

# 용융아연 도금공정에서의 SNOUT 내부 유동장 해석 (I)

신대식\*, 최제호\*\*, 이상준\*\*\*  
(1999년 2월 1일 접수)

## Velocity Field Measurement of Flow Inside SNOUT of Zinc Plating Process (I)

Dae Sig Shin, Jayho Choi and Sang-Joon Lee

**Key Words :** Snout(강판유입구), Flow Visualization(유동가시화), Particle Image Velocimetry(입자영상유속계), Zinc Plating(아연 도금)

### Abstract

PIV(Particle Image Velocimetry) velocity field measurements inside the snout of a 1/10 scale model of the Zn plating process were carried out at the strip speed  $V_s=1.5$  m/s. Aluminum powder particles ( $1\mu\text{m}$ ) and atomized olive oil ( $3\mu\text{m}$ ) were used as seeding particles to simulate the molten Zinc flow and deoxidization gas flow, respectively. A pulsed Nd:Yag laser and a  $2\text{K}\times 2\text{K}$  high-resolution CCD camera were synchronized for the PIV velocity field measurement. From flow visualization study, it is found that the liquid flow in the Zn pot is dominantly governed by the uprising flow caused by the rotating sink roll, with its effect on the steel strip inside the snout largely diminished by installing of the snout. The deoxidization gas flow in front of the strip inside the snout can be characterized by a large-scale vortex rotating clockwise direction formed by the moving strip. In the rear side of the strip, a counter-clockwise vortex is formed and some of the flow entrained by the moving strip impinges on the free surface of molten zinc. The liquid flow in front of the strip is governed by the flow entering the snout, caused by the spinning sink roll. Just below the free surface a counter-clockwise vortex is formed near the snout wall. The moving strip affects dominantly the flow behind the strip inside the snout, and large amount of the liquid flow follows the moving strip toward the sink roll. The thickness of the flow following the strip is very thin in the front side due to the uprising flow, however thick boundary layer is formed in the rear side of the strip. Its thickness is increased as moving downstream toward the sink roll. Inside the snout, the deoxidization gas flow above the free surface is much faster than the liquid flow in the zinc pot. Due to the larger influx of the flow following the moving strip in the rear side of the strip, higher percentage of imperfection can be anticipated on the rear surface of the strip.

### 기호설명

$V_s$  : 스트립의 속도

### 1. 서론

최근 자동차용 강판을 중심으로 고품질 아연

도금 강판의 수요가 크게 증가하고 있다. 아연도금 강판은  $460^\circ\text{C}$ 로 유지되는 고온의 용융 도금욕(molten Zn pot) 내부에 있는 싱크롤(sink roll)의 회전으로 연속적으로 도금욕 속으로 들어가 도금욕 내부를 지나는 동안에 도금 된다. 이러한 아연 도금 공정에서 화학반응이나 금속산화물에 기인하여 드로스(dross)가 발생된다. 이러한 드로스는 아연 도금 강판 표면에 부착되어 도금 강판의 품질을 저하시키기 때문에 이를 방지하기 위한 여러 가지 대책이 강구되고 있다. (1-3)

\* 회원, 포항공과대학교 기계공학과 연구원

\*\* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 회원, 포항공과대학교 기계공학과

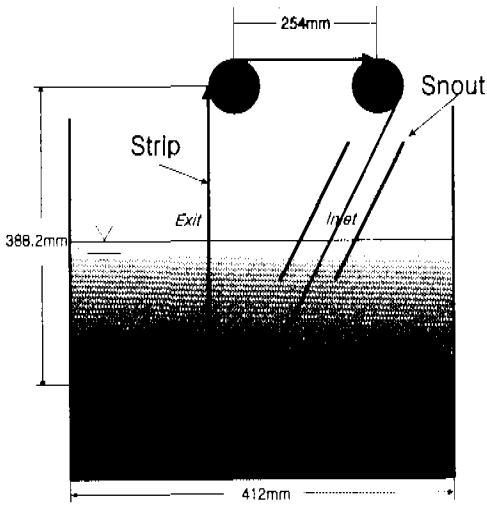


Fig. 1 Schematic diagram of the Zn-plating process model used in this study.

Fig. 1 은 아연 도금 강판에 드로스가 부착되는 것을 방지하기 위하여 일반적으로 사용하는 방법을 나타낸 것으로 강판스트립(strip)이 도금욕 속으로 들어가는 입구에 강판유입구(snout)를 설치하는 것이다.

그러나 이러한 snout 가 설치됨에 따라 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 snout 내부에 있는 용융아연으로부터 아연 증기가 증발하여 snout 내벽에 충돌, 부착되어 애시(ash)를 형성하게 되고, ash 가 일정 크기 이상이 되면 자중에 의해 강판 상부나 도금욕(Zn pot) 표면으로 떨어져 강판 표면에 묻어 들어가 미도금 등 불량 발생하게 된다. Snout 가 설치된 아연도금 공정에서 일하는 현장 조업자들에 따르면 드로스에 의한 결함보다는 산화 ash 에 의한 미도금 문제가 도금강판의 품질에 더욱 크게 영향을 미친다고 한다.

Ash 에 의한 미도금 문제를 해결하는 방법중 하나는 아연 도금욕 표면에 산화피막을 형성시켜 아연 증발량을 감소시키는 것이다. 또 다른 방법으로는 내부 유동을 제어할 수 있는 안내판(baffle)을 설치하는 것이다. 이러한 방법을 적용하기 위해서는 강판스트립이 고속으로 이동하고 있는 snout 내부유동, 즉 하부의 용융아연과 상부의 환원가스 유동에 대한 해석이 필요하다. 특히, 스트립 이동에 따른 마찰력에 기인하여 도금욕 내부 유동이 변하게 되며, 이동속도에 따른 용융아연의 표면부근의 유속정도가 필요하다.

아연도금 공정과 관련한 대부분의 기존 연구는 주로 도금욕 내부유동을 수 모델 실험을 통해 정

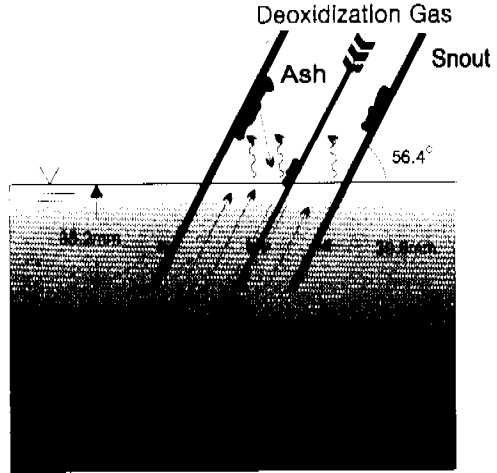


Fig. 2 Ash problem inside the snout of Zn plating process.

성적으로 가시화한 것으로 싱크를 주위유동에 초점을 맞추고 있다. Kurobe<sup>(1)</sup>는 snout 가 없는 상태에서 아연 도금욕 내부의 유동특성과 드로스 거동을 입자주입법과 LDV(Laser Doppler Velocimetry)를 이용하여 해석하였다. 그리고 Yakawa<sup>(2)</sup> 등은 도금욕 내부 밑바닥에 놓인 드로스의 부상을 억제하려고 도금욕 바닥면에 Z형 배플을 설치하고, 이것이 드로스 거동에 미치는 효과를 연구하였다. Nakamura<sup>(3)</sup> 등은 강판의 이동속도에 따른 부유 드로스 양을 수 모델 실험을 통해 해석하였다. 그러나 아직까지 국내의를 막론하고 snout 내부유동에 관한 연구가 발표된 적은 없어 보인다.

LDV 나 열선유속계와 같은 기존의 속도측정 방법으로 snout 내부유동이나, 용융 도금욕의 표면유속을 정확히 측정하는 것은 매우 어렵다. LDV 의 경우 유동을 교란시키지는 않지만, 한 순간에 한 점의 속도만 측정하기 때문에 시간에 따라 변화하는 복잡한 유동의 분석에는 적합하지 않다. 열선유속계의 경우도 LDV 와 마찬가지로 점측정(point measurement) 방법이며, 열선을 유동 내에 설치하게 되면 유동을 교란시킬 수 있다.

본 연구에서는 snout 가 장착된 아연 도금용 모사장치를 제작하고 아연도금 과정을 실험적으로 모사하였다. 그리고 유동가시화 기법으로 snout 주위 유동과 내부로 유입되는 유동의 거동을 관찰하였고, 디지털 화상처리를 이용한 입자영상 유속계, Particle Image Velocimetry, 이하 PIV로 약칭) 기법<sup>(4-11)</sup>을 이용하여 snout 내부유동의 속도장과 와도 분포를 측정하여 snout 내부의 용융아연 유동과 환원가스 유동을 실험적으로 해석하였다. 속도장

측정시 snout 내부 유동을 보다 정확히 해석하기 위해 고해상도 CCD 카메라를 사용하였다. 이러한 PIV 측정기법은 유동에 교란을 주지않고, 짧은 시간 내에 순간 속도장을 측정하며, 유동장의 거시적인 특성 뿐만 아니라 미시적인 해석에도 유용하다.

이와 같은 연구를 통해 얻어진 유동 정보를 분석함으로써 snout 내부유동에 대한 정확한 이해와 함께 도금욕 표면주위의 유동형태를 파악함으로써 아연증기에 기인한 미도금 문제해결에도 접근할 수 있으며, 궁극적으로 아연도금 강판의 품질향상에도 기여할 수 있을 것이다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 수 모델 장치

수 모델 모사장치는 실제 도금공정의 유동조건과 동일하게 하기 위하여 레이놀즈수(Reynolds number)와 프라우드수(Froud number)의 상사법칙을 적용하고 크기를 1/10로 축소하여 투명 아크릴로 제작하였다. 본 연구를 위해 제작한 모사장치의 개략도와 사진을 각각 Fig.1과 Fig.3에 나타내었는데, 도금욕 바닥면까지 실제에 가깝게 제작하였다. Snout 장치는 수면과 56.4° 각을 이루도록 하고 도금욕 안으로 35.2mm 깊이까지 잠기게 설치하여 실제와 똑 같은 기하학적 상사를 가지도록 하였다.

아연 도금욕 모사장치는 크게 스트립 모사부분과 시험부로 나누어지는데, 스트립 모사부는 수조 내에 설치한 싱크플과 수조 상부에 설치된 구동롤에 이음매 없는 벨트(endless belt)가 회전하는 방식으로 이루어져있다. 상부의 구동롤은 직류모터로 회전하게 되며, 회전수를 변화시켜 스트립의 이동속도를 조절할 수 있다. 또한 상부에는 수평수위 조절장치가 있는데, 이것을 미세 조절함으로써 스트립 벨트가 회전하는 동안 측면방향으로 움직이는 것을 방지할 수 있다. 그리고 점선으로 표시한 부분이 시험부 구간으로 도금욕 표면을 기준으로 하부의 용융아연 유동부분과 상부의 환원가스 유동부분으로 구성되어 있다. 그리고 깨끗한 입자영상(particle image)을 얻기 위하여 snout 측면은 투명 유리로 제작하였다.

유동가시화와 속도장 측정은 snout 중앙평면(central plane)에서 수행되었다. 용융아연과 환원가스를 묘사하는 작동유체로 각각 물과 연기(smoke)를 사용하였다.

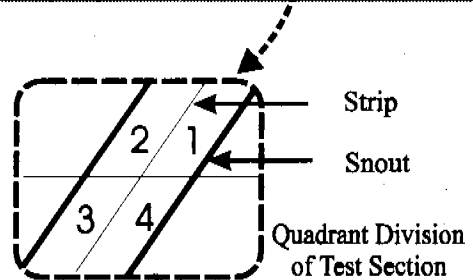
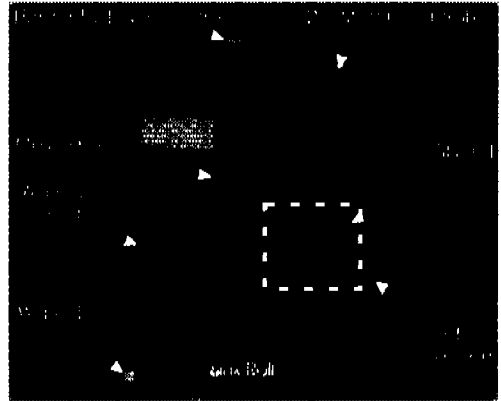


Fig. 3 Photograph of experimental apparatus for 1/10 cold model.

### 2.2 유동가시화

유동가시화를 위한 조명으로 할로젠(halogen) 램프를 이용하였고, 램프로부터 나온 빛을 색온도 조절용 필터(filter)와 광케이블(fiber-optic cable)을 거쳐 실린더 렌즈(cylindrical lens)를 지나게 하여 평면광을 만들어 원하는 유동 단면을 조사하였다. 산란 입자로는 폴리비닐 클로라이드(polyvinyl chloride)를 사용하였다. 그런데 강판스트립을 모사한 고무 벨트가 빛을 차단하므로 snout 전면과 후면을 동시에 조명하기 위하여 조명장치 2 개를 수 모델 측면과 상부에 하나씩 설치하였다. 유동가시화 영상은 Nikon F5를 이용하여 촬영하였고, 카메라 노출은  $f=4.0$ , 셔터속도(shutter speed) 1/6 초이고 ASA400 필름을 사용하였다. 도금강판의 이송 속도인 스트립 속도( $V_s$ )는 실제 현장 작업과 유사한  $V_s=1.5$  m/s로 고정하여 유동가시화 실험을 수행하였다.

### 2.3 PIV(입자영상 유속계)

Snout 내부유동의 속도장을 측정하기 위해 PIV 속도장 측정시스템을 이용하였다. PIV 시스템은 Nd:Yag 레이저(파장 532 nm), CCD 카메라, 영상처리보드, 제어 및 계산용 컴퓨터, 동기화 장치 등

으로 이루어져 있으며 그 개략도를 Fig. 4에 나타내었다. 입자영상 취득에는 SMD사에서 제작한 고해상도 CCD 카메라를 사용하였는데, 공간 분해능이  $2K \times 2K$  픽셀(pixel)이며 영상신호(video signal)은 12비트(bit)이다. 카메라 셀(cell)의 충전율은 100%이고 초당 4장의 영상을 얻을 수 있으며, 공냉식으로 별도의 냉각장치를 필요로 하지 않는다. 그리고 PIV 속도장 측정시 방향모호성(directional ambiguity) 문제를 해결하기 위하여 영상 자체물 이동(image shift) 시키는 기능이 카메라에 내장되어 있어 회전거울과 같은 추가적인 장치가 필요 없다.

화상처리기를 이용한 PIV 속도장 측정기법의 기본원리는 주어진 시간간격( $\Delta t$ ) 동안 움직인 유동 입자들의 변위정보를 CCD 카메라를 이용하여 2차원 화상데이터로 저장한 후, 디지털 화상처리기법을 이용하여 입자 변위를 측정하여 유동속도를 분석하는 것이다. 즉, PIV 기법은 레이저 평면광으로 조사된 유동단면 내부의 2차원 속도벡터 성분을 구하게 되는데, 이러한 PIV 속도장 측정기법은 입자영상(particle image)을 취득, 속도벡터를 추출하고, 그리고 추출한 속도장 결과를 나타내는 3단계 과정으로 이루어진다. 입자영상을 취득하는 과정에서 우선 해야 할 일은 작동유체에 맞는 입자(particle)를 선정하여야 한다. 입자는 유동을 제

로 추종할 수 있도록 충분히 작아야 하며, 영상에 입자들이 선명하게 나타날 수 있도록 주어진 레이저 평면광에 잘 산란 되어야 한다. 또한 신뢰성 있는 속도 측정이 가능하도록 입자 농도(particle concentration)가 충분히 높아야 한다. 이러한 세가지 입자선정 조건을 고려하여 본 연구에서는 직경  $1\mu m$  알루미늄 입자를 용융아연 유동을 모사하도록 도금욕 내에 넣어 사용하였다. 상부의 환원가스플 모사하기 위해서는 직경  $1\sim 3\mu m$ 의 울리브 오일 입자를 이용하였다. 다음으로 실린더형 렌즈와 구형렌즈(spherical lens)를 이용하여 레이저 평면광을 만들어 측정하고자 하는 유동장을 조사하게 된다. 그런 다음 CCD 카메라를 평면광에 수직되게 장착하여 입자영상을 취득하게 되는데, 좋은 입자영상을 얻기 위해서 평면광을 카메라 관측장(field of view) 중심 가까이 위치시키는 것이 필요하다.

레이저광에 산란된 입자들의 입자영상을 찍는 일련의 과정은 다음과 같다. 먼저 CCD 카메라의 셔터가 열리면서 1차 노출(exposure time)이 시작된다. 이 순간에 레이저광을 조사하면 평면광 내의 입자들이 산란하게 되고 그들의 위치가 CCD 카메라 셀 속에 저장된다. 그리고 나서 시간 간격  $\Delta t$  동안 CCD 카메라는 미리 설정한 픽셀(pixel)만큼 셀을 이동하고 난 후, 2차 노출을 시작한다. 그러면 레이저에서 두 번째 광이 조사되고 이동한 입자들의 새로운 위치가 같은 프레임에 저장된다. 이렇게 하나의 영상에 2번의 펄스광을 조사하여 입자영상을 얻는 방식이 단일영상 이중노출(single-frame double-exposure)기법이다. 즉, 카메라에 장착되어있는 영상이동 기능을 사용하여 하나의 영상 위에  $\Delta t$  시간 후의 두 번째 영상을 이중노출하여 입자영상을 얻는 것이다.

본 연구에서는 두개의 레이저 펄스 사이의 시간간격( $\Delta t$ ) 동안 9픽셀을 이동(shift) 시켰다. 레이저는 두개의 광원을 가지고 있는 2-head Nd:Yag 레이저를 이용하였고, 각각 레이저는 펄스당 약 25mJ 에너지를 방출한다. 조사되는 레이저 펄스와 카메라의 노출신호를 정확히 동기시켜야 하므로 이에 필요한 동기장치를 직접 제작하여 사용하였다. Fig.5은 고해상도 CCD 카메라와 Nd:Yag 레이저 펄스를 동기시키는 신호계통도(signal diagram)를 표시한 것으로 레이저 펄스의 폭은 약 7 nsec이다.

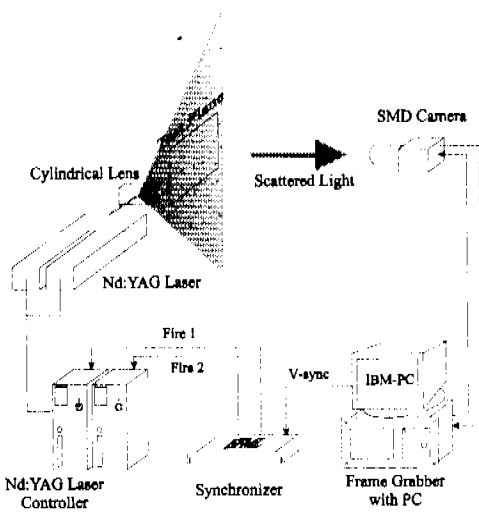


Fig. 4 Schematic diagram of PIV velocity field measurement system.

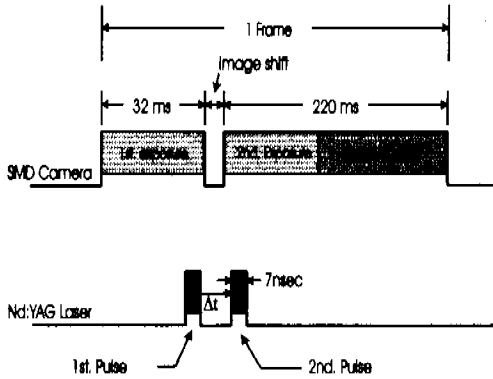


Fig. 5 Signal diagram of synchronization for velocity field measurement.

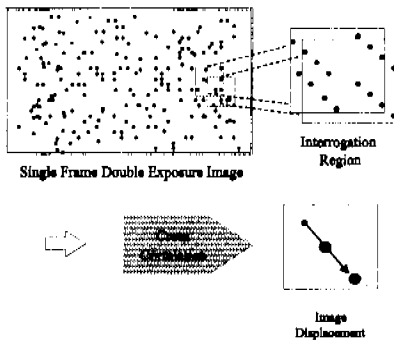


Fig. 6 General concept of the single frame double exposure cross-correlation PIV technique.

Fig. 6은 본 연구에서 사용한 PIV 측정기법의 개념도를 나타낸 것으로 한 장의 입자영상에 이중 노출시키고 두 번째 레이저 펄스에 맺힌 영상을 X 또는 Y 방향으로 일정거리 만큼 이동시켜 입자 영상을 쌍(pair)으로 얻어 속도벡터를 구하게 된다.

이렇게 구해진 입자영상으로부터 속도장을 추출하기 위하여 상호 상관법(cross-correlation)을 사용하였다. 상호상관 함수를 구하기 위해 사용되는 두번째 미소조사구간은 영상이동 시킨 만큼 다른 위치에서 잡게 된다. 이 경우 상호상관 함수는 자기상관에 의해 중앙에 큰 상관 값이 생기고, 이곳을 대칭으로 속도방향을 나타내는 큰 상관 값과 함께 상대적으로 작은 상관 값으로 반대위치에 나타나게 되어 유동방향의 모호성을 해결할 수 있다. 이러한 PIV 방식은 고속유동의 속도장 측정이나 난류구조 해석을 위해 높은 해상도를 가진 입자영상을 취득하는 경우에 많이 사용하고 있다. 본 연구에서는 미소조사구간과 탐색영역(searching area)의 크기를 64 × 64 픽셀로 하였고, 50% 오버랩핑



Fig. 7 Flow visualization of molten Zn flow.

(overlapping) 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 유동가시화

아연 도금속 내부, 특히 snout 내부와 주위, 그리고 싱크플 및 이송되는 스트립 근처의 정성적인 유동 형태를 알아보기 위하여 유동가시화를 수행하였다. 강판 스트립의 이송속도를  $V_s=1.5 \text{ m/s}$  로 고정하고 snout 중앙단면에서 취득한 유동가시화 영상을 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7을 보면 스트립 뒷면에서는 싱크플 회전에 의해 야기된 반 시계방향 와류 때문에 스트립을 따라 상승하는 유동이 형성되며, 일부는 snout 내부로 유입되고, 나머지는 snout 바깥쪽으로 빠져 나간다. Snout 외부로 흘러간 유동은 수면쪽으로 상승하면서 A 영역에서 좌우로 분기된다. 우측으로 흘러간 유동은 snout 외부 전면에 시계방향의 와류를 형성하고, 좌측으로 흘러간 유동은 스트립을 지나 수면위로 상승하는 스트립에 의해 생성된 속도성분과 B 영역에서 만나 반 시계방향의 큰 와류 유동을 형성한다. 아래방향으로 빠른 속도로 움직이는 스트립 뒷면에서는 표면에 아주 가까운 영역을 제외하고는 싱크플 회전에 따른 와류의 영향으로 대부분 스트립을 거슬러 올라가는 유동이 지배적이다. 그러나 스트립 바로 위의 점성저층(viscous sublayer)에서는 no-slip 조건에 따라 스트립을 따라 움직이며, 스트립 표면 가까이에서 매우 큰 속도 구배가 형성됨을 알 수 있다.

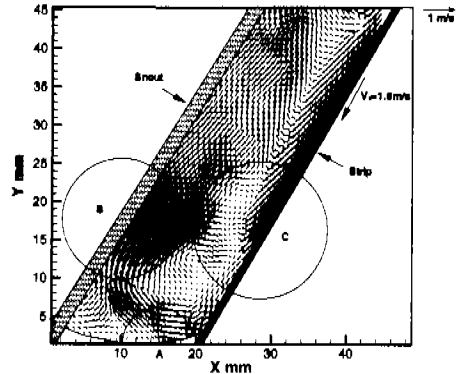
Snout 후면에서는 회전하는 싱크플의 영향이 크지 않아 snout 내부로 유입되는 속도성분과 스트립을 따라 내려가는 속도성분이 함께 존재하며, 이러한 유동은 snout 후면 아래 C 영역에서 분기된다.

3.2 속도장 측정

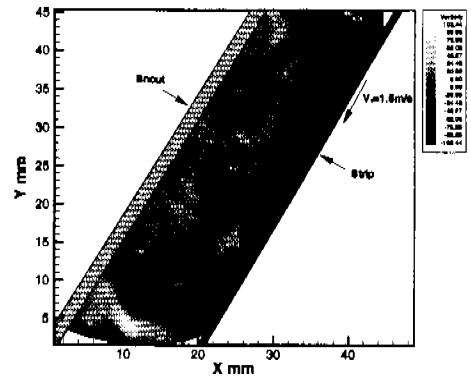
Snout 내부유동의 유동특성을 정확하게 해석하기 위하여 snout 내부 시험부를 Fig. 3에 나타낸 것처럼 4분면으로 나누어 각각의 분면에 대하여 PIV 속도장 측정 실험을 수행하였다. 본 실험에서 특히 중요한 곳은 4분면에 걸쳐 있는 도금육 표면 주위의 유동장이다. 왜냐 하면 Fig. 2의 개념도에서 설명한 것처럼 이 부분에서 주로 아연증기가 발생하여 snout 내벽에 부착되고 이중 일부가 떨어져 떨어지면서 도금 강판에 결합이 발생하기 때문이다. 속도장 측정시 스트립의 이동속도는 유동 가시화 경우와 같은  $V_s=1.5$  m/s로 고정하였고, 같은 유동조건에서 수십 번 이상 속도장을 측정하여 결과에 대한 재현성을 확인하였다.

3.2.1 Snout 내부 공기 유동장

Snout 내부 스트립상부의 환원가스 거동을 묘사한 2분면 시험부 중앙단면에서 얻어진 순간 속도장과 와도 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 와도 분포는 시계방향으로 회전하는 와를 검게 표시하고 반시계 방향의 와도를 밝게 표시하였다. 속도장 결과를 보면 스트립 표면을 따라 환원가스가 빠른 속도로 움직이다가 용융아연 표면에 부딪히면서 좌측으로 방향을 틀게 된다. 즉 아래방향으로 이동하는 스트립에 기인하여 snout 내부 아래 부분에 시계방향으로 회전하는 커다란 와류가 생성되어 snout 벽 B 영역에서 snout와 충돌하며, 넓은 접촉 면적을 가진다. 그리고 snout 아래 왼쪽 가장자리에는 세기는 크지 않지만 반 시계방향으로 회전하는 2차 와류가 형성된다. 아연 도금육에서 증발되는 아연증기는 도금육 표면 가까이에서 형성하는 시계방향의 와류동에 기인하여 A 영역에서 snout 앞면으로 이동한 후 B 영역을 향해 상승한다. 이때 입자크기가 상대적으로 큰 증기아연이 B 영역에 충돌하면서 부착된다. Snout 내벽에 계속적으로 부착되면 ash의 크기가 커지게 되고 자중에 의해 도금육 표면에 떨어지거나, 시계방향으로 회전하는 snout 내부 와류유동에 의해 이동하여 스트립 상부 C 영역에 떨어져 도금 강판의 결합을 유발시키는 것으로 생각된다. 자중에 의해 떨어진 이러한 ash들은 도금육 표면속도가 상대적으로 낮은 왼쪽 모서리 부분에 모이게 될 것이다. 영역 B에 부착되지 않은 작은 크기의 증기아연 시계방향의 와류에 의해 일부는 스트립 상부 C 영역에 떨어지고, 나머지는 입자는 위쪽으로 이동하게 된다. 따라서 snout 내부 2분면에서의 환원가스 유



(a) Velocity field



(b) Vorticity field

Fig. 8 Velocity and vorticity fields of deoxidization gas flow in the 2<sup>nd</sup> quadrant.

동은 스트립 이동에 기인한 큰 규모의 시계 방향 와류가 주도적인 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 snout 내부 스트립 후면의 환원가스 유동 영역인 1분면에서 측정한 속도장 결과를 나타낸 것이다. 유동형태를 자세히 살펴보면 아래방향으로 빠른 속도로 이동하는 스트립 표면을 따라 환원가스가 빠른 속도로 움직여 반 시계방향의 와류형태를 이루고 있다. 속도 분포를 보면 스트립을 따라 하강한 환원가스 유동은 도금육 표면 가까이에서 분기되어 한쪽은 도금육 표면과 바로 충돌하고, 다른 쪽은 도금육 표면을 따라 snout 후면 쪽으로 이동하여 작은 반 시계방향의 와류를 형성한다. 스트립을 따라 도금육 방향으로 움직이는 환원가스 유동의 폭은 도금육 표면에 가까이 갈수록 커지고 있다. 이것은 스트립을 따라 아래 방향

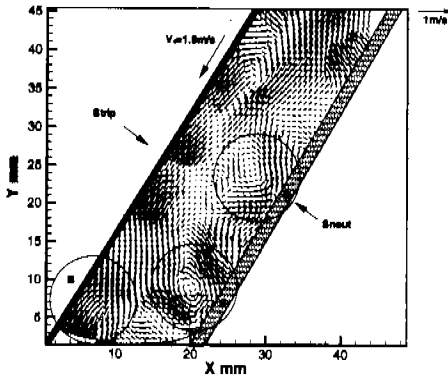


Fig. 9 Velocity field of deoxidization gas flow in the 1<sup>st</sup> quadrant.

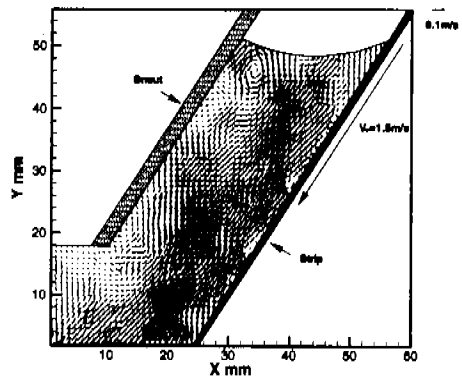


Fig. 10 Velocity field of molten zinc flow in the 3<sup>rd</sup> quadrant.

으로 이동할수록 유동에 부가되는 스트립에 의한 운동량이 증가하기 때문이다. 환원가스는 snout 후면 중간 위치인 C 영역에서도 반 시계방향의 와류를 이루면서 위쪽방향으로 빠져나가게 된다. 따라서 도금욕 표면 가까이에서 발생하는 아연증기는 A 영역에 주로 충돌, 부착되어 ash가 형성되고, 부착이 되지 않은 작은 입자의 아연증기는 snout 중간에 생기는 반시계 와류에 의해 snout 후면 C 영역에 부착되어질 것이다. A 영역에 부착된 ash가 커지면 자중에 의해 snout 표면을 따라 도금욕에 떨어져 B 영역에 형성된 유입유동에 의해 도금강판 후면에 부착되어 결합이 발생하게 된다. 이처럼 도금욕 표면으로 유입되는 환원 가스유동으로 인하여 도금욕 표면에 부유되어 있는 드로스나 ash 등이 도금 강판 후면에 부착하게 되어 결합을 일으키는 것으로 생각된다. 그러므로 도금욕 표면에 산화피막을 형성시키거나 배플을 snout 내부에 설치하여 이 부분의 유동형태를 제어하게 되면 도금강판 후면에 발생하는 결합을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

3.2.2 Snout 내부 용융아연 유동장

스트립 전면 용융아연의 유동을 나타내는 시험부 3분면에서의 snout 내부 중앙단면에서 측정된 속도장 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 여기서 보면 스트립 이송속도의 영향을 지배적으로 받는 2분면의 환원가스 유동과는 달리 스트립 이송에 의한 영향은 상대적으로 작게 나타났다. 반면에 싱크롤 회전에 기인한 snout 내부 유입속도가 지배적인 것으로 나타났다. 회전하는 싱크롤에 의해 발생하는 상승유동의 일부분이 스트립을 거슬러 올라와

snout 내부로 유입된 후 도금욕 표면까지 흘러간다. Snout 내부로 유입되는 유동은 주로 snout 벽면과 스트립 사이의 중심 영역에 주로 분포하고 있으며, 상승하던 유동은 도금욕 표면 가까이에서 도금욕 속으로 들어오는 스트립의 강한 운동량에 의해 snout 벽면과 스트립 쪽으로 분기되어진다. 좌측의 snout 벽쪽으로 분기된 유동은 반 시계방향의 와유동을 형성하고 스트립쪽으로 분기된 유동은 스트립 표면 방향으로 움직이고 있다. 이것은 환원가스 유동의 결과에서 증기아연을 위쪽으로 상승시키는 속도 성분이 있는 영역과 잘 일치하고 있다. 또한 유동가시화 결과에서 관찰한 바와 같이 아래방향으로 이송되는 스트립 표면의 아주 가까운 점성저층 영역을 제외하면, snout 내부 중앙단면에서 용융아연 용액이 하강하지 않고 있다. 따라서 snout 내부 3분면에서의 유동형태는 싱크롤 회전에 기인하여 생성된 snout 내부 유입 유동이 지배적이며, snout 내부를 따라 상승한 유동은 주로 snout와 스트립 중앙영역에서 도금욕 표면으로 유출되어진다.

Fig. 11은 스트립 후면 용융아연의 유동장을 나타내는 시험부 4분면에서 얻어진 속도장 결과를 나타낸 것으로 snout 끝 단으로부터 snout 내부로 유입되는 유동형태를 잘 보여주고 있다. 스트립 근처까지 유입된 유동은 B 영역에서 스트립을 따라 하강하는 유동과 snout 내부 깊숙이 상승하는 유동으로 분기되어진다. Snout 내부로 유입된 유체는 상승하다 스트립을 따라 하강하는 유체의 강한 운동량을 이기지 못해 C 영역에서 대부분 하강하고, 일부만 상승하는 거동을 보여주고 있다. Snout 뒷쪽 영역에서 snout 내부로 유입되는 용융아연 용액은 A 영역에서 시계방향의 큰 와동을 형성한

후 아래 방향으로 빠르게 이동되는 스트립에 거슬러 상승하다 스트립 표면을 따라 하강하는 유동보다 운동량이 작아지게 되면서 스트립 쪽으로 방향을 틀어 하강하게 된다. 이와 같은 복잡한 유동형태로 인해 스트립 주위에는 빠른 유동이 집중되어 있는데 비해 반대편 snout 내벽쪽에는 아주 낮은 속도의 유동영역이 형성되어 있다.

도금욕 표면에서의 유동은 snout 에서 스트립쪽으로 이동하기 때문에 만약, 도금욕 표면에 부유드로스나 아연증기의 ash 가 부유되어 있다면 이러한 유동형태로 인하여 아연 도금 강판의 후면에 결합을 유발시킬 수 있다. 그리고 스트립 전면인 3 분면과는 달리, 스트립 표면을 따라 아래로 흘러가는 유동이 현저하다. 이것으로부터 스트립 후면의 유동은 스트립 이송속도와 스트립 후면으로 유입되는 유입속도에 의해 그 유동형태가 결정됨을 알 수 있다.

따라서 snout 내부 스트립 후면인 4 분면에서의 용융아연의 유동형태는 스트립 유동과 snout 후면을 통해 유입되는 유동에 의해 영향을 받고 있으며, 도금욕 표면으로 유출되는 속도성분은 3 분면과 비교하여 매우 작다.

3.2.3 도금욕 표면 주위 속도장

Snout 내부 아연 도금욕 표면부근의 속도장 결과를 환원가스 측과 도금욕 측으로 나누어 Fig. 12 에 표시하였다. Fig. 12(a)는 스트립 전면에서 도금욕 표면 부근의 속도 분포이고, Fig. 12(b)는 스트립 후면에서의 속도 분포를 나타낸 것이다. 여기서 보면, 먼저 환원가스 측의 유속이 용융아연의 유

속에 비해 상대적으로 매우 큼을 알 수 있다. Snout 내부 스트립 전면에서 공기측 유동형태는 스트립 쪽에 시계방향으로 회전하는 큰 와류가, snout 쪽에는 반 시계방향의 작은 와가 형성되어 있다. 용융아연 측에는 snout 측에 반 시계방향으로 회전하는 와류가 형성되고, 스트립측에 주로 수면위로 유출하는 유동이 분포하고 있다. 도금욕 표면으로의 유출은 snout 와 스트립의 중간위치에서 이루어지고 있으며, 용융아연 측의 표면 유출 속도는 평균적으로 0.1 m/s 이하로 공기측의 표면 속도에 비해 매우 작다. 스트립 후면의 속도분포를 나타낸 Fig. 12 (b)를 보면 도금욕 표면 주위의 공기측 유동은 스트립 이송으로 야기된 반 시계방향의 큰 와류가 형성되어 스트립쪽 도금욕 표면에 충돌하고 있다. 용융 아연측 유동에서는 반 시계 방향으로 회전하는 와류가 형성되어 스트립쪽으로 유입되는 유동형태를 보여주고 있다. 그러므로 만약 snout 내부 도금욕 표면에 ash 가 균일하게 분포하고 있다면 스트립 전면 보다는 후면에서 도금강판의 결합이 더 많이 발생됨을 알 수 있으며, 실제 조업에서도 이것이 확인되고 있다.

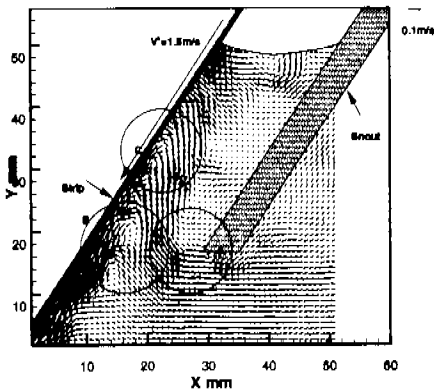


Fig. 11 Velocity field of molten zinc flow in the 4<sup>th</sup> quadrant.

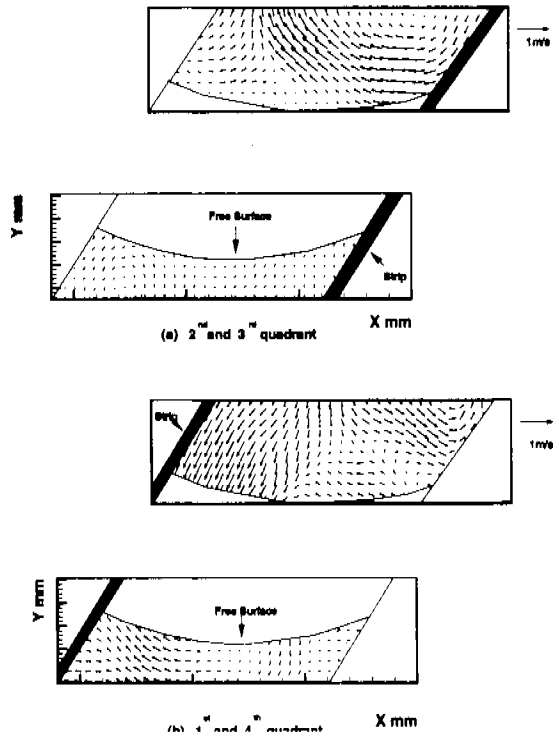


Fig. 12 Instantaneous velocity fields round free surface of Zn pot inside the snout.



## 4. 결 론

용융아연 도금 공정에서 강판유입구인 snout 내부의 유동특성을 실험적으로 연구하였다. 강판 스트립의 이송속도를  $V_s=1.5\text{m/s}$  인 상태에서 snout 내부의 용융아연 액체유동과 환원가스 기체유동의 유동장상 유동가시화와 PIV 속도장 측정을 통해 해석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 도금욕 내부 유동은 싱크플에 의해 형성되는 와류 유동이 지배적이고, snout 설치로 인해 도금욕 표면 가까이에서 강판스트립에 미치는 이 와류유동 효과는 감소된다.

(2) Snout 내부 스트립 전면의 환원가스 유동은 스트립 이송에 의해 형성된 시계방향의 와류가 주도적인 역할을 한다. 스트립 후면에서의 환원가스 유동장은 스트립 이송에 의해 반 시계 방향의 와류가 snout 내부에 형성되며, 유동중 일부는 스트립을 따라 하강한 용융아연 유동 속으로 유입한다

(3) 스트립 전면에서 용융아연의 액체유동은 싱크플 회전에 기인한 snout 내부 유입속도가 지배적이고, snout 벽면과 스트립 사이의 중앙영역을 통해 snout 내부로 유입된다.

(4) Snout 내부의 스트립 후면에서는 스트립 이송의 영향이 지배적이며, 유입된 유동의 대부분이 아래 방향으로 내려가는 스트립을 따라 하강한다. 스트립을 따라 움직이는 유동층은 스트립 상면에서는 싱크플의 영향으로 매우 얇은 반면, 스트립 하면에서는 하부로 내려갈수록 두꺼워진다.

(5) Snout 내부 스트립 전면 도금욕 표면부근의 유동형태는 환원가스측은 스트립쪽에 시계방향으로 회전하는 큰 와류가, 용융아연측은 snout 쪽에 반 시계방향의 작은 와류가 형성된다. 또한 용융아연 측의 표면유출속도는 환원가스 측의 표면속도에 비해 매우 작다.

(6) 스트립 전면보다는 스트립 후면에서 스트립을 따라 유입되는 유동성분이 강하여, 도금욕 표면에서 드로스나 ash 가 균일하게 발생한다면, 도금 강판의 결합은 snout 내부 전면 보다는 후면에서 더 많이 발생됨을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 포항제철(주) 광양전술과제사업의 일부분으로 수행되었으며 이와 관련하여 광양제철소 압연연구팀 김홍윤씨에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Kurobe, 1996, "Cold Model Experiment on Flow Phenomena in Hot Dip Plating Bath," *CAMP-ISIJ*, vol.9 1080-1083.
- (2) Yakawa, 1996, "Investigation of Restraining Method from Bottom Dross Flinging," *CAMP-ISIJ*, vol.9 1084-1087.
- (3) Nakamura, 1996, "Dross Control in Zinc Bath for Producing Exposed GA with High Surface Quality," *CAMP-ISIJ*, vol.9 1076-1079.
- (4) Adrian, R. J., 1991, "Particle Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics," *Annual Review Fluid Mechanics*, Vol 23, pp. 1202~1215.
- (5) Bjorkquist, D. C., Fingerson, L. M., 1992, "Particle Image Velocimetry," TSI Incorporated, *Progress in Visualization*, Vol 1, pp. 313~326.
- (6) Dracos, Th., 1996, "Three-Dimensional Velocity and Vorticity Measuring and Image Analysis Techniques," *Ekluwer academic publishers*.
- (7) Keane, R. D. and Adrian, R. J., 1991, "Optimization of Particle Image Velocimeters Part 2 - Multiple Pulsed Systems," *Report No. 47.80*.
- (8) Keane R. D. and Adrian R. J., 1992, "Theory of Cross-Correlation Analysis of PIV Images," *Applied Scientific Research*, Vol 49, pp. 1~39.
- (9) Keane, R. D. and Adrian, R. J., 1990, "Optimization of Particle Image Velocimeters Part 1: Double Pulsed Systems," *Measurement Science and Technology*, Vol 1, pp. 1202~1215.
- (10) Lai, W. T., 1996, "Particle Image Velocimetry," TSI Incorporated, 3D Velocit-Vorticity Measuring and Image Analysis Techniques short Course.
- (11) Lourenco, L. M. and Korthapalli, A., 1995, "On the Accuracy of Velocity and Vorticity Measurements with PIV," *Experimental in Fluids* Vol 18, pp. 421~428.