

## 수리 가능한 부품통제를 위한 성능측정수단에 관한 연구 -A Study on the Performance Measure for Recoverable Item Control-

김지승\*

Kim, Ji-Seung

김병국\*

Kim, Byoung-Kug

### Abstract

This paper deals with performance measures for recoverable item control where the demand process is time-dependent. The performance measure is essential for modelling a multi-echelon inventory problem for repairable items. Most repairable items are expensive and have a great influence on the performance of equipments. Thus the information on these items is very useful to the decision maker.

The purpose of this paper is to derive the system performance measure and the part(component) performance measure considering a cannibalization policy under the dynamic environment.

### 1. 서론

제고 이론의 대부분은 소비성 제품(consumable product)을 대상으로 한다. 즉 수요를 만족시킨 후 영원히 그 시스템에서 떠나는 것이다. 그러나 수리부속을 포함하고 있는 고가품 등의 경우에는 고장 발생 시 고장난 부품은 일정 기간의 수리기간을 거친 후 다시 시스템으로 복귀하여 수요를 충족시키며 이러한 과정은 반복된다. 즉, 고장난 부품이 일정 수리기간 후에는 새로운 부품이 된다고 보는 것이다. 본 연구에서는 수리 후의 부품 성능은 새 부품의 성능과 같다고 가정한다.

수리가능한 부품의 다단계 제고시스템을 모형화하기 위해서는 시스템의 성능을 상황에 적절하게 표현해 주는 것이 필수적이다. 왜냐하면 시스템의 상황에 따라 요구하는 성능이 다르기 때문이다. 예를 들면 항공기 정비시스템의 경우와 통신망의 부품 정비시스템의 경우는 요구하는 조건이 매우 다르다. 항공기 정비시스템에 있어서도 군의 경우를 생각해 보면 평시와 전시의 경우에 있어서는 현저한 차이가 난다. 또한 시스템의 성능을 표현하기 위해서는 시스템을 구성하고 있는 제품 그리고 제품을 구성하고 있는 부품의 상태를 측정하는 지표가 요구된다.

---

\* 경북산업대학교 산업공학과

수리가능한 부품의 재고 모형은 Sherbrooke[8]의 METRIC모형을 효시로하여 현재까지 꾸준히 연구되어 왔다. 수리가능한 부품은 일반적으로 고가품이면서 수요가 많이 발생하는 것이 아니기 때문에 기존의 대부분 연구는 ( $S-1, S$ ) 재고 정책, 즉 수요가 일어날 때마다 주문하는 정책에 초점이 맞춰져 있다. 이 정책은 Base Stock 정책 또는 One-for-One 정책으로도 불리며 수요는 적지만 고가의 품목이어서 주문비가 재고 유지비나 고갈 비용에 비교하여 상대적으로 무시될 수 있을 때 적용하는 ( $s, S$ ) 정책에서  $s = S-1$  인 특수한 경우이다. 또한 이를 연구들의 주류는 안정된 상태(steady state)의 시스템 모형화 방법에 관심을 기울였다. 즉, 기본 수요과정이 시간에 따라 homogeneous하다는 것이다. 일반적으로 평상시의 의사 결정에 있어서는 이 가정이 적합하다. 이와 같은 연구로는 [4], [8] 등이 있다.

그러나 시간에 따라 수요율이 달라지는 경우 안정된 상태의 모형은 적합치 않다. 예를 들어 공군과 같은 항공 시스템에 있어, 수리를 필요로하는 부품의 수는 항공기의 비행시간, 마모율 등에 따라 큰 영향을 받는다. 특히 전시 상황과 같이 수요가 급증하는 경우에 안정된 시스템을 가정하여 한 의사 결정은 실제와 큰 차이가 난다.

Muckstadt[5]는 수요가 시간에 따라 변할 때 안정된 시스템 모형하의 backorder수준과 시간의 변동을 고려한 모형하의 backorder수준이 크게 다름을 보여 주었다. 이와 같은 연구로는 [2], [3], [6] 등이 있다. 수요가 시간에 따라 변하는 경우와 일정한 경우의 분석 방법은 시스템 상황에 따라 달라져야 한다. 그러나 두 모형의 시스템 성능 측정 수단은 거의 비슷하다. 즉, 수요가 시간에 따라 변하는 경우는 안정된 상태의 성능 측정 수단인 준비율, 평균 backorder 양 등이 일정한 것이 아니라 시간  $t$ 에 따라 변하므로  $R(t), EB(t)$  등으로 시간  $t$ 의 함수가 되는 것이다.

따라서 본 논문의 목적은 수요가 시간에 따라 변하는 경우 차용대체(cannibalization) 정책을 고려하여 여러 가지 성능 측정 수단을 유도하는 것이다. 차용대체에 관해서는 다음 절에 자세히 설명된다.

## 2. 성능 측정 수단(performance measure)

수리 가능한 부품의 다단계 재고 모형에서는 상위 단계와 하위 단계를 연결해 주는 보급로(pipeline)의 부품량과 보급 수준을 연계시킴으로써 우리는 제품의 부품이 사용 가능한지 아니면 부족한지를 알 수 있다. 즉, 제품의 성능이 어느 정도 발휘할 수 있는지를 파악할 수 있는 것이다. 일반적으로 수리 가능한 제품에 있어 제품의 성능은 시간  $t$ 에 주어진 보급 수준(재고 수준)  $S(t)$ 에 의해 결정된다. 성능 측정 수단을 유도하는 자세한 방법에 대해서는 참고문헌 [1], [8], [9] 등을 참조하길 바란다. 이  $S(t)$ 는 제품이 고장났을 때 그 제품을 다시 작동케 하는데 사용되어지는 것이다. 다시 말해 재고 고갈을 막는데 사용된다. 시점  $t$ 에서 수리중인 부품 수와 주문중인 부품 수를 합친 것이  $S(t)$ 를 초과할 때, 그 제품은 backorder상태에 있다고 한다. 먼저 성능 측정 수단으로 사용될 수 있는 것은 다음과 같은 것을 생각할 수 있다.

$R(t)$  : 시간  $t$ 의 준비율(Ready rate), 즉 시간  $t$ 에 back order가 없을 확률

$FR(t)$  : 시간  $t$ 의 충족율(Fill rate), 즉 시간  $t$ 의 수요가 재고로부터 곧 보충될 수 있는 확률

$EB(t)$  : 시간  $t$ 의 평균 back order 양, 즉 시간  $t$ 의 평균 고갈량

$VB(t)$  : 시간  $t$ 의 back order 양의 분산

본 연구에서는 수요가 시간에 따라 변하는 경우를 다루게 된다. 여기서는 수요가 nonstationary Poisson distribution을 따른다고 가정한다. Nonstationary(Nonhomogeneous) Poisson 분포의 정의는 다음과 같다.

정의 2.1 counting process  $\{N(t), t \geq 0\}$  가 다음 조건을 만족할 때 intensity 함수  $r(t)$ 를 가진 nonstationary Poisson 분포라고 한다.

- a)  $N(0) = 0$
- b)  $\{N(t), t \geq 0\}$  has independent increments.
- c)  $P\{N(t+h) - N(t) \geq 2\} = o(h)$
- d)  $P\{N(t+h) - N(t) = 1\} = r(t)h + o(h)$

시간  $t$ 의 재고 수준을  $S(t)$ 라 놓고, 보급로에 있는 평균 부품수를  $\lambda(t)$ , 즉 서비스 받고 있는 평균량으로 나타내면 위의 지표는 다음과 같이 표현된다.

$$R(t) = \sum_{k=0}^{s(t)} P(k/\lambda(t)) = \sum_{k=0}^{s(t)} \lambda(t)^k e^{-\lambda(t)} / k!$$

$$FR(t) = \sum_{k=0}^{s(t)-1} P(k/\lambda(t))$$

$$\begin{aligned} EB(t) &= \sum_{k=s(t)+1}^{\infty} (k-s(t))P(k/\lambda(t)) \\ &= \lambda(t) - S(t) + \sum_{k=0}^{s(t)} (S(t)-k)P(k/\lambda(t)) \end{aligned}$$

$$(\because \sum_{k=0}^{\infty} kP(k/\lambda(t)) = \lambda(t) ,$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} s(t)p(k/\lambda(t)) = s(t))$$

재고 고갈량의 분산  $VB(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} VB(t) &= \sum_{k=s(t)+1}^{\infty} [(k-s(t))^2 P(k/\lambda(t)) - [EB(t)]^2] \\ &= \lambda(t) + [\lambda(t) - s(t)]^2 - [EB(t)]^2 - \sum_{k=0}^{s(t)} [(k-s(t))^2 P(k/\lambda(t))] \\ &(\because \sum_{k=0}^{\infty} [(k-\lambda(t))^2 P(k/\lambda(t))] = \lambda(t)) \end{aligned}$$

이러한 측정 수단들은 각 부품별로 필요한 시기에 쉽게 계산될 수 있다. 부품 고갈의 효과(재고 부족으로 인한)는 제품이 제대로 작동을 할 수 없게 한다. 따라서 시간  $t$ 에 평균적으로 어느 정도의 제품이 작동 능력이 없는 가를 구하는 것이 제품의 성능 측정을 하기 위해 필수적이다. 현장에서는 최대한 작동 가능한 제품의 수를 늘이기 위해 차용대체(cannibalization)가 행해진다. 차용대체의 정의는 다음과 같다.

정의 2.2 차용대체(cannibalization) : 2대 이상의 장비에서 각각 다른 구성품의 고장이 발생하여 장비가 작동되지 못할 때 한 장비에서 다른 장비가 필요로 하는 구성품을 떼어 내어 해당되는 장비에 장착해 주는 정비 행위

제품에 따라 차용 대체가 용이한 것이 있고 또한 거의 불가능한 것이 있다. 따라서 차용 대체의 용이도에 따라 분류하여 살펴보자.

### 2.1 차용 대체가 없을 경우

$NS(t)$ 를 시간  $t$ 에서의 제품 수라고 놓고 부품이  $N$ 종류 있다고 하자. 또한 한 종류 부품의 재고 고갈만 일어나도 제품은 성능을 발휘할 수 없다. 즉, 이 모형에서 다른 부품은 제품의 성능에 중요한 영향을 미치는 부품만을 대상으로 삼는다.

$i$ 종류의 부품에  $k$ 개의 고갈이 있을 때, 어떤 제품에서  $i$ 부품의 고갈이 발생할 확률은  $k / NS(t)$ 이다. 따라서, 어떤 제품에 부품  $i$ 의 고갈이 발생할 확률은 다음과 같다.

$$\frac{EB_i(t)}{NS(t)} = \sum_{m=s_i(t)+1}^{\infty} \frac{(m-S_i(t))}{NS(t)} p(m/\lambda_i(t))$$

그러므로 제품이 어떤 품목의 고갈로 인하여 작동 불능이 될 확률은

$$1 - \prod_{i=1}^N \left(1 - \frac{EB_i(t)}{NS(t)}\right)$$

최종적으로 시간  $t$ 에 작동 불능일 제품의 평균량  $EN(t)$ 는 다음과 같다.

$$EN(t) = NS(t) \left[ 1 - \prod_{i=1}^N \left(1 - \frac{EB_i(t)}{NS(t)}\right) \right]$$

물론 윗 식은 각 부품이 한 제품에 1개씩 있다고 가정할 경우이다. 만약 제품에 한 부품이 여러개 장착될 경우 그 양을  $Q_i$ 라 놓자. 이 경우의  $EN(t)$ 는 조건부 확률을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} EN(t) &= NS(t) \times [1 - \prod_{i=1}^N \Pr(i\text{부품의 고갈이 없음})] \\ &= NS(t) \times \left[ 1 - \prod_{i=1}^N \sum_{y=0}^{NS(t) \times Q_i} \Pr \left( \begin{array}{l} i\text{부품의 고갈이 } y\text{개 있을 때 어떤} \\ \text{제품에 고갈이 없을 경우} \end{array} \right) \right] \\ &= NS(t) \times \left[ 1 - \prod_{i=1}^N \frac{\sum_{y=0}^{Q_i \times NS(t)} \binom{Qi \cdot NS(t) - y}{Qi} PB(y)}{\binom{Qi \cdot NS(t)}{Qi}} \right] \end{aligned}$$

$\frac{(Q_i \cdot NS(t) - y)}{Q_i}$  를 해석하면 어떤 제품의 전체 고갈 부품수가  $y$ 개 있을 때 고갈이 나지 않

은 부품들 중에서  $Q_i$ 만큼 가져올 확률이므로 즉 고갈이 없을 경우를 의미하게 된다. 여기서  $PB_i(y)$ 는 부품  $i$ 가 시간  $t$ 에  $y$ 개의 고갈을 가질 확률로서 아래와 같이 표현된다.

$$PB_i(y) = \begin{cases} \sum_{k=0}^{S_i(t)} \frac{e^{-\lambda_i(t)} \cdot \lambda_i(t)^k}{k!}, & y = 0 \\ \frac{e^{-\lambda_i(t)} \cdot \lambda_i(t)^{S_i(t)+y}}{(S_i(t)+y)!}, & y > 0 \end{cases}$$

## 2.2 완전한 차용 대체가 이루어질 경우

이 경우는 부품 고갈이 일어났을 경우 작동 불능 제품 수를 최소화하기 위해 가능한 차용 대체를 모두 한다는 것이다. 또한 차용 대체는 수리에 비해 시간이 매우 적게 걸리는 것이 일반적이라므로 그 시간은 무시한다. 다음과 같이  $p^i(j)$ ,  $p(j)$ 를 정의하자.

$P^i(j)$  = 부품  $i$ 의 고갈이  $j$ 보다 같거나 적을 확률

$P(j)$  = 작동 불능 제품 수가  $j$ 보다 같거나 적을 확률

제품에 한 개의 부품만이 장착될 경우 다음과 같이 표현된다.

$$P^i(j) = \sum_{k=0}^{S_i(t)+j} P(k/\lambda_i(t)) = \sum_{k=0}^{S_i(t)+j} \frac{e^{-\lambda_i(t)} \cdot \lambda_i(t)^k}{k!}$$

$$P(j) = \prod_{i=1}^N P^i(j)$$

1) 절과 마찬가지로 만약 제품에 한 종류의 부품이 여러 개 들어가는 경우를 생각해 보면 다음과 같다.

$$P(j) = \prod_{i=1}^N P^i(Q_i, j)$$

## 2.3 총 평균 backorder 양

이 측정 수단은 각 부품의 backorder 양을 합친 것이다.

$$TEB(t) = \sum_{i=1}^N EB_i(t)$$

윗 식은 일반적으로 재고 모형에 있어 목적 함수나 제약식에 사용된다.

### 3. 결론

본 논문에서는 수요율이 시간에 따라 변할 때 수리 가능한 부품의 다단계 재고 문제를 모형화하는데 필수적인 성능 측정 수단을 유도하였다. 성능 측정 수단 유도시 대부분의 수리 가능한 재고 모형에서는 문제의 복잡성 때문에 차용대체를 고려하지 않았다. 그러나 본 연구에서는 현실성을 높이기 위해 차용대체가 용이한 경와 아닌 경우를 분리하여 충족율, backorder 가 일어날 확률 등의 성능 측정 수단을 유도하였다. 추후 연구 과제로서는 여기에서 유도된 성능 측정 수단을 이용하여 문제를 모형화하고 이 모형을 푸는 해법을 개발하는 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1]. Cohen,A.M. and Kleindorfer,R.P., " Near-Optimal Service Constrained Stocking Policies for Spare Parts", Oper. Res., Vol 37, No 1, 1989
- [2]. Graves,S.C. and De Bodt,A.M., " Continuous-Review Policies for a Multi-Echelon Inventory Problem with Stochastic Demand", Mgt. Sci., Vol 31, No 10, Oct., 1985
- [3]. Issacson,Boren,Tsai and Pyles, Dynamic METRIC Version 4, The Rand Corporation, R -3289-AF, 1988
- [4]. Lee,L.H. and Moinzadeh,L., " Operating Characteristics of a Two-Echelon Inventory System for Repairable and Consumable Items under Batch Ordering and Shipment Policy", Naval Res. Logis., Vol 34, 1987
- [5]. Muckstadt,J.A., Comparative Adequacy of Steady-state Versus Dynamic Models for Calculating Stockage Requirements, The Rand Corporation, R-2636-af, 1980
- [6]. Raymond,P., The Dyna-METRIC Readiness Assessment Model, The Rand Corporation, R-2886-AF, 1984
- [7]. Roll,Y., Golany,B. and Seroussi,D., ' Measuring the Efficiency of Maintenance Units in the Israel Air Force'. Eur. J. of Oper. Res., Vol 43, 1989
- [8]. Scherbrooke,C.C., " METRIC: A Multi-Echelon Technic for Recoverable Item Control", Oper. Res., Vol 16, 1968
- [9]. Schwarz,L.B., Multi-Level Production/Inventory Control Systems, Noorth-Holland, 1981