

# 물류창고에서 bucket brigade 기반의 주문인출방식에 대한 수행도 분석

구평희  
부경대학교 시스템경영공학과

## Performance evaluation of bucket-brigade order picking in warehouses

Pyung Hoi Koo  
Dept. of Systems Management and Engineering, Pukyong National University

### Abstract

Order picking is the process of retrieving a number of items out of warehouse storage to meet a number of independent customer orders. Today, as the transactions through electronic commerce and home shopping increase, a large amount of small orders should be picked within tight time windows. Therefore, fast and efficient order picking is important in today's logistics environment. This paper examines a new order picking method, bucket brigade (BB) order picking. Bucket brigade is a way of coordinating workers who progressively perform a set of operations for an order along a warehouse flow line. Each worker in the line follows a simple rule: Perform operations on an order until the next worker downstream takes it over; then go back to the previous worker upstream to take over a new order. In this way, the line balances itself. We investigate through simulation experiments the performance of the BB picking strategy under various logistics environment.

**Keywords:** Order picking, bucket brigades, zone picking, dynamic assignment, warehousing.

### 1. 서론

최근 전자상거래, 홈쇼핑에 의한 거래가 일반화됨으로 인하여 주문은 빈번히 발생하고 주문당 주문량은 감소하는 것이 일반적인 추세이다. 또한, 신속대응(Quick Response), 적시생산(Just In Time) 등의 공급망(Supply Chain) 운영 전략이 보편화되고 있는 환경에서 빠르고 효율적인 주문 처리는 중요한 경쟁력의 요소가 되고 있다. 이러한 물류환경에서, 물류 창고는 기존의 보관기능 중심에서 고객의 주문 처리를 위한 중간단계로 인식되고 있다. 일반적으로 물류창고의 기능은 입고, 저장, 오더피킹, 출고로 구분할 수 있다. 그 중 오더피킹은 고객의 주문이 발생하면 해당 주문에 포함된 제품을 창고에서 인출하여 주문을 만족시키는 작업을 말한다. 대부분의 창고에서 오더피킹 작업은 노동 집약적이어서 가장

많은 공수가 필요하고 고비용이 수반되는 기능이다. Tomkins *et al*(2003)에 따르면 오더피킹과 관련된 비용은 물류창고 총 운영비용의 약 55%를 차지한다. 따라서, 물류 창고의 경쟁력을 갖추기 위해서는 효율적인 오더피킹 작업이 요구된다.

오더피킹시스템에서의 설계 및 운영상의 문제와 이에 대한 기존의 연구는 De Koster *et al* (2006)에 의해 심도 있게 조사되었다. 오더피킹의 효율성은 창고 배치 형태, 제품저장 전략, 피킹전략, 피킹경로, 주문처리 방법 등 여러 가지 요인에 의해서 영향 받는다. 이 중 피킹 전략은 주문을 어떠한 방법으로 인출할 것인가 하는 결정과 연관이 있다. 하나의 고객 주문서에는 인출해야 할 여러 개의 물품이 포함된다. 오더피킹은 인출 작업자가 주문상에 있는 물품을 어떻게 인출하는가에 따라 picker-to-part 방식과 part-to-picker 방

식으로 구분된다. Picker-to-part 방식에서는 작업자가 창고의 통로를 이동하면서 주문된 물품을 인출하고, part-to-picker 방식에서는 작업자가 창고의 한 장소에 위치해 있고 제품이 작업자에게 이동되어 작업자가 제품을 인출하는 방식이다. Part-to-picker 방식의 예로서는 통로끝(end-of-aisle) 자동창고(AS/RS)와 캐로셀(carousel) 등이 있다.

일반적으로 산업체에서 채택되고 있는 방식은 picker-to-part 방식이다. Picker-to-part 방식은 작업자가 담당하는 작업영역에 따라 오더별피킹(picking by order) 방식과 존피킹(zone picking) 방식으로 구분된다. 오더별피킹은 한 작업자가 하나의 주문에 있는 모든 물품을 인출하는 방법이다. 이 방식은 각 주문을 한 작업자가 책임지므로 물품 인출시의 오류를 줄일 수 있고 추가적인 관리를 최소화 하는 장점이 있다. 이 방식에서는 작업자의 이동 시간을 줄이기 위하여 최단거리 경로계획을 수립하는 것이 중요한 의사결정 내용이다. 오더피킹 경로에 대한 문제는 창고의 형태에 따라 최적화 모형(Ratliff and Rosenthal, 1983; Vaughan and Petersen, 1999)과 휴리스틱(Peterson, 1997, Roodbergen and De Koster, 2001) 접근법의 측면에서 연구가 이루어져 왔다.

존피킹 방식은 창고를 일정한 구역으로 나누고 각 구역을 한 작업자에게 할당하는 방식이다. <Figure 1 참조> 각 구역의 작업자는 담당구역의 시작지점에 놓여있는 박스로부터 담당구역에서 인출해야 할 물품을 확인하고 차례대로 창고 랙(rack)으로부터 물품을 인출하여 박스에 넣는다. 여기서 박스는 특정 오더 또는 오더를 모은 batch에 포함된 물품을 담는 역할을 한다. 담당구역에서 처리해야 할 해당 오더의 물품을 모두 인출하여 박스에 넣은 후에 박스를 다음 구역의 시작지점에 놓고 다시 담당구역의 시작지점으로 돌아와 다음 오더를 처리한다. 이때, 만일 구역의 시작 지점에 대기하고 있는 박스(오더)가 없으면 작업자는 다음 박스(오더)가 도착할 때까지 유휴상태로 된다. 마지막 작업자는 모든 물품을 박스에 넣은 후에 다음 작업(예: 분류, 포장, 선적 등)을 위해 박스를 다음 작업장으로 향하는 컨베이어 위에 올려놓는다. 존피킹 방식은 창고에 보관된 물품의 종류가 많은 경우, 오더의 수가 많은 경우, 주문 당 인출할 물

품이 많지 않은 경우에 가장 효과적인 인출 방법으로 알려져 있다.



Figure 1. A zone picking system

존피킹 방식에서 작업자의 효율을 극대화하고 주문의 처리량을 늘리기 위해서는 각 구역에서의 작업량을 평균화 하는 것이 중요하다. 생산시스템의 조립라인에서 line balancing에 의하여 각 조립작업자에게 작업량을 균등하게 배분하는 것과 유사하다. 균등한 작업배분이 이루어지지 않으면 어떤 구역은 바쁘게 작업하는데 다른 구역에서는 일감이 없어 작업자가 유휴상태로 되는 경우가 발생한다. 이는 곧 시스템 효율에 악영향을 미치고 결과적으로는 오더 처리량을 감소시키고 주문 처리시간을 증가시키는 요인이 된다. 존피킹에서의 작업량 균형과 관련하여, Jane(2000)은 주문량이 변화할 때 구역의 수를 조정하고, 각 구역의 부하량을 균등화 시키는 알고리즘을 제시하였다. Jane and Lai(2005)는 각 구역의 부하량을 균등하게 하기 위하여 오더간의 주문 물품 유사성을 나타내는 유사계수(similarity coefficient)를 기반으로 하여 물품을 구역에 할당시키는 알고리즘을 제시하였다. Le-Duc and De Koster(2005)는 혼합정수 계획법을 이용하여 최적의 구역 수를 결정하는 모델을 제안하였다. 기존의 구역할당 방식은 일반적으로 장기적인(예: 1년) 과거 실적자료나 수요예측을 기반으로 각 구역의 부하율이 균등화 되도록 물품을 구역에 할당한다. 그러나, 실제 창고의 운영 시에는 오더의 내용이 시시각각으로 변화하므로, 장기적으로는 균등한 부하가 가능할 지라도 일상 관리적인 측면에서 각 구역의 작업량은 시간에 따라 변한다. 또한 각 작업자는 개인의 능력에 따라 작업속도가 상이하므로 표준시간에 의해 각 구역의 부하가 균등화 되더라도, 실제 작업에서는 느린 작업자의 작업속도에 의하여 전체 오더 처리량이 결정된다. 기존의 존피킹 방식은 이러한 시간적인 운영상의 문제를 해결하기에는 한계가 있다.

본 논문에서는 위에서 설명한 기존의 존 피킹 방식에서의 운영상 문제점을 해소하기 위해 bucket brigade를 활용한 새로운 피킹 방식을 다룬다. 다음 2절에서는 bucket brigade의 개념과 이를 기반으로 하는 오더 피킹 방식을 설명한다. 3절에서는 여러 물류 환경에서 bucket brigade와 존 피킹 방식의 생산성에 대하여 비교 분석하고, 4절에서는 결론과 향후 연구 방향에 대하여 논한다.

## 2. Bucket Brigade 피킹 방식

Bucket Brigade 피킹 방식은 담당하는 구역의 범위를 물류환경에 따라 동적으로 변화하여 생산성과 유연성을 동시에 얻으려는 방법이다. Bucket Brigade(BB)는 <그림 2>에서 보는 바와 같이 개미가 먹이를 운반할 때 서로 협력하는 행동을 모방하고 있다. (Anderson *et al.* 2002).

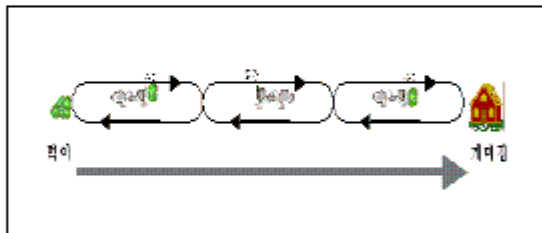


Figure 2. A bucket brigade in ants

개미가 먹이를 집으로 운반할 때 강한 개미는 개미집 부근에서 먹이를 나르고, 약한 개미는 먹이가 있는 곳에서 먹이를 나른다. 개미집에서 가장 가까운 곳에서 일을 하는 강한 개미는 먹이를 운반해 온 개미로부터 먹이를 넘겨받아 개미집으로 운반하여 보관한 후 다시 다음에 운반되는 먹이를 넘겨받기 위해 먹이가 운반되는 쪽으로 이동한다. 먹이를 처음 운반하는 작은 개미는 먹이를 물고 운반하기 시작한 후 이전 운반 작업을 마치고 돌아온 큰 개미를 만나면 먹이를 넘겨주고 다음 먹이 운반을 위하여 다시 먹이 있는 곳으로 간다. 중간에 있는 개미는, 먹이 있는 쪽의 개미로부터 먹이를 인도 받아 개미집 방향으로 운반하다 운반 중에 다음 개미를 만나면 먹이를 넘겨주고, 새로운 먹이를 넘겨받기 위하여 먹이가 있는 방향으로 다시 이동한다. 모든 개미는 다음의 간단한

로직을 따라 일을 한다: "먹이 장소로 이동한다. 이동 중에 먹이를 나르는 개미를 만나면 먹이를 인도받아 개미집 쪽으로 향한다. 먹이를 넘겨 받음 다음 개미를 만나면 먹이를 인계한다." 이러한 로직을 오더피킹에 적용한 것이 BB기반의 오더피킹 방식이다. (이후부터는 BB피킹 방식이라 한다.) 피킹 작업자는 개미가 먹이를 운반할 때와 같이 아래의 간단한 로직을 따른다.

- (1) 오더(박스)를 선행 작업자에게 넘겨받아 순서에 따라 물품을 인출하여 박스에 넣는다.
- (2) 후행 작업자가 작업을 마치고 돌아오면 현 오더(박스)를 넘겨주고 선행 작업자에게 다음 오더(박스)를 넘겨받아 피킹 작업을 수행한다

첫 번째 작업자는 선행 작업자가 없으므로 인출 목록이 명시된 오더를 받아 인출 물품별 창고저장 위치에 따라 물품을 인출하기 시작하고, 최종 작업자는 모든 피킹작업이 완료되면 완료된 오더를 다음 처리장(예: 선적장, 분류장 등)으로 보낸다. 이와 같이 인출 작업을 수행하면 각 조립 작업장 사이의 중간재고 (WIP: Work In Process)가 없어진다. 각 작업자는 일정하게 할당된 작업만을 수행하는 것이 아니고 상황에 따라 오더마다 작업내용과 작업량이 변한다.

BB를 가장 유용하게 활용하기 위해서는 몇 가지 조건을 필요로 한다. 이러한 조건은 절대적인 것은 아니지만 BB의 효과를 최대화하기 위해 필요하다. 우선 기본적인 BB는 다음의 세 가지 조건을 기반으로 한다. (Bartholdi *et al.* 2001).

- 조건 1. 최소의 walk-back시간. 선행 작업자로부터 작업을 넘겨받기 위해 걷는 시간은 물품을 처리하는 총 시간보다 무시할 수 있을 정도로 작다.
- 조건 2. 작업속도에 의한 작업자 순서화. 각 작업자는 작업속도가 다르고, 작업라인에는 가장 느린 작업자에서부터 빠른 작업자 순서로 배치된다.
- 조건 3. 작업시간의 연속성 및 확정성. 각 작업의 작업시간은 확정적으로 주어지고, 모든 작업은 생산라인에 연속적으로 분포되어 있다. 조립하는 모든 조립 공정의 작업시간은 [0,1]로 normalize 될 수 있다.

Bartholdi *et al.*(2001)는 BB로 하여금 최대의 생산량을 달성할 수 있도록 하는 위와 같은 이상적인 조건을 BB 표준모델이라 하였다. 이러한 BB 표준모델에서는 중앙의 통제 없이 자연스럽게 작업자의 능력에 맞도록 작업이 할당된다. 여기서,  $x_i$ 는 작업자  $i$ 가 라인  $[0,1]$  상에서 작업을 종료하는 위치라 하고,  $v_i$ 는 작업자  $i$ 의 작업 속도라 하면, 작업자가 처음 작업을 시작하는 장소와는 상관없이 작업자  $i$ 는 결국 다음의 수렴하는 작업시간 간격에서 작업을 하게 된다(Bartholdi and Eisenstein, 1996).

$$\left[ \sum_{j=1}^{i-1} v_j / \sum_{j=1}^n v_j, \sum_{j=1}^i v_j / \sum_{j=1}^n v_j \right] \quad (1)$$

<Figure 3>은 작업 속도가 각기 다른 (각각 0.5, 1.0, 1.5) 3명의 작업자가 조립 라인에서 BB를 적용하여 조립작업을 수행하는 경우의 각 작업자가 작업을 인계인수하는 위치를 시뮬레이션으로 보여주고 있다. 그림에서 아래 부분의 점은 해당 시간에 첫 번째 작업자가 두 번째 작업자에게 작업을 넘겨준 시간이고, 위쪽의 점은 두 번째 작업자와 세 번째 작업자의 작업 교환 시간을 나타낸다. 그림에서 보듯이 BB를 적용하면 시간이 진행됨에 따라 각 작업자의 작업량이 수렴한다. 작업자 3은 가장 속도가 빠르므로 가장 많은 작업을 수행하고, 반대로 작업자 1은 가장 느린 작업자로서 적은 작업을 수행하게 된다. 식(1)에서도 각 작업자가  $[0,0.17]$ ,  $[0.17,0.5]$ ,  $[0.5,1]$  간격의 작업을 수행함을 알 수 있다.

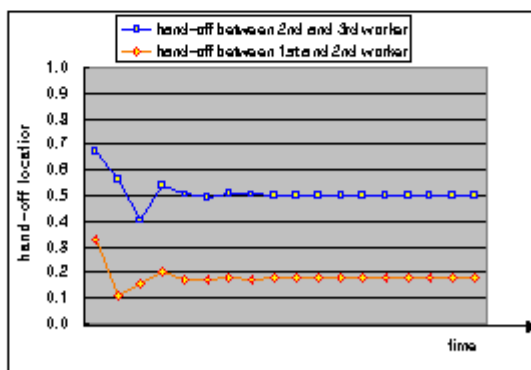


Figure 3. A time phased view of bucket brigades with three workers.

BB표준 모델에서의 단위시간당 생산량은  $\sum_{i=1}^n v_i$  으로 수렴하게 된다(Bartholdi *et al.*, 2001). 위의 예에서 단위 시간당 생산량은  $3.0(=0.5+1.0+1.5)$ 이다. 세 작업자의 작업속도가 모두 1.0인 경우에도 시간당 생산량이 3.0이므로, BB표준 모델의 경우에 작업자의 작업속도 차이에 의한 손실이 없음을 알 수 있다. BB기반 작업할당 방법의 특징을 요약하면 아래와 같다.

- Pull시스템: 후공정의 작업자가 선행공정의 작업자에게 작업을 인계 받는 형식이다. 이러한 pull 형태는 WIP를 최소화 한다.
- 분산제어형: 시스템의 운영이 중앙 통제 없이 자율적으로 간단한 규칙에 의하여 이루어진다.
- 적응형: 작업자의 작업속도와 시스템 환경변화에 따라 작업자의 작업량이 유연하게 조정된다.
- 자율적 균형: 작업자를 속도별로 배치한다면 자율적으로 작업량이 균등 배분된다.
- 최대생산: 각 작업자 능력을 최대한 활용함으로써 최대의 산출량을 달성할 수 있다.

BB에 대한 연구는 비교적 최근에 시작되었다. Bartholdi and Eisenstein(1966)은 BB의 개념을 최초로 소개하고 BB 적용시의 시스템 상태를 수리적으로 분석한 표준모형을 제시하였다. 최근에는 BB 표준모형의 전제조건이 만족되지 않은 경우에 대한 연구가 주로 발표되고 있다. 즉, 작업시간이 확률적인 경우(Bartholdi *et al.*, 2001), Walk-back 시간이 존재하는 경우(Bartholdi and Eisenstein 2005, Bartholdi *et al.* 2007), 인계시간이 존재하는 경우(Bartholdi & Eisenstein 2005), 느린 작업속도로부터 빠른 작업속도의 작업자 순서대로 위치하지 않은 경우 (Hirotsani *et al.*, 2006), 작업 순서가 정해지지 않은 비선형인 경우(Bartholdi *et al.*, 2006) 등 여러 가능한 상황에서 BB 시스템을 분석하는 연구가 수행되었다. Munoz and Villaloboz (2002)는 작업자의 이직이 자주 발생하는 상황에서 이직률이 조립라인의 생산성에 어떤 영향을 미치고, 이때 BB를 포함하여 어떤 조립방식을 택하는 것이 좋은가 하는 연

구를 수행하였다. Buzacott (2002)는 생산 시스템에서의 두 가지 변동, 즉 작업자 간의 작업속도 차이와 확률적 작업시간의 조건 하에서 기존의 고정된 방법과 BB로 대표되는 동적인 방법을 비교분석하였다. Bratcu and Dolgui (2005)는 BB를 기반으로 하는 이론적 연구와 적용 현황을 심도 있게 조사한 논문을 발표했다.

오더피킹에서 BB를 적용한 시스템에 대한 연구는 높이 기대되는 활용성에도 불구하고 찾아보기 어렵다. Bartholdi *et al.* (2001)는 오더피킹 작업에서 각 오더는 서로 다른 주문 내용을 포함하고 있으므로 각 station의 작업시간이 확률적으로 변하는 것으로 가정하고 BB 오더피킹 시스템을 모델링 하고 분석하였다. 그러나 실제 주문인출 작업에서 하나의 인출 물품을 하나의 station으로 본다면 인출 시간이 확률적이라기보다는 0-1, 즉 주문에 해당 물품이 포함(1)하거나 포함하지 않는 경우(0)로 구분할 수 있고, 인출 물품에 포함된 경우에만 작업시간이 발생한다고 볼 수 있다. 이와 같은 특성을 포함하여 오더피킹에서의 BB는 일반적인 BB의 표준모형과는 다른 다음과 같은 특징이 있다.

- (1) 각 주문별로 인출해야 할 물품이 서로 다르다. 따라서 각 주문에 대해 인출하는 시간도 다르므로 주문에 대하여 작업시간을 normalize하여 [0,1]로 정의할 수 없다(표준모형 조건(3) 위배) 일반적으로 대부분 bucket brigade 분석이 총 작업시간을 normalize하여 작업자의 위치를 기반으로 수행되나 이러한 분석방법을 오더피킹에 적용하는 것은 비현실적이다.
- (2) 작업자의 작업시간이 동일하더라도 blocking이 발생할 수 있다. BB모형에서 blocking은 작업자의 작업속도 차이나 작업시간의 확률적인 변동에 의해 발생하는 것으로 간주되었다. (Bartholdi *et al.* 2001) 오더피킹 작업에서는 각 주문마다 인출부품의 위치가 다르므로 작업시간이 동일하더라도 선행 작업자의 다음 인출 물품의 위치가 후행작업자의 현 위치보다 뒤에 있을 때 blocking이 발생한다.
- (3) 오더를 다음 작업자에게 넘기는 hand-off이 즉각적으로 이루어 지지 않는 경우가 보통이다. 즉 후행작업자가 선행작업자에게 주문을 넘겨받을 수 있는

상황에서 선행작업자가 현재 물품을 인출 중이라면 해당 작업을 완료할 때까지 후행작업자는 대기해야 한다. 만일 오더당 인출해야 할 물품이 많고 작업자가 적으면 hand-off시간은 전체 인출시간에 비해 적으므로 무시될 수 있지만 오더피킹 작업에서 오더당 인출 물품이 적은 경우에는 무시하지 못할 hand-off시간이 존재한다.

- (4) 각 물품마다 인출해야 할 물품이 다르고 또한 각 물품마다 저장위치가 다르므로 BB를 적용한 오더피킹은 작업량의 측면과 공간적인 측면 모두에서 수렴하지 않는다.
- (5) 일반 BB 피킹에서는 모든 station에 작업이 존재한다고 가정하였다. 그러나 실제로 각 위치에는 인출작업물이 없는 경우도 발생한다.

이러한 오더피킹에서의 특징은 BB를 적용할 때 해결해야 할 문제이다. 특히 blocking 현상은 BB피킹의 생산성을 저해하는 주된 요인이다. Blocking은 다음 작업을 위해 이동해야 할 때 선행작업자가 방해하여 작업을 진행하지 못하는 경우에 발생한다. <Figure 4>는 blocking의 예를 보여 주고 있다. 현재 작업자 1은 order #1의 a1를 인출하는 중이라고 하자. 이때 order #2를 처리하는 작업자 2가 b1의 인출을 마치고 b2를 인출하려 이동할 때 작업자 1이 a1의 위치에서 작업 중이므로 blocking 현상이 발생하여 작업자 2는 더 이상 작업을 진행하지 못한다. Blocking은 작업자 1이 a1과 a2를 모두 처리한 후 a3로 이동되고 나서야 해결된다.

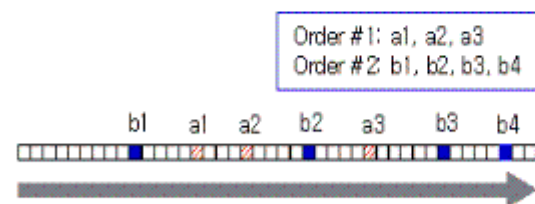


Figure 4. Blocking in a BB picking system

본 논문에서는 BB피킹을 적용하는 경우의 수행도에 대해서 시뮬레이션을 통하여 분석한다. 특히 BB피킹에서 작업장의 혼잡과 작업자의 혼란을 줄이기 위하여 작업자의 작업영역을 일정한

구역으로 제한하는 경우, 구역 사이에 버퍼가 제한적인 경우, 작업자의 작업속도가 차이 나는 경우에 대하여 BB피킹의 수행도를 분석한다.

### 3. 시뮬레이션 실험 분석

앞에서 언급한 BB 표준모형의 3가지 가정은 BB를 가장 효율적으로 적용할 수 있는 환경이다. 그러나 현실에서는 이러한 가정과는 다른 물류환경이 일반적이다. 본 절에서는 BB 표준모형의 3가지 가정 중에서 무시할 수 있는 walk-back 시간만을 유지하고, 나머지 2가지(속도차이 및 연속작업) 조건은 완화한 상태에서 BB피킹의 수행도를 분석한다. Walk-back 시간에 대한 가정은 존피킹과 BB피킹 두 경우 모두 walk-back 시간이 (일반적으로 동일하게) 필요하므로 표준모형의 가정을 그대로 유지하였다. 반면에 작업자의 작업속도는 차이가 미미한 경우도 있고, 특히 오더피킹에서는 일반적으로 현재 인출하고 있는 작업이 있는 경우는 현 작업을 끝내고 다음 작업자에게 주문을 넘겨주는 것이 일반적이므로 연속작업의 가정은 현실에 모순되므로 불연속(discrete) 작업을 가정하였다.

BB피킹의 효율성을 검증하기 위하여 존피킹 방식을 채택하고 있는 산업체 데이터(Jane 2000)를 약간 수정한 참고 시스템을 가지고 분석을 실시하였다. 대상 창고는 직접 판매방식을 채택하고 있는 기업의 화장품과 일상용품을 저장하고 있다. 제품의 종류는 150 가지이고 현재 3 구역으로 나누어 존피킹에 의해 주문을 대응하고 있다. 하루에 약 800개의 주문이 발생하고, 각 주문에는 6 ~ 12 종류의 물품이 포함된다. 즉, 평균 9 가지의 제품이 하나의 주문에 포함된다.

시뮬레이션 실험으로 존피킹과 BB피킹의 생산성을 비교하기 위하여 하루에 800개의 주문을 처리해야 하는 5개의 시나리오를 생성하였다. 각 주문에 포함된 제품의 수를 생성하기 위하여 랜덤수  $r$  ( $6 \leq r \leq 12$ )을 생성하고, 모든 제품이 동일한 확률로  $r$  개의 제품을 생성하여 주문을 구성하였다. 분석의 편의성을 위하여 존피킹에 대해서, 제품 1에서 50번까지는 구역 1에 배정하고, 51에서 100까지는 구역 2에, 그리고 제품 101에서 150까지는 구역 3에 배정하였다. 각 작업자는 하나의 구역만을 담

당하여 각 주문에서 해당 구역에 저장되어 있는 제품만을 인출하여 주문에 대응한다. 이렇게 하면, 모든 제품이 동일한 확률로 주문된다고 가정하였으므로 장기적으로는 각 구역의 부하율이 평균화 된다. 각 구역 사이에 다음 작업을 위해 대기하고 있는 주문의 수는 제한이 없다고 가정한다. 작업자가 하나의 제품을 인출하는데 소요되는 시간은 평균 10초 표준편차 1초의 정규분포를 따른다. 각 주문에는 6 ~ 12개의 인출해야 할 제품이 있으므로 하나의 주문을 처리하기 위해서는 총 60 ~ 120초의 인출시간이 소요된다. 작업자는 하나의 주문을 인출하기 시작하면 해당 구역에서 인출해야 할 제품을 모두 처리하고 다음 구역으로 옮겨준 후 다음 주문을 처리할 수 있다. BB피킹에서는 작업자는 일정한 구역에 할당되지 않는다. 표준 BB 모델과는 다르게, 각 작업자는 동일한 작업속도를 가지고 있다고 가정한다. (작업자의 속도가 차이 나는 경우도 후반부에서 분석한다.)

이상의 주문처리 상황에서 손실시간 없이 모든 제품이 연속적으로 인출되어 처리된다면 하루 주문의 모든 작업은 아래의 계산과 같이 401분이면 완료된다.

|                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1일 처리 주문 수: 800<br>주문당 평균 인출 제품: 9개<br>주문당 한 작업자의 평균 인출개수: 3개<br>제품 1단위 인출 평균시간: 10초<br>주문당 한 작업자의 평균 인출시간: 30초 (0.5분)<br>작업자가 하루 주문을 모두 인출하는데 소요되는 평균 시간: 400분<br>마지막 주문을 처리하는 추가시간: 1분 (후위 2개의 구역에서 소요되는 시간)<br>모든 주문을 완료하기위한 평균소요시간 (makespan): 400분 + 1분 = 401분 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

<Table 1>은 위와 같은 기본적인 상황에서 BB피킹을 적용했을 때와 존피킹을 적용했을 때의 makespan과 리드타임을 보여주고 있다. 리드타임이란 하나의 주문에 대하여 첫작업자가 인출작업을 시작한 시점으로부터 마지막 작업자가 해당 주문의 인출작업을 모두 완료한 시점까지의 시간을 의미한다. Makespan은 계획기간(예 1일) 동안의 모든 주문을 처리하는데 소요되는 시간을 의미하며, 처리해야 할 오더의 양이 주어진 경우 시간당 생산량을 대신해서 자주 사용되는 평가 지표이다. 일반적으로 산



업현장의 상황과 유사하도록 하기 위하여 시뮬레이션 인출 작업은 Transient 상황을 가정하였다. 즉, 첫 번째 작업자가 첫 번째 주문의 인출작업을 시작하는 것으로부터 시뮬레이션이 시작되고, 하루치 주문의 모든 작업이 완료되면 시뮬레이션은 종료된다.

Table 1. Comparison of BB picking and zone picking

|                 | BB picking | Zone picking |
|-----------------|------------|--------------|
| Makespan(min.)  | 568.9      | 444.3        |
| Lead time(min.) | 1.92       | 29.71        |

실험 결과 makespan에 있어서는 존 피킹이 우수한 결과를 보여주고, lead time은 BB 피킹이 우수한 결과를 보인다. 존피킹에서는 모든 주문을 처리하는데 이상적인(401분) 상황보다 10% 증가한 444.3분이 소요되었다. 이는 작업자가 담당하는 구역에서 인출해야 할 제품의 수가 주문마다 차이가 나므로 후위작업자가 작업을 마치고 다음 주문을 처리하기 위해 준비되었으나, 선행 작업자가 아직 주문을 처리하고 있어 대기하고 있는 시간에 의한 손실에 기인한다(starvation 대기). BB피킹의 경우에는 581.6분이 소요되어 이상적인 상황보다는 42% 증가하였는데, 이는 후위 작업자가 다음 작업을 위해 준비 중인 상태에서 선행작업자가 현재 인출하고 있는 제품의 인출이 완료될 때까지 대기하고 있어야 하기 때문에 발생하는 대기시간과(hand-off 대기), 선행작업자가 다음 제품을 인출하려고 할 때 후위 작업자가 대상 제품보다 앞쪽에 있는 제품을 인출하는 경우 선행작업자가 진행하지 못하고 막히는 경우(blocking 중단)에 발생하는 작업자의 시간손실에 기인한다.

반면에 리드타임에 대해서는 존피킹은 29.71인데 반하여 BB피킹은 1.92으로, 두 방식이 많은 차이를 보이고 있다. 이상적인 상황이라면 하나의 주문을 처리하는 데는 9개의 제품을 인출해야 하므로 1.5분이 소요될 것이다. BB피킹에서의 리드타임 손실은 앞에서 설명한 blocking 중단에 기인한다. (hand-off대기는 리드타임에 영향을 주지 않는다.) 존피킹은 BB피킹보다 상당히 장기간의 리드타임이

소요된다. 이는 존피킹에서는 주문마다 각 구역에서의 처리물량이 변동하므로 단기적으로 각 구역에서의 부하량이 다르고, 따라서 결과적으로 각 구역 사이의 버퍼에 많은 물량의 재공품재고(WIP: work-in-process)가 쌓이게 되기 때문이다. Little의 법칙( $L=\lambda W$ )에 의하여 WIP 재고가 많으면 리드타임은 길어진다. BB 피킹에서는 그 운영 특성 때문에 WIP가 항상 3개 이하로 유지되지만, 존피킹에서는 시간에 따라 WIP가 변동한다. <Figure 5>는 존피킹을 적용하는 경우 하루 동안 시간이 경과함에 따라 WIP가 크게 변동함을 보여주고 있다. 특히 어느 특정 시점에서는 최대 50개의 WIP 재고가 존재함을 볼 수 있다.

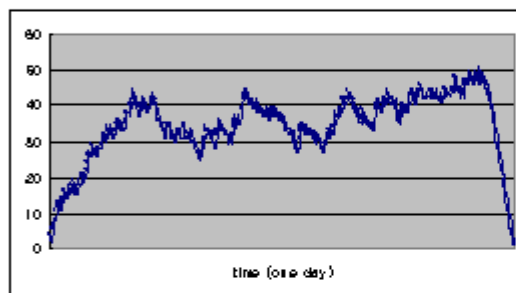


Figure 5. WIP levels over time

WIP가 많으면 창고가 복잡해지고, 작업자가 제품을 인출하여 다른 박스에 넣는 오류를 발생시킬 가능성을 크게 한다. 또한 어떤 창고 환경에서는 많은 박스를 구역 사이에 쌓아놓을 공간이 없는 경우도 있다. 따라서 대부분의 경우 각 구역 사이의 버퍼 공간에 제약이 있다. 본 논문에서는 Buffer 공간의 제약이 있는 경우에 buffer 크기에 따라 각 인출전략이 어떻게 영향을 받는지 실험을 통하여 분석하였다. <Table 2>는 존피킹에서 buffer 제약이 있는 경우 리드타임과 makespan의 변화를 보여주고 있다. 여기서 예를 들어 버퍼크기가 2이라는 것은 각 구역사이에 2개의 박스가 다음 작업을 위해 대기할 수 있는 공간이 있다는 것을 의미한다. 따라서 작업자가 하나의 주문 처리를 마쳤을 때 이미 2개의 박스가 대기하고 있는 경우 작업자는 작업을 중단한다(blocking 중단). 버퍼크기가 무한대이면 앞의 <Table 1>에서의 존피킹과 동일한 결과를 얻는다. 그러나, 버퍼 크기가 작으면 리드타임은 감소하고 makespan은 증가하

는 것을 볼 수 있다. 리드타임이 감소하는 이유는 버퍼크기가 감소함에 따라 중간재고가 감소되고 이는 리드타임의 감소로 나타난다. Makespan이 증가하는 이유는 버퍼가 작아지면, 위에서 설명한 blocking 중단이 자주 발생할 뿐 아니라, 이전 작업장에서 주문을 넘겨주지 않아 발생하는 starvation 중단도 증가하기 때문이다. 이와 같이 존피킹에서는 buffer의 크기에 따라 생산성이 영향 받는데 반하여 BB피킹은 운영 특성상 버퍼가 필요 없으므로 버퍼크기에 관계없이 <Table 1>과 동일하게 리드타임은 1.92고 makespan은 568.9이다. 리드타임 측면에서는 BB피킹이 우수한 결과를 주지만, makespan측면에서의 BB피킹 수행도는 버퍼크기가 1인 존 피킹 방식과는 비슷하나 버퍼크기가 커지면 존피킹보다 열등한 결과를 가져다 준다. (여기서, 기존의 BB피킹을 다른 논문과는 다르게 본 논문에서는 일반적인 단순한 BB피킹을 인출작업에 적용하면 주문처리 량의 측면에서 존피킹보다 열등한 결과를 얻는다는 것을 실험을 통하여 확인하였다.)

Table 2. Effect of buffer sizes in zone picking

| buffer size | lead time | makespan |
|-------------|-----------|----------|
| 1           | 2.61      | 567.5    |
| 2           | 3.18      | 529.2    |
| 3           | 3.62      | 505.0    |
| 4           | 4.37      | 497.0    |
| 5           | 4.76      | 482.0    |

BB피킹에서는 작업자가 작업하는 위치에 제한이 없다. <Figure 6>은 BB피킹을 적용하는 경우 각 작업자 간의 주문 인계인수 지점을 보여준다. 그림에서 세로축은 창고의 위치를 나타내고 (각 제품이 하나의 저장위치에 보관되어 있으므로 150개의 위치가 존재), 가로축은 각 주문을 나타낸다 (1일 800개 주문 중 200개만 표현). 그래프의 아래 부분의 점은 첫번째 작업자와 두번째 작업자간의 주문 인계인수 지점이며, 위 부분의 점은 두번째 작업자와 세번째 작업자간의 주문 인계인수 지점을 나타낸다. BB의 표준모형 조건의 경우에 인계인수 지점이 수렴하는 것과는 다르게(<Figure 3>

참조), 오더피킹 작업에서는 시간이 경과함에 따라 인계인수지점이 변동하고 수렴하지 않는다. 이는 각 오더마다 인출해야 할 물품이 다르므로 인출 위치도 계속 변동되기 때문이다. 따라서, BB피킹 방식을 적용하면 작업자의 작업 영역이 항상 변하고, 작업량도 때번 변하여 작업장이 혼잡해지고 작업이 복잡해지는 문제가 발생한다. 또한 영역 제한이 없는 관계로 blocking중단이 자주 발생 한다.

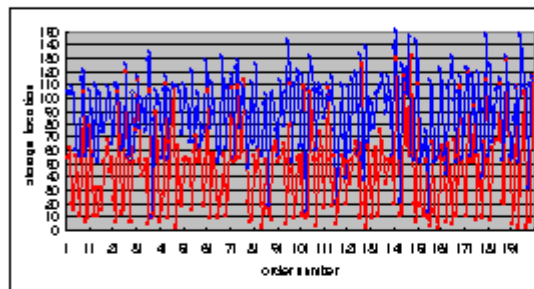


Figure 6. The locations of hand-offs over time in a order picking system.

BB피킹에서의 혼잡 및 blocking문제를 해결하는 하나의 대안으로서 각 작업자의 작업영역을 제한하는 방안을 실험을 통하여 분석하였다. 본 실험에서는 BB피킹에서 첫번째 작업자와 두 번째 작업자의 작업영역을 제한하여 (즉, 첫 번째 작업자는 70번째 물품까지 인출 가능하고, 두 번째 작업자는 120번째 물품까지 인출 가능하다. 이 지점까지 다음 작업자가 인수하지 않으면 담당 영역의 최종위치에 물품을 두고 다시 새로운 작업을 시작하러 앞쪽으로 간다.) <Table 3>에서 영역제한을 둔 BB피킹 방식은 일반적인 BB피킹 방식보다 리드타임에서 약간의 증가를 보이고 있으나 makespan은 감소함을 알 수 있다. Makespan이 감소하는 이유는 영역 제한 시 놓아진 물품으로 인해 blocking중단과 hand-off 손실이 감소되기 때문이다.

Table3. Performance of BB picking under restricted work area.

|                  | BB 피킹<br>(일반) | BB 피킹<br>(영역제한) |
|------------------|---------------|-----------------|
| Makespan (min.)  | 568.9         | 496.2           |
| Lead time (min.) | 1.92          | 2.27            |



BB 피킹은 작업자간의 작업속도가 차이는 경우 더욱 적합한 피킹 전략이다. 일반적으로 존피킹에서의 구역 할당은 설계단계의 작업이므로 작업자의 작업속도 차이보다는 주어진 표준시간에 의해 작업을 각 구역에 할당한다. 그러나, 운영단계에서는 각 작업자의 작업속도는 근무경력이나 개인적인 능력 차이로 인하여 각자가 다르다. 이때, 존피킹에서는 각 구역의 작업 처리 시간은 상이하게 되고 이는 각 구역의 부하 불균형으로 이어지게 된다. 그러나 BB 피킹에서는 작업자의 작업속도가 차이되면 작업자는 각자의 작업속도에 따라 자율적으로 작업량이 배분된다. <Figure 7>은 작업자의 작업속도가 차이 나는 경우 두 오더피킹 전략의 makespan을 보여주고 있다. 수평축의 수는 작업자간의 작업속도 차이를 의미한다. 예를 들어, 수평축에서의 숫자 0.2는 각 작업자간에 20%의 작업속도 차이가 남을 의미한다. 즉, 가장 느린 작업자는 0.8, 보통속도의 작업자는 1.0, 가장 빠른 작업자의 속도는 1.2를 의미한다. 작업자의 속도가 차이 나는 경우는 BB의 표준모형에서 처럼 속도가 느린 작업자는 라인의 선두에, 그리고 가장 속도가 빠른 작업자는 라인의 후방에 배치한다. <Figure 7>에서 작업속도의 차이가 발생하는 경우 존피킹에서는 makespan이 증가하는데 반하여, BB 피킹에서는 영향을 적게 받는다는 것을 볼 수 있다. 존피킹에서 makespan이 증가하는 것은 전체 주문처리 시간이 가장 느린 작업자의 속도에 의해서 결정되기 때문이다. 반면에 BB 피킹에서는, 느린 작업자는 적은 작업량을 처리하고 빠른 작업자는 많은 작업을 처리하도록 BB 자율 운영시스템이 속도 차이를 흡수하므로 작업자들의 평균속도가 작업량을 결정한다.

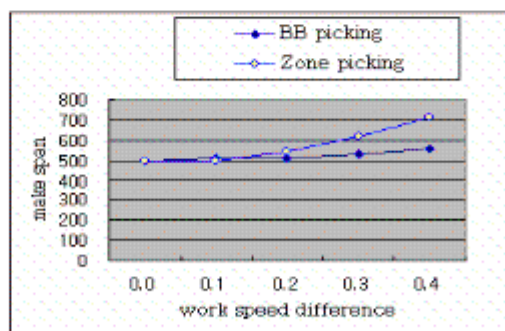


Figure 7. The effect of work speed on makespan

#### 4. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 물류창고의 오더피킹 작업에서 작업자가 피킹하는 물품을 동적이고 자율적으로 할당하는 Bucket Brigade(BB) 피킹 전략을 소개하고, 그 효용성을 검증하기 위하여 기존의 존피킹 방식과의 비교분석 실험을 수행하였다. 실험 결과 일반적인 BB 피킹 방식은 존피킹 방식보다 lead time에서는 우수하나 makespan에서는 열등한 결과를 보여주고 있다. 그러나 존피킹에서 버퍼크기에 제약이 있는 경우는 버퍼크기에 따라서 makespan 측면에서도 BB 피킹이 우수한 결과를 줄 수 있음을 보여주었다. 또한 기존 BB 피킹을 개선하면 BB 피킹 방식의 performance를 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 작업자의 작업속도가 차이 나는 경우 BB 피킹은 상대적으로 존피킹보다 영향을 덜 받는 것을 실험을 통하여 알 수 있었다. BB 피킹이 작업자의 작업속도가 차이가 나는 경우에 상대적으로 더 좋은 결과를 보여 준다는 사실은, 작업자의 개인적인 능력이 다르고 또한 최근 많은 이직현상에 따른 숙련자와 초보자가 같은 라인에서 일을 하게 되는 경우에 특히 BB가 유용한 작업배정 방식이라는 것을 보여준다.

BB를 적용하기 위해서는 여러 가지 선행적으로 해결해야 할 문제들이 있다. BB 피킹에서 각 작업자의 작업내용은 일정하지 않고 작업영역은 주문마다 변화한다. 이러한 상황에서 작업장은 혼란스럽게 되고, 작업자는 작업에 대한 전반적인 지식이 있어야 한다. Schultz et al. (2002)가 지적하였듯이, 유연한 작업할당의 이익을 얻기 위해서는 이에 수반하는 문제들을 먼저 도출하고 해결하는 것이 필요하다. 본 논문은 하나의 상황을 가지고 여러 시나리오를 설정한 후 실험을 통하여 BB 피킹 방식의 수행도를 분석하였다. 주문별 인출 물품 수, 물품저장방식, 물품별 인출시간 분포 등이 BB 피킹의 수행도에 주는 영향도 추가적인 분석이 요구된다. 또한 실험의 결과와 같이 BB 피킹의 performance를 향상시키기 위하여 기존의 일반적인 BB 피킹을 변형한 새로운 알고리즘의 개발이 추가로 필요하다고 여겨진다.

## 참고문헌

- Anderson, C., Boomsma, J.J. and Bartholdi, J.J. (2002), Task partitioning in insect societies: bucket brigades, *Insectes Sociaux*, 49, 1-10.
- Bartholdi, J.J. and Eisenstein, D.D. (1996) A production line that balances itself, *Operations Research*, 44(1), 21-34.
- Bartholdi, J.J., Eisenstein, D.D., Foley, R.D. (2001) Performance of bucket brigades when work is stochastic, *Operations Research*, 49(5), 710-719.
- Bartholdi, J.J., Eisenstein, D.D., and Lim, Y.F. (2006) Bucket brigades on in-tree assembly networks, *European Journal of Operational Research*, 168(3), 870-879.
- Bratcu, A.I and Dolgui, A. (2005) A survey of self-balancing production lines("bucket brigade"), *Journal of Intelligent Manufacturing*, 16, 139-158.
- Buzacott, J.A. (2002) The impact of worker differences on production system output, *International Journal of Production Economics*, 78, 37-44.
- De Koster, R., Le-Duc T. (2006) Roodbergen, K.J., Design and control of warehouse order picking: a literature review, Report ERS-2006-005-LIS, RSM Erasmus University, The Netherlands.
- Jane, C-C. (2000), Storage location assignment in a distribution center, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 30(1), 55-71.
- Jane, C-C. and Lai, Y-W. (2005) A clustering algorithm for item assignment in a synchronized zone order picking system, *European Journal of Operational Research*, 166, 489-496.
- Le-Duc, T. and De Koster, R. (2005) Determining the optimal number of zones in a pick-and-pack order picking system, Report ERS-2005-029-LIS, RSM Erasmus University, The Netherlands.
- Munoz, L.F, Villalobos, J.R. (2002) Work allocation strategies for serial assembly lines under high labor turnover, *International Journal of Production Research*, 40(8), 1835-1852.
- Peterson, C.G. (1995) Routeing and storage policy interaction in order picking operations, *Decision Sciences Institute Proceedings*, 3, 1614-1616.
- Peterson, C.G. (1997) An evaluation of order picking routeing policies, *International Journal of Operations & Production Management*, 17(11), 1098-1111.
- Ratliff, H.D., and Rosenthal, A.S. (1983) Order picking in a rectangular warehouse: a solvable case of the TSP, *Operations Research* 31(3), 507-521.
- Roodbergen, K.J. and de Koster, R. (2001) Routing methods for warehouse with multiple cross aisles, *International Journal of Production Research*, 39(9), 1865-1883.
- Schultz, K.L., McClain, J.O. and Thomas, L.J. (2003) Overcoming the dark side of work flexibility, *Journal of Operations Management*, 21, 81-92.
- Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A. Frazelle, E.H. Tanchoco, J.M.A. and Trevino, J. (2003) *Facilities Planning*, John Wiley & Sons, New York.
- Vaughan, T.S. and Petersen, C.G. (1999) The effect of warehouses cross aisles on order picking efficiency, *International Journal of Production Research*, 37(4), 881-897.