Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers
Vol. 41, No. 4, pp. 330-337, August 2015.
ISSN 1225-0988 | EISSN 2234-6457
http://dx.doi.org/10.7232/JKIIE.2015.41.4.330
© 2015 KIIE
<Original Research Paper>

Bucket Brigade를 기반으로 한 분산자율형 조립셀 운영전략

구 평 회†

부경대학교 시스템경영공학부

A Decentralized Self-Control Strategy for Assembly Cell Using Bucket Brigade

Pyung Hoi Koo

Department of Systems Management and Engineering, Pukyong National University

A bucket-brigade is a way of transporting items where items are passed from one person to the next. The operation of the bucket brigade imitates the cooperative behavior of ants when brood, food or other resources are moved. Koo (2009) presented a bucket brigade-based assembly cell where 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 flow line is self-balanced without any predetermined job assignment. However, there are some productivity losses related to hand-off and blocking. This paper examines the hand-off and blocking losses and presents a new bucket brigade-based assembly cell where working areas for each assembler is restricted with the help of buffer interfaces. Simulation experiments are used to validate the performance of the new assembly system.

Keywords: Assembly cell, Bucket brigades, Decoupling buffer, Self-balancing assembly line

1. 서 론

본 논문은 여러 요소조립작업을 통하여 최종 완제품을 생산하는 조립라인에서 생산성을 향상시키기 위한 새로운 라인 운영방식에 대해 다룬다. 제품(또는 서비스)을 생산하기 위하여 순차적으로 작업이 수행되어야 하는 흐름생산 환경에서 각 생산자원(작업자, 기계, 로봇 등)에게 얼마만큼의 요소작업을 배정하는가를 결정하는 작업배정(work assignment) 문제는 조립라인에서 생산성을 결정하는 중요한 의사결정 문제이다. 일반적으로 조립라인에서 작업배정에 대한 의사결정은 각 작업자에게 가급적 균등한 작업량을 배정하는 라인밸런싱(LB : Line Balancing) 기법을 통하여 이루어진다. 라인밸런싱은 각 생산자원에게 작업량을 균등하게 배정하여 주어진 생산자원을 최대한 활용하고, 따라서 최소의 비용으로 최고의 생산성을 달성하는 것을 목표로 한다. 라인밸런싱 의사결정의 결과로 각 생산자원에 요소작업이 배정되면 해당 자원은 제품의 흐름 속도에 따라 일정 부분의 작업을 반복적으로 수행하게 된다. 라인밸런싱을 통한 조립라인의 설계는 그동안 많은 연구가 수행되어 왔다. 대부분의 기존 연구는 라인밸런싱을 통해 작업이 각 작업자에게 균등하게 할당 되도록 하고, 작업자는 할당된 조립작업을 반복적으로 수행하는 정적인 환경을 다루고 있다. 조립라인의 작업할당 방식에 대한 기존 연구는 Scholl and Becker(2006)와 Hu *et al.*(2011)의 조사 연구논문에 잘 정리되어 있다.

라인밸런싱에서는 각 자원에 할당하는 작업의 양을 시간으로 표현하기 위하여 일반적으로 표준시간(standard time)이 이용된다. 흐름라인을 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 작업배정에 이용하는 것은 당연하게 생각될 수 있다. 그러나 현실

† 연락저자 : 구평회 교수, 608-737 부산광역시 남구 용소로 45 부경대학교 시스템경영공학부, Tel : 051-629-6485, Fax : 051-629-6478, E-mail : phkoo@pknu.ac.kr
2015년 2월 9일 접수; 2015년 3월 30일 수정본 접수; 2015년 6월 9일 게재 확정.

세계에서는 각 작업자는 숙련도나 각 개인의 능력 등에 의하여 작업속도에 차이가 존재한다. 이와 같은 경우는 이론적으로 산출된 라인밸런싱 효율과는 다르게 가장 느린 작업자의 작업속도에 의하여 효율이 결정된다. 또한, 표준시간을 기반으로 결정된 작업할당의 결과는 유연성의 측면에서도 문제가 있다. 설비, 작업자, 품질 등 여러 요인에 의하여 생산시스템은 변동성과 불확실성이 존재하고, 제품의 종류가 점점 다양해지고 수명주기가 단기화 되는 시장 환경에서 생산시스템은 불확실성을 빠르게 대응할 수 있는 유연성을 갖추는 것이 점점 더 중요하게 되었다. 또한, 최상의 라인밸런싱 알고리듬이라 하더라도 요소작업의 선후관계에 대한 제약과, 요소작업을 분할 할 수 없다는 조립속성 때문에 현실적으로는 균형손실이 발생한다. 이러한 라인밸런싱을 기반으로 하는 조립라인의 문제점을 해결하고자 최근에는 조립셀이 도입되고 있다(Sengupta and Jacobs, 2004; Johnson, 2005; Ruiz-Torres and Mahmodi, 2007, Chung and Yoon, 2015). 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, 조립셀 방식은 위에서 언급한 문제점의 많은 부분을 제거하거나 완화시키지만 셀 내에서 밸런싱이 필요하다는 점에서 아직도 위의 문제점이 많이 남아있다.

위에서 기술한 기존의 조립라인 운영에 대한 문제점을 해결하기 위하여 최근 각 자원이 자율분산적으로 요소조립작업을 수행하는 Bucket Brigade(BB)를 적용한 조립셀에 대한 연구가 소개되고 있다. Koo(2009)는 Bucket Brigade의 개념을 조립라인 운영전략으로 채택한 BB조립셀을 제안하고 이를 기존의 조립라인 및 조립셀과 비교분석하여 그 performance를 검증하였다. 본 논문은 Koo(2009)가 제시한 Bucket Brigade 기반의 조립셀에서 발생할 수 있는 생산성 손실 요소를 최소화 하는 새로운 Bucket Brigade 기반의 조립라인 운영 방식을 제안한다. 새로운 운영방식은 작업자의 작업 영역에 제한을 두고 작업영역 후반부에 버퍼 기능을 두어 연속된 작업자 간의 작업을 decoupling하여 hand-off 손실과 blocking 손실을 줄여 생산성을 높이고자 한다(hand-off이나 blocking에 의한 운영손실에 대해서는 다음 절에서 추가로 설명한다). 제시된 새로운 조립라인 운영방식의 performance를 검증하기 위하여 시뮬레이션 실험을 통하여 기존의 운영방식과 비교분석한다. 또한 새로운 운영방식에서 버퍼의 크기와 버퍼의 위치가 생산성에 어떤 영향을 주는지도 함께 분석한다.

2. Bucket Brigade(BB) 기반의 흐름라인 운영 방식

2.1 BB 기반의 조립 셀(BB조립셀)

Bucket Brigade(BB)는 여러 작업으로 이루어진 라인에서 작업자가 요소작업을 동적이고 자율적으로 맡아 작업을 수행하는 유연한 라인운영 방식이다. Bucket Brigade는 비교적 최근에 소개되어(Bartholdi and Einsentein, 1996) 초기에 의류산업과 창고에서의 Order Picking 작업에 적용되었고 그 적용 범위가 확산되어 현재는 여러 산업에서 적용되고 있다(Bratcu and Dolgui, 2005; Quader and Castillo-Villar, 2013, Lim and Wu, 2013). Bucket Brigade는 <Figure 1>(a)에서 보는 바와 같이 개미가 먹이를 운반할 때 서로 협력하는 행동을 모방한다. 한 장소에서 다량의 먹이를 찾아 이를 개미집으로 옮겨야 하는 경우, 어떤 개미집단은 다음의 간단한 로직을 따라 서로 협력하며 먹이를 운반한다. 우선 여러 마리의 개미가 먹이가 있는 위치와 개미집 사이에 배치되고, 각 개미는 자신의 선행개미(즉 자신보다 먹이 위치에 가까운 곳에서 일하는 개미)로부터 먹이를 넘겨받아 개미집 쪽으로 먹이를 운반한다. 이때 후행개미(즉 자신보다 개미집에 가까이에서 일하는 개미)를 만나면 먹이를 바로 넘겨준 후 다시 먹이 장소로 이동한다. 먹이 위치에 가장 가까운 개미는 후행 개미에게 먹이를 넘겨준 후 다음 먹이 운반을 위하여 다시 먹이 있는 곳으로 가서 새로운 먹이를 운반하기 시작한다. 개미집에 가까운 개미는 선행 개미에게 먹이를 넘겨받은 후에 개미집으로 운반하여 보관한 후 다시 다음에 운반되는 먹이를 넘겨받기 위해 먹이가 운반되는 쪽으로 이동한다. 위에서 설명한 개미의 먹이운반 행동 로직은 제조・물류 시스템의 작업라인에 그대로 활용된 것이 Bucket Brigade 기반의 시스템운영방식이다. <Figure 1>(b)는 이러한 개미의 먹이운반로직과 이러한 로직을 여러 작업으로 구성된 조립작업라인에 적용한 경우에 대해 그림으로 보여준 것이다(Koo, 2009).

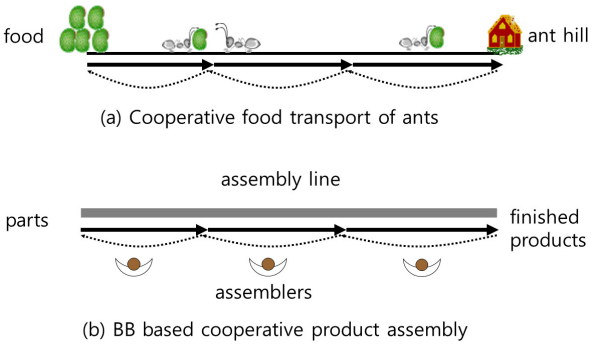


Figure 1. (a) Bucket brigade(BB) in ants and (b) BB based assembly line

<Figure 2>는 BB조립셀에 의해 조립작업이 진행되는 상황에서 라인의 중간에서 작업하는 조립작업자들이 따라야 하는 작업 로직을 흐름도로 표현한 것이다. 조립라인의 중간에서 작업하는 작업자(<Figure 1>의 작업자 2)는 선행작업자(<Figure 1>의 작업자 1)의 작업위치로 이동하여 선행작업자가 현재의 작업을 완료할 때까지 기다린 후 작업을 인계 받아 다음 요소조립 작업을 수행한다. 이때 다음 요소작업이 후행작업자(<Figure 1>의 작업자 3)의 조립작업에 의해 진행될 수 없다면(예를 들

어 해당 조립작업에 필요한 설비를 후행작업자가 사용하고 있는 경우) blocking 현상이 발생하여 선행작업자는 후행작업자가 해당 요소조립작업을 완료할 때까지 기다려야 한다. Blocking 현상이 발생하지 않거나 문제가 해결되면 해당 요소조립작업을 수행한다. 요소작업이 완료된 이후에는 후행작업자가 작업인수를 위해 대기하고 있는지 확인하여 대기하고 있지 않으면 다음 요소조립작업을 수행하기 위하여 blocking 현상을 확인하고 요소조립작업을 수행하는 절차를 반복한다. 후행작업자가 대기하고 있으면 남은 조립작업을 넘겨주고 새로운 조립작업을 인수 받기 위하여 선행작업자의 위치로 이동한다. 여기서, 작업자들 사이에 조립작업을 전달하는 시기는 요소조립작업이 완료된 이후에나 가능하다는 것을 인식할 필요가 있다. 작업라인의 첫 번째 작업자는 라인의 시작부분에서 첫 번째 요소조립작업을 시작하고, 라인의 최종 작업자는 모든 조립공정을 마치면 완제품을 조립라인에서 내보낸 후 선행작업자에게서 새로운 조립작업을 인수받아 조립이 완료될 때까지 작업을 수행한다.

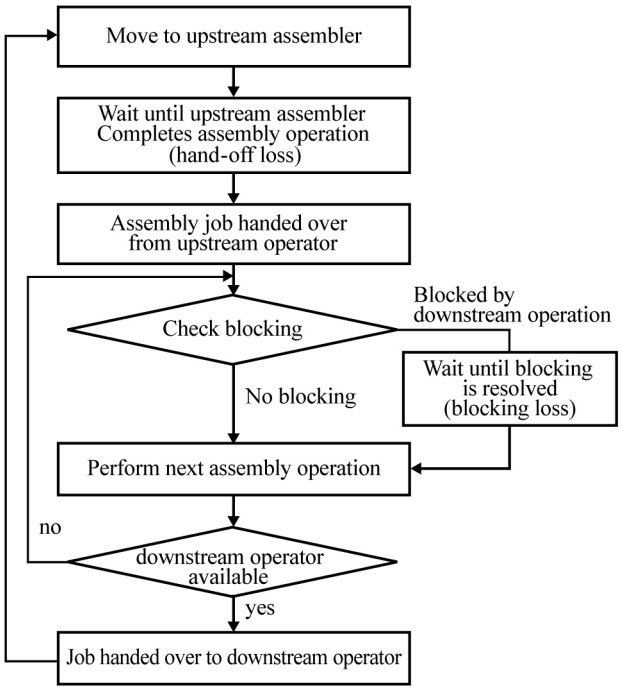


Figure 2. Operation procedure in BB assembly cell

Bucket Brigade의 특징은 중앙집중식이 아닌 분산 자율화 개념이라 말할 수 있다. 즉, 각 작업자는 중앙에서 일정하게 할당한 작업만을 수행하는 것이 아니고 독립적으로 작업을 수행한다. 따라서 매 조립작업마다 시스템의 상태에 따라 처리하는 작업내용과 작업량이 동적으로 변할 수 있다. Bucket Brigade의 또 다른 장점은 라인이 스스로 balancing 된다는 것이다. 작업숙련도의 차이에 의해서 작업속도가 차이가 나더라도 Bucket Brigade 하에서는 작업자는 각자의 능력만큼 일을 하게 된다. 또한 제품의 흐름측면에서 보면 작업자 간에 작업이 직접 인수인계되어 요소조립작업 사이에 중단 없이 계속 연속된 조립작업이 진행되므로 중간 대기시간이 최소화 될 수 있고 따라서 각 조립작업장 사이의 재공품재고(WIP : work in process)를 최소화 할 수 있다.

Bucket Brigade를 흐름작업에서의 작업할당에 적용한 연구를 시작한 Bartholdi의 연구팀은 Bucket Brigade 기반의 운영방식이 다음의 세 가지 조건이 만족되는 경우에 최고의 생산성을 달성할 수 있다고 주장하였다(Bartholdi and Einsentein 1996; Bartholdi *et al*., 2001; Bartholdi *et al*., 2006) : (1) walk-back 시간이 아주 작아 무시할 정도이고, (2) 작업은 어느 때고 인수인계가 가능하며 (3) 각 작업자의 작업속도는 다를 수 있지만 확정적으로 알려져 있다. 그리고 이러한 조건이 만족 되었을 때 시간이 지나면 시스템이 안정적으로 된다는 것을 증명하였다. 그러나 현실적인 조립환경에서는 이러한 전제조건들이 모두 만족되기는 불가능 하다. 특히 '작업은 어느 때고 인수인계가 가능하고 작업시간은 확정적'이어야 하는 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(hand-off 손실). 또한, 조립환경은 계속 변화하므로 작업시간은 설비트러블이나 부품조달 문제 등 여러 가지 요인에 의하여 일정하지가 않다. 이와 같은 변동성이 존재하는 상황에서는 선행작업자가 작업이 지연되어 후행작업자에게 영향을 미치는 경우가 발생 할 수 있다(blocking 손실). 본 논문에서는 이와 같이 현실적인 문제가 존재하는 생산환경에서 Bucket Brigade를 기반으로 하는 새로운 조립셀 운영방식을 제시하고 그 performance를 분석한다.

2.2 일반적인 BB조립셀에서의 효율 손실

현실적으로 변동성과 불확실성이 존재하는 생산시스템에서 Bucket Brigade를 기반으로 하는 조립셀을 적용하는 경우에는 두 가지의 효율 손실 현상, 즉 hand-off 손실과 blocking 손실이 발생한다. 본 절에서는 이 두 가지 손실에 대하여 좀 더 자세히 설명한다.

(1) *Hand-off* 손실

BB조립셀에서 한 작업자가 선행 작업자에게 작업을 인수받으려고 할 때 선행작업자가 어떤 요소조립작업을 수행하는 중이라면, 선행작업자는 현재 수행 중인 조립작업을 완료한 후에 작업을 인도(hand-off) 받아야 하는 경우가 대부분이다. 후행작업자는 이 기간 동안 대기 손실을 경험하게 된다. Koo(2009)는 hand-off 상황이 발생하는 조립라인에서의 효율을 계산하는 식을 제시하였다. 작업자가 어떤 요소조립작업 i를 수행하는데 소요되는 평균시간을 p_i라고 하고 완성품 하나를 조립하기 위해서는 n개 요소작업으로 구성되어 있다고 하면, 하나의

완성품을 조립하는 총 조립시간(T)은 $T=\sum_{i=1}^{n} p_i$가 되고, 요소작업의 평균 생산시간(p)은 $p = T/n$이다. 선후작업자의 작업시간이 상호 영향을 주지 않고 독립적이어서 후행작업자가 작업을 마치고 다음 작업을 인수 받을 수 있는 시점은 선행작업자가 물품을 인출하는 평균시간인 p상에서 Uniform 분포를 따른다고 가정 하면, 평균적인 hand-off 대기시간은 $p/2$가 된다. BB 조립셀에 m명의 작업자가 작업하고 있다고 하면, 하나의 완성품을 조립하기 위해 요소작업이 진행되는 동안 hand-off 대기가 발생하는 횟수는 m-1회가 되고, hand-off 시간은 $(m\text{-}1)p/2$이 된다. 이는, T 시간이 필요한 조립작업을 수행하기 위하여 조립자원이 $T+(m\text{-}1)p/2$ 만큼의 시간이 필요하다는 것을 의미한다. 따라서 이 조립라인에서 hand-off에 의한 효율손실비율 E_{loss}은 다음과 같이 계산된다(Koo, 2009).

$$E_{loss} = \frac{(m-1)p/2}{T+(m-1)p/2} = \frac{(m-1)/(2n)}{1+(m-1)/(2n)} \quad (1)$$

각 요소작업의 조립시간이 동일하고 변동성도 존재하지 않는 경우에는 위의 식을 이용하여 효율손실비율을 예측할 수 있다. 그러나, 일반적으로 생산현장에서는 각 요소작업의 조립시간이 다른 경우가 대부분이고, 요소작업에 대한 조립시간에 있어서도 변동성이 존재하므로 위의 식 (1)로 얻은 효율손실비율보다 실제 효율손실은 더 클 것으로 예상된다. 예를 들어, 각 요소조립의 평균조립시간은 p로 동일하지만 각 작업시간은 지수분포를 따르는 생산환경의 경우에는 지수분포의 memory-less 성질에 의하여 기대되는 hand-off 시간은 각 요소조립의 평균조립시간 p와 같게 된다. 따라서 요소조립작업 시간이 지수분포를 따르는 경우에 hand-off에 의한 효율손실비율 E_{loss}는 아래의 식에 의해 얻을 수 있다.

$$E_{loss} = \frac{(m-1)p}{T+(m-1)p} = \frac{(m-1)/n}{1+(m-1)/n} \quad (2)$$

<Figure 3>은 두 가지 생산환경, 즉 조립시간에 변동성이 없는 경우와 지수분포를 따르는 변동성이 있는 경우에 계산식 (1)과 (2)를 이용하여 얻은 효율손실비율과 시뮬레이션 실험을 통하여 얻은 효율손실비율을 비교하고 있다. 실험을 통하여 위의 계산식이 비교적 정확하게 효율손실비율을 예측하고 있다는 것을 볼 수 있고, 동시에 조립시간의 변동성이 커지면 hand-off의 의한 효율손실도 또한 커진다는 것을 확인할 수 있다.

위에서 계산된 hand-off에 의한 효율손실비율은 BB조립셀에서의 생산능력을 구하는데 이용될 수 있다. 하나의 셀을 한 명이 담당한다면 hand-off이 발생하지 않으므로 작업자 한명이 시간당 최대로 생산할 수 있는 제품의 수는 $1/T$이다. 그러나 hand-off 손실이 존재하는 경우 BB조립셀에서 1인당 생산능력, r은 다음과 같이 얻을 수 있다 : $r = (1 - E_{loss})/T$. 식 (1)과 식 (2)에서 효율손실비율은 작업자 수(m)와 요소조립작업의 수

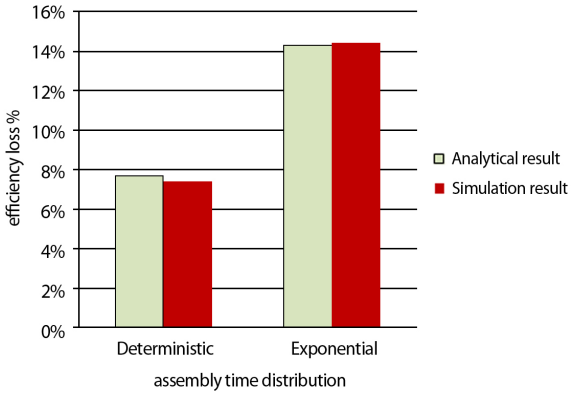


Figure 3. Comparison of analytical and simulation results in terms of efficiency loss %

(n)에 영향을 받음을 알 수 있다. <Figure 4>는 작업자수와 요소작업 수가 변함에 따라 hand-off에 의한 라인효율 손실에 어떤 영향을 주는지 나타내고 있다. 요소조립작업의 수가 많고 작업자 수가 적으면 hand-off 시간이 전체 조립 시간에서 차지하는 비율이 작아지게 되므로 생산성 손실이 적어지게 된다. 즉, m/n이 아주 작아지면(즉, 작업자가 한 제품 당 처리해야 하는 요소조립작업 수가 많으면) hand-off에 의한 효율손실이 0에 가깝게 됨을 알 수 있다. 반대로, 작업자가 한 제품 당 처리해야 하는 요소조립작업 수가 적으면 hand-off에 의한 효율손실이 커져서 Bucket Brigade를 적용해서 얻을 수 있는 효과가 줄어들게 됨을 알 수 있다.

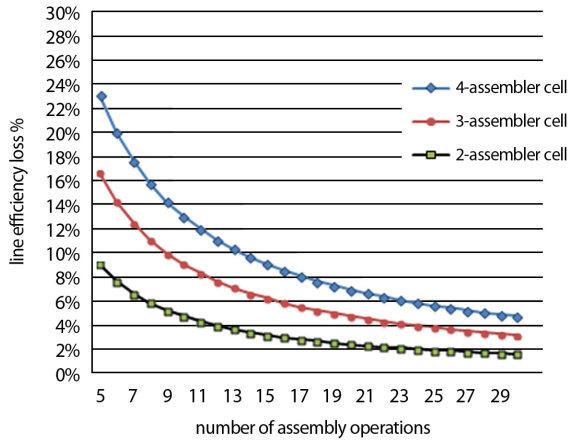


Figure 4. Hand-off loss in BB Assembly Cell

(2) *Blocking* 손실

BB조립셀에서 요소작업의 처리시간이 확률적으로 변경될 때 blocking 손실이 발생될 수 있다. 설비 트러블에 기인한 작업 지연, 제품의 품질문제에 따른 재작업 또는 작업 시간 지연, 작업자의 작업속도 변동성, 다품목 제품 생산 경우 제품의 부품별 생산시간 차이 등 여러 요인에 의하여 요소작업의 처리시간은 일정하지 않고 변동성이 존재한다. 예를 들어 <Figure 5>에서 보여주는 것과 같이 BB조립셀에서 선행작업자가 설비

트러블 때문에 작업을 진행 하지 못하고 설비가 수리될 때까지 기다리고 있는 <Figure 5>(a) 상태에서 후행작업자가 이전 작업을 모두 마치고 해당 설비를 이용한 작업을 수행하려 할 때 앞 작업이 아직 마치지 않았으므로 더 이상 작업을 진행하지 못하는 <Figure 5>(b) 상태가 발생할 수 있다. 이처럼 후행작업자가 조립작업을 수행하려는데 선행작업자가 아직 해당 작업을 마치지 못하여 대기해야 하는 상태가 되었을 때 발생하는 작업시간 손실을 blocking 손실이라 한다.

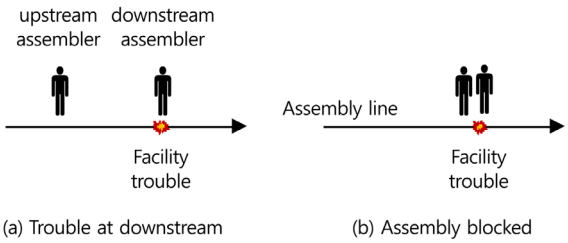


Figure 5. Blocking loss in BB Assembly Cell

위에서 기술한 hand-off 손실과 blocking 손실 때문에 Koo (2009)가 제시한 일반적인 BB조립셀에서는 생산능력의 손실을 경험하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 새로운 BB조립셀 운영방식을 제시한다.

2.3 새로운 BB조립셀 : Zoned BB조립셀(ZBB조립셀)

위에서 기술한 hand-off과 blocking에 기인한 효율 손실은 연속적인 두 작업자 간의 interface 되는 부분에서 발생한다. 본 논문에서는 이러한 효율손실을 최소화하기 위하여 작업자의 작업영역에 제한을 두고 각 작업영역의 끝단 부분에 buffer를 두어 작업을 원활히 할 수 있도록 한다(비교를 위하여 일반적인 BB조립셀을 GBB조립셀이라 하고, 새롭게 제시하는 BB조립셀을 ZBB조립셀 이라 하자). <Figure 6>는 ZBB조립셀의 형태를 간단하게 보여주고 있다.

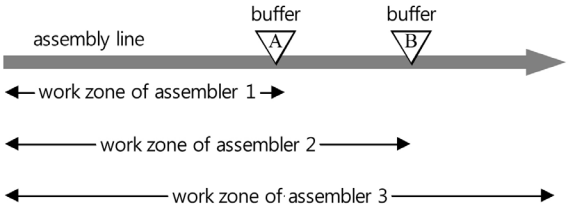


Figure 6. Work zone allowed for each assembler in ZBB assembly cell

<Figure 6>에서 작업자 1은 조립작업을 시작하여 작업자 2가 조립작업을 인수할 수 있을 때까지 조립작업을 수행한다. 첫 번째 버퍼의 위치인 A까지 작업을 수행하였는데 작업자 2가 해당 작업을 인수하지 않았다면 작업자 1은 현재 요소작업을 마치고 A의 위치에 있는 버퍼에 미완성된 상태의 조립품을 두고 조립라인의 처음으로 돌아가서 조립작업을 새롭게 시작한다. 작업자 2의 경우는 다음 조립작업을 위해 준비가 되면 상류(upstream) 방향으로 이동하여 우선 A위치의 버퍼에 작업물이 있는지 확인한다. 이때 조립작업이 존재하면 해당 조립작업을 A위치에서부터 시작하고, 존재하지 않으면 일반적인 Bucket Brigade 운영방식과 같이 선행작업자(작업자 1)의 작업을 인수받아 작업을 시작한다. 조립라인의 마지막 작업자인 작업자 3은 조립작업을 모두 마치면 상류(upstream) 방향으로 이동하여 B위치의 버퍼에 작업물이 있는지 확인하고 작업물이 있으면 이 작업물로 조립작업을 시작하고, 없으면 작업자 2로부터 작업물을 인수받아 작업을 시작한다. 작업자 2와 작업자 3이 버퍼로부터 작업물을 꺼내어 조립작업을 시작하는 경우에는 hand-off에 의한 효율 손실이 발생하지 않는다. 또한 작업자 1과 작업자 2의 경우 조립을 진행 할 수 있는 작업 영역이 주어지므로 blocking에 의한 손실도 감소할 것으로 기대된다.

3. 실험을 통한 조립방식의 비교 분석

제시된 Bucket Brigade를 기반으로 하는 조립라인 운영방식인 ZBB조립셀의 performance를 검증하기 위하여 12개의 요소조립작업으로 이루어진 제품의 가상 조립셀을 대상으로 실험을 수행하였다. 각 요소작업의 작업 순서는 선후관계에 의해 미리 정해져 있다고 가정한다. 각 요소작업의 작업의 조립시간은 <Figure 7>에 나타나 있다. 본 절에서는 일반조립라인, 일반조립셀, GBB조립셀, ZBB조립셀의 performance를 비교 분석한다. 일반 조립라인은 각 요소작업을 한명의 작업자가 담당하여 12명의 작업자가 하나의 조립라인을 담당하며, 일반조립셀과 BB조립셀은 하나의 셀에 3명의 작업자가 조립작업을 담당한다고 가정한다. 특히 일반조립셀에서는 각 작업자의 작업부하를 균등화하기 위하여 작업자 1은 1~4번 작업을, 작업자 2는 5~8번째 작업을 그리고 작업자 3은 9~12번 작업을 담당하며, 하나의 제품에 대하여 각각 15.1분, 17.9분, 14.9분의 조립작업시간이 필요하다. 동적으로 시스템이 변하는 상황을 분석하기 위하여 각 운영전략에 대하여 ARENA 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션 모델을 구축하고 여러 생산 환경에서 실험을 실시하였다. 각 시나리오에 대한 실험은 통계적인 오류를 고려하여 10회 반복 수행하였고, 시뮬레이션 초기 100시간의 데이터는 버리고 그 이후 200시간의 통계치만 수집하여 데이터를 분석하였다.

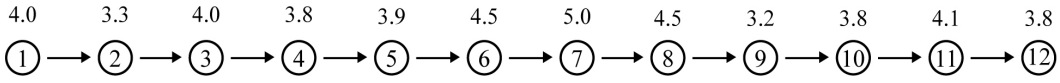


Figure 7. An assembly system with 12 assembly operations

(1) 변동성이 없는 생산환경에서 각 조립운영방식의 생산성 비교

우선 가장 단순한 경우로 각 요소작업의 조립시간이 변동성 없이 항상 일정하다는 가정 하에 각 조립라인 운영전략의 생산성을 비교한다. 일반조립라인의 경우에 조립라인의 생산속도, 즉 택타임은 7번째 작업에 의해 결정되어 5분이 된다. 따라서, 이 조립라인에서는 시간당 12개의 조립완성품을 생산할 수 있으며 이는 작업자 한명이 시간당 1개의 제품을 생산함을 의미한다. 하나의 제품을 조립하여 완성시키기 위해서는 47.9분의 조립시간이 필요하므로, 라인효율, E는 E = 47.9/(12×5.0) = 79.8%이다.

동일한 제품을 생산하기 위하여 조립셀을 구성하여 제품을 생산하는 경우 하나의 조립셀에서 17.9분 만에 하나씩 제품이 생산되어 시간당 60/17.9 = 3.35개의 조립품을 완성할 수 있고, 따라서 작업자 한명이 시간당 1.12개의 제품을 생산할 수 있다. 라인효율은 이때 E = 47.9/(3×17.9) = 89.2%이다.

3명의 작업자로 이루어진 GBB조립셀의 경우는 생산시간의 변동성이 존재하지 않으면 blocking 손실 없이 hand-off 손실만 발생한다. 식 (1)로 부터 효율손실비율은 7.7%이고, 이때 한명의 작업자가 시간당 1.16개의 제품을 생산할 수 있다는 것을 알 수 있다. ZBB조립셀에서는 작업자 1은 6번째 조립작업까지만 수행할 수 있고, 작업자 2는 10번째 작업까지만 수행할 수 있다고 가정하였다. GBB조립셀과 마찬가지로 조립시간의 변동성이 없으므로 blocking 손실 없이 hand-off 손실만 발생한다. 따라서 GBB조립셀과 동일한 형태로 작업하게 되고, 따라서 performance도 동일한 결과를 얻을 수 있다. 식 (1)과 식 (2)의 정확성을 검증하고자 시뮬레이션 실험을 수행하였고, 시뮬레이션 실험 결과 유사한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

<Figure 8>은 현재의 시스템에서 다른 조립운영전략을 적용했을 때 1 Man-Hour(MH) 당 생산되는 제품수를 비교하고 있다. 조립셀이 조립 라인에 비해 생산량이 12%만큼 증가하고, GBB와 ZBB를 적용하면 기존의 일반조립셀보다 생산량이 추가로 3.6% 만큼 증대시킴을 볼 수 있다.

(2) 시스템의 변동성이 존재하는 경우 각 조립운영방식의 생산성 비교

제시된 ZBB조립 라인 운영방식은 시스템의 변동에 유연하게 대처할 수 있으므로 변동성이 있는 시스템에 더욱 적합한 운영전략이라고 판단된다. 이를 확인하기 위하여 요소작업의 조립시간에 변동성이 존재하는 경우 각 조립운영방식의 performance를 비교분석한다. 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 등 여러 가지 요인에 의해 생산시간은 변동성이 존재한다. 일반적인 생산시스템의 변동성은 변동계수가 0.75와 1.33사이에 있다고 알려져 있다(Hopp and Spearman, 2008). 여기서는 조립시간이 감마분포를 따른다

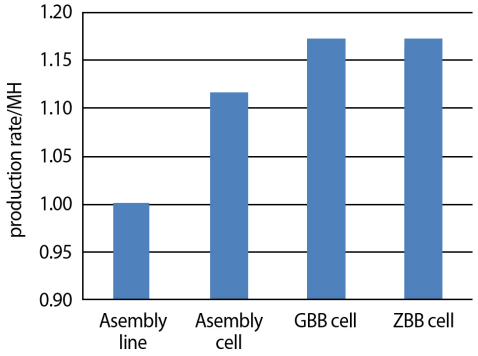


Figure 8. Performance of assembly methods under deterministic assembly time

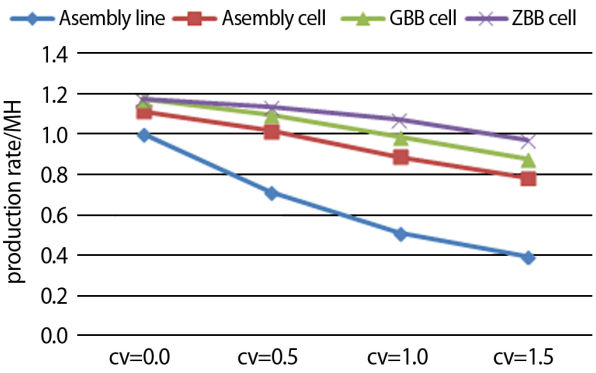


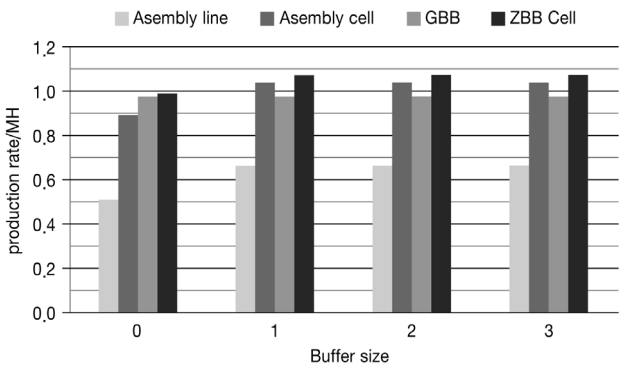
Figure 9. Performance of assembly methods with stochastic assembly time

고 가정하였고, 변동계수(coefficient of variation)가 0.5, 1.0, 1.5 세 가지 경우에 실험을 수행하였다. ZBB조립셀의 경우 작업자 1의 작업영역은 6번째 조립작업까지이며, 작업자 2의 작업영역은 10번째 조립작업까지를 기본시스템으로 하여 실험을 수행하였다. <Figure 9>는 조립하는데 소요되는 시간의 변동성이 변하는 경우 각 조립방식의 performance를 비교하고 있다. 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 blocking 손실로 인해 performance가 악화된다. ZBB조립셀은 다른 조립운영방식과 비교하여 변동성의 영향을 가장 적게 받고 있음 보여주고 있다.

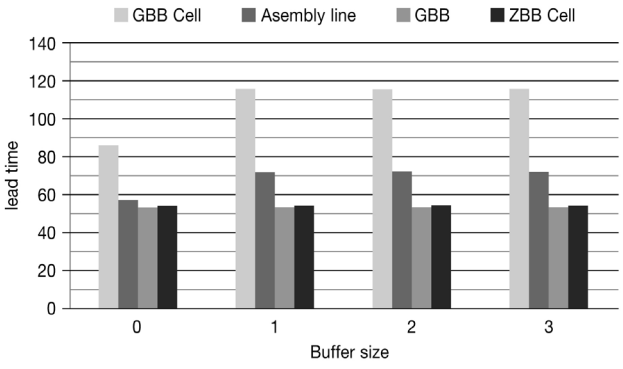
(3) 변동성을 대응하기 위해 중간버퍼를 활용하는 경우 performance 비교

시스템의 변동성을 대응하기 위한 전략으로 일반적으로 적용하는 전략이 각 자원에 버퍼를 두어 변동성을 흡수하는 것이다. 버퍼는 여러 변동성을 흡수하여 시스템의 효율 손실을 줄일 수는 있으나, 버퍼를 너무 크게 하면 생산리드타임과 중간

재고(WIP)가 증가한다. 따라서 버퍼는 크기를 일정한 수준 이상으로 가져가지 않고 적정한 수준으로 유지하며 라인을 운영하는 것이 필요하다. 버퍼를 이용하여 생산 라인을 컨트롤 하는 전략은 여러 가지가 있으나, 본 논문에서는 각 작업자간의 버퍼크기를 일정하게 하는 환경을 가정한다. 작업자가 담당하는 요소조립작업을 수행한 후에 다음 작업자가 작업 중이면 buffer에 제품을 놓아두고, 다음 작업을 수행한다. 이때 buffer에 놓아둘 공간이 없으면 버퍼에 빈 공간이 생길 때까지 기다린다. <Figure 10>은 버퍼전략을 적용하는 시스템에서 버퍼의 크기에 따라 각 운영전략의 생산량과 리드타임을 비교하고 있다. 요소조립작업시간의 변동계수는 1.0로 가정하였다. 조립라인 운영전략 중 GBB조립셀은 버퍼를 인정하지 않으므로 버퍼크기와 관계없이 항상 동일한 결과가 나옴을 볼 수 있다. 다른 세 전략에서는 버퍼를 하나 두면 생산성이 급속히 향상됨을 알 수 있다. 그러나 버퍼의 크기를 2 이상으로 하면 생산성의 증가속도가 미미함을 알 수 있다. 특히 ZBB조립셀이 버퍼의 유무에 상관없이 다른 운영전략보다 더 좋은 결과를 산출해 내고, 특히 버퍼를 증가하더라도 리드타임이 거의 증가하고 있지 않음을 볼 수 있다. 이는 버퍼를 두더라도 ZBB에서는 실제로 제품을 버퍼에 두고 다음 작업을 수행하는 경우가 적기 때문에 WIP가 적게 되고 이는 Little의 법칙에 의해 리드타임이 적게되는 것으로 설명 될 수 있다.



(a) production rate



(b) lead time

Figure 10. Performance of assembly methods with different buffer sizes

(4) ZBB조립셀에서 버퍼위치가 생산성에 미치는 영향

앞의 실험에서 ZBB조립셀의 경우 작업자 1은 6번째 조립작업까지, 작업자 2는 10번째 조립작업까지를 작업영역으로 하였다. 버퍼의 위치가 변함에 따라 생산성의 변화를 알아보기 위하여 작업영역을 변경해 가면서 실험을 수행하였다. <Figure 11>는 변동계수가 1.0이고 버퍼크기를 1로 한 상황에서의 실험 결과를 보여주고 있다. 그림에서 작업영역(b1, b2)은 작업자 1은 b1번째 조립작업까지, 작업자 2는 작업영역은 b2번째 조립작업까지를 작업영역으로 하고 있음을 표현하고 있다. 실험결과 작업영역이 변함에 따라 생산성이 변함을 알 수 있고, 특히 현재의 경우에는 작업자 1은 5번째 조립작업까지, 작업자 2는 9번째 조립작업까지로 작업영역을 정하는 경우가 가장 높은 생산량을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 작업영역을 (4, 8)과 같이 제한을 많이 두면 선행작업자들의 능력을 최대한 발휘될 수 없는 경우가 발생하여 생산성 손실이 발생할 수 있고, (7, 11)처럼 너무 넓게 잡으면 작업자 간에 직접 hand-off 상황이 자주 발생함으로써 효율손실에 의한 생산성 저하로 연결될 수 있기 때문에, 적절한(이 실험에서는 (5, 9) 영역) 위치에 버퍼를 설정하는 것이 필요하다.

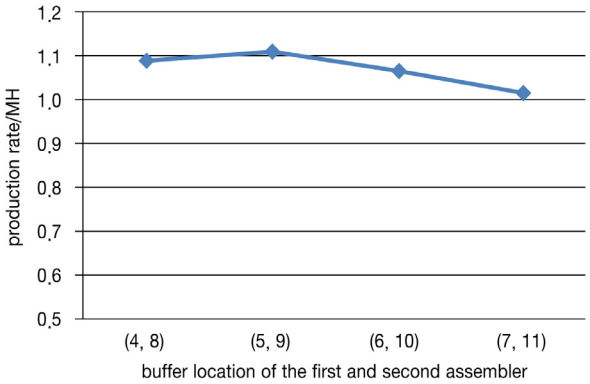


Figure 11. Performance of assembly methods with different buffer locations

4. 결 론

본 논문은 조립작업의 생산성을 높이기 위하여 Bucket Brigade 개념을 적용한 새로운 조립라인 운영방식을 제안하였다. Bucket Brigade는 여러 공정으로 이루어진 라인에서 각 공정을 생산자원에게 자율적으로 할당하는 유연한 작업할당 방법이다. 본 논문은 Koo(2009)가 제시한 Bucket Brigade를 적용한 조립셀 운영방식에서 효율손실의 원인이 되는 hand-off과 blocking 현상을 분석하고, 이에 따른 효율 손실을 최소화하는 새로운 Bucket Brigade 기반의 조립라인 운영 방식을 제안하였다. 제안된 운영방식은 작업자의 작업 영역에 제한을 두고 작업영역 후반부에 버퍼 기능을 두어 연속된 작업자간의 작업을 decoupling하여 hand-off 손실과 blocking 손실을 줄이도록 하였다.

시뮬레이션 실험을 통하여 일반조립라인, 일반조립셀, 일반 BB조립셀과 제시된 새로운 BB조립셀을 여러 생산 환경에서 비교분석하였다. 실험결과 새로운 BB조립셀이 일반 BB조립셀보다 우수한 생산성을 보이고 있음을 확인하였다. 특히 시스템의 변동성이 큰 경우에도 다른 조립 운영방식과 비교하여 생산성이 덜 악화되어 변화에 강건한 조립운영방식임을 알 수 있었다. 또한, 실험을 통하여 조립작업자 사이의 버퍼공간을 많이 둘 필요가 없다는 것을 확인 할 수 있었고, 작업영역의 범위가 생산성에 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

본 논문에서 제시된 BB조립셀이 성공적으로 운영되기 위해서는 각 작업자가 여러 가지 작업에 대한 기능을 보유하고 있어야 하므로 작업자의 교육훈련이 우선되어야 한다. 또한, BB조립셀의 특징은 중앙집중식이 아닌 분산 자율적으로 의사결정이 이루어지므로, 각 작업자의 협력 작업에 대한 긍정적인 인식이 필요하다. 작업영역이 확정적으로 정해져 있지 않기 때문에 작업자간의 협조가 잘 이루어 지지 않으면 오히려 일반조라인 운영형태인 경우보다 생산성이 낮게 나올 가능성도 있다. 따라서, 자율 분산적 협동작업을 통해 실제로 생산성 향상을 달성하기 위해서는 어떻게 작업자에게 생산성 향상을 통해 얻은 이익을 분배할 것인가와 이와 관련하여 성과측정을 어떻게 해야 하는지에 대한 방안이 BB조립셀의 도입 이전에 수립되는 것이 필요하다.

본 논문에서 제시한 BB조립셀에서 추가로 연구할 부분이 남아있다. 작업자의 숙련도가 각기 차이나는 경우 어떤 작업자를 어느 위치에서 작업하게 하는 것이 생산성과 라인의 안정성을 최대로 할 것인가 하는 문제와, 작업자가 작업을 인수받기 위해 이동해야 하는 경우 이동시간을 고려한 조립셀의 배치 형태에 대한 연구, 그리고 다품종의 제품을 조립하는 경우 제품별 또는 공정별 버퍼 위치와 크기의 결정에 대한 연구 등이 추가로 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., and 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.

Chung, D.-K. and Yoon, W.-Y. (2015), A case study on productivity improvement for conveyor assembly production line in medium and small-sized manufacturing factories, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineering*, **41**(2), 209-219.

Hopp, W. J. and Spearman, M. L. (2008), *Factory Physics, Third Edition*, Waveland Press Inc., Illinois, USA.

Hu, S. J., Ko, J., Weyand, J., ElMaraghy, H. A., Lien T. K., Koren, Y., Bley, H., Chryssolouris, G., Nasr, N., and Shpitalni, M. (2011), Assembly system design and operations for product variety, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **60**, 715-733.

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. (2009), Application of bucket brigades in assembly cells for self work balancing, *IE Interfaces*, **22**(2), 144-152.

Lim, Y. F. and Wu, Y. (2013), Cellular bucket brigades on U-Lines with discrete work stations, *Production and Operations Management*, **23**(7), 1113-1128.

Quader, S. and Castillo-Villar, K. K. (2013), A state-of-the-art matrix analysis of bucket brigade. *Proceedings of Industrial and systems engineering research conference 2013, Institute of Industrial Engineers*, SanJuan, Puerto Rico.

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.

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.