

TRIZ-based Improvement of Glass Thermal Deformation in OLED Deposition Process

Woo-Sung Lee* · Jin Young Choi**†

*Department of Industrial Systems Engineering, Ajou University

**Department of Industrial Engineering, Ajou University

트리즈 기반 OLED 증착 공정의 글래스 열 변형 개선

이우성* · 최진영**†

*아주대학교 산업시스템공학과

**아주대학교 산업공학과

The global small and mid-sized display market is changing from thin film transistor-liquid crystal display to organic light emitting diode (OLED). Reflecting these market conditions, the domestic and overseas display panel industry is making great effort to innovate OLED technology and increase productivity. However, current OLED production technology has not been able to satisfy the quality requirement levels by customers, as the market demand for OLED is becoming more and more diversified. In addition, as OLED panel production technology levels to satisfy customers' requirement become higher, product quality problems are persistently generated in OLED deposition process. These problems not only decrease the production yield but also cause a second problem of deteriorating productivity. Based on these observations, in this study, we suggest TRIZ-based improvement of defects caused by glass pixel position deformation, which is one of quality deterioration problems in small and medium OLED deposition process. Specifically, we derive various factors affecting the glass pixel position shift by using cause and effect diagram and identify radical reasons by using XY-matrix. As a result, it is confirmed that glass heat distortion due to the high temperature of the OLED deposition process is the most influential factor in the glass pixel position shift. In order to solve the identified factors, we analyzed the cause and mechanism of glass thermal deformation. We suggest an efficient method to minimize glass thermal deformation by applying the improvement plan of facilities using contradiction matrix in TRIZ. We show that the suggested method can decrease the glass temperature change by about 23% through an experiment.

Keywords : OLED, TRIZ, Position Process, Glass Thermal Deformation, Contradiction Matrix

1. 서 론

유기발광다이오드(organic light emitting diode: OLED)

는 고효율, 경량/박형, 저소비전력 등의 장점으로 인하여 차세대 디스플레이로 각광받고 있으며, 세계의 디스플레이 시장은 액정표시장치에서 OLED로 변화하고 있다. 세계 주요국들은 OLED 新 시장을 선점하기 위해 국가적 차원에서 공격적인 투자가 이루어지고 있다.

국내의 경우에도 2006년 OLED의 대량생산을 시작으로 중소형 디스플레이 시장에서 점유율 97% 수준의

Received 3 March 2017; Finally Revised 20 March 2017;

Accepted 21 March 2017

† Corresponding Author : choijy@ajou.ac.kr

세계 최대 생산국으로 발돋움하였다. 국내 OLED 패널(panel) 생산 업체들은 해외 경쟁사와의 차별화된 기술을 통해 시장 지배력을 꾀하고 있다. 대표적으로 대면적 OLED 장비 적용을 통한 생산성 향상, 고해상도 및 신축성 있고(flexible), 접을 수 있으며(foldable), 말 수 있는(rollable) 고부가 제품 적용 등의 끊임없는 기술 혁신을 진행하고 있다. 또한, 전략기술, 수요창출, 산업기반의 T/F 구성을 통해 OLED의 차세대 신성장 동력의 발판을 꾀하고 있다.

이처럼 차세대 디스플레이인 OLED는 기술이 점차 고도화되고 제품군 또한 중소형 크기의 스마트폰부터 중대형 크기의 모니터까지 다양해지고 있다. 그러나 고객 요구를 만족시키기 위한 OLED 생산 기술의 수준이 높아질수록 생산과 품질의 문제점도 발생되고 있다[2]. 대표적으로 글래스(glass) 깨짐에 의한 생산 효율 저하, 픽셀(pixel)간 위치(position) 틀어짐으로 인한 픽셀 혼색 및 결색 발생 등의 품질 불량이다. 지금까지 OLED 생산 업체의 생산 공정에서는 관련 문제점 해결을 위해 증착 공정의 프로세스(process) 개선 및 생산 운영 기준 정립, 설비 개조/개선 등의 많은 노력과 시행착오를 겪으며 끊임없는 노력을 하고 있지만, 그 결과는 아직 미비한 수준이다. 따라서 생산 및 품질을 저하시키는 항목들에 대해서 문제점 도출, 원인 분석 및 해당 문제점들에 대한 해결 대책 마련이 필요하다.

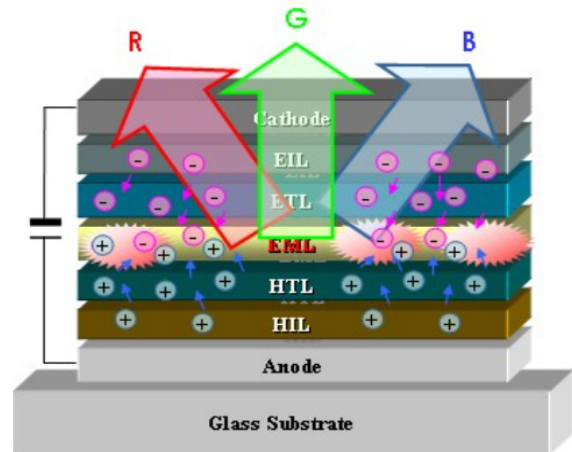
본 논문에서는 OLED 패널 생산 기술이 고도화됨에 따라 고해상도 제품 적용에 의한 품질 문제 중의 하나로써 OLED 증착 공정에서 이슈가 되고 있는 글래스 열 변형에 의한 픽셀 위치 틀어짐을 개선할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 먼저 열 변형에 대한 다양한 원인을 특성요인도를 이용하여 분석하고, X-Y 행렬을 이용하여 품질 불량에 대한 조치인 글래스 폐기, 수선, 엔지니어의 품질 확인 등에 대해 평가하여 도출된 각 요인들의 중요성의 우선 순위를 정하였다. 이를 통해 열 제어 기술 부족에 의한 글래스 팽창/수축 발생이 글래스 픽셀 위치 틀어짐에 가장 큰 영향을 끼치는 원인인 것으로 확인하였다. 또한, 선정된 문제점들에 대해 TRIZ[1] 기법을 활용하여 해결책을 모색하고, 적용 실험을 통해 제안된 개선안의 효율성을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 제 2장에서는 OLED 공정과 OLED 공정의 열해석에 대한 기존 연구 및 한계점에 대해서 기술한다. 제 3장에서는 OLED 증착 공정 열 변형의 원인 분석 및 개선 과제 도출에 대하여 설명하고, 제 4장에서는 트리즈를 이용한 개선 방법 도출 및 적용 결과를 기술한다. 마지막으로 제 5장에서는 본 논문의 결론과 향후 연구 방향에 대하여 논의한다.

2. OLED 공정

2.1 OLED의 개요

OLED는 발광성 유기재료를 양극과 음극 사이에 다층의 샌드위치 모양으로 형성한 후, 전기적 여기에 의한 발광 현상을 이용하는 디스플레이로 “Organic Light Emitting Diode”의 약자이다[9]. <Figure 1>은 OLED의 일반적인 구조로서, OLED의 빛이 캐소드(음극)을 통과해 글래스 면으로 나가는 것을 표현한 것이다[11]. OLED 레이어(layer)의 다층 구조는 발광 효율과 에너지 수명을 향상시키기 위한 여러 기능층들이 추가된 것이다. 이러한 기능층들은 1,000~2,000Å 수준의 박막으로 형성되어 있으며, 세부 구성은 <Table 1>과 같다.



<Figure 1> OLED Structure[11]

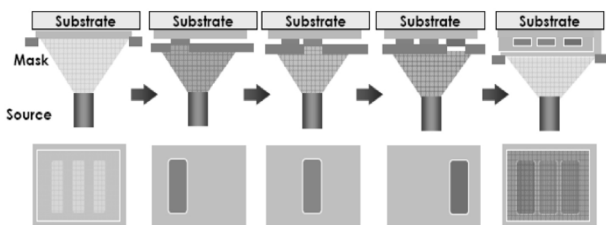
<Table 1> OLED Functional Layer

Layer	Description
HIL	Hole Injection Layer
HTL	Hole Transfer Layer
EML	Emission Material Layer
ETL	Electron Transfer Layer
EIL	Electron Injection Layer

2.2 증착 방식

OLED 증착 방식은 Fine Metal Mask(FMM) 방식이다. 이 방식은 유/무기 재료를 고온의 열로 기화시켜 고진공 상태에서 박막의 금속 마스크(metal mask)를 글래스에 밀착시켜 원하는 위치에만 재료를 증착하는 화소 형성 기법이다. 적색, 녹색, 청색의 구현을 위해서는 각각의 증착 공정을 거치게 된다. <Figure 2>는 이러한 색 패턴 형

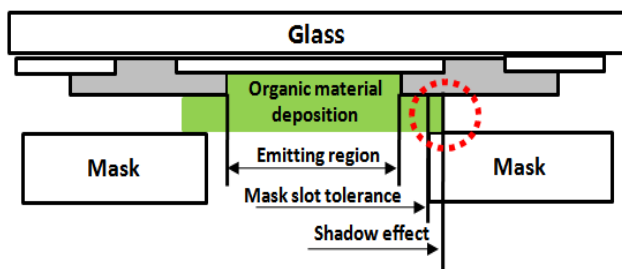
성 개략도를 나타낸다. 일반적으로 300ppi 이상의 OLED에 사용되는 마스크는 40 μ m 두께의 금속 박막을 통하여 제작된다. 이러한 금속 마스크는 열팽창률이 우수한 합금을 사용하고 있으며, 글래스 크기가 커짐에 따라 분할형 스틱(stick) 마스크를 통해 마스크 프레임에 용접한다. 글래스와 마스크의 밀착도 및 패턴 정밀도 향상을 위해 마스크에 일정한 힘을 가하여 스트레칭 후 용접하는 인장 용접 방식을 적용하고 있다[3].



<Figure 2> Schematic Diagram of R.G.B Pattern Foration[3]

2.3 글래스 그림자(Shadow) 효과

OLED 공정의 대표적인 품질 불량 중, 마스크와 글래스의 픽셀 위치가 틀어져 적색, 녹색, 청색의 패턴 형성 시 결색 또는 혼색을 일으키는 그림자 효과가 있다. 프리미엄 제품의 증가로 고해상도 디스플레이가 적용됨에 따라 픽셀 정의 레이어(pixel defined layer : PDL) 마진 스펙(margin spec.) 또한 엄격해져 불량 발생률이 증가하고 있다. 그림자 효과는 원자재성, 마스크 제작, 글래스 열팽창 및 수축 등에 의해 발생된다고 알려져 있다. 이를 세부적으로 살펴보면 FMM의 박막두께와 개구부 영역의 크기, 글래스와 마스크 간 밀착정도, OLED 유/무기를 가열하는 증착원 크기와 위치 등에 의하여 결정된다[3]. <Figure 3>은 글래스와 마스크 간 픽셀 위치가 틀어져 정해진 영역을 벗어나 타 재료가 증착되는 그림자 효과를 나타낸 것이다[10]. 그림자 효과가 OLED 공정의 유기물을 사용하는 발광층(EML)에서 발생된다면 적색, 녹색, 청색 간의 색 침범 발생으로 인해 색재현성 및 휘도가 떨어지게 된다.

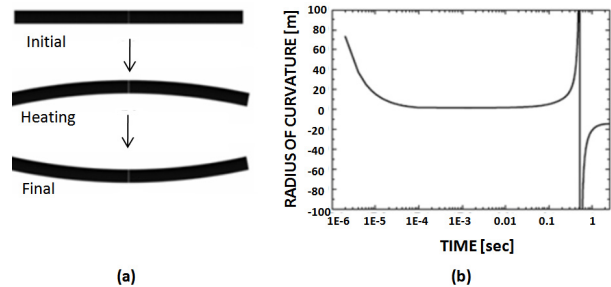


<Figure 3> Glass Shadow Effect[10]

2.4 OLED 공정의 열 해석에 대한 연구

2.4.1 글래스 열 변형 시뮬레이션

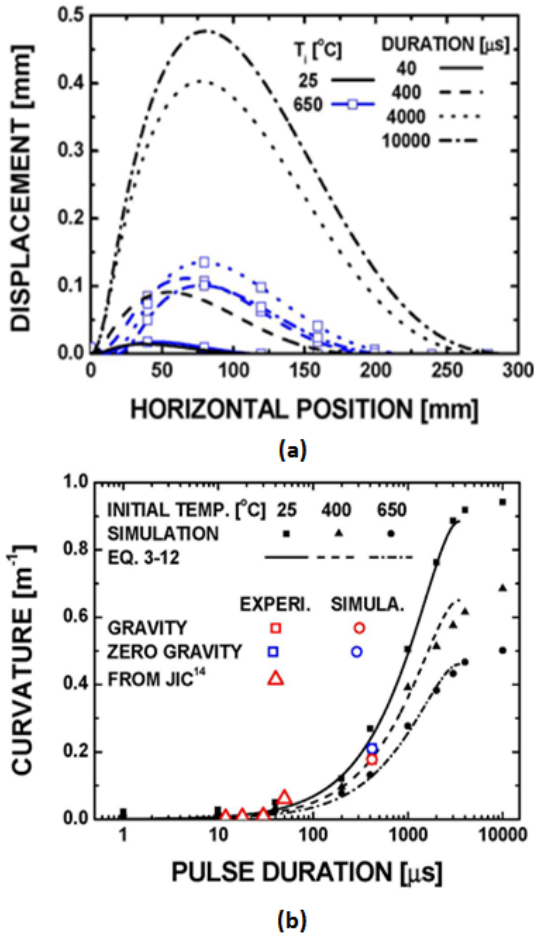
OLED의 증착 방식은 상향식으로 하부의 증착원은 500 $^{\circ}$ C 이상의 고온을 통해 고체의 유/무기 재료를 기화시킨다. 이 과정에서 고온의 열을 받은 글래스 부분은 팽창하고, 반대면은 상대적으로 온도가 낮아 변형이 작다. 이때 글래스의 상/하면의 열팽창 차이는 응력을 발생시키며, 글래스의 온도가 낮아짐에 따라 응력완화(stress relaxation)가 발생된다. 소자의 온도가 전이 온도와 동일해지면 팽창된 글래스는 다시 수축되는데 응력완화로 인해 고온의 열을 받은 부분은 원래의 길이보다 짧아지게 된다. 이러한 현상은 <Figure 4>와 같이 표현될 수 있다[5]. <Figure 4>의 (a)는 온도에 따른 글래스의 형태를 나타낸 그림이다. <Figure 4>의 (b)는 시간에 따라 변화하는 글래스의 곡률 반경을 나타낸 그림으로 최대 온도에서는 글래스가 열팽창되어 곡률 반경이 (+)의 값을 갖는다. 시간이 지남에 따라 글래스 온도가 낮아져 열 수축이 발생되고 이는 응력완화로 인해 (-)의 곡률 반경을 갖게 된다. 특히, 0.6s 이후부터 글래스의 곡률 반경이 (+)에서 (-)로 변화하는 것을 확인할 수 있다[3].



<Figure 4> OLED Glass Thermal Deformation in Crystallization Process[5]

2.4.2 글래스 예열에 따른 변형

OLED 결정화 공정의 글래스 예열 및 펄스(pulse) 지속 시간에 따른 글래스 변형은 <Figure 5>와 같다[4]. <Figure 5(a)>는 상온(25 $^{\circ}$ C)에서의 글래스와 고온(650 $^{\circ}$ C)에서 예열한 글래스에 대해서 펄스 길이에 따른 글래스의 변형을 나타낸 것이다. 펄스의 길이가 40 μ s일 때, 글래스 온도에 따른 변화량의 차이가 없으나 4,000 μ s 이상부터는 글래스 예열이 되지 않은 경우가 예열을 진행한 경우보다 4배 가량 글래스 변형의 차이가 발생하였다. <Figure 5(b)>는 동일한 펄스 지속시간에서 글래스 온도와 곡률의 차이를 나타낸 그래프이다. 상온(25 $^{\circ}$ C)에서의 글래스가 각 400 $^{\circ}$ C와 650 $^{\circ}$ C로 예열한 경우보다 1~2배 정도 곡률의 차이가 크게 발생되는 것을 확인할 수 있다[10].



<Figure 5> OLED Deformation by Preheat Requirement and Pulse[4]

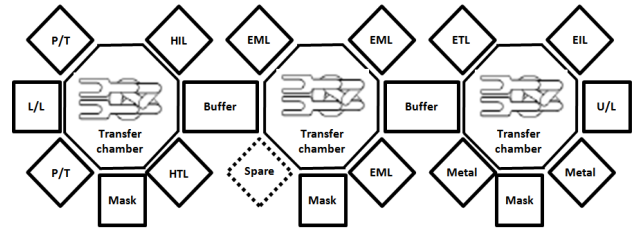
2.5 기존 연구의 한계점

이러한 OLED 공정의 열 해석에 대한 기존 연구들은 글래스 열 변형 메커니즘 및 글래스 예열 여부에 따른 글래스 변형 정도 등의 확인을 통해 글래스 열 변형 개선에 대한 방향성을 제시하였다. 그러나 해당 연구들은 글래스 열 변형의 개선 방안으로 글래스 예열에 대한 필요성은 제시했지만 방법론적인 측면에서 열 제어에 대한 구체적인 시험 조건은 제시하지 않았다.

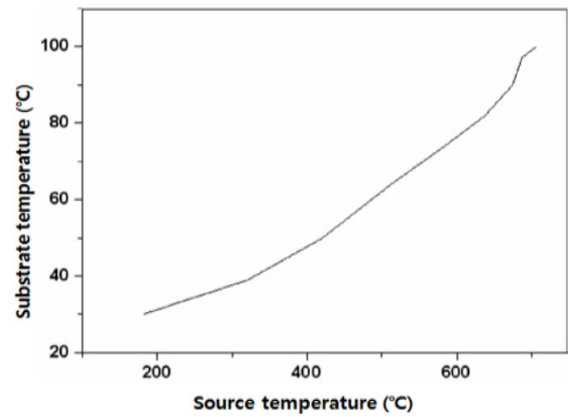
3. 원인 분석 및 개선 과제 도출

3.1 글래스 열 변형 원인 분석

먼저 OLED 증착 공정에서의 동작상태 확인을 통한 글래스 열 변형 발생 원인을 분석하였다. OLED 증착 공정은 글래스에 유/무기물 증착을 위해서는 글래스가 물류 체입



<Figure 6> Deposition Facility Layout[5]



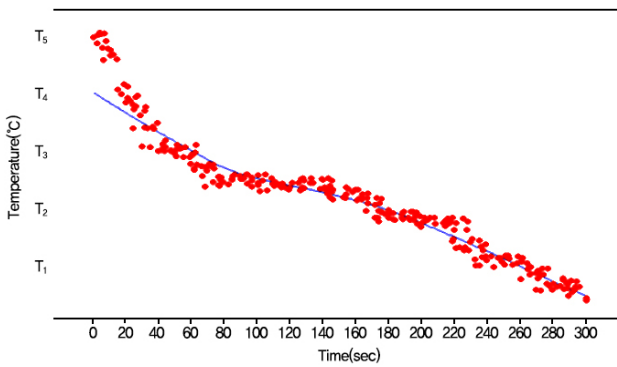
<Figure 7> Glass Temperature Change by Source Temperature[6]

버(chamber)를 통해 반송되고, 정해진 각 프로세스 체입버에서 고온 및 고진공 상태에서 플라즈마(plasma) 처리, 유기 재료, 금속 증착을 하는 인라인 방식이다[5]. <Figure 6>은 이러한 인라인 방식의 증착 공정 배치를 나타낸 그림이다.

증착 공정의 물류 라인은 단일 경로 형태로 구성되었으며, 물류 체입버에서 설비 돌발 고장 등이 발생되어 공정의 진행이 멈출 경우, 前 공정의 글래스는 반송되지 못하고 해당 체입버 내에서 정체된다. 글래스가 프로세스 체입버 내에 정체될 경우, 유/무기 재료 기화를 위한 고온의 열로 인해 얼룩 및 증착막 두께 균일성(uniformity) 이상 등의 문제가 발생된다. <Figure 7>은 프로세스 체입버에서 증착원 온도에 따른 글래스온도 변화를 나타낸 그림이다[6]. 이를 통해 증착 간 글래스의 온도의 변화는 상당히 큰 것을 알 수 있다.

글래스가 물류 체입버 내에서 정체될 경우, 대기시간에 따라 글래스 온도가 떨어지게 된다. 이로 인해 後 공정 프로세스 체입버로의 글래스 투입 온도의 차이가 발생된다. <Figure 8>은 물류 체입버 내에서의 대기시간에 따른 글래스의 온도 변화를 나타낸 그래프이다. 이러한 글래스 온도 변화는 열팽창 및 수축의 차이를 발생시켜 픽셀 위치의 틀어짐 불량을 야기한다[4].

본 논문에서는 OLED 증착 공정에서의 글래스 픽셀



<Figure 8> Temperature Change by Glass Waiting Time[7]

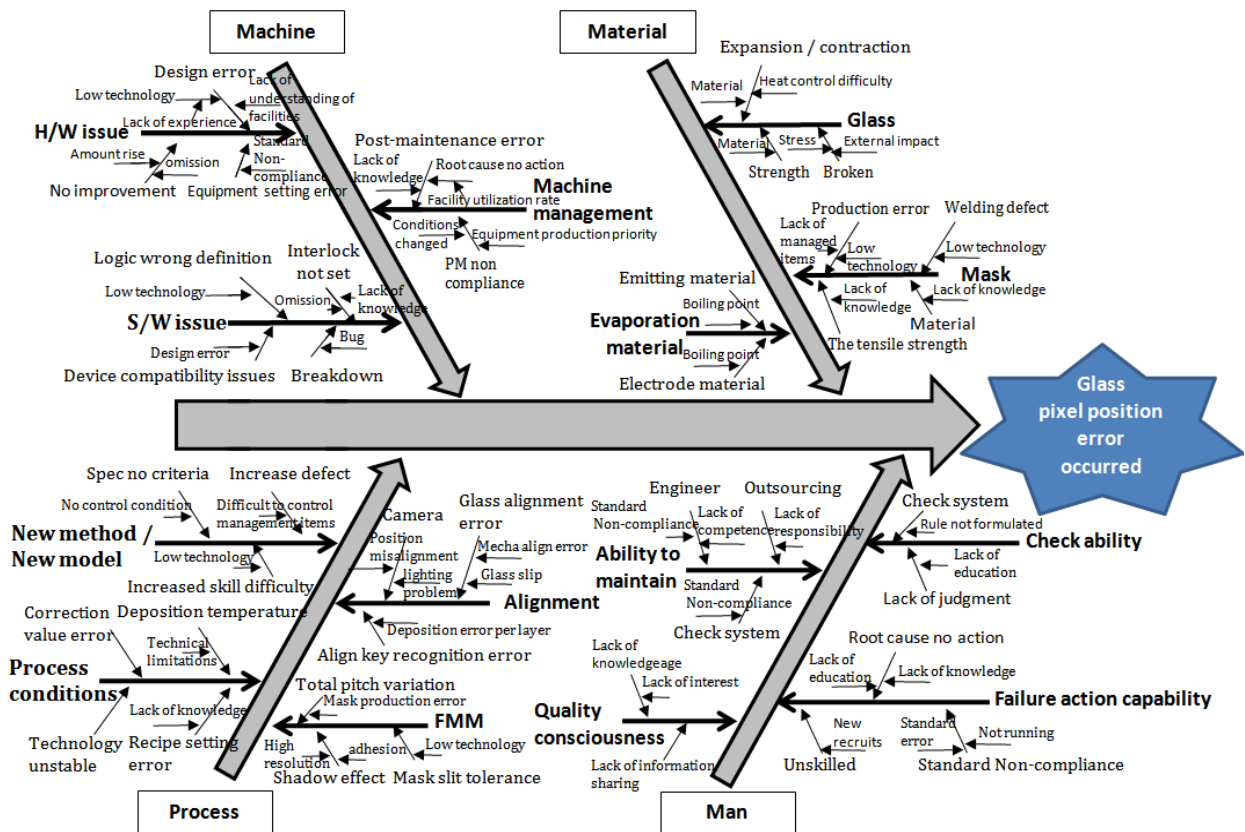
위치 틀어짐에 영향을 끼칠 수 있는 요인을 설비(machine), 공정(process), 부품/재료(material), 사람(man)의 4가지 범주로 분류하고 <Figure 9>와 같이 특성요인도로 표현하였다. 설비 조건에서는 설비 가동을 위한 하드웨어 및 소프트웨어 문제를 포함하였다. 부품/재료 측면에서는 증착 재료 및 글래스와 마스크에 의한 불량률 포함하였다. 공정 측면에서는 고객의 수요에 비해 공정 관리 조건 및 방법의 개선은 상대적으로 미흡한 것을 포함하였다. 사람 측면에서는 엔지니어와 외부 인력의 보전, 점검 및 고장 조치 능력의 부족 등을 포함하였다.

3.2 개선 과제 도출

특성요인도를 통해 도출된 원인 변수 중에서 근본 원인을 찾기 위해 <Table 2>와 같이 X-Y 행렬을 작성하였다. 이를 위해 OLED 마스크 픽셀 위치 틀어짐의 결과에 따른 치명도를 3단계로 나누어 다음과 같이 가중치를 부여하였다. 불량 발생되어 생산의 중지 또는 글래스 폐기로 인해 수율에 영향을 끼치는 경우는 가중치 5, 품질 불량 발생으로 글래스 수리 발생 및 생산 주기가 늘어나는 경우는 4, 마지막으로 엔지니어의 품질 확인으로 끝나는 경우를 1로 두었다.

이와 같은 기준으로 선정된 상위 10가지 근본 원인은 다음과 같다.

- 글래스 열 변형 최소화를 위한 열 제어 기술 부족에 의한 글래스 팽창/수축 발생
- 글래스 재질 자체에 기인한 글래스 팽창/수축 발생
- 외부충격에 의한 글래스 깨짐으로 기인한 고장, 불량
- 글래스 上/下面 열 변형에 의한 응력 작용으로 기인한 고장, 불량
- 설비의 정렬 카메라(alignment camera) 물리적 위치 틀어짐으로 인한 정렬 이상
- 기술적 한계에 의한 금속 마스크 제작 오차



<Figure 9> Cause and Effect Diagram

<Table 2> XY-Matrix for Finding Main Causes

No	Main Category	Small classification	Potential cause	CTQ		Impact of quality defect				
				Weight		Disuse (5)	Repair (4)	Quality verification(1)	Weight (sum = 10)	
					Rating scale			Sum	rank	
1	Machine	Hardware issues	Design error	Low technology	3	4	4	35	34	
2				Lack of understanding of facilities	2	3	2	24	46	
3			No improvement	Rising facility price	1	1	2	11	53	
4				Missing Item Reflected Improvement	2	3	3	25	43	
5		Equipment setting error	Standard Non-compliance	4	3	3	35	34		
6		Software issues	Logic wrong definition	Low technology	4	5	4	44	29	
7				Device compatibility issues	Design error	3	4	2	33	39
8			Breakdown	Problems due to bugs	5	4	4	45	27	
9				Missing reflected interlock	4	3	4	36	32	
10				Lack of knowledge	3	4	4	35	34	
11		Machine management	Post-maintenance error	Lack of relevant knowledge	3	4	3	34	37	
12				Root cause no action	4	3	4	36	32	
13			PM non compliance	Equipment production priority not yet implemented	6	5	4	54	21	
14				Variation of application condition of equipment/process	6	5	6	56	17	
15	Material	Evaporation material	Emitting material	High temperature application for material vaporization	6	4	4	50	23	
16			Electrode material	High temperature application for material vaporization	6	4	3	49	25	
17		Glass		Disadvantage of thermal expansion of glass material itself	8	9	6	82	2	
18				Difficult to control heat to minimize glass thermal deformation	9	8	8	85	1	
19			Strength	Compressive/tensile/flexural strength is weak due to material	7	5	8	63	10	
20				Broken	Stress due to thermal deformation	7	7	8	71	4
21					Broken by external shock	8	6	9	73	3
22		Mask	Production error	Low technology	8	6	4	68	6	
23				Lack of managed items	5	4	4	45	27	
24			Welding defect	Low technology	6	6	6	60	14	
25				The tensile strength	Insufficient knowledge of Stick tensile strength	7	6	5	64	9
26				Material	Minimize Thermal Deformation Material Not Applied	7	5	5	60	14
27		Process	New method/ New model	Spec no criteria	Lock of knowledge	6	8	4	66	8
28				Increase defect	Difficult to control management items	5	7	3	56	17
29	Increased skill difficulty			Low technology	6	4	4	50	23	
30	Process conditions		Correction value error	Correction value error	7	6	8	67	7	
31				Deposition temperature	Technical limitations according to deposition method	7	4	5	56	17
32				Technical instability	Technology unstable	6	3	5	47	26
33				No control condition	Recipe setting error	4	6	7	51	22
34	Alignment		Camera	Position misalignment	6	8	7	69	5	
35				Unknown key due to lighting problem	6	6	7	61	13	
36			Glass alignment error	Mecha align error	7	5	7	62	12	
37				Glass slip	5	3	6	43	30	
38				Align key recognition error	4	2	6	34	37	
39	FMM Method		Total pitch variation	Mask production error	7	5	8	63	10	
40				High resolution process margin tight	7	4	6	57	16	
41		Shadow effect	Degree of adhesion between glass and mask	7	4	4	55	20		
42			Mask slit tolerance	Low technology	5	3	4	41	31	
43	Man	Ability to maintain	Engineer	Lack of competence	5	1	3	32	40	
44				Standard Non-compliance	4	1	2	26	42	
45			Outsourcing	Lack of responsibility	2	2	2	20	48	
46				Check system	Standard Non-compliance	2	3	2	24	46
47		Failure action capability	Root Cause Action Error	Lack of knowledge	2	3	3	25	43	
48				Lack of education	1	2	2	15	52	
49			Unskilled	A lot of new recruits	3	2	9	32	40	
50				Standard Non-compliance	Standard error	1	3	2	19	49
51			Not running	1	2	4	17	50		
52		Quality consciousness	Lack of knowledge	Lack of interest	2	3	3	25	43	
53			Lack of information sharing	Lack of information sharing	2	1	2	16	51	

- 글래스 분판 정렬 자동 보정 등의 공정 조건 설정값 이상으로 인한 불량
- 신공법/신모델 적용으로 관리 조건 모름에 따른 신 고장, 불량
- 마스크 제작 시 스틱 인장강도의 지식 부족으로 인한 고장, 불량
- 글래스의 압축/인장/휨 강도 등 자체 특성에 기인한 고장, 불량

이러한 불량 발생의 근본 원인 10가지 항목에 대해서 원인과 대책을 마련하는 것이 필요하지만 그 중에서도 신공법 및 신기술 도입에 따른 공정 조건 정립 등에 대해서는 오랜 시간이 필요하기 때문에 본 논문에서는 생산 현장 내에서 근본 및 직접적으로 문제 해결이 가능한 설비적 제어와 운영의 항목에 대한 해결 방안을 제안하고자 하였다. 특히 이러한 항목 중에서 고장 및 불량 발생의 우선순위가 높고 글래스 열 변형과의 관련성이 있는 다음 2가지 항목에 대하여 집중적으로 분석하고 대책을 찾고자 하였다.

- 글래스 열 변형 최소화를 위한 열 제어 기술 부족에 의한 글래스 팽창/수축 발생
- 글래스 上/下面 열 변형에 의한 응력 작용으로 기인한 고장, 불량

4. 트리즈 기반 글래스 열변형 개선안 적용

4.1 트리즈를 통한 개선안 제시

고온에 의한 글래스 열 변형 최소화를 위해 창의적 문제 해결 방법인 트리즈를 적용하여 해결 방안을 모색하였다. 모순행렬을 활용한 문제 해결은 다음과 같이 5단계로 나누어 단계별 적용되었다.

- 1단계 : 39가지의 공학적 변수를 통한 문제의 구성
- 2단계 : 모순행렬에서 개선/악화되는 특성의 도출
- 3단계 : 2단계의 도출된 특성을 모순행렬에 적용하여 교차 부분의 추천원리를 추출
- 4단계 : 도출된 추천원리의 적용 가능 유/無 확인
- 5단계 : 4단계의 해결 대책을 찾고 문제에 적용

4.1.1 문제 구성

문제의 상황을 정의하여 문제의 원인을 파악하는 단계로써, 알트술러의 39가지 공학적 변수를 활용하여 문제를 구성하였다. 증착 공정에서 고온에 의한 글래스 열 변형 최소화를 위해 생산 현장에 바로 적용할 수 있는 열 제어 기술에 관련된 생산 운영 및 설비 제어 측면을

우선 고려하였다. 즉, 물류 라인 정체에 의한 글래스 대기시간에 따른 온도 변화를 최소화하여 後 공정 프로세스 체임버 투입 온도를 제어하고자 하였다.

4.1.2 모순행렬에서 개선/악화되는 특성 도출

설비적 측면에서 물류 체임버 내 투입 및 배출되는 글래스 간의 온도 차이를 최소화함으로써 개선 및 악화되는 특성을 <Table 3>과 같이 나타내었다.

<Table 3> Improved or worsed Features in Contradiction Matrix

Improved	Worsed	Recommended rules
Reliability (27)	Repair Availability(34)	1,11
	Facility Complexity(36)	13,35,1
Manufacturing Precision(29)	Repair Availability(34)	25,10
	Facility Complexity(36)	26,2,18
Productivity (39)	Repair Availability(34)	1,32,10,25
	Facility Complexity(36)	12,17,28,24

4.1.3 추천원리를 추출

개선 및 악화되는 특성을 도출하고 모순행렬표에 적용하였다. 교차 부분의 추천 원리를 통하여 문제점 해결에 응용하여 도출된 추천원리는 다음과 같다: 분할(1), 추출(2), 사전조치(10), 사전예방조치(11), 굴리기(12), 역방향(13), 차원 바꾸기(17), 기계적 진동(18), 중간매개물(24), 셀프서비스(25), 복제(26), 기계시스템의 대체(28), 색깔변경(32).

4.1.4 문제 적용 가능성 확인

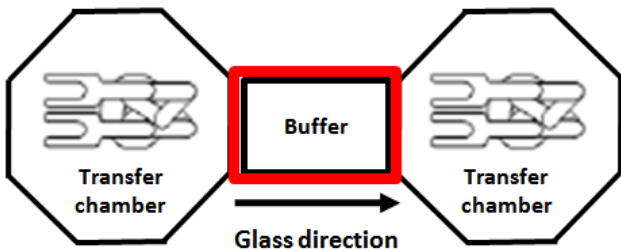
3단계에서 도출된 13개의 추천원리 중 적용 가능 유/無를 확인하기 위해 2회 이상 도출된 항목을 우선 고려하였다. 그 결과, 분할(1), 사전 조치(10), 셀프서비스(25) 항목은 중복 도출된 항목이며, 글래스 열 제어를 위한 개선안 적용 가능 항목으로 분류되었다. 이 외 도출된 항목 중 추가 적용 가능 항목으로 사전 예방 조치(11)와 중간 매개물(24)을 반영하였다. 사전 예방 조치(11) 항목은 글래스 대기시간의 증가에 따른 글래스 온도의 변화에 대해 사전 예방하기 위해 적용하였고, 중간 매개물(24) 항목은 선행 연구의 글래스 예열에 대한 필요성 및 실험 방법 응용을 통해 적용하게 되었다.

나머지 글래스 열 제어 개선안으로 미 반영된 8개 항목과 사유는 다음과 같다. 추출(2), 역방향(13), 복제(26), 기계 시스템의 대체(28), 색깔 변경(32) 항목은 글래스 열 제어를 위한 설비 및 생산 운영과의 연관성이 낮아 미 적용하였다. 또한, 굴리기(12), 차원 바꾸기(17), 기계

적 진동(18)의 항목은 증착 설비의 물리적 및 공정상의 제약으로 글래스 열 변형 최소화를 위한 개선안 항목에서 제외하였다[7].

4.1.5 대책안 적용

본 논문에서는 기존 연구들의 실험 방법 응용 및 추천 원리를 반영하여 글래스 열 변형 최소화를 위한 개선안으로 히터 설치를 통한 열 제어 방식을 고안하였다. 그 이유는 이를 통해 後 공정 이동 체임버 투입 전의 글래스 온도를 목표 온도로 유지하면서 글래스 대기시간에 따른 온도 변화를 최소화할 수 있기 때문이다. 본 논문에서 설계한 추천 원리의 사전 조치 및 사전예방조치를 반영한 히터의 설치 위치는 <Figure 10>과 같다.

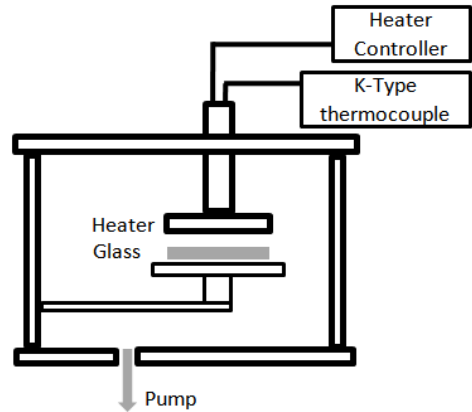


<Figure 10> Position of Heater Installation

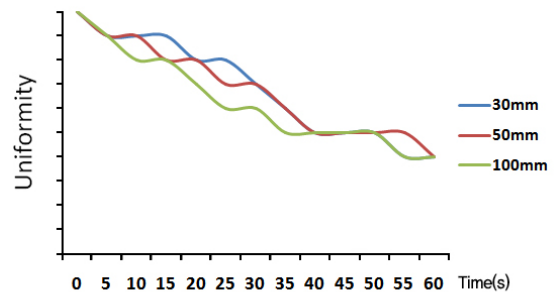
본 논문에서 적용된 히터 설치 개략도를 <Figure 11>에 나타내었다. 사용된 체임버는 녹슬지 않는 강철(stainless steel : STS, KS 규격) 재질이고, 글래스 가열장치를 버퍼 체임버 상단에 설치하고, 히터 온도는 K타입 열전대를 사용하였다. 트리즈를 통해 도출된 추천원리를 반영한 설치 개념은 다음과 같다. 유지보수를 위해 버퍼 체임버와 히터의 분리가 가능하도록 설계하였고, 글래스의 온도에 따라 히터가 동작될 수 있도록 자동제어시스템 방식을 적용하였다. 즉, 적외선 열 감지 센서를 통해 글래스 온도를 감지하고, 이를 비례적분미분(proportional integral derivative : PID)제어를 통해 히터 열 제어 시스템이 최단 시간 내에 목표 온도에 도달할 수 있도록 구성하였다. 이러한 버퍼 체임버 내 히터 설치의 유/무기 재료 증착 전 투입 글래스의 온도 변화를 최소화하여 글래스와 마스크 간의 패턴 정밀도가 향상될 수 있도록 하였다.

4.2 개선안 적용 결과

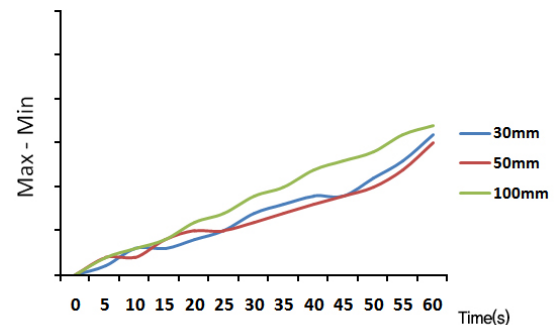
트리즈의 모순행렬 및 추천원리를 통해 적용된 개선안에 대해 결과를 분석하고 평가한 결과는 다음과 같다. OLED 증착 공정의 버퍼 체임버는 10⁻³pa~ATM 수준의 저진공 상태이다. 체임버 내부에서의 열전달은 복사 현상이 적용된다. 이는 진공 상태에서의 에너지 전달로 스



<Figure 11> Schematic Diagram of Heater Installation



(a)



(b)

<Figure 12> Glass Temperature Trend by Distance to Heater[7]

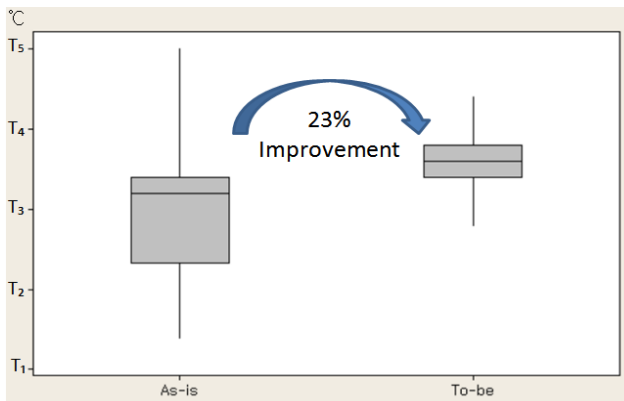
테판-볼츠만 법칙이 적용되며, 식은

$$W = \sigma \times \epsilon \times A \times (T_1^4 - T_2^4)$$

로 정리 할 수 있다. 변수 정의는 다음과 같다.

- W : 총 복사 에너지(W)
- σ : 스테판-볼츠만상수($5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{k}^4$)
- ϵ : 방사율(emissivity)
- A : 표면적(m^2)(650mm×750mm)
- T₁ : 고온 측 온도(절대온도[K])
- T₂ : 저온 측 온도(절대온도[K])

방사율 ϵ 은 물체가 에너지를 흡수한 후, 재 방사 및 반사가 진행될 때의 복사 에너지 비율을 나타낸다. 완전 반사체는 ϵ 이 0이고, 흑체는 1이다. 적용되는 물체는 일반적으로 $0 < \epsilon < 1$ 의 값으로 표현된다[8]. 본 논문에서는 85%이상의 고방사율 히터를 적용하여 손실되는 열에너지를 최소화하고자 하였다. 히터의 적정온도 산출은 히터의 표면부하 밀도와 스테판-볼츠만 법칙을 적용한 후 분리 실험을 통해 적정온도를 설정하였다. 글래스와 히터의 거리는 <Figure 12>와 같이 글래스의 온도균일도 변화실험을 통해 설정하였다. <Figure 12(a)>는 히터를 일정 온도로 고정한 후, 글래스와 히터사이의 거리를 30mm, 50mm, 100mm로 변화시키면서 글래스 온도를 측정한 그래프이다. <Figure 12(b)>는 측정된 글래스 온도의 최대치와 최소치 데이터를 이용하여 글래스 온도의 최대치-최소치의 차이를 나타낸 그래프이다. <Figure 12>에서 확인할 수 있듯이 글래스와 히터 간의 거리가 50mm 미만일 때 글래스 온도 균일도와 온도 최대치-최소치의 차이가 없는 것을 알 수 있으며, 이런 조건에서 반복 실험을 통해 추가로 미세 조정하였다.



<Figure 13> Experimental Result

<Figure 13>은 히터를 적용한 전/후의 글래스 온도 산포를 나타낸다. 히터 적용 전 글래스 온도의 표준편차와 적용 후 글래스 온도 표준편차를 비교할 때, 글래스 온도 산포가 약 23% 수준 개선됨을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 OLED 패널 생산 기술이 고도화됨에 따라 고해상도 제품 적용에 의한 품질 문제 중의 하나로써 OLED 증착 공정에서 이슈가 되고 있는 글래스 열 변형에 의한 픽셀 위치 틀어짐을 개선할 수 있는 방법을 제안하였다. 이를 위해 열 변형에 대한 다양한 원인을 특

성요인도를 이용하여 분석하고, X-Y 행렬을 이용하여 품질 불량에 대한 원인을 도출하였다. 그 결과 제어 기술 부족에 의한 글래스 팽창/수축 발생이 글래스 픽셀 위치 틀어짐에 가장 큰 영향을 끼치는 원인인 것으로 확인하였고, 선정된 문제점들에 대해 TRIZ 기법을 활용하여 해결책을 제안하였다. 그 결과 글래스 예열을 통하여 글래스 온도의 편차가 개선안 적용 전 대비 약 23% 수준 개선됨을 확인하였다.

그러나 현재 기술 수준에서는 OLED 증착 공정에서 고온의 열을 사용하여 재료를 기화시키는 방법이 유일하며, 그에 대해 수반되는 문제점으로 인해 고해상도 제품의 품질 문제를 발생시킨다. 따라서 근본적인 글래스 열 변형을 개선하기 위해서는 글래스와 마스크의 열 영향도 및 변형을 최소화할 수 있는 공법과 재료의 연구/개발을 지속적으로 진행하는 것이 필요하며, 이는 본 연구에서 고려하고 있는 다음 단계 연구 방향이다.

Acknowledgement

This work was performed for Master's thesis[7].

References

- [1] An, Y.S. and Hwang, I.K., A new Management Innovation Strategy through 6 sigma for R&D linked with TRIZ, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2009, Vol. 32, No. 3, pp. 178-187.
- [2] Han, Y.K. and Park, S.C., A six sigma methodology to solve pooling problems of display products, *Journal of the Korean Institute of Plant Engineering*, 2011, Vol. 16, No. 2, pp. 57-70.
- [3] Jeon, W.S., Lee, S.T., and Kwon, J.H., Technology Status and Future Trend on OLED Pixel Patterning Process for Large Mother Glass Production, *Applied Chemistry for Engineering*, 2008, Vol. 11, No. 5, 2008, pp. 16-29.
- [4] Jin, W.B., study on ultra rapid thermal annealing process using a flash lamp : dopant activation and crystallization of amorphous silicon [Master's Thesis], [Seoul, Korea] : Hongik University, 2014.
- [5] Kim, D.H., Park, S.H., Hong, W.E., Chung, J.K., Ro, J.S., and Lee, S.H., Thermal Analysis on Glass Backplane of OLED Displays During Joule Induced Crystallization Process, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Pusan, Korea, 2009, pp. 797-802.
- [6] Kim, J.T., Properties of organic thin film and OLED

- device with various deposition temperatures [Master's Thesis], [Pocheon, Korea] : Daejin University, 2009.
- [7] Lee, W.S., Improvement of glass thermal deformation in OLED deposition process [Master's Thesis], [Suwon, Korea] : Ajou University, 2017.
- [8] Park, H.J., Oh, S.K., Shin, Y.H., and Chung K.H., Heat Transfer from a Sample to a Hot Plate in a Low Vacuum, *The Korean Vacuum Society*, 2008, Vol. 17, No. 4, 2008, pp. 302-310.
- [9] Park, J.Y., Status of OLED Technology Development, *The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 2005, Vol. 19, No. 1, pp. 22-30.
- [10] Park, Y.H., *OLED Equipment Technology trend*, Sunic System, Ltd., 2008.
- [11] Samsungdisplay, <http://blog.samsungdisplay.com/12>.

ORCIDWoo-Sung Lee | <http://orcid.org/0000-0002-5090-1013>Jin Young Choi | <http://orcid.org/0000-0001-6397-3107>