

연속용융아연 도금라인의 도금편차 진단

배 용 환*

Diagnosis of Coating Deviation in Continuous Galvanizing Line

Y-H Bae*

Key words : Galvanizing line (용융아연 도금라인), Air wiping (공기 와이핑), Coating deviation(도금편차), Air knife(에어나이프), Coating weight model(부착량 모델식), Dynamic pressure(동압), Strip vibration(판진동), Diagnosis (진단)

Abstract

In continuous galvanizing process, the mass of zinc deposited and its distribution are controlled by the air pressure, effective distance from the air knife nozzle to the steel strip surface and line speed. Coating defects are resulted from the unbalance of these control factors and the inaccuracy of coating equipments. This paper investigates the main cause of coating deviation and a new air knife system for control of coating thickness was developed. We investigate dynamic pressure variation by air knife types. It is found that the coating deviation is caused by the unbalance of dynamic pressure, the irregularity of strip position, and the strip vibration. Formulating a useful coating model by using present working condition, an optimal working condition is suggested. The productivity and coating quality are improved by applying the result of this research at the shop floor.

기 호 설 명

P : Dynamic pressure (Kpa)

D : Distance between strip and nozzle (mm)

F : Air momentum (Kpa)

W_0 : Initial coated zinc amount (g/m^2)

$K_0, K1 \sim K4$: Constants

V : Strip speed(m/min)

ξ : Friction loss coefficient

D/S : Drive Side

t : Time(sec)

W/S : Work Side

W : Target zinc coating amount (g/m^2)

* 안동대학교 기계공학교육학과

1. 서 론

CGL의 에어와이핑(air wiping)기술은 여타 도금방법에 비하여 상대적으로 부착량을 얇게 할 수 있으며 고속으로 와이핑(wiping)할 수 있는 장점 등으로 인하여 단기간에 세계 대부분의 제철소에서 채용되어 사용되고 있다. 그러나 이러한 gas wiping기술에서 부착량과 제반인자 사이의 관계는 명확히 규명되어 있지 않으나 이 기술과 관련된 부착량 제어방법, 노즐막힘방지장치 개발등이 연구발표되고 있다.^(1,2) 또한 국내에서는 이와 관련된 기본 연구가 전혀 수행된 적이 없으며 현장의 조업은 조업자의 경험에 완전히 의존하고 있는 실정에서 현재 과도한 도금편차로 인한 권취 불능상태가 빈번히 발생하고 있다. 본 연구에서는 에어와이핑 시스템에 관한 이론적 고찰 및 CGL에서 아연도금 부착량의 불균형 방지 및 도금량 조절을 위한 에어와이핑 시스템의 개조 및 설계제작 방향을 제시하고, 표준조업기준을 제시할 수 있는 수치적 모델식을 개발함으로써 품질향상을 도모코자 하였다. 또한 실제 용융도금라인에서 발생하는 과도한 도금편차를 방지하기 위한 원인규명과 부착량과 조업 제반인자와의 관계를 규명하여 용융아연도금의 고속화 및 품질향상을 기하고자 하였다. 먼저 본 연구를 시작함에 있어서 도금편차는 어느 특정한 변수에 의하여 발생하는 것이 아니고, 설비구조상 복합적인 원인에 의하여 발생된다고 생각되었으므로, 다양한 각도의 여러가지 실험을 병행하여 실시하지 않으면 안되었다. 또한 이러한 모든 현상을 역학적인 계산에 의하여 추정하기란 매우 어렵고, 이제까지 이 부분에 대한 이론적 해석이 전무하고, 또한 불가능하리라 생각되어 실험적 방법에 의하여 발생메카니즘을 규명을 시도하였다. 우선 도금 부착량에 가장 큰 영향을 미치는 에어나이프 구조에 의한 공기유동특성 및 도금편차에 미치는 영향 연구, 조업 데이터를 컴퓨터 회귀분석에 의한 부착량 수식모델 도출로 최적조업조건을 만들었고, 에어나이프 고장해석, 구조 변경, strip진동영향 등을 고려하여 도금편차 원인을 진단 규명하였다.

2. 이론적 배경

에어와이핑과 관련된 기본유동은 유한한 저장 챔버로 유입된 공기가 적절한 내부 통로형상과 출구간극을 지닌 노즐을 거쳐 외부로 분출된 후 적당히 떨어져 수직으로 이송되고 있는 강판표면에 충돌하는 고속 분사제트 형상을 취하고 있다. (Fig.1) 일반적으로 에어와이핑 시스템에서 도금부착량은 노즐헤드의 압력과 나이프와 강판과의 간격, 그리고 나이프를 지나가는 강판의 속도등에 의하여 좌우된다. 따라서 이러한 각 제어인자들을 조절함으로써 도금부착량을 변화시킨다. 일반적으로 부착량 제어방법은 수동모드에서 작업변수는 속도제어, 압력제어, 간격제어로 구분되며, 이들 중 두가지 요소는 고정된 상태에서 하나의 제어인자를 조절함으로써 제어를 행한다. 이외에도 도금제어에 영향을 미치는 요소로는 노즐립 간극, 와이핑 기체 온도, 노즐lip단면 등이 있으며, 이들은 각각 상관관계를 가진다.

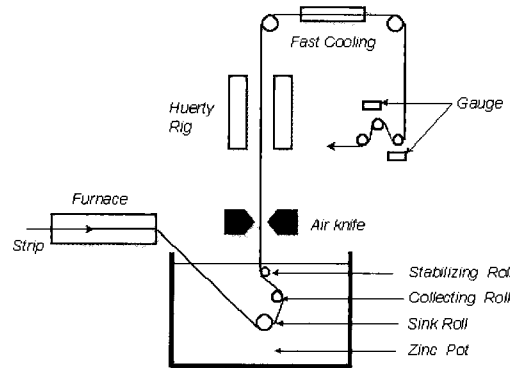


Fig.1 Galvanizing line

2.1 부착량 제어이론

에어나이프 시스템을 Cartesian 좌표계에서 Fig.2와 같이 정의할 때 참조영역을 아연도금 포트라 가정하여 포트의 중심을 O라 한다. W축은 중심선에 놓여져 있고, z축은 에어나이프를 수직이등분하여 W축에 수직으로 교차한다. 도금라인에서 공정변수들은 모두 시간 t에 따라서 변화한다. 단순화를 위하여 시간변수 t를 생략하고, 다음에 반

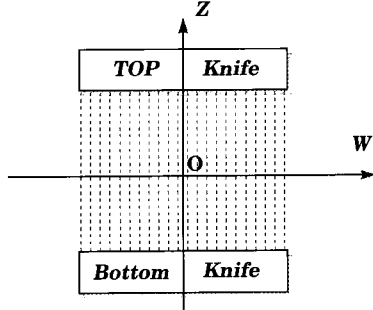


Fig. 2 Cartesian coordinates

복이산모델로 만들 수 있다. 일반적으로 부착량 m 은 스트립속도 v , 에어압력 p , 유효나이프, 스트립간격 d 라 하면

$$m = Kdv^{\alpha} p^{-\beta} \quad (1)$$

여기서 a 와 b 는 상수로서 일정하지 않으며, 프로세스 상태변화에 따라 조금씩 달라진다. 이와같은 변화로 인하여 모델식 (1) 을 매우 복잡하게 만들고 부착량제어컨트롤러 설계를 더욱 어렵게 만든다. 복잡성을 피하기 위하여 여러 연구자들은 a 와 β 를 일정한 상수로서 가정하는 경우도 있으나 프로세스의 불확실한 변화는 불확실성의 시간의존상수 K 에 의하여 발생한다.

K 의 변화는 주로 스트립 속도 범위, 목표부착량, 다른 정의되지 않는 외란에 의하여 주로 결정된다. 도금공정은 비선형 유체동력학 현상으로 매우 복잡하다. K 의 변화에 따른 분석적 도금부착량모델이 아직까지 발표되지 않고 있으며, 이것은 단지 도금부착량을 온라인 실측함으로써 정의되어질 수 있다

위의 모델에서 스트립의 표면은 에어나이프 노즐에 평행하며 수평이라고 가정한 것이고, 모델링에러는 포함되지 않았다. Jacobs 등은⁽³⁾ 불완전한 스트립의 형상, 나이프 노즐의 부적절한 조절로 인하여 스트립 폭방향으로 도금부착량 불균일을 초래한다고 주야한다. Chen 등은^(4,5) 스트립의 폭방향에 따른 에러항 ξ_s 을 이용하여 다음과 같은 수정된 부착량 모델식을 제안하였다.

$$m_s(w) = Kd_s(w)v^{\alpha} p_s^{-\beta} + \xi_s(w) \quad (2)$$

(194)

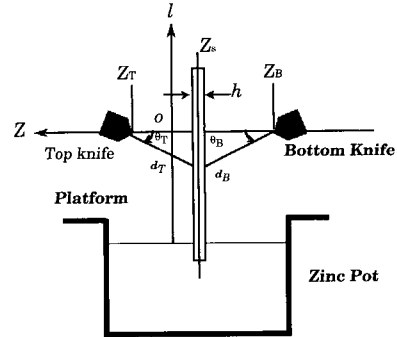


Fig. 3 Knife tilt angle

여기서 $m_s(w)$ 는 목표부착량이고, $d_s(w)$ 는 유효 나이프, 스트립간격이다.

$\xi_s(w)$ 는 모델에러이고, p_s 는 에어나이프 압력이다. Fig.3과 같이 에어나이프의 앞, 뒤를 구분하여 유효거리가 결정될수 있다.

$$d_T(w) = \frac{1}{\cos\theta_T} [z_T(w) - z_S(w) - \frac{1}{2}h] \quad (3)$$

$$d_B(w) = \frac{1}{\cos\theta_B} [z_S(w) - z_B(w) - \frac{1}{2}h] \quad (4)$$

여기서 $z_T(w)$ 는 상위 에어나이프 위치이고, $z_B(w)$ 는 하위 에어나이프 위치이다. θ_T 는 상위 나이프 경사각도이고, θ_B 는 하위 나이프 경사각도이다.

또한 梅前 등은⁽⁶⁾ 용융아연의 흐름상태를 Fig. 4 와 같은 2차원 점성유동이라 생각하여 그 운동방정식으로 Navier-Stokes의 식을 이용하여 아연도금두께를 유도했지만, 阿部 등⁽⁷⁾ 은 일반적인

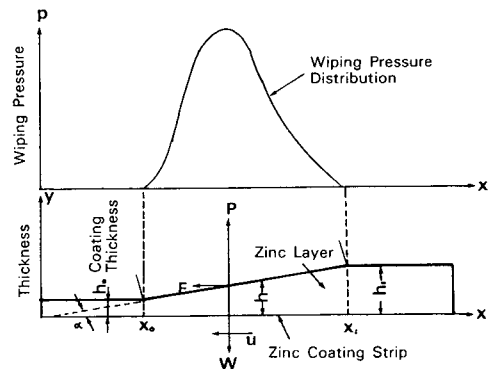


Fig.4 Status of zinc coating wiping

로 가스운동량과 도금부착량 관계에 근거하여 그 관계를 간단한 역학적 방정식으로 표시했는데, 우선 도금부착량을 제어하는 인자는 기체운동량 F 와 강판에 부착되어 나오는 초기 아연량 W_0 , 아연강판에서 와이핑 받는 시간을 t 라 하면 각 인자의 변화에 따른 부착량 변화는 다음과 같다.

$$-dW = \frac{\partial W}{\partial F} dF + \frac{\partial W}{\partial W_0} dW_0 + \frac{\partial W}{\partial t} dt \quad (5)$$

여기서 운동량 F 는 동압 P 와 노즐과 강판 사이 간격 D 의 변화에 좌우되고, 초기 아연량 W_0 는 시간 t 와 강판 속도 V 의 변화에 의하여 결정되므로 윗 식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$-dW = \frac{\partial W}{\partial F} \left(\frac{\partial F}{\partial P} dP + \frac{\partial F}{\partial D} dD \right) + \frac{\partial W}{\partial W_0} \frac{\partial W_0}{\partial t} dV + \frac{\partial W}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial V} dV \quad (6)$$

$$-dW = K1 \frac{W}{P} dP - K2 \frac{W}{D} dD - K3 \frac{W}{V} dV - K4 \frac{W}{V^2} dV \quad (7)$$

$$W = K_0 \sim P^{k1} D^{k2} V^{k3} \exp(K4/(-V)) \quad (8)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 도금편차 발생 메카니즘

본 연구에서는 도금편차 발생원인을 조사하기 위하여 에어ナイ프 노즐lip 변경 및 노즐팁 간극변화에 따른 동압측정을 실시하였으며, strip진동에 따른 도금편차 발생경향 분석, 시뮬레이터 제작에 의한 lip 미소변화에 의한 와이핑 저하로 인한 줄무늬 도금편차 발생원인을 규명하였다. 또 최적의 작업조건을 도출하기 위하여 조업데이터와 생산 실적 데이터를 이용하여 상관회귀분석에 의하여 부착량모델식을 작성하였고, 이것을 이용하여 각 목표부착량별 작업조건을 제시하였다. 일반적으로 폭방향으로 일어나는 도금편차 발생원인은 다음과 같이 추정된다. 첫째, 폭방향 에어ナイ프 동

압 불균형, 둘째, 중심부보다 단부의 와이핑력 저하, 셋째, 기체온도가 단부에서 과냉에 의하여 주로 과다한 폭방향 도금편차가 발생된다. 일반적으로 와이핑력은 노즐 선단갭 평행부 형상에 따라서 크게 좌우됨을 알 수 있었다. Fig.5는 현재 용융도

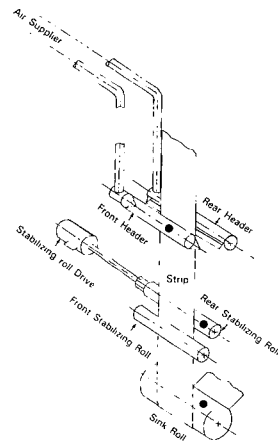


Fig. 5 Mechanical structure of CGL air knife system (● : vibration source)

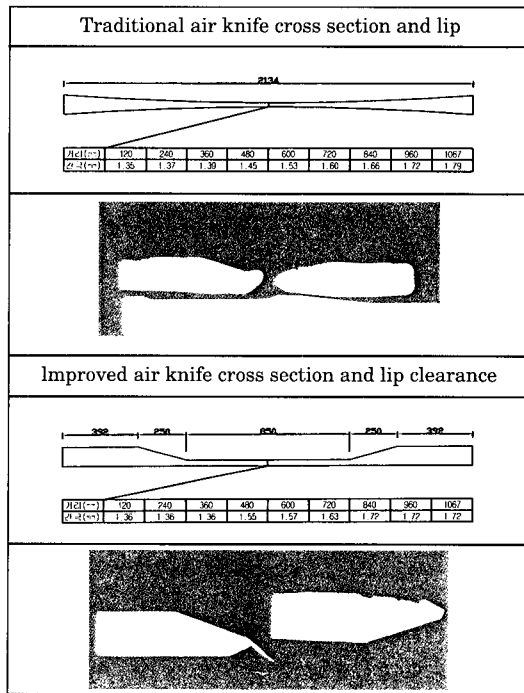


Fig. 6 Air knife lip clearance and lip cross section

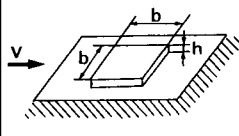
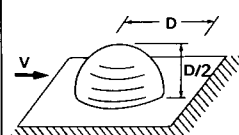
Type	Motch Pattern	Drag coefficient	Drag Force
Rectangular		$C_D=0.5$	$F=C_D A$ $\frac{\rho V^2}{2}$ ($A=bh$)
Hemisphere		$0.4 < C_D < 0.6$	$F=C_D A$ $\frac{\rho V^2}{2}$ ($A=\frac{\pi D^2}{2}$)

Fig. 7 Drag force variation by notch pattern

금라인에서 사용되고 있는 에어나이프시스템의 기계장치를 도식적으로 나타내었다. 에어를 공급하는 배관은 에어나이프의 전면헤더(front heeader)와 후면헤더(rear header)에 에어를 충전하였다가 폭방향 작은 간격(slit)을 통하여 분사시킨다. 여기서 도금편차에 가장 영향을 미치는 부분은 바로 작은 slit을 만드는 에어나이프 lip의 형상에 기인함을 알 수 있다. Fig.6의 (a)는 과도한 도금편차를 발생시킨 기존 에어나이프 폭방향 단면의 형태이고, (b)는 개조된 lip의 형태로 개조lip 사용시 단부과도금이 80%이상 감소되었다. 일반적으로 slit의 평행부 길이변화와 노즐헤더압에 따른 동압변화는 10mm에서 가장 안정된다.

또한 폭방향의 특정한 위치에 띠형상(band type)의 과도금이 나타나는 현상은 다음과 같이 설명될 수 있다. 에어분출 slit의 11mm폭 상에 에어와이핑 도중 미세한 아연분진이 응집하여 직육면체나 반구형태(아연 cloddy)의 형태가 될 때 Fig.7과 같은 항력이 발생되어 공기유동흐름속도를 저하시킨다. 따라서 이 부분에서 띠형상의 과도금이 발생한다.

3.2 응용도금설비 변화에 따른 도금편차 발생

위에서 지적한 과도금외에 폭방향의 불균일한

도금편차가 발생하는데 이것은 에어나이프 기계 구조와 밀접한 관계가 있으리라 생각되어 여러가지 현장 실험을 통하여 이를 규명하였다. Fig.5에서 도금편차를 발생시키는 요소로는 도금판의 진동, 도금판진행 중앙선변경, 노즐헤더 공기 공급방향 변경에 의한 동압불균형 등에 의하여 발생한다. 먼저 도금판 진동에 의한 도금편차량 발생은 에어와이핑 작업시 도금판의 진동은 노즐과 도금판 간격에 주기적인 변화를 일으키므로 도금부착량 변

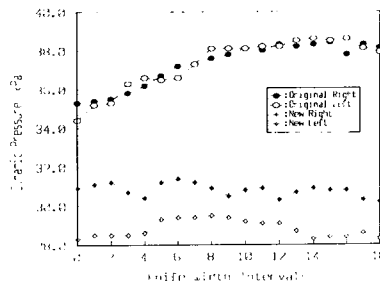
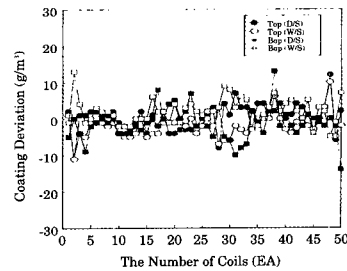
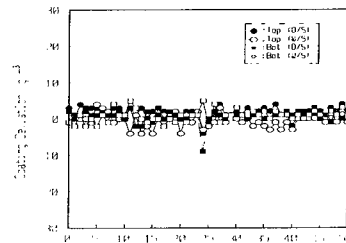


Fig. 8 Result of dynamic pressure measurement of air knife (d=5mm, P=50kPa)



(a) First air knife



(b) Improved air knife

Fig. 9 Coating deviation by air knife type

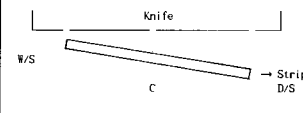
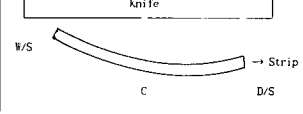
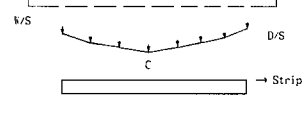
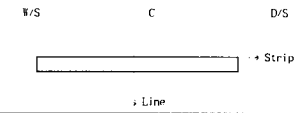
case	coating Type	knife and Strip Position
strip & Gap Unbalance	$W/S < D/S$	
C bending	$C > D/S > W/S$	
Dynamic Pressure Unbalance	Unbalance	
Strip Pass Line Unbalance	$W/S < C, D/S$	

Fig. 10 Coating deviation type by knife and strip condition

화를 유발시킨다. 여기서 발생하는 진동은 도금판 진행선에 대칭이 되는 진동이 아니고, 고차와 저차가 합해진 복합적인 형태이다. 진동을 일으키는 가진원으로서의 에어 와이핑시의 제트에 의한 도금판 진동 및 싱크(sink)들과 쿨링 타워(cooling tower)간의 장력, 스테빌라이징(stabilizing), 싱크를 편심, 도금판 크기에 따라 복합적으로 발생한다. 조업데이터 분석 결과 도금판 진동이 커짐에 따라 도금부착량 편차는 증가하는 경향이다. 또한 도금판 진행 중앙선과 에어ナイ프의 중앙이 일치 않을때 편향된 도금편차를 발생시킬 수 있고, 이것은 립간극이 한쪽은 작아지고 다른 한쪽은 커지므로 작아지는 쪽의 단부가 미도금될 수 있음을 나타낸다. Strip의 폭방향 온도편차에 의한 열변형이 균일하지 않은 상태에서 장력을 가하면 C휨이 발생하므로 나이프와 strip간의 거리 불균일에 의하여 도금편차가 발생될 수 있다. 또한 일반적으로 도금두께는 동압에 반비례하므로, 공기공급방향에 따른 폭방향 도금분포차에 의한 도금편차를 유발시킨다. Fig.8은 생산라인에서 사용중인 에어ナイ프의 동압을 DPI 420 동압측정기를 이용하여

측정한 결과로 기존의 에어ナイ프(D/S 측 공기공급방식)의 동압분포 특성은 D/S 측이 W/S 측보다 $2 Kpa$ 정도 낮은 반면, 개조 에어ナイ프(중앙공기공급방식)의 동압분포는 대체로 균일하나, 기존에 비하여 $7 Kpa$ 정도의 압력손실을 가져왔다. 기존 에어ナイ프 사용시 도금부착량편차(중앙-단부)는 Fig.9 (a)에서 보는 것처럼 불규칙적이고, 변화범위도 큰 반면, 개조 에어ナイ프 사용시 Fig.9 (b)처럼 규칙적이고, 편차가 소폭으로 줄어들었음을 알 수 있다. 이러한 원인은 조업시 노즐과 도금판에 의한 동압보상은 직선 비례적으로 이루어지지만 동압불균형은 곡선형태로 나타나므로 기존 에어나이프로에서 노즐과 도금판 간격보상에 의한 도금편차 감소에는 한계가 있음을 알 수 있었다. Fig.10에 앞에서 설명된 각 경우의 도금편차 발생 메커니즘을 나타내었다.

3.3 최적작업조건 도출

본 연구에서는 위의 (8)의 부착량 모델식을 기초로 현장조업조건을 도출하기 위하여 SCC(Supervisory Control Computer)실적치(압력, 속도, 부착량)과 현장수집 데이터(간격)를 기초로 현장수집 데이터(간격)를 기초로 현장수집 데이터의 측정오차를 $\pm 5mm$ 이내에서 회귀분석을 실시 상관계수를 산출하여, 식(9)와 같은 부착량 모델식을 만들었다. Fig.11은 부착량 모델식에 의하여 계산된 도금량과 각 작업조건별 표본 채취된 도금량을 나타낸 것으로 아주 근사한 상관관계를 나타내고 있다.

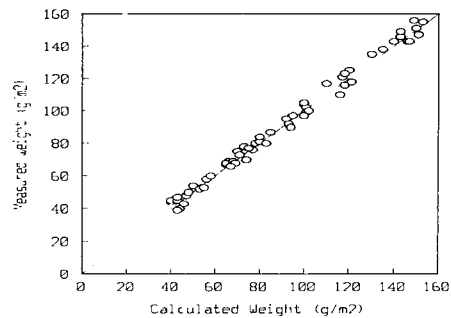
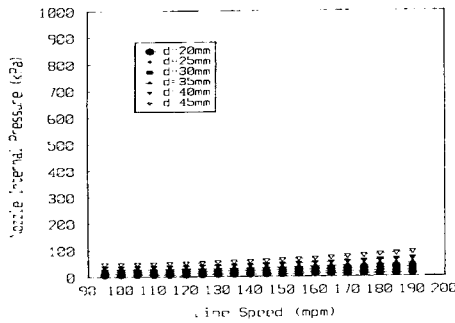
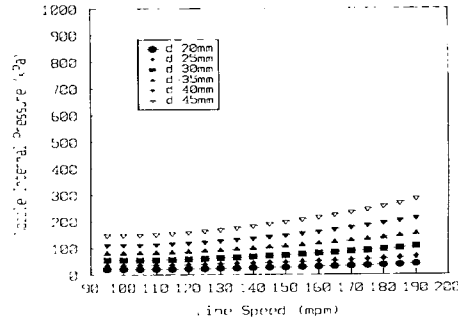


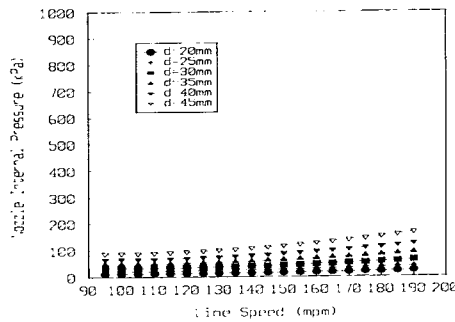
Fig.11 Comparison of calculated weight and measured weight



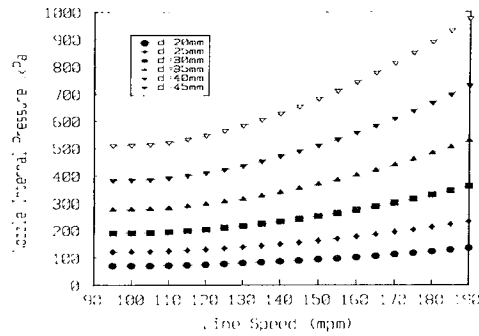
(a) Target coating weight : 150g/m²



(c) Target coating weight : 70g/m²



(b) Target coating weight : 100g/m²



(d) Target coating weight : 30g/m²

Fig.12 Optimum working condition

$$W = 3.9 (10^{-6}) P^{0.68} V^{2.47} D^{1.67} \exp(241/V) \quad (9)$$

Fig.12 (a)~(d)는 모델식에 의하여 계산된 작업 조건을 나타낸 것으로 목표 부착량 150g/m²에 대한 작업조건을 나타낸 것으로 현재 에어나이프 시스템의 송풍기 최대출력이 100(Kpa)이므로 도금 작업은 최대속도 190(mpm)까지 작업할 수 있음을 나타내고, 목표 100g/m²작업시 나이프간 간격이 45(mm)에서 작업가능한 속도는 130(mpm)이고, 목표 70g/m²에서는 간격 45(mm)에서는 작업이 불가능함을 알 수 있고, 간격 35(mm)에서 최대속도 140(mpm)로 작업가능하나 이때 부터 서서히 나이프립이 고압에 의하여 비산된 아연분진에 의하여 립막힘 현상이 자주 발생되므로 이 범위보다 느린 속도에서 저압으로 작업하는 것이 좋다. 목표부착량 30g/m²에 대하여는 간격 20(mm)에

서 최대속도 160(mpm)까지 가능하나 실제 작업시 strip온도차에 의한 열변형에 의한 C 휠에 의하여 스트립과 나이프 선단이 충돌하여 나이프내부로 용융아연이 흘러 들어가 생산중단을 초래하므로 현재 설비로는 30g/m²의 박도금은 불가능한 것으로 생각된다.

5. 결 론

공기유동특성이 도금편차에 미치는 영향에 대한 에어나이프 형태 개조 및 데이터분석, 유동가시화 실험, 동압측정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 기존 에어나이프 lip사용시 폭방향 과도한 도금편차 주원인은 lip slit 형상에 기인한 최대분류속도 저하 및 동압불균형에 기인한 것으로 생각

되고, 또한 줄무늬 형태의 과도금은 도금작업중 cloddy에 의한 항력 발생에 의하여 분류속도가 저하되면서 와이핑력이 감소되기 때문이다. 둘째, 도금편차의 주된 원인은 설비자체의 진동과 공기공급방식에 따라 발생하며, 중앙공급시 편방향 공급방식에 비하여 도금부착량 편차가 개선되나 전체 압력 저하로 박도금($30g/m^2$ 시는 불리함을 알 수 있다. 셋째, 현장 작업 데이터를 가지고 부착량 모델식을 만들어 현장에 적용하여 작업표준을 수립하였다. 위의 실험 결과를 실제 생산라인에 적용함으로써 생산성 향상과 실수를 증대를 가져왔다.

6. 참고 문헌

- 1) V.E. Harris et al., " DMC closed loop air knife control for galvanizing lines", Iron steel Eng., pp47-50, June, 1994.
- 2) S.W.Markward and Y.Z.Lu, " Integrated neural system for coating weight control of a hot dip galvanizing line", Iron Steel Eng., pp.47-49, Nov., 1995.
- 3) Jacobs, O.L.R. and D.S.Chen, " Regulation of deposited zinc in hot-dip galvanizing", In Proc. European Control Conf., Grenoble, Paper No.32.(1991)
- 4) Chen, D.S. , " Air knife position skew control on

- hot-dip galvanizing line", Proc. Asia-Pacific Conf. on Measurement and Control, Guangzhou, China, 1991.
- 5) Chen, D.S. , " Adaptive control of hot-dip Galvanizing", Automatica, Vol.31, No.5, pp.715-733, 1995
- 6) 梅田昭三, 泰和宜, 山口輝雄, 今井辛義, 江原勝也, " 連續亞鉛メッキ設備", 日立評論, Vol. 57, No.5, pp.51~pp.56, 1975.
- 7) 阿部雅樹, 矢野秀勝, 安谷屋武志, " 연속식용융아연 메ッキ의氣體絞り制御機構に關する 檢討", 鐵と鋼, Vol.66, No.7, pp.67~pp.76, 1980.
- 8) 배용환, 최진원, " Edgeovercoating 및 도금편차량 개선", 포항제철특별지원보고서, 1990.
- 9) 이동호, 남찬진, " Air Wiping Mechanism 해석", 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소 보고서, 1990.

저 자 소 개



배용환 (裴龍煥)

1962년 1월생. 1989년 부산대학교 졸업 (석사). 1992년 산업과학기술연구소 (RIST) 주임연구원 1996년 부산대학교 생산기계공학과 (박사). 현~안동대학교 기계공학교육학과 조교수.