

측정 정밀도 추정을 위한 게이지 실험계획  
프로세스 개발 및 적용  
- Development and Implementation of  
Experimental Design Process for Estimating  
the Measurement Precisions -

최 성 운\*  
Sungwoon Choi\*

Abstract

The research develops measurement processes for estimating and evaluating the gauge R&R(Reproducibility & Repeatability) using ANOVA(Analysis of Variance) of experimental design tools. The ten-step processes developed include experimental goal setting, the selection of characteristics(factors, levels), data model, ANOVA, EMS(Expected Mean Square), estimation of gauge precisions, and evaluation indexes. The three-factor combined measurement models are presented to show the processes developed in this paper.

**Keywords:** Gauge R&R, ANOVA, Experimental Design, Ten-Step Processes, Estimation of Gauge Precisions

1. 서 론

측정(Measurement)은 품질개선(Quality Improvement)을 위한 시작점으로 식스시그마의 5단계 DMAIC 중 측정(M) 단계 또는 QC Story의 현상파악 단계에서 사용되는 중요한 활동이다. 이런 중요성을 인식하여 자동차 품질경영시스템인 QS 9000 또는 ISO/TS 16949에서는 Gage(Gauge) R&R을 산출, 평가하기 위해  $\bar{x}-R$  데이터시트(Table & Data Sheet)를 도입하여 사용하고 있다. 이 양식에 의한 방법은 실무에서 사용하기에 편하나 계측자와 부품간의 교호작용(Interaction)을 구할 수 없는 단점을 가지고 있다.

---

\* 경원대학교 산업공학과

최근 이런 단점을 극복하기 위해 연구개발의 제품기술 및 생산기술에서 적용되었던 실험계획법(DOE : Design of Experiment)이 Gauge R&R에 적용되는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 측정 실험계획법에 대한 대부분의 연구가 정밀도의 구간추정(Interval Estimation)의 이론적인 연구에 편향되어 있다.[3-7]

따라서 본 연구에서는 현장의 실무자가 고객의 구체적인 요구사항인 규격에 대한 데이터를 측정하는 단계부터 시작해서 최종 계측자, 부품, 다양한 계측조건에 의한 정밀도를 효율적이고 체계적으로 설계, 분석, 평가할 수 있는 측정 DOE 10단계 프로세스를 개발한다. 또한 게이지 DOE[1,2] 중 측정 요인을 교차설계(Crossed and Factorial Design)와 지분설계(Nested Design)의 결합모형(Combined Model)으로 구성된 4인자 게이지 DOE 모형[7]에 본 연구에서 개발한 10단계 프로세스를 적용한다.

## 2. 게이지 실험계획 프로세스 개발

게이지 R&R의 정밀도를 측정, 분석, 평가하기 위한 DOE(Design of Experiment) 또는 ED(Experimental Design)의 10단계 순서는 다음과 같다.

### 1 단계 : 측정 실험목표 설정

고객의 품질 또는 기술의 요구사항인 상한규격(USL, ~이하), 하한규격(LSL, ~이상), 양쪽규격(기준치수±허용차)을 측정실험목표(Target Value, True Value, Reference Value)로 정한다.

### 2 단계 : 측정 특성치 선정

계측기에 의해 측정된 데이터는 상한규격인 경우 망소특성(Smaller-Is-Better), 하한규격인 경우 망대특성(Larger-Is-Better), 양쪽규격인 경우 망목특성(Nominal-Is-Best)으로 특성치(Characteristic Value, Dependent Variable, Response, Experimental Data)로 선정한다.

### 3 단계 : 측정 인자 선정

측정 특성치에 영향을 주는 원인을 인자(Factor, Independent Variable)라 하며 계측자(Operator, Inspector, Appraiser), 부품, 다양한 계측환경 변수에 해당한다. 인자의 모든 수준을 전부 취했을 경우는 고정모수 인자(Fixed Factor), 일부만을 샘플링했을 경우는 랜덤변량 인자(Random Factor)라 하며 이 두 성분에 따라 고정모수 모형, 랜덤변량 모형, 혼합 모형(Mixed Model)으로 구분된다. 혼합 모형의 경우 교호작용의 고정모수 인자 부분의 합과 평균이 제로인 제약모형(RCM : Restricted and Constrained Model)과 독립으로 가정하는 비제약 모형(UUM : Unrestricted and Unconstrained Model)으로 나눈다. 측정 대상인 부품(Part, Product, Process)이 동일(Identical)하게 사용되는 경우는 교차 인자(Crossed Factor)로 파괴검사(Destructive Test)와 같이 유사한(Similar) 부품을 사용하는 경우는 지분 인자(Nested Factor)로 실험을 계획한다. 두 인자의 구성에 따라 교차모형, 지분모형, 결합모형(Combined

Model)으로 구별된다. 결합모형인 경우 근사  $F$  검정과 Satterthwaite 자유도 계산이 요구된다.

- 4 단계 : 측정 수준 설정  
측정인자에 대한 구체적이고 실현 가능한 값의 수준(Level, Treatment)이라 한다.
- 5 단계 : 반복과 되풀이로 실험순서를 결정  
반복(Replication)은 계측기(Tool, Equipmen) 정밀도를 산출하기 위한 인자로 측정실험 오차를 공평히 인자수준간에 배부하기 위한 방법으로 CRD (Completely Randomized Design)로 실시한다. 되풀이(Repetition)는 블록인자(Block Factor) 또는 지분인자(Nested Factor)와 같이 특정 인자수준을 처리한 후 다른 조건을 측정할 수 있는 경우 실시한다.
- 6 단계 : 측정 데이터 구조 모형  
측정 특성과 인자의 종류, 수준의 수, 반복과 되풀이의 관계를 모집단(Population)의 모수(Parameter) 효과(Effect, Contrast)로 표현한 것이 측정 데이터 구조 모형이다. 이 모형은 실험의 내용을 효율적이고 간단하게 표현한 식으로 ANOVA(Analysis of Variance)의 측정 정밀도에 대한 요인별 정밀도를 나타낸다.
- 7 단계 : 측정 요인별 SS, DF, MS 계산  
측정 데이터 구조 모형에 따른 측정 특성을 분석, 평가하기 위해 제곱합(SS : Sum of Square), 자유도(DF : Degree of Freedom), 평균제곱(MS : Mean Square)을 계산한다. 여기서 제곱합은 계산식이 아닌 이론식을 사용하여 이는 식의 형태에 따른 자유도를 쉽게 구하기 위해서이며  $MS=SS/DF$ 의 단계를 갖는다.
- 8 단계 : EMS에 따른  $F_0$  비의 ANOVA 작성  
MS의 기대값(Expected Value)인 EMS는 측정 정밀도의 모수적 표현으로 ANOVA(Analysis of Variance)인  $F_0$  비(Ratio)를 가설설정에서 구하는 경우 사용된다.  $F_0$  비에 의한 P-Value가 유의수준  $\alpha$ 와의 비교에 의해 유의성을 판정한다.
- 9 단계 : 측정요인별 추정 정밀도와  $\sigma_{R\&R}^2$ ,  $\sigma_P^2$ ,  $\sigma_T^2$ 의 계산  
EMS와 이의 추정식인 MS의 관계로부터 측정요인인 계측자, 계측기, 부품과 다양한 측정조건에 대한 정밀도를 계산한다. 계측자 정밀도는 재현성(Reproducibility), 계측기 정밀도는 반복성(Repeatability)으로 이 두가지 정밀도 성분의 합성(Propagation)을 Gauge R&R이라 하며 분산(Variance)의 표준편차(Standard Deviation)인 RMS(Root Mean Square)  $\sigma_{R\&R}$ 로 구한다. 부품 정밀도는  $\sigma_P$ 이고 다양한 측정조건은 사용자 의도에 따라 부품 정밀도에 합성하거나 별도의 요인으로 검출하기도 한다. 총 정밀도  $\sigma_T = (\sigma_{R\&R}^2 + \sigma_P^2 + \sigma_{\text{측정조건}}^2)^{1/2}$ 으로 구한다. 통상 측정조건은  $\sigma_P^2$ 에 합성한다.
- 10 단계 : 측정 정밀도의 평가와 판정  
측정 정밀도의 평가는  $\sigma_{R\&R}$ ,  $\sigma_P$ ,  $\sigma_T$ , 공차(Tolerance)와의 관계에 의해 지표로

실시한다. 측정 정밀도의 평가 순서로는 우선 계측기의 해상도(Resolution)인 분해능(Discrimination)을  $SNR = 1.41\sigma_p/\sigma_{R\&R}$ 의 근사식으로 평가하며 정확한 식으로는 판별비율(Discrimination Ratio)  $D_p = [(1 - \rho)/(1 + \rho)]^{1/2} = (2\sigma_p/\sigma_{R\&R} + 1)^{1/2}$ 이 있으며 통상 5이상인 경우 구별력이 있다고 판정한다. 두 번째 평가순서로는 R&RTR(R&R-To-Total Precision Ratio)로  $\sigma_{R\&R}/\sigma_T$ 의 형태이며 10% 이하인 경우 게이지 R&R이 우수하다고 판정된다. 이 단계에서는 계측자와 계측기에 의한 정밀도를 감소하기 위해 측정개선의 노력을 경주해야 한다. 끝으로 PTR(Precision-To-Tolerance Ratio) =  $6\sigma_{R\&R}/\text{Tolerance}$ 에 의해 실험목표인 규격의 공차와 비교하며 이는 R&RTR의  $\sigma_{R\&R}$  감소 개선 노력에 의한 최종평가 단계이다. PTR은 부품의 경우 공정능력지수(PCI : Process Capability Index)의 역수인 PCR(PC Ratio)로 작을수록 좋은 정밀도로 평가된다. 분자의 6은  $1 - \alpha$  신뢰수준(Coverage Factor)가 99.73%일 경우 사용되며 99%, 95%일 경우 각각 5.15, 4를 사용하며 한쪽 규격일 경우 3, 2.576, 1.96을 각각 사용한다. 정밀도 외의 치우침(Bias, Accuracy)이 있는 경우는 공정능력지수의  $C_{PK}$ ,  $P_{PK}$ 를 역수로 취하는 형태로 정확도와 정밀도의 오차(Error)를 MSA(Measurement System Analysis) 관점에서 종합평가할 수 있다.

### 3. 3인자 지분 측정모형 적용

본 연구에서 개발한 게이지 DOE 프로세스의 10단계 적용은 다음과 같다.

- 1 단계 : 버니어 캘리퍼스 계측기로 측정하는 조립치수인 양쪽규격의 공차(Tolerance)가 주어진다.
- 2 단계 : 망목특성의 특성치를 갖는다.
- 3 단계 : A 계측자, B 부품, C 날짜는 모두 랜덤변량 인자이고 A, B는 지분인자, C는 교차인자이다.
- 4 단계 : A의 수준수  $i=1, 2, \dots, l$ , B의 수준수  $j=1, 2, \dots, m$ , C의 수준수  $k=1, 2, \dots, n$ 이다.
- 5 단계 : 되풀이  $p=1, 2, \dots, r$ 로 측정 실험의 랜덤화 순서는 실험순서는 <표1>과 같다.

< 표1 > 측정 실험의 랜덤화 순서

$A_1 B_1$				$A_1 B_2$				$A_2 B_1$				$A_2 B_2$			
$C_1$		$C_2$		$C_1$		$C_2$		$C_1$		$C_2$		$C_1$		$C_2$	
R	e	R	e	R	e	R	e	R	e	R	e	R	e	R	e
p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p	p
e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e
t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i
t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i	i
o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n

6 단계 : 측정 데이터 구조모형  $y_{ijkp} = \mu + a_i + b_j + (ab)_{ij} + c_{k(ij)} + e_{p(ijk)}$ 의 랜덤변량 모형, 결합모형이다.

7 단계 : 측정 정밀도 요인별 SS, DF, MS는 <표2>와 같다.

<표2> 측정 정밀도 요인별 SS, DF, MS

측정 정밀도 요인	SS	DF	MS=SS/DF
A	$mnr \sum_i (\bar{y}_{i...} - \bar{y})^2$	$l - 1$	$MS_A$
B	$lnr \sum_j (\bar{y}_{.j..} - \bar{y})^2$	$m - 1$	$MS_B$
A×B	$nr \sum_i \sum_j (\bar{y}_{ij..} - \bar{y}_{i...} - \bar{y}_{.j..} + \bar{y})^2$	$lm - l - m + 1$	$MS_{A \times B}$
C(AB)	$r \sum_i \sum_j \sum_k (\bar{y}_{ijk.} - \bar{y}_{ij..})^2$	$lmm - lm$	$MS_{C(AB)}$
E(ABC)	$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_p (y_{ijkp} - \bar{y}_{ijk.})^2$	$lmnr - lmn$	$MS_{E(ABC)}$
T	$\sum_i \sum_j \sum_k \sum_p (y_{ijkp} - \bar{y})^2$	$lmnr - 1$	

8 단계 : 측정 정밀도의 EMS와  $F_0$  비는 <표3>과 같다.

<표3> EMS와  $F_0$  비

요인	EMS	$F_0$ 비
A	$\sigma_{E(ABC)}^2 + r\sigma_{C(AB)}^2 + mn r\sigma_A^2$	$MS_A / MS_{C(AB)}$
B	$\sigma_{E(ABC)}^2 + r\sigma_{C(AB)}^2 + lnr\sigma_B^2$	$MS_B / MS_{C(AB)}$
A×B	$\sigma_{E(ABC)}^2 + r\sigma_{C(AB)}^2 + nr\sigma_{A \times B}^2$	$MS_{A \times B} / MS_{C(AB)}$
C(AB)	$\sigma_{E(ABC)}^2 + r\sigma_{C(AB)}^2$	$MS_{C(AB)} / MS_{E(ABC)}$
E(ABC)	$\sigma_{E(ABC)}^2$	

9 단계 : 요인별 측정 정밀도의 추정값은 <표4>와 같으며  $\sigma_{R\&R}^2$ ,  $\sigma_P^2$ ,  $\sigma_T^2$ 으로 유형화된 정밀도를 계산하며 <표5>와 같다.

<표4> 요인별 측정 정밀도

성분	측정 정밀도
$\sigma_A^2$	$(MS_A - MS_{C(AB)}) / mnr$
$\sigma_B^2$	$(MS_B - MS_{C(AB)}) / lnr$
$\sigma_{A \times B}^2$	$(MS_{A \times B} - MS_{C(AB)}) / nr$
$\sigma_E^2$	$MS_{E(ABC)}$

<표5>  $\sigma_{R\&R}^2$ ,  $\sigma_P^2$ 과  $\sigma_T^2$

$\sigma_{R\&R}^2 = \sigma_B^2 + \sigma_{A \times B}^2 + \sigma_{C(AB)}^2$	계측자 정밀도	$\sigma_B^2 + \sigma_{A \times B}^2$
	계측기 정밀도	$\sigma_{E(ABC)}^2$
$\sigma_P^2 = \sigma_B^2 + \sigma_{C(AB)}^2$	부품 정밀도	$\sigma_B^2$
	다양한 측정조건 정밀도	$\sigma_{C(AB)}^2$
$\sigma_T^2$	$\sigma_{R\&R}^2 + \sigma_P^2$	

10 단계 : <표5>에서 1단계 평가지표  $SNR = 1.414\sigma_P / \sigma_{R\&R}$ , 2단계 평가지표  $R\&RTR = 6\sigma_{R\&R} / \sigma_T$ , 3단계 평가지표  $PTR = \sigma_{R\&R} / \text{Tolerance}$ 이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 측정실험계획의 ANOVA 분석을 통해 정밀도를 체계적인 단계를 걸쳐 추정할 수 있는 10단계 프로세스를 개발하였다. 개발된 프로세스 단계는 측정 실험

목표 설정, 측정 특성치 설정, 측정인자 설정, 측정수준 설정, 반복과 되풀이로 실험순서를 결정, 측정 데이터 구조모형, 측정 요인별 평균제곱 계산, EMS 따른 ANOVA 작성, 측정 요인별 정밀도의 추정과 유형화, 측정 정밀도의 평가와 판정 등을 포함한다. 또한 계측자, 부품은 지분 랜덤변량 인자이고 계측조건인 날짜는 교차 랜덤변량 인자이며 되풀이(Repetition)의 랜덤화 순서를 갖는 3인자 결합 측정모형에 10단계 프로세스를 응용하였다.

## 5. 참고 문헌

1. 최성운, "측정 ANOVA의 분산성분에 의한 게이지 R&R 추정", In Press.
2. 최성운, "게이지 R&R 연구에서 근사  $F$  검정과 EMS를 이용한 측정 정밀도의 평가", In Press.
3. 이승훈 외, "군간-군내-부품내 변동을 고려한 Gage R&R 분석에 관한 연구", 한국경영과학회/대한산업공학회 춘계공동학술대회, (2005) : 975-982.
4. Burdick R.K., Allen A.E., Larsen G.A., "Comparing Variability of Two Measurement Processes Using R&R Studies", Journal of Quality Technology, 34 (1) (2002) : 97-105.
5. Burdick R.K., Borrer C.M., Montgomery D.C., "A Review of Methods for Measurement Systems Capability Analysis", Journal of Quality Technology, 35 (4) (2003) : 342-354.
6. Burdick R.K., Borrer C.M., Montgomery D.C., Design and Analysis of Gauge R&R Studies, SIAM, 2005.
7. Montgomery D.C., Runger G.C., "Gauge Capability Analysis and Designed Experiments. Part II : Experimental Design Models and Variance Component Estimation", Quality Engineering, 6 (2) (1993) : 289-305.