

TFT-LCD 공정에서의 Color Filter의 경제적 Lot Size의 결정

정봉주* · 손소영*

Determination of an Economic Lot Size of Color Filters in TFT-LCD Manufacturing

Bongju Jeong · So Young Sohn

〈Abstract〉

This paper deals with an assembly process of the TFT glasses and the color filters in LCD manufacturing. Two specific problems are presented and solved. One is a matching problem to find the best matches between a set of TFT glasses and a set of color filters, which result in the maximum number of good LCD assemblies. A simple mathematical model is constructed for this problem and an optimal solution can be obtained using an existing algorithm. The other is a main problem that requires a determination of an economic lot size of the color filters which are going to be assembled with a given set of TFT glasses. A Bayesian dynamic forecasting model is developed to predict the defective patterns of color filters. Based on the predicted defective rate of color filters, the minimum lot size of the color filters can be determined to minimize the probability of losing good TFT glasses and color filters.

1. 연구 개요

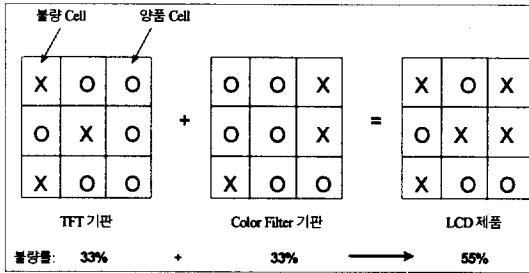
TFT-LCD(Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display)의 제조공정은 TFT기판의 제조와 Color Filter의 제조공정이 독립적으로 진행된 다음, 이 두 부품을 조립하는 공정을 거쳐 액정주입, 편광판 부착, 기타 부품의 최종조립 등의 공정을 거쳐 완성된다. 본 연구에서는 TFT기판의 제조가 이루어진 상황에서 외부로부터 입고되는 Color Filter를 조립하는 공정을 고려한다.

TFT기판은 사각형 유리판 위에 트랜지스터 회로를 집적시킨 기판으로서, 제조공정은 반도체 집적회로의 chip을 만드는 과정과 유사한 Fabrication공정을 적용

한다. TFT기판의 크기는 다양하여, 300 mm×350 mm, 300 mm×400 mm, 370 mm×370 mm, 550 mm×650 mm 등이 있으며 기술이 발달할수록 그 크기가 커지는 경향이 있다. 하나의 기판에서 하나 또는 다수 개의 제품이 만들어진다. 예를 들면, 하나의 550 mm×650 mm 기판에서 6개의 12.1인치 제품, 또는 16개의 4인치 제품들이 생산될 수 있다. 같은 크기의 TFT 기판에는 같은 크기의 Color Filter 기판이 조립되어야 하는데, 이때 TFT 기판을 하판, Color Filter 기판을 상판이라고 한다. 기판상의 각 제품 위치를 Cell이라고 하는데, 두 기판을 조립할 때 고려하여야 할 가장 중요한 요소 중의 하나는 각 Cell의 불량여부이다. 이는 〈그림 1〉에

* 연세대학교 산업시스템공학과

서 보는 바와 같이 조립되는 두 기관상의 같은 위치의 Cell이 모두 양품일 때에만 하나의 LCD 양품이 생산되기 때문이다. 따라서, 두 기관 중 한 쪽만 불량 Cell이 되어도 결국 LCD 불량품이 되므로 이 경우 한 쪽이 양품의 Cell일지라도 버리게 되는 경제적 손실이 발생한다.



〈그림 1〉 TFT기관과 Color Filter의 조립방법

이상과 같은 상황에서, 본 연구의 목적은 양품의 Cell들을 버리게 되는 경우를 최소화하여 결국 LCD 양품률을 최대화하는 방법을 찾는 것이다. 이는 곧 다음 두 가지 문제를 해결함으로써 가능해진다. 먼저, 각 기관의 Cell들에 대한 불량여부를 이미 알고 있는 TFT 기관들과 Color Filter 기관들이 주어질 경우, 이 기관들간의 최적 조합의 쌍들을 찾는 문제이다. 또 다른 문제는 TFT기관의 제조가 이루어진 상황에서 이 TFT기관들과의 조립을 고려하는 Color Filter기관의 수량, 즉 조립할 Color Filter의 Lot Size를 결정하는 문제이다. 이는 생산된 TFT기관의 각 Cell들에 대한 불량여부를 알고 있다고 할 경우, 조립할 Color Filter 기관들의 불량정보를 확률모형으로 예측하여 조립의 결과가 가장 좋게 나올 수 있는 최소의 Color Filter의 Lot Size를 결정하는 방법으로 해결 가능하다.

결국, 본 논문에서는 생산된 TFT기관과 조립될 Color Filter의 경제적 Lot Size를 결정한 다음 두 부품군들을 최적으로 Match시켜 조립하는 문제를 다룬다.

2. TFT 기관과 Color Filter의 최적 조합

2.1 문제 성격

m 개의 TFT 기관과 n 개의 Color Filter가 주어지고($n \geq m$), 각 기관의 Cell들에 대한 불량여부를 모두 알고 있을 경우, 최고의 LCD 양품률을 가질 수 있는 조합들을 찾는 문제이다. 각 기관의 불량 Pattern은 기관 내의 불량 Cell의 수 및 위치에 따라서 결정된다. 예를 들면 4개의 Cell을 가진 기관의 경우, 16종류의 불량 Pattern들이 존재한다(모두 양품일 경우를 포함). 각 TFT기관과 Color Filter는 같은 불량 Pattern을 가지고 있다 할지라도 서로 고유한 제품이므로, 이들의 가능한 조합의 수는 모두 $\frac{n!}{(n-m)!}$ 개가 된다.

만일 n 개의 Color Filter에서 주어진 TFT기관들과 똑같은 불량 Pattern을 가진 m 개의 Color Filter가 모두 존재한다면 해법은 극히 단순하다. 즉, 같은 Pattern들끼리 조립을 하면 최적조합이 된다. 이와 같이 특수한 경우를 제외하면, 이 문제는 모든 일반적인 경우에 적용할 수 있는 해법을 필요로 한다.

본 문제의 중요성은 잘못된 조합을 하였을 경우의 경제적 손실이 매우 크다는 데에 있다. 즉 양품의 Cell인데도 불구하고 조합이 잘못되어 불량 Cell과 조립되어 결국 불량 LCD 제품을 만들어 폐기하여야 되는 상황이 발생하기 때문이다. 이 경우 폐기에 의한 직접 손실 뿐만 아니라, 양품을 생산할 수 있었던 기회 손실 비용까지 발생하게 된다. 이러한 이유 때문에 최적조합 또는 이에 가까운 좋은 조합을 반드시 찾아야 할 필요성이 있는 것이다.

2.2 최적화 모형: Weighted Matching Problem

이 문제는 다음과 같은 Weighted Matching Problem으로 수리 모형화할 수 있다.

기호

m : TFT 기관의 수

n : Color Filter의 수

s : 한 TFT(Color Filter) 기관에서의 Cell의 수

t_{ik} : i 번째 TFT기판의 k 번째 Cell의

$$\text{불량여부} = \begin{cases} 1, & \text{양품일 경우} \\ 0, & \text{불량일 경우} \end{cases}$$

c_{jk} : j 번째 Color Filter기판의 k 번째 Cell의

$$\text{불량여부} = \begin{cases} 1, & \text{양품일 경우} \\ 0, & \text{불량일 경우} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & i\text{번째 TFT기판이 } j\text{번째 Color Filter와 조립되는 경우} \\ 0, & \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$$

$$\text{Maximize} \quad \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^s (t_{ik} \cdot c_{jk}) \cdot x_{ij}$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$x_{ij} = 0$ 또는 1 , 모든 i, j 에 대하여.

2.3 가능 해법들

1) 최적해법 : Weighted Matching Problem은 " $m = n$ "이 되게 dummy 변수들을 첨가하여 배정문제 (Assignment Problem)로 변환시킬 수 있다[5]. 이 문제는 기존의 해법인 Hungarian Method를 이용하여 $O(m^3)$ 의 Polynomial 계산 시간으로 최적해를 구할 수 있다 ([2], [4], [5], [7]). 그러나 현실적으로 매일 생산량이 약 1000매(기판) 정도라고 하면 변수의 수만 약 백만 개가 되는 대형문제로서의 해법의 효율성을 고려하여야 한다. 대안으로는 몇 개의 소단위 Lot으로 나누어 문제 크기를 줄여서 해법을 적용할 수 있으나, 이 경우 전체 Lot에 대한 최적해를 포기하여야 하는 손해를 감수하여야 한다.

2) 분류해법 : 기판 내의 Cell의 수가 적을 경우에 현실적으로 사용할 수 있는 방법은 분류해법(Classification Method)이다. 즉, 미리 같은 Pattern의 불량률 가진 기판들끼리 재고를 분류하여 모아두어 같은 Pattern의 TFT기판과 Color Filter를 바로 조립공정으로 보낼 수 있다. 가령 2개의 Cell을 가진 경우 4종류

의 Stock Location만 필요하며 최적해를 손쉽게 구할 수 있다. 그러나 4개의 Cell을 가진 경우부터는 이미 16종류의 Stock Location으로 분류되어야 하며, 분류되었다 하더라도 같은 Pattern들의 조합이 이루어진 후 남은 서로 다른 Pattern들끼리의 조합은 수많은 대안이 존재하게 되어 사실상 최적 조합을 수작업으로 구하는 것은 불가능하게 된다.

3) 발견적 해법 : 최적해를 보장하지는 못하더라도 효율성 때문에 실제로 많이 사용되는 발견적 해법은 상대적으로 간단한 개념이 적용된다. 즉, 같은 불량 Pattern들을 가지는 두 기판들부터 우선적으로 짝짓기를 한 다음 남은 기판들에 대해서는 Pattern의 차이가 적게 나는 기판들부터 차례대로 짝짓기를 하여 나가는 방법이다. 그러나 이 방법은 Pattern의 차이도를 결정하는 기준에 따라 해의 좋고 나쁨이 많은 영향을 받는다.

3. Color Filter의 불량률 예측

주어진 TFT기판들과 조립을 위해 선택 대상이 되는 Color Filter들의 수(Lot Size)를 결정하기 위해서는 먼저 고려하고자 하는 Color Filter들의 불량정보를 예측하여야 한다. 여기서, 불량정보란 곧 각 Color Filter기판의 모든 Cell들에 대한 불량여부를 의미한다. 본 논문에서는 각 Cell에 대한 불량률을 확률모형에 의해 예측함으로써 그 Cell의 불량여부에 대한 자료를 생성하고자 한다.

3.1 정적 확률 모형

Color Filter는 다수의 공급자들에 의해 공급될 수 있다고 본다. 먼저, $p(V_{i,k})$ 를 어떤 기간 i 에서 공급자 V (Vendor)가 공급하는 Color Filter의 k 번째 Cell이 불량일 확률이라고 하자. 각각의 $p(V_{i,k})$ 는 공급자들 간의 차이 또는 동일한 공급자에 의해 공급되는 Color Filter들 간의 차이에 따라 달라질 수 있다. 이 때, $p(V_{i,k})$ 는 입고 검사 전에 얻어지는 사전지식(Prior Knowledge)에 기초하여 다음과 같은 beta분포를 따른다고 가정한다[1].

$$p(V_{i,k}) \sim \text{beta}(1, \exp(-\delta_o - \delta_v z(V_i))) \quad (1)$$

여기서, $z(V_i) =$

- 0, Color Filter가 원래 공급자 o로부터 공급된 것일 경우
- 1, Color Filter가 공급자 o가 아닌 다른 공급자 V로부터 공급된 것일 경우

$p(V_{i,k})$ 의 기대치는 $E(p(V_{i,k})) = \frac{1}{1 + \exp(-\delta_o - \delta_v z(V_i))}$ 로 주어지므로 원래의 공급자 o와 또 다른 공급자인 V가 공급하는 Color Filter의 품질은 다음과 같이 서로 다르게 된다[6].

$$E(p(o_{i,k})) = \frac{1}{1 + \exp(-\delta_o)}$$

$$E(p(V_{i,k})) = \frac{1}{1 + \exp(-\delta_o - \delta_v)}$$

여기서, $\delta_o = \ln \left\{ \frac{E(p(o_{i,k}))}{1 - E(p(o_{i,k}))} \right\}$,

$$\delta_v = \ln \left\{ \frac{E(p(V_{i,k})) / (1 - E(p(V_{i,k})))}{E(p(o_{i,k})) / (1 - E(p(o_{i,k})))} \right\}$$

δ_o 와 δ_v 를 얻기 위한 $E(p(o_{i,k}))$ 와 $E(p(V_{i,k}))$ 에 대한 정보는 입고검사가 이루어지기 전에 각 공급자들이 주장하는 품질정보로부터 얻어진다.

$p(V_{i,k})$ 에 대한 Prior Distribution은 무작위로 선정된 $n(V_i)$ 개의 Color Filter의 표본에 의한 입고검사후 보정될 수 있다. $y(V_{i,k})$ 를 $n(V_i)$ 개의 Color Filter들 중 관측된 k 번째의 불량 Cell의 수라고 하면, $y(V_{i,k}) \sim \text{Binomial}(n(V_i), p(V_{i,k}))$ 이라고 가정할 수 있다. 이 분포에 따라 도출되는 Posterior Distribution은 다음과 같다.

$$p(V_{i,k}) | y(V_{i,k}) \sim \text{beta}(1 + y(V_{i,k}),$$

$$\exp(-\delta_o - \delta_v z(V_i) + n(V_i) - y(V_{i,k}))) \quad (2)$$

따라서, 특정 기간 t 에서 공급자 V 에 의해 공급되는 Color Filter의 특정 Cell의 불량률에 대한 Posterior 평균 및 분산은 다음과 같이 얻어진다.

$$E[p(V_{i,k}) | y(V_{i,k})] = \frac{1 + y(V_{i,k})}{1 + \exp(-\delta_o - \delta_v z(V_i)) + n(V_i)},$$

$$\text{Var}[p(V_{i,k}) | y(V_{i,k})]$$

$$= \frac{(1 + y(V_{i,k}))(n(V_i) - y(V_{i,k}) + \exp(-\delta_o - \delta_v z(V_i)))}{(1 + n(V_i) + \exp(-\delta_o - \delta_v z(V_i)))^2 (2 + n(V_i) + \exp(-\delta_o - \delta_v z(V_i)))}$$

그러나 만일 t 기간 후의 미래의 어떤 시점인 $t+1$ 에서의 $E[p(V_{t+1,k}) | y(V_{t+1,k})]$ 을 구하려면 그 시점의 관측치인 $y(V_{t+1,k})$ 가 필요하다. 즉, 위의 확률모형 (2)는 미래의 어떤 Lot에 대한 품질 예측에는 사용될 수가 없다. 다음 절에서는 이러한 예측에 사용될 수 있는 동적인 확률모형을 도출하고자 한다.

3.2 동적 확률 모형

본 절에서는 [3], [8], 그리고 [9]에서 고려된 동적 Bayesian 확률모형을 본 논문의 문제에 적용하여 도출하고자 한다. 동적 확률모형은 입수가 가능한 정보의 종류에 따라 다양하게 도출될 수 있으나, 본 논문에서는 다음과 같은 상황을 고려한다. 이미 Color Filter의 표본을 계속적으로 검사한 상황에서, 향후 입고될 Color Filter에 대한 각 Cell의 불량률을 예측하는 것이다.

앞 절에서의 모형 (1)에 따라, 어떤 기간 $t-1$ 에서의 공급자 V 에 의해 공급되는 Color Filter들에 대한 k 번째 Cell의 불량률은 다음과 같은 분포로 주어진다.

$$p(V_{t-1,k}) \sim \text{beta}(1, \exp(-\delta_o - \delta_v z(V_{t-1}))) \quad (3)$$

이 기간까지 모아진 실제 관측치,

$D(V_{t-1,k}) = (n(V_1), y(V_{1,k}), \dots, n(V_{t-1}), y(V_{t-1,k}))$ 가 얻어진다면, $p(V_{t-1,k})$ 에 대한 Posterior Distribution은 다음과 같이 도출된다.

$$p(V_{t-1,k}) | D(V_{t-1,k}) \sim \text{beta}(a_{t-1,k}, b_{t-1,k}) \quad (4)$$

여기서, $a_{t-1,k} = 1 + \sum_{j=0}^{t-2} w^j y(V_{t-1-j,k})$,

$$b_{t-1,k} = \exp(-\delta_o - \delta_v z(V_{t-1})) + \sum_{j=0}^{t-2} w^j (n(V_{t-1-j}) - y(V_{t-1-j,k})).$$

w는 0에서 1사이의 값을 갖는 데 과거치보다는 현재에 가까운 실측치에 더 많은 비중을 두어 $p(V_{t-1,k})$ 의 분포를 수정하도록 하는 역할을 한다.

이 때의 관측치는 또한 $p(V_{t,k})$ 에 대한 Posterior Distribution을 보정하는 데 사용된다.

$$p(V_{t,k}) | D(V_{t-1,k}) \sim \text{beta}(a_{t,k|t-1,k}, b_{t,k|t-1,k}) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } a_{t,k|t-1,k} &= 1 + \sum_{j=0}^{t-2} W^{j+1} y(V_{t-1-j,k}) \\ &= 1 + w(a_{t-1,k} - 1), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_{t,k|t-1,k} &= \exp(-\delta_o - \delta_v z(V_t)) \\ &\quad + \sum_{j=0}^{t-2} w^{j+1} (n(V_{t-1-j}) - y(V_{t-1-j,k})) \\ &= \exp(-\delta_o - \delta_v z(V_t)) \\ &\quad + w[b_{t-1,k} - \exp(-\delta_o - \delta_v z(V_{t-1}))]. \end{aligned}$$

그러므로 현재 기간 t에서의 관측치, $D(V_{t,k}) = (D(V_{t-1,k}), n(V_t), y(V_{t,k}))$ 를 얻은 후에는 다음을 구할 수 있다.

$$p(V_{t,k}) | D(V_{t,k}) \sim \text{beta}(a_{t,k}, b_{t,k}) \quad (6)$$

$$\text{여기서, } a_{t,k} = a_{t,k|t-1,k} + y(V_{t,k}),$$

$$b_{t,k} = b_{t,k|t-1,k} + (n(V_{t,k}) - y(V_{t,k})).$$

이제 미래 한 기간 후인 t+1기간의 불량률을 추정하여 보고자 한다. 먼저 현재 기간 t에서의 관측치를 바탕으로 한 $p(V_{t+1,k})$ 에 대한 평균 및 분산은 다음과 같이 도출된다.

$$E[p(V_{t+1,k}) | D(V_{t,k})] = \frac{a_{t+1,k|t,k}}{a_{t+1,k|t,k} + b_{t+1,k|t,k}} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Var}[p(V_{t+1,k}) | D(V_{t,k})] \\ = \frac{a_{t+1,k|t,k} \cdot b_{t+1,k|t,k}}{(a_{t+1,k|t,k} + b_{t+1,k|t,k})^2 (a_{t+1,k|t,k} + b_{t+1,k|t,k} + 1)}. \end{aligned} \quad (8)$$

모형 (5)를 도출한 것과 같은 개념으로, 미래 l기간 후인 t+l기간에서의 불량률은 다음과 같은 확률분포 모형을 가지게 된다.

$$p(V_{t+l,k}) | D(V_{t,k}) \sim \text{beta}(a_{t+l,k|t,k}, b_{t+l,k|t,k}) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } a_{t+l,k|t,k} &= 1 + \sum_{j=0}^{l-1} W^{j+1} y(V_{t+j,k}), \\ b_{t+l,k|t,k} &= \exp(-\delta_o - \delta_v z(V_{t+l})) \\ &\quad + \sum_{j=0}^{l-1} w^{j+1} (n(V_{t+j}) - y(V_{t+j,k})). \end{aligned}$$

확률모형 (9)를 이용하면, δ_o, δ_v, w 와 실측치 $n(V_{t+j}), y(V_{t+j,k})$ 가 주어졌을 때, 미래의 어떤 기간 t+l에서의 공급자 V에 의해 공급되는 각 Color Filter의 k번째 Cell의 불량여부를 예측할 수 있다. 이에 대한 예측 절차는 다음과 같다.

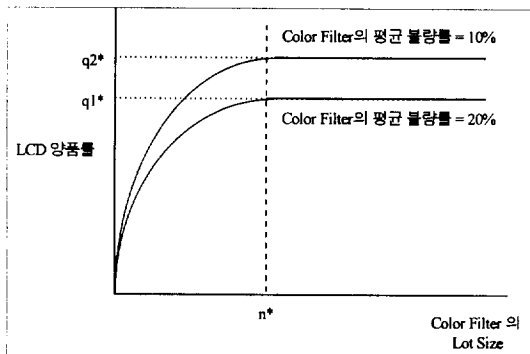
- (i) 미래의 t+l기간에서 N개의 Color Filter 기판이 필요하다고 하면,
- (ii) 공급자 V에 의해서 공급되는 각 Color Filter기판의 k번째 Cell이 불량일 확률을 예측한다. 이는 각 공급자 $V = o, 1, 2, \dots, a$ 에 따른 모형 (9)의 확률변수 $p(V_{t+l,k}) | D(V_{t,k})$ 에 대한 N_V 개의 Random Number를 생성함으로써 가능하다(여기에서, $\sum_{V=0}^a N_V = N$).
- (iii) 주어진 $p(V_{t+l,k}) | D(V_{t,k})$ 를 이용, 0이나 1의 값을 갖는 Random Variable $y(V_{t+l,k})$ 을 Binomial (1, $p(V_{t+l,k}) | D(V_{t,k})$)로부터 생성하여 $y(V_{t+l,k})$ 값이 1이면 Cell k는 불량으로 판정.

이상과 같은 방법으로 공급될 모든 Color Filter들의 각 Cell들에 대한 불량여부를 결정하면, Color Filter의 불량 Pattern들에 대한 빈도를 또한 구할 수 있다.

4. Color Filter의 경제적 Lot Size 결정

4.1 문제의 성격

앞의 2장에서 우리는 TFT 기판들과 Color Filter 기판들과의 최적조합을 구하는 문제와 해법에 관해서 논하였다. 이 때의 가정은 TFT 기판과 Color Filter의 수가 이미 결정되어 있고 또한 이들의 불량정보를 모두 알고 있다는 것이었다. 본 장에서 다루고자 하는 문제는 TFT 기판을 제조하여 최종 LCD 제품을 생산하는 회사의 입장에서 Color Filter 기판을 외부 공급자로부터 구입하는 경우에 어느 정도 Lot Size의 Color Filter를 매번의 조립 대상으로 하여 최적조합을 구하느냐의 문제이다. 이는 Color Filter의 불량정보를 예측하여(이는 3장에서 다루었음) 가장 많은 양의 최종 LCD 제품을 생산할 수 있게 하는 최소의 Lot Size를 구하는 문제이다. 즉, 다음 <그림 2>에서와 같이 예측된 Color Filter의 불량률을 가지고, LCD 제품의 최대 양품률 q^* 을 유지하는 최소의 Lot Size인 n^* 을 구하는 것이다.



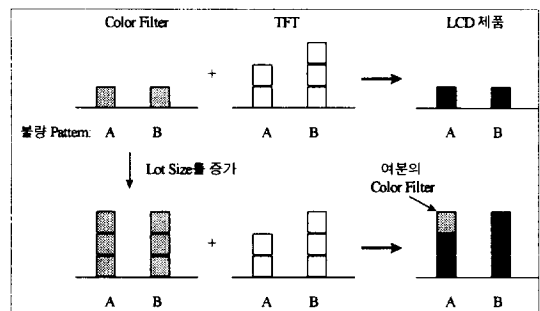
<그림 2> Color Filter의 경제적 Lot Size(n^*)의 결정

여기서 최대 양품률 q^* 란 주어진 TFT 기판에서의 모든 양품이 한 개의 손실도 없이 최종 LCD 제품으로 생산되었을 때의 양품률로서, 이는 곧 TFT 기판의 원래 양품률과 동일하게 된다. 결국 Color Filter의 Lot Size n^* 은 주어진 TFT 기판의 모든 Cell들의 불량 Pattern들과 똑같은 Color Filter들이 모두 포함되는 최소의 Lot Size를 의미하게 된다. 따라서, n^* 보다 적은

Lot을 대상으로 조립할 경우 TFT Cell들 중 양품인데도 폐기되는 경우가 발생하여 최종 LCD 제품의 양품률이 감소하게 되며, n^* 보다 큰 Lot을 대상으로 조립할 경우에는 최대 양품률 q^* 은 유지하지만 최적조합의 문제를 풀 때 문제 크기가 증가하여 계산 시간이 증가하게 된다.

4.2 Lot Size 결정 방법

앞 절에서 언급된 바와 같이, Color Filter의 경제적 Lot Size란 주어진 모든 TFT 기판들의 불량 Pattern들과 똑같은 Color Filter들이 모두 포함되는 최소의 Lot Size를 의미한다. 이러한 Lot Size의 결정을 위한 기본 개념은 <그림 3>에 예시된 바와 같다. <그림 3>에서 보는 바와 같이 두 가지의 불량 Pattern인 A, B만을 고려하면, 각 Pattern에 대한 TFT 기판이 각각 2개, 3개가 있으며, Color Filter는 각각 1개씩의 상대적 빈도를 가지고 있다고 가정하자. 따라서 조립 후 TFT Cell의 손실이 없으려면 TFT기판의 수까지 Color Filter의 수를 증가시켜 주어야 하므로, 전체적으로 Color Filter의 수를 3배 증가시켜 주어야 한다(증가량 = \max {Pattern A에 대한 증가량, Pattern B에 대한 증가량} = \max {2배, 3배}). 결국 조립 후에는 1개의 Color Filter가 여분으로 남게 되며, 이는 다음 번의 조립 Lot에 포함시킨다.



<그림 3> Color Filter의 Lot Size결정 개념: 예시

이러한 개념으로부터 Color Filter의 경제적 Lot Size의 결정 절차는 다음과 같다.

단계 1. TFT기판의 불량 Pattern에 대한 분포도 작성.

각 TFT 기판 내의 불량 Cell들의 수 및 위치에 따라서 불량 Pattern이 결정되며, 각 불량 Pattern에 대한 빈도를 구하여 분포도 작성.

단계 2. Color Filter의 불량 Pattern에 대한 분포도 예측.

(i) 확률모형 (9)에 따라, 확률변수 $p(V_{t+l,k})|D(V_{t,k})$ 에 대한 Random Number를 생성.

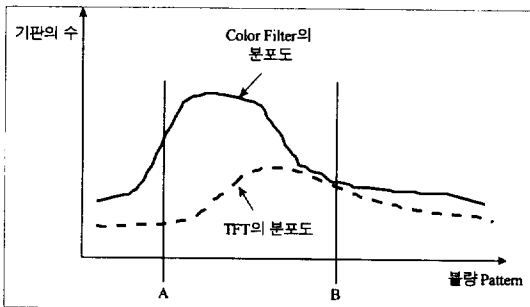
(ii) 주어진 $p(V_{t+l,k})|D(V_{t,k})$ 를 이용, 0이나 1의 값을 갖는 Random Variable $y(V_{t+l,k})$ 을 Binomial $(1, p(V_{t+l,k})|D(V_{t,k}))$ 로부터 생성하여 $y(V_{t+l,k})$ 값이 1이면 Cell k 는 불량으로 판정.

(iii) TFT 기판의 불량 Pattern들의 분포도 (빈도수)를 모두 포함할 때까지 (i), (ii)를 반복.

(iv) 불량 Pattern에 대한 빈도를 구하여 분포도 작성.

단계 3. Color Filter의 경제적 Lot Size, n^* 계산.

n^* = Color Filter의 불량 Pattern에 대한 분포도상의 빈도수의 총합.



〈그림 4〉 Color Filter 및 TFT기판의 불량 Pattern에 대한 분포도 예시

〈그림 4〉는 위의 절차에 따라 작성된 두 분포도에 대한 예시를 보여주고 있는데, 여기에서 Color Filter

기판의 분포도가 TFT기판의 분포도를 완전히 포함하고 있음을 알 수 있다.

4.3 사례

일일 TFT기판의 생산량이 1000개인 생산 라인을 가정한다. 이때, 실제로 관측된 TFT기판의 각 Cell의 불량 Pattern은 알고 있으며, Color Filter들은 매주 입고 되는 상황이다. 현재까지의 모든 Color Filter들은 한 공급자 o 에 의해 공급되었는데, 평균 20%의 불량률을 보이고 있다. 이러한 불량률에 대한 Prior Knowledge는 이제 과거 4주간의 Color Filter에 대한 불량 검사 자료를 이용하여 보정되어진다. 〈표 1〉은 현재 시점 t 를 기준으로 과거 4주간의 입고된 Color Filter들에 대한 1000개 기준의 불량 검사 자료에 대한 요약된 결과를 보여주고 있다. 이제 우리가 예측하고자 하는 것은 최대 양품률을 유지하기 위하여 얼마만큼의 수량의 Color Filter를 다음주에 입고시키느냐 하는 것이다.

〈표 1〉 과거 4주간 입고된 Color Filter의 Cell 별 불량정보

입고 주 (t-j)	$n(o_{t,j})$	$y(o_{t,j}, 1)$	$y(o_{t,j}, 2)$	$y(o_{t,j}, 3)$	$y(o_{t,j}, 4)$
t - 1	1000	249	249	247	247
t - 2	1000	202	182	206	192
t - 3	1000	180	179	172	177
t - 4	1000	171	173	176	195

입고 주 (t-j)	$y(o_{t,j}, 5)$	$y(o_{t,j}, 6)$	$y(o_{t,j}, 7)$	$y(o_{t,j}, 8)$	$y(o_{t,j}, 9)$
t - 1	251	257	229	261	258
t - 2	221	200	212	208	204
t - 3	158	176	187	192	157
t - 4	176	196	190	184	180

Prior Knowledge에 의해 $\delta_o = \ln(0.2/0.8)$, $E(p(o_{t,k})) = 0.2$ 이 되며, $w = 0.8$ 로 설정하였다. 앞의 4.2절의 Color Filter의 경제적 Lot Size의 결정 절차에 따라 Lot Size를 구할 수 있는데, 몇 가지 Lot Size에 따른 결과는

다음 <표 2>와 같다. 이 결과에서 보듯이 Color Filter의 Lot Size가 증가함에 따라 Exact Match의 수는 증가하지만, 그 증가율은 갈수록 급격히 감소하여 결국 사용되어지지 않는 잔여 Color Filter의 수량이 급격히 증가하는 결과를 낳음을 알 수 있다. 즉, 현재의 TFT 기판들을 모두 Match시키고자 하려면 거의 열 배 이상의 Color Filter들을 대상으로 Matching 작업을 수행하여야 하는데, 이 경우 Matching Problem의 크기 증가, Color Filter 잔여량의 증가라는 비효율적인 측면이 발생한다. 따라서 Exact Match의 수준을 각 기업의 제조 환경과 잔여 Color Filter의 수량을 고려하여 경제적인 적정 수준으로 정하는 것이 정책적으로 필요하다.

<표 2> Color Filter의 Lot Size에 따른 결과

(단위: 개)

Lot Size	Exact Match	잔여량
1000	749	251
5000	965	4035
10000	987	9013

5. 결론 및 토의

TFT-LCD 제조 공정 중에서 TFT 기판과 Color Filter 기판의 조립 공정 상의 가장 중요한 문제 중의 하나는, 두 기판의 잘못된 조합에 의한 조립이 양품의 TFT Cell이나 Color Filter Cell을 버려야 되는 크나큰 경제적 손실을 가져 온다는 점이다. 이는 하나의 TFT(또는 Color Filter)기판이 여러 개의 TFT(또는 Color Filter) Cell들로 구성될 수 있다는 특성에 기인한 문제로서, 현재 LCD Panel의 대형화 추세에 따라 기판의 크기 또한 점점 더 커지는 경향을 보여, 상대적으로 작은 크기의 LCD제품 생산의 경우보다 더 많은 수의 Cell들이 하나의 기판에 들어갈 것으로 보인다.

본 논문에서는 먼저 정해진 수의 TFT 기판이나 Color Filter 기판들을 서로 조립하고자 할 때, 가장 많은 수의 양품 LCD제품들을 생산케 하기 위한 최적 조합을 찾는 문제를 다루었다. 이 문제는 Weighted Matching Problem으로서 수리 모형화됨을 보이고, 가

능한 해법들을 다루었다. 해법으로는 기존의 최적 해법이 존재하나, 현장적용시 문제의 크기가 대형화되어 좀 더 현실적으로 사용 가능한 효율적인 발견적 해법의 개발이 절실히 필요하다고 보여진다.

앞의 문제보다 더 중요한 문제는 조립 대상이 되는 Color Filter 기판의 수, 즉 Lot Size를 어떻게 결정하느냐의 문제이다. 왜냐하면 Color Filter의 Lot Size는 최적 조합의 문제의 크기를 결정하여 문제 해결을 위한 계산 시간에 직접적인 영향을 주며, 또한 최종 생산되는 LCD의 양품률에 영향을 준다. 일반적으로 되도록 많은 수의 Color Filter들을 대상으로 하여 조합을 할 경우 그렇지 않은 경우보다 더 좋은 조합을 가질 확률이 높아진다는 것이다. 본 논문에서는 조립 대상이 될 Color Filter의 불량정보를 확률모형을 통해 예측하여 생성한 다음, 주어진 TFT 기판들과 가상적으로 조립하여 양품 LCD의 수를 최대화할 수 있는 Color Filter의 경제적인 Lot Size를 결정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 Color Filter뿐만 아니라 TFT 기판의 불량정보를 예측하는 데도 적용할 수 있어, 향후 생산될 TFT기판의 불량률 및 최종 생산될 LCD 제품의 불량률을 예측하는 데에 이용될 수 있다.

추후 연구 과제로서 가장 중요하다고 보여지는 것은 먼저 Color Filter의 Lot Size에 따른 경제성 분석이다. 앞 절 4.3에서 언급된 바와 같이 현재 생산된 TFT 기판들에 대한 Perfect Match를 추구할 경우의 비효율성이 쉽게 예측되므로, 현실적으로 어느 수준의 Lot Size가 가장 경제적인가 하는 질문에 대한 답이 반드시 필요하다고 보여진다. 다음으로 2.3 절에서 언급한 최적 조합을 찾는 가능 해법들에 대한 효율성 문제로서, 이는 해법들 간의 비교 분석을 통해서 현실적인 해법 선택이 가능토록 하는 것이 필요하다.

【참고문헌】

- [1] DeGroot, M. H., Probability and Statistics, Addison-Wesley, 1986.
- [2] Ford, L. R., Jr. and Fulkerson, D. R., Flows in Networks, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1962.

- [3] Harvey, A. C., Forecasting, Structural Time Series Models and the Kalman Filter, Cambridge, 1992.
- [4] Kuhn, H. W., "The Hungarian Method for the Assignment Problem," Naval Res. Logist. Quart., Vol. 2, pp. 83-97, 1955.
- [5] Lawler, E. L., Combinatorial Optimization: Networks and Matroids, Holt, Rinehart and Winston, 1976.
- [6] McCullagh, P. and Nelder, J. P., Generalized Linear Models, 2nd Edition, Chapman & Hall, London, 1989.
- [7] Murty, K. G., Linear and Combinatorial Programming, John Wiley & Sons, New York, 1976.
- [8] Sohn, S. Y., "Bayesian Dynamic Forecasting for Attribute Reliability," Computers and IE, International Conference Proceedings, Kyungju, Korea, 1996.
- [9] U.S. Army Material Command, Test Report for the Periodic Surveillance Flight Tests of the Shillelagh Missile, Special Report SR-RD-TE-95-53, US ARMY Test and Evaluation Command, Aberdeen Proving Ground, MD, 1995.



정봉주

현재 연세대학교 산업시스템공학과 조교수로 재직중. 서울대학교 산업공학과에서 학사(1986) 및 석사(1988), Pennsylvania State Univ. 산업공학과에서 박사학위(1993)를 취득함. Andersen Consulting사 및 삼성전자 반도체 부문에서 재직하였음. 주관심분야는 CIM/FMS, 정보공학, 반도체 및 LCD 생산 시스템 효율화 등임.

손소영

현재 연세대학교 산업시스템공학과 부교수로 재직중. 연세대학교 수학과에서 학사(1981), 한국과학기술원 산업공학과에서 석사(1983), Univ. of Pittsburgh 산업공학과에서 박사학위(1989)를 취득함. US Naval Postgraduate School, Rensselaer Polytechnic Institute 조교수로 재직하였음. 주관심분야는 품질 및 신뢰도 공학 모형 추정, 마케팅 분석 등임.