

【 論 文 】

氣-固 流動層爐內 流動化 및 傳熱特性에 關한
實驗的 研究

An Experimental Study on the Fluidization and Heat Transfer
Characteristics in the Gas-Solid Fluidized Bed Furnace

최 국 광 * 박 중 순 **
Gug Gwang Choi Jong Suen Park

ABSTRACT

In this paper, the fluidization characteristics of the magnesia fluidized bed and the heat transfer characteristics with the specimen (SM55C) plunged in the bed have been investigated.

To characterize the fluidization, the minimum fluidizing velocities and the relationships between bed voidage and fluidization rate and obtained.

To characterize heat transfer, the experiments for finding heating time and heat transfer effect have been carried out by varying the magnesia particles sizes. Also, the optimum heating condition in the magnesia fluidized bed is obtained.

I. 서 론

유동층의 원리는 연소, 폐열회수, 배기 Gas의 정화 및 금속열처리, 건조등의 산업생산분야에 많이 사용되고 있다.¹⁾

유동화는 미세입자가 Gas나 액체와 혼합되어 유동상태로 운전되는 것이다. 유동층내 입자는 상향으로 흐르고 있는 유체에 의해서 입자에 작용하는 항력이 입자들의 중력보다 커지게 되면 입자들은 유체와 함께 유동하게 된다.

여기서 유체가 기체일때는 유체속도의 증가에 따라 공극율은 증가하게 되고, 이보다 더 큰 속도에서는 기포가 발생하게 된다. 이와같

은 상승기포와 입자들의 거동은 열전달효과를 가져오므로 건조, 냉각, 가열 및 화학반응속도들의 증진등에 크게 작용한다. 이러한 효과는 유동층 연소(F.B.C)에서도 연소효율을 높이게 되며, 또한 유동층 내부의 온도가 균일하고, 유동층으로부터 그 내부에 있는 물체로의 전열효과가 매우 커서 금속열처리에도 적용하게 된다.²⁾

유동층을 사용할때의 장점은 유동층 입자의 유동으로 인한 혼합으로 유동층내 온도 분포가 균일화되어 유동층내에서의 열전달계수가 크다는 것이며,³⁾ 단점으로는 유동층 운전에는 동력손실과 유동입자의 크기에 제한이 따르며, 유동층내 유동현상에 대해서는 아직 잘 구명되지 않고 있다는 점이다. 유동층을 산업분야에

* 정회원 : 인천대학교 기계공학과

** 韓國에너지研究所

이용하려면 온도는 고온도 범위에 속하게 되는데, 현재까지 대부분의 연구는 비교적 낮은 온도에서 유지되는 유동층에 관한 것이 많으며, 또한 간단한 실험결과들이 이용되어 왔다.

유동층의 발생 및 운전기법은 아주 간단하지만 실제에 있어서는 유동층에 사용되는 유체 및 입자의 종류외에 유동층장치의 크기에 따라 유동화 특성들이 변하며, 고온일수록 실험결과에 대한 차이가 크게 된다. 따라서 생산공정에 적용하기 위해서는 고온에서의 유동화 특성연구가 매우 유용한 것으로 생각된다.

유동화 특성은 유동입자의 재질, 기하학적형상, 밀도, 크기 및 유동화 속도등의 영향과 관계되어 복잡한 양상을 띠게 된다.^{3),5) 19)}

이와같은 이유때문에 유동층을 연구하는데 많은 어려움이 따른다.

본 연구는 직경 841 μm 와 595 μm 의 Magnesia 입자를 사용한 유동층로내에서 유동을

($U/U_{mf}=1.30, 1.50, 1.75, 2.00$)에 따른 유동화 특성과 SM55C 재질의 시험편을 유동층로 내에서 가열하여 전열효과를 각 유동조건에 따라 구명하고, 전기로내에서 가열한 실험결과와 비교, 검토하고자 한다.

II. 실험장치 및 실험방법

2-1 실험장치

Fig. 2.1 는 실험장치의 개략도이며, 본 연구의 실험은 대기압하에서 실시하였다.

(1) 유동층 실험장치

Fig.2.2은 유동층로의 단면도를 나타낸 것이며, 유동층이 일어나는 부분 (Fluidized Bed)은 $\phi 210 \times 430 \text{ H} \times 3 \text{ t}$ 인 Stainless Steel 관으로 되어 있고, 그 상부에는 $\phi 290 \times 365 \text{ H} \times 2 \text{ t}$ 의 Freeboard가 있어서 입자의 비산을 방지하고, 실험 Probe 들을 넣을 수 있게 하였다. 유동층 밑에는 Plenum Chamber 를 설치

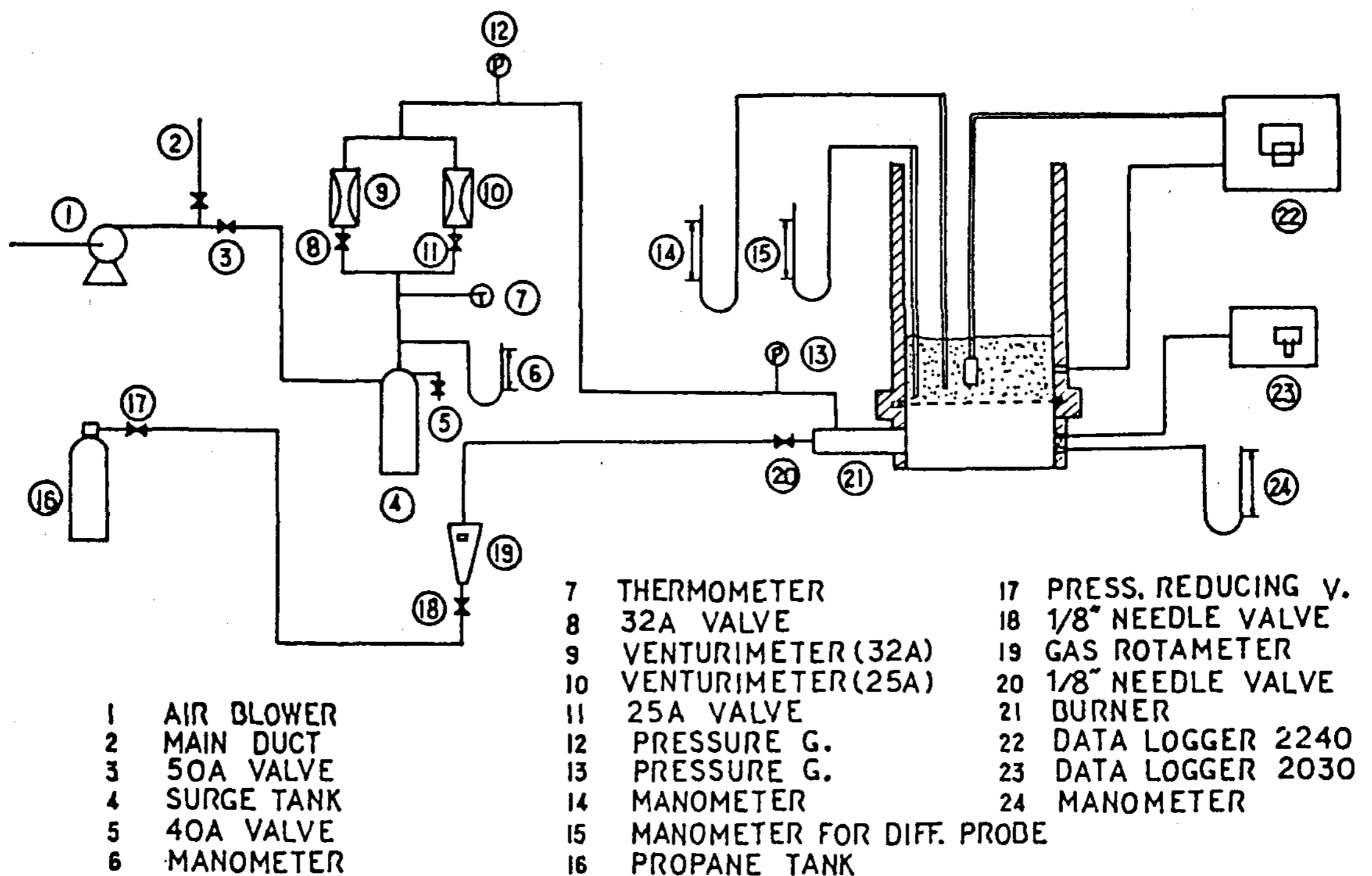


Fig.2.1 Schematic diagram of experimental apparatus

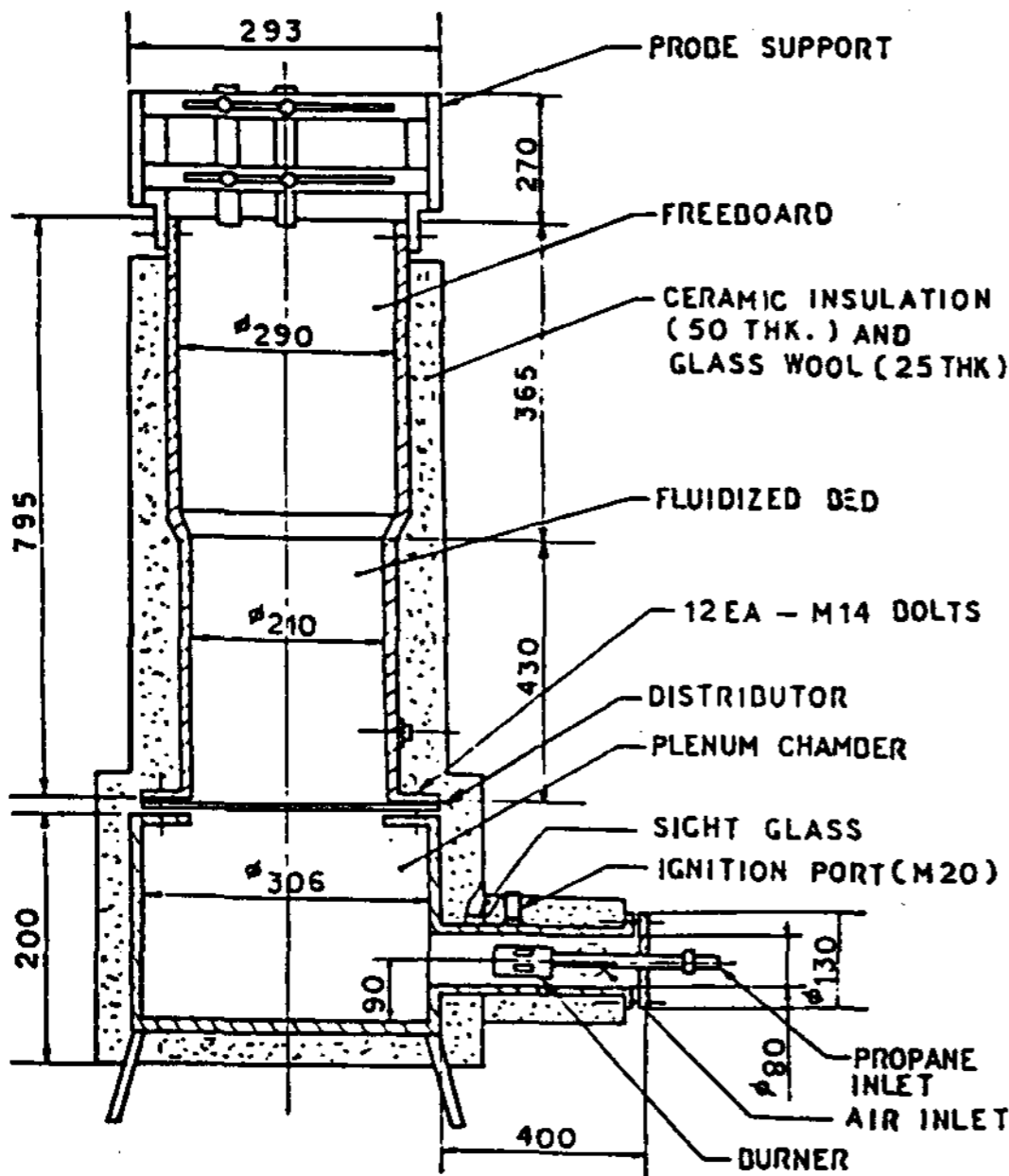


Fig. 2.2 Details of fluidized bed

하여 폭발의 위험성이 없도록 Air/Propane 이 잘 혼합하기에 충분한 공간을 갖게 하였으며, $\phi 306 \times 200 H \times 6.4 t$ 의 연강관을 사용하여 밑부분은 $\phi 318 \times 12t$ 의 연강관을 용접하였으며, 피치원 직경 $\phi 260$ 에 M 14 Bolt 를 12개 용접하여 고온의 유동층 실험에서 열팽창에 의한 열응력에 견딜수 있게 하였다. 또 Plenum Chamber 옆에서 Air/Propane 혼합 Gas 의 유도관으로 $\phi 80 \times 400 L$ 의 연강관을 용접하였다. 유도관 상부에 Sight Glass를 설치하여 연소상태를 볼 수 있게하고, 또한 점화구 (M20)를 설치하여 Burner에서 점화가 가능하게 하였다.

실험장치 외부에는 두께 50 mm Ceramic 단열재로 싸고 그 외부에는 두께 25 mm Glasswool 로 다시싸서 최대의 단열효과를 얻도록하였다.

(2) 공기공급

공기는 5 HP \times 200 V \times 3 ϕ MOTOR로 구동되는 원심송풍기로부터 Surge Tank 를 통하여

실험실내로 공급하였으며, 공기의 최대정압은 150 mm Hg였다. (Fig. 2.1 참조) 실내에 공급된 공기는 Ventri Meter (ISEya Mfg. Co.)를 통하여 Burner로 들어가게 하였다.

(3) Propane 공급

20 kg의 Propane 용기의 감압 Valve (GR)로 Gas 공급압력은 1.2 kg/cm²으로 조절하여 Gas Burner (중압용)로 공급했으며, Gas Burner의 Flange는 6 EA-M8 Bolt로 고정하였다.

(4) 분산판 (Distributor)

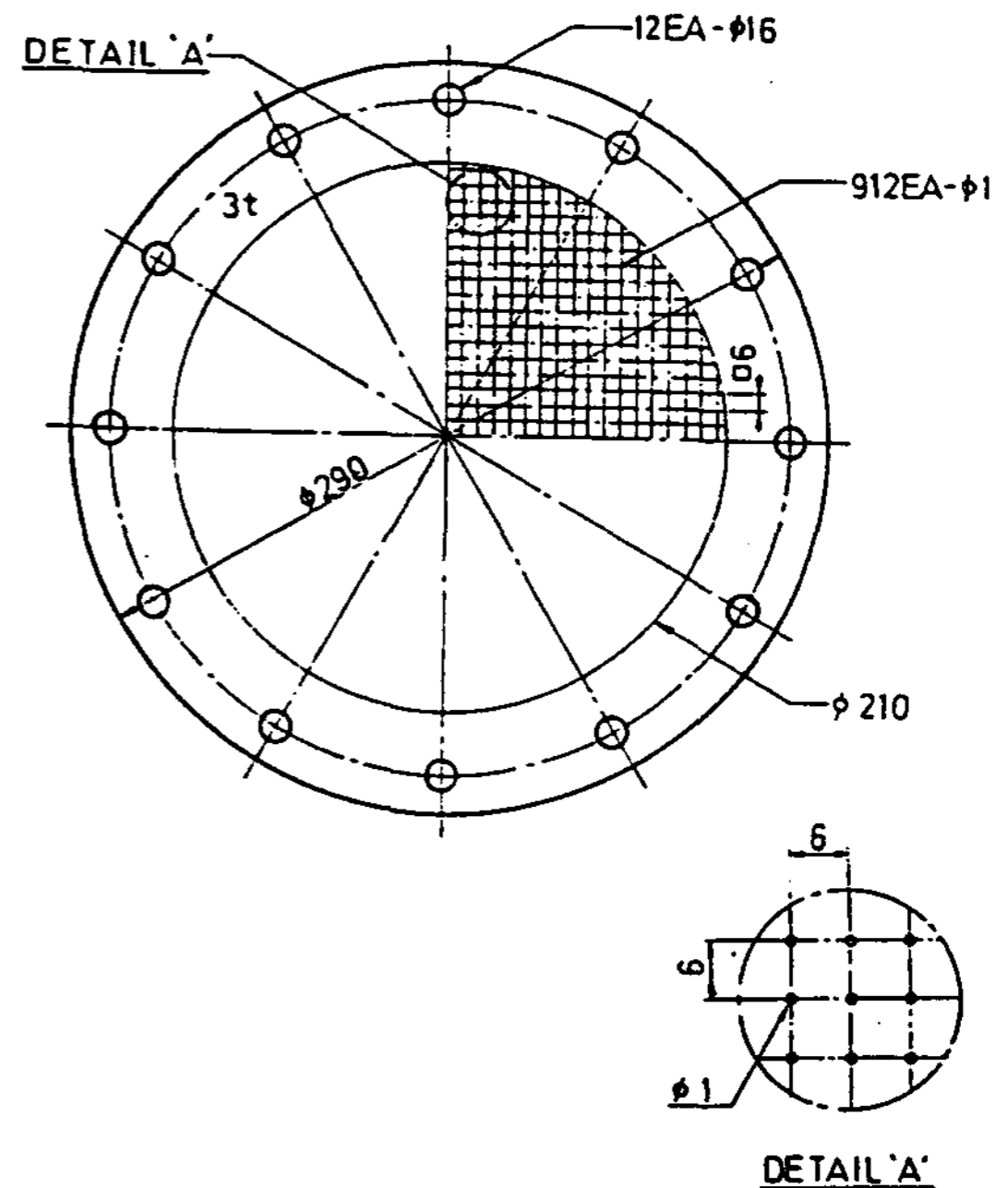


Fig. 2.3 Details of distributor

Fig. 2.3 은 분산판의 상세도이며, 이것은 유동층 거동에 큰 영향을 미치게 된다. 그러므로 균일한 유동기체 공급을 위하여 다공판으로 하였으며, 직경 $\phi 210$ 의 판에 Nozzle로 사각 Pitch 6 mm로 하여 912 EA- $\phi 1$ 의 구멍을 뚫었고 개공율은 2.07%로 하였다. 입자가 Plenum Chamber로 낙하되는 것을 방지하기 위

Table 1 Characteristics of Magnesia

Charact.	Mesh	# 20	# 30
Particle Diameter d_p (mm)		841 μm	595 μm
Particle Density (kg/m^3)		3,480	3,750
Bed Voidage ϵ_p		0.56	0.535
Shape Factor (ϕ)		0.55	0.56

Table 2 Chemical Contents of Magnesia Particles

Chemical Contents					
MgO	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	MnO ₂	SiO ₂
96.5 %	1 % 이하	1 % 이하	1 % 이하	1 % 이하	1 % 이하

해 분산판위에 # 260 Stainless Steel 망을 설치하였다. 또 분산판과 Flange 사이에는 두께 4 mm Ceramic Gasket 를 넣어 유동층 및 Plenum Chamber 의 기밀을 유지하였다.

(5) 유동입자 (Fluidizing Particles)

실험에서 사용한 Magnesia 입자의 특성은 Table 1, 2 와 같다. 입자는 KS 표준체 (# 20, # 30) 를 갖는 Sieve Shaker 를 10분간씩 작동시켜 채취하였으며, 화학적 성분은 Atomic Absorption Spectrometer (Varian Model No. 475) 를 사용하여 얻었다. 밀도는 비중병을 이용하여 측정했으며, 실험전후의 밀도차가 작아 평균치를 취하여 모든 계산에 적용하였다.

(6) 차압 Probe (Diff. Press. Probe)

Fig. 2.4 는 차압 Probe 를 나타낸 것이며, Doichev and Boichev 가 제안한 Probe 와 같은 형태의 2개의 압력 Tap 으로 이루어진 Probe 를 이용하여 ϵ_{mf} 를 구하였다. 각 Tap 은 $\phi 2 \times 1500$ L 의 Stainless Steel 관이고, 위 부분은 유동층에 주는 영향을 작게 하고, 취급이 용이하도록 $\phi 5 \times 1200$ L 의 Steel 관에 넣었다.

압력 Tap 사이의 간격은 15 mm 이고, 정압을 측정하기 위해서 90° 수직으로 굽혀졌다. 끝 부분은 타원형으로 하였으며, 입자의 유입을 방지

하기 위하여 # 260 Stainless Steel 망으로 둘러 쌓였다. Probe 끝은 분산판위 100 mm 높이에 벽으로 부터 50 mm 떨어져 설치하였다.

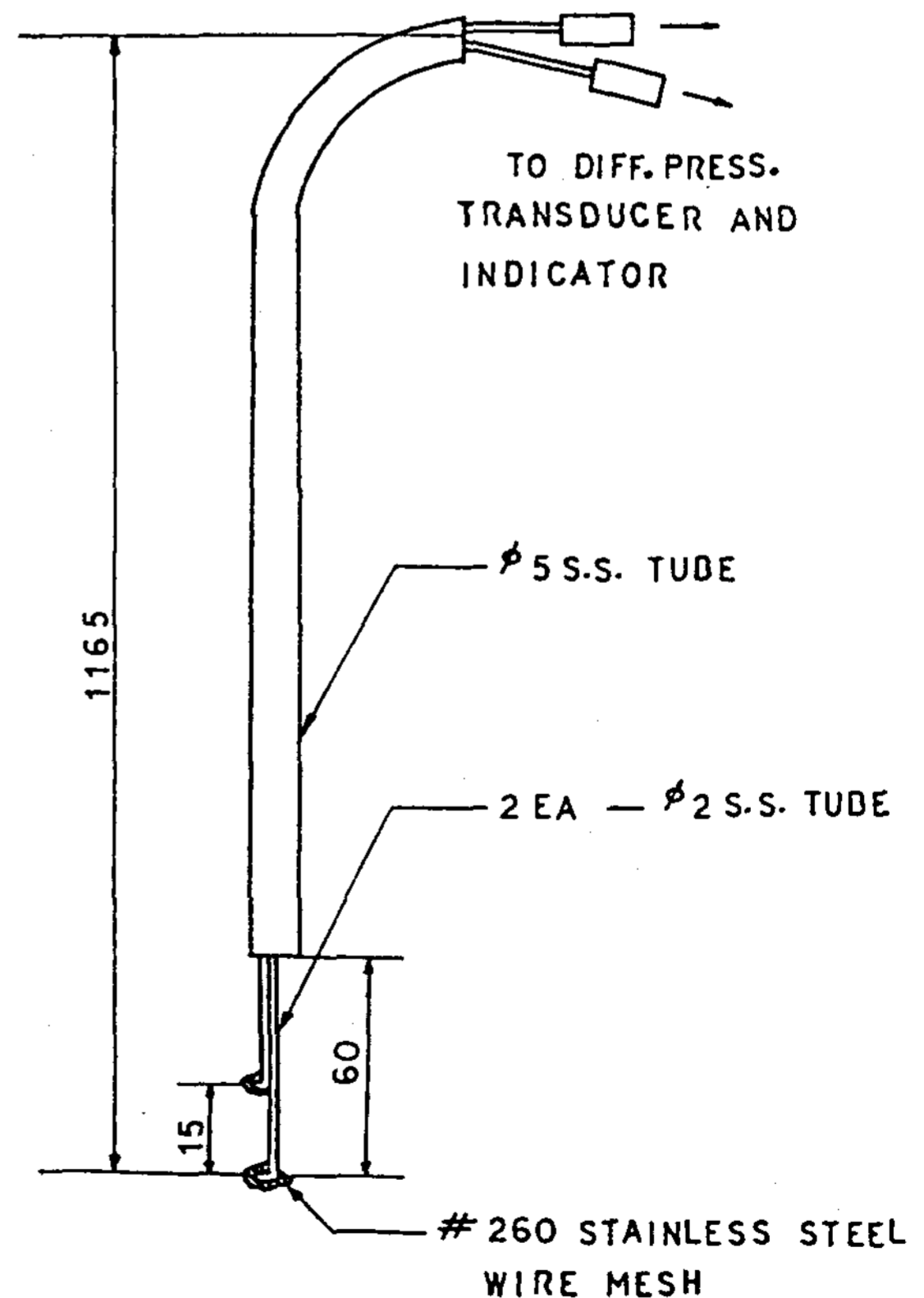


Fig. 2.4 Details of diff. press. probe

Table 3 Chemical Contents of SM 55C

Chemical Contents (%)								
C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	V	Ti
0.559	0.784	0.015	0.006	0.343	0.019	0.013	0.001	0.001

(7) 실험재료

SM55C를 실험재료로 하였으며, 이 시험편의 화학성분은 Table 3과 같다.

2-2 실험방법

유동층로내 온도를 실험온도 (840°C)까지 상승시키기 위해서 상온에서 650°C까지는 Propane Gas를 Plenum Chamber내에서 연소시켜 열을 공급하였으며, 650°C 이상부터는 분산판 (distributor)과 Gasket이 손상되는 것을 방지하며, 또한 유동층내에서 Air/Propane 혼합 Gas의 폭발방지를 위해 Plenum Chamber내의 온도를 200°C이하로 유지시키면서 유동층로내에서 연소가 유지 되도록 하였다. 이와 같이 하여 유동층로내 온도를 840°C로 유지시키고 입자의 직경이 #20(841 μm), #30(595 μm)인 경우 유동율 (U/Umf)을 1.30, 1.50, 1.75, 2.00으로 변화시키면서 실험재료를 유동층로내의 일정한 위치에 설치하여 가열실험을 하였다.

유동층로의 온도와 실험재료의 온도는 k-Type (φ 0.25)열전대를 사용하여 DATA LOGGER (FLUKE, 2240 C)로 기록하였다.

한편 ELECTRIC FURNACE (220 V, 15 A, MOTOYAMA SS-2030)내의 온도를 840°C유지시키면서 같은 실험재료의 온도상승 실험을 하였다.

III. 실험결과 및 고찰

3-1 최소유동화 속도 (Minium fluidizing velocity)

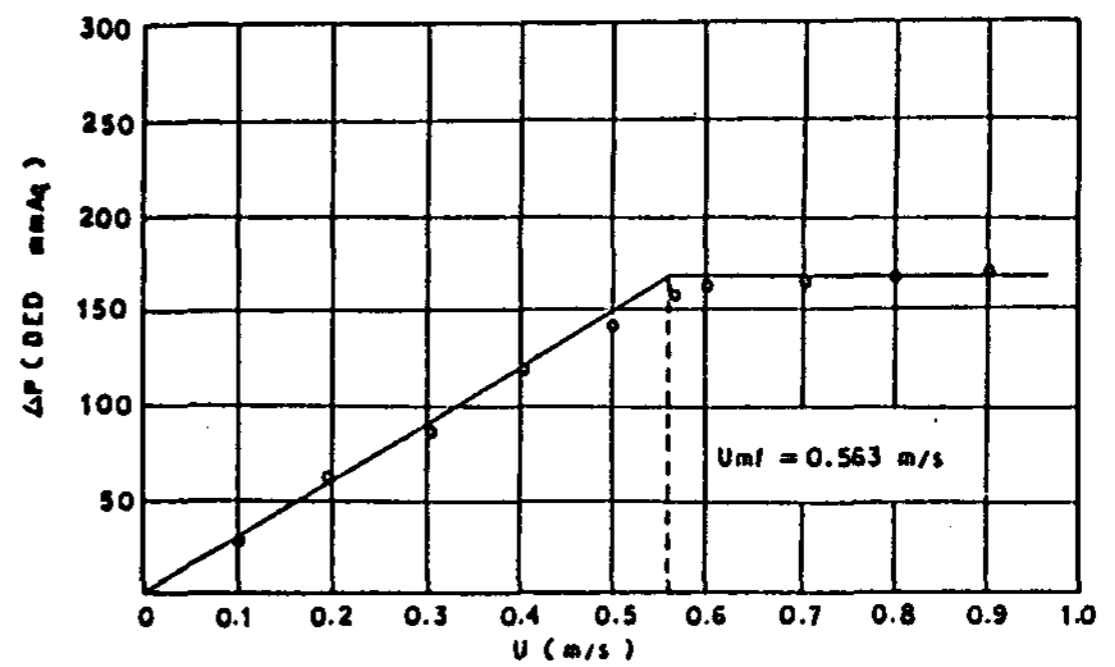


Fig.3.1 Gas velocity vs. bed pressure drop for 841μm magnesia

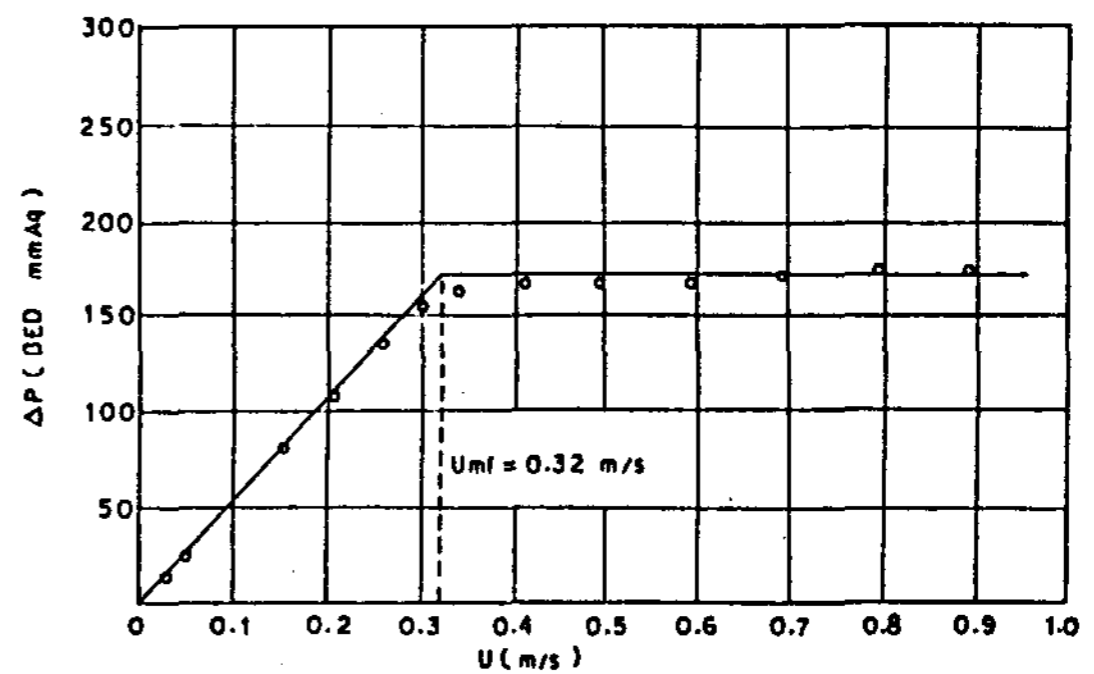


Fig.3.2 Gas velocity vs. bed pressure drop for 595μm magnesia

Fig. 3.1와 Fig.3.2에서 알수 있는 바와 같이 충전층에서 유동기체의 압력강하는 직선적으로 증가하고, 입자가 유동화되면 압력강하는 단위면적당 부력과 같게 되어 최소 유동화 속도 이상에서는 압력강하가 일정하게 되는 것을 볼 수 있다. 따라서 840°C의 상태에서 최소 유동화속도를 결정하기 위해서는 충전층에서의 경사선과 유동층에서의 수평선의 교점을 취하였다. 그 결과 841 μm Magnesia 유동층에서의 최소 유동화 속도 (Umf)는 0.563 m/s

이었고, 595 μm Magnesia 유동층에서는 0.320 m/s의 결과를 얻었다.

3-2 최소유동화 공극율 (Minimum Fluidization Voidage)

최소유동화 공극율 (ϵ_{mf})는 유동층에서 압력강하에 큰 영향을 미치게 되며, 충전층과 유동층 경계의 공극율에서 유동이 시작되는 최소 유동화 공극율은 충전층에서는 최대이고, 유동층에서는 최소가 된다. Fig.3.3와 Fig. 3.4는 유동율 (U/U_{mf})에 따라 Bed 공극율을 나타낸 것이며, 여기서 유동율이 증감함에 따라 Bed 공극율이 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 유동율 (U/U_{mf})이 1.30, 1.50, 1.75, 2.00 일때 Doichev and boi chev의 식을 이용

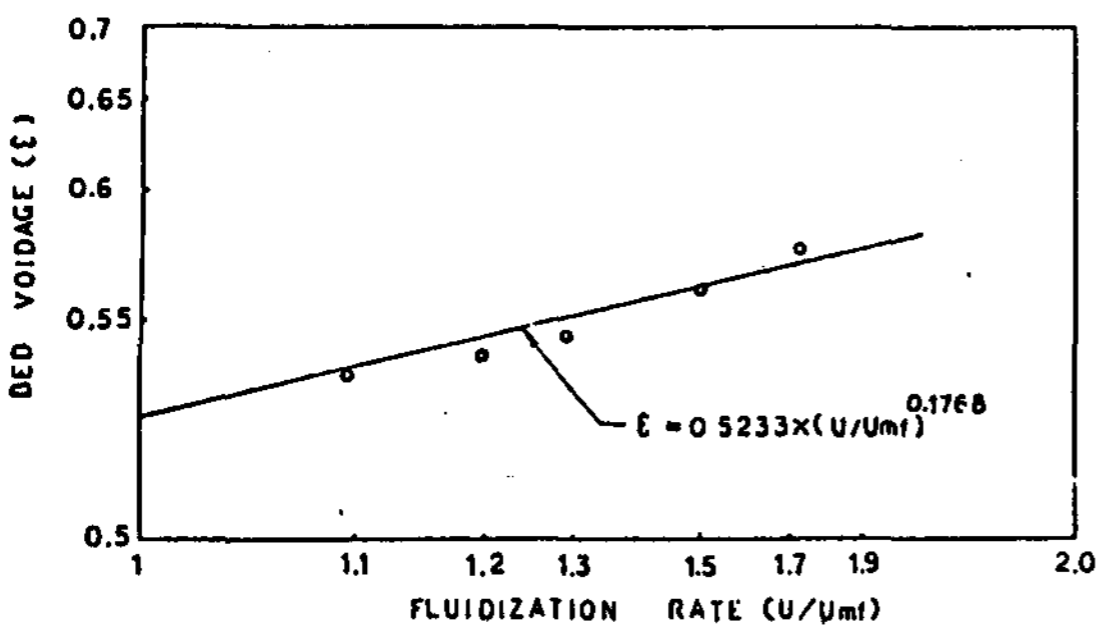


Fig.3.3 Typical plots of fluidization rate vs. average bed voidage for 841μm magnesia

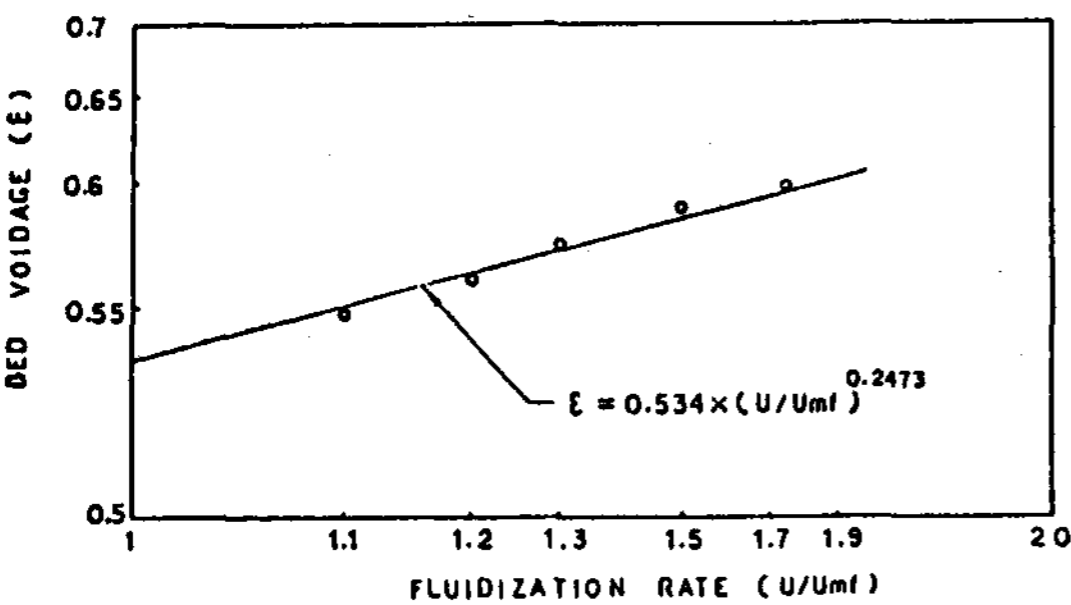


Fig.3.4 Typical plots of fluidization rate vs. average bed voidate for 595μm magnesia

하여 유동율과 공극율의 관계를 보외법으로 구하면 그 결과식은 다음과 같다.

$$\epsilon = 0.5233 \times (U/U_{mf}) \quad (d_p = 841 \mu\text{m 일때})$$

$$\epsilon = 0.5340 \times (U/U_{mf}) \quad (d_p = 595 \mu\text{m 일때})$$

3-3 전열효과

Fig.3.5와 Fig.3.6은 SM55 C 시험편을 840°C까지 올릴때 시간에 따른 온도변화를 나

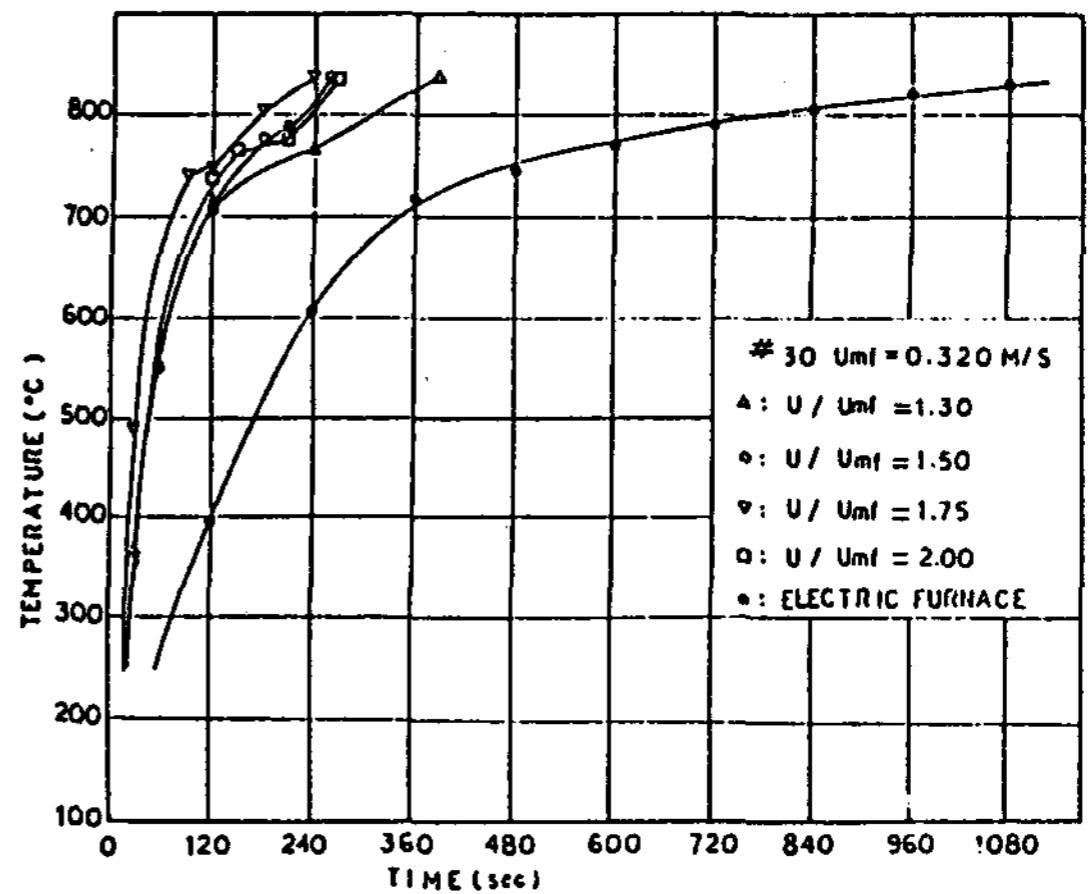


Fig.3.5 The comparison of temperature variation of plier in fluidized bed for 841μm magnesia and electric furnace with respect to time

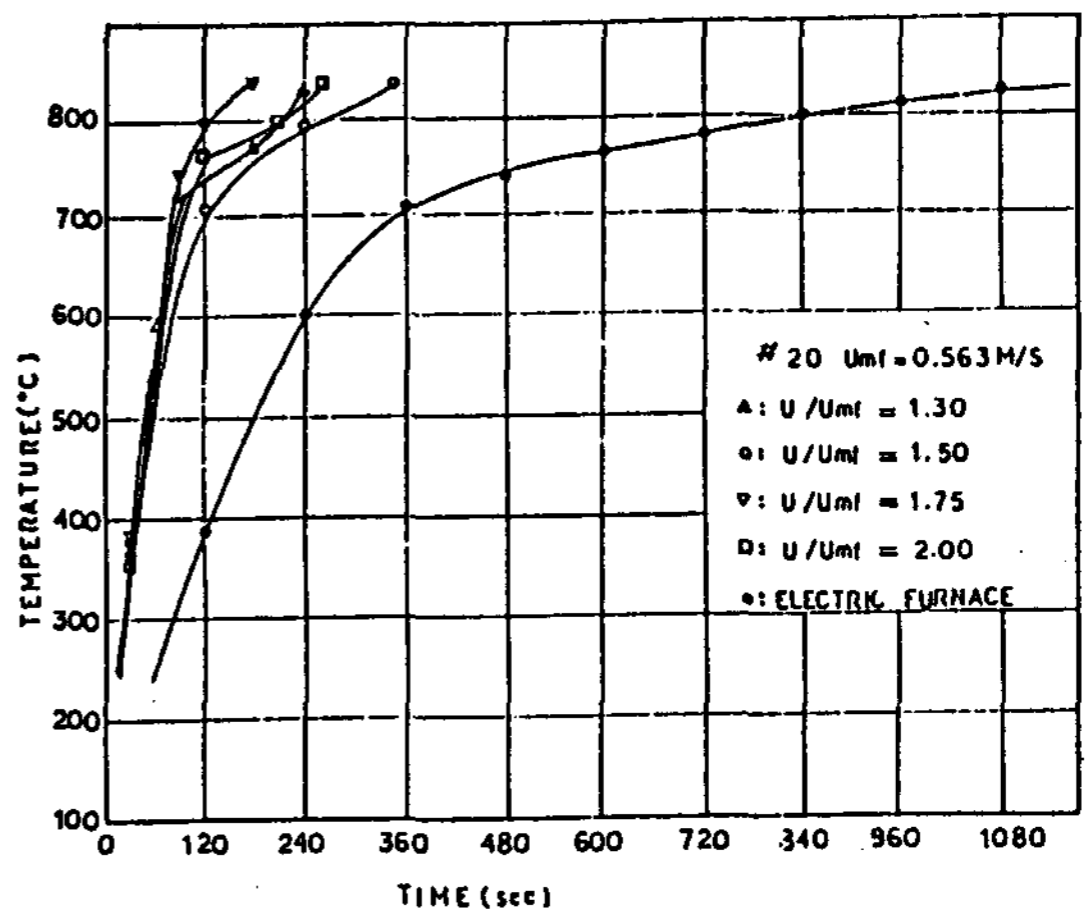


Fig.3.6 The comprison of temperature variation of plier in fluidized bed for 595μm magnesia and electric furnace with respect to time

타낸 선도이다. 여기서 유동율 (U/U_{mf}) 1.30, 1.50, 1.75, 1.200으로 변화시킨 유동층로의 전기로의 경우의 온도변화를 비교하면, 시험편의 온도를 840°C까지 올리는데 걸리는 시간이 입

자직경 841 μm 인 유동층로의 경우가 전기로의 경우보다 최고 1/6.5배에서 최소 1/3.4배가 단축되었으며, 입자직경이 595 μm 인 경우는 최고 1/5.0배에서 최소 1/3.0배가 단축되었

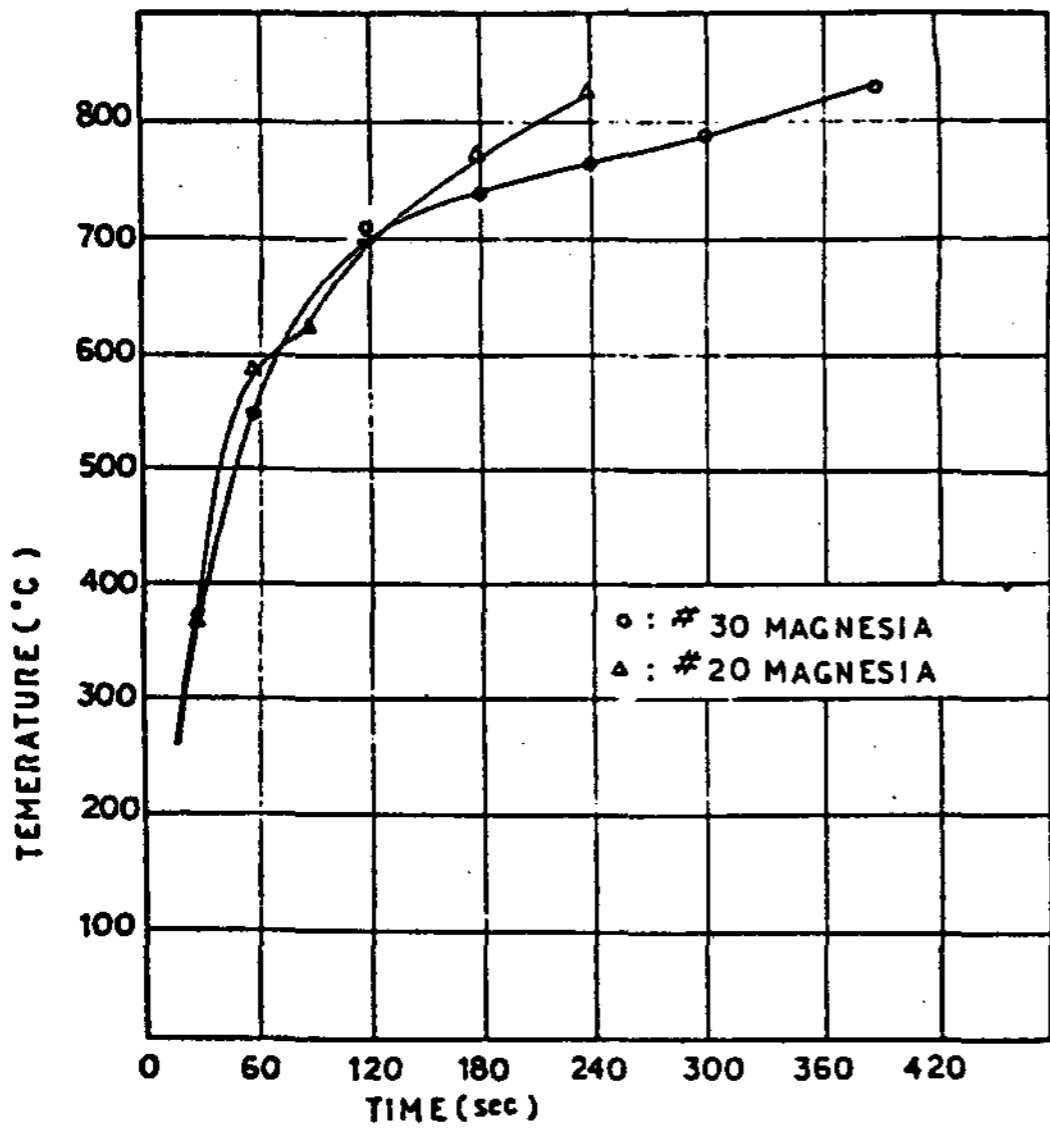


Fig.3.7 The comparison of temperature variations of plier (SM55C) in fluidized bed with respect to time in the condition of $U/U_{mf} = 1.30$

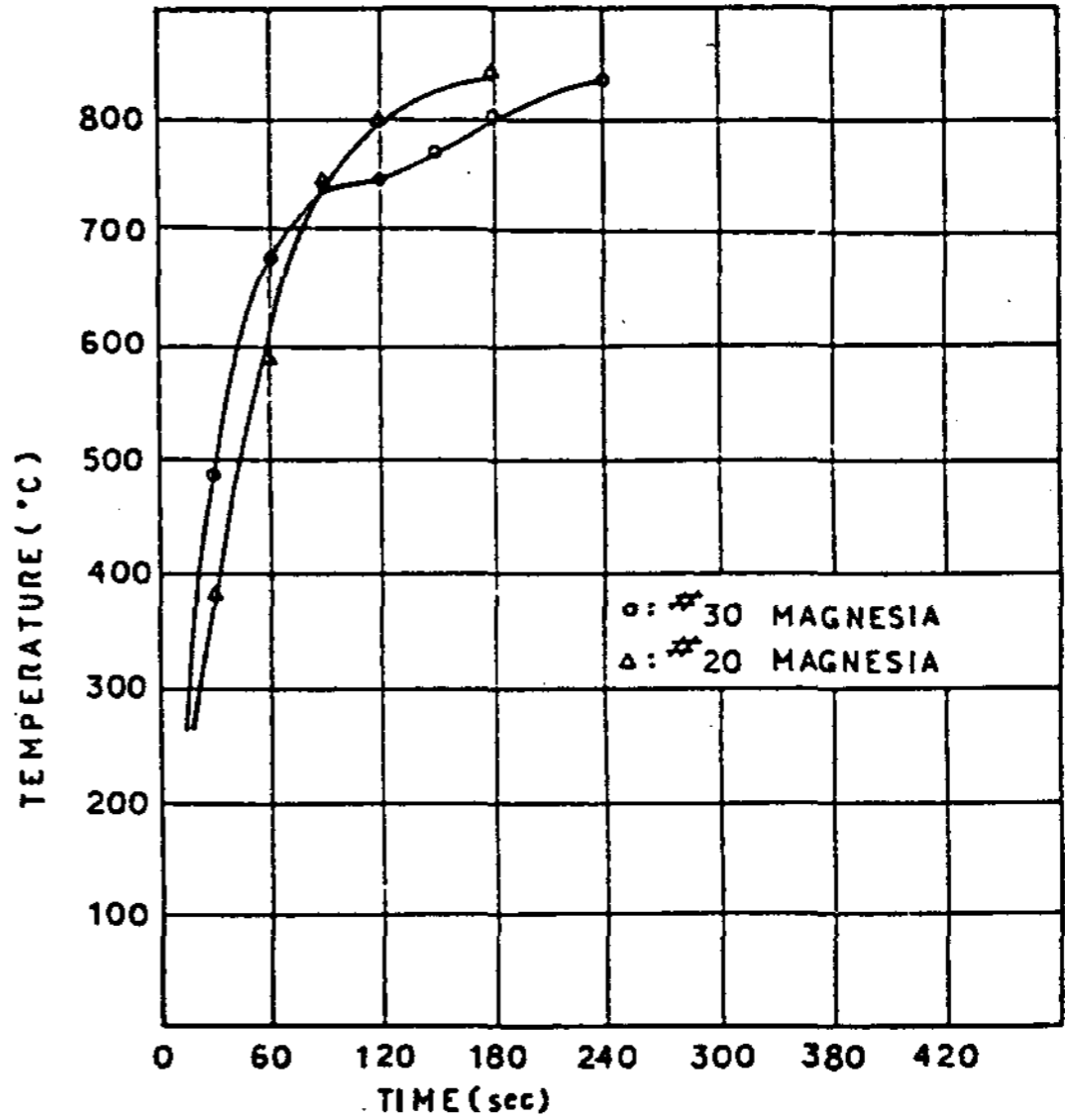


Fig.3.9 The comparison of temperature variation of plier (SM55C) in fluidized bed with respect to time in the condition of $U/U_{mf} = 1.75$

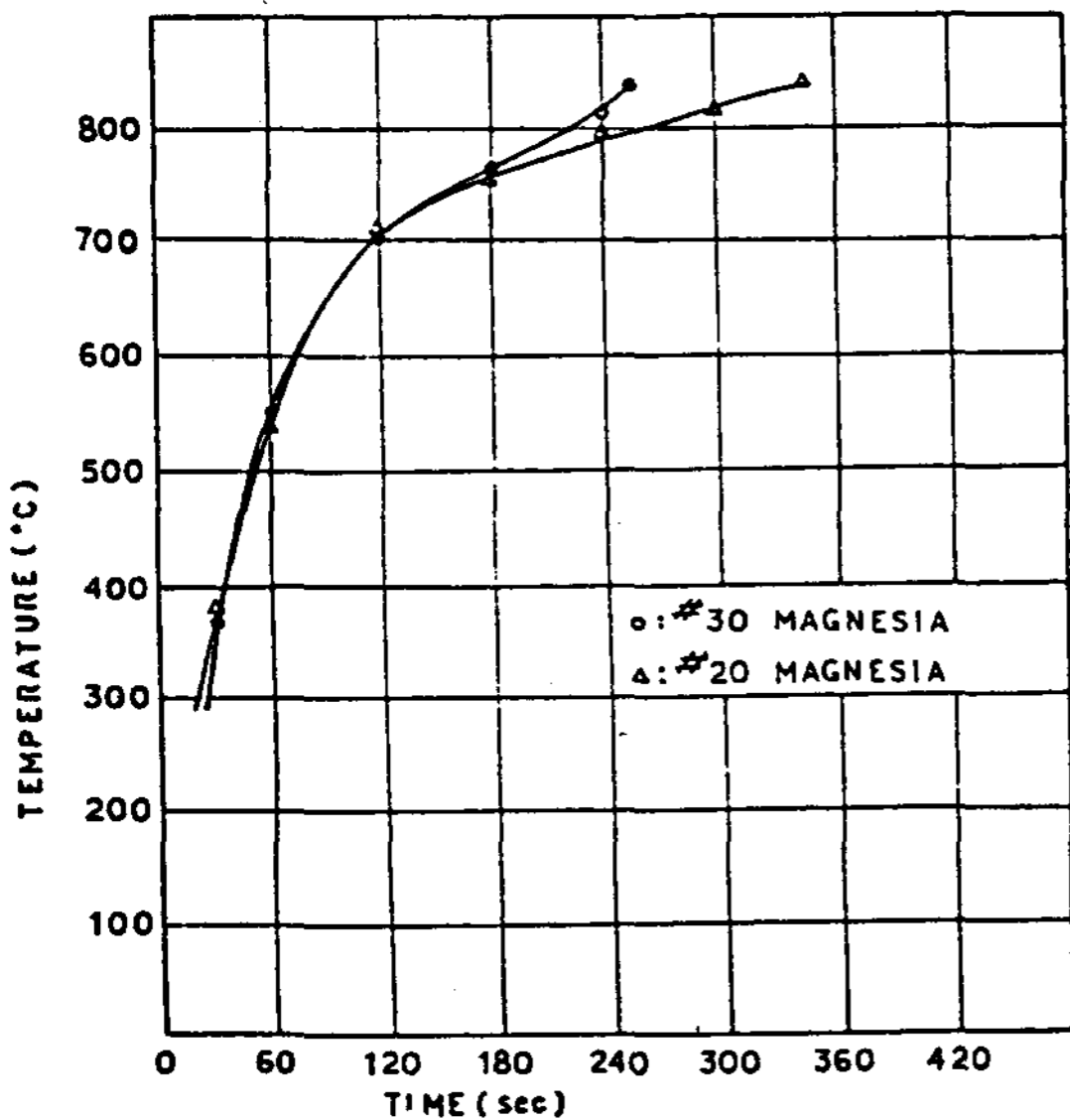


Fig.3.8 The comparison of temperature variation of plier (SM55C) in fluidized bed with respect to time in the condition of $U/U_{mf} = 1.50$

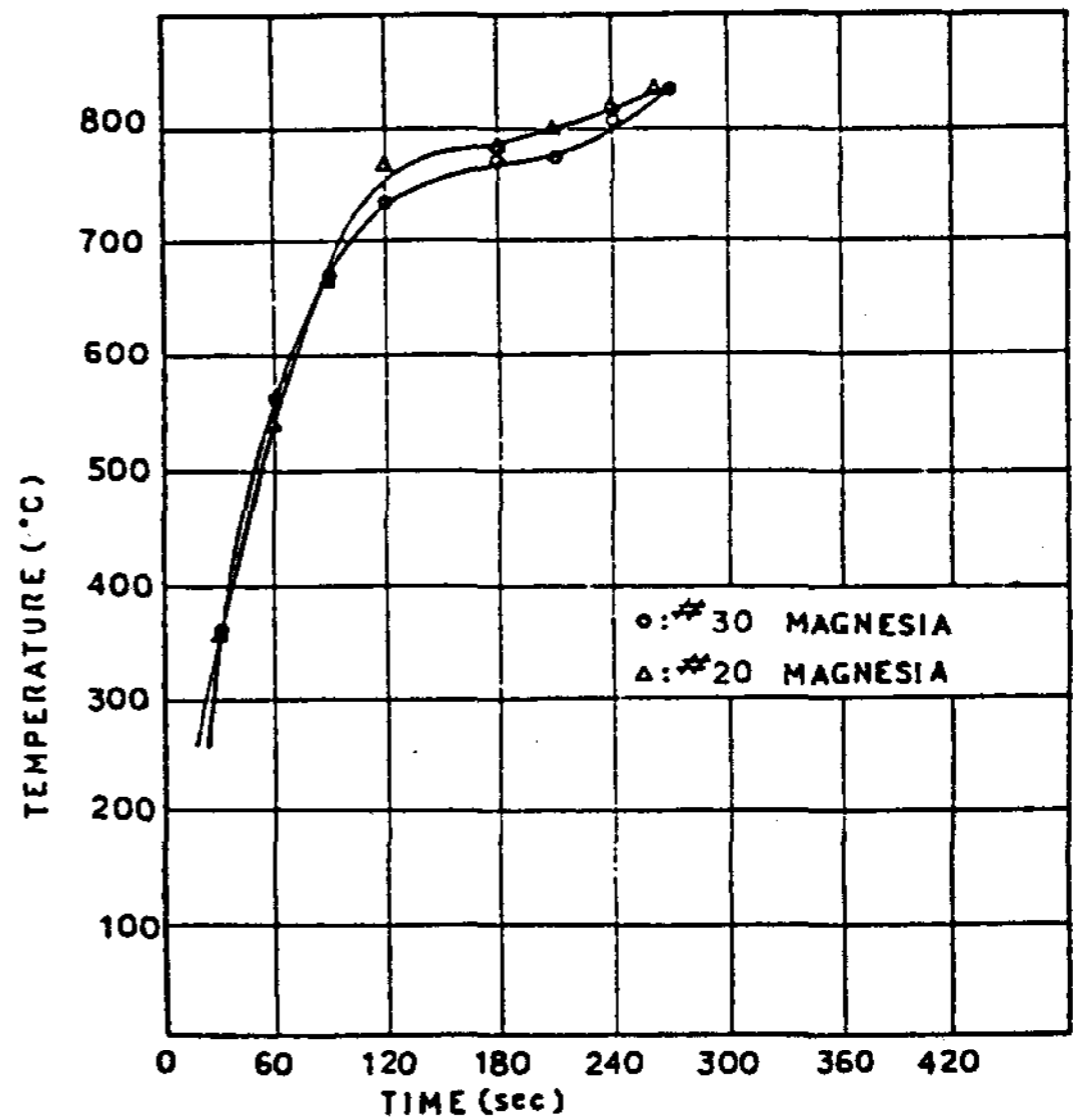


Fig.3.10 The comparison of temperature variation of plier (SM55C) in fluidized bed with respect to time in the condition of $U/U_{mf} = 2.00$

다. Fig.3.7~Fig.3.10까지는 유동층로내에서 유동율이 일정할때 입자직경의 변화에 따라 온도변화를 나타낸 선도이다. 유동율(U/Umf) 1.30 (Fig.3.7)일때 725 °C이하, U/Umf=1.75 (Fig.3.9)일때 730 °C이하, U/Umf=2.0(Fig. 3.10)일때 675°C이하에서 입자직경 595 μm 일때가 841 μm 일때보다 전열효과가 좋게 나타났으나, 각각 그 이상의 온도에서는 입자직경 841 μm 일때가 595 μm 일때 보다 전열효과가 좋게 나타났다.

이러한 현상이 나타나는 이유는, 작은 입자가 큰 입자보다 실험재료와 접촉하는 빈도는 많지만, 큰 입자의 열용량이 크기때문에 고온에서는 큰 입자에 의한 가열시간이 단축된다고 생각된다.

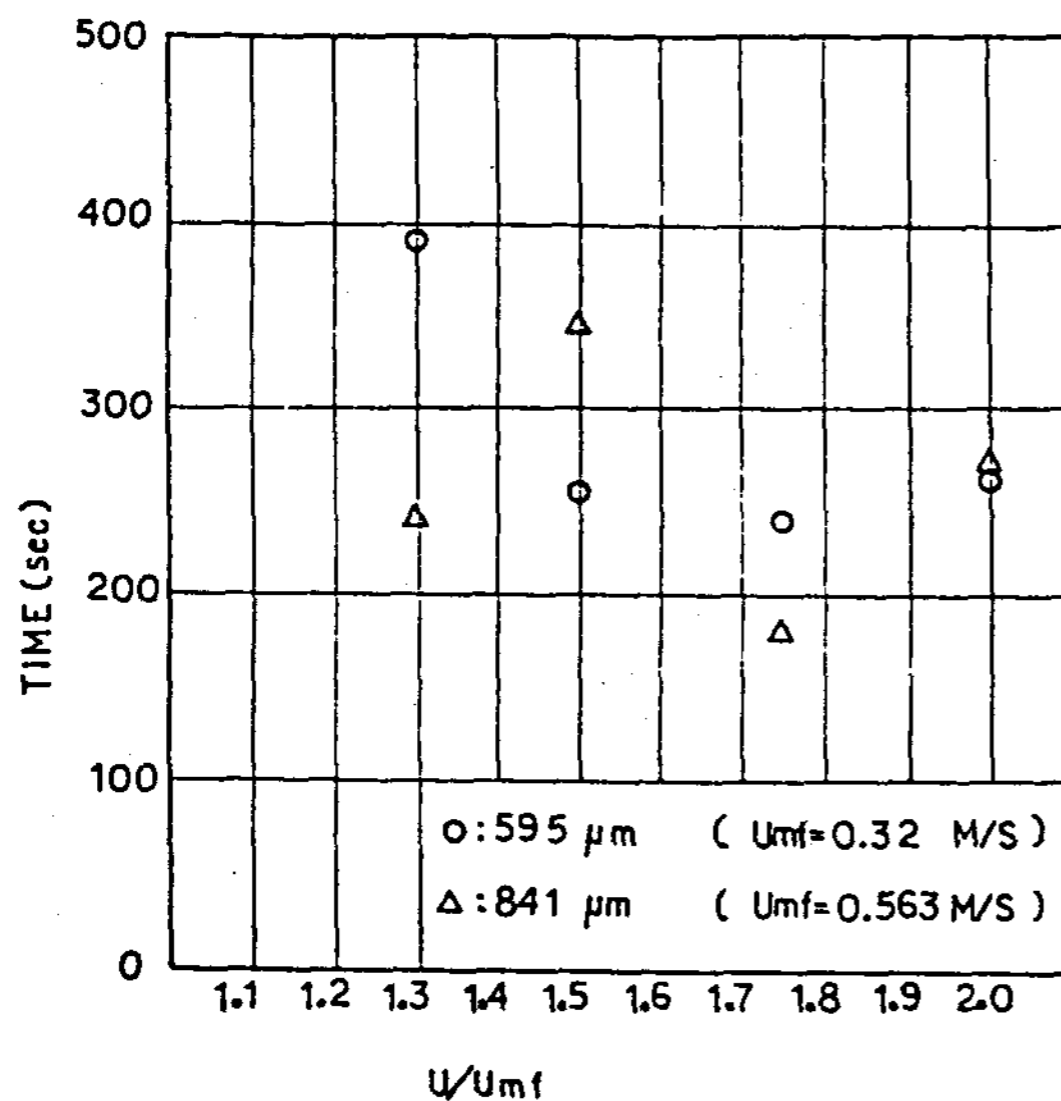


Fig.3.11 Comparison of heating time in the fluidized bed using 595μm and 841μm magnesia particles at bed temp. 840°C

Fig.3.11 는 실험재료를 840°C 까지 올리는데 유동율 (U/Umf) 변화에 따른 가열 시간의 변화를 나타낸 선도이다. 유동율 (U/Umf) 1.30에서 U/Umf=1.75까지는 가열시간이 단축되

고 그 이후에는 가열시간이 길어졌다. 이것은 일반적으로 최소 유동화속도 이후에 전체 열 전달 계수가 최대로 급격히 증가하고, 그 후에 점차 감소하는 경향이 있는 것은 많은 연구자들에 의하여 관찰된 사실과 잘 일치함을 알 수있다.

IV. 결론

본 연구는 Magnesia 입자 (직경 841 μm, 595 μm) 의 기-고유동층로에서 유동율 (U/Umf=1.30, 1.50, 1.75, 2.00) 에 따른 유동층로내 유동화 특성과 SM55C를 시료로한 전열 효과에 대해서 실험적인 고찰을 행하여 아래의 결론을 얻었다.

(1) 최소유동화속도 (Minimum Fluidizing Velocity) 는 Magnesia 입자의 직경이 841μm 595 μm 일때, 각각 0.563 m/s, 0.320 m/s 가 된다.

(2) 고온 (840°C) 의 유동층로에서 공극율과 유동율의 관계는 다음식으로 표시된다.

$$\epsilon = 0.5233 \times (U/Umf) \text{ (} dp = 841 \mu\text{m 일때)}$$

$$\epsilon = 0.5340 \times (U/Umf) \text{ (} dp = 595 \mu\text{m 일때)}$$

(3) 시료의 중심온도를 840°C까지 올리는데 유동층로에서는 전기로의 경우보다 소요되는 가열시간이 입자직경 841 μm 일때 1/6.5~ 1/3.4배 입자직경 595 μm 일때 1/5.0~1/3.0 배로 단축된다.

(4) 시료의 중심온도를 840°C까지 올리는데 Magnesia 입자 유동층로에서의 최대전열 효과를 나타내는 최적 유동율 (U/Umf) 은 1.75 이다.

REFERENCES

1. Howard J.R., "Fluidized Beds Combustion and Application", Applied Science Publishers, London and N.Y., pp.2-34, 1983.

2. Botterill J.S.M., "Fluid-Bed Heat Transfer", Academic Press, London and N.Y., 1975.
3. Kunii D. and Levenspiel O., "Fluidization Engineering", John Willey, N.Y., pp.8-9, 1969.
4. Svoboda K. and Hartman M., "Deviations of Actual Minimum Fluidization Velocities from Theoretical Predictions at Different Temperatures", A.I. Ch. E. Journal, Vol.27, No.5, pp.866-869, 1981.
5. J.S.M. Botterill, Y. Teoman and K.R. Yuregir, "Temperature Effects on The Heat Transfer Behaviour of Gas Fluidized Bed", A.I. Ch. E. Symposium Series, Vol. 77, 208, pp. 330-340, 1981.
6. N. Seki, S. Fukusako and K. Torikoshi, "Characteristics of Fluidization of a Solid Particle Bed", Trans. of ASME, Vol. 101, pp.386-390, 1979.
7. T. Mii, K. Yoshida and D. Kunii, "Temperature-Effects on the Characteristics of Fluidized Beds", J. of Chem. Eng. of Japan, Vol.6, No.1, pp.100-102, 1973.
8. J.S.M. Botterill, Y. Teoman and K.R. Yuregir, "The Effects of Operating Temperature on the Velocity of Minimum Fluidization, Bed Voidage and General Behaviour", Powder Tech., Vol.31, pp. 101-110, 1982.
9. Geldart, D., "Types of Gas Fluidization", Powder Techn., Vol. 7, pp. 285-292, 1973.
10. A.P. Baskakov, B.V. Berg, O.K. Witt, N.F. Filippovsky, V.A. Kirakosyan, J.M. Goldobin and V.K. Maskaev, "Heat Transfer to Objects Immersed in Fluidized Beds", Powder Tech., Vol.8, pp.273-282, 1973.
11. Zabrodsky S.S., "Hydrodynamics and Heat Transfer in Fluidized Beds", M.I.T. Press, Mass., pp. 4-33, 1966.
12. Ergun S., "Fluid Flow through Packed Columns", Chem. Eng. Prog., Vol. 48, pp. 89-84, 1952.
13. Metals Handbook, Ninth Edition V. 4 "Heat Treating", pp.299-306.
14. Wen C.Y. and Yu Y.H., "A Generalized Method for Predicting the Minimum Fluidization Velocity", A.I. Ch. E. Journ., Vol.12, No.3, pp. 610-612, 1965.
15. Sexena S.C. and Vogel C.J., "The Measurement of Incipient Fluidization Velocities in a Bed of Coarse Dolomite at Temperature and Pressure", Trans. Instn. Chem. Eng., Vol.55, pp.184-189, 1977.
16. Babu, S.P., Shah, B. and Talwarkar, A. "Fluidization Correlation for Coal Gasification Materials-Minimum Fluidization Velocity and Fluidized Bed Expansion Ratio", A.I., Ch. E. Symp. Series, Vol. 74, pp.176-186, 1978.
17. Davidson & Harrison, "Fluidization", Academic Press, London & New York, pp. 1-46, 1977
18. Doichev K. and Boichev G., "Investigation of the Aggregative Fluidized Bed Voidage", Powder Techn., Vol.17, pp.91-94, 1978.
19. "Heat Treater's Guide", Standard Practices and Procedures for steel, AMERICAN SOCIETY FOR METALS, pp. 67-69, 1982.