

슬러지 순산소 유동층 연소특성

장하나 · 성진호 · 최항석 · 서용칠[†]

연세대학교 환경공학과
26493 강원도 원주시 연세대길 1
(2017년 4월 24일 접수, 2017년 7월 19일 수정본 제출, 2017년 7월 24일 채택)

Combustion Characteristics of Waste Sewage Sludge using Oxy-fuel Circulating Fluidized Bed

Ha-Na Jang, Jin-Ho Sung, Hang Seok Choi and Yong-Chil Seo[†]

Department of Environmental Engineering, Yonsei University, Yonseidae-gil 1, Wonju, Kangwon, 26493, Korea
(Received 24 April 2017; Received in revised form 19 July 2017; accepted 24 July 2017)

요 약

순환유동층 모사장치와 30 kW_{th}급 파일럿 연소기를 활용하여 슬러지 순산소 유동층 연소특성을 살펴보았다. 순환유동층 모사실험에서 최소유동화속도(U_{mf})는 0.120 m/s로 계산되었고, 고속유동화를 위한 공탑속도는 2.5 m/s 이상으로 결정되었다. 파일럿 연소실험에서는 일반공기 및 21~40% 순산소 연소실험이 수행되었다. 배출가스 온도의 경우 21~25% 순산소 연소가 일반공기 및 30% 이상의 순산소 연소보다 상대적으로 높았다. 또한, 배출가스 중 CO₂ 배출농도가 21~25% 순산소 연소 범위에서 80% 이상으로 나타났다. 이를 고려한 전반적인 연소특성을 살펴 보았을 때 25% 순산소 연소가 본 슬러지 연료 연소에 대한 장시간 운전에 있어 보다 적합한 것으로 사료된다.

Abstract – Cold bed and 30 kW_{th} pilot bed tests using circulating fluidized bed (CFB) were conducted to apply oxy-fuel technology for waste sludge combustion as a carbon capture and storage technology. In cold bed test, the minimum fluidization velocity (u_{mf}) and superficial velocity for fast fluidization was determined as 0.120 m/s and 2.5 m/s, respectively. In the pilot test, air and oxy-fuel combustion experiments for waste sludge were conducted using CFB unit. The flue-gas temperature in 21~25% oxy-fuel combustion was higher than that of air and up to 30% oxy-fuel combustion. In addition, the concentration of carbon dioxide was more than 80% with the oxygen injection range from 21% to 25% in oxy-fuel CFB waste sludge combustion.

Key words: Waste sludge, Circulating fluidized bed, Oxy-fuel combustion, Carbon dioxide

1. 서 론

최근, 화석연료의 부족 때문에 신재생에너지원에 대한 수요가 급증하고 있다. 또한, 화석연료는 연소 시 지구온난화를 일으키며 심각한 대기오염을 가져오게 된다. 이러한 신재생에너지원으로써 슬러지 및 바이오매스 등이 화석연료의 대안으로 각광을 받고 있다. 우리나라의 경우, 슬러지 연간발생량은 약 천만톤에 달하며 점점 증가하고 있는 추세이다. 2010년 런던협약의 발효로써 슬러지 해양투기가 금지됨에 따라 이에 대한 처리기술 개발이 시급히 필요하다. 이러한 처리기술의 일환으로 슬러지 연소에 의한 에너지화 기술개발이 요구된다. 슬러지 연소는 종이 및 펄프 산업에서 오래 전부터 이

용되어 왔다. 공정에서 발생하는 폐수슬러지를 처리하기 위해, 유동층 연소가 널리 활용되었다. 슬러지는 주로 가연성분으로 구성되어 이를 적절히 전처리하여 연소시키면 이에 대한 에너지화가 가능하다. 특히, 유동층 연소기술은 이러한 에너지화를 최대화 할 수 있는 기술로 고려되고 있다. 이러한 유동층 연소기술에는 많은 연구가 수행되어 왔다. Orgada와 Werther는 실험실 및 파일럿 규모의 기포유동층을 활용하여 탈수슬러지의 연소특성에 대해 연구하였다[1]. 이들 연구결과에 따르면 슬러지 연소특성은 석탄의 연소와 매우 상이함을 발견하였다. 이는 슬러지가 수분함량이 많고 휘발성분이 많이 있기 때문인 것으로 파악되었다. 슬러지 연소 시, 건조, 탈휘발화, Char 연소 등의 일련의 반응과정을 거치게 된다. 이제근 등은 단단 유동층 소각로와 2단 선회류 유동층 소각로를 적용하여 하수슬러지 및 폐수슬러지의 연소특성을 관찰하였다. 본 연구에 따르면, 유동층 Bed 높이에 따라 슬러지와 석탄의 연소특성이 상이하게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 슬러지 연료의 수분 및 휘발분 함량, 그리고 밀도 차이에서 기인하는 것으로 파악되었다[2-4]. Lartva-Somppi는

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: seoyc@yonsei.ac.kr

‡이 논문은 부경대학교 이제근 교수의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

10.8 ton/h 급의 기포유동층과 10.4 ton/hr 급의 순환유동층을 활용하여 폐수슬러지와 바이오매스를 혼소 시 연소특성에 대해 비교하였다. 연구결과에 따르면 기포유동층 연소 상의 온도가 순환유동층보다 약간 높았다. 또한, 연소 상 지점과 프리보드 지점간의 온도차를 비교하였을 때 기포유동층이 순환유동층보다 구배차이가 높았다. 이는 순환유동층이 기포유동층보다 반응기 전체에 대해 열구배가 효과적으로 분포되는 것을 가리킨다[5]. 슬러지가 석탄과는 달리 휘발성분이 많이 포함되어 있는 바, 이의 연소특성에 대해 대해 많은 연구자들이 주목하였다. 그들의 연구에 따르면, 슬러지 휘발성분의 탈휘발화가 불꽃 부분과 프리보드에서 부분적으로 발생하였고 이는 반응로에서 현저한 온도구배 차이를 가져왔다. 또한, 유동속도와 온도구배가 균질연소와 오염물질 발생, 그리고 열회수에 중요한 역할을 하였다[6-9]. 상업운전 중인 슬러지 유동층 연소플랜트의 운전범위는 100톤에서 200톤 정도의 범위를 나타낸다. 대부분의 슬러지 유동층 연소플랜트가 기포유동층 연소를 활용하고 있어 열회수율이 매우 낮게 운영되고 있다. 또한, 이러한 유동층 연소에서는 과잉공기를 사용하여 연소하므로 다량의 CO₂를 배출하게 된다. 대부분의 슬러지 유동층 상업화 플랜트에서 배출가스 중 CO₂ 농도는 10~15%의 농도범위를 가지게 된다[10]. 이러한 CO₂는 지구온난화를 일으키는 대표적인 온실가스이다. 이러한 CO₂를 제어하기 위해 석탄화력발전소를 중심으로 CO₂ 제어 및 저장에 대한 기술개발이 수행되어 왔다. 탄소 제어 및 저장기술은 연소 전 제어기술, 연소 후 제어기술, 순산소 연소기술 등으로 분류할 수 있다. 이 중 순산소 연소기술은 연소 시 과잉공기 대신 순산소를 산화제로 사용하는 기술이다[11]. 또한, 순산소 연소 시 배가스를 재순환하여 최종적으로 배출가스 중 CO₂의 농도가 90% 이상의 고농도로 배출되게 한다. 이는 배출가스 중 CO₂를 추출하지 않고 직접적으로 이를 아민 등의 흡수액에 반응시켜 효과적으로 제어가 가능하게 한다[12]. 따라서, 이와 같은 순산소 연소기술을 기존 시설의 개량 및 신규 건설되는 슬러지 유동층 연소시설에 적용하여 온실가스를 제어하는 노력이 요구된다. 순산소 연소기술은 일찍이 석탄화력발전소에 적용하기 위한 파일럿 규모의 테스트가 수행되어 왔다. Argonne National Coporation (ANL)과 Energy and Environmental Research Cooperation (EERC)에서는 3 MW_{th} 순산소 파일럿 시설을 활용하여 석탄 순산소 연소실험을 수행하였다. 이 결과에 의하면 순산소 연소가 다양한 연소보일러를 개량하는데 있어 성공적으로 적용되는 것으로 파악되었다[13-15]. International Flame Research Foundation (IFRF)에서는 기존 석탄 연소시설을 개량하여 O₂와 재순환가스를 혼합하여 연소하는 것을 실험하였다. 이 실험에서 순산소 연소시설로 개량 후 CO₂ 농도가 90% 이상까지 증가하는 것으로 파악되었다[13]. IHI社에서는 1.2 MW_{th} 순산소 파일럿 시설을 활용하여 연소공기 중 산소 농도에 따른 불꽃 온도, NO_x 전환율, SO_x 농도 등과 같은 연소특성을 조사하였다[13,16]. 또한, Air Liquide와 Babcock & Wilcox (B&W)社에서는 기존 시설을 순산소 연소 시설로 개량하여 배출가스 재순환 시 CO₂ 및 다양한 오염물질을 동시에 제어할 수 있는 연소기술을 연구하였다. 이 연구에 따르면 순산소 연소 운전 시 일반 공기 연소보다 NO_x가 적게 배출되는 것으로 파악되었다. 또한, 순산소 연소 운전 시 탈황시설에서 SO_x가 효율적으로 제어되었으며 수온도 효과적으로 저감되는 것으로 파악되었다[13]. CANMET社에서는 0.3 MW_{th}의 파일럿 시설을 활용하여 석탄의 순산소 연소기술에 대해 다양한 실험을 수행하였다. 이 실험에서 연소 가스 중 산소농도, 배출가스 재순환율 등에 의한 연소특

성에 대해 조사하였다[13,17]. 또한, 0.8 MW_{th}의 파일럿 연소기를 활용하여 석유코크스, 반유연탄, 유연탄 등 연료 종류에 따른 순산소 연소특성을 조사하였다. 이러한 순산소 연소기술을 유동층 석탄화력에 접목하는 다양한 연구들이 수행되었다[18]. VTT 기술연구소에서는 0.1 MW_{th} 파일럿 연소기를 활용하여 무연탄, 유연탄, 갈탄, 목재 펠릿, 볏짚 등의 다양한 연료에 대한 일반 공기 연소 및 순산소 연소 특성에 대해 비교하였다. 위와 같이 다양한 연료 연소 시, 일반 공기 및 순산소 연소 조건에서 배출가스에 따른 시스템의 연소효율 및 배출특성이 조사되었다. CO₂, CO, NO, SO₂와 같은 주요 대상물질이 각 조건에서 고려되었다[19]. 이와 같은 대체 연료 중에서 바이오매스는 부존자원이 풍부하고 수송이 용이하여 그 활용도가 매우 높다. 이와 같은 바이오매스에 대하여 석탄과 혼소하는 연구가 수행되어 왔다. Arias 등은 일반공기 및 순산소 연소 상태에서 석탄과 바이오매스 연소특성을 비교하였다. 이들에 따르면 점화온도와 완전연소율이 석탄과 바이오매스 혼소율과 산소주입량에 따라 차이를 확인하였다[20]. 몇몇 연구자들에 의하면, 이런 대체연료에 대한 순산소 연소 시 산소주입량은 연료의 특성에 따라 달라짐을 확인하였다. 이는 각각의 연료의 연소특성이 석탄과 매우 다르기 때문인 것으로 파악되었다[20-22]. 이와 같은 순산소 유동층 연소기술은 여러 연구소에서 실증화 단계로 수행 중이다. 이와 같이 주로 석탄화력발전소에 적용하기 위해 석탄연료 단독 또는 혼소를 활용하여 실험이 수행되었으나 슬러지 단독 연료에 대한 순산소 유동층 연소실험은 그리 많은 연구가 수행되지 못하였다. 순환유동층 연소가 에너지화 측면에서 많은 장점을 가지므로 기존의 슬러지 유동층 연소플랜트를 순환유동층으로 개량하고 신규 상업플랜트에 순환유동층 연소를 적용하는 것이 필요하다. 또한, CO₂ 저감을 위해 이와 같은 상업 슬러지 유동층 연소플랜트에 순산소 연소를 접목시키는 것이 필요하다. 본 연구에서는 슬러지 연료에 대한 열회수를 개선하고 에너지화를 최대화하기 위해 기포유동층 대신 순환유동층을 적용하였다. 또한, CO₂를 저감하기 위해 순환유동층에 순산소 연소기술을 접목하였다. 이를 위해 먼저 모사장치를 활용하여 순환유동층 연소실험에 대한 모사 실험을 수행하여 주요 운전인자를 확보하였다. 또한, 30 kW_{th} 급의 파일럿 연소기를 운영하여 연료, 산소주입률에 따른 연소특성과 배출가스 특성을 조사하였다.

2. 대상시설 및 실험방법

2-1. 순환유동층 모사장치

슬러지 유동층 파일럿 연소기에 대한 주요 운전인자를 확보하기 위해 순환유동층 모사장치를 활용하여 모사실험을 수행하였다. 모사장치는 상승관(riser), 사이클론, 하강관(downcomer), 하부 루프셀(loop-seal)로 구성되었다. 이 중에서 상승관은 파일럿 연소기와 동일하게 직경이 0.15 m 이고 높이가 6.4 m이다. 유동화 고체물질은 일반 Sand 로써 직경이 315 μm이고 밀도가 1461 kg/m³ 이었다. 유동화 공기는 상승관과 하부 루프셀로 주입된다. 유동화 고체물질의 유동화 속도를 최적화하기 위해 상승관과 하강관 높이에 따른 압력손실이 측정되었다. 정상상태에서 순환유동층 하부 루프셀로 통하여 순환되는 고체순환량을 측정하기 위해, 사이클론으로부터 하강관으로 들어가는 전체 고체물질량이 측정되었다. 모사장치 하강관의 측정 칼럼에서 일정시간 동안 고체순환량이 측정되었다. 고체순환량은 측정시간과 밀도분석으로 반복적으로 측정하였다. Table 1에 순환유

Table 1. Experimental conditions in the CFB cold-bed

Design factor	Value
Bed diameter (m)	0.15
Sand material diameter (μm)	315
Sand material density (kg/m ³)	1,461
Operation temperature (°C)	25

Table 2. Boundary condition of CFD simulation for fluidization hydrodynamics

Parameter (Unit)	Value
Solid Diameter (μm)	400
Solid Density (kg/m ³)	2,607
Minimum Fluidization Velocity (u_{mf} , m/s)	0.469
Coefficient of Restitution	0.8
Angle of Internal Friction (°)	30
Wall Surface Temperature (K)	373
Gas Inlet Temperature (K)	273

동층 모사장치의 실험인자를 나타내었다.

2-2. 유동화 구배 모사 Simulation

유동화 구배 모사 Simulation은 Ansys CFD Fluent Software에 의해 수행되었다. Table 2에 본 유동화 구배 모사에 사용된 경계조건을 나타내었다.

2-3. 측정 및 분석

슬러지의 발열량은 LECO社 (St. Joseph, MI, USA)의 AC-350 발열량분석기에 의해 분석되었다. 공업분석은 LECO社 (St. Joseph, MI, USA)의 TGA-601에 의해 분석되었다. 원소분석은 Perkin

Elmer社 (MA, USA)의 2400 series II 원소분석기에 의해 분석되었다. 배출가스 분석은 휴대용 가스 분석기에 의해 분석되었다.

2-4. 순환유동층 파일럿 연소장치

슬러지 순환유동층 파일럿 연소장치는 상승관(riser), 사이클론, 하강관(downcomer), 하부 루프셀(loop-seal)로 구성되었다. 상승관은 직경이 0.15 m 이고 높이가 6.4 m 이었다. 순환유동층 연소기는 일반공기 및 순산소 연소 시 슬러지 연료에 연소열을 전달하기 위해 전기열매체로 둘러싸여 있다. 슬러지 연소를 위한 최적연소온도는 850 °C로 결정되었다. 슬러지 연료 적정투입량은 13 kg/h로 결정되었다. 연소실험은 일반공기 및 순산소 연소 조건에서 수행되었다. 순산소 연소 시 연소공기 중 산소주입량은 21%에서 40% 범위에서 연소실험이 수행되었다. 연소기가 운전되기 시작하면 연소실험은 3시간 동안 수행되며, 안정적인 연소를 위해 연료주입량, 산소주입량, 고체순환량이 운전시간 동안 일정하게 유지된다. 일반공기 및 21, 25, 30, 40% 조건의 순산소 연소 실험은 1주 동안 차례로 운전되었다. 이러한 조건으로 3주 동안 3번 연속적으로 반복 실험이 수행되었다. 안정적인 연속운전과 균일한 유동상태를 유지하기 위해, 전산 데이터 수집시스템 모니터링 및 배출가스를 상시 측정하여 파일럿

Table 3. Experimental conditions using the 30 kW_{th} CFB oxy-fuel pilot test bed

Design factor	Value
Bed diameter (m)	0.15
Fuel feeding rate (kg/hr)	13
Solid fuel mixing rate (%)	0~30
Oxygen injection rate (%)	21~40
Combustion temperature (°C)	850
Flow rate (L/min)	1,300

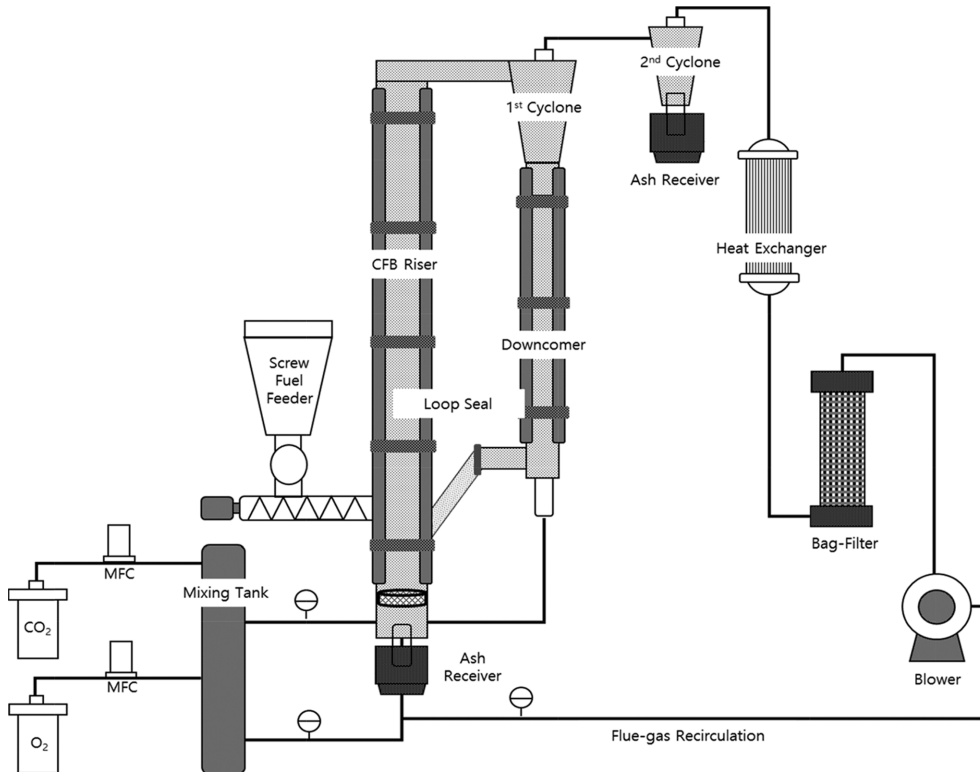


Fig. 1. Schematic diagram of the 30 kW_{th} CFB oxy-fuel pilot test bed.

연소기의 연소상태를 지속적으로 관찰하였다. Fig. 1에 본 실험의 파일럿 연소기에 대한 모사도를 나타내었다. Table 3에서 파일럿 연소기의 각 실험조건을 나타내었다.

3. 결과 및 분석

3-1. 순환유동층 모사실험

3-1-1. 최소 유동화속도(u_{mf})[23-25]

Fig. 2에 공탑속도에 따른 상승관 하부와 상부 사이의 압력손실의 차이를 나타내었다. 고정상에서 가스 유량이 증가한다고 가정하면, 표면속도가 최소 유동화속도(u_{mf})에 이르기까지 압력손실은 유동항력에 의해 지속적으로 증가하게 된다. 유동층 높이 당 압력손실 ($\Delta p_{fr}/L_m$)과 균일입자직경(d_p)는 다음과 같이 관계식으로 표현된다 [23].

$$\frac{\Delta p_{fr}}{L_m} g_c = 150 \frac{(1-\epsilon_m)^2}{\epsilon_m^3} \frac{\mu u_0}{(\phi_s d_p)^2} + 1.75 \frac{1-\epsilon_m \rho_g u_0^2}{\epsilon_m^3 \phi_s d_p} \quad (1)$$

유동화가 시작되면 마찰압력손실은 입자의 무게에 의한 압력손실과 동일하게 된다. 최소 유동화 상태의 공탑속도(u_{mf})는 식 1과 식 3을 결합하여 도출할 수 있다. 일반적으로 구형입자의 최소 유동화 속도 (u_{mf})는 다음 식과 관련된다[24,25].

$$\frac{1.75}{\epsilon_m^3 \phi_s} + \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 = \frac{150(1-\epsilon_{mf})}{\epsilon_m^3 \phi_s^2} \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2)$$

$$\frac{1.75}{\epsilon_m^3 \phi_s} \text{Re}_{p,mf}^2 + \frac{150(1-\epsilon_{mf})}{\epsilon_m^3 \phi_s^2} \text{Re}_{p,mf} = \text{Ar} \quad (3)$$

위 식에 기초하여 최소유동화 속도가 유동화 공기 압력손실 변화 결과와 비교하여 결정되었다. 식에서 계산한 최소유동화 속도는 0.097 m/s 이었으며 이는 실험결과보다 19% 적은 값이다. 그림에서 보듯이 최소유동화 속도는 0.120 m/s로 결정되었다.

3-1-2. 유동화 구배

순환유동층의 유동화에 의한 고체입자의 상승은 주로 연소기 벽면에서 먼 쪽에서 이루어지고, 연소기 벽면 근처에서는 고체 입자가 하강하는 흐름이 형성된다. 이러한 흐름은 공탑속도가 변화함에 따라 달라지며, 이러한 공탑속도 변화에 따른 연소기 내 수력학적 특성과 열전달의 특성에 대해 살펴보았다. 공탑속도 변화에 따른 열전

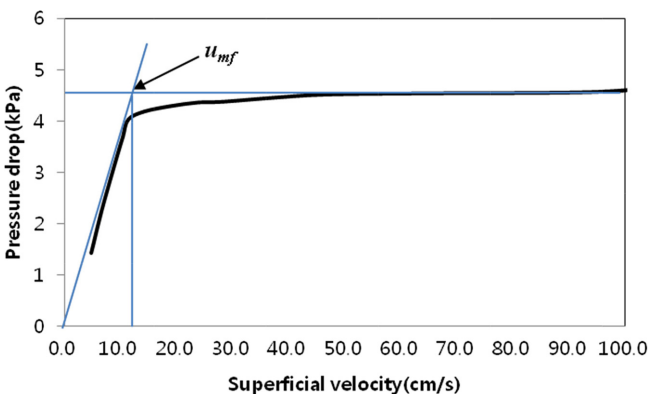


Fig. 2. Pressure drop of the riser as a function of the superficial velocity.

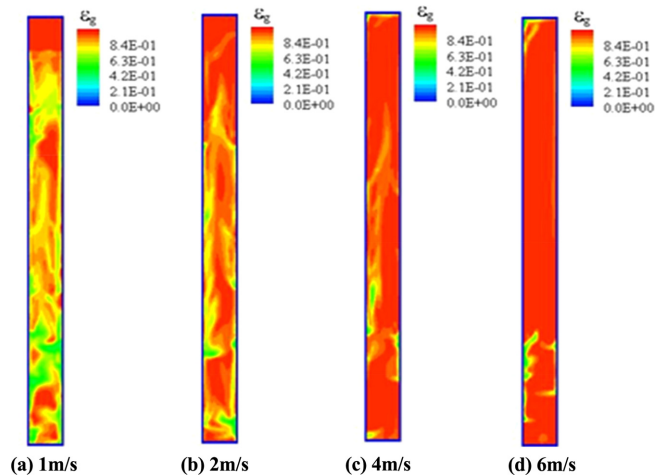


Fig. 3. Void fraction variation by superficial velocity change.

달 변화를 살펴보기 위해 기체의 공탑속도를 1 m/s 로부터 6 m/s까지 변화시켜 가며 살펴보았다. Fig. 3에 공탑속도 변화에 따른 기체 부피분율 분포를 나타내었다. 그림에서 보듯이 기체의 공탑속도가 증가할수록 기포유동영역에서 순환유동영역으로 전이가 일어난다. 따라서 기체 부피분율의 크기가 증가하게 된다. 또한, 그림에서 보듯이 공탑속도가 2 m/s 이상에서 순환유동층 연소기 내부로 기체의 주 유동이 형성되고, 벽면 근처에서 고체의 분율이 커짐을 알 수 있다. 이는 벽면 근처에서 유체의 점착조건에 의하여 기체의 속도가 감소하는 것을 가리킨다. 이러한 기체-고체간의 유동변화는 결과적으로 온도장에 영향을 주게 된다.

연소기 내 고체입자의 온도분포를 나타내는 Fig. 4(a)와 같이 공탑속도가 낮을 경우에는, 유속이 빠른 연소기 내부가 온도가 낮고 상대적으로 유속이 느린 고온의 벽면이 온도가 높음을 알 수 있다. Fig. 4(b)와 같이 공탑속도가 2 m/s 이상으로 증가하면 연소기 내부의 유속의 증가로 고체입자의 온도가 더 낮아짐을 알 수 있다. Fig. 4(c)에서 보듯이 공탑속도가 4 m/s로 증가하게 되면 온도가 급격히 낮아짐을 알 수 있다. 이는 공탑속도의 변화가 연소기 내의 온도장에 영향을 주고, 결과적으로 공탑속도가 증가할수록 고체의 운동 및 혼합에 의한 열전달효과가 감소하는 것을 가리킨다.

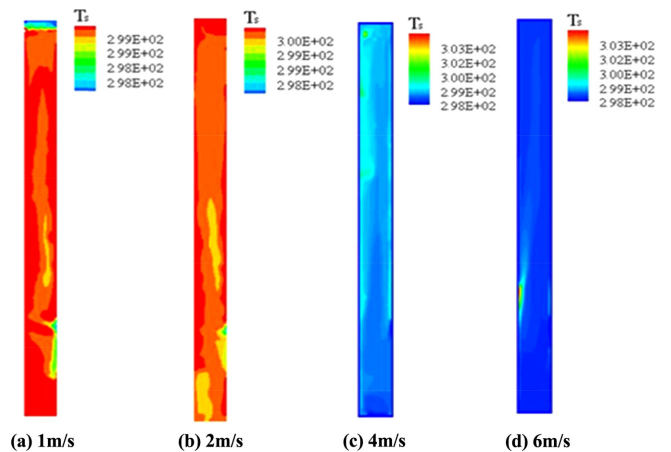


Fig. 4. Temperature variation of fluidizing material by superficial velocity changes.

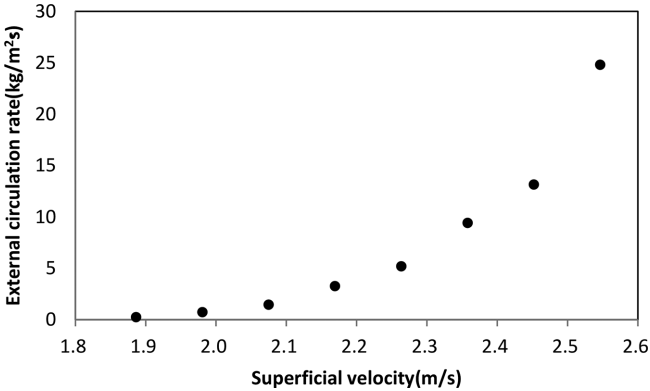


Fig. 5. Solid circulating rate as a function of the superficial velocity.

3-1-3. 외부 고체순환량

순환유동층 연소보일러에서 열매체인 고체물질은 로 전체를 순환하며 연료를 연소시키면서 열을 전달하게 된다. 따라서, 적절한 공탑 속도를 결정하기 위해 고체물질의 순환량을 결정하는 것이 필요하다. Fig. 5에 표면 유동화 속도에 따른 고체물질의 고체순환량을 나타내었다. 그림에서 보듯이, 고체순환량이 10 kg/m²s 이상 일때 유동화 속도가 2.5 m/s 이상에서 고속 유동화가 관측되었다. 고속 유동화 순환유동층 연소보일러에서 Geldard B 입자의 고체물질에 대한 외부 고체순환율은 10에서 50 kg/m²·sec의 범위를 나타내었다[25]. Horio 등도 순환유동층의 외부고체순환량을 10에서 30 kg/m²·sec의 범위에서 최적화하였다[26]. 이를 고려하여 고속유동화를 위한 공탑 속도는 2.5 m/s 부터 고려되어 운전되었다.

3-2. 순환유동층 파일럿 연소기 연소실험

3-2-1. 슬러지 특성분석

Table 4에 슬러지 연료에 대한 기초특성을 분석하였다. 공업분석 결과, 휘발분과 회분이 각각 45.11%와 35.04% 이었다. 발열량 분석 결과, 슬러지와 석탄시료의 발열량은 각각 3,008 kcal/kg와 5,966 kcal/kg 이었다. 원소분석 결과, CHONS로 구성된 슬러지 내 가연성분 함량이 석탄보다 전체적으로 낮게 분석되었다. 이는 슬러지 내 회분함량이 석탄보다 높기 때문인 것으로 파악되었다. 질소성분의 경우, 슬러지와 석탄시료가 각각 4.43%와 1.89% 로써 슬러지 시료가 석탄보다 2배 이상 높았다. 황 성분의 경우, 슬러지와 석탄시료가 각각 0.43%와 0.58% 로써 비슷한 농도로 분석되었다. 본 파일럿 연소기의 설계용량은 30kW_{th} 급으로써 이의 적정연료투입량은 13 kg/hr로 계산되었다. 원소분석 결과 및 설계용량에 기초하여 슬러지 연소에 필요한 이론공기요구량을 분석한 결과, 이론공기요구량은 835 L/min으로 계산되었다. 따라서, 공탑속도와 과잉공기비 1.5로 계산된 실제공기량을 기초하여 일반공기 및 순산소 연소 조건에 필요공기량은 1,300 L/min 으로 운전되었다.

Table 4. Results of the waste sludge basic characteristic analysis

Proximate analysis (wt%)	Sludge	Coal	Element analysis (wt%)	Sludge	Coal
Moisture	7.32	9.31	Carbon	28.14	73.08
Volatile	45.11	27.91	Hydrogen	4.74	4.52
Fixed carbon	12.25	51.26	Nitrogen	4.43	1.89
Ash	35.04	11.52	Oxygen	23.9	19.93
Calorific value (kcal/kg)	3,008	5,966	Sulfur	0.43	0.58

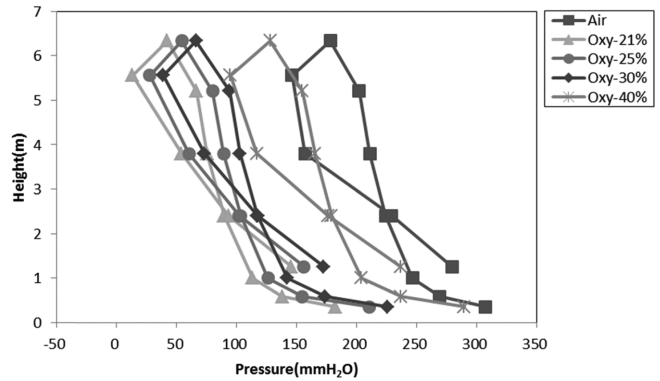


Fig. 6. Pressure profiles along the CFB pilot plant with air and oxy-fuel combustion

3-2-2. 온도 및 압력구배

Fig. 6는 파일럿 연소기에서 일반공기 및 21~40% 순산소 조건에서 슬러지 연소 시 분산판에서 루프셀까지의 각 조건에 대한 압력구배를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이, 압력구배는 일반공기 및 순산소 연소 조건에서 높이 별로 전형적인 순환유동층 압력구배를 나타내고 있다. 일반공기 연소에서 압력손실은 21%에서 40%까지의 모든 순산소 조건보다 높은 값을 나타내었다. 또한, 순산소 연소 조건에서 압력손실은 산소주입량이 증가함에 따라 증가하는 것으로 관찰되었다. 이는 압력손실이 유동화공기가 관을 통과함에 따라 동역학적 에너지가 손실되는 것에서 기인하는 것으로 사료된다. 이는 동적 점성도(ν), 밀도(ρ), 관길이(L), 유량(Q)과 같은 인자와 관련되어 있다. Table 5는 유동화 공기에 사용되는 O₂, N₂, CO₂ 등의 주요성분에 대한 물리적 가스 성분들을 나타내고 있다. 표에서 보듯이, 유동화 공기가 주로 질소와 산소로 구성된 일반공기 연소조건인 동적 점성도가 순산소 조건보다 높은 것으로 나타났다. 일반적으로 동적 점성도가 높게 되면 압력손실도 증가하게 된다. 또한, 순산소 연소 조건에서 유동화 공기가 CO₂와 O₂로 구성되어 있어 O₂주입량이 증가함에 따라 이의 동적 점성도가 증가하게 된다. 따라서, 순산소 조건에서 산소주입량이 21%에서 40%로 증가할수록 압력손실도 증가하게 된다. Fig. 7에 일반공기 및 순산소 연소 조건에서 연소 시 관의 높이에 따른 온도구배를 나타내었다. 상승관의 온도구배가 일반공기 및 순산소 연소조건에서 높이에 따라 균일한 분포를 나타내었다. 일반 공기 연소 조건에서 온도구배가 21% 순산소 조건보다 상대적으로 높게 나타났다. Table 5에 보듯이, CO₂의 열용량은 N₂보다 1.4 배 정도가 높다. 이는 21% 순산소 조건에서 연소 시 연소공기 내 N₂ 대신 CO₂를 희석가스로 사용하게 되므로 연소공기의 열용량이 증가하게 되는 것을 가리킨다. 따라서, 휘발성분이 많이 포함되어 있는 슬러지 연소의 경우, 21% 순산소 연소조건에서 슬러지 연료의 탈휘발화와 점화 시작온도가 상대적으로 늦어지게 되어 연소 시 불꽃 온도가 일반 공기조건보다 낮게 되는 것으로 사료된다. 그러나, 산소주입

Table 5. Physical gas properties of fluid flow utilized as fluidization air at 850 °C

	H ₂ O	O ₂	N ₂	CO ₂	Ratio, CO ₂ /N ₂
Density (ρ) [kg/m ³]	0.157	0.278	0.244	0.383	1.6
Thermal conductivity (k) [W/m·k]	0.136	0.087	0.082	0.097	1.2
Specific heat capacity (c_p) [J/mol·°C]	45.67	36.08	34.18	57.83	1.7
Kinematic viscosity (m ² /s)	3.20e-04	2.09e-04	2.00e-04	1.31e-04	0.7

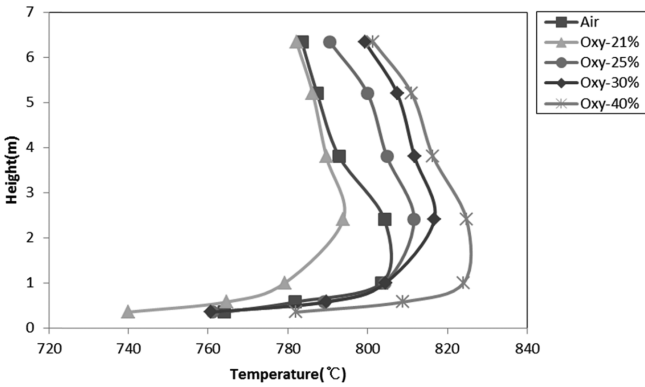


Fig. 7. Temperature profiles along the height of the riser from the air and oxy-fuel combustion

량이 25% 이상의 순산소 연소조건에서는 온도구배가 일반공기 및 21% 순산소 연소조건보다 높게 나타났다. 또한, 산소주입량이 증가함에 따라 온도 구배가 점차적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 슬러지 연료 순산소 연소 시 산소주입량이 25% 이상의 조건에서는 슬러지 연료 내 휘발성분의 탈휘발화와 점화시작온도가 산소주입량이 증가함에 따라 급격하게 빨라지게 되는 것으로 파악된다. 따라서, 25% 이상의 순산소 연소조건에서는 연소 시 불꽃 온도가 일반공기 및 21% 순산소 연소보다 상대적으로 높은 것으로 사료된다.

3-2-3. 연소 생성 배출가스 분석

Fig. 8에 일반공기 및 21~40% 순산소 연소 시 배출가스 오염물질인 NO, SO₂, CO 농도를 나타내었다. CO의 경우, 21% 순산소 연소에서 2.5%로 일반공기 및 25% 이상 순산소 연소조건보다 상대적으로 높았다. 이는 슬러지 연료 연소 시 21% 순산소 연소 조건에서 연료 내 휘발성 탄소성분의 불완전연소가 일어난 것으로 파악된다. NO의 경우, 일반공기 및 21~40% 순산소 연소조건에서 슬러지 연료 연소 시 47~73 ppm의 농도범위를 나타내었다. 일반 공기 연소 시 NOx의 생성은 Thermal NOx, Fuel NOx, Prompt NOx로 구분할 수 있다[9,10,19]. 이 중에서 Thermal NOx는 1500 °C 이상의 온도에서 연소공기 중 질소와 산소의 반응으로 발생한다. 슬러지 연료 연소 시 연소온도가 850 °C 이므로 일반공기 및 순산소 연소조건에서 발생하는 NO의 대부분이 연료 중 휘발성 질소성분의 연소 시 발생하는 Fuel NOx 인 것으로 파악된다.

위 결과에서 보듯이, 일반공기 및 순산소 연소 조건에서 NO 농도가 큰 차이를 나타내지 않았다. SO₂의 경우, 슬러지 연료 연소 시 일반공기 및 21~40% 순산소 연소 조건에서 460~645 ppm의 농도범위를 나타내었다. 특히, 21%와 25%의 순산소 연소 조건에서 SO₂ 발생농도가 상대적으로 높았다. 이는 슬러지 연료 연소 시 연료 내 휘발성 S 성분이 위 범위에서 보다 활발하게 SO₂로 전환되었음을 나타낸다. NO와 SO₂ 농도의 경우, 배출가스 중 배출농도가 전반적

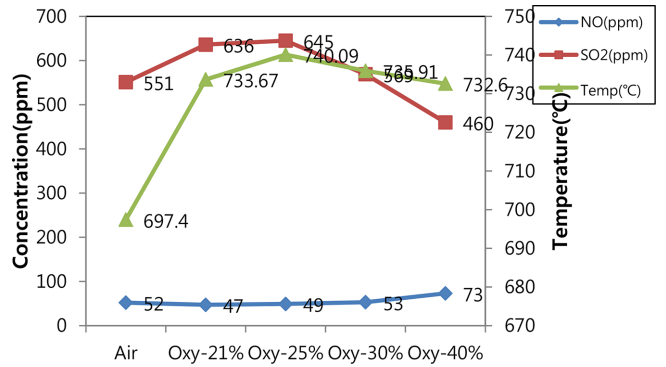


Fig. 8. NOx, SOx, CO composition in the air and oxy-fuel combustion.

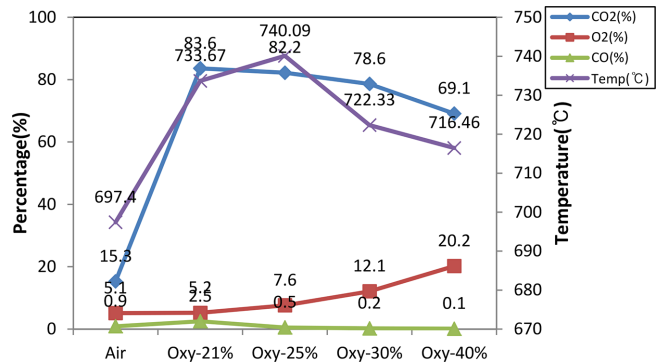


Fig. 9. CO₂, O₂ composition and temperature in the air and oxy-fuel combustion.

으로 높은 것으로 파악되어 슬러지 연료 연소 시 이에 대한 향후 대책마련이 필요하다.

Fig. 9에 일반공기 및 21~40% 순산소 연소 시 배출가스 온도와 CO₂, O₂, CO로 구성된 배출가스 성상을 나타내었다. 배출가스 온도의 경우, 21%에서 25%의 순산소 연소 조건에서의 배출가스 온도가 일반 공기 및 30% 이상의 순산소 연소조건보다 상대적으로 높았다. Table 5에서 보듯이 H₂O 및 CO₂는 N₂와 O₂에 비해 높은 열용량을 나타내게 된다. 따라서, 슬러지 연료 연소 시 21%에서 25% 순산소 연소조건에서 생성되는 배출가스 중 H₂O 수증기 및 CO₂가 일반공기 및 30% 이상의 순산소 연소조건에서 생성되는 배출가스보다 높은 열용량을 가지게 된다. 또한, 슬러지 연료는 많은 양의 휘발성으로 구성되어 있으며 이는 21%에서 25% 순산소 연소 조건에서 순환유동층 연소 시 발생하는 열엔탈피가 일반공기 및 30% 이상의 순산소 연소조건보다 상대적으로 높게 나타나는 것을 가리킨다. 배출가스 중 CO₂ 농도의 경우, 슬러지 일반공기 연소시 배출농도가 15.3%를 나타내었다. 슬러지 순산소 연소의 경우, 21%에서 25% 산소주입량 조건에서 연소 시 배출가스 중 CO₂ 농도가 80% 이상을 나타내었다. 또한, 위 범위에서 배출가스 중 과잉산소 농도가 10% 이하를 나타

내었다. 위 결과에서 나타나듯이, 슬러지 연료를 일반공기 및 21~40% 순산소 연소 조건에서 순환유동층으로 운전하였을 때, 25% 순산소 연소 조건이 열회수 측면이나 CO₂ 제어에 적용함에 있어 최적 조건으로 파악되었다. 또한, 슬러지 순환유동층 연소 시 운전 주요인자인 압력손실, 연소온도, 고체순환량, 배출가스 온도, 배출가스 성상을 비교하여 종합적으로 판단하였을 때, 25%의 순산소 연소 조건이 본 슬러지 연료 연소에 대한 장시간 운전에 있어 보다 적합한 것으로 사료된다. 향후, 본 연구결과를 바탕으로 배출가스 재순환 및 배출가스 오염물질 제어기술 등의 추가연구를 통해 배출가스 중 CO₂ 농도를 90% 이상으로 증가시키고 슬러지 연료 연소 시 열회수율을 효과적으로 확보하여, 국내외의 CO₂ 제어요구에 적극적으로 대응하고 슬러지 순산소 순환유동층 기술 상용화에 대한 경제성을 확보하도록 하겠다.

4. 결 론

순환유동층 모사장치와 파일럿 연소기를 활용하여 슬러지 연료에 대한 순환유동층 순산소 연소특성을 살펴보았다. 순환유동층 모사장치는 파일럿 연소기와 동일한 크기로 제작되었으며, 파일럿 연소 실험은 일반공기와 21~40% 순산소 연소조건에서 실험하였다. 실험 결과를 토대로 다음과 같이 주요 결과를 요약할 수 있다.

(1) 순환유동층 모사실험에서 고체물질에 대한 최소유동화 속도, 유동화 구배, 외부고체순환량을 분석하여 파일럿 실험을 위한 주요 인자를 결정하였다. 위 모사실험 결과, 슬러지 연료 유동층연소를 위한 최소유동화 속도는 0.120 m/s로 결정되었고 공탑속도는 2.5 m/s 이상으로 결정되었다.

(2) 일반공기 및 21~40% 순산소 조건에서 슬러지 연소 시 온도구배 실험결과, 25% 이상의 순산소 조건에서 일반공기 연소보다 온도구배가 높았으며 산소주입량이 높아질수록 온도구배가 높아졌다. 이는 슬러지 연료 내 휘발성분의 탈휘발화와 점화시작온도가 산소주입량이 증가함에 따라 급격하게 빨라지는 것을 가리킨다.

(3) 각 조건에서 슬러지 연료 연소 시 배출가스 온도분석 결과, 21~25% 순산소 연소 조건에서 배출가스 온도가 가장 높았다. 한편, 배출가스 내 CO₂ 농도의 경우, 21~25% 순산소 조건에서 80% 이상의 순도를 나타내었다.

(4) 위 결과를 토대로 슬러지 연료에 대한 유동층 연소 시 25% 순산소 조건이 CO₂ 고순도 및 열회수를 위한 최적조건으로 결정되었다. 또한, 슬러지 순환유동층 연소 시 운전 주요인자인 압력손실, 연소온도, 고체순환량, 배출가스 온도, 배출가스 성상을 비교하여 종합적으로 판단하였을 때, 25%의 순산소 연소 조건이 본 슬러지 연료 연소에 대한 장시간 운전에 있어 보다 적합한 것으로 사료된다.

(5) 향후, 배출가스 재순환 및 배출가스 제어연구를 통해 슬러지 순환유동층 순산소 연소의 연소인자 및 CO₂ 배출농도를 최적화하고 이를 토대로 본 기술의 상업화 운전에 대한 경제성을 확보하도록 하겠다.

감 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20113010130050, No. 20164030201250).

References

- Ogada, T. and Werther, J., "Combustion Characteristics of Wet Sludge in a Fluidized Bed," *Fuel Sci. Technol. Int.*, **75**, 617-626 (1996).
- Lee, J. K., Lee, K. H., Lee, K. H. and Chun, H. S., "Incineration of Paper Sludge Wastes in a Two-Stage Swirl-Flow Fluidized Bed Combustor," *Korean Chem. Eng. Res.*, **28**(4), 470-479(1990).
- Lee, J. K., Lee, K. H., Jang, J. G., Lee, N. S., Lim, J. S. and Chun, H. S., "Fluidized Bed Incineration of Digested Sewage Sludge: Part 1. Combustion Characteristics of the Single-Stage Fluidized Bed Incinerator," *Korean Chem. Eng. Res.*, **30**(2), 228-236 (1992).
- Lee, J. K., Lee, K. H., Jang, J. G., Lim, J. H., Lim, J. S. and Chun, H. S., "Combustion Characteristics of Digested Sewage Sludge in a Two-stage Swirl-Flow Fluidized Bed Incinerator," *Korean Chem. Eng. Res.*, **30**(4), 499-508(1992).
- Latva-Somppi, J., Kauppinen, E. I., Valmari, T., Ahonen, P., Gurav, A. S., Kodas, T. T. and Johanson, B., "The Ash Formation during Co-combustion of Wood and Sludge in Industrial Fluidized Bed Boilers," *Fuel Process. Technol.*, **54**, 79-94(1998).
- Kaferstein, P., Gohla, M., Tepper, H. and Reimer, H., "Fluidization, Combustion and Emission Behaviour of Biomass in Fluidized Bed Combustion Units," 14th International Conference Fluidized Bed Combustion, May, Vancouver(1977).
- Albrecht, J. and Schelhaas, K. P., "Investigation in NO_x Formation at Combustion of Sewage Sludge in an Commercial Scale Bubbling Fluidized Bed," 14th International Conference Fluidized Bed Combustion, May, Vancouver(1977).
- North, B. C. and Eleftheriades, C. M., "Incineration of Biomass Sludge in a Bubbling Fluidized Bed Combustion," 14th International Conference Fluidized Bed Combustion, May, Vancouver(1977).
- Werther, J. and Ogada, T., "Sewage Sludge Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **25**, 55-116(1995).
- Final Report entitled "Oxy-fuel Combustion Technology of Waste Sludge and Biomass by Circulating Fluidized Bed using Flue-gas Recirculation," Korea Energy Technology Evaluation Institute, Ministry of Trade, Industry and Energy (2013).
- IPCC Special Report on Carbon Dioxide and Storage, <http://www.ipcc.ch>.
- Buhre, B. J. P., Elliott, L. K., Sheng, C. D., Gupta, R. P. and Wall, T. F., "Oxy-fuel Combustion Technology for Coal-fired Power Generation," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **31**, 283-307(2005).
- Chen, L., Yong, S. Z. and Ghoniem, A. F., "Oxy-fuel Combustion of Pulverized Coal: Characterization, Fundamentals, Stabilization and CFD Modeling," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **38**, 156-214(2012).
- Molburg, J. C., Doctor, R. D. and Brockmeier N. F., "Carbon Dioxide Capture from PC Boilers with O₂-firing," 18th Annual International Pittsburgh Coal Conference, December, Newcastle(2001).
- Wang, C. S., Berry, G. F., Chang, K. C. and Wolsky, A. M., "Combustion of Pulverized Coal using Waste Carbon Dioxide and Oxygen," *Combust. Flame*, **72**, 301-310(1988).
- Gotou, T., Yamada, T., Kiga, T., Misawa, N. and Hashimoto, K., "Study Results of Combustion Characteristics and Behaviors of the Corrosive Substances in Oxy-fuel Combustion Process," Proceeding of the 2nd International Oxy-fuel Combustion Con-

- ference, September, Yeppoon(2011).
17. Croiset, E. and Thambimuthu, K. V., "NO_x and SO₂ Emissions from Oxygen/Carbon Dioxide Recycle Coal Combustion," *Fuel Sci. Technol. Int.*, **80**, 2117-2121(2001).
 18. Jia, L., Tan, Y., Wu, Y. and Anthony, E. J., "Oxy-fuel Tests and Results using a Pilot-scale Circulating Fluidized Bed," Proceeding of the 2nd International Oxy-fuel Combustion Conference, September, Yeppoon(2011).
 19. Tourunen, A., Leino, T., Pikkarainen, T., Nevalainen, H. and Kuivalainen, R., "Small Pilot Scale CFB Experiments under Air- and Oxygen-firing Conditions," Proceeding of the 2nd International Oxy-fuel Combustion Conference, September, Yeppoon(2011).
 20. Arias, B., Peveda, C., Rubiera, F. and Pis, J. J., "Effect of Biomass Blending on Coal Ignition and Burnout during Oxy-fuel Combustion," *Fuel Sci. Technol. Int.*, **87**, 2753-2759(2008).
 21. Fryda, L., Sobrion, C., Cieplik, M. and van de Kamp, W. L., "Study on Ash Deposition under Oxy-fuel Combustion of Coal/Biomass Blends," *Fuel Sci. Technol. Int.*, **89**, 1889-1902(2010).
 22. Toftegaard M. B., Brix, J., Jensen, P. A., Glarborg, P. and Jensen, A. D., "Oxy-fuel Combustion of Solid Fuels," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **36**, 581-625(2010).
 23. Basu, P., *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*, Taylor & Francis(2006).
 24. Kunii, D. and Lenenspiel, O., *Fluidization Engineering*, Butterworth-Heinemann(1991).
 25. Hannes, J. P., *Mathematical Modeling of Circulating Fluidized Bed Combustion*, Kartographie und Druck Peter List(1996).
 26. Horio, M., *Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Circulating Fluidized Bed Technology IV*(1997).