

완전접촉 경계면 위의 박막유동 특성을 이용한 회전무화기의 형상 설계

박 부 성* · 김 보 흥**

* 울산대학교 기계공학부

Design of Rotary Atomizer Using Characteristics of Thin Film Flow on Solid Surfaces

Boo Seong Park* and Bo Hung Kim**

* School of Mechanical Engineering, University of Ulsan

(Received February 18, 2013 ; Revised September 17, 2013 ; Accepted October 12, 2013)

Key Words: Rotary Atomizer(회전식 분무기), Parametric Study(매개변수 연구), Design Technique(설계 기법), Surface Modeling(표면 모델링), Film Thickness(박막두께)

초록: 벨 디스크(Bell disc, 오토마이저 Atomizer)를 사용한 회전식 도장기술은 뛰어난 도료 전달효율, 도장 패턴 및 입자크기의 균일성, 스프레이 건 방식에 비해 적은 압축공기 사용량 등의 장점이 있다. 또한 회전식 분무기는 모든 페인트 재료에 적용할 수 있고 자동차 연속도장 같은 대규모 도장이 필요한 환경에 적합하다. 도장기기의 성능과 밀접하게 관계된 도장품질은 벨 디스크 표면설계에 따른 액적 크기와 균일성에 의해 결정된다. 따라서 이번 연구는 도료의 점성, 밀도, 표면친화도 등의 염료 특성이 고려된 작동하는 벨 디스크의 회전수, 직경, 표면의 각도, 무화시의 박막두께에 대한 모델링을 시행하여 표면설계 방법의 기초를 수립하였다.

Abstract: A disc-type rotary atomizer affords advantages such as superior paint transfer efficiency, uniformity of paint pattern and particle size, and less consumption of compressed air compared to a spray-gun-type atomizer. Furthermore, it can be applied to all types of painting materials, and it is suitable for large-scale processes such as car painting. The painting quality, which is closely related to the atomizer performance, is determined by the uniformity and droplet size in accordance with the design of the bell disc surface. This study establishes the basics of how to design a surface by modeling the operating bell disc's RPM, diameter, surface angle, and film thickness considering dye characteristics such as the viscosity, density, and surface affinity.

- 기호설명 -

a : 표면 위의 접선가속도

a_n : 표면 위의 수직가속도

a_{ratio} : 중력과 순수 원심가속도의 비

a_x : 순수 원심가속도

b : 유동 너비

C : 무차원계수

dx : 미소반경증가

dy : 미소높이증가

F : 구심력

F' : 원심력

F_0 : 반경 x_0 에서의 원심력

F_x : 반경 x 에서의 원심력

g : 중력

h : 유동 막 높이

m : 질량

q : 유량

R : 근사된 원호의 곡률 반지름

RPM : 분당 회전수

r : 회전반경

u : x 속도

† Corresponding Author, bohungk@ulsan.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

V	: 유량의 평균속도
v	: y 속도
w	: z 속도
x	: 회전체 중심으로 부터의 반경
x_0	: 곡면이 시작하는 반경
x_{max}	: 회전체의 끝 반경
y	: 표면위의 y 좌표
Y, Y'	: 표면높이
z	: 표면위의 z 좌표
α	: F_0 와 F_x 가 이루는 곡면접선각도
ω	: 각속도
μ	: 유체의 점성계수
ρ	: 유체의 밀도
τ	: 전단응력

1. 서 론

액체의 미립화는 액체가 수많은 미세 액적으로 분열되는 현상으로 적은 양으로 넓은 면적을 뿌릴 수 있는 농약 살포, 완전연소를 돕는 연료분사, 표면보호 및 미적요소를 위한 도장 공정 등 생활 및 산업에서 활용도가 높다.^(1,2)

연료는 압력분무식, Air blaster, 회전분무 방식으로 미립화된다. 압력분무식 시스템은 구성이 복잡하여 제작비용과 시간이 많이 소요되고 보조장치들이 필요해 소형화하기에 어려움이 있다. 반면, 회전분무방식은 분사압력으로 인한 장치의 부하가 상대적으로 적게 받아 안정되고 시스템구조가 간단하여 소형화가 용이한 장점이 있다. 회전식 연료분사방식의 장점은 도장분야의 도료전달방식에도 적용된다. 도료의 미립화의 방법에 따라 분류하면 액체에 압력을 가해 분사되는 가압형, 원판의 회전에 의해 분사하는 회전형, 고속가스의 운동에 의해 분사되는 가스 분사형이 있다. 가압형은 공기조화장치나 냉각탑의 분무 노즐로 주로 사용되지만 시스템을 갖추는데 많은 노력이 요구된다. 반면, 벨 디스크(Bell disc, 오토마이저 Atomizer)를 사용한 회전식 도장기술은 소량의 압축공기 사용, 도료 전달효율의 우수성, 도장 패턴 및 입자크기의 균일성 그리고 다양한 도료에 적용할 수 있는 점에서 자동차 연속도장 같은 대규모 도장이 필요한 환경에 적합하다.⁽³⁻⁷⁾

Atomizer 분무시스템 구성은 벨브모듈, 벨 디스크, 에어터빈, 압축공기노즐 그리고 내/외부 하전

시스템 다섯 부분으로 구분된다. 분사과정은 Hinze(1950)와 Colbert(2006) 그리고 Elmour(1989) 등의 연구를 통해 볼 수 있다. 도료는 디스크의 뒷면으로 공급되어 공기터빈에 의해 고속으로 회전하는 디스크의 원심력을 받아 얇은 막을 형성하여 디스크 가장자리로 전달된다. 도료가 디스크를 이탈하는 순간, 반경방향으로 전달되는 도료는 외부 노즐의 압축공기와 하전 시스템으로 무화됨과 동시에 전방을 향하게 된다. 무화된 액적은 원뿔 형태로 피도물에 전달됨으로써 차체에 뿌려지는 도료전달 효율이 향상되게 된다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

Im, K. S.(2003) 등의 연구에서는 액체유량, 압축공기 분사량, 회전수 및 전압이 도장효율에 어떤 영향을 주는지 보여준다. 액체유량이 증가하면 토출될 때 더 많은 액적 실이 형성되지만 불균일한 크기를 보였으며, 액적크기와 질량이 증가하므로 관성력에 의해 더 넓게 퍼지는 것을 보였다. 공기 분사량은 액적의 크기보다 전달속도에 더 많은 영향을 주고, 140 l/min일 때 피도물에 골고루 분사되며 분사패턴을 형성하는데 관계됨을 보였다. 회전수의 영향으로 액적크기가 결정되며 피도물에 골고루 분사되는 임계 회전수는 20,000~30,000RPM으로 보였다. 전압은 최소한 70kV이상일 때 효과적이었다.⁽¹¹⁾

Fukuta(1993) 등의 연구에서 벨 디스크는 다양한 도료에 사용될 수 있어 성능과 품질에 대한 요구를 만족시키기 위해 적절한 무화 시스템과 분사기의 변형품이 필요하다고 말한다. 표면의 미려함과 밝기는 금속성분이 포함된 도료가 응착된 상태에 따라 달라지며 에어건을 사용했을 때와 같은 성능을 낼 수 있게 하는 회전 도장시스템의 작동조건을 제시하였다. 금속성분의 변형을 피하기 위해서는 벨 디스크의 가장자리 선속이 50m/s이하를 유지해야 함을 보였다. 노즐에 의한 공기흐름은 벨 디스크 뒤를 타고 흐르게 하되 사선흐름으로 액적속도가 12m/s이상으로 전달될 때 도장패턴의 균일함을 보였고, 피도물 표면도장의 결과는 액적속도와 크게 관련한다고 말한다.⁽¹²⁾

본 연구의 대상이 되는 벨 디스크는 곡면을 가진 원반모양으로 고속 회전축에 고정되며 회전 분사시키는 도구이다. 도료는 회전축 중앙 분배기 덮개와 표면의 틈을 통해 흘러나오고 표면을 따라 얇은 막 상태로 가장자리까지 공급된 후 미세한 액적으로 분사되므로, 공급부터 분사되기까

지의 표면설계가 벨 디스크의 성능에서 중요한 부분이 된다. 도장품질은 표면설계에 따른 액적의 크기에 의해 결정되며 액적의 크기는 벨 디스크의 회전에 의해 표면 위에 형성되는 도료박막의 두께에 의해 좌우된다.

또한 벨 디스크 가장자리 모양이 평면 또는 톱니형상을 가지느냐에 따라 분사액적의 크기가 달라질 수 있다. 차상원(2002) 등의 연구에서 도료가 가장자리에서 이탈할 때 톱니개수가 증가할수록 도착효율 및 도막두께가 증가됨을 보였고, 피도물의 기포크기와 수도 감소함을 보이면서 톱니모양이 있는 경우 도착효율과 액적비말형성에 영향을 준다고 말한다.⁽¹³⁾

외국의 경우 선진기술을 바탕으로 도장기기의 효율, 저공해, 도장 품질 향상 등 여러 기준에 의한 도장분야의 연구를 지속적으로 함으로써 회전무화 도장기기 등과 같은 부가가치가 높은 제품을 개발하고 있지만, 국내에서는 이 분야의 연구가 활발히 되지 않고 관련기술이 저조하여 단순한 모방 또는 역설계를 통해 산업적 부가가치가 낮은 현장에만 보급이 되는 실정이다. 국내 산업현장에서 쓰이는 대부분의 도장기기는 외국 제품에 의존하고 있으며 관련 장치의 수입비용이 실로 많이 들고 있어 국내 기술로 개발한 도장기기의 도입이 국내 산업을 발전시키기 위해서는 시급하다고 본다.^(13,14)

기존 연구⁽⁸⁻¹³⁾에서는 회전무화 시스템의 과정 및 유량변화, 공기노즐의 분사량과 토출방향, 회전수, 인가전압, 액적전달속도, 끝단형상 등의 작동조건에 따른 도착 및 무화효율 등에 관한 실험적 연구를 보여주었다. 이번 연구는 기존 연구인 시스템적 성능연구와는 달리 요소적 관점으로 도장기기의 중요부품 중 하나인 벨 디스크를 국내 기술로 제작하기 위한 표면 설계법을 제시하는 연구이며 다양한 변형을 만들어 주기 위한 기초 표면 설계법으로서 활용될 수 있는 방법을 제시하였다. 물질의 점성, 밀도, 유량, 벨 디스크의 회전수, 직경, 분사 면의 각도 등은 설계법에서 고려할 수 있는 변수이다. 변수들의 관계를 통해 분사되어 이탈할 때의 입자크기를 보여주는 연구와는 달리 표면위에서의 박막두께가 어떻게 형성되는지를 예측해 보는 연구를 함과 동시에 제작의 현실성도 고려할 수 있는 수정된 설계법도 같이 제안해보는 연구를 수행하였다.

2. 모델링

2.1 기초표면형성

물체가 회전을 하게 되면 회전반경(r), 각속도(ω), 질량(m)에 따라 원심력이 발생하게 된다. 원심력과 구심력이 같다면 물체는 Fig. 1(a)처럼 일정한 반경을 그리며 회전하고 그 힘의 관계는 식 (1)로 나타난다.

$$F = F' = \frac{mV^2}{r} = mr\omega^2 \quad (1)$$

본 연구의 목적인 벨 디스크의 표면 설계법을 제안하기 위해 주어진 조건($m=0.1g$, $RPM=25000$, $x>0cm$, $x_{max}=3.5cm$)에서 Fig. 1(b)의 지정한 반경 x_0 부터 일정한 접선 가속을 받도록 기준목표를 설정했다. 표면을 타고 흐르는 물질이 회전을 받아 원심력을 가지면 반경($r=x$)에 따라 원심력이 커지기 마련인데, 구간 $x>x_0$ 에서 x_0 지점과 동일한 접선 가속력을 갖기 위해서는 x_0 지점부터 곡면이 형성된다. 여기서, x_0 에서의 힘이 F_0 라면 곡면전체에 대한 접선 힘도 동일하게 F_0 가 된다. 구간 $x>x_0$ 에 대해 반경방향으로 받는 순수 원심 가속력은 F_x 이므로 곡면위의 F_0 와 F_x 사이의 관계로 수평에 대한 x 지점의 α 를 구할 수 있다.

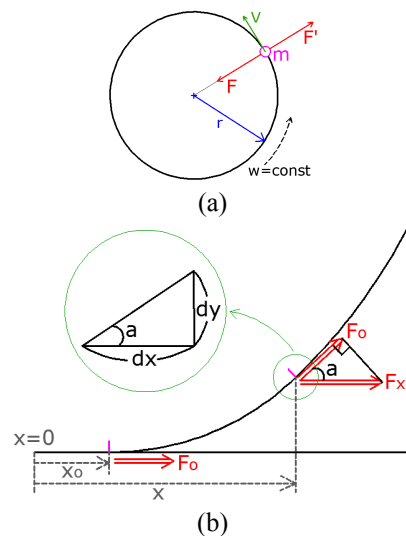


Fig. 1 (a) The relationship of centripetal force and centrifugal force and (b) schematic description of the formation of atomizer surface

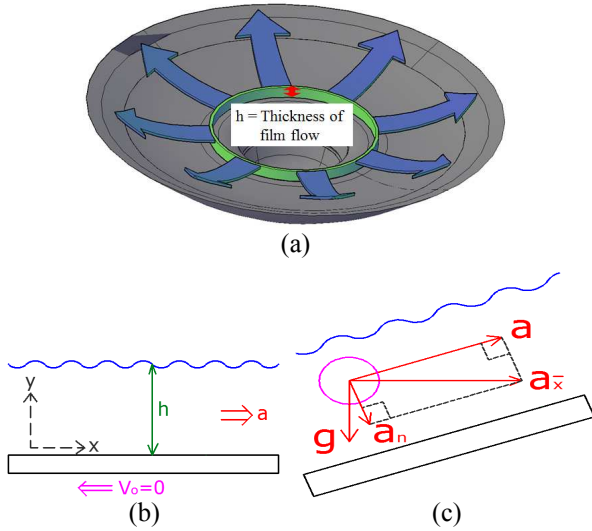


Fig. 2 Schematic description: (a) formation of film flow, (b) analysis of simplified Couette flow and (c) the component of acceleration vector on the curve surface

곡면접선각도에 따라 dx, dy 의 관계를 전체반경인 x 에 대해 고려하면 식 (2)와 같은 표면형성과 관련한 높이 Y, Y' 를 구할 수 있다.

$$Y(x) = \frac{x \sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{x}\right)^2} [x \sqrt{x^2 - x_0^2} - x_0^2 \ln(x + \sqrt{x^2 - x_0^2})]}{2x_0 \sqrt{x^2 - x_0^2}} \quad (2)$$

$$Y'(x) = Y(x) + |Y(x_0)|$$

물질이 $x_0=0$ 에서는 원심력을 전혀 받지 않으며 실제로 연결된 중앙 노즐 두께를 고려할 때, 순수하게 회전표면에서 원심력을 받는 구간은 $x_0 > 0$ 으로 제한하고 있다. 식 (2)로 형성된 곡선표면을 따르는 입자는 곡선이 시작되는 지점의 힘과 동일한 힘을 받으면서 표면을 따라 흐르게 된다.

2.2 유동해석이론

벨 디스크의 표면에서 회전 가속을 받은 물질이 박막형태로 퍼져 나가는 것을 Fig. 2(a)로 묘사할 수 있다. 모든 물질은 점성을 가지며 일정한 속도 또는 가속도로 인해 발생된 평판사이의 유동은 점성으로 인한 전단응력에 의해 발생하는 유동이 된다. 벨 디스크의 구조상 물질은 표면에 점착되어 공기 중으로 노출된 Fig. 2(b)의 Couette 유동으로 단순화 할 수 있다.⁽¹⁵⁾

2.1절에서 설정한 목표로 곡선표면이 만들어졌을 때, 표면 위의 물질이 받는 가속성분은 Fig.

Table 1 The effect of gravity on the surface

RPM	x(mm)	$a_x [m/s^2]$	$g [m/s^2]$	a_{ratio}
25,000	1	6854	9.81	0.00143
	1.5	10280		0.000954
	35	239900		4.09×10^{-5}

2(c)로 나뉜다. 도장기기에 적용되는 회전무화기는 고속RPM으로 작동을 하는 물체이며⁽¹⁶⁾ 도료에는 g 와 x 에 따라 증가하는 a_x 가 작용한다. a_x 에 대한 g 의 백터성분비 a_{ratio} 는 Table 1로 계산된다. 회전무화기의 중앙에는 도료공급노즐 홀이 있으며 공급된 물질이 표면에 닿는 어느 정도의 초기반경 ($x=1mm$)을 적용해 볼 때 a_{ratio} 는 0.00143이며, 대부분 구간($1.5mm < x < 35mm$)에 걸친 a_{ratio} 는 0.001보다 낮게 분포한다. 이 수치는 중력이 작용하는 상대적인 기여도가 유효숫자 이하이므로 해석에 포함시켜도 결과가 크게 바뀌지 않으며, 표면 위의 중력효과는 물질이 표면점착에 유지되는 힘으로만 작용하는 것으로 볼 수 있다. 유동 모멘텀인 a_x 는 a 와 a_n 으로 나뉘지고 a 는 곡선표면 전체의 일정한 가속도이며 a_n 은 표면에 점착을 유지하는 성분으로만 둘 수 있다. 그러므로 표면 위 유동흐름을 지배하는 것은 a 성분만 관여하고 기준목표에 의해 a 는 구간 $x > x_0$ 에서 일정하게 유지되는 가속으로 두었기에 곡면이 형성되더라도 평면과 같은 좌표를 두어서 계산과정을 전개할 수 있다.

연속방정식에서 유동속도는 u 만 존재하므로 식 (3)에 의해 식 (4)가 된다. 여기서 Navier- Stokes방정식을 이용하고 v, w, a_y, a_z 가 0이므로 yz 평면의 압력변화는 없다. 유동 막 표면 전체에 걸친 압력은 대기압이며 x 방향 가속도를 a 로 나타내면 식 (5)가 된다. y 에 대해 적분하고 $y=h$ 에서 공기 저항을 무시하면, 막 표면에서 전단응력은 식 (6)이므로 속도분포는 식 (7)로 나타난다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$u = u(y) \quad (4)$$

$$a = -\frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

$$\tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (6)$$

$$u = -\frac{\rho a}{2\mu} y^2 + \frac{\rho a h}{\mu} y \quad (7)$$

Table 2 Material property

Material	SAE 30 Oil	Water
ρ [kg/m^2]	912	998.2
μ [$N \cdot s/m^2$]	0.38	1.002×10^{-3}

Table 3 Operation condition

q [cc/min]	440
RPM	25,000

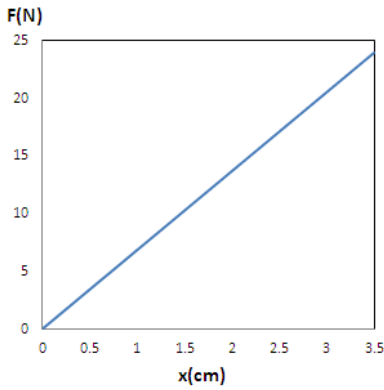


Fig. 3 Centrifugal force on the flat surface

이 속도분포에 대해 h 만큼 적분해주고 유동너비 b 를 구하면 전체유량은 식 (8)이고, 유동 막 두께는 식 (9)로 나타난다. 평균 유량에 의한 V 를 이용한 속도분포 무차원식은 식 (10)이고 C 는 식 (11)로 나타난다.⁽¹⁷⁾

$$q = \frac{\rho a h^3 b}{3\mu} \quad (8)$$

$$h = \sqrt[3]{\frac{3q\mu}{\rho a b}} \quad (9)$$

$$\frac{u}{V} = -C \left(\frac{y}{h}\right)^2 + 2C \left(\frac{y}{h}\right) \quad (10)$$

$$C = \frac{\rho a h^2}{2\mu V} \quad (11)$$

2.3 모델링 해석

해석에 사용된 물질은 Table 2의 SAE 30 Oil이고 작동조건은 Table 3에 주어졌다. 먼저 평면 상태에서 회전반경이 증가할수록 원심력이 증가하는 것을 Fig. 3으로 확인할 수 있다. 설계기준 목표에 의한 식 (2)로 만들어진 곡면위의 힘 분포는 Fig. 4(a)처럼 $x_0(1.5cm)$ 에서 일정한 힘을 갖도록 하는 그래프로 나타난다. 원점에서 x_0 까지는 x 에

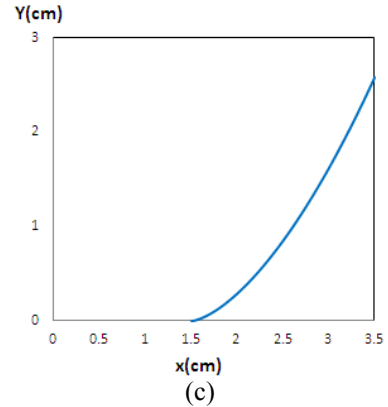
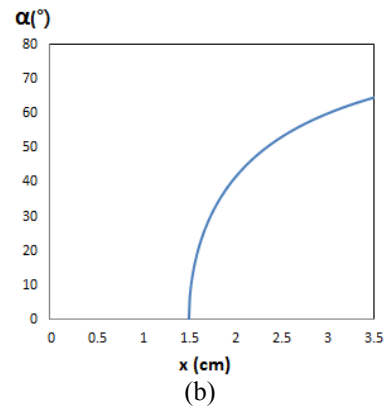
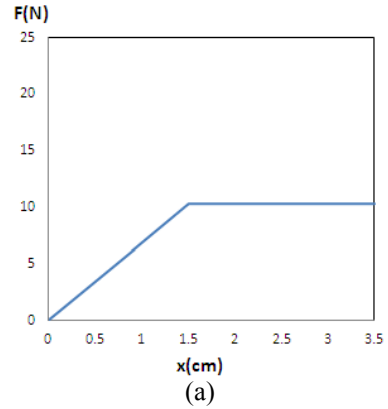


Fig. 4 Surface modeling analysis in case of $x_0 = 1.5cm$: (a) centrifugal force, (b) increasing the tangential angle and (c) deformation of surface

따라 비례하고 x_0 이상에서는 힘이 일정한 양상을 보인다. Fig. 4(a)의 그래프를 만족하기 위해 표면은 곡면을 형성하게 되면서 곡면의 접선이 평면과 이루게 된 각도 α 는 Fig. 4(b)로 나타난다. 곡면형성이 시작되는 각도의 변화는 급격하였지만, 반경이 커질수록 완만한 변화를 보였다. 기준목표인 임의의 $x_0(1.5cm)$ 에서 일정 가속을 만족하는 것을 Fig. 4(a)에서 보여주었고, 그 목표를 맞추기 위한 표면의 접선각도는 Fig. 4(b)와 같이

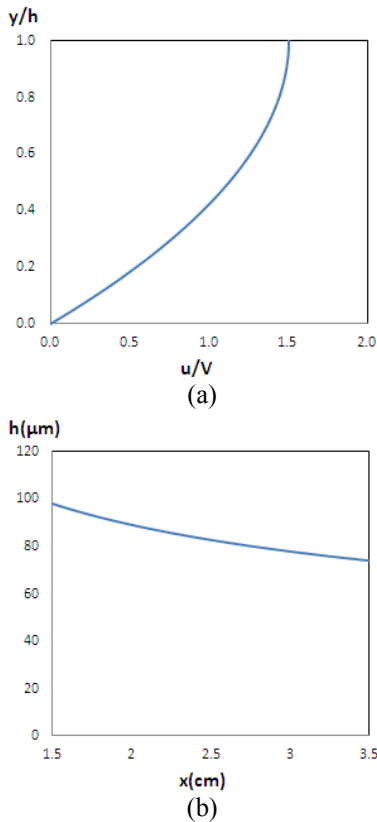


Fig. 5 (a) Dimensionless velocity and (b) film thickness of flow on a curved surface based on $x_0=1.5\text{cm}$ in case of Table 3

형성되어야 하므로, 이에 따른 표면형상은 Fig. 4(c)와 같이 만들어진다. x_0 까지는 평판이 유지되고 난 후, 작은 곡률의 표면이 형성되며 x 가 증가할수록 큰 곡률의 표면이 형성되었다. 따라서 식 (2)에 의해 만들어진 표면 Fig. 4(c)는 물질이 x_0 부터 곡면이 끝날 때까지 일정 가속을 받으며 흘러가는 것으로 말할 수 있다.

물질은 2.2절 유동해석으로 표면 위에서 유동막을 형성해 흐르며 그 유동장 내의 속도분포는 식 (10)에 의한 Fig. 5(a)로 나타난다. 표면에 근접한 높이($y/h=0$)에서는 점성마찰로 속도가 낮게 나타나고, 유동의 최대높이($y/h=1$)인 액막에서는 점성마찰이 거의 작용하지 않는 공기층이므로 속도가 가장 높게 나타났다.

이와 같은 속도분포로 물질은 표면 가장자리까지 흐른 뒤 토출되는데 x_{max} 에서의 입자의 미립화 즉, 벨 디스크를 벗어나기 직전의 유동 막 두께 정도에 따라 형성되는 액적크기로 도장품질이 좌우된다. Fig. 2(a)에서 시간당 공급되는 유량 q 가 일정하므로 어떤 시간동안에 공급된 도료 체

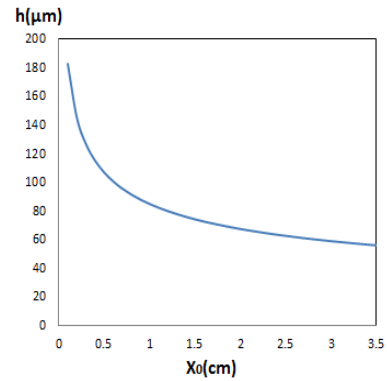


Fig. 6 Film thickness at x_{max} according to changing x_0

적(원통형 고리)이 흘러가는 동안 반경이 커지는 반면, 유동 막 높이는 작아지게 되는 반비례 관계를 보여야한다. Fig. 5(b)는 $x_0(1.5\text{cm})$ 에서 x_{max} 까지 식 (9)로 계산된 유동 막 높이를 보여주는 것으로 x 에 따라 낮아지는 분포를 보이며 x_{max} 에서 h 값이 가장 작았다. 이는 중앙 홀에서 어떤 순간에 공급된 유량의 궤적을 추적하였을 때 그 유량이 표면을 따라 흐르면서 반경에 따라 일정한 부피를 유지하기 위한 유동 막 두께의 결과를 보여주는 것이다. Fig. 5(b)의 x_{max} 에서 h 값인 토출되는 최종유동 막 두께가 무화된 액적 크기와 절대적으로 같다고는 할 수 없지만 h 값에 따라 일정한 비율로 액적 크기를 반영하는 관계에 있을 것으로 보인다. 또한 1.서론에서 기술되었듯이 끝단에서 튕니 형상을 만들어주게 되면 토출되는 순간 최종유동 막 두께보다 더 작은 정도의 비율로 액적무화에 영향을 주게 되면서 도장품질이 더욱 우수해진다.⁽¹³⁾

피도물 종류에 따라 적절한 도장품질을 만족하려는 액적크기의 기준이 있을 것이다. 물질, 유량, 회전조건 등 작동조건이나 도장시스템이 같을 때 액적크기를 다양하게 만족하기위한 요소는 벨 디스크의 변형이 필수일 것이다. x_0 부터 일정한 힘 F_0 를 목표하기위해 앞에서 곡면이 형성되었으며, x_0 의 변화로 x_{max} 에서의 h 가 변하는 것을 Fig. 6을 통해 보여준다. x_0 가 멀어질수록 곡면부의 일정 가속력도 커지기 때문에 유동에 작용하는 힘도 증가하므로 x_{max} 에서의 h 값은 작아지는 결과를 보인다. 다시 말하면, x_0 에 변화를 줌으로서 x_{max} 에서 액적크기를 만족시켜주는 h 를 구할 수 있으며, 이에 따른 곡면부 시작점 x_0

가 달라지는 변형품이 만들어진다. 원하는 도장 품질을 얻기 위해 일정힘을 주는 곡면부를 어떤 x_0 에서 형성해줄지에 대한 지표로 Fig. 6을 활용할 수 있다.

2.4 수정된 모델링

2.4.1 가공성을 고려한 모델링

앞 절까지는 일정힘을 가진다는 기준목표로 $x_0 = 1.5\text{cm}$ 인 예로 식 (2)를 사용한 Fig. 4(c)같은 곡면 형상으로 기술하였다. 하지만 식 (2)와 같은 이론적인 식은 개념적 설계에서는 충분히 적용되지만, x 에 따라 곡률 R 이 연속적으로 변하는 식을 도면에 작성하고 실제 NC머신으로 곡면을 가공할 때는 어려운 점이 많을 것으로 생각된다. 이런 문제점을 해결하고자 일정한 반지름을 가지는 원호로 단순화하는 방법으로 가공에 적용하였다. 이 방법은 Fig. 7에 나타냈듯이 식 (2)로 그려진 처음, 중간, 끝점 각각의 Y 로부터 떨어진 거리가 같은 지점을 찾아 그 거리가 반지름 R 로 되는 원호를 그리는 것으로 한다. 먼저, 1번 점의 x 는 곡면이 시작되는 지점 x_0 이며 이에 대응하는 Y 는 항상 0이다. 3번 점의 x 는 최대 반경인 끝점 x_{max} 이고 이에 대응한 Y 는 식 (2)에서 x_{max} 를 대입한 값이다. 2번 점의 x 는 x_0 와 x_{max} 의 중간 x 에 해당하고 이에 대응한 Y 는 식 (2)에서 중간 x 를 대입한 값이다. 1번, 2번, 3번 점에서 거리가 같은 4점까지의 도트선(···)길이가 x_0 에 따른 식 (2)의 곡률과 근사되는 원호의 R 이다. x_0 가 1.0~2.0cm의 구간에서 식 (2)와 근사되는 원호 R 을 Fig. 8로 나타냈다. 종합하면 Fig. 6을 보고 원하는 액막 두께를 도출하기 위해 x_0 를 지정하고 Fig. 8을 통해 x_0 에 따른 근사원호 R 을 도출시켜 가공에 적용할 수 있게 된다.

2.4.2 내구성을 고려한 모델링

곡면부를 근사되는 원호로 만들게 되면서 Fig. 7의 1번 점에서 평면과 곡면이 매끄럽게 이어지지 않는 급격하게 꺾인 표면이 생기게 되었다. 이는 물질이 유동하면서 강하게 부딪히는 현상이 일어날 수 있으며 표면에 심한 편마모가 발생할 수 있는 요인으로 보인다. 마모를 미연에 방지하기 위한 방법으로 Fig. 7에서 원호로 근사시킨 점선(---)을 수학적으로 x_0 에서 우극한과 좌극한의 기울기 값이 같아지도록 늦혀줌으로서 평면과 매

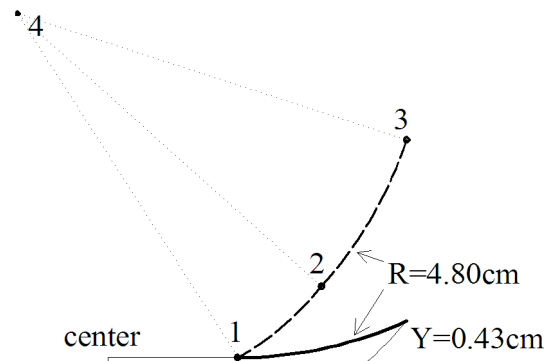


Fig. 7 Making process for an approximate circular arc and smooth surface

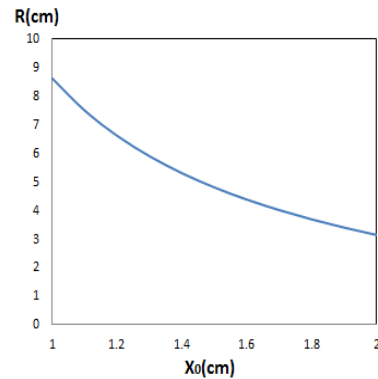


Fig. 8 Approximate circular arc according to changing x_0

끄럽게 이어지는 실선(—)을 만들어 주는 것이다. 수정된 표면은 도료에 큰 저항을 발생시키지 않게 되면서 표면의 마모 및 부식을 줄이고 물질이 흘러가는 도중에 표면에서 튀어나가는 현상을 줄여줄 수 있을 것이다. 식 (2)로 형성된 표면이 가공성과 내구성을 고려한 표면을 가지게 되면 Fig. 4(c)의 표면형상 그래프보다 전체적으로 높이가(Fig. 7의 Y)가 낮아지게 된다. $x_0=1.5\text{cm}$ 뿐만 아니라 디스크 전체반경의 x_0 에 대해서도 Y 가 낮아질 것이다. 이 영향으로 표면위의 물질이 받는 힘은 x_0 로부터 일정한 가속을 주는 분포인 Fig. 4(a)와는 다른 그래프를 보일 것이고, 유동 막 두께도 다르게 해석될 것이다.

2.5 수정된 모델링 해석

2.4절에서 수정된 곡면을 고려한 x 에 따라 물질이 받는 힘의 분포를 $x_0=1.0\text{cm}$, 1.5cm , 2.0cm 일 경우로만 Fig. 9에 나타냈다. Fig. 9(a), (b), (c)를 통해 x_0 가 증가할수록 그래프 말미부분에는 비선형적으로 더 뚜렷하게 분포되었다. 이는 Fig. 8에

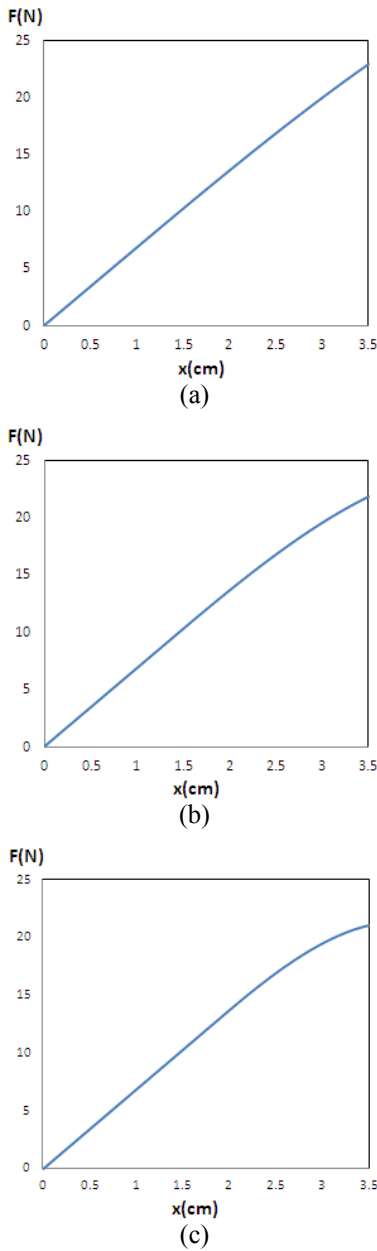


Fig. 9 Re-calculated tangential force on the surface according to the modified surface at x_0 : (a) $x_0=1.0\text{cm}$, (b) $x_0=1.5\text{cm}$ and (c) $x_0=2.0\text{cm}$

서 x_0 가 증가할 때 R 값이 작아지므로 곡면이 더 급격한 각도변화로 표면이 형성되기 때문이다. $x > x_0$ 구간의 접선방향 가속을 보면 R 이 클 때는 R 이 작을 때보다 상대적으로 평면에 근접한 곡면으로 형성되기 때문에 평면에서의 힘분포인 Fig. 3과 아주 흡사한 양상을 보이는 Fig. 9(a)처럼 나타났으며 a_x 의 크기를 x 에 따라 거의 비례적으로 받는다. 반대로 R 이 작을 때는 R 이 클

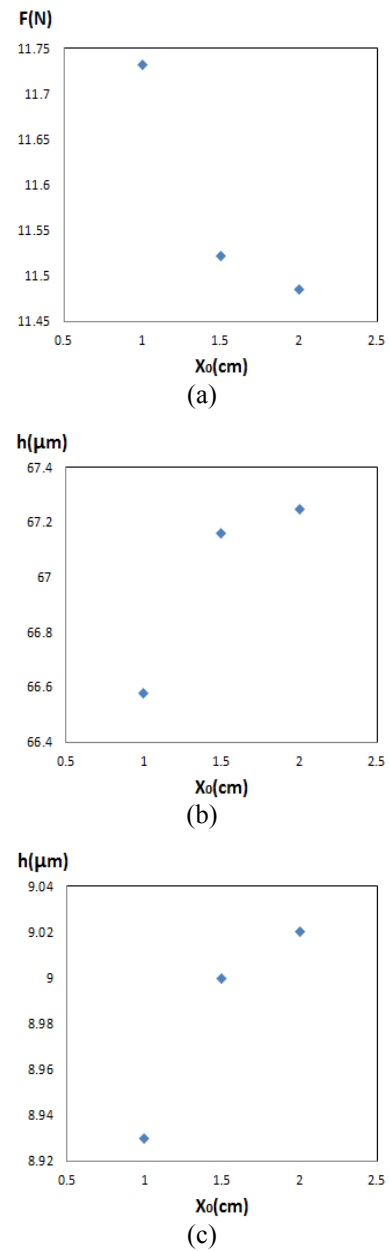


Fig. 10 Analysis at $x_0=1\text{cm}, 1.5\text{cm}, 2\text{cm}$ (a) average acceleration force related Fig. 9, (b) final film thickness of SAE 30 oil and (c) final film thickness of water

때보다 상대적으로 평면에서 멀어지는 곡면이 형성되기 때문에 Fig. 9(c)처럼 a_x 의 크기를 x 에 따라 덜 받게 되었다. 이런 영향으로 기준목표였던 Fig. 4(a)처럼 x_0 이상의 구간에서 일정하게 유지하려던 힘의 분포가 수정모델링을 거치면서 Fig. 9로 분포된 것임을 알 수 있다.

Fig. 9의 힘 분포로 인해 일정한 가속으로 작용하던 자유 경계면을 가진 Couette유동의 막 두께

해석에 어려움이 생기면서 Fig. 9(a), (b), (c) 각각에 대한 힘 분포들 평균 힘을 구하여 해석을 하였다. 일정 힘으로 간주될 수 있는 각각의 평균 힘은 Fig. 10(a)에 나타냈다. $x_0=1\text{cm}$, 1.5cm , 2cm 에 대한 평균 힘을 나타내면서 수정된 표면은 x_0 가 달라져도 유체가 받는 평균 힘이 크게 차이가 나지 않았다. Fig. 10(a)의 힘 분포로 최종 액막 두께를 계산해보면 Fig. 10(b)의 분포를 보였고, Table 1에서 수용성도료로 간주될 수 있는 물의 최종 액막 두께는 Fig. 10(c)의 분포를 보였다. 식 (2)를 그대로 형상화 했을 때 액막 두께는 Fig. 6으로 나타났지만, 수정된 표면에서 액막 두께를 계산한 수치적 값은 x_0 에 따라 큰 차이가 없는 것으로 보였다.

수정된 표면을 만들어 주면서 x_0 가 변함에 따라 액막 두께는 동일하게 나왔지만, 근사원호 R 은 다르게 형성되는 것을 Fig. 8에서 볼 수 있다. 이점을 볼 때 최종 액막 두께를 유지하면서 근사원호 R 에 따라 금속성분이 함유된 도료가 곡면을 따라 흘러갈 때 표면윤활마모의 정도를 실험적으로 비교해 볼 수 있을 것으로 보인다. 본 연구에서는 윤활마모를 실험적으로 측정해 보이지는 않았다.

그리고 수정된 표면이 수정되기 전 표면과 최종 액막 두께에서 다른 결과를 보이는 것으로 볼 때, 이 차이는 곡면부 근사원호를 1개의 원호로만 형성하면서 식 (2)에서 많이 벗어나는 표면이 형성된 것에 기인한 것으로 보인다. 따라서 Table 3과 같이 작동조건이 변하지 않는 도장시스템을 사용할 경우 요구되는 도장품질을 다양하게 만족시킬 변형품을 만들고자 할 때, 식 (2)에서 2.4.2 절을 통한 곡면부 근사원호를 2~3개의 곡률이 다른 원호로 정밀도를 향상해 설계하는 것을 제안하는 바이다.

3. 결론

본 연구는 물질의 물성치, 작동조건, 벨 디스크의 직경 및 분사 면의 각도 등을 고려한 표면모델링을 시행하였다. 동역학적 관계로 구한 기초모델은 식 (2)로 이를 따르는 표면위의 유동은 곡면이 시작되는 지점의 힘과 동일한 힘을 받으면서 표면을 따라 흐르게 된다. 일정한 가속을 받으며 표면에 흐르는 유동은 Couette유동으로 해석

하여 속도분포를 구하였고 최종 액막 두께로 입자의 무화정도를 나타냈다. 이론적으로만 구현된 설계 식에 대해 가공성과 내구성을 고려하여 수정된 표면형상을 제시하였으며, 막의 두께를 재해석하여 이론적인 형상과의 차이점을 비교하였다.

본 연구를 통해 피도물의 부가가치에 따라 다른 설계방법을 적용해 볼 수 있을 것이다. 첫째는 도장품질을 높이기 위한 방법으로 다양한 액막 두께를 만족시키기 위한 표면설계를 결정하는 변수를 x_0 로 두었고, 표면형상은 식 (2)를 따르며, x_0 가 클수록 무화성이 뛰어난 결과를 Fig. 6으로 보여주었다. 가공성에 유용하면서 식 (2)를 근접하게 형성하기 위해서는 최소한 2개 이상의 다른 곡률의 근사원호가 이루어져야 함을 알 수 있었다. 둘째는 벨 디스크의 수명과 관련된 방법으로 x_0 에 따라 액막 두께는 변하지 않았지만 1개의 근사원호로 형성된 표면이 윤활마모에 미치는 영향을 봄으로서 적절한 R 의 곡면으로 수명을 개선할 수 있는 방법이다.

따라서 첫 번째 설계법은 부가가치가 높은 우수한 도장품질이 요구되는 제품에 쓰이는 벨 디스크에 적용할 수 있고, 두 번째 설계법은 부가가치가 낮은 제품에 쓰이지만 벨 디스크를 자주 교체하지 않음으로서 생산비용을 절감할 수 있는 방법이 될 것으로 보인다.

이 연구는 도장 공장에서 사용하고 있는 회전식 스프레이 벨 디스크의 표면모델링에 관한 기초적 연구로서 연구결과를 통해 회전식 분무기 표면설계의 기초자료로 활용할 수 있으며, 벨 디스크의 성능을 결정하는 무화도 또한 예측할 수 있는 자료로 활용할 수 있을 것으로 생각한다.

후 기

본 연구는 2012년 울산대학교 기계공학부의 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

(1) Heo, J. H. and Kim, D. S, 2012, "Development and Performance Evaluation of a Liquid Particle Generator," *Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 13, No. 9, pp. 4334~4340.

- (2) Ju, E. S., Choi, J. H. and Park, Y. H., 1999, "A Study on the Ultrasonic Application for the Atomization of Liquid Fuels," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 23, No. 4, pp. 540~547.
- (3) Choi, H. K., Lee, D. H., You, G. W. and Choi, S. M., 2008, "Spray Characteristics of the Rotary Atomizer for the Slinger Combustor," *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 13, No. 3, pp. 149~155.
- (4) Mellor, A. M., 1990, Design of Modern Turbine Combustors, Academic Press, London, pp. 306~314.
- (5) Lee, D. H., Choi, H. K., Choi, S. M., You, G. W. and Huh, H. I., 2008, "The Atomization Mechanism and Spray Characteristics of Drum Type Rotary Atomizer," *Journal of The Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 12, No. 2, pp. 57~65.
- (6) Jang, S. H., Lee, D. H., You, G. W. and Choi, S. M., 2008, "Atomization of the High Speed Rotary Nozzle with Orifice Diameter," *Journal of ILASS-Korea Academic Lectures*, Vol. 2008, pp. 61~65.
- (7) Asakawa, N. and Takeuchi, Y., 1997, "Teachingless Spray-Painting of Sculptured Surface by an Industrial Robot," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 1875~1879.
- (8) Hinze, J. O. and Milborn, H., 1950, "Atomization of Liquids by Means of Rotating Cup," *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 17, No. 2, pp. 145~153.
- (9) Colbert, S. A. and Cairncross, R. A., 2006, "A Discrete Droplet Transport Model for Predicting Spray Coating Patterns of an Electrostatic Rotary Atomizer," *Journal of Electrostatics*, Vol. 64, No. 3, pp. 234~246.
- (10) Alaa A. Elmoursi, 1989, "Laplacian Fields of Bell-Type Electrostatic Painting Systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 25, No. 2, pp. 234~240.
- (11) Im, K. S., Lai M. C. and Yoon, S. J., 2003, "Spray Characteristics on the Electrostatic Rotating Bell Applicator," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 12, pp. 2053~2065.
- (12) Fukuta K., Murate M., Ohashi Y. and Toda K., 1993, "New Rotary Bell for Metallic Paint Application," *Metal Finishing*, Vol. 91, No. 10, pp. 39~42.
- (13) Cha, S. W., Lee, C. and Ko, Y. S., 2002, "Effect of Serrated Disk of Electrostatic Rotary Atomizer on Transfer Characteristics," *Journal of The Korean Society of Clean Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 45~51.
- (14) Lee, C., Cha, S. W. and Ho, K. I., 2004, "Development of the Rotary Electrostatic Painting Equipment with High Transfer Efficiency," *Journal of Fluid Machinery*, Vol. 7, No. 6, pp. 7~14.
- (15) Park, W. H. and Kim, T. K., 2000, "Solutions of the Navier-Stokes equation in slip flow region," *KSME Fall Annual Meeting 2000*, pp. 597~602.
- (16) Lee, C. and Cha, S. W., 2003, "Study on the RPM Characteristics of Rotary Atomizer for Various Air Turbine and Nozzle Types," *Journal of The Korean Society of Clean Technology*, Vol. 8, No. 4, pp. 163~168.
- (17) Young, Munson, Okiishi and Huebsch, 2007, "A Brief Introduction to FLUID MECHANICS," 4th, John Wiley & Sons, NewYork, pp. 256~259.