

화학반응 공정에서의 공정조건 및 허용차설계

안종석*, 윤원영**

* 금호석유화학(주) 품질보증팀, ** 부산대학교 산업공학과(기계기술연구소)

Parameter and Tolerance Designs of the Chemical Reaction Process

Jong Seok Ahn*, Won Young Yun**

* Kumho Petrochemical Co., Ltd, ** Dept. of Industrial Engineering(RIMT), Pusan National University

Keywords: Taguchi method, Chemical reaction process, Parameter and tolerance designs, Missing values.

Abstract

We apply Taguchi method to the process optimization problem of chemical reaction process, and some case studies are done to find out the way for cost reduction and quality improvement. The parameter and tolerance designs of Taguchi method are done with operation data of a chemical process and we propose a procedure how to use and analyze the operation data to find the optimal process conditions and tolerance limits. In order to use the continuous values in experiment conditions, it is suggested how to determine the interval of each level by discrete values and to treat any missing values caused from discrete 4 levels.

1. 서론

제품 또는 서비스의 품질특성이 산포(변동) 한다는 것이 품질관리의 기본 문제이다. 품질특성의 산포를 최소화시키기 위해서는 고유기술의 연구나 최적 공정조건을 찾기 위한 파라미터(공정조건) 설계와 허용차 설계 실험 등과 같은 제품설계와 공정 설계에서 품질관리 활동이 필요하다. 이러한 공정설계나 제품설계 과정에서의 품질관리 활동이 품질향상이나 비용 절감면에서 훨씬 효과적임

을 특히 강조하는 다구찌(Taguchi)의 파라미터 설계 및 허용차 설계 개념이 현장에서 널리 활용되고 있다고 할 수 있다.

일반적으로 이와 같은 파라미터 설계 및 허용차 설계가 화학공정에서 실시될 때에는 실험의 회수를 줄여야할 필요성이 있다. 화학공정에서는 1회 실험을 하는데 있어서 시간과 비용이 많이 소요되기 때문에, 경제적인 측면과 효과를 고려하여 가급적 실험회수를 줄여야 한다. 또한, 실험결과에 대한 과학적인 분석 없이 잘못된 결과가 현장 실험(Plant

Test)에 적용될 경우, 화학공정과 같은 경우에는 1회 생산량이 많기 때문에 대량의 손해를 볼 위험이 있다. 그러므로 실험의 회수를 줄여야하고 실험결과의 정확한 분석이 요구된다.

이러한 실험회수의 제약조건 때문에 화학 공정 역시 공학적인 고유기술 뿐만 아니라 반응표면 실험계획법, EVOP(Evolutionary Operation: 진화적 조업법)법 및 다구찌 품질공학 등과 같은 분석기술이 유용하게 적용될 수 있음에도 불구하고, 공학적인 고유기술에만 의존한 분석이 주를 이루며, 허용차 또한 기술을 도입할 때 받은 시방서에 규정된 허용차를 별도 검토 없이 그대로 계속 사용하여 오고 있는 경우가 많은 것이 현실이다.

따라서 본 연구는 화학공정과 같이 실험보다 조업자료를 이용하는 상황에서 다구찌 품질공학의 파라미터 설계와 허용차 설계를 적용하고자 하는 경우의 문제점을 지적하고, 그 절차에 따라 조업중인 데이터를 이용하는 방법을 보이려고 한다. 조업중인 데이터는 연속값이므로 이 연속값을 실험에 이용하기 위해 이산값의 구간으로 나누는 문제와 이 과정에서 발생할 수 있는 결측치를 처리하는 방법에 대한 연구로서 정특성인 망목특성치의 경우에 다구찌 방법을 응용한, 화학반응 공정에서의 공정조건 및 허용차를 설계하는 과정을 사례연구를 통해 이를 예시하고자 한다.

2. 화학공정에서 적합한 다구찌 기법의 응용 모형

2.1 화학공정에서 다구찌 기법 적용의 문제점

다구찌의 파라미터 설계와 허용차 설계방법을 장치산업인 화학공정에 적용하려면, 실험회수를 늘리는 것은 대단히 어렵다. 화학제품의 특성상 1회 실험에 있어서 시간과 비용이 많이 소요된다. 예를 들면 특정한 경우는 2~3회의 실험으로 결론을 내리기도 한다. 현장에서는 실험을 하지 않고도 유사한 효과를 얻을 수 있는 방법으로는 선형계획모형인 제품배합비 문제, 모의 실험 등이 적용될 가능성이 있겠으나 본 연구에서는 다구찌 기법을 응용하여 조업데이터를 분석하는 사례연구를 하고자 한다.

기존의 다구찌 기법에서는 직교배열표를 사용하여 실험을 하게 되는데, 이때 사용되는 직교배열표는 2수준계와 3수준계가 많이 사용되고, 가끔 혼합형이 사용되기도 한다. 실험회수가 가장 작은 $L_4(2^3)$ 직교배열표를 사용하는 경우에도 반복 2회로 한다면 최소한 8회의 실험이 필요하고, 인자수가 늘어날 경우 실험회수는 기하급수적으로 증가하게 된다. 이와 같이 실험회수가 늘어나게 되면, 화학공정과 같은 경우는 적용하기가 어렵게 된다. 또한 인자의 수준에 있어서 4수준 이상의 실험에서는 직교배열표의 사용이 복잡해지는 문제점도 있다.

2.2 다구찌 기법을 응용한 새로운 방안

위와 같은 실험 회수의 제약조건을 감안하여 실험을 하지 않고도 실험을 한 것과 같은 효과를 얻을 수 있는 방안으로 조업중인 데이터를 그대로 이용하는 방법을 제시하고자 한다. 조업중인 데이터는 연속값이며, 이 연속값을 이산값의 구간으로 나누어서 인자의 수준으로 선정하고, 조업중인 데이터를 이용

하는 과정에서 결측치가 발생할 가능성이 있으며, 이 때 결측치를 처리하는 방법과 각 수준간 구간의 폭을 적절하게 나눌 수 있다면, 실험을 하지 않고도 실험을 한 것과 같은 효과를 얻을 수 있을 것이다.

이와 같이 조업중인 데이터를 이용할 경우에는 수준의 구간을 어떻게 적절히 나누느냐와 결측치가 발생할 경우에 처리하는 문제가 관건일 것이다. 조업중인 데이터를 이용할 경우에는 4수준 이상의 실험에서도 적용이 가능하므로, 기존의 직교배열표에 의한 실험은 3수준 이상에서는 실험이 복잡해지는 문제점을 극복할 수 있고, 실험시간 또한 대폭 줄일 수 있기 때문에 다구짜 실험계획법을 응용한 방법을 보이고자 한다.

1) 각 수준간 구간의 폭 결정

수준간 구간 폭의 범위를 어디까지로 할 것인가는 실험결과와 재현성과 관련이 있을 것이다. 최적조건을 찾은 후 재현성 실험에서 특성치가 신뢰구간에 포함되지 않는 다면 애써 실험한 결과가 의미 없게 되기 때문이다. 그러므로 구간의 폭을 다음과 같이 결정하고자 한다.

$$\text{구간의 폭} = \frac{(\text{최대치}) - (\text{최소치})}{\text{구간의 수}}$$

$$\text{하한 경계치} = \text{최소치} - \frac{\text{측정단위}}{2}$$

위와 같은 방법으로 사례연구에서 사용될 인자의 구간 폭을 4수준일 경우를 결정하여 보자.

(1) 4수준일 경우

a. 인자 A(반응온도)

수집한 데이터의 최대치: 70.5℃, 최소치:

59.5℃

$$\text{구간의 폭} = \frac{70.5 - 59.5}{4} = 2.8$$

$$\approx 3$$

$$\text{하한 경계치} = 59.5 - \frac{0.5}{2} = 59.25$$

각 수준 구간의 폭

1수준: 59.25 ~ 62.25 중앙치 60.75

2수준: 62.25 ~ 65.25 중앙치 63.75

3수준: 65.25 ~ 68.25 중앙치 66.75

4수준: 68.25 ~ 71.25 중앙치 69.75

b. 인자 B(유화제 투입레벨)

수집한 데이터의 최대치: 100, 최소치: 85

$$\text{구간의 폭} = \frac{100 - 85}{4} = 3.8$$

$$\approx 4$$

$$\text{하한 경계치} = 85 - \frac{1}{2} = 84.5$$

각 수준 구간의 폭

1수준: 84.5 ~ 88.5 이 구간에 속하는 데이터 85

2수준: 88.5 ~ 92.5 이 구간에 속하는 데이터 90

3수준: 92.5 ~ 96.5 이 구간에 속하는 데이터 95

4수준: 96.5 ~ 100.5 이 구간에 속하는 데이터 100

따라서 수준은 85, 90, 95, 100을 선택한다.

2) 결측치 처리

직접 실험을 하지 않고 조업중인 데이터를 취하다 보면, 각 구간에 속하는 데이터를 얻을 수 없는 경우가 발생하게 될 것이다. 이

<표 1> 결측치가 있는 데이터의 배열

수 준	A_1	A_2	...	A_l	계
B_1	(y)	x_{21}	...	x_{l1}	$T'_{.1}$
B_2	x_{12}	x_{22}	...	x_{l2}	$T'_{.2}$
.
.
B_m	x_{1m}	x_{2m}	...	x_{lm}	$T'_{.m}$
계	$T'_{.1}$	$T'_{.2}$...	$T'_{.l}$	T'

럴 경우 데이터를 추정하여 추정된 값을 사용하여야 하는데, 본 연구에서는 반복이 없는 이원배치법인 경우에 있어서 자연로그를 취한 후 Yates의 방법으로 결측치를 추정한다음, 다시 역로그를 취하여 결측치를 추정하는 방법을 보이고자 한다.

(1) 자연로그($\ln x$)를 취한 후, 역로그를 취하는 방법

<표 1>과 같은 데이터의 배열 $x_{11}(y)$ 에서 결측치가 발생하였다면, 다음과 같이 추정한다.

① 결측치가 발생한 x_{11} 값을 제외한 모든 x_{ij} 값($x_{21} \cdots x_{lm}$)에 자연로그를 취한 값을 구한다.

② 자연로그를 취한 값에 Yates의 방법으로 결측치를 추정한다.

③ Yates의 방법으로 추정된 결측치에 다시 역로그($e^{(\text{추정값})}$)를 취한다.

(2) Yates의 방법

반복이 없는 이원배치법인 경우에 결측치를 추정하는 방법은 Yates에 의하여 제안되었는데 그 원리를 살펴보자. x_{11} 을 결측치라고 하고 이를 y 로 표시하면 <표 1>과 같은 배열표를 얻는다. 만약 $A_i B_j$ 에서 결측치가 있다면,

$$y = \frac{lT'_{i.} + mT'_{.j} - T'}{(l-1)(m-1)} \text{을 사용하여 추정한다. [13]} \quad (1)$$

(1),(2)의 방법을 응용하여 <표 2>와 같이 본 사례연구에서처럼 결측치가 발생하였을 경우 다음과 같이 추정하여 보자.

(3) $A_1 B_2$ 에서 반복 4회(x_{124}), 5회(x_{125})에서의 결측치

$A_1 B_2$ 행의 1회, 2회, 3회 데이터 값의 평균으로 4회 값을 추정하고, 1회, 2회, 3회, 4

<표 2> 사례연구 데이터 수집에서 발생한 결측치

No.	수준조합	반 복				
		1회	2회	3회	4회	5회
1	A_1B_1					
2	A_1B_2				x_{124}	x_{125}
3	A_1B_3					
·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·
14	A_4B_2					
15	A_4B_3	x_{431}	x_{432}	x_{433}	x_{434}	x_{435}
16	A_4B_4					

회 값의 평균으로 5회 값을 추정한다.

3. 사례연구

(4) A_4B_3 에서 반복 1회, 2회, 3회, 4회, 5회 모두 결측치

a. 결측치가 발생한 $x_{431}, x_{432} \dots x_{435}$ 를 제외한 모든 수준조합의 데이터에 자연로그를 취한다.

b. 반복1회(x_{431}) 추정: 자연로그를 취한 1열(반복 1회)의 데이터를 <표 1>과 같이 반복이 없는 이원배치를 한 후 식 (1)을 이용하여 결측치 x_{431} (15행1열)을 추정한다.

c. b의 방법으로 추정된 1열(반복 1회)의 결측치 x_{431} 를 다시 역로그를 취하여, 최종적으로 x_{431} 의 결측치를 추정한다.

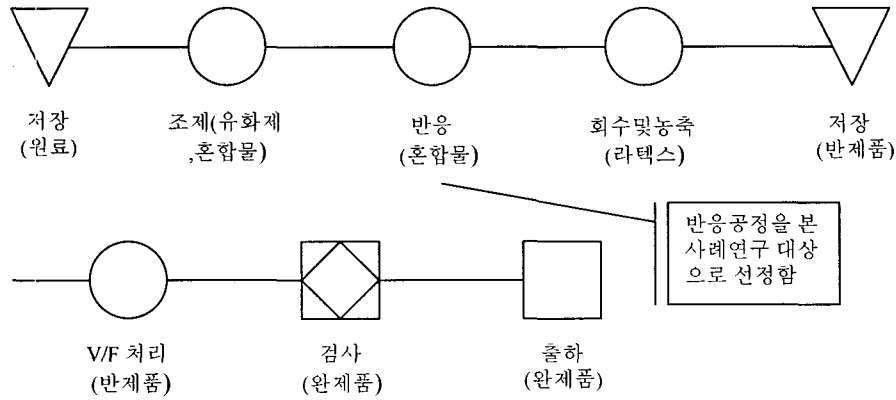
d. b와 c의 방법으로 반복 2회(x_{432}), 3회, 4회, 5회를 각각 추정한다.

K사에서 최근에 페이퍼 코팅(paper coating)용으로 쓰이는 신제품을 개발하여 판매하고 있다. 품질특성 중 입자경(particle size)이 가장 중요하며 입자경이 균일하지 못하면 다음과 같은 문제가 발생된다.

- ① 사용자의 paper coating시 문제가 된다.
- ② 코아그럼(coagulum)이 증가하므로 폐기처리 비용이 증가된다.
- ③ 규격에 벗어나는 제품은 재 가공하여 규격품으로 만들어야 하므로 재가공비용이 증가된다.

입자경에 대한 공정변수를 기존에 설정된 파라미터(공정조건)로 생산하고 있지만, 품질 특성치인 입자경이 목표치에 대한 산포가 크고 규격을 벗어나는 경우도 있다.

현재 최적공정조건을 찾기 위해 경험적으로 운전하면서 시행착오적인 방법으로 최적 공정조건을 찾아가고 있지만, 아직 만족할



<그림 1> 연구대상 공정 흐름도 : batch 생산

정도는 아니다.

따라서 이와 같은 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 품질특성 중 가장 중요한 입자경을 고객이 요구하는 제품규격 1200 ~ 1600 Å의 목표치인 1400 Å에 가장 근접할 수 있도록 공정변수인 반응온도와 유화제 투입 레벨을 찾기 위해 다구찌의 품질공학을 응용하여 다음의 목적을 달성하고자 한다.

① 입자경의 산포를 최소로 억제하는 공정 변수의 최적 수준과 평균을 목표치(m)에 맞추기 위한 수준을 찾는 파라미터 설계를 하여 품질을 향상시킨다.

② 파라미터 설계 후, 코아그럼 발생량으로 인한 폐기품처리 비용과 재작업 비용의 손실함수를 고려한 경제적 허용차 설계를 하여 원가절감으로 경영이익에 기여하고자 한다.

③ 다구찌 품질공학을 화학공정에 적용할 수 있는 모델을 개발하여 타품종, 타공정도 확산 적용하고자 한다.

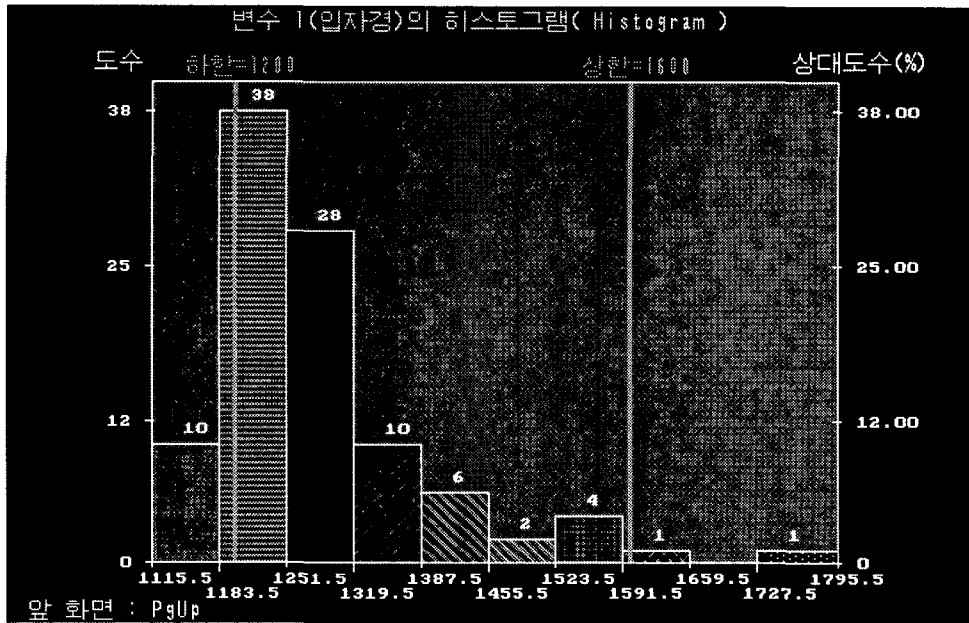
3.1 연구대상

신제품 생산공정 중, 반응공정에서 완제품 품질특성(망목특성)인 입자경에 가장 영향을 많이 주는 반응온도와 유화제 투입 레벨의 최적 공정운전 조건을 찾는다.

용어설명

- 1) 반응 온도: 화학 반응공정에서 반응시에 특성값에 영향을 주는 온도
- 2) 유화제(Emulsifier) 투입 레벨(level): 유화제 혼합물의 표준량을 100이라고 할 때, 예를 들어 85%이면 표준량 보다 적은 85%만 투입함을 의미
- 3) 라텍스(Latex): 액상고무
- 4) 입자경(particle size): 입자경은 라텍스의 유동성(rheology), 접착력 및 광택도 등에 영향을 미치며 제지용 라텍스는 입자경이 1200 ~ 1600 Å일 때 가장 안정함
- 5) 코아그럼(coagulum): 고형 성분의 알갱이로 폐기처리 하여야 함
- 6) 유동성(rheology): 복잡한 화학물질(기름, 점토, 유리 등)을 대상으로 한 유동성을 말하며 라텍스는 입자경이 1200 ~ 1600 Å일 때와 같은 입자모임으로 형성될 때 유동

(데이터 수 100개: 생산기간 2000. 9.1. ~ 10.2)



<그림 2> 입자경의 히스토그램

성이 좋다.

3.2 연구방법

실험 데이터 값은 직접실험을 하지 않고 조업중인 데이터를 이용하였다. 이 때 발생할 수 있는 결측치와 수준 구간 폭에 대해서는 2절에서 제시된 방법으로 처리하였으며, 다구짜 실험계획에서 본 연구에서는 4수준에서의 다구짜 실험계획법을 응용 하고자 한다.

3.3 파라미터 설계

신제품 생산공정에서 입자경에 대한 데이터 100개를 히스토그램<그림 2>를 그려서

조사하여 보았더니 대략 $N(1284.2, (114.8)^2)$ 분포를 따르고 있다.

히스토그램의 모양은 절벽형이고 목표값에서 규격하한으로 치우침이 있으며, 규격하한으로 벗어난 도수가 11개, 상한으로 벗어난 도수가 1개이다. 제품이 규격을 벗어날 확률은 하한규격 23.3%, 상한규격 0.3%, 전체는 23.6%이다. 공정능력 지수 $Cp=0.582$ 로 $Cp < 0.7$ 보다 작으므로 D급에 해당되며, 현재 공정이 매우 불안정한 상태이다. 따라서 공정조건 재설정과 같은 개선이 필요하다.

품질 특성치 입자경에 가장 영향을 많이 주는 인자를 반응온도와 유화제 투입 레벨을 선정한다.

<표 3> 4수준의 인자배치

구 분	인자 A			구 분	인자 B
	구 간	중앙치	범위		
1 수준	59.25~62.25	60.75	±1.5	1 수준	85
2 수준	62.25~65.25	63.75	±1.5	2 수준	90
3 수준	65.25~68.25	66.75	±1.5	3 수준	95
4 수준	68.25~71.25	69.75	±1.5	4 수준	100

<표 4> 4수준에서 수집 데이터 sheet

No.	수준조합	반 복				
		1회	2회	3회	4회	5회
1	A_1B_1	1530	1590	1450	1430	1550
2	A_1B_2	1480	1510	1370	결측치	결측치
3	A_1B_3	1490	1520	1360	1380	1440
4	A_1B_4	1340	1450	1360	1430	1270
5	A_2B_1	1440	1430	1380	1430	1420
6	A_2B_2	1420	1410	1390	1420	1410
7	A_2B_3	1360	1350	1410	1360	1420
8	A_2B_4	1370	1450	1440	1380	1460
9	A_3B_1	1420	1360	1380	1340	1360
10	A_3B_2	1460	1480	1410	1440	1460
11	A_3B_3	1370	1420	1380	1320	1260
12	A_3B_4	1290	1310	1350	1240	1210
13	A_4B_1	1230	1280	1290	1240	1210
14	A_4B_2	1360	1370	1410	1390	1370
15	A_4B_3	결측치	결측치	결측치	결측치	결측치
16	A_4B_4	1290	1240	1210	1220	1240

각 인자에 대한 4수준, 반복 5회 실험을 한다. 그리고

2인자: A(반응온도), B(유화제 투입레벨)

수준: 인자 A 4수준(A₁, A₂, A₃, A₄), 인자 B 4수준(B₁, B₂, B₃, B₄),

2) 인자 배치 및 실험 데이터 수집(수집기간: 2000. 6월 ~ 2001. 1월)

(1) 인자배치

(2) 데이터 수집

(3) 데이터 수집결과

a. 4수준: A₁B₂ 수준조합에서 반복 4회, 5회에서 결측치 발생, A₄B₃ 수준조합에서는 모두 결측치가 발생하였다.

3.3.4 결측치 처리

1) 4수준의 경우에 <표 4>에서 수집한 모든 데이터의 값에 자연로그(lnx)를 취한다.

그 결과는 <표 5>과 같다.

2) 자연로그 취한 <표 5>을 2절에서 제시한 방법과 식 (1)을 이용하여 Yates방법으로 추정하면, 4수준의 경우 A₁B₂에서 반복 4회 7.2807, 5회 7.2807과 A₄B₃에서 반복 1회 7.1574, 2회 7.1576, 3회 7.1645, 4회 7.1256, 5회 7.1301이다.

3) Yates 방법으로 추정된 값에서 다시 역로그를 취하면 다음과 같다.

① A₁B₂ 에서 반복 4회: $e^{(7.2807)} = 1452$,

반복 5회 $e^{(7.2807)} = 1452$

② A₄B₃ 에서 반복 1회: $e^{(7.1574)} = 1284$, 같은 방법으로 2,3,4,5회를 각각 추정하면 1284, 1293,1243,1249의 최종적인 추정값을 얻을 수 있다.

4수준에서 결측치를 추정된 후 실험을 위한 최종적으로 완성된 데이터는 <표 6>과 같다.

SN비 계산

4수준에서 망목특성에 대한 SN비와 민감도 S_m을 다음식에 의하여 구하여 보자.

$$SN_i = 10 \log \frac{(\bar{y}_i)^2}{V_i} \text{에 의해 계산하면}$$

$$SN_1 = 10 \log \frac{(1,510)^2}{4,600} = 26.95$$

이와 같은 방법으로 SN₁₆ 까지 계산한 결과 <표 6>과 같다.

민감도 $S_{m(i)} = 10 \log \left(\frac{T_i^2}{N_i} \right)$ 에 의해 계산하면

$$S_{m(1)} = 10 \log \left(\frac{7,550^2}{5} \right) = 70.57$$

이와 같은 방법으로 S_{m16} 까지 계산한 결과 <표 6>과 같다.

3.3.6 4수준의 분산분석

1) 산포에 영향을 주는 인자 분석

(1) SN비에 의한 변동계산

$$① CT = \frac{T^2}{N} = \frac{(505.24)^2}{16} = 15,954.22$$

$$② S_T = \sum y_i^2 - CT = 26.95^2 + 28.89^2 +$$

<표 5> 모든 데이터 값에 자연로그 취한 값

No.	수준조합	반 복				
		1회	2회	3회	4회	5회
1	A_1B_1	7.3330	7.3715	7.2793	7.2654	7.3460
2	A_1B_2	7.2998	7.3199	7.2226	결측치	결측치
3	A_1B_3	7.3065	7.3265	7.2152	7.2298	7.2724
4	A_1B_4	7.2004	7.2793	7.2152	7.2654	7.1468
5	A_2B_1	7.2724	7.2654	7.2298	7.2654	7.2584
6	A_2B_2	7.2584	7.2513	7.2371	7.2584	7.2513
7	A_2B_3	7.2152	7.2079	7.2513	7.2152	7.2584
8	A_2B_4	7.2226	7.2793	7.2724	7.2298	7.2862
9	A_3B_1	7.2584	7.2152	7.2298	7.2004	7.2152
10	A_3B_2	7.2862	7.2998	7.2513	7.2724	7.2862
11	A_3B_3	7.2226	7.2584	7.2298	7.1854	7.1389
12	A_3B_4	7.1624	7.1778	7.2079	7.1229	7.0984
13	A_4B_1	7.1148	7.1546	7.1624	7.1229	7.0984
14	A_4B_2	7.2152	7.2226	7.2513	7.2371	7.2226
15	A_4B_3	결측치	결측치	결측치	결측치	결측치
16	A_4B_4	7.1624	7.1229	7.0984	7.1066	7.1229

$$26.42^2 + \dots + 32.09^2 - CT = 298.42$$

$$= 95.33$$

$$\textcircled{3} S_A = \frac{1}{n} \sum T_{Ai}^2 - CT = \frac{1}{4} (107.79^2 + 140.07^2 + 121.93^2 + 135.45^2) - CT = 158.81$$

$$\textcircled{5} S_E = S_T - S_A - S_B = 44.28$$

(2) 의미 있는 인자에 대한 순변동 (S') 및 기여율 (ρ) 계산

$$\textcircled{4} S_B = \frac{1}{4} (127.03^2 + 141.67^2 + 121.07^2 + 115.47^2) - CT$$

a. 순변동 계산

① S'_A = 해당인자의 변동 - (해당인자의

<표 6> 4수준에서의 SN비 및 S_m 비 데이터

No.	수준 조합	반 복					T_i	\bar{y}_i	V_i	S_m	SN
		1회	2회	3회	4회	5회					
1	A_1B_1	1530	1590	1450	1430	1550	7550	1510	4600	70.57	26.95
2	A_1B_2	1480	1510	1370	1450	1450	7260	1452	2720	70.23	28.89
3	A_1B_3	1490	1520	1360	1380	1440	7190	1438	4720	70.14	26.42
4	A_1B_4	1340	1450	1360	1430	1270	6850	1370	5250	69.72	25.53
5	A_2B_1	1440	1430	1380	1430	1420	7100	1420	550	70.04	35.64
6	A_2B_2	1420	1410	1390	1420	1410	7050	1410	150	69.97	41.22
7	A_2B_3	1360	1350	1410	1360	1420	6900	1380	1050	69.79	32.59
8	A_2B_4	1370	1450	1440	1380	1460	7100	1420	1750	70.04	30.62
9	A_3B_1	1420	1360	1380	1340	1360	6860	1372	920	69.74	33.11
10	A_3B_2	1460	1480	1410	1440	1460	7250	1450	700	70.22	34.78
11	A_3B_3	1370	1420	1380	1320	1260	6750	1350	3800	69.60	26.81
12	A_3B_4	1290	1310	1350	1240	1210	6400	1280	3100	69.13	27.23
13	A_4B_1	1230	1280	1290	1240	1210	6250	1250	1150	68.93	31.33
14	A_4B_2	1360	1370	1410	1390	1370	6900	1380	400	69.79	36.78
15	A_4B_3	1280	1280	1290	1240	1250	6340	1268	479	69.05	35.26
16	A_4B_4	1290	1240	1210	1220	1240	6200	1240	950	68.86	32.09

$$\begin{aligned} & \text{자유도} \times \text{오차분산} \\ &= S_A - (\phi_A \times V_e) \\ &= 158.81 - (3 \times 4.92) = 144.05 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textcircled{2} \quad S'_B &= S_B - (\phi_B \times V_e) \\ &= 95.33 - (3 \times 4.92) = 80.57 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textcircled{3} \quad S'_E &= S_T - S'_A - S'_B \\ &= 298.42 - 144.05 - 80.57 = 73.80 \end{aligned}$$

$$\textcircled{4} \quad S'_T = S_T = 298.42$$

b. 기여율 계산

$$\begin{aligned} \textcircled{1} \quad \rho_A &= \frac{\text{해당인자의 순변동}}{\text{전체변동}} \times 100 \\ &= \frac{S'_A}{S'_T} = \frac{144.05}{298.42} \times 100 = 48.27\% \end{aligned}$$

<표 7> SN비의 분산분석(ANOVA)표

요인	S	ϕ	V	F_0	$F(\alpha)$ 값	S'	$\rho\%$
A	158.81	3	52.94	10.76	$F(3,9;0.05)=3.86$	144.05	48.27
B	95.33	3	31.78	6.46	$F(3,9;0.05)=3.86$	80.57	27.00
E	44.28	9	4.92			73.80	24.73
T	298.42	15				298.42	100.00

② $\rho_B = \frac{S'_B}{S_T} = \frac{80.57}{298.42} \times 100 = 27.00\%$

③ $\rho_E = \frac{S'_E}{S_T} = \frac{73.80}{298.42} \times 100 = 24.73\%$

(3) 해석

분산분석결과 A, B 모두 유의수준 5% ($\alpha = 0.05$)에서 검정통계량 F_0 값이 기각치 $F(\alpha)$ 보다 크므로 귀무가설이 기각된다. 즉 온도와 투입레벨은 수준 변화에 따라 제품 입자경에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

A와 B모두 유의차 있으므로 SN비가 어느 수준에서 가장 큰 영향을 미치는지를 신뢰구간 95%로 모평균 μ 를 추정하여 보자.

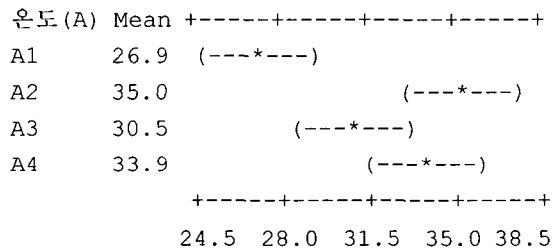
$$\bar{x}_i \pm t(\phi_E; \frac{\alpha}{2}) \sqrt{\frac{V_E}{n_i}} \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 $\mu(A_i)$, $\mu(B_i)$ 인자에 대한 95% 신뢰구간으로 모평균 μ 를 추정하여 보면 다음과 같다.

a. 인자 A의 모평균 $\mu(A_i)$ 의 95% 신뢰

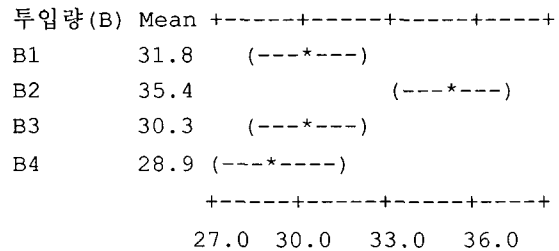
구간(confidence interval) 추정

Individual 95% CI



b. 인자 B의 모평균 $\mu(B_i)$ 의 95% 신뢰구간 추정

Individual 95% CI



모평균의 구간추정 결과 A_2B_2 수준 조합

에서 SN비가 가장 높게 나타났다. 따라서 온도는 A_2 , 투입레벨은 B_2 에서 산포에 영향을 가장 작게 준다.

c. 최적조합조건(A_2B_2)에서 신뢰구간추정

$$\begin{aligned} \text{a) } \hat{\mu} &= \text{참값} + (\text{A}_2 \text{의 효과}) + (\text{B}_2 \text{의 효과}) \\ &= \bar{T} + (\bar{A}_2 - \bar{T}) + (\bar{B}_2 - \bar{T}) \\ &= \bar{A}_2 + \bar{B}_2 - \bar{T} \\ &= 35.02 + 35.42 - 31.58 \\ &= 38.86 \end{aligned}$$

$$\text{b) } \pm CI = \pm t(\phi_e; \frac{\alpha}{2}) \sqrt{V_e \times \frac{1}{n_e}}$$

n_e = 유효반복수유

$$= \frac{\text{총 실험회수}}{\text{유의한 요인의 자유도합} + 1}$$

$$= \frac{lm}{l + m - 1}$$

$$= \pm t(9; 0.025) \sqrt{4.92 \times \frac{7}{16}}$$

$$= \pm 2.262 \sqrt{4.92 \times \frac{7}{16}}$$

$$= \pm 3.32$$

$$\hat{\mu}(A_2B_2) = 38.86 \pm 3.32$$

망목특성은 2단계로 나누어 실시하는데 제 1단계로 산포를 작게 하는 인자의 최적조합 수준은 A_2B_2 로, 35.54db ~ 42.18db까지 입자경의 산포가 존재함을 알 수 있다. 제2단계로 목표치와 일치시키기 위해서 평균치에 영향을 주는 인자를 다음과 같이 검토해 보자.

2) 평균치에 영향을 주는 조정인자 분석

(1) S_m 의 변동계산

$$\text{① } CT = \frac{T^2}{N} = \frac{(1,115.81)^2}{16}$$

$$= 77,814.50$$

$$\text{② } S_T = \sum y_i^2 - CT = 70.57^2 +$$

$$70.23^2 + \dots + 68.86^2 - CT = 3.856$$

$$\text{③ } S_A = \frac{1}{n} \sum T_{Ai}^2 - CT = \frac{1}{4} (280.67^2$$

$$+ 279.83^2 + 278.68^2 + 276.63^2)$$

$$- CT = 2.292$$

$$\text{④ } S_B = \frac{1}{4} (279.27^2 + 280.21^2$$

$$+ 278.58^2 + 277.75^2) - CT$$

$$= 0.818$$

$$\text{⑤ } S_e = S_T - S_A - S_B = 0.746$$

(2) 해석

분산분석결과 인자 A는 유의수준 5% ($\alpha = 0.05$)에서 검정통계량 F_0 값이 기각치 $F(\alpha)$ 보다 크므로 유의차가 있으나, B 인자는 유의수준 5% ($\alpha = 0.05$)에서는 유의차가 없지만, 10%에서는 유의하므로 기술적으로 검토하여 의미 있다고 판단된다. 즉 온도와 투입량은 수준 변화에 따라 입자경의 평균치(\bar{y})에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

따라서, A는 5%에서 B는 10%에서 유의차 있으므로 평균치 \bar{y} 가 어느 수준에서 목표치 1400에 근접하는지를 신뢰구간 95%로 \bar{y} 를 추정하여 보자.

$$\bar{x}_i \pm t(\phi_E; \frac{\alpha}{2}) \sqrt{\frac{V_E}{n_i}} \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 $\mu(A_i), \mu(B_i)$ 인자에 대한 95% 신뢰구간으로 \bar{y} 를 추정하여 보면 다음과 같다.

- a. 인자 A의 \bar{y} 의 모평균 신뢰구간 (confidence interval) 추정

Individual 95% CI

온도 (A)	Mean	-----+-----+-----+-----+
A1	1443	(---*---)
A2	1408	(---*---)
A3	1363	(---*---)
A4	1285	(---*---)
		+-----+-----+-----+-----+
		1260 1330 1400 1470

- b. 인자 B의 \bar{y} 의 모평균 신뢰구간 추정

Individual 95% CI

투입량 (B)	Mean	-----+-----+-----+-----+
B1	1388	(---*---)
B2	1423	(---*---)
B3	1359	(---*---)
B4	1328	(---*---)
		+-----+-----+-----+-----+
		1300 1350 1400 1450

모평균 \bar{y} 의 구간추정 결과 평균치에 큰 영향을 주는 조정인자의 수준은 $\mu(A_2)$ 1410 $\mu(B_1)$ 1390으로 A_2B_1 조합에서 목표치에 가장 근접함을 알 수 있다.

따라서 온도는 62.25 ~ 65.25℃ (A_2), 투입량은 85 (B_1)에서 목표치 1400에 가장 근접한다.

3) 실험결과 최적 수준조합 선정

(1) 제1단계로 산포에 영향을 주는 인자는 A_2B_2 수준을 선택

(2) 제2단계로 목표치와 일치시키기 위해서 평균치에 영향을 주는 인자는 A_2B_1 수준 선택

실험결과 인자 A는 산포에 영향을 주는 수준 A_2 와 평균치에 영향을 주는 수준 A_2 로 같기 때문에 A_2 수준 선정에 문제가 없으며, 인자 B의 경우는 산포에 영향을 주는 수준은 B_2 이고 평균치에 영향을 주는 수준은 B_1 으로 수준이 서로 다르므로 B_1 과 B_2 사이에서 최적값이 존재한다고 생각할 수 있다.

따라서 B_1 과 B_2 사이를 목표치 1400에 근접하는 조건을 보간법으로 찾아보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{투입량} &= 85 + (5) \frac{1390 - 1400}{1390 - 1420} \\ &= 85 + \frac{50}{30} \approx 87 \end{aligned}$$

위의 SN 비와 \bar{y} 에 대한 분석결과를 종합하여 입자경의 산포를 최소로 억제하는 공정변수의 최적 수준과 입자경의 평균값을 목표치 (m)에 맞추기 위한 4수준에서 공정조건을 설계는 다음과 같이 한다.

- 1) 인자 A(온도)는 수준 A_2 로 구간 62.25 ~ 65.25의 중앙치인 63.8℃로 설정

<표 8> S_m 의 분산분석표

요인	S	ϕ	V	F_0	$F(0.05)$	$F(0.10)$	S'	$\rho\%$
A	2.292	3	0.764	9.21	3.86	$F(3,9;0.10)=2.81$	2.043	52.98
B	0.818	3	0.273	3.29	3.86	$F(3,9;0.10)=2.81$	0.569	14.76
E	0.746	9	0.083				1.244	32.26
T	3.856	15					3.856	100.00

2) 인자 B(투입량)은 B_1 과 B_2 사이로 87%로 설정

3.4 허용차 설계

파라미터 설계에서 최적공정 조건을 찾았지만, 입자경의 산포에 의한 손실을 더 줄이기 위하여 어떤 인자에서 어느 정도의 산포를 줄이는 것이 적절한지를 밝혀서 이익과 비용의 절충안을 찾고자 한다.

허용차(tolerance) 설계를 하기 위해 최적 공정 조건(인자 A 63.8°C, 인자 B 87%)에서

목표치 1400을 중심으로 한 오차를 3수준 이원배치로 실험을 한 후, 오차요인을 직교다항식으로 분해하여 다구찌 손실비용과 특성치의 변동을 줄이기 위해 추가적으로 투입되는 비용과의 절충안을 찾아서, 기대 손실 비용이 최소가 되도록 허용차를 설계하고자 한다.

3.4.1 허용차 설계를 위한 반복이 없는 이원배치 실험

1) 수준 선정

(1) 인자 A: 중앙치 63.8 ± 1.5 의 폭으로 3수준 선정

<표 9> 이원배치에 의한 실험데이터

인자	B_1	B_2	B_3	$T_i.$
A_1	80	70	50	200
A_2	20	10	-30	0
A_3	-50	-40	-60	-150
$T.j$	50	40	-40	50

$$A_1 = 63.8 - 1.5 = 62.3$$

$$A_2 = 63.8$$

$$A_3 = 63.8 + 1.5 = 65.3$$

(2) 인자 B: 중앙치 87.0 ± 5 의 폭으로 3수준 선정

$$B_1 = 82$$

$$B_2 = 87$$

$$B_3 = 92$$

<표 9>의 데이터는 목표치-실험값의 편차이다. A_1B_1 에서 데이터 값 80은 목표치-실험값($1400-1320 = 80$)이다.

2) 분산분석

<표 9>의 데이터는 이원배치이고 A, B가 각각 3수준이므로 1차와 2차까지 구해 볼 수 있다. 다음과 같은 요인들의 변동을 직교다항식으로부터 얻을 수 있는 변동의 공식을 이용하여 구하여 보자. 각 수준에서의 반복수는 r을 사용하였다.

m = 일반평균

A_l = A의 1차 효과(linear effect)

A_q = A의 2차 효과(quadratic effect)

B_l = B의 1차 효과

B_q = B의 2차 효과

$A_l \times B_l$ = A_l 와 B_l 간의 교호작용

e = 오차효과로 $A_l \times B_q$, $A_q \times B_l$,

$A_q \times B_q$ 를 합친 것

$$S_m = \frac{T^2}{9} = \frac{(50)^2}{9} = 277.8$$

$$S_{A_l} = \frac{[(-1)T_{1.} + (0)T_{2.} + (1)T_{3.}]^2}{(\lambda^2 S)_1 \cdot r}$$

$$= \frac{(-200 - 150)^2}{2 \times 3} = 20,416.7$$

$$S_{A_q} = \frac{[(1)T_{1.} + (-2)T_{2.} + (1)T_{3.}]^2}{(\lambda^2 S)_2 \cdot r}$$

$$= \frac{(200 - 150)^2}{6 \times 3} = 138.9$$

$$S_{B_l} = \frac{[(-1)T_{.1} + (0)T_{.2} + (1)T_{.3}]^2}{(\lambda^2 S)_1 \cdot r}$$

$$= \frac{(-50 - 40)^2}{2 \times 3} = 1,350.0$$

$$S_{B_q} = \frac{[(1)T_{.1} + (-2)T_{.2} + (1)T_{.3}]^2}{(\lambda^2 S)_2 \cdot r}$$

$$= \frac{(50 - 80 - 40)^2}{6 \times 3} = 272.2$$

A의 1차, B의 1차의 교호작용의 변동 $A_l \times B_l$ 은 다음과 같이 구한다. B의 수준별로 A의 1차효과 계수 -1, 0, 1을 사용하여 다음 대비 $L(B_1)$, $L(B_2)$, $L(B_3)$ 을 구한다.

$$L(B_1) = -1(80) + 0(20) + 1(-50) = -130$$

$$L(B_2) = -1(70) + 0(10) + 1(-40) = -110$$

$$L(B_3) = -1(50) + 0(-30) + 1(-60) = -110$$

이 $L(B_1)$, $L(B_2)$, $L(B_3)$ 에 B의 1차 계수인 -1, 0, 1을 곱하여 구한다.

$$S_{A_l \times B_l} =$$

$$\frac{[(-1)(-130) + (0)(-110) + (1)(-110)]^2}{2 \times 2}$$

$$= 100.0$$

$$S_T = \sum_i \sum_j y_{ij}^2 =$$

$$(80)^2 + (70)^2 + \dots + (-60)^2 = 22,900.0$$

<표 10> 분산분석표(O 표의 변동은 오차로 풀링된 것)

요인	S	ϕ	V	ρ (%)
m	277.8	1	277.8	0.59
A_l	20,416.7	1	20,416.7	88.53
A_q	O 138.9	1		
B_l	1,350.0	1	1,350.0	5.27
B_q	O 272.2	1		
$A_l \times B_l$	O 100.0	1		
e	O 344.4	3		
(e)	855.5	6	142.6	5.61
T	22,900.0	9	2,544.4	100.00

$$S_e = S_T - (S_m + S_{A_l} + S_{A_q} + S_{B_l} + S_{B_q} + S_{A_l \times B_l}) = 344.4$$

위의 변동으로부터 분산분석표를 작성하여 보면 <표 10>과 같다.

기여율 ρ 의 계산은, 예를 들어

$$\rho_m = \frac{S_m - (\phi_m \times V_e)}{S_T} \times 100 = \frac{277.8 - 142.6}{22,900} \times 100 = 0.59(\%)$$

와 같이 계산된다.

3) 손실함수

망목특성이므로 손실금액은

$$L = k\sigma^2, \quad k = \frac{A_0}{\Delta_0^2} = \frac{600,000}{40,000} = 15 \text{ 원/ton}$$

A_0 = 소비자 허용범위를 벗어났을 때의 손실로 600,000원

$$\Delta_0^2 = \text{소비자의 허용범위로 } 1400 \pm 200$$

(1) 파라미터 설계전의 연간 전체 손실금액(연간 생산량 28,600 ton 기준)

$$15 \text{ 원} \times 13,103(\text{파라미터 설계전의 현상과악에서의 분산}) \times 28,600 \text{ ton} = 5,621,187,000 \text{ 원/년}$$

(2) 파라미터 설계후의 연간 전체 손실금액

$$L = 15 \text{ 원} \times V_t = 15 \times 2544.4 \times 28,600 \text{ ton} \quad (\text{연간 생산량})$$

$$= 1,091,547,600 \text{ 원/년}$$

따라서 파라미터 설계만으로도 연간 4,529,639,400원 절감을 할 수 있다.

3.4.2 허용차 설계

1) 온도의 허용차(인자 A)

- (1) 파라미터 설계 후($m \pm 1.5$)

$$L = 15 \times V_t \times (\rho A) / 100$$

$$= 15 \times 2,544.4 \times 0.8853$$

$$= 33,790 \text{원(손실비용/ton)}$$
 연간 손실금액 = 966,394,000원(연간 생산량 28,600ton 기준)
- (2) 1/2로 줄일 경우($m \pm 0.8$)

$$L = 15 \times 2,544.4 \times (0.8853 \times 1/4)$$

$$= 8,447 \text{원(손실비용/ton)},$$
 연간 손실금액 = 241,584,200원
- (3) 1/5로 줄일 경우($m \pm 0.3$)

$$L = 15 \times 2,544.4 \times (0.8853 \times 1/25)$$

$$= 1,352 \text{원(손실비용/ton)},$$
 연간 손실금액 = 38,667,200원

2) 유화제 투입레벨의 허용차(인자 B)

- (1) 파라미터 설계 후($m \pm 5$)

$$L = 15 \times V_t \times (\rho B) / 100$$

$$= 15 \times 2,544.4 \times 0.0527$$

$$= 2,011 \text{원(손실비용/ton)}$$

연간 손실금액 = 57,514,600원(연간 생산량 28,600ton 기준)

- (2) 1/2로 줄일 경우($m \pm 2.5$)

$$L = 15 \times 2,544.4 \times (0.0527 \times 1/4)$$

$$= 503 \text{원(손실비용/ton)}, \text{연간 손실금액} = 14,385,800 \text{원}$$
- (3) 1/5로 줄일 경우($m \pm 1$)

$$L = 15 \times 2,544.4 \times (0.0527 \times 1/25)$$

$$= 80 \text{원(손실비용/ton)},$$
 연간 손실금액 = 2,288,000원

3) 대안의 평가

추가비용과 손실금액을 고려하여 <표 11> 과 같이 각 대안을 평가한 결과, 비용이 가장 작게 소요되는 경제적 허용차는 온도 63.8 ± 0.8 , 투입레벨은 87 ± 1 일 때 최적이다.

3.5 표준화

3.5.1 공정조건

<표 11> 허용차 대안 평가표 (단위: 천원/년)

인자	허용차	추가비용	손실금액	합계	채택 여부
온도 (A)	파라미터설계 후($m \pm 1.5$)	0	966,394	966,394	
	1/2감소($m \pm 0.8$)	132,630	241,584	374,214	O
	1/5감소($m \pm 0.3$)	1,264,250	38,667	1,302,917	
투입 레벨 (B)	파라미터 설계 후($m \pm 5$)	0	57,515	57,515	
	1/2감소($m \pm 2.5$)	3,520	14,386	17,906	
	1/5 감소($m \pm 1$)	8,960	2,288	11,248	O

- 1) 인자 A(온도)는 수준 A_2 로 구간 62.25 ~ 65.25의 중앙치인 63.8°C로 설정
- 2) 인자 B(유화제 투입레벨)는 B_1 과 B_2 사이를 보간법으로 추정한 87%로 설정

3.5.2 허용차

- 1) 인자 A(온도): $m \pm 0.8$
 - 2) 인자 B(유화제 투입레벨): $m \pm 1$
- 따라서 신제품 반응공정에서의 최적 공정은 온도가 $63.8^\circ\text{C} \pm 0.8$ 와 유화제 투입레벨 87% ± 1 로 셋팅 한다.

4. 결론 및 향후 연구과제

품질기능의 변동을 최소화하기 위한 방법으로 다구찌의 파라미터 및 허용차 설계 실험이 유용하나, 화학공정과 같은 경우에는 실험의 시간과 비용측면에서 실험 회수를 늘릴 수 없는 제약 때문에 그 적용이 미흡하였다. 따라서 본 연구에서는 다구찌 품질공학을 화학공정에 적용하고자 하는 경우의 발생하는 문제점들을 지적하였고, 이러한 문제점의 대안으로 실험을 하지 않고도 마치 실험을 한 것과 같은 효과를 얻을 수 있는 방안으로 조업중인 데이터를 그대로 이용하는 경우를 화학반응 공정의 사례연구를 통해 이를 예시하였다. 조업중인 데이터를 이용하는 과정에서 발생할 수 있는 결측치를 처리하는 방법을 보였고, 연속값을 이산값의 구간으로 나누어서 수준을 설정하는 방법도 보였다. 아울러 다구찌 실험계획에서 사용되는 직교배열표는 3수준이상의 실험에서는 사용이 어려운 문제점을 본 연구에서는 4수준에서 실

험을 하였다.

이상과 같이, 조업중인 데이터를 그대로 이용하여 화학반응 공정에 있어서 다구찌 품질공학을 응용한 공정 파라미터 및 허용차 설계 실험을 하였을 때, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, 조업중인 데이터는, 많은 수준에서 실험한 것과 같으므로, 수준의 구간을 어떻게 적절하게 나누느냐가 관건이라고 할 수 있었는데 그 방법으로는 본 사례 연구와 같은 방법으로 구간의 폭을 결정하여도 별 문제가 없었다.

둘째, 결측치를 처리하는 방법은 모든 데이터에 자연로그($\ln x$)를 취하고, 자연로그를 취한 값으로 Yates의 방법으로 결측치를 추정하는 다음, 그 추정값을 다시 역로그를 취하여 결측치를 추정하는 방법을 응용하여도 별 문제가 없었다.

셋째, 화학반응 공정에서의 공정조건 및 허용차 설계를 다구찌 방법을 응용하여 실험하였을 때, 현재보다 더 좋은 공정조건을 발견할 수 있었다.

넷째, 산업현장에서 지속적으로 추진하여 오고 있는 품질향상과 원가절감 활동들이 고유기술 뿐만 아니라 본 사례 연구와 같은 분석기술이 접목될 때 상승효과가 더 크게 작용된다는 것을 알 수 있었다.

다섯째, 실험회수를 늘릴 수 없는 제약 조건이 있는 경우에는 본 사례 연구와 같이 조업중인 데이터를 이용하는 방법이 활용될 수 있을 것이다.

이상과 같은 연구결과를 토대로 품질향상이나 원가절감 등과 같은 개선활동을 할 경우, 고유기술 뿐만 아니라 분석기술이 접목될 때 상승효과가 더 크게 작용하므로 다구

찌 품질공학과 같은 분석기술을 많이 활용하여야 하겠다.

본 연구를 통하여 어려웠던 점은 허용차 설계에서 소비자의 기능한계를 벗어날 경우 손실금액을 산출하는 과정이었다. 소비자 손실금액의 산출 범위를 어디까지로 하여야 하는가와 클레임으로 인하여 거래가 중단될 가능성이 있는 경우와 같이 무형의 금액을 어떻게 산출하여야 되는가 이다. 이와 같은 문제들이 향후연구에서는 보완되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 권용만, 홍연웅(1998), “로버스트 설계에 대한 최적화 방안”, 한국품질경영학회지, 제26권 제4호, pp. 88-99.
- [2] 김경모(1994), “하위특성의 안정된 허용차 결정방법”, 한국품질경영학회지, 제22권 제1호, pp. 133-141.
- [3] 김상익(1999), “파라미터 설계법의 다특성 성능척도 산출방법”, 한국품질경영학회지, 제27권 제3호, pp. 67-77.
- [4] 김호성, 양형식, 임균택, 전대준, 정창복(1999), 「강건설계를 이용한 품질공학」, 민영사.
- [5] 田口玄一(1988), 「규격치 결정방법」, 한국표준협회.
- [6] 田口玄一(1991), 「품질공학강좌 2」, 한국표준협회.
- [7] 田口玄一(1991), 「품질공학강좌 3」, 한국표준협회.
- [8] 田口玄一(1991), 「품질공학강좌 6」, 한국표준협회.
- [9] 田口玄一(1991), 「품질공학강좌 7」, 한국표준협회.
- [10] 田口玄一(1992), 「최신실험계획법」, 한국표준협회.
- [11] 박성현(1990), 「다구찌방법을 중심으로 한 응용실험계획법」, 영지문화사.
- [12] 박성현, 박영현, 이명주(1998), 「통계적 공정관리」, 민영사.
- [13] 박성현(1999), 「현대실험계획법」, 민영사.
- [14] 박성현(2000), 「다구찌 방법과 통계적 공정관리를 중심으로 한 품질공학」, 민영사.
- [15] 서순근, 최종덕(1994), “다성능 특성치에 관한 안정성설계”, 한국품질경영학회지, 제22권 제3호, pp. 35-53.
- [16] 이상복(2000), 「기초부터 현장적용까지 알기쉬운 다구찌기법」, 창조사.
- [17] 이상복(1997), “다구찌의 손실함수에 대한 분석”, 한국품질경영학회지, 제25권 제3호, pp. 119-130.
- [18] 이우선, 이종협, 임성수(1999), “다구찌의 파라미터 설계에 대한 반응표면 접근 방법을 이용한 다반응 최적화”, 한국품질경영학회지, 제27권 제1호, pp. 165-194.
- [19] 홍성훈, 최성일, 임훈, 반재석(2000), “이차손실함수 하에서 최적 공정평균 및 규격 하한”, 한국품질경영학회지, 제28권 제4호, pp. 194-203.
- [20] Leon, R. V., Shoemaker, A.C., and Kacker, R.N.(1987), “Performance Measures Independent of Adjustment: An Explanation and Extension of Taguchi's Signal-to-Noise Ratios”,

- Technometrics*, Vol. 29, No. 3, pp. 253-265.
- [21] Lunani, M., Nair, V. N., Wasserman, G.S.(1997), "Graphical Methods for Roubust Design with Dynamic Characteristics" , *Journal of Quality Technology*, Vol. 29, No. 3, pp. 327-338.
- [22] Nair, V. N.(1992), "Taguchi's Parameter Design: A Panel Discussion" , *Technometrics*, Vol. 34, pp. 127-160.
- [23] Otto, K. N. and Antonsson, E.K(1993), "Extensions to the Taguchi Method of Product Design," *ASME J. Mechanical Design*, Vol. 115, pp. 5-13.