

# 미니밀 공정의 회귀식 모델링에 의한 제품품질향상에 관한 연구

이명학<sup>1</sup> · 하성도<sup>2</sup>

<sup>1</sup>포항제철(주) 광양제철소 BMS 팀 / <sup>2</sup>한국과학기술연구원 CAD/CAM 연구센터

## A Study on Product Quality Improvement by Regression Modeling of Mini-Mill Process

Myung-Hak Lee · Sung-Do Ha

Mini-Mill process has been recently in operation at Pohang steel company, which enables more flexible steel coil production on customer demands. The effects of process parameters in Mini-Mill process need to be analyzed not only to make the process stable but also to improve product quality. This work aims to develop a regression model of Mini-Mill process using accumulated product data such that the process parameter effects on product tensile strength may be analyzed.

The analysis shows that tensile strength is influenced mainly by the amount of components such as carbon, manganese, silicon, and sulfur. The effect of temperature is shown to be small. It is concluded that control of the components is much more responsible for both meeting the target and reducing the variation of the product tensile strength. Heat treatment is more useful in compensating tensile strength variations due to thickness differences and improving workability and other quality characteristics.

More work is necessary for establishing regression expressions of the process that is reliable and accurate enough to dispense with the off-line inspection of the product tensile strength.

### 1. 서 론

포항제철에서는 2,000년대에 예측되는 열연제품의 부족상황에 대응하고 시황에 따라 생산량을 탄력적으로 운영하며, 차세대 제조프로세스인 Strip Casting의 중간단계인 Thin Slab의 제조기술을 조기에 확보하기 위하여 1996년 10월 광양제철소에 미니밀(Mini-Mill)을 준공하여 조업을 개시하였다. 제조업에서 신규프로세스를 적용하는 경우 우선 설비의 능력 및 가동방법 등에 대한 이해가 반드시 필요하며 안정적 조업 및 제품 품질 확보를 위하여 최종제품에 미치는 각 공정변수들의 이해가 요구된다. 포항제철의 미니밀 공정의 경우에는 설비 및 가동방법에 대한 이해는 설비준공 이전의 설비시험운전단계에서 대부분 이루어졌으므로 본 연구에서는 설비 및 가동 방법 이외

에 미니밀에서 생산되는 제품의 기계적 성질에 미치는 공정변수들의 영향을 검토한다. 이를 위하여 제품의 인장강도(Tensile Strength, kg/mm<sup>2</sup>)에 미치는 공정변수들의 영향을 분석하기 위하여 회귀식을 추정하여 제안하고, 얻어진 회귀식의 예측 정도를 알아보기 위하여 회귀식을 새로운 데이터에 적용하여 얻은 결과를 분석한다. 또한 추정된 회귀식을 해석하여 목표 인장강도를 확보하고 편차를 줄이기 위한 공정운영방안을 제안한다.

### 2. 미니밀 공정 및 제품

현재 포항제철 광양제철소에서 채택하고 있는 미니밀의 생산 공정을 살펴보면 <그림 1>과 같다[1].

대부분의 미니밀에서는 고철을 주원료로 사용하여 전기로에서 용융시킨 후에 Ladle Furnace 및 Vacuum Tank Degassing의 2차정련설비를 통하여 성분 및 청정성을 확보한다. 2차정련을 통하여 성분이 조정되고 청정성이 확보된 용강은 Ladle에 담겨져 주조기로 운반되어 연속적으로 주조가 실시되며 이렇게 주조된 용강은 냉각되면서 고체의 Slab 상태가 되어 1차압연기를 통과하면서 두께가 약 50% 감소된 Bar 상태가 된다. 1차압연기에서 생산된 Bar는 수요자의 주문 증량에 따라 전단기에서 적정길이를 전단된 후에 Bar의 적정온도 확보를 위하여 유도 가열로에서 가열된 후 Coil Box에서 권취된다.

권취된 Bar는 후 공정인 압연공정의 생산 스케줄에 따라 Holding Furnace내에서 Bar의 온도를 확보하면서 일정시간 대기하게 되며 이들 중 생산지시가 내려진 Bar Coil은 Uncoiler에서 풀려지면서 사상압연기를 통과하게 된다. 이때 Strip에서는 금속조직의 변화가 일어나며 수요자가 주문한 제품의 최종두께가 확보된다. 최종두께가 확보된 Strip은 Laminar Flow를 거치면서 냉각되어 최종열처리를 통하여 적정조직 및 기계적 성질을 확보하게 되고 Down Coiler에서 Coil 상태로 감기게 된다.

시장수요에 대응한 생산체제 측면에서 보면 고로밀은 시장수요에 대응하여 생산량을 탄력적으로 조정하기 어렵지만 미니밀은 전기로의 가동 및 휴지가 용이하여 시장수요에 대한 생산의 탄력성은 매우 높으며 미니밀은 단위설비가 작고 또한 압축되어 있어 건설에 소요되는 시간이 짧고, 제품톤당 투자비에 있어서도 저렴한 장점이 있다.

미니밀 제품의 특성을 살펴보면, 미니밀은 고철을 주원료로 사용하므로 고철에 이미 존재하는 여러 잔류성분으로 인하

여 불순물이 극히 적은 고급강의 제조는 일반적으로 쉽지 않으나 압연공정이 등속으로 이루어져서 제품의 성질이 균일한 장점이 있다. 또한 미니밀은 주조 Mold의 단면적이 좁고 또한 고속으로 주조를 행하므로 제품의 표면품질은 기존의 고로밀에 비하여 일반적으로 떨어지나 제품의 형상은 고로밀과 비교하여 비슷한 수준을 보인다.

### 3. 기존연구의 고찰

포항제철 산하 산업과학기술연구소에서는 고로밀에서 생산되는 열연제품의 기계적 성질을 예측하고 제어하기 위한 기술을 개발하기 위하여 수 년간 연구를 수행해 오고 있다. 이들 중 최초연구는 탄소강의 기계적 성질을 예측하기 위하여 금속 상(Phase)의 부피 및 경도를 독립변수로 하는 회귀식을 제안하였고, 그 결과를 일본의 고로밀에서 제안된 식과 비교하였다[2].

이 연구결과를 바탕으로 한 새로운 연구에서는 고려하지 못했던 여러 인자들을 포함하는 개선된 예측식을 도출하여 항복강도는  $3\text{kg/mm}^2$  이내에서 88%, 인장강도는  $3\text{kg/mm}^2$  이내에서 91%, 그리고 연신율은 3% 이내에서 74%의 예측 정도를 보였다[3]. 또한 고로밀에서 생산되는 열연제품의 기계적 성질을 예측하는 연구를 거쳐 On-line으로 기계적 성질을 제어하기 위한 기초연구에서는 공정조건들에 따른 제품의 기계적 성질의 제어범위를 밝혔으며, 또한 On-line 제어를 위한 사전단계로서 공정조건 및 성분의 변화에 따른 기계적 성질의 변화를 예측하고 기존의 공정조건에 의해 예측된 결과와 비교분석하는 공정 Simulation 프로그램을 개발하였다[4].

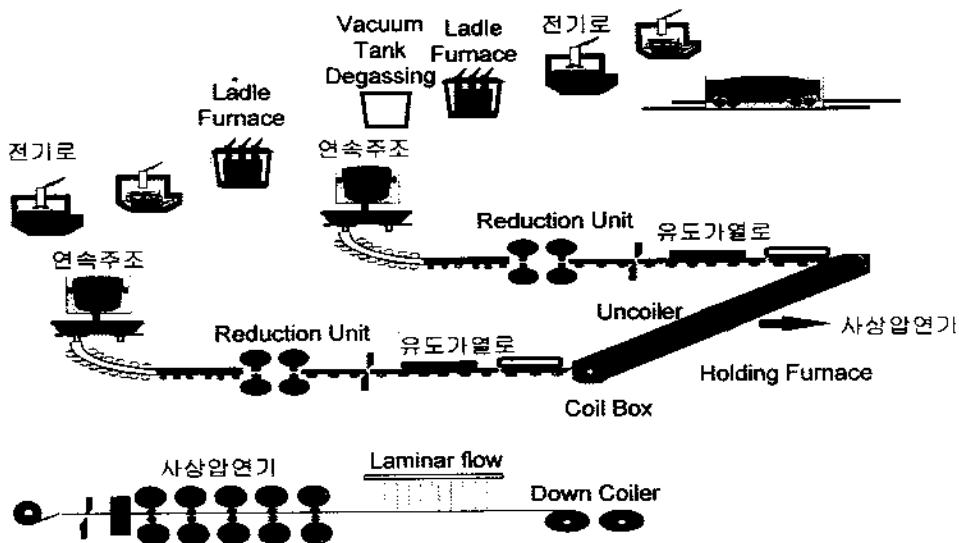


그림 1. 포항제철 미니밀 공정도.



두께 : THK1 2.3~4.5mm, THK2 4.5~8.5mm  
탄소함유량 : spec 1 0.02~0.06%, spec 2 0.05~0.08%, spec 3 0.16~0.20%

그림 2. 제품규격 및 두께별 분류.

고로밀 열연제품의 기계적 성질의 On-line 제어를 위한 기반 구축에 관한 최근의 연구에서는 인장강도를 일정하게 제어할 수 있는 제어논리를 제안하여, 기존의 설비에서 권취온도 변화에 따라 Feed Forward 제어에 의해 기계적 성질제어를 실시한 결과 제품내의 기계적 성질을 일정하게 관리할 수 있음을 밝혔다(7, 8).

이상과 같이 기존 고로밀에서 생산되는 열연제품의 기계적 성질에 관한 연구는 수 년간에 걸쳐 지속적으로 진행되어 많은 결과가 알려져 있으나, 미니밀에서 생산되는 제품에 대한 연구는 아직 본격적으로 진행된 바는 없으며 다만 공장가동 이전에 실험실에서 연구되어 성분 및 온도를 변수로 하는 회귀식이 제안된 바는 있다.

#### 4. 회귀식의 추정

##### 4.1 분석 대상 데이터

미니밀에서 생산된 초기열연제품의 회귀식을 이용한 모델링을 위하여 조업초기에 생산된 1684개 제품에 대하여 규격에서 지정하는 방법으로 시험실에서 시험된 결과값인 기계적 성질과 성분분석실에서 분석된 성분 데이터 및 제조공정 중 자동 계측기에서 측정되어 편집된 온도 및 두께 등의 데이터를 일차대상으로 선정하였다. 이들은 국가규격인 규격 1, 2와 사내규격인 규격 3의 세 가지지의 규격에 대한 제품 데이터이며, 제품의 두께는 2.3mm ~ 8.5mm 범위에 분포하고 있다. 이들 일차 데이터들을 이용하여 제품의 기계적 성질에 대한 회귀식을 추정하기 위하여 적합성을 조사한 결과, 초기조업에서 생산된 제품이므로 제조공정 중 온도의 확보가 원활하지 못하여 제품의 조직이 균일하지 못한 것이 다수 있었다. 따라서 이들 데이터 중에서 공정 중에 정상적으로 온도가 확보되었다고 판단되는 제품들을 선별하였다. 이렇게 선별된 제품들은 3개의 제품규격으로 구성되어 있으며 이들 제품규격들은 크

게 성분에 의해서 구분된다. 분석 대상규격들 중에서 규격 3은 탄소함유량의 차이가 커서 규격 1과 규격 2의 데이터를 한 집합으로 하는 분석과, 규격 3까지를 모두 포함하는 집합으로 하는 분석의 두 가지 분석을 수행하였다. 각각 규격에 대한 데이터의 분포는 <그림 2>와 같다.

##### 4.2 회귀변수의 선택

회귀식의 추정에 사용되는 변수는 시험결과 및 자동계측기에서 추출된 데이터로부터 선택하게 되는데 종속변수로는 시험 시편에서 동시에 측정이 가능한 제품의 기계적 성질인 인장강도(TS), 항복강도, 연신율의 3개 변수들 중에서, <표 1>에

표 1. 미니밀 생산제품의 기계적 성질간의 상관계수

	항복강도	인장강도	연신율
항복강도	1.00(1.00)		
인장강도	0.90 (0.84)	1.00 (1.00)	
연 신 율	-0.56 (-0.34)	-0.56 (-0.27)	1.00 (1.00)

( ) : 규격 1, 2 대상

나타난 바와 같이 항복강도와 인장강도는 서로 상관성이 높고 연신율은 제품두께와 상관관계가 크므로 항복강도와 인장강도 중에서 연신율과 상관관계가 적은 인장강도를 종속변수로 선정하였다.

독립변수로는 공정 중에 계측되는 성분, 온도, 두께, 속도 등으로 분류되는 공정제어변수 중에서 우선 아래와 같이 38개 변수를 선정하였다.

- 성분 : 탄소(C), 망간(Mn), 실리콘(Si), 인(P), 황(S) 등(16개 변수)
- 온도 : 권취온도 등(17개 변수)
- 두께 : 제품두께, Bar 두께 등(4개 변수)
- 속도 : 연속주조속도(1개 변수)

독립변수의 경우 일차대상이 된 38개의 변수를 우선 제품의 시편위치를 고려하여 대상변수의 수를 28개로 축소 한 후, Stepwise 방식 및 맬로우스 Cp를 고려하여 적절하게 조절하려 하였으나 만족할 만한 결과를 얻지 못하여, 먼저 성분, 온도, 두께, 속도로 대표되는 각 성질의 특징이 TS에 미치는 영향을 고려하였다(5,6).

성분의 경우 성분과 인장강도와의 상관성, 성분간의 상호 영향, 금속이론 및 공정특징에 따라 재검토 되었는데 구리, 니켈, 크롬, 몰리브덴 등의 잔류성분원소의 경우에는 이들 원소들이 기계적 성질에 미치는 영향으로 인하여 총량이 규제되고 있으나 미니밀에서는 그 양이 원료인 고철의 성분에 의해 결정되고 또한 잔류원소 및 니오븀, 바나듐 등의 성분은 공정 중에 성분조절이 어려우므로 이들 원소들을 Noise로 분류하였다. 이러한 과정을 거친 후 Stepwise 방식을 다시 적용하여 최종적으로 2개 규격대상과 3개 규격대상의 회귀 추정식에 포함되는 독립변수를 선택하였다. 이렇게 선정된 독립변수는 아래와 같다.

- 2개 규격: 탄소(C), 망간(Mn), 실리콘(Si), 황(S), Soluble Aluminum(SAL), 질소(N), 유도가열로 입측온도(IH 온도), 권취온도(CT 온도)
- 3개 규격: 탄소(C), 망간(Mn), 실리콘(Si), Soluble Aluminum(SAL), 유도가열로 입측온도(IH온도), 권취온도(CT온도)

### 4.3 회귀식의 추정 및 검증

#### 4.3.1 회귀식의 추정

4.2절에서 설명한 바와 같이 변수 선택과정을 거쳐 최종적으로 선택된 변수를 독립변수로 하는 각 데이터 집합의 회귀 추정식은 다음과 같다(5,6).

2개 규격의 경우:

$$TS = 382.6 + 463.4 \times C + 5.0 \text{ Mn} + 59.2 \times Si - 1815.9 \times S - 897.4 \times SAL + 654.9 \times N + 0.1 \times IH \text{ 온도} - 0.1 \times CT \text{ 온도} \quad (1)$$

표 2. 회귀식의 분산 분석표

	Source	DF	SS	MS	F 값	Prob > F	R Square
2개 규격	Model	8	169,892	21,237	162	0.0001	0.79
	Error	358	47,027	131			
	Total	366	216,919				
3개 규격	Model	6	1,403,388	233,898	1,000.1	0.0001	0.92
	Error	510	119,275	234			
	Total	516	1,522,663				

표 3. 회귀식의 모수추정값 및 표준오차

		절편	C	Mn	Si	S	SAL	N	IH 온도	CT 온도
2개 규격	모수추정	382.6	463.4	95.0	59.2	-8915.9	-897.4	654.9	0.1	-0.1
	표준오차	25.1	87.7	10.0	19.4	240.1	83.1	245.7	0.01	0.03
3개 규격	모수추정	519.5	894.9	22.2	200.4	-	-1209.9	-	0.1	-0.3
	표준오차	22.8	14.8	8.7	19.4	-	93.3	-	0.01	0.02

표 4. 회귀식의 잔차검정 결과

	더빈-와슨 D	1차자기상관	잔차평균	샤피로-윌크 W	Prob<W
식(1)	1.63	0.19	0	0.98	0.08
식(2)	1.57	0.23	0	0.98	0.13

3개 규격의 경우:

$$TS = 519.5 + 894.9 \times C + 22.2 \times Mn + 200.4 \times Si - 1209.9 \times SAL + 0.1 \times IH \text{ 온도} - 0.3 \times CT \text{ 온도} \quad (2)$$

식 (1)은 규격 1, 2의 2개 규격 367개 데이터를 대상으로 추정된 회귀식으로서 정도는 수정 R<sup>2</sup>가 0.79이며, 식 (2)는 규격 1, 2, 3의 3개 규격 517개 데이터를 대상으로 추정된 회귀식으로서 정도는 수정 R<sup>2</sup>가 0.92이었다.

기타 분산분석표와 모수 추정치 및 표준오차는 각각 <표 1>와 <표 3>과 같다.

### 4.3.2 회귀가정의 검정

앞 절에서 얻은 결과에서 오차항에 대한 가정을 검정하기 위하여 4.3.1절의 식 (1)과 식 (2)에 대하여 잔차들의 특성을 검정하였으며 그 계산결과 얻어진 Test Value는 <표 4>와 같다.

<표 4>를 보면 식 (1)과 식 (2)의 잔차는 회귀식의 기본가정인 잔차의 독립성, 등분산성 및 정규성을 만족한다고 판단된다.

다음에 회귀식에 포함된 독립변수들은 서로 독립이어야 한다는 가정을 검정하기 위하여 Tolerance 및 분산팽창계수 (Variance Inflation Factor)를 검토하여 식 (1)과 식 (2)에 포함된 독립변수간의 다중공선성(Multi-collinearity) 여부를 판단하였으며 그 결과는 <표5>와 같다.

위의 표를 보면 식 (1) 및 식 (2)의 독립변수들에 대한 Tolerance 및 분산팽창계수값은 다중공선성의 일반적인 기준인 Tolerance 0.1 이하, 분산팽창계수 10 이상의 기준을 초과하는 값이 없으므로 독립변수간 다중공선성이 있다고 판단하기는 어렵다.

### 4.3.3 회귀진단

식 (1), (2)를 각각의 데이터에 유의수준을 0.05로 하였을 경우 식 (1)에서는 25개, 식 (2)에서는 29개의 특이값이 존재하였으나 이들 관측값의 모수 추정값에 대한 영향을 Cook's D 값으로 검토해 본 결과 1보다 큰 값이 없어 회귀식의 모수추정에는 이들 특이값들이 영향을 미치지 않는 것으로 판단 가능하였다

[6,9].

특이값을 제거하고 새로운 회귀식을 추정하니 식 (1)의 변형은 수정 R<sup>2</sup> 값이 0.79에서 0.84로, 식 (2)의 변형은 수정 R<sup>2</sup> 값이 0.92에서 0.94로 증가하였으나 이들 특이값들이 회귀식의 모수추정값에 큰 영향을 주지 않으므로 식 (1), (2)는 적용 가능하다고 판단되었다.

## 5. 회귀식의 해석

### 5.1 회귀식의 예측정도 검정

4.3절에서 추정된 2개 회귀식을 이용한 예측가능성을 파악하기 위하여 결정립이 정상적인 1098개 제품의 공정변수 데이터를 식(1), (2)에 적용하였다. 이들 제품들은 회귀식 추정에 사용된 제품과 비교하면 제강공정의 조업이 어느 정도 안정되어 규격 3의 제품은 없었으며, 회귀식의 추정에 사용된 제품의 경우 두께는 최대 8.5mm이나 예측정도검정에 사용된 제품은 두께가 12.7mm이고, 두께 8.5mm이하의 제품은 모두 285개로 전체의 26%에 불과하였다. 따라서 식 (1), (2)의 예측정도를 검정하기 위해서는 데이터의 두께를 구분하여 검정할 필요가 있다.

식 (1), (2)의 예측정도를 확인하기 위하여 제품 두께 범위를 2.3~8.5mm(이하 두께그룹 1)와 2.3~12.7mm(이하 두께그룹 2)로 구분하여 적용한 결과, 인장강도가 실측값 보다 높게 예측되었으며 그 예측값의 실측값 30kg/10mm<sup>2</sup> 범위의 점유율은 두께그룹 1에서 91%, 두께그룹2에서 88%로 두께그룹1에서 예측정도가 높았다.

이와 같이 인장강도가 높게 예측되는 원인을 파악하기 위하여 먼저 제품 제조의 시계열적 변화에 따른 영향과 주요변수들의 실적변화를 검토하였으나 큰 변동요인을 발견하기 어려웠다(<그림 3> 참조).

### 5.2 회귀변수의 영향도 해석

표 5. Tolerance 및 분산팽창계수(VIF)

대상	항 목	C	Mn	Si	S	Sal	N	IH 온도	CT 온도
식 (1)	Tolerance	0.66	0.18	0.66	0.54	0.90	0.94	0.78	0.18
	VIF	1.51	5.67	1.51	1.84	1.11	1.06	1.28	5.51
식 (2)	Tolerance	0.60	0.39	0.96	-	0.85	-	0.85	0.36
	VIF	1.68	2.57	1.04	-	1.18	-	1.17	2.78

표 6. 독립변수의 표준화된 모수추정값

대상	C	Mn	Si	S	SAL	N	IH 온도	CT 온도
식 (1)	0.16		0.09	- 0.25	- 0.28	0.06	0.21	- 0.16
식 (2)	0.97	0.05	0.13	-	- 0.19	-	0.12	- 0.26

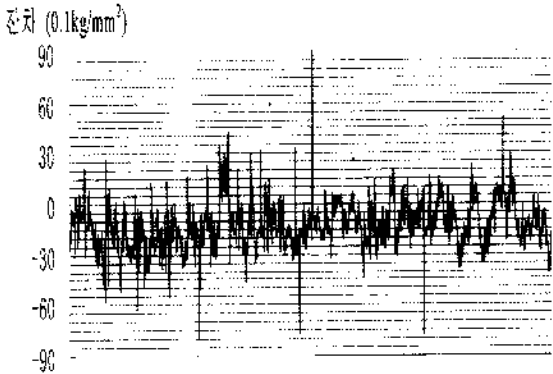


그림 3. 시간의 변화에 따른 잔차 변화량 추이[식 (1) 적용].

4절에서 추정된 식 (1), (2)에 포함된 독립변수들이 인장강도에 미치는 영향도를 알아보기 위하여 각 변수들의 표준화된 모수 추정값을 구해 본 결과는 <표 6>과 같으며, 이들을 해석하기 위하여 주요 변수들의 통계량을 산출하여 분석해 보았다.

<표 6>에서 성분을 대상으로 변수들의 영향도를 먼저 살펴보면 식 (1)에서는 망간의 영향이 식 (2)에서는 탄소의 영향이 매우 크다. 금속이론에 의하면 탄소, 망간 두 원소는 인장강도 확보를 위한 기초 원소인데 식 (1), (2)에서 각기 그 영향도가 매우 상이한 것은 식 (2)에서는 규격 1, 2에 대한 규격 3의 탄소함유량의 차이가 망간의 함유량 차이보다 커서 탄소의 영향이 큰 반면 식 (2)에 있어서는 규격 1, 2내에서 탄소보다 망간의 변동폭이 상대적으로 커 망간의 영향이 탄소의 영향보다 큰 것으로 해석된다. 따라서 탄소의 범위가 좁은 경우는 망간의 함유량에 따라 인장강도가 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

<표 6>에 의하면 식 (1), (2)에서 온도의 영향은 성분의 영향에 비해 상대적으로 작은 것으로 해석된다. 그리고 식 (1)과 식 (2)에서 권취온도의 영향도도 어느 정도 차이를 보이는데 이것은 기존연구결과를 통해 해석해 보면 식 (2)에는 탄소의 함유량이 높은 규격3이 포함되었기 때문인 것으로 해석된다.

수요자가 요구하는 제품의 규격 및 목표인장강도를 가지는 제품을 생산하는 방법은 성분 및 온도조절에 따라 여러 가지 방법이 가능하지만 현실적으로 각 규격에서 규정하는 성분범

위의 금속이론에 의한 온도범위 및 작업성을 고려할 때 그 선택의 폭이 한정되어 있다. 따라서 위의 회귀식에 의한 결과의 제품제조방법 및 조업조건 설정방법에의 적용성 검토해 볼 필요가 있다.

표준화된 모수추정값을 이용하여 제품의 인장강도에 미치는 온도의 영향은 성분의 영향보다 매우 작다는 것이 파악되었으나 공정 중의 온도의 변화에 의한 인장강도의 변화량은 정확히 알 수 없다.

그러나 이는 4장에서 추정된 회귀식 및 공정 중 목표온도를 가지고 추론이 가능하다. 즉, 온도에 의한 인장강도의 조절량은 온도변수 및 회귀계수에 의해 결정되지만 온도 변수 중 유도가열로 입측온도는 조업특성상 연속주조에 의해 결정되므로 권취온도를 이용하여 조절이 가능한데, 권취온도의 계수가 식 (1)의 경우 -0.10, 식 (2)의 경우 -0.32로서 권취온도 10℃ 변화에 의한 인장강도의 변화량은 식 (2)에 따르더라도 3.2kg/10mm에 불과하므로 온도를 이용하여 조절이 가능한 인장강도의 범위는 매우 좁다. 그리고 동일규격에서 권취온도의 변동폭이 100℃ 이상으로 커지면 제품의 기계적 성질 이외의 품질특성치인 표면품질에 영향을 미치게 된다. 제품조직의 균질성 확보를 위해서 최고온도를 일정 한계 이내로 관리하므로 실제 조업조건에서는 권취온도변화에 의한 인장강도의 변화량은 크게 기대할 수 없다.

위의 결과를 종합하면 온도는 균일한 결정립을 구성하도록 하는데 크게 기여하는 반면, 인장강도의 값은 성분에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 따라서 미니밀에서는 제품의 목표인장강도를 확보하기 위하여 권취온도를 조절하여 두께별 인장강도의 차이를 보상하는 것은 의미가 있으나, 동일수요자에게 공급되는 제품들 사이의 편차를 줄이기 위하여 성분을 분석한 후 그 결과를 On-Line으로 후공정에 전달하여 온도를 이용하여 인장강도의 편차를 조절하는 Feed Forward 방식의 제어는 효과가 없을 것으로 사료된다. 따라서 목표인장강도를 확보하고 제품들 사이의 편차를 줄이는 것은 제강공정에서 전담하고 열처리공정은 두께별 인장강도 차이보상, 작업성 및 표면, 형상, 치수 등의 기타 품질특성을 확보하는 방향으로 조업을 실

시하는 것이 유리할 것이다.

### 5.3 회귀식의 예측구간 이용

4장에서 추정된 식 (1), (2)를 적용하여 제품의 인장강도 예측값의 95% 신뢰구간을 구해 본 결과, 식 (1)의 경우  $22.8\text{kg}/10\text{mm}^2$ , 식 (2)의 경우  $22.2\text{kg}/10\text{mm}^2$ 로 나타났다. 이러한 신뢰구간의 범위가 규격범위를 벗어나는 경우를 불합격이라고 판정한 결과를 <표 7>에 정리하였다.

위의 결과를 이용하여 인장강도 예측값의 신뢰구간을 기준으로 제품의 합격여부를 판정하는 경우에도 수요자에게 제품을 보증하고 또한 실제 합격인 제품이 불량으로 판정되는 경우를 확인하기 위하여 시험실시험을 재시행하여 실측값으로 다시 판정을 한다. 이때 규격 2와 같이 조업이 안정되어 있는 경우는 예측값만을 이용한 무검사판정이 의미가 있으나, 규격 1과 같이 조업이 불안정한 경우에는 예측값을 사용하여 무검사 판정하는 것에 오류의 가능성이 크다. 또한 조업이 불안정한 경우에도 제강공정에서 120Ton의 Batch 단위로 성분이 조절되고 후공정에서는 약 20Ton 단위로 분할되어 열처리 이루어지며 또한 앞 절에서 설명한 바와 같이 권취온도변화에 따른 인장강도의 변화량은 권취온도  $50^\circ\text{C}$  변화에 최대  $2\text{kg}/\text{mm}$ 를 넘지 않으므로, 동일규격을 가지면서 동일 Batch에서 생산된 제품들은 대표적으로 1개 제품을 시험실에서 시험하여 그 결과와 예측값을 상호비교하여 기타 제품들을 판정하는 것이 바람직하다.

## 6. 결 론

미니밀 공정에서 제품의 인장강도에 미치는 공정변수의 영향을 파악하기 위하여 1996년 12월 광양제철소 미니밀 공정에서 생산된 제품에 대하여 규격 1, 2를 대상으로 한 회귀식 및 규격 1, 2, 3을 대상으로 한 회귀식을 추정하였다.

이들 회귀식을 근거로 하여 인장강도에 미치는 공정변수의 영향을 파악한 결과 성분의 영향이 매우 크고 온도의 영향은 작게 나타났다. 따라서 제품의 목표인장강도를 확보하기 위하여 권취온도조절로써 제품두께별 압연하중차이에 기인하는 인장강도의 차이를 보상하는 것은 의미가 있다고 사료된다. 그러나 동일수요자에게 공급되는 제품간의 편차를 줄이기 위하여 성분을 분석한 결과를 On-Line으로 후공정에 전달하여 온도를 조절하는 Feed Forward 방식은 큰 효과가 없을 것으로 판단된다. 따라서 목표인장강도를 확보하고 제품간 편차를 줄

이는 것은 제강공정에서 전달하고, 열처리공정은 두께별 인장강도 차이보상, 작업성 및 표면, 형상, 치수 등 기타 품질특성을 확보하는 방향으로 조업을 실시하는 것이 유리하다.

회귀식의 예측구간을 이용한 무검사보증은 미니밀 조업이 1997년 2월 현재 안정되어 있지 않으므로 적용이 어려우며, 전량무검사보증정책은 향후 조업의 안정상태를 고려하여 적용할 필요가 있다고 사료된다.

추정된 2개 회귀식의 예측정도를 새로운 데이터로 검증한 결과 예측값이 실측값보다 높은 결과를 보였는데 이는 분석 대상제품의 데이터 집합과 검정을 위한 데이터 집합간의 두께별 제품의 포함 비율에 차이가 큰 원인에 의한 것으로 사료된다.

본 연구에서 제안된 회귀식은 미니밀 조업의 안정화과정 및 제품확대과정 중에 생산된 제품을 대상으로 하였기 때문에 회귀추정시에 포함되지 않은 제품 집합에 대해서는 예측정도가 다소 떨어진다. 따라서 향후 규격 1, 2에 대한 제품두께 확대가 종료되면 회귀식의 예측정도를 향상시키기 위하여 회귀식을 조정할 필요가 있다.

본 연구에서는 미니밀 공정에서의 제품품질확보를 위하여 회귀식을 이용한 모델링을 제안하고 기존의 생산제품의 축적되어 있는 측정 데이터를 이용하여 얻은 회귀식을 통해 인장강도에 미치는 공정변수들의 영향을 상대분석하였다. 또한 회귀식을 이용한 제품무검사판정의 가능성을 검토하였다. 향후에는 제품의 기계적 성질에 미치는 공정변수의 영향을 포괄적으로 이해하기 위하여, 인장강도 이외의 제품품질 특성에 대한 공정변수의 영향에 대한 연구도 필요하며 제안된 회귀식에 대한 조정주기 및 그 방법에 대한 연구도 필요하다고 하겠다.

## 참고문헌

1. 고객사 초청 POSCO 미니밀 소개, POSCO, 1996.
2. 권오준 외, 탄소강의 재질 예측모델 적용연구, 산업과학기술연구소, 1989.
3. 권오준 외, 탄소강의 On-Line 재질예측기술개발, 산업과학기술연구소, 1991.
4. 권오준 외, 철강기술 IV, 강재부문, 산업과학기술연구소, 1992.
5. 김충련, SAS 라는 통계상자, 데이터리서치, 1996.
6. 박성현, 회귀분석, 민영사, 1995.
7. 이경중 외, On-Line 재질예측 시스템의 최적화 기술개발, 산업과학기술연구소, 1992.
8. 이재곤 외, 탄소강의 On-Line 재질제어기술개발, 산업과학기술연구소, 1995.
9. Draper, N. R. and Smith, H., *Applied Regression Analysis*, John Wiley & Sons, Inc., 1981.
10. SAS User's Guide, SAS Institute, 1979.



**이명학**

한양대학교 재료공학과에서 학사, 산업공학과에서 석사학위를 취득하였다.

현재: 포항제철주식회사 광양제철소 품질기술부

관심분야: 품질공학, 품질시스템 등



**하성도**

서울대학교 공과대학 기계공학과에서 학사, 한국과학기술원 기계공학과에서 석사, 미국 MIT 기계공학과에서 박사학위를 취득하였다.

현재: 한국과학기술원 CAD/CAM 연구센터 책임연구원

연구분야: Quality Engineering, 공정 모델링 및 최적화, Tolerance 설계 및 검사계획 등