

## 안전 설계를 고려한 허용차 결정

### - Determination of Tolerance Specifications Considering Safety Design -

최성운 \*

Choi Sung Woon

이창호 \*\*

Lee Chang Ho

#### Abstract

This paper is to propose various safety design models of tolerance specifications with different consumer requirements. In these models, tolerance specifications can be jointly determined by considering all the stochastic, economic, robust and engineering safety design factors with various characteristics of interest. In this paper, the proposed models are easily formulated for design engineers.

**Keyword** : Safety Design, Stochastic, Economic, Robust, Engineering, Factors

#### 1. 서론

규격(Specification)은 제품 또는 기계 등의 물적인 특성을 나타내며 사양, 사양 제원, 스펙 등의 다양한 용어로 사용되어 지고 있다. 규격은 공칭치수(기준치수, 목표치수, Nominal, Target, Ideal Values)  $\pm$ 허용차(Allowance)로 표기되며 2배의 허용차를 공차

---

\* 경원대학교 산업공학과 교수

\*\* 인하대학교 산업공학과 교수

2005년 9월 접수; 2005년 10월 수정본 접수; 2005년 10월 게재 확정

(Tolerance)라고 한다. 조립되는 치수는 명목특성(Nominal-Is-Best)으로 대칭 또는 비대칭 양쪽규격을 가지고, 불순물의 함유량은 망소특성(Smaller-Is-Better)으로 상한규격(공칭치수+허용차)을 가지며, 순도는 망대특성(Larger-Is-Better)으로 하한규격(공칭치수-허용차)을 갖는다.

공칭치수는 설계기술의 파라미터 최적화 문제로서 해결될 수 있으나 허용차는 품질과 코스트의 타협점을 엔지니어의 경험으로 결정하고 있다. 그러나 코스트를 절약하기 위해 허용차를 크게 잡을 경우 품질이 저하되어 판매실적이 감소되며, 품질의 강화를 위해 허용차를 좁게 잡을 경우 코스트의 상승을 가져 오게 된다.

본 연구에서는 규격을 벗어나는 불량(Defective), 부적합품(Nonconforming Unit), 결점(Defect), 부적합(Nonconformance)을 개선하기 위한 정적(Static)인 생산자위주의 품질설계관점과 소비자의 다양한 사용조건에서 문제가 되는 고장(Failure), 클레임(Claim)을 개선하기 위한 동적(Dynamic)인 소비자위주의 신뢰성설계 관점에서의 확률적, 공학적 허용차 결정 모형들을 제시하고자 한다.

품질코스트(Quality Cost)관점에서 생산자위주의 품질설계에 관련된 실패코스트(Failure Cost)는 내부(Internal) 실패 코스트로 분류되며, 소비자위주의 신뢰성 설계에 관련된 실패 코스트는 외부(External) 실패 코스트로 분류된다. 그러나 위와 같은 코스트는 생산자가 단순히 재작업비용, 클레임처리비용 등 최소한의 한계내에서 지불되는 비용으로, 소비자 또는 사회에게 끼치는 총 손실을 고려하지 않는다.

본 연구에서는 제품이 고장 날 경우 사용정지로 인한 기회 손실 비용, 수리 및 교체를 위한 불필요한 시간낭비, 고장으로 인한 소음, 대기, 수질 등의 공해 발생 비용 등의 총체적 사회적 손실에 대해 기능한계(Functional Limit)를 고려한 손실함수를 최소로 하는 경제적, 로버스트 허용차 결정 모형들을 제시하고자 한다.

2장에서는 확률적 공학적 안전 설계 방법으로 안전계수 설계, 디레이팅 설계, PCA설계, PSA설계, 여유설계, S-N설계, WCA설계, 신뢰성 공차 설계에 관련된 모형을 제안한다. 3장에서는 경제적 로버스트 안전 설계 방법으로 명목특성 허용차 설계, 망소 특성 허용차 설계, 망대 특성 허용차 설계, 하위특성 허용차 설계, 열화특성 허용차 설계에 관련된 모형을 제안한다. 4장에서는 결론을 맺는다.

## 2. 확률적 · 공학적 안전설계

### 2.1 SF(Safety Factor) 설계

#### 2.1.1 확률적(Stochastic, Probabilistic) SF 설계

강도의 분포를  $x \sim N(\mu_x, \sigma_x^2)$ , 스트레스의 분포를  $y \sim N(\mu_y, \sigma_y^2)$ 의 정규분포로 가정한다. 스트레스와 강도의 분포가 중첩(Overlap)되는 영역이 간섭이론(Interference Theory)에 의거 불신뢰도 또는 고장확률이 된다.[5]

안전계수는 스트레스 분포와 강도 분포의 일정간격의 크기로 시간에 따른 강도 분포의 좌측 이동에 영향을 받지 않기 때문에 고장이 발생하지 않게 한다. 본 모형은 기계, 토목등의 구조물에 주로 적용되며 안전계수 및 신뢰도의 산출 방법은 다음과 같다.

(1) 확률적 안전계수 (SSF, PSF)

$$SSF = \frac{\mu_y - n_y \sigma_y}{\mu_x + n_x \sigma_x}$$

여기서  $n_x, n_y$ : ±1일 경우 68.26% 영역  
 ±2일 경우 95.45% 영역  
 ±3일 경우 99.73% 영역

(2) 신뢰도

$$x - y \sim N(\mu_x - \mu_y, \sigma_x^2 + \sigma_y^2)$$

$$P(x - y > 0) = P(Z) \frac{(x - y) - (\mu_x - \mu_y)}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}$$

$$= P(Z) \frac{\mu_y - \mu_x}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}$$

### 2.1.2 공학적(Engineering) SF 설계

공학적 SF 설계는 확률적 SF 설계와 달리 표준편차를 고려하지 않고 단지 스트레스와 강도의 평균에 의해 안전계수와 안전마진을 산출한다.[7]

(1) 공학적 안전계수(ESF)

$$ESF = \frac{\mu_y}{\mu_x}$$

(2) 공학적 안전 마진(ESM: Engineering Safety Margin)

$$ESM = \frac{\mu_x - \mu_y}{\mu_y}$$

### 2.1.3 전자기적 SF 설계

EMC/EMI (Electronic Magnetic Compatibility) 전자파 환경에서 사용되는 보호비는 다음과 같다.

$$R = E_w + I_s + C_b - E_{pd}$$

여기서 R 보호비

$E_w$ : 회망 전자파의 전자기장 강도

$I_s$ : 시스템 차단

$C_b$ : 교정계수

$E_{pd}$ : 간접전자파의 전자기장 강도

## 2.2 DR (Derating) 설계

MIL-STD-721C에 의하면 디레이팅은 정격(Rated)스트레스에 비해 여유있는 적용(Applied) 스트레스를 사용하게끔 설계하는 방법이다.[6] 스트레스가 증가할수록 고장은 증가하여 이 경우 온도, 습도, 오염, 진동 등의 환경 스트레스 (Environmental Stress)와 전압, 전류, 유량, 진폭, 동적부하 등의 운영 스트레스 (Operational Stress)를 낮은 수준으로 사용함으로써 고장이 감소된다.

예를 들면 정류기(Capacitor) 같은 경우 DC 전압을 극한 환경(Severe Environment)에서는 60%의 디레이팅을, 정상적 환경(Benign Environment)에서는 90%의 디레이팅을 적용한다.

## 2.3 PCA (Pact Counts Analysis) 설계

PCA 설계는 시스템을 구성하는 부품의 종류와 수량에 따른 운영 스트레스를 품질 계수로 고려하여 고장률을 보정한다.[3]

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n (N_i)(\lambda_{bi})(\pi_{qi})$$

여기서  $\lambda_s$  : 시스템 고장률(FR : Failure Rate)

$N_i$  :  $i$ 번째 부품유형의 수량

$n$  : 서로 다른 부품 종류의 수

$\pi_{qi}$  : 품질 계수(Quality Factor)

예를 들어 PCB에서 IC, 콘텐서, 저항의 3종류 부품 유형이 각각 4개, 2개, 3개의 수량을 가지고 있다면  $n=3$ ,  $N_1=4$ ,  $N_2=2$ ,  $N_3=3$ 이 된다.

## 2.4 PSA(Part Stress Analysis) 설계

PSA 설계는 PCA 설계에 환경 스트레스를 계수로 고려하여 더욱 보수적으로 고장률을 보정한다.[3]

$$\lambda_s = \lambda_b \pi_q \pi_e$$

여기서  $\lambda_s$  : 시스템 고장률

$\lambda_b$  : 기본 고장률

$\pi_q$  : 품질계수(운영 스트레스 계수)

$\pi_e$  : 환경 스트레스 계수

## 2.5 RD (Redundancy) 설계

여분의 부품을 병렬 또는 대기 결합하는 설계 방법으로 Active Parallel Models, Parallel/Serise Models, Active Redundancy Models, Standby Parallel Models, Shared Load Parallel Models 등이 있다.[4]

## 2.6 S-N 설계

스트레스 크기  $S$ (Stress: Load Per Unit Area)와 반복을 가하여 파괴가 될 때까지의 횟수  $N$ (Number of cycles to Failure)의 관계곡선을 S-N 곡선이라 한다. 곡선의 종류는 내구한계(Endurance Limit)가 존재하는 철 합금(Ferrous Alloy)곡선과 항복로드(Ultimate Load)가 존재하는 비철 합금(Nonferrous Alloy)곡선이 있다.

S-N 곡선을 이용하여 이론적으로 가정된 S-N 곡선에 의한 반복횟수  $N_i$ 와 실제 반복횟수  $n_i$ 를 이용하여 신뢰성 설계를 수행한다.[1]

## 2.7 WCA (Worst Case Analysis) 설계

WCA 설계는 극단적인 환경적, 운영적 조건을 가정하고 공차를 설계하는 방법이다.[3]

### 2.7.1 RSSA (Root-Sum-Squared Analysis)설계

공칭치수에 대한 정확도(Accuracy), 치우침, 편의(Bias)는 최대 공차를 구할 경우 양의 치우침 (Positive Bias)을 고려하고 최소 공차를 구할 경우 음의 치우침(Negative Bias)을 고려한다.

공칭치수에 대한 정밀도(Precision)는 정규분포의 분산의 가법성(Additivity) 법칙에 의해 구하고 제곱근을 취하여 표준편차 값으로 나타내며, 최대 공차인 경우 더해주며 최소공차인 경우 빼준다.

### 2.7.2 EVA (Extreme Value Analysis) 설계

WCA 보다 보수적(Conservative)이나 안정된(Robust) 방법으로, 편의를 계산하는 방법은 같으나 정밀도의 표준편차 값을 계산할 경우 분산의 가성성 법칙을 사용하지 않고 단순히 덧셈을 해준다.

### 2.7.3 MCA (Monte Carlo Analysis) 설계

시스템 또는 부품 특성에 맞는 확률분포의 난수 (Random Number)를 발생하여 설계하는 방법으로 각 분포의 난수 발생기 (Process Generator)가 중요한 역할을 수행한다.

## 2.8 RT(Reliability Tolerance) 설계

신뢰도 및 신뢰수준을 동시에 고려하는 다양한 공차 설계 모형이 최[2]의 논문에 제시되어 있다.

### 3. 경제적 로버스트 안전설계

#### 3.1 망목특성 허용차

##### 3.1.1 대칭 허용차

다구찌의 이차손실함수에서 망목특성의 허용차를 산출하는 공식을 정식화 한다. [8,9]

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

여기서 L: 이차손실함수

y: 망목특성값

m: 공칭치수

$$k: \text{비례함수} = \frac{A_0}{\Delta_0^2}$$

$\Delta_0$ : 소비자의 기능한계 (Functional Limit)

$A_0$ : 소비자의 기능한계를 벗어나는 경우 사회적 손실

$\Delta$ : 생산자의 허용차 :  $y-m$

A: 생산자의 허용차를 벗어나는 경우 생산자 손실 : L

이차손실 함수 차변을 A로, 우변의 k를  $\frac{A}{\Delta_0^2}$ 로,  $(y-m)^2$ 을  $\Delta$ 로 치환하면 다음과 같은 허용차 공식이 정식화 된다.

$$\begin{aligned} \Delta &= \sqrt{\frac{A}{A_0}} \times \Delta_0 \\ &= \varnothing \Delta_0 \end{aligned}$$

여기서  $\varnothing$ 는 경제적 안전 계수 (ESF: Economical Safety Factor)로 생산자의 허용차는 소비자의 기능한계에 이를 고려하여 결정할 수 있다.

다른 모형에 대한 공식유도는 지면의 한계로 정식화된 공식만 제시하기로 한다.

##### 3.1.2 비대칭 허용차

비대칭 허용차인 경우 대칭허용차를 하한, 상한의 경우로 나누어 산출한다.

$$\Delta_1 = \sqrt{\frac{A_{11}}{A_{10}}} \times \Delta_{10} \quad : \text{하한허용차}$$

$$\Delta_2 = \sqrt{\frac{A_{21}}{A_{20}}} \times \Delta_{20} \quad : \text{상한허용차}$$

### 3.1.3 공정능력이 불충분한 경우

#### (1) 양품률 Q

공정능력이 불충분한 경우 양품률Q에 따라 생산자의 허용차를 설계한다.

$$\Delta = \sqrt{\frac{A}{A_0 \cdot Q}} \times \Delta_0$$

#### (2) 양품률 Q( $\Delta'$ )

허용차 $\Delta'$ 에 의한 양품률Q( $\Delta'$ )에 따라 생산자의 허용차를 설계하며 Q( $\Delta'$ )은 정규 분포에 의해 계산된다.

$$\Delta = \sqrt{\frac{A}{A_0 \cdot Q(\Delta')}} \times \Delta_0$$

$$\text{단, } Q(\Delta') = \int_{-\frac{\Delta'}{\delta}}^{\frac{\Delta'}{\delta}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

## 3.2 망소특성허용차

### 3.2.1 하한규격

망소특성인 경우 망목특성의 허용차 설계와 같은 정식화의 공식을 갖는다

$$\begin{aligned} \Delta &= \sqrt{\frac{A}{A_0}} \times \Delta_0 \\ &= \emptyset \Delta_0 \end{aligned}$$

### 3.2.2 치우침

하한규격의 이상치(Ideal Value)는 제로이나 이를 달성할 수 없을 경우 재작업(Rework)이 요구된다. 이때 첫 번째 재작업 코스트를  $RW_1$ , 두 번째 재작업 코스트를  $RW_2$ 일 경우 생산자 허용차 설계의 공식은 다음과 같다.

$$\Delta = \sqrt{\frac{\Delta_0^2(RW_1 + RW_2)}{A_0} + \sigma^2}$$

### 3.3 망대특성 허용차

망대특성 허용차는 규격하한을 갖는 작을수록 좋은 제품일 경우 적용되므로 망소특성과 경제적 안전계수  $\emptyset$ 의 고려방법이 정반대가 된다.

$$\begin{aligned}\Delta &= \sqrt{\frac{A_0}{A}} \times \Delta_0 \\ &= \frac{\Delta_0}{\emptyset}\end{aligned}$$

### 3.4 하위특성 허용차

자동차, 가전등과 같은 모기업과 협력기업과의 관계에서는 모기업의 제품이 상위특성, 협력기업이 하위특성이 된다. 소재를 만드는 기업의 제품이 하위 특성이 되며 이를 가공하는 기업의 제품은 상위특성이 된다.

#### 3.4.1 망목특성

(1) 대칭허용차

$$\begin{aligned}\Delta &= \sqrt{\frac{A}{A_0}} \times \frac{\Delta_0}{U} \\ &= \frac{\emptyset}{U} \Delta_0\end{aligned}$$

여기서  $U$ : 하위특성이 단위당 변화했을 경우 상위특성에 부여하는 값

(2) 양품률 $Q(\Delta')$

$$\Delta = \sqrt{\frac{A}{A_0 \cdot Q(\Delta')}} \times \frac{\Delta_0}{U}$$

(3) 비대칭허용차

$$\Delta_1 = \sqrt{\frac{A_{11}}{A_{10}}} \times \frac{\Delta_{10}}{U_1} \quad : \text{하한허용차}$$

$$\Delta_2 = \sqrt{\frac{A_{21}}{A_{20}}} \times \frac{\Delta_{20}}{U_2} \quad : \text{상한허용차}$$



### 3.4.2 망소특성

$$\Delta = \sqrt{\frac{A}{A_0}} \times \frac{\Delta_0}{a}$$

여기서  $a$  : 하위특성과 상위특성과의 1차 비례효과 계수

### 3.4.3 망대특성

(1) 하한규격

$$\begin{aligned} \Delta &= \sqrt{\frac{A_0}{A}} \times U \times \Delta_0 \\ &= \frac{U}{\phi} \Delta_0 \end{aligned}$$

(2) 상위특성

이상값은 클수록 좋지만 무한대가 될 수 없으므로  $m'$ 으로, 문제가 발생하는 공칭치 수를  $m''$ 로 설정하여 생산자의 허용차 공식을 정식화하면 다음과 같다.

$$\Delta = \frac{m'}{1 + \sqrt{\frac{A}{A_0} \left( \frac{m'}{m''} - 1 \right)}}$$

## 3.5 기타 허용차

### 3.5.1 열화특성

(1) 직선열화

열화하는 특성이 시간 T와 함께 변화하는 경우 생산자 허용차 모형은 다음과 같다.

$$\Delta = \sqrt{\frac{3A}{A_0}} \times \frac{\Delta_0}{T}$$

(2) 하위특성

$$\Delta = \sqrt{\frac{A}{A_0}} \times \frac{\Delta_0}{U \cdot T}$$

#### 4. 결 론

본 연구에서는 확률적, 공학적 접근방법과 경제적, 로버스트 접근방법등에 기초한 다양한 안전 설계 모형들을 제시하였다. 안전계수는 확률적 SF, 공학적 SF에 대한 산출 모형을 제시하였으며 디레이팅, 리던던시, S-N곡선, 품질계수(운영 스트레스 계수), 환경 스트레스 계수 등을 고려하는 안전 설계 모형을 제안하였다. 또한 극단적인 환경조건을 고려한 설계방법과 신뢰도 및 신뢰수준을 동시에 고려하는 모형을 제시하였다.

생산자의 허용차를 결정할 경우 소비자의 기능한계를 벗어나는 사회적 손실을 최소화 하는 정식화 모형을 망목특성, 망소특성, 망대특성, 하위특성, 열화특성등 각각의 다양한 조건에 따른 산출식 모형을 제안하였다.

향후 연구과제로는 다특성 (Multi - Characteristics)에 관련된 허용차 결정모형의 개발[10]과 EMC/EMI 에서의 안전마진을 고려하는 모델을 개발하는데 있다.

#### 5. 참 고 문 헌

- [1] 이상용, 신뢰성 공학, 형설출판사, 1997.
- [2] 최성운, "신뢰도와 신뢰수준을 고려한 기대수명 공차구간 설정에 관한 연구," 대한 안전경영과학회지, 7(2005) 73-83.
- [3] B. Dodson, D. Nolan, Reliability Engineering Handbook, Quality Publishing, Tucson, 2000.
- [4] E.A Elsyed, Reliability Engineering, Addison Wesley, NY, 1996.
- [5] K.C. Kapur, L.R. Lamberson, Reliability in Engineering Design, John Wiley, NY, 1977.
- [6] MIL-STD-721C, Definitions of Terms for Reliability and Maintainability, Department of Defense, Government Printing Office, 1981.
- [7] P.D.T. O'Conner, Practical Reliability Engineering, John Wiley, NY, 1996.
- [8] G. Taguchi, Introduction to Quality Engineering : Designing Quality into Products and Processes, Asian Productivity Organization, Tokyo, 1992.
- [9] G. Taguchi, Taguchi on Robust Technology Development, ASME Press, NY, 1993.
- [10] K.Tang, J.Tang, "Design of Product Specifications for Multi-Characteristic Inspection," Management Science, 35 (1989) 743-756.

## 저 자 소 개

**최 성 운:** 현 경원대학교 산업공학과 교수 재직 중, 한양 대학교 산업공학과에서 공학사, 공학석사, 공학박사 학위를 취득하고, 1994년 한국과학재단 지원으로 University of Minnesota에서 1년간 Post-Doc을 수행하였으며, 2002년부터 1년 반 동안 University of Washington에서 Visiting Professor를 역임하였습니다. 주요 관심분야는 자동화 생산 및 장치 산업에서의 품질관리이며, 컴퓨터·정보통신시스템의 신뢰성 설계 및 분석, RFID시스템에도 관심을 가지고 있음.

**이 창 호:** 인하대학교 산업공학과 공학사, 한국 과학기술원 산업공학과 공학석사, 한국 과학기술원 산업공학과 공학박사, 현재 인하대학교 산업공학과 교수  
관심분야 : SCM, OR, 물류관리