

## 회전무화형 도장 기기의 개발체계 및 적용에 관한 연구

이 찬 · 차상원

수원대학교 기계공학과, 환경정정기술연구센터

### Study on the Development System of Rotary Atomizing Painting Equipment and Its Application

*Chan Lee · SangWon Cha*

*Dept. of Mech. Eng., The Univ. of Suwon*

*Center for Environmental and Clean Technology*

#### 요 약

회전형 도장기기의 개발을 위한 설계, 해석, 기초실험 및 성능시험 체계를 정립하였다. 도장기기의 설계 요구조건으로부터 도장기기 구성 요소들의 설계사양을 결정하는 개념설계 모델을 제안하였고, 이를 이용하여 각각의 도장기기 구성 요소를 설계, 해석하는 과정을 제시하였다. 설계된 도장기기의 무화특성 및 도장성능을 관찰하기 위한 실험 및 시험 방법을 기술하였고, 측정절차 및 측정변수의 평가기준을 확립하였다. 본 연구의 도장기기 개발체계를 이용한 실제 도장기기 개발 적용 사례를 제시함으로써, 본 방법의 신뢰성을 확인하였다.

ABSTRACT : Concurrent development system which includes design, analysis, basic experiment and performance test procedure for rotary atomizing painting equipment was established. Basic design specifications of the equipment parts were determined according to the overall design requirements of painting equipment using conceptual design model. On the basis of derived design specifications, design and analysis procedures was proposed for developing each equipment part. Also proposed are experiment and test methods to investigate the spray and transfer characteristics of designed painting equipment, and their measurement variable, process and evaluation criteria are constructed. The present development system was validated by applying its entire processes to the actual painting equipment.

## 1. 서 론

도장기술은 현대 산업사회의 모든 공업제품에 필수적인 기술로서, 제품의 기능적 측면 뿐만 아니라 디자인 및 미관을 위해서도 제품 생산에 필수적인 과정이다. 도장기술이 모든 산업에 폭 넓게 사용되고 그 적용 범위가 점차 더 넓어짐에도 불구하고, 도장 기기 및 도장설비를 위한 기술개발 노력은 국내외적으로 매우 미흡한 것이 현실이고, 대부분의 도장관련 업체들이 필요 기술을 경험적 know-how에 의존하거나 부분적인 기술개발만을 통해 확보하고 있는 실정이다. 따라서, 최근 환경문제와 결부되어 관심이 집중하고 있는 수용성도료 사용 도장기기 및 고효율 도장기기의 개발에 있어서도 도장 전문업체들이 효과적으로 대처하지 못하고 있다.

특히 기술기반이 더욱 취약한 국내업체의 경우, 이러한 고효율 및 고부가가치의 도장기기의 개발경험은 전무한 상태이다. 이러한 취약한 국내 도장기기 및 설비 기술의 향상을 위하여, 한국기계연구원과 생산기술연구원을 주축으로 도장관련 연구개발사업이 이루어진 적이 있으나, 연구개발 노력들이 단편적으로 이루어져 실제 산업체의 기술력 향상에 큰 도움을 주지 못하였다.

그러므로, 본 연구에서는 국내 도장업체들이 설계 실제에 사용할 수 있도록, 고효율 도장기기 개발을 위한 체계적인 설계, 해석, 실험 및 시험 과정과 그에 따른 방법론들을 결합한 엔지니어링 패키지(engineering package) 형태로 개발체계를 정립하였다. 본 개발체계는 도장기기의 설계개념 정의, 각 구성요소들에 대한 설계 및 해석, 도장기기의 특성에 대한 기초실험과 도장 성능시험과 같은 도장기기 개발의 전 과정을 포함하였다. 그리고, 이러한 도장기기 개발체계를 실제 산업현장의 도장기기 개발과정에 적용함으로써, 본 개발체계의 신뢰성을 검증하였다.

## 2. 도장기기의 개발 체계 및 과정

### 2.1 도장기기 assembly의 개념설계

회전 무화형 도장기기는 Fig. 1에서 볼 수 있듯

이 무화기구인 디스크, 디스크의 구동수단인 공기 터빈, 디스크와 터빈이 연결된 회전축과 베어링, 그리고 공기 및 도료를 공급하기 위한 공기압축기와 도료펌프로 구성된다.

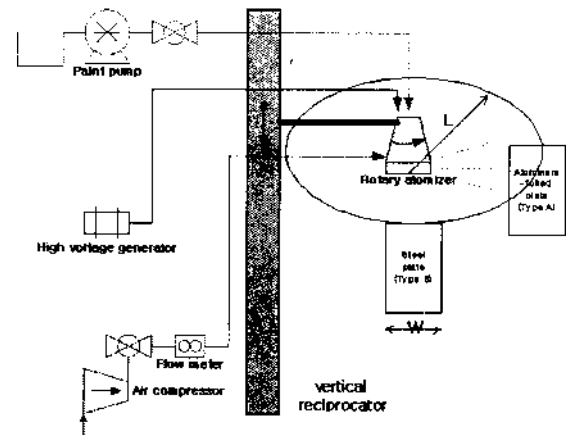


Fig. 1. Experimental arrangement

이러한 도장기기 assembly의 개발시 우선적으로 고려되어야 할 설계요구 조건은 도료의 효율적인 무화를 위한 회전수의 확보로서, 일반적으로 디스크를 무화기구로 사용하는 경우 20,000~25,000 RPM(무부하시) 정도에서 회전수가 선정된다. 그러나 도장기기의 회전수는 터빈, 디스크의 형상 및 설계변수와 회전축, 베어링의 특성에 의해 좌우되므로, 이러한 도장기기 구성요소들과 회전수와 상관계수를 알아볼 수 있는 개념설계 모델의 개발이 필요하다. 더 나아가, 주어진 회전수에 대한 개념설계 모델로부터, 도장기기 구성요소별 설계사양들(예: 터빈 및 디스크의 직경, 베어링 형태 등)을 결정할 수 있고, 그 다음 단계로 구성요소들의 기본설계를 수행할 수 있다. 본 연구의 개발체계에 따라 도장기기를 개발하는 전 과정을 아래의 Fig. 2에 나타내었다.

본 연구에서는 등속도의 회전을 하는 도장기기에 대해 다음과 같은 동력균형 관계식으로부터 개념설계 모델을 도출하였고(Fig. 3 참조), 각 동력 성분에 대한 모델은 다음과 같다:

$$\text{Actual fluid power} = \text{Disk friction power} + \text{Bearing friction by turbine(A) of disk and turbine (B)/power(C)} \quad (1)$$

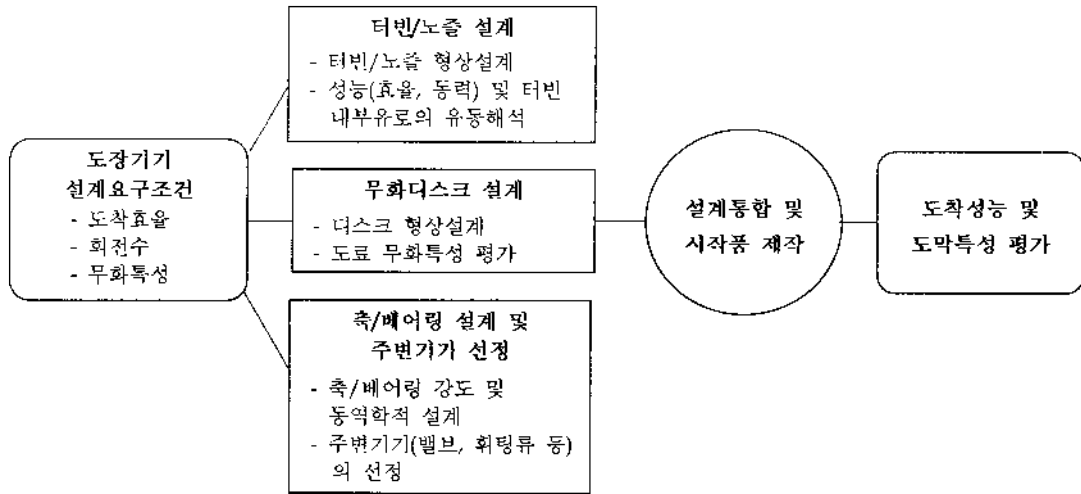


Fig. 2. Development system of painting equipment

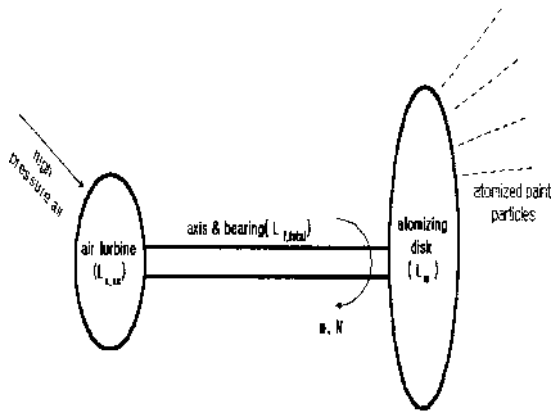


Fig. 3. Power balance of painting equipment

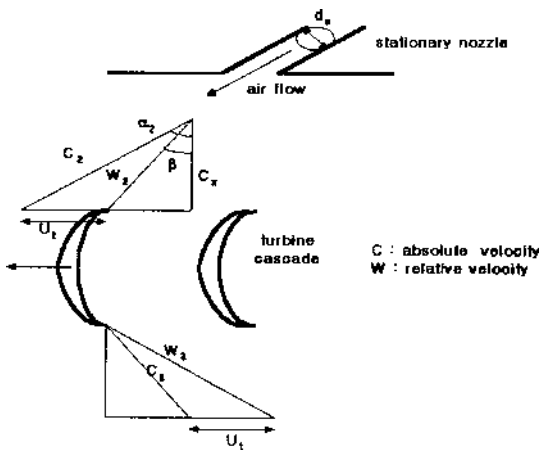


Fig. 4. Velocity triangle of air turbine

(A) 공기터빈의 동력

먼저 공기터빈의 동력은 Fig. 4의 속도삼각형으로부터 구해진다. Fig. 4에서 보여지듯이, 도장기기 노즐커버의 노즐로부터 유입되는 공기는 충격형 (impulse type) 터빈 cascade를 통과하면서 동력을 발생하며, 이때 이론적인 터빈 동력 ( $L_{a, ideal}$ )은 다음과 같이 표현된다<sup>1)</sup>.

$$L_{a, ideal} = 2m_{air} U_t C_x \tan \beta N_n \quad (2)$$

이때  $m_{air}$ 는 노즐을 통한 공기유량,  $U_t$ 는 터빈 회전속도,  $C_x$ 는 축방향속도,  $\beta$ 는 터빈의 설치각도,  $N_n$ 은 노즐의 개수를 나타낸다.

터빈을 통과하는 공기는 실제적으로는 터빈 cascade의 출구각으로 편차를 가지고 흐르며, 터빈 내부에서 압력손실이 수반되므로, 실제적인 터빈동력 ( $L_{a, ac}$ )은 이론동력에 터빈효율 ( $\eta_T$ )을 고려하여야 한다. 그러므로 실제 터빈동력은 (3) 식과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} L_{a, ac} &= \eta_T L_{a, ideal} = \eta_T 2m_{air} U_t C_x \tan \beta N_n \\ &= 2\eta_T N_n m_{air} \left( \frac{\omega D_t}{2} \right) C_2 \cos \alpha_2 \tan \beta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 2\eta_T N_n m_{air} \left( \frac{\omega D_t}{2} \right) \left( \frac{m_{air}}{\frac{\pi}{4} d_n^2 \rho_2} \right) \cos \alpha_2 \tan \beta \\
 &= 4\eta_T N_n m_{air}^2 \left( \frac{\omega D_t}{\pi d_n^2 \rho_2} \right) \cos \alpha_2 \tan \beta \quad (3)
 \end{aligned}$$

여기서  $C_2$ ,  $\alpha_2$ ,  $\rho_2$ 는 노즐출구의 유속, 각도, 밀도를,  $D_t$ ,  $d_n$ 은 터빈의 직경, 노즐의 관경을, 그리고  $\omega$ 는 도장기기의 회전각속도를 의미한다. 또한 터빈효율 ( $\eta_T$ )는 도장기기의 개념설계 단계임을 감안하여, 계산이 수월한 Soderberg의 상관관계식 [1]을 이용하여 평가한다.

### (B) 디스크 및 터빈 마찰동력

터빈 및 디스크를 회전 원판으로 가정하고, 일반적으로 회전하는 원판과 주위 유체(공기 또는 공기/도료 혼합기체)간의 마찰 동력은 다음과 같은 Pfleiderer의 경험식 [2]로부터 구해지며,

$$L_f = K_1 \rho_\infty U^3 D^2 \quad (4)$$

이때  $K_1$ 은  $0.88 \times 10^{-3}$ 이고,  $\rho_\infty$ 는 주위 유체의 밀도이다. 그러므로 (4) 식을 터빈 및 디스크에 적용하여 총 마찰동력을 구하면,

$$\begin{aligned}
 L_{f, total} &= L_{f, turbine} + L_{f, disk} \\
 &= K_1 \rho_\infty U_t^3 D_t^2 + K_1 \rho_\infty U_d^3 D_d^2 \\
 &= \frac{K_1}{8} \rho_\infty \omega^3 (D_t^5 + D_d^5) \quad (5)
 \end{aligned}$$

이 된다. 여기서  $U_d$ ,  $D_d$ 는 디스크의 회전속도 및 직경을 나타내며, 또한 본 연구에서는 터빈의 마찰동력 계산시 housing의 영향은 무시하였다.

### (C) 베어링 마찰동력

회전축에 부착되는 베어링에 의해 발생하는 마찰동력은 다음과 같이 표현되며 [2],

$$L_m = 9.8 f W U_a = 4.9 f W D_a \omega \quad (6)$$

이때  $W$ ,  $D_a$ 와  $U_a$ 는 회전차(터빈, 디스크)의 중량, 회전축의 직경과 원주속도를 나타낸다. 또한  $f$ 는 베어링의 마찰계수를 의미하며, 볼베어링의 경우 0.0015, 평판 베어링의 경우 0.005, 및첼 베어링의 경우 0.003의 값을 갖는다.

그러므로, (1) 식과 (3), (5) 및 (6) 식으로부터, 회전수는 다음과 같이 구해진다.

$$\omega = \left[ \frac{4\eta_T m_{air}^2 N_n \frac{D_t}{\pi d_n^2 \rho_2} \cos \alpha_2 \tan \beta - 4.9 f W D_a}{\frac{K_1}{8} \rho_\infty (D_t^5 + D_d^5)} \right]^{1/2} \quad (7)$$

위 (7) 식에서 분자의 첫번째항은 터빈의 영향을, 두번째 항은 베어링의 영향을 나타내며, 분모는 터빈 및 디스크의 마찰의 영향을 의미한다.

## 2.2 도장기기용 터빈 설계 모델 및 해석방법

(7) 식을 이용하여, 도장기기의 설계요구사항인 회전수에 부합되는 노즐의 관경 ( $d_n$ ), 각도 ( $\alpha_2$ ) 및 개수 ( $N_n$ ) 그리고 터빈의 직경 ( $D_t$ ), 각도 ( $\beta$ ) 및 터빈유량 ( $m_{air}$ )을 결정할 수 있으며, 이러한 값들이 터빈의 기본설계사항들(basic design specifications)이 된다.

노즐의 설계를 위해서는 주어진 터빈유량을 노즐로부터 터빈으로 유동시키는데 노즐 내부에서 고압 공기의 가속과정을 살펴보아야 하고, 최종적으로 노즐출구에서 유동이 질식(choking)되는지 여부를 설계단계에서 검토하여야 한다. 즉 노즐출구가 질식조건에 도달하면 공기의 유량이 더 이상 증가될 수 없고 이로 인해 도장기기 회전수도 증가되지 않으므로, 질식을 방지하기 위해서는 노즐의 길이와 관경을 조절할 필요가 있다. 이러한 노즐의 가속과정과 질식여부 확인은 Fanno line을 따르는 압축성 유동해석 방법 [3]을 사용하여 이루어진다.

충격형 터빈의 형상설계를 위해서는 터빈 유로

의 곡면형상(camber), 터빈의 반경 및 축방향 길이, 터빈 cascade 간격, 터빈 목(throat) 면적의 결정이 이루어져야 하며, 이를 위해서는 터빈의 익형설계 및 2차원 공기역학적 해석이 이루어져야 한다. 우선적으로 (7) 식의 개념설계 모델에서 결정한 터빈의 설치 각도 ( $\beta$ )에 맞추어 camber 선을 대칭적으로 설계하고, 유동방향에 따른 터빈유로의 수축-확대 단면 (converging-diverging cross section) 및 목(throat) 설계가 이루어져야 한다<sup>4)</sup>. 또한, 설계된 터빈 형상에 대해 좀더 엄밀한 전산유체역학적 해석(computational fluid dynamics analysis)을 통해<sup>5)</sup>, 터빈 표면에서의 유동박리(flow separation) 및 충격파 형성 여부를 검토하여, 최종적인 터빈 형상 설계가 이루어져야 한다.

**2.3 도장기가용 디스크의 설계 모델**

정전 회전무화형 도장기기를 이용하는 도장과정에서 고품질의 도장표면을 얻고, 공기 터빈의 구동동력 및 VOC 발생의 저감을 위해서는 피도물체의 도착 효율이 높아야 한다. 이를 위해서는 디스크 표면도료의 균일한 면상(面狀, flat sheet) 두께, 직경이 작고 분포가 균일한 무화 입자(droplet)의 형성이 필수적이다. Christensen과 Stealy<sup>6)</sup>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 등을 나타낸다. 한편 디스크의 형상으로는 회전수, 직경, 빗살무늬(serration), 반경방향 깃(radial vane) 등을 들 수 있다<sup>7)</sup>.

Hinze와 Milborn<sup>8)</sup>에 따르면 정전 회전무화형 도장기에서 도료가 이상적으로 무화되는 과정은 다음과 같다.

- (1) 먼저 고압의 공기로 구동되는 공기터빈에 의하여 고속으로 회전하는 도장기기의 노즐을 통해 도료가 디스크에 공급된다.

- (2) 1 단계 : 공급된 도료는 마찰력에 의하여 디스크와 같은 속도로 회전하며, 디스크의 표면을 따라 원심력에 의하여 디스크의 외주로 이동하면서 매우 얇은 면상의 도료형태가 된다.
- (3) 2 단계 : 면상의 도료는 회전 디스크의 외주에서 이탈하면서 선상(線狀, Ligament)의 도료형태가 된다.
- (4) 3 단계 : 이탈한 선상도료는 외부교란에 의해 불안정해지고, 분열하여 결국 입자상의 무화도료가 된다.
- (5) 여기에 정전효과가 추가되어 도료사이에 정전기력이 발생되고 도료의 무화는 보다 증대된다. 이와 같이 무화된 도료입자는 원심력에 의해 피도물로 이동되고 도료의 점착력 및 정전인력에 의해 피도물의 표면에 도착된다.

한편 Tanasawa 등<sup>9)</sup>은 임계 도료량  $q_1$ 과  $q_2$ 를 다음 (8), (9)와 (10) 식으로 각각 제시하였다.

$$q_1 = 2.8 \left(\frac{D}{n}\right)^{2/3} \left(\frac{\sigma}{\rho}\right) \left[1 + 10 \left\{\frac{\mu}{(\rho \sigma D)^{1/2}}\right\}^{1/3}\right]^{-1} \quad (8)$$

$$q_2 = 5.3 \left(\frac{D}{n}\right)^{2/3} \left(\frac{\sigma}{\rho}\right) \left(\frac{\rho}{\mu}\right)^{1/3} \text{ for } \frac{D\rho}{\mu} < 30 \text{ s/cm} \quad (9)$$

$$\text{또는 } q_2 = 20\sqrt{D} \left(\frac{1}{n}\right)^{2/3} \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^{5/6} \text{ for } \frac{D\rho}{\mu} > 30 \text{ s/cm} \quad (10)$$

이 식에서  $D, n$ 은 디스크의 직경 및 회전속도,  $\rho, \mu, \sigma$ 는 도료의 밀도, 점도, 표면장력을 각각 나타내며, 디스크의 회전수가 일정할 때의 임계 도료량  $q_1$ 과  $q_2$ 의 의미를 다음의 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Atonization modes at the disk circumference for various liquid flow rates

Liquid flow rate $q$	Atomization modes	Remarks
$q < q_1$	Drop formation	Direct drop atomization
$q_1 < q < q_2$	Ligament formation	Ideal 3-stage atomization
$q > q_2$	Film formation	Film formation at the disk circumference, breaks up into ligaments and drops

따라서 이상적인 무화, 즉, 디스크 외주에서의 선상 무화를 유지하기 위해서는 도장기기 노즐에서의 토출도료량을  $q_1$ 에서  $q_2$  사이로 유지하는 것이 가장 바람직하며, 토출도료량이 그 범위를 벗어날 경우에는 최적의 입자계적, 입자의 균일성, 입자 크기에 영향을 미치고, 따라서 피도물의 표면특성의 저하를 야기한다<sup>6, 11)</sup>.

그러나 디스크의 외주가 빗살무늬 모양이면 토출도료량이 임계도료량  $q_2$  보다 많을 경우에도 면상 무화를 방지하고, 선상 무화를 유지함으로써 최소 직경의 균일한 무화 입자를 얻을 수 있으며, 최적 빗살무늬의 개수  $z$ 는 디스크의 크기, 회전속도와 도료의 물성치를 이용하여 아래의 식으로 표시된다<sup>6 11)</sup>.

$$z = 0.215 \left( \frac{\rho \omega^2 D^3}{\sigma} \right)^{5/12} \left( \frac{\rho \sigma D}{\mu^2} \right)^{1/6} \quad (11)$$

위 (11) 식에서  $D, \omega$ 는 디스크의 직경 및 회전속도,  $\rho, \mu, \sigma$ 는 도료의 밀도, 점도 및 표면장력을 각각 나타낸다.

## 2.4 도장기기 무화특성 실험 방법

실제 산업현장에서의 도장은 피도물의 종류에 따라 이에 알맞은 도료와 희석제를 선택하여야 하고, 이에 따라 점도, 도막두께 등도 작업환경에 따라 최적의 조건을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 모든 도장환경에 적용할 수 있도록 도장기기 디스크의 형상, 회전속도, 도료의 점도, 정전효과 등에 따른 도료 무화입자의 특성을 가시화 실험을 통하여 알아본다.

위에서 언급하였듯이 Tanasawa 등<sup>9)</sup>은 무화도료 입자의 최대 입경 및 SMD 입경을 무화과정에 따라 다음의 (12), (13) 및 (14) 식으로 제시하였으며, 이상적인 선상무화를 유지할 때 입자가 가장 균일하고 직경이 가장 작다고 보고하였다.

입자상 무화 :

$$D_{\max} = \frac{43.2}{n D^{0.5}} \left( \frac{\sigma}{\rho} \right)^{0.5} \left( 1 + 0.003 \frac{q}{\nu D} \right), \quad SMD = D_{\max} / 1.6 \quad (12)$$

선상 무화 :

$$D_{\max} = 32 \left( \frac{q^{0.1}}{n D^{0.5}} \right) \left( \frac{\sigma^{0.5}}{\rho^{0.4} \mu^{0.1}} \right), \quad SMD = D_{\max} / 1.7 \quad (13)$$

면상 무화 :

$$D_{\max} = 105 \left( \frac{q^{0.5}}{n D^{0.8}} \right) \left( \frac{\sigma^{0.4}}{\rho^{0.4}} \right), \quad SMD = D_{\max} / 1.7 \quad (14)$$

이 식들에서  $D, n$ 은 디스크의 직경 및 회전속도,  $\rho, \mu, \sigma$ 는 도료의 밀도, 점도, 표면장력을 각각 나타낸다.

무화입자의 입경을 측정하는 기술은 기계적인 방법과 광학적인 방법으로 대별할 수 있으며, 본 연구에서는 육안판별이 어려운 입자도 측정가능하고, 실시간 이미지 획득이 가능한 영상처리 방법의 일종인 아래 Fig. 5의 PMAS(Particle motion analysis system)를 사용하였다.

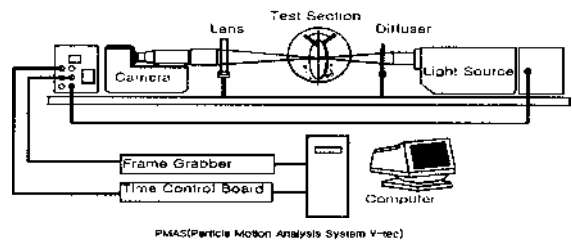


Fig. 5. Arrangement of PMAS system

PMAS는 무화입자의 입경분포 등의 데이터를 획득할 수 있는 미시적 촬영과 무화입자의 체적을 알아볼 수 있는 거시적 촬영을 수행할 수 있으며, 미시적 촬영으로부터 획득할 수 있는 데이터는 아래와 같다.

- 가. 입경 분포 곡선 : 입자 크기의 구간별 개수 분포(number based size histogram), 입자 크기의 구간별 체적 분포(volume based size histogram), 평균입경(mean diameters : D10, D20, D30, SMD) 등
- 나. 입경 분포 함수 : Rosin-Rammler 분포 함수 등
- 다. 누적 분포 곡선 : 대표입경(representative diameters : D01, MMD, D099, Dpeak) 등
- 라. 분산 및 편기(dispersion) : span factor, dispersion

factor 등이다.

입경 분포의 균일성은 아래 (15) 식의 Rosin-Rammler 분포 함수에서 판단할 수 있다.

$$1 - Q = \exp[-(d/X)^\alpha] \quad (15)$$

위 식에서  $Q$ 는 입자의 입경  $d$ 보다 작은 입경들의 누적체적 분률,  $X$ 는 D0632, 그리고  $\alpha$ 는 분포지수이다. 지수  $\alpha$ 는 분무입자분포의 균일성을 나타내는 척도이며, 이 값이 클수록 분무는 균일하다. 일반적인 도장기기에서  $\alpha$ 는 1.5 - 4, 회전무화형 도장기기에서는 7까지의 값을 갖는다<sup>7, 12)</sup>.

(15) 식에서 알 수 있듯이 도장기기 디스크에서 무화된 입자의 크기 및 분포는 디스크의 회전수, 직경, 액체의 물성치(점도, 밀도, 표면장력), 유량 그리고 정전효과와 함수이므로, 개발한 도장기기의 터빈 및 디스크, 각종 실험장치 그리고 실험방법의 타당성을 검토하고, 가시화 자료를 각종 설계변수에 따른 이상적인 선상무화과정을 선택하는 기준으로 한다.

## 2.5 도장기기 도착성능 및 도막특성 평가방법

개발한 도장기기의 도착성능 및 도막특성을 평가하기 위해서는 2.2 및 2.3절의 설계방법에 따라 도장기기의 터빈과 디스크를 Fig. 6 및 7과 같이 제작한다.

일정한 공기압에서 디스크의 직경에 따라 회전수가 변화하고 외주에서의 선속도도 변화하므로 직경이 다른 여러 개의 디스크, 또한 식 (11)에 따라 적정 빗살무늬를 가공한 디스크를 제작한다. 또한 무화된 도료가 도착되는 피도물을 제작하고, 도료펌프, 공기압축기, 고전압 발생장치, 수직이송장치 등의 실험장치를 위의 Fig. 1과 같이 구성한다.

피도물에 도착한 도료가 충분히 건조된 후 건조막두께 측정기로 도막의 두께를 측정한다. 또한 실험을 통하여 획득한 데이터를 이용하여 도착효율을 다음 식으로부터 계산한다.

$$\eta = \frac{C}{D} \times \frac{2\pi L}{W} \times 100 (\%) \quad (16)$$

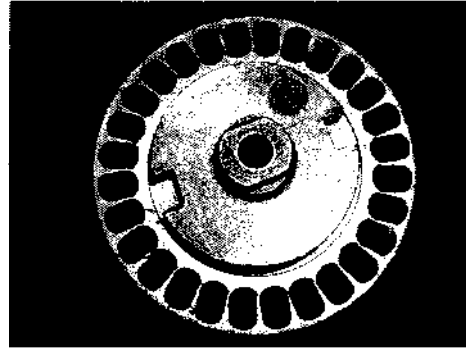


Fig. 6. Air turbine

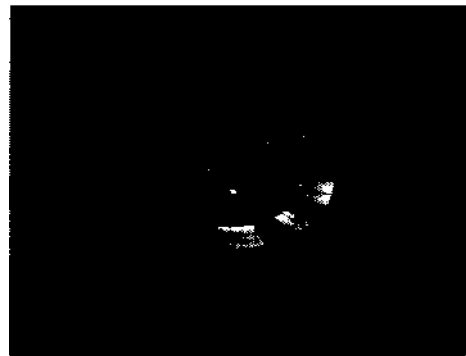


Fig. 7. Atomizing disk

이 식에서  $C$ 는 도착도료량으로서 도착후 측정된 알루미늄 foil의 질량과 도착전 측정된 알루미늄 foil의 질량과의 차이이다. 또한  $D$ 는 토출도료량,  $L$ 은 디스크의 중심과 피도물간의 거리, 그리고  $W$ 는 피도물의 폭이다. 한편 표면거칠기, 도막 부착성, 경도 등을 측정하여 피도물의 도막특성을 판단하고, SEM 촬영을 하여 표면의 기포 등을 관찰하여 개발한 도장기기의 성능을 종합적으로 평가한다.

## 3. 도장기기 개발체계의 적용 사례

본 연구에서는 2장에서 서술한 도장기기 개발체계를 20,000RPM(무부하) 및 도착효율 80% 이상의 설계요구조건을 가지고, 참고문헌 [13]을 참조하여 Table 2와 같은 구성요소별 설계제원들을 가지는 실제 도장기기에 대해 적용하여 보았다.

본 방법에 의해 예측된 결과에 의하면, 도장기기 회전수가 20,000 RPM에 도달하려면, 노즐 1개당 공급해야 하는 공기량은 60 LPM(1atm 기준)이고, 공

Table 2. Design specifications of painting equipment

Air turbine nozzle		Shaft and bearing	
Length(mm)	26	Shaft diameter(mm)	20
Diameter(mm)	2	Shaft length(mm)	133
Angle(deg)	70	Bearing type	Ball bearing
Quantities	2	Atomizing disk	
Air turbine		Diameter(mm)	120
Diameter(mm)	60	Liquid flow rate(g/min)	36.54
Angle(deg)	50	Liquid specific gravity	0.875

기를 6기압 상태로 공급하므로 질량유량은 2.89 g/s 이다. 그러나 노즐출구에서의 질식유량은 3.96 g/s 이므로, 본 도장기기는 질식상태에 아직은 도달하지 않은 경우로 판단된다. Fig 8은 본 방법에 의한 예측 결과와 실제 회전수 측정결과간의 비교를 보여주고 있으며, 본 방법이 매우 정확한 예측결과임을 보여주고 있다.

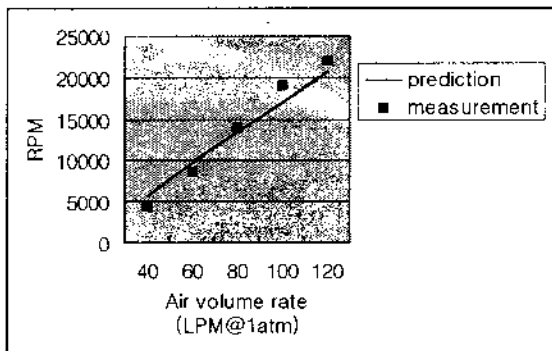


Fig. 8. Air flow rate and RPM of air turbine

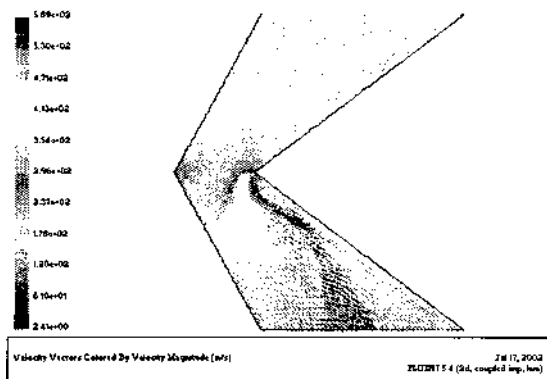


Fig. 9. Flow analysis of air turbine

공기터빈의 설계는 노즐로부터 유입되는 공기의 유속, 방향 및 터빈 회전수를 고려하여, 터빈으로 유입되는 공기의 상대 유속 및 입사각(incidence angle)이 터빈의 설치각도와 잘 일치하도록 설치각도 50 deg 로 결정하였다. 도장기기 터빈은 제작의 편이상 50 deg 각도의 입, 출구를 직선 camber line으로 대칭적으로 연결하여 설계하였고, 목 설계를 위해서는 유로의 단면적을 10 deg 기울기로 축소-확대 되도록 설계하였다. 그리고, Fig. 6에서 보여지듯이, 터빈의 유로는 원주방향으로 총 28개를 가공하였고, Soderberg의 상관관계식에 의하면 터빈의 효율은 82%로 평가되었다. Fig. 9는 터빈 내부의 유동해석결과를 보여주고 있으며, 흡입면의 모서리 부근에서 유동박리를 관찰할 수 있으나, 공기가 터빈 출구에 접근하면서 유동이 재부착되어 출구에서는 터빈 설치각을 따라 유동이 형성됨을 볼 수 있다. 즉, 터빈 내부의 유동박리는 어느 정도의 효율 저하는 가져오나, 터빈의 동력생산에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

도장기기 디스크는 선상무화를 촉진하기 위해, 디스크 원주에 (11) 식의 최적의 개수(720개)에 맞추어 빗살무늬를 내었다. 도장기기 디스크의 무화특성을 평가하기 위하여, PMAS를 이용하여 무화 궤적 및 입자크기분포를 측정하였다. 실험의 편이상 도료 대신 물을 사용하였으며, Fig. 10에서 보여지듯이, 도료의 무화궤적이 선상 형태(ligament type)로 관찰되었다.

Fig. 11은 본 도장기기의 도착성능 시험결과를 보여주고 있다. 이때 시험조건은 회전수 20,000 RPM, 인가전압 75kV 로 설정하였고, 본 도장기기와 비교



를 위해, 디스크에 빗살무늬가 전혀 없는 경우, 반쪽 원주에만 360개의 빗살무늬가 있는 경우, 원판 전체에 360 개의 빗살무늬가 있는 경우를 같이 시험하였다[14]. Fig. 11에서 볼 수 있듯이, 본 도장기기가 도착효율도 80.2%, 도막두께도 44.6 $\mu$ m로서, 다른 디스크를 가지는 도장기기에 비해 우수함을 알 수 있었다.

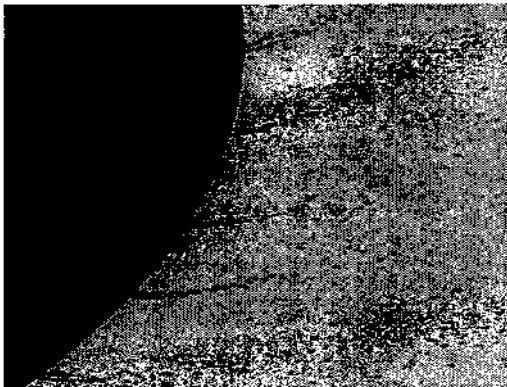


Fig. 10. Ligament atomization

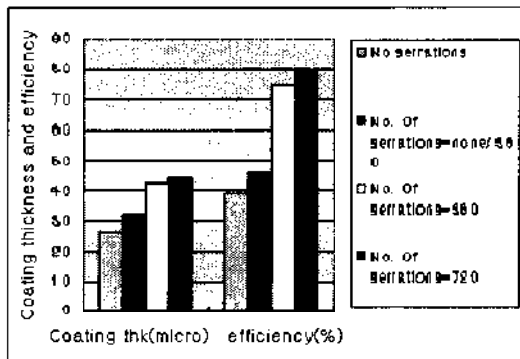


Fig. 11. Coating thickness and efficiency

앞서의 연구결과들로부터, 본 개발체계가 고효율의 도장기기를 개발하는데 있어 설계 과정이나 시험평가 체계가 매우 적합함을 알 수 있었고, 산업체의 실제 도장기기 개발에도 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

회전부화형 도장기기의 개발을 위한 설계, 해석, 실험 및 시험평가 체계 및 과정을 개발하였다. 본 개

발체계는 도장기기의 개념설계 단계부터 시작품 제작후 성능 평가 단계까지의 개발의 전 과정을 포함하였고, 각 단계에 적용할 수 있는 설계/실험/시험 방법론, 절차 및 기준들을 제시하였고, 각 개발단계 간의 연계성을 설명하였다. 본 개발체계의 적용을 통해 얻어진 도장기기는 설계점 회전수 22,000RPM과 80.2%의 도착효율을 보여주었으며, 이를 통해 본 개발체계가 실제 도장기기 산업체의 개발과정에 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 수원대학교 환경청정기술연구센터(과학기술부·한국과학재단 RRC)와 국가청정생산지원센터의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다. 본 연구를 위해 도장기기 관련 자료를 제공해 주신 (주)대한도장플랜트 관계자들에 게도 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- Dixon, S. L. : "Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery", 3rd edn, Pergamon Press (1978)
- 하재현, 박선종 : "유체기계", 문운당(1998)
- Sadd, M. A. : "Compressible Flow Flow", Prentice-Hall Inc.(1985)
- Lewis, R. I. : "Turbomachinery Performace Analysis", ARNOLD(1996)
- FLUENT v5.3 manual, FLUENT Inc.(1999)
- Chrisensen, L. S. and Steely, L. S. : "Monodisperse Atomizers for Agricultural Aviation Applications", NASA CR-159777(1980)
- Lefebvere, A. H. : "Atomization and Sprays", Hemisphere Publishing Corporation, New York (1989)
- 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)
- 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)
10. 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)
11. Matsumoto S., Belcher D. W. and Crosby E. J. : "Rotary Atomizers : Performance Understanding and Prediction", Proceedings of the 3rd. ICLAS, London, pp.1A/1/1-21(1985)
12. 이규성 : "대기오염 방지시설", 형설출판사, 서울 (1998)
13. 대한도장플랜트(주) : "도장기기 설계자료" (2001)
14. 차상원, 이찬, 고용서 : "정전 회전무화형 도장기기의 빗살부너 디스크가 도착성능에 미치는 영향", 한국정경기술학회지, Vol. 8, No 1, pp.45-51(2002)