

생산능력 필터링 알고리즘 기반의 TFT-LCD Fab 투입계획 생성 방법론

손학수¹ · 이호열^{2*} · 최병규²

¹한국국방연구원 국방운영연구센터 / ²KAIST 산업 및 시스템 공학과

Capacity-Filtering Algorithm based Release Planning Method for TFT-LCD Fab

Hak Soo Son¹ · Ho Yeoul Lee² · Byoung Kyu Choi³

¹Center for Resource and Manpower Management, KIDA

²Department of Industrial and Systems Engineering, KAIST

As the LCD fabrication factories (Fab) are highly capital-intensive and the markets are very competitive, it is an essential requirement of operational management to achieve full-capacity production while meeting customer demands on time. In a typical LCD Fab, medium-term schedules such as release plans and production plans are critical to achieve the goal of full-capacity production and on-time delivery. Presented in this paper is a framework for weekly planning system generating medium-term schedules using a finite-capacity planning method. Also this paper presents a release planning method applying capacity-filtering algorithm, especially backward capacity-filtering procedure, which is one of the finite-capacity planning methods. In addition, performance analyses using actual data of a TFT-LCD Fab show that the proposed method is superior to existing methods or commercial S/W products generating release plans.

Keyword: capacity filtering, release planning, TFT-LCD fab, medium-term schedule

1. 서론

최근 수 년 동안 평판디스플레이(flat panel display) 산업은 CRT (cathode ray tube)를 대체하며 크게 성장해왔고, 그 가운데 LCD는 확고한 선두주자 역할을 하고 있다. 이러한 LCD 패널 산업에서 국내 업체는 세계 LCD 패널 시장의 약 40% 이상을 점유할 정도로 세계적인 리더십을 발휘하며 꾸준한 매출 성장을 이루어 내고 있다. LCD는 컴퓨터 모니터, TV, 노트북 등 다양한 용도로 널리 사용되고 있으며 앞으로도 꾸준히 성장할 것으로 전망된다.

하지만 최근 LCD 패널 산업은 과거 급격한 성장세에 비교하

여, 시장 수요 대비 업체 간 과잉 설비투자에 기인한 완만한 성장률을 나타내고 있고, 이러한 환경에서 LCD 패널 생산업체들은 투자수익 제고를 위한 생산성 극대화, 고객 납기만족을 위한 적시생산 등의 관리에 큰 노력을 기울이고 있다. 그러나 현업에서는 고객의 주문과 수요를 예측하여 계획을 작성하는 부서와 생산 현장 부서 사이의 유기적인 연결에 큰 어려움을 느끼고 있는데, 가령 현장에 하달할 생산 목표 수립 시점에는 실시간으로 변화하는 이상상황 및 생산 라인의 생산능력을 상세히 고려하기 어렵고, 이 때문에 현장 부서에서는 하달된 목표량을 안정적으로 준수하기 위하여 재공재고(WIP: work in process)를 필요 이상으로 유지함으로써 수요 변화에 발 빠르게 대

*연락처 : 이호열 박사과정, 305-701 대전광역시 유성구 과학로 335 KAIST 산업 및 시스템공학과, Tel : 042-350-8313, Fax : 042-350-3110, E-mail : iamhere@vmslab.kaist.ac.kr

투고일(2009년 01월 13일), 심사일(1차 : 2009년 01월 13일), 게재확정일(2009년 01월 21일).

응하지 못하는 등의 문제가 발생하고 있다.

이러한 상황에서 수요에 따른 생산목표량을 의미하는 생산 라인 별 기준생산계획(master production schedule, 이하 MPS) 작성 업무와, 현장부서에서 수행하는 투입계획 생성 및 생산 스케줄링 업무 사이의 가교역할을 할 수 있는 주간생산계획 시스템(weekly planning system, 이하 WPS)의 중요성이 부각되고 있으며, 이러한 필요에 따라 본 연구에서는 주간생산계획 시스템의 역할 및 기능의 고도화에 기여할 수 있는 알고리즘 적용 방법론에 대하여 논하고자 한다.

지금까지 수행된 LCD 패널 산업의 생산계획 및 운영 관련 기존 연구들을 살펴보면, 크게 상위 레벨에서 계획을 생성하는 부분과 하위 레벨에서 세부계획을 수립하는 부분으로 나누어 볼 수 있다. Lin *et al.*(2006)은 LCD 생산 체인에서 push 방식과 pull 방식을 결합하여 계층적 계획 모델(hierarchy planning model)을 제안하였고, Na *et al.*(2001)과 Song *et al.*(2000)은 기준생산계획을 수립하고, TFT-LCD 공정 별로 투입/생산계획을 수립하는 알고리즘을 제안하였다. Park *et al.*(2008)은 국내의 한 LCD 생산 업체에서 활용 중인 시뮬레이션 기반의 일정수립계획 시스템에 대한 설명과 함께 다른 생산운영 시스템과의 연계를 체계적으로 정리하였고, Jeong *et al.*(2001)은 모듈 조립 라인을 대상으로 설비 할당 문제 해결을 위한 선형계획(linear programming) 모델을 제안하였다. 그리고 Choi and Seo(2008)은 유연생산라인(flexible flow line)에서 유한 생산능력 계획을 산출하기 위한 stage 단위의 생산능력 필터링 알고리즘(capacity filtering algorithm)을 제안하였다. 그러나 LCD 패널 산업에 공통적으로 적용될 수 있는 주간생산계획 시스템의 체계나 기능에 관한 연구는 부족한 실정이고, 생산시설(Fab)의 생산능력을 고려한 투입계획수립 방법론에 대한 연구는 초기단계에 있다고 보여진다.

따라서 본 논문에서는 생산능력 필터링 알고리즘을 도입하여 TFT-LCD Fab에서의 기준생산계획 혹은 생산목표량이 주어졌을 때, 이를 준수할 수 있는 투입계획을 생성하는 방법론을 제시하였다. 먼저 제 2장과 제 3장에서는 각각 LCD 패널 제조 공정과 생산운영 체제, 그리고 생산능력 필터링 알고리즘에 대해 정리하였으며, 제 4장에서는 Fab의 생산능력을 반영한 투입계획 생성 방법론을 제안하였고, 제 5장에서는 제안한 방법론을 검증하는 실험내용을 정리하였다.

2. LCD 제조 공정 및 생산운영 프레임워크

2.1 TFT-LCD 제조 공정 개요

TFT-LCD(thin-film transistor liquid crystal display)의 제조 공정은 크게 TFT 공정, CF(color filter) 공정, 셀(cell) 공정, 모듈(module) 조립 공정으로 구분된다. <Figure 1>은 이러한 TFT-LCD의 제조공정을 개략적인 수준에서 나타내고 있다.

TFT 공정에서는 유리판 위에 화소(pixel)를 제어하는 반도체막을 형성하고, CF 공정에서는 유리판 위에 색상수지를 코팅하고 공통전극을 형성한다. 완성된 TFT 기판과 CF 기판을 합착하여 내부에 액정을 주입하고 패널 크기에 맞도록 절단하는 것을 셀 공정이라고 한다. 그리고 모듈 조립 라인에서는 완성된 LCD 셀에 편광판, BLU(back light unit) 등을 조립한다. TFT 라인에서는 30~40개의 세부공정을 거쳐 TFT 기판을 완성한다. CF 공정은 TFT 공정과 크게 다르지 않고, 15~20개의 세부공정을 거치게 된다. 셀 공정에서는 TFT 하판과 CF 상판을 합착하여 액정을 주입하고 절단하는 과정에서 약 15개의 세부공정을 거쳐 흐르게 된다. 모듈 조립 라인에서는 LCD 셀에 BLU, Driver-IC, PCB 등을 조립하여 완제품을 만드는데, 셀의 종류뿐만 아니라 외부 자재의 종류에 따라 다양한 명세의 최종 완제품을 완성할 수 있다.

2.2 TFT-LCD 생산운영 프레임워크

Park *et al.*(2008)은 <Figure 2>와 같이 TFT-LCD 패널 생산 업체의 생산운영 비즈니스 아키텍처를 소개했다. 기준생산계획 수립 시스템(master planning system)에서는 영업실적과 수요예측을 바탕으로 각 생산라인 별로 가장 납기가 긴 자재의 납품 소요시간인 13주 이상의 기준생산계획을 생성하는데, 기준생산계획은 일반적으로 생산 및 출하해야 할 제품별 일간 혹은 주간 생산 목표량을 나타낸다.

주간생산계획 시스템의 역할을 크게 두 가지로 구분하여 살펴볼 수 있다. 첫 번째는, 기준생산계획 수립 시스템으로부터 내려온 생산목표량이 현재 생산시설(Fab)의 생산능력을 고려하였을 때 달성 가능한 수준인지, 혹은 여유 생산능력이 있어서 추가 생산이 가능한지 판단하여 이에 대한 피드백을 산출

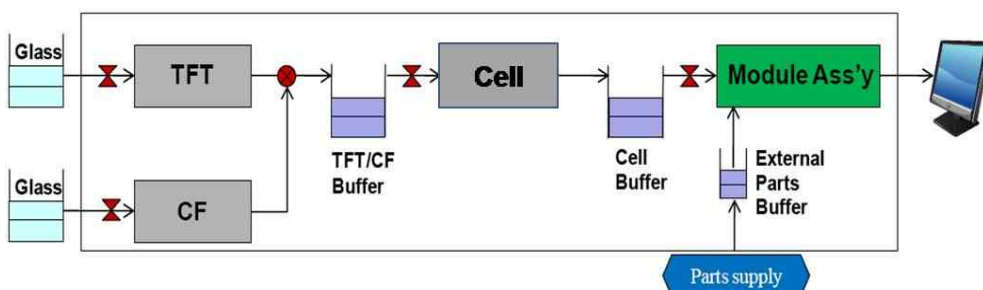


Figure 1. Overview of TFT-LCD Manufacturing Process

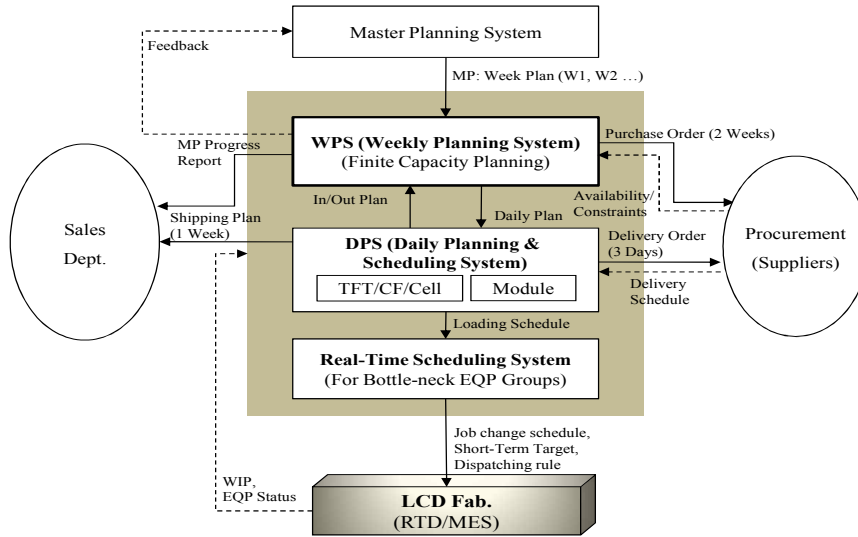


Figure 2. Business Architecture of LCD Production Management

하는 역할을 한다. 두 번째 역할은, 피드백을 반영한 기준생산 계획이 확정되면 이를 만족시키기 위한 TFT, CF, 셀, 모듈 생산 공정 별 일간 투입 및 생산목표량을 수립하는 역할을 담당한다. 이 과정에서 모듈 생산에 필요한 자재 요구량을 산정하여 자재공급업체에 구매주문을 발송하고, 주 생산계획에 대비하여 생산실적 진도를 점검하는 역할도 한다.

주간생산계획 시스템으로부터 일간 투입 및 생산목표량을 할당받은 일간생산계획 시스템(daily planning and scheduling system, 이하 DPS)은 일별계획을 바탕으로 현재 생산라인 내부의 재공재고나 설비의 상태 등을 참고하여, TFT/CF/셀/모듈 조립 라인 별로 각 세부 공정의 로딩 스케줄을 작성하여 현장 운영자에게 전달하는 작업을 담당한다. 그리고 예상 출하 계획을 수립하여 영업부서에 전달하게 된다. 실시간 스케줄링 시스템(RTS: real-time scheduling system)은 일간생산계획 시스템으로부터 전달받은 세부 로딩 스케줄을 사용하여 실시간으로 각 병목설비의 작업 전환 계획(job change schedule)을 생성하는 업무를 수행한다(Park *et al.*, 2008).

2.3 주간생산계획 시스템(WPS)

TFT-LCD 생산운영 비즈니스 아키텍처에서 볼 수 있듯이, 주간생산계획 시스템은 생산라인(Fab)의 생산능력을 반영하여 생산목표수량을 달성할 수 있도록 상위로는 기준생산계획 수립 시스템과 하위로는 일간생산계획 시스템(DPS)을 유기적으로 연계시키는 중요한 역할을 담당한다. 이를 위해 주간생산계획 시스템은 생산라인에 대한 개략적인 기준정보를 바탕으로 생산현장 및 자재구매부서가 대응할 수 있는 최소 2주 이상의 미래 시간에 대한 투입계획 및 생산목표를 산출해 주어야 한다. 그리고 이는 일간생산계획 시스템에서 개별 공정에 대한 생산스케줄을 수립하는데 고려해야 할 지침이 될 수 있다.

이러한 주간생산계획 시스템에서는 주어진 기준생산계획의

달성 가능 여부(feasibility)를 판단하고, 투입계획을 생성하는 과정에서 수시로 변화하는 생산라인의 생산능력을 반영하는 것이 가장 중요하다. 그런데 세부 공정이 회로 계층에 따라 반복되고, 각 공정마다 제품 별 작업시간이 각기 다를뿐더러, 공정 간 설비 공유가 활발히 발생하는 LCD 패널 생산 환경에서는 공장의 생산능력을 시간 구간 별로 정확히 산출하기가 어렵다.

본 연구에서는 Choi and Seo (2008)이 제안한 생산능력 필터링 알고리즘을 도입하여 주간생산계획 시스템의 핵심기능이라 할 수 있는 기준생산계획 달성을 가능하도록 하는 일간 투입 계획 생성에 관한 방법론을 개발하였다.

3. 생산능력 필터링 알고리즘

3.1 알고리즘 설명

생산능력 필터링 알고리즘은 병목 공정을 중심으로 하나 이상의 연속된 전, 후 공정들을 결합하여 구성된 stage 단위로 적용된다. 본 알고리즘에서는 stage의 시간 흐름에 따른 작업물 로딩 계획인 LP(t) : loading profile(혹은 언로딩 계획인 UP(t) : unloading profile)과 stage의 생산능력을 나타내는 CP(t) : capacity profile의 두 가지의 기본 자료 표현방식을 사용한다.

이 두 profile은 모두 다수의 profile segment들의 집합으로 이루어져 있고, LP(t)를 구성하는 segment는 작업물의 종류, 작업물 로딩 속도, 작업 시작/종료 시각, 시간 구간 내 완성 수량의 정보를 가진다. CP(t)를 이루는 segment는 단위시간당 생산능력, 시작/종료시각의 정보를 가진다. <Figure 3>은 LP(t)와 CP(t)의 예시를 나타낸 그림이다.

생산능력 필터링이란 stage 내에서 생산능력을 고려하지 않고 만들어진 LP(t) 혹은 UP(t) 즉, 무한 생산능력 계획 중에서 CP(t)보다 높은 부분 즉, 생산능력을 초과하여 계획된 구간에

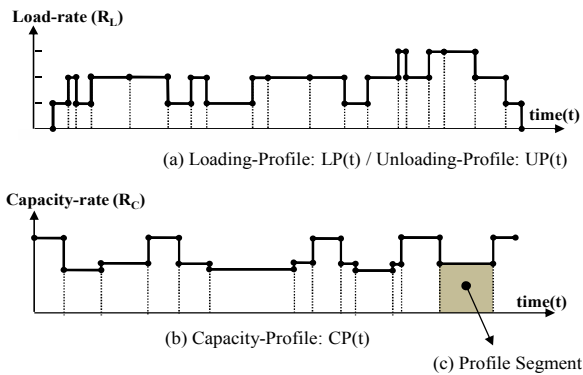


Figure 3. Illustration of Loading/Capacity Profile

대해서 CP(t) 이하가 되도록 필터링하여 유한 생산능력 계획을 생성하도록 하는 알고리즘이다. 무한 생산능력 계획을 이루고 있는 profile segment들을 순차적으로 CP(t)에 대해서 필터링하도록 설계되어 있고, 자세한 필터링 로직에 대한 설명은 참조한 논문에서 살펴볼 수 있다.

3.2 Stage 구성

생산용량 필터링 알고리즘을 적용하기 위해서는 생산라인을 필터링의 기본 단위인 stage로 구성하는 과정이 필요하다. stage를 구성하는 방법은 생산라인을 모델링하는 사용자에게 있어서 다양한 규칙이 적용될 수 있는데, 일반적으로 다음과 같은 대안이 가능하다.

- 1) 하나의 공정을 하나의 stage로 구성
- 2) 병목공정을 기준으로 stage 구성
- 3) 반복 공정들을 하나의 stage로 구성

필터링을 통해서 stage의 무한 생산능력 계획을 유한 생산능력 계획으로 만들기 위해서는 각 stage마다 생산능력(capacity)과 stage에서의 생산 소요시간(TAT : turn-around time) 정보가 있어야 한다. 이 때 stage의 생산능력은 일정한 값으로 정해진 것이 아니라 필터링할 작업물의 종류에 따라 달리 계산되기 때문에 전체 생산능력에 대비하여 가용한 생산능력의 비율로 관리된다.

3.3 전체 Fab에서의 생산능력 필터링

전 절에서 설명한대로 stage 구성을 마치면 전체 생산라인인 Fab은 일정 수의 stage와 이들 사이의 네트워크로 이루어지게 된다. 시작과 끝을 제외한 모든 stage는 하나 이상의 선행 stage와 후행 stage를 가진다. 이러한 네트워크를 바탕으로 한 stage에서 필터링을 수행함으로써 생성된 유한 생산능력 LP(t) 혹은 UP(t)는 연결된 이전 혹은 이후 stage의 무한 생산능력 LP(t)가 된다. 이와 같은 방법으로 모든 stage를 거치게 되면 전체 Fab에 대한 생산능력 필터링이 종료되고, 생성 결과는 전체 stage별로

유한한 생산능력 하에서 실제로 생산 가능한 생산계획이 된다.

생산능력 필터링은 시간을 진행시키는 방향에 따라 전진 전개식 필터링(forward filtering)과 후진 전개식 필터링(backward filtering)으로 나눌 수 있다. 처음 stage부터 차례대로 무한 생산능력 LP(t)를 필터링하여 생성된 유한 생산능력 UP(t)를 다음 stage의 무한 생산능력 LP(t)로 넘기는 것을 전진 전개식 필터링이라고 하고, 반대로 마지막 stage에서 산출되어야 할 무한 생산능력 UP(t)를 필터링한 결과인 LP(t)를 이전 stage의 UP(t)로 넘기는 것을 후진 전개식 필터링이라고 한다. 이는 각각 Yeh(2000)의 전진 스케줄링(forward scheduling), 후진 스케줄링(backward scheduling)의 한 방법으로, 투입 혹은 생산 목표량을 가용한 생산능력으로 필터링 함으로써 생산계획을 생성하는 스케줄링 하는 알고리즘으로 활용할 수 있다.

전진 전개식 필터링은 현재 투입 스케줄을 바탕으로 미래의 생산결과를 예측하는데 사용될 수 있고, 후진 전개식 필터링은 미래에 희망하는 생산계획을 달성하기 위해 현재 운영해야 할 생산 스케줄을 작성하는데 사용될 수 있다(Choi and Seo, 2008).

4. 생산능력 필터링 알고리즘 기반의 TFT Fab 공정 투입계획 생성

4.1 적용 범위

LCD 패널 생산 과정에 있어서 생산능력 필터링 알고리즘을 적용하기 위해서는 먼저 TFT와 CF, 셀, 그리고 모듈 조립 라인 모두를 하나의 공장의 형태로 구성할 것인지, 아니면 각각의 생산라인 단위로 공장을 구분하여 생산능력 필터링 알고리즘을 적용할 것인지에 대한 의견이 있을 수 있다. 그러나 현재 대부분의 LCD 생산업체에서는 TFT, CF, 셀, 모듈 조립의 단위 라인 별로 생산계획 생성업무를 별도로 수행하고 있으며, 전체 생산 과정에 있어서도 각 라인 사이에 버퍼가 있어서 TFT, CF, 셀, 모듈 라인을 사실상 각각 분리된 개별 공장으로 보아도 무관하다.

또한 공정의 특성상 모듈 조립 라인을 패널 생산을 담당하는 패널 생산 라인으로 분리할 수 있다. 모듈 조립 라인은 패널 생산 라인과 달리 소요시간이 짧고, 공정의 자동화 정도가 낮은 반면, 생산인력의 유연한 운용이 가능하기 때문에 고객의 주문에 대한 납기를 맞추는데 있어 Fab으로 분류되는 TFT, CF, 셀 라인보다는 생산계획의 중요성이 크게 고려되지 않는다. 실제로 국내 LCD 생산업체의 기준생산계획 수립 시스템에서도 셀 라인을 기준으로 기준생산계획이 만들어진다. 그리고 TFT-LCD 제조 공정의 개요를 통해서 알 수 있듯이 TFT 공정과 CF 공정은 병렬(parallel) 생산을 하는데, TFT 공정에 비해 CF 공정은 평균 소요시간이 짧고 세부공정이 비교적 단순하기 때문에 기준생산계획을 달성하는데 큰 문제가 되지 않는다.

이러한 점을 바탕으로 본 연구에서 제안하는 투입계획 생성 방법론은 적용 범위를 패널 생산 공정으로 한정하고, 그 중

TFT와 셀 라인을 개별 Fab으로 간주하여 Fab 단위의 투입계획 생성 방법론을 제안한다.

4.2 TFT Fab 공정 모델링

전장에서 설명한 바와 같이, TFT Fab에 생산능력 필터링 알고리즘을 적용하기 위해서는 대상 생산라인을 stage로 구성하여야 한다. LCD 생산공정은 세정, 증착, 사진식각, 식각, 박리검사의 반복 작업을 통하여 패턴을 생성하는데, 반도체 생산공정과 유사하게 사진식각(photo lithography) 공정이 병목공정으로 알려져 있다. 이러한 LCD 생산공정의 특성을 반영하여 한 층의 패턴을 형성하는 반복 작업을 묶어 하나의 stage로 구성할 수 있다. 이는 병목설비 기준으로 stage를 구분한 방법이기도 하다. TFT Fab을 대상으로 stage 네트워크를 모델링 한 예는 <Figure 4>와 같다.

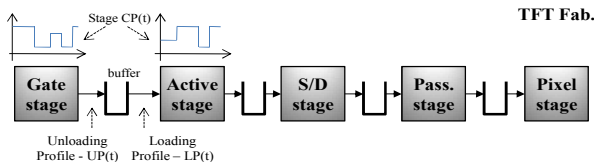


Figure 4. Illustration of Stage Modeling (TFT Fab)

생산능력 필터링을 위해서는 위와 같이 구성한 각 stage에서 각 제품을 생산할 때의 단위 생산능력 및 생산 소요시간을 정의해야 한다. 본 연구를 통해 제안하는 방법론에서는 stage의 생산능력을 그 stage의 병목공정을 담당하는 병목설비들의 생산능력의 합으로 정의하였다. stage에서의 생산 소요시간은 생산 실적 정보가 있다면 그 값들을 그대로 이용할 수 있지만, 그렇지 않은 경우 stage에 포함된 모든 세부 공정의 순수 공정시간(processing time) 총합으로 설정해두고 모델 교정을 통해 조절할 수 있다.

4.3 Fab 모델 교정(calibration)

전장에서 설명한 방법으로 모델링한 Fab에 생산능력 필터링 알고리즘을 적용할 때, 이 Fab 모델이 실제 현장상황을 잘 반영하여야만 알고리즘 적용 결과를 신뢰할 수 있다. 이를 위하여 실제 Fab과 작성한 모델의 비교분석을 통한 모델 교정 과정이 필요하다. 이는 알고리즘을 적용하여 생성된 생산계획과, 알고리즘을 적용한 동일한 시간 구간에서의 실제 현장의 운영 기록을 비교분석 함으로써 가능하다. 이 과정은 전진전개식 생산능력 필터링 방법에 의해서만 가능한데, 이는 현장의 운영이 전진 전개식으로 이루어지기 때문에 알고리즘의 수행 결과뿐만 아니라 결과를 도출하기까지의 과정까지도 실제 현장과 비교분석하여 알고리즘을 적용하기 위한 모델의 정합성을 향상시킬 수 있기 때문이다.

모델 교정 과정에서는 실제 현장에서 진행된 투입실적과 생산실적 정보를, 실제 투입실적을 전진 전개식 생산능력 필터링에 적용하여 생성한 예측 생산량과 비교하게 된다. 또한 생산실적을 구할 수 없더라도, 생산라인을 잘 묘사한 로딩 시뮬레이터가 있으면 임의의 투입계획을 통해 예측 생산량을 비교하는 방법으로 모델 교정이 가능하다.

모델 교정과정을 통해 stage의 제품 별 생산 소요시간(TAT)에 대한 조정이 필요한데, 이는 실제 소요시간에 순수 공정시간을 제외한 대기시간이 포함되어 있음을 반영해주어야 하기 때문이다.

모델 교정 방법은 다음과 같다.

- 1) 각 stage 내부에 포함된 세부 공정의 제품 별 순수 공정시간의 총합을 stage의 초기 소요시간으로 설정하여 둔다.
- 2) 초기 소요시간을 일정한 비율로 증가시키면서 주어진 임의의 투입계획으로부터 전진 전개식 필터링을 수행하여 결과를 얻는다.
- 3) 전진 전개식 필터링 결과와 실제 Fab의 생산실적과의 비교를 통하여, 실제 Fab의 생산실적과 가장 유사한 결과를 보이는 증가 비율을 찾아낸다.
- 4) 위의 3)을 통하여 구한 증가비율로 모든 stage의 소요시간을 조정한다.

4.4 후진 전개식 필터링을 통한 투입계획 생성

생산능력 필터링 알고리즘의 기본 원리는 무한 생산능력 계획을 CP(t)에 필터링 시켜서 유한 생산능력 계획을 얻는 과정이다. 이 중 전진 전개식 필터링은 stage의 LP(t)를 CP(t)에 필터링 시켜서 다음 stage의 LP(t)를 얻는 과정이고, 후진 전개식 필터링은 stage의 UP(t)를 CP(t)에 필터링 시켜서 이전 stage의 UP(t)를 얻는데 사용된다. 이러한 생산능력 필터링 알고리즘, 특히 후진 전개식 필터링을 Fab 전체 범위에서 적용하면 Fab의 생산능력을 고려하여 기준생산계획을 만족시키기 위한 Fab의 투입계획을 생성할 수 있다.

이를 위해서 1) 기준생산계획으로부터 최종 제품의 완성계획(마지막 stage의 unloading 계획)을 만들고, 2) 후진 전개식 필터링이 끝나고 얻어진 첫 stage의 loading 계획을 투입계획으로 변환해야 한다. 1항의 기준생산계획을 시간에 따른 완성 profile로 변환하는 과정에서 제품 종류별로 생산속도, 시작/종료 시각, 수량이라는 결정변수가(decision variable) 있고 사용자가 이를 정의할 수 있다.

2항의 결과로 생성된 첫 stage의 LP(t)를 투입계획으로 바꾸는 것은 어렵지 않은데, <Figure 5>와 같이 LP(t)를 하루 단위의 시간 구간(time bucket)으로 나누고, 제품 종류별로 구간 내에 들어있는 수량을 취합함으로써 투입계획을 얻어낼 수 있다. 이 과정에서 시간 구간의 범위를 조정함으로써 더욱 자세한 구간의 투입계획을 얻을 수 있다.

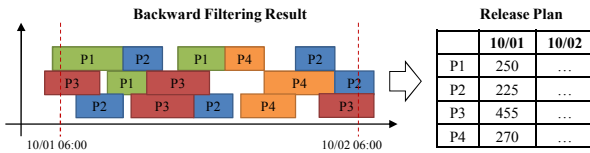


Figure 5. Conversion Process of Input LP(t) into Release Plan

4.5 투입계획 생성 방법론 정리

본 논문에서 제안하는 생산능력 필터링 알고리즘을 이용한 투입계획 생성 방법론을 정리하면 <Figure 6>과 같은데, 이는 다음과 같이 요약된다.

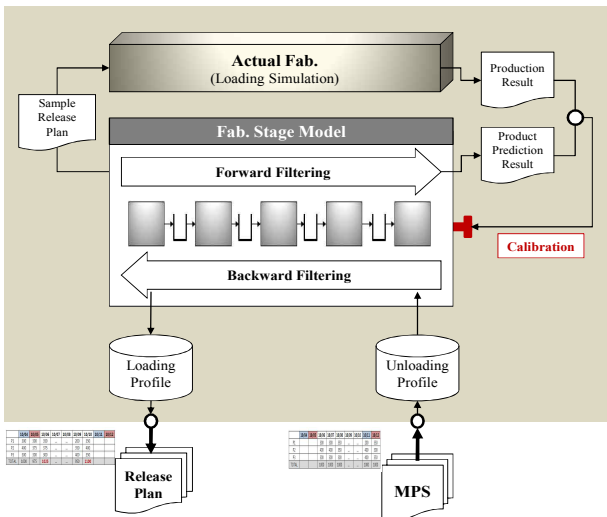


Figure 6. Capacity-Filtering Algorithm based Release Planning Method

(1)하나의 생산라인(Fab)을 대상으로 설정하고, (2)stage 단위로 대상 생산라인을 모델링한다. 계획의 정합성을 높이기 위해서 실적이나 로딩 시뮬레이션과 비교하여 (3)Fab 모델을 교정한다. 이러한 과정으로 얻어진 Fab 모델을 이용하여 (4)후진 전개식 필터링을 수행하고 결과를 잘 취합하여 투입계획을 생성한다.

5. 검증 실험

5.1 대상 라인 및 고려 사항

TFT 라인은 평균 소요시간이 가장 길고, 고가의 설비가 다수 배치된 라인이기 때문에 LCD 패널의 전체 생산 공정 중 병목 공정으로 분류된다. 때문에 본 논문에서는 제안한 방법론의 검증은 TFT 라인을 대상으로 진행하였다. CF, 셀 라인은 이와 비슷한 방법으로 적용 가능할 것이다.

제안하는 방법론에서는 병목공정의 생산능력뿐만 아니라, 사진식각 공정에 필수적으로 소요되는 포토 마스크의 가용 여

부 또한 고려하였다. 그리고 실제 주간생산계획 수립 환경과 비슷하도록 병목설비(사진식각 공정)에 예방보전(PM : preventive maintenance)을 계획하고 이를 반영하여 투입계획을 생성하도록 하였다.

5.2 기준생산계획(MPS) 준비

기준생산계획은 Fab의 생산능력을 최대한 이용함으로써 달성 가능한 생산 목표량이어야 한다. Fab의 생산능력을 초과하는 기준생산계획으로 투입계획을 산출했을 때는 투입 시점이 현재시점 대비 과거까지 넘어가는 등의 비현실적인 투입계획이 얻어지게 되고, Fab의 생산능력을 밑도는 기준생산계획은 감산과 같은 고의의 상황이 아닌 이상 고가의 설비의 유휴를 초래하여 회사의 입장에서 큰 손실을 야기하게 된다.

Table 1. Average Utilization Rate of Bottleneck Equip

Equip. No.	Utilization	Equip. No.	Utilization
#1	100.0%	#9	100.0%
#2	100.0%	#10	94.4%
#3	100.0%	#11	95.2%
#4	97.5%	#12	88.0%
#5	95.8%	#13	90.1%
#6	86.7%	#14	100.0%
#7	99.9%	#15	93.2%
#8	100.0%		

따라서 본 실험에서는 Fab의 생산능력을 최대한 이용하도록 하는 기준생산계획을 사용하였다. 이러한 기준생산계획을 얻기 위하여 임의로 생산라인의 투입량을 점점 늘리면서 로딩 시뮬레이션을 실행하여 Fab의 생산능력이 최대한 이용되었을 때의 예측 생산량(생산라인 완성수량)을 실험에 이용할 기준생산계획으로 삼았다. Fab의 생산능력이 최대한 이용되었다는 것은 병목설비의 가동률을 통해 판단하였고, 이때의 병목설비의 가동률은 <Table 1>과 같다.

5.3 Fab 모델링 및 모델 교정

본 검증실험에서는 방법론의 제안과 같이 한 층의 패턴을 생성하는 작업들을 묶어 하나의 stage로 구성하였다. 즉, TFT 라인을 1) gate(게이트 전극 패턴 생성), 2) active(절연막/반도체막 패턴 생성), 3) S/D(데이터 전극 패턴 생성), 4) passive(보호막 패턴 생성), 5) pixel(화소 전극 패턴 생성)의 5개의 stage로 구성하였다. stage의 순수 공정시간을 모두 더해서 소요시간 값으로 설정하였고, 이 값은 개별 제품 종류에 따라 얻을 수 있다.

본 실험에서 Fab 모델의 교정과 최종 투입계획의 확인을 위해 실제 Fab에서 발생하는 실제 생산 이력 데이터를 사용하는

대신에 (주)VMS 솔루션스의 SeePlan LSE®라는 로딩 시뮬레이터를 사용하였다. 이 로딩 시뮬레이터는 next event simulation 기법의 이산사건 시뮬레이션(discrete event simulation)으로 구현된 것인데, 개별 작업물의 각 공정 별 loading/unloading 이벤트 및 이송과정을 표현할 수 있다. 이 로딩 시뮬레이터는 현재 국내 유명 LCD 생산업체의 일간계획시스템(DPS)의 모듈로 활용되어 검증된 바 있다.

제안한 방법론과 같이 본 실험에서도 stage의 소요시간 증가비율을 매개변수로 Fab 모델 교정을 행하였다. 동일한 투입계획을 각각 1)진전 전개식 필터링, 2)로딩 시뮬레이션을 수행하여 예측 생산량을 얻은 뒤, 2)의 결과를 기준으로 1)의 예측 생산량이 이와 유사해지도록 매개변수인 소요시간 증가비율을 변화시켜 반복 관찰하였다. 예측 생산량의 유사성을 판단하는 척도로 기준 생산 계획 만족도(5.5 투입계획의 평가 참고)를 이용하였다.

본 실험에서는 소요시간을 순수 공정시간의 합에 1.7배로 설정했을 때 가장 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

5.4 후진 전개식 필터링을 통한 투입계획 생성

기준 생산 계획을 Fab 모델의 마지막 stage의 UP(t)로 변환할 때 사용자의 의사에 따라 다양한 형태의 UP(t)가 만들어질 수 있고, 이에 따라 최종 산출물인 투입계획도 달라질 수 있다. 본 실험에서는 이러한 영향을 최대한 줄이기 위해서 하루 단위의 제품별 생산 요구량 비율에 따라 24시간 내에서는 꾸준히 같은 속도로 unloading 되도록 UP(t)를 생성하였다.

Stage의 역순으로 Fab 모델 전체에 걸친 후진 전개식 필터링을 거치면 첫 stage의 LP(t)가 만들어지게 된다. 이론적으로는 이 LP(t)의 스케줄(제품별 투입량과 투입순서, 시각 등의 정보를 가짐) 그대로 투입해도 무관하지만, 본 실험에서는 일 단위 제품별 투입량만을 산출하도록 하였다.

5.5 투입계획의 평가

방법론을 통해서 생성된 투입계획에 대한 평가는 투입계획대로 실제 Fab에 투입하였을 때 얻어지는 생산실적이 기준생산계획 수립 시스템에서 만든 기준생산계획(MPS)을 얼마나 달성했는지를 확인하는 방법으로 수행하면 된다. 본 연구에서는 그 평가척도(KPI)로 다음의 두 가지를 방안을 제시한다.

(1) 기준생산계획 만족도

각 제품에 따라 기준생산계획 중에서 생산실적으로 만족시킨 물량을 기준생산계획 만족물량으로 정의한다. 이 기준생산계획 만족물량을 계획 기간에 따라 모두 합하고, 이 값을 기준생산계획 총량으로 나눈 값을 기준생산계획 만족도라고 한다.

<Figure 7>에서는 하나의 제품에 대하여 계획기간(10/01~10/03: 3일) 동안 기준생산계획 만족도를 계산하는 과정을 예

시하였다.

Date	10/01	10/02	10/03	
MPS	100	150	120	
Production Result	110	120	140	
Analysis	MPS Satisfaction	100	120	120
	MPS Deficiency		30	

[MPS Satisfaction Measurement]	
Total MPS Satisfaction	$\frac{100+120+120}{100+150+120}$
Total MPS	$= 91.9\%$

Figure 7. Method for Calculation of MPS satisfaction measurement

(2) 완성품 재고

기준생산계획을 만족시키지 못하는 결손을 줄이는 것이 가장 중요하고 (1)항의 기준생산계획 만족도는 이를 평가하기 위한 척도이다. 그러나 이와 더불어 기준생산계획에 대비하여 얼마나 적시에 생산되는지 역시 생산운영에서 중요한 요소이다. 완성품 재고는 생산 실적 중 기준생산계획을 만족시키고 남은 물량을 말하고, 완성품 재고가 많다는 것은 적시생산이 되지 못한다고 할 수 있다. 본 실험에서 평가척도로서의 완성품 재고는 제품별로 따로 관리하지 않고 모든 제품의 재고량을 합산하여 평가한다.

5.6 실험결과 및 분석

실험은 2주 분량의 TFT 라인의 일별 기준생산계획을 준비하고, 본 방법론을 적용하여 투입계획을 생성하여 평가하는 방식으로 진행하였다. 생산능력 필터링 알고리즘은 .NET 환경하에 C# 언어로 구현하였고, 수행 속도는 개인 PC환경에서 TFT 라인을 대상으로 2주 분량의 기준생산계획에 대한 투입계획을 생성할 때 약 15초 정도 소요되었다. 생성된 투입계획에 대한 평가는 SeePlan LSE® 로딩 시뮬레이션을 이용하여 예측 생산량을 얻은 뒤, 이를 실제 Fab의 생산실적으로 간주하고 기준생산계획과 비교하는 방법으로 진행하였다.

그리고 기준생산계획을 통해 공장의 생산실행계획을 세워주는 상용 APS(advanced planning systems) 소프트웨어 모듈과 현업에서 실제로 사용중인 휴리스틱 투입계획 생성 로직과의 비교 실험도 함께 진행하였다. 1) 상용 APS 모듈로는 i2 Technologies 사의 Factory Planner®를, 2) 현업 로직으로는 국내 S전자의 투입계획생성 로직을 대상으로 하였다. 1) i2 Technologies의 Factory Planner®는 time-bucket 단위의 생산능력으로 유한 생산능력 계획을 생성하는 time-bucketing 방법을 이용하고, 각 공정 단위의 생산스케줄이 생성되는데 이 중에서 첫 공정의 생산스케줄을 취합하여 투입계획을 얻었다. 2) 현업의 로직은 곧바로

일별 투입량을 산출할 수 있는 구조이고, 대략적인 소요시간 만큼 납기일을 당긴 후에 하나의 병목공정 생산능력으로 필터링하는 방법이 사용된다.

비교실험 결과는 <Table 2>와 같다. 이를 바탕으로 <Figure 8>과 <Figure 9>는 각각 대안 별로 기준생산계획 만족도와 일별 완성품 재고량 추이를 나타낸 그래프이다. 이를 통해 살펴보면 본 연구를 통해 제안한 생산능력 필터링 기반의 방법론을 적용하였을 경우에 상용 솔루션이나 현업 사용 로직에 비해서 비교적 기준생산계획을 잘 만족하는 투입계획을 생성할 수 있다는 것을 알 수 있다. 동시에 완성품재고 또한 다른 방법론들에 비교하여 많지 않은 것을 확인할 수 있다.

이와 같은 간단한 비교실험을 통하여 생산능력 필터링 기반의 방법론이 기존의 방법론에 비해서 생산능력을 잘 반영하여 적시생산을 가능하게 하는 투입계획을 생성해 주는 것을 확인할 수 있었다.

6. 결론 및 향후 연구 과제

주간생산계획 시스템(WPS)은 기준생산계획 수립 시스템과 일간생산계획 시스템(DPS)을 유기적으로 연결하는 역할을 수행하여야 한다. 그 중 Fab의 생산능력을 고려하여 각 생산라인 별로 적절한 투입계획을 생성하여 전달 해주는 것이 주간생산계획 시스템의 주요한 기능인데, LCD산업계에는 이 기능을 마땅히 지원해줄 수 있는 알고리즘 혹은 정보시스템 솔루션이 부족한 상황이고, 대부분을 공장의 생산운명을 담당하는 경험자에 의존하는 실정이다.

본 논문에서는 Fab의 생산능력을 고려한 적시생산을 목표로 이를 가능하게 하는 투입계획 생성 방법론을 제시하였다. 먼저 Fab을 모델링하고, 기준생산계획으로부터 생산능력 필터링 알고리즘의 후진 전개식 필터링을 이용하여 투입계획을 생성하여, 이 투입계획이 기준 생산 계획을 얼마나 잘 만족시키는

Table 2. Result of Comparing Experiment(Planning Horizon : 2 Weeks)

Product	MPS Qty. (Proportion)	Capacity Filtering based		i2 Factory Planner®		Logic used in actual LCD Factory	
		MPS Satisfaction	Inventory	MPS Satisfaction	Inventory	MPS Satisfaction	Inventory
P1	4463(10.7%)	90.68%	89.62	57.05%	95	77.82%	164.6
P2	9309(22.3%)	82.68%	104.1	77.63%	158.3	83.08%	109.2
P3	8566(20.5%)	90.25%	119.4	89.86%	155.5	80.81%	90.77
P4	11544(27.6%)	91.72%	86.69	90.07%	83.85	95.67%	79.92
P5	7875(18.9%)	93.87%	76.62	84.50%	103.2	85.18%	133
TOTAL	41757(100.0%)	(Average) 89.94%	476.4	(Average) 79.82%	595.8	(Average) 84.51%	577.5

MPS Satisfaction Measurement

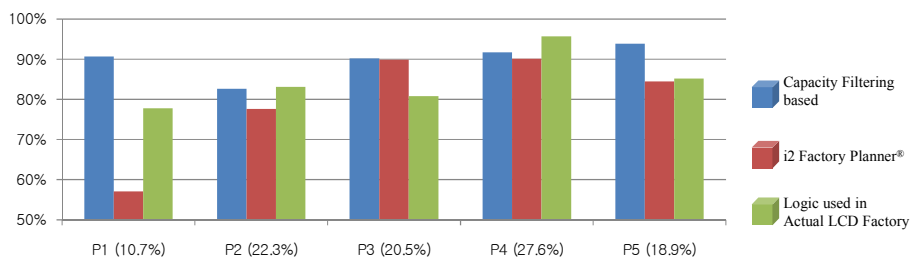


Figure 8. Result of Comparing Experiment(MPS satisfaction Measurement)

Daily Inventory

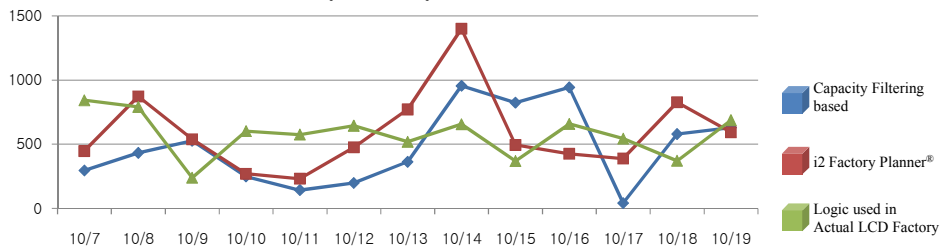


Figure 9. Result of Comparing Experiment(Daily Inventory)

지 평가하는 프레임워크 또한 제안하였다. 투입계획을 생성하는 기능 이외에 주간생산계획 시스템의 또 다른 기능인 기준생산계획에 대한 피드백 또한 투입계획 생성과 연관이 있다. 생산능력 필터링 알고리즘을 적용하여 주간생산계획 시스템을 고도화하는 취지에서는 맥락을 같이 하지만, 논문의 주제에서 벗어나는 부분이므로 본 논문에 포함시키지 않았다.

본 연구에서는 TFT 라인 하나를 대상으로 투입계획을 생성하는 방법론을 제안하고 실험하였는데, 실제 LCD 패널 생산은 모듈 조립라인을 제외하더라도 TFT/CF 라인의 생산실적 동기화, 셀 라인과의 연계 등 전체적인 Fab의 관점에서 제안한 방법론을 확장 적용할 수 있도록 하는 연구가 필요하다. 또한 제품 혼합 비율에 따른 다양한 형태의 기준생산계획을 대상으로 방법론의 효과에 대한 민감도 분석이 이루어져야 한다.

참고문헌

Choi, B. K. and Seo, J. C. (2008), Capacity-Filtering Algorithm for Finite Capacity Planning of a Flexible Flow Line, *International Journal of Production Research*, **18** February 2008, DOI : 10.1080/00207540701644201(Published on Online).

Chung-Hsing Yeh(2000), A customer-focused planning approach to make-to-order production, *Industrial Management and Data Systems*, **100**(4), 180-187.
 David Hsieh (2007), TFT LCD Market Update for KGI Securities, DisplaySearch, Available via http://www.displaysearch.com/cps/rde/xbcr/displaysearch/20071025_David_Hsieh_DisplaySearch_TFT_LCD_Update_For_KGI.pdf (accessed October 10, 2008).
 i2 Technologies (2006), *Factory Planner Guide*, Available via http://www.i2.com/assets/pdf/pds_factory_planner_pds7305.pdf(accessed October 10, 2008).
 James T. Lin, Tzu-Li Chen, and Yen-Ting Lin (2006), A Hierarchical Planning and Scheduling Framework for TFT-LCD Production Chain, *IEEE International Conference on Service Operations and Logistics and Informatics*, 711-716.
 Jeong, B., Kim, S. and Lee, Y. (2001), An assembly scheduler for TFT LCD manufacturing, *Computers and Industrial Engineering* **41**, 37-58.
 Na, H. J., Baek, J. K., Kwon, I. H., Kang, Y. H., and Kim, S. S. (2001), The study of production scheduling scheme in TFT-LCD factory, *Proceedings of the 2001 KIIE Spring Conference*, 958-961.
 Park, B. C, Park, E. S, Kim, B. H., Choi, B. K., and Lee, J. H. (2008), Simulation based Planning and Scheduling System for TFT-LCD Fab, *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, accepted for publication.
 Song, W., Seo, D. W, Shin, H. J., Baek, J. K., and Kim, S. S. (2000), A study on integrated production planning and coordination for TFT-LCD factory, *Proceedings of the 2000 KORMS Spring Conference*, 566-568.
 VMS-Solutions(2006), *SeePlan LSE@ Brochure*, Available via <http://www.vms-solutions.com/>(accessed September 20, 2006).



손학수
 KAIST 산업공학 학사
 KAIST 산업및시스템공학과 석사
 현재: 한국국방연구원 국방운영연구센터
 관심분야: Modeling and Simulation, FAB Scheduling



이호열
 KAIST 전자전산학과 전산학 전공 학사
 KAIST 산업 및 시스템 공학과 석사
 현재: KAIST 산업 및 시스템 공학과 박사과정
 관심분야: FAB 생산운영 정보화, BPM



최병규
 서울대학교 산업공학 학사
 KAIST 산업공학 석사
 미국 Purdue Univ. 산업공학 박사
 현재: KAIST 산업 및 시스템 공학과 교수
 관심분야: 제조시스템 시뮬레이션, FAB Scheduling, BPM, CAD/CAM