

Critical Path 기법을 이용한 자동화 시스템의 공정 최적화 사례 연구

Process Optimization of an Automated System Using Critical Path Method

이 승 연*, 강 길 순*, 장 종 태*, 유 준*

* 충남대학교 전자공학과 (전화: (042) 821-7710, 팩스: (042) 823-5436, E-mail : lsyacts@cnu.ac.kr)

요약 : 본 논문에서는 주어진 자동화 시스템에 대하여 Critical Path 기법을 적용한 최적화 연구를 수행하였다. 탄약 운반 자동화 시스템에 대하여 공정순서와 시간개념이 들어간 Timed Petri-Net을 이용한 이산사건 공정모델을 구축하였으며, 이를 기초로 초기조건 및 제약조건을 고려하여 제약탐색기법을 이용하여 Critical Path를 찾고 여유 공정을 산출함으로써 공정 시간 최적화를 수행하였다.

Keywords : Process Optimization, Automated System, Timed Petri-Net, Critical Path

1. 서 론

오래전부터 인간은 좋은 것과 나쁜 것을 판단하고, 이들을 개량하고 변경하는 방법을 경험으로 익혀왔다. 더 나은 것과 더 좋은 것을 찾으려는 끊임없는 욕구와 노력은 무엇이 최적인지를 기술하고, 여기에 도달하려는 수많은 연구를 가능케 하여 그 결과 최적화의 이론적 토대가 정립되게 되었다. 특히 오늘날 자동화 시스템은 컴퓨터의 발달로 여러 가지 복잡하고 다양한 기능을 수행할 수 있도록 다수의 하부 시스템 및 제어 요소로 구성된 복잡한 연결 구조를 가지고 있기 때문에 공정 최적화에 관심이 고조되고 있다. 자동화 시스템에서 있어서 공정 최적화 문제는 "주어진 자원을 얼마나 효과적으로 활용하고 있는가?"의 문제로 정의 될 수 있다. 여기서 자원이란 물리적인 요소뿐만 아니라 공정시간, 소모 전력등도 포함된다.

본 연구에서는 공정 최적화 순서를 다음과 같이 설정하였다. 우선 제약 조건 탐색 기법(Constraint Search) 이용하여 최적화된 공정순서를 (시스템의 안정성을 고려한 범위 내에서 공정시간을 최소화 하는 것으로 정의)찾는다. 공정 순서가 결정되면 Critical Path Method (CPM)을 이용하여 현 시스템에서의 Critical Path와 여유 공정을 구분한다. 그리고 Critical Path상의 모터 최적속도 산출을 통한 자원의 최대 활용 및 Cycle Time의 단축, 여유 공정을 활용한 균형 잡힌 전력 소모량 등을 고려하였다. 이를 Flow Chart로 그려 보면 그림 1과 같다.

이러한 최적화 순서로 현재 개발 중에 있는 탄약 운반 자동화 시스템을 대상으로 하여 적용해 보았으며 이를 통해 타당성을 검증할 수 있었다.

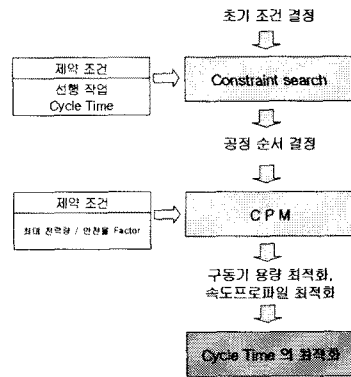


그림 1. 최적화 과정 순서도
Fig 1. Optimization Procedure

II. 자동화 공정 시스템

공정 최적화를 위해서는 먼저 대상이 되는 자동화 시스템에 대한 명확한 이해가 필요하다. 본 연구에서는 대상 시스템으로서 그림 2와 같은 무기체계의 자동화 공정 시스템을 선정하였으며 이 시스템은 크게 기구부와 제어 장치로 나눌 수 있다. 기구부는 적치대, 수평이송기, 수직이송기, 컨베이어로 구성되어 있으며, 각 장치들은 다시 몇 개의 전동기 축과 센서로 이루어져 있다.

자동화 시스템은 적치대에 보관되어 있는 탄들을 컨베이어를 통해 이송하는 공정을 수행하며 이를 위해 각 장치들이 정해진 순서대로 동작을 수행한다.

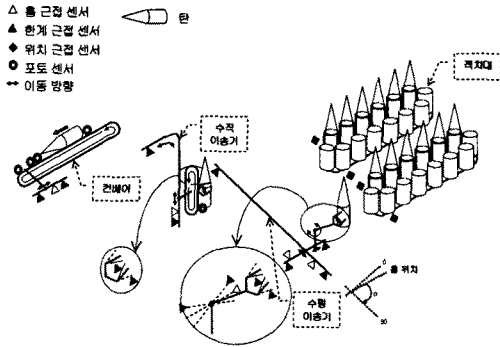


그림 2. 자동화 시스템의 구조

Fig 2. Automated System Structure

수평이송기는 수평 X, 수평 Y, 회전, 그립(Grip)의 네 가지의 축으로 구성되며 이들의 궤적 제어를 통해 탄을 적치대에서 수직이송기로 주거나 받는다. 동작 순서는 먼저 그립 축의 그리퍼(Gripper)가 탄을 잡지한 후 수평 X, 수평 Y, 회전축이 동시에 궤적 제어를 행하여 탄을 목적지까지 전달한 다음에 그립 축으로 탄을 확지한다. 그리고 다시 다음 탄을 이송하기 위해 수평 X, 수평 Y, 회전축이 동시에 궤적 제어를 행하여 원위치로 복귀한다.

수직 이송기는 수직, 회전, 그립의 세 가지의 축으로 구성되며 이들이 정해진 동작을 함으로써 탄을 수평이송기에서 컨베이어로 주거나 받는다. 동작 순서는 그립 축의 그리퍼가 수평이송기의 탄을 잡지한 후에 수직 축에 의해 상승하고 그립 축이 그리퍼를 확지한 후 회전축이 회전하여 체인이 탄을 컨베이어로 이송한다.

컨베이어는 회전과 램머 축으로 구성되며, 동작 순서는 수직이송기로부터 받은 탄을 회전축에 의해 컨베이어를 회전 시켜 컨베이어의 끝에 있는 램머까지 이송시키면 램머가 이를 받아서 전진하여 탄을 목적지까지 밀어낸다. 이러한 시스템에 대한 이해를 바탕으로 공정 최적화를 위해서는 공정을 잘 표현한 모델이 필요하다. 본 연구에서는 공정을 순서대로 나열하고 공정시간을 표현하기 위하여 시간개념이 들어간 Timed Petri-Net 모델을 이용하여 그림 3과 같이 자동화 시스템의 이산시간 공정모델을 구축했다.

III. 최적화 기법 적용

1. 공정순서 최적화

먼저 표1의 초기조건과 표2의 제약조건에 대하여 그림 4 와 같은 constraint search algorithm을 이용하여 공정 순서가 최적화 되어 있는지 확인하였다. 시스템 특성상 경로가 제한되어 있고, 세부 공정 동작 시간이 정해져 있기 때문에 모든 가능 공정 순서에 대해서 시뮬레이션을 수행한 결과 표 3과 같은 결과가 나왔으며 이를 통해 최적화 경로를 찾을 수 있었다.

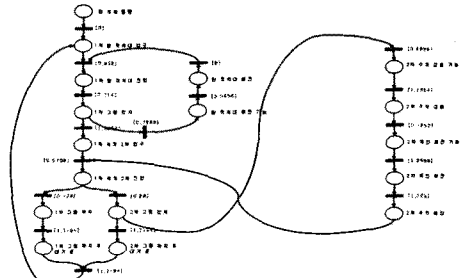


그림 3. 이산사건 공정 모델

Fig 3. Discrete Event Process Model

표 1. 초기 조건

Table 1. Initial conditions

구분	축	초기 상태
1차 이송기	수평 X	탄 적치대 입구 위치
	수평 Y	탄 적치대 입구 위치
	회전	탄 적치대 입구 위치
	그립	확지
2차 이송기	수직	하강
	체인	정지
	그립	확지
탄 적치대	회전	탄 이송 준비 위치
외부 컨베이어	회전	정지

표 2. 제약 조건

Table 2. constraint conditions

1차 이송기	① 탄 적치대 진입	탄 적치대 입구 완료
	② 그립 확지	탄 완료
	③ 2차 입구	탄 적치대 진입 위치
	④ 2차 진입	탄 완료
	⑤ 그립 확지	2차 이송기 수직 하강 위치
	⑥ 그립 확지	2차 그립 확지
2차 이송기	① 탄 적치대 입구	1차 이송기 탄 하강
	② 수직 상승	2차 이송기 그립 확지
	③ 그립 확지	2차 이송기 진입 위치
	④ 체인 회전	2차 그립 확지
	⑤ 수직 하강	2차 상승 위치
	⑥ 회전	1차 이송기 탄 적치대 이완

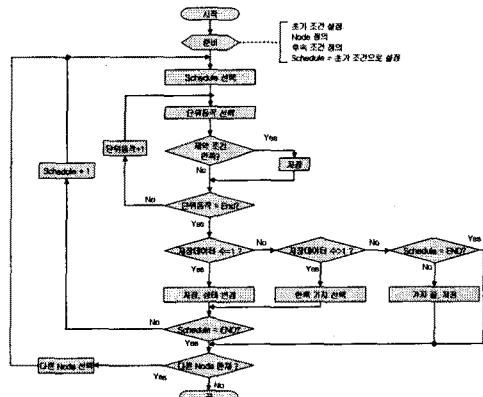


그림 4. 제약 탐색 알고리즘

Fig 4. Constraint Search Algorithm

표 3. 최적화 경로

Table 3. Optimal Path

- *** Tan Transferring Scheduling ***
- 1. Go 1stStack
- 2. Entering 1stStack
- 3. Gate of 2ndTransfer
- 4. Entering 2ndTransfer
- 5. Gripl open and Grip2 grip
- 6. 2ndTransfer Vertical up
- 7. Grip 2 Open
- 8. 2nd chain rotating
- 9. Output conveyor rotations

2. 공정 시간(Cycle Time) 최적화

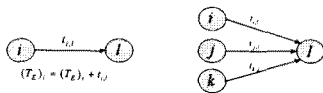
CPM를 사용하는 이유는 프로젝트를 구성하는 각 분야를 보다 세분화된 작업으로 분할하여 작업의 순서, 소요기간, 기타 제반사항들을 네트워크 형태로 표시함으로써 일차적으로 주 공정 및 여유 공정을 산출하여 중점관리 대상작업을 명확히 하고, 전체적인 작업일정을 세분화함으로써 공기지연의 사전예방, 공기 시간 단축 등의 효율적인 일정관리를 도모하기 위함이다. 따라서 CPM을 이용하여 Critical Path를 찾고, 여유 공정을 산출함으로써 공정시간의 최적화를 수행해 본다.

CPM에서 사용되는 용어의 정의는 다음과 같다.

(1) 최초 결합점 시간(Earliest Time)

그 결합점에서 시작되는 작업이 가장 빨리 착수할 수 있는 시각으로서, 그 결합점에 이르는 모든 작업이 끝날 시각이다. 따라서 그 결합점까지의 최장경로에 해당하는 거리 또는 소요시간이라고 생각 할 수 있다.

일반적으로 시결합점의 최초 결합점 시각을 0으로 두고, 한 결합점①에 이르는 작업이 하나인 경우는 그 결합점의 최초 결합점 시각 (T_E)에 작업 시간 t_{k1} 을 더하여 그 결합점 1의 최초 결합점 시각으로 정하고, 한 결합 ①에 이르는 작업이 여러 개 있는 경우는 결합점 i 의 최초결합점 시각을 ①, ②, ③ ...의 최초 결합점 시각의 각각에 각 작업 시간 t_{k1} , t_{k2} , t_{k3} , ...을 더한 것의 최대값으로 정한다.



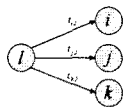
$$(T_j) = \max\{(T_E) + t_{ij}, (T_E) + t_{ij}, (T_E) + t_{ij}, \dots\}$$

그림 5. 최초 시간

Fig 5. Earliest Time

(2) 최지 결합점 시간(Latest Time)

최지 결합점 시각은 종결합점에서의 최지 결합점 시각을 종결합점에서의 최초결합점 시각과 똑같이 정한다. 일반적으로 다음과 같이 정의 된다.



$$(T_i) = \min\{(T_j) - t_{ij}, (T_k) - t_{ik}, (T_j) - t_{ij}, \dots\}$$

그림 6. 최지 시간

Fig 6. Latest Time

(3) Slack (여유 공정)

Slack 은 이벤트가 최저 결합점 시간에서 최초 결합점 시간까지의 차이를 나타낸다. 그러므로 Slack 는 중첩된 동작의 경우 다른 동작과의 여유시간을 의미하기도 한다. 단계 여유가 0이 되는 결합점들을 연결한 것이 critical path이다. 이 critical path 상의 모든 작업은 여유가 없으므로 공정 관리에서 유의해야 할 작업들이다. critical path 는 보통 굵은 선으로 표시한다.

$$Slack = T_L - T_E$$

이를 바탕으로 Arrow Diagram을 그려보면 그림 7과 같다. 굵은 선으로 표시된 부분이 critical path이며 Slack 이 0인 activity들을 연결해 놓은 것이다. 이를 바탕으로 시물레이션을 수행한 결과는 표 4와 같다.

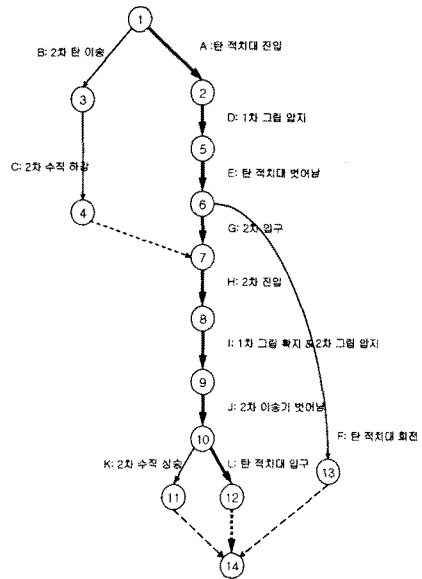


그림 7. 임계 경로

Fig 7. Critical Path

표 4. 시물레이션 결과

Table 4. Result of Simulation

09-19 20:00	Activity	On Critical Path	Earliest Start	Earliest Finish	Latest Start	Latest Finish	Slack (LS-FS)
12:59:50	Name	Path	Time	Start	Finish	Start	Finish
	1A	Yes	0.6458	0	0.6458	0	0.6458
	2B	no	1.2458	0	1.2458	0.2388	1.4854
	3C	no	1.1504	1.2458	2.396	1.4854	2.6358
	4D	Yes	0.2148	0.6458	0.8606	0.6458	0.8606
	5E	Yes	0.5698	0.8606	1.4304	0.8606	1.4304
	6F	no	3.1786	1.4304	4.607	2.0384	5.215
	7G	Yes	1.2054	1.4304	2.6358	1.4304	2.6358
	8H	Yes	0.5688	2.6358	3.2046	2.6358	3.2046
	9I	Yes	0.301	3.2046	3.5056	3.2046	3.5056
	10J	Yes	0.483	3.5056	3.9886	3.5056	3.9886
	11K	no	1.1224	3.9886	5.111	4.0826	5.215
	12L	Yes	1.2264	3.9886	5.215	3.9886	5.215
Project			Completion Time	=	5.22	secs	
Number of Critical Path(s)			=	1			

표 5. 시뮬레이션 결과 분석
Table 5. Analysis of Simulation

탄 보급	5월 6일				
Activity	Stack	설명	속정시간	관련된 모터	비율
A		0 탄 적치대 진입	0.6468	1차 X,Y,R	12.38%
B	0.2398	2차 탄보내	1.2466		
C	0.2398	2차 수직 하강	1.1504		
D		0 1차 그림 잡지	0.2148	1차 그림	4.12%
E		0 탄 적치대 벗어남	0.5688	1차 X,Y,R	10.93%
F	0.608	탄 적치대 회전	3.1766		
G		0 2차 입구	1.2054	1차 X,Y,R	23.11%
H		0 2차 진입	0.5688	1차 X,Y,R	10.91%
I		0 1차 그림확지&2차 그림잡지	0.301	1차 2차 그림	5.77%
J		0 2차 이송기 벗어남	0.483	1차 X,Y,R	9.26%
K	0.104	2차 수직 상승	1.1224		
L		0 탄 적치대 입구	1.2264	1차 X,Y,R	23.52%
총 CT			5.215	Total	100%

Critical Path에 관련된 모터 별로 Critical Path 상에서 차지하는 비율을 표 5에 나타내었다. 1차 이송기의 궤적 제어 부분이 90.11%로 Critical Path 상의 가장 많은 시간을 차지하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 1차 이송기에 관련된 모터의 성능을 개선해야 전체 시스템의 Cycle Time이 줄어들을 수 있다.

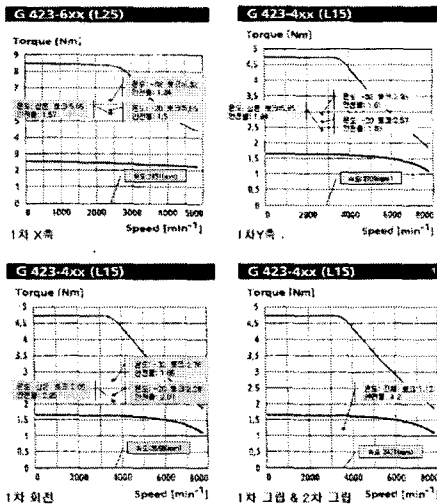


그림 8. 모터 사양
Fig 8. Motor Specification

그림 8은 1차 이송기의 축별 모터에 대하여 속도에 따른 토크를 그래프로 표현한 것이다. 대상 시스템에서 안전율은 상온에서는 1.5 이상, 저온에서는 1.2 이상이 되도록 설계했다. 위의 그래프를 살펴보면, 1차 이송기가 상온의 경우 안전율이 1.57로 여유가 거의 없다. 따라서 1차 X축의 속도를 높이는 것은 안정성 측면에서 불합리하다고 판단되며 Y축의 경우 상온에서의 안전율이 1.94, 1차 회전축의 경우 상온에서의 안전율이 2.25로 각각 0.44, 0.75정도의 여유가 있다. 따라서 X축의 움직임은 적은 대신 Y축과 회전축의 움직임이 많은 L 공정과 G 공정을 줄일 수 있다. L공정과 G 공정에서 중첩도를 고려하면 줄일 수 있는 시간은 각각 0.2398과 0.104이며 총 0.3438 초를 줄일 수 있을 것으로

예상된다.

하지만, 현 공정에서는 L 공정과 G 공정 모두 2차 이송기와 중첩 동작을 가지므로 2차 이송기의 수직/하강의 시간을 각각 0.2398초, 0.104초 느리게 하므로 peak torque를 감소하여 전체 시스템 부하를 감소시키는데 여유시간을 활용할 수 있는 것으로 판단된다.

여기서 또 한 가지 고려해야 할 사항은 위의 실험 데이터는 1번 탄 적치대를 기준으로 한 결과라는 것이다. 1차 이송기가 2차 입구에서 탄 적치대까지의 접근 시간이 1번 적치대의 경우 2.22초, 2번, 3번 탄 적치대일 경우 2.2초, 4번 탄 적치대일 경우 2.5초, 5번 탄 적치대의 경우 3.35초이므로 1번 적치대와 4번, 5번 적치대를 사용할 경우 2차 이송기를 여유 공정 시간만큼 느리게 내려오도록 함으로써 전체 peak torque를 줄이는데 이용할 수 있다.

1차, 2차 그림의 경우 각각 0.2148, 0.301초를 소모하고 있으며 이는 순수하게 그림 잡지 동작을 하는데 소요되는 시간이다. 그림 8에서 보듯이 상온에서 안전율이 4.2로 높다. 그러므로 압시시간을 더 줄일 가능성은 있지만, 탄을 잡는 시간이 줄어들수록 충격량은 더 커지므로 기구를 손상시킬 염려가 있으므로 힘들 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구는 탄약운반 자동화 시스템을 대상으로 최적화를 수행하였다. 최적화는 여러 가지 제약 조건을 만족하는 범위 내에서 주어진 자원을 최대한 활용할 수 있는지의 여부를 확인함으로써 이루어진다.

이를 위해 자동화 시스템의 공정순서와 시간개념이 들어간 Timed Petri-Net를 이용하여 최적화 공정모델을 수립하였고, Constraint Search 기법을 이용하여 공정 순서를 최적화하였으며, 이를 바탕으로 CPM을 이용하여 주 공정과 여유 공정을 분리하고, 제약 조건을 만족하는 범위 내에서 주 공정의 시간을 최대한 단축시켰다. 이런 과정을 통해 탄약 운반 자동화 시스템의 최적화를 수행하였다.

시뮬레이션을 통해 도출된 여유 공정 시간은 이들 시간만큼의 시스템의 자원을 효과적으로 활용하는데 사용될 수 있으며, 공정 시간을 줄이는 대신 시스템의 안정성을 개선하는데 여유 공정 시간을 활용하는 것은 하나의 방안이 될 수 있음을 확인할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] 박승규 외 4인, 다축 동시 제어 시스템 구축 및 기구메카니즘 최적화, 창원대학교, 2002.
- [2] F. S. Hillier, Introduction to Operations Research, McGraw-Hill, 1995.
- [3] Hillier and Lieberman, Introduction to Operations Research Hodden-Day 1980.
- [4] 장중태, 페트리네트를 이용한 RTP 셀의 모델링 및 시뮬레이션 연구, 충남대학교, 1999.
- [5] 유동선, 새로운 OR 원론, 서울 교우사, 1998.