

SmartCrown Roll Profile 형상에 따른 Work Roll과 Back-up Roll 접촉경계면의 응력해석

송승호[#] · 김상록¹ · 김기원¹

Stress Analysis at the Contact Boundary between the Work Roll and the Back-up Roll for a SmartCrown Roll Profile Shape

S. H. Song, S. R. Kim, K. W. Kim

(Received January 5, 2015 / Revised January 13, 2015 / Accepted February 4, 2015)

Abstract

SmartCrown is a system to control the plate crown by shifting the sine-shaped work rolls in the axial direction. The control range of the plate crown depends on a depth of sine-shaped roll profile because the roll radius varies continuously along the axial direction. When the roll profile is changed to improve the control range, the contact stress between the work roll and the back-up roll also changes. In the current study, the contact stress for various profiles and rolling conditions were analyzed using the finite element method and compared with results from Hertzian contact theory. A submodel method is used to increase the accuracy of the finite element analysis. The analysis results showed that the maximum increase in the contact stress was only 53MPa, so it is anticipated that no back-up roll spalling will occur.

Key Words : Work Roll Shifting(WRS), SmartCrown, Hertzian Contact Stress, Finite Element Method, Submodel Analysis

1. 서 론

SmartCrown은 열간 및 냉간 압연에서 판의 Crown과 평탄도 제어를 위하여 VAI사에서 개발된 압연 설비이다. Sine-curve 형태로 연속된 Work roll을 축방향으로 이동시켜 판의 Crown을 제어하는 방식으로, 기존의 Work roll bender 방식보다 Crown 제어범위가 더 크므로 Crown 및 평탄도 제어에 유리하다[1].

SmartCrown profile 형상에 따라 판의 Crown 제어 범위도 변하므로 Roll profile 형상 최적화가 후판 압연 Mill에서는 매우 중요함을 알 수 있다. 하지만, 판의 Crown 제어범위를 증가시키기 위하여 Profile 높이를 증가시키면 Work roll과 Back-up roll간의 간섭에 의한 접촉응력이 커질 수 있으며, Roll의 축방향

으로 작용하는 Axial force도 증가 할 수 있다. 특히, 접촉응력이 증가하게 되면 반복하중에 의해 Back-up roll에 피로 Crack 발생이 가속화되며, 이 피로 Crack이 성장하여 Roll 표면부가 전체적으로 박리되는 Spalling 현상이 발생 할 수 있다[2].

본 연구에서는 SmartCrown profile 형상과 압연 조건에 따른 Work roll과 Back-up roll간의 접촉응력 변화를 분석해 보았다. 먼저 유한요소법을 통해 접촉응력을 해석해 보았으며, 이를 Hertz 접촉 이론 결과와 비교해 보았다.

2. SmartCrown의 소개

2.1 SmartCrown의 기본 개념

1. 동국제강 중앙기술연구소

Corresponding Author : Dongkuk Steel R&D Center, E-mail: seungho.song@dongkuk.com

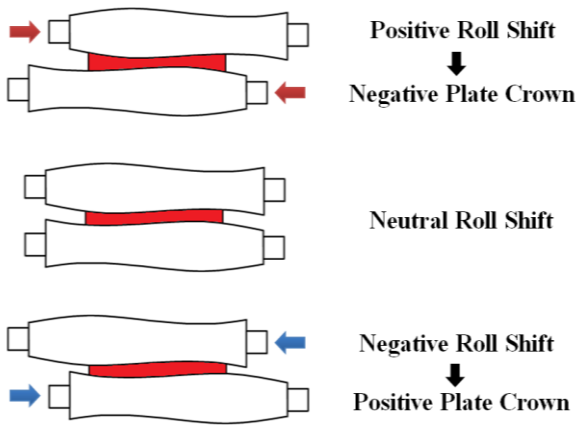


Fig. 1 Plate crown control through axial shifting of upper and lower work roll

SmartCrown은 Fig. 1과 같이, Sine-curve 형상으로 가공된 상부와 하부 Work roll을 서로 반대 방향으로 이동시켜 판의 Crown을 제어하는 방식이다. 즉, SmartCrown profile 형상과 Work roll shifting량에 따라 Crown량이 결정된다. 판의 Crown은 판의 중심부와 가장자리부에서의 상부와 하부 Work roll gap의 차이로 계산되며, (+)방향으로 Roll을 Shifting하면 판의 crown은 작아지고 (-)방향으로 Shifting하면 판의 crown은 커진다.

SmartCrown work roll은 식(1), Back-up roll은 식(2)와 같이 표현된다[3].

$$R_w(x) = R_0 + A \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \varphi \cdot (x+c)}{L}\right) + B \cdot (x+c) \quad (1)$$

$$R_b(x) = R_0 - A \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \varphi \cdot (x-c)}{L}\right) + B \cdot (x-c) \quad (2)$$

여기서 R_0 는 Roll의 반지름, L 은 Roll의 축방향 길이를 의미하며, A, B, c, φ 는 각 수식의 계수이다.

2.2 SmartCrown profile 형상 변화

동국제강의 경우, Siemens-VAI사에서 최초 제안한 SmartCrown profile을 자체적으로 수정 후 최적화하여 판의 Crown과 평탄도를 개선하였다[4]. 수정 전과 후의 SmartCrown profile 형상은 Fig. 2와 같다. Barrel 폭 $\pm 1000\text{mm}$ 지점 근처에 위치하는 두 변곡점 사이의 거리는 좁아지고 그 높이는 낮아졌다. Profile 전체 높이는 0.53mm 증가하였다.

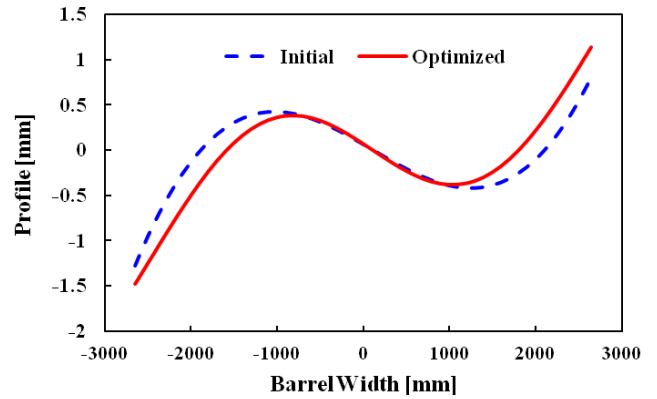


Fig. 2 Initial and optimized SmartCrown profile

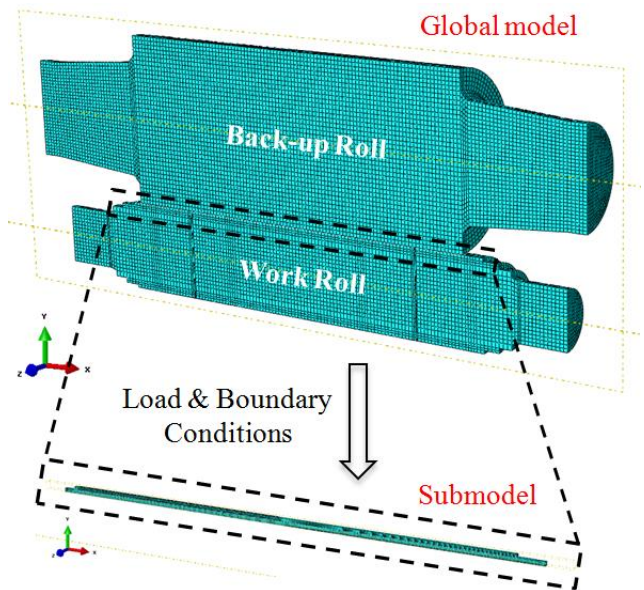


Fig. 3 Global and submodel for FE analysis

3. 접촉응력의 유한요소해석

3.1 Global and Submodel

접촉응력의 유한요소해석은 Fig. 3 과 같이, Global model 을 1 차로 탄성해석 한 후 접촉이 발생하는 영역 부근을 Submodel 로 분할하여 2 차 탄성해석을 하는 방식으로 수행하였다[5]. 해석에 사용된 프로그램은 ABAQUS v6.12 이며, 3 차원 8 절점 저감적분 (C3D8R) 요소를 적용하였다[6].

Global model 의 경우 해석의 대칭성을 고려하여 상부 Back-up roll 과 Work roll 을 1/2 만 Modeling 한 후 대칭 조건을 부여하였다. Submodel 의 해석 시에는 Global model 해석으로부터 도출된 하중 및 변위 조건을 Submodel 로 분할된 면에 부여를 하였다.

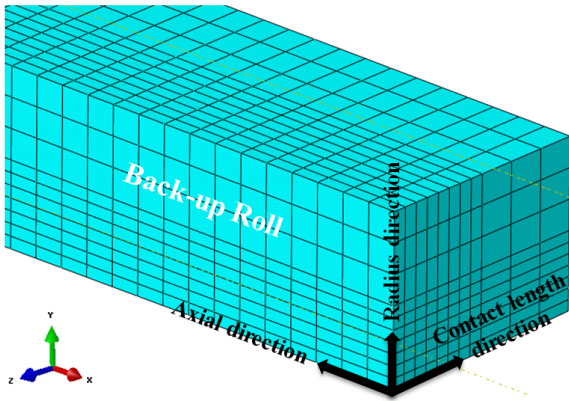


Fig. 4 Mesh size control of the Submodel: Back-up roll

3.2 Submodel의 Mesh size control

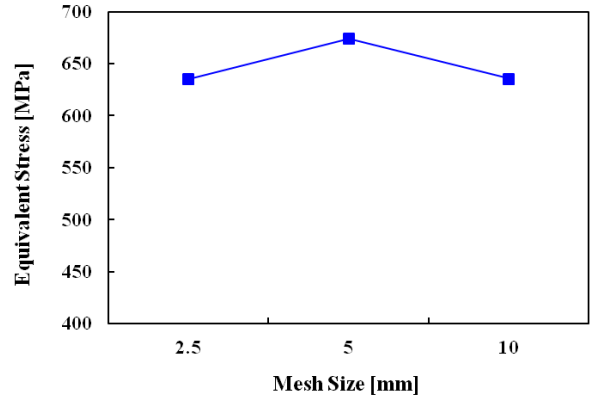
접촉응력 해석결과의 정확도를 높이기 위하여 Fig. 4와 같이 Roll의 축, 원주, 접촉길이 방향의 Mesh 크기를 각각 감소시키면서 해석을 반복하는 과정을 통하여 최적의 Mesh 크기를 결정하였다.

Fig. 5는 각 방향의 Mesh 크기에 따른 등가응력의 변화를 나타낸다. 축 방향의 경우, Mesh 크기에 따른 경향성이 없음을 알 수 있다. 원주 방향의 경우, Mesh 크기가 작아질수록 Stress가 커지는 경향을 보이지만 그 정도는 크지 않다. 접촉길이 방향의 경우, Mesh 크기가 작아질수록 Stress가 감소하며 3.8mm 이하에서는 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 최종적으로 결정된 Mesh 크기는 축, 원주, 접촉길이 방향으로 각각 5.0mm, 2.0mm, 2.4mm이다.

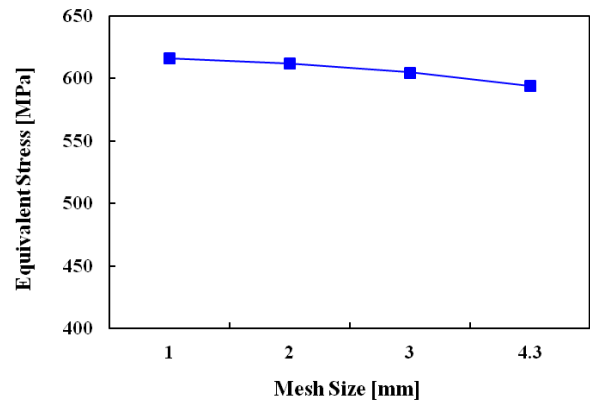
3.3 접촉응력의 유한요소해석 조건

해석에 적용된 Back-up roll 과 Work roll 의 물성치는 Table 1 과 같다. Back-up roll 은 단조공정을 통해, Work roll 은 원심주조 공정을 통해 각각 제작된다. Work roll 내층부(Core)는 Ductile cast iron 이며, 외층부(Shell)는 내마모 특성을 향상시키기 위하여 Ni-grain 으로 이루어져 있어 내층부(Core)와 외층부의 물성치가 서로 다르다[7]. Back-up roll 과 Work roll 간 마찰계수는 0.17 을 적용하였다.

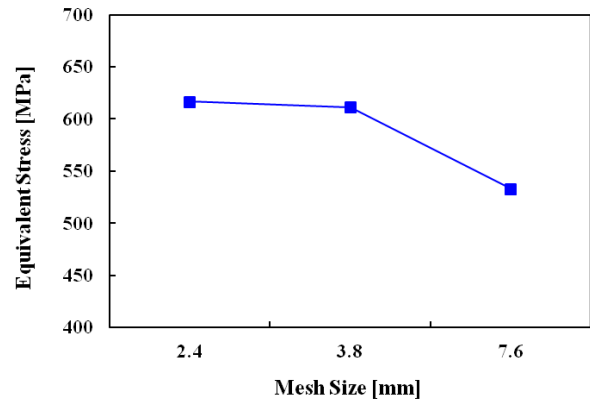
해석을 위한 압연조건은 Table 2와 같다. 판의 폭은 2000, 3400, 4800mm로 설정하였고, Specific force는 12, 18KN/mm으로, Bending force는 모두 3500KN으로 설정하였다. Shifting position은 일반적으로 판의 폭이 좁고 Rolling force가 큰 경우에는 (+)값, 폭이 넓고 Rolling force가 작은 경우에는 (-)값이 적용되므로 판의 폭과 Specific force 조건에 따라 결정하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Change of the equivalent stress by the size of mesh: (a) axial direction (b) radial direction (c) contact length direction

Table 1 Mechanical properties of Back-up and work roll

Item	Young's Modulus	Poisson's Ratio
Back-up Roll	206 GPa	0.30
Work Roll	Core	165 GPa
	Shell	175 GPa

Table 2 Rolling conditions for FE analyses

Width	Specific Force	Shifting Position	Bending Force
2000 mm	12 KN/mm	+75 mm	3500 KN
	18 KN/mm	+150 mm	
3400 mm	12 KN/mm	-25 mm	
	18 KN/mm	+50 mm	
4800 mm	12 KN/mm	-150 mm	
	18 KN/mm	-75 mm	

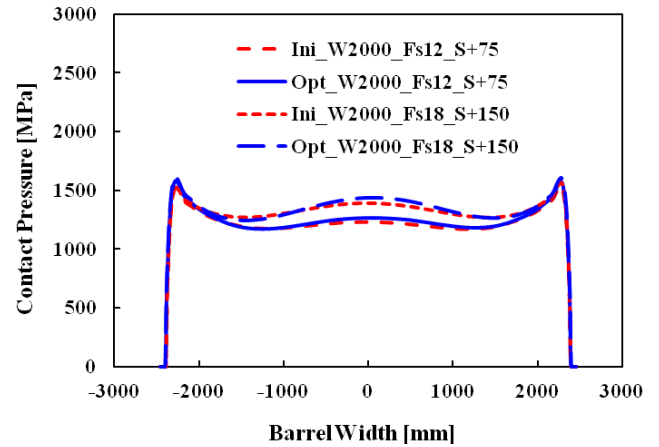
4. 접촉응력 결과 분석

4.1 유한요소해석 결과

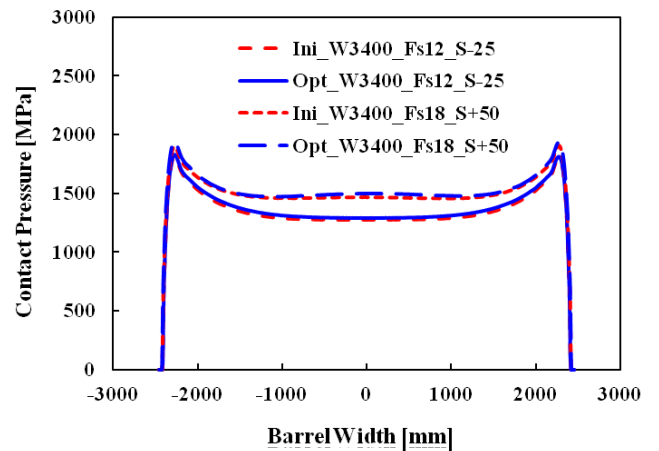
SmartCrown profile 변경 전과 후의 접촉응력을 유한요소해석으로 계산한 결과는 Fig. 6 과 같다. Specific force 가 증가하면 Roll 중심부의 접촉응력이 증가하며, 최대 접촉응력은 Back-up roll 의 Chamfer 가 시작되는 $\pm 2278\text{mm}$ 지점에서 발생함을 알 수 있다. 또한 판의 폭이 증가함에 따라 최대 접촉응력도 같이 증가함을 알 수 있다.

압연조건에 따른 폭 방향 접촉응력의 형상을 분석한 결과, 폭 2000mm 인 경우는 Roll 중심부(0mm)의 접촉응력이 $1/4(\pm 1300\text{mm})$ 지점보다 더 큰 형태를 나타냈다. 이는 판의 폭이 좁아서 Rolling force 가 Roll 중심부에 집중되며, (+)방향 Shifting 시에는 Fig. 7(a)와 같이 Roll 중심부에서 Back-up roll 과 Work roll 사이의 간섭이 발생하기 때문이다. 폭 4800mm 의 경우는 Roll 중심부에서 접촉응력이 최소이며 가장자리로 갈수록 접촉응력이 증가한다. 이는 판이 폭이 넓기 때문에 Rolling force 가 전체적으로 분산되며, (-)방향 Shifting 시에는 Fig. 7(b)와 같이 Roll 가장자리 부에서 Back-up roll 과 Work roll 사이의 간섭이 발생하기 때문이다. 결론적으로, 폭 방향 접촉응력의 형상은 판의 폭, Specific force, Work roll shifting 량에 따라 달라짐을 알 수 있다.

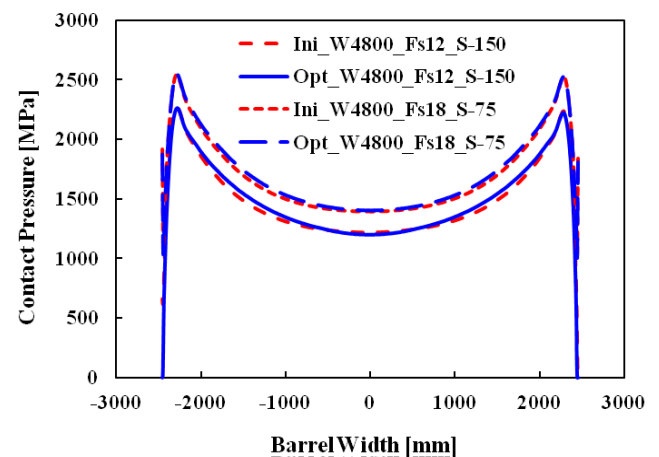
SmartCrown profile 형상 변화에 따른 최대 접촉응력의 변화를 분석한 결과, 폭 2000mm, Specific force 18KN/mm 조건에서 접촉응력이 가장 크게 증가하였으며 그 값은 53MPa이었다. 다른 조건들에서는 Profile 형상 변화에 따른 접촉응력의 증가가 53MPa 이내로 큰 차이가 없었다. 따라서 SmartCrown profile 변화에 따른 접촉응력의 증가로 인한 Back-up roll spalling 발생 가능성은 낮다고 예측된다.



(a)

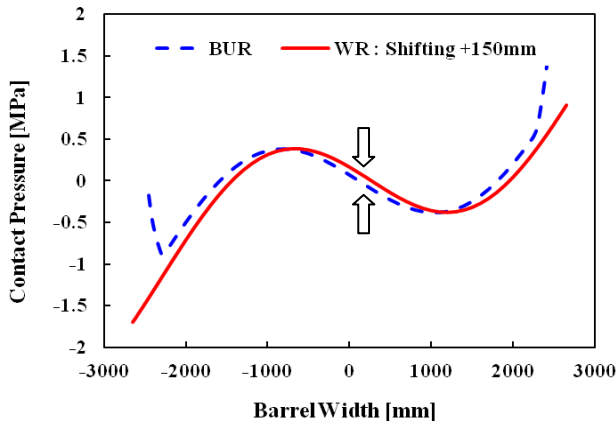


(b)

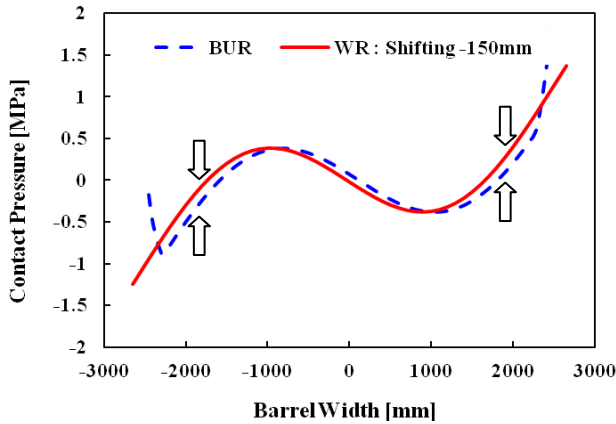


(c)

Fig. 6 Contact pressure by plate width, specific force and shifting position: (a) plate width 2000mm (b) plate width 3400mm (c) plate width 4800mm



(a)



(b)

Fig. 7 Roll gap between the back-up roll and the work roll by shifting position: (a) shifting +150mm (b) shifting -150mm

4.2 Hertz 접촉 이론 결과

탄성접촉을 하는 평행한 두 실린더 사이의 최대 접촉응력은 식(3)~(6)과 같이 계산된다[8].

$$p_0 = \frac{2P}{\pi a} = \left(\frac{PE^*}{\pi R} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$E^* = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (4)$$

$$R = (1/R_1 + 1/R_2)^{-1} \quad (5)$$

$$a = \left(\frac{4PR}{\pi E^*} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Table 3 Comparison of the contact stress results by FEA and Hertz theory

Width	Specific Force	Hertz [MPa]	FEA [MPa]
2000 mm	12 KN/mm	1157	1269 (+9.7%)
	18 KN/mm	1362	1442 (+5.9%)
3400 mm	12 KN/mm	1157	1290 (+11.5%)
	18 KN/mm	1362	1501 (+10.2%)
4800 mm	12 KN/mm	1157	1200 (+3.7%)
	18 KN/mm	1362	1402 (+2.9%)

여기서, p_0 는 최대 접촉응력, P 는 Specific force, a 는 접촉길이, R 은 실린더의 반지름, E 는 탄성계수, ν 는 포아송비를 각각 의미한다.

각각의 압연조건 별로 Hertz 접촉 이론으로 계산한 결과와 변경된 Roll profile이 적용된 유한요소해석에 의한 결과를 비교해 보았다. 참고로 유한요소해석의 접촉응력은 Roll 중심부의 값이다. 분석 결과, Table 3과 같이 유한요소해석 결과가 Hertz 접촉 이론식의 결과에 비해 2.9% ~ 11.5% 더 크게 나타났다. 그 원인으로는 유한요소해석의 경우에는 Smart Crown roll의 Shifting 시에 발생하는 Back-up roll과 Work roll간의 간섭 때문에 접촉응력이 증가하는 현상이 발생하였다. 하지만, Hertz 접촉 이론에서는 유한요소해석과는 달리 이 간섭 현상이 고려되지 않았기 때문에 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 통해 SmartCrown profile 형상과 압연 조건에 따른 Work roll과 Back-up roll간의 접촉응력 변화를 분석해보았다. 또한, 유한요소해석 결과와 Hertz 접촉 이론 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 유한요소해석에는 전체 Model을 1차로 해석한 후 관심 영역만 분할해 2차로 해석하는 Submodel analysis 방식을 적용하여 접촉응력 해석 결과의 정확도를 증가시켰다.

(2) Roll 중심부의 접촉응력은 Specific force가 증가함에 따라서 증가하였으며, 폭 방향 최대 접촉응력은 Back-up roll chamfer가 시작되는 지점에서 발생하였다. 또한, 최대 접촉응력은 판의 폭이 증가함에

따라 같이 증가하였다.

(3) 폭 방향 접촉응력의 형상을 분석한 결과, 폭 2000mm이며 (+)Shifting의 경우 Roll 중심부의 접촉응력이 1/4 지점보다 더 컸다. 폭 4800mm이며 (-)Shifting의 경우는 Roll 중심부 보다 가장자리로 갈수록 접촉응력이 증가하였다. 이는 판의 폭에 따른 Rolling force의 분포와 Work roll shifting에 의한 Roll 간 간섭현상 때문에 접촉응력의 분포가 달라지기 때문이다.

(4) SmartCrown profile 변경 전과 후의 접촉응력을 비교한 결과, 접촉응력 증가량이 가장 큰 조건은 폭 2000mm, Specific force 18 KN/mm이었으며 그 증가량은 53MPa이었다. 따라서, 접촉응력의 증가로 인한 Back-up roll spalling 발생 가능성은 낮다고 예측된다.

(5) 유한요소해석과 Hertz 접촉 이론의 접촉응력 결과를 비교한 결과, 유한요소해석의 값이 2.9%~11.5% 정도 더 크게 나타났다. 이는 Hertz 접촉 이론에서는 SmartCrown roll의 Shifting 시에 발생하는 Back-up roll과 Work roll간의 간섭현상이 고려되지 않았기 때문으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] V. B. Ginzburg, 1993, High-quality Steel Rolling: Theory and Practice, Marcel Dekker, New York, pp. 591~674.
- [2] A. Sonoda, S. Hamada, H. Noguchi, 2009, Analysis of Small Spalling Mechanism on Hot Rolling Mill Roll Surface, Memoirs of the Faculty of Eng., Kyushu University, Vol. 69, No. 1, pp. 1~14.
- [3] A. Seilinger, A. Mayrhofer, A. Kainz, 2002, Smart Crown - A New System for Improved Profile and Flatness Control in Rolling Mills, Iron Steel Rev. Int., October, p. 84.
- [4] S. H. Song, Y. D. Kwon, S. R. Kim, 2013, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Autumn Conf.(editor: S. H. Kang), Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 117~180.
- [5] S. R. Kim, S. H. Song, Y. D. Kwon, 2013, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Autumn Conf.(editor: S. H. Kang), Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 185~188.
- [6] ABAQUS Version 6.12, User's Manual, Dassault Systèmes, 2012, Providence RI.
- [7] J. H. Ryu, H. B. Ryu, 2003, Effect of Thermal Fatigue Property of Hot Strip Mill Work Roll Materials on the Rolled-in Defects in the Ultra-low Carbon Steel Strips, ISIJ Int., Vol. 43, pp. 1036~1039.
- [8] K. L. Johnson, 1985, Contact Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 99 ~104.
- [1] V. B. Ginzburg, 1993, High-quality Steel Rolling: