

## Nonsingleton 퍼지 논리 시스템을 이용한 강인 시스템의 설계

류연범\*, 안태천  
원광대학교 공과대학 전기·전자공학부

### Robust Design using Nonsingleton Fuzzy Logic System

Younbum Ryu\*, Taechon Ahn  
Departments of Electrical & Electronics Eng. Wonkwang Univ.

**Abstract** - Robust design is one method to make manufacturing less sensitive to manufacturing process. Also it is cost effective technique to improve the quality process. This method uses statistically planned experiments to vary settings of important process control parameters. In this paper we apply fuzzy optimization and fuzzy logic system to robust design concept. First a method which uses fuzzy optimization in obtaining optimum settings by measured data from experiments will be presented. Second, fuzzy logic system is made to reduce experiments using experiments results consisted with key control parameter combinations. Then optimum parameter set points are obtained by the described first fuzzy optimization method after prediction the results of each parameter combinations considering each control parameter variations by nonsingleton fuzzy logic system concept.

#### 1. 서 론

적은 비용으로 고품질의 생산물을 설계함은 엔지니어에게 대단히 중요한 일이다. 시스템 동작에 대한 설계 최적화는 이러한 작업에 있어서 해결책의 하나이다. 이것이 여러 공학 설계 분야에 효과적이라고 증명되어온 Robust Design(강인 설계)이다. 이러한 Robust Design은 제조공정에 덜 민감하게 제조하기 위한 방법으로 Variation의 직접적 제어에 의한 제어가 아니고 Variation요소의 영향을 감소시킴에 의한 Variation을 감소시킴으로서 Variation의 감소효과를 가져온다. 이 논문에서의 System의 동작 수행 특성은 각각의 Process Variation 결합에 대한 공정 변수의 영향으로 고려하기 위해 측정되어진다. 본 논문에서는 Robust Design의 개념이 소개되고, Robust Design 설계 방법을 Fuzzy Optimization과 Fuzzy Logic System으로 적용하여 시뮬레이션 하였다. 이때 Fuzzy 최적화 방법은 최적 Parameter Set을 얻기 위한 Data 분석을 위해 적용되어 지고 실험을 감소시키기 위해 FLS가 만들어 졌는데 이는 파라메터 변이의 영향을 예전하기 위해 사용되어진다. 실험으로부터 측정된 Data에 의해 최적한 값을 구할 때 기준의 Experimental Design에 의한 Robust Design이 행하여지고, 그 데이터에 의해 Fuzzy Optimization방법이 적용되며, 같은 데이터에 의해 Fuzzy Logic System을 적용한다. 이때 Key Control Parameter Combination으로 구성된 실험결과를 사용한 감소된 실험으로서 시간과 경비를 절약하는 효과를 가져오게 된다. 이 논문에서는 Robust Design 개념에 대하여 Fuzzy Optimization과 Fuzzy Logic System을 적용한다.

#### 2. 본 론

#### 2.1 Robust design

Robust Design은 시스템에 대한 생산성 개선과 비용 감소적 접근방법이다. 이는 Manufacturing Variation에 대한 Process가 갖는 민감성을 감소시키는 Process Control Parameter Setting을 동정하기 위하여 통계적으로 계획된 실험을 사용한다. 이 방법은 Genich Taguchi에 의해 발전된 Robust Design기술에 근거한다. 참고문헌 (1) (2)

Taguchi는 첫째로 환경조건에 대하여 강인한 제품 혹은 공정의 설계, 둘째 구성요소의 변이에 대한 강인한 설계/개발 생산, 셋째 목표값 근처에서의 변이의 최소화 등을 위하여 실험적인 설계를 사용하는데 본 논문에서는 먼저 그의 접근법을 적용하였다. Taguchi이론의 중요한 요소는 변동성(가변성)의 감소이다. 우리는 흔히 각각의 질적 특성이 목표 값 혹은 액면 값을 갖기를 요구한다. 이 이론의 목적은 이러한 목표근처에서의 가변성의 감소이다. Taguchi는 목표 값 근처에서 Loss Function을 갖는 모델을 이론의 시발점으로 삼았다. 이러한 손실은 가격과 관련된다. 즉 액면과 다른 질적 특성을 갖는 제품을 소비자가 사용했을 때 사회로부터 그 가격은 비난 받는다. 이런 사회적 손실의 개념은 서구의 전통적인 생각으로부터 출발한다. Taguchi는 다음과 같은 형태의 Quadratic Function을 적용한다.

$$L(y) = k(y - T)^2$$

이런 형태의 함수는 목표 값 T로부터 아무리 작은 y값을 가지더라도 페널티를 적용하게 된다. 다시 말해서 이는 y가 사양의 밖에 있는 경우에만 Penalty를 적용하는 것이다. 요약해서 Taguchi의 Robust Design이론은 아래와 같은 두 가지 중심적인 생각을 포함하고 있다.

첫째. 생산물과 공정은 변동성의 외부적 요소에 대해 강인하게 고안되어져야 한다.

둘째. 실험적 설계 방법은 이러한 목적의 성취를 돋기 위한 공학적 도구이다.(ANOVA table을 사용)

다음은 Robust Parameter설계에 관한 방법론적 설명이다. 제어 가능한 요소에 대해서나, 잡음이나 제어가 불가능한 요소에 대하여 실험적설계가 선택되어진다. Taguchi는 Experimental Design에 대하여 Orthogonal Array(직교배열)을 하였다. 제어 가능한 요소에 대하여, Inner Array라 불리는 하나의 Orthogonal Array를 설계하고, 제어 불가능한 요소에 대해서는 Outer Array라 불리는 또 다른 Orthogonal Array를 설계한다. 이때 Noise Factor Array의 목적은 그 시스템에 대해 덜 민감한 Controllable Factor Level을 동정할 수 있게 하기 위해 만들어진 Noise이다. 또한 그는 Data분석을 위해 Inner Array에서 각각의 동작에 대한 평균응답 분석을 사용하고 있다. 그는 또한 적절하게 선택된 Signal to Noise Ratio(SN:신

호 대 잡음비)가 사용된 Variation 분석을 권한다. 이런 SN비는 Quadratic Loss Function으로부터 유추되고, 그중 세 가지는 표준적이며, 광범위하게 적용 가능하다.

이러한 3가지 SN비는

$$\text{Nominal the best } SN_N = 10 \log(\bar{y}^2 / S^2)$$

$$\text{Larger the best } SN_L = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right)$$

$$\text{Smaller the best } SN_S = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right)$$

where,  $\bar{y} = \sum y_i / n$  이고

$$S^2 = \sum (y_i - \bar{y})^2 / (n-1)$$

이러한 SN비는 db Scale로 표현된다. 이러한 SN비의 각각의 쓰임은

$SN_N$  : 목적하는 시스템이 어떤 목표근처에서 변동성이 감소한다면.

$SN_L$  : 응답이 끝 때 시스템이 최적화 된다면.

$SN_S$  : 응답이 작을 때 System이 최적화 된다면

위와 같이 적용하고자 하는 시스템의 특성에 따라 SN비를 결정하고, 적절한 SN비를 적용한 그 값의 최대 값을 얻을 수 있는 Factor Level은 최적한 값이 된다.

## 2.2 Audio-Circuit of a Mobile Radio

### Transceiver에 대한 시뮬레이션.

"audio-circuit of a mobile radio transceiver"에 서의 주된 관심사는 이득인데, 이는 db로 정의되고 어떤 주파수 f에서의 이득은 다음과 같다.

$$G_f = 10 \log_{10}(V_f)$$

이 회로의 적절한 동작을 위하여 주파수 300, 700, 1000Hz에서의 gain이 지속적으로 안정하여야 한다. 즉

$$G_{300} - G_{1000} \leq -3dB$$

이를 다시 표현하면

$$Y_{300} = (V_{300}/V_{1000}) \leq 0.7079$$

그리고 또한,

$$G_{700} - G_{1000} \leq 1dB$$

이를 다시 표현하면

$$0.891 \leq Y_{700} = (V_{700}/V_{1000}) \leq 1.122$$

출력( $Y_{300}$  or  $Y_{700}$ )과 관련된 input (resistor와 capacitor) 모델이 유용하므로, 실험적 설계기술을 사용한 computer simulation 실험이 가능하다. 실험적 data를 사용함으로써 주어진 범위 안에서의 적절한 resistor와 capacitor값을 구할 수 있다.

Circuit Parameters as Controllable Factors	Nominal levels			Tolerance levels(% from nominal)		
	1	2	3	1	2	3
R1(kΩ)	10	12	15	-2	0	+2
R2(kΩ)	100	120	150	-2	0	+2
R3(kΩ)	4.7	5.6	6.8	-2	0	+2
R4(kΩ)	10	15	22	-2	0	+2
C1(μF)	0.01	0.015	0.022	-10	0	+10
C2(μF)	0.01	0.015	0.022	-10	0	+10
C3(μF)	0.01	0.015	0.022	-10	0	+10
C4(μF)	0.022	0.033	0.047	-10	0	+10

표1. Nominal Level에서의 각각의 소자 값과 Tolerance Level

### 2.2.1 Robust Design 방법

Orthogonal array는 실험의 설계를 위해 쓰여진다. 참고문헌(7)로부터 inner array는 8개의 parameters에 대하여 27회 동작되어 고안되어지고, outer array는 각각의 gain에 대해 468(27\*18)번의 실험이 요구된다. 이 예에서 circuit simulation에 PSPICE S/W를 사용한다. 이 시뮬레이션의 결과로 얻은 data에 대

한 분석은 ANOVA table에 의한다.

### 2.2.2 Fuzzy 최적화 방법

Fuzzy optimization 방법에 서는 목적함수에 대한 최적의 parameter set을 결정하기 위해 fuzzy membership 함수를 사용한다. 이 실험에서는 목적함수가  $G_{300}$ 과  $G_{700}$ 이다. 그러므로 우린 두 조건 식으로부터 두 개의 membership function을 고려할 수 있다. 여기에서도 우리는 robust design method에서 사용했던 같은 data를 사용한다. 따라서 각각의 이득에 대한 486번의 data는 parameter 결정을 위해 쓰여진다. fuzzy optimization의 문제를 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\text{maximize} \{ \mu_{G300}(x), \mu_{G700}(x) \} \quad X = \{ x_1 \dots x_8 \}$$

$$\text{subject to: } x_{min} \leq x_i \leq x_{max}$$

$$i = 1 \dots 8 \quad (R_1 \ R_2 \ R_3 \ R_4 \ C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4)$$

robust method와 같이 우리는 거의 최대 membership 함수 값을 갖는 각각의 parameter를 선택한다. 이로부터 우리는 다음과 같이 공식화된 식을 구할 수 있다.

$$\mu_D(X') = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^N \mu_{G300}(G_{300}(X')) + \sum_{i=1}^N \mu_{G700}(G_{700}(X')) \right]$$

where,  $X'$  : 액면가 parameter

$n$  : 액면가 parameter에 대한 실험결과의 수

$N$  : parameter값에 대한 이득의 실험 결과 수  $\mu_D(X) = 1$ 을 만족하는 parameter는 모든 설계목적이나 제한을 만족함을 의미한다. 각각의 parameter에 대한 최적의 parameter 값을 결정하기 위해 우리는  $\mu_D(X')$ 을 최대로 하는 parameter값을 선택한다.

### 2.2.3 Nonsingleton Fuzzy Logic System 방법

일반적으로 FLS는 Singleton(crisp) data를 사용한다. 그러나 noise에 의해 방해된 data를 사용한다면 이 방법은 효과를 거둘 수 없게 된다. 따라서 우리는 nonsingleton FLS를 사용하여 이에 대한 보완을 하였다. 이 system에 의해 우리는 fuzzy system의 입력으로서 잡음에 영향을 받은 data를 사용할 수 있다. 이는 robust 설계방법의 outer array의 개념과 흡사하다. robust 설계방법에 있어서 outer array는 제어 가능한 각각의 parameter set에 대하여 제시되어진다. 마찬가지로 non-singleton FLS에서도, robust design method에서와 같이 제어 가능한 test set이 사용되고 각각의 제어 가능한 test set noisy data set은 각각의 제어 가능한 test set에 대하여 적용되어진다. 이 system은 다음과 같이 구성된다. fuzzy IF-THEN 규칙의 집합으로 구성된 fuzzy rule base는 다음의 form과 같다.

$$R^{(i)}: \text{IF } R_1 \text{ is } F_1 \dots \text{ and } R_4 \text{ is } F_4 \text{ and } C_1 \text{ is } F_5 \text{ and } \dots \text{ and } C_4 \text{ is } F_8 \text{ then } y \text{ is } G_1 \quad (1)$$

where  $R_1 \dots R_4, C_1 \dots C_4$  and  $F_1 \dots F_8$  은 fuzzy sets 그리고  $G_1$  은 상수.

singleton FLS에서의 Input data는 crisp value 그러나 Non-singleton FLS의 Input data는 membership function이다. 이때 gaussian membership 함수의 경우

$$\mu_{X_i}(X_i) = \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x_{ri}-mr_i}{\sigma_{ri}}\right)^2\right] \quad (2) \text{ 그리고}$$

$$\mu_{F_i}(X_r) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_r - m_{F_i}}{\sigma_{F_i}}\right)^2\right] \quad (3)$$

inference를 만들고 defuzzification hight를 수정하기 위해

$$f_{ns}(x) = \sum_{i=1}^M \bar{y} \mu_i(x) = \frac{\sum_{i=1}^M \bar{y} \prod_{k=1}^n \mu_{Q_k}\left(\frac{\sigma_{x_k}^2 m_{F_i} + \sigma_{F_i}^2 x_k}{\sigma_{x_k}^2 + \sigma_{F_i}^2}\right) / (\sigma')^2}{\sum_{i=1}^M \prod_{k=1}^n \mu_{Q_k}\left(\frac{\sigma_{x_k}^2 m_{F_i} + \sigma_{F_i}^2 x_k}{\sigma_{x_k}^2 + \sigma_{F_i}^2}\right) / (\sigma')^2} \quad (4)$$

where  $\mu_{Q_k} = \mu_{F_i} \cdot \mu_{x_k}$ ,  $m_{F_i} = x_k$  과  $\sigma_{x_k}$ 는 k번째 입력의 mean and standard deviation 그리고,  $m_{F_i}$  and  $\sigma_{F_i}$ 는 첫 번째 rule( $R^1$ )의 k번째 선행한 mean and standard deviation.

이러한 예로부터 먼저 inner array parameter set의 27가지 simulation 결과를 얻을 수 있다. 이것은 robust design method에서 사용했던 같은 parameter set이다. simulation 후 우리는 그 data를 사용한 FLS를 만들었고, 각각의 parameter 값 ( $R1:10k, 12k, 15k$ )에 대한 24개의 test set을 만들었다. 각각의 test set은 27개의 parameter set으로 구성되어 있다. 이러한 set이 FLS에 대하여 쓰여질 때 각각의 parameter 값은 식(2)과 같은 gaussian membership function으로 바뀌어 진다. 평균값은 각각의 parameter 값이고, 변수는 각각의 parameter에 대하여 tolerance level을 고려하여 계산되어진다. 따라서 각각의 parameter의 tolerance level에 대한 27개의 simulation data를 얻을 수 있다. simulation data를 얻은 후 2.2.2절과 같이 같은 fuzzy decision method를 사용했다.

### 3. 결 론

다음과 같이 각각의 방법들에 대한 각기 다른 최적의 parameter set이 결정되었다.

표2 각 방법에 따른 최적의 Parameter Set

Parameter Name	Robust Design Method	Fuzzy Opt. Method	Fuzzy System Method
R1	15k	12k	15k
R2	100k	120k	100k
R3	5.6k	4.7k	6.8k
R4	10k	15k	10k
C1	0.022 $\mu$ F	0.01 $\mu$ F	0.022 $\mu$ F
C2	0.022 $\mu$ F	0.01 $\mu$ F	0.022 $\mu$ F
C3	0.015 $\mu$ F	0.01 $\mu$ F	0.01 $\mu$ F
C4	0.022 $\mu$ F	0.033 $\mu$ F	0.022 $\mu$ F

표3 Gain of 300 Hz

	Mean	Standard Deviation
Robust Design Method	0.5825	0.0388
Fuzzy Opt. Method	0.4977	0.0611
Fuzzy System Method	0.4982	0.0400

표4 Gain of 700 Hz

	Mean	Standard Deviation
Robust Design Method	0.9380	0.0166
Fuzzy Opt. Method	1.0348	0.0290
Fuzzy System Method	0.9462	0.0190

표3으로부터 300Hz에서의 fuzzy method 평균값과 fuzzy system method 평균값은 robust 설계방법의 평균값보다 좋은 결과를 가져온다. 그러나, robust 설계 방법의 표준편차 값은 fuzzy 방법보다 좋고 fuzzy system 방법보다는 약간 좋다. 또한 표4로부터 700Hz

에서 fuzzy method 평균값과 fuzzy system method 평균값은 robust 설계방법의 평균값보다 좋다. 그러나, robust 설계방법의 표준편차 값은 fuzzy 방법보다 좋고 fuzzy system 방법보다는 약간 좋다. 이런 세 가지 방법의 비교결과 fuzzy system method가 다른 두 개의 방법보다 좋다고 할 수 있다. 더욱이 Taguchi 방법에 근거한 robust 설계방법이나 퍼지 최적화 방법은 inner array data와 outer array data를 함께 고려해야 하므로 시뮬레이션 상 많은 시간을 요구하게 되고 더불어서 실제의 시스템에 있어서는 이는 곳 비용과도 연관성을 가지므로 이에 Nonsingleton FLS의 장점이 부각된다고 할 수 있다. 회로설계에 있어서, 참고문헌(8)로부터 variability의 최적화는 그렇게 중요하지는 않다. manual상에서 제공하는 또는 spec으로 묶인 또는 우리가 접하는 spec에 의해 안정 이득을 증가시키는 것이 더욱 중요하다. 또한 변이의 개선은 이러한 성취를 위한 하나의 수단이라고 말하고 있다. 그러나, 변이의 개선은 끝나지 않으므로, 이러한 관점에서 fuzzy method의 결과는 원론적 robust design method보다 더욱 안정한 이득을 갖는다. robust 설계에서 경험적 설계는 첫째로, 우리는 각각의 변수에 대한 동적인 범위를 결정해야 한다. 그러므로 최적 값에 대한 조사공간이 감소된다. 참고문헌 (8)로부터 engineer는 spec을 만족하는 더욱 적합한 resistor와 capacitor값을 알았다. fuzzy 최적화방법은 이러한 예에서와 같이 어떤 관점에서는 원래의 robust 설계방법보다 낫다고 생각한다. 그러나, 이런 예에서 fuzzy방법은 robust 설계방법이 사용했던 같은 data를 사용했으므로 우리는 fuzzy 결정방법을 다른 실험적 설계방법에 적용하는 것이 필요하다. 그리고 FLS 설계방법은 원래의 robust 설계방법보다 낫다. 또한 오직 27개의 simulation data를 사용하므로, 우리가 그 방법을 비싼 experimental 가격공정이나 생산에 적용한다면 효과적일 것이다.

### [참 고 문 헌]

- G. taguchi and Y. Wu, *Introduction to Off-Line Quality Control*, Central Japan Quality Control Association, 1979.
- R. N. Kackar, "Off-Line Quality Control, Parameter Design, and the Taguchi Method," *Journal of Quality Technology*, Vol 17, October 1985, pp.176-209.
- R. E. Bellman and L. A. Zadeh, "decision-making in a fuzzy environment," *Management Sci*, vol.17, pp.141-164, Dec.1970.
- Lee, C. C., "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybern.*, vol.SMC-20, no.2, pp.404-418, 1990.
- Lee, C. C., "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part II," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybern.*, vol.SMC-20, no.2, pp.419-435, 1990.
- Mouzouris, G.C., and J.M.Mendel, "Non-Singleton Fuzzy logic Systems," *Proc. IEEE world Congress on Computational Intelligence*, pp.456-461, Orlando, FL, June 1994.
- Taguchi Methods(*proceedings of the 1988 European Conference*), Elsevier Applied Science, London & New York : Chapter 11, "Tolerance Design and Analysis of Audio Circuits", p.111.
- Robert A. Pease, "What's all This Robust Stuff, anyhow?", *Electronic design*, March 20, 1995:p.123-127.