행형으로만 동작하게 하였다.

4) 틀, 모래, 흙 등 비금속 고체재료의 용융실험을 통하여 용이하게 유리화가 이루어짐을 확인하였고 비금속 재료의 용탕에서는 용극과 양극 사이에 걸리는 전압이 매우 커지며 따라서 아크 길이를 길게하는 경우 double arcing이 쉽게 일어날 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- M. Shibuya et al, Yokosuka Research Lab Report No. W90038, CRIEPI, 1991
- T. Amakawa, K. Adachi, S. Yasui, T. Inaba, Trans. IEE Japan, Vol. 114-A, No. 9, pp 597-602, 1994
- W. H. Gauvin, Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol.9, No. 1(Supplement), pp 65S-84S, 1989
- N. A. Barcza, J. of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 86, No. 8, pp 317-333, 1986
- U. Hütter, Radenthein, Radex-Rundsch, Heft 2/3, pp 83-95, 1992
- W. H. Gauvin et al, US Patent 4,519,835, 1985, US Patent 4,466,824, 1984
- V. Demovsky, "Plasma Metallurgy -The Principles", Elservier, N.Y., pp 212-250, 1985
- T. Amakawa, K. Adachi, S. Yasui, T. Inaba, T. IEE Japan, Vol. 114-A No. 9, '94
- S. Yasui, T. Amakawa, K. Adachi, International Symposium on Environmental Technologies: Plasma System and Application, 1995
- T. Amakawa, K. Adachi, S. Yasui, Yokosuka Research Lab. Report No.

W92012, W92043, CRIEPI, Japan, 1993

- S. Yasui, T. Amakawa, K. Adachi, Yokosuka Research Lab. Report No. W94018, CRIEPI, Japan, 1995



사진 1 철 5 [kg], 세라믹 조각, 틀 등의 금속, 비금속 혼합물을 미리 넣고 아크 길이 17[cm], 전류 300[A]에서 2시간 가열한 모습. (상)
초기상태, (중)가열직후, (하)식은 후



사진 2 불연성 비금속 재료의 용융후 굳은 것을 깨뜨린 조각들의 모습