

열 유동 현상을 고려한 마그네슘 용탕 직접 압연공정 해석

배정운*(부산대 대학원 정밀기계공학과), 강충길(부산대 기계공학과), 강석봉(한국기계연구원)

Analysis of the Molten Metal Direct Rolling for Magnesium Considering Thermal Flow Phenomena

J. W. Bae* (Dep. Mech. & Pre. Eng., PNU), C. G. Kang (Mechanical Eng. Dept., PNU), S. B. Kang (KIMM)

ABSTRACT

The proper parameters in a twin roll strip casting are important to obtain the stabilization of the Mg sheet. What is examined in this paper is the quantitative relationships of the important control parameters such as the roll speed, height of pool region, outlet size of nozzle, solidification profile and the final point of solidification in a twin roll strip casting. Unsteady conservation equations were used for transport phenomena in the pool region of a twin roll strip casting in order to predict a velocity, temperature distributions of fields and a solidification process of molten magnesium. The energy equation of cooling roll is solved simultaneously with the conservation equations of molten magnesium in order to consider the heat transfer through the cooling roll. The finite difference method (2-D) and the finite element method (2-D) are used in the analysis of pool region and cooling roll to reduce computing time and to improve the accuracy of calculation respectively.

Key Words : Thermo-fluid analysis(열유동 해석), Twin roll strip casting(쌍롤 박판 주조), Solidification final point(응고 완료점), Solidified shell(응고 셸)

기호설명

h	heat-transfer coefficient
H_p	pool depth
k	thermal conductivity
S_ϕ	source term for general variable ϕ
T	temperature
u, v	x, y-directional velocity
x, y	x, y-directional coordinate defined in the physical space
x_0, y_0	x, y-directional system of the center of the cooling roll
Γ_ϕ	diffusivity for general variable ϕ
η, ξ	η, ξ -direction coordinate defined in the computational space
ρ	density
ϕ	general variable
ω	angular velocity
rs	roll surface contacting the pool
w	cooling water

1. 서론

최근 자동차 산업기술과 항공 산업기술이 급속도로 발전함에 따라 강도는 높고 중량은 가벼운 소재의 요구가 커지고 있다. 마그네슘은 경량신소재로서 철강소재 대비 22%, 알루미늄 소재 대비 66%의 밀도를 가지고 있으며, 피로강도가 알루미늄합금보다 높고, 차폐 능력이 우수하여 항공기 및 자동차용 구조재료로서 최적의 조건을 갖추고 있다. 무엇보다도 합금으로 사용할 경우 비강도성은 지금까지 개발된 어떠한 소재보다 높고, 재활용성이 높아 현재 중요시 되고 있는 환경 보전에도 탁월하다 [1].

자동차 산업에서는 연비향상 및 공해감소 등의 요구에 의해 경량화의 필요성이 증가하여 철과 알루미늄을 마그네슘 합금으로 대체하려 한다. 일부의 부품은 이미 마그네슘합금으로 만들어 사용하고 있다. 하지만 마그네슘합금의 가장 큰 문제점은 생산비용이 높다는 것이다. 이러한 문제점을 해결하

기 위한 한 방안으로 고품질의 판재합금을 경제적으로 생산할 수 있는 쌍롤 주조 공정(Twin-roll strip casting)이 대두되고 있다.

쌍롤 주조 공정은 1856 년에 Henry Bessemer 이 용강으로부터 직접 박판제조를 시행한 이후로, 공정의 많은 장점 때문에 최근 40 여년 동안 그 중요성이 점점 커져 왔다. 쌍롤 공정의 가장 큰 장점은 용탕으로부터 두 개의 냉각 롤 물드를 이용하여 직접 두께가 얇은 판재를 제조할 수 있으므로, 압연 공정의 생략이 가능하여 설비의 간소화 및 가공 시간을 단축시켜 판재를 경제적으로 생산할 수 있는 것이다. Takuda[3] 등은 마그네슘합금 판재의 성형성과 연성 파괴성을 조사하였으며, Kang[4], Haga[5] 등은 알루미늄의 반용융 쌍롤 주조 공정의 효과에 대하여 설명하였다. 하지만 아직 마그네슘합금에 대한 쌍롤 주조 공정의 공정 변수를 제어하기 위한 기초적 데이터는 부족한 실정이다. 따라서 실험 및 이론적 연구를 통하여 제조 공정 시 문제점의 예측과 쌍롤 장치의 설계를 위한 기초적 데이터의 확립이 필요하다.

본 연구에서는 용탕부의 응고 해석에 있어서 일반화 좌표를 사용하는 유한 차분법(FDM)의 수치적 해석에 의해 직접 압연 재료인 마그네슘 소재의 쌍롤 주조 공정에 있어서 롤 속도와 용탕의 높이에 따른 용탕부의 속도장과 온도 분포를 구하고, 그에 따른 영향을 해석하고자 한다.

2. 기초 방정식

직접 압연 공정은 회전하는 냉각 롤 사이에 노즐을 통하여 용탕을 주입하면 롤 표면에 응고 셸(solidified shell)이 형성된다. 성형 공정은 두 개의 응고 셸이 만나는 응고 완료점(solidification final point)으로부터 롤의 회전에 의해 압연되어 판재로 제조되어지기 때문에 응고 완료점은 판재 성형을 좌우하는 중요한 공정 변수가 된다. 응고 완료점이 롤 출구로부터 너무 상단에 위치하면 압연율이 커지게 되어 판재 성형이 불가능하게 되어 공정의 정지를 야기시키거나, 과대 압하력이 작용하여 롤이 변형되어 폭 방향으로 판재 두께가 불균일하게 될 수 있다. 또한, 응고 완료점이 롤 출구보다 하단에 생기면 두 개의 응고 셸이 결합되지 못하여 용융 상태로 물을 빠져나오게 되므로 조업에 위험이 따르게 된다. 따라서, 판재 성형에 결정적으로 영향을 미치는 응고 완료점이 롤 속도, 용탕의 높이, 용탕 주입 온도 등의 함수로 표현되어야 용탕으로부터 연속적으로 판재를 성형할 수 있는 공정 변수들을 결정할 수 있다.

일반화좌표계에 있어서 운동방정식 및 열평형방

정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \left[\frac{1}{J} (\rho \phi) \right] - \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{1}{J} \left(\rho G_{\xi} - \Gamma_{\phi} g_{11} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{1}{J} \left(\rho G_{\eta} - \Gamma_{\phi} g_{22} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right) \right] \quad (1)$$

$$= \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{1}{J} \left(\Gamma_{\phi} g_{12} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{1}{J} \left(\Gamma_{\phi} g_{12} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right) \right] + \frac{S_{\phi}}{J}$$

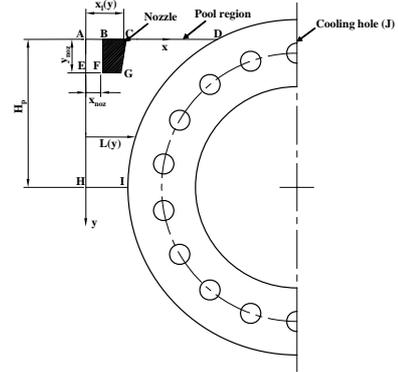


Fig. 1 Coordinate system and boundary conditions for analysis

3. 경계조건

Fig. 1 은 해석 모델과 용탕부의 응고 해석을 위한 경계조건을 표시하고 있다. 각 구간에 대한 경계조건은 다음과 같다.

Symmetric plane $\overline{[AH]}$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

Nozzle

$$u = 0, \quad v = v_{inlet}, \quad T = T_{inlet} \quad \text{at } \overline{AB}$$

$$u = v = 0, \quad T = T_{inlet} \quad \text{at } \overline{FG}, \overline{CG} \text{ and } \overline{BF} \quad (3)$$

Pool surface $\overline{[CD]}$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad v = 0, \quad T = T_{inlet} \quad (4)$$

Contact region between the pool region and the cooling roll $\overline{[DI]}$

$$u = (y - y_o) \omega, \quad v = -(x - x_o) \omega,$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{con} (T - T_{rs}) \quad (5)$$

Roll exit $\overline{[HI]}$

$$u = 0, \quad v = v_{exit}, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

Cooling hole $\overline{[J]}$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_w (T - T_w) \quad (7)$$

롤과 응고셀의 접촉하는 면은 연속적이 아니므로 열저항이 존재한다. 일반적으로 접촉면의 열저항에 대하여 대류경계로 취급하여 해석을 행한다. 실제 실험이나 조업에 있어서 이 부분의 열전달계수를 구하는 것이 극히 어렵다. 또한 접촉면에서 열전달계수는 응고셀의 고상율, 롤 재질 및 압하력의 변화에 따라 변화하게 된다. 실제 직접 압연에 있어서는 응고 완료점 이후 압하력의 작용으로 응고셀과 롤이 더 밀착을 하여 열저항이 감소하기 때문에 열전달 계수가 커지게 된다. 하지만 응고 완료점 이후 압연 영역은 미소하므로 일반적으로 탕면으로부터 롤 출구까지 용탕과 롤이 접촉하는 면에서 열전달계수는 $h_{cont}=20000W/m^2K$ 로 일정하다고 가정하고 사용하였다[7]. 용탕의 속도장은 Miyazawa[8]가 제안한 속도계산식을 사용하여 각 절점의 x와 y방향의 속도 성분을 계산하였다.

4. 해석 모델 및 방법

직접 압연 공정에 있어서 용탕부의 응고 해석을 위하여 일반화 좌표를 사용하는 유한 차분법(FDM)으로 해석을 수행하였다. 유한 차분법은 열전달 문제에서 주로 쓰이고 있는 해석법으로써 해석 결과가 비교적 정확한 것으로 알려져 있으나, 반면 해석 모델의 형상이 복잡한 경우에는 적용이 불가능한 단점이 있다.

용탕부는 40(x 방향) X 91(y 방향)의 격자점을 사용하였고, 롤은 절점수 5194 개, 요소수 4770 개로 분할하였다. 롤의 회전을 고려하기 위하여 시간 증분에 따라 롤의 원주 방향으로 분할결과 중 한 격자씩 경계를 이동시켰다.

Table 1 에 Twin Roll 캐스팅 재료인 AZ91 의 물성치를 나타내었고, Table 2 에는 쌍롤 박판 주조 공정 시 AZ91 소재의 해석 조건을 나타내었다.

Table 1 Properties of direct rolling material

Property	Symbol	Unit	AZ91
Density	ρ	kg/m ³	1810
Specific heat	C_p	J/kgK	1050
Conduction coefficient	K_p	W/mK	72
Liquidus temperature	T_L	°C	598
Solidus temperature	T_S	°C	468
Pouring temperature	T_p	°C	613
Viscosity	μ	Pa-sec	0.00164

Table 2 Calculation conditions for the direct rolling material

Property	Symbol	Unit	AZ91
Casting speed	V	m/min	3, 5, 8
Height of Pool region	H	mm	75, 96, 115
Roll diameter	2R _o	mm	300
Roll shaft diameter	2R _s	mm	224
Roll nip gap	2H _o	mm	3.2
Cooling hole	D _h	mm	φ 8 x 53
Center of cooling hole from roll center	R _c	mm	135
Nozzle size exit	x _{noz}	mm	1, 2, 3
Pouring temperature	T _p	°C	613

5. 해석 결과

Fig. 2 에 직접 압연 재료인 AZ91 에 용탕(613 °C)을 주입하여 용탕 높이 75 mm 에 따른 롤의 회전 속도(3 m/min, 5 m/min, 8 m/min)에 따라 응고셀의 온도가 정상 상태에 도달하는 10 회전 시의 온도분포와 용탕의 속도장을 나타내었다. 고상선온도의 등온선을 응고셀로 가정할 때 응고셀은 롤 표면과 접하는 부근에서 얇게 성장하다 롤 회전에 의해 두 개의 롤 표면의 응고셀이 만나는 응고 완료점 이후에 압연되어 판재로 제조됨을 확인할 수 있었다. 또한, 냉각물의 회전속도를 증가시킬 시 냉각물과 용탕이 접하는 시간이 짧아지므로 용탕으로부터 전열되는 열량이 감소하고 응고점은 출구 쪽으로 점점 이동함을 확인할 수 있다. 속도장 부분에서는 응고 완료점 근처에서는 단면이 좁아짐에 따라 변형 저항이 적은 용융 상태의 소재가 압연 방향과 반대 방향으로 되돌아 올라감을 알 수 있다. 압연 방향과 반대 방향으로 유동한 용탕은 탕면 부근에서 롤 쪽으로 유동하여 응고가 되며, 응고셀은 롤 회전에 의해 롤 출구쪽으로 이동함을 알 수 있다. 와류의 형상은 용탕의 온도분포와 비교해 볼 때 그 형상이 비슷하며, 와류가 형성되는 부분에 용탕의 온도가 급격하게 변함을 알 수 있다. 따라서, 직접 압연 시 와류의 위치 및 크기 제어는 냉각속도의 차이로 인한 판재의 기계적 성질에 중요한 영향을 미칠 것으로 생각된다. 롤 표면에 보이는 용탕의 와류는 롤 표면에 응고셀이 형성됨으로 인한 것으로 볼 수 있다.

Fig. 3 에 노즐 폭에 따른 용탕의 속도장을 나타내었다. 노즐 폭이 클수록 용탕부분의 와류가 크게 형성되어 온도가 급격히 감소함을 알 수 있다. 따라서, 응고 완료점의 위치는 올라감을 확인할 수 있다.

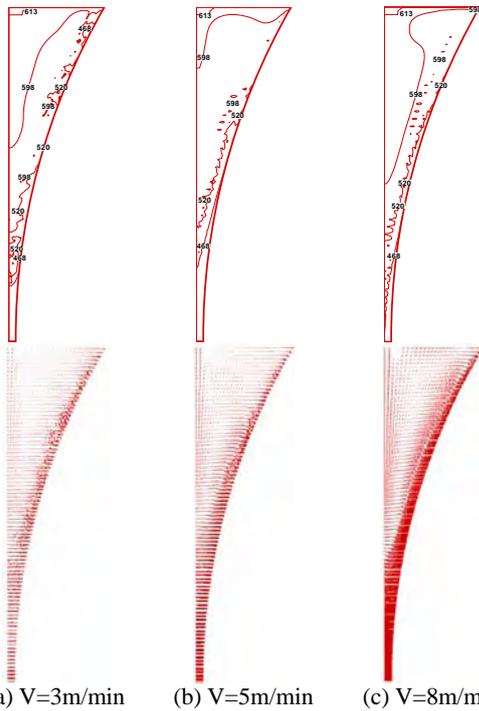


Fig. 2 Temperature distributions and flow patterns according to roll velocity in the pool region (Pool depth: 75mm)

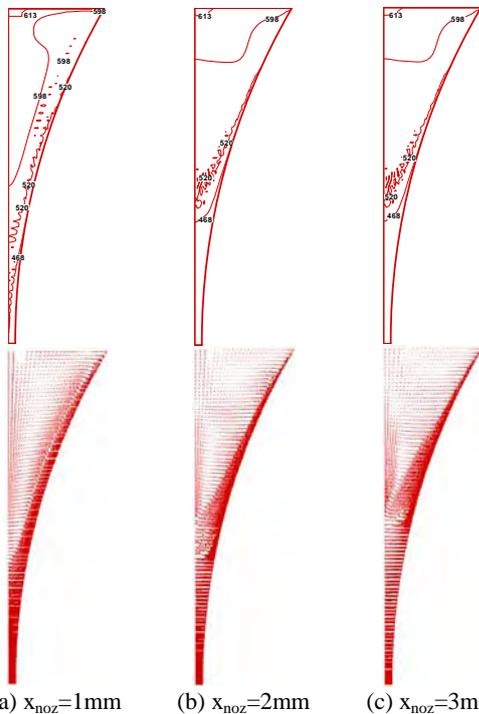


Fig. 3 Temperature distributions and flow patterns according to nozzle size in the pool region (Pool depth: 75mm, V= 8m/min)

6. 결론

직접 압연 공정에 있어서 유한 차분법의 수치해석에 의한 롤의 회전 속도, 용탕의 높이, 노즐의 폭을 고려하여 용탕부의 응고 해석과 속도장 해석으로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 용탕부의 응고 해석을 통하여 롤의 회전 속도와 용탕부의 높이 노즐 출구 폭에 따른 응고 완료점의 위치를 정량적으로 구할 수 있었다.
2. 롤 표면에 응고되어 생성되는 응고층의 두께는 롤 회전 속도에 의존하여 형성된다.
3. 용탕의 직접 압연 공정에 있어서 용탕내에서 생성되는 와류의 크기와 위치를 구하여, 용탕내의 냉각 속도와의 관계를 구할 수 있었다.
4. 용탕의 직접 압연 공정의 공정변수들은 어느 하나의 공정변수에 크게 의존하지 않으나, 경제성 등을 고려하여 볼 때, 롤 속도를 빠르게 하여 그에 맞는 용탕 높이를 제어하는 것이 가장 바람직하다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원(KIMM) 고성능 환경친화형 구조용 재료기술 개발 (과제번호 10020072) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. H. Watari and H. Ona, "Cold roll forming of small diameter pipes with pre-notches", J. Mater. Process Tech., Vol. 119, pp. 122 – 126, 2001.
2. H. Takuda, H. Fujimoto, et al., J. Mater. Process Tech. Vol. 80/81, pp. 513-516, 1998.
3. G. Kang, H. K. Jung, et al., "Thixoforming of an aluminum component with a die designed by process simulation", J. Mater. Process Tech., Vol. 11, pp.37-41, 2001.
4. T. Haga and P. Kapranos, "Billetless simple thixoforming process", J. Mater. Process Tech. Vol. 130/131, pp. 581-586, 2002.
5. Bennon, W.D. and Incropera, "Numerical Analysis of Binary Solid-liquid Phase Changing using a Continuum Model", Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol.13, pp. 277-296, 1987.
6. H. Sanari and T. Inoue, Trans. Jap. Soc. Mech. Eng., Vol. 56 (52), pp. 990-996, 1990
7. Miyazawa, K. and Szekely J., "A Mathematical Model of the Splat Cooling Process Using the Twin Roll Technique", Metal. Trans., Vol. 12A, pp. 1047, 1981.