

연속 아연 도금 코-팅 두께에 관한 수치 해석적 연구

이동원[†] · 신승영* · 김병지** · 권영두*** · 권순범****

A Numerical Analysis on the Coating Thickness in Continuous Hot-Dip Galvanizing

Dong-Won LEE, Seung-Young SHIN, Byung-Ji KIM, Young-Doo KWON
and Soon-Bum KWON

Key Words: Air Knife(에어 나이프), Coating Thickness(코-팅 두께), Gas Wiping(가스 와이핑), Hot-Dip Galvanizing(용융 아연 도금), Impinging Jet(충돌 제트), Splashing(비말)

Abstract

To control the coating thickness of zinc in the process of continuous hot-dip galvanizing, it is known from early day that the gas wiping through an air knife system is the most effective because of the obtainable of uniformity of coating thickness, possibility of thin coating, working ability in high speed and simplicity of control. But, the gas wiping using in the galvanizing process brings about a problem of splashing from the strip edge for a certain high speed of coating. And, it is known that the problem of splashing is caused mainly by the existence of separation bubble at the neighbor of the strip surface. In theses connections, in the present study, we proposed two kinds of air knife systems having the same expansion rate of nozzle, and the jet structures and coating thicknesses from a conventional and new proposed nozzles are compared. In numerical analysis, the governing equations consisted of two-dimensional time dependent Navier-Stokes equations, standard k- ϵ turbulence model to solve turbulence stress and so on are employed. As a result, it is found that it had better to use the constant rate nozzle from the point view of the energy saving to obtain the same coating thickness. Also, to reduce the size of separation bubble and to enhance the cutting ability at the strip, it is recommendable to use an air knife having the constant expansion rate nozzle.

기호설명

H : 슬릿 높이(mm)

P_{os} : 조정 조 압력(kPa)

P_i : 충돌 압력(kPa)

P_m : 최대 충돌 압력(kPa)

S : 노즐 출구와 강판 사이 거리(mm)

V_s : 강판 이송 속도(m/s)

δ : 코-팅 두께(μm)

μ_l : 코-팅 액 점성($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)

ρ_l : 코-팅 액 밀도(kg/m^3)

τ_w : 강판 표면 전단력(kg/m^3)

1. 서 론

Air knife는 가는 슬릿을 통해 고압 기체를 대상물에 분사하여 소정의 목적을 달성하는 기구로써, 주로 제품의 건조, 냉각 및 환기 등에 적용되고 있으며, 소음 및 압축 공기의 사용량이 절대적으로 감소된다.

특히, 자동차용 아연 도금 강판 제조를 위한 연속 용융도금에 있어서, 코-팅 액 부착량 제어는

[†] 회원, 경북대학교 대학원 기계공학과

E-mail : sbkwon@mail.knu.ac.kr

TEL : (053)950-5578 FAX : (053)950-6550

* 경북대학교 대학원 기계공학과

** 가톨릭상지대학 자동차모터스포츠클럽

*** 경북대학교 기계공학과

**** 책임저자, 회원, 경북대학교 기계공학과

종래에는 용융금속 도금 욕조 상에 설치시킨 롤러에 의해 이루어졌었지만, 1960년대 후반부터 비접촉법으로써 가스 와이핑(Gas wiping) 법이 실용화되었다.

이러한 Air knife를 사용하는 가스 와이핑 법은 롤 와이핑 법에 비해 코-팅 액 부착량의 균일성, 박도금성, 및 고속성이 우수하여 최근에는 대부분의 라인에서 이 방법이 이용되고 있다.

연속적인 용융 아연 도금 강판 제조 작업시 사용되는 Air-Knife에 대하여 많은 연구자들이 다양한 방법으로 연구를 시도하였다. 이와 관련 이전의 연구들을 살펴보면, Tuck⁽¹⁾은 1983년에 연속적인 도금 작업에 대해 기초적인 메커니즘을 연구하였고, Ellen 등⁽²⁾은 제트 분사에 의한 도금 작업에서 코-팅 두께 제어를 위한 새로운 해석 기법을 제안하고 압력 구배가 매우 큰 영향을 미친다는 결론을 얻었다.

또한 Tuck 등⁽³⁾은 코팅 두께의 균일화, 박 도금(Thin coating) 가능, 고속에서의 작업성 및 제어의 용이성 때문에 Gas Wiping에 Air-Knife를 사용하는 것이 가장 유용하다고 밝혔다.

용융 도금에 있어서 강판 이송 프로세스에 관해서 Hrbek⁽⁴⁾이 최초로 이론적인 접근을 행하였고, 강판에 부착되는 액막 내의 속도분포를 가정해서 도금 부착량 추정식을 유도하고, 거기에 실제 주석(아연) 도금라인의 데이터를 비교함으로써 롤 와이핑의 영향에 대해서 검토하였다. Thornton 등⁽⁵⁾은 와이핑 제트에 의한 압력구배를 고려하는 대신에 중력항을 무시하고, 액막 두께는 와이핑 제트의 압력 구배가 최대가 되는 위치에서 결정되는 것으로 해서 도금 부착량 추정식을 유도하였다.

한편, Ellen 등⁽²⁾, Tuck 등⁽³⁾ 및 Takeishi 등⁽⁶⁾에 의해, 액막의 안정성, 표면 장력 및 와이핑 제트의 전단력의 영향에 대해서 이론적 검토가 행해졌다. 그러나 예로써 Takeishi 등⁽⁶⁾의 경우, 실제 조업 조건의 결과와 예측 결과가 상당한($\pm 20\%$ 정도) 오차를 가지는 등 실험값과의 자세한 정확성은 확인되지 않았다.

한편, 용융 도금 라인의 부착량 제어에는 주로 통계적 수법이 이용되고 있고, 실제 조업 데이터를 기초로 한 도금 부착량에 영향을 미치는 가스 와이핑 조건과 조업조건의 영향에 관한 회귀식이 제안되어 있다.^{(7),(8)} 그러나 이 통계적 수법은 회귀 분석이 행해진 라인 및 그 조업범위 내에서는 신뢰성이 있다 해도 신라인의 설계 등에 이용하기

에는 불충분한 면이 있다. 게다가 현재 사용되고 있는 Air knife 시스템은 형상의 한계로 인하여 에너지가 낭비되는 단점이 있다.

이상과 관련하여, 본 연구에서는 동일한 코-팅 두께를 구현하면서 에너지를 절약할 수 있는 균일 팽창 노즐⁽⁹⁾을 제안하고, 제안된 노즐의 성능 확인을 위해 2차원 수치해석을 수행하여 강판에 작용하는 충돌 압력을 구하여 제트의 특성을 규명하고, 이 충돌 압 분포로부터 강판이 소정의 속도로 이송되는 경우에 대한 아연 코-팅 두께를 구하였다. 강판에 대한 아연 코-팅 두께를 구하는 경우에는 Ellen 등⁽²⁾ 및 Takeishi 등⁽⁶⁾이 제안한 방법을 응용하여 사용하였다.

2. 수치 및 이론 해석

2.1 수치 해석

2.1.1 수치 해석 방법

강판 표면의 충돌 압 분포에 대한 수치 해석을 위해 상용 코드인 FLUENT 6.1을 이용하였고, 지배방정식으로는 2D Navier-Stokes 방정식, 연속식, 에너지 및 상태 방정식을 사용하였다. 작동 유체의 점성을 계산하기 위해 Surtherland 방정식을 적용하였고, 난류 응력을 풀기 위하여 표준 k- ϵ 난류 모델을 채택하였다. 적용된 작동 유체는 열적, 열량적으로 완전 기체로 하였다.

경계 조건으로서 조정 조(Plenum chamber)의 정체 압력(Stagnation pressure) P_0 를 55, 66 및 70 kPa의 세 가지로, 출구 압력(Exit pressure)은 대기압으로 하였으며, 조정 조의 정체 온도(Stagnation temperature) 및 주위 온도(Ambient temperature)를 300K로 하였다.

2.1.2 수치 해석 대상 및 영역

수치해석은 기존 Air Knife 시스템(old type)과 균일 팽창 노즐(new type)을 적용한 두 모델에 있어서, 각각에 대한 상하 비대칭 형 및 대칭형 노즐의 총 네 가지 경우에 대하여 수행되었다. Fig. 1에 각 노즐 시스템에 대한 형상을 간략화 하여 나타내었다. 4종류 모든 경우 노즐 출구의 높이 및 강판과 노즐 lip사이의 거리는 1mm와 10mm로 동일하다.

수치해석의 경우 격자는 모두 사각 격자로 생성되었고, 격자수는 약 5천 개다. 본 연구의 주 관심 대상이고, 압력과 속도 등이 급변하는 노즐 출구와 강판 표면에 격자를 밀집시켜 세밀한 계산을 수행하도록

하였다. 실제 조업 조건과 동일한 형태를 구현하기 위해 노즐 출구를 기준으로 도금 浴面이 있는 아래쪽 300mm까지를 해석 영역으로 하였고, 욱면에 대한 경계조건은 Wall로 하였다.

2.2 프로그램

2.1.1 지배 방정식

연속 용융 도금에 있어서 가스 와이핑 프로세스를 Fig. 2와 같이 모델화하였다. 즉, 용융도금 욱조로부터 연속적으로 상부로 이송되는 강관에 부착된 액막에 와이핑 제트의 충돌 압력과 충돌 후 강관을 따라 흐르는 충돌 벽면제트의 전단력이 작용하여 액막이 cutting된다고 생각할 수 있으며 이 경우 액막 유동은 아래의 가정을 기초로 해석한다.

[가정] ① 강관 표면의 액막 유동은 정상 층류.

② 도금액의 표면장력의 영향은 무시

이 경우 강관 상의 액막 유동에 대한 운동 방정식 및 질량 보존식은 다음 식과 같다.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_l} \frac{\partial P}{\partial x} - g + \frac{\mu_l}{\rho_l} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

경계조건은 강관 표면에서 액막에 미끄럼이 없는 것(No slip) 및 액막 표면에 와이핑 제트에 의한 충돌 압력 $P_i(x)$ 와 전단응력 $\tau_w(x)$ 가 작용하는 것으로 하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{cases} u(x,y)|_{y=0} = V_s \\ P(x)|_{y=\delta(x)} = P_i(x) \\ \mu_l \frac{\partial u(x,y)}{\partial y} |_{y=\delta(x)} = \tau_w(x) \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

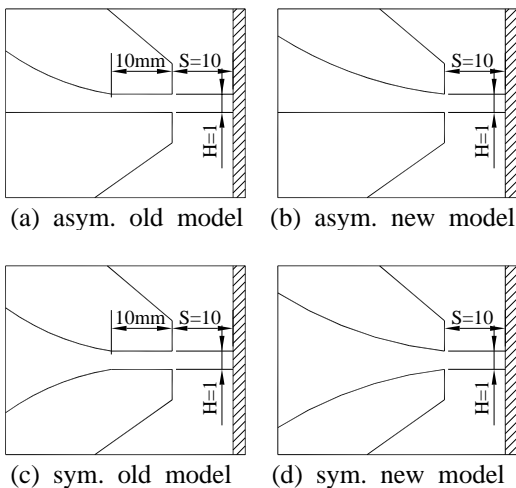


Fig. 1 Old and new air knife systems

따라서 식 (1) 및 (2)를 식 (3)의 경계조건을 바탕으로 해서 풀면 액막 내 속도 분포는 다음과 같이 된다.

$$u(x,y) = V_s + \frac{\tau_w(x)}{\mu_l} y - \frac{1}{\mu_l} \left[\frac{dP_i(x)}{dx} + \rho_l g \delta(x) - \frac{y}{2} \right] y \dots\dots (4)$$

강관 위를 흐르는 단위 폭 당 코팅 액 유량은

$$q = \int_0^{\delta(x)} u(x,y) dy = V_s \delta + \frac{\tau_w(x)}{2\mu_l} \delta^2(x) - \frac{1}{3\mu_l} \left[\frac{dP_i(x)}{dx} + \rho_l g \right] \delta^3(x) \dots\dots (5)$$

로 되고, 이 값은 단위 δ 당 유량 q 가 최대로 되는 곳을 이용하여 구할 수 있다. 즉, $\partial q / \partial \delta = 0$ 로부터 δ 를 구하고 이를 다시 식 (5)에 대입하여 q 를 구한다. 한편, 평균 액막 두께 δ_m 은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \delta_m &= \frac{q}{V_s} = \delta(x) + \frac{\tau_w(x)}{2\mu_l V_s} \delta^2(x) \\ &\quad - \frac{1}{3\mu_l V_s} \left[\frac{dP_i(x)}{dx} + \rho_l g \right] \delta^3(x) \\ &= \delta(x) \left[1 + \frac{\tau_w(x)}{2\mu_l V_s} \delta(x) - \frac{1}{3\mu_l V_s} \left\{ \frac{dP_i(x)}{dx} + \rho_l g \right\} \delta^2(x) \right] \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

무차원 변수를 다음과 같이 도입하여 각 변수를 무차원화 한다.

$$\delta^*(\eta) = \frac{\delta(\eta)}{\sqrt{\mu_l V_s / \rho_l g}}, \quad \delta_m^* = \frac{\delta_m}{\sqrt{\mu_l V_s / \rho_l g}}$$

$$P_i^*(\eta) = 1 + \frac{1}{\rho_l g b_p} \frac{dP_i(\eta)}{d(\eta)}$$

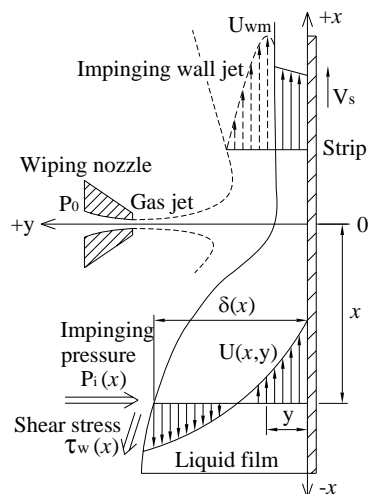


Fig. 2 Analytical model for gas wiping

$$\tau_w^*(\eta) = \frac{\tau_w(\eta)}{\sqrt{\rho_l \mu_l g V_s}} \dots\dots\dots (7)$$

단, 여기서

$$\eta = \frac{x}{b_p} \dots\dots\dots (8)$$

이며 b_p 는 최대 충돌 압력($P_{i,max}$)의 1/2이 되는 곳의 x 좌표 값으로 이들을 이용하여 무차원 하면식 (6)은 다음 식과 같이 된다.

$$\delta_m^* = \delta^*(\eta) \left[1 + \frac{1}{2} \tau_w^*(\eta) \delta^*(\eta) - \frac{1}{3} P_i^*(\eta) \delta^{*2}(\eta) \right] = h[\delta^*(\eta)] \dots\dots\dots (9)$$

각 η 와 수치해석으로부터 구한 벽면 충돌 압력을 이용하여 구한 벽면 전단응력⁽⁶⁾을 식 (9)에 대입한 후 풀면 무차원 코-팅 두께가 구해진다.

2.3 계산 조건

상기 제안된 방법을 이용하여 코-팅 두께 해석용 프로그램을 작성하고 아래 기재된 제 조건을 적용하여 계산을 수행하였다.

[계산조건]

- 노즐 슬릿 높이 B : 1mm
- 노즐-강관 거리 D : 10mm
- 강관 속도 V_s : 2.5m/s
- 작동 기체 : Air(27°C)
- 정체 압력 P_0 : 55, 66, 70kPa
- 코-팅 액 밀도 ρ_l : 6634kg/mm³
- 코-팅 액 점도 μ_l : 3.93×10⁻³Pa·s

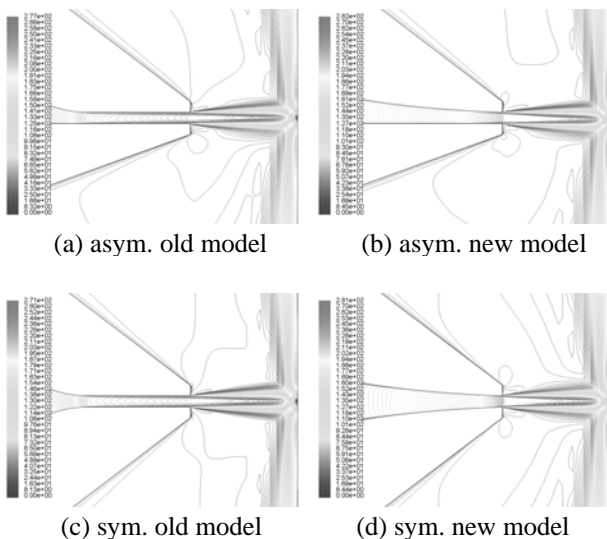


Fig. 3 Velocity contours for 66kPa

4. 결과 및 토의

3.1 수치 해석 결과

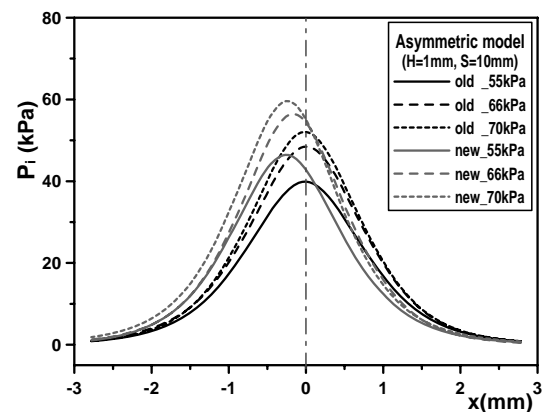
3.1.1 속도 분포

Fig. 3에 예로써 작동 정체압력이 66kPa인 경우에 대한 수치 해석 결과로부터 구한 등 속도 분포를 나타내었다.

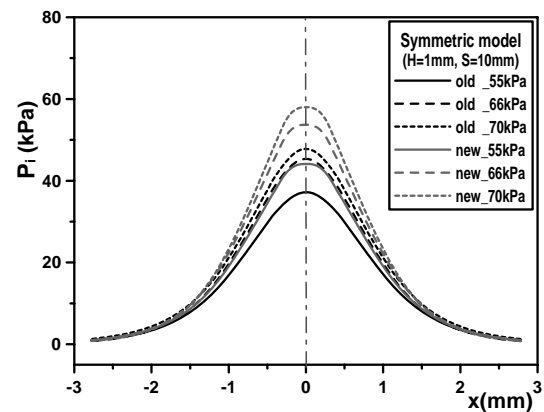
네 가지 노즐 시스템 중 노즐을 통한 air의 팽창이 균일한 경우가 압력 손실이 작기 때문에 제트 내 비점성 코어(Inviscid core)의 크기가 더 크고, 출구에서의 속도는 더 빠른 것으로 나타났다. 한편, 대칭인 경우가 상하 벽을 따라 흐르는 동일한 강도인 기류가 노즐 중심축에서 서로 충돌 간섭한 결과 에너지 손실이 크게 되어 비대칭 노즐의 경우보다 낮은 출구 속도를 나타내었다.

3.1.2. 충돌 압력 분포

Fig. 4에 각 작동 정체 압력에 있어서 old 및 new



(a) asymmetric model



(b) symmetric model

Fig. 4 Variations of impinging pressure along strip surface

type 노즐 시스템의 노즐 중심 위치에서의 벽면 충돌 압에 대한 수치 해석 결과를 나타내었다. 그림(a)는 비대칭형 노즐에 대한 것이며, 그림(b)는 대칭형 노즐에 대한 것이다. Fig. 4(a)에서 알 수 있듯이 작동 정체 압력이 증가할수록 벽면 충돌압이 크게 된다. new 노즐형인 경우가 old 노즐형의 경우보다 노즐 내부에서의 압력 강하가 작기 때문에 더 높은 벽면 충돌압을 나타내었다. 동일 정체 압력에 대해 충돌 압이 크다는 것은 에너지 saving 및 splashing 방지 차원에서 매우 흥미 있는 결과라 판단된다.

한편, Fig. 4(a)의 결과로부터 비대칭 new 노즐의 경우는 제트가 하향하는 것으로 나타났는데, 이는 노즐 위벽과 아래 벽에서 기류의 팽창 정도가 달라 상하 제트의 속도 차이가 발생하였기 때문이다. 강판 도금 시 조업에 악영향을 끼치는 비말(Splashing) 현상을 방지하는데 있어서 제트가 하향 분사되는 경우가 벽면에 수직하게 분사되는 경우보다 더 효과가 있는 것⁽⁵⁾으로 밝혀져 있는 바 본 연구에서 제안한 비대칭 노즐 시스템을 사용하면 용융 도금 작업시 비말 현상 방지에도 매우 효과가 있을 것으로 판단된다.

또 분류 충돌 속도 분포에서 설명한 바와 같이 비대칭인 경우가 출구 속도가 크게 되어 벽면 충돌 압력도 높게 나타났다.

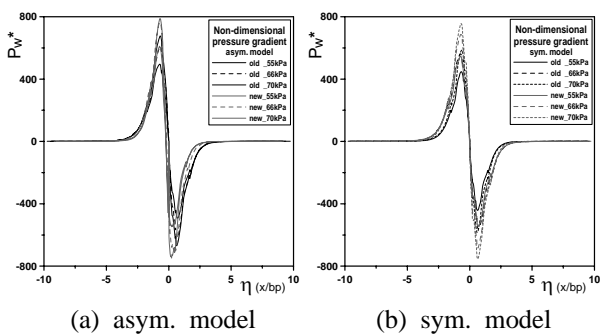


Fig. 5 Non-dimensional pressure gradient

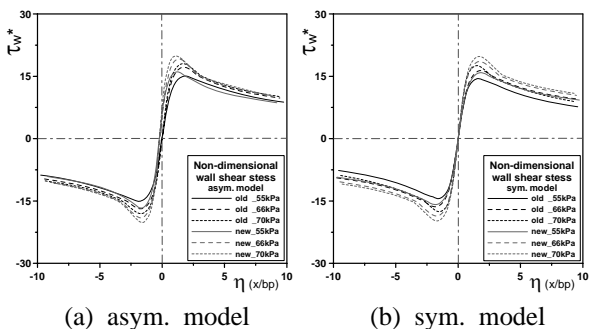


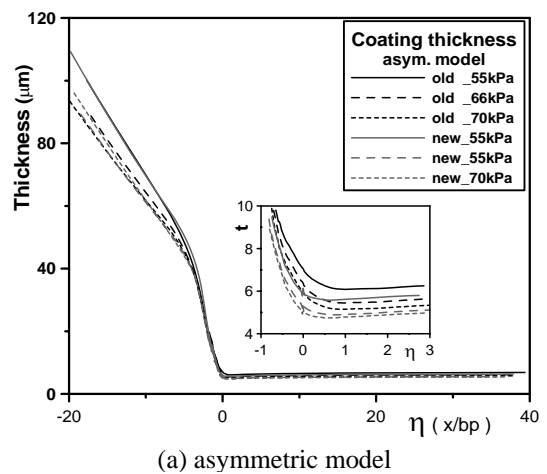
Fig. 6 Non-dimensional wall shear stress

3.1.34 무차원 압력구배 및 벽면 전단력 분포

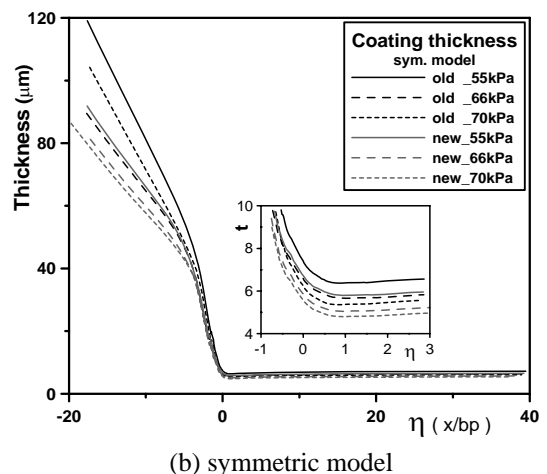
Fig. 5 및 6에 η 에 따른 충돌 분류 와이핑 제트의 무차원 압력 구배 및 무차원 전단 응력 분포를 나타내었다. 그림에 보이는 바와 같이 두 가지 분포 모두 제트 경계($\eta=\pm 1$) 근방에서 최대 및 최소값을 나타내었고, 작동 정체 압력이 증가할수록 최대 및 최소값은 더 크게 되었다.

3.2 코-팅 두께 해석 결과

Fig. 7은 네 가지 air knife 시스템에 대해 작동 정체 압력 변화에 따른 코-팅 두께 변화를 수치 해석으로 구한 결과이다. 각 그림 내의 작은 그림은 이해를 쉽게 하기 위해 변화가 심한 부분을 크게 확대한 것이다. 특이한 것은, 코-팅 두께는 분류 중심위치($\eta=0$)에서 최소로 되지 않고 분류 중심보다 약간 상부에서 최소로 된 후 다시 두꺼워짐을 알 수 있다.



(a) asymmetric model



(b) symmetric model

Fig. 7 Variations of coating thickness

코-팅 두께가 최소로 되는 위치가 분류 중심 위치보다 약간 위에 존재하는 것은 Fig. 2의 유동장 개략에서 나타난 바와 같이 충돌 분류의 x 방향 속도가 최대가 되는 위치가 분류 충돌 중심 위치보다 약간 위에 위치하여 코-팅 액 표면에 전단력이 강하게 작용하기 때문이다. 한편, 이 위치보다 더 상부의 위치에서는 충돌 벽면 제트에 의한 전단력이 감소하여 전단력에 의한 효과보다 중력의 영향이 지배적이게 되어 코-팅 두께는 오히려 증가하게 된다.

Fig. 5 및 6에 나타난 바와 같이, 작동 정체 압력이 커질수록 동일한 강판 속도인 경우에는 강판에서의 분류의 $dP/d\eta$ 및 벽면 전단 응력이 크게 되기 때문에 Ellen 등⁽²⁾이 예측한 것과 같이 코-팅 두께는 더 얇게 되었다. 동일한 작동 정체 압력일 경우, 에너지 손실이 적은 균일 팽창 노즐을 사용하는 경우가 출구 유속이 더 빠르며 강판 작용하는 충돌압력이 더 크고, 그에 따라 $dP/d\eta$ 가 더 크기 때문에 코-팅 두께는 더 얇게 된다. 이로부터 본 연구에서 제안한 air knife 시스템을 사용하면 동일한 코-팅 두께를 얻기 위해 정체 압력을 낮출 수 있어 소요 에너지를 절감할 수 있고 또한 splashing 방지에도 효과가 있을 것으로 생각된다.

Table 1에 수치 해석으로부터 구한 각 모델 및 정체 압력에 대한 최고 충돌 압력과 최소 코-팅 두께를 나타내었다.

Table 1 Maximum impinging pressure and minimum coating thickness

형상	정체압 구분	asym.			sym.		
		55 kPa	66 kPa	70 kPa	55 kPa	66 kPa	70 kPa
old type	P_i (kPa)	39.9	48.4	52.0	37.2	45.3	47.8
	δ (μ m)	6.08	5.44	5.15	6.37	5.66	5.36
new type	P_i (kPa)	46.5	56.4	59.6	44.1	53.7	58.0
	δ (μ m)	5.58	4.89	4.74	5.79	5.05	4.80

5. 결론

기존의 재래형 Air knife 노즐과 균일 팽창 노즐을 이용한 Air knife 시스템을 사용하는 경우에 대한 수치해석을 수행하고 이 수치해석 결과를 이용하여 코-팅 두께를 구하여 두 모델을 비교한 결과, 다음과 같

은 결론을 얻었다.

1. 에너지 손실이 적은 균일 팽창 노즐이 출구 유속 및 벽면 충돌 압력이 높게 나타났다.
2. 동일한 정체 압에 대해서 균일 팽창 노즐을 사용하는 air knife를 사용하는 경우가 코-팅 두께를 더 얇게 할 수 있다.
3. 비대칭형 air knife 시스템을 사용하는 것이 대칭형 시스템보다 splashing 방지에 효과적이다.

참고문헌

- (1) Tuck, E. O., 1983, "Continuous Coating with Gravity and Jet-Stripping," *Phys. Fluids*, Vol. 26, p. 2352.
- (2) Ellen, C. H. and Tu, C. V., 1984, "An Analysis of Jet Stripping of Liquid Coatings," *J. of Fluid Eng.*, Vol. 106, pp. 399-404.
- (3) Tuck, E. O. and Broeck, J. M., 1984, "Influence of Surface Tension on Jet Stripped Continuous Coating of Sheet Materials," *AIChE J.*, Vol. 30, No. 5, pp. 808-811.
- (4) Hrbek, A., 1961, "The Effect of Speed on the Thickness of the Coating Produced During Metalizing in Liquid Metals," *Metal Finishing J.*, Vol. 7, No. 8, pp. 298-302.
- (5) Thornton, J. A. and Graff, H. F., 1976, "An Analytical Description of the Jet Finishing Process for Hot-Dip Metallic Coatings on Strip," *Metallurgical Transactions B*, Vol. 7B, No. 12, pp. 607-618.
- (6) Takeishi, Y., Yamauchi, A. and Miyauchi, S., 1995, "Gas Wiping Mechanism in Hot-Dip Coating Process," *Iron and Steel*, Vol. 81, No. 6, pp. 643-647.
- (7) Edwards, W. J., Carlton, A. J., Harvey, G. F., Evans, R. F. K. and McKerrow, P. J., 1976, "Coating Mass Control System Design for a Continuous Galvanizing Line," *Automatica*, Vol. 12, pp. 225-235.
- (8) Adaniya, T., Abe, M., Shoji, M. and Yano, H., 1980, "Syudy on Gas Wiping Mechaniam for Continuous Galvanizing Line," *Iron and Steel*, Vol. 66, No. 7, pp. 835-844.
- (9) Moore, M. J. and Sieverding, C. H., 1976, "Two-Phase Steam Flow in Turbines and Separators," Hemisphere Publishing Corp., London, pp. 134-135.