

공급사슬 환경에서 제약이론을 적용한 재고 보충 및 차량경로문제 결정

An approach for inventory routing problem using TOC in supply chain

김강태*, 이영혜**

* 한양대 산업공학과 (ktkim@scm.hanyang.ac.kr)

** 한양대 산업공학과 교신저자 (yhlee@hanyang.ac.kr)

Abstract

There was a lot of research to integration of the transshipment and inventory problem in supply chain. Such a integration of inventory and transshipment problem called IRP (Inventory Routing Problem). We consider a distribution problem in which a set of products has to be shipped from a supplier to several retailers in a given planning horizon. Transshipment from the supplier to the retailer is performed by vehicles of limited capacity. Each retailer determines replenishment leadtime and order quantity with buffer management. A supplier determines optimal vehicle routing in supply chain. We suggest a heuristic algorithm which be used TOC buffer management in a replenishment problem and a tabu search algorithm in VRP (Vehicle Routing Problem).

1. 서론

공급사슬은 직·간접적으로 고객요구를 충족시키는데 필요한 모든 단계들로 구성되어 있다. 공급사슬은 생산자와 공급자뿐만 아니라 운송, 창고관리, 도매업자 그리고 고객까지도 포함한다. 또한 공급사슬은 고객 요구를 충족시키는 모든 기능을 포함한다. 공급사슬은 역동적이며, 각 단계들 간에는 끊임없는 정보, 제품, 자금의 흐름이 존재한다. 공급사슬이 존재하는 가장 주된 목적은 이윤을 발생시키기 위해 고객요구를 충족시키는 데에 있다. 이러한 공급사슬 환경에서 고객의 요구를 충족시키기 위해서는 수요나 공급의 불확실성에 대비하여 재고를 보유하여야 한다. 그러나 재고의 과보유는 재고를 관리하는데 있어서 많은 비용을 초래하게 된다. 일반적으로 고객대응성과 효율성 사이에서 공급사슬 성과를 재고와 운송부분으로 크게 나누어 생각해 볼 수 있다. 재고는 공급사슬 내에 있는 원자재, 재공품, 완제품 모두를 말한다. 재고정책의 변화는 공급사슬의 효율성과 대응도에 지대한 영향을 미치기 때문에 재고는 매우 중요한 공급사슬 성과요인으로 볼 수 있다. 예를 들어 의류 소매상은 많은 양의 재고를 보유함으로써 고객 대응수준을 더 높일 수 있다. 즉 많은 양의 재고를 통해 소매상이

고객의 요구를 즉시 만족시킬 수 있는 가능성은 높아진다. 그러나 많은 양의 재고는 소매상의 재고비용을 증가시키기 때문에 비효율적이다. 재고 절감은 고객 대응도에는 해를 끼치지만 소매상으로 하여금 효율성을 높여준다. 운송(transportation)은 공급사슬내의 한 지점에서 다른 지점으로 재고의 이동을 수반한다. 운송은 그 수송방법과 경로에 따라 각자 특징적인 많은 조합을 생성할 수 있다. 운송의 선택은 공급사슬의 대응도와 효율성에 큰 영향을 미친다. 예를 들어 우편 주문 판매회사는 제품을 배송하기 위해 3PL회사를 이용함으로써 공급사슬을 더 효율적이게 한다. 하지만 높은 비용으로 3PL회사와 제휴한다면 효율성은 감소할 것이다. 또한 기업은 제품 배송을 위해 들러야할 지점들의 순서에 따른 최적 경로생성에 따라 운송비용의 절감을 얻을 수 있을 것이다. 최근에는 공급사슬 전체의 효율을 극대화 하기 위해서 부분적인 요소만을 고려하는 부분 최적화에서 벗어나 여러 요소를 통합하여 다루는 공급사슬의 통합이 필요하다. 따라서 이러한 재고비용과 수송비용을 동시에 고려할 수 있는 재고문제와 수송문제의 통합에 대한 필요성이 최근에 대두되었다. 따라서 고객들의 재고보충계획을 수립하여 어느 기간에 얼마만큼의 양을 보충해 줄 것인가를 결정하고 그 계획에 따라 최적경로를 결정하는 재고경로문제가 필요하게 되었다.

2. 기존 연구

고객에 재고보충계획과 경로를 결정하는 재고경로 문제는 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 그에 대한 내용을 살펴보면 다음과 같다.

Jaillet et al.(2002)은 rolling horizon을 사용하여 재고비용 및 수송비용에 대한 근사값을 구하였으며 Gaur와 fisher (2004)는 IRP문제를 슈퍼마켓 체인모형에 적용시켜 보충 주기 및 경로를 구하였다.

Bertazzi et al. (2002)은 order-up-to level정책을 사용하여 보충시점 및 경로를 구하였다. 또한 제약이론에 관한 연구도 다양하게 이루어져 왔다. 제약이론은 다음과 같은 세 가지 연구주제를 통해 진화하여 왔다. 첫째 제약이론의 로지스틱 패러다임으로 불리는 것으로 생산운영관리의 생산일정계획에서 사용할 수 있는 드림-버퍼-로프

스케줄링 방법, 버퍼관리 시스템 등이 이에 포함된다. 둘째, 성과 측정할 수 있는 방법으로 전통적인 원가회계와는 전혀 다른 측정 방법을 제공하며 셋째 지속적인 개선 방법으로서 핵심 문제를 파악하고 분석할 수 있는 일반적인 접근방법으로 원인-결과-원인 도표, 구름제거방법과 같은 방법이 이에 속한다. 먼저 제약이론의 기본 개념은 시스템의 제약요인에 집중함으로써 지속적인 개선을 달성할 수 있다는 사실에 근거를 둔 경영철학이다. Fawcett와 Pearson(1991)은 제약자원 관리방법을 적절히 적용한 기업들은 많은 혜택을 볼 수 있으며 특히 중소기업이나 설비자원의 제약이 있는 제조 기업에 매우 효과적임을 주장하였다. Ruhj(1996)은 제약이론의 성과측정 측면에서 기본적인 개념을 설명하고 TOC가 독립적인 성과측정 프로그램이 아니기 때문에 관리자들은 TOC를 총체적인 원가관리 노력의 일환으로 사용할 수 있다고 주장하였다. 두 번째로 제약이론에서는 드럼-버퍼-로프 혹은 DBR이라고 불리는 제약자원에 대한 스케줄링 방법을 제공하고 있다. 시스템의 성과를 최대화 유지하기 위해서는 시스템의 제약자원이 최대로 활용될 수 있어야 한다. DBR 생산통제 기법은 그 후 버퍼관리로 발전하였다. 이에 관한 연구들이 Schragenheim과 Ronen(1990, 1991) 및 Guide와 GHishelli(1995), Simmon등 (1996), Uzsoy와 Wang (2000)에 의해 이루어 졌다. 이 외에 성과측정 연구는 Luebbe와 Finch (1992), Mayday (1994), Coman과 Ronen (2000), Holmen(1995)에 의해 이루어 졌고 사고체계 연구는 Boyd와 Cox(1997), Gattiker와 Boyd (1999)에 의해 이루어 졌다. 이러한 제약이론을 공급사슬에 적용한 연구로는 simatupang et al. (2004)이 공급사슬 협업에 제약이론을 적용하여 협업 시 일어날 수 있는 제약에 대한 문제 해결에 제약이론의 적용이 이루어졌으나 아직까지 공급사슬경영에 제약이론을 적용한 연구가 미흡하다.

3. TOC (Theory of constraints)

TOC(Theory of constraints)는 물리학을 전공한 골드랏(Eliyahu Moshe Goldratt) 박사가 1975년 꾸준히 추구하여 왔던 개념과 도구들을 한곳에 집대성한 경영 패러다임이다. 이 패러다임은 그가 박사학위 논문을 작성하면서 개발하였던 유치 흐름에 관한 최적화 이론을 공장의 물류개선을 위한 스케줄링 방법에 응용하면서 시작되었다. TOC는 흐름개념의 경영 의사결정을 위한 포괄적 원칙으로 발전되었으며, 이를 위한 다양한 도구를 제공한다. 또한 의사결정의 초점을 제약에 맞추어 물자의 흐름, 돈의 흐름, 생각의 흐름을 최적화한다. 마치 지레의 원리처럼 적은 노력으로 최대의 효과를 거두는 원리에 기반을 두고 있다. 흐름의 제약에 초점을 맞추는 TOC 의사결정 과정은 다음과 같은 3단계 질문 형식으로 표현된다. 이를 집중개선 프로세스라고 한다. 첫 번째로 "무엇을 변화시키는가"이다. 여기서 흐름은 막는 제약과 핵심문제를 찾는다. 두 번째로 "무엇으로 변화할 것인가"이다. 전체 흐름량을 최대화하는 것이며 세 번째로는 "어떻게 변화를 추진

하는가"이다. 여기에서는 핵심문제를 해결하고 제약의 흐름을 최대화 시킨다. 즉 TOC는 어떤 문제에 대해서 이미 만들어진 해답을 갖고 있는 경우도 있지만 많은 경우 해답을 찾아가는 방법을 안내하는 역학이 더 크다. 다시 말해서 TOC의 요점은 먼저 흐름을 막는 곳 (제약)을 찾고, 이곳을 통과하는 흐름을 모든 의사결정의 기준으로 삼는 것이다. 제약을 찾고 개선하는 TOC의 5단계 개선활동은 다음과 같이 정리되어질 수 있다.

- 단계 1. 시스템의 제약자원을 찾아낸다. (Identify the constraints)
- 단계 2. 제약자원을 최대한 활용하는 방안을 결정한다. (Decide how to Exploit the constraints)
- 단계 3. 그 외의 모든 의사결정은 단계 2의 결정에 종속시킨다. (Subordinate everything else to the decision taken in step2)
- 단계 4. 제약자원의 능력을 향상시킨다. (Elevate the constraints)
- 단계 5. 위 단계들의 적용으로 제약자원이 사라졌다면 단계 1로 돌아간다. (If, in any of the above steps, a constraint is broken, go to step 1)

3.1. 공급사슬 내에서의 재고

공급사슬 내의 재고는 공급과 수요사이의 불균형으로 인해 발생한다. 이는 미래의 수요에 대비하기 위해 재고를 보유하고 있는 소매상에서 적용되어진다. 공급사슬내의 재고의 중요한 역할은 고객이 원할 때 이미 만들어진 제품으로 만족시킬 수 있는 수요의 총량을 증가시키는 것이다. 재고의 또 다른 중요한 역할은 생산과 배송도중에 발생하는 규모의 경제를 활용함으로써 비용을 감소하는 것이다. 재고는 제공품을 위한 원자재에서부터 완제품에 이르기까지 공급사슬 내의 공급자, 생산자, 배송자 그리고 소매업자에 이르기까지 넓게 퍼져있다. 재고는 공급사슬 내의 비용의 중요한 원천이다. 그리고 고객의 서비스수준에 큰 영향을 미친다. 제약이론에서는 재고를 가치를 산출하지 않는 능력의 사용으로 규정한다. 이러한 낭비를 제거함으로써 재고비용을 감소시키고 가치를 산출하지 않는 능력을 줄일 수 있다. 이렇게 낭비를 줄이기 위해서는 재고를 조금만 확보하여야 한다. 하지만 이렇게 재고를 조금만 확보하게 되면 고객이 원하는 시간에 납품을 할 수 없게 되고 판매기회를 상실함으로써 고객을 잃어버리게 되고 판매를 보호할 수 없게 된다. 고객의 서비스 수준을 올리고 판매기회 손실을 최소화하기 위해서는 재고를 많이 확보하여 고객의 요구에 즉시 대응할 수 있어야 한다. 이렇듯 올바른 공급사슬 경영을 하기 위해서는 재고를 적게 확보해서도 많이 확보해서도 안 된다. 이러한 재고 확보 여부에 대한 충돌은 아래 그림 1과 같다.

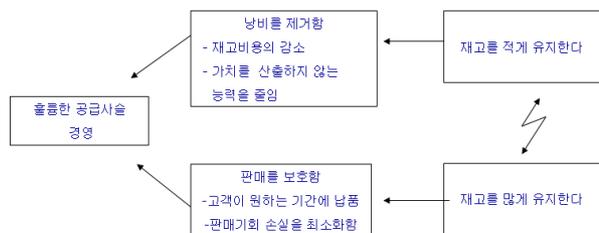


그림 1. 재고확보 여부에 대한 충돌

TOC는 아주 불확실한 상황을 복잡한 예측 기법을 이용하여 아주 정확하게 맞추려고 하는 대신에 충분한 만큼 개략적으로 만들려고 노력을 한다. 따라서 적절한 재고량을 확보하여 위의 문제에 대처하기 위해서 TOC(Theory of constraints)의 버퍼관리를 이용한다.

3.2. 버퍼관리

TOC에서는 드럼-버퍼-로프 혹은 DBR이라고 불리는 제약자원에 대한 스케줄링 방법이 연구되었었다. DBR은 실행 가능한 일정계획을 수립하고 버퍼관리에 의해 실행과정을 제어한다. DBR 스케줄링은 모든 공정의 시작시점과 종료시점을 지정하는 간트차트(Gantt Chart)형식이 아니라, 원자재의 투입시점만 지정하는 방식이다. 그러므로 DBR은 각 공정간 벽을 허물고 서로 협력을 도모할 수 있는 새로운 여건을 조성한다. DBR은 ‘가장 약한 고리’에 해당하는 공정에 한해서 정확한 자료를 요구하면서 계획대로 실행될 수 있는 유한능력 일정계획을 수립한다. DBR은 약간의 재고를 허용하면서 ‘가장 약한 고리’를 먼저 개선함으로써 짧은 시간에 적은 비용으로도 JIT와 거의 같은 효과를 볼 수 있다. DBR 생산통제 기법은 그 후 버퍼관리로 발전하였다. 버퍼란 시스템의 변동을 흡수해서 중요한 위치에 있는 자원의 생산성을 보호하는 것을 말하면 버퍼관리란 불확실성에 대비하기 위해서 재고의 수준을 관리하는 것이다. 버퍼관리는 생산일정계획에서 자원버퍼, 조립버퍼, 출하 버퍼의 수준변동을 모니터링하면서 제약자원과 조립공정을 보호하고 납기약속을 지키도록 관리하였다. 또 이것은 앞 공정의 작업상태를 알려주는 바로미터(barometer) 역할을 한다. 버퍼관리는 쓰루풋 최대화, 대응시간 최소화, 납기준수를 최대화를 달성할 수 있는 도구이며, 일정관리를 제대로 운영시키는 디딤돌이다. MTS환경에 공급사슬 상에서는 제품의 품질에 대비한 재고를 버퍼로 생각하고 접근하였다(simatupang et al.) 그래서 버퍼를 신속처리구역, 추적구역, 안전구역으로 총 3가지 수준으로 구분하였다. 이는 아래 그림 2와 같다. 버퍼관리를 위해서는 먼저 버퍼 크기를 정해야 한다. 기존의 생산일정계획에 버퍼관리에서는 주로 시간으로 버퍼의 크기를 나타내어 조정하였지만 여기서는 재고의 수준으로 나타내어진다. 처음에는 여유있게 수준을 정해 놓고 다시 검토하면서 조정해 가는 것이 좋다. 이렇게 버퍼의 변동을 살피고 조절해 가는 과정을 통해 적절한 양의 재고수준을 유지하면서 고객의 높은 서비스수준을 만족시키면서 재고비용을 줄일 수 있다.

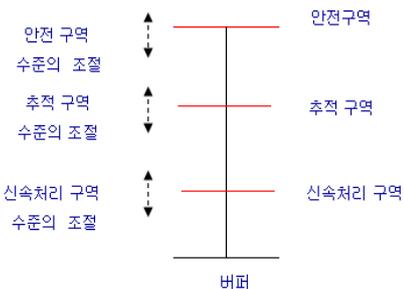


그림 2. 버퍼관리

4.문제정의 (Problem Definition)

앞에서 언급한 바와 같이 “언제, 얼마만큼의 양을, 어떤 경로로” 가져다 줄 것인지를 결정하는 재고경로문제 (Inventory Routing Problem)로서 하나의 중앙창고와 다수의 소매점으로 구성되어 있다. 또한 계획기간 (500기간/일)을 가지며 버퍼관리 정책을 사용하여 버퍼관리 알고리즘에 따라 소매점에 재고보충계획을 세우며 보충주기 내 각 기간별로 소매점들의 차량경로계획이 수립되어져서 최적의 경로를 탐색하고 최적경로로 제품을 보충하여 주게 된다. 재고보충 주기 내에는 각 소매점 별로 단 한 번의 재고 보충이 이루어지며 재고의 부족 시에는 비상보충을 허용한다. 이러한 비상보충은 중앙창고의 차량을 이용하는 것이 아닌 외부 업체와의 아웃소싱 계약에 의해 제 3의 운송업체에서 담당하게 된다. 이 문제의 가정 사항으로는 중앙창고의 재고비용과 용량은 고려하지 않았으며 물품은 단일품목으로 한정되어 있으며 불확실한 수요를 가지고 있다. 또한 비상보충으로 인해 Backorder는 고려하지 않는다. 또한 중앙창고에서 소매점간의 운송은 1기간(일)에 처리가 가능하다.

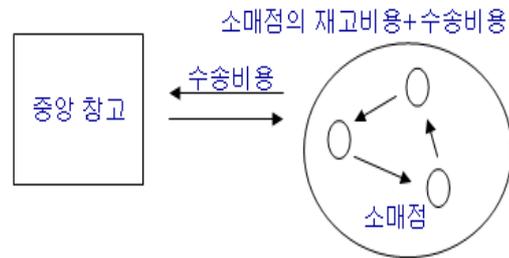


그림 3. 재고경로 문제

이러한 재고경로문제(Inventory Routing Problem)의 제약요인에 대해 알아보면 수요의 불확실성을 들 수 있다. 이러한 수요의 불확실성으로 인한 재고의 부족으로 소비자가 구매할 제품에 대한 기회상실에 따른 재고 비용의 증가가 발생된다. (simatupang et al., 2005) 또한 재고보충을 위한 차량의 운송 시 차량의 대수가 제한되고, 운행시간의 제한 및 급변하는 도로사정, 고객 수요의 변동 등으로 인한 운송 비용 등을 제약요인으로 꼽을 수 있을 것이다. 이러한 제약요인을 해결하기 위해서는 적절한 시점에 적당량의 재고를 유지할 수 있도록 적절한 재고의 관리가 필요하며 이를 위해서 재고보충 일정계획 수립 시 버퍼관리를 도입하여 재고비용을 감소시킨다. 또한 소매점간의 최적경로를 탐색하고 수송을 실행함으로써 운송비용을 감소시킬 수 있다.

4.1. 기호정의

i, j	임의의 소매업자 $(1, \dots, n), i \neq j$
t	임의의 기간
R_n	소매업자 들의 n 번째 재고 보충 검사 주기
D_i	소매업자 i 의 단위 기간당 수요
μ_i	소매업자 i 의 단위 기간당 평균
σ_i	소매업자 i 의 단위 시간당 수요의 표준편차
μ_{it}	소매업자 i 의 보충리드타임에 대한 평균 수요
σ_{it}	소매업자 i 의 보충리드타임에 대한 표준편차
S_{it}	소매업자 i 의 보충주기 별 재고 보충량
OH_{it}	소매업자 i 의 t 기간 보유 재고
SO_{it}	소매업자 i 의 t 기간 재고 부족 수준
I_{it}	소매업자 i 의 t 기간 수요를 충족시킨 후 재고량
SL_{it}	소매업자 i 의 수요에 대한 서비스 수준
FB_i	소매업자 i 의 신속처리구역 버퍼 수준
TB_i	소매업자 i 의 추적구역 버퍼 수준
SB_i	소매업자 i 의 안전구역 버퍼 수준
EC	소매업자에 대한 단위 기간의 비상보충 비용
ER_{it}	소매업자 i 의 비상 보충량
CH	소매업자에 대한 단위 재고의 유지 비용
CP	소매업자에 대한 단위 재고의 손실 비용
CO	소매업자에 대한 단위 제품당 주문 비용
IC_i	소매업자 i 의 재고비용당 단위 재고의 손실 비용
v	차량
T	재고보충일정 내의 기간의집합
N	모든 소매업자의 집합
N_t	기간 별 차량경로계획 대상이 되는 소매업자의 집합
tr_{ij}	소매업자 i 와 소매업자 j 사이에 기간의 운송시간
s_i	소매업자 i 의 서비스 시간
fc	차량사용에 대한 고정비용
vm	사용가능한 최대 차량 허용대수
vc	차량 최대 허용량
TM	기간내 허용된 운송 가능 시간
x_{ijt}	소매업자 i 와 소매업자 j 사이에 t 기간의 운송량
y_{it}	$\begin{cases} 1: \text{소매업자 } i \text{에 } t \text{기간에 재고보충이} \\ \text{있는 경우} \\ 0: \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$
e_{ijt}	$\begin{cases} 1: t \text{기간에 소매업자 } i \text{와 소매업자 } j \text{의 운송이} \\ \text{있는 경우} \\ 0: \text{그렇지 않은 경우} \end{cases}$

5. 재고경로문제 (IRP)의 알고리즘

재고경로문제의 해결을 위해 재고보충 일정계획 수립과 차량경로문제를 고려하는 알고리즘을 제안하고자 한다. 재고보충 일정계획을 수립하여 기간별 평균 재고비용을 계산하고 재고관리 정책에 따라 재고보충에 따른 기간별 평균 수송비용을 계산함으로써 보충주기 내 최소의 비용을 가지는 소매점 별 리드타임과 재고 보충량, 그리고 최적경로를 찾을 수 있다.

5.1. 재고보충 일정계획 수립

재고보충 일정계획은 버퍼관리 알고리즘에 따라 재고비용을 최소로 할 수 있는 재고 보충 일정계획을 수립하게 된다. 따라서 서비스 수준을 고려한 버퍼관리 정책을 재고관리 정책으로 사용하였다. 서비스 수준이란 보유하고 있는 재고로써 고객의 수요를 만족시키는 수준으로서 정의할 수 있다.

$$SL_{it} = P(D_{it} < I_{it}) = \Phi\left(\frac{I_{it} - \mu_{it}}{\sigma_{it}}\right) \quad (1)$$

그리고 제품은 제품성장 단계를 지나 안정단계에 접어들어서 제품의 수요가 어느 정도 안정되어 있다는 가정 하에 각 소매업자의 수요는 정규분포로 가정한다.

$$D_i \sim N(\mu_i, \sigma_i), \quad \mu_{it} = \mu_i \times t, \quad \sigma_{it} = \sqrt{\sigma_i^2 \times t} \quad (2)$$

또한 각 소매업자의 리드타임동안의 수요는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\mu_{it} = \mu_i \times L_i, \quad \sigma_{it} = \sqrt{\sigma_i^2 \times L_i} \quad (3)$$

앞에서 설명했던 버퍼관리에 대한 알고리즘을 제안하고자 한다. 버퍼는 신속처리 구역, 추적 구역, 안전구역의 3가지 수준으로 나누어지며 초기 버퍼의 수준은 아래와 같이 정해진다. 신속처리 구역 버퍼는 가장 하단에 존재하는 버퍼수준으로써 기존의 재고정책에서 쓰이는 안전재고의 개념과 유사하다.

$$FB_{i0} = k \cdot \sigma_{i_i} = k \cdot \sigma_i \cdot \sqrt{L_i} \quad (4)$$

다음으로 중간 수준인 추적구역은 초기에는 중간 수준의 수준으로 설정되어지지만 재고 보충 주기 내에 기간별 재고의 수준에 따라 조정되어 짐으로써 보충주기 동안의 재고의 상황을 알 수 있는 척도로써 활용 되어진다. 따라서 재고의 수준의 변화를 추적하는 척도라고 볼 수 있으며 버퍼관리에서 중요한 역할을 담당한다.

$$TB_{i0} = \frac{FB_{it} + SB_{it}}{2} \quad (5)$$

마지막으로 가장 상위 수준인 안전구역 버퍼는 재고 보충량 산정 시 활용되어지며 재고 수준이 이 수준에 위치할 경우에는 추적하거나 따로 모니터링 할 필요가 없는 안전구역이다. 이 구역의 초기 버퍼수준은 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$SB_{i,0} = u_i \cdot L_i + k \cdot \sigma_{I_i} \quad (6)$$

이렇게 설정된 초기 버퍼수준을 증가하고 감소시키는 버퍼조정에 관련된 버퍼관리 알고리즘은 아래와 같이 보여 질 수 있다.

먼저 Case 1의 경우를 살펴보면 현재의 재고 수준이 안전구역의 미 침투 시에는 안전구역 버퍼 수준을 감소하고 추적구역 수준을 증가시킨다. 현재의 재고 수준이 안전구역을 미 침투했다는 것은 안전구역 수준이 상대적으로 높게 설정되어서 미 침투되어진 상태이기 때문에 안전구역 수준을 낮추어 줌으로써 재고의 보충량을 줄일 수 있다. 아래의 그림 4를 참조하면 쉽게 이해할 수 있다.

다음경우는 Case 2로써 추적구역의 위치를 조사하였을 경우 추적구역의 수준이 신속처리 구역보다 높게 설정되어 있을 경우이다. 재고의 보충주기 내에 재고 수준의 변화에 따라서 추적구역의 수준이 변화되어지기 때문에 추적구역은 보유하고 있는 재고의 수준 및 상태를 알려주는 척도의 역할을 하기 때문에 추적구역 수준이 신속처리 구역보다 높게 설정되어 있는 경우는 아직까지 재고의 보유량이 적지 않아서 재고 부족의 확률이 낮은 것을 의미한다. 따라서 이 경우에 신속처리 구역의 침투조사를 하여서 재고가 부족할 경우가 발생 시에만 추적구역을 감소시키고 비상보충을 실시하여 준다. 재고 부족상황이 없고 신속처리 구역만을 침투할 경우에는 추적구역의 수준만 감소시켜 주도록 한다.

다음 경우는 Case3으로써 앞에 Case 2와 달리 추적구역 수준이 신속처리구역의 수준보다 낮게 형성되어 있는 경우으로써 이미 재고의 수준이 신속처리 구역 수준 밑으로 많이 침투되어서 재고의 보유 수준이 낮은 상태임을 말해준다. 이렇듯 침투가 잦은 것은 상대적으로 신속처리 구역이나 안전구역의 버퍼 수준이 낮게 형성되어 있음을 의미하므로 추적구역 수준을 제외한 안전 구역의 버퍼수준과 신속처리구역의 버퍼 수준을 높여줘야 할 필요가 있다. 따라서 재고의 부족 상황이 발생하지 않았을 경우는 신속처리 구역의 버퍼수준만을 증가시켜 주고 재고의 부족 상황이 발생하였을 경우에는 안전구역 버퍼수준과 신속처리 구역의 버퍼 수준을 동시에 증가시켜 주며 추적구역을 감소 시켜 주도록 한다. 또한 재고 부족에 대해 고객의 서비스수준을 유지시켜 고객에 대한 판매 기회상실 및 고객을 잃어버리지 않기 위해서 비상보충이라는 대응책을 사용하도록 한다. 비상보충 시 차량경로계획은 따로 구성하지 않도록 한다. 이유는 현재의 기업은 비상보충의 경우에 아웃소싱을 통해 전문운송기업인 3PL회사와 계약이 이루어진 상태로서 비상 보충량에 따른 별도의 비용만 부담할 뿐 비상보충에 따른 차량의 제한과 경로계획은 따로 고려하지 않도록 한다. 비상 보충 시 급하게 보충해야할 비상 보충량의 산정은 식 7과 같다. 비상 보충량은 신속처리구역의 수준만큼 계산되어지며 그 다음기간에 재고 보유량에 추가되어짐을 알 수 있다.

$$ER_{it} = \begin{cases} TB_{it} & I_{it} \leq 0 \\ 0 & I_{it} > 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$OH_{it+1} = I_{it} + ER_{it} \quad (8)$$

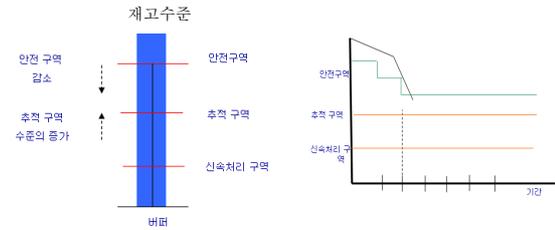


그림 4. Case 1 버퍼관리



그림 5. Case 2 버퍼관리

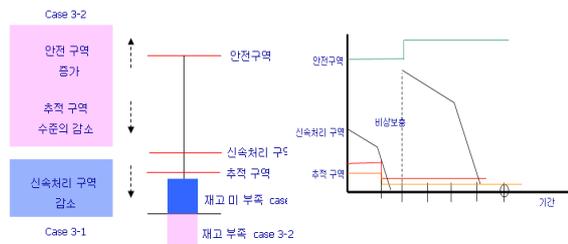


그림 6. Case 3 버퍼관리

위의 경우에 따른 알고리즘을 매 기간마다 적용하여 재고 보충주기 내에 각 버퍼의 수준을 조절하도록 한다. 또한 검사기간이 보충주기가 되었을 경우에는 보충주기에 대한 검사가 이루어진다. 즉 재고 부족상황이 많이 일어났다면 보충주기가 너무 길어져 보충리드타임이 너무 늘어나서 재고 부족상황이 자주 발생할 수 있다. 따라서 이런 경우에는 재고의 보충주기를 줄여주어야 하며 반대로 재고 보충주기가 너무 짧은 경우에는 수송비용이 증가하게 되므로 상대적으로 보충주기를 다시 늘려줘야 한다. 이러한 과정에 의해서 보충주기를 적절한 수준으로 조절하게 된다. 보충주기의 기간에는 보충주기에 대한 조절뿐만 아니라 재고의 보충량을 산정

하기도 한다. 재고의 보충량은 보충주기별 해당 기간의 안전구역 수준 - 추적구역 수준으로 이루어진다. 즉 보충주기 내에 추적구역의 수준에 따라서 보충량의 크기가 결정되어 지는 것이다. R_n 은 보충주기를 나타내고 재고 보충량 식을 나타내면 다음과 같다.

$$S_{iR_n} = SB_{iR_n} - TB_{iR_n} \quad (9)$$

따라서 위의 알고리즘을 정리해 보면 다음과 같다. 단계 0. 각각의 소매업자는 수요를 자신의 재고로 충족 후 재고보유량을 계산

- 단계 1. 안전 구역의 버퍼에 대한 침투여부 조사
 - 단계 1.1. 안전구역의 버퍼 침투 시 단계 2로 이동
 - 단계 1.2. 안전구역의 버퍼 미 침투 시 안전구역의 버퍼 수준 감소, 추적구역의 증가, 단계 6으로 이동
- 단계 2. 추적구역의 위치 조사
 - 단계 2.1. 추적구역이 신속처리 구역보다 높으면 단계 3으로 이동
 - 단계 2.2. 추적구역이 신속처리 구역보다 낮으면 단계 5로 이동
- 단계 3. 추적구역의 침투조사
 - 단계 3.1. 추적구역의 침투에 따른 추적구역 감소
 - 단계 3.2. 단계 4로 이동
- 단계 4. 신속처리 구역의 침투 조사
 - 단계 4.1. 재고 부족여부 조사
 - 단계 4.1.1 재고 미 부족 시 추적구역 감소, 단계 6으로 이동
 - 단계 4.1.2. 재고 부족 시 추적구역 감소. 비상보충 실시, 단계 6으로 이동
- 단계 5. 재고 부족여부 조사
 - 단계 5.1. 재고 미 부족 시 신속처리구역 수준 증가, 단계 6으로 이동
 - 단계 5.2. 재고 부족 시 안전구역 버퍼 수준 증가, 추적구역 감소, 비상보충 실시, 단계 6으로 이동
- 단계 6. 재고 보충주기 검사 및 종료기간 검사
 - 단계 6.1. 보충주기 별 보충주기 내 재고 부족 상황의 횟수에 따라 보충주기의 증가 및 감소 결정
 - 단계 6.2. 보충주기가 아니면 단계 0으로 이동
 - 단계 6.3. 종료기간에 해당하면 종료

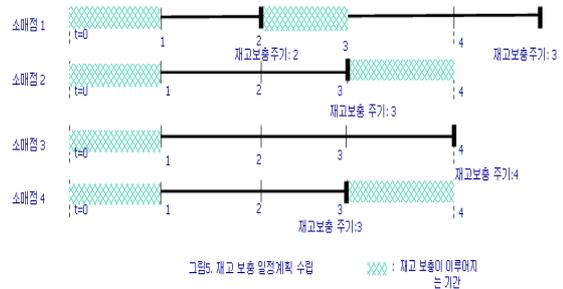
위의 알고리즘을 통해 버퍼관리가 이루어지며 이러한 버퍼관리 재고관리 정책을 통해 재고 주문량과 재고 보유량, 재고 부족량, 비상보충량을 계산함으로써 재고의 비용을 얻을 수 있다. 따라서 재고의 비용은 재고 주문비용 + 재고보유비용+ 재고 부족비용+ 비상보충비용으로 구성되어 진다.

$$I_{it} = OH_{it} - D_{it} \quad OH_{it} \geq D_{it} \quad (10)$$

$$SO_{it} = D_{it} - OH_{it} \quad OH_{it} < D_{it} \quad (11)$$

$$IC = \sum_i \sum_{t=1}^T (CO \cdot S_{it} + CH \cdot I_{it} + CP \cdot SO_{it} + EC \cdot ER_{it}) \quad (i=1, \dots, n) \quad (12)$$

위의 소매점 별 보충 주기내의 보충리드타임에 대한 결정은 버퍼알고리즘의 보충주기 조절에 따라 결정되어 진다. 따라서 중앙창고에서 소매점으로 보충주기 기간에 출발하여 리드타임 후에 재고를 보충하여 주게 된다. 각 소매점 별로 보충 주기 내에 한 번의 보충만 이루어지며 이 리드타임은 전체 계획기간에 걸쳐 적용되어진다.



5.2. 차량경로계획 수립

차량 경로계획 문제는 전체 계획기간 내에 기간별도 발생되어 지며 보충 리드타임이 검사기간에 해당하는 소매점들의 차량경로를 세우는 계획이다. 차량경로문제는 차량의 용량과 차량의 수량제한을 제약조건으로 두고 또한 소매업자에 들어오는 차량수와 나가는 차량수가 동일하여야 하며 한 기간 내에는 소매업자에는 한 대의 차량의 한번 방문만 허용한다. 이러한 차량경로문제에 대한 식을 나타내면 다음과 같다.

위의 식을 살펴보면 차량운송비용을 최소로 하는 것을 목적식으로 하며 (13)식과 같다. (14)의 식은

$$\text{Min} \sum_i \sum_{j \in N_i} c_{ij} \cdot x_{ij} \quad (13)$$

Subject to

$$\sum_{i \in N_i} e_{jiv} - \sum_k e_{jkv} = 0 \quad \text{for } t \in T, v \in V, j, k \in N \quad (14)$$

$$\sum_j \sum_v e_{jiv} = 1 \quad \text{for } i \in N \quad (15)$$

$$\sum_i \sum_v e_{0iv} \leq vm \quad (16)$$

$$x_{jk} \leq \sum_v vc \cdot e_{jkv} \quad \text{for } j, k \in N, v \in V \quad (17)$$

$$\sum_i x_{ij} - \sum_k x_{jk} = S_i \cdot y_j \quad \text{for } j \in N \quad (18)$$

$$\sum_v (e_{jiv} + e_{jiv}) \leq 1 \quad \text{for } i, j \in N \quad (19)$$

$$\sum_j \sum_v e_{ijv} = y_i \quad \text{for } i, j \in N \quad (20)$$

$$y_i = 1 \quad \text{for } i \in N \quad (21)$$

$$x_{ijv} \geq 0, e_{ijv}, y_i \in \{0, 1\} \quad (22)$$

소매업자에 들어오는 차량수와 나가는 차량수가 동일한 것을 표현한 식이며 (15)식은 소매업자에 한 대의 차량만 허용을 한다는 제약조건을 나타내며 (16)식은 가용한 차량의 대수 제한되어 있음을 나타낸다. 다음으로 (17)식은 수송이 가능한 차량의 경우 차량에 실을 수 있는 용량이 한정되어 있는 제약식을 나타낸다. (18)식은 소매업자 j의 재고보충량을 나타내는 식이며 (19)식은 I, j간 경로발생시 j와 I의 경로생성을 제한하는 제약식이며 (20)의 식은 소매업자에 한 번의 경로만 생성할 수 있음을 나타낸다. 이러한 차량경로 문제의 경우 Danzig and Ramser(1959)에 의해 NP-hard 문제로 밝혀졌으며 이러한 일반적인 차량경로문제에서 Tabu 탐색 알고리즘이 가장 효과적으로 사용될 수 있다. (Baker and sheasby, 1999) 따라서 차량 경로문제 해법을 위해 Shalhi and rand(1993)에 Tabu탐색 알고리즘 방법을 수정하여 개발하였다.

Tabu 탐색 알고리즘 절차는 다음과 같다. 먼저 단계 1에서 초기화를 시킨 후 단계 2에서 초기해를 생성한다. 초기해는 각 기간별로 차량경로 대상이 되는 소매점을 차량용량을 고려하지 않고 한 대의 차량에 단일 경로로 생성한다. 이렇게 생성된 차량 경로에 3-optimal을 통해 최소의 비용을 가지는 차량경로로 재구성한 후 차량의 용량에 맞게 각 소매점을 순서대로 차량에 할당한다. 이렇게 생성된 초기해의 이웃 해를 생성하기 위해서 차량별로 할당된 소매점의 교환을 한다. 이때 질 좋은 이웃 해를 생성하기 위해서 차량별로 남아있는 용량을 고려하여 차량용량 제약조건에 맞는 소매점만 랜덤하게 교환하여 이웃 해를 생성한다. 이렇게 생성된 이웃 해에 대해 3-optimal을 통해 이웃해의 개선을 이루며 최적의 경로를 탐색하게 된다. 이때 생성된 이웃해와 최적 해에 대해 타부리스트를 작성하게 되며 반복회수 조건인 종료조건이 만족되어 질 때까지 반복하게 된다.

위의 Tabu탐색 알고리즘을 통한 차량경로문제 해결과 버퍼관리 알고리즘을 통해 재고보충 일정계획 문제를 해결함으로써 재고경로문제 (IRP)에 해법에 대한 알고리즘을 제안하고자 한다.

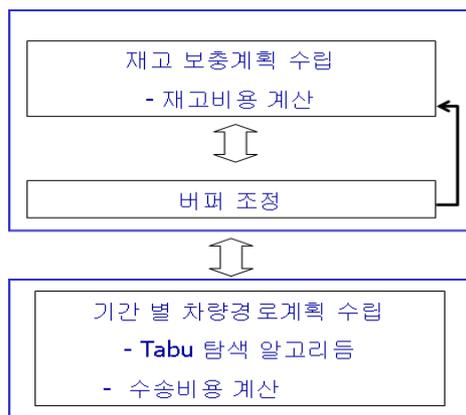


그림6. 제안알고리즘

6. 수치예제

실험은 재고보충문제에의 경우 시뮬레이션 프로그램인 Arena 9.0을 이용하여 진행하였다. 실험에 사용되어진 컴퓨터는 펜티엄4 3.1Ghz에 1G Ram을 사용하였다. 재고보충 문제의 경우 시스템이 steady

state상태의 시뮬레이션으로 볼 수 있지만 제한된 계획기간 내의 자료만 필요로 하므로 종료형 시뮬레이션으로 가정하고 절단된 반복 실행법을 사용하였다. 시뮬레이션의 실행에 앞서 시스템이 안정화 상태에 있을 때의 시뮬레이션을 진행하기 위해서 Warm-up period를 설정해 주어야 한다. 따라서 Arena 9.0의 output analysis기능을 통해 분석결과 각각 200period의 warm-up period를 설정해 주었다. 따라서 시뮬레이션의 실험은 총 500기간의 계획기간에 100회의 시뮬레이션을 진행하였다. 또한 각 소매점의 수요에 대한 실험 시나리오는 다음과 같이 구성하였다.

소매업자	A Set		B Set	
	평균	표준편차	평균	표준편차
1~25	10~50	0~10	10~50	0~50

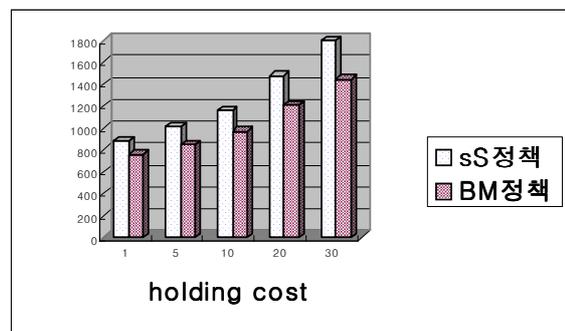
표 1. 소매점의 수요분포 차량경로문제의 입력모수

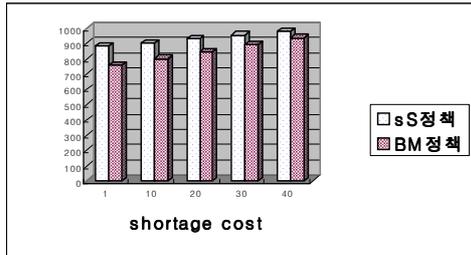
노드수	10	25	50
차량수	4	6	10
차량 용량	100	200	200
수요	Uniform(10,60)	Uniform(10,60)	Uniform(10,60)

Tabu 탐색 해의 비교

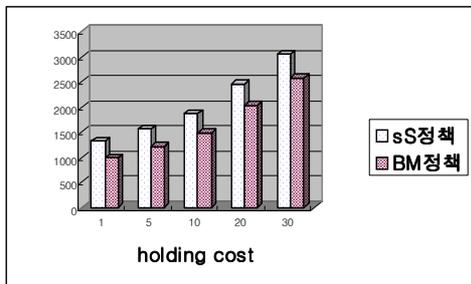
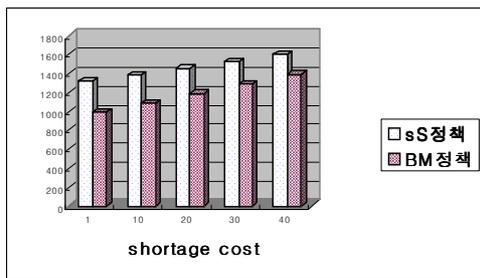
노드수	heuristic (saving)		Tabu		cplex		error
	값	시간(초)	값	시간(초)	값	시간(초)	
10	1350	4.8	1285	26.843	1285	70264.9	5%
25	7630	14.7	6650	100.23	-	-	14.7%
50	16240	21.3	10700	137.516	-	-	51.7%

실험 A set의 재고경로비용 분석





실험 B set의 재고경로비용 분석



6. 결론 및 향후 연구방향

앞에서 재고경로문제 (IRP)에 대해 제약이론의

개념을 적용하여 보았다. 제약이론을 이용하여 재고경로문제 (IRP)에 대한 제약요소를 찾고 이를 해결하기 위해서 버퍼관리를 도입하여서 버퍼관리라는 재고정책을 제안하였다. 또한 버퍼관리의 알고리즘과 타부서치 알고리즘을 제안하여 재고경로문제 (IRP)의 해법에 대한 새로운 알고리즘을 제안하였다. 앞으로 더 많은 시나리오를 통해 더 정확한 분석이 필요하며 전체 재고경로문제에 대한 실험이 더 필요하다. 또한 노드 수를 증가시켜서 큰 문제 사이즈에서의 실험도 필요할 것으로 보이며 향후에는 단일계층이 아닌 다단계의 공급사슬으로 모형을 확장하여 중앙창고의 재고비용과 용량도 제한되어져 있을 경우의 문제도 개발하여 연구하여야 할 것이다.

참고문헌

김선민, 박광훈.,(2001) 제약이론의 최근 연구동향, *한국생산관리학회지*, 11, 88-110.
 정남기, (1999) TOC 제약경영, *대청미디어*.
 최광식,(2001) 기업회생을 위한 패스워드, *한국 언론자로 간행회*,.
 Bertazzi, L., G. Paletta. and M. G. Speranza., (2002), Deterministic Order-Up-To Level Policies in an Inventory Routing Problem, *Transportation Science*, 36, 119-132.
 Baker, B. M. and Sheasby, J.(1999), Extensions to the Generalized assignment Heuristic for Vehicle Routing, *European Journal of operational Research*, 119, 147-157 .
 Campbell, A. M. and M. W. P. Savelsbergh, (2004), A Decomposition Approach for the Inventory-Routing Problem, *Transportation Science*, 38, 488-502.
 Gaur, V. and M. L. Fisher.,(2004), A Periodic Inventory Routing Problem at a Supermarket Chain, *Operation Research*, 52, 813-822..
 Herer, Y. T. and R. Levy.,(1997), The metered Inventory Routing problem, An Integrative Heuristic Algorithm, *International journal of production economics*, 51, 69-81.
 Jaillet. P., J. F. Bard., L. Huang. and M. Dror. (2002), Delivery Cost Approximations for Inventory Routing Problems in a Rolling Horizon Framework, *Transportation Science*, 36, 292-300 .
 Salhi, S. and Rand, G. K.,(1993), Incorporating Vehicle Routing Into The Vehicle Fleet Composition Problem, *European Journal of Operational Research*, 66, 313-330.
 Simatupang. T. M., A. C. Wright. And R. Sridharan.,(2004), Applying the Theory Of Constraints To Supply Chain Collaboration, *Supply chain management*, 9, 55-70 .