

◆ 특집 ◆ 자율적응 생산시스템 통합 운용기술

재구성형 모듈러셀의 팔레트-치구 할당: 통합적 접근

Pallet-fixture Allocation in Reconfigurable Manufacturing Cells: An Integrative Approach

한수민¹, 서진우¹, 박진우^{1,✉}, 이종국², 강경철², 이상호², 문점생²
Sumin Han¹, Jinwu Seo¹, Jinwoo Park^{1,✉}, Jongkuk Lee², Kyungchul Kang², Sangho Lee²
and Jumseang Moon²

¹ 서울대학교 산업공학과/자동화 연구소 (Automation and System Research Institute / Department of Industrial Engineering, Seoul Nat'l Univ.)

² 두산인프라코어 (Doosan Infracore, Ltd.)

✉ Corresponding author: autofact@snu.ac.kr, Tel: 02-880-7179

Manuscript received: 2012.1.13 / Accepted: 2012.2.17

To schedule a Reconfigurable Manufacturing Cell (RMC), reconfiguration and setting decisions should be made first. Those decisions, together with characteristics of production orders, affect attainable performance of a system. So an integrative approach is required considering all decisions and characteristics rather than dealing with each of them separately. Pallet-fixture allocation, as a decision problem in setting, which determines the number of pallets to be equipped with each fixture type to produce different types of products, has rarely been investigated. In this study, several pallet-fixture allocation rules are proposed including both simple and novel ones. Then system performance is investigated through various combinations of setting and scheduling decisions (rules) for given system configurations and production orders, via simulation. The result shows that one of proposed pallet-fixture allocation rules which considers both configuration and order characteristic outperforms the others, justifying the necessity of an integrative approach in the RMC operation

Key Words: Reconfigurable Manufacturing Cell (재구성형모듈러셀), Scheduling (일정 계획), Pallet-fixture Allocation (팔레트-치구 할당), Simulation (시뮬레이션)

1. 서론

재구성형모듈러셀(Reconfigurable Manufacturing Cell, RMC)은 시스템의 구성요소를 현장 상황(생산 제품의 종류, 생산량)에 따라 빠르게 변화시킬 수 있는 가공 셀을 말한다.

기존의 유연생산시스템(Flexible Manufacturing System, FMS)이 범용 기계와 소재이송장치의 사용, 컴퓨터에 의한 컨트롤을 통해 생산시스템의 유연성을 확보한 것이라면 RMC는 여기에 더하여 하드웨어의 종류 및 수량 변경을 통한 재구성을 가

능하게 함으로써 생산환경의 변화에 보다 근본적으로 대응하는 시스템이라고 할 수 있다.

재구성의 대상이 되는 하드웨어에는 기계, 소재이송장치, loading / unloading (L/U) station(혹은 셋업), 팔레트/치구(fixture) 등이 있으며 Fig. 1은 특정 RMC의 재구성 예를 보여준다. 해당 RMC는 기본 모듈과의 간단한 기구적 연결 및 인터페이스만으로 재구성 시간이 1-2 일로 최소화 되도록 설계되었으며 Fig. 1과 같이 최대 3 machines, 2 L/U stations, 36 pallets까지 재구성이 가능하다.

RMC 환경에서의 스케줄링은 하드웨어의 종류

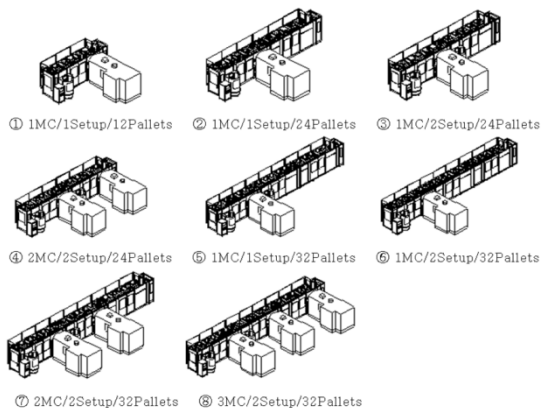


Fig. 1 Reconfiguration of RMC

및 수량을 결정하는 재구성(reconfiguring) 단계, 라우팅(routing)과 팔레트-치구 할당을 결정하는 세팅(setting) 단계, 재구성과 세팅의 결과에 따라 작업을 장비에 할당하는 스케줄링(scheduling) 단계로 이루어지며 전 단계의 결과는 다음 단계의 결과 및 성능에 영향을 미친다. Fig. 2 는 이를 나타내고 있다.

본 연구에서는 시스템 구성이 결정된 이후에 세팅 단계, 그 중에서도 팔레트-치구 할당 단계와 스케줄링 단계를 다룬다. 모든 단계를 통합적으로 다루는 것이 궁극적으로 의미가 있다고 하겠으나 그러려면 먼저 개별 단계간의 관계를 알아보는 것이 필요하다.

팔레트-치구 할당(pallet-fixture allocation)은 fixturing 이라고도 하며 주어진 팔레트에 특정 타입의 치구를 결합하는 것을 말한다. RMC, FMS 를 비롯한 범용 생산시스템에서 소재를 가공하기 위해서는 소재가 팔레트 위에 장착되어 있어야 하며 치구는 소재를 팔레트 위에 고정시켜 주는 역할을 한다. 가공하는 소재의 종류(때로는 소재 가공에 수행되는 공정)에 따라 필요로 하는 치구의 종류도 달라지며 사용 가능한 팔레트가 있어도 알맞은 치구가 설치되어 있지 않으면 소재를 가공할 수 없다.

팔레트에서 치구를 제거하고 다른 종류의 치구를 결합하는 것이 가능하지만 팔레트를 치구에 결합하기 위해 많은 노력과 시간이 소요되기 때문에 일반적으로 가공 도중 치구를 변경하지 않는다. 따라서 가공 전에 주어진 팔레트에 어떤 치구를

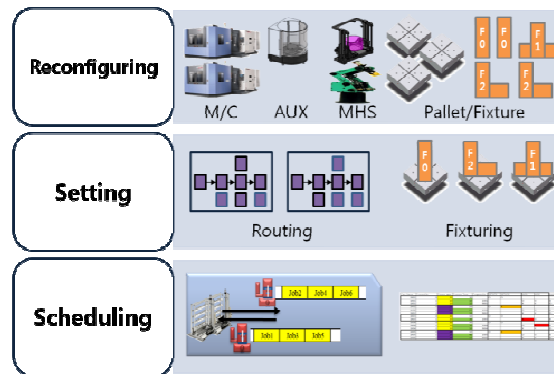


Fig. 2 Stages of manufacturing

결합할 것인가를 결정해야 하는 문제가 발생한다. 팔레트-치구 할당 문제의 결과는 이후의 스케줄링과 궁극적으로 시스템 성능에 영향을 미치기 때문에 신중이 이루어져야 한다.

본 연구에서는 주어진 시스템 구성 상황에서 팔레트-치구 할당 문제를 푸는 규칙을 제시하고 시스템 성능에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 알아보도록 한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 관련 연구에 대해 알아보고 3 장에서는 문제를 정의한다. 4 장에서는 팔레트-치구 할당 규칙을 제시하고 5 장에서는 시스템 성능에 영향을 미치는 스케줄링 규칙 및 생산 주문의 특성에 대해 알아본다. 6 장에서는 실험을 통해 제시한 규칙이 시스템 성능에 미치는 영향을 종합적으로 평가한다.

2. 관련 연구

생산시스템에서 팔레트/치구 제약(소재 가공을 위해 적절한 팔레트/치구가 있어야 한다는 제약)을 고려한 연구는 드문 편이다.

Rahimifard and Newman^{1,2}는 FMC 에서 fixturing 의 중요성을 지적하고 multi-flow scheduling system 을 통해 공구 스케줄과 치구 스케줄, 소재 스케줄 간의 조화를 이루는 데 필요한 요소를 언급하고, 이를 실제로 적용 하는데 있어 필요한 정보 모델의 관해 연구하였으나 구체적인 방법을 제시하지는 못하였다.

초기에는 FMS 의 설계 및 계획 단계에서 팔레트/치구 제약을 고려한 연구들이 있었는데 폐쇄형

대기행렬 네트워크(closed queuing network)를 이용하여 평형상태(equilibrium state)에서의 평균적인 시스템 성능을 알아보는 연구들이 있었으며 특히 Solot³ 은 Solot and Bastos⁴ 은 FMS 의 산출율(throughput) 요구 조건 만족시키는 최적 팔레트의 개수를 구하기 위한 혼합정수계획 모형을 제시하고 타부 서치를 이용한 해법을 제시하였다. 그러나 대기행렬 네트워크의 평형상태분포를 구하기 위해서는 가공시간이 지수분포를 따라야 하고, 행렬에서 허용되는 우선순위 규칙이 소수의, FCFS 와 같은 단순한 규칙 중 하나이어야 한다(Shanthikumar and Buzacott⁵)는 한계가 있다.

시물레이션을 활용한 연구도 있는데 Sethi, et. al.⁶ 는 RMC 환경과 유사한 2 stage flowshop 에서 팔레트 제약이 있는 경우의 스케줄링 문제를 연구하였고 Gilmore-Gomory 알고리즘(Gilmore and Gomory⁷) 이 적은 수의 팔레트를 사용하면서 우수한 성능을 나타냄을 보였으나 단일 제품 생산과 각 stage 당 1 대의 기계가 있는 단순한 상황을 가정하였다.

Denzler et al.⁸ 는 FMS 에서 기계 고장 및 가공 지연, 작업장 간 운송시간을 종합적으로 고려하고 소재 종류별 팔레트의 개수와 기계 가동률과의 관계를 연구하였고 Maziar Mashaei, et. al.⁹ 도 순환(cyclic) 생산시스템에서의 최적 팔레트 양을 제시하였지만 전자는 팔레트-치구 할당과 스케줄링을 별개의 문제로 보았고 후자는 fixturing 을 고려하지 않고 한 종류의 팔레트-치구 조합만을 가정하였으며 스케줄에 종속적인 방법을 제시하였다.

시스템의 성능은 재구성(본 연구에서 제외)과 세팅(fixturing 만 고려), 스케줄링, 생산 주문 간의 상호 작용에 따라 결정되며 각각의 요소에 대해 여러 가지 대안을 고려하고 주어진 조건 하에서 최적의 조합을 찾는 것이 필요하다. 기존의 연구는 개별 요소에 치우친 경향이 있다. Lee and Ryo¹⁰ 는 FMS 에서 기계고장에 따른 비자발적 시스템 재구성에 대응하기 위해 기계 별로 서로 다른 할당 규칙을 적용하는 혼합할당규칙 알고리즘을 제시하였지만 팔레트/치구 제약에 대한 고려가 없고 스케줄링 단계에서의 의사결정만을 다루고 있다. 본 연구에서는 관련 요소들을 종합적으로 고려하는 방법을 제시하고자 한다.

3. 문제 정의

본 연구에서 다루는 RMC 스케줄링 문제는 다음과 같다.

모든 소재(또는 제품)은 셋업(또는 loading)과 기계가공의 순서를 거친다. 셋업은 공용 L/U station 을 통해 이루어지며 제품의 종류별로 다른 셋업 시간을 가진다. 기계가공 시간도 제품의 종류에 따라 다르다.

모든 소재는 종류별 전용 치구가 결합된 팔레트에 장착되어야만 셋업 및 가공 공정을 시작할 수 있다.

셋업이 끝난 소재는 기계사용 가능여부에 따라 곧바로 가공되거나 버퍼에서 대기한다. 가공이 끝난 소재는 별도의 소요 시간 없이 L/U station 을 통해 밖으로 빠져 나오고(unloading) 팔레트를 반환한다.

배치 생산을 가정하며 생산에 앞서 한번 팔레트-치구 할당이 이루어지면 생산 도중 치구의 변경은 고려하지 않는다. 시스템에 가용한 팔레트의 개수는 주어지며 치구는 충분하다고 가정한다.

모든 기계의 성능은 동일하며, 모든 종류의 공정을 처리할 수 있다.

소재별 공정은 단공정(single operation)으로, 한번의 셋업과 한 번의 가공을 거친 후에는 모든 가공이 완료된다.

소재는 셋업이 완료된 순서대로 기계에서 가공이 된다.

소재이송시간과 버퍼의 용량은 고려하지 않는다.

확정적(deterministic) 상황을 가정한다.

시스템 목적함수는 배치(batch)생산에서 총완료 시간(makespan)을 최소화하는 것이다.

앞의 세 가지는 RMC 및 FMS 에서의 일반적인 가공공정을 기술한 것이며, 치구 변경에 관한 것은 변경에 많은 노력과 시간이 소요된다는 현장 상황을 반영한 것이며 충분한 치구를 가정한 것은 문제 설명을 용이하도록 하기 위한 것이다. 동일(identical) 기계, 범용 생산 가정은 범용 기계를 사용하는 유연생산 시스템에서 일반적이며, 단공정 가정은 여러 가지 공정이 하나의 기계에서 순차적

으로 진행되는 경우 단공정으로 볼 수 있다는 점에 기인한 것이다. 셋업 순서와 기계가공 순서를 동일하게 한 것은 팔레트-치구 할당 문제를 중심으로 하는 본 연구의 목적 상 문제를 단순화한 것이며, 소재이송시간과 버퍼의 용량 관련 가정은 소재이송시간이 셋업/가공 시간에 비해 아주 작은 경우, 셋업 시간과 가공시간의 차이가 크지 않을 때 성립하며 일반적인 경우라 할 수 있다.

4. 팔레트-치구 할당 규칙

본 절에서는 팔레트-치구 할당 규칙을 제시한다. 일반적인 3 가지 규칙과 본 연구에서 개발한 1 가지 특별규칙이 있다.

규칙에 사용되는 기호는 다음과 같다.

· 입력변수

i = 제품 종류의 인덱스 ($i=1,2,\dots$)

d_i = 제품 종류 i 의 목표 가공수량

p_i = 제품 종류 i 의 단위 기계가공 시간

l_i = 제품 종류 i 의 단위 셋업 시간

M = 시스템에 있는 기계 대수

L = L/U station 의 수

N = 팔레트의 수

· 결정변수

n_i = 제품 종류 i 의 전용치구를 결합할 팔레트의 개수

· 제약조건

$$\sum_i n_i = N \tag{1}$$

규칙에 의해 n_i 가 결정되면 해당 개수만큼의 전용치구를 팔레트에 결합하여 생산을 수행하게 된다. 제약 조건은 각 제품에 할당된 팔레트 수의 합이 전체 팔레트의 수를 넘지 않아야 한다는 것을 의미한다.

4.1 제품의 목표 가공수량에 따른 할당 규칙

팔레트를 각 제품의 목표 가공 수량에 비례하여 분배한다. 목표 가공 수량이 많을수록 많은 수의 팔레트를 필요로 할 것이라는 점을 감안한 규

칙이다. 해당 규칙을 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$n_i = N \times \frac{d_i}{\sum_k d_k} \tag{2}$$

4.2 제품의 개별 가공시간에 따른 할당 규칙

팔레트를 각 제품의 개별 가공시간에 비례하여 분배한다. 여기서 개별 가공시간은 각 제품이 가공시스템 안에서 보내는 시간으로, 셋업에 소요되는 시간과 가공에 소요되는 시간을 모두 합친 시간이다. 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$n_i = N \times \frac{p_i + l_i}{\sum_k (p_k + l_k)} \tag{3}$$

4.3 최소충분팔레트 수를 고려한 할당 규칙

본 연구에서 개발한 특별 규칙으로서, 최소충분팔레트 수 (minimal sufficient number of pallets)란 각 제품이 단일 생산된다고 가정하였을 때 팔레트 부족으로 인한 유휴(idle)가 발생하지 않도록 하는 최소한의 팔레트의 수를 의미한다. 이 때 스케줄링은 팔레트/치구 제약이 없는 2-stage flexible flow shop 문제와 동일하게 된다.

연구에서 제시하는 최소충분팔레트 수는 stage 당 1 대의 기계만을 고려한 Sethi, et. al.⁴와는 다른 것이며 그 원리는 Fig. 3 과 같다.

최소충분팔레트개수 n_i^* 는 셋업 시간과 기계가공시간, 셋업의 수와 기계 대수의 관계에 따라 4 가지 CASE 로 나뉘며 구체적으로는 다음과 같다.

CASE 1: $p_i \geq l_i$ AND $L \geq M$ 인 경우

$$n_i^* = 2M \tag{4-1}$$

CASE 2: $p_i \geq l_i$ AND $L < M$ 인 경우

$$n_i^* = \min\left\{\left(\frac{p_i}{l_i}\right) \times L, M + L\right\} \tag{4-2}$$

CASE 3: $p_i < l_i$ AND $L > M$ 인 경우

$$n_i^* = \min\left\{\left(\frac{p_i}{l_i}\right) \times M, M + L\right\} \tag{4-3}$$

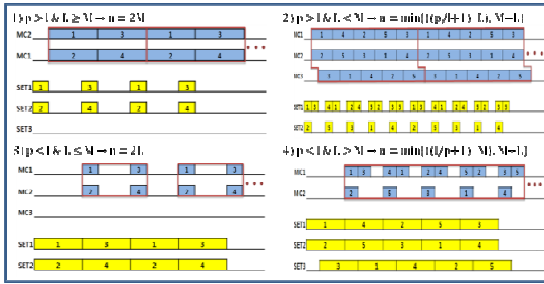


Fig. 3 Illustrative examples of the ‘minimal sufficient number of pallets’ rule

CASE 4: $p_i < l_i$ AND $L \leq M$ 인 경우

$$n_i^* = 2L \tag{4-4}$$

각 제품 종류별 n_i^* 이 도출되면 실제로 규칙에서 제품 별로 할당할 전용 치구의 개수 n_i 는 다음과 같이 주어진다.

$$n_i = \left\lfloor N \times \frac{n_i^*}{\sum_k n_k} \right\rfloor \tag{5}$$

할당 후 남은 팔레트가 있을 경우 n_i^* 값이 큰 순으로 한 개씩 할당한다.

5. 스케줄링 규칙 및 생산주문의 특성

이 절에서는 시스템 성능에 영향을 미치는 또 다른 요소인 스케줄링 규칙 및 생산주문의 특성에 대해 알아보도록 한다.

5.1 스케줄링 규칙

팔레트-치구 할당이 이루어진 후에는 스케줄링이 가능하다. RMC 스케줄링 환경은 팔레트/치구 제약이 존재하는 2 stage flexible flow shop(FFc) 이라고 볼 수 있으며 팔레트/치구 제약이 없는 경우, 즉 제품별 팔레트의 개수가 충분히 주어진 경우에도 문제의 복잡도는 NP-hard 이다(Park et al.¹¹). 따라서 우선순위 규칙과 같은 발견적 기법이 사용된다.

본 연구에서는 앞서 제시한 팔레트-치구 할당 규칙과의 조합을 위해 다음과 같은 스케줄링 규칙

을 고려하였다. 이들 규칙은 디스패칭 규칙 (dispatching rule)으로서 셋업에 소재 할당이 가능한 시점에 적용되며 할당 가능한 소재 중에서 다음을 기준으로 선정한다.

규칙 정의를 위해 추가로 사용되는 기호는 다음과 같다.

· 입력변수

n_i^a = 시스템 내부에 있는 팔레트를 제외하고 사용가능한 제품 종류 i 의 전용치구가 결합된 팔레트의 개수

d_i^f = 제품 종류 i 의 생산완료수량

J = 셋업 공정을 기다리고 있는 제품 종류의 집합

· 결정변수

$I(J)$ = 다음 차례에 셋업할 제품의 종류

- Least Number of Vacant Pallets: 스케줄링 시점에서 할당 가능한 팔레트의 숫자가 가장 적은 제품을 우선 배치한다.

$$I(J) = \arg_i \min\{n_i^a\} \tag{6}$$

- Most Number of Products Remaining: 스케줄링 시점에서 목표 가공 량까지 남은 가공물 수가 많은 제품을 우선하여 배치한다.

$$I(J) = \arg_i \max\{d_i - d_i^f\} \tag{7}$$

- Most Work Remaining: 모든 제품의 총 가공시간을 계산하여 가장 많은 시간이 남아있는 제품을 우선 배치한다.

$$I(J) = \arg_i \max\{d_i^f \times p_i\} \tag{8}$$

각각의 규칙에 대해 동점조건 처리(tie breaking)를 위해 LPT (Longest Processing Time)과 SPT (Shortest Processing Time)를 각각 적용하였고 따라서 스케줄링 단계에서 총 여섯 종류의 규칙을 고려하였다.

5.2 생산 주문의 특성

시스템의 성능은 앞서 언급한 팔레트-치구 할당 규칙, 스케줄링 규칙 외에도 생산 주문의 영향을 받는다. 생산 주문의 특징은 여러 가지가 있을 수 있으나 그 중에서도 제품별 셋업 시간과 기계 가공 시간의 길이 간의 관계가 가장 중요하다고 할 수 있다. 이는 시스템 성능 지표가 총 시스템의 완료 시간이라는 점에 기인한 것으로 셋업과 기계가공 중 어느 곳이 병목 공정이 되는가 와도 관련이 있다. Pilot study 를 통해서도 이를 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 셋업 시간과 기계가공 시간의 길이 간의 관계를 다음의 세 가지로 구분하여 생각한다.

- 셋업 시간이 가공 시간보다 긴 경우($s_i > p_i$)
- 가공 시간이 셋업 시간보다 긴 경우($s_i < p_i$)
- 양쪽이 혼재된 경우(mixed)

현장 데이터를 분석한 결과 제시한 세 가지 경우가 모두 나타나는 것으로 확인되었다.

6. 실험 연구

6.1 실험 설계

팔레트-치구 할당 규칙, 스케줄링 규칙, 생산 주문의 특성 조합에 따른 시스템 성능을 평가하기 위해 시뮬레이션을 이용하여 실험을 수행하였다.

6.1.1 입력 자료의 생성

시스템 구성의 변화는 본 연구의 범위에서 벗어나는 것이지만 셋업(L/U station)의 수와 가공 기계의 수에 대해 Table 1 과 같이 몇 가지로 나누어 실험하였다.

Table 1 Configurations of setups & machines

	N>M	N<M	N=M
The number of setups(L/U stations)	5	3	2
The number of machines	2	3	5

팔레트도 시스템 구성 요소이다. 여기서는 절

대적인 팔레트의 개수보다는 상대적인 팔레트의 여유도를 나타내는 팔레트 인덱스(pallet index)를 사용하였다. 팔레트 인덱스는 다음과 같이 주어진다.

$$pallet\ index = \frac{N}{\sum_k n_k^*} \tag{9}$$

Pallet index 가 1 이라는 것은 시스템에 주어진 팔레트의 개수가 각 제품 종류 별로 필요로 하는 팔레트의 양을 충족시킨다는 의미이다. n_k^* 이 단일 생산을 가정한 것임을 생각할 때 실제로 필요로 하는 팔레트의 양은 더 줄어들게 된다. Denzler et al.⁸ 은 너무 많은 팔레트가 주어질 경우 기계 가공 공정에 병목이 발생하여 셋업 시퀀싱(sequencing)을 통한 실제적인 스케줄링이 이루어지지 않음을 지적하였다. 본 연구에서는 pallet index 값을 조정함으로써 이 문제를 해결하고자 한다. pallet index 를 포함하여 그 외 실험 자료 생성과 관련된 사항을 Table 2 에 나타내었다.

Table 2 Experimental conditions

The Number of product types	4
Setup/machining times	Shorter one: UNIF(10,50) Longer one: UNIF(10, 500)
Production amount for each product type	20
Applied Pallet Index	0.7

6.1.2 하한치 설정

한편 규칙 및 주문 특성 조합에 따른 시스템 성능 평가를 위해서는 비교대상이 필요하다. 최적해를 구하기 위해서는 많은 노력이 필요하므로, 다음과 같은 수식을 이용해 문제의 하한(lower bound, LB)을 계산하여 비교 대상으로 활용하였다.

$$LB = \max \left\{ \left[\frac{1}{M} \left(\sum_i p_i + \min\{l_i\} \times \frac{\lfloor \frac{M}{N} \rfloor (\lfloor \frac{M}{N} \rfloor + 1)}{2} \right) \right], \left[\frac{1}{N} \sum_i l_i + \min\{p_i\} \times \frac{\lfloor \frac{N}{M} \rfloor}{M} \right] \right\} \tag{10}$$

해당 수식은 크게 두 부분으로 나뉘는데, 앞부분은 가공시간이 셋업 시간보다 긴 경우이며, 뒷부분은 셋업 시간이 긴 경우이다. 가장 짧은 셋업 시간에 $[M/N]([M/N] + 1)/2$ 를 곱한 결과는 초기 셋업에 소요되는 시간을 나타낸다.

실제 비교를 위해 제시한 하한 값은 입력에 따라 변화하게 되므로 하한 값과 시스템 성능과의 상대적인 값인 GAP 을 평가지표로 활용하였다. GAP 는 다음과 같이 주어진다.

$$GAP = \frac{Z}{LB} \quad (11)$$

Z 는 주어진 입력에 대한 시스템 성능 또는 총 완료시간을 나타낸다. GAP 이 1 이면, 시스템 성능이 하한 값과 같은 이상적인 경우라는 의미이며, 1.5 라면, 주어진 조합에서 시스템 성능이 이상적인 값보다 50% 더 긴 결과를 얻었다는 뜻이 된다.

이상에서 정의한 내용을 바탕으로 앞 장에서 정의한 네 가지 팔레트-치구 할당규칙과 스케줄링 규칙 여섯 가지, 생산 주문의 특성 세 가지, 그리고 셋업과 가공기계 대수 조건 세 가지를 조합하여 실험을 수행하고 총 완료시간으로부터 GAP 을 측정하였다. 각각의 규칙과 환경 조합마다 100 회씩 반복 실험하였고 시뮬레이터는 C#을 활용하여 개발하였다.

6.2 실험 결과

입력변수 및 스케줄링 규칙과의 조합을 고려하지 않았을 때 팔레트-치구 할당규칙의 성능을 Table 3 에 표시하였다. Table 3 은 반복 실험으로부터의 평균 GAP 과 분산을 포함하고 있으며 Number-to-produce rule 은 목표 가공개수를 고려한 규칙을, Work-to-do rule 은 개별 가공시간을 고려한 규칙을, Minimal sufficient number rule 은 본 연구에서 제안한 최소충분팔레트 수를 기초로 한 규칙을 가리킨다.

Table 3 Overall system performance of pallet-fixture allocation rules

Applied Rule	Average GAP	Variance
Number-to-produce	1.522	0.128
Work-to-do	1.570	0.154
Minimal sufficient number	1.514	0.102

시스템 구성과 스케줄링 규칙, 주문 특성을 고려하지 않았을 때 최소충분팔레트 수를 고려하는 규칙이 좋은 성능을 나타내는 것으로 나타났고 목표 가공개수를 고려한 규칙이 그 다음으로 좋은 성능을 보이는 것으로 나타났다. 반면 개별 가공시간을 고려한 규칙은 그보다 못한 성과를 보이는 것으로 나타났다.

6.2.1. 스케줄링 규칙과의 조합에 따른 분석

Table 4-1~4-9 는 시스템 구성과 생산 주문 특성이 주어졌을 때, 팔레트-치구 할당 규칙과 스케줄링 규칙의 조합에 따른 시스템 성능을 나타내고 있다. 상황 별 가장 우수한 조합의 성능을 밑줄로 표시하였다.

Table 4-1 performance of pallet-fixture allocation rules in combination with scheduling rules: When $s_i > p_i, L = 5, M = 2$

Rules	LNVP		MNPR		MWKR	
	SPT	LPT	SPT	LPT	SPT	LPT
Tie-breaking						
Number-to-Produce	1.522	1.532	<u>1.512</u>	1.521	1.574	1.642
Work-to-do	1.528	1.543	1.670	1.599	1.745	1.642
Min. sufficient number	1.543	1.532	1.529	1.514	1.578	1.658

*LNVP: least number of vacant pallet, MNPR: most number of products remaining, MWRK: most work remaining

Table 4-2 performance of pallet-fixture allocation rules in combination with scheduling rules: When $s_i > p_i, L = 2, M = 5$

Rules	LNVP		MNPR		MWKR	
	SPT	LPT	SPT	LPT	SPT	LPT
Tie-breaking						
Number-to-Produce	1.503	1.511	1.503	1.503	1.510	<u>1.501</u>
Work-to-do	1.503	1.511	1.519	1.529	1.647	1.621
Min. sufficient number	1.503	1.511	1.502	1.503	1.504	<u>1.501</u>

Table 4-3 performance of pallet-fixture allocation rules in combination with scheduling rules: When $s_i > p_i, L = 3, M = 3$

Rules	LNVP		MNPR		MWKR	
	SPT	LPT	SPT	LPT	SPT	LPT
Tie-breaking						
Number-to-Produce	1.510	1.524	1.505	1.506	1.515	1.518
Work-to-do	1.510	1.524	1.556	1.557	1.640	1.640
Min. sufficient number	1.510	1.524	1.505	1.506	1.515	1.518

Table 4-4 performance of pallet-fixture allocation rules in combination with scheduling rules: When $s_i < p_i, L = 5, M = 2$

Rules	LNVP		MNPR		MWKR	
	SPT	LPT	SPT	LPT	SPT	LPT
Tie-breaking						
Number-to-Produce	1.501	1.507	1.503	1.503	1.516	1.503
Work-to-do	1.504	1.508	1.524	1.533	1.701	1.631
Min. sufficient number	1.502	1.505	1.503	1.503	1.509	1.503

Table 4-5 performance of pallet-fixture allocation rules in combination with scheduling rules: When $s_i > p_i, L = 2, M = 5$

Rules	LNVP		MNPR		MWKR	
	SPT	LPT	SPT	LPT	SPT	LPT
Tie-breaking						
Number-to-Produce	1.289	1.311	1.295	1.304	1.313	1.390
Work-to-do	1.296	1.299	1.365	1.323	1.443	1.487
Min. sufficient number	1.306	1.311	1.309	1.309	1.297	1.424

Table 4-6 performance of pallet-fixture allocation rules in combination with scheduling rules: When $s_i > p_i, L = 3, M = 3$

Rules	LNVP		MNPR		MWKR	
	SPT	LPT	SPT	LPT	SPT	LPT
Tie-breaking						
Number-to-Produce	1.511	1.526	1.512	1.530	1.514	1.519
Work-to-do	1.512	1.526	1.543	1.560	1.603	1.600
Min. sufficient number	1.511	1.526	1.512	1.530	1.514	1.519

Table 4-7 performance of pallet-fixture allocation rules in combination with scheduling rules: When $s_i = p_i, L = 5, M = 2$

Rules	LNVP		MNPR		MWKR	
	SPT	LPT	SPT	LPT	SPT	LPT
Tie-breaking						
Number-to-Produce	1.557	1.580	1.618	1.531	1.669	1.752
Work-to-do	1.513	1.522	1.573	1.577	1.850	1.770
Min. sufficient number	1.512	1.517	1.521	1.522	1.602	1.619

Table 4-8 performance of pallet-fixture allocation rules in combination with scheduling rules: when $s_i = p_i, L = 2, M = 5$

Rules	LNVP		MNPR		MWKR	
	SPT	LPT	SPT	LPT	SPT	LPT
Tie-breaking						
Number-to-Produce	1.515	1.532	1.536	1.527	1.582	1.777
Work-to-do	1.514	1.524	1.590	1.529	1.777	1.741
Min. sufficient number	1.514	1.524	1.504	1.499	1.620	1.715

Table 4-9 performance of pallet-fixture allocation rules in combination with scheduling rules: when $s_i = p_i, L = 3, M = 3$

Rules	LNVP		MNPR		MWKR	
	SPT	LPT	SPT	LPT	SPT	LPT
Tie-breaking						
Number-to-Produce	1.529	1.542	1.541	1.549	1.677	1.705
Work-to-do	1.534	1.540	1.619	1.578	1.774	1.789
Min. sufficient number	1.529	1.542	1.541	1.549	1.677	1.705

Table 4-1~4-9로부터 스케줄링 규칙과의 조합에 따라 팔레트-치구 할당 규칙의 성능이 달라짐을 알 수 있으며 우수한 조합 또한 주어진 시스템 구성과 주문 특성에 따라 달라지는 것으로 나타났다. 팔레트-치구 할당 규칙 중 목표 가공 개수를 고려한 규칙과 최소 충분 팔레트 개수를 고려한 규칙이 보완적으로 사용될 수 있는 반면 개별 가공시간을 고려한 규칙은 다른 규칙에 의해 배제(dominated)되는 것으로 나타났다. 스케줄링 규칙에서는 이러한 배제성(dominance)을 발견할 수 없었다.

결과의 유의성을 검증하기 위해 수행한 분산분석(ANOVA)에서 모든 조건(9 가지)에 대해 두 가지 인자(팔레트-치구 할당 규칙, 스케줄링 규칙)가 통계적으로 유의한 것($p < 0.01$)으로 나타났으며, 셋업 시간과 기계 가공시간이 동일하고 L/U station 과 기대의 대수가 동일한 경우(Table 9)를 제외하고 같은 수준으로 유의한 교호작용이 있는 것으로 나타났다.

7. 결론

재구성형모듈러셀은 시스템 재구성과 세팅, 스케줄링을 통해 생산 주문의 변화에 대응할 수 있으며 각각의 요소가 시스템 성능에 미치는 영향이 종합적으로 고려되어야 한다. 본 연구에서는 시스템 구성과 생산 주문의 특성이 주어졌을 때 팔레트-치구 할당을 중심으로 각각의 조합에 따라 시스템 성능이 어떻게 변화하는지 살펴보았다.

실험 결과를 통해 연구에서 제시한 최소충분팔레트 수를 고려한 규칙이 가공 수량을 고려한 규칙과 보완적으로 사용될 수 있으며 개별 가공시간을 고려한 규칙을 배제할 수 있음을 보였다. 한편 스케줄링 규칙 간에는 배제성을 찾아볼 수 없었다.

한 규칙이 다른 규칙을 배제한다는 것은 규칙이 외부 조건(시스템 구성, 주문 특성)의 변화에 대한 대응력이 우수함을 나타냈다. 최소충분팔레트 수를 고려한 규칙이 이러한 특징을 보이는 것은 규칙이 시스템 구성과 주문 특성을 동시에 고려하고 있기 때문이며 이는 통합적인 접근 방법의 필요성을 뒷받침해 준다. 기존의 연구는 이러한 각 요소 간의 작용을 간과한 채 각각의 문제를 개별적으로 접근해 왔다.

이번 연구에서는 시스템 구성을 주어진 것으로 파악하였으나 실제 RMC 에서는 시스템 구성 또한 의사 결정 대상이 된다. 본 연구의 결과로부터 얻은 지식을 활용하여 추후의 연구에서는 RMC 의 모든 의사결정 요소를 종합적으로 고려하고 환경 변화에 대한 대응 효율을 극대화하는 방법을 제안하고자 한다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 추진하는 산업원천

기술개발사업의 하나로 수행되는 ‘자율적응 생산 시스템 통합 운용기술’ 과제 (과제번호: 10033564)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Rahimifard, S. and Newman, S., "Simultaneous Scheduling of Workpieces, Fixtures and Cutting Tools within Flexible Machining Cells," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 35, No. 9, pp. 2379-2396, 1997.
2. Rahimifard, S. and Newman, S., "The Application of Information Systems for the Design and Operation of Flexible Machining Cells," *J. Intelligent Manufacturing*, Vol. 2, pp. 21-27, 1999.
3. Solot, P., "A Heuristic Method to Determine the Number of Pallets in a Flexible Manufacturing System with Several Pallet Types," *Int. J. Flexible Mfg. Sys.*, Vol. 2, No. 3, pp. 191-216, 1990.
4. Solot, P. and Bastos J., "MULTIQ: A Queueing Model for FMSs with Several Pallet Types," *J. Opl. Res. Soc.*, Vol. 39, No. 9, pp. 811-821, 1988.
5. Shanthikumar, J. and Buzacott, J., "Open Queueing Network Models of Dynamic Job Shops," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 19, No. 3, pp. 255-266, 1981.
6. Sethi, S. P., Sriskandarajah, C., Van de Velde, S., Wang, M. W. and Hoogeveen, H., "Minimizing Makespan in a Pallet-Constrained Flowshop," *J. Sched.*, Vol. 2, No. 3, pp. 115-133, 1999.
7. Gilmore, P. and Gomory, R., "Sequencing a One State-Variable Machine: A Solvable Case of the Traveling Salesman Problem," *Op. Res.*, Vol. 12, No. 5, pp. 655-679, 1964.
8. Denzler, D., Boe, W. and Duplaga, E., "An Experimental Investigation of FMS Scheduling Rules under Uncertainty," *J. Op. Mgt.*, Vol. 7, No. 1-2, pp. 139-151, 1987.
9. Mashaei, M., Lennartson, B., Sannehed, F. and Abbestam, G., "Optimal Number of Pallets for Reconfigurable Cyclic Manufacturing Plants," *Proc. of Emerging Technologies & Factory Automation Conf.*, 2009.
10. Lee, D. and Ryo, I., "A Study on Scheduling by Mixed Dispatching Rule in Flexible Manufacturing

- Systems,” J. Soc. of Korea Industrial and Systems Engineering, Vol. 21, No. 47, pp. 35-46, 1998.
11. Park, J., Seo, J. and Park, J., “RMC scheduling considering setup and pallet constrains,” Proc. of KIIE/KORMS Joint Conf., 2010.