

퍼지 논리의 최적화에 의한 강인 시스템의 설계

권양원*, 이종석, 류상문, 안태천
원광대학교 전기·전자공학부

Robust Design Using Fuzzy Logic Optimozation

Yangwon Kwon*, Jongsuk Lee, Sangmun Ryu, Taechon Ahn

*School of Electrical & Electronics Eng., Wonkwang University, Iksan, Chonbuk

Abstract - To design high quality products at low cost is one of very important tasks for engineers. Design optimization for performances can be one solution in this task. There is the robust design which has been proved effectively in many fields of engineering design. In this paper, the concept of robust design is introduced and combined to the fuzzy optimization method and the fuzzy logic system method with non-singleton. These methods are applied for data analysis to get optimum parameters and to reduce experiments. The optimum parameter set points are obtained by the proposed methods. These methods are applied to a filter circuit, a part of the audio circuit of mobile radio transceiver. The simulation results are compared each other. The new methods reduce and predict the effect of parameter variation sources

1. 서 론

엔지니어에게 있어서 적은 비용으로 고품질의 생산물을 설계한다는 것은 대단히 중요한 일이다. 1953년 일본의 세라믹 타일공장의 생산공정에서 얻은 연구결과로부터 제조공정에 덜 민감하게 제조하기 위한 방법으로 변이의 직접적 제어에 의한 제어가 아니고 변이요소의 영향을 감소시킴에 의한 변이를 감소시킴으로서 변이의 감소 효과를 가져온다. 그래서 시스템 동작에 대한 설계 최적화는 이러한 작업에 있어서 해결책의 하나이다. 이처럼 여러 공학 설계 분야에 효과적인 것이 강인 설계이다.

강인 설계 방법은 이와 같은 요구조건을 만족시키는 기술로 이미 여러 공학 설계 분야에 효과적으로 적용되어 그 우수성이 입증되고 있다. 이 방법은 Taguchi가 제안한 것으로 실험적 설계에 의해 최적의 파라미터 값을 찾는 것으로 그 후 Taguchi 방법으로 통용되었다. 유럽에서는 Taguchi 방법에 대한 집중 연구를 통하여 서구적 개념을 도입하고자 하는 일환으로 목표 값 이외의 값에서도 penalty를 적용할 수 있는 전형적인 손실 함수를 정의하고, 이 이론을 다른 시스템에도 적용할 수 있게 발전시켰다[1],[2]. 그러나 이러한 전형적인 방법에 기초한 강인 설계 방법은 통계적인 결과에 의해 결과를 얻으므로 적잖은 시뮬레이션 횟수를 요구하고 그에 따르는 높은 비용이 문제시되고 있다.

한편, 퍼지 최적화 방법[3]은 Zadeh가 제안한 방법으로 불확실한 데이터를 추정하고 처리할 수 있는 능력을 갖고 있어 양호한 매개변수 추정 특성을 보여주고 있는 것으로 알려져 있고, Non-singleton 퍼지 논리 시스템 방법[4]은 Mendel이 제안한 방법으로, 전형적인 Singleton 퍼지 논리 시스템 방법[4]처럼 입력변수로 일정한 값을 받아들임과는 달리, 입력변수로 어떤 구간

값을 받아들이는 방법으로 임의의 시스템 상에서도 적용의 용동성을 갖고 있어 최적화 된 매개변수를 추정하는 것으로 알고 있다.

본 논문에서는 생산공정에서 강인 시스템을 설계하기 위하여 강인 설계 방법에 대하여 Fuzzy Optimization과 Non-singleton FLS를 결합시켜 새롭게 더욱 발전된 개념의 강인 설계 방법들을 제안한다.

2. 강인제어

강인 설계 방법은 시스템에 대한 생산성 개선과 비용 감소적 접근방법이다. 이는 Manufacturing 변수에 대한 Process가 갖는 민감성을 감소시키는 공정제어 파라미터를 동정하기 위하여 통계적으로 계획된 실험을 사용한다. 이 방법은 Genich Taguchi에 의해 발전된 강인 설계 기술에 근거한다[1,2].

Taguchi는 첫째로 환경조건에 대하여 강인한 제품공정의 설계, 둘째로 구성요소의 변화에 대해 강인한 설계/개발 생산, 셋째로 목표값 근처에서의 변화의 최소화 등을 위하여 실험적인 설계법을 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 손실함수(Loss Function)을 갖는 모델을 이론의 시발점으로 삼았다. 이러한 손실은 가격과 관련된다. 즉 액면과 다른 질적 특성을 갖는 제품을 소비자가 사용했을 때 사회로부터 그 가격은 비난받는다. 이런 사회적 손실의 개념은 서구의 전통적인 생각으로부터 출발한다.

Taguchi는 다음과 같은 형태의 2차함수를 적용한다.

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

이런 형태의 함수는 목표 값 T로부터 아무리 작은 y값을 가지더라도 페널티를 적용하게된다. 다시 말해서 이는 y가 사양의 밖에 있는 경우에만 페널티를 적용하는 것이다. 요약해서 Taguchi의 강인설계 이론은 두 가지 중심적인 생각을 포함하고 있다.

첫째, 생산물과 공정은 변동성의 외부적 요소에 대해 강인하게 고안되어야한다.

둘째, 실험적 설계 방법은 이러한 목적의 성취를 돕기 위한 공학적 도구이다.

강인 파라미터 설계는 제어 가능한 요소나, 잡음이나 제어가 불가능한 요소에 대하여 실험적설계가 선택되어진다. Taguchi는 실험적인 설계 방법에 직교배열을 사용하였으며, 제어 가능한 요소에 대하여, 내부배열이라 불리는 하나의 직교배열을 설계하고, 제어 불가능한 요소에 대해서는 외부배열이라 불리는 또 다른 직교배열을 설계하였다. 시스템에 대해 덜 민감한 제어 가능한 요소의 레벨을 동정할 수 있게 하기 위해 잡음 요소 배열을 만들었으며, 데이터 분석을 위해 내부배열에서 각각의 동작에 대한 평균응답 분석을 사용하고 있다. 또한 적절

하게 선택된 신호 대 잡음(SN)비가 사용된 변화의 분석을 사용하였으며, 2차 손실함수로부터 표준적이고 광범위하게 적용 가능한 세 가지의 SN비를 유추하였다.

이러한 3가지 SN비는

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

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

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

where, $\bar{y} = \sum y_i / n$ and $S^2 = \sum (y_i - \bar{y})^2 / (n-1)$ 이고 dB 형태로 표현된다.

본 논문에서는 적용하고자 하는 시스템의 특성에 따라 SN비를 결정하고, 적절한 SN비를 적용해 그 값의 최대 값을 얻을 수 있는 요소의 레벨을 최적화한다.

3. 퍼지논리 시스템의 최적화

3.1 퍼지논리 시스템(FLS)

일반적으로 FLS는 짝을 이루지 않는 데이터, 즉 하나의 상수를 사용한다. 그러나 노이즈에 의해 방해된 데이터를 사용한다면 이 방법은 효과적이지 못하다. 따라서 nonsingleton을 사용하여 이에 대하여 보완하였다. 이것은 잡음에 방해받은 데이터를 사용한 시스템의 동정을 수행하기 위해 Mendel에 의해 제안된 것이다. 이 시스템에 의해 우리는 퍼지시스템의 입력으로서 잡음에 영향을 받은 데이터를 사용할 수 있으며, 강인설계 방법의 외부배열의 개념과 흡사하다. 외부배열은 제어 가능한 각각의 파라미터 집합에 의해 이루어지며, non-singleton FLS에서도 강인설계 방법에서와 같이 제어 가능한 테스트 집합이 적용되어진다.

FLS는 퍼지 개념과 퍼지논리가 직접적 관계를 갖는 시스템에 대한 이름이다. 일반적으로, FLS는 스칼라 출력에로의 입력 데이터 벡터의 비선형 투영이다.

이러한 FLS는 퍼지화, 규칙, 추론엔진, 비 퍼지화의 4개의 요소로 구성되어지며, 규칙이 확립되어지면 FLS는 입력으로부터 출력에로의 투영으로서 보여질 수 있다. 규칙은 전문가에 의해서 제공되어지거나, 숫자적인 데이터로부터 생성될 수도 있다. 이러한 두 가지 경우에서의 규칙은 IF-THEN문장의 모임으로서 표현되어진다. 퍼지화는 상수를 퍼지 집합으로 투영한다. FLS의 추론엔진은 상수를 퍼지 집합으로 투영하고 규칙을 결합하는 방법을 다루며, 비 퍼지화는 출력 집합을 상수로 투영한다.

본 논문에서 우리는 먼저 상수 데이터를 사용한 퍼지 시스템을 만들고, Non-singleton FLS 방법은 각각의 제어 파라미터 집합의 잡음요소를 고려하기 위해 쓰여진다.

3.2. 퍼지 최적화

본 논문에서는 퍼지 소속함수를 이용한 데이터 최적화 방법을 사용한다. Bellman과 Zadeh는 퍼지환경에서 의사결정을 위한 방법을 제안했다. 그들은 어떤 값을 결정하는데 퍼지 소속함수를 사용했고, 그들이 규정한 최대영역은 퍼지영역의 소속함수가 최대 값을 이루는 양자택일의 공간에서의 한 점이며, 일반적인 설계 문제는 아래와 같이 표현된다.

$$\text{minimize} \{ f_1(x), \dots, f_m(x) \}$$

$$\text{subject to : } g_i(x) \leq \text{spec}_i \quad i = 1 \dots m$$

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$$

여기서, $f_i(x)$ 는 최소화된 목적함수 M이고, $g_i(x) \leq \text{spec}_i$ 는 만족되어진 외란이며, x 는 설계 파라미터들의 벡터이다. 그리고 $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$ 는 설계 파라미터의 경계조건이다.

목적함수 $f_i(x)$ 을 최소화하는 시도에 있어서, 설계자는 흔히 $f_i(x)$ 가 받아들여질 수 있는 값이 될 때, 비록 그 값이 완전한 최소값에 도달되기 전일지라도 최적 값을 찾는 과정을 그만둔다. 따라서 우리는 최소값 혹은 최대값의 퍼지 개념을 공식화한 그리고 엄밀하게 설계자가 이루기 원하는 각각의 목적함수 $f_i(x)$ 을 결합할 수 있다. 같은 방법으로 실제의 시뮬레이션 시스템에서 언급할 수행사양은 퍼지 집합을 사용하여 공식화되고 퍼지 목적 함수로써 다루어질 것이다. 이러한 각각의 퍼지 목적 함수 $f_i(x)$ 에 대하여, 특정한 수행 값의 수용가능성의 정도를 반영한 소속함수 $\mu_{fi}(x)$ 을 규정한다. 만일 D_{fi} 가 $f_i(x)$ 의 가능한 값의 간격이라면 μ_{fi} 는 다음과 같다.

$$\mu_{fi} : D_{fi} \rightarrow [0, 1]$$

$$f_i(x) \rightarrow \mu_{fi}(x)$$

$\mu_{fi}(x)$ 는 목적함수 f_i 와 결합된 만족도를 반영한 [0 1]사이의 실수이다.

만일,

$$\mu_{fi} = 1 : \text{Objective Function } f_i$$

가 완전히 만족되어지고,

$$\mu_{fi} = 0 : \text{Objective Function } f_i$$

가 전혀 만족되지 않으면, 0과 1사이의 값은 특정 수행 값의 수용가능성을 반영함을 의미한다.

μ_{fi} 가 1에 가까울수록 더욱 좋은 값이므로, 따라서 위의 식은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\text{maximize} \{ \mu_{f1}, \dots, \mu_{fm} \}$$

$$\text{subject to : } g_i(x) \leq \text{spec}_i \quad i = 1 \dots m$$

$$X_{\min} \leq X \leq X_{\max}$$

4. 시뮬레이션

이동 라디오 수신기의 오디오 회로에서의 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 안정하여야한다. 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 관계된 input (resistor 와 capacitor)모델이 유용하므로, 실험적 설계기술을 사용한 computer simulation 실험이 가능하다. 실험적 데이터를 사용함으로써 주어진 범위 안에서의 적절한 저항과 커패시터 값을 구할 수 있다

표1. 공칭레벨에서의 각각의 소자 값과 허용레벨

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

시뮬레이션한 결과 다음과 같이 각각의 방법들에 대한 각기 다른 최적의 파라미터가 결정되었다.

다음은 제안된 방법에 따른 결과와 그에 따른 각각의 시뮬레이션에 의한 이득값을 그래프로 도식화하여 비교하였다.

표2 각 방법에 따른 최적의 Parameter Set

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

표3으로부터 300Hz에서의 퍼지 최적화 방법의 평균값과 FLS 방법의 평균값은 강인 설계방법의 평균값보다 좋은 결과를 가져온다. 그러나, 강인 설계 방법의 표준편차 값은 퍼지 최적화 방법보다 좋고 FLS 방법보다는 약간 좋다.

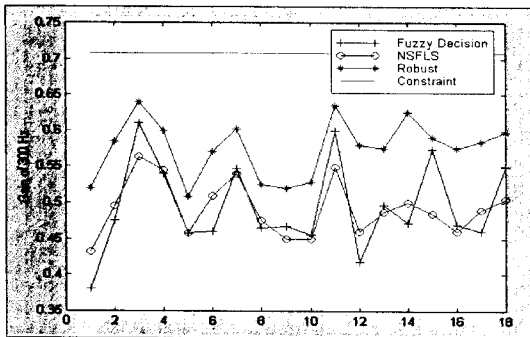


그림 1 300Hz 에서의 이득값 비교

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

표4로부터 700Hz에서 퍼지 최적화 방법의 평균값과 퍼지시스템 방법의 평균값은 강인설계 방법의 평균값보다 좋다. 그러나, 강인설계 방법의 표준편차 값은 퍼지 방법보다 좋고 퍼지 최적화 방법보다는 약간 좋다.

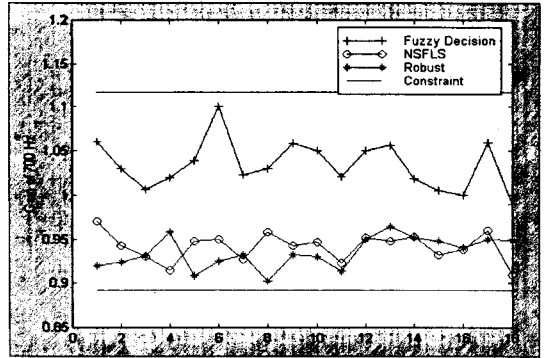


그림 2 700Hz 에서의 이득값 비교

세 가지 방법의 비교결과 FLS 방법이 다른 두 개의 방법보다 좋다고 할 수 있다. 더욱이 Taguchi 방법에 근거한 robust 설계방법이나 퍼지 최적화 방법은 내부 배열 데이터와 외부배열 데이터를 함께 고려해야 하므로 시뮬레이션 상 많은 시간을 요구하게 되고 더불어서 실제의 시스템에 있어서는 이는 큰 비용과도 연관성을 가지므로 이에 Non-singleton FLS의 장점이 부각된다고 할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 생산공정에서 강인 시스템을 설계하기 위하여 강인 설계 방법에 퍼지 최적화 방법과 Non-singleton 퍼지 논리 시스템 방법을 결합시켜 새롭고 더욱 발전된 개념의 강인 설계 방법들을 제안한다. 퍼지 논리 시스템(FLS)을 만들어 매개변수 변화의 영향을 추정함으로써, 주요 제어 매개변수의 조합을 구성하고, 이 조합을 이용한 실험결과를 사용함으로써 실험의 수를 감소시키고, 각각의 매개변수 조합의 결과를 예견할 수 있었다.

주요한 제어 매개변수의 조합으로 구성된 실험결과를 사용한 감소된 실험으로서 시간과 경비를 절약하는 효과를 가져왔다.

이상의 과정을 통하여 얻은 세 가지 방법을 이동 라디오 수신기의 오디오 회로 필터에 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고, 평균값, 표준편차의 관점에서 비교해본 결과 퍼지 최적화 방법과 FLS 방법이 우수하였다.

[참고 문헌]

- [1] G. taguchi and Y. Wu, Introduction to Off-Line Quality Control, Central Japan Quality Control Association, 1979.
- [2] R. N. Kacker, "Off-Line Quality Control. Parameter Design, and the Taguchi Method," Journal of Quality Technology, Vol 17, pp.176-209, 1985.
- [3] R. E. Bellman and L. A. Zadeh, "Decision-making in a fuzzy environment," Management Sci, vol.17, pp.141-164, Dec.1970.
- [4] 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.
- [5] Taguchi Methods(proceedings of the 1988 European Conference), Elsevier Applied Science, London&New York : Chapter 11, "Tolerance Design and Analysis of Audio Circuits", pp.111.
- [6] Robert A. Pease, "What's all This Robust Stuff, anyhow", Electronic design, pp.123-127, 1995.