creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사학위논문

검사 간격 최적화를 고려한 경제적 상태 기반 유지 보수 모델 : 수소 지게차 연료전지 적용

An Economic Condition-Based Maintenance Model Considering Inspection Interval Optimization : An Application to Fuel Cells of Forklifts

2023 년 8 월

서울대학교 대학원

산업공학과

홍 석 환

검사 간격 최적화를 고려한 경제적 상태 기반 유지 보수 모델 : 수소 지게차 연료전지 적용

An Economic Condition-Based Maintenance Model Considering Inspection Interval Optimization : An Application to Fuel Cells of Forklifts

지도교수 이 덕 주

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2023 년 6 월

서울대학교 대학원

산업공학과

홍 석 환

홍석환의 공학석사 학위논문을 인준함

2023 년 6 월

위 원 장	홍 유 석	(인)
부위원장	이 덕 주	(인)
위 원	박 건 수	(인)

초록

지구온난화와 같은 전 지구적 기후 변화에 따라, 탄소 중립의 필요성이 대두되고 있다. 이에 따라 건설업계에서도 환경 문제에 대응하기 위해 수소 지게차와 같은 친환경적인 건설 기계를 개발하고 있다. 하지만 수소 지게차를 활용하는 사용자 입장에서는 환경뿐만 아니라 경제적 타당성을 고려하지 않을 수 없다. 수소 지게차의 경우 연료전지가 전체 비용 중 큰 부분을 차지하기 때문에, 이를 적절하게 유지 보수할 필요가 있다. 또한 수소 지게차는 가혹한 운용 환경 때문에 연료전지 열화가 가속되고, 열화에 따라 연료 효율이 저하된다. 하지만 이를 반영해 유지 보수 비용을 도출하는 연구는 부족한 상황이다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 연료 효율의 저하를 반영하여, 유지 보수 여부와 다음 검사까지의 시간을 결정하는 마르코프 결정 과정(Markov decision process, MDP) 모형을 개발하고 이를 통해 가장 비용 효과적인 연료전지의 상태 기반 유지 보수(Condition-based Maintenance, CBM) 정책을 도출한다.

주요어: 수소 지게차, 연료전지, 상태 기반 유지 보수, 열화, 마르코프 결정 과정

학번: 2021-25320

목차

초록 **i**

목차 **iii**

표 목차 **iv**

그림 목차 **v**

제 1 장 서론 **1**

1.1 연구 배경 1

1.2 연구 동기 및 목적 3

1.3 논문구성 4

제 2 장 선행 연구 고찰 **5**

2.1 수소 지게차 관련 선행 연구 5

2.2 CBM 관련 선행 연구 7

제 3 장 수소 지게차 상태 기반 유지 보수(CBM) 모델 **10**

3.1 상태 기반 유지 보수(CBM) 모델 10

3.2 마르코프 결정 과정(Markov decision process) 12

3.3 가치 함수(Value function) 정의 20

3.4 가치 이터레이션(Value iteration) 22

제 4 장 실험 및 실험 결과 **23**

4.1 문제 상황 및 실험 데이터 23

4.2 실험 결과 25

4.3 민감도 분석 29

4.3.1 검사 비용 c_i 29

4.3.2 최소 유지 보수 비용 c_m 30

4.3.3 중단 시간 비용 c_d 31

4.3.4 연료 효율 저하 계수 ρ 32

4.3.5 할인률 r 33

4.3.6 민감도 비교 34

제 5 장 결론 **36**

5.1 결론 36

5.2 향후 연구 방향 38

참고문헌 **39**

Abstract **43**

감사의 글 **45**

표 목차

표 3.1 표기법 11

표 4.1 실험 데이터 23

표 4.2 주기적 검사 모델(오른쪽)과의 비교 25

표 4.3 연료 효율 저하를 고려하지 않은 모델(오른쪽)과의 비교 26

표 4.4 연료 효율 저하를 고려하지 않았을 때, 주기적 검사 모델(오른쪽) 과의 비교 27

표 4.5 c_i 수준별 유지 보수 정책 29

표 4.6 c_m 수준별 유지 보수 정책 30

표 4.7 c_d 수준별 유지 보수 정책 31

표 4.8 ρ 수준별 유지 보수 정책 32

표 4.9 r 수준별 유지 보수 정책 33

그림 목차

그림 3.1 열화 과정 설명 18
그림 3.2 문제 상황 설명 20

그림 4.1 34

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

최근 지구 온난화와 같은 전 지구적 기후 변화가 심화됨에 따라 탄소 중립에 대한 관심이 증가하고 있다. 현재까지와 같이 화석 연료에 의존하면 탄소와 같은 온실 가스가 배출되고 지구 온난화가 심화되기 때문에 이에 대응하기 위해서 화석 연료 사용량을 줄이고 탄소 중립을 달성하려는 노력이 필요하다. 이에 따라 세계 주요 국가들이 탄소 중립 선언을 하고 있으며, 대한민국 또한 2050년까지 탄소 중립을 달성한다고 선언하였다[24].

이러한 사회적 흐름에 발맞춰 각 산업계에서도 탄소 중립을 달성하기 위한 노력을 하고 있으며, 건설업계도 마찬가지로 수소 지게차와 같은 화석 연료를 사용하지 않는 친환경 건설 기계를 개발에 힘쓰고 있다. 그럼에도 불구하고, 친환경 대체 건설 기계를 활용하는 사용자 입장에서는 환경적인 측면뿐만 아니라 경제적 타당성을 고려하지 않을 수 없다. 이익을 추구하는 기업의 특성상 기존의 디젤 지게차와 같은 다른 대안과 비교했을 때 동일하거나 더 나은 경제성이 보장되지 않는다면 친환경 건설 기계를 채택할 유인이 존재하지 않는다. 그렇기 때문에 친환경 건설 기계 사용을 규제를 통해 강제하지 않는다면, 경제적인 인센티브가 뒷받침되어야 친환경 건설 기계의 사용으로 이어질 수 있고, 경제적 타당성을 평가하기 위해 수소 지게차의 특성을 반영한 적절한 경제성 평가 모형이 필요하다.

수소 지게차의 경우 연료전지 비용이 총 구매 비용에서 큰 부분을 차지한다. 또한, 수소 지게차에서 사용되는 연료전지의 경우 짐을 들었다가 내리는 등 수소 지게차의

가혹한 운행 환경 탓에 열화가 가속되는 특성이 존재한다[16]. 그렇기 때문에 수소 지게차의 경우, 연료전지를 적절히 유지 보수하고 이를 토대로 정확히 유지 보수 비용을 계산하는 것이 경제성 평가 측면에서 중요하다. 따라서 유지 보수 비용을 도출하는 데 있어서 열화로 인해 발생하는 여러 기대 비용을 바탕으로 최적의 유지 보수 정책을 반영할 필요가 있다.

1.2 연구 동기 및 목적

수소 지게차의 경우, 연료전지 비용이 높고 유지 보수의 중요성이 강조되기 때문에 적절한 유지 보수 정책 하에서 열화로 인해 발생하는 확률적 비용을 반영하여 유지 보수 비용을 도출할 필요가 있다. 하지만 현재까지 수소 지게차의 경제성과 관련된 연구에서는 유지 보수 비용을 고려하지 않거나, 고려하는 경우에도 사용자 설문 결과만을 반영하는 등, 최적 유지 보수 정책 하에서 유지 보수 비용을 도출하려는 연구는 많이 이루어지고 있지 않다[14, 19].

한편, 수소 지게차의 경우 연료전지가 열화됨에 따라 연료 효율이 저하되어 추가적인 연료를 소모하게 된다는 특성을 갖고 있다[2, 17]. 그렇기 때문에 이러한 특성을 열화에 따른 비용으로 반영하여 유지 보수 정책에 반영할 필요가 있지만, 현재까지 연료전지의 효율 저하와 같은 특성을 고려하여 유지 보수 정책을 도출한 상태 기반 유지 보수(Condition-based maintenance, CBM) 연구는 부족한 상황이다. 또한, 상태 기반 유지 보수 관련 연구의 경우, 주기적 상황 하에서 비용을 최소화하거나 가동률을 최대화하는 유지 보수 행동 정책을 도출하는 데 집중하고 있어, 검사 간격을 함께 최적화하는 상태 기반 유지 보수 연구는 많이 이루어지지 않고 있는 상황이다.

본 연구에서는 수소 지게차 연료전지의 연료 효율 저하라는 특성을 반영하여 최적 검사 주기를 고려한 유지 보수 비용 모델을 제안하는 것을 목적으로 한다. 이를 통해, 보다 현실적이면서 유연한 유지 보수를 수행할 수 있을 것으로 기대한다. 본 논문에서 제안하고자 하는 모델의 기존 연구 대비 차별점을 정리하면 다음과 같다.

(a) 연료전지의 열화에 따른 추가적인 연료 비용를 열화 비용으로써 고려한다.

(b) 상태 기반 유지 보수 정책에서 유지 보수 행동뿐만 아니라 다음 검사까지의 간격을 함께 선택한다.

1.3 논문구성

본 논문은 5 장으로 구성된다. 제 2장에서는 선행 연구를 살펴본다. 제 3장에서는 수소 지게차 연료전지의 최적 유지 보수 정책을 도출하기 위한 상태 기반 유지 보수 모델을 제안한다. 제 4장에서는 수소 지게차 연료전지 관련 비용 파라미터를 기반으로 실험을 수행한 결과를 살펴본다. 마지막으로 제 5장에서는 결론과 향후 연구방향을 제시한다.

제 2 장 선행 연구 고찰

2.1 수소 지게차 관련 선행 연구

수소 지게차의 경우, 연료전지 비용이 총 비용에서 큰 부분을 차지하고, 운용 환경이 가혹한 만큼, 이를 적절히 유지 보수할 필요가 있다. 수소 지게차에 대해서 기술적, 경제적 측면에서 연구가 이루어지고 있는데, Renquist et al.[19]의 경우 운용을 위해 필요한 기반 시설 비용을 포함해 전기 배터리 지게차와 수소 지게차의 경제성을 비교하였다. Metzger and Xianglin[14]는 연구에서 리튬 이온 배터리 지게차와 양성자 교환 박막형 연료전지(Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC), 직접 메탄올 연료전지(Direct methanol fuel cell, DMFC) 지게차의 생애 주기 비용(Life cycle cost, LCC)를 비교하였다. 하지만 두 연구의 경우 유지 보수 비용을 사용자 설문을 통해 반영하였거나[19], 유지 보수 비용을 고려하지 않은 채 비용을 추정하였다[14].

수소 연료전지는 단순히 유지 보수에만 비용이 발생하는 것이 아니라, 연료전지의 열화에 따라 연료 효율이 저하되기 때문에 추가 연료 비용이 발생한다[2, 17]. 또한, 수소 지게차는 건설 기계의 특성상 가혹한 환경에서 운행되기 때문에 수소 자동차 등에서 보다 연료전지의 열화가 빠르게 일어난다[16]. 그렇기 때문에 수소 지게차의 유지 보수 비용을 계산하는 경우, 수소 연료전지의 열화 비용을 고려해 유지 보수 비용을 도출할 필요가 있다.

연료전지의 열화로 인한 요소를 고려한 유지 보수 관련 연구로는 Wu et al.[20]가 있다. 해당 연구는 단순한 유지 보수 비용만이 아니라, 연료전지 열화를 통해 발생하는 추가적인 온실 가스를 제약을 고려하여 열화가 수리 가능한 경우와 가능하지 않은

경우에 대해 유지 보수 정책을 도출하였다.

2.2 CBM 관련 선행 연구

유지 보수는 크게 고장 발생 후 수리하는 교정 유지 보수(corrective maintenance, CM)와 고장 발생 전 유지 보수하는 예방 유지 보수(preventive maintenance)가 존재한다[1]. 그리고 예방 유지 보수는 다시 시간 기반 유지 보수(Time-based maintenance, TBM)와 상태 기반 유지 보수(CBM)로 나뉘며, 운용 환경에 따라 다른 방법이 채택된다. 최근에는 상태를 점검하는 기술의 발달에 따라, CBM에 대한 관심이 늘어가고 있다.

CBM 관련 선행 연구에는 다양한 상황을 가정한 문제들이 존재하며, 검사의 수준, 검사 주기, 유지 보수의 수준, 목적 함수 등 다양한 기준을 통해 분류할 수 있다. 특히, 검사 주기를 중심으로 모형을 나누면 크게 세 가지로 나눌 수 있다[3]. 첫 번째는 연속적인 검사로, 상태를 지속적으로 관찰할 수 있는 경우에 적용된다. Liao et al.[12]의 연구에서는 지속적인 검사 하에서, 불완전한 수리, 열화 수준과 양의 상관관계를 갖는 수리 시간을 가정한 문제를 설정하고 유지 보수 정책을 도출하였다. 연속적인 검사는 검사 비용이 많이 든다는 단점이 존재하며, 수소 지게차의 경우 운용 특성상 연속적인 검사을 적용하는 것이 불가능하다.

두 번째로는 주기적인 검사으로, 정해진 일정 간격마다 장비를 검사하고, 상태를 기반으로 유지 보수 여부를 결정한다. Fouladirad et al.[8]는 다중 모드의 열화에 대한 문제를 다루었다. 일반적인 모드와 열화가 가속되는 모드로 나뉘는데, 모드의 변화는 검사를 통해 바로 알 수 있는 것이 아니라 확률적으로 감지한다고 가정하였다. 이러한 문제 상황을 토대로, 검사 주기를 결정한 후, 최적 경계(threshold)를 결정한다. Ferreira et al.[7] 또한 주기적인 검사 하에서 CBM을 다루었는데, 특히 여러 결정 기준이 존재할 때 적절한 검사 주기를 도출하는 것에 집중하였다. Huynh et al.[10]의 경우도 마찬가지로 주기적인 검사 하에서 최적 유지 보수 정책을 도출하였다. 열화를 점진적인 열화인

감마 분포와 갑작스러운 고장인 Nonhomogeneous poisson process를 가정하고, 장기적 기대 비용율(Long run expected cost rate)를 최소화하는 유지 보수 정책을 찾았다. Liu et al.[13]은 유한한 시간대(finite horizon)를 가정하였으며, 두 개의 부품의 열화가 서로에게 영향을 준다는 가정과 주기적인 검사이라는 문제 상황을 설정하고 최적 유지 보수 정책을 도출하였다.

마지막으로 비정기적인 검사 상황 하에서의 유지 보수를 들 수 있다. Grall et al.[9]는 열화 간격을 구분하고, 매 간격마다 특정 검사 주기를 지정하였다. 즉, 어떤 열화 상태에 대해 다음 검사까지의 시간을 결정해놓는 방식으로 비정기적 검사 상황을 설정하였다. Jiang[11] 또한 비정기적인 검사에 대해 다루었는데, 해당 연구의 경우 각 열화에 대해 검사 주기가 결정되는 것이 아니라 초기 상태부터 일정 지점까지 비정기적인 검사 주기를 구하고 그 이후는 동일한 주기마다 검사를 시행하는 준 주기 모형(quasi-periodic scheme)을 수립하였다. Zhao et al.[22]은 시간에 따라 열화(degradation)와 자기 수복(self-recovering)이 나타난다고 가정하고, 다음 검사까지의 시간을 열화 상태의 함수로 나타내었다. Drent et al.[6]은 주기적 유지 보수와 시스템 내의 다른 부품의 고장으로 인한 비주기적 유지 보수로 구분하여 최적 유지 보수 정책을 도출하는 문제를 다루었다.

이외에도 Chen and Trivedi[4]는 시간 불확실성을 고려하기 위해 세미 마르코프 결정 과정(Semi-markov decision process)를 통해 문제를 정의하였다. 해당 연구에서는 유지 보수를 크게 최소 유지 보수(minimal maintenance)와 주요 유지 보수(major maintenance)로 구분하였다. 그리고 다음 검사까지의 시간의 확률 분포를 결정하여, 시간의 불확실성을 더한 모형을 설계하였다. Xu and Azhari[21]는 검사 간격 최적화하는 연구를 수행하였으나, 유지 보수 경계는 미리 정한 값을 사용하였으며, 예방적 유지 보수를 해서 상태가 개선되는 것을 고려하지 않고 검사 간격을 결정하였다.

유지 보수 한계선과 다음 검사까지의 시간을 결정하는 것은 유지 보수 비용에 큰

영향을 끼친다[9]. 그렇기 때문에, 유지 보수 한계선만을 설정하는 것이 아니라, 다음 검사까지의 시간을 함께 결정한다면 보다 유연하면서도 비용 효과적인 유지 보수 정책을 도출할 수 있다.

하지만 이러한 중요도에도 불구하고, 현재까지 유지 보수와 다음 검사까지의 시간 모두에 대해 최적 정책을 도출한 연구가 많이 이루어지지 않고 있는 상황이다. 또한, 수소 지게차의 열화로 인한 추가적인 연료 비용을 열화 비용에 반영하는 연구 또한 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 수소 지게차의 연료 효율의 열화를 고려하고 유지 보수, 다음 검사까지의 시간을 함께 결정하는 CBM 모형을 개발하고자 한다.

제 3 장 수소 지게차 상태 기반 유지 보수(CBM) 모델

3.1 상태 기반 유지 보수(CBM) 모델

최근 검사 기술의 발달과 함께 상태를 적절히 진단하는 것이 가능해지며, 상태 기반 유지 보수(CBM)이 다양한 분야에서 활용되고 있다. 수소 지게차의 연료전지 또한 열화 상태 진단을 바탕으로 유지 보수할 수 있는데, 보다 현실적인 유지 보수를 위해서는 수소 지게차 연료전지의 경우 연료 효율 저하로 인한 비용을 고려할 필요가 있다. 또, 유지 보수를 수행할 때, 열화가 진전되지 않아 충분히 운용이 가능함에도 검사를 자주 수행하는 것은 비용적으로 효과적이지 않다. 그렇기 때문에 검사 간격을 함께 최적화하는 경우, 비용을 보다 절감할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 수소 연료전지 열화로 인한 추가 연료 비용과 검사 간격 최적화를 고려한 CBM 모델을 제안한다.

상태 기반 유지 보수 모델에 사용될 표기는 다음 Table 3.1과 같다.

Table 3.1: 표기법

기호	정의
c_R	대체 비용
c_m	최소 유지 보수 비용
c_M	주요 유지 보수 비용
c_d	중단 시간 비용
c_h	수소 연료 비용
c_i	검사 비용
m	유지 보수 행동
t_p	검사 간격 행동
i	열화 수준
$g(i)$	연료 효율 열화 함수
$P_{ij}(a,t)$	i 상태에서 $a(=m,t_p)$ 행동을 했을 때, t 시간 후 j 상태로 전이될 확률
$c_d(i,m,t_p)$	i 상태에서 m, t_p 행동을 했을 때, 기대 중단 시간 비용
$c_f(i,m,t_p)$	i 상태에서 m, t_p 행동을 했을 때, 기대 추가 연료 비용
λ	열화율
r	할인률
π	정책

3.2 마르코프 결정 과정(Markov decision process)

문제 상황은 Chen et al.[4]에서와 같이 포아송 과정의 열화를 가정하였고, 가능한 유지 보수 행위를 최소 유지 보수와 주요 유지 보수로 구분하였다. 가능한 유지 보수를 둘로 구분한 것은 현재 연구개발 단계에 있는 부분 수리를 반영하기 위함이다[26]. 구체적인 문제 상황에 대한 가정은 다음과 같다.

문제 상황 가정

1. 연료전지의 열화는 포아송 과정(Poisson process)을 따른다.

2. 최소 유지 보수(minimal maintenance)는 열화 수준을 1만큼 낮추고, 주요 유지 보수(major maintenance)는 연료전지 열화 상태를 초기화시킨다.

3. 유지 보수, 검사, 수리 중에는 중단 시간 비용(downtime cost)가 발생하며, 이 동안에는 열화가 발생하지 않는다.

4. 연구 기간은 무한으로 가정한다.

5. 열화는 0에서 k단계까지 확률적으로 진행되며, 0은 초기 상태, k는 고장 상태를 의미한다.

6. 대체, 유지 보수 비용은 대체 및 유지 보수가 종료된 시점에서, 중단 시간 비용은 중단 시간이 끝난 시점에서, 연료 효율 저하 비용은 검사, 고장 등으로 열화가 멈추는 시점에 발생한다.

위와 같은 가정 하에서 마르코프 결정 과정을 활용하여 최적 상태 기반 유지 보수 정책을 도출하고자 한다. 마르코프 결정 과정은 일반적으로 확률적인 변화를 고려하여 의사결정을 하기 위해 사용되며, 마르코프 결정 과정은 의사결정자(agent), 상태(state), 행동(action), 전이 확률(transition probability), 보상(reward)과 같은 요소로 이루어진다. 본 연구에서의 마르코프 결정 모형의 의사결정자는 수소 지게차 사용자를 의미하여, 나머지 요소는 다음과 같이 정의한다.

· 상태(State) : $i \in I = \{0, 1, ..., k\}$

· 행동(Action) : $a = (m, t_p) \in \{0, 1, 2, 3\} \times \{t_p | t_p$는 가능한 검사 주기$\}$

· 전이 확률(Transition probability) : $P_{ij}(a, t) = \mathcal{L}^{-1}(\frac{\lambda^{j-i}}{s+\lambda^{j-i+1}})$

· 보상(Reward) : $R(i, m, t_p) = \begin{cases} rc_d(i, m, t_p) + rc_f(i, m, t_p), & \text{if } i \neq k \\ re^{-rt_R} \times (c_d \times t_R + c_R) + R_f, & \text{if } i = k \end{cases}$

· $R_f = e^{-r\tau(i,m)} \times \int_0^{t_p} re^{-rt} \cdot P_{ik}(a, t) \cdot \left\{C_f + (c_d \times t_R + c_R) \times e^{-rt_R}\right\} dt$

· $C_f :=$ i 상태에서 a라는 행동을 취했을 때 k 상태까지 전이하며 발생하는 연료 효율 저하 비용

행동은 유지 보수 행동과 검사 주기 행동의 2차원으로 이뤄져있다. 유지 보수 행동의 0은 유지 보수를 하지 않는 것을 의마하며, 1은 최소 유지 보수 행동, 2는 주요 유지 보수 행동, 3은 고장으로 인한 대체를 의미한다. 또, 검사 주기 행동을 통해 다음 검사까지의 시간 간격을 정해주게 된다. 위의 보상식에서 t_R은 수소 지게차를 새로운 수소 지게차로 대체하는 데 드는 시간을 의미하며, 최소 유지 보수, 주요 유지 보수, 검사에 소요되는 시간을 가리키는 표기는 각각 t_m, t_M, t_i와 같다.

전이 확률 $P_{ij}(a,t)$는 i 상태에서 a라는 행동을 했을 때, 정확히 t 시간 이후 j 상태로 전이될 확률을 의미한다. 전이 확률은 Chen and Trivedi [4]와 같은 균형 방정식을 통해 도출하였다.

$$\frac{dP_{ij}(a,t)}{dt} = 0, \quad \text{if } j < i \tag{3.1}$$

$$\frac{dP_{ii}(a,t)}{dt} = -\lambda \cdot P_{ii}(a,t) \tag{3.2}$$

$$\frac{dP_{ij}(a,t)}{dt} = -\lambda \cdot P_{ij}(a,t) + \lambda \cdot P_{ij-1}(a,t), \quad \text{if } i < j \leq k \tag{3.3}$$

식 (3.1)은 열화 상태가 더 낮은 수준으로 떨어질 확률은 0이라는 것을 의미한다. 그리고 식 (3.2)와 식 (3.3)는 다음 상태로 빠져나가는 것과 이전 상태에서 유입되는 균형을 의미한다.

위와 같은 미분방정식을 라플라스 변환하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s\mathcal{L}(P_{ii})(a,s) - 1 = -\lambda\mathcal{L}(P_{ii})(a,s) \tag{3.4}$$

$$s\mathcal{L}(P_{ij})(a,s) = -\lambda\mathcal{L}(P_{ij})(a,s) + \lambda\mathcal{L}(P_{ij-1})(a,s), \text{ if } i < j \leq k \tag{3.5}$$

위의 식 (3.4)와 (3.5)의 라플라스 변환항들을 좌변에 모은 후, 식들을 곱하면, 라플라스 변환항이 모두 약분되고 $\mathcal{L}(P_{ij})(a,s)$만 남는다. 이에 라플라스 역변환을 취하면 전이 확률을 구할 수 있다.

보상 식에서 $c_d(i,m,t_p)$과 $c_f(i,m,t_p)$는 상태와 행동에 의존하는 비용 함수이다. 전자는 유지 보수 행동에 따른 유지 보수 비용과 중단 시간 비용을 포함하는 식이며, 후자는 연료전지 열화에 따라 추가적으로 발생하는 연료(=수소) 비용을 나타낸다. 이를 식으로 나타내면 다음 식과 같다.

$$c_d(i,m,t_p) = \begin{cases} (1-P)\cdot C_I \cdot e^{-rT}, & \text{if } i=0 \\ (1-P)\cdot C_I \cdot e^{-rT}, & \text{if } 1 \le i < k,\ m=0 \\ (1-P)\cdot C_I \cdot e^{-rT} + C_m \cdot e^{-r\tau(i,m)}, & \text{if } 1 \le i < k,\ m=1 \\ (1-P)\cdot C_I \cdot e^{-rT} + C_M \cdot e^{-r\tau(i,m)}, & \text{if } 1 \le i < k,\ m=2 \\ (c_d \times t_R + c_R)\cdot e^{-rt_R}, & \text{if } i=k \end{cases} \tag{3.6}$$

$P = P_{ik}(a,t),\ C_I = c_d \cdot t_i + c_i,\ T = t_i + t_p + \tau(i,m),\ C_m = c_d \cdot t_m + c_m,\ C_M = c_d \cdot t_M + c_M$

$$\tau(i,a) = \begin{cases} 0, & \text{if } i=0 \\ 0, & \text{if } 1 \le i < k, m=0 \\ t_m, & \text{if } 1 \le i < k, m=1 \\ t_M, & \text{if } 1 \le i < k, m=2 \\ t_R, & \text{if } i=k \end{cases} \tag{3.7}$$

식 (3.6)는 유지 보수 행동에 따라 달라지는 비용을 나타내고 있다. P는 열화가 다시 시작되고 t_p 시간이 지날 때까지 고장나지 않을 확률이다. 검사 비용은 다음 번의 검사 시점을 결정한 후, 그때까지 고장이 나지 않아야 발생한다. 따라서 검사 비용 항에는 $1-P$를 곱하여 기대 가치를 계산한다. 그리고 C_I는 검사에 드는 비용으로, 검사 비용과 검사 동안의 중단 시간 비용으로 이루어져 있다. T는 다음 결정 시점까지의 시간으로,

수리하는 데 드는 시간, 다음 검사까지의 시간, 그리고 검사 시간의 합으로 나타난다. C_m은 최소 유지 보수를 하는 데 드는 비용으로, 최소 유지 보수 비용과 최소 유지 보수 동안의 중단 시간 비용의 합으로 나타난다. C_M은 주요 유지 보수 비용으로, 주요 유지 보수 비용과 주요 유지 보수 동안의 중단 시간 비용의 합으로 나타난다. $\tau(i, m)$은 유지 보수 행동에 따라 결정되는 값으로, 유지 보수 시간이다.

열화가 진행되지 않은 초기 상태에서는 검사 비용과 검사 시간 동안의 중단 시간 비용이 발생한다. 이 때, 발생한 비용은 연속 할인을 통해 현가로 변환된다. 검사 비용은 검사가 끝난 이후에 발생하기 때문에, T 시점의 값을 할인해온다. 고장나지 않고, 초기 상태도 아닌 경우 유지 보수 행동을 결정하고, 이에 따라 비용이 발생한다. 유지 보수를 하지 않는 경우, 초기 상태일 때와 마찬가지로 검사 비용과 검사 시간 동안의 중단 시간 비용이 발생한다. 마찬가지로 검사 비용을 T 시점에서 할인해온다. 최소 유지 보수를 하는 경우 검사 시간과 최소 유지 보수를 수행하는 시간 동안 중단 시간 비용이 발생하고, 검사 비용과 최소 유지 보수 비용이 발생한다. 검사 비용의 경우 T 시점에서 할인하며, 최소 유지 보수 비용은 유지 보수 시간 $\tau(i, m)$ 시점에서 할인해온다. 이와 유사하게 주요 유지 보수를 하는 경우 검사 시간과 주요 유지 보수를 수행하는 시간 동안 중단 시간 비용이 발생하고, 검사 비용과 주요 유지 보수 비용이 발생한다. 이 때, 검사 비용은 T 시점에서, 유지 보수 비용은 $\tau(i, m)$ 시점에서 할인해온다. 마지막으로 고장 상태에서는 수리하는 데 드는 시간 동안 중단 시간 비용과 수리 비용이 발생한다. 발생한 비용은 수리가 완료되는 시점 t_R에서 할인하여 현가로 변환한다.

$$c_f(i,m,t_p) = \begin{cases} \sum_{j\geq i}\sum_{I=i}^{j} \frac{c_a(I)\cdot P_{ij}(a,t)\cdot t_p\cdot e^{-r(t_p+\tau(i,m))}}{j-i+1}, & \text{if } i=0 \\ \sum_{j\geq i}\sum_{I=i}^{j} \frac{c_a(I)\cdot P_{ij}(a,t)\cdot t_p\cdot e^{-r(t_p+\tau(i,m))}}{j-i+1}, & \text{if } 1\leq i<k, m=0 \\ \sum_{j\geq i}\sum_{I=i}^{j} \frac{c_a(I)\cdot P_{ij}(a,t)\cdot t_p\cdot e^{-r(t_p+\tau(i,m))}}{j-(i-1)+1}, & \text{if } 1\leq i<k, m=1 \\ \sum_{j\geq i}\sum_{I=i}^{j} \frac{c_a(I)\cdot P_{ij}(a,t)\cdot t_p\cdot e^{-r(t_p+\tau(i,m))}}{j+1}, & \text{if } 1\leq i<k, m=2 \\ 0, & \text{if } i=k \end{cases} \tag{3.8}$$

식(3.8)은 연료 효율 저하에 따른 추가적인 연료 비용을 나타낸다. 식 내의 $c_a(I)$ 항은 다음과 같이 정의된다.

$$c_a(I) = \left(\frac{1}{g(I)} - 1\right) \times c_h \tag{3.9}$$

$$g(I) = 1 - \rho \cdot I \tag{3.10}$$

$g(I)$은 열화에 따라 저하되는 효율을 의미한다. 연료전지 열화에 따라 연료 효율이 저하되는 것은 여러 연구를 통해 밝혀져 있다[2, 17]. 본 연구에서는 연료전지 열화와 연료 효율의 저하의 관계를 닫힌 형태(Closed-form)로 나타내기 위해 연료 효율 저하가 선형적으로 발생한다고 가정하였다. I은 열화 수준을 의미하며, ρ는 연료 효율 저하 계수를 뜻한다. 식 (3.9)은 연료 효율 저하에 따른 추가적인 비용을 의미한다. 예를 들어, 연료 효율이 현재 초기 상태의 90%라면, 업무를 수행하기 위해서는 초기 상태보다 $\frac{1}{9}(=\frac{10}{9}-1)$만큼의 추가적인 연료가 사용된다.

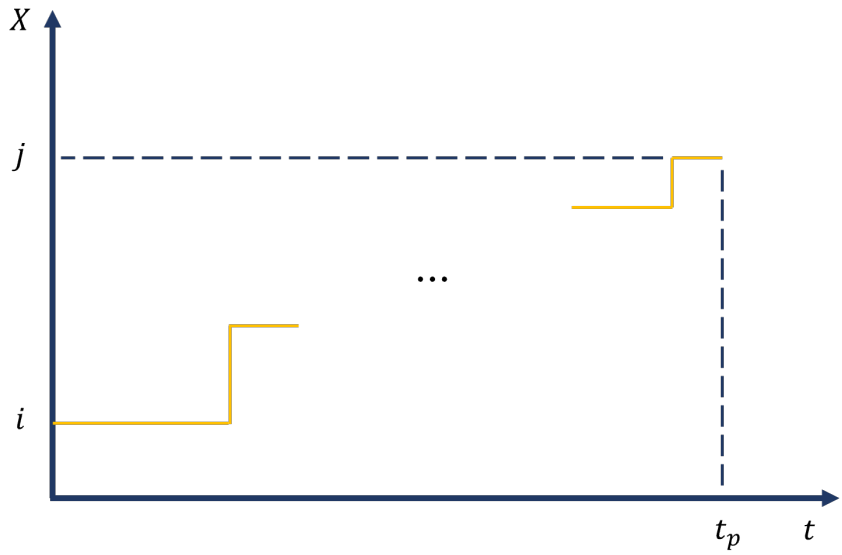

Figure 3.1: 열화 과정 설명

위의 Figure 3.1과 같이, t_p 동안 i에서 j까지 열화가 발생한다고 가정하면, 열화 과정은 다양한 궤적(trajectory)을 그릴 수 있다. 각 열화 단계에 머무르는 시간을 t_i, t_{i+1}, ..., t_j라고 하면, 열화가 포아송 과정을 따르고, 각 단계에서의 열화는 $i.i.d$를 따르기 때문에, 각 열화 단계에서 머무르는 기대 시간은 동일하다. 따라서, 열화 단계 내에서의 기대 시간은 다음 식 (3.11)과 같이 구할 수 있다.

$$E[\ t_h \mid t_i + t_{i+1} + ... + t_j = t_p,\ i \leq h \leq j\ ] = \frac{t_p}{j - i + 1} \tag{3.11}$$

그렇기 때문에 $c_f(i, m, t_p)$은 각 열화 단계에서 머무르는 시간 동안 연료 효율 저하로 인해 추가되는 연료 비용과 a라는 행동을 취했을 때 i에서 j로 열화될 확률을 곱하여 i보다 크거나 같은 모든 j에 대해 더해줌으로써 구할 수 있다. 식 (3.8)에서 유지 보수 행동을 하지 않을 때는 i에 변화가 없고, $m = 1$로 최소 유지 보수 행동을 취했을 땐 i 자리에 $i - 1$이 대입된 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로, $m = 2$로 주요 유지 보수를

했을 땐 i 자리에 0이 대입 되어있다. 고장나는 경우 수리가 진행되기 때문에 $i = k$일 땐 연료 효율 저하로 인한 비용이 발생하지 않는다. 연료전지 열화로 인해 발생하는 추가 연료 비용의 경우 열화가 중단된 후 비용이 발생하기 때문에 유지 보수 시간 $\tau(i, m)$과 검사 시간 t_p가 지난 시점($=\tau(i, m) + t_p$)에서 비용을 할인해 현가로 치환한다.

3.3 가치 함수(Value function) 정의

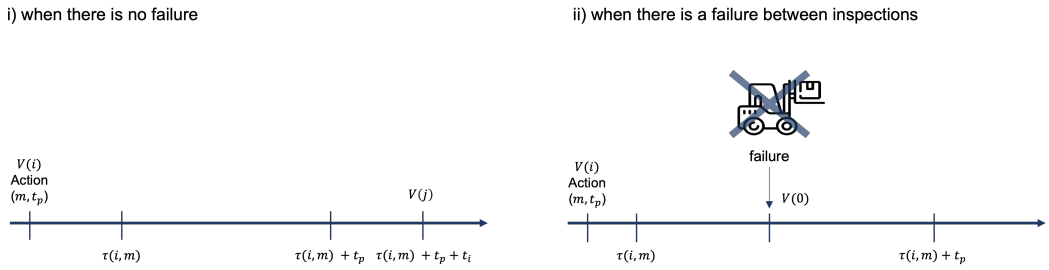

Figure 3.2: 문제 상황 설명

$V(i)$는 i 상태에서 이후 단위 시간 당 발생할 비용으로 정의한다. 그렇기 때문에, $V(i)$를 구할 때 $c_d(i,m)$과 $c_f(i,m,t_p)$, R_f 뿐만 아니라 $V(j)$로 이후 시점에서 발생하는 모든 비용을 현재 시점으로 할인해오고, 계산된 현가를 다시 무한 시간 대의 연속 등가로 환산해주는 방식으로 계산한다. 위의 보상 식 $R(i,m,t_p)$에서 $c_d(i,m,t_p)$와 $c_f(i,m,t_p)$에 r이 곱해져 있는 것은 무한 시간의 연속 등가로 환산하는 과정에서 곱해진 것이다.

문제 상황은 위의 Figure 3.2에서와 같이 크게 두 가지 경우로 나뉠 수 있다. 좌측의 그림과 같이, 결정 시점에서 결정한 t_p까지 고장이 발생하지 않은 경우, 먼저 유지 보수 시간 $\tau(i,m)$까지 유지 보수로 인한 중단 비용이 발생하고, 이후부터 열화가 진행되어 연료 효율 저하로 인한 추가 연료 비용이 발생한다. 그리고 검사 비용, 검사 비용과 검사로 인한 중단 시간 비용이 검사 종료 시점에 발생한다. 발생한 비용을 각 비용 발생 시점에서 현가로 할인해오고, 다음 상태에서의 가치 또한 전이 확률과 할인률을 반영하여 기대 가치를 구해 할인해온다.

우측의 그림의 경우, 사용자가 정한 t_p에 도달하기 전에 고장이 발생한 경우를 나타낸다. 그렇기 때문에 유지 보수 시간 동안 발생한 중단 시간 비용과 고장이 발생한 시점 t까지 발생한 추가 연료 비용, 고장 수리 동안 발생하는 중단 시간 비용, 고장 비용, 그리고 초기화된 상태의 가치를 할인해온다. 이는 고장이 발생하는 경우, 무조건 수리

행동을 취하고, $p = 1$의 확률로 초기 상태로 전환되기 때문이다.

최적 유지 보수 정책을 도출하기 위해, 다음과 같은 벨만 최적 방정식(Bellman optimality equation)을 만족시키는 가치의 참값을 찾아야 한다.

$$V^*(i) = \min_a \left[R(i,a) + \sum_{j \geq i} P_{ij}(a,t) \cdot V^*(j) \cdot e^{-r(t_p + \tau(i,m) + t_i)} + G(i,a) \right] \tag{3.12}$$

$$G(i,a) = e^{-r\tau(i,a)} \cdot \int_0^{t_p} r e^{-rt} \cdot P_{ik}(a,t) \cdot V^*(0) \cdot e^{-rt_R} \, dt$$

여기서 C_R는 고장 비용이고, C_f는 앞에서 정의한대로 i 상태에서 a라는 행동을 취했을 때 k 상태까지 열화되며 발생하는 추가 연료 비용을 의미한다.

3.4 가치 이터레이션(Value iteration)

마르코프 결정 과정의 경우, 선형 계획법(Linear programming)이나 동적 계획법(Dynamic programming)을 활용하여 문제를 풀 수 있다. 이 중 동적 계획법은 다시 정책 이터레이션(Policy iteration)과 가치 이터레이션(Value iteration)으로 나뉜다. 각각의 방법은 장단점이 존재하는데, 선형 계획법의 경우 가장 정확한 해를 구할 수 있지만 계산 복잡도가 높다. 또, 정책 이터레이션이 상대적으로 가치 이터레이션 보다 정확한 해를 계산할 수 있지만 계 복잡도가 높다. 본 연구에서는 가치 이터레이션을 활용하여 최적해를 도출하였다.

가치 이터레이션의 의사 코드는 다음과 같다.

Algorithm 1 Value Iteration Algorithm

Require: Degradation rate, cost parameters, time parameters, discount rate

Set $V_0(i) = 0, \forall i$ ▷ Value initialization
$G(i,a) := \int_0^{t_p} e^{-rt} \times P_{ik}(a,t) \times e^{-rt_R} \times V_{n-1}(0)\, dt$
while $V_n(i) - V_{n-1}(i) > \varepsilon, \forall i$ **do** ▷ Value iteration loop
    for $1 \leq i < k$ **do**
        $V_n(i) = \min_{a \in A}[R(i,a) + \sum_{j \geq i} e^{-r(t_i + t_p + \tau(i,m))} \cdot P_{ij}(a,t) \cdot V_{n-1}(j) + G(i,a)]$
    end for
    $V_n(k) = e^{-rt_R} \times (rc_d \times t_R + rc_R + V_{n-1}(0))$
end while
return $V^*(i), \pi^*$ ▷ Return value and policy

가치 이터레이션을 위해 입력 파라미터로, 열화율, 비용 파라미터, 시간 파라미터, 할인률이 요구된다. 먼저, 값을 초기화한 다음, 반복문 내에서 각 상태별로 가치(=비용)을 최소화하는 행동을 찾는다. 반복문은 가치가 참값으로 수렴할 때까지 반복한다. 알고리즘의 정지 기준(Stopping criteria)으로 사용되는 ε은 미리 정한 파라미터이다.

제 4 장 실험 및 실험 결과

4.1 문제 상황 및 실험 데이터

실험을 위해 수소 지게차 1대를 운용하는 상황을 가정한다. 그리고 열화와 비용에 대한 구체적인 가정은 3.2에서 정의한 문제 상황 가정을 동일하게 적용한다. 수소 지게차 사용자는 수소 지게차의 연간 평균 유지 보수 비용을 최소화하는 것을 목적으로 한다.

먼저, 본 연구에서 제시한 모델의 효과를 확인하기 위해 다음 검사까지의 시간 간격을 고려하지 않는 기존 CBM 모델과 비교 분석을 수행한다. 그리고 연료 효율 저하로 인한 추가 연료 비용의 영향을 알아보기 위해 본 연구의 모델과 연료 효율 저하를 고려하지 않은 모델을 비교한다. 다음으로 연료 효율 저하를 고려하지 않았을 때, 주기적 모델과 검사 간격 최적화를 고려한 모델을 비교한다. 마지막으로 파라미터들에 대해 민감도 분석을 수행한다.

Table 4.1: 실험 데이터

c_m	\$1,100	c_M	\$11,000
c_R	\$35,000	c_d	\$400/day
c_h	\$28.44/day	c_i	\$100
λ	0.5	ρ	0.03
t_i	1 day	t_m	1 day
t_M	3 day	t_R	10 day
r	0.05	ε	5

분석을 위해 사용된 실험 데이터는 Table 4.1과 같다. 수소 지게차의 유지 보수 비용을 도출하기 위해, [19]에서의 수소 지게차 비용 항들을 활용하였다. 먼저, 열화로

인해 고장이 나는 경우 c_R은 수소 지게차를 대체하기 위한 비용으로, 수소 지게차 및 연료전지 구매 비용 $35,000을 대입하였다. 이와 유사하게, c_M은 연료전지를 대체하는 비용으로 $11,000을 대입하였다. 최소 유지 보수 비용 c_m은 c_M을 기준으로 값을 설정하였다. 연료 비용 c_h 또한 일일 소요 수소량과 수소 가격을 곱해 계산한 값을 사용하였다. 검사 비용 c_i의 경우 해당 연구에서 사용한 값이 존재하지 않아, 대한건설기계안전관리원의 검사소 입고 검사 비용을 참고하여 $100이라는 값을 대입하였다 [23]. λ의 경우, United States Department of Energy의 보고서를 참고하여, 연료전지의 수명을 반영해 대입하였다 [5]. 해당 보고서에서는 일반적인 연료전지의 보증 수명을 5년으로 제시하고 있어, 평균적으로 5년 후 고장나도록 λ의 값으로 0.5를 사용하였다. 할인률 r은 현재 미국의 기준금리 5.00-5.25%를 참조하였다. c_d의 경우 중단 시간 비용으로, 수소 지게차를 이용하지 못하는 시간 동안 다른 지게차를 대여해오는 데 드는 비용으로 값을 삽입하였다. 이 때의 지게차 비용은 미국의 Superior Industrial Products가 제공하는 값 중, medium-capacity reliable forklift의 가격을 참고하였다[25]. 이외의 ρ와 같은 경우, 선행 연구를 참고하여 값을 설정하였다[2, 17].

4.2 실험 결과

3.4에서 제시한 가치 이터레이션을 활용하여 평균 유지 보수 비용의 참값을 도출하였다. 먼저, 기존의 주기적 검사 모형과 비교하였다. 다른 모든 비용 및 모델을 동일하게 설정한 후, 선택 가능한 t_p를 0.5 하나로 고정하였을 때와 비교하였고, 도출된 정책 및 유지 보수 비용은 다음 Table 4.2와 같다.

Table 4.2: 주기적 검사 모델(오른쪽)과의 비교

i	m	t_p
0	0	0.75
1	1	0.75
2	1	0.75
3	1	0.25
4	1	0.25
5	1	0.25
6	1	0.25
7	2	0.75
8	2	0.75
9	2	0.75
10	3	0.75
$V^*(0) = 1350$		

i	m	t_p
0	0	0.5
1	1	0.5
2	1	0.5
3	1	0.5
4	1	0.5
5	1	0.5
6	1	0.5
7	2	0.5
8	2	0.5
9	2	0.5
10	3	0.5
$V^*(0) = 1572$		

m이 0이라면 유지 보수를 하지 않는 것을 의미하며, m이 1일 때는 최소 유지 보수, m이 2일 때는 주요 유지 보수, 마지막으로 m은 3일 때는 새로운 수소 지게차로의 대체를 의미한다. 위의 결과를 살펴보면, 검사 기간을 고려할 때와 고려하지 않을 때 유지 보수 행동에는 변화가 없음을 확인할 수 있다. 모두 열화 1 상태부터 6 상태까지 최소 유지 보수를 수행하며, 7 상태부터 9 상태까지 주요 유지 보수를 수행한다. 이러한 결과는 열화 상태가 진행되며 고장과 가까워질수록 위험 비용이 증가하기 때문에 비용을 최소화하기 위해서는 예방적으로 연료전지를 교체하는 것이 필요하다고 해석할 수 있다.

다음 검사까지의 시간을 함께 최적화하는 경우, 열화 상태가 진전될수록 보다 짧은 검사 간격을 가져간다. 이는 열화와 고장에 대한 위험 회피로, 검사를 자주 수행함으로써 고장과 열화를 피하려는 시도로 해석할 수 있다. 연간 평균 유 보수 비용으로 해석할 수 있는 $V^*(0)$의 경우 검사 기간을 고려해 최적화한 경우 약 $222를 절감할 수 있었다. 이는 기존의 모델 대비 약 14.1%의 비용 절감으로, 한 대가 아닌 다수의 지게차를 운용하는 작업장 입장에서는 상당히 큰 차이라 할 수 있다.

다음으로 연료 효율을 포함하지 않은 모델과의 비교 분석을 수행하였으며, 결과는 다음 Table 4.3과 같다.

Table 4.3: 연료 효율 저하를 고려하지 않은 모델(오른쪽)과의 비교

i	m	t_p
0	0	0.75
1	1	0.75
2	1	0.75
3	1	0.25
4	1	0.25
5	1	0.25
6	1	0.25
7	2	0.75
8	2	0.75
9	2	0.75
10	3	0.75
$V^*(0) = 1350$		

i	m	t_p
0	0	0.75
1	0	0.75
2	0	0.75
3	0	0.75
4	0	0.75
5	0	0.75
6	0	0.75
7	1	0.75
8	1	0.5
9	1	0.25
10	3	0.75
$V^*(0) = 964$		

주기적 검사 모델과 다음 검사까지의 기간을 함께 최적화한 모델에서 유지 보수 정책이 동일하게 나타난 것과 다르게, 연료 효율 저하를 고려한 모델과 고려하지 않은 모델은 유지 보수 정책에서 차이를 보였다. 연료 효율 저하를 고려하지 않는 모델의 경우 열화가 상당히 진행된 6 상태에서도 예방 유지 보수를 수행하지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한, 연료 효율 저하를 고려하지 않는 경우, 상태 7부터 상태 9까지 고장과

굉장히 근접한 열화 상태에서도 주요 유지 보수를 수행하지 않는다.

이러한 두 모델에서의 극명한 차이는 연료전지의 열화에 따른 연료 효율 저하가 상당한 추가 연료 비용이 발생한다는 것을 의미한다. 연료 효율의 저하가 없는 경우, 위험 비용이 상당히 작은 것으로 해석된다. 확률적 고장과 열화로 인한 비용이 주요 유지 보수 비용보다 작아, 연료전지의 교체를 수행하지 않는다고 해석할 수 있다. 연료 효율 저하로 인한 비용이 추가됐기 때문에 비용적인 측면에서는 고려한 모델이 더 큰 값을 보인다. 약 $386의 값의 차이는 연료 효율 저하로 인한 추가적인 연료 사용에 따른 비용으로, 연료 효율 저하가 유지 보수에 큰 영향을 끼치는 것을 알 수 있다.

마지막으로 연료 효율 저하를 고려하지 않고 다음 검사 기간까지의 최적화를 반영한 모델과 연료 효율 저하와 다음 검사 기간까지의 최적화 모두를 고려하지 않은 주기적 검사 모델을 비교하였으며, 결과는 다음 Table 4.4와 같다.

Table 4.4: 연료 효율 저하를 고려하지 않았을 때, 주기적 검사 모델(오른쪽)과의 비교

i	m	t_p
0	0	0.75
1	0	0.75
2	0	0.75
3	0	0.75
4	0	0.75
5	0	0.75
6	0	0.75
7	1	0.75
8	1	0.5
9	1	0.25
10	3	0.75
$V^*(0) = 964$		

i	m	t_p
0	0	0.5
1	0	0.5
2	0	0.5
3	0	0.5
4	0	0.5
5	0	0.5
6	0	0.5
7	1	0.5
8	1	0.5
9	1	0.5
10	3	0.5
$V^*(0) = 1209$		

왼쪽과 오른쪽의 표를 비교했을 때, 유지 보수 행동이 같다는 것을 확인할 수 있다. 열화 상태가 0부터 6까지 유지 보수를 하지 않으며, 7부터 9까지 최소 유지 보수, 10일

때 새로운 수소 지게차로의 대체를 하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 다음 검사까지의 간격을 살펴보면, 유지 보수를 하지 않을 때는 계속 0.75의 간격으로 검사를 하며, 최소 유지 보수를 하는 경우 열화가 진행됨에 따라 점점 더 짧은 간격으로 검사를 하는 것을 확인할 수 있다. 이는 주요 유지 보수 비용이 크고, 최소 유지 보수를 하는 경우 짧은 기간 내에 완전히 고장이 날 확률이 적기 때문으로 해석된다.

비용의 경우, 검사 간격을 고려하여 최적화했을 때, 검사 기간을 고려하지 않았을 때보다 연간 $245를 절감할 수 있다. 이는 검사 기간을 고려하지 않은 모델 대비 약 20.3%의 비용 절감으로, 다수의 지게차를 운용하는 작업장의 입장에서는 상당한 차이가 난다는 것을 알 수 있다.

4.3 민감도 분석

4.3.1 검사 비용 c_i

먼저, 검사 수행에 소요되는 검사 비용 c_i에 대해 민감도 분석을 수행하였다. c_i의 민감도 분석은 c_i 값 5개 수준에 대해 0부터 200까지 등간격에 대해 수행하였다. c_i 수준별 유지 보수 정책의 변화는 다음 Table 4.5와 같다.

Table 4.5: c_i 수준별 유지 보수 정책

i	m	t_p	m	t_p	m	t_p	m	t_p	m	t_p
0	0	0.75	0	0.75	0	0.75	0	0.75	0	0.75
1	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75
2	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75
3	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25
4	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25
5	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25
6	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25
7	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75
8	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75
9	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75
10	3	0.75	3	0.75	3	0.75	3	0.75	3	0.75
	$c_i = 0$		$c_i = 50$		$c_i = 100$		$c_i = 150$		$c_i = 200$	

Table에서 확인할 수 있듯이, c_i는 유지 보수 정책에는 영향을 끼치지 않았다. 이는 c_i 값 자체가 다른 비용 항에 비해 작기 때문으로 해석된다. 검사하는 데 드는 비용의 변화는 본 문제 상황 하에서는 검사 주기, 유지 보수 행동에는 크게 영향을 주지 않았다.

4.3.2 최소 유지 보수 비용 c_m

다음으로 최소 유지 보수 비용 c_m에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. c_m 기존 값 \$1100에 대하여 0%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150%, 200% 수준에 대하여 민감도 분석을 수행하였으며, 결과는 다음 Table 4.6과 같다.

Table 4.6: c_m 수준별 유지 보수 정책

i	m	t_p	m	t_p	m	t_p	m	t_p	m	t_p	m	t_p	m	t_p
0	0	0.75	0	0.75	0	0.75	0	0.75	0	0.75	0	0.75	0	0.75
1	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75
2	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75
3	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.75
4	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	0	0.75
5	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	0	0.75
6	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	2	0.75	2	0.75	2	0.75
7	1	0.25	1	0.25	1	0.25	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75
8	1	0.25	1	0.25	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75
9	1	0.25	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75
10	3	0.75	3	0.75	3	0.75	3	0.75	3	0.75	3	0.75	3	0.75
	$c_m = 0$		$c_m = 550$		$c_m = 825$		$c_m = 1100$		$c_m = 1375$		$c_m = 1650$		$c_m = 2200$	

c_m이 \$0일 때는, 0과 10을 제외한 모든 상태에서 최소 유지 보수를 수행한다. 또, 열화 상태에 따라 더 짧은 검사 간격으로 변화한다. c_m이 \$550일 때는 9 상태에서 주요 유지 보수를 수행하는 것을 확인할 수 있다. 또, c_m이 \$825, \$1100, \$1375로 커질수록 더 낮은 열화 상태에서 주요 유지 보수를 수행한다. 이러한 변화는 최소 유지 보수 비용과 주요 유지 보수 비용의 비율이 유지 보수 정책에 영향을 끼친다는 것을 보여준다. 최소 유지 보수 비용이 적을 때는 주요 유지 보수를 덜 수행하고, 최소 유지 보수 비용이 커질수록 주요 유지 보수 비중이 커진다.

c_m이 \$2200일 때, 4, 5 상태에서 유지 보수를 수행하지 않는 것으로 나타난다. 열화가 진행될수록 유지 보수를 덜 수행하는, 직관과 일치하지 않는 유지 보수 정책이다. 이러한 유지 보수 정책은 열화 단계가 4와 5에 달해있을 때, 3과 4보다 진전될 수 있는 열화 단계가 적어, 발생할 수 있는 연료 효율 저하로 인한 비용이 작어져, 최소 유지 보수를 하는 데 드는 비용이 열화로 인한 비용보다 큰 것으로 해석된다.

4.3.3 중단 시간 비용 c_d

다음으로 중단 시간 동안 발생하는 중단 시간 비용 c_d에 대해 민감도 분석을 수행하였다. c_d의 민감도 분석은 c_d 값 5개 수준에 대해 200부터 600까지 등간격에 대해 수행하였다. c_i 수준별 유지 보수 정책의 변화는 다음 Table 4.7와 같다.

Table 4.7: c_d 수준별 유지 보수 정책

i	m	t_p	m	t_p	m	t_p	m	t_p	m	t_p
0	0	0.75	0	0.75	0	0.75	0	0.75	0	0.75
1	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75
2	1	0.25	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75
3	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.75
4	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25
5	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25
6	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	2	0.75
7	1	0.25	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75
8	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75
9	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75
10	3	0.75	3	0.75	3	0.75	3	0.75	3	0.75
	$c_d = 200$		$c_d = 300$		$c_d = 400$		$c_d = 500$		$c_d = 600$	

c_d가 작을 때는, 주요 유지 보수를 적게 수행하는 것을 확인할 수 있다. 상태 8과 상태 9에서만 주요 유지 보수를 수행한다. c_d가 커질수록 검사 간격을 크게 설정하고자 한다. c_d가 \$200일 때는 열화 2상태에서 0.25만큼의 검사 간격을 설정하지만, \$300일 때부터는 0.75로 설정하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 검사 기간 동안 발생하는 중단 시간 비용 또한 유지 보수 정책에 큰 영향을 끼치는 것으로 해석할 수 있다.

c_d가 커질수록 주요 유지 보수를 수행하는 열화 시점이 앞당겨지는데, 이는 최소 유지 보수를 하는 경우 다음 검사 때 다시 최소 유지 보수를 하게 되고 지속적으로 중단 시간 비용이 발생하기 때문에, 열화를 초기화하여 이런 중단 시간 비용을 줄이기 위해서 주요 유지 보수를 수행하는 것으로 해석된다.

4.3.4 연료 효율 저하 계수 ρ

다음으로 연료전지 열화에 따른 연료 효율 저하 계수 ρ에 대해 민감도 분석을 수행하였다. ρ의 민감도 분석은 ρ 값 5개 수준에 대해 0.02부터 0.05까지 등간격에 대해 수행하였다. ρ 수준별 유지 보수 정책의 변화는 다음 Table 4.8와 같다.

Table 4.8: ρ 수준별 유지 보수 정책

i	m	t_p	m	t_p	m	t_p	m	t_p	m	t_p
0	0	0.75	0	0.75	0	0.75	0	0.75	0	0.75
1	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75
2	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.5
3	1	0.75	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25
4	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25
5	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25
6	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25
7	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75
8	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75
9	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75
10	3	0.75	3	0.75	3	0.75	3	0.75	3	0.75
	$\rho = 0.02$		$\rho = 0.025$		$\rho = 0.03$		$\rho = 0.035$		$\rho = 0.04$	

ρ의 변화에 따라, 유지 보수 행동의 정책에는 변화가 나타나지 않았다. 상태 1부터 6까지는 최소 유지 보수를 수행하고, 7-9까지는 주요 유지 보수를 수행한다. ρ를 고려하지 않았을 때의 경우 유지 보수 행동에도 변화가 있었던 것을 고려하면, 0.05-0.1 수준의 변화는 유지 보수 행동의 변화를 이끌어내기에는 충분하지 않은 변화인 것으로 해석할 수 있다. 다만, 이 때도 최적 검사 간격에는 변화가 나타났다. ρ가 증가하며 검사 간격을 더 짧게 설정하는 것을 확인할 수 있다. 예를 들면, ρ가 0.04인 경우, 다른 ρ에서와 달리 2 상태에서 0.5의 유지 보수 간격을 최적으로 선택하였다.

4.3.5 할인률 r

마지막으로 할인률 r에 대해 민감도 분석을 수행하였다. r의 민감도 분석은 r 값 5개 수준에 대해 0.01부터 0.09까지 등간격에 대해 수행하였다. r 수준별 유지 보수 정책의 변화는 다음 Table 4.9와 같다.

Table 4.9: r 수준별 유지 보수 정책

i	m	t_p	m	t_p	m	t_p	m	t_p	m	t_p
0	0	0.75	0	0.75	0	0.75	0	0.75	0	0.75
1	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75
2	1	0.25	1	0.75	1	0.75	1	0.75	1	0.75
3	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.75
4	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25
5	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25
6	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25	1	0.25
7	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75
8	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75
9	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75	2	0.75
10	3	0.75	3	0.75	3	0.75	3	0.75	3	0.75
	$r = 0.01$		$r = 0.03$		$r = 0.05$		$r = 0.07$		$r = 0.09$	

r의 변화에 따라 유지 보수 행동 정책에는 영향을 주지 않았다. 다만, 검사 간격은 r이 증가할수록 늘어나는 경향을 보였다. r이 0.01에서 0.03으로 바뀜에 따라 2 상태에서의 t_p가 0.25에서 0.75로 증가하였다. 또, r이 0.07에서 0.09로 증가함에 따라 3 상태에서의 t_p가 0.25에서 0.75로 증가하였다. 이는 r이 증가할수록 현재 가치를 크게 평가하기 때문에, 검사 주기를 늘림으로써 발생할 위험 비용보다, 현재 검사 주기를 늘림으로써 얻을 수 있는 중단 시간 비용 등의 이익을 더 크게 평가하기 때문으로 해석된다.

4.3.6 민감도 비교

각 파라미터의 변화에 따라 평균 연간 유지 보수 비용의 변화는 Figure 4.1과 같이 나타난다.

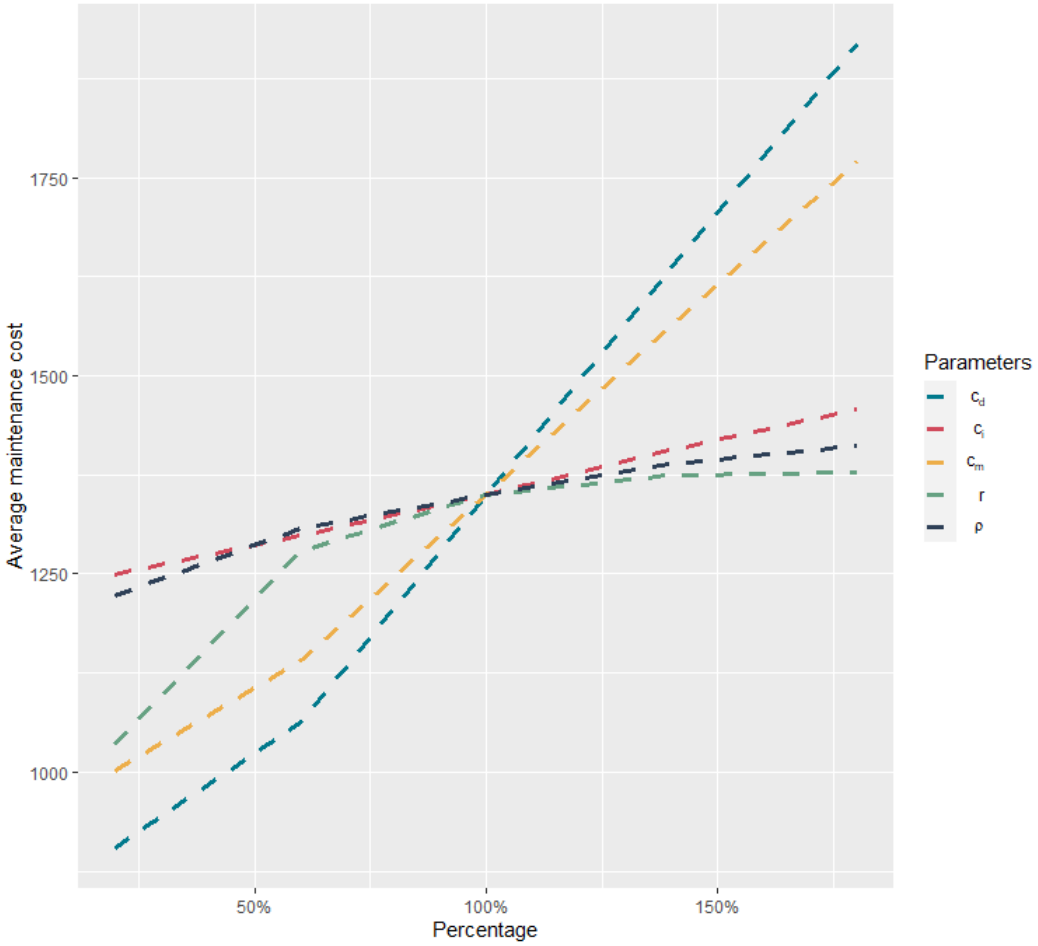

Figure 4.1

r을 제외한 나머지 파라미터들은 선형에 가까운 형태로 변화하는 것을 확인할 수 있다. c_d, c_i, c_m의 경우, 목적함수인 평균 연간 유지 보수 비용에 선형 항으로 반영되어 있기 때문에 선형적으로 변화하는 것으로 해석된다. ρ는 유리함수와 같이 분수의

분모에 들어가있음에도 선형적으로 변화하고 있는데, 이는 ρ와 i를 곱하더라도 0에서 1 사이에서의 값만을 가지기 때문에, 유리함수의 1차 근사와 같은 형태로 나타나는 것으로 해석된다.

Figure 4.1에서 확인할 수 있듯이, 평균 연간 유지 보수 비용은 중단 시간 비용 c_d에 가장 민감하게 반응하였다. 그 다음으로는 최소 유지 보수 비용 c_m에 민감한 것을 확인할 수 있다. 그 다음으로는 c_i, ρ 순으로 민감하게 반응하였으며, r에 대해서는 낮은 값에서는 가장 가파르게 증가하였으나, 값이 늘어날수록 민감도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

제 5 장 결론

5.1 결론

본 논문에서는 수소 지게차를 위한 새로운 유지 보수 비용 모델을 제안하였다. 먼저, 해당 모델은 수소 지게차의 특성에 따른 비용을 반영하였다. 수소 지게차의 열화에 따라 연료 효율이 저하되어 추가적으로 연료를 소모한다는 점을 고려하여 비용항을 추가하였다. 또한, 비용을 절감하고 보다 유연하게 의사결정을 수행할 수 있도록 각 결정 시점에서 유지 보수 행동뿐만 아니라 다음 검사까지의 간격을 함께 선택할 수 있게 상태 기반 유지 보수 모델을 개선하였다. 따라서 해당 모델을 활용해 유지 보수 정책을 결정하는 경우, 수소 지게차의 특성을 반영하면서 검사 시점의 열화 상태에 따라 다음 검사까지의 시간 간격을 고려하며 유연하게 유지 보수를 수행할 수 있다.

또, 선행 연구와 문헌을 통해 얻은 값을 반영하여 실험을 수행하였다. 기존의 주기적 유지 보수 모델과 본 연구에서 제시한 모델을 비교한 결과, 유지 보수 행동에는 차이가 없었지만 연간 $222를 절감해 주기적 모델 대비 약 14.1%의 비용 감축을 할 수 있다는 결과를 도출하였다. 또한, 수소 지게차의 특성인 연료 효율 저하로 인한 추가 연료 비용을 고려하지 않은 모델과 비교를 수행하였다. 마지막으로 연료 효율 저하를 고려하지 않은 상황에서 주기적 유지 보수 모델과 본 논문에서의 비정기적 상태 기반 유지 보수 모델을 비교하였으며, 연간 $245의 유지 보수 비용을 절감하여 주기적 모델 대비 약 20.3%의 비용을 감축할 수 있다는 결과를 도출하였다. 비교 분석 후 실험에 사용한 파라미터들에 대해 민감도 분석을 수행하였다. 이를 통해 각 파리미터의 변화에 따라 유지 보수 정책과 유지 보수 비용이 어떻게 변화하는지 확인하였다.

다음 검사까지의 간격을 고려하지 않는 주기적 모델과 본 논문에서 제시한 유지 보수 모델을 비교함으로써 새로운 모델이 유지 보수 비용을 큰 폭으로 감축할 수 있다는 사실을 확인하였다. 다수의 지게차를 운용하는 사용자의 입장에서 유지 보수 비용을 14.1% 절감하는 것은 상당히 유의미한 차이로 해석할 수 있다. 그렇기 때문에 본 논문에서 제시한 모델을 활용하여 열화 상태에 따라 검사 간격을 적절히 조정함으로써 유지 보수 비용을 감축할 수 있을 것으로 기대된다.

또한 연료전지의 연료 효율 저하를 고려하지 않았을 때의 최적 유지 보수 정책과 본 연구에서의 모델을 통해 도출한 최적 유지 보수 정책을 비교한 결과 상당한 차이를 보였다. 이는 연료 효율 저하로 인한 추가 연료 비용이 연료전지의 유지 보수 정책에 실질적으로 영향을 끼치는 것을 의미한다. 그렇기 때문에 본 연구에서 제시한 모델을 통해 수소 지게차의 유지 보수 정책을 도출하는 경우 보다 현실적으로 유지 보수를 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

5.2 향후 연구 방향

한편, 본 연구에서는 열화가 점진적으로 한 단계씩 발생하는 포아송 프로세스를 가정하였으나, 실제 연료전지의 열화 분포를 반영하지 못했다. 그렇기 때문에 열화가 진행될수록 열화의 속도가 달라진다는 점을 반영하여 현실적인 열화 분포를 가정하고 유지 보수 정책을 도출한다면 보다 현실적인 연구가 될 수 있을 것으로 기대한다.

또한, 본 연구에서는 수소 지게차의 연료전지 열화에 따른 연료 효율 저하라는 특성을 반영하였으나, 수소 지게차의 가장 큰 장점 중 하나인 탄소 배출량 저감이라는 특성을 반영하지 못했다는 한계가 존재한다. 실제로, 유지 보수를 수행함에 있어 연료전지 열화에 따라 탄소 배출량이 증가하는 것을 반영한 유지 보수 모델이 존재한다[20]. 작업장을 운영하는 입장에서 탄소 배출을 의무적으로 감축해야 하고, 탄소를 배출하기 위해선 탄소 배출권을 구매해야 한다. 연료전지가 열화됨에 따라 탄소를 추가적으로 발생시킨다면 추가적인 탄소 배출권 구매로 인한 비용을 열화 비용에 포함해야 한다. 단, 수소 지게차의 활용을 통해 이미 탄소 배출을 감축하기 때문에, 다른 지게차와의 비교를 바탕으로 탄소 배출권을 덜 구매해도 된다면 이는 비용이 아니라 이익으로 이어질 수도 있다. 이와 같이 환경적인 측면에서 접근한다면 보다 유의미한 연구가 될 것이다.

마지막으로, 본 논문은 수소 지게차의 유지 보수 비용을 도출하는 상태 기반 유지 보수 모델을 제안하였는데, 경제성 분석은 하나의 대안에 대해 분석을 수행할 때보다 다른 대안과의 비교할 때 큰 의미를 갖는다고 할 수 있다. 그렇기 때문에 추후 디젤 지게차, 리튬 이온 배터리 지게차와 같은 다른 대안과의 비교를 통해 유지 보수 비용을 비교한다면 보다 의미있는 연구가 될 것으로 기대한다.

참고 문헌

[1] R. Ahmad and S. Kamaruddin, *An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application*, Computers & Industrial Engineering, 63 (2012), pp. 135–149.

[2] P. Ahmadi and E. Kjeang, *Realistic simulation of fuel economy and life cycle metrics for hydrogen fuel cell vehicles*, International Journal of Energy Research, 41 (2017), pp. 714–727.

[3] S. Alaswad and Y. Xiang, *A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system*, Reliability Engineering & System Safety, 157 (2017), pp. 54–63.

[4] D. Chen and K. S. Trivedi, *Optimization for condition-based maintenance with semi-markov decision process*, Reliability Engineering & System Safety, 90 (2005), pp. 25–29.

[5] U. Doe, *The fuel cell technologies office multi-year research, development, and demonstration plan*, US Department of Energy, (2016).

[6] C. Drent, S. Kapodistria, and J. Resing, *Condition-based maintenance policies under imperfect maintenance at scheduled and unscheduled opportunities*, Queueing Systems, 93 (2019), pp. 269–308.

[7] R. J. Ferreira, A. T. de Almeida, and C. A. Cavalcante, *A multi-criteria decision model to determine inspection intervals of condition monitoring based on delay time analysis*, Reliability Engineering & System Safety, 94 (2009), pp. 905–912.

[8] M. Fouladirad, A. Grall, and L. Dieulle, *On the use of on-line detection for maintenance of gradually deteriorating systems*, Reliability Engineering & System Safety, 93 (2008), pp. 1814–1820.

[9] A. Grall, C. Bérenguer, and L. Dieulle, *A condition-based maintenance policy for stochastically deteriorating systems*, Reliability Engineering & System Safety, 76 (2002), pp. 167–180.

[10] K. T. Huynh, A. Barros, C. Berenguer, and I. T. Castro, *A periodic inspection and replacement policy for systems subject to competing failure modes due to degradation and traumatic events*, Reliability Engineering & System Safety, 96 (2011), pp. 497–508.

[11] R.-y. Jiang, *Optimization of alarm threshold and sequential inspection scheme*, Reliability Engineering & System Safety, 95 (2010), pp. 208–215.

[12] H. Liao, E. A. Elsayed, and L.-Y. Chan, *Maintenance of continuously monitored degrading systems*, European Journal of Operational Research, 175 (2006), pp. 821–835.

[13] B. Liu, M. D. Pandey, X. Wang, and X. Zhao, *A finite-horizon condition-based maintenance policy for a two-unit system with dependent degradation processes*, European Journal of Operational Research, 295 (2021), pp. 705–717.

[14] N. Metzger and X. Li, *Technical and economic analysis of fuel cells for forklift applications*, ACS Omega, 7 (2022), pp. 18267–18275.

[15] M. Ohnishi, H. Kawai, and H. Mine, *An optimal inspection and replacement policy for a deteriorating system*, Journal of Applied Probability, 23 (1986), pp. 973–988.

[16] P. Pei, Q. Chang, and T. Tang, *A quick evaluating method for automotive fuel cell lifetime*, International Journal of Hydrogen Energy, 33 (2008), pp. 3829–3836.

[17] M. Raeesi, S. Changizian, P. Ahmadi, and A. Khoshnevisan, *Performance analysis of a degraded pem fuel cell stack for hydrogen passenger vehicles based on machine learning algorithms in real driving conditions*, Energy Conversion and Management, 248 (2021), p. 114793.

[18] T. Ramsden, *Evaluation of the total cost of ownership of fuel cell-powered material handling equipment*, tech. rep., National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2013.

[19] J. V. Renquist, B. Dickman, and T. H. Bradley, *Economic comparison of fuel cell powered forklifts to battery powered forklifts*, International Journal of Hydrogen Energy, 37 (2012), pp. 12054–12059.

[20] S. Wu, D. Wu, and R. Peng, *Considering greenhouse gas emissions in maintenance optimisation*, European Journal of Operational Research, 307 (2023), pp. 1135–1145.

[21] G. Xu and F. Azhari, *Data-driven optimization of repair schemes and inspection intervals for highway bridges*, Reliability Engineering & System Safety, 228 (2022), p. 108779.

[22] X. Zhao, M. Fouladirad, C. Bérenguer, and L. Bordes, *Condition-based inspection/replacement policies for non-monotone deteriorating systems with environmental covariates*, Reliability Engineering & System Safety, 95 (2010), pp. 921–934.

[23] 대한건설기계안전관리원, *건설 기계 검사*. https://www.kcesi.or.kr/home/mainBusiness/ctcqInspct/fdrmInspct/fdrmInspct02.jsp. Accessed: 2023-05-30.

[24] 법제처, *세계 각국의 온실가스 감축 목표 및 관련 법령*. https://world.moleg.go.kr/web/dta/lgslTrendReadPage.do?A=A&searchType=all&searchPageRowCnt=10&CTS_SEQ=50035&AST_SEQ=3891&ETC=1. Accessed: 2023-05-30.

[25] Superior Industrial Products, *Forklift rental prices*. https://www.sip.net/forklift-rental-prices/. Accessed: 2023-05-30.

[26] 전자뉴스, *수소연료전지 '단위 셀'만 교체...車 수리비 경감 기술 나온다*. https://www.etnews.com/20210413000109. Accessed: 2023-05-10.

Abstract

An Economic Condition-Based Maintenance Model Considering Inspection Interval Optimization : An Application to Fuel Cells of Forklifts

Seokhwan Hong
Department of Industrial Engineering
The Graduate School
Seoul National University

Global climate change has prompted an increasing recognition of the necessity for carbon neutrality. In response, the construction industry is developing environmentally friendly construction machinery, such as fuel cell forklifts, to address environmental concerns. However, it is important to consider the perspective of users, who must evaluate not only the environmental impact but also the economic viability. In the context of fuel cell forklifts, fuel cells constitute a substantial proportion of the overall expenses, thus emphasizing the need for meticulous maintenance. Moreover, fuel cell forklifts experience degradation under harsh operating conditions, leading to reduced fuel efficiency. However, research on maintenance costs reflecting this degradation is limited. This study introduces a novel Markov decision process

(MDP) model that aims to optimize both the interval to the next inspection and maintenance decisions, while effectively considering the degradation of fuel efficiency. The primary objective of this paper is to establish a cost-effective condition-based maintenance (CBM) policy that aligns with the distinctive attribute of fuel cell forklifts.

Keywords: Fuel cell forklifts, Condition-based maintenance, Degradation, Markov decision process

Student Number: 2021-25320

감사의 글

서울대학교 산업공학과의 모든 식구들께 감사드립니다.