Journal of the KSQC
Vol. 11, No. 1, 1983

4因子 以上의 EVOP法에 관한 연구

姜 銀 美*

ABSTRACT

Evolutionary Operation was proposed by Box(1957) as an operating procedure for nudging a plant toward optimum conditions without causing dramatic disturbances and catastrophic cutbacks in production. In case two or three operating variables are monitored, Box and Hunter (1959) show how the EVOP is facilitated by using simplified calculations and emphasizing graphical presentation.

Now, in this artical we develope EVOP when four operating variables are monitored and suggest more extended EVOP in general case.

1. 서 론

EVOP法은 Evolutionary Operation의 약자로서 현장에서 실제로 생산을 진행시켜 나가면서 工程最適條件을 찾기 위하여 생산라인(Production Line)을 대상으로 실험할 수 있도록 짜여진 實驗計劃法이다.

각 因子의 수준의 폭을 약간만 바꾸어 주면서 反應의 조그만 변화를 進化的인 개념으로 탐지하여 생산성이나 품질을 향상시켜 보려는 工程操作法이 EVOP法이라 볼 수 있는데 이는 최초에 Box [2]에 의하여 소개되었고, Barnett [1]에 의하여 구체화 되었다.

이제까지 EVOP法은 편의상 因子가 두 개나 많아야 세 개까지를 대상으로 하였고 이에 대하여는 Box와 Hunter [3]가 간략한 계산방법과 함께 圖示的인 해설을 하였다. 그러나 실제 공정에서 영향을 주는 因子의 수는 3개 이상인 경우가 實在하므로 이 논문에서는 因子의 수가 4개와 그 이상인 경우에 대하여 다루려 한다.

2절에서는 3因子의 경우를 그대로 확장하여 얻어진 2블럭으로 나눈 경우의 EVOP法에 관하여 설명하고,

3절에서는 4블럭으로 나눈 경우, 즉 수정된 4因子의 EVOP法에 관하여 논하였으며,

4절에서는 이 두 방법의 차이에 대하여 기술하였다. 그리고 5절에서는 5因子의 경우를 예로 들어 확장된 경우의 일반적인 EVOP法에 대하여 언급하였다.

2. 4因子의 EVOP法

2.1 4因子의 실험계획

4因子의 경우는 2因子나 3因子의 경우와 같이 그림으로 쉽게 나타낼 수는 없다. 그러므로 각각의 실험조건을 중심을 0, 낮은 수준을 -1, 높은 수준을 1로 하여 나타내어 표시한다. 가장 높은 차수의 4因子 교호작용을 블럭과 교락(confound) 시키면 다음 표(2.1)과 같은 2개의 블럭이 얻어진다.

* 성신여자대학교 전임강사

블 럭 1	블 럭 2
① =(0, 0, 0, 0)	①′=(0, 0, 0, 0)
② =(−1, −1, −1, 1)	②′=(−1, −1, −1, −1)
③ =(−1, −1, 1, −1)	③′=(−1, −1, 1, 1)
④ =(−1, 1, −1, −1)	④′=(−1, 1, −1, 1)
⑤ =(−1, 1, 1, 1)	⑤′=(−1, 1, 1, −1)
⑥ =(1, −1, −1, −1)	⑥′=(1, −1, −1, 1)
⑦ =(1, −1, 1, 1)	⑦′=(1, −1, 1, −1)
⑧ =(1, 1, −1, 1)	⑧′=(1, 1, −1, −1)
⑨ =(1, 1, 1, −1)	⑨′=(1, 1, 1, 1)

표(2.1)

2. 2 계산방법

블럭 1과 블럭 2로 나누어서 實驗하며 데이터 시이트는 다음 표(2.2)와 같다.

실험조건	블 럭 1			블 럭 2		
사이클	①②③④⑤⑥⑦⑧⑨			①′②′③′④′⑤′⑥′⑦′⑧′⑨′		
1	$y_{11}y_{12}y_{13}$	……	y_{19}	$y'_{11}y'_{12}y'_{13}$	……	y'_{19}
2	$y_{21}y_{22}y_{23}$	……	y_{29}	$y'_{21}y'_{22}y'_{23}$	……	y'_{29}
3						

표(2.2) 4因子用 데이터 시이트

얻어진 데이터를 분석하기 위해 표(2.3)의 계산 시이트를 사용하면 편리하다. 이 계산 시이트의 사용방법은 Box와 Hunter〔3〕의 요령과 동일하다.

2. 3 이론적 근거

새로운 표준편차를 구하는 공식 $s=R\times f$와 새로운 평균치에 대한 95% 오차한계에 대한 이론적 근거는 2因子나 3因子의 경우와 동일하다. 즉, n번째 사이클의 i번째 실험조건의 데이터를 y_{ni}라 하면 n사이클에서 얻은 측정치와 $n-1$ 사이클까지의 데이터의 평균의 차이는

$$D_n = y_{ni} - \frac{y_{1i}+y_{2i}+\cdots+y_{n-1i}}{n-1}$$

이며 y_{pi}, $p=1, \cdots n$들은 서로 독립이므로 y_{pi}의 분산이 $\mathrm{Var}(y_{pi})=\sigma^2$이라 가정할 때

$$\mathrm{Var}(D_n)=\sigma_D^2$$

$$=\mathrm{Var}(y_{ni})+\frac{1}{(n-1)^2}\sum_{p=1}^{n-1}\mathrm{Var}(y_{pi})$$

$$=\sigma^2+\frac{(n-1)}{(n-1)^2}\sigma^2=\frac{n}{n-1}\sigma^2$$

따라서 y_{pi}의 표준편차는

$$\sigma=\sqrt{\frac{n-1}{n}}\,\sigma_D$$

가 된다. 여기에서 σ_D의 추정치는 모집단이 정규분포라는 가정하에 Pearson〔6〕으로부터 유도한

$$\hat{\sigma}_D=\frac{R}{d_2}$$

로 계산되며, 여기서 R은 9개의 D_n 가운데 제일 큰 것과 제일 작은 것과의 차이이다. 표본크기가 9인 경우는 $d_2=2.970$이다. 따라서 σ의 추정치 s는

$$s=\sqrt{\frac{n-1}{n}}\,\hat{\sigma}_D=\sqrt{\frac{n-1}{n}}\cdot\frac{R}{2.970}$$

로 얻어지며

$$f=\sqrt{\frac{n-1}{n}}\cdot\frac{1}{2.970}$$

로 놓으면

$$s=R\times f$$

가 된다. n에 따른 f의 값은 EVOP 계산 시이트에 실려있다.

그리고, 새로운 평균치에 대한 분산이

$$\mathrm{Var}(\bar{y}_{ni})=\frac{\sigma^2}{n}$$

이므로 새로운 평균치에 대한 약 95% 오차 한.

블럭 1

①= (0, 0, 0, 0) ⑥= (1, −1, −1, −1)
②= (−1, −1, −1, 1) ⑦= (1, −1, 1, 1)
③= (−1, −1, 1, −1) ⑧= (1, 1, −1, 1)
④= (−1, 1, −1, −1) ⑨= (1, 1, 1, −1)
⑤= (−1, 1, 1, 1)

	평균치의 계산						
조 업 조 건	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
(a) 앞사이클까지의 합계							
(b) 앞사이클까지의 평균							
(c) 새로운 측정치							
(d) (b) − (c) (차이)							
(e) (a) + (c) (합계)							
(f) 새로운 평균치							

효 과 의 계 산

$E_1=(A+B\times C\times D)$의 효과
$=\frac{1}{4}(\bar{y}_6+\bar{y}_7+\bar{y}_8+\bar{y}_9+\bar{y}_2+\bar{y}_3-\bar{y}_4-\bar{y}_5)$
$=$

$E_2=(B+A\times C\times D)$의 효과
$=\frac{1}{4}(\bar{y}_4+\bar{y}_5+\bar{y}_8+\bar{y}_9-\bar{y}_2-\bar{y}_3-\bar{y}_6-\bar{y}_7)$
$=$

$E_3=(C+A\times B\times D)$의 효과
$=\frac{1}{4}(\bar{y}_3+\bar{y}_5+\bar{y}_7+\bar{y}_9-\bar{y}_2-\bar{y}_4-\bar{y}_6-\bar{y}_8)$
$=$

$E_4=(D+A\times B\times C)$의 효과
$=\frac{1}{4}(\bar{y}_2+\bar{y}_5+\bar{y}_7+\bar{y}_8-\bar{y}_3-\bar{y}_4-\bar{y}_5-\bar{y}_6)$
$=$

$E_5=(A\times B+C\times D)$의 효과
$=\frac{1}{4}(\bar{y}_2+\bar{y}_3+\bar{y}_8+\bar{y}_9-\bar{y}_4-\bar{y}_5-\bar{y}_6-\bar{y}_7)$
$=$

$E_6=(A\times C+B\times D)$의 효과
$=\frac{1}{4}(\bar{y}_2+\bar{y}_4+\bar{y}_7+\bar{y}_9-\bar{y}_3-\bar{y}_5-\bar{y}_6-\bar{y}_8)$
$=$

$E_7=(A\times D+B\times C)$의 효과
$=\frac{1}{4}(\bar{y}_3+\bar{y}_4+\bar{y}_7+\bar{y}_8-\bar{y}_2-\bar{y}_5-\bar{y}_6-\bar{y}_9)$
$=$

$E_8=$ 평균변화의 효과
$=\frac{1}{9}(\bar{y}_2+\bar{y}_3+\bar{y}_4+\bar{y}_5+\bar{y}_6+\bar{y}_7+\bar{y}_8+\bar{y}_9-8\bar{y}_1)$
$=$

효 과 의 계 산

$E_1'=(A-B\times C\times D)$의 효과
$=\frac{1}{4}(\bar{y}_6'+\bar{y}_7'+\bar{y}_8'+\bar{y}_9'-\bar{y}_2'-\bar{y}_3'-\bar{y}_4'-\bar{y}_5')$
$=$

$E_2'=(B-A\times C\times D)$의 효과
$=\frac{1}{4}(\bar{y}_4'+\bar{y}_5'+\bar{y}_8'+\bar{y}_9'-\bar{y}_2'-\bar{y}_3'-\bar{y}_6'-\bar{y}_7')$
$=$

$E_3'=(C-A\times B\times D)$의 효과
$=\frac{1}{4}(\bar{y}_3'+\bar{y}_5'+\bar{y}_7'+\bar{y}_9'-\bar{y}_2'-\bar{y}_4'-\bar{y}_6'-\bar{y}_8')$
$=$

$E_4'=(-D+A\times B\times C)$의 효과
$=\frac{1}{4}(\bar{y}_2'+\bar{y}_5'+\bar{y}_7'+\bar{y}_8'-\bar{y}_3'-\bar{y}_4'-\bar{y}_5'-\bar{y}_6')$
$=$

$E_5'=(A\times B-C\times D)$의 효과
$=\frac{1}{4}(\bar{y}_2'+\bar{y}_3'+\bar{y}_8'+\bar{y}_9'-\bar{y}_4'-\bar{y}_5'-\bar{y}_6'-\bar{y}_7')$
$=$

$E_6'=(A\times C-B\times D)$의 효과
$=\frac{1}{4}(\bar{y}_2'+\bar{y}_4'+\bar{y}_7'+\bar{y}_9'-\bar{y}_3'-\bar{y}_5'-\bar{y}_6'-\bar{y}_8')$
$=$

$E_7'=(-A\times D+B\times C)$의 효과
$=\frac{1}{4}(\bar{y}_3'+\bar{y}_4'+\bar{y}_7'+\bar{y}_8'-\bar{y}_2'-\bar{y}_5'-\bar{y}_6'-\bar{y}_9')$
$=$

$E_8'=$ 평균변화의 효과
$=\frac{1}{9}(\bar{y}_2'+\bar{y}_3'+\bar{y}_4'+\bar{y}_5'+\bar{y}_6'+\bar{y}_7'+\bar{y}_8'+\bar{y}_9'-8\bar{y}_1')$
$=$

블 럭 2

①′= (0, 0, 0, 0) ⑥′= (1, −1, −1, 1)
②′= (−1, −1, −1, −1) ⑦′= (1, −1, 1, −1)
③′= (−1, −1, 1, 1) ⑧′= (1, 1, −1, −1)
④′= (−1, 1, −1, 1) ⑨′= (1, 1, 1, 1)
⑤′= (−1, 1, 1, −1)

공정 (project) =
단계 (phase) =
사이클 번호 (n) =
반응 (response) =
날짜 (date) =

평균치의 계산

⑧	⑨	①′	②′	③′	④′	⑤′	⑥′	⑦′	⑧′	⑨′

(*) 종래의 추정치 s =
(g) 앞사이클까지의 s 의 합계 =
(h) 앞사이클까지 s 의 평균 =
(i) 새로운 표준편차 $s = \bar{R} \times f$
(j) 범위의 평균 $= \dfrac{R_1 + R_2}{2} = \bar{R} =$
(k) 새로운 s 의 합계 =
(l) 새로운 s 의 평균 $= (k)/(n-1) =$

효 과 의 계 산

$$A = \tfrac{1}{2}(E_1 + E_1') =$$
$$B = \tfrac{1}{2}(E_2 + E_2') =$$
$$C = \tfrac{1}{2}(E_3 + E_3') =$$
$$D = \tfrac{1}{2}(E_4 + E_4') =$$
$$A \times B = \tfrac{1}{2}(E_5 + E_5') =$$
$$A \times C = \tfrac{1}{2}(E_6 + E_6') =$$
$$A \times D = \tfrac{1}{2}(E_7 - E_7') =$$
$$B \times C = \tfrac{1}{2}(E_7 + E_7') =$$
$$B \times D = \tfrac{1}{2}(E_6 - E_6') =$$
$$C \times D = \tfrac{1}{2}(E_5 - E_5') =$$
$$A \times B \times C = \tfrac{1}{2}(E_4 + E_4') =$$
$$A \times B \times D = \tfrac{1}{2}(E_3 - E_3') =$$
$$A \times C \times D = \tfrac{1}{2}(E_2 - E_2') =$$
$$B \times C \times D = \tfrac{1}{2}(E_1 - E_1') =$$

평균변화의 효과 $= \tfrac{1}{2}(E_8 + E_8') =$

n	f	$\dfrac{1}{\sqrt{n}}$	$\dfrac{1.33}{\sqrt{n}}$
1		1.00	1.33
2	0.24	0.71	0.94
3	0.27	0.58	0.77
4	0.29	0.50	0.67
5	0.30	0.45	0.59
6	0.31	0.41	0.54
7	0.31	0.38	0.50
8	0.31	0.35	0.47
9	0.32	0.33	0.44
10	0.32	0.32	0.42
11	0.32	0.30	0.40
12	0.32	0.29	0.38
13	0.32	0.28	0.37
14	0.32	0.27	0.36
15	0.33	0.26	0.34
16	0.33	0.25	0.33
17	0.33	0.24	0.32
18	0.33	0.24	0.31

95 % 誤差限界의 계산

새로운 평균치에 대하여 : $\pm \dfrac{2}{\sqrt{n}} s =$

효과에 대하여 : $\pm \dfrac{1}{\sqrt{n}} s =$

평균변화에 대하여 : $\pm \dfrac{1.33}{\sqrt{n}} s =$

계는

$$\pm 2\sqrt{\mathrm{Var}(\bar{y}_{ni})} = \pm \frac{2}{\sqrt{n}}\sigma$$

인데 σ를 s로 대체하면 $\pm \frac{2}{\sqrt{n}}s$가 된다.

다음으로 효과의 유의성 검정을 위한 약 95%의 誤差限界를 계산하여 보면 다음과 같다.

n번째 사이클의 A의 효과는

$$E_A = \frac{1}{2}(E_1' + E_1) = \frac{1}{2}\cdot\frac{1}{4}(\bar{y}_6 + \bar{y}_7 + \bar{y}_8 + \bar{y}_9 - \bar{y}_2 - \bar{y}_3 - \bar{y}_4 - \bar{y}_5 + \bar{y}_6' + \bar{y}_7' + \bar{y}_8' + \bar{y}_9' - \bar{y}_2' - \bar{y}_3' - \bar{y}_4' - \bar{y}_5')$$

이며, 이의 분산은

$$\mathrm{Var}(E_A) = (\frac{1}{8})^2(16 \times \frac{\sigma^2}{n}) = \frac{1}{4}\cdot\frac{\sigma^2}{n}$$

이다. 따라서 약 95% 오차한계는 σ 대신에 s를 사용하면 $\pm \frac{s}{\sqrt{n}}$가 된다.

이와 마찬가지로 B, C, D, $A\times B$, $A\times C$, $A\times D$, $B\times C$, $B\times D$, $C\times D$, $A\times B\times C$, $A\times B\times D$, $A\times C\times D$, $B\times C\times D$의 효과에 대한 오차한계도 구할 수 있으며, 위와 同一하게 $\pm \frac{s}{\sqrt{n}}$가 된다.

다음으로 평균변화(CIM)의 효과에 대한 誤差限界를 구해보면 다음과 같다. n번째 사이클에 대한 CIM의 효과는

$$E_{\mathrm{CIM}} = \frac{1}{2}(E_8' + E_8) = \frac{1}{2}\times\frac{1}{9}(\bar{y}_{n2} + \bar{y}_{n3} + \bar{y}_{n4} + \bar{y}_{n5} + \bar{y}_{n6} + \bar{y}_{n7} + \bar{y}_{n8} + \bar{y}_{n9} - 8\bar{y}_{n1} + \bar{y}_{n2}' + \bar{y}_{n3}' + \bar{y}_{n4}' + \bar{y}_{n5}' + \bar{y}_{n6}' + \bar{y}_{n7}' + \bar{y}_{n8}' + \bar{y}_{n9}' - 8\bar{y}_{n1}')$$

이며, 이의 분산은

$$\mathrm{Var}(E_{\mathrm{CIM}}) = (\frac{1}{18})^2(16\cdot\frac{\sigma^2}{n} + 2 \times 64\frac{\sigma^2}{n}) = \frac{4}{9}\frac{\sigma^2}{n}$$

따라서 95% 오차한계는 σ를 s로 대치하면

$$\pm \frac{4}{3}\frac{s}{\sqrt{n}} = \pm \frac{1.33}{\sqrt{n}}s$$

가 된다.

2.4 얻어진 결론의 해석

EVOP法에 의한 실험에서는 한 단계(phase)의 실험이 끝나면 다음 단계로 넘어가 실험을 계속 진행시켜 最適條件의 변화를 계속 탐지하여야 한다. 한 단계의 실험이 끝나서 다음 단계의 실험에 대한 최적 수준의 위치가 어디에 있는가를 판정할 때의 결정방법은 다음과 같다. 단, 여기에서 유의하다는 것은 제1종 오류 $\alpha = 0.05$일 때의 이야기이고 반응을 극대화 하는 것을 기준으로 하였다. 즉, 반응을 극소화 할 경우는 정반대의 방향으로 움직이면 된다.

(1) 어떤 有意한 효과가 陽이면 이 因子의 수준을 약간 올리고 陰이면 수준을 약간 내리는 방향으로 이동시킨다.

(2) 두 개 이상의 효과가 유의하다면 이들 因子의 수준은 효과의 크기에 比例한 양 만큼 동시에 바꾸어야 한다.

(3) 평균변화(CIM) 효과가 有意하면서 陽이면 현재의 조업조건은 反應表面上에서 오목

부분에 있다고 볼 수 있으며 ②~⑨의 수준 中에서 反應이 큰 쪽으로 다음 단계의 중심점을 옮겨야 한다.

(4) 交互作用 $A\times B$의 효과가 有意하면서 陽이면 A, B 두 수준을 동시에 올리든지 아니면 동시에 내리는 방향으로 옮겨야 한다. 만약 유의하면서 陰이면 한 수준은 올리고 나머지 한 수준은 내리는 방향으로 이동시킨다.

(5) 交互作用 $A\times B\times C$의 효과가 有意하면서 陽이면 A, B, C 세 수준을 동시에 올리든지 두 수준은 내리고 나머지 한 수준만 올리는 방향으로 中心을 이동하여야 한다. 만일 有意하면서 陰이면 세 수준을 동시에 내리든지 두 수준은 올리고 나머지 한 수준만 내리는 방향으로 이동시킨다.

위의 (1), (2), (3), (4)는 2인자나 3인자의 경우와 흡사하고 (5)만이 4因子의 EVOP法에서 추가되는 부분이다.

(1)~(5)의 방향설정을 基本으로 하며 어떻게 中心點을 옮겨야 할지는 실험자가 결정하여야 한다. 예를 들어 A, B의 효과가 有意하면서 陽이고 $A\times B\times C$의 효과는 有意하면서 陰이면 A와 B의 수준은 올리고 C의 수준은 내리는 방향으로 즉, (1, 1, −1, 0)의 方向으로 最適條件이 옮겨져야 한다. 이런 경우 어느 정도 옮겨야 할 지는 실험자의 판단에 의존하여야 한다.

3. 수정된 4因子의 EVOP法

3, 1 실험계획법

2절에서 소개한 4因子의 EVOP法에서는 한 블럭에 9개의 실험점을 갖게 된다. 한 블럭內의 실험점들은 주어진 因子의 수준변화 이외에는 同一한 실험조건 下에서 실험을 하여야 하나 한 로트(lot)가 9回分이 되지 않는다든가 하나의 爐에 9개가 들어갈 수 없다든가 하는 경우가 생기게 된다. 이 경우에는 블럭의 수를 4개로 하며 한 블럭에 중심점을 포함하여 5개의 실험점을 갖는 방법을 생각하여 볼 수 있다. 즉, 가장 효과가 적으리라 예상되는 두 因子의 교호작용을 결합요인으로 갖는 3因子의 교호작용 둘을 정의대비(defining contrast)로 하여 블럭을 4개로 나눈다. 예를 들면 A, B, C, D 네 因子를 갖는 실험에서 A와 D의 교호작용이 가장 적으리라 예상되는 경우 정의대비는

$$I = ABC = BCD = AD$$

가 되고, 중심점을 제외하면 블럭은 그림(3.1)과 같이 나누어지게 된다. 여기서 각 실험점들의 표현은 2^4 要因實驗에서와 같은 方法으로 하였다.

블럭 1	블럭 2	블럭 3	블럭 4
c	cd	d	(1)
b	bd	bcd	bc
ad	a	ac	acd
abcd	abc	ab	abd
($ABC+$, $BCD+$)	($ABC+$, $BCD-$)	($ABC-$, $BCD+$)	($ABC-$, $BCD-$)

그림 (3. 1)

그리고 별명(Alias)은 다음과 같이 된다.

블럭 1

$A = BC = ABCD = D$

$B = AC = CD = ABC$

$C = AB = BD = ACD$

블럭 2

$A = BC = -ABCD = -D$

$B = AC = -CD = -ABC$

$C = AB = -BD = -ACD$

블럭 3

$A = -BC = ABCD = -D$

$B = -AC = CD = -ABC$

$C = -AB = BD = -ACD$

블럭 4

$A = -BC = -ABCD = D$

$B = -AC = -CD = ABC$

$C = -AB = -BD = ACD$

그러므로 $E_1^{(1)}$, $E_2^{(1)}$, $E_3^{(1)}$, $E_1^{(2)}$, …… $E_3^{(3)}$, …… $E_3^{(4)}$를 다음과 같이 정의하면 주효과와 교호작

용들을 각각 $E_i^{(n)}$의 式으로 나타낼 수 있다.

블럭 1 로부터

$$E_1^{(1)} = \text{Effect of } (A + BC + ABCD + D) = \frac{1}{2}(ab + abcd - c - b)$$

$$E_2^{(1)} = \text{Effect of } (B + AC + CD + ABC) = \frac{1}{2}(b + abcd - c - ad)$$

$$E_3^{(1)} = \text{Effect of } (C + AB + BD + ACD) = \frac{1}{2}(c + abcd - b - ad)$$

블럭 2 로부터

$$E_1^{(2)} = \text{Effect of } (A + BC - ABCD - D) = \frac{1}{2}(a + abc - cd - bd)$$

$$E_2^{(2)} = \text{Effect of } (B + AC - CD - ABC) = \frac{1}{2}(bd + abc - cd - a)$$

$$E_3^{(2)} = \text{Effect of } (C + AB - BD - ACD) = \frac{1}{2}(cd + abc - bd - a)$$

블럭 3 으로부터

$$E_1^{(3)} = \text{Effect of } (A - BC + ABCD - D) = \frac{1}{2}(ac + ab - d - bcd)$$

$$E_2^{(3)} = \text{Effect of } (B - AC + CD - ABC) = \frac{1}{2}(bcd + ab - d - ac)$$

$$E_3^{(3)} = \text{Effect of } (C - AB + BD - ACD) = \frac{1}{2}(bcd + ac - d - ab)$$

블럭 4 로부터

$$E_1^{(4)} = \text{Effect of } (A - BC - ABCD + D) = \frac{1}{2}(acd + abd - (1) - bc)$$

$$E_2^{(4)} = \text{Effect of } (B - AC - CD + ABC) = \frac{1}{2}(bc + abd - (1) - acd)$$

$$E_3^{(4)} = \text{Effect of } (C - AB - BD + ACD) = \frac{1}{2}(bc + acd - (1) - abd)$$

위의 式들로부터 각 효과들을 유도하면 다음과 같다. 즉,

$$\text{Effect of } A = \frac{1}{4}(E_1^{(1)} + E_1^{(2)} + E_1^{(3)} + E_1^{(4)})$$

$$BC = \frac{1}{4}(E_1^{(1)} + E_1^{(2)} - E_1^{(3)} - E_1^{(4)})$$

$$ABCD = \frac{1}{4}(E_1^{(1)} - E_1^{(2)} + E_1^{(3)} - E_1^{(4)})$$

$$D = \frac{1}{4}(E_1^{(1)} - E_1^{(2)} - E_1^{(3)} + E_1^{(4)})$$

$$\text{Effect of } B = \frac{1}{4}(E_2^{(1)} + E_2^{(2)} + E_2^{(3)} + E_2^{(4)})$$

$$AC = \frac{1}{4}(E_2^{(1)} + E_2^{(2)} - E_2^{(3)} - E_2^{(4)})$$

$$CD = \frac{1}{4}\left(E_2^{(1)} - E_2^{(2)} + E_2^{(3)} - E_2^{(4)}\right)$$

$$ABC = \frac{1}{4}\left(E_2^{(1)} - E_2^{(2)} - E_2^{(3)} + E_2^{(4)}\right)$$

$$\text{Effect of } C = \frac{1}{4}\left(E_3^{(1)} + E_3^{(2)} + E_3^{(3)} + E_3^{(4)}\right)$$

$$AB = \frac{1}{4}\left(E_3^{(1)} + E_3^{(2)} - E_3^{(3)} - E_3^{(4)}\right)$$

$$BD = \frac{1}{4}\left(E_3^{(1)} - E_3^{(2)} + E_3^{(3)} - E_3^{(4)}\right)$$

$$ACD = \frac{1}{4}\left(E_3^{(1)} - E_3^{(2)} - E_3^{(3)} + E_3^{(4)}\right)$$

위의 效果들을 살펴 보면 별명(Alis)의 부호들과 밀접한 관계가 있음을 발견하게 된다. 이점에 대하여는 다음 4절에서 언급하겠다. 그리고 구하여진 效果들 中의 3次 이상의 교호작용은 실제로는 아무 의미가 없음을 알 수 있다. 평균변화의 효과(CIM)는 각 블럭마다 중심점을 각 인자의 중간 수준에서의 실험점으로 하나씩 주어줌으로써 쉽게 구하여 질 수 있다.

이 수정된 4因子의 EVOP法에서도 EVOP 계산 시이트를 이용하여 간단히 분석할 수 있는데 그를 위해 편의상 표(2.1)에서와 같은 방법으로 표기한다. 즉, 위의 예에서 보면, 그림(3.1)의 각 블럭에 中心點을 하나씩 주어서 다음 표(3.2)와 같이 나타낸다.

블 럭 1	블 럭 2	블 럭 3	블 럭 4
$1^{(1)} = (0, 0, 0, 0)$	$1^{(2)} = (0, 0, 0, 0)$	$1^{(3)} = (0, 0, 0, 0)$	$1^{(4)} = (0, 0, 0, 0)$
$2^{(1)} = (-1, -1, 1, -1)$	$2^{(2)} = (-1, -1, 1, 1)$	$2^{(3)} = (-1, -1, -1, 1)$	$2^{(4)} = (-1, -1, -1, -1)$
$3^{(1)} = (-1, 1, -1, -1)$	$3^{(2)} = (-1, 1, -1, 1)$	$3^{(3)} = (-1, 1, 1, 1)$	$3^{(4)} = (-1, 1, 1, -1)$
$4^{(1)} = (1, -1, -1, 1)$	$4^{(2)} = (1, -1, -1, -1)$	$4^{(3)} = (1, -1, 1, -1)$	$4^{(4)} = (1, -1, 1, 1)$
$5^{(1)} = (1, 1, 1, 1)$	$5^{(2)} = (1, 1, 1, -1)$	$5^{(3)} = (1, 1, -1, -1)$	$5^{(4)} = (1, 1, -1, 1)$

표(3.2)

3.2 계산방법

블럭 1, 2, 3, 4로 나누어서 실험하며 데이터 시이트는 표(3.3)과 같다.

실험조건 / 사이클	블 럭 1	블 럭 2	블 럭 3	블 럭 4
	$1^{(1)}\ 2^{(1)}\ 3^{(1)}\ 4^{(1)}\ 5^{(1)}$	$1^{(2)}\ 2^{(2)}\ 3^{(2)}\ 4^{(2)}\ 5^{(2)}$	$1^{(3)}\ 2^{(3)}\ 3^{(3)}\ 4^{(3)}\ 5^{(3)}$	$1^{(4)}\ 2^{(4)}\ 3^{(4)}\ 4^{(4)}\ 5^{(4)}$
1	$y_{11}^{(1)}\ y_{12}^{(1)}\ y_{13}^{(1)}\ y_{14}^{(1)}\ y_{15}^{(1)}$	$y_{11}^{(2)}$ .... $y_{15}^{(2)}$	$y_{11}^{(3)}$ .... $y_{15}^{(3)}$	$y_{11}^{(4)}$ .... $y_{15}^{(4)}$
2	$y_{21}^{(1)}\ y_{22}^{(1)}\ y_{23}^{(1)}$	$y_{21}^{(2)}$		
3				
⋮				

표(3.3) 수정된 4因子用 데이터 시이트

이 데이터를 분석하는데에 표(3.4)의 계산 시이트를 이용하면 편리하다. 표(3.4)에서 각 효과들의 계산은 $A \times D$의 교호작용이 없다는 가정하에 하였다.

표(3.4) 수정된 4인자용 EVOP 계산 시이

	블 럭 1	블 럭 2
	$1^{(1)} = (0, 0, 0, 0)$ $2^{(1)} = (-1, -1, 1, -1)$ $3^{(1)} = (-1, 1, -1, -1)$ $4^{(1)} = (1, -1, -1, 1)$ $5^{(1)} = (1, 1, 1, 1)$	$1^{(2)} = (0, 0, 0, 0)$ $2^{(2)} = (-1, -1, 1, 1)$ $3^{(2)} = (-1, 1, -1, 1)$ $4^{(2)} = (1, -1, -1, -1)$ $5^{(2)} = (1, 1, 1, -1)$

	평균치의 계산					평균치의 계산				
조 업 조 건	$1^{(1)}$	$2^{(1)}$	$3^{(1)}$	$4^{(1)}$	$5^{(1)}$	$1^{(2)}$	$2^{(2)}$	$3^{(2)}$	$4^{(2)}$	$^{(2)}$
(a) 앞사이클까지의 합계										
(b) 앞사이클까지의 평균										
(c) 새로운 측정치										
(d) (b) − (c) (차이)										
(e) (a) − (c) (합계)										
(f) 새로운 평균치										

효과의 계산

$E_1^{(1)} = (A\times B\times C + A\times B\times C\times D\times -D)$의 효과

$= \frac{1}{2}(\bar{y}_4^{(1)} + \bar{y}_5^{(1)} - \bar{y}_2^{(1)} - \bar{y}_3^{(1)}) =$

$E_2^{(1)} = (B + A\times C + C\times D + A\times B\times C)$의 효과

$= \frac{1}{2}(\bar{y}_3^{(1)} + \bar{y}_5^{(1)} - \bar{y}_2^{(1)} - \bar{y}_4^{(1)}) =$

$E_3^{(1)} = (C + A\times B + B\times D + A\times C\times D)$의 효과

$= \frac{1}{2}(\bar{y}_2^{(1)} + \bar{y}_5^{(1)} - \bar{y}_3^{(1)} - \bar{y}_4^{(1)}) =$

$E_4^{(1)} =$ 평균변화의 효과

$= \frac{1}{5}(\bar{y}_2^{(1)} + \bar{y}_3^{(1)} + \bar{y}_4^{(1)} + \bar{y}_5^{(1)} - 4\bar{y}_1^{(1)}) =$

효과의 계산

$E_1^{(2)} = (A + B\times C - A\times B\times C\times D - D)$의 효과

$= \frac{1}{2}(\bar{y}_4^{(2)} + \bar{y}_5^{(2)} - \bar{y}_2^{(2)} - \bar{y}_3^{(2)}) =$

$E_2^{(2)} = (B + A\times C - C\times D - A\times B\times C)$의 효과

$= \frac{1}{2}(\bar{y}_3^{(2)} + \bar{y}_5^{(2)} - \bar{y}_2^{(2)} - \bar{y}_4^{(2)}) =$

$E_3^{(2)} = (C + A\times B - B\times D - A\times C\times D)$의 효과

$= \frac{1}{2}(\bar{y}_2^{(2)} + \bar{y}_5^{(2)} - \bar{y}_4^{(2)} - \bar{y}_3^{(2)}) =$

$E_4^{(2)} =$ 평균변화의 효과

$E_4 = \frac{1}{5}(\bar{y}_2^{(2)} + \bar{y}_3^{(2)} + \bar{y}_4^{(2)} + \bar{y}_5^{(2)} - \bar{y}_1^{(2)}) =$

효과의

$E_1^{(3)} = (A - B\times C + A\times B\times$

$= \frac{1}{2}(\bar{y}_4^{(3)} - \bar{y}_5^{(3)} - \bar{y}_2$

$E_2^{(3)} = (B - A\times C + C\times D-$

$= \frac{1}{2}(\bar{y}_3^{(3)} + \bar{y}_5^{(3)} - \bar{y}_2$

$E_3^{(3)} = (C - A\times B + B\times D-$

$= \frac{1}{2}(\bar{y}_2^{(3)} + \bar{y}_5^{(3)} - \bar{y}_3$

$E_4^{(3)} =$ 평균변화의 효과

$= \frac{1}{5}(\bar{y}_2^{(3)} + \bar{y}_3^{(3)} + \bar{y}_4$

$A = \frac{1}{4}(E_1^{(1)} + E_1^{(2)} + E_1^{(3)} + E_1^{(4)}) =$

$B = \frac{1}{4}(E_2^{(1)} + E_2^{(2)} + E_2^{(3)} + E_2^{(4)}) =$

$C = \frac{1}{4}(E_3^{(1)} + E_3^{(2)} + E_3^{(3)} + E_3^{(4)}) =$

$D = \frac{1}{4}(E_1^{(1)} - E_1^{(2)} - E_1^{(3)} + E_1^{(4)}) =$

$A\times B = \frac{1}{4}(E_3^{(1)} + E_3^{(2)} - E_3^{(3)} - E_3^{(4)}) =$

$A\times C = \frac{1}{4}(E_2^{(1)} + E_2^{(2)} - E_2^{(3)} - E_2^{(4)}) =$

$B\times C = \frac{1}{4}(E_1^{(1)} + E_1^{(2)} - E_1^{(3)} - E_1^{(4)}) =$

$B\times D = \frac{1}{4}(E_3^{(1)} - E_3^{(2)} + E_3^{(3)} - E_3^{(4)}) =$

$C\times D = \frac{1}{4}(E_2^{(1)} - E_2^{(2)} + E_2^{(3)} - E_2^{(4)}) =$

평균변화의 효과 $= \frac{1}{4}($

새로운

효과에

평균변

트 ($A \times D$가 블럭과 교락된 경우)

블 럭 3	블 럭 4	
$1^{(3)} = (0,\ 0,\ 0,\ 0)$	$1^{(4)} = (0,\ 0,\ 0,\ 0)$	공정 (project) =
$2^{(3)} = (-1, -1, -1,\ 1)$	$2^{(4)} = (-1, -1, -1, -1)$	단계 (phase) =
$3^{(3)} = (-1,\ 1,\ 1,\ 1)$	$3^{(4)} = (-1,\ 1,\ 1, -1)$	사이클번호 (n) =
$4^{(3)} = (1, -1,\ 1, -1)$	$4^{(4)} = (1, -1,\ 1,\ 1)$	반응 (response) =
$5^{(3)} = (1,\ 1, -1, -1)$	$5^{(4)} = (1,\ 1, -1,\ 1)$	날짜 (date) =

평균치의 계산					평균치의 계산					표준편차의 계산
$1^{(3)}$	$2^{(3)}$	$3^{(3)}$	$4^{(3)}$	$5^{(3)}$	$1^{(4)}$	$2^{(4)}$	$3^{(4)}$	$4^{(4)}$	$5^{(4)}$	(*) 종래의 추정치 s =
										(g) 앞사이클까지의 s의 합계 =
										(h) 앞사이클까지의 s의 평균 =
										(i) 새로운 표준편차 $s = \bar{R} \times f$ =
										(j) 범위의 평균 = $\dfrac{R^{(1)} + R^{(2)} + R^{(3)} + R^{(4)}}{4} = \bar{R}$
										(k) 새로운 s의 합계 =
										(l) 새로운 s의 평균 = (k) / ($n-1$) =

계산	효과의 계산
$\times C \times D - D$)의 효과	$E_1^{(4)} = (A - B \times C - A \times B \times C \times D + D)$의 효과
$^{3)} - \bar{y}_3^{(3)}) =$	$= \frac{1}{2}(\bar{y}_4^{(4)} + \bar{y}_5^{(4)} - \bar{y}_2^{(4)} - \bar{y}_3^{(4)}) =$
$-A \times B \times C$)의 효과	$E_2^{(4)} = (B - A \times C - C \times D + A \times B \times C)$의 효과
$^{3)} - \bar{y}_4^{(3)}) =$	$= \frac{1}{2}(\bar{y}_3^{(4)} + \bar{y}_5^{(4)} - \bar{y}_2^{(4)} - \bar{y}_4^{(4)}) =$
$-A \times C \times D$)의 효과	$E_3^{(4)} = (C - A \times B - B \times D + A \times C \times D)$의 효과
$^{3)} - \bar{y}_4^{(3)}) =$	$= \frac{1}{2}(\bar{y}_2^{(4)} + \bar{y}_5^{(4)} - \bar{y}_3^{(4)} - \bar{y}_4^{(4)}) =$
	$E_4^{(4)}$ = 평균변화의 효과
$^{3)} + \bar{y}_5^{(3)} - 4\bar{y}_1^{(3)}) =$	$E = \frac{1}{5}(\bar{y}_2^{(4)} + \bar{y}_3^{(4)} + \bar{y}_4^{(4)} + \bar{y}_5^{(4)} - 4\bar{y}_1^{(4)}) =$

$E_4^{(1)} + E_4^{(2)} + E_4^{(3)} + E_4^{(4)}) =$

95 % 課差限界의 계산

평균치에 대하여 : $\pm \dfrac{2}{\sqrt{n}} s =$

대하여 : $\pm \dfrac{1}{\sqrt{n}} s =$

화에 대하여 : $\pm \dfrac{0.89}{\sqrt{n}} s =$

n	f	$\dfrac{1}{\sqrt{n}}$	$\dfrac{0.89}{\sqrt{n}}$
1		1.00	0.89
2	0.30	0.71	0.63
3	0.35	0.58	0.51
4	0.37	0.50	0.45
5	0.38	0.45	0.40
6	0.39	0.41	0.36
7	0.40	0.38	0.34
8	0.40	0.35	0.31
9	0.40	0.33	0.30
10	0.41	0.32	0.28
11	0.41	0.30	0.27
12	0.41	0.29	0.26
13	0.41	0.28	0.25
14	0.41	0.27	0.24

이 계산 시이트의 사용방법과 얻어진 결론의 해석은 2절에서와 同一하므로 설명을 생략하겠다.

3·3 이론적 근거

평균변화(CIM)의 효과에 대한 信賴限界를 제외하고는 2절에서와 모두 같은 결과를 갖는다.

n번째 사이클에 대한 CIM의 효과는

$$E_{CIM} = \frac{1}{4}(E_4^{(1)} + E_4^{(2)} + E_4^{(3)} + E_4^{(4)})$$

$$= \frac{1}{4} \times \frac{1}{5}(\bar{y}_{n2}^{(1)} + \bar{y}_{n3}^{(1)} + \bar{y}_{n4}^{(1)} + \bar{y}_{n5}^{(1)}$$

$$- 4\bar{y}_{n1}^{(1)} + \bar{y}_{n2}^{(2)} + \bar{y}_{n3}^{(2)} + \bar{y}_{n4}^{(2)} + \bar{y}_{n5}^{(2)}$$

$$- 4\bar{y}_{n1}^{(2)} + \bar{y}_{n2}^{(3)} + \bar{y}_{n3}^{(3)} + \bar{y}_{n4}^{(3)} + \bar{y}_{n5}^{(3)}$$

$$- 4\bar{y}_{n1}^{(3)} + \bar{y}_{n2}^{(4)} + \bar{y}_{n3}^{(4)} + \bar{y}_{n4}^{(4)} + \bar{y}_{n5}^{(4)}$$

$$- 4\bar{y}_{n1}^{(4)})$$

이며, 이의 分散은

$$\mathrm{Var}(E_{CIM}) = \left(\frac{1}{20}\right)^2 \left(16 \cdot \frac{\sigma^2}{n} + 4 \times 16\frac{\sigma^2}{n}\right)$$

$$= \frac{\sigma^2}{5n}$$

이다. 따라서 95% 신뢰한계는 σ를 s로 대신하면

$$\pm 2\sqrt{\frac{1}{5n}}\ s = \pm \frac{0.89}{\sqrt{n}}\ s$$

가 된다.

4. 4因子의 EVOP法과 수정된 4因子의 EVOP法의 비교

2절에서 소개한 4因子의 EVOP法은 같은 실험조건 下에 9回의 실험을 할 수 있는 경우에만 가능하다. 이 경우에는 최고차의 교호작용 $A \times B \times C \times D$만이 블럭과 交絡(confound) 되어 있으므로 3因子 교호작용 이하의 효과를 다 구할 수가 있게 된다. 그러므로 좀더 빠르게 최적점으로 가까이 갈 수 있는 반면 고려하여야 하는 효과가 많으므로 다음 단계(phase)의 中心點의 이동방향이 간단히 구해지지 않는 경우가 있게 된다.

3절에서 소개한 수정된 4因子의 EVOP法은 한 블럭 안에 실험점이 5개이므로 관리하기가 편리하다. 그러나 정의대비(defining contrast)로써 3因子의 교호작용 둘과 그들의 긴 합요인인 2因子의 교호작용이 블럭효과와 交絡되어 있다. 그러므로 이들 이외의 3因子 이상의 교호작용의 효과가 구해지더라도 실제로는 무의미해지고 만다. 그러나 3因子 이상의 교호작용이 무시되는 경우라면 이 방법이 훨씬 효율적일 수 있다.

5. EVOP法의 일반화

앞의 2, 3절을 살펴 보면 2^n 要因實驗에서 힌트를 얻었음을 알 수 있다. 즉, 가장 높은 차수의 교호작용을 정의대비로 하면 전체를 두 블럭으로 나누어서 한 블럭에 中心點을 포함하여 $(2^{n-1}+1)$개의 實驗點을 가지면 정의대비를 제외한 모든 效果를 구해 줄 수가 있다. 이때, 너무 실험점이 많다고 여겨지면 네 블럭으로 나누는 2^{n-2} 要因實驗法을 적용하고 이 경우의 한 블럭 내의 실험점은 $(2^{n-2}+1)$개가 된다. 또한 이것도 많다고 여겨질 때는 2^{n-3} 要因實驗法을 적용시켜 8블럭으로 나누어 준다. 이러한 방법으로 실험에 적당한 블럭의 수를 결정하여 각 블럭에서의 실험점들을 정한 후에 因子들의 效果를 구해 줄 수 있게 된다.

예를 들면 5因子의 실험에서 4블럭으로 나누어 한 블럭 內의 실험점을 9개 씩으로 한다면 다음과 같이 효과를 구해 줄 수 있다. 정의대비를

$$I = ABC = CDE = ABDE$$

와 같이 정하면 이에 따른 각 블럭의 실험점들은 中心點을 제외하면 그림(5.1)과 같다.

이때에 별명(Alias)은 각 블럭에서 다음과

같이 얻어진다.

블럭 1	블럭 2	블럭 3	블럭 4
c	ce	e	(1)
cde	cd	d	de
be	b	bc	bce
bd	bde	$bcde$	bcd
ae	a	ac	ace
ad	ade	$acde$	acd
abc	$abce$	abe	ab
$abcde$	$abcd$	abd	$abde$
($ABC+$, $CDE+$)	($ABC+$, $CDE-$)	($ABC-$, $CDE+$)	($ABC-$, $CDE-$)

그림(5.1)

블럭 1에서

$A = BC = ACDE = BDE$

$B = AC = BCDE = ADE$

$C = AB = DE = ABCDE$

$D = ABCD = CE = ABE$

$E = ABCE = CD = ABD$

$AD = BCD = ACE = BE$

$AE = BCE = ACD = BD$

블럭 2에서

$A = BC = -ACDE = -BDE$

$B = AC = -BCDE = -ADE$

$C = AB = -DE = -ABCDE$

$D = ABCD = -CE = -ABE$

$E = ABCE = -CD = -ABD$

$AD = BCD = -ACE = -BE$

$AE = BCE = -ACD = -BD$

블럭 3과 블럭 4에서는 각 별명들이

$A = -BC = ACDE = -BDE$,

$A = -BC = -ACDE = BDE$

와 같은 기호를 각각 따르리라는 것을 3. 2절과 위의 블럭 1과 2로부터 쉽게 유추할 수가 있다.

각 效果들의 계산은 각 블럭을 ( )안의 첨자로 나타내면

$E_1^{(1)} = (A + B\times C + A\times C\times D\times E + B\times D\times E)$의 효과

$= \frac{1}{4}(ae + ad + abc + abcde - c - cde - be - bd)$

$E_1^{(2)} = (A + B\times C - A\times C\times D\times E - B\times D\times E)$의 효과

$= \frac{1}{4}(a + ade + abce + abcd - ce - cd - b - bde)$

$E_1^{(3)} = (A - B\times C + A\times C\times D\times E - B\times D\times E)$의 효과

$= \frac{1}{4}(ac + acde + abe + abd - e - d - bc - bcde)$

$$E_1^{(4)} = (A - B \times C - A \times C \times D \times E + B \times D \times E)\text{의 효과}$$

$$= \frac{1}{4}(ace + acd + ab + abde - (1) - de - bce - bcd)$$

B, C, D, E, AD와 AE의 別名에 대하여도 각각을 $E_i^{(k)}$, $i = 1, \cdots 7$, $k = 1, 2, 3, 4$로 위와 같은 형태로 나타낼 수 있다. 3. 2절에서의 계산과정을 잘 살펴보면 4블럭으로 나누었을 때의 각 因子들의 효과를 쉽게 구할 수 있다. 즉,

$$\text{효과 } A = \frac{1}{4}(E_1^{(1)} + E_1^{(2)} + E_1^{(3)} + E_1^{(4)})$$

$$B \times C = \frac{1}{4}(E_1^{(1)} + E_1^{(2)} - E_1^{(3)} - E_1^{(4)})$$

$$A \times C \times D \times E = \frac{1}{4}(E_1^{(1)} - E_1^{(2)} + E_1^{(3)} - E_1^{(4)})$$

$$B \times D \times E = \frac{1}{4}(E_1^{(1)} - E_1^{(2)} - E_1^{(3)} + E_1^{(4)})$$

$$B = \frac{1}{4}(E_2^{(1)} + E_2^{(2)} + E_2^{(3)} + E_2^{(4)})$$

$$A \times C = \frac{1}{4}(E_2^{(1)} + E_2^{(2)} - E_2^{(3)} - E_2^{(4)})$$

$$\vdots$$

구하고자 하는 효과가 별명의 몇 번째 위치에 있나에 따라서 그 해당하는 블럭의 정의대비의 부호를 각 블럭의 해당하는 별명의 효과에 곱해 준 뒤 그것들의 평균을 구하면 된다.

예를 들면 위의 예제에서 $B \times C$는 첫번째 별명의 두번째 위치에 있으므로 블럭 2의 정의대비의 부호를 살펴 보면 $+I = +ABC = -CDE = -ABDE$ 즉 $(++--)$이다.

그러므로

$$\text{효과 } B \times C = \frac{1}{4}\{E_1^{(1)} + E_1^{(2)} + (-1)E_1^{(3)} + (-1)E_1^{(4)}\}$$

$$= \frac{1}{4}(E_1^{(1)} + E_1^{(2)} - E_1^{(3)} - E_1^{(4)}) \text{ 이다.}$$

물론, 이 경우에도 4因子 이상의 교호작용의 효과는 실제로는 무의미하다.

일반적으로 EVOP法의 계산 시이트를 만드는 것은 각 블럭마다 $(0, 0, \cdots, 0, 0)$의 中心點을 첨가하여 평균변화 효과를 구할 수 있도록 하고 각 因子의 높은 수준을 1, 낮은 수준을 -1로 하여 실험점들을 나타내어 주고 위의 효과의 계산식을 이용하여 效果들을 구하고 그에 따른 신뢰구간을 2절이나 3절의 방법과 같이 유도하여 구해 줌으로써 할 수 있다. 그리고 다음 단계(phase)의 中心點의 위치도 2. 4절의 방향설정을 기본으로 하여 쉽게 적용시킬 수가 있게 된다.

參 考 文 獻

(1) Barnett, E.H. (1960). "Introduction to Evolutionary operation," Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 52, pp. 500.

(2) Box, G.E.P. (1957). "Evolutionary Operation: A Method for Increasing Industrial Productivity," Applied Statist. Vol. 16, pp. 3 – 23.

(3) Box, G.E.P. and Hunter, J.S. (1959). "Condensed Calculations for Evolutionary Operation Programs," Technometrics, Vol. 1, pp. 77-95.

(4) John, P.W.M. Statistical Design and Analysis of Experiments, Macmillan Company, New York. 1971.

(5) Hicks, C.R. Fundamental Concepts in the Design of Experiments, Holt, Rinehart and Winston, Inc. New York, 1964.

(6) Pearson, E.S. (1932). "The Percentage Limits for the Dist. of Range in Samples from a Normal Population," Biometrika, Vol. 24. pp. 404-17.

(7) 朴聖炫, 현대실험계획법, 大英社, 1982.