

후판압연에서의 재결정거동 예측

이동근*, 박종진**
홍익대학교 대학원*
홍익대학교 기계공학과**

Prediction of Recrystallization Behavior during Thick-Plate Rolling

D. G. Lee* and J. J. Park**
Hong-ik University, Graduate School*
Hong-ik University, Dept. of Mechanical Engineering**

Abstract

In the present investigation, recrystallization occurring during hot rolling of thick steel plate was predicted. The thermo-mechanical history of a material point was traced by the finite element method and the recrystallization was predicted by the Sellars equations. The investigation was performed for 4 different cases; two different pass schedules in conventional rolling and two different pass schedules in controlled rolling. Variations of temperature, strain, strain rate and grain size were compared with each other. It was found out that the difference of grain size through thickness was more distinctive in the cases of controlled rolling.

Key words : Finite Element Method, Controlled Rolling, Recrystallization, Retained Strain

1. 서론

자동차, 조선, 산업기계 등에 많이 사용되는 강판재는 기계적 성질(예; 항복강도, 인장강도, 연신율, 파괴인성 등)이 좋아야 하며 또한 균일하여야 하는데, 이는 미세한 결정립을 판재내에 균일하게 분포시킴으로써 이루어질 수 있다. 최근 강판재의 기계적 성질에 대한 수요자의 요구사항이 높아짐에 따라 이를 만족시키기 위한 압연기술이 필요하게 되었다. 이를 위하여 재질예측 및 제어(SPPC; structure/property prediction and control) 기술이 개발되고 있는데 이는 과학적인 방법으로 전 제조공정, 즉 가열, 압연, 냉각 시에 일어나는 금속학적 현상을 수식화하고 이를 토대로 공정인자와 재질과의 관계를 규명하는 수식 모델을 개발하여 압연공정의 제어에 적용하는 기술이다(1-3).

금속재료의 미세조직은 재료가 거처온 열-기계적 이력(thermo-mechanical history)에 의하여 결정된다. 열간압연과 같이 고온변형에서는 온도, 변형률, 변형률속도의 이력에 따라 초기조직이 변형, 회복, 재결정, 결정립성장의 과정을 반복적으로 거치면서 미세조직이 변화하게 된다. 이와같이 복잡한 미세조직의 제어는 압연조건을 제어함으로써 가능하다. 이를 위해서는 열간압연시 판재 내에서 발생하는 열-기계적 이력을 파악하고 이로부터 재결정거동과 잔류변형량 등의 미세조직을 예측하는 연구가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 후판 열간압연을 평면변형으로 가정하고 상용 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-2D를 사용하여 변형과 온도변화를 해석하였다. 이로부터 구한 판재 두께방향으로의 세 위치의 열-기계적 이력을 Sellars 모델링을 이용하여 구축한 재결정예측 시스템에 적용하여 압연 공정 중 발생하는 재결정거동과 잔류변형율을 예측하여 보았다. 이와 유사한 연구로는 이정서(4) 등이 사상압연에서 발생하는 재결정거동의 예측과 조현중(5)이 행강압연에서 발생하는 재결정거동의 예측이 있다. 또한 곽우진(6), 김대영(7) 등은 열간단조 중에 발생하는 재결정거동을 예측하였다.

2. 압연공정의 유한요소해석

후판압연은 각각 세부에 따라 다르기 때문에 표준적인 조업조건 같은 것을 이끌어 내는 것은 어렵다. 또한 제어압연의 조건은 요구되는 기계적성질, 화학성분, 판두께 등에 따라서도 다르다. 따라서 본 연구에서는 후판에서의 상용압연과 제어압연 공정을 참조하여 개략적으로 공정을 2가지의 패스와 2가지의 압하율로 변화시켰다. 소재는 0.12C-1.4Mn-0.025Nb 강이며, 판재의 초기온도, 패스 수, 조압연이 끝난후 온도냉각시간, 압하율, 스탠드간 쉬는 시간은 Table 1에 나타내었다. 판재의 초기온도는 상용압연(CV)과 제어압연(CR)에서 각각 1150℃와 1050℃로 하였다. 2 패스 압연은 조압연과 사상압연이 1 패스씩이고, 패스 당 압하율은 초기두께의 20%씩이다. 반면에 4 패스 압연은 조압연과 사상압연이 2 패스씩이고, 패스 당 압하율은 초기두께의 10%씩이다. 따라서 4가지 경우 모두 초기두께는 150mm이고, 압연 후 판재두께는 90mm이다. 상용압연의 경우 조압연 후 냉각시간이 25초인 반면에 제어압연은 250초로 상대적으로 길어서 사상압연시 판재의 온도가 현저히 낮아진다. 물반경과 물속도는 각각 조압연에서 600mm와 3.4rad/sec, 사상압연에서 500mm와 6rad/sec이다. 물의 초기온도는 200℃로 가정하였으며 사상압연이 끝난후 60초까지 공냉 해석을 하였다. 판재의 변형과 온도분포는 상하대칭으로 가정하였다.

Table 1. Rolling conditions

	CV2	CV4	CR2	CR4
initial temperature of plate(℃)	1150	1150	1050	1050
pass	2	4	2	4
cooling time after roughing(sec)	25	25	250	250
reduction w.r.t. initial thickness	20%	10%	20%	10%
interpass time(sec)		10		10

CV : conventional rolling, CR : controlled rolling

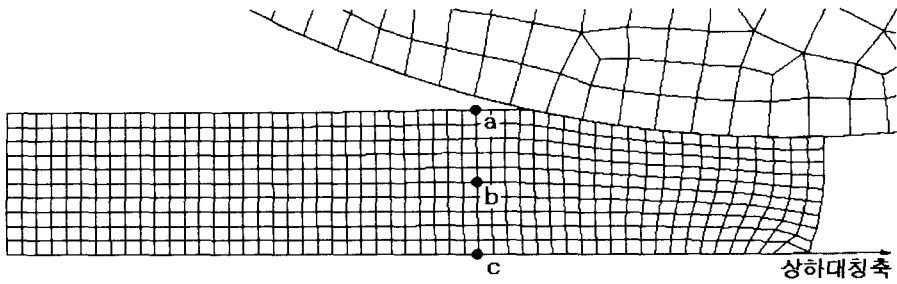


Fig. 1 Locations of three points to trace in a half of the cross section

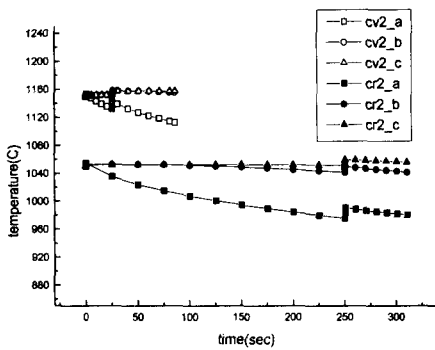


Fig. 2 Predicted temperatures at three points in CV2 and CR2

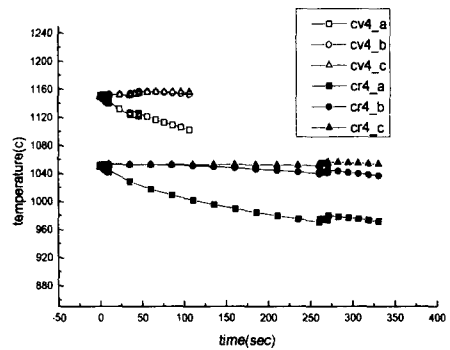


Fig. 2 Predicted temperatures at three points in CV4 and CR4

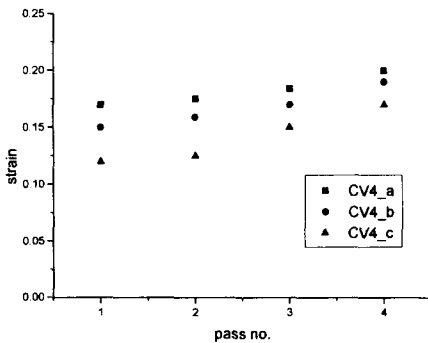


Fig. 4 Predicted strains at each pass in CV4

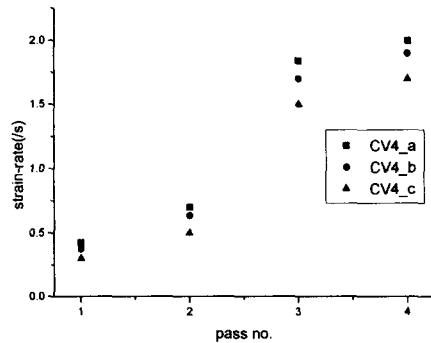


Fig. 5 Predicted strain rates at each pass in CV4

Fig. 1은 조압연 시작직후 판재단면의 상부 1/2을 나타내고 있는데, 열-기계적 이력과 재결정 거동을 예측할 위치를 a, b, c와 같이 선택하였다. Fig. 2에 해석으로부터 구한 CV2와 CR2에서의 각 점의 온도 변화를 나타내었다. 변형열로 인해 판재의 온도가 높아지고 변형이 끝난 후 쉬는 시간에서 대기로의 열손실이 나타났다. CV2에서 a, b, c점의 최종온도는 각각 1112.8°C, 1156°C, 1157°C이다. a점의 경우 판재의 표면이므로 열손실이 커서 37.2°C만큼 온도가 낮아졌으며 b, c점의 경우 판재의 내부이므로 열손실보다 변형으로 인한 온도상승이 더 커서 초기온도보다 약간 높아졌다. CR2에서는 a, b, c점의 최종온도가 각각 971°C, 1040.5°C, 1055°C이다. 이 경우 조압연 후 판재의 온도냉각시간이 250초로 길어서 a점에서는 79°C 만큼 낮아졌으며 CV2와는 달리 b점에서도 열손실이 변형열보다 커서 최종온도가 낮아졌다. c점에서는 열손실보다 변형열이 커서 온도가 약간 상승하였다. Fig. 3는 해석으로 구한 CV4와 CR4에서 온도변화를 나타낸다. CV4에서는 a, b, c점의 최종온도가 각각 1103°C, 1153°C, 1153°C이며 CR4에서는 971°C, 1037.5°C, 1053°C이다. 2 패스 압연에서와 마찬가지로 CV4에서 a점은 최종온도가 초기온도보다 낮아졌고, b점과 c점은 높아졌다. CR4에서는 a점과 b점은 온도가 낮아졌으며 c점은 온도가 높아졌다.

Fig. 4는 CV4에서 각 점이 각 패스에서 받는 변형률을 나타낸 것이다. 표면인 a점에서 변형률이 가장 크게 나타났으며 중심부로 갈수록 변형률이 작게 나타났다. 압연을 받으면서 판재의 두께가 감소하므로 상대적으로 압하율이 커져서 후반부로 갈수록 변형률은 크게 나타난다. Fig. 5는 CV4에서 각 점에서의 변형률속도를 나타낸 것이다. 변형률속도는 각 스탠드에서의 변형률을 압연 시간인 롤과 판재의 접촉시간으로 나눈 값이다. 따라서 변형률속도도 표면인 a점에서 중심부인 c점으로 갈수록 작게 나타났으며 후반부로 갈수록 증가하였다. 압연이 진행되면서 판재의 두께가 얇아지므로 롤과 판재의 접촉시간이 짧아진다. 따라서 후반부로 갈수록 변형률속도는 변형률보다 현격하게 증가하게 된다.

3. 재결정거동 예측

많은 연구가들에 의해 열적-기계적 변수들을 인자로써 동적, 정적 재결정거동을 모델링하려는 연구가 진행되고 있다(8-11). 이러한 모델링 식들은 주로 C-Mn 강을 기준으로 개발되었고, 재결정분율, 정적재결정입도, 결정립성장의 식들로 구성되는데, 사용되는 입력변수는 온도, 변형률, 변형률속도 그리고 초기 결정립크기이다. 본 연구에서는 Sellars 식을 사용하여 개발한 재결정예측 시스템을 이용하여 재결정거동을 예측하였다. 이 식은 초기 결정립크기와 Z값으로 결정되는 최고 변형률 ϵ_p 의 80%를 기준으로 준동적재결정과 정적재결정을 구분한다. 이 경우 재결정 완료시간은 각각 변형률속도, 온도 그리고 초기 결정립크기, 온도, 변형률에 의하여 결정된다. 재결정 완료시 결정립크기는 초기 결정립크기와 ϵ_p 의 곱의 57%를 기준으로 결정되는 ϵ^* 에 따라 식을 선택하게 되어 있다. 두 식에 의하여 예측되는 결정립크기는 각각 변형률속도, 온도, 초기결정립도 그리고 변형률에 의하여 결정된다. 열간압연에서는 변형에 의한 온도상승, 냉각에 의한 온도강하 등으로 온도변화가 발생하게 된다. 본 연구에서는 재결정거동 예측시 이러한 온도변화를 고려하기 위하여 additivity rule(12)을 적용하였다.

조압연 전의 판재는 크기가 200 μ m인 결정립들이 균일하게 분포되어 있다고 가정하였으며, 재결정분율이 95% 이상 되면 재결정이 완료된 것으로 간주하고 그 후에는 결정립 성장을 계산하였다. 패스 간의 이송시간이 재결정완료에 필요한 시간보다 작은 경우에는 부분재결정의 경우로써 재결정된 부분과 재결정되지 않은 부분이 공존한다. 재결정된 부분은 재결정식에 의한 크기를 갖으며 변형률이 없는 반면에, 재결정되지 않은 부분은 초기 결정립크기를 유지하며 변형률이 존재한다. 평균적 의미에서 유효 결정립크기는 $\bar{d} = (1-X)d_0 + Xd_{rec}$ 로, 잔류변형률은 $d\epsilon = \epsilon(1-X)$ 로 계산하였다. 다음 패스의 압연에서 잔류변형률은 누적변형률로, 유효 결정립크기는 초기 결정립크

기로 사용하였다.

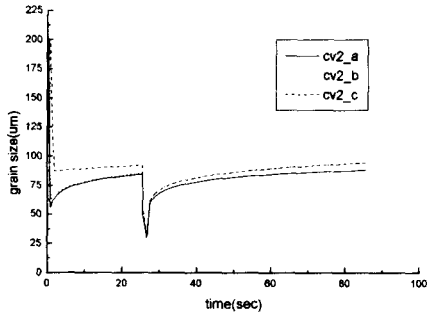


Fig. 6 Predicted grain sizes at three points in CV2

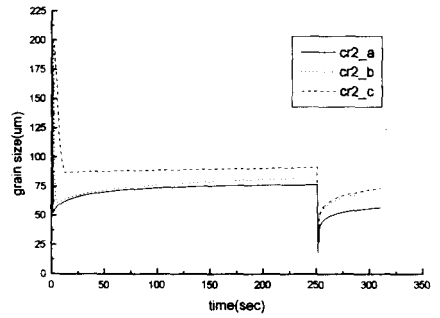


Fig. 7 Predicted grain sizes at three points in CR2

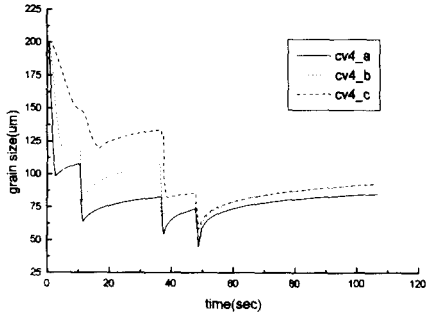


Fig. 8 Predicted grain sizes at three points in CV4

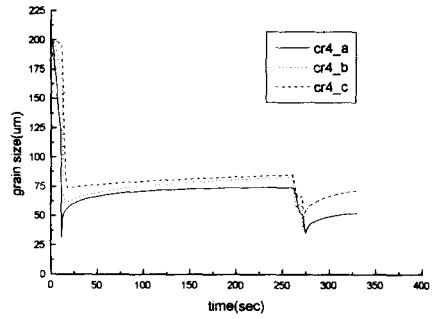


Fig. 9 Predicted grain sizes at three points in CR4

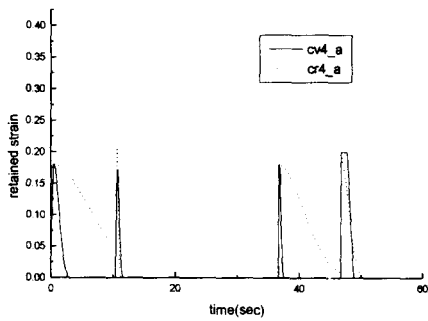


Fig. 10 Predicted retained strain at point a in CV4 and CR4

Fig. 6은 CV2에서의 결정립크기의 변화를 나타낸 것이다. 압연이 진행되면서 재결정과 결정립 성장이 반복되어 결정립이 미세화되었다. 재결정은 진구간에서 0.4~1초 사이에 재결정이 완료되었다. 급격한 기울기를 가지며 결정립 크기가 작아지는 구간이 재결정이 발생하여 완료되기까지이며 그 후 완만한 기울기를 가지며 결정립 크기가 커지는 구간이 재결정성장이 발생하는 것이다. 최종 결정립크기는 b점과 c점이 온도가 높아서 크고 판재 표면인 a점은 온도가 낮아서 상대적으로 작게 예측되었다. b점과 c점은 온도변화가 거의 동일하여 최종 결정립크기가 거의 동일하게 예측되었다. 하지만 첫 번째 패스에서 재결정완료시 b점의 결정립크기가 c점의 결정립크기보다 작게 예측되었고 따라서 결정립 성장과정도 다르게 나타났는데 이는 c점의 변형률이 상대적으로 작아서 정적재결정립 크기가 더 크게 나타났기 때문이다. 따라서 두께방향으로의 결정립크기는 a점이 $88.02\mu\text{m}$, b점과 c점이 $94.33\mu\text{m}$ 로 $6.31\mu\text{m}$ 의 차이가 있었다. Fig. 7은 CR2에서의 결정립크기의 변화를 나타낸 것이다. 재결정은 0.5~2초 사이에 완료되었으며 최종 결정립크기는 a, b, c점이 각각 $56.74\mu\text{m}$, $70.97\mu\text{m}$, $73.44\mu\text{m}$ 로 a점과 c점이 $16.7\mu\text{m}$ 의 차이가 있었다. CV2의 경우와는 달리 b점과 c점의 결정립크기가 $2.47\mu\text{m}$ 만큼 차이가 있었는데 이것은 첫 번째 패스 후 냉각시간이 훨씬 길어서 b점과 c점이 온도의 차이가 크게 발생하였기 때문이다. CV2와 CR2에서는 최종 결정립크기가 a, b, c점에서 각각 $31.27\mu\text{m}$, $22.47\mu\text{m}$, $24.94\mu\text{m}$ 만큼의 차이를 나타내며 제어압연의 경우 최종결정립이 상대적으로 더 미세화되었다.

Fig. 8은 CV4에서의 결정립크기의 변화를 나타낸 것이다. CV2보다 각 패스에서의 변형률이 작으므로 재결정이 완료되는데 걸리는 시간도 오래걸렸다. 0.5~4초사이에 재결정이 완료하였으며 첫 번째 스탠드에서 c점의 경우는 재결정이 완료되지 못하였다. 최종 결정립크기는 a, b, c점이 각각 $84.95\mu\text{m}$, $92.64\mu\text{m}$, $92.77\mu\text{m}$ 로 a점과 c점이 $7.82\mu\text{m}$ 의 차이가 있었다. Fig. 9은 CR4에서의 결정립크기의 변화를 나타낸 것이다. 온도와 변형률이 모두 상대적으로 낮아서 첫 번째 패스에서는 a, b, c점 모두 재결정이 완료되지 못하였다. 다른 패스에서는 1~5초 사이에 재결정이 완료되었다. 최종 결정립크기는 a, b, c점이 각각 $52.59\mu\text{m}$, $71.76\mu\text{m}$, $71.8\mu\text{m}$ 로 a점과 c점이 $19.21\mu\text{m}$ 의 차이가 있었다. CV4와 CR4에서는 최종 결정립크기가 a, b, c점이 각각 $32.36\mu\text{m}$, $20.88\mu\text{m}$, $20.97\mu\text{m}$ 만큼의 차이를 보이며 역시 제어압연의 경우에 결정립이 더 미세화하였다.

미재결정 오스테나이트를 제어냉각하면 변형을 받은 오스테나이트 입계나 변형대에서의 핵발생 외에 오스테나이트 입내까지도 페라이트가 핵생성하여 페라이트의 대폭적인 세립화가 발생된다. 즉 압연후 잔류변형률이 남아있게되면 제어냉각시 결정립의 미세화를 가져오게 된다(참고문헌). Fig. 10은 CV4와 CR4에서 a점의 잔류변형률의 변화를 나타낸것이다. 비교를 위해 CR4의 경우 두 번째 패스 후 냉각시간이 250초이지만 25초로 축소하여 도시하였다. CR4의 경우 상대적으로 압연온도가 낮으므로 재결정이 완료되는데 걸리는 시간이 길어서 판재내에서 잔류변형률이 CV4보다 오래 남아있게 되는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

강판재의 후판압연공정 중 발생하는 재결정거동을 예측하였다. 강소성 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-2D를 사용하여 해석하였으며 해석결과로 구한 온도, 변형률, 변형률속도를 Sellars의 재결정식을 이용한 재결정예측 시스템에 적용하여 재결정거동과 잔류변형률을 예측하였다. 본 연구에서 추적한 a, b, c점에서의 최종 온도, 결정립크기의 예측결과는 다음과 같다.

(1) CV2에서 최종온도는 각각 1113°C , 1156°C , 1157°C 로 표면과 중심과의 차이는 44°C 이었으며 최종 결정립크기는 각각 $88\mu\text{m}$, $94\mu\text{m}$, $94\mu\text{m}$ 로 표면과 중심의 차이는 $6\mu\text{m}$ 이었다.

(2) CR2에서 최종온도는 각각 971°C , 1041°C , 1055°C 로 표면과 중심과의 차이가 84°C 이었으며 최종 결정립크기는 각각 $57\mu\text{m}$, $71\mu\text{m}$, $73\mu\text{m}$ 로 표면과 중심의 차이는 $16\mu\text{m}$ 이었다.

(3) CV4에서 최종온도는 각각 1103°C , 1153°C , 1153°C 로 표면과 중심과의 차이가 50°C 이었으며

최종 결정립크기는 각각 85 μm , 93 μm , 93 μm 로 표면과 중심의 차이는 8 μm 이었다.

(4) CR4에서 최종온도는 각각 971 $^{\circ}\text{C}$, 1038 $^{\circ}\text{C}$, 1053 $^{\circ}\text{C}$ 로 표면과 중심과의 차이가 82 $^{\circ}\text{C}$ 이었으며 최종 결정립크기는 각각 53 μm , 72 μm , 72 μm 로 표면과 중심과의 차이는 19 μm 이었다.

제어압연의 경우 냉각시간이 길어서 상대적으로 온도가 낮으므로 재결정이 완료되는데 걸리는 시간이 상용압연보다 크게 나타났다. 본 연구에서는 개략적인 압연공정을 대상으로 수행되었다. 실제 압연은 십여 패스에 걸쳐 수행되며, 또한 제어압연의 경우에는 사상압연 초기온도가 900~700 $^{\circ}\text{C}$ 로 낮다. 이 경우 재결정이 완료되는데 걸리는 시간은 훨씬 길어질 것이고, 미재결정에 의한 잔류변형률이 많이 존재할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 권오준, 강기봉, 이근수, 장래용, “재질예측제어기술의 물리야금학”, 대한금속학회, 제1회 상변태 심포지엄, pp.21-31(1988)
2. 권오준, 신수철 “재질예측기술의 개발현황 및 전망”, 대한금속학회보, Vol.4, No.1, pp.15-25(1991)
3. 권오준, 이경중, “탄소강의 온라인 열연 재질예측 시스템 개발”, 대한금속학회지, 30, p.1335(1992)
4. J. S. Lee and J. J. Park, “Prediction of Recrystallization Behavior in Steel Sheet During Hot Rolling Process”, ISIJ, pp.500-505(1998), Japan
5. 조현중, 유한요소법을 이용한 열간압연공정의 모델링 및 미세조직 예측, 석사논문, 홍익대학교 대학원(1995)
6. 곽우진, 이경중, 권오준, 황상무, “열간단조공정중 강의 재결정거동 유한요소해석”, 한국소성가공학회지, 제5권, 제4호, pp.305-319(1996)
7. 김대영, 박종진, 염종택, 박노광, “강의 열간단조중 발생하는 재결정거동의 예측”, 대한금속학회지, 36권, 7호, pp.1146-1153(1998)
8. H. Yada, “Prediction of microstructural changes and mechanical properties in hot strip rolling”, Trans. ISIJ, 23, pp.100-109(1983)
9. H. Yada, “Structure of austenite of carbon steels in high speed hot working process”, 鐵と鋼, 제15호, pp.322-329(1984)
10. K. Esaka, J. Wakita, M. Takahashi, O. Kawano and S. Haraday, 製鐵研究. No 32, p.92(1986)
11. C. M. Sellars, “Modelling microstructural development during hot rolling”, Materials Science and Technology. Vol.6, pp.1072-1081(1990)
12. E. Scheil, Arch. Eisenhüttenw., Vol. 12, p.565(1935)