[I] 緒 言

充填層の有効熱伝導度に関する研究は Kling¹⁰⁾ に始まり非常に多くの報告がなされている^{2,3,4)}。すなわち流れをとまなう場合の有効熱伝導度については Wilhelm¹⁶⁾ の基本微分方程式による解析, Ranz¹⁴⁾ による流れと直角方向への流体混合に関する研究あるいは Argo & Smith¹⁾ らの理論式などがある。一方流れをとまなわない場合については Schumann & Voss^{5,6,8)} らが半理論式をだしている。また本邦においても八田・前田・川添^{7,12,13)} の研究さらに輻射伝熱をも考慮した矢木・国井^{11,19,20)} の理論式がある。しかしながらこれらの研究はいずれも充填層粒子の層数が充填層半径方向に非常に多くある場合について検討されたもので、層数少ない場合をも考慮に入れた理論解析は未だなされていない。またこれら解析結果と実験結果との比較検討も比較的高温の場合はあまり行なわれてはいない。

かかる見地を立て、筆者らは流れをとまなわない充填層有効熱伝導度について、熱伝達と電流の相似則を応用し層数少ない場合をも考慮に入れた理論解析を行ない、さらに高温における種々の実験結果と照合し式の検討を行った。

[II] 式 の 誘 導

流れをとまなわない充填層内の伝熱機構を、

- i) 固体内の伝導 ①
- ii) 隣接する固体の接触面を通しての伝熱 ②
- iii) 充填層内空間にあるガスの対流伝熱 ③
- iv) 隣接固体間輻射伝熱 ④
- v) 空間を通しての1層とびの固体・固体間輻射伝熱 ⑤

からなっていると考える(2層とびあるいはそれ以上の固体・固体間輻射伝熱は一応無視する)。

この伝熱機構を模型化して示せば Fig. 1 のようである。

ここで熱伝達と電流の相似則から、

$$\left. \begin{aligned} q &= k(\Delta T / \Delta x) S \\ i &= E / R \end{aligned} \right\}$$

より $\Delta x / kS$ を抵抗と考える。

同様にして輻射では $\sigma T^3 \Delta T S$ から $1 / \sigma T^3 S$ を抵抗とする。

いま Fig. 2 において、

R_1 : 粒子内伝導抵抗, R_2 : 固体接触抵抗, ガスの対流伝熱抵抗および固体固体間輻射射伝熱抵抗にもとづく全抵抗, R_3 : 空隙を通して1層とび輻射伝熱抵抗とする。

まず半径方向に充填粒子が1ヶすなわち層数1の場合は, Fig. 3 より、

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1 + 2R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{R_3(R_1 + 2R_2)}{R_1 + R_3 + 2R_2} \quad (1)$$

となる。

- ① heat transfer through solid
- ② heat transfer through the contact surface of solid
- ③ heat transfer by convection of fluid
- ④ heat transfer by radiation from packing to packing
- ⑤ heat transfer by radiation from packing to packing beyond a packing

Fig. 1 A model of heat transfer in packed bed

Fig. 2 A model of thermal resistance in packed bed

* 昭和34年3月25日

** 名古屋大学工学部化学工学科

Fig. 3 A model of thermal resistance in one packed layer

Fig. 4 A model of thermal resistance in two packed layers

Fig. 5 A model of thermal resistance in n packed layers

また層数 2 の場合は, Fig. 4 より,

$$\left. \begin{aligned} i_1 + i_1' &= i_1'' + i_1' + i_2' = i_2 + i_2' = i \\ i(R_2 + R_1) + i_1'' R_2 &= i_1' R_3 \\ i_1'' R_2 + (R_1 + R_2) i_2 &= i_2' R_3 \\ E &= (R_1 + R_2) i_1 + i_1'' R_2 + (R_1 + R_2) i_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

よって,

$$\frac{E}{i} = R = \frac{R_1 R_2 + R_2 + 2 R_1 R_3 + 3 R_2 R_3}{R_1 + 3 R_2 + R_3} \quad (3)$$

となる。

一般に n 層ならば, Fig. 5 より,

$$\begin{aligned} i &= i_1 + i_1' = i_2 + i_2' = i_3 + i_3' = \dots = i_n + i_n' \\ &= i_1'' + i_1' + i_2' = i_2'' + i_2' + i_3' = \dots = i_{n-1}'' + i_{n-1}' + i_n' \end{aligned}$$

また,

$$\begin{aligned} i_1(R_1 + R_2) + i_1'' R_2 &= i_1' R_3 \\ i_1'' R_2 + i_2 R_1 + i_2'' R_2 &= i_2' R_3 \\ &\dots\dots\dots \\ i_{n-1}'' R_2 + i_n(R_1 + R_2) &= i_n' R_3 \end{aligned}$$

よって

$$\left. \begin{aligned} i_1(R_1 + 2R_2 + R_3) + i_2 R_2 &= (R_2 + R_3)i \\ i_2 R_2 + i_2(R_1 + 2R_2 + R_3) + i_3 R_2 &= (2R_2 + R_3)i \\ &\dots\dots\dots \\ i_{n-1} R_2 + i_n(R_1 + 2R_2 + R_3) &= (R_2 + R_3)i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

となり, この解を求めればよい。

一般に,

$$i_{n-1} R_2 + (R_1 + 2R_2 + R_3) i_n + R_2 i_{n+1} = (2R_2 + R_3) i$$

の解は,

$$R_2 \alpha^2 + (R_1 + 2R_2 + R_3) \alpha + R_2 = 0$$

の根を α_1, α_2 とし,

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{aligned} \right\} = -\frac{R_1 + 2R_2 + R_3}{2R_2} \pm \sqrt{\left(\frac{R_1 + 2R_2 + R_3}{2R_2}\right)^2 - 1}$$

$$i_n = C_1 \alpha_1^n + C_2 \alpha_2^n + \frac{2R_2 + R_3}{R_1 + 2R_2 + R_3} i$$

で与えられる。

C_1, C_2 は常数でこれを決めるため, (4) 式の第 1 を代入すると,

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{R_1 + 2R_2}{R_1 + 4R_2 + R_3} \frac{\alpha_2^{n+1} - 1}{\alpha_2^{n+1} - \alpha_1^{n+1}} i \\ C_2 &= \frac{R_1 + 2R_2}{R_1 + 4R_2 + R_3} \frac{1 - \alpha_1^{n+1}}{\alpha_2^{n+1} - \alpha_1^{n+1}} i \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

となる。一方全電圧 E は,

$$\begin{aligned} iR = E &= i_1(R_1 + R_2) + i_1'' R_2 + i_2 R_1 + i_2'' R_2 + \dots \\ &\quad + i_{n-1}'' R_2 + i_n(R_1 + R_2) \\ &= (i_1 + i_2 + \dots + i_n)(R_1 + 2R_2) - iR_2(n-1) \\ &= (R_1 + 2R_2) \left\{ C_1 \frac{\alpha_1(1 - \alpha_1^n)}{1 - \alpha_1} + C_2 \frac{\alpha_2(1 - \alpha_2^n)}{1 - \alpha_2} \right\} i \\ &\quad + \left\{ \frac{(R_1 + 2R_2)(2R_2 + R_3)}{R_1 + R_3 + 4R_2} n - (n-1)R_2 \right\} i \end{aligned}$$

これに C_1, C_2 の値を入れると,

$$\begin{aligned} R &= \frac{2R_2(R_1 + 2R_2)^2}{(R_1 + 4R_2 + R_3)^2} \frac{\alpha_2 - \alpha_1 + \alpha_2^n - \alpha_1^n - \alpha_2^{n+1} + \alpha_1^{n+1}}{\alpha_2^{n+1} - \alpha_1^{n+1}} \\ &\quad + \frac{(R_1 + 2R_2)(2R_2 + R_3)}{R_1 + 4R_2 + R_3} n - (n-1)R_2 \quad (6) \end{aligned}$$

となる。さて (1), (3), (6) 式に R_1, R_2, R_3 の値をそれぞれ代入して $R = nl/k_s S$ として k_s すなわち有効熱伝導度をもとめることができる。これから層数変化による有効熱伝導度の値を知りうる。

[Ⅲ] 式の検討ならびに応用

上式より見て判るように R_1, R_2, R_3 などがわかれば有効熱伝導度をもとめることができるが, それらの抵抗は Fig. 6 からわかるように,

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{l_s}{k_s S_s}, \quad R_2' = \frac{l_s'}{k_s' S_s'}, \quad R_2'' = \frac{l_v}{k_v S_v}, \\ R_2''' &= \frac{1}{\sigma' T^3 S_v'}, \quad R_3 = \frac{1}{\sigma'' T^3 S_v''}, \\ \frac{1}{R_2} &= \frac{k_s' S_s'}{l_s'} + \frac{k_v S_v}{l_v} + \sigma' T^3 S_s, \quad R = \frac{nl}{k_s S} \end{aligned}$$

Fig. 6 A model of thermal resistance in packed bed

となる。ここで、 $l_s, S_s, S_s', \dots$ などの値や考え方については議論の余地があるが一応諸家の考え方^{9,18,19,20)}にならって、

$$l = l_p = \beta D_p, \quad l_s = \tau D_p, \quad l_s' = \tau' D_p, \quad l_v = \varphi D_p,$$

$$S_s = (1 - \epsilon^{1.3}) S, \quad S_s' = \delta S, \quad S_v = (1 - \epsilon^{1.3} - \delta) S,$$

$$S_v' = \epsilon^{1.3} S$$

とおくことにする。

いま n が充分大きい場合について考えて見ると、その場合は6式の第1項は消えて、

$$\begin{aligned} \frac{R}{n} &= \frac{(R_1 + 2R_2)(2R_2 + R_3)}{R_1 + 4R_2 + R_3} - \frac{(n-1)}{n} R_2 \\ &= \frac{R_1 R_3 + R_1 R_2 + R_2 R_3}{R_1 + 4R_2 + R_3} \end{aligned} \quad (7)$$

となる。

これより、

$$\frac{n}{R} = \frac{k_s S}{l} = \frac{\frac{l_s}{k_s S_s} + \frac{1}{\sigma'' T^3 S_v'} + \frac{4}{\frac{k_s' S_s'}{l_s'} + \frac{k_g S_v}{l_v} + \sigma' T^3 S_v}}{\left(\frac{l_s}{k_s S_s} \right) \left(\frac{1}{\sigma'' T^3 S_v'} \right) + \left\{ \left(\frac{l_s}{k_s S_s} \right) + \left(\frac{1}{\sigma'' T^3 S_v'} \right) \right\} \frac{1}{\frac{k_s' S_s'}{l_s'} + \frac{k_g S_v}{l_v} + \sigma' T^3 S_v}}$$

よって、

$$\frac{k_s}{k_g} = \frac{\frac{k_g l_s S}{k_s l S_s} + \frac{k_g S}{\sigma'' T^3 S_v' l} + \frac{4}{\frac{k_s' S_s' l}{k_g S l_s'} + \frac{S_v l}{S l_v} + \frac{\sigma' T^3 S_v l}{k_g S}}{\left(\frac{k_g l_s S}{k_s l S_s} \right) \left(\frac{k_g S}{\sigma'' T^3 S_v' l} \right) + \left(\frac{k_g S l_s}{k_s S_s l} + \frac{\sigma' T^3 S_v l}{\sigma'' T^3 S_v' l} \right) \frac{1}{\frac{k_s' S_s' l}{k_g S l_s'} + \frac{S_v l}{S l_v} + \frac{\sigma' T^3 S_v l}{k_g S}}}$$

したがって、

$$\begin{aligned} \frac{k_s}{k_g} &= \frac{\frac{k_g}{k_s} \frac{\tau}{(1 - \epsilon^{1.3}) \beta} + \frac{k_g}{\sigma'' T^3 \epsilon^{1.3} \beta D_p} + \frac{4}{\frac{k_s'}{k_g} \frac{\delta \beta}{\tau'} + \frac{(1 - \epsilon^{1.3} - \delta) \beta}{\varphi} + \frac{\sigma' T^3}{k_g} (1 - \epsilon^{1.3} - \delta) \beta D_p}}{\left[\frac{k_g}{k_s} \frac{\tau}{(1 - \epsilon^{1.3}) \beta} \frac{k_g}{\sigma'' T^3 \epsilon^{1.3} \beta D_p} + \left(\frac{k_g}{k_s} \frac{\tau}{(1 - \epsilon^{1.3}) \beta} + \frac{k_g}{\sigma'' T^3 \epsilon^{1.3} \beta D_p} \right) \frac{1}{\frac{k_s'}{k_g} \frac{\delta \beta}{\tau'} + \frac{(1 - \epsilon^{1.3} - \delta) \beta}{\varphi} + \frac{\sigma' T^3 (1 - \epsilon^{1.3} - \delta) \beta D_p}{k_g}} \right]} \\ &= \frac{\left[\frac{4 k_s (1 - \epsilon^{1.3}) \beta}{k_g \tau} \frac{\sigma'' T^3 \epsilon^{1.3} \beta D_p}{k_g} + \left(\frac{k_s}{k_g} \frac{(1 - \epsilon^{1.3}) \beta}{\tau} + \frac{\sigma'' T^3 \epsilon^{1.3} \beta D_p}{k_g} \right) \left(\frac{k_s'}{k_g} \frac{\delta \beta}{\tau'} + \frac{(1 - \epsilon^{1.3} - \delta) \beta}{\varphi} + \frac{\sigma' T^3 (1 - \epsilon^{1.3} - \delta) \beta D_p}{k_g} \right) \right]}{\frac{k_s}{k_g} \frac{(1 - \epsilon^{1.3}) \beta}{\tau} + \frac{\sigma'' T^3 \epsilon^{1.3} \beta D_p}{k_g} + \frac{k_s'}{k_g} \frac{\delta \beta}{\tau'} + \frac{(1 - \epsilon^{1.3} - \delta) \beta}{\varphi} + \frac{\sigma' T^3 (1 - \epsilon^{1.3} - \delta) \beta D_p}{k_g}} \end{aligned}$$

さて一応 $\beta = 1, \tau = 1, \delta = 0$ ^{19,20)} とすると、

$$\frac{k_s}{k_g} = \frac{\frac{4 k_s (1 - \epsilon^{1.3})}{k_g} \frac{(\sigma'' T^3 \epsilon^{1.3} D_p)}{k_g} + \left\{ \frac{k_s (1 - \epsilon^{1.3})}{k_g} + \frac{\sigma'' T^3 \epsilon^{1.3} D_p}{k_g} \right\} \left\{ \frac{(1 - \epsilon^{1.3})}{\varphi} + \frac{\sigma' T^3 (1 - \epsilon^{1.3}) D_p}{k_g} \right\}}{\frac{k_s (1 - \epsilon^{1.3})}{k_g} + \frac{\sigma'' T^3 \epsilon^{1.3} D_p}{k_g} + \frac{1 - \epsilon^{1.3}}{\varphi} + \frac{\sigma' T^3 (1 - \epsilon^{1.3}) D_p}{k_g}}$$

あるいは、

$$\frac{k_s}{k_g} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{k_s (1 - \epsilon^{1.3})}{k_g} + \frac{\sigma'' T^3 \epsilon^{1.3} D_p}{k_g}} + \frac{1}{\frac{1 - \epsilon^{1.3}}{\varphi} + \frac{\sigma' T^3 (1 - \epsilon^{1.3}) D_p}{k_g}} D_p}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{4 \frac{k_s}{k_g} (1 - \epsilon^{1.3}) \frac{\sigma'' T^3 \epsilon^{1.3} D_p}{k_g}}{\frac{k_s}{k_g} (1 - \epsilon^{1.3}) + \frac{\sigma'' T^3 \epsilon^{1.3} D_p}{k_g} + \frac{1 - \epsilon^{1.3}}{\varphi} + \frac{\sigma' T^3}{k_g} (1 - \epsilon^{1.3}) D_p} \\
& = \frac{(1 - \epsilon^{1.3})}{\left(\frac{k_g}{k_s} \right) \frac{1}{1 + \left(\frac{\sigma'' T^3 \epsilon^{1.3} D_p}{k_g} \right) \left(\frac{k_g}{k_s (1 - \epsilon^{1.3})} \right)} + \frac{1}{\frac{1}{\varphi} + \frac{\sigma' T^3}{k_g} D_p}} \\
& + \frac{\epsilon^{1.3} \sigma'' T^3 D_p}{\frac{1}{4} + \left\{ \frac{\sigma'' T^3 \epsilon^{1.3} D_p}{k_g (1 - \epsilon^{1.3})} + \frac{1}{\varphi} + \frac{\sigma' T^3 D_p}{k_g} \right\} \frac{k_g}{4 k_s}} \quad (8)
\end{aligned}$$

となる。

(8) 式が充填層粒子の層数が充分多い場合の一般式である。液充填の場合は輻射の項をはぶいて、

$$\frac{k_s}{k_g} = \frac{1 - \epsilon^{1.3}}{\frac{k_g}{k_s} + \varphi} \quad (9)$$

となる。

なお、 σ' 、 σ'' の値は矢木らにならって、

$$\begin{aligned}
\sigma' T^3 &= 0.1952 \left(\frac{p}{2 - p} \right) \left(\frac{t + 273}{100} \right)^3 \\
\sigma'' T^3 &= 0.1952 \frac{1}{1 + \frac{\epsilon}{2(1 - \epsilon)} \cdot \frac{1 - p}{p}} \left(\frac{t + 273}{100} \right)^3
\end{aligned}$$

を用いてよからう。 φ については、諸家の実測値¹⁷⁾ を (8) または (9) 式に代入して φ を計算しこれと ϵ との関係を図 7 に示した。計算にあたっては Fig. 7 より φ の値をもとめた。

さて上式の誘導にあたっては、空隙・空隙の輻射伝熱は次に固体を通しての伝熱となると考えたもので、すなわち固体伝導抵抗が常に考慮されているものであり、この点矢木ら^{19), 20)} の考え方ややことなっている。したがって輻射抵抗と固体伝導抵抗が充分差異があり、かつ空隙・空隙の輻射伝熱が有効熱伝導度に充分影響を与え

Fig. 7 Value φ calculated from previously reported data¹⁷⁾

る場合は両者の式から計算した値は開きがでてくる。

さて (8) 式は計算にあたってやや面倒であるので、いま (7) 式、

$$\frac{R}{n} = \frac{R_1 R_3 + R_2 R_3 + R_1 R_2}{R_1 + 4 R_2 + R_3}$$

において、

$$R_2 / R_1 = m, \quad R_3 / R_2 = h$$

とおけば、

$$R_3 = m h R_1$$

となり、したがって、

$$\frac{R}{n} = \frac{h R_1 + m h R_1 + R_1}{\frac{1}{m} + 4 + h}$$

$$\frac{R}{n R_1} = \frac{m(h + 1 + m h)}{4 m + m h + 1}$$

となる。

ここで、

$$\frac{R}{n R_1} = \frac{l}{k_s S} \cdot \frac{k_s S_a}{l_s} = \frac{D_p}{k_s S} \cdot \frac{k_s (1 - \epsilon^{1.3}) S}{D_p}$$

$$= \frac{k_s}{k_g} (1 - \epsilon^{1.3})$$

$$\frac{R_2}{R_1} = m = \frac{k_s (1 - \epsilon^{1.3}) S}{D_p}$$

$$= \frac{1}{\left\{ \frac{k_g}{D_p} (1 - \epsilon^{1.3}) + \sigma' T^3 (1 - \epsilon^{1.3}) \right\} S}$$

$$= \frac{k_s}{k_g} \frac{1}{\frac{1}{\varphi} + \frac{\sigma' T^3 D_p}{k_g}}$$

すなわち、

$$m \frac{k_s}{k_g} = \frac{1}{\frac{1}{\varphi} + \frac{\sigma' T^3 D_p}{k_g}}$$

となる。

また、

$$\frac{R_3}{R_2} = h = \frac{1}{\sigma'' T^3 \epsilon^{1.3} S} \left\{ \frac{k_g}{\varphi D_p} (1 - \epsilon^{1.3}) + \sigma' T^3 (1 - \epsilon^{1.3}) \right\} S$$

ここで近似的に $\sigma'' = \sigma'$ とおくならば

$$= \frac{(1 - \epsilon^{1.3})}{\epsilon^{1.3}} \left[\frac{1}{\left(\frac{\sigma' T^3 D_p}{k_g} \right) (\varphi)} + 1 \right]$$

Fig. 8 Relation between R_2/R_1 , $(R_1/R_1) \left(\frac{k_g}{h_g} \right)$ and ϵ , $\frac{\sigma' T^3 D_p}{R_g}$

となる。よって m , h を ϵ , $\frac{\sigma' T^3 D_p}{k_g}$ のパラメータで図示しておけば有効熱伝導率は近似的ながら非常に容易にもとめることができる。このようにして図示したのが Fig. 8 である。

層数少ない場合も同様にもとめうるが、たとえば、 $R_2=R_3$ としたとき、 $R_2/R_1=m$ として、

$$\begin{aligned} n=1; \quad \frac{R}{n} &= R_1 \left\{ \frac{m(1+2m)}{(1+3m)} \right\} \\ n=2; \quad &= R_1 \left\{ \frac{m(3+4m)}{(1+4m)} \right\} \times \frac{1}{2} \\ n=3; \quad &= R_1 \frac{m(8m^2+13m+5)}{7m^2+6m+1} \times \frac{1}{3} \\ n=\infty; \quad &= R_1 \frac{m(2+m)}{1+5m} \end{aligned}$$

となる。したがって、

	$(R/n)/R_1$			
	$m=10$	$m=1$	$m=0.1$	$m=0.01$
$n=1$	6.78	0.75	0.0925	0.0099
$=2$	5.25	0.70	0.122	0.0146
$=3$	4.10	0.62	0.127	0.0161
$=\infty$	2.35	0.50	0.147	0.0192

となる。これよりわかるように平均層当り抵抗したがって有効熱伝導率 k_e は層数によって変化することがわかる。

【IV】 実験結果ならびに考察

ここで n が充分大きな場合について行なった実験結果

1. Position of thermocouples
2. Nichrome wire employed to counterbalance heat loss
3. Nichrome wire employed to counterbalance heat loss through wall
4. Silica tube
5. SiC electric heater
6. Refractory brick
7. Insulating fire brick
8. Packed bed

Fig. 9 Experimental apparatus (a) used to measure effective thermal conductivity

Fig. 10 Experimental apparatus (b) used to measure effective thermal conductivity

をしめす。使用した装置が Fig. 9, 10 に示されてある。充填物粒子の大きさにより適宜2つの装置を併用した。熱源には SiC 発熱体を用い一定時間ごとに所定の電力になるように調節した。塔の上部および下部にニクロム

線加熱源をおき垂直方向の熱の流れを防いだ。また装置の外壁にもニクロム線を入れ熱損失を防ぐとともに所定の温度差に保つよう調節した。温度測定はアルメル・クロメル線を用いとくに高温の場合は白金・白金ロジウム線を使用した。実験値と(8)式よりもとめた計算値との比較を Fig. 11, 12, 13, 14, 15 に示した。空気の熱伝導率については Cowling の値⁵⁾を採用した。また供試

充填物の特性値を Table 1 に示した。図から判るように金属球、磁製球の場合は実験値と計算値はよい一致を示している。また断熱耐火煉瓦 F2 の場合では粒径の比較的大きな場合かなりよい一致をみるが、粒径が小さくなると両者にやや開きがでる。これは固体粒子自身の熱伝導率の変化によるものと考えられる。

さらに比較的高温で行なわれた矢木らの実験について、同氏らの理論式との計算の比較の1例を Fig. 16 に示した。

Fig. 11 Data on iron spheres

Fig. 12 Data on porcelains

Fig. 15 Data on insulating fire bricks

Fig. 13 Data on glass spheres

Fig. 14 Data on insulating fire bricks

Fig. 16 Comparison between the values obtained of our theoretical equation with the experimental data previously reported²⁰⁾

Table 1 Characteristics of packings used in the experiments on effective thermal conductivity

Packing	D_p [mm]	ϵ	K_s [kcal/ m·hr·°C]
Iron sphere	18	0.43	45
Porcelain sphere	18	0.43	1.4
Glass sphere	16	0.435	1
Insulating fire brick sphere	5	0.5	0.18
"	1.2*	0.7	0.18
Insulating fire brick cube	20	0.43	0.18
"	10	0.43	0.18

* mean value

[V] 総 括

筆者らは熱伝達と電流の相似則を応用して、流れをともしない充填層有効熱伝導度について、熱の流れ方向の充填層粒子数が少ない場合をも考慮に入れた新しい理論式を誘導した。その結果、充填層半径方向の粒子数が6~7 以上ではほぼ定常になることが認められた。さらに誘導された一般式の計算の複雑さを省くため、 R_3/R_2 , R_2/R_1 , ϵ , $\frac{\sigma' T^3 D_p}{k_g}$ の4つの無次元項の関係を chart にし計算が極めて容易に行なわれるよう考慮した。層数の充分大なる場合について行った実験結果は理論式とよい一致をしめした。

付記 本研究を行うに当たり実験ならびに計算の一部を手伝って頂いた平田仁宏氏に謝意を表す。

Nomenclature

C_1, C_2 : constants given by Eq. (5)	[—]
D_p : average diameter of packings	[m]
E : voltage	[volt]
h : ratio of R_3 to R_2	[—]
i : electric current	[ampere]
i_n : electric current passed through R_1	[ampere]
i_n' : electric current passed through R_3	[ampere]
i_n'' : electric current passed through R_2	[ampere]
k_s : effective thermal conductivity in packed bed	[kcal/m·hr·°C]
k_g : thermal conductivity of fluid	[kcal/m·hr·°C]
k_s : thermal conductivity of packing	[kcal/m·hr·°C]

l : average length between centers of packings	[m]
l_p : effective length between centers of packings	[m]
l_s : effective length for heat flow by conduction in packing	[m]
l_s' : effective length relating to heat flow by conduction of contact surface	[m]
l_v : effective length for heat flow by convection of fluid	[m]
m : ratio of R_2 to R_1	[—]
n : numbers of packings in the direction of heat flow	[—]
ρ : emissivity of packing	[—]
q : heat flux	[kcal/hr]
R : resistance	[ohm]
R_1 : resistance to conduction in packing	[ohm]
R_2 : composite resistance of R_2' , R_2'' , and R_2''' in parallel	[ohm]
R_2' : contact resistance to conduction of packing	[ohm]
R_2'' : resistance to convection of fluid	[ohm]
R_2''' : resistance to radiation between adjacent packings	[ohm]
R_3 : resistance to radiation between packings beyond a packing	[ohm]
S : area for heat flow	[m ²]
S_s : area for heat flow by conduction in packing	[m ²]
S_s' : contact area of packing	[m ²]
S_v : area for heat flow by convection of fluid	[m ²]
S_v' : area for heat flow by radiation between packings beyond a packing	[m ²]
T : temperature	[°K]
ΔT : temperature difference	[°K]
t_m : mean temperature in packed beds	[°C]
α_1, α_2 : solution of Eq. (4)	[—]
$\beta = l_p/D_p$	[—]
$\gamma = l_s/D_p$	[—]
$\gamma' = l_s'/D_p$	[—]
$\delta = S_s'/S$	[—]
ϵ : fractional void	[—]
$\varphi = l_v/D_p$	[—]
$\sigma T^3, \sigma' T^3, \sigma'' T^3$: heat transfer coefficient of radiation	[kcal/m ² ·hr·°C]

Literature cited

- 1) Argo, W. E. and Smith, J. M. : *Chem. Eng. Progress*, **49**, 443 (1953)
- 2) Bunnell, D. G. et al : *Ind. Eng. Chem.*, **41**, 1977 (1947)
- 3) Campbell, J. M. and Huntington, R. L. : *Pet. Ref.*, **31**, No. 2, 123 (1952)
- 4) Coberly, C. A. and Marshall, Jr. W. R. : *Chem. Eng. Progress*, **47**, 141 (1951)
- 5) Cowling, C. : "Mathematical Theory of Non-Uniform Gases" Cambridge University Press (1952)
- 6) Damköhler, G. : *Z. Elektrochem.*, **42**, 846 (1936) ; **43**, 8 (1937)
- 7) Hatta, S. and Maeda, S. : *Chem. Eng. (Japan)*, **13**, 79 (1949)
- 8) Kanulwick, W. G. and Martin, L. H. : *Proc. Royal Soc. (London)*, **A 141**, 144 (1933)
- 9) Kimura, M. : *Chem. Eng. (Japan)*, **21**, 472 (1957)
- 10) Kling, G. : *Forsch. Geb. Ingenieurw.*, **9**, 28 (1938)
- 11) Kunii, D. : *Chem. Eng. (Japan)*, **20**, 564 (1956)
- 12) Maeda, S. and Kawazoe, K. : *ibid.*, **17**, 276 (1953)
- 13) Maeda, S. and Kawazoe, K. : *ibid.*, **18**, 276 (1954)
- 14) Ranz, W. E. : *Chem. Eng. Progress*, **48**, 247 (1952)
- 15) Schumann, J. E. W. and Voss, V. : *Fuel*, **13**, 249 (1934)
- 16) Singer, E. and Wilhelm, R. H. : *Chem. Eng. Progress*, **46**, 343 (1950)
- 17) Wilhelm, R. H., Johnson, W. C., Wynkoop, R. and Collier, D. W. : *Chem. Eng. Progress*, **44**, 105 (1948)
- 18) Wyllie, M. R. J. and Gregory, A. R. : *Trans. Am. Inst. Mining Met. Engrs.*, **198**, 103 (1953)
- 19) Yagi, S. and Kunii, D. : *Chem. Eng. (Japan)*, **18**, 576 (1954)
- 20) Yagi, S. and Kunii, D. : *A. I. Ch. E. Journal*, **3**, 373 (1957)

Effective Thermal Conductivities in Packed Beds

S. Sugiyama* & M. Fujitsu*

Electric analogue circuits are used for evaluating the effective thermal conductivities in packed beds without fluid flow, taking into consideration the numbers of packings placed in the direction of heat flow.

In the analysis, it is assumed that the thermal resistance within packed beds may occur in the following forms :

- (1) Thermal resistance of packing itself.
- (2) Thermal resistance of contact area.
- (3) Thermal resistance of fluid between packings.
- (4) Thermal resistance to heat radiation from packing to packing.
- (5) Thermal resistance to heat radiation from packing to adjoining packing beyond one.

The equations obtained are given in the form of Eqs. 1, 3, 6 and 7. Introducing the values of thermal resistance into Eq. 7, we have obtained Eq. 8 which expresses the relation of k_s/k_g .

Experiments have been carried out with various packings : iron, porcelain, glass balls and insulating fire bricks at the temperature between 100 and 1000°C.

Comparisons between the experimental results and the values obtained from Eq. 8 are shown in Figs. 11, 12, 13, 14 and 15. The calculation can be readily handled by employing the chart of Fig. 8, without using the complicated formula, Eq. 8. The difference between the value obtained from the chart (Fig. 8) and that obtained from Eq. 8 is small and negligible.

* Department of Chemical Engineering, Nagoya University