

充填內에서의 熱傳達特性에 關한 實驗的 研究

An Experimental Study on the Heat Transfer for a Packed Bed

유 지오* 양 한주** 서 정윤***
(Ji Oh Yoo)(Han Ju Yang)(Jeong Yun Seo)

(1986. 3.15 접수)

ABSTRACT

In this paper heat transfer characteristics in air-solid packed bed with spherical steel particles are studied experimentally. The effect of particle sizes ($\phi 1.5, \phi 2.5, \phi 3.96, \phi 4.75, \phi 5.95, \phi 7.15$), bed sizes ($\phi 50, \phi 60, \phi 70, \phi 80$) and mass flow rate are investigated.

Also heat transfer effect of the bed with particles and without particles is compared in terms of heat transfer coefficient.

As a result of this experiments, the following relation is obtained in the range of the Reynolds numbers 40 between 1500.

$$Nu = 0.8755 Re^{0.6367} \quad (40 < Re < 1500)$$

Nomenclature

- A_w : Cross Sectional Area of Bed (m^2)
- D : Bed Diameter (mm)
- D_p : Particle Diameter (mm)
- I : Electric Current (A)
- V : Voltage (V)
- H_{av} : Average Heat Transfer Coefficient ($w/m^2 K$)
- r_b : Radius of Packed Bed (mm)
- r_h : Radius of Heater (mm)
- U : Mean Velocity in Packed Bed (m/sec)
- ρ_g : Density of Air (kg/m^3)
- μ_g : Dynamic Viscosity of Air ($kg \cdot m/sec$)
- λ_g : Thermal Conductivity of Air ($w/m \cdot K$)

장치, 蓄熱槽, 化學反應器¹⁾ 등에 광범위하게 이용된다. 그런데 이들 과정의 대부분은 에너지 傳達과 密接한 관계가 있기 때문에 設計目的을 위해서는 熱流束 및 溫度分布에 대한 知識을 필요로 하고 있다. 그러나 充填層에서의 熱傳達特性은 充填粒子的 幾何學的 形狀, 充填粒子的 材質, 充填密度, Bed의 크기 및 流體의 流動速度 등에 影響을 받게 되므로 매우 복잡한 양상을 띠게 되며, 이와 같은 이유 때문에 充填層에서의 熱傳達特性을 究明하는 데는 많은 어려움이 따르게 된다.

Boterill²⁾ ³⁾ 등은 충전층내에 삽입된 전열면에서 열전달특성을 충전층을 半徑方向으로 일정한 空隙率과 일정한 流動速度를 갖는 두개의 영역으로 나누어 充填粒자를 모래, 구리등을 사용하여 연구하였다. Ranz⁴⁾ 는 充填層內에서 充填粒자의 直徑에 달하는 거리를 入口領域으로 정의하였으며, 이 入口領域에서의 Nusselt 數는 入口領域을 벗어난곳 보다 다소 큰 값을 갖는다

1. 序 論

熱傳達 效果를 향상시키기 위하여 固體粒자를 傳熱媒體로 使用하는 充填層은 가열장치, 열교환

* 仁荷大學院

** 東洋工業專門大學

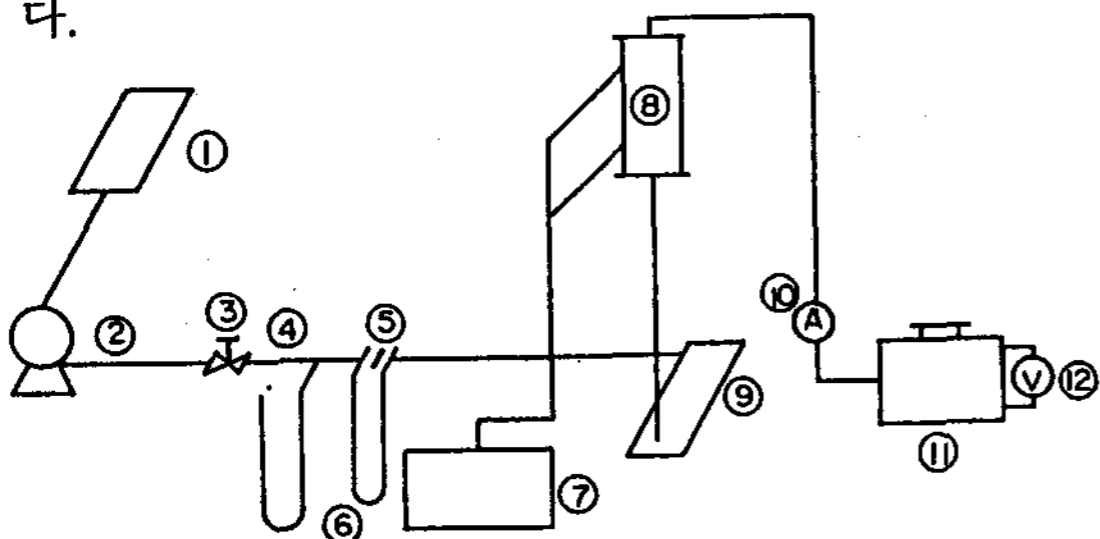
*** 正會員: 仁荷大 工大

고 發表하였다. 또한 Gabor⁵⁾는 Reynolds 數가 230 보다 작은 범위에서 平均熱傳達係數는 有效熱傳導도와 函數關係가 있다는 것을 理論적으로 밝혔으며 실험에 의하여 確認하였다. E. Ach-
enbach⁶⁾은 化學反應器에 응용하기 위하여 구형 Heater 를 사용하여 充填層內에서 熱傳達係數를 구하였다.

本 研究에서는 특히 Bed 직경과 입자직경의 변화가 충전층내에 삽입된 傳熱面에서의 熱傳達特性에 미치는 영향을 平均熱傳達係數 및 Nusselt 數에 대해서 고찰하고 粒子를 충전시키지 않은 경우와 熱傳達 效果를 비교 검토하고자 한다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

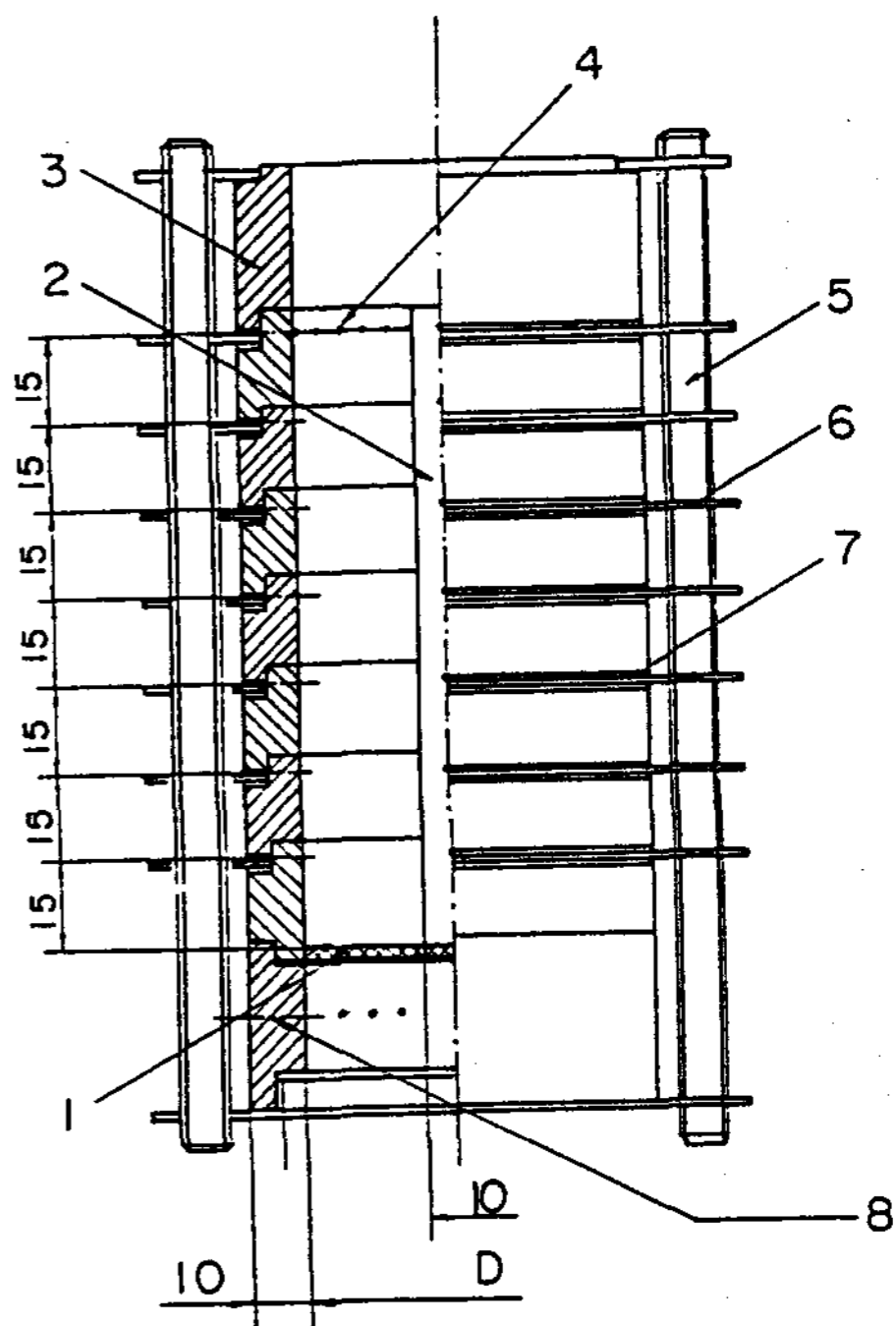
本 實驗에 使用된 實驗裝置의 개략도는 Fig. 1 과 같다. 大氣中의 空氣를 濾過하기 위하여 送風機의 入口에 空氣濾過裝置 (Airfilter) ①을 設置하였으며, ②는 送風機 (Blower, 13m³ / min × 300mmAq) 이다. 이때 送風機를 통과한 공기는 流量調節밸브③ (Discharge Valve) 에 의해서 流量이 調節되며, 이 유량을 測定하기 위하여 오리피스 (orifice) ⑤를 設置하였다. 本 실험에서 유량범위는 0.06 ~ 0.5kg/min 이며 각 Bed, 각 粒子에 대하여 통과 할 수 있는 最大 流量까지 流量을 변화시키면서 實驗을 실시하였다.



(1) Air Filter (2) Blower (3) Discharge Valve
(4) Manometer (5) Orifice (6) Manometer
(7) Data Logger (8) Packed Bed (9) Air Chamber
(10) Ampere Meter (11) Slidac (12) Volt Meter

Fig. 1. Schematic Diagram of Experimental Apparatus

또한 오리피스를 지난 공기를 定常狀態로 Bed 에 공급하기 위하여 공기실 ⑨ (Air Chamber) 를 設置하였다. 充填層內에 插入된 棒型 Heater (10×105mm) 는 전류계 ⑩ (Ampere Meter) 와 電壓計 ⑫ (Volt Meter) 를 設置하여 전압조절장치 (Slidac) ⑪로 전압과 전류를 일정 (50V×0.91 A) 하게 유지하면서 加熱하였다.



(1) Stainless Screen (2) Heater (3) Bed
(4) Thermocouple Position (5) Bolt (6) Flange
(7) Packing (8) Thermocouple Hole

Fig. 2. Detail of Packed Bed

Fig.2는 충전층의 詳細圖를 나타낸다. 온도측정을 위해서 熱電對 (C-C, φ70 μm) 는 Heater 表面溫度를 測定하기 위하여 Heater 表面을 따라 軸方向으로 7개의 區間으로 나누어 裝착하였으며 Bed內에는 반경방향으로 Table에 명시한 간격으로 6개, 軸方向으로는 Heater 表面에서와 마찬가지로 7개의 區間에 裝착하였다. 또한 충전층內로 유입되는 공기온도는 Bed入口에 裝착한 3개의 열전대로 측정하였다.

Table Bed Diameter and Interval of Thermocouple

Bed Dia.	50	60	70	80
Interval of Thermocouple	4	5	6	7

Scale ; mm

3. 熱傳達 係數의 計算 및 無次元數의 定義

가) 平均熱傳達係數

充填層内에서의 熱傳達現象은 流體의 흐름에 영향을 받는 現象과 流體의 흐름에 영향을 받지 않는 現象으로 大別되며 각각은 매우 복잡한 양상을 띠게 되므로 熱傳達特性을 理論적으로 해석하는 것은 매우 곤란하다.

따라서 本 實驗에서는 다음과 같은 가정하에 平均熱傳達係數를 구하고자 한다.

1) Heater에서 발생한 모든 熱은 유체에 의해서 제거된다.

2) 充填層内에서 固體粒子的 溫度는 流體의 溫度와 같다.

3) Heater의 單位길이當 發生하는 熱流束은 一定하다.

4) 充填層内에서 流動方向으로 流速은 全體 斷面에 걸쳐서 一定하다.

이와 같은 假定으로 부터 平均熱傳達係數를 구하면 다음과 같다.

$$H_{av} = \frac{I \cdot V}{A_w(T_w - T_b)} \dots\dots\dots 1)$$

여기서 T_b 는 充填層内의 流體平均溫度로 다음 式으로 계산하였다.

$$t_b = \frac{2}{(r_b^2 - r_h^2)} \int_{r_h}^{r_b} tr dr \dots\dots\dots 2)$$

나) 無次元數의 定義

Reynolds數 및 Nusselt數는 充填되는 粒子를 特性길이로 하여 다음과 같이 정의하였다.

$$Re = \frac{P_g V \cdot D_p}{\mu_g} \dots\dots\dots 3)$$

$$Nu = \frac{H_{av} \cdot D_p}{\lambda_g} \dots\dots\dots 4)$$

4. 實驗結果 및 考察

Fig.3, Fig.4에서는 Bed의 크기가 同一한 경우 流量 및 粒子的 크기 변화가 平均熱傳達係數에 미치는 영향을 나타내고 있으며, 또한 Bed에 粒子를 充填시키지 않은 경우와 비교하였다.

이 그림에서는 流量이 增加함에 따라 平均熱傳達係數는 直線的으로 增加하며 Bed의 크기가 일정한 경우, 질량유량이 同一할 때는 充填粒子가 작을수록 熱傳達係數가 더 크다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 粒子的 크기가 작을 수록 열전달계수가 增加하는 경향을 각 Bed에 대하여 비교하면 粒子直徑이 3.96 mm인 경우가 粒子直徑이 7.15mm인 경우 보다 Bed直徑이 50mm인 경우는 平均 39%, Bed直徑이 60mm인 경우는 平均 32%, Bed直徑이 70mm인 경우는 平均 30%, Bed直徑이 80mm인 경우는 平均 20%의 증가가 있었다. 이와 같은 경향은 充填粒子的 크기가 감소하면 充填粒子를 통한 傳熱面積의 增大效果와 粒子效果와 粒子사이를 유동하는 流體의 半徑方向에서 일어나는 유체의 混合效果가 增大하기 때문이라고 생각된다.

各 Bed에서 粒子를 充填시킨 경우와 充填시키지 않은 경우에 平均熱傳達係數의 增加率을 비교하면 Bed直徑이 50mm인 경우에는 各粒子 크기에 따라 최소 2.5배에서 최대 4.5배, Bed直徑이 60mm인 경우는 최소 3.3배에서 최대 5배, Bed直徑이 70mm인 경우는 최소 3.6배에서 최대 5.7배까지 증가하며, Bed直徑이 80mm인 경우는 최소 3.0배에서 최대 3.8배까지 증가한다는 것을 알 수 있었다.

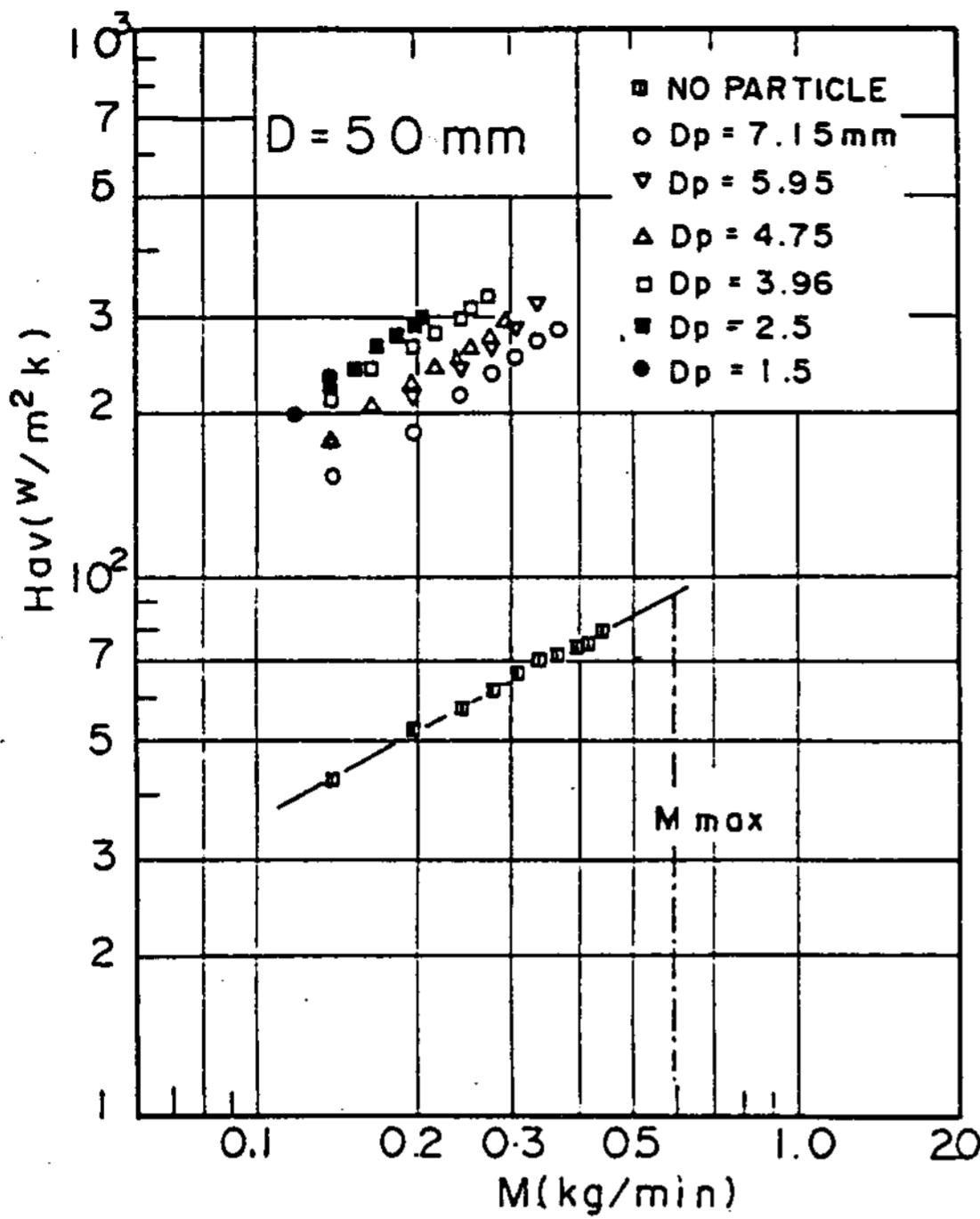


Fig. 3. Comparison of Average Heat Transfer Coefficient & Mass Flow Rate, M, with Various Particle Diameter (Bed Dia. = 50mm)

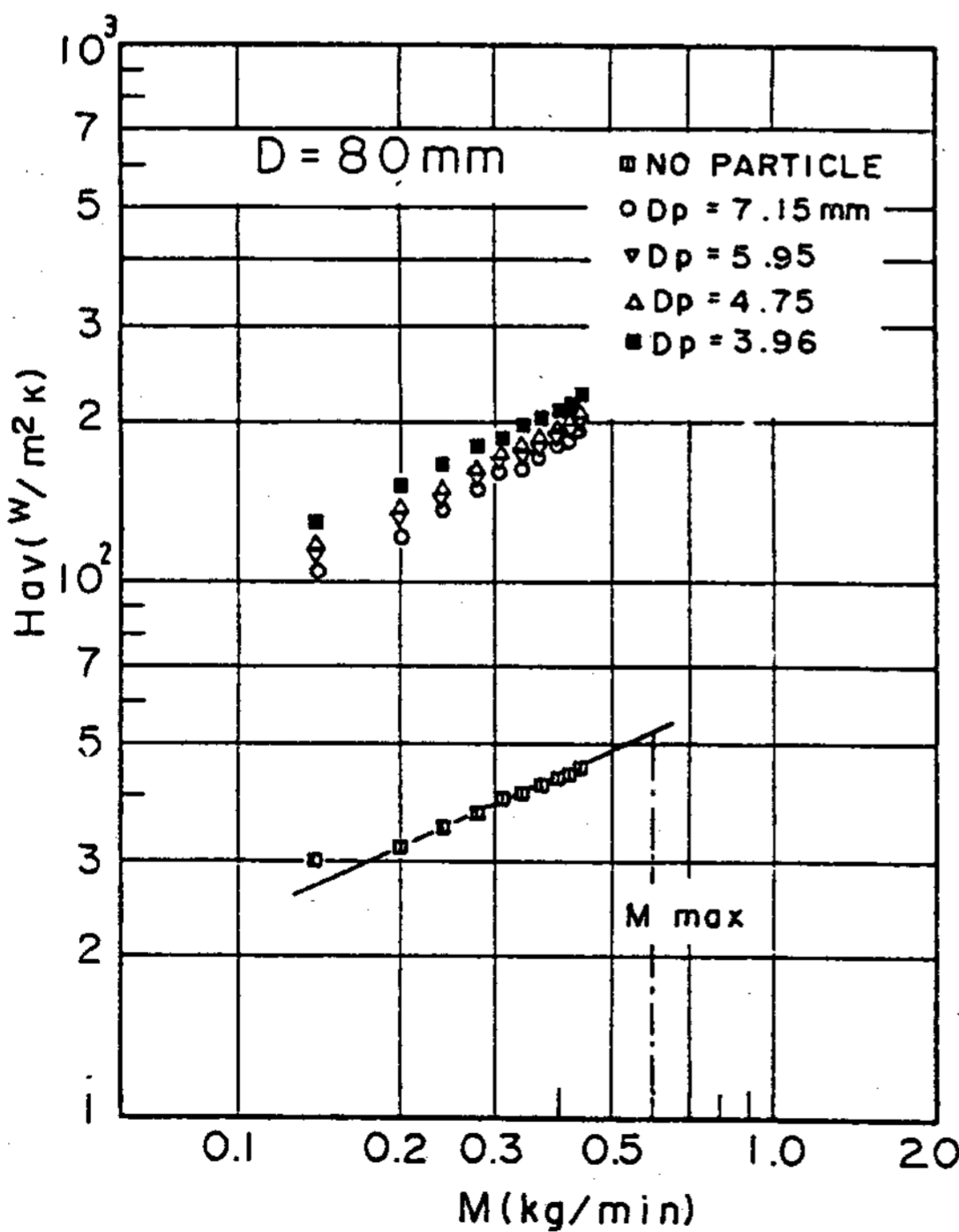


Fig. 4. Comparison of Average Heat Transfer Coefficient & Mass Flow Rate, M, with Various Particle Diameter (Bed Dia. = 80mm)

Fig.5, Fig.6은 粒子的 크기가 同一한 경우 유량 및 Bed의 크기가 平均熱傳達係數에 미치는 영향을 나타내고 있다.

여기서는 粒子的 크기가 同一할 때 Bed를 통과하는 質量流量이 同一하다면 Bed의 크기가 작을수록 平均熱傳達係數가 增加한다는 것을 알 수 있다. 또한 Bed의 크기를 작게 함으로써 얻을

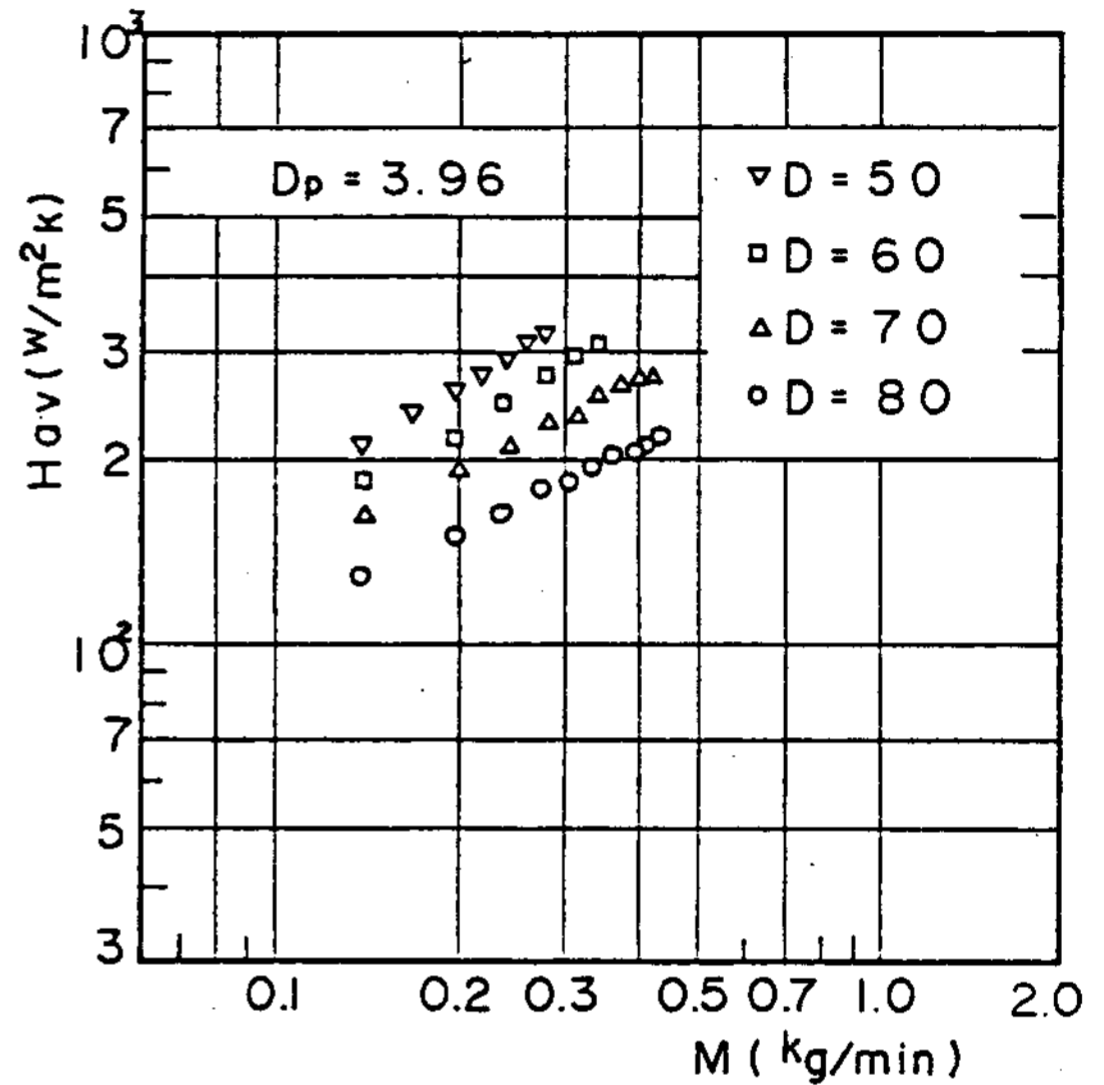


Fig. 5. The Effect of Various Bed Diameters on Average Heat Transfer Coefficient for a Particle Diameter (Particle Dia. = 3.96mm)

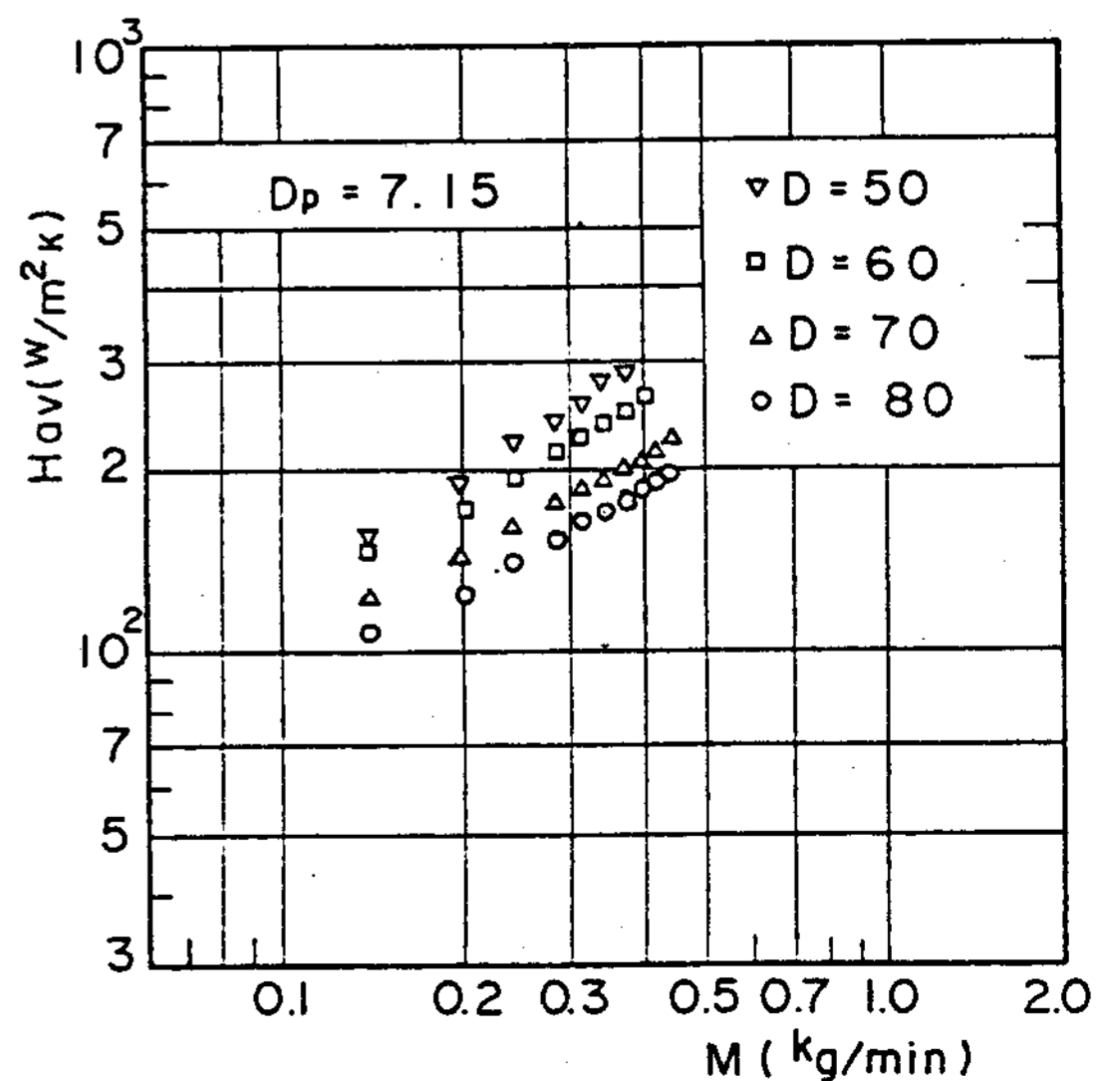


Fig. 6. The Effect of Various Bed Diameters on Average Heat Transfer Coefficient for a Particle Diameter (Particle Dia. = 7.15mm)

수 있는 熱傳達 增進效果는 粒子의 크기가 작은 경우에 약간 크다는 것을 알 수 있다.

이와 같이 Bed直徑이 작아짐에 따라 熱傳達效果가 向上되는 現象은 同一 流量의 流體가 充填層을 흐를때 Bed直徑이 작으면 流動斷面積의 감소로 단위면적당 흐르는 유량은 증가하게 되므로 이로 인한 冷却效果가 증대하기 때문으로 생각된다.

Fig.7은 各 Bed, 各 粒子에 대하여 Reynolds數에 대한 平均熱傳達係數를 나타낸 것으로서 粒子의 크기가 同一한 경우, 各 Bed에 대한 平均熱傳達係數는 Bed의 크기에 거의 관계없이 Reynolds數가 增加함에 따라 直線的으로 同一하게 增加하는 傾向이 나타났다. Reynolds수가 同一한 경우에는 充填粒子가 작을때 그 값이 增大한다는 것을 알 수 있다.

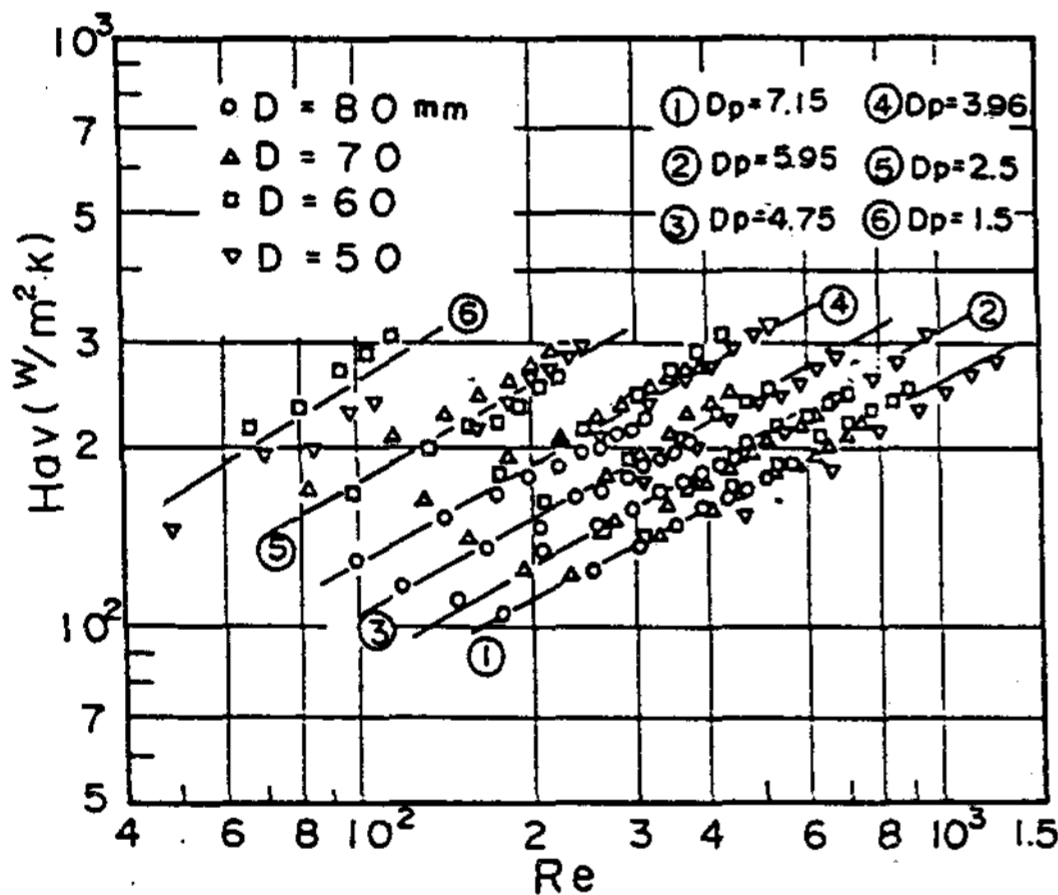


Fig. 7. Correlation of Average Heat Transfer Coefficient & Reynolds No. to each Particle Dia. & Bed Dia.

以上の 考察에서 充填層에서의 熱傳達 增進效果는 粒子의 크기와 Bed의 크기가 작을수록 增加하며, 또한 充填粒子의 크기를 變化시키는 것이 Bed의 크기를 變化시키는 것보다 더 效果的이라는 것을 알 수 있다.

Fig.8에서는 各 Bed, 各 粒子에 대한 Nusselt數를 Reynolds數에 대해서 나타낸 것으로 充填層에서 Nusselt數는 粒子의 크기나 Bed의

크기에 큰 영향을 받지 않고 다음 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$Nu = 0.8755 Re^{0.6367} \quad 40 < Re < 1500$$

또한 이 結果는 E.Achenbach⁶⁾가 직徑이 983mm이고 充填 높이가 840mm인 Bed에 粒子의 直徑이 60mm인 球狀粒子로 充填한 充填層을 球狀 Heater로 加熱하여 얻은 實驗結果와 比較하면 약 10% 범위내에서 성립한다.

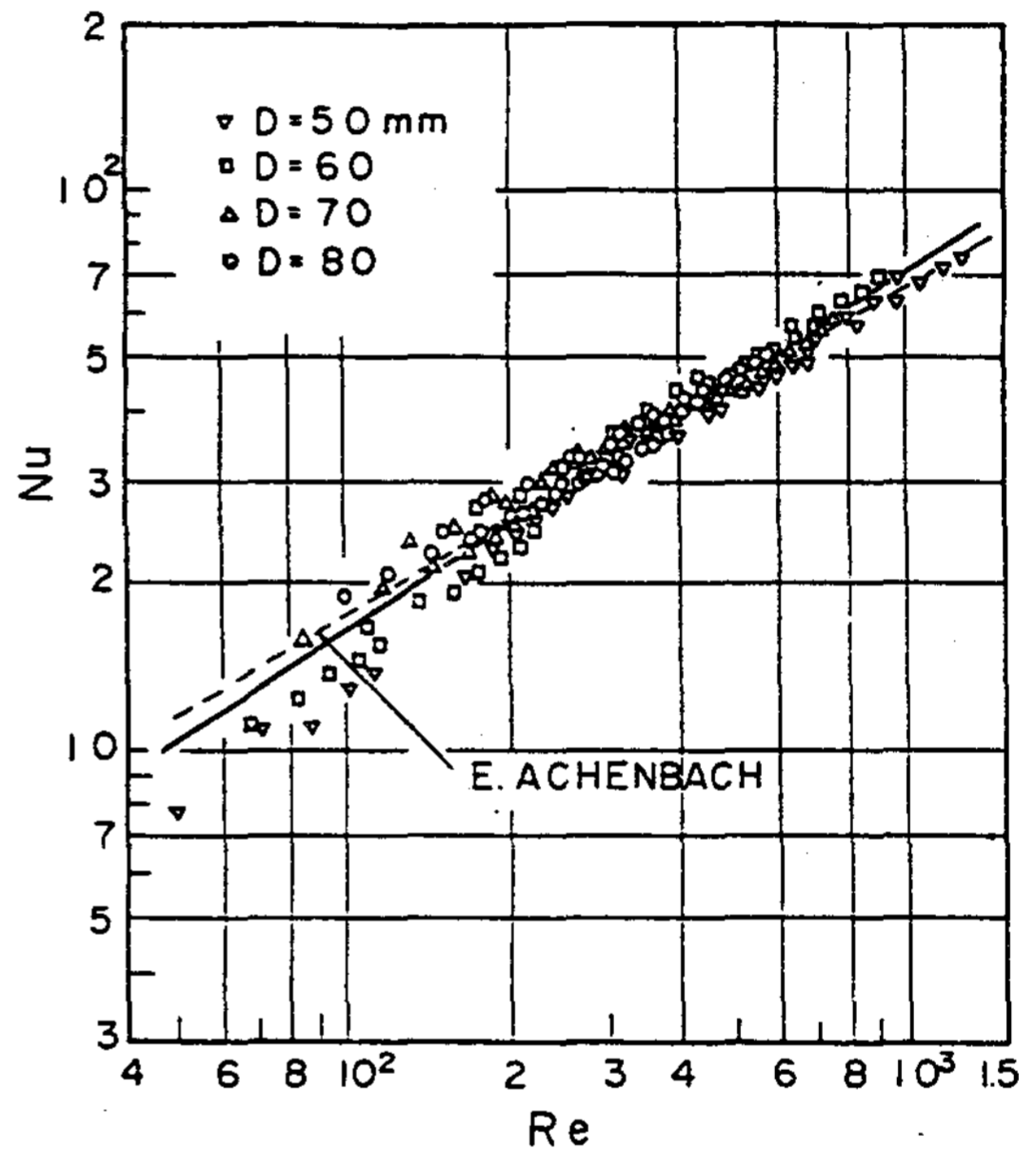


Fig. 8. Correlation of Reynolds No. & Nusselt No. Various Particle Diameters & Bed Diameter

5. 結 論

本 研究는 球狀粒子 充填層을 空氣가 通過할 때 粒子의 크기 및 Bed의 크기의 變化가 充填層内에 挿入된 傳熱面(φ10×105)에서의 熱傳達特性에 미치는 影響을 考察하기 위하여 6種의 鋼球(φ1.5, φ2.5, φ3.96, φ4.75, φ5.95, φ7.15)와 4種의 Bed(φ50, φ60, φ70, φ80)를 使用하여 質量流量範圍 0.06 ~ 0.5kg/min에 대하여 實驗한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 充填層內에서 平均熱傳達係數는 流量이 增加함에 따라 直線的으로 增加하며, 同一한 流量이 Bed를 통과하면 粒子的 크기와 Bed의 크기가 작을 수록 熱傳達效果가 增大된다.

2. Bed를 통과하는 유량이 同一할 경우에는 충전층에서의 平均熱傳達係數는 充填粒子가 없을 경우 보다 粒子的 크기와 Bed의 크기에 따라 最小 2.6 배에서 最大 5.5 배까지 增加한다.

3. Bed의 單位面積當 質量流量이 同一한 경우, 平均熱傳達係數는 Bed의 크기와는 關係없이 粒子的 크기가 작을수록 增加한다.

4. 充填層內에서 Nusselt 數와 Reynolds數의 關係는 모든 充填粒子的 크기 및 Bed의 크기에 대해서 다음 關係式을 만족한다.

$$Nu = 0.8755Re^{0.6367} \quad 40 < Re < 1500$$

Reference

- 1) J.M. Bert, Chem. Eng. Prog., Vol. 70, No. 5, pp. 78-84 (1974)
- 2) J.S.M. Botterill, Chem. Eng. Sci., Vol. 33, pp. 509-515 (1978)
- 3) Decker N. & Glicksman L., Chem. Eng. Sci., Vol. 35, pp. 831-855 (1980)
- 4) Ranz. W.E., Chem. Eng. Pro., Vol. 48, pp. 247-253 (1952)
- 5) John D. Gabor, Chem. Eng. Sci., Vol. 25, pp. 979-984 (1970)
- 6) E. Achenbach, Heat Transfer 1982, Proceedings of The Seventh International Heat Transfer Conference. (1982)