

## 상 · 하수 슬러지 탈수케이크의 공기건조에 관한 연구

이정언<sup>†</sup> · 조은만\* · 김봉환\*\*

부산대학교 산학협력중심대학 · \*(주)리엔텍엔지니어링 · \*\*진주산업대학교

(2006년 4월 17일 접수, 2006년 11월 13일 채택)

### Air Drying Technology for Dewatered Cake from Wastewater and Waterworks Sludge

Jung-Eun Lee<sup>†</sup> · Eun-Man Cho\* · Bong-Hwan Kim\*\*

ILC, Pusan National University · \*Reentec Engineering Co.,Ltd. · \*\*Jinju National University

**ABSTRACT** : Air drying equipment was built as a device for reduction of dewatered cake from wastewater and waterworks sludge and to reproduce it by reusable matter. Dewatered cake was supplied into the air drying equipment which operated by air velocity of 80 m/sec, air rate 30 m<sup>3</sup>/min and air temperature of 40°C, and dried to produce the dried powder. The air drying equipment was composed of the air ejector which made high-speed fluid field, and cyclone which made circling fluid field. Dewatered cake was crushed at the high-speed zone as first step, and formed into dried powder of sphere shape by the collision between particles at the circling fluid zone. Wastewater sludge with water content of 82.5 wt% was supplied 1.0 kg/min into air drying equipment and produced the dried powder which had the water content of 62.3 wt% and mass median diameter of 2.4 mm after process. At that time, it was analyzed that water removal rate was 0.1 H<sub>2</sub>O△kg/min · DS kg and air consumption was 170 m<sup>3</sup>/DS kg. Under same experimental conditions, when waterworks sludge was dried, water content of dried powder decrease to 47.5 wt% and mass median diameter decrease 2.1 mm and water removal rate increase 0.13 H<sub>2</sub>O△kg/min · DS kg. Air consumption increase 180 m<sup>3</sup>/DS kg with comparison to the results of wastewater sludge. Therefore, this technology was evaluated that drying the dewatered cake of waterworks sludge was more efficient than wastewater sludge, and also economical sludge handling technology due to drying the cake by only air.

**Key Words** : Air Drying, Dewatered Cake, Wastewater and Waterworks Sludge, Dried Powder, Water Content

**요약** : 하수 및 상수 처리장에서 발생하는 탈수케이크의 감량화와 재활용 가능한 물질로 생산하기 위한 방안으로 공기건조장치를 구축하였다. 80 m/sec의 공기속도와 30 m<sup>3</sup>/min의 공기유량, 그리고 공기온도 40°C로 운전되는 공기건조장치에 함수율 80 wt%이상의 탈수 케이크를 공급하여 건조하였다. 공기 건조장치는 Air Ejector에 의한 고속유동장과 사이클론에 의한 선회 유동장으로 구성되어 있는데, 투입된 탈수 케이크는 선회 유동장에서 1차 파쇄되고 선회 유동장에서 입자간의 충돌효과에 의해 성형되어 최종 구형의 건조분말을 생산한다. 함수율 82.5 wt%인 하수슬러지를 1.0 kg/min의 양으로 탈수 케이크를 공급하여 평균 함수율 62.3 wt%, 평균 입경 2.4 mm인 건조분말을 회수하였다. 이때 수분제거율은 0.1 H<sub>2</sub>O△kg/min · DS kg, 공기소모량은 170 m<sup>3</sup>/DS kg로 분석되었다. 동일 조건에서 상수 슬러지를 공기건조하였을 때 함수율은 47.5 wt%로 감소하였으며 평균 입경은 2.1 mm 그리고 수분 제거율은 0.13 H<sub>2</sub>O△kg/min · DS kg으로 증가하였으며 공기소모량은 180 m<sup>3</sup>/DS kg로 증가하였다. 즉 본 기술은 하수 슬러지에 비하여 상수 슬러지의 탈수 케이크를 건조할 때 효율적이며 열을 가하지 않고 공기만으로 건조하여 수분을 감량시키기 때문에 경제적인 슬러지 처리 방법으로 평가된다.

**주제어** : 공기건조, 탈수케이크, 하수 및 상수 슬러지, 건조분말, 함수율

## 1. 서론

상 · 하수 처리장에서 발생하는 탈수케이크는 연간 300만톤 이상이며, 제지, 철강, 염/안료, 정류 등의 산업체에서 발생하는 탈수 케이크는 연간 1,000만톤에 달한다. 이들 슬러지는 해양 투기, 매립 등과 같은 폐기방법과 비료화와 같은 재활용 방법으로 크게 대별되어 관리되고 있다. 2005년 현재 발생하는 탈수 케이크 중 약 80%는 해양투기와 매립으로 처리

되고 있으며, 나머지 20%만이 소각 또는 재활용되고 있다. 해양투기에 의한 방법으로 슬러지를 처리하는 비중이 높은 것은 처리비용이 가장 저렴하기 때문이다. 하지만 이 방법은 경제적인 측면에서 접근할 문제 이상의 사회 환경적 문제를 내포하고 있다. 2004년도에 '런던협약 96의정서' 비준한 국가가 26개국 중 19개국이므로 향후 7개국만 비준하면 해양 투기 방법의 슬러지 처리는 국제적인 규제에 따라 전면 금지된다. 현 시점에서 2006년도부터 우리나라는 이 의정서를 비준하였으므로 해양투기에 의한 슬러지 처리는 금지될 전망이다,<sup>1)</sup> 환경부는 탈수 케이크 재활용율을 50% 이상 목표로 하고 있지만 달성 여부는 미지수다. 슬러지 처리의 효율적인 방안을 위한 기술개발은 1990년 초반부터 진행되어 왔으며,

<sup>†</sup> Corresponding author  
E-mail: jelee@pusan.ac.kr  
Tel: 051-510-3694

Fax: 051-514-3690

1997년 [폐기물관리법]의 제정을 계기로 본격적인 연구가 진행되어 왔다. 슬러지의 효율적인 처리 필요성에 대한 인식의 폭이 증대됨에 따라, 폐수처리공정에서 발생된 슬러지를 저감시키고 재활용하기 위해 농축→안정화→개량→탈수→건조→처분→이용 등의 각 단계별 기술이 상당히 이루어져 왔다. 하지만 현 시점에서 분류된 각 기술이 효과적으로 현장에 적용되어 운용되고 있는 사례가 드물다. 그 이유는 기술적인 측면과 경제적인 측면 때문이다. 슬러지처리 중 핵심공정은 탈수, 건조, 재활용의 공정이다. 기존 슬러지 처리 공정에서는 탈수 후 생성된 슬러지의 70% 이상을 해양 투기로 처리하고 나머지 중 일부를 건조한 후 재활용 한다. 이와 같은 처리방식이 15년간 고수되고 있는 이유는 탈수 케이크의 함수율을 저감시킬 수 있는 기술이 없기 때문이다. 현재 하수처리장에 범용적으로 설치된 벨트프레스로부터 생산된 탈수케이크의 함수율은 80% 정도이다. 함수율이 너무 높아 소각, 건조시 에너지 투입량이 높아 실효성이 없다. 또한 재활용 또는 매립하고자 할 경우 수분 함량에 소요되는 비용이 너무 높아 현실성이 없는 것으로 분석되고 있다. 따라서 슬러지 처리의 핵심은 저 비용으로 처리하여 재활용 하는 것이다. 본 기술은 이와 같은 취지하에 저 에너지 소비형인 무열 공기건조장치 기술을 개발하여 저 함수율 건조분말을 생산하여 재활용함으로써, 해양투기로 인해 발생될 수 있는 환경적·제도적 문제점을 극복하고자 하는 것이다.

슬러지 처리공정에서 함수를 저감은 연소, 용융 등의 공정과 연계하여 운용하고자 할 때, 건조는 매우 중요한 공정이거나 현재까지 건조 장치를 중간단위 공정으로 인식하였을 뿐 탈수 케이크 처리공정의 주요 공정으로 인식하지 못하고 있다. 이와 같은 이유로 현재까지 에너지 소모성이 큰 열 건조방식이 슬러지 건조기의 주류를 이루고 있었다. 최근 설치되고 있는 열 건조 방식(로타리 킨, 디스크) 건조기는 800℃ 이상의 열풍에 의한 접촉으로 슬러지 내 포함된 수분을 함수율 40% 이하로 건조시키는데 해양배출의 처리비 2배 이상의 에너지비용과 NOx 등 배가스의 발생으로 대기오염방지를 위한 후처리설비에 대한 시설비로 상당한 예산이 지출되어야 하는 애로사항이 있다.<sup>2)</sup> 이에 본 기술은 저에너지비용으로 슬러지를 감량화 할 수 있는, 열원이 필요 없는 건조 기술로써 최소한의 에너지로 탈수케이크를 기존의 열을 사용하는 건조방식을 통하지 않고 매개 유체로 Dry Air만을 사용하여 유기물함량을 보전하면서 저 함수율을 획득할 수 있는 고속선회공기 유동장을 이용한 공기건조 장치를 개발하는 것이다.

탈수장치로부터 생산된 80 wt%의 탈수 케이크가 Air Ejector를 통과하면서 공기속도가 80 m/sec인 고속공기유동장에서 1~2 mm로 파쇄(Break-up)된 후 사이클론으로 이송한다. 사이클론으로 유입된 파쇄된 탈수 케이크 표면의 수분은 약 30 m<sup>3</sup>/DSkg의 공기유량에 의해 기화되어 저 함수율 분말로 된다. 탈수 케이크가 고속/선회 유동장을 통과하면서 입자간의 충돌, 수분 증발 등의 과정을 겪으면서 Aggregate 현상을 통해, 입자 성형화 과정을 겪으면서 입자의 크기가 2 mm

이하인 저 함수율 건조 분말을 생산한다. 본 기술은 열을 가하지 않은 상태에서의 건조이므로 기존의 열 건조방식에 비하여 투입에너지 량이 적어 실용화가 가능한 기술로 평가된다.

## 2. 공기건조 메카니즘

### 2.1. 공기건조 특성

Fig. 1<sup>3)</sup>은 습윤 물질의 건조 특성 곡선을 나타낸 것으로, 횡축은 함수율 분율, 종축은 건조속도로 표현하였다. 수분을 함유하고 있는 습윤 물질(탈수 케이크)이 일정한 온도와 습도(H)를 유지하고 있는 건조공간에 투입되었을 때 건조는 크게 정률건조기간(Constant rate drying period)과 감률건조기간(Falling rate drying period)으로 이루어진다. 건조 시간의 변화에 따라 함수율의 변화가 미미한 구간을 정률건조기간이라 하고, 함수율이 감소하는 구간을 감률건조기간이라 한다. 이들 건조 특성은 건조 대상 물질(탈수 케이크)의 특성과 최초 수분의 함량의 차이에 따라 정률과 감률의 시간에 차이는 있지만 임의 재료 건조 시 이 두 기간은 반드시 존재한다. 그림에서 보는 바와 같이 건조 속도는 건조면적 A를 기준으로 시간에 대한 함수율 변화(dW/dt)를 나타내는 면적(A)기준 건조속도,  $R_s = (W_s \cdot R_w)/A$ 와 건조 대상 물질의 질량( $W_s$ )를 기준으로 나타내는 질량기준 건조속도,  $R_w = (A \cdot R)/W_s$ 로 평가한다. 건조는 초기 정률건조기간을 통과한 후 정률건조기간에서 수분이 증발한다. 이때 정률건조기간에서 감률건조기간으로 이동할 때의 함수율을 한계함수율( $W_c$ )이라 하고 건조가 더 이상 진행되지 않을 때의 함수율을 평형함수율( $W_e$ )이라한다.<sup>3)</sup>

건조에 있어 정률/감률기간의 정도는 케이크의 특성(유·무기물 함량)과 초기 슬러지의 함수율, 그리고 건조장치의 성능에 따라 차이가 있다. 건조 효율 향상, 즉 건조 시 투입되는 에너지 량을 최소화하기 위해서는 정률건조기간을 줄여야 한다. 본 공기건조 기술은 기존의 열 건조에 비하여 정률건조기간이 매우 짧다. 공기 건조는 탈수 케이크 건조 시 정률건조기간이 시작됨과 동시에 바로 감률건조 영역으로 들어간다. Fig. 1의 빗금 친 부분은 정률건조기간이 짧음에 따라 발생하는 에너지 절감 량을 나타낸 것이다. 공기건조에 있어 정률건조기간이 없는 이유는 케이크 입자를 파쇄하여 건조하기 때문이다. Air Ejector에서 80 m/sec 이상으로 증속된 공기는 유동장으로 유입된 케이크를 2 mm 이하로 파쇄한다. 파쇄된 입자는 케이크에 비하여 상대적으로 비표면적이 매우 커기 때문에 선회 유동 공간으로 이송된 입자는 건 공기로의 기화가 잘 이루어진다. 따라서 본 기술의 핵심은 고속유동장에서 입자를 파쇄하여 입자의 비표면적을 크게 하여 선회 유동장에서 기화하게 함으로써, 정률건조기간을 최소화할 수 있기 때문에 열이 없는 상태에서도 건조가 가능하다는 것이다. 이에 따라 기존의 열 건조에 비하여 약 1/5의 에너지 만으로도 건조가 가능하므로 저 소비형 건조기술이다. 또한 고속 공기 유동장에서 파쇄된 입자는 입자간의 충돌 현상에

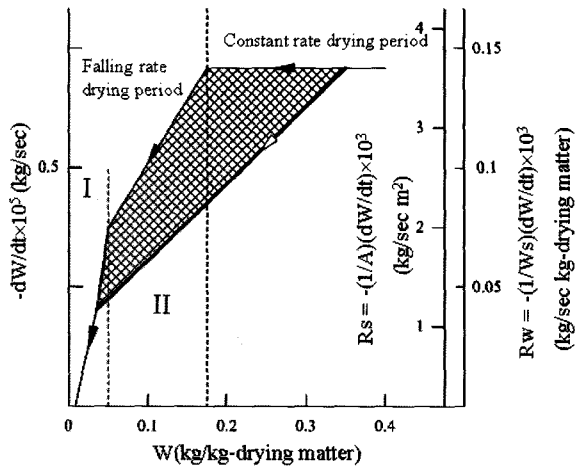


Fig. 1. Drying characteristic curve of dewatered cake.

의해 Aggregation되어 구형의 입자를 생산할 수 있어, 탈수 케이크 건조에 있어 가장 해결하기 어려운 건조분말 수송 문제를 쉽게 해결할 수 있다는 점이다. 뿐만 아니라 본 기술은 공기 유동조건(공기속도, 유량, 온도)을 적절히 조정하면, 최종 건조 분말의 함수율과 입자 크기를 조절할 수 있기 때문에 건조 분말의 재활용 용도에 따라 생산할 수 있는 맞춤형 장치라는 장점도 있다.

2.2. 공기건조에서 입자의 파쇄 및 분말성형

탈수 케이크가 공기건조장치로 유입되면 고속유동장에서 1차 파쇄가 이루어지며, 선회유동장에서 분말 성형되어 구형의 입자로 최종 생산된다. Fig. 2<sup>4)</sup>는 케이크가 분말 성형되는 과정을 나타낸 것이다. Blower로부터 공급된 공기는 Air Ejector를 통과하면서 80 m/sec의 속도로 증속된다. 이때 공급된 탈수 케이크는 공기와의 충돌과 유동상 입자간의 충돌 현상에 의해 약 2 mm 크기로 파쇄된다. 파쇄된 입자는 공기를 따라 3단으로 구성된 Cyclone으로 이송하게 된다. 사이클론 내부에서 선회유동을 하는 공기를 따라 입자가 유동하면서 입자간의 충돌 현상에 의한 Aggregation과 Coagulation에 의해 유착 또는 분리 과정을 반복하면서 구형의 입

자로 성장한다. 이와 같은 과정을 겪는 와중에 입자의 표면에 분포하고 있는 수분이 기화한다.<sup>4)</sup> 입자로부터 수분의 기화 속도가 빠를수록 입자의 파쇄 현상 증가한다. 유기성인 하수 슬러지에 비하여 무기성인 상수 슬러지의 파쇄가 빠르게 진행하므로, 하수 슬러지는 상수 슬러지에 비하여 입자의 크기가 크고 함수율이 높은 경향이 있다.

3. 실험 및 분석방법

3.1. 실험장치

탈수 케이크를 공기유속 80 m/sec 이상의 고속 및 선회유동장에 통과시키면 Fig. 2에서 보는 바와 같이 입자의 표면 기화, 파쇄 등의 현상에 의해 건조분말이 된다. Fig. 3은 고속 및 선회유동장에서 기화원리에 의해 입자표면에서 건조가 이루어지는 고속선회공기유동장치로서, 탈수 케이크 공급장치, Air ejector, 다단 cyclone, 건조분말 회수장치로 구성되어 있다. 그리고 Table 1은 장치의 설계조건과 운전조건을 나타낸 것인데, Ring Blower로부터 압력 0.1 kgf/cm<sup>2</sup>, 유량 30 m<sup>3</sup>/min, 공기속도 80 m/sec의 공급 공기는 직경이 70 mm 인 Air ejector를 통과하면서 고속공기 되고, 높이/직경의 비가 0.18인 사이클론을 통과하면서 선회공기 유동이 된다. 습식 로타리 벨브로 1.0 kg/min으로 공급된 탈수케이크는 공기 이송 관 내부로 정량 공급된다. 공급된 탈수케이크는 이송 관 내에서 혼합된 후 공기유속 증폭기(Air ejector)를 고속으로 통과함으로써 슬러지 입자에 포함된 수분은 높은 속도에 의한 분사 및 충격 등의 물리적인 에너지로 인하여 표면의 부착수와 간극수 일부가 탈리하게 된다.<sup>5)</sup> 2 단계에서 공기 이송 관과 유속증폭기를 통과한 슬러지는 본 기술의 직렬 연속 설치된 Hydro-cyclone으로 유입되며, 다단 Cyclone은 높은 건조효율을 얻기 위하여 원통부의 내부에 입자간의 활발한 충돌을 유발시키기 위한 난류발생장치가 설치된다. 사이클론 내부의 Vortex유동과 원심력에 의해 하부로 벽면을 타고 선회 하강한 슬러지 입자들이 역 와동 유동(Reverse Vortex Flow)의 선회류 스트로틀에 의해 활발한 입자의 유동

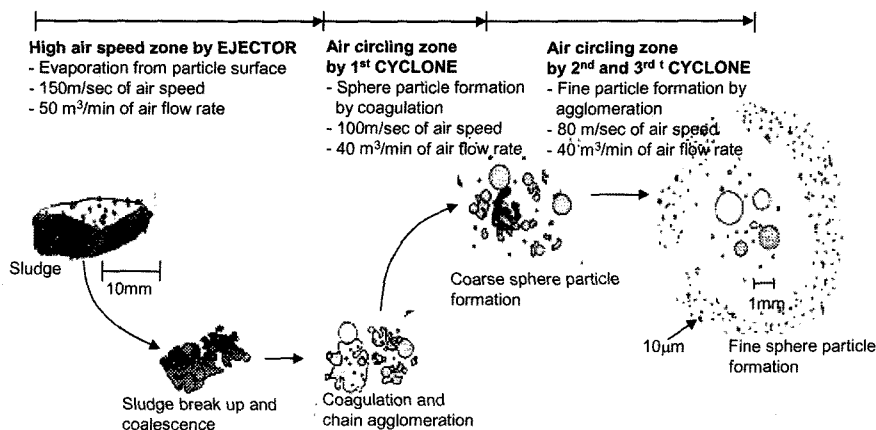


Fig. 2. Particle formation mechanism at the air jet dryer.

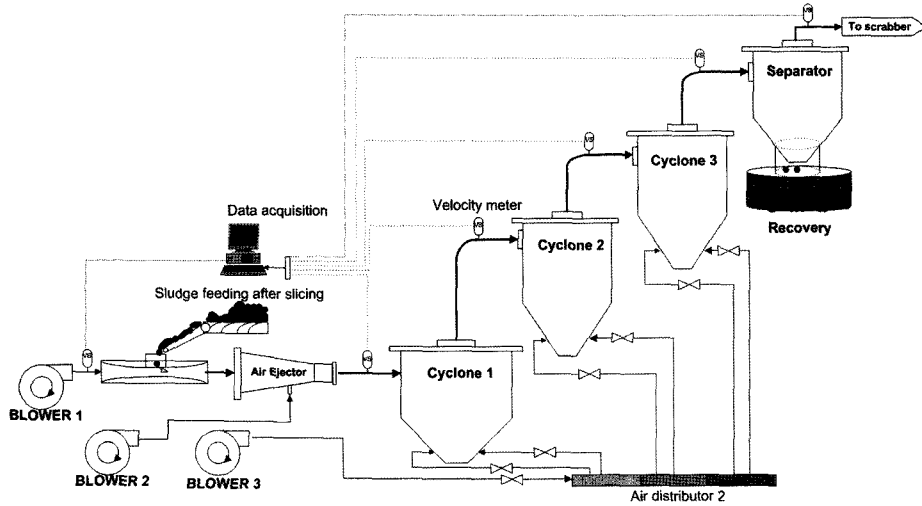


Fig. 3. Schematic diagram of air dryer using air ejector and multi cyclone.

Table 1. Experimental conditions of air jet dryer

Variables		Unit	Spec. and Value
Design Variables	Diameter of Air Ejector	mm	70
	H/D of Cyclone	-	0.18
Operating Variables	Retention Time	min	6
	Air Pressure	kg/cm <sup>2</sup>	0.1
	Air Flow Rate	m <sup>3</sup> /min	30
	Air Velocity	m/sec	80
	Average Temperature	°C	45
	Cake Supply	kg/min	1.0
Wastewater Sludge	Initial Water Content	wt%	82.5
	Organic Content	wt%	55.5
	Cake Temperature	°C	10

이 촉진되고, 하부 스톨로부터 발생한 선회류의 중심방향에서 발생한 부압에 의한 상승기류를 타고 건조된 슬러지입자는 다음단계의 사이클론 건조기로 이송되어 2, 3차 연속 건조가 이루어진다. 건조된 슬러지를 함유한 공기는 최종단계로 사이클론 분리기에서 분리되어 습 공기는 상부로 배출되고 건조분말은 하부로 하강 배출된다. 이때 탈수 케이크가 공급된 후 분말로 생산되는 체류시간(Retention Time)은 6분이다. 본 장치는 (1) 고속 유동장에 의한 압축 및 충돌에 의한 에너지의 전달 (2) 주입 유량에 따른 공기유속에 의한 사이클론 내부 압력강하의 저온건조조건 (3) 건조한 주입공기와 탈리된 수분으로 인한 사이클론 내부의 상대 습도 차에 의한 제습건조에 의해 건조되며 건조성능은 슬러지의 재료성상 및 초기 함수율에 따라 결정된다.

### 3.2. 실험방법

탈수장치로부터 생산된 상·하수 탈수케이크에 대하여 공기 건조장치를 이용하여 건조 특성을 평가하였다. 장치의 각 부위에 장착된 센서를 통해 풍속, 풍량, 온도를 측정하였다. 약 15분간 공회전하여 유동 공기의 상태가 안정화되면 분당

1.0 kg/min의 양으로 30분간 탈수 케이크를 투입하여 건조 분말을 생산한다. 생산된 건조분말의 무게를 측정후 200 g 표본 추출하여 체가름 장치를 통해 6단계로 선별한다. 선별된 분말에 대하여 각각 무게와 함수율을 측정하여 평균 입도 및 함수율을 평가하는 자료로 활용한다. 공기 건조 전의 탈수 케이크와 공기로 생산되는 건조분말의 함수율은 “KS F 2306”의 방법으로 측정하였다. 시료를 투입하기 전 약 15분 동안 장치를 공회전 시켜 공기 유동 조건(압력, 유량, 속도, 온도) 측정하였으며 공기 유동 조건을 안정화 시켰다. 건조분말은 회수시간은 30분으로 하였다. 분리를 통해 회수된 건조분말에 대하여 입자 크기별 분류하여 평균입경, 평균함수율, 회수율, 수분제거율, 공기소모량 등을 계산하여 분석하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 장치의 공기 유동 조건 및 측정 평가

Fig. 3에서 설명한 바와 같이 공기건조장치의 유동 특성을 평가하기 위해 유속, 유량 온도를 장치의 11곳에서 측정하였다. Table 2는 장치의 각 위치별(Air Ejector, 사이클론, 분리기) 유속과 유량을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 송풍기로부터 사이클론 유입까지, 즉 Air Ejector의 유속은 80~65 m/sec로 분포하며, 사이클론과 분리기에서의 유속은 35~10 m/sec이다. Air Ejector에서의 평균 유량은 37~30 m<sup>3</sup>/min이고 사이클론에서의 유량은 28~25 m<sup>3</sup>/min 각 사이클론 사이의 연결관에서의 유량은 10 m<sup>3</sup>/min 이하였다. 그리고 분리기에서는 유량이 약 70 m<sup>3</sup>/min까지 상승하였다. 이와 같이 유량이 장치의 각 위치에서 변하는 이유는 유량이 장치의 각 위치에서 변하는 이유는 Air ejector, 이송 관, 사이클론 및 연결관의 관경이 각각 다르고 분리기로 부터 영향을 받은 압력 때문인 것으로 분석된다. 즉 분리기는 대기와 직접 접촉하고 있으므로 압력이 가장 낮으며, 사이클론, Air ejector로 가면서 압력은 지속적으로 높아진다. 이와 같이 장치 내부의

**Table 2.** Average air velocity and flow rate

Point of test Measure items	Air Ejector		Cyclone					Separator			
	DP-1	DP-2	DP-3	DP-4	DP-5	DP-6	DP-7	DP-8	DP-9	DP-10	DP-11
Air velocity(m/sec)	80	65	35	27	5	13	5	14	8	10	7
Air flow rate(m <sup>3</sup> /min)	37	30	16	29	6	26	10	42	61	79	54

Note ; DP-1: rear side of air ejector, DP-2: rear side of transport pipe, DP-3: 1st cyclone, DP-4: rear side of 1st cyclone, DP-5: 2nd cyclone, DP-6: rear side of 2nd cyclone, DP-7: 3rd cyclone, DP-8: rear side of 3rd cyclone, DP-9: upper side of separator, DP-10: lower side of separator, DP-11: outlet of separator

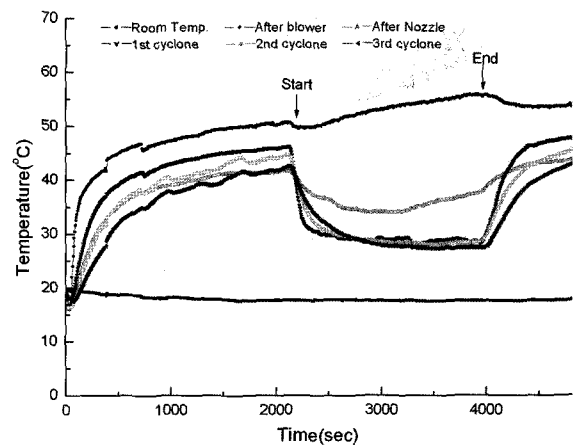
각 지점별 압력의 변화에 의한 영향으로 유량이 변화하게 되는 것이다. 2절의 공기건조 메카니즘에서 설명한 바와 같이 탈수 케이크 입자의 파쇄와 입자 표면의 수분 건조를 유도한다. 즉 유속이 빠를수록 케이크 입자간의 파쇄가 잘 되고, 이에 따라 입자의 크기가 작아져 결국 입자 표면의 수분 증발을 잘 유도한다. 시스템 내 공기 유량은 입자의 표면으로부터 증발되는 수분을 함유한다. 시스템 내로 공급하는 공기의 유량이 클수록 파쇄된 케이크 입자의 표면으로부터 많은 양의 수분을 증발시킬 수 있다. 유속 및 유량의 측정값과 공기건조의 메카니즘을 통해, Air Eject는 케이크 입자를 잘게 파쇄하여 입자의 표면으로부터 수분을 증발시키도록 유도하는 기능을 하며, 사이클론에서는 수분 증발을 가속화 시켜 함수율을 저하시키며 입자의 형상을 구형화 시킨다. 그리고 분리기에서는 입자와 공기를 분리 시켜 최종 생산품(건조분말)을 회수한다.

시스템의 특성을 진단하는데 온도 또한 매우 중요한 역할을 한다. Table 3은 장치의 Air ejector와 사이클론 장치의 공기 온도를 측정하여 나타낸 것으로 시료 투입 전·후 온도 변화를 비교하였다. Air Ejector에서의 온도는 약 45℃, 사이클론에서의 온도는 약 35℃ 정도 인데, 시료를 투입하였을 때, Air Ejector의 온도는 변화가 없으나 사이클론에서는 온도가 약 7℃ 정도 감소하였다. 그 이유는 사이클론에서 수분의 증발이 많기 때문에 나타나는 현상을 반증한다. Fig. 4는 공기건조장치를 운전할 때의 온도 분포 변화를 나타낸 것으로, 공회전 시 온도는 일정하게 상승하다가 균일하게 유지되었지만, 시료를 투입하는 순간 시스템 각 부위의 온도는 급격히 하강하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 현상이 발생하는 이유는 슬러지가 장치내로 투입되자 수분 증발이 발생되고, 그 수분의 영향에 의해 온도가 급격히 하강하는 현상이다. 공기 건조 장치의 건조 성능에 영향을 미치는 인자는 공기유량, 공기 속도 그리고 공기온도이다. 공기 유량과 속도는 Blower에 의해 결정되는 인자 이지만 공기 온도는 투입되는 케이크의 온도와 주변 공기 온도에 의해 결정되므로 환경적인 인자에 영향을 많이 받는다. 본 시스템이 환경적인 온도 변화에 영향을 받지 않고 안정적으로 장치를 운용하기 위해서는 공기 유량이 중요한 작용한다. 즉 온도가 낮을 경우 풍량을 증가시켜야 하며, 주변의 온도가 높을 경우 상대적으로 풍량을 줄여도 저함수율 분말 건조를 생산할 수 있다. 따라서 이와 같은 운전 조건을 결정하기 위해 온도 분포를 측정하여야 한다.

**Table 3.** Temperature distribution of air ejector

Point of test Measure items	Air Ejector			Cyclone		
	TP-1	TP-2	TP-3	TP-3	TP-3	TP-3
Average temp. before feeding cake(℃)	18	46	37	41	38	35
Average temp. before after cake(℃)	18	53	36	30	30	30

Note ; TP-1: rear side of blower, TP-2: rear side of air ejector, TP-3: rear side of 1st cyclone, TP-4: rear side of 2nd cyclone, TP-5: rear side of 3rd cyclone



**Fig. 4.** Temperature distribution of air jet dryer.

**4.2. 건조분말의 함수율과 입도의 관계**

탈수 케이크를 공기건조하면 Fig. 2에서 분석한 바와 같이 입자간의 충돌 현상에 의한 Aggregation과 Coagulation에 의해 유착 또는 분리 과정을 반복하면서 구형의 입자로 된다. Fig. 5는 공기 건조장치를 통해 생산된 건조분말의 형상을 나타낸 것이다. 입도는 0.5 mm 이하의 작은 입자와 4 mm 이상의 큰 구형 입자까지 다양하게 분포하고 있는데, 2 mm 정도 크기 입자가 가장 많이 분포하고 있다. 함수율은 이들 크기가 다른 입자에 대하여 6단계로 분류하여 각각의 함수율을 측정 후 평균함수율을 구하였다. Table 4와 Fig. 6은 공기건조장치를 이용하여 상수와 하수 슬러지 탈수 케이크를 건조하여 생산한 건조분말을 체가름하여 6단계로 입도별 분류한 다음 함수율을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 하수 슬러지의 탈수 케이크로부터 생산된 건조분말의 크기가 4 mm 이상되는 입자의 함수율은 67.2 wt%이며, 입자의 크기가 감소할수록 함수율은 점점 감소하여 0.5 mm 이하의 미세 입

자의 경우 함수율은 34.2 wt%로 감소하였다. 즉 건조 분말의 크기가 작을수록 감소한다. 그 이유는 공기건조 메커니즘에서 분석한 바와 같이, 공기건조는 케이크가 고속 공기 유동장에서 파쇄되고, 선회 유동장에서 Aggregate되는 과정을 반복하면서 건조되는데, 이때 입자의 파쇄정도가 클수록 건조 성능은 향상되기 때문이다. 상수 슬러지로부터 생산된 건조분말의 함수율은, 입도의 크기가 4 mm 이상일 경우 50.9 wt%이며, 하수 슬러지의 경우와 마찬가지로 입자의 크기가 작아질수록 함수율이 감소하여 입자 크기가 0.5 mm 이하에서 38.3 wt%로 분석되었다. 입자 크기와 회수된 량 그리고 함수율의 자료를 바탕으로 평균 함수율을 계산한 결과 하수 슬러지는 62.2 wt%, 상수 슬러지는 47.5 wt%로 분석되었다. Fig. 6은 하수 슬러지와 상수 슬러지로부터 생산된 건조분말에 대하여 입자의 크기에 따른 함수율 변화를 비교한 것이다. 각각의 초기 함수율이 82.5, 83.4 wt%인 점을 고려하면 상수 슬러지의 건조 성능이 하수 슬러지에 비하여 우수하다는 것을 파악할 수 있다. 그 이유는 상수 슬러지의 경우 유기물 함량이 약 24 wt%이고 하수 슬러지는 50 wt% 이상 되며, SiO<sub>2</sub> 함량의 비율도 상수 슬러지가 하수 슬러지에 비하여 2배 이상 많다.<sup>6)</sup> 공기건조시 SiO<sub>2</sub>함량은 고속유동장에서 입자의 파쇄성을 강화시키며, 유기물은 선회유동장에서 입자간의 충돌에 의한 유착 특성을 강화시킨다. 즉 SiO<sub>2</sub>함량이 높을수록, 유기물의 함량이 낮을수록 건조분말의 크기는 작아져 결국 저 함수율 분말을 생산할 수 있는 것이다.

Table 4. Water content as particle size of dried powder

Size of dried powder(mm)	Wastewater sludge		Waterworks sludge	
	Percentage	Water content (wt%)	Percentage	Water content (wt%)
4.0-6.0	12.25	67.2	7.22	50.9
2.8-4.0	17.81	67.1	12.71	50.8
2.0-2.8	25.73	61.6	37.17	49.8
1.0-2.0	33.96	61.2	34.04	49.6
0.5-1.0	8.24	56.8	15.5	42.2
0.3-0.5	2.01	34.2	1.64	38.3

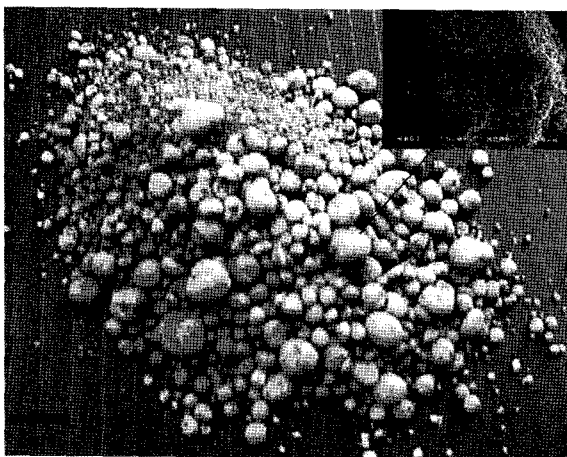


Fig. 5. Shapes of dried powder.

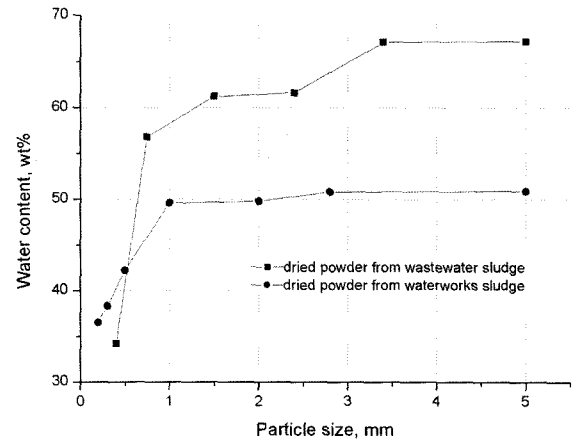


Fig. 6. Comparison of water content for dried powder from wastewater and waterworks sludge.

### 4.3. 건조분말의 입도분포 특성

본 연구에서 건조분말의 입도는 매우 중요한 인자로서, 장치의 성능을 간접적으로 판단할 수 있는 기준이 되며 또한 4-2절에서 설명한 바와 같이 건조분말의 함수율과 직접적인 관계가 있다. Table 5와 Fig. 7은 하수와 상수 슬러지로부터 생산된 건조분말에 대하여 체가름으로 입자를 분류하여 평균 입경을 구한 것이다. 체가름의 대표 입경은 5, 3.4, 2.4, 1.5, 0.75, 0.4, 0.25 mm이다. 하수 슬러지로부터 생산된 분말의 대표 직경에 해당하는 질량은 각각 24.1, 35.05, 50.61, 66.82, 16.22, 3.88, 0.09 g로 측정되었다. 각 질량(mi)에 대표직경 dmi를 곱해 총질량(M)으로 나누면 입자의 크기(dmm)가 구해진다. 이들 각 입자의 크기를 더해 체가름 단계(7단계)로 나누면 평균 입경을 구하는데, 아래와 같다.<sup>7)</sup>

$$dmm = \frac{\sum mid_i}{M} \quad (1)$$

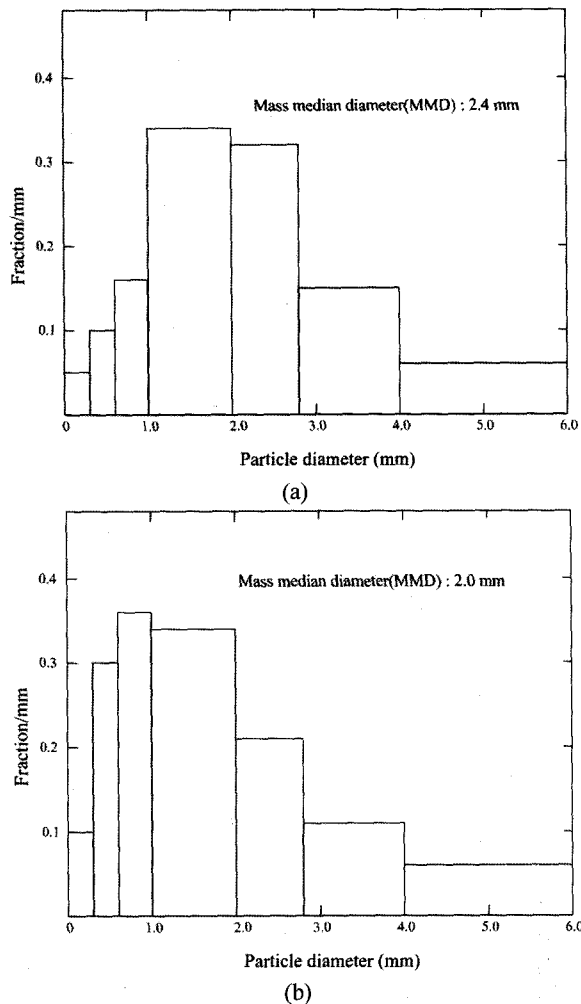
하수 슬러지로부터 생산된 건조분말의 평균 입경은 2.4 mm 이고, 상수 슬러지 건조분말의 평균 입경은 2.1 mm로 분석되었다. 즉 하수 슬러지로부터 생산된 건조분말의 입경이 상수 슬러지의 경우에 비하여 크다. Fig. 7은 하수와 상수 슬러지의 입도분포 변화를 나타낸 것인데, 2.0 mm를 기준으로 비교할 때 이 크기 이하의 입자 크기가 많이 분포하고 있는데, 특히 상수 슬러지 건조분말의 경우 1.0 mm 이하의 미세 입자 분포량이 하수 슬러지에 비하여 상대적으로 많다. 이와 같은 결과를 바탕으로 볼 때, 상수 슬러지는 상대적으로 공기건조장치에 적합한 물질이라는 것을 알 수 있다. 상수 슬러지는 하수 슬러지에 비하여 유기물 함량이 낮을 뿐만 아니라, SiO<sub>2</sub>함량이 상대적으로 많은 특성이 있다.<sup>1,8)</sup> 슬러지가 공기 건조될 때 고속유동장에서는 파쇄되고 선회 유동장에서는 입자간의 충돌에 의해 Aggregate되면서 Fig. 5에서 보는 바와 같이 구형의 입자로 만들어진다. 슬러지에 함유되어 있는 무기물과 SiO<sub>2</sub>함량은 입자의 파쇄와 성형에 영향을 미치는 주요 인자이다. 즉 무기물과 SiO<sub>2</sub>함량이 높을수록 고속 유동장에서 파쇄 성능은 뛰어나기 때문에 미세 입자를 형성하는데, 입자가 잘게 부서지면 입자의 표면으로부터 수분 배

출이 용이 하므로 결국 저 함수율 건조 분말을 만드는 것이다. 따라서 하수 슬러지는 무기물과 SiO<sub>2</sub> 함량이 상수 슬러지에 비하여 상대적으로 낮기 때문에 공기건조기로부터 생산된 건조분말의 입자가 크고 함수율이 낮다. 건조분말의 크기가 2~2.5 mm이고 형상이 구형인 점을 고려하면, 복토재 또는 성토재료의 재활용시 매우 용이한 장점이 있다.

**Table 5.** Particle size of dried powder from wastewater sludge

median diameter(mm),dmi	Wastewater sludge		Waterworks sludge	
	mass(g), mi	dmmi	mass(g), mi	dmmi
5	24.1	0.61	14.25	0.36
3.4	35.05	0.6	25.08	0.43
2.4	50.61	0.621	50.7	0.62
1.5	66.82	0.51	73.36	0.56
0.75	16.22	0.06	30.59	0.12
0.4	3.88	0.007	3.21	0.01
0.25	0.09	0.000114	0.17	0.00021
MMD(mm), dmm	2.4		2.1	

Note : dmm =  $\sum \text{midi}/M$ , MMD : Mass Median Diameter



**Fig. 7.** Particle size distribution of dried powder: (a) wastewater sludge, (b) waterworks sludge.

**4.4. 건조분말의 생산성 평가**

슬러지 건조분말의 생산성을 평가하기 위해 장치 공회전-탈수케이크 공급 - 장치 내 입자의 체류시간-건조분말 회수 등의 과정을 통해 건조분말을 생산하였다. 공급된 하수 슬러지의 탈수 케이크 함수율이 82.5 wt%인 탈수 케이크를 1.0 kg/min로 30분간 총 30 kg을 공급하여 13.389 kg을 회수하였으며, 이때의 건조 분말 함수율은 62.3 wt%이었다. 이와 같은 자료를 바탕으로 공기건조장치에 공급한 탈수 케이크의 Dry Solid(DS)량은 5.25 DS kg이고 회수한 건조분말 량은 5.05 DS kg이므로 회수율은 96.2%로 분석되었다. 상수 슬러지의 경우 공급된 탈수 케이크의 Dry Solid(DS)량은 4.98 DS kg이고 회수한 건조분말 량은 4.6 DS kg으로 회수율이 92.2%로 하수 슬러지에 비하여 상대적으로 낮았다. 그 이유는 입도의 크기와 관련이 있다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 상수 슬러지로부터 생산된 건조 분말은 1 mm 이하의 입도가 하수 슬러지의 건조분말에 비하여 상대적으로 많다. 따라서 미세 분말이 Fig. 3의 분리기의 하부로 회수되지 못하고 공기를 따라 일부 배출되었기 때문으로 분석되었다.

Table 6은 탈수 케이크를 공기 건조하였을 때 수분제거율과 공기 소모량을 계산한 결과를 정리한 것이다. 공기의 평균 유량이 30 m<sup>3</sup>/min이고, 하수 슬러지 탈수 케이크 공급량은 0.175 DS kg/min이다. 슬러지 처리량에 따른 공기량을 계산(30 ÷ 0.175 = 170 m<sup>3</sup>/DS kg)하면 170 m<sup>3</sup>/DS kg을 얻을 수 있다. 이와 같은 방법으로 상수 슬러지에 대하여 계산하여 180 m<sup>3</sup>/DS kg을 얻었다. 이와 같이 상수 슬러지를 건조하는데 소비되는 공기 소모량이 많은 이유는 하수 슬러지에 비하여 입자의 표면으로부터 수분 배출량이 많기 때문으로 분석할 수 있다. 이를 뒷받침 할 수 있는 정량적인 관계 값은 수분 제거율로 평가 할 수 있다. Table 6은 하수 및 상수 슬러지 탈수 케이크로 공기 건조하였을 때 수분제거율을 분석한 결과이다. 공급한 탈수 케이크 25 kg으로부터 제거된 수분량은 하수슬러지의 경우 16.41 kg, 상수 슬러지의 경우 20.3 kg으로 측정되었으며, 이를 바탕으로 수분 제거율을 분석한 결과 하수 슬러지는 0.1 H<sub>2</sub>OΔkg/min · DS kg이고 상수 슬러지는 0.13 H<sub>2</sub>OΔkg/min · DS kg의 결과를 얻었다. 즉 상수 슬러지의 수분 제거율은 하수 슬러지에 비하여 약 30% 증가하였다. 이는 입자의 크기와 함수율의 관계를 비교한 결과와 같은 경향을 보인다. 슬러지의 성분, 함수율, 입도, 수분제거율의 관계를 요약하면, 상수 슬러지는 하수 슬러지에 비하여 무기물과 SiO<sub>2</sub> 함량이 높아 고속유동장에서 파쇄가 잘되고 입자의 표면으로부터 수분 제거율이 하수 슬러지에 비하여 약 30% 우수하여 입자의 크기가 작고 함수율이 낮은 건조분말을 생산이 가능하였다. 공기건조장치에서 정수 슬러지의 수분 제거율이 우수하므로 상대적으로 공기 소모량이 많은 역학적 관계가 형성된다.

Table 7은 공기 건조장치를 이용하여 하수 및 상수 탈수 케이크를 건조하였을 때 도출된 결과를 요약한 것이다. 동일량(1.0 kg/min)을 공급하였을 때 하수 슬러지의 경우 함수율 62.3 wt%의 건조분말을 13.4 kg 회수하였으며 이때 평균입

**Table 6.** Water removal rate for dewatered cake

Items of performance	Wastewater sludge	Waterworks sludge
Water mass of feeding cake(kg)	24.75	25
Water mass of dried powder(kg)	8.34	4.7
removal amount(kg)	16.41	20.3
removal amount per(kg/min)	0.547	0.67
Water removal rate (H <sub>2</sub> O Δkg/min · DS kg)	0.1	0.13

**Table 7.** The performance results of air jet dryer

Items of performance	Dried powder from wastewater sludge	Dried powder waterworks sludge
Weight of dried power(kg)	13.4	9.2
MMD of dried powder(mm)	2.41	2.1
Water content of dried power(wt%)	62.2	47.5
Water removal rate (H <sub>2</sub> O Δkg/min · DS kg)	0.1	0.13
Air consumption(m <sup>3</sup> /DS kg)	170	180

경은 2.41 mm이고 수분제거율은 0.1 H<sub>2</sub>O Δkg/min · DS kg, 그리고 공기소모량은 170 m<sup>3</sup>/DS kg로 분석되었다. 상수 슬러지의 경우 하수 슬러지에 비해 건조분말의 함유율 47.5 wt%로 약 30% 감소하였으며, 공기소모량은 6% 증가하였다. 따라서 본 장치는 하수 슬러지에 비하여 상수 슬러지의 탈수 케이크를 건조할 때 효율적이다. 뿐만 아니라 본 장치는 슬러지 탈수 케이크에 대하여 열을 가하지 않고 공기량만으로 건조하여 수분을 감량시켜, 슬러지를 재활용 가능한 물질로 생산하는데 매우 효과적인 장치로 평가할 수 있다.

### 5. 결론

하수 및 상수 처리공정에서 발생하는 탈수케이크의 감량화와 재활용을 위한 방안으로 공기건조장치를 구축하여 건조 성능평가를 수행한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 공기 속도 80 m/sec, 공기유량 30 m<sup>3</sup>/min의 공기로 상수 및 하수 처리 공정으로부터 발생하는 탈수 케이크를 건조하는 공기 건조장치를 구축하였으며, 고속 및 선회 공기 유동장에서 탈수 케이크가 구형의 미세 입자로 성형되는 공기 건조 메카니즘을 정리하였다.
- 2) 공기 건조장치는 열을 가하지 않고 탈수 케이크의 표면으로부터 수분을 기화시켜 건조하는 것으로 평균 공기 온도는

는 약 40℃ 정도이다. 이는 기존 건조장치가 대부분 열을 이용한다는 점과 비교하면 매우 경제적인 방법인 것으로 평가한다.

3) 하수 슬러지의 탈수 케이크에 대하여 공기 건조하였을 때, 4 mm 이상 되는 입자의 함유율은 67.3 wt%이며, 입자의 크기가 감소할수록 함유율은 점점 감소하여 0.5 mm 이하의 미세 입자의 경우 함유율은 34.2 wt%로 감소하였다. 그리고 건조분말의 평균 함유율은 62.2 wt%이고, 상수 슬러지의 평균 함유율은 47.5 wt%로 분석되었다.

4) 하수 슬러지로부터 생산된 건조분말의 평균 입경은 2.4 mm이고, 상수 슬러지 건조분말의 평균 입경은 2.1 mm로 약 13% 감소하였는데 그 이유는 상수 슬러지에 함유되어 있는 무기물과 SiO<sub>2</sub> 함량이 높아 고속유동장에서 파쇄 성능이 뛰어나기 때문에 미세 입자의 형성에 유리한 조건을 갖추고 있기 때문이다.

5) 동일량(1.0 kg/min)의 탈수케이크를 공기건조장치를 통해 건조하였을 때, 하수 슬러지의 경우 수분제거율은 0.1 H<sub>2</sub>O Δkg/min · DS kg, 공기소모량은 170 m<sup>3</sup>/DS kg로 분석되었으며 상수 슬러지는 수분제거율이 30% 증가한 0.13 H<sub>2</sub>O Δkg/min · DS kg이고 공기소모량은 6% 증가한 180 m<sup>3</sup>/DS kg으로 분석되었다. 따라서 본 장치는 하수 슬러지에 비하여 상수 슬러지의 탈수 케이크를 건조할 때 효율적이며 열을 가하지 않고 공기만으로 건조하여 수분을 감량시키기 때문에 경제적인 슬러지 처리 방법으로 평가한다.

### 참고문헌

1. 이정연, "하수슬러지의 탈수를 향상을 위한 열 탈수 연구," 대한환경공학회지, **26**(5), 601~609(2004).
2. Kudara, T., Mujumdar, A. S., "Advanced Drying Technologies," Marcel Dekker INC., New York, pp. 49~67(2002).
3. 中村 正秋, 立元 雄治, "乾燥技術," 工業調査會, pp. 18~23(2005).
4. Flagan, R. C., Seinfeld, J. H., "Fundamentals of Air Pollution Engineering," Prentice Hall, New Jersey, pp. 358~370(1998).
5. Svarovsky, L., "Solid-Liquid Separation," Butterworth & Co., pp. 202~213(1990).
6. 이정연, "정수슬러지의 특성이 탈수성능에 미치는 영향," 대한환경공학회지, **25**(8), 1059~1066(2003).
7. Hinds, W. C., "Aerosol Technology-Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles," A Wiley-Interscience Publication, New York, 69~103(1982).
8. 이정연, "혼합 슬러지의 탈수성에 관한 연구," 대한환경공학회지, **26**(8), 925~932(2004).