

## Taguchi방법에 의한 실험 계획

### Planning of Experiments by Taguchi Method

이            종            원\*  
Chong    Won    Lee

#### 1. 서    론

실험을 해본 경험이 있는 사람은 한번쯤은 심각하게 고민해본 경험이 있으리라 생각한다. 실험을 어떻게 계획하고 수행해야 하는지 하는 문제이다. 실험계획에서 선결되어야 하는 것은 실험변수 또는 조건, 즉 실험인자(factor)를 무엇으로 결정하는가, 각 인자의 수준(level)을 몇등급으로 어떻게 설정하는지 하는 문제와 아울러 실험결과(response) 또는 반응치를 무엇으로 대표하며 어떻게 정량화(측정)하는가 하는 문제이다. 인자와 수준과 반응치의 문제가 결정되면 실제 실험을 어떻게 수행할까 하는 계획을 세워야하는데 가능한 적은 횟수의 실험으로 반복효과와 신뢰성이 있는 실험을 계획하는 것이 중요시된다.

여기에서 실험이란 실제 실험장치나 설비를 이용하는 것 이외에 수치적 계산(simulation)도 포함될 수 있다. 만약 인자의 수가 많다면 또 각 인자의 수준이 많아지면 자연 실험횟수도 증가하게 되는데 모든 조합의 실험을 수행하는데 있어 경비와 노력과 시간이 엄청나게 많이 든다면 어떻게 해야 하는지하는 문제를 Taguchi 방법과 관련하여 다루고자 한다.

고전적 실험계획법은 금세기 초기에 영국의 R. A. Fisher에 의해 개발되기 시작했으며 주

로 통계적 계획법으로 복잡한 가정 및 과정을 수반하는 고도의 통계적 지식을 요하기 때문에 실제 공학자들이 이용하는데 어려운 점이 많았다. 반면 Taguchi의 실험계획법은 공학적 도구로서 개발되었으며 비용 절감적이며 현대 산업의 문제와 요구조건에 부합되는 응용력이 높은 기술들을 이용하고 있다. 즉 제품 설계에서 가장 저렴한 생산가로 가장 안정적이고 신뢰성 높은 성능을 주는 인자의 조합을 찾는데 많이 이용된다. 기존의 방법과 다른점은 통계학적인 실험계획에 수반되는 이론과 노력이 상당히 단순화되거나 제거되었고 경제적으로 한번에 많은 인자들을 고려하는 직접적인 방법이 그 특징이며 또한 교호작용을 일종의 잡음인자로 보아 실제 교호작용이 상대적으로 심각하지 않다고 판단되는 경우에는 주 효과분석만으로도 최적조건과 우수한 재현성(reproducibility)을 보장하게 된다. 본고에서는 품질향상 측면보다는 실험계획법 자체에 중점을 두고 이를 소개하고자 한다. 실험계획의 일차적 목적은 어느 의미에서는 모형화 즉 반응치에 미치는 각 인자의 주효과의 교호작용 관계를 규명하는 것이라고 볼 수 있으며 방법론에서 전조합실험(full-factorial experiment)과 부분실험(fractional factorial experiment)으로 구분할 수 있는데 부분실험

\* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과 교수

법의 목적은 어떻게 하면 경제적으로 실험횟수를 최소화하되 전조합실험법의 효과를 낼수 있는가 다시 말하면 실험계획에 포함되지 않은 인자의 조합실험 결과를 어떻게 효과적으로 예측할 수 있나 하는 것이다. Taguchi의 실험계획은 직교배열을 이용한 부분실험법에 근거를 두고 있다.

## 2. 비빔밥 실험—전조합실험법(full factorial experiment)

조리에 다소 경험과 관심이 있는 사람이라면 흔히 먹는 음식이라도 더좋은, 맛있는 조리법에 대해 한번쯤 생각해 보았으리라 생각한다. 일례로 비빔밥의 경우를 보자. 요리책을 들쳐보면 여러가지 비빔밥의 조리법이 있는데 물론 요리연구가의 취향에 따라 다소 차이를 발견할 수 있다.

표 1에는 전주비빔밥과 진주비빔밥의 조리법을 보이고 있는데, 가미되는 재료의 종류는 유사함에도 불구하고 각각은 '진주'와 '전주'의 차이보다는 더한 독특한 다른 맛을 낸다. 여기에서의 문제는 요리책에서 추천하는 전주와 전주비빔밥보다도 더 맛있고 독특하고 더 많은 대중의 기호에 만족되는 제 3의 비빔밥을 만들려고 할때 어떻게 할까 하는 문제이다. 가능한 모든 재료의 다양한 조합으로 가장 맛있는 또는 독특한 비빔밥을 실험에 의해 찾아내는 것이 목적이라면 먼저 비빔밥을 구성하는 재료를 열거해야 되는데 이때 고려해야 할 사항은 비빔밥을 비빔밥답게 만드는 범위내에서 재료를 선택해야 할 것이다. 이러한 각각의 재료가 인자가 되며 다음으로 고려할 사항은 각 재료의 양 또는 혼합비율 등급, 즉 수준의 결정이다. 예를들어 4인분 기준하여 간장은 큰술로 1, 2, 3 하던지 '약간 적은듯', '적당량', '약간 많은듯'식으로 수준을 정해야 한다. 이경우 간장이라는 인자는 3수준을 갖게 된다.

한편 고려해야 하는 것은 반응치의 설정과 측정방법인데 예를 들어 맛을 반응치로 설정할 경우 이를 어떻게 정량화하는가 인데 랜덤

샘플된 집단의 10점 스케일의 평점 등이 한 예가 되겠다. 만약 13가지의 재료(인자)가 각각 3수준을 갖는 실험을 모두 하려면

$$3^{13} = 1,594,323$$

가지의 비빔밥을 조리해야 하는데 한가지 비빔밥을 만드는데 30분이 걸린다면 하루 8시간 일년 250일을 일해도 400년. 인(man-year)이 걸리는 엄청난 양의 실험이 된다. 그 비용이야 이루 말할 수 없음은 두말할 필요가 없다. 실제 오늘날의 독특한 전주나 진주비빔밥이 그 지방사람들의 애호를 받게 되기까지 시행착오를 거치는 동안 그 정도의 시일과 인원과 비용이 소요되었을지도 모른다. 한마디로 요약하면, 전조합실험법은 모든 가능한 실험조건 하에서의 실험계획이긴 하지만 인자와 수준의 수가 어느정도 커지기만 하면 비효율적인 방법이 된다.

전조합실험법을 설명하기 위해 2수준 - 3인자 실험의 예를들면 표 2와 같다. 표 2는 전조합실험법 및 실험결과(반응치  $y$ )를 보이고 있는데 이를 재배치해서 표시하면 표 3과 같다. 표 2, 3에서 A, B, C는 인자를 나타내는 기호이고 하첨자 1과 2는 각 인자의 수준을 나타내며  $y$ 는 반응치이다. 표 3에서의 배열의 숫자는 각 인자의 수준을 나타낸 것으로 예를들어 2번째 실험의 경우는  $A_1 B_1 C_2$  즉 A와 B는 첫번째 수준으로, C는 두번째 수준으로 설정했을 경우를 나타내며 이때의 실험결과는  $y_2$ 이다. 2수준계, 3수준계, 혼합수준계의 인자수에 따른 총 실험횟수를 표 4에 보였는데 인자수가 증가함에 따라 전조합실험법에 의한 총 실험횟수가 급격히 증가함을 알 수 있다.

## 3. 일시일원실험법(One factor at a time experiment)

앞서의 비빔밥 실험에서 각 재료가 전체 맛에 어떤 정도로 영향을 주나를 알아보는 것이 실험의 한 목적인데 이를 파악하기 위해서 채택되는 효율적인 방법으로 많이 시행되는 계획은 부분조합실험법의 고전적 유형인 일시일

표 1 비빔밥 조리법

전주비빔밥(전라도)

재료(4인분)

밥	4공기
쇠고기	150g
간장	큰술 1숟
설탕	작은술 2
파·마늘	숟뿌리 · 2쪽
깨소금·참기름	큰술 1숟씩
후춧가루	약간
도라지, 고사리	150g씩
시금치·미나리·숙주	150g씩
표고버섯	4개
콩나물	250g
붉은고추·과	약간씩
파·마늘	1뿌리 · 4쪽
깨소금·참기름	큰술 2숟씩
간장	큰술 1
청포묵·달걀	1/2모 · 1개
고추장·소금	적당량씩

- ① 쇠고기는 연한 살코기로 준비하여 가늘게 채썰어 파·마늘을 다져 넣고 나머지 양념들을 섞어 고루 주물러 육회를 만든다.
- ② 도라지는 가늘게 잘라 소금으로 문질러 씻은 후 꼭 짜고, 고사리는 센줄기를 골라내고 짧게 끊어 놓는다.
- ③ 시금치·미나리는 다듬어 끓는 물에 소금을 약간 넣고 데쳐서 찬물에 헹궈 건져 꼭 짠후 짧게 끊는다. 숙주도 끓는 물에 데치도 표고버섯은 물에 불려 줄기를 뺀 후 채썬다.
- ④ 콩나물은 다듬어 냄비에 넣고 물 1숟컵을 붓고 10분정도 끓이다가 분량의 양은 건져내고, 물 4컵을 더 부은 다음 소금으로 간을 맞추고 붉은고추와 과를 채썰어 넣어 콩나물 국을 끓인다.
- ⑤ 파·마늘을 다져 깨소금·참기름·간장과 섞어 양념장을 만든후 도라지·미나리·시금치·고사리·숙주·표고버섯·콩나물 건져낸 것에 각각 조금씩 넣어 무친다.
- ⑥ 청포묵은 얇게 썰고 달걀은 황백 지단을 부친 후 채썬다.
- ⑦ 그릇에 밥을 나누어 담고 재료들을 고루 돌려 담은후 고추장을 얹어 콩나물 국과 함께 상에 낸다.

진주비빔밥(경상도)

재료(4인분)

밥	4공기
숙주·콩나물·고사리·무우	
썩갓	100g씩
썩대기(돌김)	2장
청포묵	1/2모
쇠고기	150g
바지락	100g
옛표장(고추장)	적당량
파·마늘 다진것	약간씩
간장·설탕·깨소금·참기름	
후춧가루	약간씩
양지머리·선지	200g씩
양·허파	100g씩
무우	1/2개
콩나물	100g
고사리	30g
간장·후춧가루	약간씩

- ① 콩나물·숙주는 삶고 썩갓은 끓는 물에 데쳐서 각각 파·마늘 다진 것, 간장·참기름·깨소금 약간씩을 넣고 무친다. 무우는 채썬후 간장을넣어 볶고, 고사리는 갠 양념하여 볶는다.
- ② 썩대기는 구워서 곱게 부수어 간장·깨소금·참기름·설탕으로 무치고 청포묵은 얇게 저며 썬다. 쇠고기는 곱게 채썰어 갠 양념을 넣고 무쳐 육회를 만든다.
- ③ 바지락은 살만 곱게 다져서 참기름으로 볶다가 물 1숟컵을 붓고 끓인후 소금으로 간을 하여 보탕국을 만든다.
- ④ 양은 끓는 물에 데쳐 칼 등으로 겹은 막을 벗기고 양지머리와 허파는 덩어리째 씻어 건져 냄비에 물 8컵을 붓고 양과 함께 부르도록 삶은후 꺼내어 얇게 저민 다음 냄비에 다시 넣는다.
- ⑤ 선지는 끓는물에 1순가락씩 떠넣어 삶아내고 무우는 얇게 썰어 납작썰기한 다음, 콩나물·고사리를 깨끗이 씻어 ④에 넣고 함께 끓이다가 간장·후춧가루로 간을 맞추어 국을 만든다.
- ⑥ 밥을 대접에 나누어 담고 그 위에 재료들을 얹은 다음 보탕국 큰술 1를 떠넣고 옛표장(옛을 고아판든 고추장)을 얹는다. 국은 바로 그릇에 담아낸다.

표 2 전조합실험 예 (2 수준 - 3 인자 경우)

		C		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
A	B				
A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>		y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	
	B <sub>2</sub>		y <sub>3</sub>	y <sub>4</sub>	
A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>		y <sub>5</sub>	y <sub>6</sub>	
	B <sub>2</sub>		y <sub>7</sub>	y <sub>8</sub>	

표 3 2 수준 - 3 인자 경우의 전조합배치표

실험번호	A	B	C	반응치
1	1	1	1	y <sub>1</sub>
2	1	1	2	y <sub>2</sub>
3	1	2	1	y <sub>3</sub>
4	1	2	2	y <sub>4</sub>
5	2	1	1	y <sub>5</sub>
6	2	1	2	y <sub>6</sub>
7	2	2	1	y <sub>7</sub>
8	2	2	2	y <sub>8</sub>

원 실시법이다. 이 방법은 한 인자의 수준이 변할때 다른 인자들의 수준은 변하지 않는 방법이다. 설명을 효과적으로 하기위해 2 수준 - 3 인자의 경우를 다시 예로 들면 표 5 와 같다.

첫번째 실험과 두번째 실험은 B, C를 기준치(1수준)로 설정한 상태에서 A의 수준의 반응치에 미치는 효과를 파악하기 위한 실험이고 첫번째와 세번째는 B의 수준의 효과, 첫

번째와 세번째는 C의 수준의 효과를 파악하기 위한 실험이 된다. 표 5를 수식화하면

$$\begin{aligned}
 y_1 &= \alpha A_1 + \beta B_1 + \gamma C_1 + \mu + \varepsilon_1 \\
 y_2 &= \alpha A_2 + \beta B_1 + \gamma C_1 + \mu + \varepsilon_2 \\
 y_3 &= \alpha A_1 + \beta B_2 + \gamma C_1 + \mu + \varepsilon_3 \\
 y_4 &= \alpha A_2 + \beta B_2 + \gamma C_1 + \mu + \varepsilon_4 \\
 y_5 &= \alpha A_1 + \beta B_1 + \gamma C_2 + \mu + \varepsilon_5 \\
 y_6 &= \alpha A_2 + \beta B_1 + \gamma C_2 + \mu + \varepsilon_6 \\
 y_7 &= \alpha A_1 + \beta B_2 + \gamma C_2 + \mu + \varepsilon_7 \\
 y_8 &= \alpha A_2 + \beta B_2 + \gamma C_2 + \mu + \varepsilon_8
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

가 되는데 여기서  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 미지수로 인자 A, B, C의 반응치에 미치는 효과의 기울기를 나타내는 계수이고  $\mu$ 는 미지절편 또는 각 평균수준에서의 반응치 평균이며  $\varepsilon$ 은 실험 및 모형오차이다. 일반적으로는

$$y = \alpha A + \beta B + \gamma C + \mu + \varepsilon \tag{2}$$

로 주어지는 식(여기에서의  $\varepsilon$ 은 모형오차)의 계수  $\alpha, \beta, \gamma$ 를 알아내는 것이 실험의 1차목적이 되며 이를 모형화 또는 시스템구명이라 부를 수 있다. 일단 모형이 실험에 의해서 확인되면 반응치를 극대화 또는 극소화하는 A, B, C의 조합을 찾을 수 있게 되는데 이것이 실험의 최종적인 목적이 된다.

식(1)로부터 각 계수(기울기)들은

$$\alpha = \frac{y_1 - y_5}{A_1 - A_2}, \quad \beta = \frac{y_1 - y_3}{B_1 - B_2}, \quad \gamma = \frac{y_1 - y_2}{C_1 - C_2} \tag{3}$$

로부터 결정되는데 여기에서 문제가 되는것은 실험의 재현성 내지 신뢰성인데 문제는 y측정시 불확실성, 수준의 변동성 등에 예민하게 계수들이 정해진다는 점이다.

표 4 각 실험계획에 의한 총 실험횟수

수준계	직교배열기호	인자수	실험 횟수		
			직교배열	일시일원실험법	전조합실험법
2 수준계	L <sub>4</sub> (2 <sup>3</sup> )	3	4	≤ 4	8
	L <sub>8</sub> (2 <sup>7</sup> )	7	8	≤ 8	128
	L <sub>12</sub> (2 <sup>11</sup> )	11	12	≤ 12	2,048
	L <sub>16</sub> (2 <sup>15</sup> )	15	16	≤ 16	32,768
	L <sub>32</sub> (2 <sup>31</sup> )	31	32	≤ 32	2,147,483,648
3 수준계	L <sub>9</sub> (3 <sup>4</sup> )	4	9	≤ 9	81
	L <sub>27</sub> (3 <sup>13</sup> )	13	27	≤ 27	1,594,323
혼합수준계	L <sub>18</sub> (2 <sup>1</sup> × 3 <sup>7</sup> )	1(2수준) + 7(3수준)	18	≤ 16	4,374
	L <sub>36</sub> (2 <sup>3</sup> × 3 <sup>13</sup> )	3(2수준) + 13(3수준)	36	≤ 30	12,754,584

여하튼 앞서 비범법실험의 경우 이 방법으로 실험계획을 하면 총 27회의 실험으로 소기의 목적을 달성할 수 있는데 400년, 인의 노력이 단 14시간, 인(man-hour)으로 압축되는 놀라운 방법이다. 실험의 재현성을 높이기 위해서는 이 경우 똑같은 실험계획에 의해 여러번 같은 실험을 반복할 수도 있으나 아직도 해결되지 않은 문제는 특정 수준의 기준점에서의 각 인자의 효과가 다른 기준점에서도 통용되는가 하는 문제이다. 예를들어  $A_1(B_1 C_1)$ 과  $A_2(B_1 C_1)$ 의 실험으로부터의  $A$ 의 효과(즉 계수  $\alpha$ )가 다른 기준점 예컨대  $A_1(B_2 C_1)$ 과  $A_2(B_2 C_1)$ 의 실험에서도 똑같이 예측되겠느냐 하는 점이다. 말하자면  $\alpha$  그 자체 또는 식(1)의 형태에 어느 정도의 불확실성이 내재되어 있지 않느냐 하는 점이다. 이유는 실제로 식(1)과 같은 단순모형이 복잡한 실제현상을 정확히 대변한다기 보다는 통계적 평균의 의미에서 대변한다고 보아야 하기 때문이다. 따라서  $\alpha$ 를 구하기 위해서는  $A_1(B_1 C_1)$ 과  $A_2(B_1 C_1)$ ,  $A_1(B_2 C_1)$ 과  $A_2(B_2 C_1)$ ,  $A_1(B_2 C_2)$ 와  $A_2(B_2 C_2)$ 의 모든 실험에서 얻어지는  $\alpha$ 의 평균치가 고려되어야 한다는 것이다. 그러나 실제 이를 다 고려하려면 전조합실험법을 수행해야 하는데 이를 수식으로 나타내면 편의상  $\mu = 0$ 이라 하면 표 3으로부터

$$y = Xp + \varepsilon \quad (4)$$

여기서

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_1 & B_1 & C_2 \\ A_1 & B_2 & C_1 \\ A_1 & B_2 & C_2 \\ A_2 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_1 & C_2 \\ A_2 & B_2 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \end{bmatrix} \quad p = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}$$

따라서

$$p = [X^T X]^{-1} X^T y$$

로부터 구해진  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 실험결과  $y_i$ 를 사

표 5 일시일원실험법에 의한 실험예(2수준-3인자 경우)

실험번호 (열)	행렬	인자 또는 조건			반응치 (실험결과)
	인자 행	A	B	C	
		1	2	3	
1		$A_1$	$B_1$	$C_1$	$y_1$
2		$A_2$	$B_1$	$C_1$	$y_5$
3		$A_1$	$B_2$	$C_1$	$y_3$
4		$A_1$	$B_1$	$C_2$	$y_2$

용하여 최소자승 오차법( $\varepsilon \varepsilon^T$ 를 최소화)에 의해 구해진 일종의 평균화된 계수들이 된다. 그림 1에 인자 A의 효과와 관련된 계수  $\alpha$ 와 실험결과들과의 관계를 보였다. 이와 대비하여 일시일원배치법에 의한 모형화 과정은 식(3)로부터 알 수 있듯이 실험오차에 민감하게 된다.

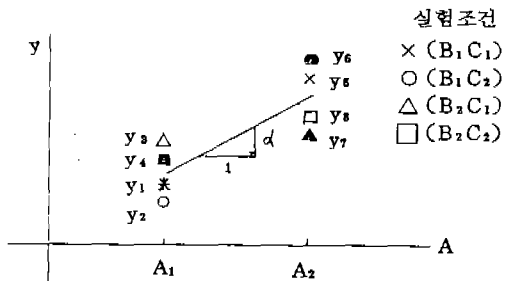


그림 1 전조합배치법에서의 최소자승 오차법에 의한 A 인자의 효과결정

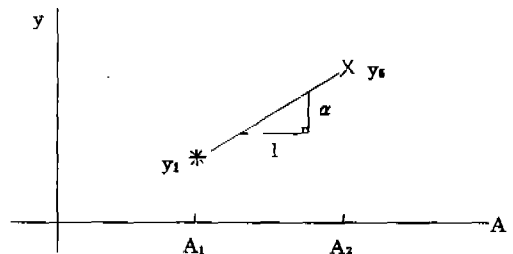


그림 2 일시일원실험법에서의 A 인자의 효과결정

그림 2에 인자 A와 관련된 효과  $\alpha$ 를 구하는 과정을 보였다. 그림에서 알 수 있듯이 이렇게 구한 계수들을 사용하여 식(2)로부터 실

험하지 않은 다른 조건에서의 결과  $y$  를 예측할 때에는 상당한 오차가 발생할 수 있다.

- 결론적으로 일시일원실험법의 장점은
- 전조합실험법에 비해 실험횟수가 매우 적으나

단점으로는

- 교호작용을 다룰 수 없고
- 다수인자의 동시 수준변화에 대한 정보를 얻을 수 없으며
- 실제 상황에서의 결과 예측에 대한 신뢰성과 재현성이 취약하다.

는 점으로 현대 실험계획법에서는 사용이 금지되고 있다.

#### 4. 직교배열(orthogonal array)을 이용한 Taguchi method

일시일원배치법과 전조합실험법의 장·단점을 보완한 방법으로 제시된 것이 직교배열에 의한 실험계획이다. 부분조합실험법의 하나인 직교배열에 의한 실험계획법이 공학문제나 산업현장에 적용되기 시작한 것은 2차세계대전 이후라고 보아야겠으며 최근에는 Taguchi 에 의해 실험계획법뿐 아니고 품질관리 측면에서 적극적으로 생산현장에 응용되고 있다. 앞서의 2수준-3인자 실험의 경우를 예로들면 표 6과 같다.

표 2와의 차이점은 각 행에 모든 수준이 나타나되 각 수준의 빈도가 모두 동일(이 경우 2회)하면서도 각 열의 실험계획이 모두 다르다는 것이다. 이러한 배열중 최소의 실험횟수를 요구하는 배열을 직교배열(orthogonal array) 이라고 하며 이 경우 Taguchi 는  $L_4(2^3)$  이라고 표시한다.  $L$  은 직교배열 기호이고 4는 총 실험횟수, 2는 수준수, 3은 인자수를 나타낸다. 이  $L_4(2^3)$  직교배열은 표 2에서 선택할 수 있는 2개의 직교배열 중에서 하나가 되는데 다른 하나는 표 6의 각 수준을 서로 바꾼것(즉 1은 2로, 2는 1로)이 되나 이는 애초의 수준 설정시 순서가 무의미하다는 점을 감안하면 표 6으로 통합될 수 있다. 표 6을 수식화하면

$$\begin{aligned} y_1 &= \alpha A_1 + \beta B_1 + \gamma C_1 + \mu + \varepsilon_1 \\ y_4 &= \alpha A_1 + \beta B_2 + \gamma C_2 + \mu + \varepsilon_4 \\ y_6 &= \alpha A_2 + \beta B_1 + \gamma C_2 + \mu + \varepsilon_6 \\ y_7 &= \alpha A_2 + \beta B_2 + \gamma C_1 + \mu + \varepsilon_7 \end{aligned} \quad (5)$$

이 되며 여기서

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{(y_1 + y_4) - (y_6 + y_7)}{2(A_1 - A_2)} \\ \beta &= \frac{(y_1 + y_6) - (y_4 + y_7)}{2(B_1 - B_2)} \\ \gamma &= \frac{(y_1 + y_7) - (y_4 + y_6)}{2(C_1 - C_2)} \end{aligned} \quad (6)$$

로부터 결정되는데 식(3)과는 달리 각 계수를 결정짓는데 이 경우 각 2회의 실험결과가 이용되고 있는것이 특징이며 이는 전체 실험횟수를 증가시키지 않고도 동일실험을 2회 반복한 결과와 동일한 효과를 얻는것이 특징이다. 표 6에 보인 직교배열의 다른 특징은 임의의 두 열(실험)을 비교할때 어느 경우든지 3인자중 두인자가 다른 수준으로 변화되는 것을 알 수 있으며 따라서 표 5의 소극적인-기준점에서 한 인자의 수준만 바꾸는- 입장에서 인자의 영향을 광범위한 수준변화를 통해 적극적인 실험(wild experiment)으로 개선되었다는 것을 알 수 있다.

표 6. 직교배열에 의한 실험예(2수준 - 3인자 경우)

실험번호 (열)	직교행렬			반응치	
	인자 행	$L_4(2^3)$			
		A	B	C	
1	1	1	1		$y_1$
2	1	2	2		$y_4$
3	2	1	2		$y_6$
4	2	2	1		$y_7$

다른 한편으로는 예를 들어  $\alpha$  (인자 A의 효과)를 구하기 위해서 인자 A의 수준을  $A_1$  (실험 1, 2) 또는  $A_2$  (실험 3, 4)로 고정시킨 경우 B와 C의 각 수준빈도가 모두 동일하므로  $\alpha$ 를 구할때의 B와 C의 수준변화에 대한 효과가 평균적으로 0이 되고 있다는 점인데

이는 앞서 표 3에서의 전조합실시법의 특성과 비슷하다고 볼 수 있다. 예를들어 인자 A와 관련된 효과  $\alpha$ 를 구하는 과정을 그림 3에 보였다.

결론적으로 직교배열에 의한 실험계획은 비용절감뿐 아니고 전조합실시법과 유사한 robust한 실험계획임을 알 수 있다. 다만 재현성의 문제는 다소 남게 되므로 반드시 실험계획에서 누락된 경우에 대한 확인실험을 거쳐야 할 필요가 있다. 직교배열에 의한 부분조합실시법을 이용할때 소요되는 총 실험횟수는 표 4에 보였다.

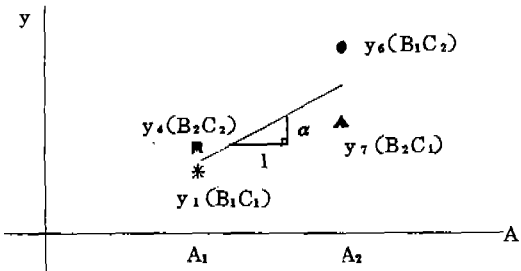


그림 3 직교배열에 의한 실험계획에서의 A인자의 효과결정

### 5. 실험계획 예

#### 5.1 $L_4(2^3)$ 및 $L_9(3^4)$ 에 의한 가속도계 제작실험

그림 4에 보인 압전형 가속도계를 개발·제작하는 과정에서 이론적으로는 압전소자의 재질이 동일할 경우

$$(\text{중력당 전하감도}) \propto (\text{부유질량})$$

의 관계를 갖으며 압전소자의 두께와는 무관하게 되어있다. 또한 압전소자의 극성을 반전시켜도 전하감도와는 무관해야 한다.

실제 제작된 가속도계의 보정을 통해서 위의 이론적 관계를 규명하기 위해서 먼저 설계 변수(인자)를 부유질량의 두께, 압전소자의 두께, 극성의 3인자로 결정하고 2수준 실험계획을  $L_4(2^3)$ 에 의해 세우고 실제 4개의 가속도계를 제작한 후 보정실험을 통해 얻은 전

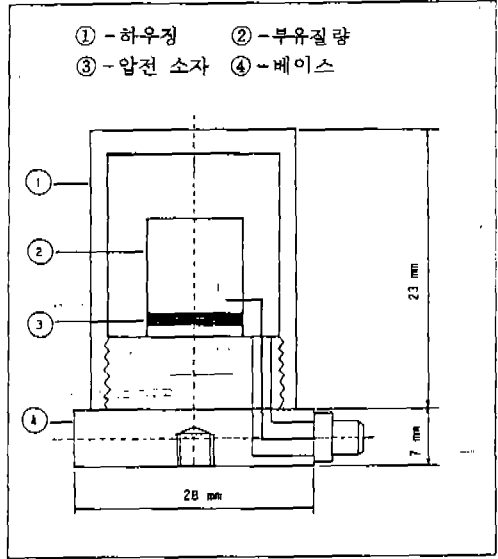


그림 4 단일압축식 압전형 가속도계 (구성요소)

하감도를 반응치로 한 실험결과는 표 7과 같다. 표 7의 실험결과로부터 만들어진 반응치표(response table)는 표 8과 같다.

표 8을 보면 인자 A(압전소자 두께)와 인자 C(극성)의 효과가 이론치 0과는 달리 각기 수준 평균의 15%, 10% 정도로 이론치와는 다소 차이를 보이고 있으며 인자 B(부유질량 두께)의 효과는 이론치보다 20% 가량 작게 나옴을 알 수 있다. 각 인자를 2수준으로 결정 한데에는 기본적으로 각 인자의 반응치에 대한 선형관계를 가정하는 것이므로 좀더 신뢰성이 높고 일반적인 2차함수형의 비선형성을 수용하기 위해 부유질량과 압전소자의 두께를 모두 3수준으로 한 새로운 실험계획을  $L_9(3^4)$ 에 의해서 세웠으며 그 결과는 표 9와 같고, 반응치표는 표 10과 같이 작성할 수 있다.

$L_9(3^4)$  직교배열표에서 D는 dummy 인자로 실제실험 조건과는 관계가 없으며 인자 C는 2수준이기 때문에 수준 2를 편의상 +극성으로 대치하였다. 반응치표를 보면 실험횟수가 증가함에 따라 예상대로 극성 반전의 효과는 거의 없는 것으로 확인되었으나 압전소자의 두께의 효과는 무시할 수 없다는 것과

표 7 압전형 가속도계 성능실험 (2 수준)

	L <sub>4</sub> (2 <sup>3</sup> )			A 압전소자두께(mm)	B 부유질량두께(mm)	C 극 성	전하감도 PC/g	
	A	B	C				실험값	이론값
1	1	1	1	1	7	+	14.10	19.5
2	1	2	2	1	3	-	6.95	8.4
3	2	1	2	2	7	-	17.04	19.5
4	2	2	1	2	3	+	7.53	8.4

표 8 압전형 가속도계 성능실험 반응치표 (2 수준)

	A	B	C
수준 1	10.525	15.57	10.815
수준 2	12.285	7.24	12.00
수준간 차이	1.76(0)	8.33(11.1)	1.185(0)

( )속의 값은 이론값

표 10 압전형 가속도계 성능실험 반응치표 (3 수준)

	A	B	C
수 준 1	10.14	15.07	11.16
수 준 2	11.29	11.19	
수 준 3	12.14	7.30	11.21
수준간최대차이	2(0)	7.77(11.1)	0.05(0)
수 준 평 균 μ	11.19(13.9)		

표 9 압전형 가속도계 성능실험 (3 수준)

	L <sub>9</sub> (3 <sup>4</sup> )				C 극 성	A 압전소자두께(mm)	B 부유질량두께(mm)	전하감도 PC/g	
	C	A	B	D				실험값	이론값
1	1	1	1	1	+	1	7	14.10	19.4
2	1	2	2	2	+	1.5	5	11.92	13.9
3	1	3	3	3	+	2	3	7.53	8.4
4	2	1	2	3	+	1	5	9.36	13.9
5	2	2	3	1	+	1.5	3	7.43	8.4
6	2	3	1	2	+	2	7	16.59	19.5
7	3	1	3	2	-	1	3	6.95	8.4
8	3	2	1	3	-	1.5	7	14.53	19.5
9	3	3	2	1	-	2	5	12.29	13.9

부유질량의 효과는 이론치보다 약 25% 낮게 나옴을 알 수 있다. 압전소자의 영향이 이론식과 달리 0이 아닌것은 이론에서는 압전체의 접촉면에서의 구속조건을 무시했기 때문으로 판단되며 수준평균과 수준 2의 값이 유사한 점으로 미루어 인자 A와 B는 실험수준 범위내에서 선형효과만 나타냄을 알 수 있다. 이러한 실험을 통하여 실험계획에서 누락된 인자의 조합에 대한 반응치를 예측할 뿐만아니

라 원하는 중력당 전하감도를 갖는 설계값들을 추정해서 결정할 수 있게 된다.

### 5.2 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)에 의한 절삭실험

과거 실험실에서 수행한 절삭실험시 실험계획은 표 11과 같다.

이 실험에서는 피이드, 절삭속도, 절삭깊이 절삭위치를 인자로 선택하였으며 각기 3수준으로 일시일원배치법에 의해 수행했다. 이때



표 11 절삭실험시 절삭조건(일시일원배치법)

변 수	실 험	주축속도 rpm	이송속도 in/rev	절삭깊이 mm	절삭속도 m/sec	절삭위치
이송속도	1	300	.0080	1.0	.100	중 앙
	2-2	300	.0120	1.0	.095	"
	3	300	.0163	1.0	.090	"
주축회전 속 도	4	200	.0120	1.0	.067	"
	2-2	300	.0120	1.0	.095	"
	5	400	.0120	1.0	.127	"
절삭깊이	6	300	.0120	0.5	.093	"
	2-2	300	.0120	1.0	.095	"
	7	300	.0120	1.5	.100	"
절삭위치	2-1	300	.0120	1.0	.095	심압대측
	2-3	300	.0120	1.0	.095	주축대측

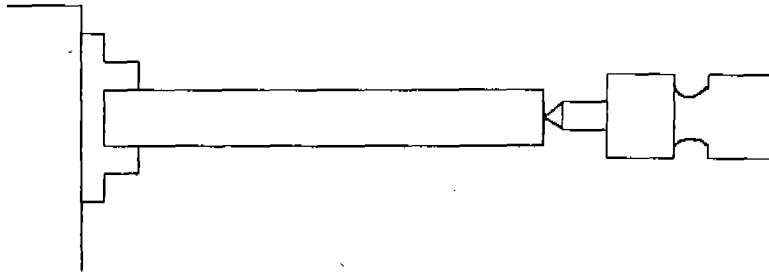


표 12 직교배열을 이용한 절삭실험 계획

행 실험번호	L <sub>9</sub> (3 <sup>4</sup> )				A	B	C	D
	A	B	C	D	절삭속도 m/sec	피 이 드 in/rev	절삭깊이 mm	절삭위치
1	1	1	1	1	0.067	0.0080	0.5	심압대측
2	1	2	2	2	"	0.0120	1.0	중 앙
3	1	3	3	3	"	0.0163	1.5	주축대측
4	2	1	2	3	0.095	0.0080	1.0	주축대측
5	2	2	3	1	"	0.0120	1.5	심압대측
6	2	3	1	2	"	0.0163	0.5	중 앙
7	3	1	3	2	0.127	0.0080	1.5	중 앙
8	3	2	1	3	"	0.0120	0.5	주축대측
9	3	3	2	1	"	0.0163	1.0	심압대측

피이드는 비교적 기어변속에 의해 다른 절삭 조건(인자)에 무관하게 잘 조정이 되었으며 절삭깊이는 정격깊이를 조절했으나 실제 절삭깊이는 다소 변화가 예상되며, 절삭속도는 스펀들 속도×공작물 반경의 관계에서 스펀들속도를 조절하여 간접적으로 수준변화를 주었으나 반경 20 mm의 공작물을 수차례 연속절삭함에 따라 실제 계산된 절삭속도 수준은 0.067 m/sec,  $0.95 \pm 0.05$  m/sec, 0.127 m/sec 이었다. 모든 조합의 실험을 수행하려면  $3^4 = 81$  번의 실험이 요구되나 이경우 9번의 실험으로 절삭에 의한 공작기계 진동현상을 규명할 수 있었다. 다만 이 경우 Taguchi 방법을 도입했었다면 표 12에 주어진 실험계획에 의해 좀더 효과적인 실험결과를 얻을 수 있었을 것이다. 앞서 서술한 바와 같이 일시일원실험법에 의한 실험계획은 일견 조직적인 것처럼 보이나 금기로 하는것이 좋겠다.

5.3  $L_{16}(2^{16})$ 에 의한 엔진마운트 실험

승차감을 향상시키기 위해 요즘 승용차에 설치되고 있는 그림 5에 보인 유체봉입 엔진마운트의 동특성을 파악하기 위한 실험을 수행하기 위한 실험계획의 일예를 표 13에 보였다. 이경우 2수준 2인자와 4수준 3인자를 고려하므로 일견 혼합수준계로 보이나 2

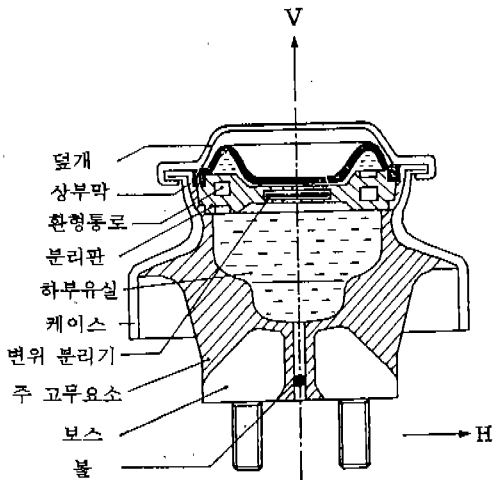


그림 5 유체봉입 엔진마운트

표 13 수평(H)방향 마운트에 대한 실험계획표

(a) 실험인자 행렬~ $L_{16}(2^{16})$

구 분	유체의 유 무	온 도	V 방향 하 중	H 방향 하 중	진 폭
1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2
3	1	2	1	3	4
4	1	2	2	4	3
5	1	3	1	4	2
6	1	3	2	3	1
7	1	4	1	2	3
8	1	4	2	1	4
9	2	1	1	3	3
10	2	1	2	4	4
11	2	2	1	1	2
12	2	2	2	2	1
13	2	3	1	2	4
14	2	3	2	1	3
15	2	4	1	4	1
16	2	4	2	3	2

(b) 각 인자의 수준값 및 자유도

실험 인자	수 준				자 유 도
	1	2	3	4	
유체의 유무	부	유			1
온도(°C)	-5	25	55	85	3
V-방향하중(kgf)	0	106			1
H-방향하중(kgf)	14	21	28	35	3
가진 진폭(mm)	.04	.16	.28	.40	3
주 효과를 보기위한 자유도					11
전체 실험의 자유도					15
오차에 할당되는 자유도					4

수준계에 적용되는  $L_{16}(2^{16})$  직교배열을 쉽게 표 13(a)와 같이 변형시킬 수 있다. 변형된 직교배열은  $L_{16}(2^3 \times 4^4)$ 과 같이 표시할 수 있으므로 2수준 인자 4개에 해당하는 4행이 dummy가 된다. 이경우 전조합실험법에 의한  $2^2 \times 4^3 = 256$ 회의 실험이 요구되나 직교

표 14 H-방향 마운트의 복소 강성계수에 대한 1차함수 근사 결과

번호	저장 강성 계수 (K)					손실 계수 ( $\eta$ )				
	기울기 절편 오차 <sup>1)</sup>			평균 <sup>2)</sup> 오차 <sup>3)</sup>		기울기 절편 오차 <sup>1)</sup>			평균 <sup>2)</sup> 오차 <sup>3)</sup>	
	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	(%)	(%)		A <sub>2</sub> ( $\times 10^{-2}$ )	B <sub>2</sub>	(%)	(%)	
1	.0255	6.33	.48	7.03	4.9	.1879	.0506	2.2	.1023	25
2	.0231	7.19	.55	7.83	4.1	.2054	.0543	1.5	.1107	25
3	.0141	6.35	.46	6.74	2.9	.0029	.0296	1.5	.0304	2
4	.0142	6.50	.49	6.89	2.9	-.0004	.0441	1.1	.0440	1
5	.0108	6.51	.64	6.80	2.3	-.0188	.0228	3.5	.0176	15
6	.0133	6.19	.64	6.55	2.9	-.0101	.0230	5.4	.0202	8
7	.0130	6.53	.48	6.89	2.6	-.0335	.0295	1.4	.0203	22
8	.0147	6.46	.48	6.86	3.0	-.0176	.0274	2.2	.0226	10
9	.0269	6.81	.41	7.55	4.9	.2255	.0662	2.6	.1283	24
10	.0282	7.81	.13	8.58	4.5	.2553	.0769	2.7	.1471	23
11	.0104	6.63	.42	6.91	2.1	-.0048	.0351	2.7	.0338	3
12	.0132	7.73	.21	8.10	2.3	-.0039	.0427	4.4	.0416	4
13	.0176	5.99	.74	6.47	3.8	-.0234	.0288	3.9	.0223	14
14	.0185	6.16	1.0	6.67	3.9	-.0221	.0274	4.7	.0213	14
15	.0163	6.19	.61	6.64	3.4	-.0280	.0258	11	.0181	24
16	.0188	6.27	.85	6.79	3.9	-.0176	.0264	7.6	.0215	13

저장 강성계수;  $K = A_1 \omega + B_1$  (kgf/mm)

손실계수;  $\eta = A_2 \omega + B_2$ ,  $\omega$ : Hz

각 실험의 조건은 표 12의 실험 계획표에 나와 있음.

1. 실험결과(K,  $\eta$ )와 1차함수 근사 결과와의 편차
2. 5~50 Hz 범위의 주파수에서 K,  $\eta$ 의 평균값
3. 평균에 대한 편차

배열을 이용한 경우 16회의 실험으로 충분하게 된다. 각 인자의 수준은 표 13(b)에 보였다.

실제 매 실험에서 구한 반응치는 스칼라 양이 아닌 주파수 함수로 표현되는 두개의 곡선(그림 6(a)참조)으로 이로부터 간단한 모형을 커브피팅한 결과 구해진 특성계수들을 반응치로 대신하였는데 이경우 반응치는 표 14에 보인바와 같이 4개의 특성계수로 구성되어 있다. 이들 반응치들을 실험결과로 하여 반응치표를 구한다음 이로부터 각 인자의 효과를 계산한 다음 이를 이용해서 수정된 특성계수를 표 15와 같이 얻을 수 있게 된다. 이 결과를 이용하여 재현한 특성곡선의 예를 그림 6(b)에

보였는데 실험결과(그림 6(a))와 상당히 근사한 특성을 보이고 있다.

## 6. 추가로 고려해야 할 사항

지금까지는 주로 이해를 돕기 위해 방법론을 단순화하여 실험계획법을 설명하였으나 Taguchi 방법을 추후 직접 응용하는 경우를 고려하여 수준계, 교호작용 및 자유도에 대해 간단히 부연 설명하고자 한다.

### 6.1 수 준 계

인자의 수준이 모두 동일한 경우를 2수준

표 15 다투찌 방법에 의해 재계산한 결과

번호	저장강성계수(K)			손실계수(η)		
	기울기	절편	오차 <sup>1)</sup> (%)	기울기	절편	오차 <sup>1)</sup> (%)
	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	(%)	A <sub>2</sub> (×10 <sup>-2</sup> )	B <sub>2</sub>	(%)
1	.0230	6.66	3.8	.1940	.0512	3.2
2	.0244	7.10	0.9	.2114	.0585	5.5
3	.0127	6.60	3.2	.0021	.0365	21.9
4	.0124	6.93	5.4	-.0102	.0417	3.5
5	.0125	5.97	7.2	-.0225	.0228	7.2
6	.0139	6.40	3.5	-.0213	.0215	24.3
7	.0137	6.05	6.7	-.0360	.0218	41.4
8	.0161	6.35	1.1	-.0222	.0274	6.5
9	.0267	6.97	2.1	.2212	.0644	3.5
10	.0296	7.40	4.2	.2475	.0739	4.4
11	.0125	6.56	0.6	-.0161	.0354	9.8
12	.0143	7.12	7.2	-.0023	.0379	11.2
13	.0173	6.14	2.3	-.0131	.0281	12.4
14	.0165	6.34	2.1	-.0175	.0295	16.6
15	.0160	6.37	2.6	-.0218	.0282	16.1
16	.0170	6.68	5.3	-.0169	.0317	26.7
오차 <sup>2)</sup>	7.9	5.0	(%)	6.0	8.7	

저장 강성계수;  $K = A_1 \omega + B_1$  (kgf/mm)

손실계수;  $\eta = A_2 \omega + B_2$ ,  $\omega$ : Hz

1. 실험결과(K, η)와 다투찌 방법에 의해 근사된 계수를 이용해 다시 계산한 결과와의 편차
2. 표 13의 1차함수 계수와 근사된 계수와의 편차

표 16 전조합실험법에 의해서 얻는 정보 (2 수준 3인자 경우)

정 보	기 호	자 유 도
주 효 과	A	3
	B	
	C	
이중교호작용	A×B	3
	A×C	
	B×C	
삼중교호작용	A×B×C	1
총 자유도		7
총 실험 횟수		8

계, 3수준계 등으로 부르며 모두 동일하지 않은 경우를 혼합수준계라고 부른다. 2수준을 갖는 인자의 경우는 반응치에 선형효과를 미치는 인자로 파악되며 3수준 인자는 반응치에 비선형효과를 미치는 인자로 구분된다. 예를들어 인자A가 3수준을 갖을 경우 반응치와의 관계는

$$y = \mu + \alpha A + \beta A^2 + \epsilon$$

의 관계로 볼 수 있으며 반응치표(response table)로부터 인자A의 반응치에 대한 1차효과계수 α와 2차효과계수 β를 각 수준값 A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>와 관련된 반응치 y<sub>1</sub>, y<sub>2</sub>, y<sub>3</sub>와의 관

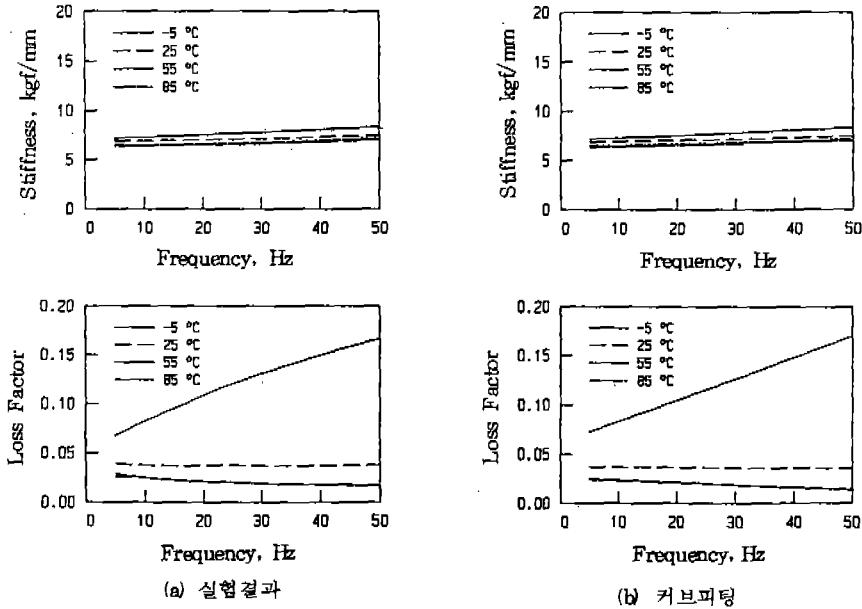


그림 6. 마운트의 동강성과 손실계수 ; 온도변화의 영향

계로부터 구할 수 있다. 4수준계 5수준계동도 유사한 개념으로 설명할 수 있는데, 다만 인자가 틀이상인 경우는 각 인자의 차수증가와 아울러 교호작용의 차수도 동시에 증가한다는 점을 유의해야 한다.

6.2 교호작용(interaction)

만일 A의 효과가 B의 서로 다른 수준에서 같지 않다면 2개의 인자 A와 B는 서로 '교호한다'고 말한다. 일종의 A와 B간의 반응치에 대한 상승효과를 나타내는 것으로 앞서 식(1) 등과 같이 표현되는 경우는 예를 들어  $\alpha$  (A의 효과계수)는 B와 C의 수준에 관계없이 구해진다면 A와 B, A와 C와의 교호작용은 없게된다. 편의상 A, B 두 인자와 그 교호작용만을 고려한 모형식은

$$y = \mu + \alpha A + \beta B + \delta AB + \epsilon$$

이 되며 인자 A의 효과계수는  $\alpha$ 가 아니고  $(\alpha + \delta B)$ 가 되어 B의 수준에 따라 A의 효과가 달라지게 된다. 이 경우 직교배열에서 이러한 교호작용을 주 인자와 함께 배치할 수 있는데 결국은 윗식에서의  $\alpha, \beta, \delta$ 를 구하는 과정을 포함하는 다소 복잡한 관계를 도출해

낼 수 있다. 여기서  $\delta$ 는 교호작용의 강도가 된다. 교호작용을 직교배열의 적절한 행에 포함시키게 되면 결국 배치시킬 수 있는 주 인자의 수를 축소하는 결과를 낳게 되고 한편으로는 어느 인자 사이의 교호작용이 중요시 되나를 사전에 알기가 어려우므로 Taguchi는 실험계획시 교호작용의 효과가 중요하게 되는 확고한 이유가 없는한 교호작용을 포함하기 보다는 더 많은 인자를 고려한 방법을 추천하고 있다.

우리가 모든 인자의 모든 다중 교호작용(multi-way interaction)을 인정하게 되면 결국은 전조합배치법의 실험을 하게되는데 2수준 3인자의 경우를 예로들면 표 16에 보인바와 같이 주효과만을 고려할 경우  $3 + 1 = 4$ 회의 실험만으로 이중 교호작용까지 고려할 경우  $3 + 3 + 1 = 7$ 회, 삼중교호작용까지 고려하면 8회의 실험을 요구하게 되므로 결국 교호작용을 하나, 둘 인정하게 되면 결국 전조합 배치법과 같아지게 되므로 경제성이 없게된다. 이 경우 모든 교호작용을 없애게 되면 8회의 실험계획에 D, E, F, G 등의 4개의 2수준 인자를 추가할 수 있는 여유가 생긴다.

교호작용을 무시하는 대신 Taguchi는 직교

배열에서 누락된 실험조건하에서의 확인 실험에 의해서 재현성을 재고하는 방법을 권장하고 있다. Taguchi의 직교배열을 이용한 실험계획법의 기본방향은 robust하고 경제적인 실험법이라 할 수 있다. 만약 확인실험 결과가 예측과 틀리면

- 중요한 실험인자가 누락되었거나
- 수준설정에 문제가 있거나
- 교호작용이 누락된

경우로 볼 수 있다. 교호작용을 포함한 일반적인 직교배열의 운용은 다음 기회로 미루기로 한다.

### 6.3 자유도 (degree-of-freedom)

자유도는 아래와 같이 정의된다. 즉

- 인자의 자유도 = (수준수 - 1)
- 두 인자의 교호작용의 자유도 = (한인자의 자유도) × (다른 인자의 자유도)
- 직교배열의 자유도 = 총 실험횟수 - 1

자유도는 가장 경제적인 직교배열을 선택하는데 사용되게 되는데 우선 고려할 인자의 수와 각 인자의 수준수, 교호작용들을 근거로 각 자유도를 계산하여 더한 것이 총 요구되는 자유도가 되며 이보다 작지 않은 자유도를 갖는 직교배열중에서 적절한 것을 선택하게 된다. 인자와 교호작용을 배치할때는 흔히 Taguchi가 창안한 선점도(linear graph)를 이용하는 것이 편리한데 이때 실험변수(조건)로서의 인자의 수준변화 난이도가 참조되어야 한다.

## 7. 결 어

아직도 고전적인 실험계획법에 철저히 의존하거나 고도로 복잡한 통계이론에 근거한 현대 실험계획법을 고수하는 학자나 생산현장의 엔지니어들은 Taguchi 방법의 실효성에 대해 다소의 회의를 갖고 있는 듯하다. 그러나 Taguchi 방법의 이론적 정당성을 논하기 이전에, 방법의 단순화로 현장 엔지니어나 공학자들이 쉽게 접근할 수 있고 용이하게 시도할 수 있는 방법으로서 오래전부터 일본에서, 최근에는 미국에서 이 방법을 이용한 수 많은 성공사례가 발표되어 오고 있다는 점에서 높이 평가해

야 할 일이다. 특히 품질관리를 위한 일련의 Taguchi 방법론은 현대의 현장엔지니어에게는 큰 충격으로서 받아들여져야 할 것이다.

또한 본고에서 강조했듯이 품질관리 이전의 하나의 실험계획법으로서의 Taguchi 방법은 현장 뿐아니라 실험실에서의 실험을 조직적이고 경제적으로 계획하고 수행하는데 있어 큰 역할을 담당하리라 믿는다.

## 참 고 문 헌

1. 박성현, 현대실험계획법, 제 13~14 장, 대영사, 1982.
2. Introduction to Quality Engineering - 5 day Seminar Course Manual, American Supplier Institute, Inc., 1987.
3. 염봉진, 김병천, 실험계획 및 분석, 한국과학기술원 산학협동공개강좌 교재, 1988, pp. 77~121.
4. Genichi Taguchi, Introduction to Quality Engineering, Asian Productivity Organization, 1986.
5. Raghunath Kacker, Some Orthogonal Arrays for Screening Designs, Bell Laboratories, 1982.
6. Taguchi Methods - Orthogonal Arrays and Linear Graphs, American Supplier Institute, Inc., 1987.
7. Genichi Taguchi, System of Experimental Design, UNIPUB, 1987.
8. 변승완, 이종원, DDS 방식에 의한 공장 기계 절삭특성 규명, 대한기계학회 논문집 제 5권제 4호, pp. 303~311, 1981.
9. 이종원, 구경희, 압전형 가속도계의 설계, 제작 및 보정 - 개발연구사례를 중심으로 -, 대한기계학회지 제 29권제 2호, pp. 175~183 및 제 4호, pp. 414~425, 1989.
10. 김철순, 유체봉입 엔진마운트의 동특성해석, 한국과학기술원 기계공학과 석사학위논문, 1982년 2월
11. 박규연, 압전형 다축 하중계의 설계, 제작 및 보정, 한국과학기술원 기계공학과 석사학위논문, 1990년 2월.