

## 박판 주조 롤의 최적설계

박철민<sup>†</sup> · 강태욱\* · 박경진\*\*

(2002년 5월 27일 접수, 2002년 8월 5일 심사완료)

### Optimal Design of Strip Casting Roll

Cheol-Min Park, Tae-Wook Kang and Gyung-Jin Park

**Key Words :** Twin Roll Strip Casting(쌍롤형 박판주조), Optimal Design(최적설계), Finite Element Analysis(유한요소해석), Thermal Stress(열응력)

#### Abstract

In twin roll strip casting process, the design of casting roll is the most important equipment for producing strip. Analyses of heat transfer and deformation for the casting roll are carried out by using the finite element program, ANSYS. Both the elastic deformation and the elasto-plastic deformation under a thermal load are considered in the analysis. Optimization to minimize the volume of roll is performed under the various thermal loads such as the heat flux and the roll speed. Design variables are defined by diameters and positions of the cooling hole in the roll. Although the thermal load remarkably varies, the design variables and objective function are found to be consistent.

#### 1. 서론

쌍롤형 박판주조공정(strip casting process)은 기존의 공정이 슬라브 혹은 박슬라브를 만든 후 이를 압연하여 철강판재를 만드는 대신 용강으로부터 직접 판재를 제조할 수 있는 기술로서 열간 압연 공정 전체를 생략할 수 있는 획기적인 기술이다. 이 기술은 기본적으로 맞물려 돌아가는 두 개의 주조롤에 용강을 부어 응고시킴과 동시에 일정량의 열간 변형을 가해 1~6 mm의 철판재를 제조하는 방식<sup>(1-3)</sup>이며 극히 짧은 시간(0.2~0.6 초)내에 모든 응고과정이 완료되어야 하고 고온의 용강이 이러한 급속 냉각 과정을 거치는 동안 주조롤의 전폭에 걸쳐 균일한 응고와 형상이 확보되어야 하기 때문에 기계 또는 기계요소 설계가 매우 중요하다.

이 공정은 매우 높은 온도의 용강이 직접 주조롤에 접촉하여 바로 얇은 주편이 생산되는 주조공정이기 때문에 박판의 형상을 결정하는 주조롤의 중요성은 대단히 크다. 따라서 주조롤 설계가 대

단히 중요한 요소이므로 주조롤 설계는 박판주조공정의 핵심이라 할 수 있다.

이와 같은 주조롤의 설계는 필요한 변수들이 어떤 것이 있는지, 어떻게 배치하고 어떤 치수를 선정해야 하는 지가 매우 중요하다. 주조롤은 용강과 접촉하는 동안에는 용강으로부터 매우 큰 열량이 주조롤에 들어가므로 주조롤 표면 부근의 온도구배가 크게 되고 이에 따라 열응력이 크게 발생한다. 그리고 용강과 접촉하지 않는 동안에는 냉각수구멍의 열방출에 의해 냉각된다. 주조롤은 가열과 냉각을 반복하고 특히 주조롤 표면은 가열과 냉각을 반복하는 온도폭이 크기 때문에 큰 값의 인장 및 압축 열응력이 반복적으로 걸린다. 반복적인 온도변화는 공정의 특성이기 때문에 반복적인 열 하중을 받는 조건에서 주조롤에 가해지는 열을 효과적으로 냉각하도록 설계하여야 한다. 만일 그렇지 않고 과도한 반복부하를 받게 되면 이로 인해 주조롤 표면에 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 표면 품질을 좋게 하기 위해서 주조롤 표면 균열 가능성이 적도록 주조롤을 설계하여야 한다.

Nikolai 와 Mihail<sup>(4)</sup>는 쌍롤형 박판주조과정에서

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 포항산업과학연구원 S/C 프로젝트팀

E-mail : cmpark@rist.re.kr

TEL : (054)279-6662 FAX : (054)279-6679

\* 포항산업과학연구원

\*\* 회원, 한양대학교 기계정보산업공학부

주변형상에 영향을 주는 인자에 대해 연구하였고, 김용희<sup>(5)</sup> 등은 쌍롤형 박판주조법에서 용강의 유동을 계산하고 유동과 더불어 주조롤의 열전달 해석을 수행하였다. Kang<sup>(6-12)</sup>은 실험적인 방법으로 열전달 계수를 결정하고 주조롤의 열적해석을 하였고, 또한 열하중과 압연하중을 받는 주조롤에서 변형형상과 주변두께의 변화를 연구하고, 주조롤의 수명에 대해 연구하였다. 그리고 Lewis<sup>(13)</sup> 등은 열응력 해석모델에 대해 열전달계수값에 대해 최적화하는 연구를 하였다. Carlos Alexandre<sup>(14)</sup> 등은 쌍롤형 연속주조기의 열전달을 수학적 방법으로 접근하였으며, Kopp<sup>(15)</sup> 등은 주조롤 치수에 따른 크라운의 변화를 상용프로그램을 통해 조사하였다. 그러나 이들의 연구 결과들은 열전달에 의한 응력 및 변형만을 고려하였을 뿐<sup>(16)</sup> 주조롤 자체의 설계와 관련된 연구는 이루어진 적이 없으며, 주조롤의 형상설계를 전제로 연구되지 않았다.

박판주조롤에서 내부응력 및 열팽창량에 영향을 미치는 인자는 주조롤 재질, 냉각수 구멍위치 및 크기와 표면처리에 사용되는 재료 및 재료 두께 등이 있는데<sup>(17)</sup> 본 연구에서는 주조롤의 설계를 위해 인자들 중 냉각에 밀접한 영향을 주는 인자에 대해 검토하였다. 그러기 위해 탄성변형모델로 온도와 변형을 연결해석(coupled analysis)하였으며, 수치해석적 방법으로 주조롤의 내부 응력 및 열팽창을 알아보았다.

그리고 롤의 열전달해석을 통해 롤의 온도분포를 계산하고 그 결과로 탄소성변형해석을 하였다. 또한 과중한 열부하를 고려해 볼 때 주조롤의 열하중을 효과적으로 냉각시킬 수 있는 냉각수 구멍의 치수 및 위치 변수에 대해 형상최적설계를 수행하여 설계변수들의 정량화를 시도하였다.

열전달 및 열응력 해석을 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS<sup>(18)</sup> 를 사용하여 계산하였고 최적설계 적용도 ANSYS 프로그램을 이용하였다.

## 2. 박판주조롤

쌍롤형 박판주조공정은 기존 연속주조 및 열간 압연 공정을 생략하고 바로 열연코일을 생산하는 획기적인 공정 축약형 기술이다. 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 압연공정을 거쳐 코일을 생산한다. 그리고 박슬라브 주조 기술은 연주공정과 비슷하나 열연부하를 감소시키기 위해 슬라브의 두께가 50~75mm 로 주조하고 이를 압연하여 열연코일을 생산하는 공정 기술이다.

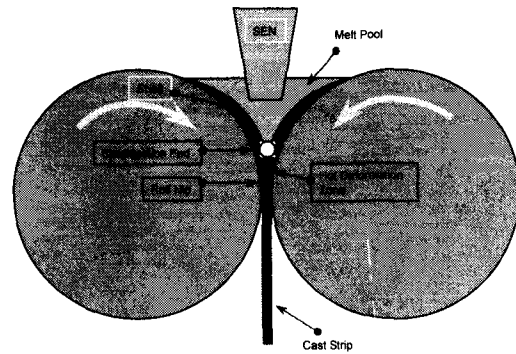


Fig. 1 Schematic representation of twin roll strip casting process

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 저감시킬 수 있는 주조기술이다. 이 기술은 1856년 영국의 Bessemer<sup>(3)</sup>에 의해 창안되어 시도되었으나 양질의 판재를 생산하기 위해서는 주변 내화물이나 제어등과 같은 여러 가지 기술이 제대로 개발되지 못한 실정이었다. 그러나 1970년대 말과 1980년대 초에 이 기술이 관심의 초점이 되기 시작하여 현재까지 활발히 연구가 진행되고 있다.

박판주조공정은 Fig. 1 과 같이 회전하는 두 롤에 용강을 직접 부어 응고시키면서 동시에 압연을 하는 공정으로 롤은 물론 용강 공급 노즐, 용강이 새어 나오지 못하게 하는 에지담(edge dam) 등의 요소 기술이 대단히 중요하며 이런 기계장치를 정밀하게 콘트롤(control)하는 기술 또한 매우 중요하다. 그 중에서도 롤은 주변을 생산해 내는데 가장 큰 역할을 하고 있다.

주조롤은 일반적으로 슬리브(sleeve)와 축(arbor)으로 구성되고, 두 부분은 주로 열박음(shrink fitting)에 의해 조립되며, 일부는 확산용접(diffusion welding)에 의해서도 조립된다. 슬리브는 열전도도가 좋은 구리를 보통 사용하며, 롤표면은 니켈과 같은 재료로 도금이나 용사를 통해 표면처리를 한다. 그리고 주조롤은 슬리브에 냉각을 위한 냉각수 구멍이 있어 전달되는 열을 식혀주는 역할을 한다. 박판주조롤 설계의 최적화 정식

## 3. 박판주조롤

압연공정에서는 압연롤 자체에 가해지는 외력이 크기 때문에 주조롤의 편평화 현상, 주조롤의 굽힘

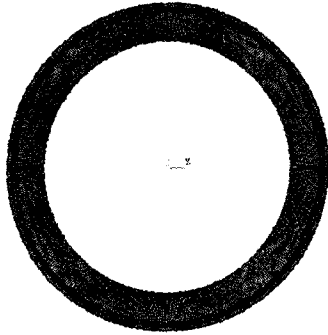


Fig. 2 The mesh of cooling roll

및 전단현상 등이 나타난다. 그러나 박판주조용 롤은 공정의 기계적, 물리적인 특성상 용강상태에서 응고되는 시간이 매우 짧으며 응고됨과 동시에 주편이 주조롤을 통과하기 때문에 물리적인 외력이 일반적인 압연에 비해 매우 작은 상태에서 사용된다.

압연에 의한 물리적인 외력은 주조롤의 응력분포에 크게 영향을 미치지 않을 것이기 때문에 본 연구에서는 물리적인 외력은 무시하고 주조롤 표면의 열응력의 영향을 중심으로 검토하였다.<sup>(15)</sup> 해석모델링은 유한요소해석을 통해 구리 롤을 대상으로 응력계산을 수행하였다.

Fig. 2는 응력계산을 위한 모델의 축방향 수직 단면을 나타낸 것이며 시간에 따라 경계조건이 변화하므로 Fig. 3에 나타낸 것처럼 수직단면 전체를 계산하지 않고 롤 냉각수 구멍의 몇 부분만 취하여 2차원 평면변형 해석을 하기 위한 모델로 선정하였다.

경계조건으로는 원통 좌표계의  $r-\theta$  좌표에서 원주방향으로는 변형이 없이 반경방향으로만 변형이 생길 수 있도록 구속하였으며, 롤의 회전에 대한 경계조건은 롤에 가해지는 열적 경계조건 즉, 열유속을 회전하는 것처럼 모사시켜 용강이 롤에 접촉하고 있는 각도에서는 열하중이 가해지고 그렇지 않은 구간에서는 열하중이 없이 롤 자체 냉각이 되도록 하여 롤의 회전과 같은 효과를 가지게 하였다.

열적 경계조건은 주조롤에 용강의 열을 받는 부분과 받지 않는 부분으로 나누어 열전달 및 열응력 해석을 하였다. 온도해석시 용강과 접촉시에는 주조롤 표면에 일정량의 열량이 흡열된다는 경계조건을 사용하였으며 냉각수 구멍에서는 구멍에서의 냉각수 유속 및 형상, 온도 등의 효과를 고려할 수 있는 열전달계수값을 사용하여 계산하였다.<sup>(19)</sup>



Fig. 3 The analysis model of axisymmetric section plane

계산은 주조롤의 최적설계를 적용하기 위해 지름 1250 mm, 폭 1300mm 인 POSCO 실험 설비인 구리롤에서 304 스테인레스(stainless)를 45 mpm (m/min)의 속도로, 열유속은  $6.2 \text{ MW/m}^2$  로 하여 매 계산시마다 2 도씩 회전하여 총 20 회전을 기준으로 실시하였다.

변형과 응력의 경향을 빠른 시간내에 보기 위해서 탄성유한요소법을 이용하여 구한 결과를 검토하였고, 롤 닢(nip) 부근에서는 매우 높은 온도구배가 예상되어 유효(von Mises)응력이 항복응력을 초과할 수 있어 탄소성 유한요소법으로 해석하여 그 결과를 비교하였다. 또한 회전하는 주조롤이 위치에 따라 각각 다른 경계조건에 접하게 되므로 주조 진행 상황과 같이 온도가 변화하는 천이해석(transient analysis)방법을 이용하여 열전달 계산을 하였다.

주조롤은 높은 온도의 용강이 직접 롤과 접촉하기 때문에 롤의 냉각이 매우 중요하다. 그러므로 롤의 냉각을 위한 냉각수 구멍의 위치와 배열 그리고 크기 등이 냉각의 중요 변수이다. 이에 롤의 최적화를 위해 롤의 냉각수 구멍과 냉각수 구멍 위치를 설계변수로 잡았다. 그리고 열부하가 높은 주조롤은 내부 응력이 매우 높을 것이고 이에 따라 변형도 클 것이다. 이런 응력과 변형은 열에 의한 것이기 때문에 냉각수 구멍을 통한 냉각이 롤의 온도상승을 감소시키고 그만큼 응력과 변형도 감소된다. 그러므로 온도 및 열변형해석에서 구한 응력과 변형 및 변형률을 제한조건으로 하여 냉각수 구멍의 위치와 크기를 계산하였다.

냉각수 구멍의 크기에 따라 롤의 체적이 달라지므로 가능한 한 가볍고 가공이 용이하게 할 목적으로 롤의 부피를 목적함수로 정하여 최적설계를 수행하였다.<sup>(20)</sup>

사용된 재료는 구리합금과 니켈 재료를 사용하였고 이때 물성치는 온도에 의존하므로 온도에 따라 물성치가 변하는 조건이다.<sup>(21)</sup> 하중 조건은 열유속의 변화와 주조속도의 변화를 주어 최적설계를 하였다. 위의 문제에서 최적화의 일반적인 수식<sup>(22-24)</sup>은 식 (1)과 같다.

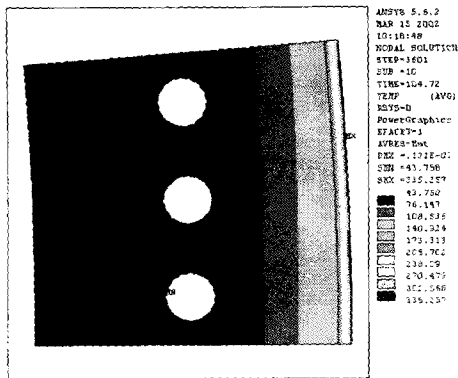


Fig. 4 Temperature distribution at the roll nip

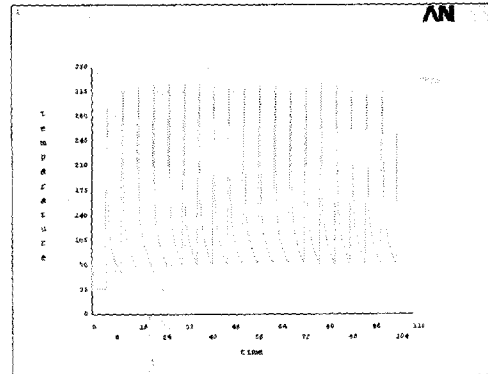


Fig. 5 Temperature variation of roll surface with time

Find D, PCD (1)  
 To minimize Volume  
 Subject to

$$\sigma \leq \sigma_{\max} = 3.7 \times 10^8$$

$$\varepsilon \leq \varepsilon_{\max} = 3 \times 10^{-2}$$

$$\delta \leq \delta_{\max} = 3 \times 10^{-4}$$

where,  
 D is the diameter of cooling hole  
 PCD is the position of cooling hole  
 $\sigma$  is the stress and  $\varepsilon$  is the strain.  
 $\delta$  is the displacement in the radial direction

최적화 알고리즘은 공학문제를 해결하는데 있어 일반적인 방법으로 알려져 있는 반응표면법(response surface method)를 사용하였다. 이 방법은 종속변수를 근사화하는 영차근사법(zero-order method) 보다 좀더 진보된 방법이며 ANSYS 프로그램의 최적화 모듈에서 제공되어 있다.

#### 4. 최적화결과

박판구조용 구조롤은 충분한 크기의 용강풀(pool)을 형성하고, 용강과 롤의 접촉면적을 크게 하기 위하여 일반 압연롤 보다 훨씬 큰 직경을 가진다. 박판구조공정에서 구조롤은 연속구조에서의 몰드(mold)의 역할과 압연에서의 롤의 역할을 동시에 수행한다. 롤의 몰드 역할 관점에서 구조롤은 냉각수 구멍에 의한 냉각능이 매우 중요하고 압연롤의 역할 관점에서 보면 구조롤의 변형 및 열팽창이 매우 중요한 역할을 하지만 물리적 외력을 거의 무시한 박판구조공정은 열변형과 내부응력이 롤 냉각과 매우 밀접한 관계를 가지고 있으므로 구조롤의 냉각관점에서 해석의 주안점을 두었다.

최적설계를 적용하기 전의 탄성응력과 변형상태

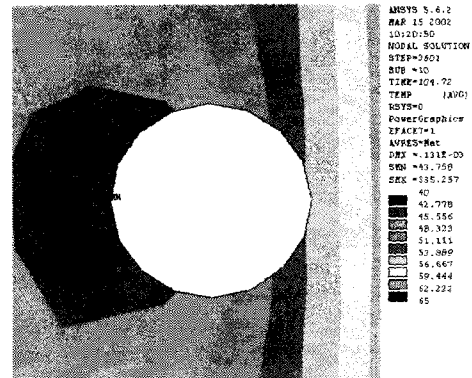


Fig. 6 Temperature distribution around cooling hole at the roll nip

에 대해 고찰하고 그 최적설계를 적용한 후의 응력 및 변형상태를 고찰하였다. 그리고 최적설계 적용시 설계변수의 변화를 관찰하였다.

Fig. 4 는 20 회전후의 롤 뉘에서 온도분포를 나타내고 있다. 일반적으로 박판구조롤에 사용되는 구리합금은 경도를 높이고 고온에서 사용가능토록 지르코니아(Zr) 석출경화 합금을 사용하고 있는데 이 합금은 보통 400 °C 이상의 온도에서는 자체 물성을 잃을 가능성이 있기 때문에 400 °C 이상 올라가면 안된다. 온도결과에서 롤뉘의 표면온도 분포가 350 °C 미만으로 나타나고 있다. 특히 구조롤의 도금층 아래의 구리합금 온도는 표면층 온도 보다 훨씬 낮게 나타나고 있다. Fig. 5 는 20 회전하는 동안 구조롤 표면의 온도변화를 나타내었다.

Fig. 5 에서 뉘의 온도가 약 330°C 정도이고 매니스커스 직전의 온도는 약 70 °C 정도이다. 온도결과에서 구조롤이 회전하면서 온도변화가 급격하게 변하고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 6 은 롤 뉘에서의 냉각수 구멍주위의 온도분포를 나타내고 있다.

Table 1 Radial displacement due to thermal expansion at the roll nip (20 rev.)

	Nip	180도 회전후	Meniscus 직전
온도(°C)	330	104	70
변형(mm)	0.282	0.265	0.242
응력(N/m <sup>2</sup> )	1.33E9	3.02E8	1.95E8

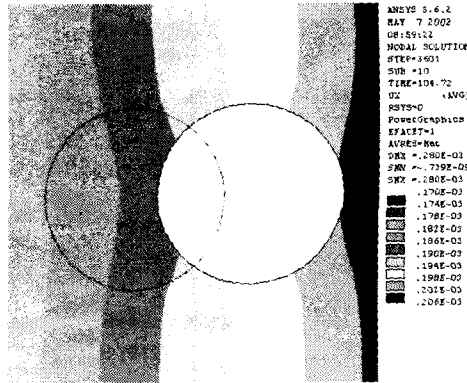


Fig. 7 Change of cooling hole position due to the thermal expansion

Table 1 은 롤 뉘에서의 주조물 온도와 변형 및 응력을 정리하였다. 롤 뉘에서의 최대 팽창량은 반경방향으로 약 282 micron 정도의 팽창을 보이고 있는데 이런 팽창은 주편 두께에 그대로 영향을 준다. 주조 중 초기 주편을 제외한 나머지 주편은 폭 방향으로 거의 편평한 상태의 주편이 형성되어야 한다. 그러기 위해서 주조물의 팽창을 미리 예상하여 주편의 형상에 영향이 덜 미치도록 주조물에 팽창의 양 만큼 음으로 주조물의 크라운 형상을 부여한다. 여기서 크라운은 롤 열팽창에 의해 폭방향 팽창의 차이가 생기므로 이를 보상하기 위해 부여하는 형상을 말한다. 롤은 주조 중에 계속 팽창하다가 평형 상태에 이르면 팽창량은 더 이상 늘어나지 않고 단지 주기적인 수축과 팽창만 반복한다. 만일 열하중 또는 속도가 커져서 롤에 가해지는 열부하가 커지면 롤의 평형상태에 이르는 시간이 훨씬 길어질 것이다.

Fig. 7 은 주조전 원래의 롤 상태에서 열팽창에 의해 냉각수 구멍이 롤 열변형에 의해 위치 이동한 상태를 나타내고 있다. 이런 변형은 뉘에서 열적경계조건에 의해 팽창하고 다시 롤 뉘을 빠져나와 열부하를 받지 않는 구간에 있을 때 다시 수축하는 작용을 하므로 주기적으로 팽창, 수축작용을 반복하게 된다. 이러한 현상을 Fig. 8 에서 잘 나타내고 있다.

Fig. 9 와 Fig. 10 은 각각 탄성 해석으로 계산한 결과와 탄소성 해석으로 계산한 결과에 대한 롤 뉘에서의 유효 응력 분포를 나타내고 있다.

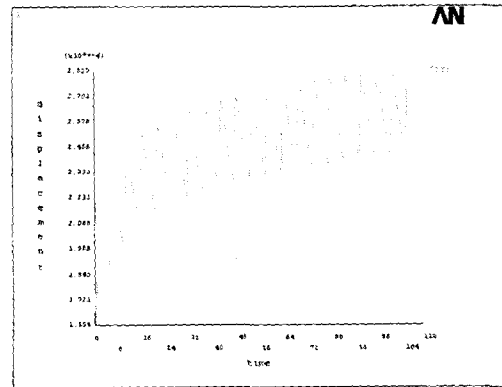


Fig. 8 Radial displacement variant with time

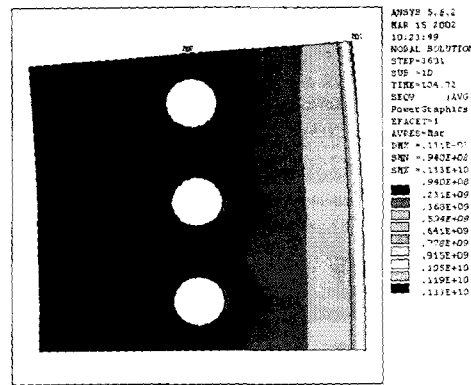


Fig. 9 von Mises stress distribution near roll surface at the roll nip

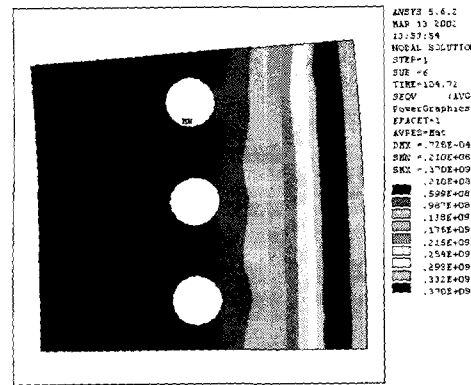


Fig. 10 von Mises stress distribution near roll surface at the roll nip (Elasto-Plastic deformation)

유효 응력이란 소성변형이 일어나는지 여부를 판단하기 위하여 사용하는 응력으로 유효응력이 항복강도보다 크면 소성변형이 일어남을 의미한다. Fig. 9 에서 최대유효응력은  $1.33 \times 10^9 \text{ N/m}^2$  이며

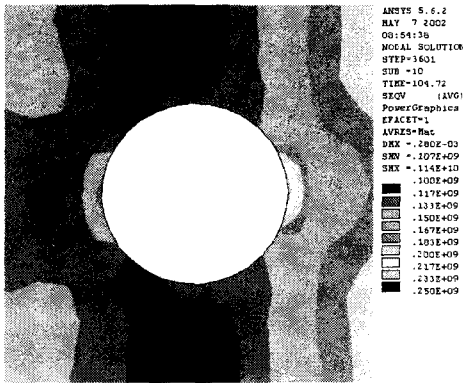


Fig. 11 von Mises stress distribution around the cooling hole

이는 매우 높은 값으로 실제의 경우에는 이렇게 높은 응력은 걸리지 않으며 탄성모델을 사용하였기 때문에 유효응력이 높게 나왔다. 탄성변형해석에서 나온 결과는 실제가 아니므로 탄소성해석을 하여야 한다. Fig. 10 은 탄소성 모델로 계산한 결과이며 항복응력값을 초과하지 않는다. 그러나 변형은 계속 변화할 것이나 평형상태에 이르면 더 이상 변형량의 변화는 없이 일정 구간에서 수축과 팽창을 반복할 것이다. 유효응력으로 볼 때 주조를 표면부의 급격한 온도구배에 의해 소성영역에 있으며 소성변형을 하게 된다. 그러나 열변형에 의한 소성변형이고, 원주방향 압축응력(hoop stress)이 지배적이기 때문에 소성변형량은 매우 작을 것으로 판단된다.

Fig. 11 은 냉각수 구멍 주위의 유효응력분포를 나타내고 있는데 냉각수 구멍 주위의 유효응력은  $1 \sim 2.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$  이며 주조물에 사용하는 구리합금의 항복응력  $3.7 \times 10^8 \text{ N/m}^2$  이므로 냉각수 구멍 주위에 응력분포는 항복응력 아래에 있다. 주조물에서 응력 분포는 Table 1 에서 알 수 있듯이 롤 넓에서 가장 높고 매니스커스에 도달하기 직전이 유효응력이 가장 낮은 상태이다. 그리고 매니스커스 직전상태는 소성변형영역에서 탄성변형영역으로 복귀한 상태이므로 응력이 높지 않은 상태이다.

이와 같이 응력은 박판주조공정의 특성상 주어진 열부하 때문에 롤넓에서 매우 높으며, 소성변형 또한 피할 수 없다. 그렇지만 롤의 냉각을 얼마나 효과적으로 하느냐에 따라 응력과 변형을 줄일 수 있을 것이다. 그러기 위해서 냉각수 구멍의 크기와 위치가 상당히 중요한 변수로 작용한다.

구멍의 위치와 크기는 응력과 변형을 변화시키기 때문에 적정 위치와 크기를 잘 선정하여야 한다. 구멍의 위치가 롤 표면에 가까울수록 표면온도가 낮아져 응력도 낮아질 것이고 롤 표면과 멀

Table 2 The used condition of heat load for optimal design

	Speed (mpm)	Heat Flux (MW)
Case1	45	6.2
Case2	60	8.4
Case3	80	9.3
Case4	100	10.2

어질수록 응력이 높아질 것이다. 그리고 구멍의 크기가 크면 클수록 구멍과 구멍사이의 간격이 넓어져 온도분포가 균일하지 않고 이에 따라 롤 표면의 응력분포도 불균일할 것이다. 반대로 구멍크기가 작으면 작을수록 구멍과 구멍사이의 간격이 좁아져 온도분포 및 응력분포가 균일하게 나타날 것이다. 그렇지만 구멍이 너무 작으면 구멍의 가공이 불가능해지기 때문에 적당한 크기의 구멍 크기를 선정하여야 한다. 그러므로 열부하에 의한 주조물의 냉각을 주안점으로 하여 효과적인 냉각과 적은 열응력이 걸리도록 하기 위해 구멍의 크기와 위치를 설계변수로 정하고 탄소성해석을 통해 최적설계를 수행했다.

최적화를 위한 제한 조건은 식 (1)과 같이 유효응력과 변형률 그리고 반경방향의 변위를 제한조건으로 하였다. 제한조건에서 유효응력은 주조물에 사용한 구리합금의 항복응력으로 정하였으며 최적화되는 과정에서 형상과 위치가 변함으로 응력이 항복응력을 초과하지 않게 하였다. 변형률은 탄소성해석에서 응력이 항복응력값에 도달하면 항복응력을 초과하지 않고 변형만 계속 일어나게 되는 데 이때 변형률을 제한하였다. 반경방향 변위는 앞에서 설명한 롤의 팽창을 예측함에 있어 너무 많은 팽창이 일어나면 주편의 편평화를 위한 크라운 양을 많이 주어야 하고 크라운 가공에도 영향을 미치므로 주어진 하중조건에서 팽창형상의 예측이 쉽고 작은 양의 열팽창을 유도하기 위해 반경방향의 변위를 제한 조건으로 잡았다. 마지막으로 목적함수는 부피로 선정하였는데 구멍크기와 위치에 따라 부피의 변화가 발생하기 때문에 선정하였다.

Table 2 는 열 하중 조건인 속도와 열유속의 조건을 나타내었다. 이들 조건으로 최적설계를 수행한 결과, 냉각수 구멍의 크기는 주조물의 지름에 대해 약 0.64%의 비율의 결과가 나왔으며, 위치는 주조물의 지름에 대해 약 96%의 비율에 해당하는 지점이 가장 좋은 영역으로 나왔다. 이 결과는 앞서 언급한 기준조건에 대한 결과이며, Table 2 의 case 1 에 해당된다. 주조물의 유효응력과 변형량 및 변위는 제한 조건을 만족하는 범위에 있으며

설계변수의 값들이 주어진 하중조건에서 최적의 상태라 판단된다. 그러나 속도와 열유속의 변화에 따라 응력과 변형이 달라질 수 있고 이에 따라 냉각수 구멍 크기와 위치가 달라질 수 있다. 그래서 열하중 조건을 점점 증가하면서 계산하였다.

Table 3 은 열하중이 증가하는 Table 2 의 조건으로 계산한 결과를 나타내었다. Table 3 에 나타낸 것과 같이 각각의 경우, 속도와 열유속의 변화에 따라 응력과 변형 그리고 설계변수 등이 조금씩 변화하고 있다.

주조롤의 속도와 열유속의 조건은 하중조건이기 때문에 이 하중조건에 따라 응력과 변형이 변하는 것은 당연한 현상이다. 그러나 최적설계의 제한조건으로 범위를 제한하였기 때문에 그 범위내에서 모든 것을 만족시켜야 한다. 유효응력의 제한 조건은 항복응력을 초과할 수 없게 하였으므로 제한조건범위를 넘어서지 않고 있으며, 수렴오차범위에서 차이를 보이고 있다. 변형은 하중이 증가할수록 꾸준히 증가하지만 제한 조건의 경계에는 미치지 못하고 있다. 모든 경우에서 제한 조건을 만족하는 범위에서 설계변수의 값들은 거의 비슷하다. 이와 같이 냉각수 구멍의 크기와 위치의 최적설계의 결과는 열유속과 주조롤의 회전속도의 변화에도 불구하고 변화의 양이 작고 모든 경우에 대해 유사한 결과의 최적값을 얻었다.

최적설계 결과, 설계변수가 하중 조건의 변화에도 불구하고 거의 유사한 결과를 얻었으므로 목적

함수도 거의 동일한 결과로 나타났다. Fig. 12 는 각각의 경우에서 목적 함수인 부피의 결과를 나타내고 있다. 그림에서는 경우 1 부터 4 까지 부피가 증가하고 있는데 증가하는 양이 매우 작고 변화폭이 매우 작으므로 무시할 만한 결과라 할 수 있다. 이런 결과로 롤의 최적설계는 만족할 만한 결과라 할 수 있다.

5. 결론

박판주조 주조롤의 설계에서 2 차원 평면변형모델을 사용하여 열전달 해석과 소성변형을 고려한 변형해석을 하고 최적설계를 적용하였다.

(1) 유효응력으로 관점에서 주조롤 표면부의 급격한 온도 구배에 의해 롤 표면부가 소성영역에 있으며, 소성변형을 하게 되나 열변형에 의한 원주방향 압축응력이 지배적이기 때문에 소성변형량은 매우 작다.

(2) 설계관점에서 냉각수 구멍 주위의 응력분포는 구리의 항복응력 보다 낮은 유효응력이고, 매니스커스와 풀뿔 사이를 제외한 다른 영역들은 소성변형영역에서 탄성변형영역으로 복귀하는 상태이므로 유효응력분포가 낮은 상태로 가고 있음을 알 수 있다.

(3) 과도한 열부하에 의한 주조롤의 냉각을 주안점을 두었기 때문에 구멍의 크기와 위치를 설계변수로 선정하였고, 최적설계를 수행한 결과, 냉각수 구멍의 크기는 주조롤의 지름에 대해 약 0.64%의 비율이며, 위치는 주조롤의 지름에 대해 약 96%의 비율에 해당하는 지점이 주어진 조건상에서 최적의 값이다.

(4) 최적설계에서 부하를 증가시켰을 때 각 설계변수는 미미한 변화만 보일 뿐 변화가 없으므로 박판주조 공정에서의 냉각수 구멍의 크기와 위치는 주어진 조건에서 최적설계 되었음을 알 수 있다.

Table 3 The variation amount of design variable for the speed and Heat flux variation

	Stress (Pa)	Strain	Deformation (m)	Hole 크기 (%)	Hole 위치 (%)
Case1	3.71E8	1.43E-2	1.03E-4	0.643	96.003
Case2	3.75E8	2.47E-2	1.32E-4	0.641	96.001
Case3	3.76E8	2.74E-2	1.33E-4	0.641	95.984
Case4	3.78E8	2.99E-2	1.37E-4	0.640	96.000

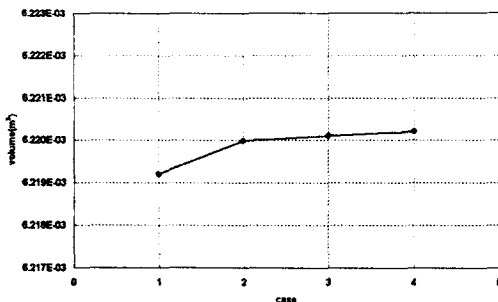


Fig. 12 The amount of objective function for the each case

후 기

이 연구는 교육부 지원 BK21 사업연구비, 한국 과학재단지정 최적설계기술센터의 연구비 지원 및 POSCO 과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Research Institute of Industrial Science & Technology, 1992, Internal Report, *Development of Strip Casting Process II*, in Korean, Vol. 3, pp. 500~539.

- (2) Research Institute of Industrial Science & Technology, 1994, Internal Report, *Development of Strip Casting Process III*, in Korean, Vol. 3, pp. 236~270.
- (3) Bessemer, H., 1856, 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, "Mathematical Modeling of Heat Transfer in the Twin Roll Continuous 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) Research Institute of Industrial Science & Technology, 1996, Internal Report, *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) Arora, J.S., 1989, *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill Book Company, International edition.
- (21) Davy Distington Limited, 1992, Internal Report, Specification No. 104416.
- (22) Kang, B. S., Choi, W. S. and Park, G. J., 2000, "Structural Optimization under Equivalent Static Loads transformed from Dynamic Loads based on Displacement," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 24, No. 8, pp. 1949~1957.
- (23) Choi, W. S. and Park, G. J., 2000, "Structural Optimization Using Equivalent Static Loads at All the Time Intervals," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 24, No. 10, pp. 2568~2580.
- (24) Lee, G. W., Suk, I. W. and Park, G. J., 2001, "A Method for Simplified and Equivalent Finite Element Modeling Using Optimization Technique," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 25, No. 1, pp. 1~10.