

자율적인 벨런싱을 실현하는 Bucket Brigade 기반의 조립셀 운영방식

구평회*

부경대학교 시스템경영공학과

Application of Bucket Brigades in Assembly Cells for Self Work Balancing

Pyung-Hoi Koo

Department. of Systems and Management Engineering, Pukyong National University

Assembly line has been recognized as an efficient production system in mass production. However, the recent production environment characterized as mass customization urges production managers to transform a long assembly line to a number of short assembly cells. To maximize the utilization of resources in an assembly cell, it is important to have the line balanced. This paper presents a bucket brigade-based assembly cell. Bucket brigade is a way of coordinating workers who progressively perform a set of assembly operations on a flow line. Each worker follows a simple rule: perform assembly operations on a product until the next worker downstream takes it over; then go back to the previous worker upstream to take over a new assembly job. In this way, the line balances itself. The bucket brigade assembly cell is analyzed and compared with traditional assembly lines and general assembly cells. The paper also discusses some prerequisite requirements and limitations when the bucket brigade assembly cells are employed.

Keyword: assembly cell, bucket brigades, ant behavior, line balancing, dynamic assignment

1. 서론

컨베이어 조립라인은 1900년대 초에 포드 자동차의 조립라인에 도입된 이래 대량생산(Mass Production) 환경에서 전형적인 생산체제로 널리 사용되어오고 있다. 컨베이어 조립라인은 표준화, 전문화, 단순화를 특징으로 하고 있으며, 생산해야 할 제품의 종류가 적고 라이프사이클이 긴 제품을 생산하는데 적합한 시스템이다. 전통적인 조립라인에서는 많은 조립작업자가 길게 연결된 컨베이어 조립라인에서 각 작업자에게 할당된 조립작업을 수행하여 완제품을 생산한다. 조립라인에서 어떤 작업자가 어떤 요소조립작업을 수행 할지 결정하는 문제를 라인

벨런싱(line balancing) 문제라고 한다. 라인벨런싱은 생산자원(작업자)을 최대한 활용하기 위하여 각 작업자에게 가급적이면 균등하게 작업을 배정한다.

라인벨런싱을 통한 조립라인의 설계는 그동안 많은 연구가 수행되어 왔다. Scholl and Becker(2006)와 Becker and Scholl(2006)은 여러 가지 조립라인 작업할당 방식을 심도 있게 조사한 논문을 발표하였다. 대부분의 기존 연구는 라인벨런싱을 통해 작업이 각 작업자에게 균등하게 할당 되도록 하고, 작업자는 할당된 조립작업을 반복적으로 수행하는 정적인 환경을 다루고 있다(e.g., Arcus, 1966; Lapierre *et al.*, 2006; Corominas *et al.*, 2008). 이와 같이 정적으로 균형잡힌(balanced) 조립라인은 불확실성

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

*연락처 : 구평회 교수, 608-739 부산광역시시 남구 용당동 산 100 부경대학교 시스템경영공학과, Fax : 051-629-6478,

E-mail : phkoo@pknu.ac.kr

투고일(2009년 02월 20일), 심사일(1차 : 2009년 03월 27일), 게재확정일(2009년 04월 29일)

과 변동성이 없는 안정된 생산환경에서 효율적으로 운영될 수 있으나, 현실적으로는 아래와 같은 문제점이 존재하여 계획된 생산성을 달성하기가 어렵다.

- (1) 표준시간 활용의 문제 : 일반적으로 라인밸런싱에서 각 자원에 할당하는 작업의 양을 시간으로 표현하기 위하여 확정적 수치인 표준시간이 이용된다. 조립라인을 설계하는 당시에는 어느 작업자가 어떤 작업장을 담당하게 될지 결정되지 않는 상태가 일반적이므로 라인밸런싱에 의한 작업할당 의사결정 시에 보통정도의 숙련도를 가진 작업자가 정상적인 작업환경 하에서 보통의 작업속도로 작업할 때 소요되는 시간인 표준시간을 이용하는 것은 당연하게 생각될 수 있다. 그러나 현실적으로 표준시간 설정 시에 가정된 이러한 조건을 만족하는 경우는 드물다.
- (2) 생산시스템에서의 변동과 불확실성 : 설비, 작업자, 품질, 수요 등 여러 요인에 의하여 생산시스템은 항상 변동성과 불확실성이 존재한다. 예를 들어 한 작업장에서 설비에 이상이 발생한 경우에 컨베이어 라인 전체가 중단되고 이에 따라 생산실적은 계획량에 미치지 못한다.
- (3) 다품종 생산라인 : 최근 대부분의 조립라인은 다품종의 제품을 하나의 라인에서 생산한다. 이러한 상황에서는 라인밸런싱이 복잡하고 효율도 낮다. 또한 제품의 생산조합(product mix)이 변경될 때마다 라인 구성을 새롭게 해야 한다.
- (4) 제품의 라이프 사이클 단축 : 현대의 시장환경은 소비자의 요구가 급변하고 따라서 제품의 라이프사이클이 단축되고 있다. 이러한 상황에서는 생산제품이 자주 변하게 되고 이에 맞게 생산시스템을 조정해야 된다. 이러한 잦은 시스템 조정은 혼란을 가중시키고 생산성을 저하시키는 요인이 된다.
- (5) 균형손실 : 최적의 라인밸런싱 알고리즘이라 하더라도 작업의 불연속성 때문에 일반적으로 100%의 균형효율을 달성하지 못한다. 이러한 균형손실은 자원의 낭비를 가져오고 결국 시스템에서 산출되는 output을 떨어뜨린다.
- (6) 작업자의 작업속도 차이 : 현실적으로 각 작업자는 숙련도나 각 개인의 능력 등에 의하여 작업속도에 차이가 난다. 작업속도 차이는 최근의 이직률과 임시직의 증가로 인해 더욱 중요한 관리요소가 되고 있다. 이와 같은 경우는 이론적으로 산출된 라인밸런싱 효율과는 다르게 가장 느린 작업자의 작업속도에 의하여 시스템의 효율이 결정된다.

상기와 같은 기존 일반조립라인의 문제점으로 인하여 조립라인은 수요의 변동성, 제품의 다양성, 짧은 라이프사이클 등을 특징으로 하는 최근의 Mass Customization 환경에서 다른 형태의 생산방식으로 대체되고 있다. 그 중에 대표적인 것이 셀(cell) 생산방식의 도입이다. 일반조립라인이 단순 반복작업을 통한 소품종 대량생산 체제에 적합한 방식이라면, 셀생산 방식은 적은 인원의 작업자가 생산셀에서 모든 조립 공정을 소화하는 자기완결형 생산 체제이다. 셀생산방식은 기존의 일반적인 조립라인과 비교하여 생산성과 유연성을 동시에 얻을 수

있는 방식으로 최근에 많은 기업에 의해 산업현장에 도입되고 있다. 그러나 기존의 조립셀 방식은 위에서 언급한 문제점의 많은 부분을 제거하거나 완화시키지만 셀 내에서 밸런싱이 필요하다라는 점에서 아직도 위의 문제점을 완전히 해결하지 못한다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 각 자원에 작업을 동적이고 자율분산적으로 배정하는 Bucket Brigade (BB)를 적용한 조립셀을 소개한다. BB는 여러 공정으로 이루어진 라인에서 각 공정을 생산자원에게 자율분산적으로 할당하는 동적인 작업할당 방법이다. Scholl and Becker (2006)가 조사한 기존의 라인밸런싱에 의해 운영되는 생산라인에서는 작업자가 각자에게 할당된 조립작업을 완료한 후에 후행 작업자에게 나머지 조립작업을 넘기는 Push형 생산이라면, BB 기반의 조립셀은 후행 작업자가 조립작업을 완료하면 선행 작업자에게서 조립작업을 인수받아 조립작업을 수행하는 Pull형 생산방식이다.

본 논문에서는 Bucket Brigade를 이용한 새로운 조립라인 운영 방식을 소개하고 분석을 통하여 그 활용성을 연구한다. 여기서, 라인밸런싱 방법이라 하지 않고 조립라인 운영 방식이라고 한 것은 단순히 작업을 할당하는 방식이 아니고 라인의 운영 방식까지도 변경되어야 하므로 사용한 용어이다. 다음의 제 2장에서는 조립라인과 BB에 대한 일반적인 내용을 소개하고, BB를 기반으로 하는 조립셀을 설명한다. 제 3장에서는 사례를 가지고 여러 가지 조립작업환경에서 BB조립셀, 일반조립라인 및 일반조립셀의 수행도를 분석한다. 제 4장은 논문의 결과와 BB조립셀을 도입할 경우에 고려해야 할 사항에 대해서 논한다.

2. 조립셀 및 Bucket Brigade

2.1 조립라인 및 조립셀

조립라인은 컨베이어 벨트 등의 물류 설비를 따라 정렬된 m 개의 작업장 (또는 작업자)으로 구성되어 있다. 제품은 n 개의 요소조립작업을 통하여 완성품으로 조립된다. 조립라인에서 작업자는 제품이 도착하면 할당된 하나 이상의 조립작업을 수행한다. 각 작업자는 하나의 제품에 대하여 사이클타임(cycle time : c) 이내에 작업을 수행해야 한다. 사이클타임은 생산해야 할 제품의 수량을 생산에 투입되는 시간을 나누어 얻은 값을 고려하여 결정한다. 조립라인의 라인밸런싱은 밸런싱효율이 최대가 되도록 작업을 작업자에게 할당한다. 밸런싱효율 E 는 $E = T/(m \cdot c)$ 에 의해 구해진다. 여기서 T 는 한 제품에 대한 총 조립작업 시간을 나타낸다.

컨베이어 조립라인은 제품의 라이프사이클이 길고 소품종의 대량생산 환경에서는 적합한 체제이나 제품의 종류가 다양하고 라이프사이클이 짧은 것을 특징으로 하는 현재의 환경에서는 생산성과 유연성 측면에서 문제점을 드러낸다. 이러한

환경에 대처하기 위해 최근 소수의 작업자가 모든 조립 공정을 소화하는 자기 완결형 생산 체제인 셀 생산방식이 도입되고 있다. 셀생산방식은 기존의 긴 컨베이어 라인을 작은 규모의(일반적으로 U자형의) 조립셀로 구성하여 실현된다. 조립셀은 일반조립라인과 비교하여 아래와 같이 여러 가지 장점을 가지고 있다(Wemmerlov and Johnson, 1997; Sengupta and Jacobs, 2004; Johnson, 2005; Ruiz-Torres and Mahmodi, 2007)

- (1) 생산성 향상: 동일한 조립인원으로 더 많은 양의 제품을 생산할 수 있다. 이는 주로 일반 조립라인에서 작업불균형(unbalance)에 의한 손실을 줄임으로써 달성된다. 산업현장의 자료에 의하면 셀생산방식을 이용하면 생산성을 약 20~30% 향상시킬 수 있다고 보고하고 있다.
- (2) 생산라인의 변동 및 불확실성에 대한 대응: 각각의 생산셀은 독립적으로 운영되므로 한 셀에서의 품질 및 설비 문제 등에 의한 변동성은 다른 셀에 영향을 주지 않으므로 전체적인 효율이 향상된다
- (3) 다품종 생산: 각각의 셀에서 일정한 제품군을 생산할 수 있으므로 여러 종류의 제품을 생산하는 환경에서 효율적이다.
- (4) 작업자의 작업속도 차이 흡수: 컨베이어 라인은 작업속도가 차이 나는 경우 가장 느린 작업자의 속도에 전체 라인이 영향 받는데 반하여 조립셀은 해당 셀만 영향을 받고 다른 조립셀은 각각의 셀에서 작업하는 작업자의 속도에 영향을 받는다.
- (5) 작업 단조감 해소: 한 작업자가 여러 종류의 조립작업을 담당하므로 일반조립라인에서의 단순 반복작업에 의한 단조로움을 줄일 수 있다.
- (6) 제품품질에 대한 책임감: 소수의 작업자가 제품 전체를 만들어 내므로 제품에 대한 책임감이 증대되고, 이는 품질 향상으로 연결된다.

조립셀은 일반조립라인의 문제를 여러 면에서 해결하고 있지만 아직 해결하지 못하는 부분도 존재한다. 조립셀에서는 균형효율이 증가하여 생산성 향상을 달성하고는 있지만 조립셀 내에서는 여전히 균형손실이 존재한다. 시스템의 변동성과 불확실성에 대한 대응 면에서도 독립적인 셀에 의해 위험을 분산시키는 효과는 있지만 해당되는 셀 내에서는 여전히 직접적인 영향을 받아 생산성이 감소된다. 다품종을 생산하는 경우 또는 라이프사이클이 짧은 경우 생산셀의 운영과 관련된 의사결정이 계속 수정되어야 한다. 또한 작업자의 숙련도나 능력의 차이로 인한 작업속도차이는 여전히 문제점으로 남는다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 Bucket Brigade를 적용한 셀생산방식을 소개한다.

2.2 Bucket Brigade 기반의 조립셀(BB조립셀)

Bucket Brigade는 각 작업자의 작업량을 생산시스템의 상황에 따라 동적으로 변화하여 생산성과 유연성을 동시에 얻으려

는 방법이다. Bucket Brigade(BB)는 개미가 먹이를 운반할 때 서로 협력하는 행동을 모방하고 있다(Anderson *et al.*, 2002). 어떤 집단의 개미가 먹이를 집으로 운반할 때 모든 개미는 다음의 간단한 로직을 따라 일을 한다: “먹이 장소로 이동한다. 이동 중에 먹이를 나르는 개미를 만나면 먹이를 넘겨받아 개미집 쪽으로 향한다. 새로운 개미를 만나면 먹이를 넘겨준 후 다시 먹이 장소로 이동한다.” 이때, 강한 개미는 개미집에서 가까운 곳에서 먹이를 나르고, 약한 개미는 먹이가 있는 곳에서 먹이를 나른다. 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. 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.

BB를 연속작업에서의 작업할당에 적용한 연구는 Bartholdi에 의해서 시작되었다(Bartholdi and Emswiler, 1996, Bartholdi *et al.*, 2001, Bartholdi *et al.*, 2006). BB에서 최대의 생산성을 달성하기 위해서는 다음의 세 가지 전제조건을 필요로 한다: (1) 무시할 수 있는 walk-back시간, (2) 작업속도가 느린 작업자에서부터 시작하여 빠른 작업자로 작업이 진행, (3) 작업은 어느 때고 인수인계가 가능하고 작업시간은 확정적. 이러한 조건을 만족하는 시스템을 BB 표준모델이라 한다. Bartholdi and Emswiler(1996)는 x_i 를 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 $\left[\sum_{j=1}^{i-1} v_j / \sum_{j=1}^n v_j, \sum_{j=1}^i v_j / \sum_{j=1}^n v_j \right]$ 간격의 작업을 수행 하게 되고, 이 때의 단위시간당 생산량은 $\sum_{j=1}^n v_j$ 으로 수렴하게 된다는 것을 증명하였다.

BB조립셀은 BB의 개념을 라인운영전략으로 채택한 셀을 말한다. <Figure 1>은 3명이 작업하는 BB조립셀의 형태를 보여 주고 있다. 각 작업자는 후행작업자에게 작업물을 넘겨준 후 선행작업자에게 새로운 조립품을 넘겨받아 작업을 시작한다. 라인의 첫번째 작업자인 작업자 1은 선행 작업자가 없으므로 라인의 시작부분(<Figure 1>의 ‘o’부분)에서 제품의 최초 조립작업을 시작으로 작업을 수행하고, 라인의 최종 작업자인 작업자 3은 조립라인의 마지막 부분(<Figure 1>의 ‘c’부분)에서 모든 조립 공정을 완료하고 선행작업자인 작업자 2에게 돌아가서 새로운 작업을 넘겨받아 다음 제품의 조립작업을 수행한다. 작업자 2는 작업자 3에게 작업물을 넘겨준 후에 작업자 1로 돌아가 새로운 제품을 넘겨받는다. 이와 같이 작업을 수행하면 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 개별적으로 위에서 설

명한 간단한 로직을 따라 작업을 수행한다. BB의 또 다른 장점은 라인이 스스로 balancing 된다는 것이다. 작업속도도의 차이에 의해서 작업속도가 차이가 나더라도 BB 하에서는 작업자는 각자의 능력만큼 일을 하게 된다. 또한 제품은 작업자 간에 직접 인수인계되어 각 조립 작업장 사이의 재공품재고(WIP : work in process)가 없어진다.

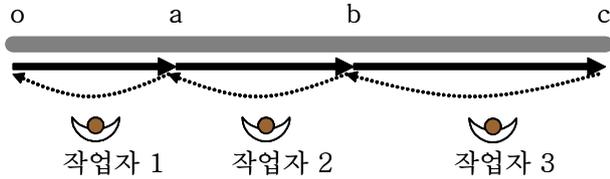


Figure 1. BB assembly cell

BB조립셀이 위에서 설명한 BB 표준모델을 따른다면 각 작업자는 100%의 효율로 작업하게 되어 최대의 생산성이 가능하다. 그러나 현실적인 조립환경에서는 이러한 표준모델의 전제조건들이 모두 만족하기는 불가능 하다. 특히 ‘작업은 어느 때고 인수인계가 가능하고 작업시간은 확정적’이어야 하는 세 번째 조건은 조립환경에서는 만족되기 어렵다. 일반적으로 조립작업은 한 요소조립작업을 마친 이후라야 다른 작업자가 다음 요소작업을 수행할 수 있으므로 후행작업자가 작업을 완료하였다고 하더라도 선행작업자가 조립작업을 수행 중이라면 후행작업자는 이 요소조립작업이 완료될 때까지 기다려야 한다. 또한, 조립환경은 계속 변화하므로 작업시간은 여러 가지 요인에 의하여 일정하지가 않다. 본 논문은 이와 같이 현실적인 문제가 발생했을 때 BB조립셀의 performance에 대해 분석한다.

3. 실험을 통한 BB조립셀의 Performance 분석

본 절에서는 Park(2003)이 소개한 미니카세트를 조립하는 컨베이어라인을 대상으로 일반조립라인, 일반조립셀 방식, BB조립셀 방식의 수행도를 비교분석한다. 대상으로 하는 시스템은 21개의 공정으로 이루어져 있다. (<Figure 2> 및 <Table 1> 참조) 조립은 case 준비 작업인 1번 공정에서 시작되어 포장작업인 21

번 공정에서 완료된다. 미니카세트를 조립하는 데는 총 796초가 소요된다(라인 효율 향상과 설명의 편의를 위해 원 자료를 약간 수정하였음).

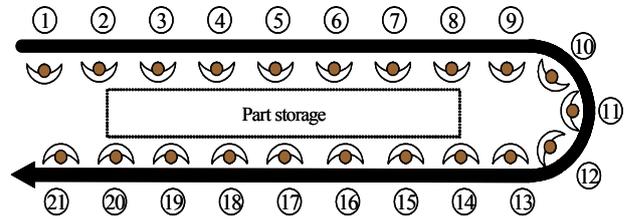


Figure 2. Conveyor assembly line for cassette tape recorders

대상으로 하는 생산라인은 월 22일 작업하고 1일 정규작업시간은 7.67시간(27,600초)이다. 현재 적용되고 있는 일반조립라인은 각 공정을 한명의 작업자가 담당하여 컨베이어라인 전체적으로는 21명의 작업자가 조립작업을 수행한다.

일반조립셀은 모든 조립작업이 하나의 셀에서 수행되도록 라인을 짧게 구성한 조립시스템이다. 한 셀 내에서는 소수(여기서는 3명)의 작업자가 21가지의 모든 조립작업을 수행한다. 현 작업인원 21명을 모두 활용하기 위해서는 7개의 조립셀을 구성할 수 있다. 이때 각 작업자에게 작업을 균등하게 배정하기 위하여 작업자 1은 1~7번 작업을, 작업자 2는 8~14번 작업을, 그리고 작업자 3은 15~21번의 조립작업을 수행한다. 라인을 운영하다보면 공간의 제약상 WIP를 많이 쌓아놓고 작업하지 못하는 경우가 있다. 또한 WIP가 증가하면 lead time이 길어지고 이는 품질상의 문제도 유발하는 경우가 발생한다. 따라서 컨베이어라인이나 일반 셀에서의 첫 번째 작업자는 라인내의 중간재고가 너무 많이 쌓이지 않도록 제품투입을 통제한다. 본 논문에서는 라인내의 전체 재공품 재고를 항상 일정한 수준으로 유지시키는 CONWIP(Spearman et al., 1990) 방법에 의하여 제품의 투입을 조절한다. CONWIP에서는 시스템 내에 있는 제품의 수(WIP 수)를 일정한 양으로 유지하면서 라인을 통제한다. 본 논문에서는 작업자 수의 3배 즉 63개의 제품이 항상 시스템 내에 유지되도록 한다(조립셀에서는 하나의 셀에 9개의 WIP 유지).

BB조립셀은 일반조립셀과 같이 긴 조립라인을 몇 개의 조립

Table 1. Assembly operations of cassette tape recorders

OP#	operation	time(sec)	OP#	operation	time(sec)	OP#	operation	time(sec)
1	case 준비(1)	44	8	중간검사, PWB수정	44	15	중간검사(2)	35
2	case 준비(2)	31	9	Deck조립준비(1)	50	16	Main Case체결	31
3	case 준비(3)	42	10	Deck조립준비(2)	39	17	최종검사(1)	35
4	Main기판수정(1)	38	11	Body case체결	32	18	최종검사(2)	39
5	Main기판수정(2)	31	12	Main기판체결	45	19	최종검사(3)	45
6	Main기판수정(3)	32	13	Door case 체결	30	20	포장(1)	41
7	Main조정	39	14	중간검사(1)	40	21	포장(2)	33
	소계	257		소계	280		소계	259

셀로 구성하고 각 셀에 3명의 작업자가 조립작업을 담당하는 경우이다. 하지만 이 방법에서는 작업자의 작업량이 미리 결정되지 않고 앞에서 설명한 Bucket Brigade 방식에 의해 후행 작업자가 선행작업자에게 조립작업을 넘겨받아 수행하는 형태의 운영방식을 따른다. 본 논문에서는 작업자의 이동시간은 고려하지 않았다. 이는 일반조립라인, 일반조립셀 및 BB조립셀 모두에게 이동시간이 있는 경우 총 이동시간은 동일하다는 가정 하에 이동시간이 각 조립운영 방식에 미치는 performance에 대한 영향은 비슷하다고 판단했기 때문이다. 또한 본 논문에서는 U라인을 대상으로 하고 있지만, 직렬, 원형, L자형의 조립라인에서도 특별한 구분 없이 적용 가능하다. 이제 앞에서 언급한 3 가지 조립라인 운영형태를 다양한 작업환경 하에서 비교 분석한다.

(1) 생산시간이 확정적이고 시스템에 변동성이 없는 경우

시스템에 변동성이 없고 생산시간이 확정적인 경우에는 일반조립라인과 일반조립셀의 생산성은 해석적인 방법에 의해 performance를 구해낼 수 있다. 그러나 BB조립셀은 hand-off 시간이 일정하지 않으므로 Simulation 실험을 통하여 performance를 확인하였다. Hand off 시간이란 BB조립셀에서 후행 작업자가 선행작업에게 다음 작업을 넘겨받으려고 할 때 선행작업자가 현 요소작업을 끝마칠 때까지 기다려야 하는 시간을 말한다. Simulation은 Visual SLAM을 이용하였다(일반조립라인과 일반조립셀의 경우에도 시스템이 불확실하고 변동성이 있는 경우는 해석적인 방법으로 performance를 얻기 쉽지 않으므로 이때는 simulation을 이용하였다). <Figure 3>은 현 실험환경 하에서의 조립라인 운영 방식별 월 생산량을 비교한 것이다.

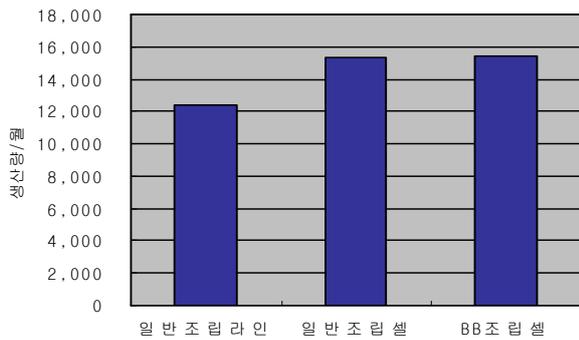


Figure 3. Monthly production rate for assembly methods

(a) 일반조립라인 : 일반조립라인의 사이클타임은 작업시간이 가장 긴 공정 즉 병목공정에 의해 결정된다. 대상 시스템에서는 9번 공정의 작업시간이 50초가 가장 길므로 사이클 타임은 50초이다. 이때의 밸런싱효율은 $E = T/mc = 796/(21 \times 50) = 75.8\%$ 이다(T 는 총 조립시간, m 은 작업자수, c 는 조립 사이클타임을 의미함). 일반조립라인의 월간 생산량은 12,144대(= 22일 \times 27,600초/50초)이다.

(b) 일반조립셀: 조립셀에서 작업하는 3명의 작업자는 하나의 제품을 생산하는데 작업자 1은 257초, 작업자 2는 280초, 작업자 3은 259초가 소요되므로 조립셀의 사이클 타임은 작업시간이 가장 긴 280초이다. 밸런싱효율은 $E = 796/(3 \times 280) = 94.8\%$ 이다. 각 조립셀의 생산량은 2,169대(= 22일 \times 27,600초/280초)이고 21명의 작업자는 7개의 조립셀을 구성할 수 있으므로 총 15,180대를 생산할 수 있다. 이는 일반조립라인보다 3,036대가 많은 숫자이며 약 25.0%의 생산량 증대를 의미한다. 일반조립라인의 생산량(12,144대)을 얻기 위해서는 6개의 조립셀이 필요하다. 이는 생산셀에서는 18명의 작업인원으로 21명이 작업하는 일반조립라인의 생산량을 달성할 수 있다는 것을 의미한다.

(c) BB조립셀 : 시뮬레이션 실험 결과 BB조립셀에서는 2,186대의 제품을 생산한다. 일반조립셀과 같이 21명의 작업자는 7개의 조립셀을 구성할 수 있으므로 총 15,302의 생산이 가능하다. 이는 일반조립라인보다 26.0%의 생산량 증가를 의미하며, 일반조립셀과 비교해서는 0.8%의 생산성 향상을 보이고 있다. 작업자의 작업효율과 관련해서는 작업자 1은 100%, 작업자 2는 97.1%, 작업자 3은 92.0%로 평균 96.4%의 효율로 조립작업을 수행한다. BB조립셀에서의 효율 손실은 hand-off에 의해 발생하는데 작업자 2와 3만이 효율손실을 보고 작업자 1은 hand-off에 의한 효율 손실이 없음을 알 수 있다. BB조립셀의 효율은 일반 조립셀의 밸런싱효율 75.8%보다 크게 높고, 조립셀의 효율인 94.7%보다는 약간 높은 결과를 얻었다. 또한 시뮬레이션 결과 작업장 내에서 조립중인 제품(WIP)의 평균 수는 20.2인데, 이는 일반조립라인과 일반조립셀의 63보다 크게 작은 것이다.

위 분석에서 BB조립셀은 시뮬레이션에 의해 실험결과를 분석하였으나 근사적으로 performance를 분석할 수 있다. 제품조립을 위해 n 가지의 요소조립작업이 필요하고, 요소조립작업 j 를 수행하는 데는 t_j 시간이 소요된다고 하면, 총 조립시간 T 는 $T = \sum_{j=1}^n t_j$ 에 의해 표현된다. Hand-off 시간 없이 후행 작업자에게 언제라도 현재 수행중인 작업을 넘겨줄 수 있는 경우 hand-off에 의한 작업자의 효율 손실이 없으므로, 작업자 1인당 생산량 r 은 $r = 1/T$ 이고 따라서 작업자 m 명의 생산량은 m/T 이다. Hand-off 시간이 존재하는 경우 hand-off가 발생할 작업위치는 확률적으로 동일하다고 가정하면 요소조립작업의 평균시간 \bar{t} 는 $\bar{t} = T/n$ 이고 평균적인 1회 hand-off 시간은 $\bar{t}/2$ 가 된다. 각 제품은 모든 요소조립작업이 완료될 때까지 $m-1$ 회의 hand-off를 경험하게 되므로 평균적인 총 hand-off는 $(m-1)\bar{t}/2$ 이다. 따라서 hand-off 시간이 존재하는 경우 작업효율 E 와 작업자 1명의 단위시간당 생산량 r 은 아래와 같다. 여기서 작업효율은 작업시간 중에서 실제 조립작업을 수행하는 시간의 비율을 의미한다.

$$E = \frac{T}{T + (m-1)t/2} \tag{1}$$

$$r = \frac{1}{T + (m-1)t/2} \tag{2}$$

이때 조립셀을 담당하는 m 명의 작업자가 생산하는 단위시간당 생산량은 mr 이 된다. <Figure 4>는 각 셀을 담당하는 작업자의 수가 변함에 따른(21명이 생산하는) 총 생산량의 변화이다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 BB조립셀에 작업자를 많이 배정할수록 1인당 생산량은 줄어든다. 이는 작업자가 많을수록 hand-off에 의한 효율 손실이 증가하기 때문이다. 만일 1명의 작업자가 하나의 셀을 담당하면 hand-off 손실 없이 최대의 생산량을 얻을 수 있다. 이때의 생산량은 16,019대(=21명×22일×27,600초/796초)이다. 작업자 3명이 조립라인을 담당하는 경우 식 (1)에 의해 15,352대의 생산량을 얻는데 이는 Simulation 실험에 의한 결과치인 15,302와 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 식 (1)에서 작업효율은 95.8%로 시뮬레이션의 96.4%와는 크게 차이가 없다. 따라서 시스템에 변동성이 없고 생산시간이 확정적인 경우에는 BB조립셀의 performance를 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 얻을 수 있다.

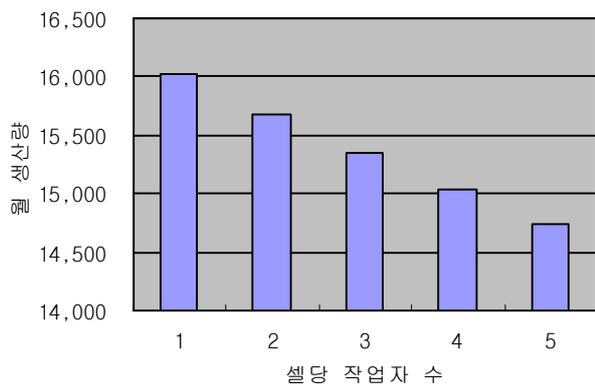


Figure 4. Production rate per operator in the BB assembly cell

실험 결과의 신뢰성을 높이기 위해 조립시간을 임의로 생성하여 각기 다르게 한 10개의 시나리오를 가지고 분석한 결과를 <Figure 5>에서 보여주고 있다. 여기서 시나리오 1은 위에서 설명한 경우이다(각 시나리오 별로 생산량이 차이 나는 것은 시나리오를 랜덤으로 구성하였기 때문에 생산제품의 총 조립소요시간이 차이 나기 때문이다). 그림에서 각 운영방식에 대한 효율과 생산능력을 보면 생산시간이 확정적이고 시스템에 변동성이 없는 경우 BB조립셀의 performance는 일반조립라인보다는 상당히 우수한 결과를 나타내고 있으나, 일반조립셀과는 performance가 유사함을 볼 수 있다. 따라서 시스템이 안정적이고 조립시간이 일정한 경우는 일반조립셀의 적용만으로도 우수한 performance를 얻을 수 있다. 그러나 일반적으로 생산 시스템은 여러 종류의 변동성과 불확실성이 존재한다. 이러한

경우에 각 조립방식의 performance는 아래에서 분석한다.

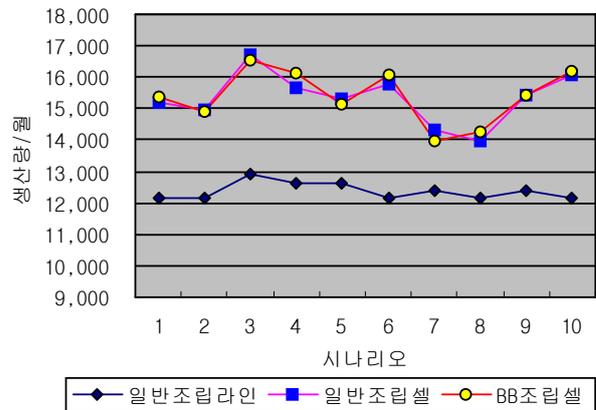


Figure 5. Performance of assembly methods under deterministic assembly time

(2) 생산시간이 확률적으로 변하는 경우

제품을 조립하는 경우 요소조립 시간은 여러 가지 요인에 의하여 일정치 않은 경우가 대부분이다. 즉, 작업자의 컨디션이나, 부품의 품질, 조정작업 유무, 셋업시간, 작업오류, 다품종 제품의 생산 시 제품별 조립시간 차이 등 여러 가지 요인에 의해 생산시간은 확정적이지 못한 것이 일반적이다. <Figure 6>은 조립하는데 소요되는 시간이 확정적인 경우와 상황에 따라서 변하는 확률적인 경우에 각 조립방식의 performance를 비교하고 있다. 확률적인 경우의 조립시간은 변동계수(coefficient of variation)가 0.35(즉 모수가 8)인 Erlang 분포를 따른다고 가정하였다. 모든 조립방식에서 조립시간이 확률적인 경우에는 확정적일 때와 비교하여 performance가 악화되고 있다는 것을 알 수 있다. 확률적인 조립시간의 경우에 일반조립라인과 일반조립셀에서 작업자간의 작업시간 밸런스가 사전에 계획했던 것과는 차이가 나서 발생하는 작업량 불균형(workload unbalance)으로 인해 performance가 악화되고, BB조립셀에서는 앞에서 설명한 hand-off 손실과 더불어 작업시간이 확률적이므로 선행작업자가 다음 작업을 해야 하는 상황에서 후행작업자가 해당 작업을 아직 수행하는 경우에 발생하는 blocking 손실로 인해 performance가 악화된다. <Figure 6>를 통하여 생산시간이 확률적인 경우 모든 조립방식의 performance가 악화되고 있지만, 그 중 BB조립셀에서의 영향이 가장 적다는 것을 알 수 있다. 특히, 변동성이 없는 경우 비슷한 performance를 보여주는 BB조립셀과 일반조립셀에 대해 비교해 보면, 확률적인 시간의 경우에는 BB조립셀이 일반조립셀보다 우수함을 볼 수 있다(리드타임 측면에서 세 가지 조립라인 운영방식을 비교해 보면 기존조립라인은 56.0분, 일반조립셀은 49.9분, BB조립셀은 14.2분으로 BB조립라인은 생산량에서 뿐만이 아니라 리드타임 측면에서도 타 방법과 비교하여 우수한 결과를 산출한다).

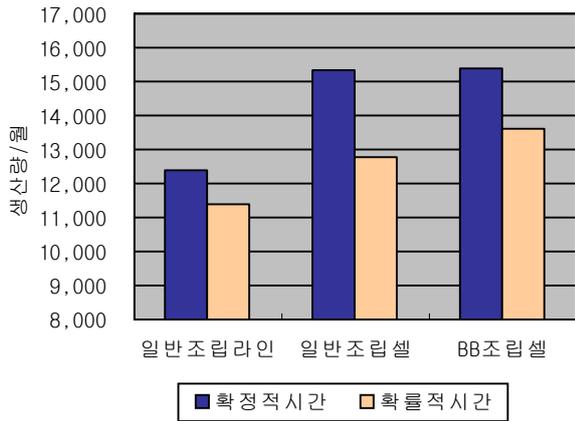


Figure 6. Performance of assembly methods under stochastic and deterministic assembly time

(3) 조립시간은 확정적이나 시스템에 변동성이 있는 경우

조립시간은 항상 일정하나 제품 품질의 이상, 기계설비의 이상, 조립작업자의 비정상적인 작업 등 여러 변동요인이 발생하는 경우에 대해서 3가지 조립방식을 비교하였다. 이러한 이상요인에 의한 변동성은 생산시스템에는 항상 존재하게 된다. 본 논문에서는 작업 중에 작업자가 설비나 품질 이상에 의해 조립작업을 중단하고 조정작업을 수행해야 하는 경우에 대해 알아본다. 각 조립공정에서는 1%의 확률로 이상요인이 발생하고 이때 지수분포를 따르는 평균 5분의 조정시간이 요구된다고 가정한다. <Figure 7>은 이와 같은 조립 중단시간이 발생하는 경우에 각 조립라인 운영방식의 performance를 비교하고 있다. 시스템의 변동성이 존재하는 경우 BB조립셀이 우수한 결과를 보이고 특히 일반 조립셀 보다도 일관되게 우수한 결과를 줄 수 있다. 확률적인 조립시간과 시스템의 변동성이 동시에 존재하는 경우에도 실험결과는 Figure 7과 유사하게 타 방법에 비해 BB조립셀의 performance가 우수하다는 결과를 얻었다.

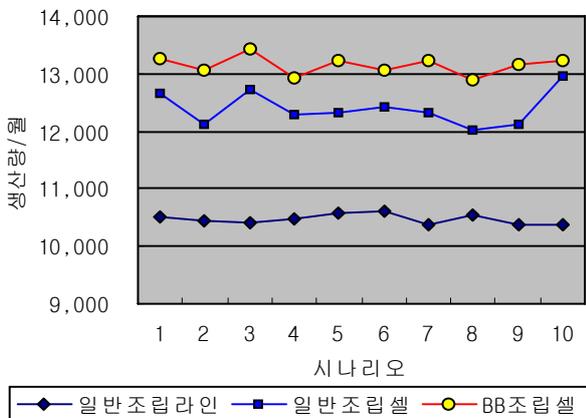


Figure 7. Performance of assembly methods under downtime

(4) 작업자의 작업속도가 차이나는 경우

<Figure 8>은 작업자의 작업속도가 차이나는 경우에 일반 조립셀과 BB조립셀의 performance를 비교하고 있다. 여기서 작업속도 차이가 20%라는 것은 3명의 작업자 중 보통속도 작업자의 작업속도를 기준으로 했을 경우 한 작업자는 작업속도가 20% 느리고 또 다른 작업자는 20% 빠르다는 것을 의미한다. 일반조립셀의 경우에는 작업량이 이미 표준시간에 의해 작업량이 균등 배분되어 정해져 있으므로, 작업속도가 느린 작업자는 그만큼 할당된 작업을 수행하기 위해서 오랜 시간이 소요되고, 따라서 조립셀의 생산량은 이 느린 작업자의 속도에 의해서 결정된다. 따라서 속도 차이가 많이 날수록 performance는 감소하게 된다. 반면에 BB조립셀의 경우에는 작업자의 작업속도의 차이가 performance에 미치는 영향이 거의 없음을 볼 수 있다. BB 조립셀에서는 작업속도가 빠른 작업자는 더 많은 작업량을 수행하고, 작업속도가 느린 작업자는 적은 양의 작업을 수행하도록 자율적으로 작업량이 조정됨으로써, 작업균형이 자율적으로 이루어진다. 이에 따라 작업속도차이에서 오는 손실을 최소화 할 수 있다. 따라서 작업자간의 작업속도에 차이가 있는 경우 BB조립셀은 더욱 유망한 조립셀 운영방식이다.

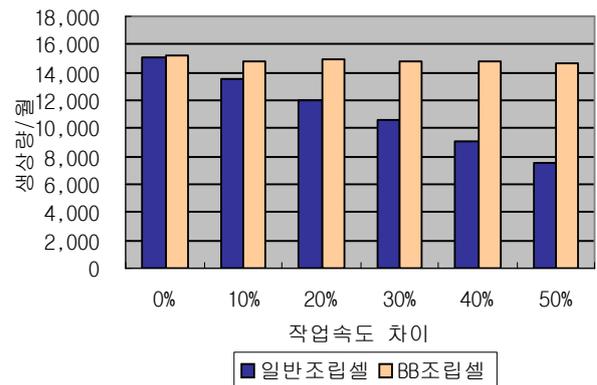


Figure 8. Performance of assembly methods under different worker speeds

4. 결론 및 토의

작업자에게 조립작업을 할당하는 라인밸런싱 문제는 조립라인에서 중요한 의사결정 사항이다. 라인밸런싱은 작업량의 균등 배정을 통하여 주어진 생산자원(작업자)을 최대한 활용하고, 따라서 최소의 비용으로 최고의 생산성을 달성할 수 있다는 논리를 바탕으로 한다. 그러나 일반적으로 생산시스템은 변동성과 불안정성 때문에 계획에 의해 배정된 라인균형효율을 달성하기 어렵다. 이와 같은 조립 라인의 문제점으로 인하여, 그리고 수요의 변동성, 제품의 다양성, 짧은 라이프사이클 등을 특징으로 하는 최근의 Mass Customization 환경에서 유연성과 효율성을 확보할 목적으로 많은 기업에서 조립셀(Cell)을

도입하고 있다. 셀 생산 방식은 적은 인원의 작업자가 생산셀에서 모든 조립 공정을 소화하는 자기 완결형 생산 체제이다. 조립셀 방식은 긴 조립라인의 여러 문제점을 완화시키지만 셀 내에서의 밸런싱문제 및 시스템의 불안정 및 변동성에 기인한 문제들은 여전히 포함하고 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 각 자원에 작업을 동적이고 자율분산적으로 배정하기 위해 개미의 협력작업 방식인 Bucket Brigade(BB)를 적용한 조립셀을 소개하였다.

BB는 여러 공정으로 이루어진 라인에서 각 작업을 생산자원에 자율적으로 할당하는 유연한 라인운영 방식이다. 이전의 라인밸런싱에 의한 조립생산라인이 작업자가 각자에게 배정된 작업을 수행한 후에 다음 작업자에게 넘기는 Push형 생산이라면, BB는 후행 작업자가 필요시 선행작업자에게서 제품을 넘겨받아 작업을 수행하는 Pull형 생산방식이라 할 수 있다. BB 조립셀은 시스템의 상태에 따라 조립작업이 자율적으로 유연하게 결정되는 분산자율형 조립방식이다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통하여 기존의 조립라인과, 일반조립셀, 그리고 BB 조립셀의 performance를 여러 생산 환경에서 비교분석하였다. 실험결과 일관성 있게 일반조립셀과 BB조립셀이 기존의 일반조립라인보다 좋은 생산성을 보여주었다. 일반조립셀과 BB조립셀 사이에서는, 시스템이 변동성이 없고 작업시간이 확정적인 경우에는 일반조립셀과 BB조립셀이 비슷한 performance를 보였으나, 조립작업시간에 변동성이 있는 경우, 작업자의 작업속도가 차이 나는 경우, 시스템이 품질이나 장비의 이상으로 중단되는 경우 등과 같이 시스템이 불안정하고 변동성이 존재하면 BB조립셀이 일반조립셀 보다 우수한 결과를 보였다.

BB조립셀을 적용하여 적절히 운영된다면 실험분석 결과처럼 조립작업의 고생산성을 달성할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나, BB조립셀을 구현하기 위해서는 여러 가지 선행적으로 해결해야 할 조건들이 있다. 우선 BB조립셀에서는 각 작업자의 작업량과 내용이 일정하지 않고 조립작업마다 변하게 된다. 따라서 작업자는 여러 공정을 소화해 낼 수 있는 다기능의 작업자이어야 하므로 BB조립셀을 적용하기에 앞서 작업자의 다기능 숙련 교육이 선행되어야 한다. Schultz *et al.*(2002), Slomp *et al.*(2005) 등이 지적하였듯이 작업자의 다기능화를 통한 조립작업의 유연화는 그 장점과 단점이 공존한다는 것을 염두에 두어야 한다. BB조립셀은 조립작업자가 4-5명 이상 되면 혼란을 야기할 수 있으므로 작업자가 4명 이하인 조립장에 적합하다. 많은 조립작업자가 작업하는 긴 조립라인의 경우에는 본 논문의 실험환경에서와 같이 여러 개의 작은 조립셀로 분할하고 각 조립셀에서 BB를 활용한 조립방식을 사용하는 것이 추천된다. 부품의 크기가 커서 넓은 부품저장 공간의 확보가 필요한 경우 조립셀의 길이는 길어지게 된다. 이처럼 작업자가 라인을 따라 이동하면서 작업해야 하는 경우에는 이동거리가 최소화 될 수 있도록 조립라인을 구성하고 설비를 배치하는 것이 필요하다. 조립라인에 BB를 적용한 연구 사례는 최근 국외의 경우에 보고되고 있으나(Munoz and Villaloboz, 2002; Buzacott,

2002; Bratcu and Dolgui, 2005) 아직 국내에서는 창고오더피킹 작업에서의 활용 방안(Koo, 2008) 이외에는 연구 적용된 사례가 없다. 많은 작업자가 작업하는 기존의 긴 조립라인을 조립셀로 변경하거나 새로운 조립셀을 구성하고자 할 때, 본 논문에서 논의된 선행조건들을 해결하면서 BB조립셀 운영방식을 적용한다면 조립생산성 향상을 실현할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

Anderson, C., Boomsma, J. J., and Bartholdi, J. J. (2002), Task partitioning in insect societies : bucket brigades, *Insectes Sociaux*, 49, 1-10.

Arcus, A. L. (1966), COMSOAL : A computer method of sequencing operations for assembly lines, *International Journal of Production Research*, 31, 259-277.

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.

Becker, C. and Scholl, A. (2006), A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing, *European Journal of Operational Research*, 168, 694-715.

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.

Corominas, A., Pastor, R., Plans, J. (2008), Balancing assembly line with skilled and unskilled workers, *OMEGA*, 36(6), 1126-1132.

Johnson, D. J. (2005), Converting assembly lines to assembly cells at sheet metal products: Insights on performance improvements, *International Journal of Production Research*, 43(7), 1483-1509.

Koo, P. H. (2008), Application of bucket-brigades to order picking in warehouses, *IE Interfaces*, 21(3), 333-342.

Lapierre, S. D., Ruiz, A., and Soriano, P. (2006), Balancing assembly lines with tabu search, *European Journal of Operational Research*, 168(3), 826-837.

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.

Park, S. H. (2003), Design of the U-shaped assembly line to replace conveyor systems, *IE Interfaces*, 16(2), 240-247.

Ruiz-Torres, A. J. and Mahmood, F. (2007), Impact of worker and shop flexibility on assembly cells, *International Journal of Production Research*, 45(6), 1369-1388.

Scholl, A. and Becker, C. (2006), State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing, *European Journal of Operational Research*, 168(3), 666-693.

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.

Sengupta, K. and Jacobs, F. R. (2004), Impact of work teams: a comparison study of assembly cells and assembly line for a variety of operating environment, *International Journal of Production Research*, 42(19), 4173-4193.

Slomp, J., Bokhorst, J. A. C., and Molleman, E. (2005), Cross-training in a cellular manufacturing environment, *Computers and Industrial Engineering*, 48, 609-624.

Spearman, M. L., Woodruff, D. L., and Hopp, W. J. (1990), CONWIP : a pull alternative to kanban, *International Journal of Production Research*, 28(5), 879-894.

Wemmerlov, U. and Johnson, D. J. (1997), Cellular manufacturing at 46 user plants : Implementation experiences and performance improvements, *International Journal of Production Research*, 35, 29-49.



구 평 희

한양대학교 산업공학과 학사

Purdue University 산업공학 석사

Purdue University 산업공학 박사

현재: 부경대학교 산업공학과 부교수

관심분야: 생산 및 물류 시스템의 설계 및 운영