

생산 및 물류 시스템에서의 Bucket Brigade 활용 및 시뮬레이션 분석¹⁾

Application of Bucket Brigade in Manufacturing and Logistics Systems

구평희, 강희영

부경대학교 시스템경영공학과 (phkoo@pknu.ac.kr, nb0023@hanmail.net)

Abstract

제품(또는 서비스)을 생산하기 위하여 여러 순차적인 작업이 수행되어야 하는 환경에서 생산자원(기계 또는 작업자)에게 얼마만큼의 요소작업을 배정하는가를 결정하는 작업배정(Work Assignment) 문제는 중요한 의사결정 문제이다. 일반적으로 이용하는 작업배정 방식은 각 생산자원에게 가급적 균등한 작업량을 배정하는 라인밸런싱(LB: Line Balancing) 전략이다. 그러나 LB 방식은 작업자의 작업속도 차이나 시스템의 여러 가지 변동 상황(기계고장, 품질문제 등)의 고려 없이 작업을 배정하기 때문에 실제로는 계획된 밸런싱효율을 달성하기 어렵다. Bucket Brigade (BB)는 이러한 문제에 대응하기 위한 새로운 작업배정 방법으로 제시되고 있다. BB는 개미의 협력작업 개념을 바탕으로 하는 분산 자율적인 작업배정 방법이다. 본 발표에서는 생산 및 물류시스템에서 BB의 적용 가능성과 문제점을 논의하고, 시뮬레이션을 통하여 여러 작업 환경에서 BB의 수행도를 분석한다.

1. 서론

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 일반적으로 추구하는 작업배정 방식은 각 생산자원에게 가급적 균등한 작업량을 배정하는 라인밸런싱(LB: Line Balancing) 전략이다. 라인밸런싱은 작업량의 균등 배정을 통하여 주어진 생산자원을 최대한 활용하고, 따라서 최소의 비용으로 최고의 생산성을

달성할 수 있다는 논리를 바탕으로 한다. 작업배정이 완료되면 생산자원은 모든 요소작업을 수행할 수 있는 능력이 있는 경우에도 제품의 흐름 속도에 따라 배정된 일정 부분의 작업만을 수행하게 된다.

라인밸런싱에서 각 자원에 할당하는 작업의 양을 시간으로 표현하기 위하여 표준시간이 이용된다. 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 라인밸런싱 효율과는 다르게 가장 느린 작업자의 작업속도에 의하여 효율이 결정된다. 또한, 표준시간을 기반으로 결정된 할당의 결과는 유연성의 측면에서도 문제가 있다. 즉, 생산시스템에서의 변동이나 불확실성을 고려하고 있지 않다. 제품의 종류가 점점 다양해지고 수명주기가 단기화 되는 시장환경에서 생산시스템은 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 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. BB 방식은 초기에 의류산업과 창고에서의 Order Picking 작업에 적용되었고 그 적용 범위가 확산되어 현재는 여러 산업에서 적용되고 있다(Bratcu and Dolgui, 2005).

본 논문에서는 BB의 개념을 소개하고 BB의 활용 방안을 논한다. 2절에서는 BB에 의한 작업할당 방법을 소개하고 기존의 라인밸런싱과는 어떤 차이점이 있는지 기술하고, 3절에서는 시뮬레이션 실험

1) 이 논문은 2004년도 부경대학교 연구년 교수지원에 의하여 연구되었음

을 통하여 여러 작업 환경에서의 BB의 효용성을 검증한다.

2. Bucket Brigade에 의한 작업배정

Bucket Brigade(BB)는 개미가 먹이를 나를 때 서로 협력하는 행동을 모방하고 있다. 개미가 먹이를 개미집으로 나를 때 강한 개미는 개미집에서 가까운 곳에서 먹이를 나르고, 약한 개미는 먹이가 있는 곳에서 먹이를 나른다. 개미집에서 가장 가까운 곳에서 일을 하는 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 들고 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 아래와 같이 조립작업에 활용된다.

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

라인의 첫번째 작업자는 선행 작업자가 없으므로 라인 시작부분에서 제품(주문)의 최초 조립작업을 시작으로 작업을 수행하고, 라인의 최종 작업자는 모든 조립 공정을 마치면 조립된 제품을 완성 제품상자등에 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 작업속련도의 차이에 의해서 작업속도가 차이가 나지만 BB 하에서는 모든 작업자는 각자의 능력만큼 일을 하게 된다.

BB를 가장 유용하게 활용하기 위해서는 몇 가지 선행조건이 만족 되어야 한다. Bartholdi et al.(2001)는 BB를 적용하여 최대의 생산량을 달성할 수 있도록 하는 <그림 1>과 같은 이상적인 조건을 BB표준모델이라 하였다.

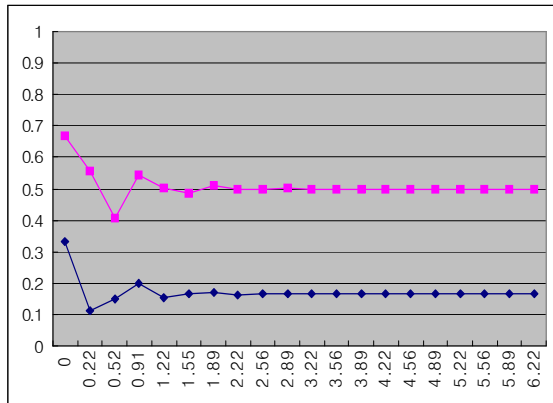
- 조건 1. 무시 가능한 walk-back시간. 선행 작업자로부터 작업을 넘겨받기 위해 걷는 시간은 총 조립작업 시간과 비교하여 아주 작다. walk-back시간이 0이면 모든 작업자가 후행 작업자에게 작업을 넘겨주는 시간은 최종 작업자의 작업 완료시간과 같아진다.
- 조건 2. 작업 속도에 의한 작업자 순서화. 각 작업자는 작업속도에 따라서 배치된다.
- 조건 3. 작업시간의 연속성 및 확정성. 각 작업의 작업시간은 확정적으로 주어지고, 모든 작업은 생산라인에 연속적으로 분포되어 있다. 이때 모든 조립공정의 작업시간을 normalize하여 [0,1]로 정의 할 수 있다

<그림 1> BB 표준모델

위의 선행조건은 절대적인 것은 아니지만 BB의 효과를 최대화하기 위해 필요하다. BB표준모델에서는 중앙의 통제 없이 자율적인 라인 밸런싱이 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 작업시간 간격에서 작업을 하게 된다(Bartholdi and Eisentein, 1996).

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

<그림 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. 그림에서 BB를 적용하면 초기에는 각 작업자의 작업내용이 다소간 변동이 있지만, 시간이 진행됨에 따라 각 작업자의 작업량이 수렴함을 알 수 있다. 또한 작업속도가 빠른 작업자일수록 많은 작업을 수행함을 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 2> 작업자 3명인 경우의 작업 배정

또한 BB표준모델에서의 단위시간당 생산량은 $\sum_{i=1}^n V_i$ 으로 수립하게 된다(Bartholdi et al. 2001). 위의 예에서 단위 시간당 생산량은 3.0(=0.5+ 1.0+ 1.5)이고 이는 시뮬레이션에 의해서도 확인되었다. BB표준모델에서는 각 생산자원의 손실시간이 없기 때문에 생산자원을 100% 활용하는 효과가 있다. 이는 라인밸런싱 방법에서 밸런싱 효율이 100%되는 것과 동일한 효과이다.

일반적으로 생산시스템과 물류시스템에서는 이와 같이 BB표준모델에서의 이상적이 조건을 모두 만족시키는 것은 불가능하다. 본 논문에서는 시뮬레이션 실험을 수행하여 현실적인 환경에서 BB의 활용성을 검증한다.

3. 실험 및 결과분석

본 논문에서는 라인밸런싱 방법과 BB를 비교하기 위하여 시뮬레이션 실험을 하였다. 시뮬레이션 모형은 비주얼베이직을 도구로 사용하여 구성하였으며, 펜티엄4급 PC를 사용하여 실험을 실시하였다. 기존의 라인밸런싱 방법은 작업별로 주어진 선후관계를 고려하여 밸런싱 효율이 최고가 되도록 각 생산자원에 작업을 할당하였다. 밸런싱 효율은 아래와 같이 정의된다.

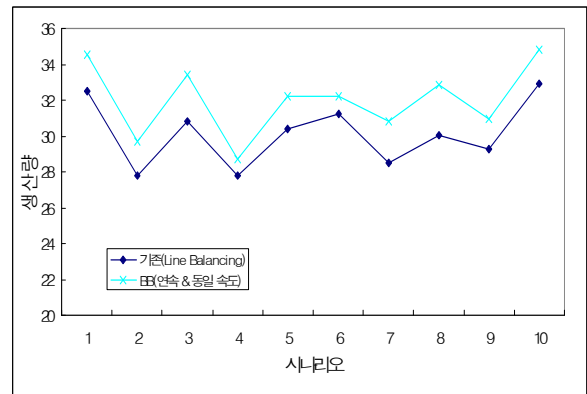
$$\text{밸런싱 효율}(\%) = \frac{\text{작업시간총합계}}{\text{cycletime} \times \text{생산자원수}}$$

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

실험대상이 되는 시스템은 요소작업이 15개로 이루어진 라인을 작업자(생산자원) 3명이 작업하는 것으로 정하였다. 각 요소작업의 작업시간은 일양 분포 U(2,4)에서 Sampling하여 얻었다. 통계적인 오차를 고려하여 난수를 발생시켜 얻은 10개의 시나리오를 가지고 실험하였다. 시뮬레이션 실행시간은 하루 8시간(480분)으로 하였다.

3.1 기본분석: 연속작업 및 동일속도 작업

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 3>은 실험 결과를 보여주고 있다.



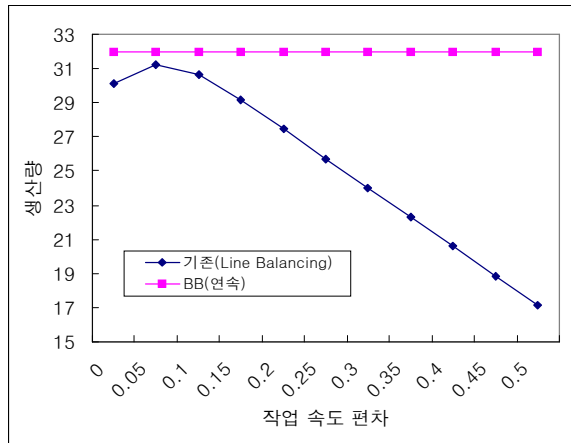
<그림 3> 이상적인 상황에서의 BB 및 라인밸런싱 수행도 비교

그림에서 BB(연속&동일 속도)가 라인밸런싱(기존)의 방법보다 단위시간당 생산량이 많음을 볼 수 있다. 이는 이상적인 상황에서도 고정적인 작업 배정방식인 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.

3.2 연속작업 및 작업속도 차이 있는 경우

본 절에서는 작업자의 작업속도가 차이 나는 경우를 대상으로 실험하였다. 여기서 작업자의 속도는 느린 작업자, 보통 작업자, 빠른 작업자를 두고, 보통 속도의 작업자를 기준으로 작업속도 편차를 더하거나 빼주었다. 예를 들어 작업 속도의 차이가 없는 경우는 작업 속도를 모두 1로 한데 반하여, 작업속도의 차이가 존재하는 경우는 세 작업자의 속도를 각각 0.9, 1.0, 1.1 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>는 실험 결과를 보여주고 있다. BB는 작업자의 속도 차에 관계없이 일정한 생산량을 보여주었으나, 기존의 방법은 작업자의 속도차가 커짐에 따라서 0.05~0.1 구간에서 일시적으로 생산량이 증가함을 보이다가 다시 일정

한 비율로 감소하는 것을 보였다. 이 구간에서 생산량이 증가하는 이유는 작업속도가 빠른 작업자에게 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. 이 상에서 볼 수 있듯이 연속 작업일 경우에 BB에서 작업 속도에 상관없이 더 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.



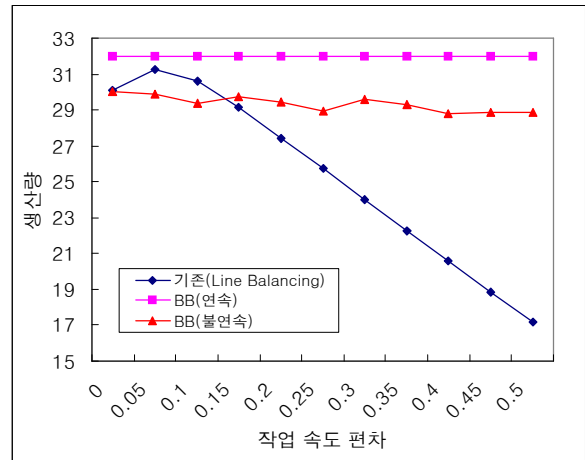
<그림 4> 작업속도가 상이한 경우의 실험결과

3.3 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 5>는 실험 결과를 보여주고 있다. 실험결과 불연속 작업인 경우에 BB의 수행도가 연속적인 작업인 경우보다 낮다는 것을 볼 수 있다. 이는 불연속인 경우에는 작업자가 일을 마친 후 선행공정으로부터 곧바로 작업을 인도받을 수 없기 때문에 발생하는 유휴시간(즉 생산자원 loss)이 발생하기 때문이다. 기존의 방법은 작업속도의 편차가 0.1일 때까지 생산량이 약간 더 좋다가 작업속도의 편차가 커질수록 일정한 비율로 생산량이 감소하였다. 즉 불연속적인 경우에는 속도차이가 많지 않은 상태에서는 기존의 라인밸런싱 방법보다 BB방법이 모든 경우에 우수하다고 말할 수 없다는 결론을 얻었다. 그러나 그림에서 보듯이 BB의 수행도는 작업속도에 민감하지 않

게 반응하므로 작업자의 속도차이가 어느 수준 이상 되면 BB방법의 활용이 수행도를 향상시킬 수 있다는 결론을 얻었다.



<그림 5> 불연속 작업에서의 수행도 비교

4. 결론

본 논문에서는 여러 작업으로 이루어진 라인에서 각 작업을 생산자에게 자율적으로 할당하는 유연한 작업할당 방법인 Bucket Brigade(BB)의 개념을 소개하고, 그 효율성을 검증하기 위하여 기존 라인밸런싱 방법과의 비교분석 실험을 수행하였다. 실험결과 BB는 동적인 작업 배정이 가능하기 때문에 기존의 라인밸런싱 방법보다 높은 수행도를 보임을 알 수 있었다. 특히 작업자의 작업속도 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. 그러나 일반적인 조립환경에서 작업의 분할이 불가능한 경우에는 BB의 경우 생산자원이 일정기간 대기해야 하는 현상이 발생하므로, 이 경우에는 작업자의 속도 차이가 미미하다면 오히려 기존의 라인밸런싱 방법이 더 좋은 결과를 보일 수 있음을 확인 하였다.

BB를 적용하기 위해서는 여러 가지 선행적으로 해결해야 할 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 할당한 경우에는 부작용도 함께 따를 수 있다. Schultz et al. (2002)는 유연한 작업할당의 역작용이 이를 통해 얻는 이익보

다 클 수 있으므로 이러한 방법의 적용은 신중을 기해야 한다고 주장하고 있다.

이러한 해결해야 할 문제에도 BB는 동적이고 Pull 형태의 작업배정에 따른 생산성 향상의 잇점을 가지고 있다. 본 연구에서는 몇 가지 상황에서 BB를 기존의 방법과 비교하고 있으나, 추가적인 여러 가지 현실적인 상황, 즉 walk-back 시간이 있는 경우, 확실적인 작업시간, 다품종의 생산 라인 등의 경우를 고려한 보다 종합적인 효율성 분석 연구가 진행 중이다.

참고문헌

- Bartholdi, J.J. and Eisenstein, D.D. A production line that balances itself, *Operations Research*, 44(1), 21-34, 1996
- Bartholdi, J.J., Eisenstein, D.D., Foley, R.D., Performance of bucket brigades when work is stochastic, *Operations Research*, 49(5), 710-719, 2001
- Bratcu, A.I and Dolgui, A., A survey of self-balancing production lines("bucket brigade"), *Journal of Intelligent manufacturing*, 16, 139-158, 2005
- Schultz, K.L., McClain, J.O. and Thomas, L.J., Overcoming the dark side of work flexibility, *Journal of Operations management*, 21, 81-92, 2003.