

순환유동층에서 폐수슬러지와 석탄의 혼소 특성

배달희^{*†}, 선도원^{*}, 박재현^{*}, 류호정^{*}, 박도현^{**}

Incineration of Waste Water Sludge and Coal in a Circulating Fluidized Bed Combustor

Dal-Hee Bae, Dowon Shun, Jaehyeon Park, Ho-Jung Ryu and, Do-Hyun Park*

ABSTRACT

Co-incineration of coal and wastewater sludge was performed in a 0.1MWth bench scale circulating fluidized bed combustor(CFBC). Sludge was received from a wastewater treatment plant in a dye industrial complex in Busan Metropolis. Moisture content of received sludge was 80%. Coal and sludge mixture was prepared with weight ratio of 90/10, 85/15 and 80/20. Co-combustion characteristics of the coal and sludge mixture demonstrated stable combustion conditions. Component analysis, incineration characteristics, boiler performance was measured before and after the test and application for commercial 59MWth CFBC boiler. The release of hazardous components such as SO₂ and Cl was suppressed by the presence of inherent minerals of Ca, Na, K in coal and sludge mixture. Pre-drying was not essential but it was recommended for the benefits of manageability of sludge.

Key Words : Sludge, Circulating Fluidized Bed, Incineration

1. 서 론

무분별한 슬러지 투기는 대기, 토질 및 해양 환경을 심각하게 오염시킨다. 국내에서는 2003년부터 하수 슬러지의 단순매립이 금지되었고, 해양투기가 점차적으로 금지될 예정으로 있다.

슬러지 처리방법에는 매립, 해양 투기, 퇴비화, 소각 등의 방법이 있으며 유럽의 경우 매립이 일반적으로 사용되었으나 매립지의 제한과 토양오염 등의 문제점으로 점차 감소하는 추세이며, 해양 투기의 경우 해양 오염과 같은 문제점의 발생으로 인하여 소각에 의한 하수 슬러지 처리가 매우 빠르게 증가하고 있다. 슬러지를 소각하는 기술에는 로터리 킬른(rotary kiln), 다단로(multiple hearth

furnace), 유동층(fluidized bed)¹⁾을 사용하는 방식이 있으며 여러 경제적, 기술적 문제로 유동층 방식에 의한 소각이 하수 슬러지 처리 시장에서 우위를 차지할 것으로 예측된다. 유동층 소각은 층내 혼합이 잘 되기 때문에 상대적으로 낮은 온도와 낮은 과잉공기에서도 완전 연소가 가능하고 많은 양의 층내 불활성 물질이 열 저장소의 역할을 하여 갑작스러운 온도 변화를 방지해준다. 또한 소각로의 고온 부분에 기계장치가 없기 때문에 보수 유지비가 적게 들며 별도의 공정 없이도 공해 물질의 배출억제가 가능하고 수분을 많이 포함하고 있는 연료에도 적용이 뛰어나다는 장점이 있어 다양한 분야에서 적용되고 있다.

우리나라의 경우 하수슬러지의 소각시설은 수가 적고 대부분 외국의 기술로 설계되고 있는 실정이며, 일부 연구기관이나 학교, 기업²⁾ 등에서 연구를 수행해 오고 있으나 아직은 소각 장치의 설계와 운전, 대형화 기술에 있어서 더 많은 연구가 필요한 상황이다. 한편 일부 소각로 제작용체들은

* 한국에너지기술연구원 청정신공정연구센터

† 연락처, E-mail : dalbae@kier.re.kr

** 부산염색공업협동조합

정부에서 하수슬러지의 매립이나 해양투기를 금지한다는 법제화에 힘입어 소각기술개발을 서두르고 있고, 공단 주변의 일부 소규모 공장에서 산업폐기물을 대상으로 소각로가 개발되고 있다.

본 연구는 국내 P 공단에서 배출되는 염색폐수 슬러지를 순환유동층 보일러에서 혼소하여 에너지를 회수하고 폐기물을 안전하게 처리하고자 하는데 목적이 있다³⁾. 본 사업은 전용소각로가 아닌 일반 고체연료 연소 순환유동층 보일러에서 일반 폐기물 슬러지 혼소를 통하여 폐기물을 안전하게 연소하고자 하는 기본 연구이다⁴⁾. 연구의 결과는 사회적 문제가 되고 있는 슬러지 안전소각⁵⁾을 위한 하나의 적용사례가 될 것이며 이의 성공에 따라 기술적 경제적 파급효과가 매우 크리라 기대한다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구를 위해 사용된 장치는 Fig. 1과 같다^{6,7)}. 연소로 하부에 외부 water jacket을 설치하고, 2100, 3400, 4900mm 지점에 수평형 이중관 열교환기가 설치되어 연소로 온도를 조절한다. 또한 연소로 하부는 내경 5" tubular 형이고 높이가 2200mm이다. 연소로 상부는 내경 6" tubular형으로 높이는 5000mm이다. 설비의 규모가 커서 장치는 노천 철골구조에 설치하였다. 석탄은 분쇄와 전처리 과정을 거친 5mm이하의 것을 screw feeder를 통해 연소로 (공기 분배기 위 1.25m)로 공급한다. 슬러지와 석탄의 혼소는 먼저 석탄과 슬러지를 주어진 비율로 혼합한 뒤 석탄공급 장치로 공급하였다. 연소공기는 1차공기와 2차공기로 나누어지며, 1차공기는 분산판 하부로, 2차공기는 분산판 위 2.1m 지점에서 공급한다. 연소로의 loop seal에서는 회재의 유동과 재순환을 위해 유동화 공기를 분산판을 통해 별도로 공급한다.

연소로 하부는 충밀도가 높고 고온이 유지되며 공급된 석탄은 휘발분이 분리되며 동시에 연소공기에 의해 발화한다. 고속유동 상태인 순환유동층 연소로에서 연소재는 비산하며 일부는 연소로 벽면을 따라 하강과 비상을 반복하는 내부순환을 하며 입경이 작은 나머지 회재는 연소로를 빠져나가 사이클론에 인입된다.

사이클론에서 포집된 회재는 dip leg를 따라 loop seal에 도착하면 dip leg공기와 return leg 공기에 의해 유동화 되고 이송되어 연소로로 재 투입된다.

배연중 NO, SO₂, CO, N₂O의 성분과 농도는 실시간 분석기인 ABB RAS 14를 사용하였다. 원소분석과 연료의 발열량은 LECO AC-300사의 열량분석기이다. 연소재의 성분분석은 Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer (ICP-MS

HP4500)와 X-Ray Fluorescent (Bruker SRS 3400)을 사용하였다.

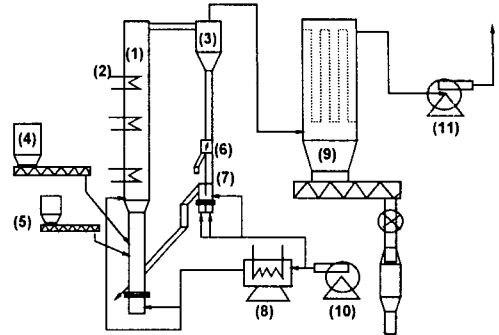


Fig. 1. Diagram of circulating fluidized bed combustor

- (1) Combustor, (2) Heat transfer tube, (3) Cyclone, (4) Coal feeder, (5) Limestone feeder (6) Solid flow diverter, (7) Loop seal, (8) Air preheater, (9) Bag filter, (10) F.D. fan, (11) I.D. fan

3. 결과 및 고찰

3.1. 성분특성

Table 1.은 슬러지의 공업분석 및 원소분석결과이다. 슬러지는 P 염색공단 폐수처리장 슬러지로서 탈수 후 함수율은 82.5-84.03%이다. 도착기준 슬러지의 발열량은 분석기로 분석이 불가능하였고, 100°C에서 40분과 2시간 건조한 슬러지의 발열량은 각각 1541과 2773kcal/kg으로 나타났다. 건조 슬러지에는 2.15%의 황이 함유되어 있었다.

Table 1. Properties of sludge

| | | As received | 100°C | 100°C |
|---------------------------|-----------------|-------------|-------|-------|
| | | | 40min | 2hr |
| Proximate Analysis(%) | Moisture | 82.5 | 33.43 | 5.44 |
| | Volatile matter | 12.08 | 25.34 | 51.87 |
| | Ash | 5.42 | 21.23 | 42.69 |
| | Fixed Carbon | 0 | 0 | 0 |
| Ultimate Analysis(%) | Dry | | | |
| | C | 30.3 | | |
| | H | 5.23 | | |
| | N | 4.84 | | |
| | S | 2.15 | | |
| Calorific Value (kcal/kg) | | | 1541 | 2773 |

슬러지는 폐수 종말 처리장에서 약품처리 되면서 시약 중 황화철에 의해 성분 중 황이 존재하게

된다. Table 2.에 슬러지 처리 약품의 종류와 사용량을 나타내었다. 그밖에도 시약에 의해 Na 성분이 많이 존재한다.

Table 2. Chemicals used for sewage treatment

| Chemicals | Rate (kg/month) |
|-------------------|-----------------|
| Sulphuric acid | 172,476 |
| Iron Sulphate | 469,383 |
| Sodium Hydroxide | 9,507 |
| Aluminum Sulphate | 193,537 |
| Bleach | 33,889 |
| liquid oxygen | 10,610 |
| Anion | 2,997 |
| Cation | 3,183 |
| Polycrin (A-511) | 7 |
| Kurizet(S-307) | 31 |

Table 3에 ICP-MS를 이용한 슬러지 회의 성분분석을 나타내었다. Table 2의 슬러지 종말 처리장에서 사용된 각종 시약이 슬러지 회분에 반영되었으며 슬러지 회분중 대표적인 금속성분은 Na로 418ppm이었다. 이는 시약중 가성소다의 잔류성분으로 이해된다. 또한 Ca 성분도 375ppm으로 나타난다.

Table 3. Ash analysis (ICP-MS)

| Element | Concentration (ppm) |
|---------|---------------------|
| Li | 0.295 |
| Na | 417.7 |
| Mg | 30.82 |
| K | 41.15 |
| Ca | 375.1 |
| V | 1.668 |
| Cr | 0.0014 |
| Mn | 15.59 |
| Fe | 0.704 |
| Cu | 0.049 |
| Zn | 0.26 |
| Sr | 3.125 |
| Hg | 0.0001 |
| Pb | 0.0012 |

실험에 사용한 석탄과 석탄/슬러지 혼합물의 분석자료를 Table 4에 나타내었다. 보일러의 주 연료인 석탄은 유연탄인 중국산 선화탄이다. 석탄과 혼합한 슬러지는 석탄과 슬러지 무게 비 각각 95:5, 90:10, 85:15, 80:20으로 혼합하였다. 슬러지는 입수후 실험시까지 보관중 일부 자연 건조되어 60%의 함수율을 나타내었다. 10%수분을 가진 석탄과 함수율 60% 슬러지의 혼합시료는 약 20% 정도의 함수율을 나타내었다. 석탄은 저유황탄으

로 0.53-0.71%의 황 함량을 나타내었다. 석탄회중 CaO의 함량은 약 23.9-25.3%으로 0.65%의 황농도와 회분중 25% CaO를 가정하였을 때 석탄만의 자체 Ca/S비는 1.7로 탈황능력이 우수하리라 예상된다. 또한 석탄/슬러지 비가 80/20으로 혼소되었을 경우 슬러지중 황의 농도를 Table 1로부터 2.15%로 가정하였을 때 Ca/S 비가 1.4로 자체 탈황 잠재력이 역시 매우 높다고 예상된다.

Table 4. Properties of coal and coal/sludge mixture

| | | Sludge | Coal | Sludge 10% | Sludge 15% | Sludge 20% |
|------------------------|-----------------|----------|-------|------------|------------|------------|
| | | Moisture | 59.54 | 10.83 | 13.47 | 16.29 |
| Proximate Analysis (%) | Volatile matter | 22.6 | 30.58 | 29.06 | 29.17 | 28.25 |
| | Ash | 17.86 | 4.86 | 8.95 | 9.31 | 8.37 |
| Ultimate Analysis (%) | Fixed Carbon | 0 | 53.73 | 48.52 | 46.23 | 44.71 |
| | C | 27.98 | 69.98 | 64.98 | 64.79 | 65.72 |
| | S | 1.73 | 0.67 | 0.64 | 0.73 | 0.68 |

Table 5에 연소재의 분석 결과를 나타내었다. 석탄만을 연소했을 경우 비산회중 고정탄소는 27% 이 때 가연분 손실은 2.5% 이었다. 슬러지와 석탄이 혼소되었을 경우 석탄과 슬러지의 중량비가 5-20%까지 변동범위에서 회분중 고정탄소는 25-33%정도로 나타났고 가연분 손실은 4.7-5.4%까지 나타났다. 따라서 석탄만을 연소한 경우보다 모든 혼소실험에서 연소효율은 약간 떨어진다. 슬러지 비율의 변화에 따라 연소효율의 변화 경향이 나타나지 않은 Fig. 2에서와 같이 실험범위 내에서는 슬러지 비율에 따른 연소로 온도 변화의 폭이 작기 때문이라 판단된다. 또한 실험장치가 비교적 커서 공급시료의 조성이 Table 4의 분석값으로 정확하게 유지되지 않았을 것이며 서로 다른 날에 실험한 관계로 날씨등 실험 외부조건이 변화한 원인도 있다. 슬러지 비율에 따른 수분의 증발잠열 손실로 연소로의 온도가 현저히 낮아지지 않는 이상 휘발분이 주성분인 슬러지의 비율변화에 따라 연소효율이 변화한다고 보기는 어렵다. 그러나 슬러지 비율 20% 이상의 농도에서는 운전상태를 안정적으로 유지하지 못하였으므로 실험을 포기하였다. 즉 Table 4에서 수분농도 19%이상인 석탄/슬러지 혼합물 80/20보다 슬러지 비율이 높은 경우 본 장치에서는 안정적 운전이 되지 않았다. 한편 Bottom ash는 입자가 굵어서 비산되지 못하고 연소로 하부로 배출된 회로서 연소로 내에서의 체류시간이 길어 거의 완전 연소되며 가

연분이 0.03%로 거의 나타나지 않았다.
 가연분 손실은 다음과 같이 계산하였다.

$$Carbon\ loss = \frac{Carbon\ Flyash \times Flyash\ rate}{Fuel\ rate}$$

여기서 Carbon loss; 가연분 손실 [-]
 Carbon Flyash; 비산회중 탄소농도 [-]
 Flyash rate; 비산회 발생량[kg/h]
 Fuel rate; 연료 주입량[kg/h] 이다.

Table 5. Properties of ash

| Sludge content [%] | 0 | 10 | 15 | 20 | 20 | |
|------------------------------|--------------------|------------|------------|------------|---------------|-------|
| Proximate Analysis (%) | Moisture | 2.64 | 1.44 | 1.02 | 1.09 | 0.14 |
| | Volatile matter | 8.11 | 14.57 | 12.12 | 12.74 | 0.11 |
| | Ash | 62.12 | 60.15 | 61.68 | 60.84 | 99.68 |
| | Fixed Carbon | 27.13 | 23.84 | 25.18 | 25.33 | 0.07 |
| FC loss (%) | 2.5 | 4.6 | 5.1 | 4.7 | 0.3 | |
| Reference | Fly ash | Fly ash | Fly ash | Fly ash | Bottom ash | |

하부회와 비산회의 성분을 분석하였다. Table 6
 과 Table 7은 각각 ICP-MS와 XRF 방식으로 분
 석한 비산회와 하부회의 성분을 나타낸다. Fly
 ash 1과 2, Bottom ash 1과 2는 각각 석탄/슬러지
 80/20과 동일한 연소 조건에서 2회 실험중 채집한
 표본이다. 연소재의 특징은 염소 성분(Cl)이 하부
 회보다 주로 비산회에 응축되는 것으로 나타났다.
 이는 연료의 비산재에 포함된 Na, K, Ca, Mg 성
 분이 발생 염소를 기상에서 기-고 반응을 통해
 흡수하고 다시 백필터로 비산되기 때문에 연소로
 하부에서 거의 정체상태로 있어 발생 염소와 접촉
 기회가 적고 입자 굵기가 더 커서 활성표면적이
 적은 하부회 보다 비산회에서 염소성분이 더 많이
 검출되는 것으로 이해된다.

Table 6. Analysis of ash (ICP)

| Compone nt | Fly ash1 (wt %) | Bottom ash1 (wt %) | Fly ash2 (wt %) | Bottom ash 2 (wt %) |
|---------------|--------------------|--------------------------|--------------------|---------------------------|
| Li | | | | |
| Na | 1.52 | 1.74 | 1.99 | 2.15 |
| Mg | 0.9 | 1.03 | 0.9 | 0.95 |
| K | | | | |
| Ca | 4.94 | 10.48 | 5.15 | 9.58 |
| V | | | | 0.08 |
| Cr | | 0.28 | 0.27 | 0.21 |
| Mn | | 0.12 | | 0.05 |
| Fe | 3.24 | 6.56 | 5.34 | 11.19 |
| Cu | 0.89 | | 1.04 | |
| Zn | 0.75 | 0.13 | 0.86 | |
| Sr | | | | |

| | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|
| Hg | | | | |
| Pb | | | | |
| Al | 7.53 | 5.12 | 6.81 | 4.17 |
| Si | 10.77 | 14.05 | 11.12 | 12.45 |
| P | 0.27 | 0.86 | | |
| S | 2.07 | 0.85 | 3.96 | 2.06 |
| Cl | 1.38 | 0.37 | 0.98 | 0.07 |
| K | 0.97 | 1.12 | 0.85 | 0.53 |
| Ti | 0.42 | 0.61 | 0.37 | 0.53 |
| Ni | 0.2 | 0.55 | | |

Table 7 Analysis of ash(XRF)

| Component | Fly ash 1wt % | Bottom ash 1 | Fly ash 2 | Bottom ash 2 |
|-----------|------------------|-----------------|-----------|-----------------|
| Na2O | 1.32 | 1.29 | 1.49 | 0.711 |
| MgO | 1.32 | 0.158 | 0.957 | 0.0971 |
| Al2O3 | 16.2 | 8.15 | 12.2 | 5.03 |
| SiO2 | 27.2 | 80.4 | 22.7 | 85.1 |
| P2O5 | 1.25 | 0.229 | 0.719 | 0.213 |
| SO3 | 10.1 | 0.348 | 18.5 | 0.449 |
| Cl | 2.3 | 0.0363 | 1.15 | - |
| K2O | 2.03 | 3.62 | 1.4 | 2.53 |
| CaO | 17.1 | 2.22 | 14.5 | 1.73 |
| TiO2 | 1.33 | 0.212 | 1.06 | 0.17 |
| Cr2O3 | 1.16 | 0.0886 | 1.18 | 0.0611 |
| MnO | 0.223 | 0.0484 | 0.272 | 0.042 |
| Fe2O3 | 16.7 | 2.99 | 22.4 | 3.64 |
| CoO | 0.0314 | | 0.0411 | |
| NiO | 0.698 | 0.0326 | 0.557 | 0.0191 |
| CuO | 0.0675 | 0.0235 | 0.0604 | 0.0252 |
| ZnO | 0.51 | 0.242 | 0.234 | |
| Ga2O3 | 0.00461 | | 0.00473 | |
| Br | 0.0169 | | 0.016 | |
| SrO | 0.165 | 0.493 | 0.223 | 0.0484 |
| ZrO2 | 0.0397 | | 0.0267 | |
| MoO3 | 0.0255 | | 0.0309 | |
| BaO | 0.109 | | 0.107 | 0.0622 |
| PbO | 0.0401 | | 0.0243 | |

3.2. 연소특성

Fig 2.는 연소를 시작하여 슬러지/석탄 투입후
 2시간 뒤부터 연소로내 온도 분포를 선화탄만을
 연소했을 때와 비교하여 나타낸 것이다. 주입열
 량은 두 경우 모두 70kW 내외로 유사하다. 슬러
 지와 석탄을 혼소했을 때 연소로 주입구 부근
 (2.1m)에서 온도의 감소가 일어난다. 이는 석탄/
 슬러지 혼합물의 증발잠열 손실로 이해된다. 4m
 이상에서는 다시 연소로의 온도가 상승하는데 이
 는 석탄과 슬러지에 포함된 휘발분이 연소하기 시
 작하는 것으로 이해된다. 4m 이상 높이부터 축
 방향 온도분포는 석탄만을 연소하였을 경우와 같
 이 고른 온도 분포를 나타내었으며 이는 선화탄의

높은 휘발분과 슬러지의 휘발분이 쉽게 착화하기 때문이다. 따라서 연소성은 비교적 좋은 것으로 나타난다.

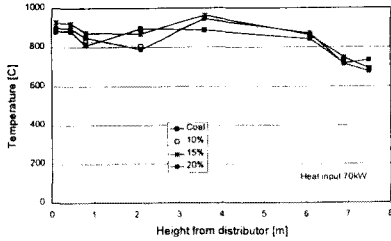


Fig. 2. Vertical temperature distribution during combustion

Fig. 3는 배연중 주 성분과 주 오염성분을 나타낸 것이다. 배연중 SO₂의 발생은 석탄의 낮은 황 함유량과 무기물에 의한 회재중 높은 Na, Ca 등 무기물에 의한 SO₂ 흡수로 인하여 농도는 매우 낮다^{8,9)}. 질소산화물은 상용유동층과 달리 연소로 하부를 과잉공기비가 높은 산화상태에서 조업하였다. 따라서 NO_x 발생량은 상용보일러의 경우보다는 높다. 그러나 석탄만을 연소했을 경우와 차이가 없으며 이는 슬러지에 포함된 질소 성분이 전체 조성에 크게 영향을 못 미치기 때문이다⁷⁾.

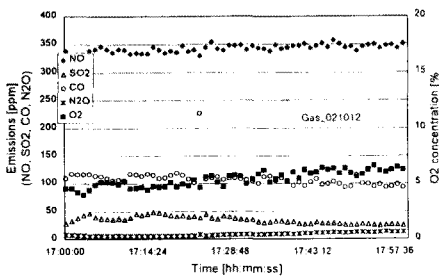


Fig. 3. Emission characteristics of major pollutants

NO_x의 비는 온도 증가를 따라 증가하며 N₂O는 미량 발생하였으며 일반적인 석탄 순환유동층 연소로의 경향과 같이 온도의 증가를 따라 감소하였다¹⁰⁾.

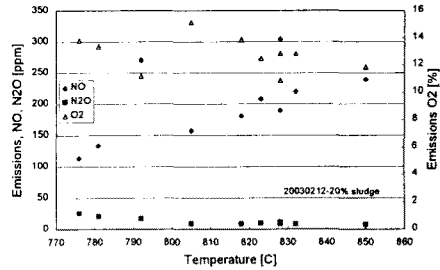


Fig. 4. Emission characteristics of nitrogen oxide with respect to temperature

연소로 배연 중 Cl이나 HCl의 발생은 연소로의 열교환기 부식 뿐 아니라 dioxine 등 유해 유기 염소와의 관계성 때문에 매우 민감한 사안이다^{11,12,13)}. Table 8에서 배연중 Cl₂는 최대 6ppm으로 나타났다. HCl은 불검출이었으며 HCN은 17ppm 미만으로 나타나 유기질소나 HCl의 배출우려는 없는 것으로 나타난다.

Table 8. Emission rate of chlorine and ammonia as a result of combustion

| sludge ratio Component | 5% | 10% | 15% | 20% |
|---------------------------|----|-----|-----|-----|
| Cl ₂ | 0 | 0 | 3 | 3 |
| HCN | 17 | 17 | 7 | 10 |
| NH ₃ | 0 | 0 | 0 | 0 |

상용 순환유동층 연소로를 가정한 물질수지와 에너지수지를 Table 9에 나타내었다. 슬러지/석탄 혼합물의 발열량은 4965kcal/kg으로 계산하였고 과잉공기는 35% 연소로의 연소효율을 97%로 가정하였다. 석탄/슬러지의 혼합비는 80/20이다. 석탄중의 수분이 약 10%이기 때문에 석탄 수분의 증발잠열에 의한 열손실은 약 4%이며 슬러지 수분의 증발 잠열손실은 2%이다. 슬러지의 이론 고위 발열량이 561kcal/kg이므로 슬러지열량의 1/5 가량의 열이 슬러지 수분의 증발잠열로 소모되는 것이다. 또한 슬러지 수분의 증발잠열에 의해 보일러 효율은 약 2% 감소한다.

Table 9. Energy and mass balance for commercial boiler (excess air: 35%, coal/Sludge: 80/20, Moisture in sludge: 82%)

| | Temp. | Solid | Heat | Gas | Heat | Q | % |
|-----------------|--------|--------------|----------------|-----------------|-----------|-----------|---|
| | [K] | [kg/kg coal] | [kcal/kg coal] | [kgmol/kg coal] | [kcal/kg] | [kcal/kg] | |
| Reference | 298.15 | | | | | | |
| Environment | 293 | | | | | | |
| Coal combustion | | 1 | 4964.9 | | | 4964.9 | |

| | | | | | | | |
|------------------------------|-------|--------|----------|--------|---------|--------|-------|
| Unburnt loss | | | | | | | |
| CO->CO2 | | | 4.43E-05 | 2.99 | | | |
| CH4->CO2+H2O | | | 2.21E-05 | 4.70 | | | |
| C->CO2 | | | 0.001561 | 146.81 | | | |
| <sum> | | | | 154.50 | -154.50 | -3.11 | |
| C.E. [%] | 96.89 | | | | | | |
| Radiation loss[%] | 1 | | | -49.65 | -49.6 | | |
| Incoming dry air | 316 | | 0.3224 | 40.19 | 40.2 | 0.81 | |
| H2O lat. Coal | | | 0.0192 | 200.95 | -201.0 | -4.05 | |
| H2O lat. Sludge | | | 0.0101 | 105.46 | -105.5 | -2.12 | |
| H2O lat. air | | | 0.0066 | 68.88 | 68.9 | 1.39 | |
| Fuel specific | 293 | 1 | -0.93 | | | -0.9 | |
| Sulfation/S | | 0.0011 | 3.91 | | | 3.9 | |
| Lime. calci./Ca | | 0.000 | 0.00 | | | 0.0 | |
| Lime. specific Energy | 293 | 0.000 | 0.00 | | | 0.0 | |
| Bed drain | 1123 | 0.017 | 2.48 | | | -2.5 | -0.05 |
| Gas to baghouse | 403 | 0.067 | 1.260 | 0.3475 | -273.75 | -272.5 | -5.49 |
| Design margin [%] | 1 | | | | | -49.6 | |
| Boiler efficiency by HHV [%] | 85.4 | | | | | | |

슬러지의 함수율은 폐수 처리장에서 입수된 함수율 82.5%의 것과 건조된 분말 형태의 함수율 33.4%을 대상으로 각각 석탄/슬러지의 비에 따른 슬러지 수분의 잠열손실량(kcal/kg coal), 잠열손실의 비율 (% fuel), 보일러 효율의 변화, 59MWth 보일러의 연료(석탄/슬러지 혼합연료) 공급량을 Table 10에 나타내었다. 함수율 82.5%의 슬러지를 석탄과 혼합한 경우 슬러지 비율이 0 부터 30%까지 변화함에 따라 보일러 효율은 87.6%에서 83.6%까지 변화하였고 이에 따라 59MWth 출력을 내기 위해 필요한 연료량이 2.62 부터 3.8kg/s로 변화하였다. 연료량 3.8kg/s의 경우 순수 석탄량은 3.8×0.7=2.66이므로 약 0.04kg/s의 연료가 슬러지 소각을 위해 더 소모되는 것이다.

2002년 11월 12일 log sheet에 따르면 P사는 하루동안 1호기가 207ton의 석탄을 사용하였고 2호기가 158ton의 석탄을 사용하였다. 이 공장에서 폐수 슬러지는 일 평균 60ton 발생하였다. 따라서 석탄과 슬러지를 혼합하면 전체 혼합연료 중 슬러지는 14%가 되어 안정 연소범위 이내가 된다. 따라서 이론적으로는 건조 감량이 불필요하다.

보일러 효율 88%에 출력량 59MWth(증발량 80ton/h) 보일러를 Table 2의 조성을 갖는 선화탄

으로 연소할 경우 석탄 공급량은 Table 10에서 2.62kg/s이다. 석탄/슬러지가 85/15인 경우 필요한 연료량은 3.1kg/s이므로 순수 석탄량은 2.63kg/s이며 0.01kg/s의 석탄이 또는 석탄 1kg 당 0.004kg의 석탄이 수분의 증발 잠열에 의한 보일러 효율 감소를 보충하게 된다. 따라서 2002년 11월 12일 현재를 감안하면 1일 0.004×(207 + 154) = 1.44ton/day의 석탄을 더 사용하는 것이 되어 현실적으로 연료 손실은 미미하다.

건조의 필요성은 제때 연소하지 못하므로서 발생하는 슬러지의 보관시설의 어려움, 저장중 발생하는 악취나 부패, 기술적으로는 석탄/슬러지 혼합 연료의 함수율 과다에 따른 연료공급 라인의 불안정문제, 연소후 배가스 중 백연 발생 등을 감안하여 결정하여야 한다. 함수율 82.5% 슬러지를 함수율 33.4% 까지 건조한 경우 60ton/day×(1-0.825)/(1-0.334)=15.76ton/day 즉 15.8ton/day로 감량된다. 2002년 11월 12일 현재로 계산하면 혼합연료의 슬러지 비율은 15.8/(207ton/day 1호기 + 154ton/day 2호기 + 15.8ton/day sludge) = 4.2%가 된다. Table 10에서 석탄/슬러지 비가 95/5 인 경우 같은 출력의 보일러가 필요한 연료량은 2.72kg/s가 된다. 순수 석탄량은 2.58kg/s가 되어 오히려 0.14kg의 이득 즉 석탄 1kg당 0.05kg의 석탄 절감효과가 발생한다.

Table 10 Heat loss by moisture of coal/sludge mixture in case of commercial boiler system

| Moisture content of sludge (%) | Coal/Sludge | latent Heat loss by moisture in sludge, (kcal/kg fuel) | Heat loss by latent Energy of moisture in sludge (%) | Boiler efficiency (%) | Fuel feed rate, (kg/s, 59MWth CFB Boiler) |
|--------------------------------|-------------|--|--|-----------------------|---|
| 82.5 | 70/30 | 158.2 | 3.6 | 83.6 | 3.80 |
| | 80/20 | 105.5 | 2.1 | 85.4 | 3.31 |
| | 85/15 | 79.1 | 1.5 | 86.2 | 3.10 |
| | 90/10 | 52.7 | 0.9 | 86.9 | 2.92 |
| | 95/5 | 26.4 | 0.5 | 87.6 | 2.82 |
| | 100/0 | 0 | 0 | 88.2 | 2.62 |
| 33.4 | 70/30 | 112.6 | 2.3 | 85.7 | 3.34 |
| | 80/20 | 75.1 | 1.4 | 86.7 | 3.06 |
| | 90/10 | 37.5 | 0.7 | 87.5 | 2.83 |
| | 93/7 | 26.3 | 0.6 | 87.7 | 2.76 |
| | 95/5 | 18.8 | 0.3 | 87.8 | 2.72 |

3.3. 건조기 분석

Table 10에서와 같이 함수율 33.4%까지 건조할 경우 건조기의 물질 및 열수지와 경제성을 분석하

였다. 건조기 열 공급은 경유 버너를 가정하였다. 슬러지 발생량을 60ton/d로 가정하고 건조기는 1일 15시간 가동한다고 가정한다. 건조기로 공급되는 열풍의 온도는 810K(537°C)로 정하고 폐열은 423K(150°C)의 열풍으로 배출된다. 수분의 응축단은 설계에서 배제한다. 건조기의 열수지를 Table 11에 나타내었다. 건조기로 공급되는 열풍의 온도를 810K로 낮추기 위하여 전체 공기를 연소공기의 4배 공급하였다. 건조기의 열효율은 약 76%가 된다.

Table 11. Energy and mass balance for dryer

| Heat Calculation | Solid | Heat | Gas | Heat |
|--|---------|-----------|------------|-----------|
| [K] | [kg/kg] | [kcal/kg] | [kgmol/kg] | [kcal/kg] |
| Reference | 298.15 | | | |
| Environment | 293 | | | |
| Fuel combustion | 1 | 11,731 | | 11731 |
| Unburnt loss | | | | |
| CO → CO ₂ | | | 1.42E-4 | 67592 |
| CH ₄ → CO ₂ + H ₂ O | | | 3.50E-5 | 212224 |
| C → CO ₂ | | | 1.24E-3 | 94032 |
| <sum> | | | | 133,48 |
| C.E. | 98,862 | | | |
| Air | 293 | | 2.0608 | -35,98 |
| H ₂ O lat. flue | | | 1.12E-1 | -10476 |
| H ₂ O lat. air | | | 4.20E-2 | 10476 |
| oil specific | 293 | 1 | -2.6E+0 | -2,575 |
| Sulfation/S | | 0 | 3619 | 0 |
| lime. caloi./Ca | | 0 | 128,899 | 0 |
| lime spe. | 293 | 0 | -0.9122 | 0 |
| Fan credit | | | 2.06 | 118 |
| Flue gas out | 423 | | 2.10 | 9.1E+2 |
| Radiation loss | 1 | | 117,308 | -117.3 |
| Design margin | 1 | | 117,308 | -117.3 |
| Dryer efficiency | | | | 0,7672 |

건조기의 시스템 구성과 공정수지를 Fig. 5에 나타내었다. Dryer를 중심으로 왼쪽의 값은 건조기로 들어가기전의 열용량과 무게를 나타내었고 오른쪽의 값은 건조 이후의 값이다. 그럼에서 시간당 건조기의 부하는 탈수 슬러지 기준 4000kg/h이며 건조 슬러지는 1051kg/h 발생한다.

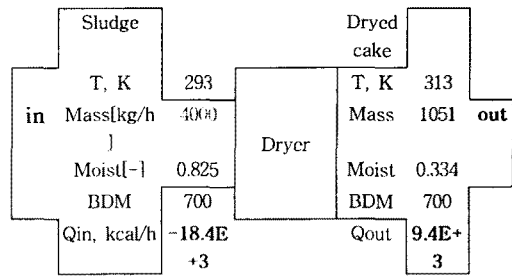


Fig. 5. Energy and mass balance of sludge for dryer

Fig. 6에 건조기의 버너와 가스부분의 공정수지를 나타내었다. Burner를 중심으로 Diesel 연료유와 연소공기가 들어와 연소되며 배연(Flue gas)이 발생한다. 이때 건조기의 배 온풍은 기화된 수분의 증발잠열을 포함한다. 배연의 온도와 열용량을 Dryer 하단 오른쪽에 나타내었다. Dryer 상단의 값은 건조 후 가스의 조성 과 열용량을 나타내었다. 본 공정을 가동하기 위한 경유의 유량은 시간당 324liter, 하루에는 4860liter의 연료가 필요하다. 석탄과 혼소하였을 경우 일 1.44ton석탄이 더 필요한 것과 대비하면 상당한 연료비 지출이 발생한다.

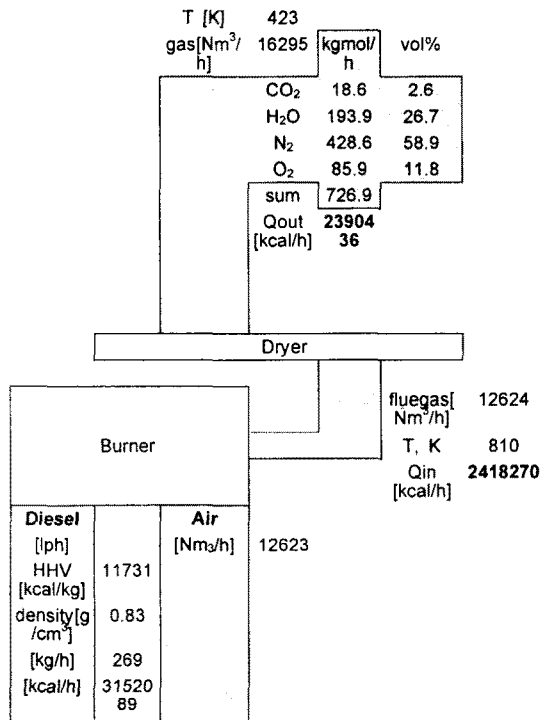


Fig. 6. Energy and mass balance of gas for dryer

경제적인 슬러지 건조를 위해서는 별도의 연소열원을 사용하는 것 보다는 보일러의 스팀라인 또는 폐열을 열원으로 사용하는 것이 바람직하다. 이 경우 간접가열이기 때문에 폐열의 손실이 적을 뿐 아니라, 건조로 배가스의 총량이 적어 배가스 중의 수분 응축이나 악취처리 등의 부담도 더욱 줄어든다.

4. 결론

순환유동층 연소로에서 염색공단 슬러지와 석탄의 혼소는 석탄/슬러지 혼합비가 90/10에서 80/20까지 양호하고 원활하게 이루어졌다. 연구의 결과는 다음과 같이 요약된다.

- 1) 함수율 80% 슬러지를 석탄대비 20%까지 혼합하여 운전하였을 때에도 연소특성은 원활하였다.
- 2) 실험장치에서의 연소효율은 95% 이상으로 석탄만 연소하였을 때와 유사하게 나타났다.
- 3) 슬러지 연소에 따라 나타나는 배연특성 중 NO_x의 발생은 석탄만을 연소했을 경우와 거의 유사하였다.
- 4) SO₂는 석탄의 낮은 황 함량과 슬러지가 함유한 Ca 등 알칼리 금속에 의하여 흡수되어 배연농도가 매우 낮았다.
- 5) 배연중 Cl₂은 6ppm 미만으로 나타났으며, HCl은 불검출이었고, HCN은 17ppm 미만으로 나타나 유기질소나 HCl의 배출우려는 없는 것으로 나타났다.
- 6) Cl은 주로 비산회에 농축되었으며 하부회에는 잔류하지 않았다.
- 7) 슬러지 혼소에 따라 보일러 효율이 감소하므로 전체 연료 공급량은 늘어나게 된다. 그러나 현재 운전조건이 증발량 70Ton/h 정도이므로 슬러지 혼소에 의해 공급부하가 증가하더라도 공급장치의 부하과다 문제는 없으리라 본다.
- 8) 석탄/슬러지 혼소에 따라 슬러지 수분에 의한 증발잠열손실로 보일러 효율 감소가 일어난다. 함수율 82.5% 슬러지 20% 혼소시 약 2.1%의 보일러 효율감소가 일어난다.
- 9) P사의 경우 하루동안 1호기가 207ton의 석탄을 사용하였고, 2호기가 158ton의 석탄을 사용하였다. 슬러지는 평균 60ton/일 발생하므로 석탄과 슬러지를 혼합하면 전체 혼합연료 중 슬러지는 14%가 되어 안정 연소범위 이내가 된다.
- 10) 건조장치의 설치는 시설비와 운전비의 지출을 유발한다. 그러나 보일러 효율을 최대한 유지하고 슬러지의 보관성 향상과 연소로의 정상운전을 위하여 슬러지의 건조가 권장된다.

참고문헌

1. IEA-FBC: International Energy Agency - Fluidized Bed Conversion Year Report 2001,
2. 김병채: 액상 석유화학 폐기물 처리 소각설비 및 폐열회수 기술 개발 (II), 연구보고서, 동력자원부 93D102-627DP1 (1993)
3. 선도원: 염색공단 슬러지 상용순환유동층 소각기술개발, 연구보고서, 에너지기술연구원 KIER A2-5346 (2003)
4. D.-Ducarne, E., Marty, E., Lucien, D.,: "Co-combustion of Coal and Municipal Solid Waste in a Circulating Fluidized Bed," Fuel, Vol. 77, No. 12, pp. 1311-1315 (1998).
5. 박영옥 등, "하폐수 슬러지의 에너지화 재이용 기술개발," 한국에너지기술연구소 보고서 KIER-A02105, 249pp. (2000).
6. 선도원 등: "열병합발전을 위한 순환유동층연소 기술개발"한국에너지기술연구원 보고서, 산업자원부, (1998)
7. 선도원 등: "산업용 유동층 연소로 진단 및 개선방안 연구", 한국에너지기술연구원 보고서, 산업자원부, (2003).
8. Wey, M.-Y. et al.: "Pollutant in incineration flue gas", Journal of Hazardous Materials, Vol. B82, pp. 247-262 (2001).
9. Bodenan F., Deniard PH.: "Characterization of Flue Gas Cleaning Residues from European solid Waste Incinerators", Chemosphere, Vol. 51, pp. 335-347 (2003)
10. Werther J., Ogada T., Philippek C., " N₂O Emissions from the Fluidized-bed Combustion of Sewage Sludges", Journal of the Institute of Energy, Vol. 68, pp.93-101 (1995)
11. Wang, K. S., Chiang, K. Y., Tsai, C. C., Sun, C. J., "Effect of Chlorides on Emissions of Hydrogen Chloride Formation in Waste Incineration," Chemosphere, Vol. 38, No. 7, 1571-1582 (1999)
12. Liu G.-Q et al.: "Fundamental Study of the Behavior of Chlorine during the Combustion of Single RDF", Waste Management Vol 21, pp. 427-433 (2001)
13. Lawrence A. D., Bu J. : "The Reactions Between Ca-based Solids and Gases Representative of those found in a Fluidized-bed Incinerator" Chemical Engineering Science, Vol. 55, pp. 6129-1637 (2000)