

일관제조공정에서의 최적 조업조건의 도출

김윤호* · 최해운*

Determination of An Optimal Operation Condition in Continuous Manufacturing Process

Yoon-Ho Kim* · Hae-Woon Choi*

ABSTRACT

The most important factors for a product to survive in the market are cost and quality. In recent years, quality proceeds to cost. There are many techniques of use to improve the quality of a product. One of the techniques is applying statistical methods (especially Taguchi method) to real operational conditions for a continuous manufacturing process in P company. There are 91 factors to control in the process. So, we predetermined 7 main effect factors and 6 interactive effect factors by statistical methods and advices of engineers. With these 13 factors, we determined the optimal level of operations for the process.

1. 서 론

전기강판제품은 고부가가치를 창출하는 제품으로서 Low Carbon Steel, Fe-Si Alloy(Silicon Steel), Amorphous 및 Ferrite 등으로 분류된다. 특히 규소계 전기강판(Silicon Steel)은 방향성(GO)제품과 무방향성(NO)제품으로 나누어지며, 주로 변압기를 만드는데 쓰이는 GO재는 일반방향성(CGO)과 고급방향성(HGO)으로 분류된다[3].

최근 CGO 전기강판의 제품개발은 실수율 향상과 적정 Base Coating 조건 및 Coating성분 도출이며, HGO전기강판은 소강성분 적정기술 및

최적 압연·소둔기술 등의 제조기술 개발과 적정 성분계 및 소둔조건 도출등을 통한 제품의 박물화 방향으로 나아가고 있다. 따라서 전기강판 소재 제조이력을 이용하여 자성에 영향을 주는 주요항목을 선정하여 집중관리함으로써 최종제품의 품질향상을 꾀할 수 있는 방안이 마련되어야 할 필요가 있다[2].

전기강판제품의 품질은 여러가지가 있는데 그 중에서 가장 중요한 것은 철손품질(혹은 자성품질이라고도 함)이며, 철손이란 어떤 소재에 에너지를 흘렸을 때 잃어버리는 에너지의 양이다. 따라서 전기강판의 품질이 양호한 것은 철손이 낮은 것을 의미한다.

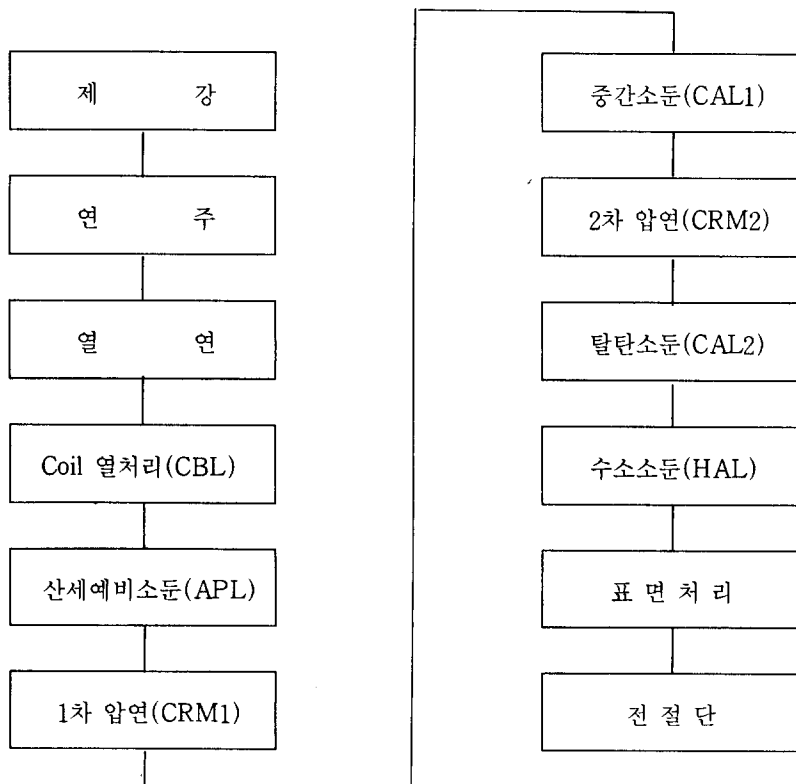
지난 10여년간 산업의 생산성과 품질을 개선시키기 위한 하나의 방법인 Taguchi Method는 미국에서 폭발적인 인기를 얻고 있으나, 칭찬과 비난이 엇갈리고 있다[6]. Taguchi는 “품질은 제품이 출하된 시점으로부터 성능특성치의 변동과 부작용 등으로 인하여 사회에 끼친 총손실이다”라고 정의하고 있다. 또한 품질공학을 Off-line QC와 On-line QC로 구분하였으며[7], Off-line QC의 중요성을 더 강조하고 있다[5].

본 고에서는 P회사에서 생산되고 있는 HGO전기장판의 실제 조업 자료를 이용하여 철손의 품질을 가장 좋게하는 최적 조업수준을 제시하는데 있다. 최적 조업수준을 제시하기 위한 방법으로 직교배열표를 주로 이용하는 Taguchi기법[8]을 적용하였다.

2. 조업현황

2.1 GO재 생산 Flow

방향성 전기장판 제품의 제조공정은 [그림 1]에서 보는 바와 같이 매우 복잡하고 긴 공정이기 때문에 공정관리에 많은 비용이 소요될 뿐만 아니라 품질에 영향을 미치는 야금인자 및 공정제어인자가 대단히 많고 상호복합적으로 작용하는 일면이 있기 때문에 품질제어가 쉽지가 않을 뿐더러 품질편차가 발생하여도 그 원인을 정확히 판단하기 어렵다. 따라서 철손품질에 영향을 많이 미치는 인자를 알아내어 최적 조업수준을 설정하고서 집중 관리함으로써 더 나은 품질의 제품을 확보할 수 있다.



[그림 1] GO재 생산 Flow

2.2 주요 영향인자의 추출

현재 표본회사에서 각 공정마다 관리하는 항목은 제강 및 연주에서 30개, 열연에서 18개, 전기강관 공정 (CBL부터 전절단까지를 말함)에서 43개 등 총 91개 항목을 DB로 관리하고 있다. 그러나 실제로 91개 항목 모두가 주어진 조업표준에서 철손품질에 영향을 미치지 않는 것이다.

91개 항목을 세 차례에 걸친 (자료가 다른 것에 대해서) 통계적인 분석 (회귀분석, 분산분석 등)과 전문가의 경험을 근거로 하여 주영향인자로서 C, Si, S, Mn, FT6, DG18500, HM33410과 교호영향인자로서 $Mn \times S$, $DG18500 \times S$, $DG18500 \times Mn$, $C \times Si$, $Mn \times HM33410$, $Mn \times FT6$ 등의 총 13개 인자를 선택하였다.

3. 최적 조업수준의 결정

3.1 실험설계

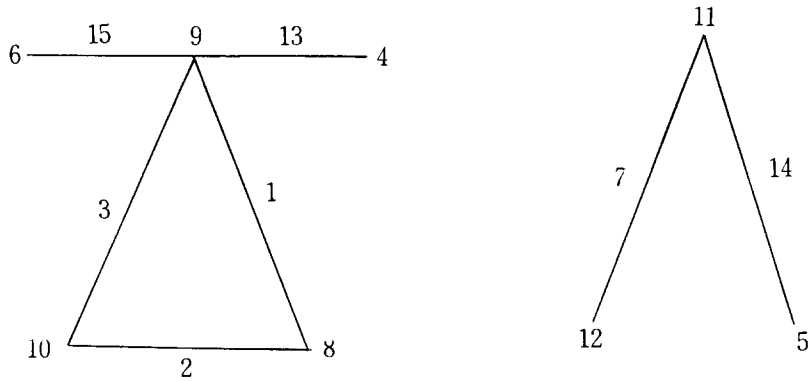
제품의 품질을 향상시키거나 불량률을 감소시키려는 실험에서 대체적으로 고려하여야 할 인자(因子)의 수는 매우 많다. 만일 인자의 수가 많으면 주효과(主效果)와 사전의 경험이나 지식으로 보아서 있을 것 같은 2인자 교호작용을 추출하고, 없으리라 생각되어지는 2인자 교호작용 및 고차

의 교호작용을 희생시켜서 실험횟수를 적게 할 수 있는 실험계획을 할 수 있도록 만들어 놓은 표가 직교배열표 (Table of Orthogonal Array)이다. 이러한 직교배열표의 유용성을 인정하여 실험배치에 적극 이용한 일은 비교적 최근의 일로서 전기공학자인 Taguchi의 업적이 크다[1].

일관 제철공정은 매우 복잡하고 똑같은 환경에서 실험하기란 불가능하여 만일 실험을 행할 수 있다고 하더라도 엄청난 비용 때문에 비경제적이다. 따라서 본 고에서는 현재의 조업표준과 실제의 작업결과치로 제품의 품질을 향상시킬 수 있는 방안을 모색하는 데 있다. 제품의 품질을 향상시킬 수 있는 방법은 여러가지가 있을 수 있으나 그 한 가지로 조업표준을 새로 설정하여 관리를 강화함으로써 달성할 수 있다. 왜냐하면 기존의 조업표준이란 설비의 신·증설시 들어오는 기술의 know-how로서 일반적인 것이며, 복잡한 공정을 거쳐서 제품이 제조되기 때문에 많은 환경이 바뀌어서 맞지가 않는 것이 많이 있기 때문이다.

2.2절에서 언급한 7개의 주인자와 6개의 교호인자로 실험을 할 수 있는 것은 $L_{16}(2^{15})$ 의 2수준계로서 해당되는 선점도는 [그림 2]와 같으며 column별로 해당하는 인자를 나열해 보면 다음과 같다[9].

- | | | |
|-----------------|---------------|----------------|
| 1 : Mn×S | 2 : S×DG18500 | 3 : Mn×DG18500 |
| 4 : HM33410 | 5 : 오차항 | 6 : FT6 |
| 7 : C×Si | 8 : S | 9 : Mn |
| 10 : DG18500 | 11 : C | 12 : Si |
| 13 : Mn×HM33410 | 14 : 오차항 | 15 : Mn×FT6 |



[그림 2] 선점도

3.2 실험의 수행

실험을 행하기 위하여 일정기간 ('92년 5월-9월)동안 시계열적으로 자료를 수집해 보니 639개의 관찰치가 있었으나 관리미흡으로 자료입력이 잘못된 것이나 실제로 일어날 수 없는 조업범위의 것은 제외하였다. 수준은 조업범위를 양분하여 적은 값을 가지는 부분을 수준 1, 큰 값을 가지는 부분을 수준 2로 두었다. 실제의 조업범위나 조업표준은 해당기업의 know-how이기 때문에 생략하였다. 실험계획에 의거하여 배치한 결과 각 row당 최소 4개의 반응변수 (철손)의 값이 존재하였다. 따라서 반복수를 4개로 결정하고 5개 이상의 철손값이 존재하는 row에서는 난수표를 이용하여 4개를 random하게 선택하였다. 이것을 요약 정리한 것이 다음의 <표 1>이다. 만일 어떤 row에 반응변수가 존재하지 않는다면 자료를 추가적으로 취하거나 실험계획을 수정하여야 할 것이다.

실제의 작업범위가 조업표준과 완전히 일치하는 인자는 C, Si, S, FT6의 4가지였으며, 나머지 3개 인자는 그렇지 않았다. 즉 Mn은 기존의 조업범위에서 상·하 4%정도 넓게 실제의 조업이 이루어졌으며, DG18500은 조업표준보다 80℃에서 120℃까지 낮게 실제의 조업이 나타났다. 그리고 HM33410은 조업표준보다 온도가 평균 35℃ 정도 높게 나타났다. 실제 실험 결과는 <표 1>에 나타나 있다.

방향성 전기강관의 품질척도치인 철손은 작으면 작을수록 좋은 것으로 망소특성이 되며 SN비는

$$SN_i = -10 \log(MSD_i) \text{이다.}$$

$$\text{여기서 } MSD_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 y_{ij}^2 \text{이다.}$$

$$\text{또, 평균철손값은 } \bar{y}_i = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 y_{ij} \text{가 된다.}$$

〈표 1〉 실험결과

열 행	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	철손실적치	\bar{y}_i	MSD _i	SN _i	수치변환 SN _i =SN _i +5
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.290 1.248 1.290 1.188	1.2540	1.5743	-1.9708	3.0292
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1.710 1.660 1.610 1.590	1.6425	2.7000	-4.3136	0.6864
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1.360 1.380 1.400 1.610	1.4375	2.0765	-3.1734	1.8266
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1.520 1.470 1.500 1.610	1.5250	2.3284	-3.6705	1.3295
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1.270 1.670 1.600 1.590	1.5325	2.3725	-3.7520	1.2480
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1.410 1.250 1.340 1.610	1.4025	1.9846	-2.9767	2.0233
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1.500 1.530 1.430 1.550	1.5025	2.2596	-3.5403	1.4597
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1.310 1.390 1.400 1.410	1.3775	1.8991	-2.7854	2.2146
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1.270 1.460 1.410 1.310	1.3625	1.8622	-2.7002	2.2998
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1.610 1.610 1.600 1.330	1.5375	2.3783	-3.7626	1.2374
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1.410 1.610 1.560 1.600	1.5450	2.3935	-3.7902	1.2098
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1.460 1.550 1.690 1.550	1.5625	2.4482	-3.8884	1.1116
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1.330 1.360 1.340 1.470	1.3750	1.8938	-2.7334	2.2268
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1.560 1.500 1.450 1.500	1.5025	2.2590	-3.5392	1.4608
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1.610 1.590 1.350 1.440	1.4975	2.2541	-3.5297	1.4703
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	1.490 1.480 1.410 1.450	1.4575	2.1253	-3.2741	1.7259

3.3 실험결과의 분석

3.3.1 분산분석

〈표 1〉을 이용하여 분산분석을 실시하여 보자. 여기서는 SN비를 데이터로 하여 변동을 계산하며 먼저 주요인에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

$$S_{HM33410} = \frac{1}{16} (12.348 - 14.212)^2 = 0.2172$$

$$S_{FT6} = \frac{1}{16} (12.436 - 14.123)^2 = 0.1779$$

$$S_S = \frac{1}{16} (11.789 - 14.770)^2 = 0.5554$$

$$S_{MN} = \frac{1}{16} (13.460 - 13.099)^2 = 0.0081$$

$$S_{DG18500} = \frac{1}{16} (10.770 - 15.790)^2 = 1.5750$$

$$S_C = \frac{1}{16} (11.420 - 15.140)^2 = 0.8649$$

$$S_{Si} = \frac{1}{16} (11.374 - 15.185)^2 = 0.9077$$

다음으로 교호작용에 대하여 변동을 계산하여 보자.

$$\text{Mn과 S의 교호작용의 변동은 } \frac{1}{16} \{(5.5356 + 7.2066) - (6.2538 + 7.5636)\}^2$$

	1	2
1	7.5636	5.5356
2	7.2066	6.2538

$$= \frac{1}{16} (12.7422 - 13.8174)^2$$

$$= 0.0723$$

$$\text{DG18500과 S의 교호작용의 변동은 } \frac{1}{16} \{(6.6048 + 7.2245) - (4.3649 + 8.3654)\}^2$$

	1	2
1	8.3654	6.6048
2	7.2245	4.3649

$$= \frac{1}{16} (13.8293 - 12.7303)^2$$

$$= 0.0755$$

$$\text{DG18500과 Mn의 교호작용의 변동은 } \frac{1}{16} \{(5.0567 + 7.7475) - (5.7130 + 8.0425)\}^2$$

	1	2
1	8.0425	5.0567
2	7.7475	5.7130

$$= \frac{1}{16} (12.8042 - 13.7555)^2$$

$$= 0.0566$$

C와 Si의 교호작용의 변동은 $\frac{1}{16} \{(6.5577+6.6031) - (4.8167+8.5822)\}^2$

	1	2
1	8.5822	6.5577
2	6.6031	4.8167

$$= \frac{1}{16} (13.1607 - 13.3989)^2$$

$$= 0.0035$$

HM33410과 Mn의 교호작용의 변동은 $\frac{1}{16} \{(7.2363+6.1238) - (6.2242+6.9754)\}^2$

	1	2
1	6.9754	6.1238
2	7.2363	6.2242

$$= \frac{1}{16} (13.3601 - 13.1996)^2$$

$$= 0.0016$$

FT6와 Mn의 교호작용의 변동은 $\frac{1}{16} \{(6.6711+5.6470) - (6.7894+7.4522)\}^2$

	1	2
1	7.4522	5.6470
2	6.6711	6.7894

$$= \frac{1}{16} (12.3181 - 14.2416)^2$$

$$= 0.2312$$

그리고 수정항 CT는

$$CT = \frac{1}{16} \left\{ \sum_{i=1}^{16} (SN_i+5) \right\}^2 = \frac{1}{16} (27.6697)^2 = 47.8508 \text{ 이고}$$

총변동 S_T 는

$$S_T = \sum_{i=1}^{16} (SN_i+5)^2 - CT = 52.9526 - 47.8508 = 5.1018 \text{ 이다.}$$

또한 오차항의 변동 S_e 는

$$S_e = 0.3548 \text{ 이다.}$$

위에서 나열한 사항을 종합하여 분산분석표를 만들면 <표 2>와 같다.

〈표 2〉 분산분석표

요인	S	0	V	F ₀ (pooling)
HM33410	0.2171	1	0.2171	3.0321
FT6	0.1779	1	0.1779	2.2846
S	0.5553	1	0.5553	7.7556*
(Mn)	0.0082	1	0.0082	—
DG18500	1.5752	1	1.5752	22.0000**
C	0.8649	1	0.8649	12.0796**
S _i	0.9077	1	0.9077	12.6773**
(Mn×S)	0.0723	1	0.0723	—
(DG18500×S)	0.0755	1	0.0755	—
(DG18500×Mn)	0.0566	1	0.0566	—
(C×S _i)	0.0035	1	0.0035	—
(HM33410×Mn)	0.0016	1	0.0016	—
FT6×Mn	0.2312	1	0.2312	2.4777
Error	0.3548	2	0.1774	
(Error)	(0.5725)	(8)	(0.0716)	
Total	5.1018	15		

()는 pooling 시킨 것

〈표 2〉에서 ()는 변동의 값이 작아서 pooling시킨 인자이며 *는 유의수준 5%에서, **는 1%에서 유의한 것이다. DG18500, C, S_i는 매우 유의하며 S는 유의수준 5%에서 유의하며 나머지 인자들, 즉 HM33410, FT6, FT6×Mn도 상당히 영향이 있는 편이다.

3.3.2 모평균의 추정

DG18500, C, S, S_i가 통계적으로 유의하며 나머지 3개인자도 어느 정도 유의함을 알 수 있다. 그리하여 7개의 인자에 대하여 모평균을 추정하고자 한다.

먼저 교호작용 FT6×Mn에 대하여 최적 조합을 알아보자.

$$\overline{\text{FT6(1)Mn(1)}} = (3.0292+1.4597+1.2374+1.7259) / 4 = 1.8631$$

$$\overline{\text{FT6(1)Mn(2)}} = (0.6864+2.2146+2.2998+1.4703) / 4 = 1.6678$$

$$\overline{\text{FT6(2)Mn(1)}} = (1.8266+1.2480+1.1116+1.4608) / 4 = 1.4117$$

$$\overline{\text{FT6(2)Mn(2)}} = (1.3295+2.0233+1.2098+2.2268) / 4 = 1.6973$$

위의 교호작용에서 최적 조건은 Mn, FT6 모두 1수준이다. 다음으로 주요인인자의 SN비의 평균값을 보면 아래와 같다.

$\overline{DG18500(1)} = 15.790 / 8 = 1.9738$	$\overline{DG18500(2)} = 10.770 / 8 = 1.3462$
$\overline{HM33410(1)} = 14.212 / 8 = 1.7765$	$\overline{HM33410(2)} = 12.3480 / 8 = 1.5435$
$\overline{C(1)} = 15.1400 / 8 = 1.8925$	$\overline{C(2)} = 11.420 / 8 = 1.4275$
$\overline{Si(1)} = 15.1856 / 8 = 1.8982$	$\overline{Si(2)} = 11.3744 / 8 = 1.4218$
$\overline{S(1)} = 14.7704 / 8 = 1.8463$	$\overline{S(2)} = 11.7896 / 8 = 1.4737$

주요인인자의 결과에서도 모두 1수준에서 최적 조건이 된다. 이때 SN비의 점추정값은

$$\begin{aligned} \hat{\mu} &= \overline{FT6(1)Mn(1)} + \overline{DG18500(1)} + \overline{HM33410(1)} + \overline{C(1)} + \overline{S(1)} + \overline{Si(1)} - 5 \bar{T} \\ &= 1.8631 + 1.9738 + 1.7765 + 1.8925 + 1.8463 + 1.8982 - 5(27.6697 / 16) \\ &= 2.6036 \end{aligned}$$

으로 현 조업표준에서의 SN비보다 2.6036-(1.7293) = 0.8743 데시벨(db)만큼 증가된 값이다. 현 조업표준에서의 SN비는 실제의 조업결과를 2등분하여 2수준으로 나누었기 때문에 전체 실험 결과치 16개의 SN비 평균을 사용하였다.

현 조업표준에서의 MSD를 (MSD)_c, 최적수준 조합에서의 MSD를 (MSD)_o로 쓴다면 SN비의 증가가 0.8743이었으므로

$$\begin{aligned} 0.8743 &= -10\log(\text{MSD})_o + 10\log(\text{MSD})_c \\ &= 10\log \left\{ \frac{(\text{MSD})_c}{(\text{MSD})_o} \right\} \end{aligned}$$

이다. 따라서

$$\frac{(\text{MSD})_c}{(\text{MSD})_o} = 10^{0.08743} = 1.2230$$

로 현 조업표준에 비하여 최적 수준조합에서 만든 제품은 MSD가 1.2230배 감소한다. 따라서 손

실함수가 $L_s = k \cdot \text{MSD}$, 이므로 손실금액도 1.2230배 감소하게 된다.

본 논문에서의 실험계획에서 사용된 총 64 (16×4)개의 표본에 대한 철손 평균치는 1.4682로서 실제의 현장에서 구해지는 평균값보다 높게 나타났다. 이것은 random sampling하는 과정에서 발생하는 차이라고 보면 된다. 최적 수준조합에서의 평균 철손값은 1.2540인데 이것도 위에서 언급한 것과 같은 맥락으로 보면 현재의 조업관리를 최적 수준조합의 조업상태로 되도록 집중관리함으로써 기대되는 이익은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{기대 이익금액} &= \{G9 (\text{최적 조업수준에서의 철손값의 등급})\text{판매가} - G10 (\text{현 조업수준에서의 철손값의 등급})\text{판매가}\} \times \text{연간 판매량} \\ &= (1,007 - 962) \text{천원} / \text{톤} \\ &\quad \times 11.6 \text{천톤} \\ &= 522 \text{백만원} \end{aligned}$$

즉 평균적으로 연간 5억 2천 2백만원의 추가적 인 이익이 발생된다. 여기서 G9과 G10은 방향성 전기강판의 두께 0.30mm의 재질로서 G9은 평균 철손 값이 1.23이며, G10은 1.29이다. 이 기준을 선택한 것은 표본회사의 방향성 전기강판의 제품 생산량이 3가지의 두께 (0.27, 0.30, 0.35mm) 중에서 0.30mm가 가장 많으며 그 중에서도 G9 및 G10이 대부분을 차지하고 있기 때문이다.

4. 결 론

우리는 생산되는 제품의 품질을 향상시키기 위하여 여러가지 기법을 사용하게 된다. 그 중에서 기존의 조업실적을 활용하여 통계적 분석에 의해서 나온 결과를 이용할 경우 많은 효과를 얻을 수 있다. 그 이유는 연구 결과를 활용하여 조업표준을 설정하나 이것은 어디까지나 많은 가정에서 출발하였기 때문에 실제의 조업과 맞지 않는 경우가 허다하다. 또한 조업환경이란 작업자가 원하는 대로 되지 않기 때문에 최적의 조업조건은 다를 수 있으며, 그리고 최종 제품의 품질에 영향을 미치는 조업항목도 다르게 나타날 수 있다. 따라서 품질을 향상시키기 위하여 현 조업수준 하에서 품질에 영향을 미치는 인자들을 도출하여 집중관리함으로써 소기의 목적을 거둘 수 있다.

방향성 전기강판 제품을 생산할 때 관리되는 조업항목은 91개이나, 통계적인 분석과 전문가의 경험을 바탕으로 7개의 주인자와 6개의 교호인자 등 총 13개 인자를 Taguchi 실험계획에 의하여 최적 수준을 검토한 결과 모두 인자들의 1수준에서 나타났다. 이 때 손실금액은 현 조업보다 1.2230배 감소하였으며, 추가로 얻어지는 기대이익은 연간 5억 2천만원에 달하였다. 이처럼 현재의 조업표준은 새로이 잘 설정함으로써 제품의 품질 향상을 꾀할 수 있다고 본다.

참 고 문 헌

1. 박성현, 다구찌 방법을 중심으로한 응용실험계획법, 영지문화사, 1990
2. 산업과학기술연구소, 통계적 기법을 이용한 방향성 전기강판의 품질적중을 향상 방안에 관한 연구, 1991
3. 산업과학기술연구소, 전기강판 제조조건의 통계적 관리기법 개발(I), 1989
4. 염봉진, 고선우, 김성준, 제품 및 공정설계를 위한 다구찌 방법, 경영과학 제 7권 제 2호, 1990
5. Benton, W. C., Statistical Process Control and the Taguchi Method : A Comparative Evaluation, Int. J. Prod. Res, Vol.29, No. 29, 1991. pp1761-1770
6. Gunter, B., A Perspective on the Taguchi Methods, Quality Progress, June 1987, pp44-52
7. Ross, P. J., The Role of Taguchi Methods and Design of Experiment in QFD, Quality Progress, June 1988, pp41-47
8. Ryan, T. P., Taguchi's Approach to Experimental Design : Some Concerns Journal of Quality Technology, Vol.17, No.4, 1985, pp34-36
9. Taguchi, G., System of Experimental Design, UNIPUB, 1987