

## 열간 조압연 공정에서 슬래브 측면부의 소성변형거동 예측

정재환<sup>1</sup> · 이경훈<sup>2</sup> · 이선봉<sup>3</sup> · 이인규<sup>4</sup> · 이상호<sup>5</sup> · 김형진<sup>5</sup> · 이계영<sup>5</sup> · 김병민<sup>#</sup>

### Prediction of Plastic Deformation Behavior of the Side Surface of Slab during Hot Rough Rolling

J. H. Jeong, K. H. Lee, S. B. Lee, I. K. Lee, S. H. Lee, H. J. Kim, K. Y. Lee, B. M. Kim

(Received April 10, 2014 / Revised July 2, 2014 / Accepted July 23, 2014)

#### Abstract

The aim of the current study was to predict the plastic deformation behavior of a heated slab during hot rough rolling. FE-simulations were performed to investigate the metal flow and to locate the position of surface material from the slab through the rough rolling and onto the strip, using a material point tracking technique. In addition, experimental hot rolling trials were conducted where artificial defects were impressed onto a heated slab in order to validate the FE-simulation results. The simulated results show the same tendency of deformation behavior as the experimental measurements. The movement of slab defects from the side surface towards the strip center is directly linked to the extent of lateral spread during the rolling.

**Key Words** : Sizing Pressing, Hot Rough Rolling, Automotive Steel Sheet, Plastic Deformation, Material Tracking

## 1. 서 론

열간 조압연 공정(Rough rolling process)은 사상압연에서 압연이 용이하도록 슬래브의 두께를 감소시키고 원하는 폭으로 제어하는 공정이다. Fig. 1에 나타낸 것처럼 열간 조압연 공정은 사이징 프레스(sizing press)와 엣지 롤(edge roll)에 의한 수직 압연과 작업 롤(work roll)에 의한 수평압연으로 구성된다. 열간 압연공정 중 발생하는 결함은 슬래브 측면부의 국부적인 소성변형과 온도강화에 의해 발생된다[1~5]. 또한 초기 슬래브에 존재하는 기공, 개재물, 산화물과 같은 결함은 압연공정을 거치면서 새로운 형태의 결함(stringer, lamination, crack)으로 진전되기도 한다.

위 결함들의 발생 원인을 규명하기 위하여 선행 연구들이 수행되었다. Záhumenský와 Merwin은 열간 및 냉간 압연에서 인공 결함의 이동 및 원인을 예측하기 위해 초기 슬래브에 인공결함(casting powder, porosity)을 삽입하여 압연 실험을 수행하였다. 열간 압연 공정 후 관찰되는 결함의 수와 면적은 각각 초기 결함의 깊이 및 부피에 비례하여 나타나며, 압연 방향으로 연신된 선형 결함(silver type)이 존재한다[6]. Moir와 Preston은 초기 주조된 슬래브가 코팅 스트립까지 성형되는 동안 표면 결함의 발달과 거동을 2D 유한요소 모델을 이용해 관찰하였다. GA 강판의 열간 압연공정 시, 슬래브 내부에 존재하는 아르곤 가스 및 내부 산화물이 압연 공정 중 슬래브 표면으로 이동되어 결함으로 진전될 수 있다[7].

1. 부산대학교 대학원 정밀가공시스템전공  
2. PNU-IFAM 국제공동연구소  
3. 계명대학교 기계자동차공학부  
4. 한국생산 기술연구원 극한제조기술 연구실용화그룹  
5. 현대제철 기술연구소 열연기술개발팀  
# Corresponding Author: School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l University, E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

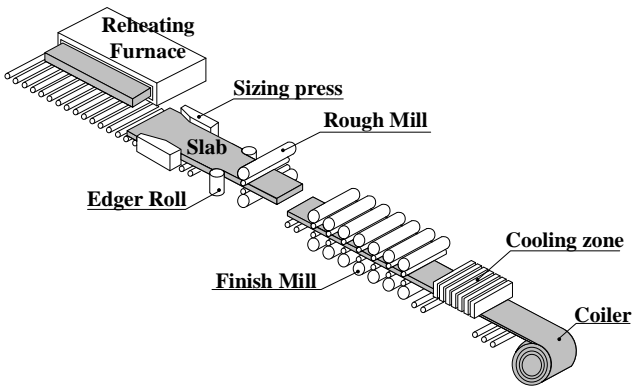


Fig. 1 Schematic diagram of hot rolling process

이 외에도 각 공정변수들이 슬래브 변형 거동에 미치는 영향을 유한요소해석적 접근을 통해 조사하거나[8, 9], 슬래브 표면 또는 내부에 이중 금속 재료를 삽입한 후 압연하는 실험적 방법에 의해 선행 연구들이 수행되었다[10~12].

하지만 기존 연구들은 엷저 롤을 무시한 열간 조압연 실험 및 유한요소해석, 계산시간을 감소시키기 위한 해석 알고리즘 개발 및 2D 유한요소 모델 제안 등의 단점이 있기 때문에 실제 공정에 적용하여 슬래브의 변형거동을 예측하는데 제한적이다.

본 연구에서는 재료위치추적(material tracking) 기법을 적용한 3D 유한요소 모델을 이용하여, 열간 조압연 공정 시 슬래브의 측면부 변형거동을 예측하였다. 유한요소해석결과는 니켈을 삽입한 자동차 강판용 슬래브의 사이징 프레스 및 열간 조압연 실험을 통해 검증되었다.

## 2. 열간 조압연 공정의 유한요소해석

### 2.1 유한요소해석 조건

열간 압연 공정의 일반적인 제조 라인을 Fig. 1에 나타내었다. 본 연구에서는 슬래브의 측면부 소성변형 거동에 가장 큰 영향을 미치는 열간 조압연 공정에 대해 유한요소해석을 수행하였다. 사용된 자동차 외판재용 슬래브 재료(Steel A)의 고온 기계적 물성을 Fig. 2에 나타내었다. 고온 압축시험은 Gleeble 장비를 이용하여 수행되었으며, 열간 사이징 프레스와 조압연 공정 동안 슬래브의 변형률 속도 및 온도강하를 고려하여 변형률 속도 0.1, 10, 50  $s^{-1}$ 와 온도 950, 1000, 1100, 1200  $^{\circ}C$ 의 범위에서 실시하였다.

열간 조압연 공정은 사이징 프레스, 엷저 압연 및

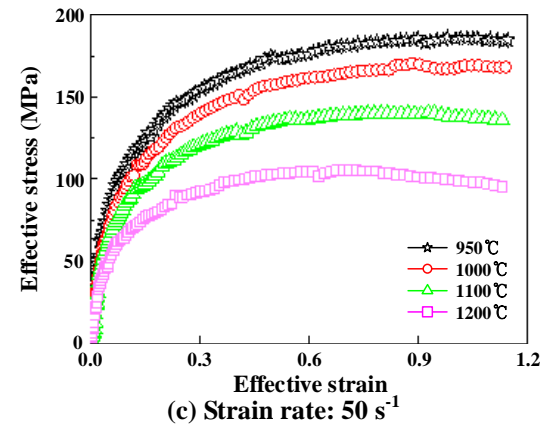
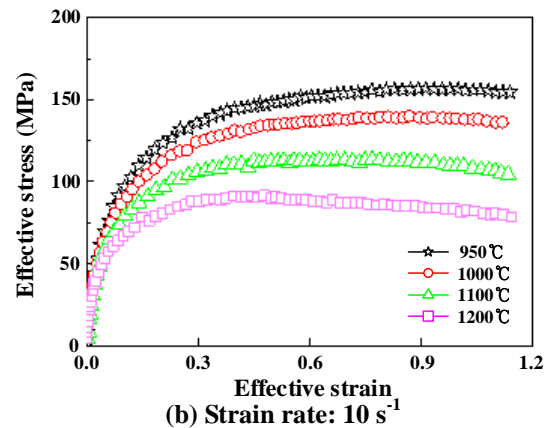
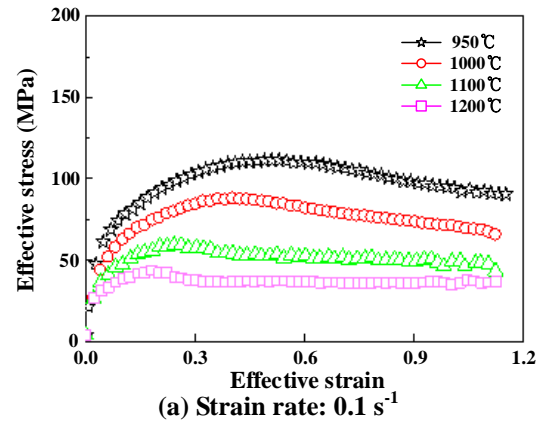


Fig. 2 Effective stress-strain curves at different temperatures and strain rates

수평 압연으로 구성되어 있다. Table 1은 열간 조압연 공정의 유한요소해석 조건을 나타내고 있다. 가열로에서 송출된 초기 슬래브의 폭과 두께는 각각 1537.46mm와 222.4mm이며, 해석에 사용된 초기온도는 압연 전 가열로에서 가열된 슬래브의 온도로써 1196 $^{\circ}C$ 로 정의되었다. 가열로에서 사이징 프레스로 이송되는 총 15초 동안, 공기와의 자연대류로 인한

**Table 1 Input parameters required for of hot rough rolling process**

Slab	Material	Steel A		
	Geometry	H222.4 × W1537.46 mm		
Anvil	Material	AISI H13		
	Anvil type	2 Step anvil		
	Anvil angle	$\theta_1=18^\circ, \theta_2=12^\circ$		
	Anvil velocity	172 mm/s		
S.P.	Width reduction	115.33 mm		
	Friction constant(m)	0.6		
	Temperature	Slab	1196°C	
		Anvil	500°C	
	Slab transfer pitch	300 mm		
	R.M.	Roll type	2 High mill	
Diameter		Work roll	1205.71 mm	
		Edger roll	1148.76 mm	
Initial temperature		500°C		
Friction factor(m)		0.6		
RPM		32~76 rpm		

**Table 2 Roll rotational speed for of hot rough process**

Num. of Pass		1	2	3	4	5	6	7
Rotational Speed(RPM)	Edge	·	·	55.62	·	57.84	·	58.14
	Rough	32	44	63	66	68	74	76

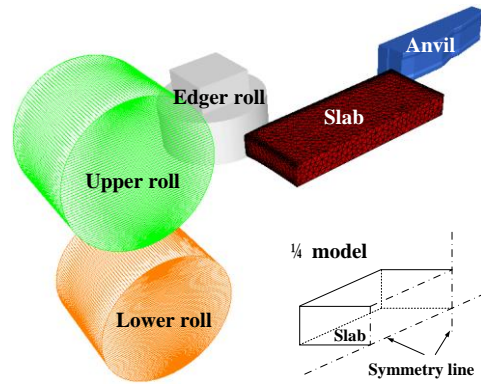
슬래브의 열손실이 발생한다.

이송된 슬래브는 2단 단차 엔빌을 이용하여 압하량 115.33mm로 사이징 프레스된다. 이 때, 엔빌의 이송 피치와 압하 속도는 각각 300mm와 172mm/s이다.

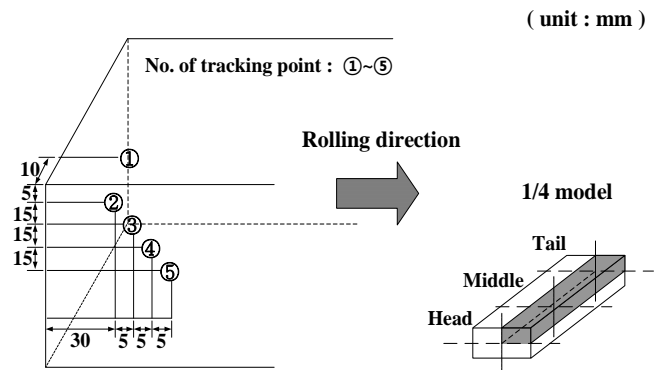
엔빌과 슬래브 사이의 마찰계수(m)는 0.6, 계면 열전달계수와 대류 열전달 계수는 압연기 제원 및 현장조건에 고려하여 각각 11.3 N/s·mm·°C, 0.02N/s·mm·°C이다.

열간 조압연 공정은 가역(Reverse) 압연이 포함된 왕복 공정으로 진행된다. 슬래브가 순방향으로 압연이 진행되는 때, 엡저 압연과 수평 압연 사이에서 스케일 제거를 위한 수냉 작업이 수행된다. 하지만 슬래브가 역방향으로 진행 시에는 수냉 작업 및 엡저 압연이 생략된 채 수평 압연만 수행된다. 각 압연 공정에서 롤의 회전속도는 Table. 2와 같이 32~76 rpm로 패스가 증가함에 따라 증가되며, 압연된 바(bar)의 총 두께 및 폭 감소량은 각각 184.79mm와 71.4 mm이다.

계산시간을 감소시키기 위해 Fig. 3과 같이 1/4 슬



**Fig. 3 3D FE-model of hot rough rolling process**



**Fig. 4 Initial coordinate of material tracked points**

래브와 엔빌, 엡저 롤 및 한 쌍의 수평 롤로 구성된 유한요소모델을 적용하였다. 성형해석에 사용된 상용 S/W는 FORGE 2011이며, 재료위치추적 기법을 적용하여 슬래브의 측면부 소성변형거동을 정량적으로 예측하였다. Fig. 4는 슬래브 길이방향 끝단부에 위치한 추적 포인트의 좌표를 나타낸다. 슬래브 상면과 측면에 각각 1개와 4개의 추적 포인트를 적용하여 각 공정 별 위치변화를 측정하였다.

**2.2 유한요소해석 결과**

Fig. 5는 초기 슬래브, 사이징 프레스 및 열간 조압연 공정 후 변형된 슬래브 단면에 대하여 추적 포인트를 나타낸 그림이다. 사이징 프레스 공정에서는 폭 압하에 의해 슬래브 단면에 도그 본(dog-bone)이 형성되었다. 초기 슬래브의 상면(top)에 위치했던 포인트 ①은 도그 본에 의해 슬래브 최대 두께부 및 모서리(edge)로 이동된 후, 수평압연에서는 다시 슬래브 중심 방향으로 이동되었다. 이는 상하 작업 롤과 슬래브 사이의 마찰력에 의해 슬래브 표면이 X축 방향으로의 변형에 제한을 받기 때문에, 슬래브

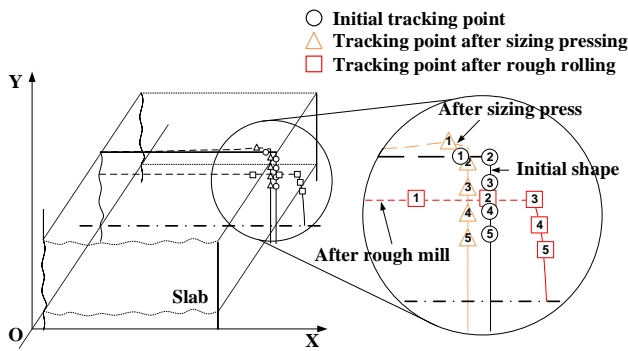


Fig. 5 Material tracked points at each stage during hot rough rolling process

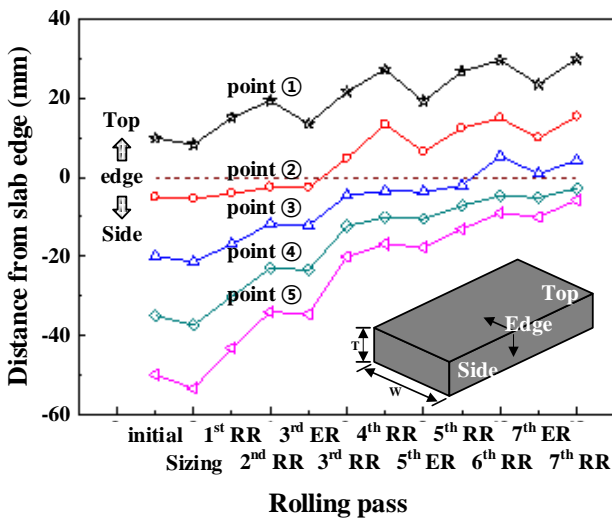


Fig. 6 Distance of material tracked points during hot rough rolling process

폭 퍼짐 발생 시 주로 두께방향 중심부의 소재들이 슬래브 측면(side)으로 이동됨을 의미한다. 초기 슬래브의 측면에 위치했던 포인트 ②와 ③은 조압연 공정 시 슬래브의 폭 퍼짐이 증가하면서 슬래브 상면으로 이동하였다. 변형 전 측면에 위치했던 포인트 중에서 상대적으로 두께 방향으로 슬래브 중심에 위치했던 포인트 ④와 ⑤는 조압연 공정이 완료된 후에도 측면부에 위치하였다. 하지만 수평 압연에 의해 슬래브 두께가 감소함에 따라 포인트 ④와 ⑤는 슬래브 측면 모서리를 향해 이동되었다.

열간 조압연 공정 중 추적 포인트의 위치 변화를 슬래브 모서리에서 표면에 위치한 각 포인트까지의 거리로써 Fig. 6에 나타내었다. 각 포인트들은 수평 압연과 수직압연에 따라 상이한 변형거동을 나타내고 있다. 작업 룰에 의한 수평압연 시, 슬래브 상면

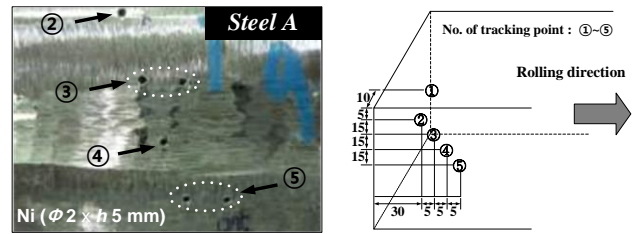
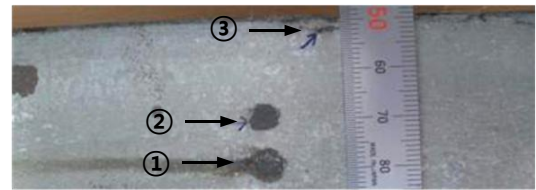
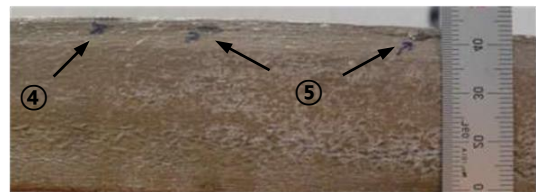


Fig. 7 Initial coordinate of artificially tracked defects in initial slab



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 8 Positions of artificial defects after hot rough rolling process

과 측면의 포인트들은 각각 슬래브 폭 방향 중심과 모서리로 이동되었다. 2단 단차 엔빌, 엷저 롤에 의한 수직압연에서 슬래브 상면의 포인트들은 모서리로 이동되었지만 측면의 포인트들은 모서리에서 두께방향 중심으로 이동되었다. 열간 조압연 공정이 완료된 후, 초기 슬래브 측면의 포인트 ②와 ③은 슬래브 상면으로 완전히 이동되었고 포인트 ④와 ⑤는 모서리에서 5mm 아래까지 이동되어 이후 사압연 공정 중에서 슬래브 상면으로 이동될 것으로 예상된다.

### 3. 열간 조압연 공정의 검증 실험

열간 조압연 공정의 유한요소해석 결과를 검증하기 위해 자동차 외판재용 소재인 Steel A에 대하여 열간 압연 실험을 실시하였다. Fig. 7과 같이 초기 슬래브에 드릴로 홀 가공하여 추적 포인트의 좌표와 동일한 위치에 니켈을 삽입하였다. 압연 실험 조건은 Table 1에 명시된 해석 조건과 동일하다.

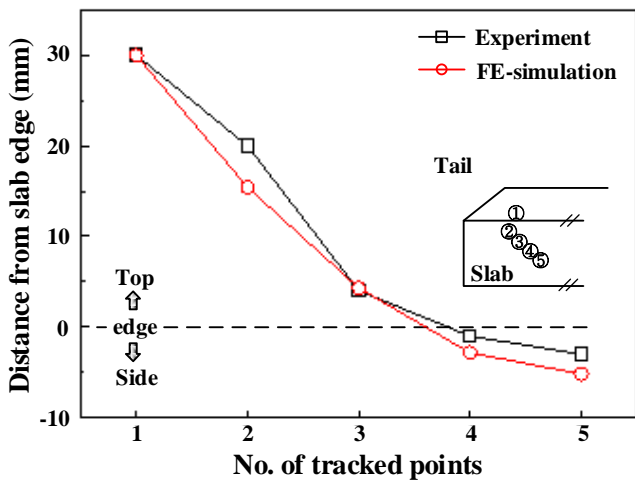


Fig. 9 Comparison between measured and simulated values of material tracked points after hot rough rolling process

Fig. 8은 초기에 삽입하였던 니켈이 검출된 바의 상면 및 측면부를 나타낸 사진이다. 슬래브 모서리에서 가까운 위치에서 검출된 포인트 ③의 경우, 초기의 인공 추적 결함들 중 하나만 측정되었다.

Fig. 9는 열간 조압연 공정의 해석 및 실험 결과를 모서리에서의 추적 포인트까지의 거리 그래프로 나타낸 것이다. Steel A의 압연 실험 결과, 실험에서 사용된 슬래브의 단면은 스카핑(scarfing) 작업에 의해 직사각형이 아니며, 이로 인해 다소의 위치 오차가 발생되었다. 포인트 ②에서 최대오차 5mm가 발생하였지만 슬래브 측면부의 변형 거동은 성형해석과 경향이 잘 일치함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 열간 조압연 공정에서 자동차 외판재용 슬래브의 측면부 변형 거동을 관찰하기 위해 재료위치추적 기법을 적용한 유한요소해석을 실시하였다. 니켈을 삽입한 슬래브의 열간 조압연 실험을 통해 해석의 신뢰성을 검증하였다. 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 사이징 프레스 및 엷저 롤에 의한 수직압연에서는 슬래브 상면 및 측면에 위치한 추적 포인트들은 각각 모서리와 측면의 두께방향 중심으로 이동되었다.

(2) 작업롤에 의한 수평압연 공정에서는 슬래브 상면 및 측면의 포인트들은 각각 슬래브 폭 방향

중심과 모서리로 이동되었다. 롤과 슬래브 사이의 마찰력에 의해 슬래브 표면의 변형이 제한적이기 때문에, 슬래브 폭 퍼짐 발생 시 내부 소재들이 슬래브 측면으로 이동되었다.

(3)  $\emptyset 2\text{mm}$ 의 니켈을 삽입한 슬래브를 사용한 열간 조압연 검증 실험 결과, 유한요소해석 결과의 경향이 잘 일치하였다. 재료위치추적 기법을 통해 열간 조압연 공정 중 슬래브 측면부 변형거동을 잘 예측할 수 있었다.

(4) 초기 슬래브 측면에 결함이 있을 경우, 열간 압연 공정이 진행됨에 따라 슬래브 모서리를 지나 폭 방향 중심으로 이동될 수 있다. 향후 열간 조압연 공정에서 수직 및 수평 압연량을 조정하여 슬래브 측면 결함의 이동을 최소화할 수 있는 연구가 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 현대제철 산학연구과제 및 PNU-IFAM 국제공동연구소의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### REFERENCES

- [1] E. Esa, S. Ulf, 2000, Transversal Cracks and their Behaviour in the Hot Rolling of Steel Slabs, J. Mater. Process. Technol. Vol. 101, No. 1~3, pp. 312~321.
- [2] H. L. Yu, X. H. Liu, C. S. Li, K. Y. 2006, Behavior of Transversal Crack on Slab Corner during V-H Rolling Process, J. Iron. Steel. Res. Int. Vol. 13, No. 6, pp. 31~37.
- [3] H. L. Yu, X. H. Liu, L. Q. Chen, C. S. Lo, Y. Zhi, X. W. Li, 2009, Influence of Edge Rolling Reduction on Plate-Edge Stress Distribution during Finish Rolling, J. Iron. Steel. Res. Int. Vol. 16, No. 1, pp. 22~26.
- [4] H. L. Yu, X. H. Liu, C. S. Li, H. F. Lan, G. D. Wang, 2009, Research on the Behavior of Transversal Crack in Slab V-H Rolling Process by FEM, J. Mater. Process. Technol. Vol. 209, No. 6, pp. 2876~2886.
- [5] Y. K. Son, S. H. Lee, J. B. Lee, S. J. Lee, B. M. Kim, 2009, Prediction of Edge-cracking Generation in Cold Rolling, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., pp. 117~120.
- [6] P. Záhumnenský, M. Merwin, 2008, Evolution of

- Artificial Defects from Slab to Rolled Products, J. Mater. Process. Technol. Vol. 196, No. 1~3, pp. 266~278.
- [7] S. Moir, J. Preston, 2002, Surface Defects-Evolution and Behaviour from Cast Slab to Coated Strip, J. Mater. Process. Technol. Vol. 125~126, pp. 720~724.
- [8] S. H. Lee, D. H. Kim, S. M. Byon, H. D. Park, B. M. Kim, 2005, Deformation Behavior of Slab by Two-Step Sizing Press in a Hot Strip Mill, Trans. Mater. Process., Vol. 14, No. 9, pp. 791~797.
- [9] M. S. Chun, J. S. Cheong, I. T. An, Y. H. Moon, 2003, Finite Element Analysis of Slab Deformation under the Width Reduction in Hot Strip Mill, Trans. Mater. Process., Vol. 12, No. 7, pp. 668~674.
- [10] E. Esa, S. Ulf, 1999, Behaviour of Longitudinal Surface Cracks in the Hot Rolling of Steel Slabs, J. Mater. Process. Technol. Vol. 94, No. 2~3, pp. 141~150.
- [11] T. Wang, H. Xiao, T. Y. Tie, X. D. Qi, 2012, Improvement of 3-D FEM Coupled Model on Strip Crown in Hot Rolling, J. Iron, Steel. Res. Int. Vol. 19, No. 3, pp. 14~19.
- [12] J. M. Kim, W. N. Choi, C. S. Park, K. W. Kim, 2013, Analysis of the Metal Flow in H-Beam Rolling using Beam Blank, Trans. Mater. Process., Vol. 22, No. 7, pp. 383~388.