

## 열 플라즈마를 이용한 뼈 폐기물 소각 기술

김우형\* · 김봉수\* · 한상원\* · 기호범\*\* · 채재우\*\*\*

### Incineration Technology of Bone Waste Using Thermal Plasma

Woo-Hyung Kim, Bong-Soo Kim, Sang-Won Han, Ho-Beom Ki, Jae-Ou Chae.

#### ABSTRACT

The meat consumption produces a lot of bone waste everyday. Dumping bone waste without treatment results into environmental hazards. Conventional treatment by pyrolysis is slow, inefficient and produces hazardous by-products. In the work, an investigation of bone waste incinerated using thermal plasma technology is presented. A high temperature arc plasma torch operated at 33 kW was employed for the experiments. Bone waste was incinerated to remove the infectious organic matter and to vitrify the inorganic matter using plasma torch. Bone waste was reduced its 2/3 weight after the treatment. The process was highly efficient, economical, convenient, and fuel free. This method could be used as an alternative method for disposal of bone waste, small infectious animals, hazardous hospital waste, etc.

**Key Words** : Thermal plasma(열 플라즈마), Plasma torch(플라즈마 토치), Energy Dispersive X-ray Spectroscopy(EDX), Scanning Electron Microscope(SEM)

기 호		설 명	
C/Ca	carbon - calcium ratio	DC	direct current
P/Ca	phosphorus - calcium ratio	kW	kilowatt
O/Ca	oxygen - calcium ratio	ppm	parts per million
NOx	nitrogen oxide		

### 1. 서 론

산업의 발전에 따라 에너지 수요는 급증하게 되었고 이에 따른 화석 연료의 사용 증가는 환경 오염을 더욱 심각하게 만들었다. 그리고 산업화에 의해 양산된 유해폐기물과 생활수준의 향상으로 인한 생활폐기물의 증가는 환경오염과 함께 그 처리 문제가 사회의 중요한 현안으로 부상하게 되었다. 그로 인해 오염 물질의 배출은 줄이며 폐기물을 효과적으로 처리하기 위한 기술들이

많이 개발되고 있다.

사람이 살아가면서 영위하는 여러 생활들 가운데 가장 기본적인 것은 식생활이다. 인류가 존재하면서부터 사람은 육류를 즐겨 먹었다. 사람에게 의해 소비된 고기는 다량의 뼈를 배출하게 되었다. 국내의 경우 뼈와 같은 폐기물 처리의 많은 부분을 매립에 의존하고 있다. 하지만 매립은 토양과 주변 환경의 오염을 가속화 시키고 있으며, 매립지의 부족난은 폐기물 처리 방안에 대한 시급한 대안을 요구하고 있다. 또한 더욱 강화되는 환경규제에 대응하기 위해 새로운 친환경 기술이 필요하다. 이러한 문제들을 해결할 수 있는 하나의 방법으로 열 플라즈마를 이용한 소각 기술을 제안한다.

고기의 소비 후 배출되는 뼈는 단단한 무기물

\* 인하대학교 기계공학과 첨단환경기술연구소실

† 연락처자, combustion80@inhaian.net

\*\* 인하대학교 열플라즈마환경기술연구소센터

\*\*\* 인하대학교 기계공학과

과 전염성을 지닌 유기물로 이루어져 있다. 적절한 처리 없이 버려진 뼈는 환경오염의 원인으로 작용하기 때문에 플라즈마 열분해를 통하여 유기물의 전염성은 제거하고 무기물은 유리화 시킬 필요가 있다. 현재, 플라즈마를 이용한 방법은 각종 환경오염 처리를 위한 새로운 효과적인 기술로 각광받고 있으며, 폐기물 처리를 위해 여러 방면으로 연구되고 있다. 고형 폐기물 처리에 사용되는 플라즈마 반응기는 고온 아크 플라즈마에 의하여 작동되는 플라즈마 토치를 이용한다. 플라즈마 토치는 고형 폐기물 처리에 매우 효율적이고 경제적이며 화석연료로 인한 제약이 없다는 장점을 갖고 있다.

### 2. 실험 방법

Figure 1은 본 실험이 수행된 실험장치의 개략도이다. 본 실험 장치는 크게 나누어 플라즈마 토치, 반응 연소실 및 가스 배출구로 구성되어 있다.

반응 연소실은 높이가 140mm이며 내부직경이 100mm이고, 가스 배출구에는 유출가스의 온도를 제어하기 위한 water-cooling system이 설치되어 있다.

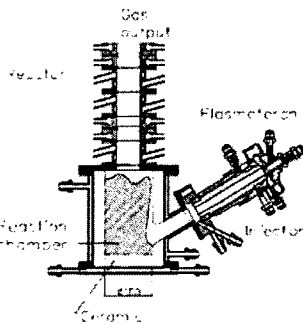


Fig. 1 Experimental setup

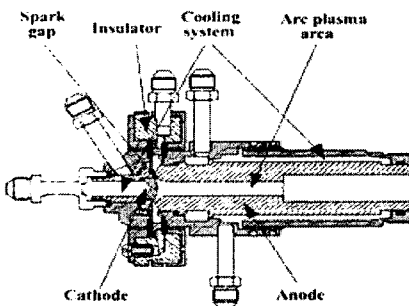


Fig. 2 Schematic diagram of the plasma torch

Figure 2는 플라즈마 토치의 개략도이다. 플라즈마 토치는 원통 모양의 양극과 중심부의 음극이 있고, 전극 사이에는 약4mm의 간격이 있으며 전극의 냉각을 위하여 water-cooling system을 이용했다. 대기상태의 공기가 180L/min으로 전극 사이의 간격으로 공급되고, 접선 공간을 통해서 플라즈마 토치의 방전영역으로 들어간다. 아크 점화 장치로부터 고주파 스파크 방전이 일어나며, 고온 DC 아크 플라즈마를 형성하기 위하여 DC 전압이 적용되었다. 플라즈마 토치에서 발생하는 플라즈마 화염은 신선한 뼈가 적재되어 있는 연소실로 분사되며 3000K의 열을 발생시킨다. 실험에 사용된 뼈는 일반적인 동물의 뼈이며 유기물과 무기물로 이루어져 있다. 플라즈마 토치는 33kW의 전력으로 7분 동안 작동된다.

Table 1 Experimental parameters

Input power	33kW
Air flow rate	180L/min
Cooling water flow rate	7L/min
Temperature inside the chamber	3000K
Operating time	7min

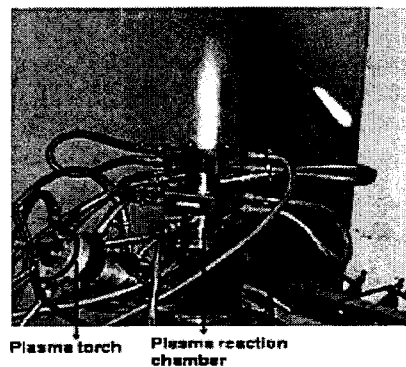


Fig. 3 Plasma torch and plasma reaction chamber used in experiments

Table 1은 실험에 사용된 변수 값들을 보여준다. 그리고 Figure 3은 작동되고 있는 실험장치의 사진이다. 안정되어 보이는 플라즈마 화염은 반응 연소실 위쪽의 가스 배출구에서 관측되었다.

플라즈마 소각 전의 신선한 뼈와 플라즈마 소

각 후의 뼈의 특성은 Energy Dispersive X-ray Spectroscopy(EDX)를 갖춘 Hitachi S-4200 Scanning Electron Microscope(SEM)을 사용하여 분석하였다. 플라즈마 소각 과정을 통해 형성되는 부산물의 위험성을 파악하기 위해서 Teledyne 9110AH NOx 분석기를 사용하여 반응 연소실로부터 유출되는 가스에 포함된 질소산화물(nitrogen oxide, NOx)의 농도를 측정하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

플라즈마 소각 전의 신선한 뼈와 소각 후의 뼈의 상태를 Figure 4의 (a)와 (b)에서 확인할 수 있다. 고온 플라즈마 소각 후에 뼈는 무게가 감소하며, 유리화된 물질로 변화하였다. 반응 연소실에서 고온 플라즈마에 의해 300g의 적재된 뼈가 7분 동안의 소각 후에 110g으로 2/3 정도의 무게가 감소됨을 보였으며, 뼈의 유기물이 열분해되고 무기물이 유리화되는 것을 확인하였고, 뼈의 소각된 부분들은 용융된 단단한 물질이 되었다.

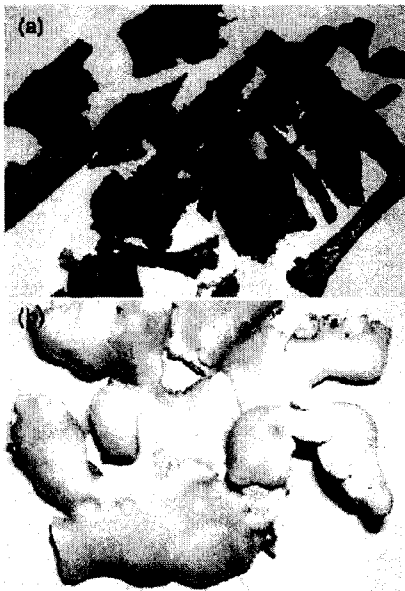


Fig. 4 The bone samples before treatment (a) and after high temperature plasma treatment (b)

소각 과정 동안에 쓰인 뼈의 구조변화를 알기 위해 견본 뼈를 이용하여 SEM 검사를 하였다. Figure 5는 건조시킨 신선한 뼈와 4분 동안 소각한 뼈, 그리고 7분 동안 소각한 뼈의 구조를 나타냈다. 건조시킨 신선한 뼈는 느슨한 구조를 보이고, 7분후의 뼈는 농축된 구조를 보였다.

Table 2 Composition of the fresh bone and the plasma treated bone

Sample	Element atomic %				C/ Ca	P/ Ca	O/ Ca
	C	P	Ca	O			
Fresh bone	28.7	2.9	1.9	66.5	15.1	1.5	35.0
Treated for 4 min	15.3	9.3	10.7	64.7	1.4	0.9	6.0
Treated for 7 min	6.9	12.1	18.4	62.6	0.4	0.7	3.4

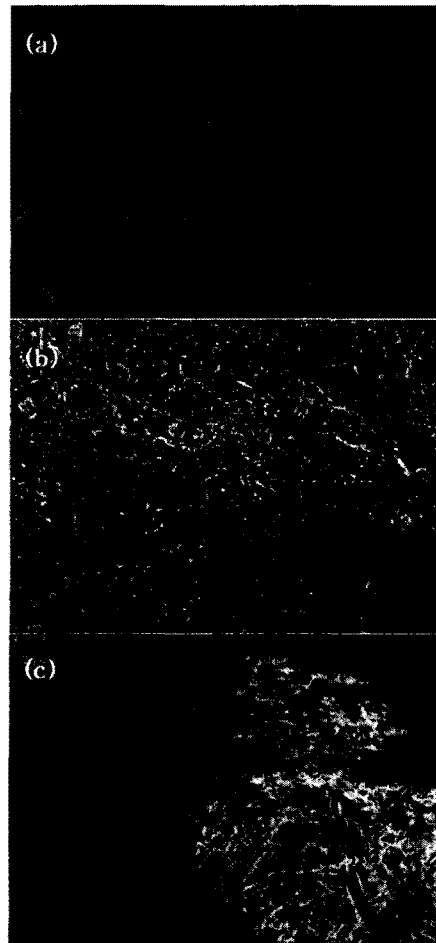


Fig. 5 SEM images of the samples including fresh bone (a), bone treated for 4 min (b), and bone treated for 7 min (c).

그리고 Table 2에서 EDX 분석을 통한 C, P, Ca 및 O 성분들의 변화량을 알 수 있다.

수산화인회석( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ )은 뼈의 중요한 무기물로 P와 Ca의 원천이다. 우리는 Ca의 대부분이 플라즈마 소각 동안에 거의 그대로 유지된다고 가정하였고 다른 성분들의 변화를 확인할 수 있는 기준치로 사용하였다. 먼저 C의 경우를 살펴보면, 신선한 뼈로부터 4분 소각 까지 90% 정도가 감소하였고 7분 소각까지는 97%이상이 감소됨을 보였다. 그리고 P의 경우에도 4분 후에 40%, 7분 후에 53% 정도가 감소됨을 보였다. P의 감소율은 C와 O의 감소율 보다는 작지만 P로 인한 유해성을 줄이기 위한 플라즈마 소각은 짧은 시간 내에 뼈의 P를 감소시킬 수 있다. 뼈는 고온 플라즈마에 의해 소각되어 주로 무기염으로 변화하고 7분 동안 소각된 뼈는 더 낮은 탄소 함량을 갖게 되었다. 따라서 조밀하게 유리화된 뼈는 무해하며 안전하게 처리될 수 있다.

소각 과정에서 발생하는 가스 유출물의 농도를 측정하였다.  $\text{NO}_x$ 는 고온 공기 아크 방전동안에 생성된다. 자연 상태의 플라즈마 토치에서 발생하는  $\text{NO}_x$ 의 농도는 1000ppm이었고, 뼈를 소각하기 시작한 4분 후에는 620ppm으로 감소되었고, 7분 후에는 480ppm이었으며, 실험이 끝난 후의 농도는 62ppm으로 측정되었다. 반응 연소실에 뼈가 적재되고 플라즈마에 의해 소각되며 시간이 지남에 따라  $\text{NO}_x$ 의 농도는 감소하였다. 소각 처리동안에 유기물을 열분해 시킴으로 에너지는 소비되고 플라즈마의 온도는 낮아진다. 낮은 온도에서의 연소는  $\text{NO}_x$ 발생을 억제한다.  $\text{NO}_x$  외에도  $\text{H}_2\text{O}$ 와  $\text{CO}_2$ 가 소각 과정동안에 형성되지만, 영향은 거의 없다. 7분 동안의 소각 과정에서  $\text{NO}_x$ 는 예상보다 적게 생성되고, 우레아나 암모니아 사용에 의한 선택적 촉매 저감방식에 의해 감소시킬 수 있다.

소각 과정에서 공기 아크 방전에 의해 생성된 고온 플라즈마를 사용하여 뼈를 처리할 수 있다. 이 소각 과정은 화석연료의 사용 없이 적은 오염물질을 배출했다. 3.9kWh의 전기에너지로 300g의 신선한 뼈를 경제적으로 처리할 수 있다.

#### 4. 결론

열 플라즈마 기술을 도입하여 유해한 폐기물의 처리를 위한 기초연구로서 고온 DC 아크 플라즈마를 사용하여 뼈 폐기물의 소각을 위한 실험을 수행하였다.

본 연구에서 사용된 플라즈마는 발생 방법과 온도 등이 잘 알려져 있다. 실험 및 분석 결과에 의하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 뼈 폐기물은 열 플라즈마에 의해 소각될 때 유기물은 열분해 되고 무기물은 유리화시킴으로 무게의 감소 효과와 함께 폐기물을 용융시킴으로써 보다 효과적으로 처리할 수 있다.

2) 소각 과정을 통해 뼈 폐기물 속의 유해 성분(P, C)을 감소시킴으로 환경오염의 위험성을 줄일 수 있다.

3) 탄화수소( $\text{C}_m\text{H}_n$ ) 계열 연료의 소비 없이 전기 에너지만으로 소각할 수 있는 기술로서 에너지 절약을 위한 새로운 기술로 널리 사용 가능하며 전염성을 지닌 동물이나 위험성 폐기물 등을 안전하게 처리할 수 있을 것으로 예상된다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 지정 RRC 인하대학교 열플라즈마 환경기술연구센터의 2006년도 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] T. Inaba and T. Iwao, "Treatment of Waste by DC Arc Discharge Plasmas", IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, Vol. 7 pp.684-692, 2000.
- [2] Ph.G. Rutberg, A.N. Bratsev, A.A. Safronov, A.V. Surov, and V.V. Schegolev, "The Technology and Execution of Plasma-Chemical Disinfection of Hazardous Medical Waste", IEEE Transactions of Plasma Science, Vol. 30, pp.1445-1448, 2002.
- [3] S.W. Kim, H.S. Park and H.J. Kim, "100 kW Steam Plasma Process for Treatment of PCBs (polychlorinated biphenyls) Waste", Vacuum, Vol. 70, pp.59-66, 2003.
- [4] H. Nishikawa, M. Ibe, M. Tanaka, M. Ushio, T. Takemoto, K. Tanaka, N. Tanahashi and T. Ito, "Treatment of Carbonaceous Wastes Using Thermal Plasma with Steam", Vacuum, Vol. 73, pp.589-593, 2004.
- [5] N. Lapa, J.F.S. Oliveira, S.L. Camacho, L.J. Circeo, An ecotoxic risk assessment of residue materials produced by the plasma pyrolysis / vitrification (PP/V) process, Waste. Manag. 22 (2002) 335342.
- [6] T.W. Cheng, J.P. Chu, C.C. Tzeng, Y.S. Chen, "Treatment and Recycling of Incinerated Ash Using Thermal Plasma Technology",

Waste Management, pages.485490, 2002.

[7] H.B. Kwon, C.W. Lee, B.S. Jun, J.D. Yun, S.Y. Weon, B. Koopman, "Recycling Waste Oyster Shells for Eutrophication Control", Resource Conservation and Recycling, pages. 75-82, 2004.

[8] H. Yoon, S. Park, K. Lee, J. Park, "Oyster Shell as Substitute for Aggregate in Mortar", Waste Management Research, pages.158170, 2004.