

균열로의 그늘효과에 의한 슬랩변형에 관한 수치해석적 연구

노정훈¹ · 황병복[#] · 맹주원¹ · 김재도²

Numerical Study of Shadow Effect on Slab Deformation in Reheating Furnace

J. H. Noh, B. B. Hwang, J. W. Maeng, J. D. Kim

(Received December 3, 2010 / Revised February 17, 2011 / Accepted March 8, 2011)

Abstract

Three dimensional simulations were performed for the deformation of a slab in a roller hearth type slab reheating furnace. The main objective of this study was to examine the deformation pattern of the slab due to the shadow effect, i.e., the temperature difference between the upper and lower slab surfaces, in particular, the variations of displacement and effective stress in the vertical direction. A commercially available FE code, ANSYS Workbench 12.1TM, was used in a fully coupled thermo-elasticity analysis. Several cases with different slab surface temperatures were selected for the simulations. For the sake of simplicity, the temperature environment inside the furnace was assumed to be homogeneous for the upper and lower faces of the slab. Two cases of with different slab width were selected as model geometry. The deformation patterns were computed and explained in terms of periodicity and symmetry. The results indicated that the shadow effect leads to a significant displacement in the vertical direction and, thereby, is one of the main reasons for the separation of the slab and its supports. These simulations also predicted that the deformation is more severe along the transverse direction than along the longitudinal direction.

Key Words : Roller Hearth Type, Shadow Effect, Coupled Thermo-elasticity, Periodicity, Reheating Furnace

1. 서 론

연속주조공정(continuous casting process)과 열간 압연공정(hot rolling process) 사이에 필수적으로 적용되는 균열로공정(reheating furnace process)은 슬랩(slab)의 온도를 균일하게 높임으로서 이어지는 압연공정에서 소성가공성을 원활하게 하는 역할을 한다[1]. 이러한 균열로는 에너지 소모가 적은 특징을 가지고 있으나 가스버너에 의한 연소로 인하여 슬랩 표면을 산화시켜 스케일(scale)

을 형성시킨다[2~4]. 일반적으로 균열로의 품질은 일차적으로 슬랩 내부의 온도를 균일하게 가열하여 균열로의 출구에서 설정 온도에 얼마나 근접한 온도 분포를 가지고 나오는가로 평가된다. 또한 슬랩의 이송 수단에 의해 발생하는 타이어 흔적(tiremark)도 균열로의 품질을 평가하는 요소 중 하나이다.

균열로에서 슬랩을 이송하는 방법으로는 워킹빔(working-beam type)[5, 6], 롤러허스(roller-hearth type)[7, 8], 푸셔(pushers-type)[9, 10] 등이 있으나, 가장

1. 인하대학교 기계공학과 대학원

2. 인하대학교 기계공학과

교신저자: 인하대학교 기계공학과,

E-mail: bbhwang@inha.ac.kr

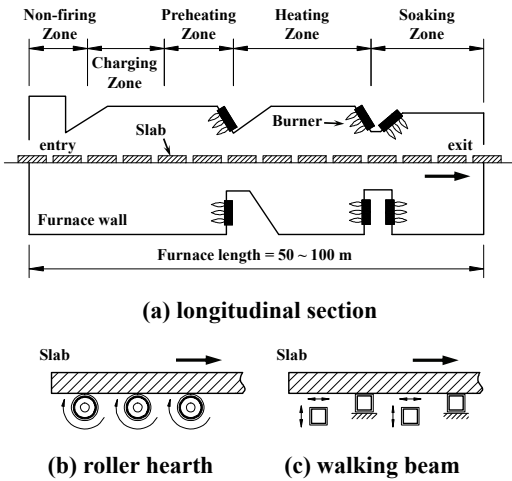


Fig. 1 Reheating furnace

많이 쓰이는 것은 워킹빔과 롤러허스 형식이다. 일반적으로 균열로의 장입부(entry)에서 슬랩이 균열로 내부로 안착되며, 이송방법에 의해 슬랩이 이동하면서 예열부, 가열부, 침투부(soaking zone)을 거치면서 취출부(exit)에서 균등한 온도로 가열된 슬랩이 다음 압연공정으로 이동한다. 워킹빔 형식의 균열로에서는 Fig. 1에 도식적으로 나타난 바와 같이 워킹빔이 전후/상하 운동하면서 슬랩을 앞으로 이송시키며, 롤러허스 형식에서는 회전하는 롤 상단에 슬랩이 놓임으로서 자연스럽게 이송되는 방식이다.

모든 형태의 균열로에서와 마찬가지로 롤러허스 형식의 균열로에서도 일반적으로 타이어와 슬랩의 접촉부분에 타이어흔적[11~13]과 온도분포에 의한 스킨마크(skidmark)[14~16]의 특성이 나타난다. 타이어흔적은 여러 가지 이유에서 발생하는 것으로 알려져 있다. 가장 흔한 이유로 슬랩 표면에 형성된 스케일이 타이어에 묻어나서 발생하는 scale pickup과 슬랩 표면의 스케일이 타이어와의 접촉압력에 의해 슬랩 내부로 압인되는 scale imprinting 현상이 있다. 또한 슬랩이 타이어와 일부만 접촉하여 경계면의 접촉압력이 유동응력(flow stress)보다 높아지게 되어 슬랩의 표면이 타이어에 의해 압입되는 현상도 나타난다. 특히 1,000℃ 이상의 고온의 상태에서는 유동응력이 일반 실온의 약 2-3% 정도로 낮아지기[17] 때문에 소성변형에 의한 타이어흔적의 발생 가능성이 높아진다. 이러한 타이어흔적은 슬랩 표면에 생성되는 스케일의 두께와 함께 타이어와 슬랩이 접촉

하는 시간 및 접촉압력에 직접적으로 영향을 받는다.

본 논문에서는 열-구조 연성해석을 통해 슬랩표면에 작용하는 그늘효과와 함께 슬랩의 자중에 의한 변형으로 발생하는 슬랩의 처짐을 해석하였다. 또한 유효응력의 분포를 분석하고 타이어와 접촉부분에서의 접촉압력을 분석함으로써 압입에 의한 소성변형의 가능성도 알아 보았다. 본 논문에서는 보편적으로 사용되는 상용해석프로그램을 사용하여 해석을 수행하였다. 해석에 적용된 공정 조건 및 고온에서의 재료성질은 참고문헌을 통해 알려진 조건을 적용하였다.

2. 해석조건

해석에 사용된 슬랩은 두께가 85mm인 연강으로 길이가 1,260mm와 1,540mm의 두 가지의 형상적 모델을 적용하였다. 순수하게 슬랩의 자중에 의한 변형 형태도 파악하기 위하여 슬랩 상/하면의 온도가 같은 경우도 모의실험을 수행하였다. 또한 일반적으로 알려진 그늘효과에 의한 슬랩 하면의 온도가 10℃와 20℃ 낮은 경우를 상정하여 시뮬레이션 하였다. Table 1에 시뮬레이션에 적용된 공정조건들이 정리되어 있다.

롤러축(roller shaft) 각 부분에 장착된 타이어는 축이 회전함에 따라 슬랩은 출구방향으로 이동되면서 균열로의 출구를 빠져 나갈 때까지 가열된다. 슬랩이 이동하면서 슬랩과 타이어의 접촉위치가 연속적으로 변하기 때문에 경계조건이 변화하게 된다. 모든 경우의 접촉 조건에 대한 시뮬레이션

Table 1 Process conditions in simulation

| Parameters | Values |
|---------------------------------------|--------------|
| Slab thickness (mm) | 85 |
| Slab width (mm) | 1,260, 1,540 |
| Density (kg/m ³) | 7,850 |
| Coefficient of Thermal Expansion (°C) | 0.000012 |
| Tensile yield strength (MPa) | 250 |
| Tensile ultimate strength (MPa) | 460 |
| Temperature difference (°C) | 0, 10, 20 |
| Top surface Temp. (°C) | 1048 |
| Bottom surface Temp. (°C) | 1028 |

- Slab material : structural steel

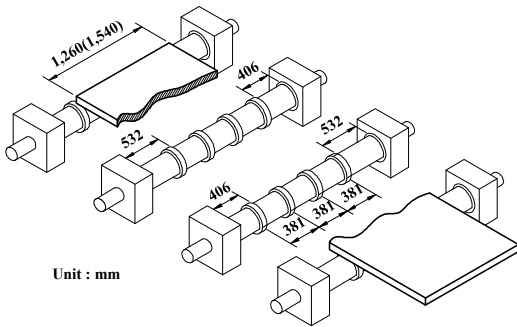


Fig. 2 Schematic of selected slab position

션을 수행하는 것은 타당치 않기 때문에 극한 상황을 포함하는 대표적인 상황을 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 2에 시뮬레이션이 수행된 조건을 도해하였다. 슬랩의 자중에 의한 굽힘이 극대화 되는 것을 고려하기 위하여 슬랩의 선단부는 다음 롤러축에 도달하기 직전의 상태로 하였으며, 슬랩의 후단은 자중에 의한 효과를 최소화하는 경우로 상정하여 마지막 타이어에 끝부분이 지지되는 형태로 구성하였다. 이러한 상태에서 시뮬레이션을 수행함으로써 열변형과 함께 자중에 의한 변형을 포함하는 최대/최소의 변형형태를 예측할 수 있다.

열-구조 연성해석을 위해 CATIA V5™ 을 이용하여 폭이 다른 2 가지 형식의 슬랩을 포함한 롤러축을 3 차원 모델을 생성한 후 ANSYS Workbench 12.1™ 에서 import 하였다. 해석에 사용된 FE 모델이 Fig. 3 에 나와 있다. 해석에 사용된 유한요소모델의 절점 및 요소의 수는 각각 313,440 및 142,635 (광폭 슬랩)이고, 협폭 슬랩의 경우 각각 304,460 및 140,850 이다. 본 해석에서는 롤의 처짐에 대한 해석은 별도로 수행하지 않았으며 단지 슬랩의 자중 및 그늘효과에 의한 변형에 국한하여 해석

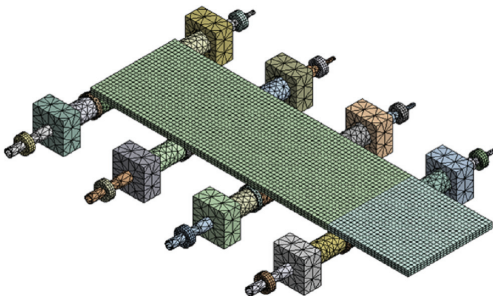


Fig. 3 FE model in simulation (w = 1,540 mm)

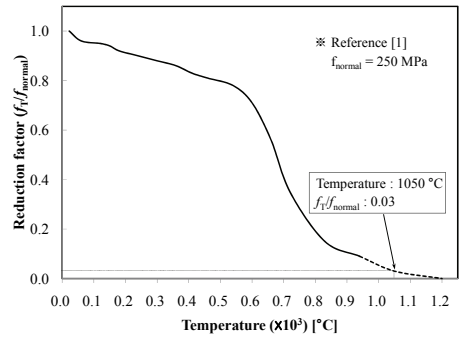
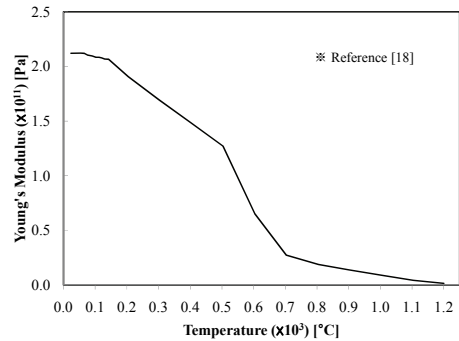


Fig. 4 Temperature vs. elastic constant(top) and yield stress(bottom)

을 수행하였다.

슬랩은 일반 구조용강으로 온도에 따른 탄성계수와 항복강도가 Fig. 4에 각각 나와 있다. 그림에서 알 수 있듯이 1,000℃ 이상의 고온에서는 탄성계수와 항복강도가 실온의 약 2-3% 정도로 줄어들어 강성이 매우 약해 지는 것을 알 수 있다.

3. 해석결과

슬랩은 상하면의 표면온도차에 의해 변형이 발생된다. 이러한 변형은 슬랩의 폭 및 길이방향으로 2중 곡률의 형태를 보이나 형상적인 특성으로 길이 방향으로의 변형은 폭방향에 비해 변위 크기 않으므로 본 논문에서는 분석하지 않았다. Fig. 5에 슬랩의 상하면의 온도차가 20℃일 때 열 변형 의한 슬랩의 변형형태가 나와있다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 축의 처짐을 고려하지 않더라도 순수하게 슬랩의 열변형에 의해서 안쪽 2개의 타이어와 슬랩이 접촉하지 않는 것으로 나타났다. 또한 협폭 및 광폭 슬랩의 변형형태는 거의 비슷한 것으로 예측되었다. 그림에서 수직방향의 변위는 25배로 확대하여 표현하였다.

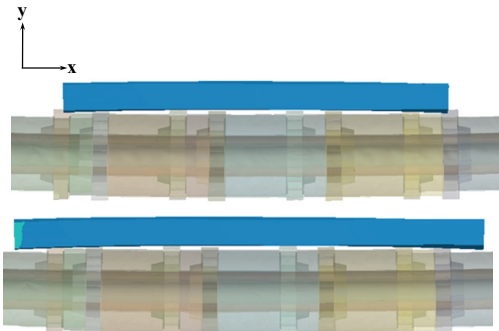


Fig. 5 Deformation patterns of 1,260 mm(top) and 1,540mm(bottom) slab ($\delta y \times 25$)

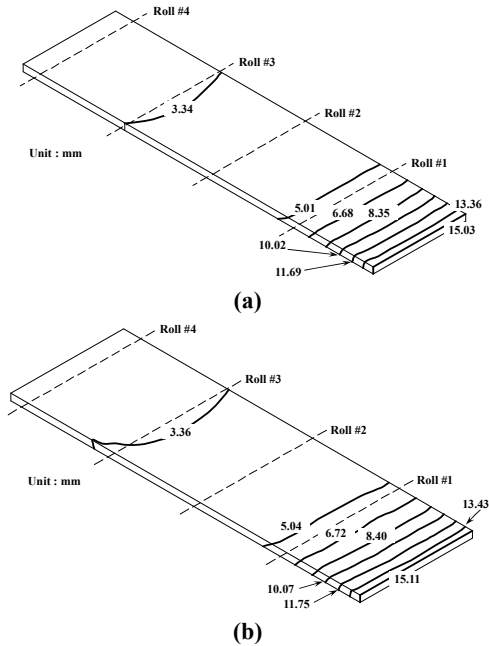
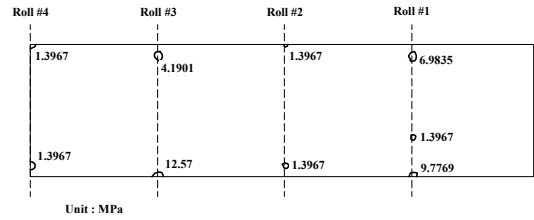
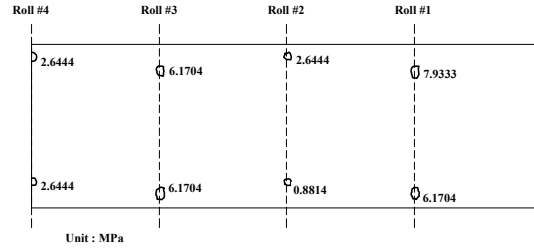


Fig. 6 Displacement at slab end for 1,260 mm(top) and 1,540mm(bottom) slab

슬랩이 균열로를 진행하면서 슬랩의 선단부와 후단부는 각각 다음 타이어에 접촉하기 직전 또는 타이어에서 떨어진 직후에 가장 큰 처짐 변위를 갖게 된다. Fig. 6에 슬랩 선단부의 처짐을 보여주는 해석결과를 나타냈다. 그림에서 협폭과 광폭 모두 비슷한 형태의 처짐형태를 나타내고 있으며 최대 처짐변위는 약 15mm 정도로 예측되었으며, 이렇게 슬랩의 선단부 처짐이 클 경우에는 슬랩이 다음 타이어와 접촉하는 순간 타이어에 충격을 주어 물리축을 쌓고 있는 단열재를 파손시킬

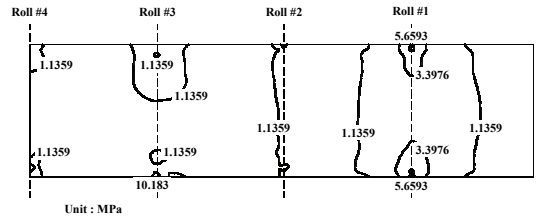


(a)

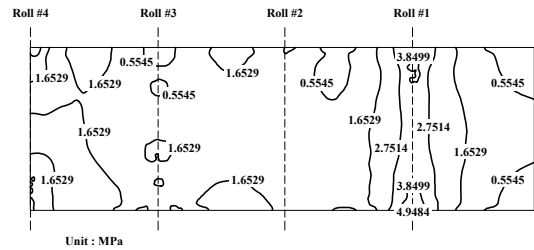


(b)

Fig. 7 Contact pressure between slab and tire for 1,260mm(top) and 1,540mm(bottom) slab



(a)



(b)

Fig. 8 Equivalent stress distributions for 1,260mm (top) and 1,540mm(bottom) slab

수 있다.

Fig. 7에 슬랩과 타이어의 접촉압력을 나타냈다. 그림에서 볼 수 있듯이 협폭 슬랩의 경우 3번 측 오른쪽 바깥 타이어 접촉부에서 약 12.5Mpa의 접촉압력이 예측되었으나 광폭 슬랩에서는 1번 측에서 왼쪽 바깥 타이어 접촉부에서 약 8Mpa의 접촉압력이 예측되었다. 특히하게도 슬랩의 폭

이 작은 경우에 접촉압력이 더 크게 예측되었다. 이러한 최대 접촉압력의 크기는 1150도 부근에서 구조용강의 항복응력이 5-10Mpa인 점을 고려할 때 압입에 의한 소성변형을 유발하여 슬랩의 밑면에 타이어흔적을 만들 수 있는 가능성을 말해준다.

소재의 소성변형 가능성을 알아보기 위하여 유효응력의 분포를 Fig. 8에서와 같이 알아 보았다. 협폭 슬랩의 경우 타이어와 최대접촉압력을 나타내는 부위와 동일한 위치에서 약 10Mpa의 최대유효응력이 예측되었으며, 광폭 슬랩의 1번 축에서 경우에는 최대접촉압력이 발생하는 위치와는 다른 반대 편 타이어 접촉부에서 약 5Mpa의 최대 유효응력이 발생되었다. 예측된 최대 접촉압력과 마찬가지로 협폭에서의 최대유효응력이 광폭에서 보다 약 2배 정도 크게 예측된 점이 특이하다 하겠다.

4. 결과분석

열변형에 의한 슬랩의 처짐을 보다 상세히 분석하기 위하여 슬랩의 양 끝 단과 네 개의 롤러 축에 포함된 네 개의 타이어 위치에서 슬랩의 변위를 측정하였다. 측정방법은 Fig. 9에 설명되어 있는 것과 같이 변형전 초기 상태의 슬랩 하면을 기준으로 변위를 측정하였다.

슬랩의 변위는 각각의 롤러축의 위치 및 타이어의 위치에서 측정하였으며, 이러한 변위는 슬랩이 균열로에서 앞으로 전진함에 따라 주기적으로 변화하게 된다. Fig. 10에 시뮬레이션에서 예측된 슬랩의 변위를 각각의 롤러축의 위치에서 측정된 것을 나타내었다. 그림에서 쉽게 알 수 있는 것은 슬랩의 변위는 각각의 롤러축의 위치에서 서로 상이한 형태를 보이고 있다는 점이다. 슬랩의 선단부를 외팔보 형태로 지지하고 있는 1번 롤러축 위치에서의 슬랩의 변위는 대체적으로 양단의 처짐 변위가 슬랩의 가운데 보다 작은 것을 볼 수 있으며 이러한 경향은 협폭의 슬랩인 경우 더욱

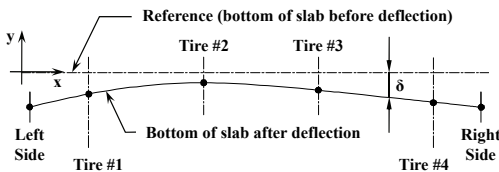
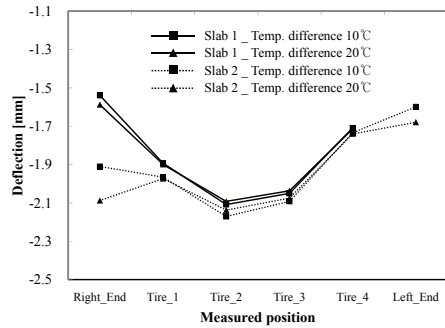
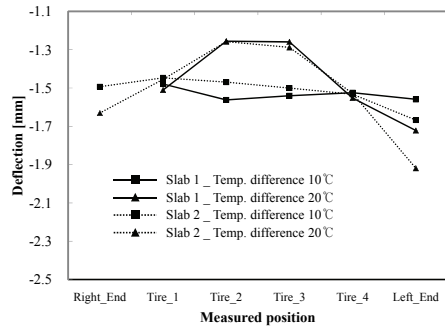


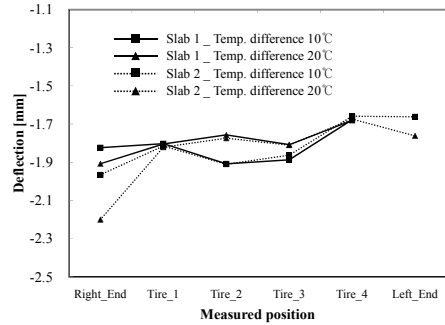
Fig. 9 Measurement of slab displacement



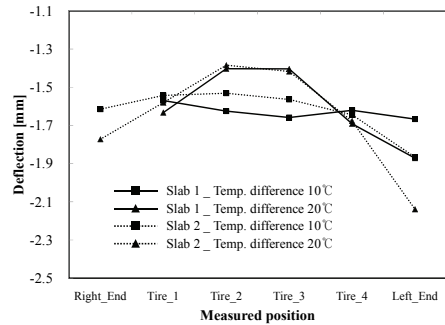
(a) roller shaft 1



(b) roller shaft 2



(c) roller shaft 3



(d) roller shaft 4

Fig.10 Slab deflections at different positions

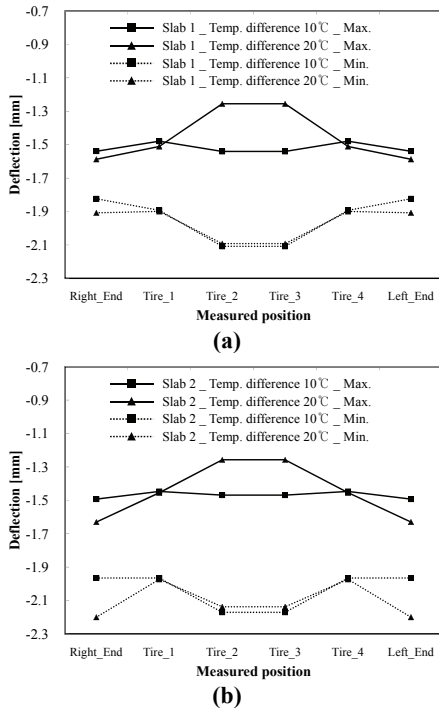


Fig.11 Deflection range at different positions of narrow(top) and wide slab(bottom)

뚜렷하게 나타난다. 또한 슬랩의 진행방향으로 볼 때 슬랩의 좌측으로 갈수록 그늘효과 및 슬랩의 폭에 의한 처짐 변위의 차이가 보이지 않는 것으

로 예측되었다.

2 번과 4 번 축 위치에서의 슬랩의 변위는 서로 비슷한 경향을 보이고 있으며, 그늘효과 즉, 상하면의 온도차가 10°C일 때는 광폭 및 협폭 슬랩 모두에서 슬랩의 변위가 거의 일정함을 볼 수 있다. 그림에서 그늘효과에 의한 온도차가 20°C일 때 광폭의 슬랩에서 양단의 변위가 크게 나타남을 알 수 있다. 3 번 롤러축 위치에서의 슬랩의 변위는 전체적으로 비교적 일정한 경향을 보이거나 1 번 타이어 바깥쪽 슬랩의 끝 단에서 광폭의 슬랩이 협폭의 슬랩보다 비교적 큰 처짐 변위를 보이고 있다.

앞서 설명한 바와 같이 슬랩의 처짐 변위는 슬랩이 균열로를 진행하면서 연속적으로 변하게 된다. 이러한 특징을 고려하여 슬랩의 각각의 위치에서의 처짐의 변화폭을 Fig. 11에 나타냈다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 그늘효과에 의한 온도차가 10°C일 때 최대 및 최소 변위 차가 비교적 크게 나타나며, 슬랩의 중앙부에서 변위폭이 더 커지는 것을 볼 수 있다. 슬랩의 중앙부에서의 최대 변위는 슬랩의 폭에 관계없이 비슷하게 예측되었다. 슬랩의 양단에서는 서로 다른 그늘효과에 의한 변위차가 크게 나타났으며 이러한 경향은 광폭 슬랩에서 더욱 뚜렷하게 나타난다. Table 2에 지금까지 설명한 슬랩의 변위를 정리하여 나타냈다.

Table 2 Summary of slab deflections

| | Slab | Slab 1 (w = 1,260 mm) | | | | | | | |
|------------|-------------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Temp. diff. | 10°C | | | | 20°C | | | |
| | Roll | R1 | R2 | R3 | R4 | R1 | R2 | R3 | R4 |
| Deflection | Right end | -1.5390 | | -1.8236 | | -1.5874 | | -1.9078 | |
| | Tire 1 | -1.8927 | -1.4790 | -1.8025 | -1.5696 | -1.8994 | -1.5105 | -1.8042 | -1.6328 |
| | Tire 2 | -2.1083 | -1.5620 | -1.9083 | -1.6252 | -2.0922 | -1.2554 | -1.7568 | -1.4032 |
| | Tire 3 | -2.0504 | -1.5404 | -1.8869 | -1.6587 | -2.0367 | -1.2592 | -1.8079 | -1.4041 |
| | Tire 4 | -1.7083 | -1.5243 | -1.6777 | -1.6208 | -1.7136 | -1.5525 | -1.6807 | -1.6916 |
| | Left end | | -1.5592 | | -1.6670 | | -1.7221 | | -1.8718 |
| | Slab | Slab 2 (w = 1,540 mm) | | | | | | | |
| | Roll | R1 | R2 | R3 | R4 | R1 | R2 | R3 | R4 |
| Deflection | Right end | -1.9098 | -1.4931 | -1.9656 | -1.6150 | -2.0876 | -1.6304 | -2.2001 | -1.7725 |
| | Tire 1 | -1.9655 | -1.4469 | -1.8149 | -1.5426 | -1.9732 | -1.4546 | -1.8212 | -1.5805 |
| | Tire 2 | -2.1707 | -1.4692 | -1.9105 | -1.5312 | -2.1374 | -1.2577 | -1.7740 | -1.3844 |
| | Tire 3 | -2.0919 | -1.5001 | -1.8629 | -1.5639 | -2.0750 | -1.2878 | -1.8104 | -1.4176 |
| | Tire 4 | -1.7340 | -1.5327 | -1.6585 | -1.6445 | -1.7402 | -1.5289 | -1.6736 | -1.6775 |
| | Left end | -1.5986 | -1.6677 | -1.6623 | -1.8662 | -1.6793 | -1.9191 | -1.7621 | -2.1393 |

5. 결 론

본 논문에서는 균열로에서 그늘효과에 의한 슬랩의 변형을 상용해석프로그램을 이용하여 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 슬랩의 길이 방향으로의 처짐 변위는 폭 방향에 비해 무시할 정도로 미미하게 예측되었다.

(2) 그늘효과에 의해 슬랩의 중앙부가 타이어와 떨어짐으로써 집중하중을 받게 되며, 따라서 소성 변형에 의한 타이어흔적이 발생할 가능성이 있는 것으로 예측되었다.

(3) 그늘효과에 의한 슬랩의 상하 변위는 슬랩의 중앙부에서 현저하게 큰 것으로 나타났으며, 전반적으로 협폭보다 광폭의 슬랩이 그리고 그늘 효과가 클수록 더 큰 변위차를 보인다.

(4) 슬랩이 모든 타이어와 밀착되지 않은 상태에서 일부 타이어의 접촉압력이 높아짐으로써 scale pickup 현상이 심해지고, 이로 인해서 타이어 흔적이 발생할 가능성이 있다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업임 (No.2010-0022439).

참 고 문 헌

[1] J. H. Jang, D. E. Lee, M. Y. Kim, H. G. Kim, 2010, Investigation of the slab heating characteristics in a reheating furnace with the formation and growth of scale on the slab surface, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 4326~4332.

[2] S. H. Han, D. J. Chang, C. Y. Kim, 2010, A numerical analysis of slab heating characteristics in a walking beam type reheating furnace, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 3855~3861.

[3] A. Freitas, F. D. Steffen, N. Tajuddin, D. Wyler, 2009, Upper limits on the Peccei-Quinn scale and on the reheating temperature in axino dark matter scenarios, *Phy. Letters B*, Vol. 679, pp. 270~277.

[4] S. J. Zhao, Q. F. Wang, T. Pan, C. Y. Zhang, H. Su, C. F. Yang, Z. S. Yan, Y. Q. Zhang, 2007, Fundamental Evaluations on Microstructure and

Mechanical Properties of on-Line Normalizing Processed V-N Microalloyed N80 Class Oil Casings, *J. Iron and Steel Res.*, Vol. 14, pp. 227~233.

[5] S. H. Han, S. W. Baek, M. Y. Kim, 2009, Transient radiative heating characteristics of slabs in a walking beam type reheating furnace, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 1005~1011.

[6] M. Y. Kim, 2007, A heat transfer model for the analysis of transient heating of the slab in a direct-fired walking beam type reheating furnace, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 3740~3748.

[7] M. Chmielowski, E. Specht, 2006, Modelling of the heat transfer of transport rollers in kilns, *Appl. Ther. Eng.*, Vol. 26, pp.736~744.

[8] R. L. Fournier, D. A. Horne, F. G. Rinker, K. Jackson, 1990, Analysis and testing of the metal parts furnace for the demilitarization of chemical warfare munitions, *J. Hazardous Mater.*, Vol. 23, pp. 1~20.

[9] H. J. Karimi, M. H. Saidi, 2010, Heat transfer and energy analysis of a pusher type reheating furnace using oxygen enhanced air for combustion, *J. Iron Steel Res.*, Vol. 17, pp. 12~17.

[10] A. Jaklic, F. Vode, T. Kolenko, 2007, Online simulation model of the slab-reheating process in a pusher-type furnace, *Appl. Ther. Eng.*, Vol. 27, pp. 1105~1114.

[11] V. I. Rospasienko, 1964, Reconstruction of the roller hearth continuous furnace of the 2800 mill, *Kommunarskii Metallurgical Plant Translated from Metallurg*, No. 2, pp. 26~28.

[12] G. Facco, 1994, Rolls for high temperature roller hearth furnaces, *U. S. Patent 5,362,230*.

[13] G. Facco, 1994, Roll system for roller hearth furnaces for thin slabs, *U. S. Patent 5,374,186*.

[14] J. H. Jang, D. E. Lee, C. M. Kim, M. Y. Kim, 2008, Prediction of furnace heat transfer and its influence on the steel slab heating and skid mark formation in a reheating furnace, *J. Iron and Steel Inst. Jpn.*, Vol. 48, No. 10, pp. 1325~1330.

[15] C. T. Hsieh, M. J. Huang, S. T. Lee, C. H. Wang, 2010, A numerical study of skid marks on the slabs in a walking beam type slab reheating furnace, *Numer. Heat Transfer, Part A*, Vol. 57, pp. 1~17.

[16] M. Cui, H. G. Chen, Y. Chen, B. Wu, 2008, Study on Emissivities and Absorptivities of Gas in Reheating Furnace, J. Northeastern Univ., Vol. 29, No. 1, p. 97.

[17] J. Chen, B. Young, B. Uy, 2006, Behavior of high strength structural steel at elevated temperatures, J. Struct. Eng., pp. 1948~1954.

[18] ANSYS, INC., 2010, ANSYS workbench 12.1™ user manual, ANSYS, INC.