

고체입자 다단유동층 공기에열기의 이론적 성능해석

박상일, 최경빈
한국에너지기술연구소, 공업로연구팀

Theoretical Analysis of the Multistage Fluidized Bed Air Preheater

Sang Il Park and Kyong Bin Choi
Korea Institute of Energy Research, Industrial Furnace Research Team

1. 서론

다단유동층은 공업로부터 배출되는 다량의 분진을 함유한 부식성 배가스로 부터의 폐열 회수에 사용될 수 있다. 이러한 종류의 열교환기는 큐폴라, 유리용해로, 알루미늄 용해로와 소각로등에 적용된 사례가 있다⁽¹⁾. Toei and Akao는 다공판 형식의 다단유동층 건조기를 개발하였다⁽²⁾. Flamant and Gauthier는 다단유동층의 형식이 다공판인 경우와 overflow 형식인 경우를 비교하였다⁽³⁾. Gauthier and Flamant는 유동층에서의 loading 과 flooding 조건에 대한 실험식을 제시하였다⁽⁴⁾. 다단유동층에서 각 단에서 고체입자와 기체가 열평형을 이루는 경우에 대하여 이론식을 제세하였다⁽⁵⁾. 그러나, 유동층의 고체입자 밀도가 낮은 경우에는 고체입자의 체류시간이 짧기 때문에 고체입자와 기체의 열평형을 이룰 수 없다⁽⁶⁾. 이러한 경우, 유동층에서의 열평형을 가정한 이론식을 사용할 수 없다. 본 연구에서는 각 단의 유동층에서 열평형을 이루지 못할 경우에 대한 이론적인 해석을 수행하였으며, 이러한 해석을 위하여 유동층에서의 열평형을 나타내는 인자를 제시하였다. 이러한 인자를 사용함으로써 다단유동층 열교환기와 공기에열기의 성능에 대한 비교적 간단한 이론식을 유도하였다.

2. 다단유동층 공기에열기

Fig.1에 다단유동층 공기에열기의 개략도를 나타내었다. 고체입자 유동층의 경우, 고체입자의 비표면적이 매우 크며 열전달율이 높아, 고체입자는 유동층에서 기체와 급속하게 열평형을 이룰 수 있다. 이러한 경우의 다단유동층 열교환기의 열효율은 식(1)과 (2)와 같이 나타낼 수 있다⁽⁵⁾. 이 식에서 보면 열효율은 고체입자와 기체의 열용량비와 단수만의 함수로 나타난다.

$$\eta = \frac{k - k^{n+1}}{1 - k^{n+1}} \quad \text{for } k \neq 1 \quad (1)$$

$$\eta = \frac{n}{n+1} \quad \text{for } k = 1 \quad (2)$$

$$\text{where } k = \frac{\dot{m}_g C_{p_g}}{\dot{m}_s C_{p_s}}$$

각 단에서 열평형을 이룬 다단유동층 열교환기의 열효율의 단수에 따른 변화를 Fig.2에 나타내었다. 그리고 이러한 경우의 열효율의 열용량비에 따른 변화를 Fig.3에 나타내었다.

3. 다단유동층 열교환기의 이론해석

한 단의 유동층에서의 고체입자에로의 전열량은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_n = \dot{m}_s C_{p_s} (T_{s_o} - T_{s_i}) \quad (3)$$

이것은 역시 기체로부터의 전열량과 같으며 식(4)와 같다.

$$Q_n = \dot{m}_g C_{p_g} (T_{g_i} - T_{g_o}) \quad (4)$$

고체입자와 기체가 유동층에서 대향류를 이룬다고 가정하면 이러한 전열량은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_n = haH \Delta T_m \quad (5)$$

where

$$\Delta T_m = \frac{(T_{g_i} - T_{s_o}) - (T_{g_o} - T_{s_i})}{\ln((T_{g_i} - T_{s_o}) / (T_{g_o} - T_{s_i}))}$$

다음의 식(6)과 (7)이 i 번째의 유동층에 대하여 성립한다고 가정하면 식(3)-(5)로부터 식(8)을 유도할 수 있다.

$$\Delta T_i = T_{g_i} - T_{s_o} \quad (6)$$

$$\Delta T_{i-1} = T_{g_o} - T_{s_i} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta T_i}{\Delta T_{i-1}} = \exp \left[\left(\frac{haH}{\dot{m}_g C_{p_g}} \right) \left(1 - \frac{\dot{m}_g C_{p_g}}{\dot{m}_s C_{p_s}} \right) \right] \quad (8)$$

만약 식(8)이 다단유동층의 모든 단에서 성립한다고 가정하면 단수가 n 인 다단유동층 열교환기에 대하여 식(9)를 얻을 수 있다.

$$\Delta T_n / \Delta T_o = K_g^n \quad (9)$$

where

$$K_g = \exp \left[\left(\frac{haH}{\dot{m}_g C_{p_g}} \right) \left(1 - \frac{\dot{m}_g C_{p_g}}{\dot{m}_s C_{p_s}} \right) \right]$$

유동층에서의 고체입자와 기체와의 열평형 정도를 나타낼 수 있는 인자를 식(10)와 같이 제시하였다.

$$\phi = haH / (\dot{m}_s C_{p_s}) \quad (10)$$

그러면 식(9)의 K_g 는 식(11)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K_g = \exp[-(1-1/k_g)\phi] \quad (11)$$

식(3), (4) 와 (9)로부터, 다단유동층 열교환기의 열효율에 대한 이론식을 식(12)와 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_g = \frac{T_{so} - T_{si}}{T_{gi} - T_{si}} = \frac{k_g(1 - k_g K_g^{-n})}{(1 - k_g K_g^{-n})} \quad \text{when } k_g \neq 1 \quad (12)$$

$$\eta_g = (n\phi)/(1+n\phi) \quad \text{when } k_g = 1 \quad (13)$$

따라서 다단유동층 열교환기의 열효율은 단수, 열용량비, 열평형도의 3가지 인자만의 함수로 나타낼 수 있다. 여기서 열평형도는 본 연구에서 제시한 인자인 ϕ 로 표시할 수 있다.

식(12)과 (13)을 식(1)과 (2)와 비교하면, 유동층에서 고체입자와 기체가 열평형을 이룬 경우의 인자, ϕ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = \frac{\ln k_g}{1 - 1/k_g} \quad (\text{or } K_g = 1/k_g) \quad \text{when } k_g \neq 1 \quad (14)$$

$$\phi = 1 \quad \text{when } k_g = 1 \quad (15)$$

Fig.2 와 Fig.3에 $k=1$ 인 경우의 다단유동층 열교환기의 단수 (n) 과 열평형도 (ϕ)의 영향을 나타내었다. 그리고 $n=5$ 과 $\phi=0.5$ 인 경우의 열용량비의 영향을 Fig.4 과 Fig.5에 나타내었다.

4. 공기에열기에 대한 이론 해석

다단유동층 공기에열기는 고체입자를 가열하는 다단유동층과 연소용 공기를 예열하는 다단유동층으로 이루어진다. 이 경우, 공기에열용 다단유동층 열교환기의 열효율은 식(16)과 (17)과 같다.

$$\eta_a = \frac{k_a(1 - k_a K_a^{-n})}{1 - k_a K_a^{-n}} \quad \text{when } k_a \neq 1 \quad (16)$$

where

$$k_a = (\dot{m}_a C_{p_a}) / (\dot{m}_s C_{p_s})$$

$$K_a = \exp[-(1-1/k_a)\phi]$$

$$\text{and } \eta_a = n\phi/(1+n\phi) \quad \text{when } k_a = 1 \quad (17)$$

이 경우, 다단유동층 공기에열기의 열효율은 다음과 같다.

$$\eta_T \equiv \frac{T_{ao} - T_{ai}}{T_{gi} - T_{ai}} = \frac{1/k_a}{1/\eta_g + 1/\eta_a - 1} \quad (18)$$

그리고 공기에열기의 열효율을 각각의 인자의 함수로 표시하면 다음과 같다.

$$\eta_T = \frac{1/k_a}{\frac{1-1/k_g}{K_g^{-n_g}-1} + \frac{1-1/k_a}{K_a^{-n_a}-1} + 1} \quad \text{when } k_g \neq k_a \neq 1 \quad (19)$$

$$\eta_T = \frac{1}{1/(n_g \phi_g) + 1/(n_a \phi_a) + 1} \quad \text{when } k_g = k_a = 1 \quad (20)$$

$k_g = k_a = 1$ 인 경우의 공기에열기의 열효율의 변화를 Fig.6에 나타내었다. 여기서 $\phi = 1$ 은 열평형을 나타낸다. 그리고 공기에열기의 열효율의 열용량비의 영향을 Fig.7에 나타내었으며 $\phi = \max$ 는 역시 열평형을 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서는 비교적 고체입자의 체류시간이 짧아서 고체입자와 기체가 열평형을 이루지 못한 경우에 대한 다단유동층 열교환기의 열효율에 대한 이론식을 제시하였다. 유동층에서 열평형도를 나타내는 인자 (ϕ)를 도입하였으며, 이 경우 다단유동층 열교환기의 열효율은 n , k and ϕ 의 3가지 인자만의 함수로 표시할 수 있다. 열평형을 이룬 경우의 ϕ 를 열용량비 (k) 의 함수로 나타내었다. 그리고 다단유동층 열교환기와 공기에열기의 열효율의 이러한 3가지 인자에 따른 변화를 나타내었다.

사용기호

A	: 면적	a	: 비표면적
Bi	: Biot 수 (hr/k_s)	C_p	: 비열
Fo	: Fourier 수 ($a_s/\rho_s C_p s$)	h	: 대류열전달계수
H	: 고체입자 체류량	k	: 열용량비
K_g	: 식(9)의 변수	\dot{m}	: 고체입자의 유량
n	: 단수	ΔP_B	: 고체입자에 의한 압력손실
Qn	: 유동층의 전열량	r	: 고체입자의 반경
T	: 온도	t	: 시간
ΔT_m	: 대수평균온도차		

하첨자

a	: 공기	g	: 가스
i	: 입구	o	: 출구
s	: 고체입자		

Greek symbols

η	: 열효율	ρ_s	: 고체입자의 밀도
ϕ	: 식(10)의 인자		

참고문헌

1. Schadt, H. F.: "High-Efficiency Fluid-Bed Heat Exchanger Recovers Heat from Combustion Gases," *Ind. Heat Exchanger*, pp.71-79 (1985).
2. Toei, R. and Akao, T.: "Multistage Fluidized Bed Apparatus with Perforated Plates," *Inst. Chem. Engrs. Symp. Series 30*, pp.34-42 (1968).
3. Flamant, G. and Gauthier, D.: "Multistage Fluidized Bed Heat Exchangers : Comparison between the Perforated Plates System and the Overflow Pipe System Up to 500 °C," XVIII ICHMT Symposium, Dubrovnik Yougoslavia, Sep. (1985).
4. Gauthier, D. and Flamant, G.: "Heat Recovery by Perforated-Plate Multistage Fluidized Bed Exchangers," *Heat Recovery System & CHP*, Vol.8, No.1, pp.9-21 (1988).
5. Kunii, D. and Levenspiel, O.: *Fluidization Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., New York (1969).
6. Park, S. I. and Park, Y. J.: "Multi-stage fluidized bed heat exchangers," *Energy R&D*, Vol.15, No.1, pp.144-156 (1993).

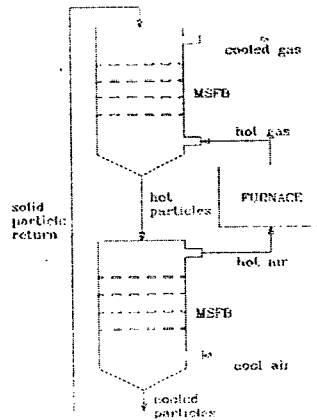


Fig. 1. Schematic of multi-stage fluidized bed air preheater.

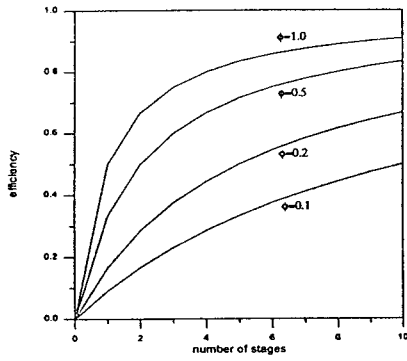


Fig. 2. Effect of n on η of MSFB heat exchanger ($k=1$).

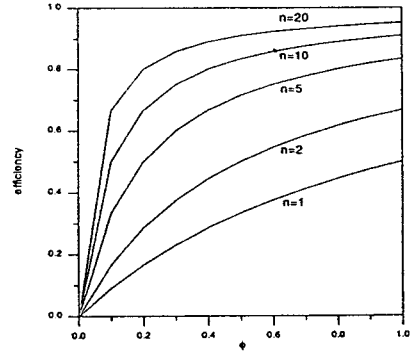


Fig. 3. Effect of ϕ on η of MSFB heat exchanger ($k=1$).

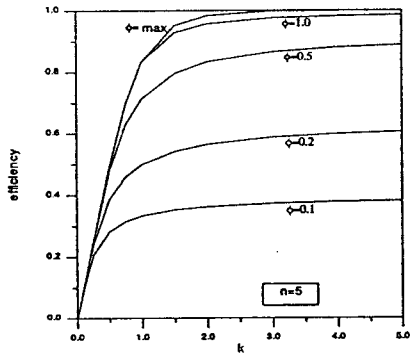


Fig. 4. Effect of k on η of MSFB heat exchanger ($n=5$).

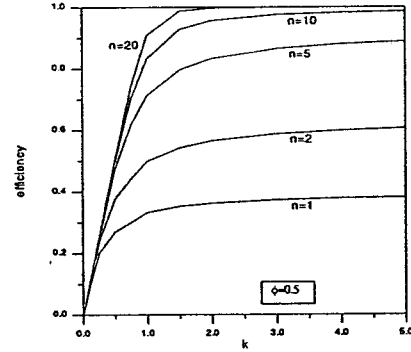


Fig. 5. Effect of k on η of MSFB heat exchanger ($\phi=0.5$).

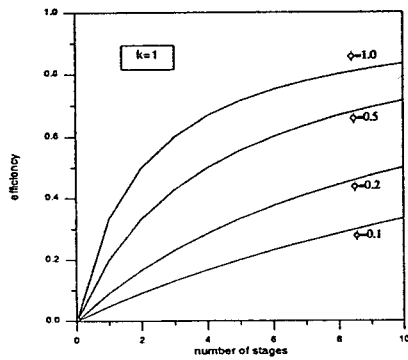


Fig. 6. Effect of n on η of MSFB air preheater ($k_g = k_a = 1$).

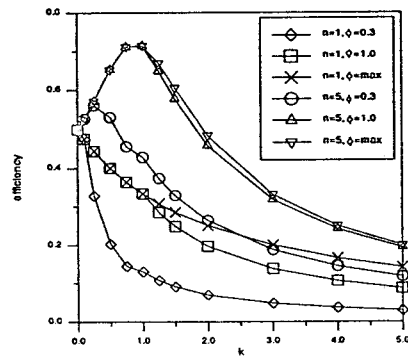


Fig. 7. Effect of k on η of MSFB air preheater.