

# 함수다공질층의 진공건조에 관한 연구

## A Study on Vacuum Drying of Water-Saturated Porous Media

박형진\*, 金京根\*\*

### Abstract

The vacuum drying characteristics of water-saturated porous media were studied experimentally. The water-saturated porous media, water-saturated sand layer, was heated by the isothermal bottom wall of the rectangular vessel. The vacuum drying rate and temperature distribution of the sand layer were measured and calculated under a variety of conditions of heated wall temperature, vacuum rate, and thickness of the test material. It was found that the drying rate due to the heat and mass transfer is greatly influenced by the heated wall temperature, vacuum rate, and thickness of the test material.

### 사 용 기 호

D	: 확산계수	[cm <sup>2</sup> /min]
f	: 건조면적	[cm <sup>2</sup> ]
k <sub>g</sub>	: 표면증발계수	[g/cm <sup>2</sup> · min · mmHg]
L	: 거리	[cm]
M <sub>v</sub>	: 분자량	[g/mol]
P	: 전압	[mmHg]
P <sub>c</sub>	: 주위에서의 수증기 분압	[mmHg]
P <sub>s</sub>	: 재료의 증발면에서의 수증기 분압	[mmHg]

\* ; 한국해양대학교 대학원 기계공학과 기계공학전공

\*\* ; 한국해양대학교 기관공학과 교수

$P_{so}$	: 재료의 표면에서의 수증기 분압	[mmHg]
$P_v$	: 혼합기체중 수증기의 분압	[mmHg]
$\Delta P$	: 수증기의 분압차	[mmHg]
$Q_v$	: 확산량	[g/min]
$R$	: 일반기체상수	[g · m/K · mol]
$R_c$	: 향울건조속도	[g/cm <sup>2</sup> · min]
$R_d$	: 감울건조속도	[g/cm <sup>2</sup> · min]
$T$	: 온도	[°C]
$\lambda$	: 질량전도도	[g/cm · min · mmHg]

## 1 서론

재료로부터 수분을 제거하는 건조는 산업전반에서 광범위하게 이용되는 공정으로서 최근 화학공업 및 식품공업의 비약적인 발전과 함께 다양한 건조방식들이 제안되고 있다.<sup>(1),(2)</sup> 아울러 수분제거에 막대한 에너지를 요구하는 건조공정의 효과적인 운영을 위하여 열에너지의 소비를 극소화하고 피건조제품의 열변성이 없는 범위내에서 건조속도를 증가시킴으로써 건조시간을 단축하고자 하는 노력이 요구되고 있다. 현재 제안된 많은 건조방식중에서 특히 열에 불안정한 재료의 경우에는 저온의 상태에서 신속하게 건조해야 하므로 냉풍건조, 진공건조, 진공동결건조 방식들이 주로 채용되고 있다.<sup>(3),(4)</sup> 진공건조방식은 현재 건조공정에서 일반적으로 사용하고 있는 대류전열에 의한 열풍건조방식에 비하여 배기가스량 및 배기가스중에 포함된 폐열량이 적기 때문에 열효율이 높고, 대단히 낮은 저수분의 상태로 재료를 건조할 수 있는 특징이 있다.<sup>(1),(3),(4)</sup> 또한 건조전 상태로의 복원성이 양호하고, 위생적인 건조제품을 생산할 수 있으므로 최근에 진공건조방식에 대한 관심이 크게 부각되고 있다. 이와 같은 진공건조장치의 설계에는 진공상태하에서의 재료의 건조특성에 관한 정성적, 정량적인 자료가 요구되어진다.<sup>(5),(6),(7)</sup> 그러나 진공상태하에서의 재료의 건조특성에 관한 연구보고는 대단히 부족한 실정으로 진공건조장치의 설계가 경험적인 방법에 크게 의존하고 있다. 진공건조특성은 진공상태하에서 열과 물질의 이동이 동시에 일어나는 복합적인 현상으로 그 메카니즘이 대단히 복잡하다.

본 연구에서는 진공상태하에서의 재료건조에 대한 기초적인 자료를 수집하고자 하부면에서 등온의 조건으로 전도에 의하여 가열되어지는 경우의 건조 메카니즘을 파악하고, 진공도, 가열면 온도, 재료의 종류 및 두께가 진공건조속도 및 온도분포에 미치는 영향들을 실험적인 방법으로 검토하였다.

## 2 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

Fig.1에 실험장치의 계통도를 나타낸다. 실험장치는 시험부, 진공용기, 응축기, 진공펌프, 가열장치 및 측정계로 구성되어 있다. 시험부는 160(L)×100(W)×80(H)×10(t)mm의 투명 아크릴 용기로 상면은 개방되어 있다. 시험부의 하면은 등온가열조건을 달성하기 위하여 두께 3mm 동판과 전기가열기로 구성되어 있으며, 전기가열기로는 두께 10mm의 베크라이트판 위에 두께 30 $\mu$ m의 스테인레스 박판을 접착시킨 것을 사용하였고, 전기가열기의 표면과 동판 사이에는 절연을 위하여 두께 0.1mm의 테프론시트를 삽입하였다. 가열면의 표면온도를 측정하기 위하여 동판의 표면에 76 $\mu$ m  $\phi$  C-A열전대를 3개소에 등간격으로 부착하였으며, 정온도가열장치 및 데이터처리장치에 연결시켜 등온의 가열조건을 감시, 유지하였다. 또한 시험부내의 시료온도분포를 측정하기 위하여 76 $\mu$ m  $\phi$  C-A열전대를 외경 1mm의 스테인레스관에 삽입시켜 제작한 것을 아크릴의 측면에 0.5mm 간격으로 배치하였다. 진공용기내의 압력은 진공펌프를 이용하여 소정의 압력으로 유지되며 이 때의 압력은 마노미터 및 Pressure Transducer를 통하여 측정하였다. 시료로부터 증발되는 수증기는 진공펌프 배관계통에 설치된 응축기를 지나면서 응축되어 제거되도록 하였다.

### 2.2 실험방법

대부분의 피건조재료가 함수다공질층임을 고려하여 본 연구에서는 시료로서 모래를 채용하였다. 시료인 모래는 표준그물망을 이용해 각각의 입자크기 별로 분류하여 사용하였으며, 그 평균입자경은 Table 1과 같다. 시료의 충전에는 먼저 시험부내에 일정 두께로 시료를 투입하고 충분히 탈기시켜 재료의 함수율(수분을 포함하지 않는 재료의 건질량에 대한 재료중에 포함된 함유수분의 질량 비)을 27% 근방으로 유지하였다.

Table 1 Mean diameter of sampling material

Material	Diameter of material
100Mesh Sand	0.104mm < D < 0.154mm
32Mesh Sand	0.368mm < D < 0.61 mm

본 실험에서는 응축기내의 표면온도를 5 $^{\circ}$ C로 일정히 유지시킨 다음 시료를 담은 시험부를 진공용기내에 있는 전자저울 위에 위치시키고 진공용기를 밀폐시킨 후 일

정온도와 일정압력을 유지하기 위한 가열기의 정온도장치와 진공펌프를 가동하는 시점을 실험의 개시점으로 하였다. 시료의 수분확산에 따른 함수율의 변화는 시험 부가 놓여있는 고정밀 전자저울을 통해 일정한 시간 간격으로 측정하여 구하였고, 함수율의 변화로부터 수분의 건조속도(단위면적, 단위시간당 증발하는 수분의 질량)를 계산하였다. 또한 실험중에는 시료내의 온도를 검출하여 함수율, 가열온도 및 진공도 등이 시료내 온도분포에 미치는 영향 등을 검토하였다.

### 3 실험결과 및 고찰

#### 3.1 진공건조 메카니즘

비친수성재료인 다공질층 모래내의 수분은 입자의 표면에 부착되어 있는 부착수 또는 결합수, 입자와의 간격사이에 존재하는 모관수, 그리고 자유로이 이동가능한 자유수의 형태로 이루어져 있다.<sup>(8),(9)</sup> 이와 같은 재료의 진공건조과정은 일방향확산에 관한 Stefan의 법칙을 적용하여 진공건조특성의 고찰이 가능하다. 일방향확산에 의한 증기의 질량유속은 다음 식과 같다.

$$Q_v = -f \frac{M_v D}{RT} \frac{P}{P - P_v} \frac{dP_v}{dL} \quad (3.1)$$

상식으로 부터 전압  $P$ 가 일정할 경우 재료의 증발표면온도가 증가할수록 표면에서의 포화수증기분압차  $dP_v$ 가 증가하여 수분의 확산량은 증가하게 되며, 재료의 증발 표면온도가 일정할 경우에는 진공도가 클수록  $P/(P-P_v)$ 가 증가하게 되어 수분의 확산량이 증가하게 됨을 알 수 있다. 또한 재료내부의 증발면에 대하여  $dL$ 이 커짐에 따라 확산량이 감소하게 됨을 알 수가 있다.

함수다공질층 재료의 기본 건조메카니즘은 다음과 같은 2모관 확산모델로 근사하여 간략하게 설명되어진다. Fig.2(a)에서 보는 바와 같이 재료는 직경이 다른 2종류의 모관이 서로 결합해 있으며, 수분의 확산과정은 다음과 같은 순서로 일어난다. 먼저 (a) 및 (b)에서 보는 바와 같이 수분확산은 모관(2)에서 지배적으로 일어나며, 모관(2)에서 증발한 수분은 모관(1)로 부터 측벽을 통하여 모세관력에 의해 흡입되어지는 액으로 보상되어진다. 건조의 진행과 함께 모관(1)내의 액면은 점차로 저하하며, 모관(2)로의 흐름에 대한 저항이 모관력과 평행을 이루는 점 즉 임계점  $L_c$ 까지 하강한다. 이 기간동안의 수분확산은 일정한 확산속도를 유지하게 되며 이 기간을 항율건조기간이라 한다. 이 기간동안의 건조속도는 다음 식으로 표시할 수가 있다.

$$R_c = k_g(P_s - P_c) = k_g(\Delta P) \quad (3.2)$$

여기서  $k_g$ 는 수분의 증발계수를 나타내며  $P_s$ 는 재료의 표면, 즉 증발면에서의 수증기 분압을 나타내고  $P_c$ 는 재료표면 주위에서의 수증기 분압을 나타낸다. 계속해서 수분의 확산이 진행됨에 따라 (c)에서 보는 바와 같이 모관(1)의 액면이 임계점  $L_c$ 를 지나게 되면 모관(1)과 모관(2)의 액면은 동시에 하강을 시작한다. 이 때의 수분의 확산속도는  $L_2$ 의 증가와 함께 확산이 지배적으로 일어나는 증발면이 재료의 내부로 침투하게 되므로 기건조층이 수증기의 확산에 대한 저항으로 작용하여 건조속도는 급격하게 감소하게 된다. 이와같이 건조속도가 급격하게 감소하는 기간을 감울건조기간이라 한다. 이때 증발면의 수증기분압은  $P_s$ 가 되지만 재료표면에서의 수증기 분압은  $P_{s0}$ 가 된다. 이 기간동안의 건조속도는 다음 식으로 표시할 수가 있다.

$$R_d = \frac{\lambda}{\mu L_2} (P_s - P_{s0}) = k_g (P_{s0} - P_c) \quad (3.3)$$

여기서  $\mu$ 는 재료의 구조특성을 나타내는 구조인자로서 기건조층의 확산에 대한 저항을 나타내며 실험에 의하여 구해진다. (3.3)식을 연립하여  $P_{s0}$ 를 제거하면 건조속도는 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$R_d = \frac{1}{\frac{1}{k_g} \times \frac{\mu L_2}{\lambda}} (P_s - P_c) \quad (3.4)$$

상식으로부터 일정한 건조조건에서  $L_2$ 의 증가와 함께 건조속도는 점차 감소함을 알 수가 있다. Fig.2(d),(e)에서 보는 바와 같이 수분의 확산이 더욱 진행되면 모관(1)의 수분은 소멸되고 모관(2)의 액면이 지속적으로 감소함에 따라 건조속도는 더욱 감소하게 된다.

### 3.2 건조특성곡선

Fig.3은 본 실험을 통하여 얻어진 진공건조 특성곡선을 나타낸 것으로 시료의 함수율에 대한 건조속도 및 시료의 온도분포 특성을 보이고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시료의 건조속도는 실험개시와 함께 상승하여 일정한 값을 유지하다가 어느 시점에서 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 초기의 상승은 가열의 시작과 함께 시료의 온도가 상승하므로 증발표면에서의 수증기분압차가 증가하기 때문이며, 그 후 가열량 및 확산에 의한 수분이동량이 열적평형을 이루는 점에서 일정한 값을 유지하게 된다.

즉 시료의 건조속도가 일정기간동안 일정한 값을 지속적으로 유지하는 것은 Fig.2에서 설명한 바와 같이 직경이 큰 모관(1)의 액면이 임계점에 도달할 때 까지는 직경이 작은 모관(2)에서 확산이 지배적으로 일어나기 때문이다. 또한 어느 시점

에서 급격히 건조속도가 감소하는 것은 모관(1)의 액면이 임계점을 지나 하강하게 됨에 따라 모관(2)의 액면 즉 증발면이 재료의 내부로 침투하게 되고 재료의 기건조층이 확산에 대한 저항으로 작용하기 때문이다. 여기에서 일정한 건조속도를 유지하는 항울건조기간은 다공질층 재료속에 포함된 수분중 자유수 및 모관수가 증발하는 기간이며 감울건조기간은 부착수 또는 결합수가 증발하는 기간이다. 건조과정 중의 시료내 온도분포는 Fig.3으로부터 알 수 있는 바와 같이 초기에 급격히 상승하여 항울건조기간동안 비교적 일정한 값을 유지하다가 한계함수율(항울건조기간에서 감울건조기간으로 접어드는 시점)을 지나 감울건조기간에 들어가면서 일시적으로 하강하다가 다시 상승함을 알 수 있다. 항울건조기간에서의 온도분포가 비교적 일정한 값을 유지하는 것은 가열면으로부터 시료로 전도되어진 공급열량과 시료의 증발표면으로부터의 수분의 확산에 의한 제거열량이 열적평형을 이루고 있기 때문이며, 감울건조기간에서 건조속도의 급격한 감소와 함께 온도가 하강하는 것은 본 실험조건이 가열면 등온조건이므로 가열면으로부터의 공급열량이 건조속도의 급격한 감소와 함께 감소하는 비정상적 열적거동 때문이라고 판단된다. 그리고 본 실험의 시료와 같은 비교적 공극이 크고, 하부면에서 열원을 공급하는 열적조건(하부면에서 상층으로 갈수록 온도가 감소)에서는 재료표면 아래에서의 수분확산의 영향도 크게 작용한다. 즉 Fig.2(b)의 모관(1)에서 증발면의 온도가 모관(2)의 상층표면보다 높으므로 수증기분압차가 크고 기건조층의 길이  $L$ 에 의한 압력손실은 공극이 클수록 줄어들게 되므로 재료표면 아래에서의 수분확산의 영향을 무시할 수 없게 된다.

### 3.3 진공도의 영향

Fig.4는 진공도에 대한 건조속도의 영향을 나타낸다. 그림으로부터 건조속도는 진공도가 클수록 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 식(3.1)에서 나타낸 바와 같이 전압  $P$ 가 감소할수록  $P/(P-P_0)$ 가 커져서 확산질량유속이 증가하기 때문이다. 또한 그림에서 건조속도의 증가율은 진공도가 클수록 증가함을 알 수 있다. 즉 진공도차 ( $\Delta P$ )에 대한 건조속도증가( $\Delta R$ )의 비가 500mmHg의 경우 보다 300mmHg의 경우에서 2배이상 증가한다. 이것은 식(3.1)에서  $P$ 의 변화량에 대한  $P/(P-P_0)$ 의 변화량 관계로부터 고진공에서 건조속도의 증가율이 크게됨을 쉽게 알 수 있다. 그리고 한계함수율은 진공도가 증가할수록 적은 폭이나마 상승하고 있다. 이것은 진공도가 증가할수록 건조속도가 증가함으로서 시료내부의 수분이동 및 확산저항이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. Fig.5에는 건조속도에 대한 진공도의 영향을 건조소요시간으로 나타내었다. 그림에서 진공도가 클수록 건조속도가 증가함으로서 건조시간이 단축된다는 것을 알 수 있다. Fig.6은 Fig.4와 동일조건에 대한 시료 표면온도의 변화를 나타낸 것으로 진공도의 변화에 대한 시



료 표면온도의 변화는 그다지 크지 않다. 이것은 고진공에서 건조속도가 함에 따라 등온의 조건을 유지하기 위하여 가열면 공급열량이 증가하기 때문이다.

### 3.4 가열면온도의 영향

Fig.7에는 가열면온도가 시료의 건조속도에 미치는 영향을 나타내고 있다. 그림으로부터 가열면의 온도증가와 함께 시료의 건조속도가 증가한다는 것을 알 수 있다. 이것은 가열면온도가 증가할수록 시료에 공급되는 열량이 증가함으로써 시료의 증발표면온도가 상승하게 되므로 확산속도의 구동력이 되는 시료의 증발표면과 주위와의 수증기분압차가 크게 되기 때문이다.

### 3.5 재료의 영향

재료의 종류에 따른 건조속도의 영향을 Fig.8에 나타낸다. 재료로서는 100Mesh 모래와 32Mesh 모래 그리고 점토를 사용하여 일정압력과 일정온도에 대한 건조특성 실험을 행하였다. 그림에서와 같이 시료의 평균공극직경이 증가할수록 건조속도가 증가한다는 것을 알 수 있다. 이것은 평균공극직경이 작을수록 시료내의 수분의 이동 및 확산에 대한 저항이 증가하기 때문이다. 그러나 본 실험범위 내의 모래에 있어서는 변화폭이 그다지 크지 않다. 이에 비해 점토의 경우는 모래와 비교하여 건조속도의 차가 크고 한계함수율도 27%정도로 대단히 크다는 것을 알 수 있다. 이는 모래가 비친수성 재료인데 비하여 점토는 친수성재료인 점과 공극이 적음으로 인한 수분이동 및 확산저항이 대단히 크기 때문이다.

### 4.5 재료두께의 영향

Fig.9은 재료두께의 변화에 대한 건조속도의 영향을 나타낸다. 일정압력, 일정온도 및 동일재료에 대하여 재료의 두께를 변화시켰을 경우 건조속도는 재료의 두께가 증가함에 따라 크게 감소함을 그림으로부터 알 수 있다. 이와 같이 재료의 두께가 증가함에 따라 건조속도가 감소하는 것은 재료의 두께가 증가함에 따라 재료내의 수분이동 및 확산에 대한 저항이 증가하기 때문이다. Fig.10에 Fig.9와 동일조건에 대한 재료의 표면온도변화를 나타내고 있다. 그림은 재료두께의 변화에도 불구하고 거의 일정한 표면온도를 보이고 있다. 이것은 재료의 두께가 얇을수록 건조속도가 증가함으로써 가열면온도의 일정조건을 유지하기 위하여 가열면 공급열량이 증가하기 때문이다.

## 5 결론

본 연구에서는 입자경이 균일한 모래를 사용하여 진공상태하에서의 건조특

성에 관한 기초적 자료를 수집하고자, 하부면이 등온조건으로 가열되는 상태에서 재료의 수분이동 메카니즘을 파악하고 나아가 진공도, 가열면온도, 재료의 종류 및 두께가 건조속도와 재료의 온도분포에 미치는 영향들을 실험적인 방법으로 연구 검토한 결과, 본 실험범위내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시료의 건조속도에는 항울건조기간과, 감울건조기간이 존재하며, 항울건조기간이 끝나고 감울건조기간에 돌입하는 재료의 한계함수율은 본 연구의 시료인 모래의 경우 약 5% 전 후이었다.
- (2) 건조속도는 진공도가 클수록 증가하며, 진공도차 ( $\Delta P$ )에 대한 건조속도증가 ( $\Delta R$ )의 비는 500mmHg의 경우 보다 300mmHg의 경우 2배 이상 증가함을 알 수 있었다.
- (3) 본 실험의 가열조건과 같은 하부면 가열의 경우는 가열면의 온도가 증가할수록 시료의 증발표면온도가 상승하게 되므로 확산의 구동력이 되는 시료의 증발표면과 주위와의 수증기분압차가 크게 되어 시료의 건조속도는 증가하게됨을 알 수 있었으며, 항울건조기간에서 가열면온도  $T_w$ 가 증가함에 따라 건조속도 및 건조열유속은 가열면온도  $T_w$ 의 약 3승에 비례하여 증가함을 알 수 있었다.
- (4) 시료의 입자경이 작을수록 시료내의 수분의 이동 및 확산에 대한 저항이 증가하기 때문에 건조속도가 감소한다는 것을 알 수 있었으며, 이러한 경향은 고진공, 고온의 영역에서 더욱 뚜렷히 나타나며, 입자경이 매우 작은 점토의 경우는 모래와 비교하여 건조속도의 차가 크고 한계함수율도 27%정도로 대단히 크다는 것을 알 수 있었다.
- (5) 재료의 두께가 증가할수록 재료내의 수분이동 및 확산에 대한 저항이 증가하기 때문에 건조속도는 크게 감소함을 알 수 있었으며, 항울건조기간에서 재료 두께의 증가에 따른 건조속도와 건조열유속은 재료두께의 0.9승에 비례하여 감소함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) 久保田濃, “乾燥裝置”, 省エネルギーセンター, pp.31~94(1995)
- (2) 辛浩一, “乾燥裝置”, 大光書林, pp.331~387(1995)
- (3) 太田勇夫, 益子正教, 木村進, “眞空乾燥”, 日刊工業新聞社, pp.2~20(1964)
- (4) 桐榮良三, 前田金剛, 山內敏夫, 不破威信, 和田一洋, 山本博久, “眞空乾燥の基礎的研究”, 化學工學, 第24卷, 第5號, pp.289~297(1960)
- (5) “眞空機器技術資料集”, 化學工學, 第24卷, 第5號, pp.385~424(1960)



- Jacobs, R. B., Kaff, S. F., "Ind. Eng. Chem.", vol40, pp.842(1948)
- (7) Carman, P., "J. Soc. Chem. Ind.," vol66, pp.529(1947)
  - (8) "冷凍空調便覽", 第5版, 第1卷 基礎編, 日本冷凍協會, pp.490~499
  - (9) 木村進, "乾燥食品事典", 朝倉書店, pp.23~31(1984)



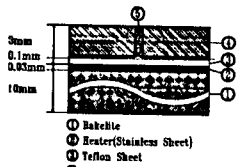
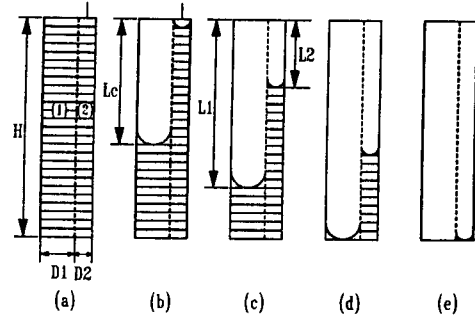
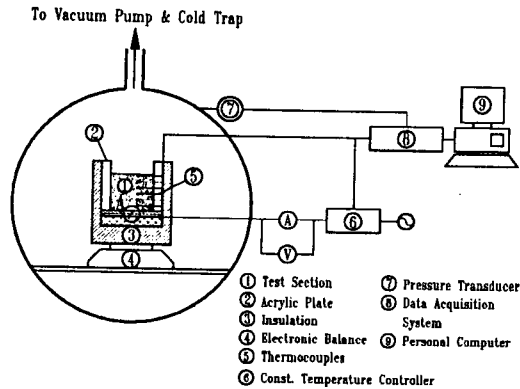


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig.2 Two capillary model

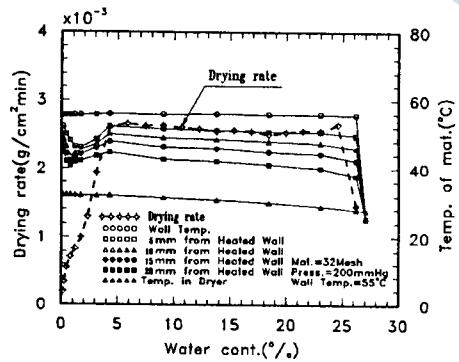


Fig.3 Drying characteristic curves

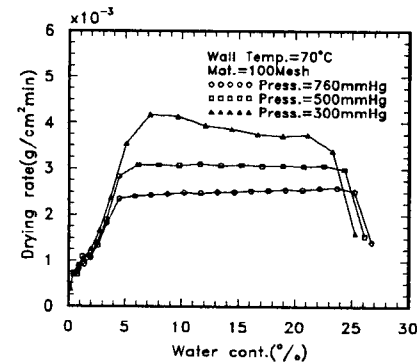


Fig.4 Effect of degree of vacuum on drying rate

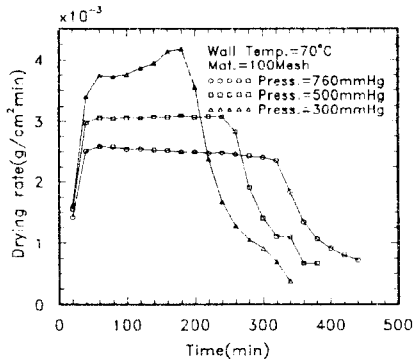


Fig.5 Effect of degree of vacuum on drying rate

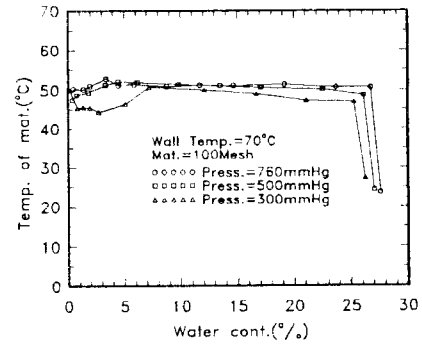


Fig.6 Effect of degree of vacuum on surface temp. of mat.

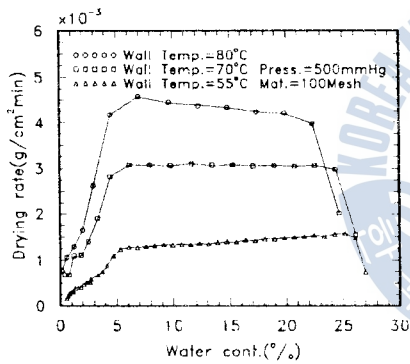


Fig.7 Effect of heated wall temperature on drying rate

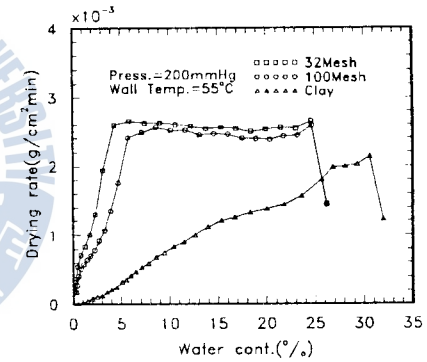


Fig.8 Effect of sampling material on drying rate

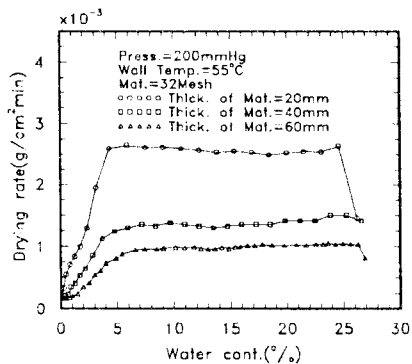


Fig.9 Effect of thickness of sampling material on drying rate

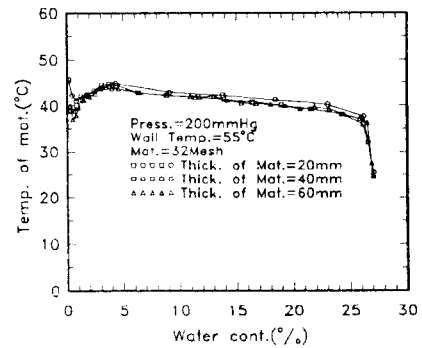


Fig.10 Effect of thickness of sampling material on surface temp. of mat.

