

급속냉각형 순환유동층 열교환기의 다이옥신 저감성능 연구

박 상 일

한국에너지기술연구원 고효율에너지연구본부

A Study on Dioxin Reduction Characteristics of Rapid Cooling Type Circulating Fluidized Bed Heat Exchanger

Sang-il Park

ABSTRACT: The flow and heat transfer performance were measured at high temperatures in CFB heat exchanger with multiple risers and downcomers. The theoretical model for predicting heat exchanger performance was developed in this study. The model predictions were compared with the measured heat transfer rates to show relatively good agreement. The maximum gas cooling rate was 20,300 °C/sec, and the dioxin reduction rate was 68%.

Key words: Circulating fluidized bed(순환유동층), Heat exchanger(열교환기), Rapid cooling(급속냉각), Prediction model(예측모델), Dioxin reduction(다이옥신 저감)

기 호 설 명

C_{Dm} : 유효 항력계수
 C_p : 비열
 d : 직경
 f : 접촉면적비
 g : 중력상수
 h : 열전달계수
 h_H : 입자군의 유효열전달계수
 h_w : 가스층의 유효열전달계수
 L : 길이
 k : 열전도도
 p : 압력
 Q : 전열량
 u : 유속
 U_m : 입자군의 유속

그리스 문자

δ : 가스층 간격
 ε : 기공율
 ρ : 밀도

하첨자

c : 접촉(contact)
 e : 유효(effective)
 g : 가스
 m : 입자군
 p : 입자
 w : 벽면(wall)

1. 서 론

소각로의 고온 배가스에는 다이옥신과 분진을 포함한 다량의 오염물질을 함유하고 있다. 이러한 고온 배가스의 열회수를 위하여 일반적으로 폐열보일

† Corresponding author
 Tel.: +82-42-860-3313; fax: +82-42-860-3102
 E-mail address: sipark@kier.re.kr

러를 사용한다. 이 경우, 폐열보일러의 배가스가 냉각되는 과정에서 다이옥신이 재합성되어 다이옥신의 농도가 증가하게 된다.⁽¹⁾ 본 연구에서는 다관형 순환유동층 열교환기에서의 배가스의 급속냉각 특성을 고찰하기 위하여 유동 및 전열 성능실험과 이론적 분석을 수행하였다. 본 연구의 다관형 순환유동층 열교환기의 열전달계수의 예측 모델은 Mickley and Fairbanks⁽²⁾의 renewal model을 일부 수정하여 개발하였다. 그리고 전열성능에 대한 예측 모델의 계산 결과와 실험 결과를 비교하여 본 연구의 해석 모델의 타당성을 검증하였다. 이러한 해석 모델을 사용하여 계산한 가스의 온도분포로부터 가스의 냉각속도를 결정하였다. 본 연구의 실험결과, 석회석을 사용한 다관형 순환유동층 열교환기에서 850°C에서 250°C까지의 가스의 최대냉각속도는 최대 20,300°C/sec이며, 다이옥신의 제거율은 68% 정도이다.

2. 실험장치 및 방법

고밀도의 다관형 순환유동층 열교환기의 고온에서의 유동 및 열전달 성능을 측정하기 위하여 Fig. 1과 같은 실험장치를 제작하였다.

이러한 실험장치는 연소실, 버너, 열교환실험장치, 공기유량계, 송풍기, 물펌프, 물유량계, datalogger와 압력계로 구성되어 있다. 열교환기 전열관 규격은 25A이며, 수직전열관의 높이는 600mm이고, 상승관(riser)은 20개이며 하강관은 4개이다.

본 연구에 사용한 고체입자는 직경이 0.1 mm - 0.15 mm의 석회석이다. 전열관 배열의 상부에 고체입자와 가스를 분리하기 위한 입자분리장치를 설치하여 고체입자가 열교환기의 외부로 방출되는 것을 방지하였으며 전열관 배열의 밑에는 다공판을 설치하였다.

그리고 전열관의 외부에 수냉자켓을 설치하여 고온의 배가스를 냉각하였다. Datalogger와 열전대를 사용하여 전열관에서의 배가스와 물의 입출구온도를 측정하였다. 오리피스 유량계를 사용하여 배가스유량을 측정하고, 물의 유량은 oval type 물유량계로 측정하였다. 고체입자 하강관에서 고체입자의 순환유량을 밸브를 사용하여 측정하였다. 그리고 상승관과 전체 열교환기의 압력손실을 측정하였다. 이러한 실험을 통하여 여러

가지 순환유동층 열교환기 운전 조건에 대하여 고체입자의 투입량을 변경하면서 순환유동층 열교환기의 유동 및 전열성능을 측정하였다. 그리고 다이옥신 및 염화수소의 저감율도 측정하였다.



Fig. 1 CFB heat exchanger test apparatus

3. 실험결과 및 고찰

순환유동층 열교환기의 고온 실험장치에서의 가스유량에 따른 가스의 입출구온도와 총 압력손실의 변화를 측정하였다. Fig. 2에 가스온도의 측정 결과를 나타내었으며, 이 경우 가스입구온도는 모두 850°C 이상이며, 가스출구온도는 모두 200°C 이하이다. Fig. 3에 가스유량에 따른 총 압력손실의 변화를 나타내었다. 총 압력손실은 대략 200 - 300 mmH₂O 정도이다.

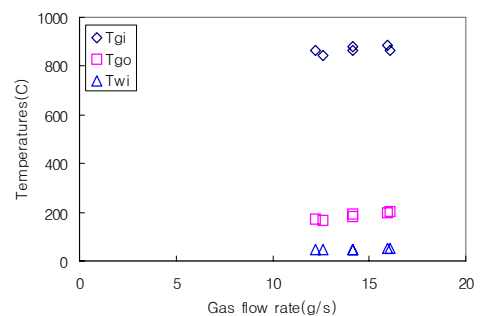


Fig. 2. Gas and water temperatures.

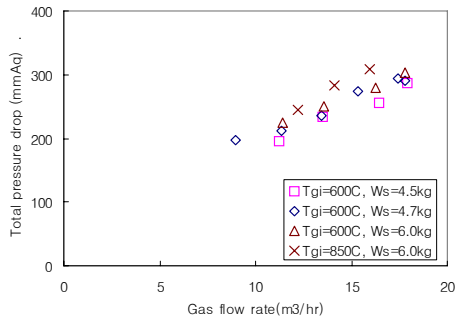


Fig. 3. Total pressure drop.

고온성능실험에서 상승관에서의 압력손실과 하강관에서의 고체입자 순환유량을 측정하였다. Fig. 4에 가스유량에 따른 상승관 압력손실의 변화를 나타내었다. 이 경우, 상승관 압력손실은 가스유량과 온도가 증가하면서 함께 증가하며, 또한 고체입자의 체류량과 함께 증가한다. Fig. 5에 가스유량에 따른 고체입자 유량과 가스 유량의 비율의 측정결과를 나타내었다. 이 경우, 입자와 가스의 유량비는 가스유량, 가스온도와 고체입자 체류량의 증가와 함께 증가한다. 여기서 입자와 가스의 유량비는 최대 28.2 까지 증가하는 것으로 나타난다.

고온성능실험에서 가스와 물의 입출구온도와 유량을 측정하여 열교환기 전열량과 열효율을 계산하였다. Fig. 6에 가스유량과 가스온도에 따른 전열량의 변화를 나타내었다. 전열량은 가스유량과 가스온도에 따라 증가한다. 그리고 Fig. 7에 가스유량에 따른 열교환기의 열효율의 변화를 나타내었다. 이 경우, 열효율은 가스유량의 증가에 따라 감소하며, 가스입구온도의 영향은 크지 않다.

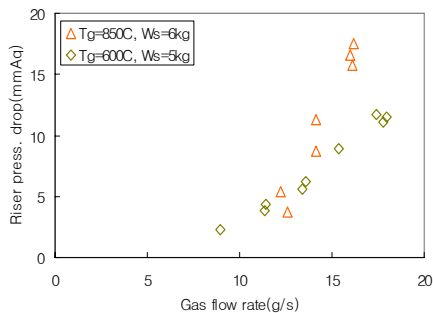


Fig. 4. Gas side pressure drop in riser.

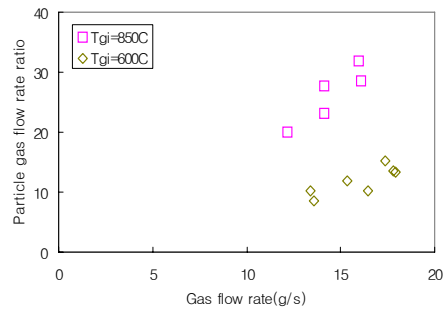


Fig. 5. Ratio of particle to gas flow rate.

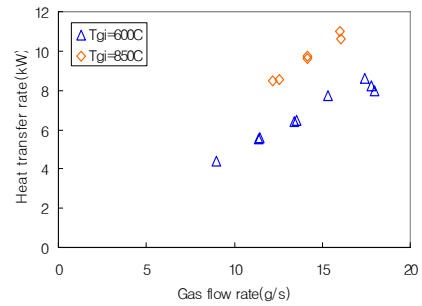


Fig. 6. Variation of heat transfer rates.

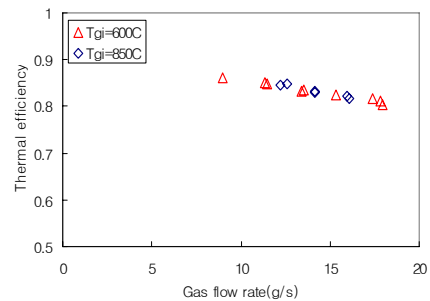


Fig. 7. Variation of thermal efficiencies.

4. 유동특성 및 열전달계수 예측모델

순환유동층 열교환기의 상승관에서의 2상유체 유동을 1차원으로 가정하여 상승관에서의 고체입자의 유속변화 그리고 2상유체의 압력손실을 다음의 관계식을 사용하여 계산하였다.

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{3}{4} C_{Dm} \rho_f \frac{(U_f + U_p)^2}{(\rho_p - \rho_f) D_p} - g - \frac{2f_s U_p^2}{D}$$

$$\Delta P_T = \int_0^L \rho_p(1-\epsilon)g dL + \frac{2f_g \rho_f U_f^2 L}{D} + \int_0^L \frac{2f_p \rho_p (1-\epsilon) U_p^2}{D} dL + \rho_p(1-\epsilon)U_p^2$$

위의 식에서 고체입자의 유속변화는 첫째 항으로부터 항력, 중력 그리고 마찰력에 의하여 영향을 받는다. 그리고 압력변화는 첫째 항으로부터 입자의 중력, 가스상 마찰력, 입자상 마찰력 그리고 가속도에 의하여 영향을 받는다.

그리고 순환유동층 열교환기에서의 열전달은 다음의 항으로 나타낼 수 있다.⁽³⁾

- Gas to particle heat transfer :

$$Q_{gp} = h_{gp} A_p (T_g - T_p)$$

- Particle to wall heat transfer :

$$Q_{pw} = h_{pw} A_{wall} \cdot f \cdot (T_p - T_{wall})$$

- Gas to wall heat transfer :

$$Q_{gw} = h_{gw} A_{wall} \cdot (1-f) \cdot (T_g - T_{wall})$$

여기서 h_{gp} 는 gas와 입자사이의 열전달계수, A_p 는 입자의 표면적, h_{pw} 는 입자와 상승관 전열면사이의 열전달계수, A_{wall} 은 상승관 전열면적, h_{gw} 는 gas와 상승관 전열면 사이의 열전달계수, 그리고 f 는 입자군의 전열면 접촉면적비율이다.⁽⁴⁾ 이러한 접촉면적비에 대한 여러 가지의 실험식들을 검토하여 결정하였다.

입자대류의 경우, Mickey and Fairbanks⁽²⁾는 기포유동층의 벽면에 접촉하는 입자군을 일정한 유효열전도도와 유효비열을 나타내는 균일한 재질로 가정하였다. 만약 입자군이 열투입깊이(thermal penetration depth)가 두꺼운 경우, 즉 열투입깊이가 1mm 보다 작고, 접촉시간이 1초 정도인 경우, 입자군을 반무한 열전도체로 가정할 수 있다. 이러한 경우, 시간평균의 열전달계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_H = 2 \left(\frac{k_p \rho_p c_p \epsilon_c}{\pi t_c} \right)^{1/2}$$

여기서 ϵ_c 는 0.6으로 가정하였다. 그리고 Gelperin and Einstein⁽⁵⁾은 입자군의 유효열전도도에 대한 경험식을 다음과 같이 보고하였다.

$$\frac{k_e}{k_g} = 1 + \frac{(1-\epsilon) \rho [1 - (k_g/k_p)]}{(k_g/k_p) + 0.28 \epsilon_c^{0.63} (k_p/k_g)^{0.18}}$$

Glicksman⁽⁶⁾은 입자군의 운동방정식을 풀어 입자군의 평균체류시간에 대한 이론식을 제시하였다.

$$L = \frac{U_m^2}{g} [\exp(-gt_c/U_m) - 1] + U_m t_c$$

Mickley and Fairbanks⁽²⁾의 renewal type의 모델은 입자군의 접촉시간이 짧은 경우, 입자군과 전열면 사이의 가스층을 고려하지 않기 때문에 정확한 예측 결과를 얻을 수 없다. 전열면의 가스층의 간격의 유효 열전달계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_w = k_g / (\delta d_p) \text{ where } \delta = 0.0282 (1-\epsilon)^{-0.59}$$

입자군의 열전달계수와 가스층의 열전달계수의 열저항을 직렬로 가정하여 renewal model을 적용하면, 입자군과 전열면의 열전달계수는 다음과 같다.

$$h_{pw} = \left[\frac{1}{h_H} + \frac{1}{h_w} \right]^{-1}$$

가스대류열전달(dispersed phase heat transfer)의 경우, 일반적인 유로 내에서의 난류유동에 대한 가스 대류의 열전달계수 산출 식을 사용하여 h_{gw} 를 계산하였다.⁽⁷⁾ 그리고 가스에서의 고체입자의 열전달계수(h_{gp})는 일반적인 유동층에서의 실험식을 사용하였다.⁽⁸⁾

5. 예측모델 결과 비교 및 가스냉각속도

다관형 순환유동층 열교환기에 대한 유동 및 전열 해석을 위한 모델을 개발하였다. 그리고 전열 성능 해석결과로서 모델을 사용한 전열량을 계산하였으며, 이러한 모델을 사용한 계산결과와 측정결과를 Fig. 8에 비교하여 나타내었다. 전열량의 비교결과, 전열량의 계산결과의 오차는 약 20% 이내로 나타나, 본 연구의 다관형 순환유동층 열

교환기의 유동 및 전열성능에 대한 해석모델의 정확성이 입증되었다고 판단된다.

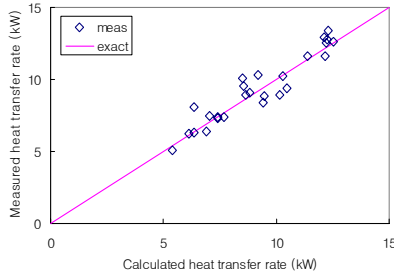


Fig. 8. Comparison between calculated heat transfer rates and measured ones.

다관형 순환유동층 열교환기의 고온 성능실험 결과 중에서 6가지의 실험 조건에 대하여 본 연구의 해석 모델을 사용하여 가스 및 고체입자의 온도분포와 압력분포를 계산하였다. 이러한 실험 조건들은 가스입구온도가 850°C 이상이다. 그리고 가스유량이 약 16g/s이며 고체입자의 체류량이 4 - 6 kg 범위에서 변화하는 경우와 고체입자의 체류량이 6kg이며 가스유량이 약 12 - 16 g/s 범위에서 변하는 경우이다. 이러한 6가지의 실험 조건과 이에 대한 모델의 해석결과를 Table 1에 나타내었다.

각 실험조건에서의 가스냉각속도는 모델해석결과로 얻은 가스온도분포로부터 가스온도가 850°C에서부터 250°C까지 냉각되는 시간을 계산하여 결정하였다. 이것은 다이옥신의 재합성 온도가 약 450°C - 250°C 범위인 것을 고려한 것이다. 가스냉각속도에 대한 계산 결과를 보면, 가스유속이 16g/s인 4가지 경우 모두 냉각속도가 10,000°C/sec 이상이며, 가스유속이 낮은 경우 냉각속도는 이보다 작게 나타났다.

최대의 가스냉각속도를 나타낸 실험조건을 보면, 가스유량이 16.2g/s이며 고체입자의 체류량이 6kg인 경우이다. 그리고 이 경우의 고체입자 유량은 457g/s로 고체입자와 가스의 유량비가 28.2 정도이다. 그리고 냉각시간은 0.01945sec로 냉각속도는 약 20,300°C/sec인 것으로 나타났다.

Fig. 9과 Fig. 10에 각 실험조건에서의 해석 모델을 사용한 가스와 고체입자의 시간에 따른 온도변화의 계산결과를 각각 나타내었다.

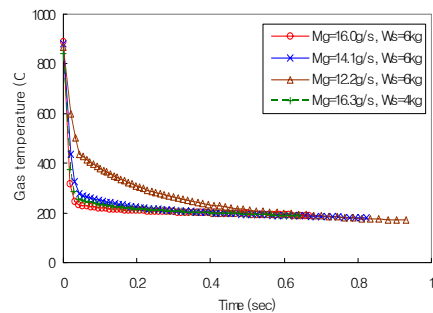


Fig. 9. Variation of calculated gas temperatures with time.

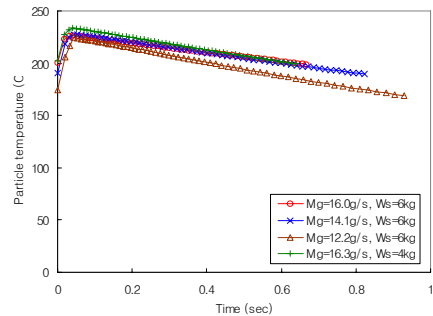


Fig. 10. Variation of calculated particle temperatures with time.

Table 1. Selected 6 experimental conditions and calculated gas cooling rates

No.	gas flow rate (g/s)	particle weight (kg)	gas inlet temp. (C)	particle inlet temp. (C)	particle flow rate (g/s)	cooling time (sec)	coolingrate (°C/sec)
1	16.2	6	855.3	204.9	457	0.02945	20,374
2	14.1	6	879.5	190.8	250	0.1000	5,968
3	12.2	6	867.0	174.1	115	0.3340	1,796
4	16.0	6	887.7	200.4	440	0.02962	20,257
5	16.3	5	835.3	199.7	377	0.03479	17,245
6	16.3	4	841.6	202.0	326	0.0500	12,000

소형 소각실험장치에 순환유동층 열교환기에서의 다이옥신 제거율을 측정하였다. 이러한 다이옥신 측정시의 배가스 유량은 16g/s이며, 고체입자 투입량은 4kg이다. 그리고 배가스 입구온도는 826°C이며, 출구온도는 188°C이고 가스의 냉각속도는 12,000 °C/sec 이다. 상승관에서의 압력손실은 13.5 mmAq 이며, 이론해석 모델을 사용하여 계산한 석회석 입자의 순환유량은 326 g/sec 이다. 따라서 석회석 입자와 배가스의 유량비는 20.4 로 나타났다.

석회석 순환유동층 열교환기의 전단과 후단에서 다이옥신과 HCl의 농도를 측정하였으며, 다이옥신의 경우 기체 상태와 고체 상태의 다이옥신을 분리하여 샘플링하여 측정하였다. Table 2에서 보면, 다이옥신의 저감율은 약 68% 정도이며, HCl의 경우의 저감율은 약 76% 인 것으로 나타나 순환유동층에서의 배가스 급속냉각에 의한 다이옥신 재형성 방지와 석회석 입자 유동화에 의한 다이옥신의 흡착에 의한 다이옥신의 저감 효과는 우수한 것으로 판단된다.

Table 2. Dioxin and HCl measurement results.

item	before heat exchanger	after heat exchanger	reduction rate
total dioxin [ng-TEQ/Sm ³]	26.93	8.53	68.3%
gas phase dioxin [ng-TEQ/Sm ³]	0.26	0.121	53.5%
solid phase dioxin [ng-TEQ/Sm ³]	26.57	8.41	68.3%
HCl [ppm]	656	154	76.5%

6. 결론

다관형 순환유동층 열교환기의 고온에서의 유동 및 전열성능을 측정하였으며 열교환기의 유동 및 전열성능에 대한 해석모델을 개발하였다. 다관형 순환유동층의 총 압력손실은 약 200 - 300 mmH₂O 이며, 열효율은 약 80 - 87%정도이다. 고체입자와 가스의 유량비는 28.2 까지 증가한다. 가스의 입구온도가 850°C이상인 실험조건에서 가스의 출구온도는 모두 200°C이하이다. 그리고 4가지의 선정된 실험조건에서 해석모델을 사용하여 계산한 850°C에서

250°C까지의 가스냉각속도는 10,000°C/sec 이상이며, 본 실험에서의 최대의 가스냉각속도는 20,300°C/sec 이다. 본 연구에서의 석회석 순환유동층에서의 급속냉각에 의한 다이옥신 재형성 방지와 석회석의 흡착에 의한 다이옥신의 제거율은 68% 이며, HCl의 제거율은 76% 이다.

참고문헌

1. 이재효외, 2002, 중형 폐기물 소각시설 냉각설비에서의 다이옥신 생성, 한국폐기물학회 논문집 제19권 제7호, pp. 895-903.
2. Mickley, H. S. and Fairbanks, D. F., 1955, Mechanism of heat transfer to fluidized beds, AIChE Journal, Vol. 1, No. 3, pp. 374-384.
3. 박상일, 2007, 다이옥신 저감을 위한 급속냉각형 열회수장치의 유동 및 전열특성 연구, 환경공동학술대회, pp.2427-2430.
4. Lints, M. and Glicksman, L. R., 1993, The structure of particle clusters near the wall of a circulating fluidized bed, AIChE symposium series, Vol. 89, No. 296, pp. 35-47.
5. Gelperin, N. I. and Einstein, V. G., 1971, Heat transfer in fluidized beds, Chapter 10 in Fluidization (eds Davidson, J. F. and Harrison, D.), Academic Press, New York, p. 471.
6. Glicksman, L. R., 1988, Circulating fluidized bed heat transfer, in circulating fluidized bed technology II, Basu, P. and Large, J. F., eds., Pergamon Press, Oxford, pp. 13-30.
7. Nusselt, W., 1931, Der Wärmeaustausch zwischen wand und wasser in rohr, Forsch. Geb. Ingenieurwes., Vol. 2, p. 309.
8. Kunii, D. and Levenspiel, O., 1969, Fluidization Engineering, John Wiley & Sons, Inc.