

홀로닉 생산 시스템의 스케줄링 알고리즘

김 정, 이영해
한양대학교 산업공학과

Abstract

고객의 수요가 매우 다양해지고 제조 산업에서의 인건비 비중이 더욱 높아짐에 따라 기존의 생산 시스템은 새로운 변화를 요구하고 있다. 소 품종 대량생산 시스템이나 유연 생산 시스템 등을 위해 개발되어 온 대부분의 생산 계획은 off-line 상에서 시스템의 모든 요소들이 정상적이라는 가정 하에서 수립되었다. 이로 인해서 기계가 갑작스럽게 정지하거나 공구의 이상 현상 등이 발생하여 기 수립된 계획에 따라 작업을 지속하기 힘든 경우가 생길 수 있다. 다양해지는 고객의 요구를 만족시키기 위하여 생산 시스템은 제어 측면에서 고기능화 되어 가고 있다. 따라서 이러한 생산 시스템의 운영을 위해 적절한 기법이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 자율 기계들로 구성된 홀로닉 생산 시스템의 운영을 위한 스케줄링 알고리즘을 제시한다.

1. Introduction

제조기술과 컴퓨터의 발달은 유연한 자동 생산 시스템의 출현을 가능하게 하였다. 소비자들의 기호의 변화에 따른 급작스런 제품 모델의 대체와 신속한 생산을 통한 납기 만족은 오늘날의 생산 시스템에서 매우 중요한 관심이 된다[5][9]. 이에 따라서 생산 시스템은 고기능화, 자율화 및 분산화 등의 매우 고도로 발달된 시스템으로 진보되고 있다[2][14]. 그런데 이와 더불어 하드웨어를 적절히 통제하여 생산 시스템이 제 기능을 발휘할 수 있도록 도와주는 적절한 소프트웨어의 기술 개발이 요구되고 있다.

생산 시스템의 효율적인 운영을 위해서는 적절한 스케줄링 및 공정 계획을 수립하는 것이 매우 중요한데 오늘날의 진보적인 생산 시스템의 운영을 위해 전통적인 방법에 의한 계획을 수립하는 것으로는 만족스런 결과를 기대하기가 매우 어렵게 되었다. 전통적인 스케줄링 방법은 주로 기계의 상태가 정상이고 각 기계에서 부품을 처리하는 시간이 일정하며 공구의 마모에 따른 가공 시간의 변동은 없는 것으로 가정하여, off-line으로 생산 스케줄링을 한다[11]. 그래서 작업중에 갑작스런 기계의 고장이나 공구의 마모에 따른 생산량이 기대하는 수준에 미치지 못하는 경우, 또는 공구가 부러짐으로써 작업이 멈추어야 할 때, 이미 세워놓은 스케줄링 및 공정 계획은 변경될 수 있다. 또한 때로는 전혀 의미 없는 것으로 되어 버릴 수도 있다. 선형 작업이 있는 경우나 시스템 내에 기계의 용량이 매우 한정적일 때, 또한 이 밖에도 여러 종류의 제약 조건들을 만족시키기 위한 생산의 통제와 생산 계획 및 공정

계획의 수립을 위해 최근 이슈가 되고 있는 홀로닉 개념을 적용할 수 있다[10]. 홀론(Holon)이라는 개념은 생물학 심리학, 그리고 사회과학 등 여러 과학 분야 일반적 개념으로부터 유래된다[1].

J.R. Agre 등은 Steel을 만들어 내는 water cooling system에 홀로닉 개념을 적용하였다[4]. 또한 Valckenaers 등은 제어시스템에 홀로닉 개념을 적용하여 기존의 계층적 제어 시스템(Hierarchical control system)과 수평적 제어 시스템(Heterarchical control system)으로 Holonic control system과 비교하였다[7]. Luh는 이제까지 연구해 온 스케줄링에 홀로닉 개념을 적용시키고자 시도하였다[8]. Tonshoff 등은 제품 설계에 홀로닉 개념을 적용하였다[3]. 일본 전자공업진흥협회에서는 미래의 공장시스템(Future Factory System: FFS)의 개념 및 그 평가 방법에 대한 검토를 하고 있다[13]. 1988년 3월의 보고서에서 제안한 홀로닉 인테그레이션(Holonic Integration)의 개념에 따라 미래의 생산 시스템을 생각하는데 있어 중요한 시사를 한다.

국내에서도 미래의 생산 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이들은 수평적 구조와 계층적 구조와 비교하여 홀로닉 제조 시스템에 대한 개념을 소개하였다[14].

홀로닉 생산 시스템(Holonic System)은 계층적 시스템과 수평적 시스템의 장점을 취하여 개발된 새로운 시스템이다[10]. 홀로닉 시스템은 먼저 off-line으로 짜여진 스케줄을 어드바이시로서 생각하며 스케줄러가 제시하는 것에 충실하려고 한다. 그러나 시스템의 목표를 추구해 나가는 과정에서 이상이 발생하여 스케줄러가 제시하는 것에 따라 작업을 수행할 수 없을 경우나 스케줄러가 제시하는 해가 명백히 지역적인 최적해라고 판단될 때에는 협상과 협력을 통해 보다 건설적인 해를 찾아가게 된다. 이로써 시스템에 이상이 발생할 경우, 그 이상 요인에 대해 민감하게 대처하게 된다.

홀로닉 생산 시스템이 이러한 기능을 갖도록 하려면 홀론을 효과적으로 구성하는 것이 필요하다.

2. 생산 시스템의 구성

본 연구에서 대상으로 삼고 있는 생산 시스템의 개략도를 Fig.1에 나타낸다. 여러 대의 기계들이 시스템 내에 있다. 기계들은 공구 베겨진 것을 갖고 있어서 다양한 종류의 작업(Operation)을 처리할 수 있다. 기계의 작업 처리능력은 기계의 종류마다 다를 수 있는데 사용하는 공구의 상태나 기계 노후화 등에 의해서도 달라질 수 있다. 또한 한 부품을 위한 작업을 완성하기 위해 필요한 경우 다른 기계로 옮겨 수행할 수 있으므로

작업 경로가 수시로 달라질 수도 있다.

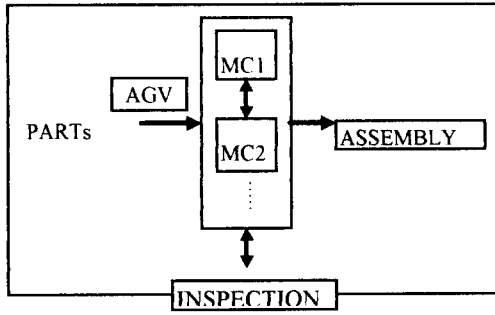


Fig.1 생산 시스템의 개략도

스케줄링을 위해서는 생산 시스템의 운영에 영향을 주는 요소들에 대해서 흐름을 구성하고 각 흐름들이 의사소통을 하면서 시스템 전체 목표를 위해 협력하고 협상하게 하는 것이 필요하다.

생산 시스템에 한 주문이 들어오게 되면 주문을 구성하는 부품의 종류를 결정하고 각 부품을 가공하는데 요구되는 공정 계획과 일정 계획이 수립되어야 하는데 부품의 가공을 위해 필요한 오퍼레이션의 종류, 부품 가공을 위한 재료의 종류, 선행 제약, 품질의 수준 등 공정 계획(Process Plan)은 이미 수립되었다고 가정한다. 본 연구에서는 생산 시스템의 환경이 동적으로 변화되는 상황들에서 일정 계획을 수립한다.

소비자로부터 제품 생산에 대한 요청이 있을 시, 제품을 위해 요구되는 가공 부품을 선정해야 하는데 부품의 종류에 따른 재료, 가공 방법, 요구 품질의 수준 등이 다를 수 있다.

생산 시스템은 9개의 요소들로 구성되며 각 요소들은 해당 정보를 관리하며 필요 시 다른 요소들과 정보를 상호 교환하면서 시스템 공동의 목표를 수행해 나간다. PRODUCT는 현재 생산 시스템의 상황을 고려하여 주문을 받아들이는 역할을 수행한다. 생산 시스템에서 생산이 어려운 제품의 주문은 받아들이지 않게 되는데 이를 위해 납기일과 가격을 고려한다. PART는 PRODUCT로부터 전달 받은 제품을 구성하는 부품들의 종류를 결정 후, MACHINING, MATERIAL, SETUP 그리고 QUALITY에 통보한다. MATERIAL에서 부품 가공을 위한 재료를, MACHINING에서 오퍼레이션의 종류를, QUALITY에서 오퍼레이션에 요구되는 품질의 수준을 결정하고, SETUP에서는 재료를 팔레트 위에 고정시키는 방법을 결정한다. 이렇게 결정된 사항들은 AGV와 MACHINE에게 전달되어 오퍼레이션을 수행하게 된다.

3. 홀로닉 생산 시스템 스케줄링

스케줄링 문제는 오퍼레이션들을 기계에 할당하는 문제이다. 기계가 오퍼레이션을 할당 받기 위해 기계간에 협상을 진행해야 한다. 기계간의 협상을 통해 시스템의 목표에 가장 적절하다고 판단되는 기계에 오퍼레이션을 할당하게 되

며 이로써 기계별 오퍼레이션의 수행 순서가 결정된다.

한 오퍼레이션이 시스템에 들어 오면 각 기계들은 자신의 현재 상태와 가동율을 참고하여 오퍼레이션 수행 가능 시간을 계산한다. 그리고 오퍼레이션 수행을 위한 준비 시간을 계산하여 그 오퍼레이션을 언제까지 수행 완료할 수 있는지 계산한다. 이러한 일련의 계산 과정이 각 기계마다 진행된다. 기계의 상태와 가동율, 오퍼레이션의 수행을 위한 재료나 부품의 이동 소요 시간 등은 시간에 따라 변하게 되는데 각 기계가 오퍼레이션 수행 완료 시각을 계산할 때에는 이러한 변화들을 모두 반영하여 정보들을 갱신해간다. 따라서 각각의 기계들은 환경 등의 변화에 능동적으로 대처해 가면서 자신의 목표를 이루어 간다. 이러한 성질을 갖는 객체 즉, 환경 등의 변화에 자율적으로 적응해 나가면서 시스템 공동의 목표 수행을 위해 다른 객체들과 협상하며 자신의 목표를 수행해 나가는 것을 흐름이라고 하였다.

부품의 가공을 위해 필요한 오퍼레이션의 종류를 결정 후, 시스템이 여러 상황을 고려하여 오퍼레이션들을 적절한 기계에 할당해야 한다. 스케줄링을 위해 변수를 다음과 같이 정의한다. 먼저 부품 p의 오퍼레이션 i를 기계 k에서 수행한 후, 이어서 부품 q의 오퍼레이션 j를 기계 l에서 수행할 때의 소요 시간을 식(1)과 같이 나타낸다.

$$mpkplqij = o_{qij} \quad (1)$$

여기서 o_{qij} 는 부품 q의 오퍼레이션 j를 기계 l에서 수행할 때 예상되는 작업 시간으로 기계가 정상적으로 가동될 경우의 시간이다.

또한 오퍼레이션의 선행 제약을 식(2)와 같이 나타낸다.

$$pc_{kplqij} = r \quad (2)$$

부품 p의 오퍼레이션 i를 기계 k에서 수행한 후, 부품 q의 오퍼레이션 j를 기계 l에서 수행할 때, 부품 p의 오퍼레이션 i가 부품 q의 오퍼레이션 j 이전에 반드시 처리해야 할 선행 작업이 되면 r의 값은 1, 오퍼레이션 j가 i보다 먼저 처리되어야 하면 0이 된다.

오퍼레이션을 기계에 할당할 경우 기계의 고장 여부를 고려해야 한다. 기계가 고장나 있음에도 불구하고 오퍼레이션을 할당할 시 많은 문제가 생길 수 있는데 기계의 고장 여부에 대한 정보를 식(3)과 같이 나타낸다.

$$mb_{kplqij} = a_i \quad (3)$$

부품 p의 오퍼레이션 i를 기계 k에서 수행한 후, 부품 q의 오퍼레이션 j를 기계 l에서 수행하려고 할 때 기계 l의 상태를 나타내는 것으로써 a_i 의 값은 기계가 영구 고장인 경우에는 0의 값을 갖게 되고 그렇지 않은 경우에는 1의 값을 갖는다.

기계 고장이 발생하면 생산 담당자는 기계 수리를 담당하는 부서에 통보해 주어야 한다. 수리 부서에서는 기계 수리를 위해 필요한 시간을 예측하여 이를 생산 담당자에게 알려주어야 한다.

기계 고장을 수리하는 시간을 식(4)에 나타낸다.

$$mr_{kpiqj} = rc_i \quad (4)$$

rc_i 는 부품 p 의 오퍼레이션 i 를 기계 k 에서 수행한 후, 부품 q 의 오퍼레이션 j 를 기계 l 에서 수행하려고 할 때 기계 l 이 고장난 경우 수리를 하는데 요구되는 예상 시간이다.

기계 고장은 아니지만 기계 자체의 이상 혹은 물의 마모 등으로 인해 기계를 정상적으로 가동하기가 쉽지 않은 경우가 생길 수 있다. 스케줄러는 이러한 현장의 상황을 고려하여 오퍼레이션을 기계에 할당해야 한다. 기계 가동율을 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$ma_{kpiqj} = b_i \quad (5)$$

여기서 b_i 는 부품 p 의 오퍼레이션 i 를 기계 k 에서 수행한 후, 부품 q 의 오퍼레이션 j 를 기계 l 에서 수행할 때, 기계 l 의 현재 가동율을 나타낸다.

부품 가공을 위해 재료나 재공품을 정해진 기계에 운반할 때 운반 시간을 식(6)과 같이 나타낸다.

$$mr_{kpiqj} = tr_{kl} \quad (6)$$

여기서 tr_{kl} 은 기계 k 에서 기계 l 까지 재료나 재공품을 운반할 때 요구되는 시간이다.

임의의 기계에서 오퍼레이션을 수행한 후, 이어서 다른 기계로 옮겨 오퍼레이션을 수행할 때 작업물을 내리고(unloadin), 다른 기계에 올리는(loading) 일을 요구한다. 작업물의 unloading 및 loading을 위해 필요한 시간을 식(7) 및 식(8)에 각각 나타낸다.

$$mu_{kpiqj} = ut_k \quad (7)$$

$$ml_{kpiqj} = lt_l \quad (8)$$

여기서 ut_k 는 기계 k 에서 오퍼레이션을 수행한 후 작업물을 내릴 때 소요되는 시간을 의미하며 lt_l 는 작업물을 기계 l 에 올릴 때 요구되는 시간을 의미한다.

식(1)부터 식(8)까지 중에서 한 기계의 가동 및 생산성에 관련된 것은 식(1), (3), (4) 그리고 (5)이므로 실제 기계가 오퍼레이션을 수행하기 위해 필요로 하는 시간을 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$rmp_{kpiqj} = mb_{kpiqj} * \{ (mp_{kpiqj} / ma_{kpiqj}) + mr_{kpiqj} \} \quad (9)$$

한편 기계를 교체하여 오퍼레이션을 수행할 때 운반 및 준비에 관련된 것은 식(6), (7) 그리고 (8)이므로 기계를 교체하여 오퍼레이션을 수행할 필요가 발생할 때, 오퍼레이션 수행을 위해 식(9)에 나타낸 시간 이외에 식(10)에 나타낸 시간이 추가로 요구된다.

$$mct_{kpiqj} = ml_{kpiqj} + mu_{kpiqj} + ml_{kpiqj} \quad (10)$$

따라서 기계 k 에서 부품 p 의 오퍼레이션 i 를 수행한 후, 기계 l 에서 부품 q 의 오퍼레이션 j 를 수행할 때 소요되는 총 시간은 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$pt_{kpiqj} = rmp_{kpiqj} + mct_{kpiqj} \quad (11)$$

따라서 오퍼레이션을 기계에 할당할 때 식(11)의 총 오퍼레이션 수행 시간과 식(2)의 오퍼레이션별 선행 관계를 고려하여 전체 오퍼레이션 수행 완료 시간이 최소가 되도록 하여야 생산성을 극대화 할 수 있다. 그런데 일반적인 스케줄링

문제는 NP-Hard 문제로 알려져 있어서 기계에 할당할 오퍼레이션의 수에 따라 해를 구하는 계산량이 지수적으로 증가하게 된다[6]. 따라서 소비자의 다양한 요구의 변화에 민첩하게 대처해야 하는 오늘날 생산 시스템의 운영을 위해서는 적합하지 않다. Fig.2는 오퍼레이션을 기계에 할당하는 일을 기계 간의 협상을 통해 실현되는 스케줄링 알고리즘에 대한 흐름도를 나타낸다.

제품에 대한 생산 주문을 받게 되면 제품을 구성하는 부품의 종류를 결정한 후, 소요 부품의 가공을 위해 필요한 오퍼레이션의 종류를 결정하게 된다. 결정된 오퍼레이션은 각 기계에 할당되는데 이러한 일련의 스케줄링을 위해 다음과 같은 내용들이 이루어지게 된다.

단계 1. 선행 작업이 있는 경우와 없는 경우로 구분하여 선행 작업이 없는 오퍼레이션을 적절한 기계에 우선 할당한다(Fig.2에서 op_{qj} 는 할당할 오퍼레이션 qj 를 의미함).

단계 2. 기계는 오퍼레이션을 할당 받기 위해 자신의 현재 작업 상태를 점검한다. 작업을 하고 있으면 그 일이 언제 끝나게 되는지 파악한다(Fig.4에서 m_i, ck 는 기계 i 에서 현재 진행중인 오퍼레이션을 완료하는 시각임).

단계 3. 기계는 오퍼레이션이 자신에게 할당될 경우 그 오퍼레이션의 수행을 위한 준비 시간(식(10) 참조), 즉 오퍼레이션 op_{qj} 를 위한 부품의 재료나 재공품을 기계 k 에서 기계 l 에 이송하는데 걸리는 시간(식(6)의 mr_{kpiqj})과 현재 기계 m_i 에서 다른 오퍼레이션이 수행중에 있을 시, op_{pi} 를 오퍼레이션이 완료되면 언로딩시키고 오퍼레이션 op_{qj} 를 로딩시키는 시간을 파악한다(식(7)의 mu_{kpiqj} 과 식(8)의 ml_{kpiqj}).

단계 4. 기계는 오퍼레이션을 할당 받아 수행할 경우 그 오퍼레이션에 대한 예상 수행 소요시간을 계산한다. 오퍼레이션 op_{qj} 를 기계 m_l 에서 수행하는데 요구되는 시간은 식(9)의 rmp_{kpiqj} 의 값이 된다.

단계 5. 기계는 또한 오퍼레이션에 대한 예상 수행 완료 시각을 계산한다. 오퍼레이션의 수행 완료 시각은 오퍼레이션을 수행하기 시작하는 시각에 작업 준비시간을 더해 주어야 한다. 또한 선행작업이 있을 시 이를 완료하는 시각을 함께 고려해야 하는데 이는 식(12)와 같이 계산된다.

$$op_{qj}, m_l, ck = \max \{ m_l, ck, (op_{qj} \text{의 선행작업 완료시각} + rmp_{kpiqj}) + rmp_{kpiqj} \} \quad (12)$$

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

단계 7. 모든 오퍼레이션들이 기계에 할당되었으면 $make\ span$ (가장 늦은 오퍼레이션 수행 완료시각)을 구하고 오퍼레이션 할당 작업을 마친다. 그렇지 않으면 단계 1을 반복한다.

위의 단계 1부터 단계 7까지의 과정을 Fig. 2에 나타낸다.

기계별 오퍼레이션 수행이 완료되면 각 기계별로 성취한 결과들에 대하여 자료화하여 기계의 교체 등의 참고 자료로 사용할 수 있다.

또한 기계의 가동율이 저하되거나 시스템의 상태가 정상적이지 못한 경우 기계는 MANAGER에게 자신의 상황을 신속히 보고하여 조치가 가능하게

하며 오퍼레이션을 할당받을 시 참고 자료로 사용되게 한다.

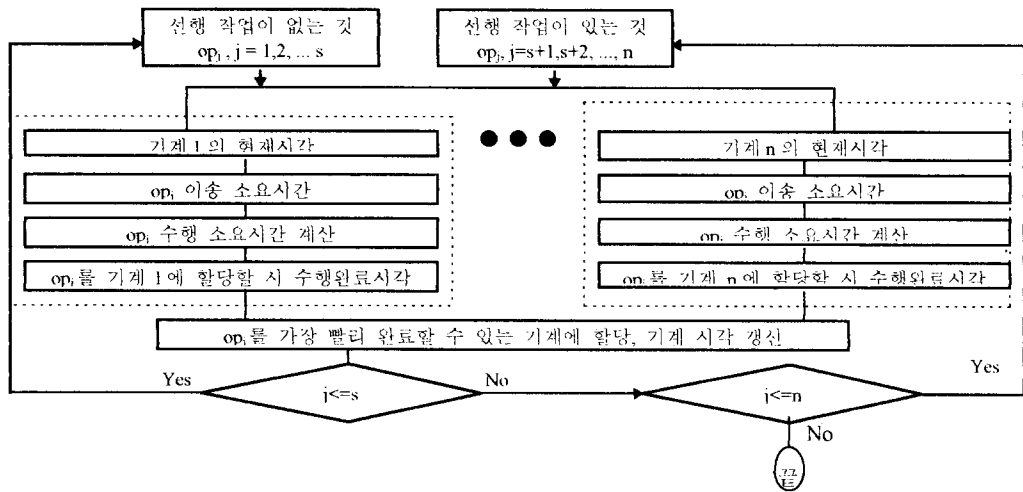


Fig. 2 홀로닉 생산 시스템 스케줄링 알고리즘

5. 결론

기존의 전통적인 방법에 의한 스케줄링 및 공정계획의 산출은 시스템 환경의 변동이나 제품모델링의 변경 등에 민감하게 대처하지 못했다. 그런데 미래의 생산 시스템은 소비자 기호의 다양화에 따른 다품종 소량 생산체제를 갖추지 않으면 안된다. 본 연구에서는 홀로닉 생산 시스템에 적용될 수 있는 스케줄링 기법을 홀로닉 개념을 이용하여 제시하였다. 연구를 통해서 얻어지게 되는 결과들은 차세대 생산 시스템에 적합한 스케줄링 및 공정 계획 기법으로서 역할을 충실히 감당할 것으로 사료된다. 또한 시스템을 구성하는 요소들이 소비자의 욕구를 만족시키기 위해 자율화, 협력화 및 분산화 되어 전체 시스템의 목표를 이루어 나가는데 있어서 이를 만족시키는 소프트웨어의 개발에 크게 기여할 것으로 또한 사료된다.

6. 참고문헌

[1] A. Koestler. *The GHOST in the MACHINE*. Arkana Books, 1967
 [2] D.M. Dilts, N.P. Boyd and H.H. Whorms. "The Evolution of Control Architectures for Automated Manufacturing Systems", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 10, No. 1, 79-93, 1991
 [3] H.K. Tonshoff, M. Winkler and J.C. Aurich, "Product Modelling for Holonic Manufacturing Systems", *Proc. of 4th Intl. Conf. on CIM and Automation Technology*, Oct. 11-12, Troy, New York, 121-127, 1994
 [4] J.R. Agre, G. Elsley, D. McFarlane, J. Cheng and B. Gunn, "Holonic Control of a Water Cooling System for a Steel Rod Mill", *Proc. of 4th Intl. Conf. on CIM and Automation Technology*, Oct. 11-12, Troy, New York, 134-141, 1994
 [5] K. Iwata, M. Onosato and M. Koike, "Random Manufacturing System: a New Concept of Manufacturing

Systems for Production to Order". *Annals of the CIRP*, Vol. 43, No. 1, 379-383, 1994
 [6] M. Pinedo. *Scheduling Theory, Algorithms, and Systems*, Prentice Hall, 1995.
 [7] N.A. Duffie, R. Chitturi and J.I. Mou. "Fault-tolerant Heterarchical Control of Heterogeneous Manufacturing System Entities". *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 7, No. 4, 1988
 [8] P.B. Luh and L.Gou, "Holonic Manufacturing Systems", *NSF Design and Manufacturing Proceedings of Grantees Conference*, Albuquerque, NM, Jan. 1996.
 [9] P. T. Kidd. *Agile Manufacturing : Forging New Frontiers*. Addison-Wesley, 1994
 [10] P. Valckenaers, F. Bonneville, H. V. Brussel, L. Bongaerts and J. Wyns, "Results of the Holonic Control System Benchmark at KULeuven", *Proc. of 4th Intl. Conf. on CIM and Automation Technology*, Oct. 11-12, Troy, New York, 128-133, 1994
 [11] S.E. Ramaswamy and S. Joshi, "Distributed Control of Automated Manufacturing Systems", *Proceedings of 4th Intl. Conf. on CIM and Automation Technology*, Oct. 11-12, Troy, New York, 411-420, 1994
 [12] Y. W. Wan. "Which is better off line or Real time scheduling?", *International Journal of Production Research*, 33, 7, 2053-2059, 1996.
 [13] 日本電子工業振興協會, *フ・チャ・ファクトリシステム (FFS) に関する調査研究報告書 VI*, 1988
 [14] 이영해, 이용수, 전성진. "홀로닉 생산 시스템을 위한 일정 계획 모델", 95추계학술대회논문집, 701-706, 한국정밀공학회, 서울, 1995.11.18.
 [15] 이영해 역, *CIM / FA 사전*, 도서출판 기술, 1993