

블룸을 이용한 중형 H형강 BDM 압연 공정 연구

김정민¹ · 김기원² · 김병민[#]

BDM Rolling of Middle Sized H-beams from a Bloom

J. M. Kim, K. W. Kim, B. M. Kim

(Received October 28, 2015 / Revised November 23, 2015 / Accepted November 25, 2015)

Abstract

H-beams are generally produced by hot rolling composed of a Break Down Mill (BDM) and a Finishing Mill (FM). The goal of the current study was to develop BDM rolling of H300 × 300 beams from blooms slit from slabs. In order to manufacture H300 × 300 beams, the caliber design and the pass schedule of BDM rolling were proposed for a bloom instead of a beam blank. The proposed BDM caliber design and pass schedule were tested using FE-simulation and pilot tests. For the major shape dimensions, such as flange width, web height, web thickness, as well as BDM rolling loads, a comparative analysis between the FE-simulation and the pilot rolling tests was conducted. The results of FEM analysis and pilot rolling tests showed good consistency. Moreover, BDM rolling loads were predicted to be in the range of allowable rolling loads. It was concluded that the designed BDM rolling is suitable for implementation within current manufacturing capacity.

Key Words : H-Beam, Bloom, Caliber Design, FE-simulation, BDM Rolling Process, Pilot Rolling Test

1. 서론

일반적으로 H형강 제품 생산에 사용되는 소재는 블룸(bloom), 빔 블랭크(beam blank), 슬래브(slab) 등이 있다. 블룸은 직사각형 형상으로 중, 소형 H형강 용 압연 소재로 사용하고 있으며 H형상의 빔 블랭크와 슬래브는 중, 대형 H형강에 사용하고 있다. 현재 블룸으로 H100×100~H200×200, 빔 블랭크를 이용하여 H250×250~H600×300 등 다양한 H형강을 생산하고 있다.

소재 형상에 따라 H형강 Break Down Mill(이하 BDM) 공형 형상 차이가 있다. 우선 블룸을 이용하는 H형강 BDM 공형은 직사각형 형상을 H형상으로 압연하기 위해 Fig. 1 과 같이 좌, 우 분할 공형인 센터링 공형이 사용되고 있다. 또한 빔 블랭크를 사용하

는 H형강 BDM 공형은 Fig. 2 의 B3, B4, B5 공형 형상을 사용하고 있다. 마지막으로 일본에서 대형 H형강 압연용으로 사용하고 있는 슬래브는 센터링 공형과 유사하지만 그루브가 상대적으로 작은 종형상인 Belly 공형을 사용하여 도그 본(dog bone) 형상으로 압연 한 후, 유니버설(universal) 압연을 이용하여 대형 H형강을 생산하고 있다[1, 2]. 이러한 소재 형상에 따른 H형강 압연 공정 개발 및 압연 거동 등을 포함한 선행 연구들이 수행하였다. T. Yanazawa 등은 웨브 높이가 800mm 이상이 대형 H형강을 개발하기 위해 슬래브를 이용한 압연공정을 개발하였고[1], H. Yamaguchi, K. Komori, A. A. Milenin, E. J. Kwak, J. M. Kim 등은 유한요소 해석을 이용하여 H형강 및 일반형강의 압연공정 개선, 롤 응력 계산, 원형강 및 H형강 압연 거동 등 다양한 연구를 수행하였다[2~8].

1. 부산대학교 대학원 정밀가공시스템 전공

2. 동국제강 형강생산팀

Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l university, bmkim@pusan.ac.kr

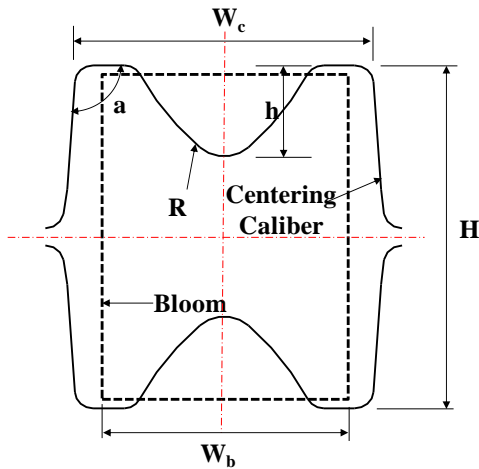


Fig. 1 The schematic diagram of centering rolling

하지만 기존 연구와 같이 유한요소해석을 이용하여 형강 압연공정 개발 또는 개선이 가능하지만 압연공정을 검증하기 위해서는 유한요소해석만으로는 한계가 있기 때문에 열간 압연 또는 압연 모사 실험이 필요하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 3차원 유한요소해석과 압연 모사 실험을 병행하여 절단 슬래브를 이용한 중형 H형강 BDM 압연공정을 개발 및 검증하였다. 즉 슬래브를 절단하여 적합한 블룸 사이즈를 확보한 후, 이를 이용하여 BDM 공형설계 및 패스 스케줄 작성을 통해 H300×300 BDM 압연공정을 도출하였다. 그리고 3차원 유한요소해석과 형강 BDM 압연 모사 실험을 수행하였고 각 패스 별 소재 주요 치수 및 압연 하중 비교를 통해 H300×300 BDM 압연공정을 검증하였다.

2. H형강 BDM 공형설계

2.1 센터링 공형설계법

소재 형상 및 H형강 사이즈에 따라 H형강 BDM 공형 형상 차이가 있다. 빔 블랭크는 소재 형상이 H형상 이기 때문에 Fig. 1 과 같은 센터링 공형이 없지만 직사각형 형상인 블룸 또는 슬래브는 센터링 공형이 필요하다. 센터링 공형은 소재를 좌, 우 균등하게 분할시키기 때문에 슬래브 및 블룸 용 BDM 공형에서는 중요하다[9].

구체적으로 설명하면 센터링 공형에 의해 소재가 좌, 우 균등하게 분할 되지 않을 경우 최종 H형강 제품의 좌, 우 플랜지 폭 치수 오차가 발생하기 때

문에 양호한 품질 확보를 위해서는 센터링 공형 설계가 상당히 중요하다. 본 연구 대상 H형강은 웨브(web) 높이와 플랜지(flange) 폭이 동일하기 때문에 웨브 높이와 플랜지 폭이 동일한 H형강 센터링 공형설계법에 대해 설명하고자 한다. Fig. 1 은 센터링 압연 모사 그림이다. Fig. 1 과 같이 센터링 압연은 소재를 좌, 우 균등하게 분할하는 압연이기 때문에 센터링 공형설계 시, 그루브 형상, 공형 폭, 공형 선단부와 외측벽을 이루는 각도 등 공형 파라미터 치수 결정이 중요하다[9]. 이 파라미터는 H형강 압연 실험과 현재 적용하고 있는 공형 형상 분석에 의해 획득한 경험식이다.

Fig 1 에서 H는 공형의 전체 높이, R 은 센터링 공형의 그루브, a는 공형선단부와 외측벽을 이루는 각도, W 는 공형폭, h 는 공형 그루브 높이. 식 (1)~(4) 는 센터링 공형설계 시 주요 파라미터 수식이다. 우선 공형 그루브 형상을 결정하는 주요 파라미터인 h 는 공형 전체 높이의 1/5 이상 1/4 이하로 한다. 그 이유는 그루브 높이를 1/4 이상으로 할 경우 압연 시 소재와 롤 간의 마찰력 증가로 인한 풀다운(pull down)이 발생하여 소재의 플랜지부 미충만이 발생할 가능성이 높다. 반대로 1/5 이하로 할 경우 차기 웨브 높이 확대 공형 압연에서 웨브 압하가 커지기 때문에 오버필링(overfilling) 및 압연부하가 증가 할 수 있으므로 적합한 그루브 높이 결정이 중요하다.

$$\frac{1}{5}H \leq h \leq \frac{1}{4}H \quad (1)$$

$$250 \leq R \leq 300 \quad (2)$$

$$W_c = W_b + \alpha \quad (3)$$

$$93^\circ \leq a \leq 95^\circ \quad (4)$$

또한 공형 그루브 형상 결정 주요 파라미터가 R 이다. R 은 그루브 높이를 고려하여 위의 식과 같이 적합한 R 을 선정한다. 공형 폭 W_c 는 소재 안정적으로 압연될 수 있도록 소재의 폭 W_b 보다 크게 한다. 소재의 균일한 좌, 우 분할 확보를 위해 소재의 외측과 공형 측벽이 접촉되어야 하므로 감면울과 두께 압하율을 고려하여 폭 퍼짐량 α 가 결정되는데, 대략 10~20mm 정도로 부여한다. 마지막으로 공형 선단부와 외측벽을 이루는 각도 a 를 선정한다. 압연 후, 소재가 안정으로 롤을 통과 하기 위해서는 반드

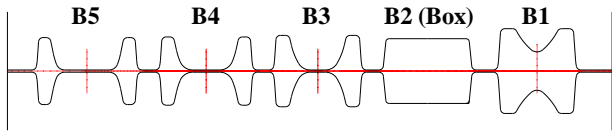


Fig. 2 The BDM caliber arrangement of H300×300

Table 1 The BDM caliber in each BDM rolling pass

Pass No	1	2	3	4	5	6
Caliber No	B1	B1	B1	B3	B3	B2
Pass No	7	8	9	10	11	-
Caliber No	B4	B2	B4	B2	B5	-

시 a 는 90° 이상이 되어야 한다. 그래서 일반적으로 수식 (4)와 같은 각도를 가진 공형을 적용하고 있다. 물론 H 형강 크기에 따라 센터링 공형설계법이 다르며 본 연구에서 제시한 센터링 공형설계법은 웨브 높이와 플랜지 폭 치수가 동일한 H 형강 공형설계법이다.

2.2 H300×300 BDM 공형

본 연구의 H 형강 대상 사이즈는 중형 사이즈인 H300×300 이다. H300×300 BDM 공형은 총 5 개로 구성되어 있다. B1 공형은 소재 분할용인 센터링 공형, B2 공형인 박스 공형은 공형 압연 시, 오버필링 제거를 위한 엇징 압연용으로 사용되며 B3, B4 공형은 BDM 리더 패스 형상을 만들기 위한 중간 공형이다. 마지막으로 B5 공형은 BDM 리더 패스 공형이다.

Fig. 2 는 절단 슬래브 용 H300×300 BDM 공형 배열도이다. H300×300 의 BDM 압연 패스 수는 총 11 패스이고 Table 1 은 H300×300 의 BDM 압연 패스 별 적용 공형을 나타낸 표이다.

3. H300×300 BDM 압연 공정 해석

3.1 블룸 및 제품 사이즈

Fig. 3은 블룸과 H300×300 제품 형상 및 치수를 보여준다. 블룸 사이즈는 300mm(W)×430mm(H)이다. 이는 두께가 300mm인 슬래브를 430mm로 절단한 것이다. H300×300 제품 사이즈는 폭, 높이가 300mm 이고 웨브 두께는 10mm이며 플랜지 두께는 15mm 이다.

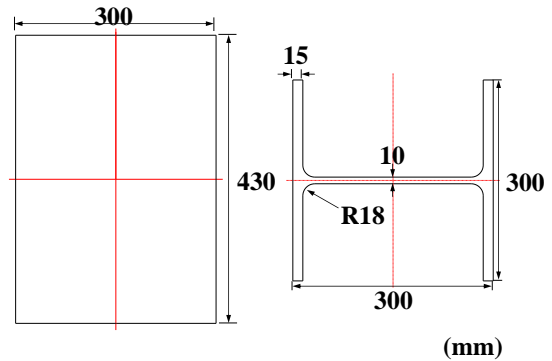


Fig. 3 The shape of the bloom and H300 × 300

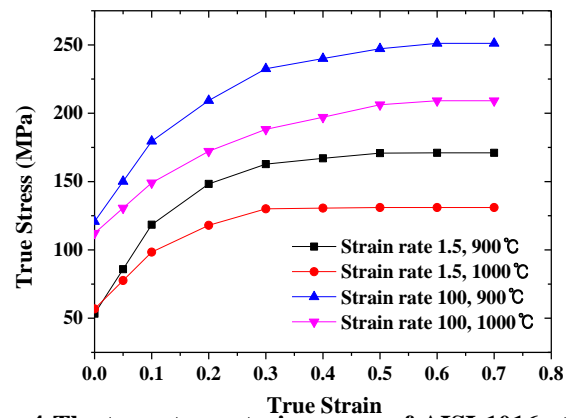


Fig. 4 The true stress-strain curves of AISI 1016 at 900 ~ 1000 °C

3.2 압연 해석 개요

본 연구에서는 DEFORM - 3D의 압연 템플릿을 이용하여 압연해석을 수행하였고 열전달 공정과 압연 공정을 연계하여 해석을 진행하였다. 열전달 공정에서 해석조건은 다음과 같다. 해석 시간은 현재 H300×300의 BDM 압연 시간을 측정하여 해석에 적용하였고 대류 열전달 계수는 0.02N/sec/mm/°C를 적용하였다[7, 8]. 소재 초기 온도는 현재 H300×300의 가열로 소재 추출온도와 동일한 1200°C를 적용하였다.

압연 해석에 적용 할 유동응력은 Fig. 4와 같이 해석 프로그램에서 보유하고 있는 AISI 1016 강재의 고온 유동응력이다.

이 유동응력을 적용한 이유는 상온 상태에서 AISI 1016 강재의 유동응력이 H형강 소재인 SS400의 유동응력과 유사하다는 것과 H형강 및 일반형강의 열간 압연 해석 결과분석을 통해 소재충만성, 압연하중 등의 결과가 실압연과 유사하다는 결과를 확인

Table 2 The specification of roll and material

Parameter	Unit	Value	
Model Ratio	-	1/6	
Material	Size	mm	71.5×50×300
	Grade	-	Pb
Roll	Size	mm	∅ 200×500
	Grade	-	SM45C

하였고[8] 이로 인해 고온에서의 유동응력이 유사할 가능성이 높다고 판단되었기 때문이다. 롤 경은 초기경을 적용하였고, 압연속도는 현 조업과 동일하게 적용하였다. H형강이 상, 하, 좌, 우 대칭이기 때문에 1/4 대칭 조건을 적용하였고 롤과 블룸 간 마찰은 일정전단마찰상수 (m) 0.7을 적용하였다[7, 8].

4. H300×300 BDM 압연 공정 모사 실험

4.1 실험 개요

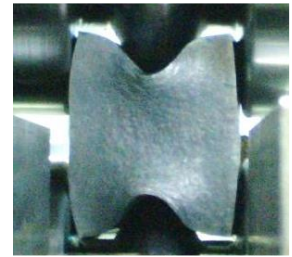
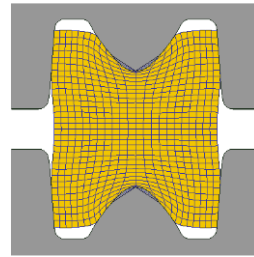
H300×300의 BDM 압연공정의 유한요소해석 결과를 검증하기 위해 형강 BDM 압연 모사 실험을 실시하였다. 형강 압연 모사 시험기는 일본 JFE Steel Kurashiki 연구소에서 보유하고 있으며 Table 2는 H형강 압연 실험을 위한 모델 비율, 롤과 소재의 강종 및 치수를 나타낸 표이다. 압연 속도는 압연 시험기의 부하를 감안하여 각 패스 별 동일하게 4 ~ 5 RPM을 적용하였다

5. 결과 분석

5.1 형상 및 하중 결과 비교

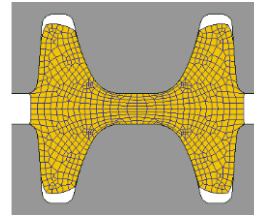
도출된 BDM 공형과 패스 스케줄을 이용하여 H300×300 BDM 압연 공정 해석 및 모사 실험을 수행하였다. Fig. 5는 3차원 유한요소해석에 의해 획득한 소재 형상이고 Fig. 6은 압연 모사 실험에 의한 소재 형상이다. 여기서 주요 치수 결과를 비교 하기 위해서 실험에 의해 획득한 형상을 6배로 확대하였다.

Fig. 6은 해석 및 실험에 의해 획득한 각 패스 별 소재 웨브 높이, 플랜지 폭, 웨브 두께를 비교한 표이다. 실선은 해석 결과이고 점선은 실험 결과이다. H는 플랜지 폭, B는 웨브 높이, Tw는 웨브 두께이다.



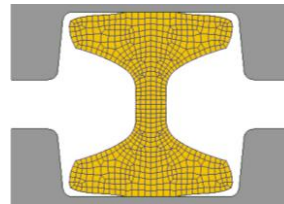
(a) FE-Simulation (1Pass)

(b) Experiment (1Pass)



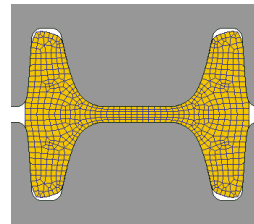
(c) FE-Simulation (3Pass)

(d) Experiment (3Pass)



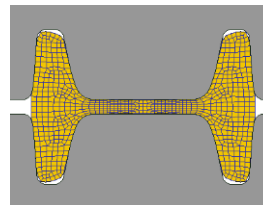
(e) FE-Simulation (8Pass)

(f) Experiment (8Pass)



(g) FE-Simulation (9Pass)

(h) Experiment (9Pass)



(i) FE-Simulation (11Pass)

(j) Experiment (11Pass)

Fig. 5 The FE-Simulation and experiment of H300 × 300 BDM rolling

H, Tw의 경우, 해석결과와 실험결과의 치수 오차가 10mm 이내로 상당히 유사하다는 것을 확인하였고 B의 치수 오차는 부분적으로 20~40mm 이지만

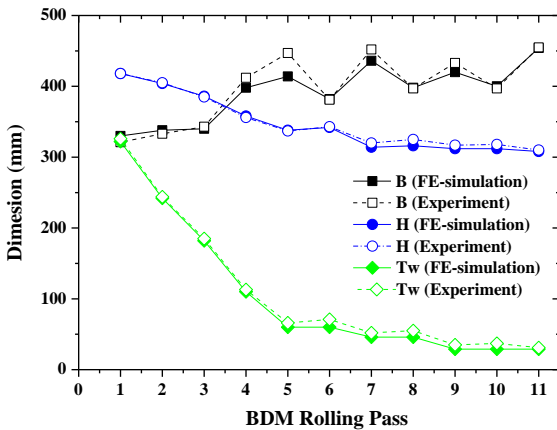


Fig. 6 The comparative result of main dimension by FE-simulation and the experiment

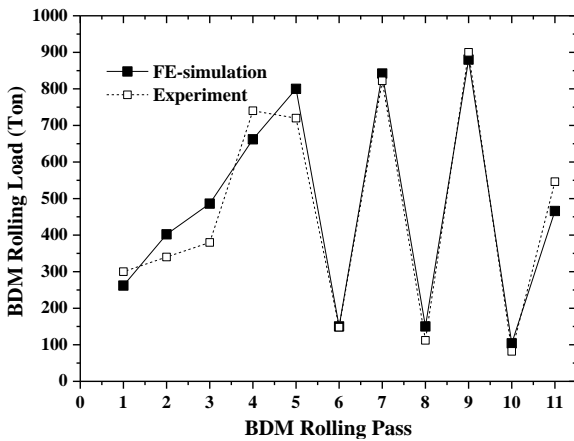


Fig. 7 The comparative result of rolling load by FE-simulation and the experiment

전반적으로 상당히 유사하다는 것을 확인하였다. 특히 5P, 7P, 9P에서 치수 오차가 크게 발생한 원인은 오버필링의 차이이다. 오버필링은 소재와 롤 간의 마찰, 소재의 변형저항 등의 압연 조건에 따라 차이가 발생할 수 있다. BDM 리더 패스인 11P에서는 해석결과와 실험결과가 상당히 일치 한다는 것을 확인하였다.

Fig. 7은 해석과 실험에 의해 획득한 압연 하중 비교 그래프이다. 압연 모사 실험은 실 모델의 1/6로 축소되었고 소재는 납을 사용하였기 때문에 해석과 실험에 의해 획득한 하중 차이는 있다. 그래서 모사 실험에서 획득한 압연 하중을 아래의 압연하중 변환식을 이용하여 실압연을 가정한 예측 하중을 계산하였고 이를 해석에서 획득한 압연 하중과 비교 분석하였다.

$$P = \frac{P_{exp.} \cdot \beta}{\{1000 \cdot (M.R)^2\}} \quad (5)$$

$P_{exp.}$: The experimental rolling load (kgf)

M. R : The model ratio

β : The weight of the material's plastic region

P : The prediction of rolling load assuming real BDM rolling

식(5)는 형강 압연 모사 실험 하중을 이용한 실 압연 하중 변환식이고 형강 압연 모사 실험에서 획득한 하중과 모델 비율을 이용한 실험식이다[9]. 압연하중 변환식에 적용되는 변수 β 는 고온 영역에서의 강제 소성역 가중치 이다. 본 연구에서는 변수 β 를 압연 패스에 따라 다르게 적용하였다.

1 ~ 3패스에서는 2.9 ~ 3.1, 4 ~ 8패스에서는 3.2 ~ 3.5, 9 ~ 11패스에서는 3.5 ~ 3.7을 적용하였다. 이는 압연 패스 수가 증가할 수록 소재 온도가 낮아지고 소재 온도가 낮을 수록 소재의 소성역이 넓어짐에 따라 가중치가 증가하게 된다. 가중치는 일반 구조용강 또는 저탄소강의 고온 영역구간 900~1200℃ 구간에서의 값이다. 부분적으로 해석과 실험에 의한 하중 오차는 발생하였으나 전체적인 경향은 상당히 일치함을 확인하였다. 또한 각 패스 별 압연하중이 BDM 압연설비 하중 1000톤 이하로 발생하였기 때문에 BDM 실압연이 가능하다고 판단된다. 유한요소해석과 압연 모사 실험을 이용하여 도출된 H300×300 BDM 공형과 패스 스케줄을 검증하였고 주요 치수 및 하중 분석을 통해 해석결과와 실험결과와의 유사성을 확인하였다.

단 미흡한 점이 있다면 BDM 압연 시 발생한 오버필링과 BDM 리더 패스의 플랜지 미충만이다. 오버필링과 미충만으로 인해 우수한 H형강 품질 확보가 어려우므로 오버필링과 BDM 리더 패스의 충만성 확보를 위한 공형 및 패스 스케줄 재 검토가 필요하다.

6. 결론

본 연구에서는 절단 슬래브를 이용한 H300×300 BDM 압연공정을 검증하기 위해 BDM 공형과 패스 스케줄을 이용하여 3차원 유한요소해석과 압연 모사 실험을 수행하였고 해석 결과와 실험 결과를 비

교 분석하였다.

형상 치수의 경우 해석과 실험 결과 간의 오차는 발생하였으나 전체적인 경향은 상당히 유사하다는 것을 확인하였다.

또한 압연하중의 경우, 해석과 실험 간의 오차는 최대 10% 이내로 비교적 양호한 유사성을 확인하였으며 각 패스 별 압연하중이 1000톤 이하로 발생하였기 때문에 H300×300 BDM 압연 가능성을 확인하였다.

이러한 결과를 통해 도출된 BDM 공형과 패스 스케줄의 신뢰성을 검증하였다. 단 오버필링 최소화 및 BDM 리더 패스의 충만성 확보를 위한 공형 및 패스 스케줄 재검토가 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 일본 JFE Steel Kurashiki 연구소의 장비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

REFERENCES

- [1] T. Yanazawa, T. Tanaka, M. Yamashita, T. Nakanishi, T. Kusaba, T. Akune, 1980, New BDM Rolling Method of Large H-shapes, J. Japanese. Soc. Tech. Plast., Vol. 21, No. 235, pp. 696~705.
- [2] H. Yamaguchi, Y. Kusaba, 1995, Development of Rolling Technique for Thick-flange-H-beam by the Rigid Plastic FEM, 1995, CAMP-ISIJ, Vol.8, p. 433.
- [3] K. Komori, 1997, Simulation of Deformation and Temperature in Multi-pass Caliber Rolling, J. Mater. Process. Technol., Vol. 71, pp. 329~336.
- [4] K. Komori, K. Komula, 2000, Simulation of Deformation and Temperature in Multi-pass H-shape Rolling, J. Mater. Process. Technol., Vol. 105, pp. 24~31.
- [5] A. A. Milenin, H. Djya, S. Mroz, 2004, Simulation of Metal Forming during Multi-pass Rolling of Shape Bars, J. Mater. Process. Technol., Vol.153~154, pp. 108~114.
- [6] E. J. Kwak, G. P. Kang, K. H. Lee, I. H. Son, 2009, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Fall Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 169~772.
- [7] J. M. Kim, C. S. Park, K. M. Woo, 2010, Rolling Process and Roll Stress Analysis of CB100 using by 3D FEM, J. Trans. Mater. Process., Vol. 19, No. 2, pp.101~106.
- [8] 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, J. Trans. Mater. Process., Vol. 22, No. 7, pp. 383~388.
- [9] Kawasaki Steel, 1999, Engineering of Caliber Rolling Process, Kawasaki Steel, Japan, pp. 60~62.