Inductor에 의해 가열된 용융 아연 도금욕 내의 유동과 온도 분포 계산

한경아† · 박화수* · 남성현**

Computational Analysis of Fluid Flow and Temperature Distribution in a Galvanizing Bath Heated by Channel Inductors

Kyung-a Han, Hwasoo Park and Sung-Hyun Nam

Key Words : Galvanizing Bath(아연 도금욕), Channel Inductor(채널 인덕터), Flow Structure(유동구조), Temperature Distribution(온도분포)

Abstract

Fluid flow and temperature distribution inside a molten zinc bath were investigated by computational fluid dynamics method. Modeling the channel inductor where alternating current of 60Hz was applied, Lorentz force and generated heat were obtained and later supplemented as source terms to momentum and heat equations. The present work validates CFD technique is effectively adopted when the inductor hardware modification or its configuration is considered for the optimum flows.

기호설명

u : 유체의 속도
p : 압력
C_p : 열 용량
k : 난류운동에너지
ε : 난류 소산율
μ_t : 난류점성계수
μ_{eff} : 유효점성 계수
ρ : 밀도
T :온도
g : 중력
σ_{th} :열전도도

1. 서 론

철강재료의 내식 성을 향상시킬 목적으로 철을 용융아연에 침지하여 표면에 아연을 피복하는 아연도금은 근래 자동차, 가전제품 등에 그 용도가 확대됨에 따라 품질의 고급화가 요구되고 있으며 또한 생산의 경제성 문제가 대두 되고 있다. 가장 큰 문제인 드로스(dross)를 해결하기 위하여는 용융 아연의 유동 해석이 필수이며 이에 대한 연구는 수 모델에 의한 연구와 computer 수치 해석으로 나눌 수 있다. 수 모델에서는 인덕터(inductor)의 설치가 불가하고 따라서 인덕터의 채널(channel) 내로 아연의 이동을 가하여 실험할 수 밖에 없다[1]. 그러나 수치해석에 의한 방법에서도 현재까지 발표된 논문은 인덕터 내의 자기장과 이에 의한 열 발생은 계산하지 않고 수 모델 실험에서와 같이 아연욕과 접한 인덕터의 경계 조건을 아연이 이동하는 inlet 조건으로 하여 계산하였다[2]-[4].

본 연구에서는 채널 형 인덕터를 모델링(modeling) 하여 60 Hz 의 교류 전류 하에 자기장을 계산한 후 이를 용융 아연의 유동 계산에서 운동량 방정식에 원천 항으로 첨가하여 아연 욕과 인덕터를 포함하여 유동을 계산하였다. 인덕터에서 발생한 열을 열 방정식에 첨가하여 아연욕 내의 온도를 계산하였으며 이 아연 욕을 구성하는 내화재를 계산에 포함하였다.

† 국민대학교 신소재공학부
E-mail :hwpark@kookmin.ac.kr
TEL : (02)910-4662 FAX : (02)910-4320
* 국민대학교 신소재공학부
** 포스코건설 기술연구소

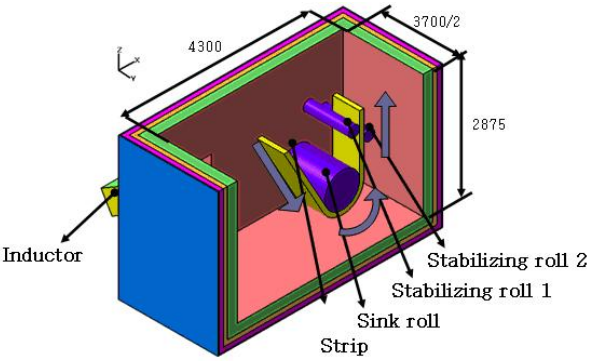

Fig. 1 Schematic diagram of a zinc bath. Front is the symmetry plane

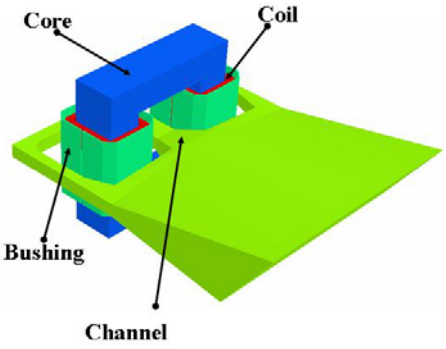

Fig. 2 Modeling of inductor channel

2. 계산과정

2.1 아연 욕과 인덕터 모델링

Fig.1 은 계산영역에 포함된 내화재, 아연 욕과 인덕터를 보여 주며 Fig.2 에 인덕터의 구조를 첨부하였다. 대칭을 고려 하여 전체의 1/2 만 택하였으며 싱크롤, 스터블라이징롤을 포함하였다. 아연욕의 전체 크기는 4300 x 3700 x 2875 mm 이며 스트립의 폭은 1253 mm, 속도는 180 m/min, 인덕터에는 2000A 의 전류를 인가하여 계산하였다.

2.2 수치해석

정상상태의 Navier -Stokes 방정식과 연속 방정식은 다음과 같다. 여기에 Boussinesq 항 M 과 자기장에 의한 로렌츠 힘 F 가 원천 항으로 첨가되었다.

$$\nabla \bullet \mathbf{u} = 0 \qquad (1)$$

$$(\nabla \bullet \mathbf{u})(\rho \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu_{eff} \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{M} + \mathbf{F} \quad (2)$$

난류 계산을 위하여 다음과 같이 $k-\varepsilon$ 난류 모델을 사용하였으며 방정식의 모든 상수는 난류 모델에서 일반적으로 사용하는 값들이다[5].

$$\rho \mathbf{u} \bullet \nabla k = \nabla \bullet \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k + G_k - \rho \varepsilon \qquad (3)$$

$$\rho \mathbf{u} \bullet \nabla \varepsilon = \nabla \bullet \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

열 계산을 위하여 에너지방정식을 유동방정식과 연계하여 계산하였다. 열 방정식에도 인덕터에서 생성된 에너지는 원천 항(S)으로 첨가되었다.

$$(\mathbf{u} \bullet \nabla)(\rho C_p T) = \nabla \bullet (\sigma_{th} \nabla T) + S \qquad (5)$$

로렌츠 힘은 유도전류 J 와 자기장 B 로부터 다음과 같이 계산된다.

Table 1 Thermo-physical properties of molten zinc

Density (kg/m^3)	6700
Viscosity (Pa.s)	0.004
Specific heat (J/kg.K)	512
Thermal conductivity (J/sec.m.c)	60
Melting temperature (°C)	420°C

Table 2 Thermo-physical properties of refractories

	Refractory 1	Refractory 2	Refractory 3
Thermal conductivity (w/m-k)	1.8356	0.1559	0.0711
Heat capacity (J/kg.K)	750	1300	100
Density (kg/ m^3)	2900	750	220
Thickness (mm)	220	100	100

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \qquad (6)$$

Table 1 과 Table 2 에는 계산에서 사용한 용융 아연과 내화재의 물리적 성질을 종합하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전자기장 계산

인덕터의 표면에서의 로렌츠 힘과 열 분포를 Fig.3 과 Fig.4 에 도시하였다. 로렌츠 힘의 방향은 채널의 외부로 향하며 로렌츠 힘과 열 모두 채널의 가운데 부분에서 가장 높은 값을 갖는다.

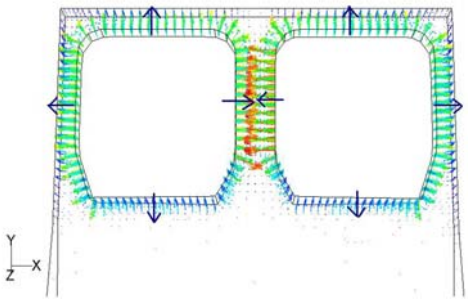

Fig. 3 Lorentz force vectors

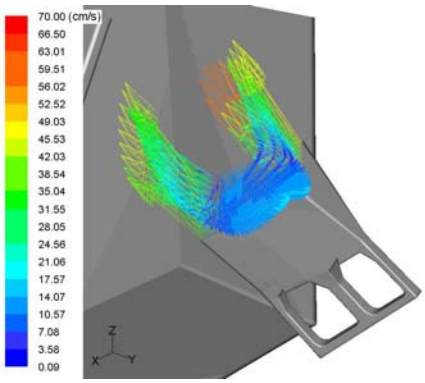

Fig.5 Outgoing and incoming flow vectors at interface of zinc bath and inductor

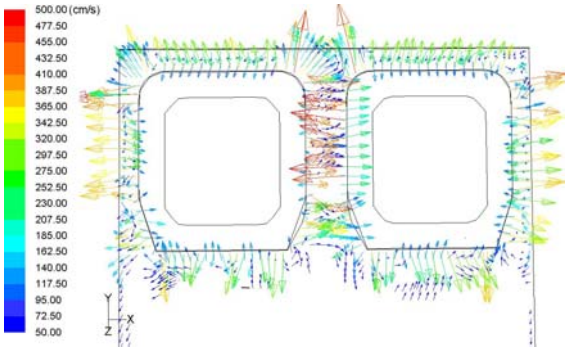

Fig.6 Flow vectors on channel center plane near inductor coil

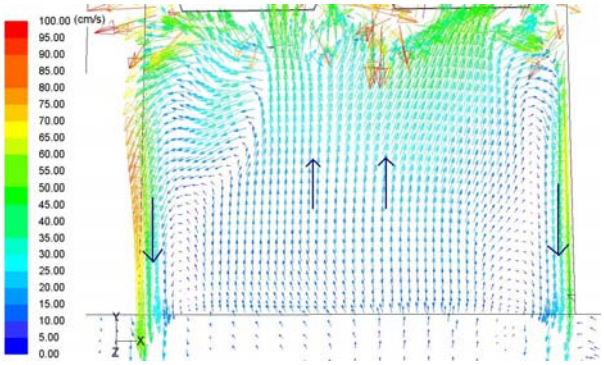

Fig.7 Flow vectors on channel center plane

3.2 유동구조

Fig.5 는 아연욕과 채널의 경계면에서 속도 벡터를 보이고 있다. 이곳의 유동은 채널의 양단에서

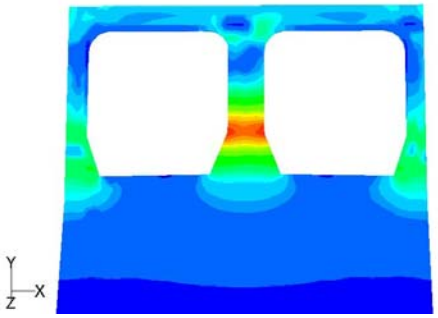

Fig.4 Energy contours

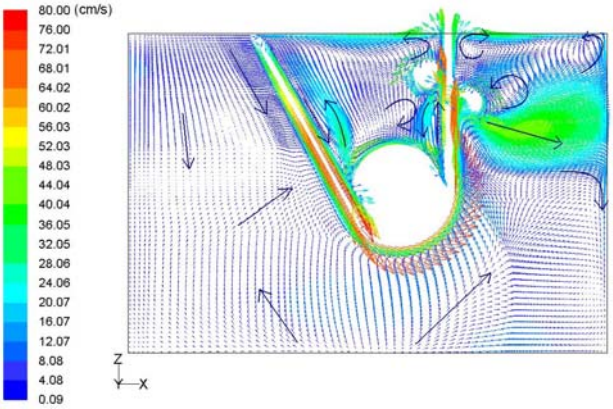

Fig.8 Flow vectors on symmetry plane

아연욕으로 향하고 채널의 중심부에서는 아연욕에서 채널로 유입됨을 보인다. Fig.6 은 채널의 중심면에서의 속도 벡터를 보이는데 유동의 속도는 최고 500cm/s 로 속도가 크고 일반 예측과는 달리 방향이 일정하지 않다. Fig.7 은 채널 내에서의 속도를 중심 면에서 보이는 데 채널 양단에서 아연욕으로 향하는 유동과 가운데서 들어오는 유동을 확실히 알 수 있다.

Fig.8 은 아연욕에서 대칭면의 유동이다. 스트링 사이의 내부는 싱크롤, 스터블라이징롤과 스트링의 이동으로 인하여 4 개의 회전유동이 존재한다[(3),(6)]. 스트링 외부 유동은 스트링을 따라 이동하는 유동이 스터블라이징롤 2 에 의해 분리된 후 아연욕 외벽에 충돌하여 두 방향으로 나뉜다. 상승하는 유동은 반 시계방향의 회전유동을 만들고 하강하는 유동은 외벽을 따라 아연욕 바닥으로 이동한다. 이 때 상승하여 반 시계방향으로 회전하는 유동은 스트링을 향하여 드로스를 이동시킬 것으로 예상된다[(1)]. 스트링 외부구역의 하부 유동은 싱크롤 밑에서 좌우로 갈라지며 상승한다. 대칭면의 왼쪽은 채널에서 대칭면을 향하여 토출되는 유동의 영향을 받고, 스트링 내부는 인덕터의 영향이 크게 미치지 않는다. 전체적인 속도 분포를 Fig.9 와 Fig.10 에 도시하였다. 비교적 낮은 속도(0~10cm/s)와 높은 속도(10~375cm/s)를 분리하여

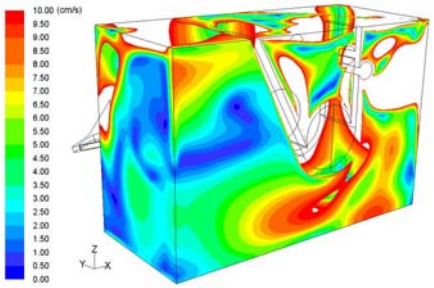

Fig.9 Regions with flow less than 10cm/s

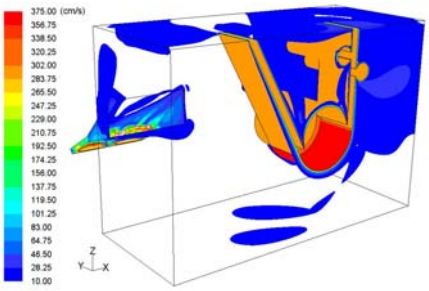

Fig.10 Regions with flow greater than 10 cm/s

표시하였는데 David J.Willis[2] 등의 논문과 유사한 분포를 보인다. 유체의 대부분은 비교적 낮은 속도인 0~10 cm/s 의 영역에 속해 있으며 스트릮 속도 (300cm/s)의 약 3~4% 의 값을 가진다. 스트립 근처와 채널 부분의 유동은 10~375cm/s 에 속해 있다. 스트릮, 싱크롤, 스터블라이징롤과 맞닿아 있는 부분은 스트릮 속도와 유사하다. Fig.11 은 아연욕의 바닥과 후면의 유동을 보여준다. 채널이 부착된 후면벽에서는 약 40-45 cm/s의 속도로 채널 양쪽으로 토출 되는 유동이 발생하고 후면의 좌측 하부에서 상승하고 우측 하부에서는 하강한다. 우측 하부에서 하강한 유동은 저면의 우측에서 반시계방향으로 회전하는 유동을 발생시켰다. 이는

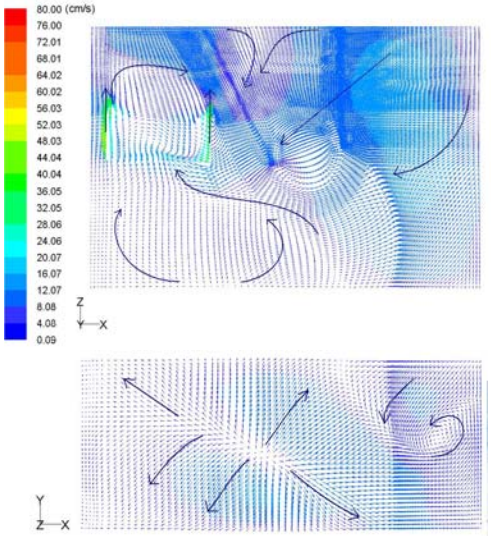

Fig.11 Flow vectors on the rear wall and bottom plane

드로스 부상에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 저면의 중앙 부분은 후면과 대칭면을 향하여 갈라지고 후면과 대칭면을 따라 상승한다. Fig.12 는 아연욕 상부면 유동인데 아연욕의 양단 옆면을 따라 상승한 유동은 중심부를 향한다. 상부면의 오른쪽은 중심부를 향하는 유동과 아연욕에서 빠져나가는 스트릮에 의한 유동이 충돌하여 중심부로 향하는 유동의 진행을 방해한다. 상부면의 중심부는 유동속도가 낮다. Fig.13 은 채널의 우측 단면에서 토출 하는 유동의 속도 벡터이다. 채널에서 상부를 향하여 토출 하지만 아연욕 내로 들어오는 스트릮의 영향으로 상부면까지 상승하지 못한다. 채널중앙 단면의 속도 벡터는 Fig.14 와 같이 유동은 채널 내부로 유입되고 이 단면의 유동은 스트릮의 영향이 크게 나타나지 않는다. 채널 좌측 단면을 나타낸 Fig.15 도 스트릮의 영향을 받지 않아 우측 단면과 달리 토출된 유동은 상부면까지 도달하였다.

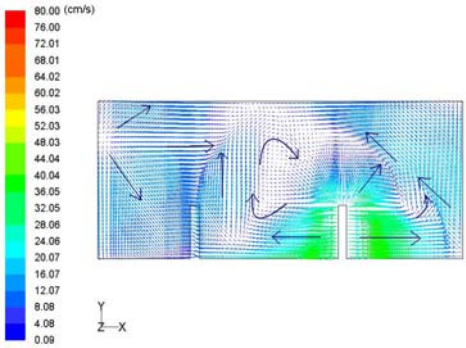

Fig.12 Flow vectors on top surface

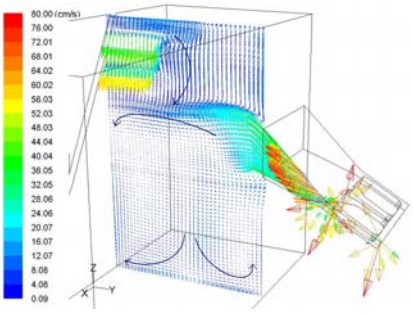

Fig.13 Flow vectors on a plane vertically cut as shown

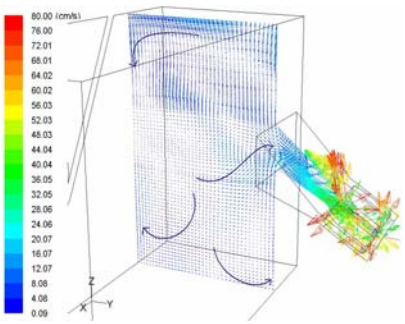

Fig.14 Flow vectors on a plane vertically center cut at inductor

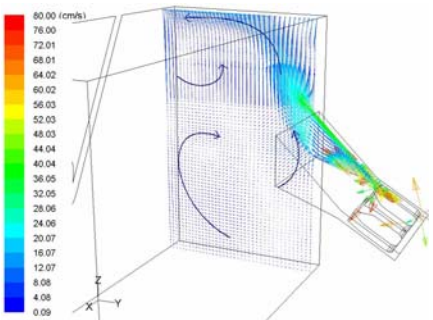

Fig.15 Flow vectors on a plane vertically cut as shown

3.3 온도분포

아연욕 내의 온도분포는 속도 벡터와 밀접한 관계가 있다. Fig.16 은 대칭면의 온도분포를 보여주는데 458-459℃ 사이에 분포하고 있다. 스트립 내부구역의 용융아연 온도는 주위 보다 낮은데 이것은 인덕터를 통과하여 나오는 고온의 유동이 스트립 내부로의 이동을 스트립이 방해하여 열 전달이 이루어지지 않았기 때문이다. 또 외부구역에 위치한 스터블라이징롤 1 근처 부분도 회전유동이 온도가 낮아진 아연욕 표면의 영향을 받아 온도가 저하하였다. 아연욕 내 온도분포는 인덕터의 영향을 크게 받아 싱크롤을 중심으로 볼 때 오른쪽보다 인덕터가 설치된 왼쪽이 온도가 높게 분포하였다. Fig.17 은 인덕터가 설치된 후면과 저면의 온도분포이다. 후면은 최고온도 459.2℃, 최저온도 457.6℃로서 온도 구배가 가장 큰 반면 저면은 큰 온도편차 없이 거의 일정한 온도를 유지한다. 상부 표면의 온도는 Fig.18 과 같다. 같은 면의 속도 벡터를 나타낸 Fig.12 와 비교하면 유동이 거의 정체되어 있는 부분은 저온의 분포를 보이며 상부면의 왼쪽은 채널에서 토출 후 상승한 유동 때문에 온도가 가장 높다. Fig.19, Fig.20, Fig.21 은 채널 우측, 중앙, 좌측 단면의 온도분포이다. 채널에서 토출한 고온의 유동 때문에 채널을 기준으로 아연욕 상부가 하부보다 고온 중심이고 온도가 낮은 하부 중에서도 후면 쪽에서 더욱 낮은 온도분포가 나타났다. Fig.19 의 상부면 근처에서 온도가 국부적으로 낮게 나온 이유는 이 부분이 스트립 내부구역이기 때문이다. Fig.22 와 Fig.23 은 내화재의 온도분포와 아연욕 가장 외부에 설치된 강판 표면의 온도분포이다. Fig.23 의 강판 표면을 보면 인덕터가 부착된 부분의 온도가 예상대로 가장 높게

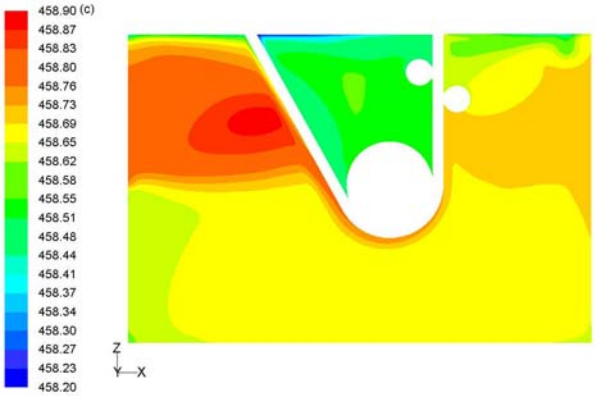

Fig.16 Temperature contours on symmetry plane

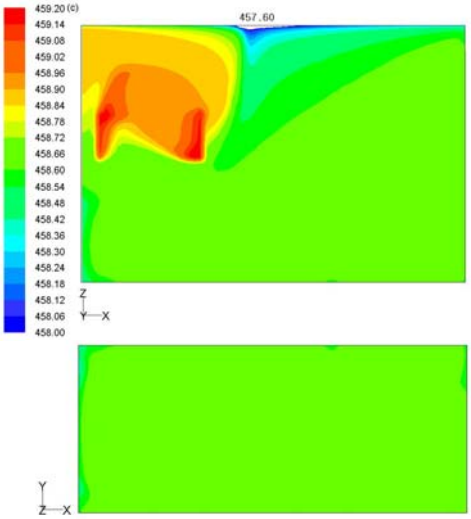

Fig.17 Temperature contours on the rear wall and bottom plane

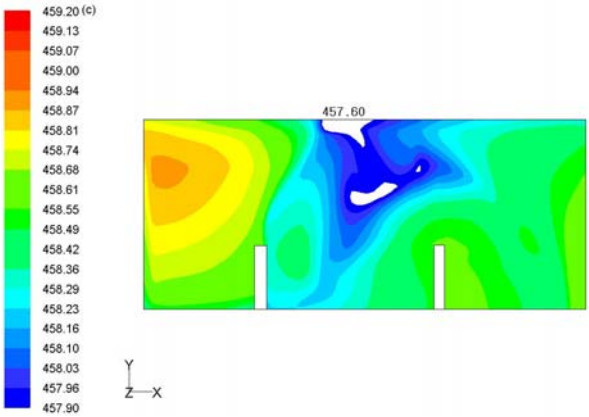

Fig.18 Temperature contours on top surface

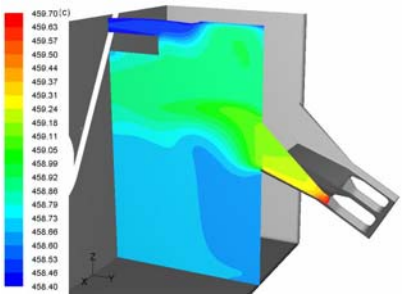

Fig.19 Temperature contours on the same plane of Fig. 13

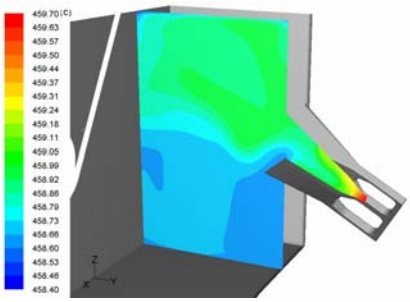

Fig.20 Temperature contours on the same plane of Fig. 14

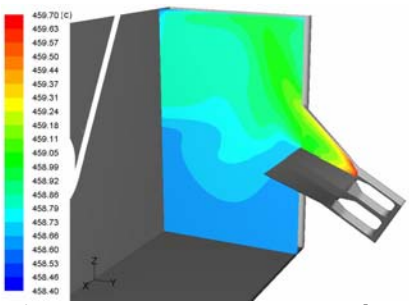

Fig.21 Temperature contours on the same plane of Fig. 15

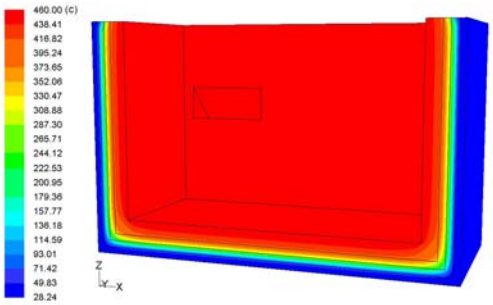

Fig.22 Temperature contours of refractories

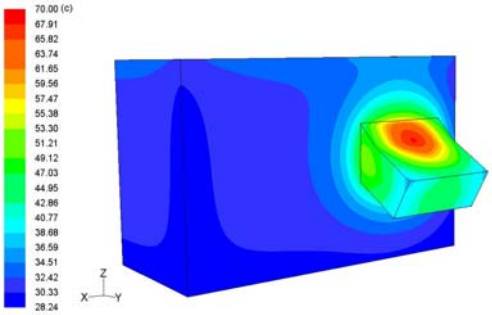

Fig.23 Temperature contours on steel plate

분포 되어있고 그 온도는 최고 70℃에서 40℃사이의 분포를 나타내었다. 인덕터가 부착된 곳을 제외한 나머지 부분은 약 30℃이다.

4. 결 론

스트립과 싱크롤, 스터블라이징롤을 포함하여 연속용융아연도금 공정에서 사용되는 실제 아연욕 크기와 같은 크기로 모델링하여 교류 전류 하에 자기장을 계산한 후 유동 방정식과 열 방정식을 풀어 다음과 같은 결론을 구하였다.

- 채널을 제외한 아연욕 내 최고, 최저 온도는 459.36℃, 457.73℃ 이다.
- 채널 내의 유동은 인덕터 중심부에서 아연욕에서 채널 내부로 이동하고 좌우 양단에서 아연욕 내로 이동 한다.
- 스트립 내부구역은 인덕터의 영향이 미치지 못하여 아연욕에서 비교적 낮은 온도가 분포하며 스트립 외부구역의 왼쪽 (스트립 입구쪽) 유동은 인덕터에 의한 유동의 영향을 받는다.
- 스트립 외부구역 중 아연욕의 표면을 제외하고 상부보다 하부의 온도가 낮고, 그 중 후면 부근이 온도가 낮았다.
- 본 연구의 유동과 온도분포 계산은 아연 도금욕의 최적 형상 설계를 위한 기본 자료로 추후 사용될 수 있다.

후 기

본 연구에 연구비를 지원해 준 포스코건설에 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Sang Joon Lee, Seok Kim, Min Seok Koh and Jae Ho Choi, 2002, “Flow Field Analysis inside a Molten Zn pot of the Continuous Hot-dip Galvanizing Process”, *ISIJ International*, Vol. 42, No.4, pp.407-413

(2) David J.Willis, Florin Ilinca, Frank Ajersch, 2004, “Fluid Flow Modeling in a 55%Al-Zn pot”, *Galvatech Conference Proceedings*, pp.905-916

(3) Yong Hee Kim, Yong Whan Cho, Soon–Hyo Chung, Jae-Dong Shim and Hyung Yong Ra, 2000, “Numerical Analysis of Fluid Flow and Heat Transfer in Molten Zinc Pot Continuous Hot-dip Galvanizing Line”, *ISIJ International*, Vol. 40, No.7, pp.706-712

(4) Eric Baril, Michael Gaug, Joseph R. McDermid, 2004, “Transient Flow Pattern and Temperature Distribution in a Continuous Galvanizng Bath Resulting from the Operation of Heating Inductors”, *Galvatech Conference Proceedings*, pp.927-936

(5) B. E. Launder and D. B. Spalding., 1974, “The Numerical Computation of Turbulent Flows”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, pp.269-289

(6) L.Ouellet, F. Ajersch, F. Ilinca, 2004, “Numerical Simulation and Validation of Flow in a Galvanizing Bath using a Water Model”, *Galvatech Conference Proceedings*, pp.917-926