

# 통계적 공정 관리(SPC)와 엔지니어링 공정 관리(EPC)의 비교 조사 : 통합 방안을 중심으로

이명수\* · 김광재\*\*

\* 포항공과대학교 기계산업공학부

## A Comparative Study of SPC and EPC with a Focus on Their Integration

Myeong-Soo Lee\* · Kwang-Jae Kim\*\*

\* Division of Mechanical and Industrial Engineering,  
Pohang University of Science and Technology

Key Words : Statistical Process Control(SPC), Engineering Process Control(EPC), Process Monitoring, Process Adjustment

### Abstract

With the common objective to improve process productivity and product quality, statistical process control (SPC) and engineering process control (EPC) have been widely used in the discrete-parts industry and the process industry, respectively. The major focus of SPC is on process monitoring, while that of EPC is on process adjustment. The emergence of the hybrid industry necessitates a synergistic combination of the two methods for an effective process control. This paper investigates the existing studies on SPC, EPC, and the integration of the two methods. This paper also presents future research issues in this field.

## 1. 서 론

오늘날 품질 관리에 있어서 공정 관리의 역할은 매우 큰 비중을 차지하고 있다. 공정 관리의 목적은 생산 공정을 적절히 관리함으로써 제조 단계에서부터 불량품의 발생을 미리 예방하여 고객이 요구하는 품질의 제품을 생산하는 데에 있다. 이러한 상황에서 통계적 공정 관리(Statistical Process Control; 이하 SPC)와 엔지니어링 공정 관리(Engineering Process Control; 이하 EPC)는 각각의 특성을 지니고 널리 이용되고 있다.

SPC는 여러 개의 부품들을 조립하여 제품을 만

드는 조립 산업에 주로 적용되어 왔다. SPC에서는 관리도(Control Chart)를 통해 공정이 관리 상태를 이탈한 경우 이를 가급적 빨리 인지하는 공정 감시(Process Monitoring)에 중점을 둔다(DeVor *et al.*, 2002; Xie *et al.*, 2001; Evans and Lindsay, 1996; Mitra, 1993). 공정이 관리 상태를 이탈했음이 인지되면, 공정 엔지니어는 생산을 중단시키고 공정 내의 이상 원인(Assignable Cause)을 찾아내어 이를 제거하게 된다.

한편, EPC는 화학 공정과 같이 원료가 설비를 통해 흘러가는 동안 변환이나 변형을 일으켜서 제품이 되는 장치 산업에서 널리 활용되고 있다. EPC에서는 공정의 품질 특성치가 목표치에 일치되도록 관련 인자를 실시간으로 보정하는 공정 조정(Process Adjustment)에 중점을 둔다(Box and Luceno, 1997; Crowder *et al.*, 1997; Kuo, 1995). 이러한

† 교신저자 kjk@postech.ac.kr

※ 본 논문은 2004년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

공정 조정은 자동 공정 관리(Automatic Process Control)로도 알려져 있으며, 피드백(Feed-Back) 또는 피드포워드(Feed-Forward) 제어를 사용하여 이루어진다.

두 방법론은 공정 내의 변동 원인을 감소시키고 품질 수준을 높이기 위한 목적상의 공통점이 있으나, 다음의 두 가지 측면에서 분명한 차이점이 존재한다. 첫째로 실행 전략 측면에서 볼 때, 두 방법론은 상대적인 차이가 있다. 즉, SPC는 전사적인 품질 개선 활동의 일부로서 최고 경영자에 의하여 톱-다운(Top-Down) 방식으로 이루어지며, ‘매니지먼트’의 성격이 강하다. 한편, EPC는 공정 엔지니어에 의해 버텀-업(Bottom-Up) 방식으로 이루어지며, ‘제어’의 성격이 강하다(Montgomery *et al.*, 1994). 둘째로 역할 측면에서 볼 때, 두 방법론은 큰 차이가 존재한다. 일반적으로 공정 관리는 ‘감시(Monitoring) - 진단(Diagnosis) - 제어(Control)’의 세 가지 요소로 구성된다. SPC는 주로 공정 변화를 감시(Monitoring)하는 역할만을 수행할 뿐, 이상원인 파악 및 조치 활동은 공정 엔지니어의 재량에 맡겨진다(Del Castillo, 2002). 반면에 EPC는 측정된 현재의 품질 특성치 또는 예측된 미래의 품질 특성치를 바탕으로, 제어(Control) 이론에 근거한 공정 조정(Adjustment) 역할을 수행할 뿐 공정 감시나 진단은 다루지 않는다(Janakiram and Keats, 1998).

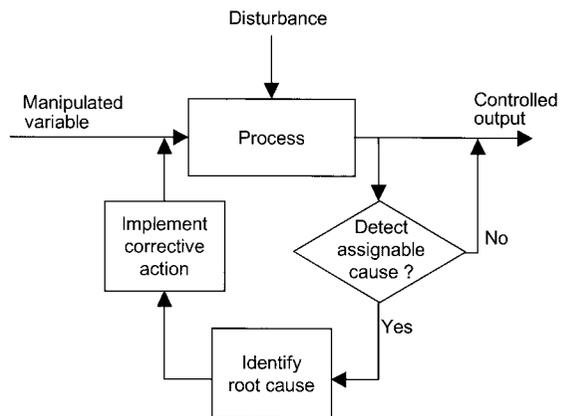
이와 같이 두 방법론은 서로 모순되거나 상충되지 않는, 상호 보완적인 특성을 가지고 있다. 또한, 근래에 들어 부품 산업과 장치 산업의 경계가 모호해지고, 컴퓨터 칩(Chip) 제조와 같은 하이브리드(Hybrid) 형태의 산업이 점차로 보편화되고 있다. 따라서 이러한 시대적 상황에 따라 SPC와 EPC의 통합에 대한 필요성이 제기되기 시작했다(Box *et al.*, 1997; Box and Kramer, 1992).

본 논문은 SPC와 EPC에 대한 기존 연구를 비교, 분석하고, SPC-EPC 통합 시 고려해야 될 연구 이슈를 도출하고자 한다. 이를 위해, 먼저 SPC와 EPC에 관한 기존 연구를 조사, 정리하였다. 그리고 두 방법론의 특징을 서로 비교한 후, SPC-EPC 통합에 관한 기존 연구를 조사, 정리하였다. 정리된 결과를 바탕으로 하여, SPC-EPC 통합 시 고려해야 할 이슈를 도출하였다. 마지막으로 도출된 이슈에 대한 토의 및 결론을 제시하였다.

## 2. 문헌 조사

### 2.1 통계적 공정 관리(SPC)

일반적으로 SPC는 일련의 ‘감시, 원인 파악, 조치’의 활동으로 구성된다(Montgomery, 1991). <그림 1>에서 보는 바와 같이, 먼저 공정으로부터 품질 특성에 대한 데이터를 수집하여 공정이 관리 상태에 있는지를 감시한다. 만일 공정이 관리 상태를 이탈했다면, 즉 이상 원인에 의해 공정이 변화했다면, 해당 이상 원인을 파악하여, 이를 제거한다. 앞서 기술한 바와 같이, SPC에서는 주로 공정 변화를 감시하는 방법론 측면의 연구들이 대부분이고, 이상 원인 파악 및 조치 활동을 위한 통계 방법론에 대한 연구는 상대적으로 미미하다(Del Castillo, 2002).



<그림 1> Structure of SPC(Montgomery, 1991)

SPC의 가장 대표적인 공정 감시 방법론인 관리도는 품질 특성의 변동을 그래프로 나타낸 것이다. 1930년대 슈하트(Shewhart)에 의해 제안된 관리도는 품질 특성의 중심을 관리하는 ‘평균값 관리도(X-bar Chart)’, 산포를 관리하는 ‘범위 관리도(R Chart)와 표준편차 관리도(s Chart)’, 계수형 관리도인 ‘불량률 관리도(P Chart), 결점수 관리도(C Chart)’ 등이 있다. 전통적인 관리도에 대한 내용과 관리 상태의 판단 기준에 대한 자세한 내용은 DeVor *et al.* (2002), Evans and Lindsay(1996), Mitra (1993) 등을 참고한다.

슈하트 관리도는 공정의 변화를 판단하는 데에 있어서, 이미 검사된 표본 데이터는 고려하지 않고 단지 현재의 표본 데이터만을 활용함으로써 미세한

공정 변화를 탐지할 수 없다는 단점이 있다. 현재의 데이터뿐만 아니라 이전에 수집된 데이터를 모두 활용하는 관리도 기법으로 ‘누적합 관리도(CUSUM Chart)’와 ‘지수가중 이동평균 관리도(EWMA Chart)’가 개발되었다. 누적합 관리도와 지수가중 이동평균 관리도에 대한 자세한 내용은 각각 Hawkins and Olwell(1998)과 Lucas and Saccucci(1990)를 참고한다.

한편, 관리 한계선을 사용하지 않는 ‘예비 관리도(Pre-Control Chart)’라는 것이 있다. 이 관리도는 관리 한계선 대신 규격 한계선을 사용한다. 예비 관리도에서는 규격 구간을 4등분하여 내측 두 구간을 ‘Green Zone’, 외측 두 구간을 ‘Yellow Zone’, 규격 한계선 외부를 ‘Red Zone’으로 구분한다. 이를 통해 공정이 항상 ‘Green Zone’에서 움직이도록 관리하는 것이다. 예비 관리도에 대한 자세한 내용은 Ledolter and Swersey(1997)과 Steiner(1997~1998)를 참고한다.

일반적으로 품질은 서로 상관관계가 있는 여러 개의 품질 특성에 의해 결정된다. ‘다변량 관리도(Multivariate Chart)’는 평균 벡터와 분산-공분산 행렬을 이용하여 이러한 상관관계를 고려한다. 다변량 관리도는 다변량 분포를 기반으로 한 관리도를 비롯하여 주성분 분석(Principal Component Analysis; PCA)이나 PLS(Partial Least Squares)를 이용한 관리도 등 다양한 형태가 존재한다. 다변량 관리도에 대한 자세한 내용은 Mason *et al.*(1997), Kourtis and MacGregor(1996), Lowry and Montgomery(1995) 등을 참고한다.

전통적인 형태의 관리도는 시간의 흐름에 따라 수집된 데이터 간에 서로 독립(Independent)임을 가정하고 있다. 하지만 연속 생산 공정과 같이 데이터 간의 자기상관(Autocorrelation)이 존재하는 경우가 있다. 자기상관 데이터를 고려하는 일반적인 방법은 ‘시계열 관리도(Time-Series Chart)’를 작성하는 것이다. 자기상관 데이터를 고려하는 관리도에 대한 자세한 내용은 Faltin *et al.*(1997)과 Montgomery and Mastrangelo(1991)를 참고한다.

이외에 ‘생산량이 적은 경우의 관리도 방법(Control Chart for Short Run)(Del Castillo *et al.*, 1996)’, ‘표본 수 및 표본 방법이 일정하지 않은 경우의 관리도 방법(Control Chart with Variable Sampling)(Costa, 1997; Crowder *et al.*, 1997;

Reynolds *et al.*, 1990)’, ‘관리도의 경제적 설계 방법(Economic Design of Control Chart)(Keats *et al.*, 1997; Ho and Case, 1994)’ 등 다양한 연구 주제들이 있다.

## 2.2 엔지니어링 공정 관리(EPC)

EPC에서 사용하는 제어 방식에는 크게 ‘피드백(Feed-Back) 제어’와 ‘피드포워드(Feed-Forward) 제어’로 구분할 수 있다(Stephanopoulos, 1984). 피드백 제어는 품질 특성치(Controlled Output)와 목표치와의 차이에 관한 정보가 피드백 루프(Loop)를 통해 보정 변수(Manipulated Variable)로 전달되어 보상을 실시하는 방식을 말한다(<그림 2(a)>참고). 이 방식은 모든 방해 원인(Disturbance)을 간단하게 보상해 줄 수 있는 장점이 있기 때문에 일반적으로 사용되고 있다. 피드백 제어 중 널리 이용되는 형태로 ‘비례-적분-미분(Proportional-Integral-Differential; 이하 PID) 제어’가 가장 대표적인 제어 방식인데, 식 (1)과 같이 보정 변수의 수준을 결정한다(Tsung *et al.*, 1999) :

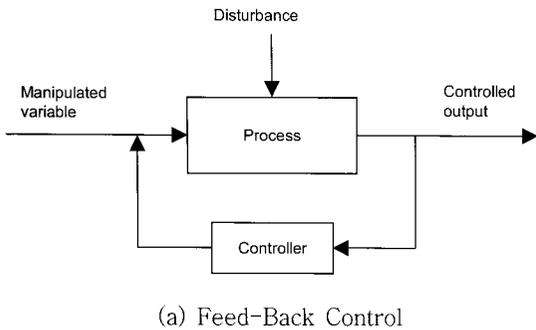
$$u_t = -k_p e_t - k_I \sum_{j=0}^{\infty} e_{t-j} - k_D (e_t - e_{t-1}). \quad (1)$$

여기서  $k_p$ ,  $k_I$ ,  $k_D$ 는 상수(Constant)이고,  $e_t$ 는 시간  $t$ 에서의 품질 특성치와 목표치와의 차이를,  $u_t$ 는 시간  $t$ 에서의 보정 변수의 수준을 의미한다.

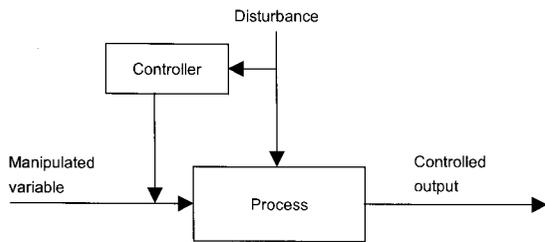
피드포워드 제어는 피드백 제어와는 달리 공정에 영향을 미치는 방해 원인의 종류와 크기를 미리 예측하여 그것들이 공정에 변화를 일으키기 전에 미리 보정 변수를 통하여 그에 상응하는 보상을 취해 주는 방식을 말한다(<그림 2(b)>참고). 이 방식은 공정에 영향을 미치는 방해 원인이 모두 측정 가능할 경우에 효과적이거나, 대부분의 생산 공정에서는 공정 내의 모든 방해 원인을 측정하기 어려우므로 실제로는 잘 적용되지 못하고 있다.

이와 같은 제어 방식은 주로 수학적, 공학적으로 모델링 함으로써 이루어진다. 대표적인 제어 모델로는 ‘PID Controller’, ‘MMSE(Minimum Mean-Squared Error) Controller’, ‘ARIMA(Auto-Regressive Integrated Moving Average) Controller’ 등이 있다. 이에 대한 자세한 내용은 김종걸과 정해운(2000), Box and Luceno(1997), Crowder

et al.(1997), Kuo(1995), Stephanopoulos(1984) 등을 참고한다.



(a) Feed-Back Control



(b) Feed-Forward Control

<그림 2> Structure of EPC(Stephanopoulos, 1984)

### 2.3 SPC-EPC 통합

일반적으로 제조업에서의 SPC 담당자와 EPC 담당자는 서로 다른 역할을 가지고 있다. 그런 이유로, 그들은 서로의 업무를 잘못 이해하거나 서로의 업무에 대해 비판적인 시각을 갖는 경우가 종종 발생한다(Box and Kramer, 1992). 예를 들어, SPC 담당자들은 'EPC는 공정의 방해 원인을 제거하지 않고 공정을 조정하려고 하며, 공정에 관한 정보를 감추게 할 뿐만 아니라 특성치의 산포를 증가시키는 과도보상을 하는 경우가 발생한다'라고 비판한

다. 반면에 EPC 담당자들은 'SPC는 공정을 안정화시키는 데에 있어서 효과적이지 못하고, 공정의 동적인 특성을 파악하지 못한다'라고 말한다(박치형, 1992).

위와 같은 비판들은 서로의 특성을 이해하지 못한 상황에서 발생한 것이다. 공정의 방해 원인 중에는 제거 비용, 기술적 문제 등으로 인하여 제거할 수 없는 것이 존재하며, 이러한 경우 보정 변수를 사용하여 보상해 주는 것이 효과적이다. 또한 지수 가중 이동평균(EWMA) 관리도와 같이, 자동 공정 제어 하에서 공정을 안정화하는 데에 효과적인 SPC 기법들이 개발되고 있다(Box and Kramer, 1992). <표 1>은 여러 관련 연구들로부터 두 방법론의 특성을 비교, 요약한 결과이다(김종걸과 정해운, 2002; Janakiram and Keats, 1998; Box et al., 1997; Montgomery et al., 1994; Box and Kramer, 1992). 결과적으로, 두 방법론은 서로 모순되거나 상충되지 않는, 상호 보완적인 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

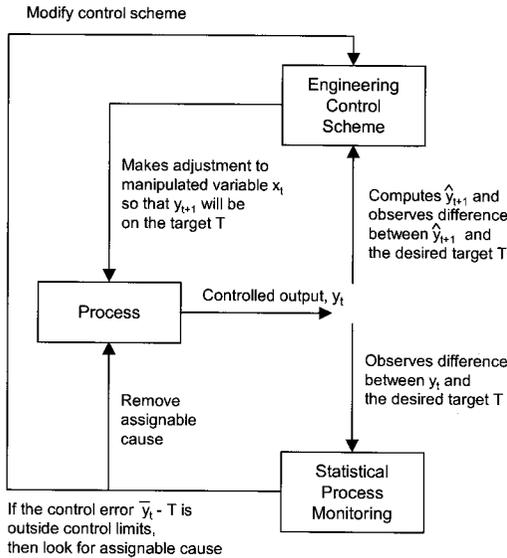
최근 들어, 부품 산업과 장치 산업의 경계가 점점 모호해지고 컴퓨터 칩(Chip) 제조와 같은 하이브리드(Hybrid) 형태의 산업이 보편화되는 추세이다. 이에 따라, SPC와 EPC의 통합에 대한 필요성을 제기하고, 두 방법론의 통합 접근이 개개의 독립적인 접근 방법보다 우수함을 증명하는 연구들이 이루어지고 있다(Xie et al., 2001; Box et al., 1997; Montgomery et al., 1994).

Montgomery(1991)은 이러한 상호 보완적인 관계를 <그림 3>과 같이 표현하였다. 즉, 공정으로부터 측정된 품질 특성  $Y_t$ 와 목표 T와의 차이가 관리 한계 밖에 있는 지를 감시함으로써 이상 원인을 찾아 제거하는 SPC 과정을 거치게 된다. 동시에 측정된 품질 특성  $Y_t$ 로부터  $Y_{t+1}$ 을 예측하고 이것과 목

<표 1> Comparison of SPC and EPC

	SPC	EPC
Focus	Process Monitoring	Process Adjustment
Objective	Reducing variability by detecting and eliminating the assignable causes	Minimizing variability by compensating for the effect of disturbances
Application Domain	Parts Industry	Process Industry
Major Tool	Control Charts	Feed-back/Feed-forward Regulation
Typical Assumption	Successive observations are independent	Successive observations are autoregressive

표 T와의 차이를 보정하는 EPC의 피드포워드 과정을 거치게 된다.



<그림 3> Relationship between SPC and EPC (Montgomery, 1991)

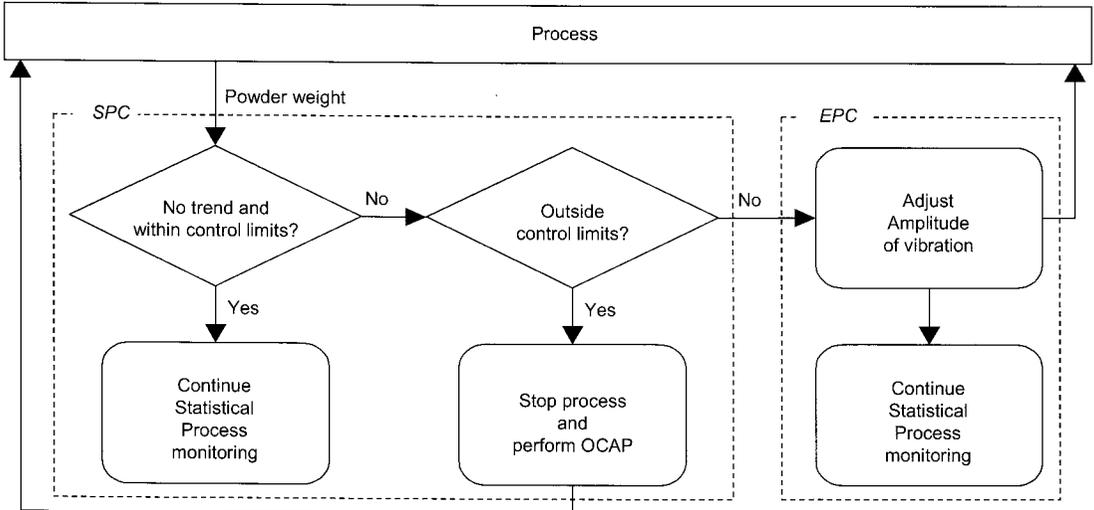
Montgomery(1991)의 관계 모델을 바탕으로 하여 두 방법론을 통합하고자 하는 후속 연구들이 다수 진행되고 있으며, <표 2>에 정리된 바와 같다. 이러한 연구들은 대부분 SPC의 관리도 기법과 EPC의 제어 기법을 통합하는 형태로 이루어지고 있다. SPC 측면에서는 자기상관 데이터를 다룰 수 있는

CUSUM/Cuscore 관리도나 다변량 데이터를 다룰 수 있는 PCA/Bivariate/ $T^2$  관리도를, EPC 측면에서는 주로 PID Controller나 MMSE Controller를 다루고 있는데, 가장 대표적인 통합의 형태는 ' $T^2$  관리도 + MMSE Controller'라고 할 수 있다. 일부의 연구에서는 공정이 관리 상태를 벗어난 경우, 이상 원인을 찾아내기 위한 진단(Diagnosis) 방법으로써 신경망 분석(Neural Network)과 동적인 주성분 분석(Dynamic PCA) 등의 기법을 통합 모델에 포함시키고 있다(Chiu *et al.*, 2003; Shi and Tsung, 2003; Tsung, 2000).

한편, 현실적으로 실제 생산 공정에 적용이 가능하도록 Montgomery(1991)의 관계 모델을 구체화하는 통합 절차에 관한 연구들이 진행되고 있다(김종걸과 정해운, 2002; Shi and Tsung, 2003; Tsung, 1999; Janakiram and Keats, 1998). 그 중에서 Janakiram and Keats(1998)의 통합 절차가 <그림 4>에 주어져 있다. 먼저 SPC의 공정 감시를 통해 공정이 관리 상태인지를 검사한다. 만일 관리 한계선 내에 위치하고 특정 패턴이 보이지 않으면 공정은 관리 상태로 간주한다. 만일 공정이 특정 패턴을 나타내기는 하지만 관리 한계선 내에 위치한다면, EPC의 공정 조정을 실시하고 공정 감시를 계속한다. 만일 공정이 관리 한계선 밖에 위치한다면, 생산을 중단시키고 이상 원인을 찾아 제거한다. 이러한 통합 절차는 공정 관리를 세부 단계로 구분하여 각 단계별로 의사 결정 포인트를 설정하고, 이에 따

<표 2> Studies on integration of SPC with EPC

	SPC	EPC
김종걸과 정해운(2002)	Various Control Charts	MMSE Controller
Chiu <i>et al.</i> (2003)	Shewhart/CUSUM Charts	MMSE/PI Controllers
Shi and Tsung(2003)	$T^2$ Chart	ARMA + PID Controller
Jiang and Tsui(2002)	Shewhart Chart	MMSE/PI Controllers
Tsung and Apley(2002)	Dynamic $T^2$ Chart	ARMA + PID Controller
Tsung(2000)	$T^2$ Chart	ARMA+MMSE Controller
Tsung(1999)	PCA Chart	PID Controller
Shao and Chiu(1999)	Shewhart Chart	MMSE/PI Controllers
Tsung <i>et al.</i> (1999)	Bivariate Chart	PID Controller
Capillar <i>et al.</i> (1999)	Various Control Charts	MMSE Controller
Shao(1998)	Cuscore Chart	MMSE Controller
Janakiram and Keats(1998)	Shewhart Chart	MMSE Controller



<그림 4> Integrated SPC/EPC system for powder weight process control(Janakiram and Keats, 1998)

라 적절한 공정 관리 방법을 수행하도록 하는 특징이 있다.

### 3. SPC-EPC 통합 시 고려해야 할 이슈

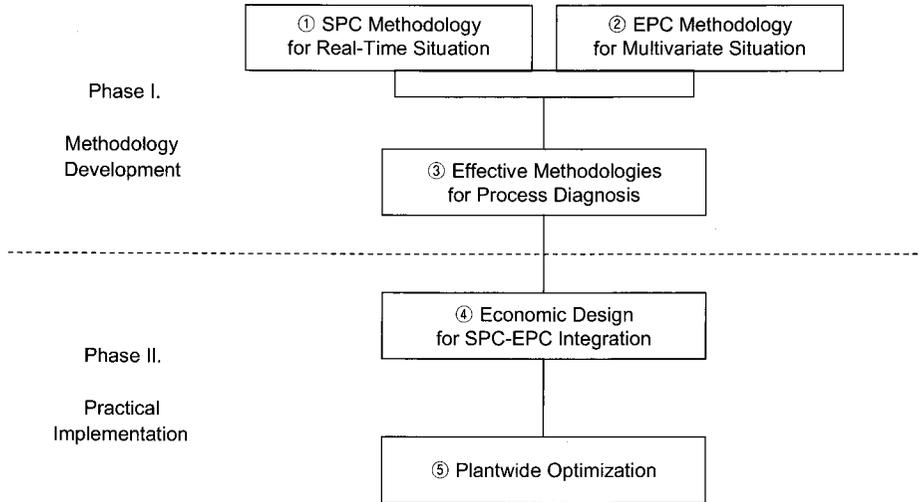
SPC-EPC 통합에 관한 연구는 아직까지 초기 단계라 할 수 있다. 왜냐하면 통합에 대한 필요성이 제기된 이후로, 현재까지는 관리도 기법과 제어 기법 간의 통합 가능성 및 통합 관리의 잠재적 우수성을 제시하는 연구가 대부분이기 때문이다. 이러한 통합 모델이 실제 생산 공정에 적용되어 현실적 성과를 달성하기 위해서는 일관된 관점에서 계획된 연구가 필요하다. 이러한 연구의 틀이 <그림 5>에 제안되어 있다.

<그림 5>는 크게 2단계로 구성되어 있으며, 5개의 주요 연구 이슈가 제시되어 있다. 첫 번째 단계는 통합을 위한 ‘방법론 개발’로서, 두 방법론의 효과적인 통합을 위해 각 방법론이 통합 전에 보다 깊이 있게 연구되어야 하는 이슈와 두 방법론이 효과적으로 통합되기 위해 필요한 중간 과정으로 ‘공정 진단(Process Diagnosis)’ 방법론의 개발에 관한 이슈이다. 두 번째 단계는 ‘실제 공정 적용’으로서, 실제 공정의 현실에 적합하도록 하는 경제적인 통합 모델의 개발에 관한 이슈와 통합 모델이 단일 공정에서 전(全) 공정으로 확장할 때의 이슈에 관한 것이다. 각 이슈별 세부 설명은 다음과 같다.

첫째로, 통합 방법론 하에서 실시간(Real-Time) 데이터를 활용하여 효과적으로 공정을 감시할 수 있는 SPC 방법론의 개발이 요구된다. 앞서 문헌 조사에서 설명한 바와 같이, SPC 방법론은 일반적으로 표본 내에서는 우연 원인(Chance Cause)이, 표본 간에는 이상 원인(Assignable Cause)이 발견되도록 합리적인 표본 주기를 정하고 이에 적합한 공정 이상 감지 기준을 규정하고 있다. 하지만 실시간으로 끊임없이 데이터가 수집되는 상황 하에서 볼 때, 기존의 전통적인 표본 주기 결정 방법 및 공정 이상 감지 기준은 더 이상 효과적인 기준이 되지 못한다. 따라서 이러한 상황에 적합한 관리도 개발 및 공정 이상 감지 기준 설정에 관한 연구가 필요하다.

둘째로, 통합 방법론 하에서 다중 변수를 고려하는 EPC 방법론의 개발이 요구된다. 앞서 문헌조사에서 설명한 바와 같이, SPC 방법론은 다변량 분포를 기반으로 한 관리도나 주성분 분석과 같이 차원을 축소하는 관리도 등 다양한 형태가 개발되어 있다. 하지만, EPC 방법론은 일반적으로 단일 변수만을 다루고 있다. 따라서 효과적인 통합모델 연구를 위해서는 EPC에서 다중 변수를 고려할 수 있는 방법론의 개발이 선행되어야 할 것이다.

셋째로, 통합 방법론을 더욱 효과적으로 만들기 위한 ‘공정 진단 (Process Diagnosis)’ 방법론의 연구가 요구된다. ‘감시(Monitoring)-진단(Diagnosis)-제어(Control)’의 공정 관리 3요소 중 SPC-EPC 통합 모델에서 상대적으로 미진하게 처리되고 있는



<그림 5> Framework for future research

요소가 ‘진단’ 부분이다. 기존의 진단 방법은 가설검정, 회귀분석, 분산분석 등의 전통적인 통계 기법들에 의존하여 왔다. 이들은 대량의 데이터가 수집되고 인자들 간의 상관관계가 복잡하게 얽혀 있으며 자기상관관계가 존재하는 상황에서는 효과적이지 못하다. 따라서 이러한 상황에 적합한 공정 진단 방법의 개발 및 SPC-EPC 통합 모델에서의 활용 방안에 대한 연구가 필요하다. 이와 관련된 연구 이슈에 관해서는 Venkatasubramanian *et al.*(2003a, 2003b, 2003c)를 참고해 볼 수 있다.

넷째로, 통합 방법론 하에서의 경제적인 통합 모델 설계 방안에 대한 연구가 요구된다. 기존의 경제적인 SPC 설계는 공정 특성을 감안하여 표본 개수, 표본 주기 등의 SPC 관련 파라미터들을 결정하는 문제에 초점이 맞추어져 있다. 하지만, 통합 방법론에서는 SPC 비용과 EPC 비용이 통합된 관점에서 이를 최소화하는 방안이 마련되어야 할 것이다. 따라서 통합 비용 모델의 개발과 그 모델의 최적화 방법론의 개발이 요구된다.

마지막으로, 전(全)공정을 고려하는 통합 방법론(Plantwide SPC-EPC Integration)에 대한 연구가 요구된다. 기존의 SPC-EPC 통합 모델은 시간 도메인(Time Domain) 하에서 단일 공정에 국한되어 있다. 생산 공정의 효율과 품질 개선을 극대화하기 위해서는 개별 공정의 최적화보다는 전체 최적화 관점에서의 통합에 대한 연구가 요구된다.

이 외에도 다양한 관점에서 SPC-EPC 통합과 관

련된 연구 이슈들이 추가될 수 있으며, 각 이슈별로 연구 방법론을 구체화시킬 필요가 있다.

#### 4. 결 론

본 논문은 SPC와 EPC에 관한 기존의 연구들을 조사 및 정리하고, 이를 비교함으로써, 두 방법론이 가진 개념과 특성을 이해하고자 하였다. 또한, 최근 들어 관심이 높아지고 있는 SPC-EPC 통합 모델에 관한 연구를 조사, 정리함으로써, 이와 관련된 향후 이슈를 도출하고자 하였다.

SPC는 조립 산업에 주로 적용되어 왔으며, 관리도를 통해 공정이 관리 상태를 이탈한 경우 이를 가급적 빨리 인지하는 공정 감시에 중점을 둔다. 반면에, EPC는 장치 산업에서 널리 활용되어 왔으며, 공정의 품질 특성치가 목표치에 일치되도록 관련 인자를 실시간으로 보정하는 공정 조정에 중점을 둔다. 두 방법론은 공정 내의 변동 원인을 감소시키고 품질 수준을 높이기 위한 목적상의 공통점이 있으나, 실행 전략과 역할 측면에서 볼 때 상대적으로 서로 다른 특성을 가지고 있다. 하지만, 두 방법론은 서로 모순되거나 상충되지 않는, 상호 보완적인 관계임을 알 수 있다. 따라서 부품 산업과 장치 산업의 경계가 모호해지고, 컴퓨터 칩(Chip) 제조와 같은 하이브리드 형태의 산업이 점차로 보편화되는 상황에서 SPC와 EPC의 통합은 시대적 요구라 할 수 있다.

현재까지의 SPC-EPC 통합 연구는 크게 두 방법

론에서 활용되는 기법 간의 통합에 관한 연구들과 실제 생산 공정에 적용할 수 있는 통합 절차에 관한 연구들로 나누어 볼 수 있다. 기법 통합에 관한 연구들은 주로 자기상관 데이터와 다변량 데이터를 다룰 수 있는 SPC의 관리도 기법과 PID, MMSE Controller와 같은 EPC의 제어 기법을 통합하는 형태이다. 그리고 통합 절차에 관한 연구는 주로 공정 관리를 세부 단계로 구분하여 각 단계별로 의사 결정 포인트를 설정하고 이에 따라 적절한 공정 관리 방법을 수행하도록 한다.

이러한 통합 모델이 실제 생산 공정에 적용되어 성과를 달성하기 위해서, 향후에 고려되어야 할 연구 이슈들을 제시하였다. 첫째, 통합 방법론 하에서 실시간(Real-Time) 데이터를 활용하여 효과적으로 공정을 감시할 수 있는 SPC 방법론의 개발이 요구된다. 둘째, 통합 방법론 하에서 다중 변수를 고려하는 EPC 방법론의 개발이 요구된다. 셋째, 통합 방법론을 더욱 효과적으로 만들기 위한 공정 진단 방법론의 연구가 요구된다. 넷째, 통합 방법론 하에서의 경제적인 통합 모델 설계 방안에 대한 연구가 요구된다. 마지막으로, 전(全) 공정을 고려하는 통합 방법론(Plantwide SPC-EPC Integration)에 대한 연구가 요구된다.

본 논문은 SPC-EPC 통합과 관련된 핵심 관련 문헌을 조사, 정리함으로써 향후 연구 방향을 제시하고자 하는 데에 그 의의가 있다.

### 참 고 문 헌

[1] 김종걸, 정해운(2000), "EPC 이론적 전개에 관한 조사연구", 「대한산업공학회/한국경영과학회 춘계공동학술대회 논문집」, pp. 349-356.  
 [2] 김종걸, 정해운(2002), "하이브리드 산업에서 SPC와 EPC 통합모형의 사례연구", 「대한산업공학회/한국경영과학회 춘계공동학술대회 논문집」.  
 [3] 박치형(1992), 「통계적 공정관리와 자동공정 제어의 특성과 결합에 관한 연구」, 석사학위논문, 한국과학기술원 산업공학과.  
 [4] Box, G. E. P., Coleman, D. E. and Baxley, R. V., Jr.(1997), "A comparison of statistical process control and engineering process control," *Journal of Quality Tech-*

*nology*, Vol. 29, No. 2, pp. 128-130.  
 [5] Box, G. and Kramer, T.(1992), "Statistical process monitoring and feedback adjustment - A discussion (with discussion)," *Technometrics*, Vol. 34, No. 3, pp. 251-285.  
 [6] Box, G. and Luceno, A.(1997), *Statistical control by monitoring and feedback adjustment*, John Wiley & Sons, Inc., NY.  
 [7] Capilla, C., Ferrer, A. and Romero, R. (1999), "Integration of statistical and engineering process control in a continuous polymerization process", *Technometrics*, Vol. 41, No. 1, pp. 14-28.  
 [8] Chiu, C. C., Shao, Y. E., Lee, T. S. and Lee, K. M.(2003), "Identification of process disturbance using SPC/EPC and neural networks", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 14, pp. 379-388.  
 [9] Costa, A.(1997), "X-bar chart with variable sample size and sampling intervals", *Journal of Quality Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 197-204.  
 [10] Crowder, S. V., Hawkins, D. M., Reynolds, M. R., Jr. and Yashchin, E.(1997), "Process control and statistical inference", *Journal of Quality Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 134-139.  
 [11] Del Castillo, E.(2002), *Statistical process adjustment for quality control*, John Wiley & Sons, Inc., NY.  
 [12] Del Castillo, E., Grayson, J., Runger, G., and Montgomery, D. C.(1996), "A review of SPC methods for short runs", *Communications in Statistics - Theory and Methods*, Vol. 25, pp. 2723-2737.  
 [13] DeVor, R. E., Chang, T. H. and Sutherland, J. W.(2002), *Statistical quality design and control*, Macmillan Publishing Company, NY.  
 [14] Evans, J. R. and Lindsay, W. M.(1996), *The management and control of quality*, 3rd Ed., West Publishing Company, NY.  
 [15] Faltin, F. W., Mastrangelo, C. M., Runger,



- G. C. and Ryan, T. P.(1997), "Consideration in the monitoring of autocorrelated and independent data", *Journal of Quality Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 131-133.
- [16] Hawkins, D. M. and Olwell, D. H.(1998), *Cumulative sum charts and charting for quality improvement*, Springer-Verlag, NY.
- [17] Ho, C. and Case, K. E.(1994), "Economic design of control charts : A literature review for 1981-1991", *Journal of Quality Technology*, Vol. 26, No. 1, pp. 39-53.
- [18] Janakiram, M. and Keats, J. B.(1998), "Combining SPC and EPC in a hybrid industry", *Journal of Quality Technology*, Vol. 30, No. 3, pp. 189-200.
- [19] Jiang, W. and Tsui, K. L.(2002), "An economic model for integrated APC and SPC control chart", *IIE Transactions*, Vol. 32, pp. 505-513.
- [20] Keats, J. B., Del Castillo, E., Von Collani, E. and Siniga, E.(1997), "Economic modeling for statistical process control", *Journal of Quality Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 144-147.
- [21] Kourti, T. and MacGregor, J. F.(1996), "Multivariate SPC methods for process and product monitoring", *Journal of Quality Technology*, Vol. 28, No. 4, pp. 409-428.
- [22] Kuo, B. C.(1995), *Automatic control system*, 7th Ed., Prentice-Hall International, Inc., NJ.
- [23] Ledolter, J. and Swersey, A.(1997), "An evaluation of pre-control", *Journal of Quality Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 163-171.
- [24] Lowry, C.A. and Montgomery, D.C. (1995), "A review of multivariate control charts," *IIE Transactions*, Vol. 27, pp. 800-810.
- [25] Lucas, J. M. and Saccucci, M. S.(1990), "Exponentially moving average control charts : Properties and enhancements (with discussion)", *Technometrics*, Vol. 32, pp. 1-29.
- [26] Mason, R. L., Champ, C. W., Tracy, N. D., Wierda, S. J. and Younga, J. C.(1997), "Assessment of multivariate process control techniques", *Journal of Quality Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 140-143.
- [27] Mitra, A.(1993), *Fundamentals of quality control and improvement*, Macmillan Publishing Company, NY.
- [28] Montgomery, D. C.(1991), *Introduction to statistical quality control*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., NY.
- [29] Montgomery, D. C., Keats, J. B., Runger, G. C. and Messina, W. S.(1994), "Integrating statistical process control and engineering process control," *Journal of Quality Technology*, Vol. 26, No. 2, pp. 79-87.
- [30] Montgomery, D. C. and Mastrangelo, C. M. (1991), "Some statistical process control methods for autocorrelated data (with discussion)", *Journal of Quality Technology*, Vol. 23, No. 2, pp. 179-204.
- [31] Reynolds, M. R., Jr., Armin, R. W. and Arnold, J. C.(1990), "CUSUM charts with variable sampling intervals (with discussion)", *Technometrics*, Vol. 32, pp. 371-396.
- [32] Shao, Y. E.(1998), "Integrated application of the cumulative score control chart and engineering process control", *Statistical Sinica*, Vol. 8, pp. 239-252.
- [33] Shao, Y. E. and Chiu, C. C.(1999), "Developing identification techniques with the integrated use of SPC/EPC and neural networks", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 15, pp. 287-294.
- [34] Shi, D. and Tsung, F.(2003), "Modelling and diagnosis of feedback-controlled processes using dynamic PCA and neural networks", *International Journal of Production Research*, Vol. 41, No. 2, pp. 365-379.
- [35] Steiner, S. H.(1997~1998), "Pre-control and some simple alternatives," *Quality En-*

- gineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 65-74.
- [36] Stephanopoulos, G.(1984), *Chemical process control: An introduction to theory and practice*, Prentice-Hall, Inc., NJ.
- [37] Tsung, F.(1999), "Improving automatic-controlled process quality using adaptive principal component monitoring", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 15, pp. 135-142.
- [38] Tsung, F.(2000), "Statistical monitoring and diagnosis of automatic controlled processes using Dynamic PCA", *International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 3, pp. 625-637.
- [39] Tsung, F. and Apley, D. W.(2002), "The dynamic  $T^2$  chart for monitoring feedback-controlled processes", *IIE Transactions*, Vol. 34, pp. 1043-1053.
- [40] Tsung, F., Shi, J. and Wu, C. F. J.(1999), "Joint monitoring of PID-controlled processes", *Journal of Quality Technology*, Vol. 31, No. 3, pp. 275-285.
- [41] Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K. and Kavuri, S. N.(2003a), "A review of process fault detection and diagnosis - Part I: Quantitative model-based methods", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, pp. 293-311.
- [42] Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R. and Kavuri, S. N.(2003b), "A review of process fault detection and diagnosis - Part II: Qualitative models and search strategies", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, pp. 313-326.
- [43] Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Kavuri, S. N. and Yin, K.(2003c), "A review of process fault detection and diagnosis - Part III: Process history based methods", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, pp. 327-346.
- [44] Xie, M., Goh, T. N. and Cai, D. Q.(2001), "An integrated SPC approach for manufacturing processes", *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 12, No. 2, pp. 134-138.