

정전 회전무화형 도장기기의 빗살무늬 디스크가 도착성능에 미치는 영향

차상원 · 이 찬 · 고용서

수원대학교 기계공학과

Effect of Serrated Disk of Electrostatic Rotary Atomizer on Transfer Characteristics

SangWon Cha · Chan Lee · YongSeo Ko

Department of Mechanical Engineering, The University of Suwon

요 약

회전 무화형 도장기기의 고효율화를 위한 기초 연구로서 도장기기 회전 디스크의 형태에 따른 도장기기의 성능을 실험적으로 고찰하였다. 본 연구에서는 도료의 무화가 선상 무화가 유지되도록 도장기기 디스크의 빗살 무늬 형상을 설계하였다. 최적설계에 따라 제작된 도장 기기의 도장 성능시험을 통해 도착효율 및 도막특성을 실험적으로 관찰하였고, 기존의 도장기기 성능 시험결과와 비교 분석하였으며, 회전디스크의 빗살무늬 형태가 도착효율 및 도막 특성에 미치는 영향을 규명하였다.

ABSTRACT : The effect of outer edge serrations of a rotating disk in the electrostatic rotary atomizer has been experimentally investigated. In this study, the edge serrations of the rotating disk are designed and fabricated to maintain the ligament atomization for wide range of paint flow rates. A series of experiments have been conducted using optimally-designed or off-designed disks to investigate the surface characteristics, i.e., transfer efficiencies, thicknesses and bubbles. The optimally-designed disk has experimentally shown the best surface characteristics compared to other disks, especially for an existing non-serrated disk.

1. 서 론

도장(塗裝)은 현대 산업사회의 인류가 필요로 하는 거의 모든 공업제품의 기능적 보호와 외관의 미화를 위해 필수불가결하며, 이외에도 우리 주변의 다양한 산업, 상업, 공공 및 주거시설 등에서도 도장의 적용 대상은 무수히 많다. 도장의 목적은 일반적으로 피도장물의 방식, 방부, 방습, 방충 등과 같은 제품의 보호와 피도장물의 외관상 미려한 색상과 무늬 등을 내는 것을 들 수 있다. 최근에는 기존 도장의 응용분야에서 탈피하여, 도장기술을 열, 음파, 전기 및 전파 등의 전도성을 변화시켜 주는데 사용하거나 자기(磁氣) 기록매체로서 정보를 기록하는 것과 같은 전자 및 정보통신 공학 분야에서도 활발히 적용하고 있다[1].

그러나 최근 점증하는 지구 환경 보전에 대한 관심은 도장산업에도 여러 가지 환경규제의 형태로 나타나고 있다. 도료에는 중금속, 안료, 용제 및 휘발성유기화합물(VOC) 등이 함유되어 있으며[2], 특히 VOC는 산업 전체 배출량의 40%가 도장산업에서 발생하는 것으로 보고되고 있다[3]. 한편 국내 도장산업을 통해 발생하는 VOC 배출량은 198,235 ton/year (1996년 기준)이고, 국내 도장기기의 도착 효율은 약 55% 수준이므로 나머지 45%의 도료(연간 31,500 kl)가 폐수 및 대기오염 물질로서 방출되고 있는 실정이다[4]. 따라서 인체에 나쁜 영향을 끼치는 VOC를 획기적으로 감소시킬 수 있는 도장기기의 설계 개선이 당면과제로 대두되고 있다.

이러한 기술적인 문제들을 해결하기 위해, 기술선진국의 도장전문업체들은 도장기기의 저공해화, 고효율화, 에너지 절약 및 도장 품질 향상에 연구/개발 노력을 집중하고 있으며, 이를 통해 고효율 정전 회전무화형 도장기기 등과 같은 고부가가치 제품들을 생산하고 있다. 그러나 국내의 도장기기 분야는 아직도 기술적으로 매우 낙후된 상황이고, 최근 이등[5] 외에 연구도 거의 이루어지지 않고 있으며, 따라서 산업적 기반도 매우 취약한 실정이다. 이러한 취약한 기술기반 때문에, 국내 업체들은 외국 도장기기의 모방 및 역설계 방식을 통해 저부가가치의 air spray 도장 건, airless spray 도장 건, airless pump 등의 일부만을 국산화하고 있으며, 고가 및 고성능의

도장기기의 개발은 엄두도 못내는 실정이다. 이러한 이유로, 국내에서 사용되는 고효율의 도장기기는 대부분 외국에서 수입하고 있으며, 수입 규모도 연간 2000~9000 만불에 이르고 있다[4].

따라서 본 논문에서는 도장기기 중 가장 도착효율이 높고 고부가가치를 가진 정전 회전무화형 도장기기(Electrostatic rotary atomizer)의 디스크 외주(外周, Edge, Rim)를 빗살무늬(Serration) 형태로 최적 설계/제작하여 피도물의 표면특성, 도막두께, 도착효율 등의 성능을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다.

2. 도장기기 회전 디스크의 설계 이론

정전 회전무화형 도장기기를 이용하는 도장과정에서 고품질의 도장표면을 얻고, 공기 터빈의 구동동력 및 VOC 발생의 저감을 위해서는 피도물에의 도착효율이 높아야 한다. 이를 위해서는 디스크 표면의 균일한 면상(面狀, Flat sheet) 도료 두께 및 균일하고 직경이 작은 무화 입자(Droplet)의 형성이 필수적이다. Christensen 과 Stealy [6]에 따르면 균일한 무화 입자를 얻기 위해서는 디스크의 표면이 매끄러워야 하고, 원심력이 중력보다 커야 한다. 한편 디스크 진동이 없이 회전하여야 하며 또한 도료의 공급이 일정해야 한다.

그러나 이 외에도 도료의 무화 특성에 영향을 끼치는 설계변수로는 도장기기 노즐의 형상, 도료의 물성치, 유동변수, 대기의 조건, 정전 효과(Electrostatic effect) 및 디스크의 형상 등을 들 수 있다. 여기에서 도료의 물성치는 표면장력, 점성, 밀도 등을, 유동변수는 토출도료량, 난류강도, 디스크 표면의 면상 도료 두께 등을 나타낸다. 한편 디스크의 형상으로는 회전수, 반경, 빗살무늬(Serration), 반경방향 깃(Radial vane) 등을 들 수 있다 [7].

예를 들어 토출도료량의 영향을 살펴보면, 일정한 디스크의 회전수에서 적정 설계도료량보다 적은 도료량에서는 디스크의 외주에서 직접 입자상의 무화가 이루어진다. 또한 적정 설계도료량보다 많은 도료량에서는 디스크의 외주에서 도료가 면상을 유지하며 이탈한 후 선상(線狀, Ligament, Filament), 그리고 입자상 무화가 이루어져 최적의 입자궤적, 입자의 균일성, 입자 크기에 영향을 미치고, 따라서 피도

물의 표면특성의 저하를 야기한다[8].

Hinze와 Milbom [9]에 따르면 정전 회전무화형 도장기기에서 도료가 이상적으로 무화되는 과정은 다음과 같다.

- (1) 먼저 고압의 공기로 구동되는 공기터빈에 의하여 고속으로 회전하는 도장기기의 노즐을 통해 도료가 디스크에 공급된다.
- (2) 공급된 도료는 마찰력에 의하여 디스크와 같은 속도로 회전하며, 디스크의 표면을 따라 원심력에 의하여 디스크의 외주로 이동하면서 매우 얇은 면상의 도료형태가 된다.
- (3) 면상의 도료는 회전 디스크의 외주에서 이탈하면서 선상의 도료형태가 된다.
- (4) 이탈한 선상도료는 외부교란에 의해 불안정해지고, 분열하여 결국 입자상의 무화 도료가 된다.
- (5) 여기에 정전효과가 추가되어 도료사이에 정전기력이 발생되고 도료의 무화는 보다 증대된다. 이와 같이 무화된 도료입자는 원심력에 의해 피도물로 이동되고 도료의 점착력 및 정전 인력에 의해 피도물의 표면에 도착된다.

한편 Tanasawa 등 [10]은 무화과정이 이러한 3 단계, 즉 면상→선상→입자상 무화를 유지할 때 입자가 가장 균일하고 직경이 가장 작다고 보고하였으며, 이 때의 무화도료입자의 최대 직경 및 SMD 직경, 그리고 디스크 외주에서 이탈하는 선상도료의 수를 각각 다음의 식 (1), (2) 및 (3)으로 제시하였다.

$$d_{max} = 32 \left(\frac{q}{nD^{0.5}} \right) \left(\frac{\sigma^{0.5}}{\rho^{0.4} \mu^{0.1}} \right) \quad (1)$$

$$d_{SMD} = d_{max} / 1.7 \quad (2)$$

$$I_m = \frac{0.83 \left(\frac{\rho}{\sigma} \right)^{0.5} \left(\frac{D}{2} \right)^{1.5} \left(\frac{60}{2\pi n} \right)}{1 + 10 \left\{ \frac{\mu}{\rho \sigma D} \right\}^{\frac{1}{3}}} \quad (3)$$

이 식들에서 D, n 은 디스크의 직경(cm) 및 회전속도(rpm), ρ, μ, σ 는 도료의 밀도(g/cm^3), 점도($dyne \cdot s/cm^2$), 표면장력($dyne/cm$)을 각각 나타낸다.

또한 디스크의 외주에서 직접 입자상 무화가 되는 임계 도료량 q_1 과 디스크의 외주에서 면상 이탈하는 임계 도료량 q_2 를 다음 식 (4) 과 (5)로 각각 제시하였다.

$$q_1 = 2.8 \left(\frac{D}{n} \right)^{2/3} \left(\frac{\rho}{\mu} \right) \left[1 + 10 \left\{ \frac{\mu}{(\rho \sigma D)^{1/2}} \right\}^{1/3} \right]^{-1} [cm^3/s] \quad (4)$$

$$q_2 = 5.3 \left(\frac{D}{n} \right)^{2/3} \left(\frac{\rho}{\mu} \right) \left(\frac{\rho}{\mu} \right)^{1/3} [cm^3/s] \text{ for } \frac{D\rho}{\mu} < 30 \text{ s/cm} \quad (5)$$

위에서도 언급하였듯이 이상적인 3 단계, 즉, 면상→선상→입자상 무화를 유지하기 위해서는 도장기기 노즐에서의 토출도료량을 q_1 에서 q_2 사이로 유지하는 것이 가장 바람직하다.

또한 Christensen 과 Stealy[6] 및 Matsumoto 등 [11]에 따르면 디스크의 외주가 빗살무늬 모양이면 많은 도료량에서도 면상 이탈을 방지하고, 선상 무화를 유지함으로써 최소 직경의 균일한 무화 입자를 얻을 수 있다. Christensen 과 Stealy[6]는 최적 빗살무늬의 수 z 를 디스크의 크기, 회전속도와 도료의 물성치를 이용하여 아래의 식으로 표시하였다.

$$z = 0.215 \left(\frac{\rho \omega^2 D^3}{\sigma} \right)^{5.12} \left(\frac{\rho \sigma D}{\mu^2} \right)^{1/5} \quad (6)$$

한편 Matsumoto 등 [11]은 식 (6)을 $We = \rho \omega^2 R^3 / \sigma$ 로 정의되는 Weber수 및 $Re = \rho \omega R^2 / \mu$ 로 정의되는 Reynolds수를 이용하여 최적 빗살무늬의 수 N_z 를 다음 식으로 나타내었다.

$$N_z = 0.574 (We)^{1/4} (Re)^{1/3} \quad (7)$$

위 식 (6)과 (7)에서 D, R, ω 는 디스크의 직경(m), 반경(m) 및 회전속도(rad/sec), ρ, μ, σ 는 도료의 밀도(kg/m^3), 점도($N \cdot s/m^2$) 및 표면장력(N/m)을 각각 나타낸다.

3. 도장기기의 성능 실험 장치 및 방법

3.1 디스크 제작

보수조건(피도불이 정지되어 있을 경우의 도장)

하에서 빗살무늬의 유무에 따른 피도물체의 도착효율, 표면 특성, 도막 두께 등을 알아보기 위하여 의주를 빗살무늬 모양으로 가공한 알루미늄 디스크를 설계하였다. 식 (6) 또는 (7)을 이용하여 설계한 디스크의 최적 빗살무늬 수는 직경 12cm, 회전수 10,000 rpm일 경우 720개이며, 이에 따라 제작한 디스크의 형상이 Figure 1에 나타나 있다. 그러나 빗살무늬의 영향을 살펴보기 위하여 360개 빗살무늬를 가진 디스크, 반은 빗살무늬가 없고 반은 360개의 빗살무늬를 가진 디스크, 그리고 빗살무늬가 없는 기존의 디스크 등 4개의 디스크를 제작하였다.

3.2 피도물 제작

도장기에서 무화된 도료가 도착되어, 도착효율 등의 실험 데이터를 얻기 위한 피도물은 다음의 방법으로 제작하였다.

1. 1.2 nm 두께의 steel 피도물을 폭 15 cm, 길이 50 cm로 여러 개 자른 후 각각의 번호를 피도물에 기록한다.
2. 알루미늄 foil을 폭 17cm, 길이 52cm로 여러 개 자른 후 정밀저울로 각각의 질량을 측정한다.
3. 알루미늄 foil로 steel 피도물을 감싸고 번호를 foil에 기록한다.



Fig. 1. Shape of edge serrations

여기에서 알루미늄 foil로 감싸지 않은 steel 피도물(Type S)은 실험 후 건조막 두께를 측정할때, 또

한 도장부위를 절단하여 SEM 촬영을 하기 위한 용도로 사용된다. 한편 알루미늄 foil로 감싼 피도물(Type A)은 실험 후 foil을 벗겨내고, foil의 질량을 측정하여 도착효율을 계산하기 위하여 사용한다.

3.3 실험 장치 구성

도장기기 디스크의 형상, 정전효과 및 공기 터빈의 공기압(디스크 회전수)의 변화에 따른 효과를 알아보기 위하여 아래의 Figure 2와 같이 실험장치를 구성하였다.

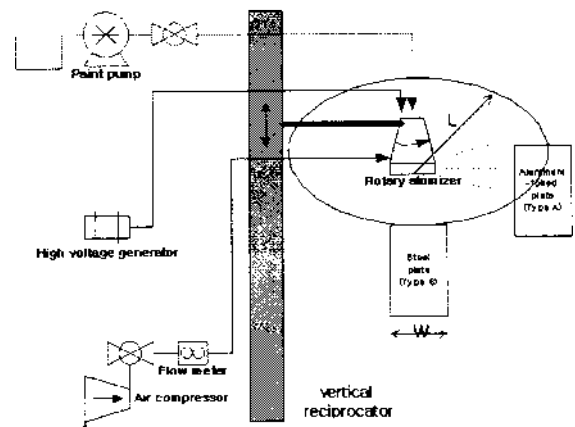


Fig. 2. Experimental arrangement

3.4 실험 방법

디스크, 피도물의 제작 및 실험장치의 구성이 완료되면, 다음의 방법에 따라 실험을 수행하였다.

1. 실내공기속도, 온도 및 습도를 측정하였다.
2. 도료공급장치(도료펌프 및 라인), air compressor, 고전압 발생장치, 수직이송장치 등의 가동을 준비하였다.
3. 도료에 용제를 첨가하여 잘 섞었다.
4. 제작한 디스크를 도장기기에 부착한 후, 도장기기를 수직이송장치에 고정시켰다.
5. 피도물 2개(Type S 및 Type A)를 도장기기에서 일정한 거리에 위치시켰다.
6. Air compressor, 고전압 발생장치를 작동시키며 공기압(회전속도), 인가전압을 조절하였다.

7. 수직이송장치를 가동하고, 도장기에서 무화된 도료가 정상상태(Steady state)가 될 때까지 약 30초간 도료펌프를 구동하여 도료공급을 시작하였다. 이때 미립화된 도료가 피도물들에 도착되지 않도록 차폐물로 피도물들을 가렸다.
8. 정상상태가 되면 차폐물을 제거함과 동시에 스톱 위치로 시간을 측정하며 60초간 피도물들을 도장하였다.
9. 60초가 지나면 차폐물로 피도물들을 가려 더 이상 도장되지 않도록 한 후, 모든 시스템의 가동을 중지하였다.
10. 피도물들을 제거하여 적외선 히터로 건조시킨 후, 자연 냉각시켰다.
11. 피도물들과의 거리, 공기압(회전속도), 인가전압의 영향을 측정하기 위해서 5-10의 과정을 반복하였다.
12. 디스크 형상의 영향을 측정하기 위해서 4-10의 과정을 반복하였다.
13. 모든 실험이 끝나면 디스크를 도장기에서 제거한 후, 도료펌프를 가동시키며 노즐에서 직접 토출되는 도료를 플라스틱 통에 60초간 받고 부피를 측정하였다.
14. 피도물(Type A)에서 알루미늄 foil을 벗겨낸 후, 정밀저울로 foil의 질량을 측정하였다.
15. 피도물(Type S)에 도착한 건도막두께를 건도막두께 측정기를 이용하여 측정하였다.

16. 플라스틱통에 받은 도료의 질량을 정밀저울로 측정하였다.
17. 도료의 비중을 측정한 부피와 질량을 이용하여 계산하였다.
18. 도료의 점도를 점도계로 측정하였다
19. 피도물(Type S)에 도착한 도장부위를 직경 1.5cm로 절단하여 SEM 촬영하였다.

3.5 도착효율 계산

실험을 통하여 획득한 데이터를 이용하여 도착 효율을 다음 식으로부터 계산하였다.

$$\eta = \frac{C}{D} \times \frac{2\pi L}{W} \times 100 (\%) \tag{8}$$

이 식에서 C 는 도착도료량(g)으로서 도착후 측정된 알루미늄 foil의 질량과 도착전 측정한 알루미늄 foil의 질량과의 차이이다. 또한 D 는 토출도료량(g), L 은 디스크의 중심과 피도물간의 거리(cm), 그리고 W 는 피도물의 폭(cm)이다.

4. 실험 결과 및 토론

디스크의 형상 및 인가전압의 변화에 따른 건도막 두께 및 도착효율에의 영향을 아래 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Summary of the experiments

실내조건	공기속도: 0	도료	점 도: 26.24 cP	피도물	두께 0.12cm
	온 도: 8.8℃		토출량: 36.54 g/min		폭 15cm
	습 도: 61%		비 중: 0.875		길이 50cm
도장 실험시간 : 1 min				디스크 중심 - 피도물간 거리 : 26 cm	
Case No.	디스크 형상 (빗살무늬 수)	인가전압 (kV)	디스크회전수 (rpm)	건도막 두께 (μm)	도착효율 (%)
1	None	75	10,000	26.0	39.1
2	None/360	75	10,000	32.2	46.4
3	360	75	10,000	42.7	74.2
4	720	75	10,000	44.6	80.2
5	720	0	10,000	17.3	13.8
6	720	40	10,000	30.1	59.9

이 표에서 Case 1, 2, 3 및 4 는 디스크에 빗살 무늬가 없는 경우, 반쪽 디스크에만 360개의 빗살 무늬가 있는 경우, 디스크 전체에 360, 720 개의 빗살 무늬가 있는 경우를 각각 나타낸다.

디스크의 빗살무늬가 도착성능에 미치는 영향을 알아보기 전에, 인가전압에 의한 영향을 Table 1의 Cases 4-6 및 Figure 3에 나타내었다. 인가전압이 0 인 무정전 무화의 경우 도막두께도 매우 얇고, 특히 도착효율은 20%에도 미치지 못하는 것으로 나타났다. 또한 무정전인 경우에는 실험시 Wrap around 효과도 관찰되지 않았다. 한편 그림에서 보여지듯이, 인가전압의 증가는 도착효율 향상 및 도막두께의 현저한 증가를 가져옴을 알 수 있다. 이러한 결과로부터, 본 연구에서는 가장 도장 효율이 좋은 인가 전압 75 kV를 설계조건으로 삼았다.

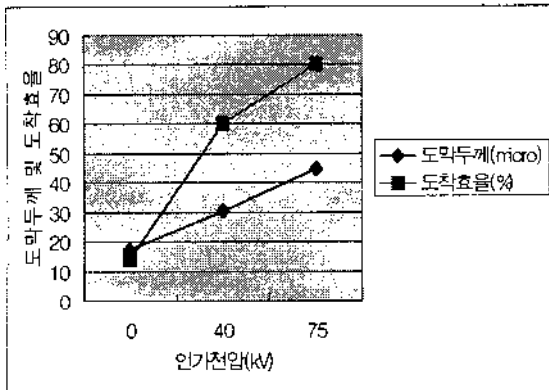


Fig. 3. Electrostatic effect on surface characteristics

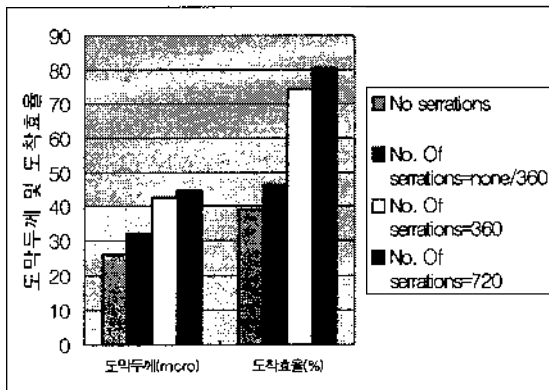


Fig. 4. Effect of disk shape on surface characteristics

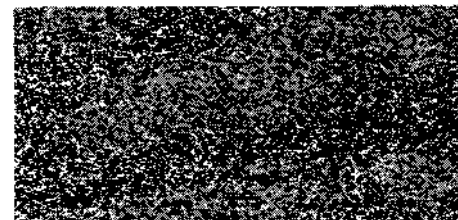
디스크의 빗살무늬 형상에 따른 영향이 Table 1

과 Figure 4에 나타나 있다. 빗살무늬 형태가 서로 다른 Case 1, 2, 3 과 4를 비교해 보면, 720개의 빗살무늬를 가진 디스크(Case 4)가 인가전압 75 kV, 회전수 10,000 rpm로 운전될 때 가장 높은 도착효율과 두꺼운 도막두께를 보여주었다. Case 4는 기존의 도장기기 디스크(Case 1)에 비하여 전도막 두께와 도착효율 모두 급격히 증가한 것을 알 수 있다. 특히 도착효율은 100% 이상 증가하였다.

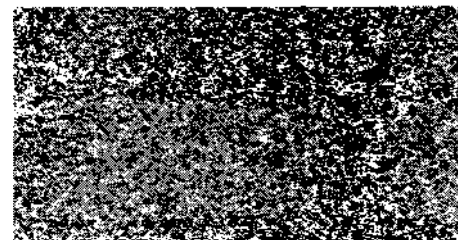
실험 중 측정된 데이터를 이용하여 산출한 도료의 토출량은 0.7 cm³/s 로서, 이는 식 (4)의 $q_1 = 0.4\text{cm}^3/\text{s}$ 및 식 (5)의 $q_2 = 27\text{cm}^3/\text{s}$ 와 비교하면 선상무화의 범위에 있으나, $q_1 = 0.4\text{cm}^3/\text{s}$ 에 매우 근접한 토출량이다. 따라서 Case 1, 즉, 빗살무늬가 없는 디스크는 입자상 무화에서 선상 무화로 천이되는 영역으로 판단할 수 있다. 그러나 Cases 2-4 에서는 디스크 외주의 빗살무늬가 선상무화를 촉진하여 도막두께 및 도착효율에 영향을 미친 것으로 생각할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Surfaces taken by SEM for 75 kV (a) NI = 0, (b) NI = 360 (c) NI = 720

한편 디스크의 형상이 피도물의 표면 거칠기와 기포에 미치는 영향을 알아보기 위해 도장부위를 SEM 촬영하였다. Figure 5(a)에서 볼 수 있듯이 빗살무늬가 없는 기존의 디스크(Case 1)에 의한 피도물의 표면에서는 큰 직경의 많은 기포를 관찰할 수 있었다. 그러나 Figure 5(c)의 최적의 빗살무늬를 가진 디스크(Case 4)에 의한 표면은 기포의 크기도 작아지고, 그 수도 현저히 감소한 것을 보여주었다. 이 또한 위에서 언급하였듯이 무화과정이 면상→선상→입자상 무화를 유지할 때 입자가 가장 균일하고 직경이 가장 작기 때문에 판단된다.

5. 결론 및 향후 연구방향

도장기기 회전 디스크의 빗살무늬 형상 설계가 도장 성능에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였다. 빗살무늬가 있는 경우의 디스크를 가진 도장기기가 빗살무늬가 없는 경우에 비해 도착효율 및 도막두께에 있어서 2배 이상 우수한 성능을 보여주었고, 빗살무늬 수 증가에 따라 도착효율 및 도막두께는 더욱 더 증가함을 알 수 있었다. 또한 피도물의 기포 크기와 수도 현저히 감소하였다. 이러한 결과는 도장기기 회전 디스크의 빗살무늬 형상이 도료 무화 특성에 미치는 영향이 매우 크기 때문이며, 앞으로 여러 가지 디스크의 형상 설계변수들의 최적화를 통해 지속적인 도장기기 성능의 향상이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 수원대학교 환경청정기술연구센터(과학기술부·한국과학재단 지정 RRC)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1. 장순익 : "도장 실무 가이드", 세화, 서울(1996)
2. 김종욱 역 : "환경과학개론", 북스 힘, 서울(2001)
3. 건국대학교 환경공학과 대기오염 실험실 : www.enviworld.co.kr/jarho/air/voc.htm(1998)
4. 생산기술연구원 : "청정도장기술개발 도장성능 시험평가 설비 구축사업" 보고서(1999)
5. 이 찬, 차상원, 고용서 : "정전 회전무화형 도장기기의 디스크 형상에 따른 도착성능 연구", 한국청정기술학회, 춘계학술대회(2002)
6. Chrisensen, L. S. and Steely, L. S. : "Mono-disperse Atomizers for Agricultural Aviation Applications", NASA CR-159777(1980)
7. Lefebvere, A. H. : "Atomization and Sprays", Hemisphere Publishing Corporation, New York (1989)
8. Karim, G. A. and Kumar, R. : "The Atomization of Liquids at Low Ambient Temperature Conditions", Proceedings of the 1st. ICLAS, Tokyo, pp.151-155(1978)
9. Hinze, J. O. and Milborn, H. : "Atomization of Liquids by Means of Rotating Cup", ASME J. Appl. Mech., Vol. 17, No. 2, pp.145-153(1950)
10. Tanasawa Y., Miyasaka Y. and Umehara M. : "Effect of Shape of Rotating Disks and Cups on Liquid Atomization", Proceedings of the 1st. ICLAS, Tokyo, pp.165-172(1978)
11. Matsumoto S., Belcher D. W. and Crosby E. J. : "Rotary Atomizers : Performance Understanding and Prediction", Proceedings of the 3rd. ICLAS, London, pp.LA/1/1-21(1985)