

<論 文>

직접압연을 이용한 박판제조법에 관한 연구(I)

—주편의 표면상태 및 기계적 성질—

강 충 길*

(1989년 5월 2일 접수)

The Study on Strip Production Method Using Direct Rolling(I)

—Surface Quality of Cast Production and Mechanical Properties—

Chung-Gil Kang

Key Words : Direct Rolling(직접압연), Mashy State(반용융) Cooling Rate(냉각속도), Ripple Mark(리플자국) Wedge Shape Nozzle(썰기형 노즐)

Abstract

Strip continuous casting suggests that we can produce strip by compressing solidification profiles which are formed on the surfaces of two rolls, and so it says if rolling rate is gets larger, the mechanical properties will be improved. However, actually there are some difficulties in roller intensity, and roll slip makes it impossible to produce strip. The study will argue about the relation casting condition and surface quality of cast production which is achieved by experimental method that cools the internal part of two rotating rolls and pours equal widthed molten pool directly through a wedge shaped nozzle. It is very difficult to measure cooling rate in width direction of strip experimentally, so it is needed to measure it theoretically. The cooling rate in width direction of strip calculated with two dimension solidification analysis, and clarified the relation solidification structure and experimental hardnees.

1. 서 론

최근 철강업에서는 열연판에 상당하는 박판을 용강으로부터 직접제조하는 박판연속주조(strip continuous casting)법 및 직접압연(direct rolling)법이 중요한 과제로 되어있다^(1~6). 이들제조법이 실용화되어 열간가공공정이 생략되면, 현재의 연속주조용 재가열로가 필요 없으며, 에너지효과 및 열간압연의 생략에 의한 생산성 향상은 물론 현재의 강제제조 시스템에 크다란 혁신을 가져올 수 있다.

또한 응고속도의 증가로 인한 결정미세화 및 편석감소, 소성가공이 곤란한 재료의 박판 및 세션가공 등의 장점 때문에 신소재의 제조방법으로도 이용되어지고 있다^(7~8).

위의 방법의 실용화를 위해서는 주편이 완전한 조건하에서 연속적으로 주조되어지고 주편의 표면 및 내부에 있어서의 응고조직, 표면거칠기 및 제품의 두께가 설계대로 제조되어야 한다. 이러한 목적하에서 쌍로울식 박판연속주조의 연구는 해석적 방법에 의한 1차원 응고해석^(9,10), 액상과 고상의 유동을 고려한 응고특성 및 용탕의 흐름에 대한 해석⁽¹¹⁾, 실험에 의해서 얻어진 Sn-Pb 공정합금의 응고두께와 응고시간의 관계⁽¹²⁾, 파라핀 및 SUS 304

*정회원, 부산대학교 공과대학 정밀기계공학과

를 이용한 주조의 안정성 및 응고조직의 관찰⁽¹³⁾, 주철과 고탄소강의 응고조직 및 열처리방법⁽¹⁴⁾ 등에 관한 실험적 연구결과가 있다. 저자는 박판연속주조법을 실현하기 위한 기초적 연구로서 Sn-15%Pb, Sn-37%Pb 합금을 이용하여 주조조건에 따른 주편의 상태를 분류하였으며, 또한 용탕의 온도측정에 의해서 응고특성을 밝혔다⁽¹⁵⁾.

위의 연구는 직육면체 형태의 노즐을 통하여 용탕을 로울 사이에 주입했기 때문에 일정한 폭의 용탕이 로울 사이에 주입되지 않아 박판의 폭방향에 대한 기계적성질 및 주편의 표면형태를 압연조건에 따라 정확히 파악할 수 없었다.

특히 박판연속주조법은 두개의 로울표면에 형성되어진 응고 프로파일을 압착하여 박판을 제조하기 때문에 압연율이 크면 기계적성질이 향상되어지나 현실적으로는 로울의 강도에 문제가 있고 또한 로울 스크립 때문에 박판제조가 불가능하다. 이러한 문제점 때문에 로울두께가 두꺼운 직접압연기에 의하여 제조되어진 박판의 압연조직 및 기계적성질에 관한 연구보고⁽¹⁷⁾가 있으나 박판제조시 극히 중요한 용탕을 주입하는 노즐의 형태 및 압연조건의 변화에 대한 응고특성을 밝히지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 제조공정을 생략하고, 보다 최종제품의 형상에 가까운 직접압연법을 실현하기 위한 기초적 연구로서 두개의 회전하는 로울 내부를 냉각하면서 썩기형 노즐을 통하여 폭이 균일한 용탕을 직접 주입하는 실험방법에 의해서 얻어진 주편의 표면상태와 주조조건과의 관계에 대하여 논하며 또한 기계적성질에 대하여 검토한다.

직접압연의 경우 박판두께 방향의 냉각속도를 실험적으로 측정한다는 것은 극히 어려운 현상이므로 이론적으로 계산할 필요가 있다. 따라서 2차원 응고해석방법⁽¹⁶⁾을 이용하여 박판의 두께방향에 대한 냉각속도를 구하고, 또한 실험적으로 측정할 정도와 응고조직과의 관계를 밝히고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 회전하는 로울사이에서 용탕을 연속적으로 주입하면서 박판을 직접제조하는 실험장치의 주요부를 표시하고 있다.

위의 실험장치는 크게 용탕주입부와 주조부로 되어있다. 용탕주입부는 가열로와 용탕의 온도를 조절하면서 두개의 로울사이에서 용탕을 주입하는 노즐

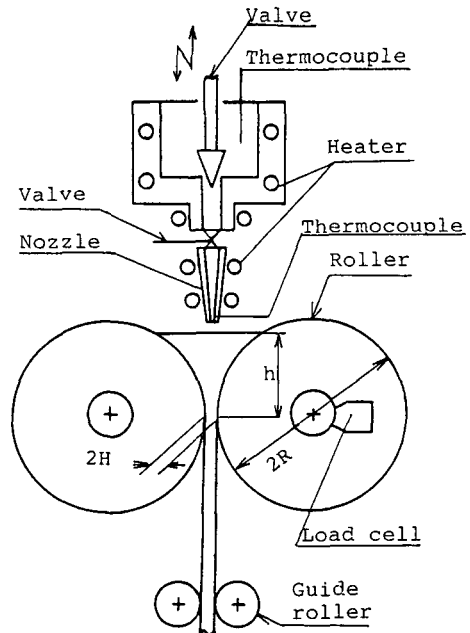


Fig. 1 Experimental apparatus for direct rolling

부분으로 되어있다. 가열로와 노즐부분의 온도를 보다 정확히 제어하기 위해서는 각각 분리하여 C-A 열전대에 의하여 온도를 측정하고, PID 식에서 온도조절을 각각 행하였다. 가열로내의 교반기에 의하여 용탕의 온도를 균일화 하였으며, 주조부에 대응하는 두개의 로울은 두께 $T_R=35\text{mm}$ 의 주강으로 만든 원통에 Ni로 도금하였으며, 로울내부는 냉각능력을 증대시키기 위해서 분사냉각이 되도록 설계되어져 있다. 수평방향으로 작용하는 압하력은 로울의 양단에 설치한 두개의 로드셀에 의하여 계측하고 미동장치에 의하여 로울간의 간격을 조절하였다. 주조시에 주편의 변형을 방지하기 위해서 로울중심으로 부터 각각 50, 92mm의 위치에서 가이드 로울러를 설치하였다. 본 실험장치의 로울 직경은 $2R=170\text{mm}$, 용탕출구 부분에서의 노즐의 크기는 폭과 두께가 각각 50mm, 1.5mm의 폭이 균일한 용탕을 두개의 로울사이에서 주입할 수 있도록 설계되어진 Fig. 2와 같은 썩기형 노즐을 취하였다.

실험조건은 냉각수의 온도 $T=25^\circ\text{C}$, 냉각수량 = 4.8l/min, 노즐 출구에서의 용탕의 온도 $T=225^\circ\text{C}$, 로울각속도 $\omega=0.5\sim 2.6$ rad/sec, 로울간격 $2H=2.0\text{mm}$, 탕면에서 로울출구까지의 높이

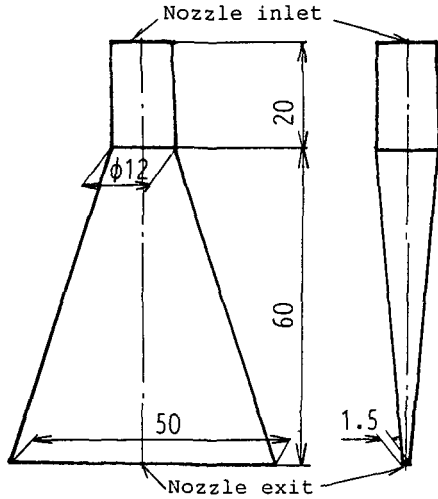


Fig. 2 Nozzle type in liquid metal pouring

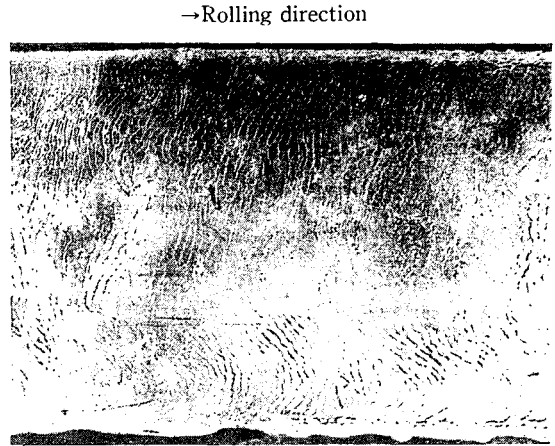
$h=15, 30\text{mm}$, 주편의 폭 $W=50\text{mm}$ 의 범위에서 실험을 하였다. 평형상태도가 다른주편의 성형특성을 밝히기 위하여 본 연구에서는 용점이 낮아 실험이 용이한 모델재료 Sn-15%Pb(액상선온도 $T=208^\circ\text{C}$, 고상선온도 $T_s=183^\circ\text{C}$), Sn-37%Pb(고상선 온도 183°C) 두종류를 이용하였다.

3. 실험결과

3.1 주편의 표면상태

직접압연에 있어서 주편의 표면상태에 영향을 주는 중요한 인자는 로울각속도(ω), 로울간격($2H$), 용탕의 온도(T_p), 탕면(liquid level)으로부터 로울 출구까지의 높이(h), 냉각수량(Q), 로울직경($2R$), 로울두께(T_R), 냉각성능 및 방법 등이다. 이들 인자중 압연가능 조건에 영향을 주는 중요한 인자는 $\omega, 2H$ 이며 특히 ω 는 탕면에서의 용탕의 흐름에 좌우되므로 연속적인 박판의 제조에 중요한 인자이다.

Fig. 3은 압연조건 $T_p=225^\circ\text{C}$, $2H=2.0\text{mm}$, $h=30\text{mm}$ 압연재료 Pb-15%Sn의 경우 로울각속도 ω 의 변화에 의한 주편의 표면상태를 나타낸다. $\omega=1.6\text{ rad/sec}$ 의 경우에는 주편의 표면에 리플자국이 나타나 있으나 $\omega=2.6\text{ rad/sec}$ 의 경우는 리플자국은 보이지 않으나 주편의 폭방향의 중앙부분에 균열(이하 중앙균열이라 부름)이 나타나 있다. $\omega=2.1\text{ rad/sec}$ 의 경우는 주편표면이 전반적으로



(a) $\omega=1.6\text{ rad/sec}$



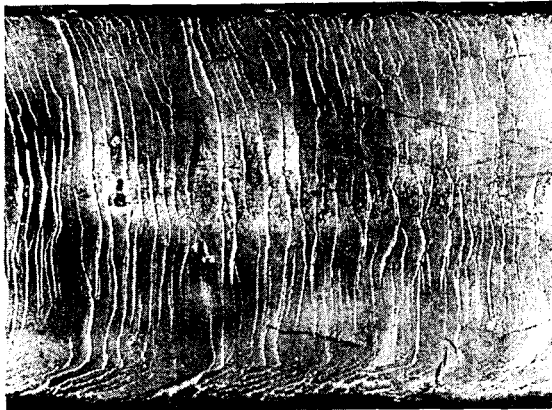
(b) $\omega=2.1\text{ rad/sec}$



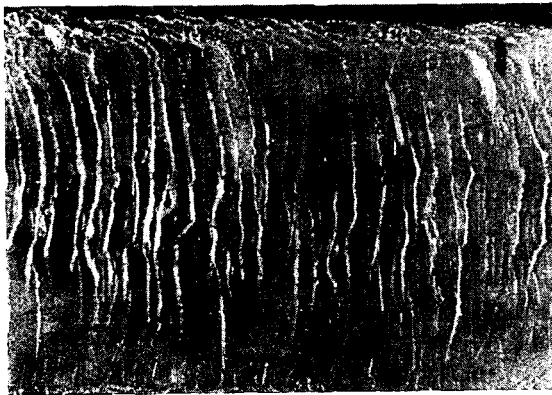
(c) $\omega=2.6\text{ rad/sec}$

Fig. 3 Surface quality of rolled sheet to direct rolling condition, $T_p=225^\circ\text{C}$, $2H_o=2.0\text{mm}$, $h=30\text{mm}$, Sn-15%Pb

→Rolling direction



(a) $\omega = 0.5$ rad/sec



(b) $\omega = 0.6$ rad/sec



(c) $\omega = 0.7$ rad/sec

Fig. 4 Surface quality of rolled sheet to direct rolling condition, $T_p = 225^\circ\text{C}$, $2H_0 = 2.0\text{mm}$, $h = 15\text{mm}$, Sn-37%Pb

균일하게 나타나있다. 이것은 로울각속도가 증가함으로써 주편의 표면상태는 양호하게하나 중앙균열을 일으키게 하며 로울각속도가 적은 $\omega = 1.6$ rad/sec의 경우는 리플자국을 생성시켜 주편이 굽힘가공을 받을때 표면균열을 일으키는 원인이 된다. Fig. 4는 압연조건 $T_p = 225^\circ\text{C}$, $2H = 2.0\text{mm}$, $h = 15\text{mm}$ 의 경우 고액공존상태의 영역이 없는 Sn-37%Pb의 ω 의 변화에 의한 주편의 표면상태를 나타낸다. ω 의 증가와 더불어 리플자국은 현저하게 줄어드는 경향을 나타내고 있으나 $\omega = 0.7$ rad/sec의 경우는 주편의 표면이 비교적 양호하나 폭방향으로의 표면균열이 나타나있다. 이것은 로울각속도의 증가에 의한 주편표면의 파괴 현상을 유발하는 원인이 되기도한다⁽¹⁸⁾. 이상 고액공존상의 유무에 따라 표면상태가 현저하게 다르게 나타나는 것은 로울각속도와 액체금속의 점도차이로 인한 탕면에서의 흐름의 차이라고 생각되어지며 주편의 표면상태가 양호한 최적 주조속도가 존재함을 알 수 있었다.

3.2 용탕의 온도분포 및 압하력 측정

직접압연 과정에 있어서 용탕내부의 온도분포의 측정은 응고완료점, 냉각속도, 응고 프로파일의 형성과정등의 측면에서 극히 중요하다. 두개의 로울 표면에 형성되어진 응고 프로파일을 압착하여 박판을 제조하기 때문에 압연율의 제어가 필요하며 냉각속도, 응고 프로파일의 형성과정은 박판의 기계적 성질을 좌우하는 중요한 요인이다. 저자가 고안한 시정수 1.3 sec, 측정 사이클 1 sec의 다점열전대 방식에 의한 탕면의 온도측정 결과를 Fig. 5에

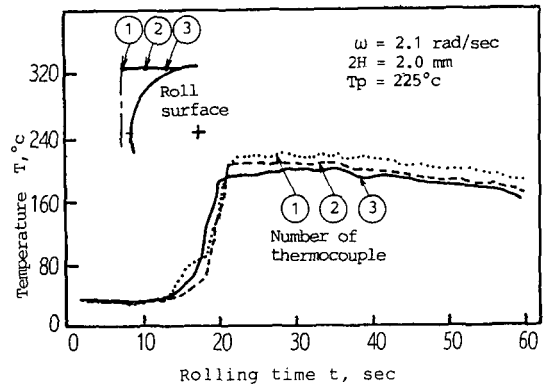


Fig. 5 Temperature distribution to rolling time in liquid pool

나타내고 있다. 측정위치 ①은 폭방향의 중앙위치, 측정위치 ②, ③은 폭방향의 중앙에서 각각 5, 10 mm의 위치에 대응하는 온도측정 결과이다. 로울 측면에 가까울수록 탕면의 온도는 감소하며 그 온도차는 10~20°C 정도이다. 이는 용탕주입방법의 최적화에 의하여 탕면의 온도를 일정하게 하여 초기 응고 프로파일의 형성과정을 제어할 수 있어야 될 것으로 생각된다.

Fig. 6은 압연조건 $2H=2.0\text{mm}$, $T_p=225^\circ\text{C}$, 탕면으로부터 $h=15\text{mm}$ 위치에 있어서 탕면내부의 중앙수직면의 온도 T 의 변화를 로울각속도의 변화와 더불어 측정된 결과이다. 로울각속도의 증가와 더불어 온도는 상승하나 온도변화폭은 탕면에서의 온도변화폭과 거의 같다. 이는 로울각속도의 증가는 로울표면으로 부터 열유출량의 감소를 의미하며 반응용상태 ($T_m=208\sim 183^\circ\text{C}$)에서의 유동현상은 로울각속도의 증가에도 불구하고 온도변화폭에 무관하다고 생각되어진다.

Fig. 7은 압연재료 및 압연조건이 각각 Pb-15% Sn, $2H=2.0\text{mm}$, $T_p=225^\circ\text{C}$ 의 경우에 있어서 방사선온도계에 의하여 측정되어진 표면온도 T_{su} 와 주조시간 t 와의 관계를 표시하고 있다. 중앙균열이 나타나고 있는 $\omega=2.6\text{ rad/sec}$ 일때의 T_{su} 는 리프자국을 형성하는 $\omega=1.6\text{ rad/sec}$ 에 비하여 온도 변화 폭이 크게 나타나고 있다. 이와같은 주편의 온도변화폭은 방사선온도계에 미치는 방사율의 차이라고 생각된다. 실험중 주편의 표면상태의 변화에 따른 방사율을 조절할 수가 없었기 때문에 일정한 온도로 측정이 되지 않았다고 생각된다. 이것은 주편의 상태에 따라서 표면의 온도차이의 폭이 크다는 사실을 알았다. 따라서 건전한 주편을 얻기 위해서는 주편의 표면온도 제어가 극히 중요하다.

Fig. 8은 Fig. 7의 압연조건인 경우에 있어서 비직진성이 0.02%인 축의 양단에 설치한 두개의 로드셀에 의하여 측정된 압하력 F 와 압연시간 t 를 표시하고 있다. 중앙균열이 나타나는 $\omega=2.6\text{ rad/sec}$ 일때의 압하력의 분포보다도 리플자국이 나타나는 $\omega=1.6\text{ rad/sec}$ 의 경우가 안전한 상태에서 주조가 행해졌다는 사실을 알 수 있다. 이것은 압연속도가 큰 경우는 용탕주입시 많은 양의 용탕이 주입되어져야 하므로 탕면에서의 수평유지가 어려우며 또한 탕면에서의 응고시작의 위치가 일정하지 않기 때문에 응고완료점의 변화에 의한 압하율의 차이가 중요한 원인이라고 생각되어진다. 압하력

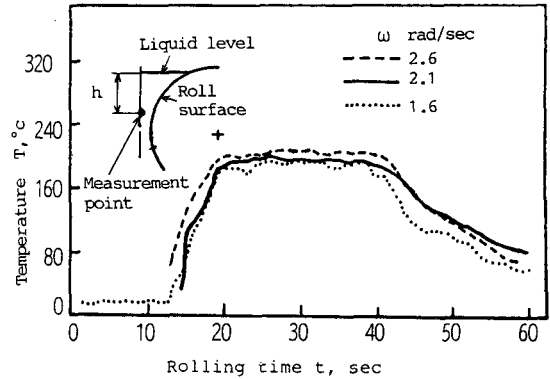


Fig. 6 Temperature distribution to rolling time in the measurement point $h=15\text{mm}$

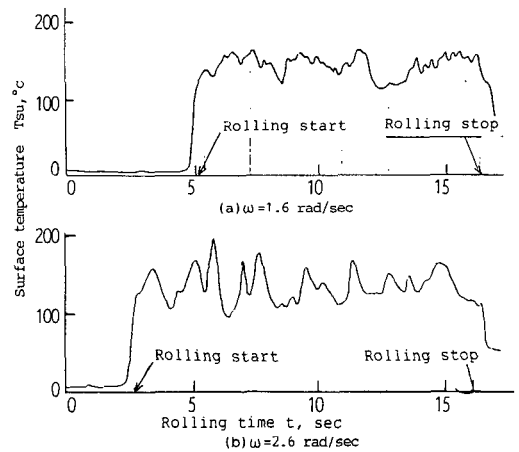


Fig. 7 Relation surface temperature and rolling time with measured by the infrared thermometer

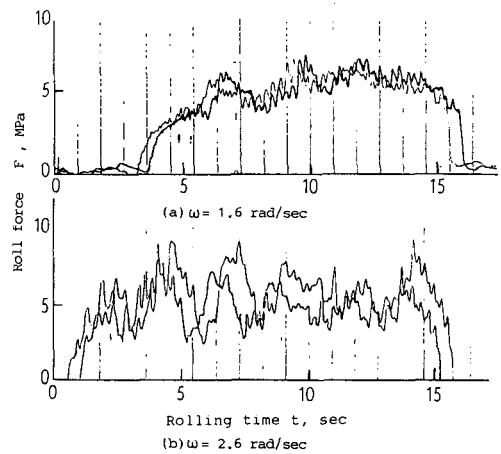


Fig. 8 Relation rolling force and rolling time with measured by the load cell

의 변화폭은 리플마크의 형성으로 생긴 편차로 생각되며, 표면이 비교적 깨끗한 주편 일수록 압하력의 편차가 적게 측정 되었다.

3.3 주편의 기계적 성질 및 응고조직

박판을 제조할때 균일한 형상의 주편이 얻어지도록 주조조건을 제어하는 것이 극히 중요하다. 로울 간격에 있어서 상계면에서의 물질전달 및 액상역에서의 와류현상 때문에 주편단면 전체에 걸쳐서 주편의 응고특성과 기계적 성질과의 관계를 파악해들 필요가 있다. 냉각속도가 주편의 경도분포 및 응고조직에 미치는 영향을 조사하기 위해 직접압연에 의하여 얻어진 주편단면의 경도분포를 측정하고 그것에 대응하는 응고조직을 조사하였다. Fig. 9는 경도측정의 위치를 표시한다. A, C 부분은 주편폭 방향의 단부분이고, B 부분은 중앙부이다. Fig. 10은 압연조건 $T_p=225^{\circ}\text{C}$, $2H=2.0\text{mm}$, $h=30\text{mm}$, $w=2.1\text{ rad/sec}$ 의 경우 얻어진 압연재료 Sn-15% Pb에 있어서 주편두께 방향의 위치와 마이크로 비커스경도 Hv(하중 50g)와의 관계를 표시하고 있다.

B부분의 주편두께 $t=-0.7\sim 0.7$ 의 위치에서는 A, C 부분보다도 경도 분포는 비교적 균일하다. Fig. 11은 압연재료 Sn-15%Pb의 경우 로울각 속도의 변화에 의한 주편표면과 단면중심의 경도비

$$\gamma = \{(Hv.0 + Hv.2) / 2\} / Hv.1$$

와의 관계를 표시한 것이다. 이때 Hv.0, Hv.2은 주편표면의 경도이고, Hv.1은 주편두께방향의 중앙부분의 경도이다. 이것은 로울각속도가 증가할수록 주편표면의 냉각속도와 두께방향 중앙부분에서 냉각 속도의 차이가 크기 때문인 것으로 생각 되어진다.

직접압연에 있어서 주편내 냉각속도의 측정이 불가능하기 때문에 이론적인 계산이 필요하다. 실험에서 얻어진 경도분포가 주편의 냉각속도에 미치는 영향을 검토하기 위해서 액상역과 고상역을 동시에 고려하고, 액상역에서의 용탕의 흐름을 1차원으로 가정한 2차원 응고이론에 의하여 냉각속도를 계산하였다⁽¹⁶⁾. 계산에 사용한 압연재료의 물성치는 비열 $c=0.06\text{cal/g}^{\circ}\text{C}$, 액체와 고체의 열전도도는 각각 $k_1=0.12$, $k_2=0.05\text{cal/cms}^{\circ}\text{C}$ 이고, 응고잠열 $L=9.08\text{cal/g}$, 용탕온도 $T_0=225^{\circ}\text{C}$, 액상선온도 $T_I=208^{\circ}\text{C}$, 고상선온도 $T_s=183^{\circ}\text{C}$, 밀도 $\rho=7.2\text{g/cm}^3$ 이다.

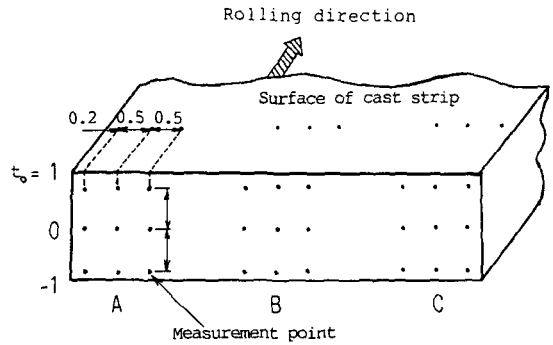


Fig. 9 Measurement point of vickers hardness

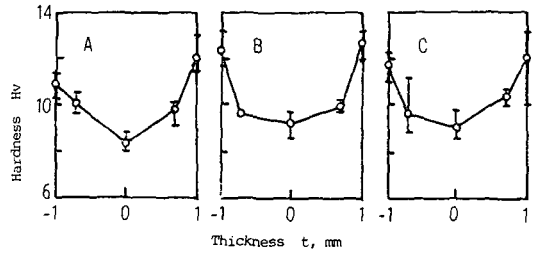


Fig. 10 Hardness distribution in rolled sheet cross section, $T_p=225^{\circ}\text{C}$, $2H_0=2.0\text{mm}$, $h=30\text{mm}$, $w=2.1\text{ rad/s}$

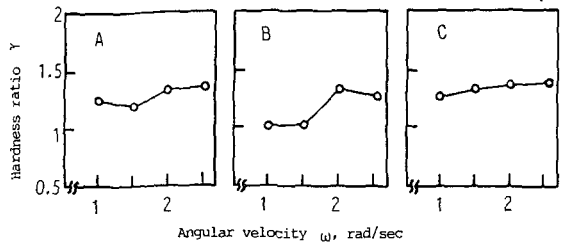


Fig. 11 Relation hardness ratio of rolled sheet cross section and angul velocity with direct rolling condition, $T_p=225^{\circ}\text{C}$, $2H_0=2.0\text{mm}$, $h=30\text{mm}$

압연재료 Sn-15%Pb에 있어서 냉각속도 $D(^{\circ}\text{C}/\text{sec})$ 와 경도 Hv와의 관계를 Fig. 12에 표시한다. 주편단면에서의 냉각속도 및 경도는 각각 $D=10^2\sim 10^4(^{\circ}\text{C}/\text{sec})$, $Hv=9.1\sim 12.6$ 이다. 이들의 결과에서 냉각속도분포와 경도분포가 정성적으로 잘 일치하고 있음을 알았다.

주편의 응고조직과 경도분포와의 관계를 파악하기 위해서 부식액 초산(8ml), 빙초산(16ml) 및 글리세린(76ml)을 이용하여 응고조직을 관찰하였다.

Fig. 13은 압연재료 Sn-15%Pb의 경우 폭방향의

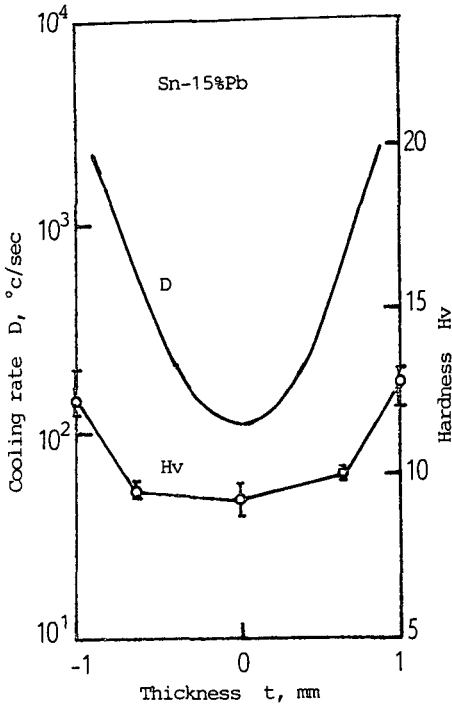


Fig. 12 Relation theoretical cooling rate and experimental hardness distribution in direct rolling condition, $h=30\text{mm}$, $2R=170\text{mm}$, $V_x=21.4\text{m/min}$

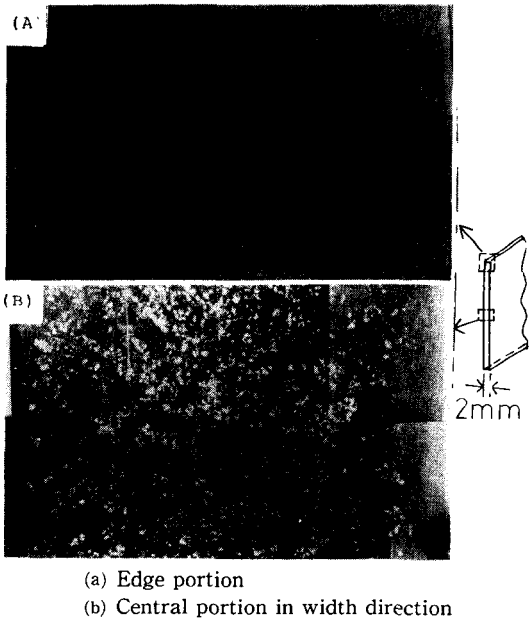


Fig. 13 (a) Edge portion
(b) Central portion in width direction

단부분(A) 및 주편폭방향의 중앙부분(B)의 응고 조직이다. 단부분(A)의 로울표면에는 Sn을 많이 포함하는 백색입상조직의 입경이 평균적으로 적고, 두께방향의 중앙부에서는 입경이 크게 되어 있다.

중앙부분(B)에 있어서는 로울표면 가까운 부분에서는 백색입상조직의 입경이 적지만, 전체로서는 폭방향의 단부분(A)에 비해서 비교적 균일한 응고조직이 관찰되었다. 또한 백색입상조직의 입경이 적은 로울표면 부근에서는 냉각속도 및 경도가 크게 되어 있다는 사실을 알았다.

4. 고찰

주편표면의 상태는 압연재료 Sn-15%Pb에 따라서 상이한 형태를 나타내고 있다. 이것은 용탕에서 압연재료의 점도차이로 인한 표면장력에 영향이 크며 리플자국이 생성되는 중요한 원인이라고 생각되어진다. 그 생성기구를 Fig. 14(a)(b)(c)에 표시한다. 노즐로부터 나온 용탕이 탕면상에서 로울표면 측으로 유동함에 따라 온도가 Fig. 5 처럼 낮아지는 동시에, 응고 프로파일 선단은 표면장력 때문에 로울에 접하지 않고 Fig. 13(a) 처럼 된다. 로울이 회전함에 따라 점차적으로 새로운 용탕이 주입되어진다. 이때 용탕이 완전히 주편표면의 공극부를 채울 수가 없는 상태가 된다.

Fig. 14(a)(b)의 상태가 계속 일어나면 Fig. 14(c) 처럼 주편표면에 리플자국이 생성되어진다고 생각된다. 이와같은 현상은 노즐형상의 적정화 및 압연속도의 증가에 의한 냉각조건의 개선에 의하여 해결되어질 것으로 생각된다.

본 연구에서는 탕면으로부터 노즐 출구까지의 거리 $h=15, 30\text{mm}$ 의 위치에서 주입한 실험결과이다. Fig. 15처럼 탕면으로부터 로울출구까지의 거리를

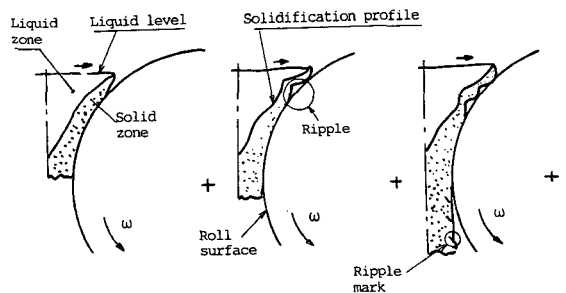


Fig. 14 Model of ripple mark formation on the surface of the rolled sheet

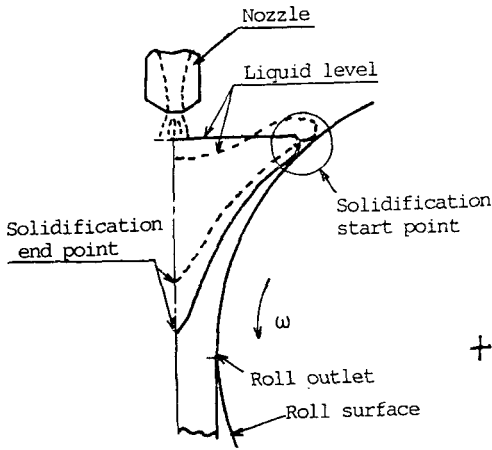


Fig. 15 Position of solidification end point with liquid level variation

일정한 값으로 유지하거나 극히 어렵기 때문에 응고시작점의 위치에 변화를 가져온다. 그러므로 응고완료점의 상하이동으로 인한 압하력이 변화하며, 또한 주편표면온도 T_{su} 가 Fig. 5에서 표시한 것처럼 일정하지 않음을 알 수 있다. 이와같은 문제는 기존 슬래브의 연속주조시 노즐을 몰드에 침적시키는 방법과 같이 쌍로울식 직접압연에 있어서도 노즐을 용탕에 침적시키는 것이 좋을 것으로 생각된다. 응고조직에 영향을 주는 주편단면에서의 냉각속도 D (°C/sec)의 측정이 극히 어려워 이론적으로 계산하였다. 2차원 응고이론에 의하여 구한 고상역의 온도분포 $T(r, \phi)$ 및 로울표면과 접촉하는 탕면이 로울출구까지 이동하는데 필요한 압연시간 t 에 의하여 결정되어지는 냉각속도 D 를

$$D = \frac{T(r, \phi)}{t} = \frac{T(r, \phi)}{R \sin^{-1}(h/R) / V_x}$$

로써 정의하였다. 여기서 $T(r, \phi)$ 와 V_x 는 로울출구부근에서의 주편의 두께방향의 온도 및 압연속도이고, R 과 h 는 각각 로울반경, 탕면의 높이이다. 냉각속도를 2차원 응고이론의 전열해석에 의하여 근사적으로 구하였지만 보다 엄밀한 냉각속도의 해석을 위해서는 주편과 로울과의 스톱, 로울두께, 과냉현상 및 액상역에서의 2차원 유동을 고려한 전열해석이 필요하다. 그리고 Fig. 15에서 처럼 응고시작점의 위치변동에 의하여 응고완료점의 위치가 변하기 때문에 로울압하력의 계산치가 측정치와 같게되는 응고완료점을 정확히 추정해야하며, 또한

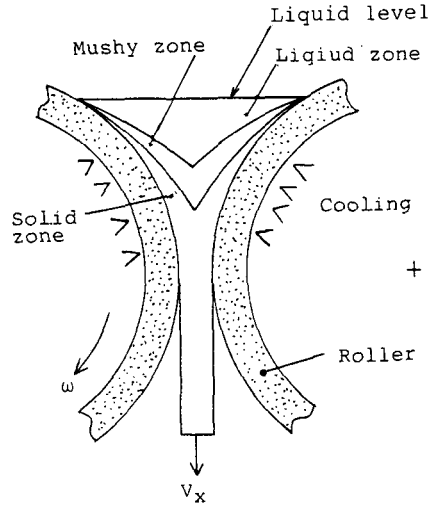


Fig. 16 Phase transformation of liquid metal in direct rolling

로울표면에 액체금속이 접촉하는 초기응고상태를 계산하여야 한다. 직접압연에 있어서 Miyazawa⁽¹⁸⁾는 고상역에 대한 로울 압하력의 계산방법을 제시하고 있으나, 보다 정확한 압하력의 계산은 Fig. 16에서 보여주는 바와 같이 액상역, 반응용역, 고상역을 동시에 해석하여야 하며, 또한 실험재료의 온도와 변형률속도를 고려한 고온인장시험으로부터 응력-변형률 곡선을 구하여야 하므로 앞으로의 연구과제로 남겨둔다.

본 연구에서는 로울간격을 2mm로 하였을때 제품의 두께 2.1~2.2mm정도였다. 이 원인은 직접압연중 반복적으로 가열, 냉각되어 발생하는 로울의 열응력, 압하력에 대한 굽힘응력의 작용으로 인한 로울의 변형 및 로울출구를 벗어난 주편의 냉각능력 감소로 인한 주편의 팽창등을 생각할 수 있다. 이를 최소화하기 위해서는 온도가 일정한 용탕 주입방법의 개발, 로울냉각능력의 극대화 및 로울출구 부근에서의 2차냉각등이 중요한 과제라 생각된다.

냉각과정중 변태율이 큰 영향을 주기 때문에 변태예측 모델과 냉각곡선의 관계를 파악하여 냉각중 재료의 형상변화를 예측할 수 있어야 한다. 또한 냉각중에 동적회복, 재결정과 같은 재질변화에 대한 이론적 계산이 필요하다. 특히 재질이 균질인 주편을 제조하기 위해서는 로울 각속도, 주편의 표면온도등의 정보로부터 응고조직변화의 영향을 동시에 예측하고 그 결과를 이용한 최적 냉각조건을

자동적으로 지시하는 압연조건이 자동화가 절실히 필요하며, 실용화를 위해서는 폭이 350mm 이상의 주편이 얻어질 수 있는 용탕주입 방법이 중요하다.

5. 결 론

용탕의 주입방법에 있어서 쇠기형 노즐을 통한 직접압연의 모델실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 주편의 표면상태는 압연속도의 증가에 따라서 양호하나 주편의 표면에 미소한 균열이 나타났다.

(2) 주편단면 중앙의 두께방향의 경도분포는 표면 부근에 비하여 비교적 균일하며 주편표면근방에서의 경도는 두께방향의 중앙부분의 경도의 1.1~1.3 배이다.

(3) 주편단면의 경도분포는 응고조직의 변화와 정성적으로 일치하며 전열해석에서 구한 냉각속도 분포와 정성적으로 일치하였다.

(4) 주편단면 중앙의 경도에 대한 주편표면의 경도비는 로울각속도의 증가와 더불어 증가한다.

후 기

본 연구는 1988년도 한국과학재단의 전반기 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로, 재단 관계자에게 감사를 드립니다. 실험장치의 제작 및 실험에 도움을 주신 부산대학교 공과대학 부속공장 관계자 및 현 삼립산업기술연구소 윤광식 씨에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Cygler, M. and Wolf, M., 1986, "Continuous Strip and Thin Slab Casting of Steel", Iron and Steelmaking, Aug, pp. 27~33.
- (2) Kusakawa, T., 1985, "Strip Casting of Iron and Steel", Testsu to Hagane, Vol. 71, No. 12, A 200.
- (3) Kamio, A., 1981, "Continuous Casting of Aluminium", J. Jap. Soc. Tech. Plasticity, Vol. 22, No. 247, pp. 779~785.
- (4) Miyazawa, K., etc, 1982, "Rolling Characteristics in the Twin-Roll Rapid Solidification Process", J. Jap. Inst. Metal, Vol. 46, No. 9, pp. 944~1102.
- (5) Kogiku, F., 1984, "The Production of Rapid Solidification Strip by Twin-Roll Technique", Testsu to Hagane, S. 970.
- (6) Sakaguchi, H. etc, 1986, "Casting Test of Thin Slabs by an Experimental Caster of Twin Roll Type", Testsu to-Hagane, Vol. 72, No. 4.
- (7) Ohnaka, I., 1986, "Production of Amorphous Alloy Materials and Rapid Quenching Techniques", J. Jap. Soc. Mech. Eng, Vol. 88, No. 802, pp. 60~64.
- (8) Yukumoto, M. etc, 1985, "Analysis of the Solidification Process in the Roller Quenching Method", Rapidly Quenched Metals, ed. S. Steel and H. Walimont, Vol. 1, pp. 91~94.
- (9) Clyne, T.W., Garcia, A., 1981, "The Application of a New Solidification Heat Flow Model to Spray Cooling", J. Meter. Sci. Vol. 16, No. 6, pp. 1643~1653.
- (10) Pimpitkar, S.M. Carfona K.S., etc, 1985, "Comparision of the Single Roller and Double Roller Process for Casting Low Carbon Steel", Rapidly quenched Metals, ed. S. Steel and H. Walimont, Vol. 1, pp. 95~100.
- (11) Miyazawa, K., Szekeley, J. 1981. "The Mathematical Model the Spray Cooling Process Using the Twin Roll Technique", Metal. Trans. 12A -6, pp. 1047~1058.
- (12) Kasama, A. 1985, "Consideration on the Rapid Solidification of Steels", Testsu to Hagane, Vol. 71, No. 12, A 225.
- (13) Nishioka, S.I., et al., 1985, "Solidification Behavior in the Twin-Roll Casting Process", Testsu to Hagane, Vol. 71, No. 12, A 241.
- (14) Yoshida, C., et al., 1986, "Characteristic of Rapidly Solidified Cast Iron and High Carbon Steel", Testsu to Hagane, Vol. 72, No. 16, pp. 2240~2246.
- (15) Hojo, H., Kang, C.G. etc, 1987, "A Study on Twin-Roll Type Continuous Casting—Solidification Characteristic and Casting Condition—", Trans. JSME, Vol. 53, No. 496, pp. 2452~2458.
- (16) Kang, C.G., Hojo, H. etc, 1987, "A Study on Twin Roll Type Continuous Casting—Two-Dimensional Solidification Analysis with Heat Transfer in the Solid and Liquid Regions—", Trans. JSME, Vol. 53, No. 496, pp. 2459~2466.
- (17) Saitoh, S. et al, 1987, "A Study on Direct Rolling of Liquid Metal", Proc. 38th. Jap. Conf. Tech. Plasticity, pp. 125~128.
- (18) Miyazawa, K., Choh, T. and Inouye, M., 1982, "Rolling Characteristics in the Twin-Roll Rapid Solidification Process", J. of Jap. Inst. of Metals, 469, p. 944.