

기포 유동층 연소로에서 유기성 슬러지와 역청탄 혼합 연소 특성

아비도프 아지즈 슈쿠로비치^{1,2}, 장현태^{3*}

¹타슈켄트주립기술대학 석유 및 가스 프로세싱학과, ²크레퍼스, ³한서대학교 화학공학과

Mixing Combustion Characteristics of Organic Waste Sludge and Bituminous Coal in a Bubble Fluidized Bed Combustor

Aziz Abidov Shukurovich^{1,2}, Hyun-Tae Jang^{3*}

¹Dept. of Oil & gas Processing, Tashkent State Technical University

²CRAFFERS, LLC.

³Dept. of Chemical Engineering, Hanseo University

요약 이산화탄소에 의한 지구 온난화를 방지하기 위하여 화석연료 사용 저감에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다. 이산화탄소 저감을 위하여 유기 폐기물 소각과정에서 에너지 생산은 화석연료 사용 저감을 위한 효율적 방법이다. 본 연구는 기포유동층연소로에서 유기성 폐기물 슬러지와 유연탄을 혼합 연소특성을 고찰하였다. 열전달과 물질전달이 우수한 유동층 연소로가 폐기물 소각에 효율적이므로 내경 0.155m, 높이 2.2m의 유동층 연소로에서 혼합연소를 수행하였다. 하수슬러지, 염색슬러지, 비료슬러지를 유기성 폐기물로 사용하였다. 유동층연소로에서 슬러지 종류와 혼합비에 따른 연소효율, 비산유출율, 층내 온도분포, 압력요동 특성, 배출가스 농도를 측정하여 혼합연소 특성을 해석하였다. 슬러지 물리화학적 특성에 의하여 혼합연소 특성은 영향 받으며, 비산유출율과 층내 체류시간에 의하여 연소효율이 영향을 받았다. 유동층에서 해석된 혼합연소 특성 결과로 비산입자 순환이 이루어지는 순환유동층에서 혼합연소 수행시 슬러지의 높은 연소효율을 얻을 수 있을 것으로 예측하였다. 슬러지의 높은 회분 함유량으로 상부 영역에서 높은 온도분포를 나타내었으며, 마모도가 높은 슬러지는 freeboard 연소가 증가함을 알 수 있었다.

Abstract Energy production from organic waste incineration provides an efficient means of reducing fossil fuel consumption. In this study, the combustion characteristics of mixtures of organic waste sludge and bituminous coal were investigated using an 0.155m I.D./2.2m high fluidized bed combustor. Sewage sludge, dye sludge, and fertilizer sludge were used as organic wastes. Combustion characteristics were analyzed using elutriation rate constants, combustion efficiencies, temperature profiles versus axial bed height, pressure fluctuation properties, and flue gas compositions for different sludge types and mixing ratios. Mixed combustion characteristics were affected by the physicochemical properties of sludge. Combustion efficiency was primarily affected by elutriation rate constant and residence time in the fluidized bed. Mixed combustion characteristics showed high sludge combustion efficiency was obtained when mixed combustion was performed using a circulating fluidized bed. In addition, sludges with a high abrasion rate increased freeboard combustion.

Keywords : Waste Organic Sludge, Bituminous Coal, Fluidized Bed, Mixing Combustion, Combustion Efficiency

*Corresponding Author : Hyun-Tae Jang(Hanseu Univ.)

email: htjang@hanseo.ac.kr

Received March 27, 2023

Accepted June 2, 2023

Revised April 17, 2023

Published June 30, 2023

1. 서론

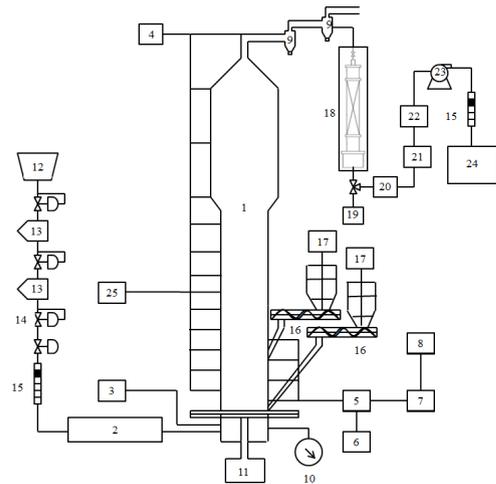
세계적으로 감염병 사태 등으로 폐기물 발생량이 증가하고 있다. 탄소배출 감소를 위한 노력으로 폐기물 발생은 줄어들 것으로 예상되고 있으나, 탄소배출 저감의 혁신적 기술 개발 이전까지는 소비 증가에 따라 증가될 것으로 예측된다. 하수도 통계에 따르면, 2014년 365만톤에서 2020년 연간 슬러지 발생량은 422만 톤으로 지난 10년간 71.7% 증가했으며, 이 중 201만 톤(47.8%)을 재활용 등으로 자체 처리하고 172만 톤(40.6%)은 외부에 위탁 처리하고 있다[1]. 또한 2017년 발생된 폐기물을 처리하는 과정에서 배출된 온실가스는 16.8백만톤CO₂ eq.으로, 국가 총배출량의 2.4%를 차지하고 있으며, 2017년 전체 전력 발전량 중 석탄발전에 의한 발전량은 43.1%이다[2]. 따라서, 분해과정에서 이산화탄소와 메탄을 방출하는 유기성 오니를 석탄 대체로 사용하여 화석연료 석탄 사용량을 줄이고 연소로에서 안정화 과정으로 에너지를 획득할 수 있다. 최근 경제성장으로 우즈베키스탄의 심각한 문제 중 하나가 폐기물 발생 증가와 적절한 폐기물 관리 문제이다. 대한민국의 동등하게 해양투기 금지와 매립지 확보 농업 이용 감소로 인하여 처리에 대한 문제가 발생된다. 매립은 소화에 의하여 메탄과 이산화탄소 발생만이 아닌 NO_x 등의 온실가스 발생이 일어난다[3]. 우즈베키스탄은 법률에서 신기술 처리 방법을 사용하여 고형 폐기물 및 하수 재사용에 대한 표준을 정하고 있으며, 우즈베키스탄 영토내 처리 시설이 기준에 따라 운영되고 있다[4]. 유기성 오니의 연료로 사용은 전력 생산을 위한 화석 연료 소비를 감소시키므로 대체 에너지원이 확보되기 이전까지 필수적이다. 유기폐기물을 이용한 에너지 전환은 많은 연구자들에 의하여 연구가 진행되고 다양한 연소공정이 개발되었다[5,6]. 화석 연료는 대한민국 에너지 생산의 62.4%를 차지하며, 석탄은 국내 전력 생산의 44% 정도를 차지하는 연료이다[7]. 화석연료 연소기술과 관련된 문제로 SO_x, NO_x와 같은 산성가스 대기오염물질 배출 제어이었으나 최근 CO₂와 미세분진 제어도 화석연료 발전소 설계 및 운영에서 결정적인 요소로 작용한다. 유기성 폐기물 연소는 전열강도가 높고 연료 제약이 적은 유동층연소(FBC)에서 처리하는 방법을 최선 방법으로 고려할 수 있다. 유동층에서 유기성 폐기물의 연소 처리 과정에 대하여 다양한 실증과정에서 효율적 방법과 우수한 결과를 나타내었다[8]. 다양한 연료와 혼합연소 가능성 연구결과도 발표되었다[9,10]. 따라서 본 연

구에는 다양한 3종의 유기성 오니와 역청탄을 유동층에서 연소실험을 과잉공기비, 유동화속도 및 혼합비 등에 대하여 수행하여 유기성 오니와 석탄의 혼합연소특성을 도출하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용한 유동층연소로를 Fig. 1에 나타내었다.



- | | | |
|----------------------|---------------------|-------------------|
| 1. FBC | 2. Pre-heater | 3. Thermocouple |
| 4. Temp. recorder | 5. Press.transducer | 6. Power |
| 7. Amplifier | 8. P.C. | 9. Cyclone |
| 10. Monometer | 11. Discharger | 12. Compressor |
| 13. Regulator | 14. Air filter | 15. Flowmeter |
| 16. Screw feeder | 17. Hopper | 18. Filter |
| 19. Back press. reg. | 20. Condenser | 21. Coarse filter |
| 22. Fine filter | 23. Suction pump | 24. Gas analyzer |
| 25. Cooling system | | |

Fig. 1. Schematic diagram of measuring of sub-bituminous coal spontaneous combustion.

연소로 하부는 내경 0.155m를 사용하였으며, 상부 freeboard는 비산유출을 감소시키기 위하여 내경 0.21m로 제작되었으며, 높이는 2.2m이다. 분산판은 노즐 직경 1.0mm 다공판으로 개공비 1.53%를 사용하였다. 석탄과 유기성오니의 주입은 스크루공급기를 사용하였으며, 바닥재 배출은 진동배출기를 이용하였다. 배출관에는 사이클론을 2개 설치하여 비산입자를 포집하였으며, 일부의 배출가스는 필터와 제습기 통과 후 가스분석기를 사용하여 산소, 이산화탄소, 일산화탄소, 질소산화

물, 황산화물의 농도를 측정하였다. 층상부층 전영역에 열전대를 설치하여 온도를 기록하고 층하부 분산판으로부터 0.05m 간격으로 4개의 압력전달기를 설치하여 압력요동을 측정하였다.

2.2 실험방법

유동층에 층물질로 바닥재를 충전한 후 설치된 예열기를 이용하여 공급공기를 예열하여 층온도를 400℃로 가열한 후 착화제로 질산바륨이 함유된 착화탄을 주입하여 역청탄의 발화온도 이상인 650℃로 승온이 되면 석탄과 유기성 오니를 각각의 공급기를 이용하여 공급하고 층 내부 및 외부에 설치된 냉각관을 이용하여 층내 온도를 일정하게 유지하였으며, 층내 압력자료로부터 배출 속도를 조절하여 일정한 중회비를 유지하면서 실험을 수행하였다. 온도의 측정은 분산판으로부터 0.05m 간격으로 4지점과 0.15m 간격으로 4지점 0.5M 간격으로 3지점을 K형 열전대로 측정하였으며, 분산판으로부터 0.05m 간격으로 4지점에서 압력요동 신호를 압력전달기를 이용하여 10ms 간격으로 측정하였다. 배출가스의 농도는 사이클론 통과 후 필터를 거쳐 NDIR방식 연소가스 측정기(Horiba PG-250)를 이용하였다.

2.3 시료

본 연구에 사용된 석탄은 역청탄이며, 유기성폐기물은 다음 Table 1에 나타난 바와 같이 3종을 사용하였다. 유기성 오니의 밀도와 회분함량은 사용된 응집제에 영향을 크게 받으며, 하수슬러지가 사용된 슬러지의 평균값과 같이 나타나고 있다. 유동층연소로의 주입은 8 mesh 이하 입자를 사용하였으며, 입도분포는 Fig. 2에 나타내었다. 입자경을 8mesh(2.36mm) 이하로 사용한 것은 실험에 사용한 유동층의 주입구가 1인치 파이프이므로 입자의 브릿지 현상을 억제하고 원활한 주입을 위하여 1/8배를 정한 것입니다. 그림에서 하수슬러지의 평균 입경이 가반크게 나타나 있고, 하수슬러지의 경우 응집제의 사용량이 많으므로 큰 입경을 나타내었다. 각 연료 시료의 활성화에너지는 Kissinger 법[11]과 Friedman법[12]으로 각각 계산하여 나타내었다[13]. 석탄보다 슬러지 활성화에너지가 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Table 1. Analysis of Coal and Sludge.

Fuel	Sewage Sludge	Dyeing Sludge	Fertilizer sludge	Bituminous coal
Density(kg/m ³)	2,818	3,753	1,571	1,393
Proximate analysis (wt.%)				
Moisture	6.5	10.6	30.1	0.7
Ash	43.0	31.0	21.4	10.0
Volatile	4.3	13.6	16.3	31.2
Fixed carbon	46.2	44.8	32.2	58.8
Ultimate analysis (wt.%, dry basis)				
C	29.2	38.5	58.5	75.0
H	5.4	7.0	8.0	4.8
O	22.4	21.8	20.0	12.0
N	4.3	4.2	13.6	1.3
S	0.6	0.4	0	0.1
Other Characteristics				
Heating value (kcal/kg)	3,202	4,002	2,555	7,074
Bulk density (kg/m ³)	819	927	495	372

Table 2. Activation energy determined by Kissinger and Friedman Methods[11,12]

Method	Sewage	Dyeing	Fertilizer	Coal
Kissinger(J/mol)	128.36	201.6	124.3	246.4
Friedman(J/mol)	136.8	211.2	150.7	254.8

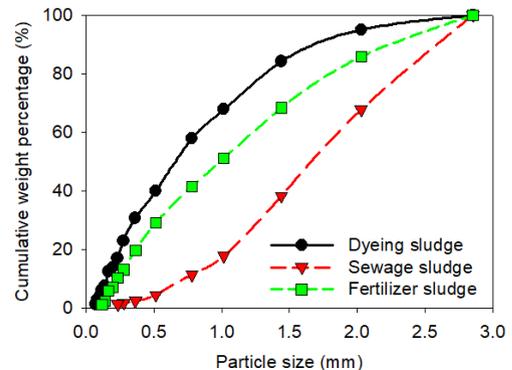


Fig. 2. Cumulative particle size distribution of feeding sludge.

3. 결과 및 고찰

3.1 슬러지 혼합에 의한 연소효율

Fig. 3은 3종의 슬러지를 석탄과 중량비로 5, 10, 15, 20% 혼합하여 연소한 경우 유동층 하부에서 배출되는 바닥재(bottom ash)를 채취하여 연소효율을 Eq. (1)의 방법으로 측정하여 나타낸 결과이다. 바닥재의 경우 하

수슬러지의 경우 거의 완전연소인 99.7에서 99.9로 나타나고 있으며, 염색슬러지가 가장 낮은 98.5%를 나타내고 있다. 또한 퇴비슬러지의 경우 슬러지 혼합비 증가에 따라 바닥재 연소효율이 증가하는 경향을 나타낸다.

$$\eta(\%) = (1 - \frac{\text{unburned combustile}}{\text{feded combustile}}) \times 100(\%) \quad (1)$$

유동층 연소효율은 상부 비산유출량과 비산유출입자의 연소효율이다. Fig. 4에 1차 및 2차 사이클론에서 포집된 비산유출입자 연소효율을 측정하여 나타내었다. 모든 슬러지가 혼합비 증가에 따라 낮아지는 경향의 연소효율을 나타내고 있으며, 하수슬러지의 경우 연소효율 감소비가 매우 작게 나타나고 있다. Fig. 4에 나타낸 연소효율은 상부 유출된 입자의 연소효율로써 비산유출량이 고려되어야 미연분의 유출을 알 수 있으므로 Fig. 5에 비산유출량을 정규화한 elutriation rate constant로 슬러지 혼합비에 따라 나타내었다. 비산재의 연소효율은 각 슬러지의 물리화학적 특성 차이로 발생하는 것으로 해석될 수 있다. Table 1의 공업분석 결과에서 하수슬러지의 회분 함량은 43%로 염색슬러지와 축산슬러지의 31%, 21.4%보다 10% 이상 높게 나타나고 있다. 이는 응집제의 사용량이 많고 처리수 특성에 따른 것으로 높은 강도를 나타내게 되므로 입자의 마모도가 낮게 나타나게 되며, 슬러지가 유동층에 주입되는 순간 매우 빠른 탈휘발과 연소가 발생된다.

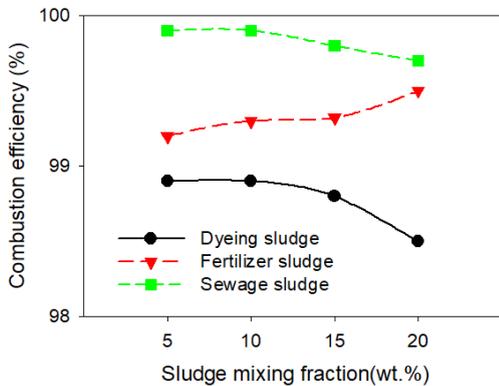


Fig. 3. Combustion efficiency of Bottom ash according to sludge mixing fraction with coal and sludge type (Excess air 50%, Superficial air velocity 0.344 m/s).

하수슬러지의 경우 휘발분이 4.3%로 염색슬러지, 축산슬러지의 13.6%, 16.3% 보다 매우 낮고 고정탄소량이 높다. 유동층에서 입자 마모는 입자간과 입자와 기벽과의 마찰과 충돌로 발생한다. 본 실험에 사용한 슬러지 입

자를 ASTM D5757-95의 방법으로 시험하면 1시간 이내에 전량 비산유출되는 매우 낮은 강도이다. 유동층연소로에서 입자 마모는 입자 주입과 동시에 휘발분의 탈휘발이 발생되고[14] 탈휘발 과정에서 다량의 가스 방출(gas evolution)로 입자 분열이 매우 빠르게 일어난다[15]. 다량의 회분을 함유한 하수슬러지와 염색슬러지의 유출율은 혼합비 증가에 의하여 증가하게 된다.

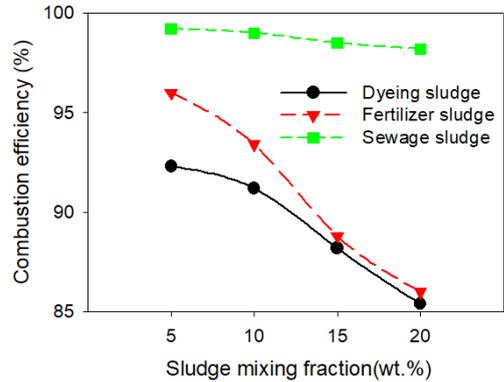


Fig. 4. Combustion efficiency of fly ash according to sludge mixing fraction with coal and sludge type (Excess air 50%, Superficial air velocity 0.344 m/s).

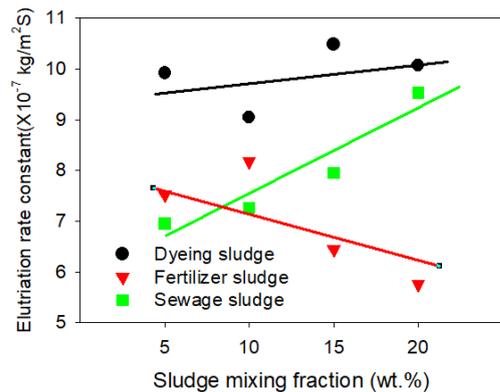


Fig. 5. Elutriation rate constant according to sludge type and mixing fraction.

반면에 매우 낮은 회분 함유량과 높은 수분 함유량을 포함한 축산슬러지의 경우 유출율이 낮아지는 경향이 나타나고 있다. 이를 비산재 연소효율과 비교 고찰하면 다음과 같다. 하수슬러지의 경우 층내에서 마모속도가 느리고, 휘발분 함량이 낮으므로 인하여 in-bed 영역에서 주연소가 일어나며, 비말동반 과정에서 입자의 고정탄소가 연소되며, 비말되어 배출한다. 또한 축산슬러지의 경

우 연소로 주입과 동시에 대부분의 입자가 파쇄되어 비말 동반되며 splash 영역과 freeboard 에서 대부분의 연소가 일어나는 것을 혼합비 증가에 따른 비산재 연소 효율과 비산유출상수 감소를 나타낸 Fig. 4, 5에서 알 수 있다. 염색슬러지의 경우 두 슬러지 평균과 같은 현상이 일어나며, 이는 공업분석결과의 고정탄소, 수분, 회분, 휘발분의 함량으로 설명될 수 있다. 배출가스의 이산화탄소 농도를 Fig. 6에 나타내었다.

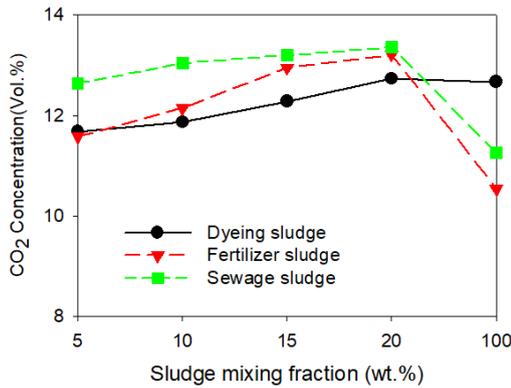


Fig. 6. CO₂ concentration profile according to sludge mixing fraction(Ea=50%, U=0.344m/sec).

하수슬러지의 이산화탄소 농도가 가장 높게 나타나고 있으며, 슬러지만을 연소하여 나타낸 농도에서는 염색슬러지가 높게 나타난다. 100%에서는 층내 고열량의 유연탄이 존재하지 않으므로 층내 영역의 전열강도가 낮으므로 일어나는 현상으로 사료 된다.

3.2 혼합연소 층내 거동 해석

유동층연소로에서 슬러지 혼합에 따른 연소특성을 온도와 압력으로 연소효율과 이산화탄소 농도로 해석한 거동을 검증하기 Fig. 7에 슬러지를 100wt.% 연소한 경우 분산판으로부터 높이에 따른 온도를 나타내었다. 하수슬러지는 주 연소영역이 in-bed 영역이므로 3종의 슬러지 중 가장 높은 온도를 층 하부에서 나타내고 있으며, 축산슬러지의 경우 전 영역에서 낮은 값을 나타내고 있다. 염색슬러지는 하수슬러지와 비슷한 유형으로 하수슬러지에 비하여 낮은 온도를 나타내고 있다. 또한 슬러지 혼합비에 의한 온도 특성을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8은 혼합비 증가에 따라 유동층 하부 층영역 온도가 감소되고 상부 온도가 증가되는 것을 알 수 있었다. 혼합비 5%는 석탄만을 연소한 경우와 거의동일하며, 대부분의 연소가 in-bed와 splash에서 일어나는 것을 알 수 있다. 마모도

가 큰 퇴비 슬러지의 경우 층상부의 온도가 높고 하부 온도가 낮은 것을 알 수 있으며, 20%에서는 in-bed 온도는 크게 감소하는 것으로 나타나고 있다. 이러한 현상으로 마모도가 큰 슬러지는 주입과 동시에 마모되어 상부 연소가 증가하는 것을 알 수 있다.

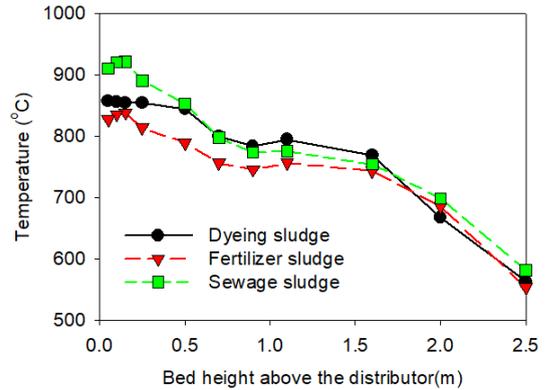


Fig. 7. Temperature profile according to sludge type (Sludge Mixing fraction 100%, Excess air 50%, Superficial air velocity 0.344 m/s).

유동층 연소 변수에 해당되는 공탑속도와 과잉공기비 및 U_o-U_{mf} , U_o/U_{mf} 등이 고려되어야 하나 연소과정에서 발생하는 유동화 정도를 나타낼 수 있는 U_o-U_{mf} , U_o/U_{mf} 는 매우 작은 차이를 나타내므로 고려하지 않았다. 혼합비와 과잉공기비의 계산은 100% 석탄연소시 30%의 과잉공기를 공급할 수 있는 조건을 기준조건으로 선정하고, 이를 바탕으로 동일 산소요구량이 필요한 석탄과 슬러지의 혼합비를 고정한 상태에서 각각의 주입속도를 계산하여 결정되었다. 따라서 혼합비 증가에 따라 주입되는 시료의 양이 증가된다. 이는 역청탄보다 높은 회분 비와 가연분 함량이 작은 슬러지 혼합에 기인한다. 따라서 혼합비의 증가가 전체적으로 낮은 온도를 나타내고 있으나 하수슬러지의 경우 주 연소영역은 in-bed임을 Fig. 9에서 알 수 있었다. 기포 유동층에서 얻어진 연소효율과 연소 영역 및 비산유출율로부터 순환 유동층에서 연소시 매우 높은 연소효율을 나타낼 수 있을 것으로 사료되며, 슬러지가 열매체로 작용하여 thermal NO_x의 발생도 감소할 수 있을 것으로 예측할 수 있다.

각 슬러지 입자의 연소영역의 차이를 규명하기 위하여 유동층의 분산판으로부터 0.05m에서 0.05m 간격으로 4개의 압력전달기를 이용하여 층내 압력요동 신호를 측정하여 다음 Eq. (2)를 이용하여 압력요동의 표준편차를 계산하여 Fig. 9에 나타내었다.

$$S.D. = \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (X(t) - \mu_x)^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

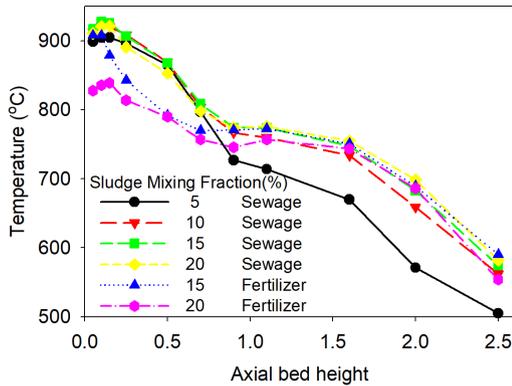


Fig. 8. Temperature profile with bed height according to sewage sludge mixing fraction(Excess air 50%, Superficial air velocity 0.344 m/s).

Fig. 9에서 동일한 연료 주입속도에 공기 공급을 증가시켜 과잉공기비를 변수로 측정한 결과이다. 따라서 과잉공기비 증가와 공탑속도 증가가 일어나는 조건의 실험으로 U_o-U_{mf} , U_o/U_{mf} 가 증가되어 층내 유동화 강도 증가가 일어난다.

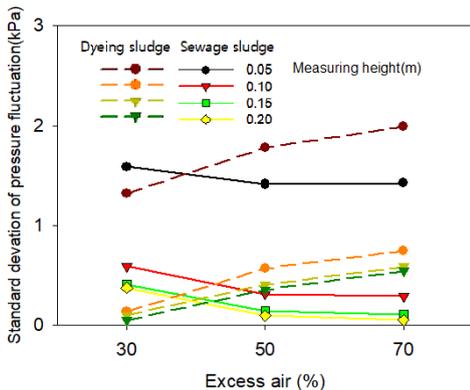


Fig. 9. Standard deviation of pressure fluctuation with measuring height above the distributor according to excess air ratio(sludge mixing fraction 20%).

하수슬러지의 In-bed 영역에서 연소가 염색슬러지보다 높게 나타나며, Fig. 4, 5에 나타난 바와 동일하게 비산재의 연소효율이 높다. 유동층에서 압력요동의 표준편차는 기포 빈도와 크기 증가에 따라 증가하며, 입자의 탈휘발 현상 및 연소에 의한 입자의 가스필름이 형성되는

경우 입자의 유효성 밀도(effectiveness density)가 감소되어 나타나게 된다[16]. 연소와 탈휘발 등은 표준편차를 감소시키게 된다. 따라서 상대적으로 층상부에서 연소가 일어나는 염색슬러지는 공탑속도 증가에 따라 압력요동의 표준편차가 증가되고, 하수슬러지는 미미한 감소가 일어난다.

이러한 특성으로 연소강도를 높이고 순환흐름이 있는 순환유동층에서는 축방향으로 전체 영역에서 연소가 격렬히 일어나며, 사이클론에서도 후 연소가 일어날 것으로 해석될 수 있다.

4. 결론

내경 0.155m의 유동층연소로에서 역청탄과 3종의 슬러지 혼합 연소를 과잉공기비, 혼합비에 대하여 기초적 연소특성 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 열전달과 물질전달이 우수한 유동층은 다양한 슬러지의 혼합 연소시 슬러지의 성형과정에서 사용된 무기 응집제 사용량에 의하여 회분 함량이 영향을 받으며, 슬러지 회분 함량과 freeboard 온도로 부터 슬러지의 in-bed 영역 체류시간에 의하여 연소영역에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.
2. 기포유동층에서 회분, 휘발분, 고정탄소 함량에 의하여 층내 연소특성이 다르게 나타나며, 주 연소영역이 변화한다. 마모속도를 촉진시키는 조성을 지닌 슬러지가 상대적으로 층 상부에서 연소가 일어나며, 미연분의 배출이 증가된다.
3. 기포유동층에서 얻어진 슬러지 연소특성과 수력학적 특성으로부터 연료 주입량과 공기 주입량을 증가시켜 연소강도가 강화되면 더 우수한 연소효율을 나타낼 것으로 예측된다.
4. 연소 강도가 높은 순환유동층에서 슬러지 조성과 형상에 관계 없이 높은 연소효율을 나타낼 수 있고, 슬러지 회분은 전량 비산재 형태로 배출될 것을 예측할 수 있다.
5. 석탄 유동층에 슬러지 혼합연소시 혼합비 증가에 따라 유동층 상부 연소가 증가하고 사이클론에서 슬러지 입자 연소 증가에 의한 사이클론 온도 증가를 예측할 수 있었다.

References

- [1] 2020 Sewerage Statistics, Ministry of Environment, 2021.12.31. https://me.go.kr/home/web/public_info/
- [2] Korea 2050 Carbon Neutral Strategy <https://www.KEEP.go.kr/portal/144?action=read&action-value=8a61e818abf030159a4805293880f1b0>
- [3] J. Werther, T. Ogada, "Sewage sludge combustion", *Progress in Energy and Combustion Science*, **25**, pp.55-116 (1999)
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(98\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(98)00020-3)
- [4] National Implementation of Agenda 21: REPUBLIC OF UZBEKISTAN, <https://www.un.org/esa/earthsummit/uzbek-cp.htm#chap21>
- [5] T. Chae, "NOx Reduction by Co-Firing and Reburning of Biomass in 1MWth Coal Combustion", *J. Korean Soc. Combust.*, **25(3)** pp.48-53 (2020)
DOI: <https://doi.org/10.15231/jksc.2020.25.3.048>
- [6] M. Fang, L. Yang, G. Chen, Z. Shi, Z. Luo, K. Cen, "Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed", *Fuel Processing Technology*, **85**, pp.1273-1282 (2004)
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2003.08.002>
- [7] Korea National Indicators System, 2021 <https://www.index.go.kr/>
- [8] S. C. Saxena, C. K. Jotshi, "Fluidized-Bed Incineration of Waste Materials", *Progress in Energy and Combustion Science*, **20(4)**, pp.281-324 (1994)
DOI: [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(94\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0360-1285(94)90012-4)
- [9] S. Frazzitta, K. Annamalai, "Performance of a Burner with Coal and Coal-Bio-Solid Fuel Blends", *Journal of propulsion and power*, **15(2)** pp.181-186 (1999)
DOI: <https://doi.org/10.2514/2.5440>
- [10] D. J. Bayless, A. R. Schroeder, D. C. Johnson, J. E. Peters, H. Krier, R. O. Buckius, "Effects of Natural Gas Cofiring on Ignition of Coal and Coke Particles", *Combustion Science and Technology*, pp.185-198 (1994)
DOI: <https://doi.org/10.1080/00102209408935404>
- [11] H. E. Kissinger, "Reaction Kinetics in Differential Thermal Analysis", *Anal. Chem.*, **29(11)** pp.1702-1706 (1957)
- [12] H. L. Friedman, "Kinetics of Thermal Degradation of Char-Forming Plastics from Thermogravimetry. Application to a Phenolic Plastic", *Journal of Polymer Science*, **6(1)**, 183, (1964)
DOI: <https://doi.org/10.1021/ac60131a045>
- [13] Abidov Aziz Shukurovich, "The Combustion Characteristics of Organic Waste in a Fluidized Bed Combustor", Master's thesis, Hanseo University Seosan, Korea, pp.32-80, (2013)
<http://www.riss.kr/link?id=T13347190&outLink=K>
- [14] A. Soria-Verdugo, N. Garcia-Hernando, L. M. Garcia-

Gutierrez, U. Ruiz-Rivas, "Analysis of biomass and sewage sludge devolatilization using the distributed activation energy model", *Energy Conversion and Management*, **65**, pp. 239-244 (2013)
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.08.017>

- [15] B. Abdelmounaim, V. J. Pierre, "The impact of thermal pre-treatment on oil shale attrition and fragmentation in fluidized bed combustion", *Experimental Thermal and Fluid Science*, **28(7)**, pp. 677-682 (2004)
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exphemflusci.2003.12.004>
- [16] Y. I. Zinov'e, "Effective density of a fluidized bed", *Journal of engineering physics*, **31**, pp. 1279-1284 (1976)
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00859304>

아비도프 아지즈(Abidov Aziz)

[정회원]



- 2013년 8월 : 한서대학교 화학공학 전공 (공학석사)
- 2017년 2월 : 한서대학교 생명공학과 (공학박사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 타슈켄트 국립공과대학교 석유공학과 부교수
- 2018년 8월 ~ 현재 : 크레퍼스 제과회사 생산관리책임자

<관심분야>

석유 및 천연가스 공정, 분리공정, 유동층반응

장 현 태(Hyun Tae Jang)

[중신회원]



- 1989년 8월 : 고려대학교 화학공학과 (공학석사)
- 1996년 2월 : 고려대학교 화학공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 화학공학과 교수

<관심분야>

분리공정, 유동층반응