

도장부스 수조 내 슬러지 처리 시스템의 개발

이 찬* · 차상원* · 유영돈**

Development of the Sludge Treatment System in Water Bath of Painting Booth

Chan Lee*, Sang Won Cha* and Young Don Yoo**

Key Words: Painting booth (도장부스), Sludge (슬러지), Floating skimmer (부상식 흡입장치), Centrifugal separator (원심분리기), Dewatering (탈수), Clean water (청정액)

ABSTRACT

A sludge treatment system for introducing the waste water mixture with paint sludge from the water bath of paint booth and for recycling cleaned water to paint booth after sludge separation is developed. Floated sludge is introduced from the water surface in the bath by using floating-skimmer, and is conveyed by pump to the centrifugal separator where sludge and cleaned water are separated. From the operation results of the present sludge treatment systems applied in actual paint booths, paint sludge can be separated automatically and effectively from water bath with its water content of 60-70%, and sludge-free clean water is returned to paint booth.

1. 서론

현재 도장 공정은 건축, 자동차, 선박, 전기전자 제품, 공업용, 철구조물, 도로 표지, 플라스틱 등 여러 산업 분야에 적용되고 있다. 도장을 위해 현재 사용되는 도장 부스에는 건식과 습식의 두가지 방법이 있다. 건식 방법은 도료의 분무로 인해 인체에 유해하며 폭발 등의 위험성이 있기 때문에 이를 방지하기 위하여 적절한 급, 배기 장치를 설치하고, 반면에 습식의 경우에는 Fig. 1에서 보여지듯이 도장부스의 배기가는 여과장치를 통과시킴으로써 기체 상태의 유기용제를 제거하고, 오버 스프레이 도료는 도장부스에서 사용되는

순환 용수에 혼입시켜 수조로 보내진다. 또한 수조에서는 도료에 점착제를 첨가하여 피트에 도료를 슬러지 형태로 부상 혹은 침강 분리시킨 후 정기적으로 사람이 수작업에 의해 걸러낸 뒤 배출하여 산업폐기물로서

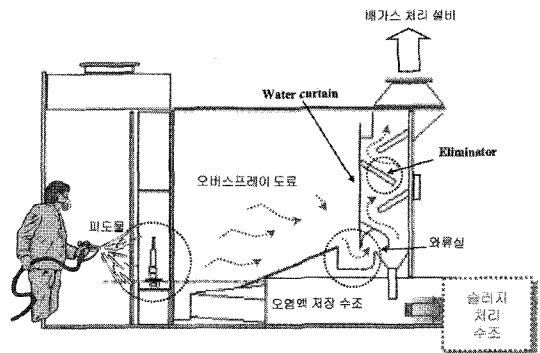


Fig. 1 Schematic of a wet-type paint booth

* 수원대학교 기계공학과, 환경청정기술연구센터

** 고등기술연구원 플랜트엔지니어링 센터

책임저자 E-mail : clee@suwon.ac.kr

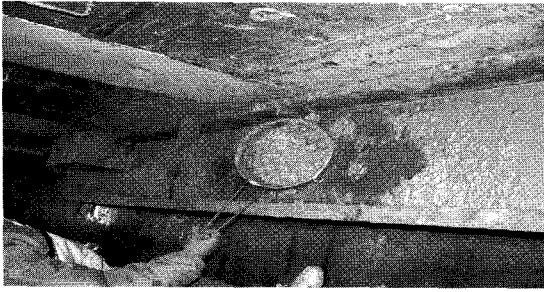


Fig. 2 Conventional sludge removal method

처분하고 있다 (Fig. 2 참조). 이와 같이 발생된 도장 슬러지에는 다량의 휘발성 화합물과 중금속 등을 포함하고 있는데, 이것을 제거하는 수작업은 작업자의 건강을 해칠 뿐만 아니라 작업 능률을 저하시키고, 도장 공정에서의 작업을 기피하는 문제가 된다^{(1)~(3)}.

따라서, 도장 공장의 작업자가 최적의 작업환경 상태에서의 작업과 생산성 향상을 위한 하나의 방법으로, 도장 부스 내의 도장 슬러지 처리를 위한 시스템, 즉 작업자와의 접촉을 최소로 한 수조 내 슬러지 포집, 탈수 그리고 자동 배출 기능을 가진 시스템이 필요할 것으로 판단된다. 그러므로 본 논문은 습식 도장 부스에 일반적으로 적용될 수 있는 도장 슬러지 처리 시스템의 설계 개념을 제안하였고, 시스템 구성을 위해 수조, 부상식 흡입장치 및 원심형 분리기들을 설계, 선정하였다. 더 나아가 설계된 각 구성요소들을 결합한 슬러지 처리 시스템을 실제 도장 공장들에 적용하여 본 시스템의 운전 및 성능특성을 파악하였고, 본 슬러지 처리 시스템이 도장 슬러지를 도장부스로부터 분리하여 탈수처리 하는데 매우 효과적임을 알 수 있었다.

2. 도장슬러지 처리 시스템의 설계

2.1 도장슬러지 처리 시스템의 설계 개념

앞서 언급한 바와 같이, 기존 도장 슬러지 처리방식의 가장 큰 문제점은 수조에 부유된 슬러지를 수작업에 의해 걸러내며, 이로 인해 작업자의 건강에 매우 부정적인 영향을 미친다는 점이다. 더불어 슬러지 제거 작업 및 효과가 지속적이고 일정하지 않아 수조에서 다시 도장부스로 재순환되는 물에 다량의 슬러지가 포함되어, 도장부스내의 도장 작업 성능 및 생산성에도 큰 영향을 미친다는 점이다.

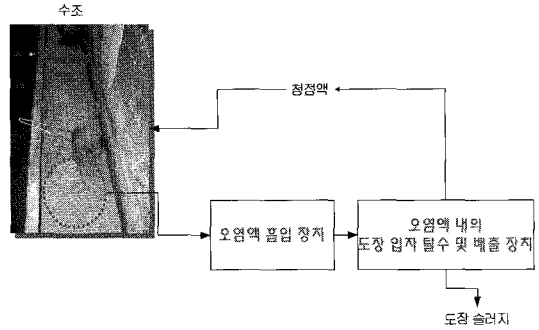


Fig. 3 Design concept of sludge treatment system

이러한 문제점을 극복하기 위하여, 본 연구는 Fig. 3과 같은 도장 슬러지 처리 시스템을 고안하였다. 즉 수조 내에 부유되는 도장 슬러지를 오염액과 같이 흡입하여, 오염액 중의 물과 슬러지를 탈수분리한 후 슬러지는 배출처리하고 물은 다시 수조로 재순환하여 도장 부스의 수막 (water curtain) 용수로 사용한다.

2.2 오염액 흡입장치 설계

일반적으로 도장 부스에서 생성된 오염액은 수조로 유입되며, 오염액 중의 슬러지는 물 표면에 부상되어 층을 이룬다. 그러므로 수조의 물 표면에 부상된 슬러지를 흡입하기 위해서는 물 표면의 슬러지를 포함하는 오염액을 효과적으로 흡입하기 위한 흡입 장치의 설계와 흡입 펌프의 선정이 요구된다.

본 연구에서는 흡입구를 물 표면에 부상시켜 슬러지를 포함하는 오염액을 제거할 수 있는 부상식 흡입장치 (floating skimmer)를 고려하였으며, 흡입장치는 수조의 오염액이 흐르는 전체 면적에 걸쳐 설치되도록 하였다. 도장부스 수조의 부상식 흡입장치 설계에 있어서 가장 중요한 문제는 흡입장치의 흡입구를 물에 얼마나 잠기도록 설치하느냐 하는 점이다. 흡입 장치의 흡입구가 오염액에 많이 잠기면 처리하려는 부상 슬러지 보다 물의 흡입량이 많아져 동일한 슬러지를 처리하는데 있어 탈수 및 배출 장치의 크기가 커지는 문제점이 있다. 반면에 흡입 장치의 흡입구가 오염액에 잠기는 깊이가 적으면, 슬러지를 포함하는 오염액의 흡입량은 적어지고 주위 공기의 혼입이 많아져, 흡입 펌프에 의해 탈수 및 배출 장치로의 이송이 불가능해지거나, 펌프 흡입 배관내의 진공현상으로 인해 배관이 흡착되는 문제를 야기할 수 있다⁽³⁾. 그러므로 슬러지를 완전히 제거하면서도 주위 공기나 물의 과도한

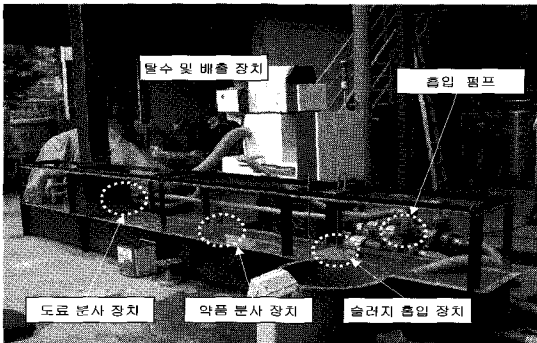


Fig. 4 Experimental setup for the sludge treatment system with floating skimmer

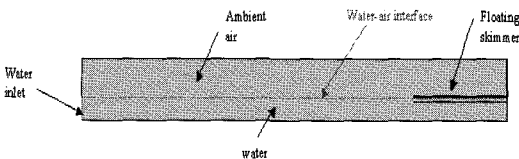


Fig. 5 Grid system of water bath



Fig. 6 Dimensions of the inlet section of the floating skimmer suction port

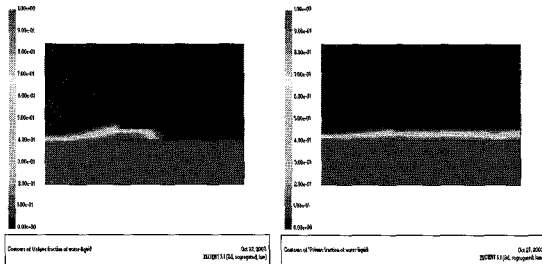


Fig. 7 Flow behavior of air, water and sludge at skimmer inlet region(left: $D/H_{skim}=0\%$, right: $D/H_{skim}=33.3\%$)

유입을 방지할 수 있도록 부상식 흡입장치를 물에 적절한 비율로 잠기도록 설계하는 것이 매우 중요하다.

흡입 장치의 적절한 설계를 위해 본 연구에서는 Fig. 4와 같은 모형 수조를 통한 실험 및 전산유체역학적 수치해석을 병행하였다. 슬러지를 흡입장치를 통해 흡입하는 유동문제는 물, 슬러지 및 공기가 서로 혼합되는 3상 유동(3-phase flow) 문제로서, 이 문제를 해석하기 위해 본 연구에서는 Fig. 5와 같은 2차

원 격자계를 사용하였다. 또한 부상식 흡입장치의 흡입구는 사각 단면(폭: 380 mm, 높이: 7 mm)을 가지도록 설계하였고, Fig. 6에 나타나듯이, 부상식 흡입장치가 수조의 물 표면에 잠기는 정도에 따라 흡입성능이 어떻게 달라지는지를 검토하기 위해, 흡입장치 높이 (H_{skim}) 7 mm에 비해 물에 잠기는 깊이 (D)를 조절하였다.

본 연구에서는 수조 내 물-슬러지 오염액과 주위 공기에 대한 유동을 FLUENT 코드를 사용하여 계산하였고, 물, 슬러지 및 공기가 혼합되는 경계면에서 유동에 대한 계산을 위해서는 VOF (Volume of Fluids) 모델을 사용하였다⁽⁴⁾. VOF 모델은 해석하려는 모든 상(phase)에 대해 운동량 방정식을 풀고, 서로 다른 상의 유체들이 이루는 접촉면에 대해서는 volume fraction(α_q)을 구하여 격자계 cell에서 다음과 같이 질량보존방정식을 계산한다.

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \nabla \cdot \nabla \alpha_q = 0, \quad \sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (1)$$

이때, 각 cell에서 구해진 volume fraction을 이용하여 서로 다른 상들이 혼합된 혼합유체의 밀도, 점도 등을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\rho = \sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q, \quad \mu = \sum_{q=1}^n \alpha_q \mu_q \quad (2)$$

여기서 수면에 부유된 슬러지는 내부적으로 물을 함유하고 있으므로, 액체와 같은 슬러지(liquid-like sludge)로 간주될 수 있으므로, 액체상태로서 슬러지의 물성은 실제 도장약수 수조들로부터 채취된 슬러지 시료들에 대한 측정결과들로부터 구하였다. 측정된 슬러지 밀도는 평균적으로 800 kg/m^3 이고, 슬러지 점도는 도장약수에 따라 4~40 cP 범위 내에서 매우 큰 차이를 보이나, 수조 내에 투입되는 화학약품의 배합 및 첨가량에 따라 원하는 값까지 점도를 조절할 수 있다. 그러므로, 본 연구에서는 슬러지의 좀 더 원활한 유동성을 확보하기 위해 슬러지 점도를 물의 점도에 비해 약 4배 높은 것으로 가정하였다.

Fig. 7은 흡입 장치의 물에 대한 잠김 비율 (D/H_{skim})이 0%인 경우와 33.3%인 경우의 유동 거동을 보여주고 있으며, 수조 바닥에서부터 물, 슬러지 및 공

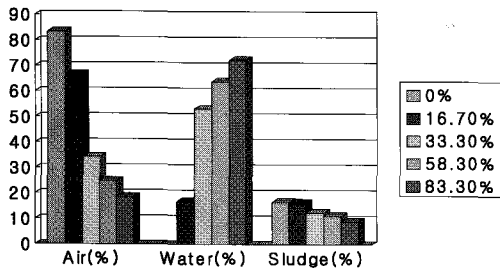


Fig. 8 Volume fractional suction flow for air, water and sludge

기가 층을 이루고 skimmer로 유입되는 모습을 보여 주고 있다. 그림에서 보여지는 바와 같이, 33.3% 잠김 비율의 슬러지 유입거동이 0%에 비해 월등히 우수함을 알 수 있다. Fig. 8은 흡입 장치의 물에 대한 잠김 비율 ($D/H_{skimmer}$)이 0, 16.7, 33.3, 58.3, 83.3%인 경우들에 대해 흡입장치로 유입되는 공기/물/슬러지 혼합 물에 대한 흡입 특성을 채적 분율로 비교하여 보여주고 있다. 흡입장치가 물에 잠기는 비율이 작을수록 공기 혼입량이 급격히 늘어남을 알 수 있다. 또한 슬러지의 유입량은 전체 혼합물의 10~15% 수준으로, 흡입장치가 물에 잠기는 비율이 클수록 물의 유량 증가로 인해 슬러지 유입비율이 줄어드는 경향을 보인다.

Table 1은 5가지 흡입장치의 잠김 정도에 따른 흡입장치 내 압력 손실에 대한 계산결과들을 비교하고 있으며, Fig. 8과 Table 1의 결과들을 종합적으로 검토해 본 결과 흡입장치가 약 30% 정도 물에 잠겨서 슬러지를 흡입, 제거하는 것이 가장 바람직한 것으로 판단된다. 수치계산의 상세한 결과들은 참고문헌⁽⁵⁾에 잘 기술되어 있으며, 본 연구의 계산결과들은 Fig. 4의 모형 수조 실험을 통해서도 확인되었다⁽³⁾.

오염액을 흡입하여 탈수 및 배출 장치로 보내는 흡입 펌프도 슬러지의 지속적인 제거를 위해 중요한 요소이다. 본 연구에서는 일차적으로 흡입 펌프로써 벨루트 펌프를 사용하였다. 이 경우에는, 수면 위에 부상된 슬러지의 특성 때문에, 부상 슬러지를 흡입하기 위해서는 공기, 슬러지와 물이 동시에 흡입될 수 밖에 없었고, 이로 인해 펌프 내에 공기가 차서 흡입장치를 통하여 오염액 흡입이 되지 않는 문제점이 있었다. 따라서, 공기가 포함된 물에 대해서도 펌핑이 원활한 펌프의 선정이 필수적이다. 이러한 조건에서 펌핑이 원활하게 이루어질 수 있는 펌프로 다이아프램 펌프를 선정하여 실험한 결과 재가동 시에도 원활한 펌핑이 가능함을 확인하였다.

Table 1 Comparisons of the pressure losses for different skimmer designs

Immersion%	Pressure loss (kPa)
0	123
16.7	73
33.3	53
58.3	136
83.3	123

2.3 오염액 탈수 및 슬러지 배출장치 설계

흡입된 오염액 내에 포함된 고형 슬러지 만을 분리하고, 슬러지가 분리된 청정액은 다시 수조로 공급하기 위해서는 오염액 내에 포함된 슬러지 고형 입자만을 분리하고, 일정 간격 또는 연속적으로 탈수된 슬러지를 외부로 배출할 수 있어야 한다.

일반적으로 사용되고 있는 탈수 방법으로는 진공탈수 (vacuum press), 가압탈수 (filter or belt press), 원심탈수 (centrifuge) 및 천일건조 (drying bed) 등이 있으나⁽³⁾, 본 연구에서는 작업자의 수작업 시간을 최소화 하고 운영비용을 적게 하는 원심 분리 방법을 기본 공정으로 채택하였으며, 원심 분리 공정과 연계하여 탈수된 슬러지가 자동으로 배출되는 장치를 추가하였다.

본 탈수 및 슬러지 배출장치는 슬러지 흡입 장치에 의해 흡입된 오염액을 회전하는 원통형 용기 내로 분사하여, 오염액 내의 슬러지 고형 입자는 물보다 큰 원심력을 받기 때문에 회전 용기의 노벽에 부착되고, 물은 회전 용기의 벽면을 타고 흘러 회전 용기의 상부 개구부를 통하여 외부로 배출된다. 일정시간 경과후 회전 용기에 부착된 고형 입자량이 증가하면, 회전을 정지하고, 용기의 하부가 열려진 후, 용기 벽면에 부착된 슬러지 고형 입자를 제거하는 스크래퍼 (scraper) 가 시계 방향과 반시계 방향으로 번갈아 회전하여 슬러지를 하부로 배출하는 구조를 갖는다. 본 장치의 1회 탈수시간은 30분 내에서 1시간 정도이며, 스크래퍼의 회전에 의해 슬러지를 외부로 배출하는 시간은 5분이내로 하였다. Fig. 9는 본 연구에서 사용한 탈수 및 슬러지 배출장치의 외관을 보여주고 있으며, Table 2는 장치의 주요 사양이다.

Table 2 Specifications of dewatering and sludge discharge system

Max. capacity	200 kg/min
Main motor	3phase×6kw×4P
Geared motor	3phase×0.7kw×4P
RPM	2500 rpm
Gross weight	800kg

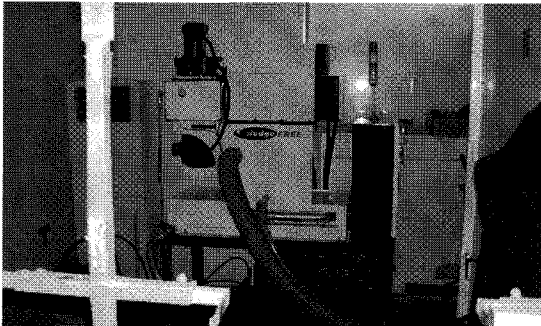


Fig. 9 Dewatering and sludge discharge system

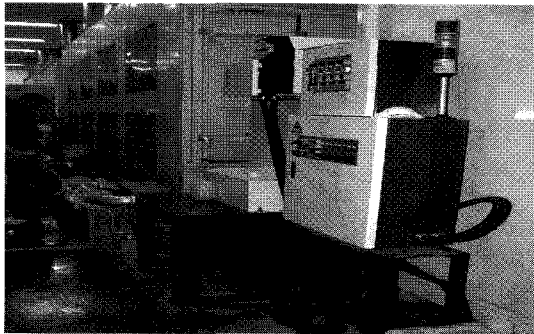


Fig. 10 Sludge treatment system installed in the water bath of actual paint booth

3. 도장 슬러지 처리 시스템의 시험결과

본 도장 슬러지 처리 시스템을 실제 도장산업체의 도장부스들에 설치하여 실증 시험하였다. Fig. 10은 실제 도장부스 후면의 수조에 설치된 시스템을 보여주고 있으며, Fig. 11은 수조의 수면에 부상되어 있는 흡입장치 설치의 한 예를 보여주고 있다.

Fig. 12는 A업체의 수조 내 오염액 수분함량과 작업자가 채를 이용하여 수작업으로 부상된 슬러지를 마대로 담았을 경우의 슬러지 수분 함량을 나타낸 것으로, 먼저 오염액의 수분함량은 94~99% 정도이며, 작업자가 채를 이용하여 수작업으로 분리한 슬러지의 수분함량은 70~85% 정도이다. 그러나 대부분의 경우, 슬러지의 수분 함량은 80% 이상임을 알 수 있다.

Fig. 13은 본 도장 슬러지 처리시스템을 이용하여 배출된 슬러지와 청정액 내의 수분 함량을 나타낸 것이다. 탈수 후 슬러지 케이크의 수분함량은 50~60% 정도로 낮아졌으며, 청정액은 수분함량이 99% 이상으로 거의 오염물을 포함하지 않음을 알 수 있다.

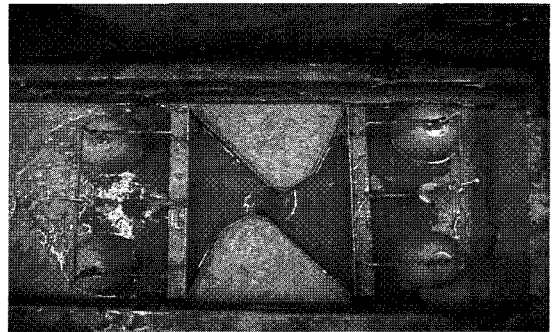


Fig. 11 Floating skimmer installed in the water bath of actual paint booth

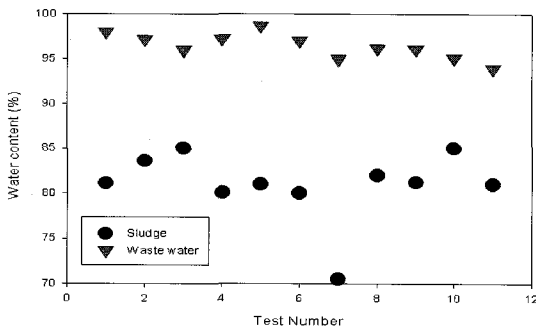


Fig. 12 Water contents of waste water and sludge treated by human operation (company A)

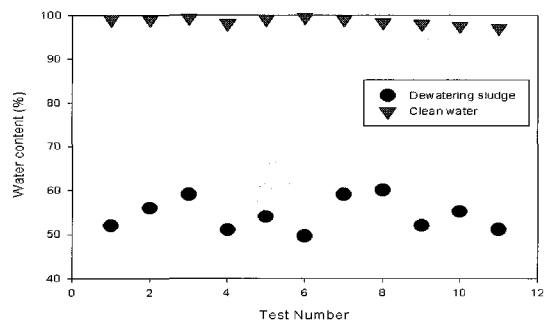


Fig. 13 Water contents of waste water and sludge treated by the present system (company A)

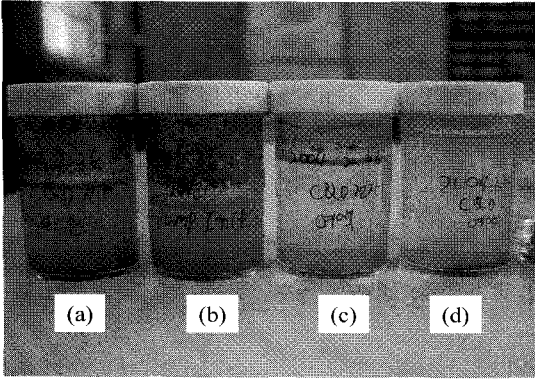


Fig. 14 Waste water and clean water samples (company A)

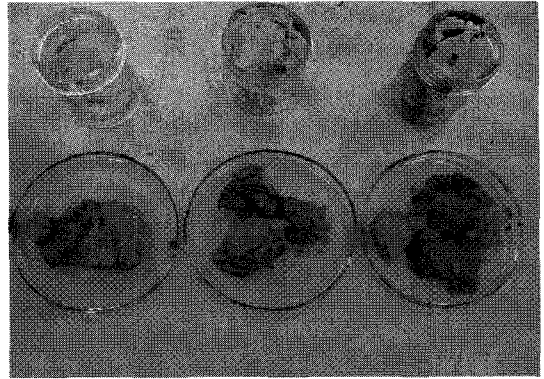


Fig. 15 Water and sludge samples after or before treatment (company A)

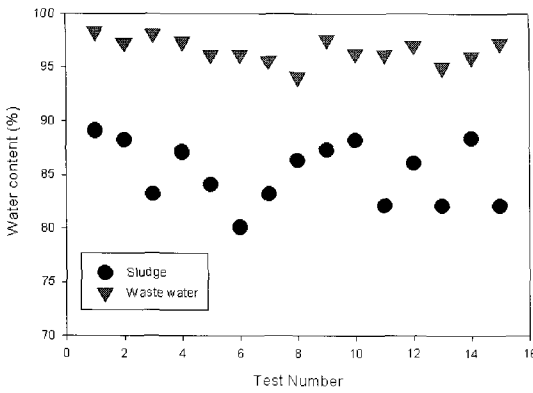


Fig. 16 Water contents of waste water and sludge treated by human operation (company B)

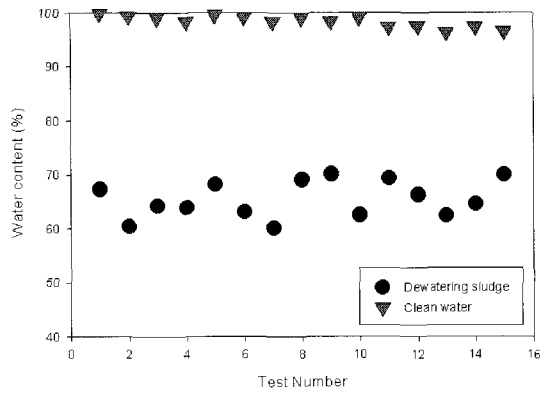


Fig. 17 Water contents of waste water and sludge treated by the present system (company B)

Fig. 14는 본 도장 처리시스템으로 유입되기 전의 오염액과 처리 후 배출되는 청정액을 나타내고 있으며, (a), (b)는 오염액, (c), (d)는 청정액을 나타낸다. Fig. 15는 청정액과 탈수된 슬러지를 오염액과 탈수 전 슬러지와 비교하고 있다. 그림에서 보여 지듯이, 육안으로도 처리 후 탈수된 슬러지가 탈수 전 슬러지에 비해 수분이 제거되어 건조한 모습을 보여준다.

Fig. 16은 B업체의 기존 수조 내의 오염액 수분함량과 작업자가 채를 이용하여 수작업으로 부상된 슬러지를 마대로 담았을 경우 마대 내에서 채취한 슬러지에 대한 수분 함량을 나타낸 것으로, 먼저 오염액의 수분함량은 94~99% 정도이며, 작업자가 채를 이용하여 수작업으로 분리한 슬러지의 수분함량은 80~90% 정도이다. 여기서 오염액의 수분 함량이 94% 정도의 다소 낮은 결과를 얻었는데, 이는 수조의 오염액에 비교적 많은 양의 슬러지가 부유해 있음을 의미한다.

Fig. 17은 본 시스템의 탈수 및 배출 장치에서 배출된 슬러지의 수분 함량과, 탈수 및 분리 장치로부터 배출되는 청정액 내의 수분 함량을 나타낸 것으로, 슬러지 케이크의 수분함량은 60~70% 정도이며, 오염액이 슬러지를 많이 포함하고 있었으므로, 탈수 후에도 슬러지에 비교적 많은 수분이 함유됨을 알 수 있다. 그러나 청정액의 수분함량은 99% 이상으로 오염액 내의 슬러지 고형 입자가 대부분 제거되어 배출됨을 알 수 있었다.

Fig. 18은 탈수 및 배출장치로 유입되는 오염액, 배출되는 청정액 그리고 탈수 슬러지를 샘플링한 것으로 그림에서 (a), (b), (c)는 탈수 슬러지를, (d)는 탈수 및 배출장치에서 배출되는 청정액, (e)는 탈수 및 배출장치로부터 유입되는 오염액을 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 19는 청정액 (Fig. 18에서 (d)인 경우)과 오염액 (Fig. 18에서 (e)인 경우)의 처리 정도를 육안으

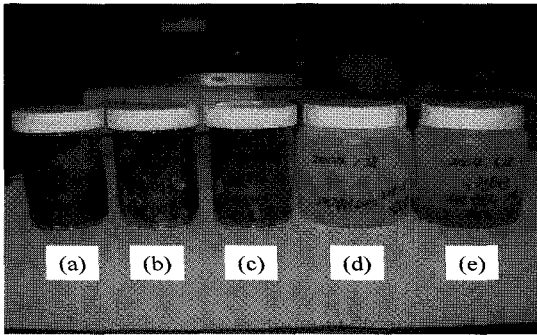


Fig. 18 Water and sludge samples after treatment (Company B)

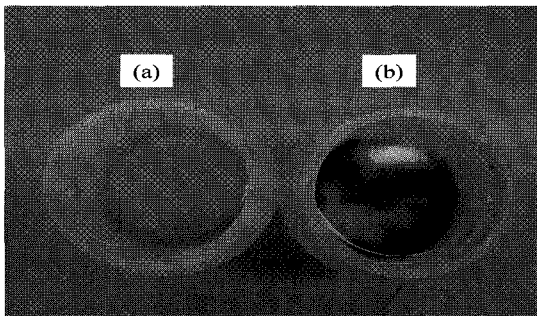


Fig. 19 Waste water and clean water samples (Company B)

로 비교하기 위하여 3시간 동안 용기에 저장한 후 사진을 찍은 것이다. 사진에서 알 수 있는 바와 같이 오염액의 바닥에는 상당량의 슬러지 고형분이 가라앉아 있는 것이 확인되지만, 청정액은 가라앉은 고형분여의 관찰되지 않았다.

앞서의 시험결과들로부터 본 시스템의 슬러지 흡입 성능 및 청정액의 청정도는 비교적 양호한 것으로 보이나, 시스템으로부터 배출되는 처리 후 슬러지의 수분함량은 좀 더 낮출 필요가 있는 것으로 판단된다. 탈수 처리 후에도 슬러지의 수분함량이 높은 이유는 슬러지에 포함된 물이 표면 수분 (surface moisture) 형태가 내부 수분 (inherent moisture) 형태로 존재하기 때문으로 판단되며, 본 시스템의 원심분리방식과 같은 기계적 방법으로는 수분함량을 더 줄이는데 다소의 어려움이 있으리라 보여진다. 그러므로 슬러지의 수분 함량을 좀더 낮추기 위해서는 원심분리 방식과 다른 탈수 방식과의 연계운전이 필요한 것으로 보여진다.

4. 결론

도장부스에서 발생하는 슬러지를 수조로부터 자동적으로 처리하는 시스템을 개발하였다. 본 도장 슬러지 처리시스템은 수조 표면에 부유되는 슬러지를 오염액과 같이 흡입하여, 슬러지 고형분과 청정액으로 분리하도록 설계하였다.

시험 및 계산 결과에 따르면, 수조에서의 슬러지 흡입은 흡입구의 30% 정도가 물에 잠긴 부상식 흡입장치를 통해 효과적으로 이루어졌고, 흡입된 슬러지와 오염액은 탈수 및 배출장치를 통해 슬러지 고형분과 청정액으로 비교적 손쉽게 분리되었다. 배출된 슬러지 고형분에는 50~70%의 수분이 포함되어 있고, 청정액은 오염물질의 함량이 1% 미만의 청정도를 유지하였다. 그러나 슬러지의 수분함량을 좀더 낮추기 위해서는 탈수 방법 및 과정에 대한 추가적인 연구가 필요하리라 보여진다.

후 기

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 직무기피요인해소사업인 “도장 공장에서 배출되는 도료 슬러지 처리를 위한 부스 리프레샤 장치 개발” 연구과제로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) 윤재호, 김영률, 1999, 청정도장기술개발 도장성능시험평가설비 구축사업, 산업자원부
- (2) 松谷守康, 1995, 도장실무핸드북, 세화
- (3) 유영돈, 이찬 외, 2004, 도장 공장에서 배출되는 도료 슬러지 처리를 위한 부스 리프레샤 장치 개발, 중소기업청
- (4) FLUENT v5.3 manual, 1999, FLUENT Inc.
- (5) 이찬, 차상원, 유영돈, 2004, “도장 슬러지 제거를 위한 도장 부스 수조의 설계,” Clean Technology, 제10권 제2호, pp.89~100