

열연 슬라브 압연에서 워크롤 표면 원주방향 인장응력 감소를 위한 냉각 방법

나두현¹ · 이영석[#]

A Cooling Method which Reduces the Tangential Tensile Stresses on a Work Roll Surface during Hot Slab Rolling

D. H. Na, Y. Lee

(Received November 10, 2011 / Revised December 15, 2011 / Accepted December 16, 2011)

Abstract

The work roll surface temperature rises and falls repetitively during hot slab rolling because the work roll surface is cooled continuously by water. This study focused on Std. No. 7 to determine a cooling method which significantly reduces the tangential tensile stresses on the work roll surface of the hot slab mill at Hyundai Steel Co. in Korea. A series of finite element analyses were performed to compute the temperature distribution and the tensile stresses in the circumferential direction of the work roll. The virtual slab model was used to reduce the run time considerably by assigning a high temperature to the virtual slab. Except for the heat generated by plastic deformation, this is equivalent to the hot rolling condition that a high temperature slab (material) would experience when in contact with the work rolls. Results showed that when the virtual slab model was coupled with FE analysis, the run time was found to be reduced from 2000 hours to 70 hours. When the work roll surface cooled with a certain on-off patten of water spray, the magnitude of the tangential stresses on the work rolls were decreased by 54.1%, in comparison with those cooled by continuous water spraying. Savings of up to 83.3% in water usage are possible if the proposed water cooling method is adopted.

Key Words : Cooling Method, Tangential Tensile Stresses, Work Roll, Hot Slab Rolling, FE Simulation

1. 서 론

가열로에서 고온(1100°C 이상)으로 가열된 슬라브(slab)는 열연 압연에서 폭압연기-조압연기-사상압연기를 거쳐 특정 두께 및 폭으로 압연된다. 일반적으로 사상압연기에서 7개의 스탠드가 연속적으로 배치되어 있다. 여기서 스탠드는 수평 타입인 한 쌍의 워크롤을 의미한다. 초기 30~60mm 두께의 슬라브는 사상압연에서 압연된 후 1.2~22.0mm의 두께로 가공된다.

여기에서 워크롤 표면 온도는 회전하는 동안

계속 변한다. Fig. 1은 롤이 한 바퀴 회전하는 동안 롤표면의 어떤 한 점 Q(삼각형 모양)의 온도변화를 설명한다. 물이 회전할 때 냉각수는 정해진 위치에서 롤표면에 계속 분사된다. 롤표면 Q의 온도는 롤과 슬라브가 접촉할 때 상승한다.(Fig. 1(a)) 슬라브와 롤의 접촉이 끝났을 때 롤표면 온도는 공냉으로 인해 낮아진다(Fig. 1(b)). 이후 롤표면 Q의 온도는 노즐에서 분사되는 냉각수에 의해 급격하게 낮아진다(Fig. 1(c)). 점 Q와 냉각수의 접촉이 끝난 후 롤표면 Q의 온도는 압연 중 발생한 복열에 의해 증가하기 시작한다(Fig. 1(d)). 비록 롤

1. 중앙대학교 기계공학부

교신저자: 중앙대학교 기계공학부, E-mail: ysl@cau.ac.kr

표면 Q의 온도는 공냉과 냉각수에 의해 부분적으로 감소하지만 1바퀴 회전 후 롤표면 Q의 온도는 1바퀴 회전 후 롤표면 Q의 온도는 회전 전보다 높다.

상기에서 언급된 어떠한 점 Q는 롤표면에 무수히 많다. 무수한 점 Q는 상기 과정을 반복적으로 경험하기 때문에 롤 전체 표면 온도는 증가한다. 이러한 온도 상승을 억제하기 위해 슬라브가 빠져나간 후 다음 슬라브 치입 전까지 롤표면에 냉각수가 지속적으로 분사된다.

슬라브에 의한 롤표면 온도 상승과 강제 수냉에 의한 롤표면 온도 하강으로 인해 롤표면 원주방향으로 인장응력과 압축응력이 발생한다. 이 현상은 결국 롤표면 피로 파괴를 유발한다. 따라서 워크롤표면의 온도변화와 원주방향 인장 및 압축 응력 예측 연구가 매우 중요하다.

C. G. Sun 등[1]은 유한요소법을 이용하여 워크롤표면 온도와 응력 분포를 계산하였다. 그들은 롤 속도, 소재와 물의 접촉열전달 계수, 마찰 계수 차이에 대한 워크롤표면 온도를 비교하였다. 그리고 Coffin[2]이 제안한 low-cycle fatigue life prediction model을 이용하여 사상압연 1, 2, 3번 스텐드의 롤수명을 예측하였다. A. Saboonchi 등[3]은 finite-difference method을 이용하여 롤표면 온도를 계산하였다. 그들은 노즐 충격 스프레이 각도, 노즐 스프레이 각도, 노즐 개수, 냉각수 압력(water pressure), 노즐 타입을 변경하여 워크롤표면 온도를 계산하고 비교하였다. 이 결과를 바탕으로 그들은 어떠한 조건이 롤표면 온도를 낮출 수 있는지를 연구하였다. D. Benasciutti 등[4]은 유한요소법을 이용하여 장시간 압연 중 롤표면 온도 분포를 계산하였다. 그들은 3600초 후 롤표면 온도가 정상 상태에 도달하였다고 보고하였다. 그들은 롤이 정상 상태(steady state)일 때 롤표면 원주방향 응력(tangential stress)과 원주방향 기계적 변형(tangential mechanical strain)이 피로 수명과 관련 있다고 보고하였다.

상기 연구자들은 슬라브가 물에서 빠져나갔을 때 물에 냉각수만 분사되는 경우를 고려하지 않았다. 실제 조업에서 1개의 슬라브 압연 후 다음 슬라브 치입 전까지 일정 시간이 소요된다. 즉, 일정 시간 동안 물은 압연을 하지 않는 공회전 압연(idle rolling) 상태이다. 공회전 압연 상태에서도 냉각수가 지속적으로 롤표면에 분사된다. 또한 상기 연구자들은 냉각수 분사방법에 대한 연구를 수행하지 않았다. 그들은 냉각수가 항상 지속적으로 롤표면에 분사될 때 롤표면온도 변화에 초점

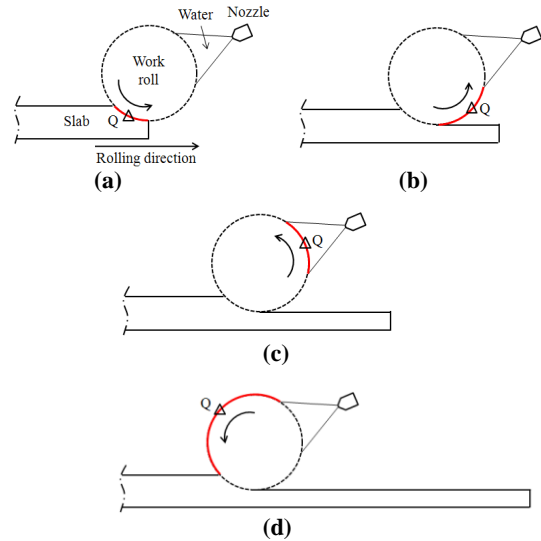


Fig. 1 Schematic of rolling (a) a point Q comes in contact with slab (b) a point Q leaves slab and cools down by air (c) a point Q begins to cool down by water (d) a point Q leaves water cooling region and cools down by air

을 두었다. 기존의 압연롤 냉각 연구는 노즐의 개수, 위치, 타입, 배열 및 수압에 국한되어 있다.

본 연구자는 사상압연 7번 스텐드의 롤표면 온도변화 및 원주방향 응력변화를 해석하였다. 슬라브가 물에서 압연되는 과정과 슬라브가 물에서 압연되지 않는 과정, 즉 공회전 압연, 두 과정이 해석에 포함되어 있다. 본 연구자는 계산 시간을 단축하기 위해 가상 슬라브 기법을 사용하였다. 가상 슬라브 기법은 열전달만 고려된 모델이고 압연에 의한 슬라브의 소성 변형은 고려되지 않았다. 그리고 본 연구자는 롤표면 원주방향 인장 응력을 감소시킬 수 있는 단속적 수냉각(off-and-on water cooling) 방식을 제안하였다.

2. 압연, 냉각조건

Fig. 2(a)는 열연압연공장 마지막 스텐드에서 압연 및 냉각 상태를 도식적으로 표현하였다. 7번 스텐드의 워크롤 직경은 695mm이고 롤 속도는 12.51m/s이다. 7번 스텐드에서 슬라브의 입측 두께는 1.62mm이고 출측 두께는 1.42mm이다. 사상압연 7번 스텐드의 노즐은 총 4개이다. 노즐은 하부 물에도 동일한 위치에 있다. 따라서 노즐 위치는

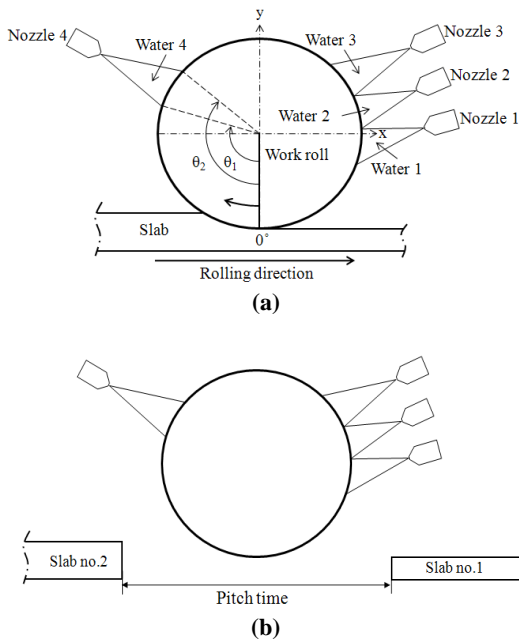


Fig. 2 (a) Schematic of water spray during rolling and (b) Description of pitch time

Table 1 The nozzle position, angle, distance and cooling flux

Nozzle No.	x, y (mm)	Angle (deg) $\theta_1 \sim \theta_2$	Cooling flux(L/sec)
1	540.4, 13.5	262.0~298.5	0.8808
2	508.3, 120.5	248.4~262.7	0.8808
3	513.2, 255.5	217.0~248.2	0.8808
4	-543.8, 291.5	91.3~117.0	0.4573

압연방향을 중심으로 상/하 대칭이다. Table 1에서 각 노즐 별 위치, 롤표면에 분사되는 냉각수 분사 각도($\theta_1 \sim \theta_2$), 냉각수 유량을 보여준다. 냉각수 온도는 4개의 노즐 모두 16°C이다. θ_1, θ_2 는 노즐의 분사 각도를 의미한다.(Fig. 2(a))

1개의 슬라브가 물에서 압연된 후 다음 슬라브가 물에 치입되기까지 일정 시간이 소요된다. 공회전 압연 상태를 '피치 시간(pitch time)' 이라 한다.(Fig. 2(b)) 압연공정에서 피치 시간 동안 냉각수가 롤표면에 지속적으로 분사된다. 즉 냉각수는 슬라브가 빠져나간 후에도 워크롤표면에 항상 분사된다. 7번 스탠드의 피치 시간은 약120초이다.

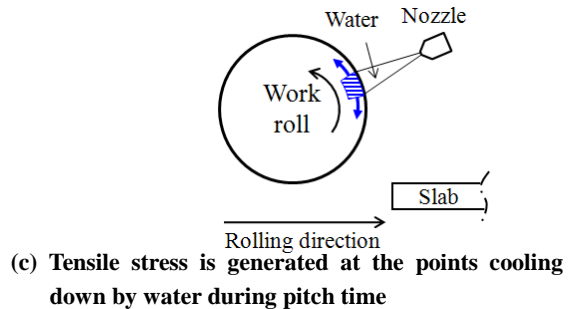
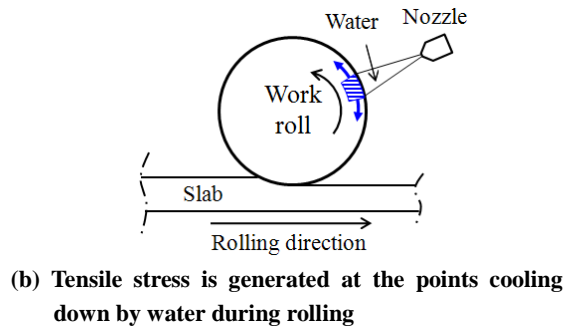
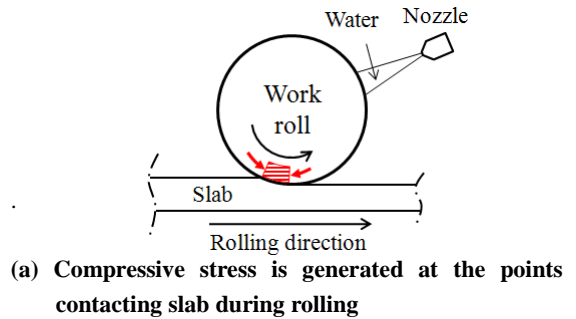


Fig. 3 Compressive and tensile thermal stress on work roll surface

3. 워크롤표면 원주방향 인장, 압축응력 발생 메커니즘

고온의 슬라브와 물이 접촉할 때(Fig. 1(a)) 물의 접촉 부위 온도는 상승한다. 하지만 압연 중 슬라브와 접촉된 부위를 제외한 물의 나머지 부분 온도는 상대적으로 낮다. 따라서 물의 접촉 부위 팽창은 나머지 부위의 낮은 온도로 인해 억제된다. 이로 인해 물표면의 접촉 부위(원주방향) 전후 미소영역에서 원주방향으로 국부적인 압축응력이 발생하게 된다(Fig. 3(a)).

슬라브에 의해 표면 온도가 상승된 물과 냉각수가 접촉할 때(Fig. 1(c)) 냉각수와 접촉한 물부위

온도는 낮아진다. 하지만 접촉 부위를 제외한 물의 나머지 부분 온도는 상대적으로 높다. 냉각수와 접촉된 부위 수축은 나머지 부위의 높은 온도로 인해 억제된다. 그러므로 냉각수가 롤표면에 분사될 때 냉각 전 후 미소영역에서 원주방향 응력은 국부적인 인장상태이다(Fig. 3(b)). 압연 중 롤 표면에는 압축응력(Fig. 3(a))과 인장응력(Fig. 3(b))이 동시에 발생한다. 하지만 롤표면 온도가 압연 중 지속적으로 상승하기 때문에 롤팽창이 억제된다. 따라서 원주방향 압축응력 크기가 인장응력보다 크다. 이것은 압연 중 롤표면 원주방향으로 압축 응력만 발생한다는 것을 의미한다.

슬라브(소재)가 물을 빠져나갔을 때(피치 시간) 롤표면에는 냉각수만 분사된다(Fig. 3(c)). 슬라브가 물을 빠져나간 후 롤표면 원주방향 압축응력은 조금씩 작아진다. 그 이유는 슬라브에 의한 롤표면 온도 상승은 없고 냉각수와 접촉하는 부위 온도는 감소하기 때문이다. 따라서 피치 시간 동안 롤표면 원주방향으로 인장응력이 발생하게 된다. 여러 개의 슬라브가 압연되면 롤표면 원주방향으로 압축응력과 인장응력이 반복적으로 발생한다. 이러한 이유로 슬라브의 압연 매수가 증가할수록 롤표면에 인장 및 압축 응력이 지속적으로 발생한다. 반복적으로 발생하는 인장응력으로 인해 롤표면에 피로균열이 발생하게 된다.

4. 제안된 냉각방법

지속적인 수냉으로 인해 롤냉각이 이루어 지더라도 롤표면은 온도 하강과 상승을 반복적으로 경험하게 된다. 이로 인해 롤표면 원주방향 인장응력은 압연 공정 중 항상 발생하게 된다. 본 연구자는 롤표면 원주방향 인장응력 발생을 억제하기 위해 단속적 수냉각(off-and-on water cooling) 방식을 제안하였다.

단속적 수냉각 방식은 피치 시간 동안만 롤 냉각에 적용된다. 슬라브가 압연될 때, 즉 압연 중 냉각수는 기존과 동일하게 지속적으로 롤표면에 분사된다. 단속적 수냉각 방식이 사용되면 롤표면 원주방향 인장응력 크기가 지속적 수냉각 방식의 인장응력 크기보다 작아지게 된다. 단속적 수냉각 방식의 효과를 연구하기 위해 다음과 같은 4 개의 경우가 고려되었다.

지속적 수냉각, 즉 피치 시간 동안 지속적으로 냉각수가 분사되는 상태를 조건 1)이라고 한다.

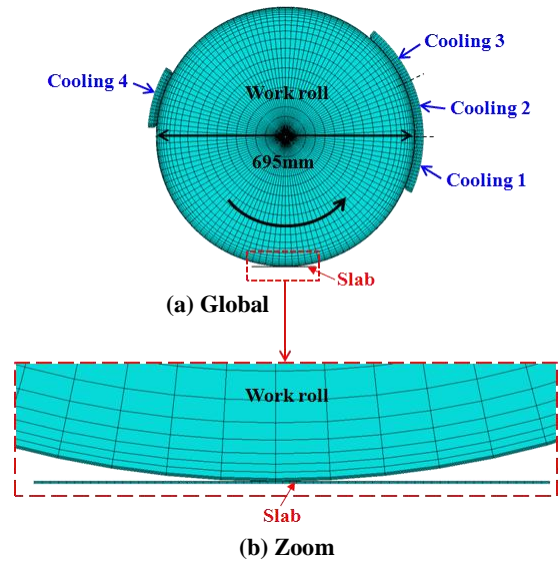


Fig. 4 Finite elements model (global and zoom)

이 조건은 120 초 동안 계속해서 냉각수가 분사되는 것을 의미한다. 여기서 120 초는 피치 시간이다. 실제 공정에서는 조건 1)과 동일하게 냉각수가 지속적으로 분사된다. 조건 2) ~ 조건 4)는 단속적 수냉각 조건이다. 조건 2)는 20 초 동안 냉각수가 분사되고 100 초 동안 정지한다. 조건 3)은 40 초 동안 냉각수가 분사되고 80 초 동안 정지한다. 마지막으로 조건 4)는 60 초 동안 냉각수가 분사되고 60 초 동안 정지한다.

5. 유한요소해석

5.1 유한요소 모델링과 경계조건

해석시간을 단축하기 위해 FE 모델은 2차원으로 모델링되었다. 슬라브와 워크롤은 상/하 대칭이기 때문에 1/2 대칭(symmetric) 조건이 적용되었다. 해석 방법은 내연적 시간 적분법(implicit time integration)이다. 요소(element) 종류는 4절점 2-D 열전달 요소인 CPE4RT(A 4-node plane strain thermally coupled quadrilateral, bilinear displacement and temperature, reduced integration, hourglass control)이다. 슬라브와 워크롤의 마찰 계수는 0.35이다.

Fig. 4는 유한요소해석으로 모델링된 2차원 형상을 보여준다. 롤요소 최소 사이즈는 0.3mm이다. 냉각수(cooling water)와 슬라브는 워크롤에 접촉된 상태로 모델링 되었다. 초기 슬라브 온도는 880°C, 롤온도는 30°C고 냉각수 온도는 16°C이다.

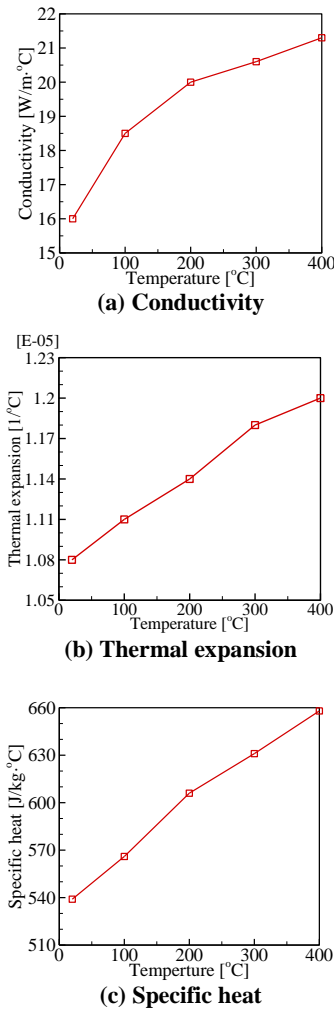


Fig. 5 Thermal properties of the work roll used in this study

Table 2 The mechanical properties of the work roll

Property	Density	Young's modulus	Poisson's ratio
Shell	7620kg/m ³	220GPa	0.287
Core	7100kg/m ³	160GPa	0.275

5.2 워크롤과 슬라브 재료 물성

사상압연 7번 스탠드의 워크롤 재질은 HSS (High Speed Steel)이다. 본 연구자는 워크롤의 전도도, 열팽창계수, 비열을 20~400°C 범위에서 측정하였다. 왜냐하면 S. Serajzadeh 등[5]은 열연 사상압연 1번 스탠드에서 롤표면 온도가 약 400°C까지 상승한다고 보고하였기 때문이다. Fig. 5는 온도

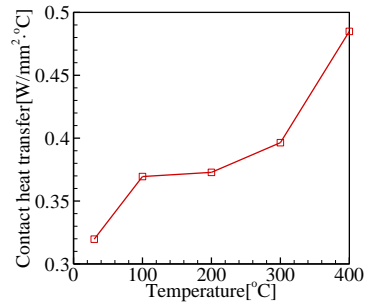


Fig. 6 Contact heat transfer coefficient as a function of temperature

Table 3 Convection heat transfer coefficient between the work roll and cooling

	Convection heat transfer coefficient (W/mm ² ·°C)
Cooling 1	0.0689
Cooling 2	0.0616
Cooling 3	0.0654
Cooling 4	0.0605

별로 측정된 워크롤의 전도도, 열팽창계수, 비열 값을 보여준다.

Table 2는 워크롤내부(core)와 외부(shell)의 기계적 물성치를 보여준다. 본 연구에서 사용된 워크롤내부(core) 직경은 530mm이다. 본 연구에서 사용된 슬라브는 AISI 1020 이다. AISI 1020의 밀도(density)는 7860kg/m³이고 푸아송비(poisson's ratio)는 0.29이다. AISI 1020의 전도도(conductivity)는 28.35W/m·°C이고 비열(specific heat)은 420J/kg·°C이다[1,6]. 소재의 열간변형을 기술하는 구성방정식으로 Shida's equation[7] 이 사용되었다.

5.3 열전달계수

본 연구자는 슬라브와 워크롤의 접촉 열전달계수를 계산하기 위해 C.O. Hlady 등[8]이 제안한 식을 이용하였다. Fig. 6은 본 연구에서의 압연 조건이 적용되었을 때 접촉 열전달계수를 보여준다.

냉각수와 워크롤의 수냉에 의한 대류 열전달계수가 또한 요구된다. Vladimr B. Ginzburg 등[9]은 노즐과 롤표면의 거리, 수압, 냉각수 유량, 롤표면 온도, 냉각수 분사 각도 변화에 따른 냉각수와 워크롤의 대류 열전달계수 수식을 제안하였다. Table 3는 본 연구에서 적용된 압연 조건으로부터 구한 대류열전달계수를 보여준다. Cooling 1은 노즐 1에

서 분사되는 냉각수가 물과 접촉하는 구간을 의미한다(Fig. 4). 노즐이 4개이기 때문에 cooling 구간도 4개이다. 공냉에 의한 물의 대류열전달계수는 $20\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 로 설정되었다.

5.4 가상 슬라브 기법

7번 스탠드에서 압연된 소재길이는 약1000m이다. 따라서 많은 해석 시간이 요구된다. 계산 시간을 단축하기 위해 실제 슬라브(Fig. 7(a))는 가상 슬라브(virtual slab)(Fig. 7(b))로 대체되었다. 본 연구자는 자동차 디스크 브레이크 모델을 기초로 하여 가상 슬라브 기법을 사용하였다[10~12]. 자동차 디스크는 브레이크 패드와 접촉할 때 열이 발생된다. 이 현상은 물과 슬라브가 접촉할 때 물표면에 열이 발생하는 것과 유사하다. 그리고 디스크와 브레이크 패드의 접촉이 끝나면 공기 중에서 냉각된다. 이 현상은 슬라브가 압연된 후 냉각수만 분사되는 것과 유사하다. 따라서 열연 압연에서 가상 슬라브가 브레이크 패드 역할을 하고 디스크가 롤 역할을 하게 된다. 가상 슬라브 모델은 슬라브 내부에 발생하는 가공발열을 고려하지 못한다. 그러므로 본 연구자는 접촉 열전달에 의해 발생하는 온도의 10%를 가공발열에 의한 온도라 가정하였다. 가상 슬라브 기법을 이용하여 본 연구자는 해석 시간을 기존 2000시간에서 70시간으로 단축할 수 있었다.

6. 결과 및 토의

6.1 워크롤표면 온도

Fig. 8 은 슬라브가 워크롤에서 압연될 때 워크롤표면 온도 변화를 보여준다. R 은 롤의 반지름이고 r 은 롤 중심으로부터 노드(node)까지 거리이다. r/R 이 1 이면 물과 슬라브가 접촉한 표면이다. r/R 이 0.999 이면 물표면에서 0.3mm 내부인 것을 의미한다. 슬라브와 물이 접촉할 때 물표면 온도는 약 300°C 까지 상승한다. 사상압연 7 번 스탠드에서 슬라브 1 개가 압연되는데 소요되는 시간은 약 70 초이다. 하지만 물표면 온도는 압연 시작 후 10 초 이전에 정상 상태에 도달한다(Fig. 8). 즉, 압연 시작 후 11 초에서 70 초까지 물표면 온도 변화는 거의 없다는 것이다. 따라서 본 연구자는 해석 시간을 단축하기 위해 물이 정상 상태에 도달한 압연 시간 10 초까지 해석을 수행하였다. 압연 중 냉각수가 물표면에 계속 분사되기 때문에 물표면

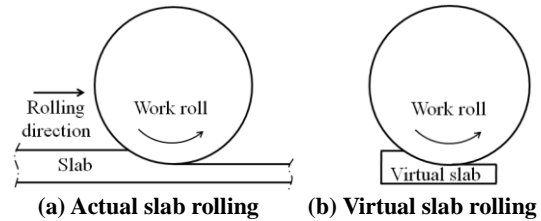


Fig. 7 Comparison of actual rolling and virtual slab rolling

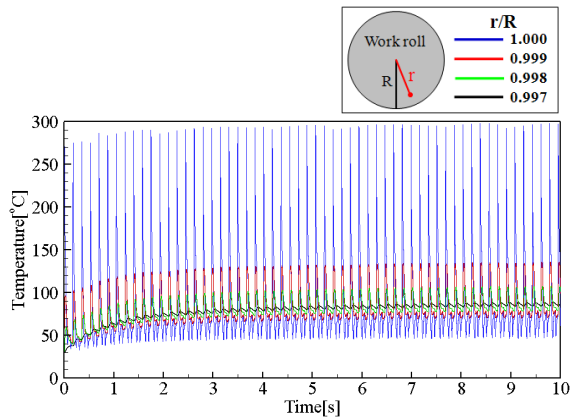
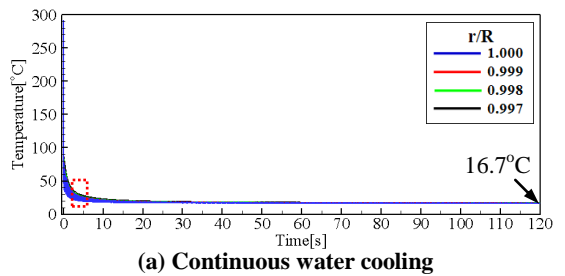
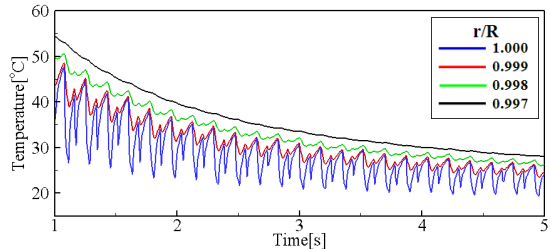


Fig. 8 Temperature distributions at the work roll surface during rolling



(a) Continuous water cooling



(b) Temperature distributions from 1 to 5 second
Fig. 9 Temperature distributions at the work roll surface during pitch time - Continuous water cooling (Case 1)

온도는 일정 온도 이상 올라갈 수 없다. 따라서 물이 정상 상태에 도달하게 된다.

Fig. 9(a)는 조건 1)에 대한 롤표면 온도 변화를 보여준다. 압연 중 롤표면 온도는 300°C 까지 상승하지만(Fig 8) 피치 시간 동안 롤표면 온도는 16.7°C 로 낮아진다. 피치 시간 동안 물은 공회전 압연(idle rolling) 상태이다. 따라서 롤표면 온도 상승이 없다. 또한 압연 시간(70 초)보다 순수냉각 시간(120 초)이 더 길기 때문에 롤표면 온도는 냉각수 온도(16°C)와 거의 동일하게 낮아진다. Fig. 9(b)는 Fig 9(a)에서 빨간 점선 박스로 표시된 부분을 확대하여 보여준다. 시간이 경과할수록 롤표면 ($r/R=1$)에서 온도 상승 폭이 점차 줄어든다. 또한 r/R 이 0.999, 0.998, 0.997 일 때 롤내부 온도도 지속적으로 낮아진다. 피치 시간에서 냉각수에 의한 롤표면 온도는 20 초 만에 20°C 까지 낮아진다. 롤표면 온도는 이후에 거의 변화가 없다. 즉, 냉각 중에도 물은 정상 상태에 도달하게 된다. 따라서 냉각 시작 20 초 후 롤표면 냉각 효과는 미비하다.

Fig. 10 은 조건 2)로 냉각된 롤표면 온도변화를 보여준다. 냉각수가 분사되는 동안 롤표면 온도는 18.7°C 로 낮아지게 되고 냉각수 분사가 정지된 동안에는 30.3°C 로 상승하게 된다. 냉각수가 분사되는 20 초 동안 롤표면 온도는 조건 1)과 동일하게 급격히 낮아진다. 하지만 냉각수 분사를 정지하면 압연 중 슬라브에 의해 상승된 롤내부 온도로 인해 롤표면 온도는 조금씩 올라가게 된다. 피치 시간 120 초 후 상승된 롤표면 온도는 상온(30°C)과 거의 동일하였다. 조건 3)과 조건 4)에 대한 온도 변화 경향은 조건 2)와 동일하였다. 피치 시간 120 초 후 조건 1)의 롤표면 온도는 16.7°C 이다. 조건 2)는 30.3°C, 조건 3)은 27.2°C 그리고 조건 4)는 25.0°C 이다. 롤표면 온도는 단속적 수냉각 방식이 사용되었을 때 다소 높았다. 조건 2)의 경우 롤표면 온도가 가장 높다. 조건 2)의 롤표면 온도는 물 초기 온도 30°C 와 동일하다. 물의 열팽창을 방지하기 위해 피치 시간 동안에 냉각수가 롤표면에 분사된다. 하지만 조건 1)과 조건 2)의 온도 차이는 물의 열팽창에 영향을 미칠 정도로 크지 않다.

6.2 워크롤표면 원주방향 응력

Fig. 11 은 슬라브 압연 중 워크롤표면 원주방향 응력을 보여준다. 물이 정상 상태에 도달했을 때 롤표면 원주방향 최대압축응력은 -541.3MPa 이다.

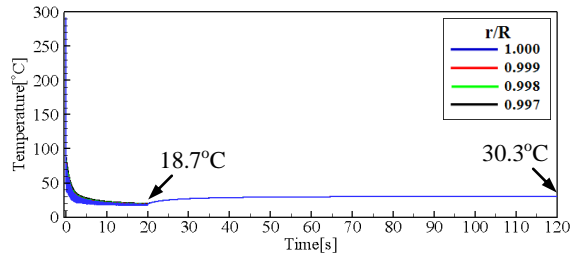


Fig.10 Temperature distributions at the work roll surface during pitch time - Off-and-on water cooling (Case 2)

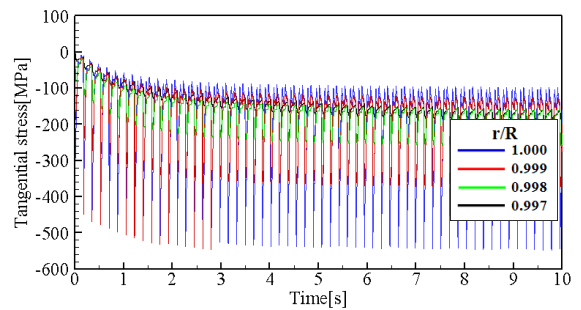
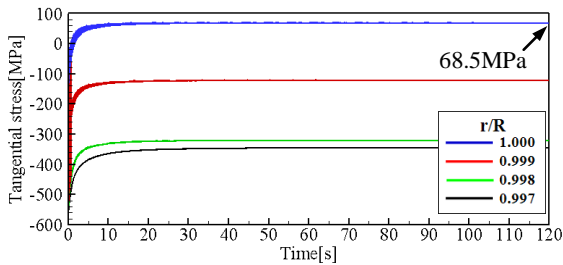


Fig.11 Tangential stress distributions at the work roll surface during rolling

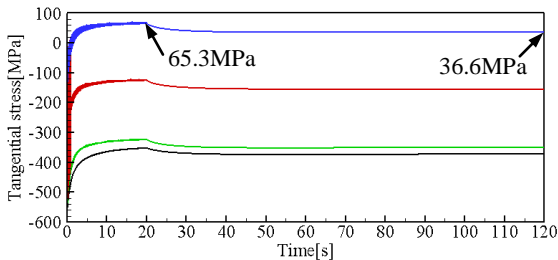
r/R 이 작아질수록 롤내부의 온도 변화가 작기 때문에 롤표면 원주방향 압축응력 크기도 작아지게 된다. 본 연구자는 슬라브의 소성 변형이 고려된 경우에 대해서도 해석을 수행하였다. 이 경우의 롤표면 원주방향 응력이 슬라브 기법을 사용한 경우의 응력과 비교되었다. 결과적으로 슬라브의 소성 변형이 고려된 경우 롤표면 원주방향 최대압축응력은 -547.5MPa 이다. 따라서 슬라브의 소성 변형은 롤표면 원주방향 응력에 영향을 미치지 않았다.

Fig. 12(a)는 조건 1)에 대한 롤표면 원주방향 응력 결과를 보여준다. 롤표면($r/R=1$)에서 인장응력은 최대 68.5MPa 이다. r/R 이 1 보다 작은 경우, 즉 롤내부의 원주방향 응력은 압축응력만 발생하였다. 따라서 롤표면을 제외한 롤내부에 균열 발생 가능성은 낮다.

Fig. 12(b)는 조건 2)에 대한 롤표면 원주방향 인장응력 결과를 보여준다. 냉각수를가 분사되는 20 초 동안 인장응력이 지속적으로 증가하다가 20 초 후부터 인장응력이 감소한다. 냉각수에 의해 롤표면 온도가 급격하게 낮아질 때 롤표면에서 65.3MPa 의 인장응력이 발생하였다. 반대로 냉각



(a) Continuous water cooling (Case 1)



(b) Off-and-on water cooling (Case 2)

Fig.12 Tangential stress distributions at the work roll surface during pitch time

Table 4 The computed tangential stress of the work roll surface after pitch time ($r/R=1$)

	Cooling mode	Tangential stress(MPa)
Case 1	120s(injection)	70.4
Case 2	20s(injection)-100s(stop)	32.3
Case 3	40s(injection)-80s(stop)	39.3
Case 4	60s(injection)-60s(stop)	42.6

수 분사가 정지되면 인장응력 크기가 감소하였다.

단속적 수냉각 방식의 장점은 롤표면 온도를 지속적으로 떨어뜨리지 않는 것이다. 따라서 롤표면 수축량이 지속적 수냉각 방식에 의한 수축량보다 작다. 그러므로 단속적 수냉각 방식이 사용되면 롤표면 원주방향 인장응력 크기가 지속적 수냉각에 의해 발생된 인장응력 크기보다 작다.

Table 4는 지속적, 단속적 수냉각 방식에 따른 피치 시간 후(120초) 롤표면 원주방향 응력을 보여준다. 조건 2)의 경우 지속적 수냉각 방식(조건 1))보다 롤표면 원주방향 인장응력이 54.1% 감소하였다. 인장응력이 지속적 수냉각 방식(조건 1))보다 조건 3)의 경우 44.2%, 조건 4)의 경우 39.5%로 각각 감소하였다. 또한 냉각수 분사 동력은 피치 시간 동안 조건 2)의 경우 지속적 수냉각 방식

(조건 1))보다 83.3%, 조건 3)의 경우 66.7%, 조건 4)의 경우 50.0% 절약되었다. 따라서 지속적 수냉각 방식이 사용되면 롤표면 원주방향 인장응력이 감소되고 냉각수 분사 동력이 절약된다.

7. 결론

롤표면 원주방향 인장응력 발생을 억제하기 위해 본 연구자는 열연 슬라브 압연의 사상압연에서 롤냉각 방법에 대해 연구하였다. 본 연구에서의 결론은 다음과 같다.

(1) 본 연구자는 가상 슬라브 기법을 사용하여 슬라브 1 개에 대한 해석 시간을 2000 시간에서 70 시간으로 단축하였다. 결과적으로 롤표면 원주방향 응력은 슬라브의 소성 변형이 고려된 경우와 비교했을 때 차이가 없었다. 따라서 본 연구에서 사용된 가상 슬라브 기법이 롤표면 원주방향 응력을 해석하는데 적합하였다.

(2) 피치 시간 동안 단속적 수냉각 방식이 사용되면 지속적 수냉각 방식보다 롤표면 원주방향 인장응력이 최소 39.5%에서 최대 54.1% 완화되었다. 따라서 단속적 수냉각 방식이 사용되면 롤표면 균열 발생 가능성이 낮아지고 롤 수명이 향상된다. 또한 피치 시간 동안 냉각수 분사 동력이 최소 50.0%에서 최대 83.3% 절약된다.

참고 문헌

- [1] C. G. Sun, C. S. Yun, J. S. Chung, S. M. Hwang, 1998, Investigation of Thermomechanical Behavior of a Work Roll and of Roll Life in Hot Strip Rolling, Metall. Mater. Trans. A, Vol. 29, No. 9, pp. 2407~2424.
- [2] L. F. Coffin, 1959, Symp. on Internal Stresses and Fatigue in Metals, Elsevier, Amsterdam, p. 363.
- [3] A. Saboonchi, M. Abbaspour, 2004, Changing the Geometry of Water Spray on Milling Work Roll and its Effect on Work Roll Temperature, J. Mater. Process. Technol., Vol. 148, No. 1, pp. 35~49.
- [4] 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. 707~716.
- [5] S. Serajzadeh, A. Karimi Taheri, F. Mucciardi, 2002, Unsteady State Work-roll Temperature

- Distribution during Continuous Hot Slab Rolling, Int. J. Mech. Sci, Vol. 44, No. 12, pp. 2447~2462.
- [6] M. Vural, 2006, The Differences Between the Strengths of Quality Levels of Weld Imperfections Given in ISO 5817, J. Achievements Mater. Manuf. Eng., Vol. 15, No. 1-2, pp. 193~198.
- [7] S. Shida, 1969, Empirical Formula of Flow Stress of Carbon Steels Resistance to Deformation of Carbon Steels at Elevated Temperature, Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 10, pp. 610~617.
- [8] C. O. Hlady, J. K. Brimacombe, I. V. Samarasekera, E. B. Hawbolt, 1995, Heat Transfer in the Hot rolling of Metals, Metall. Mater. Tans. B, Vol. 26, No. 5, pp. 1019~1027.
- [9] V. B. Ginzburg, F. A. Bakhtar, R. J. Issa, 1997, Application of Cool Flux Model for Analysis of Work Roll Thermal Conditions in Hot Strip Mills, Iron Steel Eng., Vol. 74, pp. 38~45.
- [10] C .H. Gao, X. Z. Lin, 2002, Transient Temperature Field Analysis of a Brake in a Non-axisymmetric Three-Dimensional Model, J. Mater. Process. Technol., Vol. 129, No. 1-3, pp. 513~517.
- [11] Y. Yang, W. Chen, 2011, A Nonlinear Inverse Problem in Estimating the Heat Flux of the Disc in a Disc Brake System, Appl. Therm. Eng., Vol. 31, No. 14-15, pp. 2439~2448.
- [12] A. Adamowicz, P. Grzes, 2011, Influence of Convective Cooling on a Disc Brake Temperature Distribution during Repetitive Braking, Appl. Therm. Eng., Vol. 31, No. 14-15, pp.2177~2185.