

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.7.919

연속주조기의 몰드 폭 변경 패턴 개발

강기판*†, 신 건*, 강충길**

* 포스코 제강연구그룹, ** 부산대학교 기계공학과

Development of High-Speed Width-Changing Pattern in Continuous Caster

Gi Pan Kang*†, Geon Shin* and Chung Gil Kang**

* Dept. of Steelmaking Research Group, POSCO,

** Dept. of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received November 16, 2009 ; Revised April 21, 2010 ; Accepted May 7, 2010)

Key Words : Continuous Caster(연속주조기), Mold(주형), Width Change(폭변경), Solidified Shell(응고막), Hydraulic cylinder(유압실린더), Driving Force(구동력)

초록: 연속주조 시에 폭변경 속도를 향상시키기 위해 폭조정의 4 가지 패턴에 대해 연구하였다. 주요 사항은 폭변경 장치의 구동력을 최소화하고, 몰드 내의 응고막의 변형해석 모델을 개발하고, 폭변경 속도 상승을 제한하는 주요인자를 도출하는 것이다. 폭변경 실험을 근간으로 4 개 패턴의 주요 특징을 도출하였고, 각 패턴에 대한 힘을 비교하였다. 실험은 각 패턴의 구동력 비교를 위해 동일한 주조속도에서 수행하였다. 응고막 변형 해석모델의 변수를 조정하기 위해 실험결과를 모델에 적용하였다. 폭변경 속도를 상승시키고, 구동력을 저감시키기 위해 패턴의 변수를 제어하였다. 가장 효율적인 패턴은 고속패턴이었으며, 구동력을 저감하기 위한 주요인자는 구동장치가 이동할 때의 기울기였다.

Abstract: Four patterns for width adjustment were studied with an aim to increase the width-adjustment speed in continuous casting. The main goals are to minimize the actuating force of a WAM actuator, to develop a deformation analysis model of a solidified shell in the mold, and to induce the main limit factor for the speedup of width adjustment. On the basis of the width-adjustment experiment, the notable features of four patterns types were considered, and we compared the corresponding actuating forces. For comparing the driving forces of the patterns, during the experiment, the same casting speed was maintained for each pattern. To optimize the parameter of the deformation analysis model of the solidified shell, the experiment results were applied to them. To speed up width adjustment and to reduce the driving force, we controlled the pattern parameters. The most effective pattern was the fast-mode pattern, and the taper was the main parameter that helped reduce the driving forces during the motion of the actuator.

- 기호설명 -

- a : 주형 단변 이동 가속도
- b : 정수 (定數)
- η : 주형 상하부 속도 차 계수
- δ : 응고 막 두께
- θ : 주형 단변 경사각
- $\dot{\epsilon}$: 응고 막 strain rate (변형 歪速度)
- $\dot{\epsilon}_l$: 주형 하단에서의 strain rate
- $\dot{\epsilon}_u$: 주형 매니스커스 부에서의 strain rate

1. 서론

연속주조 중에 주편의 폭을 변경하는 폭 변경 공정은 고객만족을 위한 소 Lot 주문 생산체제 및 에너지 절감과 생산성 향상, 설비비용 절감을 위해 연주-압연 직결공정이 일반화됨에 따라 그 중요성이 더해지고 있으며 폭 변경 속도 및 폭 변경량은 주어진 주조속도에 대해 테이퍼진 주편의 길이를 결정하고 이는 여재를 발생하여 실수율을 저감하는 요인이 되며, 또한 생산 계획의 한계요인이 되기도 한다.

폭 변경 속도 및 폭 변경량을 제한하는 요인은 현실적으로는 슬래브 통 크레인의 집게 구조

† Corresponding Author, gp kang@posco.co.kr

한계에 의해 한번당 40mm / 3.3M => 12.12 mm/m 의 폭 변경량 한계를 가지며 이는 주어진 주조 속도 하에서 폭 변경 속도를 결정하는 한계요인이 되며 열연공장에서의 사이징 밀 능력에 따라서 폭 변경량을 제한받기도 한다. 폭 변경 속도 및 폭 변경량은 설비 도입 시의 사양에 의해 제한되며, 또 다른 폭 변경에 대한 제한 조건은 주편 품질에 영향을 미치는 주형 내 탕면 변동으로 이는 주조속도 변동과 밀접한 관계가 있기 때문이며 기존에는 폭 변경 시 일정 주속으로 감속하여 폭 변경을 실시하여야 했으므로 폭 변경 조업 자체를 자제하였으나, 최근 탕면변동 제어기능 향상으로 감속하지 않고도 정속주조 폭 변경이 가능하게 되었다.

폭 변경량이 상기의 통 크레인 사양에 의해 한번당 12mm/m 로 제한되므로, 폭 변경 속도는 주조속도 x 12 의 방식으로 가변 되지만 일정 폭 변경 속도 이상에서는 설비사양 한계에 의해, 특히 기계적 구조 및 구동력의 한계에 의해 폭 변경 속도가 제한된다. 현재 보고되고 있는 최대 폭 변경 속도는 NSC 의 경우⁽¹⁾ 주속 1.4~1.8mpm 에서 100 mm/min/side 이며, SMS 는 주속 4.5mpm 에서 25mm/min/dise, VAI 는 주속 1mpm 에서 20mm/min/side 이며, 미니밀의 조업 실적은 최대 21mm/min/side 수준이고, 실 조업 실적은 주조속도 4.3mpm 에서 14.2mm/min/side 이며, 포항에서는 15 mm/min/side 정도의 폭 변경 속도로 조업하고 있다.

생산된 테이퍼 주편의 처리방법은 일반적으로 열연공장에서의 사이징 밀을 사용하여 폭 압연을 실시함으로써 실수율을 향상시키고 있으며 NSC 의 경우에는 폭 압연을 실시하고 VAI 의 경우 슬래브 1 매 이내에서 테이퍼 주편으로 처리하며 Arvedi 의 경우는 95%를 동일 폭으로 생산한다. 최근 고속 폭 변경 기술이 개발됨으로써 주편 1 매 내에서도 테이퍼진 주편의 테이퍼를 절사하여 후 공정인 열연공장의 폭 압연 공정을 생략하려는 시도가 보고되고 있다.

본 과제에서는 일반적으로 실시하고 있는 폭 변경 속도로 생산되는 테이퍼진 주편의 길이를 최소화하여 1 매 내에서 테이퍼를 절사함으로써 후공정에 영향을 주지않고 폭 변경량에 따라 통 크레인의 제한을 회피할 수 있는 고속 폭 변경 기술을 개발하는데 그 목적이 있으며, 또한 이강종 연연주의 경우 연결주편의 여재를 활용하여 연결주편 절사량 내에서 폭 변경을 실시함으로써 생산성을 향상하고자 한다.

주조 중 폭 변경 속도를 향상시키기 위한 기술을 개발하기 위해서는 폭 변경 시 주형내 형성되는 응고막의 거동해석 등과 같은 주편에 미치는 물성연구와 주형 단변부를 구동시키는 구동장치 및 구조에 대한 하드웨어, 구동장치의 이동에 대한 제어장치, 이동 패턴에 대한 소프트웨어 관련 연구가 수행되어야 한다.

2. 이론적 배경

주조 중에 폭 변경을 하기 위해서는 주어진 설비의 단변 구동력 내에서 주형내의 응고막을 변형시켜야 하며, 이 응고막의 형성은 주조속도와 밀접한 관계가 있다. 주조속도가 상대적으로 낮으면 응고막이 두꺼워져 변형력이 증가하고 구동력도 증가하게 된다. 반면, 주조속도가 상대적으로 증가하면 동일한 구동력 하에서도 여하히 폭 변경 속도를 증가할 수 있다. 이러한 관점에서 최근에는 기존에 사용하고 있는 상하부 구동장치를 평행하게 이동하는 Parallel 패턴과 상하부 구동장치를 Zigzag 식으로 이동하는 Stepwise 패턴외에 상부의 얇은 응고막을 먼저 변형시키고 하부의 두꺼운 응고막을 변형시키는 개념의 폭 변경 패턴으로써 Z Mode 와 Fast Mode 를 적용하고 있다.

주조 시 주형의 단변 테이퍼는 매우 중요한 조업 관리요소로서 주조 폭에 따라 적정 테이퍼를 설정하지 못하면 즉, 과소 테이퍼의 경우 응고막과 주형사이에 응고막 수축에 의한 에어갭이 발생하여 주형과 응고막 사이의 열전달을 방해하므로 응고막 형성이 불안해져 Breakout 발생의 원인이 되기도 한다. 또한 과도 테이퍼의 경우 주편을 인발함에 따라 췌기모양의 응고막에 의해 인발저항이 증가하고 단변동판의 마모가 진행하게 되므로 생산 주편의 강종 및 폭에 따라 적정한 테이퍼의 설정은 조업의 기본이 되는 요소이다.

이러한 테이퍼를 조정하여 폭 변경을 하려는 시도는 매우 조심스러운 공정이며, 특히 주편을 감폭하는 폭 변경 공정보다 주편의 폭을 증가시키는 증폭의 경우, 응고막의 응고속도를 고려하여 폭 변경을 실시하여야 하며 증폭 시 적정 테이퍼 설정이 되지 못하여 역 테이퍼 시에는 용강이 하부로 쏟아지는 조업사고가 발생하게 된다. 따라서, 증폭 시 폭 변경 속도의 한계는 주조속도에 따라 폭 변경 패턴에 관계없이 감폭 시 보다는 다소 작아지게 된다.

2.1 폭 변경 패턴의 종류 및 특징

폭 변경 패턴은 Fig. 1 의 상하 유압실린더가

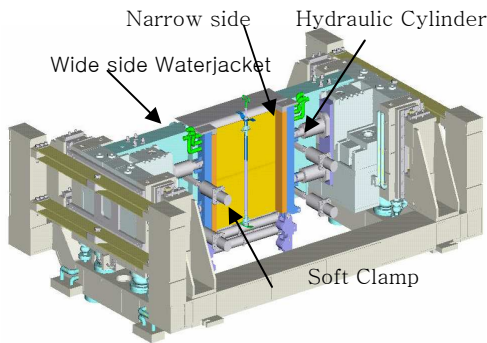


Fig. 1 Width adjustment mold of pilot caster

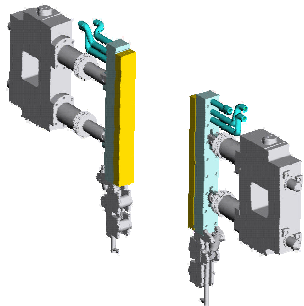


Fig. 2 Width adjustment device

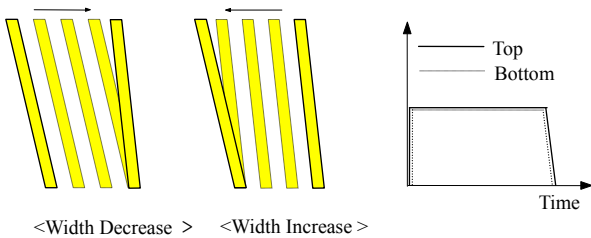


Fig. 3 Parallel pattern

이동하는 위치에 따라 생성되는 단변의 이동 형태로서 일반적으로 Parallel Mode, Stepwise Mode, Z Mode, Fast Mode 로 구분되는데, Fast Mode 의 경우 해외 주요 공급사별로 명칭을 달리하며, NSC 의 경우는 NS-VWM (Variable Width Mold), SMS 는 Short Wedge Moving, VAI 는 S-Lulea 라 명명하고 있다.

2.1.1 Parallel 폭 변경 방법

Fig. 3 과 같이 이 방법은 비교적 간단하게 동작 하는 것으로 폭 변경시 몰드 단변의 상부 부분과 하부 부분이 동시에 같은 속도로 움직인 후 폭 변경 완료 전 시점에는 주편 폭과 생산하는 강중에 맞는 테이퍼를 조정한다. 이 방법은 몰드 단변부의 구동축이 1 개 또는 2 개일 경우 모두 적용 가

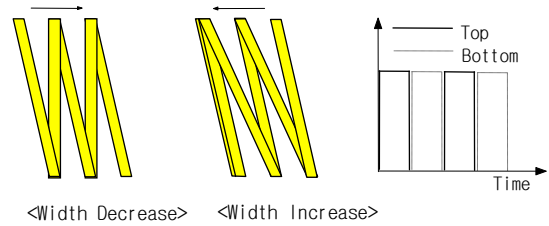


Fig. 4 Stepwise pattern

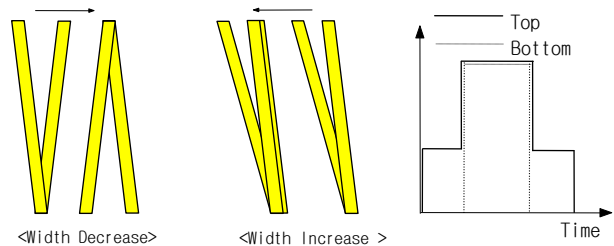


Fig. 5 Z-mode pattern

능하며 일반적으로 그 적용 범위는 1step 이 10mm 이하일 경우가 적당하고 1 step 이 10mm 이상일 경우에는 일반적으로 폭 감소 시에만 적용한다.

2.1.2 Stepwise 폭 변경 방법

Fig. 4 와 같이, 이 방법은 몰드의 단변에 몰드를 구동시키는 구동 장치가 2 개 설치되어 있는 경우에 가능하며 동작 sequence 는 몰드의 상부 부분과 하부 부분이 순차적으로 움직인다. 적용범위는 1step 이 10mm 이하일 경우에 적당하며 10mm 이상일 경우에는 일반적으로 폭 증가 시에만 적용한다.

2.1.3 Z mode 폭 변경 방법

Fig. 5 와 같이 이 방법은 상기 2 가지 방법을 조합한 방법으로 시작 시점과 종료 시점에는 stepwise 방법으로 움직이고 중간 진행 시점에는 parallel 방법으로 움직인다. 이 패턴은 폭 변경량과 주조속도, 테이퍼 주편 길이를 모두 감안하여 step 을 결정하게 되는데 이는 초기 step 에 의해 테이퍼량이 결정되므로 역 테이퍼가 주어지는 step 량의 경우에는 폭 변경 속도가 주편의 이동속도에 비례하여 증가하지 않으면 응고막과 주형사이에 에어갭이 발생하여 용강누출이 발생하게 된다. 이 패턴은 폭 변경량이 클 경우에 작은 구동력으로 폭 증가 및 감소에 모두 적당하다

2.1.4 Fast mode 폭 변경 방법

Fig. 6 과 같이 이 방법은 시작 시점과 종료 시

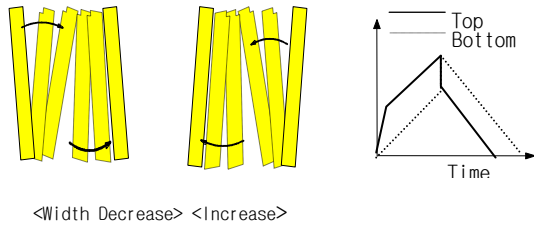


Fig. 6 Fast mode pattern

점에서 stepwise 방법으로 움직이고 중간 진행 시점에서 테이퍼 정, 역이 이루어지는 방법으로 움직인다. 적용 범위는 제한이 없으며 폭 변경 시 단변이 주편의 측면을 따라 사인파형을 그리며 폭 증가 및 감소를 하게 된다. 이 패턴은 주편의 측면을 따라 사인파형을 그리는 형태이므로 동판의 마모를 줄이기 위해서는 테이퍼 주편길이를 길게 가져가는 것이 유리하며 최소한 동판 길이의 2 배수가 되어야 한다. 폭 변경량은 제한이 없으나, 큰 폭 변경량에 대해 테이퍼 주편의 길이가 짧으면 기울어지는 테이퍼 각도가 너무 크게되어 기계장치에 무리가 발생하거나 구조적 제한이 발생하기도 하므로 주의하여야 한다.

2.2 고속 폭 변경 프로파일

지금까지 일반적인 폭 변경 방법의 폭 가변 패턴에 있어서 주요 문제점은 고속으로 폭 가변을 실시할 경우 break-out 이나 bleeding 과 같은 결함이 발생할 가능성이 높다는 것이다. 따라서 본 문제를 해결하기 위해서는 고속으로 폭 가변을 실시할 수 있는 폭 변경 패턴을 확보하여야 한다. 이를 위하여 사용되는 고속 폭 변경 패턴을 분석하여, 현재 고려되고 있는 시험 연주기에 사용 가능한 패턴을 이끌어 내었다. 이 패턴을 이용하여 폭 가변 시 몰드 동판의 거동과 응고 막의 변형을 해석하였다. 그리고 더 나아가 새로운 고속 폭 변경 패턴을 도출할 수 있는 방법을 제시하였다. 폭 변경에 따른 동판의 거동을 분석하면 다음과 같다.

Fig. 7 에서와 같이 시간 $t=t_0$ 일 때부터 $t=t_0 + dt$ 일 때까지의 동판의 이동을 가정한다. 먼저, 몰드 내 응고막의 단변부 상부에서의 변위를 N_u , 하부에서의 변위를 N_l 이라 하고 단위시간당 변형량을 구해보자.

$$\frac{dN_u}{dt} = \frac{dX_u}{dt} - V_C \tan \theta \tag{1a}$$

$$\frac{dN_l}{dt} = \frac{dX_l}{dt} - V_C \tan \theta \tag{1b}$$

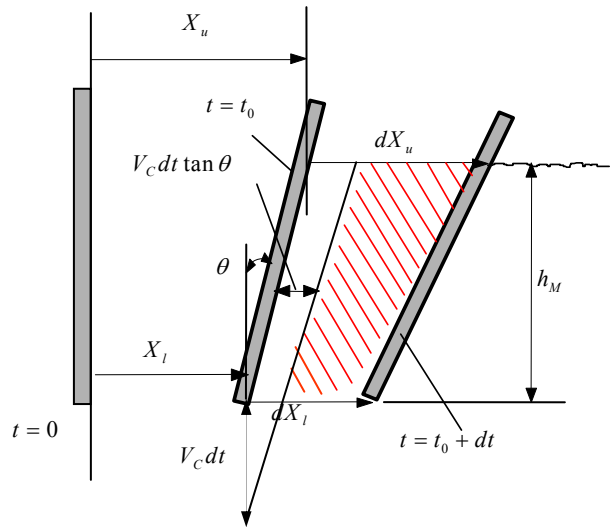


Fig. 7 Motion concept of narrow face

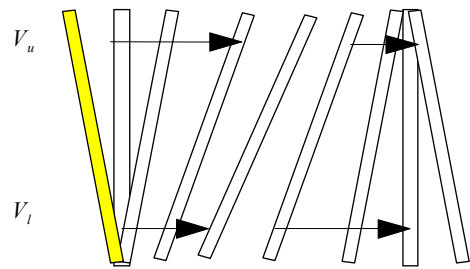


Fig. 8 Width reduction motion

여기에서, X_u 와 X_l 은 $t=t_0$ 일 때 몰드 동판의 초기 위치($t=0$)에서부터 상부와 하부까지의 거리를 나타내며 dX_u 와 dX_l 은 각각 dt 동안 몰드 동판 단변부의 상부와 하부가 이동한 거리이다. 그리고 V_C 는 주조 속도이고 θ 는 단변부와 수직과의 각도로서 $\tan \theta$ 는 다음과 같다.

$$\tan \theta = \frac{X_u - X_l}{h_M} \tag{2}$$

이 때, h_M 은 매니스커스의 높이이다. 따라서, 응고막의 strain 과 strain rate 는 각각 다음과 같다.

$$\epsilon_u = \frac{N_u}{B_b / 2} \tag{3a}$$

$$\epsilon_l = \frac{N_l}{B_b / 2} \tag{3b}$$

$$\dot{\epsilon}_u = \frac{d\epsilon_u}{dt} = \left[V_u - (X_u - X_l) \frac{V_C}{h_M} \right] \frac{2}{B_b} \tag{4a}$$

$$\dot{\varepsilon}_l = \frac{d\varepsilon_l}{dt} = \left[V_l - (X_u - X_l) \frac{V_C}{h_M} \right] \frac{2}{B_b} \quad (4b)$$

여기서, B_b 는 몰드 장변부의 폭을 말한다. 그리고, V_u 와 V_l 는 각각 몰드 동판 상부와 하부의 속도를 나타낸다.

한편, 폭 변경 시 strain rate 가 일정한 조건이 안정적이므로 다음을 만족해야 한다.

$$\frac{d\dot{\varepsilon}_u}{dt} = 0 \quad (5a)$$

$$\frac{d\dot{\varepsilon}_l}{dt} = 0 \quad (5b)$$

식 (4a)와 (4b)를 t 에 대해 미분하여 식 (5a)와 (5b)의 조건을 적용하면

$$\frac{dV_u}{dt} - (V_u - V_l) \frac{V_C}{h_M} = 0 \quad (6a)$$

$$\frac{dV_l}{dt} - (V_u - V_l) \frac{V_C}{h_M} = 0 \quad (6b)$$

한편, 식 (4a)에서 (4b)를 빼면 다음의 식을 얻는다.

$$\dot{\varepsilon}_u - \dot{\varepsilon}_l = (V_u - V_l) \frac{2}{B_b} \quad (7)$$

이 식을 식 (6a)와 (6b)에 대입하면,

$$\frac{dV_u}{dt} = (\dot{\varepsilon}_u - \dot{\varepsilon}_l) \frac{B_b}{2} \frac{V_C}{h_M} \equiv a \quad (8a)$$

$$\frac{dV_l}{dt} = (\dot{\varepsilon}_u - \dot{\varepsilon}_l) \frac{B_b}{2} \frac{V_C}{h_M} \equiv a \quad (8b)$$

여기서, $a = 0$ 이면 V_u 와 V_l 은 일정한 속도를 갖는다. 이러한 경우는 기존의 폭 변경 방식인 parallel mode 나 stepwise mode 의 폭 변경 방식에서 나타난다. 이 때는 몰드 동판 상부와 하부의 strain rate 가 일정하다.

이와 달리, 고속 폭 변경의 경우는 a 가 상수 값이다. 따라서, $a = a_1$ 라 두고 적분 상수를 b_1 라 두면 몰드 동판 상부와 하부의 속도는 다음과 같다.

$$V_u = a_1 t + b_1 + \Delta V_1 = a_1 t + b_1 + a_1 \frac{h_M}{V_C} \quad (9a)$$

$$V_l = a_1 t + b_1 \quad (9b)$$

여기서, ΔV_1 는 V_u 와 V_l 의 차이로, 식 (6a)에 $\frac{dV_u}{dt} = a_1$ 을 대입해서 얻을 수 있다. 따라서, 고속 폭 변경의 경우는 상부와 하부의 strain rate 차가 일정하게 된다.

조업 중 폭 감소 해석의 패턴은 Fig. 8 과 같게 되고 식 (9a)와 (9b)의 속도를 고려하면 Fig. 9 의 속도 프로파일을 얻게 된다. a_1 과 a_2 는 각각 속도 증가 시와 감소 시 증가량과 감소량의 크기, 즉 가속도의 크기이다. 이 때 해석의 편의를 위해 폭 변경 시작과 끝의 몰드 동판 단변부의 기울기 θ 가 같다고 두면 속도 프로파일은 대칭점 시간인 T_r 에 대해 좌우 대칭이 된다. 속도가 증가하는 부분을 ‘전반기’라 칭하고 속도가 감소할 때를 ‘후반기’라 두어 해석하였다.

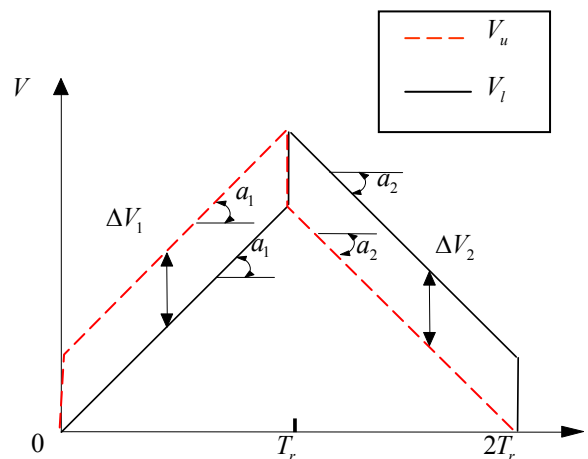


Fig. 9 Velocity profile of width reduction

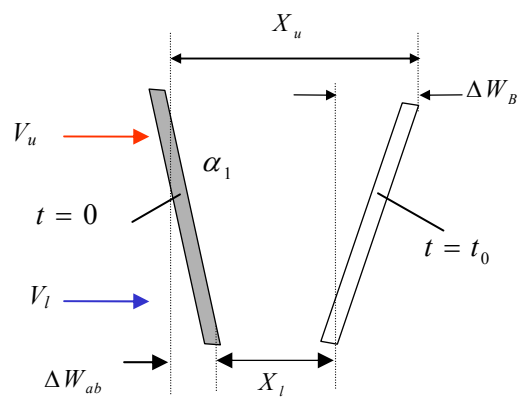


Fig. 10 Status of narrow face in half time

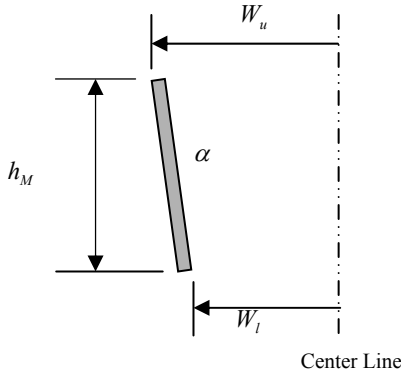


Fig. 11 Taper rate in narrow face

1) 전반기 : $0 < t < T_r$

시간 t 가 $0 < t < T_r$ 일 때 동판의 거동을 해석하기 위해 다음과 같은 순서를 따른다.

Fig. 10 에서는 $t=0$ 일 때와 $0 < t < T_r$ 인 시간 t 에서의 몰드 동판의 형상을 나타내었다. 그림에서 나타난 길이의 관계식은 다음과 같다.

$$X_u - X_l = \Delta W_{ab} + \Delta W_B = \frac{\alpha_1 W_{l1} h_M}{100} + \Delta W_B \quad (10)$$

여기서, α 는 몰드 동판 단변부의 테이퍼율을 나타낸다. Fig. 11 에서와 같이 테이퍼율은 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = \frac{W_u - W_l}{W_l} \times \frac{1}{h_M} \times 100 = \frac{\Delta W_{ab}}{W_l} \times \frac{1}{h_M} \times 100 \quad (11)$$

여기서, W_u 는 장변부의 중앙(대칭선)에서부터 단변부 상부까지의 거리이고 W_l 은 단변부 하부까지의 거리이다. 따라서 폭 변경 전 초기 상태에서 동판 단변부의 테이퍼율 α_1 은 다음과 같다.

$$\alpha_1 = \frac{W_{u1} - W_{l1}}{W_{l1}} \times \frac{1}{h_M} \times 100 = \frac{\Delta W_{ab1}}{W_{l1}} \times \frac{1}{h_M} \times 100 \quad (12)$$

한편, Fig. 9 의 속도 프로파일에서, 다음을 얻을 수 있다.

$$X_u - X_l = \Delta V_1 \cdot t = a_1 \frac{h_M}{V_C} t \quad (13)$$

따라서, 식 (10)과 (13)을 연립하고 식 (12)을 대입하면 다음과 같이 ΔW_B 에 대한 식으로 표현할 수 있다.

$$\Delta W_B = a_1 \frac{h_M}{V_C} t - \frac{\alpha_1 W_{l1} h_M}{100} \quad (14)$$

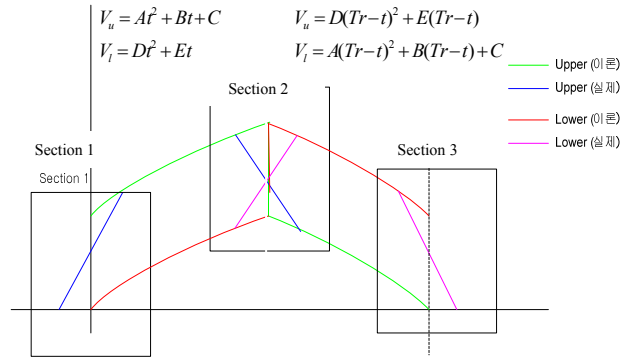


Fig. 12 Velocity profile of new fast pattern

여기서, 우변의 두 번째 항은 상수이므로 위 식은 시간(t)에 따른 몰드 동판의 형상(ΔW_B)을 나타낸다. 이 관계는 속도 그래프의 기울기인 a_1 에 비례한다. 기울기 a_1 은 조업에 따른 변경 거리와 속도에 따라 달라진다. 그림 2.3 의 속도 그래프에서, 전체 폭 변경 시간과 전체 이동 거리는 아래와 같다.

$$T_{total} = 2T_r \quad (15)$$

$$X_{total} = a_1 \cdot T_r^2 + \Delta V_1 \cdot T_r = a_1 \cdot T_r \cdot (T_r + \frac{h_M}{V_C}) \quad (16)$$

2) 후반기 : $T_r < t < 2T_r$

해석의 편의를 위해 $\alpha_1 = \alpha_2$ 라 두면, 속도 프로파일은 T_r 에 대해 좌우 대칭이다. 따라서, 그림 2.3 에서 보듯이 $T_r < t < 2T_r$ 인 시간 동안 몰드 동판 단변부의 상부와 하부의 속도는 다음과 같다.

$$V_u = -a_1 t + 2a_1 T_r \quad (17a)$$

$$V_l = -a_1 t + 2a_1 T_r + \Delta V_1 = -a_1 t + a_1 (2T_r + \frac{h_M}{V_C}) \quad (17b)$$

2.3 새로운 고속 폭 변경 패턴 도출

실제로 2.2 절의 Fig. 9 와 같은 패턴을 제어기에서 구현하기에는 무리가 있었으며 다음 그림과 같은 속도제어 프로파일을 사용하여 제어하는 새로운 폭 변경 패턴을 구현하였다. 일례로서, Section 1 에서의 일정 가속 구간(직선)과 곡선부의 교차점을 구하면 다음과 같다.

$$At^2 + Bt + C = at + b \quad (18)$$

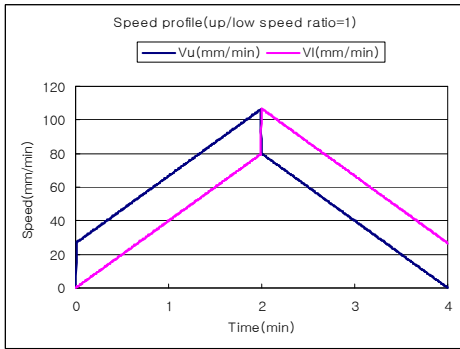


Fig. 13 Velocity profile of $\eta=1$

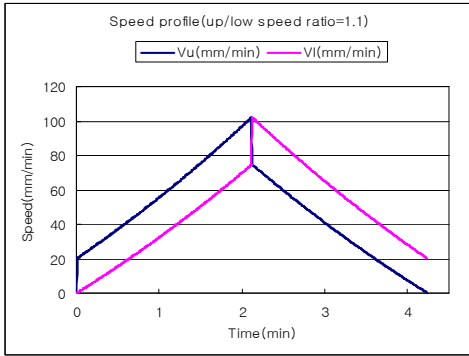


Fig. 14 Velocity profile of $\eta=1.1$

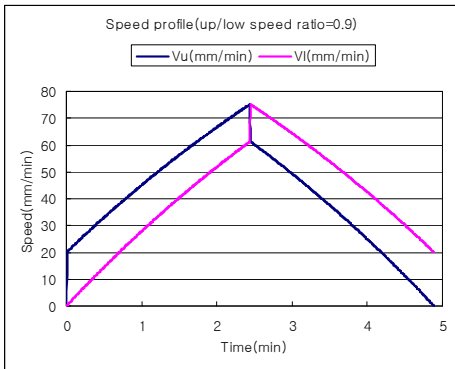


Fig. 15 Velocity profile of $\eta=0.9$

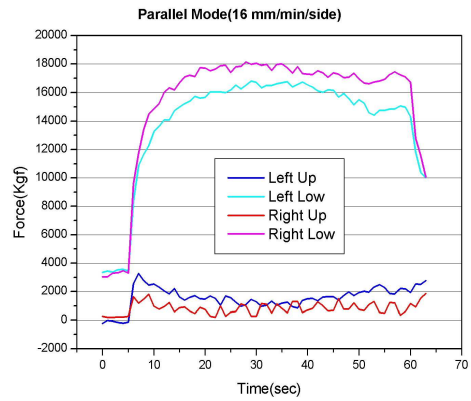


Fig. 16 Force of cylinder (Parallel Pattern 16mm/min/side)

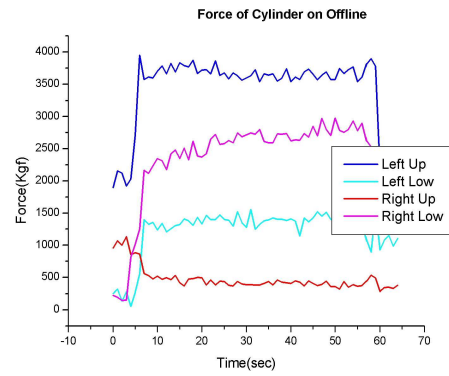


Fig. 17 Force of cylinder (No-cast status)

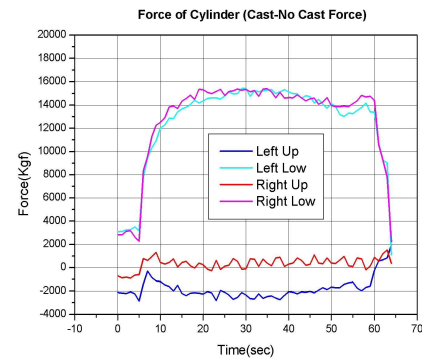


Fig. 18 Force for the deformation of solid shell

$$\int_0^t (At^2 + Bt + C - at - b)dt = \frac{b^2}{2a} \quad (19)$$

곡선부의 속도 프로파일을 일반식으로 표현하면 다음과 같다.

상부 실린더 속도:

$$V_u = \frac{\Delta V'}{(\eta-1)} \left[\eta \cdot \exp \left\{ \frac{(\eta-1) \cdot V_C}{h_M} \cdot t \right\} - 1 \right] \quad (20)$$

하부 실린더 속도:

$$V_l = \frac{\Delta V'}{(\eta-1)} \left[\exp \left\{ \frac{(\eta-1) \cdot V_C}{h_M} \cdot t \right\} - 1 \right] \quad (21)$$

여기서, η 는 주형 상하부 속도 차 계수로서 이 값에 따른 속도 프로파일은 다음 그림과 같이 나타나는데 $\eta=1$ 인 경우는 직선형태로 나타나고, $\eta>1$ 인 경우는 아래로 오목한 형상이며, $\eta<1$ 인

경우는 위로 블록한 형상의 속도 프로파일을 나타낸다. 그 차이점은 $\eta > 1$ 인 경우가 $\eta < 1$ 인 경우보다 빠른 시간 내에 목표치에 도달 가능하다는 것이며 이는 폭 변경 속도를 증가 시킬 수 있다는 것이다.

3. 실험 및 분석결과

실험을 위하여 시험연주기에서의 시험조업은 11회 이루어졌으며 초기 구동력 한계를 파악하고 위험을 줄이기 위하여 950x140 몰드에서 parallel 패턴에서 폭변경 속도를 1, 2, 4, 8, 16, 20 mm/min/side의 6 회의 실험을 수행하였으며 7 회, 8 회에는 패턴별로 속도 상승 시험을 수행하였다. 1100x100 몰드로 변경하여 3 회의 시험 조업을 통해 다음과 같은 실험을 수행하였다.

3.1 응고막 변형력 측정

폭 변경 시에 발생하는 응고막의 변형력은 주조 중에 폭변경 유압실린더의 작용력에서 비주조시의 작용력을 제거함으로써 측정이 가능하다. 다음 그림은 16mm/min/side의 속도로 동작시켜서 응고막에 걸리는 변형력을 측정된 결과이다.

상기의 Fig. 18 에서 상부 실린더에 나타나는 힘이 (-)라는 것은 몰드 내 탕면에서는 응고막이 얇아 변형력이 거의 없으며 하부 실린더가 힘을 작용하는 방향에 대해 버티는 방향으로 힘이 작용한다는 것을 나타낸다.

3.2 구동력 한계 측정 시험

주조중 폭변경시에 유압력을 측정하면 아래 그림과 같이 나타나는데 상하부 실린더의 작용 방향이 서로 반대임을 알 수 있으며 좌우 유압력을 합하면 최대압력인 280 bar 임을 알 수 있다.

아래 그림은 폭 변경 속도를 1,2,4,8,16 mm/min/side

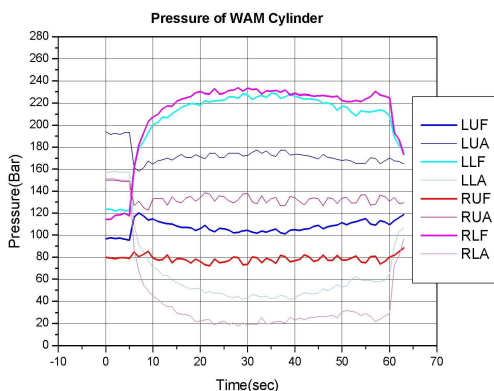


Fig. 19 Pressure of cylinder during width change

의 속도로 시험하여 구동력을 측정된 결과이며 설계시에 20 ton의 힘으로 동작하도록 설계되어 있으므로 측정된 결과로서 추정하면 parallel 패턴에서는 26mm/min/side의 속도가 한계임을 추정할 수 있다.

950mm 몰드에서 측정된 결과를 토대로 1100mm 몰드에서 주조속도 1.3 m/min, 폭변경 속도 20 mm/min/side의 속도로 시험한 결과 다음 그림과

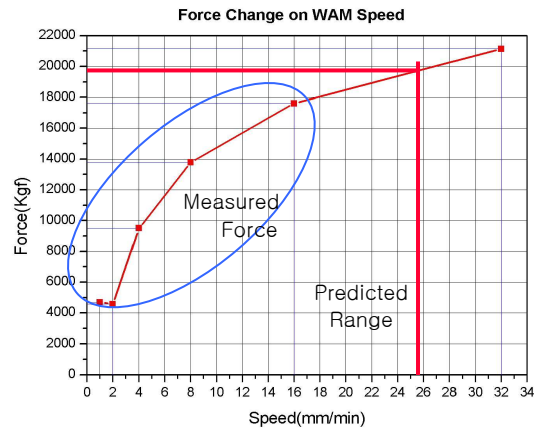


Fig. 20 Actuating force of cylinder

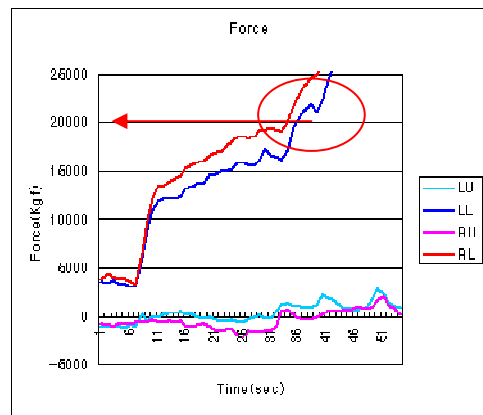


Fig. 21 Force of cylinder at 20mm/min/side

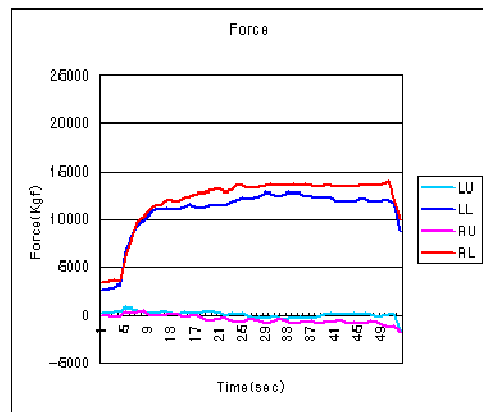


Fig. 22 Force of parallel pattern

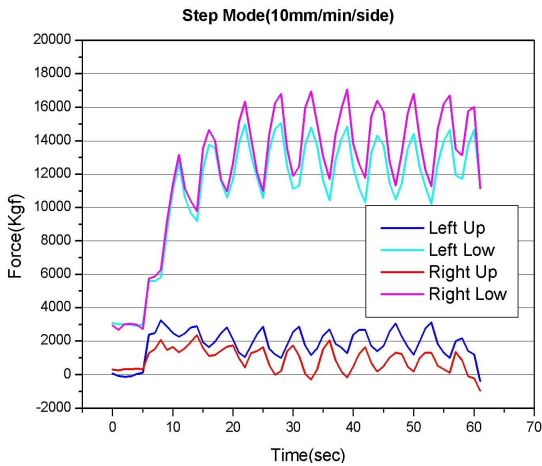


Fig. 23 Force of stepwise pattern

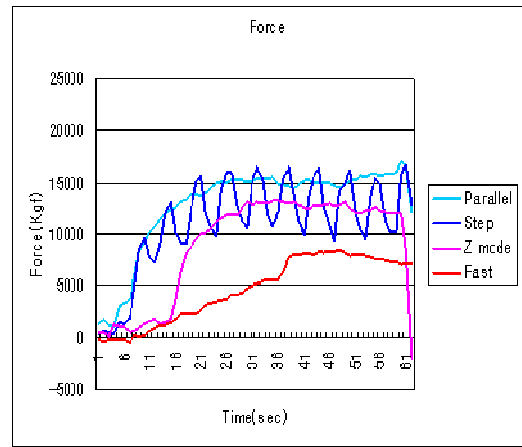


Fig. 26 Force comparison of width changing pattern

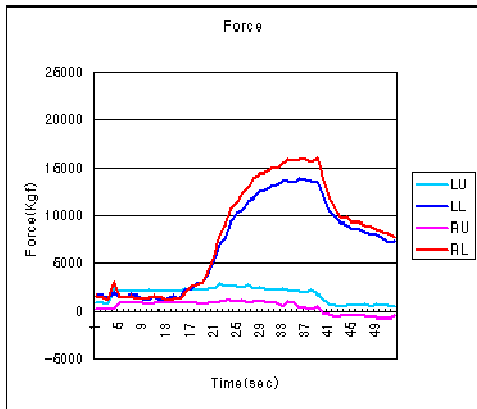


Fig. 24 Force of Z-pattern

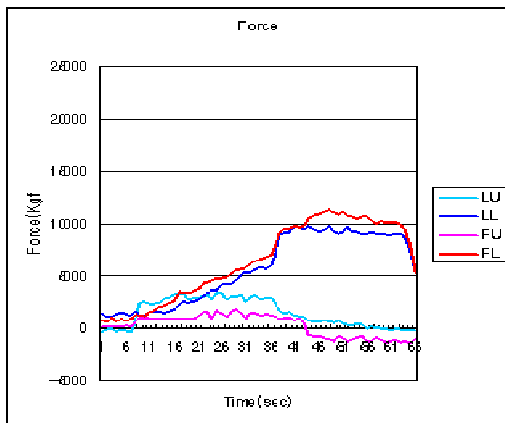


Fig. 25 Force of fast pattern

같이 유압라인 압력인 280bar 의 작용 최대압력이 나타났으며 이때 주편 정체가 발생하였다. 따라서, Parallel 패턴은 몰드 길이 및 단변 테이프 상태에 따라 20mm/min/side 이상의 폭 변경 속도를 구현할 수 없다는 것을 알 수 있다.

3.3 패턴 별 구동력 측정 시험

단변이 움직이는 4 가지 패턴에 대해 주조속도

1.3 m/min 하에서 10mm/min/side 의 속도로 폭 변경시의 힘을 비교한 결과는 다음과 같다.

다음 그림은 각 패턴별 구동력을 비교한 것으로 Parallel > Stepwise > Z mode > Fast 패턴의 순으로 구동력이 작게 나타나므로 이는 폭 변경 속도를 보다 더 증가시킬 수 있다는 것을 의미한다.

4. 결론

폭 변경 시의 구동력 한계는 유압 설비사양에 의해 제한되었으며 변형에 필요한 힘이 상하 구동축의 힘을 더한 것이 아니라 하부 구동축이 응고막 변형의 모멘트 중심이 됨으로써 하부실린더의 구동력이 한계라는 것을 파악하였다.

폭 변경 속도 상승에 대한 한계인자는 기본적으로 주조속도, 그에 따른 응고막 두께, 구동축 이동시의 테이퍼량이 있으며 동일 폭 변경 속도하에서 Tapered Length 가 길 경우 변형을 속도를 저감하여 구동력 저감 및 속도를 상승시킬 수 있다고 판단된다.

폭 변경으로 인한 동판의 마모는 조업관리 지표로서 관리가 되어야 하며, 일반적으로 폭 변경 시의 품질은 특별히 관리되고 있지는 않지만 후공정에서의 품질 피드백을 통하여 영향도 여부는 분석할 필요가 있다고 판단된다.

후기

시험연주기는 2003년 5월에 준공되어 현재까지 300 회 정도의 시험주조를 하였으며 강종개발 및 프로세스 개발, Powder 국제공동연구 등 다양한 시험주조를 하고 있다. 신제강 건설사업으로 공장

이전을 위해 2008년 3월에 shutdown 하여 10월에 설비 최고 주조속도 12 m/min 의 고속주조용 설비 개조를 완료하였다.

폭 변경 시험은 준공 초기에 자율과제로 추진하여 11 회 정도의 기회가 주어졌고 과제는 구동력 한계를 파악하는 수준에서 종료하여 아쉬움이 있으나 20mm/min 이상의 고속 폭변경 시험은 하이 밀에서 고속주조에 따른 폭변경 속도 증가 요구가

발생하는 시점에서 진행할 계획이다.

참고문헌

- (1) Setsuo Kittaka, Kunio Watanabe, Toyohiko Kanki, Yasuaki Miura, July 2002, "Nippon Steel High Speed Variable Width Mold "NS-VWM" for Slab Caster," *Nippon Steel Technical Report*, No. 86