

# 반응표면분석에 의한 혼합물의 다특성 허용차배분

김성준(강릉대학교), 임정규(강릉대학교), 박종인(한양대학교)

## A mixture tolerancing with multi-characteristics by response surface method

Seong-Jun Kim, Jung-Gyoo Lim (Kangnung National Univ.), Jong In Park (Hanyang Univ.)

### Abstract

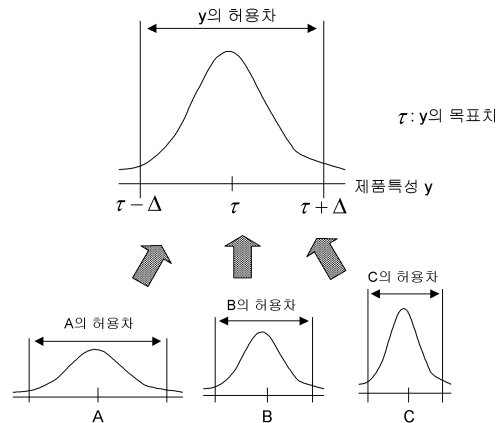
Quality variations in mixture products such as medicine, food, engineering chemicals, and alloy materials can be caused by their own sub-components. For instance, discharging characteristics of a lithium-ion rechargeable battery depend upon the mixture ratio of ethylene, dimethyle, and ethyle-methyle, all of which consists an electrolyte solution in the battery. Thus it is important to determine tolerances of mixture components in maintaining the product quality at a desired level. This paper proposes a simple but efficient approach to a mixture tolerancing method with multi-response variables. We use a response surface method for empirical modelling between mixture components. An illustrative example of the proposed method is given.

Keywords: *Response surface method, Mixture experiments, Tolerancing, Multi-characteristics, Tolerance region*

### 1. 서론

성능산포의 개선은 식스시그마 품질을 달성하는 데 요구되는 중요한 열쇠이다. 산포감소를 통한 품질개선기법으로서 다구치방법은 1980년대 초반에 처음 소개된 이래 지난 20여년 간 여러 산업 현장에서 폭넓게 활용되어 왔다. 다구치는 산포감소를 위해 파라미터설계와를 허용차설계를 제안하였다. 파라미터설계는 산포의 원인인 잡음을 그대로 내버려 둔 채 품질특성이 잡음의 영향에 둔감하도록 설계조건을 결정하는 방법이다. 반면, 허용차설계는 하위특성의 변동범위를 관리함으로써 최종 품질특성의 산포를 줄이고자 한다. 파라미터설계와를 허용차설계 모두 산포개선이라는 목적을 달성하기 위해서 직교표 등을 이용한 실험계획법을 이용하게 된다. 사실, 파라미터설계와를 허용차설계는 상호택일의 관계가 아니라 순차적이면서 서로 보완적인 관계에 있다고 하겠다. 파라미터설계를 통해 최적조건이 파악되었다 하더라도, 소비자 요구품질을 만족시키고 산포를 규격 안쪽으로 더

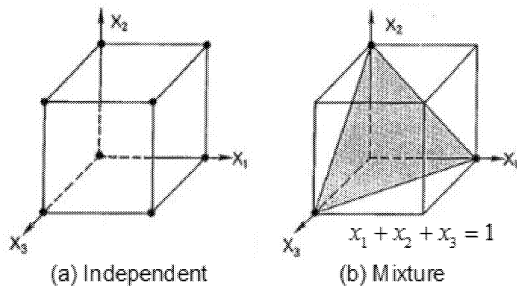
줄이기 위해서는 허용차설계가 필요하기 때문이다. 허용차설계란, <그림 1>에서 보는 것처럼 제품감소를  $y$ 의 산포를 줄이기 위해 하위특성 (또는 인자) A, B, C의 허용차를 선택적으로 줄이는 것을 말한다. 이 때 하위특성 간의 제약은 고려하지 않는 것이 보통이지만, 혼합물 (Mixture)의 허용차설계는 그렇지 않다.



<그림 1> 허용차설계 개략도

혼합물이란 윤활유, 건축재, 식음료 등과 같이 여러 성분을 혼합해서 제조되는 제품을 말하는 데, 혼합물의 품질특성은 개별 성분의 양이 아니라 전체적인 혼합비에 의해 결정되는 특징이 있다. 특히 혼합비의 총계는 늘 1이라는 제약이 따르게 되고 바로 이 때문에 실험공간이 <그림 2>와 같은 심플렉스 (Simplex) 형태가 되는 등 여러 가지 특수한 상황이 발생한다. 이런 연유로, 혼합물은 반응표면실험계획 이론에서도 독립적인 영역으로 취급되고 발전되어 왔던 것이다(Cornell, 2002; Myers and Montgomery, 2002).

본 논문은 성분비 간에 제약관계가 존재하는 혼합물의 허용차를 결정하는 방법에 대해 연구한다. 최종품질특성과 성분비 사이의 경험적 모델을 얻기 위해 본 연구에서는 반응표면분석법의 하나인 혼합물계획법 (Mixture Design)을 이용하기로 한다. 특히 혼합물의 품질특성이 다수인 경우가 많으므로 이러한 경우에도 손쉽게 적용이 가능한 허용차 결정절차를 제시하고자 한다.



<그림 2> 심플렉스 실험영역 비교 ( $k=3$ )

## 2. 관련연구

만약  $y$ 와 성분비  $x_1, x_2, x_3$  간에 함수관계 즉  $y = f(x_1, x_2, x_3)$ 가 알려져 있다면  $y$ 의 표준편차는 인자의 편미분값과 표준편차의 함수로 나타낼 수 있으므로 허용차설계를 분석적으로 수행할 수 있다. 하지만 함수형태를 알 수 없고 더욱이 인자의 수도 많을 때에는 분석적인 방법으로는 한계가 있으며 실험계획법을 이용한 실험적 방법이 유용할 것이다.

앞에서도 언급하였듯이 혼합물 실험은 성분비

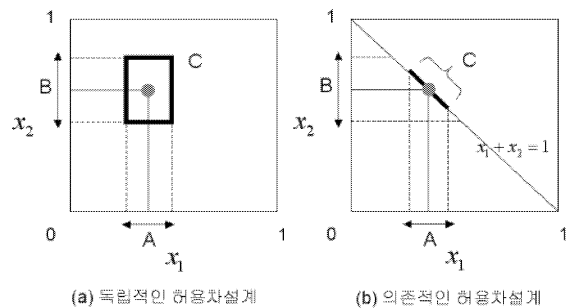
의 합이 1이라는 조건이 수반되는 특징이 있다. 즉 혼합물을 구성하는  $k$ 가지 물질의 성분비를  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ )라고 하면

$$x_1 + x_2 + \dots + x_k = 1$$

과 같은 제약식이 존재하는 것이다. 여기서  $x_i \geq 0$ 임은 물론이다.

혼합물에 대한 반응표면분석은 전통적인 분야 뿐 아니라 나노재료, 합성수지, 차세대 반도체, 이차전지 등과 같은 첨단 분야에서도 제품설계 및 품질개선을 위해 활발하게 이용되고 있다. 하지만 반응표면분석을 통해서 최적 혼합비를 발견하였더라도 성분마다의 허용차를 결정해주는 것은 안정적인 품질의 제품을 생산하는 데 꼭 필요한 단계이다. 특히 이차전지나 식품, 의약품 등과 같이 인명에 위해를 줄 수 있는 제품의 경우에는 그 필요성이 더욱 크다고 할 수 있다.

더욱이, 혼합물 성분비가 허용차 내에 있다고 하더라도 동일한 품질수준을 보장하는 것은 아니고 특히 배합비가 바뀌게 되면 혼합물의 경우는 물성 자체가 변화한다는 점을 유념해야 한다. 이러한 맥락에서 볼 때, 허용차를 충족시켰다 하더라도 목표치로 접근할수록 품질손실이 최소화되도록 규정한 다구치의 손실함수는 이러한 상황을 잘 반영하고 있는 셈이다. 또한 전술한 바와 같이 배합비는 그 합이 1이 되어야 하므로 기존 허용차설계에서처럼 하위특성의 허용차를 독립적으로 결정할 수 없음을 고려해야 한다. 다음 <그림 3>은 이러한 상황을 잘 예시하고 있다.



<그림 3> 제약의 유무에 따른 허용차설계 비교

뿐만 아니라, 대부분의 혼합물은 Cornell (2002)에서도 지적하였듯이 다수의 성능특성을 갖게 된다. 예를 들어 핵폐기물 처리에 이용되는 Borosilicate Glass는 점도, 전도성, 화학적 내구성에 관한 기준치가 명시되어 있다. 따라서 이들 기준을 모두 만족할 수 있도록 여러 산화물들 간의 최적 배합비를 찾아야 하는 데 쉬운 일은 아니다. 어느 한 특성에 대한 최적 배합비는 다른 특성에 대해서는 그렇지 않을 가능성이 높기 때문이다. 이 문제는 특성 간에 상관관계가 존재할 때 더욱 복잡해지고 다루기 어렵게 된다. 이런 경우에는 결국 비용적인 절충을 통해 최종적인 의사결정을 내려야 하는 데 역시 다구치가 제안한 손실함수가 유용한 기준을 제공한다. 하지만 그의 손실함수는 단일 특성에만 적용되므로 혼합물의 여러 품질특성을 동시에 고려한 허용차설계를 위해서는 특성 간의 중요도와 상관관계를 적절하게 수용할 수 있는 손실함수가 제시되어야 한다. 허용차설계를 위한 다변량 손실함수에 관련된 연구는 Park et al. (2008)을 참고하기 바란다.

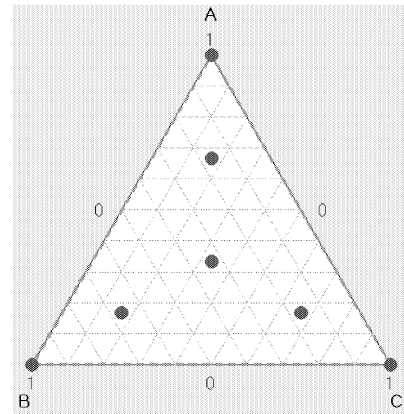
실험계획법을 이용한 혼합물의 로버스트설계에 대해서는 꾸준히 연구되고 있다. 예를 들어, Steiner and Hamada (1997)은 통제하기 어려운 공정변수나 측정오차가 있을 때 혼합물의 로버스트설계에 대해 연구하였다. 이와 비슷한 연구로서, 곡물로 만들어지는 빵의 가공안정성을 테스트하기 위해 혼합물 실험계획법을 다구치의 파라미터설계와 결합해서 활용할 수 있음이 Næs et al. (1998)에 의해 제시되기도 하였다. 통제하기 어려운 공정변수를 잡음으로 볼 때, 잡음에 둔감한 혼합물을 찾기 위해 Steiner and Hamada (1997)이  $y$ 를 혼합물  $X$ 와 공정변수  $Z$ 의 함수  $\hat{y} = g(X, Z)$ 로 모델링한 후 손실함수  $E_Z(\hat{y} - \tau)^2$ 를 최소화하는 방안을 제시하였다. 사실 이 모형은 Cornell (2002)가 제시한 2차 모형과 같은 것으로, 이 분야에서는 혼합물과 공정변수의 공동 반응표면을 나타낼 때 기본적인 모형으로 사용된다. 예를 들어 Kim and Park (2005)과 같이 혼합물 실험계획법의 하나인 꼭지점계획법 (Extreme Vertices Design)과 전통적인 부분요인배치 (Fractional Factorial Design)를 교차시킨 실험계획을 이용할 경우, 같은 모델로서 로버스트설계를 수행할

수 있다. 특히 이 연구는 혼합물 조성비의 Operating Window를 넓힐 수 있는 공정조건을 찾는 것이 여러 성능특성을 동시에 최적화하는데 유리하다는 점을 지적하였다. 또한 Goldfarb et al. (2003)은 개별적인  $E_Z(\hat{y})$ 과  $Var_Z(\hat{y})$ 을 동시에 다루는 Dual Response Approach를 제안하였다. 이 방법은 공정변수를 제어가능한  $W$ 와 제어가 불가능한  $Z$ 로 분류해서 다루는 것이 특징이다. 이외에도, Kowalski et al. (2002)는 공정변수를 고려한 혼합물 실험계획법에서 Randomization을 충분히 고려할 수 없을 때를 대비한 Split-Plot 계획에 대해 연구하였다.

혼합물이 아닌 조립이나 가공 분야에서의 허용차설계는 더욱 다양하게 연구되어왔다. Kim and Choi (2003)은 다구치의 손실과 가공비용의 합으로 표현되는 총비용을 최소화하는 허용차 할당모형을 비선형계획법으로 개발하였다. 가공치수가 정규분포가 아닌 베타분포를 따른다고 가정한 것이 특징적이다. 이와 유사하지만, Feng and Kusiak (1997)은 목적함수를 선형으로 표현하고 허용차설계의 해법으로서 추계적 정수계획법을 제안하였다. Wu et al. (1998)은 다구치의 품질손실과 제조비용을 최소화할 수 있는 허용차설계를 제시하였고, 특히 분포의 형태에 따라 품질손실을 더 적절하게 정할 수 있도록 조정계수를 제공하였다. 그리고 이 결과를 그대로 비대칭 손실함수의 경우에도 적용할 수 있도록 확장하였다. D'Errico and Zaino, Jr. (1988)은 허용차설계에서 실험계획법의 역할에 대해 논의하고  $y$ 의 함수 형태가 알려져 있을 경우에 사용이 가능한 대안을 제시하였다. 허용차설계를 위한 편미분에 관한 정보를 얻기 위해 CAD와 DOE를 함께 활용할 수 있음을 Bisgaard et al. (2000)은 사례로 보여주었다. Jeang (1999)는 반응표면분석법을 도입하여 조립부품의 허용차설계를 수행하였고, Li and Wu (1999)는 파라미터설계와 허용차설계를 단계적으로 실시할 것이 아니라 동시에 실행하는 것이 더 바람직스러울 수 있음을 예시하였다.

한편 고려되는 성능특성이 다수인 경우의 허용차설계에 대한 연구로서 Moskowitz et al. (1999)는 설계변수에 대한 불완전한 정보 즉 평균과 분산만이 알려져 있을 때 폐기 및 재작업 비용을 최소화하는 다변량 허용차 배분 방법을

제시하였다. 이를 일반화한 절차도 역시 Moskowitz et al. (2001)에 의해 제안되었으며 아울러 Full Information이 존재할 때와 비교했을 때 허용차설계 결과에 어떤 차이가 나타나는지도 논의되었다. 특히 이 논문에서는 허용차설계의 목적함수에 다구치의 품질손실의 개념을 도입하고 있다. Chou and Chang (2000)도 다구치의 기대손실을 최소화함으로써 Wheel의 두께와 직경을 동시에 고려하는 허용차 배분에 대해 연구하였다. 또한 다특성의 공분산행렬 정보를 이용하여 품질손실과 제조비용의 합을 최소화하는 허용차설계 절차가 Lee and Tang (2000)에 의해 제안된 바 있다.



<그림 4> Simplex Design Plot

### 3. 혼합물 허용차 결정방법

지금까지 소개한 바와 같이, 비용 혹은 손실을 최소화하기 위한 허용차설계에 대해서는 다양한 Discipline에서 연구가 이루어져 왔다. 하지만 대부분은 조립이나 가공 부문에 국한되어 있으며 혼합물 부문에서는 그 관련 연구가 상대적으로 미흡한 실정이다. 최근 Park et al. (2008)이 제안한 다특성 허용차설계는 비용이나 상관관계에 대한 사전정보가 있을 때 유용하게 활용할 수 있다. 본 논문은 혼합물실험에 대한 반응표면모델링 결과를 기초로 허용차설계를 수행하는 방안을 제안하며 아울러 다특성 상황에서 적용될 수 있음을 예시한다.

<표 1> 실험계획표 및 데이터셋

	A	B	C	y1	y2
1	1.00000	0.00000	0.00000	62	0.08
2	0.00000	1.00000	0.00000	60	0.20
3	0.00000	0.00000	1.00000	52	0.13
4	0.33333	0.33333	0.33333	62	0.40
5	0.66667	0.16667	0.16667	73	0.29
6	0.16667	0.66667	0.16667	64	0.33
7	0.16667	0.16667	0.66667	54	0.31
8	0.33333	0.33333	0.33333	65	0.35

#### 3.1 혼합물 실험계획

본 예제에서는 보다 간단한 설명을 위해 세 가지 성분을 다루기로 한다. Simplex Lattice Design에 의한 실험점은 <그림 4>와 같다. 실험계획에 보다 자세한 이론은 Cornell (2002)와 박성현 (2003)을 참고하기 바란다. 실험계획 및 데이터셋은 다음과 같다. 데이터셋  $y_1$ 과  $y_2$ 는 설명을 위해 가공적으로 생성된 것이며 실험계획법 소프트웨어는 Minitab R14 영문판을 이용한다.

$$\hat{y}_1 = 62.2022x_1 + 60.2022x_2 + 52.2022x_3 + 98.623x_1x_2 + 26.623x_1x_3 - 69.377x_2x_3$$

미니탭에서 Mixture Regression에 의한 2차 모델을 추정한 것으로 혼합물의 성분비는  $y_1$ 에 매우 유의하였고 대부분 항도 유의한 것으로 나타났다. 마찬가지로  $y_2$ 에 대해 모델링을 수행한 결과는 다음과 같다.

#### 3.2 모델링 및 분석

먼저  $y_1$ 에 대한 데이터분석을 수행하고 다음과 같은 모델링 결과를 얻었다.

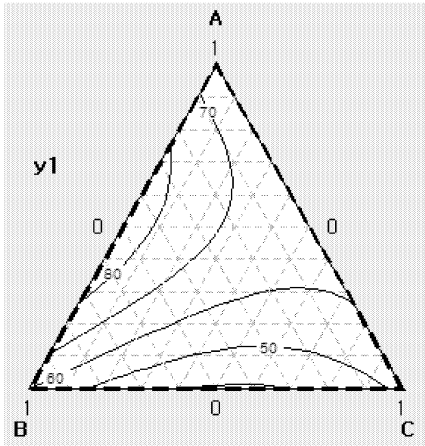
$$\hat{y}_2 = 0.07929x_1 + 0.19929x_2 + 0.12929x_3 + 0.66574x_1x_2 + 0.84754x_1x_3 + 0.60754x_2x_3$$

참고로,  $y_1$ 과  $y_2$ 에 대한 Response Surface Plot은 <그림 5>와 <그림 6>에 각각 도시되어 있다.

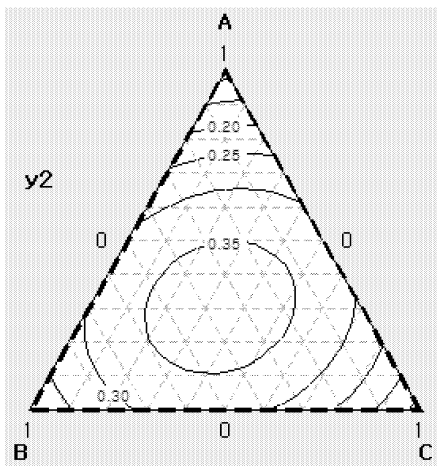
#### 3.3 최적성분비 결정

두 가지 특성을 동시에 고려한 최적성분비를 찾기 위해 미니탭의 Response Optimizer 기능을 이용하기로 한다. 그 실행결과에는 <그림 7>에

제시된 바와 같다.



<그림 5>  $\hat{y}_1$ 에 대한 Response Surface Plot



<그림 6>  $\hat{y}_2$ 에 대한 Response Surface Plot

그림에서 알 수 있듯이  $y_1$ 은 목표치가 70인 망목특성으로  $y_2$ 는 망대특성으로 각각 가정하였다. 품질특성이 둘 이상인 경우 최적조건을 찾기 위해 미니탭에서는 호감도함수법을 사용한다. 먼저  $m$ 개의 개별특성에 대한 호감도를 평가한 후 그들의 기하 평균으로서 전체 호감도 (Composite Desirability)를 평가하여 최적조건을 구하는 것인 데 자세한 설명은 Derringer (1994)와 Minitab (2004)를 참고하기 바란다. 그림에 나타난 바와 같이 최적 혼합비는  $(x_1, x_2, x_3) = (0.3826, 0.3894, 0.2280)$

이며 이 조건에서  $y_1$ 과  $y_2$ 의 추정치는 각각  $\hat{y}_1 = 69.9996$ 과  $\hat{y}_2 = 0.3647$ 로 얻어졌다.

Optimal	Hi	[ ]:A	[ ]:B	[ ]:C
D	Cur	1.0	1.0	1.0
0.74103	Lo	[0.3826]	[0.3894]	[0.2280]
		0.0	0.0	0.0

y1			
Targ: 70.0			
y = 69.9996			
d = 0.99996			
y2			
Maximum			
y = 0.3647			
d = 0.54914			

<그림 7> Response Optimizer 실행결과

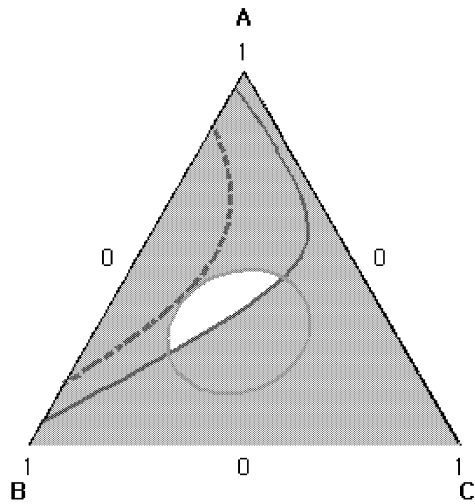
참고로,  $y_1$ 과  $y_2$ 에 대해서 개별적으로 평가된 호감도는 각각  $d_1 = 0.99996$ 과  $d_2 = 0.54914$ 이며 이에 따른 종합호감도는

$$\begin{aligned}
 D &= (d_1^{w_1} \times d_2^{w_2} \times \dots \times d_m^{w_m})^{1/(w_1 + w_2 + \dots + w_m)} \\
 &= \sqrt{0.99996 \times 0.54914} \\
 &= 0.74103
 \end{aligned}$$

와 같이 계산된다. 즉 앞의 최적혼합비는 바로 종합호감도를 최대화하는 혼합비인 것이다.

### 3.4 허용차 배분

성분비의 허용차를 결정하기 위해 우선 최종특성에 대한 허용구간을  $66 \leq y_1 \leq 74$ 와  $y_2 \geq 0.356$ 으로 각각 가정한다. 미니탭의 Overlaid Plot 기능을 이용하면 <그림 8>과 같이 허용차영역 (Tolerance Region)을 얻을 수 있다. 하지만 개별성분비에 대한 범위가 요구되거나 성분 수가 많을 때에는 Overlaid Plot을 사용하는 것이 어려워진다. 이에 본 논문은 특정한 성분비 하나를 고정시킨 후 나머지 성분에 허용차를 순차적으로 배분함으로써 허용차영역을 얻는 방안을 제시한다.



<그림 8> Overlaid Plot에 의한 허용차영역

먼저  $y_1$ 을 고려한 허용차배분에 대해 알아본다. 우선  $x_1 = 0.3826$ 을 고정시킨 상태에서  $x_2$ 와  $x_3$ 의 변경가능범위를 조사한다. 앞에서 얻은  $\hat{y}_1$ 을 이용하면  $0.3176 \leq x_2 \leq 0.4484$ 와  $0.3176 \leq x_2 \leq 0.4484$ 를 각각 얻을 수 있다. 마찬가지로  $x_2 = 0.3894$ 에 대한  $x_1$ 과  $x_3$ 의 변경가능범위는

$$\begin{aligned} 0.3412 &\leq x_1 \leq 0.4254 \\ 0.1852 &\leq x_3 \leq 0.2694 \end{aligned}$$

가 되고  $x_3 = 0.2280$ 에 대한  $x_1$ 과  $x_2$ 의 변경가능범위는

$$\begin{aligned} 0.2929 &\leq x_1 \leq 0.7213 \\ 0.0507 &\leq x_2 \leq 0.4791 \end{aligned}$$

로 구할 수 있다. 따라서 이들 결과를 종합함으로써 각각의 범위를 동시에 만족하는 구간은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} 0.3277 &\leq x_1(y_1) \leq 0.4400 \\ 0.2889 &\leq x_2(y_1) \leq 0.4663 \\ 0.1706 &\leq x_3(y_1) \leq 0.2829 \end{aligned}$$

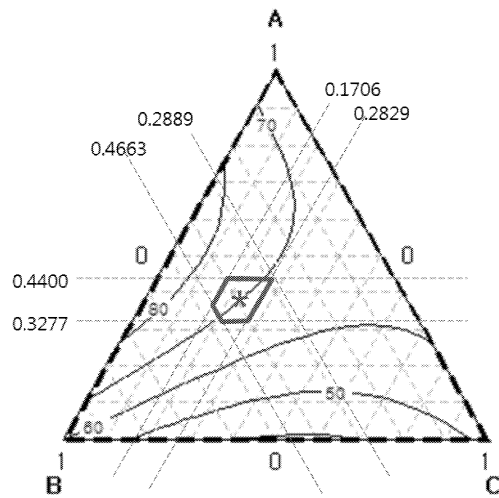
그리고 이 영역을 Simplex Plot을 이용하여

도시하면 <그림 9>와 같다.

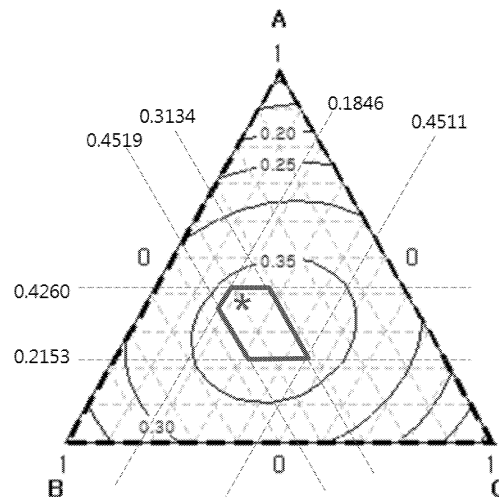
같은 방법으로  $y_2$ 에 대한 허용차영역을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 0.2153 &\leq x_1(y_2) \leq 0.4260 \\ 0.3134 &\leq x_2(y_2) \leq 0.4519 \\ 0.1846 &\leq x_3(y_2) \leq 0.4511 \end{aligned}$$

역시 <그림 10>은 허용차영역을 Simplex Plot으로 나타낸 것이다.



<그림 9>  $y_1$ 에 대한 허용차영역

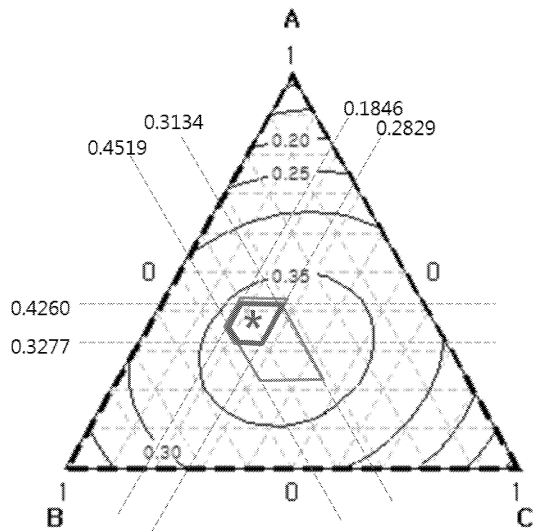


<그림 10>  $y_2$ 에 대한 허용차영역

이제 이들 결과를 이용하면, 두 가지 특성의 허용차구간을 동시에 만족하는 허용차영역을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} 0.3277 &\leq x_1(y_1, y_2) \leq 0.4260 \\ 0.3134 &\leq x_2(y_1, y_2) \leq 0.4519 \\ 0.1846 &\leq x_3(y_1, y_2) \leq 0.2829 \end{aligned}$$

<그림 11>은 이 결과를 만족하는 허용차영역을 도시한 것으로 <그림 9>와 <그림 10>을 중첩시킨 것과 같다.



<그림 11>  $y_1$ 과  $y_2$ 에 대한 동시 허용차영역

#### 4. 요약

본 논문은 혼합물의 허용차를 결정하기 위해 반응표면분석법을 이용하는 방안을 제시하였다. 먼저 혼합물 품질특성과 성분 간의 경험적 모델을 구하고 최적성분비를 발견한다. 다음, 품질특성에 대해 주어진 허용차를 만족할 수 있는 허용차영역을 최적성분비 주위에서 결정한다. 이를 위해, 개별 성분비의 값을 하나씩 고정시킨 후 다른 성분비에 순차적으로 허용차를 배분하는 방식을 취하였다. 제안된 방법은 이론적인 가정이나 사전정보에 대한 요구 없이도 동시 허용차영역을 손쉽게 식별할 수 있으며 특히 개별 성분비

마다 상한과 하한이 제시되므로 공정의 세팅과 모니터링에도 유용하게 활용될 수 있다. 하지만 품질특성 간에 선호도나 상관관계가 반영되어 있지 않아서 허용차배분 결과를 정량화하는 데에는 한계가 있다. 이 부분은 Park et al. (2008)이 제안한 다변량 기대손실 함수를 이용하여 보완할 필요가 있다. 아울러 제안된 방법을 Kim and Park (2005)의 이차전지 실험데이터에 적용함으로써 현장문제 해결을 위한 개선방안도 모색하고자 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 2008년도 정부재원 (교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받았음 (KRF-2008-521-D00528).

#### 참고문헌

- [1] Cornell, J. (2002), *Experiments with Mixtures*, New York, Wiley.
- [2] Myers, R. H. and Montgomery, D. C. (2002), *Response Surface Methodology*, Second Edition, Wiley, New York
- [3] Park, J. I., Kim, S. J., and Jeong, M. K. (2008), "A New Tolerance Design Method for a Secondary Rechargeable Battery Using Design of Experiments with Mixture," *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 24, pp. 543-556.
- [4] Steiner, S. H. and Hamada, M. (1997), "Making mixtures robust to noise and mixing measurement errors," *Journal of Quality Technology*, 29(4), pp. 441-450.
- [5] Nas, T., Fargestad, E. M. and Cornell, J. (1998), "A comparison of methods for analyzing data from a three component mixture experiment in the presence of variation created by two process variables," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Vol. 41, pp. 221-235.

- [5] Kim, S. J. and Park, J. I. (2005), "An Optimum Design of Secondary Battery Using Design of Experiments with Mixtures," *Industrial Engineering Interfaces*, Vol. 18, No. 4, pp. 402-411.
- [7] Goldfarb, H., Borrer, C. and Montgomery, D. (2003), "Mixture-process variable experiments with noise variables," *Journal of Quality Technology*, Vol. 35, No. 4, pp. 393-405.
- [8] Kowalski, S. M., Cornell, J. A. and Vining, G. G. (2002), "Split-plot designs and estimation methods for mixture experiments with process variables," *Technometrics*, 44(1), pp. 72-79.
- [9] Kim, K. S. and Choi, H. G. (2003), "Nonlinear tolerance allocation for assembly components," *IE Interfaces*, 16, Special Edition, pp. 39-44.
- [10] Feng, C. X. and Kusiak, A. (1997), "Robust tolerance design with the integer programming approach," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 119, pp. 603-610.
- [11] Wu, C. C., Chen, Z. and Tang, G. R. (1998), "Component tolerance design for minimum quality loss and manufacturing cost," *Computers in Industry*, 35, pp. 223-232.
- [12] D'Errico, J. R. and Zaino, Jr., N. A. (1988), "Statistical tolerancing using modification of Taguchi's method," *Technometrics*, 30(4), pp. 397-405.
- [13] Bisgaard, S., Graves, S. and Shin, G. (2000), "Tolerancing mechanical assemblies with CAD and DOE," *Journal of Quality Technology*, 32(3), pp. 231-240.
- [14] Jeang, A. (1999), "Optimal tolerance design by response surface methodology," *International Journal of Production Research*, 37(14), pp. 3275-3288.
- [15] Li, W. and Wu, C. F. J. (1999), "An integrated method of parameter design and tolerance design," *Quality Engineering*, 11(3), pp. 417-425.
- [16] Moskowitz, H., Plante, R. and Duffy, J. (1999), "The partial information case for multivariate tolerance design using scrap and rework costs," *International Journal of Production Research*, 37, pp. 139-154.
- [17] Moskowitz, H., Plante, R. and Duffy, J. (2001), "Multivariate tolerance design using quality loss," *IIE Transactions*, 33, pp. 437-448.
- [18] Chou, C. Y. and Chang, C. L. (2000), "Bivariate tolerance design for lock wheels by considering quality loss," *Quality and Reliability Engineering International*, 16, pp. 129-138.
- [19] Lee, C. L. and Tang, G. R. (2000), "Tolerance design for products with correlated characteristics," *Mechanism and Machine Theory*, 35, pp. 1675-1687.
- [20] 박성현 (2003), 개정판 현대실험계획법, 민영사.
- [21] Derringer, G. (1994), "A balancing act: optimizing a product's properties," *Quality Progress*, Vol. 27, pp. 51-58.
- [22] MINITAB® (2004), Release 14, Minitab Inc, State College, PA.