

# 플라즈마와 아크방전을 적용한 발전소 부산물 애시 개질

## Treatment of Ash from power plant by-product using plasma and arc discharge



박선규 Sun-Gyu Park  
목원대학교 건축공학과 교수  
E-mail : psg@mokwon.ac.kr

### 1. 머리말

건설산업의 주재료가 되는 시멘트는 제조과정에 있어서 배출되는 다량의 이산화탄소는 지구온난화의 주된 원인이며, 이산화탄소의 배출량 저감을 위한 시멘트의 대체재로서 산업부산물을 사용하는 방안에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 대체 산업부산물로써 플라이애시는 석탄 화력발전소에서 발생하는 분진을 집진 및 냉각한 것으로 콘크리트 혼화재로서 사용할 경우에 재료분리의 방지, 유동성 향상, 장기강도의 증진 등의 성능 개선에 효과적이다.

하지만 플라이애시의 사용상 플라이애시와 함께 혼입된 미연탄소분과 표면의 유리질 박막의 영향이 문제점으로 대두된다. 미연탄소 성분은 발전소의 보일러 내부에서 완전히 연소하지 않고 남은 원탄 입자가 플라이애시의 집진 과정에 혼입된 것을 말하고, 표면 유리질 박막은 집진과정에서의 급랭에 의한 피막층이다.

미연탄소는 부정형-다공성의 입자로서, AE제 흡착 현상을 야기시킬 수 있으며, 미연탄소가 함유된 발전소 기반 애시를 혼입한 콘크리트의 유동성 확보에 어려움이 따를 뿐만 아니라 비용 상승 등의 문제 또한 동반된다. 유리질 박막의 경우 플라이애시 입자 내부에서 반응성 물질이 용출되는 것을 방해하는 역할을 하기에 이를 파괴하는 과정이 요구된다. 이러한 유리질의 박막은 알칼리 환경에 놓여질 시 파괴되는 성질을 지니고 있기 때문에 시멘트의 수화 과정에 의해 조성되어 알칼리 환경으로 유리질 박막의 파괴로 이어질 수 있으나, 장시간이 요구된다는 문제가 동반되고 초기 압축강도 확보에 영향을 끼칠 수 있다.

위와 같은 미연탄소 및 유리질 박막 등 발전소 기반 애시의 잠재적 문제점을 해결하기 위하여 인위적 유리질 피막 파괴와 애시의 표면개질 처리가 대안으로서 활용될 수 있다. 유리질 박막의 제거를 위하여 알칼리 자극제를 첨가하는 방안은 효과가 우수하지만, 사용상 위험성과 고가의 재료로서 건설공사에 다량으로 사용함에 어려움이 따르고 있는 실정이다. 한편, 미연탄소가 다량 포함된 애시 또는 일부와 혼합된 플라이애시는 플라즈마와 아크방전을 이용하여 개질이 가능하다. 본고에서는 이가운데 전기장을 사용한 플라즈마와 아크방전을 사용한 미연탄소분 개질방법에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 플라즈마를 이용한 발전소 부산물의 전처리

### 2.1 플라즈마 개요

플라즈마는 전기장을 이용해 물질에 고온의 열을 가하고 상태를 변이시켜 입자를 이온화 하는 화학 반응로서 초고온에서 음전하를 지닌 전자와 양전하를 띤 이온으로 분해되어 이온화 된 기체상태로 존재한다. 플라즈마 상태 내부의 전하 분포도는 상당히 높으며, 거시적인 관점에서 볼 때 그 음전하와 양전하의 수가 같아 결과적으로 전기적 중성을 띠게 된다. 이 가운데 이온과 전자는 씨앗 전자와 중성 입자의 충돌에 의해 발생한다. 이온화 충돌은 전자와 중성 입자가 충돌에 의해 중성 입자의 전자 중 하나가 자유 전자가 되는 현상으로서 이러한 현상이 반복되어 충분한 이온-전자쌍이 발생되고 유지될 경우 플라즈마가 생성되었다고 할 수 있다.

### 2.3 플라즈마를 이용한 개질

플라즈마는 온도 및 밀도에 따라 분류되고 대표적으로 글로우 방전, CCP(Capacitively Coupled Plasma), ICP(Inductively Coupled Plasma) 등이 있다. 플라즈마는 사용되는 활성기체의 종류에 따라서도 분류가 가능하다. 플라즈마 현상을 발생시키기 위해서는 진공상태 및 반응의 활성화를 위한 활성기체 ( $O_2$ ,  $N_2$ , Ar 등)를 사용하며 일반적으로  $O_2$ 가 사용되고 있다. 건설산업에서는 CCP type의  $O_2$  플라즈마의 적용성이 높다. <그림 1>에 나타낸 바와 같은 CCP type의  $O_2$  플라즈마를 이용하여 플라이에서의 표면을 개질한 후 강열감량을 측정 한 일부 연구에서 5.8%의 강열감량을 나타내었다. 보고된 연구에서는 <그림 2>와 같이 플라즈마를 이용하여 개질처리를 진행함에 따라 10회 진행했을 경우 강열감량이 0.11%가 되었으나, 표면개질 처리 횟수가 증가함에 따라 강열감량의 감소율은 점차 저하하는 것으로 나타났다. 따라서 플라즈마를 이용해 플라이에서의 표면을 개질할 경우 미연탄소 제거 효과가 있으나, 그 횟수가 증가함에 따라 제거 효율은 감소하는 것으로 보여진다. 이러한 미연탄소분 제거의 매커니즘은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

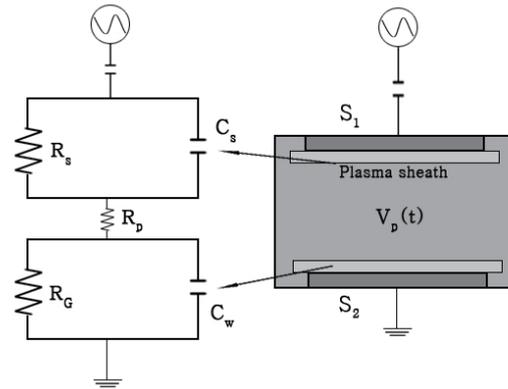


그림 1. CCP type의  $O_2$  플라즈마

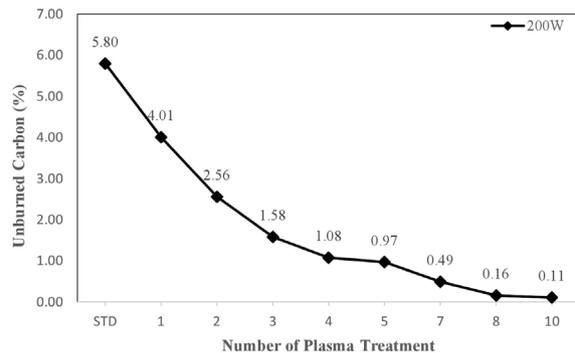


그림 2. 플라즈마 처리 횟수에 따른 미연탄소 감량

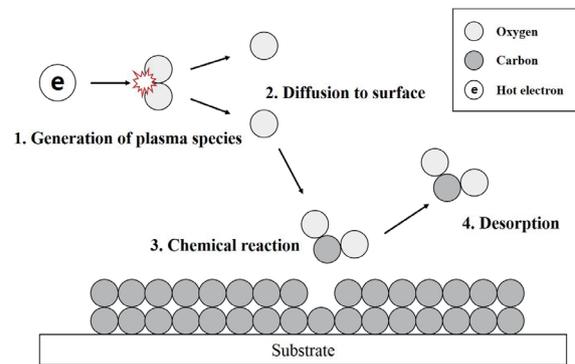


그림 3. 미연탄소분 제거 매커니즘

### 2.3 플라즈마를 이용한 개질의 특징

$O_2$  플라즈마를 발전소 애시의 개질에 사용함에 있어서 크게

두가지 문제점이 동반된다. 먼저 플라이애시 내에 함유되어 있는 미연탄소인 C와 활성기체로서 주입된 O<sub>2</sub>가 결합하여 최종적으로 CO<sub>2</sub>가 생성되어 기체 상태로 제거되는 것이다. 또한, 플라즈마는 오존O<sub>3</sub>을 발생시키는 문제점을 지니고 있다. O<sub>2</sub>를 활성기체로서 사용할 경우 O<sub>2</sub>는 O원자로 분해되는데 이 때 C와 결합하지 못 한 잉여 O원자가 O<sub>2</sub>와 결합하여 O<sub>3</sub>가 생성된다. O<sub>3</sub>는 무색의 자극적인 냄새를 지닌 유해가스로 불안정한 상태로서 다른 물질과 결합하려는 성질을 지녀, 주변 물질의 물성을 변화시키는 산화작용을 일으킨다. 요컨대 발전소 애시의 개질에 플라즈마를 적용할 경우는 미연탄소분 제거 효율성 측면에서 우수하지만, 유해물질 생성 문제에 대한 대책이 수반되어야 한다.

### 3. 아크방전을 이용한 발전소 부산물의 전처리

#### 3.1 아크방전 개요

아크방전이란 양극과 음극의 대립에서 양 전극의 사이에 존재하는 기체가 전위차에 의한 전압 강하로 전기적으로 방전되어 전류가 흐르게 되는 현상을 말한다. 아크방전은 그림 4와 같이 방전기체의 압력에 따라 크게 저압과 고압 아크방전으로 분류할 수 있다. 고압 아크방전은 전자이온 및 중성기체 원자들로 구성된 약전리 플라즈마 상태로 볼 수 있으며, 저압 아크방전은 낮은 밀도의 중성기체 원자들에 의해 탄성충돌 빈도가 적어져 전자온도는 매우 높으나 중성원자들의 온도는 낮다는 특징을 지니고 있어서 부산물 전처리에 적합하다. 아크방전 영역 내에서는 가벼운 전자들이 고속으로 이동하며 큰 에너지를 생성하고, 다른 입자와 탄성 충돌을 일으키며 에너지를 전달, 에너지를 전달받은 입자는 온도가 상승하게 된다. 이와 같은 과정이 반복적으로 발생할 때 아크방전이 지속되는 것이다. 아크방전이 발생할 때 3000~6000℃의 고온의 열을 발생시킨다. 또한 탄성충돌 이후 비탄성 충돌을 일으키는 과정에 빛(불꽃)을 방출시키는데 이러한 열 및 불꽃을 이용한 발전소 애시의 개질이 가능하다.

#### 3.2 아크방전을 이용한 개질

실험실 스케일의 아크방전 발생기는 <그림 5>와 같고, 아크방전기, 집진기, 팬, 압축기로 구성되어 있다. 아크방전을 이용한 애시의 개질 방법은 먼저 애시를 주입구를 통하여 소량씩 투입하고 투입된 애시는 아크방전 영역으로 이동하며, 내부에 발생하고 있는 고온의 아크 불꽃과 접촉하여 표면이 개질된다. 이 때 아크방전 영역은 총 4단계로 이루어져 있으며, 모든 아크방전 영역을 통과해 표면개질이 완료된 애시는 집진기로 이동하여 토출된다.

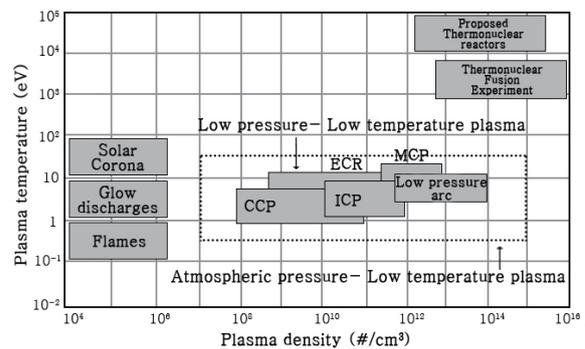


그림 4. 아크방전의 분류

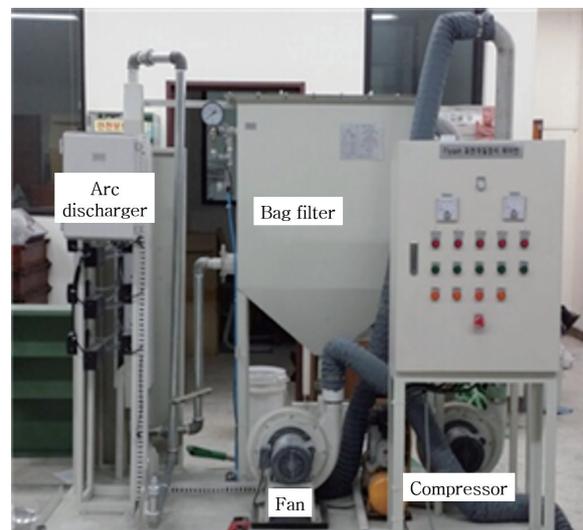


그림 5. 아크방전 발생기

### 3.3 아크방전을 이용한 개질결과

화력발전소에서 얻어지는 플라이애시를 대상으로 앞서 언급한 아크방정 개질은 2회 반복하여 그 결과를 요약하면 아래와 같다. 플라이애시의 물리적 특성은 [표 1]과 같고, 플라이애시의 강열감량, 분말도, 비중, SEM, 아크방전 개질 전후의 EDS와 XRD 분석결과를 이하에 요약한다.

먼저, 개질 결과 강열감량이 감소하는 것으로 나타났다. 내부에 함유되어 있던 미연탄소가 연소되어 제거되었기 때문에 얻어진 결과로 감소율은 약 2%로, 2장에서 언급한 플라즈마 처리를 2회 하였을 경우의 감소율(3.24%)과 유사한 수치로 나타났다. 분말도의 경우 4300에서 4500으로 증가하였다. 비중의 경우 아크 개질 처리 전·후에 있어서 큰 차이를 나타내지 않았다. 아크방전 처리 전·후의 SEM 분석 결과는 그림 6과 같다. 내부에 함유된 미연탄소가 아크방전 처리된 결과 상당 부분이 제거된 것을 확인할 수 있다.

[표 1] 플라이애시 물리적 특성

	Density (g/cm <sup>2</sup> )	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Ignition loss (%)
FA*	2.24	4,302	9.0

\* FA : Fly Ash

[표 2] EDS 결과 (wt%)

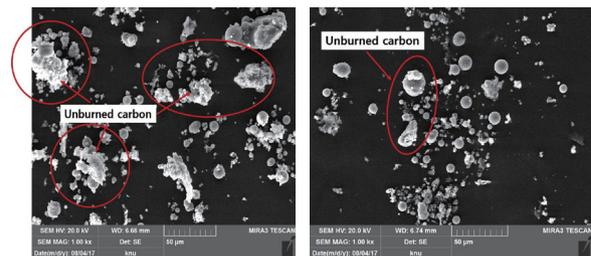
	처리전 플라이애시	처리후 플라이애시
C	23.28	26.02
O	39.78	36.27
Mg	0.18	0.42
Al	3.42	11.56
Si	31.72	21.55
K	0.47	1.60
Ca	0.44	0.77
Fe	0.71	1.81
Pt	0.00	0.00
Total	100.0	100.0

아크방전을 이용해 표면개질 한 플라이애시의 EDS 분석 결과는 [표 2]와 같다. Si 및 O 성분이 감소하는 것으로 나타났다, 유리질 박막이 아크 불꽃과 접촉할 경우, 고온의 열에 의해 결합구조가 파괴되며 SiO 및 O 성분으로 재결합 하여 공기중으로 분산됨에 따라 분석 결과 원소 질량이 감소한 것으로 판단된다.

XRD 분석 결과는 <그림 7>과 같이 아크방전 처리 이후, 2θ 50°~80° 부근에서 가장 뚜렷한 경향을 나타내었다. 플라이애시 표면의 유리질 박막이 아크방전에 의해 파괴되어 기존에 측정되지 않던 원소들이 분석됨에 따라 새로운 피크가 발생된 것으로 보여진다.

### 4. 맺음말

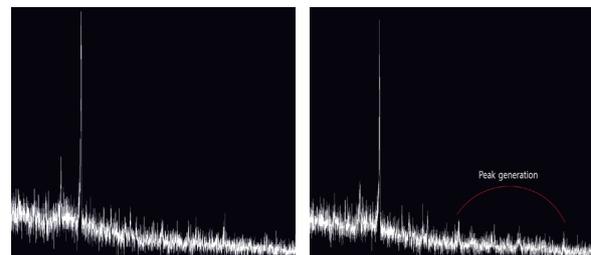
미연탄분이 함께 혼입되는 발전소 애시의 특성상 혼입된 미연탄분의 제거를 통한 발전소 애시의 개질은 콘크리트 사용



(a) 처리 전 플라이애시

(b) 처리 후 플라이애시

그림 6. 아크방전 개질 전후 플라이애시



(a) 처리 전 플라이애시

(b) 처리 후 플라이애시

그림 7. 아크방전 개질 전후 플라이애시 XRD

을 위한 효과적인 수단으로 여겨진다. 개질처리를 위한 수단으로서 플라즈마법과 아크방전법이 활용될 수 있으나, 각각의 특징을 고려한 효과적인 적용이 필요하다. 개질효율과 사용성면에서는 플라즈마법이 상대적으로 우수하며, 안전성과 에너지 소비를 고려할 때는 아크방전법이 상대적으로 우수하다. 발전소 애시의 개질의 효과는 강열감량의 감소와 애시 표면의 유리질 피막의 파괴로 요약될 수 있다.

#### 참고문헌

- 1 Kim, S.A., Park, S.G. (2018). Removal of Unburned Carbon and Surface Treatment Effect of Fly Ash Using Arc Discharge, Journal of the Korea Concrete Institute, 30(1), 83-89.
- 2 Lee, C.H., Cho, M.H. (2013). Understand of Plasma, Journal of Power Electronics, 18(3), 29-33.
- 3 Lim, Y.J., Lee, S.H., Lee, S.J., Lim, D.S., Jeong, H.Y. (2012). A Study on the Unburned Carbon Removal Techniques of Fly Ash using Plasma Treatment, Proceedings of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 12(1), 78-79.

담당 편집위원 : 박원준(강원대학교)

#### ●● 학회지 원고모집 안내

Magazine of RCR(한국건설순환자원학회지)은 계간으로 발행되어 회원을 비롯한 관련 업계, 학회, 유관기관 및 단체 등에 배포되고 있습니다. 회원 여러분의 많은 원고 투고 부탁드립니다.

##### 1. 원고 종류

논단, 특집기사, 기술기사, 공사기사, 해외 기술정보 및 번역기사(뉴스), 현장탐방(국내외 연구소 및 국제학술대회 참가), 우리 회사소개, 신기술 또는 신제품 소개 등

##### 2. 원고 분량

글씨크기 11pt, 줄 간격 160%

- 1) 특집기사, 기술 및 공사기사 : A4용지 10매 이내
- 2) 해외 정보소개, 현장탐방 및 우리회사 소개기사 : A4용지 8매 내외

##### 3. 원고 작성

- 1) 원고의 모든 내용(사진, 그림 등 기타 부속물 포함)은 한글 작성이 원칙임. 단, 의미 전달이 모호할 우려가 있는 경우에는 그 원어를 괄호 안에 표기함.
- 2) 제목의 작성 : 제목은 가급적 10자 이내로 정하며 영문 제목도 동시에 표기함.
- 3) 저자의 소개 : 성명, 소속, 직위, 전공분야/관심분야, 연락처, e-mail 주소, 저자 사진(컬러)
- 4) 제출 마감일 : 발행일 30일 전까지(발행일 : 3, 6, 9, 12월)

##### 4. 제출할 곳

한국건설순환자원학회 오경숙 차장(E-mail : rcr@rcr.or.kr)