

FMS 에서 동적 공구할당 전략하의 작업순서 결정 Determination of Operation Sequence under Dynamic Tool Allocation Strategy in FMS

이충수*, 김성식**

*광주대학교 산업정보공학과, **고려대학교 산업공학과

Abstract

최근 제조회사는 다양한 소비자의 요구, 제품의 짧은 수명 주기, 치열한 국내외 경쟁 등으로 특징 지워진다. 이러한 제조회사에 적응하기 위하여 FMS(flexible manufacturing systems)에서 기계의 종류는 다기능 공작기계(versatile machine)로 구성되고, 공구는 빠른 공구 이동장치(tool delivery system)에 의하여 제어되는 추세에 있다. 공구 이동장치를 이용하여 가공 중에 필요한 공구를 다른 기계 또는 공구 저장장치로부터 공급하는 동적 공구할당 전략하의 FMS에서는 공구의 가용여부(작업 일정계획)를 고려한 작업순서 결정이 중요한 문제이다.

본 연구에서는 동적 공구할당 전략하의 FMS에서 한 부품 또는 한 셋업에서 공구대기시간을 줄이는 방향으로 공구할당을 수행하는 작업순서 알고리즘을 제안하고, 시뮬레이션 실험을 통하여 다른 방법으로 공구할당을 수행하는 알고리즘과 비교함으로써 본 작업순서 알고리즘의 우수성을 입증한다.

1. 서론

최근 제조회사는 다양한 소비자의 요구, 제품의 짧은 수명 주기, 치열한 국내외 경쟁 등으로 특징 지워진다. 이러한 제조회사에 적응하기 위하여 FMS(flexible manufacturing systems)에서 기계의 종류는 다기능 공작기계(versatile machine)로 구성되고, 공구는 빠른 공구 이동장치(tool delivery system)에 의하여 제어되는 추세에 있다[1]. 이러한 FMS에서는 동일한 기능의 다기능 기계들로 구성되기 때문에 각 기계는 필요한 공구만 공급된다면 다양한 작업을 수행할 수 있다. 즉, 부품의 가공을 위하여 필요한 공구를 보유한 상태에서 가공을 시작하는 전통적 FMS와 달리, 공구 이동장치를 이용하여 필요한 공구를 가공중에 공급 받아 한 기계에서 부품의 가공을 완료할 수 있다. 따라서 이러한 FMS에서는 전통적 FMS에서 중요시 여기는 부품흐름(part flow)의 계획보다 공구 이동장치를 이용한 공구흐름(tool flow)의 계획이 중요한 문제이다([1], [5], [6]). Kashyap 과 Khator[4]는 FMS에서 총 운영비의 20 ~ 30%는 공구에 관련된 비용이라고 언급했다. Jones 등[3]은 효율적인 공구할당(tool allocation)에 의하여 공구재고를 40%까지 줄일 수 있다고 주장했다.

공구할당 전략은 정적 공구할당 전략(static tool allocation strategy)과 동적 공구할당 전략(dynamic tool allocation strategy)으로 분류할 수 있다. 정적 공구할당 전략에서 생산계획 기간에 필요한 공구는 가공 전에 해당 기계에 할당되며, 할당된 공구는 그 기간 동안에 이동되지 않는다. 동적 공구할당 전략에서 생산계획 기간에 필요한 공구는 초기에 미리 할당되지 않고, 가공중에 필요할 때마다 할당된다.

FMS에서 동적 공구할당 전략을 채택하여 운영하고 있는 업체들은 가공 부품수(part type)을 늘리고 싶어한다. 그러나 이 경우 같은 공구를 시스템에 여러 개 보유하는 공구중복률(tool duplication rate)이 낮아지기 때문에 필요한 공구를 사용하기 위하여 기계가 대기하는 공구 대기시간(tool waiting time)이 증가된다. 이는 기계 유희시간이 길어져 FMS의 성능을 저하시키는 원인이 된다.

동적 공구할당 전략을 이용한 기존 연구로서 Grieco 등[2]은 빠른 공구 이동장치를 이용하여 공구할당을 하여 시스템의 보유 공구 수를 줄이고도 줄이지 않았을 때와 유사한 성능을 유지할 수 있다는 것을 입증하였다. 그들은 공구 대기시간을 성능 척도로 이용하였다. Koo[5]는 부품투입이 이루어진 후, 한 공구의 가공 종료시마다 실시간으로 선행관계를 만족하며 공구 대기시간을 최소로 하는 다음 공구를 선택하였다. 상기 두 기존연구에서의 공구 선택 시점을 공구의 가공완료 직후가 아닌 부품의 가공완료 직후로 변경함으로써, 선행관계를 이용하여 부품의 가능한 여러 작업순서를 고려함으로써 공구 대기시간을 더 줄일 수 있다.

본 연구에서는 동적 공구할당 전략하의 FMS에서 한 부품의 전체 공구대기시간을 줄이는 방향으로 공구할당을 수행하는 작업순서 알고리즘을 제안하고, 시뮬레이션 실험을 통하여 다른 방법으로 공구할당을 수행하는 알고리즘과 비교함으로써 본 작업순서 알고리즘의 우수성을 입증하고자 한다.

2. 시스템 개요

전체 시스템의 모듈은 그림 1과 같이 투입 전 계획(pre-released planning)과 투입 후 계획(post-released planning)으로 구성된다. 투입 전 계획에서는 부품이 시스템에 도착하기 전에 셋업, 작업, 공구,

가공시간 등을 결정하는 공정계획을 수행하고, 투입 후 계획에서는 부품이 시스템에 도착한 후 부품 투입 전 계획에서 생성된 정보를 입력으로 하여 작업순서, 일정계획, 부품투입 등을 동시에 수행한다.

여야 한다는 것을 의미한다. 이 초기 선행관계 행렬에서 열 j 의 선행 작업수의 합 $sum(j)$ 를 계산하여 0인 작업을 그림 2(c)의 작업순서에 고정시킨다

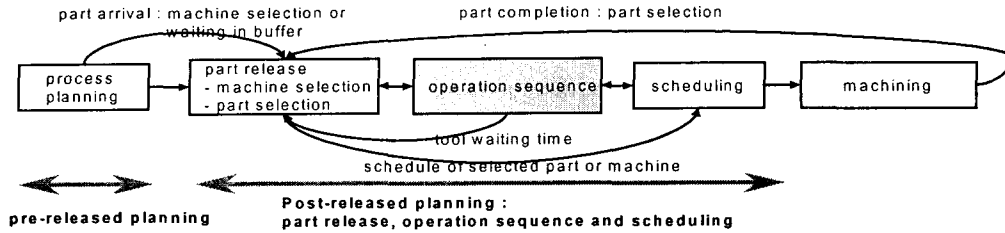


그림 1 시스템 구조

동적 공구 할당 전략하의 FMS에서는 부품 투입시 후에 일어날 공구의 경쟁 정도(공구 대기시간)를 파악하여 고려하는 것이 매우 중요하다. 본 시스템의 전체 구조는 기존에 수립된 공구의 일정계획을 참조하여 후보 부품 각각에 대하여 공구 대기시간을 최소화하는 방향으로 작업순서를 수행하고, 계산된 공구 대기시간을 부품투입에 이용하였다.

본 논문에서는 부품투입 문제를 제외한 작업순서 결정 문제만을 다룬다.

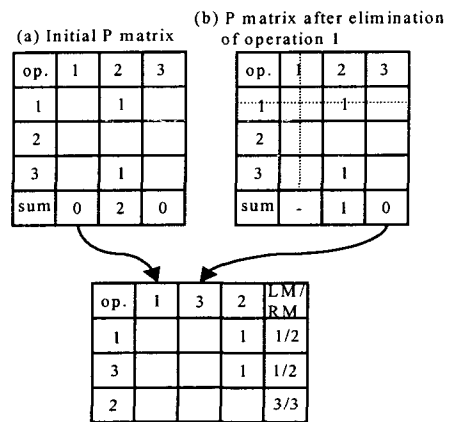
3. 작업순서 결정 알고리즘

작업순서(operation sequence)를 결정하는 시점에서 해당 부품을 가공하기 위한 작업 및 작업 수와 작업을 수행하기 위한 공구가 정해져 있고, 다른 기계에서 가공 중인 부품의 공구 일정계획이 정해져 있다. 한 부품을 가공하기 위한 작업(operation)간에는 선행관계(precedence relation)가 존재한다. 한 작업을 수행한 후, 선행관계를 만족하는 다음 작업은 여러 개가 존재할 수 있다. 그러므로 선행관계를 만족하는 작업순서는 여러 개가 존재한다. 본 작업순서 알고리즘은 선행관계를 만족하는 여러 작업순서(alternative operation sequence) 중, 공구 대기시간을 최소로 하는 하나의 작업순서를 결정한다.

본 작업순서 알고리즘은 두 단계로 수행된다. 첫번째 단계에서 선행관계에 의하여 생성된 왼쪽 이동범위(left movement : LM)과 오른쪽 이동범위(right movement : RM)의 계산([7], [8])을 통하여 가능한 여러 개의 작업순서를 생성한다. 이 내용은 3.1절에서 설명한다. 두번째 단계에서는 여러 개의 작업순서 중 공구 대기시간을 최소로 하는 작업순서를 선택한다. 이 내용은 3.2절에서 설명한다.

3.1 선행관계를 만족하는 대체 작업순서의 생성

설계정보의 기하형상과 공차에 의하여 작업간에는 반드시 만족되어야 하는 선행관계가 생성된다. 선행관계를 만족하는 작업순서를 결정하기 위하여 그림 2의 (a)와 같은 선행관계 행렬(P matrix: precedence matrix) $P(i, j)$ 를 이용했다. 그림 2(a)의 초기 선행관계 행렬에서 $P(1, 2)=1$ 로 표시되어 있다. 이것은 작업 1(op1)이 작업 2(op2)보다 먼저 가공되



(c) Changeable operation sequence by LM and RM

그림 2 변경 가능한 작업순서 결정

$sum(j)=0$ 는 작업 j 보다 먼저 가공해야 할 작업이 없다는 의미이다. 그림 2의 (a)에서 $sum(j)$ 가 0인 작업은 작업 1과 작업 3이며, 여기서는 작업 1을 임의로 작업순서에 고정시켰다. 그림 2의 (b)에서는 작업 1을 제거한 후, $sum(j)$ 를 다시 계산하여 나머지 작업들을 작업순서에 고정시켰다. 어떤 작업 j 의 LM(left movement)은 작업순서에서 왼쪽으로의 이동 허용범위를 의미하고, RM(right movement)은 오른쪽으로의 이동 허용범위를 의미한다[15,16]. 그림 2의 (c)에는 계산된 LM과 RM과 그들에 의하여 변동 가능한 작업순서가 나타나 있다. 여기서 작업 1과 작업 3의 LM과 RM은 1과 2이다. 따라서 작업 1과 3은 작업순서에서 첫번째 또는 두번째에 위치할 수 있다.

3.2 공구대기시간을 최소화하는 작업순서의 결정

그림 2의 (c)에서 결정된 LM과 RM 사이에서 변동 가능한 여러 작업순서에서 다른 기계의 일정계획을 참조하여 공구 상태, 공구 이동시간, 공구 이동장치 대기시간 등을 고려하여 공구 대기시간을 최소로 하는 공구할당과 작업순서를 결정한다. 그림 2의 예에서는 다른 기계의 일정계획을 참조하여 가능한 작업순서 $op1 \rightarrow op3 \rightarrow op2$ 과 $op3 \rightarrow op1 \rightarrow op2$ 중, 공구 대기시간을 적게 일으키는 작업순서를 결정한다.

이 알고리즘의 세부과정은 그림 3에 나타나

있다. 이 알고리즘은 두 단계로 이루어진다. 첫 단계(그림 3의 Step 1)에서 다음 작업선택 규칙에 의하여 작업순서를 결정한다. 두번째 단계(그림 3의 Step 2)에서 공구 대기시간이 발생한 작업들을 LM과 RM 사이로 이동시키면서 공구 대기시간을 더 줄이려는 시도를 하였다.

을 이용하여 선행관계를 만족하면서 공구 경쟁을 줄이는 경험적 알고리즘으로 NP 난도문제를 풀었으며, 이 알고리즘으로부터 도출된 결과는 근사 최적해이다.

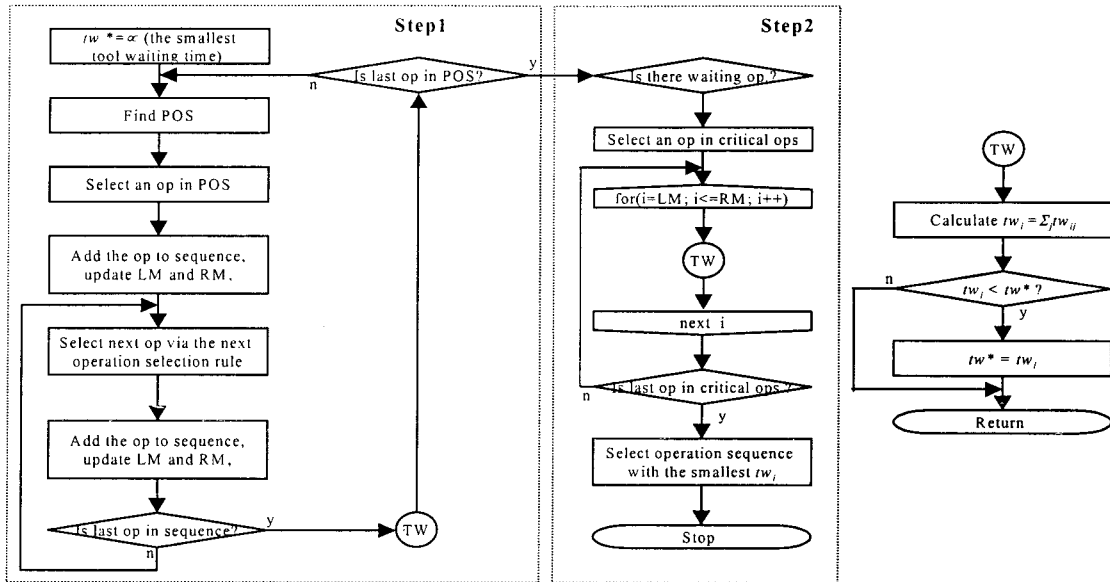


그림 3 공구대기시간을 최소화하는 작업순서의 결정

3.2 공구대기시간의 계산

공구 대기시간 tw_{ij} 는 공구 경쟁에 의한 대기시간($ct_i - t_{ijk}$), 공구 이동시간(mt_{ijk}), 공구 이동장치의 대기시간(ttw_{ij})으로 구성된다. 공구할당 시점에 필요한 공구가 다른 기계에서 사용중이라면 공구 대기시간은 0 이상일 것이다. 그러나 공구할당시점 전부터 유희해서 미리 이동했다면 공구 대기시간은 0일 것이다. 이 공구 대기시간의 계산은 다음과 같다.

$$tw_{ij} = \sum_i \sum_k \{ \max(0, ct_i - t_{ijk} + mt_{ijk} + ttw_{ij}) U_{ijk} \} \text{ for all } i, j \in O_i$$

$$U_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{if operation } j \text{ of part } i \text{ is processed with tool } t \text{ on machine } k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

예를 들어 그림 4의 (a)와 (b)같이 기계 1과 2에 다른 부품이 스케줄된 경우, 공구 이동장치의 대기시간은 0라고 가정했을 때, 그림 4의 (c)처럼 공구 t1과 t2에서 공구 이동시간(mt_{2212} , mt_{2322})이 발생했음에도 불구하고 부품 2의 작업 2(op2)에 필요한 공구 t1의 공구대기시간은 0이고, 작업 3에 필요한 공구 t2의 공구 대기시간은 6이다. 이의 계산식은 아래와 같다.

$$tw_{22} = \max(0, ct_1 - t_{222} + mt_{2212} + ttw_{221}) = \max(0, 5 - 8 + 1 + 0) = 0$$

$$tw_{23} = \max(0, ct_2 - t_{232} + mt_{2322} + ttw_{232}) = \max(0, 19 - 14 + 1 + 0) = 6$$

위와 같은 작업순서 결정문제는 NP 난도문제(NP-hard problem)이다. 본 연구에서는 LM과 RM

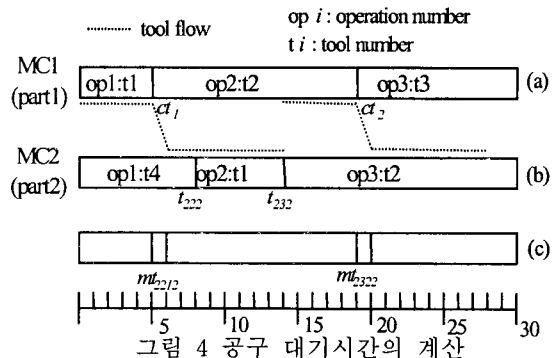


그림 4 공구 대기시간의 계산

4. 시뮬레이션 실험

동적 공구할당 전략하의 FMS의 성능에 큰 영향을 주는 요인을 분석하기 위하여 2^k 요인실험(2^k factorial design)을 도입하였다. 본 실험에서는 공구의 이동을 적절히 제어하면서 많은 종류의 부품을 생산하기 때문에 공구흐름(tool flow)에 밀접한 관련이 있는 공구 중복율(tool duplication rate), 부품 종류 수, 부품의 평균 작업 수, 공구 이동장치 수 등을 실험 요인으로 결정했다. 공구 중복율(tool duplication rate)은 시스템에 있는 각 공구 종류별 공구수를 기계수로 나눈 평균 수치이다. 실험 결과, 공구 중복률, 부품 종류 수, 부품의 평균 작업 수의 순으로 중요한 영향을 주었다.

본 연구의 작업순서(operation sequence) 알고리즘과 비교하려는 알고리즘은 Grico 등과 Koo의 연구에서 사용했던 공구의 가공완료 직후에 선행관계를 만족하는 후보 공구중 공구 대기시간이 가장 작은 공구를 다음 공구로 선택하는 알고리즘 A이

다. 부품투입 규칙의 효과는 배제하고 작업순서 알고리즘 자체만을 분석하려는 이 실험에서의 성능척도는 평균 공구 대기시간이다.

제안한 작업순서 알고리즘과 알고리즘 A를 비교하기 위하여 부품의 평균 작업 수가 저수준, 중수준, 고수준인 부품을 각 20 개씩 선정하였다. 작업순서 알고리즘 자체만의 성능을 비교하기 위하여 기계별 일정계획, 기계별 보유 공구 등의 시뮬레이션 환경을 동일하게 설정한 후, 이 60 개의 부품에 대하여 한 부품씩만을 투입하여 두 작업순서 알고리즘(알고리즘 A와 제안한 알고리즘)을 수행하여 공구 대기시간을 측정하였다. 여기서 60 개의 부품을 연속 투입한다면 첫번째 부품 이후에는 공구의 상태가 달라지므로 두 작업순서 알고리즘을 비교하는 것이 의미가 없기 때문에 한 부품만을 투입하였다. 부품의 평균 작업 수가 저수준, 중수준, 고수준의 60 개 부품에 대하여 한 부품씩 작업순서 알고리즘을 수행하여 공구 대기시간을 측정하여 평균을 표시한 그래프를 그림 5에 정리하였다. 그림 5의 모든 경우에서 제안된 알고리즘이 알고리즘 A보다 우수했다. 또한 그림 5로부터 부품의 평균 작업 수가 많을수록 알고리즘 A와 공구 대기시간의 차이가 커짐을 알 수 있다. 그 이유는 작업 수가 고수준일 때, 예약된 공구수가 많아져 공구 경쟁이 빈번하므로 공구 대기시간이 늘어나기 때문이다.

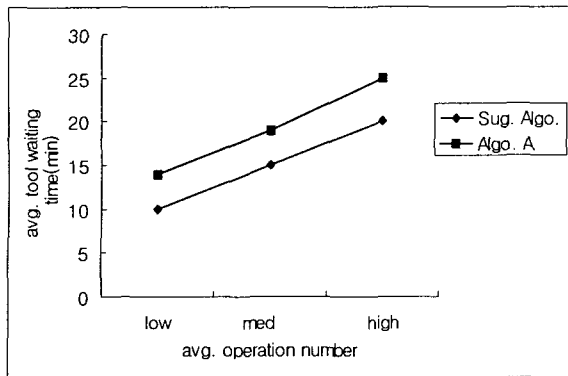


그림 5 평균 작업수에 따른 평균 공구 대기시간

그림 6에는 공구 중복율을 저 수준, 중 수준, 고 수준으로 변경하면서 60 개의 부품을 선정/투입하여, 측정된 공구 대기시간을 정리하였다. 평균 공구 대기시간을 정리하였다. 여기서는 공구 중복율이 작아질수록 알고리즘 A와 큰 차이를 보였다. 이것은 제안된 방안이 공구 대기시간을 줄이는 방향으로 작업순서를 결정했기 때문에 공구 경쟁이 많이 일어나는 공구 중복율이 저 수준 및 중 수준인 경우에 다른 방안들 보다 차이가 컸다.

5. 결론

본 연구는 동적 공구할당 전략하의 FMS에서 작업순서 결정 문제를 언급했다. 본 연구의 시스템 성능에 가장 큰 영향을 주는 요인은 공구 중복율이었고, 그 다음으로 부품 수, 부품의 평균 작업 수가 영향을 주었다. 제안한 방안이 다른 방안보다 우수한 이유는 부품 전체의 공구 대기시간을 줄이는 방향으로 작업순서를 고려했기 때문에 기계

및 공구의 배치가 동일한 상황에 같은 부품이 투입되더라도, 다른 방안들보다 짧은 시간에 부품의 가공을 완료할 수 있기 때문이다.

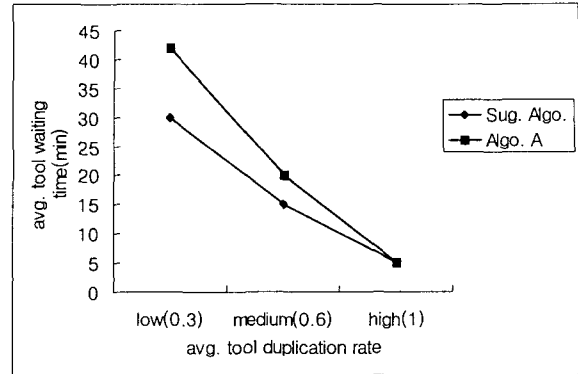


그림 6 공구중복률에 따른 평균 공구 대기시간

최근 SSMS 형태의 공구 이동장치를 이용하는 FMS가 늘고 있고, 새로 설계되는 FMS에 공구 이동장치를 필수적으로 구성하는 추세이기 때문에 본 연구는 실제 시스템에 유용하게 이용되리라 판단된다.

참고문헌

- [1] 이충수, "SSMS (Single-stage Multi-machine Systems)에서 동적 공구할당 전략하의 부품투입 방안 연구", 고려대학교 산업공학과 박사학위 논문, 2000. 2
- [2] Grieco, A., Semararo, Q., Tolio, T. and Toma, S., "Simulation of tool and part flow in FMS", *International Journal of Production Research*, Vol. 33(3), pp. 643-658, 1995.
- [3] Jones, T., "How the big(and little) guys do it", *Tooling and Production*, pp. T7-T10, 1994.
- [4] Kashap, A. S. and Khator, S. K., "Control rules for tool sharing in flexible manufacturing systems", *Computers and Industrial Manufacturing*, Vol. 25(1-4), pp. 507-510, 1993.
- [5] Koo, P-H., "Flow planning and control of Single-Stage Multimachines Systems", Ph.D Thesis, Purdue university, 1996.
- [6] Lee, C. S., Kim, S. S., Choi, I. and Rho, H. M., "A part release scheme in single-stage multimachine systems", to be published in *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- [7] 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(1), pp. 517-520, 1992.
- [8] Wang, E., Kim, Y. S., Lee, C. S., and Rho, H. M., "Feature-based machining precedence reasoning and sequence planning", *Proc. ASME Computers in Engineering Conference*, Atlanta, Georgia, 1998.