

4-수준 계량인자가 포함된 반사계획에 관한 연구

최규필¹ · 변재현^{2*}

¹오리온전기(주) / ²경상대학교 산업시스템공학부, 항공기부품기술연구센터

A Study on Developing Fold-Over Designs with Four-Level Quantitative Factors

Kiew-Phil Choi¹ · Jai-Hyun Byun²

¹ Total Productivity Team, Orion Electric Company, Gumi, 730-904

² Department of Industrial and Systems Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701

Two-level fractional factorial designs are widely used when many factors are considered. When two-level fractional factorial designs are used, some effects are confounded with each other. To break the confounding between effects, we can use fractional factorial designs, called fold-over designs, in which certain signs in the design generators are switched. In this paper, optimal fold-over designs with four-level quantitative and two-level factors are presented for (1) the initial designs without curvature effect and (2) those with curvature effect. Optimal fold-over design tables are provided for 8-run, 16-run, and 32-run experiments.

Keywords: fractional factorial designs, four-level quantitative factors, fold-over design, combined design, resolution, word length pattern, curvature effect

1. 서론

실험의 목적을 효과적으로 달성하고 실험에 소요되는 비용이나 시간을 현저히 줄이기 위해서는 실험목적을 달성할 수 있는 범위에서 최소의 횟수로 수행할 수 있는 실험계획법을 이용해야 한다. 2-수준 일부실시계획(fractional factorial design)은 이와 같이 시행횟수를 줄여 실험의 목적을 달성할 수 있는 실험계획법 중의 하나인데, 2-수준 일부실시계획을 이용할 경우에는 주의해야 할 두 가지 특징이 있다. 첫 번째로 2-수준 일부실시계획을 이용하여 실험할 경우에는 인자들의 주효과 또는 교호작용 효과를 구분하여 구할 수 없는 교락현상(confounding)이 발생한다. 일반적으로 고차의 교호작용과 주효과 혹은 고차의 교호작용과 2인자 교호작용이 교락되어 있는 경우에 고차의 교호작용을 무시하여 실험결과를 해석할 수 있지만, 주효과와 2인자 교호작용 또는 2인자 교호작용간에 교락이 생길

때에는 실험결과를 명확하게 해석하지 못하게 된다. 이와 같이 일부실시계획을 이용하여 교락되는 효과가 나타날 경우에 각 효과를 분리하여 구하기 위해서는 반사계획(fold-over design)을 이용하여 추가적인 실험을 실시해야 한다. 반사계획에 관한 기존 연구를 보면, 우선 Box, Hunter, and Hunter (1978)는 Resolution III 실험계획에서 교락되어 있는 요인 효과를 분리하여 구하는 방법을 제시하였다. 그들은 하나의 인자와 관련된 요인 효과를 분리하는 방법과 모든 인자의 주효과를 분리하여 구하는 방법에 대하여 설명하였다. Montgomery and Runger (1996)는 2-수준 일부실시계획을 이용하여 실험을 수행한 결과로 나타나는 교호작용 효과를 분리하기 위하여 반사계획을 활용할 때 유용한 두 가지 규칙을 제시하였다. 이에 대한 상세한 내용은 2절에서 살펴보기로 한다. 두 번째로 2-수준 일부실시계획은 모든 인자의 수준을 항상 두 개로 고정해야 하는데, 실제 실험현장에서는 실험에 포함되는 인자의 수준을 두 개로 고정하기가 쉽지 않다. 이와 같이 수준을 두 개로 고정

본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단 지정 항공기부품기술연구센터의 지원에 의해 연구되었음.

* 연락저자 : 변재현 교수, 660-701 경남 진주시 가좌동 900 경상대학교 산업시스템공학부, Fax : 055-762-6599, e-mail : jbyun@nongae.gsnu.ac.kr
2002년 4월 접수, 1회 수정(1일 소요) 후, 2002년 7월 게재 확정.

하기 어려운 다수준(multi-level) 인자가 실험에 포함될 경우에는 2-수준 요인배치를 그대로 이용할 수 없다. 이를 해결하기 위해 대부분의 인자가 2-수준이며 일부의 다수준 인자가 존재하는 실험에서 2-수준 일부실시계획의 장점을 유지하면서 실험을 실시할 수 있는 실험계획에 대한 연구가 수행되어 왔으며, 여러 문헌에 다수준 인자가 포함된 일부실시계획의 최적 실험계획(optimal design)이 제공되어 있다. 일반적으로 다수준 인자가 포함되어 있는 실험에서도 반사계획을 이용하여 2^{k-p} 일부실시계획과 유사한 방법으로 교락되어 있는 효과를 분리해 낼 수 있지만, 초기실험계획(initial design)에서 두 개의 2-수준 인자를 이용하여 다수준 인자를 작성하였기 때문에 선택한 반사인자(folding factor)에 따라 resolution이나 WLP(word length pattern)가 다르게 나타난다. 본 연구의 목적은 대부분의 인자가 2-수준이고 일부의 4-수준 계량인자가 있을 때에, 실험의 크기와 인자의 수에 따라 이미 제시되어 있는 4-수준 요인배치의 최적 실험계획에 추가하여 이용할 수 있는 최적 반사계획을 제공하는 데에 있다. 이를 위해 4-수준 계량인자가 포함된 실험에서 반사계획을 이용하여 추가 실험을 실시할 경우에 나타나는 특징을 파악하고, 4-수준 계량인자의 2차 효과 유의성 여부에 따른 최적 반사계획을 구하여 결과를 정리한다.

다수준 인자가 포함된 실험계획에 대한 연구결과는 Addelman (1962)에 의해 처음 소개되었다. Addelman은 수준 수가 서로 다른 인자가 섞여 있는 혼합수준(mixed level)의 직교 주효과 계획(orthogonal-main-effect-plan)을, 각 인자의 수준이 다른 인자들의 수준에서 나타나는 빈도가 비례적일 때 인자의 수준을 줄이는 collapsing과 인자의 수준을 증가시키는 replacement를 이용하여, 작성하는 방법을 제안하였다. Bingham (1997)은 실험에 포함되는 3-수준 인자와 4-수준 인자가 계량인자인 실험계획에 대한 연구를 수행하였다. 그는 다수준 계량인자의 수준을 0을 중심으로 좌우 동일한 간격으로 설정하였는데, 그 결과로 $3^m 2^{n-q}$, $4^m 2^{n-q}$ 실험계획의 직교성(orthogonality)이나 resolution의 변화 없이 2^{k-p} 실험계획을 확장하여 이용할 수 있음을 제시하였다. Choi and Byun (2001)은 2-수준 인자와 4-수준 계량인자를 동시에 고려한 실험계획에 대한 연구 결과를 제시하였다. Ankenman (1999)은 4-수준 계수인자가 포함된 실험계획의 활용범위를 더욱 넓혀 반사계획을 통해 resolution을 증가시키는 실험계획에 대한 연구를 실시하였는데, 기존의 2^{k-p} 실험계획의 반사계획을 구하기 위해 Montgomery and Runger (1996)가 제시한 결과를 $4^m 2^n$ 실험계획에 적용하였다.

2. 4-수준 계량인자가 포함된 반사계획

본 논문에서는 4-수준 계량인자가 포함된 실험계획의 효과적인 반사계획을 얻기 위하여 Montgomery and Runger (1996)가 제시한 2가지 반사계획 규칙을 적용한다. Montgomery and Runger가 제시한 반사계획 규칙은 다음과 같다.

• 반사계획 규칙 1

초기실험계획과 반사계획이 결합된 실험계획(combined design)의 정의대비(defining relation)는 초기실험계획의 정의 대비에 포함된 단어(words) 중 반사계획에서 부호(sign)가 “-”로 바뀐 단어를 제외한 나머지 단어로 이루어진다.

• 반사계획 규칙 2

Combined design에서 요인효과의 교락관계를 나타내는 별명구조(alias structure)는 초기실험계획의 별명구조에 포함된 각각의 별명 중 반사계획에서 부호가 “-”로 바뀐 별명을 제외한 나머지 별명들로 이루어진다.

• 반사계획 규칙 1의 예 : 2^{6-3} 실험계획

Generator	반사인자	정의대비		
		초기실험계획	반사계획	Combined Design
D=AB E=AC F=BC	A	I = ABD = ACE = BCF = DEF = ABEF = ACDF = BCDE	I = -ABD = -ACE = BCF = DEF = -ABEF = -ACDF = BCDE	I = BCF = DEF = BCDE

• 반사계획 규칙 2의 예 : 2^{7-3} 실험계획

Generator	반사인자	초기실험계획의 별명구조	반사계획에서 부호가 바뀐 개별 별명	Combined Design의 별명구조
E=ABC F=BCD G=ACD	A	AB+CE+FG AC+BE+DG AD+CG+EF AE+BC+DF AF+BG+DE AG+BF+CD BD+CF+EG	-AB -AC -AD -AE -AF -AG	AB, BC+DF BD+CF+EG AC, BE+DG AD, BF+CD AE, BG+DE AF, CE+FG AG, CG+EF

4-수준 인자가 포함된 실험계획의 반사계획에 대한 기존 연구결과를 보면, 4-수준 계수인자가 포함된 실험계획에 대하여 Ankenman (1999)이 8회, 16회, 32회 실험에서 combined design의 resolution을 증가시키면서 minimum aberration design이 되는 반사계획과 반사인자를 정리하여 표로 제시하였다. 그러나 4-수준 계량인자가 포함된 실험의 반사계획에 대한 연구결과는 지금까지 없다. 본 논문에서는 4-수준 계량인자의 2차 효과가 초기실험에서 유의한지 아닌지에 따라 이용할 수 있는 최적 반사계획을 구하여 실험자가 이용하기 편리하도록 표로 작성하여 제공하고자 한다.

Choi and Byun(2001)은 4-수준 계량인자가 포함된 실험계획을 구성하기 위하여 두 개의 2-수준 인자를 이용하여 4-수준

인자에 할당하고 4개의 수준 값을 -1.5, -0.5, 0.5, 1.5로 설정하고, 4-수준 인자의 할당에 이용된 2-수준 인자의 교호작용은 4-수준 인자의 2차 효과와 동일하게 나타난다는 특징을 이용하여 4-수준 계량인자의 2차 효과가 포함된 최적 실험계획을 제시하였다. 본 논문은 Choi and Byun (2001)에서 제시한 초기 실험계획을 이용하여 얻은 실험데이터를 분석한 결과, (1) 2차 효과가 유의하지 않은 경우와 (2) 2차 효과가 유의한 경우를 구분하여 최적의 반사계획을 구하고 그 결과를 표로 제시하고자 한다.

3. 4-수준 계량인자의 2차 효과를 고려한 반사계획 선정 예

초기실험에서 4-수준 계량인자의 2차 효과를 고려하여 구한 최적 실험계획에 반사계획을 이용하여 추가실험을 실시할 경우에는 초기실험에서 구한 4-수준 계량인자의 2차 효과가 유의한지 아닌지에 따라 선택되는 반사계획이 달라져야 한다. 2차 효과의 유의성에 따른 최적의 반사계획을 제시하기 전에 실험횟수가 8회이고, 4-수준 계량인자의 개수는 1개, 2-수준 인자 개수는 4개인 $4^1 2^{4-3}$ 실험을 이용하여 최적 반사계획을 선정하는 절차를 예시하기로 한다. 우선 4-수준 계량인자의 2차 효과를 고려한 최적 실험계획을 구하고, 두 가지 반사계획을 이용하여 구한 combined design의 resolution과 WLP를 기준으로 하여 이들 반사계획을 비교해 본다.

$4^1 2^{4-3}$ 실험계획은 2^{6-3} 일부실시계획으로부터 두 개의 2-수준 인자를 4-수준 계량인자에 할당함으로써 작성할 수 있다. $4^1 2^{4-3}$ 실험을 위하여 이용할 수 있는 계획은 모두 4가지인데,

각각에 대하여 resolution과 WLP를 구해보면 <표 1>과 같다. <표 1>을 통하여 $4^1 2^{4-3}$ 실험의 최적 실험계획은 design generator가 $D=AC, E=BC, F=ABC$ 인 2^{6-3} 일부실시계획에서 2-수준 인자 A, B를 4-수준 계량인자 X에 할당한 실험계획임을 알 수 있다. 그러면 최적 초기실험계획에 반사계획을 이용하여 추가 실험을 실시할 경우, 선택되는 반사계획과 4-수준 계량인자의 2차 효과 유의성 여부에 따른 combined design의 resolution과 WLP의 차이를 살펴보자.

$4^1 2^{4-3}$ 실험의 반사계획은 기초 실험계획인 2^{6-3} 일부실시계획의 6개 인자(A, B, C, D, E, F)를 이용하여 작성할 수 있다. 2^{6-3} 일부실시계획은 2^6 실험계획의 1/8 실시 계획인데 6개의 2-수준 인자를 이용하여 작성할 수 있는 반사계획의 수는 7가지이다. 본 절에서는 2가지 반사계획을 이용하여 작성된 combined design의 resolution과 WLP를 비교하여 설명한다.

3.1 반사인자 A, B를 이용하여 작성된 반사계획

$4^1 2^{4-3}$ 실험에 반사인자 A, B를 이용하여 작성한 반사계획은 <표 2>의 9번-16번 열로 나타난다. <표 2>를 $4^1 2^{4-3}$ 실험계획과 반사계획이 합쳐진 combined design을 이용하여 X'X 행렬을 작성하면 <표 3>과 같이 나타나고, X'X 행렬을 이용하여 Choi and Byun (2001)에 제시된 절차에 따라 combined design의 defining relation, resolution, WLP를 구하면 다음과 같다.

- (1) Off-diagonal elements 중 0이 아닌 element를 가지는 효과들 모두 구한다.
- $X^2 = CF, X^2 = DE, XC = XF, XD = XE, CD = EF, CE = DF, CF = DE$

표 1. $4^1 2^{4-3}$ 실험에서 이용 가능한 실험계획의 Resolution 및 WLP

2^{6-3} 일부실시계획		$4^1 2^{4-3}$ 실험계획		
Generator	Defining Contrast	Defining Contrast	Resolution	WLP
D = AB E = AC F = BC	I = ABD = ACE = BCF = DEF = BCDE = ACDF = ABEF	I = $X^2D = XCE$ = XCF = DEF = XCDE = XCDF = X^2EF	II	(1, 4, 2)
D = AB E = AC F = ABC	I = ABD = ACE = DCF = BEF = ABCF = BCDE = ADEF	I = $X^2D = XCE$ = DCF = XEF = $X^2CF = XCDE$ = XDEF	II	(1, 4, 2)
D = AB E = BC F = ABC	I = ABD = BCE = DCF = AEF = ABCF = ACDE = BDEF	I = $X^2D = XCE$ = DCF = XEF = $X^2CF = XCDE$ = XDEF	II	(1, 4, 2)
D = AC E = BC F = ABC	I = ACD = BCE = BDF = AEF = ABCF = ABDE = CDEF	I = XCD = XCE = XDF = XEF = $X^2CF = X^2DE$ = CDEF	III	(0, 6, 1)

표 2. 4^{12-3} 실험계획과 반사인자 A, B를 이용한 반사계획

Run	X	C	D	E	F	X^2	XC	XD	XE	XF	CD	CE	CF	DE	DF	EF
1	-1.5	-1	1	1	-1	2.25	1.5	-1.5	-1.5	1.5	-1	-1	1	1	-1	-1
2	-0.5	-1	-1	1	1	0.25	0.5	0.5	-0.5	-0.5	1	-1	-1	-1	-1	1
3	0.5	-1	1	-1	1	0.25	-0.5	0.5	-0.5	0.5	-1	1	-1	-1	1	-1
4	1.5	-1	-1	-1	-1	2.25	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	1	1	1	1	1	1
5	-1.5	1	-1	-1	1	2.25	-1.5	1.5	1.5	-1.5	-1	-1	1	1	-1	-1
6	-0.5	1	1	-1	-1	0.25	-0.5	-0.5	0.5	0.5	1	-1	-1	-1	-1	1
7	0.5	1	-1	1	-1	0.25	0.5	-0.5	0.5	-0.5	-1	1	-1	-1	1	-1
8	1.5	1	1	1	1	2.25	1.5	1.5	1.5	1.5	1	1	1	1	1	1
9	1.5	-1	1	1	-1	2.25	-1.5	1.5	1.5	-1.5	-1	-1	1	1	-1	-1
10	0.5	-1	-1	1	1	0.25	-0.5	-0.5	0.5	0.5	1	-1	-1	-1	-1	1
11	-0.5	-1	1	-1	1	0.25	0.5	-0.5	0.5	-0.5	-1	1	-1	-1	1	-1
12	-1.5	-1	-1	-1	-1	2.25	1.5	1.5	1.5	1.5	1	1	1	1	1	1
13	1.5	1	-1	-1	1	2.25	1.5	-1.5	-1.5	1.5	-1	-1	1	1	-1	-1
14	0.5	1	1	-1	-1	0.25	0.5	0.5	-0.5	-0.5	1	-1	-1	-1	-1	1
15	-0.5	1	-1	1	-1	0.25	-0.5	0.5	-0.5	0.5	-1	1	-1	-1	1	-1
16	-1.5	1	1	1	1	2.25	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	1	1	1	1	1	1

표 3. 반사인자 A, B를 이용한 Combined Design의 $X'X$ 행렬

	X	C	D	E	F	X^2	XC	XD	XE	XF	CD	CE	CF	DE	DF	EF
X	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C		16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D			16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E				16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F					16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X^2						41	0	0	0	0	0	0	16	16	0	0
XC							20	0	0	16	0	0	0	0	0	0
XD								20	16	0	0	0	0	0	0	0
XE									20	0	0	0	0	0	0	0
XF										20	0	0	0	0	0	0
CD											16	0	0	0	0	16
CE												16	0	0	16	0
CF													16	16	0	0
DE														16	0	0
DF															16	0
EF																16

(2) 교각관계로 표현되어 있는 효과를 word 형태로 변환
 · $X^2CF, X^2DE, XXCF, XXDE, CDEF, CDEF, CDEF$

(3) 동일한 word가 중복되어 나타나면 하나만 남기고 모두 제거한다.
 · $X^2CF, X^2DE, CDEF$

(4) 남아 있는 word를 이용하여 defining relation을 작성한다.
 · Defining relation : $I = X^2CF = X^2DE = CDEF$

· 2차 효과를 포함하는 경우 : resolution III,
 WLP = (0, 2, 1)
 · 2차 효과를 제외하는 경우 : resolution IV,
 WLP = (0, 0, 1)

3.2 반사인자 C, D를 이용하여 작성된 반사계획

반사인자 C, D를 이용하여 반사계획을 작성하고, combined design의 $X'X$ 행렬을 구하면 <표 4>와 같이 나타난다. <표 4>

표 4. 반사인자 C, D를 이용한 Combined Design의 X' X 행렬

	X	C	D	E	F	X ²	XC	XD	XE	XF	CD	CE	CF	DE	DF	EF
X	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	8
C		16	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0
D			16	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E				16	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0
F					16	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0
X ²						41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XC							20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XD								20	0	0	0	0	0	0	0	0
XE									20	0	0	0	0	0	0	0
XF										20	0	0	0	0	0	0
CD											16	0	0	0	0	16
CE												16	0	0	16	0
CF													16	16	0	0
DE														16	0	0
DF															16	0
EF																16

의 X' X 행렬을 이용하여 위 3.1절의 (1)-(4)에 제시된 절차에 따라 combined design의 defining relation, resolution, WLP를 구하면 다음과 같다.

Defining relation : I = XCD = XEF = CDEF

- 2차 효과를 포함하는 경우, resolution III, WLP = (0, 2, 1)
- 2차 효과를 제외하는 경우, resolution III, WLP = (0, 2, 1)

3.3 두 개의 반사계획 비교

위의 두 가지 반사계획에 의해 나타나는 combined design의 resolution과 WLP는 <표 5>와 같다. <표 5>를 이용하여 두 가지 실험계획을 비교해 보면, 먼저 2차 효과를 포함하는 경우에는 3.1절의 반사계획과 3.2절의 반사계획이 동일한 결과를 가진다. 그러나 2차 효과를 제외하는 경우에는 3.1절의 반사계획이 3.2절의 반사계획보다 combined design의 resolution이 높고, WLP가 작기 때문에 보다 나은 계획이라 할 수 있다.

표 5. 두 가지 반사계획의 비교

		반사인자 A, B		반사인자 C, D	
Combined Design	2차 효과 제외	Resolution	IV	Resolution	III
		WLP	(0, 0, 1)	WLP	(0, 2, 1)
	2차 효과 포함	Resolution	III	Resolution	III
		WLP	(0, 2, 1)	WLP	(0, 2, 1)

표 6. 4¹2⁴⁻³ 실험계획의 7가지 반사계획에 대한 Resolution, WLP

반사 계획	반사인자	2차 효과 포함 여부	Resolution	WLP
1	(A)=(C, E)=(D, F)	제외	III	(0, 2, 1)
		포함	III	(0, 2, 1)
2	(B)=(C, D)=(E, F)	제외	III	(0, 2, 1)
		포함	III	(0, 2, 1)
3	(C)=(A, E)=(B, D)	제외	III	(0, 2, 0)
		포함	III	(0, 3, 0)
4	(D)=(A, F)=(B, C)	제외	III	(0, 2, 0)
		포함	III	(0, 3, 0)
5	(E)=(A, C)=(B, F)	제외	III	(0, 2, 0)
		포함	III	(0, 3, 0)
6	(F)=(A, D)=(B, E)	제외	III	(0, 2, 0)
		포함	III	(0, 3, 0)
7	(A, B)=(C, F)=(D, E)	제외	IV	(0, 0, 1)
		포함	III	(0, 2, 1)

위 예에서는 2가지 반사계획에 대한 combined design의 resolution과 WLP를 상세히 비교하였다. 그러면 4¹2⁴⁻³ 일부실시계획에서 작성할 수 있는 7가지 반사계획에 대한 combined design의 resolution과 WLP를 고려하여 최적 반사계획을 구해 보자. <표 6>에는 7가지 반사계획에 대한 combined design의

resolution과 WLP가 제시되어 있다. 여기에서 (A) = (C, E) = (D, F)는 A를 반사인자로 이용하면 C, E를 반사인자로 이용하거나 D, F를 반사인자로 이용할 경우와 동일한 반사계획이 작성됨을 의미한다. <표 6>을 보면 4-수준 계량인자의 2차 효과를 고려하지 않을 경우에는 (A, B)를 반사인자로 이용한 combined design이 resolution IV로 최적 반사계획이 된다. 2차 효과를 포함할 경우에는 (A), (B), 또는 (A, B)를 반사인자로 이용하여 작성된 combined design이 최적이다.

4. 2차 효과의 유의성 여부에 따른 최적 반사계획 탐색

본 절에서는 $4^m 2^{n-p}$ 실험계획에서 4-수준 인자의 2차 효과를 고려하여 resolution과 WLP에 근거하여 구한 최적 실험계획을 초기실험계획으로 이용하고, 초기실험계획 결과 2차 효과가 있는 경우와 없는 경우에 대하여 resolution과 WLP를 비교하여 최적 반사계획을 구한다. 실험횟수가 8, 16, 32회이고, 4-수준 계량인자가 최대 3개, 2-수준 인자가 최대 13개까지 포함되는 실험에 대하여 최적 반사계획을 다음과 같이 3개의 단계를 따라 탐색한다.

단계 1. $4^m 2^{n-p}$ 실험계획을 작성하기 위해 기초가 되는 2^{k-p} 실험계획으로부터 반사인자를 선정하여 반사계획을 작성하고, $4^m 2^{n-p}$ 반사계획으로 변환한다. 초기실험계획과 반사계획이 결합된 combined design의 resolution과 WLP를 구한다.

단계 2. 단계 1의 2^{k-p} 실험계획에서 반사인자를 바꾸어 단계 1과 동일한 절차로 combined design의 resolution과 WLP를 구하여 이전 반사인자에 의해 구한 결과와 비교하여 resolution이 높거나, resolution은 동일하고 WLP가 낮은 반사계획을 찾는다.

단계 3. 단계 2를 이용 가능한 반사계획에 대하여 반복적으로 실시한 후, $4^m 2^{n-p}$ 실험계획의 최적 반사계획을 구한다.

<표 7>, <표 8>, <표 9>에 최적 반사계획의 탐색 결과를 제시하였다. 각 표의 왼쪽에는 2차 효과를 제외한 최적 반사계획이 제시되어 있으며, 오른쪽에는 2차 효과를 포함한 최적 반사계획이 표시되어 있다.

5. 결론

본 논문에서는 4-수준 계량인자와 2-수준 인자를 동시에 고려한 실험계획을 바탕으로 4-수준 계량인자의 2차 효과 유의성

표 7. 8회 실험의 최적 반사계획

기초 실험	2차 효과를 제외한 최적 반사계획		2차 효과를 포함한 최적 반사계획	
	4-수준 인자 개수		4-수준 인자 개수	
	1	2	1	2
2^{4-1}	D=-ABC	D=-ABC	D=-ABC	D=-ABC
2^{5-2}	D=-AC E=-ABC	D=-AB E= AC	D=-AC E=-ABC	D=-AB E=-AC
2^{6-3}	D=-AC E=-ABC F=-BC	D= AB E=-AC F=-BC	D=-AC E=-ABC F= BC	D=-AB E=-AC F= BC
2^{7-4}	D=-AB E=ABC F=-BC G=-AC	D=-AB E= ABC F=-BC G=-AC	D=-AB E= ABC F=-BC G=-AC	D=-AB E= ABC F=-BC G= AC

여부에 따른 반사계획의 활용을 위한 연구 결과를 제시하였다. 본 연구의 결과는 4-수준 계량인자가 포함된 초기실험에서 4-수준 인자의 2차 효과가 유의할 경우와 유의하지 않을 경우를 분리하여 구한 최적 반사계획이다. 4-수준 계량인자가 포함된 일부실시계획을 수행해야할 때에 초기실험의 결과를 바탕으로 본 연구에서 제시한 최적반사계획을 효과적으로 이용할 수 있으리라 기대한다.

참고문헌

Addelman, S. (1962), Orthogonal Main-Effect Plans for Asymmetrical Factorial Experiments. *Technometrics*, 4(1), 21-46.
 Ankenman, B. E. (1999), Design of Experiments with Two- and Four-Level Factors. *Journal of Quality Technology*, 31(4), 363-375.
 Bingham, T. C. (1997). An Approach to Developing Multi-Level Fractional Factorial Designs. *Journal of Quality Technology*, 29(4), 370-380.
 Box, G. E. P.; Hunter, W. G. and Hunter, J. S. (1978). *Statistics for Experimenters*. John Wiley & Sons, New York, NY.
 Choi, K. P. and Byun, J. H. (2001), Design of Fractional Factorial Experiments with Four-Level Quantitative and Two-Level Factors, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 27(4), 352-365.
 Montgomery, D. C. and Runger, G. C. (1996), Foldovers of 2^{k-p} Resolution IV Experimental Designs, *Journal of Quality Technology*, 28(4), 446-450.

표 8. 16회 실험의 최적 반사계획

기초 실험	2차 효과를 제외한 최적 반사계획			2차 효과를 포함한 최적 반사계획		
	4-수준 인자 개수			4-수준 인자 개수		
	1	2	3	1	2	3
2^{5-1}	E = -ABCD	E = -ABCD		E = -ABCD	E = -ABCD	
2^{6-2}	E = ABC F = -ACD	E = -ABC F = ACD	E = BCD F = -ABD	E = -ABC F = -ACD	E = -ABC F = -ACD	E = BCD F = -ABD
2^{7-3}	E = ABC F = ABD G = -ACD	E = ABC F = ABD G = -ACD	E = ABD F = BCD G = -ABCD	E = -ABC F = -ABD G = -ACD	E = -ABC F = -ABD G = -ACD	E = -ABD F = BCD G = -ABCD
2^{8-4}	E = ABC F = ABD G = -ACD H = -BCD	E = ABC F = ABD G = -ACD H = -BCD	E = -BD F = -ABC G = ABD H = BCD	E = -ABC F = -ABD G = -ACD H = BCD	E = ABC F = -ABD G = ACD H = -BCD	E = BD F = ABC G = -ABD H = -BCD
2^{9-5}	E = -AC F = -BC G = -CD H = -ABD I = ABCD	E = -AC F = -AD G = -BC H = ABD I = -ABCD	E = -BD F = ABC G = ABD H = BCD I = -ABCD	E = -AC F = -BC G = -CD H = -ABD I = ABCD	E = AC F = -AD G = -BC H = ABD I = -ABCD	E = BD F = -ABC G = -ABD H = -BCD I = ABCD
2^{10-6}	E = -AC F = ABC G = ABD H = ACD I = BCD J = -ABCD	E = -AC F = ABC G = ABD H = ACD I = BCD J = -ABCD	E = -AC F = ABC G = ABD H = ACD I = BCD J = -ABCD	E = AC F = -ABC G = -ABD H = -ACD I = BCD J = ABCD	E = -AC F = ABC G = -ABD H = ACD I = -BCD J = -ABCD	E = AC F = -ABC G = -ABD H = -ACD I = BCD J = ABCD
2^{11-7}	E = -AC F = -AD G = -BC H = -ABC I = -ABD J = -BCD K = -ABCD	E = -AC F = -AD G = -BC H = -ABC I = -ABD J = -BCD K = -ABCD	E = -AC F = -BC G = -BD H = -ABC I = -ABD J = -ACD K = -ABCD	E = -AC F = -AD G = -BC H = -ABC I = -ABD J = -BCD K = -ABCD	E = -AC F = -AD G = -BC H = -ABC I = -ABD J = -BCD K = -ABCD	E = -AC F = BC G = -BD H = -ABC I = -ABD J = -ACD K = -ABCD
2^{12-8}	E = -AC F = AD G = -BC H = -CD I = ABC J = ABD K = -BCD L = ABCD	E = AC F = -AD G = BC H = CD I = -ABC J = -ABD K = BCD L = ABCD	E = -AC F = -BC G = BD H = -CD I = ABC J = ABD K = ACD L = ABCD	E = AC F = -AD G = BC H = -CD I = -ABC J = -ABD K = BCD L = ABCD	E = AC F = -AD G = BC H = -CD I = -ABC J = -ABD K = -BCD L = -ABCD	E = AC F = -BC G = -BD H = -CD I = -ABC J = -ABD K = -ACD L = -ABCD
2^{13-9}	E = -AB F = -AC G = -AD H = -BC I = -BD J = -CD K = -ABC L = -ABD M = ACD	E = -AB F = -AC G = -AD H = -BC I = -BD J = -CD K = -ABC L = -ABD M = ACD	E = -AB F = -AC G = -AD H = -BC I = -BD J = -CD K = -ABC L = -ABD M = ACD	E = -AB F = -AC G = -AD H = BC I = -BD J = CD K = ABC L = -ABD M = -ACD	E = -AB F = -AC G = -AD H = BC I = BD J = -CD K = -ABC L = -ABD M = -ACD	E = -AB F = -AC G = -AD H = -BC I = -BD J = -CD K = ABC L = ABD M = -ACD
2^{14-10}	E = AB F = -AC G = BC H = -BD I = CD J = ABC K = ABD L = -ACD M = BCD N = ABCD	E = -AB F = AC G = -AD H = BC I = -BD J = CD K = ABC L = -ABD M = -ACD N = -BCD	E = -AB F = AC G = -AD H = BC I = -BD J = CD K = ABC L = -ABD M = ACD N = -BCD	E = AB F = -AC G = BC H = -BD I = CD J = ABC K = ABD L = -ACD M = -BCD N = -ABCD	E = -AB F = -AC G = -AD H = -BC I = -BD J = -CD K = ABC L = ABD M = -ACD N = -BCD	E = -AB F = AC G = -AD H = BC I = -BD J = -CD K = ABC L = -ABD M = -ACD N = -BCD

표 9. 32회 실험의 반사계획

기초실험	2차 효과가 제외된 최적 반사계획			2차 효과가 포함된 최적 반사계획		
	4-수준 인자의 개수			4-수준 인자의 개수		
	1	2	3	1	2	3
2^{6-1}	F = -ABCDE	F = -ABCDE	F = -ABCDE	F = -ABCDE	F = -ABCDE	F = -ABCDE
2^{7-2}	F = -ACD G = ABCE	F = -ACE G = -ABDE	F = -ACE G = -ABDE	F = -ACD G = -ABCE	F = -ACE G = -ABDE	F = -ACE G = -ABDE
2^{8-3}	F = -ACD G = -ACE H = ABDE	F = -ACE G = -ABDE H = BCDE	F = -ACE G = -ABDE H = BCDE	F = -ACD G = -ACE H = -ABDE	F = -ACE G = -ABDE H = BCDE	F = -ACE G = -ABDE H = BCDE
2^{9-4}	F = ACD G = -ACE H = ABDE I = -BCDE	F = ABC G = -ACE H = ABDE I = -BCDE	F = ABC G = -ACE H = ABDE I = -BCDE	F = -ACD G = -ACE H = -ABDE I = BCDE	F = -ABC G = ACE H = ABDE I = -BCDE	F = -ABC G = ACE H = ABDE I = -BCDE
2^{10-5}	F = ABC G = -ACD H = -ACE I = ABDE J = -BCDE	F = ABC G = ACD H = -ACE I = ABDE J = -BCDE	F = ABC G = ACD H = -ACE I = ABDE J = -BCDE	F = -ABC G = ACD H = -ACE I = ABDE J = -BCDE	F = -ABC G = -ACD H = ACE I = ABDE J = -BCDE	F = -ABC G = -ACD H = ACE I = ABDE J = -BCDE
2^{11-6}	F = -ABC G = -ACD H = -ACE I = -ABDE J = -BCDE K = ABCDE	F = -ABC G = -ACD H = -ACE I = -ABDE J = -BCDE K = ABCDE	F = -ABC G = -ACD H = -ACE I = -ABDE J = -BCDE K = ABCDE	F = -ABC G = -ACD H = -ACE I = -ABDE J = -BCDE K = ABCDE	F = -ABC G = -ACD H = -ACE I = -ABDE J = -BCDE K = ABCDE	F = -ABC G = -ACD H = -ACE I = -ABDE J = -BCDE K = ABCDE
2^{12-7}	F = -AC G = ABCD H = ABCE I = ABDE J = ACDE K = BCDE L = -ABCDE	F = -AC G = ABCD H = ABCE I = ABDE J = ACDE K = BCDE L = -ABCDE	F = -AC G = ABCD H = ABCE I = ABDE J = ACDE K = BCDE L = -ABCDE	F = -AC G = -ABCD H = -ABCE I = -ABDE J = ACDE K = -BCDE L = ABCDE	F = -AC G = -ABCD H = ABCE I = -ABDE J = -ACDE K = -BCDE L = ABCDE	F = -AC G = -ABCD H = ABCE I = -ABDE J = -ACDE K = -BCDE L = ABCDE