◎ 논 문

높은 도착효율을 가지는 회전형 정전 도장기기의 개발

이 찬* · 차상원* · 호광일*

Development of the Rotary Electrostatic Painting Equipment with High Transfer Efficiency

Chan Lee*, Sang Won Cha* and Kwang Il Ho*

Key Words: Painting equipment (도장 기기), Air turbine (공기 터빈), Atomizing disk (무화 디스크), Ligament atomization (선상 무화), Transfer efficiency (도착 효율)

ABSTRACT

A new electrostatic rotary atomizing painting equipment using air turbine was developed for high transfer efficiency. Based on the overall design requirements of painting equipment, basic design specifications of the equipment parts such as air turbine and atomizing disk are defined from the present conceptual design model. Air turbine is designed with the section profile of NACA airfoil, and its internal flow field is analyzed by commercial CFD code. Atomizing disk is designed to achieve the ligament type spray of paint with the use of visualization technique. Various experiments and tests are conducted to investigate the spray and the transfer characteristics of newly-designed painting equipment, and the measurement results are compared with the those of conventional painting equipments. The comparison results show the present painting equipment is superior to the conventional ones in the aspects of transfer efficiency and coating surface characteristics.

1. 서 론

도장기술은 현대 산업사회의 공업제품의 표면처리를 위한 필수적인 기술로서, 모든 산업에 폭 넓게 사용되고 그 적용 범위가 점차 더 넓어지고 있는 실정이다. 그러나 국내 도장공정에 사용하는 도장기기의 상당 부분이 외국 제품에 의존하고 있으며, 대부분의 국내 도장관련 업체들은 저가의 도장기기 생산에 치중하고 있고, 도장기기 관련 필요 기술들을 경험적 know-how나 외국제품의 역설계방식에 의존하고 있는 실정이다.

따라서, 최근 들어 대형 도장공정의 휘발성 대기오염물질 (VOC) 발생량 저감과 같은 환경문제와 결부되어 고효율 도장기기의 개발이 도장업계의 주요한 관심사로 부각되고 있으나, 기술기반이 취약한 국내업체의 경우 고효율 및 고부가가치의 도장기기의 개발을 위한 기술 기반이 전무한 상태이다. 이러한 이유로, 국내 도장업체들은 친환경적 도장 설비 구축에 큰 어려움을 겪고 있다. 예를 들어, 국내 도장기기의 도착효율이 약 55% 수준이 가장 좋은 수준으로 보고 되고 있으므로[1], 국내에서 사용되는 도료의 45% (년간 3,1500 kℓ)는 대부분이 도장 설비에서의 폐수 및 VOC로 방출되고 있는 실정이다.

* 수원대학교 기계공학과, 환경청정기술연구센터
책임저자 E-mail : clee@suwon.ac.kr

그러므로, 본 연구에서는 국내 도장업체들이 실제 설계에 사용할 수 있도록, 고효율 회전형 액체 정전 도장기기 개발을 위한 체계적인 개발체계를 정립하였고, 이러한 도장기기 개발체계를 실제 산업현장의 회전식 정전 액체 도장기기 개발과정에 적용함으로써, 본 개발체계의 신뢰성을 검증하였다. 또한 본 연구결과는 유체기계 적용분야에 한 단계 기여할 수 있을 것이다.

2. 도장기기의 개발 방법

본 연구에서 고려하는 회전 무화형 도장기기는 무화 기구인 디스크, 디스크의 구동수단인 공기 터빈, 디스크와 터빈이 연결된 회전축과 베어링, 그리고 공기 및 도료를 공급하기 위한 공기압축기와 도료펌프로 구성된다. 그러므로 본 연구에서는 Fig. 1과 같은 개발순서에 따라 도장기기를 개발하였다.

2.1 도장기기 개념 설계 모델

이러한 도장기기의 개발시 우선적으로 고려되어야 할 설계요구 조건은 도료의 효율적인 무화를 위한 회전수의 확보로서, 일반적으로 디스크를 무화기구로 사용하는 경우 무화 디스크에 따라 15,000~30,000 RPM (무부하시) 범위에서 회전수가 선정된다. 그러나 도장기기의 회전수는 터빈, 디스크의 형상 및 설계변수와 회전축, 베어링의 특성에 의해 좌우되므로, 이러한 도장기기 구성요소들과 회전수와의 상관관계를 알아 볼 수 있는 개념설계모델의 개발이 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 등속도의 회전을 하는 도장기기에 대해 다음과 같은 동력균형 관계식으로부터 개념설계 모델을 도출했고 (Fig. 2 참조), 각 동력 성분에 대한 모델은 다음과 같다.

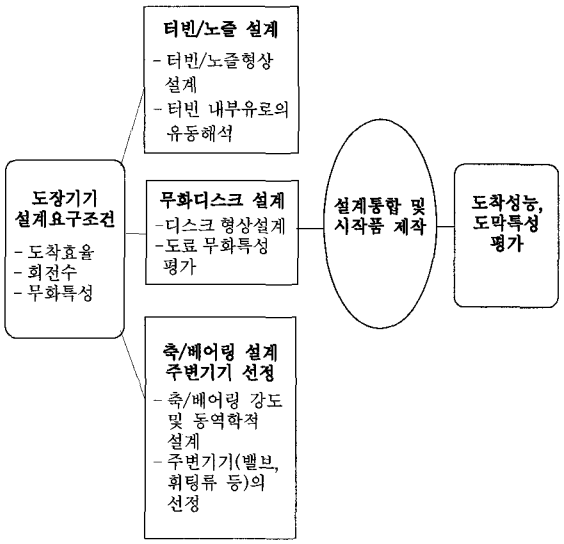

Fig. 1 Development procedure of rotary painting equipment

2.1.1 공기터빈의 동력

먼저 공기터빈의 동력은 Fig. 3의 속도삼각형으로부터 구해진다. Fig. 3에서 보여지듯이, 도장기기 노즐커버의 노즐로부터 유입되는 공기는 충격형 (impulse type) 터빈 cascade를 통과하면서 동력을 발생하며, 이때 이론적인 터빈동력 ($L_{a,ideal}$)은 다음과 같이 표현된다[2].

$$L_{a,ideal} = 2\, m_{air}\, U_t\, C_x \tan\beta\, N_n \qquad (1)$$

Actual fluid power = Disk friction power + Bearing friction
by turbine(A) of disk and turbine(B) power(C)

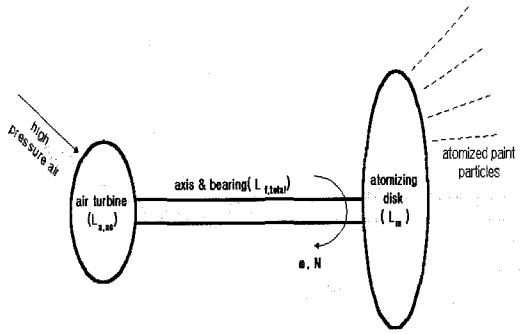

Fig. 2 Power balance of painting equipment

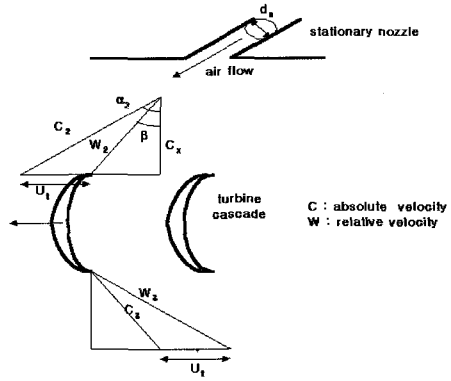

Fig. 3 Velocity diagram of air turbine

이때 m_{air}는 노즐을 통한 공기유량, U_t는 터빈 회전속도, C_x는 축방향속도, β는 터빈의 설치각도, N_n은 노즐의 개수를 나타낸다.

터빈을 통과하는 공기는 실제적으로는 터빈 cascasde의 출구각으로 편차를 가지고 흐르며, 터빈 내부에서 압력손실이 수반되므로, 실제적인 터빈동력($L_{a,ac}$)은 이론동력에 터빈효율(η_T)을 고려하여야 한다. 그러므로 실제 터빈동력은 식 (2)와 같이 정리될 수 있다.

$$L_{a,ac} = \eta_T L_{a,ideal} = \eta_T 2 m_{air} U_t C_x \tan\beta N_n$$
$$= 2\eta_T N_n m_{air}\left(\frac{\omega D_t}{2}\right)\left(\frac{m_{air}}{\frac{\pi}{4} d_n^2 \rho_2}\right)\cos\alpha_2 \tan\beta$$
$$= 4\eta_T N_n m_{air}^2\left(\frac{\omega D_t}{\pi d_n^2 \rho_2}\right)\cos\alpha_2 \tan\beta \qquad (2)$$

여기서 C_2, α_2, ρ_2는 노즐출구의 유속, 각도, 밀도를, D_t, d_n은 터빈의 직경, 노즐의 관경을, 그리고 ω는 도장기기의 회전각속도를 의미한다. 또한 터빈효율(η_T)는 도장기기의 개념설계 단계임을 감안하여, 계산이 수월한 Soderberg의 상관관계식[2]을 이용하여 평가한다.

2.1.2 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[3]으로부터 구해지며,

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

이때 K_1은 $0.88\text{x}10^{-3}$ 이고, ρ_∞는 주위 유체의 밀도이다. 그러므로 식 (3)을 터빈 및 디스크에 적용하여 총 마찰동력을 구하면,

$$L_{f,total} = L_{f,turbine} + L_{f,disk}$$
$$= K_1 \rho_\infty U_t^3 D_t^2 + K_1 \rho_\infty U_d^3 D_d^2$$
$$= \frac{K_1}{8}\rho_\infty \omega^3 \left(D_t^5 + D_d^5\right) \qquad (4)$$

여기서 U_d, D_d는 디스크의 회전속도 및 직경을 나타내며, $U = \omega D/2$로 표현된다. 또한 본 연구에서는 터빈의 마찰동력 계산시 housing의 영향은 무시하였다.

2.1.3 베어링 마찰동력

회전축에 부착되는 베어링에 의해 발생되는 마찰동력은 다음과 같이 표현되며[3],

$$L_m = 9.8 f W U_a = 4.9 f W D_a \omega \qquad (5)$$

이때 W, D_a와 U_a는 블레이드(터빈, 디스크)의 중량, 회전축의 직경과 원주속도를 나타낸다. 또한 f는 베어링의 마찰계수를 의미하며, 볼베어링의 경우 0.0015, 평판 베어링의 경우 0.005, 밋첼 베어링의 경우 0.003의 값을 갖는다[3].

그러므로, 식 (2)과 (3), (4) 및 (5)으로부터, 회전수는 다음과 같이 구해진다.

$$\omega = \left[\frac{4\eta_T m_{air}^2 N_n \frac{D_t}{\pi d_n^2 \rho_2} cos\,\alpha_2 \tan\beta - 4.9 f W D_a}{\frac{K_1}{8}\rho_\infty (D_t^5 + D_t^5)}\right]^{1/2} \qquad (6)$$

위 식 (6)에서 분자의 첫번째항은 터빈의 영향을, 두번째 항은 베어링의 영향을 나타내며, 분모는 터빈 및 디스크의 마찰의 영향을 의미한다.

2.2 도장기기 요소의 기본 설계

식(6)을 이용하여, 도장기기의 설계요구시방인 회전수에 부합되는 노즐의 관경(d_n), 각도(α_2) 및 개수(N_n) 그리고 터빈의 직경(D_t), 각도(β) 및 터빈 유량(m_{air})을 결정할 수 있으며, 이러한 값들이 터빈의 기본설계시방들(basic design specifications)이 된다.

2.2.1 공기 터빈의 설계

노즐의 설계를 위해서는, Fig. 3에서 보여지듯이, 주어진 터빈유량을 노즐로부터 터빈으로 유동시키는데 노즐 내부에서 고압 공기의 가속과정을 살펴보아야 하고, 최종적으로 노즐 출구에서 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[4]을 사용하여 이루어진다.

Fig. 4는 본 연구에서 고려한 도장기기 노즐의 개략도를 보여주고 있다. 노즐은 도장기기 커버의 단면을 통해 고압공기가 유입되어, 노즐 커버 내에 가공된 비교적 큰 부피의 정체 공기실(stagnation air chamber)를 거친 후 매우 작은 유로를 통해 가속되어 터빈 블레이드에 충돌하도록 설계하였다. 공기는 노즐을 거치며 속도, 압력 및 온도가 심하게 변화되는 압축성 유동현상을 보여주며, 또한 Fig. 4에서 보여지듯이, 공기의 흐름((0)~(1))은 축소단면을 거치는 등엔트로피 유동으로, 공기의 흐름((1)~(2))는 일정 단면의 마찰이 있는 유로를 흐르는 Fanno-line 유동으로 간주할 수 있다. Fig. 5는 Fanno-line에 따른 물리량의 변화들을 보여주고 있다.

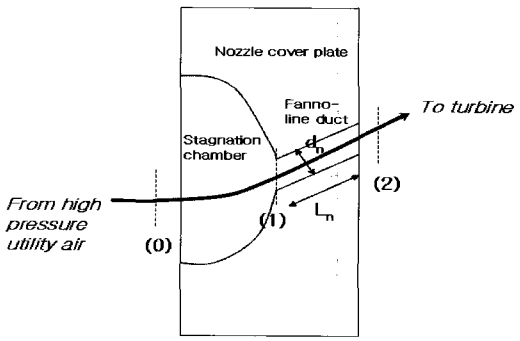

Fig. 4 Air flow passing through nozzle

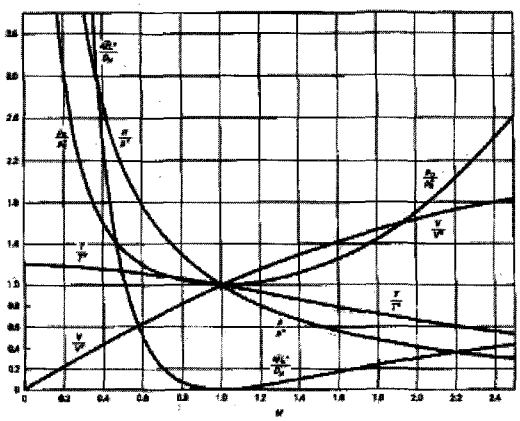

Fig. 5 Property relations for Fanno-line flow

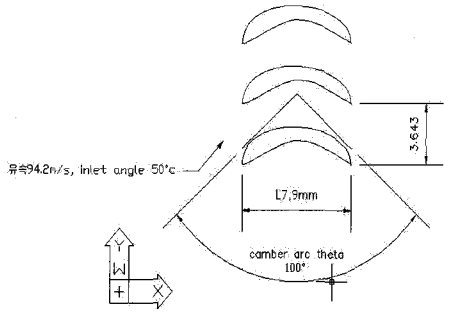

Fig. 6 Cascade design of the turbine of painting equipment

터빈의 형상설계를 위해서는 터빈 유로의 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. Fig. 6 에서 보여지듯이, 식 (2)의 개념설계 모델에서 결정한 터빈의 설치각도(β)에 맞추어 캠버선(camber line)을 대칭적으로 설계하고, 유동방향에 따른 터빈 내부 유로의 수축-확대 단면(converging diverging cross section) 및 목(throat) 설계가 이루어진다.

또한, 설계된 터빈 형상에 대해 좀더 엄밀한 전산유체역학적 해석을 통해, 터빈 표면에서의 유동박리(flow separation) 및 충격파 형성 여부를 검토하여, 최종적인 터빈 형상 설계가 이루어져야 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 터빈의 캠버선 및 익형설계는 CASCADE 프로그램[5]을 이용하여 수행하였고, 터빈 내부 유동에 대한 2차원 압축성, 점성 공기역학적 해석은 FLUENT code[6]를 이용하였다.

2.2.2 무화 디스크의 설계

정전 회전무화형 도장기기의 도착효율을 높이기 위해서는, 디스크 표면에서 이탈하는 도료가 선상(線狀, ligament)무화 형태가 되어야 하며, 이탈한 선상도료는 외부교란에 의해 불안정해지고, 분열하여 결국 입자상의 무화 도료가 된다. 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.

Tanasawa 등[7]은 선상 무화를 위한 임계 도료량 q_1과 q_2를 식 (7), (8)와 (9)으로 각각 제시하였다.

$$q_1 = 2.8\left(\frac{D}{n}\right)^{2/3}\left(\frac{\sigma}{\rho}\right)\left[1+10\left\{\frac{\mu}{(\rho\,\sigma\,D)^{1/2}}\right\}^{1/3}\right]^{-1} \quad (7)$$

$$q_2 = 5.3\left(\frac{D}{n}\right)^{2/3}\left(\frac{\sigma}{\rho}\right)\left(\frac{\rho}{\mu}\right)^{1/3} \text{ for } \frac{D\rho}{\mu} < 30 \text{ s/cm} \quad (8)$$

$$q_2 = 20\sqrt{D}\left(\frac{1}{n}\right)^{2/3}\left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^{5/6} \text{ for } \frac{D\rho}{\mu} > 30 \text{ s/cm} \quad (9)$$

이 식에서 D, n은 디스크의 직경 및 회전속도, ρ, μ, σ는 도료의 밀도, 점도, 표면장력을 각각 나타내며, 디스크의 회전수가 일정할 때의 임계 도료량 q_1과 q_2의 의미를 다음의 Table 1에 나타내었다.

따라서 이상적인 무화, 즉, 디스크 외주에서의 선상무화를 유지하기 위해서는 도장기기 노즐에서의 토출 도료량을 q_1에서 q_2 사이로 유지하는 것이 가장 바람직하며, 토출 도료량이 그 범위를 벗어날 경우에는 최적의 입자궤적, 입자의 균일성, 입자 크기에 영향을 미치고, 따라서 피도물의 표면특성의 저하를 야기한다.

그러므로 본 연구에서는 앞서의 선상무화 설계 기준에 따라 디스크의 직경, 회전수 및 도료량을 선정하였다.

2.3 도장기기의 실험 및 성능 시험

도료의 무화 특성 및 입자의 입경을 측정하는 기술은 기계적인 방법과 광학적인 방법으로 대별할 수 있으나, 본 연구에서는 육안판별이 어려운 입자도 측정가능하고, 실시간 이미지 획득이 가능한 영상처리 방법의 일종인 아래 Fig.7의 PMAS (Particle Motion Analysis System)를 사용하였다. PMAS는 도료 무화입자의 입경분포 등의 데이터를 획득할 수 있는 미시적 촬영과 무화입자의 궤적 (선상무화 여부)을 알아볼 수 있는 거시적 촬영이 가능하다. PMAS에 의한 측정방식 및 측정결과 분석방법에 대한 구체적인 내용은 참고문헌[8]에 상세히 기술되어 있다.

Table 1 Atomization pattern vs paint flow rate

Paint flow rate, q	Atomization pattern at disk rim
$q < q_1$	Drop formation
$q_1 < q < q_2$	Ligament formation
$q > q_2$	Film formation

도료입자들의 피도물에 대한 도착효율 (transfer efficiency)를 측정하기 위해서는 Fig. 8와 같은 성능 시험 설비를 사용하였고,

이때 도장성능 시험의 규격 및 시험설비 제원은 ASTM D5009[1]에 따르며, 도착효율 (transfer efficiency)은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{도착효율} = \frac{\text{피도물에 부착된 도료의 고형분 질량}}{\text{분무되는 도료의 고형분 질량}}$$

한편 피도물의 도막 특성 평가를 위해서는 도장 표면의 도막두께, 표면거칠기, 경도 등을 측정하여 피도물의 도막특성을 판단하였고, SEM 촬영을 하여 표면

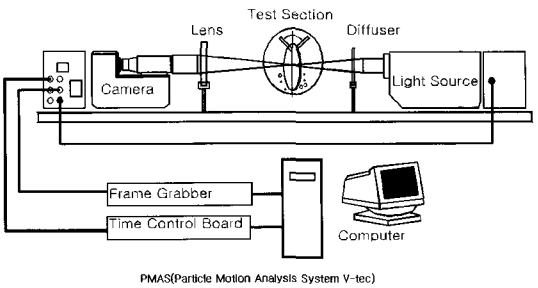

Fig. 7 Schematics of PMAS system

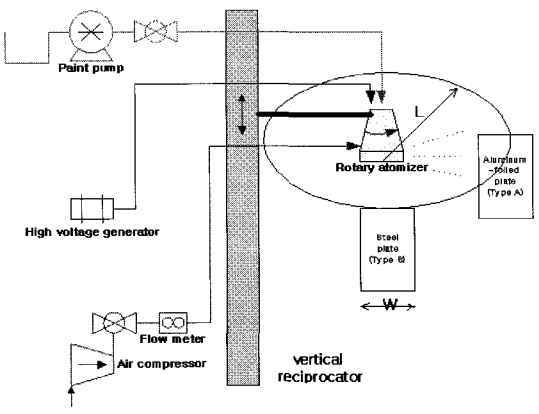

Fig. 8 Schematic diagram of painting equipment performance test

의 기포 등을 관찰하여 개발한 도장기기의 성능을 종합적으로 평가하였고, 그 결과들을 3장에 제시하였다.

3. 도장기기 개발 사례

본 연구에서는 2장에서 서술한 도장기기 개발체계를 15,000RPM (무부하시)의 설계요구조건을 토대로, 회전형 액체 정전 도장기기를 개발하였다. 본 연구에서 회전수를 15,000 RPM으로 고정한 이유는 연구를 수행한 국내 도장업체의 실제 도장기기 회전수 조업조건에 맞추었으며, 이외 에도 도장기기 회전수를 너무 높게 설정할 경우 분무된 도료입자 크기가 너무 작아져 도료입자가 피도물에 도착하기 전에 바로 증발할 가능성이 있기 때문이다[7].

전체 도장기기 전체에 대한 설계 제원 결정은 2.1절의 개념설계모델을 이용하였고, 세부적인 도장기기 구성요소들의 설계는 노즐, 터빈 및 무화디스크 설계 방법들을 적용하였다. 그리고 개발된 도장기기의 성능 평가는 2.3절의 실험 및 시험방법을 이용하여 수행하였다. 이렇게 설계된 도장기기의 제원이 표 2에 정리되어 있다.

Fig. 9는 본 방법에 의해 예측된 도장기기 회전수와 측정결과간의 비교를 보여주고 있으며, 본 방법이 매우 정확한 예측결과를 가져다 줌을 알 수 있다. 또한 도장기기 설계 회전수가 15,000 RPM이므로, 노즐 1개당 공급해야 하는 공기량은 45 LPM (1atm 기준)이고, 공기를 6기압 상태로 공급하므로 질량유량은 2.17 g/s이다. 그러나 Fanno line을 따른 압축성 유동 계산에 의하면 노즐출구에서의 질식유량은 3.96 g/s 이므로, 본 도장기기는 아직은 질식 상태에 도달하지 않은 경우로 판단된다.

Table 2 Design specifications of new rotary painting equipment

Air nozzle		Axis and bearing	
length (mm)	26	diameter of axis (mm)	20
diameter (mm)	2	axis length (mm)	133
Inclination angle (deg)	70	type of bearing	ball
No. of nozzles	2	Atomizing disk	
Turbine		diameter (mm)	120
diameter (mm)	60	paint feed (g/min)	70.00
setting angle (deg)	50	specific gravity of paint	0.81

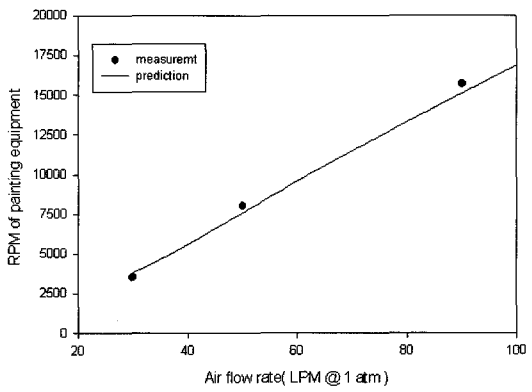

Fig. 9 Painting equipment RPM vs. air flow

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 터빈 블레이드의 입, 출구 설치각도 (β)를 +50, −50 deg.로 결정하였다. 도장기기 터빈은 최대 두께 20%의 NACA66-010 익형을 사용하였고, circular arc camber line으로 설계하였다. 또한 블레이드 시위길이는 7.9 mm이고 pitch/chord ratio는 0.46 이다. 참고로 본 연구에서는 익형 두께를 두껍게 하는 것이 도장기기 동력생산 및 회전수 증가에 유리한 것으로 판단되었으나, 도장기기 터빈의 3차원 가공상의 제약으로 인해 20%의 최대 두께로 한정하였고, 터빈의 날개길이 방향 뒤틀림 (twisting)도 주지 않았다.

Fig. 10은 본 연구에 의해 개발된 도장기기용 air-foil형 공기 터빈을 보여주고 있으며, Fig. 11은 기존 도장기기에 사용되던 원판형 공기 터빈을 보여주고 있다. Fig. 12는 터빈과 무화 디스크가 결합된 도장기기 조합 (assembly)을 보여주고 있다.

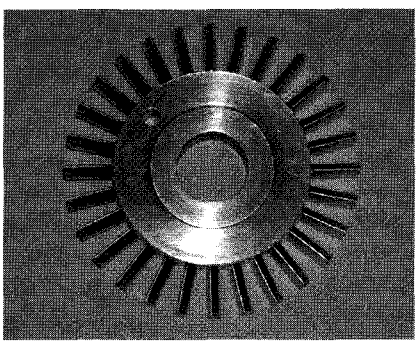
Fig. 10 Airfoil-type air turbine (new design)

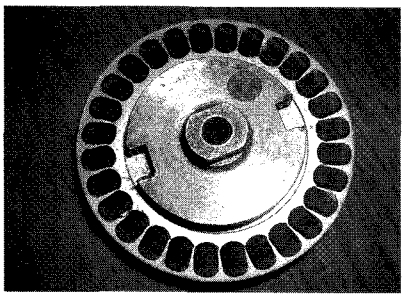

Fig. 11 Conventional air turbine

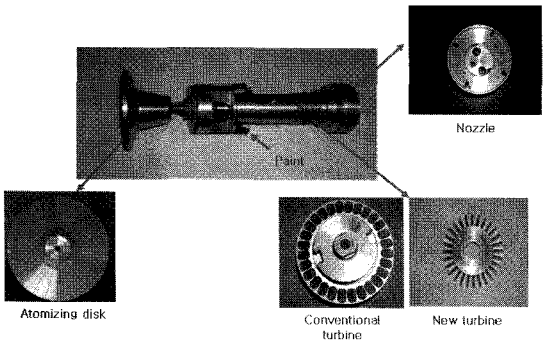

Fig. 12 Painting equipment assembly

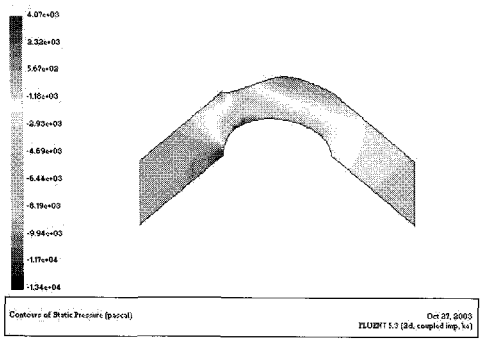

Fig. 13 Static pressure distribution of turbine

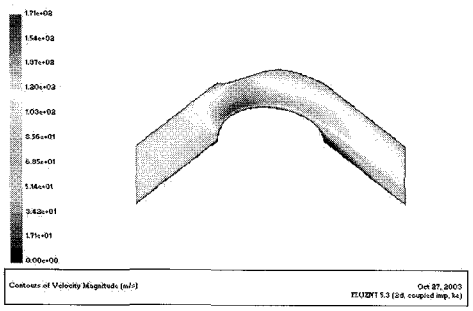

Fig. 14 Velocity contour in turbine cascade

Fig. 13은 설계된 블레이드 표면의 압력계수 분포 예측결과를 보여주고 있으며, Fig. 14는 블레이드 내부의 점성 유동해석결과를 보여주고 있다.

Figs. 13과 14에서 보여지듯이, 흡입면과 압력면 사이의 압력차 형성 및 블레이드 표면을 거치는 유동의 팽창과정이 큰 에너지 손실없이 이루어짐을 알 수 있다. 블레이드 후연 부근에서 유동박리를 관찰할 수 있으나, 이러한 유동박리 현상이 어느 정도의 터빈 효율 저하를 가져오나, 도장기기용 동력생산에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Fig. 15는 본 도장기기의 무화 (atomization) 특성을 보여주고 있으며, 도장기기 무화 디스크 원주에서 빠져나가는 액체가 선상형태로 무화됨을 알 수 있다. 또한 Fig. 16에서 보여지듯이, 무화된 액적의 크기가 20~50 μm 범위임을 알 수 있다. 그러므로, 본 도장기기의 무화특성이 2.2.2절에 서 언급한 도착효율 향상을 위한 최적 조건을 유지함을 알 수 있다.

Table 3은 본 도장기기의 도착성능 시험결과와 도막특성 측정결과를 보여주고 있다. 이때 시험조건은 인가전압 75 kV로 설정하였고, 본 도장기기와의 비교를 위해, 2가지의 재래식 원판형 터빈을 사용한 도장

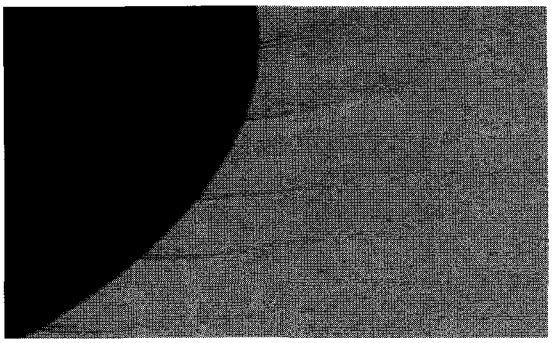

Fig. 15 Ligament atomization view

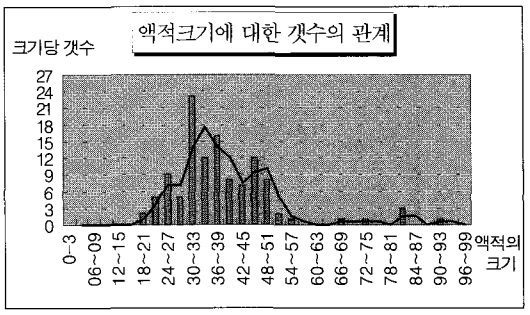

Fig. 16 Droplet distribution histogram

Table 3 Coating characteristics of painting equipment

model	dry film thickness (μm/min)	roughness (μm)	transfer efficieny (%)
airfoil type	60	0.11	79.7
conventional (modified)	52	0.19	70.8
conventional (original)	25	-	38.0

기기의 경우[9),(10)]와 본 측정결과를 비교하였다. 표에서 볼 수 있듯이, airfoil type 의 공기 터빈을 사용한 경우가 다른 재래식 도장기기 들에 비해 높은 도착효율과 좋은 도막특성을 보여주고 있다. 이때 도착효율은 ASTM D5009 방식에 의해 측정하였고, 도막표면 거칠기는 Mitutoya사의 거칠기 측정 장치를 이용하여 측정하였다. 이러한 결과는 공기터빈을 이용한 도장기기가 높은 회전수를 발생시켜 도료의 선상무화를 촉진시키고 및 도료 입자 크기를 더욱 작게 형성해 주기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

도장기기 설계에 airfoil형 공기터빈을 적용하기 위하여 회전무화식 액체 도장기기의 개발을 위한 개념설계모델 및 설계 방식을 제시하였으며, 개발된 도장기기에 대한 무화 특성, 도막 특성 및 도착 성능을 평가하기 위한 방법론을 제시하였다.

본 연구에서 제안한 개발체계에 준하여 airfoil형 공기터빈을 적용한 도장기기를 설계, 제작 및 시험을 수행하였다. 도장기기의 실험, 시험 측정결과를 재래식 도장기기와 비교하여, airfoil 형 공기터빈을 사용하는 도장기기가 도착효율 및 도막특성 측면에 있어 우수함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 청정생산 기술사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다. 또한 본 연구를 위해 도장기기 관련 자료를 제공해 주신 (주) 대한도장플랜트 관계자들에게도 감사드립니다.

참고문헌

(1) 윤재호, 김영률, 1999, 청정도장기술개발 도장성능시험평가설비 구축사업, 산업자원부
(2) Dixon, S.L., 1978, Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, 3rd ed., Pergamon Press
(3) 하재현, 박선종, 1998, 유체기계, 문운당
(4) Sadd, M.A., 1985, Compressible Flow Flow, Prentice-Hall Inc.
(5) Lewis,R.I., 1996, Turbomachinery Performacec Analysis, ARNOLD
(6) FLUENT v5.3 manual, 1999, FLUENT Inc.
(7) Tanasawa Y., Miyasaka Y. and Umehara M, 1978, "Effect of Shape of Rotating Disks and Cups on Liquid Atomization", Proceedings of the 1st. ICLAS, Tokyo, pp. 165~172
(8) 이찬, 차상원, 2002, "회전무화형 도장기기 개발체계 및 적용에 관한 연구," 청정기술 제8권 제2호, pp. 101~110
(9) 차상원, 이찬, 고용서, 2002, "정전 회전무화형 도장기기의 빗살무늬 디스크가 도착성능에 미치는 영향", 청정기술, 제8권 제2호, pp. 45~51
(10) 이찬, 차상원, 2003, "터빈 및 무화디스크 설계에 따른 도장기기 회전수 특성에 관한 연구," 청정학회 춘계학술대회 논문집, pp. 121~125