

## LCD공정에서 스토커시스템 성과측정 모델

정재우 · 김판수<sup>†</sup>

경북대학교 경영학부

### A Performance Model for Stocker Systems in Liquid Crystal Display (LCD) Fabrication Lines

Jaewoo Chung · Pansoo Kim<sup>†</sup>

School of Business, Kyungpook National University

The stocker system is another name of automated storage and retrieval system (AS/RS) and being popularly used as main material handling tools in Liquid Crystal Display (LCD) and semiconductor fabrication facilities. Recently the use of the stocker system has been extended to transportation from conventional storage and retrieval in LCD fabrication facilities. Toolsets are connected in the ground level of the stocker system and 4~6 stories of the shelves are placed in the upper or lower ground level. As a consequence of the more sophisticated design, move requests imposed on the system greatly increased. For solving this problem, the industry adopted the dual-robot stocker system that two robots are moving along the same guide line in the stocker system. This research develops a closed-form solution to estimate a delivery rate of the dual robot stocker system under given design and operation parameters. Using this stochastic model, industry practitioners could analyze performance levels under given various design parameters, and ultimately the model helps optimizing the design parameters.

**Keywords :** AS/RS, Dual Robot Stocker System, LCD Fabrication, Performance Model

#### 1. 서 론

스토커시스템은 자동창고 시스템(AS/RS : automated storage and retrieval system)의 다른 이름이다. 특히 LCD나 반도체의 제조공정에 많이 쓰이는 물류장비이다(Jang and Choi[4]). 최근에 스토커시스템은 최신 LCD공장에서 물류만이 아니라 저장의 용도로도 많이 사용되고 있다. 유리원판의 크기에 따라서 분류되는 LCD공장의 1세대에서 4세대까지는 자동반송차 시스템(AGVS : automated guided vehicle system)으로도 잘 운영이 되었으

나 5세대를 지나면서 유리원판의 크기가 점차 커지면서 AGVS는 공간을 더욱 많이 요구하는 문제가 있고, 진공 클린룸은 전체비용을 줄이기 위해 가능하면 공간을 줄여야 하기 때문에, 운송과 저장을 동시에 할 수 있어서 공간절약에 더욱 효율적인 스토커시스템이 최근의 LCD, 혹은 반도체 공장의 더욱 나은 물류의 대안으로 사용되고 있다.

스토커시스템은 총 4~6층 규모이고, 지상 1층은 설비와 연결되어 있다. 이러한 구조를 잘 이용해서 공간을 이용해야 전체 클린룸의 공간을 줄이면서 공장의

논문접수일 : 2011년 05월 03일    논문수정일 : 2011년 05월 27일    게재확정일 : 2011년 07월 14일

<sup>†</sup> 교신저자 pskim@knu.ac.kr

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-327-2010-1-B00208).

효율을 높일 수 있다. 하지만 공간의 효율만 생각하다 보면 스토커시스템에 물리는 반송 및 저장의 부담은 매우 커지게 된다. 이러한 스토커시스템의 부하를 줄이기 위해서 스토커시스템에 대한 정교하고 효율적인 디자인에 많은 관심을 기울이게 되었고, 두 개의 반송 로봇을 사용하는 스토커시스템이 소개되었다.

듀얼로봇 스토커시스템은 그 구조상, 하나의 로봇은 다른 로봇과 동일한 구간에서 동시에 작동할 수 없기 때문에, 겹치는 위치에서는 상대로봇이 해당구간에서 작동을 마칠 때 까지 기다려야 한다. 이러한 상황을 막힘(blocking)이라고 부른다. 이러한 막힘을 해결하기 위하여 제품의 선적 및 하역을 위한 구역이 스토커시스템 중간에 위치하여 물류장비와 스토커시스템 혹은 스토커시스템 끼리의 연결을 위해서 필요하다. 이와 같은 다양한 요구 때문에 산업현장에서는 듀얼로봇 스토커시스템의 효율을 높이고 공간을 덜 사용하면서 원하는 모든 기능을 가지고 있는 물류시스템을 설계하기 위해서 많은 연구가 필요하게 되었다.

본 연구는 듀얼로봇 스토커시스템의 설계문제를 해결할 수 있는 수학적 모델을 제시함으로써 다양한 모수추정을 통해서 설계문제를 해결할 수 있는 시도가 가능하게 하였다. 본 연구를 통해서 제시되는 스토커시스템의 성과측정 모델은 산업현장에서 크게 두 가지의 효과를 기대할 수 있다. 첫째, 본 모델을 이용하여 현장에서 다양한 스토커시스템의 효율을 미리 측정해 볼 수 있다. 예를 들어서 엔지니어들은 현장의 많은 스토커시스템들 중에서 어느 시스템에 듀얼로봇을 사용할 것인지를 결정하여야 한다. 혹은 어느 단일로봇 스토커시스템을 듀얼로봇으로 바꾸면 성과가 뛰어나게 되는지를 결정할 수 있다. 이러한 결정들은 기대 반송요구횟수와 실제 스토커시스템의 반송성과의 비교로 결정된다.

둘째, 수학적 모델은 듀얼로봇 스토커시스템을 최적으로 운영하기 위한 모수를 추정하기 위한 수단으로 사용된다. 특히, 듀얼로봇 스토커시스템에는 각각의 로봇이 단독으로 사용해야 하는 구간과 두 로봇이 공동으로 사용해야 하는 구간으로 구분되어야 하는데, 이러한 구간을 구분하기 위한 모수의 추정에 꼭 필요한 것이 비교할 만한 성과를 측정할 수 있는 수학적 모델이다.

본 연구의 제 2장에서는 관련 위와 관련된 기존연구에 대해서 살펴보고, 제 3장에서는 수학적 모델을 위한 가정들과 구체적인 모델의 구성, 마지막 제 4장에서 결론을 내리는 순서로 논문을 구성하였다.

## 2. 기존연구

LCD산업은 최근 가장 빠르게 성장하는 산업 중의 하나이다. 여기서 LCD는 TV, Monitor, 그리고 Mobile 기기에서 다양하게 사용되고 있는 디스플레이 장치이다. LCD 제조공정은 그 구성은 반도체 공정과 비슷하지만, 좀 더 사이즈는 크고 복잡정도는 단순한 구조를 가지고 있다. 두 공정 시스템 모두 다양한 형태의 물류기기와 유연생산 시스템으로 구성되어 있다. 반도체 공정의 물류 시스템에 대해서는 많은 연구가 있었고, Montoya-Torres[11]과 Agrawal and Heragu[1]에 의해서 분석 및 정리되었다. 하지만 이 연구에서 LCD공정에서의 물류장비에 대한 연구는 약간 언급되었고 많은 제시가 있지는 않았다.

Jang and Choi[4]는 LCD산업에서의 물류 시스템에 대해서 소개를 하였다. 이 연구에서는 다양한 형태의 물류 시스템(운송 carrier, 스토커시스템, 반송장비)에 대한 소개와 더불어 LCD공정의 특징에 대해서도 설명하였다. 하지만 이 당시에는 아직까지 듀얼로봇 시스템은 나오지 않았고 역시 연구에서도 소개되지 못했다. Jang et al.[5]의 논문에서는 큐잉 네트워크 모델을 이용하여 단일로봇의 움직임 해석하는 연구를 하였다. 이 연구는 시뮬레이션의 대안으로 큐잉모델을 이용하였다는데 의의가 있다. 물건의 도착과 출발, 서비스와 고장 등을 확률변수로 두고 버퍼의 크기, 그리고 고장이 전체 시스템에 어떻게 영향을 미치는 지 알아내었다. 여기서 사용된 척도가 반송율이고 본 연구에서 사용하려는 척도와 동일하다. Jang et al.[6]은 AGV의 경로 문제에서도 비슷한 적용을 시도하였다.

컴퓨터 시뮬레이션은 자동 유연생산 시스템을 해석하기 위한 유용한 도구로서 사용되었다. 특히 시뮬레이션은 눈에 보이는 해석을 가능하도록 하여 현장의 엔지니어가 사용하기에 편리한 방법이다. 하지만 Bank[3], Nazzle and McGinnis[12] 등에 따르면 시뮬레이션은 결과를 얻을 때까지 시간이 많이 걸리고, 모델링 전문가가 필요할 뿐 아니라 모델링 준비하는 시간도 많이 걸리는 단점이 있다.

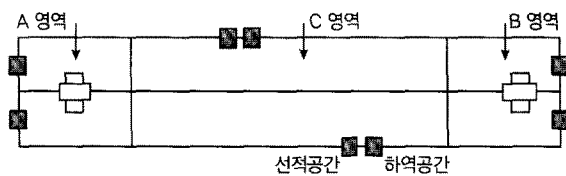
Bozer and White[2]는 로봇이 수직과 수평으로 움직이는 경우 이동시간을 계산하는 모델을 개발하였다. 특히, 저장 공간을 설계하고 선적 및 하역 횟수를 결정하는 일은 연구의 주된 관심이었었고, 본 연구에서 시도하는 연구목적의 단일로봇 시스템에서의 시도의 효시가 되는 연구라고 할 수 있다. Kouvelis and Papanicolaou[9]은 복수의 복도가 있는 자동창고에서 2층의 저장 공간의 최적 경계를 찾는 연구를 하였다. Lee et al.[10]은 다양한 크기의 저장을 하는 자동창고 시스템을 소개하고 최적의 장소 할당방법을 제시하였다.

이상과 같은 다양한 물류 시스템의 연구는 특정 상세한 문제의 해결을 하기위한 다양한 접근을 시도하였다. 특히 자동창고 시스템의 연구는 단일로봇의 경우에 해당하는 연구만 진행되었다. 다양한 연구주체가 있었지만 아직까지 듀얼로봇에 대한 연구의 진행은 되지 않았다. 특히 듀얼로봇의 사용은 대형 LCD를 제조하는 현장에서 더욱 필요하고 이러한 현장은 국내가 가장 앞서 있기 때문에 아직까지 앞선 결과가 발표되기는 힘든 실정이다.

### 3. 모델링

본 장에서는 듀얼로봇 스토커시스템의 성과를 측정할 수 있는 모델을 제시한다. 이를 위해서 먼저 모델의 묘사와 정의, 그리고 가정들에 대해서 설명한다. 듀얼로봇 스토커시스템의 물리적인 특징에 의해 전체 스토커시스템의 운송영역은 세부분으로 나누어진다. 이 세 부분을 A, B, C라고 한다면, 하나의 통로에 A영역, C영역, B영역의 차례로 세부분으로 나누어지고, 특정 로봇 a는 A영역과 C영역만 운송할 수 있을 뿐, B영역은 운송하지 못하고, 또한 로봇 b역시 B영역과 C영역만 운송할 수 있게 된다. 즉, 공동영역인 C영역은 두 로봇이 사용은 가능하지만 하나의 로봇이 점령하면 다른 로봇은 기다려야 한다. 만약 A영역에서 B영역으로의 반송요구가 있다면 이러한 반송은 먼저 C영역의 비어있는 저장공간 중에서 무작위로 선출하여 그 곳을 목적지로 반송이 먼저 이루어지고, 다시 그 곳에서 B영역으로 반송요구를 발생시켜 C영역에서 B영역으로 반송이 순차적으로 이루어 져야 한다. 이러한 반송을 통과반송(crossover trip)이라고 부른다. 이에 대한 설명은 <그림 1>과 같다. 각 영역마다 선적 및 하역공간이 있다.

두 로봇은 모두 동일한 운영법칙을 따라야 하고, 구조도 동일하다고 가정해야 한다. 반송은 저장선반에서 저장선반으로, 혹은 공정설비로, 또는 스토커시스템으로, 선적 및 하역공간으로부터 저장선반으로의 반송이 있다. 본 시스템의 디자인 문제로는 공동운송 영역인 영역 C의 길이를 얼마만큼 가져가야 하는지, 운송법칙은 어떻게 정할 것인지 등 많은 의사결정문제가 있을 수 있다.



<그림 1> 듀얼로봇 시스템의 영역구분

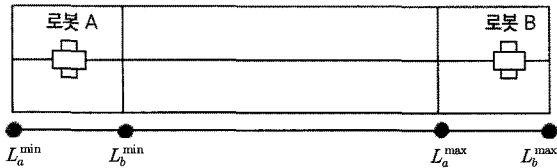
듀얼로봇 스토커시스템에서의 운반단위는 카세트인데, 이 카세트를 운반하기 위한 단계는 네 단계로 나뉜다. 빈 로봇이 선적을 위해서 이동, 선적, 선적한 로봇이 목적지로 이동, 목적지에서 카세트를 내려놓기 등 네 단계이다. 이러한 스토커시스템에서 가장 중요한 성과척도는 얼마나 많이 운송을 하는가를 측정하는 반송율(Jang and Choi[4])이다. 이는 운송을 많이 할수록 운반의 전체 용량이 커지고 운송을 기다리는 시간이 줄어들기 때문이다. 이는 단위 시간당 최대 운송횟수로 구해진다. 이를 위한 운송환경에 대한 다양한 가정들은 다음과 같다.

첫째, 수직이동시간은 무시한다. 이는 가정이라기보다는 스토커시스템의 특성에 의한 것이다. 둘째, 반송의 시작위치와 목적지는 일차원 공간에서 균등분포(uniformly distribution)로 발생한다. 셋째, 시작 지와 도착지는 연속 공간에서 발생한다고 가정한다. 물론 시작위치와 도착위치가 정해져 있을 수도 있지만, 자동창고에서 선반은 거의 끊임없이 만들어져 있고 자동창고의 길이가 충분히 길 수 있기 때문에 연속선상에서 발생한다고 가정하여도 크게 현실 사정과 다르지 않다. 넷째, 두 로봇이 충돌하는 일은 없는데, 그것은 공동공간에서 하나의 로봇이 운송하고 있다면 다른 로봇은 그 공간이 빌 때 까지 기다린다는 것을 가정했기 때문이다. 반송요구는 선입선출(FIFO : first in and first out) 규칙에 의해 처리되어야 한다.

본 연구의 목적은 듀얼로봇 스토커시스템의 성과척도인 반송율을 계산할 수 있는 수학적 모델을 개발하는 것이다. 이를 위해서 전체 라인의 길이( $l$ ) 영역 A와 B의 전체 길이에 대한 비율 등을 주요한 모수로 사용한다. 먼저, 다음과 같이 기호를 정의하였다.

- $R$  : 로봇의 집합{a, b} = {로봇 A, 로봇 B}
- $l$  : 통로의 전체 길이
- $L^{\min}$  : 통로의 왼쪽 끝 위치
- $L^{\max}$  : 통로의 오른쪽 끝 위치
- $L_R^{\min}$  : 로봇 R이 운행 할 수 있는 왼쪽 끝 위치
- (예)  $L_a^{\min} = 0, L_b^{\min} > 0$
- $L_R^{\max}$  : 로봇 R이 운행할 수 있는 오른쪽 끝 위치, 즉 다음과 같은 결론을 본 연구의 전반에 걸쳐 내릴 수 있다.
- $L_b^{\max} = l, L_a^{\max} < l, l - L_a^{\max} = L_b^{\min}$
- $l = L^{\max} - L^{\min} = L_b^{\max} - L_a^{\min}$
- $s$  : 특정 운행의 시작지점
- $d$  : 특정 운행의 목적지점
- $v$  : 로봇의 속도

- $w$  : 선적 및 하역에 걸리는 시간  
 $a$  : 특정운행에 걸리는 총 시간  
 $\alpha^{et}$  : 특정운행에서 로봇이 비어있는 상태에서 운행한 시간  
 $\alpha^{lt}$  : 특정운행에서 로봇에 물건을 싣고 있는 상태에서 운행한 시간  
 $\beta$  : 특정운행에서의 총 이동거리  
 $\beta^{et}$  : 특정운행에서 로봇이 비어있는 상태에서 운행한 거리  
 $\beta^{lt}$  : 특정운행에서 로봇에 물건을 싣고 있는 상태에서 운행한 거리  
 $\lambda^s(l, v, w)$  : 단일로봇 스토커시스템에서 반송율  
 $\lambda^d(l, v, w : L_a^{\min} L_a^{\max} L_b^{\min} L_b^{\max})$  : 듀얼로봇 스토커 시스템에서 반송율



〈그림 2〉 주요 위치 표시

본 연구에서는 이러한 용어를 이용해서 듀얼로봇 스토커시스템의 성과를 측정하는 모델을 개발한다. 먼저, 단일로봇 스토커시스템의 반송율을 생각해 본다. 단일로봇 스토커시스템에서는 로봇의 막힘을 고려할 필요가 없다. 문제를 쉽게 하기 위해 본 라인의 통로모양은 좌우대칭임을 가정한다. 운행의 요구가 전체 통로의 길이에서 무작위로 발생한다는 점을 고려한다면 전체 통로길이  $l$ 에 대해서 기대 운행 거리는  $l/3$ 이 된다는 것을 Johnson[7] 연구에 의해서 알고 있다. 이를 이용해서 다음과 같은 단일로봇 시스템의 운행 반송율을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E^s[\alpha] &: \text{단일로봇 시스템에서 기대 운행 시간} \\
 E^s[\alpha] &= E^s[\alpha^{et}] + E^s[\alpha^{lt}] + 2w \\
 &= \frac{E^s[\beta^{et}]}{v} + \frac{E^s[\beta^{lt}]}{v} + 2w
 \end{aligned}$$

위에서 얻은 운행거리에 대한 결론으로 인해,

$$E^s[\beta^{et}] = E^s[\beta^{lt}] = l/3 \text{ 는 알고 있다. 즉,}$$

$$E^s[\alpha] = \frac{2l}{3v} + 2w \quad (1)$$

이다. 식 (1)을 이용해서, 단일로봇 시스템의 반송율은,

$$\lambda^s(l, v, w) = \frac{1}{E^s[\alpha]} = \frac{3v}{2l + 6vw} \quad (2)$$

로 정리할 수 있다. 예를 들어서, 전체길이 60m, 분당 20m의 속도, 그리고 0.5분의 선적 및 하역 시간의 수치를 적용하여 계산을 해 본다면, 단일로봇 스토커시스템의 반송율은

$$\begin{aligned}
 \lambda^s(60, 20, 0.5) &= \frac{3v}{2l + 6vw} = \frac{3(20)}{2(60) + 6(20)(0.5)} \\
 &= 0.3333 \text{trip/min} = 20 \text{trip/hr}
 \end{aligned}$$

로 계산할 수 있다. 이 결과는 다음에서 유도하는 듀얼로봇 스토커시스템의 반송율과 비교하여 어느 시스템이 더 나은지 결론을 유도할 수 있다.

다음으로, 듀얼로봇 스토커시스템의 반송율은 다음과 같이 유도할 수 있다.  $E_R^d[\alpha]$ 을 듀얼로봇 시스템에서 운행의 막힘을 고려한 특정 로봇 R의 기대운행시간이라고 정의한다면,  $E_a^d[\alpha] = E_a^d[\alpha^{et}] + E_a^d[\alpha^{lt}] + 2w + E_a^d[\alpha]\epsilon$ . 즉,  $E_a^d[\alpha](1-\epsilon) = E_a^d[\alpha^{et}] + E_a^d[\alpha^{lt}] + 2w$ 이다. 여기서  $\epsilon$ 는 듀얼로봇끼리 서로 상충하는 운행요구 때문에 운행에 막힘 현상이 일어나는 비율을 의미한다. 즉, 로봇 a의 기대운행 시간은 비어서 운행한 시간과 물건을 채워서 운행한 시간 그리고 승차와 하차 시간 그리고 막힘현상 때문에 걸리는 시간의 합으로 계산할 수 있다. 이 아이디어를 이용해서 다음과 같은 수식을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_a^d[\alpha] &= \frac{E_a^d[\alpha^{et}] + E_a^d[\alpha^{lt}] + 2w}{1-\epsilon} \\
 &= \frac{\frac{E_a^d[\beta^{et}]}{v} + \frac{E_a^d[\beta^{lt}]}{v} + 2w}{1-\epsilon}}{\frac{L_a^{\max}}{3v} + \frac{L_a^{\max}}{3v} + 2w} \\
 &= \frac{\frac{2L_a^{\max}}{3v} + 6w}{1-\epsilon} \\
 &= \frac{2L_a^{\max} + 6vw}{3v(1-\epsilon)}
 \end{aligned}$$

유도된 기대운행시간을 이용해서 로봇 a의 반송율을 계산하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{E_a^d[\alpha]} = \frac{3v(1-\epsilon)}{2L_a^{\max} + 6vw}$$

로봇 a의 반송율을 이용해서 듀얼로봇 시스템의 전체 반송율은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \lambda^d(v, w : L_a^{\min}, L_a^{\max}, L_b^{\min}, L_b^{\max}) \\ &= \left( \frac{1}{E_a^d[\alpha]} + \frac{1}{E_b^d[\alpha]} \right) \\ & - \lambda^d(v, w : L_a^{\min}, L_a^{\max}, L_b^{\min}, L_b^{\max})\delta \end{aligned}$$

여기서  $\delta$ 는 전체 운행요구 대비, A영역이나 B영역에서 운행의 요구가 발생하여 두 로봇을 이용해야만 운영을 마칠 수 있는 운행의 비율을 의미한다. 위 식은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \lambda^d(v, w : L_a^{\min}, L_a^{\max}, L_b^{\min}, L_b^{\max}) \\ &= \frac{\left( \frac{1}{E_a^d[\alpha]} + \frac{1}{E_b^d[\alpha]} \right)}{1 + \delta} = \frac{2 \left( \frac{3v(1-\epsilon)}{2L_a^{\max} + 6vw} \right)}{1 + \delta} \\ &= \frac{3v(1-\epsilon)}{(L_b^{\max} + 3vw)(1 + \delta)} \end{aligned}$$

여기서  $\delta$ 는 영역 A 혹은 영역 B에서 운행의 요구가 발생하고 목적지는 반대쪽에 일어나는 상황이다. 즉, A영역에서 선적의 요구가 있고 그 요구의 목적지가 B영역인 경우나 그 반대의 상황이 발생할 확률은 각 요구가 균등분포(uniform distribution)로 발생하기 때문에 다음과 같이 요약할 수 있다.

$$\delta = 2 \left( \frac{l - L_a^{\max}}{l} \cdot \frac{L_b^{\min}}{l} \right) = \frac{2L_b^{\min}(l - L_a^{\max})}{l^2}$$

앞의 단일로봇 스토커 시스템에서 반송율을 계산한 예제에서 사용한 수치와 같은 수치를 이용해서  $\delta$  값을 계산을 해보면 다음과 같은 결과를 알 수 있다.

$$\delta = 2 \left( \frac{60 - 50}{60} \cdot \frac{10}{60} \right) = \frac{2L_b^{\min}(l - L_a^{\max})}{l^2} = 0.0556$$

이제, 특정통로  $l$ 에서 특정위치  $x$ 에 대해서 단일로봇의 체류를 확률분포함수로 나타내면 다음과 같다.

$$f(x) = -k(x - L^{\min})(x - L^{\max}) - vw/l \quad (5)$$

여기서  $k$ 는  $f(x)$ 를 1로 만들어주기 위한 상수이다.  $f(x)$ 는 확률분포함수이기 때문에 전체영역에 걸친 적분은

1이 되어야 한다. 즉 전체를 적분하여 1로 만드는 방법으로 구하여야 한다.

이 확률분포함수의 유도는 다음과 같다. 전체 길이  $l$ 의 운행통로에서  $n$ 개의 승차와 하차위치를 가정하고 특정 위치에서 바로 옆의 위치로 이동하는데 걸리는 시간을  $\pi$ 라고 한다면,  $n = \frac{l}{v\pi}$ 라는 식이 성립한다. 전체 통로를  $l_1, l_2, \dots, l_n$ 의 부분통로로 나누어서 정의하자.  $f(x)$ 는 전체영역에서 로봇이 체류할 확률분포이므로 좌우대칭 함수이다. 즉,  $f_X(l_1)$ 을  $l_1$ 영역에 로봇이 머무를 확률분포함수라고 한다면,  $f_X(l_1) = f_X(l_n)$ 이 성립하고 이에 따라 좌측에 해당하는 영역의 확률분포와 대칭되는 우측영역의 분포가 같고 다음식이 성립함을 의미한다.  $f_X(l_2) = f_X(l_{n-1}), \dots, f_X(l_i) = f_X(l_{n-i})$ 가 성립한다. 여기서  $n$ 이 짝수이면  $1 = n/2$ , 홀수이면  $i = (n-1)/2$ 이다. 만약, 특정 로봇이 특정 위치에 온다면 그 위치에서  $w$ 의 선적 혹은 하역의 시간을 보내게 된다. 모든 위치가 적어도  $k(vw/l)$ 의 확률을 최소한으로 가지게 된다.

이와 같은 가정과 결과들을 이용하여 각 지역에 머무를 확률분포함수를 유도하면 다음과 같다.  $l_1$ 이 운행의 시작점이나 목적지가 된다면, 그 위치에서  $w$ 시간만큼 체류할 것이다.

$$\begin{aligned} f_X(x=l_1) &= P(s=l_1) + P(d=l_1) - P(s=l_1)P(d=l_1) \\ &+ k(vw/l) = k(2/n - 1/n^2 + vw/l) \end{aligned}$$

이다.  $l_2$ 의 경우  $f_X(x=l_2)$ 는 두 개의 부분으로 나누어져 있고 다음과 같이 나타낼 수 있다.  $f_X(x=l_2) = f_X^1(x=l_2) + f_X^2(x=l_2)$ .  $f_X^1(x=l_2)$ 는  $l_2$ 가 운행의 출발지나 목적지가 되는 경우이고  $f_X^2(x=l_2)$ 는 스쳐지나가는 경우의 확률분포함수이다.  $l_2$ 이 출발지나 도착지가 되는 경우를 고려해 보자. 이 경우에는 확률분포함수는  $l_1$ 의 경우와 같고,  $f_X^1(x=l_2) = k(2/n - 1/n^2 + vw/l)$ 로 표현할 수 있다. 여기에  $l_2$ 에 스쳐지나가는 경우는  $l_2$ 보다 왼쪽의 통로를  $s$ , 오른쪽의 부분통로를  $d$ 라고 한다면 다음 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} f_X^2(x=l_2) &= P(s < l_2) \cap P(d > l_2) \\ &= (l_2 - L^{\min})(L^{\max} - l_2) \end{aligned}$$

위에서 유도한  $f_X^1(x=l_2)$ 의 경우의 확률과 합한다면 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$f_X(x=l_2) = k(2/n - 1/n^2 + vw/l) - (l_2 - L^{\min})(l_2 - L^{\max})$$

이 식을  $x \in \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ 에 대해서 일반화 시킨다면 다음과 같이 정리된다.

$$f_X(x) = k\{-(x - L^{\min})(x - L^{\max}) + 2/n - 1/n^2 + vw/l\}$$

아주 작은 통로 간 이동시간  $\pi$ 과 부분통로를 아주 작게 생각하여 큰  $n$ 값을 적용하여 이산형을 연속형 모델로 유도할 수 있고, 다음과 같은 결과를 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} f(x) &= f_X(x) \\ &= k\{-(x - L^{\min})(x - L^{\max}) + 2/n - 1/n^2 + vw/l\} \\ &= k\{-(x - L^{\min})(x - L^{\max}) + vw/l\} \end{aligned}$$

각각의 로봇  $a$ 와  $b$ 에 대해서는 다음과 같이 각각의 영역에 대해서 간단하게 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} f^a(x) &= -k[(x - L_a^{\min})(x - L_a^{\max}) - vw/L_a^{\max}] \\ f^b(x) &= -k[(x - L_b^{\min})(x - L_b^{\max}) - vw/(l - L_b^{\min})] \end{aligned}$$

이 식들을 이용하여 듀얼로봇 스토커시스템에서 운행합현상의 기대시간을 구할 수 있다. 막힘율은 로봇  $a$ 나  $b$ 의 경우 동일하기 때문에 로봇  $a$ 의 경우만 고려한다. 즉 겹치는 부분의 반의 면적에 해당한다.

$$\begin{aligned} \epsilon &= \int_{L_b^{\min} + L_a^{\max}}^{L_a^{\max}} -k[(x - L_a^{\min})(x - L_a^{\max}) - vw/l] dx \\ &= -\frac{k}{3} \left[ L_a^{\max^3} - \frac{1}{8} (L_b^{\min} + L_a^{\max})^3 \right] \\ &\quad + \frac{1}{2} k (L_a^{\min} + L_b^{\max}) \left[ L_a^{\max^2} - \frac{1}{4} (L_b^{\min} + L_a^{\max})^2 \right] \\ &\quad + \frac{1}{2} k (-L_a^{\min} L_a^{\max} + vw/l) (L_a^{\max} - L_b^{\min}) \end{aligned}$$

이제 반송율을 계산하기 위해 위에서 사용된 예제의 수치를 이용한다면 다음과 같다.

$$f^a(x) = -k[x(x-50) - 1/5]$$

여기서  $k$ 를 계산하기 위해서 확률밀도함수의 전체의 적분값은 1이 된다는 점을 이용한다.

$$\begin{aligned} \int_0^{50} f^a(x) dx &= 1, \text{ 즉,} \\ -k \int_0^{50} [x(x-50) - 1/5] dx &= (62530/3)K = 1 \\ k &= 0.00004797 \end{aligned}$$

이렇게  $k$ 값을 구할 수 있다. 이  $k$ 값을 이용하여

$$\begin{aligned} f^a(x) &= -0.00004797[x(x-50) - 1/5] \\ \epsilon &= \int_{30}^{50} -0.00004797[x(x-50) - 1/5] dx = 0.3520 \end{aligned}$$

을 구할 수 있다. 위에서 구한  $\delta$ 값과 식 (3)을 이용하면 다음과 같은 듀얼로봇 스토커시스템에서의 반송율을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda^d(v, w, L_a^{\min}, L_a^{\max}, L_b^{\min}, L_b^{\max}) &= \lambda^d(20, 0.5 : 0, 50, 10, 60) \\ &= \left( \frac{3(20)(1-0.3520)}{(50+3(20)(0.5)(1+0.0556)} \right) \\ &= 0.4761 \text{trip/min} = 28.57 \text{trip/hr} \end{aligned}$$

이다. 이 값과 단일로봇 시스템에서의 반송율인  $\lambda^s(l, v, w) = 20 \text{trip/hr}$ 과 비교하면 현 예제의 경우 듀얼로봇 스토커시스템이 반송율 측면에서 단일로봇 스토커시스템보다 훨씬 우월한 것을 쉽게 알 수 있다.

#### <표 1> 반송율 결과비교

(총길이 60m, 로봇속도 20m/분, 선적하역시간 0.5분)

	반송율
단일로봇 시스템	20trip/hr
듀얼로봇 시스템	28.57trip/hr

## 4. 결 론

본 연구에서는 듀얼로봇 스토커시스템에서 반송율을 계산하는 모델을 제시하였다. 이 모델을 이용하여 산업현장에서는 다양한 디자인 모수를 이용하여 성과 수준을 해석할 수 있다. 또한 이를 이용해서 최적의 성과를 내는 모수를 찾아내어 모델을 최적화 할 수 있다. 앞으로 많은 현장에서 사용할 수 있는 듀얼로봇 스토커시스템의 다양한 모델을 비교하기 위해서 본 연구에서 개발한 성과척도는 다양한 연구의 시발점이 된다고 할 수 있다.

하지만 본 연구는 또한 다음과 같은 한계를 가지고 있다. 우선, 반송요구 위치 및 반송목적지가 일차원 공간에서 균등분포로 발생한다는 가정을 하였다. 또한 두 로봇의 움직임의 가장 기초적인 톨을 기본으로 움직인다는 가정을 하였다. 이러한 두 가지의 가정은 실제 LCD 제조 현장과는 다소 차이가 있을 수 있다. 이러한 부분의 고찰이 본 연구에서는 부족하다.

본 연구에서 제안하는 모델을 이용하여 듀얼로봇의 운영규칙, 듀얼로봇 스토커시스템의 구조설계 등을 할 수 있다. 이러한 부분은 향후에 아주 훌륭한 연구가 될 수 있다. 특히 특정로봇이 공용지역을 사용하고 있을 때 다른 로봇이 이 공용지역을 사용해야 하는 경우 기다릴 수밖에 없는데, 다양한 룰을 적용하여 성과를 비교해보는 연구가 있을 수 있고, 얼마나 공용지역의 길이를 가져가야 하는지(C의 길이가 어느 정도일 때 어느 로봇이 유리한지), 공용지역과 전체길이와의 관계 및 전체 길이가 얼마나 될 때 듀얼로봇 시스템이 단일로봇 시스템보다 더욱 나은 성과를 내는지, 어느 조건에서 단일로봇을 써야하고 듀얼로봇을 써야 하는지 등에 대한 연구를 향후 연구로 생각해 볼 수 있다.

### 참고문헌

- [1] Agrawal, G. K. and Heragu, S. S.; "A survey of automated material handling systems in 300-mm semiconductor fabs," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 19(1) : 112-120, 2006.
- [2] Bozer, Y. A. and White, J. A.; "Travel-time models for automated storage/retrieval systems," *IIE Transactions*, 16(1) : 38-46, 1984.
- [3] Banks, J.; "Introduction to simulation," *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, 7-13, 1999.
- [4] Jang, Y. J. and Choi, G. H.; "Introduction to automated material handling systems in LCD panel production lines," *IEEE International Conference on CASE '06*, 223-229, 2006.
- [5] Jang, Y. J., Choi, G. H., and Kim, S. I.; "Modeling and analysis of stocker system in semiconductor and LCD fab," *Proceedings on IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, 273-276, 2005.
- [6] Jang, J., Suh, J., and Ferreira, P. M.; "An AGV routing policy reflecting the current and future state of semiconductor and LCD production lines," *International Journal of Production Research*, 39(17) : 3901-3921, 2001.
- [7] Johnson, R. V.; "Finding building shapes that minimize mean trip times," *Computer Aided Design*, 24(2) : 105-113, 1992.
- [8] Kouvelis, P. and Papanicolaou, V.; "Expected travel time and optimal boundary formulas for a two-class-based automated storage/retrieval system," *International Journal of Production Research*, 33(10) : 2889-2905, 1995.
- [10] Lee, Y. H., Lee, M. H., and Hur, S.; "Optimal design of rack structure with modular cell in AS/RS," *International Journal of Production Economics*, 98(2) : 172-178, 2005.
- [11] 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*, 17(7) : 648-663, 2006.