

허스롤 목 부위 형상 변화에 따른 열응력 분포 변화 유한요소해석

나두현¹ · 이영석[#]

Finite Element Analysis of Thermal Stresses on a Hearth Roll Surface Depending on Changes in the Neck Shape

D. H. Na, Y. Lee

(Received February 11, 2016 / Revised March 29, 2016 / Accepted May 2, 2016)

Abstract

The hearth roll, which transfers the cold-rolled strip sheet in a Continuous Annealing Line (CAL), is always subjected to changes in the surface temperature and subsequently experiences thermal stress in service. These variations lead to the generation of thermal cracks on the hearth roll surface as well local plastic deformation. We performed finite element analysis to predict the thermal stress changes on the hearth roll surface and designed the collar shape of the hearth roll to minimize these thermal stresses. Results show that the hearth roll with a collar having an obtuse angle is much more effective than a hearth roll with collar having a right angle when the tangential stress, which is one of main causes leading to surface cracks, is compared for the various conditions. It was found that the tangential stress and the temperature on the surface of hearth roll can be reduced by 51.9% and 26°C if the shape of roll on collar is re-designed.

Key Words : Continuous Annealing Line, Hearth Roll, Thermal Stress, Finite Element Analysis

1. 서론

냉간압연 공정에서 생산된 스트립(strip)은 매우 경화된 상태이다. 따라서 적절한 가공성이 요구되는 최종제품으로 판매되기에는 부적합하다. 따라서 열처리를 통해 냉간압연된 스트립에 연성(ductility)과 강도를 동시에 부여함으로써 가공성을 향상시키는 작업이 필요하다. 이러한 작업을 하는 곳이 소둔공정이다. 소둔공정에는 상소둔(BAF: batch annealing furnace) 방식과 연속소둔(CAL: continuous annealing line) 방식으로 구분된다. 상소둔 방식은 연속 소둔보다 소둔 시간을 장시간 동안 유지해야 하는 단점이 있다. 따라서 대부분의 철강 회사는 생산성을 향상시키고 제조 원가를 절감하기 위해 소둔 시간이 상대적으로 짧은 연속소둔 방식을 많이 채택하고

있다.

연속소둔 공정에서 스트립은 일반적으로 밀폐된 공간, 즉 가열로의 상하에 설치된 여러 개의 허스롤(hearth roll)을 차례로 통과하면서 예열, 가열, 균열, 서냉, 급냉, 시효(aging) 열처리 과정을 거쳐 고온 800°C로 가열된 후 상온까지 냉각되어 최종제품으로 생산된다[1]. 허스롤은 스트립을 이송할 때 사용되는 롤(roll)의 한 종류로 롤 내부가 비어 있다. 허스롤 내부가 비어있는 이유는 롤의 자중을 줄여 회전관성모멘트를 감소시켜 롤의 회전 제어를 빠르게 또 쉽게 하기 위함이다. 이러한 이유로 연속소둔 공정의 생산성이 향상된다.

스트립이 급랭대(RCS: rapid cooling section)를 통과할 때, 스트립 온도를 급격하게 낮추기 위해 상온의 냉각수(cooling water)가 스트립 표면에 분사된다.

1. 현대제철 기술연구소 압연기술개발팀

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, E-mail: ysl@cau.ac.kr

급랭대 구간에 있는 허스롤은 생산현장에서 급냉대 롤(RCS roll)이라 부른다. 스트립 표면에 분사된 냉각수의 일부분이 스트립 표면을 타고 아래로 흘러 내려 급랭대 아래에 위치한 허스롤 표면에 접촉한다. 가열로 내부의 허스롤은 고온 분위기에 노출되어 있기 때문에 롤 표면온도는 대략 400~450℃이다. 따라서 상온의 냉각수가 허스롤 표면에 접촉하면 순간적으로 롤 표면에 급격한 열응력이 발생된다. 롤 표면에 발생된 열응력의 크기는 허스롤 사용수명에 큰 영향을 준다. 또한 허스롤 표면에서 급격한 열응력으로 인해 균열이 발생하면 최종 제품의 표면 품질 손상을 야기시키고 이것은 롤 교체 횟수 증가로 이어진다. 이는 곧 생산원가의 증가로 직결되기 때문에 허스롤 표면 열응력에 대한 연구가 매우 중요하다.

Jacques 등[2]은 유한요소해석을 이용하여 연속소둔 공정에서 스트립의 항복 응력(yield stress) 변화, 허스롤 간의 장력 제어, 스트립과 허스롤의 마찰계수 변화에 대해 연구하였다. Lee 등[3]은 연속소둔 공정에서 장력 제어의 효율성 증진을 위한 웹 장력 제어 전략(web tension control strategy)에 대한 연구를 수행하였다. 그들은 스트립 온도와 중력으로 인해 발생하는 웹 장력 변화를 고려하여 수치 모델(mathematical model)을 개발하였다. Li 등[4]은 연속소둔공정에서 스트립을 어닐링(annealing)한 뒤 품질향상을 위해 신경망(neural network)을 사용하여 품질 모델(quality model)을 개발하였다. 그리고 그들은 개발된 모델을 현장에 적용하여 검증하였다. Chen 등[5]은 유한요소해석을 이용하여 연속소둔 공정에서 열전달을 고려한 스트립의 응력 변화에 대해 연구하였다. 그들은 테이퍼 롤(taper roll) 형상으로 인해 스트립 폭 방향으로의 불균일(non-uniform) 온도 분포를 야기하여 잔류 응력(residual stress)과 열 버클링(heat buckling) 문제가 발생한다고 언급하였다. Bai 등[6]은 연속소둔공정에서 스트립의 표면흠 발생을 줄이기 위해 가열대(heating section)에 있는 허스롤 표면에 횡방향 줄(horizontal strip)을 가공하여 스트립 표면에 찍힌 줄 형태를 분석하였다. 그들은 스트립의 표면흠을 줄이기 위한 최적 장력시스템(optimized tension system)을 제안하였다.

하지만 연속소둔 공정에서 스트립 표면의 냉각용 체류수로 인한 허스롤 표면에 발생하는 열응력(thermal stress) 발생과 크기에 대한 연구는 없다. 따



Fig. 1 Hearth roll shape used in continuous annealing line[7]

라서 본 연구자는 유한요소법을 이용하여 허스롤 표면 온도가 냉각수에 의해 순간적으로 낮아지고 스트립에 의해 높아질 때의 롤 표면 열응력을 예측하였다. 또한 본 연구는 허스롤의 목(neck) 부위 형상 변화에 따른 표면 온도 및 열응력 분포 변화를 분석하였다. 유한요소해석 결과를 바탕으로 본 연구자는 허스롤 표면에 발생하는 열응력을 감소시킬 수 있는 목 부위 형상을 제안하였다.

2. 연속소둔 공정

2.1 연속소둔 공정 개략도

Fig. 1은 연속소둔 공정에서 사용되는 허스롤(hearth roll)의 실제 모습을 보여준다[7]. 최근 자동차 강판의 초고장력강(AHSS: advanced high strength steel) 생산으로 허스롤에 대해 높은 특성이 요구된다. 특히 허스롤은 고온에서 사용되며 빠른 속도로 회전하기 때문에 내마모 특성이 우수해야 한다[8]. 또한 자동차 강판의 표면 품질을 확보하기 위해 열응력 저항이 우수한 허스롤이 사용되어야 한다.

Fig. 2(a)는 연속소둔 공정의 전체 개략도이다. 연속소둔 공정에서의 스트립은 일반적으로 7개 구간(section)을 통과하여 열처리된다. 냉간압연에서 압연된 스트립(strip)는 예열대(PHS: pre heating section) 및 가열대(HS: heating section)를 통과하면서 750~800℃까지 가열된다. 그리고 스트립은 균열대(SS: soaking section)에서 750~800℃ 온도를 계속 유지한다. 그 다음 서냉대(SCS: slow cooling section)와 급랭대(RCS: rapid cooling section)를 지나면서 스트립 온도는 450~550℃까지 떨어진다. 마지막으로 스트립은 과시효대(OAS: over aging section) 및 최종냉각대(FCS: final cooling section), 수냉각대(WCS: water cooling section)를 통과하여 50℃까지 낮아진다[1].

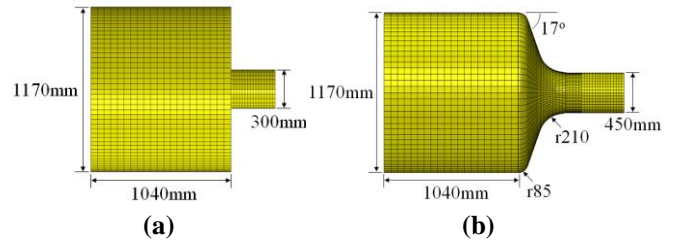
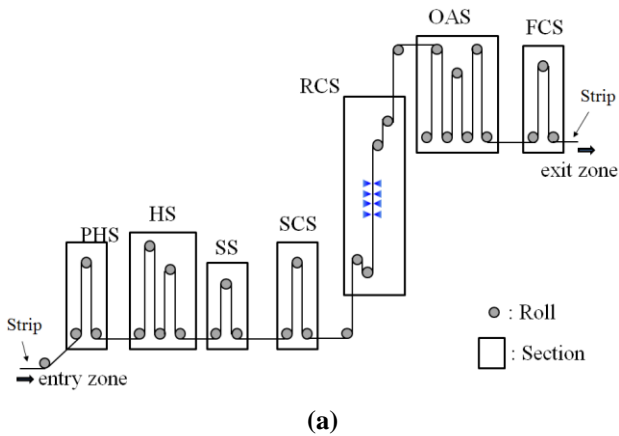


Fig. 3 Profile of hearth roll in CAL (a) hearth roll with collar of a right angle (b) hearth roll with collar of an obtuse angle

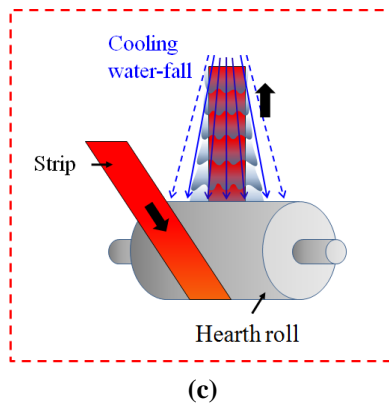
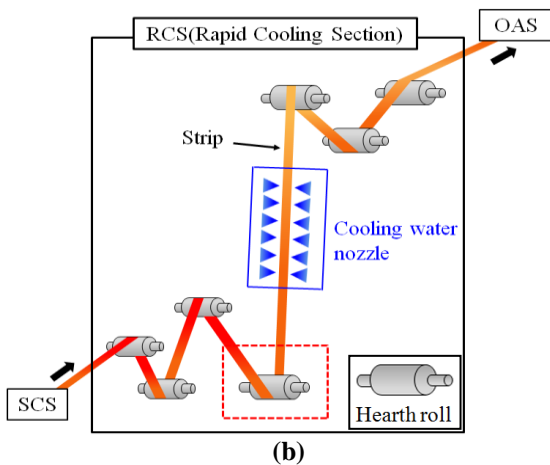


Fig. 2 (a) schematic of continuous annealing line[1] (b) configuration in RCS(rapid cooling section) and (c) zoom on the hearth roll under the cooling water

이러한 열처리 과정을 거친 스트립은 연성과 강도를 동시에 확보하게 되고 제품으로 출하하게 된다.

Fig. 2(b)는 연속소둔 공정에서의 급랭대(RCS: rapid

cooling section)에 대한 그림이다. 연속소둔 공정에서 스트립에 냉각수를 분사하는 설비는 서냉대와 급랭대이다. 그 중에서도 급랭대를 지나는 스트립 표면 온도는 분사되는 냉각수에 의해 일반적으로 600℃에서 250℃까지 떨어진다. Fig. 2(c)는 급랭대에서 냉각수 노즐(cooling water nozzle) 밑에 위치한 허스롤을 확대한 그림이다. 냉각수 노즐에서 분사된 냉각수는 스트립 표면을 따라 아래로 흘러내린다. (Fig. 3(c)) 흘러내린 냉각수는 고온(400~450℃)의 허스롤 표면과 접촉하여 허스롤 표면에 열응력을 유발한다.

2.2 허스롤 축-동체 연결부 형상

Fig. 3은 허스롤의 축-동체 연결부 형상을 보여준다. Fig. 3(a)는 목(neck) 부위가 직각인 허스롤(hearth roll with collar of a right angle)이고 Fig. 3(b)는 목 부위가 둔각인 허스롤(hearth roll with collar of an obtuse angle)이다. 여기서 목 부위란 롤 옆면과 샤프트(shaft)가 만나는 지점이다. 이 부분은 허스롤 몸체를 지지하는 역할을 하기 때문에 중요하다. 목 부위가 직각인 허스롤은 라운딩이 없기 때문에 코너 r이 없고 둔각인 허스롤은 이 부위에 라운딩을 하여 코너 r값이 210mm이다.

목(neck) 부위가 직각인 롤의 형상과 둔각인 롤 형상의 차이점은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째로 목 부위가 직각인 롤 내부에 보조원판(support circular plate)이 존재한다. 허스롤 내부는 비어있는데 롤 내부까지 들어와 있는 샤프트를 고정하기 위해 보조원판이 지지대 역할을 한다. 반면 목 부위가 둔각인 허스롤에는 보조원판이 없다. 둘째로 목 부위가 직각인 롤 형상은 롤 옆면과 샤프트가 직각으로 만나는 반면 목 부위가 둔각인 롤 형상은 롤 옆면에 콘 부(side wall cone)를 새롭게 추

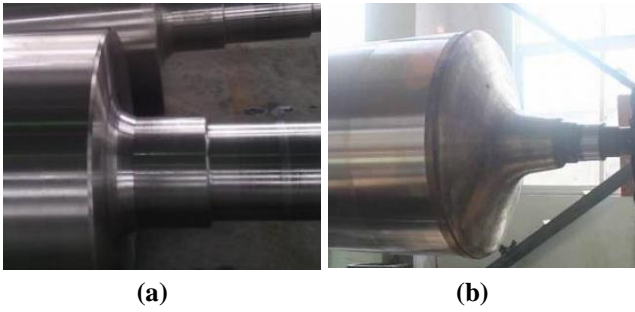


Fig. 4 Hearth roll shape used in CAL (a) roll with collar of a right angle (b) roll with collar of an obtuse angle[9]

가하여 샤프트와 곡률을 유지하고 있다.

Fig. 4는 두 허스롤 형상 차이에 대한 실제 모습을 보여준다[9]. 본 연구에서 우리는 직각과 둔각인 허스롤에 대해 유한요소해석을 이용하여 롤 표면온도와 응력을 비교 분석하였다.

3. 유한요소해석

3.1 허스롤(Hearth roll)

허스롤의 자중은 3080kg이고, 회전 속도는 135 rpm이다. 스트립이 허스롤에 가하는 하중은 23kN이다. 그리고 허스롤의 반지름과 롤의 두께는 각각 365mm와 28mm이다. 본 연구자는 롤 목 부위 형상 변화에 대한 결과를 비교하기 위해 3차원으로 모델링하였다. 본 연구자는 상용프로그램인 ABAQUS 6.9-1을 이용하여 내연적 방법(implicit method)과 연성 온도-변위(coupled temp-displacement) 기법을 사용하여 해석을 수행하였다. 요소 종류는 8절점 3차원 열전달 요소인 C3D8RT(8-node tri-linear displacement and temperature, reduced integration)이다. 허스롤과 스트립은 좌우 대칭이기 때문에 해석시간 단축을 위해 1/2 대칭(symmetric) 조건이 적용되었다.

3.2 냉각모델 및 경계조건

Fig 5는 냉각수, 스트립(strip)와 허스롤 유한요소 모델을 보여준다. 둔각, 직각롤 형상은 롤 옆면과 샤프트가 결합되는 형상이 변경된 것이기 때문에 냉각수(cooling water)와 스트립은 허스롤 표면에 지속적으로 접촉된다. 따라서 롤 전체 둘레 3673.8mm (=2*π*585mm) 중 스트립은 1500.1mm, 냉각수는 734.8mm 접촉한다. 본 연구에서 사용된 스트립 시

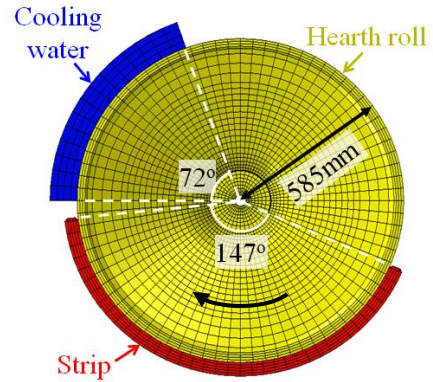


Fig. 5 FE modeling for cooling water, strip and hearth roll

Table 1 Measured density and conductivity at different temperatures

Temperature (°C)	Density (kg/m ³)	Conductivity (W/m·°C)
20	7812	11.87
200	7744	14.93
400	7659	17.81
600	7560	21.45

트 소재는 DP 강(Dual Phase steel)이다.

허스롤과 스트립, 허스롤과 냉각수가 접촉할 때의 열전달이 고려되었다. 허스롤과 스트립의 접촉 열전달 계수는 13,000W/m²·°C로 두었다. 이 값은 급냉대를 통과할 때 스트립의 온도 감소량 및 통과 시간을 고려하여 산출되었다[10]. 또한 허스롤과 냉각수의 대류 열전달 계수는 10,100W/m²·°C였다[11].

Table 1은 온도 변화에 따른 허스롤의 밀도 및 열전도도를 보여준다. 온도가 올라갈수록 밀도는 작아지는 반면 열전도도는 높아진다.

스트립과 냉각수의 온도는 각각 630, 30°C이고, 허스롤 주변 온도는 455°C이다. 허스롤 회전 속도는 7.2m/s이고 스트립 폭은 970mm이고 두께는 17mm이다.

4. 결과 및 토의

4.1 결과값 도출 위치

본 연구자는 허스롤의 축 방향을 따라 동일한 위치의 노드(node)에서 결과값을 도출하였다. Fig. 6(a)에서 Point A_r, B_r은 목 부위가 직각인 허스롤에서 결

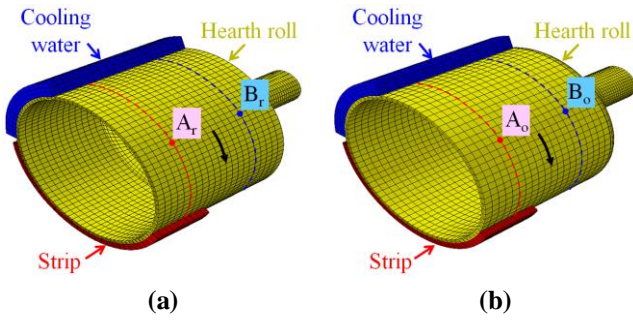


Fig. 6 Data acquisition points in finite element analysis:
 (a) RCS roll with collar of a right angle (b) RCS roll with collar of an obtuse angle

과를 도출한 위치이다. 그리고 Fig. 6(b)에서 Point A_o, B_o는 목 부위가 둔각인 허스롤에서 결과를 도출한 위치이다. Point A_r, A_o의 경우 허스롤에 스트립과 냉각수가 모두 접하는 노드이다. 반면 Point B_r, B_o의 경우 허스롤에 냉각수만 접하는 노드이다. 이렇게 두 가지 경우로 구분한 이유는 스트립과 냉각수를 모두 접하는 허스롤 노드(node)들은 피로파괴(fatigue fracture)가 발생하고 냉각수만 닿는 노드들은 소성변형(plastic deformation)이 되기 때문이다. 그 이유는 스트립과 냉각수가 모두 접하는 Point A_r, A_o의 경우 스트립과 접촉되면서 허스롤 표면 온도가 상승하였다가 냉각수에 의해 온도가 떨어지게 된다. 이러한 온도변화로 인해 허스롤 표면에 압축과 인장응력이 반복되면서 피로하중이 발생된다. 하지만 냉각수만 접하는 Point B_r, B_o는 온도가 지속적으로 떨어지면서 인장응력만 발생하게 된다.

4.2 형상 별 표면온도 비교

계산된 결과의 경향성을 확인하기 위해 허스롤을 10번 회전시켰을 때까지의 결과를 분석하였다. 해석 결과에서 허스롤이 10번 회전한 이후 표면 온도와 응력은 수렴하는 경향을 보였다. Fig. 7은 목 부위가 직각인 허스롤과 둔각인 허스롤의 온도-시간 관계를 보여준다.

결과를 보면 허스롤에 스트립과 냉각수가 모두 접하는 Point A_r, A_o에서 두 형상 모두 어느 한 온도로 수렴되는 것을 볼 수 있다. 목 부위가 둔각인 허스롤의 온도가 목 부위가 직각인 허스롤보다 26℃ 높았다. 결과적으로 허스롤의 목(neck) 형상만 변경해도 허스롤 표면 온도가 달라짐을 알 수 있다. 두 번째로 허스롤에 냉각수만 접하는 Point B_r, B_o를 보

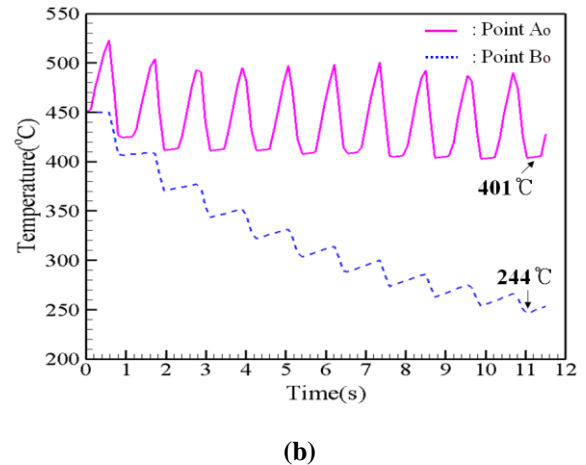
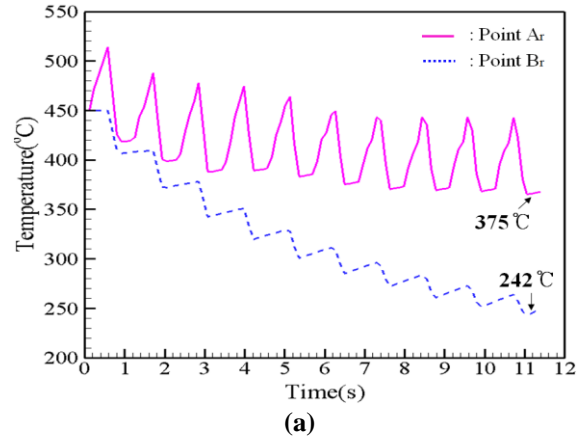


Fig. 7 Variations in roll surface temperature in terms of time: (a) RCS roll with collar of a right angle (b) RCS roll with collar of an obtuse angle

면 수렴되는 온도값의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. Point B_r, B_o는 고온의 스트립에 의한 응력의 영향을 받지 않기 때문에 형상 차이에 의한 온도 변화가 거의 없다. 즉, 허스롤 형상이 변함으로써 스트립이 허스롤에 가하는 하중의 영향이 달라지면서 롤 표면온도가 변하게 된다.

4.3 형상 별 표면응력 비교

본 연구자는 또한 허스롤 표면에 발생하는 응력을 비교하였다. 이 때 발생하는 표면 응력은 온도 차이에 의한 접선방향(tangential direction)의 열응력(thermal stress)을 의미한다. Fig. 8은 목 부위가 직각인 허스롤과 둔각인 허스롤의 접선방향 응력-시간 관계를 보여준다.

Fig. 7과 Fig. 8은 온도와 접선방향 응력이 매우 밀접한 관계가 있음을 보여준다. 허스롤 표면 온도가

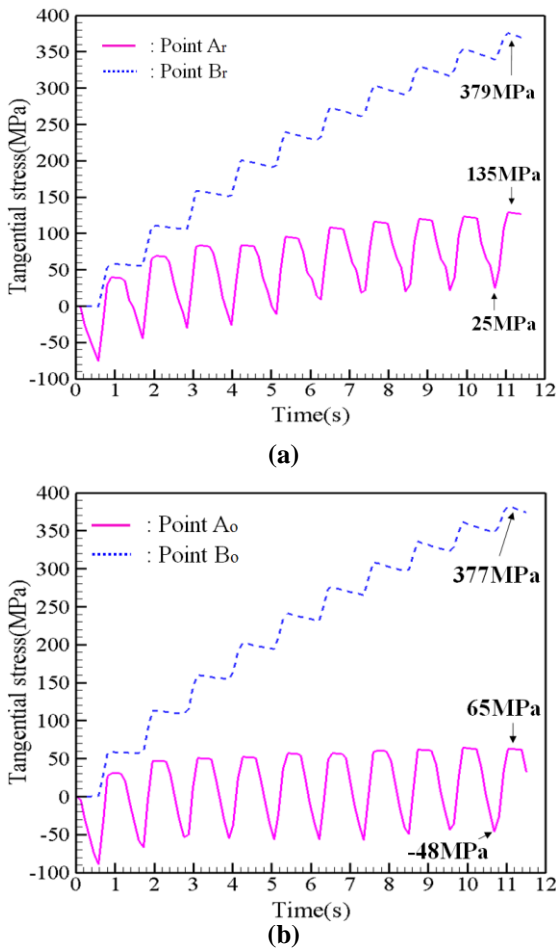


Fig. 8 Variations in tangential stress on roll surface in terms of time (a) RCS roll with collar of a right angle (b) RCS roll with collar of an obtuse angle

스트립과 접촉하여 상승하게 되면 접선방향으로 압축응력(compressive stress)이 발생한다. 그 이유는 다음과 같다. 허스롤은 고온의 스트립과 접촉하여 표면온도가 상승하면 팽창하려고 한다. 하지만 고온의 스트립과 접촉하지 않은 부분은 상대적으로 온도가 낮다. 허스롤에서 스트립과 접촉하여 팽창하려는 부분은 상대적으로 온도가 낮은 부분에 의해 팽창이 억제된다. 따라서 허스롤은 온도가 증가함에 따라 접선방향으로 반력이 발생하여 압축응력을 유발한다. 반대로 허스롤이 냉각수와 접촉하면 인장응력(tensile stress)이 발생한다. 그 이유는 냉각수와 접촉한 부분은 수축하려고 하지만 냉각수와 접촉하지 않은 부분은 수축을 억제하려고 한다. 따라서 허스롤 표면 접선방향으로 인장응력이 발생하게 된다[12].

허스롤 형상 변화에 따른 접선방향의 응력-시간 결과를 비교해보면 Point Ar, A₀에서의 형상에 따른 접선방향 최대 응력은 매우 큰 차이를 보인다. Fig. 8(a), (b)에서 롤이 10번 회전한 시간(약 11초)에서의 Point Ar의 접선방향 최대 응력은 135MPa이다. 하지만 Point A₀의 접선방향 응력은 65MPa이다. 결과적으로 목 부위의 형상을 직각에서 둔각으로 변경으로써 허스롤에 발생하는 접선방향의 최대 응력이 51.9% 감소하였다.

본 연구자는 롤이 10번 회전한 시간(약 11초)에서 허스롤 형상에 따른 Point Ar, A₀에서의 응력 평균값을 비교하였다. 응력 평균값은 응력의 최대값과 최소값의 평균이다. 목 부위가 직각인 허스롤의 응력 최대값은 135MPa이고 최소값이 25MPa이기 때문에 응력 평균값은 80MPa이다. 목 부위가 둔각인 허스롤의 응력 최대값은 65MPa이고 최소값은 -48MPa이기 때문에 응력 평균값은 8.5MPa이다. 따라서 평균적으로 발생하는 응력은 목 부위가 직각인 허스롤이 둔각인 허스롤에 비해 71.5MPa 더 높다. 목 부위의 형상을 직각에서 둔각으로 변경으로써 허스롤에 발생하는 접선방향의 평균 응력은 89.4% 감소하였다. 이것은 목 부위가 직각인 허스롤이 지속적으로 더 높은 응력을 받는다는 것을 의미한다. 피로수명(fatigue life)을 고려하면 평균 응력이 대폭 감소한 목 부위가 둔각인 허스롤의 사용수명이 직각인 허스롤에 비해 비약적으로 늘어날 것으로 예상된다.

그리고 Point Br, B₀에서의 접선방향 응력은 Fig. 7의 온도 결과와 마찬가지로 허스롤 형상에 따라 응력값의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 접선방향 응력의 경향성을 살펴보면 시간이 지나면서 응력의 증가량이 감소되어 일정응력에 수렴해 가는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구자는 연속 소둔 공정에서 급랭대(RCS)에서의 허스롤 형상에 따른 롤 표면응력 변화를 연구하기 위해 유한요소해석을 수행하였고 결론은 다음과 같다.

(1) 냉각수와 스트립이 허스롤 표면에 접촉하는 과정에서는 인장, 압축 응력이 반복되어 지속적인 열응력을 받게 된다. 이로 인해 롤의 표면에서 균열 및 국부적 소성변형이 발생할 수 있다.

(2) 냉각수와 스트립이 모두 접촉하는 허스롤 표면 (Point A, A₀)에서의 형상을 직각에서 둔각으로 바뀌 줌으로써 허스롤에 작용하는 접선방향 최대 응력이 51.9%, 평균 응력이 89.4% 감소하였다. 또한 롤 표면온도도 26°C 낮아졌다.

(3) 본 연구 결과는 허스롤의 재료 물성을 변경하지 않고 허스롤 형상 설계 변경 만으로 접선방향 응력 크기를 줄일 수 있음을 보여주었다. 향후 본 연구에서 제시한 허스롤 형상에 대해 최적 설계 연구가 필요하다.

REFERENCES

- [1] C. W. Lee, K. H. Shin, 2005, Strip Tension Control Considering the Temperature Change in Multi-Span Systems, *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 19, No. 4, pp. 958~967.
- [2] N. Jacques, A. Elias, M. Potier-Ferry, H. Zahrouni, 2007, Buckling and Wrinkling during Strip Conveying in Processing Lines, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 190, No. 1~3, pp. 33~40.
- [3] G. T. Lee, J. M. Shin, H. M. Kim, J. S. Kim, 2010, A Web Tension Control Strategy for Multi-span Web Transport System in Annealing Furnace, *ISIJ Inter.*, Vol. 50, No. 6, pp. 854~863
- [4] S. Li, Q. Chen, G. Huang, 2006, Dynamic Temperature Modeling of Continuous Annealing Furnace using GGAP-RBF Neural Network, *Neurocomputing*, Vol. 69, No.4~6, pp. 523~536.
- [5] T. Chen, C. Ho, J. Lin, L. Wu, 2010, 3-D Temperature and Stress Distributions of Strip in Preheating Furnace of Continuous Annealing Line, *Applied Thermal. Eng.*, Vol. 30, No. 8~9, pp. 1047~1057.
- [6] Z. Bai, X. Shi, Y. Shen, H. Si, L. Zhou, S. Yu, 2011, Characteristic Analysis and Comprehensive Control for the Horizontal Stripes of High-Grade Automotive Panels in Continuous Annealing, *Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 97~104
- [7] <http://www.kmtec21.com>
- [8] <http://www.sermatechkorea.co.kr>
- [9] <http://industrialsteelrollers.sell.everychina.com>
- [10] P. Hartley, I. Pillinger, C. E. N. Sturgess, 1992, Numerical Modelling of Material Deformation Processes Research, Development and Applications, Springer-Verlag, London.
- [11] D. Benasciutti, E. Brusa, G. Bazzaro, 2010, Finite Elements Prediction of Thermal Stresses in Work Roll of Hot Rolling Mills, *Procedia Eng.*, Vol. 2, No. 1, pp. 707~706.
- [12] D. H. Na, Y. Lee, 2012, A Cooling Method which Reduces the Tangential Tensile Stresses on a Work Roll Surface during Hot Slab Rolling, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 21, No. 1, pp. 58~66.