

確定的 週期時間을 갖는 多機種 Line 設備의 最適擔當 機械臺數 決定

Optimal Man-machine Assignment for Sequential Dependent Multi Different Machines Under Deterministic Cycle Time

李 根 熙*

金 鴻 國**

Abstract

This paper is concerned with a man-multi machine assignment problem to minimize idle time. Assuming different types of semi-automatic machines with deterministic service-processing time, the problem approaches by sequential dependent one operator can handle several machines, where determine optimal range the cost of idle labor and machine time is to be minimized in preparing a work schedule.

The Procedure, to establish man-machine assignment model, and it's results are:

- (1) Objective function to minimize opportunity loss cost, which is happened by idle time, is verified recursive process through heuristic method.
- (2) The algorithm, is programmed by BASIC language for personal computer, and a numerical example is given to illustrate the heuristic algorithm.

This study will be helpful to enhance productivity of Shopfloors as a result of increasing the efficiencies of both operator and machine.

1. 서 론

생산설비의 고급화 투자에 따른 자동·반자동 기계의 대체 및 증설에 의해 설비생산성이 증대되는 반면, 그로 말미암은 유효인력의 효과적 활용이 제조원자 절감의 차원에서 고려해야 할 새로운 과제로 대두되고 있는 가운데, 1936년 wright[1]의 간섭이론(Theory of Interference)의 발표된 이후 합리적인 작업자-기계할당(Multi machine-Labor Assignment, MLA)을 위한 많은 연구가 행해져 있다.[2]

자동화된 설비와 그것을 취급하는 작업자 할당문제는, 간섭으로 대표되는 작업자와 기계(자동 또는 반자동 설비군)의 조합(Adjustment machine coupling)에 의해 발생한 유휴시간(Idle Time)의 최소화가 MLA의 중심과제가 된다. 이에 본 연구는 수취급시간과 기계가동시간이 확정적 주기를 갖고 발생하는 반자동 기계설비군의 MLA문제를 다루되, 다수의 서로 다른 기능을 갖는 기계(다기종)가 라인으로 형성되어 일련의 순서에 의해 단계적으로 취급이 발생하는 상황(Sequential dependent)[3]에서, 유휴시간을 비용함수에 반영한 손실비용 최소화의 Heuristic algorithm을 개발하고 그 유효성으로 평가하는데 그 목적을 둔다.

1인의 작업자가 운전·통제·조작하는 적정 기계대수의 산정은, 작업자에게 할당된 기계군의 크기에 의해 야기되는 작업자 및 기계 유휴시간을 일정기간에 발생한 노무코스트와 기계코스트의 손실 비용함수로 처리하여 그 적정범위를 결정하는 과정으로 전개가 가능하다. [9] 일반적으로 너무 많은 기계를 할당하게 되면 작업자효

* 漢陽大學校 工科大學 産業工學科 教授

** 韓國生產性本部 專門委員

접수 : 1988. 5. 31.

울의 향상에 따라 단위당 노무코스트는 감소하게 되나, 기계유희율이 증가하여 단위당 기계코스트는 감소하는 상호 역의 관계를 갖게 되는데, 이러한 현상은 기계를 너무 적게 할당할 경우도 마찬가지로 나타 난다. 따라서 손실비용과 효율의 양자를 모두 만족시킨다는 것은 불가능하며 양자를 어느정도 희생하면서 최적 할당을 고려 하기 위해서는 발견적기법이 요구되는 것이다.

MLA문제에 있어서 발견적 기법을 적용한 예는 Miller와 Berry[4, 5]의 실험분석 해법(Experimental Analysis) 및 분지한계 해법(Branch and Bound Algorithm)에서 볼 수 있다. 그들의 연구는 공정상에 이미 소 요 기계대수가 결정되어 있고, 각각의 기계에 대한 수취급 및 기계가동 시간이 정기적 · 확정적(deterministic)일 때 할당된 인원을 최소화 하는 최적해 알고리즘을 모색한 것이다. 즉, 정해진 기계대수를 몇명의 작업자에게 할당하는 것이 코스트와 효율을 최적의 상태로 유지하는 것인가를 수리모형으로 정립한 것이다.

Miller와 Berry는 그 전제조건으로 동종 또는 다기종의 기계를 각각 독립(기계와 기계간, 또는 가공물의 취 급에 있어서 상호 영향을 미치지 않음을 의미)의 상황으로 전개 하였으나, 현실에 있어서는 특히 기계가공 공 장에서는 제품으로의 가공공정이 일련의 순서에 의해 발생하고 따라서 기계가동과 수취급이 기계간에 종속적 (Sequential dependent)[6]으로 이뤄지므로, 이같은 조건에서 최적담당 기계대수를 결정하는 할당모형이 현실 적으로 요구된다.

본 연구에서는 지금까지 시도되지 않았던 다기종 라인설비에 대한 기계할당 문제에 있어서, 손실비용을 최소 화하는 1인의 담당대수를 결정하는 새로운 모형을 순화과정(recursive process)에 의한 발견적 기법에 의해 구 축하고자 한다.

본 연구와 동일한 모델에 대해 최적해(optimum solution)을 구하는 기법이 아직 제시되어 있지 않으므로 본 연구에서 정립한 모형의 타당성을 평가하기 위해 적용예를 제시하고, 그 결과를 수작업표와 비교 · 검토한다.

2. 다기종 Line설비의 최적담당 대수결정 모형

2.1 전제조건

다기종 Line설비의 최적담당 기계대수결정 문제에 있어서 다음과 같은 기본가정을 전제로 한다.

- (1) 단일 작업자가 서로 다른 기능을 가진 여러대의 반자동기계를 동시에 취급한다.
- (2) 각각의 기계는 가공물 이송순서에 따라 배치되어 있고 작업자의 작업순서도 기계배치순에 따른다.
- (3) 생산공정은 N대의 기계로 구성되며 기계의 고장은 무시한다.
- (4) 가공 중인 job은 가공이 완료될 때까지 기계에서 제거되거나 재취급 하지 않는다(Non Preemptive).
- (5) 수취급 및 기계가공시간은 기계간에 서로 다를 수 있으나 시간치는 결정되어 있다.
- (6) 작업자는 모든 기계에 대하여 동일한 취급능력을 갖는다.
- (7) 기계간의 이동시간은 작업자 수취급시간에 포함시키거나 무시할 수 있다.
- (8) 노무비용(labor cost)은 평균임률을 적용하여 산정한다.
- (9) 기계비용(machine cost)은 기계별로 각기 다를 수 있으며 가동에 따른 제 비용을 고려한다.
- (10) 단위시간당 사이클 수는 담당대수에 따라 변하나 작업개시등에 의해 balancing이 가능하다.

2.2 모형의 설계

전술한 바와 같이 본 연구에서는 작업자 유희시간(Labor Idle Time)과 기계 유희시간(Machine Idle Time)에 의한 조합손실비용을 최소화 하는 기계범위를 구하는 것을 목적으로 하므로, 2.1의 전제조건을 만족하는 목적식을 다음식(1)과 같이 정리할 수 있다.

$$TMIC = \text{Min} \left\{ \frac{C_i}{t} \cdot R_j (T_j - \sum_{i \in S_j} U_i) + \frac{\sum S_i}{t} \cdot R_j [T_j - \text{Max}(U_{i-1} + P_{i-1}, U_i + P_i)] \right\} \dots\dots\dots (1)$$

여기서

TMIC=최적 작업할당 범위의 최소 유희비용(Total Minimum Idle Cost)

N=담당 기계대수

U_i=기계 i(i=1, 2, 3, …, m)에 대한 수취급시간

P_i=기계 i의 가동(자동운전)시간

$\sum_{i \in S_j} U_i$ = 작업자 j에게 할당된 기계 i(i=1,2,3,...,m)에 대한 수취급시간의 합
 t = 단위시간(시간 또는 분 단위)
 T_j = 작업 주기시간 (Cycle Time)
 R_i = 단위시간(t)당 cycle 수
 H = 단위시간(t)당 작업자 유휴시간(Labor Idle Time)
 M = 단위시간(t)당 기계 유휴시간(Machine Idle Time)
 C_i = 단위시간(t)당 노무비(Labor Cost)
 S_i = 단위시간(t)당 기계비(Machine Cost)
 $\sum_{i \in S_j} S_i$ = 작업자 j에게 할당된 기계 i(i=1,2,3,...,m)의 기계비 누적치
 H_c = 단위시간(t)당 유휴노무비(Labor Idle Cost)
 M_c = 단위시간(t)당 유휴기계비(Machine Idle Cost)

$$* \begin{cases}
 TIC = H_c + M_c \\
 T_j = \text{Max}[\sum_{i \in S_j} U_i, \text{Max}(U_{i-1} + P_{i-1}, U_i + P_i)] \\
 R_i = \frac{t}{T_j} \\
 H = R_j(T_j - \sum_{i \in S_j} U_i) \\
 M = R_j[T_j - \text{Max}(U_{i-1} + P_{i-1}, U_i + P_i)] \\
 H_c = H \cdot \frac{C_i}{t} \\
 M_c = M \cdot \frac{S_i}{t}
 \end{cases}$$

*모형의 algorithm 과정에서 사용되는 식임

2.3 모형의 전개과정(algorithm)

전항에서 언급한 목적책을 수작업에 의해 처리하는 데는 상당한 시간과 노력이 요구되므로 개인용 컴퓨터를 이용할 수 있도록 하였으며, 그 수행절차는

- (1) 입력자료 정리 및 입력단계
- (2) cycle Time 결정단계
- (3) 유휴시간 및 비용 산출단계
- (4) 최적작업 할당단계로 구분하여 순환과정의 반복 수행으로 최적해에 접근한다.

2.3.1 입력자료 정리 및 입력단계

입력을 위한 data의 정리는 다음 순서에 의한다.

- (1) 대상 Line을 결정하고 기계대수(N)을 파악한다.
- (2) 시간단위를 결정한다(여기서는 단위시간(t)을 1시간으로 한다).
- (3) 대상 Line의 수취급(U_i) 및 기계가동시간(P_i)을 Stop watch에 의해 예비관측을 행한 후, E.Grant 법에 의해 신뢰도 95%, 정도 $\pm 5\%$ 의 관측회수를 결정하여 시간치 data를 정리한다.
- (4) 시간당 노무비를 평균임률에 의해 산출한다.
- (5) 기계별 시간당 비용을 산정한다.

기계비용(Machine Cost)의 계산에는 일반적으로 다음과 같은 요소가 포함된다[7,8].

- (i) 기계구입을 위한 투자자본비, 설치비, 감가상각비, 세금, 보험료등.
- (ii) 치공구비, 소모품비 및 보전비
- (iii) 기계운전을 위한 동력비(소비전력, 증기, 공기, 수력, 가스 등)
- (iv) 기계설치 장소의 비용(건물상각비 또는 임대료 등).

이상과 같은 입력자료를 프로그램이 쉽게 대화식(Interactive mode)으로 입력함으로써 내부적인 routine으로 처리시킬 수 있다.

2.3.2 작업주기시간(Cycle Time) 결정단계

다기종 Line 설비에 대한 할당연구에 있어서 가장 중요한 요소는 할당 기계대수에 따라 상시로 변하는 작업

주기시간을 결정하는 것이다.

전단계의 수취급시간 및 기계가동시간에 현단계의 수취급 및 기계가동시간을 cycle Time에 포함시켜야 할지 여부를 계속 비교하며 진행한다(그림 1,2). 그 순서는 다음과 같다.

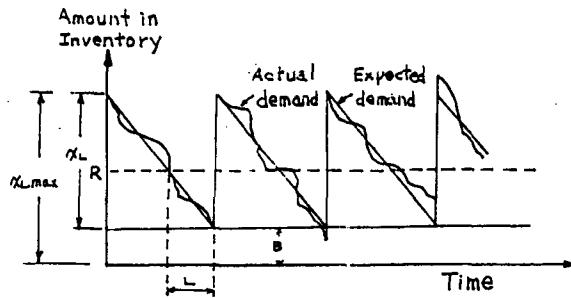


Fig 1. Safety Stock

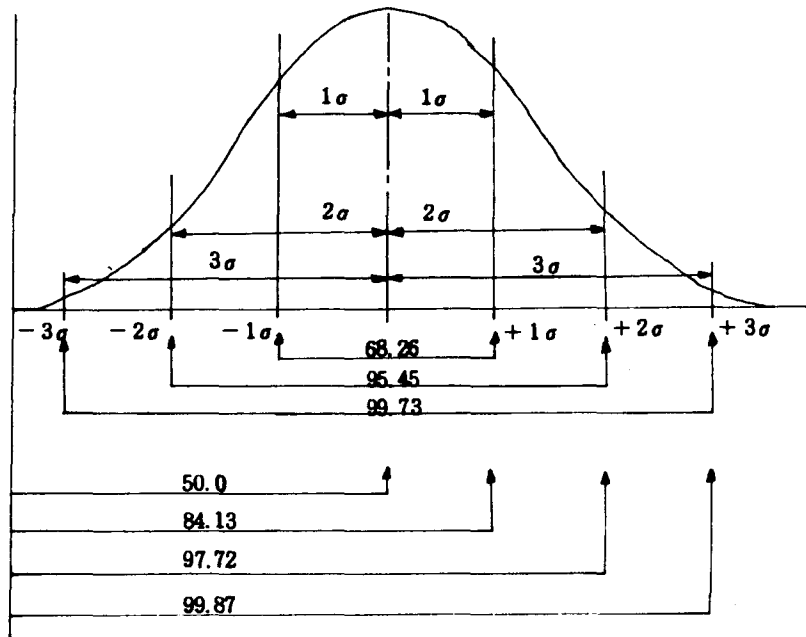


Fig 2. Standard deviation and service level

- (1) 현단계까지의 누적 수취급시간(U_i)을 구한다($\sum_{i \in S_i} U_i$)
- (2) 전단계까지의 수취급 및 기계가동 시간의 합($U_{i-1} + P_{i-1}$)과 현단계를 포함한 수취급 및 기계가동 시간의 합($U_i + P_i$)을 비교하여 큰 값을 취한다.

$$\text{Max}(U_{i-1} + P_{i-1}, U_i + P_i)$$

- (3) Cycle Time은 (1)항의 $\sum_{i \in S_i} U_i$ 와 (2)항의 $\text{Max}(U_{i-1} + P_{i-1}, U_i + P_i)$ 의 비교에 의해 큰 값으로 결정한다.

$$T_j = \text{Max}[\sum_{i \in S_j} U_i, \text{Max}(U_{i-1}, U_i + P_i)] \dots\dots\dots (2)$$

2.3.3 유휴시간(Idle Time) 및 유휴비용(Idle Cost) 산출단계

유휴시간 및 비용은 Cycle Time에 의해 결정된 단위시간당 Cycle수에 영향을 받는다.

(1) 단위시간당 Cycle수(R_j)를 구한다.

$$R_j = \frac{t}{T_j} \dots\dots\dots (3)$$

(2) 단위시간당 작업자 유휴시간(H)을 구한다.

$$H = R_j(T_j - \sum_{i \in S_j} U_i) \dots\dots\dots (4)$$

(3) 단위시간당 기계 유휴시간(M)을 구한다.

$$M = R_j[T_j - \text{Max}(U_{i-1} + P_{i-1}, U_i + P_i)] \dots\dots\dots (5)$$

(4) 단위시간당 유휴노무비(H_c) 및 유휴기계비(M_c)를 식 (3), (4), (5)에 의해 구한다.

$$H_c = H \cdot \frac{C_f}{t} \dots\dots\dots (6)$$

$$M_c = M \cdot \frac{\sum_{i \in S_j} S_i}{t} \dots\dots\dots (7)$$

2.3.4 최적작업 할당단계

(1) 전항의 유휴시간 및 유휴비용 산출단계에서 유도한 식 (6), (7)의 유휴노무비(H_c)와 유휴기계비(M_c)의 합(TIC=Total Idle Cost)을 구한다.

(2) 전단계에서 구한 TIC와 현단계의 TIC를 비교하여 최소치를 결정한다.

즉, $H_{c-1} + M_{c-1} < H_c + M_c$ 라면 새로운 자료를 추가입력하여 recursive process를 반복한다.

(4) 현재할당이 최적이 되고 이 때의 비용이 최종복합함수인 식 (1)의 「최적 작업할당 범위의 최소 유휴비용」(Total Minimum Idle Cost, TMIC)이므로 현단계의 기계군, 작업주기시간(T_j), 작업자효율(He) 및 기계 효율(Me)을 출력한다.

$$He = 1 - \frac{H}{t} \dots\dots\dots (8)$$

$$Me = 1 - \frac{M}{t} \dots\dots\dots (9)$$

이와 같은 단계를 반복하여 1인의 작업자가 담당하는 기계대수(작업역)를 결정한다.

2.4 적용 단계

적용 예로서, 그림3과 같이 7대의 반자동 기계가 라인으로, 형성된 공정을 가정하여 표1의 입력자료를 기초로, 몇명의 작업자를 할당할 것인가를 Heuristic Algorithm으로 해를 구한다.

표1. 입력자료 표

Variables		Input data		Remarks
Machine Set	(N)	7		1st. Optimal Group
Unit Time	(t)	60 (min)		
No. of Operator	(m)	1 (man)		
Labor Cost	(C _i)	4,500 (₩/Unit time)		
Machine Cost & Time				
Machine No.		Labor Time (DM)	Machine Time (DM)	Machine Cost (₩)
Machine	# 1	2.0	7.4	3,500
Machine	# 2	1.8	6.6	2,000
Machine	# 3	3.4	5.8	2,800
Machine	# 4	3.2	5.8	1,800
Machine	# 5	2.3	8.3	1,600
Machine	# 6	3.2	7.5	2,200
Machine	# 7	2.0	6.4	1,800

본 예제에 대한 Iteration을, 개발한 Heuristic Algorithm의 컴퓨터 프로그램에 의해 수행한 결과는 표2와 같다.

표2. 프로그램 수행 결과표

```

*****
THIS PROGRAM IS PURPOSE OF THE ECONOMIC
MACHINE ASSIGNMENT FOR SEQUENTIAL DEPENDENT
MULTI DIFFERENT MACHINES
*****

***** INITIAL CONDITION *****

AVAILABLE MACHINE SET      : 7
NUMBER OF OPERATOR        : 1
UNIT TIME (MIN.)          : 60
LABOR COST FOR UNIT TIME  : 4500

MACHINE'S TIME & COST
      I      LABOR TIME      MACHINE TIME      MACHINE COST
-----
MACHINE # 1  I      2.0          7.4             3500
MACHINE # 2  I      1.8          6.6             2000
MACHINE # 3  I      3.4          5.8             2800
MACHINE # 4  I      3.2          5.8             1800
MACHINE # 5  I      2.3          8.3             1600
MACHINE # 6  I      3.2          7.5             2200
MACHINE # 7  I      2.0          6.4             1800
-----

***** 1 - TH OPTIMAL ASSIGNMENT *****

1 - TH ASSIGNED MACHINE GROUP      = MACHINE # 1 - MACHINE # 4
TOTAL MINIMUM IDLE COST FOR UNIT TIME = 976
CYCLE TIME                          = 10.4
PRODUCT RATE FOR UNIT TIME          = 5.8
LABOR IDLE TIME FOR UNIT TIME       = 0
MACHINE IDLE TIME FOR UNIT TIME     = 5.8
LABOR EFFICIENCY                    = 1.00
MACHINE EFFICIENCY                  = 0.90

***** 2 - TH OPTIMAL ASSIGNMENT *****

2 - TH ASSIGNED MACHINE GROUP      = MACHINE # 5 - MACHINE # 7
TOTAL MINIMUM IDLE COST FOR UNIT TIME = 1342
CYCLE TIME                          = 10.7
PRODUCT RATE FOR UNIT TIME          = 5.6
LABOR IDLE TIME FOR UNIT TIME       = 17.9
MACHINE IDLE TIME FOR UNIT TIME     = 0
LABOR EFFICIENCY                    = 0.70
MACHINE EFFICIENCY                  = 1.00
*****
    
```

2.5 결과의 검토

새로운 Algorithm을 검토함에 있어, 우선 기계할당의 결과가 목적하는 바와 같이 최적의 상태인가 여부를 검증하는 과정이 선행되어야 할 것으로 본다. 기계할당의 타당성을 검증하기 위하여 표3과 같은 수작업표를 작성하여 표2의 프로그램 수행결과와 비교 검토한다.

표3. 작업할당 수작업 수행표

OPER- ATION NO.	MACHINE LABOR TIME (U1)	MACHINE PROCESS TIME (P1)	ACCUM. LABOR TIME (ΣU1)	LABOR & PROCESS TIME (U1+P1)	Max (U1+P1, P1+P1, U1+P1)	CYCLE TIME (Tj)	PRODUCT RATE (Rj) / HOUR	LABOR IDLE TIME (H)	MACHINE IDLE TIME (O)	LABOR COST / # (C1)	MACHINE COST / # (S1)	ACCUM. MACHINE COST/H (ΣS1)	LABOR IDLE COST/H (O1)	MACHINE IDLE COST/H (O1)	TOTAL MIN. IDLE COST (TMC)
1	2.0	7.4	2.0	9.4	9.4	9.4	8.4	47.4	0	4,500	3,500	3,500	3,500	0	
2	1.8	6.8	3.8	8.4	9.4	9.4	8.4	35.8	0	4,500	2,000	5,500	2,685	0	
3	3.4	6.6	3.8	8.4	9.4	9.4	8.4	14.1	0	4,500	2,000	8,300	2,685	0	
4	3.2	5.8	10.4	9.0	9.4	10.4	5.8	0	5.8	4,900	1,800	10,100	0	978	4
5	2.3	5.8	2.3	10.4	9.0	9.4	10.4	5.8	0	4,500	1,800	1,800	3,547	0	
6	3.2	7.5	5.5	10.7	10.7	10.7	5.8	29.1	0	4,500	2,200	3,800	2,183	0	
7	2.0	6.4	7.5	8.4	10.7	10.7	5.8	17.9	0	4,500	1,800	5,600	1,342	0	

위의 결과비교에 따르면 프로그램 수행결과와 일치함을 확인할 수 있었고, 이 때의 작업할당 최적해로서 표4의 결과를 얻었다.

표4. 최적할당결과표

항 목		할 당 내 용	
기계대수		7대	
기계할당	작업자	1	2
	기 계	# 1~# 4	# 5~# 7
작업주기시간		10.7 분	
시간당생산량		5.6 Unit/ Hour	
시간당유류비용		2,318 원/ Hour	
노무호율		85 %	
기계호율		95 %	
제품개당비용		$\frac{(4,500 \times 2) + 15,700}{5.6}$ = 4,410 원/ Unit	

3. 결 론

본 연구에서는 작업자-기계할당 문제중 확정적 주기시간을 갖는 다기종의 반자동설비가 Line으로 형성되어, 기계와 기계사이의 작업이 종속적으로 발생하는 상황에서, 유휴비용을 최소화하는 모델을 Heuristic Algorithm에 의해 설정하고 그 타당성을 고찰하였다.

이와 같은 연구는 일반 기계공장의 생산공정 특성의 하나인 Sequential dependent로 작업이 수행되는 상황에서, 1인의 작업자에게 자동화된 고등틀의 기계로 구성된 Line의 작업역을 어떻게 할당할 것인가를 근접해에 의해 해결하는데 기여한다. 수리모델에 의해 유도한 목적함수를 수치예에 적용한 결과와 기존의 작업자-기계도표에 근거한 수작업표를 비교한 결과가 일치함을 확인할 수 있었고, 특히 복잡한 수작업에 의해서 해결이 곤란한 다단계 주기시간 결정과정을 간소화할 수 있었으며, 할당역 결정, 생산량, 효율의 결정을 손쉽게 처리할 수 있었다.

그러나 본 연구에서 전제조건으로 제시한 요소 중 기계가동중의 부대작업 수행, 수동및 반자동기계의 혼합공정 및 독립과 종속의 혼합공정이 추가된 조건에서 더욱 효율성이 높은 근사 최적해를 구하기 위한 연구가 수행되어야 할것으로 판단된다.

Reference

- 1) Wright, W. R., Duvall, W. G. and Freeman, H. A., "Machine Interference." *Mechanical Engineering*, vol. 58, No. 8(August, 1936), pp. 510-514.
- 2) Stecke, K. E., *Machine Interference: Assignment of Machines to Operators*, Hand Book of Industrial Engineering, Edited by Salvendy, G., Willy-Interscience, New York, 1982.
- 3) Mcleavey, D. W. and Narasimban, S. L., *Production Planning and Inventory Control*, Allyn and Bacon, 1985.
- 4) Miller, J. G. and Berry, W. L., "Heuristic Methods for Assigning Men to Machines: An Experimental Analysis," *AIIE Transactions*, June, 1974, pp. 97-104.
- 5) Miller, J. G. and Berry, W. L., "The Assignment of Men to Machines: An Application of Branch and Bound." *Decision Sciences*, vol. 8, 1977, pp. 56-64.
- 6) Greene, J. H., *Production and Inventory Control Hand Book*, Mc Graw-Hill, 1987, 2nd Edition.
- 7) Jones, D., *Work Measurement of Multimachine Assignments*, I. E Hand Book, Edited by Maynard, H. B., 1971, 3rd Edition.
- 8) 池永謹一, 作業測定と標準時間, 日刊工業新聞社, 東京, 1980.
- 9) 李根熙, 作業管理의 理論과 實際, 創知社, 서울, 1986.