Check for updates

Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers
Vol. 52, No. 5, pp. 406-418, October 2026.
ISSN 1225-0988 | EISSN 2234-6457
https://doi.org/10.7232/JKIIE.2026.52.5.406
© 2026 KIIE

시뮬레이션 기반 (k, n) 모듈 시스템의 최적 정비정책 연구

손병관[1] · 조천천[2] · 윤원영[3] · 한영진[4†]

[1]광주미래차모빌리티진흥원 기업지원팀 / [2]정저우대학교(중국) 경영학과
[3]부산대학교 산업인공지능연구소, 네모시스(주) / [4]울산과학대학교 융합안전공학과

Simulation-based Optimal Maintenance Policy for (k, n) Module Systems

Byeong Kwan Son[1] · Zhao Qian Qian[2] · Won Young Yun[3] · Young Jin Han[4]

[1]Corporate Support Team, Gwangju Future Automotive Mobility Agency
[2]School of Management, Zhengzhou University(China)
[3]Industrial AI Research Institute, Pusan National University and Nemosys
[4]Department of Integrative Safety Engineering, Ulsan College

This paper investigates an optimal maintenance policy for a (k, n) module system under a performance-based warranty. The system consists of n groups, each containing k identical products, and exhibits partial degradation when some products fail. Therefore, a penalty cost is imposed once the system's degradation exceeds a specific limit. Due to this characteristic, maintenance is initiated when the number of failed products in the system reaches a predefined maintenance initiation threshold, which significantly affects the total warranty cost. To find the optimal policy, we develop a discrete-event simulation model to estimate the total expected warranty cost of the (k, n) module system during the warranty period. Sensitivity analysis examines the effect of key model parameters on the threshold and total warranty cost. In addition, three maintenance policies, corrective replacement only, group-based opportunistic preventive replacement, and life-based preventive replacement are compared in terms of the total expected warranty cost.

Keywords: (k, n) Module System, Performance-Based Warranty, Maintenance Initiation Threshold, Discrete-Event Simulation

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 필요성

일반적으로 보증은 일정 기간 제품이 의도된 기능을 수행하지 못할 경우, 소비자가 이에 대응할 수 있도록 지원하는 보상 수단으로 활용되고 있다. 지금까지 판매자가 다양한 형태의 보증 전략을 제시하고 사용하였는데, 최근에는 성능보증 정책(Performance-Based Warranty)이라는 새로운 형태의 보증 방식이 제안되어 적용되고 있다(Wang *et al.*, 2021; Dai *et al.*, 2023). 성능보증은 고객과 판매자가 제품의 성능 지표를 기반으로 계약을 체결하고, 보증기간 동안 발생할 수 있는 고객의 경제적 손실을 판매자가 일정 부분 분담하는 방식이다.

보증 정책에서 활용되는 성능 지표는 고장 횟수, 지연 시간 등 제품 특성에 따라 달라질 수 있으며, 성능보증에서 대표적으로 사용되는 지표는 가동률이다. 성능보증은 제품이 계약된 목표가동률을 달성하지 못할 경우 판매자가 부족분에 해당하

이 논문은 중국 국가자연과학재단의 지원(Grant No. 72101240), 허난성 주요 과학기술 프로그램(Grant No. 242102521030) 지원을 받아 수행되었음.
† 연락저자 : 한영진 교수, 44610 울산광역시 남구 대학로 57 울산과학대학교 융합안전공학과, Tel : 052-279-3153, Fax : 052-277-1538, E-mail : yjhan@uc.ac.kr
2026년 6월 29일 접수; 2026년 7월 22일 수정본 접수; 2026년 7월 23일 게재 확정.

는 경제적 손실을 보상하는 방식이다. 이러한 성능보증은 가동률 미달분 또는 핵심 성능의 열화를 보상하는 형태로 운영되며, 제품의 수명주기 동안 고장 없이 안정적으로 작동해야 하는 대규모・고신뢰성 장비에 주로 적용된다(Dai *et al.*, 2023, 2024). 출시 초기의 신제품은 성능에 대한 불확실성으로 인해 고객이 수익 감소를 우려할 수 있는데, 이 경우 판매자가 성능보증을 제안함으로써 고객의 부담을 완화할 수 있다.

국내에서도 성능보증은 신재생 에너지 관련 제품(ESS, Energy Storage System)에 널리 적용되고 있다. 해당 장비들은 전력 생산과 공급 과정에서 장시간 안정적인 운전이 요구되며, 고장으로 인한 가동 중단 시 경제적 손실이 크기 때문이다(Kim *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2024). 특히 배터리・ESS 분야에서는 용량・가동률과 같은 성능 지표를 보장하는 보증이 핵심 계약 요소로 다뤄지고 있다(Liu and Wang, 2025). 따라서 고객들은 성능보증 정책을 통해 제조업체와 위험을 분담함으로써 안정적인 장비의 운용을 보장받고자 한다. 이에 과거에는 제품 구매 시 가격을 우선으로 고려하였으나, 최근에는 가격뿐만 아니라 가동률을 보장하는 성능보증을 계약 조건에 포함하는 사례가 증가하고 있다. 반면에 판매자는 보증기간 동안에 고장 난 제품의 예방정비를 통해 목표가동률 미달성으로 인한 보상비용을 줄이고자 한다. 그러나 잦은 무상 정비는 가동 중단 시간을 증가시켜 오히려 전체 보증비용(정비비용, 페널티 비용 등)이 증가할 수 있다.

한편, 최근 신재생에너지 관련 시스템들은 동일한 기능을 하는 k개의 제품으로 이루어진 하나의 그룹이 n개로 구성된 (k, n) 모듈 구조를 지닌다. 실제로 대용량 ESS는 다수의 동일 단위(PCS 모듈, 배터리 모듈)를 병렬・다단으로 구성하는 모듈형 설계가 표준으로 자리잡고 있다(Liu *et al.*, 2022; Ma *et al.*, 2023). 예를 들어, PCS 8대로 이루어진 그룹이 총 15개라면 총 120대의 PCS로 구성된 (8, 15) 시스템이 된다. 또한 (k, n) 모듈 시스템은 일부 제품에서 고장이 발생하더라도 전체 시스템은 즉시 고장으로 정의되지 않고, 단지 성능이 저하되는 것으로 판단한다. 따라서 (k, n) 모듈 시스템의 성능을 평가할 때는 부분 고장에 따른 성능 저하를 반영하는 가동률이 적절하다(Yun and Kim, 2019; Bakeer *et al.*, 2022).

이와 같은 (k,n) 시스템을 구성하는 모든 제품은 동일한 기능을 수행하며 그룹 내 제품의 고장이 발생하면 해당 그룹 내 작동 중인 모든 제품을 정지시킨 후에야 고장복구가 가능하다. 그러나 한 그룹 내 일부 제품이 고장 나더라도 나머지 정상 제품을 정지하지 않는다면 해당 그룹은 여전히 정상적으로 작동할 수 있으며, 시스템 또한 정상 기능을 수행할 수 있다. 기존 보증 정책 연구에서는 하위시스템의 고장이 발생하면 즉시 정비를 수행하는 정비 정책을 주로 고려하였다. 그러나 부분 고장을 고려할 수 있는 (k,n) 모듈 시스템의 경우 고장이 발생할 때마다 즉시 정비를 시작하기보다는 시스템 내 다른 제품의 고장이 누적될 때까지 정비를 지연시킨 후 한 번에 다수의 고장 난 제품을 복구하는 것이 더 경제적일 수 있다.

다만, 정비를 시작하기 위해서는 정상적으로 작동 중인 제품도 강제로 정지시켜야 하며, 정비가 완료될 때까지 정지상태를 유지해야 한다는 점을 고려해야 한다. 즉시 정비를 할 때에는 정비 횟수가 많아져 총정비비용이 증가하고, 반대로 정비 지연이 길어질수록 고장 제품의 수가 늘어나 시스템의 가동률이 저하된다. 이에 따른 페널티 비용이 증가해 결과적으로 총 보증비용이 커질 수 있다. 따라서 성능보증 기간에 판매자가 부담하는 총 보증비용을 최소화하기 위해서는 시스템 내 고장 제품의 수가 적정 기준에 도달했을 때 정비하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 성능보증 정책하에 보증기간 내 판매자의 총 보증비용을 최소화할 수 있도록 (k, n) 모듈 시스템의 정비시작기준, 즉 고장 난 제품 수를 결정하는 최적화문제를 다룬다.

1.2 기존 연구

성능보증정책 관련 초기 연구에서는 주로 단일 제품의 가동률 기반 보증비용 구조를 분석하였다. Su and Cheng(2018)은 Q개의 동일한 장비(풍력 터빈 기어박스)를 대상으로 가동률 기반 보증정책하에서 보증비용을 최소화하는 최적 예방정비 주기 결정을 연구하였다. 이들은 보증기간에 발생하는 고장은 최소수리로 정비하고, 목표가동률을 만족시키면서 단위시간당 보증비용률을 최소화하는 불완전한 예방정비의 최적 주기를 도출하였다. Wang *et al.*(2020)은 성능 기반 계약하에서 두 종류의 고장 모드(열화・충격)를 가지는 단일 시스템의 상태기반 정비 정책을 연구하였다. 시스템은 정상・열화・고장의 3단계로 상태가 전이되는 특성하에서 서비스 제공자의 기대이익률을 최대화하는 최적 점검 간격과 예방교체 임계값을 결정하였다. Wang *et al.*(2021)은 즉시 작동 불능이 되는 고장(Hard Failure)과 점진적으로 성능이 저하되는 고장(Soft Failure)이 경쟁적으로 발생하는 단일 시스템의 성능보증을 연구하였으며, 세 가지 보상 정책(무상교체, 페널티, 전액 환불)을 비교하여 최적의 보상 방식을 제시하였다.

최근 성능보증정책 연구에서는 비용 임계값 및 학습효과를 통합하는 방향으로 연구가 진행되고 있다. Dai *et al.*(2023)은 보증기간을 교체 구간과 수리 구간으로 구분하고, 설정된 정비비용 한도를 초과하거나 제품의 수명이 일정 기준에 도달하면 보증이 종료되는 정책을 다루었다. 또한, 제조업체의 총 기대이익을 최대화하는 최적 보증설계(제품 가격, 보증기간, 성능보증 수준)를 도출하였으며, 두 가지 보증정책과의 수치 비교를 통해 제안한 정책의 유효성을 검증하였다. 이후 Dai *et al.*(2024)은 자신의 2023년도의 보증설계 연구를 성능 기반 계약하의 정비 정책 연구로 확장하였다. 계약 기간 중에는 열화 수준이 임계값에 도달하면 예방정비를 수행하고, 계약 종료 시점에는 업그레이드를 수행하는 정비 정책을 제시하였다. 계약이 누적될수록 학습효과로 인해 정비비용이 절감되고 소요

시간이 단축되는 구조를 모형화하고, 이를 바탕으로 OEM의 기대순이익을 최대화하는 계약 기간별 최적 예방정비 임계값과 개선계수를 결정하였다.

한편, 보증 정비에서 정비의 개시·전환을 결정하는 임계값으로 수리시간(Repair Time Threshold)을 활용한 연구도 있었다. Park *et al.*(2013)은 갱신형 최소수리-교체 보증하에서 수리시간이 임계값을 초과하면 교체로 전환하는 정책을 제시하고, 보증종료 후 정비까지 포함한 수명주기 단위시간당 비용률을 최소화하였다. Park *et al.*(2026)은 이를 확장하여 수리시간 임계값과 보증기간을 동시에 결정함으로써 제조사의 기대이익을 최대화하는 보증·가격 설계를 제안하였다.

위 선행연구들은 성능보증하에서 단일 시스템을 대상으로 최적 정비 정책을 다루고 있으나, 실제 산업시스템은 다수의 부품으로 구성되는 복잡한 구조를 가지는 경우가 많다. 이에, 부분 고장을 허용하는 중복 설계 구조인 k-out-of-n 시스템에 대한 정비 정책 연구도 진행되었다. Yun and Kim(2019)이 성능보증정책하에서 (k, n) 모듈 시스템의 가동률 기반 보증정책을 연구하였다. 보증기간 중에 시스템 가동률이 목표가동률에 미달하면 판매자가 페널티 비용을 지급하는 구조를 정의하고, 제품 고장시간이 지수분포를 따른다는 가정하에서 Markov Chain을 활용하여 시스템 가동률을 도출하였다. 또한 모델 파라미터가 가동률에 미치는 영향을 수치 예제를 통해 분석하였다.

Safaei *et al.*(2022)은 k-out-of-n:F 시스템을 대상으로 최적 예방정비 정책을 연구하였다. Age Replacement와 Minor Repair를 결합한 혼합 예방정비 정책을 통해 시스템 교체 후 잔여 부품의 중고품 판매 수익을 함께 고려하여 장기 평균비용을 최소화하였다. 수치 실험을 통해 제약조건(비계획 교체 발생 상한, 운영시간 향상)을 만족하는 최적 Minor Repair 시작 기준과 횟수, 계획교체 시점을 도출하였다. Liu *et al.*(2024)은 k-out-of-n:G 시스템의 상태 기반 정비와 비주기적 검사를 연계한 최적 정비 정책을 연구하였다. 다수의 부품을 동시에 점검하면 고정비용이 절감되는 경제적 의존성하에서 시스템의 상태에 따라 검사 간격을 동적으로 조절하는 비주기적 검사 정책을 적용하였다. 또한, 단위시간당 평균비용률을 목적함수로 하고, Dynamic Programming을 활용하여 최적 검사 간격을 결정한 다음, 예방정비 임계값과 최적 부품 수를 탐색하였다.

Zhang et al.(2021)과 Zhang and Fang(2025)은 임무 수행 중에는 예방교체를 수행할 수 없다는 운용 환경에 주목하여, 블록교체와 수명교체에 각각 임무 구간을 통합한 정비정책을 제안하였다. 특히, Zhang and Fang(2025)은 k-out-of-n 구조를 가지는 무인 드론 엔진 시스템의 세 가지 정책(단순 교체, 교체 우선, 교체 후순위)의 부품 총수와 계획교체 시간을 단위시간당 기대비용률을 목적함수로 해석적 방법으로 최적화하였다.

한편, (k, n) 모듈 시스템처럼 다부품 모듈 구조에서의 정비 특성을 가진 시스템의 비용 지표와 가동률은 해석적 방법으로 계산하기 어려운 경우가 많으므로, 이를 해결하기 위해 시뮬레이션 기반 접근법이 효과적인 방법이다. Golbasi and Turan (2020)은 이산사건 시뮬레이션(Discrete-Event Simulation, DES)을 활용하여 광산 토공 작업(Earthing Operation)의 다양한 정비 시나리오(수정정비, 예방정비, 기회정비 조합)를 모형화하였다. 이를 바탕으로 시스템 가동률 최대화 또는 총정비비용 최소화를 목적함수로 하는 시스템의 최적 정비 시나리오를 탐색하였다. Jung *et al.*(2022)은 다계층(Multi-level)으로 구성된 자동차의 2차원 보증정책을 연구하였다. 특히 제조사에서 보증하는 단위(부품 또는 모듈)에 따라 보증비용이 달라질 수 있는 한국형 레몬법하에서 다계층 구조의 복잡성으로 인해 보증기간 내 총 보증비용(누적 수리비용, 환불 비용)의 수학적 해석이 어려워, Monte Carlo 시뮬레이션을 활용하였다. Oszczypała *et al.* (2024)은 k가 확률변수인 k-out-of-n 병렬 시스템의 신뢰성 분석 및 중복설계 최적화를 연구하였다. 업무량이 동적으로 변하는 운영 환경에서 시스템의 가동에 필요한 k가 확률분포를 따른다는 가정하에서 연속시간 마르코프 연쇄(Continuous-Time Markov Chain)와 Monte Carlo 시뮬레이션을 병행하여 시스템의 가동률과 기술적 성능을 만족하는 최적 부품 수 n을 도출하였다. 이처럼 다수 부품으로 구성된 시스템에서는 한 부품의 고장과 정비를 계기로 다른 부품을 함께 정비하면 고정비용을 분담할 수 있는 경제적 의존성(Economic Dependence)이 존재하며, 이를 활용한 기회정비·일괄정비가 효과적인 것으로 알려져 있다(Golbasi and Turan, 2020; Liu *et al.*, 2024). 그러나 이러한 연구들은 정비를 일괄적으로 수행하는 방식에 초점을 두었을 뿐, (k, n) 모듈 시스템에서 언제 개시할지를 결정하는 고장 수 기반 정비시작기준에 관한 연구는 충분히 이뤄지지 않았다.

이처럼, 기존 성능보증 연구에서도 k-out-of-n 시스템을 대상으로 한 다양한 정비 정책이 다루어졌으나, (k, n) 모듈 시스템의 운용과 정비 특성(부분 고장, 그룹별 가동 상태, 정비 개입 시점 등)을 구체적으로 반영한 연구는 많지 않다. 특히 본 연구와 가장 가까운 Yun and Kim (2019)은 동일한 (k, n) 모듈 시스템을 다루었으나, 지수분포 가정하의 Markov 모형으로 가동률을 분석하는 데 그쳤을 뿐 정비시작기준의 최적화나 정비 정책 간 비용 비교는 다루지 않았다. 반면 본 연구는 (1) 일반 고장분포(예: Weibull)를 수용하는 이산사건 시뮬레이션으로 (k, n) 모듈 시스템의 운용과 정비 특성을 모형화하고, (2) 총 보증비용을 최소화하는 최적 정비시작기준을 도출하며, (3) 고장교체 정책과 두 가지 예방교체 정책을 비용 측면에서 비교한다는 점에서 차별성을 가진다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 (k, n) 모듈 시스템의 최적 정비 정책 문제를 설명한다. 3절에서는 성능보증 기간 중 (k, n) 모듈 시스템의 총 보증비용을 산출하기 위해 제시한 시뮬레이션 모형을 설명한다. 4절에서는 시뮬레이션을 활용하여 다양한 수치 예제를 수행하고 결과를 분석한다. 5절에서는 결론을 제시한다.

2. (*k*, *n*) 모듈 시스템 정의 및 정비 정책

2절에서는 동일한 기능을 가진 제품 k개로 이루어진 그룹이 n개 존재하는 (k,n) 모듈 시스템의 운용과 정비 특성을 설명한다. 이어서 총 보증비용의 구성요소를 제시하고, 정비시작기준에 기반한 정비 정책 문제를 설명한다. 본 연구에서 이용될 기호는 다음과 같다.

k : 한 그룹에 포함된 동일 제품의 개수
n : 시스템을 구성하는 그룹의 총개수
N: 시스템 내 총 제품의 개수($N=k\times n$)
m : 정비시작기준
m^* : 최적정비시작기준
I_{m^*} : 정비시작기준이 m^*에서의 정비발생간격
ϵ : 수명기반 예방교체 임계값 계수
θ : 수명기반 예방교체 임계값
A_T : 성능보증 계약에 명시된 목표가동률
$A(t)$: t 시점에서의 시스템 가동률
A_{avg} : 보증기간 동안의 평균가동률
$N_f(t)$: t 시점에서의 고장 난 제품의 수
$N_s(t)$: t 시점에서의 강제 정지된 정상 제품의 수
t_i : i번째 이벤트의 발생 시점
$\triangle t_i$: i번째 이벤트 구간의 지속시간(t_i부터 다음 이벤트 발생 전까지의 길이)
W : 성능보증기간($=\sum \triangle t_i$)
TWC : 보증기간 동안 발생하는 총 보증비용
TC_m : 모든 정비 작업에서 발생한 총 고정비용
TC_r : 보증기간 고장교체 및 예방교체에 드는 총 교체비용
TC_p : 목표가동률 미달로 인해 발생하는 총 페널티 비용
C_m : 정비 1회 수행 시 발생하는 고정비용
C_r : 제품 또는 부품 1개 교체에 드는 단위 비용
C_p : 목표가동률 미달에 대한 단위 페널티 비용
TN_m : 보증기간 내 전체 정비 횟수
TN_c : 보증기간 내 전체 고장교체된 제품의 총 개수
TN_p : 보증기간 내 전체 예방교체된 제품의 총 개수
TP : 목표가동률에 미달한 정도와 그 지속시간의 곱을 누적한 값

2.1 (*k*, *n*) 모듈 시스템의 운용과 정비 특성

<Figure 1>은 본 연구에서 고려하는 (k,n) 모듈 시스템의 구조를 나타내며, 이 시스템은 다음과 같은 운용 및 정비 특성을 가진다.

(1) 그룹 내 일부 제품이 고장 나더라도 나머지 정상 제품은 계속 작동하며, 그룹은 운용 상태를 유지한다.
(2) 정비 중인 그룹은 시스템 가동에 관여하지 못하므로, 정비 시점과 기간이 시스템의 전체 가동률에 직접적인 영향을 미친다.
(3) 제품 고장이 발생하더라도 즉시 교체하지 않고, 시스템 내 고장 제품의 수가 정비시작기준에 도달할 때까지 교체를 지연한다.
(4) 교체는 그룹 단위로 수행되며, 이 과정에서 그룹 내 정상 제품도 강제로 정지된다.
(5) 그룹 내 모든 고장 제품의 교체가 완료되면, 강제로 정지된 정상 제품을 포함하여 그룹 전체가 동시에 정상 작동을 재개한다.

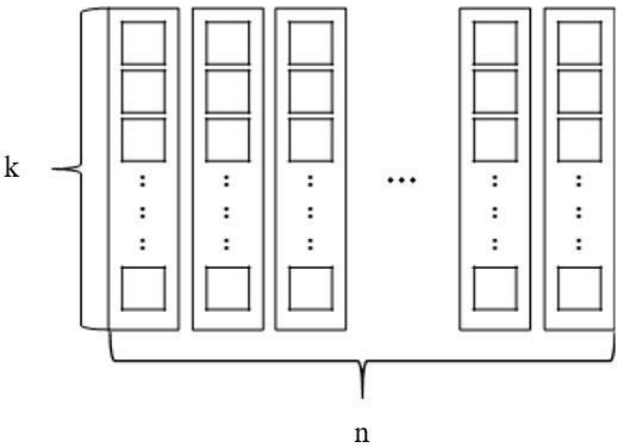


Figure 1. Structure of a (k,n) System(Example)

이와 같은 운용 및 정비 특성으로 인해 일부 제품이 고장 나거나 정비 중일 때도 시스템은 일정 수준의 기능을 유지할 수 있으므로, 시스템의 전체 성능을 평가하기 위한 지표로 가동률을 사용하는 것이 적절하다. 따라서 본 연구에서는 Yun and Kim(2019)이 제시한 산정 방식에 따라 (k,n) 모듈 시스템의 가동률을 전체 제품 수 대비 현재 작동 중인 제품 수의 비율(%)로 정의하며, 여기서 작동 중인 제품 수는 전체 제품의 총수에서 고장이 발생했거나 정비 과정에서 강제로 정지된 제품을 제외한 값으로 계산된다. 이를 식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$A(t)=(N-N_f(t)-N_s(t))/N\times 100(\%) \quad (1)$$

<Figure 2>는 $(4,2)$ 시스템의 정비 특성을 보여주는 예로, 시스템 내 고장 난 제품의 수를 기준으로 고장 난 제품이 교체되는 과정과 그에 따른 가동률 변화를 보여준다. 먼저 정비시작기준이 고장 난 제품의 수가 3개일 때 시스템의 가동률은 63%이다. 이때 오른쪽 그룹의 고장 난 제품 2개를 먼저 복구하기 위해 같은 그룹에서 작동 중인 제품 2개를 강제 정지시키며, 정비를 마칠 때까지 시스템의 가동률은 38%로 유지된다(왼쪽 그룹에서 추가 고장이 없는 경우). 이후 오른쪽 그룹의 모든 제품을 다시 작동하면 가동률은 50%까지 상승한다. 한편 정비시작기준이 5개일 때에는 오른쪽 그룹 내 4개 제품이 다

시 작동하기 전까지 가동률은 최저 25%까지 낮아진다. 이후 고장 난 제품이 모두 복구되고 모든 제품이 작동하면 가동률은 50%, 100%로 회복된다.

이와 같은 정비 특성으로 인해 그룹 내 고장 제품의 정비 과정에서 정상적으로 작동 중이던 제품이 강제로 정지되는 시점부터 재가동되는 시점까지의 시간은 시스템의 비가동시간에 포함되며, 이는 가동률의 일시적 저하로 이어진다. 예를 들어 자동차의 타이어나 항공기의 엔진과 같이 안전과 직결되는 시스템에서는 구성 제품 중 단 하나라도 고장이 발생하면 즉시 정비를 수행하는 것이 일반적이다. 반면 제품의 고장이 안전보다는 생산성에만 영향을 미칠 때는 고장 제품의 교체를 일정 시점까지 지연하는 것이 경제적일 수 있다. 본 연구에서 고려하는 (k, n) 모듈 시스템은 평가 지표 중 안전성을 제외하고 가동률만을 대상으로 한다. 따라서 제조사 입장에서는 보증기간 내 목표가동률 제약하에서 총 보증비용을 최소화할 수 있는 최적 정비시작기준을 결정하는 것이 중요한 의사결정 과제가 된다.

한편, 시스템 내 고장 제품을 교체할 때는 고장이 발생하지 않았더라도 노후화된 제품을 함께 교체하면, 상대적으로 적은 비용으로 향후 발생할 수 있는 고장을 예방할 수 있다. <Figure 3>은 정비시작기준이 3개일 때 고장교체와 예방교체 과정을 예로 보여준다. 총 8개 제품 중 3개가 고장 나면 정비가 수행되며, 이때 고장 난 제품을 복구하기 위해 해당 그룹 내 작동 중인 모든 제품이 강제로 정지된다.

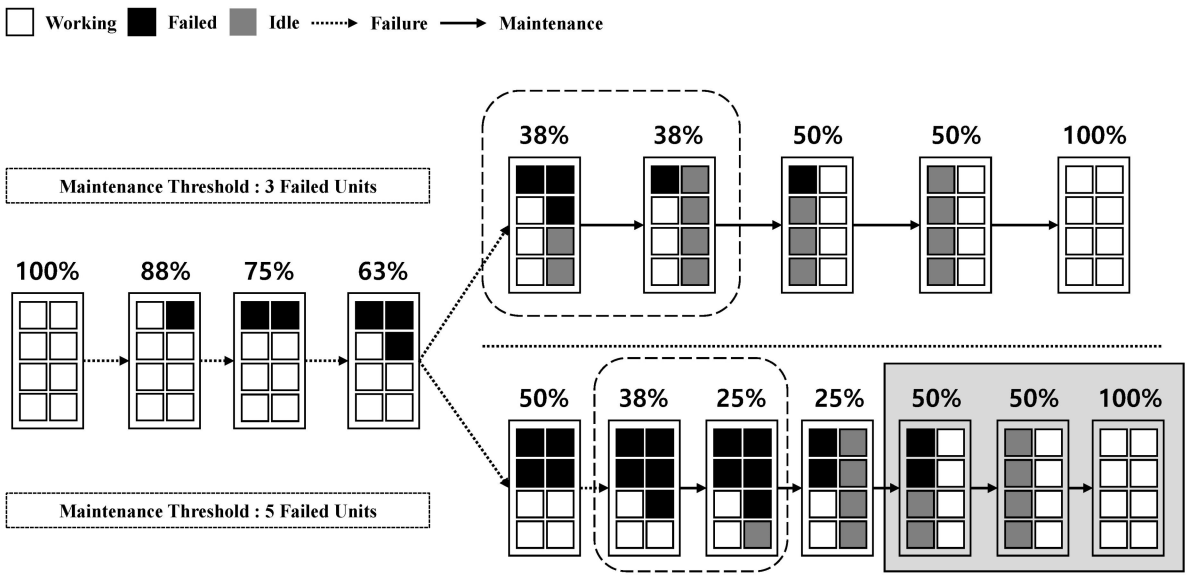


Figure 2. Failure Replacement in a $(4, 2)$ System (Example)

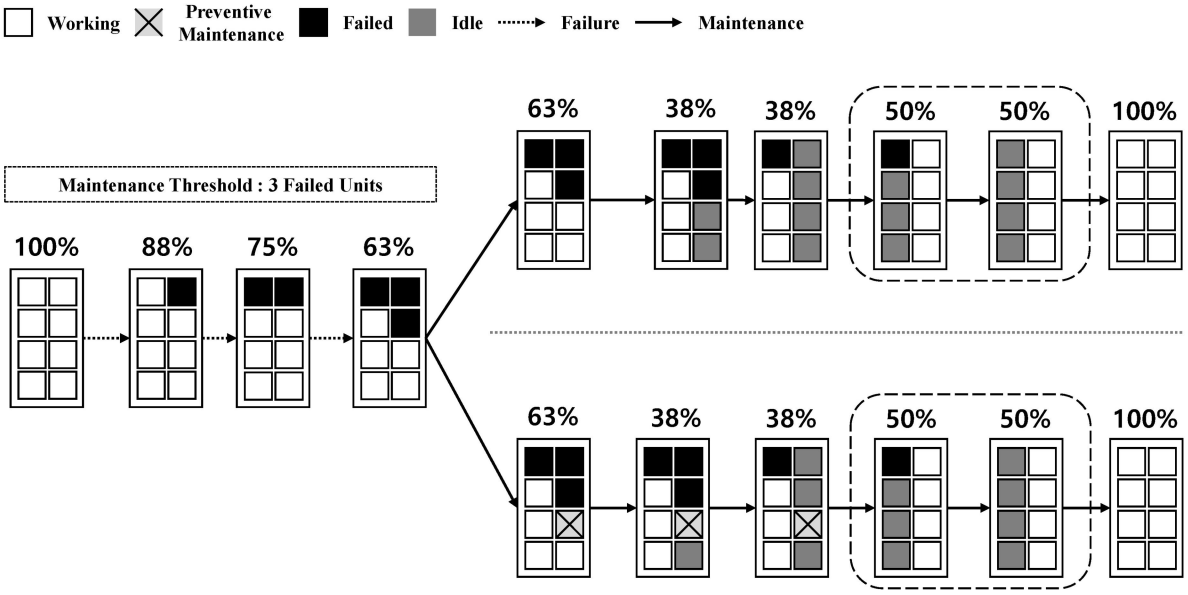


Figure 3. Failure Replacement and Preventive Replacement in a $(4, 2)$ System (Example)

상단과 하단 흐름의 공통점은 정비가 수행될 때마다 정비고정비용이 1회 발생한다는 점이고, 차이점은 하단 흐름에서는 고장교체와 함께 강제 정지된 제품에 대한 예방교체가 이루어진다는 점이다. 정비고정비용이 높은 경우, 예방교체를 병행하면 향후 고장 발생과 그에 따른 정비 횟수를 줄여 총 보증비용의 절감 효과를 기대할 수 있다. 그러나 반대로 정비고정비용이 매우 낮거나 제품 교체 비용이 상대적으로 높은 경우에는 예방교체가 경제적이지 않을 수 있다. 따라서 예방교체 기준은 고장 발생 감소 효과와 총 보증비용에 미치는 영향을 종합적으로 고려하여 설정해야 한다.

위와 같은 (k, n) 모듈 시스템의 운용 및 정비 특성에 따라, 본 연구에서 고려하는 시스템의 고장 및 교체와 관련된 가정은 다음과 같다.

(1) 시스템은 동일한 크기의 그룹 n개로 구성되며, 각 그룹은 k개의 동일한 제품을 포함한다.
(2) 시스템 내 각 제품의 고장은 서로 독립적으로 발생한다.
(3) 고장 제품은 동일한 새 제품으로 교체된다.
(4) 정비가 이루어지지 않는 그룹의 제품들은 정비 중인 그룹과 무관하게 독립적으로 작동한다.
(5) 둘 이상의 그룹에 대한 정비는 동시에 수행되지 않으며, 한 그룹의 정비가 완료된 후 다른 그룹의 정비가 순차적으로 진행된다.

2.2 (k, n) 모듈 시스템의 보증비용과 정비정책 시나리오

(k, n) 모듈 시스템의 정비 정책을 평가하기 위해서는 보증기간 제조사가 부담해야 할 총 보증비용(TWC)를 고려해야 한다. 식 (2)와 같이 TWC는 총 정비고정비용(TC_m), 총 교체비용(TC_r), 그리고 총 페널티비용(TC_p)로 구성되며, 시뮬레이션 기법을 활용하여 각 비용 항목의 기대비용을 추정한다.

$$E[TWC] = E[TC_m] + E[TC_r] + E[TC_p] \quad (2)$$

총 기대정비고정비용($E[TC_m]$)은 정비 인력 투입, 장비 정지, 안전조치 등과 같이 정비 횟수에 비례하여 발생하는 자원 소모를 반영하며, 정비 1회당 고정 단가(C_m)과 기대 총정비 횟수($E[TN_m]$)을 이용하여 식 (3)과 같이 정의된다.

$$E[TC_m] = C_m \times E[TN_m] \quad (3)$$

총 기대교체비용($E[TC_r]$)은 정비 과정에서 소모되거나 교체되는 제품과 부품에 대한 재료비의 총 기대비용으로, 시스템의 정상 가동을 위해 불가피하게 발생하는 직접적인 물적 비용이다. 교체 제품의 단가(C_r)와 총교체된 제품의 개수($E[TN_c] + E[TN_p]$)를 이용하여 식 (4)와 같이 산출한다.

$$E[TC_r] = C_r \times (E[TN_c] + E[TN_p]) \quad (4)$$

총 기대페널티비용($E[TC_p]$)는 특정 시점 t에서 시스템 가동률($A(t)$)가 목표가동률(A_T)에 미달하는 경우 부과되는 불이익 비용의 기댓값이다. 목표가동률에 미달한 정도와 그 지속시간의 곱을 누적한 값을 TP로 정의하고, 단위 페널티비용(C_p)를 곱하여 식 (5)와 같이 산출한다.

$$E[TC_p] = C_p \times E[TP] \quad (5)$$

한편, 본 연구에서는 (k, n) 모듈 시스템에 적용할 수 있는 세 가지 정비정책 시나리오를 설정하고, 시뮬레이션을 통해서 각 정책의 총 보증비용을 비교・평가한다.

(1) 고장교체 정책: 시스템 내 고장 제품의 총수가 정비시작 기준에 도달하면 정비를 개시하고, 고장 상태의 제품만을 새 제품으로 교체하는 정책
(2) 기회적 일괄 예방교체 정책: 고장에 의해 정비 기회가 발생하며, 해당 그룹 내 고장 제품의 교체와 함께 가동 이력이 있는 모든 제품을 일괄 예방교체하는 정책
(3) 수명 기반 기회적 예방교체 정책: 정비 기회 발생 시 고장 제품을 교체하는 동시에, 수명이 임계값 이상인 제품만 예방교체하는 정책

3. (k, n) 모듈 시스템의 시뮬레이션 모델

본 연구가 고려하는 Weibull 고장분포에서는 각 제품의 고장률이 사용시간에 따라 변하여 지수분포의 무기억성에 기반한 Markov 해석 모형(Yun and Kim, 2019)이 성립하지 않으며, 지수분포를 가정하더라도 (8, 15) 규모에서는 상태 수가 급증하여 해석적 계산이 사실상 불가능하다. 이에 본 연구에서는 (k, n) 모듈 시스템에서 발생하는 이벤트(고장, 교체 등)를 시간 순서에 따라 처리하고, 각 이벤트 발생 시점마다 시스템 가동률을 계산하여 이를 기반으로 총 기대보증비용을 추정하는 이산사건 시뮬레이션 모델을 설계하였다.

3.1 시뮬레이션 주요 모듈

시뮬레이션은 시스템의 초기 상태에서 시작하여, 고장 및 정비 이벤트를 시간 순서대로 처리한다. 각 제품의 고장시간과 정비시간은 입력된 확률분포를 바탕으로 생성되며, 특정 제품의 고장이 발생하면 시스템 전체의 고장 제품 수에 누적된다. 시스템 내 고장 제품의 총수가 정비시작기준에 도달하면 정비가 개시되며, 이때 정비 대상 그룹 내 정상 가동 중인 제품은 정비 완료 시점까지 운용을 멈춘다. 이 과정은 이벤트 큐에서 발생 시간순으로 처리되며, 매 이벤트 처리 후 시스템의 상태를 갱신한다.

$A(t)$는 이벤트와 이벤트 사이에서 일정하게 유지되고, 이벤트 발생 시점에만 변하므로, i번째 이벤트 직후의 구간 가동률($A(t_i)$)는 다음 이벤트가 발생하기 전까지 구간 길이($\triangle t_i$)동안 유지된다. 따라서 보증기간 동안 평균가동률(A_{avg})는 각 구간의 가동률을 구간 길이로 가중하여 식 (6)과 같이 산출한다.

$$A_{avg} = \frac{1}{W}\sum_i A(t_i)\triangle t_i \tag{6}$$

또한, 2.2절에서 정의한 TP는 각 구간의 목표가동률 미달분에 구간 길이를 가중하여 식 (7)과 같이 산출한다.

$$TP = \sum_i \max(A_T - A(t_i), 0)\triangle t_i \tag{7}$$

시뮬레이션 종료 후 누적된 가동률 면적을 활용하여 평균가동률과 페널티 면적을 각각 식 (6), 식 (7)로 산출하고, 이를 성능보증비용 평가에 활용한다.

한편, 시뮬레이션 모델은 ① 시스템 구조 · 정비정책 · 비용 항목 등 실험 환경 설정, ② 고장 및 정비 완료 이벤트의 시간 순 처리, ③ 가동률 · 비용 항목의 통계 집계, ④ 동일 조건 반복 실행을 통한 평균 및 신뢰구간 산출의 네 가지 기능 모듈로 구성된다.

3.2 시뮬레이션 실행 단계

본 연구의 시뮬레이션은 (k, n) 모듈 시스템의 운용과 정비 특성을 모사하기 위해 일련의 단계적 절차로 수행되며, 입력정보 설정에서부터 이벤트 처리, 통계 집계, 반복 실행에 이르기까지 순차적으로 진행된다.

Step 1: 입력정보 설정 : 시스템 구조, 고장 및 정비시간 분포, 정비시작기준, 시뮬레이션 시간, 비용 항목 등 필수 파라미터를 정의한다.

Step 2: 이벤트 초기화: 시스템의 초기 상태를 정상으로 설정하고, 각 제품의 고장시간을 확률분포 기반으로 생성하여 이벤트 큐에 등록한다.

Step 3: 이벤트 추출: 이벤트 큐에서 가장 이른 시점의 이벤트를 추출한다.

3.1: 추출된 이벤트 시각이 보증기간 종료시간 이상이면 Step 6으로 이동한다. 그렇지 않으면, Step 4를 수행한다.

Step 4: 이벤트 처리 및 통계 갱신 : 이벤트 처리 후 직전 구간의 가동률과 경과시간의 곱을 가동률 면적으로, 목표가동률 미달분을 페널티 면적으로 누적하고, 정비 횟수, 교체 수량, 비용 항목을 집계한다. 이벤트 유형이 고장 발생이면 4.1로, 정비 완료이면 4.2로 이동한다.

4.1: 해당 고장이 현재 정비 중인 그룹에서 발생한 경우, 이벤트를 무시하고 Step 3으로 이동한다. 아니라면, Step 4.1.1로 이동한다.

4.1.1: 해당 제품의 상태를 고장으로 전환하고 시스템 전체 고장 수를 갱신한다.

4.1.2: 갱신된 고장 수가 정비시작기준에 도달했다면, Step 5로 이동한다. 그렇지 않으면, 다음 고장시간을 생성하여 큐에 등록한 후 Step 3으로 이동한다.

4.2: 해당 제품의 교체를 완료하고 교체 비용을 기록한다 (해당 제품의 사용 이력을 0으로 초기화).

4.2.1: 해당 그룹에 교체 대기 중인 고장 제품이 남아 있는 경우 다음 제품의 교체를 예약하고 Step 3으로 이동한다. 그렇지 않으면, Step 4.2.2로 이동한다.

4.2.2: 해당 그룹의 고장 제품 교체가 모두 완료되면, 적용된 정비 정책에 따라 추가 예방교체를 수행한 뒤 교체 비용을 기록한다(사용 이력을 0으로 초기화).

4.2.3: 그룹 정비를 종료하고 해당 그룹의 모든 제품을 정상 상태로 복귀시킨 다음 새로운 고장시간을 생성한다.

4.2.4: 정비를 대기 중인 다음 그룹이 있는 경우 해당 그룹의 정비를 시작하고 Step 3으로 이동한다. 없으면 정비를 종료한 후 Step 3으로 이동한다.

Step 5: 정비 예약 : 그룹별 고장 수를 기준으로 정비 순서를 결정하고, 정비 소요 시간을 기반으로 정비 완료 이벤트를 큐에 등록한다. 그다음 해당 제품의 다음 고장 시간을 생성하여 큐에 등록한 후 Step 3으로 이동한다.

Step 6: 반복 실행 : 반복 횟수가 남아 있다면, Step 2로 이동하여 재실행한다. 아니라면, 평균값과 신뢰구간을 포함한 최종 결과를 산출한다.

본 연구에서는 위 절차를 세 가지 정비 정책에 동일하게 적용하되, Step 4.2.2의 예방교체 수행 여부와 대상 선정 기준만 정책별로 달리하였다. 고장교체 정책 (1)에서는 Step 4.2.2를 진행하지 않으며, 기회적 일괄 예방교체 정책 (2)에서는 정비로 정지된 정상 제품 중 가동 이력이 있는 모든 제품을, 수명기반 예방교체 정책 (3)에서는 누적 작동시간이 임계값 이상인 제품을 예방교체 대상으로 선정한다.

4. 시뮬레이션 기반 (k, n) 모듈 시스템 수치실험

4절에서는 수치 예제 실험을 수행하여 입력변수의 변동이 시스템의 가동률과 총 기대보증비용에 미치는 영향을 정량적으로 분석한다. <Table 1>은 수치 실험에서 적용된 입력정보로 총 120개 제품으로 구성된 $(8, 15)$ 시스템을 고려한 것이다.

본 연구는 $(8, 15)$ 모듈 시스템의 운용 조건을 다양하게 설정한 후 수치 실험을 수행하였다. 구체적으로 (1) 목표가동률별 최적 정비시작기준을 도출하고, (2) 기준조건에서 고장시

Table 1. Model Parameters in Numerical Experiments for a (8, 15) Module System

Category	Parameters	Value	Unit
Warranty	Warranty Period	87600(=10x365x24)	Hour
System	Number of Groups	15	-
	Number of Products per Group	8	-
	Total number of products	120	-
Failure/ Maintenance	Failure	Weibull(1200, 1.5)	Hour
	Maintenance	Normal(5.0, 0.5)	Hour
Cost	Fixed Cost	125,000	KRW
	Replacement Cost	40,000	KRW/Unit
	Penalty Cost	86.4	KRW/(% · h)

Note: Penalty Cost is charged per 1%p shortfall in availability per hour.

Table 2. Convergence Analysis Results for the Number of Simulation Repetitions

Maintenance Initiation Threshold	Number of Simulation Repetitions		Rate of Change(%)		95% CI(±, %)	
	Baseline (50)	Comparison (70, 100)	$E[TWC]$	$E[A_{avg}]$	$E[TWC]$	$E[A_{avg}]$
10	50	70	-0.065	+0.007	0.096	0.013
10	50	100	-0.008	-0.004	0.091	0.015
30	50	70	-0.006	+0.012	0.117	0.031
30	50	100	+0.019	+0.026	0.096	0.028
50	50	70	-0.134	-0.035	0.131	0.059
50	50	100	-0.054	+0.037	0.114	0.038

Note: 95% CI: half-width of the 95% confidence interval as a percentage of the mean, at 70 or 100 repetitions

간 분포의 척도모수를 변화시키며 최적 정비시작기준과 보증비용에 대한 민감도 분석을 수행하며, (3) 기회적 일괄 예방교체 및 수명 기반 예방교체의 비용 효과를 고장교체 정책과 비교한다.

<Table 2>는 시뮬레이션 반복횟수 결정을 위한 비교 실험 결과로, 50회 대비 70회와 100회의 총 기대보증비용과 평균가동률 변화율이 모든 조건에서 ±0.14% 이내로 수렴하였다. 또한, 100회 기준 95% 신뢰구간은 총 기대보증비용이 평균 대비 ±0.12% 이내, 평균가동률이 ±0.04% 이내로 충분한 정밀도를 보였다. 이에 수렴 여유를 확보하여 본 연구의 반복횟수를 100회로 설정하였다.

4.1 고장교체 정책하에서 목표가동률별 최적 정비시작기준

<Figure 4>는 목표가동률별 정비시작기준에 따른 총 기대보증비용의 변화를 나타내며, 모든 목표가동률에서 총 기대보증비용에 대해 U자 곡선을 형성한다. 이는 정비시작기준 m이 작으면 잦은 정비로 인한 고정비용과 교체비용이 증가하는 반면 m이 크면 정비지연으로 인한 페널티 비용이 증가하기 때문이다.

목표가동률별로 총 기대보증비용을 최소화하는 최적 정비시작기준을 도출한 결과는 <Table 3>과 같으며, 총 기대보증비용은 100회 반복 시뮬레이션의 95% 신뢰구간과 함께 제시하였다. 목표가동률이 증가할수록 최적 정비시작기준이 감소하는 경향을 보였으며, 정비발생간격이 약 70시간씩 단축되고 정비횟수가 약 41~87회 증가하였다. 이는 높은 가동률을 달성하기 위해서는 더 잦은 정비가 요구됨을 의미한다. 비용 측면에서는 목표가동률이 80%에서 95%로 높아짐에 따라 총 기대보증비용이 375,843천원에서 468,080천원으로 약 24.5% 증가하였으며,

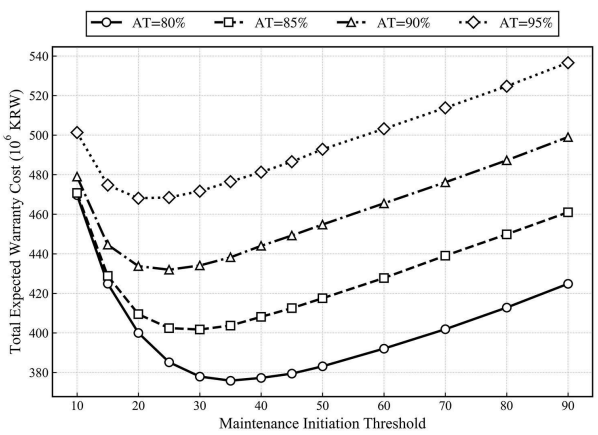


Figure 4. Total Expected Warranty Cost in Cases with Different Maintenance Initiation Thresholds and Target Availability

Table 3. Optimal Maintenance Initiation Threshold and Key Statistics by Target Availability

A_T	m^*	$E[TWC]$ (Thousand KRW)	$E[TC_j]/E[TWC](\%)$			$E[A_{avg}]$ (%)	$E[TN_{m^*}]$ (times)	$E[I_{m^*}]$ (h)
			$E[TC_m]$	$E[TC_r]$	$E[TC_p]$			
80%	35	375,843±484	6.8	85.5	7.7	77.94	204	428.7
85%	30	401,698±558	7.6	82.4	9.9	80.48	245	357.1
90%	25	431,944±566	8.7	78.8	12.5	83.08	302	289.8
95%	20	468,080±595	10.4	74.6	15.0	85.71	389	225.1

Note: ± denotes the half-width of the 95% CI based on 100 simulation replications.

교체비용의 비중이 85.5%에서 74.6%로 감소하는 반면, 페널티 비용의 비중은 7.7%에서 15.0%로 증가하였다. 이는 가동률 목표가 높을수록 페널티 비용 부담이 커짐을 나타낸다.

4.2 고장교체 정책하에서 고장시간 분포의 척도모수 민감도 분석

4.2절에서는 4.1절에서 목표가동률별로 도출한 최적 정비시작기준을 고정한 채, 고장시간 분포의 척도모수만 변화시키며 그 영향을 분석한다. 척도모수 기준값은 1,200h이며, 1,020h부터 1,920h까지 180h 간격의 6수준으로 변화시켰다. Weibull 분포에서 척도모수의 감소는 제품 수명의 단축을, 증가는 수명연장을 의미하며, 형상모수(=1.5)는 고정하였다.

실험 결과 <Table 4>와 같이 척도모수가 1,920h로 증가할수록 총 기대보증비용이 모든 목표가동률에서 감소하였으며, 척도모수가 가장 작은 1,020h 대비 가장 큰 1,920h의 감소율은 목표가동률과 무관하게 약 43~44% 수준으로 나타났다. 1,200h를 기준으로 보면, 척도모수가 1,020h로 감소한 조건에서 총 기대보증비용이 약 16% 증가하지만, 척도모수가 60% 증가한 1,920h 조건에서는 약 35% 감소하였다. 한편, 동일한 척도모수 조건에서는 목표가동률이 높을수록 총 기대보증비용이 높게 나타났다.

Table 4. Total Expected Warranty Cost in Cases with Different Scale Parameters and Target Availability

(Unit: thousand KRW)

Scale Parameter	80%(m^*=35)	85%(m^*=30)	90%(m^*=25)	95%(m^*=20)
1,020	436,399	466,572	501,400	541,100
1,200	375,843	401,698	431,944	468,080
1,380	330,052	352,900	379,300	413,000
1,560	294,691	314,700	339,200	369,800
1,740	266,500	284,500	306,800	335,400
1,920	243,300	259,800	280,300	307,600
Reduction Rate (%)	**44.2**	**44.3**	**44.1**	**43.2**

Table 5. Simulation Statistics in Cases with Different Scale Parameters and Target Availability

A_T	Scale Parameter	$E[A_{avg}](\%)$	$E[TN_c]$(units)	$E[TP](\% \cdot h)$
80%	1,020	76.52	9,309	404,530
	1,200	**77.94**	8,029	**337,134**
	1,380	78.97	7,045	295,352
	1,560	79.77	6,278	267,434
	1,740	80.41	5,662	246,972
	1,920	80.90	5,155	232,072
85%	1,020	79.16	9,606	548,858
	1,200	**80.48**	8,278	**461,810**
	1,380	81.46	7,265	405,111
	1,560	82.20	6,461	367,344
	1,740	82.83	5,824	337,916
	1,920	83.29	5,297	317,427

Table 5. Simulation Statistics in Cases with Different Scale Parameters and Target Availability (Continued)

A_T	Scale Parameter	$E[A_{avg}]$(%)	$E[TN_c]$(units)	$E[TP]$(% · h)
90%	1,020	81.84	9,894	723,547
	1,200	**83.08**	8,506	**623,912**
	1,380	84.01	7,444	554,395
	1,560	84.70	6,633	505,637
	1,740	85.27	5,973	467,449
	1,920	85.71	5,426	440,328
95%	1,020	84.58	10,164	913,327
	1,200	**85.71**	8,726	**814,895**
	1,380	86.57	7,644	741,213
	1,560	87.22	6,790	686,606
	1,740	87.73	6,112	643,893
	1,920	88.13	5,562	611,078

<Table 5>는 고장시간 분포의 척도모수 변화에 따른 주요 통계량을 목표가동률별로 정리한 것이다. 먼저 척도모수가 증가할수록 단위 제품의 평균 수명이 길어져 보증기간 중 고장 발생이 줄어들어 시스템의 평균가동률이 증가하였다. 예를 들어, 목표가동률 80%는 척도모수 1,020h의 76.52%에서 1,920h의 80.90%로 4.38%p 상승하였다. 또한, 제품 수명 연장에 따라 평균 고장교체 수가 줄어들었으며, 목표가동률 80% 기준 척도모수 1,020h의 9,309개에서 1,920h의 5,155개로 약 45% 감소하였다. 평균 페널티 면적 역시 감소하여, 목표가동률 80% 기준 척도모수 1,020h의 404,530% · h에서 1,920h의 232,072% · h로 약 43% 감소하였다.

4.3 예방교체 정책의 비용 효과 분석

4.3절에서는 고장교체 정책과 예방교체 정책의 비용 효과를 비교 · 분석한다. 앞서 4.1절에서 도출한 각 목표가동률의 최적 정비시작기준을 적용하여 (1) 고장교체만 수행하는 정책, (2) 정비 기회 발생 시 가동 이력이 있는 모든 제품을 일괄 예방교체하는 정책, 그리고 (3) 제품의 수명이 임계값 이상일 때만 예방교체를 수행하는 수명 기반 예방교체 정책을 비교한다.

수명 기반 예방교체 정책에서 예방교체 여부를 결정하는 임계값은 4.1절에서 도출된 각 목표가동률의 평균 정비발생간격에 임계값 계수(ϵ)를 곱하여 산출한다. 임계값 계수가 작을수록 임계값이 낮아져 예방교체 대상 제품의 수가 증가하며, 임계값 계수가 클수록 예방교체 대상이 줄어든다. 본 실험에서는 임계값 계수를 네 수준(0.5, 1.0, 1.5, 2.0)으로 설정하였다. 각 목표가동률의 평균 정비발생간격은 <Table 3>에 제시된 바와 같다.

<Figure 5>는 목표가동률별 예방교체 정책의 총 기대보증비용의 변화를 나타내며, 모든 조건에서 목표가동률이 높아질수록 이 비용이 증가하는 경향을 보였다. 수명 기반 예방교체 정책 (3)의 임계값 계수가 증가할수록 총 기대보증비용이 감소하였으며, 임계값 계수가 0.5일 때는 일괄 예방교체 정책(2)과 거의 동일한 수준이었으나, 임계값 계수가 2.0일 때는 목표가동률 80% 기준 약 9.8% 낮은 비용을 보였다. 이는 임계값을 높게 설정할수록 불필요한 예방교체가 줄어들어 교체비용과 비가동시간이 함께 감소하기 때문이다.

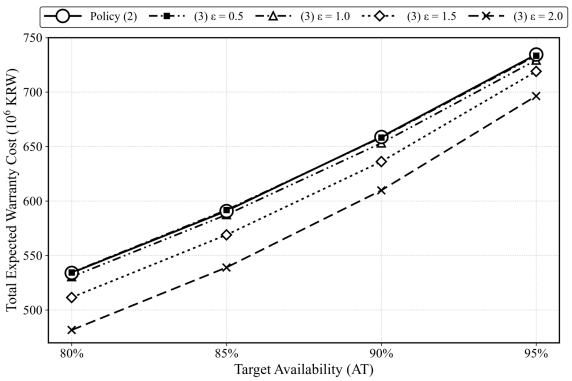


Figure 5. Total Expected Warranty Cost Comparison by Target Availability under Preventive Replacement Policies

<Table 6>은 목표가동률별 일괄 예방교체 정책 (2)과 수명 기반 예방교체 정책 (3)의 주요 통계량을 비교한 결과이다. 수명 기반 예방교체 정책 (3)은 임계값 계수가 증가할수록 평균 예방교체 수와 평균 페널티비용이 감소하고 평균가동률이 상승하는 경향을 보인다. 임계값 계수가 2.0일 때 일괄 예방교체 정책 (2) 대비 평균 예방교체 수는 목표가동률 80%에서 25.8%, 95%에서는 9.8% 감소하였으며, 평균가동률은 각각 2.39%p, 1.73%p 상승하였다. 페널티비용 역시 목표가동률 80%에서 25.5%, 95%에서 10.2% 감소하였으며, 이는 임계값 계수가 클수록 불필요한 예방교체가 줄어들어 비가동시간이 단축되고 이에 따른 페널티비용도 함께 감소하기 때문이다.

Table 6. Comparison of Preventive Replacement Policies (2) and (3) by Threshold Coefficient and Target Availability

A_T	Maintenance Policy		$E[A_{avg}]$ (%)		$E[TN_p]$		$E[TC_p]$ (×10³ KRW)	
			Value	Δ	Value	Δ	Value	Δ
80%	(2)		72.07	-	6,233	-	66,603±201	-
	(3)	$\epsilon = 0.5$	72.08	+0.01	6,235	+0.03	66,580±195	-0.03
		$\epsilon = 1.0$	72.27	+0.20	6,143	-1.40	65,046±195	-2.30
		$\epsilon = 1.5$	73.23	+1.16	5,599	-10.20	57,931±159	-13.00
		$\epsilon = 2.0$	74.46	+2.39	4,624	-25.80	49,606±147	-25.50
85%	(2)		73.84	-	7,098	-	86,008±220	-
	(3)	$\epsilon = 0.5$	73.81	-0.03	7,108	+0.14	86,138±190	+0.15
		$\epsilon = 1.0$	74.04	+0.20	7,002	-1.40	84,444±216	-1.80
		$\epsilon = 1.5$	74.98	+1.14	6,512	-8.30	77,426±172	-9.90
		$\epsilon = 2.0$	76.26	+2.42	5,666	-20.20	68,146±166	-20.80
90%	(2)		75.82	-	8,170	-	107,495±208	-
	(3)	$\epsilon = 0.5$	75.85	+0.03	8,160	-0.12	107,267±216	-0.21
		$\epsilon = 1.0$	76.08	+0.26	8,045	-1.50	105,545±188	-1.80
		$\epsilon = 1.5$	76.91	+1.09	7,646	-6.40	99,292±178	-7.70
		$\epsilon = 2.0$	78.04	+2.22	6,920	-15.30	90,781±160	-15.60
95%	(2)		78.02	-	9,462	-	128,529±217	-
	(3)	$\epsilon = 0.5$	78.05	+0.03	9,435	-0.29	128,287±236	-0.19
		$\epsilon = 1.0$	78.23	+0.21	9,354	-1.10	126,952±191	-1.20
		$\epsilon = 1.5$	78.78	+0.76	9,098	-3.80	122,812±214	-4.50
		$\epsilon = 2.0$	79.75	+1.73	8,539	-9.80	115,439±194	-10.20

Note: ± denotes the half-width of the 95% CI based on 100 simulation replications.

<Table 7>은 목표가동률별 세 가지 정책의 주요 통계량을 비교한 결과이다. 분석결과, 모든 목표가동률에서 정책 (1)의 총 기대보증비용이 가장 낮게 나타났다. 정책 (2)는 정책 (1) 대비 총 기대보증비용이 목표가동률 80%에서 42.1%, 목표가동률 95%에서 56.9%까지 증가하였다. 이는 정비 기회마다 가동이력이 있는 모든 제품을 일괄 교체함으로써 교체비용과 비가동시간이 많이 증가하였기 때문이다.

정책 (3)은 임계값 계수가 2.0일 때 모든 목표가동률에서 총 기대보증비용이 최소값을 나타냈다. 이 조건에서 정책 (3)은 정책 (2) 대비 총 기대보증비용이 목표가동률 80%에서 9.8%, 95%에서 5.2% 감소하였으며, 평균가동률도 소폭 상승하였다. 이는 임계값을 높게 설정할수록 불필요한 예방교체가 줄어들어 비가동시간과 교체비용이 함께 감소하기 때문이다. 그러나 이 조건에서도 정책 (3)의 총 기대보증비용이 정책 (1) 대비 목

Table 7. Warranty Costs and Key Statistics of the Three Maintenance Policies by Target Availability

A_T	Policy	$E[A_{avg}]$ (%)	$E[TN_p]$ (units)	$E[TP]$ (% · h)	$E[TWC]$ (×10³ KRW)	Δ (%)
80%	(1)	77.94	–	337,134	375,843±484	–
	(2)	72.07	6,233	770,871	534,160±816	+42.1
	(3)$\epsilon = 2.0$	74.46	4,624	574,138	481,642±644	+28.2
85%	(1)	80.48	–	461,810	401,698±558	–
	(2)	73.84	7,098	995,457	590,958±900	+47.1
	(3)$\epsilon = 2.0$	76.26	5,666	788,727	539,074±700	+34.2
90%	(1)	83.08	–	623,912	431,944±566	–
	(2)	75.82	8,170	1,244,154	658,910±932	+52.6
	(3)$\epsilon = 2.0$	78.04	6,920	1,050,704	609,817±670	+41.2
95%	(1)	85.71	–	814,895	468,080±595	–
	(2)	78.02	9,462	1,487,600	734,480±978	+56.9
	(3)$\epsilon = 2.0$	79.75	8,539	1,336,104	696,415±905	+48.8

Table 8. Re-optimized Maintenance Initiation Thresholds and Warranty Costs of Policies (2) and (3)

A_T	Policy	m^*	$E[TWC]$ (thousand KRW)	Δ vs (1) (%)	$E[A_{avg}]$ (%)
80%	(1)	35	375,843 ± 484	-	77.94
	(2)	90	441,430 ± 478	+17.5	53.21
	(3)$\epsilon = 2.0$	90	442,398 ± 513	+17.7	53.21
95%	(1)	20	468,080 ± 595	-	85.71
	(2)	80	551,220 ± 661	+17.8	57.39
	(3)$\epsilon = 2.0$	80	551,634 ± 591	+17.9	57.34

Note: Thresholds for policies (2) and (3) are re-optimized over m = 10-110 with 100 replications per condition; ± denotes the half-width of the 95% CI.

표가동률 80% 기준 28.2%, 목표가동률 95% 기준 48.8% 높은 수준으로 예방교체 정책의 비용 우위는 확인되지 않았다. 한편, 모든 정책과 목표가동률 조합에서 총 기대보증비용의 95% 신뢰구간 반폭은 평균 대비 ±0.2% 이내로, 위와 같은 정책 간 비용 차이는 시뮬레이션 오차 범위를 크게 상회한다.

한편, 위 결과는 정책 (1)을 기준으로 도출된 최적 정비시작기준을 정책 (2)와 (3)에 동일하게 적용한 것이므로, 이러한 설계가 결과에 미친 영향을 확인하기 위해 대표 목표가동률 2수준(80%, 95%)에서 정책 (2)와 정책 (3)ϵ=2.0의 정비시작기준을 10~110 범위에서 독립적으로 재탐색하였다(조건당 100회 반복). 재탐색 결과 두 정책 모두 총 기대보증비용이 정비시작기준에 대해 U자 곡선을 형성하였으며, 재탐색된 최적 정비시작기준은 정책 (1)의 최적값보다 훨씬 큰 90(목표가동률 80%)과 80(목표가동률 95%)으로 나타났다(<Table 8>). 재탐색된 최적 정비시작기준에서 정책 (2), (3)의 총 기대보증비용은 정책 (1)의 최적값 대비 17.5~17.9% 높은 수준으로, 이는 정책 (1)의 최적 정비시작기준을 고정하였을 때의 격차(28.2~56.9%)보다 크게 줄어들었다. 그러나 고장교체 정책 (1)의 비용 우위는 여전히 유지되었다. 한편 재탐색된 최적 정비시작기준에서는 평균가동률이 53~57% 수준까지 하락하여 목표가동률에 크게 미달하였는데, 이는 본 실험의 단가 체계에서 정비 지연에 따른 교체비용 절감이 페널티비용 증가를 상회하기 때문이다. 따라서 예방교체 정책의 적용 시에는 비용 최소화와 목표가동률 준수 간의 상충관계를 함께 고려할 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 성능보증 정책이 적용된 (k, n) 모듈 시스템을 대상으로 총 기대보증비용을 최소화하는 최적 정비시작기준을 도출하였다. 이산사건 시뮬레이션을 활용하여 보증기간 (k, n) 모듈 시스템의 평균가동률과 총 기대보증비용을 추정하고 이를 바탕으로 고장교체 정책과 예방교체 정책을 비교하였다. 또한, 수치실험을 통해 주요 매개변수의 변화가 최적 정비시작기준과 총 기대보증비용에 미치는 영향을 민감도 분석으로 검토하였다.

먼저 고장교체 정책하에서 목표가동률별 최적 정비시작기준을 도출한 결과 모든 목표가동률에서 총 기대보증비용이 U자 곡선을 형성하였다. 이는 정비시작기준이 작으면 잦은 정비로 인한 고정비용과 교체비용이 증가하고, 반대로 정비시작기준이 크면 정비 지연으로 인한 페널티 비용이 증가하기 때문이다. 그다음 고장시간 분포의 척도모수 변화에 대한 민감도 분석 결과, 척도모수가 증가할수록 제품 수명이 연장되어 고장 발생 빈도가 줄어들었으며, 실험한 척도모수 범위에서 최소에서 최대로 늘렸을 때 총 기대보증비용이 모든 목표가동률에서 약 43~44% 감소하였다. 마지막으로 예방교체 정책의 비용 효과 분석에서는 수명 기반 예방교체 정책(3)이 일괄 예방교체 정책(2)보다 낮은 총 기대보증비용을 나타냈다. 그러나, 수명 기반 예방교체 정책 (3)은 고장교체 정책 (1) 대비 총 기대보증비용이 높게 나타났다. 또한, 정책 (2)와 (3)에 대해 정비시작기준을 독립적으로 재탐색한 결과, 정책 (1) 대비 비용 격차는 크게 축소되었으나(28.2~56.9% → 17.5~17.9%), 고장교체 정책 (1)의 비용 우위는 유지됨을 확인하였다.

또한, 본 연구의 수치실험은 (8, 15) 모듈 시스템, 즉 8개 제품으로 구성된 그룹이 15개인 단일 시스템 구조를 대상으로 수행되었다. 따라서 그룹 크기(k)와 그룹 수(n)의 조합이 달라질 경우에도 본 연구에서 도출된 결과의 경향성(목표가동률 증가에 따른 최적 정비시작기준의 감소, 정비시작기준에 대한 총 기대보증비용의 U자형 곡선 등)이 유지되는지는 확인되지 않았다.

향후 연구로는 정비 정책별 최적 정비시작기준을 독립적으로 탐색하여 효과를 분석하고, 다양한 k, n 조합에 대한 일반화 가능성을 검증하고, 다수의 모듈로 구성된 네트워크 문제를 다루고자 한다.

참고문헌

Bakeer, A., Chub, A., Shen, Y., and Sangwongwanich, A. (2022), Reliability analysis of battery energy storage system for various stationary applications, *Journal of Energy Storage*, **50**, 104217.

Dai, A., Wang, X., Li, Y., Li, T., and He, S. (2023), Design of a performance-based warranty policy with replacement-repair strategy

and cumulative cost threshold, *International Journal of Production Economics*, **255**, 108700.
Dai, A., Luo, Z., Zhao, X., Qin, J., and Ruan, Y. (2024), Optimal maintenance policy design considering learning effects under successive performance-based contracts, *Computers & Industrial Engineering*, **193**, 110287.
Golbasi, O. and Turan, M. O. (2020), A discrete-event simulation algorithm for the optimization of multi-scenario maintenance policies, *Computers & Industrial Engineering*, **145**, 106514.
Jung, S. H., Han, Y. J., and Yun, W. Y. (2022), Estimation of warranty cost of Korean lemon law through simulation, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **48**(4), 376-388.
Kim, Y. H., Kim, J. M., Kim, K. H., Lee, Y. B., and Rho, D. S. (2023), A study on safety evaluation method considering fault cases in ESS, *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, **72**(8), 887-896.
Lee, Y. B., Kim, J. M., Lee, M. H., Rho, S. E., Kim, S. J., and Rho, D. S. (2024), Safety evaluation method considering operation environments and applications in ESS, *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, **73**(5), 773-783.
Liu, M., Cao, X., Cao, C., Wang, P., Wang, C., Pei, J., Lei, H., Jiang, X., Li, R., and Li, J. (2022), A review of power conversion systems and design schemes of high-capacity battery energy storage systems, *IEEE Access*, **10**, 52030-52042.
Liu, Y., Wang, G., and Liu, P. (2024), A condition-based maintenance policy with non-periodic inspection for k-out-of-n: G systems, *Reliability Engineering & System Safety*, **241**, 109640.
Liu, Y. and Wang, X.-L. (2025), Warranties of batteries: requirements, state-of-the-art, relevant analysis methods, and research perspectives, *Journal of Reliability Science and Engineering*, **1**, 032003.
Ma, Z., Jia, M., Koltermann, L., Blömeke, A., De Doncker, R. W., Li, W., and Sauer, D. U. (2023), Review on grid-tied modular battery energy storage systems: Configuration classifications, control advances, and performance evaluations, *Journal of Energy Storage*, **74**, 109272.
Oszczypała, M., Konwerski, J., Ziołkowski, J., and Małachowski, J. (2024), Reliability analysis and redundancy optimization of k-out-of-n systems with random variable k using continuous time Markov chain and Monte Carlo simulation, *Reliability Engineering & System Safety*, **242**, 109780.
Park, M., Jung, K. M., and Park, D. H. (2013), Optimal post-warranty maintenance policy with repair time threshold for minimal repair, *Reliability Engineering & System Safety*, **111**, 147-153.
Park, M., Jung, K. M., and Park, D. H. (2026), Optimal warranty policy with repair time threshold under repair-replacement warranty considering the expected total profit, *Applied Mathematical Modelling*, **157**, 116893.
Safaei, F., Ahmadi, J., and Taghipour, S. (2022), A maintenance policy for a k-out-of-n system under enhancing the system's operating time and safety constraints, and selling the second-hand components, *Reliability Engineering & System Safety*, **218**, 108103.
Su, C. and Cheng, L. (2018), An availability-based warranty policy considering preventive maintenance and learning effects, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, *Part O: Journal of Risk and Reliability*, **232**(2), 576-586.
Wang, X., Liu, B., and Zhao, X. (2021), A performance-based warranty for products subject to competing hard and soft failures, *International Journal of Production Economics*, **233**, 107974.
Wang, Y., Liu, Y., Chen, J., and Li, X. (2020), Reliability and condition-based maintenance modeling for systems operating under performance-based contracting, *Computers & Industrial Engineering*, **142**, 106344.
Yun, W. Y. and Kim, N. H. (2019), Availability analysis of (k, n) module systems under warranty, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **45**(6), 475-483.
Zhang, Q., Fang, Z., and Cai, J. (2021), Extended block replacement policies with mission durations and maintenance triggering approaches, *Reliability Engineering & System Safety*, **207**, 107399.
Zhang, Q. and Fang, Z. (2025), Optimal age replacement policies for k-out-of-n systems considering mission durations, *Reliability Engineering & System Safety*, **254**, 110625.

저자소개

손병관: 부산대학교 산업공학과에서 2020년 석사, 2025년 박사학위를 취득하였고, 현재 광주미래차모빌리티진흥원에 재직 중이다. 연구 분야는 시스템 신뢰성, 위치 최적화, 시뮬레이션이다.

조천천: 부산대학교 산업공학과에서 2013년 학사, 2015년 석사, 2020년 박사학위를 취득하였다. 현재 정저우대학교에서 부교수로 재직 중이다. 연구 분야는 시스템 신뢰성, 탐지 및 유지보수 이론, 시뮬레이션 및 알고리즘 분야다.

윤원영: 서울대학교 산업공학과에서 1982년 학사, 한국과학기술원에서 1984년 석사, 1988년 박사학위를 취득하였다. 부산대학교에서 조교수, 부교수, 정교수를 역임하였으며, 2024년 정년퇴임하였다. 현재 부산대학교 산업인공지능연구소 특별연구원, 네모시스(주) 기술고문으로 근무하고 있다. 주요 연구 분야는 시스템 신뢰성, 품질, 확률모형 및 응용통계, 시스템 시뮬레이션 분야이다.

한영진: 부산대학교 산업공학과에서 2009년 석사학위를 취득하고 2015년 산업공학 박사학위를 취득하였다. 현재 울산과학대학교에서 융합안전공학과 부교수로 근무 중이다. 주요 연구 분야는 시스템 신뢰성, 설비 유지보수 및 운영 최적화이다.