[논 문] 한국재료학회지
Korean J. Mater. Res.
Vol. 32, No. 9 (2022)

https://doi.org/10.3740/MRSK.2022.32.9.391

전열응고해석법을 이용한 마그네슘합금의 열전달계수 및 롤의 온도변화 측정

한창석† · 이찬우
호서대학교 자동차ICT공학과

Measurement of Heat Transfer Coefficient of Magnesium Alloy and Temperature Change of Roll using Heat Transfer Solidification Analysis Method

Chang-Suk Han† and Chan-Woo Lee
Dept. of ICT Automotive Engineering, Hoseo University,
201, Sandan7-ro, Seongmun-myeon, Dangjin City, Chungnam 31702, Republic of Korea

(Received June 29, 2022 : Revised June 29, 2022 : Accepted September 16, 2022)

Abstract Research is being actively conducted on the continuous thin plate casting method, which is used to manufacture magnesium alloy plate for plastic processing. This study applied a heat transfer solidification analysis method to the melt drag process. The heat transfer coefficient between the molten magnesium alloy metal and the roll in the thin plate manufacturing process using the melt drag method has not been clearly established until now, and the results were used to determine the temperature change. The estimated heat transfer coefficient for a roll speed of 30 m/min was 1.33×10^5 W/m^2·K, which was very large compared to the heat transfer coefficient used in the solidification analysis of general aluminum castings. The heat transfer coefficient between the molten metal and the roll estimated in the range of the roll speed of 5 to 90 m/min was 1.42×10^5 to 8.95×10^4 W/m^2·K. The cooling rate was calculated using a method based on the results of deriving the temperature change of the molten metal and the roll, using the estimated heat transfer coefficient. The DAS was estimated from the relationship between the cooling rate and DAS, and compared with the experimental value. When the magnesium alloy is manufactured by the melt drag method, the cooling rate of the thin plate is in the range of about 1.4×10^3 to 1.0×10^4 K/s.

Key words magnesium alloy, continuous thin plate casting method, melt drag method, heat transfer coefficient, cooling rate.

1. 서 론

소성가공용의 용도로서 마그네슘합금 판재를 제조하기 위한 박판 연속주조법의 연구가 활발히 진행되고 있다.[1-8] 최적의 박판제작 조건을 명확하게 하고, 또한 제조장비의 적절한 설계를 실시하기 위해서는 이론적 해석[9]이 가장 효과적이다.

저자들은 지금까지 용융드래그방법을 이용하여 마그네슘합금 박판제작에 관한 연구[10-12]를 수행하여 왔다. 본 연구에서는 용융드래그방법에 전열응고해석법[13,14]을 적용하여 지금까지 명확하게 정립되어 있지 않은 마그네슘합금의 용융드래그방법에 있어서 박판제작 과정의 용탕과 롤 사이의 열전달계수 및 이 결과를 이용하여 박판 및 롤의 온도변화를 조사하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1에 실험장비의 개요도 및 해석모델을 나타내었

†Corresponding author
E-Mail : hancs@hoseo.edu (C. -S. Han, Hoseo Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

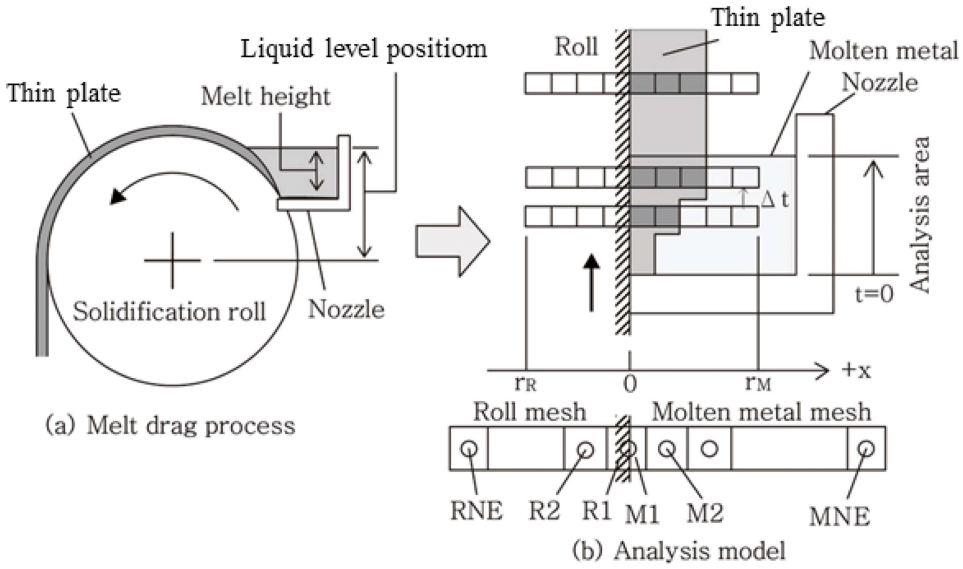

Fig. 1. The Schematic diagram and analysis model of experimental equipment on melt drag method.

Table 1. The experimental and analysis conditions.

Material	AZ31
Roll material	Cu
Roll speed (m/min)	5 ~ 90
Pouring temperature (°C)	780
Liquid level position (mm)	145
Melt height (mm)	25
Initial roll temperature (°C)	20
Molten metal analysis range (mm)	13.45
Molten metal nesh size (mm)	0.05
Roll analysis range (mm)	220
Roll mesh size (mm)	0.5

Table 2. The properties of rolls manufactured Cu and properties of AZ31 magnesium alloy.

	AZ31	Cu
Density (kg/m^3)	1780	8920
Specific heat (J/kg·K)	1050	385
Latent heat of metal (J/kg·K)	339	–
Thermal conductivity (solid) (W/m·K)	120	399
(liquid) (W/m·K)	76	–
Liquidus line temperature (°C)	630	–
Solidus line temperature (°C)	575	–

으며, Table 1에는 실험조건과 해석조건을 나타내었다. 박판제작 실험은 이전에 보고한[12] 조건과 동일하며, 해석에 이용한 물성값[15]을 Table 2에 나타내었다. 일차원 비정상 열전도 방정식을 유한차분법(finite difference method)[9]을 이용하여 해를 구하였다. 아래에 본 해석에서 사용한 가정을 나타내었다.

1. 롤 면은 평평한 형상이다.
2. 열 이동은 롤의 반경 방향 (박판두께 방향)만 일차원이다.
3. 해석한 프로세스는 준정상상태이다.
4. 계산을 시작할 때의 용탕과 롤 면의 온도는 일정하다.
5. 어느 경계면에서도 미끄럼은 없다.
6. 롤의 물성값은 온도에 관계없이 일정하다.
7. 용탕의 반응고 영역에 대한 물성값은 지렛대법칙에 따른다.
8. 노즐 벽, 대기와의 접촉면은 단열로 되어 있다.
9. 해석은 Fig. 1과 같이 용탕과 롤이 접촉한 후 박판이 노즐을 나올 때까지로 한다.

해석에 사용한 기본식은 다음과 같이 일반적인 일차원 비정상 열전도식 이다.

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\lambda}{\rho Cp}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{1}$$

각 메시에 대한 기본식은

$$T_M = T_P \qquad (0 \le x \le r_{\max} : \text{초기 조건}) \tag{2}$$

$$T_R = T_A \qquad (x<0 : \text{초기 조건}) \tag{3}$$

$$\frac{\partial T_M}{\partial t}=\frac{\lambda_M}{\rho_M Cp_M}\frac{\partial^2 T_M}{\partial x^2} \qquad (0<x\le r_{\max}) \tag{4}$$

$$\frac{\partial T_R}{\partial t}=\frac{\lambda_R}{\rho_R Cp_R}\frac{\partial^2 T_R}{\partial x^2} \qquad (-r_R<x<0) \tag{5}$$

$$h(T_M-T_R)=\lambda_M\left(\frac{\partial T_M}{\partial x}\right) \quad (x=0 : \text{용탕쪽}) \tag{6}$$

$$h(T_R-T_M)=\lambda_R\left(\frac{\partial T_R}{\partial x}\right) \quad (x=0 : \text{롤쪽}) \tag{7}$$

그리고 응고잠열의 보정은 온도회복법[9]을 사용하였으며, 이 방법에서는 잠열 방출 대신에 고상율의 증가를 고려하여 고상율이 1이 되면 영역 V의 응고가 완료된 것으로 하였다.

$$\Delta g_S = \frac{Cp_M T_U}{L} \tag{8}$$

이와 같은 기본식을 양적해법 (explicit scheme)에 따라, 예를 들어 용탕온도의 유한차분법 식은

$$T_{iM}^{t+\Delta t} = T_{iM}^{t} + (T_{iM+1}^{t} - 2T_{iM}^{t} + T_{iM-1}^{t}) \frac{\lambda_M \Delta t}{\rho_M C_{PM} \Delta x^2} \tag{9}$$

시간차이 Δt는

$$\Delta t = \frac{\rho Cp \Delta x}{2(\frac{\lambda}{\Delta x} + h)} \alpha \tag{10}$$

으로 구하였으며, 본 해석에서는 시간차이 계수 α는 모두 0.2로 하였다. T : 온도, λ : 열전도율, ρ : 밀도, Cp : 비열, h : 용탕과 롤 사이의 열전달 계수, r : 롤 중심으로부터의 거리, T_P : 용탕의 초기 온도, T_A : 롤의 초기 온도, g_s : 고상율, T_U : 액상선으로부터의 하강온도, L : 응고잠열, 아래첨자 M은 용탕, R은 롤 이다.

3. 결과 및 고찰

롤과 용탕 사이의 열전달계수를 변화시켜 이것에 대응하는 박판두께를 산출하였다. Fig. 2에 각 롤 스피드에 대한 열전달계수와 박판두께와의 관계를 나타내었다. 실험값과 비교하여 각 실험조건에 대한 열전달계수를 예측하였다. Table 3에 예측한 롤 스피드와 열전달계수와의 관계를 나타내었다. 그리고 노즐 내의 용탕 롤과의 접촉시간과 열전달계수의 관계를 Fig. 3에 나타내었다.

롤 스피드 30 m/min에 대하여 예측한 열전달계수는 1.33×10^5 W/m$^2 \cdot$K으로 일반적인 알루미늄 주물의 응고해석에 이용되는 열전달계수에 비하여 매우 큰 값을 나타내었다. 참고문헌[16]에서 마그네슘합금의 쌍롤법의 해석에 이용하였던 열전달계수는 $4.2 \times 10^5 \sim 16.2 \times 10^4$ W/m$^2 \cdot$K으로, 본 연구에서 예측한 열전달계수는 참고문헌 값의 범위 안에 있다.

본 해석에서 예측한 열전달계수는 노즐 내의 용탕이 노즐에서 나올 때까지의 평균값으로, 예를 들면 롤 스피드 30 m/min에서는 용탕과 롤의 접촉시간이 1.15×10^{-1} s로 매우 짧은 시간이었기 때문이라고 판단된다. 용탕과 롤이 접촉하기 시작한 초기에서 열전달계수는 매우 큰 값을 나타내고 있지만 응고수축에 의한 박리가 발생하여 열전달계수는 급격하게 저하한다고 생각할 수 있지만, 롤 스피드 5~90 m/min인 범위에서 열전전달계수는 $1.42 \times 10^5 \sim 8.95 \times 10^4$ W/m^2·K로 차이는 작다.

그리고 예측한 열전달계수를 이용하여 본 해석범위에

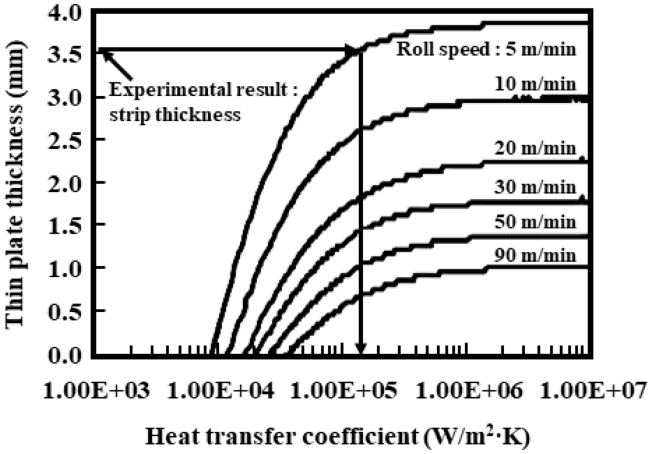

Fig. 2. Corresponding thin plate thickness result by changing the heat transfer coefficient between roll and molten metal (roll speed: 5 ~ 90 m/min).

Table 3. Relationship between estimated roll speed and heat transfer coefficient.

Roll speed (m/min)	Thin plate thickness (mm)	Contacting time (s)	Heat transfer coefficient (W/m^2·K)
5	3.53	6.92×10^{-1}	1.42×10^5
10	2.62	3.46	1.20
20	1.82	1.73	1.34
30	1.42	1.15	1.33
50	0.9	6.92×10^{-2}	9.40×10^4
90	0.53	3.85	8.95

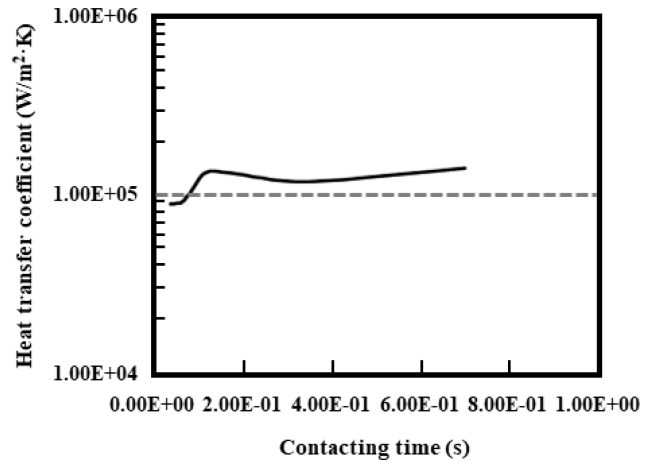

Fig. 3. The relationship between the contacting time of the molten metal in the nozzle with the roll and the heat transfer coefficient.

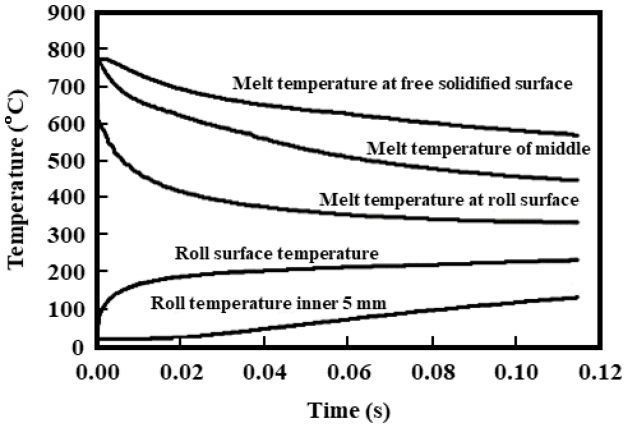

Fig. 4. Temperature change with the roll speed is 30 m/min.

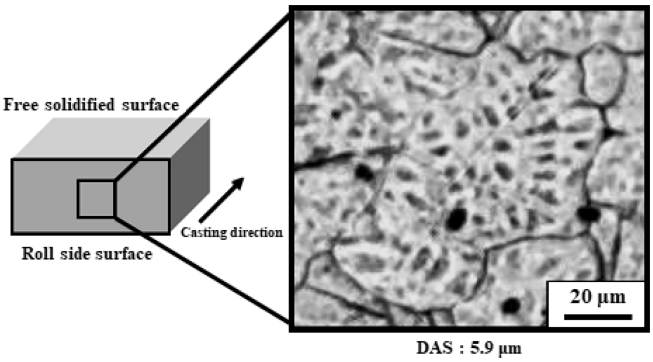

Fig. 5. Microstructure observation and DAS measurement result in the central part of the manufactured thin plate.

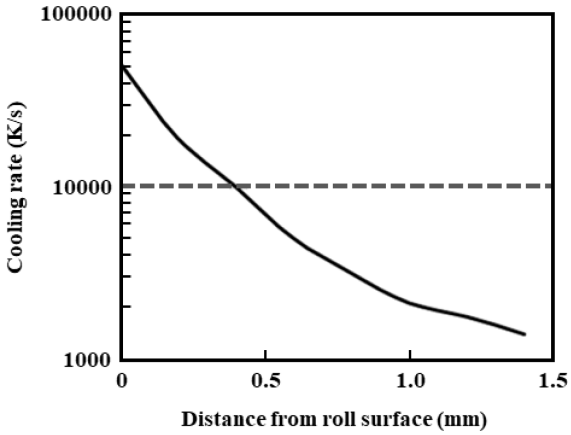

Fig. 6. The relationship between the distance from the roll surface and the cooling rate for the roll speed of 30 m/min.

대한 용탕(박판)과 롤의 온도변화를 도출하였다. 하나의 예로서 Fig. 4에 롤 스피드가 30 m/min일 때의 온도변화를 나타내었다. 그래프에는 5개의 곡선이 나타나있는데 위에서부터 순서대로 자유응고면(박판표면)에 해당하는 메시의 온도, 박판두께 중심부의 온도, 용탕의 롤 접촉면 쪽에 대한 온도, 롤의 표면온도, 롤 표면에서 내부로 5 mm 들어간 위치의 온도를 나타내는 것이다. 이 해석범위에서 용탕(박판)의 롤 접촉면에 대한 온도는 약 336 °C까지 냉각되었으며, 롤 표면온도는 약 235 °C까지 상승한 결과를 얻었다.

예측한 열전달계수를 입증하기 위하여 C_α법[17]을 이용하여 박판두께 중앙부의 냉각속도를 산출한 결과, 4107 K/s 이었다. DAS와 냉각속도의 관계식 (11)을 사용하여 DAS를 예측하였다.

$$\lambda_2 = 35.5\,R^{-0.31} \tag{11}$$

λ_2 : DAS (μm), R : 냉각속도 (K/s)

예측한 DAS는 약 2.6 μm이다. 비교를 하기 위하여 동일한 조건으로 제작한 박판의 두께방향 중앙부의 미세조직을 관찰하고, DAS를 측정하였다. 실험값으로서의 DAS는 약 5.9 μm (Fig. 5)이며, 특히 실험을 통하여 제작한 박판의 DAS 및 결정립 지름은 박판두께 방향에서 차이는 나타나지 않았다. 해석을 실시한 경우가 냉각속도가 더 빠른 결과를 얻었는데, 이 원인은 열전달계수를 일정하게 하였다는 점에 있다고 판단되며, 향후에는 시시각각으로 변화하는 열전달계수를 해석에 포함시킬 필요가 있다고 생각된다. 그리고 박판두께 방향의 각 메시에 대한 냉각속도를 산출하였다. 하나의 예를 들면, 롤 스피드가 30 m/min에 대한 롤 표면부터의 거리와 냉각속도와의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 롤 접촉면의 냉각속도는 매우 빠르지만, 마그네슘합금을 용융드래그방법으로 제작한 박판의 냉각속도는 약 $1.4 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^4$ K/s의 범위에 있다고 판단된다.

4. 결 론

용융드래그방법에 전열응고해석을 적용하여 마그네슘합금을 용융드래그방법으로 박판을 제작하는 과정에서 용탕과 롤 사이의 열전달계수와 박판 및 롤의 온도변화를 예측한 결과, 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

(1) 롤의 스피드가 5~90 m/min인 범위에서 예측한 용탕과 롤 사이의 열전달계수는 $1.42 \times 10^5 \sim 8.95 \times 10^4$ W/m^2·TTK 이었다.

(2) 예측한 열전달계수를 이용하여 용탕 (박판) 및 롤의 온도변화를 도출한 결과로부터 C_α법을 이용하여 냉각속도를 산출하고, 냉각속도와 DAS와의 관계식으로부터 DAS를 추정하여 실험값과 비교하였다. 마그네슘합금을 용융드래그방법으로 제작할 때 박판의 냉각속도는 약 $1.4 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^4$ K/s의 범위에 있다.

References

1. X. Dong, L. Feng, S. Wang, E. A. Nyberg and S. Ji, J. Magnesium Alloys, **9**, 90 (2021).
2. H. J. Sharahi, M. Pouranvari and M. Movahedi, Mater. Sci. Eng., A, **781**, 139249 (2020).
3. B. Xiao, G. L. Song, D. Zheng and F. Cao, Mater. Des., **194**, 108931 (2020).
4. K. Wang, J. Wang, X. Dou, Y. Huang, N. Hort, S. Gavras, S. Liu, Y. Cai, J. Wang and F. Pan, J. Mater. Sci. Technol., **52**, 72 (2020).
5. X. Chen, Y. Jia, Q. Liao, W. Jia, Q. Le, S. Ning and F. Yu, J. Alloys Compd., **774**, 710 (2019).
6. M. Okayasu and S. Takeuchi, Int. J. Metalcasting, **12**, 298 (2018).
7. T. Chen, Z. Chen, J. Shao, R. Wang, L. Mao and C. Liu, Mater. Des., **152**, 1 (2018).
8. J. Hu, J. Teng, X. Ji, D. Fu, W. Zhang and H. Zhang, Mater. Sci. Eng., A, **695**, 35 (2017).
9. H. Watari, S. Izawa, K. Davey, M. T. Rasgado and T. Haga, J. Mater. Proc. Technol., **155/156**, 1662 (2004).
10. C. S. Han and Y. J. Kwon, Korean J. Mater. Res., **31**, 511 (2021).
11. C. S. Han and Y. J. Kwon, Korean J. Mater. Res., **31**, 576 (2021).
12. C. S. Han and C. W. Lee, Korean J. Mater. Res., **32**, 326 (2022).
13. H. Watari, Y. Nishio, R. Nakamura, K. Davey and N. Koga, Adv. Mater. Res., **97/101**, 1077 (2010).
14. G. Kumar, S. Hegde and K. N. Prabhu, J. Mater. Proc. Technol., **182**, 152 (2007).
15. H. Wei, F. Hu and R. Guan, Special Casting & Nonferrous Alloys, **26**, 739 (2006).
16. J. H. Kuo, R. J. Weng and W. S. Hwang, Mater. Trans., **47**, 2547 (2006).
17. S. M. Liu, Z. Li and J. C. Li, Mater. Sci. Forum, **873**, 28 (2016).

<저자소개>

한창석
호서대학교 교수

이찬우
호서대학교 학생