종합병원 외래약국을 위한 자동 물류 취급 시스템의 설계 및 실시간 운용

김종원, 우중원

서울대학교 기계설계학과

1. 머리말

물류 취급시스템은 그 중요성에도 불구하고 오랜 기간 동안 생산시스템에 대한 연구의 대상에서 제외되어 왔었다. 물류취급시스템에 대한 분석의 어려움이 그 이유중의 하나이기도 하지만, 물류취급시스템을 생산체계의 핵심인 생산공정에 종속되는 하위의 시스템으로 파악했던 전통적인 과거의 관점으로 인하여 물류시스템에 대한 관리가 불필요한 것으로 간주된데에도 그 이유가 있었다. 과거의 물류취급시스템에 대한 인식은, 공급된 물류를 생산 부로 이동하는 부분만이었으며, 그 이후의 가공공정간의 물류이동은 물류취급시스템의 영역밖에 해당하는 것이었다.

그러나 자동화 시스템의 개발로 말미암아 물류취급시스템에 대한 관심이 증가되었고, 현재는 생산체계에 있어서 생산공정 못지않게 중요한 역할을 담당하고 있는 것으로 인식되기에 이르렀다. 통합된 생산체계에 있어서의 물류취급시스템은 "적절한 양의 올바른 물류를 올바른 장소, 시간에 적절한 순서로 적합한 조건하에 적절한 비용으로 제공하는 적절한 방법" 으로 정의되어 진다. 즉 물류취급시스템은 독립된 보관장소로부터 생산부까지의 물류이동뿐만이 아니라, 생산체계내의 각 가공셀들간의 물류이동과 온라인 임시보관장소의 역할까지 담당하여, 생산체계내의 여러 구성부분들의 경계선을 이어주는 역할을 담당하는 생산체계의 통합자인 것이다.

본 글에서는, 무인운반차 (AGV : Automated Guided Vehicle), 자동창고(AS/RS : Automated Storage/Retrieval System), 콘베이어시스템, 바코드시스템등의 자동물류취급시스템을 응용하여, 극단적인 다품종소량생산체제의 납기단축효과와 가동효율을 어떻게 향상시킬 수 있는지를 저자들이 직접주도하여 설계, 설치, 가동중인 사례를 통하여 실증적으로 밝혀보고자 한다.

2. 문제정의

일반적으로, 다품종소량생산체제의 생산시스템은 아래와 같이 구성된다고 가정할 수 있다.

(1) 생산공정은 N개의 공정군으로 이루어지며, i번째 공정군 P_i에는 m_i개의 기계가 생산라인에 존재한다 $(1 \le i \le N)$

(2) 각 공정군의 기계배치는 임의로 변경가능하며, 공정군과 기계들의 최적배치는 초기에는 알지 못한다고 가정한다. 단, 물류의 투입공정과 검사공정의 위치는 고정되어 있으며, 기계간의 거리와 공정군간의 위치에도 제한사항이 존재한다.

(3) 검사공정 P_{N-1}과 출고공정 P_{N+2}사이에는 출고지연을 감안한 일시저장 버퍼스테이션이 존재한다.

(4) 생산제품은 최대 M개의 종류의 제품으로 이루어지며 제 j번째 종류$(1 \le j \le M)$의 제품의 생산량은 x_j개이다. 각 제품별 요구공정은 투입공정 P_0로 시작하며, 임의의 순서 및 갯수의 공정군 $P_i(1 \le i \le N)$들을 거쳐서, 검사공정 P_{N+1}에서 종료되며, 각 공정군 (P_0, P_{N+1}포함)에서 소요되는 시간은 각 제품별로 다르다.

위와 같이 가정되는 생산시스템에 적합한 물류취급시스템을 설계, 설치하기 위하여 해결해야 할 문제들은 다음과 같다. 물류취급시스템의 기본배치도는 그림1과 같다.

(1) 생산제품군 PG(j : x)에 대한 생산공정군의 최적배치안 OFP(P : m)을 결정하는 문제.

(2) 최적배치안 OFP(P : m)에 대해서 AGV를 사용할 경우, 생산제품군 PG(j : x)에 대한 AGV속도분포 $V_{AGV}(P)$와 로트의 크기에 대한 가동률 WR_{AGV}의 관계

를 결정하여 문제에 적합한 AGV의 속도분포와 운반 로트크기를 결정하는 문제.

(3) 주어진 AGV조건과 생산제품군 PG(j:x)에 대해서, P_0로부터 P_{N+1}까지 제품생산 Lead-Time분포 PL(j:x)와 투입공정 P_0에서 재공량분포 $QP_0(t)$를 예측하는 문제.

(4) 일시저장 버퍼스테이션을 스텍커크레인이 부착된 AS/RS로 설계할 경우, 검사공정 P_{N+1}에서의 완제품 완성싯점 $T_i(j:x)$와 출고공정 P_{N+2}에서의 출고싯점 $T_0(j:x)$차이에 대한 AS/RS의 버퍼의 크기를 결정하는 문제.

(5) 검사공정 P_{N+1}에서의 완제품 완성률 $PR_i(j:x)$와 출고공정 P_{N+2}에서의 출고싯점 $PR_0(j:x)$차이에 대한 스텍커크레인의 이송속도 V_{ASRS}와 AS/RS의 전단의 재공량분포$Q_{ASRS}(t)$의 관계를 예측하는 문제.

(6) 작업지시 (P_0) 부터 출고완료 (P_{N+2})까지의 전체 Lead-Time분포 TPL(j:x)를 분석하는 문제.

그러면, 위에서 언급된 바와 같은 물류취급시스템의 설계 및 설치문제를 해결하기 위하여, 어떠한 방법을 사용할 수 있는 것인지를 적합한 사례를 예를 들어서 알아보기로 한다.

3. 자동물류취급시스템의 도입필요성

생산시스템에서 물류취급시스템이 적절히 고려되지 않았을 때 발생하는 문제점은 물류이동의 정체에 따른 리드타임 증가이며, 이것은 품종이 다양화 될수록 더욱 큰 문제를 유발한다. 물류이동의 정체는 간접인원의 투입을 유발하며, 회사전체의 고정비용을 증가시키고, 궁극적으로 제조업의 경쟁력을 감소시킨다. 그러나, 아직도 물류취급시스템의 자동화에 대하여 근본적인 검토를 시작하지 않고 있는 제조업체가 많이 있다. 이것은 점점 온도가 올라가고 있는 물속에서 헤엄치고 있는 개구리처럼, 다품종화되고 있는 시장환경속에서 적극적으로 대처방안을 찾지 않고 있는 것과 같다.

A라는 소재가 컨베이어1을 통해서 운반되어 기계P에서 가공되어서 B라는 제품이 된 후, 다시 컨베이어2를 통해서 반출된다고 하자. 기계P에서 가공되는 속도에 맞추어서 컨베이어1위에 소재A를 하나씩 투입한다고 했을 때, 이 생산시스템의 직접생산성은 당연히 기계P의 가공속도에 의해서 결정되지만, 소재 A가 투입되어 제품 B가 반출되기까지의 리드 타임은 컨베이어 1, 2의 길이와 속도에 의해서 결정된다. 컴퓨터통합생산(CIM : Computer Integrated Manufacturing)에서 추구하는 비지네스 스피드 향상을 위해서는 상위레벨에서의 생산관리 합리화와 하위레벨에서의 물류취급시스템 자동화를 추진하지 않으면 안된다.

우리가 일상생활에서 쉽게 접할 수 있는 사례의 하나로서, 종합병원의 외래약국을 들 수 있다. 하루에 약 1,000~1,500종류의 처방전이 외래약국에 집중되며, 각 처방전은 환자마다 작성되기 때문에 서로 다르다. 이것은 제조공장에서의 작업명령서와 같다. 외래약국 안에는 조제공정에 따라서, 정제수동포장, 정제자동포장, 계수조제, 물약포장, 소아약포장, 연고 및 외용제포장등으로 구분되며, 처방전마다 거쳐야 되는 공정이 다르다. 예를 들면, 내과에서 처방된 경우는 정제자동포장을 거쳐서 물약포장에서 완성되는 약도 있으며, 단순히 정제수동포장을 거치면 되는 약도 있다. 여기서 포장이라고 함은, 예를 들어서, A약병에서 알약을 2개씩 꺼내고, B약병에서 알약을 1개씩 꺼내어, 그 조합을 40개 약봉지에 나누어 담는 공정을 의미한다. 즉, 일종의 분류조립공정이라고 할 수 있다.

이에 따른 당연한, 결과로서, 각 처방전에 따라서 조제되는 시간보다는 각 공정에서 대기하는 시간이 많아져서, 리드타임이 증가하고, 그결과 환자들이 외래약국앞에서 오랜 시간동안 투약대기해야하는 문제를 유발하고 있다.

그림 2는 강남성모병원에서 현재처리하고 있는 처방전의 30일간의 변화량으로서 일일 평균 1080건에 이르고, 월요일의 경우는 하루 1400건의 처방전을 처리하고 있으며, 연간 증가추세에 있다. 그림 3은 하루동안 외래약국에 투입되는 처방전의 변화를 보여주는 것으로서, 오전 11시대와 오후 3시대에 투입량이 각각 최대가 된다. 이것은 오전과 오후로 나뉘어서 의사의 진료가 끝난 후, 외래약국으로 투입되는 처방전이 갑자기 집중되는 것을 의미한다. 이에 따라서, 개선전의 시간대별 평균 투약시간은 그림 4와 같이 평균60분, 최대 4시간이 소요되었으며, 약사들은 약사들대로 그림5에서와 같이 공정과 공정사이의 조제재공약의 운반을 담담하였으므로, 조제업무이외에 불필요한 동선이 많이 발생하였다. 한편, 투약구에서는 조제완료되어 투약대기중인 조제약이 평균 200종류가 적체되어, 약사 3명이 한쪽에서는 투약번호대로 분류하고, 다른쪽에서는 환자에게 투약하고, 또 다른쪽에서는 즉시 찾아가지 않는 조제약을 정리하는 데 시간을 많이 투입하고 있었다.

4. 자동물류취급시스템의 도입

이상에서 살펴본 바와 같이, 강남성모병원의 외래약국은 극단적인 다품종 소량생산체제가 필연적으로 겪게 마련인 극심한 물류이동의 정체에 따라서, 납기 지연에 따른 환자들의 투약대기시간 증가와 약사들의 간접업무 투입(조제재공약 운반, 조제완료약 분류 및 투약)이라는 비효율적인 결과를 피할 수 없었다. 이것은 대부분의 종합병원 외래약국에서 발생하고 있는 현상이며, 배치 생산을 하고 있는 제조업이 품종다양화 및 납기단축의 시장환경에서 공통으로 당면하고 있는 현상이다.

이를 해결하기 위하여, 그림 6과 같이 강남성모병원 외래

약국을 개조하였다. 즉, 약사들에 의한 조제재공약운반을 없애기 위해서, 외래약국환경에 맞는 소형 무인운반시스템(AGV : 사진1 참조)을 기구부, 제어부포함하여 완전자체개발하여 설치하였으며, 조제완료약의 분류, 보관, 투약작업의 효율개선을 위하여 가장 적합한 소형 무인창고(AS/RS : 사진2 참조)를 완전자체개발하여 설치하고, 바코드 시스템과 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 운용시스템을 구축하였다.

5. 자동 물류 취급 시스템의 설계 및 모델링

강남성모병원 외래약국의 경우, 자동물류취급시스템 설치 이후의, 각 처방전이 조제되어 투약되기까지의 개괄적인 흐름은 다음과 같다. 각 처방전은 수납창구에서 에어슈트를 통해서 외래약국으로 전달되어 투입공정인 작업분배과정을 거쳐서 각 가공군으로 AGV를 통해서 전달된다. 각 가공군에서는 전달된 처방전에 의하여 약을 가공하고 약제조에 대한 검사를 마친 뒤 다음 가공이 요구되는 가공군으로 AGV를 통하여 약을 전달한다. 모든 가공을 마치고 검사공정으로 전달된 약은 최종검사자에 의하여 약의 크기에 맞는 운반용기에 담겨져서 AS/RS로 전달된다. AS/RS에서는 약이 투약이 요구된 약인지를 확인하여 출고를 하거나, 투약이 요구될 때까지 창고에 보관을 하게된다.

이상과 같이 작업이 이루어지는 외래약국의 경우는 다품종소량생산형태에 가까운 복잡한 생산시스템이므로, 복잡한 정보를 처리할 수 있는 Colored페트리네트[1]와 실시간이산현상시스템을 해석하기 위한 Timed 페트리네트[2]의 특성을 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 Colored and Timed 페트리네트[3]에 확률의 개념을 도입한 Colored and Stochastic페트리네트[4]를 이용하여 모델링을 수행하였다. 본 시스템에서의 상태들과 사건들을 정의하면 페트리네트의 플레이스와 트랜지션들을 구성할 수 있으며 이를 이용한 시뮬레이션을 통하여 AGV와 AS/RS의 설계변수를 결정하였다. 참고로 AGV부분에 대한 페트리네트모델을 그림 7에 도시하였다 .

AGV에 관계된 설계변수는 적절한 AGV의 속도 V_{AGV}와 AGV에 의하여 한번에 이송되는 약의 일괄작업의 갯수의 2가지이다. 업무가 일괄처리될 경우 그렇지 않았을 때보다 평균대기시간이 길어진다는 것은 대기이론(queueing theory)분야에서 이미 밝혀진 바 있다 [5]. 그러나 본 시스템과 같은 경우 AGV속도의 한계로 인해 일괄처리가 되지 않을 경우 물류의 정체가 AGV에서 발생하게 된다. 또한 일괄처리갯수가 너무 커지면 일괄처리를 대기하는 과정에서 물류가 정체하게 되므로 적절한 일괄처리의 갯수를 결정할 필요가 있다. 일괄처리갯수는 AGV의 속도에 관계되는 양이므로 독립적으로 결정할 수가 없다. 본 시스템에서는 다음과 같은 알고리즘을 이용하여 AGV의 속도와 일괄처리갯수를 결정하였다.

(1) 실현 가능한 AGV의 최대처리속도와 AS/RS의 최대처리속도를 이용하여 평균투약대기시간을 최소로 하는 적절한 일괄처리갯수를 결정한다.

(2) 이와 같이 결정된 AGV의 일괄처리갯수에 대하여 AGV의 속도를 변화시키며 AGV처리속도의 타당성을 확인한다.

위의 절차에 대하여 페트리네트를 이용하여 시뮬레이션을 한 결과 일괄 처리 갯수가 4개일 때 평균대기시간이 최소로 나타났으며 이를 그림8에 나타내었다. 일괄처리갯수 4개인 경우에 대해서 AGV의 처리속도를 변화시키면서 시뮬레이션을 수행한 결과 AGV의 처리속도가 증가함에 따라 평균대기시간은 현저하게 줄어들다가 100 m/min 이상이 되면 평균대기시간의 변화가 경미한 것으로 나타났다. 이로부터 AGV의 처리속도는 100m/min가 적당하다는 것을 알 수 있다.

이상과 같이 결정된 AGV의 처리속도와 일괄작업갯수에 대하여 AS/RS의 처리속도를 변화시키며 시뮬레이션을 수행하여 적절한 AS/RS의 처리속도를 결정한다. AS/RS 처리속도변화에 대한 평균대기시간의 변화를 그림 10에 나타내었으며 이로부터 AS/RS의 스택커 크레인의 속도가 20m/min이상이어야 한다는 것을 알 수 있다. 본 시스템에서는 40m/min의 스택커 크레인 속도를 선택하였다.

6. 시스템 설치 및 운용결과

강남성모병원의 자동물류취급시스템은 1대의 AGV와 1대의 소형 AS/RS, 이들을 이어주는 콘베이어 벨트들, 물류의 이동을 점검하기 위한 5대의 바코드터미널과 1대의 Host PC로 구성되어 있다. 각 가공군은 직선운동을 하는 AGV에의해 연결이 되며 검사공정과 AS/RS, AS/RS와 출고공정은 콘베이어 벨트에 의해 연결이 된다. AGV와 AS/RS의 제어는 각각 독립적으로 이루어지며 AS/RS의 운용, 각 물류의 이동에 대한 점검과 AS/RS에서의 물류식별은 바코드 터미널과 연결된 Host PC에 의하여 이루어진다. 이상의 자동물류취급시스템의 구성도를 그림 11에 나타내었으며 Host PC의 운용 S/W의 구조도를 그림 12에 나타내었다.

자동물류취급시스템의 가동은 1993년 7월 10일부터 시작되어 현재 운용중에 있으며 1993년 11월에 측정된 한달간의 시간별 투약대기시간을 각각 그림 13에 나타내었다. 투약대기시간을 자동물류취급시스템이 설치되기 전인 1991년 5월과 비교하면 일일당 평균 처방전 매수는 1080개에서 1217개로 12.6%가 증가하였으나 평균투약대기시간은 58분에서 34분으로 41%정도 감소한 것으로 나타났으며 최대투약대기시간또한 240분에서 114분으로 53%정도 감소한 것으로 나타났다.

시뮬레이션으로 예측한 결과를 실제결과와 비교하기 위하여 시뮬레이션으로 얻은 시간별 AGV가동률을 측정된 가동률과 함께 그림 14에 나타내었으며 AS/RS의 시뮬레이션 가동률과 측정된 가동률을 그림 15에 나타내었다. 이 경우 시뮬레이션의 조건을 시스템의 설치전과 달라진 실제의 조건에 근사시키기 위하여 물류입력, 즉 처방전의 발생빈도에 일정한 가중치를 주어 실제물류입력갯수와 비슷한 1230개로 조정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 가동률의 비교에서 알 수 있듯이 AS/RS의 가동률의 경향과 수치는 실제상황과 유사하게 나타났으나 AGV의 가동률은 시뮬레이션 예측결과가 실제의 가동률과 비교시 경향은 유사하지만 수치가 비교적 높게 나타났다. 이는 실제 AGV의 물류운반량이 정해진 일괄작업갯수보다 많은 경우가 빈번하며, 또한 조제실내의 물류운반이 전적으로 AGV에 의존하지 않고 근무 약사들의 손에 의하여 운반되는 경우가 자주 발생하기 때문인 것으로 분석된다. 실례로서 시뮬레이션시 AGV의 물류운반량은 일괄처리갯수4개로 고정되어 있으나 실제로는 4개를 초과하여 많게는 20개까지의 약을 동시에 운반하는 경우가 많이 발생한다. 또한 조제중인 약사들이 약이 조제되는 데로 AGV를 이용하지 않고 손으로 직접 전달하는 경우 역시 자주 발생한다.

시뮬레이션을 통하여 예측된 시간별 평균 투약 대기시간과 측정된 시간별 평균 투약 대기시간을 비교하여 그림 13에 나타내었으며 전체평균투약시간과 최대투약시간을 표 1에 나타내었다.

표 1. 시뮬레이션 결과와 실제 측정치의 투약대기시간 비교.

	시뮬레이션 결과	1993년 11월의 측정치
일평균 처방전 매수	1,230개	1,217개
평균 투약 대기 시간	25분 24초	34분 16초
최대 투약 대기 시간	115분 48초	113분 58초

시뮬레이션의 시간별 투약대기시간에 대한 통계치는 오전 9 : 30부터 오후 6 : 30사이에 조제된 약만을 대상으로 통계를 냈는데 그 이유는 일괄작업의 갯수가 고정된 시뮬레이션의 경우 처방전의 도착시간간격이 매우 길은 8 : 30부터 9 : 30사이는 실제와는 달리 일괄작업을 기다리는 시간이 비현실적으로 길어지므로 실제측정치와의 비교가 의미가 없기 때문이다. 또한 이 시간간격에 발생하는 처방전의 갯수는 전체 조제된 약의 갯수에비해 매우 적으므로 전체결과에 거의 영향을 끼치지 않는다.

시간별 투약대기시간을 비교해보면 시뮬레이션 결과와 실제 측정치가 대체로 비슷한 경향을 보이고 있으나 시뮬레이션 결과의 투약대기시간이 전체적으로 작게 나타나고 있고 전체투약대기시간을 비교하면 평균투약대기시간에서 약10분정도의 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이는 시뮬레이션에 사용된 공정별 소요시간에 실제에서 일어나는 인적인 지연 요인이 제외되었다는 데에서 이유를 찾을 수 있다.

7. 맺음말

본 글에서는 자동물류취급시스템을 설치하여 극단적인 다품종소량생산시스템을 모델링하고 분석하여 설계변수들을 결정하는 틀을 설명하였으며, 이에 의해 설치되어진 자동물류취급시스템의 실례를 들어서 자동물류취급시스템이 납기단축과 간접공수절감에 얼마나 효율적인가를 보였다.

본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 다양한 정보처리와 실시간 이산현상시스템의 해석 및 검증을 위하여 Colored and Stochastic 페트리네트를 정의하고 이를 이용하여 자동물류취급시스템이 설치되어진 생산시스템에 대한 모델링을 수행하였다.

(2) Colored and Stochastic페트리네트 모델에 대한 시뮬레이션을 수행하는 소프트웨어를 개발하여 주어진 모델의 성능평가를 수행하였다.

(3) 자동물류취급시스템의 설계변수를 결정하는 알고리즘을 제시하였으며 이에 의거한 시뮬레이션을 통하여 적절한 설계변수를 결정하였다.

(4) 자동물류취급시스템이 설치되어진 생산시스템을 대상으로 모델과 설계변수의 타당성을 검증하였다.

참고문헌

[1] H. Genrich. and K. Lautenbach., "System modeling with high level petri nets", Theoretical Computer Science 13, pp. 109－136.

[2] C. Ramchandani, "Analysis of asynchronous concurrent systems using timed petri nets", Ph.D Dissertation, Department of Electrical Engineering, MIT, Cambridge, Massachusetts, 1974.

[3] 김 기범, 페트리네트를 이용한 유연생산 시스템에 관한 연구, 서울대학교 박사학위 논문, 1993.

[4] 우 종원, 자동물류취급시스템의 설계 및 실시간 운용에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문, 1994.

[5] Cooper RB. Introduction to queueing theory, 2nd Ed. New York, NY, North Holland, pp. 200－242 1981.

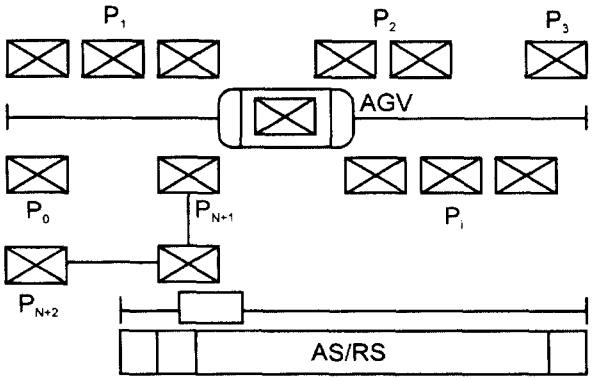


그림 1. 물류취급시스템의 기본 배치도.

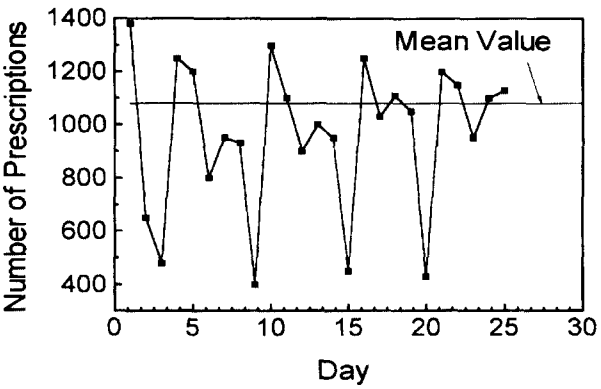


그림 2. 강남성모병원 외래약국의
일별 처방전 처리매수 변화량.

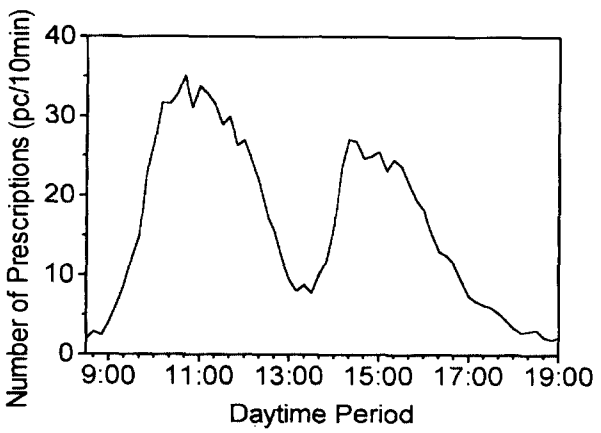


그림 3. 강남성모병원 외래약국의
일일 처방전 투입량 변화 곡선.

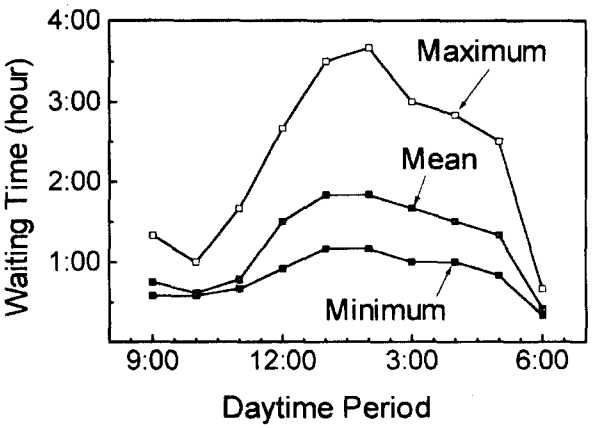


그림 4. 개선 전의 강남성모병원
외래약국에서의 투약대기시간.

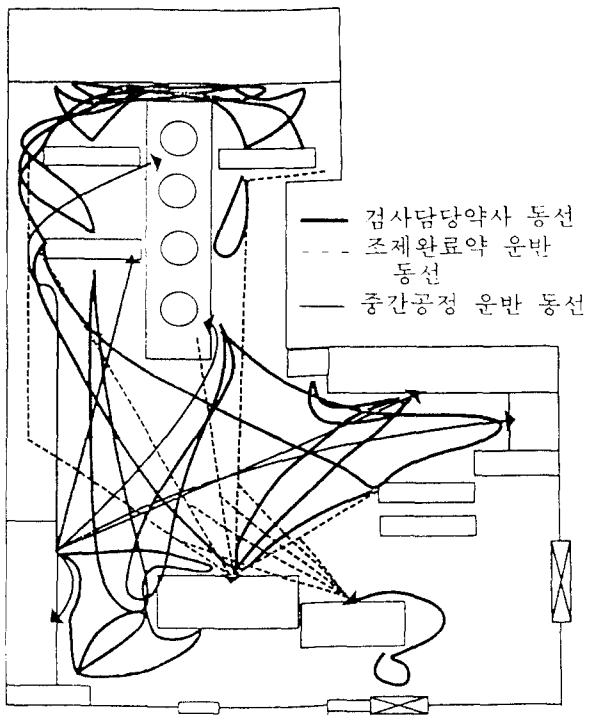


그림 5. 개선 전의 강남성모병원 외래약국 설비
배치도 및 약사들 동선 분석도.

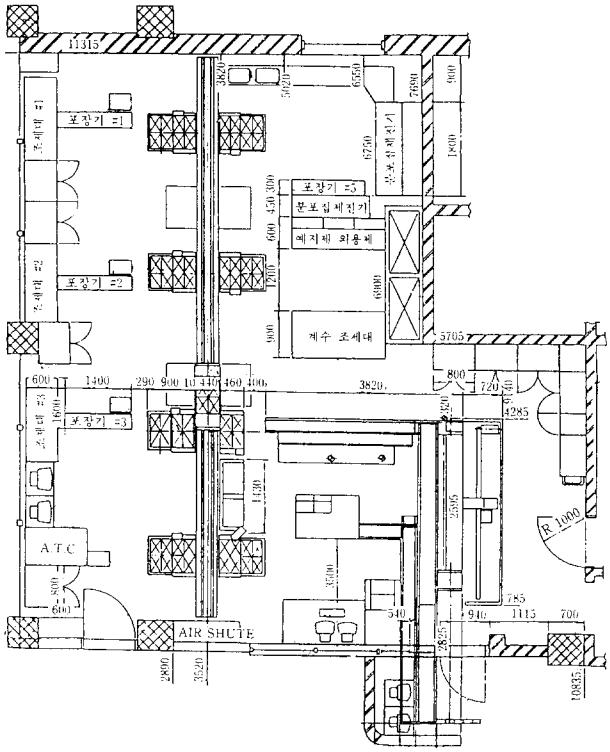


그림 6. 개선 후의 강남성모병원 외래약국 조제실 배치도.

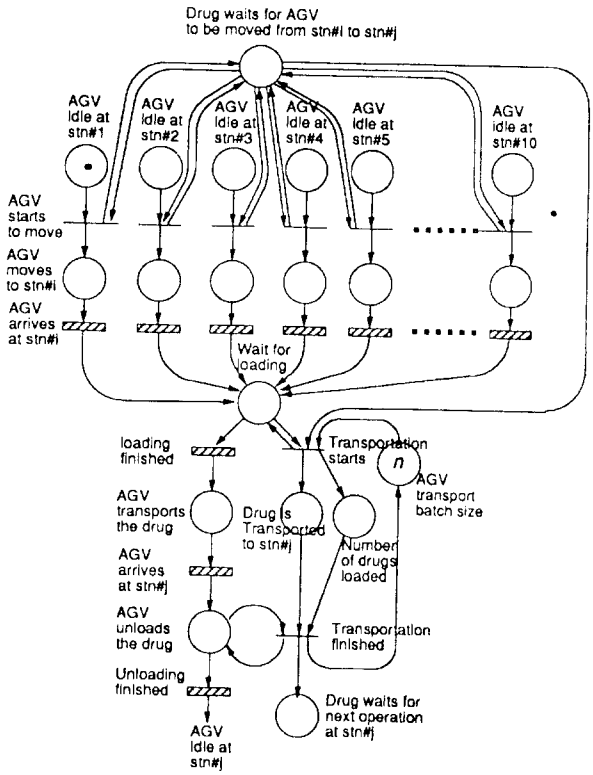


그림 7. 무인 운반차의 페트리 네트 모델.

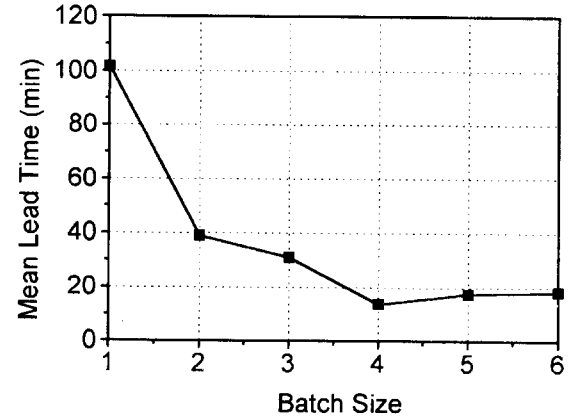


그림 8. 일괄처리객수에 따른 투약대기시간.

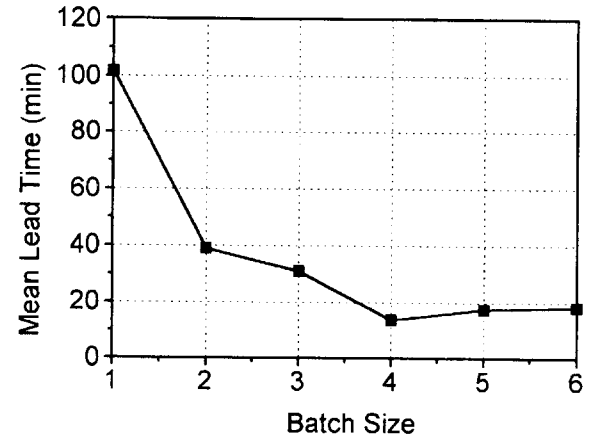


그림 9. 무인운반차 처리속도에 따른 투약대기시간.

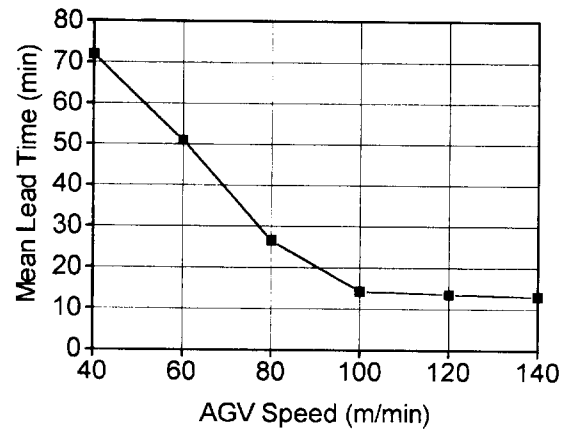


그림 10. 자동창고 처리속도에 따른 투약대기시간.

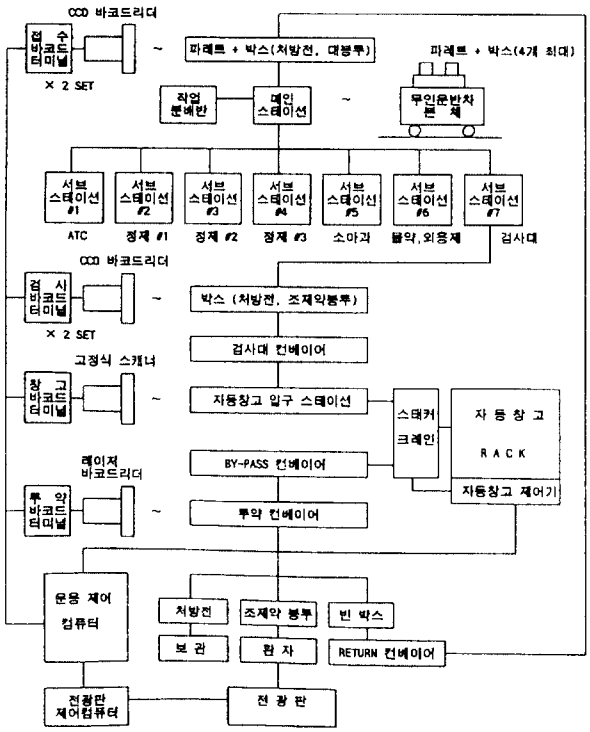


그림 11. 강남성모병원 외래약국의
자동물류취급시스템 구성도.

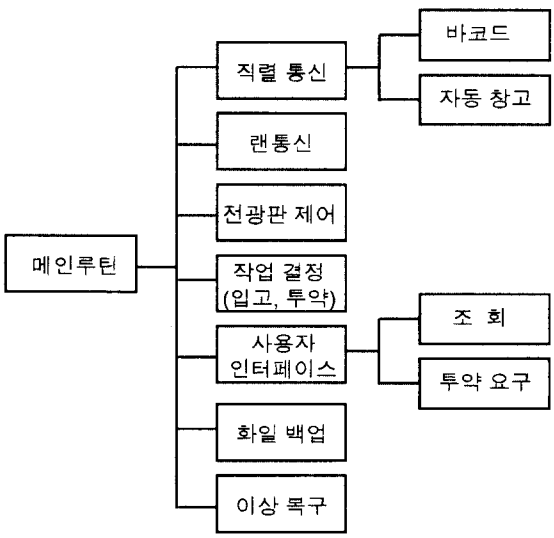


그림 12. 운용소프트웨어 구조도.

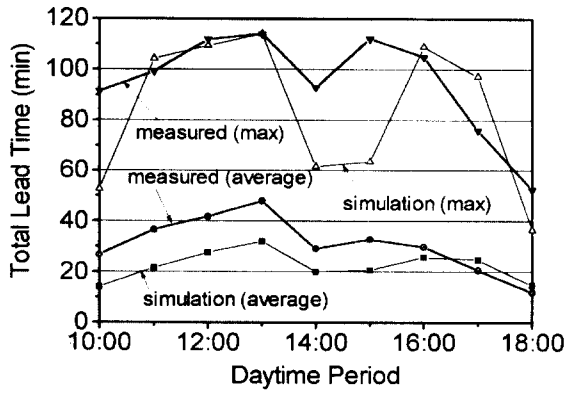


그림 13. 개선 후의 시간별 투약대기시간.

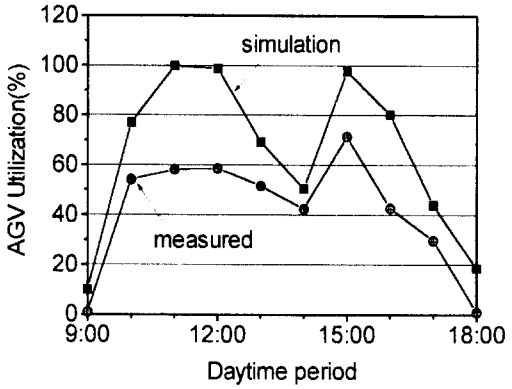


그림 14. 시뮬레이션과 실제측정치의
무인운반차 가동률 비교.

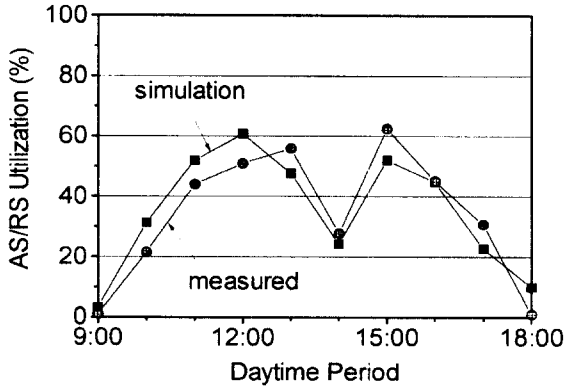


그림 15. 시뮬레이션과 실제측정치의
자동창고 가동률 비교.

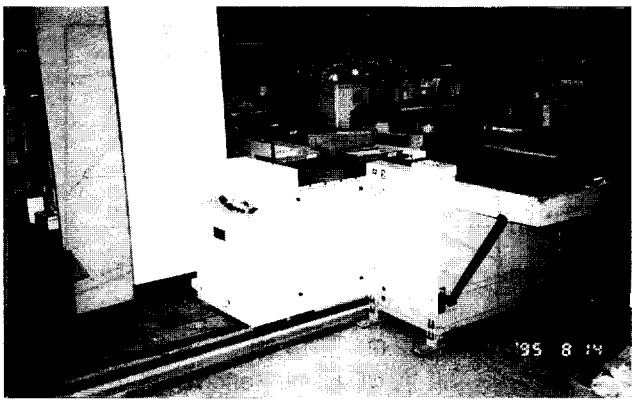


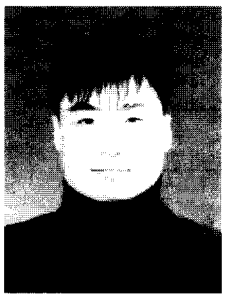
사진 1. 강남성모병원 외래약국용 무인운반차.

사진 2. 강남성모병원 외래약국용 자동창고.

저 자 소 개

김 종 원

서울대학교 기계설계학과 조교수
1955년생
서울대학교 기계공학과 학사
한국과학원 기계공학과 석사
University of Wisconsin-Madison 기계공학과 박사
주소 : 서울 관악구 신림동 산 56－1 기계설계학과, 151-742
TEL : (02) 880-7138 / FAX : (02) 883-1513
Email : mejwkim@asri.snu.ac.kr.



우 중 원

서울대학교 대학원 박사과정
1969년생
서울대학교 기계설계학과 학사
서울대학교 기계설계학과 석사
서울대학교 기계설계학과 박사과정수료
주소 : 서울 관악구 신림동 산 56-1 기계설계학과, 151-742
TEL : (02) 880-7144 / FAX : (02) 872-2729
Email : woo · macea.snu.ac.kr.