

구매가격 변동시 위험을 고려한 재고모형

유석천* · 박찬규*† · 정 욱*

Risk-averse Inventory Model under Fluctuating Purchase Prices

Seuck-Cheun Yoo* · Chan-Kyoo Park* · Uk Jung*

■ Abstract ■

When purchase prices of a raw material fluctuate over time, the total purchasing cost is mainly affected by reordering time. Existing researches focus on deciding the right time when the demand for each period is replenished at the lowest cost. However, the decision is based on expected future prices which usually turn out to include some error. This discrepancy between expected prices and actual prices deteriorates the performance of inventory models dealing with fluctuating purchase prices.

In this paper, we propose a new inventory model which incorporates not only cost but also risk into making up a replenishment schedule to meet each period's demand. For each replenishment schedule, the risk is defined to be the variance of its total cost. By introducing the risk into the objective function, the variability of the total cost can be mitigated, and eventually more stable replenishment schedule will be obtained. According to experimental results from crude oil inventory management, the proposed model showed better performance over other models in respect of variability and cost.

Keyword : Inventory Model, Price Fluctuation, Risk Aversion, Variance

1. 서 론

전통적인 재고관리 모형은 최소의 비용으로 수

요를 충족시키는 재고 보충량과 재고 보충 시점을 결정하는 데 초점을 두고 있다([14]). 이때 고려되는 비용으로는 재고유지비용, 주문 또는 준

논문접수일 : 2010년 04월 06일 논문게재확정일 : 2010년 11월 19일

* 동국대학교 서울캠퍼스 경영학부

† 교신저자

비비용, 재고 고갈비용 등이 있다. 보충하는 원자재의 단가가 일정한 경우 원자재 구매비용은 최적 주문량과 주문시점 결정에 영향을 주지 않으므로 별도로 고려할 필요가 없었다. 그러나 원자재의 구매단가가 지속적으로 변동하는 경우에는 구매비용을 반영하여 주문량과 주문시점을 결정해야 한다. 특히, 원자재 구매비용이 재고유지비용에 비해 상대적으로 크고 원자재 구매비용의 변동이 큰 경우 원자재 구매가격은 주문량과 주문시점 결정에 큰 영향을 미친다. 원자재 구매가격이 낮을 때 원자재를 다량 보충하고 원자재 구매가격이 높을 때는 재고 보충을 미루는 것이 전체 비용 측면에서 유리하다.

구매가격의 변동 폭이 상대적으로 큰 물품의 재고모형(이후 ‘가격변동 재고모형’이라 칭함)에 관한 연구는 1970년 이전부터 Kingsman[16], Kalymon[15] 등에 의해 시작되었다. 이후 공급사슬의 글로벌화가 가속되고 원자재 뿐만 아니라 반완성품(semi-finished products)으로 아웃소싱 범위가 확대되면서 구매가격의 변동은 조달비용에 결정적인 영향을 미치게 되었다[3]. 특히, 중국을 비롯한 신흥 국가들의 경제적 부상으로 귀금속 및 희귀금속, 가죽, 철광석, 원유 등의 구매가격이 상승하고 가격의 변동폭도 커지고 있다[1, 3, 9, 11, 29]. 또한, 외화 표시 가격이 변하지 않더라도 환율 변동에 의해 실제 구매가격의 변동이 유발되기도 한다[4, 10]. 최근에는 반도체와 같이 시간에 지남에 따라 구매가격이 하락하는 경우[27], 공급업자가 일시적으로 가격을 할인하는 경우[23] 등에 관한 연구로 가격변동 재고모형의 적용범위가 확장되었다.

지금까지 제안된 가격변동 재고모형들은 구매가격 변동의 회수와 지속성, 수요의 불확실성 여부, 미납주문(backlog) 허용 여부, 창고 용량 제약 여부, 이윤 고려 여부 등 다양한 기준에 의해 세분화할 수 있다. 그 중 구매가격 변동의 회수 및

지속성을 기준으로 가격변동 재고모형을 분류해 보면 특정시점 이후부터 가격이 인하 또는 인상되는 경우를 가정한 가격변동 재고모형, 일시적인 가격 할인에 따른 가격변동 재고모형, 구매가격이 확률분포에 따라 지속적으로 변동되는 경우를 고려한 가격변동 재고모형으로 세분화된다.

첫 번째로 특정시점을 기준으로 그 이후부터 원자재의 가격이 인상 또는 인하되는 경우 최적 주문량과 주문시점을 결정하는 연구는 경제적 주문량(Economical Order Quantity, EOQ) 모형의 수정을 통해 주문량을 계산할 수 있는 명시적 공식을 찾는데 초점을 두고 있다. Bachman[4]은 구매가격이 인상되는 경우 기존의 재고정책에 어떠한 영향을 주는가를 분석하였다. 그 이후로 재고관리 기간이 유한한 경우와 무한한 경우로 나누어 특정시점 이후로 구매가격이 상승 또는 하락할 경우 최적주문량과 주문시점을 계산하는 공식을 도출하는 연구가 수행되었다[8, 9, 18, 19]. Marterl and Gascon[22]은 재고유지비용이 구매가격에 연동된다는 가정 하에 구매가격이 특정시점 이후로 상승 또는 하락할 때 최적주문량을 구하는 문제를 수리계획문제로 모형화하고 휴리스틱을 제안하였다.

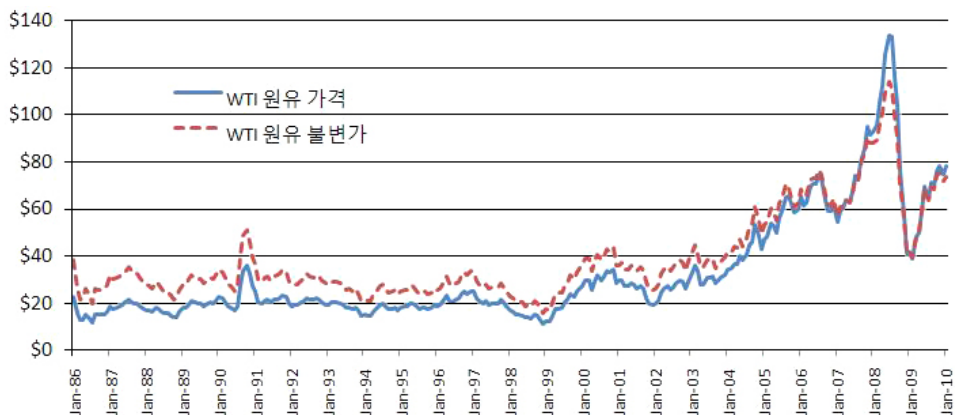
두 번째로 공급업자가 일정기간 동안 한시적으로 가격 인센티브를 제공하는 경우를 다루는 가격변동 재고모형은 가격 인센티브를 활용할 수 있도록 특별주문량(special order quantity)의 수준을 결정하는데 초점을 맞추고 있다[22, 23]. 특히, Ardalan[2]은 공급업자가 제공하는 가격 인센티브로 인해 고객에게 판매하는 가격이 할인될 수 있고 이로 인해 최종고객의 수요가 증가하는 경우를 가정하여 특별주문량을 계산하는 방법을 제시하였다.

첫 번째와 두 번째 가격변동 재고모형은 공통적으로 가격이 1회 또는 2회만 변경되고 변경되기 전후의 가격이 확정적으로 알려져 있다고 가

정한다. 그러나 원유, 고철 및 금속 원자재 등의 가격은 시장의 수급상황이나 환율과 같은 경제적 요인 등에 의해 끊임없이 가격이 변화한다. 예를 들면 원유가격은 [그림 1]과 같이 원유 수급 상황, 경제적/정치적 요인 등에 의해 지속적으로 변동하고 있다. 세 번째 범주의 가격변동 재고모형에서는 이러한 상황을 고려하여 구매가격이 확률분포를 따라 변동한다는 가정 하에 최적재고정책을 유도한다. 구매가격의 변동이 일회적인 경우는 주로 연속조사(continuous review) 재고모형을 확장하는 형태의 연구가 이루어진 반면에 구매가격이 지속적으로 변동하는 상황을 다루는 재고모형은 정기적인 재고보충을 가정한 연구가 많았다. 먼저 Kalymon[15]은 구매가격이 마코프 추계과정(Markovian stochastic process)를 따르며 수요가 구매가격에 영향을 받는다는 가정 하에 (s, S) 형태의 재고정책이 최적임을 증명하였다. 즉, 재고수준이 s 보다 작으면 S 수준까지 재고를 보충하고, 재고가 s 이상이면 재고를 보충하지 않는 것이 최적의 재고정책이다. 여기서 s 와 S 는 구매가격, 이월된 재고수준, 수요에 따라 변경된다. 이후 Hall and Rust[12]는 도매가격이 마코프 체인(Markov chain)에 따라 변화하고 수요와 소매가격은 도매가격에 따라 확률적으로 변한

다는 가정 하에 이윤을 최대화하는 경우에도 (s, S) 재고정책의 최적성이 여전히 유지됨을 증명하였다. 최근 Yang and Xia[29]는 구매가격이 마코프 추계과정(Markovian stochastic process)를 따르고 수요가 복합 포아송과정(compound Poisson process)를 따르는 연속조사(continuous review) 재고모형에서도 일정한 가정이 성립하는 경우 (s, S) 형태의 재고정책이 최적임을 보였다.

가격변동 재고모형에 관한 연구가 다양한 가정 하에서 (s, S) 형태 재고정책의 최적성을 규명하는데 집중된 반면에 구체적으로 s 와 S 의 값을 구하는 방법을 제시한 연구는 크게 3가지로 요약할 수 있다. 첫 번째 Golabi[11]는 수요가 확정적이라는 가정하에 매 주문시점마다 임계가격수준(critical price level)들을 구하고 구매가격을 임계가격수준들과 비교하여 향후 몇 개 기간의 수요량을 미리 구매할 것인지를 결정하는 방법을 제안하였다. 두 번째로 Gavimneni[9, 10]는 제품의 판매가격은 일정하나 수요가 불확실하며 구매가격이 마코프 체인(Markov chain)을 따르는 추계프로세스(stochastic process)라는 가정 하에 최적주문량을 근사적으로 구하는 휴리스틱을 제안하였다. 최근 연구로는 매 기간 초에 그 기간의 수요 충족을 위한 주문량은 Gavimneni가 제안



[그림 1] WTI(West Texas Intermediate) 원유가격 변화

한 방법을 사용해 계산하고 이후 기간의 수요에 대비한 선주문량은 Golabi가 제안한 방법을 사용해 계산한 다음 이를 더하여 주문하는 방법을 건설자재 산업에 적용한 연구가 수행되기도 하였다[20].

Golabi의 연구를 비롯한 지금까지 살펴본 가격 변동 재고모형들은 구매비용, 재고유지비용 등의 합으로 정의되는 총비용의 기대값(expectation)을 최소화하는데 목적을 두고 있다. 즉, 확률분포를 따르는 구매비용의 기댓값을 구하고 이를 기준으로 총비용을 최소화하도록 구매시점과 주문량을 결정하고 있다. 그러나 구매가격이 확률분포에 따라 변동하기 때문에 실제 구매가격은 이전에 예측된 구매가격의 기댓값과 차이가 있다. 이로 인해 총비용의 기대값을 최소로 하는 재고 정책에 따라 재고보충을 하더라도 실제 비용은 재고정책의 기대비용(expected cost)과 큰 차이를 보일 수 있다. 특히, 대부분의 실제 비즈니스 상황에서는 구매가격의 확률분포가 알려져 있지 않고 구매가격의 확률분포 자체도 시간이 지남에 따라 계속 변화하기 때문에 재고정책의 실제 비용과 기대비용과의 차이는 더욱 커진다. 이러한 차이는 매 시점 주문량을 결정해야 하는 의사결정자에게는 위협으로 인식된다.

실제 소요 비용과 기대비용과의 차이로 인한 위험(risk)에 중립적(neutral)인 의사결정자(decision-maker)는 기대비용을 최소화하는 재고정책을 선호하지만 위험의 회피(aversion)를 중시하는 의사결정자는 위험이 작은 재고정책을 선호하게 된다. 즉, 위험을 회피하고자 하는 의사결정자 관점에서는 구매가격의 기댓값이 최소가 될 것으로 예측되나 그 실현 여부가 불투명한 특정 시점에 주문을 집중하기 보다는 구매가격이 비교적 낮으면서 가격 실현 가능성이 높은 시점에 주문을 분산시키는 전략을 선호할 것이다. 본 연구는 이러한 점에 착안하여 재고정책의 기대비용과 위험을 동시에 고려하여 기대비용과 위험

의 합을 최소화할 수 있는 가격변동 재고모형을 제안한다. 제안된 가격변동 재고모형은 가격이 비교적 낮고 가격 변동의 가능성이 낮은 시점으로 주문을 분산시킴으로써 재고정책의 위험을 감소시킨다. 제안된 가격변동 재고모형은 현 주문시점의 구매가격이 비교적 낮은 경우 미래 시점에 필요한 재고의 일부를 보충함으로써 구매가격의 변동으로 인한 위험을 낮춘다.

공급사슬의 비용 뿐만 아니라 위험을 통제하는 정책이 새롭게 부각되고 있는 시점에서[6, 28, 30], 본 연구는 가격변동 재고모형에 위험회피 개념을 최초로 도입했다는 점에서 의의가 있다. 또한, 선물옵션이라는 별도의 파생상품시장을 고려해야 하는 기존 연구에 비해 가격과 위험을 동시에 고려해 주문량을 결정함으로써 기존 재고모형을 보다 일반화했다는 점에서 본 연구는 의미가 크다고 할 수 있다. 본 연구에서 제시된 가격변동 재고모형을 활용하면 구매가격의 변동에 따른 조달비용의 불확실성을 줄일 수 있어 의사결정의 안정성을 제고할 수 있다. 나아가 구매가격의 변동 폭이 크고 예측하기가 어려울수록 위험을 고려한 가격변동 재고모형은 효과적인 대안이 될 것이다.

본 연구의 이후 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 비용 최소화를 목적으로 하는 기존 가격변동 재고모형을 살펴보고 그 문제점을 분석한다. 제 3장에서는 본 연구에서 새롭게 제시하는 위험회피 가격변동 재고모형을 제안하며, 제 4장에서는 예제 문제에 적용한 결과를 제시한다. 또한 제안된 위험회피 가격변동 재고모형을 원유 재고관리에 적용하고 그 결과를 고찰한다. 마지막으로 본 연구의 결론을 제 5장에서 제시한다.

2. 구매가격 변동시 비용 최소화 재고모형과 그 문제점

본 절에서는 기존 연구에서 제시된 가격변동

재고모형을 알아보고 문제점을 분석한다. 가격변동 중 재고모형 유도 시 사용할 기본가정은 다음과 같다.

1. 재고모형의 계획구간은 $1, 2, \dots, N$ 로 유한하다.
2. 매 기간의 수요는 확정적이다.
3. 미납주문은 허용되지 않고 모든 수요가 충족되어야 한다.
4. 재고보충시간(lead time)은 0이다.
5. 주문비용은 고려하지 않는다.
6. 재고유지비용은 구매가격에 비례한다.
7. 미래시점의 구매가격은 확률분포를 따른다.
8. 기간 1의 초기재고는 0이고, $(N+1)$ 에서 재고의 잔존가치(salvage value)는 0이다.
9. 1회 주문량에 대한 제한은 없다.

또, 본 연구에서 사용할 기호들을 다음과 같이 정의한다.

I_i : 기간 i 의 초기 재고

D_i : 기간 i 의 수요

p_i : 기간 i 에서 원자재의 실제 구매가격

r_i : 재고유지비용 비율로서 기간 i 에서 구매한 원자재 1단위를 단위기간 동안 보관하는 비용이 실제 구매가격 대비 차지하는 비율

h_i : 기간 i 에서 기간 $(i+1)$ 초까지 원자재 단위당 재고유지비용으로 $h_i = r_i \times p_i$ 로 계산됨

N : 재고모형의 마지막 기간(planning horizon)

$f_i(p)$: 기간 i 의 원자재 구매가격을 의미하는 확률변수 P 의 확률밀도함수

$F_i(p)$: 기간 i 의 원자재 구매가격을 의미하는 확률변수 P 의 누적확률분포

σ_i : 기간 i 의 원자재 구매가격을 의미하는 확률변수 P 의 표준편차

가정 2와 가정 3은 원자재를 대상으로 하는 대부분의 재고관리 시스템의 상황에 크게 위배되지 않는다. 완제품의 생산계획은 보통 수개월 전에

수립되고 이후 자재소요계획에 의해 원자재의 수요가 결정된다[14]. 특히 현재 시점으로부터 일정 기간까지는 생산계획이 동결되므로[14], 원자재의 수요도 일정기간 동안은 확정적으로 알려져 있으므로 가정 2가 성립한다고 볼 수 있다. 또한 완제품 생산을 계획대로 실행하기 위해서는 핵심 원자재의 수요는 반드시 충족되어야 하므로 가정 3도 일반적인 상황과 일치한다. 예를 들어 백금이나 팔라듐 같은 금속은 자동차 소음기 생산에 의무적으로 사용되어야 하는 재료로서[1], 재고 고갈이 발생하면 자동차 생산 중단을 유발할 수 있어 반드시 필요량만큼 재고를 보유하고 있어야 한다.

가정 4에서 재고보충기간이 0이라 가정하였다. 이는 대부분의 재고모형에 관한 연구와 같이 논의의 편의성 때문이며 결론의 일반성을 훼손하지 않는다. 재고보충기간이 0이 아니라 $l(>0)$ 인 경우 기간 j 에 필요한 재고의 보충은 늦어도 기간 $(j-l)$ 이전에 이루어져야 한다. 따라서 기간 i 에 기간 i 이후의 수요가 아니라 기간 $(i+l)$ 이후의 수요를 고려하여 주문량을 결정하면 된다. 자세한 논의는 [15, 20, 24]를 참조하기 바란다.

다음으로 가격변동 재고모형의 운용절차를 정한다. 기간 i 초에 재고수준은 I_i 이고, 구매가격 p_i 는 확정적으로 알려져 있다. 주문량 x_i 를 결정한 다음 주문을 내고 즉시 재고가 보충되어 재고수준이 $(I_i + x_i)$ 가 된다. 이후 수요 D_i 가 충족되고 기간 i 말의 재고수준은 $(I_i + x_i - D_i)$ 로 기간 $(i+1)$ 초로 이월된다. 기간 i 동안의 재고유지비용은 $h_i \cdot (I_i + x_i - D_i)$ 로 계산된다.

기간 i 의 초기재고가 I_i 이고 구매가격이 p_i 일 때 기간 i 부터 기간 N 말까지 총비용 기대값의 최소값을 $C_i(I_i, p_i)$ 라 나타내면 다음 식이 성립한다[11].

$$C_i(I_i, p_i) = \min_{x \geq q_i} \{p_i x + (I_i + x - D_i)h_i + \int_0^\infty C_{i+1}(I_i + x - D_i, p) dF_{i+1}(p)\} \quad (1)$$

단, $q_i = \max D_i - I_i$, 0이고, $C_{N+1}(\cdot, \cdot) = 0$ 이다.

식 (1)에서 $x \geq q_i$ 는 기간 i 의 수요 D_i 는 반드시 충족되어야 하므로 초기재고 I_i 가 수요 D_i 보다 작으면 최소 $(D_i - I_i)$ 이상의 재고가 보충되어야 함을 나타낸다. 기간 i 에서 구매비용과 재고유지비용을 모두 합친 비용은 $p_i x + (I_i + x - D_i)h_i$ 이다. 또, 식 (1)에서 기간 $(i+1)$ 의 구매가격 p 는 누적확률분포 $F_{i+1}(p)$ 를 따르는 확률변수이다. 가정 8에 의해 $C_{N+1}(\cdot, \cdot) = 0$ 이라 쓸 수 있다. 동적계획법(dynamic programming)의 기본 성질에 의해 $C_i(\cdot, \cdot)$ 는 유한한 값을 가지며 $C_1(\cdot, \cdot)$, $C_2(\cdot, \cdot)$, ..., $C_N(\cdot, \cdot)$ 로 이루어지는 수열(sequence)은 유일하게 결정된다[11]. 식 (1)로부터 기간 i 의 최적주문량 x_i^* 는 다음 식에 의해 결정된다.

$$x_i^* = \operatorname{argmin}_{x \geq q_i} \{p_i x + (I_i + x - D_i)h_i + \int_0^\infty C_{i+1}(I_i + x - D_i, p) dF_{i+1}(p)\} \quad (2)$$

식 (2)의 최적주문량 x_i^* 는 간단히 계산되는 것이 아니라 동적계획법 문제를 풀어야만 그 값을

구할 수 있다. 계획기간 N 이 커지면 최적주문량 x_i^* 를 찾는 시간이 급속히 증가하므로 보다 간편하게 기간 i 의 최적주문량을 계산할 수 있는 방법이 요구된다. Golabi[11]는 기간 i 에서 구매가격의 범위를 $(N-i+1)$ 개의 구간으로 나누는 상수 $A_{i,N}, A_{i,N-1}, \dots, A_{i,i+1}, A_{i,i}$ 의 값을 구하고, 기간 i 의 실제 구매가격 p_i 가 $A_{i,n+1} < p_i \leq A_{i,n}$ 이면 기간 $i, i+1, \dots, n$ 까지의 수요량을 기간 i 에 일시에 구매할 것을 제안하였다. 여기서 $A_{i,j}$ 는 식 (3)과 같이 정의되며 $A_{i,N} < A_{i,N-1} < \dots < A_{i,i+1} < A_{i,i+1} < A_{i,i}$ 이다.

$$A_{i,j} = \int_0^\infty \min(p, A_{i+1,j}) dF_{i+1}(p) - h_i \quad (3)$$

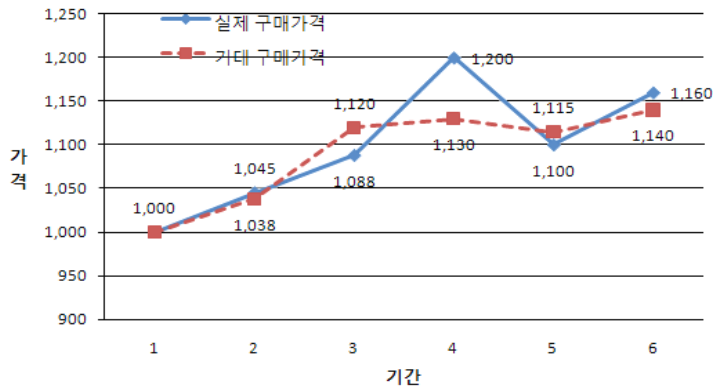
단, $A_{i,i} = \infty$ 이다.

<표 1>과 [그림 2]에 제시된 예를 통해 식 (3)을 이용한 Golabi 방법이 어떻게 작동되는가를 보다 자세히 살펴본다.

<표 1>에서 각 기간의 구매가격 확률분포는 일양분포(uniform distribution)를 따르는 것으로 가정하였고, 분포의 최소값이 a 이고 최대값이 b 일 때 $U(a, b)$ 로 표시하였다. 기대 구매가격은 일양분포의 평균값을 의미하며, 실제 구매가격은 해당 기간이 도래했을 때 관찰된 구매가격의 실제값을 의미한다. 재고유지비용 비율은 실제 구

<표 1> 기간별 구매가격, 재고유지비용 및 수요(예 1)

기간(i)	1	2	3	4	5	6
구매가격 확률분포 ($f_i(p)$)	-	U(978, 1098)	U(1050, 1190)	U(1050, 1210)	U(1065, 1185)	U(1010, 1190)
기대 구매가격	-	1,038	1,120	1,130	1,125	1,100
실제 구매가격(p_i)	1,000	1,045	1,088	1,200	1,100	1,160
재고유지비용 비율(r_i)	4%	4%	4%	4%	4%	4%
재고유지비용(h_i)	40.00	41.80	43.40	48.00	44.00	46.40
수요(D_i)	370	400	380	420	390	360
주문량	370	780	0	420	390	360



[그림 2] 기대 구매가격과 실제 구매가격(예 1)

매가격 대비 단위기간 동안 원자재 1단위를 보관할 때 발생하는 재고유지비용의 비율을 나타낸다. 재고유지비용은 각 기간에 구매한 원자재 1단위를 단위기간 동안 보관하는데 소요되는 비용을 의미한다. 7번째 행은 각 기간의 수요를 나타내며, 마지막 행은 Golabi 방법을 사용할 경우 매 기간의 주문량을 의미한다. [그림 2]은 실제 구매가격과 기대 구매가격을 나타낸 차트인데 기간 3, 5에서는 실제 구매가격이 기대 구매가격보다 낮으며 기간 2, 4, 6에서는 실제 구매가격이 기대 구매가격보다 높음을 알 수 있다.

Golabi 방법에 의하면 기간 1에서 초기재고는 0이고 $A_{1,2} = 998 < p_1 < \infty$ 가 성립하므로 기간 1에서는 기간 1의 수요에 해당하는 370개를 주문한다. 기간 2에서 초기재고는 0이고 $A_{2,4} = 1,039.93 < p_2 \leq A_{2,3} = 1,078.20$ 가 성립하므로 기간 2에서는 기간 2와 3의 수요를 함께 구매한다. 기간 3에서 초기재고는 380개이고 $A_{3,4} = 1,086.48 < p_3 < \infty$ 가 성립하므로 기간 3의 주문량은 0이다. 여기서 기간 3의 수요를 충족하기 위해 구매비용으로 397,100이 소요되었고, 재고유지비용으로 15,884가 소요되었다. 이 두 비용을 합친 비용을 각 기간의 조달비용(procurement cost)라 하면 기간 3의 수요 충족을 위한 조달비용은 412,984이다. 또 조달비

용을 그 기간의 수요로 나눈 값을 단위 조달비용이라 하면 기간 3의 수요 충족에 소요된 단위 조달비용은 $412,984/380 = 1,086.8$ 이다. 조달비용 중 재고유지비용은 해당 기간의 수요가 그 이전 기간에 미리 주문되는 경우에만 0이 아닌 값을 갖는다. 기간 4에서는 초기재고가 0이고 $A_{4,5} = 1,067.00 < p_4 < \infty$ 이므로 기간 4의 수요만큼만 주문한다. 기간 5에서도 초기재고는 0이고 $A_{5,6} = 1,096.00 < p_5 < \infty$ 이므로 기간 5의 수요만큼만 주문하면 된다. 마지막으로 기간 6의 초기재고는 0이므로 기간 6의 수요 360만큼만 주문한다. 기간 1부터 기간 6까지의 수요를 모두 충족시키기 위해 소요된 재고비용과 구매비용을 합친 총비용은 2,551,584이다. 또, 기간 3을 제외한 나머지 기간의 수요는 그 기간 이전에 미리 구매되지 않으므로 조달비용이 구매비용과 같다.

그러나 Golabi가 제안한 방법은 두 가지 문제점을 안고 있다. 첫 번째는 기간 i 에서 기간 j ($> i+1$)의 수요에 대비해 원자재를 구매하는 것은 기간 $(j-1)$ 의 수요가 이미 충족되어야만 가능하다는 점이다. 즉, 식 (3)은 기간 i 에서 기간 $(i+1), \dots, (j-1)$ 까지의 수요의 합만큼을 구매하기로 결정된 상황 하에서만 기간 j 의 수요만큼을 추가 구매할지를 결정한다. 그러나 기간 $(j-1)$ 의

수요충족에 필요한 재고를 기간 i 에 미리 주문하지 않더라도, 기간 j 의 수요는 기간 i 에 미리 구매해 두는 것이 비용 면에서 유리한 경우가 존재한다. 예 1에서 기간 4의 수요는 이전 기간에 미리 구매하지 않고 기간 4에 주문한다. 만약 기간 1에서 기간 4의 수요량을 미리 구매할 경우 구매가격에 재고유지비용을 합산한 단위당 조달비용은 1,120으로 기간 4의 기대 구매가격 1,130보다 작다. 즉, 기간 1에서 기간 4의 수요량을 미리 구매할 경우 원자재 1단위당 10만큼 절감할 것으로 예상된다. 따라서 기간 1에서 기간 4의 수요를 미리 구매하는 것이 유리하다(기간 1에서 기간 4의 수요를 미리 구매해 놓으면 기간 4의 실제 구매가격이 예상 구매가격보다 높아지므로 기간 4에 구매하는 것에 비해 단위당 80을 절감할 수 있다). 그러나 Golabi 방법은 기간 1에서 기간 4의 수요를 미리 구매하지 않는다. 이는 기간 1에서 기간 2의 수요를 미리 구매하지 않기 때문이다. 즉, 기간 1에서 기간 2의 수요를 미리 구매하는 것이 유리하지 않기 때문에 식 (3)의 가정에 의해 기간 2 이후의 수요에 대해서는 기간 1에 미리 구매하는 것 자체를 고려하지 않는다.

두 번째 문제점은 각 기간에서 미래 시점의 재고를 미리 보충할 것인지에 관한 의사결정을 구매가격의 기대값에 따라 결정한다는 점이다. 이는 비용 최소화를 목적으로 하는 모든 구매가격 변동하의 재고모형이 공통적으로 안고 있는 문제점이기도 하다. 그러나 대부분의 현실 상황에서 실제 구매가격은 기대 구매가격과 차이를 갖는다. 예 1에서 현재 시점이 기간 5라고 가정해 보자. 현재 구매가격은 1,100이고 기간 6의 기대 구매가격도 1,100이다. 기간 6의 수요를 기간 5에 미리 주문하면 단위당 조달비용은 1,144가 되고 이는 기간 6에 구매할 때 소요될 것으로 예상되는 구매가격의 기대값보다 높다. 따라서 비용 최소화를 목적으로 하는 경우 기간 5에서는 기간 6

의 수요를 미리 주문하지 않는다. 그러나 미래에 대한 불확실성을 가능한 한 줄이고자 하는 의사결정자의 경우 기간 6의 실제 가격이 기대 구매가격보다 높게 나오으로써 조달비용이 급격히 증가하는 위험을 중요하게 고려할 것이다. 이 경우 실제 구매가격이 다른 기간들에 비해 상대적으로 낮은 기간 5에 D_6 중 일부를 미리 주문하고, 나머지는 기간 6에 보충하는 방식으로 기간 6의 수요 충족에 수반되는 위험을 분산하고자 할 것이다. 만약 기간 5에 D_6 의 (1/2)만큼을 미리 구매하고 나머지 (1/2)는 기간 6에 구매하는 경우 단위당 평균 조달비용은 1,152로 기간 6에 D_6 을 모두 구매하는 것보다 단위 조달비용이 8만큼 작다. 이는 투자 포트폴리오(portfolio)를 구성하는 상황과 유사하다. 투자 포트폴리오의 기대 수익률만을 고려하면 실제 수익률이 기대 수익률과 많은 차이가 날 수 있다. 따라서 이러한 위험을 고려하여 여러 투자 대안에 분산 투자함으로써 투자 포트폴리오의 수익률을 일정 수준 이상으로 유지하면서 투자 포트폴리오의 위험을 최소화한다. 구매가격 변동하에서 재고 보충 시기와 주문량을 결정할 때 비용뿐만 아니라 그에 따른 위험을 함께 고려하여 적절한 주문시점과 주문량을 구할 필요가 있다.

3. 구매가격 변동시 위험회피 재고 모형

제 2장에서는 구매가격이 변동할 때 비용의 기대값만을 고려한 재고모형의 문제점을 분석하였다. 본 절에서는 이러한 문제점을 해결할 수 있는 새로운 재고모형을 제시한다. 현재 시점을 기간 i 초라 하자. 기간 $j(>i)$ 의 수요 D_j 를 충족하기 위해 기간 $i, i+1, \dots, j$ 에 각각 x_i, x_{i+1}, \dots, x_j 만큼 주문하는 재고보충계획을 $R(x_i, x_{i+1}, \dots, x_j)$ 로 표현한다. 기간 i 에서 $R(x_i, x_{i+1}, \dots, x_j)$ 의 총비용

Π_i^j 은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Pi_i^j = & x_i \cdot (1+(j-i)r_i)p_i + x_{i+1} \\ & \cdot (1+(j-i-1)r_{i+1}) \cdot P_{i+1} + \dots + x_j \cdot P_j \end{aligned} \quad (4)$$

단, $x_i + x_{i+1} + \dots + x_j = D_j$ 이다.

식 (4)에서 p_i 만 확정된 값이고 나머지 P_{i+1}, \dots, P_j 는 확률변수이다. 수요 D_j 를 충족하기 위해 기간 i 시점에 x_i 를 주문할 때 구매비용은 $x_i \cdot p_i$ 이다. 또 x_i 개의 재고를 기간 j 까지 유지해야 하므로 가정 6에 따라 재고유지비용은 $x_i \cdot (j-i) \cdot r_i p_i$ 가 된다. 따라서 기간 i 에서 소요되는 비용은 $x_i \cdot (1+(j-i)r_i)p_i$ 이다. 이후의 기간의 비용 산출식은 가격이 확정되지 않았고 확률변수에 의해 표현된다는 점만 다르다. 따라서 Π_i^j 는 기간 i 초에 기간 j 의 수요 충족에 소요되는 조달비용을 나타내는 확률변수이며, 시점 i 에 따라 값이 달라질 수 있다. Π_i^j 의 기대값은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} E(\Pi_i^j) = & (1+(j-i)r_i)p_i x_i \\ & + (1+(j-i-1)r_{i+1})\bar{p}_{i+1}x_{i+1} + \dots + \bar{p}_j x_j \end{aligned} \quad (5)$$

단, $\bar{p}_t = E(P_t)$, $t = i+1, \dots, j$ 이다.

$E(\Pi_i^j)$ 는 기간 i 시작 시점에서 평가한 재고보충 계획 $R(x_i, x_{i+1}, \dots, x_j)$ 에 소요되는 비용의 기대값이다. 그러나 기간 j 시점에 가서야 확정되는 D_j 의 실제 조달비용은 $E(\Pi_i^j)$ 와 차이가 있을 수 있다. 이러한 기대 비용과 실제 비용과 차이는 재고관리계획의 불확실성을 유발한다. 제 2장에서 살펴본 바와 같이 재고보충계획의 기대 비용이 작더라도 재고보충계획의 불확실성이 높은 경우에는 기대 비용보다 실제 비용이 클 확률이 높다. 반면 재고보충계획의 기대 비용이 약간 크더라도 재고보충계획의 불확실성이 낮으면 실제 비용이 기대 비용과 거의 비슷할 가능성이 높다. 본 연

구는 이러한 기대 비용과 실제 비용과의 차이를 줄이기 위해 재고보충계획의 비용뿐만 아니라 불확실성을 함께 고려할 수 있는 방법을 제안한다.

먼저 재고보충계획의 불확실성을 나타낼 수 있는 재고보충계획의 위험을 정의한다. 재고보충계획의 위험은 투자 포트폴리오의 위험에 대한 정의와 유사하다. 투자 포트폴리오를 구성할 때 투자 포트폴리오의 위험은 투자 포트폴리오 수익률의 분산으로 정의되고, 투자 포트폴리오 수익률의 분산은 각 투자대안 수익률의 분산과 서로 상이한 두 투자대안 수익률간의 공분산으로 표현된다[21]. 본 연구에서는 재고보충계획의 위험을 투자 포트폴리오 위험과 동일하게 재고보충계획 총비용의 분산으로 정의한다. 즉, 재고보충계획 $R(x_i, x_{i+1}, \dots, x_j)$ 의 위험을 다음 식과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} Var(\Pi_i^j) = & Var(x_i \alpha_i^j p_i + x_{i+1} \alpha_{i+1}^j P_{i+1} + \dots + x_j \alpha_j^j P_j) \\ = & \sum_{t=i+1}^j (x_t \alpha_t^j)^2 \sigma_t^2 + 2 \sum_{t=i+1}^j \sum_{s=t+1}^j (x_t \alpha_t^j) \\ & \times (x_s \alpha_s^j) (\sigma_t \sigma_s \rho_{ts}) \end{aligned} \quad (6)$$

단, $\alpha_t^j = (1+(j-t)r_t)$ 이고 ρ_{ts} 는 P_t 와 P_s 의 상관계수(correlation coefficient)이다.

식 (6)에서 보는 바와 같이 마코위치 모형에서는 3개 이상의 투자대안간의 상호 연관성을 두 쌍의 대안간의 상호 연관성으로 분해하여 표현하고 있다. 즉, 세 개의 대안 A, B, C간의 상호 연관성은 개념적으로 A와 B, B와 C, C와 A 등 두 개 대안간의 상호 연관성으로 나누어 표현한다. 이러한 성질은 분산을 위험으로 정의하였기 때문에 분산을 구하는 공식으로부터 유도된다. 본 연구도 마코위치 모형과 마찬가지로 분산을 위험으로 정의하였으므로 3개 이상의 기간간의 상호 관련성은 2개 기간간의 상호 관련성의 합으로 표현된다. 그러나 식 (6)에서 제시한 재고

보충계획 위험은 마코위츠(Markowitz)의 투자 포트폴리오 위험과는 약간 다른 점이 있다. 투자 포트폴리오는 상이한 수익률분포를 가진 투자대안으로 이루어지고, 각 투자대안의 수익률은 일반적으로 서로 다른 시계열을 갖는다. 마코위츠의 투자 포트폴리오 선정 모형에서 공분산의 현실적 의미는 두 개의 투자대안의 수익률 시계열이 얼마나 유사하게 변화하는가를 나타낸다. 반면, 재고보충계획은 상이한 구매시점을 나타내는 구매대안들로 구성되며, 각 구매대안의 구매가격은 동일한 시계열의 서로 다른 시점의 값을 나타낸다. 따라서 식 (6)의 재고보충계획에서 공분산의 실질적 의미는 동일한 시계열상에서 일정한 시간 지연이 있는 두 시점의 구매 가격이 서로 얼마나 큰 상관관계를 갖는지를 나타낸다. 그러나 이러한 차이점에도 불구하고 식 (6)의 재고보충계획의 위험이 각 구매대안의 분산과 두 개의 상이한 구매대안간의 공분산으로 표현된다는 점은 마코위츠 모형과 동일하다.

재고보충계획의 기대 비용을 줄이면서 동시에 재고보충계획의 위험을 일정 수준 이하로 유지하는 문제는 다음 $(RAIM_i^f)$ 과 같이 이차계획법(quadratic programming) 문제로 모형화할 수 있다.

$$\begin{aligned} \min \quad & E(I_i^f) + \lambda \text{Var}(I_i^f) \\ & = (\alpha_i^j p_i) x_i + (\alpha_{i+1}^j \bar{p}_i) x_{i+1} + \dots + (\alpha_j^j \bar{p}_j) x_j \\ & + \lambda \left\{ \sum_{t=i+1}^j (\alpha_t^j \sigma_t)^2 x_t^2 + 2 \sum_{t=i+1}^j \sum_{s=t+1}^j (\alpha_t^j \alpha_s^j \sigma_t \sigma_s \rho_{ts}) x_t x_s \right\} \\ (RAIM_i^f) : \quad & s.t. \quad x_i + x_{i+1} + \dots + x_j = D_j, \\ & \quad \quad \quad x_i, x_{i+1}, \dots, x_j \geq 0. \\ & \quad \quad \quad \text{단, } \lambda \text{ 는 } \lambda \geq 0 \text{ 인 상수이다.} \end{aligned}$$

$(RAIM_i^f)$ 의 목적함수는 재고보충계획의 비용과 위험의 합이다. 여기서 λ 는 재고보충계획에서 위험이 차지하는 비중을 나타내므로 위험 가중치

라 부르기로 한다. 현재 시점 i 에서 기간 i 의 주문량은 위험에 아무런 영향을 주지 않는다. 왜냐하면 현재 시점은 이미 가격이 확정되어 있기 때문에 주문량에 관계없이 불확실성이 존재하지 않는다. 따라서 재고보충계획의 위험을 줄이기 위해서는 현재 시점 기간 i 에 미리 원자재를 보충해두는 것이 유리하다. 그러나 기간 i 의 구매 가격이 충분히 낮지 않은 경우에는 기간 i 에 재고를 보충하게 되면 조달비용이 증가할 수 있다. $(RAIM_i^f)$ 의 목적함수는 위험과 비용의 합을 고려하여 이를 최소화하므로, $(RAIM_i^f)$ 는 조달비용의 기대값이 낮으면서 위험도 작은 재고보충계획을 찾을 수 있게 해준다. 여기서 $(RAIM_i^f)$ 는 다음 정리에 의해 유일한 최적해를 갖는다.

정리 1 :

$$\beta_{i+1} P_{i+1} + \beta_{i+2} P_{i+2} + \dots + \beta_j P_j = 0, \quad (\beta_{i+1}, \beta_{i+2}, \dots, \beta_j) \neq 0 \text{ 을 만족하는 } (\beta_{i+1}, \beta_{i+2}, \dots, \beta_j) \text{ 가 존재하지 않으면 } (RAIM_i^f) \text{ 는 유일한 최적해를 갖는다.}$$

(증명) $(RAIM_i^f)$ 의 가능해 집합은 공집합이 아니므로 최적해가 존재함은 명확하다. 최적해의 유일성을 보이기 위해 $(RAIM_i^f)$ 의 제약식으로부터 x_i 를 $x_i = D_j - x_{i+1} - \dots - x_j$ 로 표현하고 이를 목적함수에 대입하면 x_i 가 제거된 문제 (\overline{RAIM}_i^f) 를 얻을 수 있다. 이 과정에서 목적함수의 상수항은 제거하였다.

$$\begin{aligned} \min \quad & ((\alpha_{i+1}^j \bar{p}_i) - (\alpha_i^j p_i)) x_{i+1} + \dots + ((\alpha_j^j \bar{p}_j - (\alpha_i^j p_i)) x_j \\ & + \lambda \left\{ \sum_{t=i+1}^j (\alpha_t^j \sigma_t)^2 x_t^2 + 2 \sum_{t=i+1}^j \sum_{s=t+1}^j (\alpha_t^j \alpha_s^j \sigma_t \sigma_s \rho_{ts}) x_t x_s \right\} \\ (\overline{RAIM}_i^f) : \quad & s.t. \quad x_{i+1} + \dots + x_j \leq D_j, \\ & \quad \quad \quad x_{i+1}, \dots, x_j \geq 0. \end{aligned}$$

(\overline{RAIM}_i^f) 의 제약식 $x_{i+1} + \dots + x_j \leq D_j$ 는 $x_i \geq 0$

을 보장하기 위해 추가한 제약식이다. $(RAMI_i^j)$ 의 목적함수를 행렬 기호를 써서 $(\lambda/2)\mathbf{x}^T\mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{c}^T\mathbf{x}$ 과 같은 형태로 표현할 때 2차항의 행렬 Q 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q = \begin{bmatrix} (\alpha_{i+1}^j\sigma_{i+1})^2 & \alpha_{i+1}^j\alpha_{i+2}^j\sigma_{i+1}\sigma_{i+2} & \cdots & \alpha_{i+1}^j\alpha_{i+1}^j\sigma_{i+1}\sigma_j \\ \alpha_{i+1}^j\alpha_{i+2}^j\sigma_{i+1}\sigma_{i+2} & (\alpha_{i+2}^j\sigma_{i+2})^2 & \cdots & \alpha_{i+2}^j\alpha_{i+2}^j\sigma_{i+2}\sigma_j \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{i+1}^j\alpha_{i+1}^j\sigma_{i+1}\sigma_j & \alpha_{i+2}^j\alpha_{i+2}^j\sigma_{i+2}\sigma_j & \cdots & (\alpha_j^j\sigma_j)^2 \end{bmatrix}$$

이차계획법에서 Q 가 양정치(positive definite) 행렬이면 이차계획법의 최적해는 유일함이 알려져 있다[5]. 따라서 Q 가 양정치 행렬임을 보이면 된다. 한편, Q 는 분산-공분산행렬(variance-covariance matrix)로 임의의 $(j-i)$ 차원 벡터 $\mathbf{x}(\neq 0)$ 에 대해 $\mathbf{x}^T\mathbf{Q}\mathbf{x} = Var(II_i^j)$ 이다. 정리의 가정이 성립하면 $Var(II_i^j) > 0$ 이므로, 이는 $\mathbf{x}^T\mathbf{Q}\mathbf{x} > 0$ 임을 의미하고 Q 는 양정치 행렬이다. ■

위의 정리 1은 특정 기간의 구매가격 확률분포가 다른 기간의 구매가격 확률분포들의 선형 조합(linear combination)으로 표현되지 않음을 가정하고 있다. 구매가격이 확률적으로 변동하는 일반적인 상황에서는 특정 기간의 구매가격이 타 기간의 구매가격에 의해 정확히 결정되는 경우는 거의 없다. 즉, 이전 기간의 구매 가격이 미래의 구매가격에 영향을 미치는 경우가 있기는 하지만 그 경우에도 미래의 구매가격을 완전히 결정하지는 않는다. 이는 각 기간의 구매가격은 이전 기간들의 구매가격과 외부 변수의 변동 이외에도 고유의 불규칙한 변동을 내포하고 있기 때문이다. 따라서 대부분의 적용 환경에서 정리 1의 가정이 성립하며 $(RAMI_i^j)$ 의 최적해는 유일하게 결정된다고 할 수 있다.

앞서 살펴본 $(RAMI_i^j)$ 는 기간 j 의 수요에 대비하여 기간 i 에 구매해야 하는 원자재 주문량을 결정하기 위한 문제이다. 미래의 기간 $j = i+1, i+2,$

...에 대해 $(RAMI_i^j)$ 를 풀어서 미래 각 기간의 수요에 대비하여 기간 i 에 주문해야 하는 주문량의 총합 Q_i 을 구할 수 있다. 각 기간의 주문량 Q_i 를 구하는 절차는 다음과 같다. 여기서 n 은 자연수이다.

위험회피 재고모형 주문량 결정 알고리즘

단계 0 : 초기화

기간 $t = 1, 2, \dots, N$ 에 대해 $d_t = D_t,$

$Q_t = 0$ 으로 둔다.

시작 시점을 $i = 1$ 로 둔다.

단계 1 : 주문량 계산

기간 $j = i+1, i+2, \dots, i+n$ 에 대해

다음을 수행한다.

d_j 를 수요로 하여 $(RAMI_i^j)$ 를 풀어

최적해 $(x_i^*, x_{i+1}^*, \dots, x_j^*)$ 를 구한다.

$Q_i^j = x_j^*$ 로 둔다.

$Q_i = Q_i + x_i^*$ 로 둔다.

$d_j = d_j - x_j^*$ 로 둔다.

단계 2 : 주문 실행

Q_i 만큼 재고를 보충한다.

다음 기간이 시작되면 $i = i+1$ 로 둔다.

$i > N$ 이면 종료하고 아니면 단계 1로 간다.

[그림 3] 위험회피 재고모형의 주문량 계산 절차

[그림 3]에서 d_j 는 기간 j 의 수요 중 재고보충이 아직 안 되고 남아 있는 양을 의미한다. Q_i^j 는 기간 j 의 수요 중 기간 i 에 재고보충이 되는 양을 의미한다. 기간 j 의 수요는 여러 기간에 걸쳐 재고보충이 될 수 있다. 구매가격 변동시 비용만을 최소화 하는 재고모형에서는 기간 j 의 수요 충족에 필요한 재고를 특정 시기에 일괄적으로 구매한다. 그러나 [그림 3]과 같이 위험회피를 목적으로 하는 재고모형에서는 D_j 를 충족하기 위해 여러 기간에 걸쳐 재고를 보충하게 되는데, 이는 재고보충 시기를 분산함으로써 조달비용의 불확실성을 줄일 수 있기 때문이다. 따라서 위험회피 재고모형은 제 2장에서 살펴본 비용 최소화 모형의 두 번째 문제점을 해결할 수 있다. 또한, 위험회피 재고모형은 기간 i 에서 D_{j-1} 와 D_j 충족에

필요한 주문량을 $(RAIM_i^{j-1})$, $(RAIM_i^j)$ 를 각각 풀어서 독립적으로 결정한다. Golabi 방법은 제 2장의 첫 번째 문제점에서 논의하였듯이 순차적으로 재고보충을 해야 한다고 가정하나 위험회피 재고모형에서는 이러한 가정을 제거하였다.

[그림 3]에서 $(RAIM_i^j)$ 의 최적해 $(x_i^*, x_{i+1}^*, \dots, x_j^*)$ 요소 중에서 실질적으로 기간 i 에 사용되는 요소는 x_i^* 이고 나머지 x_{i+1}^*, \dots, x_j^* 는 사용되지 않는다. 예를 들어 x_{i+1}^* 는 p_{i+1} 이 알려지지 않은 기간 i 에서 구한 값이다. 다음 시점이 되어 현재 시점이 기간 $(i+1)$ 로 바뀌면 p_{i+1} 이 확정적으로 정해진다. 기간 $(i+1)$ 에 p_{i+1} 을 이용하여 $(RAIM_{i+1}^j)$ 을 다시 풀 다음 Q_{i+1} 를 계산하는 것이 보다 정확하게 기간 $(i+1)$ 의 주문량을 구할 수 있다. 또한, Q_i 를 계산할 때 기간 $i+1$ 부터 기간 $i+n$ 까지 n 개의 기간만을 고려한다. n 이 길수록 보다 일찍부터 재고보충계획을 수립하므로 조달비용과 위험을 줄일 수 있는 가능성이 많아진다. 그러나 한편으로는 n 이 길수록 보다 먼 미래시점의 구매가격 분포를 예측해야 하므로 예측된 구매가격 분포의 정확성이 떨어질 수 있다. 만약 구매가격 분포의 예측 정확성이 낮으면 수립된 재고보충계획도 비효율적이 될 수 있으므로 실제 비즈니스 상황에서는 구매가격 분포를 비교적 정확하게 예측할 수 있는 기간까지만 Q_i 계산에 고려할 수 있도록 n 를 적절히 설정해야 한다.

위험회피 재고모형은 식 (3)에 제시된 방법과

는 다르게 주문량을 쉽게 계산할 수 있는 명시적인 공식을 제공하지는 않는다. 그러나 $(RAIM_i^j)$ 는 비음(non-negativity) 제약식 외에 다른 제약식을 1개만 갖는 매우 단순한 이차계획법 문제로 빠른 시간내에 최적해를 구할 수 있다. 또한 식 (3)을 적용하기 위해서는 미래 각 기간의 구매가격에 대한 확률분포를 추정해야만 한다. 반면 $(RAIM_i^j)$ 는 구매가격의 기대값과 표준편차 및 상관계수만 필요로 하므로 식 (3)에 비해 구매가격 예측작업이 보다 단순화된다. 실제 비즈니스 환경에서 구매가격의 기대값을 정확히 예측하는 것은 쉽지 않으며, 나아가 구매가격의 확률분포까지 정확하게 예측하는 것은 더욱 어렵다. 이러한 관점에서 확률분포 추정이 필요 없는 위험회피 재고모형이 Golabi 방법에 비해 보다 실용적이라 할 수 있다.

4. 모형 적용 및 그 결과

본 절에서는 제 3장에서 제시한 위험회피 재고모형을 간단한 예제문제와 원유 재고관리에 각각 적용해 보고 그 결과를 제시한다. 먼저 제 2장에서 설명한 예제문제에 위험회피 재고모형을 적용해본다. 위험회피 재고모형 주문량 계산 절차에서 $n=6$ 으로 두고 $(RAIM_i^j)$ 의 목적함수에서 위험 가중치 λ 를 각각 $\lambda=0$, $\lambda=10^{-6}$, $\lambda=1$ 로 설정하여 위험회피 재고모형을 수행한 결과는 다음 <표 2>와 같다.

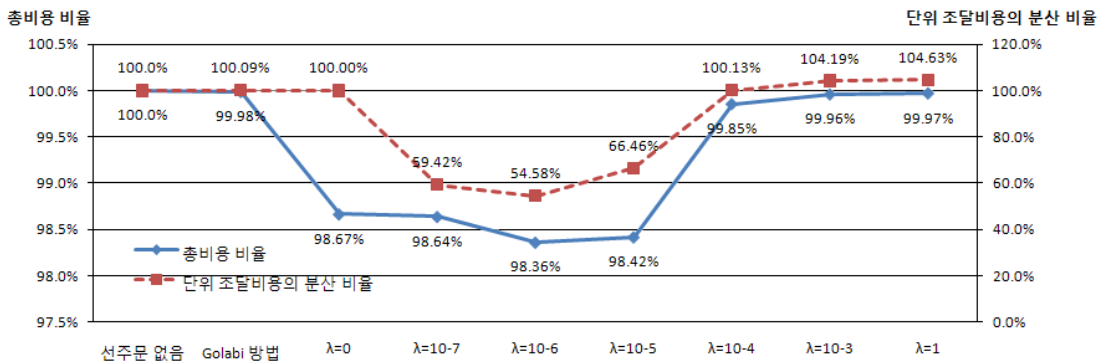
<표 2> 위험회피 재고모형의 각 시점별 주문량

가중치	$\lambda = 0$							$\lambda = 10^{-6}$							$\lambda = 1$							
	수요시점	1	2	3	4	5	6	합계	1	2	3	4	5	6	합계	1	2	3	4	5	6	합계
주문 시점	1	370			420			790	370	275	352	420			1417	370	400	380	420	390	360	2320
	2		400	380				780		125	28			153								0
	3							0						0								0
	4							0						0								0
	5						390	390					390	249	639							0
	6							360	360						111	111						0
	합계	370	400	380	420	390	360	-	370	400	380	420	390	360	-	370	400	380	420	390	360	-

<표 2>에서 3행부터 8행까지는 주문시점을 의미하고 열은 수요시점을 의미한다. 예를 들면 3번째 행의 6번째 열에 나타난 420은 기간 4의 수요 중 420을 기간 1에 주문하였음을 의미한다. <표 2>에서 $\lambda=0$ 인 경우를 살펴보면 위험에 대한 고려 없이 조달비용의 기대값이 최소가 되는 시점에 주문을 한다. 기간 1에서 기간 4의 수요량을 미리 보충하는 데 소요되는 비용이 기간 4의 구매가격 기대값보다 낮으므로 기간 4의 수요량을 기간 1에 주문한다. 또, 기간 6의 수요는 이전에 미리 구매하지 않고 기간 6에 바로 보충한다. 그 이유는 기간 5에서 기간 6의 수요를 미리 보충하는 비용이 기간 6의 구매가격 기대값보다 더 크기 때문이다. 그러나 기간 6의 구매가격 분포는 분산이 가장 커서 구매가격의 불확실성이 가장 높다. 따라서 제 2장에서 제시하였듯이 이러한 불확실성에 대비하여 구매가격이 비교적 낮은 기간 5에 기간 6의 수요 중 일부를 미리 보충해두는 것이 유리하다. $\lambda=0$ 인 경우는 이러한 불확실성을 고려하지 않기 때문에 기간 6의 수요를 이전 기간에 보충하지 않는다. 반면 $\lambda=10^{-6}$ 인 경우를 보면 기간 5에 기간 6의 수요 중 일부를 미리 보충하고 있다. 즉, 기간 6의 수요량 360 중 249를 기간 5에 보충하고 나머지 111개를 기간 6에 보충한다. 기간 6의 구매가격 불확실성에

대비하여 일부를 기간 5에 구매함을 알 수 있다. $\lambda=10^{-6}$ 인 경우에는 $\lambda=0$ 인 경우와 다르게 특정 기간의 수요를 충족하기 위한 주문을 여러 개 기간에 분산시킴으로써 구매가격의 변동으로 인한 위험을 감소시키고 있다. 예로 기간 2의 수요량 400개 중 275개는 기간 1에 주문하고 나머지 125개는 기간 2에 보충한다. 그러나 위험 가중치를 $\lambda=1$ 로 증가시키면 비용보다는 위험을 보다 중시하게 되어 모든 주문이 기간 1에 집중된다. 이는 기간 1 시작 시점에서 기간 1의 가격은 이미 확정된 상태이고 나머지 기간의 구매가격은 확률분포에 따라 변동되므로 구매가격의 불확실성을 최소화하려면 기간 1에 모두 주문하는 것이 유리하기 때문이다. 이 경우 [그림 4]와 같이 전체 비용이 오히려 증가하게 된다.

[그림 4]는 여러 가지 가격변동 재고모형을 적용하고 그 결과를 비교한 차트이다. 재고모형 중 ‘선주문 없음’은 미래의 수요에 대비해 미리 주문하는 것을 배제하고 매 기간마다 그 기간의 수요만큼 주문하는 방법으로서 이 방법에서는 구매비용만 존재하며 재고유지비용은 항상 0이다. 총비용 비율은 선주문이 없는 재고모형의 총비용에 비해 각 재고모형 총비용의 비율을 의미한다. Golabi 방법은 선주문이 없는 재고모형과 총비용 면에서 거의 동일하여 주문 시점을 효과적으로



[그림 4] 재고모형별 총비용과 조달비용의 분산 비교

결정하지 못함을 알 수 있다. 반면 위험회피 재고모형의 경우 위험 가중치 λ 에 따라 총비용이 달라진다. 위험 가중치 λ 가 0이거나 매우 작으면 위험에 대한 고려 없이 비용만을 최소화하도록 재고보충계획을 수립하게 된다. 이로 인해 예측된 구매가격보다 실제 구매가격이 높아지면 총비용이 오히려 증가할 수도 있다. 그러나 예제에서는 위험회피 재고모형의 위험 가중치 λ 를 0으로 두면 선주문이 없는 경우나 Golabi 방법보다 비용이 감소하였다. 반대로 위험 가중치 λ 가 높게 설정되면 위험을 줄이기 위해 구매가격 변동이 있는 미래 시점보다는 구매가격이 높더라도 그 값이 확정된 현재 시점에 미리 주문하게 된다. 이 경우에도 현재 시점이 비용이 높으면 총비용이 오히려 증가할 수 있다. [그림 4]에서 $\lambda=10^{-6}$ 일 때 비용과 위험을 함께 고려하여 가장 효과적인 구매시점을 선정함으로써 총비용을 최소화할 수 있다.

여러 가지 재고모형을 비교하는 또 다른 척도로 단위 조달비용의 분산을 고려할 수 있다. 위험회피 재고모형은 기간 j 의 수요 충족에 필요한 재고를 여러 기간에 걸쳐 나누어 주문하는데 이 경우 기간 j 의 조달비용은 분산된 주문들의 구매비용과 재고유지비용의 합이다. 기간 j 의 단위 조달비용은 기간 j 의 조달비용을 기간 j 의 수요로 나눈 값을 의미한다. 단위 조달비용의 변동이 작으면 조달비용의 변동도 작아질 것이며 결과적으로 재고보충계획의 불확실성이 낮다고 볼 수 있다. 따라서 위험을 회피하는 의사결정자의 경우 단위 조달비용의 변동이 큰 재고모형보다는 단위 조달비용의 변동이 작은 재고모형을 선호할 것이다.

단위 조달비용의 변동 정도를 기준으로 여러 가지 재고모형을 비교해 보자. [그림 4]에서는 단위 조달비용이 변동되는 정도를 단위 조달비용의 분산으로 측정하고 그 크기를 선주문이 없는

경우의 단위 조달비용 분산에 대한 상대적 비율로 나타내었다. 선주문을 고려하지 않는 경우 어느 기간의 단위 조달비용은 그 기간의 실제 구매가격과 항상 동일하다. 따라서 선주문을 고려하지 않는 경우에 단위 조달비용의 분산은 실제 구매가격의 분산과 같다. [그림 4]에서 Golabi 방법은 실제 구매가격과 거의 동일한 수준으로 단위 조달비용이 변동하고 있다. 반면 $\lambda=10^{-6}$ 인 위험회피 재고모형의 경우 단위 조달비용 분산이 실제 구매가격 분산의 약 54% 수준으로 단위 조달비용이 실제 구매가격보다 훨씬 안정적임을 볼 수 있다. $\lambda=1$ 인 경우에는 위험을 줄이기 위해 구매가격이 확정된 시점에 미리 주문하게 되고 이로 인해 구매가격과 재고유지비용이 증가함으로써 결과적으로 단위 조달비용의 분산이 오히려 커진다. $\lambda=0$ 인 경우에는 비용을 줄이기 위해 주문시점을 분산시키지 않고 구매가격의 기대값이 낮은 시점으로 주문으로 미루게 된다. 이로 인해 단위 조달비용의 변동이 심해진다. [그림 4]에서 비용과 단위 조달비용의 분산을 종합적으로 고려해 볼 때 위험 가중치를 $\lambda=10^{-6}$ 으로 설정하는 것이 [그림 4]에 제시된 다른 위험 가중치들에 비해 상대적으로 유리하다. 이 경우 Golabi 방법이나 선주문을 고려하지 않는 경우보다 비용은 약 1.6% 절감할 수 있고 단위 조달비용의 변동은 약 45% 줄일 수 있다.

4.1 위험 가중치(λ) 설정

[그림 4]에 제시된 바와 같이 위험 가중치 λ 는 위험회피 재고모형의 수행도에 큰 영향을 미친다. λ 가 매우 작은 경우에는 불확실성으로 인한 위험을 무시하고 단순히 비용의 기댓값만을 고려하여 구매량을 결정한다. 반대로 λ 가 매우 큰 경우에는 기대비용이 높더라도 위험이 작은 시점에 주문을 내므로 위험이 0인 현재 시점에 가

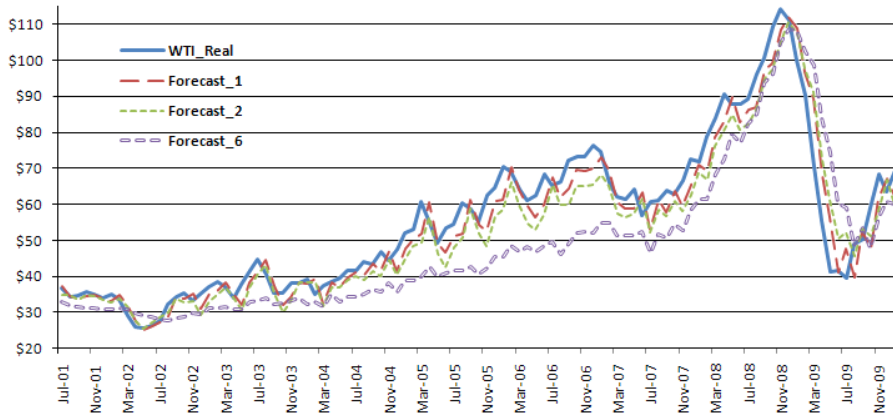
능한 많은 양을 주문하려 할 것이다. 이 두 경우 최적의 의사결정을 내리지 못하여 전체 조달비용이 증가하는 문제가 있다. 따라서 실제 비즈니스 상황에 위험회피 재고모형을 적용하기 위해서는 위험 가중치 λ 를 적절히 설정할 수 있는 방법이 요구된다.

실제 문제마다 적합한 위험 가중치 λ 를 설정하는 방법으로는 통계학 및 데이터마ining(data mining) 등에서 일반적으로 활용되는 교차타당성 검증(cross-validation) 방법을 사용할 수 있다. 교차타당성 검증에 관한 자세한 설명은 [17, 25]를 참조하기 바란다. 교차타당성 검증 방법을 사용하여 위험가중치를 설정하는 절차를 설명하면 먼저 실험 대상이 되는 자료를 학습데이터와 시험데이터 그룹으로 나눈다. 이후 학습데이터를 다시 두 개의 그룹으로 나눈다. 일반적인 교차타당성 검증은 학습데이터를 v 개의 그룹으로 나누지만 본 연구에서 다루는 원유와 알루미늄의 구매가격은 모두 시계열자료로 최신 기간만 타당성 검증에 사용하는 것이 바람직하므로 v 개 대신 두 개의 그룹으로 학습데이터를 나눈다. 두 번째 단계에서는 학습데이터의 두 그룹중 첫 번째 그룹의 데이터를 사용하여 가격예측 방법을 학습한다. 세 번째 단계에서 위험가중치를 여러 가지 값으로 변경해가면서 학습데이터의 두 번째 그룹의 데이터에 위험회피 재고모형을 적용한다. 네 번째 단계에서는 각 위험 가중치별 위험회피 재고모형의 총비용을 계산하여 총비용을 최소로 하는 위험가중치를 실제 문제에 사용할 위험가중치로 설정한다. 마지막으로 설정된 위험가중치를 사용하는 위험회피 재고모형을 학습데이터에 적용하여 그 결과를 분석한다.

4.2 원유 재고관리 적용 결과

다음으로 위험회피 재고모형을 원유 도입에 적

용한 결과를 알아본다. 여러 종류의 원유가격 중 가장 널리 활용되는 WTI(West Texas Intermediate) 원유가격 자료를 1986년부터 2010년 1월까지 수집하여 월별 평균 가격을 구하였다. 물가 상승에 의한 원유가격 상승효과를 제거하기 위해 월별 평균 가격을 미국 생산자 물가지수(producer price index)를 사용하여 불변가격으로 변환하였다. WTI 원유가격 자료와 미국 생산자 물가지수 자료로는 각각 [26]와 [7]에 발표된 자료를 사용하였다. 원유가격 예측방법으로는 자기회귀모형(autoregressive model)을 사용하였다. 현재 시점이 기간 i 시작이라면 기간 i 부터 $(i-5)$ 까지 최근 6개 기간의 원유가격을 독립변수로 하여 기간 $(i+1)$ 부터 기간 $(i+6)$ 까지 다음 6개 달의 원유가격을 예측하였다. 구매가격 변동 재고모형은 2001년 1월부터 2010년 1월까지 적용하였다. 기간 i 시작 시점의 예측 절차를 설명하면 먼저 1986년 1월부터 기간 $(i-36)$ 까지의 자료를 이용하여 자기회귀모형의 계수를 도출한다. 다음으로 자기회귀모형을 기간 $(i-35)$ 부터 기간 i 까지의 자료에 적용하여 예측치의 표준편차를 추정한다. 또한, 기간 $(i+1)$ 부터 기간 $(i+6)$ 까지의 원유가격 예측치와 표준편차를 계산한다. 마지막으로 기간 i 이전의 자료로부터 상관계수를 계산한다. [그림 5]는 이러한 방법으로 예측된 원유가격과 실제 원유가격을 나타낸 차트이다. WTI_Real는 실제 원유 불변가격을 의미하고 Forecast_1, Forecast_2, Forecast_6은 각각 1개월, 2개월, 6개월 전에 예측한 가격을 의미한다. 보다 먼 미래로 갈수록 예측의 정확성이 떨어짐을 알 수 있다. 실제로 1개월 전, 2개월 전, 6개월 전 예측치의 평균 절대오차(mean absolute deviation)는 각각 4.0780, 7.2302, 16.9802로 예측 시점으로부터 예측 대상 기간이 멀수록 예측 오차가 증가하였다. Golabi 방법의 적용을 위해서는 원유가격의 확률분포를 추정해야 하는데 확률분포로는 정규분포를 가정하

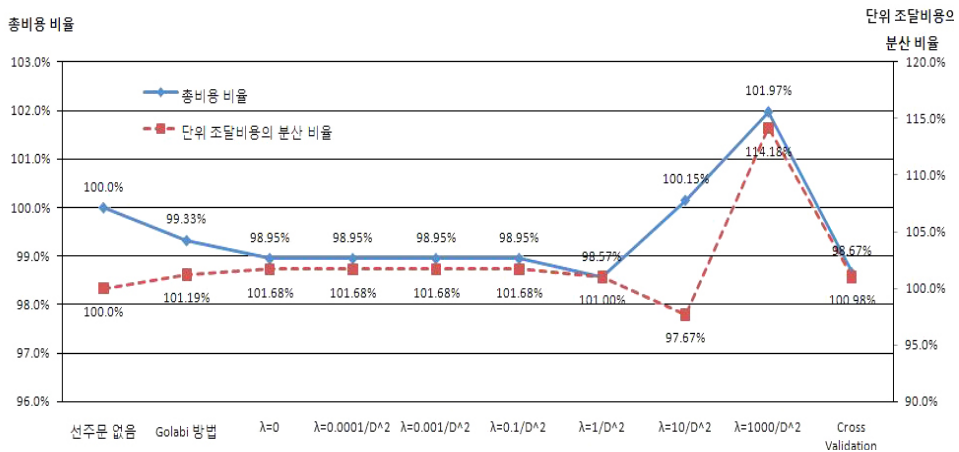


[그림 5] WTI 원유 가격과 예측치

있고 앞서 추정된 예측치와 표준편차를 정규분포의 평균과 표준편차로 입력하였다.

위험회피 재고모형의 주문량 계산 절차의 n 값을 6으로 두어 각 시점에서 최대 6개 미래 기간의 수요를 고려하여 주문량을 결정하였다. 각 기간의 수요치는 50에서 150사이의 범위를 갖는 일양분포(uniform distribution)로부터 무작위로 값을 생성하여 설정하였다. 수요의 평균값을 D 라 할 때 위험 가중치는 $\lambda=0$, $\lambda=0.0001D^{-2}$, $\lambda=0.001D^{-2}$, $\lambda=0.1D^{-2}$, $\lambda=D^{-2}$, $\lambda=10D^{-2}$, $\lambda=1000D^{-2}$ 로 각각 설정하고 위험회피 재고모형을 적용하였다. 또

한, 교차타당성 검증방법을 사용하여 위험가중치를 설정한 결과도 함께 제시했으며, 이때 1995년 12월 이전 데이터로부터 가격예측모형을 학습하고 교차타당성 검증은 1996년 1월부터 2000년 12월까지 5개년에 대해 수행하였다. 수행시마다 각 재고모형의 총비용과 단위 조달비용의 분산을 구하였고, 이 과정을 40회 반복하여 총비용과 단위 조달비용의 평균값을 산출하였다. 또한, 위험회피 재고모형의 이차계획법문제는 Matlab 7.1이 제공하는 최적화 도구(optimization toolbox)를 이용하여 최적해를 구하였다. [그림 6]는 WTI



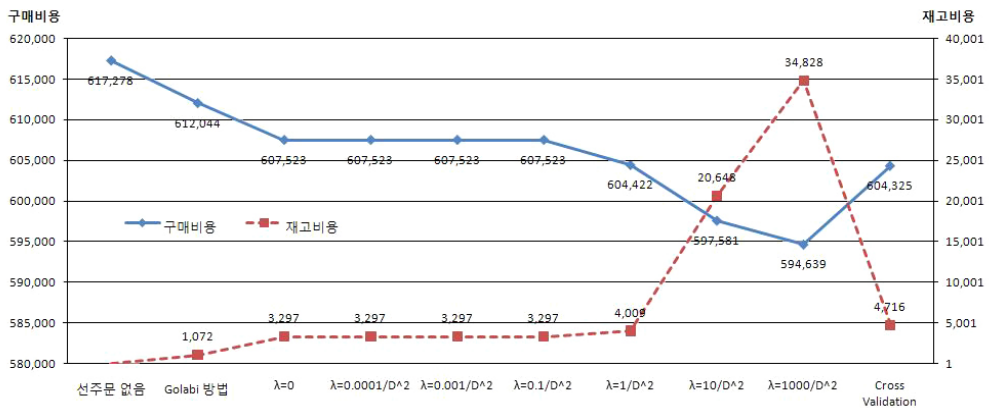
[그림 6] WTI 원유 가격 변동시 재고모형별 수행 결과 비교

원유가격 변동시 각 재고모형별 총비용 비율과 단위 조달비용의 분산 비율을 보여준다.

[그림 6]에 제시된 결과는 [그림 4]의 예제에서 살펴본 결과와 유사함을 알 수 있다. Golabi 방법의 비용은 선주문이 없이 매 기간 즉시 보충하는 방법에 소요되는 비용의 99.33%로 Golabi 방법을 사용한 선주문을 활용할 경우 0.7%의 비용 감축효과가 있음을 알 수 있다. 또 Golabi 방법의 단위 조달비용 분산은 유가의 분산보다 1.19% 커서 단위 조달비용의 변동이 유가의 변동보다 증폭되었음을 알 수 있다. 이는 선주문에 의해 재고유지비용이 발생하고 이로 인해 단위조달비용이 상승하는 경우가 있기 때문이다. 반면 위험회피 재고모형을 보면 위험 가중치 $\lambda = D^{-2}$ 일 때 비용이 최저가 되어 총비용을 약 1.43% 절감할 수 있다. 하지만 가중치 값이 $\lambda = 10D^{-2}$ 보다 커지면 비용이 다시 증가함을 알 수 있다. 반면 단위 조달비용의 분산은 $\lambda = 10D^{-2}$ 일 때 유가 분산의 97.67% 수준으로 줄어든다. 위험 가중치 λ 가 $\lambda = 1000D^{-2}$ 이상으로 커지면 단위 조달비용의 분산이 다시 증가함을 볼 수 있다. [그림 6]의 위험회피 재고모형의 결과가 [그림 4]의 결과와 다른 점은 특정한 위험 가중치에서 총비용과 단위 조달비용의 분산이 동시에 최소가 되지 않는다

는 점이다. [그림 4]에서는 $\lambda = 10^{-6}$ 일 때 총비용과 단위 조달비용의 분산이 모두 최소가 되지만 [그림 5]를 보면 총비용은 $\lambda = D^{-2}$ 에서 최적이 되나 단위 조달비용의 분산은 $\lambda = 10D^{-2}$ 에서 최적이다. 따라서 총비용과 단위 조달비용의 변동간의 상충관계를 고려하여 적절한 위험 가중치를 찾아야 한다. [그림 5]에서 보는 바와 교차타당성 검증방법을 통해 위험가중치를 설정하는 경우 총비용과 단위조달비용 면에서 Golabi 방법보다 우수한 위험회피 모형을 찾을 수 있다. 교차타당성 검증방법으로 위험가중치를 설정한 경우 총비용을 약 1.33% 줄일 수 있고 단위 조달비용의 분산은 100.98%가 된다. 이는 Golabi방법에 비해 총비용 면에서는 0.66% 포인트, 단위조달비용의 분산 면에서는 0.21% 포인트 우수하며 이러한 차이는 통계적으로도 유의한 것으로 판명되었다.

총비용을 구매비용과 재고유지비용으로 나누어 분석해보면 [그림 7]과 같은 결과를 얻을 수 있다. 선주문을 하지 않는 경우에는 재고유지비용은 없으므로 구매비용이 총비용과 같다. 위험가중치가 커질수록 구매비용이 감소하고 재고유지비용은 증가함을 볼 수 있다. 이는 미래의 구매가격은 불확실성을 포함하고 있고 위험가중치



[그림 7] 총비용 중 구매비용과 재고비용의 변화(원유 재고관리)

가 높을수록 위험회피 재고모형은 불확실성에 대해 높은 비용을 부과하므로 상대적으로 선주문이 많아진다. 이 경우 구매가격으로 인한 비용을 줄일 수 있으나 선주문에 의해 재고유지비용이 증가하게 된다. 위험회피 재고모형은 Golabi 방법에 의해 구매비용이 낮음을 볼 수 있고 이는 위험회피 재고모형이 Golabi 방법에 비해 보다 적절하게 선주문 시점을 선정하고 있음을 의미한다.

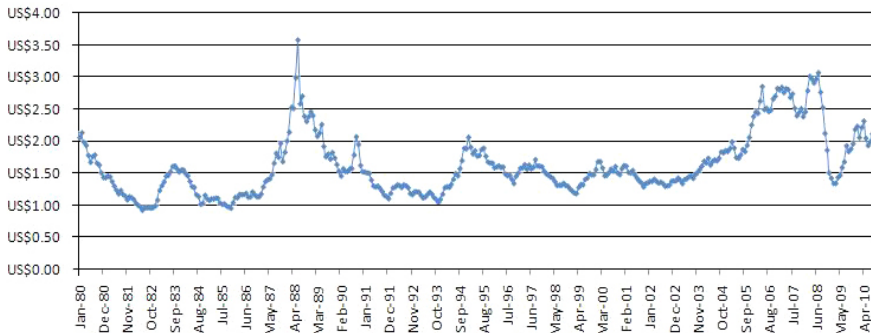
4.3 알루미늄 재고관리 적용 결과

마지막으로 위험회피 재고모형을 알루미늄 재고관리에 적용한 결과를 알아본다. 1980년 이후 알루미늄 가격에 대한 자료는 [13]로부터 획득하

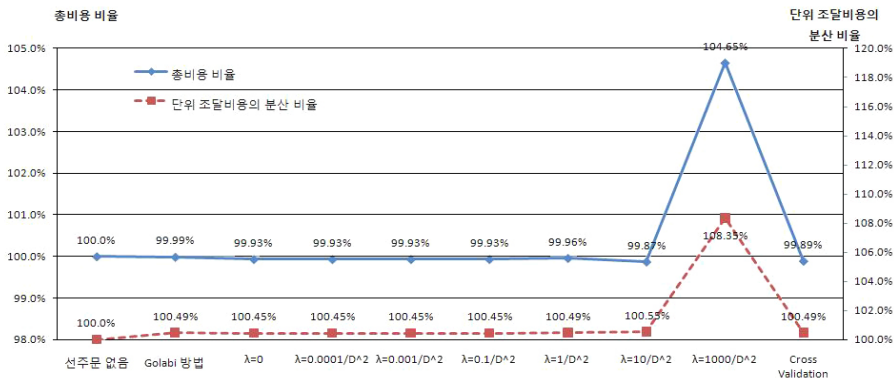
였으며 변화 추이를 그래프로 나타내면 [그림 8]과 같다. 이때 가격은 1kg당 미국달러 기준으로 표시하였다.

가격예측방법, 수요량 생성 방법, 위험회피 재고모형의 주문량 계산 절차는 원유 재고모형과 동일하다. 위험회피 재고모형의 가중치도 원유 재고모형과 동일하게 $\lambda=0$, $\lambda=0.0001D^{-2}$, $\lambda=0.001D^{-2}$, $\lambda=0.1D^{-2}$, $\lambda=D^{-2}$, $\lambda=10D^{-2}$, $\lambda=1000D^{-2}$ 로 설정하였다. 교차타당성 검증방법을 사용하여 위험가중치를 설정할 때 검증자료로 1995년 1월부터 2000년 12월까지 6개년의 자료를 사용하였다. 여러 가지 모형을 알루미늄 재고관리에 적용한 결과는 [그림 9]와 같다.

위험가중치 변화에 따른 위험회피 재고모형의



[그림 8] 알루미늄 가격의 추이



[그림 9] 재고모형들의 수행 결과(알루미늄 재고관리)

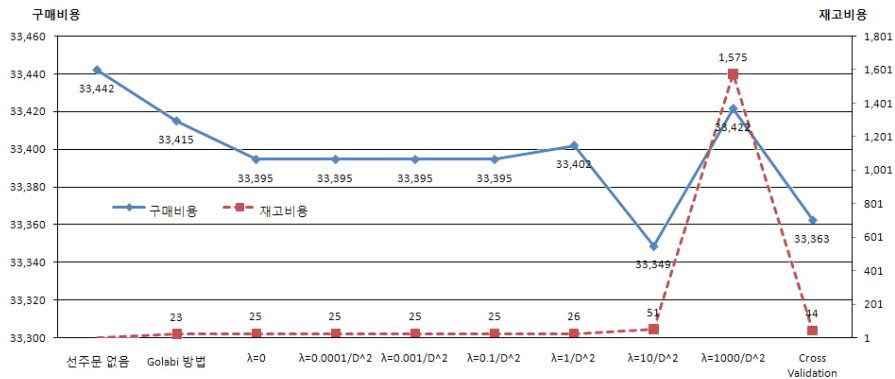
총비용 비율과 단위조달비용의 분산비율의 변화는 앞에 살펴본 원유 재고관리의 경우와 유사한 형태를 띠고 있다. 먼저 총비용을 살펴보면 위험가중치가 0에서 점점 증가할수록 총비용이 감소하여 $\lambda=10/D^2$ 에서 총비용이 최소가 된 다음 위험가중치가 $\lambda=1000/D^2$ 이 되면 다시 총비용이 증가한다. 단위조달비용의 분산비율은 일정구간 동안 변함없이 유지되다 이후 증가하였다. 위험회피 재고모형과 Golabi 방법 모두 단위조달비용의 분산비율이 100%보다 커서 선주문이 없는 경우보다 단위조달비용의 분산이 더 커졌다. 이는 구매가격은 선주문으로 낮아졌으나 재고유지비용이 증가하여 단위조달비용의 분산이 전체적으로 증가하였기 때문이다. 교차타당성 검증 방법에 의해 위험 가중치를 설정하면 총비용은 0.11% 감소하지만 단위조달비용의 분산은 0.49% 증가한다. Golabi 방법이 총비용을 0.01% 줄이는 데 비해 위험회피 재고모형은 이보다 더 많은 0.11%의 비용을 감소시켜 총비용면에서 위험회피 재고모형이 Golabi 방법보다 우수함을 알 수 있다. 단위조달비용의 분산 면에서도 교차타당성 방법을 사용하면 위험회피 재고모형의 분산이 Golabi 방법의 분산과 동일하다. 결론적으로 위험회피 재고모형이 Golabi 방법에 비해 총비용을 보다 더 감소시킬 수 있으며 단위조달비용의 분산은 거

의 동일한 수준으로 유지한다고 할 수 있다.

총비용 중 구매비용과 재고비용의 변화를 그래프로 나타내면 [그림 10]과 같다. 위험가중치가 증가함에 따라 구매비용은 전반적으로 감소하나 위험가중치가 커지면 다시 구매비용은 증가한다. 원유 재고관리의 경우와 다르게 $\lambda=1/D^2$ 일 때 구매비용이 증가했다가 $\lambda=10/D^2$ 일 때 다시 감소하였다. 반면 재고유지비용은 위험가중치 값이 커짐에 따라 계속 증가하였다. 전반적으로 위험회피 재고모형은 Golabi 방법에 비해 구매비용이 더 작고 재고유지비용은 더 큰 것으로 나타났다.

5. 결론 및 추후 연구과제

본 연구는 원자재 구매가격이 지속적으로 변동되는 상황에서 매 기간 주문량을 결정할 때 비용뿐만 아니라 위험을 함께 고려하는 위험회피 재고모형을 제시하였다. 구매가격 변동시 기존 재고모형은 구매가격의 평균치에 의거하여 비용을 최소화하도록 주문량을 결정한다. 그러나 구매가격 예측치는 실제 구매가격과 달라 오차를 포함하고 있으며 이로 인해 구매가격의 예측치에 근거한 주문량 결정은 비효율적일 수도 있다. 위험회피 재고모형은 투자 포트폴리오 모형과 유사하게 구매가격 분포의 분산을 위험으로 정



[그림 10] 총비용 중 구매비용과 재고비용의 변화(알루미늄 재고관리)

의하여 비용 뿐만 아니라 위험을 동시에 고려하여 매 기간 주문량을 결정한다. 위험회피 재고모형은 어느 한 기간의 수요 충족에 필요한 재고를 구매가격이 비교적 낮은 여러 기간에 분산시켜 보충함으로써 구매가격 변동의 위험을 줄인다. 실제 문제에 위험회피 재고모형을 적용한 결과 위험회피 재고모형은 기존에 제시된 방법보다 단위 조달비용의 변동성을 줄일 뿐만 아니라 전체 비용도 감소시키는 것으로 나타났다.

향후 연구과제로는 먼저 비용과 위험을 동시에 고려할 때 최적 재고모형이 어떤 유형일 것인가를 규명할 필요가 있다. 비용만을 고려하는 경우와 마찬가지로 위험을 함께 고려한 경우에도 (s,s) 형태 재고모형의 최적성이 유지되는가는 흥미로운 연구과제가 될 것이다. 또한, 구매가격 변동시 재고모형의 성과는 예측의 정확성에 좌우된다. 따라서 예측 정확도에 따라 위험회피 재고모형 수행도의 민감도를 분석하는 것도 중요한 연구과제가 될 것이다. 그 밖에 연구과제로 위험 가중치가 위험회피 재고모형의 수행도에 미치는 영향을 분석하고, 교차타당성 검증방법과 같은 경험적 오차에 근거한 방법 이외에도 보다 이론적인 근거에 의해 위험 가중치를 설정하는 방법을 찾는 것도 흥미로운 연구주제가 될 것이다. 마지막으로 유가나 알루미늄 재고관리 이외에 보다 다양한 실제 상황에 위험회피 재고모형을 적용하고 그 유용성을 검증하는 것도 추후 과제로 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 권정의, 백금계열 금속소재의 조달 및 재고 비용에 관한 연구, 동국대학교 박사학위논문, 2004.
- [2] Ardalan, A., "Combined optimal prices and optimal inventory replenishment policies when a sale results in increase in demand," *Computers and Operations Research*, Vol. 18(1991), pp.721-730.
- [3] Arnold, J., S. Minner, and B. Eidam, "Raw material procurement with fluctuating prices," *International Journal of Production Economics*, Vol.121(2009), pp.353-364.
- [4] Bachman, A., "Inventory control with price fluctuations," *International Journal of Operations and Production Management*, Vol.6 (1986), pp.58-64.
- [5] Bazara, M.S., H.D. Sherali, and C.M. Shetty, *Nonlinear Programming : Theory and Algorithms*, 3rd ed., Wiley-Interscience, 2006.
- [6] Chen, X., M. Sim, D. Simchi-Levi, and P. Sun, "Risk aversion in inventory management," *Operations Research*, Vol.55(2007), pp.828-842.
- [7] Economic Research, Federal Reserve Bank of St. Louis, <http://research.stlouisfed.org/fred2/>.
- [8] Gascon, A., "On the finite horizon EOQ model with cost changes," *Operations Research*, Vol.43(1995), pp.716-717.
- [9] Gavirneni, S. and T.E. Morton, "Inventory control under speculation : Myopic heuristics and exact procedures," *European Journal of Operational Research*, Vol.117(1999), pp.211-221.
- [10] Gavirneni, S., "Periodic review inventory control with fluctuating purchasing costs," *Operations Research Letters*, Vol.32(2004), pp.374-379.
- [11] Golabi, K., "Optimal inventory policies when ordering prices are random," *Opera-*

- tions Research, Vol.33(1985), pp.575-588.
- [12] Hall, G. and J. Rust, "The (S, s) policy is an optimal trading strategy in a class of commodity price speculation problems," *Economic Theory*, Vol.30(2007), pp.515-538.
- [13] International Monetary Fund, <http://www.imf.org/external/np/res/commod/index.asp>.
- [14] Jacobs, F.R., R.B. Chase, and N.J. Aquilano, *Operations and Supply Management*, 12th ed., McGraw-Hill, 2009.
- [15] Kalyon, B.A., "Stochastic prices in a single-item inventory purchasing model," *Operations Research*, Vol.19(1971), pp.1434-1458.
- [16] Kingsman, B.G., "Commodity purchasing," *Operations Research Quarterly*, Vol.20 (1969), pp.59-80.
- [17] Lattin J., J.D. Carroll, and P.E. Green, *Analyzing multivariate data*, Thomson Learning, 2003.
- [18] Lev, B. and H.J. Weiss, "Inventory models with cost changes," *Operations Research*, Vol.38(1990), pp.53-63.
- [19] Luo, J. and P. Huang, "A note on inventory models with cost changes," *Operations Research*, Vol.51(2003), pp.503-504.
- [20] Manikas, A., Y.-L. Chang, and M. Ferguson, "BlueLinx can benefit from innovative inventory management methods for commodity forward buys," *Omega*, Vol.37 (2009), pp.545-554.
- [21] Markowitz, H.M., "Portfolio Selection," *The Journal of Finance*, Vol.7(1952), pp.77-91.
- [22] Martel, A. and A. Gascon, "Dynamic lot-sizing with price changes and price-dependent holding costs," *European Journal of Operations Research*, Vol.111(1998), pp. 114-128.
- [23] Ramasesh, R.V., "Lot-sizing decision under limited-time price incentives : A review," *Omega*, Vol.38(2010), pp.118-135.
- [24] Scarf, H., "The optimality of (S, s) policies in the dynamic inventory problems," In : K.J. Arrow, S. Karlin, P. Suppes, editors, *Mathematical Methods in the Social Sciences*, Standford University Press, Standford, 1960.
- [25] Tan, P.-T., M. Steinbach, and V. Kumar, *Introduction to data mining*, Pearson, 2006.
- [26] U.S. Energy Information Administration, <http://www.eia.doe.gov/>.
- [27] Wang, Y., "The optimality of myopic stocking policies for systems with decreasing purchasing prices," *European Journal of Operational Research*, Vol.133(2001), pp. 153-159.
- [28] Wu, J., I. Li, S. Wang, and T.C.E. Cheng, "Mean-variance analysis of the news vendor model with stockout cost," *Omega*, Vol.37(2009), pp.724-730.
- [29] Yang, J. and Y. Xia, "Acquisition management under fluctuating raw material prices," *Production and Operations Management*, Vol.18(2009), pp.212-225.
- [30] Zhang, D., H. Xu, and Y. Wu, "Single and multi-period optimal inventory control models with risk-averse constraints," *European Journal of Operational Research*, Vol. 199(2009), pp.420-434.