

쌍롤형 박판주조공정에서 열박음을 고려한 열적 크라운해석

박철민*, 박경진**

The Effect of Shrink Fit on the Thermal Crown Analysis in Twin Roll Strip Casting Process

Cheol-Min Park*, Gyung-Jin Park**

ABSTRACT

In twin roll strip casting process, coupled analyses of heat transfer and deformation for the cast roll are carried out by using the finite element program MARC to examine the thermal crown. Shrink fit effect and plastic deformation are considered. The results shows that the thermal crown is greatly influenced by shrink fit and that the thermal crown for POSCO Pilot Caster 2 Copper Roll has "M" shape. The effects of several factors on thermal crown are also investigated. The amount of thermal crown increases as heat flux, casting speed, sleeve thickness and casting roll width increase and decreases as the casting roll diameter increases.

Key Words : Twin Roll Strip Casting(쌍롤형 박판주조), Thermal Crown(열적 크라운), Finite Element Analysis(유한요소해석), Shrink Fitting(열박음 썸치)

1. 서론

쌍롤형 박판주조공정(strip casting process)은 기본적으로 맞물려 돌아가는 두개의 롤에 용강을 부어 응고시킴과 동시에 일정량의 열간 변형을 가해 1~6 mm의 판재를 제조하는 방식⁽¹⁾이며, 극히 짧은 시간(0.2~0.6 초)내에 모든 응고과정이 완료되어야 하고 고온의 용강이 이러한 급속 냉각 과정을 거치는 동안 롤의 전 폭에 걸쳐 균일한 응고와 형상이 확보되어야 한다. 이 과정은 직접 박판을 제조하므로 열간압연을 생략할 수 있는 신 공정으로, 현재 기술적인 문제들은 대부분 해결된 상태이고,

일부 회사에서는 상업화 공장을 건설하거나 건설 후 시운전 중에 있다.⁽²⁾ 후속 열간압연이 생략되는 박판주조공정은 많은 장점을 가지고 있지만 용강에서 직접 냉연가능한 주편을 제조해야 하기 때문에 종래의 슬라브 주조법이나 박슬라브 주조법보다 제조되는 주편이 더욱 엄격한 요구조건을 만족해야 한다. 특히 크라운(crown)이 불량한 주편은 후속 냉간압연시 구불 구불(wave)하거나 주편에지 크랙(edge crack)을 유발하므로 크라운에 대한 엄격한 제어가 요구되며, 냉간압연의 정밀도 향상과 함께 요구되는 크라운의 조건은 더욱 엄격해지고 있다⁽³⁾.

○ 2002년 4월 23일 접수
* 포항산업과학연구원, S/C 프로젝트팀
** 한양대학교 기계정보산업공학부

일반적으로 크라운은 롤의 열팽창 차이로 롤의 중앙과 가장자리의 변형량이 다르게 나타나는 현상을 일컫는데 열간압연에서는 롤 교차(crossing), 롤 쉬프팅(shifting) 등의 방법으로 조업 중에 크라운을 적절하도록 조절하는 것이 가능하지만, 에지댐(edge dam) 때문에 롤의 축방향 변위가 구속되는 박판주조공정의 경우에는 롤의 직경을 폭방향으로 다르게 하는 크라운 가공에 의해서만 크라운 조절이 가능하다. 따라서 박판주조의 경우에는 주조 중 크라운 조절이 불가능할 뿐만 아니라 크라운을 변화시키기 위해서는 롤을 교체하여야 한다. 최근에는 주조 중 냉각수 온도의 조절을 통해 크라운을 조절할 수 있는 주조롤이 개발되었지만⁽⁴⁾ 응답성이 너무 늦고, 장치가 복잡하여 실제 주조에 적용하기는 어렵다. 따라서 양호한 판형상의 주편을 얻기 위해서는 미리 크라운을 정확히 예측하여 롤 가공시 반영하여야 한다. 쌍롤형 박판주조공정에서 주편(strip)의 크라운은 2 개의 주조롤이 최대한 근접한 위치인 롤 닢(nip)에서 만들어진 롤 갭(gap)에 의해 결정된다. 그런데 주조롤은 주조 중 용강으로부터 전달된 열에 의해 온도가 상승하고, 이에 의해 열변형이 발생하므로 롤 갭의 변화가 발생한다. 따라서 크라운을 예측하기 위해서는 롤의 열변형 거동을 이해하는 것이 필수적이다.

Lindorfer 등⁽⁵⁾은 수평식 박판주조에 대한 물변형을 조사하였으며 물변형을 달걀모양화(ovalization), 가장자리 효과와 굽힘으로 구분된다고 보고하였다. 강충길 등⁽⁶⁻⁹⁾은 350mm 폭의 주조롤에 대한 크라운 해석과 열변형 해석을 Ansys 를 이용하여 실시하였으나 이때 열박음의 영향은 고려하지 않았다. Kopp 등⁽¹⁰⁾은 주조롤 치수에 따른 크라운의 변화를 ABAQUS 를 이용하여 조사하고 주조롤 치수가 크라운의 형상을 변화시킨다고 보고하였다. 그러나 이들 연구 결과들은 주조롤의 슬리브(sleeve) 만을 계산 대상으로 하였으며 열박음, 소성변형 등은 고려하지 않았다.

본 연구에서는 열박음, 소성변형의 영향을 모두 고려하여 쌍롤식 박판주조시 주조롤에 대한 온도과 열변형을 수치해석적 방법으로 해석하고 이 결과로부터 주조동안 주조롤의 열변형 거동과 열적 크라운 형성 거동을 조사하였다. 또한 열적 크라운에 미치는 주조롤 유형, 주조속도, 주조롤로 들어가는 열유속 및 주조롤 치수 등의 영향을 조사하였다. 롤 크라운 해석을 위해서 상용 유한요

소 해석 프로그램인 MARC⁽¹¹⁾를 사용하여 계산하였다.

2. 쌍롤형 박판주조공정

쌍롤형 박판주조공정은 기존 연속주조 및 열간 압연 공정을 생략하고 바로 열연코일을 생산하는 획기적인 공정 축약형 기술이다. 기존 연속주조공정은 몰드(mold)를 이용하여 200~250mm 의 슬라브를 주조하여 재가열, 조압연, 마무리 열간 압연 등을 거쳐 열연코일을 생산할 수 있는 공정이다. 이 공정은 연주공장에서 슬라브를 생산하고 이후 열연공장에서 압연과정을 거쳐 코일을 생산한다. 그리고 박슬라브 주조 기술은 연속주조공정과 비슷하나 열연부하를 감소시키기 위해 슬라브의 두께가 50~75mm 로 주조하고 이를 압연하여 열연코일을 생산하는 공정 기술이다.

한편 박판주조기술은 박슬라브 주조기술보다 진일보한 개념으로 슬라브를 만들지 않고 용강에서 직접 열연코일을 1~6mm 두께를 생산하므로 전체 열간 압연공정을 생략할 수 있어 투자비는 물론 생산원가를 대폭 저감시킬 수 있는 획기적인 신주조기술이다. 이 기술은 1856 년 영국의 Bessemer 에 의해 창안⁽¹⁾되어 시도되었으나, 양질의 판재를 생산하기 위한 요소 기술이 개발되지 못한 실정이었다. 그러나 1970 년대 말과 1980 년대 초에 이 기술이 관심의 초점이 되기 시작하여 현재까지 활발히 연구가 진행되고 있다.

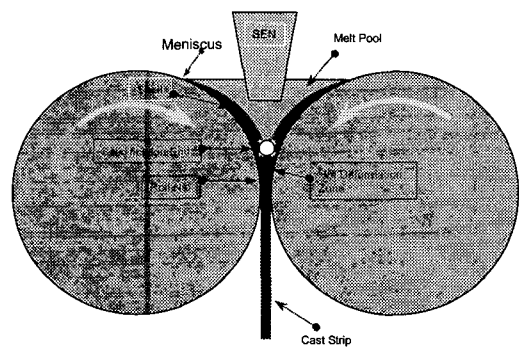


Fig. 1 Schematic representation of twin roll strip casting process

박판주조공정은 Fig. 1 과 같이 회전하는 두 롤에 용강을 직접 부어 응고시키면서 동시에 압연을

하는 공정으로 롤은 물론 용강 공급 노즐, 용강이 새어나오지 못하게 하는 에지담(edge dam) 등의 요소 기술이 대단히 중요하며 이런 기계장치를 정밀하게 제어(control)하는 기술 또한 중요하다. 그 중에서도 롤은 주편을 생산해 내는데 가장 큰 역할을 하고 있다.

3. 해석모델링

박판주조용 롤은 공정의 기계적, 물리적인 특성상 용강상태에서 거의 응고됨과 동시에 주편이 롤을 통과하고, 가해지는 압하력이 크지 않기 때문에 물리적인 외력이 일반적인 압연에 비해 매우 작다. 그러므로 압연에 의한 물리적인 외력은 롤의 응력분포에 크게 영향을 미치지 않을 것이기 때문에 물리적인 외력은 무시하고 롤표면의 열응력 및 변형의 영향을 중심으로 검토하였다. 그리고 해석 모델링은 구리 롤에 대해 수행하였다.

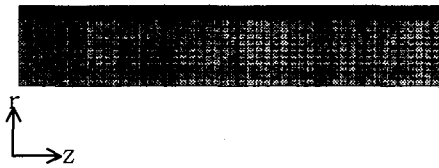


Fig. 2 The analysis model of an axisymmetric section plane

사용한 모델은 Fig. 2 와 같고 축대칭 열탄소성 모델로 온도와 변형을 연결해석(coupled analysis) 하였다. 축대칭 모델의 경우에는 냉각수 채널의 효과를 실제와 같이 고려할 수 없지만, 원통좌표계에서 실제 냉각수 채널 효과를 고려하여 축방향 단면인 r-z 평면에 대하여 열전달과 열변형 해석을 실시하여 축대칭 모델을 박판주조시 크라운 해석에 적용하는 것이 무리가 없음을 확인하였다.

열전달 계산시 롤 표면의 경계조건은 열유속(heat flux) 경계조건으로 하였다. 이때 열유속 경계조건은 용강과 롤이 접촉하는 구간과 용강과 롤이 접촉하지 않는 구간으로 나누어 용강과 롤이 접촉하지 않는 동안은 열유속이 없는 것으로 하였다. 계산에 사용된 열유속 값은 김완수 등⁽¹²⁾에 의해 보고된 실험값을 사용하였고 주조롤의 폭방향 열유속은 일정한 것으로 가정하였다. 김완수 등⁽¹²⁾은

용강과 롤이 접촉한 경우 롤표면의 열전달 계수는 롤 님(roll nip)쪽에 가까워질수록 감소된다고 보고하였다. 롤 님쪽에 가까워질수록 감소하는 열전달 계수에 의해 열유속도 롤 님쪽에 가까워질수록 감소하지만, 이런 열유속의 변화 거동이 주편의 크라운을 결정하는 롤 님부의 롤 크라운에 미치는 영향은 미약하기 때문에 여기서는 평균 열유속 값을 사용하여 용강과 롤이 접촉하는 부분의 열유속이 일정한 것으로 가정하였다. 냉각수 채널은 열전달 경계조건을 사용하였다. 특히 롤표면부에 위치한 냉각수 채널은 축대칭 모델에서는 경계면으로 고려할 수 없으므로 냉각수 채널(channel)이 위치한 부분에 열전달 경계 조건으로 표현되는 내부 흡열(heat sink) 또는 방열(source)이 있는 것으로 처리하였고, 이런 방법으로 얻어진 결과가 타당함을 냉각수 채널을 고려한 경우와 비교하여 확인하였다. 주조롤의 초기 온도는 냉각수의 입측온도로 하였고, 냉각수 온도는 실험에서 얻어진 입측 냉각수 온도와 출측 냉각수 온도의 평균온도로 하였다. 폭방향 냉각수 온도는 일정한 것으로 가정하였고, 주조동안 냉각수 온도의 상승은 없다고 가정하였다.

계산은 롤 폭 1300mm, 롤 직경 1250mm 인 포항제철 실험 설비인 구리 롤에서 304 스테인레스를 60m/min 으로 주조하는 경우를 기준으로 실시하였으며, 각종 변수들이 열적 크라운에 미치는 영향을 조사하기 위하여 각종 변수들을 변화시킨 경우⁽¹³⁾의 계산도 함께 실시하였다. 주조롤은 내구성과 경계성을 고려하여 외부 슬리브와 내부 축을 열박음하여 제작한다. 일반적으로 열박음은 외부 슬리브를 가열하여 팽창시킨 뒤 축을 삽입하는 방식이다. 이러한 주조롤의 열박음 효과를 고려하기 위하여 슬리브와 내부 축(arbor)을 함께 계산하였으며, 이들 사이의 경계부는 접촉경계조건을 사용하였다. 열박음은 열전달과 변형해석에 앞서 열박음 계산을 실시하고 그때 발생한 잔류응력을 주조롤이 가진 상태로 주조가 시작되도록 하여 고려하였다. 니켈 도금층은 열박음이 완료된 후 생성되도록 하여 고려하였다. 이는 실제의 경우 니켈 도금층은 열박음 완료 후에 도금되므로 열박음에 의한 잔류응력이 발생하지 않기 때문에 열박음 계산시 니켈층에 잔류 인장응력이 형성되는 것을 방지하기 위해서이다. 계산에서 사용한 시간간격은 롤이 1° 회전할 때 1 단계가 되도록 하였

고 계산에 사용된 물성치는 온도에 의존하는 값으로 하였으며 문헌^(12, 14)에 제시된 값을 사용하였다.

4. 해석결과

4.1 슬리브 열전달 및 변형해석

쌍롤식 박판주조공정에서 주조롤은 회전하면서 용강과 접촉하는 동안 용강으로부터 열을 전달 받고, 용강으로부터 전달받은 열은 냉각수 채널을 통해 냉각수로 전달되므로 가열과 냉각 과정을 반복한다. 주조롤의 표면, 니켈/구리 계면, 롤표면에서 9.6mm 깊이 위치에서의 시간에 따른 온도 변화를 Fig. 3 에 나타내었고, 40 바퀴째 회전시 매니스커스(meniscus)에서 1 회전 동안의 온도변화를 Fig. 4 에 나타내었다.

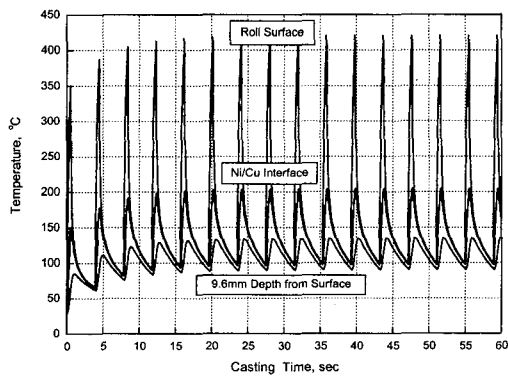


Fig. 3 Temperature variation of roll surface with time

주조롤 표면은 용강과 접하기 시작하는 매니스커스 지점부터 급격히 온도가 증가되기 시작하여 용강과 접촉이 끝나는 롤 님 지점까지 온도가 증가하고, 롤 님에서 매니스커스까지 회전하는 동안은 온도가 감소한다. Fig. 3 에서 보듯이 주조롤 표면의 경우에는 주조롤이 10 회전하기 전에 이전 회전과 다음 회전의 온도변화가 없는 정상상태에 도달한다. 주조롤 표면에서 롤 안쪽으로 들어갈수록 최대온도 위치가 롤 님에서 뒷쪽으로 점차 이동하고, 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간이 점차 길어진다. 주조롤 전체가 완전히 정상상태에 도달하기까지는 상당한 시간이 소요되는 것으로 확인되었다.

쌍롤형 박판주조 동안 주조롤 온도의 상승은 주조롤의 열변형 및 열응력을 발생시킨다. 폭방향

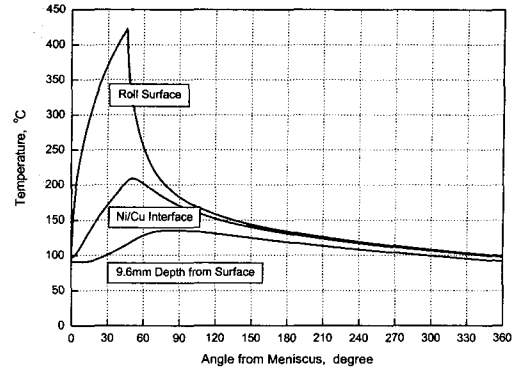


Fig. 4 Temperature distribution of each position of roll in steady state

으로 열유속이 일정하다고 가정하였기 때문에 주조롤의 폭방향 온도분포는 균일하며, 반경방향 온도분포는 롤 표면부가 가장 온도가 높고 롤 표면부근에서 내부로 들어가면서 급격한 온도감소가 일어나서 냉각수 부근에서부터는 온도변화가 상당히 미약해지는 양상을 가진다. 이러한 반경방향 온도분포에 의해 롤 표면부는 많이 팽창하려고 하는 반면 롤 안쪽으로 들어갈수록 팽창하려는 정도는 작아지고, 롤 안쪽 부분은 롤 바깥쪽 부분의 팽창을 억제하는 방향으로 작용한다. 따라서 롤 표면부쪽은 압축의 원주방향응력(hoop stress)이 형성되고 롤 내부쪽은 인장의 원주방향응력이 형성된다. 이러한 경향은 축방향응력의 경우에도 동일하며, 반경방향응력의 경우에는 롤 전체에 인장응력으로 작용하고 표면에서는 자유표면이므로 반경방향응력이 걸리지 않는다. 이와 같은 열응력에 의해 탄성변형 및 소성변형이 일어나고, 폭방향 온도가 균일한 주조롤의 경우에는 온도차에 기인하는 탄성변형과 소성변형에 의해 크라운이 결정된다.

주조롤은 주조동안 열팽창에 의해 직경이 증가하므로 롤 갭이 주조동안 줄어든다. 따라서 주조롤 열팽창에 의한 롤 갭 감소를 주조동안 보상하지 않으면 주편의 두께는 주조시간에 따라 점차 줄어든다. Hohenbichler⁽¹⁵⁾ 등에 의하면 쌍롤형 박판주조시 열팽창에 의해 500 μ m 이상의 두께 저하가 나타나는 것으로 보고되었다. 열팽창에 의해 두께가 감소하는 속도는 시간이 지남에 따라 점차 줄어들고 결국 정상상태에 도달하게 된다. 탄성변형만 발생하는 경우에는 온도분포가 결정되면 이전

온도이력에 관계없이 열변형 양상이 결정되므로, 온도분포가 정상상태에 도달하면 열변형도 정상상태에 도달하는 것이 자명하지만, 소성변형이 일어나는 경우에는 현재의 열변형 양상이 현재의 온도분포 뿐만 아니라 이전 온도이력에 의해서도 영향을 받는다. 그러므로 소성변형을 고려하는 경우에는 온도가 정상상태에 도달했다라도 소성변형이 계속 일어난다면 변형은 계속 일어날 수 있다. 그러나 계산결과 박관주조의 경우에는 주조를 온도가 정상상태에 도달한 경우에도 급격한 순환적(cyclic) 온도변화에 의해 롤표면부는 지속적으로 소성 변형이 일어나지만 일정시간 후에는 한 회전하는 동안 발생한 압축소성변형이 인장소성변형에 의해 상쇄 되었고 정상상태에 도달하였다.

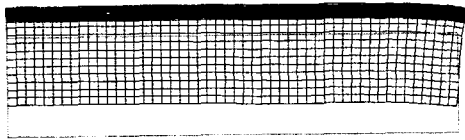


Fig. 5 The deformed shape of roll (100 times enlarged)

폭방향 온도변화가 없는 주조롤에서 크라운이 형성되는 원인을 2 종류로 나누어 생각할 수 있다. 첫번째는 열변형에 기인하는 것이다. 롤 내부의 축방향 변형은 무시할 수 있을 정도로 작고 롤 중앙부의 축방향 변형은 롤 내부에 의해 구속되기 때문에 평면변형조건과 유사하다. 반면 롤 가장자리부는 축방향으로 자유 표면이므로 평면응력조건이 된다. 이와 같이 롤 중앙부와 가장자리부는 각각 평면변형조건과 평면응력조건에서의 변형에 지배되고, 평면변형조건에서 반경방향 변형이 평면응력조건보다 크기 때문에 열변형에 의한 중앙부의 직경 증가가 가장자리부의 직경 증가보다 커지게 된다. 이를 가장자리 효과(edge effect)라 하고 가장자리 효과에 의해 가장자리 부근에서 주조롤의 급격한 에지강하(edge drop)가 발생한다. 두번째 원인은 롤 굽힘이다. 롤 표면부는 롤 내부보다 온도가 많이 상승하고 따라서 롤표면부는 축방향으로 압축응력이 걸리고 롤내부는 축방향으로 인장응력이 걸린다. 이러한 응력분포는 주조롤에 굽힘을 유발하고 그 결과 롤의 중앙부와 가장자리부의 직경이 차이나게 된다. 이러한 롤 굽힘은 롤표면과 롤내부의 온도 차이가 커질수록 심하게 일어난

다. Fig. 5 에서 60m/min 으로 304 스테인레스 강을 주조하는 경우 40 바퀴째 롤 뿔에서의 열변형된 슬리브 모양을 변형을 100 배 확대하여 나타내었다. 이 그림에서 롤 가장자리부는 표면부 축방향 변형이 내부보다 큰 평면응력조건에 의한 변형이 일어났고 중앙부는 표면부의 변형과 롤내부의 축방향 변형이 평면변형조건의 변형이 일어났음을 확인할 수 있다. 결과적으로 롤 굽힘이 일어났음도 확인할 수 있다.

4.2 열적 크라운 해석

롤의 크라운은 롤의 반경방향의 열변형으로 인해 롤의 중앙과 가장자리의 변위 차이를 말한다. 쌍롤형 박관주조에서 크라운이 정상상태에 도달했다는 의미는 롤 뿔에서의 크라운이 변하지 않는다는 의미이다. Fig. 6 에 주조롤이 주조후 100 바퀴 회전했을 때의 매니스커스에서 뿔까지 크라운 변화를 나타냈다. 그림에서 보듯이 열적 크라운 형상은 가장자리에서 약 170mm 지점까지 급격한 열팽창 증가를 보이다가 이 위치를 지나서 중앙부로 가는 동안은 열팽창이 완만하게 줄어드는 “M”형 형상을 가진다. 이러한 “M”형 크라운은 주조롤의 내부에 빈 공간이 있고 직경대비 폭이 큰 경우에 발생하며⁽¹⁰⁾ 주조롤의 폭이 작은 경우에는 “M”형 롤 크라운 대신 포물선형의 롤 크라운이 형성된다^(6,9, 16). Fig. 6 과 같은 “M”형 크라운은 주조롤의 굽힘에 의해 발생하는 것으로 주조롤 표면과 내부의 축방향 응력차이가 크고, 주조롤의 폭이 클 때 2 중 굽힘이 발생하여 나타난다. “M”형 크라운에서 가장자리 부근에서 가장자리 쪽으로의 급격한 열팽창 감소는 가장자리 효과에 기인하고, 주조롤의 중앙부 쪽으로 가면서 열팽창이 줄어드는 것은 롤 굽힘의 결과이다.

매니스커스에서 형성된 크라운은 주조롤이 용강과 접하면서 온도 증가에 의해 증가하여 롤 뿔까지 크라운이 점차 증가한다. 롤 뿔에서의 크라운은 롤이 뿔을 지나서 다시 매니스커스까지 회전하는 동안 점차 감소하여 매니스커스에 다시 도달한다. 매니스커스와 롤 뿔에서의 크라운 차이는 약 90 μ m 정도이며, 이 차이는 주조속도, 열유속 등에 의해 영향을 받는다. 매니스커스부와 뿔부의 90 μ m 의 크라운 차이는 응고셀이 매니스커스에서 바로 생성되고 주변에 변형이 일어나지 않는다고 가정하면, 롤 뿔에서 열팽창이 최대인 지점은 응

고셀과 주조롤이 접촉된 상태이나 가장자리는 응고셀과 주조롤 사이에 90 μ m의 공기 갭이 존재함을 의미한다. 일반적으로 박판주조에서 주편은 매니스커스보다 아래에서 생성되고, 응고셀이 얇은 경우 철정압(ferrostatic pressure)에 의해 변형이 발생하며, 압하를 받기 때문에 롤 가장자리부에 발생하는 공기 갭의 크기가 매니스커스와 넓의 크라운 차이보다는 작겠지만 크라운에 의해 롤 가장자리부에 어느 정도의 공기 갭은 형성될 것이다. 가장자리부의 공기 갭 형성은 가장자리부의 응고가 중앙부에 비해 늦어짐을 의미하고 이는 일반적으로 관찰된 박판주조 주편의 가장자리부 응고 지연 현상과 잘 일치한다. 그러나 매니스커스와 넓에서 크라운 차이로만 주편 가장자리부의 응고 지연과 관련된 모든 현상을 설명하는 것은 불가능하고 따라서 주편 가장자리부의 응고 지연을 일으키는 또 다른 원인이 있는 것으로 추정된다.

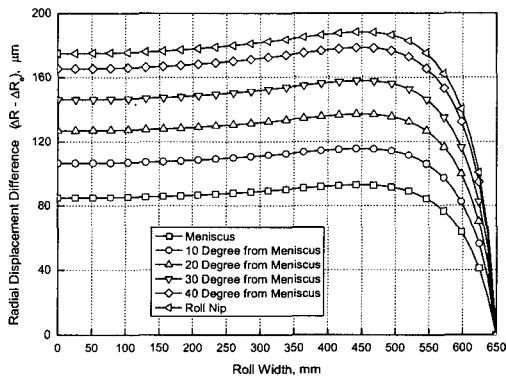


Fig. 6 The variation of thermal crown profile from meniscus to roll nip

Fig. 7 에 시간에 따른 롤 넓에서의 중앙부 열팽창과 가장자리부 열팽창으로 정의되는 크라운 양의 변화를 나타냈다. 주조초기에는 크라운이 작게 형성되고 주조롤이 주조시작 후 6 바퀴 회전할 때까지는 시간에 따라 점차 크라운이 커지다가 6 바퀴 회전한 후부터는 오히려 크라운이 줄어들다가 정상상태에 도달한다. 이와 같은 시간에 따른 크라운 변화 거동은 다음과 같은 이유 때문이다.

주조가 시작되면 롤표면의 온도가 급격히 증가하므로 크라운도 같이 증가한다. 그러나 주조롤이 6 바퀴 회전한 후에는 Fig. 3 에서 살펴본 바와

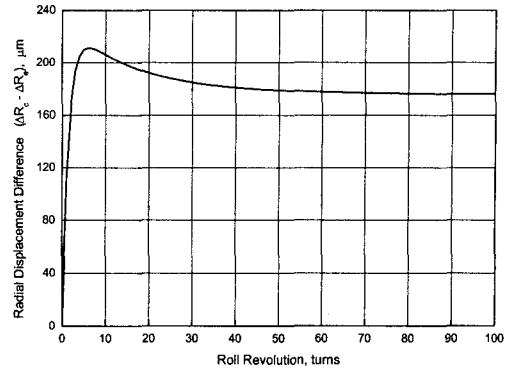


Fig. 7 The variation of amount of thermal crown

같이 롤표면 온도는 거의 변하지 않는 반면 롤 내부는 계속 온도가 증가한다. 따라서 주조롤이 6 바퀴 회전한 후에는 롤표면에 형성되는 축방향 압축 응력과 롤내부의 축방향 인장응력이 줄어든다. 이것은 크라운을 형성하는 원인중 하나인 굽힘모멘트의 감소를 의미하며, 굽힘모멘트 감소에 의해 6 바퀴 후에는 롤 크라운이 감소하는 것이다. 주조롤이 6 바퀴 회전한 후부터 감소한 크라운은 롤내부 온도의 변화가 점차 줄어들면서 정상상태에 도달한다. Fig. 7 에서 롤 크라운은 주조시작후 약 80 바퀴 회전한 후부터 정상상태에 도달하여 거의 변하지 않음을 알 수 있다.

4.3 열적 크라운에 미치는 각종 변수들의 영향

4.3.1 주조롤 유형의 영향(열박음의 영향)

쌍롤형 박판주조에서 주조롤은 일반적으로 슬리브와 축으로 구성되고, 두 부분은 주로 열박음에 의해 조립되며, 일부의 경우에는 확산접합(diffusion welding)에 의해서도 조립된다. 그러나 박판주조시 열적 크라운에 대한 이전의 연구들은⁽⁵⁻¹⁰⁾ 주로 슬리브만 대상으로 하고 축은 해석에 포함시키지 않았기 때문에 주조롤 제조 방법의 효과가 고려되지 않았다. 그러나 열박음에 의해 조립된 주조롤은 슬리브에 원주방향 인장 잔류응력이 형성되어 있고, 슬리브 안쪽 면이 축에 의해 구속되기 때문에 슬리브만 있는 경우와 열변형 양상이 달라지고, 확산접합으로 제조된 주조롤의 경우에도 슬리브만 변형되는 경우와 열변형 양상이 달라진다.

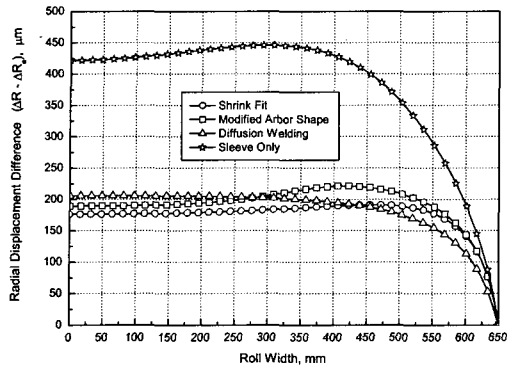


Fig. 8 The effect of casting roll type on thermal crown

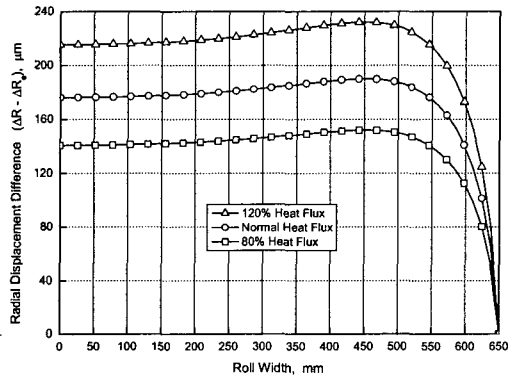


Fig. 9 The effect of heat flux on thermal crown

Fig. 8 에 열박음을 고려하지 않고 슬리이브가 자유롭게 열변형되는 경우, 열박음을 고려한 경우, 확산접합에 의해 슬리이브와 축이 결합된 경우와 축과 슬리이브가 폭의 일부분에서 접촉되지 않도록 축 형상을 변경하여 열박음을 고려한 경우에 대한 크라운을 나타냈다. 그림에서 보듯이 축을 고려하지 않고 슬리이브만 해석한 경우가 축을 고려한 경우보다 크라운이 훨씬 크게 일어난다. 이는 슬리이브만 해석하는 경우에는 롤 굽힘이 매우 크게 발생하여 열변형에 의해 슬리이브 가장자리부의 내경이 열변형 전보다 오히려 줄어드는 반면 축을 고려한 경우에는 슬리이브 가장자리의 내경이 줄어들 수 없으므로 롤 굽힘이 슬리이브만 고려한 경우보다 크게 줄어들기 때문이다. 열박음을 고려한 경우에는 굽힘이 줄어들기는 하지만 열박음시 쥘채(shrinkage)에 의해 발생한 축과 슬리이브 계면

의 압력이 폭방향으로 변하면서 약한 굽힘이 일어나고, 그 결과 “M” 형 크라운 형상이 얻어진다. 반면 확산접합의 경우에는 축과 슬리이브가 접합되었기 때문에 축과 슬리이브가 같이 변형되어야 하므로 면적관성모멘트가 매우 크다. 따라서 확산접합의 경우에는 굽힘이 거의 일어나지 않고 크라운 형상은 포물선 형상이 된다. Fig. 8 의 개선된 축 형상의 경우에는 축과 슬리이브 접촉 계면의 중앙에서 400mm 위치 좌우의 65mm 와 가장자리 25mm 가 슬리이브와 축과의 접촉이 일어나지 않는 형상의 축을 해석한 결과이다. 그림에서 보듯이 축의 형상도 크라운에 많은 영향을 미침을 알 수 있다. 따라서 정확한 크라운 해석을 위해서는 롤 제조 방법 및 축 형상의 고려가 필수적이다.

4.3.2 열유속의 영향

쌍롤형 박판주조공정에서 용강으로부터 롤 표면으로 유입되는 열유속은 주속, 분위기 가스의 종류, 롤 표면처리, 용강의 온도 등 많은 조업 변수에 영향을 받는다. 이러한 조업 변수에 의해 열유속이 바뀌는 경우에 대한 롤 크라운의 변화를 조사하였다. Fig. 9 에 포함제철 실험 설비에서 60m/min 으로 304 스테인레스 강을 주조할 때 통상의 열유속보다 열유속이 20% 감소한 경우와 20% 증가한 경우의 100 바퀴제 낱의 크라운을 나타내었다. 그림에서 보듯이 열유속이 증가할수록 크라운이 커진다. 열유속의 증가는 주조롤의 온도가 더 많이 증가하도록 하므로 크라운이 열유속 증가에 의해 증가된다. 20%의 열유속 변화에 의해 크라운도 약 20%의 변화를 보이고 있으며 이 경우의 크라운의 변화 정도는 약 40 μ m 정도였다. 그러므로 정상적인 열유속에서 편평한 주편이 얻어지도록 주조롤 크라운 형상을 가공하였다면 열유속이 20% 증가하는 경우에는 80 μ m 오목한 형상의 크라운을 가진 주편이 얻어지고 열유속이 20% 감소하는 경우에는 \square μ m 볼록한 형상의 크라운을 가진 주편이 얻어질 것이다. 따라서 강종 변화, 분위기 가스 변화 등에 의해 열유속의 큰 변동이 있는 경우에는 주조롤의 크라운을 변경시켜야 한다.

4.3.3 주조속도의 영향

주조속도는 박판주조공정에서 가장 중요한 조

업변수 중 하나이며, 롤의 냉각능, 주편 두께, 롤 반발력(roll separating force) 등에 의해 결정되며 주로 두께 변화에 의해 바뀌게 된다. 따라서 주조속도의 변화는 주편 두께의 변화를 의미한다. 주조속도의 변화에 따른 열적 크라운의 변화를 Fig. 10에 나타냈다. Fig. 10은 48m/min, 60m/min, 72m/min 및 80m/min 주조속도인 경우에 넓에서의 크라운을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 주조속도가 늦어질수록 크라운은 증가하는 경향을 보인다. 이는 주조속도가 늦어질수록 롤이 1회전하는 동안 용강이 주조롤이 접하는 시간인 접촉시간이 길어져서 롤 온도가 증가하기 때문이다. 접촉시간의 관점에서 보면 주속이 60m/min에서 48m/min으로 20% 감소할 경우 접촉시간은 25% 증가하는 반면 주속이 60m/min에서 72m/min으로 20% 증가할 때 접촉시간 감소는 약 17%이며 80m/min인 경우가 접촉시간이 25% 감소한 경우이다. 동일한 정도의 접촉시간이 증가하는 방향(48m/min)으로 변화하는 경우와 감소하는 방향(80m/min)으로 변화하는 경우 크라운의 변화정도는 거의 비슷했다. 이는 박판주조공정에서 주속에 따른 크라운 변화가 거의 반비례 관계가 성립함을 의미한다.

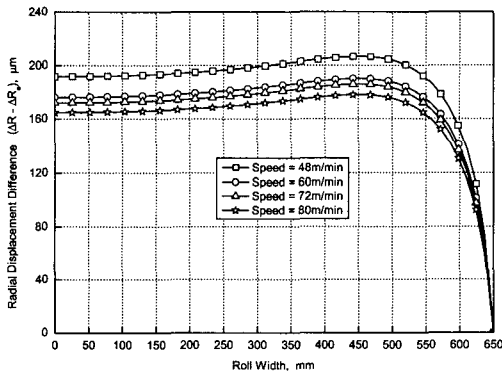


Fig. 10 The effect of casting speed on thermal crown

그러나 실제 박판주조에서는 주조속도 변화에 의해 열유속이 변한다⁽¹²⁾. 따라서 주조속도가 크라운에 미치는 영향은 주조속도의 변화에 의한 열유속의 변화를 함께 고려하여야 한다. Fig. 11에 주조속도의 변화에 따른 열유속 변화를 고려한 경우 주조속도에 따른 크라운 변화를 나타냈다. 그림에서 보듯이 주조속도에 따른 열유속의 변화를 고려

하면 주조속도가 크라운에 미치는 영향은 열유속의 변화를 고려하지 않은 경우와 반대가 됨을 알 수 있다. 즉 주조속도가 빠를수록 크라운이 커진다. 이는 주조속도가 증가할 때 접촉시간 증가에 의한 크라운의 감소량 보다 열유속 증가에 의한 크라운 증가량이 더 크기 때문이다.

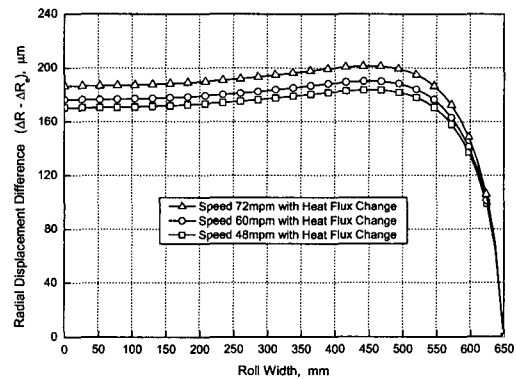


Fig. 11 The effect of casting speed on thermal crown
(The variation of heat flux with casting speed considered)

4.3.4 슬리브 두께 효과

4.1 절에서 설명한 바와 같이 쌍롤형 박판주조에서 주조롤의 표면부는 많이 팽창하려고 하는 반면 롤내부 즉, 슬리브는 표면부의 팽창을 제한하려는 역할을 한다. 그러므로 슬리브의 두께가 얇아지면 표면부의 팽창을 제한하는 힘이 줄어들기 때문에 열팽창이 커지고 롤 굽힘도 커지는 경향이 나타난다. 그러나 슬리브 두께가 감소하는 경우 열팽창과 굽힘 증가 경향은 열박음에 의해 둔화되며 결과적으로 슬리브 두께가 크라운에 미치는 영향은 가장자리 효과에 의해 지배 받는다. 따라서 슬리브 두께가 줄어드는 경우에는 굽힘 증가에 의한 크라운 증가 경향과 평면응력 상태인 가장자리 효과에 의한 크라운 감소 영향이 복합적으로 작용한다. 그리고 슬리브의 두께가 얇아지는 경우 가장자리 효과에 의한 중앙부와 가장자리부의 열팽창의 차이는 줄어든다.

Fig. 12에 주조롤의 직경은 바꾸지 않고 슬리브의 두께만 20% 증가한 경우와 감소한 경우의 크라운을 나타내었다. 4.3.1 절에서 설명한 바와 같이 열박음된 경우에는 슬리브 두께에 따른 크라운

운의 변화는 가장자리 효과에 주로 영향을 받기 때문에 슬리브 두께가 증가할수록 크라운이 증가되는 경향을 보인다. 열박음 효과를 고려하지 않고 슬리브만 해석하면 슬리브 두께가 두꺼울수록 팽창을 제한하는 힘이 커지기 때문에 열팽창이 작아지고 롤 굽힘도 작아지는 경향이 있으므로 슬리브 두께가 증가할수록 크라운이 줄어드는 경향을 확인할 수 있었다.

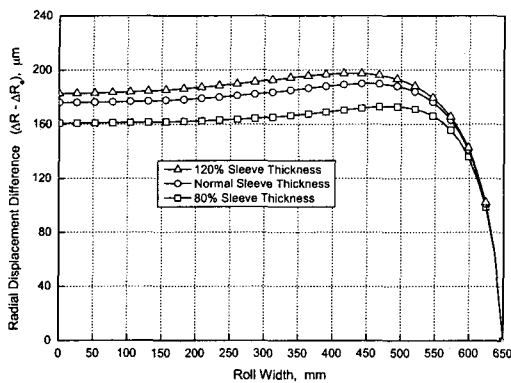


Fig. 12 The effect of sleeve thickness on thermal crown

4.3.5 주조롤 치수 효과

주조롤의 직경과 폭의 변화는 열변형 양상을 바꾸므로 크라운에 영향을 미친다. Fig. 13에 슬리브의 두께는 바뀌지 않고 축의 직경을 변화시켜 주조롤의 직경을 100mm 증가시킨 경우와 감소시킨 경우 롤 뒀에서의 크라운을 나타내었다. 그림에서 보듯이 롤직경이 증가할 수록 크라운은 줄어든다. 이는 계산시 용강 레벨을 동일하게 하고 직경을 변화시킨 결과이다. 용강 레벨(level)이 일정할 때 롤 직경이 증가하면 물과 용강이 접촉되는 접촉길이가 줄어들어 접촉시간이 줄어드는 반면 동일한 주조속도에서 롤이 1회전하는데 걸리는 시간은 길어진다. 이는 주조롤 직경에 의해 주조롤이 용강으로부터 열을 전달받는 시간은 짧아지는 반면 냉각되는 시간은 길어지는 것을 의미하며 그 결과 롤의 온도가 낮아지고 크라운은 줄어드는 것이다.

Fig. 14에 주조롤의 폭을 100mm 증가시킨 경우와 감소시킨 경우의 크라운 변화를 나타내었다. 그림에서 롤폭이 증가하면 크라운이 커지는 것을 볼 수 있다. 롤 폭의 증가는 평면 응력 조건에 기

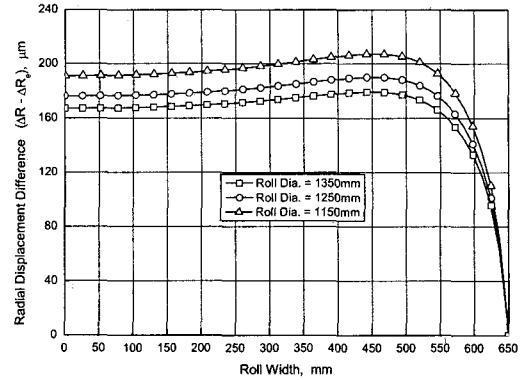


Fig. 13 The effect of roll diameter on thermal crown

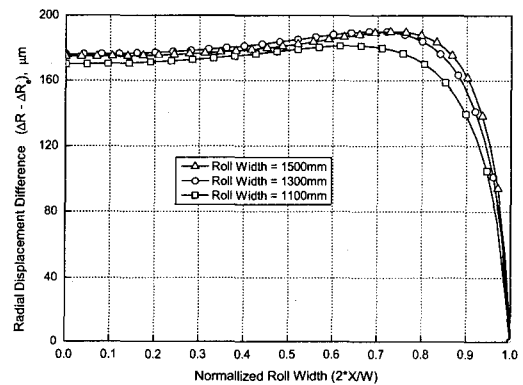


Fig. 14 The effect of roll width on thermal crown

인하는 가장자리 효과에는 영향을 미치지 않는 반면 롤 굽힘을 증가시킨다. 따라서 롤폭의 증가에 의해 크라운이 증가하는 것이며 앞서 언급한 바와 같이 열박음으로 조립된 주조롤에서는 롤 굽힘이 미약하기 때문에 롤폭의 변화에 따른 크라운의 변화도 미약하다. 하지만 롤폭의 증가는 롤의 축방향 팽창이 더 많이 일어날 수 있으므로 중앙부 오목한 정도를 더 크게 할 수 있다. 그림에서와 같이 롤폭이 감소하면 중앙의 오목한 형상이 감소한다. 이것은 롤의 축방향 팽창에 기인한 것이라 할 수 있다. 중앙부의 오목한 형상은 롤폭이 줄어들수록 점차 감소하다가 볼록한 형상으로 바뀌면서 포물선 형태의 크라운으로 크라운 형상이 바뀌게 된다.^(6,16)

5. 결론

열박음의 영향과 소성변형을 고려한 축대칭 열탄소성 모델을 사용하여 쌍롤형 박판주조 공정에서 열적 크라운을 해석하였다.

1. 열적 크라운은 열팽창과 가장자리 효과 및 롤 굽힘에 의해 형성되며, 롤 굽힘에 의해 포항제철 실험설비인 주조롤의 경우에는 "M" 형 크라운이 발생함을 확인하였다.
2. 열박음을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 비교한 결과 열박음이 크라운을 크게 감소시키는 역할을 한다는 것을 확인하였다.
3. 주조 초기에는 크라운이 점차 증가하다가 일정시점에서 최대 크라운을 가진 후 점차 크라운이 줄어들면서 정상상태에 도달하는 양상을 보인다.
4. 쌍롤형 박판주조시 각종 변수에 따른 크라운의 변화를 조사한 결과, 용강에서 주조 롤의 열유속 증가, 주속 증가, 주조롤 직경 감소, 주조롤 슬리브 두께 증가, 주조롤 폭 증가에 의해 롤 크라운이 증가하는 것을 확인하였다.

후 기

이 연구는 교육부 지원 BK21 사업연구비, 한국과학재단지정 최적설계신기술센터의 연구비 지원 및 POSCO 과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

이 연구를 위해 많은 도움을 주던 중 유명을 달리한 고 이용기 박사에게 삼가 감사의 마음을 전합니다.

참고문헌

1. H. Bessemer, US Patent 49053, July 25, 1856.
2. 강태욱 외, "Strip Casting 공정개발 IV," Vol. 1, pp. 1-14, 1996.
3. J. M. Damasse, D. Themines and L. Vendeville, "The Myosotis Project Progress report," La Revue de Metallurgie, Vol. 97, No. 1, pp. 43-52, 2000.
4. K. Tanaka, K. Yamamoto, H. Takata, T. Yamane, T. Matsumoto, R. Hashimoto and Y. Wakiyama, US

Patent 5560421, 1996.

5. B. Lindorfer, H. Bumberger, C. Furst, G. L. Houze, B. D. Love and T. M. Browne, "Perspectives of strip casting technology based on results from the coil cast prototype of allegheny Ludlum," METEC Congress 94, pp. 451-456, 1994.
6. 강충길, 김영도, "용탕직접압연공정의 초기 조건 예측 및 냉각로울 설계," 한국 소성 가공학회지, 제 4 권, 제 3 호, pp. 233-244, 1995.
7. C.G. Kang & Y.D Kim, "Optimum shape design techniques of direct roller under thermal load and rolling force in the direct rolling process of molten materials considering solid fraction," Journal of Materials processing Technology 67, pp. 71-77, 1997.
8. C.G. Kang, Y.D. Kim and Y.J.Chung, "A thermal process analysis considering sheet thickness variation of width direction in twin roll strip continuous casting," THERMEC'97, pp. 2193-2199, 1997.
9. C.G. Kang, Y.D Kim and S.W.Lee, "A Solidification and cooling roll deformation analysis considering thermal flow in twin roll strip continuous casting process," The Minerals, Metal & Materials Society, pp. 65-86, 1996.
10. R. Kopp, U. Albrecht-Fruh, L. Hentschel, U. Rudolphi, J.W. Schmitz, D. Senk & F. Simon, "Technological challenges of the twin roll strip casting process," THERMEC'97, pp. 2201-2207, 1997.
11. MARC manual, MSC. Software Korea, 2001.
12. 김완수, 정형태, 이용기, 정성인, 강태욱, "쌍롤식 박판주조공정의 응고시 열전달계수값 모델에 관한 연구," RIST 研究論文, 제 13 권, 제 4 호, pp. 396-402, 1999.
13. N. ZAPUSKALOV & M. VERESCHAGIN, "Effect of technological factors on strip profile in twin roll casting process," ISIJ international, Vol. 38, No. 10, pp. 1107-1113, 1998.
14. Davy Distington Limited Internal Report Spec. No. 104416, 1992.
15. G. Hohenbichler, U. Albrecht-Fruh, J. M. Damasse and R. Capotosti, "Future Perspectives of the strip casting process for flat steel production," Proceedings of the CCC'2000 in Linz, Innovation Session, Paper

No. 6, 2000.

16. R. Kopp, F. Hagemann, L. Hentschel, J. W. Schmitz and D. Senk, "Thin-strip casting-modeling of the combined casting/metal-forming process," J. Mat. Proc. & Tech. 80-81, pp. 458-462, 1998.