

시스템 가동률에 따른 수리 부속 제품의 재고 수준 결정에 관한 연구

정석재[†] · 한승훈 · 김경섭

연세대학교 정보산업공학과 박사과정

Study for Determining an Inventory Level of Spare Parts according to System Utilization

Suk Jae Jeong[†] · Sung Hoon Han · Kyung Sup Kim

Dept of Industrial & Information Systems Engineering, Yonsei University

It has been a major issue to repair the broken system quickly for improvement of productivity and utilization. Generally, high utilization of system requires the high amount of spare parts in inventory and inventory cost. Therefore, it is necessary to determine the proper amount of inventory with regard to utilization of system. This study designs a methodology for determining the proper amount of inventory level in a two-echelon spare parts distribution system. The requirements are to satisfy proper customer demands at a distribution center and to maintain over the utilization of the whole system at customers. This methodology minimizes total inventory investment at a distribution center and customers.

Keywords : Inventory, Spare Parts, Operating Rate

1. 서 론

기술의 발달로 인하여 현재 생산되는 시스템은 고도의 정밀성과 많은 부가 서비스를 할 수 있도록 설계되었으며, 시스템을 이루는 구성품의 수가 헤아릴 수도 없을 정도로 많은 제품이 생산되고 있다. 이러한 제품으로 군수품의 경우에는 항공기, 전차, 함정, 기타 첨단 무기 등을 들 수 있으며 상용으로는 수송장비, 건설장비, 중장비, 전자장비 등을 들 수 있다. 그 특징으로는 예산의 제약으로 인해 과다하게 많은 재고를 유지하기 어려운 반면, 재고가 부족할 경우에는 시스템 전체의 가동 불능으로 인해 시스템 운영상 큰 문제를 초래하므로 시스템을 구성하는 모든 구성품에 대하여 적정 재고수준을 유지하는 효율적인 방법이 요구된다. 만약 시스템이 군 관련 제품일 경우에는 작전수행능력을 발휘할 수 있

는 일정한 운영수준 이상을 요구하므로 전체 시스템의 가동률을 만족하면서 비용을 최소로 하는 재고수준을 결정하여야 한다. 또한 시스템을 사용하는 고객에게 제품을 제공하는 공급망의 상위 단계의 분배센터의 경우에는 재고량의 변동이 심하여 채찍효과가 나타나므로 고객의 수요에 적절하게 대응하는 효율적인 재고관리가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 국외의 외부공급자에게서 제품을 구입하는 분배센터와 시스템을 운영하는 고객으로 구성된 2계층 공급사슬에서, 분배센터에서는 다수의 고객 수요에 대해 일정수준의 고객 서비스를 만족시키는 최적의 재고수준을 결정하고, 고객에서는 전체 시스템의 가동률을 일정수준 이상 유지시키는 최적의 재고수준을 결정하여 분배센터와 고객에서의 재고 투자비를 최소화시키는 방법 및 해법을 제시하는 것이다.

[†] 교신저자 jae7811@yonsei.ac.kr

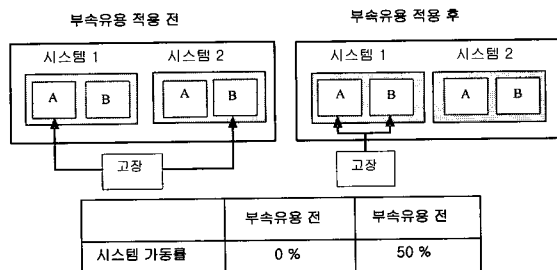
2. 관련 연구

현재까지 시스템 가동률에 관한 연구는 시스템의 신뢰성에 대한 연구가 대부분이고 시스템 가동률과 제품의 재고와 연관한 연구는 미진한 상태이다. 시스템 신뢰성에 대한 대부분의 연구는 시스템을 구성하고 있는 구성품이나 전체 시스템의 수명에 대한 신뢰도를 추정하는 것이며, 재고와 연관한 연구는 오의 1명(2000 ; 2001)의 동시조달제품에 대한 연구가 있다. 동시조달제품은 후속으로 구성품을 지원 받을 수 없는 경우에 계획된 시스템 운영기간 동안에 시스템 가동률을 유지하기 위해서 시스템 구입시 필요한 구성품을 한꺼번에 구입하는 것을 말한다. 이 연구에서는 한 개의 시스템에서 한 부품이 고장나면 시스템이 고장나는 것으로 신뢰성 문제로 접근하여 전체 시스템의 가용도 제약하에서의 동시조달제품의 구매량을 결정하였다.

시스템 가동률과 재고와 연관한 또 다른 연구는 수리 가능제품을 대상으로 대기행렬로 접근한 김의 2명(1998 ; 2001)의 연구가 있다. 수리가능제품은 고장난 제품을 폐기하지 않고 수리 후 재사용하는 것을 말하는데 이 연구에서는 고장나서 재사용 할 수 있도록 수리하는데 시간이 걸리므로 시스템의 최소요구 가동률을 만족시키는 구성품 하나하나의 여유 재고를 산정하였다.

그 밖에 가동률에 관한 연구로는 하나의 시스템을 여러 가지 부속품들의 결합체로 보는 것이 아니라 시스템 자체의 고장 발생률에 따라 예비 시스템의 대수와 수리 자원의 개수를 산출하는 Khan(1999)과 Seal(1995)의 연구가 있다.

그러나 수리가능제품을 대상으로 한 김의 2명(1998 ; 2001)의 연구에서 구성품 하나하나의 최소요구 가동률을 만족시키는 적정 재고 수준을 결정한다고 해서 전체 시스템의 최소요구 가동률을 만족시키지는 못한다. 왜냐하면 구성품이 각기 다른 시스템에서 고장나면 전체 시스템의 가동률은 낮아지기 때문이다. <그림 1>에서 서로 다른 시스템에서 서로 다른 구성품이 고장났을 경우를 보면 알 수 있다.



<그림 1> 부속유용과 시스템 가동률

시스템을 운영하는 고객의 입장에서 서로 다른 시스템에서 서로 다른 구성품이 고장났을 경우에, 고장난 구성품을 교체할 재고가 없으면 <그림 1>에서처럼 불가능한 시스템에서 가용한 구성품을 재사용하는 부속유용 방법을 통하여 운영 가능한 시스템 대수를 최대로 늘리기 때문에 부속품 하나 하나의 최소요구 가동률을 만족시키는 여유재고를 구하면 전체 시스템의 최소요구 가동률을 만족할 수 있다. 그러므로 김의 2명(1998 ; 2001)의 연구에서의 전제조건은 부속유용의 개념을 포함하고 있어야 한다. 동시조달제품을 대상으로 한 오의 1명(2000 ; 2001)의 연구에서는 한 대의 시스템에서 한 부품이 고장나면 시스템이 고장나는 것으로 가정하였기 때문에 부속유용의 개념을 적용시키지 않았다. 이 연구에서는 수리 할 수 있는 재고가 있을 경우에는 부속유용을 적용하든지 안 하든지 똑같은 결과가 나타나지만 재고가 없을 경우에는 부속유용을 한 경우가 더 적은 재고 수준으로 최소요구 가동률을 만족시키는 결과가 나타난다. 시스템을 구성하는 대부분의 구성품은 수리가능제품이든 동시조달제품이든지 간에 부속유용이 가능하기 때문에 부속유용을 적용하는 것이 현실적이며, 부속유용을 할 수 있는 제품에 대해서는 부속유용을 적용시켜 재고수준을 결정하는 것이 타당하다.

분배형 공급사슬에서 재고에 관한 연구는 활발히 이루어져왔다. 기존의 대부분의 분배형 공급사슬의 연구는 하나의 분배센터와 여러개의 고객으로 구성된 단일 분배센터·복수 고객의 2계층 분배형 공급사슬에 관한 것이다. 그 중에서 본 연구의 바탕이 되는 연구로 수리 가능제품을 대상으로 확률적 수요에 대해(S-1, S)의 정책을 적용한 Sherbrooke(1968)에 의해 개발된 METRIC 모델이 가장 기초가 된다. 그 후에 Hopp 외 2명(1997 ; 1999), Graves(1985), Moinzadeh and Lee(1986), Svoronos and Zipkin(1991) 등이 이를 보완 발전 시켰다. Hopp 외 2명(1997 ; 1999)는 단일 분배센터에서 주문횟수와 고객서비스 수준의 제약조건에서 재고 투자비를 최소로 하는 (r, Q)값을 구하는 Heuristic을 제안했다. 그 후에 자신의 연구를 바탕으로 2계층 분배형 공급사슬로 범위를 확장하여 분배센터에서는 주문횟수와 고객서비스 수준의 제약조건을 가지고, 고객에서는 년 간 주문이 지연되는 양의 제약조건을 가질 때 재고 투자비를 최소로 하는 Heuristic을 제안했다. Graves(1985)는 고객의 수요에 음이항 분포를 적용하였으며, Moinzadeh and Lee(1986)는 backorder penalty 비용을 최소화하는 Batch size와 재고 수준을 결정하는 것이었으며, Svoronos and Zipkin(1991)는 수송시간에 확률분포를 적용하여 METRIC 모델을 좀 더 현실화하였다.

또한 분배센터에서의 고객서비스에 관한 연구는 재고 관리 관점에서 고객이 원하는 시점에서 얼마나 수요에 대처하느냐가 관건이므로 재주문점에 대한 연구가 이루어져 왔다. 이에 대한 연구는 Nahmias(1993), Hopp와 2명(1997), Ganesham(1999), Andersson and Melchioris(2001) 등이 있다. Nahmias(1993)는 고객서비스를 2가지 형태, 즉 리드타임 동안 Backorder가 발생하는가 발생하지 않느냐에 따라 Type I과 Type II 서비스를 정의하였으며, Hopp 와 2명(1997)은 Nahmias(1993)의 고객서비스를 적용하여 (r, Q)값을 구하는 3가지 형태의 Type I, Type II, Hybrid Heuristic을 제안하였다. Ganesham(1999)은 여러 개의 공급자, 하나의 재고 창고, 여러 개의 소매점으로 구성된 공급망에 대해 분배센터와 고객과의 서비스를 고려하여 최적에 근접한 (r, Q)값을 구하였다. Andersson and Melchioris(2001)은 2계층 분배형 공급사슬을 M/G/S/S 모델로 구현하여 서비스를 만족시키는 재고량을 구하였다.

3. 모 델

본 연구에서는 공군의 항공기 보급체계를 바탕으로 모델을 수립하였다. 수립된 모델은 공군의 항공기 보급 체계에만 국한되어 적용할 수 있는 것이 아니라 모든 무기체계 및 시스템을 운영하는 모든 기업에 동일하게 적용시킬 수 있다. 단지, 공군을 예로 시스템을 항공기로, 시스템 가동률을 항공기 가동률로 보는 것이다. 공군의 경우에는 보유하고 있는 항공기의 대수, 특히 가동중인 항공기의 대수가 작전 수행능력을 가늠하는 척도로 중요한 관심 대상이며, 이에 따른 수리부속 재고를 얼마나 보유하고 있어야 하는가가 현안 문제이다.

모델 구성은 국외의 외부공급자에게서 제품을 구입하여 여러 개의 비행기지에 제품을 조달하는 군수사령부와, 제품을 소모하고 군수사령부에게로 제품을 주문하여 획득하는 여러 개의 비행기지가 있다. 공급망에 있어서 한 개의 분배센터와 다수의 고객이 있는 것과 동일하다. 재고관리 정책에 있어서 분배센터 역할을 하는 군수사령부는 (r, Q)정책을 사용하며, 고객 역할을 하는 비행기지는 (S-1, S)정책을 사용한다. 항공기 수리부속에 대한 조달은 무기체계 특성상, 국외에서 조달하기 때문에 분배센터로 들어오는 리드타임은 장기간 소요되고, Lost Sale은 없으며 Backorder만 존재한다. 그리고 비행기지인 고객에서는 항공기 가동률을 특정수준 이상으로 유지해야 하며, 군수사령부인 분배센터에서는 원활한 보급을 위해 특정수준 이상의 고객 서비스를 해야 한다.

제품에 대한 수요는 고객에서 수리부속 제품별로 포아송분포로 발생하며, 년 간 수요로 나타낸다. 수리부속에 대하여 비행기지 내에서 자체 정비하여 다시 사용할 경우는 수요에 포함시키지 않으며, 보충해야 될 경우에만 수요에 포함시킨다. 정비로 인한 항공기의 불가동일 경우는 재고 부족으로 발생하는 불가동에 비하여 일시적이므로 정비시간을 0으로 간주하여 항공기 가동률과는 무관하게 본다. 고객에서 항공기 수리부속에 대한 수요가 발생하면 보유하고 있는 수리부속으로 교체, 정비하고 수리부속이 부족하면 Backorder가 발생하고 Backorder가 발생한 양 만큼에 해당하는 항공기 수가 수리부속 재고의 부족으로 불가동 상태가 된다.

3.1 기호 설명

3.1.1 공통 기호

i = 제품번호 ; $i = 1, \dots, N$

C_i = 제품 i 의 비용

$$C = \sum_{i=1}^N C_i$$

3.1.2 결정 변수

Q_o^i = 분배센터에서의 제품 i 에 대한 주문량

r_o^i = 분배센터에서의 제품 i 에 대한 주문점

S_m^i = 고객 m 에서의 제품 i 에 대한 목표재고

3.1.3 고객 기호

m = 고객 번호 ; $m = 1, \dots, M$

d_m = 분배센터에서 고객 m 까지의 제품 배달기간(일)

λ_m^i = 고객 m 에서의 제품 i 에 대한 년 간 평균 수요(개수/년)

l_m^i = 고객 m 에서의 제품 i 에 대한 평균 리드타임(일)

θ_m^i = 고객 m 에서의 제품 i 에 대한 리드타임 동안의 평균 수요

$B_m^i(S_m^i)$ = 고객 m 에서의 제품 i 에 대한 리드타임 동안의 평균 Backorder량

$h_m^i(S_m^i) = S_m^i - \theta_m^i + B_m^i(S_m^i)$ = 고객 m 에서의 제품 i 에 대한 평균 재고량

O_m = 시스템(항공기) 가동률

k = 시스템(항공기) 대수 ; $k = 1, \dots, K$

3.1.4 분배센터 기호

λ_o^i = 분배센터에서의 제품 i 에 대한 년 간 평균 수요

l_o^i = 분배센터에서의 제품 i 에 대한 보충 리드타임(일)

- θ_o^i = 분배센터에서의 제품 i 에 대한 리드타임 동안의 평균 수요
- $A_o^i(r_o^i, Q_o^i)$ = 분배센터에서의 제품 i 대한 품질될 확률
- $B_o^i(r_o^i, Q_o^i)$ = 분배센터에서의 제품 i 대한 리드 타임 동안의 평균 Backorder량
- $h_o^i(r_o^i, Q_o^i)$ = 분배센터에서의 제품 i 에 대한 평균 재고량
- F = 분배센터에서의 연간 주문 횟수
- S = 분배센터에서의 고객 서비스율

3.2 시스템 가동률

시스템 가동률과 수리부속 재고량과의 연관성을 알아보기 위해서 시스템을 항공기로 대체 적용하여 단일제품과 복수제품으로 구성되었을 경우를 살펴보면 다음과 같다. 우선, 단일제품으로 구성되었을 경우 항공기 대수가 K 대 있다는 것은 제품을 K 개 보유하고 있는 것과 동일하며, 항공기가 고장이 났을 경우에 예비 제품을 고장난 제품과 교체하여 운영가능 대수를 항상 K 대로 유지할 것이다. 만일 고장이 발생한 개수보다 예비 제품이 부족하다면 부족한 만큼의 항공기 대수가 불가동 상태로 될 것이고 부족한 제품만큼 Backorder가 발생한다. 이 때, 고객은 분배센터에 불가동 상태로 된 제품의 개수와 예비 보유 재고량만큼을 주문할 것이다. 따라서 항공기의 가동 대수는 예비제품이 남아 있으면 K 대이고, Backorder가 발생한 상태이면 K -Backorder량과 같다. 항공기 가동률은 총 항공기 대수 대 가동 대수의 비율을 말하므로, 항공기 가동률의 정의는 (K -Backorder량)/ K 이다. 복수제품이 모여 하나의 시스템을 구성할 경우에 각 제품별로 Backorder가 발생하였다면 부속유용에 의해 최대 Backorder가 발생한 제품에 해당하는 시스템 수가 불가능 상태가 된다. 그러므로 복수제품의 시스템 가동률의 정의는 (K -제품 i 중 최대 Backorder량)/ K 이다.

3.3 수리 모형

수리모형의 목적식 (1)은 분배센터와 고객에서의 모든 제품에 대하여 연간 재고 투자비의 합을 최소로 하는 것으로 분배센터에서의 재고비용과 고객 m 개의 재고비용의 합을 나타낸다. 제약식 (2)와 제약식 (3)은 분배센터에서 모든 제품에 대하여 연간 주문횟수와 고객 서비스에 대한 조건이며, 제약식 (4)는 고객에서 시스템 가동률에 대한 조건이다. 여기서 목적식은 모든 제품에 대한 연간 재고 투자비의 합을 나타내지만 제약식은 단일 제품에 대해 적용한 것을 알수 있다. 이것은

고객에서 모든 구성품들에 대하여 부속유용을 적용하였기 때문에 각각의 단일제품에 대한 시스템 가동률을 만족시키는 재고수준을 구하면 전체 시스템의 가동률을 만족시키기 때문이다. 분배센터에서도 고객에서 단일제품에 대하여 시스템 가동률을 만족시키는 재고수준을 결정하였으므로 원활한 후속지원을 위해 단일 제품에 대한 고객 서비스율을 적용하였다. 그러므로 목적식 (1)은 각각의 단일제품에 대한 재고 투자비를 최소로 하는 재고투자비를 결정하는 문제인 단일제품 모델로 분해할 수 있다.

Minimize

$$\sum_{i=1}^N C_i \cdot \{h_o^i(r_o^i, Q_o^i) + \sum_{m=1}^M h_m^i(S_m^i)\} \dots\dots\dots (1)$$

subject to

$$\lambda_o^i / Q_o^i \leq F \quad \forall i \dots\dots\dots (2)$$

$$1 - A_o^i(r_o^i, Q_o^i) \geq S \quad \forall i \dots\dots\dots (3)$$

$$1 - B_m^i(S_m^i) / K \geq O_m \quad \forall i, \forall m \dots\dots\dots (4)$$

$$r_o^i, Q_o^i, S_m^i \geq 0, \quad r_o^i, Q_o^i, S_m^i : \text{정수} \dots\dots\dots (5)$$

위의 식 (1)에서 식 (5)는 비선형, 이산 최적화문제이므로 실질적으로 정확한 해를 구하는 것은 어렵다. 왜냐하면 Lagrangian 방법을 적용하는 경우에 정수의 해를 구하므로써 생기는 오차가 발생한다. 또한 근사적 방법을 적용하여 구한 주문량과 재주문점 때문이다. 따라서 본 연구에서는 전체 수리모형을 고객과 분배센터 단계로 분리하여 간단한 방법으로 근사 최적값을 구하는 각각의 Heuristic 모형을 수립하였다.

3.3.1 고객 Heuristic

고객 Heuristic 단계의 목적식 (6)은 식 (1)에서 고객 부분에 해당되는 부분으로 해를 구하기 위해서 각각의 제품과 고객에 대한 $N \times M$ 개의 Submodel을 만들어서 단일제품, 단일고객 문제로 전환하였다.

Minimize

$$\sum_{i=1}^N C_i \cdot \{ \sum_{m=1}^M h_m^i(S_m^i) \} \dots\dots\dots (6)$$

subject to

$$1 - B_m^i(S_m^i) / K \geq O_m \quad \forall i, \forall m \dots\dots\dots (7)$$

$$S_m^i \geq 0 \quad S_m^i : \text{정수} \dots\dots\dots (8)$$

단일제품, 단일고객에 대한 목적식은 식 (9)와 같으며 각각의 단일고객, 단일제품에 대한 재고 투자비를 최소로 하는 것이다. 제약식 (10)은 시스템 가동률의 정의에 따라 항공기 가동률이 요구되는 최소 가동률 이상 되어야 하는 조건으로 리드타임 동안의 수요가 리드타임 동

안의 불가동되어 Backorder가 일어나는 양 이상일 경우에 적용된다. 리드타임 동안의 수요가 Backorder가 일어나는 양보다 작을 경우에는 목표재고 S_m^i 는 0값을 가진다.

Minimize

$$C_i \cdot \{h_m^i(S_m^i)\} \dots\dots\dots (9)$$

subject to

$$1 - B_m^i(S_m^i)/K \geq O_m \dots\dots\dots (10)$$

$$S_m^i \geq 0 \quad S_m^i : \text{정수} \dots\dots\dots (11)$$

목표재고량 S_m^i 는 lagrangian 방법으로 Nahmias(1993)의 Type II 서비스를 적용하여 식 (12)와 같으며 여기서 ρ 는 Lagrangian 계수이며 $\Phi(\cdot)$ 는 리드타임 동안의 수요에 대한 누적분포함수이다.

$$S_m^i = \begin{cases} \theta_m^i + \Phi^{-1}\{1 - (C_i K)/\rho\} \cdot (\theta_m^i)^{1/2}, & \text{if } C_i K \leq \rho \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots\dots (12)$$

또한 고객 m 에서 제품 i 에 대한 리드타임 동안의 평균 Backorder량 $B_m^i(\cdot)$ 은 리드타임동안의 평균수요를 평균과 분산으로 하는 정규분포로 확률밀도함수를 가정하여 근사값으로 구하여 다음의 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} B_m^i(S_m^i) &= \sum_{u=S_m^i}^{\infty} (u - S_m^i) \cdot \phi\{(u - \theta_m^i)/(\theta_m^i)^{1/2}\} \\ &= \sum_{u=S_m^i+1}^{\infty} [1 - \Phi\{(u - \theta_m^i)/(\theta_m^i)^{1/2}\}] \\ &= \sum_{u=0}^{\infty} [1 - \Phi\{(u - \theta_m^i)/(\theta_m^i)^{1/2}\}] \\ &\quad - \sum_{u=S_m^i}^{\infty} [1 - \Phi\{(u - \theta_m^i)/(\theta_m^i)^{1/2}\}] \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

고객에서의 리드타임 l_m^i 은 분배센터에서 고객까지의 배달시간과 분배센터에서 Backorder가 일어나서 대기하는 시간을 더하여 식 (14)와 같으며 분배센터에서 대기하는 시간은 little's law에 의해 구하였다. 리드타임 동안의 수요량은 리드타임에 수요량을 곱하여 식 (15)를 얻을 수 있다.

$$l_m^i = d_m + B_o^i(r_o^i, Q_o^i)/\lambda_o^i \dots\dots\dots (14)$$

$$\theta_m^i = \lambda_m^i \cdot l_m^i \dots\dots\dots (15)$$

그러므로 위에서 구한 $S_m^i, B_m^i(S_m^i)$ 값을 이용하여 $h_m^i(S_m^i)$ 값을 구한다.

3.3.2 분배센터 Heuristic

분배센터 Heuristic의 목적식 (16)은 식 (1)에서 분배센터에 해당되는 부분으로 해를 구하기 위해서 각각의 제품에 대한 N 개의 서브모델을 만들어서 단일제품 문제로 전환하였다.

Minimize

$$\sum_{i=1}^N C_i \cdot h_o^i(r_o^i, Q_o^i) \dots\dots\dots (16)$$

subject to

$$\lambda_o^i / Q_o^i \leq F \quad \forall i \dots\dots\dots (17)$$

$$1 - A_o^i(r_o^i, Q_o^i) \geq S \quad \forall i \dots\dots\dots (18)$$

$$r_o^i, Q_o^i \geq 0, \quad r_o^i, Q_o^i : \text{정수} \dots\dots\dots (19)$$

단일제품에 대한 목적식은 식 (20)과 같으며 분배센터에서 단일제품에 대한 재고투자비를 최소로 하는 것이다. 식 (21)은 분배센터에서의 주문 횟수에 대한 제약식이며, 식 (22)은 분배센터에서 고객에 대한 고객 서비스 수준에 대한 조건이다.

Minimize

$$C_i \cdot h_o^i(r_o^i, Q_o^i) \dots\dots\dots (20)$$

subject to

$$\lambda_o^i / Q_o^i \leq F \dots\dots\dots (21)$$

$$1 - A_o^i(r_o^i, Q_o^i) \geq S \dots\dots\dots (22)$$

$$r_o^i, Q_o^i \geq 0, \quad r_o^i, Q_o^i : \text{정수} \dots\dots\dots (23)$$

식 (22)에서 S 는 고객서비스 수준으로 $0 \leq S \leq 1$ 사이의 값을 가지며 $A_o^i(r_o^i, Q_o^i)$ 는 제품 i 에 대하여 품질이 일어날 확률을 말하므로, 1에서 품질이 일어날 확률을 뺀 값인 $\{1 - A_o^i(r_o^i, Q_o^i)\}$ 은 서비스 받을 확률을 나타낸다. 품질될 확률의 정확한 값은 식 (24)이지만 본 연구에서는 Nahmias(1993)와 Hopp et al.(1997)가 적용한 Type II Service를 적용하여 식 (25)와 같다. 여기서 $p(\cdot)$, $P(\cdot)$ 는 리드타임 동안의 수요에 대한 확률밀도함수와 누적분포함수를 말한다.

$$\begin{aligned} A_o^i(r_o^i, Q_o^i) &= 1/Q_o^i \cdot \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{y=r_o^i+1}^{r_o^i+Q_o^i} p(i+y) \right\} \\ &= 1/Q_o^i \cdot \left\{ \sum_{y=r_o^i+1}^{r_o^i+Q_o^i} \sum_{i=0}^{\infty} p(i+y) \right\} \\ &= 1/Q_o^i \cdot \left[\sum_{y=r_o^i+1}^{\infty} \{1 - P(y-1)\} \right. \\ &\quad \left. - \sum_{y=r_o^i+Q_o^i+1}^{\infty} \{1 - P(y-1)\} \right] \\ &= 1/Q_o^i \left[\alpha(r_o^i) - \alpha(r_o^i + Q_o^i) \right] \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

$$A_o^i(r_o^i, Q_o^i) = \alpha(r_o^i)/Q_o^i \dots\dots\dots (25)$$

식 (25)에서 $\alpha(r_o^i)$ 는 리드타임 동안의 평균 Backorder량을 나타내며 리드타임 동안의 확률밀도함수는 고객 Heuristic과 동일하게 평균과 분산이 리드타임동안의 평균 수요량과 동일한 정규분포를 따른다고 가정하여 $\phi\{(u - \theta_o^i)/(\theta_o^i)^{1/2}\}$ 으로 나타내었다. 그러므로 제약식 (22)를 다시 쓰면 다음의 식 (26)과 같다.

$$1 - \sum_{u=r_o^i}^{\infty} [1 - \Phi\{(u - \theta_o^i)/(\theta_o^i)^{1/2}\}] / Q_o^i \geq S \dots\dots\dots (26)$$

Q_o^i 와 r_o^i 은 Hopp et al.(1997)의 연구에서 Hybrid Heuristic 방법을 적용하여 Lagrangian Method로 구하여 식 (27)과 식 (28)이 된다. ν 와 μ 는 Lagrangian계수이다.

$$Q_o^i = \max \left[\left\{ (2\nu\lambda_o^i) / C_i \right\}^{1/2}, 1 \right] \dots\dots\dots (27)$$

$$r_o^i = \begin{cases} \theta_o^i + \Phi^{-1} \{ 1 - (C_i Q_o^i) / \mu \} \cdot (\theta_o^i)^{1/2}, & \text{if } C_i Q_o^i \leq \mu \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots\dots (28)$$

품질이 되는 평균 Backorder량의 정확한 값은 식 (29)이지만 본 연구에서는 위에서 정리한 리드타임 동안의 평균 Backorder량 $\alpha(r_o^i)$ 를 그대로 사용하였으며 식 (30)과 같다.

$$\begin{aligned} B_o^i(r_o^i, Q_o^i) &= 1/Q_o^i \cdot \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} i \sum_{y=r_o^i+1}^{r_o^i+Q_o^i} p(i+y) \right\} \\ &= 1/Q_o^i \cdot \left\{ \sum_{y=r_o^i+1}^{r_o^i+Q_o^i} \sum_{i=0}^{\infty} ip(i+y) \right\} \\ &= 1/Q_o^i \cdot \left[\sum_{y=r_o^i+1}^{\infty} \{y - (r_o^i + 1)\} \{1 - P(y-1)\} \right. \\ &\quad \left. - \sum_{y=r_o^i+Q_o^i+1}^{\infty} \{y - (r_o^i + Q_o^i + 1)\} \{1 - P(y-1)\} \right] \\ &= 1/Q_o^i \cdot [\beta(r_o^i) - \beta(r_o^i + Q_o^i)] \dots\dots\dots (29) \end{aligned}$$

$$B_o^i(r_o^i, Q_o^i) = \alpha(r_o^i) \dots\dots\dots (30)$$

또한 평균 재고량에 대한 함수식은 식 (31)이며 위에서 구한 $r_o^i, Q_o^i, B_o^i(r_o^i, Q_o^i)$ 값으로 평균 재고량 $h_o^i(r_o^i, h_o^i(r_o^i, Q_o^i))$ 를 구한다.

$$h_o^i(r_o^i, Q_o^i) = r_o^i - \theta_o^i + Q_o^i/2 + 1/2 + B_o^i(r_o^i, Q_o^i) \dots\dots\dots (31)$$

4. 모델 적용 및 결과

본 연구에서는 1개의 분배센터와 2개의 고객으로 구성된 공급망에 대하여 모델을 적용하였다. 제품수는 10가지이고 제품의 수요는 각각 다른 포아송분포로 발생하며 가격도 제품별로 다르다. 수요가 적은 제품은 수요가 많은 제품에 비하여 상대적으로 가격을 비싸게 책정하였으며, 수요가 많은 제품은 가격을 적게 책정하였다. 대상 시스템은 같은 기종의 항공기로 시스템 대수는 한 고객 당 100대씩을 보유하고 있으며 한 고객에서의 시스템 가동률은 90% 이상을 요구한다. <표 1>은 입력 데이터로 제품별 가격과 고객에서의 연간 수요, 분배센터에서의 리드타임을 나타내며 2개의 고객은 동일한 값을 가진다. 분배센터에서 고객까지의 배달기간은

국내이기 때문에 1일 걸리고, 외부공급자에서 분배센터까지의 리드타임은 제품을 국외에서 도입하기 때문에 10일에서 100일까지 걸린다. 또한, 분배센터에서의 주문 횟수는 4회로 책정하였다.

<표 1> 제품별 데이터

제품	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_i	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4
λ_m^i	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
l_o^i	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10

위의 <표 1>의 데이터를 이용하여 분배센터 Heuristic을 적용하여 얻은 결과값은 다음의 <표 2>이며, 고객 Heuristic에 적용하여 얻은 결과값은 <표 3>~<그림 5>와 같다. 분배센터에서는 고객서비스율이 70%, 80%, 90%인 경우에 대하여 재주문점과 주문량을 구하여, 이에 대한 재고투자비를 산정하였다. 또한 고객에서는 분배센

<표 2> 분배센터 결과값

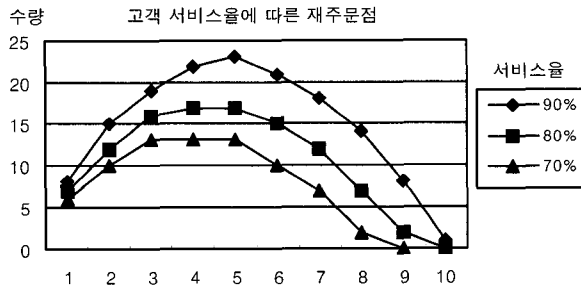
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	C_i	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4
	λ_o^i	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
	l_o^i	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
	Q_o^i	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
	θ_o^i	5.48	9.86	13.15	15.34	16.44	16.44	15.34	13.15	9.86	5.48
서비스율 90%	r_o^i	8	15	19	22	23	21	18	14	8	1
	B_o^i	0.44	0.80	1.48	1.82	2.17	2.91	3.37	3.52	3.95	4.63
	h_o^i	5.96	11.44	15.33	18.98	21.73	22.97	24.03	24.87	25.09	25.65
	$C_i h_o^i$	238.3	411.8	490.4	531.1	521.6	459.0	384.1	298.5	200.7	102.6
서비스율 80%	r_o^i	7	12	16	17	17	15	12	7	2	0
	B_o^i	0.81	1.90	2.61	3.83	4.71	5.75	6.51	7.69	8.20	5.48
	h_o^i	5.33	9.54	13.46	15.99	18.27	19.81	21.16	22.04	23.34	25.50
	$C_i h_o^i$	213.1	343.3	430.7	447.6	438.3	396.2	338.6	264.5	186.7	102.0
서비스율 70%	r_o^i	6	10	13	13	13	10	7	2	0	0
	B_o^i	1.26	2.84	4.03	5.92	6.90	8.79	9.82	11.49	9.86	5.48
	h_o^i	4.78	8.48	11.88	14.07	16.46	17.85	19.47	20.83	23.00	25.50
	$C_i h_o^i$	191.2	305.2	380.1	394.1	394.9	357.0	311.6	250.0	184.0	102.0

터에서의 고객 서비스율이 70%, 80%, 90%인 경우의 각각에 대하여 고객에서의 시스템 가동률이 96%~100%를 유지시켜주는 목표재고량과 이에 대한 재고투자비를 구하였다. 고객에서의 시스템 가동률 100%를 만족시켜 주는 목표재고량은 실제 가동률 99.9%에 대한 목표재고량이다.

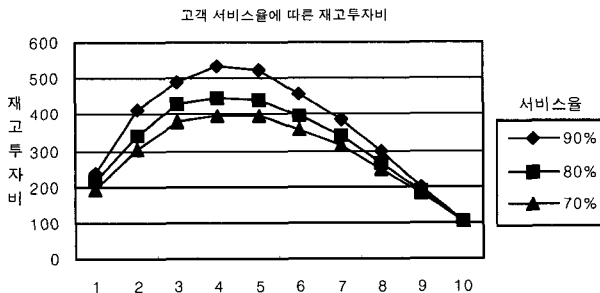
<표 2>의 분배센터 결과값에서 주문량 Q_m^i 는 주문횟수의 제약조건으로 인하여 구해지므로 고객 서비스율과는 무관하며, 리드타임 동안의 수요량도 연간 수요와 리드타임의 곱으로 구하므로 고객 서비스율과는 무관하다.

분배센터에서 고객에게 만족시켜주어야 하는 고객 서비스율이 증가하면 리드타임 동안의 Backorder량은 감소하는 반면, 재주문점은 증가하여 이에 대한 재고투자비는 증가한다. 제품별로는 동일한 고객 서비스율에서 리드타임 동안의 수요량이 클수록 재주문점은 증가한다.

이에 대하여 분배센터에서 고객 서비스율에 따른 제품별 재주문점과 재고투자비를 도식화하면 <그림 2>와 <그림 3>이 된다



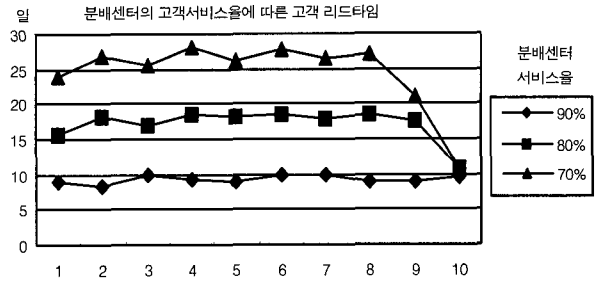
<그림 2> 분배센터에서 고객 서비스율에 따른 제품별 재주문점



<그림 3> 분배센터에서 고객 서비스율에 따른 제품별 재고투자비

고객 결과값에서 분배센터에서 고객까지의 리드타임은 배달시간과 분배센터에서 Backorder가 발생하여 제품이 보충될 때까지 대기하는 시간이 포함되어 있으며

분배센터에서의 서비스율이 증가할수록 리드타임은 줄어든다. <그림 4>는 분배센터의 고객 서비스율에 따른 고객의 제품별 리드타임에 대해 도식화 한 것이다.



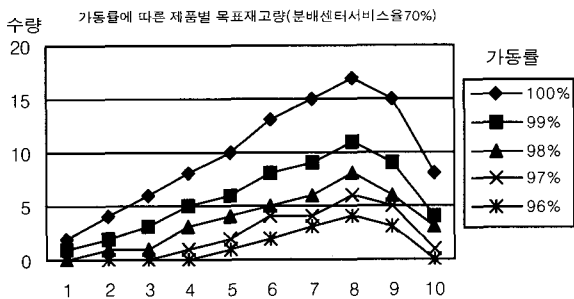
<그림 4> 분배센터의 고객서비스율에 따른 고객의 제품별 리드타임

<표 3> 고객 결과값(분배센터에서 서비스율 70%일 경우)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	l_m^i	23.99	26.92	25.50	27.99	26.16	27.74	26.59	27.20	21.00	11.00
	θ_m^i	0.66	1.47	2.09	3.07	3.58	4.56	5.10	5.96	5.18	3.01
가동률 100%	S_m^i	2	4	6	8	10	13	15	17	15	8
	B_m^i	0.02	0.05	0.04	0.10	0.07	0.08	0.07	0.09	0.07	0.09
	h_m^i	1.36	2.58	3.95	5.03	6.49	8.51	9.96	11.13	9.89	5.07
	$C_i h_m^i$	54.53	92.79	126.3	140.9	155.7	170.3	159.4	133.5	79.16	20.30
가동률 99%	S_m^i	1	2	3	5	6	8	9	11	9	4
	B_m^i	0.32	0.56	0.64	0.63	0.67	0.71	0.77	0.76	0.81	0.97
	h_m^i	0.66	1.09	1.54	2.56	3.08	4.15	4.67	5.59	4.63	1.95
	$C_i h_m^i$	26.58	39.22	49.46	71.85	73.99	83.04	74.69	67.06	37.08	7.82
가동률 98%	S_m^i	0	1	1	3	4	5	6	8	6	3
	B_m^i	1.16	1.19	1.86	1.52	1.47	1.85	1.84	1.68	1.91	1.47
	h_m^i	0.50	0.72	0.76	1.46	1.88	2.28	2.74	3.77	2.73	1.46
	$C_i h_m^i$	20.23	25.77	24.43	40.75	45.20	45.71	43.80	45.29	21.82	5.83
가동률 97%	S_m^i	0	0	0	1	2	4	4	6	5	1
	B_m^i	1.16	2.03	2.70	2.91	2.70	2.39	2.93	2.61	2.42	2.85
	h_m^i	0.50	0.56	0.60	0.84	1.12	1.83	1.83	2.62	2.24	0.84
	$C_i h_m^i$	20.23	20.06	19.36	23.56	26.86	36.69	29.29	31.39	17.93	3.35
가동률 96%	S_m^i	0	0	0	0	1	2	3	4	3	0
	B_m^i	1.16	2.03	2.70	3.75	3.47	3.74	3.59	3.81	3.67	3.69
	h_m^i	0.50	0.56	0.60	0.68	0.88	1.18	1.49	0.62	1.49	0.68
	$C_i h_m^i$	20.23	20.06	19.36	19.12	21.21	23.62	23.85	7.39	11.95	2.71

<표 4> 고객 결과값(분배센터에서 서비스율 80%일 경우)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
l_m^i		15.74	18.34	16.88	18.47	18.17	18.49	17.96	18.55	17.63	11.00
θ_m^i		0.43	1.00	1.39	2.02	2.49	3.04	3.44	4.07	4.35	3.01
가동률 100%	S_m^i	1	3	4	6	7	8	10	11	12	8
	B_m^i	0.09	0.02	0.03	0.03	0.06	0.09	0.05	0.10	0.09	0.09
	h_m^i	0.663	2.021	2.647	4.010	4.565	5.054	6.609	7.032	7.742	5.075
	$C_i h_m^i$	26.50	72.74	84.71	112.27	109.57	101.09	105.75	84.38	61.94	20.30
가동률 99%	S_m^i	0	1	2	3	3	4	5	7	7	4
	B_m^i	0.94	0.69	0.49	0.58	0.98	0.99	0.91	0.68	0.86	0.97
	h_m^i	0.50	0.68	1.10	1.56	1.49	1.95	2.46	3.62	3.52	1.96
	$C_i h_m^i$	20.154	24.590	35.182	43.669	35.802	39.026	39.382	43.416	28.12	7.82
가동률 98%	S_m^i	0	0	0	1	2	3	3	4	5	3
	B_m^i	0.93	1.53	1.94	1.782	1.559	1.496	1.893	1.917	1.656	1.471
	h_m^i	0.50	0.52	0.55	0.76	1.07	1.46	1.45	1.85	2.31	1.46
	$C_i h_m^i$	20.15	18.88	17.63	21.22	25.67	29.13	23.18	22.21	18.46	5.83
가동률 97%	S_m^i	0	0	0	0	1	1	2	3	3	1
	B_m^i	0.94	1.53	1.94	2.62	2.28	2.88	2.55	2.52	2.81	2.85
	h_m^i	0.50	0.52	0.55	0.60	0.79	0.84	1.11	1.45	1.46	0.84
	$C_i h_m^i$	20.15	18.88	17.63	16.78	19.08	16.78	17.78	17.45	11.69	3.35
가동률 96%	S_m^i	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0
	B_m^i	0.93	1.53	1.94	2.62	3.12	3.72	3.32	3.99	3.51	3.69
	h_m^i	0.50	0.52	0.55	0.60	0.64	0.68	0.87	0.92	1.17	0.68
	$C_i h_m^i$	20.15	18.88	17.63	16.78	15.27	13.61	13.95	11.07	9.33	2.71



<그림 5> 분배센터의 서비스율이 70%일 때, 가동률에 따른 제품별 목표재고량

<그림 4>에서 분배센터에서의 서비스율이 90%인 경우는 리드타임이 8일에서 9일까지 걸리며, 80%인 경우는 11일에서 19일, 70%인 경우는 20일 이상이 걸린다. 그러나 제품 10은 분배센터의 고객 서비스율이 70%, 80%인 경우 동일하게 11일이다. 이것은 고객서비스율이 70%, 80%인 경우 제품 10의 재주문점이 0이기 때문에 분배센터에서 Backorder가 발생하여 제품이 보충될 때까지의 대기하는 기간이 각각 10일로 동일하며 여기에 분배센터에서 고객까지의 배달기간 1일이 더해져서 구

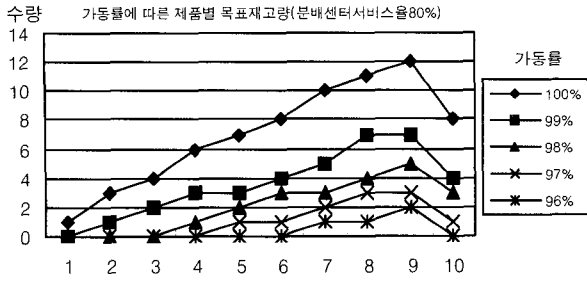
해진 값이다.

고객에서 특정 가동률 이상을 유지시켜주는 목표재고량은 동일한 가동률에서 제품별로 리드타임 동안의 수요량이 클수록 많은 목표재고량을 필요로 하며, 분배센터에서의 서비스율이 증가하면 할수록 목표재고량은 적어진다. 고객에서의 리드타임 동안의 수요량은 연간 수요량에 리드타임의 곱으로 구하며, 분배센터의 고객서비스율이 증가할수록 고객의 리드타임 동안의 수요량은 적어진다. 같은 제품에 대하여 가동률에 따라서는 가동률이 증가할수록 보유해야 될 목표재고량이 증가한다. <그림 5>, <그림 6>, <그림 7>은 분배센터의 고객서비스율 70%, 80%, 90%일 경우의 각각에 대하여 고객에서 가동률에 따른 제품별 목표재고량은 도식화 한 것이다.

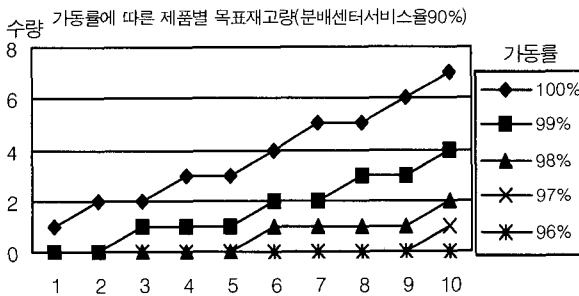
재고투자비는 <표 6>의 분배센터-고객 재고투자비와 같다. 분배센터에서는 고객 서비스율이 증가할수록 재고투자비는 증가하며, 고객에서는 가동률이 증가할수록 재고투자비는 현저하게 증가하는 것을 알 수 있다. 분배센터의 고객 서비스율의 변화에 따라서는 고객 서비스율이 감소할수록 고객의 재고투자비는 증가한다. <그림 8>은 고객에서 가동률에 따른 재고투자비로 도식화하여 나타낸 것이다.

<표 5> 고객 결과값(분배센터에서 서비스율 90%일 경우)

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
l_m^i		8.96	8.33	9.98	9.31	8.91	9.86	9.80	9.04	9.02	9.46
θ_m^i		0.25	0.46	0.82	1.02	1.22	1.62	1.88	1.98	2.22	2.59
가동률 100%	S_m^i	1	2	2	3	3	4	5	5	6	7
	B_m^i	0.00	0.00	0.08	0.03	0.08	0.09	0.07	0.09	0.07	0.07
	h_m^i	0.76	1.54	1.26	2.01	1.86	2.47	3.19	3.11	3.84	4.48
	$C_i h_m^i$	30.22	55.59	40.28	56.22	44.75	49.45	50.99	37.33	30.75	17.93
가동률 99%	S_m^i	0	0	1	1	1	2	2	3	3	4
	B_m^i	0.84	0.96	0.49	0.70	0.92	0.70	0.95	0.55	0.75	0.64
	h_m^i	0.60	0.50	0.67	0.68	0.70	1.08	1.07	1.57	1.53	2.05
	$C_i h_m^i$	23.87	18.08	21.51	19.15	16.74	21.55	17.07	18.82	12.20	8.18
가동률 98%	S_m^i	0	0	0	0	0	1	1	1	1	2
	B_m^i	0.84	0.96	1.33	1.55	1.76	1.35	1.63	1.74	2.00	1.66
	h_m^i	0.60	0.50	0.51	0.53	0.54	0.73	0.75	0.76	0.77	1.07
	$C_i h_m^i$	23.87	18.08	16.43	14.71	12.93	14.54	11.95	9.06	6.19	4.29
가동률 97%	S_m^i	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	B_m^i	0.84	0.96	1.33	1.55	1.76	2.19	2.47	2.58	2.84	2.40
	h_m^i	0.60	0.50	0.51	0.53	0.54	0.57	0.59	0.60	0.62	0.80
	$C_i h_m^i$	23.87	18.08	16.43	14.71	12.93	11.36	9.41	7.15	4.92	3.21
가동률 96%	S_m^i	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	B_m^i	0.84	0.96	1.33	1.55	1.76	2.19	2.47	2.58	2.84	3.24
	h_m^i	0.60	0.50	0.51	0.53	0.54	0.57	0.59	0.60	0.62	0.64
	$C_i h_m^i$	23.87	18.08	16.43	14.71	12.93	11.36	9.41	7.15	4.92	2.58



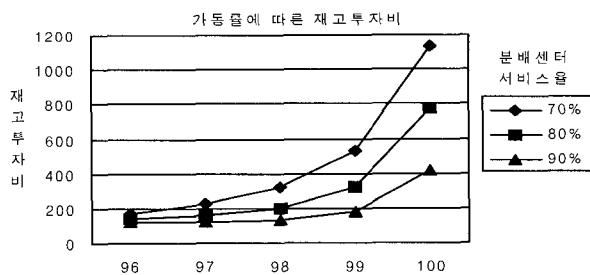
<그림 6> 분배센터의 서비스율이 80%일 때, 가동률에 따른 제품별 목표재고량



<그림 7> 분배센터의 서비스율이 90%일 때, 가동률에 따른 제품별 목표재고량

<표 6> 분배센터-고객 재고투자비

분배센터 서비스율	분배센터 재고비	가동률에 따른 고객 재고투자비				
		96%	97%	98%	99%	100%
70%	2870.22	169.51	228.72	318.86	530.80	1133.0
80%	3161.24	139.40	159.57	202.36	317.17	779.24
90%	3639.24	121.45	122.08	132.04	177.17	413.51



<그림 8> 고객에서 가동률에 따른 재고투자비

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 2계층 분배형 공급사슬에서 시스템을 구

성하는 수리부속에 대하여 분배센터에서는 고객 서비스를 고려하여 적정 수준의 재주문점과 목표재고량을 결정하고, 고객에서는 부속유용을 적용하여 시스템 가동률과 재고량과의 관계를 연관시켜 일정수준 이상의 가동률을 유지시키는 목표재고량을 결정하였다. 모델은 군의 무기보급체계에 적용하여 주어진 예산 하에서 각 무기체계의 시스템 가동률을 산정하거나 시스템 가동률을 유지시켜주는 목표재고 투자비용을 산정하였다. 이러한 모델은 기업의 고가 장비나 설비의 운영유지 사업에 적용시켜도 적합할 것이다. 본 연구에서는 부속유용을 할 수 있는 제품에 대하여 가동률에 따른 재고량을 결정하였으나 향후에는 부속유용을 할 수 없는 제품에 대하여도 연구되어야 하겠다.

참고문헌

- [1] 김종수, 허선, 신규철; “중양창 재고를 가진 수리가능 시스템의 최적해법”, 대한산업공학회지, 24(3) : 387-396, 1998.
- [2] 김태영, 김종수, 허선; “일반 서비스 시간분포를 갖는 다단계 수리가능 재고시스템에 대한 최적재고수준 알고리즘”, 대한산업공학회지, 27(3) : 226-232, 2001.
- [3] 오근태, 김명수; “운용가용도 제약하에서 소모성부품과 수리순환부품이 혼재된 동시조달부품의 최적구매량 결정”, 산업경영시스템학회지, 23(59) : 53-67, 2000.
- [4] 오근태, 나윤근; “운용가용도 제약하에서의 소모성 예비부품의 구매량 결정을 위한 해법”, 한국시물레이션학회지, 10(3) : 83-94, 2001.
- [3] Graves, S. C.; “A multi-echelon inventory model for a repairable item with one-for-one replenishment,” *Management Science*, 31 : 1247-1256, 1985.
- [4] Hopp, W. J., Spearman, M. L., and Zhang, R. Q.; “Easily implementable (Q, r) inventory control policies,” *Operations Research*, 45 : 327-340, 1997.
- [5] Jonas Andersson and Philip Melchior; “A two-echelon inventory model with lost sales,” *Int. J. Production Economics*, 69 : 307-315, 2001.
- [6] Kala Chand Seal; “Spreadsheet Simulation of a queue with arrivals from a finite population : The machine repair problem,” *Int. J. of Operations & Productin Management*, 15 : 0114-3577, 1995.
- [7] Moinzadeh, K. and Lee, H. L.; “Batch Size and Stocking Levels in multi-echelon repairable systems,” *Management Science*, 32 : 1567-1581, 1986.
- [8] Nahmias, S.; *Production and Operations Analysis*. Second Edition, Irwin, Homewood, IL, 1993.

- [9] Rotab, M. R. Khan, "Simulation modeling of a garment production system using a spreadsheet to minimize production cost," *International Journal of Clothing Science and Technology*, 11 : 287-299, 1999.
- [10] Ram Ganeshan, "Managing supply chain inventories : A multiple retailer, one warehouse, multiple supplier model," *Int. J. Production Economics*, 59 : 341-354, 1999.
- [11] Sherbrooke, C.; "MetricL a multi-echelon technique for recoverable item control," *Operations Research*, 16 : 122-141, 1968.
- [12] Svoronos, A. and Zipkin, P.; "Evaluation of one-for-one replenishment policies for multiechelon inventory systems," *Management Science*, 37 : 68-83, 1991.
- [13] Wallace, J. Hopp, Rachel, Q. Zhang, and Mark, L. Spearman; "An easily implementable hierarchical heuristic for a two-echelon spare parts distribution system," *IIE Transactins*, 31 : 977-988, 1999.