

물류창고에서 Bucket Brigade를 활용한 오더피킹에 대한 연구

구평희[†]

부경대학교 시스템경영공학과

Application of Bucket-brigades to Order Picking in Warehouses

Pyung Hoi Koo

Dept. of Systems Management and Engineering, Pukyong National University

Warehouses form an important link in a supply chain network. Among a variety of activities in warehouses, order picking is the process of retrieving a number of items out of storage to meet customer orders. Today, as the transactions through direct sales are wide spread, warehouses often receive a large amount of small orders to be handled within tight time windows, which makes fast and efficient order picking more important than ever. This paper examines a new order picking method where the concept of bucket brigade (BB) is applied. Bucket brigade is a way of dynamically coordinating workers who progressively perform a set of operations along a flow line. In bucket brigades, a worker is not assigned his jobs in a static way. Each worker takes a job from his predecessor when he is free. We identify some considerations when bucket brigades are applied to order picking activities. A new BB picking protocol is presented to improve existing BB picking protocols. Through simulation experiments, the performance of BB order picking is evaluated under various logistics environments.

Keyword: order picking, bucket brigades, zone picking, dynamic assignment, warehousing, self-balancing

1. 서론

최근 전자상거래, 홈쇼핑, 카탈로그 판매 등에 의한 거래가 일반화되어 주문은 빈번히 발생하고 주문당 주문량은 감소하는 것이 일반적인 추세이다. 또한, 적시생산(JIT), 신속대응(Quick Response) 등의 공급망(Supply Chain) 운영 전략이 보편화 되고 있는 환경에서 빠르고 효율적인 주문 처리는 물류경쟁력의 중요한 요소가 되고 있다. 일반적으로 물류창고의 기능은 입고, 저장, 오더피킹, 출고로 구분할 수 있다. 그 중 오더피킹은 고객의 주문에 따라 제품을 창고에서 인출하는 작업을 말한다. 오더피킹 작업은 노동 집약적이어서 대부분의 창고에서 가장 많은 공수가 필요하고 고비용이 수반되는 기능이다. Tomkins *et al.*(2003)에 따르면 오더피킹과 관련된 비용은 물류창고의 총

운영비용 중 약 55%를 차지한다. 따라서, 물류 창고의 경쟁력을 갖추기 위해서는 우선적으로 효율적인 오더피킹 작업이 요구된다.

오더피킹의 효율성은 창고 배치형태, 제품저장 전략, 피킹 전략, 피킹경로, 주문처리 방법 등 여러 가지 요인에 의해서 영향을 받는다. 이 중 피킹 전략은 주문을 인출하는 방법에 대한 결정과 관련이 있다. 하나의 고객 주문서에는 보통 인출해야 할 여러 개의 물품이 포함된다. 오더피킹은 인출 작업자가 각 주문에 있는 물품을 어떻게 인출하는가에 따라 picker-to-part 방식과 part-to-picker 방식으로 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 인출

본 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-D00575).

[†]연락처 : 구평희 교수, 608-739 부산시 남구 용당동 산100 부경대학교 시스템경영공학과, Fax : 051-629-6478,

E-mail : phkoo@pknu.ac.kr

투고일(2008년 03월 01일), 심사일(1차 : 2008년 03월 06일, 2차 : 2008년 07월 23일), 게재확정일(2008년 07월 31일).

하는 방식이다. Part-to-picker 방식의 예로서는 통로끝(end-of-aisle) 자동창고(AS/RS)와 캐로셀(carousel) 등이 있다.

산업체에서 일반적으로 채택되고 있는 방식은 picker-to-part 방식이다. 이 방식은 다시 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, 1995 and 1997; Roodbergen and De Koster, 2001) 접근법에 의한 연구가 이루어져 왔다.

존피킹 방식은 창고를 일정한 구역으로 나누고 각 구역을 한 작업자에게 할당하는 방식이다. 이 방식은 생산시스템의 조립라인에서 완제품(주문)을 생산하기 위하여 여러 부품(물품)을 순서대로 조립하는 것과 유사하다. 하나의 주문에 대하여 선행 구역에서의 인출작업이 완료되면 주문은 다음 구역으로 이동된다. 존피킹 방식은 창고에 보관된 물품의 종류가 많은 경우, 오더의 수가 많은 경우, 주문 당 인출할 물품이 많지 않은 경우에 효과적인 인출 방법으로 알려져 있다.

본 논문에서는 존피킹 방식을 적용한 물류환경에서 bucket brigade를 활용한 새로운 피킹 방식을 연구한다. 다음 제 2장에서는 존피킹 방식에 의한 주문 인출 절차에 대해 세부적으로 기술하고 기존의 관련 연구를 조사한다. 제 3장에서는 bucket brigade의 개념과 이를 기반으로 하는 오더피킹 방식을 설명한다. 또한 오더피킹 작업에 bucket brigade를 이용하는 경우에 발생하는 효율손실을 분석한다. 제 4장에서는 여러 물류 환경에서 bucket brigade와 존 피킹 방식의 생산성에 대하여 비교 분석한다. 특히 일반적인 BB 피킹에서의 효율손실 문제를 해결하기 위한 새로운 BB 피킹 방식을 제시하고 실험을 통하여 그 수행도를 분석한다. 제 5장에서는 결론과 향후 연구 방향에 대하여 논한다.

2. 존피킹에 의한 오더피킹 작업

<Figure 1>은 오더피킹 작업에서 존피킹 방식을 적용한 예를 도식적으로 나타낸 것이다(Bartholdie *et al.*, 2001). 창고는 일정한 구역으로 분할되고 각 구역은 한 명의 작업자가 인출 작업을 수행한다. 일반적으로 존피킹을 채택하는 창고에서는 물품을 이동시키기 위해서 컨베이어가 사용된다.

모든 작업자는 담당구역의 시작지점에 놓여있는 박스로부터 담당구역에서 인출해야 할 물품을 확인하고 차레대로 창고 랙(rack)으로부터 물품을 인출하여 박스에 넣는다. 여기서 박스

는 특정 주문(또는 여러 주문을 모은 batch)에 포함된 모든 물품들을 담는 역할을 하고, 박스에는 인출해야 할 물품리스트가 포함되어 있다. 작업자는 담당구역에서 처리해야 할 해당 오더의 물품을 모두 인출한 후에 박스를 다음 구역의 시작지점에 놓고 다시 담당구역의 시작지점으로 돌아와 다음 오더를 처리한다. 이때, 구역의 시작지점에 대기하고 있는 박스가 없으면 작업자는 다음 박스가 도착할 때까지 유ힴ상태로 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 인출(pick) 후에 다음 구역으로 넘기면서(pass) 주문을 처리하므로 pick-and-pass 방식이라고도 한다.

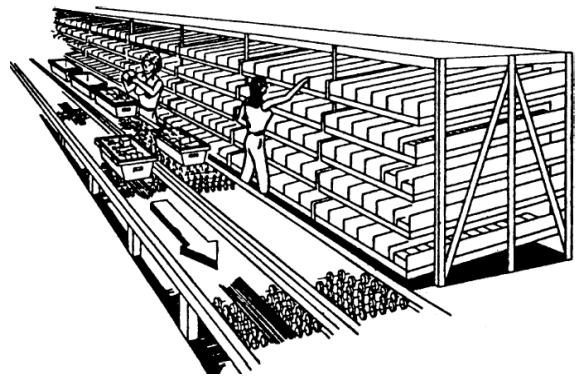


Figure 1. A zone order picking system

존피킹 방식에서 작업자의 효율을 극대화하고 주문 처리량을 늘리기 위해서는 각 구역에서의 작업량을 평준화 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 유ힴ상태로 되는 경우가 발생한다. 이는 곧 시스템 효율에 악영향을 미치고 결과적으로는 주문 처리량을 감소시키고 주문 처리 시간을 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 Laih(2005)는 각 구역의 부하량을 균등하게 하기 위하여 오더간의 유사계수(similarity coefficient)를 기반으로 하여 물품을 구역에 할당시키는 알고리즘을 제시하였다. Le-Duc and De Koster(2005)는 혼합정수계획법을 이용하여 최적의 구역 수를 결정하는 모델을 제안하였다. 위에서 언급한 기존의 연구들은 장기적인(예: 1년) 과거 데이터를 기반으로 각 구역의 부하율이 균등화 되도록 각 구역에 물품을 정적으로 할당하고 있다. 그러나, 실제 주문은 시간별로 주문량과 내용이 계속 변화하는 것이 일반적이다. 따라서 기존의 작업량 균등배분을 기초로 한 정적인 물품할당은 장기적으로는 균등한 부하가 가능할 지라도 일상 관리적인 측면에서 각 구역의 작업량

은 시간에 따라 변화하게 된다. 또한 각 작업자는 개인의 능력에 따라 작업속도가 상이하므로 표준시간에 의해 각 구역의 부하가 균등화 되더라도, 실제 작업에서는 느린 작업자의 작업속도에 의하여 오더처리량이 결정된다. 본 논문에서는 위에서 설명한 기존의 존피킹 방식에서의 운영상 문제점을 해소하기 위해 Bucket Brigade를 활용한 오더피킹 방식에 대해 연구한다.

3. Bucket Brigade 피킹 방식

3.1 Bucket Brigade 피킹 방식이란?

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

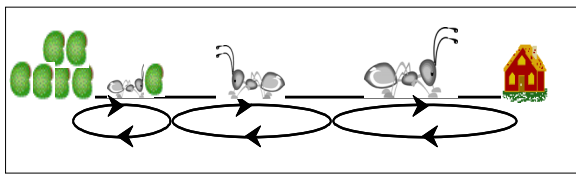


Figure 2. A bucket brigade in ants

Bucket Brigade 방식에서 모든 개미는 다음의 간단한 로직을 따라 일을 한다: “먹이가 있는 쪽으로 이동한다. 이동 중에 먹이를 나르는 개미를 만나면 먹이를 인도받아 개미집 쪽으로 향한다. 먹이를 넘겨받을 다음 개미를 만나면 먹이를 인계한다.” 이러한 로직을 오더피킹에 적용한 것이 BB 기반의 오더피킹 방식이다(이후부터는 BB 피킹 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 수행 한다

첫 번째 작업자는 선행 작업자가 없으므로 인출 목록이 명시된 오더를 받아 인출 물품별 창고 저장 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 인출장업장의 중간재고(WIP : Work In Process)가 최소화 될 수 있다. 각 작업자는 일정하게 할당된 작업만을 수행하는 것이 아니고 상황에 따라 오더마다 작업 내용과 작업량이 변한다.

BB를 가장 유용하게 활용하기 위해서는 몇 가지 조건을 필

요로 한다. 우선 BB 피킹은 직선형이나 U자형의 연결된 인출 시스템에서 적용하기에 적합하다. 또한 아래의 세 가지 조건을 만족하는 시스템에 BB를 적용하면 생산성을 최대화할 수 있다(Bartholdi *et al.*, 1996).

- 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 주어져 있고, 모든 작업은 생산라인에 연속적으로 분포되어 있다.

Bartholdi *et al.*(2001)은 BB로 하여금 최대의 처리량을 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 작업속도(즉, 단위시간당 주문처리량)라 하면, 작업자가 처음 작업을 시작하는 장소와는 상관없이 작업자 i 는 결국 다음의 수렴하는 작업시간 간격에서 작업을 하게 된다(Bartholdi and Eisentein, 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 흐름라인에서 BB를 적용하여 작업을 수행하는 경우 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. 결국 각 작업자의 작업량은 식 (1)과 동일하게 각각 $[0, 0.17]$, $[0.17, 0.5]$, $[0.5, 1]$ 으로 수렴됨을 볼 수 있다.

BB 표준 모델에서의 단위시간당 주문처리량은 $\sum_{i=1}^n v_i$ 에 수렴하게 된다(Bartholdi *et al.* 2001). 위의 예에서 단위 시간당 주문처리량은 $3.0 (= 0.5 + 1.0 + 1.5)$ 이다. 이는 작업자가 처리할 수 있는 최대의 양이다. 각 작업자의 작업속도에 맞도록 작업량이 자율적으로 할당되어 이와 같은 최대의 처리량이 가능하다. 세 작업자의 작업속도가 모두 1.0인 경우에도 시간당 주문처리량이 3.0이므로, BB 표준 모델의 경우에 작업자의 작업속도 차이에 의한 손실이 없음을 알 수 있다(정적인 작업할당 방

식을 적용했다면 가장 속도가 느린(0.5) 작업자에 의해 작업량이 결정되므로 이때의 시간당 주문 처리량은 $0.5 \times 3 = 1.5$ 가 된다. 따라서 이 경우, BB 방식이 정적인 방식보다 2배의 주문 처리량을 얻는다는 것을 알 수 있다).

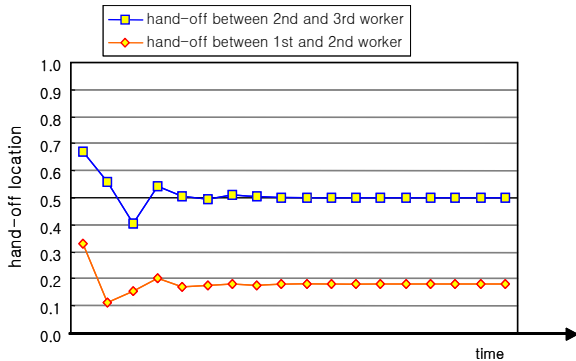


Figure 3. A time phased view of bucket brigades with three workers

BB 기반 작업할당 방법의 특징을 요약하면 아래와 같다.

- Pull시스템 : 후공정의 작업자가 선행공정의 작업자에게 작업을 인계 받는 형식이다. 이러한 pull 형태는 WIP를 최소화 한다.
- 동적 작업할당 : 인출작업을 작업자에게 미리 할당해 주는 정적인 방법이 아니라, 작업 상황에 따라 가변적으로 변하는 동적 할당전략이다.
- 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.

3.2 Bucket Brigade 관련 기존 연구

BB에 대한 연구는 비교적 최근에 시작되었다. Bartholdi and Emswiler(1996)은 BB의 개념을 최초로 소개하고 표준조건을 만족하는 경우 BB 적용시의 시스템 상태를 수리적으로 분석한 표준모형을 제시하였다. 이후, BB의 표준모형의 전제조건이 만족되지 않은 경우, 즉 작업시간이 확률적인 경우(Bartholdi *et al.*, 2001), Walk-back 시간이 존재하는 경우(Bartholdi and Emswiler 2005, Bartholdi *et al.*, 2007), 인계시간이 존재하는 경우(Bartholdi and Emswiler 2005), 느린 작업속도로부터 빠른 작업속도의 작업자 순서대로 위치하지 않은 경우(Hirotsu *et al.*, 2006), 작업 순서가 정해지지 않은 비선형인 경우(Bartholdi *et al.*, 2006) 등에서의 BB 시스템을 분석하는 연구가 수행되었다. Munoz and Villalobos(2002)는 작업자의 이직이 자주 발생하는 상황에

서 이직률이 조립라인의 생산성에 어떤 영향을 미치고, 이때 어떤 조립방식을 택하는 것이 좋은가 하는 연구를 수행하였다. Buzacott(2002)는 생산시스템에서의 두 가지 변동, 즉 작업자 간의 작업속도 차이와 확률적 작업시간의 조건 하에서 기존의 고정된 방법과 BB로 대표되는 동적인 방법을 비교분석하였다. Bartholdi and Emswiler(2005)은 BB를 활용한 트랙터 조립작업의 수행도를 분석하였다. 여기서 각 작업자 별로 상이한 walk-back시간과 hand-off시에 발생하는 시간손실(작업 인수인계 시간으로 두 작업자 모두 동일한 hand-off 손실 시간이 발생)을 고려한 모델을 제시하였다. 일정한 조건이 만족되면 walk-back과 hand-off시간이 존재하는 경우에도 자율적인 균형이 유지되고 BB적용 트랙터 조립라인이 기존의 조립방법과 비교해서 우수한 수행도를 보인다고 주장하였다. Bratcu and Dolgui(2005)는 BB를 기반으로 하는 이론적 연구와 적용 현황을 심도 있게 조사한 논문을 발표했다.

BB 개념을 이용한 오더피킹에 대한 분석연구는 Bartholdi *et al.*(2001)에 의해 발표되었다. 오더피킹 작업에서 각 주문은 인출해야 할 물품이 각각 다르므로 각 물품의 인출 시간을 지수 분포를 따른다고 가정하고 BB 시스템을 분석하였다. 이 논문에서 확률적인 시간 하에서도 작업자가 처리할 작업장(station)이 많으면 표준모형의 경우와 비슷한 수행도를 보인다는 것을 증명하였다. 저자들은 실제 대형마트(Revco Drug Stores)의 창고에서 BB 피킹을 적용한 결과 34%의 생산성 향상 효과를 얻었음을 보고하고 있다. BB를 적용한 물류창고는 그 외에도 편의점의 물류센터(WAWA Convenience Stores), 음반유통(Anderson Merchandizing) 등에서 볼 수 있다(Bratcu and Dolgui 2005).

본 논문에서는 BB를 실제 물류창고의 오더피킹작업에 적용하는 경우 기존의 연구에서 간과되고 있는 특징과 효율에 영향을 주는 요인을 도출하고, 이러한 요인들이 BB 피킹작업에 어떤 영향을 주는지 분석한다.

3.3 BB 피킹의 특징 및 효율 손실

본 절에서는 Bucket Brigade를 창고의 인출작업에 적용되는 경우 오더피킹 작업이 가지는 특징을 논한다. 특히 앞에서 설명한 BB 표준모형의 전제조건과는 다른 특징을 찾고, 이러한 특징이 오더피킹작업의 효율성에 어떤 영향을 주는지에 대하여 분석한다. BB 피킹 작업의 주요 특징은 아래와 같다.

- (1) 각 주문별로 인출해야 할 물품이 서로 다르다. 따라서 각 주문에 대해 인출하는 시간도 다르므로 주문에 대하여 표준모형의 조건 (3)과는 다르게 작업시간을 normalize하여 $[0, 1]$ 로 정의 할 수 없다. 일반적으로 모든 bucket brigade 분석이 총 작업시간을 normalize하여 작업자의 위치를 기반으로 수행되나 이러한 분석방법은 사용될 수 없다.
- (2) 작업자의 작업시간이 동일하더라도 blocking이 발생할 수 있다. BB모형에서 blocking은 작업자의 작업속도 차이나 작업시간의 확률적인 변동에 의해 발생하는 것으로 간주

되었다(Bartholdi *et al.*, 2001). 오더피킹 작업에서는 각 주문마다 인출물품의 위치가 다르므로 선행 작업자의 다음 인출 물품 위치가 후행작업자의 현 위치보다 뒤에 있을 때 blocking이 발생한다.

- (3) 오더를 다음 작업자에게 넘기는 hand-off이 즉각적으로 이루어 지지 않는 경우가 보통이다. 즉 후행작업자가 선행 작업자에게 주문을 넘겨받을 수 있는 상황에서 선행작업자가 현재 물품을 인출 중이라면 해당작업을 완료할 때까지 후행작업자는 대기해야만 한다. 만일 오더당 인출해야 할 물품이 많고 작업자 수가 적으면 hand-off 시간은 전체 인출시간에 비해 적으므로 무시될 수 있지만 오더 피킹 작업에서 오더당 인출 물품이 적은 경우에는 무시하지 못할 hand-off 시간이 존재하므로 수행되는 hand-off 시간에 영향을 받는다.
- (4) 각 물품마다 인출해야 할 물품이 다르고 또한 각 물품마다 저장 위치가 다르므로 BB를 적용한 오더피킹은 작업량과 공간적인 측면 모두에서 수렴하지 않는다.
- (5) 기존의 BB 피킹에서는 모든 station에 작업이 존재한다고 가정하였다. 그러나 실제로 각 위치에는 인출작업물이 없는 경우도 발생한다.

오더피킹 작업에 BB를 적용하는 경우 위에서 설명한 특징으로 인하여 작업자는 100%의 효율을 달성하는 것은 불가능하다. 이러한 오더피킹 작업의 특징으로부터 두 가지, 즉 hand-off와 blocking에 기인한 작업손실이 발생함을 알 수 있다.

• Hand-off 손실

BB피킹에서 한 작업자가 작업을 종료한 후 선행 작업자에게 작업을 인수받으려고 할 때 선행작업자가 물품을 인출하는 중이라면, 선행작업자는 현재 인출 중인 작업을 완료한 후에 작업을 인도할 수 있다. 후행 작업자는 이 기간 동안 대기 손실을 경험하게 된다.

작업자가 하나의 물품을 인출하는데 소요되는 시간은 평균 t 라고 하고 주문에는 평균적으로 n 개의 물품이 포함되어 있다고 하면 주문의 평균적인 총 인출시간 T 는 $T = nt$ 이다. 선행 작업자의 작업시간이 상호 영향을 주지 않고 독립적이어서 후행 작업자가 작업을 마치고 다음 작업을 인수 받을 수 있는 시점은 선행작업자가 물품을 인출하는 평균시간인 t 상에서 Uniform분포를 따른다고 가정 하면, 평균적인 hand-off 대기시간은 $t/2$ 가 된다. 피킹라인에 m 명의 작업자가 작업하고 있다고 하면, 첫 번째 작업자를 제외한 $m-1$ 명의 작업자가 hand-off 시간 손실을 경험하게 된다. 한 작업자는 하나의 주문에 대해서 평균 nt/m 시간 동안 인출작업을 수행하므로 hand-off 시간이 존재하는 경우 작업자의 hand-off 손실비율 H_0 는 아래와 같이 구해진다.

$$H_0 = \frac{t/2}{nt/m + t/2} = \frac{1}{2n/m + 1} \tag{2}$$

<Figure 4>는 물품 하나의 인출시간이 2분이고 주문당 평균 인출 물품 수가 3~25개인 오더피킹작업에서 BB 피킹을 적용하는 경우 물품 수 n 과 작업자의 수 m 이 변할 경우의 hand-off 손실을 나타낸다. 식 (2)에서 보듯이 hand-off 손실은 인출할 물품수와 작업자의 수에 영향을 받는다. 즉, 인출할 물품 수가 증가하고 작업자 수가 적으면 hand-off 시간이 전체 조립 시간에서 차지하는 비율이 커지게 된다. 즉, 식 (2)에서 보듯이 인출물품 수와 작업자 수와의 비, n/m 이 큰 경우에 hand-off 손실이 작게 되어 BB피킹의 효율성이 증대된다. 식 (2)에서 n/m 가 아주 커지면(즉, 작업자가 한 오더당 인출해야 할 물품이 아주 많으면) Hand-off 손실이 0에 가까워짐을 알 수 있다. 반대로, n/m 가 작아지면 Hand-off 손실이 커져 BB피킹의 효과가 상쇄된다.

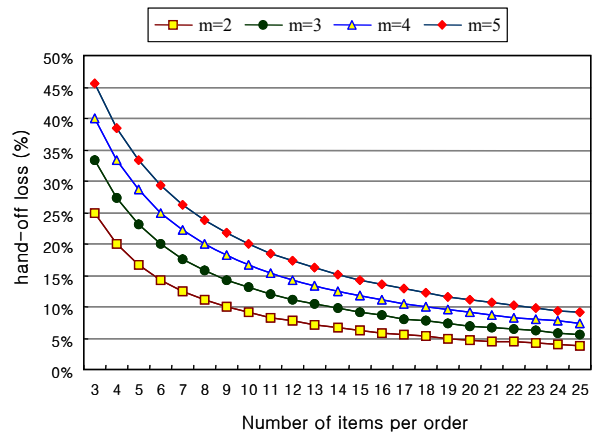


Figure 4. Hand-off loss in BB Picking

Hand-off 손실에 대한 식 (2)는 선행 작업자의 작업시간이 상호 영향을 주지 않고 독립적이라는 가정 하에 수립되었다. 그러나, 현실 세계에서는 인출 작업이 서로 연속적으로 수행되어야 하므로 작업시간에 상호 영향을 준다. 실제적인 물류 환경에서의 hand-off 손실은 제 4장의 실험을 통해서 확인한다.

• Blocking 손실

BB 피킹에서는 한 작업자가 인출작업을 하기 위하여 후행작업자를 추월하지 않는 것이 일반적이다. Bartholdi *et al.*(1996)는 BB 시스템에서 작업자 추월을 허용하면 오히려 수행도가 떨어진다는 것을 보였다. 이와 같이 작업자 간의 추월이 허용되지 않는 경우 선행 작업자가 인출하려는 물품의 위치가 후행 작업자의 위치보다 뒤에 있는 경우 선행작업자는 후행작업자가 그 위치를 통과한 후에나 해당물품을 인출할 수 있다. 이때 선행작업자가 물품인출을 위해 대기하는 시간을 blocking 시간이라 한다. <Figure 5>는 blocking의 예를 보여주고 있다. 현재 작업자 1은 order #1의 a1을 인출하는 중이라고 하자. 이때 order #2를 처리하는 작업자 2가 b1의 인출을 마치고 b2를 인출하려고 이동할 때 작업자 1이 a1의 위치에서 작업 중이므로 진행하지 못하는 blocking 현상이 발생한다. blocking은 작업자 1이 a1과

a2를 모두 처리한 후 a3로 이동하고 나서야 해결된다. 이러한 blocking 현상은 hand-off 손실과 더불어 BB 피킹 방식에서 작업 효율을 악화시키는 요인이 된다.

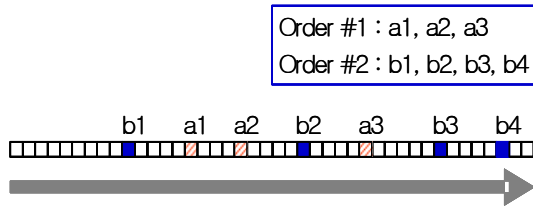


Figure 5. Blocking loss in BB picking

본 절에서는 오더피킹 작업에서 BB를 활용할 때의 특징과 이때 수반되는 효율손실에 대해 알아보았다. 기존의 BB 관련 논문들은 이러한 특징을 간과하고 있다. 다음 절에서는 BB 피킹과 존피킹 방식의 수행도를 비교분석하기 위해서 수행한 시뮬레이션 실험의 결과를 설명한다. 또한 실험 결과 확인된 hand-off와 blocking 손실을 최소화하기 위하여 기존의 BB 피킹방식을 개선한 새로운 운영 방안을 제시하고 시뮬레이션 실험을 통하여 새로운 방식의 수행도를 분석한다.

4. 시뮬레이션 실험 분석

BB 피킹의 효율성을 검증하기 위하여 존피킹 방식을 채택하고 있는 산업체 데이터(Jane 2000)를 약간 수정한 창고 시스템을 가지고 분석을 실시하였다. 대상으로 하는 물류시스템은 화장품과 일상용품을 저장하고 있고 <Figure 1>과같이 직선형의 인출라인형태로 운영되고 있다. 제품의 종류는 150가지이고 현재 3구역으로 나누어 존피킹에 의해 인출작업을 수행하고 있다. 하루에 약 800개의 주문이 발생하고, 각 주문에는 6~12 종류(평균 9가지 종류)의 물품이 포함된다.

시뮬레이션 실험으로 존피킹과 BB피킹의 생산성을 비교하기 위하여 하루에 800개의 주문을 처리해야 하는 10개의 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 담당하여 각 주문에서 해당 구역에 저장되어 있는 제품만을 인출하여 주문에 대응한다. 이렇게 하면, 모든 제품이 동일한 확률로 주문된다고 가정하였으므로 장기적으로는 각 구역의 부하율이 평준화 된다. 우선, 각 구역 사이에 다음 작업을 위해 대기하고 있는 주문의 수는 10개(즉, buffer(버퍼) 크기 = 10)로 제한 한다고 가정한다(따라서 창고 내에서 현재 처리중

인 주문은 최대 23개가 존재할 수 있다). 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 인출 시간이 소요된다. 작업자는 하나의 주문을 인출하기 시작하면 해당 구역에서 인출해야 할 제품을 모두 처리하고 다음 구역으로 넘겨준 후 다음 주문을 처리할 수 있다. BB 피킹에서 작업자는 일정한 구역에 할당되지 않는다. 표준 BB 모델과는 다르게, 각 작업자는 동일한 작업속도를 가지고 있다고 가정한다(작업자의 속도가 차이 나는 경우도 후반 부에서 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
- 주문당 평균 인출 제품 : 9개
- 주문당 한 작업자의 평균 인출물품수 : 3개
- 제품 1단위 인출 평균시간 : 10초
- 주문당 작업자 평균인출시간 : 30초(0.5분)
- 작업자가 하루 주문을 모두 인출하는데 소요되는 평균 시간 : 400분
- 마지막 주문을 처리하는 추가시간 : 1분(후위 2개의 구역에서 소요되는 시간)
- 모든 주문을 완료하기 위한 소요시간(makespan) : 400분 + 1분 = 401분

시뮬레이션 실험에 대한 분석은 첫 번째 주문의 인출 작업이 시작되면서부터 모든 주문의 인출 작업이 완료되는 시점까지의 데이터를 기반으로 한다. 이는 실제 대부분 창고에서의 오더피킹 작업은 이러한 transient state와 유사한 환경에서 이루어지므로 좀 더 현실을 반영한다고 여겨지기 때문이다.

4.1 존피킹과 BB 피킹의 수행도 비교 분석

<Table 1>은 위와 같은 기본적인 상황에서 BB 피킹을 적용했을 때와 존피킹을 적용했을 때의 makespan과 리드타임을 보여주고 있다(괄호 안의 수치는 표준편차를 의미함). 리드타임이란 하나의 주문에 대하여 첫 작업자가 인출작업을 시작한 시점으로부터 마지막 작업자가 해당 주문의 인출작업을 모두 완료한 시점까지의 시간을 의미한다. Makespan은 주어진 모든 주문을 처리하는데 소요되는 시간을 의미하며, 처리해야 할

Table 1. Comparison of BB picking and zone picking

	BB picking	Zone picking
Makespan(min.)	497.1(2.8)	444.8(6.2)
Lead time(min.)	1.7(0.0)	7.2(0.8)

오더의 양이 주어질 경우 시간당 주문처리량을 대신해서 자주 사용되는 평가 지표이다.

실험 결과 makespan에 있어서는 존피킹이 우수한 결과를 보여주고, 리드타임은 BB 피킹이 우수한 결과를 보인다. 존피킹에서는 모든 주문을 처리하는데 이상적인(401분) 상황보다 10% 증가한 444.8분이 소요되었다. 이는 작업자가 담당하는 구역에서 인출해야 할 제품의 수가 주문마다 차이가 나므로 후위작업자가 작업을 마치고 다음 주문을 처리하기 위해 준비되었으나, 존 사이에 대기하고 있는 주문이 없어 대기함으로써 발생하는 시간손실(starvation 손실)과 후위 버퍼에 허용된 최대의 주문이 쌓여 있어 선행작업자가 더 이상 작업을 진행할 수 없는 버퍼제약에 의한 blocking 손실에 따른 시간증가에 기인한다. BB 피킹의 경우에는 497.1분이 소요되어 이상적인 상황보다는 24% 증가하였는데, 이는 앞 절에서 설명하였듯이 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. <Table 2>는 BB 피킹을 적용할 때 각 작업자별 Blocking 손실과 hand-off 손실을 보여주고 있다. Blocking과 hand-off으로 인하여 작업자는 평균적으로 약 14%의 작업효율 손실을 경험하고 있음을 볼 수 있다.

Table 2. Blocking and hand-off losses in BB picking

	blocking loss(%)	hand-off loss(%)
picker 1	13.6%	0.0%
picker 2	9.8%	8.6%
picker 3	0.0%	11.2%

<Table 1>에서 리드타임에 대해서는 존피킹은 7.2인데 반하여 BB 피킹은 1.7로, 두 방식이 많은 차이를 보이고 있다. 이상적인 상황이라면 하나의 주문을 처리하는 데는 9개의 제품을 인출해야 하므로 평균 1.5분이 소요될 것이다. BB 피킹에서 발생하는 리드타임 손실은 앞에서 설명한 blocking 손실에 의해서 발생한다(hand-off 손실은 리드타임에 영향을 주지 않는다). 존피킹은 BB 피킹보다 장기간의 리드타임이 소요된다. 이는 존피킹에서는 주문마다 각 구역에서의 처리물량이 변동하므로 단계적으로 각 구역에서의 부하량이 다르고, 따라서 결과적으로 각 구역 사이의 버퍼에 많은 물량의 재공품재고(WIP)가 쌓이게 되기 때문이다. Little의 법칙에 의하여 WIP 재고가 많으면 리드타임은 길어진다. BB 피킹에서는 그 운영 특성 때문에 WIP가 항상 3개 이하로 유지되지만, 존피킹에서는 시간에 따라 WIP가 변동한다. <Figure 6>는 존피킹을 적용하

는 경우 하루 동안 시간이 경과함에 따라 WIP가 크게 변동함을 보여주고 있다. 평균적으로 WIP는 13.5개이고, 어느 특정 시점에서는 최대로 23개(인출 중인 주문 3개 + 버퍼에 대기하고 있는 주문 20개)의 WIP 재고가 존재함을 알 수 있다.

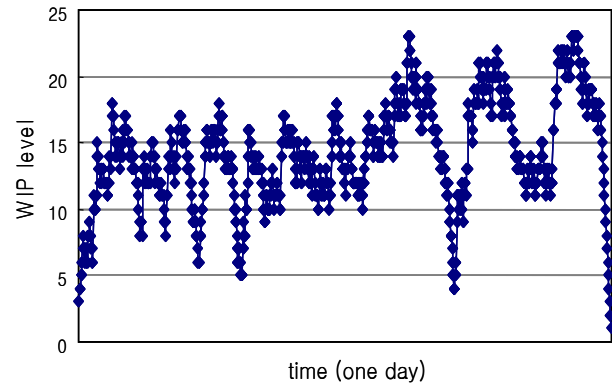


Figure 6. WIP levels over time in zone picking

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 버퍼공간에 제약이 있다. 버퍼 공간의 제약이 있는 경우에 버퍼 크기에 따라 인출전략이 어떻게 영향을 받는지를 실험을 통하여 분석한 결과는 다음절에서 설명한다.

4.2 존피킹에서 버퍼의 영향

<Table 3>은 존피킹에서 버퍼 제약이 있는 경우 리드타임과 makespan의 변화를 보여주고 있다. 여기서 예를 들어 버퍼 크기가 2라는 것은 각 구역 사이에 2개의 박스가 대기할 수 있는 공간이 있다는 것을 의미한다. 따라서 작업자가 어떤 주문 처리를 마쳤을 때 이미 2개의 박스가 버퍼에 대기하고 있는 경우 작업자는 다음 주문을 위한 인출작업을 수행하지 못하고 대기상태로 된다(버퍼로 인한 blocking 중단).

Table 3. Effect of buffer size in zone picking

buffer size	lead time	makespan
1	2.4	508.4
2	3.0	479.4
3	3.5	467.0
4	4.0	460.6
5	4.6	455.4
10	7.2	444.8
15	8.7	440.3
20	10.0	440.1
∞	11.0	438.9

<Table 3>에서 버퍼 크기가 작으면 리드타임은 감소하고 makespan은 증가하는 것을 볼 수 있다. 리드타임이 감소하는 이유는 버퍼크기가 감소함에 따라 중간재고가 감소되기 때문이고, Makespan이 증가하는 이유는 버퍼가 작아지면 위에서 설명한 버퍼에 의한 blocking 중단이 자주 발생할 뿐 아니라, 이전 작업장에서 주문을 넘겨주지 않아 발생하는 starvation 중단도 증가하기 때문이다. 버퍼제약이 있는 존피킹을 BB 피킹과 비교하면(BB 피킹은 운영 특성상 버퍼가 필요 없으므로 버퍼크기에 관계없이 <Table 1>과 동일하게 리드타임은 1.7이고 makespan은 497.1이다), 리드타임 측면에서는 BB 피킹이 버퍼크기에 상관없이 우수한 결과를 주지만, makespan 측면에서의 버퍼크기가 1일 때는 BB 피킹이 우수한 결과를 보이고, 버퍼크기가 2이상 이 되면 존피킹이 우수한 결과를 보여준다. 다음절에서는 makespan에 대해서도 우수한 결과를 얻을 수 있도록 BB 피킹 방법에 대한 개선방안을 제시하고 수행도를 분석한다.

4.3 BB 피킹의 개선안

기존의 일반적인 BB 피킹에서는 작업자가 작업하는 위치에 제한이 없다. <Figure 7>은 BB 피킹을 적용하는 경우 각 작업자 간의 주문 인수인계 지점을 보여준다. 그림에서 세로축은 창고의 위치를 나타내고(각 제품이 하나의 저장위치에 보관되어 있으므로 150개의 위치가 존재), 가로축은 각 주문을 나타낸다(1일 800개 주문 중 100개만 표현). 그래프의 아래 부분의 점은 첫 번째 작업자와 두 번째 작업자간의 주문 인수인계 지점이며, 위 부분의 점은 두 번째 작업자와 세 번째 작업자간의 주문 인수인계 지점을 나타낸다. BB의 표준모형 조건의 경우에 인수인계 지점이 수렴하는 것과는 다르게(<Figure 3> 참조), 오더피킹 작업에서는 시간이 경과함에 따라 인수인계 지점이 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 매번 변하여 작업장이 혼잡해지고 작업이 복잡해지

는 문제가 발생한다. 또한 영역 제한이 없기 때문에 blocking 중단이 자주 발생 한다.

본 절에서는 BB 피킹에서의 효율손실 문제를 해결하기 위하여 존피킹과 BB 피킹을 혼합한 새로운 방안을 제시하고 실험을 통하여 수행도를 분석한다(이후 새로운 BB 피킹 방식을 존BB 피킹으로 칭한다). 존BB 피킹 방식에서는 blocking과 hand-off손실을 줄이기 위하여 존피킹에서와 같이 버퍼를 활용한다. 즉, 기존의 BB 피킹에서는 작업영역의 제한이 없었으나 존BB 피킹에서는 각 작업자의 작업영역에 제한을 둔다. 작업자는 기존의 일반적인 BB 피킹 방식을 이용하다가 한계위치에 도달하면 그 지점 이후에 인출할 물품이 있더라도 주문을 한계위치의 버퍼에 놓고 돌아가 새로운 오더피킹 작업을 수행한다.

본 논문에서, 첫 번째 작업자는 70번째 물품까지 인출 가능하고(즉, 첫 번째 작업자의 한계위치는 70), 두 번째 작업자는 120번째 물품까지 인출 가능하도록 작업로직을 정하였다. 따라서 첫 번째 작업자는 1~70위치, 두 번째 작업자는 1~120위치, 세 번째 작업자는 1~150위치의 물품을 인출 할 수 있다. 각 작업자가 한계위치에 도달할 동안 다음 작업자가 오더를 인수하지 않으면 담당 영역의 최종위치(한계위치)에 물품을 두고 다시 새로운 작업을 시작하러 앞쪽으로 간다. <Table 4>는 버퍼크기를 3으로 했을 때의 존BB 피킹 방식과 일반적인 BB 피킹 방식의 수행도를 보여주고 있다. 존BB 피킹은 일반적인 BB 피킹 방식보다 리드타임에서 약간의 증가를 보이고 있으나 makespan은 크게 감소함을 알 수 있다.

Table 4. Performance of Zone BB picking under restricted work area.

	일반 BB 피킹	존BB 피킹
Makespan(min.)	497.1	465.1
Lead time(min.)	1.7	2.1

Makespan이 감소하는 이유는 영역 제한 시 버퍼에 대기하고 있는 물품으로 인해 blocking중단과 hand-off 손실이 감소되기 때문이다. <Figure 8>은 일반 BB 피킹과 존BB 피킹에서의 blocking 손실과 hand-off 손실을 비교하고 있다.

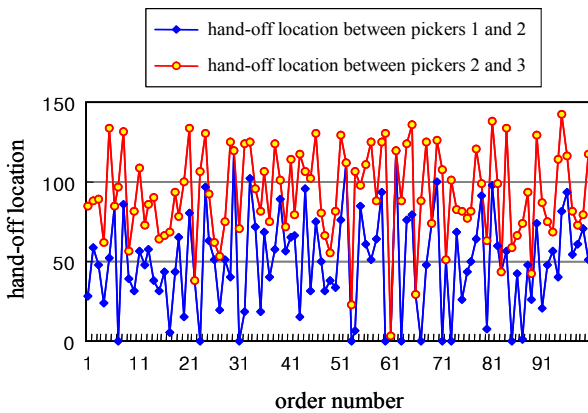
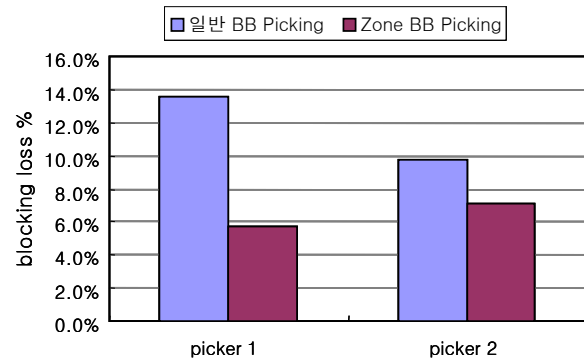


Figure 7. The locations of hand-offs over time in an order picking system



(a) Comparison of blocking losses

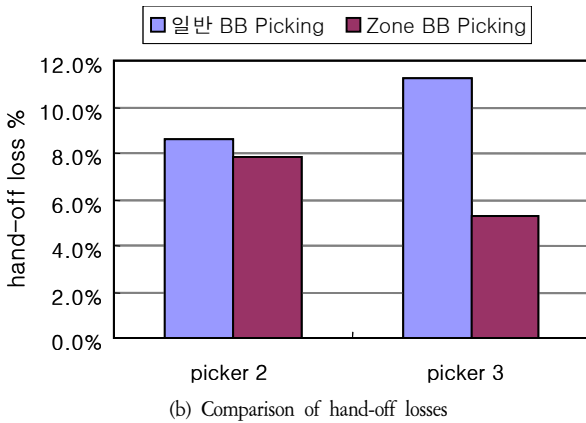


Figure 8. Comparison of general BB picking and zone BB picking

존BB 피킹은 존피킹과 같이 버퍼의 크기에 따라 수행도가 달라진다. <Figure 9>는 버퍼의 크기가 변할 때 두 방식에서의 makespan 변화를 보여주고 있다. 존 피킹은 버퍼 크기가 수행도에 많은 영향을 주지만, 존BB 피킹은 버퍼크기에 영향을 적게 받음을 볼 수 있다. 그림에서 버퍼크기가 3인 경우를 기준으로 이보다 적은 경우는 존BB 피킹이 큰 경우에는 존 피킹이 우수한 결과를 보임을 알 수 있다. 결과적으로 버퍼의 크기가 작은 경우에는 존BB 피킹 방식이 makespan과 리드타임 모두의 경우에서 존피킹보다 우수한 수행도를 보이고 있음을 알 수 있다.

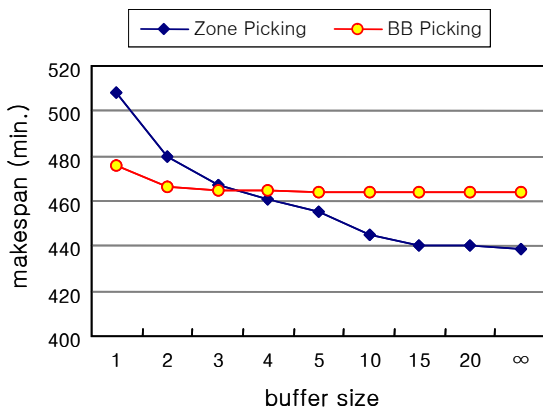


Figure 9. Performance of the picking methods over different buffer sizes

위 실험에서는 한계위치를 정하여 기존의 BB 피킹을 개선한 존BB 피킹이 우수한 결과를 보이고 있음을 보여주고 있다. 이때, 한계위치를 어느 곳에 둘 것인가에 따라 performance가 차이가 난다. 최적의 위치한계 설정을 위한 분석적인 방법에 대한 연구는 앞으로 추가로 연구되어야 할 내용이다.

4.4 작업속도 차이의 영향

일반적으로 존피킹에서의 구역 할당은 계획단계의 의사결

정 사항이므로 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 작업처리 시간은 상이하게 되고 이는 각 구역의 부하 불균형으로 이어지게 된다. 그러나 BB 피킹에서는 작업자의 작업속도가 차이나면 작업자는 각자의 작업속도에 따라 자율적으로 작업량이 배분된다.

<Figure 10>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 작업자 간에 20%의 작업속도 차이가 있음을 의미한다. 즉, 가장 느린 작업자는 0.8, 보통속도의 작업자는 1.0, 가장 빠른 작업자의 속도는 1.2를 의미한다. 작업자의 속도가 차이 나는 경우는 BB의 표준모형에서처럼 속도가 느린 작업자는 라인의 선두에, 그리고 가장 속도가 빠른 작업자는 라인의 후방에 배치한다. 그림에서 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 작업자의 효율손실이 적게 발생한다.

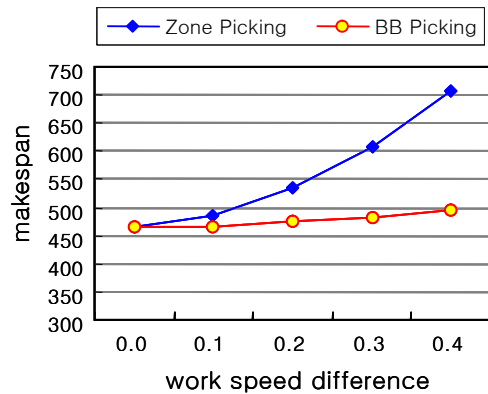


Figure 10. The effect of work speed on makespan

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 물류창고의 오더피킹 작업에서 작업자가 피킹하는 물품을 동적이고 자율적으로 할당하는 Bucket Brigade(BB) 피킹 전략을 소개하고, 오더피킹에서 BB를 적용하는 경우 고려해야 할 사항과 이때 효율 손실을 주는 요인을 도출하고 분석하였다. 또한 BB 피킹의 효율성을 검증하기 위하여 기존의 존피킹 방식과의 비교분석 실험을 수행하였다. 실험 결과 일

반적인 BB피킹 방식은 존피킹방식보다 리드타임에서는 우수하나 makespan에서는 열등한 결과를 보여주고 있다. 존 피킹에서 버퍼크기에 제약이 있는 경우는 버퍼크기에 따라서 makespan 측면에서도 BB 피킹이 대등한 결과를 줄 수 있음을 보여 주었다. 또한 기존의 BB 피킹과 존피킹을 혼합하여 본 논문에서 제시한 새로운 BB 피킹방식은 리드타임과 makespan 두가지 모두에 있어서 존 피킹방식보다 우수한 결과를 주고 있음을 확인하였다. 작업자의 작업속도가 차이 나는 경우 BB 피킹은 상대적으로 존 피킹보다 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.

본 논문은 아직 국내에 적용된 사례가 없는 BB 개념을 소개하는 것이 일차적인 목적이다. BB는 자원의 효율적인 이용이란 측면에서 여러 분야에서 활용될 수 있으리라 기대된다. 본 논문에서 대상으로 하는 창고에서의 오퍼피킹 작업뿐만 아니라, 일반적인 생산조립라인에서도 적용 가능한 개념이다. 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. 유연한 작업할당의 이익을 얻기 위해서는 이에 수반하는 문제들을 도출하고 해결하는 것이 필요하다.

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. (2005) Using bucket brigades to migrate from craft manufacturing to assembly lines, *Manufacturing and Service Operations Management*, 7(2), 121-129.
- 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.
- Bartholdi J. J., Eisenstein D. D., Lim Y. F. (2007) Chaos and convergence in bucket brigades with finite walk-back velocities, *Operations Research*, in press.
- 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.
- Hirotani, D. H., Myreshka, Morikawa, K. Takahashi, K. (2006), Analysis and design of self-balancing production line, *Computers and Industrial Engineering*, 50, 488-502.
- Jane, C-C. (2000), Storage location assignment in a distribution center, *International Journal of Physical Distribution and 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 and 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.
- Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A. Frazelle, E. H. Tanchoco, J. M. A. and Trevino, J. (2003) *Facilities Planning*, John Wiley and 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.



구 평 희

한양대학교 산업공학과 학사
Purdue University 산업공학 석사
Purdue University 산업공학 박사
현재: 부경대학교 시스템경영공학과 부교수
관심분야: 생산/물류 시스템의 설계 및 운영