

운송시간의 예측을 통한 물류정체 통제 모형

†정재우* · 허연호**

Congestion Management with Arrival Estimation of Unit Loads in an Automated Material Handling System

† Jaewoo Chung* · Yeonho Hur**

■ Abstract ■

The automated material handling systems today are playing ever more important roles in semiconductor/LCD fabrication facilities. Recently they became more flexible, intelligent, and speedy than in the past. The facilities have been fully automated because the size and weight of the unit loads used in the facilities were being increased beyond the limits that a human operator can handle. This research develops an efficient procedure to streamline the delivery of unit loads by the automated material handling system (AMHS). For this task, the research employs the event scheduling theory that has been successfully used in the both academia and industry. The developed procedure was applied to an actual LCD fabrication facility and improved the performance of an existing material handling system.

Keywords : Automated Material Handling System, Congestion Management, Semiconductor/LCD Fabrication System, Event Scheduling, Delivery Time Estimation

1. 서 론

반도체와 LCD 산업은 모두 반도체 공정을 활용

하여 제품을 생산한다. 이들 산업에서 취급하고 있는 제품들은 최대한의 청정도가 유지되는 환경에서 고가의 장비를 활용한 미세한 공정을 수백 회

논문접수일 : 2011년 09월 26일 논문수정일 : 2012년 01월 24일 논문게재확정일 : 2012년 01월 25일

* 경북대학교 경영학부

** LG Display (주) FA 기술담당

† 교신저자

반복해야 완성된다. 특히 요즈음은 기존 PC, 모니터, 및 TV 중심의 수요에서 탈피하여 모바일기기 중심으로의 수요 전이가 급속하게 이루어지고 있는데 이로 인하여 이들 생산설비에서 취급하는 제품의 종류 또한 빠르게 증가하고 있다. 다른 한편으로는 한국, 일본, 대만, 미국, 및 중국 업체들 간의 치열한 시장 선점 경쟁이 진행되고 있고 원가우위를 점하기 위하여 각 업체들은 더욱 까다로운 공정들을 생산에 활용하고 있다. 이 두 가지 요인들 모두 생산설비를 효율적으로 운영하여 생산성을 높여야 하는 운영관리자 관점에서는 매우 큰 부담으로 작용하고 있다.

반도체 공정은 크게 전 공정과 후 공정으로 나누는데 웨이퍼 또는 TFT(thin-film transistor)를 가공하는 전 공정에 투자 및 운영 노력의 80% 이상이 집중되고 있다[1]. 이 전 공정 처리 설비를 흔히 랩(fabrication) 이라고 부르고 한 단위의 랩은 수백대에 이르는 고가의 공정 장비와 첨단 물류 장비들로 구성되어 있고 신규 랩의 건설에는 3조 원 이상의 대형 투자가 수반된다. 랩 내의 물류는 거의 100% 자동화 되어 있는데 이는 물류에 필요한 인건비 부담을 줄일 뿐만 아니라 생산 활동을 표준화하여 랩 내에서 발생하는 정보의 신뢰성을 높여 공정 개선 활동을 간접적으로 지원하는 효과를 거두고 있다. 랩의 물류 자동화를 통해서 얻을 수 있는 장점에 대해서는 여러 문헌에 의해서 다루어져 왔는데 이들을 정리하면 다음과 같다[2-4].

- 물류 자동화의 장점
 - 제품의 공정간 이동시간 단축하여 가동률 향상에 기여함
 - 작업에 대한 표준화 및 단순화로 랩의 운영이 투명화 됨
 - 물류운영 인건비의 절감 및 인력관리 비용 감소를 가능하게 함
 - 정보의 신뢰성 증가로 높은 레벨의 생산운영 시스템, 즉 디스페칭, 스케줄링, SPC(statistical process control), APC(advanced process control) 등의 도입이 가능하게 함

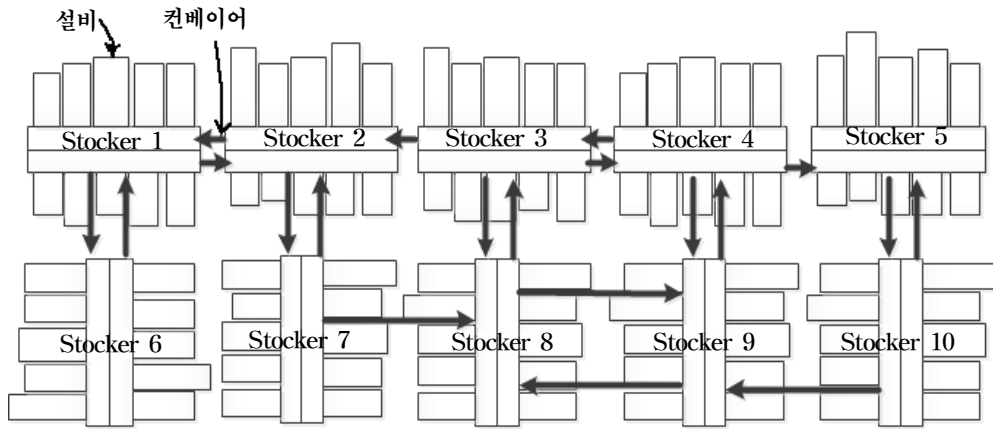
본 연구는 반도체/LCD 랩의 운영에 있어서 핵심 동력이 되고 있는 물류 시스템의 성능을 높일 수 있는 방법의 개발에 초점을 두고 있다. 우선 랩 물류 시스템을 분석적 모델로 표현할 수 있는 방법을 제안하고 이 분석적 모델을 활용하여 실제 시스템의 성능 개선에 기여하고자 한다. 특히, 본 연구는 산학협력과제로 진행되었고 본 연구에서 개발된 모형은 실제 LCD 랩에 적용되어 생산성 향상에 기여하였다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 이어지는 제 2장에서는 본 연구에서 다루는 문제에 대해서 설명하고 관련된 문헌의 내용을 소개한다. 제 3장에서는 본 연구에서 제안된 정제관리에 대한 접근법과 분석적 모형을 설명한다. 제 4장에서는 제안된 모형의 적용결과에 대해서 설명하고 제 5장에서는 연구의 한계점과 추가적으로 필요한 연구과제에 대해서 설명한다.

2. 연구배경

반도체/LCD 랩에서 물류의 이동과 보관은 lot 단위로 카세트에 담겨진 상태로 이루어지는데 lot의 크기는 대략 15매에서 30매로 회사 또는 각 회사의 라인마다 다르다. 이 카세트를 배송하는 장비로는 OHT(overhead transporter), OHS(overhead shuttle), AGV(automated guided vehicle), inter-floor lifter, conveyor 등이 있으며 보관을 담당하는 장비로는 stocker라 불리는 AS/RS(automated storage and retrieval system), buffer station 등이 있다. 최근에는 이 stocker가 카세트의 보관뿐만 아니라 배송에도 사용되고 있다.

<그림 1>은 LCD 랩의 레이아웃을 단순화하여 표현한 것이다. 일반적으로 복층의 구조로 되어 있으나 편의상 단일 층만 표현되어 있다. LCD 랩에서 공정 장비는 stocker에 연결되어 있고 stocker 내부에 있는 crane에 의해서 물류가 이루어지고 있다. Stocker의 내부는 crane이 이동하는 rail이 있고 양쪽에 장비와 선반이 배치되어 있다. 주로 1



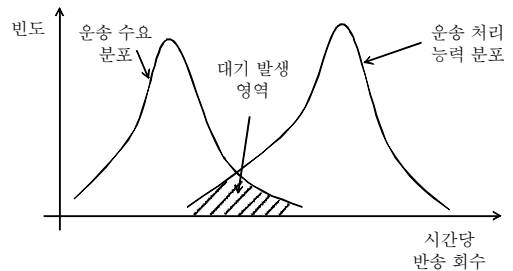
<그림 1> LCD 웹 레이아웃

층에는 장비와 stocker를 연결하는 load/unload buffer station이 배치되고 2층에서 4층 사이에는 공정 중에 있는 카세트를 보관할 수 있는 선반이 배치되어 있다. 한 개의 웹은 수십 대의 stocker로 구성되어 있는데 한 대의 stocker에는 10~20대의 장비가 연결된다. Stocker와 stocker 사이는 방향성을 가지는 컨베이어를 통해서 연결한다. 한 stocker에서 한 두 개의 공정을 처리하고 다른 stocker로 이동하는데 이때 컨베이어를 통해서 다른 stocker로 이동되고 때로는 몇 개의 stocker를 거쳐서 최종 목적지 stocker로 이동하기도 한다.

반도체 웹도 LCD 웹과 유사하나 stocker 대신 OHT와 OHS를 주로 활용하고 카세트를 저장하는 공간은 설비와 설비 사이 또는 OHT 트랙 좌우나 밑을 활용하고 있다. 반도체 웹은 LCD 웹보다 훨씬 더 많은 수의 장비가 필요하므로 물류 시스템은 조금 더 복잡하다[5]. 본 연구의 대상인 LCD 웹에서 사용되고 물류 시스템에 대한 보다 자세한 설명은 Jang and Choi[6]에서 볼 수 있다.

웹 물류 시스템 설계에 있어서 어려움 중에 하나는 적절한 능력의 설계이다. 운송 수요는 생산능력에 의해서 대략적으로 결정이 되지만 생산설비의 가동수준과 공정시간의 차이로 인하여 시간대별 수요의 몰림 현상, 즉 변동성이 일반적으로 심하다. 뿐만 아니라 이 운송 수요를 처리하는 물류

시스템의 능력 또한 고정되어 있는 것이 아니라 물류 시스템의 운영로직과 가동률 등에 의해서 변동성을 가진다. <그림 2>는 운송수요와 처리능력에 존재하는 변동성을 설명하고 있다[7]. 이 변동성으로 인하여 정상적으로 설계된 웹의 운영에 있어서도 운송 중인 lot의 대기는 불가피하게 발생하고 있다.



<그림 2> 운송 수요 및 물류처리 능력의 변동성

순간적으로 대기 lot이 많이 발생하는 상황에서 효과적인 정체의 통제는 물류 시스템의 처리능력을 향상시키는 효과를 거둘 수 있다. 하지만 그동안 실제 웹 현장에서는 물류의 정체가 발생하면 주로 하드웨어의 능력을 키우는 보완투자로 대응하거나 작업자의 개입을 통해서 물류의 우선순위를 조절하는 방식으로 문제를 해결하여왔다.

본 연구에서는 물류의 정체 현상이 발생하였을 때

운송대상이 되는 lot들의 속성을 파악하고 효율적인 제어 기법을 통해서 시스템적인 정체관리를 하고자 하였다. 이를 위하여 이벤트 스케줄링 기법을 도입하여 개별 lot들의 운송시간을 예측하고 예측된 운송시간이 평균운송시간보다 상당히 느린 경우 그 경로가 정체상태에 있다고 판단한다. 정체가 예상되는 경로에 대해서는 공정우선순위가 높은 lot들을 제외하고 우선순위가 낮은 lot들에 대한 운송을 통제함으로써 공정우선순위가 높은 lot들이 상대적으로 빨리 운송이 될 수 있는 방법을 개발하여 실제 웹에 적용하였다.

기존에 발표된 문헌을 살펴보면 웹 물류에 대한 학계와 산업계의 꾸준한 관심이 이어져왔는데 이에 대한 총체적인 검토는 Agrawal and Heragu[8]과 Montoya-Torres[9]에 의해 제공된 바 있고 Jang and Choi[6]은 LCD 웹의 물류 자동화 시스템에 대해서 상세하게 소개하고 있다. 반도체/LCD 물류 문제는 주로 설계 문제와 제어 문제로 나누어 연구가 되어져 왔다. 설계 문제 중에서 가장 주목을 받았었던 문제는 물류비용을 최소화하기 위한 vehicle 경로의 설계 문제인데 Ting and Tanchoco[10]은 OHT의 특성을 고려하여 단방향 loop의 설계 문제를 다루었고 그들의 후속 연구[11]에서는 x-y축으로 이루어진 양방향 OHT loop의 위치 선정 문제를 연구하였다.

AMHS 중 웹에서 일반적으로 사용되고 있는 AGV(automated guided vehicle)와 관련된 연구로 Koo and Jang[12]은 확률적인 접근법을 이용하여 AGV의 운행시간을 예측하는 모델을 제시했다. 특히 일반적으로 널리 사용되는 근거리차량 할당 정책과 임의차량 할당 정책 하에서의 공차운행 시간 모형을 제시하고 시뮬레이션을 통해 이를 검증했다. Nazzal and McGinnis[13]도 마코프체인을 이용하여 비슷한 연구를 진행하였는데 이 연구의 목적은 대기시간의 정확한 추정에 있다.

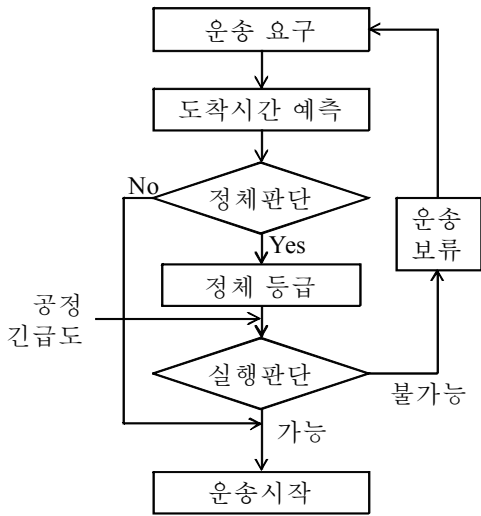
최근 반도체/LCD 산업의 가공원료인 웨이퍼와 유리 기관의 크기가 커짐에 따라 웹 내의 물류제어에 대한 관심이 높아지고 있고 AGV가 OHS/OHT로

대체되고 있음에 따라 stocker에 대한 관심 또한 증가되고 있다. 즉, stocker의 위치 결정 문제[14], 그리고 목적지로서의 stocker 선택 문제[15] 등이 연구되고 있으며, 또한 보다 특화된 종류의 stocker(예 : test wafer stocker)의 설계와 운용 방안도 연구되고 있다. Jang et al.[16]은 LCD 라인에서의 stocker 설계 문제를 풀기 위하여 Queuing Network 이론을 활용하였다.

위에서 살펴본 바와 같이 기존의 많은 연구자들이 반도체/LCD 웹의 물류 시스템 성능 개선을 위하여 노력하였다. 실제 웹 현장에서 유용하게 사용될 수 있는 물류 정체현상의 관리에 관련된 연구는 극히 제한적이라고 할 수 있다. 본 연구와 유사한 목적을 가진 연구로는 Li et al.[17]의 연구가 있다. 그들은 인텔 반도체 웹을 대상으로 재공이 부족하여 idle이 예상되는 설비에 대해서 우선순위를 높여서 장비의 idle 시간을 줄이고자하였다. 본 연구와 Li 등의 연구와의 차이점은 본 연구에서는 물류 시스템의 성능향상에 좀 더 초점을 두고 있다는 점이다. Li 등의 연구가 설비의 idle 시간을 정확히 파악하는데 초점을 두었다면 본 연구는 운송시간의 예측에 초점을 두고 운송정체 현상이 발생할 경우 효과적인 lot의 선택을 통한 전체적인 물류 효율의 향상에 초점을 두고 있다.

3. 우선순위결정 과정

본 연구에서 사용하고 있는 정체관리의 과정을 대략적으로 설명하면 <그림 3>과 같다. 본 과정의 최종 결과는 요청되어진 개별 lot의 운송요구에 대해서 운송을 실행할 것인지 또는 몇 분 후에 다시 시도할 것인지(운송보류)에 대한 결정이다. 최초 시작은 개별 lot의 운송요구로부터 시작되는데 디스패칭 시스템에 의해서 내려지는 운송요구는 주로 출발지와 목적지 그리고 lot의 ID(identification)를 포함한다. 주어진 출발지와 목적지를 바탕으로 최적의 운송경로가 결정이 되고 이를 바탕으로 그 lot의 도착시간을 예측한다.



〈그림 3〉 개별 운송요구에 대한 통제 과정

도착시간을 예측하는 이유는 그 lot이 사용할 경로에 대한 정체판단을 위해서이다. 과거 자료를 바탕으로 한 운송시간의 분포를 고려하였을 때 도착 예정시간의 백분위수가 일정 한도를 넘어가면 정체로 분류된다. 정체의 등급은 백분위수의 수준에 따라 3단계로 나누어 분류된다. 마지막으로 주어진 공정 긴급도와 앞에서 계산한 정체등급에 따라 최종적으로 운송을 보류할 것인지 즉시 운송을 시작할 것인지를 판단하게 된다. 운송이 보류된 lot들은 일정 시간 후에 다시 운송요구를 하게 된다.

운송되어지는 lot의 공정 긴급도는 목적지 장비의 병목 장비 여부, 목적지 장비에 대기 중인 WIP의 수준, 및 lot의 공정 상태에 대한 중요성 등에 의해서 복합적으로 결정된다. 즉, 이는 운송 시스템의 내부적인 상황과 관계없이 외부적 요인에 의해서 결정된 우선순위라고 할 수 있는데 디스패칭 시스템과 작업자에 의해서 결정된다. 본 연구에서 제안하는 물류 정체관리 방법의 각 단계별 접근법은 아래 제 3.1절~제 3.4절에서 보다 자세히 설명하기로 한다.

본 논문에 사용될 기호를 정리하면 아래와 같다.

i : 운송될 lot의 인덱스

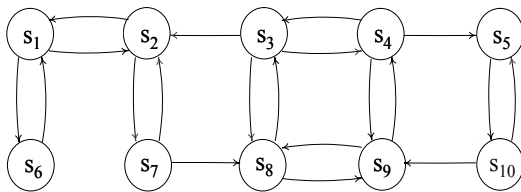
- j : lot의 운송을 담당할 물류설비의 인덱스(예 : <그림 1>에서 stocker 1, stocker 2, ...)
- J : 모든 물류설비들의 집합
- $[i, j]$: lot i 가 물류설비 j 에 의해서 처리됨을 의미
- $[i, j]^*$: lot i 의 운송처리에 필요한 마지막 이벤트 노드에 해당되는 lot i 와 물류설비 j 페어
- F : 마지막 이벤트 노드의 집합, 만약 $[i, j] = [i, j]^*$ 이면 $[i, j] \in F, \forall i, j$
- t_j : 물류설비 j 에 필요한 최소 처리시간
- $w_{i,j}$: lot i 의 물류설비 j 에서 대기시간(결정변수)
- r_i : lot i 에 대한 공정긴급도 가중치(real-time dispatcher-RTD와 같은 상위 컨트롤 시스템에서 주어짐)
- e_{ij}^a : lot i 의 물류설비 j 에 도착시간 및 도착 이벤트 노드를 의미함(결정변수)
- e_{ij}^d : lot i 의 물류설비 j 로부터 출발시간 및 출발 이벤트 노드를 의미함(결정변수)
- $(e_{ij}^*, e_{i,j+1}^*)$: 노드 e_{ij}^* 로부터 노드 $e_{i,j+1}^*$ 로 운송 수행을 의미.
- V_i : lot i 를 운송하기 위한 이벤트 노드들의 집합(<그림 5> 참고)
- A_i : lot i 를 운송하기 위해 V_i 에 있는 이벤트 노드들을 연결하는 arc들의 집합(<그림 5> 참고)
- G_i : lot i 를 운송하는 경로를 표현한 그래프, $G_i = G(V_i, A_i)$
- T_i : 이벤트 스케줄링을 통해 예측된 lot i 의 도착시간
- T_i^* : 보정 후 lot i 의 예측된 도착시간, lot i 의 최종 도착예측시간

3.1 도착시간의 예측

본 연구는 lot의 주어진 경로에 대하여 도착시간의 예측을 위하여 이벤트 스케줄링[18]을 활용한다. 이벤트 스케줄링을 위하여 운송이 발생하는 과정을 이벤트 그래프로 표현해야 하는데 이벤트 그래프는 운송시스템의 물리적 장치와 그 장치에서

발생하는 주요 이벤트를 도착 순서에 따라 그래프로 표현한 것이다.

Lot의 운송에 필요한 이벤트 그래프를 생성하기 전에 물류시스템을 그래프로 나타낼 필요가 있다 [19]. 위 <그림 1>에서 표현된 물류 시스템을 그래프를 활용하여 표현하면 아래 <그림 4>와 같다. <그림 4>에서 원은 노드로써 위 <그림 1>에서 stocker를 나타내며 s_1 은 <그림 1>의 stocker1을 의미한다. <그림 4>에서 arc는 <그림 1>의 컨베이어를 의미하는데 stocker간의 연결 상태를 표시하기도 한다. 이벤트 그래프는 물류시스템을 표현한 일반 그래프를 바탕으로 각 노드에서 발생하는 event들을 모두 고려하여 그래프로 표현한 것이다.

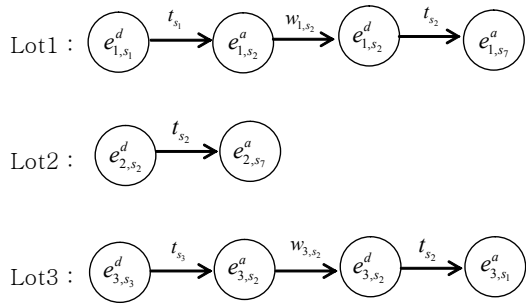


<그림 4> 그래프를 활용한 LCD 펌 물류의 표현

이벤트 그래프를 구성하기 위해서는 그 모델에 포함된 물리적 장치들과 그 장치들에서 발생하는 주요 이벤트들이 모두 정의되고 각 이벤트들이 발생하는 순서에 대한 정의가 있어야 한다. 이벤트 그래프에서 각 노드는 물리적 장치에서 발생하는 이벤트 형태뿐만 아니라 그 이벤트가 발생하는 시간을 의미한다. 이 이벤트 노드들은 방향성 있는 arc에 의해 연결된다. 이러한 arc들은 어떤 이벤트가 다른 이벤트에 어떻게 영향을 주는지를 나타낸다.

어떤 lot의 운송요구가 접수되면 출발지와 목적지 그리고 경로 정보를 활용하여 하나의 이벤트 그래프를 생성하는데 이 이벤트 그래프를 본 논문에서는 편의상 물리적 체인이라고 정의한다. <그림 5>는 <그림 1>과 <그림 4>에서 발생한 3개의 운송요구를 물리적 체인으로 표시한 것이다. <그림 5>에서 lot1은 s_1 에서 출발하여 s_2 를 경유하여 s_7 에 도착할 예정이다(<그림 3>도 참고바람). Lot2는 s_2

에서 출발하여 s_7 에 도착할 예정이고 lot3은 s_3 를 출발하여 s_2 를 거쳐서 s_1 에 도착할 예정이다. 각 노드는 이벤트 타입, 시간 및 lot ID를 포함하고 있다. 각 노드와 노드를 연결하는 arc는 이벤트가 발생하는 순서를 의미하는데 물리적 체인에 나타난 arc는 일종의 제약사항으로써 해당 운송요구가 성공적으로 수행되기 위해서는 반드시 아래의 순서대로 이벤트가 실행되어야 함을 의미한다. 각 arc에 주어진 숫자는 각 이벤트에서 다음 이벤트를 발생시키는데 필요한 시간 또는 소요되는 시간의 경과를 의미한다.



<그림 5> 물리적 사슬

<그림 5>에 나타난 물리적 사슬은 어떤 물류설비에서 어떤 순서로 lot을 처리할 것인지는 표현되어 있지 않고 lot의 출발지와 목적지 그리고 그 경로에 의해서 결정된다. 이 물리적 사슬을 바탕으로 각 물류설비에서 어떤 순서로 lot을 처리할 것인지 그리고 처리시간이 중복되면 어떤 lot이 얼마간의 대기시간이 발생하게 되는 것인지를 결정하는 과정이 이벤트 스케줄링을 통해서 이루어진다. <그림 6>은 이벤트 스케줄링 후에 각 물류설비별로 lot들의 처리순서를 그래프에 나타낸 것이다. 그림에서 물류설비가 처리하는 lot의 순서를 로지컬 사슬이라 정의한다.

<그림 6>에서 설명하고 있는 로지컬 사슬을 살펴보면 s_1 은 lot1의 출발을 처리한 다음 lot3의 도착을 처리하게 스케줄링 되어있다. S_2 의 경우 lot2의 출발을 처리한 다음 lot1의 도착과 출발을 순차적으로 처리하고 lot3의 출발과 도착을 차례로 처리하

게 되었다. 마지막으로 s7의 경우 lot2의 출발을 처리하고 lot1의 도착을 처리하게 스케줄링 되어있다.

이벤트 스케줄링을 통해서 각 lot의 도착시간이 예측이 되며 스케줄링의 원리를 수리적 모형으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Minimize } \sum_{[i,j] \in F} r_i e_{ij}^a \quad (1)$$

S.T.

$$e_{ij}^a + t_j + w_{ij} \leq e_{ij}^d \quad (2)$$

if $(e_{ij}^a, e_{ij}^d) \in A_i, \forall i, j$

$$e_{ij}^d - e_{i,j+1}^a \leq 0 \text{ if } (e_{ij}^d, e_{i,j+1}^a) \in A_i, \forall i, j \quad (3)$$

$$e_{kj}^d + t_j \leq e_{lj}^a \text{ 만약 물류설비 } j \text{에서 lot } l \text{이 lot } k \text{ 다음에 처리된다면, } \forall k, l, j \quad (4)$$

$$e_{ij}^a, e_{ij}^d \geq 0 \text{ for all } \forall i, j \quad (5)$$

위 모형에서 목적함수는 모든 lot들의 운송시간이 끝나는 시간에 대하여 가중치를 곱하여 합한 값이 최소화되게 하는 것이다. 제약조건인 식 (2)는 모든 lot들이 어떤 물류설비에서 처리되기 위해서는 최소필요시간이 경과해야함을 의미한다. 식 (3)은 <그림 5>에 나타난 물리적 체인을 고려한 것으로 lot의 운송이 처리되기 위해서는 정해진 이벤트노드를 순서대로 수행하여야 함을 강제한다. 식 (4)는 어떤 물류설비에서 2개 이상의 lot이 동시에 처

리될 수 없음을 나타낸다. 식 (4)를 구현하기 위해서는 정수계획법이나 비선형계획법 형태의 추가적인 모형이 개발되어야한다. 본 논문은 위의 수리모형을 이벤트 스케줄링을 표현하는 목적으로 사용하고 본 문제에 대한 풀이는 휴리스틱 기법을 활용하고 있다.

위에서 제시된 이벤트 스케줄링 모형에 대하여 효과적인 해를 찾는 방법으로 아래와 같은 휴리스틱 기법을 사용하였다. 본 휴리스틱 기법의 사용 목적은 각 lot들의 도착시간을 추정하는데 있음으로 현장에서 사용하고 있는 물류운송 규칙을 되도록 지키도록 하였다. 사용된 휴리스틱 기법은 다음과 같다.

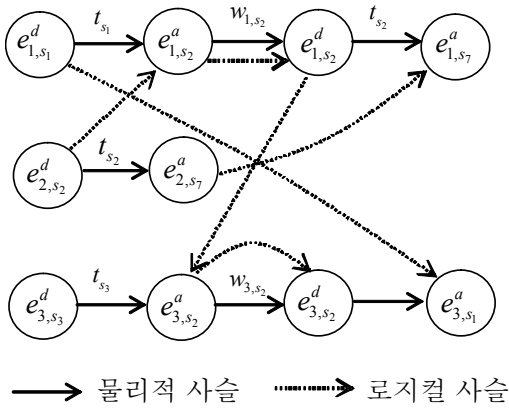
단계 1 : 초기화

기존의 물류 시스템을 활용하여 현재 운송중이거나 운송요구가 발생된 모든 lot들에 대하여 물리적 체인을 생성하여 이를 G_i 로 둔다. G_i 에 있는 모든 노드를 $e_{ij}^a = \infty$ 과 $e_{ij}^d = \infty$ 로 둔다.

단계 2 : 현재 위치의 반영

본 step에서는 운송중인 lot들에 대하여 현재 위치를 파악하여 해당 lot과 물류설비에 대하여 이벤트 노드 $e_{ij}^a = 0$ 으로 세팅한다. 이때 한 대의 물류설비에는 오직 하나의 이벤트 노드만 0으로 세팅될 수 있다. 예를 들면 <그림 5>와 <그림 6>에서 $e_{1,s_1}^d, e_{2,s_2}^d, e_{3,s_3}^d$ 는 각 lot들의 시작 노드가 됨으로 0으로 세팅된다.

단계 3 : r_i 가 가장 높은 이벤트 노드를 선택하여 EST(earliest start time) 기준으로 고정한다. r_i 가 같은 lot이 여러 개 존재할 경우 EST가 가장 빠른 노드를 선택한다. 모든 노드의 시간이 모두 결정될 때까지 단계 3을 반복한다. 예를 들어 위 <그림 5>와 <그림 6>에서 r_1, r_3, r_2 의 순서대로 r_i 의 값이 주어진다(즉, lot1의 공정긴급도가 가장 우선이고 lot2의 공정긴급도가 가장 낮다면) stocker2의 관점에서는 단계 1에 의해서 결정된 e_{2,s_2}^d 를 처리한 다음 e_{1,s_2}^a 를 처리하고 $e_{1,s_2}^d, e_{3,s_2}^a, e_{3,s_2}^d$ 의 순서대로 처리하게 된다.



<그림 6> 로지컬 사슬

모든 lot에 대하여 위의 과정을 통해서 결정된 e_{ij}^a 중에서 $[i, j] \in F$ 이면 e_{ij}^a 는 잠정적으로 lot i 의 도착예정시간이 된다. 이를 다시 정리하면 $T_i = e_{ij}^a$, if $[i, j] \in F, \forall i$ 와 같이 정의된다.

3.2 도착시간의 보정

이벤트 스케줄링을 통해서 추정된 도착예정시간은 현재 이미 수행중인 운송요구만 고려하게 됨으로 추정된 도착시간은 항상 실제 도착시간 보다 작아지는 경향이 있다. 이는 추정시간 이후에 운송요구가 발생한 lot들이 중간에 끼어 들 수 있기 때문이다. 이를 보정하기 위하여 두 가지의 방법이 제안되었다. 첫째, 대안 1은 추정시간 이후에 발생할 lot들을 가상적으로 생성한 후 이를 포함하여 이벤트 스케줄링을 수행하는 것이다. 모든 물류설비에 대해서 추정시간 이후 발생할 운송요구에 대한 발생은 평균 도착시간과 확률분포를 활용함으로써 생성가능하다. 둘째, 대안 2는 이벤트 스케줄링을 통해 예측한 각 노드에서의 소요시간과 각 노드의 최근 평균운송시간에 대한 가중합을 고려하여 도착시간을 추정하는 것이다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$T_i^* = \sum_{j \in A_i} (\alpha \cdot e_{ij}^a + (1-\alpha) \cdot \mu_j), \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (6)$$

식 (6)에서 α 는 보정상수로써 각 lot의 시작노드에서는 1에서 시작하여 시작노드에서 멀어질수록 비례하여 값이 작아진다. 실제에서는 여러 번의 실험과정을 거쳐서 예측 에러가 가장 작은 α 값을 적용하였다. 식 (6)에서 μ_j 는 물류설비 j 가 lot을 처리하는데 걸린 평균시간으로서 대기시간과 순수처리시간을 포함한 소요시간이다.

위에서 제시된 두 가지 방법 중에서 첫 번째 방법의 예측 오차가 더 작은 것으로 분석되었으나 실제에서는 두 번째 방법이 적용되었다. 그 이유는 첫 번째 방법은 계산시간이 많이 걸리는 경향이 있어서 서버에 과중한 부하를 줄 수 있을 것으로 우려되었

기 때문이다.

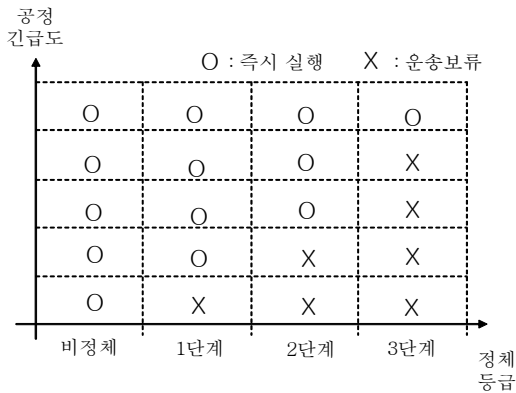
3.3 경로의 정체판단

정체관리의 다음 단계는 위에서 예측된 도착시간을 활용하여 <그림 3>에 보인바와 같이 정체판단을 하는 것인데 정체의 구분은 3단계로 이루어진다. 정체의 등급을 3단계로 나누는 것은 경험적인 기준으로 현장의 상황에 따라 보다 세부적으로 나누거나 통합할 수 있을 것으로 판단된다.

정체판단을 위한 기준은 해당 lot의 예측된 운송소요시간과 그 lot이 사용하는 경로의 운송소요시간 분포를 활용하여 이루어진다. 예측된 운송시간이 그 경로의 소요시간 분포에서 백분위수 기준 70% 이상이면 1단계 정체로 분류되며 80%와 90% 이상이면 2단계, 3단계 정체로 각각 분류된다. 이 때 경로의 운송소요시간에 대한 분포는 경로에 포함된 노드의 숫자를 매개변수로 한 확률분포를 생성하였는데 이는 과거의 운송소요시간의 이력을 통해서 정의되었다. 경로에 포함된 노드의 숫자가 많아지는 경우에는 중심극한 정리에 의해서 정규분포에 근사한다는 것을 확인 할 수 있었다.

3.4 운송의 보류 판단

본 연구에서 제안하는 정체관리의 마지막 단계는 <그림 3>에 나타난 바와 같이 운송을 보류할 것인지 즉시 실행할 것인지를 판단하는 것이다. 이는 <그림 7>에 나타난 바와 같이 운송보류 판단 매트릭스를 통해서 이루어진다. 이 매트릭스는 lot의 공정긴급도와 정체의 등급에 따라서 lot의 운송을 즉시 실행할 것인지 보류하였다가 재탐색을 할 것인지를 결정하는 기준을 제공하고 있다. 실제 공정긴급도는 여러 단계로 나누어져 있으나 그림에서는 설명의 편의성을 위하여 5단계로 나누었으며 정체 판단의 기준 또한 현장의 경험적 요구사항을 반영한 것이다. 이 공정긴급도는 운영관리자들에 의해서 변경될 수 있는 매개변수임을 밝혀둔다.



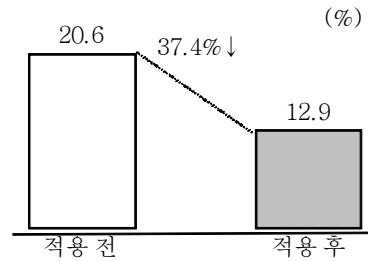
<그림 7> 운송보류 판단 매트릭스

4. 적용 결과

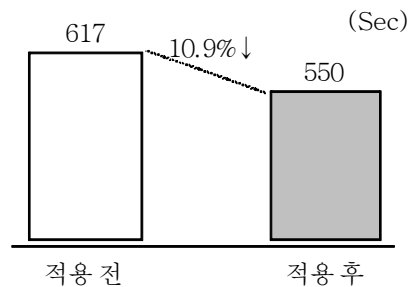
본 연구에서 제안된 방법은 LG Display 웹에 적용되어 있으며 <그림 8>~<그림 10>에서 설명된 바와 같은 효과를 거두었다. 아래 그림들에 제시된 자료는 새로운 방법을 웹에 적용한 이후 약 1개월의 자료와 적용 이전 약 1개월의 자료를 비교분석한 것이다. 반도체/LCD 업계는 실제 생산자료에 대해서 매우 엄격하게 보안관리를 하고 있으므로 본 연구의 결과 또한 다소 제한적으로 공개할 수밖에 없음을 밝혀둔다.

<그림 8>은 본 연구에서 제안한 방법을 적용하기 전후의 stocker의 full-rate를 비교한 것이다. Stocker full-rate가 높으면 높을수록 물류의 정체가 빈번하게 발생하므로 공정설비의 물류배송 지연, 설비의 blocking 등 여러 가지 부작용이 초래되고 할 수 있다. 그림에서 나타나 있듯이 새로운 방법이 적용된 후 약 37.4%의 개선효과가 나타났다.

<그림 9>는 새로운 기법을 적용하기 전후의 평균운송소요시간을 비교한 것이다. 본 연구에서 제시된 기법을 적용한 후 효과적인 정체관리로 인하여 평균 운송시간이 10.9% 줄어든 것을 알 수 있다. 이는 하드웨어의 추가적인 투자 없이 소프트웨어적 운영효율의 향상으로 인하여 운송시간을 단축한 예로서 LG Display 내에서 성과를 높이 평가를 받았다.

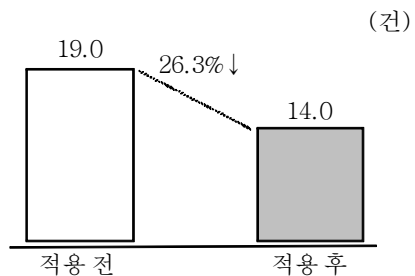


<그림 8> Stocker Full-rate



<그림 9> 평균 운송소요시간

<그림 10>은 새로운 방법의 효과를 stocker full-rate와 운송시간 단축 외에 다른 측면에서 검증한 자료인데, 적용 전후 이송 중인 카세트 숫자의 평균을 비교한 그래프이다. 운송시간이 단축된다면 Little의 법칙에 의하여 운송 중인 카세트의 숫자가 비례적으로 줄어야 한다. 그림에서 볼 수 있듯이 약 26%의 단축이 있었으며 이는 추가적으로 저장 공간의 여유를 확보하여 생산운영에 있어서 수월성을 개선하는 효과를 가져왔다.



<그림 10> 운송중인 lot 수량 표준편차

본 연구에서 제안하는 모형은 향후 다양한 방법

으로 응용되어 여러가지 개선활동에 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 실제로 있었던 예를 들면 운송시간을 예측하는 부분은 물류 시스템에서 발생하는 비이상적인 에러를 감지하는데 유용하게 활용되었다. 이는 실제 운송시간과 예측운송시간의 차이가 큰 lot들의 운송이력에 대하여 원인조사를 하는 과정에서 이루어졌는데 기존 물류시스템에 존재하는 여러가지 문제점들을 발견할 수 있었으며 이는 곧 개선으로 연결되었다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 반도체/LCD 웹에서 생산성의 중요한 열쇠가 되고 있는 물류 시스템의 개선을 위한 새로운 방법을 제안하고 이를 실제 LG Display (주) 웹의 물류 시스템에 적용하였다. 이 새로운 방법은 이벤트 스케줄링을 활용하여 운송 lot들의 도착예정시간을 예측하였다. 이를 바탕으로 경로의 정체정도에 대한 정보를 파악하였고 이 정보를 활용하여 공정긴급도가 높은 lot들을 우선적으로 처리하고 긴급도가 떨어지는 lot들에 대해서는 운송을 통제함으로써 전체적인 효율을 높이고자하였다. 적용결과 stocker full-rate, 평균운송소요시간 등에서 주목할 만한 개선효과를 거두었다.

본 연구의 과정에서 추가적으로 개선이 필요한 과제가 몇 가지 제기되었다. 첫째, 본 연구에서 제안하는 방법보다 능동적인 물류의 제어가 가능하다면 추가적인 개선이 가능할 것으로 판단된다. 정체관리를 통해서 물류효율을 높이는 방식은 현재 현장에서 사용하고 있는 물류 시스템의 변경이 가능한 범위에서 선택된 차선책이라고 할 수 있다. 물류의 정체가 판단될 때 경로의 변경이나 우선순위의 조절 등을 포함한 보다 적극적인 방식의 문제해결이 필요해 보인다. 둘째, 공정 긴급도와 운송 우선순위를 통합한 제어 방안이 필요한 것으로 판단된다. 현재 공정 긴급도와 운송 우선순위는 디스패처와 MCS(material control system)에서 각각 결정하는 사항으로 계층적의사결정이 이루어지고

있다. 공정 우선순위와 현재 물류운송의 현황을 동시에 고려한 종합적인 시스템의 설계와 운영이 이루어진다면 보다 높은 수준의 운송 효율을 달성할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 이는 현재 설치되어 운영되고 있는 물류 시스템 환경에서는 불가능하고 신규라인의 투자나 시스템 upgrade 등의 계기가 주어졌을 때 가능할 것으로 판단된다. 이 두가지 과제에 대한 후속연구는 반도체/LCD 물류시스템의 개선에 관심을 갖고 있는 여러 연구자들에 의해서 계속적으로 이루어질 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Lee, Y.H., "Supply Chain Model for the Semiconductor Industry of Global Market," *Journal of Systems Integration*, Vol.10, No.3 (2001), pp.189-206.
- [2] Chung, S.L. and M. Jeng, "Fabulous MESs and C/Cs : An overview of semiconductor fab automation," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, (2004), pp.8-18.
- [3] Campbell, P.L. and G. Laitinen, "Overhead Intrabay Automation and Microstocking-a virtual fab case study," *Proceedings of IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, (1997), pp.368-372.
- [4] Weiss, M., "300 Fab Automation Technology options and selection criteria," *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*, (1997), pp.373-379.
- [5] Cardarelli, G., P.M. Pelagagge, and A. Granito, "Performance analysis of automated interbay material-handling and storage systems for large Wafer Fab," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol.12, No.3(1996), pp.227-234.
- [6] Jang, Y.J. and G.H. Choi, "Introduction to Automated Material Handling Systems in

- LCD Panel Production Lines," *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, (2006), pp.223-229.
- [7] Agrawal, G.K. and S.S. Heragu, "A survey of automated material handling systems in 300-mm Semiconductor Fabs," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol.19, No.1(2006), pp.112-120.
- [8] Montoya-Torres, J.R., "A literature survey on the design approaches and operational issues of automated wafer-transport systems for wafer fabs," *Production Planning and Control*, Vol.17, No.7(2006), pp.648-663.
- [9] Ting, J.H., J.M.A. Tanchoco, "Unidirectional circular layout for overhead material handling systems," *International Journal of Production Research*, Vol.38, No.16(2000), pp. 3913-3935.
- [10] Ting, J.J. and J.M.A. Tanchoco, "Optimal Bidirectional Spine Layout for Overhead Material Handling Systems," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol.14, No.1(2001), pp.57-64.
- [11] Koo, P.H. and J. Jang, "Vehicle Travel Time Models for AGV Systems under Various Dispatching Rules," *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol.14, No.3 (2002), pp.249-261.
- [12] Nazzal, D. and L.F. McGinnis, "Analytical approach to estimating AMHS performance in 300mm fabs," *International Journal of Production Research*, Vol.45, No.3(2007), pp. 571-590.
- [13] Mackulak, G.T. and P. Savory, "A simulation-based experiment for comparing AMHS performance in a semiconductor fabrication facility," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol.14, No.3(2001), pp. 273-280.
- [14] Sun, D.S., N.S. Park, Y.J. Lee, Y.C. Jang, C.S. Ahn, and T.E. Lee, "Integration of lot dispatching and AMHS control in a 300mm wafer FAB," *Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop, IEEE/SEMI*, 2005.
- [15] Jang, Y.J., G.H. Choi, and S.I. Kim, "Modeling and analysis of stocker system in semiconductor and LCD fab," *IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, (2005), pp.273-276.
- [16] Li, B., J. Wu, W. Carriker, and R. Giddings, "Factory throughput improvements through intelligent integrated delivery in semiconductor fabrication facilities," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol.18, No.1(2005), pp.222-231.
- [17] Sargent, R.G., "Event Graph Modelling for Simulation with an Application to Flexible Manufacturing Systems," *Management Science*, Vol.34, No.10(1988), pp.1231-1251.
- [18] Bondy, J.A. and U.S.R. Murty, "Graph theory with applications," North-holland, NY, 1976.