

이중 순환식 유동층 연소로내에서 2차 공기 주입에 의한 CO, NO_x 저감효과

장석돈* · 신동훈** · 황정호*

Effect of Secondary Air Injection on CO and NO_x Emission in an Internally Circulating Fluidized Bed Combustor

S. D. Jang, D. H. Shin and J. H. Hwang

Key Words: ICFBC(Internally Circulating Fluidized Bed Combustor), SAR (Secondary Air Ratio), NO_x, CO

Astract

Combustion experiments are carried out to obtain the fundamental data for application of a internally circulating fluidized bed combustor to the combustion of paper sludge wastes. Experimental parameters are identified as secondary air ratio, sludge weight and water contents. The secondary air ratio was varied from 0 to 20% and water content was 14%, 25%, 35%, 45%, 62% and sludge weight was 30g, 60g, 90g. As a result, carbon conversion ratio was higher than injection of primary air. Emission of CO and NO_x reduced with an increase of secondary air injection.

1. 서론

인구 증가와 고도의 산업발달과 그에 따른 경제규모의 팽창으로 방대한 양에 달하는 하수 및 폐수의 양이 증가하고 있으며, 이에 따라 폐수 처리 시 발생하는 슬러지의 양도 증가하고 있다. 슬러지(sludge)란 하수 및 폐수 처리 후 발생하는 2차 부산물로 건조시 발열량이 3000~5000kcal/kg 정도의 무연탄 수준의 발열량을 지니지만 70~80%의 많은 수분을 함유하고 있는 고체연료로

볼 수 있다. 이러한 슬러지는 상수, 공업용수, 하수 및 폐수, 제지, 축산 등 발생원이 매우 다양하며 심각한 환경 오염 문제를 야기시키고 있어 이에 대한 효율적인 처리가 시급히 요청되고 있다.

이런 슬러지의 처리방법에는 매립 및 해양투기, 연소(또는 소각) 등 다양한 방법이 있다. 그러나 수분이 70~80%로 높고 부패가능성이 높은 유기물 함량이 높아 단순 매립시 악취발생, 침출수의 배출로 인한 지하수 및 토양오염 등의 문제가 발생하고 해양투기는 슬러지를 해양에 투기하기까지 관리, 저장, 운반 등의 과정에서 많은 문제점이 발생한다. 이와 같이 기존의 방법(매립 및 해양투기)에서의 문제점으로 인해 환경오염이 적게 발생하는 슬러지 처리방법의 개발이

* 연세대학교 기계공학과

** 연세대학교 CT(Clean Tech.) 연구단

최대 환경 과제 중의 하나로 부각하고 있다. 우리나라의 경우에서 슬러지의 처리방법을 보면 1996년도는 매립이 78%, 해양투기가 19%이며 연소에 의한 슬러지 처리는 없었다. 그러나 1999년에는 매립의 비율(40.7%)은 상대적으로 낮아지고 해양 투기의 비율(52.1%)이 급격히 증가됨을 알 수 있고 연소에 의한 처리는 2.1%로 증가하고 있다.[1] 이처럼 매립과 해양 투기에 의해 대부분의 슬러지가 처리되고 있음을 알 수 있다. 그러나 최근 개정된 폐기물 관리법(수질환경보전법 제 25조 및 하수도법 제 2조)의 준수에 따라 2003년 이후부터는 해양투기가 곤란해지므로 그에 대한 대책 마련이 매우 시급한 실정이다. 따라서 1997년부터 도입된 연소법은 아직까지 낮은 비율로 처리되고 있지만, 슬러지를 환경적으로 무해하게 감량화시킬 수 있는 장점이 있어 그 처리 비율이 계속 증가될 전망이다.

연소 처리의 관점에서 슬러지는 다량의 수분을 포함하고 있는 고체 연료로 볼 수 있다. 그러나 슬러지 내의 높은 수분함량(70~80%)은 연소 시 에너지의 효율적 사용 관점에서 방해요소로 작용하고 있으며, 연소의 전 단계 과정으로 이들 수분을 증발시켜야 함으로써 이 과정에서 막대한 양의 열량이 필요하고 보조로 투입해야 하는 에너지나 연료량이 많은 것이 문제점이다. 유동층 연소로는 다른 연소로에 비해 이런 함수율을 높은 슬러지의 연소에 적합한 것으로 인정받고 있다.

유동층 연소로는 유동화의 구조 및 특성에 따라 기포 유동층(BFB, Bubbling Fluidized Bed)과 순환 유동층(CFB, Circulating Fluidized Bed)으로 나눌 수 있다. 순환 유동층은 유동화 공기의 속도가 기포 유동층에 비해 높아 고속의 공기 유속에 의해 입자가 순환된다. 유동물질의 순환으로 연소로의 모든 부분으로 연소영역이 확대되고, 난분해성 물질의 체류시간을 증대시켜 충분히 분해되게 하는 장점이 있다.

현재의 유동층 연소 방법은 슬러지 등을 탈수 건조한 후 연소시키거나, 또는 연소로 내에서 보조 연료를 이용해 건조 및 연소를 동시에 병행하는 시스템이 대부분으로 건조 설비 설치와 운영 및 보조연료 사용 비용

상승 등의 비효율적인 면이 내포되어 있다. 본 연구에서는 이런 문제점들을 해결하기 위해 기존의 내부 순환 유동층 방법중 하나로 연소가스 흐름이 로 내에서 이중으로 순환되게끔 제작한 이중 순환식 유동층 연소로를 채택하였다. 이는 이중 순환식 유동층 연소로는 기존의 연소로보다 더 작게 만들 수 있고 슬러지뿐만 아니라 다양한 연료를 사용할 수 있기 때문이다.[2,3] 또한 연소가스의 흐름이 이중으로 순환함으로써 로 내에서 건조 및 연소가 동시에 이루어져 함수율을 높은 슬러지가 완전 연소 처리될 것으로 예상된다.

또한 최근에는 유동층 연소로에 2차 공기(Secondary Air)를 적극적으로 활용하는 경향이 있는데 이는 첫째, 연소 후 배출되는 NO_x, CO 등의 공해물질(pollutants)를 제어하기 위한 Staged Combustion이 목적이고 [4, 5, 6], 둘째는 연소 과정에서 혼합을 증대시켜 효율을 높이기 위함이다.[7] 또한 연소로 내의 체류시간을 증가시켜 반응시간을 충분하게 하는 목적도 있다. 따라서 본 연구에서는 이중 순환식 유동층 연소로를 이용해 저지 슬러지의 연소 특성 및 공해물질 배출 특성을 파악하고 2차 공기를 주입함으로써 공해물질이 저감되는 것을 파악하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용한 이중 순환식 유동층 연소로(ICFBC)의 흐름도는 Fig. 1에 나타내었다. 이중 순환식 유동층 연소로는 크게 공기 예열 장치, 연소로, 슬러지 주입부, 압축공기 공급부, 연소가스를 분석하는 가스 분석장치, 온도 및 압력측정 계기로 구성되어 있다.

이중 순환식 유동층 연소로는 내부에 해당하는 Riser와 외부의 Annulus로 구분되며, 내부는 SUS 310S로 외부는 SUS 304 재질로 제작되었다. Riser 부분은 1차 공기 주입부분의 내경이 직경 0.04m로 테이퍼진 형태로 이루어져 있으며 상단부는 내경이

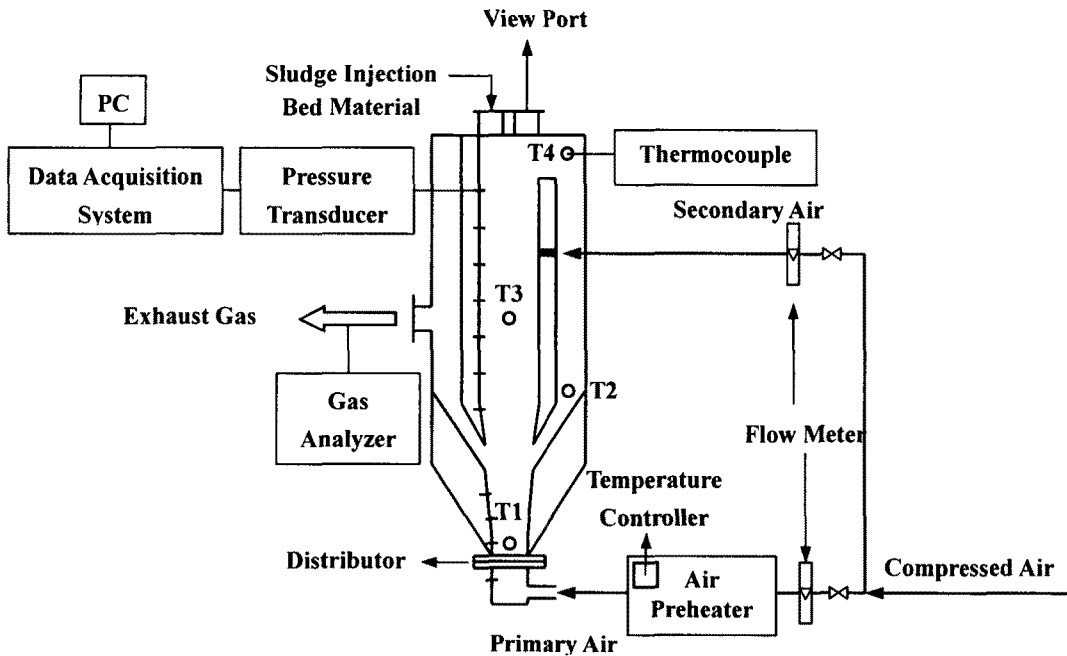


Fig. 1 Schematic Diagram of ICFBC

0.1m, 높이는 0.65m이다. Annulus 부분은 내경이 0.25m이고 높이는 Riser와 같다. 이중 순환식 유동층 소각로에 사용한 1차 공기분산판은 내경 6mm의 총 9개로 균일한 간격으로 뚫어서 제작한 다공형 분산판을 사용하였으며 screen을 깔아 유동사의 유입을 방지하였다. 제지슬러지의 주입은 연소가 주로 이루어지는 내부의 Riser에 직접 투입 되도록 연소로 상부에 주입위치를 설치하였고, 슬러지 주입부 옆에는 별도의 관측창을 내어 연소로 내부의 연소상태를 관찰할 수 있도록 제작하였다. 단열을 위해 연소로 전체 외벽에는 ceramic wool을 감아 단열시켰다.

그리고 연소로 각 지점에서의 온도를 측정하기 위해 높이별로 K-Type 열전대를 설치하였으며 측정된 온도는 자동기록계에 의해 연속적으로 기록되었다. 소각 후 배출되는 연소가스(O_2 , CO , CO_2 , NO_x , C_xH_y)를 측정하기 위해 배출구에 가스 채취구를 설치하였고 Gas Analyzer(GreenLine Mk2)로 측정되었다. 연소용 공기는 공기 압축기로부터 1차 및 2차 공기로 나뉘어져 로타메타를 거쳐 1차 공기는 공기 예열기 내에서 예열된 후 공기 분산판을 통해 연소로 내부로 주입

하였고, 2차 공기는 공기 분산판에서 0.4m Riser상부 지점에 반경방향으로 설치한 주입관을 통해 로 내로 주입하였다. Riser 상부로 배출된 연소가스는 Annulus를 거쳐 배출관을 통해 배출되었다.

2.2 실험방법

연소실험을 시작할 때는 먼저 층매질인 모래($d_p = 300\mu m$, $\rho_s = 2,240 \text{ kg/m}^3$)를 주입한 후 예열된 공기를 공급하면서 층내 온도가 $500^\circ C$ 가 될 때까지 가열시켜, 제지 슬러지(paper sludge)를 투입하였다. 실험은 슬러지의 함수율(water content)과 질량을 변화시켜서 수행하였다. 실험조건은 Table 1에 나타냈다.

1차 공기는 300lpm(liter per minute)을 주입하였으며 질량에 따른 수분함량을 변화시키면서 O_2 , CO , CO_2 , NO_x , C_xH_y (하이드로카본)의 농도를 가스 분석기에 의해 측정하였다. 2차 공기는 전체 공기량(300 lpm)에서 10%, 20%로 변화시키면서 실험하였다.

본 연구에서 사용된 제지 슬러지의 공업 분석치와 원소분석치를 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Experiment conditions

Parameters	Range
Water content (%)	14, 25, 35, 45, 62
Sludge weight (g)	30, 60, 90
Bed height (m)	0.15
Total air flow(lpm)	300
Secondary air ratio (SAR, %)	0, 10, 20
Bed temperature (°C)	500

제지 슬러지에 대한 발열량 측정은 별도로 하지 않았다. 발열량 계산은 Dulong식을 많이 사용하나 이것은 석탄과 같이 안정된 탄소성분이 주성분을 이루는 폐기물의 발열량 추정에 이용되며, 슬러지의 발열량 추정에는 Steuer 식이 발열량 예측에는 더 잘 맞는 것으로 알려졌으며 계산식은 다음과 같다.[7]

Steuer 식 :

$$\begin{aligned} \text{HHV} = & 8100\left(C - \frac{3}{8}O\right) + \\ & 34250\left(H - \frac{O}{16}\right) + \\ & 2500S + 5700\left(\frac{3}{8}O\right) \quad [\text{kcal/kg}] \end{aligned}$$

2.3 탄소전환율(Carbon conversion ratio)과 평균 탄소 전환 시간(mean carbon conversion time)[9]

배출되는 연소가스 중에 CO와 CO₂의 농도를 측정함으로써 원소 분석결과를 이용하여 계산한 탄소량과 측정을 통해 계산된 탄소량과의 비를 탄소 전환율(Carbon conversion ratio)로 정의하고 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Carbon conversion ratio}(\%) \\ = \frac{\text{carbon in emission}}{\text{carbon in fuel}} \times 100 \end{aligned}$$

Table 2. Composition of paper sludge used in the experiments

Proximate analysis	(wt, %)
Volatile matter	50.48
Fixed carbon	8.75
Ash	40.77
Ultimate analysis	(wt, %)
C	25.75
H	3.88
N	25.37
O	4.23
S	0.0
Calorific value	(kcal/kg)
HHV	2647

carbon in emission

$$\begin{aligned} N_{CE} [\text{mole}] \\ = \int_0^{t_B} \frac{Q}{22.4} (\chi_{CO} + \chi_{CO_2} + \chi_{C,H_1}) dt \end{aligned}$$

carbon in fuel

$$N_{CF} [\text{mole}] = \frac{f_c \times m_{fuel}}{12}$$

여기서 f_c , m_{fuel} , Q , χ , t_B 는 각각 연료 중의 탄소 함량, 투입된 연료의 질량, 연소 가스유량(lpm), 측정된 가스의 mole fraction, 총 연소시간이다.

평균 탄소 전환 시간은 유동층 연소에서 탄소 잔류량 추정에 가능한 인자로서 탄소의 유동층 내 평균 체류시간을 의미하고 다음과 같이 계산된다.

$$t_c = \int_0^{t_B} \left(1 - \frac{n_{CE}}{N_{CF}}\right) dt$$

여기서 n 은 특정 시간까지 탄소의 연소량이다.

배출가스 중 하이드로카본(C_xH_y)의 탄소 계수 x 를 구하였다. 그 산정근거는 다음과 같다.

$$x = \frac{[1 - (\chi_{CO} + \chi_{CO_2})]}{\chi_{C,H_1}}$$

여기서 χ_{CO} , χ_{CO_2} , $\chi_{C_xH_y}$ 는 투입되는 탄소 함량과의 비를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

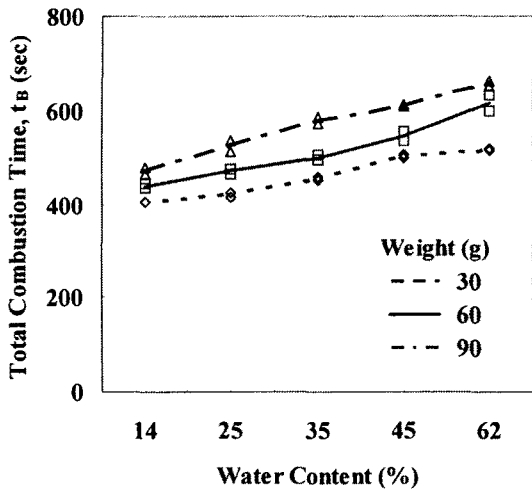


Fig. 2 Total Combustion Time

Fig. 2는 이중 순환식 유동층 연소로에서 투입한 슬러지 질량별 수분함량별 총 연소 시간을 나타낸 그림이다. 수분함량이 증가할수록 연소시간도 증가하는데 이는 수분함량이 많을수록 건조과정에서 시간이 길어지기 때문으로 판단된다.

Fig. 3는 이중 순환식 유동층 연소로에서 투입한 슬러지의 탄소량이 연소 후 얼마나 배출되는가를 알아보기 위해 제지 슬러지를 질량별로 수분함량을 달리하면서 연소 실험한 결과이다. 질량별로 수분함량에 따라 모두 같은 경향을 보이고 있다. 즉 수분함량 35%에서 가장 탄소 전환율이 좋았으며 35% 전후로 조금씩 떨어졌다. 그 중 본 연구에서는 질량이 60g인 경우가 가장 탄소 전환율이 90%이상으로 높았고 각각의 질량에서는 35%의 수분함량을 지닌 제지 슬러지에서 탄소 전환율이 90%이상으로 높게 나타났다.

Fig. 4은 제지 슬러지의 질량별 수분함량 변화에 따른 평균 탄소 전환 시간을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 수분 함량이 증가하면서 평균 탄소 전환 시간이 길어졌다. 이는 수분함량이 증가할수록 건조 과정이 길어져서 탄소가 반응하는데 시간이 걸리기 때문으로 판단된다. 최등[9]이 실험한 제지 슬러지에 대한 결과에서도 동일하게 나타나고 있다.

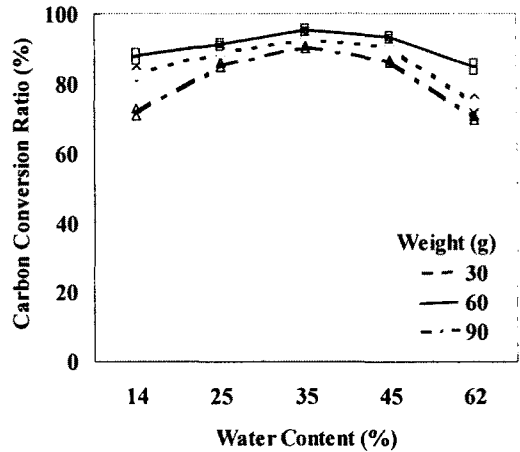


Fig. 3 Carbon Conversion Ratio

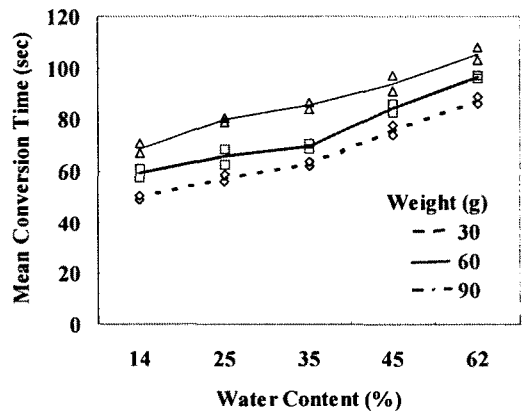


Fig. 4 Mean Conversion Time

Fig. 5는 35%의 수분함량을 가진 제지 슬러지에 대해 2차 공기비를 0%~20%까지 변화시키면서 탄소 전환율을 알아본 것이다. 2차 공기비가 증가할수록 탄소 전환율도 증가한다는 것을 알 수 있었다. 이는 2차 공기를 주입함으로써 2차 공기에 의해 미연입자의 로내 체류시간이 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 6는 2차 공기 주입비의 변화에 따른 CO의 배출농도를 나타내었다. 2차 공기비가 증가할수록 CO의 배출은 감소하였는데 이는 반경방향으로 2차 공기를 주입함으로써 연소로 내의 체류시간이 증가하여 CO가 CO₂로 전환한 것으로 판단된다. 이는 Fig. 7에서 CO₂의 배출량이 2차 공기비가 증가할

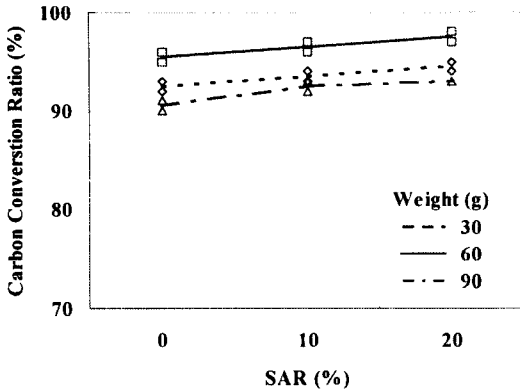


Fig. 5 Carbon conversion ratio by SAR

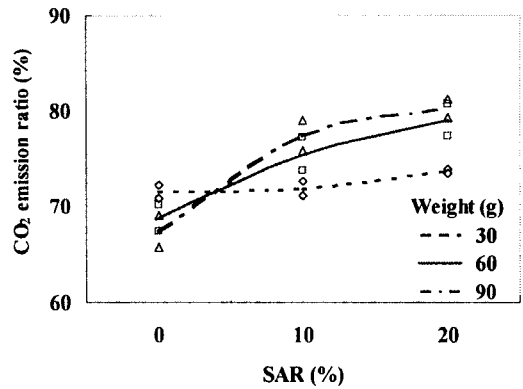


Fig. 7 CO₂ Emission

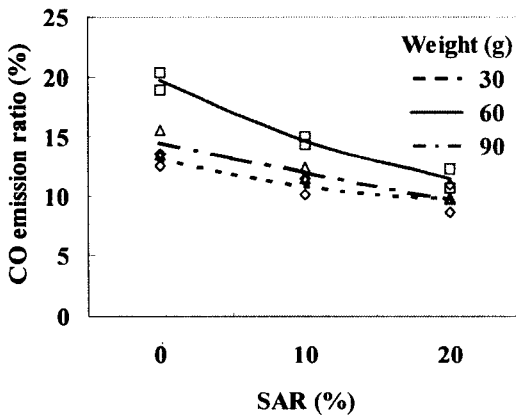


Fig. 6 CO Emission Ratio

수록 배출량도 증가하는 것으로 알 수 있다. 35%의 수분함량인 60g의 제지 슬러지의 경우 CO의 최고치를 비교했을 때 1차 공기만을 주입했을 때 9696 ppm이고 10%의 SAR을 주입했을 때 7108 ppm, 20%의 SAR일 때는 5144 ppm으로 점차 감소하였다.

Fig. 8은 2차 공기 주입비의 변화에 따른 NO_x의 배출농도를 나타내었다. 2차 공기비가 증가할수록 NO_x의 배출농도는 감소하는 것을 알 수 있다. 배출가스 분석결과 NO₂는 나오지 않았고 질소산화물은 NO가 전부였다.

Fig. 9은 제지 슬러지 연소시 배출되는 하이드로카본(C_xH_y)의 탄소계수 x를 알아본 것이다. 수분함량이 낮은 경우 x의 값이 높은 이유는 혼합에 의한 불완전 연소가 발생

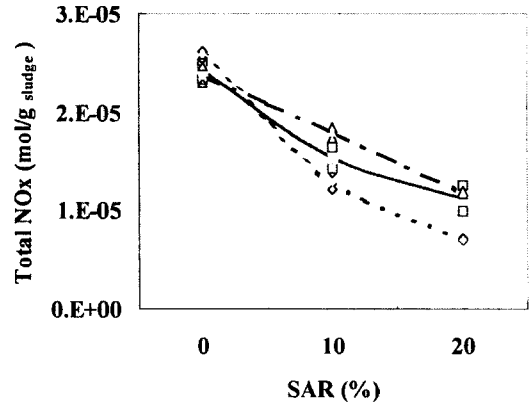


Fig. 8 Total NO_x Emission

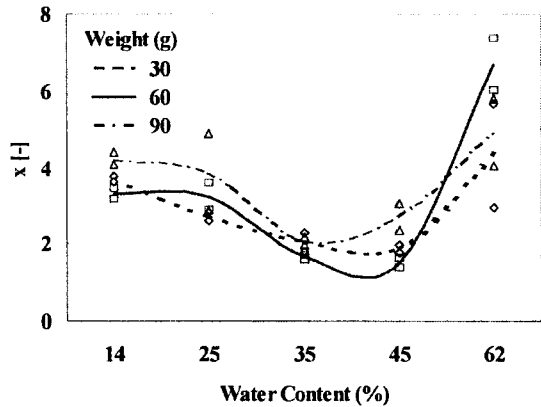


Fig. 9 Average carbon coefficient of exit HC, x

했기 때문에 판단되며 수분함량이 높은 경우는 온도 하강에 의한 불완전 연소가 일어났기 때문이다. 본 연구에서 최적의 연소

는 수분함량 35%~45%사이에서 발생한다고 할 수 있다. 제지 슬러지 30g과 90g에서는 유사한 경향을 보이지만 60g인 경우 62%에서 두 경우보다 다소 증가하였다.

Fig. 10은 본 연구에서 제작한 이중 순환식 유동층 연소로의 용량을 알아본 것이다. 산정 기준은 단위 면적당 단위시간당 투입량으로 정의되는 화상 부하율($\text{ton/hr} \cdot \text{m}^2$)을 이용하였다. 계산 결과는 살펴보면 탄소전환율이 90%이상인 경우 수분함량이 약 21~51%의 슬러지를 연소시킬 수 있으며 연소용량은 약 200~480 $\text{ton/hr} \cdot \text{m}^2$ 으로 추정된다. 그리고 탄소 전환율이 80%이상인 경우 수분함량은 약 14~62%의 슬러지를 연소시킬 수 있으며 연소용량은 180~550 $\text{ton/hr} \cdot \text{m}^2$ 으로 판단되었다. 본 연구에서 적정 용량은 탄소 전환율이 좋았던 60g슬러지의 경우로 연소 가능한 수분함량은 약 21~51%까지 가능하며 화상 부하율은 약 300~420 $\text{ton/hr} \cdot \text{m}^2$ 정도라고 할 수 있다.

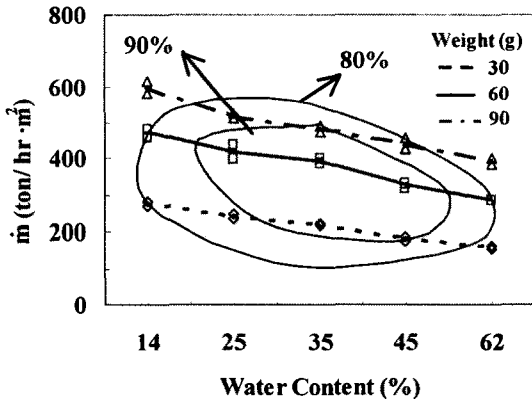


Fig. 9 Combustion Capacity

4. 결론

이중 순환식 유동층 연소로를 이용해 제지 슬러지에 대한 수분함량에 대한 실험과 2차 공기 주입을 하면서 실험을 수행하였다. 이 결과로부터 2차 공기의 주입이 CO, NO_x의 저감에 대하여 다음과 같이 평가할 수 있다.

1. 1차 공기만을 주입했을 때 제지슬러지는 35%의 수분함량에서 가장 높은 탄소 전

환율을 보였다. 이때 2차 공기 주입했을 때 탄소전환율이 증가하였다.

2. 투입량을 변화시켰을 때 60g에서 가장 높은 탄소전환율을 보였다.

3. 2차 공기비가 증가할수록 CO와 NO_x가 감소하였는데 이는 반경방향으로 2차 공기를 주입함으로써 staged combustion과 체류시간이 길어진 영향 때문으로 판단된다. 따라서 2차 공기의 적극적인 활용이 공해 저감과 효율증대에 효과적임을 알 수 있다.

4. 하이드로카본(C_xH_y)의 측정에서 수분함량과 x의 관계를 살펴보았다. 본 연구에서는 수분함량이 낮은 경우는 혼합에 의한 불완전연소가 수분함량이 높은 경우 온도 하강에 의한 불완전연소가 진행되었다. 본 연구에서의 최적의 연소는 수분함량 35%~45%에서 진행된다고 판단되었다.

후기

본 연구는 에너지 학술 진흥 사업(2000-C-CC03-P-02)의 일환으로 진행되었습니다.

참고문헌

- [1] 환경부, 2000 '99 하수도 통계.
- [2] Lukanda, M., Christophe G., and Robert, L., 1999, "Parameter Analysis and Scale-up Considerations for Thermal Treatment of Industrial Waster in an Internally Circulating Fluidized Bed Reactor," Chem. Eng. Sci., Vol. 54, pp. 3071~9078.
- [3] Lukanda, M., Christophe G., and Robert, L., 1999, "Modeling of an Internally Circulating Fluidized Bed Reactor for Thermal Treatment of Industrial Solid Wastes," Can. J. Chem. Eng. Vol. 77, pp. 420~431
- [4] Brem, G. and Brouwers, J. J. H., 1991, "Mathematical Modeling of Staged Combustion in an AFBC," Fluidized Bed Combustion, Vol. 1, pp. 449~458, ASME.
- [5] Gulyurtlu, I. K., Bordalo, C. and

- Cabrita, I. A., 1995, "The Effect of Staging of Reburning Fuel to Reduce NO_x and N₂O Levels during Fluidised Bed Coal Combustion," Fluidized Bed Combustion, Vol. 2, pp. 1351~1357, 1995.
- [6] Lyngfelt, A. and Leckner, B., 1999, "Combustion of Wood-chips in Circulating Fluidized Bed Boilers-NO and CO Emissions as Functions of Temperature and Air-staging," Fuel, Vol. 78, pp. 1065~1072.
- [7] Takahashi K, 1999, "Combustion Improvement in Fluidized Bed Sewage Sludge Incinerator," Proc. of 5th International Conference on Incineration for Clean Environment, pp. 337~343.
- [8] 환경 시리즈 2, 폐기물 소각로 - 계획과 설계, 환경연구회편, 문지사, 1993.
- [9] 최진환, 박영호, 최상민, 2001 "고체 폐기물 연료의 유동상 연소-연료 특성 및 운전 인자 변화," 한국폐기물학회지, Vol 18, No 3, pp. 1~9.