Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers
Vol. 30, No. 1, pp. 36-43, March 2004.

반복 측정이 가능한 인라인 측정시스템의 안정성 평가

정수호 · 변재현†

경상대학교 산업시스템공학부 항공기부품기술연구센터

Stability Evaluation of In-Line Measurement System with Repeated Measurements

Sooho Joung · Jai-Hyun Byun

Department of Industrial and Systems Engineering and Research Center for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701

In-line measurement systems are preferred to those in analytical laboratories, since in-line systems provide rapid response to process upsets. If an in-line measurement system exhibits an unstable variation and if this instability in measurement variation goes undetected, it will make the process monitoring procedure invalid. This paper presents a stability evaluation procedure for the in-line measurement system using two independent readings from the in-line measurement system and one reading from the analytical laboratory, which requires less measurement cost and time.

***Keywords*:** stability evaluation, in-line measurement system, analytical laboratory measurement system, repeated measurements, measurement cost, measurement time

1. 서 론

생산 공정을 모니터하고 관리하기 위해서는 측정시스템을 잘 운용하는 것이 필수적이다. 어떤 측정시스템을 이용할 것인가 하는 것은 측정비용, 시간, 정밀도를 동시에 고려하여 결정된다. 2개의 측정시스템을 이용하여 생산 공정을 모니터할 수도 있다. 초기의 정보는 생산 현장에서 제품이 생산되는 즉시 품질특성을 측정하는 인라인(in-line) 측정시스템을 사용하여 얻고, 보다 정확한 측정정보를 얻는 것이 필요할 때에는 분석실 측정시스템을 이용하는 것이다(Leitnaker, 2000; Steiner, 2000). 예를 들면, 자동차용 엔진 덮개를 생산하는 공정에서는 인라인 고정구 계측기(fixture gauges)를 이용하여 주요 치수를 근사적으로 측정한다. 고정구 계측기를 이용하여 데이터를 얻는 데에는 30분 이내의 시간이 소요된다. 좀더 정확한 치수 데이터를 얻으려고 3차원 측정기(coordinate measurement machine; CMM)를 이용하면 비용이 많이 소요되고, 측정시간도 수시간 걸린다. 이와 같이, 인라인 측정시스템을 이용하면 제품의 품질특성을 신속하게 측정할 수 있어 분석실 측정시스템을 이용할 때보다 측정시간을 크게 줄일 수 있다는 경제적인 장점이 있지만 정밀도는 떨어진다. 분석실 측정시스템은 보다 정확한 측정정보를 제공하지만, 장비가격이 고가이며 측정시간이 길다는 단점이 있다.

생산되는 제품의 저품질비용(cost of poor quality)을 줄이기 위해서는 생산공정의 상태를 가능한 실시간으로 파악하고 이상이 발생하면 빠른 시간 내에 대처하는 것이 필요하다. 이를 위하여 품질관리 담당자들은 공정 내에서 측정을 하여 얻은 측정데이터가 분석실에서 얻는 데이터보다 일반적으로 측정변동이 크다는 단점은 있지만, 측정시간이 짧고 실시간으로 공정의 상태를 파악할 수 있다는 장점 때문에 인라인 측정을 더 선호하고 있다.

또한 대부분의 중소기업의 경우, 생산현장에서 품질특성을 측정할 수 있는 인라인 측정시스템은 보유하고 있으나, 고가인 정밀한 분석실 측정시스템은 보유하고 있지 않다. 인라인 측정시스템은 생산공정에서 사용되기 때문에 사용기간이 길

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 항공기부품기술연구센터의 지원에 의해 연구되었음.
† 연락저자 : 변재현 교수, 660-701 경남 진주시 가좌동 900 경상대학교 산업시스템공학부, Fax : 055-762-6599, E-mail : jbyun@nongae.gsnu.ac.kr
2003년 1월 접수; 2003년 6월, 2003년 11월, 2004년 2월 수정본 접수; 2004년 2월 게재 확정.

어짐에 따라 제품의 품질특성을 제대로 측정하고 있는지 검증을 받는 것이 필요하다. 이를 위하여 시간이 흐름에 따라 안정적으로 믿을 수 있는 측정데이터를 제공하는지의 여부를 판단하는 안정성 평가를 수행하여야 한다. 만일 동일한 부품을 대상으로 인라인에서 측정한 결과와 분석실에서 측정된 결과가 시간이 지남에 따라 다르게 나타나면, 인라인 측정시스템을 수리하거나 필요 시에는 교체하는 품질보증 활동을 수행해야 한다.

그러므로 인라인에서 얻은 품질특성 데이터를 이용하는 업체는 안정성 평가를 위하여 정기적으로 정밀한 측정기를 보유하고 있는 국가기관, 정밀측정 전문 대행업체, 또는 정밀측정 장비를 보유한 대기업에 측정을 의뢰하여 사용료를 지불하고 인라인 측정시스템의 사용 적합성을 확인하고 있다.

자동화되어 있는 공정에서 생산되는 제품은 주로 자동검사 장비를 이용하여 인라인에서 전수검사를 하는데, 이 때에는 인라인에서 데이터를 한 번밖에 얻을 수 없다. Leitnaker(2000)는 인라인에서 1개의 측정데이터, 분석실에서 2개의 데이터를 얻어서 측정시스템의 안정성을 평가하는 절차를 제공하였다. 그러나 생산라인이 자동화되어 있지 않은 경우는 생산제품을 주로 샘플링에 의하여 검사를 한다. 이렇게 자동화되어 있지 않은 공정에서는 인라인에서 제품을 샘플링하여 품질특성을 2회 측정하는 것이 가능하다. 본 논문에서는 샘플링에 의하여 검사할 경우에 인라인 측정시스템에서 2회 반복 측정한 데이터와 분석실 측정시스템을 사용하여 1회 측정한 결과를 서로 비교하고 분석하여, 인라인 측정시스템의 안정성을 평가하는 절차를 제안하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 Leitnaker (2000)가 제시한 인라인 측정의 안정성 평가방법의 문제점을 지적하고 개선된 방법을 제안하였다. 분석실에서 2회 측정함으로써 발생하는 측정비용과 시간을 가능한 한 줄이기 위해, 인라인에서 2회 측정하고 분석실에서 1회 측정하여 측정비용과 측정시간을 줄일 수 있는 인라인 측정의 안정성 평가방법은 3장에 소개하였다. 안정성 평가 사례는 4장에, 본 연구의 결론은 5장에 제시하였다.

2. 안정성 평가의 기존 연구

2.1 각 측정시스템에서 1회 측정

Leitnaker(2000)는 인라인 측정공정의 안정성을 평가하기 위해, 먼저 생산공정에서 샘플을 취해 각 측정시스템을 이용하여 제품의 품질특성을 1회씩 측정하는 경우를 검토하였다. 인라인 측정시스템에서 i번째 샘플의 측정데이터 X_i와 분석실 측정시스템의 i번째 샘플 데이터 Y_i의 차이인 $D_i = X_i - Y_i$를 이용한 개별 X 관리도(individual X chart)와 이동범위 관리도(moving range chart)를 작성하여 관리상태를 판단함으로써 시간의 흐름에 따른 인라인 측정공정의 안정성 평가를 하였다. 그리고 Leitnaker는 인라인 측정시스템과 분석실 측정시스템의 측정오차의 분산 추정치를 다음과 같이 제시하였다.

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}^2_\varepsilon &= (1/2)(S^2_X - S^2_Y + S^2_D) \\ \hat{\sigma}^2_\delta &= (1/2)(S^2_Y - S^2_X + S^2_D) \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, $\hat{\sigma}^2_\varepsilon$과 $\hat{\sigma}^2_\delta$은 각각 인라인과 분석실 측정시스템의 측정오차 분산의 추정치, S^2_X, S^2_Y, S^2_D은 각각 X_i, Y_i, D_i의 표본분산이다. 인라인과 분석실 측정시스템 측정오차의 분산 추정치의 분산은 각각

$$\begin{aligned} Var(\hat{\sigma}^2_\varepsilon) &= \{2/(n-1)\}\sigma^4_\varepsilon + \{1/(n-1)\} \\ &\quad (\sigma^2_t\sigma^2_\varepsilon + \sigma^2_t\sigma^2_\delta + \sigma^2_\varepsilon\sigma^2_\delta) \\ Var(\hat{\sigma}^2_\delta) &= \{2/(n-1)\}\sigma^4_\delta + \{1/(n-1)\} \\ &\quad (\sigma^2_t\sigma^2_\varepsilon + \sigma^2_t\sigma^2_\delta + \sigma^2_\varepsilon\sigma^2_\delta) \end{aligned} \tag{2}$$

이다. 여기서, n은 샘플의 크기이며, σ^2_t은 공정데이터 참값의 분산이다. 위의 식 (2)를 보면 샘플 크기 n이 아주 크지 않다면, σ^2_t이 커짐에 따라서 측정오차의 분산이 증가하므로 σ^2_t이 적정하게 작게 유지되어야 한다(Grubbs, 1948).

2.2 인라인에서 1회, 분석실에서 2회 측정

Leitnaker(2000)는 측정오차 분산 추정치의 분산이 σ^2_t의 영향을 받지 않도록 하기 위해 인라인에서 1회 측정, 분석실에서 2회 반복하여 측정할 것을 제안하였다. X_i는 인라인 측정시스템에서 얻은 i번째 샘플데이터이고, Y_{i1}은 분석실 측정시스템에서 얻은 i번째 샘플의 첫 번째 측정데이터, Y_{i2}는 두 번째 데이터라고 하자. 먼저 분석실 측정시스템을 사용하여 얻은 2회 반복 측정데이터에 대한 $\overline{X}$ 관리도와 R 관리도를 이용하여 분석실 측정시스템의 일관성을 판단한다. 그래서 이상이 없다고 판단되면, $D_i = X_i - (1/2)(Y_{i1} + Y_{i2})$에 근거한 개별 X 관리도와 이동범위 관리도를 이용하여 인라인 측정시스템의 안정성을 평가한다. 그리고 인라인 측정시스템과 분석실 측정시스템의 측정오차의 분산 σ^2_ε과 σ^2_δ을 각각 다음과 같이 추정하였다.

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}^2_\varepsilon &= S^2_D - (1/4)S^2_A \\ \hat{\sigma}^2_\delta &= (1/2)S^2_A \end{aligned} \tag{3}$$

여기서, S^2_D은 D_i의 표본분산이고, S^2_A은 $A_i = Y_{i1} - Y_{i2}$의 표본분산이다. 그리고 인라인과 분석실 측정시스템의 분산 추정치의 분산을 각각 다음과 같이 제시하였다.

$$Var(\hat{\sigma}^2_\varepsilon) = \sigma^2_\varepsilon + (1/2)\sigma^2_\delta$$
$$Var(\hat{\sigma}^2_\delta) = 2\sigma^2_\delta \tag{4}$$

식 (4)는 분산 추정치의 분산이기 때문에 우변이 σ^4_ε, σ^4_δ 또는 $\sigma^2_\varepsilon\sigma^2_\delta$의 형태로 표현되어야 함에도 불구하고 그렇게 나타나 있지 않음을 알 수 있다. 측정시스템들의 분산 추정치의 분산을 적합하게 추정하기 위하여 Leitnaker(2000)의 참고문헌인 Hahn and Nelson(1970)을 구체적으로 검토하였다. 3개의 측정데이터 X_i, Y_{i1}, Y_{i2}는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_i &= T_i + M_X + \varepsilon_i \\ Y_{i1} &= T_i + M_Y + \delta_{i1} \\ Y_{i2} &= T_i + M_Y + \delta_{i2} \end{aligned} \tag{5}$$

여기서, $i = 1, 2, ..., n$에 대하여, T_i는 i번째 샘플의 참값, M_X, M_Y는 각각 인라인 측정시스템과 분석실 측정시스템의 편의(bias), ε_i와 δ_{i1}, δ_{i2}는 각각 X_i와 Y_{i1}, Y_{i2}의 측정오차이다. 식 (5)로부터 A_i와 D_i는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} A_i &= \delta_{i1} - \delta_{i2} \\ D_i &= (M_X - M_Y) + \varepsilon_i - (1/2)(\delta_{i1} + \delta_{i2}) \end{aligned} \tag{6}$$

A_i와 D_i의 기대값과 분산을 구하면, 이들은 각각

$$\begin{aligned} E(A_i) &= 0 \\ E(D_i) &= M_X - M_Y \\ Var(A_i) &= 2\sigma^2_\delta \\ Var(D_i) &= \sigma^2_\varepsilon + (1/2)\sigma^2_\delta \end{aligned} \tag{7}$$

이 된다. 식 (7)을 이용하면 인라인 측정시스템과 분석실 측정시스템의 분산 추정치는 각각 $\hat{\sigma}^2_\varepsilon = s^2_D - (1/4)s^2_A$과 $\hat{\sigma}^2_\delta = (1/2)s^2_A$이 된다. 즉, 식 (4)는 인라인 측정시스템과 분석실 측정시스템의 분산 추정치의 분산이 아니라, 분석실 측정시스템에서 얻은 두 개의 데이터들의 차이 A_i와 두 개의 측정시스템을 비교하기 위한 차이값인 D_i의 분산임을 알 수 있다.

인라인 측정시스템과 분석실 측정시스템의 분산 추정치의 분산을 구해보기로 한다. Grubbs(1948)는 3개의 측정데이터에 대한 측정오차의 분산인 σ^2_ε, $\sigma^2_{\delta_1}$, $\sigma^2_{\delta_2}$을 다음과 같이 추정하였다.

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}^2_\varepsilon &= (1/2)(S^2_{X-Y_1} + S^2_{X-Y_2} - S^2_{Y_1-Y_2}) \\ \hat{\sigma}^2_{\delta_1} &= (1/2)(S^2_{X-Y_1} - S^2_{X-Y_2} + S^2_{Y_1-Y_2}) \\ \hat{\sigma}^2_{\delta_2} &= (1/2)(-S^2_{X-Y_1} + S^2_{X-Y_2} + S^2_{Y_1-Y_2}) \end{aligned} \tag{8}$$

그리고 이들의 분산은 각각

$$\begin{aligned} Var(\hat{\sigma}^2_\varepsilon) &= \{2/(n-1)\}\sigma^4_\varepsilon + \{1/(n-1)\} \\ &\quad (\sigma^2_\varepsilon\sigma^2_{\delta_1} + \sigma^2_\varepsilon\sigma^2_{\delta_2} + \sigma^2_{\delta_1}\sigma^2_{\delta_2}) \\ Var(\hat{\sigma}^2_{\delta_1}) &= \{2/(n-1)\}\sigma^4_{\delta_1} + \{1/(n-1)\} \\ &\quad (\sigma^2_\varepsilon\sigma^2_{\delta_1} + \sigma^2_\varepsilon\sigma^2_{\delta_2} + \sigma^2_{\delta_1}\sigma^2_{\delta_2}) \\ Var(\hat{\sigma}^2_{\delta_2}) &= \{2/(n-1)\}\sigma^4_{\delta_2} + \{1/(n-1)\} \\ &\quad (\sigma^2_\varepsilon\sigma^2_{\delta_1} + \sigma^2_\varepsilon\sigma^2_{\delta_2} + \sigma^2_{\delta_1}\sigma^2_{\delta_2}) \end{aligned} \tag{9}$$

과 같이 나타남을 보였다. $Var(\hat{\sigma}^2_{\delta_1})$과 $Var(\hat{\sigma}^2_{\delta_2})$의 합동추정량(pooled estimator)을 이용하여 분석실 측정시스템의 분산 추정치의 분산을 구할 수 있는데, 이는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} Var(\hat{\sigma}^2_\delta) &= \{(n-1)^2 Var(\hat{\sigma}^2_{\delta_1}) + (n-1)^2 Var(\hat{\sigma}^2_{\delta_2})\} \\ &\quad /(n+n-2)^2 = \{Var(\hat{\sigma}^2_{\delta_1}) + Var(\hat{\sigma}^2_{\delta_2})\}/4 \\ &= [\{1/(n-1)(2\sigma^4_{\delta_1} + \sigma^2_\varepsilon\sigma^2_{\delta_1} + \sigma^2_\varepsilon\sigma^2_{\delta_2} + \sigma^2_{\delta_1}\sigma^2_{\delta_2}) \\ &\quad + \{1/(n-1)(2\sigma^4_{\delta_2} + \sigma^2_\varepsilon\sigma^2_{\delta_1} + \sigma^2_\varepsilon\sigma^2_{\delta_2} + \sigma^2_{\delta_1}\sigma^2_{\delta_2})\}]/4 \\ &= \{2(\sigma^4_{\delta_1} + \sigma^4_{\delta_2} + \sigma^2_\varepsilon\sigma^2_{\delta_1} + \sigma^2_\varepsilon\sigma^2_{\delta_2} + \sigma^2_{\delta_1}\sigma^2_{\delta_2})\} \\ &\quad /\{4(n-1)\} \\ &= (\sigma^4_{\delta_1} + \sigma^4_{\delta_2} + \sigma^2_\varepsilon\sigma^2_{\delta_1} + \sigma^2_\varepsilon\sigma^2_{\delta_2} + \sigma^2_{\delta_1}\sigma^2_{\delta_2}) \\ &\quad /\{2(n-1)\} \end{aligned} \tag{10}$$

식 (9)의 $Var(\hat{\sigma}^2_\varepsilon)$과 식 (10)의 $Var(\hat{\sigma}^2_\delta)$을 보면 측정오차의 분산 추정치의 분산이 공정데이터 참값의 분산 σ^2_t의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

3. 효율적이며 경제적인 안정성 평가방법

자동적으로 검사할 수 있는 인라인 측정시스템을 이용하면 데이터를 1회 측정할 수밖에 없다. 그러므로 인라인 시스템의 안정성을 평가하는 데 있어서 측정오차 분산 추정치의 분산이 공정데이터 참값의 분산 σ^2_t의 영향을 받지 않도록 하기 위해서는 2.2절에서 제시한 것처럼 인라인에서 측정한 샘플을 분석실로 갖고 와서 보다 정밀한 측정시스템에서 2회 반복 측정하여 나온 결과를 인라인 데이터와 비교하는 방법을 써야 한다(Leitnaker, 2000). 그러나 기계부품을 가공하는 업체의 경우처럼 샘플링을 하여 검사를 할 수 있을 때에는, 분석실 측정시스템을 사용하여 제품의 품질 특성을 2회 반복하여 측정하는 대신에 인라인 측정시스템으로 2회 측정하여 측정시간과 측정비용을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 분석실 측정시스템을 이용하는 비용이 크거나 측정시간이 많이 걸리는 경우에, 인라인 측정시스템에서 2

회 반복 측정하고 분석실 측정시스템에서 1회 측정하여 효율적이면서도 경제적으로 인라인 측정시스템의 안정성을 평가하는 절차를 제시하고자 한다.

본 절에서 사용되는 기호의 의미는 다음과 같다.

T_i : i번째 샘플의 참값

X_{i1} : 인라인 측정시스템에서 얻은 i번째 샘플의 첫 번째 데이터

X_{i2} : 인라인 측정시스템에서 얻은 i번째 샘플의 두 번째 데이터

Y_i : 분석실 측정시스템에서 얻은 i번째 샘플 데이터

ε_{ij} : X_{ij}에 대응하는 측정오차

δ_i : Y_i에 대응하는 측정오차

σ_t^2 : 공정데이터 참값의 분산

$\sigma^2_{\varepsilon_1}$: 인라인 측정시스템에서 얻은 첫 번째 데이터의 측정오차 분산

$\sigma^2_{\varepsilon_2}$: 인라인 측정시스템에서 얻은 두 번째 데이터의 측정오차 분산

σ_ε^2 : 인라인 측정시스템의 측정오차 분산

σ_δ^2 : 분석실 측정시스템의 측정오차 분산

A_i' : i번째 샘플에 대한 2개의 인라인 측정데이터의 차이, $X_{i1}-X_{i2}$

D_i' : i번째 샘플에 대한 측정시스템 간 차이, $(1/2)(X_{i1}+X_{i2})-Y_{i1}$

시간의 흐름에 따른 인라인 측정공정의 안정성을 평가하기 위하여, 먼저 A_i'에 대한 $\overline{X}$ 관리도와 R 관리도를 이용하여 인라인 측정의 일관성을 판단한다. 그래서 이상이 없다고 판단되면, D_i'을 이용한 개별 X 관리도와 이동범위 관리도를 작성하여 관리상태를 판단함으로써 인라인 측정공정의 안정성을 평가한다.

인라인 측정시스템의 안정성이 확보되었다고 판단되면 인라인 시스템과 분석실 시스템의 측정오차를 추정할 수 있다. 먼저 A_i'과 D_i'의 분산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Var(A_i') &= 2\sigma_\varepsilon^2 \\ Var(D_i') &= (1/2)\sigma_\varepsilon^2+\sigma_\delta^2 \end{aligned} \tag{11}$$

식 (11)로부터 인라인과 분석실 측정시스템의 측정오차 분산은 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_\varepsilon^2 &= (1/2)\, s^2_{A'} \\ \hat{\sigma}_\delta^2 &= s^2_{D'}-(1/4)s^2_{A'} \end{aligned} \tag{12}$$

여기서, $s^2_{D'}$은 D_i'의 표본분산이며 s^2_A는 A_i'의 표본분산인 $\Sigma_{i=1}^n A_i'^2/n$이다. 그리고 Hahn and Nelson(1970)에서 제시된 방법을 이용하여 수식을 정리하면 $\hat{\sigma}^2_{\varepsilon_1}$과 $\hat{\sigma}^2_{\varepsilon_2}$의 합동 추정량인 $\hat{\sigma}_\varepsilon^2$과 $\hat{\sigma}_\delta^2$의 분산은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Var(\hat{\sigma}_\varepsilon^2) &= (\sigma^4_{\varepsilon_1}+\sigma^4_{\varepsilon_2}+\sigma^2_{\varepsilon_1}\sigma^2_{\varepsilon_2}+\sigma^2_{\varepsilon_1}\sigma^2_\delta+\sigma^2_{\varepsilon_2}\sigma^2_\delta) \\ &\quad /\{2(n-1)\} \\ Var(\hat{\sigma}_\delta^2) &= \{2/(n-1)\}\sigma^4_\delta+\{1/(n-1)\}\,(\sigma^2_{\varepsilon_1}\sigma^2_{\varepsilon_2}+ \\ &\quad \sigma^2_{\varepsilon_1}\sigma^2_{\varepsilon_2}+\sigma^2_{\varepsilon_1}\sigma^2_\delta+\sigma^2_{\varepsilon_2}\sigma^2_\delta) \end{aligned} \tag{13}$$

식 (13)을 보면, $Var(\hat{\sigma}_\varepsilon^2)$과 $Var(\hat{\sigma}_\delta^2)$은 2.2절의 방법을 이용할 때와 마찬가지로 공정데이터의 분산인 σ_t^2의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

인라인 측정시스템에서 얻은 첫 번째 데이터 측정오차의 표준편차 σ_{ε_1}과 두 번째 데이터 측정오차의 표준편차 σ_{ε_2}는 동일한 계측기로 동일한 샘플을 잴 때의 측정오차이므로 같다고 가정할 수 있다. $\sigma_{\varepsilon_1}=\sigma_{\varepsilon_2}=\sigma_\varepsilon$으로 가정하면 $Var(\hat{\sigma}_\varepsilon^2)$는 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$Var(\hat{\sigma}_\varepsilon^2)=(3\sigma^4_\varepsilon+2\sigma^2_\varepsilon\sigma^2_\delta)/\{2(n-1)\} \tag{14}$$

측정오차의 분산 추정치의 분산이 공정데이터 참값의 분산 σ_t^2의 영향을 받지 않도록 하기 위하여, 실험실 측정시스템에서 2회 반복 측정하는 대신에, 인라인에서 2회 반복 측정하는 방법을 이용할 때에 인라인 측정시스템의 정밀도에 어떤 변화가 있는지를 알아보기로 한다. 식 (9)에서 σ_{δ_1}과 σ_{δ_2}는 각각 실험실 측정시스템에서 얻은 첫 번째와 두 번째 데이터의 측정오차이므로 $\sigma_{\delta_1}=\sigma_{\delta_2}=\sigma_\delta$로 가정할 수 있다. 그러면 인라인에서 1회, 실험실에서 반복 2회 측정한 데이터를 이용할 때 $Var(\hat{\sigma}_\varepsilon^2)$는 다음과 같이 간단한 형태가 된다.

$$Var(\hat{\sigma}_\varepsilon^2)=(2\sigma^4_\varepsilon+2\sigma^2_\varepsilon\sigma^2_\delta+\sigma^4_\delta)/(n-1) \tag{15}$$

식 (14)에 나타난 인라인에서 2회, 분석실에서 1회 측정할 때 $Var(\hat{\sigma}_\varepsilon^2)$인 $Var(\hat{\sigma}_\varepsilon^2,\ I2L1)$와, 식 (15)에 있는 인라인에서 1회, 분석실에서 2회 측정할 때 구한 $Var(\hat{\sigma}_\varepsilon^2)$인 $Var(\hat{\sigma}_\varepsilon^2,\ I1L2)$의 비율은

$$\frac{Var(\hat{\sigma}_\varepsilon^2,\ I2L1)}{Var(\hat{\sigma}_\varepsilon^2,\ I1L2)}=\frac{3\sigma^4_\varepsilon+2\sigma^2_\varepsilon\sigma^2_\delta}{2\,(2\sigma^4_\varepsilon+2\sigma^2_\varepsilon\sigma^2_\delta+\sigma^4_\delta)} \tag{16}$$

이다. 식 (16)은 2회 반복 측정을 실험실에서 하는 대신에 인라인에서 함으로써 나타나는 측정오차 추정치의 정밀도가 향상되는 정도이다. <Table 1>은 $\sigma_\varepsilon/\sigma_\delta$의 증가에 따라 나타나는

$Var(\hat{\sigma}^2_\varepsilon, I2L1) / Var(\hat{\sigma}^2_\varepsilon, I1L2)$의 변화량을 나타낸 것이며, <Figure 1>은 <Table 1>의 결과값을 그래프로 나타낸 그림이다.

Table 1. Effect of $\sigma_\varepsilon / \sigma_\delta$ on $Var(\hat{\sigma}^2_\varepsilon, I2L1) / Var(\hat{\sigma}^2_\varepsilon, I1L2)$

$\frac{\sigma_\varepsilon}{\sigma_\delta}$	$Var(\hat{\sigma}^2_\varepsilon, I2L1) / Var(\hat{\sigma}^2_\varepsilon, I1L2)$
1	0.500
2	0.683
3	0.721
4	0.734
5	0.740
6	0.743
7	0.745
8	0.746
9	0.747
10	0.748
11	0.748
12	0.749
13	0.749
14	0.749
15	0.749
16	0.749
17	0.749
18	0.749
19	0.750
20	0.750

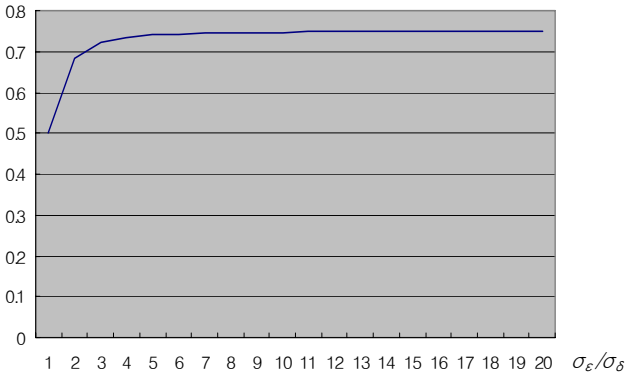


Figure 1. Effect of $\sigma_\varepsilon / \sigma_\delta$ on $Var(\hat{\sigma}^2_\varepsilon, I2L1) / Var(\hat{\sigma}^2_\varepsilon, I1L2)$.

<Figure 1>을 보면, $\sigma_\varepsilon/\sigma_\delta$가 증가함에 따라 비율은 0.5부터 차츰 증가하다가, 0.755에 수렴함을 알 수 있다.

결과적으로 측정오차의 분산 추정치의 분산이 공정데이터 참값의 분산 σ^2_t의 영향을 받지 않도록 하기 위하여, 실험실 측정시스템에서 2회 반복 측정하는 대신에, 인라인에서 2회 반복 측정하는 방법을 이용하면 1) 측정시간을 줄일 수 있어서 효율적이고, 2) 고가의 실험실 측정시스템을 덜 사용함으로써 경제적이며, 3) 인라인 측정시스템의 정밀도를 높일 수 있다.

4. 안정성 평가 사례

3장에서 제안된 평가방법을 T업체에서 생산하고 있는 slide bush라는 기계부품을 이용한 사례를 통하여 예시하고자 한다. slide bush는 냉장고, 세탁기, 에어컨 등 가정용 제품에 들어가는 컴프레서(compressor)를 구성하는 부품 중의 하나이다. 가정용 제품의 경우 대부분 실내에서 작동하기 때문에 소음을 가능한 한 줄여야 하는데, slide bush의 진원도(roundness)가 좋지 않으면 컴프레서의 소음이 심해진다. 본 사례에서는 slide bush의 진원도를 주요 품질 특성으로 삼고 진원도 측정을 위한 인라인 측정시스템의 안정성을 평가하는 방법을 설명하고자 한다.

<Figure 2>는 현재 T업체가 slide bush의 진원도를 측정하기 위해 생산현장에서 사용하고 있는 인라인 측정시스템인 "V 블록 측정기"를 나타낸 것이다. V 블록 측정기를 이용하여 진원도를 측정하기 위해서는 V 블록 위에 제품을 올려놓고 한 바퀴 돌린다. 이 때 다이얼게이지의 바늘이 움직인 수치의 1/2이 진원도 값이 된다. V 블록 측정기를 이용하여 한 개의 slide bush 부품을 측정할 때 소요되는 시간은 숙련된 작업자의 경우 약 30초(0.5분) 정도이다. <Figure 3>은 보다 정확한 측정정보를 얻기 위해서 사용되는 분석실 측정시스템인 "RA-116 진원도 측정기"이다. RA-116 진원도 측정기는 고가의 측정 장비이므로 이 장비를 구매하지 않고 V 블록 측정기의 안정성을 정기적으로 평가하기 위하여 인근 G대학에 가서 비용을 지불하여 사용하고 있다. RA-116 진원도 측정기는 회전테이블의 손잡이를 돌려 먼저 회전테이블의 수평을 맞추는 레벨링 작업과 회전테이블과 제품의 축심을 일치시키는 센터링 작업이 이루어진 다음에 진원도 측정에 이용되고 있는데, 5분 정도의 측정시간이 소요된다.

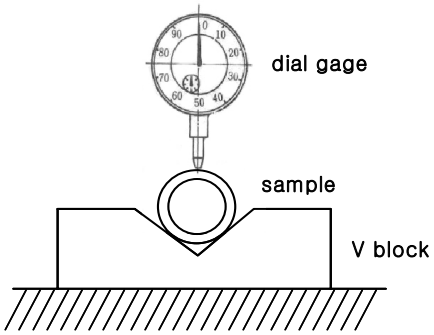


Figure 2. V Block measurement device.

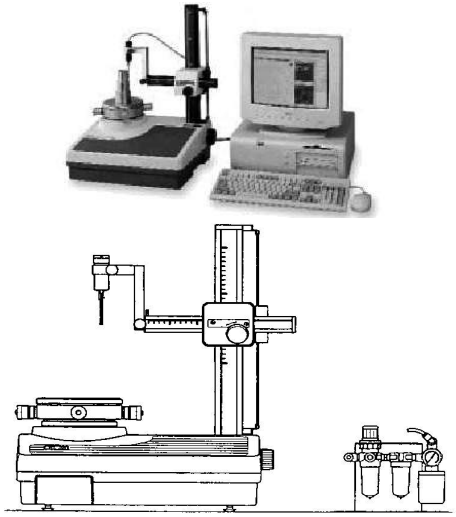
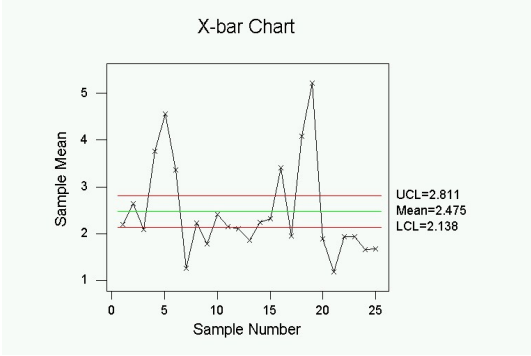


Figure 3. RA-116 roundness measurement system.

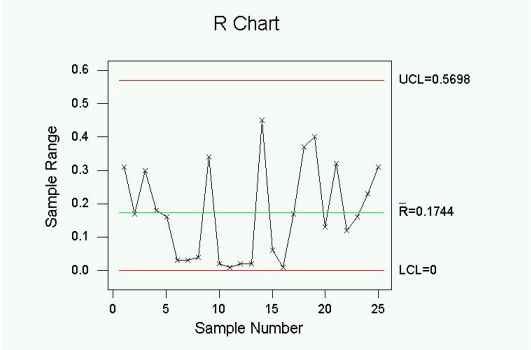
시간의 흐름에 따른 측정시스템의 안정성을 평가해야 하므로 대략 1시간 간격으로 샘플링을 하여 데이터를 얻었다(<Table 2>).

Table 2. Roundness measurement data of slide bush (unit: ㎛)

No.	X_{i1}	X_{i2}	Y_i	A'_i	D'_i
1	2.04	2.35	2.03	-0.31	0.165
2	2.55	2.72	2.96	-0.17	-0.325
3	2.24	1.94	1.83	0.30	0.260
4	3.85	3.67	3.88	0.18	-0.120
5	4.48	4.64	4.51	-0.16	0.050
6	3.35	3.38	3.40	-0.03	-0.035
7	1.27	1.24	1.28	0.03	-0.025
8	2.25	2.21	2.20	0.04	0.030
9	1.95	1.61	1.64	0.34	0.140
10	2.40	2.42	2.48	-0.02	-0.070
11	2.15	2.14	2.11	0.01	0.035
12	2.10	2.12	2.16	-0.02	-0.050
13	1.87	1.85	1.67	0.02	0.190
14	2.46	2.01	2.45	0.45	-0.215
15	2.29	2.35	2.31	-0.06	0.010
16	3.40	3.41	3.43	-0.01	-0.025
17	1.87	2.04	1.93	-0.17	0.025
18	3.89	4.26	4.07	-0.37	0.005
19	5.02	5.42	5.08	-0.40	0.140
20	1.82	1.95	1.81	-0.13	0.075
21	1.02	1.34	1.31	-0.32	-0.130
22	1.99	1.87	1.90	0.12	0.030
23	1.85	2.01	1.95	-0.16	-0.020
24	1.55	1.78	1.49	-0.23	0.175
25	1.83	1.52	1.72	0.31	-0.045



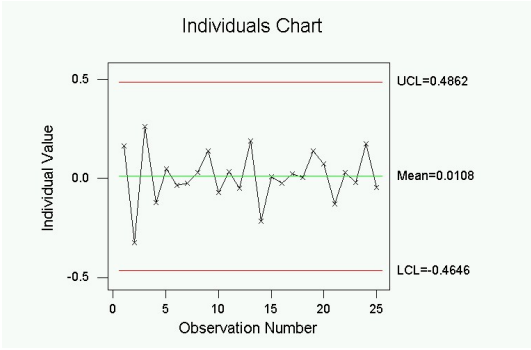
(a) $\overline{X}$ chart



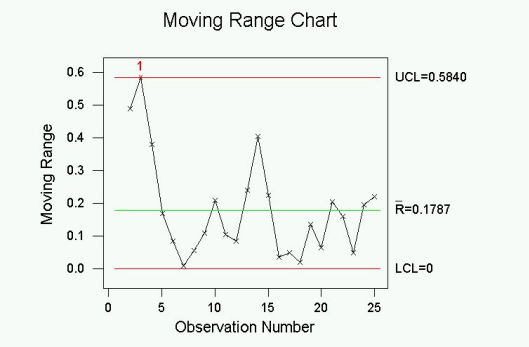
(b) R chart

Figure 4. $\overline{X}$- R chart of in-line measurement data.

<Figure 4>는 인라인 측정시스템에서 얻은 2개의 반복 측정 데이터를 이용한 $\overline{X}$ 관리도와 R 관리도이다. $\overline{X}$ 관리도는 관리한계선이 계측기 오차(반복성)에 기초하여 작성된다. 그러므로 평균값들이 대부분 관리한계선을 벗어날수록 측정시스템이 적합하다고 판단할 수 있다(Bai, *et al*., 1996; Lee, 2001). $\overline{X}$ 관리도를 보면 점들이 관리한계선을 많이 벗어나 있으므로 인라인 측정시스템은 부품 간 변동을 검출하기에 적합하다고 판단할 수 있다. 그리고 R 관리도를 보면 모든 점들이 관리한계선을 벗어나지 않고 점의 배열에 아무런 습성이 없이 관리상태하에 있다고 할 수 있다. 즉, 측정의 일관성이 있다고 판단할 수 있다.



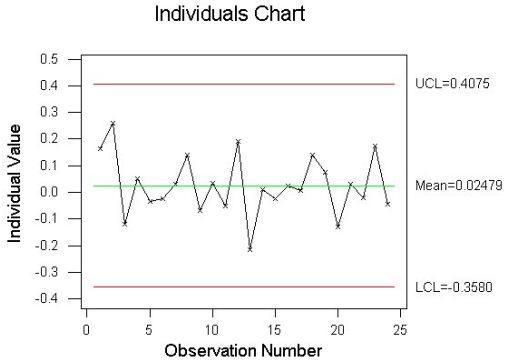
(a) individual X chart



*1:outlier

(b) moving range chart

Figure 5. Individual X and moving range chart of D_i'.



(b) moving range chart

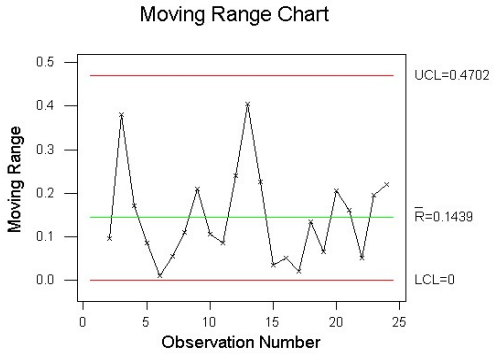
Figure 6. Revised individual X and moving range chart of D_i'.

그리고 <Figure 5>는 두 개의 측정시스템을 비교하기 위한 D_i'에 대한 개별 X 관리도와 이동범위 관리도이다. 각 관리도를 보고 관리상태를 판단하여 볼 때, 개별 X 관리도의 경우 모든 점이 관리한계선을 벗어나지 않고 점의 배열에 아무런 습성이 없으므로 관리상태하에 있다고 판정할 수 있다. 그러나 이동범위 관리도의 경우를 보면 2번째 점이 중심선으로부터 3 σ 관리상한선을 벗어나고 있음을 알 수 있다. 어떤 데이터가 관리한계선을 벗어나면 그 원인을 규명하여 재발하지 않도록 대책을 마련해야 한다(Bai, *et al*., 1996). 본 사례의 경우 2번째 데이터는 기록 오류임이 밝혀져서 그 데이터를 제외한 다음 D_i'에 대한 개별 X 관리도와 이동범위 관리도를 <Figure 6>과 같이 얻었다. <Figure 6>은 데이터가 관리상태에 있음을 나타내고 있고, 인라인 측정시스템이 안정적임을 알 수 있다.

그리고 인라인 측정시스템의 분산 추정 값은 다음과 같이 구할 수 있었다.

$$\hat{\sigma}_{\varepsilon}^{2} = 1/2s_{A'}^{2} = (1/2)(0.04934) = 0.02467$$

본 사례에서는 제안한 안정성 평가방법을 이용하여 측정시간을 10배, 측정비용을 2배 정도 줄여서 측정절차의 효율성과 경제성을 높이고, 인라인 측정시스템의 정밀도를 제고할 수 있음을 보여주었다.



(a) individual X chart

5. 결 론

생산현장에서 인라인 측정시스템을 이용하여 제품의 주요 품질특성을 측정하면 분석실에서 측정할 때보다 측정시간이 짧고 실시간 공정관리를 통해 공정에 이상이 있을 경우 신속하게 대처할 수 있다. 하지만 인라인 시스템을 이용하면 시간이 지남에 따라 측정데이터의 변동이 커질 수 있다는 우려 때문에 주기적으로 인라인 측정시스템의 안정성을 평가하는 것이 필요하게 된다. 본 논문에서는 기계 가공품 생산공정에서 샘플링하여 검사할 경우, 인라인 측정시스템에서 2회 측정한 데이터와 분석실 측정시스템으로부터 1개의 데이터를 얻을 때, 두 개의 측정시스템에서 측정한 데이터의 차이값을 이용하여 개별 X 관리도와 이동범위 관리도를 통해 인라인 측정의 안정성을 평가하는 방법을 제안하였다.

인라인에서 2회, 분석실에서 1회 측정하여 얻은 인라인 측정오차 분산 추정치의 정밀도는 인라인에서 1회, 분석실에서 2회인 경우에 비하여 향상된다(<Table 1>). 그러므로 본 연구에서 제안한 안정성 평가방법을 이용하면, 계측기의 setup 시간, 측정비용, 측정시간 등을 고려한 경제적인 면과 인라인 측정시스템의 정밀도 면에서 모두 이득을 볼 수 있다. 결국, 기계 가공품의 경우에 동일한 샘플을 인라인에서 반복 측정하는 것이 가능하다면, 인라인 측정시스템에서 반복 2회 측정하고 분석실 측정시스템에서 1회 측정한 데이터를 이용하는 안정성 평가방법이 경제적이고 효율적이므로 측정관리를 수행하는 품질관련 담당자들에게 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

Bai, D. S., et al. (1996), *Statistical Quality Control*, second ed., Yeongi Moonhwasa.

Grubbs, F. E. (1948), On Estimating Precision of Measuring Instruments and Product Variability, *J. Am. Statist. Assoc.,* 48, 243-264.

Hahn, G. J. and Nelson, W. (1970), A Problem in the Statistical Comparison of Measuring Devices, *Technometrics*, **12**(1), 95-102.

Lee, S. H.(2001), *MINITAB Measurement System Analysis*, Eretec.

Leitnaker, M. G. (2000), Comparing Measurement Processes: In-line Versus Analytical Measurements, *Quality Engineering*, **13**(2), 293-298.

Steiner, S. H. (2000), Statistical Process Control Using Two Measurement Systems, *Technometrics*, **42**(2), 178-187.