

고체입자 다단유동층 공기에열기의 최적화

박상일, 최경빈, 권기영*
한국에너지기술연구원, 공업로연구팀
한국과학기술원, 화학공학과*

Optimization of the Multistage Fluidized Bed Air Preheater

Sang Il Park, Kyong Bin Choi, Ki Young Kwon*
Korea Institute of Energy Research, Industrial Furnace Research Team
Korea Advanced Institute of Science & Technology, Dept. of Chemical Engineering*

1. 서론

다단유동층은 공업로에서 배출되는 다량의 분진을 함유한 부식성 배가스로부터의 폐열회수에 사용될 수 있다. 그러나 유동층에서 고체입자의 밀도가 낮은 경우 충분한 열평형이 이루어지지 않게 된다.⁽¹⁾ 본 연구에서는 열평형이 이루어지지 않는 경우에 대한 이론적 해석⁽²⁾을 기초로 하여 최적화 조건을 정하기 위한 이론적인 식을 유도하였다.

2. 다단유동층 열교환기의 최적화

2-1. 다단유동층 열교환기의 이론해석

한단의 유동층에서의 고체입자에로의 전열량은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 이것은 역시 기체로부터의 전열량과 같으며 식(2)와 같다.

$$Q_n = \dot{m}_s C_{p_s} (T_{so} - T_{si}) \quad (1)$$

$$Q_n = \dot{m}_g C_{p_g} (T_{gi} - T_{go}) \quad (2)$$

고체입자와 기체가 유동층에서 대향류를 이룬다고 가정하면 이러한 전열량은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_n = haH \Delta T_m \quad (3)$$

where
$$\Delta T_m = \frac{(T_{gi} - T_{so}) - (T_{go} - T_{si})}{\ln((T_{gi} - T_{so}) / (T_{go} - T_{si}))}$$

단수가 n인 다단유동층 열교환기에 대하여 식(4)를 얻을 수 있다.

$$\Delta T_n / \Delta T_0 = K_g^n \quad (4)$$

where
$$K_g = \exp[-(1 - 1/k_g)\phi], k = (\dot{m}_g C_{p_g}) / (\dot{m}_s C_{p_s}), \phi = haH / (\dot{m}_s C_{p_s})$$

식 (1), (2)와 (4)로부터 다단유동층 열교환기의 열효율에 대한 이론식을 구한다⁽²⁾.

$$\eta_g = \frac{T_{so} - T_{si}}{T_{gi} - T_{si}} = \frac{k_g(1 - K_g^{-n})}{1 - k_g K_g^{-n}} \quad \text{when } k_g \neq 1 \quad (5)$$

$$\eta_g = (n\phi) / (1 + n\phi) \quad \text{when } k_g = 1 \quad (6)$$

유동층에서 고체입자와 기체가 열평형을 이룬 경우의 인자 ϕ_{\max} 는 다음과 같다.

$$\phi_{\max} = \frac{\ln k_g}{1 - 1/k_g} \quad (\text{or } K_g = 1/k_g) \quad \text{when } k_g \neq 1 \quad (7)$$

$$\phi_{\max} = 1 \quad \text{when } k_g = 1 \quad (8)$$

2-2. 순이익 및 최적화

다단유동층 열교환기의 사용함으로써 열회수에 의해 절감되는 비용과 송풍기를 사용하는 것에 의한 지출비용을 고려할 수 있다. 다단유동층 열교환기에 대한 이론식⁽²⁾으로부터 순이익을 구하면 식(9),(10)과 같다.

$$\text{net cost} = \frac{C}{211.1} \dot{m}_g C_{p_g} \Delta T \frac{1 - \exp(\alpha)}{1 - k_g \exp(\alpha)} - \frac{\dot{m}_g \Delta P_B}{1.103} \quad \text{when } k_g \neq 1 \quad (9)$$

$$\text{net cost} = \frac{C}{211.1} \dot{m}_g C_{p_g} \Delta T \frac{1}{1 + \frac{\dot{m}_g C_{p_g}}{A \Delta P_B \text{ha}}} - \frac{\dot{m}_g \Delta P_B}{1.103} \quad \text{when } k_g = 1 \quad (10)$$

$$\text{where } C = \frac{\text{kg 당 연료비}}{\text{kWh 당 전기료}}, \quad \alpha = \left(1 - \frac{\dot{m}_s C_{p_s}}{\dot{m}_g C_{p_g}}\right) \left(\frac{A \Delta P_B \text{ha}}{\dot{m}_s C_{p_s}}\right)$$

식(9),(10)에서 \dot{m}_s 가 증가하면 순이익이 일정한 값으로 수렴하며, ΔT 는 선형적으로 증가하는 경향을 갖는다. 따라서 최적화의 대상은 \dot{m}_g 와 ΔP_B 가 된다 (Fig. 1, 2). 최적값을 구하면, \dot{m}_g 에 대해서 식(11),(12)를, ΔP_B 에 대해서는 식(13)~(15)를 얻는다.

$$\frac{1 + (\alpha_{\text{opt}} - 1) \exp(\alpha_{\text{opt}})}{(1 - k_{\text{opt}} \exp(\alpha_{\text{opt}}))^2} = \frac{191.4 \Delta P_B}{C C_{p_g} \Delta T} \quad \text{when } k_g \neq 1 \quad (11)$$

$$\dot{m}_{g, \text{opt}} = \frac{A \Delta P_B \text{ha}}{C_{p_g}} \left(\sqrt{\frac{C C_{p_g} \Delta T}{191.4 \Delta P_B}} - 1 \right) \quad \text{when } k_g = 1 \quad (12)$$

$$\Delta P_{B, \text{opt}} = \sqrt{\frac{C \dot{m}_g C_{p_g}^2 \Delta T}{191.4 A \text{ha}}} - \frac{\dot{m}_g C_{p_g}}{A \text{ha}} \quad \text{when } k_g = 1 \quad (13)$$

$$\Delta P_{B, \text{opt}} = \frac{\dot{m}_s C_{p_s}}{A \text{ha} (1 - 1/k_g)} \ln \left[\frac{1 + 2k_g \beta + \sqrt{1 + 4k_g \beta}}{2k_g^2 \beta} \right] \quad \text{when } k_g > 1 \quad (14)$$

$$\Delta P_{B,opt} = \frac{\dot{m}_s C_{p_s}}{Aha(1-1/k_g)} \ln \left[\frac{1 + 2k_g\beta - \sqrt{1 + 4k_g\beta}}{2k_g^2\beta} \right] \quad \text{when } k_g < 1 \quad (15)$$

where $\beta = \frac{191.4\dot{m}_g}{(k_g - 1)^2 AhaC\Delta T}$

다단유동층 열교환기에 있어서 고체 체류량이 늘어나게 되면 어느 정도까지는 열교환기의 효율이 증가하므로 열회수에 의한 이익이 증가하지만, 그 이상으로 늘어나게 되면 더 이상 열교환량이 증가되지 않으므로 열회수에 의한 이익분이 일정해진다. 이를 이용하여 단수의 영향을 첨가하면 순이익의 열회수 부분의 ΔP_B 는 식(16)에 정의된 ΔP_B^* 로 바뀐다.

$$\Delta P_B^* = \begin{cases} \Delta P_B & \text{when } \Delta P_B < \Delta P_{B,max} \\ \Delta P_{B,max} & \text{when } \Delta P_B \geq \Delta P_{B,max} \end{cases} \quad (16)$$

where $\Delta P_{B,max} = \frac{n\dot{m}_s C_{p_s}}{Aha} \phi_{max}$

압력손실과 단수에 대한 최적화 조건은 각각 식(17), (18)~(19)와 같다.

$$\Delta P_B = \Delta P_{B,max} = \Delta P_{B,opt} \quad (17)$$

$$n_{opt} = \frac{Aha\Delta P_{B,opt}}{\dot{m}_s C_{p_s}} \frac{1-1/k_g}{\ln k_g} \quad \text{when } k_g \neq 1 \quad (18)$$

$$n_{opt} = \frac{Aha\Delta P_{B,opt}}{\dot{m}_s C_{p_s}} \quad \text{when } k_g = 1 \quad (19)$$

\dot{m}_g 에 대한 최적화 문제는 k_g 의 값에 따라 달라지는데, $k_g = 1$ 인 경우는 단수의 영향을 고려하여도 순이익의 최대값이 변하지 않아 식(12)를 이용하면 되며, $k_g \neq 1$ 인 경우는 수치해를 구하여야 한다.

2-2. 기타 변수들의 영향

물성치인 C_{p_g} , C_{p_s} 를 제외한 변수들의 조합에서 Aha 와 $C\Delta T$ 가 커지면 $\Delta P_{B,opt}$ 와 n_{opt} 및 순이익의 최대값이 증가하는 것을 볼 수 있다 (Fig.5~7). n_{opt} 에 대해서는 A 와 ΔT 의 영향이 동일하게 나온다.

3. 다단유동층 공기예열기의 최적화

3-1. 순이익 및 최적화

다단유동층 공기예열기에 대한 이론식⁽²⁾으로부터 공기예열기의 순이익을 구하면 식 (20), (21)과 같다.

$$\text{net cost} = \frac{C\dot{m}_g C_{p_g} \Delta T'}{211.1} \frac{1 - \exp(\alpha)}{2 - k_g - k_g \exp(\alpha)} - \frac{\dot{m}_g \Delta P_B}{0.5515} \quad \text{when } k_g \neq 1 \quad (20)$$

$$\text{net cost} = \frac{C\dot{m}_g C_{p_g} \Delta T'}{211.1} \frac{1}{1 + \frac{2\dot{m}_g C_{p_g}}{A \Delta P_B h a}} - \frac{\dot{m}_g \Delta P_B}{0.5515} \quad \text{when } k_g = 1 \quad (21)$$

공기에열기의 경우는 \dot{m}_s 도 최적화의 대상이 된다. 각 변량들에 대한 최적화 조건 및 단수의 영향을 고려한 순이익은 2-2에서와 같은 방법을 이용하여 구할 수 있다. Fig. 8~10은 단수의 영향을 고려한 순이익의 변화를 나타낸 것이다.

3-2. 기타변수들의 영향

식(9), (10)과 식(20), (21)이 유사한 형태를 보이고 있으므로, 기타변수의 영향 역시 동일하게 나타난다.

4. 결론

본 연구에서는 다단유동층 열교환기와 다단유동층 공기에열기에서 고체입자와 기체가 열평형을 이루지 못하는 경우에 대한 이론식으로부터 열교환기와 공기에열기를 최적화할 수 있는 조건식들을 제시하였다. 다단유동층 열교환기의 경우, 최적화의 대상이 되는 변수들은 \dot{m}_g 와 ΔP_B , 단수이며 다단유동층 공기에열기의 경우는 \dot{m}_g 와 \dot{m}_s , ΔP_B , 단수가 최적화의 대상이 되었다. 각각의 변수들에 대해 최적조건에서의 관계식을 제시하고 최적운전조건이 존재하는 것을 확인하였다. 최적화의 대상이 되지 않는 다른 변수들에 대해서도 순이익과 최적값에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

사용기호

A	: 면적	a	: 비표면적
C	: 식 (9),(10)의 인자	C_p	: 비열
h	: 대류열전달계수	H	: 고체입자 체류량
k	: 열용량비	K_g	: 식 (4)의 변수
\dot{m}	: 유량	n	: 단수
net cost	: 순이익	ΔP_B	: 고체입자에 의한 압력손실
Q_n	: 유동층의 전열량	T	: 온도
ΔT	: $T_{gi} - T_{si}$	$\Delta T'$: $T_{ao} - T_{ai}$
ΔT_m	: 대수평균온도차		

상첨자

i : i번째 단

하첨자

a : 공기
 i : 입구
 o : 출구
 s : 교체입자

g : 가스
 max : 최대값
 opt : 최적값

Greek symbols

α : 식 (9)의 변수
 η : 열효율

β : 식 (4)의 변수
 ϕ : 식 (14),(15)의 인자

참고문헌

1. Park, S. I. and Park, Y. J.: "Multi-stage fluidized bed heat exchangers," Energy R&D, Vol.15, No.1, pp.144-156 (1993).
2. Park, S. I. and Choi, K. B.: "Theoretical Analysis of the Multistage Fluidized Bed Air Preheater", Energy R&D, pp.147-152 (2000).

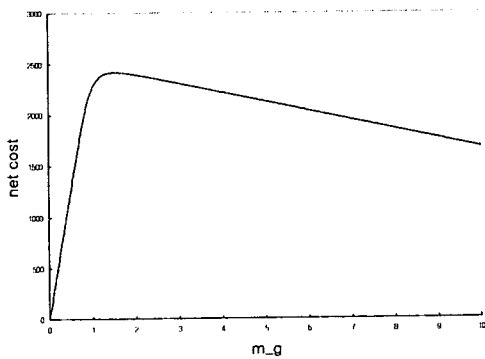


Fig.1 \dot{m}_g vs. net cost

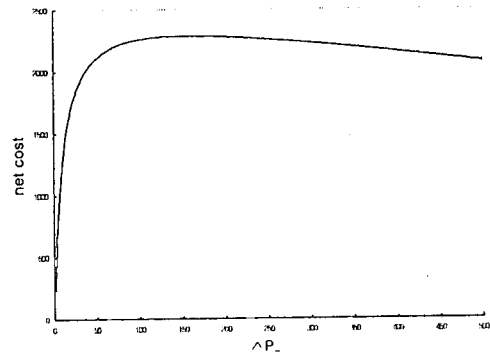


Fig.2 ΔP_B vs. net cost

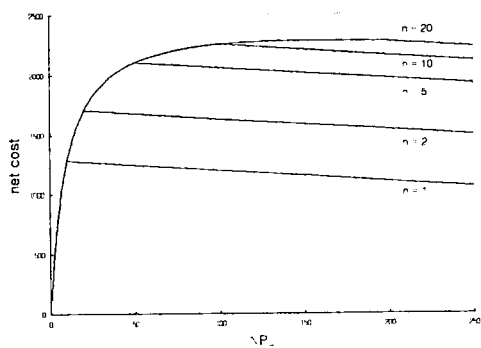


Fig.3 ΔP_B vs net cost with various n ($k_g=1$)

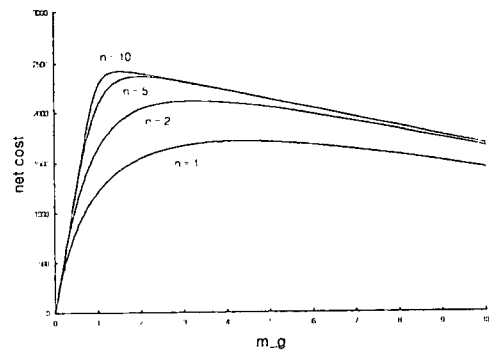


Fig.4 \dot{m}_g vs net cost with various n ($k_g \neq 1$)

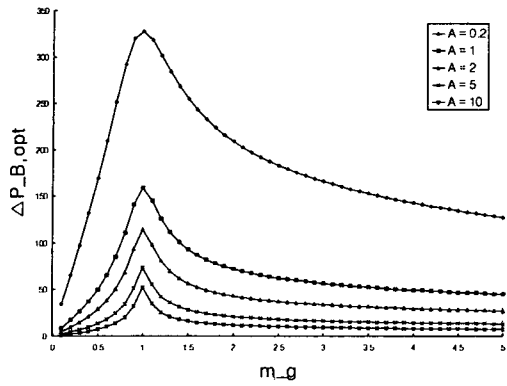


Fig.5 \dot{m}_g vs $\Delta P_{B,opt}$ with various A

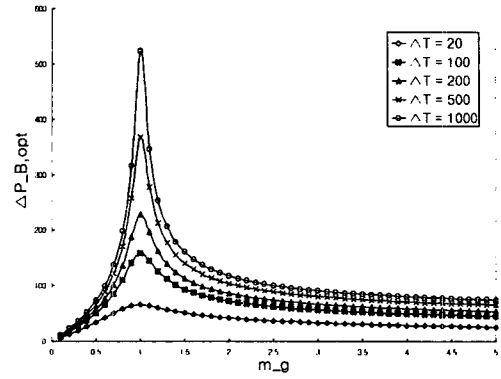


Fig.6 \dot{m}_g vs $\Delta P_{B,opt}$ with various ΔT

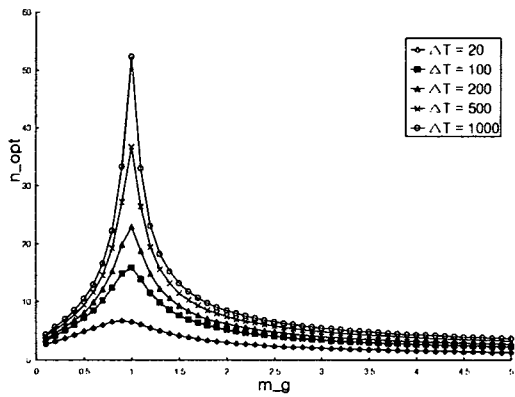


Fig.7 \dot{m}_g vs n_{opt} with various A

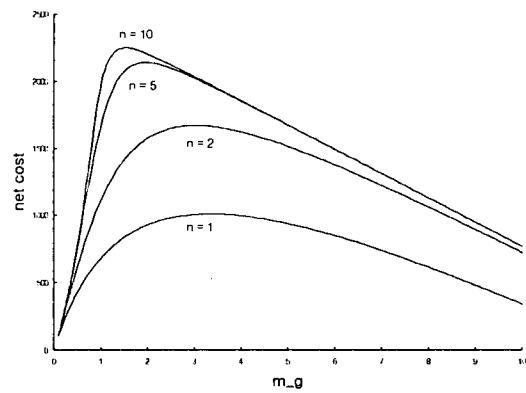


Fig.8 \dot{m}_g vs. net cost with various n ($k_g \neq 1$)

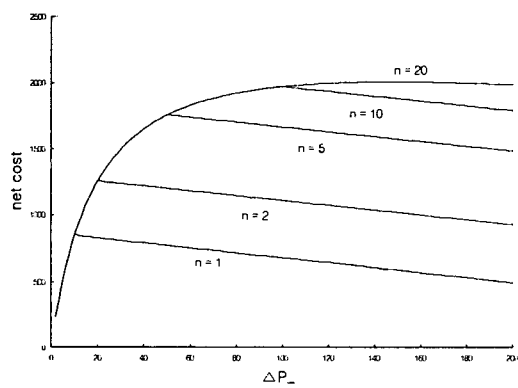


Fig.9 ΔP_B vs. net cost with various n ($k_g = 1$)

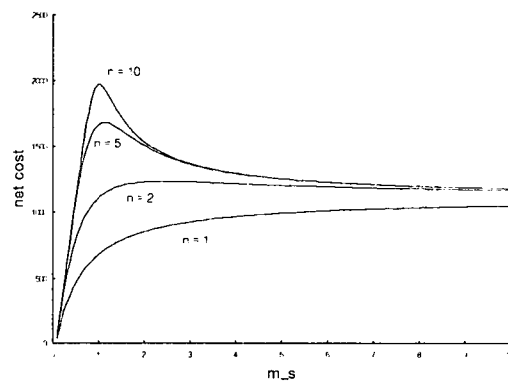


Fig.10 \dot{m}_s vs. net cost with various n ($k_g \neq 1$)