

타구치 로버스트 계획에서 응용모형의 개발

최성운*

*경원대학교 산업공학과

Development of Application Models Based on the Robust Design

Sung-Woon Choi*

*Dept. of Industrial Engineering, Kyungwon University

Abstract

This study develops three new models that are practically applicable to three stages of Taguchi's robust design, which includes system design, parameter design and tolerance design. In system design, the Multiple Loss Function Analysis(MLFA) and Overall Loss Index(OLI) which reflect upon weight of characteristics and importance of specification are developed. Moreover parameter design presents Process Capability Index(PCI), C_{PUK} and C_{PLK} , in order to segregate Signal-To-Noise Ratio(SNR) into accuracy and precision for an evaluation of relative comparison.

In addition, tolerance design presents the new model of allowance computation for assembled product which is primarily derived from safety margin(SM) considering functional limit and specification.

The guideline of those three new models, which include systematic charts and applicable illustrations, offers convenience for practitioners in the field. Hence, the practical applications could be made with the steps of robust designs such as system design, parameter design and specification allowance design.

Keywords: MLFA, OLI, SNR, PCI, SM Guidelines, Robust, System, Parameter, Tolerance, Specification Allowance Design

1. 서론

품질(Quality)은 요건의 일치성(Conformance to Requirements)을 위해 스펙을 벗어나는 부적합품(Nonconforming Unit) 또는 불량(Defective)을 검사의 사후관리 또는 SPC 관리도의 사전관리에 의해 미연에 방지하는데 있다. 신뢰성(Reliability)은 사용의 적합성(Fitness for Use)을 위해 고객의 사용조건에서 스펙(Specification, 규격, 사양, 제원, 시방, 명세)을 벗어나는 클레임(Claim) 또는 고장(Failure)을 전 생애에 걸쳐 시간에 의한 고장률을 감소 또는 제거하는 데 있다. 품질이 기업 내에서의 개발, 생산기술, 검사조건에서 양품의 생산에 있다면 신뢰성은 고객 사용조건에서 클레임의 방지 및 예방에 있다.

따라서 고객의 사용조건에 따라 기업 내에서 양품도 클레임이 될 수 있다는 현장성 또는 시공성이 신뢰성에서는 강력히 요구된다. 신뢰성 시험은 전 생애를 걸쳐 수행할 수 없기 때문에 백일, 돌잔치 같은 Burn-In (Aging) 테스트를 수행하며 예방주사를 맞히는 것처럼 온도, 습도, 진동 등의 고객조건을 가혹하게 하는 가속 수명시험(Accelerated Life Test)을 실시한다. 따라서 신뢰성 비즈니스에서는 단순한 생산기술조정을 벗어난 부적합품 또는 불량개선의 품질 비즈니스와 다르게 일정기간 사용 후 클레임이 없는 경우 (가능하면 이를 출하전 Burn-In 테스트 수행)에 한해 납품이 완료됐다는 적극적인 고객만족의 방법이다.

그러나 고객의 사용조건과 같이 제어가 불가능하거나

† 본 논문은 2011년도 경원대학교 교내연구비 지원에 의한 결과임

† 교신저자: 최성운, 경기도 성남시 수정구 복정동 산 65 경원대학교 산업공학과

M · P: 011-256-0697, E-mail: swchoi@kyungwon.ac.kr

2011년 1월 12일 접수; 2011년 3월 7일 수정본 접수; 2011년 3월 7일 게재확정

대규모의 교체가 요구되는 설비의 생산기술 조건은 비용이 많이 소요되어 이러한 Noise 조건에서 Robust하며 [7,8] 제품의 Signal을 최대화 하는 SNR(Signal-to-Noise Ratio)[4]에 의한 타구치 로버스트계획을 사용한다.

이 설계방법은 명목특성(NTB : Nominal-the-Best), 망대특성(LTB : Larger-The-Better), 망소특성(STB : Smaller-the-Better) 모두 SNR을 최대화 하는 로그와 음수의 수학적 표현으로 통일하고 교호작용을 무시한 주효과만으로 설계된 실험계획으로 SNR을 최적화한다.

특히 개선된 SNR을 사회에 미치는 손실함수(Loss Function)[1,2]의 절감액으로 나타난다. 타구치 기법에서는 고객의 기능한계(Functional Limit)[5]와 기업의 규격한계(Specification Limit)의 비로 SM(Safety Margin, Safety Factor)으로 나타내며 이는 손실함수와 연계된다.

따라서 본 연구에서는 타구치 로버스트 기법 적용시 고려되어야 하는 손실함수를 MRA (Multiple Response Analysis)의 만족도 함수(Desirability Function)[6]를 응용하여 가중치와 중요도에 따라 다중 손실함수(Multiple Loss Function)와 종합 손실도 지수(Overall, Combine, Composite Loss Index)를 개발한다.

또한 SNR을 PCI (Process Capability Index)의 정밀도(Precision)와 정확도(Accuracy) 관점에서 연계해석하여 기존의 한쪽규격의 C_{PU} , C_{PL} 에서 정확도와 정밀도가 분해 해석할 수 있는 C_{PUK} , C_{PLK} 를 제시하고 기능한계와 규격한계를 고려한 분산의 가법성 법칙에 의한 조립 허용차 설계의 새로운 모형을 개발한다. 끝으로 정규분포의 PDF(Probability Density Function), 만족도 함수, 손실함수, SNR, PCI, 안전계수(SM)의 적용 가이드라인을 동일 개념 파악을 위한 도표로 제시하여 실무자에게 사용의 편의성을 제공한다.

2. 다중 손실 함수와 종합 손실도 지수의 개발

기호 및 용어

- y : 특성치
- Δ : 생산자의 규격한계에서 허용차
- A : Δ 에 의한 손실비용
- Δ_0 : 소비자의 기능한계
- A_0 : Δ_0 에 의한 손실비용
- $L(y)$: 특성치 y 에 대한 손실함수(Loss Function)
- ω : 손실함수의 가중치(Importance)
- I : 스펙의 중요도(Weight)
- l_i : 스펙 i 의 가중치 ω 를 고려한 손실함수
- L : 종합 손실 지수(OLI)
- T : 기준 목표 공칭치수

- \bar{y} : y 의 평균
- s : y 의 표준편차
- C_{PK} , C_{pm} : 양쪽규격의 공정능력 지수
- C_{PUK} , C_{PLK} : 상한, 하한규격의 공정능력지수
- Δ_s : 조립품의 허용차
- SNR : Signal-To-Noise Ratio
- NTB : Nominal-The-Best
- LTB : Larger-The-Better
- STB : Smaller-The-Better
- SM : Safety Margin
- MRA : Multiple Response Analysis
- PCI : Process Capability Index
- MLFA : Multiple Loss Function Analysis
- OLI : Overall Loss Index
- USL : Upper Specification Limit
- LSL : Lower Specification Limit
- CV : Coefficient of Variation

타구치 로버스트 계획은 시스템 설계(System Design), 파라미터 설계(Parameter Design), 허용차 설계(Tolerance or Allowance Design)의 3단계로 이루어진다. 시스템 설계는 소비자의 참 특성인 목적기능을 수행하기 위한 손실함수(Loss Function)를 최소화하는 기능한계(Functional Limit)와 이에 대한 손실비용에 의한 Prototype을 결정하는 원류단계이다. 파라미터 설계와 허용차 설계는 3절, 4절에서 SNR과 SM의 개념과 연계되어 제시된다.

따라서 본 연구에서는 MRA에서 사용했던 만족도 함수를 응용하여 다중 손실함수 분석(MLFA : Multiple Loss Function Analysis) 모형을 개발하고 종합 손실 지수(OLI)의 기하평균(Geometric Mean)에 의한 산출 방법을 제시한다.

타구치 로버스트 계획은 특성치(Characteristics)와 인자(Factor)를 실무적인 다양성을 고려하여 선정하는 데 있다. 기존 미국식 실험계획(Design of Experiment)과의 차이점은 신호(Signal)인자 x 에 대한 동(Dynamic)특성 y 의 비례상수 M 과의 관계 $y = \beta M$ 에 있다. 또한 제어불가능한 오차(Error)와는 같으나 오차가 실현이 불가능한 반면에 고객사용조건, 생산조건의 실현가능한 잡음(Noise)인자의 선정에 타구치 로버스트 계획의 특징이 있다.

즉, 상수의 표준상태를 유지하는 제어인자로 계량연속형 데이터인 명목특성(양쪽규격), 망소특성(상한규격), 망대특성(하한규격)을 단순 최적화하는 미국식 실험계획과 다르게 잡음인자를 고려하여 이에 Robust한 실험설계를 수행하는 것이 중요한 차이이다. 불량, 등

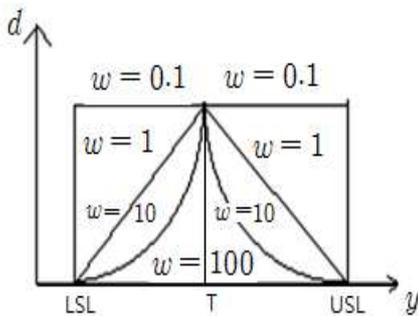
급품과 같은 계수이산형 또는 명목형 특성치도 타구치 계획에서 다루나 본 연구에서는 PCI, 공차설계등에서 정 규분포의 가정을 기초로 하므로 이를 생략하기로 한다.

손실함수는 최소화를 위해 2차함수(Quadratic Function)인 포물선(Parabola)의 형태로 주어지며 양쪽규격(LSL ~USL), 상한규격(USL), 하한규격(LSL)에 의해 망목 특성, 망소특성, 망대특성의 3가지 형태가 존재한다. x 축은 기능한계 Δ_0 , y 축은 손실비용 A_0 에 의해 망목 손실함수 $L(y) = (A_0/\Delta_0^2)(y - T)^2$ 이다. T 는 기준 공 칭 목표치수이며 $(y - T)^2$ 은 분산정밀도를 최소화하기 위해 SNR로 변환되어 파라미터 설계에서 사용되고 A_0, Δ_0 는 SM에 의한 허용차 설계에서 활용한다. 망 소 손실함수 $L(y) = (A_0/\Delta_0^2)y^2$ 으로 100% 척도시 $T = 0\%$ 이고 망대 손실함수 $L(y) = (A_0 \Delta_0^2)/y^2$ 으로 100%척도시 $T = 100\%$ 이다.

MRA는 여러 개의 반응변수(Response Variable)를 갖는 2차 회귀함수(Regression Function)를 최적화하는 실험설계이다. 양쪽규격의 망목특성, 상한규격의 망 소특성, 하한규격의 망대특성에 의한 만족도 함수는 정밀도 차이에 따른 분포의 모양을 벤치마킹하여 가중치(Weight)를 고려한 다양한 형태를 [그림 1]과 같이 고려한다. 상한규격의 망대특성의 만족도 함수 $d_i = ((y - USL)/(T - USL))^w$ 이고 하한규격의 망소특 성의 만족도 함수 $d_i = ((y - LSL)/(T - LSL))^w$ 이며 양쪽규격의 망목특성은 두가지를 모두 고려한다. [그림 1]에서 100의 가중치(Weight)는 T 의 수직선 함수로 양 쪽규격의 경우 기준공칭 목표치수가 되며 상한규격, 하 한규격인 경우 규격을 퍼센트로 가정할 경우 0%, 100%에 해당한다. 개별 만족도 지수를 인자변수의 중 요도(Importance) I_i 를 고려한 기하평균에 의한 합성만

족도지수(OLI) $D = (d_1^{I_1} d_2^{I_2} \dots d_k^{I_k})^{1/\sum_{i=1}^k I_i}$ 이다.

MRA의 가중치 ω 를 고려한 손실함수는 [그림 2]와 같 이 기울기에 의해 달라지며 3가지 손실함수 모두 가중

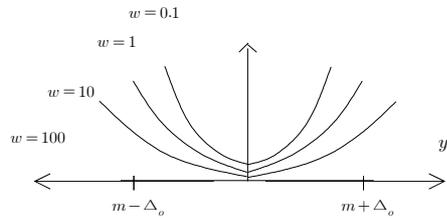


[그림 1] 양쪽규격 망목특성의 만족도함수

치가 100이며, 가중치는 [그림 1]의 수직선 만족도 함 수와 다르게 수평선의 손실함수가 된다. 이는 만족도 함수의 최대화와 손실함수의 최소화의 Duality 원리에 기초한다. 다중인자 k 개의 I_i 를 고려한 MLF의 종합

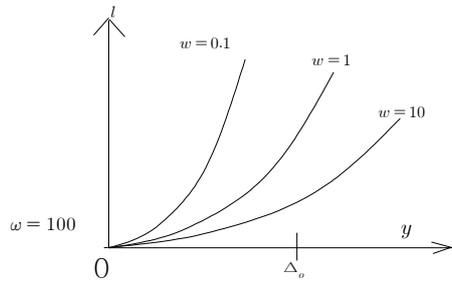
손실도 지수 $L = (l_1^{I_1} l_2^{I_2} \dots l_k^{I_k})^{1/\sum_{i=1}^k I_i}$ 이다. 스펙의 중요도는 1점 기준으로 0.0~1.0까지의 정수로 정하나 가중치와 마찬가지로 실무에서는 기업여건을 고려하여 개별적으로 설정할 수 있다.

타구치 로버스트 계획에서는 평균을 최소화하는 2차 손실 함수(포물선) $(y - T)^2$ 을 사용했지만 중앙값을 최소화하는 경우 절대 손실함수(대칭 v자형) $|y - T|$ 를 활용한다.



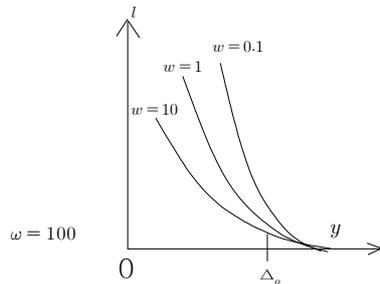
$$l_1 = (A_0/\Delta_0^2)^\omega (y - T)^2$$

(a) 양쪽규격의 망목특성



$$l_2 = (A_0/\Delta_0^2)^\omega y^2$$

(b) 상한규격의 망소특성



$$l_3 = (A_0 \Delta_0^2)^\omega / y^2$$

(c) 하한규격의 망대특성

[그림 2] 가중치를 고려한 손실함수

만약 $Q_1/(Q_1 + Q_2)$ 의 Fractile 손실함수(비대칭 v자형)를 최소화한다면 2개의 손실함수;

$$F_1(y - T) (y > T \text{인 경우}),$$

$F_2(T - y) (y < T \text{인 경우})$ 를 사용하고 최빈값을 최소화하는 경우 $y \neq T$ 인 경우 1의 이진(Binary) 손실함수(점(Point)함수)를 이용한다.

MLFA와 OLI의 적용 예

실린더 축의 3가지 스펙인 치수, 신율, 인장강도는 각각 타구치 계획에서는 망목특성, 망소특성, 망대특성에 해당된다. 치수의 스펙은 100 ± 2 , 신율은 20이하, 인장강도는 50이상으로 계량연속형 측정단위를 가지나 이를 생략하기로 한다.

치수의 경우 $A_0=200, \Delta_0=1, \omega=0.1, I_1=0.2$, 신율의 경우 $A_0=150, \Delta_0=10, \omega=0.3, I_2=0.5$, 인장강도의 경우 $A_0=300, \Delta_0=70, \omega=0.8, I_3=0.7$ 이다.

스펙 i 에 대한 MLFA ℓ_i 는 치수 $\ell_1=(A_0/\Delta_0^2)^\omega (y - T)^2=(200/1^2)^{0.1} (y - 100)^2=1.70(y - 100)^2$, 신율 $\ell_2=(A_0/\Delta_0^2)^\omega y^2=(150/10^2)^{0.3} y^2=1.13y^2$, 인장강도 $\ell_3=(A_0 \Delta_0^2)^\omega / y^2=(300 \times 70^2)^{0.8} / y^2=85872/y^2$ 이다.

스펙의 중요도 I_i 를 고려한 손실함수 $\ell_i^{I_i}$ 는 치수 $y=101, I_1=0.2$ 에 대해 $\ell_1^{I_1}=(1.70(101-100)^2)^{0.2}=1.11$, 신율 $y=11, I_2=0.5$ 에 대해 $\ell_2^{I_2}=(1.13 \times 11)^{0.5}=3.53$, 인장강도 $y=69, I_3=0.7$ 에 대해 $\ell_3^{I_3}=85872/69^2=18.04$ 이다.

MLFA의 종합 손실도 $OLI=(\ell_1^{I_1} \ell_2^{I_2} \dots \ell_k^{I_k})^{1/\sum_{i=1}^k I_i}=(1.11 \times 3.53 \times 18.04)^{1/1.4}=20.94$ 이다.

3. SNR과 PCI의 연계 분석에 의한

C_{PUK}, C_{PLK} 의 개발

파라미터 설계는 2절의 시스템 설계에서 Prototype 개발을 위한 최소 손실함수를 최대 SNR의 평가지수로 변환하는 상류, 중류 단계이다. 이 SNR은 직교배열의 실험설계에서 특성치의 값으로 사용되며 Noise에 Robust한 최적의 인자 수준을 설정한다.

따라서 본 연구에서는 타구치 계획의 SNR과 SPC (Statistical Process Control)의 PCI를 정확도, 정밀도, 오차의 관점에서 연계하여 비교, 분석하기로 한다.

미국식 실험계획과 같이 정(Static)특성치만을 다룰 경우 직교배열표(Orthogonal Array Table)의 내측배열에는 제어인자, 외측배열에는 잡음인자를 배치한다. 신

호인자를 추가로 고려할 경우 외측배열의 잡음인자와 조합된 직교배열표를 사용한다.

2절의 양쪽규격 망목특성의 손실함수 $L(y)=(A_0/\Delta_0^2)(y - T)^2$ 에서 $(y - T)^2$ 은 오차로 $(y - \bar{y} + \bar{y} - T)^2$ 의 형태로 표현하면 $(y - \bar{y})^2$ 의 정밀도와 $(\bar{y} - T)^2$ 의 정확도의 두 성분으로 직교분해(Orthogonal Decomposition)된다. 따라서 손실함수를 최소로 하는 $(y - T)^2$ 은 정밀도와 정확도를 높이면 되는 지수 SNR과 같다. SNR을 사용하는 이유는 A_0, Δ_0, y, T 등 4개의 변수에 의한 손실함수보다 평균, 분산등의 데이터를 2개의 척도로 효율적으로 다루는 데 있다. 여기서 정밀도 $(y - \bar{y})^2$ 는 표준편차 $s = (\sum (y - \bar{y})^2 / (n - 1))^{1/2}$ 에서 편차제곱합에 해당되며 각 데이터와 평균과의 차인 산포 정밀도를 고려하는 주요 성분이 된다. 또한 정확도 $(\bar{y} - T)^2$ 는 평균 \bar{y} 가 기준공칭 목표치수 T 에 일치하는가의 여부를 판단하는 것이다. 정밀도 s 와 정확도 \bar{y} 를 동시에 표현하는 통계적 척도는 변동계수(CV : Coefficient of Variation) = s/\bar{y} 가 있으며 이는 무단위(Dimensionless)로 상대정밀도를 계산하기 위해 애초에 고안된 것이다.

타구치는 이를 응용하여 사용자가 계산기가 없던 시절 분산=(표준편차)^{1/2}에서 루트를 계산하지 않는 방법으로 전자공학에서 사용되는 SNR 공식을 도입하였다. 상한규격 망목특성의 경우 $SNR = 10 \log \bar{y}^2 / s^2$ 으로 \bar{y}/s^2 은 $(CV)^2 = (s/\bar{y})^2$ 의 역수(최소손실함수와 최대 SNR은 Duality 관계)로 분모는 정확도 부분, 분자는 정밀도부분을 나타내며 이는 비교용도의 상대정밀도를 계산하는 CV와는 다른 관점에서 해석하여야 한다. 즉 변동계수 CV에서 \bar{y} 는 단위를 없애는 용도로 사용하나 타구치 계획에서는 기준치 T 에 일치하기 위한 \bar{y} 로 해석되어, 전자공학에서의 Signal이 커야 하는 개념과는 모순된 SNR공식이 되어 파라미터 설계 시 SNR은 정밀도 부분만 체크되거나 정확도는 별도의 \bar{y} 를 분석해야 하는 단점이 있다. 전자공학의 SNR에서 log함수를 사용한 이유는 Signal은 크고 Noise는 작아 값이 커지는 것을 루트(Square Root)함수보다 더욱 빠르게 감소할 수 있기 때문이며 10을 곱한 이유는 파라미터 설계시 현재에 비해 개선된 SNR에 의한 손실함수의 감소를 $10^{-\Delta SNR}$ 과 같이 10의 지수 형태로 간단히 계산하기 위한 용도이다. 상한규격 망소특성의 손실함수 $L(y)=(A_0/\Delta_0^2)y^2$ 에서 y^2 값 자체가 정확도, 정밀도 부분으로 이를 최소화하는 SNR을 최대로 표현하려면 log함수 앞에 마이너스를 붙여주면 y^2 의 역수가 되어 $SNR = -10 \log \sum y^2/n$ 으로 표현한다. 여기서 y^2 을 역수로 하지 않고 그

대로 사용하는 이유는 손실함수와 표현의 일관성을 위해서이며 n 으로 나눈 것은 데이터수를 고려했다는 의미이다. 상한규격 망소특성과 같이 하한규격 망대특성의 $SNR = -10\log_{10}(\sum y^2/n)$ 이다. 동특성의 SNR은 망소특성의 SNR과 형태가 비슷하여 $y = \beta M$ 의 네 가지 수식형태에 따라 다르게 유도한다.

PCI는 정규분포의 PDF(Probability Density Function) 모양을 규격과 비교하여 정밀도, 정확도를 나타내는 상대적 지수로 업중간 비교가 가능하다는 장점으로 널리 사용되고 있다. 따라서 손실함수에서 주요변수를 도출하여 간편하게 사용하는 SNR과는 정확도, 정밀도 관점에서 같은 개념이다. 양쪽규격 망소특성의 경우 $SNR = 10\log(\bar{y}/s)^2$ 이고 해당 PCI의 $C_{pk} = (1 - ((\bar{y} - T)/(USL - T))((USL - LSL)/6s)$ 으로 앞부분은 정확도를 뒷부분은 정밀도를 나타낸다. 정확도는 분수위에 정밀도는 분수아래에 위치하여 서로의 성능을 감소시키는 단점을 피하기 위하여 정밀도와 정확도를 분모에 위치하는

$$C_{pm} = ((USL - LSL)/6(s^2 + (\bar{y} - T)^2))^{1/2} \text{ 이 있다.}$$

상한규격 망소특성의 경우 $SNR = -10\log_{10}(\sum y^2/n)$ 과 같이 정밀도와 정확도를 하나의 식으로 표현하는 PCI $C_{PU} = (USL - \bar{y})/3s$ 가 있고 이를 두가지 성분에 의한 식으로 제시하면 $C_{PUK} = (1 - K)C_{PU} = (1 - (\bar{y} - T)/(USL - T))((USL - T)/(3s))$ 이 된다. 하한규격 망소특성의 경우 $SNR = -10\log_{10}(\sum y^2/n)$ 의 대응되는 PCI $C_{PL} = (\bar{y} - LSL)/3s$ 이며 이를 두가지 성분에 의한 식으로 제시하면 $C_{PLK} = (1 - K)C_{PL} = (1 - (T - \bar{y})/(T - LSL))(T - LSL)/(3s)$ 이 된다.

C_{PUK}, C_{PLK} 의 적용예

금속 시편의 불순물의 함유량 $USL=5\%$ 이하, 순도가 $LSL=95\%$ 이상인 스펙이 각각 평균 \bar{y} 가 3%, 97%, 표준편차 s 가 0.8, 2.5이다. 불순물의 목표치 $T=1\%$ 일 경우 $C_{PUK} = (1 - (\bar{y} - T)/(USL - T))(USL - T)/(3s) = (1 - (3 - 1)/(5 - 1))(5 - 1)/(3 \times 0.8) = (1 - 0.5)(1.67) = 0.835$ 로 치우침 계수 $K=0.5$ 로 $K=0$ 의 정확도 기준에 비해 나쁜 나산포 PCI $C_{PU} = 1.67$ 로 좋은 정밀도를 유지한다.

순도의 목표치 $T=98\%$ 인 경우 $C_{PLK} = (1 - (T - \bar{y})/(T - LSL))(T - LSL)/(3s) = (1 - (98 - 97)/(98 - 95))(98 - 95)/(3 \times 2.5) = (1 - 0.33)0.4 = 0.268$ 로 치우침 계수 $K=0.33$ 으로 불순물의 함유량에 비하여 정확도는 좋으나 나산포 PCI $C_{PL} = 0.4$ 로 나쁜 정밀도를 유지하여 순도의 C_{PLK} 는 불순물의 함유량 C_{PUK} 보다 작게 나온다.

따라서 한쪽규격의 경우 양쪽규격과 같이 본 연구에

서 제시한 정확도와 정밀도를 구분한 공정능력지수를 사용할 경우 상응하는 품질혁신 및 개선이 가능하다.

4. 기능한계와 규격한계에 의한 허용차 설계 모형개발

허용차 설계는 상중류 시스템 설계의 손실함수에서 고려된 소비자 기능한계 와 이로 인한 손실비용과 생산자 규격한계(Specification Limit)로 인한 손실비용 등을 고려한 SM을 통해 생산자의 허용차를 결정하는 하류단계이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 단품(One-Piece)의 생산자 허용차 설계를 조립품(Assembly Product)으로 확장하여 새로운 SM에 의한 생산자 허용차 모형을 개발한다. 기능한계 Δ_o 는 실제 소비자가 사용하는 스펙으로 넓어져도 이로 인한 손실비용 A_o 가 최소이면 금상첨화이나 ([그림 2]에서 수평선 $\omega = 100$ 에 가까워지는 손실함수) Δ_o 와 A_o 는 2차 비례(반비례) 관계를 지닌다. 이 경우 생산자가 만들려고 하는 규격한계에서 허용차 Δ 는 이로 인한 손실비용 A 와 소비자 기능한계 Δ_o 와 소비자 기능손실비용 A_o 에 의해 결정되어야 한다.

망소, 망대특성의 경우 2절에서 Δ_o^2 와 A_o 은 2차 비례 관계에 의해 $\Delta_o^2 : A_o = \Delta : A$ 에서 $\Delta = (A/A_o)^{1/2} \Delta_o$, 망대특성의 경우 2차 반비례 관계에 의해 $1/\Delta_o^2 : A_o = 1/\Delta^2 : A$ 에서 $\Delta = (A_o/A)^{1/2} \Delta_o$ 이다. 여기서 소비자의 기능한계와 생산자의 규격한계의 상대적 비를 안전계수(SF) 또는 안전마진(SM)이라 부르며 망소, 망대 특성의 경우 $SF = (A_o/\Delta_o^2)/(A/\Delta^2)$, 망대특성의 경우 $SM = A_o \Delta_o^2/A \Delta^2$ 이다. 기능한계 Δ_o 에 대한 사회에 미치는 소비자 손실비용 A_o 를 줄이기 위해서는 허용차 Δ 를 작게 잡아야 한다는 원리를 가지고 있다. 이는 통상 고객과 약속한 스펙보다 작업공정에서 좀 더 엄격한 관리기준을 설정하는 것과 같다. 망소, 망소특성의 경우 허용차 $\Delta^2 = (A/A_o)\Delta_o^2$ 과 분산의 가법성 법칙에 의한 조립 허용차 $\Delta_s^2 = \Delta_1^2 + \Delta_2^2$ 을 연계하면 $(A_s/A_{s0})\Delta_s^2 = (A_1/A_{10})\Delta_{10}^2 + (A_2/A_{20})\Delta_{20}^2$ 이 된다.

Δ_o^2 과 A 의 2차비례 관계로 $A_1 = (\Delta_{10}^2/(\Delta_{10}^2 + \Delta_{20}^2))A_s$, $A_2 = (\Delta_{20}^2/(\Delta_{10}^2 + \Delta_{20}^2))A_s$ 이며 Δ^2 과 A_o 의 2차 반비례 관계로 $\Delta_1^2 = (1/A_{10} + (1/A_{10} + 1/A_{20}))\Delta_s = (A_{20}/(A_{10} + A_{20}))\Delta_s$, $\Delta_2^2 = (A_{10}/(A_{10} + A_{20}))\Delta_s$ 이다. 기존연구 [3]에서는 A 의 결정에서 Δ_o^2 을 Δ_o 로 오류표기하고,

<표 1> 시스템, 파라미터, 허용차 설계의 적용 가이드라인

	시스템 설계		파라미터 설계		허용차 설계		
	단일 인자 손실함수	다중 인자 손실함수	SNR	PCI	단품 Δ	안전계수 SM	조립제품 Δ
양쪽규격 망목특성	$(A_o/\Delta_o^2)(y-T)^2$	$(A_o/\Delta_o^2)^\omega(y-T)^2$	$10\log(\bar{y}/s)^2$	$C_{PK} = (1-k)((USL-LSL)/(6s))$ 여기서 $k = (\bar{y}-T)/(USL-T)$	$(A/A_o)^{1/2}\Delta_o$	$(A/\Delta_o^2)/(A/\Delta^2)$	$\Delta_1 = (A_{20}/(A_{10}+A_{20}))\Delta_s$ $\Delta_2 = (A_{30}/(A_{10}+A_{20}))\Delta_s$
상한규격 망소특성	$(A_o/\Delta_o^2)y^2$	$(A_o/\Delta_o^2)^\omega y^2$	$-10\log\sum y^2/n$	$C_{PK} = (1-k)((USL-T)/(3s))$ 여기서 $k = (\bar{y}-T)/(USL-T)$	$(A/A_o)^{1/2}\Delta_o$	$(A/\Delta_o^2)/(A/\Delta^2)$	$\Delta_1 = (A_{20}/(A_{10}+A_{20}))\Delta_s$ $\Delta_2 = (A_{30}/(A_{10}+A_{20}))\Delta_s$
하한규격 망대특성	$(A_o\Delta_o^2)/y^2$	$(A_o\Delta_o^2)^\omega/y^2$	$-10\log\sum 1/(\sum y^2/n)$	$C_{PK} = (1-k)((T-LSL)/(3s))$ 여기서 $k = (T-\bar{y})/(T-LSL)$	$(A_o/A)^{1/2}\Delta_o$	$(A_o\Delta_o^2)/(A\Delta^2)$	$\Delta_1 = (A_{20}/(A_{10}+A_{20}))\Delta_s$ $\Delta_2 = (A_{30}/(A_{10}+A_{20}))\Delta_s$

Δ 결정에서 A_o 의 역수관계를 잘못 선정하여 망대특성의 관계식으로 나타난다. 그러나 본 연구에서는 망대특성의 경우 Δ_o^2 와 A 의 2차 반비례 관계로 $A_1 = (1/\Delta_{10}^2)(1/\Delta_{10}^2 + \Delta_{20}^2)A_s = (\Delta_{20}^2/(\Delta_{10}^2 + \Delta_{20}^2))A_s$, $A_2 = (\Delta_{10}^2/(\Delta_{10}^2 + \Delta_{20}^2))A_s$ 이다.

Δ^2 과 A_o 의 2차 비례 관계로 $\Delta_1 = (A_{10}/(A_{10} + A_{20}))^{1/2}\Delta_s$, $\Delta_2 = (A_{20}/(A_{10} + A_{20}))\Delta_s$ 이다.

본 연구에서 개발한 시스템 설계, 파라미터 설계, 허용차 설계에서의 적용 가이드라인은 <표 1>과 같다.

조립품의 타구치허용차 설계의 적용예

2개의 구성품(Component)으로 조립되는 제품 또는 시스템은 기능(Function)상으로 직렬(Series) 구조를 가지고 있다. 조립품의 치수 규격한계에서 허용차 $\Delta_s=10$ 이고, 첫번째 구성품의 기능한계 Δ_{10} 로 인한 손실비용 $A_{10}=200$, 두번째 구성품의 기능한계 Δ_{20} 로 인한 손실비용 $\Delta_{20}=300$ 의 망목특성이다.

첫 번째 부품의 치수 규격한계의 허용차 $\Delta_1=(A_{20}/(A_{10}+A_{20}))^{1/2}\Delta_s=(300/(200+300))^{1/2}10=7.75$, 두번째 부품의 치수 허용차 $\Delta_2=(A_{10}/(A_{10}+A_{20}))^{1/2}\Delta_s=(200/(200+300))^{1/2}10=6.32$ 이다.

5. 결론

본 연구에서는 시스템 설계, 파라미터 설계, 허용차 설계의 3단계 타구치 로버스트 계획에 대해 다음과 같은 결과를 도출하였다.

첫째 시스템 설계에서는 소비자 관점에서의 기능한계에 대한 Prototype 개발시 사회에 미치는 손실함수의 가중치와 중요도를 고려한 MLFA(Multiple Loss Function

Analysis) 모형을 개발하였다.

둘째 손실함수를 효율적으로 평가하기 위한 SNR에 대한 정확도, 정밀도 요소를 공정능력지수와 연계하여 새로운 C_{PUK} 와 C_{PLK} 를 개발하였다.

끝으로 소비자 기능한계와 생산자 규격한계의 안전계수를 고려한 허용차 설계시 단일부품에서 복수 조립부품으로 확장된 모형을 개발하였다.

또한 실무자의 이해와 사용의 편의성을 위해 본 연구에서 개발된 3단계 주요 내용을 가이드라인의 도표로 정리하여 제시하였다.

6. 참고 문헌

- [1] 타구치 겐이치, 품질공학강좌 1-7호, 일본규격협회, 한국표준협회번역, 1991.
- [2] 이상복, MINITAB을 이용한 다구찌 기법활용, 이레테크, 2006
- [3] 이상복, “다구찌 기법을 이용한 2개 부품이상의 허용차 설계에 관한 연구”, 대한산업공학회 추계학술대회발표문집, (2005): 1-6 .
- [4] 이승훈, MINITAB을 이용한 공학통계 자료분석, 이레테크, 2008.
- [5] 최성운 외, “안전설계를 고려한 허용차 결정”, 대한안전경영과학회지, 7(4)(2005): 49-59.
- [6] 최성운, “MRA에서 특성값의 측정단위와 수치형태에 따른 종합만족도 산출방법”, 대한안전경영과학회 추계학술대회발표논문집 (2009): 565-572.
- [7] Taguchi G., Introduction to Quality Engineering : Designing Quality into Products and Processes, Asian Productivity Organization, 1992.
- [8] Taguchi G, Taguchi on Robust Technology Development, ASME Press, 1993

저 자 소 개

최 성 운



현 경원대학교 산업공학과 교수.
한양 대학교 산업공학과에서 공
학사, 공학석사, 공학박사 학위를
취득하고, 1994년 한국과학재단
지원으로 University of Minnesota
에서 1년간 Post-Doc을 수행했
으며, 2002년부터 1년 반 동안 University
of Washington에서 Visiting Professor

를 역임하였음. 주요 관심분야는 자동화 생산 및 장치
산업에서의 품질관리이며, 통신, 정보시스템의 보안, 신
뢰성 설계 및 분석, 서비스 사이언스, RFID시스템,
Wavelet에도 관심을 가지고 있음.

주소: 경기도 성남시 수정구 복정동 신65번지 경원대학교
산업공학과