

# 병렬기계에서 실시간 공구할당 및 작업순서 결정 모델

## A Model for Real-Time Tool Allocation and Operation Sequence in Parallel Machines

이충수, 노형민(한국과학기술연구원 CAD/CAM 연구센터), 김성식(고려대 산업공학과)

### Abstract

Manufacturing environment is getting characterized by unstable market demand, short product life cycle and time-based competition. For adapting this environment, machine tools have to be further versatile functionally in order to reduce part's set-up time. Unlike existing manufacturing systems mainly to focus on part flow, it is important to control tool flow using fast tool change device and tool delivery device in parallel machines, consisting of versatile machine tools, because complete operations on a part can be performed on one machine tool in a single machine set-up.

In this paper, under dynamic tool allocation strategy to share tools among machine tools, we propose a real-time tool allocation and operation sequence model with an objective of minimizing flow time using autonomy and negotiation of agents in parallel machines

Key words : parallel machines(병렬기계), real-time tool allocation(실시간 공구할당), operation sequence(작업순서)

### 1. 서론

1980년대 말에 부품을 한번의 셋업으로 가공할 수 있는 다기능 공작기계의 개념이 도입되었다 [1,2]. 다기능 공작기계는 빠른 공구 교환장치, 빠른 공구 이동장치 등을 이용하여 배치(batch) 크기가 적고, 신속히 가공을 해야 하는 생산 환경에 적합한 기계이다. 이 다기능 공작기계의 개념은 병렬기계[3]로 발전하였다. 병렬기계는 동일한 기능을 갖는 다기능 기계들로 구성된다. 다기능 공작기계의 한 예는 다양한 가공방법을 제공하는 Mill/Turn 머시닝 센터이다. 병렬기계는 부품을 여러 기계로 이동시키면서 가공하던 기존 FMS와 달리, 한 기계에서 부품의 가공을 완료할 수 있다. 따라서 병렬기계에서는 기존 FMS에서 중요시되던 부품 흐름보다는 신속한 공구 교환장치 및 공구 이동장치를 이용하여 공구 흐름을 제어하는 것이 중요한 문제이다.

Mason[4]과 Cuppan[5]은 기존 생산 시스템에서 주로 사용되는 여러 공구할당 전략을 분류하였으나 이러한 전략들은 높은 공구 재고비용이 소요된다. Hahn 등[6]과 Grieco 등[7]은 빠른 공구 이동장치를 이용하여 가공중에 기계간 공구 이동이 가능한 동적 공구할당 전략을 소개하였다. 이 동적 공구할당 전략은 시스템내의 다른 기계가 보유하고 있는 공구를 공유함으로써 가상적으로 공구 매거진의 크기를 증가시키며 위의 공구할당 전략들보다 공구 재고 비용이 적게 소요될 수 있다.

병렬기계에 동적 공구할당 전략을 이용한 기

존 연구로써, Cantamessa 등[8]은 두 기계를 대상으로 작업장의 공구 수를 최소화하는 경험적 알고리즘을 제안하였다. 이 연구는 오프라인 상태에서 공구할당을 수행한 연구이다. Grieco 등[7]은 빠른 공구 이동장치를 이용하여 실시간 공구할당을 하여 시스템의 보유 공구 수를 줄이고도 줄이지 않았을 때와 유사한 성능을 유지할 수 있다는 것을 입증하였다. Song 등[9]은 기계별 부하의 평준화와 동적 공구할당 전략 하에서 실시간으로 대체공구를 이용하여 기계간 공구 이동을 최소화하는 연구를 수행하였다. Koo[10]는 최소 비용 흐름 네트워크(minimum cost flow network)를 이용하여 실시간으로 공구를 할당하는 연구를 수행하였다. 즉, 한 공구에 의한 가공을 완료한 직후에 그 상황에서 선행관계를 만족하는 최적 공구를 선택하였다. 이러한 Grieco, Song, Koo의 연구에서는 주어진 작업순서에 실시간으로 적절한 공구를 할당했으나 한 부품의 가능한 작업순서들 중 최적 공구할당은 고려하지 않았다. 따라서 부품 전체의 가능한 작업순서 중에서 최적의 공구를 할당할 수 있는 실시간 공구할당 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 동적 공구할당 전략하의 병렬기계에서 Agent의 협상 및 자율성을 이용하여 부품의 총 작업시간을 최소로 하는 실시간 공구할당 및 작업순서를 결정하는 모델의 개념을 제안하고자 한다. 여러 병렬기계 중에서 어느 한 기계가 부품의 가공을 완료하고 동시에 시스템 버퍼에 여러 개의 부품이 있는 경우, 가공해야 할 다음 부품을 선택하기 위하여 각 부품별로 공구할당 및 작업순서 결정 알

고리즘을 수행한다. 대체 공구선택에 의한 손실율 (LRTS: loss rate by tool select)이 적은 부품을 선택하고 해당 기계의 작업일정을 수립한다. 이때 대체 공구 선택에 의한 손실을 일으킨 작업은 가능하면 공구를

교체 할당해야 할 주요작업(critical operation)으로 보고, 주요작업의 공구를 손실이 적은 공구로 교체하기 위하여 기계간 협상을 수행한다.

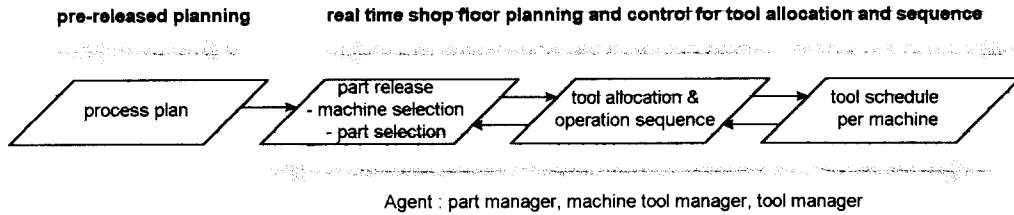


Fig. 1 Flow planning and control in parallel machines

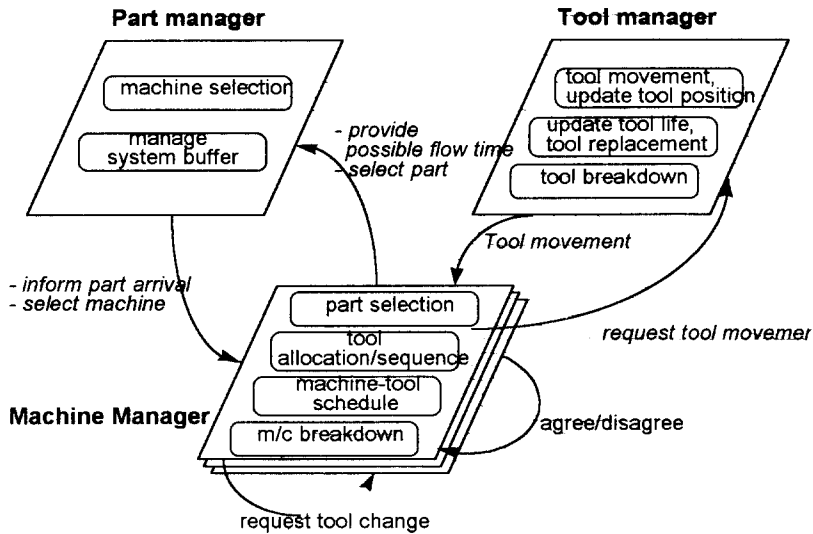


Fig. 2 Organization and functions of agents

## 2. 병렬기계의 Agent 모델링

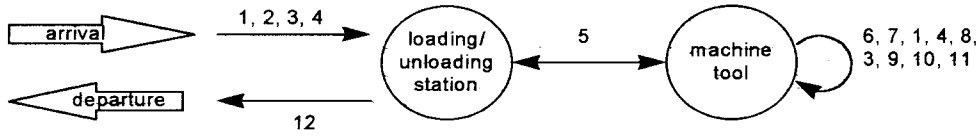
### 2.1 Agent의 구성 및 행위

Fig. 1 과 같이 병렬기계의 흐름 계획 및 제어는 공정계획을 수행하는 부품 투입 전 계획(pre-released planning) 부분과 부품이 병렬기계에 도착했을 때 부품투입(기계선택, 부품선택), 공구할당 및 작업순서, 기계별 공구 순서 등을 수행하는 실시간 흐름 계획 및 제어 부분으로 나뉘어진다. 공정계획에서는 기계를 선택하지 않고 부품의 가공방법(작업, 작업별 대체공구, 대체공구별 작업시간)만을 결정한다. 부품이 시스템에 도착하였을 때 실시간으로 공구할당 및 작업순서를 포함한 흐름 계획 및 제어를 수행

한다. 도착한 부품에 대한 가공 기계가 결정되어 공구할당 및 작업순서가 결정되면 각 기계별로 한 부품에 대한 공구의 스케줄을 수립하며, 부품의 가공이 완료되면 스케줄을 지워버린다. 이 흐름 계획 및 제어를 위하여 Agent를 이용한다. Fig. 2와 같이 Agent는 부품 관리자, 기계 관리자, 공구 관리자로 구성하였으며 기계 관리자는 기계 수 만큼 존재한다고 가정한다. 부품 관리자는 시스템 버퍼 관리, 기계 선택 등의 기능을 수행한다. 기계 관리자는 부품 선택, 공구 할당 및 작업순서, 스케줄링, 기계 고장시 처리 등의 기능을 수행한다. 공구 관리자는 작업종료시 스케줄을 참조하면서 공구이동, 공구수명의 소진 및 공구 고장시 공구실에서 새공구로 교환하는 기능을 한다. 각 Agent들은 자율적으로 자신의 기능을

수행하며, 협상이 필요한 기능은 다른 Agent 와 협상을 하며 수행한다.

부품이 시스템에 도착해서 가공을 완료하고 나갈 때까지 일어날 수 있는 Agent 의 행위를 Fig. 3 과 같이 가정하고, 시스템에서의 사건을 Fig. 4 와 같이 가정한다. Fig. 5 에는 사건 사이의 상호 연관 관계와 사건이 발생했을 때 일어나는 Agent 의 행위를



**activity definition**

- 1. fixturing 2. tool allocation/operation sequence 3. machine selection 4. machine - tool schedule
- 5. part movement 6. machining(operation) 7. tool movement 8. part selection 9. tool replacement
- 10. machine repairing 11. schedule adjustment 12. unfixturing 13. waiting in system buffer

Fig. 3 Activity of agents

에게 부품의 도착을 알린다. 각 기계 관리자는 다른 기계에 스케줄된 공구를 고려하여 공구할당 및 작업순서 알고리즘을 수행하여, 자신이 가장 빨리 가공할 수 있는 작업시간을 계산하여 부품 관리자에게 제시한다. 부품 관리자는 가장 빠른 작업시간을 제시한 기계에 부품을 할당한다.

event ID	event description	related agent
E1	end of part arrival	part manager
E2	end of part machining	machine manager
E3	end of one operation	machine, tool manager
E4	end of machine breakdown	machine manager
E5	end of tool breakdown	tool manager
E6	end of repairing the downed machine	machine manager
E7	end of replacing the downed tool	tool manager

Fig. 4 Event definition of agents

**부품선택(dispatching)** : 기계가 부품의 가공을 완료했을 때 기계 관리자는 새 부품을 선택하기 위하여 시스템 버퍼를 검색한다. 시스템의 버퍼에 2 개 이상의 부품이 있다면 부품 관리자에게 급히 가공해야 할 부품이 있는가를 문의한다(urgency : URG). 그런 부품이 있으면 기계 관리자는 그 부품을 선택하고, 없으면 각 부품의 공구할당 및 작업순서를 결정하면서 공구선택에 의한 손실율(LRTS)을 계산하여 가장 적은 손실율을 갖는 부품을 선택한다. LRTS 의 계산 방법은 다음과 같다. 대체공구 없이 한 공구만을 제공받은 경우  $LRTS = (\text{총 공구 대기시간} / \text{총 작업시간}) \times 100$  이다. 대체공구를 제공받은 경우  $LRTS = (\text{총 공구 대기시간} + (\text{선택된 공구의 작업시간} - \text{대체공구 중 가장 작은 작$

정리하였다.

**2.2 Agent 의 협상 규칙**

Agent 의 협상은 기계 선택, 부품 선택, 공구할당을 수행할 때 이루어진다

**기계선택** : 부품이 시스템에 도착했을 때 유휴한 기계가 2 대 이상이면 부품 관리자는 해당 기계 관리자

업시간)/대체공구 중 가장 작은 공구의 작업시간) × 100 으로 계산한다. 공구선택에 의한 손실은 필요로 하는 공구가 다른 기계에 스케줄되어 있기 때문에 발생한다. 이때 공구선택에 의한 손실을 발생시킨 작업은 특별히 관리해야 할 주요작업이라고 정의한다. **공구할당** : 주요작업의 가공을 하기 전에 필요공구를 스케줄한 해당 기계 관리자에게 다른 공구로 바꿀 의향이 있는가를 타진한다. 해당 기계 관리자는 가공이 남아 있는 작업에 대하여 다른 공구로 공구할당 및 작업순서를 수행하여 기존의 공구할당보다 더 작은 작업시간에 남은 가공을 완료할 수 있으면 협상에 동의를 한 후 새 스케줄을 수립하고, 그렇지 않으면 반대 의사를 표시한다. 해당 기계 관리자가 동의를 한 경우, 공구의 교환을 요청했던 기계 관리자는 그 공구를 할당하여 새로운 스케줄을 수립한다.

**3. 공구할당 및 작업순서 결정 알고리즘**

기계 선택과 부품 선택에 의하여 부품을 기계에 할당할 때 공구할당 및 작업순서 결정 알고리즘을 수행하여 그 결과를 이용하여 해당 기계 관리자의 스케줄을 수립한다(primary step). 또한 부품의 작업시간을 줄이기 위하여 주요작업의 필요 공구를 다른 기계 관리자에게 요청하는 과정에서 관련 기계 관리자는 가공을 안한 작업에 대하여 공구할당 및 작업순서 알고리즘을 수행한다(optimization step).

이 알고리즘은 Fig. 6 의 순서로 수행된다. Fig. 6 의 1, 2 와 같이 공정계획 정보를 이용하여 선행관계를 고려한 작업순서를 결정한다. 이 작업순서는 각 작업내용의 좌우측 변동 범위에 의하여 많은 작업순

서로 표현될 수 있다[11]. 작업순서의 검색영역 (search space)을 줄이기 위하여 좌우측 변동범위를 이용하여 순서 트리(sequence tree)를 생성한다. 이 순서 트리는 좌우측 변동범위의 성질에 의하여 소그림으로 블럭화된다. 따라서 블럭간의 순서를 유지하면서 공구 대기시간, 대체공구의 작업시간, 공구 교환시간, 공구 이동시간의 합을 최소로 하는 공구를 할당한다 (Fig. 6 의 3). 이때 공구 대기시간은 다른 기계의 스케줄을 검색하여 계산한다. Fig. 7 은 임의의 예제를 순서 트리로 변환한 예이다. 작업시간을 더 줄이기 위하여 주요작업에 대한 필요 공구를 다른 기계에 요청하고, 다른 기계가 공구를 양보하면 그 공구를

할당한 후 다시 스케줄을 수립한다(Fig. 7 의 4, 5, 6) 순서 트리에서의 작업시간(공구 대기시간, 대체공구의 작업시간, 공구 교환시간, 공구 이동시간)을 최소로 하는 공구할당 절차는 다음과 같다.

- ① 각 블럭내에서 가능한 작업순서별 작업시간을 최소로 하는 공구할당
- ② 상위 블럭의 마지막 작업과 하위 블럭의 첫 작업이 같은 공구를 사용할 수 있는 경우, 작업시간을 더 줄일 수 있는지 체크.
- ③ 작업시간을 줄일 수 있으면 다시 ①의 공구할당을 수정, 줄일 수 없으면 ①의 결과를 수용한 후 ④로 이동.

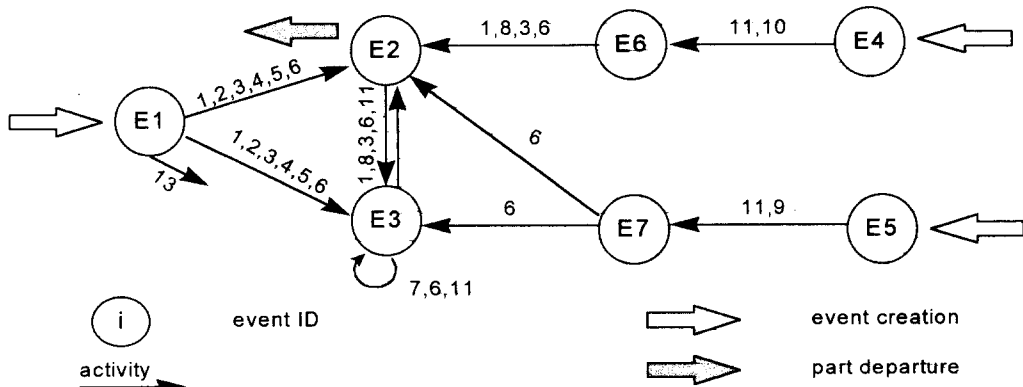


Fig. 5 Interrelation diagram between events

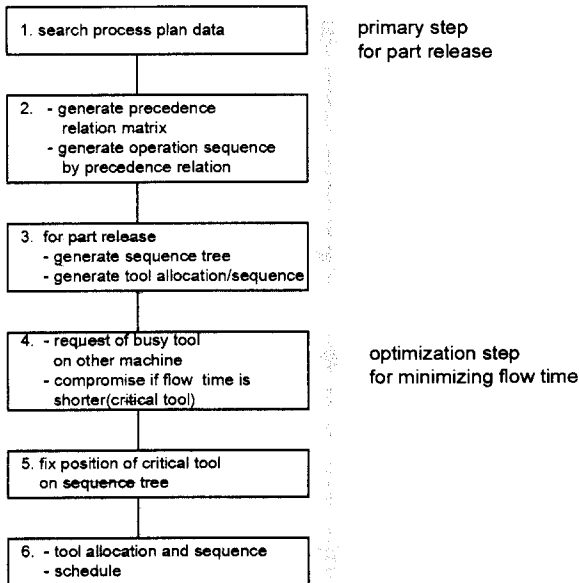


Fig. 6 Procedure for tool allocation and operation sequence

- ④ 하위 블럭이 있으면 ②로 이동, 없으면 종료.

본 연구에서 제안한 공구할당 및 작업순서 결정 알고리즘의 특성은 다음과 같다.

첫째, 부품 투입 시점에서 최적인 공구할당 및 작업순서를 결정했다라도 작업시간을 줄일 수 있는 주요작업이 있다면 공구고장, 공구수명의 소진 등에 따라 기계의 공구 보유상태 및 스케줄이 수시로 변경되기 때문에 기계간 협상을 통하여 주요작업의 작업시간을 줄여준다.

둘째, 선행관계에 의한 변동범위를 이용한 순서 트리의 블럭화는 가능한 작업순서의 검색영역을 축소시킴으로써 검색영역을 줄일 수 있다.

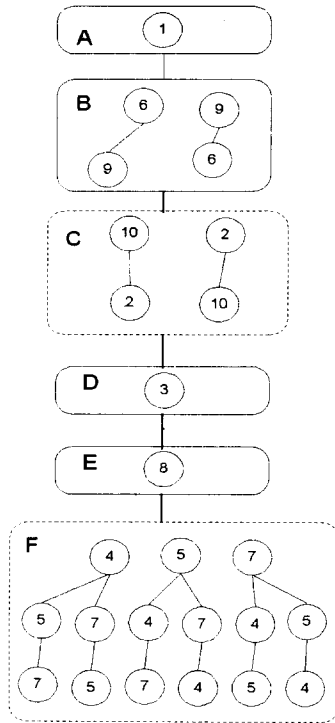


Fig. 7 An example of sequence tree

#### 4. 요약

본 연구에서는 동적 공구할당 전략하의 병렬기계에서 Agent의 자율성과 협상을 이용하여 실시간으로 공구할당 및 작업순서를 결정하는 모델의 개념을 제안하였다. 본 모델의 특징은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 공구 흐름이 중요한 병렬기계의 특성때문에 공구할당 및 작업순서 결정 알고리즘을 통하여 대체 공구선택에 의한 손실율을 적게 유발하는 부품을 선택한다.
- ② 공구고장, 공구수명의 소진 등에 따라 기계의 공구 보유상태 및 스케줄이 수시로 변경되기 때문에 작업시간의 손실을 일으킨 주요작업의 공구를 교체하기 위하여 기계간 협상을 수행한다.
- ③ 선행관계에 의한 변동 범위를 이용하여 순서 트리를 블럭화 함으로써 가능한 작업순서의 검색영역을 축소하여 검색시간을 줄일 수 있다.
- ④ 자율적 행위와 협상을 수행하는 Agent를 이용함으로써 이상 상황 발생시 신속히 대처할 수 있다.

공구 제어를 중요시하는 병렬기계에서 기계별 공구의 중복이 많은 경우 또는 적은 경우 모두 본 연구에서 제안한 실시간 공구할당 및 작업순서 모델을 이용하여 부품의 총 작업시간을 줄일 것으로 사

료된다.

향후 시뮬레이션을 이용하여 기존 실시간 공구할당 알고리즘과 본 모델의 작업시간 비교, 기존의 부품투입 규칙과 본 모델의 작업시간 비교 등의 연구를 수행하고자 한다.

#### 참고문헌

- [1] Kellock, B., "One-hit machining cuts bar work cost", Machinery and Production Engineering systems, v. 143 n. 3682, 1985.
- [2] Hollingum, J., "Renishaw probes new manufacturing method", The FMS Magazine, v. 6, n. 2, 1988.
- [3] MacCarthy, B. L. and Liu, J., "Addressing the gap in scheduling research : a review of optimization and heuristic methods in production scheduling", International Journal of Production Research, v. 31, n. 1, 1993.
- [4] Mason, F., "Computerized cutting tool management", American Machinist and Automated Manufacturing, pp. 105-120, 1986.
- [5] Cuppan, B., "Tool management considerations for cells and FMS", 3<sup>rd</sup> Biennial International Machine Tool Technical Conference, 1986.
- [6] Hahn, H. S. and Sanders, J. L., "Performance analysis of a LIM-based high speed tool delivery system for machining", International Journal of Production Research, v. 32, n. 1, 1994.
- [7] Grieco, A., Semararo, Q., Tolio, T. and Toma, S., "Simulation of tool and part flow in FMS", International Journal of Production Research, v. 33, n. 3, 1995.
- [8] Cantamessa, M. and Lombardi, F., "Tool flow planning in a flexible manufacturing system", Computer Integrated Manufacturing Systems, v. 6, n. 2, 1993.
- [9] Song, C-Y., Hwang, H. and Kim, Y. D., "Heuristic algorithm for the tool movement policy in flexible manufacturing systems", Journal of manufacturing systems, v. 14, n. 6, 1994.
- [10] Koo, P-H., "Flow planning and control of single-stage multimachines systems", Ph.D Thesis, Purdue university, 1996.
- [11] Rho, H. M., Geelink, R., van 't Erve, A. H., Kals, H. J. J., "An Integrated Cutting Tool Selection and Operation Sequencing Method", Annals of the CIRP, Vol. 41, No. 1, 1992.