

# 생산, 측정 및 교정 프로세스에서 오차 유형화에 의한 확장 공정능력지수의 개발

최성운\*

\*경원대학교 산업공학과

## Development of Extended Process Capability Index in Terms of Error Classification in the Production, Measurement and Calibration Processes

Sung woon Choi\*

\*Dept. of Industrial Engineering, Kyungwon University

### Abstract

We develop methods for propagating and analyzing EPCI(Extended Process Capability Index) by using the error type that classifies into accuracy and precision. EPCI developed in this study can be applied to the three combined processes that consist of production, measurement and calibration. Little calibration work discusses while a great deal has been studied about SPC(Statistical Process Control) and MSA(Measurement System Analysis). EPCI can be decomposed into three indexes such as PPCI(Production Process Capability Index), PPPI(Production Process Performance Index), MPCPI(Measurement PCI), and CPCPI(Calibration PCI). These indexes based on the type of error classification can be used with various statistical techniques and principles such as SPC control charts, ANOVA(Analysis of Variance), MSA Gage R&R, Additivity-of-Variance, and RSSM(Root Sum of Square Method). As the method proposed is simple, any engineer in charge of SPC, MSA and calibration can use efficiently in industries. Numerical examples are presented. We recommend that the indexes can be used in conjunction with evaluation criteria.

Keywords : EPCI, PPCI, PPPI, MPCPI, CPCPI, SPC, MSA, Calibration

### 1. 서론

경영, 관리, 기술의 목표계획에 대해 실제 활동의 문제점을 개선 또는 혁신하는 접근방법으로는 사전적, 사후적 두가지 문제 해결 방법이 있다. "Do the right thing"은 목표계획을 중심으로 하는 사전관리의 효과성을 강조하는 경영어구이며 "Do the thing right"은 실제 활동을 겨냥한 사후관리적인 효율성을 강조하는 말이다.

품질관리에서 사후적 문제해결 방법으로 로트(Lot) 또는 배취(Batch)에 대한 전수검사(Full Inspection), 샘플링

검사 등의 검사방식이 있다. 검사는 고객이 요구하는 스펙(Specification, 규격, 사양, 제원, 시방, 명세)의 품질 목표를 기준으로 부적합품(Nonconforming Unit, Nonconformance, Defective, 불량), 적합품(양품), 부적합(Nonconformity, 결점), 적합(비결점) 또는 합격(Accept), 불합격(Reject)의 판정(Decision Making)을 내리는 것이다. 부적합품의 제품 또는 불합격 로트의 문제점을 해결하는 방법으로는 재작업(Rework), 수리(Repair), 특채(Concession), 용도변경, 감가할인, 폐기 등의 사후약방문적인 처리를 할 수 밖에 없다. 특히 해

† 교신저자: 최성운, 경기도 성남시 수정구 복정동 산 65 경원대학교 산업공학과

M·P: 011-256-0697, E-mail: swchoi@kyungwon.ac.kr

2009년 4월 접수; 2009년 4월 수정본 접수; 2009년 5월 게재확정

의 원자재와 부품을 사용하는 기업에서 부적합품이 발생할 경우 구매 리드타임(Lead Time)이 길어 납기 지연이 발생한다. 더욱 핵심 부품, 원료인 경우 구매단가가 비싸 요즘같은 어려운 산업경제환경하에서는 자금유동성으로 인해 클레임(Claim)이 부도로 연결되는 불운을 맞이할 수 있다.

이와 반대로 생산프로세스에서 사전적 문제해결 방법으로는 SPC(Statistical Process Control)가 있는데 이는 관리도, 히스토그램, 공정능력지수(PCI : Process Capability Index), 공정성능지수(PPI : Process Performance Index) 등의 품질통계기법을 생산기술 기능의 조직활동을 통해 수행한다.

이는 작업 또는 공정 초기에 이상원인(Assignable Cause)을 제거, 개선하여 사후 검사에서 부적합품을 미연에 방지하는 유비무환적인 사고방식이다. SPC 관리도에서는 예비(Trial) 관리한계를 벗어나는 특별 구간 이상원인을 제거, 개선한 후 미리 설정된 관리한계 내에서 안정된 우연원인(Random Cause)의 공정을 예측하여 불량률의 사전예방이 가능하게 해준다. 해석용 관리도에서 공정의 이상원인이 존재하는 경우 군내 우연변동과 구간 이상변동의 원인을 모두 고려하는 PPI와 관리용 관리도에서 공정이 정상인 경우 군내 우연변동을 고려한 PCI가 있다.[4,12,14] 특히 PCI는 관리한계 내에서 우연원인을 예측하여 관리하는 경우 사용되는 지수이다.[7,8] 검사와 SPC의 관계를 비유하자면 검사에서 스펙의 규격한계가 사회의 엄격한 법으로 부적합품이 법을 어긴 전과자와 같다. SPC 관리도에서는 관리한계가 집안의 가훈으로 이를 어긴 이상원인이 문제아이다. 이는 가정에서 조기에 문제아를 바로 잡으면 사회에서 전과자가 없어진다는 수신제가치국평천하의 속담과 같다. 즉 품질은 검사에 의해 이루어지는 것이 아니고 SPC 또는 생산기술에 의한 작업과 공정에서 만들어지는 것이다.[5]

생산프로세스의 SPC 사전관리활동으로 제품을 아무리 잘 만들었다 하더라도 측정(Measurement)을 잘못 하였다면 고객과 약속한 스펙을 지킬 수 없다. 이를 해결하기 위한 측정 프로세스의 MSA(Measurement System Analysis)에서는 측정의 목표인 제품스펙을 계측기의 참값(True Value)으로 가정한다. MSA에서 측정오차는 선형성(Linearity), 안정성(Stability) 등의 정확성(Accuracy, Bias, 치우침)과 Gauge R&R의 정밀도로 구분한다.

Gauge R&R은 계측자 정밀도인 재현성(Reproducibility)과 계측기 정밀도인 반복성(Repeatability)으로 구성되며 관리도, ANOVA (Analysis of Variance)의 통계적 기법에 의해 평가된다.[3,6,9,10,13] 그 외에 계측기의 해상도(Resolution)에 의한 구별력(Discrimination)과 영향분석, GPC(Gauge Performance Curve) 등의 분석이 요구된다.[2]

생산, 측정 프로세스에서 제품을 완벽하게 처리하였다 라도 계측기의 교정(Calibration)이 되어 있지 않을 경우 고객과 생산자는 기준이 다른 계측기를 사용하는 것과 같다. 교정은 소급성(Traceability)을 이용하여 기준이 되는 표준기에 계측기를 0점 조정하는 정확성을 조정해주는 방법이다. 교정 수학적 모형(Mathematical Model)을 이용한 교정값의 가감에 의해 치우침(Bias)의 보정값이 분석된다. 아울러 A형, B형 표준불확도(Uncertainty), 감도계수(Sensitivity Coefficient), 포함인자(Coverage Factor)에 의한 확장불확도가 정밀도의 RSSM(Root Sum of Square Method) 합성방법으로 평가된다.

교정 프로세스에서도 과거에는 생산 프로세스의 SPC, 측정 프로세스의 MSA처럼 오차(Error)를 정확도(치우침, 중심, 축, 위치, 방향)와 정밀도(산포, 균일성, 폭, 넓이, 변동)로 구분하여 계통오차와 우연오차로 평가, 분석하였다. 그러나 최근 표준기의 참값은 오직 하느님만이 알고 있다는 겸손한 자세로 계속 목표값을 찾겠다는(Moving Target) 의미로 불확도의 개념을 사용하고 있다.[1,11,15,16,17] 교정단계에서 수학적 모형에 기준치우침 교정값은 정확도로, A형, B형 표준 결합 불확도는 정밀도로 유형화 할 수 있다.

이와 같이 생산, 측정, 교정 각 프로세스별 연구는 수행되어 있지만 이를 하나의 지수로 통합하는 연구는 전혀 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 생산, 측정, 교정 프로세스의 오차를 정확도(치우침)와 정밀도로 유형화하여 3단계 프로세스를 합성한 확장 공정능력지수(EPCI : Extended PCI)를 개발하였다. EPCI는 치우침이 없는 정적(Static) EPCI와 치우침이 있는 동적(Dynamic) EPCI로 구분되며 각 프로세스마다 오차유형에 따라 PPCI(Production PCI), MPCI(Measurement PCI), CPCI(Calibration PCI)와 같이 독립적으로 EPCI를 분해하여 사용할 수 있다. 이를 위해 본 연구에서 생산 프로세스에서는 계량연속형, 계수이산형 PPCI, PPPI(Production PPI)와, 측정 프로세스에서는 파괴, 비파괴 측정에서 적용되는 ANOVA 모형의 MPCI를, 교정 프로세스에서는 A형, B형 불확도의 CPCI를 개발하였다. 그동안 별개의 개념으로 인식되었던 생산 SPC의 PCI, PPI와 측정 MSA의 PTR(Precision-Tolerance Ratio), 교정 불확도를 연계, 통합하여 하나의 지수로 활용할 경우 기업의 품질기술 능력을 규모, 업종에 관계없이 상대적으로 비교, 평가할 수 있어 벤치마킹의 자료로 활용할 수 있는 이점이 있다. 이를 적용하는 기업은 부서간 업무가 다기능의 품질기술활동으로 바뀌어 조직의 유연성과 더불어 EPCI 지수의 기여도에 따른 성과를 측정할 수 있다.

## 2. 생산 프로세스에서 PPCI와 PPPI의 개발

### 2.1 계량연속형 생산 프로세스

#### 2.1.1 계량연속형 PPCI의 개발

계량연속형 생산 프로세스는 고객에게 중요하거나 특별히 관리되어야 할 제품에 적용한다. 계량연속형 PPCI는 공정산포의 정밀도 관점에서는 관리도에서 정상으로 판정된 경우의 군내 표준편차  $\hat{\sigma}_w$ 와 치우침의 유무에 따라  $k=0$ (Static),  $k>0$ (Dynamic)으로 분류되며[5] 산정 절차는 다음과 같다.

단계 1 : SPC 관리도의 적용단계 및 판정

품질분임조 활동의 QC Story 15단계 중 현상파악, 결과 분석, 사후관리 단계나 식스 시그마 운동의 DMAIC 5단계 중 Measure, Control 단계에서  $\bar{x} - R$ ,  $\bar{x} - s$ ,  $I - MR$  해석용, 관리용 관리도가 우연인인의 정상으로 판정되었을 경우에 사용한다. 관리도의 Subgroup Number는  $k$ , Subgroup Size는  $n$ 이다.

단계 2 : 군내 표준편차  $\hat{\sigma}_w$ 의 추정

단계 2.1 :  $\bar{x} - R$  해석용 관리도

(1)  $n$ 인 경우 R 관리도 사용 :  $\hat{\sigma}_w = \bar{R}/d_2$ ,  $d_2$ 는  $n$ 에 의한 계수

(2)  $n_i$ 인 경우 R 관리도 사용 :

$$\hat{\sigma}_w = \left( \frac{\sum_{i=1}^k a_i R_i / d_2}{\sum_{i=1}^k a_i} \right), \quad a_i = (d_2 / d_3)^2 \text{로 } d_2, d_3 \text{는 } n_i \text{에 의한 계수}$$

(3)  $n$ 인 경우  $\bar{x}$  관리도 사용 :  $\hat{\sigma}_w = \hat{s}_w / c_4$ ,

$$\hat{s}_w^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_{i.})^2 / k(n-1),$$

$c_4$ 는  $k(n-1)+1$ 에 의한 계수

(4)  $n_i$ 인 경우  $\bar{x}$  관리도 사용 :  $\hat{\sigma}_w = \hat{s}_w / c_4$ ,

$$\hat{s}_w = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_{i.})^2 / \sum_{i=1}^k (n_i - 1),$$

$c_4$ 는  $\sum_{i=1}^k (n_i - 1) + 1$ 에 의한 계수

(5)  $n$ 인 경우 Median  $\tilde{R}$ 를 사용 :  $\hat{\sigma}_w = \tilde{R} / d_4$ ,  $c_4$ 는  $n$ 에 의한 계수

단계 2.2 :  $\bar{x} - s$  해석용 관리도

(1)  $n$ 인 경우  $s$  관리도 사용 :  $\hat{\sigma}_w = \bar{s} / c_4$ ,  $c_4$ 는  $n$ 에 의한 계수

(2)  $n_i$ 인 경우  $s$  관리도 사용 :

$$\hat{\sigma}_w = \left( \frac{\sum_{i=1}^k b_i s_i / c_4}{\sum_{i=1}^k b_i} \right), \quad b_i = (c_4 / c_5)^2 \text{으로 } c_4, c_5 \text{는 } n_i \text{에 의한 계수}$$

(3)  $n$ 인 경우  $\bar{x}$  관리도 사용 : 단계 2의 (3)과 동일

(4)  $n_i$ 인 경우  $\bar{x}$  관리도 사용 : 단계 2의 (4)와 동일  
단계 2.3 :  $I - MR$  해석용 관리도

(1)  $\overline{MR}$  사용 :  $\hat{\sigma}_w = \overline{MR} / d_2$ ,  $d_2$ 는  $n$ 에 의한 계수

(2)  $\widetilde{MR}$  사용 :  $\hat{\sigma}_w = \widetilde{MR} / d_4$ ,  $d_4$ 는  $n$ 에 의한 계수

단계 3 : 치우침 계수  $k$ 를 계산

양쪽 규격인 경우 스펙=기준치(공칭치, 목표치) $\pm$ 허용차에 대해 관리한계=평균 $\pm 3 \times$ 표준편차로 치우침은 기준치와 평균의 차이이며 무단위를 위해 허용차로 나누면  $k = |(\hat{\mu} - \text{기준치}) / \text{허용차}|$ 를 구할 수 있다. 상한 규격의 목표치는 100%를 기준으로 0%이며 하한규격의 목표치는 100%이다.

단계 4 : 치우침 계수  $k=0$ 인 경우 PPCI( $k=0$ )를 계산

$$PPCI(k=0) = (USL - LSL) / 6\hat{\sigma}_w$$

단계 5 : 치우침 계수  $k>0$ 인 경우 PPCI( $k>0$ )를 계산

단계 5.1 : 분자에 치우침, 분모에 정밀도를 고려

$$PPCI_1(k>0) = (1 - k)PPCI(k=0) = \text{Min}\{(\hat{\mu} - LSL) / 3\hat{\sigma}_0, (USL - \hat{\mu}) / 3\hat{\sigma}_0\}$$

단계 5.2 : 분모에 치우침, 정밀도를 모두 고려

$$PPCI_2(k>0) = (USL - LSL) / 6(\hat{\sigma}_0^2 + (\hat{\mu} - \text{기준치}))^{1/2}$$

단계 5.3 :  $PPCI_2(k>0)$ 에서 대칭이 아닌 경우

$$PPCI_3(k>0) = \text{Min}\{(\hat{\mu} - LSL) / 3(\hat{\sigma}_0^2 + (\hat{\mu} - \text{기준치}))^{1/2}, (USL - \hat{\mu}) / 3(\hat{\sigma}_0^2 + (\hat{\mu} - \text{기준치}))^{1/2}\}$$

#### 2.1.2 계량연속형 PPPI의 개발

계량연속형 PPPI는 공정산포의 정밀도 관점에서는 관리도에서 이상으로 판정된 경우의 종합 표준편차  $\hat{\sigma}_0$ 와

치우침의 유무에 따라  $k = 0$ (Static),  $k > 0$ (Dynamic)으로 구분되며[5] 평가 절차는 다음과 같다.

단계 1 : SPC 관리도의 적용단계 및 판정

QC Story 15단계 중 현상 파악, DMAIC 단계중 Measure 단계에서  $\bar{x} - R$ ,  $\bar{x} - s$ ,  $I-MR$  해석용 관리도가 이상원인으로 판정되었을 경우에 적용한다.

단계 2 : 종합 표준편차  $\hat{\sigma}_0$ 의 추정

단계 2.1 :  $\bar{x} - R$ ,  $\bar{x} - s$  해석용 관리도

(1)  $x_{ij}$ 를 사용 :  $\hat{\sigma}_0 = \hat{s}_0 / c_4$ ,

$$\hat{\sigma}_0^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2 / (kn - 1), c_4 \text{는 } n \text{에 의한 계수}$$

(2)  $\overline{MR}_{x_i}$ 의 사용 :  $\hat{\sigma}_0 = \overline{MR}_{x_i} / d_2$ ,  $d_2$ 는  $n = 2$ 에 의한 계수

(3)  $MR_{x_i}$ 의 사용 :

$$\hat{\sigma}_0 = \left( \sum_{i=1}^{k-1} MR_{x_i}^2 / 2(k-1) \right)^{1/2} / c_4', c_4' \text{은 } k \text{에 의한 계수}$$

(4)  $\widetilde{MR}_{x_i}$ 의 사용 :  $\hat{\sigma}_0 = \widetilde{MR}_{x_i} / d_4$ ,  $d_4$ 는  $n = 2$ 에 의한 계수

단계 2.2 :  $I-MR$  해석용 관리도

$$\hat{\sigma}_0 = \hat{s}_0 / c_4, \hat{s}_0^2 = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2 / (k-1), c_4 \text{는 } k \text{에 의한 계수}$$

단계 3 : 치우침 계수  $k$ 를 계산 : 2.1.1의 단계 3과 동일

단계 4 : 치우침 계수  $k = 0$ 인 경우  $PPPI(k = 0)$ 를 계산

$$PPPI(k = 0) = (USL - LSL) / 6\hat{\sigma}_0$$

단계 5 : 치우침 계수  $k > 0$ 인 경우  $PPPI(k > 0)$ 을 계산

단계 5.1 : 분자에 치우침, 분모에 정밀도를 고려

$$PPPI_1(k > 0) = (1 - k)PPPI(k = 0) = \text{Min}\{(\hat{\mu} - LSL) / 3\hat{\sigma}_0, (USL - \hat{\mu}) / 3\hat{\sigma}_0\}$$

단계 5.2 : 분모에 치우침, 정밀도를 모두 고려

$$PPPI_2(k > 0) = (USL - LSL) / 6(\hat{\sigma}_0^2 + (\hat{\mu} - \text{기준치}))^{1/2}$$

단계 5.3 :  $PPPI_2(k > 0)$ 에서 대칭이 아닌 경우

$$PPPI_3(k > 0) = \text{Min}\{(\hat{\mu} - LSL) / 3(\hat{\sigma}_0^2 + (\hat{\mu} - \text{기준치}))^{1/2}, (USL - \hat{\mu}) / 3(\hat{\sigma}_0^2 + (\hat{\mu} - \text{기준치}))^{1/2}\}$$

## 2.2 계수이산형 생산프로세스

### 2.2.1 부적합품 PPCI와 PPPI의 개발

부적합품 생산프로세스는 Unit 기준에 의해 카운트 되는 제품에 적용한다. 부적합품 PPCI와 PPPI는 공정산포의 관리도 관점에서 정상, 이상의 판정과 치우침의 유무에 따라 분류되며[4] 적용절차는 다음과 같다.

단계 1 :  $p$ ,  $np$  해석용 관리도의 판정

현상파악, Measure의 개선단계에서 관리도 정상, 이상을 판정한다.

단계 1.1 : 정상으로 판정

군내 표준편차  $\hat{\sigma}_w$ 로 이루어진  $PPM_1$ 을 계산하고 PPCI를 적용한다.

단계 1.2 : 이상으로 판정

종합 표준편차  $\hat{\sigma}_0$ 로 이루어진  $PPM_2$ 를 계산하고 PPCI를 적용한다.

단계 2 : 목표 부적합품률과 관리도의 평균불량률에 따른 치우침  $k$ 를 계산

단계 2.1 :  $k = 0$ 인 경우

$$PPCI(k = 0) = 3\Phi^{-1}(1 - PPM_1)$$

$$PPPI(k = 0) = 3\Phi^{-1}(1 - PPM_2)$$

단계 2.2 :  $k > 0$ 인 경우

$$PPCI(k > 0) = 3PPCI(k = 0) - 1.5$$

$$PPPI(k > 0) = 3PPPI(k = 0) - 1.5$$

### 2.2.2 부적합 PPCI와 PPPI의 개발

부적합 생산프로세스는 개개의 스펙기준에 의해 카운트 되는 제품에 적용한다. 부적합 PPCI와 PPPI도 2.2.1와 마찬가지로 관리도의 정밀도 판정과 치우침  $k$ 에 의해 구분되며[4] 평가 절차는 다음과 같다.

단계 1 :  $c$ ,  $u$  해석용 관리도의 판정

현상파악, Measure의 개선단계에서 관리도의 이상유무를 판정한다.

단계 1.1 : 우연원인으로 판정

우연원인  $\hat{\sigma}_w$  로 이루어진  $DPMO_1$  를 계산하고  $PPCI$  를 적용한다.

단계 1.2 : 이상원인으로 판정

우연원인과 이상원인에 의한  $\hat{\sigma}_0$  로 구성된  $DPMO_2$  를 계산하고  $PPPI$  를 적용한다.

단계 2 : 목표 단위당 부적합(부적합률)과 관리도의 평균 단위당 부적합(부적합률)의 차이인 치우침  $k$  를 계산

단계 2.1 :  $k = 0$  인 경우

$$PPCI(k=0) = 3\Phi^{-1}(1 - DPMO_1)$$

$$PPPI(k=0) = 3\Phi^{-1}(1 - DPMO_2)$$

단계 2.2 :  $k > 0$  인 경우

$$PPCI(k > 0) = 3PPCI(k=0) - 1.5$$

$$PPPI(k > 0) = 3PPPI(k=0) - 1.5$$

### 3. 측정프로세스에서 MPCCI의 개발

#### 3.1 비파괴 측정모형에서 MPCCI의 개발

##### 3.1.1 2인자 교호작용 변량모형

측정프로세스의 MPCCI는 AIAG 양식에 의한 방법,  $\bar{x} - R$  관리도에 의한 방법, DOE(Design of Experiment)의 ANOVA 방법 등이 있다.  $\bar{x} - R$  관리도에서는 교호작용을 고려할 수 없으며 이를 실무자에게 이용하기 쉽게 만든 것이 AIAG 양식이다.[2] 따라서 본 연구에서는 계측자, 계측기, 생산부품 등의 다양한 측정조건에서 MPCCI를 산출하기 위해 ANOVA 방법을 이용한다.

비파괴 측정 모형의 MPCCI 평가절차는 다음과 같다.

단계 1 : 측정 정확도의 계산

1차 회귀분석에 의한 선형성(Linearity)과  $\bar{x} - R$  관리도에 의한 안정성(Stability)에 의해 측정 정확도를 산출한다.

단계 2 : 측정조건에 따른 ANOVA 모형 선정, 정밀도 계산 및 평가

단계 2.1 : 측정모형 설정

A를 계측자의 수( $i=1, 2, \dots, l$ ), B를 부품의 수( $j=1, 2, \dots, m$ ), 반복의 수 ( $k=1, 2, \dots, r$ )인 경우의 2인자 교호작용 변량모형의 ANOVA 모형은 <표1>과 같다.

<표1> 변량 측정 모형

요인	MS	E(MS)	F <sub>0</sub>
A	V <sub>A</sub>	$\sigma_E^2 + r\sigma_{A \times B}^2 + mr\sigma_A^2$	$V_A / V_{A \times B}$
B	V <sub>B</sub>	$\sigma_E^2 + r\sigma_{A \times B}^2 + lr\sigma_B^2$	$V_B / V_{A \times B}$
A × B	V <sub>A × B</sub>	$\sigma_E^2 + r\sigma_{A \times B}^2$	$V_{A \times B} / V_A$
E	V <sub>E</sub>	$\sigma_E^2$	

<표2> 측정 정밀도

유형	E(MS)
재현성 $\sigma_{R1}^2$	$\sigma_A^2 = \frac{V_A - V_{A \times B}}{mr}$ $\sigma_{A \times B} = (V_{A \times B} - V_E) / r$
반복성 $\sigma_{R2}^2$	$\sigma_E^2 = V_E$
Gauge R&R	$\sigma_{R \& R}^2 = \sigma_{R1}^2 + \sigma_{R2}^2$
부품정밀도 $\sigma_P^2$	$\sigma_B^2 = \frac{V_B - V_{A \times B}}{lr}$
총정밀도 $\sigma_T^2$	$\sigma_T^2 = \sigma_{R \& R}^2 + \sigma_P^2$

단계 2.2 : 측정 정밀도 계산

계측자 정밀도인 재현성, 계측기 정밀도인 반복성과 생산부품의 정밀도는 <표2>와 같다.

단계 2.3 : 측정 정밀도 평가

AIAG에서는  $1 - \alpha = 99\%$ 인 5.15를, MINITAB에서는  $1 - \alpha = 99.73\%$ 인 6을  $\sigma_{R \& R}$ 에 곱하여 각각  $6\hat{\sigma}_T$ ,  $6\hat{\sigma}_{historical}$ , 공차(Tolerance :  $USL - LSL$ )로 나누어 % 총변동(% 연구변동), % 공정변동, % 공차변동(PTR : Precision Tolerance Ratio)을 사용한다. PTR이 10% 미만인 경우는 Excellent, Unconditionally Acceptable, Adequate로, 30% 미만인 경우는 Marginal, Conditionally Unacceptable로, 30% 이상인 경우는 Unacceptable로 평가된다.

단계 3 : MPCCI의 개발 및 평가기준

단계 3.1 : MPCCI의 개발

측정프로세스의 MPCCI에서 치우침은 단계 1에서 평가되어 제외되고 정밀도만 체크하면 된다.

$$MPCCI = \frac{USL - LSL}{6\hat{\sigma}_{R \& R}}$$

상한, 하한 한쪽 규격인 경우 단계 2.3에서 6대신 분모, 분자에 3을 곱하면 되고 MPCCI 역시  $3\hat{\sigma}_{R \& R}$ 으로 평가한다.

<표3> MPCPI 및 PPCI 평가기준

측정프로세스			생산프로세스		
PTR	MPCI	판정기준	PCR	PPCI (k=0)	판정기준
10% 미만	11.1 초과	1등급	149% 이상	0.67 미만	5등급
20% 미만	5 초과	2등급	100% 미만	1.00 미만	4등급
30% 미만	3.3 이하	3등급	75% 미만	1.33 미만	3등급
			60% 미만	1.67 미만	2등급
			50% 이하	2.00 미만	1등급

<표4> CRD, RBD 측정모형

요인	V	CRD	RBD <sub>1</sub>	RBD <sub>2</sub>
		A, B: 모수	A: 변량, B: 모수	A: 변량, B: 모수
A	V <sub>A</sub>	$\sigma_E^2 + mr\sigma_A^2$	$\sigma_E^2 + r\sigma_{A \times B}^2 + mr\sigma_A^2$	$\sigma_E^2 + mr\sigma_A^2$
B	V <sub>B</sub>	$\sigma_E^2 + lr\sigma_B^2$	$\sigma_E^2 + lr\sigma_B^2$	$\sigma_E^2 + r\sigma_{A \times B}^2 + lr\sigma_B^2$
A × B	V <sub>A × B</sub>	$\sigma_E^2 + r\sigma_{A \times B}^2$	$\sigma_E^2 + r\sigma_{A \times B}^2$	$\sigma_E^2 + r\sigma_{A \times B}^2$
E	V <sub>E</sub>	$\sigma_E^2$	$\sigma_E^2$	$\sigma_E^2$

단계 3.2: 평가기준

단계 2.3에서 PTR은 MPCPI의 역수로 이를 고려한 MPCPI 평가기준과 생산프로세스의 PPCI와 PCR(Process Capability Ratio)의 관계는 <표3>과 같다.

예를 들어 MPCPI > 11.1 인 경우는 측정 정밀도가 스펙 공차에 10% 미만을 차지한다는 의미이며 PPCI ≥ 2.0 인 경우는 생산 정밀도가 스펙 공차에 50% 이하를 차지한다는 의미이다.

3.1.2 비파괴측정 모형 개발

3.1.1에서 계측자 A와 생산부품 B를 각각 고정 모수인 자(Fixed Factor)와 변량블럭인자(Random Block Factor)로 측정조건을 설정할 경우 CRD(Completely Randomized Design)와 RBD(Randomized Block Design) 모형이 생성된다. 본 연구에서는 지면의 한계로 3.1.1에서 단계 2.1의 측정모형만 언급하기로 하며 <표4>와 같다.

3.2 파괴 측정에서 MPCPI의 개발

3.2.1 2단계 지분실험법 모형

파괴측정인 경우 부품 B는 비파괴측정과 같이 공유하여 사용하지 못하고 계측자 A에게 각각 주어지므로 교차인자(Crossed Factor)가 아닌 지분인자(Nested Factor)로 측정조건이 설정되며 데이터 구조 모형식은

<표5> 3단계 지분실험법 측정 모형

요인	V	E(MS)	F <sub>0</sub>
A	V <sub>A</sub>	$\sigma_E^2 + nr\sigma_{A \times B}^2 + mn\sigma_A^2$	V <sub>A</sub> / V <sub>A × B</sub>
B	V <sub>B</sub>	$\sigma_E^2 + lr\sigma_{C(B)}^2 + ln\sigma_B^2$	V <sub>B</sub> / V <sub>C(B)</sub>
A × B	V <sub>A × B</sub>	$\sigma_E^2 + nr\sigma_{A \times B}^2$	V <sub>A × B</sub> / V <sub>E</sub>
C(B)	V <sub>C(B)</sub>	$\sigma_E^2 + lr\sigma_{C(B)}^2$	V <sub>C(B)</sub> / V <sub>E</sub>
E	V <sub>E</sub>	$\sigma_E^2$	

$y_{ijk} = \mu + a_i + b_{j(i)} + e_{k(ij)}$ 의 2단계 지분 실험법이 된다. 지면의 한계로 3.1.1의 단계2를 적용하면

$$E(MS_A) = \sigma_E^2 + r\sigma_{B(A)}^2 + mr\sigma_A^2,$$

$$E(MS_B) = \sigma_E^2 + r\sigma_{B(A)}^2,$$

$$E(MS_E) = \sigma_E^2$$

으로 계측기 정밀도 반복성  $\sigma_{R_2}^2 = V_{E(AB)}$ , 계측자 정

밀도 재현성  $\sigma_{R_1}^2 = \sigma_A^2 = \frac{V_A^2 - V_{B(A)}^2}{mr}$ ,

부품정밀도  $\sigma_P^2 = \sigma_B^2 = \frac{V_{B(A)} - V_{E(AB)}}{r}$ 가 계산된다.

3.2.2 파괴측정 모형 개발

3.2.1의 2단계 지분실험법을 A는 계측자, B는 생산부품, C는 날짜(k=1, 2, ..., r), 반복의 수(p=1, 2, ..., r)로 측정조건을 변경하였을 경우 3단계 지분실험법의 모형이 된다. 데이터의 구조 모형식은  $y_{ijkp} = \mu + a_i + b_j + (ab)_{ij} + c_{k(ij)} + e_{ijkp}$ 으로 측정모형은 <표5>와 같으며  $\sigma_{R_1}^2 = \sigma_A^2 + \sigma_{A \times B}^2$ ,  $\sigma_{R_2}^2 = \sigma_E^2$ ,  $\sigma_P^2 = \sigma_B^2 + \sigma_{C(B)}^2$ 으로 계산은 3.1.1의 단계 2.2와 같이 수행한다.

3.3 계수이산형 측정프로세스의 MPCPI 개발

계수이산형 측정프로세스의 ANOVA 모형으로는 계측자 A, 생산부품 B의 각 Cell(방)에 대해 되풀이(Repetition)하는 2방(Two-Way Cell) 분할법을 적용할 수 있다. 데이터의 구조 모형식은  $y_{ijk} = \mu + a_i + b_j + (ab)_{ij} + e_{k(ij)} = \mu + a_i + b_j + e_{(1)ij} + e_{2(ijk)}$  이며 이는 날짜 C를 고려할 경우 3방(Three-Way Cell) 분할법으로 확장이 가능하다.

계수이산형 제품은 측정이 불가능할 경우 인간의 5가지 감각기관에 의해 측정되거나 혹은 스펙이 경미한 경우 Go/No-Go(Limit) 게이지 또는 자동 선별장치에 의해 비교측정되는 경우 적용된다.

계수이산형 리미트 게이지와 계량연속형 다이얼(Dial)

게이지는 제품을 측정하는 방법에 차이가 있을뿐 스펙의 공차를 활용하는 것은 동일하다. 따라서 본 연구에서 제안한 2방, 3방 분할법에서 3.1.1과 같이 동일한 단계에 의하여  $\sigma_{R\&R}$ 을 계산하여 MPCl를 산출할 수 있다.

#### 4. 교정프로세스에서 CCPI의 개발

##### 4.1 수학적모형과 불확도

교정프로세스에서 수학적 모형에 대한 치우침과 확장불확도[1]의 계산은 다음과 같다.

단계 1 : 교정 수학적 모형의 설정에 의한 치우침 (편의)계산.

예를 들어  $M = A - B_1 + B_2 + B_3$ 의 수학적 모형에 대한 교정측정값은 보정값이 되며 이는 기대값(Expected Value)의 연산자(Operator) 처럼  $E(aX \pm bY) = aE(X) \pm b(Y)$ 의 선형성(Linearity)이 유지된다.

단계 2 : A형, B형 표준(Standard) 불확도  $U_i$  계산

단계 2.1 : A형 표준 불확도

표준기에 대한 계측기의 교정측정값  $n$ 개를 구하여 표준편차  $s$ 를 구한다. 중심 극한 정리(CLT : Central Limit Theorem)에 의해 표준오차(Standard Error)가  $U_A = \frac{s}{\sqrt{n}}$ 가 된다. 데이터를 몇 개의 그룹으로 나눌 수 있는 경우 자유도의 가중평균인 합동 표준편차  $S_p$ 를 구할 수도 있다.

단계 2.2 : B형 표준 불확도

B형 불확도는 과거의 교정 성적서 또는 이론분포로 알려진 과거의 정보를 통해서 구할 수 있으며 분포의 불확도는 정규분포, t분포, 사각분포, 삼각분포, U형분포 순서로 작아진다.

- (1) 정규분포 :  $U_B = \frac{U}{Z_{1-\alpha}}$ ,  $U$ : 교정서적서의 확장 불확도  $1-\alpha = 95\%, 99\%, 99.73\%$ 일 경우 포함인자  $Z_{1-\alpha} = 1.96, 2.58, 3.00$ 의 포함인자
- (2) t분포 :  $U_B = \frac{U}{t_{1-\alpha}(\nu_{eff})}$ ,  $\nu_{eff}$ 는 Satterthwaite 자유도
- (3) 삼각분포 :  $U_B = \frac{a}{\sqrt{6}}$ ,  $a$ 는 반범위(Half Range)
- (4) 사각분포 :  $U_B = \frac{a}{3}$

(5) U형분포 :  $U_B = \frac{a}{\sqrt{2}}$

(6) 사다리꼴분포 :  $U_B = (a^2(1+\beta^2)/6)^{\frac{1}{2}}$ ,  $\beta$ 는 작은 길이를 큰 길이로 나눈값

단계 3 : 결합(Combined) 표준 불확도  $U_c$ 의 계산

수학적 모형에서 1차 편미분(Partial Derivation)에 의한 감도계수(Sensitivity Coefficient)  $C_i$ 를 구하여 단계2의 표준 불확도에 곱해준다. 감도계수를 사용하는 이유는 수학적 모형의 단위를 통일시켜 주기 위해서이다. 합성 표준

불확도  $U_c = (U_A^2 + U_B^2)^{\frac{1}{2}}$ 로 분산의 가법성(Additivity of Variance)과 표준편차의 RSSM(Root Sum of Squares Method)를 이용해서 구한다. 상관계수(Correlation Coefficient)가 고려되는 결합 표준불확도 계산도 가능하다.

단계 4 : 확장(Extended) 불확도  $U_E$ 의 계산

단계 4.1 : 단계 2.1에서 A형 불확도 자유도  $\nu_i$  계산

$$\nu_A = n - 1$$

단계 4.2 : 단계 2.2에서 B형 불확도 자유도  $\nu_i$  계산

- (1) 정규분포 :  $\nu_{eff} > 30$ 인 경우  $\infty$
- (2) t분포 : 교정성적서의  $\nu_{eff}$
- (3) 사각분포 외 :  $\nu_B = \frac{1}{2}(\frac{100}{R})^2$ 에서 상대오차(Relative Error)가 0%, 즉  $1-R=100\%$ 인 경우  $\nu_E = \infty$ 가 된다.

단계 4.3 : 유의수준  $1-\alpha$ 에 대한 포함인자 계산

(1) t분포 :  $t_{1-\alpha}(\nu_{ff})$ , 유효자유도

$$\nu_{eff} = \frac{U_c^2}{\sum_{i=1}^k \frac{(c_i u_i)^4}{\nu_i}}$$

(2) 정규분포 :  $Z_{1-\alpha} = 1.96, 2.58, 3.00$ 인 경우

$$1-\alpha = 95\%, 99\%, 99.73\%$$

(3) 1개 삼각분포 : 포함인자 =  $\sqrt{6} - \sqrt{6\alpha}$

(4) 1개 사각분포 : 포함인자 =  $\sqrt{3}(1-\alpha)$

(5) 단계 4.2에서 지배적 성분의 불확도 ( $U_{main}$ )와 나머

지 성분의 불확도( $U_{remainder}$ )의 비율  $a = \frac{U_{main}}{U_{remainder}}$

의 값에 따라 포함인자의 값을 정할 수 있다. 만약  $0 \leq a < 1$ 인 경우 사각분포를,  $r > 10$ 인 경우 중심극한정리에 의하여 정규분포를 적용한다.  $r = 2$ 인 경우 2개

의 사각분포는 사다리꼴 분포를 적용하며,  $1 \leq r \leq 10$ 인 경우 포함인자  $= (3(r+1)^2 / (r^2 + 1))^{1/2} (1 - (4r\alpha / (r+1)^2))$  으로 계산된다.

단계 4.4 : 확장 불확도  $U_E$ 의 계산  
 $U_E = \text{포함인자} \times U_c$

## 4.2 교정 프로세스의 CCPI 개발

교정 프로세스의 CCPI 적용 단계는 다음과 같다.

단계 1 : 교정 치우침의 평가  
 4.1의 단계1의 방법으로 계산한다.

단계 2 : CCPI의 개발  
 $CCPI = \frac{USL - LSL}{6U_c}$ , 여기서 교정기관의 자격을 얻은 생산업체에서 4.1의 단계와 같이 구한다. 교정성적서를 활용하는 기업은 4.1의 단계 4.4에서  $U_c = U_E / \text{포함인자}$ 로 구한다. PPCI, MPCPI와 마찬가지로 상한, 하한규격일 경우  $3U_c$ 를 사용한다.

## 5. 통합 프로세스에서 EPCI의 개발

생산, 측정 교정의 3단계 프로세스에서 정확도(치우침)과 정밀도의 오차유형에 의한 확장 공정능력지수 EPCI의 평가단계는 다음과 같다.

단계 1 : 치우침의 평가  
 생산프로세스에서 치우침은 스펙의 기준치수와 관리도의 평균값의 차이를 2.1의 단계 3과 같이 구하며 목표부적합품률(부적합률)과 관리도의 평균 부적합품률(부적합률)의 차이는 2.2의 단계2와 같이 평가한다. 측정프로세스에서는 3.1.1의 단계1과 같이 선형성, 안정성을 구하며 교정프로세스에서는 4.1의 단계1과 같이 표준기와 측정기의 수학적 모형에 의한 교정오차 값이 된다.

단계 2 : 정밀도의 평가를 위한 EPCI의 개발  
 (1)양쪽규격의 경우

$$EPCI = \frac{USL - LSL}{6\sqrt{\sigma_w^2 + \sigma_{R\&R}^2 + U_c^2}}$$

분모의 정밀도는 생산프로세스에서의 정상인 공정에서의 군내 분산, 측정프로세스의 Gage R&R, 교정프로세스의 결합표준 불확도를 나타낸다.

(2)상한규격의 경우

$$EPCI_U = \frac{USL - \hat{\mu}}{3\sqrt{\sigma_w^2 + \sigma_{R\&R}^2 + U_c^2}}$$

(3)하한규격의 경우

$$EPCI_L = \frac{\hat{\mu} - LSL}{3\sqrt{\sigma_w^2 + \sigma_{R\&R}^2 + U_c^2}}$$

단계 3 : EPCI의 평가 및 민감도 분석

EPCI의 평가는 3.1.1의 단계3.2 기준에 의하여 수행한다. 교정불확도를 생산, 측정단계의 정밀도와 합성하기 위해서는 교정기관의 자격을 갖는 기업에서 공통된 스펙을 사용해야 하는 전제조건이 있다. EPCI 또는

<표6> 불확도 요약표(단위 :  $\mu m$ )

불확도 유형	불확도 성분	교정측정값	정보	표준 불확도	분포	감도계수	결합표준불확도	자유도
A형	측정값 A	$n=3$ $\bar{x} = 100.1\mu m$	s=5	$\frac{5}{\sqrt{3}} = 0.58$	정규	$\frac{\partial M}{\partial A} = 1$	0.58	2
B형	표준기값 $B_1$	$100\mu m$	교정 성적서 $k=2$ , $U_E=0.8$	$\frac{0.8}{2} = 0.4$	5	$\frac{\partial M}{\partial B_1} = -1$	-0.4	$\infty$
B형	분해능 $B_2$	$0\mu m$	분해능 $1\mu m$	$\frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29$	삼각	$\frac{\partial M}{\partial B_2} = 1$	0.29	$\infty$
B형	온도차이 $B_3$	$0^\circ c$	온도차이 $\pm 2^\circ c$	$\frac{2}{\sqrt{6}} = 0.82$	사각	$\frac{\partial M}{\partial B_3} = 1$	0.82	$\infty$
	수학적 모형 $M = A - B_1 + B_2 + B_3$	치우침 $= 0.1\mu m$					RSSM에 의해 $U_c = 1.12$	$v_{eff} = 27.8 \approx 27$



이의 역수인 비율(Ratio)에 영향을 주는  $\sigma_w, \sigma_{R\&R}, U_c$ 는 제품가격, 품질에 따라 생산, 측정, 교정의 중요도와 난이도를 고려하여 계획단계에서 최적배분을 하고 이를 관리해 나가는 부시간 품질기술 업무가 요구된다.

적용 예제 : 생산 프로세스에서 조립치수의 스펙이  $100 \pm 0.8\mu m$ 인 제품이 SPC관리도에 의해 운영되며  $\bar{x}-R$ 관리도 적용 결과 정상으로, 치우침  $k=0$ 으로 판정되었다. 따라서 군내 표준편차  $\hat{\sigma}_w=5.23$ 을 2절과 같이 구할 수 있었다.

측정프로세스에서 치수를 측정하는 마이크로미터의 능력은 MSA에 의해 운영되며 파괴측정 ANOVA 모형에서 3절과 같이  $\hat{\sigma}_w=1.35$ 를 구하였다.

교정프로세스에서 표준기는 게이지블럭  $100 \pm 0.8\mu m$ 에 대해 최소눈금의 분해능  $1\mu m$ 인 마이크로미터를 교정할 경우 두 기기의 온도차이는  $\pm 2^\circ C$ 이다.

교정 수학적 모형  $M=A-B_1+B_2+C$ 이며 반복 교정불확도 측정은  $n=3$ 으로 하였다. 교정불확도  $U_c$ 를 구하기 위한 불확도 요약표(Uncertainty Budget)는 <표6>과 같다.

단, EPCI는 KOLAS에서 교정기관으로 인증받은 기업에서 동일한 생산, 측정, 교정스펙을 사용하는 것을 전제조건으로 한다. ISO에서  $\nu_{eff} > 10$  일 경우 정규 분포를 적용하며  $1-\alpha=95\%$ 일 경우 포함인자=2로 측정불확도  $U_E=2 \times 1.12=2.24\mu m$ 이다.

$Y=y \pm U_E=0.1 \pm 2.24\mu m$  ( $1-\alpha=95\%$ , 포함인자=2)이다. 여기서  $U_c=1.12$ 는 교정불확도로 정밀도로 간주된다. 따라서

$$EPCI = \frac{USL - LSL}{6\sqrt{\sigma_w^2 + \sigma_{R\&R}^2 + U_c^2}}$$

$$= \frac{10008 - 96.4}{6\sqrt{5.23^2 + 1.35^2 + 1.12^2}}$$

$$= 0.05$$

로 단계 3에 의하면 5등급으로 평가된다. 프로세스별  $PPCI=0.05$ ,  $MPCI=0.20$ ,  $CPCI=0.24$ 이며 공차대비  $\hat{\sigma}_w$ 가 20배,  $\hat{\sigma}_{R\&R}$ 은 5배,  $U_c$ 는 4.2배의 비율(Ratio)을 이룬다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 생산, 측정 및 교정 프로세스에서 오차 유형화에 의한 단계별 공정능력지수 PPCI, PPPI, MPCPI, CPCI와 이를 통합연계한 확장 공정능력지수 EPCI를 개발하였다.

계량연속형 프로세스에서는  $\bar{x}-R$ ,  $\bar{x}-s$ , I-MR해석용, 관리용 관리도로 정상인 경우 군내표준편차  $\hat{\sigma}_w$ , 이상인 경우 통합표준편차  $\hat{\sigma}_o$ 의 정밀도와 치우침 계수  $k=0$ ,  $k>0$ 인 경우로 유형화하여 PPCI와 PPPI를 개발하였다. 또한 계수이상형 생산프로세스에서도  $p$ ,  $pn$ ,  $c$ ,  $u$  해석용 관리도를 이용하여 계량연속형과 같이 오차를 정밀도와 정확도로 유형화하여 PPCI, PPPI를 제안하였다. 특정 프로세스에서 비파괴측정, 파괴측정 조건에서 사용되는 관련 ANOVA모형과 MPCPI를 개발하였고 한계 게이지로 자동선별되는 계수형 측정프로세스의 모형과 MPCPI 표준방안을 제시하였다.

교정프로세스에서 수학적 모형에 의한 A형, B형 불확도와 감도계수로 합성된 결합 불확도의 교정정밀도로 CCPI를 산출하는 방안을 제안하였다.

끝으로 생산, 측정, 교정의 전 단계를 합성하여 평가할 수 있는 EPCI를 개발하였으며 이의 역수 EPCR(Extended Process Capability Ratio)는 공차대비 각 프로세스의 정밀도의 비율을 알 수가 있어 평가기준의 보완책으로 활용될 수 있다.

## 7. 참 고 문 헌

- [1] 최성운, "측정 불확도 모형 분류 및 평가", 대한안전경영과학회지, 9 (1) (2007) : 145-156.
- [2] 최성운, "측정시스템 분석 모형의 고찰 및 새로운 모형의 제안", 대한안전경영과학회지, 10 (1) (2008) : 191-195.
- [3] 최성운, "분할법에서 EMS 알고리즘을 이용한 풀링 분산검정", 대한안전경영과학회지, 10 (3) (2008) : 245-251.
- [4] 최성운, "이산공정에서 SPC 관리도에 의한 Z시그마 수준과 PCI 및 PPI의 산출", 대한안전경영과학회지, 11 (1) (2009) : 131-136.
- [5] 최성운, "정확도와 정밀도 오차에 의한 PCI, PPI 및 Z시그마 수준의 유형화", In Press.
- [6] Borror C.M, Montgomery D.C., Runger G.C., "Confidence Intervals for Variance Components from Gauge Capability Studies", Quality and Reliability Engineering

International, 13 (1997) : 361-369.

- [7] Bothe D.R., Measuring Process Capability, Landmark Publishing Inc., 2001.
- [8] Breyfogle F.W., Implementing Six Sigma, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2003.
- [9] Burdick R.K., Allen A.E., Karsen G.A., "Comparing Variability of Two Measurement Processes Using R&R Studies", Journal of Quality Technology, 34 (2002) : 97-105.
- [10] Harter HL, "On the Analysis of Split-Plot Experiments", Biometrics, 17 (1) (1961) : 144-149.
- [11] KSA 3000:2005 측정결과의 불확도 측정 및 표현을 위한 지침.
- [12] Pyzdek T., The Six Sigma Handbook, 2nd Edition, McGraw-Hill, 2003.
- [13] Rao C.V., Saxena K.P., "A Study of Power of a Test Procedure Based on Two Preliminary Tests of Significance", Estadiska, 33 (1979) : 201-214.
- [14] Rezaie K, Ostadi B, Taghizadeh MR, "Applications of Process Capability and Process Performance Indices", Journal of Applied Sciences, 6 (5) (2006) : 1186-1191.
- [15] <http://www.kasto.or.kr>
- [16] <http://www.kriss.re.kr>
- [17] <http://kolas.ats.go.kr>

## 저 자 소 개

최 성 운



현 강원대학교 산업공학과 교수. 한양 대학교 산업공학과에서 공학사, 공학석사, 공학박사 학위를 취득하고, 1994년 한국과학재단 지원으로 University of Minnesota에서 1년간 Post-Doc을 수행했으며, 2002년부터 1년 반동안 University of Washington에서 Visiting Professor를 역임하였음. 주요 관심분야는 자동화 생산 및 장치 산업에서의 품질관리이며, 컴퓨터, 정보시스템의 신뢰성 설계 및 분석, 서비스 사이언스, RFID 시스템에서도 관심을 가지고 있음.

주소: 경기도 성남시 수정구 복정동 산65번지 강원대학교 산업공학과