

TOC 구현을 위한 스프레드시트 활용 사례 (Case study of spreadsheet applications in TOC implementation)

구평희*, 고시근*, 하재원**

*: 부경대학교 산업공학과

** : 인제대학교 산업시스템공학과

Abstract

최근에 데이터관리, 통계분석, 그래프분석, What-If 분석 등을 위하여 스프레드시트가 광범위하게 사용되고 있다. 본 논문은 전자 부품을 생산하는 라인에 TOC(Theory of Constraints)를 적용하는 과정에서 활용된 엑셀 스프레드시트 프로그램의 사례에 대하여 소개한다. TOC 개념에서의 제품 조합 문제, 제약자원 선택 분석, DBR 스케줄링 등이 자체의 함수기능, 그래프기능, 해 찾기 기능과 VBA(Visual Basic Application) 기능을 이용하여 엑셀에서 구현된 내용이 포함된다.

1. 서론

TOC(Theory of Constraints)는 Goldratt[4]에 의해 새로운 생산운영 전략으로 제시된 이래 여러 분야에서 적용되어오고 있다. 최근 몇 년 동안 국내에서도 TOC에 대한 관심이 높아져 가고 있고, 실제로 적용된 사례가 발표되고 있다[5,7]. TOC의 개념은 모든 공정은 체인과 같이 상호 연결된 작업들로 구성되어 있고 체인의 강도는 가장 약한 부분, 즉 제약에 의해 결정된다는 것을 전제로 한다. 이러한 시스템에서 제약 자원을 최대로 활용하는 것은 곧 전체시스템의 산출량을 최대로 하는 것을 의미한다. 일반적으로 제조 시스템에서 TOC를 적용할 때는 3단계로 따른다[8]: (1) 시스템에서의 제약자원을 규명한다. (2) 제약자원이 항상 최대한 활용되도록 한다. (3) 모든 비제약 자원의 활동을 제약자원에 맞추어 종속화 시킨다. Mabin & Balderstone[6]은 TOC의 적용으로 평균적으로 현금창출률은 63% 증가, 이익은 76% 증가, 재고는 50% 삭감, 주문에서 납품까지의 리드타임은 평균 70% 단축되는 것으로 발표된 문헌들을 조사하여 보고하고 있다.

본 논문에서는 저자들이 전자부품을 생산하는

기업의 제조라인을 대상으로 수행한 TOC 구현 프로젝트에서 스프레드시트를 이용한 분석 및 설계 내용을 소개한다. 스프레드시트 패키지는 현재 개인용 컴퓨터의 대중적인 보급에 따라 대부분 기업에서 데이터정렬이나 데이터베이스 활용, 회계 및 재무 분석, 그래프 분석, 통계분석, 경영의사결정, 시뮬레이션에 등에 이르기까지 다양한 분야에서 사용되고 있다. 스프레드시트는 모델 수립을 위해 자연스러운 인터페이스가 제공되고, 데이터를 쉽게 입력하고 이용할 수 있도록 할 뿐만 아니라, What-If 기능에 의해 여러 대안을 빠르게 비교 평가할 수 있고, 경영분석 및 최적화 의사결정을 위한 함수가 내장되어 있어 의사결정 문제도 합해 다룰 수 있다. 또한 내부 함수의 기능이 강력하고 복잡한 로직도 VBA(Visual Basic Application)를 사용하여 해결이 가능하다.

스프레드시트를 사용하는 기업 중에서 90% 이상은 엑셀을 사용하고 있는 것으로 조사되고 있다[9]. 특히 최근에는 최적화 문제를 해결하는 기능이 강화되어 많은 경영과학 문제를 엑셀에서 해결할 수 있다[2]. 본 논문에서는 TOC 구현 프로젝트 진행 중에 제약자원의 선택, 제품 조합 문제, DBR 스케줄링 문제 등을 스프레드시트 자체의 함수기능, 그래프기능, 해 찾기 기능과 VBA 기능을 이용하여 엑셀에서 구현된 사례를 설명한다.

2. 대상 시스템 설명

본 논문에서 대상으로 하는 생산시스템은 반도체 기판을 생산하는 라인으로, 매월 14만개에서 15만개의 제품을 한 라인에서 생산한다. 제품이 고객에 의해 주문이 들어오면 이를 영업부문과 생산부문이 협의하여 납기를 결정하고 일정계획을 수립하여 투입 일정을 결정하는 make-to-order 형태의 생산 환경을 가지고 있다. 제품은 일정한 양을 묶어 하나의 로트단위로 생산되고 관리된다. 대상 생산

시스템에서는 많은 종류의 제품을 생산하고 있으나, 제품별 생산량, 제품의 특성 및 가공 순서를 고려하여 9가지의 제품군으로 나누어진다. 제품이 생산시스템에 투입되면 45 가지의 주요 생산 공정을 거쳐 생산된다. 각 제품의 생산 경로는 각기 상이하 며 각 공정에서의 생산시간 또한 각 제품마다 다르다. 제품이 투입된 후 완성되어 입고되기까지의 시간인 리드타임은 제품별로 상이하여 평균 10일에서부터 30일까지 다양하다. 대상 시스템은 동기화 생산을 달성하고 결과적으로 재공품재고와 리드타임을 줄이는 것이 경쟁력 향상을 위해 중요하다.

3. TOC에서의 스프레드시트 활용

3.1 제약 규명

TOC의 구현 활동에서 제약자원의 규명은 우선적으로 수행 되어야 한다. 생산시스템에서 능력의 부족에 따라 발생하는 제약자원은 부하분석을 통하여 이루어진다. 그림 1은 부하분석표의 일부분을 보여준다. 생산되는 9 가지의 제품군마다 주문량과 수율 데이터를 이용하여 생산해야 할 양을 '생산량 - 주문량/수율'에 의해 구하고, 설정된 각 제품의 표준시간(S/T), 제품의 방문 여부 및 방문 비율을 조사하여 부하(load)인 소요시간을 계산한다. 각 기계의 능력(capacity)인 가용시간은 1개월 중 가동일수(30일), 일일 실동시간(1,440분), 가동률 및 장비대수를 고려하여 구한다. 설비의 능력과 부하의 단위는 분단위의 시간이다. 부하율은 소요시간과 가용시간의 비율로서 구한다. 부하분석표에서 사용된 함수는 엑셀 자체적으로 내장된 함수와 간단한 산술식이 사용된다. 부하 분석을 통하여 부하율이 100% 이상으로 가장 큰 공정을 제약공정으로 정한다. 본 사례에서는 45개의 공정 중 공정 22가 부하율이 116%로서 최대여서 제약공정으로 선정하고 이 공정을 중심으로 TOC 활동이 진행되었다.

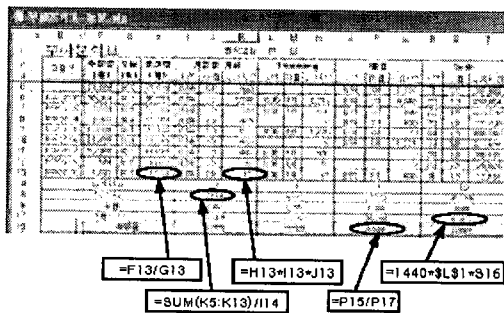


그림 1. 부하분석표

3.2 최적의 제품 조합

TOC에서 제품 조합문제는 여러 종류의 제품을 생산하는 생산시스템에서 제약자원을 최대한로 활용하여 기업의 쓰루풋을 최대한로 할 수 있도록 제품의 생산비율을 결정하는 것이다. Goldratt은 그의 저서 The Haystack Syndrome에서 제품조합 알고리즘을 제시하였다[3]. 이 알고리즘에서는 각 제품 한 단위의 쓰루풋과 해당제품이 제약공정을 사용하는 시간의 비율을 옥탄이라 하고 이 옥탄값이 큰 제품을 우선적으로 생산하는 방법을 따른다. 그러나 이러한 TOC 제품조합 방법은 비제약자원의 능력은 무한하다는 가정 하에서는 옳은 해를 산출하고 있으나, 여러 자원의 능력에 제한이 있는 경우는 최적해가 아닌 결과를 만들어 내거나 비실행 해를 산출할 수 있다. 따라서 보다 일반적인 형태의 생산 시스템에서의 제품조합 문제를 해결하기 위해서 선형계획법 모델이 사용된다[1].

본 논문에서는 엑셀의 '해 찾기' 기능을 이용하여 최적의 제품 조합을 결정하는 사례를 소개한다. 해 찾기 기능은 선형계획법, 정수계획법, 수송계획모형, 네트워크 모형, 비선형계획법 등을 해결하기 위하여 엑셀에 포함된 최적화 도구이다. 최적의 제품 조합은 보유하고 있는 자원의 능력을 최대한 이용하여 쓰루풋(Throughput)을 최대한으로 하는 것이 목적이다. 쓰루풋이란 매출에서 재료비용을 제외한 금액으로 판매에 의해 창출된 자금이다. 이는 다음과 같이 수리 모형으로 표현 할 수 있다.

$$\text{Max } Z = \sum_j T_j x_j$$

Subject to :

- (1) $\sum_j \sum_i p_{ij} x_j \leq \text{생산능력시간}$, 모든 j 에 대하여,
- (2) $L_i \leq x_i \leq U_i$, 모든 i 에 대하여
- (3) x_i 는 정수, 모든 i 에 대하여

여기서 결정변수는 제품 i 의 생산량(x_i) 이고, T_j 는 제품 i 한 단위당 쓰루풋, p_{ij} 는 설비 j 에서 제품 i 를 생산하기 위한 표준생산시간, L_i 는 제품 i 의 최소한의 생산량을 의미하는 생산 하한값, U_i 는 제품 i 의 생산 상한값을 나타낸다. 위의 모델에서 목적식은 총 쓰루풋을 최대화 하는 것이고, 제약식 (1)은 모든 설비에 대하여 소요 시간이 생산능력 시간을 초과할 수 없다는 제약이다. 제약식 (2)는 모든 제품의 생산량은 생산 하한값과 생산 상한값 사이에 있어야 하는 제약을 보여준다.

엑셀의 '해 찾기' 기능을 사용하여 최적화 문제를 해결하기 위해서는 우선 워크시트에 스프레드시트 모형을 작성해야 한다. 스프레드시트 모형에는

상기의 수리모형의 목적식과 결정변수를 표현할 셀이 지정되고, 제약조건이 나타나게 될 셀이 포함되어야 한다. 그림 2는 3.1절에서 설명된 부하분석표에서 최적의 제품 생산량을 찾기 위하여 추가로 제품에 대한 데이터를 입력해 놓고, 결정변수 셀(H35:H43), 목적식 셀(L40), 그리고 제약식 셀(K34:BC36)을 구성한 예를 보여준다. 목적식 셀에는 목적함수식을 SUMPRODUCT 함수를 이용하여 수식으로 입력하고 각 장비의 필요시간도 수식에 의해 채워 넣어야 한다. 그러나 결정변수인 각 제품의 생산량을 표현하는 셀에는 '해 찾기'의 결과로 얻어질 결정변수의 값이 입력될 것이므로 어떠한 식도 입력할 필요가 없다.

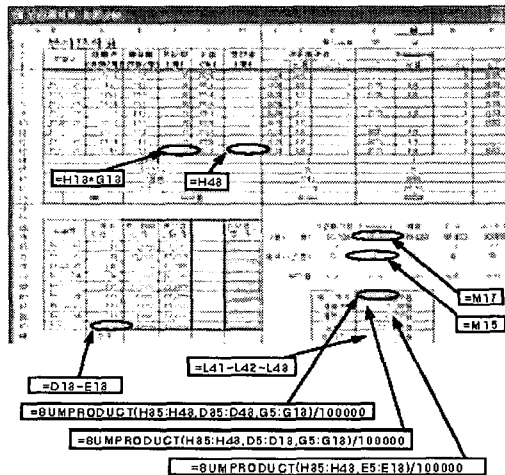


그림 2. 부하 분석표에서의 최적화 모델링

스프레드시트 최적화 모형을 위한 워크시트가 준비된 후 엑셀의 '해 찾기' 기능을 선택하여 그림 3과 같은 '해 찾기 모델 설정' GUI 대화상자를 열고 목적함수, 결정변수, 제약식을 지정해 준다. 그림에서 '목표셀'은 총 쓰루풋을 계산하는 목적함수식이 입력되어 있는 L40이고, '해의조건'에는 쓰루풋을 최대화 하는 것이므로 '최대값'이 선택된다. '변경할 셀'은 수리모형에서의 결정변수에 해당하고 따라서 H35:H43을 지정한다. 그림에서 '제약조건'의 첫째 항목과 셋째 항목은 각각 생산량이 상한 값보다 크지 않고 하한값보다는 작지 않아야 한다는 조건을 표현한 것으로서 수리모형의 제약조건 (2)를 표현한 것이다. 네 번째 항목은 수리모형의 첫 번째 제약조건인 부하(소요시간)가 능력(가용시간)보다 클 수 없음을 나타내는 수리모형의 제약조건 (1)이고, 두

번째 항목은 생산량은 정수 개이어야 한다는 제약이다. 대화상자의 모든 내용이 설정된 후 실행 버튼을 선택하면 수 초 내에 선형계획 최적화 문제는 심플렉스법으로 그리고 정수계획법 문제는 분단탐색법(branch and bound)으로 해를 구해 워크시트의 해당 셀에 결과를 보여준다.

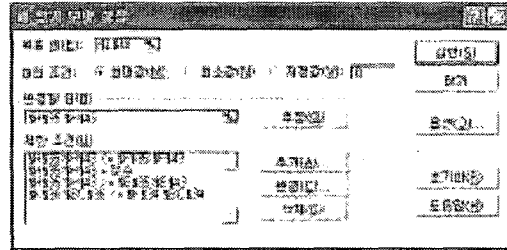


그림 3. 해 찾기 모델 설정을 위한 대화상자

그림 4는 해 찾기 기능의 수행 결과를 보여주고 있다. 각 제품별로 최적의 생산량이 H35:H43에 나타나 있고 이때의 총 쓰루풋은 141억원이라고 L40에서 보여준다. TOC의 제품 조합 방식은 제약공정의 능력과 옥탄값만을 고려하여 생산량을 결정하므로 대상 공정과 같이 제품이 다양하고 공정이 많은 시스템에서는 비실행(infeasible) 해를 산출할 수 있으나, 엑셀의 최적화 모형을 사용할 때는 모든 자원을 고려하므로 실행 가능한 최적의 생산량을 도출해 낸다. 엑셀에서 해 찾기 기능을 사용할 때의 또 다른 장점은 부하분석표 등 기존에 사용하는 데이터를 동일한 파일에서 그대로 사용하여 데이터의 신뢰성과 구원 시간의 단축이 가능하다는 것이다.

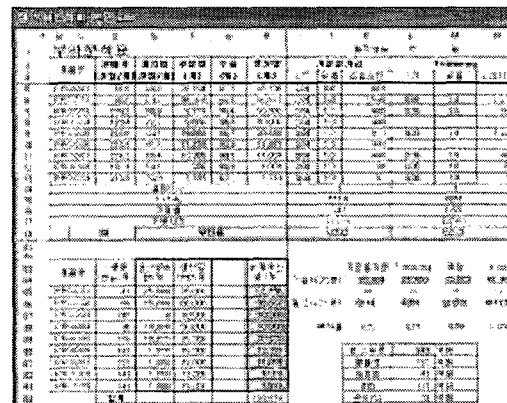


그림 4. 해 찾기 기능의 수행 결과

3.3 DBR 스케줄링

TOC 구현에 있어 설계 단계에서의 핵심은 DBR 스케줄의 작성이다. 대부분의 기업은 기존의 ERP 시스템과 MES 시스템에 의해서 MRP 기반의 정보시스템이 구축되어 있어 이를 활용하여 일정 계획이 수립되고 생산이 지시된다. TOC를 구현하기 위해서는 기존의 정보시스템을 TOC의 개념에 맞게 재구성되어야 하겠지만, 구현 초기에는 DBR 일정 계획을 수립하기 위해서는 엑셀을 활용하는 것이 효과적이다. TOC에서는 제약자원에만 스케줄이 작성되고 나머지 비제약 공정에서는 선입선출을 기반으로 제품이 생산되므로 스케줄링이 기존의 MRP 형태보다 상당히 단순화 되어 엑셀에서도 작성 가능하다. DBR 스케줄을 엑셀에서 구현하기 위해서는 엑셀의 내장함수기능과 더불어 복잡한 로직이나 의사결정에는 일반 프로그래밍언어인 Visual Basic을 엑셀에서 사용하는 VBA를 활용한다.

DBR 스케줄링은 제약공정인 드럼(Drum)의 능력을 고려하여 드럼의 세부적인 생산 일정 계획을 수립하는 Drum 스케줄링, 이를 기초로 버퍼를 고려하여 투입시간을 결정하는 로프(Rope) 스케줄링으로 구성된다. 본 논문에서는 버퍼의 크기가 여러 가지 생산 환경을 고려하여 이미 결정되었다고 가정한다. 대상 시스템은 make-to-order 생산 환경이므로 생산제품이 매일 변경되고, 생산일정계획도 기존에 이미 투입된 제품을 고려하여 작성되어야 하는 특징이 있다. 드럼과 로프 스케줄링은 생산해야 할 제품들 중 투입이 확정 되지 않은 제품들을 생산납기를 기준으로 하여 역행으로 수행된다(Backward scheduling). 이러한 스케줄링의 결과는 제품의 투입 시기가 이미 지난 경우도 있고 또는 먼 후일에 투입되어야 할 제품도 있게 된다.

그림 5는 엑셀에서 구현된 DBR 스케줄링 시스템을 보여주고 있다. 입력 데이터에는 관리번호, 제품군, 수주량 및 납기일시가 포함된다. 데이터의 입력이 완료된 후 좌상귀에 있는 'DBR 작성' 버튼을 선택하면 제약공정에서의 가공 시작시점과, 투입시점이 Backward 계산에 의해 결정되며 또한 이와 관련된 제품생산 완료일, 예상 리드타임, 그리고 완제품이 재고 상태로 있는 기간 등의 결과를 제시하도록 한다. 완제품의 재고 기간은 여러 제품이 제약자원을 동시에 사용함으로써 발생하는 선행 생산의 결과이다. 그림에서 제약자원에서의 생산 시간을 표현하는 열이 3개 있는 것은 제품에 따라 제약자원을 최대 3번 방문하기 때문에 각 방문시의 생산을 표현하기 위해서이다. 현재의 Backward 스케줄링의 미투입 주문 중에서 투입 확정일자가 정해지지 않은 주문들만을 가지고 수행되며, 결과는 주문 납기를 만족시키면서 가장 늦게 투입하는 시간이다.

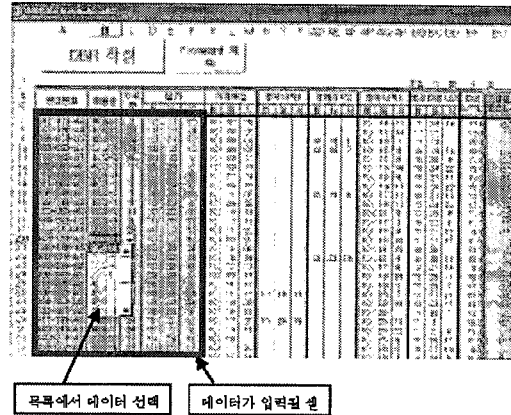


그림 5. DBR 스케줄링 (Backward)

스케줄링을 위한 복잡한 알고리즘은 엑셀의 내장함수 만으로는 작성하기 어렵기 때문에 VBA 프로그램에 의해 구현된다. 그림 5의 'DBR작성' 버튼은 VBA 프로그램과 연결되어 이를 클릭하면 DBR 스케줄링 절차가 실행되고 이 결과는 다시 워크시트의 해당 셀에 나타나게 된다.

Backward 스케줄링 결과 투입 시기가 이미 지난 제품은 우선적인 투입 제품으로 고려한다. Backward 스케줄링의 결과는 다음에 기존에 투입된 제품들과 함께 고려하여 일자별 제약의 부하와 주요 공정들에 대한 부하를 함께 고려하면서 Forward 스케줄을 작성한다. 그림 5의 'Forward 계획' 버튼을 선택하면 VBA 프로그램이 실행된다. 그림 6은 Forward 스케줄링의 결과에 따라 제약공정과 제약공정은 아니지만 제품의 조합에 따라 문제가 될 여지가 있는 주요 공정 두 곳에 대해 작성된 부하그래프이다. 그래프의 x축은 날짜를 나타내며(00: 현재일, 01: 1일 후, 02: 2일 후, ...), y축은 소요시간 및 가용 시간을 분단위로 나타낸다.

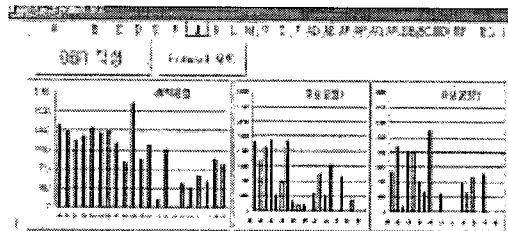


그림 6. Forward DBR 스케줄링 부하

그림 6에서 현재(10월 8일)보다 9일 후의 부하능력을 많이 초과한다. 이때는 부하를 조정하기 위하여 수작업을 통하여 투입 일정을 조정한다. 본 예에서는 현시점에서 7일과 8일 후에 능력의 여유가 있으므로 9일 후의 작업 중 일부를 7일과 8일 후에 제약공정을 통과 하도록 투입일자를 조정한다. 투입일자의 조정에는 주요 공정에 대한시점별 부하도 함께 고려한다. 당일과 그 다음날에 투입된 제품의 투입 일자와 제약공정과 주요공정의 시점별 부하를 고려하여 특별히 투입 일자가 조정된 제품에 대해서 투입일자를 확정한다. 그림 7은 이렇게 하여 투입이 확정된 제품과 기 투입된 제품들의 일정계획과 제약공정 및 주요공정에 대해 시점별 부하추이를 보여주고 있다.

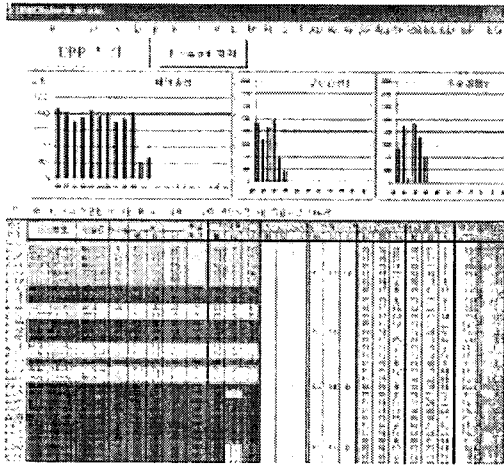


그림 7. 확정된 투입계획 및 생산부하

4. 결론

본 논문에서는 TOC를 생산 현장에 적용하는 과정에서 스프레드시트 소프트웨어인 엑셀을 이용하여 여러 가지 분석과 설계 작업을 수행한 사례를 소개하였다. TOC 구현을 위해 엑셀을 사용하는 것은 부하분석, 제품조합 최적화, 데이터 분석 및 관리 등의 기능을 하나의 파일에서 수행 가능하게 함으로써 신뢰성 있는 데이터와 신속한 모델링을 가능하게 한다. 엑셀의 해 찾기 기능은 TOC 방법에 의한 제품 조합 해결책 보다 더욱 정확하고 빠른 결과를 제공해 주어 특히 유용하게 사용될 수 있다. 또한 VBA의 활용을 통하여 복잡한 문제까지도 엑셀에서 처리될 수 있음을 보여주었다.

기존에 DBR 스케줄링 개념을 근간으로 하는

상용화된 소프트웨어는 많이 있으나, 생산 환경이 상이한 현장에서 사용하는 것은 쉽지 않다. 엑셀은 대부분의 기업에서 데이터 분석과 저장 및 보고 등에 일반적으로 실무 담당자들이 능숙하게 사용하므로, 본 논문에서 발표된 엑셀을 이용한 TOC 구현은 TOC를 적용하는 담당자가 직접 모델링하고, 프로그래밍하여 활용할 수 있어, 성공적인 TOC 구현을 위해 좋은 대안으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Balakrishnan, J. and C.H. Cheng, "Theory of constraints and linear programming: a re-examination," *International Journal of Production Research*, Vol.38, No.6.(2000), pp. 1459-1463.
- [2] Chung, Ki-Ho, "Spreadsheet-based educational method for management science," *Korean Management Science Review*, Vol.19, No.2(2000), pp. 41-58.
- [3] Goldratt, E.M., *The Haystack Syndrome*, Great Barrington(MA): North River Press, 1990.
- [4] Goldratt, E.M., and Cox, J., *The Goal*, NewYork: North River Press, 1984.
- [5] Lee, S.J. and Sun, J.U. "Development of production scheduling system using TOC/DBR scheduling concepts," *Proceedings KIIIE 2002 Fall Conference*, 2002.
- [6] Mabin, V.J. and Balderstone, S.J., "World of the Theory of Constraints: A Review of the International Literature," Boca Raton, Florida, St. Lucie Press, 2000.
- [7] Moon, J. and Rim, S.C. "A new method of profit maximization based on the theory of constraints," *IE Interfaces*, Vol.14, No.4(2001), pp. 356-364.
- [8] Perez, J.L., TOC for world class global supply chain management, *Computers and Industrial Engineering*, Vol.33, No.(1-2)(1997), pp. 289-293.
- [9] Pemberstone, J.D. and Robson, A.J., "Spreadsheet in Business," *International Management and Data Systems*, Vol.100, No.8(2000), pp. 379-388.