

Planar Flow Casting의 퍼들 형성에 관한 수치해석

김영민* · 임익태** · 김우승†

(2001년 2월 5일 접수, 2001년 7월 25일 심사완료)

A Numerical Study of the Melt Puddle Formation in the Planar Flow Casting

Young Min Kim and Ik Tae Im and Woo-Seung Kim

Key Words: Planar Flow Casting(PFC), Rapid Solidification(급냉응고), Puddle Formation(퍼들 형성), Amorphous Alloy(비정질 합금), VOF Method(유체체적법)

Abstract

In the planar flow casting(PFC) process, the conditions of the melt puddle between nozzle and rotating wheel affect significantly the quality and dimensional uniformity of the downstream ribbon. For stable puddle formation, the nozzle is placed very close to the quenching wheel, so the surface-tension and wall-adhesion forces have an important effect upon the fluid flow. In this study the planar flow casting process has been modeled using the VOF method for free surface tracking. The transient puddle formation from the present analysis shows good agreements with the previous experimental results. Furthermore, the variation of melt temperature and the corresponding cooling rate of the melt have been examined. The present results also show how the melt puddle can be formed on the rotating substrate, how the melt flows within the puddle, and how the changes of the process variables affect the puddle formation and its corresponding fluid flow and heat transfer behavior.

1. 서론

액체금속을 구리판에서 급속응고(rapid solidification)시킬 경우 비정질 합금을 제조할 수 있음을 Klement⁽¹⁾ 등이 밝혔다. 급냉응고과정으로 생산된 비정질 합금은 연자성을 나타내며 매우 우수한 철손특성과 기계적, 자기적 특성이 있기 때문에 최근 이러한 비정질합금 스트립(strip)을 양산할 수 있는 기술에 많은 연구가 집중되고 있다. 이러한 스트립 형태의 최종생산물을 얻어내는 방법으로 단롤법(Single Roll Melt Spinning)이 많이 사용되는데 단롤법에는 Planar Flow Casting(PFC), Chill Block Melt Spinning(CBMS) 및 Melt Drag(MD)^(2, 3) 등이 있다.

CBMS공정은 Fig. 1(a)와 같이 냉각롤과 노즐 사이의 틈새(gap)를 충분히 떨어뜨린 상태에서 원형 노즐에 압력을 가하여 용탕을 냉각롤에 분사시켜 스트립을 제조하는 공정이다. 이 공정에서 생산되는 스트립은 폭이 노즐 지름의 2배 이상이 되면 퍼들(puddle)이 불안정하게되어 넓은 폭을 갖는 스트립을 생산할 수 없으며 실험실에서 재료 연구목적으로 소량생산에 사용되고 있을 뿐이다.

PFC공정은 직사각형의 노즐슬릿을 통하여 가압된 용탕을 판상(planar flow)형태로 냉각롤에 공

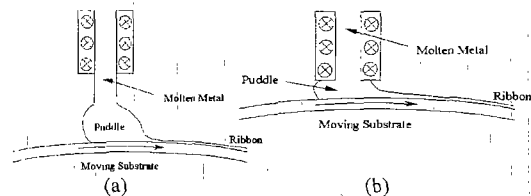


Fig. 1 Schematic diagrams of single roll melt spinning process. (a) CBMS, (b) PFC

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과
 ** 회원, 익산대학 자동차과
 † 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과
 E-mail : wskim@hanyang.ac.kr
 TEL : (031)400-5248 FAX : (031)418-0153

급하여 스트립을 제조하는 공정이다. 노즐슬릿에서 분사된 용탕은 높은 표면장력으로 인하여 어느 정도의 거리가 지나면 용탕의 면적을 최소화하려는 힘에 의하여 초기의 판상형태의 용탕이 원통형태로 바뀌게되기 때문에 용탕이 판상형태로 냉각물에 공급되기 위해서는 노즐 팁과 냉각물 사이가 매우 좁아야 한다. 따라서 Fig. 1(b)와 같이 냉각물과 노즐 간격을 좁게 하여 판상의 용탕 흐름을 유지한 상태에서 냉각물을 통하여 용탕을 응고시켜 스트립을 제조하게 된다. 용탕이 노즐과 휠 사이의 틈새에서 직사각형 형태로 기계적인 제한을 받으며 주조되는 공정이므로 CBMS 공정에 비해 스트립의 폭을 크게 늘릴 수 있어 300mm의 폭까지 균일한 스트립을 제조할 수 있다. 따라서 최근에는 여러가지 재료를 이용하여 연자성재료를 생산하는 방법으로 PFC공정에 의한 제조기술이 광범위하게 적용되고 있다.

PFC 공정에 대한 연구는 Bernoulli 방정식을 이용하여 노즐에서 유입되는 유량과 휠 속도 등에 의해 유출되는 유량의 균형을 통해 생산되는 스트립의 두께를 예측하고자 하는 연구와⁽⁴⁾ PFC공정에서 스트립이 형성되는 과정이 열적인 관점에서 의하여 지배되느냐 혹은 유체역학적인 관점에서 지배되느냐하는 분석방식을 통한 연구로⁽⁵⁾ 나눌 수 있다. 한편 최근에는 수치해석 방법을 적용하여 노즐에서 용탕이 분사되어 냉각물에 의해 퍼들이 형성되는 과정과 최종 정상상태의 퍼들 모양과 응고과정 등을 모델링 하고자 하는 노력이 이루어지고 있다.^(6~9)

PFC공정의 최대관건은 일정한 폭과 두께를 유지하며 우수한 품질의 연자성재료를 제조하는 것이다. 많은 연구자들이 PFC공정에 의해 좋은 품질의 연자성재료가 생산될 때는 노즐과 냉각물 사이에 안정된 퍼들이 형성된다고 보고하였다.^(10,11) 따라서 공정변수의 변화가 퍼들 안정성에 미치는 영향을 고찰하고자 하는 연구가 이루어지고 있다.

수치해석을 통한 퍼들 안정성에 대한 연구의 경우 Takeshita와 Shingu⁽⁶⁾는 초기에 냉각물과 노즐 사이에 용융금속이 채워져 있다고 가정하여 수치해석을 하였기 때문에 실제 공정과 차이를 보였으며 Wu⁽⁷⁾ 등은 노즐에서 용융금속이 유입되는 순간부터를 모델링 하였으나 표면장력의 영향이 정확히 고려되지 않아서 용융금속의 유입모

양이 거의 직선을 이루고 있으며 형성되는 퍼들의 크기도 작게 나타났다. 또한 Hirt⁽⁸⁾ 등의 연구에서는 퍼들 모양을 정확히 추정하였으나 표면장력에 대한 정량적 평가가 나타나 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 PFC공정에 대한 수치해석을 통하여 PFC공정의 퍼들 안정성에 중요한 영향을 미치는 용융금속의 표면장력과 접촉각의 변화를 고려하여 퍼들내의 유동현상을 해석하였다. 또한 냉각물의 회전속도, 용융금속의 유입속도와 노즐과 냉각물 사이의 간격 등의 공정변수의 변화에 따른 퍼들의 안정성과 온도해석을 통한 냉각물의 변화를 연구하였다.

2. 지배방정식 및 수치해석 방법

2.1 지배방정식

PFC공정은 노즐에서 분사된 용탕이 빠른 속도로 회전하는 냉각물에 충돌하고 유체의 전단력에 의해 끌려나가면서 냉각되어 스트립을 형성하는 상당히 동적인 과정을 거친다. 본 연구의 이론적 해석을 위해 도입한 가정은 다음과 같다.

(1) 용융금속은 슬릿모양의 노즐에 의해 분사되고 노즐과 휠 사이의 간격이 좁아서 생산되는 리본의 폭은 일정하다. 따라서 퍼들내에서의 물리적 현상은 2차원으로 가정한다.

(2) 냉각물의 직경은 퍼들의 특성길이에 비하여 상당히 크므로 냉각물과 용융금속의 접촉면은 직선으로 가정한다.

(3) 퍼들내에서 용융금속은 냉각물 표면에서 슬립이 일어나지 않는다고 가정한다.

(4) 유체는 물성값이 일정한 뉴턴유체이다.

이상의 가정에 의해 이상화된 PFC공정의 물리적 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 용탕은 일정한 온도로 유도가열로에서 가열되며 도가니에 가해지는 압력과 주위의 압력 차에 의해 직사각형 노즐슬릿을 통하여 회전하는 냉각물에 분사된다. 노즐과 휠 사이가 상당히 좁아서 분사된 유체는 노즐과 냉각물사이에서 퍼들을 형성하며 냉각물에 의해 끌려나가 일정한 두께의 스트립을 만들게 된다. 퍼들내의 유동현상에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \nabla^2 u \quad (2a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \nabla^2 v + g_y \quad (2b)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \nabla^2 T + \frac{\Delta H_f}{c_p} \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (3)$$

여기서 u, v 는 용융금속의 x, y 방향으로의 속도이며 ρ 는 밀도, P 는 압력, t 는 시간, ν 는 동점성계수, g_y 는 체력항, T 는 온도, α 는 용융금속의 열확산계수, c_p 는 용융금속의 비열, ΔH_f 는 응고잠열, f_s 는 고상분율을 나타낸다.

2.2 수치해석 방법

PFC공정은 이동하는 자유표면을 갖는 유동현상이므로 자유표면을 추적하기 위한 알고리즘이 필요하며 본 연구에서는 VOF (Volume of Fluid) 방법⁽¹²⁾을 사용하였다. 계산격자의 제어체적에 대하여 체적분율 함수(F)의 값을 평균하면 유체의 체적비율이 되며 다음과 같은 F에 대한 전달방정식을 풀어서 시간에 대한 유체영역의 변화를 추적할 수 있다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

운동량방정식은 시간에 대해 명시적방법(explicit method)과 압력 P와 VOF 함수의 F값은 제어체적의 중앙에 위치시키고 속도는 제어체적면에 위치시키는 엇갈린 격자계를 사용하여 차분하였다.⁽¹³⁾ 대류항의 차분에는 상류도식(upwind scheme)을 사용하였으며 점성항에 대해서는 2계 중앙차분방법을 사용하였다.

자유표면을 갖는 유동현상을 수치해석할 때는 유체영역의 추적과 자유표면 경계조건의 부여라는 두 가지 문제의 처리방법이 중요하다. 유체영역의 추적을 위해 체적분율함수를 도입한 식(4)의 풀이에는 수치적 확산을 방지하기 위하여 Donor - acceptor 도식⁽¹²⁾을 사용하였다. Donor - acceptor 도식은 자유표면과 같은 불연속한 특성을 수치적으로 해석할 때 발생하는 수치적 확산현상을 방지하기 위해 제어체적의 상류뿐만 아니라 하류에 위치한 제어체적에 대한 정보를 이용하는 것이다. 전달되는 유체의 체적분율이 계산되면 전달되는 유체의 양을 계산할 수 있고 계산된 F값은 식(4)를 만족하는 새로운 시간단

계에서의 F값이 된다.

자유표면경계를 유지하기 위해서는 표면에서의 접선응력(tangential stress)이 0이 되어야하며 법선응력(normal stress)은 표면 바깥의 압력과 균형을 이루도록 하여 경계조건을 부여하였다.

퍼들내의 용융금속은 냉각롤의 표면에서 슬립이 일어나지 않는다고 가정하였으므로 냉각롤과 접촉하는 곳에서의 v 속도는 0으로 u 속도는 냉각롤의 이동속도와 같도록 하여 냉각롤의 이동에 대한 경계조건을 부여하였다.

표면장력과 벽부착력을 고려하여 계산을 수행하기 위해서는 각 셀이 자유표면 셀인지 아닌지의 여부와 자유표면 셀일 경우는 유체가 주로 어떠한 모양으로 있는지 등의 결정이 필요하다. VOF 방법에서는 유체 자유표면이 계산격자를 가로지르는 직선으로 근사화될 수 있다고 가정하며 직선의 기울기를 결정한 후 계산된 F의 양만큼의 위치로 이동함으로써 각 격자의 유체 자유표면을 결정할 수 있다. 유체의 자유표면을 나타내는 근사화된 직선의 기울기를 $Y(x)$ 라 하면 자유표면의 기울기 (dY/dx)를 계산하여 다음의 식으로 곡소곡률 K_{xy} 및 표면장력에 의한 압력을 계산하였다.

$$P_s = -\sigma K \quad (5)$$

$$K_{xy} = \frac{d}{dx} \left[\frac{(dY/dx)}{\sqrt{1+(dY/dx)^2}} \right] \quad (6)$$

자유표면이 벽에 접촉하였을 경우 자유표면 경계셀의 P_s 는 식(5)와 식(6)으로 계산되나 자유표면을 나타내는 근사화된 직선은 다음과 같이 수정되어 벽부착력(wall-adhesion force)에 의한 압력을 구하게 된다.

$$Y_{i+1} = Y_i + \frac{1}{2} \frac{\delta x_i + \delta x_{i+1}}{\tan \theta} \quad (7)$$

여기서 하첨자 i 는 자유표면 셀, $i+1$ 는 경계조

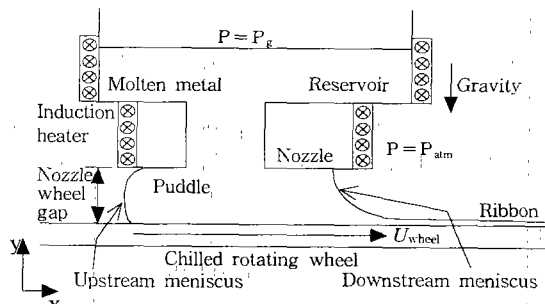


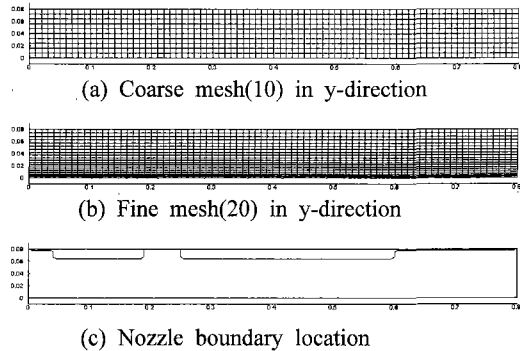
Fig. 2 Idealized schematic diagram of a PFC

Table 1 Material physical properties of Al-4%Cu Alloy⁽⁷⁾

Density	2.7 g/cm ³
Kinematic viscosity	0.0126 cm ² /s
Surface tension	100 dyne/cm
Specific heat	1.2 × 10 ⁷ erg/g · K
Thermal conductivity	1.0 × 10 ⁷ erg/s · cm ² · K
Liquidus temperature	923 K
Solidus temperature	853 K
Latent heat	3.95 × 10 ⁹ erg/g

Table 2 Geometric and process variables for the reference condition⁽⁷⁾

Nozzle-substrate gap	0.07 cm
Nozzle slit width	0.06 cm
Wheel speed	1400 cm/s
Injection velocity	80 cm/s
Pouring temperature	1400 K
Wheel temperature	300 K
Heat transfer coefficient to wheel	5.0 × 10 ⁸ erg/s · cm ² · K

**Fig. 3** Illustration of the grid system and the nozzle boundary location.

건 부여를 위한 가상셀을 나타내며 θ 는 접촉각으로서 벽과 유체 접촉면이 이루는 각, Δx 는 계산영역의 x방향 너비이다.

에너지방정식의 해석에서 잠열은 상변화 구간에서 선형적으로 방출된다고 가정하였으며 월과 용융금속간의 사이가 좁기 때문에 상, 하류 meniscus에서 공기로의 대류에 의한 열손실은 무시하여 자유표면에서의 열적경계조건은 단일 조건으로 주었다. 또한 노즐에서 분사되는 용융금

속의 온도는 일정하다고 가정하였으며 냉각물의 온도도 냉각물의 지름이 상당히 크므로 일정온도로 유지된다고 가정하였다.

본 연구에서는 시간에 대한 현시적 차분방법을 사용하였으며 한 시간증분 동안 해를 구하기 위한 해석절차를 간략히 정리하면 다음과 같다.

1) 식 (2)의 운동량방정식에 대한 현시적 근사식으로부터 전 단계의 값이나 초기조건을 이용하여 새로운 시간에서의 속도를 구한다.

2) 연속방정식을 만족시키기 위하여 각 셀(cell)에서의 압력을 구한다. 한 셀의 압력변화는 인접한 셀의 속도를 변화시키기 때문에 반복과정에 의해 속

도와 압력을 수정한다.

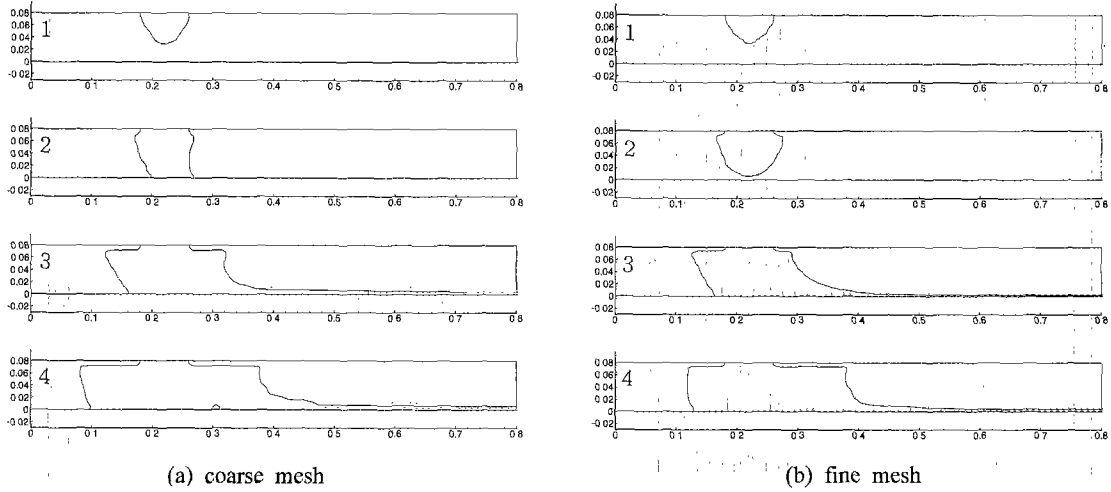
3) 각 제어체적의 F함수의 값을 구하기 위하여 식 (4)를 푼다.

4) 1)~3)의 계산에서 얻어진 정보를 사용하여 식 (3)을 풀어서 각 cell에서의 온도를 구한다. 이러한 1)~4) 과정을 원하는 시간까지 반복하여 해를 구한다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 Al-4%Cu 합금을 사용하여 퍼들 형성과 안정성에 대해 수치해석 하였으며 Table 1에 이에 대한 물성치를 나타내었다. 또 공정변수의 변화에 대한 비교기준이 되는 기준조건을 Table 2에 나타내었다.

본 연구에서 사용된 격자계와 노즐을 나타내는 내부장애물을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3(a)의 성긴격자계인 경우는 x 방향으로 80개, y 방향으로 10개의 격자를 사용하였으며 급격한 온도구배와 속도구배가 예상되는 냉각물 표면 부근에 격자를 밀집시킨 조밀격자계의 경우인 Fig. 3(b)에서는 y방향으로 20개의 격자를 사용하였다. 각 격자계에서의 해석결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서와 같이 노즐에서 분사된 용융금속은 표면장력의 영향으로 둥근 모양으로 유입되고 약 1.05msec 후에는 냉각물에 접촉하여 냉각물에 의하여 끌려나가기 시작한다. 시간이 경과하면서 퍼들은 노즐과 냉각물 사이의 좁은 공간에 갇힌 형상이 되어 상, 하류 meniscus가 점점 안정된 형상을 이루게되며 약 6.25 msec에는 정상상태에 도달하게 된다. 성긴격자계를 사용한 결과와 조밀한 격자계를 사용한 결과는 하류 meniscus를 제외하고는 거의 유사한 형태를 나타낸다. 따라서 관심영역인 퍼들 안정성 등의 유동특성을 고찰하는 데는 성긴격자계를 사용하더라도 별 무리



(a) coarse mesh (b) fine mesh
Fig. 4 Simulated results (1) 0.35 msec, (2) 1.05 msec, (3) 3.15 msec, (4) 6.25 msec of the puddle formation for the reference condition

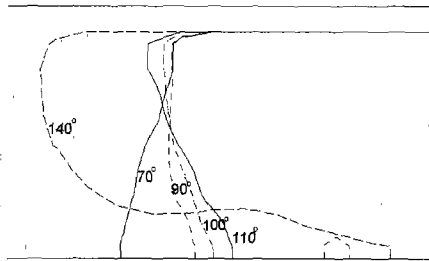


Fig. 5 Upstream meniscus shape for various contact angles



Fig. 6 Photograph of the puddle by Wilde and Matthys⁽¹²⁾

가 없다고 판단된다.

PFC공정은 노즐과 휠 사이의 간격이 상당히 좁기 때문에 표면장력의 영향이 반드시 고려되어야 한다. 표면장력을 고려한 유동해석을 위해서는 표면장력계수와 접촉각에 대한 정보를 알아야 한다. 기존의 PFC공정에 대한 연구^(6,7)는 표면장력의 영향을 잘 나타내지 못하여 용융금속의 유입모양이 거의 직선을 이루고 있으며 퍼들의 크기도 작다. 그리고 표면장력의 영향이 고려되어 퍼들의 모양을 정확히 추정할 모델링⁽⁸⁾인 경우에도 이에 대한 정량적 평가가 나타나 있지 않다. 본 연구에서는 접촉각의 변화에 따른 퍼들의 모

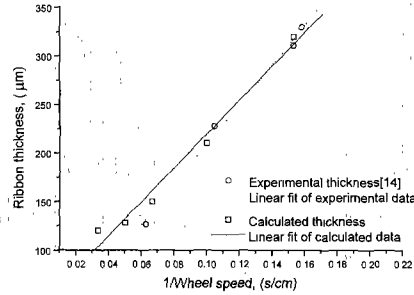


Fig. 7 Comparison of the calculated thickness with experimental thickness

양변화를 고찰하고자 기준조건에서 접촉각을 변화시키며 계산을 수행하였다. 이때 하류 meniscus의 변화는 거의 나타나지 않으므로 상류 meniscus의 변화만을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 상류 meniscus의 변화를 Fig. 6에 나타낸 Wilde와 Matthys의 실험결과⁽¹⁴⁾와 비교한 결과 본 연구에서 사용된 조건에서는 100°의 접촉각을 사용한 결과가 기존의 실험결과와 가장 유사한 결과를 보였다. 접촉각이 커질수록 휠과의 접촉면이 하류로 이동되며 이에 따라 가스가 포착되는 확률이 커지고 결국 퍼들이 안정된 형상을 유지하지 못하게 된다.

Kawahara⁽¹⁵⁾ 등은 용융금속의 온도에 따라 점성계수를 변화시켜 PFC공정의 유동해석을 수행하였다. Kawahara⁽¹⁵⁾ 등의 연구에서는 응고온도보다 낮은 온도에서의 유체의 점성계수값을 유체물성

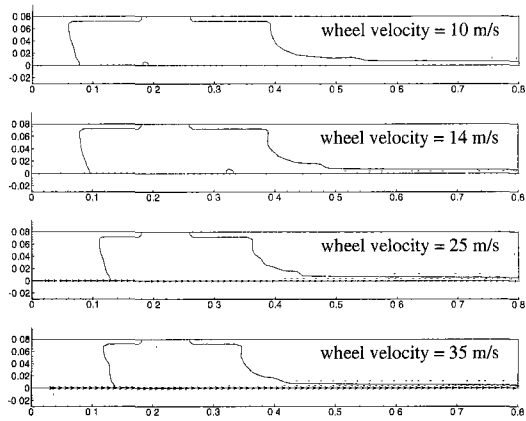


Fig. 8 Steady state puddle configurations for various substrate velocities

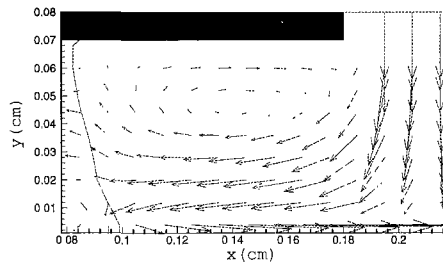


Fig. 9 Enlarged view of upstream puddle showing velocity vectors

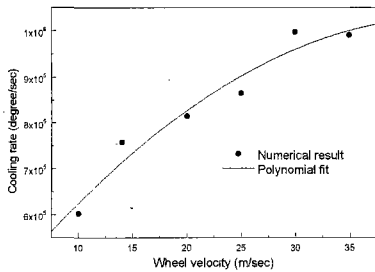


Fig. 10 Cooling rate with respect to wheel velocity

치의 값보다 10배 큰 값을 사용하고 응고온도보다 10℃ 높은 곳에서부터 선형적으로 증가시켜 사용하였다. 본 연구에서도 점성계수를 증가시키는 방법을 사용하여 생산되는 리본의 두께를 예측하였다. 본 연구에서 사용한 수치해석의 타당성을 검증하기 위하여 순수 알루미늄으로 실험을 수행하여 스트립의 두께를 구한 Yu⁽¹⁶⁾의 결과와 본 연구의 결과를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 이때 사용한 공정변수와 물성치는 Yu⁽¹⁶⁾와 동일하

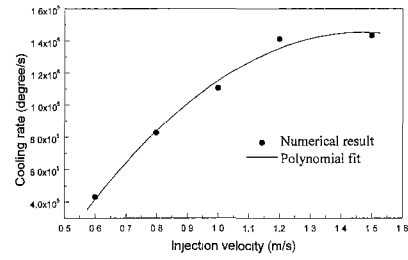


Fig. 11 Effect of melt injection velocity on cooling rate

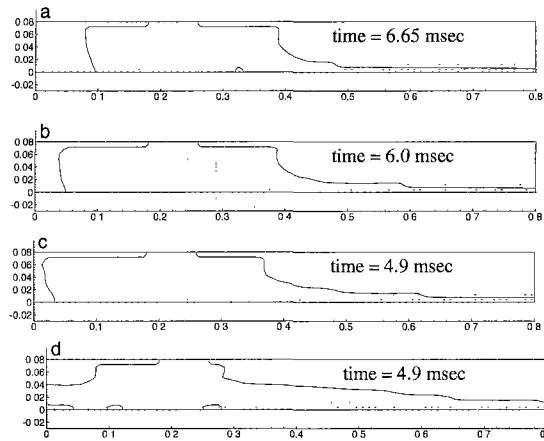


Fig. 12 Steady state puddle configurations for various melt injection velocities
(a) 0.8m/s (b) 1.0m/s (c) 1.2m/s (d) 1.5m/s

게 하였다. 실험에 의한 두께와 본 연구에서 구한 스트립의 두께가 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다.

PFC공정의 응고특성을 고찰하기 위하여 용융 금속 내부에 몇 개의 입자를 두어 이를 추적하며 온도의 변화를 계산하여 공정변수의 변화에 따른 냉각률의 변화를 비교하였다.

먼저 냉각률의 회전속도에 따른 퍼들 안정성 및 냉각률의 변화를 알아보기 위해서 냉각률의 속도를 10m/sec에서 35m/sec까지 변화시켰다. 냉각률 속도변화에 따른 정상상태의 퍼들모양을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8을 보면 냉각률의 이동속도가 증가할수록 냉각률에 유입되는 용융금속이 더욱 빨리 끌려나가므로 퍼들의 크기가 작아짐을 알 수 있다. Fig. 9에 노즐 하부에 형성되는 정체유동장의 상류 meniscus부분을 나타내었으며 이러한 정체유동장은 퍼들의 폭이 키질수록 커진다. 회전속도가 느릴수록 더 큰 퍼들을 형성하고 결국 넓은 정체유동장을 형성하게 되어 전

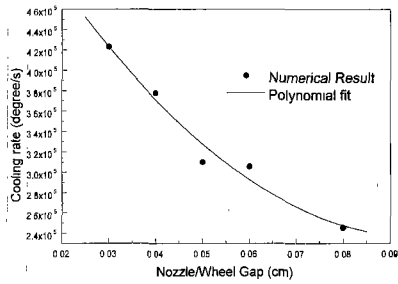


Fig. 13 Effect of nozzle/wheel gap distance on cooling rate

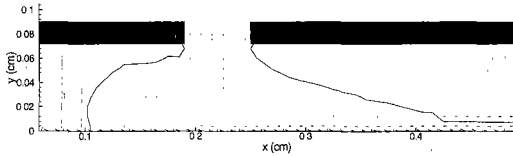


Fig. 14 Puddle configuration at 4.2msec with 0.072cm nozzle/wheel gap distance

체적인 용탕의 냉각률은 떨어지게 된다.

입자들의 시간에 따른 온도변화를 추적하여 냉각률의 속도변화에 따른 냉각률의 변화를 Fig. 10에 도시하였다. Fig. 10에서 보듯이 냉각률의 속도증가에 따라 냉각률도 증가함을 보인다. 이것은 Huang과 Fiedler의 실험⁽¹⁷⁾에서 냉각률의 속도가 15m/sec ~ 26.6m/sec까지 증가할 경우 용융금속과 냉각률 사이에 포착되는 기포의 크기가 작아져 용융금속의 접촉면적이 증가하므로 열전달률이 증가한다는 결과와 일치한다. 그러나 냉각률 속도가 30m/sec 이상일 경우에 속도증가에 따른 냉각률의 증가가 완만해지는데 이것은 냉각률의 속도 증가에 따라 유동이 불안정하게 되어 상류 meniscus 하부에 기포가 포착될 확률이 커지며 포착된 가스는 용융금속과 냉각률의 접촉을 불량하게 만들기 때문이다.

노즐에서의 용융금속의 유입속도는 퍼들 형성에 상당한 영향을 미치는 공정변수이며 너무 빠른 유입속도에서는 안정된 퍼들형성이 어렵다.⁽¹⁸⁾ 유입속도의 증가에 따라 노즐과 휠 사이에 더 많은 용융금속의 유입되며 큰 충돌력 때문에 더욱 넓은 퍼들을 형성하게 되고 퍼들 내부에서의 이차 유동장이 더욱 강해진다. Fig. 11에 도시된 냉각률에 대한 유입속도의 영향에서 볼 수 있듯이 유입속도의 증가에 따라 냉각률이 증가한다. 그러나 Fig. 12의 결과를 살펴보면 유입속도가 1.2m/s 이상이면 퍼들이 안정되지 못하고 상당히 불안정

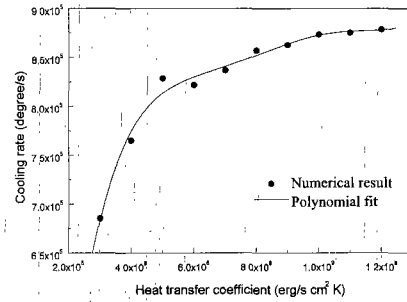


Fig. 15 Effect of heat transfer coefficient on cooling rate

한 퍼들형성을 보이며 이로 인한 냉각률과의 접촉 불량으로 냉각률의 증가는 거의 없게 된다.

노즐과 냉각률사이의 간격이 냉각률에 미치는 영향을 나타낸 Fig. 13에서 알 수 있듯이 간격이 좁아질수록 냉각률이 증가되는 경향을 나타내는데 이것은 기존의 PFC공정에 대한 연구결과와 일치하며^(7,8) 용융금속이 더욱 좁은 영역에 갇히게 되므로 안정된 퍼들을 형성한다. 반면 Table 2에 나타낸 기준조건에서 간격이 0.072cm로 넓은 경우를 나타낸 Fig. 14을 살펴보면 상류 meniscus가 노즐과 냉각률 사이에서 안정된 형상을 유지하지 못하게 된다. 이때 노즐슬릿 폭에 대한 간격의 비는 1.2이다. 따라서 본 연구에서 사용한 조건의 경우 노즐슬릿 폭에 대한 노즐과 냉각률 사이의 간격의 비가 1.2 이상일 경우는 안정된 퍼들을 형성할 수 없다.

PFC공정에서 용융금속의 냉각은 거의 대부분 냉각률과의 접촉에 의해 이루어지므로 용융금속과 냉각률사이의 열전달계수의 정확한 계산은 PFC공정의 냉각률을 추정하는데 상당히 중요하다. 그러나 열전달계수는 냉각률의 표면 거칠기, 용융금속과 냉각률사이의 친화성, 상류 퍼들에서의 가스의 포착 등 많은 미지변수에 영향을 받으므로 정확한 추정이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 열전달계수를 변화시키며 열접촉 조건의 변화에 따른 냉각률의 변화만을 고려하였으며 계산된 냉각률에 대하여 5차 다항식으로 보간한 결과를 Fig. 15에 도시하였다. Fig. 15에서 보듯이 기준조건으로 사용된 열전달계수값 ($5.0 \times 10^8 \text{ erg/s cm}^2 \text{ K}$) 보다 불량한 열접촉 조건일 경우 냉각률이 급격히 감소함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 노즐에서 용융금속이 유입되는 단계에서부터 냉각롤에서 퍼들이 형성되어 정상 상태에 도달하는 PFC의 전체 과정을 수치적으로 해석하였다. 또한 접촉각을 해석에 포함하여 표면장력에 대한 고려를 하였다. 퍼들내에서의 유동과 열전달 특성을 해석하였으며 냉각롤의 회전 속도, 노즐과 냉각롤 사이의 간격, 용융금속의 유입 속도, 냉각롤에서의 열전달계수와 같은 여러 가지 공정변수의 변화에 따른 퍼들의 형성과 냉각특성을 고찰하였다. 이러한 연구결과에 따라 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) PFC공정의 유동은 표면장력의 효과가 상당히 크므로 표면장력을 고려하여 수치해석이 수행되어야 하며 본 연구의 경우 100°의 접촉각에서 상류 meniscus의 모양과 퍼들안정성을 비교적 정확히 추정하였다.

(2) 냉각롤의 속도가 느릴수록 퍼들의 폭이 넓어지며 그로 인해 퍼들 내부에 이차유동장의 크기가 커지고 냉각롤이 감소한다. 본 연구의 경우 속도가 30m/sec 이상일 경우는 상류 meniscus에 기체가 포착될 확률이 커져 냉각롤의 증가가 완만해진다.

(3) 용융금속의 유입속도가 클수록 냉각롤은 증가되지만 본 연구에서 고려된 경우 유입속도가 1.2m/sec 이상일 경우는 퍼들이 불안정하게 되며 냉각롤의 증가는 거의 없게 된다.

(4) 노즐과 냉각롤 사이의 간격이 좁아질수록 냉각롤이 증가하고 용융금속이 더욱 좁은 영역에 갇히게 되므로 안정된 퍼들을 형성한다. 그러나 본 연구의 경우 노즐슬릿 폭에 대한 간격의 비가 1.2 이상이면 안정된 퍼들을 유지하지 못하였다.

참고문헌

- (1) Klement Jr., W., Wilens, R.H. and Duwez, 1960, *Nature*, Vol. 187, p. 809.
- (2) 성진경, 김문철, 1995, "단물법을 이용한 연자성 재료의 주조기술," *주조*, 제15권 제4호, pp. 317~330.
- (3) Steen, P.H., Karcher, C., 1997, "Fluid Mechanics of Spin Casting of Metals ; Review," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 29.
- (4) Fiedler, H., Muhlbach, H., Stephani, G., 1984, "The Effect of the Main Processing Parameters on the Geometry of Amorphous Metal Ribbons during Planar Flow Casting," *Journal of Material Science*, Vol. 19, pp. 3229~3235.
- (5) Kavesh, S., 1978, *Metallic Glasses ASM*, Metals Park, Ohio, p. 36.
- (6) Takeshita, K., Shingu, P.H., 1986, "An Analysis of the Melt Puddle Formation in the Single Roller Chill Block Casting," *Transaction of the Japan Institute of Metals*, vol. 27, No. 2, pp. 141~148.
- (7) Wu, S.L., Chen, C.W., Hwang, W.S., Yang, C.C., 1992, "Analysis for Melt Puddle in the Planar Flow Casting Process," *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 16, pp. 394~403.
- (8) Hirt, C.W., Krrzekwa, D.R., Jacobson, L.A., 1992, "Modeling Planar Flow Casting with FLOW-3D," *Melt-Spinning and Strip Casting: Research and Implementation*, Edited by Eric F. Matthys, pp. 107~122.
- (9) Kukulka, D.J., Poopisut, A., Mollendorf, J.C., 1996, "Development of Planar Flow Casting Transport Relations," *Proceedings of the 2nd European Thermal-Sciences and 14th UIT National Heat Transfer Conference*, Vol. 1.
- (10) Hillmann, H., Hilzinger, H.R., 1978, *Rapidly Quenched Metals III*, The Metals Society, p. 22.
- (11) Walter, J.L., 1978, *Rapidly Quenched Metals III*, The Metals Society, p. 30.
- (12) Hirt, C.W. and Nichols, B.D., 1981, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, pp. 201~225.
- (13) Martine, D.T., Lawrence D.C., Raymond C.M., Hirt, C.W., 1985, "NASA-VOF2D : A Computer Program for Incompressible Flows with Free Surfaces," *LA-10612-MS*.
- (14) Wilde, P.D., Matthys, E.F., 1992, "Experimental Investigation of the Planar Flow Casting Process : Development and Free Surface Characteristics of the Solidification Puddle," *Material Science and Engineering*, A150, pp. 237~247.
- (15) Kawahara, H., Shiraishi T., Ichihara, I., 1995, "A Mathematical Model of Molten Alloy Flow in Planar Flow Casting," *Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VII*, TMS, pp. 833~840.
- (16) Yu, H., 1987, "A Fluid Mechanics Model of the Planar Flow Melt Spinning Process Under Low Reynolds Number Conditions," *Metallurgical Transactions B*, Vol. 18B, pp. 557~563.
- (17) Huang, S.C., Fiedler, H.C., 1981, "Amorphous Ribbon Formation and the Effects of Casting Velocity," *Materials Science and Engineering*, vol. 51, pp. 39~43.
- (18) Sudheer, M., 1984, "Comparison of the Single Roller and Double Roller Process for Casting Low Carbon Steel," *Rapidly Quenched Metals*, Elsevier, New York, vol. V, pp. 95~100.