

# 자율, 분산된 기계가공시스템의 제어 모델 및 운영 기술에 관한 연구\*

이영해\*\* · 김 정\*\*\*

## A Study on the Control and Operation of Autonomous Distributed Machining System\*

Young Hae Lee\*\* · Jeong Kim\*\*\*

### ■ Abstract ■

The manufacturing systems have to cope with the circumstance that the requirements of customers are changed abruptly and the life cycle of product becomes short. In this paper, to develop the efficient control and operation of autonomous, distributed machining systems the concept of Holonic Manufacturing System is adopted and methods for the control and operation of the system are proposed including an evaluation function for the negotiation between holons. And it is applied to scheduling and selection of operations to be worked with consideration of quality. It is expected that the proposed methods may be applied to operate autonomous, distributed machining systems.

## 1. 서 론

오늘날의 생산시스템은 다양해지는 소비자의 요구를 민첩하게 만족시켜야 국제 경쟁에서 생존할 수 있다. 소비자들의 기호의 변화에 따른 급작스러

운 제품 모델 변경에의 대처와 신속한 생산을 통한 납기 만족은 오늘날의 기계 가공 시스템에서 매우 중요한 관심이 되고 있다. 특히 컴퓨터 및 통신 기술의 발달에 힘입어 그 기능이 매우 진보되었고 시스템의 내외 환경 변화에 대해 민첩하게 적응하고,

\* 본 논문은 '96 교육부 기계공학분야 학술연구조성비(ME-96-E-40)에 의해 연구되었음.

\*\* 한양대학교 산업공학과 교수

\*\*\* 안산공과대학 공업경영과 전임강사

자율화되었으며, 정보들이 분산되어 관리되는 등 매우 고도로 발달된 시스템으로 진보하기에 이르렀다. 따라서, 기능적인 면에서 매우 진보되고 자율화된 생산시스템을 적절히 통제하여 시스템이 제 기능을 발휘할 수 있도록 도와 주는 적절한 시스템 제어 및 운영 기술이 필요하게 되었다[6,8,9,10].

일반적으로 생산시스템의 운영에 관련된 문제들은 다음과 같이 세 가지가 있다[3].

- (1) 생산 계획 문제(Planning) : 부품 종류의 선택, 기계군 형성의 문제, 생산 제품 비율 문제, 자원 할당 문제 등
- (2) 생산 일정 계획 문제(Scheduling) : 부품 투입 순서 결정 문제, 작업 순서 결정 문제, 기계 선정 문제, 부품 우선순위 문제, 물자 이송 문제, 작업자 선정 문제 등
- (3) 생산 통제 문제(Production Control) : 기계의 고장 및 수리 문제, 수요 변동이나 기계의 가동률의 변동 및 기계 고장에 따른 일정 계획의 변경, 대체 공정 결정, 정보 수집 및 공정 통제 문제 등

그런데, 기존의 생산시스템의 제어 형태는 크게 계층 구조(hierarchical architecture)와 수평 구조(heterarchical architecture)[6,7]로 구분된다. 그런데 계층 구조는 안정성이 있으며 시스템의 최적 해를 줄 수 있는 반면 동적 환경에서의 적응이 매우 어렵고, 수평 구조는 동적 환경 변화에 적응이 가능하지만 시스템의 최적화를 실현하기가 어려운 것으로 알려져 있다.

홀로닉 생산시스템(Holonic Manufacturing System : HMS)은 계층 구조의 빠른 반응시간과 수평 구조의 환경 변화에 민첩하게 적응하는 유연성 및 자율성의 특징을 나타내는 제어 구조를 갖도록 설계된다. 이를 위하여 시스템의 각 요소들에 대하여 모듈화가 이루어지고 정보들이 분산된다. 또한 각 모듈들의 정보들이 모듈 관리자들에 의해 수정되고 의사 결정 문제의 해결을 위해서는 서로 정보가

교환된다. 이처럼 홀로닉 생산시스템은 자율화, 협력화 방식으로 운영되어 환경 변화에 대해서 빠른 반응시간을 보장하고 유용한 자원을 충분히 이용함으로써 환경 변화에 적응하면서도 전체 시스템의 운영 최적화를 가능하게 한다[4].

HMS는 시스템 구성 요소들이 자율적이면서도 협조적인 특징을 가지고 있는 구조로서 아래와 같은 내용들을 포함한다.

- (1) 홀로닉 생산시스템은 홀론들로 구성된다. 홀론은 제조 시스템에 있어서 자율적이면서도 협력적인 성질을 가진 시스템의 구성요소 및 과정으로서 제품의 전환, 운송 및 저장, 정보의 가공 처리, 생산 계획, 생산 일정 계획, 생산 통제일 수도 있다. 또한 홀론은 정보 처리 부분과 물류 처리 부분으로 나누어질 수 있으며, 하나의 홀론은 다른 홀론의 부분으로도 될 수 있다.
- (2) 홀로닉 생산시스템을 구성하는 홀론들은 자율성(Autonomy)을 갖는다. 자기의 계획, 전략 및 운영을 스스로 수행할 수 있는 능력을 갖는다.
- (3) 홀론들은 시스템 공동의 목표 수행을 위해서 협조(Cooperative)하여 필요한 업무들을 수행한다.
- (4) 홀라키(Holarchy) 구조를 갖는다. 홀라키 구조는 공동의 목표 수행을 위해 협력할 수 있는 홀론들의 구조로서 Holon 들의 협력을 위한 기본적인 규칙(basic rules)을 정의한다. 따라서 홀라키 구조는 각 홀론의 자율성(Autonomy)을 어느 정도 제한한다.

홀로닉 생산시스템은 시스템 요소들이 상위 계층의 지시에 따라 맹목적으로 행동하지 않고 자율적으로 행동한다. 따라서 상위 레벨과 주종 관계를 이루기보다는 협력관계에 있다.

HMS는 1994년 IMS프로젝트 팀에 의해 차세대 생산시스템으로 제안된 이래로 하드웨어와 소프트웨어 등의 다양한 분야에서 연구가 진행되어 왔다. Agre 등[5]은 홀론 개념을 Steel rod를 생산하는

Water Cooling System에 적용하였다. Valckenaers 등[12]은 생산시스템의 운영을 위해 Scheduler, Process Planner, Control System, Product Design 등에 대한 홀론을 구성하여 홀로닉 생산시스템을 모델링하였다. Tonshoff 등[11]은 홀로닉 개념을 제품 모델링에 적용하였는데 제품 모델링을 위해 Business System, Scheduling, CAD, 및 CAPP에 대하여 홀론을 구성하고 필요한 정보 교환이 이루어지게 하였다.

기존 연구들은 공통적으로 시스템의 목표에 영향을 주는 의사결정의 단위들을 홀론으로 구성하였다. 그 중에서 Tonshoff 등[11]이 구성한 홀론들은 의사결정에 필요한 정보들을 공유하거나 자유롭게 액세스할 수 있게 모델링 되었다. Valckenaers 등[12]은 일반적인 홀로닉 생산시스템에 대한 모델을 제시했는데 홀론들이 어떤 정보를 이용하여 의사결정을 수행하는지 밝히지 않고 있으며 홀론 간의 협상도 언급하지는 않고 있다. Tonshoff 등의 모델과 Valckenaers 등의 모델의 공통점은 공정 계획과 스케줄링을 각각의 개별적인 홀론으로 구성한 것이다. 그런데 구체적인 공정 계획과 스케줄링을 위해서는 각 홀론에 필요한 정보들이 정의되고 홀론 간의 협상을 중재하는 협상 알고리즘이 반드시 있어야 한다.

본 연구에서는 자율 분산된 기계가공시스템을 위한 홀로닉 생산시스템의 제어 모델 및 효율적 운영 방법을 다룬다. 시스템 운영을 위한 홀론들을 구성하여 자율 분산된 생산시스템을 모델링 및 홀론간의 협상을 중재할 수 있는 평가함수를 개발하고, 이를 이용하여 주문에 대한 작업 선정과 스케줄링을 수행하는 절차를 제안한다. 그리고 품질 수준을 고려하여 주문 제품의 생산을 위한 작업의 종류의 선정 및 할당 절차를 제시하며, 작업 할당 문제에 대한 수치 예제를 보인다.

## 2. 생산시스템의 운영을 위한 모듈

본 연구에서는 공정 계획과 스케줄링의 한 부분

인 작업 종류의 결정을 위해 필요한 정보를 관리하는 데이터베이스를 모듈(module)이라고 정의한다. 구체적인 모듈을 정의하기 전에 먼저 본 연구에서 고려하는 고객의 주문 처리 절차에 대하여 요약하면 다음과 같다.

생산시스템이 고객으로부터 주문을 받게 되면 먼저 주문을 구성하는 부품들과 재료를 선정하고 부품 가공을 위한 작업을 선정한다. 부품 가공을 위한 작업은 여러 기계에서 가능하나 기계의 종류별 작업 시간은 달라질 수 있다. 작업물은 AGV (Automated Guided Vehicle), 컨베이어 혹은 작업자의 수동 작업에 의해 해당되는 장소로 운반되며, 기계 제어기(Machine Controller)에 의해 통제를 받아 가공한다. 그리고 AGV나 그 밖의 반송 기구들은 각각의 제어기에 의해 통제를 받아 작업을 수행하게 된다. 주문을 구성하는 모든 부품에 대한 가공이 완료되면 고객에게 전달된다. 이러한 일련의 주문처리를 위하여 부품의 종류와 재료를 결정하고 공정 계획을 수립하며 가공을 위한 스케줄링을 수립하게 된다.

공정 계획이 수립된 후에는 작업의 선행 관계, 작업 준비 방법, 절삭 조건, 등이 결정되는데 이들과 관계된 정보들을 취급하는 모듈들을 본 논문에서는 각각 PRECEDENCE 모듈, SETUP 모듈 및 QUALITY 모듈이라고 하였다. 그리고 도면 정보로부터 제품 정보, 가공 부품에 대한 정보 및 재료 정보들이 입력되는데 이들에 대한 정보들을 각각 PRODUCT모듈, PART모듈 그리고 MATERIAL 모듈이라고 하였다.

한편 공정 계획에서 결정된 작업을 기계에 할당하는 스케줄링을 위해서는 공정 계획으로부터 전달받은 정보 이외에도 현장의 상황에 대한 정보가 고려되어야 한다. 현장에 대한 정보에는 기계의 고장 여부, 공구의 마모나 기계 가동 속도의 조정으로 인한 기계의 비정상적인 가동 상태, 기계 간의 이동 시간, 어떤 기계에서 어떤 작업이 가능하며 얼마의 시간이 소요되는지에 대한 정보 및 기계 고장을 수리하는데 소요되는 시간 등이 포함되어야

하는데 이들 각각에 대한 정보를 CONDITION 모듈, MACHINE 모듈, MHS(Material Handling System)모듈, MACHINING 모듈 및REPAIR 모듈이라고 하였다. <표 1>은 정의된 모듈들을 나타낸다.

<표 1> 시스템의 모듈과 취급되는 정보

모듈	취급되는 정보
PRODUCT	생산 시스템에서 생산할 수 있는 제품 정보
PART	제품의 부품 구조와 부품 가공을 위한 작업 종류에 대한 정보
QUALITY	제품, 부품 및 작업의 품질 수준에 관한 정보
MACHINING	기계별 수행 가능 작업 및 작업 시간에 대한 정보
PRECEDENCE	작업 수행에 따르는 기술적인 제약에 대한 정보
MHS	반제품 및 재료 등의 반송에 대한 정보
MACHINE	기계의 능력에 대한 정보
CONDITION	기계의 상태에 대한 정보
REPAIR	기계 수선에 관한 정보
MATERIAL	부품에 사용되는 재료에 관한 정보
SETUP	작업준비에 관한 정보

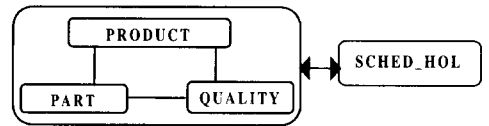
### 3. 홀론의 구성

홀로닉 생산시스템은 의사 결정을 요구하는 일이 있을 때 관련 정보를 관리하는 모듈들이 유기적으로 결합되어 의사결정을 수행한다. 생산 주문 처리를 협상을 통해 수행할 수 있는 홀론들을 구성하면 다음과 같다.

#### 3.1 작업 선정 홀론(OPER\_HOL)

일반적으로는 작업의 종류 및 품질 수준은 공정 계획에서 결정되어 표준 가공 시간과 함께 스케줄러에게 전달된다. 표준 가공 시간에는 여유시간이 있다고 하여도 기계간의 이동 시간, 톨의 마모나 기계 고장에 의한 기계 가동률의 변동 등 현장 상황을 정확히 반영하는 것이 어렵다. 부품 가공을

위한 작업의 선정을 위해서는 PRODUCT 모듈, PART 모듈 및 QUALITY 모듈 간에 정보가 교환되어야 한다. 한편 고객에게 납기를 만족시키는 것이 중요 문제가 될 경우, 생산 가능 시점에 대한 정보는 작업을 기계에 할당하는 스케줄러(SCHED\_HOL)가 관리하므로 작업 선정을 위하여 SCHED\_HOL와 협상해야 한다. 따라서 PRODUCT, PART, QUALITY 모듈 및 SCHED\_HOL의 정보 교환을 통해 작업이 선정될 수 있으므로 작업 선정을 홀론인 OPER\_HOL을 [그림 1]과 같이 구성한다.

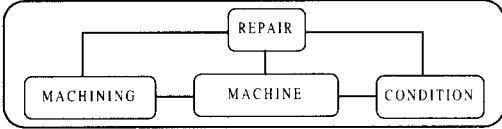


[그림 1] OPER\_HOL의 구조

#### 3.2 스케줄 홀론(SCHED\_HOL)

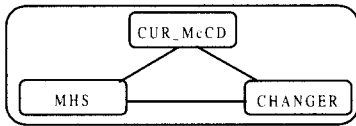
작업이 계획된 시간에 완료되려면 공정 계획에서 계산된 표준의 가공시간 이외에도 시스템의 현실 상황을 잘 반영하여 작업 할당이 이루어져야 하며 작업이 수행되는 중에 발생하는 변화에 신속하게 대처하는 것이 필요하다. 그러므로 스케줄링에서 현실 상황을 반영하기 위한 절차로써 기계의 변경상황을 설명해 줄 수 있는 MC\_RATE 모듈과 기계간의 이동 시간 및 작업 준비 시간을 제공할 수 MC\_CHANGE 모듈을 구성한다. MC\_RATE 모듈은 기계의 작업 시간을 계산하는 모듈로서 REPAIR 모듈, MACHINING 모듈, MACHINE 모듈, 그리고 CONDITION 모듈로 구성된다. REPAIR 모듈은 기계 고장시 예상 수리 시간을 관리한다. MACHINING 모듈은 정상적인 기계별 작업별 시간을 관리하며, MACHINE 모듈은 기계의 능력을 관리한다. 그리고 CONDITION 모듈은 기계의 고장 여부를 관리한다. MC\_RATE 모듈은 [그림 2]와 같은 정보 교환을 통해 할당된 작업에 대한 수

행 시간을 계산한다.



[그림 2] 가공시간 계산을 위한 MC\_RATE 모듈

MC\_CHANGE 모듈은 작업의 수행을 다른 기계에서 수행하고자 할 때 작업의 준비 시간을 계산하는 모듈로서 CUR\_McCD 모듈, CHANGER 모듈, 그리고 MHS 모듈로 구성된다. 여기서 CUR\_McCD 모듈은 기계가 현재의 작업을 완료하는 시각을 계산하고, CHANGER 모듈은 기계별 작업별 적재(loading) 및 하역(unloading)에 대한 정보를 관리한다. MC\_CHANGE 모듈은 CUR\_McCD 모듈, CHANGER 모듈, 그리고 MHS 모듈로부터 정보를 받아서 작업을 현재 기계에서 다른 기계로 옮겨 수행할 때 소요되는 시간을 [그림 3]과 같은 정보 교환을 통해 계산한다.



[그림 3] 작업 준비 시간 계산을 위한 MC\_CHANGE 모듈

한편 SCHED\_HOL은 OPER\_HOL으로부터 전달 받은 작업을 시스템의 여러 상황들을 고려하여 기계에 할당한다. 각 기계들이 작업을 할당받기 위해 경쟁하게 되는데 SCHED\_HOL은 기계들이 제시하는 작업 수행 시간(MC\_RATE 모듈이 제시함)과 작업 수행을 위해 준비하는 시간(MC\_CHANGE 이 제시)을 고려하고, 작업 수행을 위한 선행 제약 등을 고려하여 적절한 기계에 작업을 할당한다.

### 3.3 협상 중재 홀론(PROD\_HOL)

협상 중재 홀론은 홀론들의 권한을 제한하고 홀

론 간의 협상을 중재한다. 따라서 다른 홀론들이 결정한 사항들을 시스템의 목표를 고려하여 평가할 수 있는 함수들로 구성되어야 한다. 효용 함수(utility function)[1]를 이용하여 홀론간의 협상 중재를 위한 평가함수를 다음과 같이 모델링 하였다.

경쟁 관계에 있는 두 홀론이 내놓은 대안들 중에서 홀론들의 입장과 전체 시스템의 입장을 고려하여 적절한 대안을 선정하기 위한 기준 즉 평가 함수는 다음의 두 가지 성질을 반드시 포함하여야 한다; (a) 평가 함수는 두 홀론의 총 효용을 가능한 극대화하는 대안이 선정될 수 있도록 모델링 되어야 한다. (b) 평가 함수는 가능한 한 두 홀론 모두에게 공정성을 보장할 수 있는 대안이 선정되도록 모델링 되어야 한다. 임의의 대안에 대해 한 홀론이 이익을 보게 되고 다른 홀론이 큰 손해를 보게 될 때, 전체의 대안들 중에서 그 대안의 두 홀론들의 효용의 합이 최대라고 하더라도 양자에게 공정하지 않음으로 최적이라고 말하기는 곤란할 수 있다.

대안 선정을 위한 평가 함수에 포함되어야 할 내용으로서 첫번째 성질인 전체 효용 최대화의 목표는 두 홀론의 총 효용이 가장 큰 대안을 선정하면 달성될 수 있다. 두 홀론의 속성간에 상호 효용 독립인 경우에는 가법적 효용 함수를 이용하고, 상호 의존적인 경우에는 승법적 효용함수를 이용하여 모델링 될 수 있는데, 본 연구에서는 상호 효용 독립인 경우를 고려하여 두 홀론의 총 효용을 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$U(X,Y) = \alpha U_x(X) + (1-\alpha)U_y(Y), 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (1)$$

여기서  $U_x(X)$ 와  $U_y(Y)$ 는 각각 홀론 X와 Y가 갖는 단일 효용 함수를 나타낸다. 그리고  $\alpha$ 는 평할 계수로서  $\alpha$ 가  $(1-\alpha)$ 보다 크면 X쪽에 유리한 대안이 선정되고 작으면 Y쪽에 유리한 대안이 선정된다. 두 홀론의 효용이 상호 효용 독립일 때, 두 효용의 최대화를 위해 식 (1)을 만족하는 대안이 선정되어야 한다.

한편, 평가 함수가 가져야 할 기준 중 두 번째인

대안의 공정한 선정을 만족하기 위해서는 다른 두 홀론 간의 효용의 차를 가능한 한 작게 하는 대안이 선정되어야 한다. 두 효용의 차의 값을 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D = |U_X(X) - U_Y(Y)| \quad (2)$$

공정한 평가에 의해 대안이 선정되려면 가능한 두 홀론의 효용 차가 최소가 되어야 하는데 공정성에 대한 효용은 식 (2)에서 얻어진 효용의 차를 이용하여 구해질 수 있다. 그런데 효용차 특성에 따라 효용차 함수는 다양하게 표현될 수 있는데 효용차가 선형 관계에 있는 경우 공정성 평가의 기준이 될 수 있는 효용차에 대한 함수를 식 (3)과 같이 표현하는 것이 가능하다[1].

$$U_D(D) = \frac{D^0 - D}{D^0 - D^*} \quad (3)$$

여기서  $D^0$ 는 두 속성간의 가장 큰 효용 차를 의미하며  $D^*$ 는 가장 작은 효용 차를 의미한다.

그러므로 총 효용의 합을 가능한 한 최대화하면서 두 효용의 차를 가능한 한 작게 하는 대안 선정을 위한 평가 함수는 식 (4)와 같이 된다.

$$U_d(X, Y) = (1 - \beta)U(X, Y) + \beta U_D(D) \quad (4)$$

여기서  $\beta$ 는 평할 계수로써 0과 1사이의 값을 갖게 되는데  $\beta$ 가  $(1 - \beta)$ 보다 크면 가능한 한 두 홀론들의 효용 간의 차이가 작은 대안이 선정되고  $\beta$ 가  $(1 - \beta)$ 보다 작으면 가능한 한 총 효용이 큰 대안이 선정된다.

### 3.4 재료 선정 홀론(MAT\_HOL)

제품을 생산하기 위해 필요한 부품을 가공하기 위해 먼저 재료가 선택되어야 한다. 부품재료는 기본적으로 고객의 요구사항을 만족시키는 것으로 선정되어야 하는데 그러한 것이 많을 경우에는 재료 품질과 재료 비용을 고려하여 가장 적절한 것으로 선정하는 것이 타당할 수 있다. MAT\_HOL은

재료의 선택을 위해 MATERIAL PRODUCT 및 PART 모듈의 정보를 이용할 수 있는데 이에 대한 절차를 아래에 나타낸다.

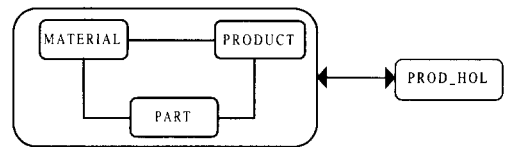
단계 1. MATERIAL 모듈에 부품을 위해 선택할 재료가 있으면 단계 2로 가고 그렇지 않으면 단계 4로 간다.

단계 2. MATERIAL 모듈로부터 임의의 한 재료를 선정 후 PRODUCT 모듈의 정보를 참조하여 선택한 재료의 품질 수준이 주문 제품의 기본적인 요구 사항을 만족하는지 평가한다. 만족하면 재료 가격과 품질 수준에 대한 평가 함수의 값을 계산한 후 단계 3으로 가고 그렇지 않으면 단계 1로 간다.

단계 3. 평가 함수의 값을 이전 재료의 것과 비교하여 재료를 선정한 후 단계 1로 간다.

단계 4. 끝낸다.

재료 선택을 위한 MAT\_HOL 구조는 [그림 4]와 같이 된다.

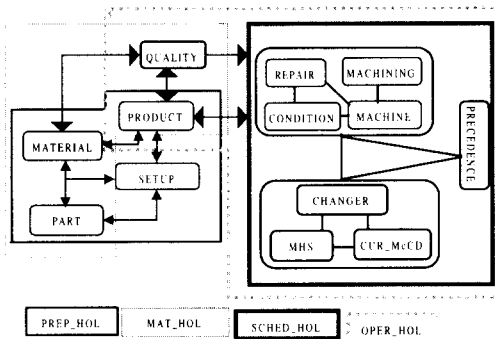


[그림 4] MAT\_HOL의 구조

### 3.5 작업 준비 홀론(PREP\_HOL)

재료를 고정시킬 수 있는 가능한 방법이 여러 가지 있을 때 준비 시간을 최소로 하는 것이 필요한 경우를 생각한다. PREP\_HOL은 부품 가공을 위해 재료를 팔레트 위에 준비하는 방법을 결정하는데 MAT\_HOL으로부터 재료가 결정되면 SETUP 모듈로부터 재료를 팔레트 위에 고정시킬 수 있는 모든 방법을 탐색하여 재료를 고정시키는데 소요되는 시간을 계산한 후 가장 짧은 시간에 고정하는 방법을 선택한다.

위에 구성된 홀론들은 기본적으로 자신이 수행할 일을 처리해 나가면서 다른 홀론과의 정보 교환을 통해 시스템 전체의 목표를 이루어나간다. 모듈 및 홀론 간의 정보 교환 경로를 [그림 5]에 나타낸다.



[그림 5] 홀론들간의 통신을 위한 구조

### 4. 품질수준을 고려한 작업 할당

부품들은 정해진 작업에 의해 가공이 이루어지게 되는데 작업의 품질 수준에 의해 부품의 품질이 결정되고, 주문 제품의 품질은 부품의 품질에 의해 결정된다. 한편 부품 가공의 품질 수준은 생산 시간과 밀접한 관련이 있는데 특히 가공의 정밀도를 높이면 가공 시간이 달라지게 될 수 있다.

그러므로 고객의 요구를 만족시킬 수 있는 주문 제품을 생산하기 위한 부품 및 작업의 종류 및 이의 품질 수준은 생산시스템의 상황을 고려하여 결정해야 한다. 그러기 위해서는 주문 제품의 생산에 관련된 홀론들이 협상과 협력을 통해 작업의 종류를 선정할 필요가 있다. 본 절에서는 먼저 부품 가공을 위한 작업의 종류를 선정하는 절차를 설명한다.

#### 4.1 용어의 정의

작업 선정 절차의 설명을 위해 용어를 아래와 같이 정의한다.

- $i$  : 부품,  $j$  : 작업,  $p$  : 부품의 품질 수준,  $q$  : 작업의 품질 수준,  $s$  : 기계에 대한 Index
- $PT_i$  : 제품을 구성하는  $i$ 번째 부품,  $i = 1, 2, \dots, n$
- $PT_{ij}$  : 부품  $i$ 의 가공을 위한  $j$ 번째 작업,  $j = 1, 2, \dots, m$
- $PT_{ip}$  : 부품  $i$ 의 품질 수준  $p$ ,  $p = 1, 2, \dots, k$
- $PT_{jq}$  : 작업  $j$ 의 품질 수준  $q$ ,  $q = 1, 2, \dots, l$
- $G_{ijg}$  : 작업 군  $g$ 에 포함되어 있는 부품  $i$ 의 작업  $j$ ,
- $Q_T$  : 생산자 목표 품질 수준,  $C_Q \leq Q_T \leq l$
- $C_Q$  : 주문 제품에 대하여 고객이 요구하는 품질 수준

#### 4.2 작업 선정 절차

소비자의 요구를 기본적으로 만족시키는 그 이상의 품질 수준을 유지할 수 있는 작업 군들은 여러 가지가 될 수 있다. 공정 계획 단계에서는 이들 중에서 어느 한 종류의 작업 군을 선정하여 스케줄 담당자에게 제공하는 것이 주요 임무일 수 있는데 현장 상황은 공정 계획 담당자에게서 전달받은 작업 군보다는 다른 종류의 작업이 더 선호될 수도 있으므로 공정 계획 담당자는 고객의 기본적인 요구를 만족시킬 수 있는 모든 작업 군의 종류를 선정하여 스케줄링 담당자와 협상하는 것이 필요하다. 고객의 요구를 기본적으로 만족시키는 작업 군의 종류를 선정하는 절차는 다음과 같다.

단계 1. 목표 품질 수준과 고객의 기본적인 요구 품질 수준을 같게 둬.

$$Q_T = C_Q$$

단계 2. 초기화( $i = 0, j = 0, p = 0, q = 0$ )

단계 3. 제품을 구성하는 부품의 품질수준을 선택.

$$PT_i^+ = PT_i, \quad PT_{ip}^+ = PT_{ip}$$

단계 4. 선택부품의 품질 수준을 목표치와 비교.

$$\Delta Q = PT_{ip}^+ - Q_T$$

$\Delta Q$ 가 0보다 크거나 같으면 단계 5로, 그렇지 않으면  $p$ 를 1증가시키고 단계 3으로

간다.

단계 5. 부품의 품질 수준을 만족하는 작업의 종류를 결정.

(단계 5.1) 부품  $i$ 의 가공을 위한 작업과 품질 수준을 선택.

$$PT_{ij}^+ = PT_{ij}, PT_{ij}^- = PT_{ijq}$$

(단계 5.2) 작업품질수준을 부품의 그것과 비교.

$$\Delta P = PT_{ijq}^+ - PT_{ij}^-$$

$\Delta P$ 가 0보다 작지 않으면  $PT_{ijq}$ 를 부품  $i$ 의 가공을 위한  $j$ 의 작업으로 선정한다. 부품 가공을 위해 여러 종류의 작업이 있을 수 있으므로 다른 작업의 선정을 위해  $j$ 를 1증가시키고 단계 5.3으로, 만일  $\Delta P$ 가 0보다 작으면  $q$ 를 1증가시키고 단계 5.3으로 간다.

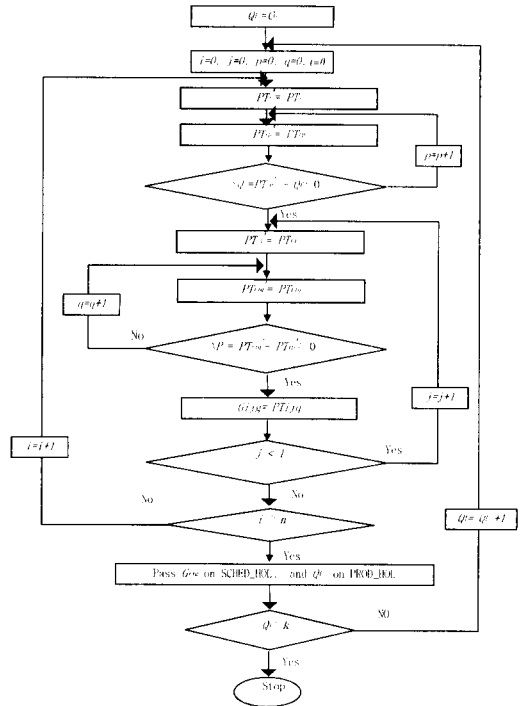
(단계 5.3) 부품 가공을 위한 모든 작업의 종류가 선정되었는지 확인. 모든 작업의 종류가 선정되었으면 단계 6으로 가고 그렇지 않으면 단계 5.1로 간다.

단계 6. 주문 제품에 대한 모든 부품의 가공을 위한 작업들이 결정되었으면 단계 7로 가고 그렇지 않으면  $i$ 를 1증가시킨 후 단계 3으로 간다.

단계 7. 작업 군을 SCHED\_HOL에게 전달하고 부품의 품질수준을 PROD\_HOL에게 전달한 후 단계 8로 간다.

단계 8. 목표 품질 수준  $Q_T$ 을 높일 수 있는지 검토한 후 높일 수 있으면  $Q_T$ 의 값을 1증가시킨 후 단계 2로 간다. 그렇지 않으면 종료한다.

위의 작업 선정 절차를 통해서 모든 부품을 가공하기 위해서 필요한 작업 군이 품질 수준별로 만들어진다. 여러 품질 수준의 작업 군들이 공정 계획 단계에서 만들어지면 이들 중 가장 적절한 작업 군이 스케줄 홀론과의 협상을 통해서 결정될 수 있는데 이와 같은 일련의 과정을 [그림 6]에 나타낸다.



[그림 6] 작업 그룹 선택을 위한 절차

### 4.3 작업 할당 절차

부품의 가공을 위해 필요한 작업의 종류를 결정 한 후, 시스템이 여러 상황을 고려하여 작업들을 적절한 기계에 할당해야 한다. 스케줄링을 위해 변수를 다음과 같이 정의한다. 먼저 부품  $i$ 의 작업  $j$ 을 기계  $s$ 에서 수행한 후, 이어서 부품  $i$ '의 작업  $j'$ 을 기계  $s'$ 에서 수행할 때의 소요 시간을 식 (5)와 같이 나타낸다.

$$mp_{s'ij's'} = O_{ij's'} \tag{5}$$

여기서  $O_{ij's'}$ 은 부품  $i$ '의 작업  $j'$ 을 기계  $s'$ 에서 수행할 때 예상되는 작업 시간으로 기계가 정상적으로 가동될 경우의 시간이다.

또한 작업의 선행 제약을 식 (6)과 같이 나타낸다.

$$PC_{s'ij's'} = r \tag{6}$$

부품  $i$ 의 작업  $j$ 을 기계  $s$ 에서 수행한 후, 부품  $i$ '의 작업  $j'$ 을 기계  $s'$ 에서 수행할 때, 부품  $i$ 의 작업  $j$ 가



부품  $i$ '의 작업  $j$ '이전에 반드시 처리해야 할 선행 작업이 되면  $r$ 의 값은 1, 작업  $j$ '가  $j$ 보다 먼저 처리되어야 하면  $\infty$ 가 된다. 작업을 기계에 할당할 경우 기계의 고장 여부를 고려해야 한다. 기계가 고장나 있음에도 불구하고 작업을 할당할 시 많은 문제가 생길 수 있는데 기계의 고장 여부에 대한 정보를 식 (7)과 같이 나타낸다.

$$mb_{sj, s'j'} = m_s \quad (7)$$

부품  $i$ 의 작업  $j$ 을 기계  $s$ 에서 수행한 후, 부품  $i$ '의 작업  $j'$ 을 기계  $s'$ 에서 수행하려고 할 때 기계  $s'$ 의 상태를 나타내는 것으로써  $m_s$ 의 값은 기계가 영구 고장인 경우에는  $\infty$ 의 값을 갖게 되고 그렇지 않은 경우에는 1의 값을 갖는다. 기계 고장이 발생하면 생산 담당자는 기계 수리를 담당하는 부서에게 통보해 주어야 한다. 수리 부서에서는 기계 수리를 위해 필요한 시간을 예측하여 이를 생산 담당자에게 알려주어야 한다. 기계 고장을 수리하는 시간을 식 (8)에 나타낸다.

$$mr_{sj, s'j'} = re_s \quad (8)$$

$re_s$ 은 부품  $i$ 의 작업  $j$ 을 기계  $s$ 에서 수행한 후, 부품  $i$ '의 작업  $j'$ 을 기계  $s'$ 에서 수행하려고 할 때 기계  $s'$ 이 고장난 경우 수리를 하는데 요구되는 예상 시간이다. 기계 고장은 아니지만 기계 자체의 이상 혹은 톨의 마모 등으로 인해 기계를 정상적으로 가동하기가 쉽지 않은 경우가 생길 수 있다. 스케줄러는 이러한 현장의 상황을 고려하여 작업을 기계에 할당해야 한다. 기계 가동률을 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$ma_{sj, s'j'} = b_s \quad (9)$$

여기서  $b_s$ 은 부품  $i$ 의 작업  $j$ 을 기계  $s$ 에서 수행한 후, 부품  $i$ '의 작업  $j'$ 을 기계  $s'$ 에서 수행할 때, 기계  $s'$ 의 현재 가동률을 나타낸다. 부품 가공을 위해 재료나 재공품을 정해진 기계에 운반할 때 운반 시간을 식 (10)과 같이 나타낸다.

$$mt_{sj, s'j'} = tr_{s, s'} \quad (10)$$

여기서  $tr_{s, s'}$ 은 기계  $s$ 에서 기계  $s'$ 까지 재료나 재공품을 운반할 때 요구되는 시간이다. 임의의 기계에서 작업을 수행한 후, 이어서 다른 기계로 옮겨 작업을 수행할 때 작업물을 하역(unloading)하고, 다른 기계에 적재(loading)하는 일을 요구한다. 작업물의 적재 및 하역을 위해 필요한 시간을 식 (11) 및 식 (12)에 나타낸다.

$$mu_{sj, s'j'} = ut_s \quad (11)$$

$$ml_{sj, s'j'} = lt_s \quad (12)$$

여기서  $ut_s$ 은 기계  $s$ 에서 작업을 수행한 후 작업물을 내릴 때 소요되는 시간을 의미하며  $lt_s$ 은 작업물을 기계  $s'$ 에 올릴 때 요구되는 시간을 의미한다.

식 (5)부터 식 (12)까지 중에서 한 기계의 가동 및 생산성에 관련된 것은 식 (5), (7), (8) 그리고 식 (9)이므로 실제 기계가 작업을 수행하기 위해 필요로 하는 시간을 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$rmp_{sj, s'j'} = mb_{sj, s'j'} \times \{ (mp_{sj, s'j'} / ma_{sj, s'j'}) + mr_{sj, s'j'} \} \quad (13)$$

한편 기계를 교체하여 작업을 수행할 때 운반 및 준비에 관련된 것은 식 (10), (11) 그리고 (12)이므로 기계를 교체하여 작업을 수행할 필요가 발생할 때, 작업 수행을 위해 식 (13)에 나타낸 시간 이외에 식 (14)에 나타낸 시간이 추가로 요구된다.

$$mct_{sj, s'j'} = mt_{sj, s'j'} + mu_{sj, s'j'} + ml_{sj, s'j'} \quad (14)$$

따라서 기계  $s$ 에서 부품  $i$ 의 작업  $j$ 을 수행한 후, 기계  $s'$ 에서 부품  $i$ '의 작업  $j'$ 을 수행할 때 소요되는 총 시간은 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$pt_{sj, s'j'} = rmp_{sj, s'j'} + mct_{sj, s'j'} \quad (15)$$

따라서 작업을 기계에 할당할 때 식 (15)의 총 작업 수행 시간과 식 (6)의 작업별 선행 관계를 고려하여 전체 작업 수행 완료 시간이 최소가 되도록 하여야 생산성을 극대화 할 수 있다. 그런데 일반적인 스케줄링 문제는 NP-Hard문제로 알려져 있

어서 기계에 할당할 작업의 수에 따라 해를 구하는 계산량이 지수적으로 증가하게 된다. 따라서 효율적인 해법의 개발이 요구되는데 기계간의 경쟁을 통해 작업을 할당하는 절차를 아래에 설명한다.

단계 0. 선행작업이 있는 작업과 그렇지 않은 작업을 그룹핑한다.

단계 1. 선행 작업이 없는 그룹에서 임의의 한 작업을 선택하고 적절한 기계에 우선 할당한다.

단계 2. 기계별 현재 작업을 마치게 될 예상 시간을 계산한다.

단계 3. 기계는 작업이 자신에게 할당될 경우 그 작업의 수행을 위한 준비 시간(식 (14) 참조), 즉 작업  $G_{ijg}$ 을 위한 부품의 재료나 가공품을 기계  $s$ 에서 기계  $s'$ 에 이송하는데 걸리는 시간(식 (10)의  $mt_{s'j,siy}$ )과 현재 기계  $m_s$ 에서 다른 작업이 수행중에 있을 시, 작업이 완료되면  $G_{ijg}$ 를 언로딩시키고 작업  $G_{ijg}$ 를 로딩시키는 시간을 파악한다(식 (11)의  $mu_{s'j,siy}$ 과 식 (12)의  $ml_{s'j,siy}$ ).

단계 4. 기계는 작업을 할당 받아 수행할 경우 그 작업에 대한 예상 수행 소요시간을 계산한다. 작업  $G_{ijg}$ 을 기계  $m_s$ 에서 수행하는데 요구되는 시간은 식 (13)의  $rmp_{s'j,siy}$ 의 값이 된다.

단계 5. 기계는 또한 작업에 대한 예상 수행 완료 시각을 계산한다. 작업의 수행 완료 시각은 작업을 수행하기 시작하는 시각에 작업 준비시간을 더해 주어야 한다. 또한 선행 작업이 있을 시 이를 완료하는 시각을 함께 고려해야 하는데 식 (16)과 같이 계산된다.

$$op_{ij}.ms.c\kappa = \max\{m_s.c\kappa, (G_{ijg} \text{의 선행작업 완료시각} + mt_{s'j,siy})\} + rmp_{s'j,siy} \quad (16)$$

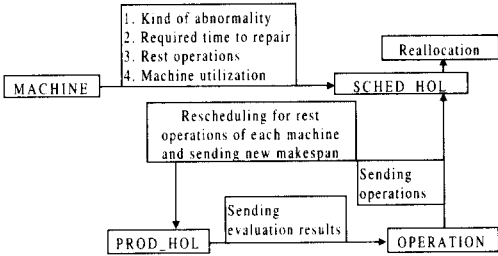
단계 6. 작업을 어떤 기계에 할당할 때 가장 빨리 완료할 수 있는지 찾아서 그 기계에 할당한다.

단계 7. 모든 작업들이 기계에 할당되었으면 makespan(가장 늦은 작업 수행 완료시각)을 구하고 작업 할당 작업을 마친다. 그렇지 않으면 단계 1을 반복한다.

홀로닉 생산시스템은 먼저 off-line으로 짜여진 스케줄에 따라서 작업을 수행하게 되나 시스템의 목표를 추구해 나가는 과정 상에서 이상이 발생하여 스케줄러가 제시하는 것에 따라 작업을 수행할 수 없을 경우나 스케줄러가 제시하는 해가 명백히 지역 최적해라고 판단될 때에는 협상과 협력을 통해 보다 건설적인 해를 찾아가게 된다. 이로써 시스템에 이상이 발생할 경우, 그 이상 요인에 대해 민첩하게 대처하게 된다. 위의 절차에 따라 작업이 할당되어 기계별로 작업을 수행하는 중에 이상이 발생하면 해당 기계는 SCHED\_HOL에게 이상의 종류, 수리 예상 시간, 잔여 작업의 종류 및 기계 능력 등을 전달한다.

SCHED\_HOL는 다른 기계들에게 잔여 작업을 재 할당한 후 makespan을 계산한다. 계산된 값이 약속한 생산 시간을 초과하지 않으면 작업을 수행하고 그렇지 않으면 이를 PROD\_HOL에게 알리고 시스템 전체적인 면을 고려하여 처리한다. 시스템 운영 중에 이상이 발생할 때의 처리 절차를 [그림 7]에 나타낸다. 한 기계에서 작업이 발생할 시 다음과 같은 절차에 의해 잔여 작업들에 대해 기계에 재할당된다. 첫째, 기계별 잔여 작업 수행 가능 시각이 계산된다. 고장난 기계의 작업 수행 가능 시각은 고장 발생 시각에 예정 수리 시각이 가산된 시각이 되며, 다른 기계들의 작업 수행 가능 시각은 현재 진행중인 작업이 완료되는 시각이 된다. 둘째, 고장난 기계에서 작업 중이던 작업의 잔여 시간을 계산한 후 다른 기계에서 작업을 수행할 때, 소요되는 예상 작업시간을 계산한다. 셋째, 가공중이던 부품의 수가 작업 가능한 기계의 수보다 적거나 같으면 모든 잔여 작업에 대해 단계 5의 식 (16)을 계산한 후 작업을 할당하고 가공 중이던 부품의 수가 많으면 고장난 기계에서 수행중이던 작

업은 기계 수리가 완료된 후 식 (16)을 계산한 후 임의의 기계에 할당한다.



[그림 7] 비정상 상태 해결을 위한 절차

#### 4.4 스케줄링을 위한 예제

주문을 받은 제품은 2개의 부품 A와 B로 구성 되어 있다. 각 부품을 생산하기 위한 작업의 종류와 작업 순서, 기계별 작업의 수행 시간, 기계의 가동률과 준비 시간 및 기계 간의 이동 시간을 <표 2>부터 <표 5>에 나타낸다.

<표 2> 부품에 요구되는 공정들

부 품	공 정
A	OP <sub>A1</sub> → OP <sub>A2</sub> → OP <sub>A3</sub>
B	OP <sub>B1</sub> → OP <sub>B2</sub>

<표 3> 기계별 공정 시간

공 정	기계 1	기계 2	기계 3
OP <sub>A1</sub>	3	2	4
OP <sub>A2</sub>	2	4	4
OP <sub>A3</sub>	4	7	1
OP <sub>B1</sub>	2	2	4
OP <sub>B2</sub>	1	4	2

<표 4> 가동률, 적재 및 하역 시간

기 계	가동률(%)	적재 시간	하역 시간
기계 1	100	2	1
기계 2	100	2	1
기계 3	100	2	1

<표 5> 기계간 이동시간

부터 까지	준비 장소	기계 1	기계 2	기계 3
준비 장소	0	1	1	1
기계 1	1	0	1	2
기계 2	1	1	0	1
기계 3	1	2	1	0

본 절의 스케줄링 알고리즘에 따라서 먼저 선행 작업이 없는 작업 그룹(OP<sub>A1</sub>, OP<sub>B1</sub>)과 선행 작업이 있는 작업 그룹(OP<sub>A2</sub>, OP<sub>A3</sub>, OP<sub>B2</sub>)으로 구분하고 선행 작업이 없는 그룹에서 한 작업 OP<sub>A1</sub>을 선택한다. 작업을 할당할 때 먼저 기계별 준비 시간은 기계 1, 기계 2, 기계 3은 모두가 3으로써 같다. 한편 기계별 처리 소요시간을 계산하면 기계 1, 기계 2, 기계 3에서 각각 3, 2, 4시간이 되므로 기계 2에 OP<sub>A1</sub>을 할당한다. 기계별 현재 작업 예상 완료 시각과 선행 작업이 없는 그룹과 있는 그룹의 작업을 갱신한다. 그리고 할당해야 할 작업이 있는지 점검하여 만일 있으면 위의 과정을 반복하고 없으면 makespan을 계산한다. 이와 같은 과정을 통해 작업을 기계에 할당할 경우 기계 수행 완료 시각은 기계1은 6시간 단위, 기계 2는 9시간 단위, 기계 3은 13시간 단위가 된다. 따라서 부품 A와 부품B를 가공하는데 소요되는 생산 시간은 13시간 단위가 된다. [그림 8]은 SCHED\_HOL에 의해 결정된 스케줄링의 결과를 나타낸다.

[그림 8]에서 정해진 순서에 따라 작업이 수행되지만 시스템의 상황이 급작스럽게 변할 수 있다. 이때 스케줄러는 즉각 상황의 변화에 대처해 나가게 되는데 작업 OP<sub>A2</sub>를 수행하는 중에 시각 6에서 기계 2가 갑작스럽게 정지하여 그 작업을 다른 기계에서 수행해야 한다고 가정한다. 시각 6에서 사고가 발생하면 이미 계획된 작업들 중에서 아직 기계에 로딩되지 않은 것들에 대해 기계1과 기계 3은 새롭게 협상을 한다.

먼저 OP<sub>A2</sub>를 언제까지 수행 완료할 수 있는지 검토한 후 스케줄러에게 그 결과를 제시하게 되고 스케줄러는 가장 빨리 수행 완료할 수 있는 기계에

작업을 할당한다. 작업  $OP_{A2}$ 를 기계에 할당한 후  $OP_{A3}$ 를 이어서 할당한다. 이렇게 새롭게 스케줄링 된 결과를 [그림 9]에 제시한다.

시간	기계 1	기계 2	기계 3
1	$OP_{B1}$ ↑	$OP_{A1}$ ↑	
2	↓	↓	
3			
4			
5			
6	$OP_{B2}$ ↓	$OP_{A2}$ ↑	
7		↓	
8			
9			
10			$OP_{A3}$ ↑
11			
12			↓
13			

[그림 8] SCHED\_HOL에 의해 결정된 스케줄링의 결과

시간	기계 1	기계 2	기계 3
1	$OP_{B1}$ ↑	$OP_{A1}$ ↑	
2	↓	↓	
3			
4			
5			
6	$OP_{B2}$ ↓	$OP_{A2}$ ↓	
7	$OP_{A2}$ ↓		
8			
9			
10	$OP_{A3}$ ↑		
11	↓		
12			
13			

[그림 9] 새롭게 스케줄링 된 결과

### 5. 결 론

본 연구에서는 자율 분산된 기계가공시스템을 위한 홀로닉 생산시스템의 제어 모델 및 효율적 운영 방법을 다루었다. 시스템 운영을 위한 홀론들을 구성하여 자율 분산된 생산시스템을 모델링하였으며 홀론간의 협상을 중재할 수 있는 평가함수를 이용하여 주문에 대한 작업 선정과 스케줄링을 수행

하는 절차를 제안하였다. 그리고 품질 수준을 고려하여 주문 제품의 생산을 위한 작업의 종류의 선정 및 할당 절차를 제시하였다. 또한 작업 할당 문제에 대하여 수치 예제를 만들어 제시하였는데 본 연구에서 제시한 자율 분산 시스템의 효율적인 운영을 위하여 홀론간의 정보 교환이 가능하도록 네트워크 환경하에서 분산시스템의 운영에 대한 연구가 심도 있게 이루어질 필요가 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] 강맹규, 「불확실성하에서의 의사결정론」, 희중당, 1996.
- [2] 노형민, 박면용, 이충수, 박병태, 손영태, 이무성, 「밀링 공정설계 시스템 개발」, 제1차년도 연차 기술 보고서, 한국과학기술연구원, 1993.
- [3] 문장석, 박진우, 장성용, “자치적 객체들간의 Bidding을 통한 FMS생산 현장 통제에 관한 연구”, 「93추계학술발표대회 논문집」, 대한산업공학회(1993), pp.38-47.
- [4] 이영해, 김정, “홀로닉 생산시스템의 개요 및 연구 방향”, 「제어 자동화 시스템공학회지」, 제3권, 제1호(1997), pp.33-40.
- [5] Agre, J.R., G. Elsley, D. McFarlane, J. Cheng and B. Gunn, “Holon Control of a Water Cooling System for a Steel Rod Mill,” *Proc. of 4th Inter. Conference on CIM and Automation Technology*, NY, Oct. 1994, pp.134-141.
- [6] Dilts, D.M., N.P. Boyd and H.H. Whorms, “The Evolution of Control Architectures for Automated Manufacturing Systems,” *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.10, No.1(1991), pp.79-93.
- [7] Duffie, N.A., R. Chitturi and J.I. Mou, “Fault-tolerant Heterarchical Control of Heterogeneous Manufacturing System Entities,” *Journal of Manufacturing Systems*,

- Vol.7(1988), No.4, pp.315-327.
- [8] Iwata, K., M. Onosato and M. Koike, "Random Manufacturing System : a New Concept of Manufacturing Systems for Production to Order," *Annals of the CIRP*, Vol. 43(1994), No.1, pp.379-383.
- [9] Kidd, P.T. *Agile Manufacturing : Forging New Frontiers*, Addison-Wesley, 1994.
- [10] Ramaswamy, S.E. and S. Joshi, "Distributed Control of Automated Manufacturing Systems," *Proceedings of 4th International Conference on CIM and Automation Technology*, New York, October 1994, pp.411-420.
- [11] Tonshoff, H.K., M. Winkler and J.C. Aurich, "Product Modeling for Holonic Manufacturing Systems," *Proceedings of 4th Inter. Conference on CIM and Automation Technology*, NY, Oct. 1994, pp.121-127.
- [12] Valckenaers, P., F. Bonneville, H. V. Brussel, L. Bongaerts and J. Wyns, "Results of the Holonic Control System Benchmark at KULeuven," *Proceedings of 4th Inter. Conference on CIM and Automation Technology*, NY, October 1994, pp.128-133.
- [13] Valckennaers, P. and H. Van Brussel, "Holonic Manufacturing Systems : Technical Overview," Technical Report, Katholieke Univ. Leuven, Division PMA Belgium, December 1995.