

## 용융아연도금설비의 gas wiping시 강판표면의 기체 유동해석

황원걸\*, 성원석\*\*, 김형\*\*, 정진환\*\*\*, 박노범\*\*\*

\* 전남대학교 기계공학과, \*\* 전남대학교 대학원 기계공학과  
\*\*\* 포항제철(주) 기술연구소 광양압연연구그룹

### Gas Flow Analysis Around Strip Edge During Gas Wiping for CGL

W. G. Hwang\*, W. S. Sung\*\*, H. Kim\*\*, J. H. Chung\*\*\*, R. B. Park\*\*\*

\* Chonnam National University

\*\* Graduate School, Chonnam National University

\*\*\* Kwangyang Rolling Products Research Group,

\*\*\*\* POSCO Technical Research Laboratories

#### Abstract

Gas wiping process of continuously hot-dip galvanized coating on steel strip has noise and coating problems. To improve the quality of product, characteristics of air flow on the steel surface must be investigated. In this paper, fluid dynamic model of the gas flow is setup and solved numerically using STAR-CD. The effects of edge baffle, distance between steel plane edge and baffle, inlet pressure, and gap between air knife and strip steel surface are investigated, and it is concluded that edge baffle can reduce over-coating and edge built-up.

#### 1. 서 론

제철소에서 용융아연 도금설비의 주 기능은 강판의 전면에 균일한 두께의 아연을 용착시키는 것이다. 연속용융도금에 따른 도금 부착량을 제어하는데 광범위하게 사용되는 방법은 가스 와이핑(gas wiping)법<sup>1)</sup>으로서 1964년 이후 실용화되었으며, 도금강판의 전후면에 에어 나이프(air knife)를 설치하여 분출되는 공기 또는 불활성 가스를 이용 강판표면의 아연액막의 두께를 균일하도록 하는

방법이다. 이는 고속 박막 도금이 가능하며, 근년에는 거의 모든 라인에 이 방법이 채용되고 있다.

가스 와이핑법에서는 에어 나이프의 분출압력 및 분출각도, 에어 나이프 노즐의 슬로트간격, 도금강판과 에어 나이프의 간격 등, 에어 나이프 시스템의 변수를 적절히 조절함으로써 도금욕의 온도 및 라인속도에 따른 도금부착량을 조절할 수 있다. 이때 에어 나이프를 중심선으로 하는 강판 상하의 일정 영역에서 균일한 방향으로 기체가 흐르면서, 균일한 크기의 압력분포를 갖는 기체 유동장이 형

성되지 않으면, 강판에서 균일한 두께의 아연용착을 얻을 수 없다. 그러나 많은 경우 강판 전후면에서 분출되는 두 분출공기의 충돌과 강판의 한정된 폭에 기인하여 강판의 에지(edge)부 주위에 이상유동이 발생하고, 그로 인하여 심한 소음과 에지부의 과도금과 같은 도금결함을 유발할 수 있다.

에지부 도금 결함의 방지와 소음 저감을 위해 기존의 공기 흐름에 새로운 흐름을 중첩시키는 중첩법과 강판 에지부에서 일정간격 떨어진 곳에 배플을 설치하는 천이법 등 여러 방법이 시도되고 있다. 그 중 천이법은 균일한 품질을 얻는데 간단하면서도 효과적인 방법으로 알려져 있으나, 배플을 따라 유도된 공기에 의해 비산된 용융액이 에어나이프의 노즐을 막는 등의 문제가 있다. 따라서 이러한 문제점만 해결하면 이 방법이 실용상 적절한 방법이라 할 수 있다<sup>2)</sup>.

여러 가지 연구결과<sup>2, 3)</sup>를 종합하여 볼 때, 용융 아연 도금설비의 성능향상을 위하여는 에어나이프 주위의 이상유동 현상을 제어하여야 하며, 그러기 위하여는 공기나이프를 중심으로 강판의 유동장에 대한 이해가 필수적이라 할 수 있다. 본 연구의 목적은 에어나이프 내부 유동의 영향과 강판 표면상의 분출공기 흐름에 의한 유동장의 특성을 파악함으로써, 강판 표면에서의 균일한 유동장 형성 방안을 모색하는 것이다. 또한 강판의 에지부 과도금 및 에지부 빌드업 현상을 감소시키기 위하여 배플을 설치한 경우 배플의 영향과 배플과 강판의 간격, 배플의 두께에 따른 영향 및 유입되는 작업 유체의 압력에 따른 유동현상을 해석하고 비교 고찰하였다.

## 2. 용융아연도금설비의 모델링

용융아연도금설비는 중앙에 강판을 두고, 강판면의 좌우에 에어나이프가 위치하며, 강판의 에지부에 배플이 설치된다. 에어나이프를 중심으로 강판의 위아래로 흐르는 기체 유동장에 의해 용융아

연이 균일한 두께로 용착된다. 즉 강판전면에서의 용착아연의 두께는 강판의 표면에 형성된 유동장의 속도분포와 압력분포의 특성에 의해서 결정된다. 이와 같은 도금설비의 에어나이프와 강판 사이의 공기 유동은 3차원 압축성유체로 해석하는 것이 타당하나, 본 연구에서는 강판 최외곽 에지부에 있어서 공기 유동의 경향 파악을 위하여 공기의 온도 변화와 밀도 변화를 고려하지 않고 해석하였다. 즉, 강판 에지부의 유동장을 3차원 비압축성 난류유동으로 해석, 고찰하였다. 또한 강판의 진행속도와 강판에 용착된 용융아연액, 그리고 고온의 상승기류는 고려하지 않고 에어나이프에서 고속으로 분사된 공기가 정지 상태로 가정한 강판에 충돌하는 것으로 모델링하였다.

유동장을 지배하는 방정식은 에너지의 보존관계를 나타내는 연속방정식과, 흐르는 유체와 접촉하는 고체 사이의 힘의 상호작용을 기술하는 운동량 방정식으로서 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \cdot \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \cdot \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \cdot \bar{u}_i \cdot \bar{u}_j + \bar{p} \cdot \bar{u}'_i \cdot \bar{u}'_j) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \bar{\rho} \cdot g \frac{x_i}{|x|} = 0 \quad (2)$$

여기서  $\bar{u}_i$ 는  $x_i$  방향의 속도성분,  $\bar{p}$ 는 압력,  $\bar{\rho}$ 는 밀도,  $g$ 는 중력가속도이다.

연속방정식과 운동량방정식의 수치해는 전산유체해석 프로그램인 STAR-CD를 이용하여 얻었다. 난류 효과를 유동계산에 적용시 난류모델로 고 레이놀드수 영역의 난류유동장 해석에 가장 일반적으로 사용되는 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다. 얻어진 수치해로부터 용융아연도금설비의 공기 나이프와 연속된 강판사이에 발생하는 기체흐름의 속도분포와 압력분포를 구하였다. 또한 이렇게 얻어진 강판표면의 속도분포와 압력분포를 이용하여 배플의 영향, 배플과 강판간격의 영향 등을 고찰하였다.

에어나이프는 조업현장에서 사용되는 에어나이

프의 도면을 바탕으로 유동해석을 위한 공간과 배플을 모델링하였다. 에어나이프는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 압력게이지에서 챔버입구까지의 연결파이프, 내부원통과 외부원통으로 구성된 이중구조의 챔버, 챔버와 노즐을 연결하는 연결부, 홀형의 노즐, upper lib, lower lib의 조립체로 구성된다.

강판의 표면은 용융아연액이 용착되어 있지 않은 스트립(strip) 상태이다. 노즐 끝단에서 용융아연액의 자유표면까지 모델링하였다. 따라서 그림 2의 하단부가 용융액조의 자유표면이 되며, 해석시 outlet 조건을 부여하였다. 에지배플은 200×150×1mm, 강판은 1,120×1,226×0.5mm로 설정하였으며, 공기와 충돌하는 부분은 격자간격을 1/8mm로 하였다. 이때 에어나이프와 강판의 간격은 7mm, 강판과 배플의 간격을 4mm로 설정하여 Fig. 2와 같이 모델링하였으며, 표 1과 같이 각각의 간격을 변화시키며, 해석 고찰하였다. 에어나

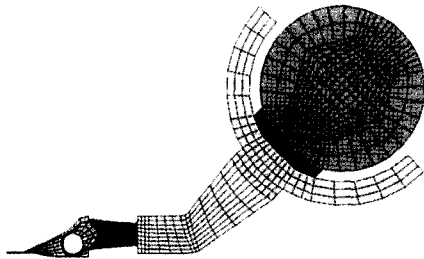


Fig. 1. Air knife

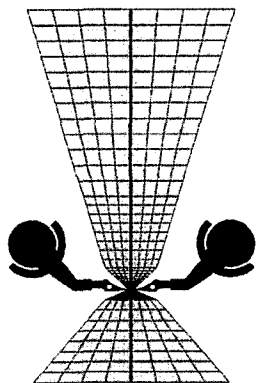


Fig. 2. Full model for CFD

Table 1. Condition for Air knife-plate model

Case	Inlet Pressure	Nozzle-Plate distance	Baffle-Plate distance	Baffle offset	Remark
1	30kPa	7mm			
2	30kPa	7mm	4mm	0mm	
3	30kPa	7mm	8mm	0mm	
4	30kPa	7mm	4mm	0.25mm	+Y
5	30kPa	10mm	4mm	0mm	
6	40kPa	7mm			
7	20kPa	7mm			

이프-강판 모델은 fluid, solid, wall의 특성을 갖는 약 120만개의 6면체 셀(cell)로 구성하였다.

#### 4. 수치해석

I-DEAS를 이용하여 해석유동장의 3차원 선도(wire frame)와 표면데이터(surface data) 등의 기하학적 형상모델을 완성한 후, IGES 변환작업을 거쳐 격자생성 전용 전처리기인 ICEM/CFD를 이용하여 격자를 생성하였다. 이 격자계를 STAR-CD의 PROSTAR로 불러들여 초기조건 및 경계조건, 해석제어조건 등을 부여하였다. 수치해석을 위한 절차는 Fig. 3과 같다.

FVM(Finite Volume Method)을 기본으로 하는 3차원 해석 유동장을 정상상태의 비압축성 유동으

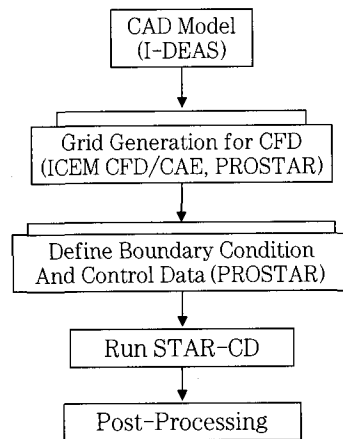


Fig. 3. CFD flowchart

로 가정하여, 정상상태에서의 압력수정 기법인 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘과 상류차분기법(UD: Upwind Differencing Scheme)을 채택하여 해석을 수행하였다. 또한 에어나이프와 강판 등으로 구성된 유동장내의 기체흐름이 복잡한 난류유동을 형성하므로 표준 난류모델을 적용하여 해석하였다. 반복계산 중 이전 단계에서의 계산결과와 현 단계에서의 계산 결과와의 차이를 각 종속변수의 입구 유입량으로 나눈 상대 잔류오차값(residual resource)이 0.1%이하인 경우를 수렴 조건으로 하였다. 이와 같은 해석결과를 통하여 해석 유동장의 속도분포와 압력분포 등을 고찰하였다.

#### 4. 1. 해석조건 및 경계조건

본 연구에서는 압력조건을 2개의 에어나이프의 입구 경계면에 동일한 압력조건인 30kPa로 설정하였으며, 출구압은 대기압으로 설정하였다. 입구에서의 난류 운동에너지를 결정하는 난류강도는 입구 유속의 10%, 특성길이는 입구직경의 10%로 설정하였다. 또한 속도항에 대한 이완계수는 0.7, 압력항에 대한 이완계수는 0.2, 그리고 난류항과 소산항에 대해서는 0.7로 정의하고, 상대 잔류오차 값이 0.1%이하가 되도록 설정하였다. 사용한 상용코드는 Windows NT용 STAR-CD 3.10A를 사용하였다.

본 연구에서는 표 1에 나타낸 바와 같이 압력, 노즐과 강판 간격, 배플과 강판 간격, 배플의 편심에 따른 각각의 경우에 대한 해석을 수행하였다.

### 5. 결과 및 고찰

수치해석을 통하여 에어나이프의 내부 유동과 노즐 내부의 유동현상을 고찰하였다. 특히 정류봉의 영향과 노즐 끝단에서의 속도를 고찰하였으며, 전체모델은 공기와 충돌하는 강판 표면의 에지부의 유동특성을 중심으로 살펴보았다.

#### 5. 1. 에어나이프 내부유동

홀 형의 노즐을 이용한 에어나이프의 유체유동을 STAR-CD를 이용한 수치해석을 통하여 노즐의 유량, 작업 유체의 속도분포 및 압력분포를 해석하였다. 에어나이프 내부에는 병목형상을 한 76개의 홀이 있으며, 홀의 전후에서 압력과 속도의 차이가 심하나, 정류봉을 지나면서 공기흐름에 미치는 홀의 영향은 감소하였다. Fig. 4는 홀 입구에서 정류봉을 지나 노즐의 출구부까지의 단면형상과 단면에 따른 속도를 나타낸 것이다.

노즐 출구부의 속도는 강판이 존재하는 구간에서 일정하게 되는데, 이러한 결과를 그림 5에 나타내었다. Fig. 5에서 노즐의 출구부는 간격 1mm이며, 8개의 격자로 구성되었으며, 1번째 셀은 가

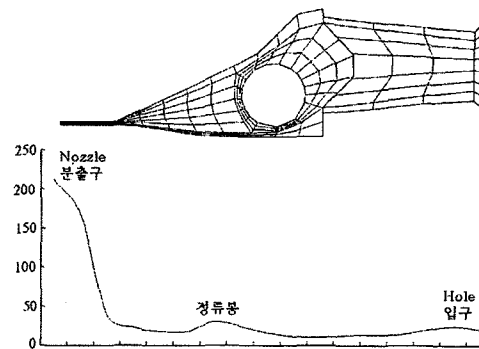


Fig. 4. Velocity distribution inside nozzle

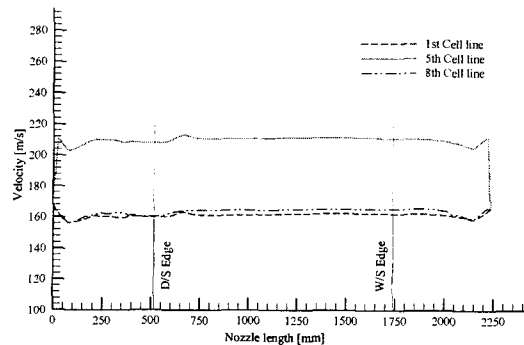


Fig. 5. Spout velocity at nozzle tip

장 윗쪽 셀이며, 8번째 셀은 아랫쪽 셀이다. 해석 결과를 살펴보면 5번째 셀에 의한 강판 구간에서 212m/s의 일정한 속도를 나타내었다. 따라서 노즐의 폭을 강판의 1.5배 정도로 하여 여유를 두면 강판 표면에 일정한 속도의 공기를 분사시킬 수 있을 것으로 사료된다.

5. 2. 강판 에지부 유동해석

작업 유체인 공기는 노즐을 통해 ±Y 방향으로 각각 분출된다. 해석결과는 에어나이프 내부유동과 전술한 7가지 경우에 대한 강판의 D/S(Drive Side)와 W/S(Work Side)의 에지부를 중심으로

살펴보았다. 에지배플에 편심이 있는 경우는 +Y 방향이며, 편심량은 0.25mm이다.

강판 표면의 속도분포를 고찰함으로써 강판표면의 공기흐름을 알 수 있다. 표 1에 나타난 7가지 경우에 대해 해석 결과를 Fig. 6~10에 나타내었다. 속도와 압력분포를 고찰한 결과 강판의 표면에서는 압력과 속도의 분포가 균일하였으나, 강판의 최외곽 에지부(0~10mm 구간)에서는 상이한 압력과 속도구배가 발생하였다. 에지배플이 없는 1, 6, 7의 경우 강판의 최외곽 에지부에서 속도의 크기는 불균일하고 방향은 강판의 진행방향에 대하여 15°정도 경사져 있었다. 이러한 현상은 에어나이프에 유입되는 공기의 압력이 높을수록 강하

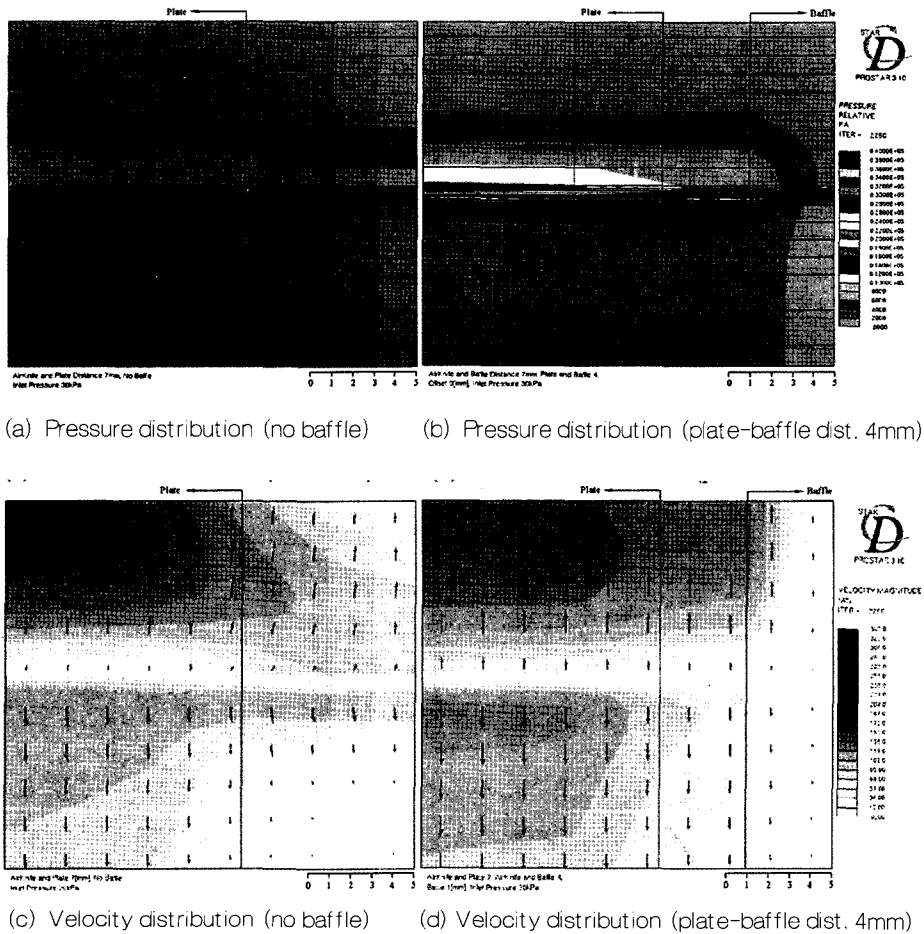
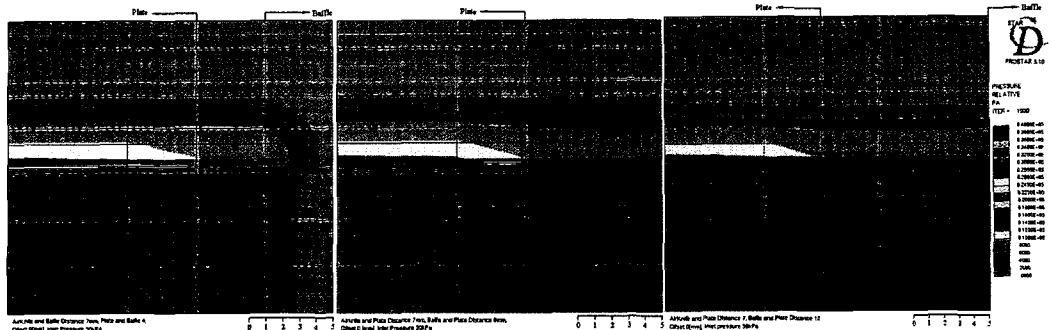
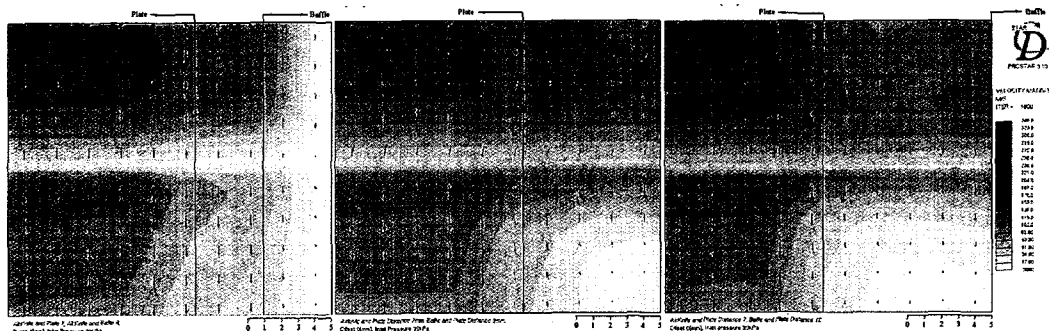


Fig. 6. Pressure and velocity distribution on the plate edge



(a) Pressure distribution:4mm (b) Pressure distribution:8mm (c) Pressure distribution:12mm



(d) Velocity distribution:4mm (e) Velocity distribution:8mm (f) Velocity distribution:12mm

Fig. 7. Effect of plate-baffle distance

였다. 반면 배플이 설치된 나머지 4가지 경우에는 이러한 현상이 현저히 감소하거나 나타나지 않았다. 이는 에지배플이 강판 에지부의 유동을 강판의 길이방향(진행방향과 용탕추 방향)으로 흐르게 하는 효과가 있음을 나타내는 결과이다. 따라서 에지배플이 강판 에지부의 이상유동 현상을 감소시키며, 에지부 과도금 및 빌드업 현상을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

5.2.1. 배플의 영향

배플의 영향을 고찰하기 위하여 Fig. 6과 같이 D/S부에서 배플이 없는 경우와 강판과 배플이 4mm 간격인 경우를 비교하였다. 배플이 없는 경우는 강판의 폭 방향 속도성분이 있으나 배플을 설치한 경우 폭 방향 속도성분이 감소되거나 소멸되는 것을 확인하였으며, 배플을 설치하지 않는 경우보다 압력이 강판의 최외곽 에지부에서 4kPa정도 높아지

고 강판의 폭방향 압력구배가 완만해졌다.

기존의 연구결과<sup>2, 8, 9)</sup>에서 알려진 바와 같이 에어나이프로부터 분사되는 공기압이 강판 중앙에 비해 에지부분으로 갈수록 낮아지고 이로 인하여 에지부 과도금 등과 같은 도금 결함이 발생한다. 따라서 과도금을 방지하기 위해서는 압력구배를 평탄하게 할 수 있는 방법을 강구해야한다. 배플을 설치한 경우 강판의 최외곽 에지부에서의 속도 분포가 Fig. 6 (d)와 같이 강판의 길이 방향으로 일정하게 되고, Fig. 6 (b)와 같이 최외곽 에지부의 압력구배가 완만하게 되어 과도금과 같은 도금 결함을 감소시키는데 도움이 될 것으로 사료된다.

5.2.2 강판-배플 간격의 영향

강판과 배플 사이의 간격 변화가 압력과 속도에 미치는 영향을 고찰하였다. 공기와 강판의 충돌부

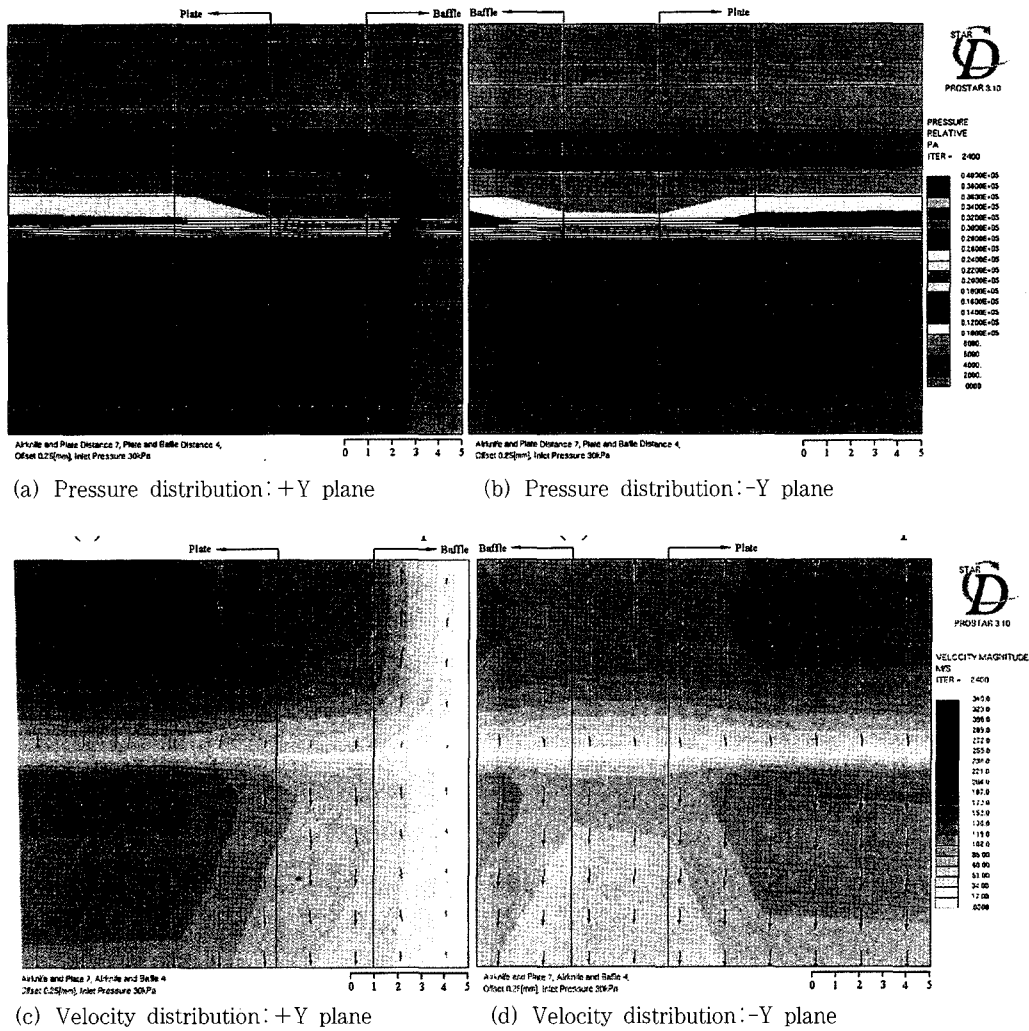


Fig. 8. Effect of baffle offset

에 있어서 압력과 속도의 차이는 있으나, 그 분포 양상은 유사하였다. 압력은 강판의 중앙부에서 에지부까지 일정한 크기를 나타내었으며, 간격이 12mm인 Fig. 7(c)에서 알 수 있는 바와 같이 중심압력의 분포의 폭이 강판의 길이 방향에 대해 좁아진 것이 관찰되었다. 강판의 에지부에서의 압력 분포와 속도분포 역시 유사하였다. 따라서 강판과 배플의 간격이 12mm정도까지 설치하여도 에지부 이상유동이 감소되어 에지부 과도금과 같은 도금 결함을 해소하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

### 5. 2. 3. 배플 편심의 영향

배플 편심이 공기의 압력과 속도분포에 미치는 영향을 고찰하기 위하여, 배플의 중심이 강판의 중심과 0.25mm의 편심을 갖고 설치된 경우를 고찰하였다. 이 경우 +Y면은 0.5mm의 단차가 있게 되며, -Y면은 강판과 단차가 없게 된다. 단차가 0.5mm인 +Y면 에지부 결과는 Fig. 8(a), (c)와 같고, 단차가 없는 경우는 Fig. 8(b), (d)와 같다. 강판 에지부의 최고압력이 +Y면은 12.5kPa, -Y면은 11.5kPa로서 1kPa 정도의 압력차를 보였다.

며, 단차가 없는 경우에 압력구배가 더 완만하게 형성되었음을 알 수 있다. 또한 단차가 없는 경우, 공기의 흐름은 강판의 진행방향에 대해 5° 정도 경사져 형성되었다. 따라서 약간의 단차는 균일한 도금에 도움이 될 것으로 사료된다.

5.2.4. 강판-노즐 간격에 따른 영향

노즐과 강판의 간격이 강판 에지부에서의 압력과 속도분포에 미치는 영향을 고찰하기 위하여, 강판-노즐 간격이 각각 7mm, 10mm인 경우를 비교하여 보았다. Fig. 9(a), (b)의 압력분포를 비교하여 보면, 강판 에지부의 최고 압력이 간격 7mm인 경우 12.5kPa이며, 간격 10mm인 경우 8.5kPa로, 약 4kPa 정도의 압력강하가 생기고, 노즐부

주위에서의 압력구배가 더 완만하게 형성됨을 확인하였다. Fig. 9(c), (d)의 속도분포를 보면, 충돌부에서 간격 7mm인 경우 102m/s, 간격 10mm인 경우 80m/s로 약 20m/s의 속도 저하가 있었으나, 유사한 속도분포를 나타내었다.

5.2.5. 입구측 압력변화의 영향

에어ナイ프에 유입되는 작업유체의 압력이 30, 40kPa인 경우 강판에지부의 압력과 속도분포에 대한 해석 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 유입되는 작업유체의 압력이 높을수록 강판 표면의 중심압력은 올라가 Fig. 10 (d)에 나타낸 바와 같이 강판의 에지부에서 강판 폭 방향의 속도 성분이 증가하였다. 특히 40kPa의 경우 노즐에서 분출되는

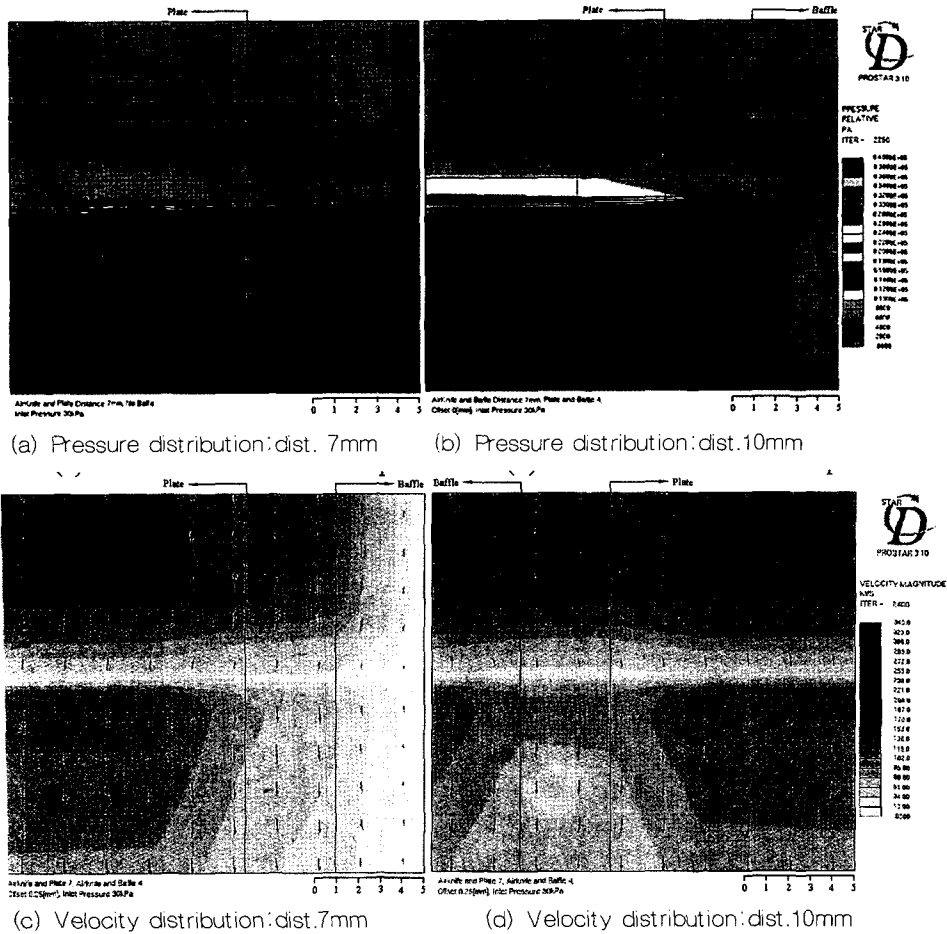
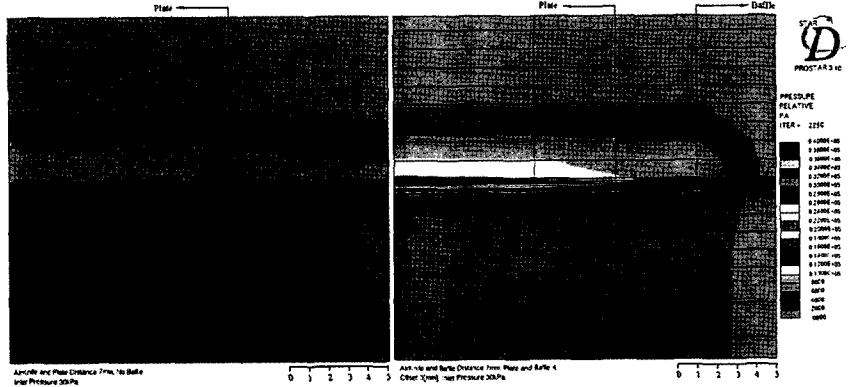
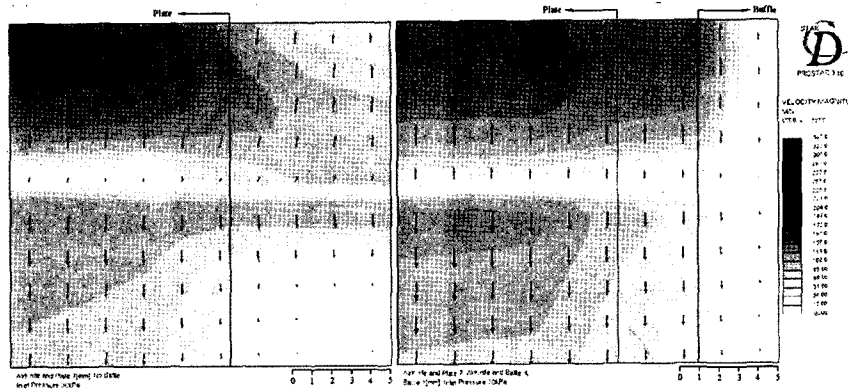


Fig. 9. Effect of plate-nozzle distance





(a) Pressure distribution:inlet press. 30kPa (b) Pressure distribution:inlet press. 30kPa



(c) Velocity distribution:inlet press. 30kPa (d) Velocity distribution:inlet press. 40kPa

Fig. 10 Effect of inlet pressure

공기의 유속이 음속에 상당하는 340m/s의 해석 결과를 얻었다. 따라서 고압의 작업시에는 좁은 노즐을 통해 고속으로 분출된 공기에 의해 강한 소음과 진동의 발생이 예상된다.

### 6. 결 론

용융아연도금설비에서 제품의 질을 향상시키기 위하여는 강판의 에지부에서의 유동현상을 고찰함으로써, 과도급 현상에 대한 원인을 파악하고 설비개선을 통하여 문제를 해결할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 강판 에지부의 유동장을 고찰하기 위하여, 에어나이프, 강판, 및 배플을 3차원으

로 모델링하고 STAR-CD를 이용하여 수치해석을 수행하였다.

강판 표면의 압력분포와 노즐분출구에서의 압력 분포를 비교한 결과, 노즐의 폭이 강판의 폭보다 1.5배 정도 되면 강판 전면에 균일한 속도분포가 형성됨을 알 수 있었다. 또한 에어나이프 내부 유동을 고찰한 결과 정류봉이 압력 및 속도를 분배를 하는 역할을 하였으며, 정류봉의 후면에서 박리현상이 발생하였다.

에지배플의 역할을 살펴보면, 강판 에지부의 압력을 상승시켜 강판의 폭방향 압력구배를 완만하게 하며, 공기의 흐름을 한쪽 방향으로 일정하게 정렬 시키는 효과가 있음을 확인하였다.

에어ナイ프와 강판의 간격에 의한 영향을 검토한 결과, 압력분포 양상과 속도의 유형은 동일하였고, 간격으로 인하여 강판표면에서 5kPa 정도의 압력 강하가 있었으나 공기의 흐름은 동일하였다. 따라서 12mm 정도까지의 간격에서는 간격의 영향은 거의 없다고 할 수 있다. 또한 강판과 노즐의 간격이 유동장에 미치는 영향은 7~10mm 범위내에서는 압력의 크기 이외에는 특이한 영향이 관찰되지 않았다.

에어나이프에 입력되는 작업유체의 압력이 상용 압력인 30kPa에서 40kPa까지 증가시켰을 때 공기와 충돌하는 강판의 중심압력이 상승하였으나, 강판의 최외곽 에지부에서 강판 폭방향 속도 성분이 증가하였다. 또한 노즐에서 분출되는 공기의 속도가 340m/s 정도까지 상승함을 관찰할 수 있었고, 공기가 음속으로 분출되어 소음을 예상할 수 있다.

### 참고문헌

1. J. J. Butler, D. J. Beam, and J.C. Hawkins : *Iron & Steel Eng.* 47, 77, 1970.
2. 박정렬, 전선호, 박노범, "연속 용융도금 강판의 에지 과도금 및 빌드업," *한국표면공학회지*, Vol. 32. No. 4, 1999.
3. M. Dubois, M. L. Riethmuller, J-M. Buchlin, and M. Arnalsteen, "The Gas-Jet Wiping Limit : The Splashing Phenomenon," *Galvatech '95 Conference Proceedings*, pp. 667-673.
4. 박종욱 외, "충돌제트의 후류 유동에 관한 연구," *한국항공우주학회지*, 제25권 제1호, pp. 46-52, 1997.
5. S. R. Yoo, I. S. Choi, P. K. Nam, J. K. Kim, S. J. Kim, and J. Davene, "Coating Deviation Control in Transverse Direction for a Continuous Galvanizing Line," *IEEE Transactions on Control System Technology*, Vol. 7, No. 1, 1999.
6. J. Davene, L. Dondin, J. K. kim, and S. J. Kim, "Dynamic Air Knives : DAK," *Galvatech '95 Conference Proceedings*, pp. 205-213.
7. C. H. Ellen and C. V. Tu, "An Analysis of Jet Stripping of Molten Metallic Coatings," *8Th Australasian Fluid Mechanics Conference*, pp. 204-207, 1983.
8. C. H. Ellen and C. V. Tu : *Trans. ASME J. Fluids Eng.* 106 (1984) 399.
9. Y. Takeishi and T. Aoki : *Tetsu-to-Hagane*, 81 (1995) 135.
10. 武石芳明, 山内昭良, 宮内澄隆, "連続溶融めっきにおけるガスワイピング機構," *鐵と鋼*, Vol. 81, No 6, pp. 37-45, 1995.
11. 安谷屋武志, 阿部雅樹, 庄司政浩, 矢野秀勝, "連続式溶融亜鉛めっき氣體交り制御機構に関する検討," *鐵と鋼*, 第7號, pp. 67-76, 1980.
12. 武石芳明, 青木健郎, "連続溶融めっきにおけるガスワイピングエットの特性," *鐵と鋼*, Vol. 81, No 2, pp.47-52, 1980.
13. J. A. Thornton and H. F. Graff, "An Analytical Description of the Jet Finishing Process for Hot-Dip Metallic Coatings on Strip," *Metallurgical Transactions B*, Vol. 7B, pp. 607-618, 1976.
14. T. Cebeci and A. M. O. Smith, "Analysis of Turbulent Boundary Layers," *Academic Press Inc.*, 1974.
15. O. Wiplier and U. Eherenstein, "Numerical Simulation of Linear and Nonlinear Disturbance Evolution in A Boundary Layer with Compliant Walls," *Journal of Fluids and Structures*, 14, pp. 157-182, 2000.
16. H. Schlichting, *Boundary-Layer Theory*, McGraw-Hill, 1968.
17. STAR-CD User Guide, V3.100, *Computational Dynamics Ltd.*, 1999.
18. I-DEAS Master Series 6, *Student Guide*. 1998.