

鐵鋼産業에서의 O.R. 適用事例

포항 종합 제철 기술고문(工博) 서 대 석
 포항 종합 제철 I. E. 실장 윤 상 규

1. 서 론

최근 Computer 분야의 눈부신 발전과 더불어 O·R은 현대 시스템 시대의 총아로서 군사, 산업, 보건, 에너지, 공공기관 등 여러 분야의 행정, 계획, 설계 업무에 있어서 필수적인 도구로 사용되기에 이르고 있다.

철강산업 분야에서도 의사 결정의 모형이 대단히 복잡하고 규모가 방대하며 또한 Data가 수시로 변하기 때문에, Computer의 이용은 필수적이 되었으며 수학적인 모형과 Computer의 합리적인 결합은 기업내에 산재해 있는 거의 모

든 문제를 다룰 수가 있게 되었다. 이미 미국 등 선진 철강국에서는 O·R 기법 중의 선형계획법, 정수계획법, 시물레이션 등의 이론과 실험계획법, 회귀 분석 등이 생산 관리, 공정 관리, 품질 관리, 설비 투자, 정보 시스템 등 많은 분야에 응용되어 기업의 이익 극대화와 자원의 효율적인 관리에 크게 이바지하고 있다. 아래 <표 I>은 철강업에서의 O·R 기법 적용사례 중 대표적인 몇 가지를 소개한 것이다.

본 사례에서는 냉연공장의 산세(酸洗)처리 공장에서 수학적인 모델이 어떻게 개발되어 응용되고 있는가에 대해서 소개하기로 한다.

표 I

분 야	내 용	사 용 기 법
생 산 관 리	균열로에서의 냉괴 장입 최적화	시물레이션
	소둔 Charge 편성 및 가열 Pattern 최적화	정수계획법 실험계획법 회귀분석
	연주 Scheduling	동적계획법
설 비 투 자	주형 및 대차 수량 결정	시물레이션
투 자 분 석	연속 주조 설비 투자 분석	시물레이션
	공장 종합 계획(MEP) 분석	시물레이션
품 질 관 리	소둔 품질 관리	회귀분석
정 보 시 스템	정보 Network에서의 file allocation	정수계획법
에 너 지	에너지 배분 모델	선형계획법

2. 산세 처리 공정 개요

산세(酸洗)란 철판을 무기산 용액에 담구어서 철판의 표면에 부착된 철의 산화물을 제거하는 공정이다. 철판의 표면 산화물이나 스케일을 제거하는 데는 여러 가지 방법이 이용되고 있지만 이와 같은 방법은 사용이 간편하고 비용이 적게 드므로 가장 널리 이용되고 있다.¹⁾

스케일은, 스타브를 얹은 철판으로 압연하는데에 필요한 높은 온도가 산화 작용을 가속시킴으로 해서, 압연 작업 중에 철판의 표면에 형성된다. 이러한 산화물은 냉간 압연 중에 여러가지 심각한 야금상의 문제나 운전상의 문제를 일으킬 뿐만 아니라, 아연이나 주석 도금 또는 기타 페인트의 도금을 곤란하게 한다.²⁾

요즘의 연속 산세는 산 탱크의 입구에서 코일의 양쪽 끝을 용접하여 기다란 연속 철판으로 만들어 산세를 하고, 산 탱크의 출구에서 이 긴 연속 철판을 다시 전단하게 되어 있다(그림 I 참조). 루프카(looping cars)는 탱크 전후에서 철판을 저장하는 설비로써 입측은 철판을 풀어주고, 출측은 전단을 하도록 정지시키게 되어 있

다. 이렇게 저장된 여유분의 철판으로, 입측이 용접을 위해 멈추거나 출측이 철판을 다시 감을 때에, 탱크 속으로 철판이 무리없이 연속적으로 흘러가게 할 수가 있다. 산 탱크 속을 통과하는 철판의 속도는 일반적으로 분당 700~800 ft이나 최근의 “super” 산세라인은 분당 1,000 ft로 설계되어 있다.³⁾

열연 코일은, 두께와 폭에 따라 달라지겠지만 통상 그 중량이 30,000~40,000 lb 이고 길이는 1,000~3,000 ft 이다.

코일의 연결 부위도 다음 공정에서 냉간 압연이 될 수 있도록 해 주어야 하나 과거의 랩(lap)이나 stitch joint 로서는 불가능하기 때문에 연속 소둔로의 입측에 용접기를 사용하게 되었다. 산세 용접 부위에 대한 수요자의 요구는 점차 까다로와져서 마침내는 용접 부위를 원하지 않는 경향이 있다. 이러한 경향은 수요자의 주문서에 용접부위가 없는 것으로 명시하게 되어 예외로 취급되고 있다. 그러나 주문서에 “용접 불허용” 이라고 명시되지 않으면, 수요자가 용접 부위가 있는 코일을 받아들인다고 간주된다. 이런 형태의 주문은 철판의 길이만 맞춰주면 되므로 스타브의 크기나 강괴의 크기와는 관계없이 주문수

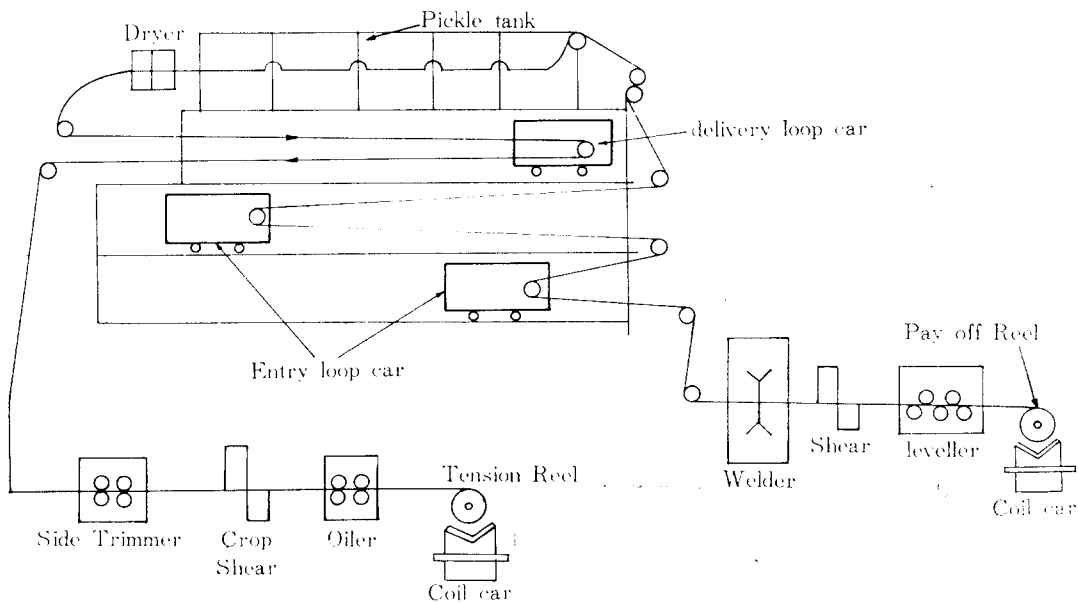


그림 I 연속 산세의 설비 개략도

량에 따라 분류되므로 “일반 주문”이라고 할 수 있다.

일반 주문은 수요자나 제작자가 상당한 융통성을 가질 수가 있다. 용접을 허용함으로써, 제작자에서 강괴 주형의 크기를 한정시키지 않기 때문에 수요자는 자기의 요구대로 코일 사이드를 명시할 수가 있다. 더구나, 강괴에서 열연 코일로 되기 까지에는 어느 공정에서든지 예기치 못한 생산량의 손실이 종종 발생되므로, “용접 불허용”이라고 명시된 때에는 동일한 강괴 사이즈에서도 최종 코일의 무게는 여러 가지로 달라질 수가 있다. 따라서 수요자는 용접 부위를 허용함으로써 코일 사이즈의 변동을 잘 컨트롤 할 수가 있으며, 제작자도 역시 강괴 주형의 크기를 조정하는데 보다 덜 신경을 쓰게 됨으로써 서로 이점이 있다. 다양한 사이즈의 강괴 주형을 전보다 잘 관리하는 데는 상당한 비용이 든다. 압연 공장에서도 몇 개의 작은 코일을 한 개의 커다란 코일로 만듦으로써 공정의 효율을 증대시키는 데에 상당한 이점이 있으며, 자재의 운반이나 생산성 및 생산량도 코일의 수가 적으면서 단중이 클수록 증가하게 된다. 이러한 절약은 10,000~15,000 lb 정도의 아주 작은 코일이 주문될 때에는 그 효과가 더욱 크게 된다.

이러한 복합 코일은 출하하기 전에 보통은 조립 공장에서 주문된 코일사이드로 전단된다.

3. 문제의 정의

산세는 어려울 뿐만 아니라 문제가 자주 발생하는 설비 중의 하나로, 제작자에게는 최소의 비용으로, 수요자가 명시한 코일 중량의 범위(최대와 최소) 내에 열연 코일을 맞춰주는 것이 문제가 된다. 문제를 정의함에 있어서, 코일이 어떠한 사이즈 또는 어떠한 량으로든 이미 압연되어 있는 상태이고, 수요자의 요구도 이미 알려져 있으므로, 문제의 제약조건은 분명해져서, 양쪽을 동시에 만족시키는가 아닌가 하는 것은 산세 자체에 달려 있는 것이다. 이 문제에는 다음과 같은 네 가지의 서로 상반될 수도 있는 목적이 있게 된다.

1. 열연 공장에서 압연된 전(全) 코일의 사용: 주문 중량을 맞춰 주고서 여분이 생기는 코일을 선택해서는 안 된다. 이는 실수율 저하와 생산량 손실의 원인이 된다.
2. 수요자가 요구한 중량 범위 내에서 출하 코일의 중량을 최대한 함으로써 출하 코일의 수를 최소화: 출하 코일의 수가 적고 중량은 클수록 수요자에게는 취급이 용이하게 되며 제작자에게도 포장이나 선적 비용을 줄일 수가 있다.
3. 주문 코일의 수를 하나의 커다란 복합 코일로 조합하는 수를 최대화 함으로써 산세 이후의 공정에서 처리될 코일의 수를 최소화.
4. 모든 코일을 동일한 예상출하 중량으로 분류함으로써 출하 코일의 중량이상(수요자가 요구하는 최대 중량 초과 또는 최소 중량 미달)이 발생할 위험을 최소화.

생산계획 부서에서는 위에서 언급한 목적에 따라, 매일 일반 주문을 분석하고, 그에 대한 산세 계획을 수립해야 할 책임이 있으며, 냉연 공장에서는 이와 같은 목적을 만족시키기 위해 기개발된 계산 방법을 철저히 적용했음에도 불구하고 많은 량의 중량 이상 코일이 만들어지고 있었기 때문에 결국 이 문제의 해결 방안을 의뢰하기에 이르렀다.

조사결과, 주어진 주문에서 하나 이상의 중량 이상 제품을 생산한 데에는 두가지 문제점이 밝혀졌다. 첫번째 문제는 주문된 코일에 대해 산세할 철판의 길이를 계산하는 방법이 정밀하지 못하다는 것이고, 두번째 문제는 각 처리 공정에서 사용되는 냉연 실수율 퍼센트가 부정확하다는 점이었다.

4. 수학적인 공식화

위에서 언급한 네 가지 목적을 최적화 하면서 코일 크기의 정확성을 증대시키고 예상 실수율을 향상시키기 위해서는, 최종 코일 사이즈의 계획을 위한 일반 주문의 분석이 빨리 전산화되어야 했다.

코일의 실제 폭과 두께는 열연에서 X-ray 측정 장치로 측정된 값을 그대로 이용할 수가 있었기 때문에 코일 크기에 대한 자료수집은 별 어려움이 없었다. 각 코일이 실제 스케일 중량과 결합되었을 때는, 상기 측정치를 이용하여 아래 공식에 의거 실제 길이를 계산할 수가 있었다.

$$\text{길이} = \frac{\text{코일 중량 (lbs.)}}{\text{폭 (in.)} \times \text{두께 (in.)} \times d (\text{lbs./cu.in.}) \times 12 (\text{in./foot})}$$

여기서 $d = \text{철의 밀도} = 0.2833 \text{ lbs/cu.in.}$

중량 손실은 주로 코일 길이(양끝을 잘라낸 상태)의 함수이므로, 실수율 계산은 코일 무게 대신 코일 길이의 함수로 표시하는 것이 정확도가 훨씬 높아진다. 사실상, 코일의 전후반부 절단(end cropping)이나 양 옆면 절단(side trimming)으로 인한 실수율 손실 때문에, 대부분의 실수율 문제는 산세 자체에 있었다. 실수율 계산을 길이로 나타내어도, side trimming은 코일 길이를 변화시키는 것이 아니므로 여기서는 제외되었다. 시험해본 결과 예상된 산세 실수율의 정도(精度)는 대단히 증대되었음을 나타내었다.

최적 산세 모델은 다음과 같은 6개의 변수에 대해 그 해(解)를 구하는 것이다.

$X_1 = \text{생산할 1차 master coil의 수}$

$X_2 = \text{각 1차 master coil에서 분할 가능한 주문 코일의 수}$

$X_3 = \text{각 1차 master coil의 중량}$

$Y_1 = \text{생산할 2차 master coil의 수}$

$Y_2 = \text{각 2차 master coil에서 분할 가능한 주문 coil의 수}$

$Y_3 = \text{각 2차 master coil의 중량}$

2차 master coil이란 최적해의 선택 범위를 넓혀 계획을 용이하게 하기 위해서 정한, 1차 master coil과 size가 다른 코일을 지칭한다.

예를 들어, 어떤 수요자가 80,000 lb의 제품을 주문하면서 10,000 lb 코일로 선적해 줄 것을 요구했다고 하고, 주문된 폭에 대해서 이 코일의 외경은 최대이고, 공장의 크레인인 35,000 lb까지 취급할 수 있다고 가정하자.

이때 만일 2차 master coil이 허용되지 않는다면, 이 주문을 처리할 가장 효율적인 방법은 20,000 lb 무게의 코일 4개를 만드는 것이다. 그러나 30,000 lb의 1차 master coil 두 개와, 20,000 lb의 2차 master coil 1개를 만든다면 산세에서 처리해야 할 코일은 3개로 줄일 수 있다. 이 예에서 해(解)는 다음과 같이 된다(실수율은 무시) :

$$\begin{aligned} X_1 &= 2 & Y_1 &= 1 \\ X_2 &= 3 & Y_2 &= 2 \\ X_3 &= 30,000 & Y_3 &= 20,000 \end{aligned}$$

이 문제의 공식은 다음과 같은 목적 함수와 제약 조건식으로 표시된다.

목적함수 ; $\min. X_1X_2 + Y_1Y_2$ (출하 코일의 수)
 $\min. X_1 + Y_1$ (처리 코일의 수)

$$\begin{aligned} \text{제약조건 ; } & \frac{(X_3 - T_y \cdot P_f - S_y) \cdot S_f E_y}{X_2 S_g} \\ & \frac{(Y_3 - T_y P_f - S_y) \cdot S_f E_y}{Y_2 S_g} \end{aligned} \quad (1)$$

$$X_1 X_3 + Y_1 Y_3 = W_p \quad (2)$$

$$X_3 \leq P_b \quad (3)$$

$$Y_3 \leq P_b \quad (4)$$

$$\sqrt{\{X_3 / (0.070825 \pi P_w)\} + P_i^2} \leq P_o \quad (5)$$

$$\sqrt{\{Y_3 / (0.070825 \pi P_w)\} + P_i^2} \leq P_o \quad (6)$$

$$\sqrt{\frac{(X_3 - T_y P_f - S_y) S_f E_y}{X_2 S_g (0.070825) \pi p w} + P_i^2} \leq C_o \quad (7)$$

$$\frac{(X_3 - T_y P_f - S_y) S_f E_y}{X_2 S_g} \leq C_x \quad (8)$$

$$\frac{(X_3 - T_y P_f - S_y) S_f E_y}{X_2 S_g} \geq C_m \quad (9)$$

여기서, $P_f = \text{산세 후 단위 길이당 중량}$

$P_o = \text{산세 후 공장에서 취급 가능한 최대 외경}$

$P_b = \text{산세 후 공장에서 취급 가능한}$

최대 코일 중량
 P_w = 산세된 코일 폭(전단 혹은 양면 절단 폭)
 P_i = 산세 후 내경
 T_f = 냉간 압연 후 단위 길이당 중량
 T_y = 냉간 압연 전 절단된 feet의 수
 S_f = 조질 압연 후 단위 길이당 중량
 S_y = 조질 압연 전 절단된 feet의 수
 S_g = 조질 압연 후 철판의 두께
 E_y = 전기 도금 라인에서의 실수율
 W_p = 산세 후 전체 주문 중량
 C_o = 수요자가 요구한 최대 코일 외경
 C_x = 수요자가 요구한 최대 코일 중량
 C_m = 수요자가 요구한 최소 코일 중량

$$X_3 = \frac{\frac{X_2 W_p}{Y_1} + (T_y P_f + S_y T_f)(Y_1 - X_1)}{\left(1 + \frac{X_1 X_2}{Y_1 Y_2}\right) Y_2} \quad (10)$$

Y_3 에 대해서 식 (2)를 풀면

$$Y_3 = W_p - \frac{X_1 X_3}{Y_1} \quad (11)$$

식 (10)의 X_3 를 식 (11)에 대입하면 Y_3 에 대한 식이 된다.

따라서, 이들 X_3 와 Y_3 를 전 제약 조건식에 대입하면 이 문제는 목적식이 두개이고, 변수가 4개로 수식화된다.

그러므로 두 개의 목적 함수는 가중치를 사용하여 다음과 같이 하나의 식으로 변환시킬 수가 있다.

$$\min. W_1(X_1 X_2 + Y_1 Y_2) + W_2(X_1 + Y_1)$$

가중치는 수요자 및 제작자의 코일 운반 비용

두 개의 목적 함수 중에 X_3 와 Y_3 항이 없으므로, 해(解)는 변수 4개의 항으로 설명된다. 제약조건 (1)과 (2)를 연합해서 풀면

표 II OPTIMAL SOLUTION

TYPE OF COILS	NO OF COILS	WGT(OD) OF EACH COIL AFTER PICKLER	EXPECTED SHIP WGT(OD)	MAX SHIP WGT	EXP % OF MAX	MIN SHIP WGT	MIN % OF MAX
5 MULT	5	58, 111(67.8)	11, 065(36.6)	11, 500	96.2%	10, 350	90.0%

PICKLING PLAN BY WEIGHT, FOOTAGE AND OD

PICKLER MASTER COIL	PICKLING SEQUENCE	COIL NUMBER	ACTUAL GAUGE	PICKLE POUNDS	PICKLE FEET	MASTER COIL OD	
1	1	L 9999 6	.1130	41, 308	1, 654	67.8	
1	2	L 9999 7	.1125	16, 802	676		
					58, 111	2, 330	
2	3	L 9999 7	.1125	24, 656	992	67.8	
2	4	L 9999 5	.1120	33, 455	1, 352		
					58, 111	2, 344	
3	5	L 9999 5	.1120	8, 377	338	67.8	
3	6	L 9999 1	.1110	41, 660	1, 698		
3	7	L 9999 3	.1104	8, 073	331		
					58, 111	2, 368	
4	8	L 9999 3	.1104	32, 864	1, 347	67.8	
4	9	L 9999 2	.1050	25, 247	1, 088		
					58, 111	2, 435	
5	10	L 9999 2	.1050	16, 312	703	67.8	
5	11	L 9999 4	.1009	41, 799	1, 875		
					58, 111	2, 578	

과 제작자의 포장 및 선적 비용을 고려하여 계산할 수가 있다.

따라서 이 모델은 Nonlinear 인 정수계획법의 문제이다.⁵⁾ 접근 방법은 3 단계로 이루어진다. 첫째, 현 주문과 생산의 Database 를 취급하는 프로그램과 주문정보 및 열연코일 재고 Data 에 대한 이해 및 두번째 단계에 Input 할 제약조건을 재구성하는 것, 두번째 단계는 문제를 풀기 위하여 Nonlinear 정수 계획법의 Package 이고, 세번째는 X_3 , Y_3 의 값을 계산하여 생산계획 담당자에게 그 해(解)를 주는 것이다.

표 II 는 프로그램의 출력 Sample 이다.

5. 시험의 결과

프로그램은 수차례 시험가동을 거쳐 실제 주

문을 계획하는데 사용되었다. 표 III 은 5개의 시험 주문에 대한 산세 후 결과를 나타낸 것이다. 이 표의 요점은 계획상의 길이 및 중량을 실제와 대비함으로써 새로운 실수율 계산의 정도(精度)를 나타내 보이고자 한 것이다. 3번째와 5번째의 주문에서는 몇 개의 코일이 실제대비 다소의 오차가 있었으나(코일 자체의 문제였다), 주문에 대한 전체 중량 및 길이는 놀라울 정도로 정확했다. "old plan"이라고 표시된 난을 보면 현행 수작업 방법으로는 중량 이상이 발생하게 됨을 알 수가 있다.

실제로, 이 5개의 주문을 "old plan"에 따라 산세 처리되었다면, 첫번 4개 주문은 중량초과 코일이 생기게 되고, 1번째와 5번째의 주문은 중량미달된 2차 코일이 만들어졌을 것이다.

표 III PICKLER ORDER PLANNING TRIALS

Order	Finished Coil No.	Feet Off the Pickler			Pounds Off the Pickler		
		Actual	Plan	Old Plan	Actual	Plan	A/P
02-45690-01	L 7802-1	1,165	1,142	Bal.	12,590	12,539	1.004
	L 7804-1	3,276	3,286	3,367	36,209	36,334	.997
	L 7804-2	3,278	3,276	3,367	36,232	36,334	.997
	L 7804-4	3,250	3,296	3,367	35,922	36,334	.989
		10,969	11,000		120,953	121,541	.995
02-46259-01	K 4984-2	2,421	2,421	2,555	42,310	42,585	.994
	K 4984-4	2,438	2,438	2,555	42,607	42,585	1.001
	K 4984-5	2,367	2,445	2,555	41,366	42,585	.971
		7,226	7,304		126,283	127,755	.988
02-46394-01	L 7789-1	3,222	3,220	3,508	39,125	39,214	.998
	L 7789-2	2,810	3,231	3,508	34,122	39,214	.870
	L 7789-3	3,247	3,247	3,508	39,428	39,214	1.005
	L 7789-4	3,223	3,222	3,508	39,137	39,214	.998
	L 7789-5	1,115	895	—	13,210	10,794	1.224
		13,617	13,815		165,022	167,650	.984
03-49267-01	J 2259-1	2,366	2,275	2,410	39,543	40,000	.989
	J 2261-1	2,336	2,333	2,410	39,915	40,000	.998
	J 2261-2	2,279	2,390	2,410	39,794	40,000	.995
		6,981	6,998		119,252	120,000	.994
07-48115-01	L 7827-1R	1,185	1,091	1,105	19,941	18,032	1.106
	L 7827-1S	1,191	1,077	1,105	20,040	18,032	1.111
	L 7828-1	1,186	1,070	1,105	19,958	18,032	1.107
	L 7829-1	1,190	1,067	1,105	20,025	18,032	1.111
	L 7829-2	573	1,066	1,105	9,610	18,032	.533
		5,325	5,371		89,574	90,160	.994

6. 실무에의 적용

위에서 언급한 바와 같이 수차례에 걸친 시험을 통해 얻은 결론을 바탕으로, 실무에서는 아래와 같이 적용되고 있다.

1. 열연에서 생산된 냉연소재 코일로써 산세 공정에서의 실수율을 최대화하는 산세 스케줄을 수립한다.
2. 산세 작업 현장에 CRT를 설치하여 작업자가 항상 Schedule을 보면서 작업을 수행하고, 상황 또는 Schedule의 변경시에는 모든 정보가 On-line으로 CRT에 지시되어 작업이 실행되고 있다.
3. 산세 과정에서 코일의 일부분이 품질 불량으로 판단되면, 그 부분을 절단해 버림으로써 Shear loss가 생기게 되나, 전산화가 됨으로써 Shear loss가 생기는 순간 즉시 그 사이즈에 맞는 주문을 찾아내어 산세 Reschedule을 수립하여 작업을 진행시키고 있다.

7. 결 론

중량이상 코일을 없앴으므로써 이 프로젝트에서

얻은 효과는 수요가 주문에 대한 적중률을 증대시키고, 생산계획 부서의 작업 부하를 크게 경감시켰다.

이 프로젝트에서 보면, 겉으로 보기에선 사소한 문제일지라도 그것이 생산성에 심각한 영향을 미칠 수도 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 어떠한 공정에 대해서든 정밀한 분석과 철저한 관리가 정말 중요하다는 사실을 재차 강조하고 싶다.

<참 고 문 헌>

- 1) "Cold Strip Pickling," *Technology of Steelmaking*, Republic Industrial Education Institute, TM 04-303, November, 1965.
- 2) "The Continuous Pickler," *Technology of Steelmaking*, Republic Industrial Education Institute, TM 13-104, January, 1968.
- 3) *The Making, Shaping and Treating of Steel*, U.S. Steel, Pittsburgh, Pa.: Herbick and Held; 1971, pp. 949~956.
- 4) Ignizio, James P., *Goal Programming and Extensions*, Lexington, Mass.: D.C. Heath Company, 1976, Chapters 2, 5 and 6.
- 5) Wagner, Harvey M., *Principles of Operations Research*, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, Inc., 1969, pp. 487, 513~514.
- 6) Ignizio, James P., op. cit., pp. 208~219.
- 7) *The Making, Shaping and Treating of Steel*, op. cit., p. 951.