

플라즈마를 이용한 액상 폐기물 처리 전원장치 개발 및 분해 기술 개발

한철우*, 김준성*, 박상훈*, 황리호*, 이병호*, 강덕원**, 김진길**
 (주)비츠로테크*, 한전전력연구원**

Development of power system and degradation technology using arc plasma for the degradation of non degradable waste water.

Chul-Woo Han*, June-Sung Kim*, Sang-Hoon Park*, Lee-Ho Hwang* Byong-Ho Rhee*, Duk-Won Kang**, Jin-Kil Kim**
 Vitzrotech Co. Ltd*, KEPRI**

Abstract - The degradation systems of non degradable waste water consist of the arc plasma torch, power supply, a feeder of liquid waste and reactors. Output of stable plasma torch, suitable air flux, microscopic atomizing state of waste water and long reaction section must be to degrade waste water more efficiently. In this paper, we are designed the stable power system, the microscopic atomizing state of waste water and the efficient reactors to satisfy various conditions. Non degradable wast water used in this work was N_2EDTA of 1.0 mol. The concentration of CO_2 and EDTA was analyzed using GC (Gas Chromatography) and HPLC (High Performance Liquid Chromatography). In the result show that CO_2 concentration was about 96% and EDTA was degraded approximately 96%.

방사성 제염폐액이 아닌 0.1mol의 N_2EDTA 를 사용하였고 GC(Gas Chromatography)와 HPLC(High Performance Liquid Chromatography)를 이용하여 CO_2 농도와 EDTA 농도를 분석하였다.

2. 폐기물 처리 시스템

2.1 10kW 플라즈마 토치 설계 및 제작

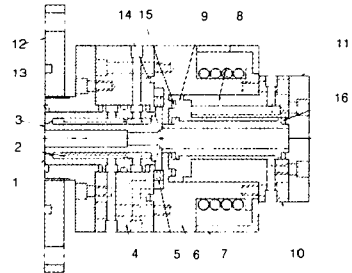
그림 1은 난분해성 폐액 처리 실험을 위해 설계 및 제작된 소형 플라즈마 토치이다.

토치의 구성은 크게 양극, 음극, 작동가스(air)공급관, 자기코일로 구성된다. 양극은 고온의 플라즈마 상태로 변환된 기체가 분출되는 출구쪽에 연결되고, 음극은 열전자가 방출되는 출구의 반대편에 연결하였다. 작동가스(air) 공급관은 오리피스를 통하여 기체를 접선방향으로 주입하고 두 전극 사이에 와류를 형성시켜 원심력 차이에 의해 상대적으로 차가운 기체는 벽쪽으로, 뜨거운 기체는 아크축으로 몰려 열적으로 잘 보호된 상태에서 아크 방전이 축을 따라 수축된 형태로 안정화 시킨다.

1. 서 론

산업기술의 발달로 인한 공장의 자동화 설비의 증가와 더불어 각 가정의 주요 부하들(냉·난방기기)의 증가로 인해 전력의 수요가 급증하고 있다. 시대의 발전이 거듭함에 따라 보다 간편하고 안정적인 설비를 추구할 것으로 여겨지며, 이러한 모든 설비와 기기들의 증가는 전력수요 증대를 요구할 것이다. 전력수요의 증대는 발전설비의 증축을 일으키며, 보다 효율적이고 대용량의 전력을 생산하기 위한 방안이 각국에서 활발히 연구되어지고 있다.

이러한 요구 방안의 한가지로 과거 원자력 발전소의 증축이 꾸준히 진행되어 왔고 현재 계속해서 증선이 되거나 운전 시간을 더 늘리고 있는 실정이다. 하지만 운전 후 원자력 발전소에서 배출되는 중·저준위 폐기물은 그 일부가 방사성 성분을 가진 상태로 현재 특별한 처리를 하지 않고 단지 여과 및 중발과정을 거쳐 농축 액상폐기물의 형태로 용기에 담아서 저장 보관하고 있는 실정이다. 그러므로 이러한 폐액처리를 위해 경제성과 효율성을 지닌 폐액 처리기술과 더불어 산업기술의 발달과 함께 생성되는 수많은 유독성 물질을 처리하기 위한 기술 개발이 시급하다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 많은 연구가 있지만 그 중의 한 방법으로 플라즈마 기술을 이용하여 수많은 유해물질과 난분해성 유해물질을 포함하는 산업폐수 및 폐가스, 폐기물 등을 안전하고 완벽하게 처리하기 위한 연구가 활발히 진행중이다[1,3]. 플라즈마를 이용한 기술이 이러한 난분해성 폐기물의 처리분야에 관심이 급증되고 있는 이유는 다음과 같은 특성을 가지고 있기 때문이다. ① 용이한 제어 ② 반응로의 예열없이 고온 발생 ③ 높은 고온 효율성 (화석연료 : 20%, 플라즈마 : 80% 효율) ④ 플라즈마 가스를 반응매체로 사용한 화학반응 ⑤ 전자와 라디칼 등으로 인한 높은 반응성 유지 ⑥ 청정에너지 : 독성 오염물질의 최소화 하지만 플라즈마를 이용한 폐액처리 공정개발은 타 공정에 비해 많은 전력이 소모되기 때문에 경제적인 운영을 위하여 고효율 토치개발과 절전형 시스템 설계등 다양한 측면들을 해결해야 한다. 본 연구에서 저자들은 10KW급 고효율 토치 개발과 이에 따르는 안정적인 전원 공급 장치 및 주변장치 설계를 통하여 액상 폐기물을 안전하게 처리할 수 있는 설비를 구축하였고 실험을 진행하였다. 본 연구에서 사용된 폐액은 실제



NO.	NAME OF PARTS	NO.	NAME OF PARTS	NO.	NAME OF PARTS	NO.	NAME OF PARTS
1	Anode Housing	4	Housing	7	절연판	10	Cathode
2	Cooling Channel Cover	5	오리피스	8	Cathode Housing(A)	11	End cap
3	Anode	6	절연체	9	Cathode Housing(B)	12	Flange
						13	
						14	O-ring
						15	
						16	

그림 1. 플라즈마 토치의 구성도
 Figure 1. Schematic of Plasma torch

자기코일은 대전류의 흐름인 아크를 그 주변에 자기장을 형성하여 식 1과 같은 Lorentz 힘에 의해 플라즈마 유체의 항력과 관형을 이루며 축 안쪽으로 향하는 힘에 의해 수축된 형태로 아크의 자기안정화를 유도할 뿐만 아니라, 아크점이 전극 표면의 한점에 고정되지 않고 회전이 일어나서 전극물질의 침식이 완화되어 전극 수명을 연장시키는 역할을 한다.

$$F = B \times i \tag{1}$$

2.2 플라즈마 토치의 전원공급부

플라즈마 토치를 위한 전원 공급 장치는 그림 2와 같은 계통으로 설계되었다. 폐액을 효율적으로 분해하기 위해서는 무엇보다 안정적인 전원공급이 중요하므로 먼저 토치의 운전조건을 파악한 후 이 조건에서 높은 효율을 가질 수 있도록 설

계 되었으며 전압 제어인 Open Loop 방식이 아니라 전류 제어인 Close Loop 방식을 채택하였다. 본 연구에서는 아크 전류를 100A로 지정하였을 때 식 2에 의해 아크 전압값을 얻을 수 있었다.

$$V = 1 \times 1360 \times \left(\frac{l^2}{Gd}\right)^{0.2} \times \left(\frac{G}{d}\right)^{0.25} \times (Pd)^{0.45} \quad (2)$$

l:공기계수, 1360:공기계수, d:전극간지름, P:100kPa, G:공급유량

전원 공급부는 크게 전압 조정 변압기, 제어정류기, 직류리액터 및 접화장치로 구성된다. 전압 조정 변압기는 입력 용량 40KVA, 380/220V의 크기로 3상 60Hz, △&Y 형식이다. 제어 정류기는 교류전압을 사용자가 원하는 직류전압으로 바꾸는 동시에 지시된 전류값을 만족하도록 전압을 조정하는 배후포 제어기능을 가지는 부분으로 원격으로 제어가 가능하도록 구성하였으며 DSP TMS320C31을 이용한 연산 기능을 이용하여 정확한 전류제어기능을 구현할 수 있도록 하였다. 직류리액터는 초기 아크시동 및 운전중에 발생할 수 있는 과도한 전류상승을 방지하여 토치의 안정적인 운전을 가능하게 하여주는 부분으로 일반적으로 직류에서는 리액터에 의한 손실이 내부권선 저항에 의한 줄열만이 작용하므로 손실측면에서도 이로운 점이 있어, 토치의 효율향상에도 많은 도움을 줄 수 있다. 마지막으로 접화기는 토치 양단에 인가되어 있는 전원을 고압, 고주파의 펄스를 연속적으로 인가하여 아크전류를 시작시키는 기기로서 18kV, 1MHz의 고주파전압이 토치에 인가되도록 제작하였으며, 접후기 동작시에 발생할 수 있는 서지문제를 방지하기 위해 내부에 필트회로를 부착하여 정류기의 보호가 가능하도록 하였다.

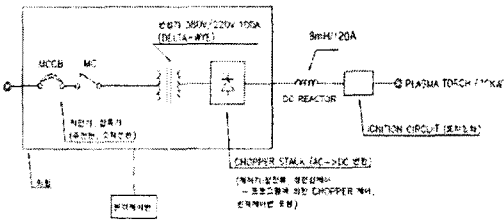


그림 2. 10kw급 전원 선비 개략도
Fig. 2. Block Diagram of 10kw Power system

2.3 폐액 공급부

폐액 공급 장치는 그림 3과 같이 폐액 보관용기와 불립프 그리고 노즐로 이루어져 있으며 반응로로 공급되는 폐액의 양은 Bypass Valve에 의하여 조절하도록 하였다. 폐액의 분무 상태는 안정적인 전원공급 상태와 더불어 폐액 분해 조건에 매우 크게 작용한다. 많은 양이라도 미세한 입자로 분무한다면 좋은 분해효율을 나타낼 수 있지만 아무리 작은 양이라도 공급되는 폐액 입자가 미세하게 분무되지 않는다면 분해효율이 크게 떨어지기 때문이다. 그러므로 공급 압력과 분무 노즐의 크기를 적절히 조화시켜야만 한다.

$$Q = \dot{m}C\Delta t \quad (3)$$

(C = 4.18 [kJ / kgK])

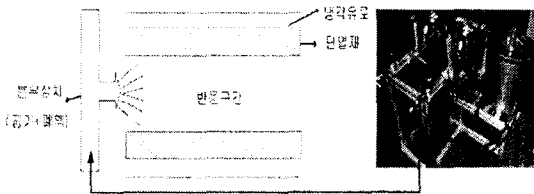


그림 3. 폐액 공급 선비
Fig. 3. Liquid waste supply system

2.4 폐액 처리용 반응로 설계

이 연구에서 제작된 폐액처리용 반응로는 그림 4와 같이 설계 및 제작되었다. 폐액을 열분해하여 처리할 때 고온의 분위기를 가능한 한 긴 구간동안 만들어주어 폐액이 오랫동안 열과 접촉될 수 있도록 만들어 주었다. 공급되는 폐액은 폐액이 일반적인 물이므로 전체가 물의 특성을 가지는 것으로 설계하였으며, 물이 증발될 때까지 필요한 열량과 수증기가 900도가 된다고 가정하고, 폐액공급량을 Trial & Error 방식으로 구하여 폐액공급량을 1.5 g/s 정도로 결정하였고, 공기온도를 900도로 평형을 이루게 하여 NO와 같은 유해기체의 발생 가능성을 최소한 하였다.

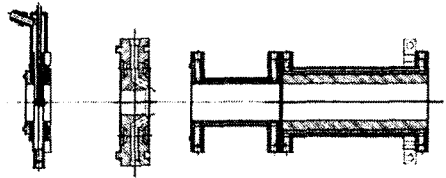


그림 4. 반응로
Fig. 4. Reactor

3. 플라즈마 토치의 운전

지금까지 언급한 장비를 이용하여 플라즈마 토치를 운전하였다. 초기 접화시에 안정적으로 동작시키기 위하여 300V의 전압을 토치의 양, 음극사이에 인가한 상태에서 접화기를 동작시켰다. 접화이후에는 전류제어모드로 전환하여 원하는 전류값을 입력하며 그에 따라 운전하였다.

그림 5는 운전중이 플라즈마 토치를 보여준다. 토치에 공급되는 공기유량은 1.5g/s 정도이며, 접화 초기에는 100V, 100A로 운전조건이 결정되었다. 그림 6과 같이 제어정류기의 전류값을 외부에서 100 > 95 > 90A로 조정하자 전류의 값이 단계적으로 변화하는 응답특성을 나타내며 이에 따라 전압도 비슷한 계단현상을 나타내었다.

모든 구간에서 10kW 정도의 출력을 보였으며, 이를 바탕으로 공기유량이 설정되면 대부분의 운전구간에 플라즈마 토치의 운전출력을 거의 일정하다고 유추할 수 있으며, 전극의 수명을 늘리기 위해서는 저전류, 고전압 구간에서 운전하는 것이 유리하다는 사실을 알 수 있었다.

그림 7은 운전 후의 토치를 나타내었다. 추후 근처에 손상된 흔적이 발견된다. 이것은 아크가 토치내부에서 공기와 함께 혼합되어 생성되어 있는 경우 내부의 압력상승에 의해 추구쪽으로 밀리게 되는 현상 때문인 것으로 판단된다.

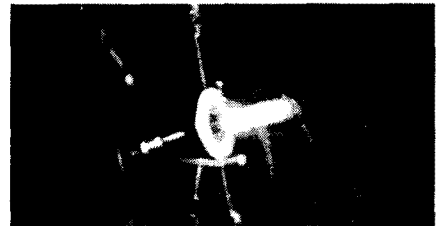


그림 5. 실험중인 플라즈마 토치
Fig. 5. Running Plasma torch

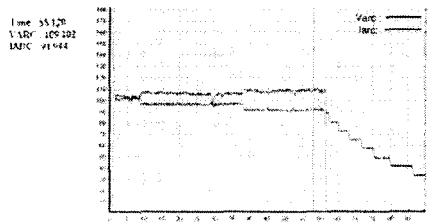


그림 6. 출력 전압, 전류
Fig. 6. Output voltage and current

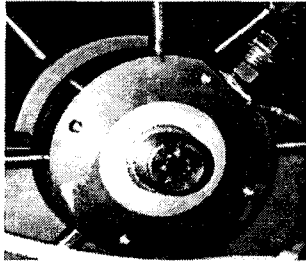


그림 7. 시험 후 플라즈마 토치
Fig. 7. Plasma torch after experiment

4. 폐기물 처리 결과

그림 8과 그림 9는 폐액처리 결과를 얻기 위해 제작 설계된 설비를 보여준다. 반응로를 통해 분해 되는 폐액의 성분과 처리 능력을 알아보기 위해 회수기를 설치하여 밀로 떨어지는 액체 및 고체를 용기에 저장하였고 그 윗부분을 통해 배기되는 증기를 압력계와 노즐을 이용하여 분석 장치로 유도하였다.

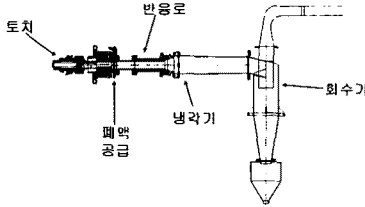


그림 8. 플라즈마 토치의 전체 설비 구성도
Fig. 8. Schematic of experimental apparatus.

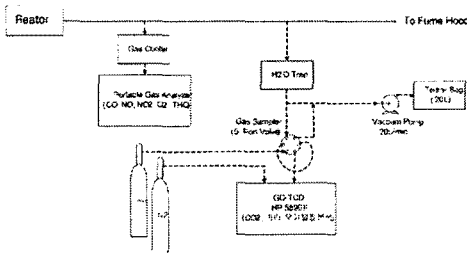


그림 9. 분석 시스템
Fig. 9. Analysis system

폐액 공급 장치에 공급되는 시료는 실제 방사성 제염폐액이 아닌 0.1mol의 Na_2EDTA 를 사용하였고 GC(Gas Chromatography)와 HPLC(High Performance Liquid Chromatography)를 이용하여 분석하였다. 표 1은 실험 후 분석시스템을 통한 분석 결과를 보여준다. 배기된 기체의 응축수를 HPLC로 분석한 결과 응축수의 EDTA 농도는 주입 용액의 농도에 비해서 4% 수준으로 측정되었고, 이는 플라즈마와 접촉된 EDTA용액의 경우 약 96% 정도의 분해 효율을 나타내고 있음을 의미한다. GC에 의한 CO_2 분석은 용액 중 포함된 EDTA가 완전분해시 생성되는 CO_2 의 양을 화학평형 및 양론적으로 계산하여 그 값을 기준으로 전환율을 측정하였다. 전체적인 EDTA의 CO_2 전환율은 대략 96% 정도로 높은 CO_2 전환율을 나타내었다.

표 1. 시험 분석 결과

Table 1. Result of experiment analysis

Test No.	1	2	3
분해율 분석결과 (HPLC 분석결과)			
EDTA 농도 (mg/L)	21478	20467	19663
응축수 중 EDTA 농도 (mg/L)	1029	1157	974
접촉된 용액의 반응효율 (%)	96.48	96.04	96.66
CO_2 전환율 분석결과 (GC 분석결과)			
완전 반응 시 CO_2 농도 (%)	0.5637	0.569	0.563
측정된 CO_2 농도 (%)	0.524	0.547	0.544
EDTA 분해율 (%)	96.52	96.1	96.62

5. 결 론

본 연구에서는 플라즈마를 이용한 액상 폐기물 처리 시스템에 관하여 다루었다. 플라즈마를 이용한 폐액 처리 방법은 접어가 용이하고, 높은 고온 효율성과 침정에너지 이용이라는 점에서 다른 방법의 처리법보다 우수하다고 할 수 있다. 하지만 안정적인 전원공급, 미세한 분무상태, 긴 반응구간을 만들어주지 못하면 공급하는 전력에 비해 분해 효율이 큰 차이를 보일 수 있다. 본 논문에서는 이러한 사항을 고려하여 10KW급 플라즈마 토치와 전원장치, 주변 장치를 설계 및 제작하여 폐액 처리 실험을 하였다. 실험에서 사용된 시료는 실제 방사성 제염폐액이 아닌 0.1mol의 Na_2EDTA 를 사용하였고 GC(Gas Chromatography)와 HPLC(High Performance Liquid Chromatography)를 이용하여 분석하였고 실험 결과 분해효율이나 CO_2 전환율에서 대략 96%의 처리 결과를 얻을 수 있었다. 향후 고출력 토치 개발과 전원 장치 개발을 통하여 많은 폐액의 양을 높은 효율에서 처리할 수 있도록 꾸준한 연구가 요구된다.

감사의 글

본 논문은 산업자원부의 '전력산업연구개발사업' "복합플라즈마를 이용한 난분해성 액상폐기물 분해 처리기술개발"의 지원을 받아 이루어진 논문입니다.

[참고 문헌]

- [1] R. Benocci, G. Bonizzoni, and E. Sindoni, editors, Thermal Plasmas for Hazardous Waste Treatment World Scientific, London, 1996
- [2] Plasma Technology Working Group, Plasma Technology for a better Environment, (U. I. E.), 1992.
- [3] Kjell E. Haugsten, Bengt Gustavson, "Environmental properties of vitified fly ash from hazardous and municipal waste incineration", Waste Management, 20, 167, 2000.
- [4] J. S. Chang, H. A. Lawess and T. Yamamoto, IEEE Trans. On Plasma Sci., Vol. 19, pp. 1152-1160, 1991.
- [5] 홍상희, 허민, 조홍, "저준위 방사성 폐기물 처리용 공동형 플라즈마 토치의 열플라즈마 특성에 관한 수치해석 및 실험 연구", 서울대학교, 1999.
- [6] 홍상희, 주원태, 김동욱, 류지명, 허민, "산업용열플라즈마 발생기의 최적 설계 및 제작", 서울대학교 열플라즈마기술 연구실 2차년도 연구보고서2001.
- [7] 이영환, 김광수, 조주영, 박대희, "Ar 가스 압력에 따른 유도결합형 플라즈마의 전자 밀도 측정", Trans. 대한 전기학회, vol. 52C, No. 11, 2003.