

## 예방 관리 기능을 갖는 시스템의 가용도 분석

이유태\*

### Availability Analysis of a System with Preventive Maintenance

Yutae Lee\*

\*Professor, Department of Information and Communications Engineering, Dong-eui University, Busan, 47340 Korea

#### 요 약

노화에 의한 시스템의 예기치 않은 장애 발생은 예방 관리 기능을 수행함으로써 줄일 수 있으며, 이를 통해 시스템의 가용도를 높일 수 있다. 예방 관리 기법은 크게 시간 기반과 조건 기반의 두 가지로 나눌 수 있다. 시간 기반 방식은 정해진 시간 간격마다 수행되고, 조건 기반 방식은 시스템 상태가 특정 조건을 만족할 때 수행된다. 조건 기반 방식은 시간 기반 방식과 비교했을 때 예방 관리의 효율성을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 본 논문은 노화 상태에서 일정 시간이 지난 후 예방 관리를 수행하게 되는 시스템을 분석할 수 있는 확률 모형을 제시한다. 제시한 모형은 현실적인 상황을 반영하여 비 마르코비안 모형으로 모델링한다. 해당 확률 모형을 수학적으로 해석하여 정상 상태에서의 시스템 가용도와 수익을 분석한다.

#### ABSTRACT

Performing preventive maintenance on a system reduces unexpected downtime caused by system aging and increases its availability. In general, preventive maintenance can be largely divided into two broad categories: time-based maintenance policy and condition-based maintenance policy. In the time-based maintenance policy the preventive maintenance is triggered at scheduled time epochs with fixed time intervals, while in the condition-based maintenance policy the preventive maintenance is performed when system state is checked to satisfy a specific condition. Condition-based maintenance has some benefits in improving maintenance efficiency, compared to time-based one. This paper presents a stochastic model for analyzing a system with condition-based preventive maintenance, where the preventive maintenance is performed after a random time since the system aging occurs, and provides an analytical solution for the steady-state availability and the corresponding profit.

**키워드** : 가용도, 예방 관리, 수익, 노화, 수학적 분석

**Keywords** : Availability, Preventive maintenance, Profit, Aging, Mathematical analysis

Received 19 May 2019, Revised 4 June 2019, Accepted 4 June 2019

\* Corresponding Author Yutae Lee(E-mail:ylee@deu.ac.kr, Tel:+82-51-890-1682)

Professor, Department of Information and Communications Engineering, Dong-eui University, Busan, 47340 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2019.23.7.869>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서론

정상 상태에서 일정한 장애 발생률에 따라 장애가 발생하고 이 후 복구가 이루어지는 시스템은 많은 연구자에 의해 연구되어오고 있다[1]. 하지만, 정상 상태에서 바로 장애가 발생하기도 하지만, 실제 많은 상황에서는 장애가 발생하기 전에 성능이 떨어지는 노화 상태를 거치게 된다.

소프트웨어 노화는 오류의 축적 또는 자원 고갈 등에 의해 발생될 수 있는데, 이는 시스템의 성능 저하와 노화 관련 장애를 일으킨다[2-3]. 최근에 소프트웨어의 규모가 급격히 커지고 복잡해짐에 따라, 노화 현상은 다양한 시스템에서 중요하게 다뤄지고 있다[2-3].

재활 등과 같은 예방 관리 기법은 노화에 의해 발생하는 성능 저하와 시스템 장애를 줄여준다[2,4,5]. 재활은 시스템을 멈추고 적합한 관리 후에 안정 상태에서 재가동하는 개념으로, 크게 시간 기반과 조건 기반의 두 가지 종류로 나눌 수 있다[4]. 시간 기반 방식은 정해진 시간 간격마다 수행되고, 조건 기반 방식은 시스템 상태가 특정 조건을 만족할 때 수행된다[6]. 조건 기반 방식은 시간 기반 방식과 비교했을 때 예방 관리의 효율성을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 노화 상태에 도달한 후 얼마간의 시간이 지난 다음 예방 관리에 들어가는 시스템을 다룬다.

Huang 등은 소프트웨어 재활이라는 예방 관리 기법에 관한 수학적 모형을 처음으로 제안하여 이 기법이 시스템 장애로 인한 비용을 줄일 수 있다는 것을 보였다[3]. 또한 노화가 진행되는 환경에서 서비스 완료 시간도 줄일 수 있음을 보였다. 예방 관리 기법을 수학적 모형을 통해 분석하는 연구는 사용되는 확률 과정에 따라 구분할 수 있다[2]. 논문 [3]는 재활을 마르코프 체인으로 모델링하였다. 이는 재활 현상을 모델링하는 기본 모형으로 사용되고 있다. 시간 기반 방식에 관한 대부분의 연구가 마르코프 과정을 도입했지만, 마르코프 재생 과정을 이용하여 일정한 시간마다 예방 관리를 수행하는 시스템을 다룬 연구도 있다[4,7,8]. Kadyan은 일종의 조건 기반 재활 방식을 다루었다[9]. 논문 [9]는 수치 결과로써 마르코비안 가정 아래에서 다양한 성능을 계산하였다. 논문 [10]에서는 논문 [9]에서의 몇 가지 오류를 지적하고 마르코비안 가정 아래에서 간단한 수치 결과를 제공하여 논문 [9]의 결과와 비교하였다.

본 논문에서는 노화 상태에서 예방 관리를 수행하는 시스템의 가용도 및 수익을 비 마르코비안 환경에서 분석한다. 시스템은 정상 상태에서 바로 장애가 발생할 수도 있고 장애가 발생하기 전에 노화 상태에 들어갈 수도 있다. 노화 상태에서는 일정 시간 후 예방 관리를 수행할 수도 있고 그 전에 장애가 발생할 수도 있다. 상태 변화가 일어날 때까지의 시간이 모두 일반적인 분포를 가진다고 가정하고 세미 마르코프 과정을 이용하여 분석한다.

## II. 모형

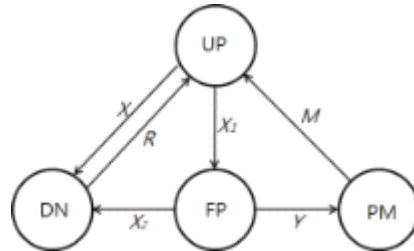


Fig. 1 State transition diagram

그림 1은 본 논문에서 다루는 시스템의 상태천이도를 나타낸다. 시스템 상태를 정상 상태 UP, 노화 상태 FP, 장애 상태 DN, 예방 관리 상태 PM으로 나눈다. 모든 상태 천이 시간은 일반적인 확률분포를 따른다. 정상 상태 UP에서 장애 상태 DN으로 천이하는 데 걸리는 시간을 확률변수  $X$ , 정상 상태 UP에서 노화 상태 FP로 천이하는 데 걸리는 시간을 확률변수  $X_1$ , 노화 상태 FP에서 장애 상태 DN으로 천이하는 데 걸리는 시간을 확률변수  $X_2$ 라 하자. 장애 복구 시간을 확률변수  $R$ 로, 노화 상태에서 예방 관리에 들어가기까지 걸리는 시간을 확률변수  $Y$ , 예방 관리 시간을 확률변수  $M$ 이라 하자. 시스템은 정상 상태 UP에서 장애 발생에 의해 장애 상태 DN에 있게 될 수도 있고, 노화에 의해 노화 상태 FP에 있게 될 수도 있다. 노화 상태 FP에 있는 시스템은 얼마간의 시간 후 예방 관리에 들어갈 수도 있고, 그 전에 장애가 발생해서 장애 상태 DN에 있게 될 수도 있다. 시스템은 장애 상태에서 장애가 복구되거나 예방 관리 상태에서 예방 관리가 끝나게 되면, 정상 상태로 돌아간다. 확률변수  $X, X_1, X_2, R, Y, M$ 은 일반적인 분포를 따르

며, 이 확률변수의 누적분포함수를 각각  $F_X(x)$ ,  $F_{X_1}(x)$ ,  $F_{X_2}(x)$ ,  $F_R(x)$ ,  $F_Y(x)$ ,  $F_M(x)$ 라 하자.

또한 수의 분석을 위해서, 정상 상태나 노화 상태에서의 시간 당 수익을 상수  $C_0$ 로 나타내고, 시간 당 복구비용을 상수  $C_1$ 으로, 시간 당 예방 관리 비용을 상수  $C_2$ 로, 장애 상태나 예방 관리 상태에 들어갈 때마다 소요되는 건 당 비용을 상수  $C_3$ 로 나타내자.

### III. 가용도 및 수익 분석

시각  $t$ 에서의 시스템 상태를 나타내는 확률 과정  $\{S(t); t \geq 0\}$ 을 다음과 같이 정의하자: 시각  $t$ 에서 시스템이 정상 상태 UP에 있으면  $S(t) = 0$ 이고, 노화 상태 FP에 있으면  $S(t) = 1$ 이고, 장애 상태 DN에 있으면  $S(t) = 2$ 이고, 예방 관리 상태 PM에 있으면  $S(t) = 3$ 이다. 시스템 상태가 바뀌는 시점을 원소로 하는 집합을  $\{t_n; n = 1, 2, \dots\}$ 라 하면, 이 집합은 확률 과정  $\{S(t); t \geq 0\}$ 에 내재된 마르코프 시점이 된다. 확률 변수  $S_n$ 을  $S_n = S(t_n + 0)$ 으로 정의하면, 이 확률 과정  $\{S_n; n = 1, 2, \dots\}$ 는 마르코프 시점  $\{t_n; n = 1, 2, \dots\}$ 에 내재된 마르코프 체인이 된다. 확률 과정  $\{S(t); t \geq 0\}$ 은 세미 마르코프 과정이고  $S(t)$ 의 값은 마르코프 시점 사이에서 일정한 값으로 유지된다.

확률 과정  $\{S(t); t \geq 0\}$ 에서  $S(t)$ 가 상태  $i$ 에서 연속적으로 머무는 체류 시간의 누적 분포 함수를  $H_i(x)$ 라 하면, 이 누적 분포 함수는 다음과 같다:

$$H_0(x) = F_X(x) + F_{X_1}(x) - F_X(x)F_{X_1}(x), \quad (1)$$

$$H_1(x) = F_{X_2}(x) + F_Y(x) - F_{X_2}(x)F_Y(x), \quad (2)$$

$$H_2(x) = P(R \leq x) = F_R(x), \quad (3)$$

$$H_3(x) = P(M \leq x) = F_M(x). \quad (4)$$

세미 마르코프 과정  $\{S(t); t \geq 0\}$ 이 상태  $i$ 에서 머무는 평균 체류 시간  $\eta_i$ 는

$$\eta_i = \int_0^\infty [1 - H_i(x)] dx, \quad i = 0, 1, 2, 3, \quad (5)$$

이며, 다음과 같다:

$$\eta_0 = \int_0^\infty [1 - F_X(x)][1 - F_{X_1}(x)] dx, \quad (6)$$

$$\eta_1 = \int_0^\infty [1 - F_{X_2}(x)][1 - F_Y(x)] dx, \quad (7)$$

$$\eta_2 = E(R), \quad (8)$$

$$\eta_3 = E(M). \quad (9)$$

세미 마르코프 과정  $\{S(t); t \geq 0\}$ 이 상태  $i$ 에 있을 극한 확률  $p_i$ 는

$$p_i = \frac{\pi_i \eta_i}{\sum_{k=0}^3 \pi_k \eta_k}, \quad i = 0, 1, 2, 3, \quad (10)$$

으로 구할 수 있다. 여기서  $\{\pi_i; i = 0, 1, 2, 3\}$ 은 내재된 마르코프 체인  $\{S_n; n = 1, 2, \dots\}$ 의 극한 확률 분포이다.

식 (10)을 이용하여 극한 확률  $p_i$ 를 구하기 위해 내재된 마르코프 체인  $\{S_n; n = 1, 2, \dots\}$ 의 극한 확률 분포  $\{\pi_i; i = 0, 1, 2, 3\}$ 을 유도할 필요가 있다.  $S_n = 0$ 에서 확률 변수  $X$ 가  $X_1$ 보다 크면  $S_{n+1} = 1$ 로의 상태 천이가 일어나고, 그렇지 않으면  $S_{n+1} = 2$ 로의 상태 천이가 일어난다. 또한  $S_n = 1$ 에서 확률 변수  $X_2$ 가  $Y$ 보다 작거나 같으면  $S_{n+1} = 2$ 로의 상태 천이가 일어나고, 그렇지 않으면  $S_{n+1} = 3$ 으로의 상태 천이가 일어난다.  $S_n = 2$ 에서  $S_{n+1} = 0$ 으로의 상태 천이 확률과  $S_n = 3$ 에서  $S_{n+1} = 0$ 으로의 상태 천이 확률은 각각 1이다. 상태 천이 확률을  $p_{ij} = P(S_{n+1} = j | S_n = i)$ 라 하면,  $p_{ij}$ 는 다음과 같다:

$$p_{01} = \int_0^\infty F_{X_1}(x) dF_X(x), \quad (11)$$

$$p_{02} = 1 - \int_0^\infty F_{X_1}(x) dF_X(x), \quad (12)$$

$$p_{12} = 1 - \int_0^\infty F_Y(x) dF_{X_2}(x), \quad (13)$$

$$p_{13} = \int_0^\infty F_Y(x) dF_{X_2}(x), \quad (14)$$

$$p_{20} = 1, \quad (15)$$

$$p_{30} = 1. \quad (16)$$

이 상태 천이 확률을 사용하여 극한 확률 분포  $\{\pi_i; n = 0, 1, 2, 3\}$ 에 대한 다음 식을 얻을 수 있다:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \pi_0 \int_0^\infty F_{X_1}(x) dF_X(x), \\ \pi_2 &= \pi_0 \left[ 1 - \int_0^\infty F_{X_1}(x) dF_X(x) \int_0^\infty F_Y(x) dF_{X_2}(x) \right], \\ \pi_3 &= \pi_0 \int_0^\infty F_{X_1}(x) dF_X(x) \int_0^\infty F_Y(x) dF_{X_2}(x). \end{aligned}$$

극한 확률  $\pi_0$ 을  $\pi_0 + \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 = 1$ 로부터 계산하면,

$$\pi_0 = \frac{1}{2 + \int_0^\infty F_{X_1}(x) dF_X(x)} \quad (17)$$

이다. 따라서 극한 확률은 다음과 같다:

$$\pi_1 = \frac{\int_0^\infty F_{X_1}(x) dF_X(x)}{2 + \int_0^\infty F_{X_1}(x) dF_X(x)}, \quad (18)$$

$$\pi_2 = \frac{1 - \int_0^\infty F_{X_1}(x) dF_X(x) \int_0^\infty F_Y(x) dF_{X_2}(x)}{2 + \int_0^\infty F_{X_1}(x) dF_X(x)}, \quad (19)$$

$$\pi_3 = \frac{\int_0^\infty F_{X_1}(x) dF_X(x) \int_0^\infty F_Y(x) dF_{X_2}(x)}{2 + \int_0^\infty F_{X_1}(x) dF_X(x)}. \quad (20)$$

여기서 구한 극한 확률  $\pi_i$ 와 평균 체류 시간  $\eta_i$ 를 식 (10)에 대입하여 세미 마르코프 과정  $\{S(t); t \geq 0\}$ 의 극한 확률  $p_i$ 를 구할 수 있다.

정상 상태(steady state)에서의 가용도를  $Av$ , 시스템이 복구 중일 확률을  $B_R$ , 시스템이 예방 관리 중일 확률을  $B_P$ 라 하자. 확률 과정  $\{S(t); t \geq 0\}$ 의 극한 확률  $p_i$ 로부터  $Av, B_R, B_P$ 를 구하면, 다음과 같다:

$$Av = p_0 + p_1, \quad (21)$$

$$B_R = p_2, \quad (22)$$

$$B_P = p_3 \quad (23)$$

이제 단위 시간 당 장애 상태나 예방 관리 상태로 들어가는 평균 건 수  $N$ 을 고려한다. 상태  $i$ 에서 상태  $j$ 로 바뀌는데 걸리는 평균 시간을  $T_{ij}$ 라 하면, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다:

$$T_{02} = E(\min(X, X_1)) + P(X > X_1) T_{12}, \quad (24)$$

$$T_{12} = E(\min(X_2, Y)) + P(X_2 > Y) T_{32}, \quad (25)$$

$$T_{32} = E(M) + T_{02}, \quad (26)$$

$$T_{03} = E(\min(X, X_1)) + P(X \leq X_1) T_{23} + P(X > X_1) T_{13}, \quad (27)$$

$$T_{13} = E(\min(X_2, Y)) + P(X_2 \leq Y) T_{23}, \quad (28)$$

$$T_{23} = E(R) + T_{03}. \quad (29)$$

식 (24), (25), (26)로부터  $T_{02}$ 는

$$\begin{aligned} T_{02} &= \frac{1}{1 - P(X > X_1)P(X_2 > Y)} \times [E(\min(X, X_1)) \\ &+ P(X > X_1)\{E(\min(X_2, Y)) + P(X_2 > Y)E(M)\}] \end{aligned}$$

이고, 이로부터  $T_{22}$ 는

$$T_{22} = E(R) + T_{02} \quad (30)$$

가 된다. 이와 유사하게 식 (27), (28), (29)로부터  $T_{03}$ 은

$$\begin{aligned} T_{03} &= \frac{E(\min(X, X_1)) + P(X \leq X_1)}{P(X > X_1)P(X_2 > Y)} \\ &+ \frac{E(\min(X_2, Y)) + P(X_2 \leq Y)E(R)}{P(X_2 > Y)} \end{aligned}$$

이고, 이로부터  $T_{33}$ 은

$$T_{33} = E(M) + T_{03} \quad (31)$$

이 된다. 단위 시간 당 장애 상태나 예방 관리 상태로 들어가는 평균 건 수  $N$ 은

$$N = \frac{1}{T_{22}} + \frac{1}{T_{33}} \quad (32)$$

이다. 따라서 수익  $P$ 는 다음과 같다:

$$P = C_0 Av - C_1 B_R - C_2 B_P - C_3 N. \quad (33)$$

#### IV. 수치 해석

Table. 1 Parameter values

Cases	Parameter				
	1/E(X)	1/E(X <sub>1</sub> )	1/E(X <sub>2</sub> )	1/E(R)	1/E(M)
Case 1	0.13	0.17	0.21	2.1	2.7
Case 2	0.16	0.17	0.21	2.1	2.7
Case 3	0.13	0.20	0.21	2.1	2.7
Case 4	0.13	0.17	0.21	2.6	2.7
Case 5	0.13	0.17	0.21	2.1	3.7

본 절의 수치 해석에 사용되는 값은 표 1에 요약되어 있다. 시스템의 장애와 노화와 관련된 실제 파라미터는 자료의 특성상 확보하기 어렵기 때문에, 표1은 관련 문

헌[9]을 참고하였다. 본 수치해석을 위하여 2절에서 정의한 확률변수  $X, X_1, X_2, R, M$ 은 지수 분포를 따르고, 확률변수  $Y$ 는 지수 분포를 따르는 경우와 확정 (deterministic) 분포를 따르는 경우를 다룬다. 또한 논문 [9]에서처럼  $C_0 = 5,000, C_1 = 150, C_2 = 75, C_3 = 50$  이라 가정한다.

표 2와 표 3은 노화 상태에서 예방 관리에 들어갈 때 까지의 시간이 지수 분포와 확정 분포를 따르는 경우의 가용도와 수익을 각각 비교한다. 5가지 경우에 대해 확정 분포를 따르는 경우가 지수 분포를 따르는 경우보다 가용도와 수익이 높게 나오는 것을 알 수 있다. 분석의 편의를 위한 기존의 마르코비안 모형이 성능을 하향 추정하는 것을 알 수 있으며, 본 논문에서 제시한 비 마르코비안 모형의 중요성을 보여준다.

Table. 2 Steady-state availability

E(Y)	Case 1		Case 2		Case 3		Case 4		Case 5	
	Exponential	Deterministic	Exponential	Deterministic	Exponential	Deterministic	Exponential	Deterministic	Exponential	Deterministic
5	0.891564	0.917872	0.880701	0.910054	0.883569	0.915348	0.901317	0.930193	0.904315	0.921171
10	0.890324	0.924014	0.879323	0.916937	0.881995	0.922348	0.899959	0.936955	0.903512	0.925055
15	0.889891	0.925878	0.878842	0.919029	0.881444	0.924444	0.899485	0.939009	0.903231	0.926230
20	0.889671	0.926500	0.878597	0.919728	0.881163	0.925140	0.899244	0.939695	0.903088	0.926622
25	0.889537	0.926715	0.878449	0.919968	0.880992	0.925380	0.899098	0.939931	0.903001	0.926757
30	0.889448	0.926789	0.878349	0.920052	0.880878	0.925463	0.899000	0.940013	0.902943	0.926804
35	0.889383	0.926815	0.878278	0.920081	0.880796	0.925492	0.898929	0.940042	0.902902	0.926820
40	0.889335	0.926824	0.878224	0.920091	0.880735	0.925502	0.898876	0.940052	0.902870	0.926826
45	0.889297	0.926828	0.878183	0.920095	0.880687	0.925506	0.898835	0.940055	0.902846	0.926828
50	0.889267	0.926829	0.878149	0.920096	0.880648	0.925507	0.898802	0.940056	0.902826	0.926829

Table. 3 Profit

E(Y)	Case 1		Case 2		Case 3		Case 4		Case 5	
	Exponential	Deterministic	Exponential	Deterministic	Exponential	Deterministic	Exponential	Deterministic	Exponential	Deterministic
5	4438.409	4569.086	4381.791	4567.102	4397.360	4568.509	4488.635	4570.841	4503.005	4569.283
10	4432.073	4600.899	4374.719	4599.097	4389.323	4600.493	4481.695	4602.735	4498.881	4600.962
15	4429.861	4610.558	4372.250	4608.812	4386.508	4610.198	4479.272	4612.419	4497.441	4610.579
20	4428.735	4613.783	4370.994	4612.056	4385.074	4613.438	4478.039	4615.653	4496.707	4613.791
25	4428.053	4614.894	4370.233	4613.174	4384.204	4614.554	4477.292	4616.767	4496.263	4614.896
30	4427.596	4615.280	4369.723	4613.562	4383.621	4614.942	4476.791	4617.154	4495.965	4615.281
35	4427.268	4615.415	4369.357	4613.698	4383.202	4615.078	4476.432	4617.290	4495.751	4615.416
40	4427.021	4615.462	4369.081	4613.746	4382.887	4615.125	4476.162	4617.337	4495.590	4615.463
45	4426.829	4615.479	4368.867	4613.762	4382.642	4615.142	4475.951	4617.353	4495.465	4615.479
50	4426.674	4615.485	4368.695	4613.768	4382.445	4615.148	4475.782	4617.359	4495.365	4615.485

## V. 결론

본 논문에서는 예방 관리 기능을 수행하는 시스템의 분석 모형을 제시했다. 해당 시스템을 비 마르코비안 모형으로 모델링하여, 세미 마르코프 확률 과정으로 시스템의 가용도와 수익을 분석했다. 또한 수치 해석을 통하여, 노화 상태에서 예방 관리에 들어갈 때까지의 시간의 확률 분포가 가용도와 비용에 미치는 영향을 보여주었다. 본 논문을 통해 분석의 편의를 위한 기존의 마르코비안 모형이 성능을 하향 추정하는 것을 알 수 있었으며, 본 논문에서 제시한 비 마르코비안 모형의 중요성을 보여주고 있다.

### ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Dong-eui University Foundation Grant(2017) and by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (2017R1A2B1009504).

## REFERENCES

[ 1 ] J. Kumar, M. S. Kadyan, and S. C. Malik, "Cost-benefit analysis of a two-unit parallel system subject to degradation after repair," *Applied Mathematical Sciences*, vol. 4, no. 56, pp. 2749-2758, 2010.

[ 2 ] D. Cotroneo, R. Natella, R. Pietrantuono, and S. Russo, "A survey of software aging and rejuvenation studies," *ACM J. on Emerging Technologies in Computing Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 1-34, Jan. 2014.

[ 3 ] Y. Huang, C. Kintala, N. Kolettis, and N. D. Fulton, "Software rejuvenation: analysis, module and applications," in *Proceeding of the 25th International Symposium on Fault-Tolerant Computing*, Pasadena: CA, pp. 381-390, Jun. 1995.

[ 4 ] H. Ryu, J. Shim, H. Ryu, and Y. Lee, "Analysis of redundant system with rejuvenation for high availability of networking service," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 20, no. 9, pp. 1717-1722, Sep. 2016.

[ 5 ] V. P. Koutras, and A. N. Platis, "User-perceived availability of a software rejuvenation model with recovery time omission," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 32, pp. 1521-1533, Aug. 2016.

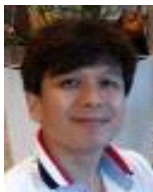
[ 6 ] T. Dohi, and H. Okamura, "Dynamic software availability model with rejuvenation," *Journal of the Operations Research Society of Japan*, vol. 59, no. 4, pp. 270-290, Oct. 2016.

[ 7 ] S. Garg, A. Puliafito, M. Telek, and K. S. Trivedi, "Analysis of preventive maintenance in transactions based software systems," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 47, no. 1, pp. 96-107, Jan. 1998.

[ 8 ] Y. Lee, and H. Kim, "Availability analysis of systems with time-based software rejuvenation," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 23, no. 2, pp. 399-406, Feb. 2019.

[ 9 ] M. S. Kadyan, "Reliability and profit analysis of a single-unit system with preventive maintenance subject to maximum operation time," *Maintenance and Reliability*, vol. 15, no. 2, pp. 176-181, 2013.

[ 10 ] Y. Lee, "Availability analysis of a Markovian system with preventive maintenance," *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 5, no. 1, pp. 54-55, Jan. 2018.



이유태(Yutae Lee)

2001년 3월-현재 동의대학교 정보통신공학과 교수  
1998년 3월-2001년 2월 한국전자통신연구원 선임연구원  
1997년 8월 한국과학기술원 수학과 이학박사  
※관심분야: 신뢰도 분석, 큐잉 이론, 빅데이터