

계측기오차 보상을 위한 압축한계 설정에 관한 연구

Research of Determining the Compressed Gauge Limit Compensating for Gauge Error

이 종 성* 고 승 호**
Lee, Jong-Seong Ko, Sung-Ho

Abstract

When testing products before shipment to the customer, quality characteristics are measured to decide whether or not their values are between the specification limits. Unfortunately, this testing procedure can lead to incorrect decisions because of gauge error. That is, good products can erroneously be qualified as bad, and bad products as good, and this has consequences for producer's and consumer's risk. In cases of such as this, the compressed gauge limit can be used to achieve the desired product quality level dictated by the manufacturer or the customer. A compressed gauge limit is a limit set by the manufacturer on a test gauge that is tighter than the specification limit established by the customer. The compressed gauge limits should be set at levels to achieve the defect levels desired by the customer and simultaneously minimize the loss of good product that is rejected due to errors in the gauges. In this article, the models for determining the defect levels and the losses obtained by adding compressed gauge limits will be developed. A response surface model approach is utilized which allows an optimal operating condition to be generated relatively easily.

키워드 : 측정시스템 분석, 계측기 오차, 압축한계, 반응표면분석

Keywords : *Measurement system, Gauge error, Compressed gauge limit, Response surface methodology*

1. 서론

제품을 제조하는 공정에서 각 공정마다 또는 공정 전체를 통해 많은 계측 검사가 행해지고 검사 결과에 따라 불량과 양품이 결정된다. 보통의 경우 계측기의 오차는 없다는 가정 하에 검사가 행해지지만, 분명 계측기 오차는 존재하며 이것이 출하 제품의 품질에 많은 영향을 미치게 된다. 특히 반도체와 의류기기를 생산하는 제조업체의 경우 작은 단위의 불량률도 고객과 회사 모두에 큰 손실을 미칠 수 있기 때문에 중요하게 인식되는 부분이다. 일반적으로 한 품질특성의 총 분산

(σ_{total}^2)은 제품 자체의 품질 산포로 인한 분산($\sigma_{product}^2$)과 계측기의 오차로 인한 분산(σ_{gauge}^2)으로 나타낼 수 있으며[3,4], 계측기의 정확도와 정밀도 분석을 통해 계측기 오차의 분산을 알 수 있다면 계측작업에 수반되는 생산자 위험(양품을 불량품으로 오판하는 확률)과 소비자 위험(불량품을 양품으로 오판하는 확률)을 추정할 수 있다.[1,2]

본 논문에서는 이미 계측기 성능분석(gauge capability study)이 수행되어 계측기의 오차분산을 알고 있다는 가정 하에서, 계측기의 오차에 의해 불량품을 양품으로 판정하여 고객에게 출하되는 불량수준(defect level)과 양품을 불량품으로 판정하여 발생하는 손실(gauge loss)을 동시에 줄일 수 있는 한 방법으로 계측을 위한 가상적 규격인 압축한계의 최적 설정 방법을 연구하였다.

* 강원대학교 산업공학과 교수, 공학박사

** (주)이화다이아몬드공업

압축한계의 값을 여러 가지로 변경시키면서 계측기 오차로 인한 불량수준과 손실을 계산하는 데에는 많은 어려움이 있다[1].

본 논문에서는 압축한계의 변화에 따른 불량수준과 손실의 관계식을 2차 회귀모형으로 표현하고, 중심합성법에 의해 실험점을 선택함으로써 적은 회수의 실험으로 적절한 반응표면을 추정할 수 있었다.[5,7]

또한 desirability function[6]을 이용하여 서로 상충적인 관계에 있는 두 반응치, 불량수준과 손실을 하나의 반응치로 통합하여, 요구되는 생산자 위험과 소비자 위험을 만족시키면서 desirability function의 값을 최대로 하는 최적의 압축한계를 설정할 수 있도록 하였다.

2. 불량수준과 손실에 대한 기본모형

제품의 품질 특성치가 연속적인 분포 $f(x)$ 이고 규격하한(LSL)과 규격상한(USL)이 모두 있다. 계측기 오차는 연속적인 분포 $g_L(x)$ 과 $g_U(x)$ 이다. 분포는 모두 정규분포이고 USL과 LSL에서의 측정은 서로 독립이라고 가정한다. 품질 특성치 x_i (또는 x'_i)를 갖는 제품이 계측기 측정의 해 양품으로 판정될 확률은 다음과 같다.

$$P(\text{양품/불량}) = \int_{LSL}^{\infty} g_L(x) dx + \int_{-\infty}^{USL} g_U(x) dx \quad (1)$$

그림 1은 이들의 관계를 나타내며 여기서 확률A와 확률B는 동시에 나타날 수 없다.

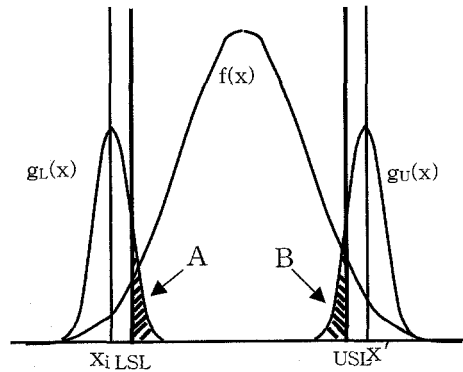


그림 1. 계측기 오차에 의해 불량품이 양품으로 판정되는 확률

계측기 오차가 정규분포이므로,
 $P(\text{양품/불량})$

$$= \int_{LSL}^{\infty} g_L(x) dx + \int_{-\infty}^{USL} g_U(x) dx$$

$$= \int_{-\infty}^{x_i} g'_L(x) dx + \int_{x'_i}^{\infty} g'_U(x) dx \quad (2)$$

여기서,
 $g_L(x) \sim N(x_i, \sigma_{g_L}), \quad g_U(x) \sim N(x'_i, \sigma_{g_U}),$
 $g'_L(x) \sim N(LSL, \sigma_{g_L}), \quad g'_U(x) \sim N(USL, \sigma_{g_U})$
 이며, $g(x)$ 을 $g'(x)$ 로 바꾸어 줌으로써 계산을 더 쉽게 할 수 있다.

그림 2는 규격을 벗어난 제품이 dx 만큼 변화할 때 불량품을 양품으로 오판하는 확률이 A, B가 됨을 나타낸 것이다. 식 (3)은 그림 2를 식으로 표현한 것이다.

$$P(\text{양품/불량}) = \int_{-\infty}^{LSL} (f(z) \int_{-\infty}^z g'_L(y) dy) dz$$

$$+ \int_{USL}^{\infty} (f(z) \int_z^{\infty} g'_U(y) dy) dz \quad (3)$$

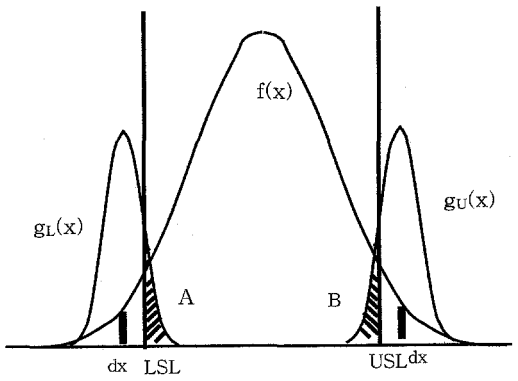


그림 2. 품질특성치 변화에 따른 불량수준

계측기 오차로 인해 불량품이 양품으로 합격되는 경우와 같이 양품이 불량품으로 판정되어 폐기되는 계이지 손실도 같은 방식으로 구할 수 있다.

$$P(\text{불량/양품})$$

$$= \int_{-\infty}^{LSL} g_L(x) dx + \int_{USL}^{\infty} g_U(x) dx$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} g'_L(x) dx + \int_{-\infty}^{x'_i} g'_U(x) dx$$

$$= \int_{LSL}^{\infty} (f(z) \int_z^{\infty} g'_L(y) dy) dz$$

$$+ \int_{-\infty}^{USL} (f(z) \int_{-\infty}^z g'_U(y) dy) dz \quad (4)$$

2.1 압축한계가 설정된 측정 시스템

2.1.1 단일 계측 시스템

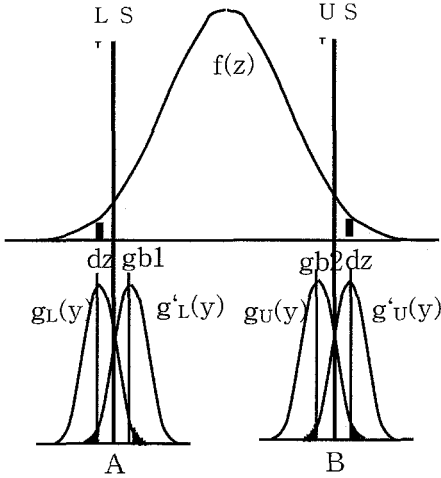


그림 3. 단일 계측기에 의한 불량수준

압축한계가 설정된 한 개의 계측기를 사용하는 시스템에서의 불량수준은 양품으로 판정되는 확률과 dz 에서의 불합격 판정확률을 곱하여 LSL 혹은 USL까지 적분하면 계산할 수 있다.

$$P(\text{양품/불량}) = \int_{-\infty}^{LSL} (f(z) \int_{-\infty}^z g'_L(y) dy) dz + \int_{USL}^{\infty} (f(z) \int_z^{\infty} g'_U(y) dy) dz \quad (5)$$

여기서,

$$g'_L(y) \sim N(gb1, \sigma_{g_L}), \quad g'_U(y) \sim N(gb2, \sigma_{g_U})$$

이다.

계측기 오차에 의한 손실도 비슷한 방법으로 구할 수 있다.

$$P(\text{불량/양품}) = \int_{LSL}^{\infty} (f(z) \int_z^{\infty} g'_L(y) dy) dz + \int_{-\infty}^{USL} (f(z) \int_{-\infty}^z g'_U(y) dy) dz \quad (6)$$

2.1.2 다수의 계측기를 갖는 시스템

여러 개의 계측기를 갖는 시스템은 계측기 손실을 특정 수준으로 유지시키면서 고객에게 출하

되는 불량수준을 줄이기 위해 사용 되어진다.

두 개의 계측기를 갖는 경우,

$$P(\text{양품/불량}) = \int_{-\infty}^{LSL} (f(z) \int_{-\infty}^z g'_{L1}(w) dw \int_{-\infty}^z g'_{L2}(x) dx) dz + \int_{USL}^{\infty} (f(z) \int_z^{\infty} g'_{U1}(w) dw \int_z^{\infty} g'_{U2}(x) dx) dz \quad (7)$$

3개 이상의 경우도 위 식(7)의 연장선에서 확장시킬 수 있다. 여러 개의 계측기를 갖는 경우 계측기 손실은 약간 복잡하다. 2개의 계측기를 갖는 것을 가정할 때, 첫 번째 계측기에 의해 양품이 제거되기 때문에 두 번째 계측기는 처음과 다른 확률분포를 나타내기 때문이다.

P (규격한계의 각 첫 번째 게이지가 불합격 판정/양품)

$$= \int_{LSL}^{\infty} (f(z) \int_z^{\infty} g'_{L1}(w) dw) dz + \int_{-\infty}^{USL} (f(z) \int_{-\infty}^z g'_{U1}(w) dw) dz \quad (8)$$

(8)

P (남아있는 양품)

$$= \int_{LSL}^{\infty} (f(z) - f(z) \int_z^{\infty} g'_{L1}(w) dw) dz + \int_{-\infty}^{USL} (f(z) - f(z) \int_{-\infty}^z g'_{U1}(w) dw) dz = \int_{LSL}^{\infty} f(z) \left(\int_{-\infty}^z g'_{L1}(w) dw \right) dz + \int_{-\infty}^{USL} f(z) \left(\int_z^{\infty} g'_{U1}(w) dw \right) dz \quad (9)$$

P (각 규격한계의 두 번째 게이지가 불합격 판정/ 양품)

$$= \int_{LSL}^{\infty} f(z) \left(\int_{-\infty}^z g'_{L1}(w) dw \right) \left(\int_z^{\infty} g'_{L2}(x) dx \right) dz + \int_{-\infty}^{USL} f(z) \left(\int_z^{\infty} g'_{U1}(w) dw \right) \left(\int_{-\infty}^z g'_{U2}(x) dx \right) dz \quad (10)$$

계측기가 두 개인 시스템의 총 손실은 각각의 계측기1과 계측기2에 대한 손실의 합으로 구할 수 있다.

P (각 2개의 게이지들이 불합격 판정/ 양품)

$$= \int_{LSL}^{\infty} (f(z) \int_z^{\infty} g'_{L1}(w) dw) dz$$

$$\begin{aligned}
 & + \int_{-\infty}^{USL} f(z) \left(\int_{-\infty}^z g'_{U1}(w) dw \right) dz \\
 & + \int_{LSL}^{\infty} f(z) \left(\int_{-\infty}^z g'_{L1}(w) dw \right) \left(\int_z^{\infty} g'_{L2}(x) dx \right) dz \\
 & + \int_{-\infty}^{USL} f(z) \left(\int_z^{\infty} g'_{U1}(w) dw \right) \left(\int_{-\infty}^z g'_{U2}(x) dx \right) dz
 \end{aligned}$$

위의 식은 다음과 같이 간단히 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & P(\text{각 2개의 게이지들이 불합격 판정/ 양품}) \\
 & = \int_{LSL}^{\infty} f(z) \left(1 - \int_{-\infty}^z g'_{L1}(w) dw \int_{-\infty}^z g'_{L2}(x) dx \right) dz \\
 & + \int_{-\infty}^{USL} f(z) \left(1 - \int_z^{\infty} g'_{U1}(w) dw \int_z^{\infty} g'_{U2}(x) dx \right) dz \quad (11)
 \end{aligned}$$

3개 이상의 게이지의 경우도 위와 같은 방법으로 확장시켜 나갈 수 있다.

3. 반응표면분석

지정된 불량수준(식 (7))을 만족시키면서 최소의 계측기 손실(식 (11))을 갖는 최적의 계측기 압축한계를 찾는 것은 쉽지 않다. 여기서는 반응표면분석을 이용하여 최적 압축한계의 설정 방법을 실제 데이터의 적용사례를 통해 보이고자 한다.

본 예제에서 사용된 데이터는 참고문헌[1]의 데이터로부터 대칭적으로 변화시켜 얻은 가상의 데이터로써, 제품 품질특성치의 평균은 500, 표준편차는 100이고 USL=650, LSL=350이다.

출하 직전에 제품을 오차분포가 다른 두 계측기로 연속 2회 검사하며, 계측기 성능분석이 수행되어 각각의 오차분포를 알고 있다고 가정한다. 품질특성과 계측기 오차의 분포는 표 1.과 같다. 표에서 GB는 설정된 압축한계를 의미한다.

표 1. 품질특성과 계측기 분포

	제품	게이지1	게이지2	게이지3	게이지4
분포	정규	정규	정규	정규	정규
평균	500	GB1	GB2	GB3	GB4
표준편차	100	30	20	30	20

불량수준과 계측기 손실의 반응표면 모델은 제품군 변환의 2차 회귀모형을 사용하였다. 불량

수준과 손실을 최소화 하기 위한 중심합성 실험 계획에서 선택된 각 실험점의 인자 수준은 표 2.와 같다.

표 2. 양쪽 규격의 중심합성계획

요인	-2	-1	0	1	2
GB1	595	610	625	640	655
GB2	595	610	625	640	655
GB3	345	360	375	390	405
GB4	345	360	375	390	405

데이터 분석은 Design-Expert[8]를 이용하였다. 각 수준에 대한 불량수준과 손실은 식(7)과 (11)을 MatLab에서 제공하는 수치적분을 이용하여 계산하였다. 계산된 확률값은 표 3.과 같다.

표 3. 불량수준과 손실의 확률값 (단위: ppm)

	GB1	GB2	GB4	GB3	불량수준	손실
1	610	610	360	360	1200.00	151800
2	640	610	360	360	1200.00	126200
3	610	640	360	360	1400.00	129800
4	640	640	360	360	2300.00	87800
5	610	610	390	360	72.168	190200
6	640	610	390	360	118.54	164700
7	610	640	390	360	302.36	168300
8	640	640	390	360	1200.00	126200
9	610	610	360	390	255.99	193800
10	640	610	360	390	302.36	168300
11	610	640	360	390	486.18	171900
12	640	640	360	390	1400.00	129800
13	610	610	390	390	25.792	215800
14	640	610	390	390	72.168	190200
15	610	640	390	390	255.99	193800
16	640	640	390	390	1200.00	151800
17	595	625	375	375	191.51	195300
18	655	625	375	375	709.03	124100
19	625	595	375	375	171.06	192000
20	625	655	375	375	1500.00	128300
21	625	625	345	375	1500.00	128300
22	625	625	405	375	171.06	192000
23	625	625	375	345	709.03	124100
24	625	625	375	405	191.51	195300
25	625	625	375	375	335.27	145800

불량수준에 관한 식 (7)과 손실에 관한 식 (11)을 동시에 최소화시키는 압축한계의 최적조건을 찾는 것은 일반적으로 쉽지 않다. 더구나 계측기의 수가 많아지면 더욱 어려워진다. 본 논문에서는 불량수준과 손실을 최소화 또는 적정 수준으로 유지할 수 있는 최적의 압축한계를 구하기 위한 식으로 (7)과 (11) 대신 2차 회귀모형을 이용하였다. 또한 독립변수인 압축한계의 조합에 따라 변하는 종속변수가 불량수준과 손실로 2 개이기 때문에 Suich와 Derringer[6]의 방법을 이용하여 두 개의 종속변수를 하나의 종속변수인 desirability function으로 통합하여, 이 desirability function을 최대화시키는 최적의 압축한계의 조합을 찾으려 하였다.

Suich와 Derringer[6]의 방법을 제공하는 Design-Expert[8]를 이용하여 해를 구해보았다. 불량수준의 목표치를 100ppm으로 하고 계측기 손실을 최소화시키는 과정을 거쳤다.

적용결과 GB1 : 633.38, GB2 : 611.52, GB3 : 363.70, GB4 : 387.70 일 때, 예측되는 불량수준 : 100ppm, 계측기 손실 : 166766ppm이었으며, 실제 식 (9)와 (11)에 적용했을 때 불량수준 : 108.18ppm, 계측기 손실 : 167000ppm으로 대체로 정확한 근사값을 얻을 수 있었다. 상대적으로 계측기 손실이 큰 이유는 데이터상의 계측기의 오차 분산이 크기 때문이다.

양쪽 규격한계를 사용할 때 표 1.의 데이터를 이용하여 압축한계를 적용하지 않을 때와 압축한계를 각각의 규격한계에 적용했을 때의 불량수준과 손실을 비교해보면 표 4.와 같다. 압축한계를 이용하면 불량수준이 크게 감소함을 알 수 있다.

표 4. 불량수준과 손실 비교

GB의 수	계측기 표준편차	불량수준	손실
0	0 %	13.36 %	0 %
1	$\sigma=25$	2.05 %	3.25 %
2	$\sigma_1=30$ $\sigma_2=20$	0.63 %	5.73 %

4. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 계측기 오차가 존재하고 양쪽 규격한계가 있는 측정 시스템에서 한 개 또는 다수의 계측기에 의한 검사 시 불량품을 양품으로 오판하는 확률인 불량수준과 양품을 불량품으로 오판하는 확률인 계측기 손실을 반응표면모형으로

수립하고, desirability function을 이용하여 비교적 쉬우면서도 정확하게 불량수준과 손실을 최소화할 수 있는 최적의 압축한계를 설정할 수 있었다. 본 논문에서는 품질특성의 분포를 정규분포의 경우로 한정하였으나 비정규분포의 경우에 대한 연구가 필요할 것이다. 또한 다후찌 방법에서의 최적화 방안이나 측정시스템의 경제성을 고려하는 압축한계의 최적화 문제 등에 관한 연구가 요구된다.

참고 문헌

- [1] D. McCarville, and D. Montgomery, "Optimal Guard Bands For Gauges In Series", *Quality Engineering*, 9(2), pp.167-177 1997.
- [2] D. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [3] D. Montgomery, and G. Runger, "Gauge Capability and Designed Experiments Part I: Basic Methods", *Quality Engineering*, Vol.6, No.2, pp.115-135, 1993.
- [4] D. Montgomery, and G. Runger, "Gauge Capability and Designed Experiments Part II: Experimental Design Models and Variance Component Estimation", *Quality Engineering*, Vol.6, No.2, pp.289-305, 1993.
- [5] Montgomery, D. C., *Design and Analysis of Experiments*, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc. 1997.
- [6] G. Derringer, and R. Suich, "Simultaneous Optimization of Several Response Variables", *Journal of Quality Technology*, Vol. 12, No. 4, pp.214-219, 1980.
- [7] R. Myers, and D. Montgomery, *Response Surface Methodology : Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [8] Stat Ease, Inc., *Design-Expert Version 6 User's Guide*, Stat Ease, Inc., Minneapolis, MN, 2000.