

한국에너지공학회(2001년도)
추계 학술발표회 논문집 P359~366

마이크로파를 이용한 내화 점토 건조 과정에 관한 기초 연구

한송목*, 김철주**

성균관대학교 대학원*, 성균관대학교 기계공학부**

A Basic Study on the Fire Clay Drying process using Microwave System

Sung Mog Han*, Chul Ju Kim**

SKKU- Graduate School*, SKKU-School of Mechanical Engineering**

1. 서 론

오늘날 목재, 하수 Sludge, 점토 등의 건조에 사용하는 산업용 건조기는 일반적으로 열풍식 건조 방식을 적용하고 있다. 이 방식은 피건조체 표면을 통하여 열이 전도에 의해 물체 내부에 전달된다. 증발은 물체의 표면에서 발생하고, 물체 내부로부터 확산 작용에 의해 물이 표면으로 이동하여 건조가 진행 된다. 이 대류 건조 방식은 피건조체의 열전도율이 낮은 경우 건조 시간이 많이 요구 되고, 따라서 에너지 소모가 크다.

마이크로파는 분자 내의 쌍극자에 회전과 진동에 에너지를 가함으로써 그 내부의 마찰로부터 열이 발생되는 데 이러한 가열을 마이크로파 가열 혹은 유전체 가열이라 한다 따라서 유전율이 크거나 작은 것이 혼재된 피건조체에서는 마이크로파는 유전율이 큰 곳으로 침투된다. 즉 피건조체가 습점토인 경우에 건점토 부분 보다는 습점토의 전체적 에 내재되어 있는 물을 직접적으로 가열 시킨다. 이러한 가열 방법은 전기적 체적 가열 (Electrical-Volumetric-heating) 방식으로 일컬어지며 앞에서 언급한 전도 가열 (Conduction-heating) 방식에 비하여 피건조체의 내부까지 단시간에 전체적인 피건조체의 온도편차를 1%이내로 가열할 수 있으므로 건조 시간을 단축 시킬 수 있다.⁽¹⁾

내화 점토는 열전도도가 상온에서 약 $0.9 W/m K$ 으로 건조로에서 $200^{\circ}C$ 이상의 고온 열풍을 이용하여 3%이하의 함수율 (Dry-Base:db)을 갖도록 건조하는데 평균 56시간의 긴 건조 시간이 필요하며 일반적으로 건조로 외부로 방출되는 열손이 커서 에너지 소모율이 매우 높다.

본 연구는 마이크로파 가열 방식을 적용하여 내화재의 원료로 사용되는 점토의 건조 공정을 개발하는데 목적이 있다. 따라서 먼저 마이크로파 건조 과정의 물리적 현상을 이해 하고자 4각 단면을 갖는 점토 시료를 제작하고, 가열 시 시편 내부의 온도변화,

건조율, 건조 특성 등을 검토하였다.

2. 관련 이론

2.1 유전체 가열 및 마이크로파 침투깊이

유전체에 마이크로파를 가하면 분자 쌍극자의 운동에 의한 열이 발생하고, 물체 내부에 열이 흡수된다. 이 때 유전체내에 열 에너지로 변화하는 열량의 크기는 다음의 식 (1)로 표시된다.

$$P_{loss} = \frac{1}{1.8} f E^2 \epsilon' \cdot \tan \delta \times 10^{-10} \quad (1)$$

또한 마이크로파가 유전체 속을 통과하면 마이크로파 에너지가 감쇄 되어 침투 깊이를 따라서 강도가 약해진다. 마이크로파의 에너지가 감쇄하는 깊이 (D)와 전력밀도가 1/2로 감소하는 반감 심도 ($D_{1/2}$)는 식(2, 3)과 같다.

$$D = \frac{\lambda}{2\pi} \left[\frac{2}{\epsilon' (\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)} \right]^2 \approx \frac{9.56 \times 10^7}{f \sqrt{\epsilon'} \cdot \tan \delta} \quad (m) \quad (2)$$

$$D_{1/2} \approx \frac{3.32 \times 10^7}{f \sqrt{\epsilon'} \cdot \tan \delta} \quad (m) \quad (3)$$

침투깊이 D 는 주파수와 $\sqrt{\epsilon'} \tan \delta$ 에 반비례하므로 $f \times \sqrt{\epsilon'} \tan \delta$ 와의 관계로 피건조체에 따라 가열 전력 밀도가 높은 주파수를 택하여 설계하여야 한다.⁽²⁾

본 실험에서 사용하는 마이크로파의 주파수 $f = 2.45GHz$ 이며, 시료용 점토의 비유전율과 손실각을 각각 $\epsilon' = 5.6$, $\tan \delta = 150 \times 10^{-4}$ 로 가정하면 시료용 점토의 반감 심도는 약 $0.38m$ 이다. 물($25^\circ C$)의 비유전율과 손실각이 각각 $\epsilon' = 76.7$, $\tan \delta = 1600 \times 10^{-4}$ 이다.

2.2 열풍 건조와 마이크로파에 대한 건조 특성 비교

다공성 물체의 건조 특성은 물체 내부의 함수량의 크기에 따라 매우 다르게 나타난다. 그 이유는 피건조체 내부에 포착된 물과 고체 입자 사이에 작용하는 힘이 함수율에 따라 다르기 때문이다. 이러한 건조 특성은 건조 과정에서 피건조체의 수분율, 건조율-시간과의 관계를 나타내는 그래프를 통하여 쉽게 이해 할 수 있다.

Fig.1, 2는 열풍에 의한 건조 특성을 개략적으로 보여 주고 있다.⁽³⁾

1. A구간: 예열 구간으로 물체의 표면 온도가 기화 온도에 도달 될 때까지 진행된다. 이 구간에서는 피건조체의 표면은 젖어 있으며, 물체 표면에서 대류에 의해 건조가 시작 되고, 건조체 내부로 열이 확산되어 물체 내부 온도가 시간에 따라 상승한다.
2. B구간: 정속 건조율 구간으로 피건조체 표면에서의 증발율과 내부에서의 수분 이

동율이 평형을 이루는 구간이다. 물의 확산에 의해 수분이 이동한다.

3. C구간: 감속 건조율 구간으로 물체 내부의 수분 함수율이 일정치 이하에 도달하면 물체 내부의 수분 이동율이 급격히 감소하며, 물체의 온도는 표면에서부터 점차 상승한다.

마이크로파를 이용한 건조 특성 곡선은 열풍 건조 특성 곡선과 같은 경향을 보이지만 각 구간별로 다른 건조 현상에 의하여 건조가 진행된다.⁽¹⁾

1. A구간: 피건조체의 예열 구간으로 물체의 두께가 반감심도에 비하여 매우 작은 경우 마이크로파에 의한 내부 체적 발생열은 전구간에서 균일하고, 온도 분포가 균일하게 증가한다.
2. B구간: 정속 건조율 구간으로 피건조체 온도가 물의 비등점에 도달하여 일정하며, 대부분의 마이크로파는 수분의 증발 잠열로 소모 된다.
3. C구간: 감속 건조율 구간으로 수분 함수율이 일정치 이하로 감소함에 따라 건조율이 저하되고 피건조체의 온도가 상승된다.

2.3 마이크로파 피건조체 가열 이론

체적가열을 받고 있는 피건조체에 에너지 균형식을 적용하면 식(4)와 같다. 좌변 항은 물체의 내부 에너지의 증가율(현열)이고, 우측 첫번째 항은 표면에서 대류 및 복사 효과에 의한 열손실, 둘째 항은 수분의 기화에 따른 잠열손실, 그리고 마지막 항은 식(1)에 의한 마이크로파 발생 열이다.⁽⁴⁾

$$m_s(w) \bar{C}_p \frac{\partial T}{\partial t} = -A_s h_{eff} (T - T_b) - \dot{m}_L h_{fg} + P_{loss}(w) \quad (4)$$

식(4)의 적용을 위하여 다음과 같은 가정이 필요하다.

- a) 피건조체 내의 온도 구배는 무시할 만큼 작다.
- b) 피건조체는 균일하며 마이크로파 에너지의 흡수에 의한 내부 발생 열은 물체의 전체적에서 일정하다.

식(4)에서 물체로부터의 열손실 항에서 대류 및 복사 항은 기화에너지 항에 비하여 일반적으로 매우 적다.

3. 실험 장치의 구성 및 실험 방법

Fig.3은 실험 장치의 개요이다. 가정용 전자 오븐의 전,후면에 마이크로파 차폐망을 설치하고, 이 두면에 풍동 덕트를 설치 하였다. 전자 오븐 전면에 설치된 가열기를 통하여 전자 오븐 내의 흡입 공기 온도를 제어 할 수 있다. 전자 오븐 전,후 덕트내에 시료로부터 수분의 배출량을 측정하기 위하여 공기의 습도, 온도, 유량을 측정 하였다.

시료는 비교적 균일한 입자 크기를 갖은 도자기용 백토를 사용하였다. 시편은 직육면

체 형상이고, $100 \times 100 \times 30$ (mm^3) 의 크기이다. 시편은 토질 시험법⁽⁵⁾에 따라 제작 하였고, 시료의 평균 공극률은 평균 27%로 측정 되었다. 이 값은 내화 점토의 자연상태 공극률 평균 20~25%에 접근된 값이었다.(Table.1)

제작한 시편의 건조가 보다 안정된 과정을 따라 진행될 수 있도록 시료의 둘레를 따라 4개 표면에 알루미늄 박판($0.05mm$)을 설치 하여 마이크로파의 유입율을 감소시켰다. 따라서 마이크로파는 시료의 전,후 양단면(100×30 mm^2)을 통하여 유입 한다. 또한 시료의 마이크로파 유입 표면에서만 기화 및 대류 열전달이 발생 할 수 있도록 시료 둘레에는 유전율이 낮고 열전도도가 낮은 테프론판($10mm$)을 설치 하였다. 이러한 방법을 통하여 시료 내부에 마이크로파와 수분의 유동을 1차원 흐름으로 접근 시킬 수 있었다.

Fig.4에서 마이크로파가 유입하는 면은 공기의 유동방향과 평행하게 설치 하였다. 열전대는 $\phi=1mm$ 의 SS피복형으로 열전대 외피를 접지하였으며, 시료의 중앙 단면에서 중앙점과 각각 $10mm$ 떨어진 2점의 온도를 측정 하였다.

흡입공기의 물성값은 Table.2에 나타내었다. 공기 유속 2.0 m/s 일때 시료 표면 대류 열전달 계수는 $h_{eff} \approx 17.3W/m^2 K$ 으로서 증발 열손실에 비하여 상대적으로 적은 3%이내의 매우 적은 값을 나타내었으며 계산에서 이를 무시 하였다.⁽⁶⁾ 따라서 식(4)에서 마이크로파에 의한 총 흡수 열량(P_{loss})를 온도 상승에 의한 현열량과 수분의 상변화에 쓰여진 잠열량으로 구분하여 계산하였다.

현열량은 시료의 온도가 전체적으로 균일하다고 가정하고, 내부 측정 3점의 평균 온도를 시료의 온도로 가정하여 식(5)에 의해 계산 하였고, 피건조체로부터의 수분 증발율은 전자 오븐 입, 출구의 절대 습도치를 비교하여 계산 하였으며 수분 감소량을 잠열량으로 가정하여 식(6)에 의해 계산하였다.

$$Q_s = \int_1^2 m_s(w) \bar{C}_p \frac{\partial T}{\partial t} dt \quad (5)$$

$$Q_L = \int_1^2 \dot{m}_L h_{fg} dt \quad (6)$$

4. 실험 결과

Fig.5는 시료를 제작하고 이것을 전자오븐 내에 설치하고 실험을 수행한 결과이며 정속 건조율 구간 이후 다음과 같은 현상이 목격 되었다.

- 시료 표면에 박피가 진행
- 시료의 중앙부에 균열이 발생
- 시료 내부 국소 온도 측정값의 진동

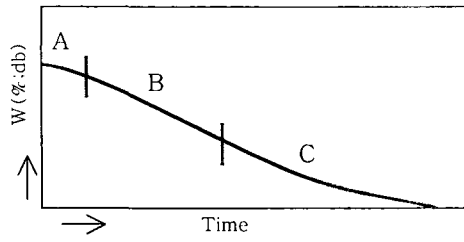


Fig.1 Moisture content-time

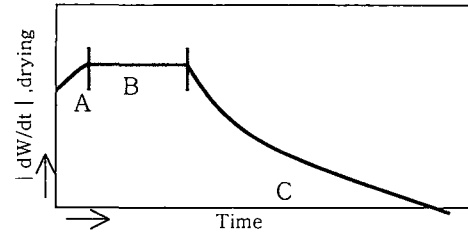
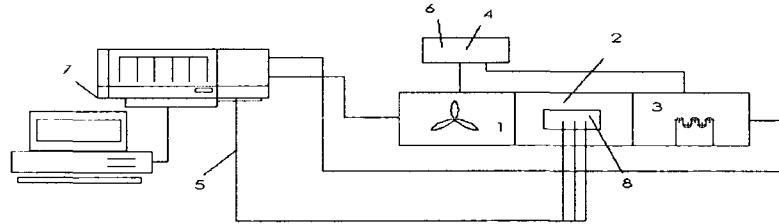


Fig.2 Drying rate-time



	Name	Type		Name	Type
1	Blower	16.2 m ³ /min. suction	5	Thermocouple	K type (Φ = 1mm)
2	Microwave	2.45GHz / 0.75kW	6	Flow meter	Digital manometer
3	Heater	Max 80°C	7	Data logger	YOKOGAWA
4	Humidity	EE30 Sensor	8	Test piece	Clay

Fig.3 Schematic of the Microwave(2.45GHz,0.75kW) experimental installation

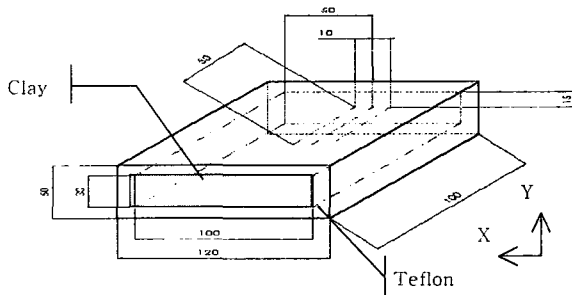


Fig.4 Location of temperature

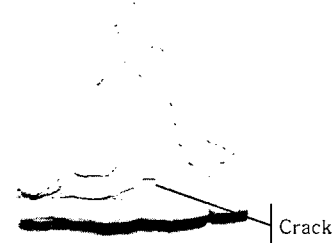


Fig.5 Test piece after drying

Table.1 Test clay piece data

Index	Data	Index	Data
Volume (m ³) = L × W × H	0.1 × 0.1 × 0.03	Initial Density (kg/m ³)	2143
Mass (kg)	0.643	Porosity (%)	27.1
Dry-Base Mass (kg)	0.503	Moisture content (W:%)	27.8

Table.2 Intake Air Properties

Index	Data
Temperature.	26.5 °C
Flow Velocity	0.26 m/s
Relative Humidity	83.5%
Absolute Humidity	20.80g/m ³
Pressure	101.3kPa

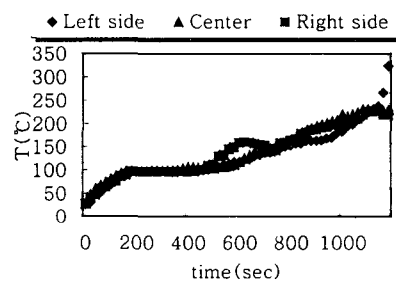


Fig.6 Temperature of 3 Points - time

이러한 현상의 주요인은 마이크로파를 고정 출력으로 하여 실험한 결과 수분율이 감소함에 따라 시료 내부에서 발생하는 열의 강도가 지나치게 강하여 시료 내부의 온도와 압력이 급격히 상승하기 때문으로 보인다.

Fig.6은 시료의 주입 단면에서 측정한 3점의 온도 변화를 기록한 그림이다. 시료 온도가 100℃미만의 초기 건조 구간에서는 3점의 온도는 3~5℃미만으로 일치 하였다. 이러한 결과는 마이크로파 가열은 시료 내부에 체적 가열을 일으키기 때문에 대류 건조와 다르게 전체 시편의 온도가 균일하게 가열 된다는 것을 잘 보여 주고 있다. 그러나 시료의 함수량이 저하함에 따라 시료의 온도가 120℃이상으로 상승하면 부분적으로 수분 분포의 불균형이 초래되어 국소적으로 수분 함수율이 낮은 영역에서 온도가 증가하는 것이 나타났다. 또한 다공성 시료 내부에서 물과 증기의 분포와 이동이 복잡하기 때문에 과열점이 반전 되어 나타나고 있다.

Fig.7, 8은 시료 내부의 함수량 변화와 증발율의 관계를 도시한 그림이다. 초기 100 sec구간에서는 증발이 거의 발생 되지 않는다. 이후 표면에서 증발이 시작 되지만 시료의 수분율은 180sec까지는 거의 일정하다. 앞의 Fig.1과 비교할 때 초기 180sec가 초기 예열구간으로 볼 수 있다. 180~800sec까지는 급격히 시료의 수분율이 감소되고 정속 건조율 구간을 이루고 있다. 이 구간에서 증발율은 비교적 일정하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 800sec구간부터 수분율 감소가 줄어들며 증발율이 급격히 감소하였고, 이 구간이 감속 건조율 구간으로 보이며 시작점의 함수율은 약10%이었다.

정속 건조율 구간에서 시편 내부 온도가 초기 증발 온도 100℃로 일정하게 유지되는 구간과 이후 시편의 온도가 비교적 선형적으로 증가하는 구간으로 나누어진다. 함수율이 3%이하에 도달될 때 시편의 평균 온도는 약 200~250℃로 나타났다.

Fig.9는 증발에너지(Q_L)와 시편의 현열에너지(Q_S)를 구분하여 나타낸 것이며, Fig.10은 증발 에너지와 현열 에너지의 합을 전열에너지(Q_{tot})로 표시하여 각각 시간의 함수로 나타낸 것이다. Fig.9에서 보는 것과 같이 초기 예열 구간에서는 마이크로파에 의한 발생에너지가 현열 에너지로 나타나고, 정속 구간에서는 증발 에너지로 변환 되는 것을 확인 할 수 있다. Fig.10에서 전열에너지($Q_{tot} = Q_L + Q_S$)는 전구간에서 20초당 약 8kJ로 비교적 균일하게 나타났다. 이것을 전기에너지 소모에 대한 에너지 변환 효율로 계산하면 약 53%에 해당한다. 그러나 180~400sec구간에서는 Q_{tot} 이 감소하는 것을 볼 수 있었으며, 이것은 시료의 온도 증가에 따라 시료 외벽에 설치 된 단열재 내부로 열 전달이 발생 하였기 때문으로 보인다.

이상의 결과로 부터 마이크로파 건조공정을 통하여 초기 함수율 28%에서 3%건조시, 시료의 무게 0.643 kg의 점토 건조에 사용된 전기에너지는 약 1376 kJ/kg 이었으며 이중 건조에 쓰인 에너지는 약 734 kJ/kg이었다. 그리고 건조에 소요된 시간은 1835 sec/kg 이었다.

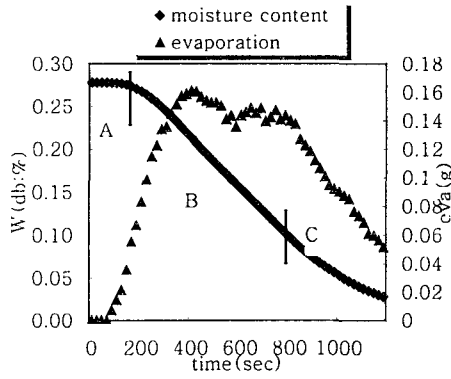


Fig.7 Moisture content-Evaporation

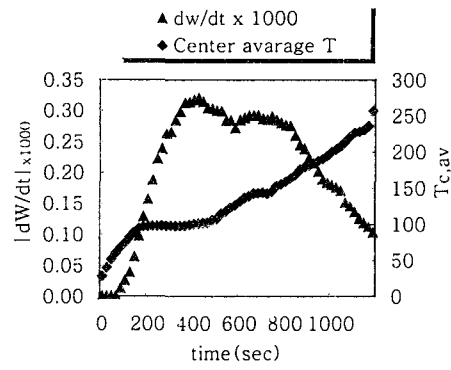


Fig.8 Temperature-Evaporation

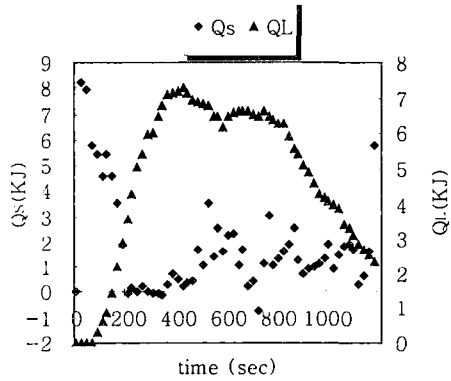


Fig.9 Energy rate of solid-evaporation

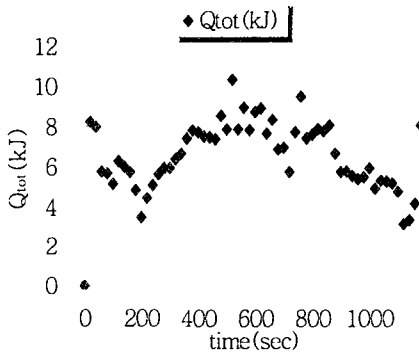


Fig.10 Total energy rate - time

5. 결 론

본 실험을 통하여 마이크로파를 이용한 건조 공정 특성을 파악할 수 있었다. 체적 발열에 의해 시료의 온도는 전체적에서 비교적 균일 하였고, 정속 건조율 구간에서는 기화 온도를 유지하는 초기 구간과 시료 온도가 증가하는 후기 구간으로 구분 되었다. 이 후기 정속 건조율 구간 이후 시료 내부의 수분의 액상과 증기상의 복잡한 이동이 나타난다. 이 결과 시료의 내부 국소 온도는 심한 변동폭을 나타내었다.

후 기

본 연구는 에너지 관리공단의 지원에 의한 에너지 절약 사업의 일환으로 수행 되었으며 그 지원에 감사 드립니다.

6. 참 고 문 헌

- 1) Roger Meredith, Engineers' handbook of industrial microwave heating.
- 2) 김영해, 1993, 공업용 마이크로파 응용기술.
- 3) Perry Green, Perry's chemical engineering handbook, 7 Ed.
- 4) B. Adu and L. Otten, 1995, J. of microwave Power and Electro-magnetic Energy. Modeling microwave-heating characteristics of granular hygroscopic solids.
- 5) 신방용, 박홍규, 1997, 토질 시험법
- 6) M. Necati OZISIK, 1985, Heat Transfer a basic approach
- 7) R. B. KEEY, 1972, Drying; Principles and practice.
- 8) ARUN S. MUJUMDAR, 1995, Handbook of industrial drying (Part 11).
- 9) ARUN S. MUJUMDAR, 1987, Advances in drying vol.4 (Chapters 2,3,4)

<Nomenclature>

A_s	Total surface area of test piece in the bed, m ²	<Greek>
\bar{C}_p	The heat capacity of mixture, kJ/kg K	$\tan \delta$ Loss factor
E	Electric field strength, V/m	ϵ' Relative permittivity
f	Frequency, Hz	ρ The density of the moist solid. kg/m
h_{fg}	The latent heat of evaporation, kJ/kg	
h_{eff}	Sum of the convective & Radiative heat transfer coefficient, W/m ² .k	
$m_s(w)$	Mass of solid, kg	
\dot{m}_L	Liquid mass flow rate, kg/s	
Q_s	Heat loss energy of the dry solid, Kj	
Q_L	Evaporation Latent heat loss of liquid, kJ	
Q_{tot}	Total heat loss of the work load, kJ	
p_{loss}	Microwave power adsorbed per teat piece, kJ/s	
T	Average solid temperature, K	
T_h	Bulk or exit air temperature, K	
t	Time. sec	
V	Volume, m ³	
W	The moisture content of dry base, %	