

# 일반 서비스 시간 분포를 갖는 다단계 수리가능 재고 시스템에 대한 최적재고수준 알고리즘

김태영 · 김종수<sup>†</sup> · 허 선

한양대학교 산업공학과

## An Algorithm for Optimal Inventory Level in Multi-Echelon Repairable-Item Inventory System with General Service Time Distribution

Tai-Young Kim · Jong-Soo Kim · Sun Hur

Department of Industrial Engineering, Hanyang University, Ansan, 425-791

This paper presents an efficient method for the problem of determining the spare inventory level of a multi-echelon repairable-item inventory system. We consider the system with two levels of inventory, two levels of service and with a general service time distribution. We propose an algorithm that determines the spare inventory level to satisfy the minimum fill rate with the minimum cost. Experimental results show that the algorithm is accurate and efficient.

**Keywords** : repairable-item, multi-echelon, inventory

### 1. 서론

수리가능제품(repairable-item)이란 가격이 고가이고 고장빈도가 적은 중요 제품을 말하며, 일단 고장나면 폐기하는 단순제품이나 소모품과는 구별된다. 수리가능제품으로는 항공기, 전차, 함정의 엔진이나, 고가의 전자장비 등을 예로 들 수 있다. 이들은 일반적으로 고장의 정도에 따라 수리를 담당하는 부서가 구별되며, 따라서 다단계 수리가능 재고 시스템(multi-echelon repairable-item inventory system)을 구성하게 된다.

수리가능 재고 시스템에서 가동중이던 제품이 고장나면, 즉시 여유제품(spare item)으로 교체된다. 이를 일대일 교체 또는 즉시교체 정책이라 부르며, 이는 수리가능제품이 고장나게 되면 이것을 포함하는 시스템 전체, 예를 들면 전투기 자체가 가동불능인 상태가 되기 때문이다.

일반적으로 수리가능제품을 포함하는 시스템을 구매할 경우에는 주요 수리가능제품을 추가로 구매하여 여유제품으로 보유하게 된다. 전차를 구매하는 경우에 추가로 전차엔진을 구매하여 주요한 수리창 또는 기지에 보관하는 것이 그 좋은 예라고 할 수 있다. 이와 관련하여 제기되는 문제가, 그렇다면 여유제품을 몇 개나 보유하여야 하는가 하는 것이다. 만약 여유제품을 적게 보유하고 있으면 원하는 서비스 수준 또는 가동률을 유지할 수 없게 된다. 즉, 전투기나 함정의 엔진이 고장나게 되면 수리가 끝날 때까지 가동이 불가능하게 되는 심각한 문제가 발생하게 된다. 반면에 너무 많은 여유제품을 보유하면 수리가능제품의 단가가 매우 고가이므로 시스템을 유지하는 데 소요되는 비용이 크게 상승하게 된다.

수리가능 재고 시스템에 대한 연구는 Sherbrooke가 METRIC 모형(1968)을 제안한 이후 활발히 이루어져왔는데, 크게 보면 수리창의 수리능력이 무한한 경우와 유한한 경우로 나누어진다.

이 연구는 2001년도 두뇌한국21 사업에 의해 지원되었음.

<sup>†</sup> Corresponding author: Professor Jong-Soo Kim, Department of Industrial Engineering, Hanyang University, 1271 Sa 1 dong, Ansan, Kyunggi-do, 425-791, Korea; Fax +82-31-409-2423; e-mail jskim@mecors.hanyang.ac.kr

2001년 2월 접수, 1회 수정 후, 2001년 5월 게재 확정.

다. 수리능력이 무한하다고 가정한 경우에는 Sherbrooke(1968)의 METRIC 모형과 Muckstadt와 Thomas(1980) 등의 연구가 대표적이다. 유한 수리능력을 가정한 경우에는 Albright(1989), Albright와 Soni(1988, 1989), Gross *et al.*(1983, 1984, 1987), Kim *et al.*(1993, 1996, 2000), Díaz와 Michael(1997) 등의 연구가 대표적이라 할 수 있다.

이전의 연구들은 문제를 단순화하기 위하여, 수리가능제품의 고장을 고치는 데 소요되는 시간이 지수분포를 따르는 것으로 가정하였다. 이로 인하여 현실 시스템에 적용하기에 어려운 점이 있었다. 본 연구는 Kim *et al.*(1996, 2000)에서 수리시간이 단순한 지수분포를 따른다는 가정을 없애고 수리시간이 일반적인 확률분포를 따른다고 가정한 것이다. 이와 더불어 시스템의 총비용을 고려한 최적화 접근법이라는 것도 또 하나의 특징으로 볼 수 있다. 아울러 본 연구는 수리창의 수리능력이 한정되어 있는 2단 재고, 2단 수리시스템을 대상으로 하고 있다.

본 논문의 목적은 위에서 설명한 특징을 갖는 수리가능시스템에서 특정한 수리가능제품의 여유제품을 몇 개나 보유하는 것이 가장 적합인가 하는 문제에 대한 해법을 제시하는 것이다. 이때 고려하는 목표는 시스템을 유지하는 비용을 최소화하는 것이며 아울러 운영목표로 설정된 가동률(서비스 수준)을 달성하는 것도 동시에 고려하게 된다.

## 2. 모형 전개

본 연구의 대상 시스템은 한 가지 종류의 수리가능제품, 이를 보유하고 있는  $I$ 개의 기지(base)와 이에 부속되어서 경고장난 제품을 수리하는 기지창(base repair center), 그리고 중고장난 제품의 수리를 담당하는 하나의 중앙창(depot)으로 구성된다. 각 기지와 중앙창은 미리 설정된 수준의 여유제품을 보유하고 있다.

기지  $i$ 에서 가동중인 제품의 고장은 평균 고장빈도가  $\lambda_i$ 인 푸아송과정을 따른다. 일단 가동중이던 수리가능제품이 고장나게 되면, 기지의 여유제품이 남아 있으면 즉시 교체해 주게 된다. 고장난 제품은 검사를 거쳐서  $a_i$ 의 확률로 경고장으로 분류되며 나머지는 중고장으로 판정된다. 경고장 제품은 기지창으로, 중고장 제품은 중앙창으로 이송되어 수리된다.

중앙창에서는 기지로부터 중고장난 제품이 도착하면, 여유제품이 있으면 즉시 이를 해당기지로 보내주고, 그렇지 못한 경우는 해당기지에 대한 품질이 발생한 것으로 간주하게 된다.

기호를 정의하기로 한다.

$P_i(n)$  = 기지  $i$ 의 수리창에  $n$ 개의 제품이 수리를 대기하거나 수리중일 확률

$P_d(D)$  = 중앙창에  $D$ 개의 제품이 수리를 대기하거나 수리중일 확률

$P_d(k_i)$  = 중앙창의 기지  $i$ 에 대한 품질이  $k_i$ 개일 확률

$P_i(m_i)$  = 기지  $i$ 와 중앙창 사이를 이동중인 제품이  $m_i$ 개일 확률,

$P(z_i)$  = 기지  $i$ 의 가동불능제품이  $z_i$ 개일 때의 확률을 나타내는 것으로 한다.

서비스 시간이 일반분포를 따를 때, 단일 서버가 존재하는 경우는 비교적 접근이 용이하지만 본 연구와 같이 복수 서버가 존재하는 경우는 분석이 쉽지 않다. 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 Hur와 Lee(2000)의 연구를 이용하기로 한다. 다음 절에서는 이들의 연구결과를 간략히 소개하기로 한다.

### 2.1 M/G/c 대기행렬 시스템의 근사법

M/G/c 대기행렬 시스템에서 고객 수의 분포나 평균 대기시간 등에 관하여 closed-form 형태로 해를 구할 수 있는 해법은 알려져 있지 않으며(Tijms, 1994), Kimura(1996), Miyazawa(1986) 등이 근사법을 사용하여 M/G/c의 특성치를 구하는 것을 시도하였다. 최근 Hur와 Lee(2000)는 이전보다 정확한 결과를 얻을 수 있는 방법을 제시하였다. 그들의 방법은 서버의 수 ( $c < 5$ )가 작고 트래픽 밀도가  $\rho < 0.7$ 일 때 6% 이내의 정확성을 보인 것으로 보고되었다. Hur와 Lee(2000)의 방법을 간단히 설명하면 다음과 같다.

M/G/c 대기행렬 시스템에서 도착률을  $\lambda$ , 서비스율을  $\mu$ , 서비스 시간을  $S$ 라 하면,  $E(S) = 1/\mu$ 이다.  $\pi_n(\lambda, S, c)$ 를 이러한 시스템 고객수에 대한 안정상태 확률분포라 하면

$$P_0(M) = \left( \sum_{n=0}^{c-1} \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} + \frac{(\lambda/\mu)^c}{c!(1-\rho)} \right)^{-1} \text{ 이고, } \rho = \lambda/c\mu$$

일 때,  $0 \leq n \leq c-1$ 에 대하여 다음과 같이 정해진다. 여기서  $P_0(M)$ 은 서비스 시간이 지수분포인 경우에 시스템이 비어 있을 확률을 나타낸다.

$$\pi_n(\lambda, S, c) = \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} P_0(M) \quad (1)$$

$n = c$ 인 경우는 식 (2)를 만족한다.

$$\pi_n(\lambda a, S, c) = \frac{(\lambda/\mu)^c}{c!} \cdot \frac{1-\nu}{1-\rho} P_0(M) \quad (2)$$

여기서  $\nu = \frac{\rho R}{1-\rho + \rho R}$ 이다. 단,  $R = \lim_{\rho \rightarrow 1} R = \frac{E(S^2)}{2E^2(S)}$ 와

$\lim_{\rho \rightarrow 0} R = \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{3E(S^2)}{2E^2(S)} \right)$ 로부터 구해진다(Kimura, 1996 참고).

마지막으로,  $n \geq c$ 에 대하여  $\pi_n(\lambda, S, c)$ 는 식 (3)을 만족한다.

$$\pi_n(\lambda, S, c) = \left( \frac{\lambda E(S) + 3\lambda E(S^+)}{4c - 3\lambda E(S) + 3\lambda E(S^+)} \right)^{n-c} \cdot \pi_c(\lambda, S, c) \quad (3)$$

단  $S^+$  은 잔여 서비스 시간이고,  $E(S^+) = E(S^2)/2E(S)$ 이다. 이어지는 2.2와 2.3절에서는 위의 결과를 이용하여 기지창과 중앙창에 있는 제품들의 확률분포를 유도하기로 한다.

2.2 기지수리창에 있는 제품들의 확률분포

기지  $i$ 의 수리창이  $c_i$  개의 수리창구를 보유하고 있는 경우 고장이 발생률  $\alpha_i \lambda_i$ 인 푸아송과정으로 발생하고 수리 시간이 일반분포를 따르고 서버수가  $c_i$  이므로  $M/G/c_i$  모형으로 볼 수 있어, 이곳에  $n$ 개의 경고장 제품이 수리중이거나 수리를 위해 대기중일 확률분포  $P_i(n)$ 는 2.1절의 결과에 의해 식 (4)로 표시될 수 있다.

$$P_i(n) = \pi_n(\alpha_i \lambda_i, S_i, c_i) \tag{4}$$

여기서, 기지수리창은  $\alpha_i \lambda_i / c_i \mu_i < 1$  일 때 안정상태에 도달하게 된다.

2.3 중앙창에 있는 제품들의 확률분포

중앙창에 도착하는 경고장 제품수는 도착률  $\sum_{i=1}^I (1 - \alpha_i) \lambda_i$  인 푸아송과정을 따른다. 중앙창이  $c_d$  개의 수리창구를 보유하고 있다고 가정하면, 중앙창에  $D$ 개의 경고장난 제품이 수리중이거나 수리를 위해 대기중일 확률분포  $P_d(D)$ 는 2.1절의 결과를 이용하면 식 (5)로 표시된다.

$$P_d(D) = \pi_D \left( \sum_{i=1}^I (1 - \alpha_i) \lambda_i, S_d, c_d \right) \tag{5}$$

중앙창은  $\sum_{i=1}^I (1 - \alpha_i) \lambda_i / c_d \mu_d < 1$ 의 조건을 만족할 때 안정 상태에 도달하게 된다.

중앙창에서 발생한, 기지  $i$ 에 대한 품질량의 확률분포를  $P_{id}(k_i)$ 로 표시하면

$$P_{id}(k_i) = \sum_{D=0}^{\infty} P_{id}(k_i|D) \cdot P_d(D) \tag{6}$$

으로 전개할 수 있다.  $P_d(D)$ 는 식 (5)를 이용하여 구할 수 있으므로  $P_{id}(k_i|D)$ 를 구할 수 있으면  $P_{id}(k_i)$ 의 값을 얻을 수 있다. 중앙창에서 발생한 모든 기지에 대한 품질량의 합에 대한, 중앙창에서 발생한 기지  $i$ 에 대한 품질량의 비율을  $\theta_i$ 로 표시하기로 하자. 이 비율은 도착률의 비율과 일치하므로 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$\theta_i = (1 - \alpha_i) \lambda_i / \sum_{i=1}^I (1 - \alpha_i) \lambda_i \tag{7}$$

그리고 중앙창의  $s_d$  개의 여유제품을 가지고 가동을 시작했다고 가정하면  $P_{id}(k_i|D)$ 는

$$P_{id}(k_i|D) = \begin{cases} 1 & \text{if } k_i=0, D \leq s_d \\ 0 & \text{if } k_i \neq 0, D \leq s_d \\ \binom{D-s_d}{k_i} \theta_i^{k_i} (1-\theta_i)^{D-s_d-k_i} & \text{if } D > s_d \end{cases} \tag{8}$$

로 나타낼 수 있다. 식 (8)의 우변의 첫째와 두 번째 행은 중앙창에 여유제품이 아직 남아 있는 상황에서는 기지  $i$ 에 대한 중앙창 품질이 없다는 것을 의미한다. 우변의 세 번째 행은,  $D > s_d$ 의 경우에는 기지  $i$ 에 대한 중앙창 품질의 개수( $D - s_d, k_i$ )를 모수로 하는 이항분포가 됨을 나타내고 있다(Kim et al., 1996, 2000).  $P_{id}(k_i|D)$ 와  $P_d(D)$ 를 구하면, 식 (6)을 이용하여  $P_{id}(k_i)$ 를 구해낼 수 있다.

2.4 이동중인 제품들의 확률분포

기지  $i$ 의 경고장 발생은 평균  $(1 - \alpha_i) \lambda_i$ 인 푸아송과정을 따르므로 기지에서 중앙창으로 이송중인 제품은 평균  $(1 - \alpha_i) \lambda_i$ 인 푸아송과정을 따른다. 중앙창은  $M/G/c$ 이므로 중앙창에서 기지로 이송중인 제품의 시간간격분포는 엄밀히 푸아송과정은 아니지만, 본 논문에서는 이를 푸아송으로 근사화하기로 한다. 기지  $i$ 와 중앙창 사이의 이 · 반송시간을 각각  $t_i$ 라 하면, 임의의 시점에 기지  $i$ 와 중앙창 사이를 이동중인 제품의 확률분포는 식 (9)와 같이 근사화할 수 있다.

$$P_i(m_i) = \frac{[2(1 - \alpha_i) \lambda_i t_i]^{m_i} e^{-2(1 - \alpha_i) \lambda_i t_i}}{m_i!}, m_i = 0, 1, 2, 3, \dots \tag{9}$$

2.5 기지의 가동불능제품수의 분포

임의의 시점에 기지  $i$ 의 가동불능제품을 기지창에 있는 제품, 중앙창에서 기지  $i$ 에 대하여 품질난 제품, 그리고 기지와 중앙창 사이를 이동중인 제품으로 정의하고  $z_i$ 로 나타내기로 하자.  $P(z_i)$ 는 중합(convolution)을 이용하여 식 (10)과 같이 계산할 수 있다.

$$P(z_i) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k_i=0}^{\infty} P_i(m_i) P_{id}(k_i) P_i(z_i - k_i - m_i), m_i = 0, 1, 2, \dots, k_i = 0, 1, 2, \dots \tag{10}$$

가동불능제품의 수를 계산하는 이유는 이 제품의 수와 여유 제품의 수를 비교함으로써 해당기지의 가동불능인 시스템의 수를 구할 수 있기 때문이다. 예를 들어 전투기를 보유한 기지의 엔진의 여유제품수가 10개일 때 가동불능제품의 수가 10개 이하일 경우는 여유제품을 전투기에 장착함으로써 전투기, 즉 시스템 자체의 가동에는 지장이 없다. 11개 이상의 엔진이 가

동불능인 상황에서는 적어도 1대 이상의 전투기가 기능을 상실하게 된다. 다음 절에서 고려하는 품질비용은 기능을 상실한 시스템의 수에 비례하여 발생하게 되므로 이를 계산하기 위해서는 가동불능제품수의 분포를 구하여야 한다.

### 2.6 기대 비용과 최소요구충족률

기지  $i$ 의 가동불능제품수  $z_i$ 가 여유제품수  $s_i$ 보다 크면, 기지  $i$ 에서는 초과하는 제품 한 개당 품질비용  $b_i$ 가 발생한다. 재고비용  $h_i$ 는 해당기지의 여유제품수에 비례한다고 보는 것이 적절하므로 재고비용은  $h_i s_i$ 와 같다. 따라서, 기지  $i$ 에서 단위기간당 발생하는 비용의 기대값을  $TC(s_i)$ 라 하면, 이는 식 (11)과 같이 표현된다.

$$TC(s_i) = h_i s_i + b_i \sum_{z_i=s_i+1}^{\infty} (z_i - s_i) P(z_i) \quad (11)$$

중앙창의 총비용함수  $TC(s_d)$ 는 식 (12)와 같다.

$$TC(s_d) = h_d s_d + b_d \sum_{D=s_d+1}^{\infty} (D - s_d) P(D) \quad (12)$$

이전 연구에 의하면 이들은 다음과 같은 몇 가지 성격을 갖는 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 1996, 2000 참고).

총비용함수  $TC(s_i)$ 와  $TC(s_d)$ 는 범위  $[1, \infty]$  사이에서 단봉(unimodal) 형태이다. 그리고  $\frac{h_i}{b_i} \leq 1$ 일 때, 기지의 비용을 최소화하는 여유제품수준은 식 (13)을 만족한다.

$$\sum_{k=1}^{\infty} P(z_i = s_i + k) < \frac{h_i}{b_i} < \sum_{k=0}^{\infty} P(z_i = s_i + k) \quad (13)$$

또한  $\frac{h_d}{b_d} \leq 1$ 일 때, 중앙창의 비용을 최소화하는 여유제품수준은 식 (14)를 만족한다.

$$\sum_{k=1}^{\infty} P(z_d = s_d + k) < \frac{h_d}{b_d} < \sum_{k=0}^{\infty} P(z_d = s_d + k) \quad (14)$$

그리고  $\frac{h_i}{b_i} > 1$  또는  $\frac{h_d}{b_d} > 1$ 일 때, 기지 또는 중앙창의 비용을 최소화하는 여유제품수준은 각각 0개이다. 이어지는 3장에서는 위에서 설명한 성질들을 이용하여 본 논문에서 제기한 문제의 해를 효율적으로 구할 수 있는 해법을 제시한다.

## 3. 해법

본 논문에서 제안하는 해법을 단계별로 설명하면 다음과 같다.

단계 1. 안정상태 조건이 성립되는가를 확인한다. 조건을 만족하면 단계 2로 가고, 그렇지 않으면 시스템이

안정상태에 도달할 수 없으므로 중단한다.

단계 2.  $D = 1, 2, \dots$ 에 대하여 적절히 작은 값, 예를 들어  $\epsilon = 10^{-4}$ 보다 작은 값까지  $P_d(D)$ 를 계산한다.

단계 2.1  $\frac{h_d}{b_d} > 1$ 이면,  $s_d^* \leftarrow 0$ 으로 하고, 그렇지 않으면  $\sum_{k=1}^{\infty} P(z_d = s_d + k) < \frac{h_d}{b_d} < \sum_{k=0}^{\infty} P(z_d = s_d + k)$ 을 만족하는  $s_d^*$  중 가장 작은 정수값으로 한다.

단계 3.  $i = 1, 2, \dots, I$ 에 대하여 아래 3.1~3.4를 실행한다.

단계 3.1  $P_i(n), P_{id}(k_i), P_i(m_i), P(z_i)$ 를  $\epsilon = 10^{-4}$ 보다 작은 확률값이 될 때까지 계산한다.

단계 3.2  $\frac{h_i}{b_i} > 1$ 이면,  $s_i^* \leftarrow 0$ 으로 하고, 그렇지 않으면  $\sum_{k=1}^{\infty} P(z_i = s_i + k) < \frac{h_i}{b_i} < \sum_{k=0}^{\infty} P(z_i = s_i + k)$ 을 만족하는  $s_i$  중 가장 작은 정수값을  $s_i^*$ 로 한다.

단계 3.3 최소요구충족률을 만족하는 여유부품수준  $\bar{s}_i$ 를 계산한다.

단계 3.4  $s_i^*$ 와  $\bar{s}_i$  중에서 큰 값을 선택한다.

단계 4. 중앙창과 각 기지별로 선택된 여유제품의 수를 해로 출력하고 멈춘다.

단계 2와 단계 3.1에서  $P_d(D)$ 와  $P_i(n)$ 을 계산할 때는 Hur와 Lee(2000)의 방법을 응용하여 도출된 식 (4)와 (5)를 이용한다. 단계 3.3과 3.4에서 충족률을 계산하고,  $\bar{s}_i$ 와  $s_i^*$  중 큰 값을 선택하는 이유는 본 논문에서 다루는 문제가 비용만을 최소화하는 것이 아니기 때문이다.

충족률이란 각 기지에서 고장난 부품들 중 즉시 교체되는 것들의 비율을 의미한다. 군에서는 이를 가동률이라고 하며, 예를 들어 전투기의 90%는 즉시 출격할 수 있는 상태로 유지되는 경우를 가동률 90%라고 말한다. 고장난 엔진 중 10%가 즉시 교체되지 못한다면 임의의 시점에 전투기 중 10%는 정상상태의 엔진을 장착하지 못한 것으로 되고, 따라서 시스템의 가동률은 90% 이하가 된다. 군 이외의 다양한 산업시스템에서도 가동률이란 개념을 적용하고 있으며, 이를 서비스율이라고 부르고 있다.

군에서는 전력유지 차원에서, 그리고 일반산업체에서는 경쟁력 확보 차원에서 꼭 준수해야 하는 충족률의 하한값을 미리 설정해 놓게 되는데 이를 최소요구충족률이라 부르고 있다. 본 논문의 비용함수가 단봉(unimodal)의 볼록함수(convex function)이므로 최소요구충족률을 가장 적은 비용으로 만족하는 여유제품의 수는  $\bar{s}_i$ 와  $s_i$  중 큰 값이 되는 것이다.

## 4. 실험

제안한 해법의 정확성과 효율성을 검증하기 위하여 수치실험

을 시행하였다. 제안한 해법은 C 언어로 프로그래밍 하였고, 정확성 검증을 위하여 시뮬레이션 모델을 ARENA(Version 3.0)로 구현하였다(Kim, 2000). 실험은 Pentium III(500 MHz CPU) 기종에서 기지의 수가 5개, 10개, 15개인 경우로 나누어 실시하였다. 각각의 실험을 위하여, 주어진 기지 수에 맞게 아래 분포를 이용하여 안정상태 조건을 만족하는 입력값을 발생시켰다.

재고비용:  $N(25, 25)$

품질비용:  $N(100, 100)$

고장발생률:  $Poisson(5)$

기지  $i$ 에서 제품이 고장났을 때 그 고장이 경고장일 확률:  
 $U(0.4, 0.8)$

중앙창의 각 창구 수리시간:  $Erlang(3, 30)$

기지창  $i$ 의 각 창구 수리시간:  $Erlang(3, 10)$

중앙창의 수리창구수:  $U(3, 6)$ 로부터 나오는 난수에 가장 가까운 정수

기지창  $i$ 의 수리창구수:  $U(2, 5)$ 로부터 나오는 난수에 가장 가까운 정수

최소요구충족률:  $U(0.55, 0.99)$

이송 시간:  $U(1.0, 2.0)$

첫 번째 실험의 목적은 해법이 최소요구충족률 조건을 만족 하면서 비용이 최소화되는 최적 재고수준을 도출해 내는 것을 검증하는 것이다. 이를 위하여 해법과 같은 조건으로 10회의 독립된 시뮬레이션을 실시한 후 총비용의 퍼센트 오차를 구하였다. 아래 <표 1>~<표 3>은 기지수별 결과를 요약한 것이다.

마지막으로 해법과 시뮬레이션 사이의 수행 결과값 차이를 <표 4>로 종합 정리하였고, <그림 1>로 도시하였다.

위 실험들은 제안한 해법의 결과가 시뮬레이션의 결과를 기준으로 할 때, 오차 범위 4.755%를 넘지 않는 것을 보여주고 있다. 특히 해법은 문제의 크기 즉, 기지의 수가 증가하면 오히려 해의 정도가 높아지는 바람직한 특성을 가진 것으로 관찰되었다.

표 1. 기지가 5개인 경우의 오차

구 분	% 오차 평균	% 오차 최소값	% 오차 최대값	% 오차 분산
기지창 1	0.385	0.044	0.044	0.245
기지창 2	3.342	2.692	3.645	0.088
기지창 3	2.394	1.898	2.865	0.109
기지창 4	13.816	11.933	16.363	2.219
기지창 5	2.779	2.364	3.070	0.126
중앙창	2.084	0.668	5.620	1.918
평 균	4.133	3.650	4.755	0.143

표 2. 기지가 10개인 경우의 오차

구 분	% 오차 평균	% 오차 최소값	% 오차 최대값	% 오차 분산
기지창 1	0.522	0.297	1.230	0.077
기지창 2	1.757	0.705	2.265	0.271
기지창 3	1.489	1.023	2.139	0.163
기지창 4	3.226	2.122	4.583	0.396
기지창 5	3.943	3.624	4.248	0.040
기지창 6	1.292	0.369	1.929	0.198
기지창 7	4.063	3.800	4.323	0.033
기지창 8	3.136	2.136	3.677	0.271
기지창 9	5.350	4.638	6.279	0.252
기지창 10	1.104	0.019	1.888	0.280
중앙창	1.656	0.866	2.237	0.230
평 균	2.503	2.143	2.593	0.034

표 3. 기지가 15개인 경우의 오차

구 분	% 오차 평균	% 오차 최소값	% 오차 최대값	% 오차 분산
기지창 1	0.605	0.482	0.680	0.005
기지창 2	0.125	1.075	1.552	0.016
기지창 3	1.012	0.945	1.108	0.003
기지창 4	0.319	0.045	0.598	0.034
기지창 5	1.242	1.069	1.486	0.020
기지창 6	1.533	1.401	1.636	0.004
기지창 7	4.216	3.796	4.804	0.079
기지창 8	3.931	3.510	4.257	0.052
기지창 9	1.189	1.020	1.247	0.067
기지창 10	2.283	2.131	2.450	0.007
기지창 11	1.821	1.695	1.914	0.009
기지창 12	0.211	0.167	0.291	0.002
기지창 13	4.292	4.148	4.439	0.019
기지창 14	0.383	0.028	0.650	0.054
기지창 15	1.797	1.620	2.222	0.078
중앙창	2.530	0.726	4.758	1.261
평 균	1.789	1.679	1.929	0.008

표 4. 제안해법의 오차

기지 수	% 오차 평균	% 오차 최소값	% 오차 최대값	% 오차 분산
5 개	4.133	3.650	4.755	0.143
10 개	2.503	2.143	2.593	0.034
15 개	1.789	1.679	1.929	0.008

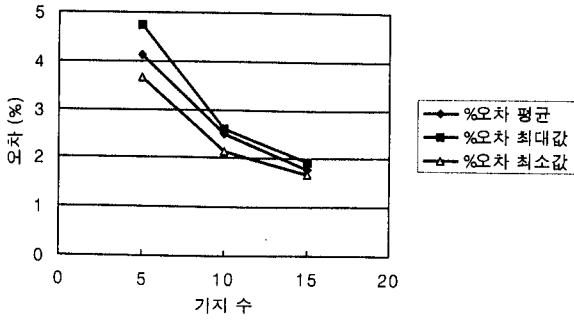


그림 1. 제안해법의 오차.

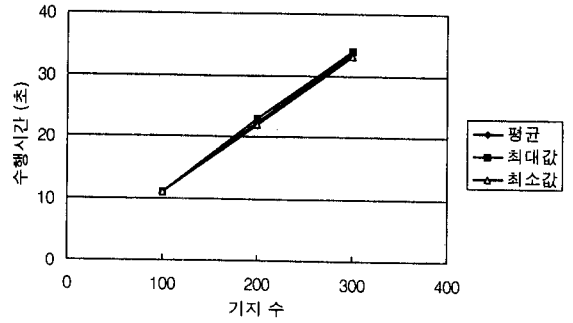


그림 2. 제안해법의 수행시간.

표 5. 기존해법의 오차

기지 수	% 오차 평균	% 오차 최소값	% 오차 최대값	% 오차 분산
5 개	10.037	9.159	12.768	1.482
10 개	11.772	11.500	12.353	0.078
15 개	7.231	6.709	7.532	0.073

해법의 타당성을 검증하기 위하여 지수분포 해법(Kim et al., 1996, 2000)을 그대로 사용하는 경우에 시뮬레이션과의 오차는 어느 정도 되는지를 실험하였다. 이를 위하여 지수분포 해법을 이용하여, 중앙창의 각 창구 수리시간과 기지창  $i$ 의 각 창구 수리시간을 열량분포와 동일한 평균을 갖는 지수분포로 주고 여유제품의 개수를 구하였다. 이렇게 구해진 여유제품수를 시뮬레이션에 입력하고 기타의 조건은 이전과 동일하게 하여 실험을 진행하였다.

기지수별로 10회의 시뮬레이션을 수행하고 총비용의 퍼센트 오차를 구한 결과가 <표 5>에 요약되어 있다. 표에서 볼 수 있는 것과 같이 퍼센트 오차의 평균은 9.680%로, 최대오차는 12.768%까지 나타나는 것으로 관찰되었다. 본 연구의 해법을 이용하는 경우의 평균오차 2.808%에 비하여 3.5배 정도 오차의 평균이 증가함을 알 수 있다.

해법의 효율성을 결정짓는 다른 하나의 척도는 대형문제의 결과를 얼마나 빨리 도출할 수 있는가 하는 것이다. 본 실험에서도 이를 위하여 현실에서 접할 수 있는 일반적 문제에 속하는, 기지 100, 200, 300개의 문제들을 풀어 보았다. 그 결과 <표 6>과 <그림 2>에서 볼 수 있는 것처럼 34초 이내에 해를 도출해 낼 수 있다. 또한 문제가 커짐에 따라 소요되는 계산시간은 선형에 가깝게 증가하고 있다. 따라서 본 논문에서 제안하는 해법은 현실문제를 신속하고 정확하게 풀어낼 수 있을

표 6. 제안해법의 수행시간

기지 수	평균	최소값	최대값	분산
100개	11.0	11.0	11.0	0.000
200개	22.3	22.0	23.0	0.233
300개	33.6	33.0	34.0	0.267

것으로 기대된다.

### 5. 결론

본 논문에서는 수리가능 시스템에서 최소요구충족률을 가장 적은 비용으로 만족시키는 여유제품의 수준을 결정하는 해법을 제안하였다. 특히 제안하는 해법은 이전의 연구와는 달리 일반분포의 수리시간과 2단 재고, 2단 수리 구조를 갖는 시스템을 대상으로 하였다. 실험결과 제시하는 모형은 대상시스템을 정확히 반영하고 있으며, 제안해법은 큰 문제들에 대해서도 아주 빠르고 정확하게 해를 도출할 수 있음을 알 수 있었다.

추후 연구과제로는 수리가능제품이 여러 개의 부속으로 구성된 경우(multi-indenture)와 시스템 자체가 여러 개의 수리가능부품으로 이루어진 경우(multi-item)로 확장하는 연구 등을 들 수 있다.

### 참고문헌

Albright, S. C. (1989), An approximation to the stationary distribution of a multiechelon repairable-item inventory system with finite sources and repair channels, *Naval Research Logistics Quarterly*, **36**, 179-195.

Albright, S. C. and Soni, A. (1989), An approximation to the stationary distribution of a multidimensional Markov process, *IIE Transactions*, **20**(1), 111-118.

Albright, S. C. and Soni, A. (1988), Markovian multiechelon repairable inventory system, *Naval Research Logistics Quarterly*, **35**, 49-61.

Díaz, A. and Michael, C. (1997), Models for multi-echelon repairable item inventory systems with limited repair capacity, *European Journal of Operational Research*, **97**(3), 480-492.

Gross, D., Kioussis, L. C. and Miller, D. R. (1987), A network decomposition approach for approximating the steady-state behavior of Markovian multi-echelon repairable item inventory systems, *Management Science*, **33**(11), 1453-1468.

Gross, D. and Miller, D. R. (1984), Multiechelon repairable-item provisioning in a time-varying environment using the randomization technique, *Naval Research Logistics Quarterly*, **31**,

- 347-361.
- Gross, D., Miller, D. R. and Soland, R. M. (1983), A closed queueing network model for multi-echelon repairable item provisioning, *IIE Transactions*, **15**(4), 344-352.
- Hur, S. and Lee, H. (2000), An approximation for the system size of M/G/c queueing systems, *Journal of the Korean Operations Research and Management Science Society*, **25**(2), 59-66.
- Kim, J. S. and Shin, K. C. (1993), Algorithm to Determine the Optimal Spare Inventory Level for Repairable-item Inventory System, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **19**(3), 81-90.
- Kim, J. S., Shin, K. C. and Park, S. K. (2000), An optimal algorithm for repairable-item inventory system with depot spares, *Journal of the Operational Research Society*, **51**(3), 350-357.
- Kim, J. S., Shin, K. C. and Yu, H. K. (1996), Optimal algorithm to determine the spare inventory level for a repairable-item inventory, *Computers & Operations Research*, **23**(3), 289-297.
- Kim, T. Y. (2000), Programs for the Repairable-item Inventory System, <<http://mecors.hanyang.ac.kr>>.
- Kimura, T. (1996), A transform-free approximation for the finite capacity M/G/s queue, *Operations Research*, **44**(6), 984-988.
- Miyazawa, M. (1986), Approximations of the queue-length distribution of an M/GI/s queue by the basic equations, *Journal of Applied Probability*, **23**, 443-458.
- Muckstadt, J. A. and Thomas, L. J. (1980), Are multi-echelon inventory methods worth implementing in systems with low-demand-rate items? *Management Science*, **26**(5), 483-494.
- Sherbrooke, C. C. (1968), METRIC: a multi-echelon technique for recoverable item control, *Operations Research*, **16**(1), 122-141.
- Tijms, H. (1994), *Stochastic Models, An Algorithmic Approach*. England: John Wiley and Sons.