쌍롤형 박판주조공정에서 주조 롤의 열응력 및 열변형 해석

박철민† · 김완수* · 박경진**

(2002 년 4 월 15 일 접수, 2002 년 6 월 19 일 심사완료)

Analysis of Thermal Stress and Deformation of Casting Roll in Twin Roll Strip Casting Process

Cheol-Min Park, Wan-Soo Kim and Gyung-Jin Park

Key Words : Twin Roll Strip Casting(쌍롤형 박판주조), Thermal Stress(열응력), Thermal Deformation (열변형), Finite Element Analysis(유한요소해석)

Abstract

The casting roll design is one of the most important requirements in twin roll strip casting process. Coupled analyses of heat transfer and deformation for the cast roll are carried out by use of the finite element program MARC to examine the thermal stress and deformation. The effects of several factors on thermal stress and deformation are also investigated. The amount of thermal stress increases when the ni thickness increases and when the casting speed and the copper sleeve thickness decrease.

1. 서 론

현재 세계 철강공급능력은 수요를 초과하는 시대에 이미 이르러 일본, 구미의 기존 철강선진국 및 1980 년대 이래 급격히 성장한 한국 및 동남아 신흥 철강국 등을 포함한 세계 철강사는 거대한 장치 및 자본투입을 근간으로 하는 기존의 독점적 대량 생산체제에서 벗어나 공정생략형 기술을 바탕으로 한 소규모 생산체제로 전환하는 추세이다. 따라서 철강제품의 고부가가치화, 생산비용의 저감과 공정의 최적화를 목표로 하여 세계 철강산업계의 근원적인 구조조정이 필연적이다. 이러한 현실을 감안해 볼 때 향후 철강산업의 기술혁명을 주도하게 될 대표적인 공정생략형 기술로는 제조공정의 생략 정도에 따라 박슬라브 주조 기술(thin slab casting) 및 박판주조공정(strip casting)등과 같은 혁신주조기술 및 박판주조공정에서 얻어진 박주편을 열간 압연하여 초극박 열연강판을 제조함으로써 냉간 압연강판을 대체할 수 있는 공정을 꼽을 수 있다.[1,2]

† 책임저자, 회원, 포항산업과학연구원, S/C 프로젝트팀
E-mail : cmpark@rist.re.kr
TEL : (054)279-6662 FAX : (054)279-6679
* 포항산업과학연구원
** 회원, 한양대학교 기계정보산업공학부

이 중 박판주조공정은 기존의 공정이 슬라브 혹은 박슬라브를 만든 후 이를 압연하여 철강판재를 만드는 것임에 반해 용강으로부터 직접 판재를 제조할 수 있는 기술로서 열간 압연공정 전체를 생략할 수 있는 획기적인 기술이다. 이 기술은 기본적으로 맞물려 돌아가는 두개의 롤에 용강을 부어 응고시킴과 동시에 일정량의 열간 변형을 가해 1~6 mm 의 철판재를 제조하는 방식[3]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 하기 때문에 기계 또는 기계요소 설계가 매우 중요하다.

박판주조공정은 매우 높은 온도의 용강이 직접 롤에 접촉하면서 용강을 응고시킴과 동시에 주편에 압하력을 주어 바로 얇은 주편으로 생산하는 주조공정으로 박판의 형상을 결정하는 롤의 중요성은 대단히 크다. 따라서 성공적인 롤의 제작은 공정의 성패를 좌우하게 되므로 롤 설계는 박판주조공정의 핵심이라 할 수 있다.

이런 롤의 설계를 위해서는 롤의 열응력 및 열변형에 관여되는 변수들의 영향을 계산을 통해 정량화하는 것이 필요하다. 롤이 용강과 접촉하는 동안에는 용강으로부터 매우 큰 열량이 롤에 들어가므로 롤 표면 부근의 온도구배가 크게 되고 따라서 열응력은 상당히 크게 발생한다. 그리고 용

강과 접촉하지 않는 동안에는 냉각수 구멍의 열방출에 의해 냉각된다. 이와 같이 롤은 가열과 냉각을 반복하고 특히 롤 표면은 가열과 냉각을 반복하는 온도폭이 크기 때문에 큰 값의 열응력이 반복적으로 바뀐다. 이로 인해 롤표면에 균열이 생길 수 있고. 균열이 생기면 그 균열이 주편의 표면에 그대로 전달되어 주편 표면품질을 나쁘게 하며, 심한 경우 냉각수의 누수위험까지 초래할 수 있다. 따라서 조업의 안전과 표면품질을 좋게 하기 위해서 롤 표면 균열 가능성이 적도록 롤을 설계하여야 한다.

Nikolai 와 Mihail[4]는 쌍롤형 박판주조과정에서 주편형상에 영향을 주는 인자에 대해 연구하였고, 김용희[5] 등은 쌍롤형 박판주조법에서 용강의 유동을 계산하고 유동과 더불어 롤의 열전달 해석을 수행하였다. Kang[6-12]은 실험적인 방법으로 열전달계수를 결정하고 롤의 열적해석을 하였고, 또한 열하중과 압연하중을 받는 롤에서 변형의 최적형상과 주편두께의 변화를 연구하고, 롤의 수명에 대해 연구하였다. 그리고 Lewis[13] 등은 열응력 해석모델에 대해 열전달계수값에 대해 최적화하는 연구를 하였다. Carlos Alexandre[14] 등은 쌍롤형 연속주조기의 열전달을 수학적인 방법으로 접근하였으며, Kopp[15] 등은 주조롤 치수에 따른 크라운의 변화를 상용프로그램을 통해 조사하였다. 그러나 이들의 연구 결과들은 열전달에 의한 응력 및 변형만을 고려하였다.[16] 박판주조 롤에서 고려해야 할 롤 내부응력 및 열팽창량에 영향을 미치는 인자는 롤 재질, 냉각수 구멍위치 및 크기와 표면처리에 사용되는 재료 및 표면처리 재료 두께 등이 있는데 이러한 인자의 적절한 선정이 박판주조용 롤의 중요 인자라 할 수 있다.[17]

본 연구에서는 이러한 제인자들이 롤에 어떤 영향을 미치는지를 알아보기 위해 고려할 수 있는 설계인자를 정하여 이 인자들의 영향을 검토하였다. 롤의 해석은 열응력과 열변형 및 온도를 기준으로 제인자의 영향을 판단하였다. 박판주조공정은 열의 흡,방열이 반복적이기 때문에 롤의 온도계산은 필수적이며 온도계산에서 얻어진 결과를 통해 롤의 내부 응력 및 열팽창을 구할 수 있다. 해석시 롤의 전체 모델을 해석하는 것이 가장 좋으나 해석 시간의 단축을 위해 해석모델을 최소의 형상으로 해석하고 해석의 정확성을 검토하기 위해 냉각수 구멍 개수에 따른 응력 및 변형을 비교하였다. 그리고 롤의 모재를 보호하기 위해 롤의 표면에 처리된 재료의 두께를 변화시키면서 응력과 변형을 비교하였다. 또한 모재의 두께 변화에 따른 열응력 변화를 검토하였으며 롤의 회전 속도에 따른 롤의 냉각능 변화 등을 모재의 재질에 따라 비교하였다. 각 경우의 열응력과 변형해석은 상용 유한 요소해석 프로그램인 MARC[18]를 사용하였다.

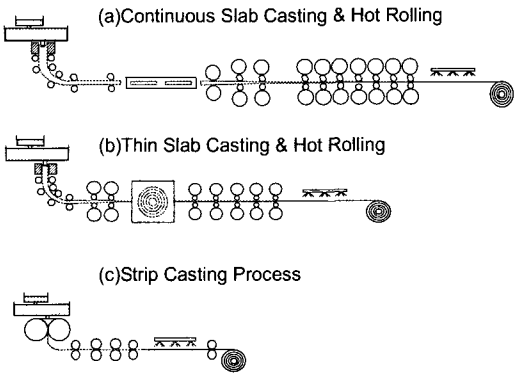

Fig. 1 From conventional slab to strip cating shortened process routes reduce costs

2. 쌍롤형 박판주조공정

쌍롤형 박판주조공정은 기존 연속주조 및 열간압연 공정을 생략하고 바로 열연코일을 생산하는 획기적인 공정 축약형 기술이다. Fig. 1 에서와 같이 기존 연주 공정은 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 연주공정과 비슷하나 열연부하를 감소시키기 위해 슬라브의 두께가 50~75mm 로 주조하고 이를 압연하여 열연코일을 생산하는 공정 기술이다.
한편 박판주조기술은 박슬라브 주조기술 보다 진일보한 개념으로 슬라브를 만들지 않고 용강에서 직접 열연코일을 1~6mm 두께를 생산하므로 전체 열간 압연공정을 생략할 수 있어 투자비는 물론 생산원가를 대폭 저감 시킬 수 있는 획기적인 신주조기술이다. 이 기술은 1865 년 영국의 Bessemer 에 의해 창안[3]되어 시도되었으나 양질의 판재를 생산하기 위해서는 여러가지 기술이 개발되지 못한 실정이었다. 그러나 1970 년대 말과 1980 년대 초에 이 기술이 관심의 초점이 되기 시작하여 현재까지 활발히 연구가 진행되고 있다.

박판주조공정은 Fig. 2 와 같이 회전하는 두 롤에 용강을 직접 부어 응고시키면서 동시에 압연을 하는 공정으로 롤은 물론 용강 공급 노즐, 용강이 새어나오지 못하게 하는 에지댐(edge dam) 등의 요소 기술이 대단히 중요하며 이런 기계장치를 정밀

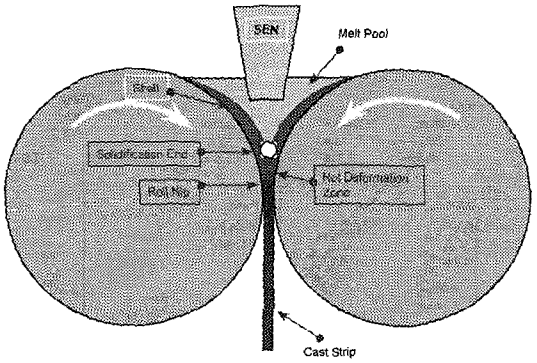

Fig. 2 Schematic representation of twin roll strip casting process

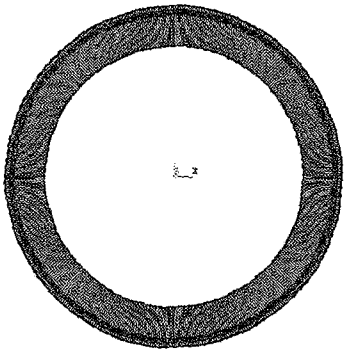

Fig. 3 The mesh of cooling roll

하게 제어(control)하는 기술 또한 매우 중요하다. 그 중에서도 롤은 주편을 생산해 내는데 가장 큰 역할을 하고 있다.

3. 해석모델링

압연공정에서는 압연롤 자체에 가해지는 외력이 크기 때문에 롤의 평평화 현상, 롤의 굽힘 및 전단현상 등이 나타난다. 그러나 박판주조용 롤은 공정의 기계적, 물리적인 특성상 용강상태에서 거의 응고됨과 동시에 주편이 롤을 통과하고, 가해지는 압하력이 크지 않기 때문에 물리적인 외력이 일반적인 압연에 비해 매우 작은 상태에서 사용된다.

압연에 의한 물리적인 외력은 롤의 응력분포에 크게 영향을 미치지 않을 것이기 때문에 물리적인 외력은 무시하고 롤표면의 열응력의 영향을 중심으로 검토하였다. 해석 모델링은 스틸 롤과 구리 롤에 대해 응력계산을 수행하였으며 특히 구리 롤을 더 중점적으로 계산하였다.

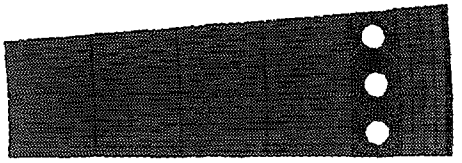

Fig. 4 The analysis model of axisymmetric section plane

Fig. 3 은 응력계산을 위한 모델의 축방향 수직단면을 나타낸 것이며 시간에 따라 경계조건이 변화하므로 Fig. 4 에 나타낸 것처럼 수직단면 전체를 계산하지 않고 롤 냉각수 구멍의 몇 부분만 취하여 2 차원 평면변형해석을 하기 위한 모델로 선정하였다. 원주단면의 경계조건으로는 원주방향으로는 변형이 없이 반경방향으로만 변형이 생길 수 있도록 구속하였으며, 롤의 회전에 대한 경계조건은 롤에 가해지는 열적 경계조건 즉, 열 유속을 회전하는 것 처럼 모사시켜 용강이 롤에 접촉하고 있는 각도에서는 열하중이 가해지고 그렇지 않은 구간에서는 열하중이 없이 롤 자체 냉각이 되도록 하여 롤의 회전과 같은 효과를 가지게 하였다. 이와 같이 열적 경계조건은 롤에 용강의 열을 받는 부분과 받지 않는 부분으로 나누어 열전달 및 열응력 해석을 하였다.

온도해석시 용강과 접촉시에는 롤 표면에 일정량의 열량이 흡열된다는 경계조건을 사용하였으며 냉각수 구멍에서는 구멍에서의 냉각수 유속 및 형상, 온도 등의 효과를 고려할 수 있는 열전달계수 값을 사용하여 계산하였다.[19]

롤 닢(nip) 부근에서는 매우 높은 온도구배가 예상되어 유효(von Mises)응력이 높은 온도에서 항복응력을 초과할 수 있어 엄밀히는 탄소성유한요소법으로 해석하는 것이 필요하나 많은 양의 계산이 필요하므로 빠르게 결과를 얻을 수 있는 탄성유한요소법을 이용하여 계산하여 구한 결과에 대해 소성영역을 감안하여 해석하였다. 또한 회전하는 롤이 위치에 따라 각각 다른 경계조건에 접하게 되므로 주조 진행상황과 같이 온도가 변화하는 천이해석(transient analysis)방법을 이용하여 계산하였다.

4. 해석 결과

박판주조용 주조롤은 충분한 크기의 용강풀(pool)을 형성하고, 용강과 롤의 접촉면적을 크게

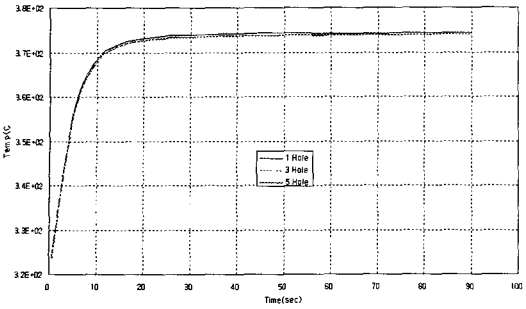

Fig. 5 Temperature variation with calculation domain size

하기 위하여 일반 압연롤 보다 훨씬 큰 직경을 가진다. 박판주조에서 롤은 연속주조에서의 몰드(mold)의 역할과 압연에서의 롤의 역할을 동시에 수행한다. 롤의 몰드 역할 관점에서 보면 롤은 냉각수 구멍에 의한 냉각능이 매우 중요하고 압연롤의 역할 관점에서 보면 롤의 변형 및 롤의 열팽창이 매우 중요한 역할을 한다.

박판주조 롤의 해석에 있어 롤의 열전달해석과 열응력해석을 동시에 수행하였으며, 롤의 열전달과 열응력 및 변형을 통해 공정변수가 박판주조에 미치는 영향 등을 고찰 하였다.

계산시 주요 공정변수로는 열탄성 계산을 통하여 계산영역이 롤의 열응력 및 열변형에 미치는 영향, 구리 롤에서 표면의 니켈 도금층 두께의 변화가 열전달 및 롤의 열응력에 미치는 영향, 구리 슬리이브 두께의 변화가 열전달과 열응력에 미치는 영향 및 주조속도가 열전달과 열응력에 미치는 영향 등을 조사하였다.

4.1 계산영역이 응력 및 롤 변형에 미치는 영향

롤의 열전달과 열탄성 변형 해석을 정확하게 하기위해서는 롤전체 영역에 대한 3 차원 해석이 필요하지만 계산시간과 컴퓨터의 한계 때문에 3 차원 계산을 실시할 수 없고 주로 r-θ 단면에서 2 차원 계산을 수행하였다. r-θ 단면에서 2 차원 계산을 실시할 경우에도 360° 전 영역을 해석하는 것은 비효율적이다. 따라서 계산영역을 냉각수 구멍 몇 개의 영역만으로 국한 할 수 밖에 없고 계산영역이 감소하면 필연적으로 오차를 유발하게 된다. 따라서 여기서는 계산영역을 냉각수 구멍 1 개, 냉각수 구멍 3 개, 냉각수 구멍 5 개 영역으로 바꾸면서 열전달 및 열응력을 계산하여 계산영역의 크기 변화가 계산 결과에 미치는 영향을 조사하고 계산영역을 롤 몇 개의 영역으로 국한함에 의해 발생된 오차의 정도를 검증하였다.

계산조건은 주조할 때의 조건과 비슷한 조건으로 하였다. 롤의 회전속도는 50 mpm(m/min)으로 하고 열유속(heat flux)은 7.55 MW/m^2 조건으로

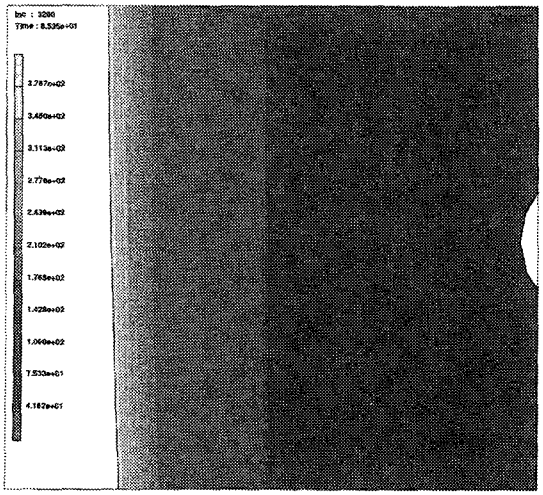

Fig. 6 Temperature distribution at the roll nip

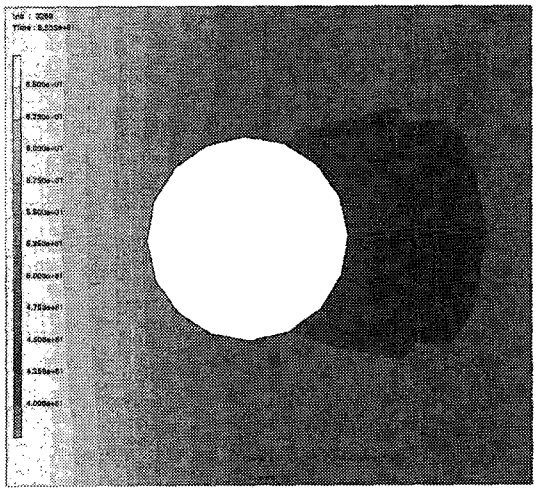

Fig. 7 Temperature distribution around cooling hole at the roll nip

계산하였다. 계산단계는 매 계산시 마다 2 도씩 회전하는 것으로 하고 총 20 회전에 3600 단계의 계산을 하였다. Fig. 5 는 20 회전까지의 냉각수 구멍 개수에 따라 롤 닢에서의 표면온도를 나타낸 것이다. 냉각수 구멍이 1, 3, 5 개의 경우 온도차이는 거의 없으며 시간의 변화에 따라 온도 변화도 동일하게 변화한다.

Fig. 6 은 20 회전후의 롤 닢에서의 롤 표면 온도분포를, Fig. 7 은 롤 닢에서의 냉각수 구멍주위의 온도분포를 나타낸 것이다.

롤에서의 온도 변화는 매우 급격한 변화를 일으키고 있다. 롤 닢부에서 롤 표면 온도가 약 378°C 이고 180 ° 회전 후의 온도는 106°C 로 냉각되었으

며 매니스커스(meniscus) 직전의 온도는 약 80°C 정도이다. 이와 같이 롤의 회전시 롤닢에서 최대이고 닢을 빠져나오면서 냉각되기 시작해서 매니스커스 까지 오면 최소온도가 되며 이를 Fig. 8 에 나타내었다.

Fig. 9 는 해석영역크기에 따른 롤 닢에서의 롤 팽창량을 나타내고 있다. 롤 닢에서의 최대 팽창량은 반경방향으로 약 310 micron 정도의 꽤 큰 팽창을 보이고 있는데 이런 팽창은 주편두께에 그대로 영향을 주기 때문에 주조시간에 따른 팽창을 고려하여 주조 롤 갭을 조정해야 할 것이라고 생각된다. Fig. 10 은 주조 전 원래의 롤 상태에서 열팽창에 의해 냉각수 구멍이 롤 열변형으로 위치이동한 상태를 나타내고 있다. 이와 같은 롤은 닢에서 열적경계조건에 의해 팽창하고 다시 롤 닢을 빠져 나와 열적 경계조건이 없을 때 다시 수축하는 주기적인 팽창, 수축작용을 반복하게 된다.

Fig. 11 과 Fig. 12 는 롤 닢에서의 유효 응력 분포를 나타내고 있다. 유효 응력이란 소성변형이 일어나는지 여부를 판단하기 위하여 사용하는 응력으로 유효응력이 항복강도보다 크면 소성변형이 일어남을 의미한다. Fig. 11 에서 최대유효응력은 1.035×10^9 N/m^2 이며 이는 매우 높은 값으로 실제의 경우에는 이렇게 높은 응력은 걸리지 않으며 탄성모델을 사용하였기 때문에 유효응력이 이렇게 높게 나왔다. 이 유효응력으로 볼 때 롤 표면부의 급격한 온도 구배에 의해 소성변형 범위에 있으나 원주방향 압축응력이 지배적이기 때문에 실제 소성은 거의 일어나지 않거나 매우 작을 것으로 판단된다.

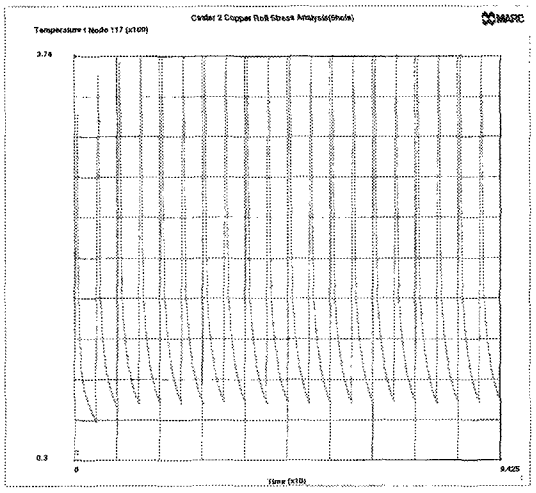

Fig. 8 Temperature variation of roll surface with time

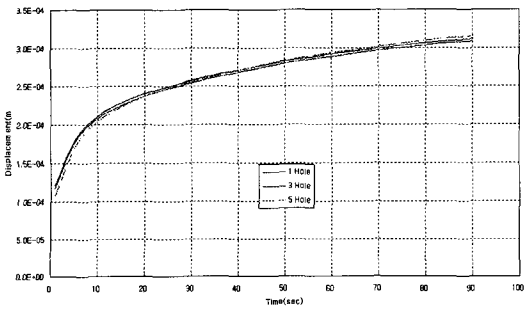

Fig. 9 Thermal expansion with calculation domain size

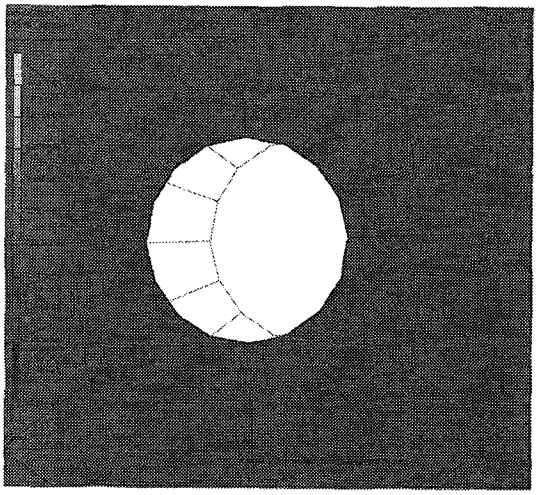

Fig. 10 Change of cooling hole position due to the thermal expansion

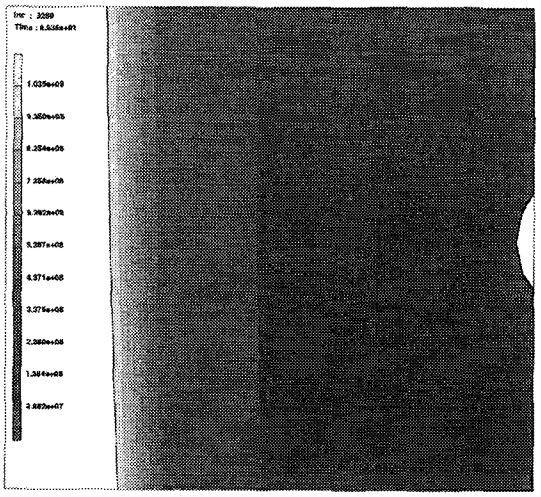

Fig. 11 von Mises stress distribution near roll surface at the roll nip

Fig. 12 는 냉각수 구멍 주위의 유효응력분포를 나타내고 있는데 냉각수 구멍 주위의 유효응력은 $4 \sim 7 \times 10^7$ N/m^2 이며 구리의 항복응력은 3.7×10^8 N/m^2 이므로 냉각수 구멍 주위에 응력분포는 항복응력 이하이다.

롤 닢을 지나 180° 회전후 롤 표면의 유효응력은 표면 온도가 점점 낮아지므로 유효응력도 점차 낮아져 약 2.043×10^8 N/m^2 이며, 매니스커스에 도달하기 직전의 유효응력 분포는 1.255×10^8 N/m^2 으로 줄어든다. 롤 닢 지점에서 응력은 소성변형영역에서 롤 닢을 지나면서 점차 탄성변형영역으로 복귀되며 복귀된 상태의 응력은 높지 않은 상태이다. Table 1 은 롤의 위치에 따라 응력과 온도를 정리하여 나타내었다.

4.2 니켈 두께 변화에 따른 열전달 및 열변형 해석

롤의 표층부와 가까운 구리 층을 보호하고 구리 계면의 온도를 낮출 목적으로 전기 도금 방식으로 니켈도금을 하는데 이 방법의 원리는 열전도률이 낮은 니켈 층만 높은 온도 상태에 있고 그 안쪽에 있는 구리 슬리이브(sleeve)는 상대적으로 낮은 온도상태에 두도록 하는 것이다. 그러나 전기도금으로 도금된 니켈도 온도 상승에 따라 경도치가 떨어져 내마모성이 약해 주조 동안 쉽게 마모가 될 수 있으므로 니켈층의 두께변화가 니켈부의 온도 변화에 미치는 효과를 검토하였다.

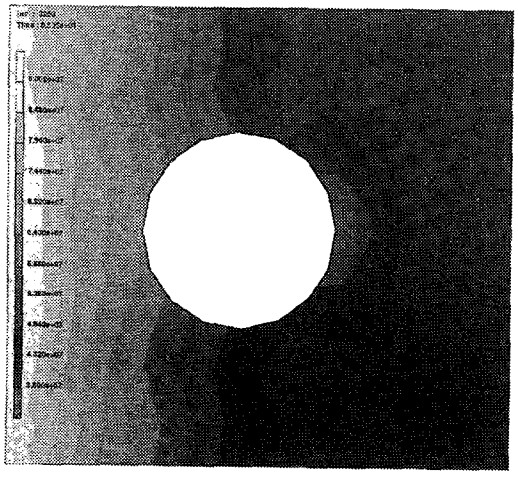

Fig. 12 von Mises stress distribution around the cooling hole

Table 1 Stress and temperature at each position

위치	nip	Nip 에서 180 도 회전 후	Meniscus 직전
Stress (N/m^2)	1.035 E9	2.043 E8	1.255 E8
온도(°C)	378	106	80

Fig. 13 은 니켈 두께에 따른 롤표면의 온도 분포를 나타내고 있는데 니켈 두께가 4mm 일 때 가장 온도가 높게 나타난다. 이것은 니켈의 열전도도가 구리 보다 낮기 때문에 두께가 두꺼울수록 열장벽이 크기 때문이며, Fig. 14 에서와 같이 니켈과 구리의 계면에서의 온도의 급격한 변화를 볼 수 있다. 따라서 니켈 두께에 따라 구리 층의 온도는 반비례관계가 성립된다. 이와 같은 결과는 유효응력에도 설명되는데 Table 2 에서 나타나듯이 구리층의 온도가 낮고 니켈 표면이 온도가 높게 되면 열응력은 온도차이가 크면 클수록 높기 때문에 4 mm 두께의 니켈 도금 롤이 응력이 가장 높게 나타난다. 그리고 구리 층이 온도가 낮으므로 열팽창도 작게 나타나며 이 영향이 니켈 층 까지 영향을 미쳐 표층의 최대 팽창량도 가장 적게 나타남을 알 수 있다.

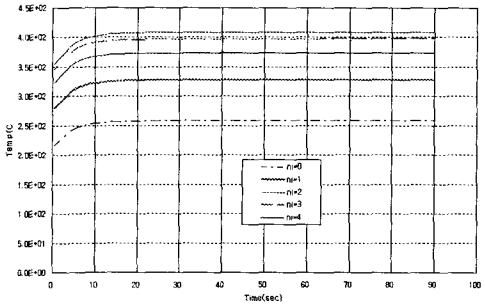

Fig. 13 Surface temperature for the thickness of Ni plating

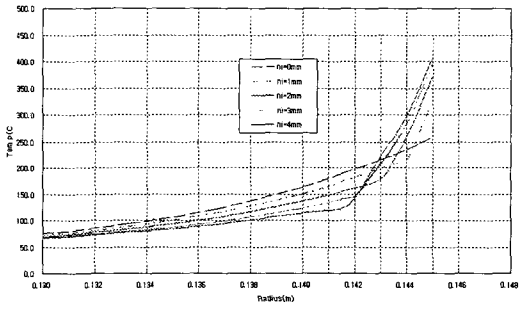

Fig. 14 Temperature distribution of the roll at the radial direction

Table 2 Stress and displacement for the thickness of the surface material

니켈두께	0 mm	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm
Stress(N/m^2)	6.89 E8	8.58 E8	1.03 E9	1.14 E9	1.2 E9
변위(mm)	0.34	0.329	0.309	0.3	0.25

4.3 구리 슬리이브 두께 변화에 따른 열응력 변화

구리 슬리이브의 두께 변화는 실제 주조 중에는 일어나지 않는 현상이며, 사용했던 롤을 재가공 또는 도금을 위해 표층재료를 깎아낼 때 표층재료를 완전히 제거하기 위해 구리 모재까지 가공해야 할 경우에 나타나는 현상이다. 이것을 다시 일정한 도금두께로 입혀 주조할 경우 롤의 냉각조건이나 롤의 응력분포가 달라져 주조에 영향을 미칠 수 있으므로 이런 영향을 조사하였다.

Table 3 은 구리 슬리이브 변화 즉, 롤의 반지름 변화에 따른 롤 표면에 온도와 변위를 나타내고 있다. 이 결과에서 구리 슬리이브의 두께가 냉각수 구멍과 거리가 멀수록 롤 표면 온도는 높게 나타나고 있다. 실제적으로 냉각수 구멍과 롤 표면과의 거리가 가까울수록 냉각효과가 뛰어나 주편의 냉각을 원활히 할 수 있을 것이라 생각할 수 있다. 그러나 냉각수 구멍과 롤 표면과의 거리가 너무 가까우면 롤이 형상이 구불구불해지는 리플(ripple) 현상이 생겨나므로 적당한 거리를 유지해야 한다. 계산에 적용한 치수에서는 리플현상이 일어나지 않았지만 이 치수 보다 더 가까우면 리플 현상이 일어날 것이다. 그리고 표면온도가 너무 낮으면 주편에서 급냉이 되어 주편의 결함을 발생시킬 우려가 있으므로 롤의 표면온도도 적당한 온도범위내에 있어야 할 것이다. 롤의 반지름 변화에 따른 롤 팽창은 표면온도가 낮을수록 팽창량이 작고 시간에 따라 계속적으로 증가하고 있다. 그러나 시간이 지남에 따라 정상상태의 팽창을 유지할 것이나 냉각효과가 크게 나타나는 반지름 610mm 인 경우는 정상상태의 팽창량을 유지하기에는 오랜 시간이 걸릴 것이다. 그러므로 롤이 최종 가공된 치수에서 팽창량을 계산하여 주조시 시간에 따른 팽창량을 보상해 주어야 한다.

Table 3 Temperature and displacement for the roll radius variation

Cu 반지름	610 mm	615 mm	620 mm	625 mm
온도(℃)	337.66	346.73	360.11	374.0
변위(mm)	0.243	0.263	0.289	0.309

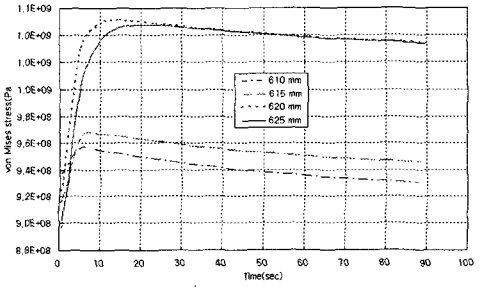

Fig. 15 von Mises stress for the roll radius variation

Fig. 15 는 롤의 반지름 변화에 따른 롤 표면의 유효 응력 분포를 나타내고 있다. 이 응력분포는 반지름이 작으면 작을수록 적은 응력 분포를 가지는데 이 유효 응력 분포는 온도에 따라 비례한다. 롤의 온도는 반지름이 큰 롤이 가장 크게 나타나고 있으며 응력도 크게 나타나고 있다. 그리고 응력의 분포가 주조초기에는 큰 응력값을 보이다가 주조경과에 따라 점점 줄어드는 현상을 볼수 있는데 이것은 초기 롤 온도와 용강의 온도차이가 커서 응력이 많이 발생되고 점점 롤의 온도가 올라감으로 용강과 롤 온도의 온도차이가 줄어들면 응력이 점점 감소하기 때문에 나타나는 현상이다.

4.4 주조속도에 따른 열응력해석

박판주조에서 주조속도가 바뀌면 롤의 온도분포가 변하고 따라서 온도편차에 의해 생기는 열응력 및 열변형도 바뀌게 된다. 특히 열변형의 변화에 의한 롤의 반경증가는 주편두께의 변화를 야기하므로 주조속도에 따른 롤의 열변형을 예측하여 주조속도가 바뀔 때 롤의 열팽창 보상값도 적절하게 바꿀 필요가 있다. 따라서 여기서는 주조속도의 변화에 따른 롤의 온도분포의 변화, 롤의 열변형의 변화 및 롤의 열응력의 변화를 조사하였다.

주조속도가 빨라지면 롤이 1 회전 하는 동안 걸리는 시간이 짧아지고 용강 또는 주편과 접촉하는 시간도 짧아진다. 주편과 접촉하는 시간이 짧아지면 롤의 특정부분이 매니스커스에서 닢까지 회전하는 동안 받는 총열량도 작아지므로 닢을 빠져나오는 롤의 온도도 낮아진다. 그러나 주조속도가 증가함에 따라 닢에서 매니스커스로 회전하는 동안 롤이 냉각되는 시간이 짧아지므로 매니스커스로 들어가는 롤의 온도는 높다. 롤의 열전달 계산에서는 용강 또는 주편과 접촉하는 부분에 일정한 열유속 경계조건을 사용하였다. 계산은 롤이 20 회전할 때까지 실시하였다.

Fig. 16 에 구리 롤을 이용하여 40mpm, 60mpm, 80mpm, 100mpm, 120mpm 으로 주조하는 경우 시간에 따른 닢에서의 롤표면 온도변화를 나타냈다.

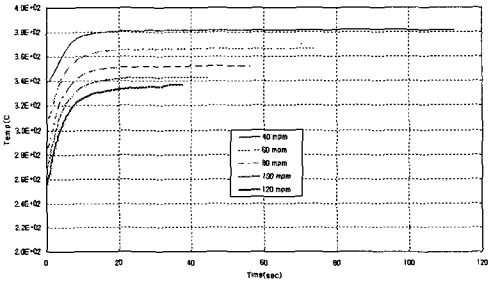

Fig. 16 Temperature variation for the roll speed

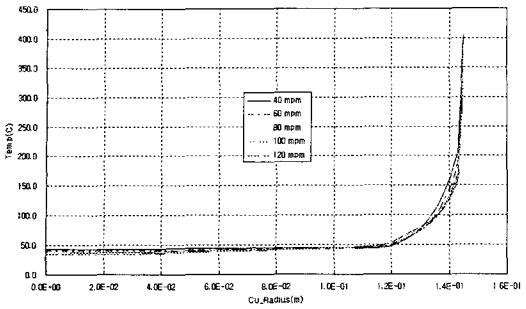

Fig. 17 Temperature distribution along the radial direction

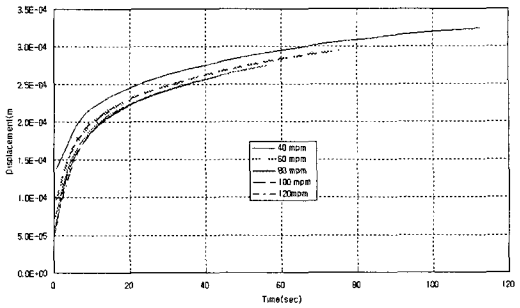

Fig. 19 Thermal expansion for the roll speed

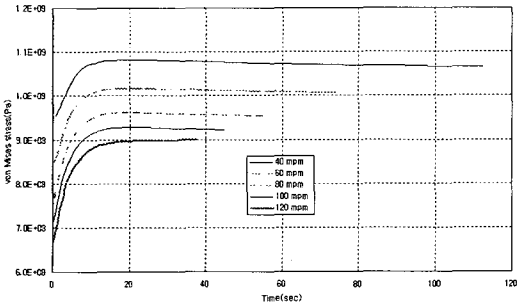

Fig. 18 von Mises stress for the roll speed

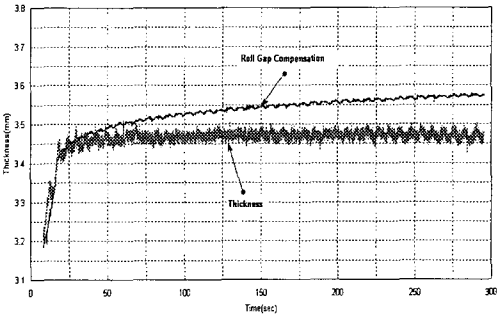

Fig. 20 Real strip thickness and roll gap compensation

주속이 빨라짐에 따라 롤 넢의 온도는 감소함을 볼 수 있다. 이것은 매니스커스에서 넢까지 롤이 회전하는 동안 받는 열량이 주속이 빨라짐에 따라 줄어들기 때문이다.

Fig. 17 은 위의 5 가지 주속에 대해 넢에서 반경방향으로의 온도변화를 나타냈다. 표면쪽에 도금된 니켈의 영향으로 롤 표면 근처에서 온도변화가 매우 급격함을 볼 수 있다. 주속에 따른 온도 변화는 롤 표면의 경우와 마찬가지로 롤 내부에서도 주속이 빨라짐에 따라 냉각되는 시간이 짧아지기 때문에 온도의 하강 폭이 작다. 시간에 따른 넢에 위치한 롤표면의 유효응력을 Fig. 18 에 나타냈다. 온도분포에서 보듯이 주속이 느린 경우가 표면에서 온도가 높기 때문에 온도에 의해 발생되는 열응력도 높다. Fig. 19 에 시간에 따른 넢에 위치한 롤의 반경변화를 나타냈다. 주조속도가 느린 경우 롤의 온도가 높으므로 당연히 열팽창량도 많아진다. 따라서 주속이 느릴수록 넢에서의 반경증가가 커진다. 주조시간에 따른 넢에서의 반경변화는 주조시간에 따른 주편의 두께변화를 야기하므로 균일한 두께의 주편을 얻기 위해서는 계산된 결과를 이용하여 롤의 열팽창량을 보상해 주어야 한다.

Fig. 20 은 실제 주조에 적용된 예로서 롤의 열팽창을 보상하기 위한 롤 갭의 변화와 실제주편의 두께를 나타낸 것이다. 약 10 ton 용량의 용강으로 약 300 초 정도 주조한 결과이다. 실제 주조에서 롤의 열팽창으로 롤갭이 줄어드는 현상을 시간에 따라 롤 갭을 증가시켜 보상함으로서 하여 생산되는 주편두께는 균일하게 나오고 있다. 이것은 열응력과 열변형의 계산결과를 토대로 현장에 직접 적용한 예이다.

5. 결 론

(1) 롤의 응력 및 변형 계산에서 계산의 영역변화로 인한 온도 차이가 거의 없고 이로 인한 변형도 매우 적어 계산영역이 응력과 열 변형 계산에 미치는 영향은 매우 작다.

(2) 구리 슬리이브를 보호할 목적의 표면 처리 재료로 도금된 니켈은 두께가 두꺼울수록 구리 슬리이브의 온도가 낮아져 구리 슬리이브의 수명은 연장할 수 있으나 니켈 표면의 온도가 더 높아져 표면 층의 응력이 높아진다.

(3) 구리 슬리이브의 두께는 얇으면 얇을수록 표면온도가 낮아져서 열응력이 낮아지지만 너무 얇으면 냉각수 구멍과 롤 표면과의 거리가 너무

가까우므로 롤표면 형상이 구불구불해지는 리플 현상이 생겨나므로 적당한 거리를 유지해야 한다.

(4) 온도에 따른 열응력은 속도가 빠르면 빠를수록 표면온도가 낮아져 그만큼 열응력이 낮아진다. 그러므로 용강의 응고가 되는 범위 내에서 속도가 빠르면 응력이 그만큼 작아져 롤의 수명을 연장할 수 있다.

(5) 롤의 열팽창은 니켈의 두께, 구리 슬리이브의 두께 및 주조속도에 따라 달라지므로 주조시 주어진 조건 즉, 각 재질의 두께나 주조속도에 따라 열팽창 예상이 가능하여 팽창량 만큼 롤 갭을 보상함으로서 일정한 두께의 주편을 얻을 수 있다.

후 기

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

참고문헌

(1) RIST, 1992, *Development of Strip Casting Process II*, in Korean, Vol. 3, pp. 500~539.

(2) RIST, 1994, *Development of Strip Casting Process III*, in Korean, Vol. 3, pp. 236~270.

(3) Bessemer, H., 1865, US Patent 49053, July 25.

(4) Zapuskalov, N. and Vereschagin, M., 1998, "Effect of Technological Factors on Strip Profile in Twin Roll Casting Process," *ISIJ international*, Vol. 38, No. 10, pp. 1107~1113.

(5) Kim, Y. H., Lee, J. H., Choi, J. T., Oh, G. H., Yoon, J. G. and Ra, H. Y., 1996, "Analysis of Melt Flow and Heat Transfer during Twin-Roll Strip Casting using BFC," *Journal of the Korean Inst. Of Met. & Mater.*, Vol. 34, No. 10, pp. 1353~1361.

(6) Kang, C. G. and Kim, Y. D., 1998, "Model Experiments for the Determination of the Heat Transfer Coefficient and Transition Thermal Analysis in the Direct Rolling Process," *Journal of Materials processing Technology*, Vol. 84, pp. 210~224.

(7) Kang, C. G. and Kim, Y. D., 1997, "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.

(8) Kang, C. G. and Kim, Y. D., 1997, "A Thermal Elastic-Plastic Finite Element Analysis to Roll Life Prediction on the Twin Roll Strip Continuous Casting Process," *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 28B, pp. 1213~1225.

(9) Kang, C. G., Kim, Y. D. and Lee, S. W., 1998, "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.

(10) Kang, C. G. and Kim, Y. D., 1996, "Heat Transfer, Deformation and Life Prediction of Colling Roll in the Molten Metal Direct Rolling," *Now and Future of Rolling Technology*, Rolling Symposium, pp. 189~205.

(11) Kang, C. G. and Kim, Y. D., 1996, "Thermal Analysis on Twin-Roll Type Strip Continuous Casting Process Considering Contact Thermal Resistance between Molten Metal and Cooling Roll," *Transaction of the KSME*, A, Vol. 20, No. 1, pp. 189~205.

(12) Kang, C. G. and Kim, Y. D. and Chung, Y. J., 1997, "A Thermal Process Analysis Considering Sheet Thickness Variation of Width Direction in Twin Roll Strip Continuous Casting," *THERMEC'97*, pp. 2193~2199.

(13) Lewis, R. W. and Ransing, R. S., 2000, "The Optimal Design of Interfacial Heat Transfer Coefficients Via a Thermal Stress Model," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 34, pp. 194~209.

(14) Santos, C. A., Junior, J. A. and Garcia, A., 1998, "Mathmetical Modeling of Heat Transfer in the Twin Roll Ccontinuous Casting Process," *AIAA/ASME joint Thermophysics and Heat Transfer Conference*, ASME, Vol. 4, pp. 133~138.

(15) Kopp, R., Albrecht-Fruh, U., Hentschel, L., Rudolphi, U., Schmitz, J. W., Senk, D. and Simon, F., 1997, "Technological Challenges of the Twin Roll Strip Casting Process," *THERMEC'97*, pp. 2201~ 2207.

(16) Kajiwara, S. and Onishi, K., 2000, "Temperature and Deformation of Strip Caster's Mold Roll," *Iron and Steel*, Vol. 86, No. 2, pp. 20~26.

(17) RIST, 1996, *Development of Strip Casting Process IV*, in Korean, Vol. 3, pp. 303~345.

(18) MSC. Software Korea, 2001, *MARC manual.*

(19) Kim, W. S., Chung, H. T., Lee, Y. G., Jeong, S. I. and Kang, T., 1999, "The Study of Heat Transfer Coefficient Value of Solidification in Twin Roll Strip Casting Process," *RIST Journal of R&D*, in Korean, Vol 13, No. 4, pp. 396~402.

(20) Davy Distington Limited, 1992, Internal Report, Specification No. 104416.