

# (s, S)-정책하의 연속형 내부재고를 갖는 M/M/1 대기행렬모형 분석

(Analysis of an M/M/1 Queue with an Attached Continuous-type (s,S)-inventory)

박진수<sup>1)</sup>, 이현근<sup>2)</sup>, 김종현<sup>2)</sup>, 윤은혁<sup>2)</sup>, 백정우<sup>2)\*</sup>

(Park Jinsoo, Lee Hyeon Geun, Kim Jong Hyeon, Yun Eun Hyeuk, and Baek Jung Woo)

**요약** 본 논문은 연속형 내부재고를 갖는 M/M/1 대기행렬모형을 다룬다. 고객은 포아송과정으로 도착하고 선입선출 서비스를 받는다. 각 고객의 서비스시간은 독립적이며 동일한 지수분포를 따른다. 고객은 서비스를 받기 위해 일반분포를 따르는 확률변수  $H$ 의 내부재고를 소비하며, 서비스 완료시점에 감소한다고 가정한다. 재고시스템은 전통적인 (s,S)-정책에 따라 운용되며, 재고의 조달 시간은 일반분포를 따른다고 가정한다. 재고가 없는 기간에 도착한 고객은 유실된다. 본 논문은 이처럼 운영되는 재고-대기행렬모형의 고객수 및 재고량에 대한 안정상태 결합확률분포를 유도하고 수치예를 보인다. 또한 장기적인 비용을 최소화하는 재고운용정책을 고찰한다.

**핵심주제어** : 대기행렬모형, 재고모형, (s,S) 재고관리, 판매상실, 연속재고유형

**Abstract** This study focuses on an M/M/1 queue with an attached continuous-type inventory. The customers arrive into the system according to the Poisson process, and are served in their arrival order; i.e., first-come-first-served. The service times are assumed to be independent and identically distributed exponential random variable. At a service completion epoch, the customer consumes a random amount of inventory. The inventory is controlled by the traditional (s, S)-inventory policy with a generally distributed lead time. A customer that arrives during a stock-out period assumed to be lost. For the number of customers and the inventory size, we derive a product-form stationary joint probability distribution and provide some numerical examples. Besides, an operational strategy for the inventory that minimizes the long-term cost will also be discussed.

**Key Words** : Queueing Model, Inventory Model, (s,S)-inventory Control, Lost-sales, Continuous-type Inventory

\* Corresponding Author : jwbaek@chosun.ac.kr

+ 이 논문은 조선대학교 『2017학년도 학부생 새싹형 연구인재 지원프로그램』의 지원을 받아 연구되었음.

Manuscript received August 13, 2018 / revised October 8, 2018 / accepted October 18, 2018

1) 용인대학교 경영정보학과, 제1저자

2) 조선대학교 산업공학과, 교신저자

## 1. 서론

많은 연구자가 내부재고를 갖는 대기행렬모형을 연구하였다. 내부재고를 갖는 대기행렬모형은 고객을 서비스하기 위해 시스템의 내부에 내장된

재고를 사용하는 새로운 형태의 대기행렬모형으로 내부재고의 크기와 고객수를 동시에 고려하는 2차원 확률과정이다.

내부재고를 갖는 대기행렬모형에서는 고객을 서비스하기 위해 내부의 재고를 사용하는데, 분석의 편의를 위해 각 고객의 서비스완료시점에 재고량이 감소한다고 가정한다. 내부재고량이 0이 되면 서버는 재고가 보충될 때까지 서비스를 제공할 수 없고, 이 때 도착하는 고객은 도착 즉시 이탈한다고 가정한다(판매상실, lost-sales). 내부재고의 운용은 전통적인 재고정책을 따른다고 가정한다.

내부재고를 갖는 대기행렬모형은 2개 이상의 부품이 조립되어 완성품을 만들 경우를 모델링하기 위해 ‘Assembly-like Queue’ 또는 ‘Kitting Queue’라는 이름으로 연구되기 시작했다 [4-7]. Berman et al. [6]은 고객의 도착간격과 서비스시간이 확정적인 경우의 비용분석을 보였다. Berman and Kim [4]은 재고의 조달시간을 0으로 가정한 모델을 분석했으며, Berman and Sapna [5]는 이와 같은 모형을 서비스시간이 일반적인 분포를 따르는 경우로 확장하였다. He and Jewkes [10]는 M/PH/1 대기행렬을 가정하여 시스템을 분석하였고 이에 관한 다양한 성능 척도를 유도하였다.

위의 연구들은 재고의 조달시간을 0으로 가정하였으며, 조달시간이 0이 아닌 경우에 대한 연구는 극히 최근에 이루어졌다. Schwarz and Daduna [17] 및 Schwarz et al. [18]은 조달시간이 지수분포를 따르며, 대기행렬이 M/M/1인 경우에 대한 다양한 연구를 진행하였고, 그 결과로 고객수 및 재고량에 대한 곱형태(product-form)의 안정상태 결합확률분포를 유도하였다. Saffari et al. [16]은 조달시간이 일반분포를 따르고  $(r, Q)$ -정책에 의하여 운영되는 대기행렬모형을 연구하였다. Krishnamoorthy and Viswanath [13]은 재고가 외부의 조달이 아닌 내부생산에 의하여 보충되는 경우를 분석하였으며, Baek and Moon [1]은 이를 확장하여 재고가 외부공급 및 내부생산에 의해 동시에 보충되는 경우를 분석하였다. Krishnamoorthy and Narayanan [12]은 M/M/1 대기행렬을 고객의 도착이 마코비안도착

과정 (Markovian arrival process, MAP)을 따르는 경우로 확장하였다. 내부재고를 갖는 대기행렬네트워크는 Schwarz et al. [19]에 의해 처음으로 분석되었는데, 각 재고의 수준이 미리 정해진 임계값 이하가 될 경우 주문을 하는 모형이다. 이 외의 다양한 연구 결과는 Krishnamoorthy et al. [11] 및 Marand et al. [15]에서 찾을 수 있다.

내부재고를 갖는 대기행렬모형에 대한 다양한 연구가 이루어졌음에도 불구하고 대부분의 연구는 이산형 재고를 가정하였다. 연속형 재고를 갖는 대기행렬모형을 고려한 최근의 연구는 Barron and Hermel [3]에서 찾을 수 있으나 고객수과정을 분석의 대상에서 제외하고 재고량에 대한 결과만을 보여 적용에 한계를 갖는다. 따라서 기존의 모형을 화학 생산공정 및 3D프린팅 생산시스템과 같이 유체형 재고를 사용하는 생산시스템에 기존의 모델을 직접 적용하기는 어렵다.

예를 들어, 플라스틱 사출 공정으로 제품을 주문제작 하는 가공공장의 경우, 제품의 원재료로 사용되는 플라스틱 용융 수지의 주문량 및 주문시점을 결정해야할 뿐만 아니라 재공품재고의 수준도 동시에 결정해야 하므로 기존의 모형을 그대로 적용하는 데 한계를 갖는다. 최근 Baek et al. [2]은 이와 같은 한계를 극복하기 위해 연속형 내부재고를 갖는 대기행렬모형을 처음으로 다루었으며, 본 논문은 Baek et al. [2]와 다른 형태의 재고 운용정책을 가정한 새로운 모형을 제시한다.

본 논문의 대상이 되는 시스템은 다음과 같은 운영특성을 갖는다. 고객은 포아송과정으로 시스템에 도착하며, 지수분포를 따르는 서비스를 받고 시스템을 이탈한다. 각 고객은 서비스완료 직후에 임의의 재고량을 소비한다. 재고는 외부공급업체에 의해 보충되며, 주문의 조달시간은 일반분포를 따른다고 가정한다. 본 논문은 연속형 내부재고를 갖는 대기행렬시스템에 대하여 기존에 연구된 이산형 모형과 유사한 곱형태의 안정상태 결합확률분포를 유도하는 것을 목표로 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 대

상 시스템을 자세히 설명하고 대기 고객수와 재고량에 대한 안정상태 결합확률분포를 유도하기 위해 원 모형을 변조한 두 가지 변조된 시스템을 정의한다. 변조된 두 시스템은 3장의 결과를 유도하기 위해 매우 중요한 역할을 한다. 3장에서는 제안된 모형을 수리적으로 분석한다. 안정상태하에서 고객수분포와 재고량의 분포가 독립임을 증명하고, 이를 바탕으로 곱형태의 안정상태 결합확률분포를 유도한다. 4장에서는 3장의 결합확률분포를 이용하여 수치예를 보이고 비용분석을 보인다. 5장은 추후 연구를 논의한다.

## 2. 연속형 내부재고 대기행렬모형

### 2.1 모형설명 및 기호정의

본 절에서는 연속형 내부재고를 갖는 M/M/1 대기행렬모형을 자세히 설명한다. Fig. 1은 대상 모델의 개념도이며, Fig. 2는 연속형 내부재고 M/M/1 대기행렬의 샘플경로(sample path)이다.  $N(t)$ 와  $I(t)$ 는 각각 시점에서의 고객수와 재고량을 나타낸다.

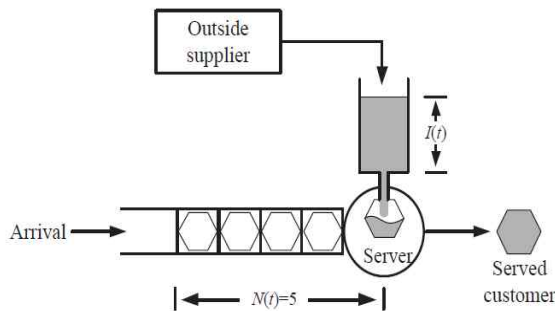


Fig. 1 Schematic Diagram of the Proposed Model

고객은 도착률  $\lambda$ 의 포아송과정으로 도착한다. 도착하는 고객은 시스템 내부에 재고가 있는 경우는 입장하고 재고가 없으면 서비스를 받지 못한 채 바로 이탈한다(lost-sales). 서버는 고객들을 선입선출(first-come, first-served, FCFS)로 서비스하며 서비스시간은 평균  $1/\mu$ 의 독립적이

고 동일한(independent and identically distributed, IID) 지수분포를 따른다. 본 논문에서는 고객수 과정의 안정조건을 만족하기 위한 조건  $\lambda < \mu$ 를 가정한다. 임의의 고객은 서비스완료시점에 일반분포를 따르는 확률변수  $H$  만큼의 재고를 사용하는데, 이를 ‘재고요구량(stock requirement)’이라고 부르기로 한다. 서비스완료시점에서 보유재고가 충분하다면 내부재고의 양이 재고요구량  $H$  만큼 감소하게 된다. 만일 보유재고가 불충분하면 Fig. 2의 ㉔에서와 같이 남은 재고를 모두 소비하고 시스템을 이탈하는 대신 추가비용이 발생한다. 재고량이 0이 되는 시점에 시스템에 남아있던 고객들은 재고가 보충될 때까지 대기열에서 대기한다.

내부재고의 운영정책은 일반적으로 널리 사용되는 정책 중 하나인  $(s, S)$ -정책을 따른다. 자세히 설명하면 재고량이  $s$ 보다 적거나 같으면 발주하고 일반분포를 따르는 조달시간 ( $V$ , 확률변수) 이후 재고량을 최대치인  $S$ 로 채우는 정책을 의미한다. 본 논문에서는  $V$ 의 분포함수를  $V(x)$ 로 쓰기로 한다. 조달시간은 고객수와 재고량에 대해 독립이다.

편의상 Fig. 2의 ㉔와 ㉕에서의 재고량을  $U_s$ 로 정의하자(재고주문시점). 본 논문에서는 재고량이 최대치  $S$ 인 시점부터  $U_s$ 가 되는 시점까지를 ‘일반기간(regular period)’라 명명하며,  $U_s$ 에서 다시  $S$ 가 될 때까지의 간격을 ‘주문기간(delivery period)’이라 부르기로 한다. 일반기간과 주문기간은 각각  $L_R$ 과  $L_D$ 로 표기한다(확률변수).

Fig. 2로부터  $N(t)$ 와  $I(t)$ 는 서로 독립임을 쉽게 알 수 있다. 그러나  $I(t)$ 만을 보면 재고량이 최대치  $S$ 가 되는 지점을 재생성점으로 갖는 재생성과정처럼 볼 수 있다. 이러한 재생성과정의 개념은 시스템의 분석에 매우 중요한 역할을 한다. 이제 재고량이  $S$ 인 시점부터 다음  $S$ 가 되는 시점까지의 기간을 사이클이라 정의하자. 그러면 임의의 사이클의 길이  $C$ 는  $L_R + L_D$ 임을 쉽게 알 수 있다. 조달시간  $V$ 와 주문기간  $L_D$ 는 서로 동일한 기간을 의미하므로 본 논문에서는 문맥에 따라 구분 없이 사용하기로 한다.

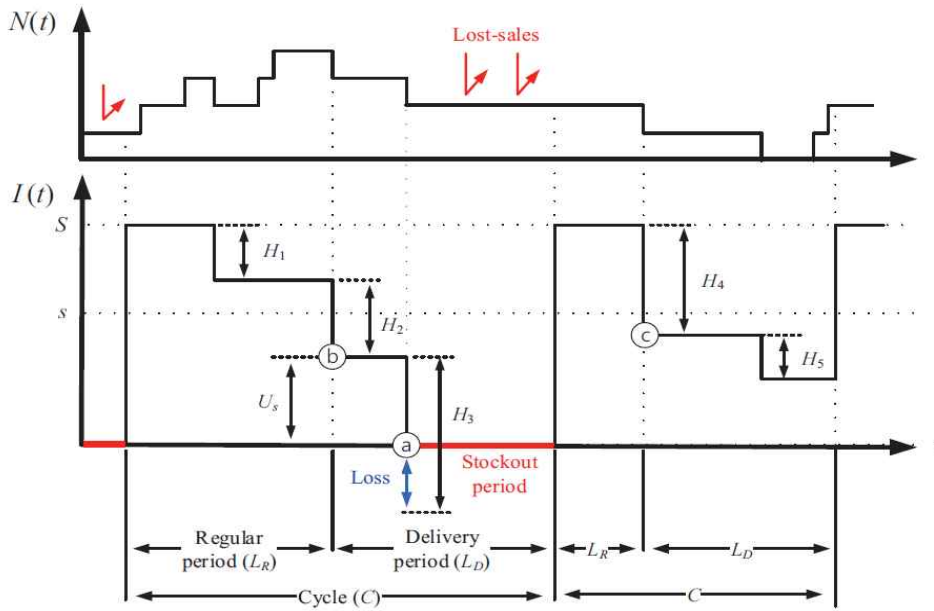


Fig. 2 Sample Path of the Joint Process  $Q = \{(N(t), I(t)) : t \geq 0\}$

### 2.2 변조된 시스템

이제 2차원 확률과정  $Q = \{(N(t), I(t)) : t \geq 0\}$ 의 안정상태하의 고객수와 재고량에 대한 결합분포를 곱형태로 유도하기 위해 확률과정  $Q$ 로부터 다음과 같은 2가지 변조된 시스템을 정의한다.

**정의 2.1 (System 1)** System 1은 원래의 과정  $Q = \{(N(t), I(t)) : t \geq 0\}$ 를 변조한 2차원 확률과정  $Q_1 = \{(N(t), I^{dual}(t)) : t \geq 0\}$ 이며, 여기서  $I^{dual}(t) = S - I(t)$ 이다. (Fig. 3 참조)

**정의 2.2 (System 2)** System 2는 System 1에서 서비스시간을 0으로 가정한 확률과정이다. (Fig. 4 참조)

Fig. 3은 원래 시스템의  $N(t)$ ,  $I(t)$  및  $I^{dual}(t)$ 를 같은 시간 축에 그린 것이다. 원 과정  $Q$ 와는 달리 System 1에서는 고객이 서비스완료시점에 확률변수 만큼의 재고를 재고 용기(storage)에 채우고 시스템을 이탈하는 것으로 볼 수 있다. System 2의 경우는 서비스시간이 0이므로 기다리는 고객이 발생할 수 없다. 따라서 System 2는 재고량만을 고려하는 1차원 확률과정

$Q_2 = \{I^{mod}(t) : t \geq 0\}$ 으로 생각할 수 있다.

재고량 과정만을 보면 System 1과 System 2는 공히 누적재고량이  $d (= S - s)$ 가 넘는 순간 폐기요청을 하고 이를 일정 기간( $V$ )이 지나면 모두 치우는 확률적 처리(clearing) 시스템과 유사한 확률적 행태를 갖는다. 추후 분석을 위해 Fig. 3, 4의 ㉔와 ㉓점에서의 System 1의 재고량을  $U_d$ 로 정의하자 (재고 처리 요청 시점에서의 재고량).

Fig. 4는 System 2의 샘플경로를 그린 것이다. System 2는 다음과 같은 네 가지 특성을 갖는다.

- (1) 고객은 도착률  $\lambda$ 인 포아송과정으로 도착하며, 각 고객은 확률변수  $H$ 만큼의 재고를 갖고 들어온다.
- (2) 각 고객은 갖고 온 재고를 크기  $S$ 의 재고 용기에 채우고 시스템을 즉시 이탈한다.
- (3) 만일 재고 수준이  $d (= S - s)$ 를 넘으면 (Fig. 4의 ㉓와 ㉔) 확률변수  $V$  이후 용기를 모두 비운다.
- (4) 임의의 고객에 의해 재고용기가 흘러넘치면 (Fig. 4의 ㉑와 ㉒) 추가 비용이 발생하게 되며, 이후 도착하는 고객들은 용기가 비워질 때까지 유실된다.

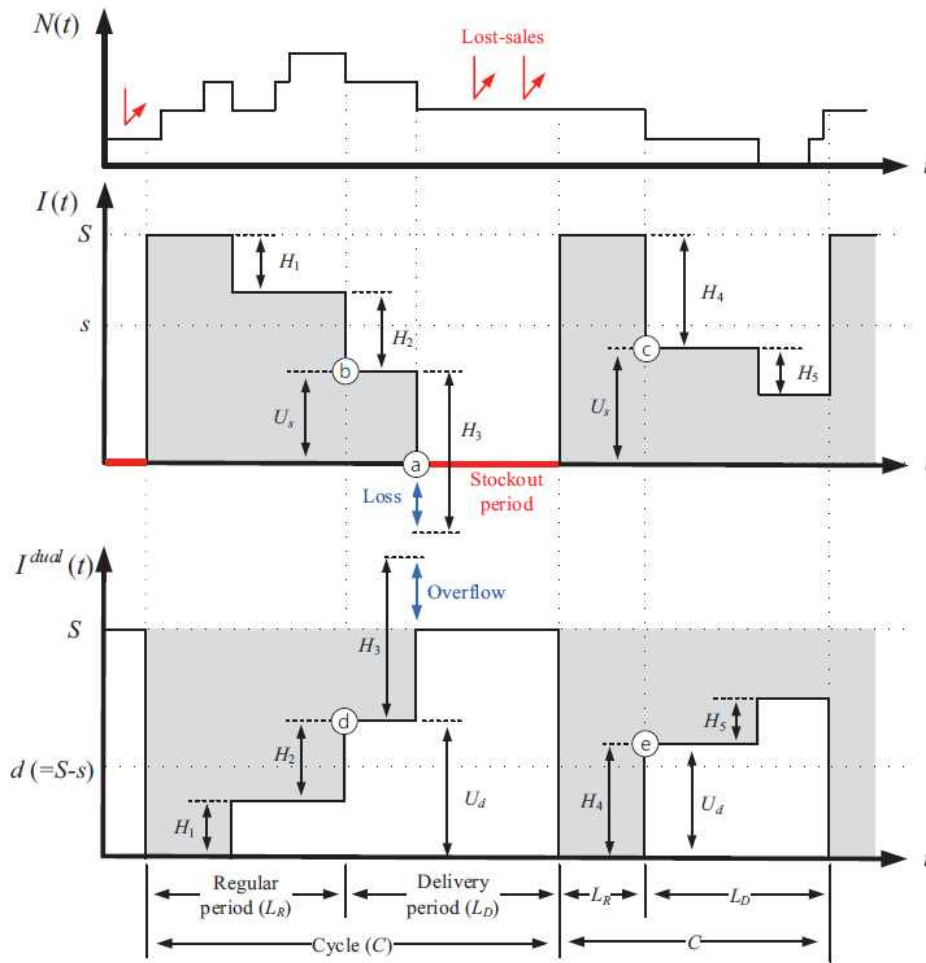


Fig. 3 Sample Paths of the Original Process and the Modified Inventory Process

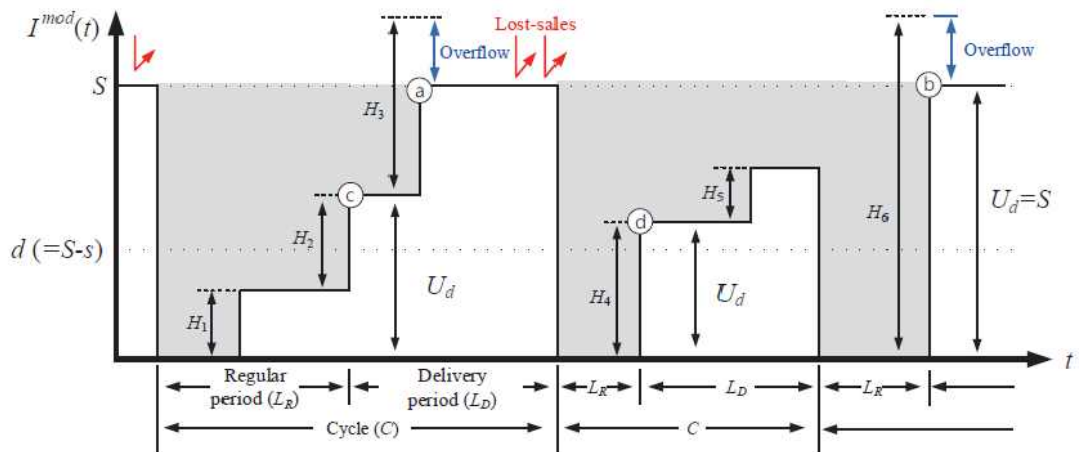


Fig. 4 Sample Path of System 2

*System 2*는 원래 과정의 분석에 매우 중요한 역할을 한다. *System 1*의 결합분포가 일반적인 M/M/1 대기행렬의 고객수분포와 *System 2*의 재고량의 분포가 곱해진 형태로 표현되기 때문이다.

### 3. 시스템 분석

본 장에서는 제안된 시스템을 분석한다. 분석을 위해 다음의 기호를 정의하자.

- $s, S$  : 의사결정 변수 ( $s \geq 0, S \geq s$ ),
- $L_D$  : 조달기간,
- $L_R$  : 주문기간,
- $C = L_D + L_R$ ,
- $V$  : 조달시간 길이, 확률변수,
- $V(x), v(x)$  :  $V$ 의 분포함수, 확률밀도함수,
- $E(V)$  : 평균조달시간,
- $H$  : 재고요구량,
- $H(x), h(x)$  :  $H$ 의 분포함수, 확률밀도함수,
- $H^{(n)}(x), h^{(n)}(x)$  :  
 $H$ 의  $n$ 차 중합( $n$ -fold convolution) 분포함수, 확률밀도함수,
- $N(t)$  : 시점  $t$ 에서의 고객수,
- $I(t)$  : 시점  $t$ 에서의 재고량,
- $\xi(t)$  : 시스템 상태의 지시확률변수 (시점  $t$ 가 일 반기간에 포함되면 1, 그렇지 않으면 0)

#### 3.1 안정상태 결합분포

본 장에서는 우선 원래 모형의 안정상태하에서의 고객수분포와 재고량분포가 독립임을 증명한다. 만약 두 분포가 독립이면 안정상태 결합확률 분포는 다음과 같은 곱 형태로 쓸 수 있다.

$$\Psi_n(x) = P(n) \cdot X(x), \quad (1)$$

$$(n = 0, 1, 2, \dots, 0 \leq x \leq S).$$

여기서  $\Psi_n(x)$ 은 결합분포,  $P(n)$ 은 고객수에 대한 주변분포,  $X(n)$ 은 재고량에 대한 주변분포이다.

원 시스템과 *System 1*은 일대일 대응이 되므로, 위와 같은 독립성을 증명하기 위해서 원래의 시스템 대신 *System 1*을 분석한다. 우선  $V_+(t)$ 를 주문기간 내 시점  $t$ 에서의 잔여조달시간 (remaining lead time)이라 정의하고 다음의 세 확률을 정의하자.

$$\Psi_n^R(x, t) = Pr[N(t) = n, I^{dual}(t) \leq x, \xi(t) = 0],$$

$$(n = 0, 1, 2, \dots, 0 \leq x \leq d),$$

$$\tilde{\Psi}_n^D(x, w, t)dw = Pr[N(t) = n, I^{dual}(t) \leq x,$$

$$\xi(t) = 1, w < V_+(t) \leq w + dw],$$

$$(n = 0, 1, 2, \dots, w \geq 0, d < x < S),$$

$$\tilde{\Psi}_n^{UB}(w, t)dw = Pr[N(t) = n, I^{dual}(t) = S,$$

$$\xi(t) = 1, w < V_+(t) \leq w + dw],$$

$$(n = 0, 1, 2, \dots, w \geq 0).$$

$t \rightarrow \infty$ 를 취하면, 다음과 같은 안정상태 확률을 정의할 수 있다.

$$\Psi_n^R(x) = \lim_{t \rightarrow \infty} \Psi_n^R(x, t),$$

$$\tilde{\Psi}_n^D(x, w) = \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\Psi}_n^D(x, w, t),$$

$$\tilde{\Psi}_n^{UB}(w) = \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\Psi}_n^{UB}(w, t),$$

$$\psi_n^R(x) = \frac{d}{dx} \Psi_n^R(x),$$

$$\tilde{\psi}_n^D(x, w) = \tilde{\Psi}_n^D(x, w).$$

콜모고로프 전진방정식(Kolmogorov forward equation)을 이용하면 위의 안정상태 확률에 대한 다음과 같은 안정상태 방정식을 얻는다.

$$0 = -\lambda \Psi_0^R(0) + \int_0^S \tilde{\psi}_0^D(u, 0)du + \tilde{\Psi}_0^{UB}(0), \quad (2)$$

$$0 = \lambda \Psi_{n-1}^R(0) - (\lambda + \mu) \Psi_n^R(0)$$

$$+ \int_0^S \tilde{\psi}_n^D(u, 0)du + \tilde{\Psi}_n^{UB}(0), \quad (3)$$

$$(n = 1, 2, \dots),$$

$$0 = -\lambda\psi_0^R(x) + \mu \left[ \Psi_1^R(0)h(x) + \int_0^x \psi_1^R(y)h(x-y)dy \right], \quad (0 < x \leq d), \quad (4)$$

$$0 = \lambda\psi_{n-1}^R(x) - (\lambda + \mu)\psi_n^R(x) + \mu \left[ \Psi_{n+1}^R(0)h(x) + \int_0^x \psi_{n+1}^R(y)h(x-y)dy \right], \quad (n = 1, 2, \dots, 0 < x \leq d), \quad (5)$$

$$-\frac{\partial}{\partial w} \tilde{\psi}_0^D(x, w) = -\lambda\tilde{\psi}_0^D(x, w) + \mu \left[ \left[ \Psi_1^R(0)h(x) + \int_0^d \psi_1^R(y)h(x-y)dy \right] v(w) + \int_d^x \tilde{\psi}_1^D(y, w)h(x-y)dy \right], \quad (w \geq 0, d < x < S), \quad (6)$$

$$-\frac{\partial}{\partial w} \tilde{\psi}_n^D(x, w) = \lambda\tilde{\psi}_{n-1}^D(x, w) - (\lambda + \mu)\tilde{\psi}_n^D(x, w) + \mu \left[ \left[ \Psi_{n+1}^R(0)h(x) + \int_0^d \psi_{n+1}^R(y)h(x-y)dy \right] v(w) + \int_d^x \tilde{\psi}_{n+1}^D(y, w)h(x-y)dy \right], \quad (n = 1, 2, \dots, w \geq 0, d < x < S), \quad (7)$$

$$-\frac{\partial}{\partial w} \tilde{\Psi}_n^{UB}(w) = \mu \left[ \Psi(0)[1 - H(S)] + \int_0^d \psi_{n+1}^R(y)[1 - H(S-y)]dy \right] v(w) + \mu \int_d^x \tilde{\psi}_{n+1}^D(y) [1 - H(S-y)]dy, \quad (n = 0, 1, 2, \dots, w \geq 0). \quad (8)$$

이제 System 2에 대하여 다음을 정의하자.

$$X^R(x) = \lim_{t \rightarrow \infty} Pr[I^{mod}(t) \leq x, \xi(t) = 0], \quad (0 \leq x \leq d),$$

$$\tilde{X}^D(x, w)dw = \lim_{t \rightarrow \infty} Pr[I^{mod}(t) \leq x, \xi(t) = 1, w < V_+(t) \leq w + dw], \quad (x \geq 0, d < x < S),$$

$$\tilde{X}^{UB}(w)dw = \lim_{t \rightarrow \infty} Pr[I^{mod}(t) = S, \xi(t) = 1, w < V_+(t) \leq w + dw], \quad (w \geq 0).$$

이를 이용하면 다음의 정리를 얻는다.

**정리 3.1** 일반적인 M/M/1 대기행렬의 고객수 확률을  $P_{M/M/1}(n) = \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n$ , ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) 라고 하면, System 1의 안정상태 결합분포는 다음과 같은 곱형태로 주어진다.

$$\Psi_n^R(x) = P_{M/M/1}(n) \cdot X^R(x), \quad (n = 0, 1, 2, \dots, 0 \leq x \leq d). \quad (9)$$

$$\tilde{\Psi}_n^D(x, w) = P_{M/M/1}(n) \cdot \tilde{X}^D(x, w), \quad (n = 0, 1, 2, \dots, w \geq 0, d < x \leq S). \quad (10)$$

$$\tilde{\Psi}_n^{UB}(w) = P_{M/M/1}(n) \cdot \tilde{X}^{UB}(w), \quad (N = 0, 1, 2, \dots, w \geq 0). \quad (11)$$

**증명.** 우선  $\chi^R(x) = (d/dx)X^R(x)$ 와  $\tilde{\chi}^D(x, w) = (d/dx)\tilde{X}^D(x, w)$ 를 정의하자. 그러면 System 2에 대하여 다음과 같은 안정상태 방정식을 얻는다.

$$0 = -\lambda X^R(0) + \int_0^S \tilde{X}^D(u, 0)du + \tilde{X}_0^{UB}(0), \quad (12)$$

$$0 = -\lambda \chi^R(x) + \lambda \left[ X^R(0)h(x) + \int_0^x \chi^R(y)h(x-y)dy \right], \quad (13)$$

$(0 < x \leq d),$

$$-\frac{\partial}{\partial w} \tilde{\chi}^D(x, w) = -\lambda \tilde{\chi}^D(x, w) + \lambda \left[ \left( X^R(0)h(x) + \int_0^d \chi^R(y)h(x-y)dy \right) v(w) + \int_d^x \tilde{\chi}^D(y, w)h(x-y)dy \right], \quad (14)$$

$(w \geq 0, d < x \leq S),$

$$-\frac{\partial}{\partial w} \tilde{X}^{UB}(w) = \lambda \left( X^R(0)[1-H(S)] + \int_0^d \chi^R(y)[1-H(S-y)]dy \right) v(w) + \lambda \int_d^x \tilde{\chi}^D(y, w)[1-H(S-y)]dy, \quad (15)$$

$(w \geq 0).$

이제 식 (9)-(11)을 (2)-(8)에 대입하면 (12)-(15)를 얻는다.  $\square$

정리 3.1의 확률적인 의미는 다음과 같다.

**관찰 3.1** 안정상태에서  $Q_1$ 과정의 고객수분포와 재고량의 분포는 독립이며, 결합확률분포는 각 주변확률분포의 곱으로 나타낼 수 있다.

**관찰 3.2** 고객수과정의 주변확률분포는 일반적인 M/M/1 대기행렬의 고객수분포와 같으며, 재고량의 주변확률분포는 System 2의 그것과 동일하다. 따라서  $Q_2$ 과정의 재고량에 대한 안정상태 분포를 유도하면  $Q_1$ 과정의 결합확률을 완벽하게 유도할 수 있다.

### 3.2 System 2 분석

이제 식 (9)-(11)을 완성하기 위해 System 2에

대한 재고량분포를 유도한다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 System 2는 서비스시간이 0이기 때문에 일반기간  $L_R$ 과 주문기간  $L_D$ 로 구성된 주기  $C$ 의 재생성과정이다. 우선,  $E(L_D) = E(V)$ 임을 쉽게 알 수 있다. 일반기간의 경우 재고량이 0에서 처음으로  $d = S - s$ 를 넘길 때까지의 시간이므로 재생과정의 성질을 이용하여 다음을 얻는다.

$$E(L_R) = \lambda^{-1}[1 + M(d)]. \quad (16)$$

여기서,  $M(x) = \sum_{n=1}^{\infty} H^{(n)}(x)$ 로 IID  $H$ 로 이루어진 재생과정의 재생함수(renewal function)이다. 따라서  $E(C)$ 는 다음과 같다.

$$E(C) = E(L_R) + E(L_D) = \lambda^{-1}[1 + M(d)] + E(V). \quad (17)$$

#### 3.2.1 일반기간 분석

$X^R(x)$ 를 유도하기 위해  $M(x)$ 에 대한 재생밀도함수  $m(x) = (d/dx)M(x) = \sum_{n=1}^{\infty} h^{(n)}(x)$ 를 정의하자. 그러면 다음의 정리를 얻는다.

**정리 3.2** System 2의 일반기간에 대해 다음이 성립한다.

$$X^R(0) = \frac{1}{\lambda E(C)} = \frac{1}{1 + M(d) + \lambda E(V)}, \quad (18)$$

$$\chi^R(x) = \frac{m(x)}{\lambda E(C)} = \frac{m(x)}{1 + M(d) + \lambda E(V)}. \quad (19)$$

**증명.** 식 (13)을 정리하면 다음을 얻는다.

$$\chi^R(x) = X^R(0)h(x) + \int_0^x \chi^R(x-y)h(y)dy, \quad (20)$$

$(0 < x \leq d).$

식 (20)은 재생형태방정식이므로 다음과 같은 유일해를 갖는다.



$$\begin{aligned} \chi^R(x) &= X^R(0) \left[ h(x) + \int_0^x h(x-y)m(y)dy \right] \\ &= X^R(0) \cdot m(x), \end{aligned} \quad (21)$$

(0 < x ≤ d).

또한 식 (12)로부터 다음을 얻는다.

$$X^R(0) = \frac{1}{\lambda} \left[ \int_0^S \chi^D(u, 0)du + X_0^{UB}(0) \right]. \quad (22)$$

여기서,  $\left[ \int_0^S \chi^D(u, 0)du + X_0^{UB}(0) \right]$ 는 단위 시간당 사이클 발생횟수를 나타내므로 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned} \int_0^S \chi^D(u, 0)du + X_0^{UB}(0) & \\ &= \frac{1}{E(C)} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{\lambda} [1 + M(d)] + E(V)}. \end{aligned} \quad (23)$$

식 (21)-(23)을 이용하면 식 (18)-(19)를 얻는다. □

### 3.2.2 주문기간 분석

주문기간 재고량의 안정상태 분포를 유도하기 위해서는 우선 임의의 주문기간 시작점에서의 재고량분포를 구해야 하며, 이는 다음과 같다.

**정리 3.3**  $U_d(x)$ , ( $d < x < S$ )를 임의의 주문기간 시작점에서 재고량이  $x$ 보다 작거나 같을 확률이라 하고,  $U_d^{UB} = U_d(S) - U_d(S-d)$ 로 정의하면 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned} u_d(x) &= \frac{d}{dx} U_d(x) \\ &= h(x) + \int_{y=0}^d m(y)h(x-y)dy, \end{aligned} \quad (24)$$

( $d < x < S$ ),

$$\begin{aligned} U_d^{UB} &= [1 - H(S)] \\ &+ \int_{y=0}^d m(y)[1 - h(S-y)]dy. \end{aligned} \quad (25)$$

**증명.** 식 (24)의 첫 번째 항  $h(x)$ 는 첫 고객이  $d$ 를 넘기는 재고량을 가지고 도착한 경우를 나타낸다. 두 번째 항은 누적된 재고량이  $y (< d)$ 인 상태에서 마지막 고객의 도착으로  $d$ 를 넘는 경우를 나타낸다. 주문기간의 시작은 이 두 가지 경우에 의해서만 일어나므로 식 (24)가 성립한다. 유사한 방법으로 식 (25)의 첫 항은 일반기간의 첫 고객이  $S$ 보다 큰 재고량을 가지고 도착하는 경우이고 (Fig. 4의 ㉞), 두 번째 항은 재고가 누적재고량이  $y (< d)$ 였다가 마지막 고객에 의해  $d$ 를 넘는 경우를 나타낸다 (Fig. 4의 ㉠). □

이제 다음을 정의하자.

$$\begin{aligned} \chi^D(x) &= \int_0^\infty \tilde{\chi}^D(x, w)dw, \quad (d < x < S), \\ X^{UB} &= \int_0^\infty \tilde{X}^{UB}(w)dw. \end{aligned}$$

또한,  $V_-(t)$ 를 IID  $V$ 로 이루어진 재생과정의 경과시간(backward recurrence time)이라 하면 다음을 얻는다.

$$V_-(t) = E(V)^{-1} \int_0^t [1 - V(x)]dx, \quad (t \geq 0).$$

$V_-(t)$ 를 이용하여 다음의 확률을 정의하자.

$$\Phi_n = \int_0^\infty \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} dV_-(t), \quad (n = 0, 1, 2, \dots).$$

이로부터 다음의 정리를 얻는다.

**정리 3.4.** 주문기간의 안정상태 재고량에 대해 다음이 성립한다.

$$\chi^D(x) = \frac{E(V)}{E(C)} \left[ u_d(x)\Phi_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \int_{y=d}^x u_d(y)\Phi_n h^{(n)}(x-y)dy \right], \quad (26)$$

$(d < x < S),$

$$X^{UB}(x) = \frac{E(V)}{E(C)} \left[ U_d^{UB} + \sum_{n=1}^{\infty} \int_{y=d}^S u_d(y)\Phi_n [1 - H^{(n)}(S-y)]dy \right]. \quad (27)$$

**증명.**  $E(V)/E(C)$ 는 System 2의 안정상태 임의 시점에 주문기간을 관찰할 확률이다. 이제 주문기간 임의시점에서의 재고량의 분포는 주문기간 시작점에서의 재고량에 조건을 취하여 구할 수 있다.

식 (26)에서 괄호 안의 첫 번째 항  $u_d(x)\Phi_0$ 은 경과시간 동안 고객의 도착이 없는 경우이고, 두 번째 항은 고객이 한 명 이상 도착하는 경우이다. 두 번째 항은 누적재고량이  $y(< x)$ 였다가 경과조달기간 동안 도착하는 고객들이  $(x-y)$ 만큼의 재고량을 갖고 오는 상황을 나타낸다.

식 (27) 역시 식 (26)과 유사한 방법으로 증명할 수 있다. 괄호 안의 첫째 항은 주문기간이 시작점에 이미 재고량이  $S$ 인 경우를 나타내고(이 경우 이후 고객은 유실), 두 번째 항은 재고량의  $y$ 만큼 누적되어 있다가 도착하는 고객들에 의해  $(S-y)$  이상의 재고량이 추가되는 경우를 나타낸다. □

### 3.3 성능척도 계산

System 1의 고객수과정은 원 시스템의 고객수 과정과 같다. 또한 System 1의 안정상태 고객수분포는 재고량분포와 서로 독립이고, 일반적인 M/M/1 대기행렬의 고객수확률과 같으므로 원래 과정의 안정상태하의 평균고객수  $E(N)$ 은 다음과 같다.

$$E(N) = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}. \quad (28)$$

원 시스템의 평균재고량  $E(I)$ 는 식 (18)-(19),

(26)-(27) 및  $d = S - s$ 임을 이용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E(I) &= S \cdot X^R(0) + \int_0^d (S-x) \cdot \chi^R(x)dx \\ &\quad + \int_d^S (S-x) \cdot \chi^D(x)dx \\ &= S \cdot (1 - X^{UB}) - \int_0^d x \cdot \chi^R(x)dx \\ &\quad - \int_d^S x \cdot \chi^D(x)dx \\ &= S \cdot (1 - X^{UB}) \\ &\quad - \left( d \cdot X^R(d) - \int_0^d X^R(x)dx \right) \\ &\quad - \left( S \cdot X^D(S) - \int_d^S X^D(x)dx \right) \\ &= S \cdot \frac{E(L_R)}{E(C)} - d \cdot \frac{E(L_R)}{E(C)} \\ &\quad + \int_0^d X^R(x)dx + \int_d^S X^D(x)dx \\ &= s \cdot \frac{E(L_R)}{E(C)} \\ &\quad + \int_0^d X^R(x)dx + \int_d^S X^D(x)dx \\ &= \frac{S + sM(S-s) + \int_0^{S-s} M(x)dx}{1 + M(S-s) + \lambda E(V)} \\ &\quad + \int_{S-s}^S X^D(x)dx, \end{aligned} \quad (29)$$

여기서,

$$X^D(x) = \frac{E(V)}{E(C)} \left[ U_d(x)\Phi_0 + \sum_{n=1}^x \int_{y=d}^x u_d(y)\Phi_n H^{(n)}(x-y)dy \right], \quad (30)$$

$(S-s < x < S),$

$$\begin{aligned} U_d(x) &= [H(x) - H(S-s)] \\ &\quad + \int_{y=0}^{S-s} m(y)[H(x-y) \\ &\quad \quad - H(S-s-y)]dy \\ &= H(x) + \int_{y=0}^{S-s} m(y)H(x-y)dy \\ &\quad - M(S-s), \end{aligned} \quad (31)$$

$(S-s < x < S)$

이다.

#### 4. 비용분석 모형 및 수치예

본 장에서는 제안된 모형에 대한 비용분석 모형을 보인다. 이를 위해 다음과 같은 비용을 정의한다.

- 1) 재고유지비용 ( $c_H$ ) : 단위 시간당 단위 재고를 유지하는데 필요한 비용
- 2) 주문비용 ( $c_O$ ) : 재고를 발주할 때 드는 비용 (사이클 당 비용, Fig. 2의 ㉑, ㉒)
- 3) 판매상실비용 ( $c_L$ ) : 판매상실 비용 (유실 고객 당 비용, Fig. 2의 빨간 화살표)
- 4) 재고부족비용 ( $c_D$ ) : 재고요구량 부족으로 발생하는 비용 (횟수 당 발생 비용, Fig. 2의 ㉓)
- 5) 대기비용 ( $c_W$ ) : 대기고객에 의해 발생하는 비용

이제 이를 이용하여 Schwarz et al.[11]과 유사한 단위 시간당 평균운용비용함수  $C(s, S)$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$C(s, S) = c_H \cdot E(I) + c_O \cdot \frac{1}{E(C)} + \lambda \cdot c_L \cdot X^{UB} + c_D \cdot \frac{P_D}{E(C)} + L_{M/M/1} \cdot c_W \quad (32)$$

여기서  $P_D$ 는 Fig. 4의 ㉑와 같은 초과소요(overflow)가 발생할 확률이며, 원래 시스템에서의  $P_D$ 는 Fig. 3의 ㉓와 같은 재고 부족 상황이 발생할 확률이다. 이는 사이클 당 최대 한번 발생할 수 있으므로  $P_D/E(C)$ 는 초과소요의 단위 시간당 발생횟수를 나타낸다.

$P_D$ 를 유도하기 위해 정리 3.4에서 사용한 방법을 적용하면 다음을 얻는다.

$$P_D = U_d^{UB} + \sum_{n=1}^{\infty} \int_{y=d}^S u_d(y) V_n [1 - H^{(n)}(S-y)] dy \quad (33)$$

여기서,  $V_n = \int_0^{\infty} \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} dV(t)$ , ( $n=0,1,2, \dots$ )은 조달시간동안 도착하는 고객이  $n$ 명일 확률이다.

식 (29)와 (30)은  $m(x)$ 과  $M(x)$ 에 대한 함수로 주어지므로 계산이 쉽지 않다. 재고요구량  $H$ 의 분포가 지수분포, 얼랑(Erlang)분포 및 초지수(hyper-exponential)분포를 따르는 특별한 경우에 대한 예시를 들기로 한다.

먼저  $H$ 가 평균  $1/\beta$ 인 지수분포를 따르면 확률밀도함수는  $h(x) = \beta e^{-\beta x}$ 이며, 이 경우 재생밀도함수는 다음과 같다.

$$m(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta^n x^{n-1} e^{-\beta x}}{(n-1)!} = \beta$$

다음으로  $H \sim Erlang(2, \beta)$ 인 경우  $h(x) = (2\beta)^2 x e^{-2\beta x}$ 이며 재생함수는 다음과 같이 유도된다.

$$m(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2\beta)^{2n} x^{2n-1} e^{-2\beta x}}{(2n-1)!} = \beta(1 - e^{-4\beta x})$$

초지수분포의 경우 확률밀도함수와 재생함수는 다음과 같다.

$$h(x) = p\beta_1 e^{-\beta_1 x} + (1-p)\beta_2 e^{-\beta_2 x}, \quad (0 < p < 1)$$

$$m(x) = \frac{\beta_1 \beta_2 + p(1-p)(\beta_1 - \beta_2)^2 e^{-[(1-p)\beta_1 + p\beta_2]x}}{(1-p)\beta_1 + p\beta_2}$$

식 (32)의 비용함수  $C(s, S)$ 를 최소화하는 최적의  $(s^*, S^*)$ 를 유도하고  $H$ 와  $V$ 의 분산이 비용에 미치는 영향을 살펴보기 위해  $\lambda = 0.9$ ,  $\mu = 1$ 로 가정하였다. 재고요구량  $H$ 와 조달시간  $V$ 에 대한 분포, 평균 및 분산을 Table 1과 같이 정의하여 총 여섯 가지 경우를 고려하였다. 여기에 다음과 같은 네 가지 비용 설정을 하고 경우에 대한  $(s^*, S^*)$  및 최소 비용을 계산하였다.

Table 1 Distributions and Parameters for Virtual Systems

	Distribution	Mean	Variance
Stock Requirement $H$	Erlang	5	25/2
	Exp.	5	25
Lead Time $V$	Erlang	8	32
	Exp.	8	64
	H.E.	8	128

- 비용설정 1  
 $c_H = 1, c_O = 50, c_L = 500, c_D = 50, c_W = 3$
- 비용설정 2  
 $c_H = 1, c_O = 500, c_L = 500, c_D = 50, c_W = 3$
- 비용설정 3  
 $c_H = 5, c_O = 50, c_L = 500, c_D = 50, c_W = 3$
- 비용설정 4  
 $c_H = 1, c_O = 50, c_L = 1000, c_D = 50, c_W = 3$

여기서 비용설정 1에 대해 비용설정 2, 3, 4는 각각 주문비용, 재고유지비용, 판매상실비용을 높인 경우이다. 앞의 재고요구량  $H$ 와 조달시간  $V$ 의 분포에 따른 6가지 경우와 4개의 비용설정을 조합하면 총 24개의 설정이 나오게 된다. 이에 대한 최적의  $(s^*, S^*)$  및 해당 비용을 소수점 넷째 자리에서 반올림하여 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2의 결과로부터 다양한 결론의 도출이 가능하지만 본 논문에서는 대표적인 결론 두 가지를 보인다. 첫째, 조달시간  $V$ 의 분산이 커질수록  $s^*$ 와  $S^*$ 의 차이가 증가하는 반면 재고요구량  $H$ 의 분산이 미치는 영향은 미미하다. 둘째, 조달시간과 재고요구량의 분산이 클수록 운용비용이 증가한다.

이외에도 다양한 결론의 도출이 가능하며 본 논문에서 다루지는 않았으나 조달시간의 평균 및 분산이  $s^*$ 와  $S^*$ , 그리고 총비용에 큰 영향을 미치는 것으로 드러났다.

Table 2 Optimal Values for Virtual Systems under Various Cost Coefficient Settings

Cost setting	Dist. of $H$	Dist. of $V$	$s^*$	$S^*$	Optimal Cost	$S^* - s^*$
1	Erlang	Erlang	21.424	27.868	40.611	6.444
		Exp.	19.979	31.018	43.768	11.040
		H.E.	14.895	34.261	47.011	19.366
	Exp.	Erlang	21.723	28.170	42.170	6.651
		Exp.	19.723	30.903	44.903	11.180
		H.E.	11.590	34.547	48.547	22.958
2	Erlang	Erlang	12.117	44.406	57.156	32.289
		Exp.	10.701	45.927	58.677	35.226
		H.E.	8.201	47.213	59.963	39.011
	Exp.	Erlang	11.420	43.975	57.975	32.555
		Exp.	9.911	45.267	59.267	35.355
		H.E.	6.378	46.557	60.557	40.179
3	Erlang	Erlang	10.400	10.809	80.540	0.410
		Exp.	6.266	11.171	83.561	4.904
		H.E.	2.915	11.460	85.056	8.545
	Exp.	Erlang	9.327	9.327	80.430	0.000
		Exp.	4.777	9.777	82.884	5.000
		H.E.	0.781	9.985	83.923	9.204
4	Erlang	Erlang	28.386	34.254	46.991	5.868
		Exp.	28.454	39.494	52.243	11.039
		H.E.	22.998	46.217	58.967	23.219
	Exp.	Erlang	29.504	35.517	49.517	6.013
		Exp.	28.989	40.169	61.608	11.180
		H.E.	19.815	47.608	61.608	27.792

## 5. 결론 및 연구과제

본 연구는 연속형 내부재고를 갖는 M/M/1 대기행렬모형을 분석하고 성능척도들을 유도하였다. 재고운용정책은 조달시간이 일반분포를 따르는  $(s, S)$ -정책을 따른다고 가정하였으며, 재고가 없을 때 도착하는 고객은 바로 시스템을 이탈하는 판매상실을 가정하였다. 시스템의 분석을 위해 두 가지 변조된 시스템을 정의하고 이를 분석하여 고객수와 재고량의 안정상태 결합분포를 유도하였으며 평균 비용을 포함한 다양한 성능척도들을 도출하였다.

추후 연구과제로는 더욱 사실적인 시스템을 묘사하기 위한 다양한 일반화를 시도해야 할 것이다. 먼저 고객의 행태에 대한 일반화이다. 일반적으로 고객들은 시스템 내부 상황을 모르기 때문에 재고가 없어도 시스템을 바로 이탈하지 않을 수 있다. 따라서 판매상실을 고객의 의지에 따라 확률적으로 일어나도록 하는 것도 하나의 일반화 방법일 것이다. 다음으로 재고의 종류에 대한 일반화이다. 본 연구에서는 단일 품목만을 고려했지만 3D 프린팅과 같은 경우 다양한 재료를 제공하기 때문에 이를 반영한다면 보다 현실적인 모형이 될 것이다. 또한  $(s, S)$ -정책 이외의 추가적인 재고운영정책을 고려할 수 있을 것이다. 대기행렬의 측면에서는 당연히 도착 및 서비스시간의 일반화가 필수적일 것이며, 서비스시간과 재고요구량의 종속성, 즉 서비스를 오래 받으면 그만큼 재고도 많이 사용하게 되는 상황도 고려해야 할 것이다. 이와 같은 일반화는 분석상의 어려움을 증가시키지만 현실 시스템을 보다 사실적으로 모델링하기 위해 중요하다 할 수 있을 것이다.

## References

- [1] Baek, J. W., Moon, S. K., "The M/M/1 Queue with a Production-Inventory System and Lost Sales," Applied Mathematics and Computation, Vol. 233, pp. 534-544, 2014.
- [2] Baek, J.W., Bae, Y.H., Lee, H.W. and Ahn, S., "Continuous-type  $(s, Q)$ -inventory Model with an Attached M/M/1 Queue and Lost Sales," Performance Evaluation, Vol. 125, pp. 68-79, 2018.
- [3] Barron Y., Hermel D., "Shortage Decision Policies for a Fluid Production Model with Map Arrivals," International Journal of production Research, Vol. 55, pp. 3946-3969, 2017.
- [4] Berman, O, Kim, E., "Stochastic Models for Inventory Management at Service Facilities," Stochastic Models, Vol. 15, No. 4, pp. 695-718, 1999.
- [5] Berman, O, Sapna, K., "Inventory Management at Service Facilities for Systems with Arbitrarily Distributed Service Times," Stochastic Models, Vol. 16, No. 3&4, pp. 343-360, 2000.
- [6] Berman, O., Kaplan, E. H., Shevishak, D. G., "Deterministic Approximations for Inventory Management at Service Facilities," IIE Transactions, Vol. 25, No. 5, pp. 98-104, 1993.
- [7] Bozer, Y. A., McGinnis, L. F., "Kitting Versus Line Stocking: A Conceptual Framework and a Descriptive Model," International Journal of Production Economics, Vol. 28, No. 1, pp. 1-19, 1992.
- [8] Brynzer, H., Johansson, M. I., "Design and Performance of Kitting and Order Picking Systems," International Journal of production economics, Vol. 41, No. 1, pp. 115-125, 1995.
- [9] Harrison, J. M., "Assembly-like Queues," Journal of Applied Probability, pp. 354-367, 1973.
- [10] He, Q.-M., Jewkes, E., "Performance Measures of a Make-to-Order Inventory-Production System," IIE Transactions, Vol. 32, No. 5, pp. 409-419, 2000.

[11] Krishnamoorthy, A., Lakshmy, B., Manikandan, R., "A Survey on Inventory Models with Positive Service Time," OPSEARCH, Vol. 48, No. 2, pp. 153-169, 2011.

[12] Krishnamoorthy, A., Narayanan, V. C., "Production Inventory with Service Time and Vacation to the Server," IMA Journal of Management Mathematics, Vol. 22, No. 1, pp. 33-45, 2011.

[13] Krishnamoorthy, A., Viswanath, N. C., "Stochastic Decomposition in Production Inventory with Service Time," European Journal of Operational Research, Vol. 228, No. 2, pp. 358-366, 2013.

[14] Lipper, E., Sengupta, B., "Assembly-like Queues with Nite Capacity: Bounds, Asymptotics and Approximations," Queueing Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 67-83, 1986.

[15] Marand A.J., Li H., Thorstenson A., "Joint Inventory Control and Pricing in a Service-Inventory System," International Journal of Production Economics, 10.1016/j.ijpe.2017.07.008, 2017.

[16] Saffari, M., Asmussen, S., Haji, R., "The M/M/1 Queue with Inventory, Lost Sale, and General Lead Times," Queueing Systems, Vol. 75, No. 1, pp. 65-77, 2013.

[17] Schwarz, M., Daduna, H., "Queueing Systems with Inventory Management with Random Lead Times and with Backordering," Mathematical Methods of Operations Research, Vol. 64, No. 3, pp. 383-414, 2006.

[18] Schwarz, M., Sauer, C., Daduna, H., Kulik, R., Szekli, R., "M/M/1 Queueing Systems with Inventory," Queueing Systems, Vol. 54, No. 1, pp. 55-78, 2006.

[19] Schwarz, M., Wichelhaus, C., Daduna, H., "Product Form Models for Queueing Networks with an Inventory," Stochastic Models, Vol. 23, No. 4, pp. 627-663, 2007.



**박진수 (Park Jinsoo)**

- 정회원
- 성균관대학교 산업공학과 학사
- 성균관대학교 산업공학과 석사
- 성균관대학교 산업공학과 박사
- 용인대학교 경영정보학과 조교수
- 관심분야 : 대기행렬시스템, 정보시스템, 수요 예측, 시물레이션



**이현근 (Lee Hyeon Geun)**

- 조선대학교 산업공학과 학사과정
- 관심분야 : 경영과학, 품질공학



**김종현 (Kim Jong Hyeon)**

- 조선대학교 산업공학과 학사과정
- 관심분야 : 경영과학, 품질공학



**윤은혁 (Yun Eun Hyeuk)**

- 조선대학교 산업공학과 학사과정
- 관심분야 : 경영과학, 품질공학



**백정우 (Baek Jung Woo)**

- 정회원
- 성균관대학교 산업공학과 학사
- 성균관대학교 산업공학과 석사
- 성균관대학교 산업공학과 박사
- 조선대학교 산업공학과 조교수
- 관심분야 : 대기행렬시스템, 확률모형, 경영과학