

〈 논문 〉

연속식 용융아연도금 공정에서 단부 과도금 현상을 방지하기 위한 하향 대칭 분류유동 연구

안 기 장* · 정 명 균†

(2005년 5월 18일 접수, 2005년 9월 2일 심사완료)

A Downwardly Deflected Symmetric Jet to Prevent Edge Overcoating in Continuous Hot-Dip Galvanizing

Gi Jang Ahn and Myung Kyoong Chung

Key Words: Air Knife(에어나이프), Continuous Hot-Dip Galvanizing(연속식 용융아연도금), Edge Overcoating(단부 과도금), Strip Edge Vortex(강판 단부 와동), Coanda Effect(코안다 효과)

Abstract

In this study, a noble method is proposed to prevent the edge overcoating (EOC) that may develop near the edge of the steel strip in the gas wiping process of continuous hot-dip galvanizing. In our past study (Trans. of the KSME (B), Vol. 27, No. 8, pp. 1105~1113), it was found that EOC is caused by the alternating vortices which are generated by the collision of two opposed jets in the region outside the steel strip. When the two opposed jets collide at an angle much less than 180°, non-alternating stable vortices are established symmetrically outside the steel strip, which lead to nearly uniform pressure on the strip surface. In order to deflect both jets downward by a certain angle, a cylinder with small diameter is installed tangentially to the exit of the lower lip of the two-dimensional jet. In order to find an optimum cylinder diameter, the three dimensional flow field is analysed numerically by using the commercial code, STAR-CD. And the coating thickness is calculated by using an integral analysis method to solve the boundary layer momentum equation. In order to compare the present noble method with the conventional baffle plate method to prevent the EOC, the flow field with a baffle plate is also calculated. The calculation results show that the tangentially installed cylinder at the bottom lip of the jet exit is more effective than the baffle plate to prevent EOC.

기호설명

- d : 실린더의 직경
- g_1 : 강판과 실린더 사이의 거리
- g_2 : 강판과 차폐막 사이의 거리
- U_s : 강판의 이동속도

1. 서론

19세기 중엽 프랑스와 영국에서 시작된 아연도금강판은 내식성이 뛰어날 뿐만 아니라 도장성, 가공성, 용접성 등이 매우 우수해 토목, 건축은 물론 자동차, 전기설비 등 여러 산업분야로 그 사용범위가 점차 확대되고 있다. 일반적으로 아연도금강판은 연속식 용융아연도금 공정에서 생산되며, 이 때 강판의 표면에 부착된 용융아연의 도금량은 가스 와이핑(gas wiping)법을 통해 조절한다. 20세기 중엽 실용화된 가스 와이핑법은 우수한 생산성과 도금량 조절의 편의성으로 최근에

* 한국과학기술원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : mkchung1118@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3054 FAX : (042)869-3054

는 거의 모든 연속식 용융아연도금 공정에서 사용되고 있지만, 강판의 단부영역에 과도금 현상이 발생하고 중앙영역에 사선무늬 표면결함이 발생하는 문제가 있다. 특히 강판의 단부영역 도금 두께가 중앙영역 도금두께보다 두꺼워지는 단부 과도금 현상(edge overcoating)은 제품의 품질을 떨어뜨리는 고질적인 병폐중의 하나로 많은 경제적 손실을 발생시킨다. 따라서 제품의 고품질화를 통한 원가절감을 위해 단부 과도금 현상에 대한 대책의 수립이 절실히 요구되는 상황이다.

조중원 등⁽¹⁾의 논문은 강판이 두 에어나이프 사이를 가로막고 있지 않은 영역에서 서로 마주보며 분사된 두 제트가 충돌하며 강판의 단부근방에 주기적인 와동(vortex)을 형성하고, 이렇게 형성된 주기적인 와동이 강판의 단부영역에서 질소가스의 충돌압력을 저하시키는 메커니즘을 수치해석을 통해 규명하였다. 또한 안기장 등⁽²⁾의 논문은 이러한 질소가스의 충돌압력저하가 에어나이프의 아연제거능력(wiping force)을 저하시켜 단부 과도금 현상이 발생하는 것을 수치해석을 통해 규명하였다. 그렇다면 서로 마주보며 분사된 두 제트가 충돌하지 않는다면, 강판의 단부근방에 주기적인 와동이 형성되지 않을 것이고, 단부 과도금 현상 또한 발생하지 않을 것이다. 현재는 박정렬 등⁽³⁾의 논문에서 실험을 통해 보여준 것처럼 강판의 단부근방에 차폐막을 설치해서 서로 마주보며 분사된 두 제트의 충돌을 방지하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이 방법은 차폐막과 강판의 거리가 가까울수록 단부 과도금

현상이 확연히 줄어드는 반면, 강판의 진동으로 인해 차폐막과 강판이 충돌하고 또한 차폐막을 따라 비산된 용융아연이 에어나이프의 노즐을 막는 등의 문제가 발생한다.

Gilchrist 등⁽⁴⁾의 논문은 Fig. 1에 나타난 것처럼 원통표면(cylindrical surface)에 접하게 분사된 제트는 곡면을 따라 흐르는 것을 실험을 통해 보여주었다. 이처럼 벽면을 따라 분사된 제트는 곡면 일지라도 벽을 따라 흐르는 성질을 가지는데, 특히 볼록한 곡면에 부착해 흐르는 현상을 코안다 효과(coanda effect)라고 한다. 본 연구에서는 서로 마주보며 분사된 두 제트의 충돌을 방지하는 방법으로 코안다 효과를 이용하였다. 즉, Fig. 2에 나타난 것처럼 강판이 두 에어나이프 사이를 가로막고 있지 않은 영역의 에어나이프에는 노즐에 접하는 실린더(cylinder)를 설치해 질소가스의 진행방향을 바꾸었다.

본 연구에서는 에어나이프에 설치한 실린더가 질소가스의 유동에 미치는 영향을 살펴보기 위해 상용코드인 STAR-CD를 사용해 연속식 용융아연도금 공정에 대한 3차원 비정상 압축성 난류유동을 계산하였다. 그리고 계산결과로 나온 질소가스의 충돌압력데이터와 전단응력데이터를 사용해 용융아연의 도금두께에 대한 지배방정식을 풀어 에어나이프에 설치한 실린더가 단부 과도금 현상에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 수치해석

2.1 3차원 비정상 유동의 수치해석

연속식 용융아연도금 공정에서는 소둔된 강판을 아연욕에 통과시킴으로써 강판의 표면에 용융아연을 부착시킨다. 그런데 강판과 용융아연 사이의 접착력 때문에 용융아연의 도금두께는 통상 필요로 하는 도금두께보다 대략 10배 이상 두꺼워지므로, 필요 이상의 용융아연을 제거하기 위해 에어나이프로부터 질소가스를 분사시킨다. 이 때 분사된 질소가스의 Mach 수는 대략 0.3~0.6이므로 강판의 표면에 형성된 질소가스의 유동은 압축성 유동으로 해석하는 것이 타당하다. 따라서 질소가스의 유동을 지배하는 방정식은 연속방정식과 운동량방정식에 추가로 상태방정식과 에너지방정식을 풀어야 하는 압축성유동의 지배방정식을 사용하였다. 그리고 난류모델로는 고 Reynolds 수 영

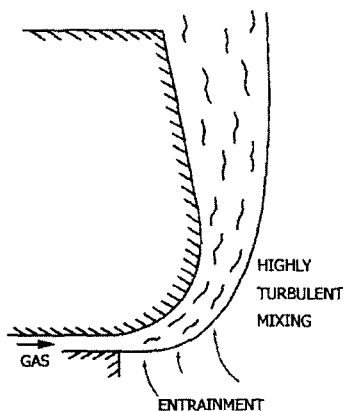
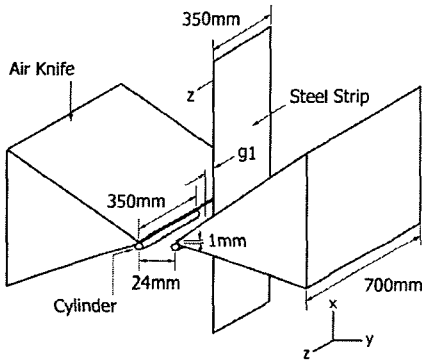


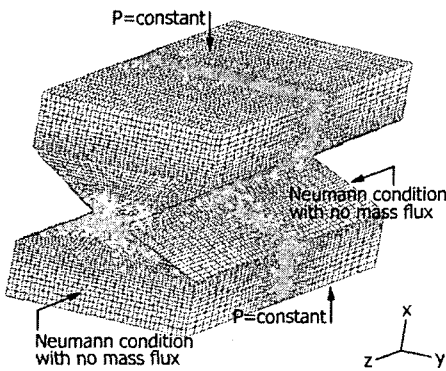
Fig. 1 Principle of the Coanda effect

역의 유동해석에 가장 일반적으로 사용되는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 3차원 비정상 압축성 난류유동의 수치해는 상용코드인 STAR-CD를 사용해 얻었다.

계산영역은 Fig. 2에 나타난 것처럼 강판이 두 에어ナイ프 사이를 반쯤 가로막고 있으며, 강판이 두 에어ナイ프 사이를 가로막고 있지 않은 영역의 에어ナイ프에는 노즐에 접하는 실린더를 설치한 형상이다. 이 때 강판이 두 에어ナイ프 사이를 가로막고 있는 영역($z < 0$)에서 강판으로 분사된 두 제트는 평판 수직 충돌제트(impinging jet)를 만든다. 그리고 강판이 두 에어ナイ프 사이를 가로막고 있지 않은 영역($z > 0$)에서 서로 마주보며 분사된 두 제트는 실린더가 설치되지 않은 경우



(a) Schematic diagram of air knife system



(b) Calculation domain

Fig. 2 Schematic diagram of air knife system and calculation domain

엔 대향 충돌제트(opposed jet)를 만들지만, 실린더가 설치된 경우엔 질소가스의 진행방향이 바뀌어 사향 충돌제트(oblique jet)를 만든다.

경계조건과 해석조건은 안기장 등⁽²⁾의 논문에서 이미 검증되었으며, 본 연구에서도 같은 경계조건과 해석조건을 사용하였다.

2.2 단부 과도금 현상의 수치해석

강판으로 분사된 두 제트는 Fig. 3에 나타난 것처럼 충돌압력과 전단응력의 형태로 용융아연의 도금두께에 영향을 미친다. 이는 Ellen 등⁽⁵⁾의 논문에서 실험을 통해 규명되었다.

질소가스가 분사되는 위치보다 높은 영역($x > 0$)에서 질소가스는 용융아연에 강판방향으로 누르는 충돌압력과 강판의 진행방향으로 끌어올리는 전단응력을 가한다. 반면 질소가스가 분사되는 위치보다 낮은 영역($x < 0$)에서 질소가스는 용융아연에 강판방향으로 누르는 충돌압력과 강판의 진행반대방향으로 끌어내리는 전단응력을 가한다. 이러한 충돌압력과 전단응력의 영향으로 Fig. 3에 나타난 것처럼 $x > 0$ 영역에서 용융아연의 도금두께가 $x < 0$ 영역에서 용융아연의 도금두께보다 얇아지게 된다.

용융아연의 도금두께를 지배하는 방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식으로, 수치해는 안기장 등⁽²⁾의 논문에서 이미 검증된 Integral methods를 사용해 얻었다.

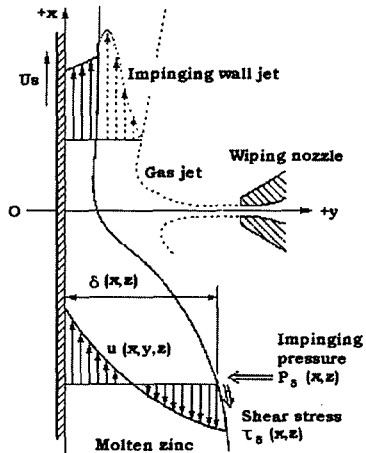


Fig. 3 Analysis of gas wiping

3. 계산 결과 및 고찰

3.1 코안다 효과

Fig. 4는 실린더를 설치하지 않은 경우, 질소가스의 유동을 나타낸 것이다. 이 때 서로 마주보며 분사된 두 제트는 매우 불안정한 특성으로 인

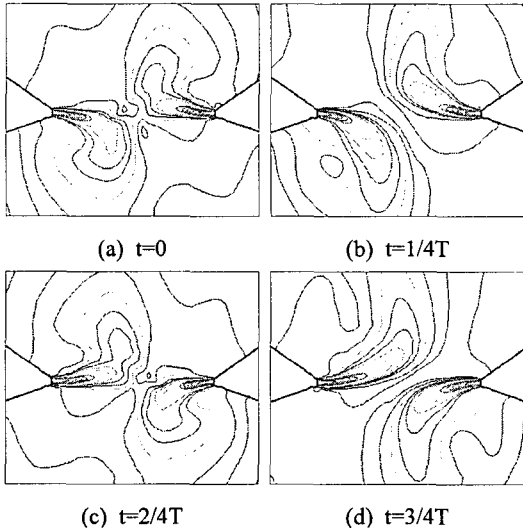


Fig. 4 Variation of velocity contour near the exit plane without cylinders

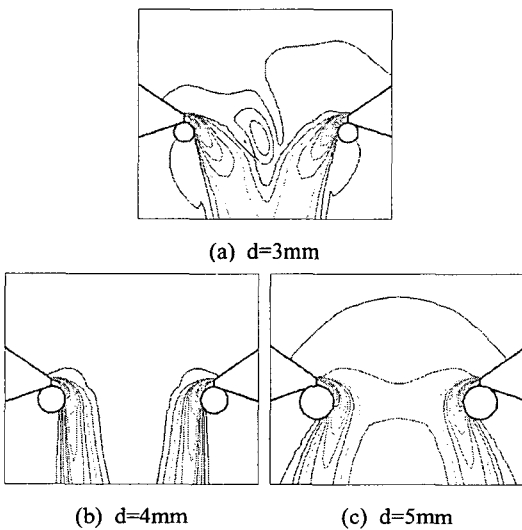


Fig. 5 Variation of velocity contour near the exit plane with cylinders

해 서로 다른 방향으로 굴절(buckling)이 일어나며, 두 제트의 위쪽과 아래쪽에는 주기적인 와동이 형성된다. 이렇게 형성된 와동으로 인해 두 제트는 와동과 동일한 주기(T)로 그 진행방향이상하로 진동하게 된다.⁽¹⁾

Fig. 5는 실린더를 설치한 경우, 질소가스의 유동을 나타낸 것이다. 이 때 서로 마주보며 분사된 두 제트는 실린더를 따라 흐르며, 두 제트의 위쪽과 아래쪽에는 주기적인 와동이 형성되지 않는다. 따라서 두 제트의 진행방향도 상하로 진동하지 않게 된다. 그리고 실린더의 직경이 커질수록 에어나이프로부터 분사된 질소가스의 휘어지는 정도는 커진다.

3.2 3차원 비정상 유동

Fig. 6은 연속식 용융아연도금 공정에서 질소가스의 유동을 나타낸 것이다. $z < 0$ 영역에서 강판으로 분사된 두 제트는 Fig. 6(a)와 (b)처럼 평판수직 충돌제트를 만들고, $z > 0$ 영역에서 서로 마주보며 분사된 두 제트는 에어나이프로 설치한 실린더로 인해 질소가스의 진행방향이 바뀌어 Fig. 6(c)와 (d)처럼 사향 충돌제트를 만든다. 이는 벽면을 따라 분사된 제트는 꼭면일지라도 벽을 따라 흐르는 성질을 갖기 때문이다. 그러나 실린더가 설치되지 않았다면 서로 마주보며 분사된

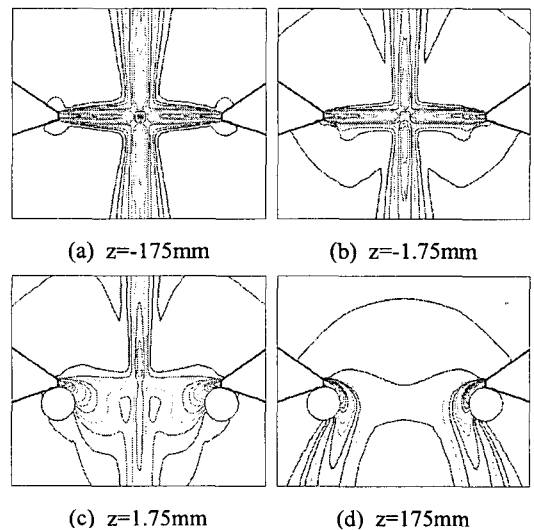


Fig. 6 Velocity contours at various span-wise locations

두 제트는 Fig. 4에 나타난 것처럼 대향 충돌제트를 만들어 강판의 단부근방에는 주기적인 와동이 형성되었을 것이다.

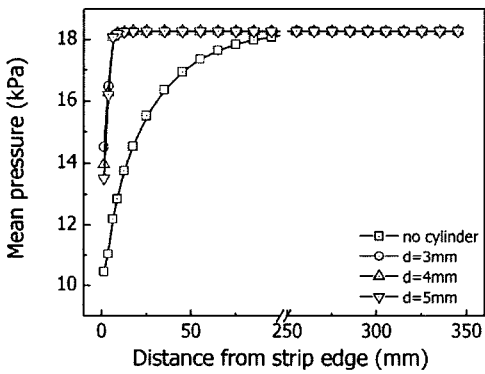
3.3 실린더의 직경

Fig. 7은 실린더의 직경이 각각 0mm, 3mm, 4mm, 5mm일 때, 질소가스가 분사되는 높이에서 강판의 폭방향에 대한 질소가스의 평균 충돌압력 분포와 용융아연의 도금두께분포를 나타낸 것이다. 실린더를 설치한 경우가 설치하지 않은 경우보다 강판의 단부영역에서 질소가스의 충돌압력 저하와 용융아연의 과도금 현상이 현저히 감소한다. 그러나 실린더의 직경변화가 질소가스의 평

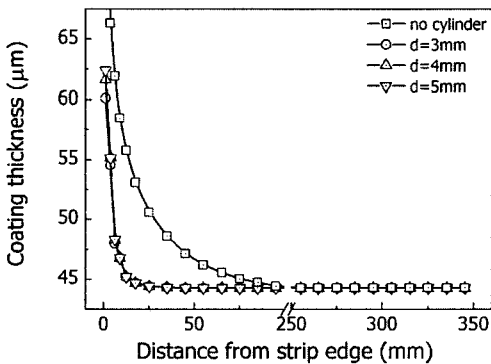
균 충돌압력분포와 용융아연의 도금두께분포에 커다란 영향을 미치지 않는다는 사실은 이 때 강판의 단부로부터 0~10mm 영역의 질소가스의 충돌압력 저하와 용융아연의 과도금 현상은 여전히 발생하는데, 이는 질소가스의 점성력으로 인해 실린더에 인접한 평판 수직 충돌제트의 진행방향도 다소 바뀌었기 때문이다.

3.4 실린더와 강판 사이의 거리

Fig. 8은 실린더와 강판 사이의 거리가 각각 0mm, 1.25mm, 2.5mm, 3.75mm, 5mm일 때, 질소가스가 분사되는 높이에서 강판의 폭방향에 대한 질소가스의 평균 충돌압력분포와 용융아연의 도

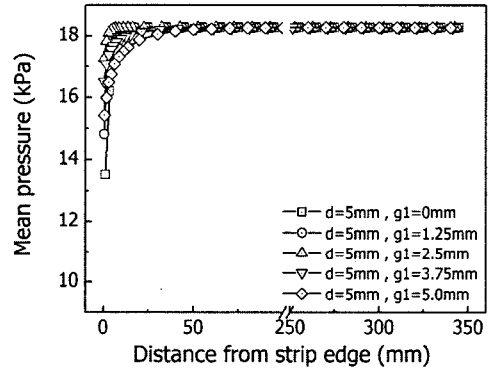


(a) Mean pressure distribution

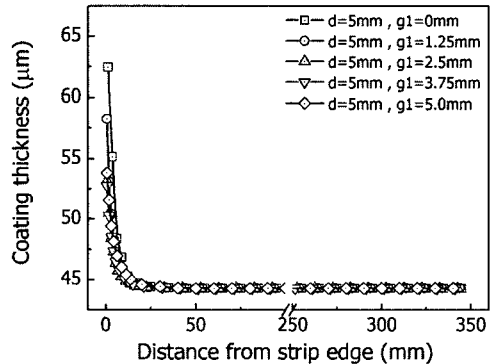


(b) Coating thickness distribution

Fig. 7 Mean pressure distribution and coating thickness distribution for various cylinder diameter



(a) Mean pressure distribution



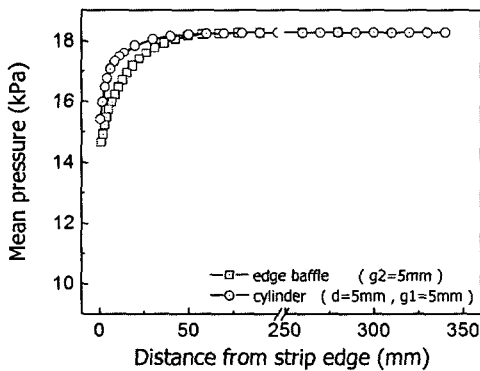
(b) Coating thickness distribution

Fig. 8 Mean pressure distribution and coating thickness distribution for various distances between steel strip and cylinder

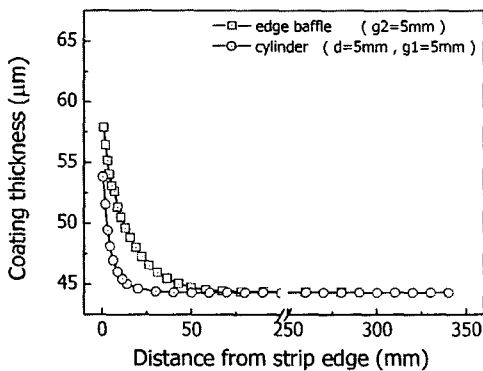
금두께분포를 나타낸 것이다. 이 때 실린더의 직경은 5mm를 사용하였다. 실린더와 강판 사이의 거리가 0~2.5mm에서는 멀어질수록 강판의 단부 영역에서 질소가스의 충돌압력저하와 용융아연의 과도금 현상이 감소한다. 이는 실린더와 강판 사이의 거리가 멀어질수록 질소가스의 점성력으로 인해 진행방향이 바뀌는 평판 수직 충돌제트의 영역이 줄어들기 때문이다. 그러나 실린더와 강판 사이의 거리가 2.5mm~5mm에서는 멀어질수록 강판의 단부영역에서 질소가스의 충돌압력저하와 용융아연의 과도금 현상이 증가한다. 이는 실린더와 강판 사이의 거리가 멀어짐에 따라 대향 충돌제트 영역이 발생하고, 이로 인해 강판의 단부 근방에 주기적인 와동이 형성되기 때문이다.

3.5 실린더와 차폐막

Fig. 9는 에어나이프에 실린더를 설치했을 때와



(a) Mean pressure distribution



(b) Coating thickness distribution

Fig. 9 Effect of cylinder and edge baffle

강판의 단부근방에 차폐막을 설치했을 때 질소가스가 분사되는 높이에서 강판의 폭방향에 대한 질소가스의 평균 충돌압력분포와 용융아연의 도금두께분포를 비교한 것이다. 에어나이프에 실린더를 설치했을 때가 강판의 단부근방에 차폐막을 설치했을 때보다 성능이 향상되었음을 알 수 있다.

4. 결론

연속식 용융아연도금 공정에서 발생하는 단부 과도금 현상은 강판이 두 에어나이프 사이를 가로막고 있지 않은 영역에서 서로 마주보며 분사된 두 제트가 충돌하며 강판의 단부근방에 주기적인 와동을 형성하기 때문에 발생한다. 따라서 본 연구에서는 두 제트의 충돌을 방지하기 위해 강판이 두 에어나이프 사이를 가로막고 있지 않은 영역의 에어나이프에 설치한 실린더가 단부 과도금 현상에 미치는 영향을 살펴보았다.

서로 마주보며 분사된 두 제트는 에어나이프에 설치한 실린더의 영향으로 진행방향이 바뀌어 서로 충돌하지 않았고, 따라서 강판의 단부근방에는 주기적인 와동이 형성되지 않았다. 이로 인해 강판의 단부영역에서 질소가스의 충돌압력저하와 용융아연의 과도금 현상이 확연히 감소하였다. 이 때 실린더의 직경변화는 질소가스의 평균 충돌압력분포와 용융아연의 도금두께분포에 밀접한 관계를 보이지 않았다. 그러나 실린더와 강판 사이의 거리변화는 질소가스의 평균 충돌압력분포와 용융아연의 도금두께분포에 밀접한 관계를 보였다. 따라서 그 간격은 일정거리 이하로 유지되어야 한다.

강판의 단부근방에서 발생하는 주기적인 와동의 형성을 방지하기 위해 에어나이프에 설치한 실린더는 강판의 단부근방에 설치한 차폐막보다 월등한 성능을 보여주었다. 또한 차폐막의 경우 차폐막과 강판의 거리가 가까우면 강판의 진동으로 인해 차폐막과 강판이 충돌하고 또한 차폐막을 따라 비산된 용융아연이 에어나이프의 노즐을 막는 등의 문제가 발생한다. 그러나 실린더의 경우 이러한 문제가 없어 실린더와 강판 사이의 거리를 보다 자유롭게 조절할 수 있다. 따라서 강판이 두 에어나이프 사이를 가로막고 있지 않은 영역의 에어나이프에 설치한 실린더는 단부 과도금

현상을 방지하는데 매우 효율적임을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) Cho, C. W., Kim, S. J., Ahn, G. J. and Chung, M. K., 2003, "Analysis of a Vortex Structure Near the Strip Edge for Preventing Edge Zn Overcoating," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 27, No. 8, pp. 1105~1113.
- (2) Ahn, G. J., Kim, S. J., Cho, C. W. and Chung, M. K., 2004, "Analysis of Edge Overcoating in Continuous Hot-Dip Galvanizing," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 28, No. 7, pp. 763~770.
- (3) Park, J. R., Jeon, S. H. and Park, R. B., 1999, "Edge Overcoating and Buildup of Continuously Hot-Dip Metalized Strip," *Journal of the Korea Institute of Surface Engineering*, Vol. 32, No. 4, pp. 555~560.
- (4) Gilchrist, A. R. and Gregory-Smith, D. G., 1988, "Compressible Coanda Wall Jet: Predictions of Jet Structure and Comparison with Experiment," *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 9, No. 3, pp. 286~295.
- (5) Ellen, C. H. and Tu, C. V., 1984, "An Analysis of Jet Stripping of Liquid Coating," *J. Fluids Engineering*, Vol. 106, pp. 399~404.