

회전건조기에서 슬러지 입자의 열전달 특성 연구

전원표, 이기우, 박기호, 이계중, 이옥현, 황희우
한국에너지기술연구원

A study on the heat transfer characteristics of sludge particles in rotary dryer

W. P. Chün, K. W. Lee, K. H. Park, K. J. Lee, W. H. Lee, H. W. Hwang
Korea Institute of Energy Research

1. 서 론

회전건조기는 원통 드럼에 적당한 경사를 주고 드럼의 회전을 이용하여 향류식(Count current flow) 또는 병류식(Co-current flow)의 열풍을 공급시켜 드럼내 피건조물이 리프터(Lifter)에 의해 위로 올려졌다가 커튼상으로 자유낙하 하는 동안에 열풍과 접촉을 반복하면서 건조가 이루어지는 대류전열방식의 건조기이다. 회전건조기는 구조가 간단하고 조작이 연속적이며, 대용량처리가 용이한 잇점이 있다. 또한 피건조물의 성상변화 및 처리량 변동에 대한 순응성이 크기 때문에 수지칩, 결정염류, 설탕, 비료, 석탄, 모래 및 시멘트 등의 입자 건조에 널리 사용되고 있다.

일반적으로 회전건조기에서의 건조과정은 입자로의 열전달, 입자내부에서 외부표면으로 이동하는 수분의 물질전달 및 입자표면에서 증기의 탈리 등 복잡한 과정이 동시에 진행되며, 가열온도, 열전달계수, 수증기 분압과 피건조물 표면의 수분과의 부분 압력차, 열전도면적, 얇은 막두께 등의 변수들이 서로 연관되어 있다. 회전건조기에 대한 기존의 연구는 주로 기하학적 구조에 따른 열풍과 입자의 상호작용에 의한 물질이동속도, 체류시간 및 열전달에 관한 수치해석 및 실험적 연구가 추진되었다^{1)~6)}.

본 연구에서는 주정박 및 대두박 등의 유기성 슬러지 입자의 열전달 특성을 파악하여 설계자료로 활용하기 위해 회전건조기에서 열풍조건, 초기함수율 및 입자크기 등에 따른 건조 특성 실험을 통해 열 및 물질전달 특성을 파악하고, 건조속도에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 회전건조기 이론

2.1 입자이동과 열풍흐름의 상호작용

회전건조기내에서의 입자이동과 열풍흐름의 상호관계는 [그림 1]에 나타난 바와 같이 입자의 이동은 리프터에 의해 굽어 올려져 드럼의 회전에 의해 다시 낙하하면서 열풍흐름 방향으로 이동한다. 따라서 입자의 이동은 중력에 의해 낙하하는 힘(F_g)과 열풍에 의한 저항력(F_d)에 의해 영향을 받는다. 먼저 입자가 중력에 의해 낙하하는 힘에 대한 운동방정식은 다음 식으로 표현할 수 있다⁶⁾.

$$F_g = \frac{\pi a_p^3}{6} \rho_p g \quad (1)$$

여기서 d_p 는 입자의 직경(mm), ρ_p 는 입자의 밀도(kg/cm³), g 는 중력가속도(kg·m/sec²)이다. 또한 축방향의 공기에 의한 영향을 무시한다고 가정하면, 열풍흐름에 대한 저항력은 다음과 같이 표시된다.

$$F_d = \frac{\pi d_p^2}{4} \rho_a v_a^2 C_D \quad (2)$$

여기서 ρ_a 는 공기의 밀도(kg/cm³), v_a 는 열풍의 속도(m/sec), C_D 는 항력계수이다. 상기의 식에서 축방향의 입자이동 방정식을 Newton의 제 2법칙을 적용하면, 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\pi d_p^3}{6} \rho_p \frac{dv_z}{dt} = \frac{\pi d_p^3}{6} \rho_p g \sin \alpha + \frac{\pi d_p^2}{4} \rho_a v_a^2 C_D \quad (3)$$

2.2 열전달 관계식

회전건조기내에서의 입자의 열전달에 영향을 미치는 인자는 드럼의 직경, 드럼의 길이, 드럼의 회전수, 리프터의 수 등 기하학적 구조와 열풍속도에 의해 영향을 받으며, 회전드럼내에서의 열풍의 흐름과 입자의 접촉에 의한 전열속도식은 실험적으로 다음과 같은 기본 식으로 표현할 수 있다¹⁰⁾.

$$q = 0.374LD \left(\frac{N-1}{2} \right) \Delta t_{lm} G^{0.46} \quad (4)$$

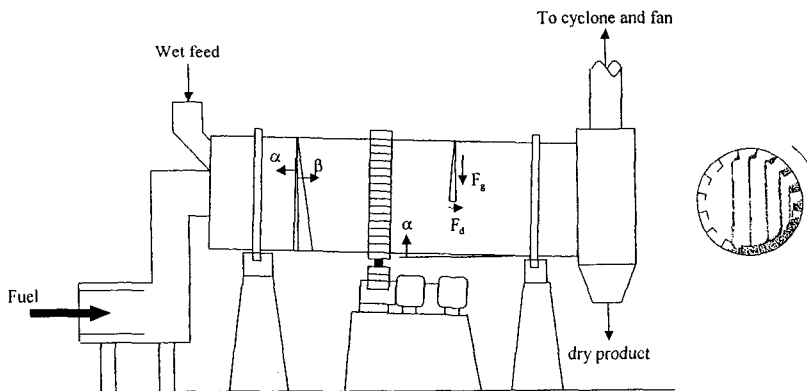
여기서 q 는 입자의 전열속도(kcal/hr), L 은 드럼의 길이(m), D 는 드럼의 직경(m), N 은 리프터의 수, G 는 단위면적당 열풍속도(kg/hr·m²)이며, Δt_{lm} 은 대수평균온도차(°C)로서 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$\Delta t_{lm} = \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{t_1 - t_w}{t_2 - t_w}} \quad (5)$$

또한 회전건조기내의 입자와 열풍흐름의 상호작용에 의한 총괄전열계수는 기하학적 구조를 고려하여 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$U_a = kLDG^n \quad (6)$$

여기서 k 는 리프터의 구조, 굵기용량, 드럼의 회전수, 시료의 공급량 등을 고려한 실험상수이다.



[그림 1] 회전건조기의 구조 및 입자의 이동

3. 실험장치 및 방법

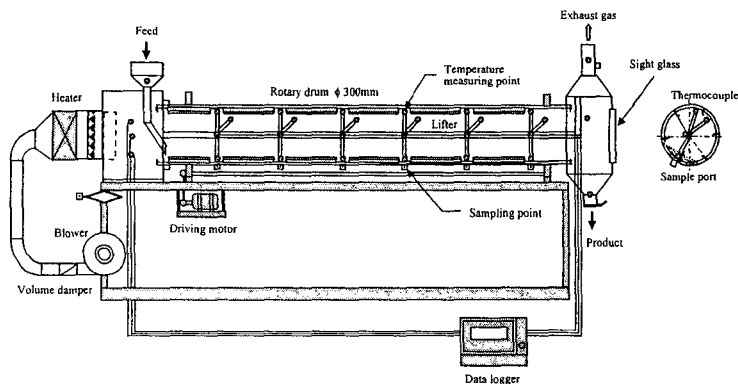
3.1 실험장치

본 연구에서 슬러지 입자의 건조특성을 파악하기 위한 실험장치는 [그림 2]와 같이 열풍 발생부, 투입부, 회전건조부, 배출부 및 배기부 등으로 구성하였다. [그림 2]에서 회전드럼의 크기는 $\phi 300 \times L 2,000 \text{mm}$ 로 두께 7mm의 탄소강으로 제작하였으며, 회전드럼의 내부에는 크기 $40 \times 280 \text{mm}$ 의 리프터를 6개씩 6열로 총 36개를 설치하였다. 감속모터(1/4hp, 90rpm)에 의해 구동되는 드럼의 회전수를 2~10rpm까지 조절할 수 있도록 인버터를 설치하였으며, 입자의 체류시간에 대한 영향을 조사하기 위해 드럼의 경사도를 1~8°까지 조절할 수 있도록 기울기 조절장치(Inclination adjustment)를 설치하였다. 또한 열풍발생기는 전기히터를 사용하였으며, 9kW 용량의 히터 2대를 설치하였으며, 열풍의 입구온도를 150~300°C까지 조절할 수 있도록 디지털 온도조절기를 부착하였다. 외기공기 공급용 송풍기(10.8m³/min, 490W)는 송풍량을 조절하기 위해 풍량조절 댐퍼를 설치하였으며, 송풍기 입구에는 흡입공기량을 측정하기 위해 마이크로마노메타를 설치하였다.

회전드럼 내에서 슬러지 입자의 각 구간에서의 함수율 변화를 측정하기 위해 회전드럼의 입구로부터 300mm간격으로 $\phi 25 \text{mm}$ 의 Sampling port를 6군데 설치하였으며, 배출구의 측면에는 강화유리를 부착하여 입자의 유동현상을 관찰할 수 있도록 하였다. 한편 회전건조기내에서의 온도변화를 측정하기 위해 [그림 2]의 실험장치에서 열풍의 입구 및 출구덕트에 k형 열전대를 6곳에 설치하였으며, 드럼내부의 구간별 열풍 및 시료의 온도를 측정하기 위해 드럼의 상부, 중앙부 및 하부측면 등에 k형 열전대를 24곳에 설치하였다.

3.2 실험방법

실험시료는 대두박(평균입자크기 89 μm) 및 주정박(평균입자크기 0.9mm) 등의 유기성 슬러지 입자를 사용하였으며, 적절한 수분조절을 통하여 초기함수율을 35~55%W.B.로 조절하고 공급량을 0.6~0.85kg/min으로 투입하여 실험장치의 운전조건을 다양하게 변화시켜 실험하였다. 본 실험에서 열풍발생기의 열풍입구온도는 160~300°C, 열풍속도는 2.4~3.75m³/min, 드럼의 경사도는 2~5°, 드럼의 회전수는 2~5rpm으로 조절하여 실험하였다. 실험조건에 따라 드럼내의 온도가 정상상태에 도달하였을 때, 시료를 투입하여 실험을 수행하였다. 건조실험과정에서 드럼내의 샘플채집은 시료투입 후, 5분 간격으로 투입구로부터 순차적으로 채집하였다. 샘플시료의 함수율 측정은 작외선 수분측정기(Kett, FD600)를 이용하였으며, 모든 샘플의 함수율 측정은 3회 측정하여 평균값을 사용하였다. 또한 습도측정은 절대습도 측정기(Vaisala, HMP235CD)를 이용하였다.



[그림 2] 건조특성 실험장치도

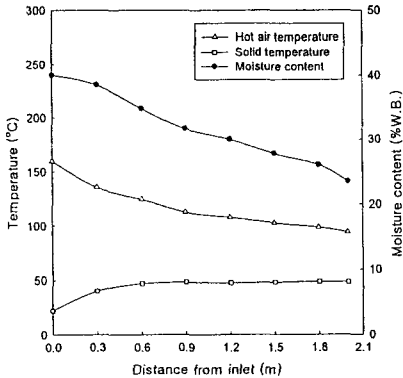
4. 실험결과 및 고찰

4.1 열풍온도에 따른 건조특성

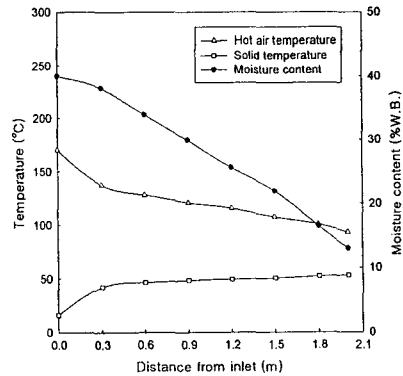
본 실험에서는 열풍온도에 따른 건조특성을 분석하기 위해 주정박 및 대두박 시료를 대상으로 하였으며, 초기함수율 35~55%W.B., 공급량 0.6~0.85kg/min, 드럼입구의 열풍속도는 2.4~3.75m³/min으로 조절하여 열풍온도를 변화시켜 실험하였다. [그림 3]은 주정박 시료에 대해 열풍의 입구온도를 160℃로 조절하여 실험한 결과이며, 드럼 입구로부터 0.3m구간에서 132.6℃로 떨어지고 0.6m구간에서는 129.5℃로 떨어졌다. 이 구간은 시료의 예열기간으로 볼 수 있으며, 열풍온도가 급격히 떨어지면서 공급열량의 대부분이 시료의 온도상승에 소비된다. 드럼 입구로부터 0.6m이후구간에서는 출구 쪽으로 건조가 진행될수록 열풍온도에 대한 기울기는 완만하게 감소하는 것으로 나타났다. 드럼의 출구쪽 배기온도는 87.2℃로 나타났으며, 출구 쪽에서의 온도가 더 낮게 떨어지는 경향은 배기 측으로의 열손실에 의한 영향으로 생각된다. [그림 3]에서 초기 투입시의 시료온도는 22℃에서 점점 온도가 상승하기 시작하여 드럼 입구로부터 0.3m구간에서 41.8℃로 나타났으며, 0.6m구간에서는 47.1℃로 상승하였다. 그 이후 구간에서는 48.4~48.7℃로 거의 일정하게 유지되었다. 따라서 드럼 입구로부터 0.6m구간은 시료의 예열기간이며, 0.6m이후 구간은 항울건조기간으로 볼 수 있다. 이 기간 동안의 함수율 변화는 직선에 가까운 곡선의 형태로 감소하는 것을 알 수 있다.

[그림 4]는 대두박 시료에 대하여 열풍온도 170℃로 조절하여 실험한 결과로써, 열풍온도는 건조가 진행되면서 드럼 입구로부터의 거리에 따라 점점 낮아지고 있으며, 주정박 시료에 대한 건조곡선과 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 함수율 변화곡선의 기울기가 주정박 시료 보다 크게 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 주정박 입자에 비해 대두박 입자의 크기가 작아 전체적인 비표면적이 크기 때문에 건조속도가 빨라지는 것으로 생각할 수 있다. 또한 열풍온도에 따른 시료의 온도변화는 주정박 시료에 비해 약간 높게 나타나고 있으며, 항울건조기간을 지나 감울건조기간으로 진입하면서 시료의 온도는 완만하게 상승하고 있다. 이 구간에서의 건조속도는 시료의 크기 및 내부적 성질에 따라 영향을 받으며, 수분증발속도는 낮아지고 시료의 온도는 지속적으로 상승하는 것을 알 수 있다.

한편 동일 운전조건에서 열풍의 가열온도를 200~300℃로 변화시켜 실험하였을 경우에도 유사한 건조특성곡선을 나타내고 있으며, 열풍온도가 높을수록 함수율 변화곡선의 기울기가 크게 낮아지고 시료의 예열기간을 지나 항울건조기간으로 진입하는 지점에서 열풍온도가 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 열풍온도가 높을수록 전열계수 값이 증가되어 보유열량이 시료입자에 빠르게 전달되어 건조속도가 빨라지는 것으로 판단된다.



[그림. 3] 열풍온도 160℃에서 주정박 시료의 건조특성 곡선



[그림. 4] 열풍온도 170℃에서 대두박 시료의 건조특성 곡선

4.2 총괄전열계수의 관계식

본 실험에서 주정박 및 대두박 등의 유기성 슬러지 시료에 대한 운전조건 변경에 따른 실험데이터를 기초로 대수평균온도차 (Δt_{lm}), 입자로의 전열량(q_m), 단위면적당의 열풍의 질량속도(G_a) 등을 계산한 결과는 <표 1>과 같다. 여기서 회전 드럼내에서의 전열량은 열손실을 제외하면 시료입자의 수분증발에 소요되므로 입구열풍의 전열량은 다음 식에 의해 계산하였다.

$$q_m = GC_p(t_1 - t_a) \quad (7)$$

본 실험에서 드럼입구의 열풍온도 200℃, 열풍속도 3.75m³/min에서 드럼의 길이에 따른 드럼 내·외부의 온도분포는 [그림 5]와 같이 측정되었으며, 이를 토대로 열손실은 6%로 계산하였다. 또한 C_p 는 열풍의 평균비열(kcal/kg℃)로서 다음 식에 의해 계산하였다.

$$C_p = 0.239 + 0.448x_a \quad (8)$$

<표 1>의 좌측 실험데이터에 의해 계산된 우측 결과를 기초로 시료입자와 열풍속도의 상호 관계에 대한 총괄전열계수는 열풍속도에 따라 [그림 6]과 같이 선형적으로 나타났으며, 이 결과로부터 총괄전열계수의 관계식을 다음과 같이 얻었다.

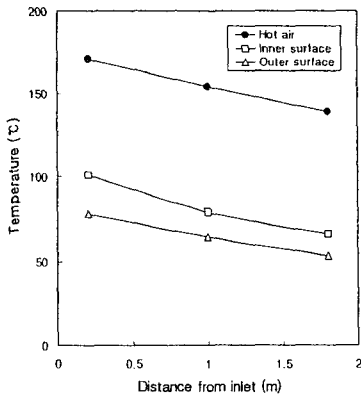
$$U_a = 0.63G_a^{0.88} \quad (9)$$

상기의 식 (9)를 식 (6)의 형태로 정리하면 다음 식으로 표현할 수 있다.

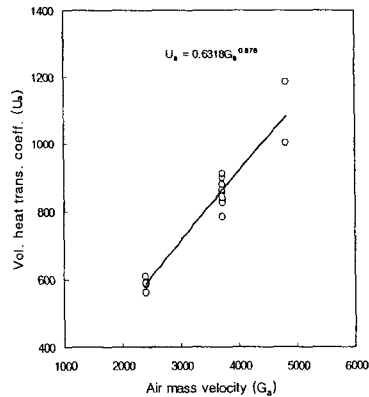
$$U_a = kLDG_a^{0.88} \quad (10)$$

여기서 $kLD = 0.63$ 으로 나타났으며, 식 (10)에 의해 k 값을 계산하여 <표 1>에 나타내었다. 본 실험장치에서 리프터의 구조, 급기용량, 드럼의 회전수, 시료의 공급량 등에 대한 실험상수 k 값은 0.93~1.12범위에 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서 도출된 총괄전열계수의 관계식과 유사한 연구결과를 비교하면, Miller 등^[1]은 백토에 대한 실험에서 U_a 값의 관계식에 대해 리프터수 12개에서 n 값은 0.46, 리프터수 6개에서 n 값은 0.6으로 제시하였고, Friedman 등^[2]은 모래에 대한 실험결과로부터 n 값을 0.46, $N/D=2\sim3$ 범위에서 k 값을 0.48~0.72로 제시하였다. McCormick^[4]은 Friedman과 Saeman^[3] 등의 연구결과를 비교하여 n 값을 0.67로 제시하였으며, Shene 등^[6]은 모래에 대하여 n 값을 0.86으로 제시하였다. 따라서 선행 연구자들이 사용한 실험시료의 대부분이 백토, 모래 및 경석 등인 점을 고려하면, 본 연구에서 제시하는 U_a 의 실험식은 타당한 결과로 사료된다.



[그림. 5] 회전드럼 내부와 벽면 내·외부의 온도분포



[그림. 6] 열풍속도와 총괄전열 계수의 상호 관계

<표 1> 실험데이터에 따른 계산결과

No.	Feed rate		Air flow			Temperature			Ambient air		Moisture content		Δt_{hm} (°C)	q_m (kcal/hr)	G_a (kg/hr·m ²)	U_a (kcal/hr·m ² ·°C)	k
	F (kg/hr)	G (kg/hr)	t_1 (°C)	t_2 (°C)	t_s (°C)	t_a (°C)	x_a (kg·w/kg·a)	X_1 (%W.B)	X_2 (%W.B)								
1	50	351	160	94.2	48.1	24	0.0077	40	23.5	74.2	10,859	4,815	1,002.4	0.95			
2	50	271	200	102.4	49.8	27	0.0073	40	21.8	93.0	10,665	3,717	785.5	0.93			
3	36	271	210	94.2	51.9	24	0.0071	55	25.4	87.3	11,466	3,717	899.6	1.07			
4	36	271	210	102.6	54.5	20	0.0082	50	16.3	91.5	11,761	3,717	880.4	1.04			
5	50	271	230	112.7	55.2	21	0.0074	40	15.9	105.5	12,885	3,717	836.5	0.99			
6	36	175	240	97.6	55.6	25	0.0078	45	21.4	96.3	8,559	2,401	608.7	1.06			
7	45	175	250	107.7	56.1	26	0.0075	40	14.8	108.5	8,917	2,401	562.9	0.98			
8	42	271	250	116.2	55.1	23	0.0077	50	20.3	115.3	13,994	3,717	831.3	0.98			
9	36	271	250	113.4	56.9	25	0.0069	55	22.0	111.2	13,871	3,717	854.4	1.01			
10	36	175	260	107.4	56.2	24	0.0084	40	12.4	110.5	9,434	2,401	584.8	1.01			
11	36	271	300	129.1	65.0	26	0.0068	55	16.9	131.5	16,891	3,717	879.8	1.04			
12	35	175	160	81.1	47.7	20	0.0070	40	14.4	65.1	5,573	2,401	586.4	1.02			
13	36	271	170	93.0	48.6	20	0.0071	40	13.0	76.6	9,247	3,717	826.8	0.98			
14	35	271	200	97.8	50.2	22	0.0076	40	8.6	89.1	10,974	3,717	843.6	1.00			
15	36	271	220	104.4	54.1	22	0.0074	40	8.6	96.9	12,206	3,717	862.8	1.02			
16	36	351	230	106.5	59.8	23	0.0072	40	7.1	95.5	16,528	4,815	1,185.4	1.12			
17	36	271	250	103.4	53.6	20	0.0078	40	7.0	106.8	14,179	3,717	909.3	1.08			
18	36	271	270	108.8	55.9	22	0.0079	40	6.1	115.3	15,352	3,717	912.0	1.08			
19	35	175	280	106.5	52.6	18	0.0078	40	8.2	120.5	10,430	2,401	592.9	1.03			
20	36	175	300	119.8	59.8	20	0.0077	40	5.0	129.9	11,147	2,401	587.7	1.02			
21	36	175	330	127.0	58.6	22	0.0054	45	7.7	147.3	12,712	2,401	591.1	1.03			

5. 결론

본 연구에서는 주정박 및 대두박 등의 유기성 슬러지 입자의 열 및 물질전달 특성을 파악하기 위해 회전건조 실험장치에서 다양한 운전조건 변경에 따른 건조특성 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

본 실험을 통해 유기성 슬러지 입자의 건조속도에 미치는 영향을 고찰하였으며, 열풍온도 및 입자의 크기가 건조속도에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 또한 실험시료의 건조특성 실험결과를 토대로 총괄전열계수 $U_a = 0.63G_a^{0.88}$ 의 관계식을 도출하였다. 본 실험식은 유기성 슬러지 평균입자크기 0.1~1mm정도에서 활용이 기대되며, 열풍온도 200~250°C, 열풍속도 2.4~3.75m³/min에서 오차범위는 약 10~15%정도로 나타났다.

참고문헌

1. Miller, C. O., B. A. Smith, and W. H. Schuette, Factors Influencing the Operation of Rotary Dryers, Trans. AICHE, Vol. 38, pp. 841-864, 1942
2. Friedman, S. J. and W. R. Marshall, Studies in Rotary Drying Part II-Heat and Mass Transfer, Chem. Eng. Prog., Vol. 45, No. 9, pp. 573-588, 1949
3. Saeman, W. C. and T. R. Mitchell, Analysis of Rotary Dryer and Cooler Performance, Chem. Eng. Prog. Vol. 50, No. 9, pp 467-475, 1954.
4. McCormick, P. Y., Gas Velocity Effects on Heat Transfer in Direct Heat Rotary Dryers, Chem. Eng. Prog., Vol. 58, No. 6, pp. 57-61, 1962
5. Baker, C. G. J., Air Solids Drag in Cascading Rotary Dryers, Drying Technology, Vol. 10 No. 2, pp. 365-393, 1992
6. Shene, C., F. Cubillors, R. Perez, and P. I. Alvarez, Modelling and Simulation of Direct Contact Rotary Dryer, Drying Technology, Vol. 14 No. 10, pp.2419-2433, 1996

있으며, 전체 VOC 성분들에 대한 평균 처리효율은 91.37 %를 보여주고 있다.

Table 1 VOC removal efficiencies for various hydrocarbons

No.	VOC component	VOC removal efficiency(%)
1	2-propanone(Acetone)	100
2	Methyl acetate	94
3	2-butanone	100
4	Ethyl acetate	85
5	Tetrahydrofuran	100
6	Methyl isobutyl ketone	90
7	Toluene	63-84
8	Xylene	75-100

4. 결 론

도장 공정에서 발생하는 배기가스 내 VOC 처리를 위한 활성탄 탑·광촉매 복합 시스템을 제안하였다. 실증시험결과 두 가지 처리기술을 복합한 VOC 처리시스템은 다양한 VOC 화합물들의 처리에 상호 보완적으로 매우 효과적으로 작용하였고, VOC 제거효율도 75~100% 에 이르렀다. 이러한 VOC 처리 성능에 대한 초기 시험 결과를 토대로, 향후 이루어질 본 VOC 처리 시스템의 설계 및 운전 조건의 최적화를 통해 실제 도장공정에 적용될 수 있는 실용적이고 경제적인 시스템의 개발이 가능하리라 보여진다.

후 기

본 연구는 수원대학교 환경청정기술연구센터의 지원과 청정생산사업 연구비 지원에 의해 이루어 졌음을 밝히며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 윤재호, 김영률, 청정도장기술개발 도장성능시험평가설비 구축사업, 산업자원부, 1999
- (2) 장순익, 도장실무가이드., 세화, 1996
- (3) 김관엽, 이찬 외, 청정도장기기 및 시스템 개발, 산업자원부, 2004
- (4) C.D.Cooper and F.C.Alley, Air Pollution Control: A Design Approach, waveland Press, 1986