

## 마이크로파 가열에 의한 도금슬러지 건조특성

문경환 · 손종렬 · 김덕찬\*

고려대학교 병설 보건대학 환경위생과 · 서울시립대학교 화학공학과\*

### Drying Characteristics of Plating Sludge by Microwave

Kyong-Whan Moon · Jong-Ryeul Sohn · Dok-Chan Kim\*

*Dep. of Environmental Sanitation, College of Health Sciences, Korea University, Seoul, Korea*

*Department of Chemical Engineering, The University of Seoul, Seoul, Korea\**

#### Abstract

Microwave heating and drying processes have been well established in various industrial applications. Feasibilities of successful application of microwave drying to many material have been shown on the laboratory or pilot-plant scale.

The microwave drying behavior of plating sludge are considered in this paper. The plating sludge containing 70%, 80% and 90% water exposed to microwave power at 2,450 MHz, 700 W. An experimental microwave drying apparatus was designed and constructed to monitor weight loss during drying.

By studying the drying characteristic curve, the moisture in sludge was almost classified into two categories : free moisture and intestinal moisture. And the critical moisture contents at which the drying rate ceases to be constant were from 10.1 to 10.5%.

A simple drying model is proposed which may be used to describe drying behavior of plating sludge. The constant rate and the falling rate periods in microwave drying were addressed separately. From the equation of constant rate period the drying rate constants decreased exponentially with increasing depth. Microwave heating compared with conventional heating offered higher heating rates from 9 to 16 times. Therefore, microwave drying process can be effective in removing moisture from plating sludge.

**Keywords** : microwave drying, plating sludge, constant rate period, critical moisture content

## I. 서 론

도금 슬러지는 도금폐수처리 공정에 수반되어 생성되는 것으로 다른 폐수 슬러지에 비하여 발생량은 적으나 일반적으로 독성이 강한 시안화물을 비롯하여 수은, 납, 카드뮴, 크롬 등의 유해 중금속을 다량 함유하고 있다.

현재 국내에는 19개 협동단지에서 220개 업체가 도금작업을 하고 있으며 이들 19개 단지는 공동으로 폐수처리장을 운영·관리하고 있다. 또한 이들 외에 약 300여 개의 독립업체가 환경부의 관리하에 조업 중에 있다. 이들 도금업소에서 발생된 폐수량은 연간 약 200만  $m^3$ 로 추정되며 월 평균 2,000  $m^3$ 의 도금 슬러지가 발생되어 전량 환경관리공단 산하 화성, 온산, 군산, 광양사업소에서 고형화 처리 후 매립되어 왔다. 그러나 1997년 10월 28일 화성사업소의 매립종료로 수도권에 위치한 배출업체들은 매립지 확보와 매립 처리비용의 증가로 많은 어려움을 겪고 있으며 국내 도금업체의 국제 경쟁력은 계속 약화되고 있는 실정이다.

도금폐수 슬러지는 처리과정에서 대부분 수산화물로 형성되기 때문에 기계적 탈수과정(screen belt pressure filter, chamber filter press, centrifuge)을 거친 후에도 함수율이 82~84%로 매우 높으며, 진공 가압탈수 등의 방법을 이용하여도 함수율을 70% 이하로 낮추기 어려운 실정이다. 그러므로 최근에는 탈수 후에 슬러지 열건조 시스템을 개발하여 도입함으로써 탈수율을 향상시키고 슬러지 부피 및 무게의 감량화로 매립비용 절감과 소각시 열효율을 향상시키고자 하는 연구가 진행되고 있다.

슬러지 건조방법에는 열풍을 직접 접촉시키는 직접건조법(direct drying)과 수증기 또는 hot oil로 가열하는 간접건조법(indirect drying) 등이 있으며, 주로 열풍을 이용하는 기류건조기(flash dryer), 회전건조기(rotary dryer), 유동층 건조기(fluidized dryer), 다단원판건조기(multiple-hearth furnace) 등의 직접건조기가 일반적으로 이용되고 있으나 이와 같은 건조기들은 건조시간이 비교적 많이 소요되고 장치의 규모가 크다는 단점이 있

다. 따라서 최근에는 UV, RF(Radio Frequency), IR(Infrared), Microwave등을 이용한 건조방법이 연구되어 지고 있다.

여기서 마이크로파는 300 MHz ~ 300 GHz의 전자파로서 자외선이나 적외선에 비해 파장(1 mm ~ 1 m)이 매우 길기 때문에 에너지 전달효과가 낮은 것으로 판단되어 왔으나 일부 물질이 마이크로파를 흡수하여 빠르게 가열되는 현상이 발견되고 부티 식품의 조리, 가공과 분석 시료의 전처리 및 각종 건조공정 등에 널리 이용되고 있다.

마이크로파의 가열원리는 전기적으로 중성인 극성물질에 마이크로파가 조사되면 극성물질이 지닌 쌍극자(dipole)가 마이크로파의 진폭변화에 따라 회전하게 되고 이 때 분자간의 마찰로 인해 물질이 가열되는 것이며, 물분자는 대표적인 유전체로서 수분이 포함된 물질에 마이크로파가 조사되면, 물질 내부의 수분이 발열체의 역할을 하게 되어 물질이 빠르게 가열된다. 즉, 마이크로파 가열은 전파 에너지가 유전체의 내부에서 열로 전환되는 원리를 이용하는 것으로 종래의 가열방식이 물질의 표면을 가열하는 표면가열 방식인데 비하여 내부에서부터 가열되는 내부가열 방식이므로 가열시간이 짧고 온도 분포가 균일하며, 대상 물질만 가열하므로 열효율이 높은 장점들이 있다.

또한 피가열물이 발열체가 되어 내부 전체에서 열이동으로 가열되므로 가열이 빠르고, 장치규모를 작게할 수 있으며, 공기 흐름속도와는 무관하게 수분을 제거할 수 있다. 또한 내부에서는 수분 분포가 균일해지며 마이크로파는 피가열물에만 흡수되므로 열효율이 높고 가역전력제어가 쉬운 장점이 있다.<sup>2)</sup>

본 연구에서는 도금 슬러지를 마이크로파를 이용하여 건조할 때 슬러지의 한계함수율, 평형함수율, 항을 및 감을 건조속도등의 건조특성을 파악하고 슬러지의 함수율, 중발표면적, 두께, 건조시간등이 건조효율에 미치는 영향을 검토하여 마이크로파를 이용한 건조방법이 경제성 있는 건조공정으로 발전될 수 있는지의 가능성을 검토하고자 하였다.

## II. 실험장치 및 방법

### 1. 실험재료

도금 슬러지 건조장치는 주파수 2450MHz, 최대출력 700 W의 mode stirrer가 장착된 multi-mode 형의 전자렌지(SAMSUNG RE-52N)를 사용하였고 전압조정기를 설치하여 항상 일정한 출력을 유지하도록 하였다.

실험장치의 내부용적은 폭 0.30m, 높이 0.25m, 깊이 0.28m로 내부에 rotary platform이 장착된 시스템으로 아래쪽 구멍에 특별히 제작된 테프론 판을 설치한 후 외부에 화학천평 (CAS AD-05)을 연결하였으며, 마이크로파 가열에 따른 슬러지의 온도 변화를 측정하기 위해 thermocouple을 오븐 상부에 설치하였다. 한편 오븐의 구조변경에 따라 마이크로파가 누출될 수 있으므로 마이크로파 누출 감지기(Holaday HI-1501)를 이용하여 누출량을 측정하여 안전을 확인하였다.

본 연구에 사용된 슬러지는 K 도금공장과 S 도금공장에서 탈수과정을 거친 슬러지를 대상으로 하였으며, 채취 후 실험실로 운반하여 폐기물 공정시험방법에 준하여 함수율과 건조 고형물 함량을 측정하였다. 또한 슬러지내의 중금속 함량을 파악하기 위해 습식·분해하여 원자흡광광도계(Unicam 890)로 측정하였으며 그 결과는 Table 1. 과 같다.

건조속도 측정을 위해 슬러지의 질량, 함수율, 증발 표면적, 두께를 각각 달리하여 건조장치 내부의 테프론 판에 넣은 후 화학천평에서 측정되는 무게를 일정시간 간격으로 PC에 기록하였으며, 4 회 반복 측정하여 평균값을 구하였다. 한편 마이크로파 가열방식과 재래식 가열방식에 따른 건조

효율을 비교하기 위해 재래식 오븐의 온도를 20 0℃로 하여 건조실험을 실시하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 건조특성곡선

슬러지내에 존재하는 수분의 형태는 자유수 (free water), 간극수(interstitial water), 인접수 (vicinal water), 결합수(hydrscopic water)로 구분되며<sup>1)</sup> Vesilind<sup>2)</sup>는 총 고형물 0.5%인 슬러지내에 각각 75%, 20%, 2%, 2.5%를 차지하고 있다고 하였으며, 가열에 의해 자유수, 간극수, 결합수의 순으로 수분이 증발된다고 하였다.

건조특성은 건조속도곡선(drying rate curve)으로 설명된다. 증발면적을 정확히 아는 정형재료에서는 단위 증발면적당 증발되는 수분량(Kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup> hr)으로 나타내고 무정형 재료에 대하여는 단위 건조재료 중량당 단위 시간에 증발하는 수분량(Kg H<sub>2</sub>O/kg hr)이 사용된다. 충분히 습윤한 재료를 건조기로 가열한 경우 건조는 건조속도곡선에 의해 재료예열기간(lag period), 항율건조기간(constant rate period), 감율건조기간(falling rate period)으로 구분된다. 항율건조기간동안 피가열물의 함수율은 시간에 따라 감소되며, 유입된 열량은 모두 수분의 증발에 이용되므로 피가열물의 온도는 일정하고 표면에는 수막이 존재하지만 내부로부터의 수분 이동속도가 증발속도보다 적은 경우에는 표면이 건조되어 유입된 열량이 수분증발과 건조부위의 현열에 소비되므로 건조속도는 점차 감소되며, 이 기간을 감율건조기간이라 한다. 한편 항율 건조기간과 감율 건조기간의 경계가 되는 함수율을 한계함수율이라 하며 항율건조기간의 함수율을 평균 함수율이라 한다.

Fig. 1은 K사와 M사의 도금 슬러지 300g을 초기함수율 70%, 증발 단면적 7 × 7 cm로 하여 가열했을 때의 건조속도곡선을 나타낸 것으로 4분간의 짧은 재료 예열기간 후에 항율건조기간이 나타났으며, 이때의 건조속도는 K사 슬러지와 S사 슬러지의 경우 각각 평균 151.4kg/m<sup>2</sup> · hr, 132.5 kg/m<sup>2</sup> · hr였다. 한편 한계함수율은 10.1%, 10.5%

Table 1. Heavy Metal Contents in Plating Sludge

plating sludge	Heavy metal content(mg/ℓ)					
	As	Se	Cr	Pb	Cu	Cd
K	540.3	1,356.6	287.3	3,348.5	4,342.1	140.6
S	321.4	843.6	339.5	4,504.0	5,236.1	98.5

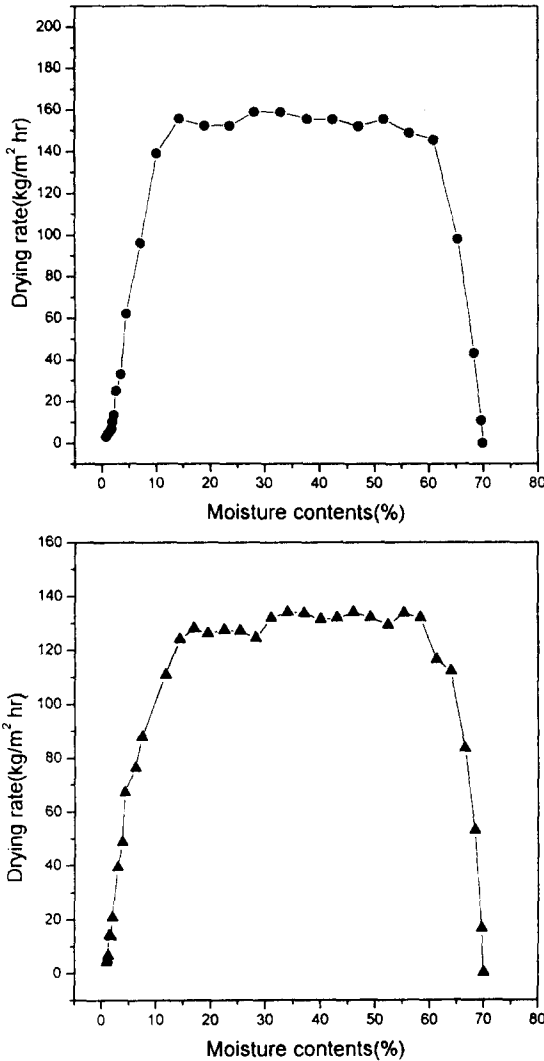


Fig. 1. Drying rate versus moisture contents curves for wet plating sludge during microwave heating process. ●, K sludge ; ▲, S sludge

로 비슷한 수치를 나타냈으며 감율건조속도곡선 또한 두 슬러지간에 별다른 차이점이 없이 직선의 모양을 나타냈다. 감율건조속도곡선은 증발된 수증기의 물질전달속도가 건조속도를 지배하는 경우나 과열증기에 의한 건조, 진공건조와 같이 압력구배로 인한 증기의 흐름이 있는 경우에는 위로 볼록한 모양을 나타내고 공극이 조밀한 고체상 물질로 확산에 의한 내부수분의 이동이 지배적일 때는 아래로 오목한 모양, 점토와 같은 것은 직선의

감율속도 1단과 아래로 오목한 감율속도 2단의 모양을 보인다고 한다.<sup>3,4)</sup>

건조되는 수분의 형태는 항률건조기간에 증발되는 것이 자유수이며, 간극수와 인접수는 각각 감율속도 1단과 2단에 제거된다고 한다.<sup>5)</sup> 또한 신<sup>6)</sup> 등은 고분자 응집제를 사용한 슬러지의 경우 슬러지 입자의 전기적 중화와 가교(bridging) 등에 의한 flocc 형성으로 슬러지내의 콜로이드 안정성이 파괴되어 자유수의 함량이 증가된다고 하였다. 그러므로 화학적으로 응집 처리된 도금 슬러지내의 수분 존재형태는 대부분이 자유수와 간극수로 구성되어 있다고 판단할 수 있었으며, 이때 수분의 이동은 주로 모세관 흐름(capillary flow)과 확산(diffusion)에 의한다고 한다.<sup>7)</sup> 감율속도 구간의 특성곡선은 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>8)</sup>

$$R_d = (W - dw) / A d\theta = R_c (F / F_c) \quad (1)$$

여기서  $R_d$ 는 감율속도( $\text{kg/m}^2\text{hr}$ ),  $W$ 는 건조질량( $\text{kg}$ ),  $A$ 는 건조면적( $\text{m}^2$ ),  $w$ 는 함수율,  $\theta$ 는 건조하는데 필요한 시간( $\text{hr}$ ),  $R_c$ 는 항률건조속도( $\text{kg/m}^2\text{hr}$ )를 나타내며,  $F$ 는 자유함수율( $= w - w_e$ ),  $F_c$ 는 한계자유함수율( $= w_c - w_e$ ),  $w_e$ 는 평형함수율,  $w_c$ 는 한계함수율(%)을 나타낸다.

Standish<sup>9)</sup>는 마이크로파 가열의 경우에는 시료 전체를 가열하므로 보통 항률건조기간은 나타나지 않고 감율 건조기간만이 나타나는 것이 일반적이라고 하였으며, 박<sup>10)</sup> 최<sup>11)</sup> 등은 마이크로파에 의한 하수 슬러지를 건조시 항률건조기간은 나타나지 않았으며 감율건조기간은 내부확산에 의해 오목한 형태로 나타났다고 하여 본 연구 결과와는 다른 특성을 나타냈다. 또한 한계함수율은 약 55~64%라 하여 본 연구의 한계함수율 10.1~10.5%에 비해 매우 높은 것으로 나타났다. 이는 하수 슬러지는 주로 세포로 구성되어 있으며 세포질 내의 수분은 세포막을 통해 제거되므로 내부로부터 수분 이동의 저항이 증대하고 수축현상이 생기기 때문이라고 생각된다. 즉 세포질의 공극이 조밀하던가 조칙이 촘촘한 물질일수록 내부 함수율이 높은 상태에서 한계함수율에 도달되며, 목재세포 등에서

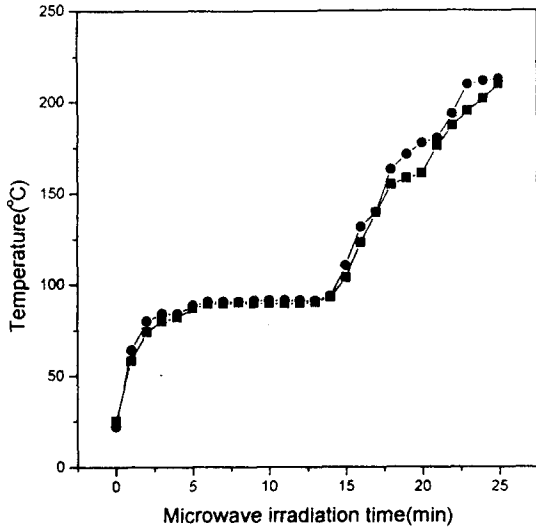


Fig. 2. Temperature distribution Curves for wet plating sludge during microwave heating process. ●, K sludge ; ▲, S sludge

는 섬유포화점(Fiber Saturation Point)이라 하여 약 36%가 된다고 한다. Fig. 2는 마이크로파 가열에 따른 온도분포를 나타낸 것으로 항울건조기간이 시작되는 4분경에 약 90°C에 도달되며 내부 수분이 기화되는 항울건조기간동안 거의 일정한 온도를 유지하나 감울건조기간에 온도가 증가되는 전형적인 건조특성곡선의 온도분포를 나타냈다.

### 2. 수분분포 변화

한계함수율까지 피가열물은 가장 높은 건조속도를 나타내며, 온도도 낮게 유지되나 감울건조기간에는 유입된 열량이 수분증발과 피가열물의 가열에 사용되므로 더욱 높은 에너지가 요구된다. 그러므로 건조기술에서 시간의 단축 및 피가열물의 변형을 방지하기 위해서는 이 값을 낮추는 것이 바람직하다. 하지만 도금 슬러지의 경우 한계함수율이 높지 않고 완전건조단계까지 요구되지 않으므로 본 연구에서는 마이크로파를 이용하여 초기함수율( $w_0$ )이 각각 70%, 80%, 90%인 슬러지 200, 400, 600, 800, 1000g에 대해 증발단면적을 11cm×11cm(두께 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 7.5cm)로 하여 한계함수율( $w_c$ )까지, 즉 자유수가 증발될 때까지

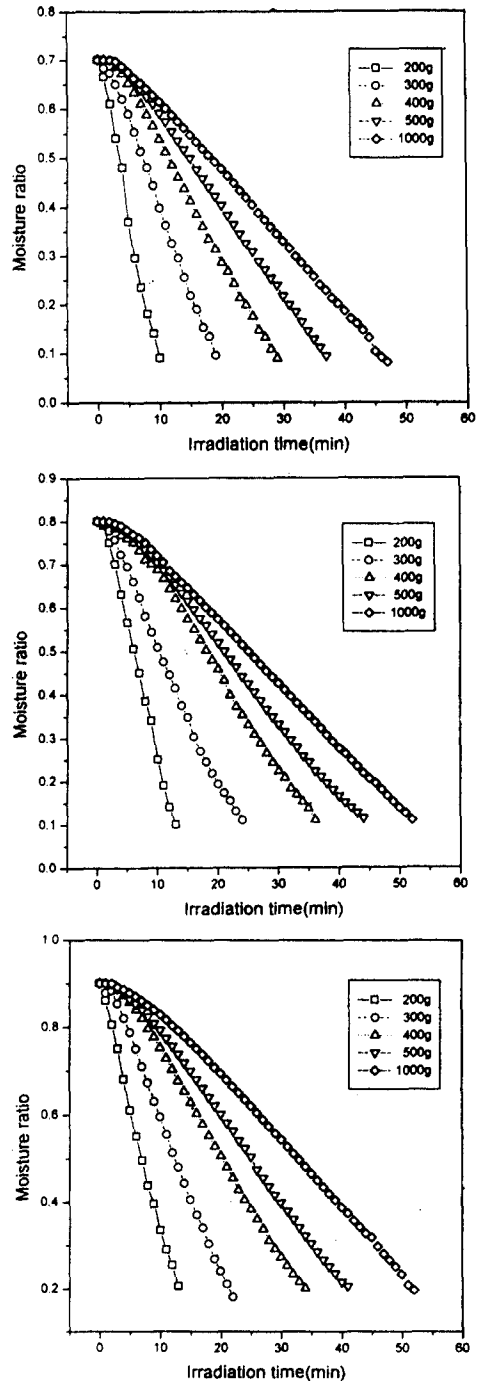


Fig. 3. Moisture ratio distribution as function of time during microwave heating process. : initial moisture content (a) 70% (b) 80% (c) 90%

의 가열시간에 따른 함수율의 변화를 측정하였으며 그 결과는 Fig. 3에 나타났다. 초기 함수율 70%, 80%, 90%인 도금 슬러지 모두에서 함수율은 선형적으로 감소되었으므로 다음식과 같이 나타낼 수 있었으며, 1차 회귀방정식에 의한 R<sup>2</sup>는 모든 시료에서 0.99 이상을 나타냈다.

$$W(\theta_{cb}) = W_0 - A(\theta_{cb}) \quad (2)$$

여기서 W는 한계함수율에 도달되기 전까지의 마이크로파 가열시간  $\theta_{cb}(\text{min})$ 에 있어서의 함수율, W<sub>0</sub>는 초기함수율, A는 건조상수이다.

Fig. 4는 슬러지층의 두께, 함수율에 따른 건조상수를 나타낸 것으로 두께가 증가함에 따른 건조상수는 지수감소곡선(exponential decay curve)형태를 나타냈으며, 함수율이 높을수록 감소속도는 둔화되었다. 이것은 마이크로파 가열은 내부가열 방식이므로 가열초기에 슬러지 내부의 온도가 급격히 증가되며 내부의 수분은 기화되어 표면으로 이동되나 슬러지 외부의 온도와 수증기 생성속도는 내부보다 낮아지므로 내부의 압력이 상승되고, 일정시간 후에 압력이 평형상태에 도달되면 내부의 수증기 제거속도는 일정하게 유지된다.<sup>12)</sup> 그러나 수분의 이동거리, 즉 두께가 두꺼워질수록 물질전달 저항이 증대되어 수증기 제거속도가 급격하게 감소되기 때문에 생각된다.

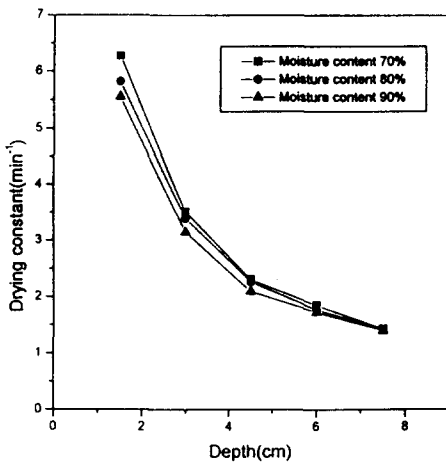


Fig. 4. Drying rate constants as a function of plating sludge depth.

건조 후 도금 슬러지의 형태는 하수 슬러지나 음식물 쓰레기가 건조될 때 나타나는 균열, 표면경화(casehardening)현상<sup>13)</sup>은 나타나지 않았으며 수축되어 부피만이 감소되었을 뿐 건조 전의 형태를 거의 그대로 유지하였고 파쇄에 의하여 분말화가 가능하였다.

마이크로파 가열에 의한 건조와 재래식 건조기(Conventional drying oven)에 의한 건조효율을 비교하기 위해 1.5kw 건조기에 함수율 70%인 도금 슬러지를 200℃로 건조한 결과는 Fig. 5와 같다. 질량 200, 400, 600, 800, 1000g인 슬러지를 함수율 20%까지 낮추는데 소요된 시간이 각각 130분, 190분, 280분, 320분, 360분으로 마이크로파에 의한 가열시간 8분, 16분, 24분, 31분, 39분에 비해 9~16배 건조시간이 긴 것으로 나타났다. 이는 마이크로파 가열에서는 슬러지 내부에서 온도구배가 비교적 커서 수분의 이동이 모세관 흐름과 확산에 의존하지만 재래식 건조에서는 온도구배가 작고 수분의 흐름은 모세관 흐름에만 의존하여 물질 흐름(mass flow)의 저항을 받기 때문으로 생각된다.

그러므로 도금 슬러지 건조에 마이크로파를 이용할 경우 높은 건조시간의 단축효과를 기대할 수 있으며 연속식 공정으로 발전시킬 수 있는 방법을

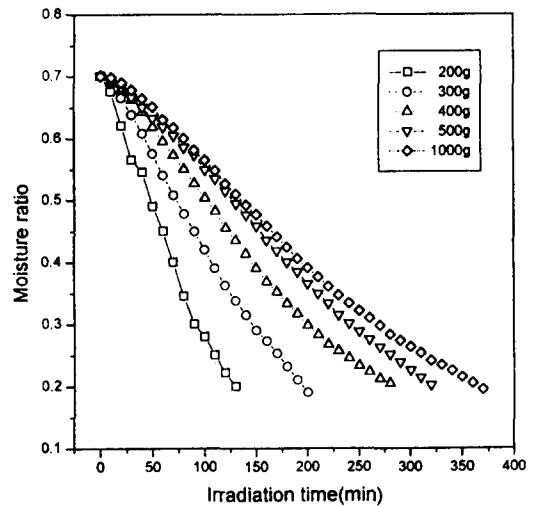


Fig. 5. Moisture ratio distribution as function of time during conventional heating process.

조사·연구함으로써 보다 효과적이고 경제적인 건조공정이 될 수 있을 것으로 생각된다.

#### IV. 결 론

도금 슬러지 건조에 마이크로파를 이용할 때 슬러지의 한계함수율, 평형함수율, 항을 및 감율 건조속도 등의 건조특성을 파악하고 슬러지의 함수율, 증발표면적, 두께, 건조시간 등이 건조효율에 미치는 영향을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 건조속도곡선에 의하면 도금 슬러지내의 수분분포는 대부분이 자유수와 간극수로 구성되어 있다고 생각할 수 있으며, 항을 건조기간의 건조속도는 평균  $142 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hr}$  였다.
2. 한계함수율은 10.1~10.5%로 나타났고 초기 함수율 70%, 80%, 90%에서 한계함수율까지의 수분감소는 1차 감소식

$$W(\theta_{cb}) = W_0 - A(\theta_{cb})$$

로 나타낼 수 있으며 1차 회귀방정식에 의한  $R^2$ 는 모든 시료에서 0.99 이상을 나타냈다.

3. 슬러지층의 두께, 함수율에 따른 건조상수는 두께가 증가함에 따라 지수감소곡선 형태를 나타냈으며 함수율이 낮을수록 감소속도는 증가하였다.
4. 마이크로파 가열에 의한 건조속도가 재래식 건조기에 의한 건조속도 보다 9~16배가 빠른 것을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. Tsang, K. : Moisture Distribution in Wastewater Sludge. Dissertation, Doctor of Philosophy, Duke University, Department of Civil and Environmental Engineering, Durham, NC, USA, 1989.
2. Vesilind, P.A. : Treatment and Disposal of Wastewater Sludges. Ann Arbor, Michigan, USA, Ann Arbor Science Publisher, Inc, 1979.
3. Halde, R.E. : Sewage Sludge Characterization by Vacuum Drying, Filtration & Separation, 16(3), 238-242, 1979.
4. 山崎蒙雄 : 마이크로파加熱乾燥裝置, 化學工學, 第19卷, 第953號, 1975.
5. K.R. Tsang and P.A. Vesilind : Moisture Distribution in Sludge, Water. Sci. Tech, Vol 22(12), 153-161, 1990.
6. 신용섭, 이제근, 이호태, 진경태, 전해수 : 건조곡선을 이용한 슬러지내 수분분포 측정, 대한환경공학회지, Vol 18(9), 1061-1072, 1996.
7. S. Whitaker : Flow in Porous Media II: the Governing Equation for Immiscible, Two Phase Flow, Transp. Porous Media 1, 105-125, 1986.
8. 신호일 : 건조장치, 대광서림, 19, 1995.
9. Standish : Particle Size Effect in Microwave Heating of Granular Material, Power Technology, 66, 225-230, 1991.
10. 박수인 : 마이크로파 가열에 의한 하수슬러지의 건조, 서울시립대학교 석사학위논문, 1992
11. 崔炳淳, 金德燦 : 마이크로파加熱による下水汚泥の乾燥, 日本廢棄物學會第5回研究發表會, 473-476, 1994.
12. Standish : Particle Size Effect in Microwave Heating of Granular Materials, Powder Technology, 66, 225-230, 1991.
13. Bridle, T.R. : Sludge Derived Oil-Wastewater Implication, Environmental Technology Letters 3, 151, 1982.