

대여장비의 신뢰도 기반 예방보전 정책을 통한 최적 의사결정 과정 개발*

배기호 · 이주현 · 박성환 · 안선웅[†]

한양대학교 산업경영공학과

Developing the Optimal Decision-Making Process through Preventive Maintenance Policy Based on the Reliability Threshold for Leased Equipment^{*}

Kiho Bae · Juhyun Lee · Seonghwan Park · Suneung Ahn[†]

Department of Industrial and Management Engineering, Hanyang University, Seoul, South Korea

Purpose: This study proposes the optimal PM (preventive maintenance) policy of leased equipment for lessee's decision-making using two types of reliability condition.

Methods: We consider reliability threshold based PM model. Equipment reliability is estimated and used as condition variable. The effect of repair for maintenance is imperfect and represented by age reduction factor.

Results: We provide two PM policies. Policy 1 is focused on minimized total cost. This policy guarantees reliability threshold until last maintenance action. Policy 2 focus on maintaining reliability threshold during leased period. The proposed approach provides optimal reliability threshold under number of PM. Through result, we finally construct decision-making process for lessee using reliability threshold and end of reliability.

Conclusion: This study provides two PM policy for lessee's decision-making. Through numerical example, we get a result of optimal reliability threshold, number of PM, optimum alternative under lessee's reliability condition.

Keywords: Preventive Maintenance, Reliability Threshold, Decision-Making, Leased Equipment, Age Reduction Factor

1. 서론

기술의 진보에 의해 시스템이나 장비의 성능이 빠르게 발전하고, 새로운 기능을 갖춘 신규 장비가 지속

해서 개발되고 있다. 따라서 장비의 교체 주기가 점차 빨라지고 있으며, 장비의 교체 비용으로 많은 비용이 소모되고 있다. 자동차, 인공위성의 통신시스템, 의학 제품, 전기 및 전자제품 등의 다양한 분야에서 장비를

* 본 연구는 한국연구재단(NRF-2016R1A2B1008163)의 지원으로 수행되었습니다.

[†] 교신저자 sunahn@hanyang.ac.kr

2017년 8월 4일 접수, 2017년 9월 1일 수정본 접수, 2017년 9월 12일 게재 확정.

구매하는 경우 보다 대여하여 사용하는 경우가 더 유리하다는 연구가 수행되었다[1, 2, 3].

장비의 대여계약을 위한 구성요소로 임차인, 임대인, 장비, 계약이 존재한다. 일반적으로 기업과 소비자 간의 임대계약 관계에서는 임차인이 장비의 초기도입비용, 유지보수 비용, 보험 비용 등을 부담한다. 따라서 임차인은 최소의 가격으로 고장 없이 우수한 성능을 유지하기를 원한다. 장비의 대여가 활발해짐에 따라, 대여기간 동안 장비의 품질이 일정 수준 이상을 유지하기를 요구하게 되었다. 장비의 품질을 판단하기 위한 척도로 성능, 신뢰도, 가용도, 지속성 등이 사용되고 있다[4]. 이러한 척도 중에서 신뢰도는 정의에 빗대어 볼 때, 임차인이 장비의 품질을 대여기간 동안 보장받기 위해 적합한 척도라고 할 수 있다.

장비는 대여기간 동안 운영 시 마모, 열화 등의 원인으로 고장이 발생하며, 신뢰도가 저하되게 된다. 이러한 손실을 예방하기 위해 적절한 시점에 유지보수 활동이 수행되어야 한다. 유지보수 활동은 고장의 발생 시점에 따라 시정보전(corrective maintenance: CM)과 예방보전(PM: preventive maintenance: PM)으로 나뉜다. 일반적으로 시정보전은 예방보전보다 큰 비용을 발생시키기 때문에, 계획적인 예방보전을 통해 비용의 절감이 필요하다.

대여장비에 관련된 다양한 연구가 수행되었다. 비용최소를 위한 최적의 나이감소요인을 범위로 산출하는 예방보전 연구와 대여기간동안 첫 예방보전 시점 및 나이감소 정도를 결정하는 연구가 수행되었다[5, 6]. 또한, 최적 고장률 감소 정도와 예방보전 횟수를 결정하는 연구[7]와 보증기간이 존재하는 상황과 아닌 상황에 대하여 최적의 예방보전 주기와 회복수준을 결정하는 예방보전 정책이 수행되었다[8]. 이외에도 국내에서도 장비의 보증기간을 바탕으로 예방보전을 수행하는 다양한 연구가 수행되었다[9, 10, 11].

본 연구에서는 불완전보전 효과를 나이감소요인으로 표현하며, 예방보전 횟수에 따라 감소하는 상황을 고려한다. 이를 바탕으로 장비의 열화에 따른 성능의 저하를 신뢰도로 표현하며, 대여기간 동안 임차인이 요구하는 신뢰도 수준을 고려하면서 최적의 예방보전 횟수와 이에 따른 최소비용을 보장하는 예방보전 정책을 제시한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 연구에서 사용하는 기호와 가정을 바탕으로 신뢰도 한계

기반 예방보전 모형을 설명하고, 정책 별 최적화 알고리즘을 제시한다. 제3장에서는 임차인의 신뢰도 조건을 반영하여 최적의 정책을 제시하는 의사결정 과정에 대해 설명한다. 제4장에서는 수치예제를 최적의 예방보전 정책과 임차인의 신뢰도 조건을 고려한 의사결정 과정을 통한 예방보전 정책의 결정을 다룬다. 연구를 통하여 얻어진 결론과 향후 연구를 마지막 장에 서술한다.

2. 신뢰도 기반 예방보전 모형

2.1 기호 및 가정

본 연구에서 사용된 기호는 다음과 같다.

기호

- i : 예방보전 정책의 변수, $i = 1, 2$
- j : 예방보전의 횟수, $j = 0, 1, 2, 3, \dots, j, \dots, N$
- L : 장비의 대여기간
- $R_{TH(T)}$: 임차인의 요구 신뢰도 한계
- $R_{L(T)}$: 임차인의 요구 종료 신뢰도
- $R_{TH(i)}$: 정책 i 의 예방보전을 시행하는 장비의 신뢰도
- $R_{L(i)}$: 정책 i 의 종료시점 L 의 신뢰도
- $R_{(i,j)}(t)$: 정책 i 의 j 번째 예방보전 후의 신뢰도함수
- $h_{(i,j)}(t)$: 정책 i 의 j 번째 예방보전 후의 고장강도 함수
- $\rho_{(i,j)}$: 정책 i 의 j 번째 불완전수리에 의한 나이 감소요인
- $N_{(i)}$: 정책 i 의 예방보전 횟수
- $M_{r(i)}$: 정책 i 의 대여기간 동안 최소수리 횟수
- C_{pm} : 예방보전 비용
- C_{mr} : 최소수리 비용
- C_{in} : 도입 비용
- $D_{(i)}$: 정책 i 의 예방보전 횟수, 신뢰도 총비용 등의 정보를 포함하고 있는 데이터 셋
- $D'_{(i)}$: 임차인의 신뢰도 조건을 보장하도록 조정된 정책 i 의 데이터 셋

본 연구에서 사용된 가정은 다음과 같다.

- (1) 대여기간 동안 장비의 열화 과정은 고장강도함수가 비동질 포아송 과정(non-homogeneous poisson process: NHPP)을 따르는 멱수법칙 고장모형(power law failure model)으로 가정하며, 고장강도함수는 식(1)과 같다.

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

- (2) 예방보전 이전에 발생하는 고장은 최소수리를 시행한다.
- (3) 예방보전을 통해 장비는 불완전하게 수리되며, 나이감소요인 $\rho_{(i,j)}$ 를 사용하여 장비를 회복시킨다.
- (4) 예방보전은 장비의 신뢰도가 신뢰도 한계 $R_{TH(i)}$ 에 도달할 경우 시행한다.
- (5) 최소수리와 예방보전 시간은 무시할 만큼 작다
- (6) 최소수리 비용, 예방보전 비용, 도입 비용은 상수로 가정한다.
- (7) N 번째 예방보전 후, 남은 대여기간 동안 예방보전은 실시하지 않으며, 최소수리만 실시한다.

2.2 불완전보전 효과를 고려한 예방보전 모형

본 연구에서는 예방보전의 시행조건으로 신뢰도 한계를 사용한다. 가동 중인 장비가 특정 신뢰도 한계에 도달할 시점에 예방보전을 실시하며 첫 예방보전 시행전의 최초의 신뢰도 함수 $R_{(i,0)}(t)$ 는 식(2)를 만족한다.

$$R_{(i,0)}(t) = \exp\left[-\int_0^t h_{(i,0)}(t)dt\right], t \geq 0 \quad (2)$$

예방보전의 시행조건은 특정 신뢰도 한계에 도달하는 경우이며, 가정 4에 의해 모두 동일하므로 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{TH(i)} = R_{(i,0)}(T_{(i,1)}) = R_{(i,1)}(T_{(i,2)}) = R_{(i,2)}(T_{(i,3)}) = \dots = R_{(i,N(i)-1)}(T_{(i,N(i))}) \quad (3)$$

또한, 예방보전 시점에 해당하는 신뢰도 한계는 예방보전 후 회복된 신뢰도 수준과 생존확률의 관계로 나타낼 수 있다. 그러므로 정책 i 의 j 번째 예방보전 시점에 도달하는 신뢰도는 $j-1$ 번째 예방보전 후 회복된 신뢰도와 j 번째 예방보전까지의 생존확률의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$R_{TH(i)} = R_{(i,j-1)}(T_{(i,j)}) = R_{(i,j-1)}(T_{(i,j-1)})R_{(i,j-1)}(T_{(i,j)}|T_{(i,j-1)}) \quad (4)$$

장비의 예방보전 효과를 표현하기 위해 수명을 가상의 나이로 표현한다. 예방보전 시행 후 장비의 가상 나이는 이전의 상태보다 개선되며, 불완전보전 효과인 나이감소요인 $\rho_{(i,j)}$ 가 시스템의 전체 수명에 영향을 미치는 Kijima type 2의 가상나이과정(virtual age process)을 통해 표현한다[12]. 식 (5)는 정책 i 의 j 번째 예방보전 후 장비의 가상 나이의 변화를 의미한다.

$$V_{(i,j)} = \rho_{(i,j)}(V_{(i,j-1)} + (T_{(i,j)} - T_{(i,j-1)})) \quad (5)$$

가상 나이 과정을 통한 예방보전 효과를 고장강도 함수에 반영하면 시간 축의 변화로 나타낼 수 있다. Kijima's type 2를 고장강도함수에 반영한 모형을ARA(arithmetic reduction of virtual age) 모형이라 하며, 정책 i 의 j 번째 예방보전 후 고장강도함수의 변화는 식(6)과 같다.

$$h_{(i,j)}(t) = h_{(i,0)}(t - (T_{(i,j)} - V_{(i,j)})), t \geq 0 \quad (6)$$

장비의 가상 나이와 고장강도함수의 변화를 바탕으로 각 예방보전 시점을 식(3)과 식(4)를 통해 추정할 수 있다. 이를 바탕으로 예방보전 주기 별 최소수리 횟수는 주기 동안의 누적고장강도함수로 산출할 수 있다. 대여기간 동안 발생하는 고장은 비동질 포아송 과정을 따르며, 대여기간 동안 발생하는 전체 최소수리 횟수 $M_{r(i)}$ 는 식(7)과 같이 정리할 수 있다.

$$M_{r(i)} = \left[\int_0^{T_{(i,1)}} h_{(i,0)}(t)dt + \int_{T_{(i,1)}}^{T_{(i,2)}} h_{(i,1)}(t)dt + \dots + \int_{T_{(i,N(i))}}^L h_{(i,N(i))}(t)dt \right] \quad (7)$$

대여기간 동안 발생하는 비용의 항목은 다음과 같다. 고장으로 인한 최소수리 총비용은 최소수리 1회 비용과 대여기간 동안 발생한 고장 횟수의 곱으로 산출한다. 예방보전으로 인한 총비용은 예방보전 1회 비용과 본 연구에서 가정한 N 회의 예방보전 횟수의 곱으로 산출한다. 장비의 도입을 위해 발생하는 도입 비용은 최초 도입 시 1회만 발생하는 비용이며, 식(8)과 같이 총비용을 계산할 수 있다.

$$TC_{(i)}(N_{(i)}, R_{TH(i)}) = M_{r(i)}C_{mr} + N_{(i)}C_{pm} + C_{in} \quad (8)$$

본 연구에서는 예방보전을 시행하는 신뢰도 한계와 대여기간의 종료시점 신뢰도를 바탕으로 두 가지 예방보전 정책을 제안한다. 첫 번째 예방보전 정책은 임차인의 총비용을 최소화하는 정책이며, <Fig. 1>과 같이 장비의 신뢰도가 신뢰도 한계 $R_{TH(1)}$ 에 도달한 경우, 예방보전을 실시한다. 종료 신뢰도 $R_{L(1)}$ 는 고려하지 않은 정책으로 미리 정해진 N 번의 예방보전 후에는 최소수리만 실시하며, 이에 의해 $R_{L(1)}$ 이 $R_{TH(1)}$ 보다 작게 형성된다.

두 번째 예방보전 정책은 임차인이 대여하는 장비의 신뢰도를 대여기간 동안 보장받기 위한 정책이다. <Fig. 2>와 같이 신뢰도 한계 $R_{TH(2)}$ 에 도달할 경우 예방보전을 실시한다. 정책 2의 조건을 반영하기 위해, $N+1$ 번째 예방보전 시점과 대여기간의 종료시점이 일치하며, $R_{TH(2)}$ 와 $R_{L(2)}$ 는 동일한 수준을 가지게 된다. 따라서 대여기간 동안 장비의 신뢰도는

$R_{TH(2)}$ 를 보장하나, 정책 1보다 더 높은 비용을 소요하게 된다.

2.3 신뢰도 제약조건

예방보전은 장비의 신뢰도가 특정 수준이 도달하면 시행하게 되므로 최적의 신뢰도 시점을 설정해야 한다. 따라서 본 절에서는 정책 별 신뢰도 기반 예방보전 모형의 최소비용을 만족하는 최적의 예방보전 횟수와 신뢰도 한계가 존재함을 증명한다.

Proposition 1.

정책 1의 최소비용을 보장하며, 예방보전을 시행하는 특정 신뢰도 수준 $R_{TH(1)}$ 은 식 (9)를 만족한다.

$$R_{TH(1)} = \exp \left[-\alpha \left(\frac{L}{\left(\sum_{j=1}^{N_{(1)}} \frac{1 - \rho_{(1,j)}^\beta}{1 - \rho_{(1,j)}} \right)^{\frac{1}{\beta-1}} + \sum_{j=1}^{N_{(1)}} (1 - \rho_{(1,j)})} \right)^\beta \right] \quad (9)$$

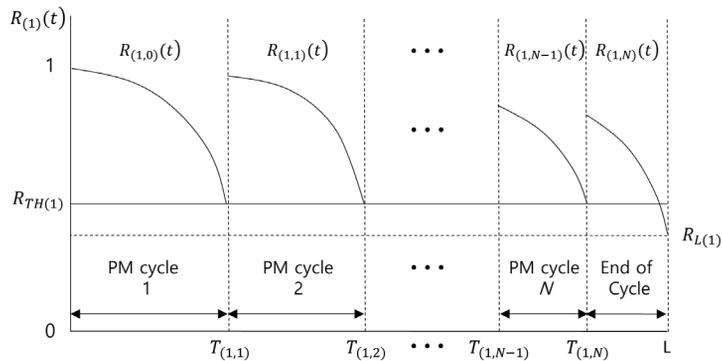


Fig. 1 Reliability function of preventive maintenance policy 1

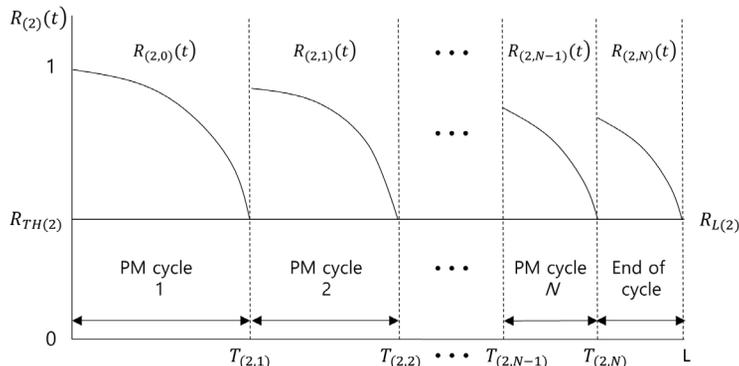


Fig. 2 Reliability function of preventive maintenance policy 2

Proof.

본 연구에서는 장비의 신뢰도가 신뢰도 $R_{TH(1)}$ 에 도달할 경우 예방보전을 시행한다. 이에 따라 첫 예방보전 시점에 대해 추정할 수 있으며 이는 식(10)과 같다.

$$R_{TH(1)} = \exp\left[-\int_0^{T_{(1,1)}} h_{(1,0)}(t) dt\right], \quad (10)$$

$$T_{(1,1)} = \left(\frac{-\ln R_{TH(1)}}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\beta}}$$

첫 예방보전 시점을 통해, 비용함수를 식 (11)의 $R_{TH(1)}$ 의 형태로 변환할 수 있다.

$$TC_{(1)}(N_{(1)}, R_{TH(1)}) = \left[\begin{array}{l} -\ln R_{TH(1)} \sum_{j=1}^{N_{(1)}} (1-\rho_{(1,j)})^{\beta} \\ + \alpha \left(L - \sum_{j=1}^{N_{(1)}} (1-\rho_{(1,j)}) \right)^{\beta} \\ \left(\frac{-\ln R_{TH(1)}}{a} \right)^{\frac{1}{\beta}} \\ + N_{(1)} C_{pm} + C_{in} \end{array} \right] C_{mr} \quad (11)$$

비용함수를 예방보전 횟수 $N_{(1)}$ 이 주어진 상황에서, $R_{TH(1)}$ 으로 편미분 하면 다음과 같은 식(12)를 만족하며, 이를 $R_{TH(1)}$ 의 형태로 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial TC_{(1)}(R_{TH(1)}|N_{(1)})}{\partial R_{TH(1)}} = \left[-\sum_{j=1}^{N_{(1)}} (1-\rho_{(1,j)})^{\beta} + W \right] C_{mr} = 0 \quad (12)$$

여기서,

$$W = \left\{ \left(\left(L - \sum_{j=1}^{N_{(1)}} (1-\rho_{(1,j)}) \right) \left(\frac{-\ln R_{TH(1)}}{a} \right)^{\frac{1}{\beta}-1} \right)^{\beta-1} \right\}$$

$$\left. \left(\sum_{j=1}^{N_{(1)}} (1-\rho_{(1,j)}) \left(\frac{-\ln R_{TH(1)}}{a} \right)^{\frac{1-\beta}{\beta}} \right) \right\}$$

$$\therefore R_{TH(1)} = \exp \left[-\alpha \left(\frac{L}{\left(\sum_{j=1}^{N_{(1)}} \frac{1-\rho_{(1,j)}^{\beta}}{1-\rho_{(1,j)}} \right)^{\frac{1}{\beta-1}} + \sum_{j=1}^{N_{(1)}} (1-\rho_{(1,j)})} \right)^{\beta} \right]$$

$$= \exp[-\alpha S(N_{(1)})^{\beta}].$$

비용함수의 편미분 결과 정책 1의 신뢰도 $R_{TH(1)}$ 은 예방보전 횟수 $N_{(1)}$ 에 영향을 받는 형태로 구성되며, 1차 미분 결과가 0을 만족하므로 비용함수의 최적지점이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이 지점이 최소비용이 된다는 것은 비용함수의 2차 미분을 통해 확인할 수 있으며, 이는 식 (13)의 결과를 통해 확인할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 TC_{(1)}(R_{TH(1)}|N_{(1)})}{\partial^2 R_{TH(1)}} = \left[\sum_{j=1}^{N_{(1)}} (1-\rho_{(1,j)})^{\beta} \frac{\beta-1}{\alpha \beta R_{TH(1)}} K \right]$$

$$C_{mr} > 0,$$

여기서,

$$K = \left[\left(\left(L - \sum_{j=1}^{N_{(1)}} (1-\rho_{(1,j)}) \right) \left(\frac{-\ln R_{TH(1)}}{a} \right)^{\frac{1}{\beta}-1} \right)^{\beta-1} \right. \quad (13)$$

$$\left. + \sum_{j=1}^{N_{(1)}} (1-\rho_{(1,j)}) \left(\frac{-\ln R_{TH(1)}}{a} \right)^{\frac{2-2\beta}{\beta}} \right]$$

2차 미분 결과 0보다 크므로 비용함수는 볼록 함수의 형태를 띠는 것을 알 수 있다. 이에 따라 예방보전 횟수와 신뢰도 한계가 최적일 때, 총비용은 최소비용임을 확인할 수 있다. 그러므로 정책 1의 최소비용을 보장하며 예방보전을 시행하게 하는 최적의 신뢰도는 식 (9)을 만족한다는 명제는 성립함을 알 수 있다.

정책 2의 최소비용을 만족하는 최적 신뢰도와 예방보전 횟수는 정책 2의 조건과 Proposition 1을 바탕으로 확인할 수 있다. 정책 2는 신뢰도 한계와 종료 신뢰도를 동일하게 설정한 상황이며 식 (3)과 식 (4)를 바탕으로 비용함수를 $R_{TH(2)}$ 로 편미분하면 식 (14)와 같이 정리할 수 있게 된다. 정책 1과 정책 2의 비용함수 식은 동일하므로 Proposition 1에 따라 볼록 함수의 형태를 가지며, 최소비용이 존재함을 알 수 있다.

$$R_{TH(2)} = \exp \left[-\alpha \left(\frac{L}{1 + \sum_{j=1}^{N_{(2)}} (1-\rho_{(2,j)})} \right)^{\beta} \right] \quad (14)$$

$$= \exp[-\alpha S(N_{(2)})^{\beta}]$$

정책 1과 정책 2의 신뢰도 제약조건을 바탕으로 예방보전의 횟수에 따른 신뢰도 한계를 계산할 수 있으며, 최적의 예방보전 횟수와 신뢰도는 제2.4절 최적화 알고리즘을 통해 다룬다.

2.4 최적화 알고리즘

본 절에서는 정책 1과 정책 2의 최적의 예방보전 횟수와 신뢰도 한계 그리고 최소비용을 도출하는 알고리즘에 대해 제시한다.

정책 1과 정책 2의 신뢰도 $R_{TH(i)}$ 는 예방보전 횟수

$N_{(i)}$ 에 영향을 받는 함수로 표현이 되며, 이는 예방보전 횟수에 의해 신뢰도가 변동됨을 의미한다. 식 (12)와 식 (14)를 바탕으로 정책 별 최소비용을 보장하는 최적의 예방보전 횟수 $N_{(i)}^*$ 와 신뢰도 $R_{TH(i)}^*$ 를 계산하는 알고리즘은 다음과 같다.

- (1) $\frac{\partial TC_{(i)}(R_{TH(i)}|N_{(i)})}{\partial R_{TH(i)}}=0$ 을 만족하는 정책 1과 정책 2의 $R_{TH(i)}$ 를 계산한다. 이는 식 (12)와 식 (14) 제시되어 있다.
- (2) $N_{(i)} = 1, R_{TH(i)} = \exp[-\alpha S(1)^\beta]$ 으로 초기설정 후, $TC_{(i)}(N_{(i)} = 1, R_{TH(i)} = \exp[-\alpha S(1)^\beta])$ 를 계산한다.
- (3) $N_{(i)} = N_{(i)} + 1, R_{TH(i)} = \exp[-\alpha S(N_{(i)} + 1)^\beta]$ 으로 갱신한 후, $TC_{(i)}(N_{(i)} = N_{(i)} + 1, R_{TH(i)} = \exp[-\alpha S(N_{(i)} + 1)^\beta])$ 를 계산한다.
- (4) $TC_{(i)}(N_{(i)} = N_{(i)} + 1, R_{TH(i)} = \exp[-\alpha S(N_{(i)} + 1)^\beta]) > TC_{(i)}(N_{(i)} = 1, R_{TH(i)} = \exp[-\alpha S(1)^\beta])$ 의 조건을 만족한다면 과정을 멈추고 그렇지 않은 경우, 과정 (3)으로 돌아가 조건을 만족할 때까지, 반복 시행한다.
- (5) 과정 (4)의 조건을 만족하는 $N_{(i)}, R_{TH(i)}, TC_{(i)}(N_{(i)}, R_{TH(i)})$ 를 정책 별 최적 $N_{(i)}^*, R_{TH(i)}^*, TC_{(i)}(N_{(i)}^*, R_{TH(i)}^*)$ 로 결정한다.

3. 임차인의 신뢰도 조건을 고려한 의사결정

본 장에서는 제2장에서 제시한 신뢰도 기반 예방보전 모형을 바탕으로 임차인의 신뢰도 조건을 고려한 최적의 예방보전 정책을 결정한다. 의사결정 요인으로 신뢰도 한계와 종료 신뢰도를 사용하며, 임차인의 의사결정에 의해 신뢰도 한계만 고려한 상황, 종료 신뢰도만을 고려한 상황, 두 가지 신뢰도를 모두 고려한 상황으로 나뉜다. 정책 1과 정책 2의 데이터 셋 $D_{(i)}$ 를 바탕으로 임차인의 요구 신뢰도 수준 이상을 보장하며, 최소비용인 대안을 조정된 데이터 셋 $D'_{(i)}$ 에서 결정하게 된다. 제3.1절, 제3.2절, 제3.3절에서 각 상황에 따른 의사결정 과정에 대해 설명한다. <Fig. 3>은 의사결정 과정을 나타낸 그림이다.

3.1 신뢰도 한계를 고려한 의사결정

본 절에서는 임차인이 계약에 대해 고려하는 조건으로 신뢰도 한계를 고려한 상황에 대해 설명한다. 임차인이 신뢰도 한계만을 고려하는 경우, 임차인이 설정한 신뢰도 $R_{TH(T)}$ 와 $R_{TH(1)}^*$ 의 대소관계를 확인한다. 만약 $R_{TH(T)}$ 가 $R_{TH(1)}^*$ 보다 작거나 같은 경우, 임차인의 신뢰도 조건을 만족하면서 정책1의 최소비용

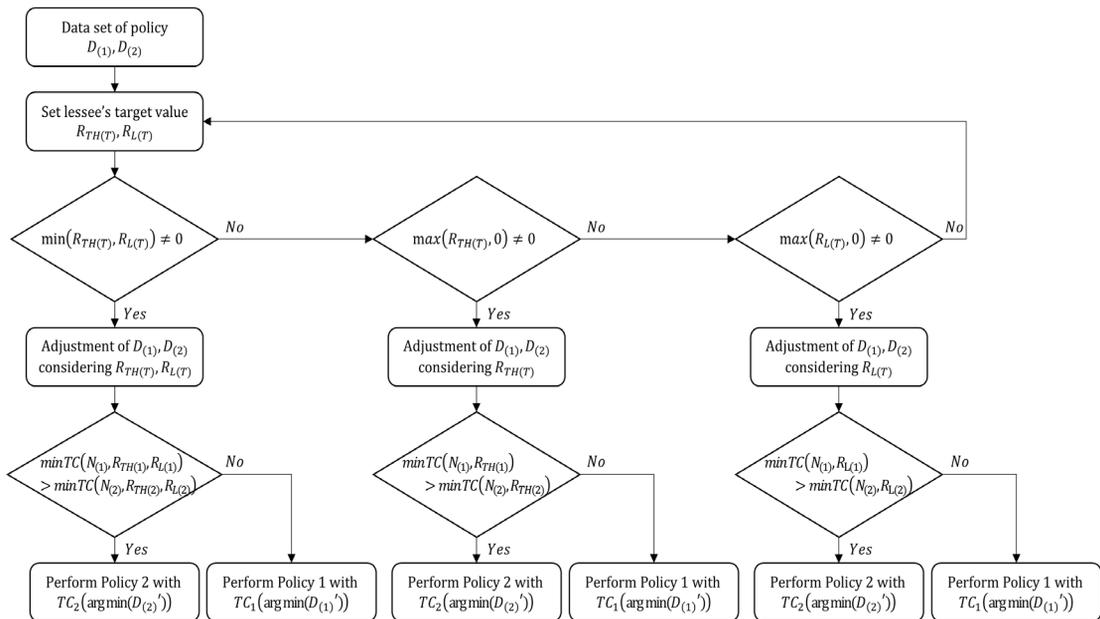


Fig. 3 Decision-making process considering the lessee's reliability conditions

을 보장하는 신뢰도 $R_{TH(1)}^*$ 가 존재하기 때문에 임차인은 본인의 조건보다 더 높은 신뢰도를 만족하면서 최소비용인 정책 1을 선택하게 된다. 이와 반대인 경우, 임차인의 신뢰도를 반영하여 정책 1과 정책 2의 데이터 셋의 범위를 재조정한다. 조정된 데이터 셋을 바탕으로 정책 별 최소비용을 비교하여, 더 작은 최소비용을 보장하는 정책을 선택한다.

3.2 종료 신뢰도를 고려한 의사결정

제3.1절에 이어서, 본 절에서는 임차인이 계약에 대해 고려하는 조건으로 종료 시점의 신뢰도를 고려한 상황에 대해 설명한다. 임차인이 종료 신뢰도만을 고려하는 경우, 임차인이 설정한 신뢰도 $R_{L(T)}$ 와 정책 1의 종료 신뢰도 $R_{L(1)}^*$, 정책 2의 종료 신뢰도 $R_{L(2)}^*$ 를 차례대로 비교한다.

$R_{L(T)}$ 가 $R_{L(1)}^*$ 보다 작거나 같은 경우, 임차인의 신뢰도 조건을 만족하면서 정책 1의 최소비용을 보장하는 신뢰도가 존재하기 때문에 임차인은 본인의 조건보다 더 높은 신뢰도를 만족하면서 최소비용인 정책 1을 선택하게 된다.

임차인의 신뢰도 $R_{L(T)}$ 가 $R_{L(1)}^*$ 보다는 크나 $R_{L(2)}^*$ 보다 작거나 같은 경우, 임차인의 신뢰도를 반영하여 정책 1과 정책 2의 데이터 셋의 범위를 재조정한다. 조정된 데이터 셋간의 비용을 비교하여 정책 2의 비용이 더 작은 경우, 임차인의 신뢰도 조건을 만족하면서 정책 2의 최소비용을 보장하는 $R_{L(2)}^*$ 가 존재하기 때문에 정책 2를 선택하게 된다. 그렇지 않은 경우, 정책 1의 비용이 정책 2의 비용보다 작은 경우가 존재하므로 조정된 정책 1의 최소비용을 보장하는 안을 선택한다. 마지막으로 $R_{L(T)}$ 가 $R_{L(2)}^*$ 보다 큰 경우, 정책 1과 정책 2의 데이터 셋의 범위를 조정한 후, 더 작은 최소비용을 보장하는 정책을 선택한다.

3.3 두 가지 신뢰도를 모두 고려한 의사결정

마지막으로 임차인이 신뢰도 한계와 종료 신뢰도를 모두 고려한 상황에 대해 설명한다. 두 가지 신뢰도를 모두 고려하는 경우, 먼저 임차인이 설정한 두 신뢰도 간의 대소 관계를 확인하고, 두 신뢰도와 정책 1과 정책 2의 최적 신뢰도와 대소 관계를 파악하며 의사결정한다.

임차인이 설정한 두 신뢰도간의 비교를 통해 총 세 가지의 상황이 존재하게 된다. 먼저 $R_{TH(T)}$ 가 $R_{L(T)}$ 보다 큰 경우에는 $R_{TH(T)}$ 와 $R_{TH(1)}^*$ 의 대소 관계를 우선 비교하고, $R_{L(T)}$ 와 $R_{L(1)}^*$, $R_{L(2)}^*$ 을 차례로 비교하여 정책 1의 최적값을 만족하는 대안이 나오는 경우와 정책 2의 최적값을 만족하는 대안 그리고 임차인의 조건을 데이터 셋에 반영하여, 최소비용 간 비교를 통해 정책을 결정한다.

임차인이 설정한 두 신뢰도가 같은 경우, $R_{L(T)}$ 와 $R_{L(1)}^*$, $R_{L(2)}^*$ 간의 비교를 통해 정책 1의 최적값을 만족하는 대안이 나오는 경우와 정책 2의 최적값을 만족하는 대안 그리고 임차인의 조건을 데이터 셋에 반영하여, 최소비용 간 비교를 통해 결정되는 경우가 나오게 된다.

마지막으로 $R_{TH(T)}$ 가 $R_{L(T)}$ 보다 작은 경우에는 본 연구의 정책 1과 정책 2의 신뢰도 결과와 다르게 도출이 되므로, 비용이 과다하게 지출되며, 신뢰도의 재설정을 요구하는 것으로 결정한다.

4. 수치예제

제2장에서는 신뢰도 한계기반 예방보전 모형의 정책 별 최적화 알고리즘을 통해 최소비용을 만족하는 예방보전 횟수와 신뢰도를 유도하였다. 또한, 제3장에서 제시한 의사결정 과정에 따라 임차인이 요구하는 신뢰도 조건에 의해 어떤 정책을 최종적으로 결정할 수 있는지를 확인하였다. 본 장에서 수행한 수치예제는 특정 장비 또는 시스템을 기간 L 동안 대여하고자 하는 임차인이 신뢰도 한계 또는 종료 신뢰도를 의사결정변수로 고려하여 최적의 예방보전 정책을 찾는 예제이다. 사용된 모수는 <Table 1>과 같으며, 고장강도함수의 모수 α , β 및 나이감소요인 $\rho_{(i,j)}$ 는 기존 연구에 근거하여 설정하였다[13, 14]. 또한, 임차인의 신뢰도 조건을 세 가지 상황으로 구분하여 의사결정 과정을 진행하였다. 실험은 정책 별 예방보전 횟수를 1회씩 순차 증가하여 30회까지의 신뢰도 한계, 종료 신뢰도, 총비용을 계산하였다. <Fig. 4>는 정책 1과 정책 2의 예방보전 횟수의 증가에 의한 신뢰도의 변화를 나타낸다. 실험 결과 예방보전 횟수가 증가함에 따라 신뢰도 한계는 증가하며, 총비용은 점차 감소하다가 특정 지점 이후로 다시 증가하는 형태를 보였다.

Table 1 Parameters of numerical example for preventive maintenance policy

L	α	β	$\rho_{(i,j)}$	C_{pm}	C_{mr}	C_{in}	Lessee's reliability conditions	
							$R_{TH(T)}$	$R_{L(T)}$
5	1.8	2.4	$\frac{j}{2j+1}$	150	200	500	0.750	0.650

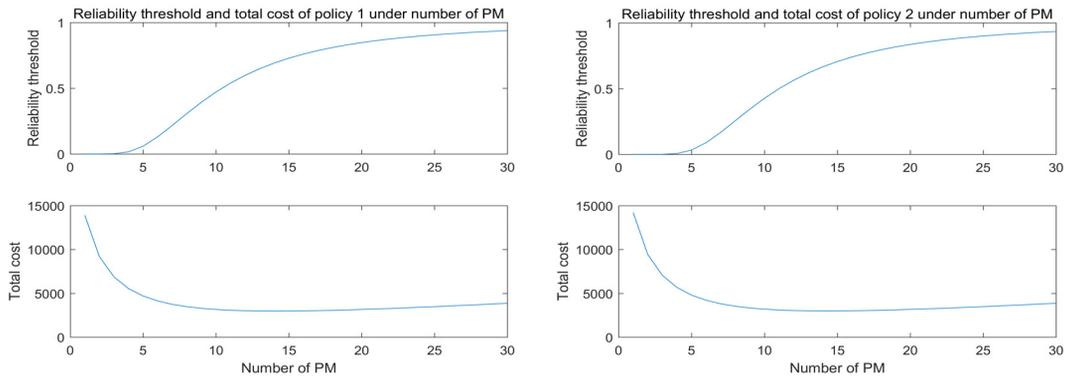


Fig. 4 Reliability threshold and total costs with respect to number of PM under policy 1, 2

정책 1의 최적 예방보전 횟수는 14회, 신뢰도 한계는 0.691, 종료 신뢰도는 0.456이고 이에 의한 최소비용은 2967.430로 나타났다. 본 연구에서 제시한 정책 1이 적절한 예방보전을 시행할 경우, 마지막 예방보전 시점까지는 신뢰도를 보증하면서 총비용을 최소화하는 결과를 보여준다. 정책 2의 최적 예방보전 횟수는 14회, 신뢰도 한계는 0.665, 종료 신뢰도는 0.665이며, 이에 의한 최소비용은 2986.232로 산출되었다. 이는 정책 2에서 적절한 예방보전 횟수를 수행하면 대기기간 전체 동안 신뢰도를 보증하면서 최소비용이 존재한다는 결과를 보여준다. 해당 수치예제의 데이터 셋 $D_{(i)}$ 는 <Table 2>에 나타나있다.

정책 1과 정책 2의 최적 예방보전 횟수는 동일하나 신뢰도 한계는 정책 1이 더 높은 수준으로 산출되었다. 또한, 총비용은 정책 1이 더 작은 비용을 보장하는 것으로 나타내었다. 정책 별 최적 신뢰도 한계, 종료 신뢰도의 대소 관계와 최적 결과값에 의한 최소비용을 비교해본 결과 식 (15)와 같은 조건을 만족하는 것으로 확인하였다.

$$\begin{aligned}
 R_{TH(1)}^* > R_{TH(2)}^* = R_{L(2)}^* > R_{L(1)}^*, \\
 TC_{(1)}(N_{(1)}^*, R_{TH(1)}^*, R_{L(1)}^*) & < TC_{(2)}(N_{(2)}^*, R_{TH(2)}^*, R_{L(2)}^*)
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

<Table 2>를 바탕으로 임차인의 신뢰도 요구조건별 의사결정을 수행한다. 첫 번째로 임차인이 신뢰도 요구조건으로 신뢰도 한계만 고려한 의사결정의 경우, 임차인이 설정한 신뢰도가 정책 1의 최적 신뢰도 $R_{TH(1)}^*$ 보다 크므로 <Table 2>의 데이터 셋을 조정하여 정책 1과 정책 2의 최소비용을 비교한다. 그 결과 정책 1의 최소비용이 2990.763로 더 작으며, 이에 해당하는 예방보전 횟수는 16회, 신뢰도는 0.759로 나타났다. 두 번째로 종료 신뢰도만 고려한 경우, 임차인이 설정한 종료 신뢰도가 정책 1의 최적 신뢰도 $R_{L(1)}^*$ 보다는 크나 정책 2의 $R_{L(2)}^*$ 보다 작은 상황에 해당하며, 데이터 셋의 조정을 통해 정책 간의 비용을 비교해본 결과 정책 2를 선택하게 되며, 정책 2의 최적값과 그에 따른 최소비용을 선택하게 된다. 마지막으로 두 신뢰도를 모두 고려한 의사결정의 경우, 임차인이 설정한 두 신뢰도를 비교한 결과, 신뢰도 한계가 더 크며, 정책 1의 최적 신뢰도 $R_{TH(1)}^*$ 보다 크므로 데이터 셋의 조정 후에 최소비용을 비교한다. 그 결과 정책 2의 최소비용이 3032.227로 더 작으며, 이에 해당하는 예방보전 횟수는 17회, 신뢰도 한계와 종료 신뢰도는 0.770으로 동일하게 나타났다. 임차인이 설정한 신뢰도 한계와 종료 신뢰도가 0.500으로 동일한 경우까지를 추가로 정리하여 <Table 3>에 나타내었다.

Table 2 Data set $D_{(i)}$ of PM policy

$N_{(i)}$	$R_{TH(1)}$	$R_{L(1)}$	$TC_{(1)}$	$R_{TH(2)}$	$R_{L(2)}$	$TC_{(2)}$
1	1.993E-11	1.849E-19	13900.808	6.600E-16	6.600E-16	14221.697
2	1.093E-05	6.825E-10	9180.501	2.410E-07	2.410E-07	9429.445
3	0.002	4.109E-06	6868.034	0.001	0.001	7049.637
4	0.016	0.001	5532.422	0.006	0.006	5667.014
5	0.059	0.004	4689.258	0.032	0.032	4791.536
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
10	0.471	0.208	3152.549	0.426	0.426	3187.633
11	0.539	0.273	3064.321	0.499	0.499	3093.906
12	0.598	0.338	3008.615	0.563	0.563	3033.826
13	0.648	0.399	2978.096	0.618	0.618	2999.779
14	0.691	0.456	2967.430	0.665	0.665	2986.232
15	0.728	0.508	2972.653	0.706	0.706	2989.077
16	0.759	0.555	2990.763	0.740	0.740	3005.206
17	0.786	0.597	3019.450	0.770	0.770	3032.227
18	0.810	0.635	3056.909	0.795	0.795	3068.275
19	0.830	0.668	3101.714	0.817	0.817	3111.875
20	0.847	0.698	3152.720	0.836	0.836	3161.846
21	0.862	0.725	3209.003	0.852	0.852	3217.234
22	0.875	0.749	3269.809	0.867	0.867	3277.261
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
27	0.921	0.835	3623.173	0.916	0.916	3627.939
28	0.927	0.847	3701.093	0.923	0.923	3705.488
29	0.933	0.858	3780.803	0.929	0.929	3784.865
30	0.938	0.869	3862.108	0.935	0.935	3865.872

Table 3 Decision-making under lessee's reliability conditions

Reliability conditions	Decision factors	$N_{(i)}$	$R_{TH(i)}$	$R_{L(i)}$	$TC_{(i)}$	Decision-making
$R_{TH(T)}: 0.750$ $R_{L(T)}: 0.650$	$R_{TH(T)}$ only	16	0.759		2990.863	Policy 1
	$R_{L(T)}$ only	14		0.665	2986.232	Policy 2*
	$R_{TH(T)}$ and $R_{L(T)}$	17	0.770	0.770	3032.227	Policy 2
$R_{TH(T)}: 0.500$ $R_{L(T)}: 0.500$	$R_{TH(T)}$ only	14	0.691		2967.430	Policy 1*
	$R_{L(T)}$ only	15		0.508	2972.653	Policy 1
	$R_{TH(T)}$ and $R_{L(T)}$	15	0.508	0.508	2972.653	Policy 1

* Optimal value of Policy i .

5. 결론

본 연구는 대여장비의 계약관계에 있어서 임차인의 초점에 맞춰 진행하였다. 임차인이 계약을 위해 고려하는 조건으로 비용뿐만 아니라, 대여기간 동안

고장 없이 장비의 성능을 보장받기 위한 신뢰도를 반영하였다. 또한, 예방보전을 통한 개선효과로 불완전 보전을 가정하였고, 장비의 수명을 가상 나이로 표현하였다. 나이감소요인을 적용하여 동일한 예방보전 비용 지급 시 장비의 열화로 인해 예방보전의 효과가

점차 감소하도록 묘사했다. 예방보전을 시행하기 위한 기준으로 신뢰도 한계를 사용했으며, 대여기간 동안 최소비용을 보장하기 위해 최적의 신뢰도 한계와 예방보전 횟수를 산출하는 알고리즘을 제시하였다.

신뢰도 한계와 종료 신뢰도를 임차인이 설정하는 신뢰도 요구조건으로 고려했으며, 신뢰도 기반 예방보전 모형의 두 정책을 수립하였다. 정책 1은 비용최소를 목적으로 하며, 정책 2는 대여기간 동안 신뢰도를 보장하는 것을 목적으로 하였다. 정책 별 최소비용을 산출하는 최적 신뢰도 한계와 예방보전 횟수가 존재함을 증명하였으며 이를 수치예제를 통해 최적값을 보였다.

이를 바탕으로 임차인의 신뢰도 요구조건을 고려하며 최소비용을 보장하는 예방보전 정책을 결정하기 위해, 의사결정 과정을 구성하였다. 의사결정 과정은 신뢰도 한계만 고려한 경우, 종료 신뢰도만 고려한 경우, 두 가지 신뢰도를 모두 고려한 경우로 나뉘어서 의사결정 과정을 구축하였으며, 수치예제를 바탕으로 임차인의 신뢰도 요구조건을 고려했을 때, 어떤 정책이 결정되는지를 확인하였다. 추후 연구로 실제 임차인의 조건을 더 반영할 필요가 있으며, 임차인의 의사결정 종료 시점에서 계약 만료, 재계약, 신규장비로 계약 등의 상황이 고려가능 할 것으로 판단한다.

References

- [1] Dasgupta, S., Siddarth, S. and Silva-Risso, J. (2007). "To lease or to buy? A structural model of a consumer's vehicle and contract choice decisions". *Journal of Marketing Research*, Vol. 44, No. 3, pp. 490-502.
- [2] Desai, P. and Purohit, D. (1998). "Leasing and selling: Optimal marketing strategies for a durable goods firm". *Management Science*, Vol. 44, No. 11, pp. S19-S34.
- [3] Nisbet, A. and Ward, A. (2001). "Radiotherapy equipment—purchase or lease?". *The British journal of radiology*, Vol. 74, No. 884, pp. 735-744.
- [4] Ebrahimi, M. and Sadeghi, M. (2013). "Quality management and performance: An annotated review". *International Journal of Production Research*, Vol. 51, No. 18, pp. 5625-5643.
- [5] Schutz, J. and Rezg, N. (2013). "Maintenance strategy for leased equipment". *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 66, No. 3, pp. 593-600.
- [6] Yeh, R. H., Chang, W. L. and Lo, H.-C., (2010). "Optimal threshold values of age and two-phase maintenance policy for leased equipments using age reduction method". *Annals of Operations Research*, Vol. 181, No. 1, pp. 171-183.
- [7] Yeh, R. H. and Chang, W. L. (2007). "Optimal threshold value of failure-rate for leased products with preventive maintenance actions". *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 46, No. 5, pp. 730-737.
- [8] Chang, W. L. and Lo, H.-C. (2011). "Joint determination of lease period and preventive maintenance policy for leased equipment with residual value". *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 61, No. 3, pp. 489-496.
- [9] Jung, K. M. (2012). "Preventive maintenance policy following the expiration of replacement-repair warranty". *Journal of Applied Reliability*, Vol. 12, No. 2, pp. 57-66.
- [10] Jung, K. M. (2014). "Preventive Maintenance Policy Following the Expiration of Extended Warranty Under Replacement-Repair Warranty". *Journal of Applied Reliability*, Vol. 14, No. 2, pp. 122-128.
- [11] Kim, T. H. and Na, M. H. (2011). "A Study on Optimal Preventive Maintenance Policy When Failure Rate is Exponentially Increasing After Repair". *Journal of Applied Reliability*, Vol. 11, No. 2, pp. 167-176.
- [12] Martorell, S., Sanchez, A. and Serradell, V. (1999). "Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions". *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 64, No. 1, pp. 19-31.
- [13] El-Ferik, S. and Ben-Daya, M. (2006). "Age-based hybrid model for imperfect preventive maintenance". *IIE Transactions*, Vol. 38, No. 4, pp. 365-375.
- [14] Lin, D., Zuo, M. J. and Yam, R. C. (2001). "Sequential imperfect preventive maintenance models with two categories of failure modes". *Naval Research Logistics*, Vol. 48, No. 2, pp. 172-183.