

## 다구찌의 피드백 제어시스템 내 다수 함수 품질특성 고찰

†이상헌\* · 송도현\*\*

Evaluation of Quality Levels with Multiple Probability  
Distributions Under the Taguchi's Feedback Control System

Sang-Heon Lee\* · Do-Hyun Song\*\*

### ■ Abstract ■

Taguchi assumed that a product characteristic has the uniform distribution in its preventive maintenance limit when deriving the expected loss generated by the quality deviation. But it is reasonable to assume that a product characteristic has the normal distribution than the uniform distribution. In this paper, we first find the optimum inspection interval and the optimum preventive maintenance limit under the truncated triangular distribution. Secondly we use the beta-general distribution and compare with the truncated triangular distribution. By using the numerical examples, we find the optimum inspection interval and the optimum preventive maintenance limit under their distributions. As a result, we find that the beta-general distribution gives the best solution and easy calculation.

Keywords : Taguchi, Preventive Maintenance, Beta-general Distribution, Feedback Control System

논문접수일 : 2006년 12월 22일    논문게재확정일 : 2007년 05월 08일

\* 국방대학교 운영분석학과 교수

\*\* 국방대학교 운영분석학과

† 교신저자

## 1. 서 론

다구찌 기법(Taguchi method)은 다구찌 겐이치(田口玄一) 박사의 생산기술 및 품질수준을 최적화하기 위한 방법이다. 다구찌의 다양한 이론 중 70년대에 제기한 손실함수의 개념은 기존의 생산 공정 중심의 발상에서 벗어나 최초 제품설계 분야에서부터 품질의 향상을 위한 노력을 기울여야 한다는 다구찌의 사회적 손실개념이 적용된 것이다[1, 3, 5, 6]. 다구찌는 이러한 손실함수를 바탕으로 다양한 기법을 발전시켰다. 그 중, 공정의 생산기계(시스템)에 대한 최적 예방정비 주기를 결정하는 방법도 제시하였는데 이러한 기법은 중전의 예방정비 이론[4, 13]과는 사뭇 다른 과학적인 것이며 참신한 아이디어와 실제의 현장상황을 적용할 수 있는 현실적인 대안으로 인정받고 있다.

그러나, 다구찌의 예방정비 기법은 도출 과정에서 현실과는 거리를 둔 가정 사항을 포함하고 있는데, 그것은 품질에 의한 기대손실을 유도할 때 제품의 예방정비한계 내에서 거의 균등분포를 따른다고 가정한 것이다. 이러한 가정은 계산의 편의성을 위한 것이지만, 실제 모집단의 특성인 정규분포와는 거리가 있다.

정규분포로 가정한 경우에는 최적검사간격과 최적 예방정비한계를 구하는데 계산이 어려우므로, 정규분포와 근사한 분포를 찾아 균등분포를 가정한 다구찌의 예방정비 기법을 개선하는데 본 연구의 목적이 있으며, 최종 목표는 적절한 분포함수를 결정함으로써 최적의 검사간격과 예방정비 한계를 기존의 다구찌 이론보다 현실에 근접하게 계산하는 것이다. 이를 위해, 먼저 최초 예방정비 한계를 기준으로 한 절단된 정규분포(Truncated Normal distribution)를 적용한 방법을 검토하고 다음으로 절단된 삼각형 분포(Truncated Triangular distribution)와 Beta-general 분포를 사용하여 계산하는 방법을 제시한다.

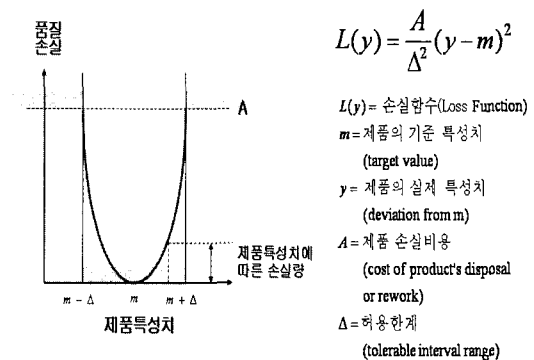
제 2장에서는 먼저 다구찌의 손실함수와 예방정비 기법을 고찰하고, 제 3장에서는 다구찌 예방정

비 기법의 개선방법을 제시한 후, 이를 바탕으로 제 4장에서 실험을 통한 대안비교와 결과에 대한 분석을 실시한다. 제 5장에서는 결론 및 발전방향을 제시한다.

## 2. 다구찌 기법 소개

### 2.1 손실 함수

다구찌 예방정비 공식은 기본적인 다구찌의 품질 손실함수 모형[9, 11, 15]인 <그림 1>을 기초로 한다. 그림의 굵은 선은 기존의 손실개념을 의미하며, 곡선식은 우측의 손실함수를 도식화한 것이다. 손실비용은 품질불량에 의한 비용(A)에 제품의 품질산포의 변화에 따라서 최상의 목표치(m)에 벗어날수록 손실비용이 2차식의 형태로 증가하는 것을 알 수 있다.



<그림 1> 품질손실함수 모형

### 2.2 예방 정비 함수

먼저, 다음과 같이 파라미터를 정의한다.

$L_0$  = 현재의 예방정비 계획에 의한 손실함수

$B$  = 검사비용

$n_0$  = 현재의 검사주기(개)

$C$  = 예방정비 비용

$u_0$  = 현재의 예방정비 주기

- $C^*$  = 품질산포가  $\Delta^*$ 보다 커지는데 따른 손실 비용
- $u^*$  = 예방정비를 실시하지 않음으로써 발생되는 MTBF
- $\Delta^*$  = 생산제품의 규격한계
- $\Delta$  = 예방정비 한계 (구하려는 값)
- $n$  = 검사주기 (개, 구하려는 값)
- $l$  = time lag
- $u$  = 평균 예방정비 주기

이와 같은 파라미터를 사용하여 표현된 예방정비 함수는 현재의 검사, 정비비용과 품질산포를 벗어나기 시작하여 예방정비의 한계를 초과하였을 때의 총 손실비용을 합산한 식 (1)과 같다.

$$L_0 = \frac{B}{n_0} + \frac{C}{u_0} + \frac{C^*}{u^*} \times \frac{1}{(\Delta^*)^2} \times \left[ \frac{\Delta^2}{3} + \left( \frac{n}{2} + l \right) \times \frac{\Delta^2}{u} \right] \quad (1)$$

최종 목적 값은 최적  $n$ 과  $\Delta$ 을 구하고자 하는 것이므로, 식 (1)을  $n$ 과  $\Delta$ 로 편미분하여 이를 0으로 놓고 풀면 최적 계측간격  $n$ 과 최적 예방정비 한계  $\Delta$ 을 각각 식 (2)와 식 (3)의 형태로 구할 수 있다.

$$\frac{dL}{dn} = -\frac{B}{n^2} + \frac{C^*}{u^*} \times \frac{1}{(\Delta^*)^2} \times \frac{(\Delta^*)^2}{2u^*} = 0$$

$$n = u^* \sqrt{\frac{2B}{C^*}} \quad (2)$$

$$\frac{dL}{d\Delta} = -\frac{2(\Delta^*)^2 C^*}{u^* \Delta^3} + \frac{C^*}{u^*} \times \frac{1}{(\Delta^*)^2} \times \frac{2\Delta}{3} = 0$$

$$\Delta = \Delta^* \left( \frac{3C^*}{C} \right)^{1/4} \quad (3)$$

다구찌는 식 (2)와 식 (3)으로 적절한 검사주기와 예방정비 한계치를 구할 수 있다고 하였다. 이때 다구찌는 생산되는 제품의 품질산포를 균등분포

포로 가정 하였다.

균등분포의 확률밀도함수는 식 (4)와 같다.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & \text{for } a < x < b \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

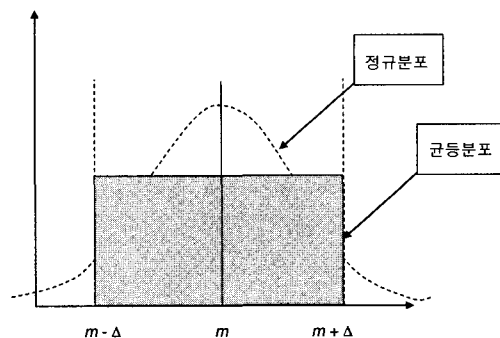
$a = m - \Delta$ ,  $b = m + \Delta$ 로 전환하면 균등분포의 확률분포함수는 식 (5)와 같이 표현 할 수 있다.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{(m+\Delta) - (m-\Delta)} = \frac{1}{2\Delta}, & \text{for } a < x < b \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

따라서 확률변수의 분산은 식 (6)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{Var}(x) &= \frac{(b-a)^2}{12} = \frac{\{(m+\Delta) - (m-\Delta)\}^2}{12} \\ &= \frac{(2\Delta)^2}{12} = \frac{\Delta^2}{3} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 구하여진  $\Delta^2/3$ 을 제품의 품질산포에 적용하였는데 이는 계산의 편의성에서 장점을 가지고 있다. 그러나 실제로 이러한 품질산포는 정규분포에 가깝다고 보는 것이 타당할 것이다. <그림 2>는 균등분포와 실제의 산포라고 기대되는 정규



<그림 2> 균등분포함수의 그래프

분포를 나타내는 그래프이다. 그림에서 보는바와 같이,  $m-\Delta$ 와  $m+\Delta$  사이의 정규분포는 같은 간격에서의 균등분포와 평균이 같고 편차가 유사한 형태로 표현이 가능하다.

### 2.3 기존 문헌 연구

Samar et al.[14]는 단일 설비의 교체나 대규모 생산공정에서의 다구찌 방법을 적용한 VRM (Variance Reduction Model) 기법을 소개하였는데, 분석과정에서 정규분포와 균등분포의 경우를 계산하였다. Chan and Ibrahim[10]은 2개 이상의 품질특성을 지니는 제품에 대한 품질수준을 측정하는 방법을 제안하였다. 이상복[7, 8]은 다구찌의 품질손실함수에 대한 기존의 평균을 기준으로 대칭을 한다는 가정이 너무 단순함을 지적하고, 실제 데이터를 분석한 손실비용함수를 제안하였고 다부품 구조모들의 경우 허용차  $\Delta$ 를 구하는 방법을 제시하였는데, 각 부품이 충분히 많으면 부품은 정규분포를 이룬다고 하였고 2개 부품 이상의 품질의 허용한계 계산방법을 정규분포의 평균과 분산으로 계산하는 방법을 제시했다.

김지훈 등[2]의 다구찌 피드백 제어 시스템에 대한 연구는 품질산포의 균등분포 가정에 대한 문제점을 지적하고, 절단된 정규분포와 절단된 삼각형 분포를 적용한 방법을 제시하였다.

피드백 제어 시스템은 공정제어 분야에서 일정한 간격으로 제품의 특성값과 공정조건을 체크하여 그 값이 어느 한계 안에 있으면 생산을 계속하고 그 한계를 넘어설 때에는 공정을 조정하는 시스템을 말한다. 이 시스템을 규명하기 위해 다구찌는 제품의 품질 특성값을 균등분포로 가정하였는데, 김지훈 등[2]은 실제의 생산공정에서 살펴본 품질 특성값은 정규분포에 가깝다고 하였다. 그러나 실제 자료를 바탕으로 분포함수를 정규분포로 추정하여 계산하는 방법은 분산값을 구하는데 어려움이 있으므로, 정규분포와 일치하지는 않지만 균등분포 보다는 정규분포의 형태에 근접하는 삼

각형분포를 사용하여 정규분포의 특성을 균등분포에 비해 더 효과적으로 반영할 수 있도록 하는 방안을 제시하였다. 제한된 일정범위 내에서는, 삼각형 분포가 균등분포에 비하여 분산이 정규분포에 보다 근접하는 것을 입증하였으며, 실제 최적 검사주기와 예방정비 한계를 설정하는 계산을 하는데 있어서도 정규분포로 계산하는 경우에 보다 근접한 값을 구하였으나, 본 연구를 통해서 확인한 결과  $2.5\sigma$ 를 초과하는 경우에는 절단된 삼각형 분포가 적절한 해를 제공하지 못하는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 절단된 삼각형 분포보다 정규분포에 근사하고 실행 불가능 영역이 존재하지 않으며 정규분포와 같은 복잡한 계산이 적은 Beta-general 분포를 이용한 품질산포를 제안하고자 한다. 실험에서는 삼각형 분포가 정규분포의 분산과 얼마나 근사하는지를 비교한 김지훈 등[2]의 결과를 토대로 이를 Beta-general 분포의 경우를 추가하여 비교하였다. 아울러 수치예제를 통해 새로운 분포를 이용한 개선식의 우수성을 검증 하였다. 수치예제는 Taguchi et al.[12]에 수록된 예방정비 기법에 관련된 예제와 김지훈 등[2]의 연구에서 제시하였던 피드백 제어시스템에 관한 수치예제 계산결과를 Beta-general 분포를 사용한 피드백 제어시스템 공식으로 다시 계산하여 비교하였다.

## 3. 다구찌 예방정비주기 기법 개선

### 3.1 절단된 정규분포

절단된 정규분포를 도출하기 위해, 먼저 정규분포의 확률밀도함수를 살펴보면 식 (7)과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

$$= \frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)$$

여기서,  $\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$

식 (7)의 정규분포를 절단된 정규분포로 전환하면 식 (8)이 된다.

$$f_{tr}(x) = \frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{x-m}{\sigma}\right) / \left[ \Phi\left(\frac{\Delta}{\sigma}\right) - \Phi\left(-\frac{\Delta}{\sigma}\right) \right] \quad (8)$$

여기서,  $\phi(\cdot)$ ,  $\Phi(\cdot)$ 는 각각 정규분포의 확률밀도 함수, 분포함수이다.

따라서 절단된 정규분포의 분산은 식 (9)이며,

$$\begin{aligned} Var(x) &= \int (x-\mu)^2 f_{tr}(x) dx \\ &= \frac{-2\Delta\sigma^2\phi(\Delta/\sigma)}{\Phi(\Delta/\sigma) - \Phi(-\Delta/\sigma)} + \sigma^2 \end{aligned} \quad (9)$$

이를 손실함수에 적용하면, 절단된 정규분포의 가정 하에 손실함수 식 (10)으로 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} L_0 &= \frac{B}{n_0} + \frac{\Delta_0^2 C}{u_0 \Delta^2} + \frac{C^*}{u^*} \times \frac{1}{(\Delta^*)^2} \\ &\times \left[ \frac{-2\Delta\sigma^2\phi(\Delta/\sigma)}{\Phi(\Delta/\sigma) - \Phi(-\Delta/\sigma)} + \sigma^2 + \left(\frac{n}{2} + l\right) \times \frac{\Delta_0^2}{u_0} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

이를 최적  $n$ 과  $\Delta$ 의 도출을 위해 편미분을 실시하면, 최적 검사주기  $n$ 은 균등분포의 최적검사주기 식 (2)와 동일한 식이 유도 된다.

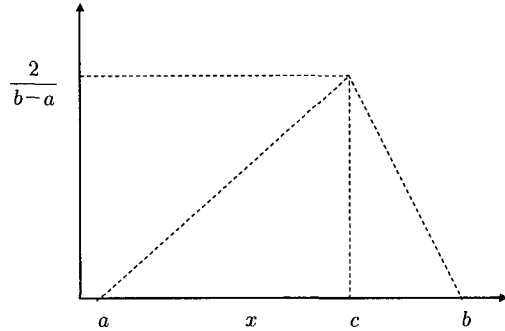
반면, 최적 예방정비 한계  $\Delta$ 는 일반적인 해법으로는 최적  $\Delta$ 의 계산이 난이하다. 결국, 절단된 정규분포의 계산은 일반적인 계산이 아닌 수치해법으로 풀어야 하므로 복잡하다.

### 3.2 절단된 삼각형 분포

일반적인 삼각형 분포의 확률 밀도함수는 식 (11)과 같고, 이를 그래프로 나타내면 <그림 3>과

같다.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)}, & \text{for } a \leq x \leq c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)}, & \text{for } c \leq x \leq b \end{cases} \quad (11)$$



<그림 3> 삼각형 분포함수의 그래프

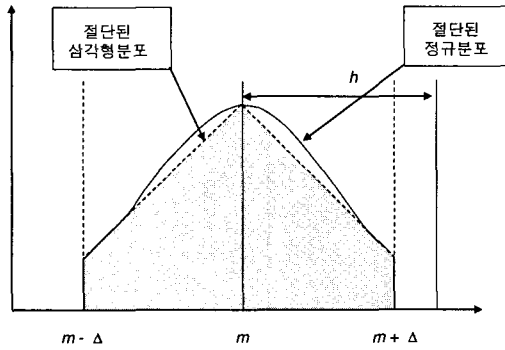
삼각형 분포는 두 개의 선형식이 결합한 형태로 표현이 가능하다. 모수  $a, b, c$ 만 결정되면 삼각형 분포를 정의할 수 있으므로 평균과 분산을 쉽게 구할 수 있다. 삼각형 분포를 정규분포와 근사시키는 데에도 유리한데, 그 이유는 정규분포에 근사하는 삼각형 분포를 찾기 위해서는 실제 좌우가 대칭인 삼각형 분포의 형태를 취하게 되므로,  $a-c$ 까지의 간격과  $c-b$ 까지의 간격이 동일한 형태의 삼각형 분포가 가능하게 되며,  $c$ 는 평균값을 나타내므로 삼각형 분포의 밑변의 길이만 알게 된다면 분포의 정의가 가능하기 때문이다.

따라서, 식 (11)의  $c$ 를 평균  $m$ 으로 치환하고 폭이  $2h$ 인 삼각형 분포로 전환하면, 확률밀도 함수는 식 (12)와 같이 간단한 형태로 전환이 가능하다. 이를 절단된 삼각형 분포로 전환하면, 식 (13)이 되고 이를 그래프로 나타내면 <그림 4>와 같다.

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{h^2} [h - |x - m|] \\ |x - m| &\leq h \end{aligned} \quad (12)$$

$$f_{tr}(x) = \frac{1}{2h\Delta - \Delta^2} [h - |x - m|] \quad (13)$$

$$|x - m| \leq \Delta, h \geq \Delta$$



<그림 4> 절단된 삼각형분포와 정규분포

여기서 절단된 삼각형 분포로 전환하는 이유는 <그림 4>에서 알 수 있듯이 절단된 정규분포에 근사하기 위해서는 평균에서의 높이를 같게 하고 폭이 2h인 삼각형 분포의 양 끝단을 2Δ 만큼의 길이만 남기고 잘라 내야만 하기 때문이다.

그러므로, 식 (13)을 통해 계산된 절단된 삼각형 분포의 분산은 식 (14)와 같다.

$$\begin{aligned} V_{tr}(x) &= \frac{1}{2h\Delta - \Delta^2} \quad (14) \\ &\times \int_{m-\Delta}^{m+\Delta} [h - |x - m|](x - m)^2 dx \\ &= \frac{4h\Delta^2 - 3\Delta^3}{6(2h - \Delta)} = \frac{4\lambda - 3}{6(2\lambda - 1)} \Delta^2 \\ &h = \lambda\Delta (\lambda \geq 1) \end{aligned}$$

이를 손실함수에 적용하여 계산하기 위해 식 (1)에 균등분포의 분산 값인  $\Delta^2/3$  대신 식 (14)값을 대입하고  $n, \Delta$ 을 기준으로 각각 편미분하여 최적  $n, \Delta$ 를 계산하면  $n$ 은 식 (2)와 동일하며,  $\Delta$ 는 식 (15)와 같다.

$$\frac{dL}{d\Delta} = -\frac{2(\Delta^*)^2 C}{u^* \Delta^3} + \frac{C^*}{u^*} \times \frac{1}{(\Delta^*)^2} \times \frac{4\lambda - 3}{3(2\lambda - 1)} \Delta = 0$$

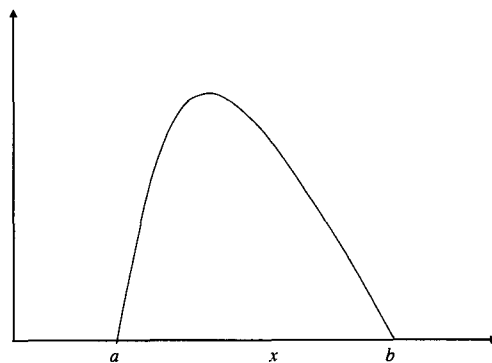
$$\Delta = \Delta^* \left( \frac{6(2\lambda - 1)C}{(4\lambda - 3)C^*} \right)^{1/4} \quad (15)$$

여기에서 알 수 있는 사실은 품질산포의 특성이 어떤 분포를 따른다고 해도 최적 검사주기  $n$ 은 동일하게 계산되며, 최적 예방정비 한계치  $\Delta$ 는 품질산포에 따라 변한다는 것이다.

### 3.3 Beta-general 분포

일반적인 Beta-general 분포의 확률 밀도함수는 식 (16)과 같고, 이를 그래프로 나타내면 <그림 5>와 같다.

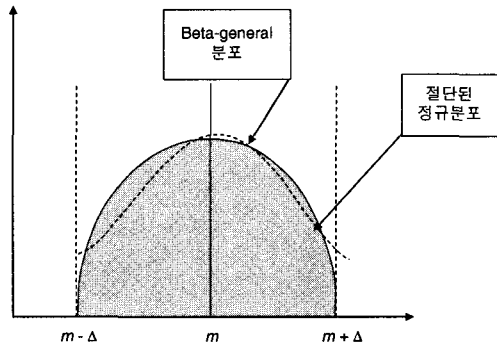
$$f(x) = \frac{(x-a)^{\alpha_1-1} (b-x)^{\alpha_2-1}}{B(\alpha_1, \alpha_2)(b-a)^{\alpha_1+\alpha_2-1}} \quad (16)$$



<그림 5> Beta-general 분포의 그래프

Beta-general 분포의 특징은 4개의 모수  $a, b, \alpha_1, \alpha_2$ 에 의해 표현이 가능하다는 점과 곡선의 형태를 취하지만 양 끝단이 무한대로 진행되는 것이 아니라 닫힌 형태를 취한다는 것이다. 이러한 특성은 Beta-general 분포를 정규분포에 근사하도록 유도하는 것과 손쉬운 계산이 가능토록 하는데 유리하게 적용된다. 모수  $\alpha_1, \alpha_2$ 가 1의 값을 갖는 경우는 균등분포와 같은 형태가 되고  $\alpha_1, \alpha_2$ 가 1에서 점점 증가 할수록 외부로 볼록한 형태를 갖

게 된다. 이러한 특징을 통해 알 수 있는 사실은 Beta-general 분포는 균등분포의 형태에서  $\alpha_1, \alpha_2$  가 증가 할수록 점점 더 정규분포에 가까워지는 분포를 갖게 된다는 것이다.



<그림 6> Beta-general 분포와 정규분포

Beta-general 분포의 추가적인 장점은 삼각형 분포를 절단된 정규분포에 근사시킬 때와 같이 절단할 필요가 없다는 것이다. 볼록한 형태를 취하므로 양 끝단의  $a, b$  값을  $\Delta$ 와 일치시키고 평균이  $m$ 이고 정규분포의 대칭성에 의해  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ 로 전환하게 되면 <그림 6>과 같이 정규분포에 근사한 형태의 Beta-general 분포의 표현이 가능해진다.

따라서, 식 (16)의 Beta-general 분포의 확률 밀도함수는 식 (17)과 같이 나타낼 수 있으며 분산은 식 (18)과 같다.

$$f(x) = \frac{[\Delta^2 - (x-m)^2]^{\alpha-1}}{(2\Delta)^{2\alpha-1} B(\alpha, \alpha)} \quad (17)$$

$$\alpha \geq 1$$

$$\begin{aligned} (Max - Min)^2 \times \frac{\alpha^2}{(2\alpha)^2 (2\alpha+1)} \\ = \frac{\Delta^2}{2\alpha+1} \end{aligned} \quad (18)$$

손실함수에 적용하기 위해 식 (1)에 균등분포의 분산 값인  $\Delta^2/3$  대신 식 (18)을 대입하고  $n, \Delta$ 을

기준으로 각각 편미분하여 최적  $n, \Delta$ 를 계산하면  $n$ 은 균등분포, 절단된 정규분포, 절단된 삼각형 분포와 마찬가지로 식 (2)와 동일하고 최적  $\Delta$ 는 식 (19)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dL}{d\Delta} = -\frac{2(\Delta^*)^2 C}{u^* \Delta^3} + \frac{C^*}{u^*} \times \frac{1}{(\Delta^*)^2} \times \frac{1}{2\alpha+1} \times 2\Delta = 0 \\ \Delta = \Delta^* \left( \frac{(2\alpha+1)C}{C^*} \right)^{1/4} \end{aligned} \quad (19)$$

## 4. 실험 및 결과 분석

### 4.1 실험 방법

<표 1>은 각 분포에 따른 분산 및 최적 검사주기  $n$ 과 최적 예방정비 한계  $\Delta$ 를 정리한 내용이다. 최적의  $n$ 을 계산하는 공식은 모든 분포의 경우에 동일하므로 실험을 통해 비교할 필요가 없는 반면 분포별 최적  $\Delta$ 는 각 분포에 따라서 다른 식이 도출되었다.

<표 1> 분포별 분산,  $n, \Delta$

| 구분              | 분산  | $n$                         | $\Delta$   |
|-----------------|---|-----------------------------|--|
| 절단된 정규분포 (최적치)  | $\frac{-2\Delta\sigma^2\phi(\Delta/\sigma)}{\Phi(\Delta/\sigma)-\Phi(-\Delta/\sigma)} + \sigma^2$ | $u^* \sqrt{\frac{2B}{C^*}}$ | -  |
| 균등분포 (다구찌)      | $\frac{\Delta^2}{3}$  | $u^* \sqrt{\frac{2B}{C^*}}$ | $\Delta^* \left( \frac{3C}{C^*} \right)^{1/4}$                         |
| 절단된 삼각형 분포      | $\frac{4\lambda-3}{6(2\lambda-1)} \Delta^2$<br>$h = \lambda\Delta (\lambda \geq 1)$               | $u^* \sqrt{\frac{2B}{C^*}}$ | $\Delta^* \left( \frac{6(2\lambda-1)C}{(4\lambda-3)C^*} \right)^{1/4}$ |
| Beta-general 분포 | $\frac{\Delta^2}{2\alpha+1}$  | $u^* \sqrt{\frac{2B}{C^*}}$ | $\Delta^* \left( \frac{(2\alpha+1)C}{C^*} \right)^{1/4}$               |

이는 각각의 분산이 다른데서 기인하므로 실험 방법은 가장 최적의 분포인 절단된 정규분포를 통해 구해지는 분산값을 계산한 후, 다구찌의 균등

분포와 절단된 삼각형 분포, 그리고 Beta-general 분포에서의 분산을 계산하여 정규분포의 분산에 근접하는 정도를 비교하는 방법을 사용하며, 분석을 위한 실험 데이터는 <표 2>와 같다.

<표 2> 실험 데이터

| $\sigma$    | $\Delta$    | $\Delta/\sigma$ |
|-------------|-------------|-----------------|
| 1           | $0.5\sigma$ | 0.5             |
|             | $1\sigma$   | 1               |
|             | $1.5\sigma$ | 1.5             |
|             | $2\sigma$   | 2               |
|             | $2.5\sigma$ | 2.5             |
|             | $3\sigma$   | 3               |
|             | $3.5\sigma$ | 3.5             |
|             | $4\sigma$   | 4               |
|             | $4.5\sigma$ | 4.5             |
|             | $5\sigma$   | 5               |
|             | $5.5\sigma$ | 5.5             |
|             | $6\sigma$   | 6               |
|             | $6.5\sigma$ | 6.5             |
|             | $7\sigma$   | 7               |
|             | $7.5\sigma$ | 7.5             |
|             | $8\sigma$   | 8               |
| $8.5\sigma$ | 8.5         |                 |
| $9\sigma$   | 9           |                 |
| $9.5\sigma$ | 9.5         |                 |
| $10\sigma$  | 10          |                 |

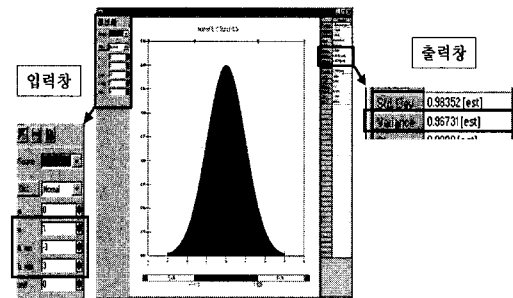
4.2 실험 절차

4.2.1 절단된 정규분포의 분산

절단된 정규분포의 분산은 <표 1>에서 정리한 분산 공식에 대입하면 계산이 가능하고 일반 통계 패키지로도 계산이 가능하다. 본 연구의 목적은 절단된 정규분포의 분산을 계산하는 방법보다는

그 결과값을 바탕으로 최적의 분포를 찾는 것이므로 통계 패키지 'Best Fit Academic Version 4.5.3'을 사용하였다.

<그림 7>은 프로그램을 이용한 분산값 계산방법의 예를 나타낸다.  $\sigma=1, \Delta=3$ 의 경우에 좌측 입력창의  $\sigma$ 에 1을 대입하고, tr. min/max 값에  $\Delta=\pm 3$ 을 대입하면 우측의 출력창에서 분산값이 약 0.97로 나오는 것을 확인할 수 있다.



<그림 7> Best Fit 활용(예)

4.2.2 균등분포의 분산

균등분포의 분산은 <표 1>의  $\Delta^2/3$ 으로 계산이 가능하다. 예를 들어,  $\sigma=1, \Delta=3$ 의 경우에는 분산은  $3^2/3=3$ 이 된다. 균등분포의 분산 값은 추정된  $\Delta$ 만 결정되면 일정한 값으로 계산된다.

4.2.3 절단된 삼각형 분포의 분산

절단된 삼각형 분포의 분산 값은 마찬가지로 <표 1>과 같다. 여기서  $\lambda$ 값은 <그림 4>와 같이 평균이  $m$ 이고 폭이  $2h$ 인 삼각형 분포의 평균에서 확률 밀도함수 값과 평균이  $m$ 이고 분산이  $\sigma^2$ 인 정규분포의 평균에서 확률밀도 값이 일치하는 경우, 두 분포가 거의 일치하는데, 이 사실을 이용하면 식 (20)과 같은 관계를 유도할 수 있다.

$$h = \sigma\sqrt{2\pi}, \quad h = \lambda\Delta$$

$$\therefore \lambda = \frac{\sigma\sqrt{2\pi}}{\Delta} \tag{20}$$

<표 1>의 절단된 삼각형 분포의 분산공식에 식



(20)을 이용하여 계산된  $\lambda$ 값을 대입하면 분산값의 계산이 가능한데, 예를 들어  $\sigma=1, \Delta=1.5$ 의 경우 계산된 분산값은 약 0.59이다.

$$\lambda = \frac{\sigma\sqrt{2\pi}}{\Delta} = \frac{1 \times \sqrt{2\pi}}{1.5} \approx 1.67$$

$$\frac{4\lambda-3}{6(2\lambda-1)} \Delta^2 = \frac{4(1.67)-3}{6\{2(1.67)-1\}} \times 1.5^2 \approx 0.59$$

#### 4.2.4 Beta-general 분포의 분산

<표 1>의 Beta-general 분포의 분산 공식을 사용하면 마찬가지로 계산이 가능하다. 이때 <그림 6>과 같이 평균이  $m$ 인 Beta-general 분포의 평균에서 확률밀도함수 값과 평균이  $m$ 이고 분산이  $\sigma^2$ 이며  $\Delta$ 에 의하여 절단된 정규분포의 평균에서 확률밀도 값이 일치하는 경우, 두 분포가 거의 일치하게 된다. 이러한 특성을 이용하여  $\alpha$ 값을 계산하는 공식을 도출하면 식 (21)과 같다.  $f_{N-tr}(x=m)$ 는 절단된 정규분포이고,  $f_{B-G}(x=m)$ 는 Beta-general 분포를 의미한다.

$$f_{N-tr}(x=m) = f_{B-G}(x=m) \tag{21}$$

$$f_{N-tr}(x=m) = \left[ \sigma\sqrt{2\pi} \times \int_{m-\Delta}^{m+\Delta} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx \right]^{-1}$$

$$f_{B-G}(x=m) = \frac{1}{2^{\alpha-1} \times \Delta \times B(\alpha, \alpha)}$$

$$\alpha \geq 1$$

여기서,  $\Delta$ 는 절단된 삼각형 분포의 계산과 마찬가지로 현행 예방정비 한계  $\Delta_0$ 를 이용하여 근사적으로 구할 수 있다.

식 (21)을 이용한  $\alpha$ 값의 계산방법을 살펴보면 절단된 정규분포 값은  $\Delta/\sigma$ 값을 표준 정규분포표의  $Z$ 값으로 하고 해당되는 값을 확인하면 간단하게 계산이 가능하며, 계산된 값이 Beta-general 분포와 일치하는 경우의  $\alpha$ 값을 구하면 된다.

예를 들어,  $\sigma=1, \Delta=3$ 인 경우  $\Delta/\sigma=Z=3$ 일 때 0.9974이므로(여기서 0.9974는 1에 가까운 수 이므로 생략해도 무관함), 이를 계산하여 절단된 정규분포 값을 구하면 0.4의 값이 나오게 된다. 이 값은 Beta-general 분포 값과 같으므로,  $\alpha \approx 4.745$ 의 값이 나오게 되며 이 값을 분산공식에 대입하면 약 0.86이 나오게 된다.

$$f_{N-tr}(x=m) = \left[ \sigma\sqrt{2\pi} \times \int_{m-\Delta}^{m+\Delta} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx \right]^{-1}$$

$$= [1 \times \sqrt{2\pi} \times 0.9974]^{-1} \approx 0.4$$

$$f_{B-G}(x=m) = \frac{1}{2^{2\alpha-1} \times 3 \times B(\alpha, \alpha)} = 0.4$$

$$\alpha \approx 4.745$$

$$\frac{\Delta^2}{2\alpha+1} = \frac{3^2}{2 \times 4.745 + 1} \approx 0.86$$

#### 4.3 실험 결과 및 분석

4.2절에서 계산된 각 확률분포별 분산 값을 비교하기 위해 계산결과를 정리하면 <표 3>과 같다.

Beta-general 분포와 절단된 삼각형 분포의 분산은 정규분포 산포와의 오차가 유사한 수준으로 시작되나,  $\Delta/\sigma$  값이 증가 할수록 절단된 삼각형 분포는 정규분포와의 오차가 점점 증가함을 알 수 있으며,  $\Delta/\sigma$  값이 2.5를 초과하면 적절한 품질산포의 계산이 불가능한데, 예를 들어  $\sigma=1, \Delta=3$ 의 경우의 분산 값을 계산해 보면 계산된 분산 값은 약 0.76이 나오게 된다.

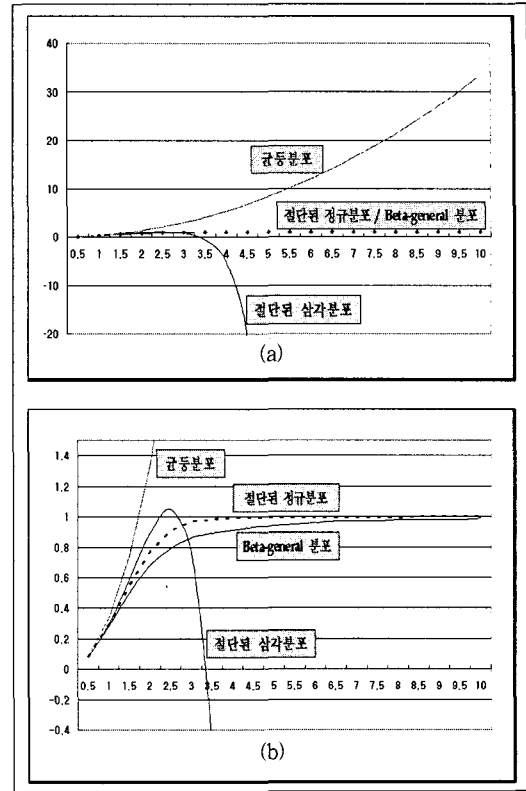
$$\lambda = \frac{\sigma\sqrt{2\pi}}{\Delta} = \frac{1 \times \sqrt{2\pi}}{3} \approx 0.84$$

$$\frac{4\lambda-3}{6(2\lambda-1)} \Delta^2 = \frac{4(0.835)-3}{6\{2(0.835)-1\}} \times 3^2 \approx 0.76$$

그러나, <표 1>의 절단된 삼각형 분포의 분산 공식은  $\lambda \geq 1$ 이어야 성립. 하므로 가정에 위배되는 값이 되어 수용할 수 없게 된다. 이러한 현상은

<표 3> 확률분포별 분산값 비교결과

| $\sigma$ | $\Delta$     | $\Delta/\sigma$ | 분산값            |            |            |                 |
|----------|--------------|-----------------|----------------|------------|------------|-----------------|
|          |              |                 | 절단된 정규분포 (최적해) | 균등분포 (다구찌) | 절단된 삼각형 분포 | Beta-general 분포 |
| 1        | 0.5 $\sigma$ | 0.5             | 0.08           | 0.08       | 0.08       | 0.08            |
|          | 1 $\sigma$   | 1               | 0.29           | 0.33       | 0.29       | 0.28            |
|          | 1.5 $\sigma$ | 1.5             | 0.55           | 0.75       | 0.59       | 0.50            |
|          | 2 $\sigma$   | 2               | 0.77           | 1.33       | 0.89       | 0.68            |
|          | 2.5 $\sigma$ | 2.5             | 0.91           | 2.08       | 1.05       | 0.79            |
|          | 3 $\sigma$   | 3               | 0.97           | 3.00       | 0.76       | 0.86            |
|          | 3.5 $\sigma$ | 3.5             | 0.98           | 4.08       | -0.64      | 0.89            |
|          | 4 $\sigma$   | 4               | 0.99           | 5.33       | -5.19      | 0.91            |
|          | 4.5 $\sigma$ | 4.5             | 0.99           | 6.75       | -22.84     | 0.93            |
|          | 5 $\sigma$   | 5               | 0.99           | 8.33       | -1563.28   | 0.94            |
|          | 5.5 $\sigma$ | 5.5             | 0.99           | 10.08      | 67.05      | 0.95            |
|          | 6 $\sigma$   | 6               | 0.99           | 12.00      | 48.48      | 0.96            |
|          | 6.5 $\sigma$ | 6.5             | 0.99           | 14.08      | 44.87      | 0.97            |
|          | 7 $\sigma$   | 7               | 0.99           | 16.33      | 45.11      | 0.97            |
|          | 7.5 $\sigma$ | 7.5             | 0.99           | 18.75      | 47.02      | 0.97            |
|          | 8 $\sigma$   | 8               | 0.99           | 21.33      | 49.90      | 0.98            |
|          | 8.5 $\sigma$ | 8.5             | 1.00           | 24.08      | 53.44      | 0.98            |
|          | 9 $\sigma$   | 9               | 1.00           | 27.00      | 57.48      | 0.98            |
|          | 9.5 $\sigma$ | 9.5             | 1.00           | 30.08      | 61.93      | 0.98            |
|          | 10 $\sigma$  | 10              | 1.00           | 33.33      | 66.76      | 0.99            |



<그림 8> 정규분포와의 분산비교( $\sigma^2 = 1$ )

$\Delta/\sigma$  값이 증가 할수록 증가하게 되며, 이러한 사실로서 절단된 삼각형 분포가 특정영역 내에서는 균등분포에 비해서 정규분포에 근사하는 값을 구하는 것이 가능하나, 계산 가능영역을 초과하는  $\lambda < 1$ 의 단계에 이르러서는 계산이 불가능하다는 것을 알 수 있다.

반면, Beta-general 분포는 2.5 $\sigma$ 를 초과하여도 정규분포와 근접한 분산값을 보이고 있으며,  $\Delta/\sigma$  값이 증가 할수록 점점 더 정규분포의 분산값과 가까워짐을 알 수 있다.

<그림 8>은 각 분포별 분산값 <표 3>을 그래프로 나타내어 비교한 것이다. (a)에서 보는 것과 같이 균등분포는  $\Delta$ 값의 증가에 따라 편차가 큰 쪽으로 증가하는 것을 볼 수가 있으며, 절단된 삼각형 분포는 비교적 유사하게 절단된 정규분포와 근사하다가,  $\Delta$ 값의 증가가 진행되면 급격하게 비

정상적인 수치를 보여 오히려 균등분포 보다 적절한 분산값을 얻지 못한다. 반면 Beta-general 분포는 정규분포와 거의 유사한 분산값을 보이고 있다.

이를 더 자세히 관찰하기 위해 확대한 <그림 8>의 (b)를 살펴보면, 절단된 삼각형 분포는  $\Delta$ 값이 2.5 까지는 유효한 값을 가지나 그 이후는 계산이 불가능한 영역인데 반해, Beta-general 분포는 초기에는 정규분포와의 분산값의 차이가 절단된 삼각형 분포의 그것과 비슷하나  $\Delta$ 값이 증가 할수록 정규분포에 점점 더 가까워지는 모습을 볼 수 있다.

따라서 Beta-general 분포가 기존에 연구된 분포에 비해 정규분포에 좀 더 근사하며  $\Delta/\sigma$ 가 어떤 값일지라도 계산이 가능하다는 것을 알 수가 있다.

4.4 수치예제

수치예제는 Taguchi et al.[12]의 최적 예방정비주기와 김지훈 등[2]의 피드백 제어시스템에 관련된 수치예제를 다룬다.

4.4.1 Taguchi et al.[12]

원자력 발전소 냉각시설의 적정수온 유지를 위한 편차는 상/하한 각각 150°C(Δ\*)을 넘지 않아야 한다. 만일, 적정수온을 유지하지 못하면 300억원(C\*)의 손해를 본다. 현재, 실시중인 예방정비를 통한 조치한계는 평균 20°C(Δ<sub>0</sub>)이고, 현행 예방정비 간격은 15일 즉, 360시간(u<sub>0</sub>)마다 한번이며 예방정비 비용은 평균 40만원(C)이 필요하다. 현재의 온도측정 간격은 8시간(n<sub>0</sub>)마다 한 번씩 하고 있으며, 이때의 측정비용은 6천원(B)이 든다.

현재까지의 온도산포를 분석한 결과, 추정된 표준편차 σ는 약 10°C가 산출되었다. 그렇다면,

- (가) 최적의 온도측정 간격은 몇 시간(n) 마다 한 번씩 하는 것이 적절한가?
- (나) 측정결과에 따라 시설을 정비하기 위한 최적 편차한계는 몇°C(Δ)인가?
- (다) σ값이 약 6°C, 5°C, 4°C인 경우 (나)는 각각 어떻게 산출되는가?

(가)를 계산하기 위한 공식은 <표 4-1>의 최적 n을 구하기 위한 공식으로 계산이 가능하다. 계산 과정은 아래와 같고 n ≈ 12.8시간, 즉 하루에 2번 정도가 적절하다.

$$u^* \sqrt{\frac{2B}{C^*}} = u_0 \times \frac{(\Delta^*)^2}{(\Delta_0)^2} \times \sqrt{\frac{2B}{C^*}} \approx 12.8 \text{시간}$$

(나)번은 각 분포별로 값이 다르다. 먼저 다구찌의 계산방법인 균등분포의 경우는, 약 11.9°C이다.

$$\Delta = \Delta^* \left( \frac{3C}{C^*} \right)^{1/4} \approx 11.9$$

이를 절단된 삼각형 분포로 풀면, 13.2°C이다.

$$\lambda = \frac{\sigma}{\Delta} \sqrt{2\pi} \approx 1.25$$

$$\Delta = \Delta^* \left( \frac{6(2\lambda - 1)C}{(4\lambda - 3)C^*} \right)^{1/4} \approx 13.2$$

Beta-general 분포로 계산한 결과는 14.1°C이다.

$$\alpha \approx 2.43$$

$$\Delta = \Delta^* \left( \frac{(2\alpha + 1)C}{C^*} \right)^{1/4} \approx 14/1$$

절단된 정규분포에 의한 계산은 <그림 7>의 통계 패키지를 활용해 계산할 수 있다. 계산결과 Δ는 13.7701 ≈ 13.8°C이다. 그러므로 (나)의 경우는 Beta-general 분포가 절단된 삼각형 분포보다 정규분포를 이용한 계산결과에 약간은 더 근접하고 있음을 알 수 있다.

(다)의 경우는 (나)번의 σ가 10°C인 경우 계산한 결과를 6°C, 5°C, 4°C로 바꾸어 계산하면 된다. 이를 계산한 결과는 <표 4>와 같다.

<표 4> 수치예제 (다)번 계산결과

| 구분              | σ = 6°C | σ = 5°C | σ = 4°C |
|-----------------|---------|---------|---------|
| 절단된 정규 분포       | 16.7    | 18.2    | 20      |
| Beta-general 분포 | 17.0    | 18.5    | 20      |
| 절단된 삼각 분포       | 40.5    | X       | X       |
| 균등 분포           | 11.9    | 11.9    | 11.9    |

<표 4>에서 알 수 있듯이 균등분포의 경우는 추정된 σ값과 상관없이 11.9°C에서 예방정비를 하는 것이 적절하다. 반면, Beta-general 분포는 절단된 정규분포에 비교적 근접하여 최적 예방정비 한계가 계산되며, σ값이 감소하여 Δ/σ의 비율이

증가할수록 정규분포에 점점 더 가까워지는 것을 볼 수 있다. 특이할 점은 절단된 삼각형 분포의 경우는 최적 예방정비한계  $\Delta$ 의 계산이 불가능하다는 것이다.  $\sigma = 6^\circ\text{C}$ 인 경우,  $\lambda \approx 0.75 < 1$ 이 되어 가정에 위배되며, 최적  $\Delta$ 값을 계산한 결과도 약  $40.5^\circ\text{C}$ 로 정상적인 해와는 거리가 먼 오류가 발생한다.

$$\lambda = \frac{\sigma}{\Delta} \sqrt{2\pi} = \frac{6}{20} \times \sqrt{2\pi} \approx 0.7519 < 1$$

$$\Delta = \Delta^* \left( \frac{6(2\lambda - 1)C^{1/4}}{(4\lambda - 3)C^*} \right) \approx 40.5$$

( $\because 4(0.7519) - 3 \approx 0.003$ )

$\sigma = 5^\circ\text{C}, 4^\circ\text{C}$ 의 경우에도 적절한 해가 도출되지 않는 것은 마찬가지이다. 마찬가지로  $\lambda$ 가 1보다 작은 해가 나오게 되고, 이를 공식에 대입하면  $\sqrt{\quad}$ 안의 값이 음수가 되어 계산 자체가 불가능하다.

$$\lambda = \frac{\sigma}{\Delta} \sqrt{2\pi} = \frac{5}{20} \times \sqrt{2\pi} \approx 0.6267 < 1$$

$$\Delta = \Delta^* \left( \frac{6(2\lambda - 1)C^{1/4}}{(4\lambda - 3)C^*} \right) = \emptyset$$

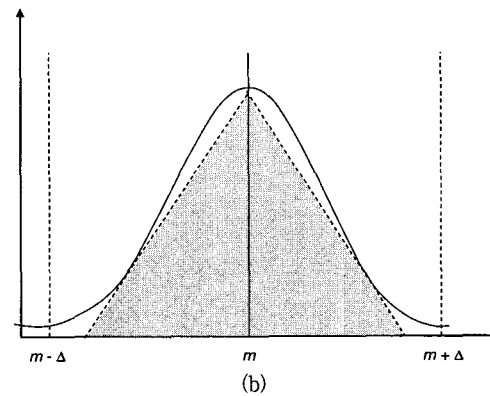
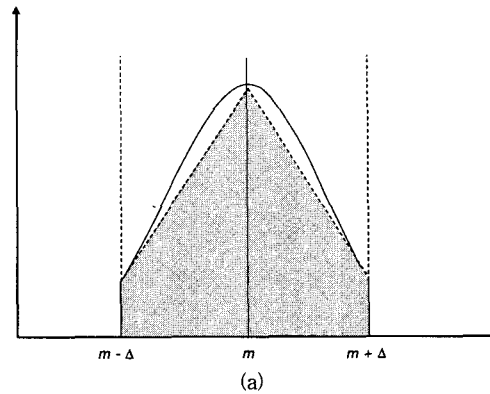
( $\because 4(0.6267) - 3 \approx -0.49$ )

$$\lambda = \frac{\sigma}{\Delta} \sqrt{2\pi} = \frac{4}{20} \times \sqrt{2\pi} \approx 0.5013 < 1$$

$$\Delta = \Delta^* \left( \frac{6(2\lambda - 1)C^{1/4}}{(4\lambda - 3)C^*} \right) = \emptyset$$

( $\because 4(0.5013) - 3 \approx -0.99$ )

이러한 오류가 발생하는 이유는 최초 절단된 삼각형 분포를 이용한 계산을 위해 <그림 9>의 (a)와 같이 양 끝단을  $\Delta$ 의 값으로 절단한 식을 도출하였으나, (b)와 같이  $\Delta$ 값이  $\sigma\sqrt{2\pi}$  값을 초과할 경우 절단된 정규분포에 근사하지 못하기 때문이다. 반면, Beta-general 분포는 절단하지 않고 양 끝이  $m \pm \Delta$ 이므로 오류가 발생하지 않고 정규분포에 근사하게 된다.



<그림 9> 절단된 삼각형 분포의 오류원인

#### 4.4.2 피드백 제어 시스템[2]

어떤 부품치수의 변수 값들은 다음과 같다.

제품의 규격( $\Delta_0$ ) :  $m \pm 15\mu\text{m}$

불합격의 손실( $A_0$ ) : 80원

계측비용(B) : 150원

조정비용(C) : 1200원

현행 계측간격( $n_0$ ) : 600개

현행 평균 조정간격( $u_0$ ) : 1200개

현행 조정 한계( $D_0$ ) :  $5\mu\text{m}$

계측시의 타임래그( $t$ ) : 1개

표준편차의 추정값( $\sigma$ ) :  $4\mu\text{m}$

이 부품의 최적의 최적 계측간격  $n$ 과 최적 조정 한계  $D$ 를 구하라.

(정규분포를 따를 때  $D = 4.2\mu\text{m}$ )

앞서 언급한 예방정비 함수와는 다르나, 다구찌의 피드백 제어 시스템 공식으로 계산이 가능하며 예방정비 함수와 분산값을 구하는 방법은 동일하다. 피드백 제어시스템에서의 분포별 분산 및 최적  $n$ ,  $D$ 를 구하는 공식은 <표 5>와 같다.

<표 5> 분산,  $n$ ,  $D$ (피드백 제어 시스템)

| 구분                  | 분산   | $n$   | $D$   |
|---------------------|--|---|---|
| 균등분포<br>(다구찌)       | $\frac{D^2}{3}$  | $\frac{\Delta_0}{D_0} \times \sqrt{\frac{2u_0 B}{A_0}}$ | $\left(\frac{3C}{A_0} \times \frac{D_0^2}{u_0} \times \Delta_0^2\right)^{1/4}$  |
| 절단된 삼각형 분포<br>(김지훈) | $\frac{4\lambda-3}{6(2\lambda-1)} D^2$<br>$h = \lambda D (\lambda \geq 1)$ | $\frac{\Delta_0}{D_0} \times \sqrt{\frac{2u_0 B}{A_0}}$ | $\left(\frac{6(2\lambda-1)}{4\lambda-3} \times \frac{C}{A_0} \times \frac{D_0^2}{u_0} \times \Delta_0^2\right)^{1/4}$ |
| Beta-general 분포     | $\frac{D^2}{2\alpha+1}$  | $\frac{\Delta_0}{D_0} \times \sqrt{\frac{2u_0 B}{A_0}}$ | $\left((2\alpha+1) \times \frac{C}{A_0} \times \frac{D_0^2}{u_0} \times \Delta_0^2\right)^{1/4}$                      |

먼저 최적  $n$ 은 분포에 상관없이 동일한 값이 나온다. 계산해 보면, 최적  $n$ 은 201개 이다.

$$n = \frac{A_0}{D_0} \times \sqrt{\frac{2u_0 B}{A_0}} \approx 201$$

다음으로 최적  $D$ 는 균등분포의 경우에는 추정된 편차와 관련이 없으므로 모든 편차의 경우에  $3.8\mu\text{m}$ 로 동일하게 계산된다.

$$D = \left(\frac{3C}{A_0} \times \frac{D_0^2}{u_0} \times \Delta_0^2\right)^{1/4} \approx 3.8$$

그러나, 절단된 삼각형 분포와 Beta-general 분포에서는 최적  $D$ 가  $\sigma$ 에 따라서 달라진다. 먼저 절단된 삼각형 분포를 구하면  $4.0\mu\text{m}$ 이 구해진다.

$$\Delta = \left(\frac{6(2\lambda-1)}{4\lambda-3} \times \frac{C}{A_0} \times \frac{D_0^2}{u_0} \times \Delta_0^2\right)^{1/4} \approx 4.0$$

Beta-general 분포를 이용하여 계산하면  $4.09 \approx 4.1\mu\text{m}$ 이며 절단된 정규분포의 최적  $D$ 값인  $4.2\mu\text{m}$ 에 가장 근접한 값이다.

$$D = \left((2\alpha+1) \times \frac{C}{A_0} \times \frac{D_0^2}{u_0} \times \Delta_0^2\right)^{1/4} \approx 4.1$$

이처럼, Beta-general 분포는 다구찌의 피드백 제어 시스템에 적용시킬 시에도 손쉽게 정규분포에 근사한 최적의 해를 구할 수 있으며 절단된 삼각형 분포보다 정규분포에 근접함을 알 수 있다.

## 5. 결론 및 향후 연구방향

다구찌는 예방정비주기를 계산하는 과정에서 품질산포에 대한 기대손실을 유도할 때 예방정비 한계 내에서의 제품의 특성 값이 균등분포를 따른다고 가정하였으며, 이러한 가정은 다구찌의 피드백 제어 시스템에서도 동일하게 적용하였다. 그러나 생산라인에서의 제품의 특성 값은 균등분포 보다는 정규분포를 따른다고 가정하는 것이 타당하기 때문에, 기존의 연구는 정규분포에 비교적 가까운 삼각형 분포를 가정함으로써 피드백 제어시스템의 계측간격과 조정한계의 최적 값을 단힌 형태로 계산하였다. 실제로, 품질산포를 비교한 결과 절단된 삼각형 분포의 기대손실이 균등분포 보다는 훨씬 정밀함을 알 수가 있다.

그러나, 절단된 삼각형 분포는  $\lambda \geq 1$ 이라는 가정 하에 출발하였으므로, 이것이 위배되는  $2.5\sigma$ 를 초과하는 경우에는 적절한 산포의 계산이 불가능하고 최적 예방정비한계를 구하지 못한다. 반면, 본 연구에서 제시한 Beta-general 분포는 삼각형 분포 보다는 안정적으로 정규분포에 근사함을 알 수 있으며,  $2.5\sigma$ 를 초과할 시에도 계산이 가능한 것을 확인할 수 있다.

실제 현장에서 획득되는 데이터가 완전히 정규분포를 따른다고 가정 할 수는 없다[7]. 왜냐하면, 모든 기계나 설비는 오차와 우연적 환경에 의해 좌우되기 때문이다. 그러나 장기간에 걸쳐 획득되는 데이터는 현재 알려진 확률분포 중 어떤 것에 가장 가까울지 분석이 가능할 것이며, 이러한 자

료가 축적된다면 현재보다 정확한 계산 및 예측이 가능하리라 기대된다. 만약, 이러한 데이터가 현재 존재하는 어떤 분포도 따르지 않는다면, 커널(kernel)함수 등을 이용한 비 모수적 접근방법도 가능하리라 여겨진다. 이러한 연구가 이루어지기 위해서는 현장의 품질 데이터를 부단히 수집하여 이를 분석하는 활동이 필요하다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김기영, 「품질경영」, 박영사, 1999.
- [2] 김지훈, 정해성, 김재주, “다구찌의 피드백 제어 시스템에 관한 연구”, 품질경영학회지, 제26권, 제3호, 1998.
- [3] 김태용, 「품질경영의 이해」, 신영사, 2004.
- [4] 박경수, 「신뢰도 공학 및 정비이론」, 희중당, 1978.
- [5] 박성현, 「품질공학」, 민영사, 2000.
- [6] 박영택, 「품질경영의 기본사상」, 품질경영연구, 1993.
- [7] 이상복, “다구찌의 품질 손실함수에 대한 분석”, 품질경영학회지, 제25권, 제3호(1997).
- [8] 이상복, “다구찌 기법을 이용한 2개부품 이상의 허용차 설계에 관한 연구”, 대한산업공학회 추계학술대회논문집, 2005.
- [9] Besterfield Dale H., Carol Besterfield-Michna, Glen H., *Total Quality Management*, Prentice Hall, 1995.
- [10] Chan W.M., Ibrahim R.N., “Evaluation the Quality Level of a Product with Multiple Quality Characteristics,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004.
- [11] Disney, J. and Bendell, A., “The potential for the Application of Taguchi Methods for Quality Control in British Industry,” Chapter 13 of *Total Quality : An Executive Guide for the 1990s*, edited by the Ernst & Young Quality Improvement Consulting Group, Dow Jones-Irwin, 1990.
- [12] Genichi Taguchi, Elsayed A. Elsayed, Thomas Hsiang, *Quality Engineering in Production Systems*, McGraw-Hill, 1989.
- [13] Kailash Chander Kapur, Lamberson, *Reliability in Engineering Design*, John Wiley & Sons, 1977.
- [14] Samar K. Mukhopadhyay, Debopam Chkraborty, “Optimal Process Variance under Taguchi Loss,” *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol.12 No.9, 1995.
- [15] Sinha, M.N., Willborn, W.O., *The Management of Quality Assurance*, John Wiley & Sons, 1985.