

미니밀 마무리압연기의 Pass Schedule 설정 프로그램 개발

이호국*, 박해두*, 최갑춘**

* POSCO 기술연구소 광양압연연구팀

** POSCO 미니밀본부 박판기술팀

Development of a finishing-mill set up program for calculating pass schedule in mini mill process

ABSTRACT Mini-mill process which is one of the new steel-making technologies to be able to produce the hot rolled coils by thin slab caster of ISP(In-line Strip Production) type, will be completed in the Kwangyang Steel Works of POSCO in August, 1996. Set-Up Model of finishing mill which consists of 5 stands is the most basic and essential in mini-mill plant. Therefore, the simulation program of Finishing-mill Set-Up model were developed in this research, using new temperature prediction model, roll gap model and rolling physical model. Using the developed FSU program, pass schedules to produce the strips with target strip thickness of 1.8mm, 2.0mm, 2.3mm, 2.7mm and 3.0mm were also determined respectively.

Key Words: Mini-Mill Process, FSU(Finishing-mill Set-Up) model, Pass Schedule

1. 서론

미니밀공정은 전로의 용강을 이용하여 200~300mm 두께의 슬래브로부터 열연코일을 생산하는 기존공정과는 달리, 전기로-연속주조-열간압연의 생산공정을 직결하여 열연코일을 제조하는 공정으로서 공정을 단축시켜 에너지 절감의 효과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 제품생산적 측면에서도 유연성을 갖는 신제철공정이다.

Nucor(미국), Hylsa(멕시코), Hanbo(한국), Arvedi(이탈리아), Armco(미국) 등의 회사는 현재 미니밀 열연코일을 생산하고 있고, 2000년까지 미국 및 개도국을 중심으로 세계 20여 개국에 50여 기의 미니밀 설비가 설치될 전망이다. 전 세계적으로 총 열연코일 생산능력의 13.3%를 점유할 추세로 예상하고 있다. 미니밀 설비는 크게 ISP(In-line Strip Production), CSP(Compact Strip Production) 및 CONROLL(CONtinuous cast & ROLLing) 등으로 대별되며, 각 설비별 특징은 표1과 같다.

세계 미니밀 설비에 의한 제품생산 추이를 살펴보면, 미니밀 열연코일의 품질한계로 인해 생산강종에 제약을 받으므로, 품질확보를 위해 Mold 두께를 50/75mm에서 90/125mm로 전환하여 Medium Caster의 건설이 증가하고 있고, Scrap 가격상승으로 대체철원을 사용하는 미니밀이 증가하고 있으며 대체철원 사용을 통한 용강의 청정도 향상으로 고급강 개발로의 방향전환을 모색하고 있는 추세이다. 또한 극박재 생산에 의한 신규수요 창출 및 고부가가치화를 추진하고 있다. 그 예로 Arvedi에서는 최소두께 1.2mm까지 열연코일을 생산하며 향후 0.8mm까지 생산할 예정이고, Hylsa에서는 최소두께 1.35mm까지 생산하며 향후 1.0mm까지 생산할 예정이다. 그리고 극박재를 생산할 목적으로 Hoogovense에서는 전기로-연주기-저온 페라이트 압연기술을 연결한

차세대 미니밀 공정의 개발을 진행하고 있다.

MDH사의 ISP형을 채택한 제철신공정 기술인 미니밀 1공장의 1기와 2기가 POSCO 광양제철소에 '96/8에 준공될 예정이고, 이에 따라 조기 조업정상화를 달성함과 동시에 철강 경쟁력 강화를 위한 미니밀 자체 고유기술력 확보의 필요성이 대두되고 있다. 열간압연 공정에 있어서 소재 두께는 중요한 관리지표인데, 열간압연 공정에 관련된 요소기술 중 연주기와 속도동기화되어 최적 바두께를 확보하고 슬래브 통관성을 최적화할 목적으로 기동하는 reduction unit 설정모델(RSU) 및 최종 목표 판두께를 확보하기 위하여 5 스탠드에 의해 등속압연되는 finishing-mill 설정모델(FSU)에 관련된 요소기술은 가장 기본적인 필수적이다.

따라서, 본 연구에서는 미니밀열연설비 도입됨에 따라, 미니밀 압연 설비특성 및 조업변수들을 고려하여 각 스탠드의 롤 회전수 및 롤 갭(Roll Gap)을 설정하기 위한 FSU 시뮬레이션 프로그램을 개발하는 데 목적을 두고 있다. 또한 개발된 프로그램을 이용하여 압연조건별로 pass schedule을 결정하고자 한다.

2. FSU 개요 및 프로그램 개발

마무리압연 설정모델(FSU:Finishing-Mill Set-Up model)은 강종, 두께, 폭 및 냉각방식 등과 같은 작업변수를 고려하고 마무리압연 공정에서 발생하는 야금학적, 물리적 및 열적-기계적 현상들을 수학적으로 표현하여 통관속도, 수냉 및 공냉 온도, 열간 변형저항, 압연하중, motor power 및 압하위치 등과 같은 개별 수식모델을 확립함과 동시에 이들을 단위 모듈화하고 통합함으로써, 소재 선단부가 압연기에 치입되기 전에 압연조건에 적절한 롤 회전수와 롤 갭을 설정하는 열연의 핵심모델이다.

FSU는 1962년 이후에 미국의 McLouth Steel사에서 열간압연기에 처음으로 적용되어 생산성, 품질 및 실수율이 향상되는 결과를 가져옴으로써 열연라인에서는 필수 요소기술로 등장하게 되었다. 일본은 1966년부터 신설공장은 물론 기존공장에 이르기까지 FSU를 도입하여, 오늘날에 이르러서는 두께적중률이 상당한 수준에 이르게 되었다. POSCO는 1978년부터 FSU에 대한 관심을 모아 전 열연공장에의 적용을 추진하여 현재 두께적중률이 90% 이상의 수준에 이르고 있다.

개발된 FSU 프로그램의 계산흐름을 간략하게 살펴보면, 주어진 입력정보를 토대로 압연설비 구간별 판온도와 열간 변형저항, 압연하중 및 power와 같은 물리량을 계산한다. 이에 따라 목표 power배분비와 비교하여 계산 power배분비의 수렴성을 판단하고, 목표 판온도 확보여부를 판단한 후, 만족되지 않으면 power배분비 확보를 위해 미소 두께변동에 의한 물리량을 재계산하고, 만족되면 최종적으로 롤 회전수 및 롤 갭이 결정된다.

개발된 프로그램 MINI-MODEL을 Fig.1에 블록도로 나타내었다. MINI-MODEL은 크게 입력데이터 처리기능, 사상입측온도 계산기능, power배분비 확보기능, check기능, 목표 FDT확보 기능의 5가지로 모듈화되어 있다. 이 중에서 power배분비 확보기능은 FSU의 핵심모델로서 압연현상과 관련된 각종 물리량을 계산하고, 그 물리량을 토대로 power배분비를 목표치로 확보하기 위하여, 수정된 Newton-Raphson법에 의해 각 스탠드의 출측 판두께를 구하는 기능으로 이를 Fig.2에 블록도로 나타내었다. 또한 Fig.3와 Fig.4에 판온도, 열간 변형저항, 압연하중 및 motor power 등과 같은 물리량 계산하는 모듈과 power감도 행렬을 구성하여 미소 두께변동량을 구하여 판두께 패턴

을 설정하는 모듈을 각각 블록도로 나타내었다.

3. 개발 결과 및 고찰

개발된 시뮬레이션 프로그램 MINI-MODEL을 이용하여, 강종은 일반 저탄소강 (0.05%C, 0.21%Mn, 0.03%Cr, 0.03%Cr)이고 판폭이 1050mm인 경우에 대하여, 표2의 압연조건으로 시뮬레이션하여 미니밀 마무리압연에서의 pass schedule을 결정하였다.

초기 판두께 패턴에 따른 각 스탠드 출측 판두께에 의해 각종 물리량을 계산하고 초기 두께의 1%에 해당하는 미소 판두께 변동을 주었을 때, 이 판두께변동에 의한 power 편차에 대한 미소 판두께의 비로 표현되는 power감도행렬을 구하고 이 연립방정식의 해인 두께변동량을 구함으로써 전 스탠드에 걸쳐 power배분비가 만족되는 출측 판두께 패턴을 설정한다. 또한 각 스탠드의 출측 판두께 패턴과 압연기의 탄성변형, 롤 팽창 및 롤 마모를 고려함으로써 롤 갭을 설정한다.

설정된 스탠드별 판두께 패턴과 롤 갭을 Fig.5(a)와 Fig.5(b)에 각각 나타내었다. 시뮬레이션 결과에 의하면, 압연조건 Case1의 목표 판두께 1.8mm를 생산하기 위해서는 각 스탠드 출측두께보다 F1에서는 2.264mm, F2에서는 0.94mm, F3에서는 0.672mm, F4에서는 0.644mm, F5에서는 0.02mm만큼 압연기 롤 갭을 수정하여 압하위치를 설정하여야 함을 알 수 있다. 또한, 다른 압연조건에 대해서도 목표 판두께를 확보하기 위한 롤 갭 설정치를 계산하였다. 이러한 결과로부터 전단 스탠드에서 출측 판두께에 대한 롤 갭 수정량은 후단 스탠드보다 크게 설정해야 하고 판두께가 얇을수록 여러 가지 요인들이 결부되어 압연하기가 어렵다는 사실도 알 수 있다. 또한 압연기에 판이 물려 압연하중이 작용할 때의 압연기 탄성변형량과 상하부 롤간 기준 갭을 설정하기 위해 실시하는 영조시 압연기의 탄성변형량도 스탠드별로 편차가 발생하는데, 전단 스탠드가 후단 스탠드보다 크게 나타난다. 이는 열간 변형저항 및 압연하중 편차에 기인한 것이다.

마무리압연 출측에서의 판속도는 압연조건에 따라 판의 기계적, 야금학적 재질을 얻을 수 있는 FDT를 확보하기 위해 미리 결정되는 인자이다. 이 판속도를 기준으로 체적일정 조건에 의해 각 스탠드의 판속도 패턴이 설정되고, 또한 롤과 판과의 상대속도에 대한 롤 주속의 비로 표현되는 선진율과 롤 주속의 관계에 의해 롤 회전수가 결정된다. 이는 power배분비를 만족하기 위해 물리량이 계산되는 과정에서 판두께 패턴이 수정되므로 power배분이 전 스탠드에 적정화될 때에 최종적으로 설정된다.

Fig.6(a)와 Fig.6(b)에 스탠드별 판속도와 롤 회전수를 각각 나타내었다. 미니밀 마무리압연 공정은 기존 공정과는 달리 등속압연되는데, 시뮬레이션 결과, 전단에서 후단스탠드에 이르기 까지 통판성은 양호하리라 판단된다. 또한 시뮬레이션 압연조건에 대해, F1에서는 60rpm이하의 저속회전해야 하고 목표판두께가 1.8mm인 경우와 3.0mm인 경우를 비교하면, F5에서 약 102rpm정도 차이가 발생한다. 스탠드간 mass flow가 균형을 이루어야 양호한 통판성을 확보할 수 있는데, 이를 위해서는 선진율 예측이 명확해야 한다. 따라서 향후 선진율 예측 수식모델의 계수조정은 필수적으로 수반되어야 한다.

압연하중은 성분, 변형률, 변형률속도 및 온도의 함수로 표현되는 열간 변형저항과 판폭 및 롤과 판의 접촉길이의 함수로 표현되고, 더욱 정도높은 압연하중을 얻기 위해서 보정함수를 도입하여 실측치와 계산치간 오차를 제거한다.

Fig.7에 스탠드별 압연하중을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, Case1, 2, 3의 경우, F1에서 압연하중이 압하량, 변형량 및 접촉길이의 영향을 더 많이 받기 때문에, 변형저항이 F5에서 대략 21kg/mm^2 인데 비해 F1에서는 12.4kg/mm^2 정도로 작고 변형률속도도 F5에서 $132\sim 162/\text{sec}$ 인데 비해 F1에서는 $25\sim 32/\text{sec}$ 정도로 작다 하더라도 F1 압연기에 작용하는 압연하중이 $1588\sim 1834\text{ton}$ 정도가 됨을 알 수 있다. 이는 최대 압연하중 4079ton 의 45%정도로 낮지만 압연기에 부하가 크게 되어 롤 마모량이 증가되고 기계적, 열적 피로의 축적정도가 크리라 판단된다. 그러나 Case4와 5의 경우 F5를 제외한 나머지 스탠드에서는 $1021\sim 1310\text{ton}$ 정도로 거의 일정한 압연하중이 작용한다.

압연기 구동의 원동력이 되는 모터power는 모터효율을 고려하여 롤 각속도와 모터 토오크의 함수로 표현된다. Fig.8에 스탠드별 모터power를 나타내었다. Case1, 2, 3 및 4의 경우, F1에서 소요 모터Power에 대한 정격 모터power의 비인 load rate가 92%이상으로 구동모터에 부하가 심하게 걸리고 불안정하다. 그러나 나머지 스탠드에서는 load rate가 73~87%정도로 비교적 안정된 상태에서 압연이 가능할 것이다. Case5의 경우에는 전 스탠드에 걸리는 load rate가 78.9%이하로 구동계가 안정된다.

Fig.9은 Uncoiler출측, 즉 pinch roll로부터 FDT온도계까지 관온도 변화추이를 나타낸 것이다. FSB나 F1,2간 DSC/Spray 수냉구간에서 온도감소가 현격하고 공냉 및 압연구간(roll bite)에서의 온도변화를 거친 후, FDT가 Case1의 경우 882°C , Case2의 경우 867°C , Case3의 경우 878°C , Case4의 경우 881°C , Case5의 경우 864°C 정도로 예측된다. 이는 목표 FDT 875°C 의 $\pm 10^\circ\text{C}$ 이내로 만족할 만하다고 볼 수 있다.

Fig.10은 소재의 소성변형에 의한 발열, 소재-롤간 마찰에 의한 발열 및 고온의 소재로부터 롤로의 열전달에 의한 온도강화 효과를 종합적으로 고려한 스탠드별 압연구간에서의 온도변화량을 나타낸 것이다. Case1의 경우 F1~F4까지는 소성발열이나 마찰발열에 의해 $4^\circ\text{C}\sim 12^\circ\text{C}$ 정도로 다른 경우보다 비교적 상승효과가 크며, 다른 경우들은 스탠드별로 온도상승보다 롤로의 전열에 의한 온도강하가 더 지배적이다.

4. 결론

수냉, 공냉 및 압연구간으로 세분화된 새로운 온도 예측모델, 마무리압연의 각종 물리량 모델, 적정 power배분비를 확보하기 위한 판두께 패턴 설정모델 및 롤 갭 설정모델 등을 사용하고 미니밀 설비특성 및 조업변수들을 고려하여 압연조건별로 pass schedule을 결정할 수 있는 FSU 시뮬레이션 프로그램 MINI-MODEL을 개발하였다. 또한 개발된 프로그램은 미니밀 열연공장의 on-line화를 추진하여 95%정도 완료되었으며, 향후 열연코일 생산에 핵심적인 역할을 하게 된다. 그리고 MINI-MODEL을 이용하여 5가지 압연조건에 대하여, pass schedule을 설정하였다. 그러나, MINI-MODEL은 압연현상에 관련된 실 조업상황이 반영되지 않아 두께적중률을 향상시키기 위해서는 조업 실측치를 기준으로 모델계수의 미세조정이나 상수정보의 표준화가 반드시 수반되어야 한다.

5. 참고문헌

- 1) P.W.Lee, R.B. Sims, and H.Wright: J. Iron and Steel Inst., Mar. 1963, pp.270
- 2) F. Hollander: "Mathematical Model for Metallurgical Process Development", The

- Iron and Steel Inst., London, 1970, pp.46-78
- 3) C. Devadas and I. V. Samarasekera: Iron and Steel Making, 13, 1986, pp.313
 - 4) C. Devadas, D. Barager, G. Ruddle, I. V. Samarasekera, and E. B. Hawbolt: Met. Trans. A, 22A, 1991, pp.307-349
 - 5) I. Tamura, H. Sekine, T. Tanaka, C. Ouchi: "Thermomechanical Processing of High-Strength Low-Alloyed Steels", Butterworths Published, 1988, PP.117
 - 6) Y. Misaka and T. Yoshimoto: J. Japan Soc. Tec. Plasticity, 8, 1967, pp.414
 - 7) S. Shida: J. Japan Soc. Tec. Plasticity, 9, 1968, pp.127
 - 8) C. Nagasaki and J. Kihara: Tetsu to Hagane, 74, 1988, pp.1418

Table 1. 미니밀 설비구성 및 특징

Type 구분	ISP	CSP	CONROLL
개발사	MDH(독일)	SMS(독일)	VAI(오스트리아)
길이	185m	325m	800m
연주 설비	<ul style="list-style-type: none"> · 수직만곡형(Parallel) · Mold:Parallel/75mm · Soft Reduction · Max. 주속:5mpm · Air-Mist 2차냉각 	<ul style="list-style-type: none"> · 수직만곡형 · Mold:Funnel/50mm · Max. 주속:5.5mpm · WaterSpray 2차냉각 	<ul style="list-style-type: none"> · 수직만곡형 · Mold:Parallel/75mm · Max. 주속:4mpm · Air-Mist 2차냉각
Bar Handling 설비	<ul style="list-style-type: none"> · 4Hi-2Stand R/U · 가열설비:I/H · 보열설비:A/F · Stelco Type Coil Box · 30min Buffer Time 	<ul style="list-style-type: none"> · 균열설비:T/F · 균열로 길이:190m · 12min Buffer Time 	<ul style="list-style-type: none"> · 4Hi-2Stand R/U · 균열설비:P/T
압연 설비	<ul style="list-style-type: none"> · 4Hi-5Stand F/M · 형상제어:P/C(F2-F4) · Descaler:300bar 	<ul style="list-style-type: none"> · 4Hi-6Stand F/M · 형상제어:CVC · Descaler:370bar 	<ul style="list-style-type: none"> · 4Hi-5Stand F/M

※R/U:Reduction Unit, I/H:Inductive Heater, A/F:Acceleration Furnace
T/F:Tunnel Furnace, P/T:Pusher Type, F/M:Finishing Mill
P/C:Pair Cross, CVC:Continuous Variable Crown

Table.2 Basic rolling conditions for simulation

	Uncoiler 추출온도	F.M 출측 관속도	Bar 두께	목표 판두께	목표 FDT
CASE 1	1050 °C	610 mpm	20 mm	1.8 mm	875 °C
CASE 2	1050 °C	590 mpm	21 mm	2.0 mm	875 °C
CASE 3	1050 °C	550 mpm	22 mm	2.3 mm	875 °C
CASE 4	1050 °C	470 mpm	23.1 mm	2.7 mm	875 °C
CASE 5	1050 °C	380 mpm	23.6 mm	3.0 mm	875 °C

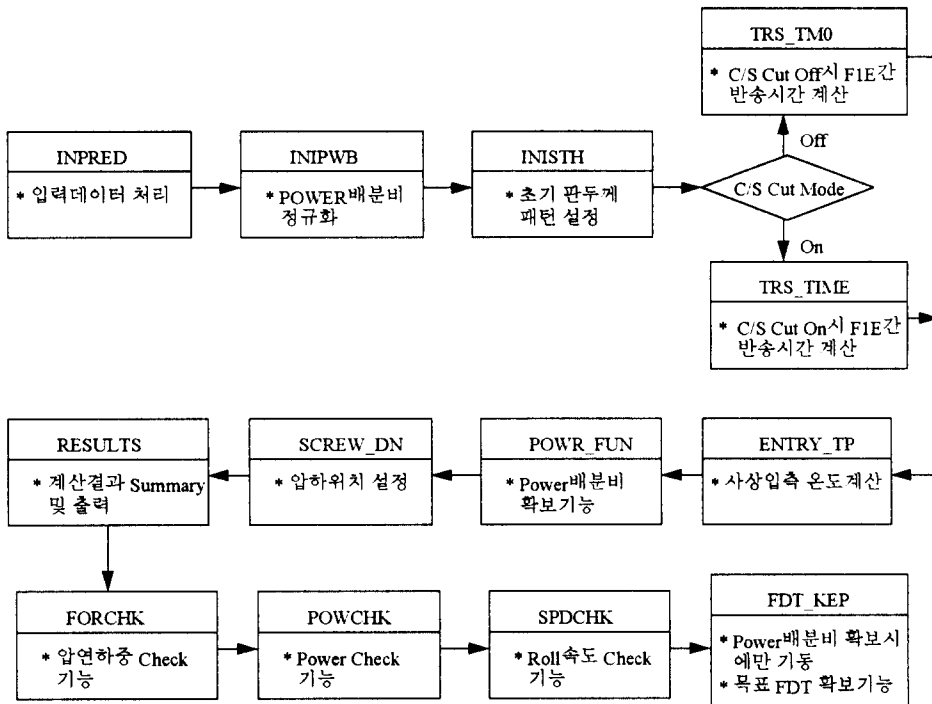


Fig.1 Block Diagram of the developed FSU program MINI-MODEL

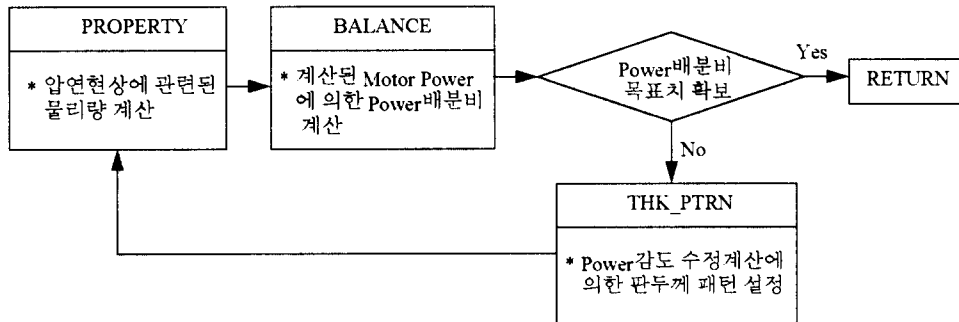


Fig.2 Block diagram of the power balance module

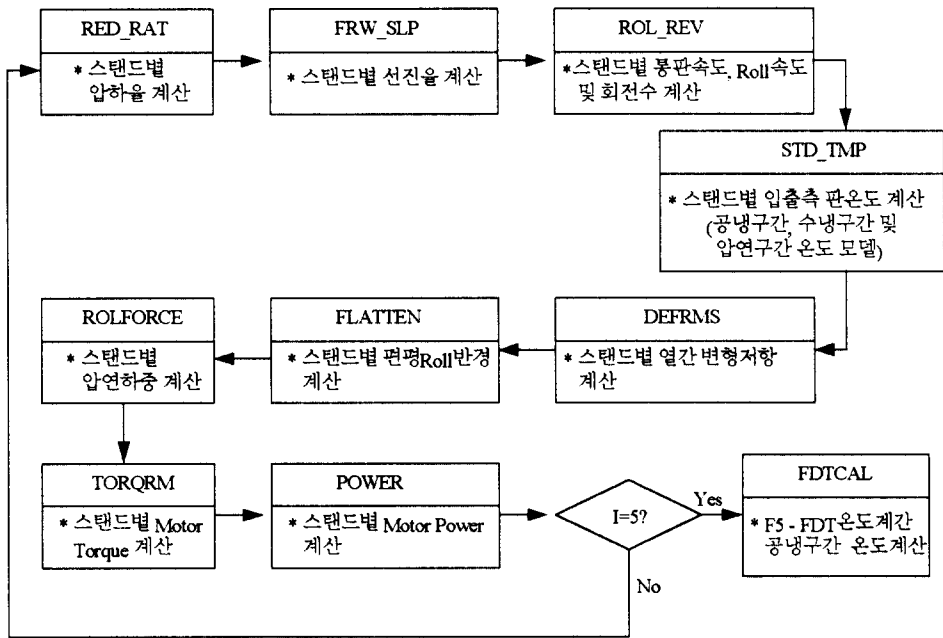


Fig.3 Block diagram of the property module

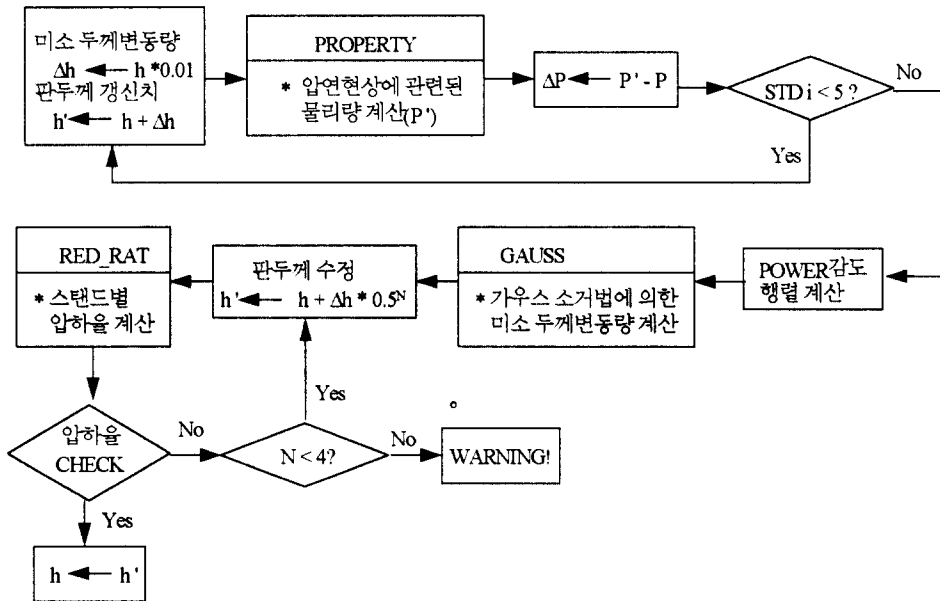
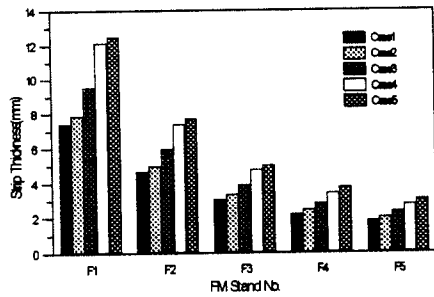
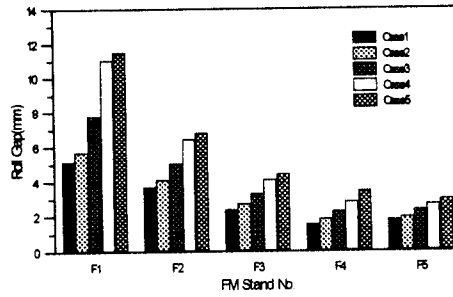


Fig.4 Block diagram of the thickness pattern module

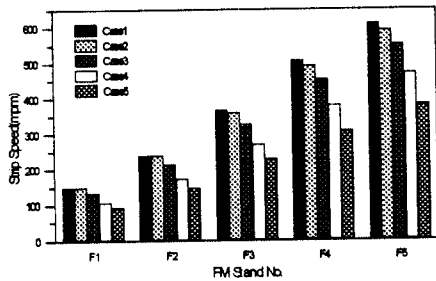


(a)

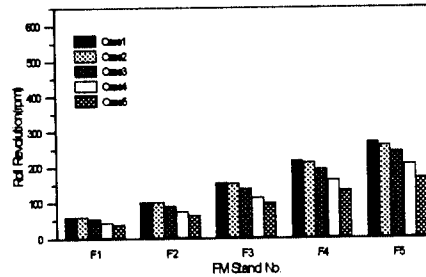


(b)

Fig.5 (a)Strip thickness, (b)Roll gap classified by each stand for simulation cases



(a)



(b)

Fig.6 (a)Strip threading speed, (b)Roll revolution classified by each stand for simulation cases

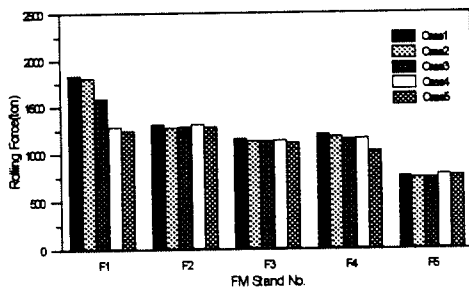


Fig.7 Rolling force classified by each stand for simulation cases

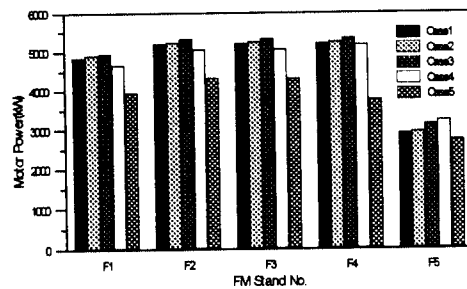
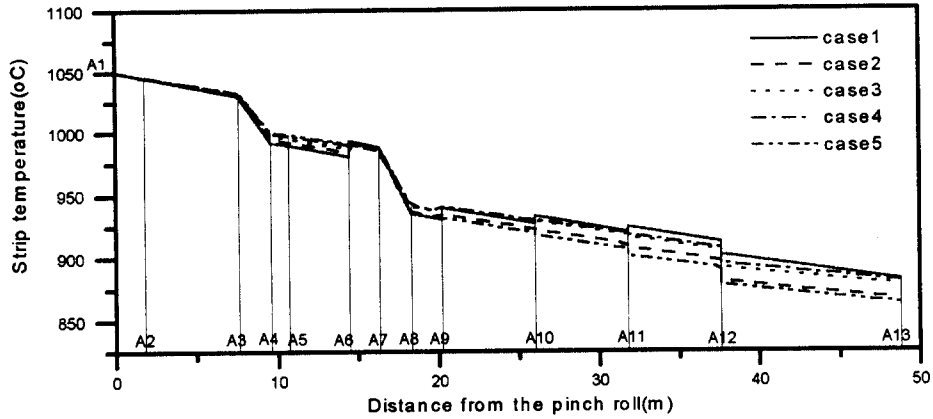


Fig.8 Motor Power classified by each stand for simulation cases



A1:Uncoiler 출측 A2:FET온도계 A3:FSB입측
 A4:FSB출측 A5:F1E A6:F1입측(출측)
 A7:F1,2 DSC/spray 입측 A8:F1,2 DSC/spray 출측 A9:F2입측(출측)
 A10:F3입측(출측) A11:F4입측(출측) A12:F5입측(출측)
 A13:FDT온도계

Fig.9 Strip temperature distributions in finishing mill line for simulations cases

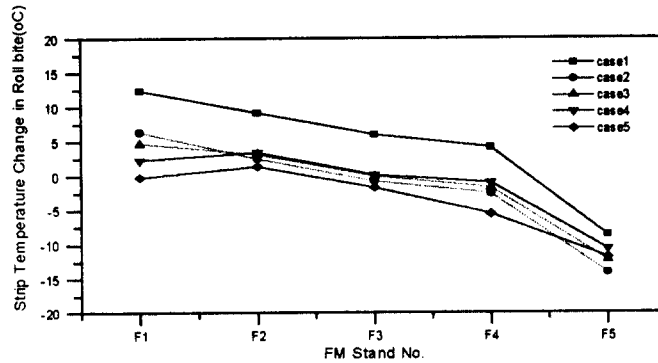


Fig.10 Strip temperature in roll bite classified by each stand for simulation cases