The Korean Communications
in Statistics Vol. 9, No. 3, 2002
pp. 733-741

Block Designs For Comparisons Within Two Groups of Inbred Lines in Diallel Crosses

Young Nam Son[1)]

Abstract

A class of block designs for general combining ability comparisons within two groups of inbred lines in diallel crosses is given. These block designs are constructed by using balanced block designs obtained by cyclically developing a single initial block. Also, the efficiencies of block designs are tabulated for number of lines 26 or less.

Keywords : diallel crosses, general combining ability, balanced block designs

1. 서론

식물의 육종실험에서 근교계통(inbred line)의 유전적 특성은 이면교배(diallel cross)를 통해 조사되는데 p를 근교계통의 수, i번째 근교계통과 j번째 근교계통의 교배를 (i,j), $i<j=1,2,\ldots,p$, 실험에 이용되는 서로 다른 교배의 수를 n_c라 하자. 그러면 $n_c=p(p-1)/2$개의 교배를 실험하여 근교계통의 일반조합능력(general combining ability: *gca*)을 비교하는 계획을 완전이면교배(Complete Diallel Cross: CDC)계획이라 한다. Gupta와 Kageyama(1994)는 지분된 균형 불완비블록(nested balanced incomplete block)계획을 이용하여 블록 CDC계획을 제시하였고 Dey와 Mihda(1996)는 삼각형 부분균형 불완비블록 계획을 이용한 블록계획 그리고 Das, Dey와 Dean(1998)은 Dey 등(1996)의 방법을 확장한 블록 CDC 계획을 제시하였다. CDC에서 p가 커지게 되면 교배의 수가 급격히 증가되어 모든 교배를 실험하는 CDC 계획이 현실적이지 못하므로 $p(p-2)/2$개의 교배 중에서 일부분만을 실험하여 *gca*를 비교하는데 우리는 이를 부분이면교배(Partial Diallel Cross : PDC)라 한다. 블록 PDC 계획을 설계하는 연구로는 Singh 과 Hinkelmann (1995, 1998), Gupta, Das 와 Kageyama(1995), 그리고 Ghosh 와 Divecha(1997)등이 있다.

Kim, Bae와 Kim(2001)은 p개의 근교계통이 두 그룹으로 분리되어 같은 그룹에 속하는 근교계통간에는 교배를 하지 않고 서로 다른 그룹에 포함된 근교계통끼리만 교배를 하여 근교계통을 비교하는 블록계획을 설계하는 방법과 효율성을 계산하는 방법을 제시하였다. 그러나 이들이 제시한 블록계획은 비 연결(disconnected)계획이므로 모든 근교계통간의 *gca* 효과차이를 추정할 수

1) Researcher, The Research Institute of Statistics Chosun University, Gwangju 501-759, Korea
E-mail: syn2000@netian.com

없다. 이러한 실험상황에서는 p개의 모든 근교계통의 비교가 두 단계를 걸쳐서 이루어지는 이면교배실험이 고려되어야 한다. 첫 번째 단계는 각 그룹 내에 속한 근교계통만을 대상으로 가장 좋은 gca효과를 나타내는 근교계통을 선택하는 것이고, 두 번째 단계에서는 두 그룹에서 선택된 근교계통만으로 이루어진 한 개의 교배를 실험하여 gca효과가 가장 좋은 근교계통을 찾는 것이다.

본 연구에서는 p개의 근교계통이 두 그룹으로 분리되어 있을 때 첫 번째 단계 즉, 각 그룹 내에서 근교계통의 gca 효과를 비교하기 위한 블록계획을 구성하는 방법을 제시한다. 이를 위해서 2절에서 균형블록(balanced block : BB)계획을 이용하여 교배의 반복수가 1인 블록계획을 설계하는 방법을 살펴보고 3절에서는 $p \leq 26$일 때 BB계획으로부터 유도되는 블록계획과 이들의 효율성을 표로 제시한다.

2. 블록계획의 설계방법

두 개의 각 그룹에 $p_1, p_2 (p = p_1 + p_2)$개의 근교계통이 있다고 할 때 i번째 그룹에서의 근교계통을 $(i-1)p_1 + j$, $j = 1, 2, \ldots, p_i$, $i = 1, 2$로 나타내고 $n_c = p_1 p_2$개의 서로 다른 교배를 블록크기가 k인 b개의 블록에 배치하는 이면교배모형(Singh과 Hinkelmann, 1995)은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$Y = \mu 1_n + \Delta_1 g + \Delta_2 \beta + \varepsilon \tag{2.1}$$

여기서 Y는 $n \times 1$ 관찰 값 벡터이고 μ는 전체평균, 1_n은 모든 요소가 1인 $n \times 1$ 벡터를 나타낸다. 또한, $g = (g_1, g_2, \ldots, g_p)'$와 $\beta = (\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_b)'$는 각각 gca 효과벡터와 블록효과벡터를 나타내며 Δ_1, Δ_2는 각각 p개의 gca와 b개의 블록에 대응하는 계획행렬이고 ε는 평균이 0, 분산이 σ^2인 $n \times 1$ 오차항 벡터이다. 모형 (2.1)에서 gca 효과벡터 g를 추정하기 위한 정보행렬 C는 다음과 같이 정의된다(Gupta와 Kageyama,1994).

$$C = (c_{ij}) = G - \frac{1}{k} NN' \tag{2.2}$$

여기서 $G = (g_{ij})$는 대칭행렬로서 g_{ii}와 g_{ij}는 각각 i번째 근교계통과 교배 (i, j)의 반복 수를 나타내고 $N = \Delta_1' \Delta_2$는 $p \times b$ 근교계통 - 블록 빈도행렬을 나타낸다.

같은 그룹에 속하는 근교계통끼리는 교배를 하지 않고 서로 다른 그룹에 포함된 근교계통끼리만 교배를 하여 두 그룹내의 근교계통을 비교할 수 있는 블록계획을 설계하기 위해서 균형블록(balanced block : BB)계획을 정의하면 다음과 같다.

정의 2.1. 모수가 $p_1 = b_1, r_1 = k_1, \lambda$인 블록계획이 아래의 조건을 만족하면 우리는 이 계획을 균형블록 계획이라 한다(Das와 Dey, 1989).

(a) $\sum_{j=1}^{b_1} n_{ij} n_{lj} = \lambda$, $i \neq l = 1, 2, \ldots, p_1$ 이고

(b) 모든 i, j에 대해서 $|n_{ij} - k_1/p_1| < 1$ 이다.

여기서 $N_1 = (n_{ij})$은 블록계획의 빈도행렬을 나타낸다.

정리 2.1. 모수가 $\{v_1 = p_1 = b_1, r_1 = k_1, \lambda\}$인 BB계획 D_1이 초기블록을 순환적으로 전개하여 구성된 계획이면 모수가 $\{p_1 = b_1, p_2 = k = k_1, r_c = 1, n_c = p_1 p_2, s_1 = p_2, s_2 = p_1, \lambda\}$이고 그룹 내 근교계통간 gca효과 차이분산이 (2.3)과 같은 PDC 계획 D_b가 존재한다.

$$\sigma_1^2 = var(\hat{g}_i - \hat{g}_j) = \frac{2p_2\sigma^2}{p_1\lambda}, \quad i < j = 1, 2, \ldots, p_1,$$

$$\sigma_2^2 = var(\hat{g}_i - \hat{g}_j) = \frac{2\sigma^2}{p_1}, \quad i < j = p_1+1, p_1+2, \ldots, p. \tag{2.3}$$

여기서 r_c는 서로 다른 교배의 반복 수이고 s_1, s_2는 각각 첫 번째와 두 번째 그룹에 속한 근교계통의 반복 수이다.

증명. 초기블록을 순환적으로 전개하여 구성한 BB계획 D_1의 i번째 블록을 $(i_1, i_2, \ldots, i_{k_1})$이라 하면 우리는 PDC 계획 D_b의 i번째 블록을 다음과 구성할 수 있다.

$\{(i_1, p_1+1), (i_2, p_1+2), \ldots, (i_{k_1}, p)\}, \quad i = 1, 2, \ldots, p_1.$

계획 D_b에서 G와 NN'행렬이 아래와 같음을 알 수 있다.

$$G = \begin{bmatrix} p_2 I_{p_1} & J_{p_1 p_2} \\ J_{p_2 p_1} & p_1 I_{p_2} \end{bmatrix}, \tag{2.4}$$

$$NN' = \begin{bmatrix} (a-\lambda)I_{p_1} + \lambda J_{p_1 p_1} & p_2 J_{p_1 p_2} \\ p_2 J_{p_2 p_1} & p_1 J_{p_2} \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

여기서 $a = p_2^2 - (p_1 - 1)\lambda$ 이고 I_t는 단위행렬, $J_t = 1_t 1_t'$, $J_{t_1 t_2} = 1_{t_1} 1_{t_2}$이다. (2.2), (2.4) 그리고 (2.5)로부터 계획 D_b의 정보행렬은

$$C = \frac{p_1}{p_2} \begin{bmatrix} \lambda\left(I_{p_1} - \frac{1}{p_1} J_{p_1}\right) & 0 \\ 0 & p_2\left(I_{p_2} - \frac{1}{p_2} J_{p_2}\right) \end{bmatrix}$$

이므로 C의 일반화 역행렬 (C^-)은 아래와 같다.

$$C^- = \frac{1}{p_1\lambda} \begin{bmatrix} p_2 I_{p_1} & 0 \\ 0 & \lambda I_{p_2} \end{bmatrix}.$$

위의 C^-로부터 PDC 계획 D_b에서 두 근교계통간의 gca효과 차이분산이 (2.3)과 같음을 알 수 있다.

예제 2.1. 모수가 $\{p_1 = b_1 = 4, r_1 = k_1 = 5, \lambda = 6\}$인 BB계획 D_1으로부터 모수가 $p_1 = 5$, $p_2 = 5, b = 4, k = 5, r_c = 1, s_1 = 5, s_2 = 4$이고 분산이 $\sigma_1^2 = 5\sigma^2/12$, $\sigma_2^2 = 0.5\sigma^2$인 D_b를 구성하면

아래와 같은 블록을 갖는 계획이다.

{(1,5), (2,6), (3,7), (4,8), (1,9)},
{(2,5), (3,6), (4,7), (1,8), (2,9)},
{(3,5), (4,6), (1,7), (2,8), (3,9)},
{(4,5), (1,6), (2,7), (3,8), (4,9)}.

따름정리 2.1. 아래와 같은 모수를 갖는 PDC 계획 D_b가 존재한다.

$\{p_1,\ p_2=k=tp_1,\ b=p_1,\ r_c=1,\ n_c=p_1p_2,\ s_1=tp_1,\ s_2=p_1, \lambda=t^2p_1\}$

여기서 t는 0보다 큰 정수이다.

따름정리 2.1의 D_b는 다음과 같이 구성된다. 모수가 $\{p_1=b_1,\ r_1=k_1=tp_1,\ \lambda=t^2p_1\}$인 BB계획 D_1은 초기블록 $\{1,2,\ldots,p_1,1,2,\ldots,p_1,\ldots,1,2,\ldots,p_1\}$을 순환적으로 전개하여 구성할 수 있는데, l_{ij}를 계획 D_1의 j번째 블록의 i번째 요소라 할 때 이것을 교배 (l_{ij}, p_1+i), $i=1,2,\ldots,tp_1$, $j=1,2,\ldots,p_1$로 대체하면 PDC 계획 D_b가 구성된다.

예제 2.2. $t=2$일 때 모수가 $\{p_1=3, p_2=k=6, b_1=3, r_c=1, n_c=18, s_1=6,\ s_2=3, \lambda=12\}$ 이고 분산이 $\sigma_1^2=\sigma^2/3$, $\sigma_2^2=2\sigma^2/3$인 D_b계획은 아래와 같은 블록을 갖는 계획이다.

{(1,4), (2,5), (3,6), (1,7), (2,8), (3,9)},
{(2,4), (3,5), (1,6), (2,7), (3,8), (1,9)},
{(3,4), (1,5), (2,6), (3,7), (1,8), (2,9)}.

따름정리 2.2. 아래와 같은 모수를 갖는 PDC 계획 D_b가 존재한다.

$\{p_1,\ p_2=k=tp_1+1,\ b=p_1,\ r_c=1,\ n_c=p_1p_2,\ s_1=tp_1+1,\ s_2=p_1, \lambda=t(tp_1+2)\}$

여기서 t는 0보다 큰 정수이다.

따름정리 2.2의 D_b는 다음과 같이 구성된다. 모수가 $\{p_1=b_1,\ r_1=k_1=tp_1+1,\ \lambda=t(tp_1+2)\}$인 BB계획 D_1은 블록 $\{1,2,\ldots,p_1,1,2,\ldots,p_1,\ldots,1,2,\ldots,p_1,1\}$을 순환적으로 전개하여 구성할 수 있는데, l_{ij}를 계획 D_1의 j번째 블록의 i번째 요소라 할 때 이것을 교배 (l_{ij}, p_1+i), $i=1,2,\ldots,tp_1+1$, $j=1,2,\ldots,p_1$로 대체하면 PDC 계획 D_b가 구성된다.

예제 2.3. $t=2$일 때 모수가 $\{p_1=3, p_2=k=7, b_1=3, r_c=1, n_c=21, s_1=7,\ s_2=3, \lambda=16\}$이고 분산이 $\sigma_1^2=7\sigma^2/24$, $\sigma_2^2=2\sigma^2/3$ 인 D_b계획은 아래와 같은 블록을 갖는 계획이다.

{(1,4), (2,5), (3,6), (1,7), (2,8), (3,9), (1,10)},
{(2,4), (3,5), (1,6), (2,7), (3,8), (1,9), (2,10)},
{(3,4), (1,5), (2,6), (3,7), (1,8), (2,9), (3,10)}.

따름정리 2.3. 아래와 같은 모수를 갖는 PDC 계획 D_b가 존재한다.

$\{p_1=3, p_2=k=3t+2, b=3,\ r_c=1, n_c=p_1p_2, s_1=3t+2, s_2=3, \lambda=(3t+1)(t+1)\}$

여기서 t는 0보다 큰 정수이다.

따름정리 2.3에 속하는 D_b는 다음과 같이 구성된다. 블록 $\{1,2,3,1,2,3,\ldots,1,2,3,1,2\}$를 순환적으로 전개하면 모수가 $\{p_1=b_1=3,\ r_1=k_1=3t+2,\ \lambda=(3t+1)(t+1)\}$인 BB계획 D_1이 구성되는데 위의 따름정리들과 같은 방법을 이용하면 PDC 계획 D_b가 구성된다.

예제 2.4. $t=2$일 때 모수가 $\{p_1=3, p_2=k=8, b_1=3, r_c=1, n_c=24, s_1=8,\ s_2=3, \lambda=21\}$인 D_b계획은 아래와 같은 블록을 갖는 계획이다.

{(1,4), (2,5), (3,6), (1,7), (2,8), (3,9), (1,10), (2,11)},
{(2,4), (3,5), (1,6), (2,7), (3,8), (1,9), (2,10), (3,11)},
{(3,4), (1,5), (2,6), (3,7), (1,8), (2,9), (3,10), (1,11)}.

3. 효율성 및 결론

두 개의 각 그룹 내에서 $\hat{g}_i - \hat{g}_j$을 추정하는데 있어 완전 확률화계획(completely randomized design)에 대한 블록계획 D_b의 효율성을 계산하기 위해서 첫 번째와 두 번째 그룹 내에서의 gca 효과차이 분산을 각각 $\sigma^2_{01}, \sigma^2_{02}$이라 하면 각 그룹에서의 D_b의 효율성은 아래와 같다.

$$e_1 = \frac{\sigma^2_{01}}{\sigma^2_1} = \frac{\frac{2}{p_2}\sigma^2}{\frac{2p_2}{p_1\lambda}\sigma^2} = \frac{p_1\lambda}{p_2^2}, \quad e_2 = \frac{\sigma^2_{02}}{\sigma^2_2} = \frac{\frac{2}{p_1}\sigma^2}{\frac{2}{p_1}\sigma^2} = 1$$

위의 e_1, e_2로부터 두 번째 그룹에서의 계획 D_b의 효율성은 그룹에 속한 근교계통의 수에 관계없이 항상 1이고 따름 정리 2.1을 이용하는 경우에서는 $e_1=1$임을 알 수 있다. 아래의 [표 3.1]-[표 3.4]는 정리 2.1과 따름 정리 2.2 - 2.4를 이용하여 $p_1+p_2 \le 26$인 경우에서 우리가 구성할 수 있는 블록계획 D_b와 이들 계획의 효율성을 계산한 것이다. [표 3.1]은 BB계획의 특별한 경우인 균형 불완비블록(balanced incomplete block) 계획으로부터 D_b를 구한 것이며 Raghavarao(1971)의 계획을 이용하였다.

본 연구는 p개의 근교계통이 두 그룹으로 분리되어 같은 그룹에 속하는 근교계통끼리는 교배를 하지 않고 서로 다른 그룹에 포함된 근교계통끼리만 교배를 하는 실험상황에서 두 그룹 내에서 일반조합능력효과를 비교하기 위한 블록계획을 BB계획을 이용하여 설계하였다. BB계획을 이용하는 경우에서는 교배의 반복수가 1로 총 교배의 수와 실험의 수가 항상 같은 계획이며 두 그룹에 속한 근교계통 수에서 차이가 클수록 보다 적은 수의 실험을 통하여 두 그룹 내의 근교계통들을 비교할 수 있는 장점이 있다. 예를 들어 한 그룹에는 4개의 근교계통이 포함되어 있고 다른 그룹에는 12개의 근교계통이 있을 때 각 그룹별로 CDC를 이용하여 실험을 하는 경우, 총 교배의 수는 6+66=72이고 서로 다른 그룹에 포함된 근교계통끼리만 교배를 하는 경우에서는 총 교배의 수가 4×12=48이 된다. 그러나 두 그룹에 속하는 근교계통의 수가 서로 비슷한 경우에서는 각 그룹별로 CDC를 이용하여 실험할 때 총 교배의 수가 작게 나타난다.

[표 3.1] 정리 2.1을 이용한 D_b 계획

p_1	p_2	k	b	r_c	n_c	s_1	s_2	λ	σ_1^2	σ_2^2	e_1	e_2
4	3	3	4	1	12	3	4	2	0.750	0.500	0.889	1
5	4	4	5	1	20	4	5	3	0.533	0.400	0.938	1
6	5	5	6	1	30	5	6	4	0.417	0.333	0.960	1
7	3	3	7	1	21	3	7	1	0.857	0.286	0.778	1
7	4	4	7	1	28	4	7	2	0.571	0.286	0.875	1
7	6	6	7	1	42	6	7	5	0.343	0.286	0.972	1
8	7	7	8	1	56	7	8	6	0.292	0.250	0.980	1
9	8	8	9	1	72	8	9	7	0.254	0.222	0.984	1
10	9	9	10	1	90	9	10	8	0.225	0.200	0.988	1
11	5	5	11	1	55	5	11	2	0.455	0.182	0.880	1
11	6	6	11	1	66	6	11	3	0.364	0.182	0.917	1
11	10	10	11	1	110	10	11	9	0.202	0.182	0.990	1
13	4	4	13	1	52	4	13	1	0.615	0.154	0.813	1
13	9	9	13	1	117	9	13	6	0.231	0.154	0.963	1
15	7	7	15	1	105	7	15	3	0.311	0.133	0.918	1
15	8	8	15	1	120	8	15	4	0.267	0.133	0.938	1
16	6	6	16	1	96	6	16	2	0.375	0.125	0.889	1
16	10	10	16	1	160	10	16	6	0.208	0.125	0.960	1

[표 3.2] 따름정리 2.1을 이용한 D_b 계획

p_1	p_2	k	b	r_c	n_c	s_1	s_2	λ	σ_1^2	σ_2^2	e_1	e_2
3	3	3	3	1	9	3	3	3	0.667	0.667	1	1
4	4	4	4	1	16	4	4	4	0.5	0.5	1	1
5	5	5	5	1	25	5	5	5	0.4	0.4	1	1
6	6	6	6	1	36	6	6	6	0.333	0.333	1	1
7	7	7	7	1	49	7	7	7	0.286	0.286	1	1
8	8	8	8	1	64	8	8	8	0.25	0.25	1	1
9	9	9	9	1	81	9	9	9	0.222	0.222	1	1
10	10	10	10	1	100	10	10	10	0.2	0.2	1	1
11	11	11	11	1	121	11	11	11	0.182	0.182	1	1
12	12	12	12	1	144	12	12	12	0.167	0.167	1	1
3	6	6	3	1	18	6	3	12	0.333	0.667	1	1
4	8	8	4	1	32	8	4	16	0.25	0.5	1	1
5	10	10	5	1	50	10	5	20	0.2	0.4	1	1
6	12	12	6	1	72	12	6	24	0.167	0.333	1	1
7	14	14	7	1	98	14	7	28	0.143	0.286	1	1
8	16	16	8	1	128	16	8	32	0.125	0.25	1	1
3	9	9	3	1	27	9	3	27	0.222	0.667	1	1
4	12	12	4	1	48	12	4	36	0.167	0.5	1	1
5	15	15	5	1	75	15	5	45	0.133	0.4	1	1
6	18	18	6	1	108	18	6	54	0.111	0.333	1	1
3	12	12	3	1	36	12	3	48	0.167	0.667	1	1
4	16	16	4	1	64	16	4	64	0.125	0.5	1	1
5	20	20	5	1	100	20	5	80	0.1	0.4	1	1

[표 3.3] 따름정리 2.2를 이용한 D_b 계획

p_1	p_2	k	b	r_c	n_c	s_1	s_2	λ	σ_1^2	σ_2^2	e_1	e_2
3	4	4	3	1	12	4	3	5	0.533	0.667	0.938	1
4	5	5	4	1	20	5	4	6	0.417	0.5	0.96	1
5	6	6	5	1	30	6	5	7	0.343	0.4	0.972	1
6	7	7	6	1	42	7	6	8	0.292	0.333	0.980	1
7	8	8	7	1	56	8	7	9	0.254	0.286	0.984	1
8	9	9	8	1	72	9	8	10	0.225	0.25	0.988	1
9	10	10	9	1	90	10	9	11	0.202	0.222	0.99	1
10	11	11	10	1	110	11	10	12	0.183	0.2	0.992	1
11	12	12	11	1	132	12	11	13	0.168	0.182	0.993	1
12	13	13	12	1	156	13	12	14	0.155	0.167	0.994	1
3	7	7	3	1	21	7	3	16	0.292	0.667	0.980	1
4	9	9	4	1	36	9	4	20	0.225	0.5	0.988	1
5	11	11	5	1	55	11	5	24	0.183	0.4	0.992	1
6	13	13	6	1	78	13	6	28	0.155	0.333	0.994	1
7	15	15	7	1	105	15	7	32	0.134	0.286	0.996	1
8	17	17	8	1	136	17	8	36	0.118	0.25	0.997	1
3	10	10	3	1	30	10	3	33	0.202	0.667	0.99	1
4	13	13	4	1	52	13	4	42	0.155	0.5	0.994	1
5	16	16	5	1	80	16	5	51	0.125	0.4	0.996	1
6	19	19	6	1	114	19	6	60	0.106	0.333	0.997	1
3	13	13	3	1	39	13	3	56	0.155	0.667	0.994	1
4	17	17	4	1	68	17	4	72	0.118	0.5	0.997	1

[표 3.4] 따름정리 2.3을 이용한 D_b 계획

p_1	p_2	k	b	r_c	n_c	s_1	s_2	λ	σ_1^2	σ_2^2	e_1	e_2
3	5	5	3	1	15	5	3	8	0.417	0.667	0.96	1
3	8	8	3	1	24	8	3	21	0.254	0.667	0.984	1
3	11	11	3	1	33	11	3	40	0.183	0.667	0.992	1
3	14	14	3	1	42	14	3	65	0.144	0.667	0.995	1
3	17	17	3	1	51	17	3	96	0.118	0.667	0.996	1
3	20	20	3	1	60	20	3	133	0.100	0.667	0.998	1

참고문헌

[1] Das A. and Dey A. (1989). A note on balanced designs. *Journal of Statistical Planning Inference* 22, 265-268.

[2] Das, A. Dey, A. and Dean, A.M. (1998). optimal designs for diallel cross experiments. *Statistics & Probability Letters* 36, 427-436.

[3] Dey, A. and Midha, C.K. (1996). Optimal block designs for diallel crosses. *Biometrika* 83, 484-489.

[4] Ghosh, D.K. and Divecha, J.(1997). Two associate class partially balanced incomplete block designs and partial diallel crosses. *Biometrika* 84, 245-248.

[5] Gupta, S. and Kageyama, S. (1994). Optimal complete diallel crosses. *Biometrika* 81, 420-424.

[6] Gupta, S. and Kageyama, S.(1995). Single replication orthogonal block designs for partial diallel crosses. *Communications Statistics -Theory and Methods* 24, 2601-2607.

[7] Kim, G.S., Bae, J.S. and Kim, J. (2001). Blocked designs and efficiency factor evaluation of crosses between two classes for investigation of new inbred lines. *The Korean Journal of Applied Statistics* 14, 59-70.

[8] Singh, M. and Hinkelmann, K. (1995). Partial Diallel Crosses in Incomplete Blocks. *Biometrics* 51, 1302-1314.

[9] Singh, M. and Hinkelmann, K.(1998). Analysis of partial diallel crosses in incomplete blocks. *Biometrical Journal* 40, 165-181.

[10] Raghavarao, D.(1971). *Constructions and Combinatorial Problems in Design of Experiments,* Dover publications.

[2002년 7월 접수, 2002년 10월 채택]