

# Developing a Decision-Making Model to Determine the Preventive Maintenance Schedule for the Leased Equipment

Ju-hyun Lee · Ki-ho Bae · Sun-eung Ahn<sup>†</sup>

Department of Industrial Management Engineering, Hanyang University ERICA campus

## 대여 장비의 예방정비 일정 결정을 위한 의사 결정 모델 개발

이주현 · 배기호 · 안선웅<sup>†</sup>

한양대학교 산업경영공학과

As a system complexity increases and technology innovation progresses rapidly, leasing the equipment is considered as an important issue in many engineering areas. In practice, many engineering fields lease the equipment because it is an economical way to lease the equipment rather than to own the equipment. In addition, as the maintenance actions for the equipment are costly and need a specialist, the lessor is responsible for the maintenance actions in most leased contract. Hence, the lessor should establish the optimal maintenance strategy to minimize the maintenance cost. This paper proposes two periodic preventive maintenance policies for the leased equipment. The preventive maintenance action of policy 1 is performed with a periodic interval, in which their intervals are the same until the end of lease period. The other policy is to determine the periodic preventive maintenance interval minimizing total maintenance cost during the lease period. In addition, this paper presents two decision-making models to determine the preventive maintenance strategy for leased equipment based on the lessor's preference between the maintenance cost and the reliability at the end of lease period. The structural properties of the proposed decision-making model are investigated and algorithms to search the optimal maintenance policy that are satisfied by the lessor are provided. A numerical example is provided to illustrate the proposed model. The results show that a maintenance policy minimizing the maintenance cost is selected as a reasonable decision as the lease term becomes shorter. Moreover, the frequent preventive maintenance actions are performed when the minimal repair cost is higher than the preventive maintenance cost, resulting in higher maintenance cost.

**Keywords** : Preventive Maintenance, Leased Equipment, Minimal Repair, Value function

### 1. 서 론

기술의 빠른 발전으로 자동차, 항공기, 선박과 같은 공학 시스템의 첨단화, 복잡화가 진행됨에 따라 장비를 소유하는 비용이 빠르게 증가하고 있다[10]. 또한, 실용

성을 추구하는 소비패턴, 신제품의 증가, 제품 사용주기 감소 등의 운영설비를 소유하기 이전에 고려해야 할 사항이 점차 많아지고 있다. 이로 인해 기업이 운영자산을 직접 소유하는 위험성이 커지고 있으며, 장비를 직접 소유하기보다 대여하여 사용하는 경우가 더 많아지고 있다. 실제로 다양한 분야에서 장비를 소유하는 것보다 대여하여 사용하는 것이 유리하다는 연구가 진행되었다[2].

Received 28 March 2018; Finally Revised 8 May 2018;

Accepted 9 May 2018

<sup>†</sup> Corresponding Author : sunahn@hanyang.ac.kr

장비 대여의 구성요소는 임차인(Lessee), 임대인(Lessor), 대여계약(Lease contract), 장비(Equipment)로 이루어져 있다. 임차인은 장비를 대여하는 고객이고, 임대인은 장비의 소유자를 뜻한다. 대여계약은 임차인이 대여할 장비를 선택한 후 임대인과 대여 기간, 유지보수, 비용, 보험 등의 대여조건을 결정한 후에 이루어진다. 장비는 임차인이 사업 운영을 위해 사용하는 산업 및 상업용 제품을 뜻한다.

장비는 운영시간이 증가할수록 마모(Wear-out)와 노화(Aging)로 인해 고장이 자주 발생하는 특징이 있다. 이러한 특징은 장비의 유지보수 비용을 증가시킨다. 유지보수 비용을 줄이기 위해 많은 연구자들은 유지보수 비용 최소화를 목적으로 다양한 예방보전 정책을 제안하였다 [4, 6]. Jaturonnate et al.[5]는 시정보전 활동으로 최소수리(Minimal repair)를 고려한 대여 장비의 주기적 예방보전 정책을 제안하였다. Schutz and Rezg[11]는 신뢰도 한계(Reliability threshold)를 사용한 대여 장비의 예방보전 정책을 제안하였다. 또한, 대여계약이 갱신되는 경우를 고려한 주기적 예방보전 정책[9, 13]과 다양한 유지보수 비용을 고려한 대여 장비의 예방보전 정책이 제안되었다[14].

기존 대여 장비의 예방보전 모형은 모든 예방보전 활동 후에 장비의 나이가 일정하게 감소하는 상황을 가정하였다[11, 12]. 그러나 이러한 가정은 운영시간이 증가할수록 열화가 가속화되어 수리효율이 떨어지는 장비의 특성을 반영하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 현실적인 상황을 고려하기 위해 예방보전 활동이 수행될 때마다 장비의 개선 효과가 감소되는 상황을 고려한다.

또한, 기존 연구는 예방보전 정책의 의사결정 과정에서 대여기간 동안 총 유지보수비용 최소화[5, 11, 12], 대여 기간 동안 총 이익 최대화[9, 13, 14] 등 하나의 기준만 고려하였다. 하나의 기준만 고려한 의사결정은 한쪽으로 편향되어 있어 의사결정자의 선호를 유연하게 반영할 수 없다. Kim et al.[7]은 다양한 의사결정 기준을 고려하여 항만 계류시설의 유지보수 투자우선순위를 결정하는 연구를 수행하였다. Bae et al.[1]는 대여 장비의 신뢰도 기반 예방보전 정책을 제안하고 임차인의 선호를 반영한 의사결정 과정에 대한 연구를 수행하였으며, 의사결정 기준으로 대여종료 시점 신뢰도를 사용하였다. 이 연구는 임차인이 장비의 유지보수를 담당하고 장비를 구매하는 특정 상황을 고려하였다. 그러나 이러한 상황은 일반적인 대여계약을 반영하기 어렵다. 장비의 유지보수는 대부분 비싼 장비와 전문 인력이 요구되므로 임차인에게 비경제적이며, 일반적으로 대여계약서에 임대인에게 장비의 유지보수를 담당하도록 명시되어 있다[12]. 따라서 본 연구에서는 임대인의 입장을 고려한 의사결정 모형을 개발한다.

임대인은 장비의 대여 기간이 끝난 뒤 장비를 다시 활

용할 것인지 장비를 팔 것인지에 대한 선택 문제에 직면한다. 그러므로 Bae et al.[1]의 연구에서 의사결정 기준으로 사용된 대여종료 시점 신뢰도는 임대인에게 중요한 의사결정 기준이다. 따라서 본 연구에서는 의사결정 모형 개발에 의사결정 기준으로 총 유지보수 비용의 최소화된 것뿐만 아니라 대여종료 시점 신뢰도도 고려한다.

본 연구에서는 두 개의 주기적 예방보전 정책을 제안하고 임대인의 유지보수 비용과 대여종료 시점 신뢰도 간 선호관계를 고려하는 의사결정 모형을 수립한다. 제안하는 정책에서 예방보전 활동은 장비의 가동시간이 예방보전 주기  $T$ 에 도달할 때마다 수행된다. 불완전한 예방보전 활동 후에 장비의 상태는 나이감소요인(Age reduction factor)을 통해 회복되는 것으로 고려된다. 의사결정 모형은 임대인이 최소 유지보수 비용을 선호하는 경우, 최소 유지보수 비용보다 대여종료 시점 신뢰도에 선호가 있는 경우로 나누어 분석된다.

본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다. 제 2장에서는 대여 장비의 주기적 예방보전 정책을 수립하고 목적 함수인 비용함수를 유도한다. 제 3장에서는 임대인의 비용과 대여종료 시점 신뢰도의 선호도를 반영한 의사결정 모형을 수립한다. 제 4장에서는 본 연구에서 제안하는 예방보전 정책과 의사결정 모형의 수치 예제를 제공한다. 마지막으로 제 5장에서는 본 연구의 결론을 논의한다.

## 2. 대여 장비의 주기적 예방보전 정책

### 2.1 모형의 구성

대여 장비의 주기적 예방보전 모형 수립을 위한 기호는 다음과 같이 정의된다.

$L$	장비의 대여기간
$h(t)$	장비의 고장강도 함수, $h(t) = \alpha\beta t^{\beta-1}$
$\alpha$	고장강도 함수의 척도 모수, $\alpha > 0$
$\beta$	고장강도 함수의 열화 모수, $\beta > 1$
$T_i(N)$	예방보전을 $N$ 번 수행했을 때 정책 $i$ 의 예방보전 주기
$T_i$	정책 $i$ 의 예방보전 활동 주기
$\rho_j$	$j$ 번째 예방보전 활동의 나이감소요인
$R_i$	정책 $i$ 의 대여종료 시점 신뢰도
$V_j$	$j$ 번째 예방보전 활동 후 장비의 가상나이
$N_i$	정책 $i$ 의 예방보전 횟수
$C_m$	최소수리 비용
$C_p$	예방보전 비용

본 연구의 가정사항은 다음과 같다.

- 1) 예방보전 활동은 장비의 가동 시간이 예방보전 주기  $T$ 에 도달할 때마다 수행한다.
- 2) 장비의 열화과정은 비 동질 포아송 과정(Non-homogeneous Poisson process, NHPP)을 가정한다. 이때 고장강도 함수는 멱수 법칙 고장모형(Power law failure model)을 따르며, 식 (1)과 같다.

$$h(t) = \alpha\beta t^{\beta-1}, \quad \alpha > 0, \beta > 1 \quad (1)$$

- 3) 예방보전 활동 전에 발생한 고장은 최소수리를 수행하며, 최소수리와 예방보전 시간은 무시할 만큼 작은 것으로 가정한다.
- 4) 예방보전 활동은 대여 기간  $L$  동안  $N$  번 수행하며,  $N$  번째 예방보전 활동 이후 잔여기간 동안은 최소수리만 수행한다.
- 5) 장비는 예방보전 활동 후 나이감소요인  $\rho_i$ 에 의해 회복되며,  $\rho_i$ 는  $0 < \rho_i < 1$ 에서 정의된다.
- 6) 최소수리 비용, 예방보전 비용은 상수로 가정한다.

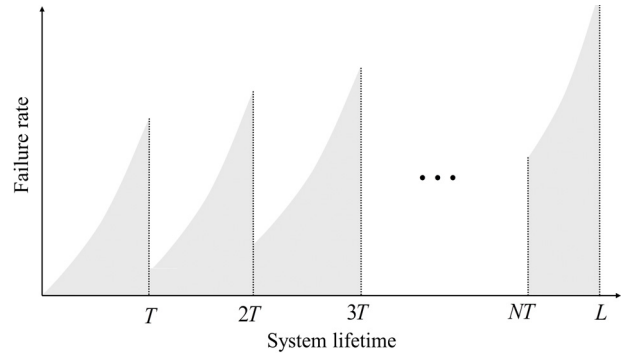
## 2.2 불완전 보전효과를 고려한 예방보전 모형

본 연구에서는 ARA(Arithmetic reduction age) 모형을 사용하여 불완전한 예방보전 활동을 모형화했다. ARA 모형은 Kijima의 가상 나이 과정(Virtual age process)을 이용하여 예방보전 활동 후에 장비의 회복을 고장강도 함수의 시간 축 변화로 표현한다[3]. 이 모형은 불완전한 예방보전 활동을 수행한 후에 나이감소요인을 사용하여 장비의 나이가 더 나은 상태로 회복되는 상황을 고려하기 때문에 불완전한 예방보전 활동을 모형화하는 데 적합하며, 실제로 많은 예방보전 정책 관련 연구에서 사용되었다[8]. 일례로 첫 번째 예방보전 활동이  $T$ 에서 수행되었을 때 장비는  $T$ 에서  $\rho_1 T$ 로 회복된다. 두 번째 예방보전 활동이 시점  $2T$ 에서 수행되었을 때 장비의 가상 나이는 예방보전 활동 후 장비의 가상 나이는  $\rho_2(1 + \rho_1)T$ 가 된다.  $i$ 번째 예방보전 활동 후의 장비의 가상 나이는 식 (2)와 같다.

$$V_i = \rho_i(V_{i-1} + iT - (i-1)T), \quad i \geq 1, V_0 = 0 \quad (2)$$

또한,  $i$ 번째 예방보전 활동 후 장비의 고장강도 함수는 식 (3)과 같으며, <Figure 1>은 예방보전 활동에 따른 장비의 고장강도 함수의 변화를 나타낸다.

$$h_i(t) = h(t - (iT - V_i)), \quad t > 0, \quad i \geq 1. \quad (3)$$



<Figure 1> Failure Rate Curve Under the Proposed PM Model

대여기간 동안 예방보전을  $N$  번 수행했을 때 최소수리 횟수는 NHPP 정의에 의해 다음과 같이 정리할 수 있으며, 식 (4)와 같다.

$$M_r = \int_0^T h(t)dt + \dots + \int_{(N-1)T}^{NT} h_{N-1}(t)dt + \int_{NT}^L h_N(t)dt \quad (4)$$

$$= \alpha T^\beta \sum_{i=1}^N (1 + A_{i-1})^\beta (1 - \rho_i^\beta) + \alpha (L - (N - A_N)T)^\beta,$$

식 (4)에서  $A_i$ 는 특정 비율을 나타내며 식 (5)와 같다.

$$A_i = \rho_i + \rho_i \rho_{i-1} + \dots + \prod_{k=1}^i \rho_k, \quad \rho_0 = 0, A_0 = 0. \quad (5)$$

대여기간 동안 임대인이 유지보수에 사용하는 총 비용은 식 (6)과 같다.

$$C(N, T, L) = M_r C_m + N C_p. \quad (6)$$

본 연구의 총 유지보수 비용 함수는 최소수리 비용과 예방보전 비용으로 구성되어 있으며, 제품 도입비용은 고려하지 않는다.

## 2.3 주기적 예방보전 정책

본 연구에서는 제 2.1절에서 언급한 가정사항을 기반으로 두 개의 주기적 예방보전 정책을 제안하였으며, 제안된 정책의 세부사항은 다음과 같다.

- 정책 1 : 예방보전 주기  $T_1 = L/(N+1)$ 로  $N$ 번의 예방보전 활동을 수행하며, 본 정책의 목표는 대여기간 동안 총 유지보수 비용을 최소화하는 예방보전 횟수를 찾는 것이다.

정책 1에 주어진 예방보전 주기  $T_1$ 을 식 (4)에 대입한 값을 식 (6)에 적용하면 정책 1의 총 유지보수 비용함수를 식 (7)과 같이 계산할 수 있다.

$$C_1(N, T_1, L) \quad (7)$$

$$= \alpha L^\beta \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (1+A_{i-1})^\beta (1-\rho_i^\beta)}{(N+1)^\beta} + \left( \frac{1+A_N}{N+1} \right)^\beta \right] C_m + NC_p.$$

- 정책 2 : 예방보전 주기  $T_2$ 로  $N$ 번의 예방보전 활동을 수행하며, 본 정책의 목표는 대여기간 동안 총 유지보수 비용을 최소화하는 예방보전 횟수와 예방보전 주기  $T_2$ 를 찾는 것이다.

정책 2의 예방보전 주기  $T_2$ 를 식 (4)에 대입하여 식 (6)에 적용하면 정책 2의 총 유지보수 비용 함수를 식 (8)과 같이 계산할 수 있다.

$$C_2(N, T_2, L) \quad (8)$$

$$= \left[ \alpha T_2^\beta \sum_{i=1}^N (1+A_{i-1})^\beta (1-\rho_i^\beta) \right] C_m + NC_p.$$

정책 2의 최적 예방보전 주기  $T_2^*$ 는 식 (9)와 같다.

$$T_2^* = \frac{L}{\left[ \frac{\sum_{i=1}^N (1+A_{i-1})^\beta (1-\rho_i^\beta)}{(N-A_N)} \right]^{\frac{1}{\beta-1}} + (N-A_N)} \quad (9)$$

$$= L/K(N).$$

식 (9)는 예방보전 횟수  $N$ 이 주어진 경우 식 (8)을  $T_2$ 로 편미분한 뒤 정리하여 유도 할 수 있다.

### 3. 대여 장비의 유지보수 일정 결정을 위한 의사 결정 모형

#### 3.1 의사결정 모형의 구성

본 장에서는 제 2장에서 제안한 두 개의 주기적 예방보전 정책을 기반으로 임대인의 총 비용과 신뢰도 간 선호도를 고려한 의사결정 모형을 제안한다. 의사결정 모형은 예방보전 횟수  $N$ 이 같은 상황을 고려하고 두 개의 상황을 반영한다. 각 상황은 다음과 같다.

- Case 1 : 의사결정 기준으로 비용만 고려한 경우

Case 1은 임대인이 유지보수 일정을 결정할 때 비용에 선호도가 있는 경우를 뜻한다. Case 1에서 임대인은 제안된 두 정책 중 유지보수 비용을 최소화하는 정책과 최적 값을 선정하여 장비의 유지보수를 수행 한다.

- Case 2 : 의사결정 기준으로 유지보수 비용보다 대여종료 시점 신뢰도에 선호도가 있는 경우

Case 2는 임대인이 유지보수 일정을 결정할 때 대여종

료 시점 신뢰도에 선호도가 있는 경우를 뜻한다. Case 2에서 임대인은 제안된 두 정책 중 대여종료 시점 신뢰도가 높은 정책 중 비용이 낮은 정책의 최적 값으로 장비의 유지보수를 수행한다.

또한, 본 연구에서는 총 유지보수 비용뿐만 아니라 대여종료 시점의 신뢰도를 임대인의 의사결정 척도 중 하나로 고려한다. 의사결정 모형에서 사용되는 대여종료 시점 신뢰도는 신뢰도와 고장강도 함수의 관계에 의해 계산할 수 있으며, 식 (10)은 장비의 신뢰도 함수를 나타낸다.

$$R(t) = \Pr \{ T \geq t \} \quad (10)$$

$$= \exp \left( - \int_0^t h(u) du \right), t > 0.$$

식 (10)에서  $R(t)$ 는 시점  $t$ 에서 장비의 신뢰도를 나타낸다. 만약 첫 번째 예방보전 활동을 시점  $T$ 에서 수행했다면, 장비의 신뢰도는  $R(T)$ 에서  $R(V_1)$ 로 회복된다. 시점  $2T$ 에서 두 번째 예방보전 활동을 수행했다면, 장비의 신뢰도는 식 (11)과 같다.

$$R(V_2) = R(V_1)R(2T|V_1). \quad (11)$$

$R(V_2)$ 는  $T+(1-\rho_1)T$ 의 기간 동안 장비의 생존 확률을 뜻한다[8]. 즉,  $R(V_2)$ 는 두 번째 예방보전 활동 후에 회복된 장비의 신뢰도이다. 이와 같은 과정을 기반으로 본 연구에서는 식 (12)와 같이 대여종료 시점 신뢰도를 결정했으며, 의사결정 모형에 사용한다.

$$R_L = \exp(-\alpha(L-(N-A_N)T)^\beta). \quad (12)$$

#### 3.2 비용만 고려한 의사결정 모형

본 절에서는 임대인이 유지보수 일정 결정을 위해 총 유지보수 비용만 고려한 의사결정 모형을 제안하며, 의사결정 과정에 대여종료 시점 신뢰도는 고려하지 않는다. 각 정책의  $L$ 과  $N$ 이 같은 경우 정책 1의 총 유지보수 비용 함수는 식 (7)과 같다. 정책 2의 총 유지보수 비용 함수는 식 (8)에 식 (9)의 예방보전 주기를 대입하여 계산할 수 있으며 식 (13)과 같다.

$$C_2(N, T_2 | N) \quad (13)$$

$$= \frac{\alpha L^\beta}{K(N)^\beta} \left[ S(N) + \left[ \frac{S(N)}{(N-A_N)} \right]^{\frac{\beta}{\beta-1}} \right] C_m + NC_p,$$

여기서

$$S(N) = \sum_{i=1}^N (1+A_i)^\beta (1-\rho_i^\beta). \quad (14)$$

비용만 고려한 의사결정 모형의 경우 각 정책의 예방보전 비용이 같으므로 최소수리 횟수의 비교를 통해 임대인의 신호를 만족시킬 수 있는 정책을 찾는다. 예를 들어 만약  $N = 1$  일 때 정책 1의 최소수리 횟수가  $Mr_{1,1}$ 이고 정책 2의 최소수리 횟수가  $Mr_{2,1}$ 일 때,  $Mr_{1,1} > Mr_{2,1}$ 면 정책 2가 선택된다. 이후 계속  $N$ 을 증가시켜 가며 최소 비용을 만족하게 하는 예방보전 횟수와 해당하는 정책의 예방보전 주기를 찾는다. <Figure 2>는 본 연구에서 제안하는 비용만 고려한 의사결정 모형의 과정을 나타낸다. <Figure 2>에서 함수  $i(N)$ 은 지시 함수를 나타내며, 식 (15)와 같이 정의한다.

$$i(N) = \begin{cases} 1, & Mr_{1,(N)} > Mr_{2,(N)} \\ 2, & Mr_{1,(N)} \leq Mr_{2,(N)} \end{cases} \quad (15)$$

### 3.3 대여종료 시점 신뢰도를 고려한 의사결정 모형

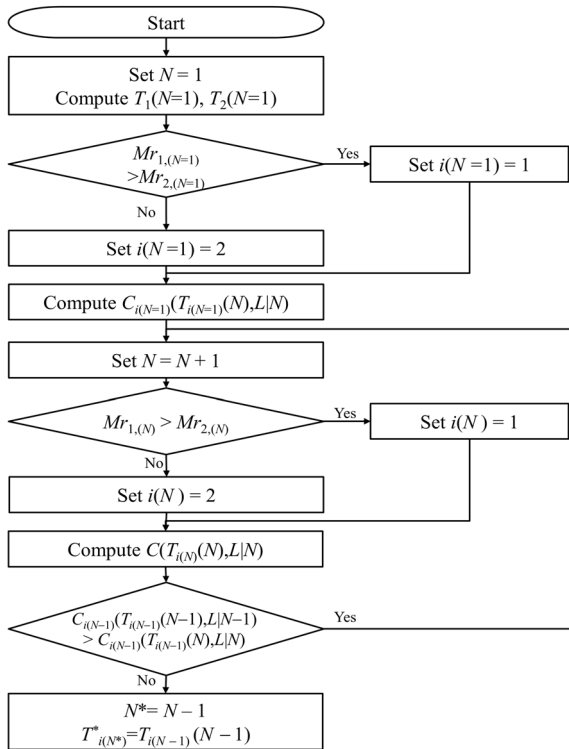
신뢰도는 장비의 성능을 파악할 수 있는 척도로 사용된다. 일반적으로 신뢰도가 낮은 장비는 고장이 자주 발생하며, 신뢰도가 높은 장비는 고장 발생 빈도가 적은 것으로 간주한다. 또한, 유지보수 관점에서 신뢰도는 제어해야 하는 중요한 요소이다. 신뢰도를 높게 유지하는 유지보수 정책은 장비를 좋은 상태로 유지할 수 있지만 빈번한 예방보전 활동으로 인해 높은 예방보전 비용이 발생

한다. 반면에 신뢰도를 고려하지 않은 유지보수 정책은 빈번한 고장의 원인이 되어 높은 수리비를 발생한다. 따라서 본 절에서 제안하는 의사결정 모형은 대여종료 시점 신뢰도만 고려하는 것이 아니라 비용도 함께 고려했다. 본 절에서 제안하는 의사결정 모형은 각 정책의 대여종료 시점 신뢰도를 우선으로 비교하고, 이후 비용을 비교하여 의사결정 한다. 대여종료 시점 신뢰도는 식 (12)에 각 정책의 예방보전 주기를 대입하여 계산할 수 있다.

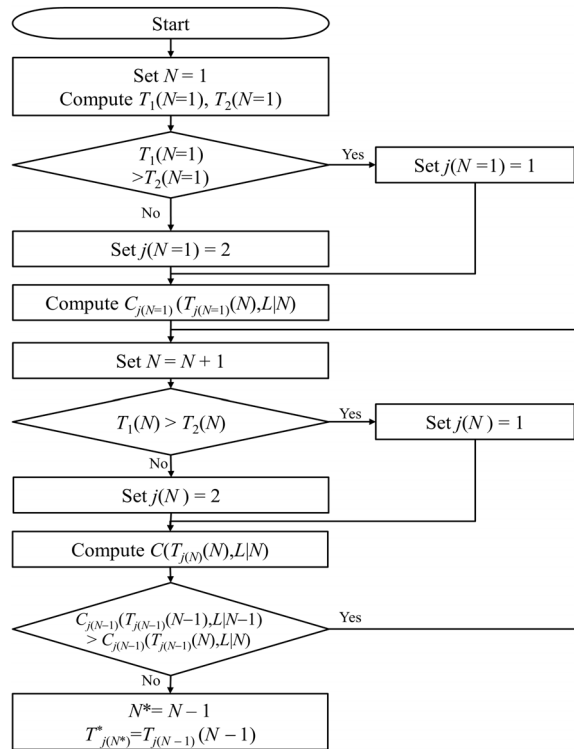
$$R_i = \exp(-\alpha(L - (N - A_N)T_i(N))^\beta), \quad (16)$$

식 (16)을 통해 대여종료 시점 신뢰도는 예방보전 주기에 의존한다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 예방보전 주기가 클수록 대여종료 시점 신뢰도가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 제안된 정책의 예방보전 주기를 통해 대여종료 시점 신뢰도의 크기를 비교한다. 예를 들어 대여기간  $L$ 과,  $(N - A_N)$ 이 같은 상황에서  $T_1(N) > T_2(N)$ 인 경우  $T_1(N)$ 으로 예방보전을  $N$ 번 수행했을 때  $T_2(N)$ 로 예방보전을  $N$ 번 수행 한 경우보다 식 (16)의 지수 부분이 더욱 0에 가깝다는 것을 확인할 수 있다. 식 (16)의 지수 부분이 0에 가깝다는 뜻은 대여종료 시점 신뢰도가 더 크다는 것을 의미한다. 따라서  $T_1(N) > T_2(N)$  이면  $R_1 > R_2$ 인 것을 확인할 수 있다.



<Figure 2> Decision-Making Process Considering Maintenance Cost



<Figure 3> Decision-Making Process Considering Reliability at the End of Lease

<Figure 3>은 본 절에서 제안하는 대여종료 시점 신뢰도를 고려한 의사결정 모형의 과정을 나타낸다. <Figure 3>에서 함수  $j(N)$ 은 지시 함수를 나타내며, 식 (17)과 같이 정의한다.

$$j(N) = \begin{cases} 1, & T_1(N) > T_2(N) \\ 2, & T_1(N) \leq T_2(N). \end{cases} \quad (17)$$

#### 4. 수치 예제

본 장에서는 제안된 주기적 예방보전 정책과 두 개의 의사결정 모형을 설명하기 위해 수치 예제를 수행하고 결과를 분석하였다. 본 수치 예제에 고장강도 함수의 모수는 (2, 3), (4, 6), (6, 9)로 가정하였다. 또한, 대여기간  $L$ 은 2, 4, 10으로 가정하였다. 수치 예제에서 유지보수 활동에 사용되는 비용은 비율로 가정했다.

본 연구에서는 최소수리 비용이 예방보전 비용보다 큰 경우와 작은 경우 모두 고려하였다. 나이감소요인은  $i/(2i+1)$ 로 가정하였으며 예방보전 횟수가 증가할수록 감소하는 형태이다. 본 수치 예제의 단위시간은 년(Year)으로 가정하였다. 비용을 고려한 의사결정 모형에 대한 수치 예제의 결과는 <Table 1>에 요약되어 있다.

<Table 1>에서 볼 수 있듯이 비용을 고려한 의사결정 과정의 경우 항상 정책 2가 선택되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 대여기간이 짧을수록 예방보전 주기  $T^*$ 가 증가하고 대여종료 시점 신뢰도가 낮아지는 것을 확인할 수

있다. 이는 정책 2의 예방보전 주기  $T^*$ 가  $L$ 의 변화에 영향을 받기 때문이다. 또한, 대여기간이 같은 상황에서  $(\alpha, \beta)$ 가 증가할 때 예방보전 횟수가 감소하기 때문에 총 유지보수 비용은 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

$C_m > C_p$ 인 경우  $C_m < C_p$ 인 경우보다 더 많은 예방보전 활동이 수행되었으므로 총 유지보수 비용이  $C_m < C_p$ 인 경우보다 높은 것을 확인할 수 있다. 또한,  $C_m > C_p$ 인 경우  $C_m < C_p$ 인 경우보다 항상 대여종료 시점 신뢰도가 높은 것을 알 수 있다. 이는 신뢰도와 비용이 절충 관계(Trade-off)이기 때문이다. 또한,  $C_m < C_p$ 인 경우  $(\alpha, \beta)$ 가 증가할수록 대여종료 시점 신뢰도가 높아지는 것을 확인할 수 있으며 이는 장비가 열화 과정을 겪기 때문이다. 실제로 고장강도 함수는  $(\alpha, \beta)$ 가 증가할수록 마모 기간에 급격히 노화된다.

대여종료 시점 신뢰도를 고려한 의사결정 모형에 대한 수치 예제의 결과는 <Table 2>에 요약되어 있다. <Table 2>에서 볼 수 있듯이 대여종료 시점 신뢰도에 선호가 있기 때문에 비용을 고려한 의사결정의 수치 예제의 결과 값 보다 대여종료 시점 신뢰도 값이 높은 것을 확인할 수 있다. 또한,  $C_m > C_p$ 인 경우 고장강도 함수의 모수가 증가할수록 대부분 정책 1이 선정 되고  $C_m < C_p$ 인 경우 대여기간  $L$ 이 낮을수록 정책 2가 선정 되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 대여기간  $L$ 이 낮아지고  $(\alpha, \beta)$ 가 증가할수록 정책 2의 예방보전 주기의 길이가 정책 1의 예방보전 주기보다 길어지는 것을 확인할 수 있다.

<Table 1> Lessor's Decision Based on the Case 1(operating hour : year)

$\rho_i = i/(2i+1)$	$(\alpha, \beta)$	$L$	$C_m/C_p = 3.0$				$C_m/C_p = 0.7$					
			Policy*	$N^*$	$T^*$	$C(L, T^*   N^*)$	$R_{i(N^*)}$	Policy*	$N^*$	$T^*$	$C(L, T^*   N^*)$	$R_{i(N^*)}$
(2, 3)		2	2	5	0.3266	9.6821	0.6142	2	2	0.6804	4.8118	0.1336
		4	2	14	0.2604	22.5165	0.6552	2	7	0.4875	12.6346	0.1328
		10	2	40	0.2409	61.4808	0.6318	2	23	0.4091	36.4792	0.1552
(4, 6)		2	2	5	0.3361	6.6430	0.8520	2	3	0.5167	4.7173	0.3797
		4	2	13	0.2837	15.6980	0.8679	2	10	0.3616	12.0037	0.6022
		10	2	36	0.2689	44.0442	0.8554	2	28	0.3428	33.9436	0.5365
(6, 9)		2	2	4	0.4095	5.3545	0.8609	2	3	0.5200	4.1717	0.5198
		4	2	11	0.3330	13.0173	0.8981	2	9	0.4004	10.7086	0.6322
		10	2	32	0.3021	36.1650	0.9169	2	27	0.3560	30.3964	0.7017

<Table 2> Lessor's Decision Based on the Case 2(operating hour : year)

$\rho_i = i/(2i+1)$	$(\alpha, \beta)$	$L$	$C_m/C_p = 3.0$				$C_m/C_p = 0.7$					
			Policy*	$N^*$	$T^*$	$C(L, T^*   N^*)$	$R_{i(N^*)}$	Policy*	$N^*$	$T^*$	$C(L, T^*   N^*)$	$R_{i(N^*)}$
(2, 3)		2	1	5	0.3333	9.6950	0.6542	2	2	0.6804	4.8118	0.1336
		4	1	14	0.2667	22.5971	0.7620	1	7	0.5000	12.6674	0.2043
		10	1	40	0.2439	61.6272	0.7862	1	23	0.4167	36.5988	0.2931
(4, 6)		2	2	5	0.3361	6.6430	0.8520	2	3	0.5167	4.7173	0.3797
		4	1	13	0.2857	15.9803	0.8960	1	10	0.3636	12.0080	0.6487
		10	1	36	0.2703	44.0926	0.9123	1	28	0.3448	33.9813	0.6796
(6, 9)		2	2	4	0.4095	5.3545	0.8609	2	3	0.5200	4.1717	0.5198
		4	1	11	0.3333	13.0177	0.9029	2	9	0.4004	10.7086	0.6322
		10	1	32	0.3030	36.1832	0.9442	1	27	0.3571	30.4106	0.7824

## 5. 결론

본 연구에서는 두 개의 대여 장비에 대한 주기적 예방보전 정책을 제안하였다. 제안된 정책에서 예방보전 활동은 특정 주기마다 수행되는 것으로 가정하였다. 예방보전 활동이 수행된 이후 장비의 나이는 나이감소요인을 통해 가상으로 회복되는 것으로 고려하였다. 제안된 예방보전 정책을 기반으로 임대인의 유지보수 비용과 대여종료 시점 신뢰도 간 선호도를 고려할 수 있는 의사결정 모형을 수립하였다. 제안된 의사결정 모형은 임대인이 유지보수 정책을 결정하는 기준으로 총 유지보수 비용 최소화만 고려한 경우, 대여종료 시점 신뢰도를 우선으로 고려한 경우로 나누어 제안하였다.

본 연구에서는 제안된 정책과 의사결정 모형을 설명하기 위해 수치예제를 수행했다. 수치예제의 결과 비용만 고려한 의사결정 모형의 경우 항상 총 유지보수 비용을 최소화하는 예방보전 주기를 갖는 정책이 선정되었다. 반면에 대여종료 시점 신뢰도를 우선으로 고려한 경우 예방보전 활동의 간격이 항상 일정한 정책이 대부분 선정되었으며  $L$ 이 낮고 고장강도 함수의 모수가 증가할수록 총 유지보수 비용을 최소화하는 예방보전 정책이 선정된다는 것을 확인하였다. 본 연구는 임대인의 입장에서 의사결정 모형을 제시하였지만 임대인과 임차인의 입장을 모두 고려한 의사결정 모형 개발이 필요하다. 본 연구는 주기적 예방보전 정책뿐만 아니라 신뢰도 기반의 예방보전 정책에 적용할 수 있다.

## Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korean government(MSIP)(No. NRF-2018R1A2B6003232).

## References

- [1] Bae, K.H., Lee, J.H., Park, S.H., and Ahn, S.E., Developing the optimal decision-making process through preventive maintenance policy based on the reliability threshold for leased equipment, *Journal of Applied Reliability*, 2017, Vol. 17, No. 3, pp. 246-255.
- [2] Dasgupta, S., Siddarth, S., and Silva-Risso, J., To lease or to buy? A structural model of a consumer's vehicle and contract choice decisions, *Journal of Marketing Research*, 2007, Vol. 44, No. 3, pp. 490-502.
- [3] Doyen, L. and Gaudoin, O., Classes of imperfect repair models based on reduction of failure intensity or virtual age, *Reliability Engineering and System Safety*, 2004, Vol. 84, No. 1, pp. 45-56.
- [4] Goh, H.W., Preventive maintenance policy on large enterprise with cellular manufacturing system, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 1997, Vol. 20, No. 44, pp. 171-178.
- [5] Jaturonnate, J., Murthy, D., and Boondiskulchok, R., Optimal preventive maintenance of leased equipment with corrective minimal repairs, *European Journal of Operational Research*, 2006, Vol. 174, No. 1, pp. 201-215.
- [6] Jung, Y.B., Optimum periodic preventive maintenance time for a system with imperfect maintenance, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 1994, Vol. 17, No. 32, pp. 221-226.
- [7] Kim, Y.H., Lee, Y.H., Song, J.J., and Lee, S.Y., The Development of Investment Prioritization Criteria for the Mooring Facilities's Maintenance by the Delphi Study, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 2014, Vol. 15, No. 1, pp. 515-524.
- [8] Lin, Z.L., Huang, Y.S., and Fang, C.C., Non-periodic preventive maintenance with reliability thresholds for complex repairable systems, *Reliability Engineering and System Safety*, 2015, Vol. 136, pp. 145-156.
- [9] Mabrouk, A.B., Chelbi, A., and Radhoui, M., Optimal imperfect maintenance policy for equipment leased during successive periods, *International Journal of Production Research*, 2016, Vol. 54, No. 17, pp. 5095-5110.
- [10] Park, S.H., Park, J.H., Bae, K.H., and Ahn, S.E., Constructing a competing risks model for the combined structure with dependent relations, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2017, Vol. 40, No. 3, pp. 92-98.
- [11] Schutz, J. and Rezg, N., Maintenance strategy for leased equipment, *Computers and Industrial Engineering*, 2013, Vol. 66, No. 3, pp. 593-600.
- [12] Yeh, R.H. and Chang, W.L., Optimal threshold value of failure-rate for leased products with preventive maintenance actions, *Mathematical and Computer Modelling*, 2007, Vol. 46, No. 5, pp. 730-737.
- [13] Yeh, R.H., Chang, W.L., and Lo, H.C., Optimal threshold values of age and two-phase maintenance policy for leased equipments using age reduction method, *Annals of Operations Research*, 2010, Vol. 181, No. 1, pp. 171-183.

- [14] Yeh, R.H., Kao, K.C., and Chang, W.L., Preventive-maintenance policy for leased products under various maintenance costs, *Expert Systems with Applications*, 2011, Vol. 38, No. 4, pp. 3558-3562.

**ORCID**

Juhyun Lee | <http://orcid.org/0000-0002-7993-0416>  
Kiho Bae | <http://orcid.org/0000-0002-6826-9159>  
Suneung Ahn | <http://orcid.org/0000-0002-8752-0265>