

Material Requirements Planning for Military Maintenance Depot

Heung Seob Kim* · Pansoo Kim**†

*Department of Systems Engineering, Air Force Academy

**School of Business, Kyungpook National University

군 정비창 자재소요계획

김흥섭* · 김판수**†

*공군사관학교 시스템공학과

**경북대학교 경영학부

In order to manage essential parts that are required for the repairable parts services performed at the military maintenance depots, the United States Air Force developed the Repairability Forecasting Model (RFM). In the RFM, if the requirements of the parts are assumed to follow the normal probability distribution after applying means from the past data to the replacement rate and lead times, the chance of the AWP (Awaiting Parts) occurring is 50%. In this study, to counter the uncertainties of requirements and lead times from the RFM, the safety level concept is considered. To obtain the safety level for requirements, the binomial probability distribution is applied, while the safety level for lead time is obtained by applying the normal probability distribution. After adding this concept, the improved RFM is renamed as the ARFM (Advanced RFM), and by conducting the numerical stimulation, the effectiveness of the ARFM, minimizing the occurrence of the AWP, is shown by increasing the efficiency of the maintenance process and the operating rate of the weapon system.

Keywords : MRP, RFM, Maintenance Depot, Spare Parts, Requirement

1. 서론

재고(Inventory)란 미래에 사용하기 위해 기업이 준비하여 보관하고 있는 유희의 재화, 원자재 또는 자산으로 정의될 수 있다. 대부분의 조직에서 재고를 유지하고 획득하는데 관련된 비용은 경영활동 비용 중 상당 부분을 차지한다. 특히 다품종, 고가의 제품들을 다루게 될수록 이러한 비용은 점차 증가하게 된다. 따라서 경제적인 재고관리는 기업의 재무관리 건전성에 지대한 영향을 미치

게 된다. 이러한 재고관리 영역은 크게 수요예측(Forecasting), 재고수준(Leveling) 그리고 발주(Ordering)로 구분된다. 수요예측은 재고수준을 결정하는데 가장 중요한 요소이며, 재고수준이 결정되면 이에 따라 필요한 시점에 필요한 수량이 재고로 유지될 수 있도록 발주를 하게 된다. 재고문제는 다양한 방법의 접근을 통해 연구되어지고 있다 [3, 4]. 기업은 수요를 충족하고 생산성을 높이기 위해 충분한 재고수준을 유지해야 하지만, 재고비용을 감소시켜야 하는 이율배반적인 문제(Antinomic problem)에 당면하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 재고관리 시스템 중 하나가 자재소요계획(MRP : Material Requirements Planning)이며, MRP 시스템의 개념은 완제품(End items) 생산

Received 5 August 2014; Finally Revised 27 November 2014;
Accepted 27 November 2014

† Corresponding Author : pskim@knu.ac.kr

계획에 따라 이에 필요한 자재를 필요한 시기에 필요한 양만큼 필요한 곳에 공급하기 위해 발주 시기와 수량을 결정하는 개념이다. MRP 시스템에 활용되는 정보는 주생산일정계획(MPS : Master Production Schedule), 자재명세서(BOM : Bill Of Materials) 및 재고상태 기록(Inventory Status Records)이며, 재고상태 기록에는 보유재고(O/H, On-Hand) 뿐만 아니라 도입예정량(D/I : Due-Ins)이 포함된다.

미국의 CACI社는 MRP 시스템의 개념을 군 정비창(Military Maintenance Depot)에서 장비 또는 복구성 부품(Repairable parts) 정비에 필요한 자재관리에 적용하기 위해 RFM(Repairability Forecasting Model) 시스템을 개발하였다. RFM 시스템은 미공군의 San Antonio Air Logistics Center(ALC)에서 사용하고 있으며, 미공군 물자사령부(AFMC : Air Force Materiel Command)의 표준 시스템으로 사용되고 있다.

RFM 시스템과 MRP 시스템의 가장 큰 차이점은 각 시스템의 목적이다. 즉, RFM 시스템은 정비공정, MRP 시스템은 제조공정에서 소요되는 자재들의 재고를 관리하는 것이다. MRP 시스템에서의 불확실적인 요소는 주생산일정계획(MPS)과 자재들의 리드타임(Lead time)이 될 수 있다. MPS는 제품의 판매 추세에 따라 생산량의 증·감이 발생할 수 있으며, 자재들의 리드타임은 자재 납품업체의 사정에 따라 변동될 수 있다. 기업에서는 이러한 불확실한 요소들을 반영하여 안전재고(Safety stock)를 유지하게 된다. 하지만 완제품을 제조하는데 필요한 자재가 확정적임에 따라 MPS가 정확하다면 모든 자재들의 소요량은 정확하게 산출할 수 있다. 이에 반해 정비공정에서의 주정비일정계획(MRS : Master Repair Schedule)은 정비대상의 임의적 고장에 의존적임에 따라 사전에 정확한 계획 수립이 불가능하며, 자재들의 리드타임 뿐만 아니라 정비 시 교환될 자재들의 소요량도 불확실하다. 즉, RFM에서는 정비계획부터 정비창에 입고된 제품에서 어떤 자재가 교환될지, 그리고 교환될 수량에 대한 정확한 예측이 불가능함에 따라 MRP 시스템에 비해 상당한 불확실성을 내포하고 있다. 따라서 동일한 제품의 과거 정비실적을 바탕으로 정비 입고량을 예측하게 되며, 과거 교환실적으로 바탕으로 자재별 교환율(Replacement rate)을 산정하여 적용한다. 하지만 교환율 또한 확률적인 요소임에 따라 MRS가 확정적이라더라도 자재별 소요량을 정확하게 예측할 수 없다. 결과적으로, 정비공정을 위한 자재소요 계획 시스템(RFM)은 MRP 시스템과 유사한 개념에서 출발하고 있으나, 정비공정에서 나타나는 불확실성을 충분히 반영하여 설계되어야 한다.

CACI社가 개발한 RFM 시스템은 MRS를 확정적으로 고려하고 있으며, 자재별 교환율과 리드타임에 대해 과거 실적 데이터의 평균(Mean)을 적용하고 있다. 이러한

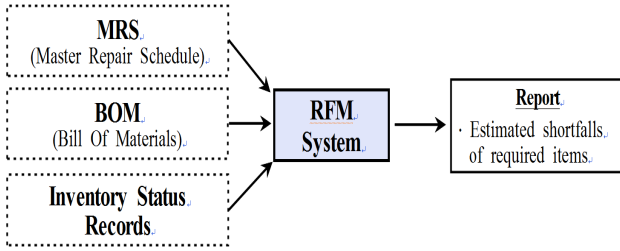
RFM 시스템은 자재별 소요량이 정규확률분포(Normal probability distribution)를 따른다고 가정할 때, 재고부족(Shortfalls)이 발생할 확률이 50%임을 뜻한다. 본 연구에서는 교환량 및 리드타임의 불확실성에 대응하기 위한 안전재고(Safety stocks)를 고려함으로써 재고부족에 의한 공정지연을 방지할 수 있도록 하였다. 이는 소요를 보수적으로 예측하는 경향이 있으나, 자재 발주시점에 보유재고(O/H)와 도입예정량(D/I)을 고려하는 적응적 재고관리 정책(Adoptive inventory management policy)[1, 5]을 적용함으로써 과도한 투자를 방지하고, 월간 또는 주간 등 MRS의 시간 단위에 따라 차기에 소요될 자재들의 통합발주(Joint replenishment)[9]를 통해 과도한 투자를 방지할 수 있도록 하였다. 미공군의 RFM을 개선하여 본 연구에서 제안하는 모형을 ARFM(Advanced RFM)으로 명명하였다.

2. RFM과 MRP 비교

RFM 시스템의 기본적인 논리(Logic)와 구조(Structure)는 MRP 시스템의 개념을 채용하고 있다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 각 시스템의 활용분야와 목적이 상이함에 따라 분명한 차이를 갖는다. 본 장에서는 RFM 시스템과 MRP 시스템의 유사성과 차이점, 그리고 CACI社의 RFM 시스템에 대하여 고찰한다[2].

2.1 RFM과 MRP의 유사성

RFM과 MRP 시스템의 첫 번째 유사성은 시스템의 논리이다. MRP 시스템은 완제품 생산일정과 완제품 생산에 소요되는 자재들의 리드타임을 고려하여 해당 자재 소요량이 적기에 도입될 수 있도록 발주시점을 결정하게 된다. 이와 같이 RFM 시스템에서도 일정별 정비 물량을 예측하고, 이에 따라 각 수리입고된 제품의 정비에 사용될 자재들의 소요량 판단 후 소요 자재들의 리드타임을 고려하여 발주하게 된다. 물론 이러한 자재 발주계획을 수립함에 있어 차이점은 있으며, 이는 제 2절에서 설명한다. 두 번째 유사성은 시스템의 구조이다. RFM 시스템의 구조는 <Figure 1>과 같다. 각 시스템 구조의 차이점은 MRP 시스템에서의 MPS가 MRS로 변경된 것과 최종 산출물이 상이하다. MPS와 MRS의 차이점은 MPS는 판매 추세에 따라 변화될 수 있으나, 결과적으로는 기업의 생산 목표에 따라 결정된다. 그러나 MRS는 고장이 발생하여 정비창에 입고된 제품들의 정비계획으로 기업이 결정할 수 없으며, 단지 정비창으로의 입고 물량을 예측하여 계획을 수립하게 된다.



<Figure 1> RFM System

2.2 RFM과 MRP의 차이점

RFM과 MRP 시스템의 논리와 구조는 앞서 언급한 바와 같이 유사하지만, 각 시스템의 목적부터 분명한 차이를 보이게 된다. 첫째는 각 시스템이 사용되는 제조공정과 정비공정의 환경적 차이에서 나타난다. 즉, 제조공정에 적용되는 MRP 시스템에서는 최종 제품에 사용되는 자재 k 의 개수(UPA : Unit Per Assembly, u_k)가 명확하기 때문에 시점 j 에 필요한 자재 k 의 소요량(d_{jk})은 최종 제품의 생산계획량(P_j)에 따라 $d_{jk} = P_j \cdot u_k$ 로 결정되며, 시점별 소요량은 정수(Integer)로 산정된다. 따라서 MRP 시스템에서의 자재의 수요는 MPS에 따라 정확하게 산정될 수 있다. 따라서 제조공정에서 자재의 수요는 생산계획에 완전하게 종속적임에 따라 MRP 시스템을 종속적 재고시스템으로 정의하고 있다.

이에 반해, 정비공정에서는 고장난 제품을 점검하고 시험(E&I, Estimation and Inspection)을 수행해야 정비에 필요한 자재들을 식별할 수 있다. 또한, 정비장으로 수리 입고된 제품들이 모두 동일한 고장유형을 갖지 않기 때문에 제품별 정비에 소요되는 자재의 종류와 수량이 다양하게 나타날 수 있다. 따라서 RFM 시스템에서는 이러한 불확실성을 고려하기 위해 과거의 정비실적 데이터를 통해 자재별 평균 교환율(r_k)을 식 (1)과 같이 산출하여 적용하고 있다. 이때 정비 실적이 많을수록 평균 교환율의 정확도가 높아지며, 이는 어떠한 현상이 일어날 확률은 적은 횟수로 측정했을 때 뚜렷이 나타나지 않으나, 횟수가 증가할수록 이론적 확률로 수렴한다는 대수의 법칙(Law of Large Numbers)으로 설명된다.

$$r_k = M_k / (R u_k) \quad (1)$$

여기서, M_k : 대상기간 중 자재 k 의 교환량

R : 과거 정비실적(대수)

따라서 시점 j 에 필요한 자재 k 의 소요량(d_{jk})은 정비계획량(N_j)과 자재의 평균 교환율(r_k)을 고려하여 식 (2)

와 같이 산정된다. 이와 같이 RFM 시스템에서는 정비공정 운영을 위한 자재들의 소요를 정비계획에 반종속적인 수요(Semi-dependent demand)로 고려하고 있다.

$$d_{jk} = r_k (N_j u_k) \quad (2)$$

3. ARFM(Advanced RFM) 설계

본 장에서는 美공군 RFM 시스템을 보다 현실적으로 개선한 ARFM 시스템의 소요산정과 발주계획 수립 방법론에 대해 고찰한다. ARFM 시스템의 구조적인 부분은 RFM과 동일하나, 입력데이터에는 자재명세서(BOM) 상에 교환율과 리드타임의 불확실성에 대응하기 위한 안전수준량(SLQ : Safety Level Quantity) 설정에 각각의 표준편차가 추가적으로 고려된다[7]. 또한, 소요산정에 있어 자재 교환율과 리드타임의 불확실성은 각각 이항분포와 정규분포로 고려하였다. 또한, ARFM 시스템에서 발주계획은 Beak et al.[1]이 제안한 적응형 재고관리 모형과 Park and Kim[5]이 제안한 예측기반 재고정책의 개념을 적용하였다.

3.1 소요산정 방법론

ARFM의 입력데이터는 RFM에서와 같이 주정비일정계획(MRS), 자재명세서(BOM), 그리고 재고기록철(ISR)로 구성된다. 시기별 자재의 소요량은 MRS와 BOM 상의 자재별 UPA, 교환율 등을 사용하여 운영수준량(OLQ : Operational Level Quantity)과 안전수준량(SLQ)으로 구분하여 산정된다.

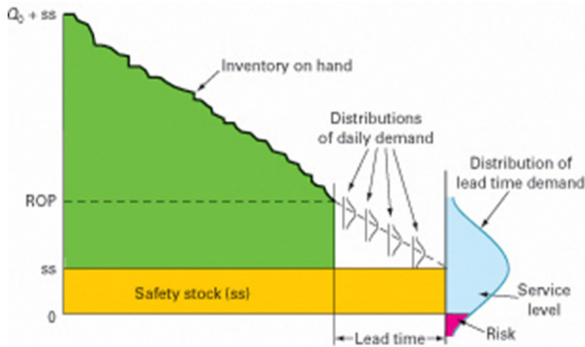
3.1.1 운영수준량(OLQ)

운영수준량(OLQ)은 RFM 시스템에서와 같이 MRS에 따라 시기별 자재 예상 사용량을 UPA와 평균 교환율을 적용하여 예측하며, 정비대상 장비 i 에 대한 자재 k 의 UPA(u_{ik})와 평균 교환율은 BOM 상의 데이터를 사용한다. 여기서 장비 i 가 정비 입고되었을 때, 자재 k 의 개별 품목의 교환여부는 베르누이분포로 고려될 수 있으며, 따라서 장비 1대 당 교환될 수량은 이항분포 $\text{Bin}(u_{ik}, r_{ik})$ 로 묘사될 수 있다. 또한, 정비계획 시점 j 에서 정비대상 장비 N_{ij} 대에 대한 자재 k 의 교환량은 이항분포의 가법성(Additivity)에 따라 $\text{Bin}(N_{ij} u_{ik}, r_{ik})$ 을 따르게 되며, 운영수준량(OLQ)은 $\text{Bin}(N_{ij} u_{ik}, r_{ik})$ 의 기댓값으로 식 (3)과 같이 산정된다.

$$\text{OLQ}_{ijk} = N_{ij} u_{ik} r_{ik} \quad (3)$$

3.1.2 안전수준량(SLQ)

안전수준량(SLQ) 운영에 대한 개념은 <Figure 2>와 같다. 즉, 안전수준량(SLQ)은 실제 교환 소요량이 운영수준량(평균 교환량)을 초과하여 재고부족(Shortfalls)으로 인해 정비공정이 지연되는 상황을 최소화하기 위해 보유하게 된다.



<Figure 2> Safety Level Quantity

정비대상 장비 i 에 대한 자재 k 의 안전수준량(SLQ)은 교환량에 대한 확률분포 $\text{Bin}(N_{ij}u_{ik}, r_{ik})$ 의 표준편차를 고려하여 산정하게 된다. 이때 자재별 중요도 등을 고려하여 안전계수(Safety factor)를 운영하도록 설계하였으며, 장비 i 에 대한 자재 k 의 안전계수는 $f_{r,ik}$ 로 표기한다. 여기서, 첨자 ‘ r ’은 자재 교환량의 불확실성에 대한 안전계수임을 의미하며, 제 3.2절에서 논의될 리드타임에 대한 안전계수($f_{l,ik}$)와 구분하기 위함이다. 안전계수는 해당 자재로 인한 정비공정 지연을 방지하는 효과도 수준을 의미한다. 이때, 교환검토 대상 수량 $N_{ij}u_{ik}$ 가 충분히 커지는 경우 교환량에 대한 확률분포 $\text{Bin}(N_{ij}u_{ik}, r_{ik})$ 는 $N[N_{ij}u_{ik}r_{ik}, N_{ij}u_{ik}r_{ik}(1-r_{ik})]$ 로 근사될 수 있다[6]. 따라서 안전계수에 따른 효과도 확률은 표준정규분포에 따라 <Table 1>과 같다[8]. 이에 따라 안전수준량(SLQ)은 식 (4)와 같이 산정한다. 참고적으로 공군은 수리부속 지원의 연속성을 보장하기 위해 “현 보급운영을 지속하고 예상되는 수요를 충족하기 위해 보유하고 있거나 발주 중에 있어야 할 수리부속의 수량”으로 정의되는 청구목표(RO : Requisition Objective) 산정 시 경제성과 효과성을 절충하여 안전수준량(SLQ)을 수요의 표준편차 수준

으로 고려하고 있으며, 이때 안전계수($f_{r,ik}$)는 1이 적용된다.

<Table 1> Probability Based on Safety Factor($f_{r,ik}$)

Safety factor	0	0.5	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	2.5
Probability	0.5	0.69	0.84	0.89	0.93	0.96	0.98	0.99

$$SLQ_{ijk} = f_{r,ik} \sqrt{N_{ij}u_{ik}r_{ik}(1-r_{ik})} \quad (4)$$

지금까지는 수시 발주하여 획득하는 방식의 수시조달 품목을 기준으로 설명하였다. 그러나 국내조달 품목 등은 연 1회 계약을 통해 1년간의 소요량을 일시에 확보하고 있다. 이러한 일시조달 품목에 있어서는 연간 정비계획 물량 전체를 고려하여 안전수준량(SLQ)을 산정하는 것이 경제적이며, 향후 미활용 재고의 발생을 최소화할 수 있다. 따라서 임의의 일시조달 품목의 납기가 $(p-1)$ 월이라면, 안전수준량(SLQ)은 p 월부터 $p+11$ 월까지 12개월간의 정비계획 물량을 고려하여 식 (5)와 같이 산정한다.

$$SLQ_{ijk} = f_{r,ik} \sqrt{\left(u_{ik} \sum_{j=p}^{p+11} N_{ij}\right) r_{ik}(1-r_{ik})} \quad (5)$$

<Table 2>는 식 (4)와 식 (5)에 의해 산정된 안전수준량(SLQ)의 차이를 예시적으로 설명하고 있으며, 일시조달 품목에 대한 안전수준량(SLQ)이 더 적은 것을 확인할 수 있다. 여기서 수시조달 품목도 식 (5)를 적용하여 산정할 경우 보다 경제적인 안전수준량(SLQ)을 운영할 수 있을 것으로 판단할 수 있으나, 연간 안전수준량(SLQ)을 재고로 유지함에 따른 재고유지비용 증가와 수시 발주시 적정 안전수준량(SLQ)을 재산정해야 함에 따른 재고관리의 복잡도 증가가 수반된다. 따라서 수시조달 품목은 연속적인 재고관리 개념에서 자재의 실제 사용량 추세를 고려하여 월간 안전수준량(SLQ)과 발주량을 결정하는 것이 보다 경제적이고, 합리적인 재고관리 방안이 될 수 있다. 또한, 일시조달 품목의 경우 해당 회계연도 기간 중 재조달이 어려움을 감안하여 안전계수를 보다 상향하여 적용할 필요가 있다.

<Table 2> Safety Level Quantity of Unscheduled or One Time Procurement Item

UPA(2ea), Replacement rate(0.143), Safety factor(1.0)

$k \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
MRS	5	3	2	6	4	3	8	4	3	5	6	5	54
Unscheduled	1.94	1.5	1.23	2.13	1.74	1.5	2.45	1.74	1.5	1.94	2.13	1.94	21.74
One time	6.36												6.36

3.1.3 소요량 산정

정비계획 시점 j 에 정비대상 장비 i 에 소요되는 자재 k 의 소요량(d_{ijk})은 운영수준량(OLQ $_{ijk}$)과 안전수준량(SLQ $_{ijk}$)의 합으로 산정되며, 최종적으로 소수점 수량에 대해 올림하여 정수화한다. 따라서 정비계획 시점 j 에 정비대상 장비 i 를 위한 자재 k 의 소요량 d_{ijk} 는 식 (6)과 같이 산정된다. 또한, 자재 k 가 여러 종류의 장비에 사용되는 공통품목(Common item)일 수 있으므로, 자재 k 의 총 소요량 d_{jk} 는 식 (7)과 같이 산정된다.

$$d_{ijk} = [(N_{ij}u_{ik}r_{ik}) + f_{r,ik}\sqrt{N_{ij}u_{ik}r_{ik}(1-r_{ik})}] \quad (6)$$

$$d_{jk} = \sum_{i=1}^{end} [(N_{ij}u_{ik}r_{ik}) + f_{r,ik}\sqrt{N_{ij}u_{ik}r_{ik}(1-r_{ik})}] \quad (7)$$

<Table 3>의 예시 품목을 대상으로 소요량을 산정한 결과는 <Table 4>와 같다. 여기서, 정비대상 장비는 1종류로 제한하고, 안전계수($f_{r,ik}$)는 수시조달 품목은 1.0, 일시조달 품목은 2.0을 적용하였다.

3.2 발주계획 수립

수시조달 품목에 대한 발주정책으로는 경제적 주문량(EOQ : Economic Order Quantity) 모형을 적용하였으며, 본 연구에서는 정비계획량에 대한 시간 단위를 월(Month)로

고려하였다. EOQ는 12개월의 소요량, 즉, 연간수요(AD : Annual Demand)를 기준으로 산정하였다. 전체 비용(TC : Total Cost)은 주문비용과 재고유지비용의 합이 된다. 주문비용은 연간 발주횟수에 비례하여 증가하여 식 (8)과 같고, 재고유지비용은 평균 재고의 자산가치(= 평균재고×단가)에 비례하여 증가하여 식 (9)와 같다. 따라서 전체 비용(TC)을 최소화하는 EOQ는 식 (10)과 같이 도출된다. 여기서, 공군에서는 소모성 품목(Consumable item)의 청구품목(RO) 산정 시 1회 주문비용(S)은 \$7.4, 재고유지비용 비율(F)은 15%를 적용하고 있다. <Table 3>의 예시 품목들을 대상으로 품목별 EOQ를 산정한 결과는 <Table 5>와 같다.

$$\text{주문비용} = \text{연간 주문횟수}(\text{AD}/\text{EOQ}) \times 1 \text{회 주문비용}(S) \quad (8)$$

$$\text{재고유지비용} = \text{평균재고}(\text{EOQ}/2) \times \text{단가}(UP) \times \text{비율}(F) \quad (9)$$

$$\text{EOQ} = \left[\sqrt{\frac{2 \times \text{AD} \times S}{F \times UP}} \right] = \left[9.9 \sqrt{\frac{\text{AD}}{UP}} \right] \quad (10)$$

<Table 5> EOQ of Example Items

k	Item	Unit price	UPA	AD	EOQ
1	PIN-RIVET	\$ 3.58	10	153	65[64.7]
2	SHAFT ASSY'	\$ 64.53	3	29	7[6.6]
3	STUD	\$ 3.89	50	656	129[128.6]
4	FILTER ELEMENT	₩ 150,000	2	24	One time

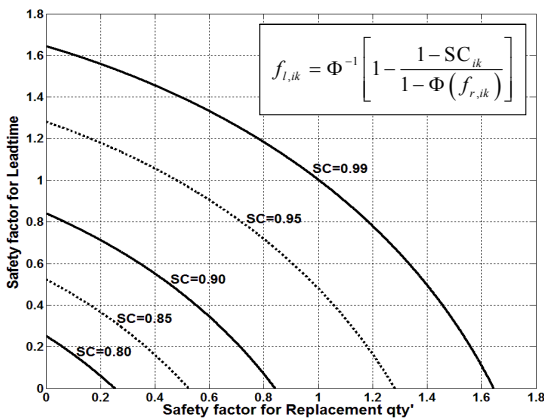
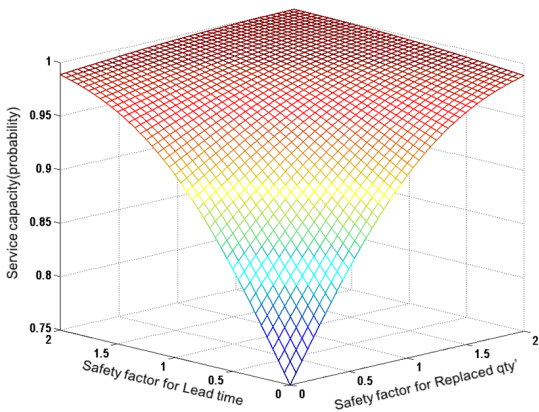
<Table 3> Example Items

k	Item	Unit price	UPA	Replacement rate	Procurement
1	PIN-RIVET	\$ 3.58	10	0.214	Unscheduled
2	SHAFT ASSY'	\$ 64.53	3	0.072	Unscheduled
3	STUD	\$ 3.89	50	0.214	Unscheduled
4	FILTER ELEMENT	₩ 150,000	2	0.143	One time

<Table 4> Example of ARFM Requirement

k \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
MRS	5	3	2	6	4	3	8	4	3	5	6	5	
1	OLQ	10.7	6.4	4.3	12.8	8.6	6.4	17.1	8.6	6.4	10.7	12.8	10.7
	SLQ	2.9	2.2	1.8	3.2	2.6	2.2	3.7	2.6	2.2	2.9	3.2	2.9
	Require	14	9	7	16	12	9	21	12	9	14	16	14
2	OLQ	1.1	0.6	0.4	1.3	0.9	0.6	1.7	0.9	0.6	1.1	1.3	1.1
	SLQ	1	0.8	0.6	1.1	0.9	0.8	1.3	0.9	0.8	1	1.1	1
	Require	3	2	1	3	2	2	3	2	2	3	3	3
3	OLQ	53.5	32.1	21.4	64.2	42.8	32.1	85.6	42.8	32.1	53.5	64.2	53.5
	SLQ	6.5	5	4.1	7.1	5.8	5	8.2	5.8	5	6.5	7.1	6.5
	Require	60	38	26	72	49	38	94	49	38	60	72	60
4	OLQ	1.5	0.9	0.6	1.8	1.2	0.9	2.3	1.2	0.9	1.5	1.8	1.5
	SLQ	7.4 [$f_{r,ik} = 1$, SLQ = 3.7]											
	Require	24 [OLQ = 16.1, SLQ = 7.4]											

또한, 정비공정에서는 여러 종류의 자재가 운영됨에 따라 자재의 단가, 수요 및 리드타임의 불확실성(표준편차) 수준 등을 고려하여 자재별 서비스 수준의 목표를 설정하고, 그에 따라 안전계수를 설정하여야 한다. 비용 측면에서 저 단가(Low price) 자재의 경우, 높은 서비스 수준을 목표로 하더라도 비용은 크게 증가하지 않는 반면, 고 단가(High price) 자재의 경우는 안전계수의 증가가 비용 증가와 직결된다. 따라서 저 단가 자재의 경우는 충분한 안전계수를 반영하고, 고단가 자재의 안전계수는 세부적으로 통제할 필요가 있다. 이때, 추가적으로 제 4장에서 볼 수 있듯이 리드타임의 안전계수를 증가시킬 경우 발주량 결정시 고려되는 수요의 기간이 증가함에 따라 부분적으로 안전수준량(SLQ)의 역할을 대체할 수 있다. 따라서 자재의 안전계수 설정 시 이러한 관계도 고려할 필요가 있다. 또한, 수요와 리드타임의 변동성(Variability)이 클수록 안전계수의 증가시 안전수준량(SLQ)과 실제 사용시점과 발주시점 차이의 증가폭이 커진다. 따라서 변동성이 큰 자재들의 안전계수 설정시 유의할 필요가 있다. 결론적으로, 실제 현장에서 적정한 안전계수 선정을 위해서는 자재의 가격, 수요와 리드타임의 변동성, 시효성 등의 자재의 특성 등을 종합적으로 고려하여야 한다.



<Figure 3> Safety factors vs. Service capacity

4. RFM과 ARFM의 비교 수치실험

본 장에서는 RFM과 ARFM 시스템 적용시의 정비공정 운영 성과에 대한 비교를 위한 수치실험 내용을 제시한다. 현실에서 품목관리관(IM : Item Manager)은 정비공정을 운영하면서 실제 사용량에 따른 재고량 변동을 고려하여 발주계획을 조정하게 된다. 이때 고려되는 것이 바로 적응형 재고관리 모형이다. 즉, 예측량을 기반으로 수립된 초도 발주계획을 기반으로 실제 사용량과 예측량의 오차를 보정하며 발주계획을 조정하게 된다. 이는 보유재고를 최소화하여 운영하면서 정비공정은 정상적으로 운영되도록 하는 경험적(Heuristic) 적응형 재고관리 기법이 적용되는 것이다. 예시 품목들의 발주계획 조정에 대한 모의(Simulation)를 위해 각 발주량의 리드타임은 $[N(l_{ik}, \sigma_{l,ik})]$ 의 난수를 통해 <Table 8>과 같이, 품목별 월간 사용량은 $[N[N_{ij}u_{ik}r_{ik}, N_{ij}u_{ik}r_{ik}(1-r_{ik})]]$ 의 난수를 생성하여 적용하였다.

<Table 8> Random Number for Lead Time

k	Item	$[l_{ik} + \sigma_{l,ik}]$	Leadtime Random Number(Month)				
			1st	2nd	3rd	4th	5th
1	PIN-RIVET	5 Month	[4]	[6]	2	5	2
2	SHAFT ASSY'	4 Month	[4]	[2]	[5]	2	3
3	STUD	3 Month	[2]	[2]	[3]	[1]	[1]

※ [Leadtime Random Number] : Used at <Table 9> and <Table 12>.

4.1 RFM 시스템 수치실험

품목관리관(IM)은 발주시점에 대한 판단은 당월 이후의 소요는 예측 소요량을 기준으로 하며, 발주결정 시기는 $[l_{ik} + \sigma_{l,ik}]$ 를 기준으로 현 재고량으로 향후 $[l_{ik} + \sigma_{l,ik}]$ 기간의 소요량 지원시 부족이 발생하는 시점을 판단하여 발주를 결정한다. <Table 9>의 1번 품목 PIN-RIVET을 예시로 설명하면, 현 시점(0시점)에 재고 65개가 5월 말에는 7개로 감소되어, 6월 예상 소요량 9개를 지원할 수 없을 것으로 예상된다. 따라서 품목관리관은 $[l_{ik} + \sigma_{l,ik}]$ 이 5개월이므로, 5월 말 이전에 재고가 보충될 수 있도록 현 시점에 65개(EOQ)를 발주한다. 1월 말에 재고를 평가한 결과, 현 재고량(50개)과 5월 도입예정량(65개)으로 2~10월까지 소요량 109개를 지원이 가능하므로 발주하지 않는다. 이러한 판단은 매월 말 전산적 계산을 통해 제공되며, 품목관리관은 이를 확인하여 발주를 결정하게 된다. 여기서 현실적인 상황으로 <Table 8>의 1번째 발주건의 리드타임 난수가 4개월이므로, 예상보다 1개월 단축된 4월말에 재고가 보충되어 4월 말 재고가 87개(잔여

22, 도입 65)가 된다. 이후 5월 말에 재고를 평가한 결과, 현 재고량(79개)로 6~10월까지 예상 소요량 65개를 지원하면 11월 소요량 16개를 지원할 수 없다. 따라서 10월 말 이전에 재고가 보충될 수 있도록 5월말에는 65개(EOQ)를 발주하게 된다. 그러나 <Table 8>의 2번째 발주건의 리드타임 난수가 6개월이므로, 예상보다 1개월 지연된 11월에 재고가 보충된다. 다행히 리드타임 기간 중의 실제 사용량이 예상 소요량보다 적어 정비공정 지연은 발생하지 않았으며, 11월 말 재고가 79개(잔여 14, 도입 65)가 된다. 이렇듯 ARFM 시스템에서는 연속적으로 현 보유재고(O/H)와 도입예정량(D/I)을 고려하여 향후 지원가능 기간을 판단하고, 안전수준이 고려된 리드타임을 고려하여 발주시기를 결정한다. 이러한 방법으로 발주계획을 보완한 결과가 <Table 9>이며, 전 품목에서 AWP(Awaiting Parts, 자재대기) 발생 없이 정비공정을 운영할 수 있었다. 일시조달 품목인 4번의 경우, 운영수준량(OLQ = 16.1개)만을 고려하였다면, 11월부터 AWP가 발생할 수

있었으며, 안전수준량(SLQ)의 안전계수를 1로 적용하였다면 총 소요량이 20개(OLQ = 16.1개, SLQ = 3.7개)로 산정되어 12월에 AWP가 발생할 수 있었다.

4.2 RFM 시스템 수치실험

RFM 시스템의 수치실험에서 발주계획은 현실적인 상황을 고려하여 ARFM에서와 같이 경제적 주문량(EOQ)과 적용형 재고관리 모형의 개념을 적용하였으며, 품목별 리드타임은 <Table 6>의 평균 리드타임(l_{ik})을, 수요예측량은 <Table 4>의 운영수준량(OLQ)을 활용하였다. 따라서 1번 품목(PIN-RIVET)의 리드타임은 3.2개월이므로 4개월을, 2번 품목(SHAFT ASSY)은 2.7개월이므로 3개월을, 3번 품목(STUD)은 1.2개월이므로 2개월을 적용하였으며, 리드타임의 모의 난수는 <Table 8>을 활용하였다. 품목별 수요예측량은 <Table 4>의 운영수준량(OLQ)을 소수점 첫째자리에서 올림 처리하여 <Table 10>과 같이 적용하였다.

<Table 9> Order Plan Example(ARFM)

k	j	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1 (5M)	MRS	-	5	3	2	6	4	3	8	4	3	5	6	5	
	Require	-	14	9	7	16	12	9	21	12	9	14	16	14	
	Used		15	8	7	13	8	8	19	9	6	12	11	10	
	Inventory	65	50	42	100	87	79	71	52	43	37	25	79	69	
	Receipt						65							65	
	Order	65						65				6M			
2 (4M)	Require	-	3	2	1	3	2	2	3	2	2	3	3	3	
	Used		1	1	1	2	2	1	2	1	1	1	3	2	
	Inventory	7	6	5	4	9	14	13	11	10	9	8	5	10	
	Receipt						7	7						7	
	Order	7			7				7			5M			
3 (3M)	Require	-	60	38	26	72	49	38	94	49	38	60	72	60	
	Used		59	42	22	67	38	31	82	39	28	52	72	54	
	Inventory	129	70	157	135	197	159	128	175	265	237	314	242	188	
	Receipt													129	
	Order	129			129				129			1M		129	
4	Require	-	24												
	Used		2	1	1	2	2	1	3	2	1	2	2	2	
	Inventory	24	22	21	20	18	16	15	12	10	9	7	5	3	

※ The one time procurement item(#4) were not ordered in this year.

<Table 10> Demand Forecasting for RFM

k	j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	PIN-RIVET	11	7	5	13	9	7	18	9	7	11	13	11
2	SHAFT ASSY'	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	2	2
3	STUD	54	33	22	65	43	33	86	43	33	54	65	54
4	FILTER ELEMENT	2	1	1	2	2	1	3	2	1	2	2	2

<Table 10>의 연간 수요예측량(AD)이 ARFM에서 예측된 소요량 대비, 1번 품목(PIN-RIVET)은 153개에서 121개로 32개가 감소되었으며, 2번 품목(SHAFT-ASSY)은 29개에서 18개로, 3번 품목(STUD)은 656개에서 585개로 감소됨에 따라 품목별 경제적 주문량(EOQ)도 변경된다. <Table 10>의 연간 수요예측량(AD)을 식 (10)에 적용하여 산출한 품목별 경제적 주문량(EOQ)은 <Table 11>과 같다. 경제적 주문량(EOQ)은 1번 품목(PIN-RIVET)이 65개에서 58개로, 2번 품목(SHAFT-ASSY)은 7개에서 6개로, 3번 품목(STUD)는 129개에서 121개로 감소되었다. 물론 품목별로 실제 사용량은 자연발생적인 수량으로 변화되지 않으며, 현 시점(시점 = 0)의 보유 재고량도 <Table 9>의 값을 동일하게 적용한다. 단, 4번 품목(FILTER ELEMENT)은 일시조달 품목으로 RFM에서 예측한 연간수요량 21개를 적용한다.

<Table 11> EOQ Recalculation Result

k	Item	Unit price	UPA	AD	EOQ
1	PIN-RIVET	\$ 3.58	10	121	58[57.6]
2	SHAFT ASSY'	\$ 64.53	3	18	6[5.2]
3	STUD	\$ 3.89	50	585	121[121.4]
4	FILTER ELEMENT	₩ 150,000	2	21	One time

RFM 시스템의 수치실험 결과는 <Table 12>와 같이 나타났다. 품목별 발주시기에 대한 판단기준은 <Table 9>에서와 동일하기 때문에 설명은 생략한다.

RFM 시스템을 적용하여 정비공정을 운영한 경우, AWP 현상이 빈번하게 발생한 것을 확인할 수 있었다. 1번 품목(PIN-RIVET)은 7월 말에 발주한 58개가 도입이 지연됨에 따라 12월에 재고부족이 발생하였으며, 2번 품목(SHAFT ASSY)은 6월부터 7월까지, 3번 품목(STUD)에 의해서는 8월에 재고부족이 발생하였다. 4번 품목(FILTER ELEMENT)은 연말에 재고고갈이 발생하였으며, 이에 따라 도입계약의 지연 발생시 AWP 발생원인이 될 수 있음을 확인하였다. 결과적으로, 한 품목이라도 부족하면 정비가 완료되지 못함에 따라 6월, 7월, 8월, 12월에 정비공정 중단이 발생하였다. 이는 창정비(Depot maintenance)공정 지연에 따라 창정비 중인 무기체계의 전투배치가 지연되거나, 무기체계 가동률 저하를 초래하는 상황을 의미한다.

4.3 수치실험 결과 평가

본 절에서는 기존의 RFM 시스템과 본 연구에서 제안하는 ARFM 시스템에 대한 수치실험 결과에 대해 평가한다. 평가요소는 1년간의 자재 주문비용과 재고유지비

<Table 12> RFM Experiment Result

k \ j		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	F+1	
MRS	-	5	3	2	6	4	3	8	4	3	5	6	5	*	
1 (4M)	Require	-	11	7	5	13	9	7	18	9	7	11	13	11	*
	Used		15	8	7	13	8	8	19	9	6	12	11	10	*
	Inventory	65	50	42	35	22	14	64	45	36	30	18	7	(-3)	*
	Receipt							58							F+1(Jan).
	Order			58					58						*
2 (3M)	Require	-	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	2	2	*
	Used		1	1	1	2	2	1	2	1	1	1	3	2	*
	Inventory	7	6	5	4	2	0	(-1)	3	8	7	6	3	1	*
	Receipt								6	6					F+1(Feb).
	Order				6			6			6		5	6	*
3 (2M)	Require	-	54	33	22	65	43	33	86	43	33	54	65	54	*
	Used		59	42	22	67	38	31	82	39	28	52	72	54	*
	Inventory	129	70	28	127	60	143	112	30	112	205	153	202	148	*
	Receipt				121		121		121		121		121		
	Order		121		121		121		121		121		121		*
4	Require	-	21												*
	Used		2	1	1	2	2	1	3	2	1	2	2	2	*
	Inventory	21	19	18	17	15	13	12	9	7	6	4	2	-	*

용, 정비공정 운영성과로서 정비계획 대비 적기 출고율을 고려하였다.

수치실험 기간(1년) 동안의 주문비용은 식 (8)에 따라 산정하였으며, 품목별 주문 1건당 \$7.4을 적용하였다. 단, 주문횟수는 본 연구의 수치실험 결과인 <Table 9>와 <Table 12>에서 나타난 품목별 주문횟수를 적용하였다. 주문비용 산출결과는 <Table 13>과 같았으며, RFM 시스템은 총 \$88.8, ARFM 시스템은 총 \$81.4로 산출되었다. 이는 예시 품목수가 적고, 수치실험 기간이 단기간임에 따라 시스템 간에 큰 차이(9%)는 나타나지 않은 것으로 평가된다. 또한, 여기서 동일 조달원 품목들에 대해 통합발주(Joint replenishment) 한다면 주문비용을 보다 절감할 수 있다.

재고유지비용은 식 (9)에 따라 산정하였으며, 재고유지비용은 품목별 단가의 15%를 적용하였다. 단, 평균재고량은 본 연구의 수치실험 결과인 <Table 9>와 <Table 12>에서 나타난 월별 재고량을 기준으로 산정하였다. 이때, <Table 9>와 <Table 12>의 재고는 월말 재고량을 의미한다. 따라서 월별 평균재고는 전월(前月)과 해당월의 기말재고 평균으로 산정하고, 후불(Backorder)이 발생한 경우(재고량 < 0)는 재고량을 0으로 고려하였다. 재고유지비용 산출 결과는 <Table 14>와 같이 나타났다. ARFM 시스템에서는 소요량과 리드타임에 안전수준이 고려됨에 따라 재고유지비용이 높게 나타났다. 이는 안전계수를 수시조달 품목은 1.0, 일시조달 품목은 2.0을 적용한 결과로 안전계수 조정에 따라 변동될 수 있다.

따라서 품목별 수요 변동률과 단가를 고려하여 안전계수를 적용한다면 재고유지비용을 감소시킬 수 있다.

정비공정 운영성과는 정비계획 대비 적기 출고율로 식 (13)과 같이 고려하였으며, 정비기간은 고려하지 않았다. 즉, 정비공정의 효율성 측면에서 자재 1종이 부족하면 자재가 있는 부분도 정비가 불가능한 사례가 발생한다. 따라서 자재 보급 지연 기간 보다 정비계획 대비 출고 일정이 지연될 수 있으나, 여기서는 이러한 부분을 고려하지는 않았다.

$$\text{적기 출고율(\%)} = [1 - (\text{출고지연량} \div \text{연간 정비계획량})] \times 100 \quad (13)$$

우선, ARFM 시스템에서는 모든 자재가 적기에 지원이 되어 정비공정이 지연된 사례는 없었다. 따라서 적기 출고율은 100%가 된다. RFM에 대한 실험결과에서 출고가 지연된 수량은 부족이 발생한 품목의 UPA를 고려하여 가정할 때, 출고가 지연된 장비 대수 또는 복구성 품목의 수량을 산정한 결과는 <Table 15>와 같으며, 연간 정비계획량은 54개였다. 따라서 RFM 시스템에서의 적기 출고율은 최소 81%에서 최대 92%이다. 적기 출고율이 최대인 경우는 창정비 공정 내에서 동류전용 최대 활용 또는 이상적으로 1대에서만 결합이 발생한 이상적인 경우에 해당된다. 또한, 관리 대상품목이 증가할수록 정비공정 중단이 발생할 확률이 높아짐에 따라 적기 출고율이 감소될 수 있다.

<Table 13> Order Cost Result

Item	RFM(A)		ARFM(B)		Diff. (B-A)
	# of order	Cost(\$)	# of order	Cost(\$)	
PIN-RIVET	2	14.8	2	14.8	-
SHAFT ASSY'	4	29.6	3	22.2	-7.4
STUD	5	37	5	37	-
FILTER ELEMENT	1	7.4	1	7.4	-
Total	12	88.8	11	81.4	7.4

<Table 14> Holding Cost Result

Item	Unit price	RFM(A)		ARFM(B)		Diff. (A-B)
		Average invent.	Cost(\$)	Average invent.	Cost(\$)	
PIN-RIVET	\$ 3.58	33.0	17.7	61.0	32.8	+15.1
SHAFT ASSY'	\$64.53	4.0	38.7	8.5	82.3	+43.6
STUD	\$ 3.89	115.0	67.1	186.5	108.8	+41.7
FILTER ELEMENT	\$142.9	11.0	235.8	14.0	300.0	+64.2
total	-	-	359.3	-	523.9	+164.6

* The exchange rate at FILTER ELEMENT is ₩1,050/1\$.

<Table 15> Holding Cost Result

* () : UPA

$k \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
MRS	5	3	2	6	4	3	8	4	3	5	6	5
Shortage	1(10)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
	2(3)	-	-	-	-	-	1	2	-	-	-	-
	3(50)	-	-	-	-	-	-	-	9	-	-	-
	4(2)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Release delay	Max.	-	-	-	-	-	1	2	4	-	-	3
	Min.	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	1

결론적으로, ARFM 시스템 적용 시 주문비용은 감소, 재고유지비용은 증가되나, 적기 출고율은 보장됨을 확인하였다. 여기서 재고유지비용의 증가는 무기체계 가동률 보장, 정비장의 운영 효율성, 계획 대비 조기 출고, 정비계획량 변동에 대한 대응능력 향상 등과 상호 보완될 수 있는 관계에 있다고 볼 수 있다. 따라서 품목별 수요량과 리드타임의 변동률을 고려한 안전계수 설정을 통해 보다 자재 운용을 슬림화하고, 정비창 효율적 운영, 정비계획량 변동 및 무기체계 가동률 보장 등에 대한 위험도(Risk) 관리 비용 간에 절충점을 찾는 것 또한 하나의 과제라 할 수 있다.

5. 결 론

RFM 시스템과 MRP 시스템은 구조적으로 유사하지만, 자재의 소요산정 측면에서는 많은 차이점이 나타난다. 즉, 자재의 수요특성이 MRP 시스템과 달리 RFM 시스템에서는 불확실하면서 정비계획(MRS)에 반증속적이다. 따라서 정비공정의 안정적 운영을 위해 자재 수요의 불확실성에 대응하기 위한 안전수준량(SLQ)이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 美공군 RFM 시스템에서 명확하게 반영하고 있는 많은 자재별 소요량과 리드타임에 대한 안전수준을 적용하였으며, 보다 경제적으로 운영하기 위해 조달방법(수시, 일시)을 구분하여 제시하였다. 또한, 예시 품목을 대상으로 한 수치실험을 통해 유효성을 검증하였다. 수치실험 결과, 안전수준 운영에 따라 다소의 추가 비용이 소요되었으나, 정비공정 효율화, 무기체계 가동률 보장 등에서 충분한 효과가 있는 것으로 나타났다. 본 연구주제의 발전을 위한 연구방향으로는, 제 3.3절에서 언급하고 있는 사항들을 기반으로 RFM에서 관리되는 모든 자재들을 고려한 시스템 차원에서의 정비창 운영목표 달성과 운영/관리 비용 최소화 등을 위한 최적 안전계수 설정에 대한 방법론이 필요하다.

References

- [1] Baek, J.-G., Kim, C.O., and Jun, Jin. Adaptive inventory control models in a supply chain with nonstationary customer demand. *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 2005, Vol. 31, No. 2, p 106-119.
- [2] Gaudette, K., Blazer, D., and Mangan, M., Repairability Forecast Model. *Air Force Journal of logistics*, 2003, Vol. 26, No. 4, p 23-38.
- [3] Lee, C.Y. and Lee, D.J., A Study on Periodic Review Inventory System under Stochastic Budget Constraint. *Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2014, Vol. 37, No. 1, p 165-171.
- [4] Lee, D.J. and Lee, C.Y., A Study on Inventory Control Policy for Semi-Finished Product and Optional Components. *Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2013, Vol. 36, No. 4, p 31-37.
- [5] Park, S.I. and Kim, J.S., A forecast-based inventory control policy for an item with non-stationary demand. *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 2011, Vol. 37, No. 3, p 216-228.
- [6] Ross, S.M., Introduction to probability models. 8th Edition. Academic Press, 2003.
- [7] Silver, E.A., Pyke, D.F., and Peterson, R., Inventory management and production planning and scheduling. 3rd Edition. John Wiley and Sons Inc, 1998.
- [8] Scheaffer, R.L. and McClave, J.T.. Probability and statistics for engineers. 4th Edition. Duxbury Press, 1995.
- [9] Yang, Y.H., Kim, J.S., and Kim, T.Y., Joint replenishment policy for items with non-stationary demands. *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 2012, Vol. 38, No. 2, p 116-124.