

LCD 산업에서 SPC 시스템의 운영방법론

남 호수, 이 현우, 최 병욱

동서대학교 시스템경영공학과, (주)한국신뢰성기술서비스, StatSoft Korea

An Operating Methodology of SPC System in LCD Industries

Ho Soo Nam, Hyunwoo Lee and B.W. Choi

요약

본 논문에서는 LCD 공정관리에서 SPC 시스템의 주요내용 및 운영방법론을 논하고자 한다. 주요내용으로는 실시간 프로세스 모니터링 방법론, 유의차분석 방법론, 이상데이터의 분석, 공정능력의 분석, 관리도 및 결과의 조회 등을 들 수 있다. 또한, TFT-LCD 공정을 크게 Fab 공정인 TFT 공정, LC 공정 및 Module 공정으로 나누어 각 공정에서의 중요한 특성과 관리방법론을 제시하고자 한다.

주요어: 통계적 공정관리, 유의차분석, 공정능력분석, 프로세스 모니터링

1. 서론

일반적으로 현장에서 활용되고 있는 협의의 SPC(Statistical Process Control: 통계적 공정관리) 시스템 기능은 프로세스의 실시간 모니터링 및 이에 기초한 다양한 형태의 메시지 전달, 그리고 이상결과에 대한 추적성을 용이하게 지원해 주는 사용자 인터페이스 기능을 포함한다.

반면 광의의 SPC는 프로세스의 모니터링 뿐만 아니라 공정능력의 분석, 측정시스템 분석, 공정최적화(recipe optimization), 설비관리 및 다양한 데이터분석기법을 망라한다.

LCD 패널제조공정은 크게 TFT/CF 공정과 LC 공정 및 Module 공정으로 구분할 수 있다. 일반적으로 TFT 공정은 반도체제조공정과 유사한 팹공정(Fabrication Process)으로 분류되며, 이 부분에 대한 SPC는 반도체공정의 SPC와 크게 다르지 않다고 볼 수 있다. 그러나 LC(Liquid Crystal) 공정은 LCD

제조에서만 나타나는 공정이며, 여기서 나타나는 결함은 흔히 그 이전공정(TFT)에 영향을 받아 나타나는 경우가 많은 특징이 있다.

본 논문에서는 TFT-LCD 제조현장에서 사용될 수 있는 SPC 도구들 가운데 중요한 몇 가지를 나열하고, LCD 산업의 특징에 적합한 SPC 운영방법론 및 개발/운영사례를 중심으로 기술하고자 한다.

논문은 LCD SPC의 주요구성 요소들 및 도구들에 대한 기술과 개발된 SPC 시스템의 운영방법론 및 개발사례의 순서로 구성되며, 각 요소들을 크게 3개의 공정으로 나누어 기술하고자 한다.

2. SPC 시스템의 주요 구성요소

2.1 프로세스의 실시간 모니터링

SPC 시스템의 가장 중요한 역할 중의 하나가 프로세스의 실시간 모니터링이라고 볼 수 있다. 일반적으로 제품이 복잡할수록

공정 또한 복잡하게 마련이며, LCD 패널제조의 경우 복잡한 공정 속에서 관리의

대상이 되는 공정특성의 개수는 수백 개에 이른다.

<표 2-1> 평균 및 산포 관리도를 위한 데이터 구조

Glass_Id	PT_01	PT_02	...	PT_0n	평균	표준편차
Glass_001	x_{11}	x_{12}	...	x_{1n}	\bar{x}_1	s_1
Glass_002	x_{21}	x_{22}	...	x_{2n}	\bar{x}_2	s_2
□			□			□
Glass_00k	x_{k1}	x_{k2}	...	x_{kn}	\bar{x}_k	s_k

이처럼 많은 공정특성을 모두 모니터링 하는 것에는 어려움이 따르며, 시스템의 성능(performance)에도 영향을 미치게 된다. 이러한 문제는 SPC Plan 에서 사전 조율(tuning)을 거쳐서 주요공정을 추출하는 선행작업을 통하여 해결될 수 있으며, Nam et. al.(2003)에서 논의된 것처럼 주요 변수추출(feature selection)과정을 거쳐 해결할 수도 있다.

LCD 공정에서 중요하게 관리되어야 할 특성은 크게 계량형 특성으로 전기적 특성 및 물리적 특성을 들 수 있으며, 이들은 주로 TFT 공정에서 관리되어야 하는 특성들이다. 반면, 액정공정과 모듈공정에서는 glass 당 결점수 및 불량률이 중요한 관리대상 특성이 된다.

먼저 계량형 특성에 대한 모니터링을 위하여 사용될 수 있는 관리도로서 평균관리도와 산포관리도를 고려해 볼 수 있다.

TFT 공정에서 관리도를 운영하는데 있어서 부분군은 LCD 공정의 특성상 로트(또는 cassette)관리의 형태 보다는 glass 단위의 모니터링이 유용하다. 이는 공정의 split-merge 에 기인하는 바가 크며, glass 단위의 모니터링에서는 한 장의 glass 가 하나의 부분군의 역할을 하게 된다. 참고로 한 장의 glass 에서 여러 부분에 걸쳐 전기/물리적 특성을 측정하게 되며, glass 내의 산포관리가 매우 중요하다.

공정의 평균관리는 glass 내의 평균관리 개념이며, 이는 통상적인 $\bar{x} -$ 관리도를 이용할 수 있으나, 관리한계선의 설계에

이용되는 공정산포는 다양한 방법에 따라 추정될 수 있으며, 주로 사용되는 방법으로는 glass 내의 산포를 이용하는 방법과 glass 간의 산포를 이용하는 방법을 들 수 있다. 이들 방법은 경우에 따라서 선택적으로 사용될 수 있으며, 시스템 개발 후 tuning 과정에서 그 사용여부가 고려될 수 있고, 시스템 개발시 선택적으로 사용할 수 있게끔 설계되어야 한다.

공정의 산포관리에서 일반적으로 범위를 이용한 R-관리도의 사용은 지양되어야 마땅하다. LCD 공정에서는 더욱 그러하며, 한 장의 glass 당 적게는 10 여 개에서 많게는 수십 개의 측정값을 가지게 되는데, 이 경우의 범위에 기초한 관리도의 효율성은 심각하게 저하된다. 따라서 glass 내의 산포관리는 표준편차관리도(s -chart)를 이용하는 것이 합리적이다.

한편, LCD 공정에서는 glass 내의 전기적/물리적 특성의 균일성(uniformity) 관리가 매우 중요한 요소인데, 균일성의 관리는 편차균일성(deviation uniformity)과 편의균일성(bias uniformity)으로 나누어 관리할 필요가 있다.

여기서 편의균일성이란 glass 내의 전반적인 특성(평균특성)이 목표값으로부터 치우침 발생정도에 기초하여 측정될 수 있다. 반면, 편차균일성은 glass 내의 평균적인 특성보다는 변동 또는 산포에 기초하여 균일성을 평가하는 방식으로 편의 균일성보다 중요하게 관리되어야 하는 특성으로 볼 수 있다.

한편, 계수형 특성의 모니터링에서는 결점수와 불량률이 중요한 관리특성이 된다. 여기서는 cell 또는 glass의 크기가 일정한 경우가 대부분이므로 굳이 단위당 결점수 관리도를 사용할 필요는 없다. LCD 공정에서 결점수는 결점의 크기도 중요하지만 결점의 유형 또한 매우 중요한 요소이다. 따라서 결점의 관리는 유형(defect code)별로 이루어져야 한다.

불량률의 관리는 batch 단위로 이루어질 수도 있으나, 시간단위로 부분군을 형성하여 모니터링하는 것이 일반적이고 바람직하다. 불량률 또한 유형(불량 code)별로 모니터링하는 것이 필요한데, 다만 불량유형이 너무 다양하므로 일정 유형군(group)으로 묶어 관리하는 것이 필요하다.

모든 관리도의 운영에서 관리선의 계산 알고리즘은 일반적인 통계적 평균과 산포에 기초하며, 다만 관리선의 갱신에는 관리대상 특성과 데이터발생량을 고려하여 갱신 주기와 갱신할 경우 활용하게 될 데이터의 범위를 SPC Plan에 반영하여야 한다.

2.2 유의차분석 방법론

대부분의 공정은 복수의 설비하에 진행되며, 주요 공정특성의 관리에서 설비간의 통계적 유의차(statistical significant difference) 발생여부를 검정하고, 유의차 발생시 시간지연 없는 인지와 적절한 조치는 공정관리에서 매우 중요한 요소이다. 이러한 통계적 유의차분석 기법은 단지 설비관리, 즉 설비간의 유의차분석 뿐만 아니라 작업자간의 유의차, 원자재간의 유의차 등 4M1E 요소간의 유의차 분석에도 적용될 수 있다.

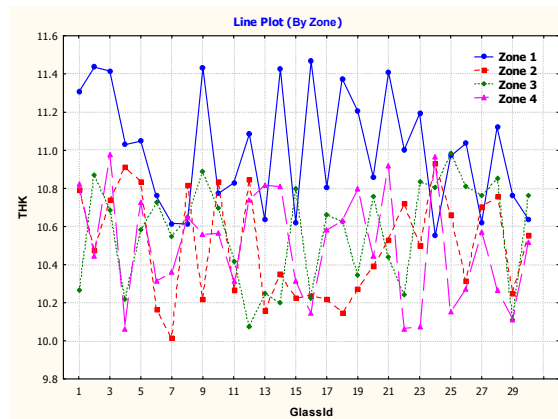
앞서 기술한 프로세스 모니터링에서 많은 경우에 설비단위로 공정특성에 대한 관리도 형태의 모니터링 기능을 이용하여 설비를 관리하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나 경우에 따라서 설비간의 미세한 차이가 발생되고 있음에도 독립적인 설비별 모니터링으로 인하여 차이발생에 대한 인지에 실패하는 경우가 있으며, 이는 경우에 따라서 장시간 뒤에 심각한 결함으로 나타나는 경우가 있게 마련이다.

유의차분석을 위하여 세부적으로는 공정특성 또는 품질특성을 계량형 공정특성, 결점수 및 불량률로 나누어 각 특성에 맞는 유의차분석

방법론이 필요하며, 이는 Joo et. al. (2004)에 잘 나타나 있다(Devore(1995), Daniel (2000)).

한편, LCD 공정에서는 TFT 공정에서 주요 관리대상 공정특성에 대한 원판 유리(mother glass)상의 영역(zone or cell)별 모니터링 및 유의차분석 또한 매우 중요한 요소이다. 이는 glass 내의 균일성(uniformity)에 영향을 미치는 요소이다. 원판유리의 크기는 세대가 증가될수록 급격하게 커지며, 이에 따른 공정특성의 균일성 관리가 그만큼 중요한 문제로 대두되게 마련인 것이다.

<그림 2-1>은 zone 별 공정특성의 평균값을 plot 한 것이다. 그림에서 zone 1의 특성값이 다른 영역보다 크게 나타남을 볼 수 있다. 그러나 이러한 시각적인 분석은 많은 경우에 그 차이의 경계가 모호하여 객관성이 결여될 수 있으며, <표 2-2>는 분산분석을 통하여 객관화한 결과로 볼 수 있다.



<그림 2-1> zone 별 유의차분석을 위한 plot

<표 2-2> 유의차분석(ANOVA) 결과

Univariate Tests of Significance for THK					
Sigma-restricted parameterization					
Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	13568.52	1	13568.52	169858.2	0.000000
Zone	6.43	3	2.14	26.8	0.000000
Error	9.27	116	0.08		

2.3 이상 glass 분석

LCD 공정에서 주요 특성의 모니터링 과정에서 관리선을 이탈(CL Out)하는 glass는 SPC Table에서 별도로 표시(flag) 되는데, 공정관리에서 로트(cassette) 단위로 관리단위가 편성되지 않으므로 경우에 따라서 이러한 문제를 해결하기 위한 의도로서 TFT 공정에서 주요 관리대상 공정특성에 대하여 <표 2-2>와 같은 형태의 정리된 데이터가 필요하다. 이는 프로세스 모니터링에서 얻어진 SPC Result Table에 기초하여 분류된 분할표(contingency table)이며, 다음과 같이 카이제곱검정(독립성검정)에 의하여 분석된다.

$$Q = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^k \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \approx \chi^2((2-1) \times (k-1))$$

$$E_{ij} = \frac{O_{i\cdot} \times O_{\cdot j}}{N} : (i, j) \text{ cell의 기대도수}$$

통상적으로 SPC Plan 수립시 이상 glass 분석에서 얻어지는 검정의 결과(p-value)에

경고가 매우 빈번하게 발생될 수 있는데, 이 경우 담당 엔지니어는 설비관리상의 어려움을 겪을 수 있으며, 원인파악 및 사후조치에 시간지연이 발생될 수 있다.

기초한 의사결정은 다음과 같이 결정할 수 있다.

- ① $p\text{-값} \leq 0.01 \Rightarrow$ 가장 이탈율이 높게 나타나는 설비 정지
- ② $0.01 < p\text{-값} \leq 0.05 \Rightarrow$ 가장 이탈율이 높게 나타나는 설비 경고
- ③ $0.05 < p\text{-값} \leq 0.10 \Rightarrow$ 가장 이탈율이 높게 나타나는 설비 주의
- ④ $p\text{-값} > 0.10 \Rightarrow$ 공정속행(설비간 이탈율에 의미 있는 차이 없음)

<표 2-3> 이상 glass 분석을 위한 정리된 데이터

설비	MCN 1	MCN 2	...	MCN k	합계
CL 이탈수	O_{11}	O_{12}		O_{1k}	$O_{1\cdot}$
정상수	O_{21}	O_{22}		O_{2k}	$O_{2\cdot}$
합계(진행수)	$O_{\cdot 1}$	$O_{\cdot 2}$		$O_{\cdot k}$	N

2.4 공정능력 분석

공정능력의 정량화 및 이에 대한 평가는 공정관리에서 매우 중요한 요소이다. 공정의 질적인 능력에 대한 분석은 공정품질의 한 척도이며, 이에 대한 정기적인 평가와 모니터링 또한 SPC의 필수 구성요소이다.

일반적으로 공정능력의 산출은 부분군내의 산포(변동)에 기초한 잠재적 공정능력지수(potential process capability)와 치우침을 고려한 실제 공정능력지수(actual process capability index), 그리고 군간/군내 변동을 포함하는 전체 변동에 기초하여 계산되는

공정성과지수(process performance index)로 구분되며, 통상적으로 부분군의 의미가 없거나 로트관리의 형식이 약할 경우에는 시간에 기초한 batch 단위에 근거하여 부분군을 형성하고 능력지수는 일별(daily)로 구분하여 모니터링하게 된다.

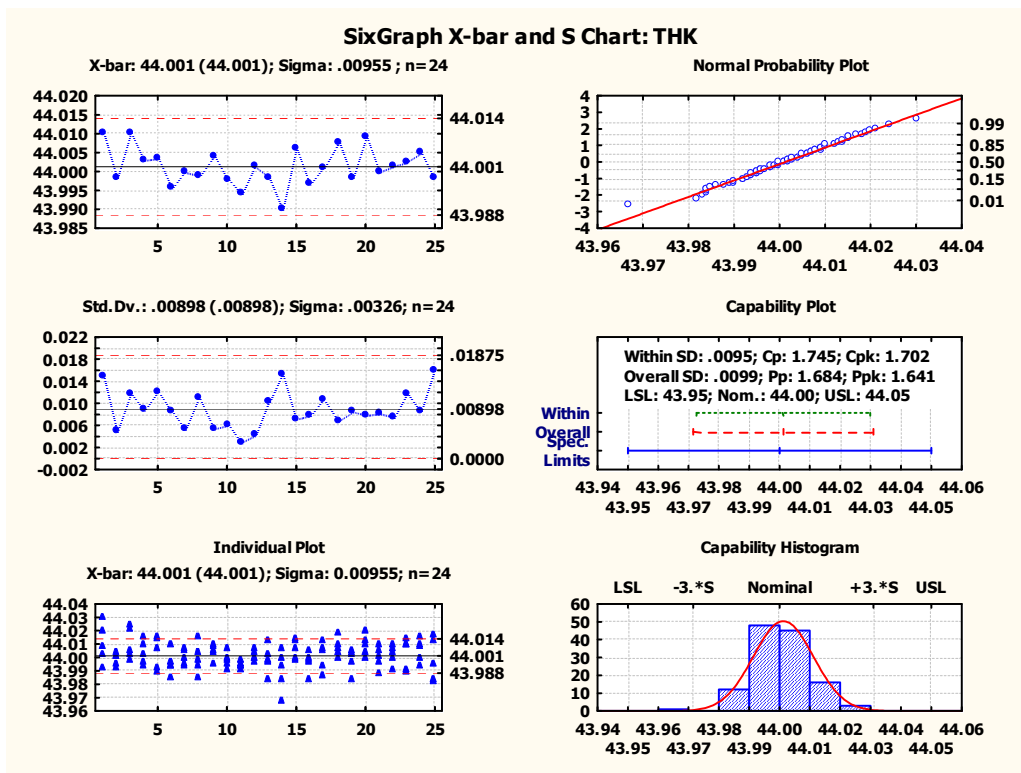
이는 또한 프로세스 모니터링에서 얻어진 데이터에 기초하여 계산되며, SPC Table에 기재된 요약값(지수를 산출하기 위한 중간계산 과정의 통계치를 말함)을 쌓아두고 계산/관리하게 된다.

한편, 공정관리의 결과를 조회할 수 있는 user interface에서는 <그림 2-2>와 같은

형태의 6 개의 graph 를 하나의 창에서
 일목요연하게 볼 수 있도록 구성한다. 그림은
 Xbar-S 관리도에 기초한 six graphs 의
 내용이다(STATISTICA reference manual
 (2004)).

공정능력지수의 trend 분석에서는 그림과는
 다르게 정해진 기간동안의 일별 공정능력
 지수와 공정성과지수가 시계열적인 형태로
 타점된다.

공정능력지수의 산출과 관련한 사항 가운데
 군내의 변동의 산출은 반드시 군내의
 표준편차를 이용하여 계산하여야 한다. 이는
 통상적으로 행하여지는 범위에 기초한 산포의
 추정이 비효율적이라는데 기인한다. LCD
 공정에서 한 장의 glass 당 계량형 데이터의
 측정값 수는 통상 수십 개를 넘어선다. 이러한
 경우에 범위에 기초한 glass 내 산포의 추정은
 매우 비효율적일 수 밖에 없다.



<그림 2-2> Xbar-S 관리도에 기초한 식스그래프

3. SPC 시스템의 개발 사례

다음은 LCD 패널 제조사의 SPC 시스템
 개발사례에 관한 부분적인 설명이다. SPC
 시스템은 크게 프로세스의 실시간적인
 모니터링(real time monitoring)과 모니터링
 결과를 볼 수 있는 User Interface 기능인
 Chart View 및 결과에 대한 해석적인 부분을
 다루는 분석모듈로 나눌 수 있다.

여기서는 대략적인 그림만 몇 가지를
 나열하고자 한다.

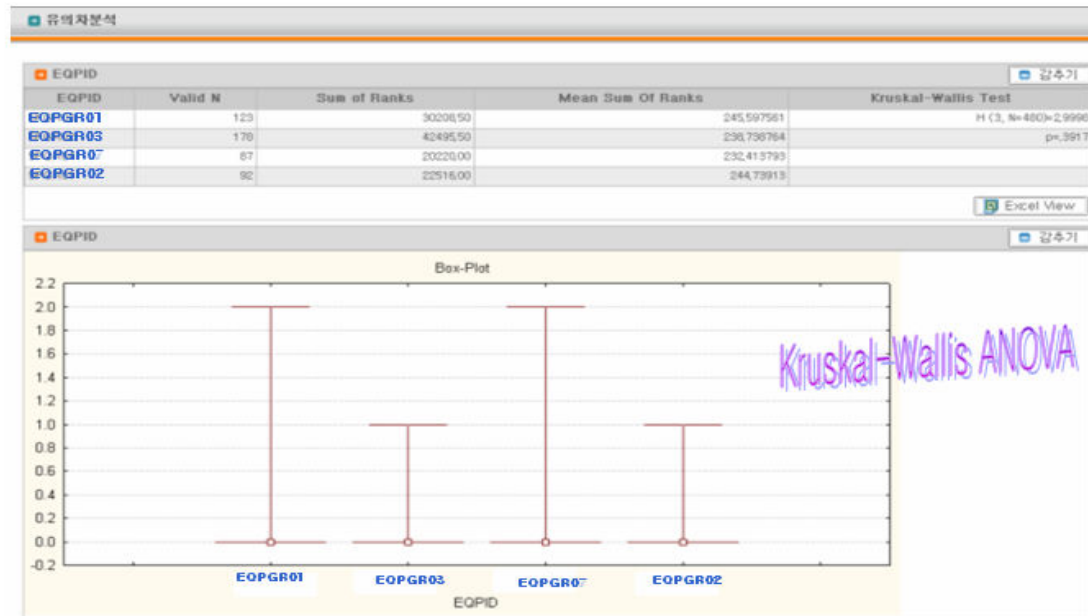
<그림 3-1>은 어떤 공정특성에 대하여
 SPC Plan 에 따른 모니터링 및 메시지 전달
 계획을 조회한 것이다. 그림에서 실시간
 모니터링에 따른 각종 check point 및
 적용여부를 등록/관리할 수 있게 되어 있다.

명칭	적용여부	InterLock여부
평균관리도 Spec Check	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
개별 값 Spec Check	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
평균관리도 CL Check	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
산포관리도 CL Check	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
평균관리도 Run Test	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
산포관리도 Run Test	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Uniformity Deviation	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
Uniformity Bias	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
분석구분		
Signed		
유의차분석(설편간(P))		
유의차분석(CHAMBER간(P))		
유의차분석(축정 POINT 위치간)		
유의차분석(자재별)		
유의차분석(설편(M))		
유의차분석(작업자(P))		
유의차분석(작업자(M))		
부적합코드		
9 samples on same side of center	<input type="radio"/>	
6 sample in row in/decreasing	<input type="radio"/>	
14 samples alternating up down	<input type="radio"/>	
RunTest		
2 of 3 samples in Zone A or beyond	<input type="radio"/>	
4 of 5 samples in Zone B or beyond	<input type="radio"/>	
15 samples in Zone C	<input type="radio"/>	
8 samples beyond Zone C	<input type="radio"/>	

한편, <그림 3-2>는 모 TFT-LCD 제조회사의 통계적 공정관리(SPC)시스템에서 glass 당 결점수에 대한 유의차 분석의 결과를 나타낸 것이다. 여기서 유의차분석은 데이터의 비정규성에 기초하여 비모수적인 검정법인 Kruskal-Wallis ANOVA 를 이용하였다.

그림에서 p-value 는 0.3917 로 비교적 큰 편이다. 따라서 설비간에 glass 당 결점수에 의미있는 차이가 발생하고 있는 것은 아니라고 볼 수 있다.

<그림 3-1> SPC Plan 에 따른 특성별 관리



<그림 3-2> 결점수에 대한 설비별 유의차분석 결과(예시)
참고문헌

Daniel, W.W. (1990). Applied Nonparametric Statistics, PWS-KENT Publishing Company

Jay L. Devore (1995). Probability and Statistics for Engineering and the Sciences. Duxbury Press, 1995.

H.S., Nam and Yulius, H. (2004). Feature Selection Methodology in Quality Data Mining, IEMS Spring Conference, SB7-5~8.

C.M., Joo, H.S., Nam and H.S. Jung (2004). A Use of Significant Difference Test in Equipment Management, IEMS Spring Conference, SB7-5~8.

STATISTICA System Reference(2004). StatSoft Inc.