



### 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



**저작자표시.** 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



**비영리.** 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



**변경금지.** 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

**저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.**

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

생산 및 물류 시스템에서의  
*Bucket Brigade* 효과 분석



2007년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

시스템경영공학과

강 희 영

공 학 석 사 학 위 논 문

생산 및 물류 시스템에서의  
*Bucket Brigade* 효과 분석

지도교수 구평희

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2007년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

시스템경영공학과

강 희 영

# 강희영의 공학석사 학위논문을 인준함

2006년 12월 22일



주 심 공학박사 고 시 근 인

위 원 공학박사 김 영 진 인

위 원 공학박사 구 평 회 인

# 목 차

|   |    |
|---|----|
| 제 1 장 서론 . . . . .                      | 1  |
| 1.1 연구의 배경 및 목적 . . . . .               | 1  |
| 1.2 연구내용 . . . . .                      | 3  |
| 제 2 장 기존 작업 배정 방식 . . . . .             | 4  |
| 2.1 생산 시스템에서의 라인밸런싱 . . . . .           | 4  |
| 2.2 물류 시스템에서의 Order picking . . . . .   | 6  |
| 제 3 장 Bucket Brigade에 의한 작업배정 . . . . . | 11 |
| 3.1 Bucket Brigade의 개념 . . . . .        | 11 |
| 3.2 Bucket Brigade의 표준모델 . . . . .      | 13 |
| 3.3 기존 연구 현황 . . . . .                  | 15 |

|   |    |
|---|----|
| 제 4 장 Simulation 실험 및 결과분석 . . . . .        | 18 |
| 4.1 조립라인에서의 Simulation 실험 및 결과분석 . . . . .  | 18 |
| 4.1.1 연속작업 및 동일 작업속도 . . . . .              | 19 |
| 4.1.2 연속작업 및 작업속도 차이 있는 경우 . . . . .        | 20 |
| 4.1.3 불연속작업 및 작업속도 차이 있는 경우 . . . . .       | 21 |
| 4.2 물류시스템에서의 Simulation 실험 및 결과분석 . . . . . | 22 |
| 4.2.1 존 피킹과 BB 피킹의 실험 결과 분석 . . . . .       | 24 |
| 4.2.2 존 피킹과 BB 피킹의 추가 실험 결과 분석 . . . . .    | 25 |
| 제 5 장 결론 및 향후 연구과제 . . . . .                | 32 |
| 참고문헌 . . . . .                              | 34 |
| Abstract . . . . .                          | 37 |

## 표 목차

|   |    |
|---|----|
| [표 3-1] Bucket Brigade 적용사례 : 미국중심 . . . . .          | 17 |
| [표 4-1] 조립라인 실험 조건 . . . . .                          | 18 |
| [표 4-2] 오더피킹 추가 실험 조건(Chin Chia Jane, 2000) . . . . . | 23 |
| [표 4-3] BB 피킹과 존 피킹의 수행도 비교 . . . . .                 | 25 |



## 그림 목차

|  |    |
|--|----|
| [그림 2-1] 조립 라인의 종류(이용일과 최원준, 2003) . . . . . | 4  |
| [그림 2-2] 존 피킹방식을 채택한 오더피킹시스템 . . . . .       | 9  |
| [그림 3-1] 개미의 먹이 운반 . . . . .                 | 11 |
| [그림 3-2] 작업자 3명인 경우의 작업 배정 . . . . .         | 15 |
| [그림 4-1] 단일 모델 조립라인 . . . . .                | 18 |
| [그림 4-2] 이상적인 상황에서의 BB 및 라인밸런싱 수행도 비교 .      | 19 |
| [그림 4-3] 작업 속도 차이 실험결과 . . . . .             | 20 |
| [그림 4-4] 불연속 작업에서의 수행도 비교 . . . . .          | 21 |
| [그림 4-5] 물류시스템에서의 존 피킹 . . . . .             | 22 |
| [그림 4-6] 물류시스템에서의 BB 피킹 . . . . .            | 23 |
| [그림 4-7] 제품 배치 . . . . .                     | 24 |
| [그림 4-8] BB 피킹 및 존 피킹 수행도 비교 . . . . .       | 24 |
| [그림 4-9] BB 피킹과 존 피킹의 WIP 변화 . . . . .       | 26 |
| [그림 4-10] BB 피킹에서의 Hand off 위치 . . . . .     | 26 |

[그림 4-11] BB 피킹에서 구역제한이 있는 경우 . . . . . 27

[그림 4-12] BB 피킹에서 구역제한이 있는 경우의 수행도 . . . . . 27

[그림 4-13] 버퍼 크기에 따른 리드타임 변화 . . . . . 28

[그림 4-14] 버퍼 크기에 따른 생산기간 변화 . . . . . 29

[그림 4-15] 작업자의 속도차이에 따른 생산기간 변화 . . . . . 30

[그림 4-16] 작업자의 속도차이에 따른 리드타임 변화 . . . . . 30



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

제품(또는 서비스)을 생산하기 위하여 순차적인 작업이 수행되어야 하는 환경에서 각 작업을 생산자원(기계 또는 작업자)에게 얼마만큼의 요소작업을 배정하는가를 결정하는 작업배정(Work Assignment) 문제는 중요한 의사결정 문제이다. 일반적으로 각 생산자원에 작업이 배정되면 해당 자원은 일정 부분의 작업만 수행하게 된다. 이러한 시스템의 대표적인 예로는 컨베이어 벨트를 따라 조립작업이 수행되는 자동차 및 전자제품 조립라인이나, 전자부품을 보드에 삽입하는 PCB 조립라인, 물류창고에서 주문된 물품을 하나의 용기에 담은 Order Picking 작업 등을 들 수 있다. 현재 생산시스템에서 일반적으로 추구하는 작업배정 방식은 각 생산자원에게 가급적 균등한 작업량을 배정하는 라인밸런싱(LB:Line Balancing) 전략과 작업자에 의해 order들을 picking하는 물류시스템에서 각 작업자에게 균등한 zone을 나누어 할당하는 Zone-picking 방식이다. 라인밸런싱 및 Zone-picking은 작업량 및 작업영역의 균등 배정을 통하여 주어진 생산자원을 최대한 활용하고, 따라서 최소의 비용으로 최고의 생산성을 달성할 수 있다는 논리를 바탕으로 한다. 작업배정이 완료되면 생산자원은 모든 요소작업을 수행 할 수 있는 능력이 있는 경우에도 제품의 흐름 속도에 따라 배정된 일정 부분의 작업만을 수행하게 된다.

각 자원에 할당하는 작업의 양을 시간으로 표현하기 위하여 표준시간이 이용된다. 여기에서의 표준시간이란 부과된 작업을 올바르게 수행하는데 필요한 숙련도를 지닌 작업자가 주어진 작업조건 하에서 보통의 작업속도로 작업을 하고, 정상적인 피로와 지연을 수반하면서 규정된

질과 양의 작업을 규정된 작업방법에 따라 행하는데 필요한 시간으로 정의된다. 조립라인을 설계하는 당시에는 어느 작업자가 어떤 작업장을 담당하게 될지 결정되지 않는 상태가 일반적이므로 보통정도의 숙련도를 가진 작업자가 정상적인 작업환경 하에서 보통의 작업속도로 작업할 때 소요되는 시간인 표준시간을 이용하는 것은 당연하게 생각될 수 있다. 그러나 현실세계에서는 각 작업자는 숙련도나 각 개인의 능력 등에 의하여 작업속도에 차이가 난다. 이와 같은 경우는 이론적으로 산출된 라인 밸런싱 효율과는 다르게 가장 느린 작업자의 작업속도에 의하여 효율이 결정된다. 또한 물류시스템에서 전체 오더에 대한 밸런싱을 위해 작업자 별로 균등한 zone을 부여하는 것 보다는 각각의 오더 하나 하나 마다 밸런싱이 필요하다. 그리고, 표준시간을 기반으로 결정된 할당의 결과는 유연성의 측면에서도 문제가 있다. 즉, 생산시스템 및 물류시스템에서의 변동이나 불확실성을 고려하고 있지 않다. 제품(오더)의 종류가 점점 다양해지고 수명주기가 단기화 되는 시장환경에서 생산시스템(물류시스템)은 유연성을 갖추는 것이 필연적이다. 또한 이직률이 증가하고 각 자원의 능력이 상이한 경우가 일반적인 상황에서 각 자원에 작업을 고정하여 할당하는 것은 생산성의 손실로 이어지는 경우가 많다.

이와 같은 문제에 대응하기 위하여 최근 각 자원에 작업을 동적이고 자율분산적으로 배정하는 Bucket Brigade(BB) 방식이 소개되었다 (Bartholdi and Eisenstein, 1996). BB는 여러 공정으로 이루어진 흐름 라인에서 각 공정을 생산자원에게 자율적으로 할당하는 유연한 작업할당 방법이다. 이전의 라인밸런싱에 의한 생산환경이 배정된 작업을 수행한 후에 후행 생산자원에 넘기는 Push형 생산이라면, BB는 후행 생산작업이 선행생산자원에 제품을 가져와 작업을 수행하는 Pull 형 생산방식이다. BB방식은 초기에 의류산업과 창고에서의 Order Picking 작업에 적용되었고 그 적용 범위가 확산되어 현재는 여러 산업에서 적용되고 있다

(Bratcu and Dolgui, 2005).

## 1.2 연구내용

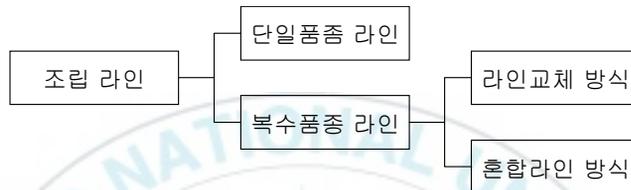
본 논문에서는 BB의 개념을 소개하고 BB의 활용 방안을 논한다. 본 논문의 2장에서는 생산시스템과 물류시스템에서의 기존 작업 배정 방식에 대해 알아보고, 3장에서는 Bucket Brigade에 의한 작업배정 방법을 소개하고, 4장에서는 시뮬레이션 실험 및 결과분석을 통하여 여러 작업 환경에서의 BB의 효용성을 검증한다. 5장에서는 결론과 향후 연구과제에 대해 제시한다.



## 제 2 장 기존 작업 배정 방식

### 2.1 생산 시스템에서의 라인밸런싱

제품이 라인을 따라 흐르는 조립라인 시스템은 다음의 [그림2-1]과 같이 분류되어진다.



[그림 2-1] 조립 라인의 종류(이용일과 최원준, 2003)

#### (1) 단일품종 라인(전용라인)

: 생산되는 품종이 1종류로서 이상적인 배치를 하기 쉽고, 관리도 용이하다.

#### (2) 복수품종 라인

##### 1)라인교체 방식

: 생산되는 품종이 변할 때마다, 공정편성을 바꾸는 것으로 제품이 흘러가고 있는 동안은 단일품종 라인과 같다. 단, 흐르는 품종이 많아지면 교체를 위한 Loss가 많아지고, 대부분 라인별 작업자수가 고정이므로 모델별 생산성에 의한 차이가 발생

##### 2)혼합라인 방식

: 복수의 품종을 혼류로 생산하는 방식으로 재고 및 재공품이 비교적 적고, 교체에 의한 Loss가 매우 적은 장점이 있다.

단, 생산계획 변경에 따른 품종의 혼합 비율이 변하면, 라인밸런싱이 무너지므로 편성방법이 복잡하고 어렵다.

위와 같은 생산 환경에서의 해결해야 될 문제는 생산라인을 균형있게 구축하는 것이다. 현실적인 면에서 볼 때, 생산자원별 작업량이 모두 동일할 수가 없기 때문에 생산자원에 유휴시간이 발생하게 되며, 병목공정이 문제로 부각된다. 병목공정이란 공정 중에서 작업량이 제일 많기 때문에 가장 느린 공정을 일컫는데, 라인의 생산능력은 병목공정의 작업시간에 의하여 결정된다. 또한 COMSOAL(Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Lines)은 Arcus에 의해서 처음으로 조립라인밸런싱문제를 해결하기 위해 컴퓨터를 이용하여 랜덤(random)하게 요소작업을 선정하여 흐름라인을 형성하는 시뮬레이션기법이다.(Arcus, 1966) 특히, 자원할당문제에 적용되었을 때 샘플크기가 방대할 경우 다른 기법들에 비해서 더 나은 결과들을 도출하였다고 보고되고 있다.(Depuy and Whitehouse, 2000)

흐름라인에서 생산자원간의 전후능력이 균형을 이루지 못하면 필연적으로 공정대기현상이 발생하여 중간재고품의 저장면적이 많이 소요되거나, 혹은 작업할 물량이 없어 유휴현상이 생기게 된다. 따라서 흐름라인의 생산자원에 작업을 균등하게 할당하는 것이 라인밸런싱이다. 라인밸런싱 방법은 작업별로 주어진 선후관계를 고려하여 밸런싱 효율이 최고가 되도록 각 생산자원에 작업을 할당하였다. 밸런싱 효율은 아래와 같이 정의된다.

$$\text{밸런싱효율(\%)} = \frac{\text{작업시간총합계}}{\text{cycletime} \times \text{생산자원수}}$$

여기서 cycle time이란 배정된 작업의 양이 가장 많은 생산자원의 작업시간을 의미한다.

## 2.2 물류 시스템에서의 Order picking

수많은 기업과 유통업 및 정부기관은 JIT(Just In Time), 신속반응(Quick Response : QR), 고품질 추구, 고객서비스 개선, 작업자 안전 및 환경보호 등을 지속적으로 선도해 왔다. 이 과정에서 창고에서는 주문품목들을 고객에게 공급하기 위한 공급활동 횟수가 과거에 비해 상대적으로 증가하였고, 신속하게 고객수요에 대응하기 위하여 창고의 수행도 향상에 대한 관심이 매우 높아졌다. 그리고 수요형태가 다양해짐에 따라 창고의 효율적 운영을 위하여 사용가능한 전략들이 제안되었다. 또한 토지비 상승, 임금 상승 및 인력 부족 등으로 인하여 창고의 효율적 관리에 대한 관심이 높아졌다. 이에 따라 창고의 역할은 보관이라는 협의의 의미에서 물자의 흐름을 조정하는 역할로 바뀌고 있으며, 창고 관리자들에게는 창고에서의 생산성 향상을 위한 노력과 함께 창고 업무의 효율적 관리에 대한 노력이 더욱 요구되어지고 있다.

창고에서의 업무는 일반적으로 입하, 보관, 오더피킹(Order picking), 출하 등으로 크게 구분한다. 그런데 최근 연구자들의 관찰과 창고 관리자들의 경험에 비추어 볼 때, 창고 전체 운영비용 중 50%이상을 차지하고 있는 오더피킹 업무는 창고에서의 생산성 향상을 위해 집중적으로 관리되어야 할 대상으로 인식되어지고 있다. 그리고 창고에서 생산성을 향상시키는 것과 직접적으로 관련이 있는 수행도는 주로 주문을 접수하고 접수된 주문 품목을 저장장소에서 꺼내어 고객에게 인도하기까지 걸리는 시간으로 평가한다. 수행도를 향상시키기 위해서는 수행도 향상과 직접적으로 관련이 있는 오더피킹 업무에서의 주문처리 시간을 줄여야 한다. 특히 오더피킹 업무에서의 50%이상을 차지하는 오더피커의 이동시간을 줄이는 것은 창고의 수행도 향상에 직접적인 영향을 줄 수 있다. 이러한 맥락에서 오더피킹 업무의 효율적 관리 및 신속하게 고객주문에 대응하

기 위한 기계화와 자동화에 대한 관심이 증가하고 있다. 그러나 전체 창고의 60%이상을 차지하고 있는 자동화되지 않은 창고에서는 오더피킹 업무의 자동화를 위한 자금 확보가 어려울 뿐 아니라 계속 늘어나는 창고업무로 인해 오더피킹 업무를 효율적으로 운영하는데 어려움을 겪고 있다.

오더피킹이란 저장 중에 있는 창고의 재고에서 고객으로부터 수주받은 물품을 주문별로 모아 출하하는 과정을 의미한다. 다품종 소량출고작업이 많아지면서 유통창고의 작업시간 분석에 의하면 30~40%가 오더피킹 작업에 투입되고 있으며, 직업 노무비도 약 40%를 점하고 있다. 최근에 영국에서 조사한 바에 의하면, 창고 운영비의 63%(출고비 포함)가 오더피킹과 관련하여 발생하는 것으로 나타나고 있다. 오더피킹 정책은 다음과 같이 세 가지로 구분할 수 있다.(김종학과 조상욱, 2004)

(1) 스트릭트 피킹(Strict Picking : 개별 처리)

: 이 정책은 싱글 피킹(Single Picking)이라고도 하며, 각 오더피커가 하나의 주문을 수령 받아 저장소를 이동하면서 주문품목을 모두 꺼내오는 정책으로 재분류 작업이 불필요하고 주문처리의 정확성이 높다는 장점이 있다. 따라서 주로 소량의 품목을 다루는 작은 창고에서 사용한다. 그렇지만 총 피킹 사이클이 길어지는 것이 단점으로 지적되고 있다.

(2) 존 피킹(Zone Picking : 구역별 처리)

: 오더피커마다 자신에게 할당된 구역을 담당하면서 주문처리를 하는 정책이다. 이 정책은 오더피커의 이동시간(Travel time)을 줄일 수 있으나 오더의 변동사항이 클 경우 오더피커가 대기하는 현상이 발생한다.

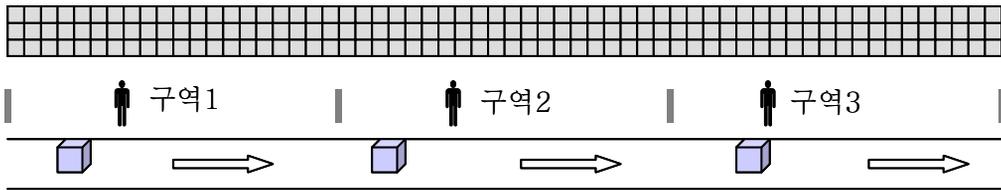
(3) 배치 피킹(Batch Picking : 품목별 처리)

: 오더피커는 불출해야 할 품목을 미리 지정 받고 여러 주문에 있는 품목을 배치(batch)단위로 묶어서 동시에 불출한다. 이 정책은 한번의 이동으로 여러 주문을 한꺼번에 처리하기 때문에 품목 당 이동시간이 감소하지만 주문을 처리하면서 주문분리를 동시에 하지 않기 때문에 후에 재분류 작업이 필요하다.

(4) 웨이브 피킹(Wave Picking)

: 존 피킹과 배치 피킹을 변형 한 것으로 오더피커는 자신에게 할당된 구역 내에서 여러 주문에 있는 품목을 배치단위로 묶어서 동시에 불출하는 방식이다. 이 정책은 존 피킹과 배치 피킹의 장단점을 보완한다.

본 논문에서는 존 피킹을 사용하는 오더피킹 시스템에 bucket brigade를 적용하는 경우를 다룬다. 존 피킹은 여러 요인에 의해서 채택되나, 주로 보관시스템의 레이아웃 상 다른 방식의 사용이 불합리한 경우나, 오더의 수는 많은데 반하여 오더당 인출해야 할 물품의 수는 적은 경우에 자주 활용된다. [그림 2-2]는 존 피킹 방식을 나타내고 있다. 일반적으로 존 피킹을 적용하는 창고의 형태는 직선형 또는 U자형이 대부분이다. 창고는 일정한 구역으로 분할되고 각 구역은 한명의 작업자가 인출 작업을 수행한다. 일반적으로 존 피킹을 채택하는 창고에서는 물품을 이동시키기 위해서 수동(passive) 컨베이어가 사용된다. 특정 주문 또는 주문을 모은 batch에 포함된 물품을 담은 역할을 하는 박스에 인출한 물품을 넣고 컨베이어를 따라 박스를 이동시킨다.



[그림 2-2] 존 피킹방식을 채택한 오더피킹시스템

모든 작업자는 담당구역의 시작지점에 놓여있는 박스로부터 담당구역에서 인출해야할 물품을 확인하고 차례대로 창고 랙(rack)으로부터 물품을 인출하여 박스에 넣는다. 담당구역에서 처리해야 할 해당 오더의 물품을 모두 인출한 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 유힬상태로 된다. 마지막 작업자는 모든 물품을 박스에 넣은 후에 다음 작업(예: 분류, 포장, 선적 등)을 위해 박스를 다음 작업장으로 향하는 컨베이어 위에 올려놓는다. 존 피킹 방식은 인출(pick) 후에 다음 구역으로 넘기면서(pass) 주문을 처리하므로 pick-and-pass 방식이라고도 한다.

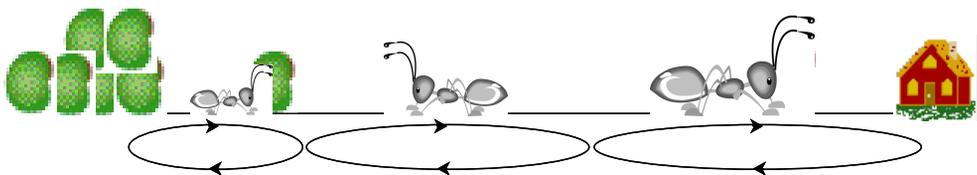
존 피킹 방식에서 작업자의 효율을 극대화하고 주문의 처리량을 늘리기 위해서는 각 구역에서의 작업량을 평준화 하는 것이 중요하다. 생산시스템의 조립라인에서 line balancing에 의하여 각 조립작업자에게 작업량을 균등하게 배분하는 것과 유사하다. 균등한 작업배분이 이루어지지 않으면 어떤 구역은 바쁘게 작업하는데 다른 구역에서는 일감이 없어 작업자가 유힬상태로 되는 경우가 발생한다. 이는 곧 시스템 효율에 악영향을 미치고 결과적으로는 주문 처리량을 감소시키고 주문 처리시간을 증가시키는 요인이 된다. 존 피킹에서의 작업량 균형과 관련하여, Jane(2000)은 주문량이 변화할 때 구역의 수를 조정하고, 각 구역의 부

하량을 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. 이러한 연구는 장기적인(예: 1년) 과거 데이터를 기반으로 각 구역의 부하율이 균등화 되도록 물품을 구역에 할당하는 것이다. 그러나, 실제 창고의 운영 시에는 주문의 내용이 계속 변화한다. 따라서 장기적으로는 균등한 부하가 가능할 지라도 일상 관리적인 측면에서 각 구역의 작업량은 시간에 따라 변화하는 것이 일반적이다. 또한 각 작업자는 개인의 능력에 따라 작업속도가 상이하므로 표준시간에 의해 각 구역의 부하가 균등화 되더라도, 실제 작업에서는 느린 작업자의 작업속도에 의하여 오더처리량이 결정된다. 기존의 존 피킹 방식은 이러한 실시간적인 운영상의 문제를 해결하기에는 한계가 있다. 본 논문에서는 위에서 설명한 기존의 존 피킹 방식에서의 운영상 문제점을 해소하기 위해 Bucket Brigade를 활용한 오더피킹 방식을 다룬다.

## 제 3 장 *Bucket Brigade*에 의한 작업배정

### 3.1 Bucket Brigade의 개념

Bucket Brigade(BB)는 개미가 먹이를 나를 때 서로 협력하는 행동을 모방하고 있다.([그림 3-1]참조) 개미가 먹이를 개미집으로 나를 때 강한 개미는 개미집에서 가까운 곳에서 먹이를 나르고, 약한 개미는 먹이가 있는 곳에서 먹이를 나른다. 개미집에서 가장 가까운 곳에서 일하는 강한 개미는 먹이를 운반해온 개미로부터 먹이를 넘겨받아 개미집으로 운반하여 보관한 후 다시 다음에 운반되는 먹이를 넘겨받기 위해 먹이가 운반되는 쪽으로 이동한다. 먹이를 처음 운반하는 약한 개미는 먹이를 물고 운반하기 시작한 후 이전 운반 작업을 마치고 돌아온 개미를 만나면 먹이를 넘겨주고 다음 먹이 운반을 위하여 다시 먹이 있는 곳으로 간다. 중간에 있는 개미는, 작은 개미로부터 먹이를 인도받아 개미집 방향으로 운반하다 큰 개미를 만나면 먹이를 넘겨주고, 새로운 먹이를 나르기 위해 먹이가 있는 장소로 다시 향한다. 모든 개미는 간단한 로직을 따르면 된다: "만일 먹이가 없으면 먹이 장소로 이동한다. 이동 중에 먹이를 나르는 개미를 만나면 먹이를 인도 받아 개미집 쪽으로 향한다." 이러한 로직은 다음과 같이 조립작업에 활용된다.



[그림 3-1] 개미의 먹이 운반

- (1) 제품의 조립작업을 선행 작업자에게 넘겨받아 조립 순서에 따라 작업을 수행한다.
- (2) 후행 작업자가 작업을 마치면 현 제품을 넘겨주고 선행 작업자에게 다음 제품을 넘겨받아 조립작업을 수행한다.

라인의 첫번째 작업자는 선행 작업자가 없으므로 라인의 시작부분에서 제품(주문)의 최초 조립작업을 시작으로 작업을 수행하고, 라인의 최종 작업자는 모든 조립 공정을 마치면 조립된 제품을 완성제품상자등에 넣는다. 이와 같이 작업을 수행하면 각 조립 작업장 사이의 중간재고 (WIP: Work In Process)가 없어지고, 각 작업자는 일정하게 할당된 작업만을 수행하는 것이 아니고 상황에 따라 제품마다 작업내용과 작업량이 변한다. BB의 특징은 중앙집중식이 아닌 분산 자율화 개념이라 말할 수 있다. 즉, 각 작업자는 중앙의 통제 없이 위의 간단한 로직을 따라 작업을 수행한다. 또 다른 BB의 장점은 라인이 스스로 balancing 된다는 것이다. 즉, 비록 작업숙련도의 차이에 의해서 작업속도가 차이가 나지만 BB 하에서는 모든 작업자는 각자의 능력만큼 일을 하게 된다.

BB를 기반으로 하는 작업할당 방법의 특징을 요약하면 아래와 같다.

- 자율균형 : 작업자를 속도별로 배치한다면 자율적으로 작업량이 균등 배분된다.
- Pull시스템 : 후공정의 작업자가 선행공정의 작업자에게 작업을 인계 받는 형식이다. 이러한 pull 형태는 WIP를 최소화 한다.
- 적응형 : 작업자의 작업속도와 시스템 환경변화에 따라 작업자의 작업량이 유연하게 조정된다.
- 분산제어형 : 시스템의 운영이 중앙 통제 없이 자율적으로 간단한 규칙에 의하여 이루어진다.

- 최대생산 : 각 작업자를 각자의 능력에 맞게 활용하므로 최대의 산출량을 달성할 수 있다.
- 교육훈련 : 간단한 규칙에 의해 다음 작업을 결정하므로 최소의 교육으로 작업을 이해할 수 있도록 한다.

### 3.2 Bucket Brigade의 표준모델

BB를 가장 유용하게 활용하기 위해서는 몇 가지 선행조건이 만족되어야 한다. (Bartholdi et al., 2001)는 BB를 적용하여 최대의 생산량을 달성할 수 있도록 하는 다음과 같은 이상적인 조건을 BB표준모델이라 하였다.

조건 1. 무시 가능한 walk-back시간. 선행 작업자로부터 작업을 넘겨받기 위해 걷는 시간은 총 조립작업 시간과 비교하여 아주 작다. walk-back시간이 0이면 모든 작업자가 후행 작업자에게 작업을 넘겨주는 시간은 최종 작업자의 작업 완료시간과 같아진다.

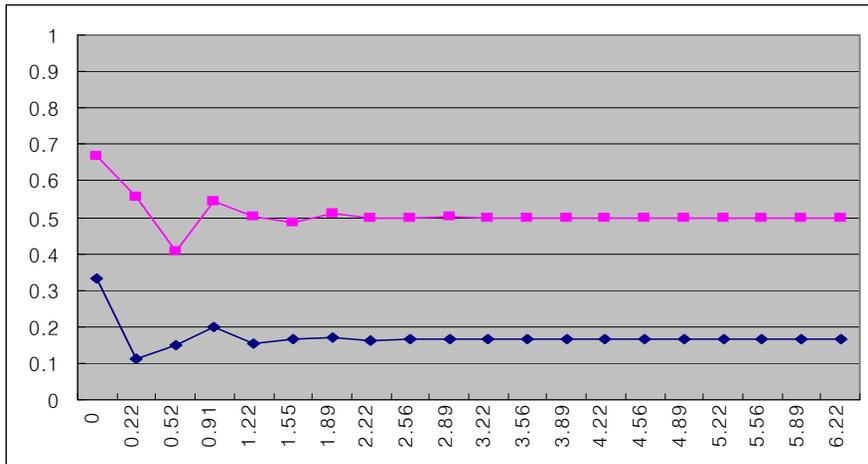
조건 2. 작업 속도에 의한 작업자 순서화. 각 작업자는 작업속도에 따라서 배치된다.

조건 3. 작업시간의 연속성 및 확정성. 각 작업의 작업시간은 확정적으로 주어지고, 모든 작업은 생산라인에 연속적으로 분포되어 있다. 이때, 모든 조립공정의 작업시간을 normalize하여 [0,1]로 정의할 수 있다.

위의 선행조건은 절대적인 것은 아니지만 BB의 효과를 최대화하기 위해 필요하다. BB표준모델에서는 중앙의 통제 없이 자율적인 Line Balancing이 가능하다. 여기서,  $x_i$ 는 작업자  $i$ 가  $[0,1]$  상에서 작업을 종료하는 위치라 하고,  $v_i$ 는 작업자  $i$ 의 작업 속도라 하면, 작업자가 어느 장소에서 작업을 시작하는 것과 관계없이 작업자  $i$ 는 결국 다음의 작업 시간 간격에서 작업을 하게 된다(Bartholdi and Eisenstein, 1996).

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

[그림 3-2]는 작업 속도가 각기 다른 (각각 0.5, 1.0, 1.5) 3명의 작업자가 BB를 적용하여 조립작업을 수행하는 경우의 각 작업자의 작업량을 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 작업인도 시간을 나타낸다. [그림 3-2]에서 BB를 적용하면 초기에는 각 작업자의 작업내용이 다소 간 변동이 있지만, 시간이 진행됨에 따라 각 작업자의 작업량이 수렴함을 알 수 있다. 즉, 안정된 상태에서 작업자 1은 총 작업의 17%, 작업자 2는 33%, 작업자 3은 50%의 작업을 수행한다. 이로써 BB에서는 작업자의 작업속도와 작업량이 비례함을 알 수 있다.



[그림 3-2] 작업자 3명인 경우의 작업 배정

또한 BB표준모델에서의 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)이고 이는 시뮬레이션에 의해서도 확인되었다. BB표준 모델에서는 각 생산자원의 손실시간이 없다. 따라서 생산자원을 100% 활용하는 효과가 있다. 이는 라인밸런싱 방법에서 밸런싱 효율이 100% 되는 것과 동일한 효과이다.

일반적으로 생산시스템 또는 물류시스템에서는 이와 같이 이상적이 조건을 모두 만족시키는 것은 불가능하다. 본 논문에서는 시뮬레이션 실험을 수행하여 현실적인 환경에서 BB의 활용성을 검증하였다.

### 3.3 기존 연구 현황

Bucket Brigade는 Bartholdi and Eisenstein(1996)에 의해 소개된 개념으로 물류시스템에서의 Order Picking 및 생산시스템에서의 조립라인

에 적용되어왔다. Bartholdi and Eisenstein(1994)은 의류산업에서의 흐름 라인에 각 작업자의 속도를 고려한 작업자 배치에 대한 연구를 수행한 결과 가장 느린 작업자를 선행공정에 가장 빠른 작업자를 후행공정에 배치하는 것이 가장 생산 효율이 높음을 보였다. 그리고 시간이 흐름에 따라 각 작업자의 작업 구간이 안정화되면서 작업자 스스로 최적화되었다. 또한 Bartholdi and Eisenstein(1995)은 bucket brigade를 적용하기 위한 생산자원의(작업자, 작업장, bucket의 크기) 설계와 운영의 기준을 제시하였으며, Bartholdi and Eisenstein(1996)은 bucket brigade를 사용하는 생산 라인이 생산환경의 변화에 자연스럽게 적응하는 민첩성에 대해 설명하였다.

Armbruster and Gel and Murakami(2007)는 bucket brigade가 사용되는 생산시스템에 새로운 작업자 한명을 투입할 때 시간의 변화에 따른 작업자의 학습상황을 고려하여 라인이 밸런싱되는 정도를 관찰한 결과 작업자의 밸런싱이 매우 견고함을 보였으며, Bartholdi et al(2006)은 트리구조 조립 네트워크에 bucket brigade를 적용하여 복잡한 조립 시스템에도 적용 가능함을 보였다.

실제로 산업현장에서 적용된 사례는 [표 3-1]과 같다. (<http://www2.isye.gatech.edu/~jjb/bucket-brigades.html>)

[표 3-1] Bucket Brigade 적용사례 : 미국중심

| 시스템                            | 회사/단체                                   | 성과   |
|--------------------------------|---|--|
| 물류                             | Revco Drug Stores, Inc. (now CVS)       | 국가 물류 센터 내 오더피킹에 적용, 피킹률 34%증가                                     |
|                                | Anderson Merchandisers                  | 2주간 임시 적용 결과 오더피커의 생산량이 20% 증가, 피킹 변동률이 90% 감소                     |
|                                | Readers Digest                          | 오더피커의 피킹률이 8% 향상, 피킹 에러 35% 감소                                     |
|                                | Wawa Convenience Stores, Inc.           | 오더피커의 첫째주 피킹률이 평균 25% 향상   |
|                                | Ford Customer Service Division          | 가장 인기 있는 제품이 회전식 원형 컨베이어에서 흐름 선반으로 이동, 피킹률이 50% 이상 증가              |
|                                | The Gap                                 | Old Navy, The Gap, Banana Republic 물류창고 피킹 모듈 내 BB를 사용, 처리량 25% 증가 |
|                                | Walgreen's                              | Walgreen물류센터에 BB를 사용, 4000개의 소매점에 공급                               |
| 생산                             | Radio Shack                             | Radio Shack 물류센터에 BB를 사용 오더피커를 통합                                  |
|                                | Coach Leatherware                       | 의류 재봉  |
|                                | Champion Products                       | 의류 재봉  |
|                                | Subway                                  | 샌드위치 생산  |
|                                | Tug Manufacturing                       | 공항 견인차 제조라인  |
|                                | Mitsubishi Consumer Electronics America | 텔레비전 조립라인, 휴대폰 패키징   |
| United Technologies Automotive | 자동화 장비의 조립                              |  |

## 제 4 장 Simulation 실험 및 결과분석

### 4.1 조립라인에서의 Simulation 실험 및 결과분석

시뮬레이션 모델은 Visual Basic 및 엑셀의 VBA를 이용하여 구축하였으며, 단일 제품을 생산하는 단일품종라인을 대상으로 하였다. [그림 4-1]



[그림 4-1] 단일 모델 조립라인

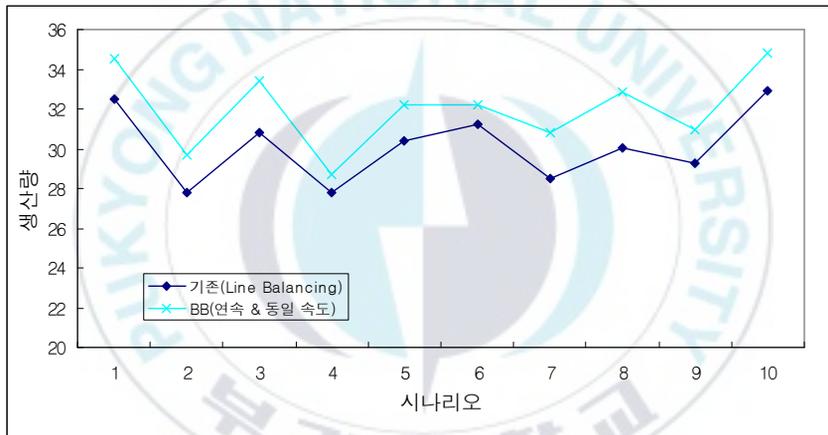
조립라인 실험의 조건으로는 [표4-1]에 주어져있다. 단일품종라인이므로 한가지 제품만을 생산하고 작업장의 수는 작업자의 수에 5배 정도 크게 하였다. 또한 다양한 상황을 고려하고자 10개의 시나리오를 생성하여 평균값을 구하였다. 요소작업시간은 각 시나리오마다 다르게 생성하였으며 Uniform분포로 2~4분으로 랜덤하게 생성하였다. 라인밸런싱에서 각 작업자는 각 시나리오마다 표준시간을 고려하여 전체 작업시간을 최대한 균등하게 나누어 작업장을 할당하였다.

[표 4-1] 조립라인 실험 조건

| parameter | value                    |
|-----------|--------------------------|
| 제품종류      | 1 종                      |
| 작업장 수     | 15 개                     |
| 작업자 수     | 3 명                      |
| 요소작업시간    | U(2,4) 분                 |
| 시나리오 수    | 10 개                     |
| 시뮬레이션 시간  | 8 시간<br>(40시간 이후 데이터 수집) |

#### 4.1.1 연속작업 및 동일 작업속도(기본분석)

이상적인 BB표준모델과 라인밸런싱 방법을 비교하기 위하여 공정이 연속 작업이며, 작업자의 속도가 동일한 경우를 가정하여 시뮬레이션 실험을 수행 하였다. 연속작업이라는 것은 후행 작업자가 선행작업자에게 작업을 인도받으려 할 때 즉시 인도 받을 수 있는 경우를 말한다. 즉, 선행작업자는 현재까지 하던 일을 멈추고 미완의 작업을 후행작업자에게 넘겨준 후에 앞 작업자에게서 수행할 작업을 인도받는 경우라 할 수 있다. [그림 4-2]은 실험 결과를 보여주고 있다.

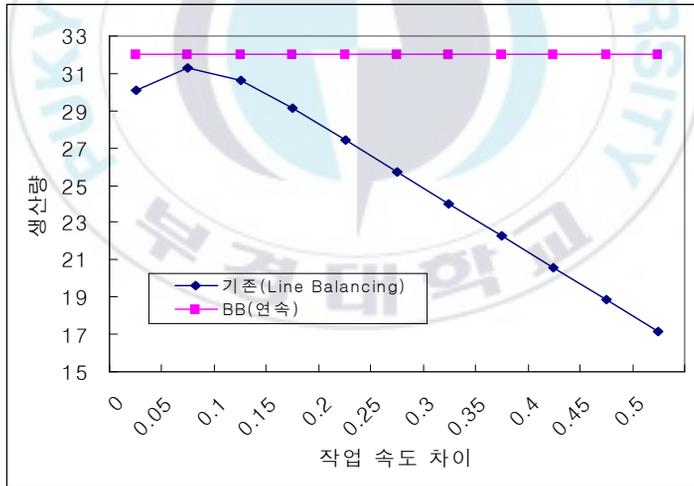


[그림 4-2] 이상적인 상황에서의 BB 및 라인밸런싱 수행도 비교

그림에서 BB(연속&동일 속도)가 라인밸런싱(기존)의 방법보다 단위 시간당 생산량이 많음을 볼 수 있다. 이는 이상적인 상황에서도 고정적인 작업배정방식인 라인밸런싱 방법의 경우는 100%의 밸런싱 효율을 얻지 못하는데 반하여 (이 경우는 94.2%) BB는 손실효율이 없는 100%의 효율을 달성하기 때문이다. 따라서, 라인밸런싱의 효율이 낮으면 낮을수록 상대적으로 BB의 수행도는 높아질 것이다.

#### 4.1.2 연속작업 및 작업속도 차이 있는 경우(BB의 표준모델)

본 절에서는 작업자의 작업속도가 차이 나는 경우를 대상으로 생산량의 변화를 관찰하였다. 여기서 작업자의 속도는 느린 작업자, 보통 작업자, 빠른 작업자를 두고, 보통 속도의 작업자를 기준으로 0.05단위로 더하거나 빼주었다. 예를 들어 작업 속도의 차이가 없는 경우는 작업 속도를 모두 1로 한데 반하여, 작업속도의 차이가 존재하는 경우는 세 작업자의 속도를 각각 0.95, 1.0, 1.05 또는 0.5, 1.0, 1.5 등으로 속도차를 정의하였다. 작업자의 속도차가 있는 경우 기존 라인밸런싱에서는 속도가 빠른 작업자를 작업부하가 가장 많은 작업장에 배치하였고, 가장 느린 작업자를 작업부하가 가장 낮은 작업장에 배치하였다. [그림 4-3]는 실험 결과를 보여주고 있다.



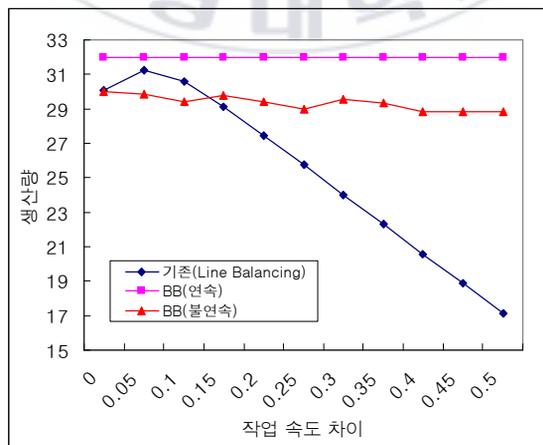
[그림 4-3] 작업 속도 차이 실험결과

BB는 작업자의 속도 차에 관계없이 일정한 생산량을 보여주었으나, 기존의 방법은 작업자의 속도차가 커짐에 따라서 0.05~0.1 구간에서 일시적으로 생산량이 증가함을 보이다가 다시 일정한 비율로 감소하는 것

을 보였다 . 이 구간에서 생산량이 증가하는 이유는 작업속도가 빠른 작업자에 가장 많은 작업량을 수행하도록 했기 때문인 것으로 분석된다. 그러나 일정한 속도차이 이상이 되면 작업량이 적더라도 느린 작업자에 의하여 생산량의 제약을 받기 때문에 생산량이 급속히 감소한다. 이상에서 볼 수 있듯이 연속 작업일 경우에 BB에서 작업 속도에 상관없이 더 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

#### 4.1.3 불연속작업 및 작업속도 차이 있는 경우

일반적으로 한 제품의 조립은 여러 공정(작업)으로 이루어져 있고 각 작업을 수행하기 위해서는 일정한 시간이 소요된다. BB의 표준모델에서는 작업시간은 연속적인 것으로 가정하여 후행 작업자가 선행작업자에게 제품을 인도 받을 때 선행작업자가 작업한 내용 이후부터 작업을 연속적으로 진행한다. 그러나 하나의 작업은 그 작업을 시작한 작업자가 완료해야 하는 경우가 있다. 본 실험에서는 이러한 작업환경에서 BB와 기존의 방법을 비교 분석한다. 여기서 기존(라인밸런싱) 방법은 공정이 연속일 때와 같게 실험 되었다. [그림 4-4]는 실험 결과를 보여주고 있다.

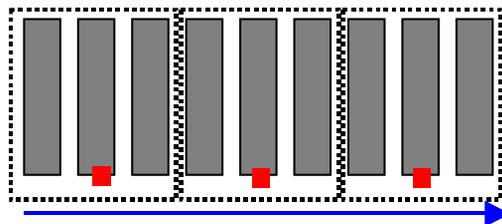


[그림 4-4] 불연속 작업에서의 수행도 비교

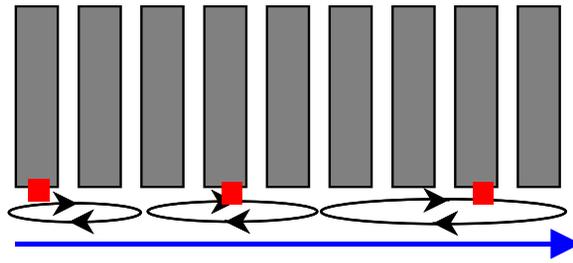
실험결과 불연속 작업인 경우에 BB의 수행도가 연속적인 작업인 경우보다 생산량이 높음을 볼 수 있다. 이는 불연속인 경우에는 작업자가 일을 마친 후 선행공정으로부터 곧바로 작업을 인도받을 수 없는 블로킹(Blocking)이 발생하여 유휴시간 (즉, 생산자원 loss)이 생기기 때문이다. 기존의 방법은 작업속도의 차이가 0.1일 때까지 생산량이 약간 더 좋다가 작업속도의 차이가 커질수록 일정한 비율로 생산량이 감소하였다. 즉 불연속 적인 경우에는 속도차이가 많지 않은 상태에서는 기존의 라인벨런싱 방법보다 BB방법이 모든 경우에 우수하다고 말할 수 없다는 결론을 얻었다. 그러나 그림에서 보듯이 BB의 수행도는 작업속도에 민감하지 않게 반응하므로 작업자의 속도차이가 어느 수준 이상 되면 BB방법의 활용이 수행도를 향상시킬 수 있다는 결론을 얻었다.

#### 4.2 물류시스템에서의 Simulation 실험 및 결과분석

오더피킹(Order picking)작업으로 이루어진 물류시스템에서 존 피킹(Zone picking)과 BB 피킹(Bucket Brigade picking)을 비교기위한 모델을 수립하였다. 존 피킹은 [그림 4-5]과 같이 각 작업자가 자기가 맡은 영역의 물품만을 피킹해서 릴레이식으로 다른 사람에게 넘겨주는 방법이며, BB 피킹에서는 [그림 4-6]와 같이 영역의 제한없이 자유롭게 피킹하여 다음 사람에게 넘겨주는 방법이다.



[그림 4-5] 물류시스템에서의 존 피킹



[그림 4-6] 물류시스템에서의 BB 피킹

실험대상 시스템은 두가지로 나누어 실험하였다.

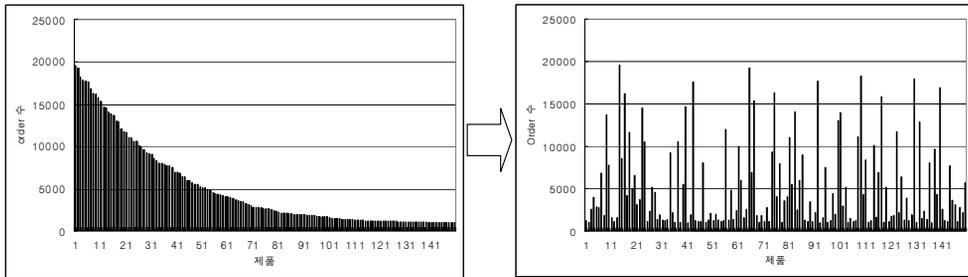
- (1) 기본적인 분석을 위해 조립라인에서의 실험조건에서 주문당 물품수만 15~30개로 바꾸어 실험하였고,
- (2) 존 피킹과 BB 피킹의 비교연구를 위해 물류시스템의 상황을 고려하여 실험조건을 표[ 4-2]와 같게 하여 추가적인 실험 분석을 하였다.

[표 4-2] 오더피킹 추가 실험 조건(Chin Chia Jane, 2000)

| parameter | value       |
|-----------|-------------|
| 제품종류      | 150 종       |
| 1일 주문량    | 800 order   |
| 주문당 물품수   | 6~12 (평균9개) |
| Zone 수    | 3 개         |
| 작업자 수     | 3 명         |
| 요소작업시간    | N(1,0.1) 분  |
| 실험 일수     | 100 일       |

또한, 각 오더(order)에 대한 100일 동안의 제품 150종의 피킹횟수는 모두 다를 것이다. 주문량이 많은 제품은 하루 오더 800개를 기준으로 800번의 피킹작업이 발생할 수 있으며, 주문량이 적은 제품은 하루에 피킹작업이 없을 수도 있다. 우리는 여기에서 제품 150 종을 각 3개의 존

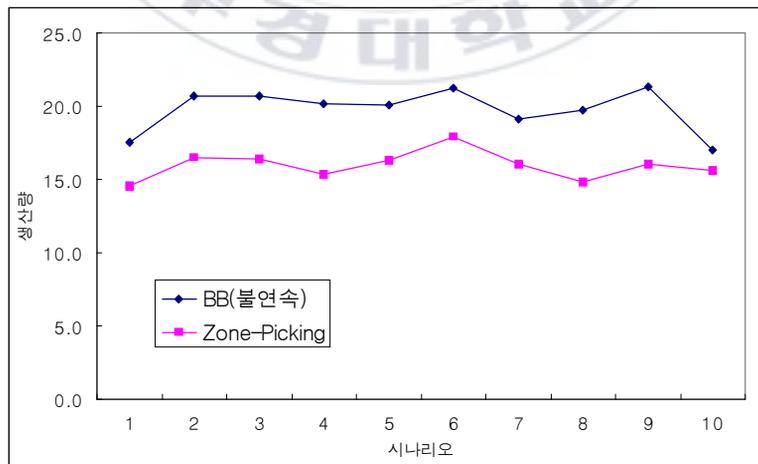
(zone)마다 균등하게 할당하기 위해 100일의 주문량을 기준으로 [그림 4-7]과 같이 제품을 분류하여 배치하였다.



[그림 4-7] 제품 배치

#### 4.2.1 존 피킹과 BB 피킹의 실험 결과 분석(기본분석)

BB 피킹과 존 피킹의 기본적인 분석을 위하여 공정이 불연속작업이며, 작업자의 속도가 동일한 경우를 가정하여 실험을 수행 하였다. 존 피킹에서는 작업자의 작업영역이 특정영역으로 제한되어 있으므로 인해 유희시간이 발생하는 반면 BB 피킹은 존 피킹과 같은 유희시간이 발생하지 않는다. [그림 4-8]은 실험 결과를 보여주고 있다.



[그림 4-8] BB 피킹 및 존 피킹 수행도 비교(기본분석)

그림에서 BB 피킹이 존 피킹보다 단위시간당 생산량이 많으며, 손실이 없는 BB 피킹의 쓰루풋이 23.8% 향상됨을 보였다.

#### 4.2.2 존 피킹과 BB 피킹의 추가 실험 결과 분석

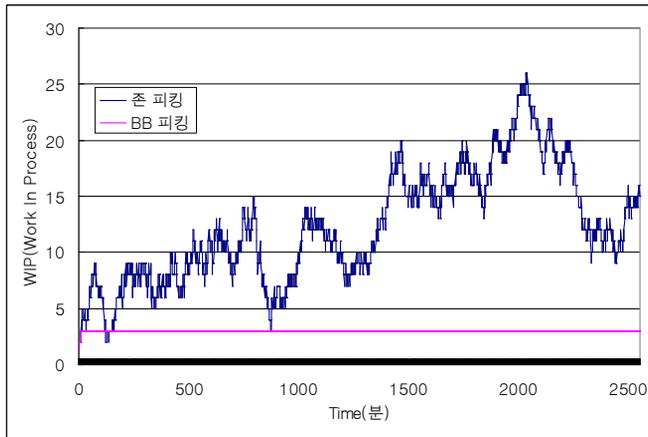
##### (1) BB 피킹과 존 피킹 비교

앞선 기본분석에서 BB 피킹의 경우 존 피킹보다 높은 수행도를 보였다. 존 피킹에서 BB 피킹과 같이 높은 수행도를 얻기 위해서 존 피킹에서의 버퍼의 크기를 무한이라고 가정하여 실험을 하였다. [표 4-3]에 실험 결과를 보여주고 있다. 성과 지표는 생산기간(Make Span)과 리드타임(Lead Time)으로 생산기간은 800개의 오더를 모두 처리하는데 걸리는 시간이며, 리드타임은 오더가 시스템에 투입되어 나오는데 까지 걸리는 시간을 말한다.

[표 4-3] BB 피킹과 존 피킹의 수행도 비교

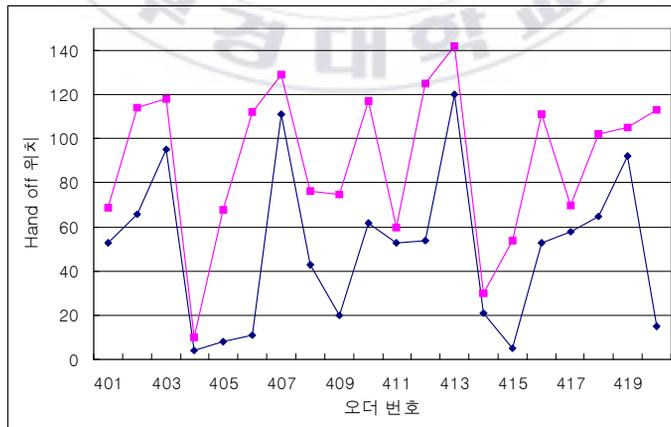
|           | BB 피킹 | 존 피킹  |
|-----------|-------|-------|
| Lead Time | 10.05 | 48.45 |
| Make Span | 2575  | 2576  |

표에서 BB 피킹과 존 피킹의 생산기간(Make Span)은 비슷하게 나타났다지만, BB 피킹은 존 피킹보다 훨씬 더 짧은 리드타임을 보였다. 또한 시스템 내 WIP수준에 대한 분석을 수행한 결과 [그림 4-9]와 같은 결과를 보였다.



[그림 4-9] BB 피킹과 존 피킹의 WIP 변화

BB 피킹에서의 WIP 수준은 3으로 일정한데 반해, 존 피킹에서의 WIP 수준은 평균 12.303에서 크게 변동하는 모습을 보였다. 그리고 BB 피킹에서 1일째 특정 시점(401오더 420오더 사이)에 선행작업자가 후행 작업자에게 작업을 넘겨주는 위치(Hand off)를 분석한 결과 [그림 4-10]과 같은 결과를 보였다.

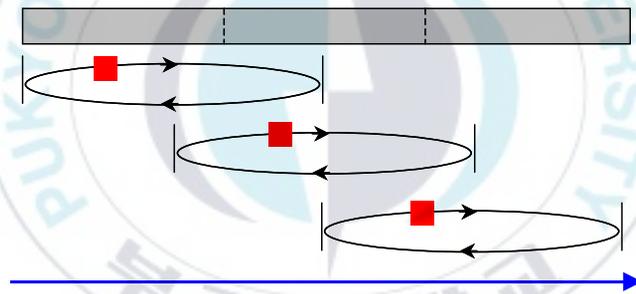


[그림 4-10] BB 피킹에서의 Hand off 위치

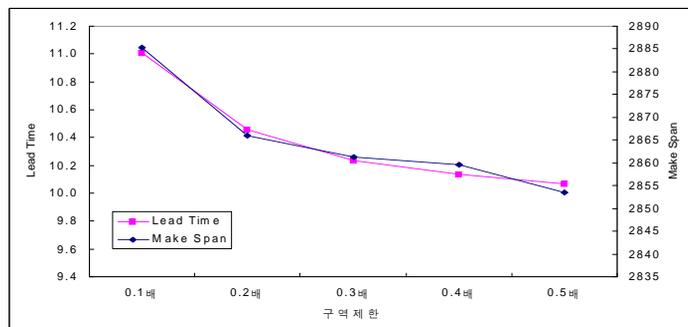
존 피킹은 작업영역이 1~50, 51~100, 101~150으로 일정한 것에 반해 BB 피킹은 그림과 같이 특정 지점에 상관없이 작업을 넘겨주는 것을 보였다. 이러한 경우 시스템 내 혼잡도 및 복잡도가 증가할 수 있다.

(2) BB 피킹에서 구역제한이 있는 경우

본 실험에서는 BB 피킹의 작업 혼잡 및 복잡을 줄이기 위해 구역제한이 있는 경우를 가정하여 리드타임 및 생산기간의 변화를 관찰하였다. 여기서 작업자의 구역은 존 피킹에서의 작업영역에서 1.1~1.5배 만큼 곱하여 최초로 작업을 시작하는 작업자와 최종적으로 작업을 마치는 작업자와 겹치지 않도록 하였다. [그림 4-11]는 존 피킹의 작업영역에 1.5배 한 것이다.



[그림 4-11] BB 피킹에서 구역제한이 있는 경우

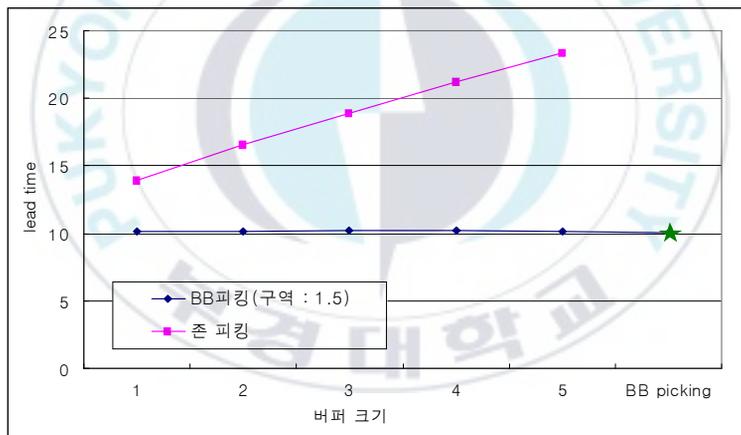


[그림 4-12] BB 피킹에서 구역제한이 있는 경우의 수행도

작업자의 할당 구역이 증가할수록 리드타임과 생산기간이 감소하여 할당 구역이 증가할수록 BB 피킹의 수행도가 좋게 나타났지만, 영역 제한이 없는 BB 피킹(리드타임 : 10.05, Make span : 2575)과 비교하였을 때 수행도가 크게 향상됨은 보이지 못했다.

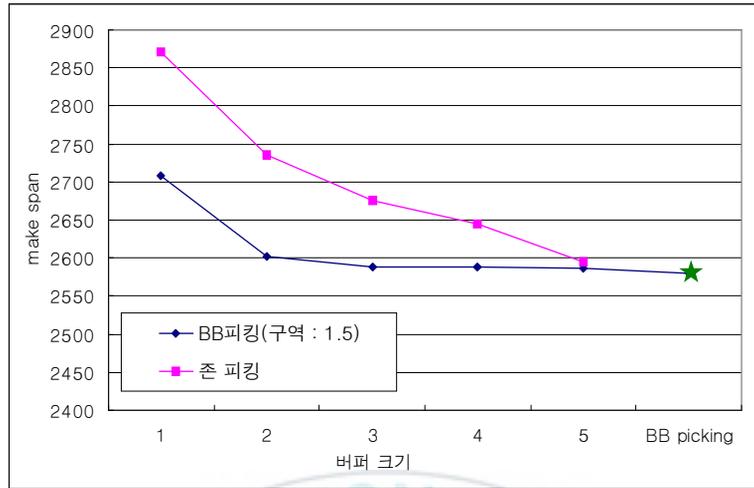
(3) 존 피킹과 구역제한이 있는 BB피킹에서 버퍼제약이 있는 경우

앞선 실험 결과 구역제한이 있는 BB피킹에서 측정결과 값이 구역제한이 없는 BB피킹에서의 생산기간(make span)을 보여주지 못하였다. 따라서 구역제한이 있는 BB피킹(구역1.5배)에 버퍼를 두어 실험하여 [그림 4-13], [그림 4-14]와 같은 결과를 보였다.



[그림 4-13] 버퍼 크기에 따른 리드타임 변화

존 피킹에서 버퍼의 크기가 커질수록 리드타임이 길어짐을 보였다. 또한 구역제한이 있는 BB피킹에서 리드타임은 버퍼의 크기 변화에 상관없이 거의 일정한 값을 나타내며, 구역제한이 없는 BB피킹의 값과 유사하게 나옴을 알 수 있다.

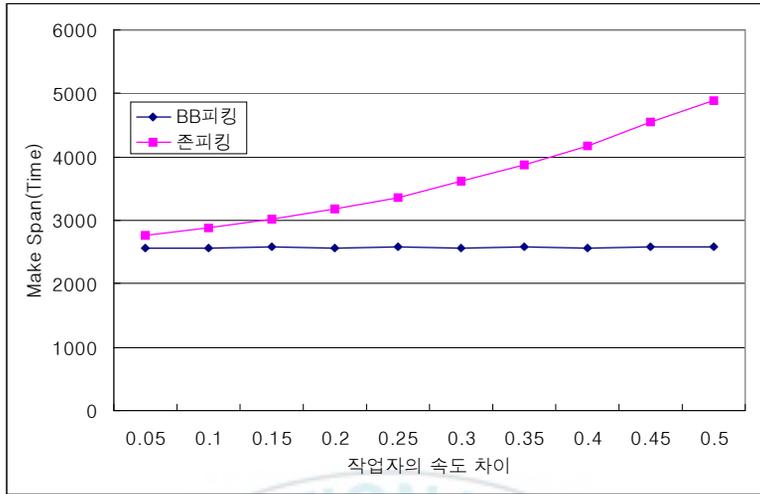


[그림 4-14] 버퍼 크기에 따른 생산기간 변화

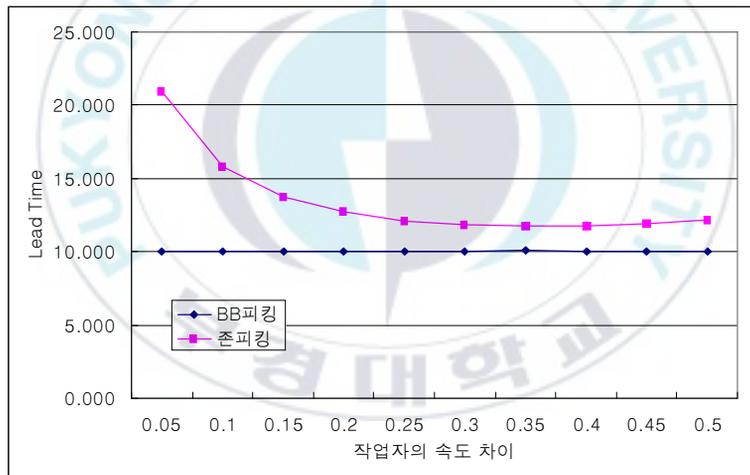
일반적으로 구역제한이 있는 BB피킹이 존피킹보다 더 좋은 결과를 보였으며, 구역제한이 있는 BB피킹에서 버퍼의 크기가 3개 이상이 되면 구역제한이 없는 BB피킹과 비슷한 생산기간을 보인다. 따라서 버퍼를 일정량 둘 수 있는 경우에 구역제한이 있는 BB피킹을 사용한다면 더욱 더 효과적으로 적용할 수 있음을 알 수 있었다.

#### (4) 작업자의 작업속도의 차이가 있는 경우

본 절에서는 BB 피킹과 존 피킹의 작업자의 속도 차이에 따른 리드 타임과 생산기간의 변화를 관찰하였다. BB의 표준모델에 따라 가장 느린 작업자를 선행 공정에 가장 빠른 작업자를 후행 공정에 배치하였다. [그림 4-15]과 [그림 4-16]는 실험 결과를 보여주고 있다.



[그림 4-15] 작업자의 속도차이에 따른 생산기간 변화



[그림 4-16] 작업자의 속도차이에 따른 리드타임 변화

[그림 4-15]에서 BB 피킹의 경우 작업자의 속도차이에 따른 생산기간의 변화가 거의 없는 것에 반해 존 피킹에서는 가장 느린 첫 번째 작업자에 의해 생산기간이 결정되므로 작업자의 속도차이가 커질수록 생산기간이 늘어남을 볼 수 있었다. 또한 [그림 4-16]에서 BB 피킹은 작업자의 속도차이에 상관없이 일정한 리드타임을 보였으나 존 피킹에서는 속

도차이가 커질수록 자신의 오더를 빨리 마친 후행 작업자가 선행 작업자로부터 작업을 바로 넘겨받을 수 있기 때문에(블로킹시간의 감소) 오더의 리드타임이 감소하는 것으로 나타났다.



## 제 5 장 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 조립라인에서의 단일품종 라인 및 작업자에 의한 오더피킹 작업으로 이루어진 환경에서 각 작업을 생산자원에게 자율적으로 할당하는 유연한 작업할당 방법인 Bucket Brigade(BB)의 개념을 소개하고, 그 효율성을 검증하기 위해 생산시스템에서의 라인밸런싱 방법 및 물류시스템에서의 존 피킹 방법과 비교분석 실험을 수행하였다. 실험결과 BB는 중앙통제에 의한 특별한 지시없이 동적인 작업배정이 가능하기 때문에 기존의 라인밸런싱 및 존 피킹 보다 높은 수행도를 보임을 알 수 있었다. 특히 작업자의 작업속도가 차이가 나는 경우에 더 좋은 결과를 보여 주었다. 이는 작업자의 개인적인 능력이 다르고 또한 최근 많은 이직현상에 따른 숙련자와 초보자가 같은 라인에서 일을 하게 되는 경우에 특히 BB가 유용한 작업배정 방법이라는 것을 보여준다. 생산조립라인에서 작업의 분할이 불가능한 경우에는 BB의 경우 생산자원이 일정기간 대기해야 하는 현상이 발생하므로, 이 경우에는 작업자의 속도가 미미하다면 오히려 기존의 라인밸런싱 방법이 더 좋은 결과를 보이고 있음을 확인 하였다. 오더피킹 작업에서는 오더마다 피킹 작업이 변함에 의해 작업자별 작업량이 크게 차이 나게 되어 수행도가 나빠짐을 보였고, 존 피킹에서 WIP를 저장하는 버퍼의 크기에 제한이 없다면 BB 피킹과 같은 수행도를 보였다. 또한 BB 피킹의 경우 시스템 내 복잡성의 증가를 감소시키기 위해 BB 피킹에서 구역을 제한한 결과 구역제한이 없는 BB 피킹만큼의 우수한 수행도를 얻지 못하였으며, 구역제한이 있는 BB피킹에서 버퍼 제약을 두어 실험한 결과 일정량 이상의 버퍼가 있다면 구역 제한이 없는 BB피킹과 비슷한 결과를 보였다. 또한 작업자의 속도차이에 따른 쓰루풋의 변화는 생산시스템에서의 실험결과와 유사하게 나옴을

알 수 있었다.

BB에 대한 연구는 아직 초기단계이다. 산업체에 적용한 사례도 이제 시작 단계이나, BB 개념을 적용한 사례에서는 커다란 생산성의 증대를 경험하고 있다(Bratcu and Dolgui, 2005) BB를 적용하기 위해서는 여러 가지 선행적으로 해결해야할 문제들이 있다. 시스템이 안정되고 작업자간의 작업속도에 차이가 있으면 각 작업자의 담당 작업은 일정한 작업으로 수렴되지만 시스템에 변동성이 있으면 작업자의 작업 내용이 계속 변할 것이다. 이러한 상황에서는 모든 생산자원이 작업에 대한 전반적인 지식이 있어야 한다. 또한 각 생산자원이 작업자인 경우 작업내용이 계속 변함에 따라 혼란이 야기 될 수 있고, 중요한 노사간의 협약사항이 될 수도 있다. 또한 작업자의 작업속도를 고려하여 동적으로 작업을 할당할 경우에는 부작용도 함께 따를 수 있다. Schultz et al. (2003)는 유연한 작업할당의 역작용이 이를 통해 얻는 이익보다 클 수 있으므로 이러한 방법의 적용은 신중을 기해야 한다고 주장하고 있다.

본 연구에서는 몇 가지 상황에서 BB를 기존의 방법과 비교하고 있으나 추후에 walk-back 시간이 있는 경우, 기계고장이나 불량 등의 이상 상황, 다품종의 생산 라인의 경우에서의 BB 수행도 분석을 수행하여 보다 종합적인 연구를 수행하는 것이 앞으로의 연구과제이다.

## 참고문헌

- [1] 김종화, 조상욱 (2004), 오더피킹 지원 시스템 개발과 피킹정책 비교 분석, 대한설비관리학회, 6권 2호, 109-129.
- [2] 이용일, 최원준 (2003), 혼류 조립라인의 재빨린싱에 관한 연구, 경영과학회 2003 춘계학술대회 논문집.
- [3] 황학 (2001), 작업관리론, 영지문화사.
- [4] Armbruster, Gel and Murakami (2007), Bucket Brigades with worker learning, European Journal of Operations Research, 1, 1, 264-274.
- [5] Arcus, A.L. (1966), COMSOAL : A computer method of sequencing operations for assembly lines, International Journal of Production Research, 4, 259-277.
- [6] Bartholdi and Eisenstein (1994), A production line that balances itself, Operations Research, 44, 1 21-34.
- [7] Bartholdi, Eisenstein and Charlotte Jacobs-Blecha and H. Donald Ratliff (1995), Design of bucket brigade production lines, ([www.isye.gatech.edu/~jjb](http://www.isye.gatech.edu/~jjb)).
- [8] Bartholdi and Eisenstein (1996), The agility of bucket brigade production lines, Proceedings of Conference on Flexible and Intelligent Manufacturing, January 22.
- [9] Bartholdi J.J., Eisenstein and Lim (2006), Bucket brigades on in-tree assembly networks, European Journal of Operational Research, 168, 870-879.

- [10] Bartholdi, J.J., Eisenstein, D.D. and Foley, R.D. (2001), Performance of bucket brigades when work is stochastic, *Operations Research*, 49(5), 710-719.
- [11] Bratcu, A.I and Dolgui, A. (2005), A survey of self-balancing production lines("bucket brigade"), *Journal of Intelligent manufacturing*, 16, 139-158.
- [12] Buzacott (2002), The impact of worker differences on production system output, *Production Economics*, 78, 37-44.
- [13] Charles G. Petersen (2002), Considerations in order picking zone configuration, *International Journal of Operations & Production Management*, 22, 7, 793-805.
- [14] DePuy, G.W. and Whitehouse, G.E. (2000), Applying the COAMSOAL computer heuristic to the constrained resource allocation problem, *Computers and Industrial Engineering*, 38, 413-422.
- [15] Jane, C.C. (2000), Storage location assignment in a distribution center, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 30, 1, 55-71.
- [16] Jane, C.C. and Laih, Y.W., (2005), A clustering algorithm for item assignment in a synchronized zone order picking system, *European Journal of Operational Research*, 166, 489-496.
- [17] Le-Duc, T. and Koster, R. D.(2005), Determining Number of Zones in a Pick-and-pack Orderpicking System, *Erasmus Research Institute of Management*.

- [18] 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.
- [19] <http://www2.isye.gatech.edu/~jjb/bucket-brigades.html>



*Effectiveness Analysis of Bucket Brigade  
in Manufacturing and Logistics Systems*

Hee-Young Kang

*Department of Systems Management & Engineering,  
The Graduate School,  
Pukyong National University*

Abstract

In the environment that a series of processes have to be done in sequence to manufacture a product (or a service), work assignment, which decide how much elemental work should be assigned to manufacturing resources (machines or workers), is a critical decision making matter. In general, work assignment pursues the line balancing (LB) strategy that assigns equal work load to each manufacturing resource as much as possible. However, because LB assigns work without considering difference in workers' working speed and various changeable factors (mechanical failures, quality problems, etc.) in the system, it is difficult to attain the planned balancing efficiency. To cope with this problem, bucket brigade (BB) was proposed as a new work assignment method. BB is an autonomous distributed work assignment method based on the concept of ants' collaborative work. In this paper, we discuss the applicability of BB in manufacturing and logistics systems and its problems, and analyze the performance of BB in various work environments through simulation.

keywords : Bucket Brigade, Line Balancing, Zone picking

## 감사의 글

부경대학교에 입학했을 때가 엇그제 같은 데 벌써 7년이라는 시간이 흘렀습니다. 학부 및 대학원 생활동안 하고자 했던 것은 많았지만 다 이루지 못하고 이렇게 마치게 되어 아쉬움이 많이 남습니다. 부족한 저에게 논문을 쓸 수 있게 해준 분들에게 이 자리를 빌어 감사의 마음을 전하려합니다.

먼저 지금까지 제가 커나갈 수 있도록 저의 든든한 버팀목이 되어주신 부모님께 감사를 드립니다. 그리고 마산에서 좋은 선생님이 되고자 목이 쉬어가며 고등학생을 가르치는 누나에게도 감사의 마음을 전합니다.

학부와 대학원 7년이란 기간 저에게 애정을 가지고 지속적인 가르침과 많은 조언을 해주신 구평희 교수님께 머리숙여 감사를 드립니다. 그리고 바쁘신 와중에도 저의 논문을 심사해 주신 고시근 교수님, 김영진 교수님께 감사를 드립니다. 그리고 2년여 대학원 생활동안 각별한 사랑으로 학문적 지도편달을 아낌없이 해주신 김병남 교수님, 오수철 교수님, 이운식 교수님, 권혁무 교수님, 옥영석 교수님, 김민수 교수님, 박병무 교수님께도 감사의 인사를 드립니다.

석사생활을 즐겁게 할 수 있게 해준 대학원 식구들에게도 깊은 감사를 드립니다. 대학원의 정신적 지주이신 진아 누님, 지현선배, 친형처럼 도와주신 원일선배, 찬호선배, 철호형, 정수선배, 학부 때부터 지금까지 수업을 같이하며 힘이 들 때 힘이 되었던 동기 유진, 갓 대학원에 들어오시는 정희 선배에게 감사드립니다. 그리고 필요할 때 마다 찾아가서 귀찮게 해도 싫은 내색 없이 도움을 주신 조민정 선생님, 동기 혜란이에게도 감사의 마음을 전합니다.

나의 대학생활을 같이한 물류 및 정보시스템 연구실 선배, 후배들에게도 감사드립니다. 항상 친절하신 대원선배, 상중선배, 상준선배, 동기 윤희, 대석, 실험실 힘든 일 도맡아 했던 후배 혼섭, 기중, 성연, 현지, 은혜에게 감사의 마음을 전합니다.

늘 바쁘다고 모임도 자주 못 나가고 연락도 먼저 잘 못하지만, 늘 함께 해준 고등학교 1학년 8반 등나무 친구들, 지수, 광안, 강술, 준형, 유황, 동우, 경인, 주형, 성한에게도 감사의 마음을 전합니다.

결코 짧지 않은 2년여의 시간 동안 감사와 고마움을 표할 사람이 너무 많아 혹 빠뜨린 사람이 있을까 걱정이 되지만, 저를 지도해주신 교수님들, 연구실 사람들, 친구들, 그리고 사랑하는 가족들 모두에게 이렇게 짧게나마 감사의 뜻을 전합니다.

모든 분들께 다시 한번 머리 숙여 감사드립니다.

강 희 영 드림

