

다특성 강건설계법을 이용한 집적회로설계⁺

김경모

금오공과대학교 신소재시스템공학부

Integrated Circuit Design Using Multi-Characteristic Robust Design

Kyung Mo Kim

School of Advanced Materials and Systems Engineering,
Kumoh National University of Technology

Abstract

The ever increasing demands for enhanced competitiveness of engineered products require a “designing-in-quality” strategy that can effectively and efficiently incorporate concepts of uncertainty, quality, and robustness into design. Engineered design optimization approaches that are typically carried out with respect to a single objective become inadequate to address these multiple set of requirements. This paper presents a design metric for a multi-attribute robust design problem with designer’s preferences on the performance accuracy and the performance precision. The use of this design metric as the robust optimal design criterion in multi-stage experimentation and modeling technique is presented. The effectiveness of the overall design procedure and the performance of the proposed design metric are tested with the aid of IC design and the results are discussed.

⁺ 본 연구는 1998년 LG 연암문화재단 해외연구교수 지원프로그램에 의해 지원되었음.

1. 서론

제조나 사용과정의 제어할 수 없는 변동(이하, 잡음)에 대해 제품 성능을 둔감하도록 하는 것은 집적회로 설계자의 주된 과제중의 하나이다. 통계적 회로설계 방법(statistical circuit design methods)은 이러한 잡음 하에서 회로의 성능을 최적화 시키는 수단으로 최근 그 중요성이 인식되고 있다. 기존의 연구에서는 회로의 품질특성(quality characteristics)을 설계변수(controllable variables), 제어할 수 없는 변수(uncontrollable variables), 그 값이 설계 전에 이미 결정되어 있는 입력모수(input parameters)들에 대한 2차 통계모형(quadratic model)으로 근사하여 설계 최적화에 사용한다[1, 2]. 이러한, 통계적 모형은 적은 실험노력으로 품질특성을 추정할 수 있게 하며, 아울러 입력모수의 불확실성이나 제어할 수 없는 변수를 설계에서 고려할 수 있게 한다.

집적회로(IC, integrated circuit)의 설계에는 PSpice (Professional Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis, MicroSim사)와 같은 회로 simulator 가 보편적으로 사용된다[최평 외, 1997]. 설계 최적화 과정에서 회로 simulator를 이용한 품질특성의 평가가 시간적으로나 비용적으로 용이하지 않은 경우에는 simulator에 대한 통계적 모형(즉, meta-model)을 이용하는 것이 효율적이다. 한편, 기존의 통계적 모형은 설계변수의 범위가 좁은 경우에는 유용하나, 그렇지 않은 경우에는 품질특성을 근사하는데 있어서 오차가 크다는 문제를 안고 있다. 그러므로, 설계영역이 넓은 경우에 정확한 통계적 모형을 구하기 위한 실험전략이 필요하다.

회로의 설계에는 목적기능과 관련된 다수의 품질특성이 있으며, 일반적으로 품질특성과 설계변수는 비선형적(nonlinear) 함수관계를 갖는다. 한편, 품질특성은 제어할 수 없는 잡음(noise)에 의해 항상 변동되므로 이들 관계식에 기존의 비선형 최적화 절차를 직접적으로 적용하는 것은 불가능하다. 실험적 설계방법은 해석적으로 해를 구하기 불가능한 경우나 계산 노력이 많이 드는 경우에 적합하며, 이산적 설계변수(discrete design variables)나 잡음을 설계과정에 쉽게 도입할 수 있게 한다. 다구찌에 의한 강건 설계는 잡음에 둔감(robust)한 설계조건을 실험적으로 찾는 방법이나, 단일 품질특성에 대한 가법모형(additive model)에 기반을 두고 있기 때문에 설계변수와 품질특성간에 비선형성이 강하거나, 또는 품질특성에 대한 크기 제한이나 설계변수 간의 함수관계로 주어지는 설계제약(constraints)이 있는 경우에는 그대로 적용할 수 없다[Kunjur and Krishnamurty, 1997]. 게다가, 다수의 품질특성이 있는 경우에는 더욱 더 문제 해결을 어렵게 만든다. 즉, 전통적 강건 설계법은 제약식이 있고 최적화 해야 할 품질특성이 다수인 경우에는 적용될 수 없으며, 더구나 현재까지 제약이 있는 다특성 강건 설계문제에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

일반적으로 다수의 품질특성에 대한 설계 최적화 기법은 생성기법과 선호기반기법으로 나눌 수 있다. 생성기법(generating method)은 설계문제에 대해 전체 또는 일부의 비지배해(non-inferior solution set)를 구해준다[Cohon, 1985]. 그러나, 생성기법에서는 생성된 비지배해를 서로 비교하여야 하는 문제가 여전히 남게 된다. 선호기반기

법(preference-based method)은 각각의 품질특성에 대한 설계자 선호도(preferences)를 구하고 이로부터 전체 선호도(overall preference)를 결정한다. 전체 선호도가 결정되면, 다특성 설계문제는 단일특성 설계문제로 변환된다.

위의 논의를 바탕으로, 본 연구는 제약 있는 다특성 설계문제에 적용할 수 있는 선호기반기법에 기초한 강건 설계절차를 개발하고, 개발된 절차를 이용하여 잡음에 강한 집적회로를 설계하는 방법을 제시하는데 그 목표가 있다.

2. 다속성 강건설계법

강건 설계(robust design)에서는 제품 수명주기동안 발생하는 사회적 손실의 추정치인 기대손실(expected loss)을 최소로 하는 설계변수의 값을 실험적으로 결정한다. 대표적 정특성(static characteristics)인 망목특성(nominal-the-best characteristics)의 기대손실은 식 (1) 과 같다.

$$L = k[\sigma^2 + (\mu - m)^2] \quad (1)$$

여기서, k 는 품질특성에 따른 상수, σ^2 은 품질특성의 분산, μ 는 품질특성의 평균값, 그리고 m 은 품질특성의 설계 목표치이다. 식 (1)에서 보는 것과 같이 기대손실을 최소화하기 위해서는 분산을 최소화시키고, 이와 동시에 평균과 목표치간의 편차를 줄여야 한다. 즉, 단일 품질특성(single quality characteristics)에 대한 강건 설계문제도 “품질특성의 분산”(이하, 정밀도)과 “품질특성의 평균과 목표치간의 편차”(이하, 정확도)를 설계속성으로 갖는 2속성 설계문제(two attributes design problem)이다. 여기서, 용어상의 혼란을 막기 위해 “정밀도”와 “정확도”는 앞으로 “속성”으로 언급한다. 다른 유형의 품질특성에 대해서도 위와 유사한 논의가 가능하다.

한편, 다구찌는 품질특성의 평균을 설계 목표치로 조정하는 것은 용이하다는 전제하에 SN 비(signal-to-noise ratio)의 최대화를 통해 기대손실을 최소화한다. 그러나, 평균조정이 모든 유형의 품질특성, 그리고 모든 설계상황에서 언제나 가능한 것은 아니다. 또한, 최적화 과정에서는 SN 비에 내재하는 정확도와 정밀도에 대한 선호도 [Iyer et al., 1998]에 따라 속성간의 절충(trade-off)이 이루어진다. SN 비에 내재한 선호도는 설계자의 선호도와는 무관한 것이므로, 설계목적에 따라 결정되는 정확도와 정밀도에 대한 설계자 선호도를 반영하는 설계평가기준(design metric)이 필요하다.

최근 Iyer와 Krishnamurty(1998)가 설계자 선호도를 고려한 설계평가기준을 제시하였으나, 그들의 평가기준은 품질특성별로 다를 수 있는 정확도와 정밀도에 대한 선호도를 독립적으로 고려하지 못하는 한계를 지니고 있다. 즉, 제시된 모든 품질특성에 대해 정밀도(또는, 정확도)에 우선 순위를 두어야 하므로, 설계자가 특정한 품질특성에 대해서는 정밀도에 우선 순위(분산을 우선적으로 줄이기를 원함)를 두고 또 다른

품질특성에 대해서는 정확도에 우선 순위(평균을 목표치에 우선적으로 근접시키기를 원함)를 두고자 할 때 이를 위한 적절한 설계방안을 제공해 주지 못한다. 이러한 설계 의도를 달성하기 위해서는 각각의 속성에 대해 설계자 선호도를 독립적으로 고려할 수 있는 설계평가기준이 필요하다. 본 연구의 3절에서 이러한 상황에서 사용될 수 있는 설계평가기준을 제시한다. 제안된 설계평가기준을 집적회로설계에 적용하면, 회로의 일부 품질특성에 대해서는 정확도에 중점을 두고, 나머지 품질특성에 대해서는 정밀도에 중점을 둔 설계 결과를 얻을 수 있게 된다.

3. 설계에서의 효용이론

본 절에서는 효용이론(utility theory) 이용하여 다속성에 대한 설계자의 주관적 선호도(subjective preferences)를 설계과정에서 정량적으로 반영하는 절차를 제시한다. von Neumann과 Morgenstern(1947)에 의해 경제적 문제의 대안평가를 위해 개발된 효용이론을 공학적 설계대안평가에 응용하고자 하는 시도가 최근 광범위하게 이루어지고 있다[Thurston, 1991]. 설계에 효용이론을 이용하는 방법은 1) 단일속성 효용함수(SAU function, single attribute utility function)의 결정과 2) SAU 함수로부터 다속성 효용함수(MAU function, multiple attribute utility function)를 구하는 2가지 절차로 구성된다. 설계속성에 대한 SAU 함수는 해당 속성에 대한 설계자의 독립적 선호도를 반영한다. 즉, SAU 함수는 최선의 속성값에 대해 효용 1 최악에 대해 효용 0 최선과 최악 사이의 속성값에 대해서 0과 1 사이의 효용값을 대응시킨다. 그리고, MAU 함수의 결정을 위해서는 lottery question 을 통해 각 속성에 대한 설계자의 절충의사(trade-off attitude)를 파악하여야 한다.

강건설계에서 고려되는 설계속성은 앞 절에서 살펴본 바와 같이 각 품질특성에 대한 정확도와 정밀도이다. 그리고, 앞으로 언급하는 설계대안(design alternatives)은 설계 변수값의 특정한 조합을 의미한다. 품질특성이 망목특성인 경우에 설계대안 i ($i=1,2, \dots, I$) 잡음조건 j ($j=1,2, \dots, J$)에서 특성 k ($k=1,2, \dots, K$)의 관측치를 y_{ijk} , 설계대안 i 잡음조건 j 에서의 관측치 평균을 $\overline{y_{ik}}$, 특성 k 의 목표치를 m_k 라고 한다. 정확도는 품질특성의 평균이 설계 목표치에 가까울수록 그리고 정밀도는 품질특성의 분산이 작을수록 바람직하므로, 설계대안 i 의 특성 k 에 대한 정확도(t_{ik})와 정밀도(v_{ik})는 식 (2) (3)을 이용하여 평가한다. 한편, 망대특성(larger-the-better characteristics) 관측치의 경우 역수를 구해 망소특성(smaller-the-better characteristics)으로 취급하고, t_{ik} 와 v_{ik} 는 그 정의에 따라 작을수록 바람직하다.

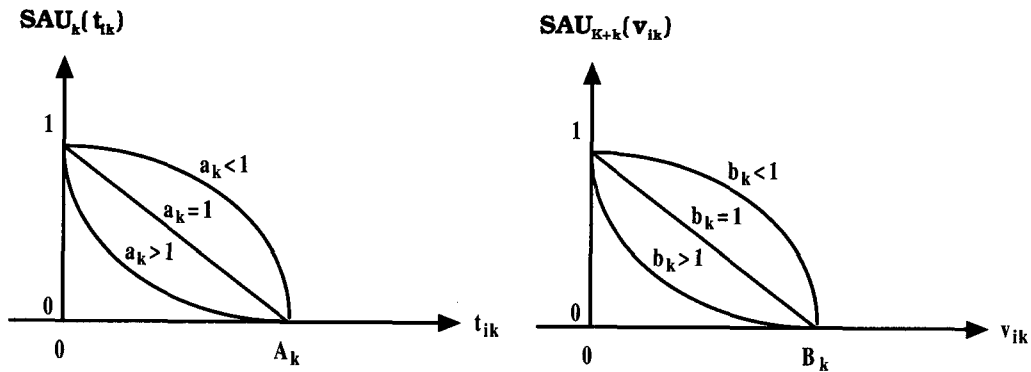
$$t_{ik} \equiv \begin{cases} (\overline{y_{ik}})^2 & , y = \text{smaller-the-better characteristics} \\ (\overline{y_{ik}} - m_k)^2 & , y = \text{nominal-the-best characteristics} \end{cases} \quad (2)$$

$$v_{ik} = \sum_{j=1}^J (y_{ijk} - \bar{y}_{ik})^2 / (J-1) \quad (3)$$

설계자가 평가하기에 품질특성 k 에 대해 t_{ik} 가 A_k 이상이면 정확도에 대한 효용이 0이고 v_{ik} 가 B_k 이상이면 정밀도에 대한 효용이 0 이라면, 품질특성 k 에 대한 정확도와 정밀도의 효용함수는 식 (4) (5)와 같이 들 수 있다. 여기서, a_k 와 b_k 는 해당 속성의 상대적 중요도를 나타내는 양의 상수로서 이 값이 클수록 상대적으로 중요한 속성에 대응된다. 다양한 상수값에 대한 SAU 함수의 형태는 <그림 1>과 같다.

$$SAU_k(t_{ik}) = \begin{cases} \left(\frac{A_k - t_{ik}}{A_k}\right)^{a_k} & , 0 \leq t_{ik} \leq A_k \\ 0 & , t_{ik} > A_k \end{cases} \quad (4)$$

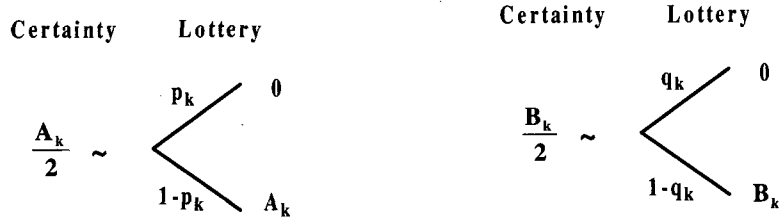
$$SAU_{K+k}(v_{ik}) = \begin{cases} \left(\frac{B_k - v_{ik}}{B_k}\right)^{b_k} & , 0 \leq v_{ik} \leq B_k \\ 0 & , v_{ik} > B_k \end{cases} \quad (5)$$



< 그림 1 > 설계자 위험성향에 따른 SAU 함수의 형태

해당 속성에 대한 설계자의 위험성향(risk attitude)에 따라 결정되는 a_k 와 b_k 는 <그림 2>의 lottery question을 이용하여 구한다. 즉, 품질특성 k 의 정확도에 대해 p_k 의 확률(이것을 표준 lottery에 대한 확률등가라고 함)로 최선의 결과 ($t_{ik}=0$)가 그리고 $1-p_k$ 의 확률로 최악의 결과 ($t_{ik}=A_k$)가 발생하는 표준 lottery에 대해 설계자의 확신통가(certainty equivalent)가 $A_k/2$ 이라면 $SAU_k(A_k/2) = p_k$ 이므로 $a_k = \log_2(1/p_k)$ 가 된다. 정밀도에 대해서도 이와 유사한 절차를 통하여 $b_k = \log_2(1/q_k)$

가 된다. 이에 대한 세부적 절차는 Keeney and Raiffa(1993)에 잘 다루어져 있다.



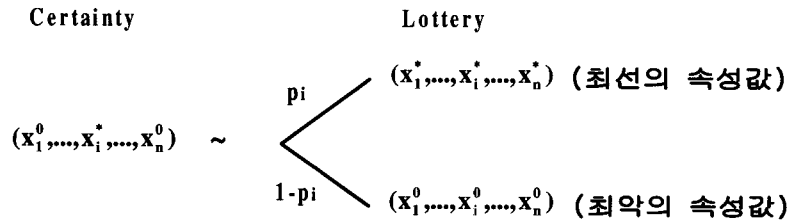
< 그림 2 > 품질특성 k의 SAU 함수 결정을 위한 lottery question

잡음에 둔감한 설계조건은 각 품질특성에 대한 정확도와 정밀도를 동시에 최소화 시킴으로써 얻어지나 일반적으로 이들은 각각 다른 설계조건에서 최소화된다. 즉, 최적 설계조건을 구하기 위해서는 속성들 간의 절충(trade-off)이 필요하며, 이러한 절충은 MAU 함수에 반영된 설계자의 절충태도에 따라 이루어진다. 의사결정에 있어서 속성간의 상호효용독립(mutual utility independence)은 일반적 전제조건이며, 실제로 대부분의 의사결정문제에 있어서 의사결정자가 이러한 성향을 보인다. 그리고, 설계속성간의 상호효용독립이 만족되는 경우에 있어서 MAU 함수는 식 (6)과 같은 승법적 형태(multiplicative form)를 갖는다[Keeney and Raiffa, 1993]. 본 연구에서도 모든 품질특성의 정밀도와 정확도는 상호효용독립임을 가정한다.

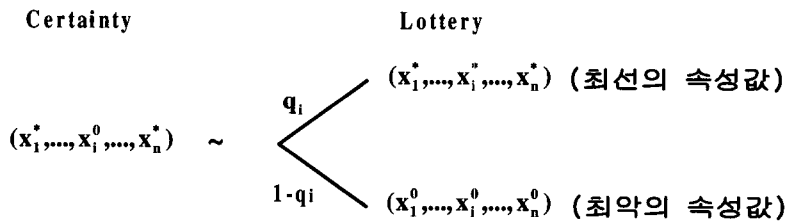
$$MAU(x) = \frac{1}{k_0} [(\prod_{i=1}^n (k_i k_i SAU_i(x_i) + 1)) - 1] \tag{6}$$

단, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 는 설계속성 벡터이다. Scaling 상수 ($k_i, i = 1, 2, \dots, n$)는 각 설계속성의 상대적 중요도를 반영하며, normalized scaling 상수 (k_0)는 $1 + k_0 = \prod_{i=1}^n (1 + k_i)$ 를 만족시키는 상수로서 MAU 값을 0과 1 사이의 값으로 정규화 시키는 역할을 한다. 일반적으로 scaling 상수는 <그림 3>과 같은 lottery question을 이용하여 구한다. 여기서, x_i^* 는 속성 i 의 최선의 결과, x_i^0 는 최악의 결과를 의미한다. 이에 대한 세부적 절차는 Thurston(1991)에 제시되어 있으므로 본 연구에서의 반복을 생략한다.

한편, <그림 3>과 같은 lottery question 을 사용하는 경우 설계자는 $n-1$ 개의 속성이 최악이고 1개의 속성만이 최선인 설계대안에 대한 설계의 수준(quality)을 평가해야 한다. 그러나, 다특성 강건 설계와 같이 속성의 수가 많은 경우 이러한 평가가 매우 어려우므로, 본 연구에서는 <그림 4>와 같은 새로운 형태의 lottery question을 이용한다.



< 그림 3 > Scaling 상수 결정을 위한 일반적인 lottery question



< 그림 4 > Scaling 상수 결정을 위한 새로운 lottery question

<그림 4>와 같이 $n-1$ 개의 속성이 최선이고 1개의 속성만이 최악인 설계대안의 설계수준을 평가해야 하는 것은 <그림 3>의 경우보다 상대적으로 용이하다고 할 수 있다. <그림 4>에 대해 설계자가 부여한 확률등가 (q_i)를 이용하여 scaling 상수를 유도하면 식 (7)과 같다.

$$k_i = \frac{1}{k_0} \left[\left(\prod_{i=1}^n (1 + k_0 q_i) \right)^{1/n} / (1 + k_0 q_i) - 1 \right] \quad (7)$$

여기서, k_0 는 $1 + k_0 = \left[\prod_{i=1}^n (1 + k_0 q_i) \right]^{1/(n-1)}$ 을 만족하는 상수이다.

결론적으로 볼 때, 개별 속성에 대한 설계자의 선호도를 SAU 함수로 평가한 후, MAU 함수를 이용하여 개별 속성의 선호도를 전체 선호도(overall preference)로 통합함으로써 설계자의 주관적 선호도를 설계과정에서 정량적으로 반영할 수 있다.

4. 설계 제약의 처리

기존의 강건 설계법은 설계변수에 대한 범위제약(bound constraints)은 설계과정에서 고려할 수 있으나, 설계변수 간의 함수관계로 주어지는 제약식(constraints)이나 품

질특성에 대한 범위제약은 처리할 수 없다. 그러나, 대부분의 제품설계에서는 만족해야 하는 제약식이 있기 때문에, 이러한 경우에 적용할 수 있는 강건 설계절차의 개발이 필요하다. 최근 Gold와 Krishnamurty(1997)는 제약도 하나의 설계속성으로 간주하여, 제약의 만족정도를 단일속성 효용함수(SAU 함수)로 구한 후 식 (8)과 같이 전체 선호도를 속성값과 제약값의 함수로 평가하는 방법을 제시하였다. 이것은 제약식이 어떤 수준까지 성취되면 설계자는 그 제약을 추가로 성취하는데 관심을 갖지 않음에 착안한 것이다.

$$D = MAU(\text{attributes}, \text{constraints}) \quad (8)$$

여기서, $MAU()$ 는 속성과 제약에 대한 다속성 효용함수이다. 식 (8)의 MAU 함수를 얻는 과정에서 속성과 제약에 대한 절충이 필요하나, 속성값과 제약값으로 구성된 lottery의 확률등가를 결정하는 것은 매우 힘든 문제이다. 그러므로, 본 연구에서는 속성과 제약간의 절충을 배제하기 위해 설계수준을 속성만으로 우선 평가하고 설계대안이 제약식을 위반하는 정도에 따라 벌칙(penalty)을 부과하는 방식으로 전체 선호도를 구한다. 이 경우 설계대안에 대한 전체 선호도는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$D = \left[\sum_{c=1}^C SAU_c(\text{constraint}) \right] MAU(\text{attributes}) \quad (9)$$

여기서, $SAU_c(\text{constraint})$ 는 제약식 $c(c=1, 2, \dots, C)$ 에 대한 단일속성 효용함수이고, $MAU(\text{attributes})$ 는 제약을 제외한 설계속성에 대한 다속성 효용함수이다. 식 (9)에 제시된 벌칙에 기반을 둔 평가방식(penalty-based decision model)은 설계대안에 대한 설계자의 선호가 제약식 위반정도가 커짐에 따라 단조감소 한다는 전제하에 유도된 것이다.

5. 다단계 실험 및 모형화 기법

강건 설계실험에서는 설계변수의 수준값을 기술적 관심범위 내에서 가급적 넓게 잡아 실험하므로, 2차 통계모형의 정확도(model accuracy)가 떨어질 가능성이 높다. 이러한 경우 통계모형의 정확도를 높이기 위한 실험전략으로 다단계 실험(multistage experimentation)이 유용하다[Bernardo et al., 1992, Box and Draper, 1969]. 다단계 실험에서는 전체 설계공간에 대해 우선 잠정적 통계모형을 구하고 이를 이용하여 최적해가 존재할 것으로 예상되는 부분공간을 결정하며, 축소된 부분공간에 대해 더욱 정확한 통계모형을 구하고 이를 이용하여 부분공간을 더욱 축소시킨다. 이와 같이 모형화 과정과 설계공간 축소과정을 필요한 만큼 반복함으로써 최적해를 탐색해 간다.

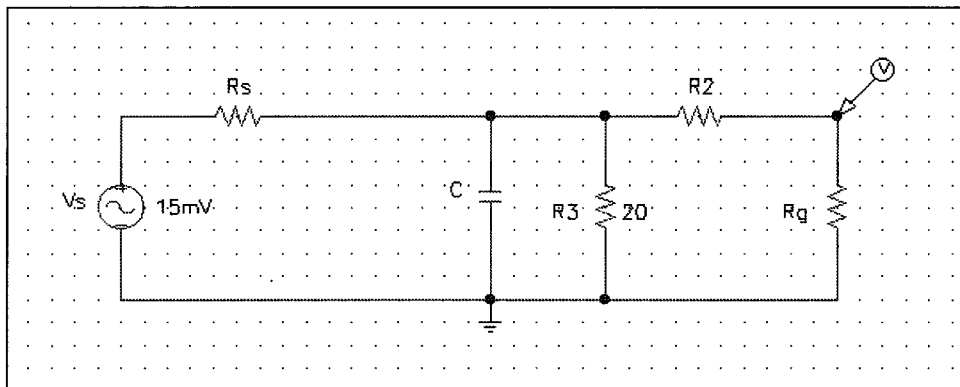
설계공간축소(design space reduction)는 충분히 정확한 통계모형이 구해질 때까지 반복하며, 설계공간축소의 구체적 방법은 6절에서 사례에서 상세히 설명한다. 본 연구에서는 다음과 같은 다단계 실험 및 모형화 절차를 제안한다.

- 단계1) 제약 $c(c=1, \dots, C)$ 에 대한 단일속성 효용함수 $SAU_c(\text{constraint})$ 를 구한다.
- 단계2) 현재의 설계공간에서 2차 반응표면을 위한 실험계획을 수립하고, 각 실험조건과 주어진 잡음수준 하에서 품질특성의 값과 제약의 값을 구한다.
- 단계3) 단계2)의 품질특성값으로 부터 식 (2) (3)을 이용하여 설계대안별로 속성값 (t_{ik}, v_{ik}) 을 구한다. 그리고, 식 (4) (5)를 이용하여 설계대안별로 각 속성에 대한 SAU 함수값을 구한다. 여기서, 설계대안은 설계실험에 사용되는 실험조건을 의미한다.
- 단계4) SAU에 대한 scaling 상수를 <그림 4>의 lottery question을 이용하여 구한 후, 이것으로부터 각 설계대안에 대한 $MAU(\text{attributes})$ 를 결정한다.
- 단계5) 단계4)에서 구한 $MAU(\text{attributes})$ 값을 이용하여 MAU의 2차 반응표면 함수를 구한다. 얻어진 2차 반응표면의 정확도가 충분하면 단계8)로 간다.
- 단계6) 비선형 최적화 절차를 이용하여 전체 선호도(D)가 최대화되는 설계변수의 값을 구한다. 여기서, 비선형 최적화 절차의 초기해는 현 단계의 실험에서 얻어진 최대 MAU 값을 갖는 설계조건을 사용한다. 최적해 탐색과정 중 필요한 후보해에 대한 $SAU_c(\text{constraint})$ 값은 각 잡음조건에서 얻어진 SAU 값의 평균으로 구한다. 후보해에 대한 전체 선호도는 식 (8)로 부터 구한다.
- 단계7) 단계6)에서 구한 최적해를 중심으로 설계자가 사전에 설정한 비율에 따라 설계공간을 축소한 후 단계2)로 간다.
- 단계8) 단계6)에서와 동일한 방법으로 최적설계조건을 구한다.

6. 집적회로 설계사례

앞 절에서 제시한 해법절차를 이용하여 안정된 성능의 집적회로를 설계하는 방법을 설명한다. 사례는 transducer/modulator와 deflection indicator 사이에서 interface로 사

용되는 passive filter용 집적회로(IC)의 설계이다. 회로의 구조는 <그림 5>와 같으며 이는 회로해석 시뮬레이션 프로그램인 PSpice의 입력으로 사용된다. 설계에서 최적화하는 품질특성은 output distortion (W_c)과 recording instrument output (V_o)이다. 이들의 설계 목표치는 고객의 요구에 따라 변경되며, 본 사례에서는 6.84 (Hz)와 $1.69 \times 10^{-3} (V)$ 을 각각 사용한다. 설계변수는 회로의 저항값 R_s, R_2, R_g 와 콘덴서 용량 C 이다. 한편, $V_s = 15.0 \times 10^{-3} (V)$ 와 $R_3 = 20 (\Omega)$ 는 이전 설계단계에서 결정되므로, 본 사례에서는 그 값이 사전에 주어지는 입력모수이며, 품질특성 W_c 와 V_o 에 대한 고객요구는 제약이 된다. 설계변수의 실험수준은 <표 1>과 같으며, 이는 강건 설계의 실험원칙을 고려하여 기술적 관점에서 볼 때 매우 넓은 범위에서 선택한다. 회로의 주된 잡음은 소자의 정격치의 변동이고, 본 실험에서는 $L_8(2^7)$ 를 이용하여 <표 2>와 같이 소자 정격치의 $\pm 5\%$ 를 잡음수준으로 고려한다.



< 그림 5 > Passive filter network 의 회로구조

< 표 1 > 설계변수별 실험수준

설계변수	R_s	C	R_2	R_g
1수준	50	500	1	100
2수준	150	1500	50.5	300
3수준	250	3000	100	500

< 표 2 > 잡음변수별 실험수준

잡음변수	R_s 변동율	C 변동율	R_2 변동율	R_g 변동율
1 수준	-5%	-5%	-5%	-5%
2 수준	+5%	+5%	+5%	+5%

전체 선호도에 대한 2차 반응표면모형을 구하기 위해 중심합성계획(CCD, Central Composite Design)을 사용한다. Simulator를 이용한 컴퓨터 실험에서는 실제 실험에서와는 달리 실험오차(experimental error)가 없으므로 1개의 중심점(center point)만 사용하였고, star points에 대한 α 값은 실험 불가능한 설계대안의 발생을 방지하기 위해 $\alpha=1$ 로 두었다[Schmidt, 1994]. SAS의 RSREG routine[15]을 이용하여 구한 반응표면모형의 정확도가 충분치 않으면(본 사례에서는 $R^2 \geq 0.95$ 를 사용하였음), R^2 에 기반을 둔 축소율로 설계공간을 축소한 후 다음 단계의 실험을 실시한다. 설계공간을 축소하는 경험적 규칙(heuristic rule)은 다음과 같다. 현 단계의 실험에서 i 제 설계변수 (x_i)의 실험범위가 $[l_i^c, u_i^c]$ 이고 이때 결정된 x_i 의 최적값을 x_i^c 그리고 현 단계에서 구한 통계모형의 결정계수를 R_c^2 라고 한다면, 다음 단계의 실험에서 x_i 의 실험범위는 축소율 $F_c=R_c^2/2$ 을 적용하여 식 (10)과 같이 결정한다.

$$[l_i^n, u_i^n] = [\max(l_i^c, x_i^c - F_c \times (u_i^c - l_i^c)), \min(u_i^c, x_i^c + F_c \times (u_i^c - l_i^c))] \quad (10)$$

현 단계의 최적값을 중심으로 설계자가 사전에 설정한 축소율을 적용하여 현행 설계공간을 축소하는 식 (10)의 의미는 다음과 같다. 현행 모형의 정확도가 높으면 현행 최적해가 실제 최적해에 가까이 있을 가능성이 높다고 판단되므로 현 설계공간을 많이 줄이고, 모형의 정확도가 낮으면 현행 최적해가 실제 최적해에 가까이 있을 가능성이 낮다고 판단되므로 현 설계공간을 적게 줄인다는 원칙을 적용한다. 한편, 설계자가 축소율을 크게 설정하면 최적해에 빠르게 수렴하는 반면 얻어진 최적해의 정확도가 떨어질 가능성이 있고, 작게 설정하면 보다 정확한 해에 수렴하는 반면 많은 실험 노력이 필요하다. 그러므로, 설계자는 설계 상황에 맞추어 축소율을 설정하여야 한다. 본 연구에서 사용된 설계공간 축소율 $F_c=R_c^2/2$ 을 사용할 때 축소비율은 <표 3>과 같다. 즉, 현 단계의 2차 모형의 결정계수가 0.95 이면 현 단계의 설계공간을 47.5 (%) 줄여 다음 단계의 설계공간으로 사용한다. 만약, 현행 단계에서 구한 2차 모형이 충분히 정확하면 NLP 절차를 이용하여 최적 설계조건을 구한다.

< 표 3 > 결정계수 수준에 따른 설계공간 축소비율

결정계수	1	0.95	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7
축소비율(%)	50	47.5	45	42.5	40	37.5	35

한편, 반응표면 실험을 하는 경우 정확한 모형을 구하기 위해 필요한 실험 횟수가 설계변수의 수에 따라 급격히 증가하므로, 실험 횟수와 모형의 정확도에 대한 절충이 필요하다. 만약, 설계변수의 수가 많으면 전체 설계공간에 대한 2수준 screening 실험으로부터 품질특성에 영향력이 큰 변수만을 추출하여 주된 실험(main experiment)에

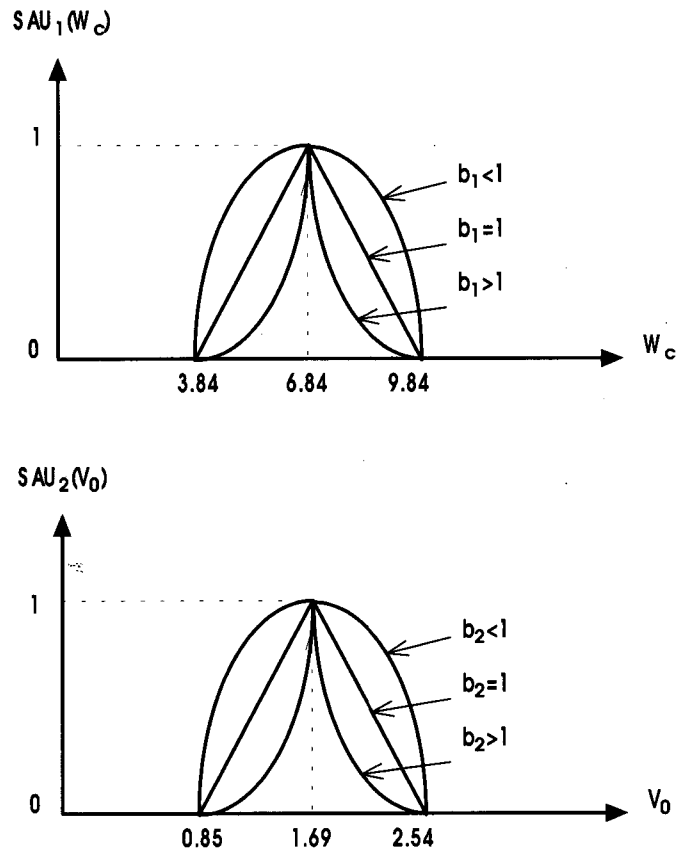
사용한다.

품질특성의 크기에 대한 식 (11) (12)과 같은 제약은 성격상 엄격히 만족해야 하는 hard constraints는 아니며, 제약위반정도에 따라 설계대안에 대한 설계자 선호를 감소시키는 soft constraints 이라고 볼 수 있다[Siddall, 1982].

$$W_c = 6.84 \text{ (Hz)} \tag{11}$$

$$V_o = 1.69 \text{ (mV)} \tag{12}$$

위의 제약에 대한 SAU 함수로 식 (13) (14)의 비선형 함수를 사용할 수 있으며, SAU 함수의 형태는 <그림 6>과 같다. 함수의 형태를 결정하는 상수 (b_1 , b_2)는 <그림 2>와 같은 lottery question을 사용하여 결정한다.



< 그림 6 > 제약에 대한 SAU 함수

< 표 4 > Passive filter network을 위한 실험계획

외측배열

잡음조건	Rs 변동율	C 변동율	R2 변동율	Rg 변동율
1	1	1	1	1
2	1	1	1	2
3	1	2	2	1
4	1	2	2	2
5	2	1	2	1
6	2	1	2	2
7	2	2	1	1
8	2	2	1	2

내측배열

실험번호	Rs	C	R2	Rg
1	1	1	1	1
2	3	1	1	1
3	1	3	1	1
4	3	3	1	1
5	1	1	3	1
6	3	1	3	1
7	1	3	3	1
8	3	3	3	1
9	1	1	1	3
10	3	1	1	3
11	1	3	1	3
12	3	3	1	3
13	1	1	3	3
14	3	1	3	3
15	1	3	3	3
16	3	3	3	3
17	2	2	2	2
18	1	2	2	2
19	3	2	2	2
20	2	1	2	2
21	2	3	2	2
22	2	2	1	2
23	2	2	3	2
24	2	2	2	1
25	2	2	2	3

$$SAU_1(W_c) = \max [0, \min [(\frac{W_c - 3.84}{6.84 - 3.84})^{b_1}, (\frac{9.84 - W_c}{9.84 - 6.84})^{b_1}]] \quad (13)$$

$$SAU_2(V_0) = \max [0, \min [(\frac{V_0 - 0.85}{1.69 - 0.85})^{b_2}, (\frac{2.54 - V_0}{2.54 - 1.69})^{b_2}]] \quad (14)$$

다속성 효용함수(MAU)에 필요한 scaling 상수는 <그림 4>와 같은 방식으로 구성된 lottery 에 대한 확률등가 (q_i)를 이용하여 결정한다. 각 실험조건에 대한 PSpice 출력으로부터 구한 속성의 SAU 값으로부터 MAU(attributes) 값을 결정하고, 이로부터 MAU(attributes) 에 대한 2차 반응표면함수를 구한다. 제약에 대한 SAU 값은 식 (13) (14)를 이용하여 구한다. 최적해 탐색과정에서 “후보해의 전체 선호도(D)”는 “반응표면함수에서 구한 MAU(attributes) 값”과 잡음 하에서 구한 “제약의 SAU 값들의 평균”을 곱하여 구한다.

제시된 해법절차를 다양한 설계자 선호도하에 적용시킨 결과가 <표 5>에 있다. 본 설계사례에서는 다양한 설계자 선호도에 대하여 2 단계 이내의 반복으로 최적해가 구해졌다. 설계자 선호도의 구성은 2 가지 품질특성을 갖는 설계상황에서 생길 수 있는 모든 경우를 대표할 수 있는 것으로 구성하였다. 선호도 1은 특정한 한 품질특성과 관련된 두 속성이 다른 품질특성의 두 속성 보다 더 중요한 상황을 대표하며, 선호도 2는 중요한 속성 유형이 품질특성에 따라 서로 다른 상황을 대표하며, 선호도 3은 두 품질특성 모두에 대해 같은 유형의 속성이 중요한 상황을 대표한다. 그리고, 확률등가가 작을수록 설계자가 해당 속성을 희생시켜 다른 속성을 개선하는 것을 바라지 않음을 의미하므로 상대적으로 중요도가 큰 속성에 대해서는 식 (4) (5)의 b_i 값이 1 보다 큰 위험 회피형 (risk averse) 효용함수가 적합하다. 반대로 확률등가가 크다는 것은 해당 속성에 대한 설계자의 위험태도가 위험 추구형 (risk prone) 임을 의미하므로 그러한 속성에 대해서는 식 (4) (5)의 b_i 값은 0과 1 사이의 값을 갖는 것이 적합하다. 본 사례에서는 편의상 위험 회피형 효용함수에 대해서는 b_i 값을 일률적으로 4를 사용하였고, 위험 추구형 효용함수에 대해서는 1/4 을 사용하였다. 제약에 대한 SAU 함수인 식 (13) (14)에서도 위와 같은 근거에 기초하여 b_i 값으로 4와 1/4을 사용하였다.

< 표 5 > 설계자 선호도에 따른 최적 속성값

설계자	선호도	선호도 1	선호도 2	선호도 3
확률등가	q1	0.9	0.9	0.1
	q2	0.9	0.1	0.9
	q3	0.1	0.1	0.1
	q4	0.1	0.9	0.9
Wc (목표 : 6.84)	표준편차	0.3530	0.3585	0.3456
	특성평균	6.5611	6.5991	6.4251
Vo (목표 : 1.69)	표준편차	0.0774	0.0788	0.0771
	특성평균	1.6215	1.6208	1.6159
결정	계수	0.9824	0.9541	0.9784
반복수		2	1	1

< 표 6 > 선호도 1하의 첫 반복단계에서 MAU(attributes)의 반응표면함수

	MAU(attributes)에 대한 2차 반응표면함수
선호도1 하에서	MAU = 0.4847 + 0.0006Rs' + 0.0106C' + 0.0044Rg'
첫 반복단계의	- 0.4105Rs'Rs' - 0.0044Rs'C' + 0.0195C'C' - 0.0406Rs'R2'
MAU	+ 0.006C'R2' + 0.0595R2'R2' + 0.0381Rs'Rg' - 0.0056C'Rg'
	- 0.0394R2'Rg' - 0.0655Rg'Rg'

여기서, 설계변수의 정규화는 <표 1>의 설계변수 범위를 이용하여 식 (15)와 같이 이루어진다(정규화에 관한 사항은 Schmidt et al.(1994)을 참조할 것).

$$R'_s = \frac{R_s - (250 + 50)/2}{(250 - 50)/2}, \quad C' = \frac{C - (3000 + 500)/2}{(3000 - 500)/2}$$

$$R'_2 = \frac{R_2 - (100 + 1)/2}{(100 - 1)/2}, \quad R'_g = \frac{R_g - (500 + 100)/2}{(500 - 100)/2} \quad (15)$$

<표 5>의 결과로 볼 때, 제안된 절차는 전체 선호도(D)에 대해 충분히 정확한 반응표면함수를 2 단계 이내의 반복(iteration)으로 구해준다. 그리고, 개별 속성에 대한 결과를 보면 작은 확률등가에 대응되는 속성에 대해 더 나은 결과가 얻어짐을 알 수 있다. Lottery question에서의 작은 확률등가 (q_i)는 설계자가 절충과정에서 해당 속성을 희생시키지 않으려는 것을 나타내므로 작은 확률등가를 갖는 속성에 대해 설계 목표치 성취정도가 크게 나타난 <표 5> 결과는 우리의 예상과 일치한다. 그러므로, 본 연구에서 제시된 강건 설계절차는 제약식이 있는 다속성 강건설계 문제에 대해서 설계자의 다속성에 대한 선호도를 체계적으로 절충해 줌을 알 수 있다.

7. 결론

본 연구에서는 기존의 강건설계 절차의 한계를 극복할 수 있는 새로운 설계절차를 개발하고, 이를 집적회로설계에 응용하여 잡음조건에 강한 회로를 설계하는 방법을 제시하였다. 설계속성에 대한 MAU 함수와 제약위반 정도에 따른 벌칙을 통합하여, 제약이 있는 다속성 강건 설계문제에 적용할 수 있는 설계평가척도(design metric)를 개발하였다. 제안된 척도를 다단계 실험 및 모형화 절차에 사용할 때 다음과 같은 장점을 갖는다.

- 1) 제안된 성능평가척도를 적용함으로써 품질특성의 평균을 설계목표로 접근시키는 문제와 품질특성의 산포를 줄이는 문제를 유연성 있게 다룰 수 있으며, 공학적 설

계 제약을 실험적 설계에 고려할 수 있게 한다.

- 2) 설계과정에서 설계속성에 대한 설계자의 선호도를 정확하게 반영시킬 수 있다.
- 3) 설계속성간에 존재하는 설계자의 절충태도를 설계과정에서 정확히 반영시킬 수 있다.
- 4) 2차 반응표면모형은 가법모형(additive model)에 비해 정확한 결과를 준다.

제안된 모형을 집적회로설계에 적용한 결과 적은 실험노력으로 설계자의 선호도가 높은 설계 조건을 안정되게 구할 수 있었다. 특히, 본 연구에서 제안된 절차는 설계변수와 품질특성간의 함수적 관계가 알려져 있지 않거나, 이들간의 관계를 근사적으로 구해 주는 simulator의 계산효율이 낮은 경우 더욱 유용할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Welch, W.J., Wu, T.K. Kang, S.M., and Sacks, J.(1990), "Computer experiments for Quality Control by Parameter Design," J. Quality Technology, Vol. 22, No.1, pp. 15-22.
- [2] Yu, T.K., Kang, S.M., Sacks, J., and Welch, W.J.(1989), "Parameter yield optimization of MOS integrated circuits by statistical modeling of circuit performances," Tech. Rep. 27, Dept. of Statistics, University of Illinois, Champaign, IL.
- [3] Bernardo, M.C., Buck, R., Liu, L., Nazaret, W.A., Sacks, J., and Welch, W.J.(1992), "Integrated Circuit Design Optimization Using a Sequential Strategy," IEEE Transactions on Computer-Aided Design, Vol. 11, No. 3, pp. 361-372.
- [4] Gold, S. and Krishnamurty, S.(1997), "Tradeoffs in Robust Engineering Design," Proc. of 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences, DETC97/DAC-3757.
- [5] Kunjur, A, and Krishnamurty S.(1997), "A Robust Multi-Criteria Optimization Approach," Mech. Mach. Theory, Vol. 32, No. 7, pp. 797-810.
- [6] Cohon, J.L.(1985), "Multicriteria Programming : Brief Review and Application," in Design Optimization, Gero John S (Ed.), Academic Press, New York.
- [7] Iyer, H.V. and Krishnamurty, S.(1998), "A Preference-Based Robust Design Metric," Proc. of 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences, DETC98/DAC-5625.

- [8] von Neumann, J., and Morgenstern, O.(1947), "The Theory of Games and Economic Behavior," 3rd Ed., Princeton University Press, Princeton, NJ.
- [9] Thurston, D.L., Carnahan, J.V., and Liu, T.(1994), "Optimization of Design Utility," ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 116, pp. 801-808.
- [10] Thurston, D.L.(1991), "A Formal Method for Subjective Design Evaluation with Multiple Attributes," Research in Engineering Design, Vol. 3, pp. 105-122.
- [11] Keeney, R.L. and Raiffa, H.(1993), Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs, Wiley and Sons, New York.
- [12] Box, G.E.P., and Draper, N.R.(1969), Evolutionary Operation, New York, Wiley.
- [13] 최평, 조용범, 목형수, 백동철, 금융조(1997), PSpice 기초와 활용, 복두출판사.
- [14] Schmidt, S.R. and Launsby, R.G.(1994), Understanding Industrial Designed Experiments, 4th ed., Air Academy Press.
- [15] SAS(1996), Version 6.12, SAS Institute Inc., Cary, NC.
- [16] Siddall, J.N.(1982), Optimal Engineering Design, New York, Marcel Dekker.
- [17] Microsoft Excel, Version 4.0, Users Guide(1993), Microsoft Corporation, Redmond. WA.