

# 流動層의 溫度變化에 따른 流動特性에 관한 實驗的 研究

An Experimental Study for Fluidized Bed Behaviour with Temperature Change.

\*白 高 吉      \*\*徐 正 閔  
(Ko Kil Baek)      (Jeong Yun Seo)

(1986. 3.15 접수)

## ABSTRACT

Minimum fluidizing velocities and voidages were investigated for closely sized sand and magnesia particles with mean diameters in the range of 297-841  $\mu\text{m}$  over the temperature between 15 and 1,000°C. Boundaries between changing behaviour at  $Re_{mf}=14$  and  $Ar=17,000$  were observed.

In beds of fine particles in Geldart's group "B", the minimum fluidizing velocity ( $U_{mf}$ ) decreased as temperature increased, but not as much as expected on account of the gas viscosity increase, furthermore the increase in the minimum fluidizing voidage ( $\epsilon_{mf}$ ). With larger particles in group "D",  $U_{mf}$  increased, first, with temperature increase because of reduced gas density, and depending on the particle size,  $U_{mf}$  reduced as flow conditions moved from turbulent to laminar.

Among the correlations predicting  $U_{mf}$ , Ergun equation agreed best with the experimental data providing that the change in  $\epsilon_{mf}$  according to temperature is allowed for.

## NOMENCLATURE

Ar : Archimedes Number [ $d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g / \mu_g^3$ ]  
 $d_p$  : Particle Diameter [m]  
 $d_{sv}$  : Surface/Volume Diameter [m]  
 $g$  : Gravitational Acceleration [ $\text{m/s}^2$ ]  
 $H, h$  : Bed Depth [m]  
 $Re$  : Reynolds Number [ $d_p U \rho_g / \mu_g$ ]  
 $Re_{mf}$  : Minimum Fluidizing  
 Reynolds Number [ $d_p U_{mf} \rho_g / \mu_g$ ]  
 $U$  : Superficial Gas Velocity [m/s]  
 $U_{mf}$  : Minimum Fluidizing Velocity [m/s]  
 $\Delta P_b$  : Bed Press. Drop. [ $\text{N/m}^2$ ]  
 $\Delta P_f$  : Fluidized Bed Press. Drop [ $\text{N/m}^2$ ]  
 $\Delta P_h$  : Diff. Height Press. Drop. [ $\text{N/m}^2$ ]  
 $\epsilon$  : Bed Voidage  
 $\epsilon_{mf}$  : Minimum Fluidized Bed Voidage  
 $\epsilon_p$  : Packed Bed Voidage  
 $N_g$  : Gas Viscosity [ $\text{Ns/m}^2$ ]  
 $\rho_g$  : Gas Density [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $\rho_s$  : Particle Density [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $\phi$  : Shape Factor.

## I. 緒 論

流動層에서의 流動特性은 燃燒效率의 增進, 廢熱回收, 排氣가스의 淨化 및 金屬熱處理 등에 많이 이용되는데<sup>1)</sup> 특히 流動層內에서의 流動粒子들에 의한 熱傳達現象은 乾燥, 冷却 및 가스로부터의 熱除去 등에 매우 큰 影響을 준다.<sup>2)3)</sup>

流動層 舉動은 溫度 및 粒子에 따라 多樣하게 변하므로 그의 解析에는 많은 어려움이 있다. 本研究에서는 流動層의<sup>1,3)</sup> 最小流動化速度 (Minimum Fluidizing Velocity,  $U_{mf}$ ) 를 中心으로 常溫으로부터 1000°C까지의 溫度範圍에서의 密度 및 크기가 다른 粒子들의 流動特性들을 實驗을 통하여 究明하고자 한다.

## II. 實驗裝置 및 實驗方法

最小流動化速度와 空隔率의 測定을 위한 實驗裝置와 實驗方法은 다음과 같다.

### 1. 實驗裝置

\* 正會員 : 大田開放大

\*\* 正會員 : 仁荷大 工大

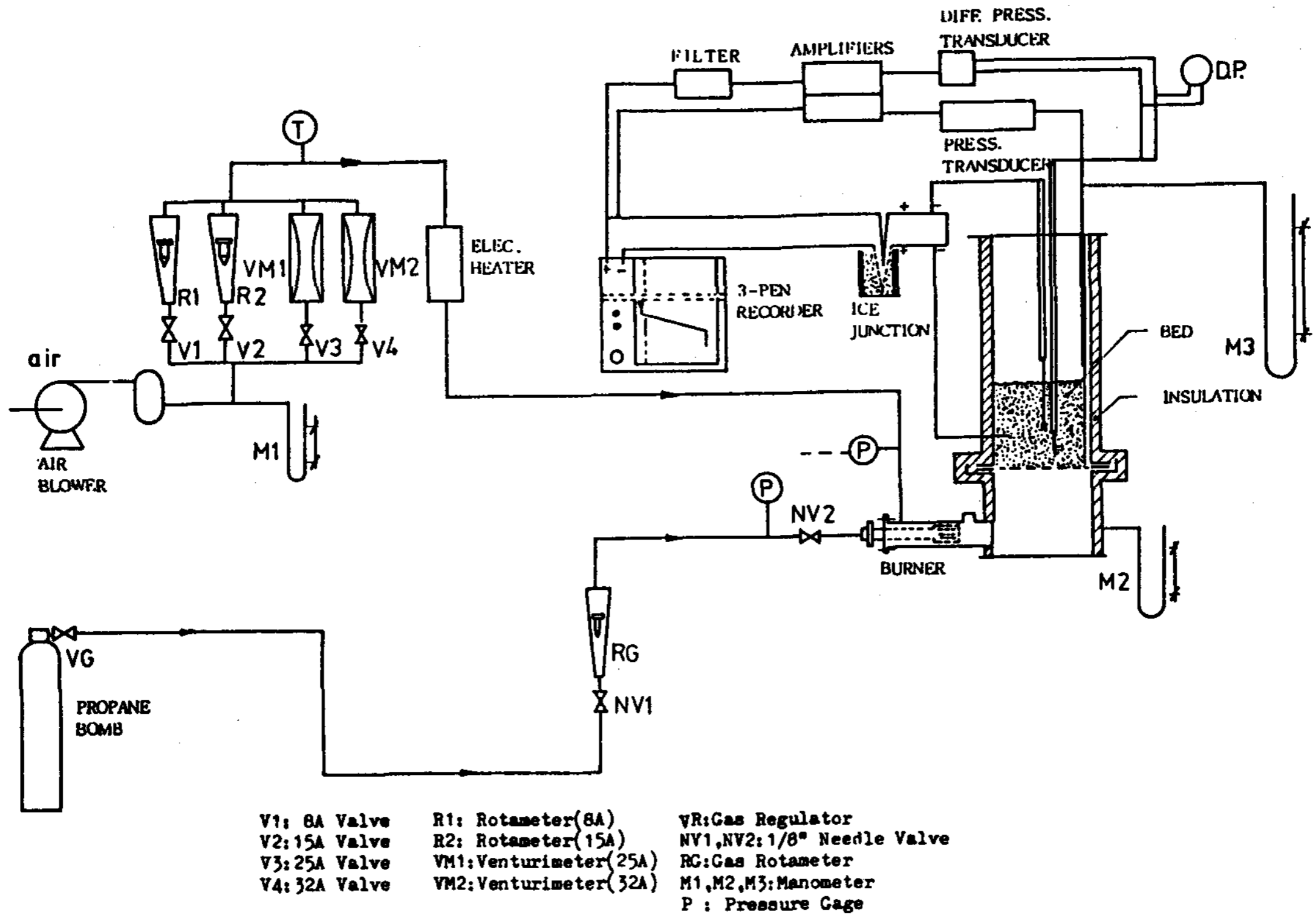


Fig. 1. Schematic Diagram of Fluidized Bed

Fig. 1. 은 實驗裝置의 概略圖를 나타내며 實驗溫度範圍는 常溫에서 1000 ℃이다. 實驗에는  $841\mu\text{m} \geq d_p \geq 297\mu\text{m}$  範圍인 모래와 Magnesia 粒子들을 사용하였다.

(a) 流動層實驗部

Fig. 2. 는 流動層實驗部の 斷面圖이다. 流動이 實際로 일어나는 部分은  $\phi 210 \times 430\text{H} \times 3\text{thk.}$ 의 stainless 鋼管이며 最大 流動層높이는 350 mm이다. 그위에는 粒子들의 飛散을 防止하기 위한 freeboard를 두었다. 또 밑에는 plenum chamber를 두고 [空氣]/[프로판]의 混合이 잘되고 爆發의 危險이 없도록 하였으며 流動層부와 plenum chamber 사이에는 分散板을 設置하였다. 모든 實驗裝置 外部에는 50 mm의 高溫用 ceramic 斷熱材와 50 mm의 rock-wool로 싸서 1000 ℃까지의 高溫實驗에서도 外部溫度가 30 ℃를 넘지 않도록 하였다.

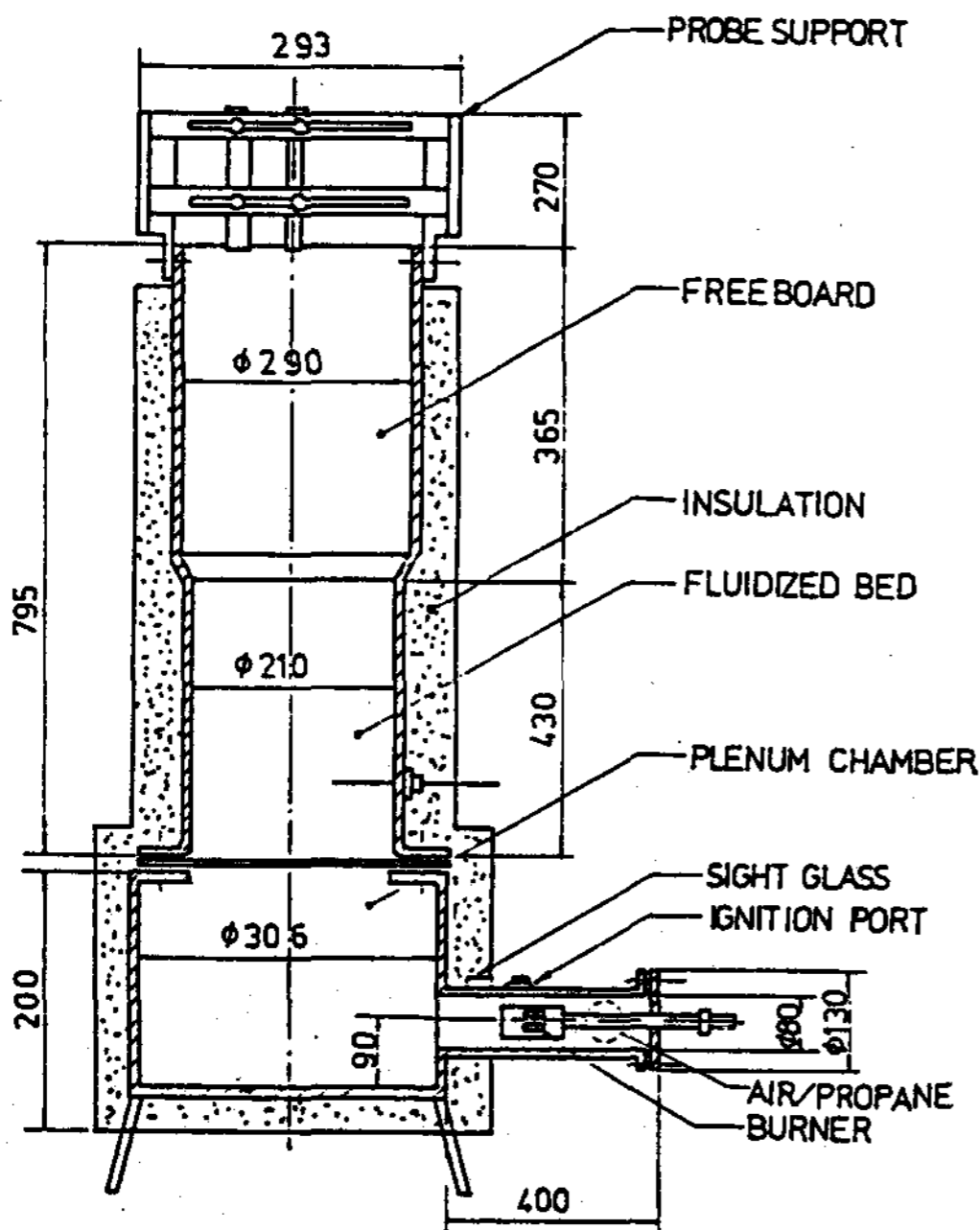


Fig. 2. Details of Fluidized Bed.

(b) 分散板 (Distributor)

φ 210 × 3thk. stainless 鋼板에 가로, 세로 6mm간격으로 φ 1의 구멍을 912개 뚫어서 分散板을 만들었으며 가스速度가 700 mm/sec 일 때, 壓力降下는 250 mm Aq가 된다.

(c) 溫度測定

K - type (C - A) 熱電對를 사용하여 流動層, 分散板 및 plenum chamber內的 溫度測定을 하였다.

2. 實驗方法

(a) 平均 粒子 直徑 (d<sub>p</sub>)

本研究에 使用된 粒子들은 매우 작은 粒子크기分布를 가지며 KS 標準체 (# 20, # 30, # 40 및 # 50)를 使用하여 5分以上 驅動하여 採取하였다. 實驗후 平均粒子直徑 및 무게는 모래에서는 3%未滿, Magnesia 粒子에서는 거의 變化가 없었다.

(b) 形狀係數 (φ)

粒子들의 形狀係數는 充填層에서의 實驗으로 얻은 結果를 다음式<sup>4)</sup>에 代入하여 구하였다.

$$Ar = 150 \frac{(1 - \epsilon_p)}{\epsilon^3 \phi^2} Re + 1.75 \frac{1}{\epsilon^3 \phi} Re^2 \quad (1)$$

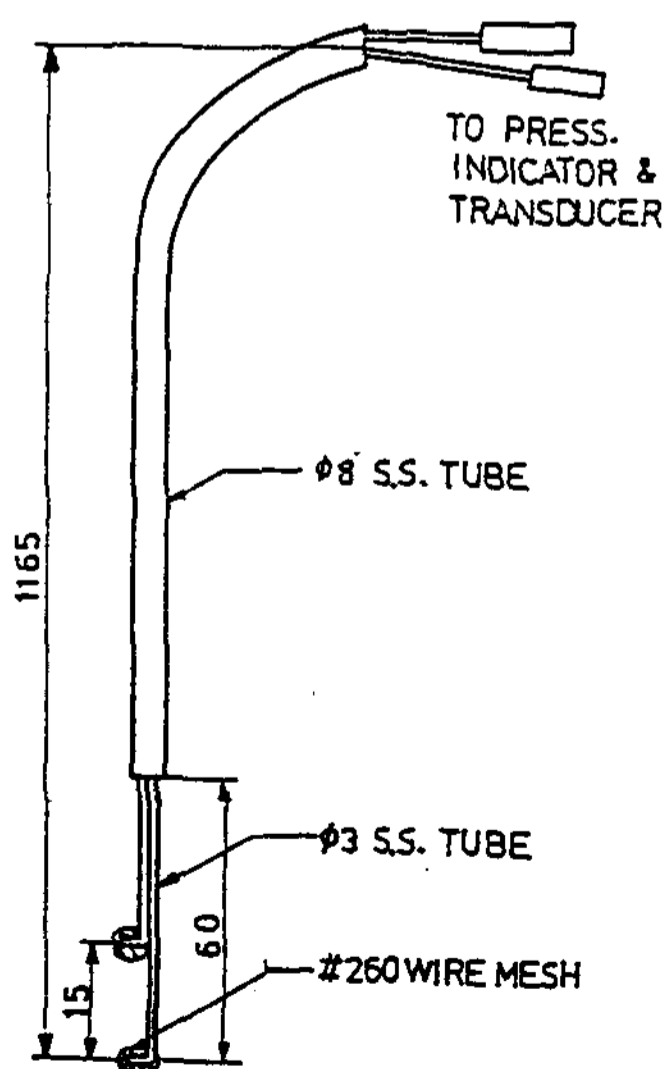


Fig. 3. Details of Diff. Press. Probe.

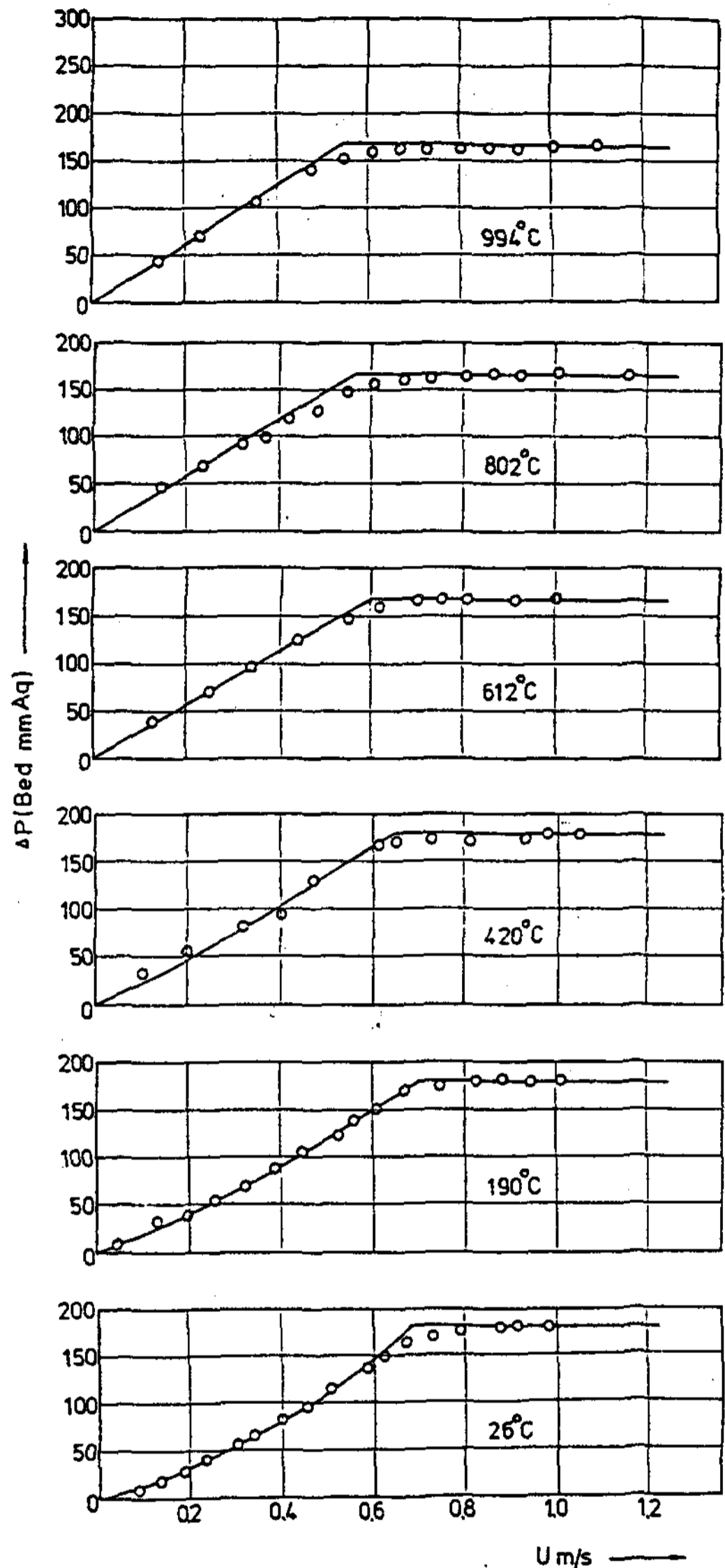


Fig. 4. Typical Pressure Drop Versus Gas Velocity Measurements at Various Temperatures for 841 μm Magnesia.

(c) 最小 流動化速度 (U<sub>mf</sub>)

流動가스의 速度와, 充填層과 流動層의 壓力降下關係를 線圖化하여 그 交點으로 U<sub>mf</sub>를 定하였다.

( Fig 4 ~ 7 參照 ) 流動層內 壓力降下를 구하기 위한 壓力 probe는 円周方向에 φ 0.5의 구멍을 6개 갖는 外徑 5mm의 Stainless 鋼管으로 되어 있으며 U字管으로 測定되는 壓力降下는 壓力變換器, 增幅器를 使用하여 記錄하였다.

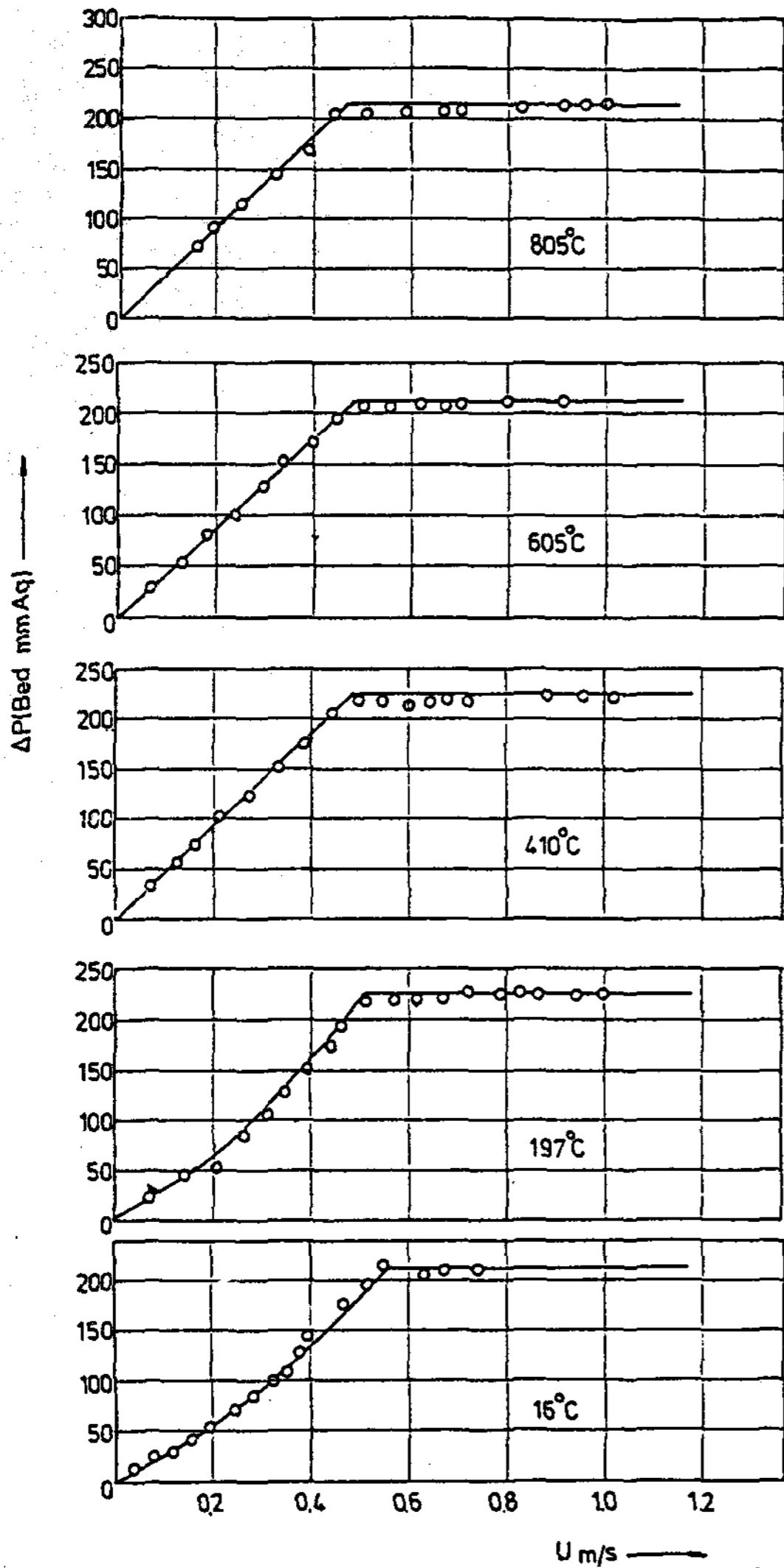


Fig. 5. Typical Pressure Drop Versus Gas Velocity Measurements at Various Temperatures for 841µm Sand

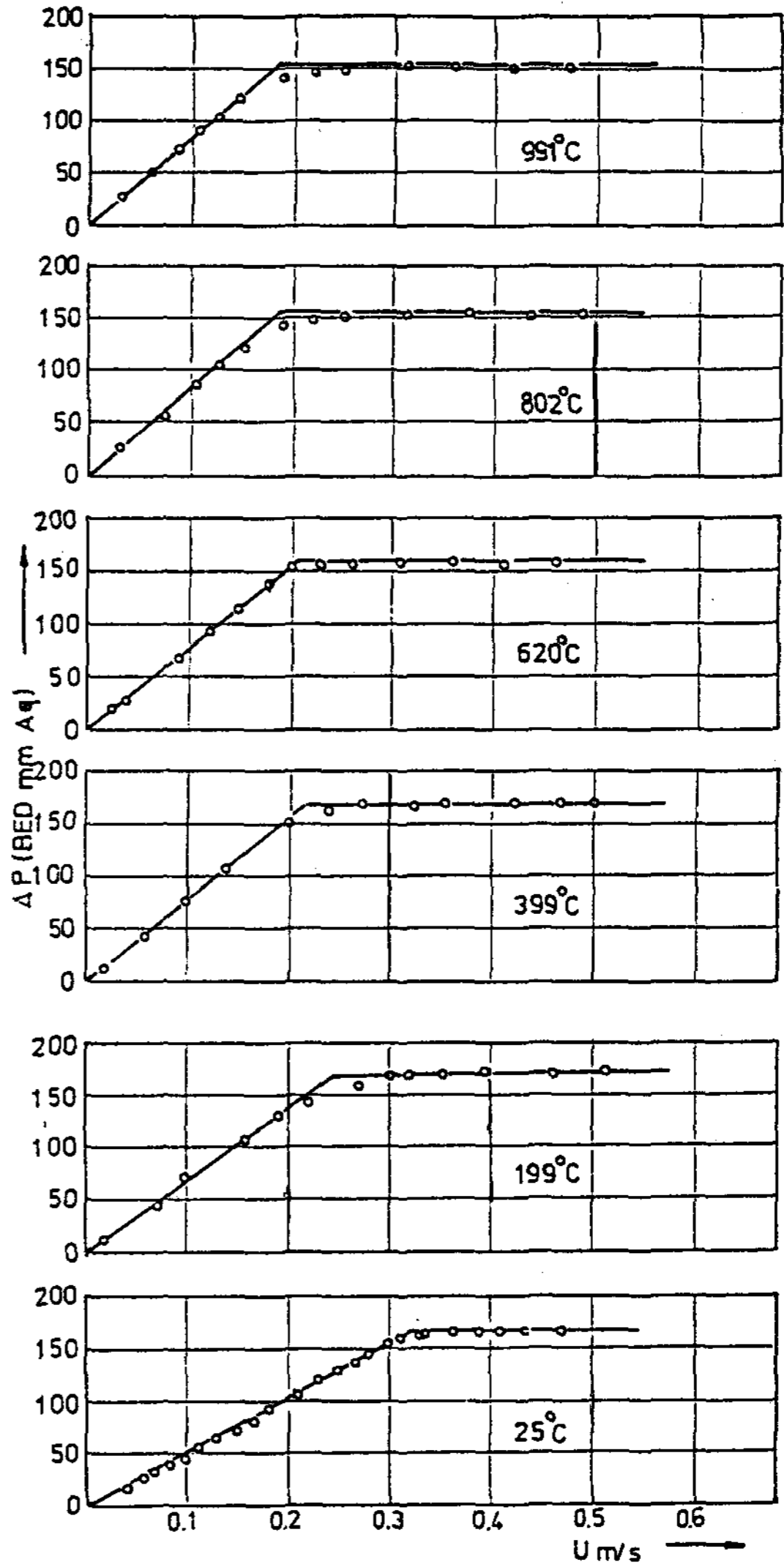


Fig. 6. Typical Pressure Drop Versus Gas Velocity Measurements at Various Temperatures for 420µm Magnesia.

(d) 流動層 空隙率 ( $\epsilon_{mf}$ )

$\epsilon_{mf}$ 를 구하기 위한 probe를 表示하면 Fig. 3. 과 같다. probe의 끝은 分散板 위로 100 mm, 壁에서 50 mm 떨어진 位置에 固定하였다. Analog式 差壓計와 並列로 差壓變換器, 增幅器 및 Filter를 通하여 差壓은 pen recorder에 記錄된다. 差壓  $\Delta P_h$ 와  $\epsilon$ 과의 關係<sup>5)</sup>는 다음과 같다.

$$\Delta P_h = h(1 - \epsilon)(\rho_s - \rho_g)g \dots\dots\dots (2)$$

윗式은 流動層粒子가 完全히 流動化될 때 有效하

다.  $\rho_g$ 는  $\rho_s$ 에 비하여 아주 작으므로 無視하면  $\epsilon$ 은 다음 (3)式으로 구할 수 있다.

$$\epsilon = 1 - \frac{\Delta P_h}{\rho_s h g} \dots\dots\dots (3)$$

따라서 (3)式에서 얻은  $\epsilon$ 과  $u / u_{mf}$ 의 關係를 線圖化하면 Fig. 9~11과 같으며  $\epsilon_{mf}$ 가 決定된다.

III. 實驗結果 및 考察

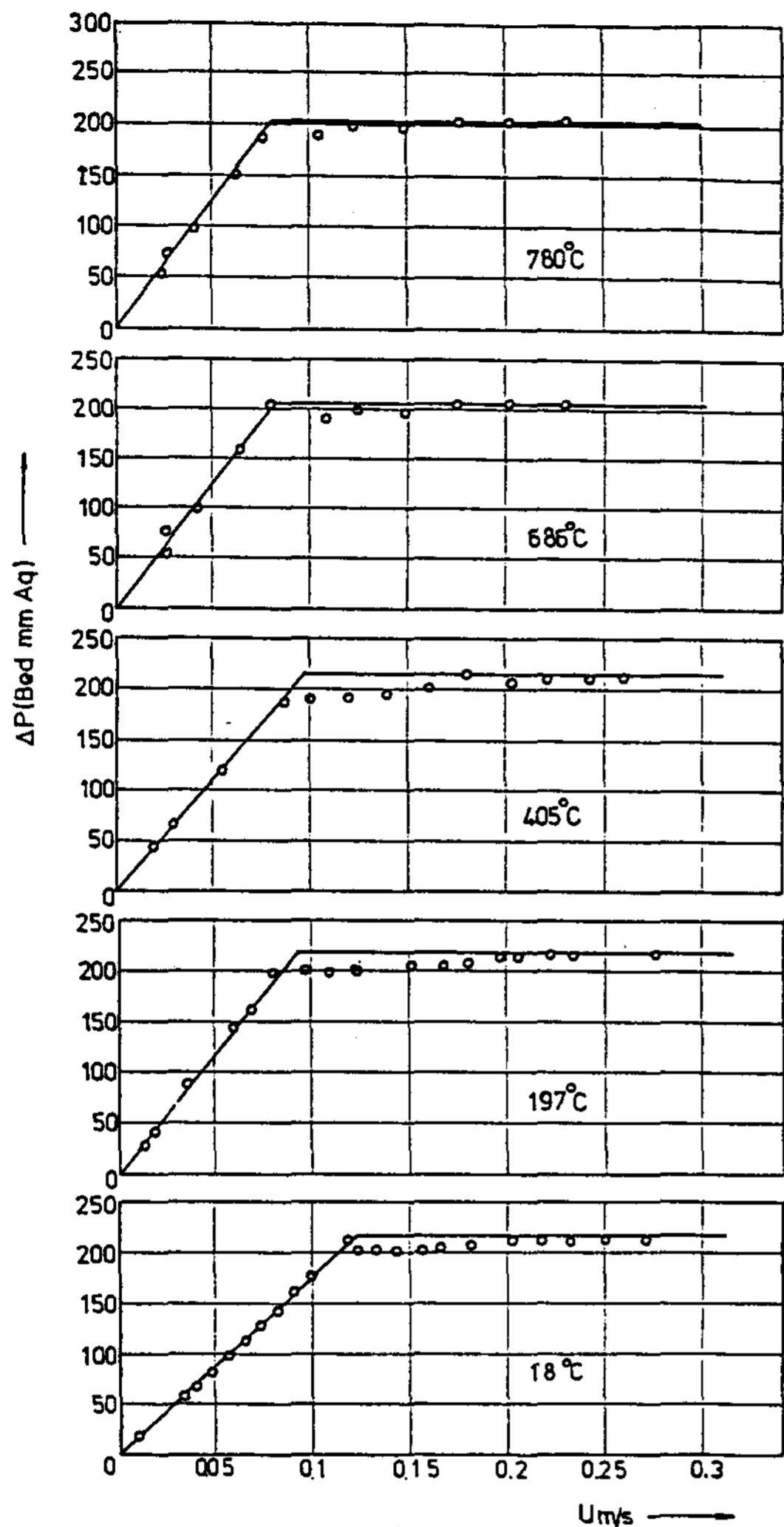


Fig. 7. Typical Pressure Drop Versus Gas Velocity Measurements at Various Temperatures for 197µm Sand

1. 最小流動化 速度 ( $U_{mf}$ )

가스속도와 壓力降下의 關係는 流動이 層流이면 Fig. 6~7.에서와 같이 充填層區域에서는 直線的인 關係가 되며, 亂流이면 Fig. 4~5.에서와 같이 曲線化되는 傾向이 있다. 粒子가 流動化되면 壓力降下는 單位面積當 浮力과 같게 되고  $U_{mf}$  以上の 速度에서 는 一定하게 된다. 그러나 流動層의 溫度가 높아질수록  $U_{mf}$ 는 減小하는 傾向이 있는데, 이것은 流動氣

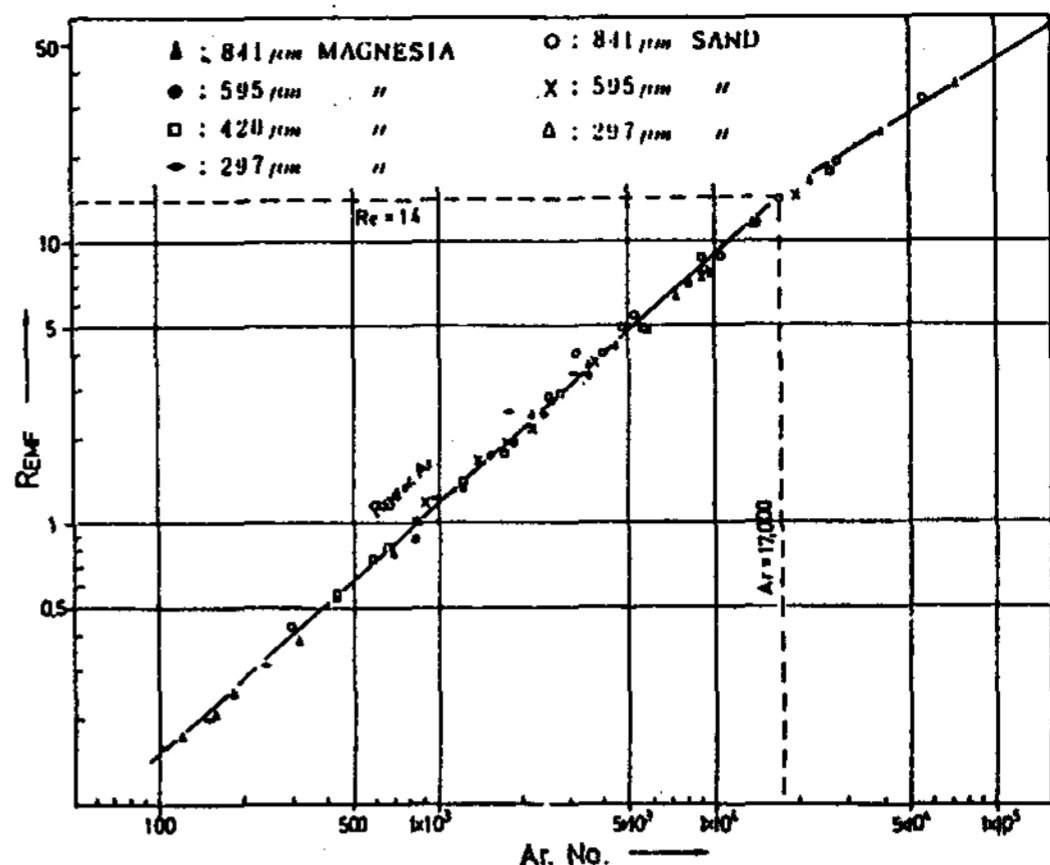


Fig. 8. Relationship Between Min. Fluidization Reynolds No.,  $Re_{mf}$ , and Archimedes No.,  $Ar$ .

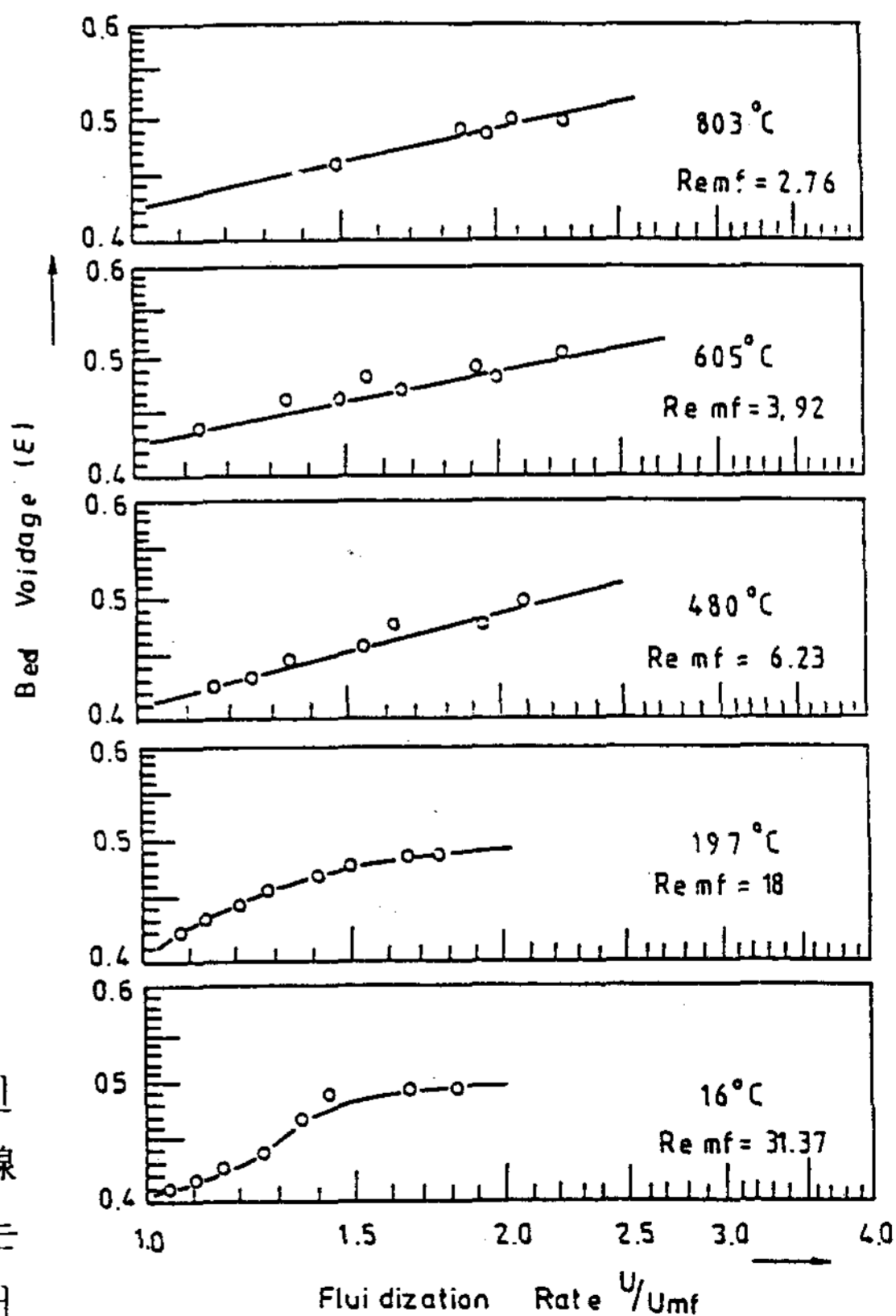


Fig. 9. Typical Plots of Average Bed Voidage, Versus Fluidization Rate,  $U/U_{mf}$ , for 841µm Sand.

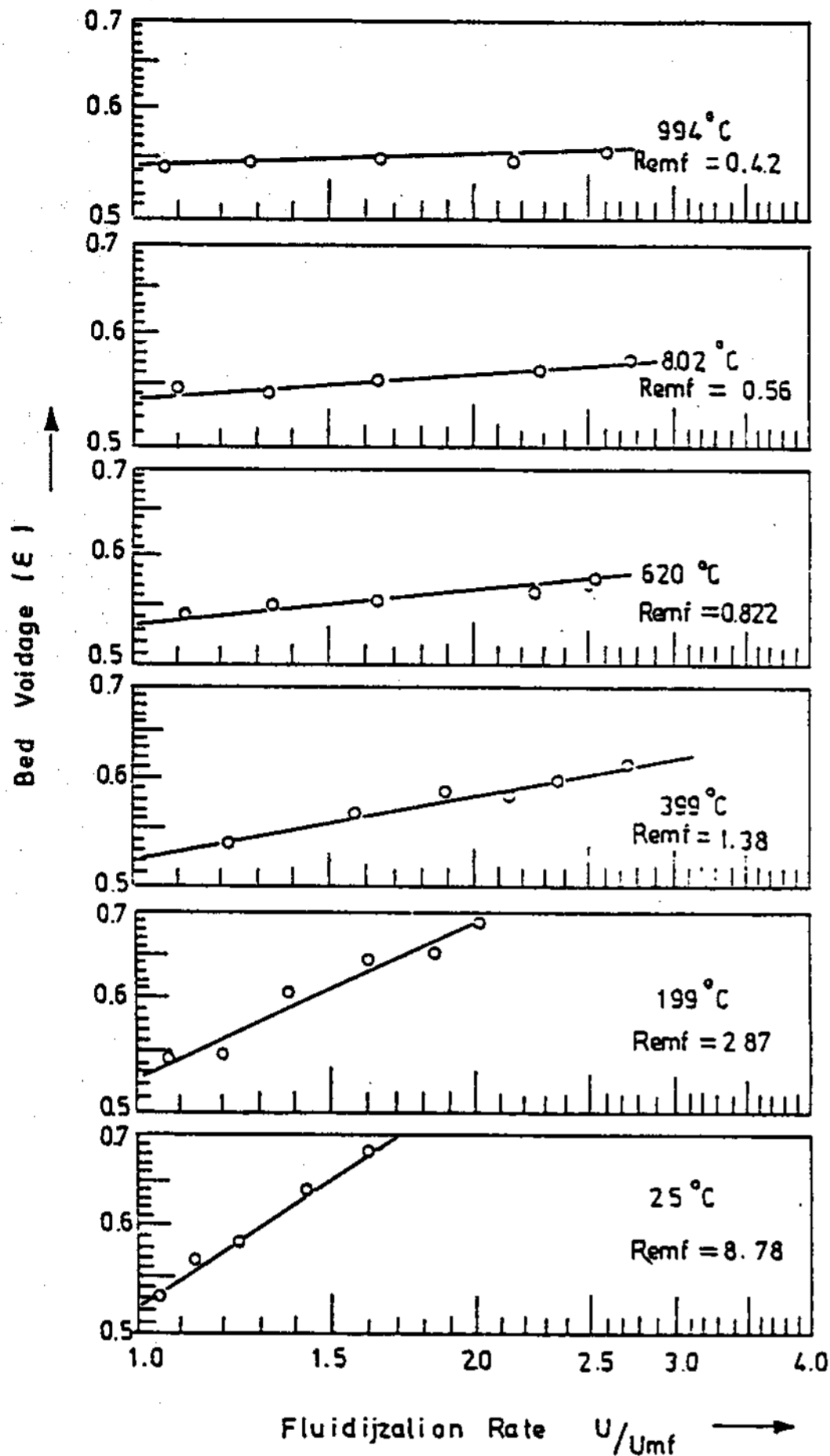


Fig. 10. Typical Plots of Average Bed Voidage,  $\epsilon$ , Versus Fluidization Rate,  $U/U_{mf}$ , for  $420\mu\text{m}$  Magnesia.

体的粘性이 증가하는 影響때문이라고 생각된다.

Fig.8. 은  $Ar$  과  $Re_{mf}$  의 關係를 나타내며, 작은 粒子的 層流區域에서의  $Re_{mf}$  는  $Ar$  에 比例하여 변하며, 큰 粒子的 亂流區域에서는  $Re = 14$ ,  $Ar = 17,000$  을 境界로 하여 變化가 약간 완만한 傾向으로 나타난다.

### 2. 最小流動化 空隔率 ( $\epsilon_{mf}$ )

Fig.9~11.은  $\epsilon$  과  $U/U_{mf}$  의 關係를 나타낸 것이며 層流區域에서는  $\epsilon$  과  $U/U_{mf}$  關係는 直線的이 되며  $U/U_{mf} > 1$  인  $\epsilon$  의 線圖에서 補外法<sup>6)</sup> 으로  $\epsilon_{mf}$  를 구하게 된다. 그러나 Fig.9. 에서와 같이 亂流區域 ( $Re > 14$ )에서는 直線的인 關係를 벗어나므로  $U_{mf}$  에 가까운

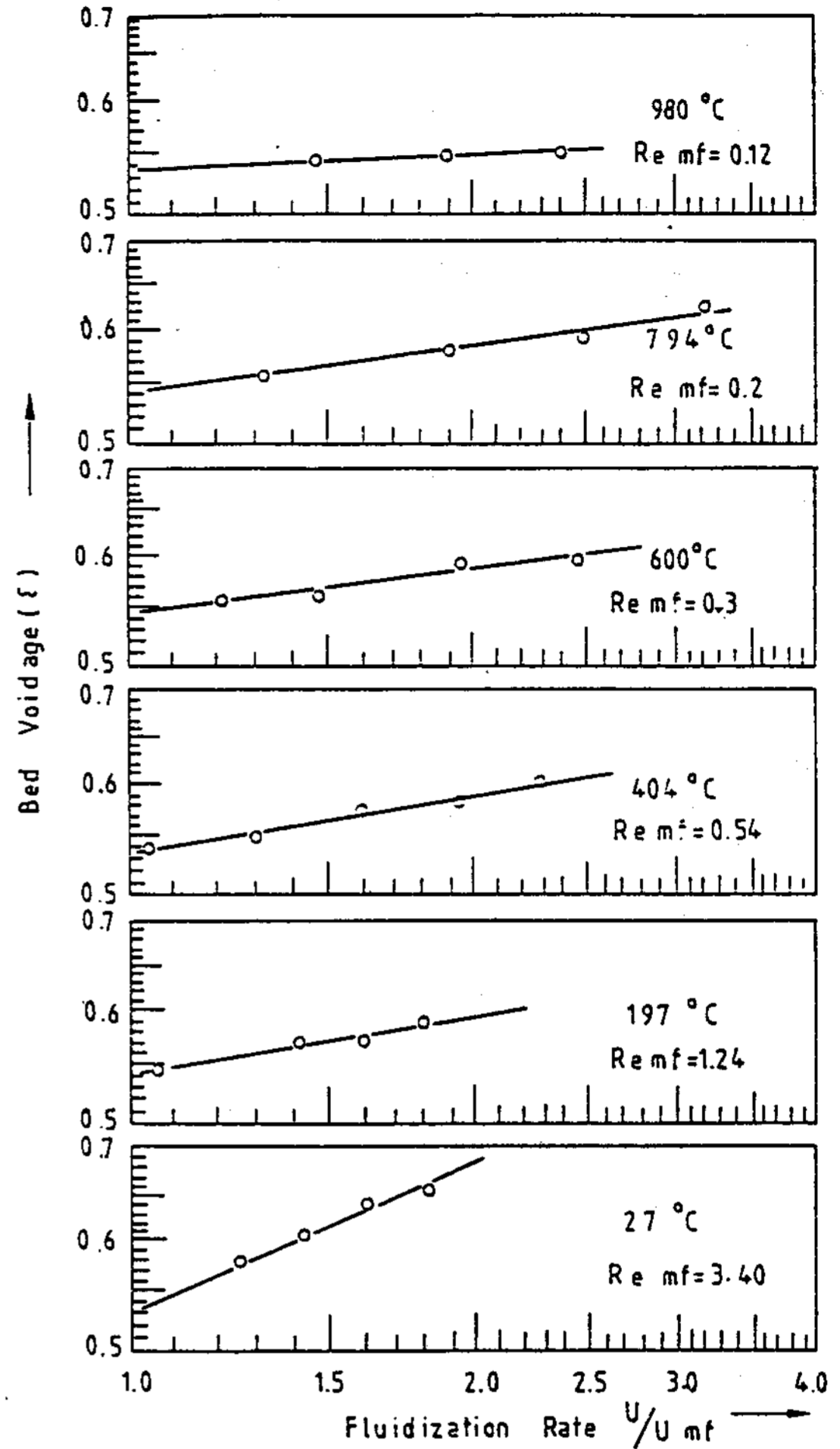


Fig. 11. Typical Plots of Average Bed Voidage,  $\epsilon$ , Versus Fluidization Rate,  $U/U_{mf}$ , for  $297\mu\text{m}$  Magnesia.

速度에서의  $\epsilon$  을  $\epsilon_{mf}$  로 잡는다.

Fig.12. 에 流動層溫度에 따른  $\epsilon_{mf}$  의 變化를 나타냈다. 이 그림에서 溫度의 增加에 따라  $\epsilon_{mf}$  가 약간 增大하는 傾向을 알 수 있다.

### 3. 最小流動化速度와 關係式

實驗적으로 구한  $U_{mf}$  와 Wen and Yu<sup>7)</sup> 式에 의한 값들과 比較하면 Fig.13. 과 같다. 그림에 의하면 本實驗의 結果는 -50% 誤差範圍內에 있다.

Fig.14~17.은 Ergun<sup>4)</sup> 의 式(式1)과 Goroshiko et al<sup>8)</sup> 의 式에서의 각  $U_{mf}$  값과 實驗에서 구한  $U_{mf}$  값을 比較한 것이다. 위 式

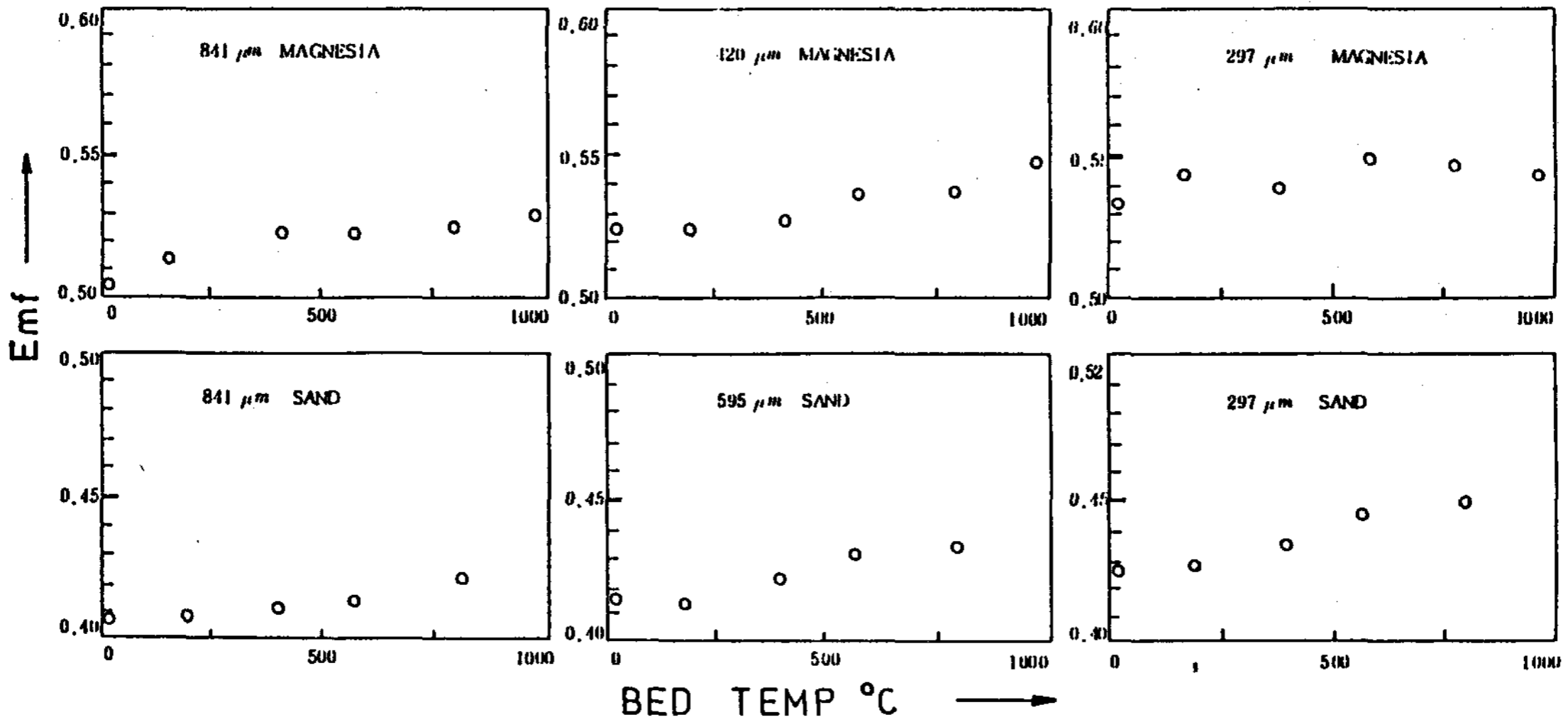


Fig. 12. Variation in Min. Fluidization Voidage,  $\epsilon_{mf}$ , With Increasing Temp. for Different Particle Size.

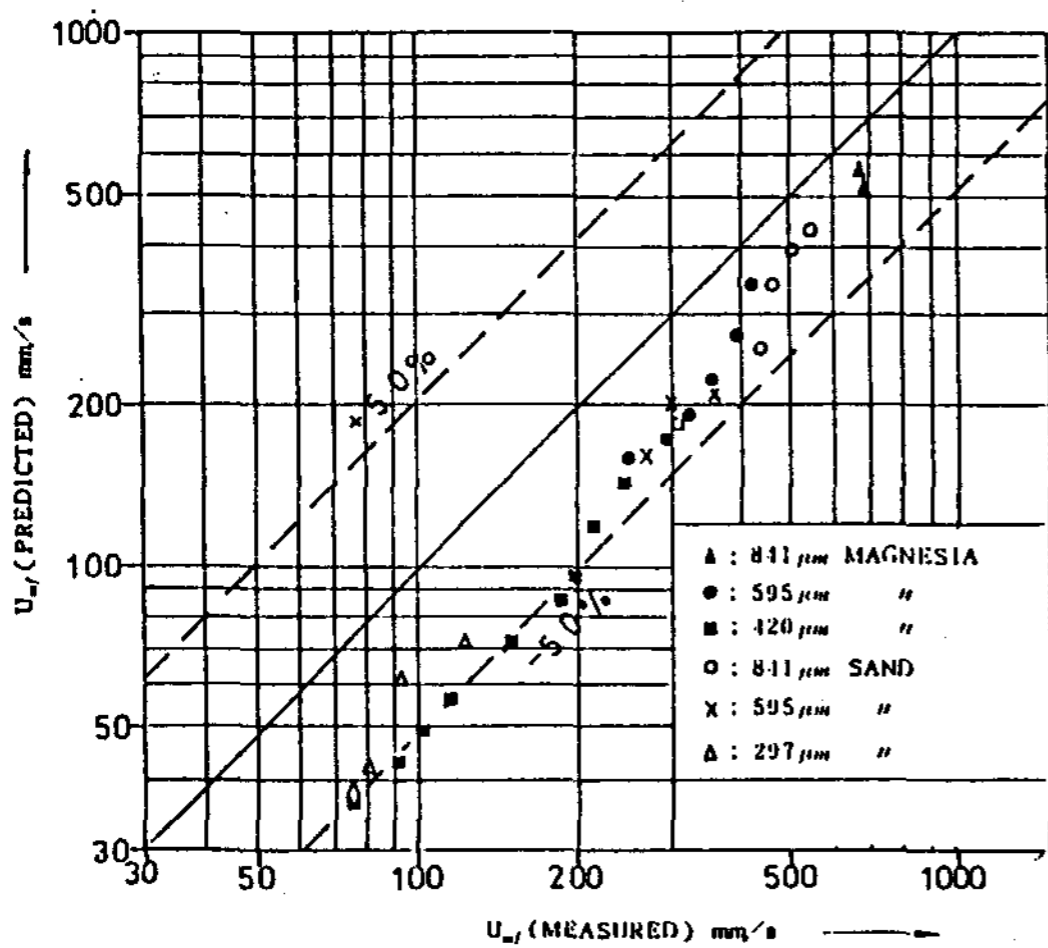


Fig. 13. Comparison of Experimental Data with the -50% Limits on the Wen and Yu Correlation Equation.

들에 適用하는  $\epsilon_{mf}$ 는 常溫에서의  $U_{mf}$ 에 대하여 구한 값이다. 그림에 의하면  $U_{mf}$ 는 低溫區域에서는 實驗値와 豫想値는  $\pm 5\%$  以內에 있으며 溫度가 增加함에 따라 그 誤差는 커지며 그값은 Goroshiko et al의 式에 接近한다. 그러나 앞에서 구한 각 溫度에서의  $\epsilon_{mf}$ 를 Ergun의 式에 代入하여 얻은  $U_{mf}$ 는 全体 溫度領域에서 實驗値와 거의 一致하는 結果를 얻었다. 또 Fig. 17. 에 의하면 亂流流動인 경우 低溫領域에서는 一時的으로 增加하였다가 減少하는 傾向

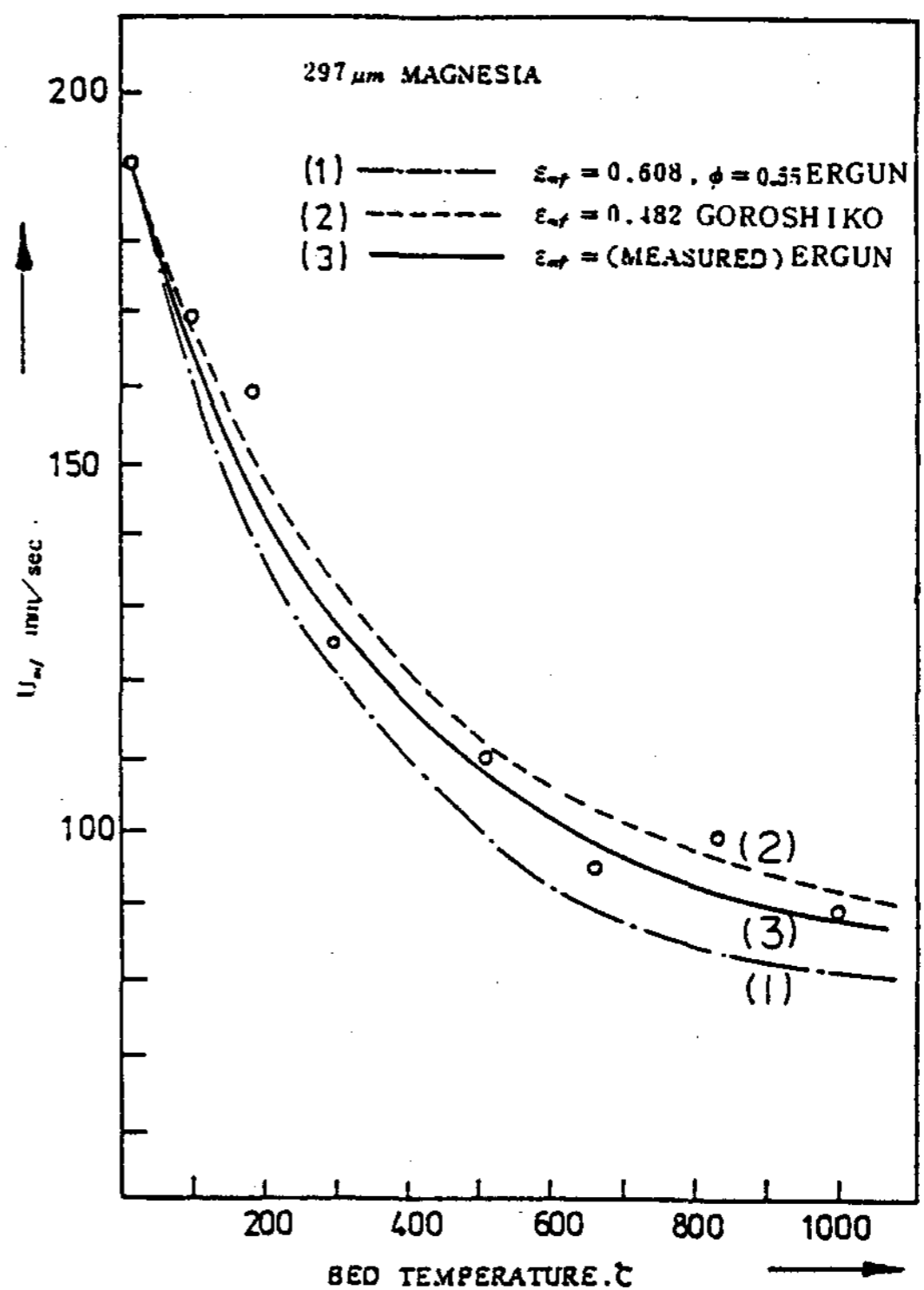


Fig. 14. Variation in Minimum Fluidization Velocity with Operating Temperature for 197 $\mu$ m Magnesia.

이 나타나는데 이것은 溫度가 높아지면 流動氣體의 粘性이 增加하여 亂流는 層流流動으로 遷移하기 때문이라 생각된다.

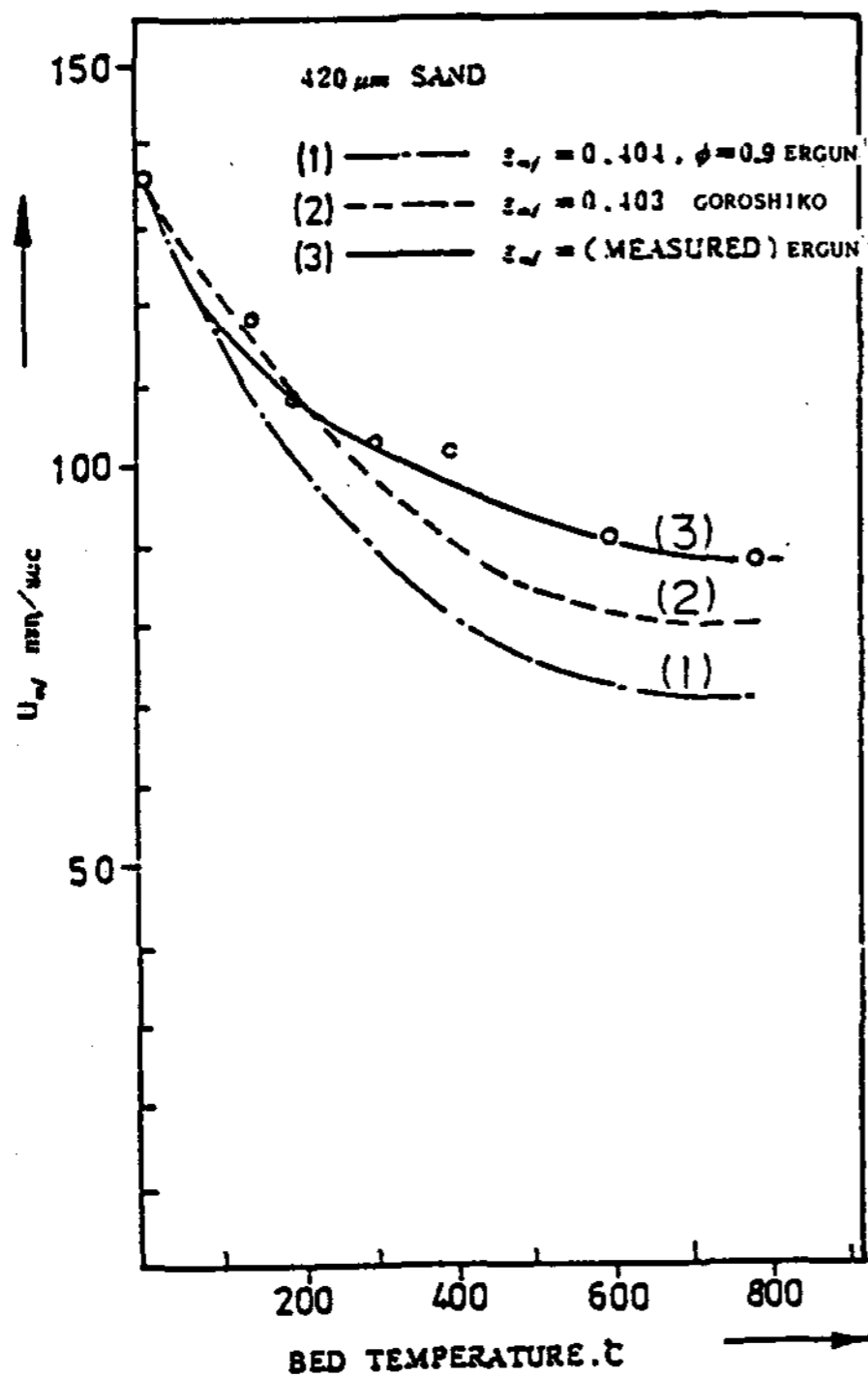


Fig. 15. Variation in Minimum Fluidization Velocity with Operating Temperature for 420 $\mu$ m Sand.

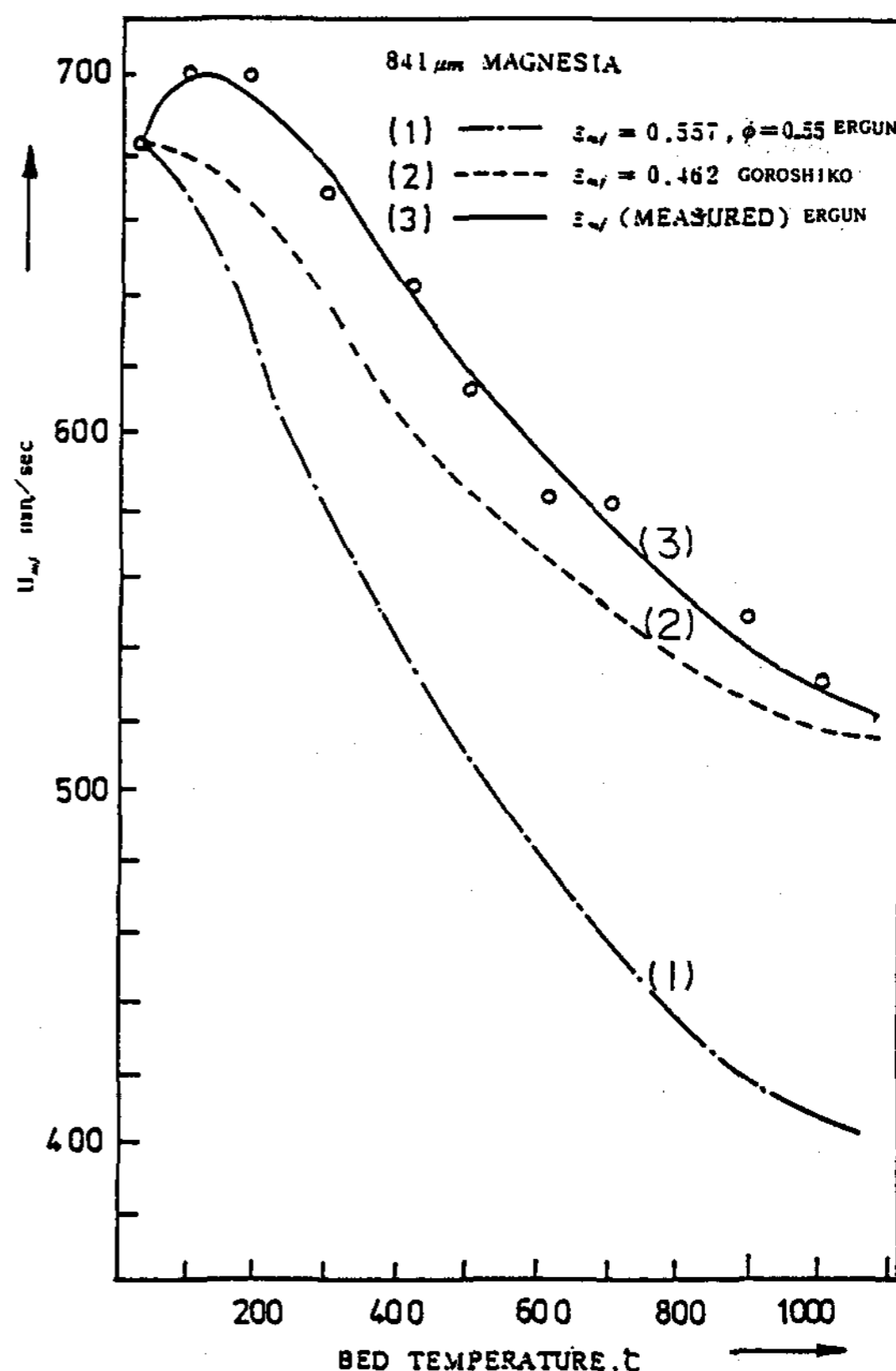


Fig. 17. Variation in Minimum Fluidization Velocity with Operating Temperature for 841 $\mu$ m Magnesia.

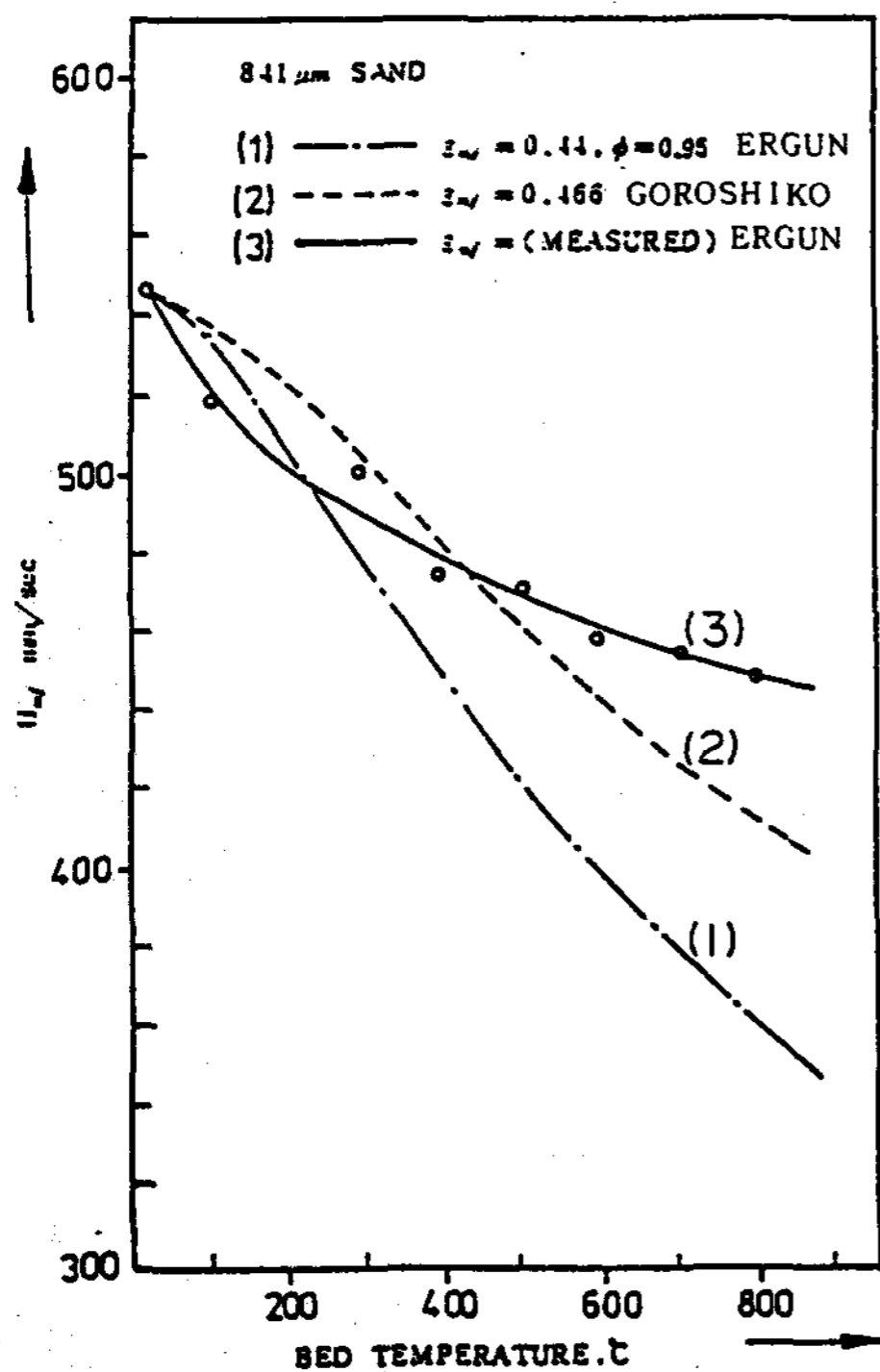


Fig. 16. Variation in Minimum Fluidization Velocity with Operating Temperature for 841 $\mu$ m Sand.

#### IV. 結 論

粒子크기가 Geldart's Group "B" 와 "D" 의 모래와 Magnesia 粒子 (297 ~ 841  $\mu$ m) 로 된 온도 15 ~ 1000  $^{\circ}$ C 의 流動層에서 最小流動化速度 및 空隔率에 관한 實驗을 하여 다음과 같이 結論을 얻었다.

1. 最小流動化 速度의 實驗値는 最小流動化 空隔率의 實驗値를 Ergun 의 式에 적용한 결과와 잘 一致한다.

2. 層流流動層에서  $Re_{mf}$  와 Archimedes 數의 關係는 直線的으로 변하며 流動特性의 境界는  $Re = 14$ ,  $Ar = 17,000$  이다.

3. 841  $\mu$ m 인 Magnesia 粒子를 除外한 流動層에서는 溫度의 增加에 따라 最小流動化 速度는 減少한다.



4. 841  $\mu\text{m}$ 인 Magnesia 粒子인 流動層의 低溫區域에서의 最小流動化 速度는 一時的으로 增加하는 傾向이 있다.

5. 層流流動層에서의 空隔率과  $U/U_{mf}$  는 거의 直線的關係를 가지며 最小流動化 空隔率은 流動層 溫度의 增加에 따라 一般的으로 增加한다.

## REFERENCES

1. Howard, J.R.: "Fluidized Beds Combustion & Application", Applied Science Publishers, London & New York, 1983.
2. Kunii, D., and Levenspiel, O.: "Fluidization Engineering", John Willey and Sons Inc., New York, 1969.
3. Botterill, J.S.M.: "Fluidized-bed Heat Transfer", Academic Press, London, 1975.
4. Ergun, S.: Chem. Eng. Prog., Vol. 48, pp. 89-94, 1952.
5. Abrahamsen, A.R. and Geldart, D.: Powder Techn., Vol. 26, pp. 35-46, 1980.
6. Doichev, K. and Boichev, G.: Powder Tech., Vol. 31, pp.101-110, 1982.
7. Wen, C.Y. and Yu, Y.H.: A.I. Ch. E. Journal, Vol. 12, No.3, pp. 610-612.
8. Davidson & Harrison, "Fluidization", Academic Press., London & New York, 1977, p. 513, 1977.