

철도 상태기반 유지보수를 위한 소프트웨어 구성

Program Architecture for Railway Condition-Based Maintenance

송성준*, 김정윤**, 여화수*†

Sungjun Song *, Jeongyun Kim **, Hwasoo Yeo *†

Abstract Maintenance of components is connected with not only system efficiency but users' safety. In several countries, studies on the development of maintenance system is in progress. Condition-Based Maintenance(CBM) is one of the strategies that supports maintenance decision making process, which is based on condition information monitored by various sensors installed in the components of a system. This study proposes a program configuration plan for condition-based maintenance in railway field. This paper includes discussion of the application and analysis of various type of data which can be obtained from railway system, and suggestion of connections of functions to find out optimized maintenance action.

Keywords : Condition-Based Maintenance, Program Architecture, Component diagnosis, Maintenance Optimization

초 록 부품의 유지보수는 전체 시스템의 운영효율 및 안전과도 연결되는 매우 중요한 부분이다. 지금까지 국내외에서는 유지보수 방법을 발전시키기 위한 다양한 연구가 있었다. 이 중에서 상태기반 유지보수(Condition-Based Maintenance)는 기존의 유지보수 데이터와 다양한 센서 데이터를 분석하여 현재 및 미래 상태를 기반으로 유지보수 의사를 결정하는 유지보수 방법이다. 본 연구에서는 상태기반 유지보수를 철도분야에 도입하기 위한 유지보수 소프트웨어의 구성 방안을 제시하고자 한다. 철도분야에서 수집할 수 있는 다양한 형태의 데이터를 유지보수에 어떻게 활용할지 논의하고, 유지보수 최적화를 달성하기 위한 소프트웨어 각 모듈의 연결 방안을 제안한다.

주요어 : 상태기반 유지보수, 프로그램 아키텍처, 부품진단, 유지보수 최적화

1. 서론

지금까지 다양한 유지보수 방법론들은 대체로 구성요소의 주기적 교체가 핵심이었다. 부품 수명 및 성능 저하를 고려하기보다는 주기적으로 부품을 교체하여 최상의 성능을 유지하는 데에 무게를 두어 시스템의 안전을 도모하였다. 단, 이 점은 유지보수 비용을 상승시키는 원인이 된다는 것과 부품 및 시스템의 노화 과정을 고려하지 못한다.

상태기반 유지보수는 유지보수 의사결정의 전략적 기법의 하나이다. 상태기반 유지보수는 다양한 센서로부터 얻은 데이터를 분석하여, 구성요소의 열화 과정 추이와 상태이상을 파악

교신저자: 한국과학기술원 건설및환경공학과(hwasoo@kaist.ac.kr)

* 한국과학기술원 건설및환경공학과

** 한국과학기술원 녹색교통대학원

하고, 소요예산을 바탕으로 하여 현 시점의 최적 유지보수 방법을 결정한다. 부품의 상태를 정확히 파악하여 유지보수 관리를 수행하므로, 고정 주기에 따른 유지보수 방법에 비해서 예산을 절약함과 동시에 안전을 향상시킬 수 있다. 이에 국내에서도 철도시스템에 상태기반 유지보수의 도입을 논의하고 있다.

본 연구에서는 상태기반 유지보수의 철도분야 도입에 앞서, 유지보수에 필요한 기능을 설명하고 각각의 기능을 모듈로 한 상태기반 유지보수 소프트웨어의 아키텍처 구성 방안을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 기존 문헌의 검토

그 동안 다양한 분야에서 유지보수 의사결정에 대한 연구가 있었다. Carnahan 외[1]는 도로포장의 유지보수 관리에서 기대 생애주기비용을 최소로 달성하기 위해 동적계획법을 적용하였다. Madanat과 Ben-Akiva[1]는 점검 일정과 유지보수 비용에 대하여 각각을 고정시켜 놓고 잠복 마르코프 결정과정(Latent Markov Decision Process, LMDP)을 적용하였으며, 유지보수 의사결정에 있어서 측정 불확실성에 대한 고려 및 점검 일정의 최적화가 중요하다고 주장하였다. 상태기반 유지보수 분야에서 시스템 단위의 최적화에 중점을 둔 연구사례도 있다. Tian과 Liao[3]은 다양한 요소들로 구성된 시스템에서 요소들의 비용적 종속관계를 고려하기 위해 비례위험모델을 기반으로 한 상태기반 유지보수 기법을 개발하였다. Yeo 외[4]는 시스템을 구성하는 각각의 단일 요소들과 더불어 이질성을 가진 각각의 요소들이 종합된 시스템에 대하여 최적의 유지보수 의사결정을 지원하는 기법을 개발하였으며, Kim 외[5]는 Yeo 외의 연구내용을 바탕으로 동일 도로포장 시스템에 대하여 상태기반 유지보수와 시간기반 유지보수(Time-Based Maintenance)를 적용하여 각각의 유지보수 결과를 비교분석 하였다.

한편, 철도분야에서의 유지보수 연구사례로는 Costello 외[6], Shafahi와 Hakhmaneshi[7]의 연구가 있다. Costello 외는 마르코프 과정을 사용하여 뉴질랜드 철도의 선로 마모 데이터를 분석하고, 이를 바탕으로 선로 마모 모형으로 구현하였다. Shafahi와 Hakhmaneshi는 이란의 철도 선로 데이터를 마르코프 과정으로 분석하여 누적 손상모델을 개발하고, 선로 유지보수 비용을 최소화 하는 모의실험을 수행하였다. 이밖에 송성준 외[8, 9]는 논문에서 국내 철도분야에 상태기반 유지보수를 도입하기 위한 연구를 수행하였으며, 해당 논문들에서는 부품의 유지보수 기법과 열화모델 추론 기법을 개발하고 철도데이터를 적용한 바 있다.

2.2 철도 상태기반 유지보수 프로그램 아키텍처 구성

검토한 기존 문헌의 사례들과 같은 다양한 상태기반 유지보수 기법들을 실제로 현장에 적용하기 위해서는 상태기반 유지보수에 활용될 시스템 구성요소인 각 부품의 데이터를 저장하고, 이를 빅데이터 기반의 소프트웨어 플랫폼으로 구현하여 유지보수 의사결정을 지원하여야 한다. 각종 센서데이터와 더불어 차량 운행기록에 따른 각종 부품의 수리 및 측정데이터와 같은 이미 보유하고 있는 장기적 관점의 부품 상태 데이터를 활용하여 향후 상태기반 유지보수의 도

입을 미리 대비할 수 있도록 유지보수 소프트웨어의 구성 방안을 제안하고자 한다.

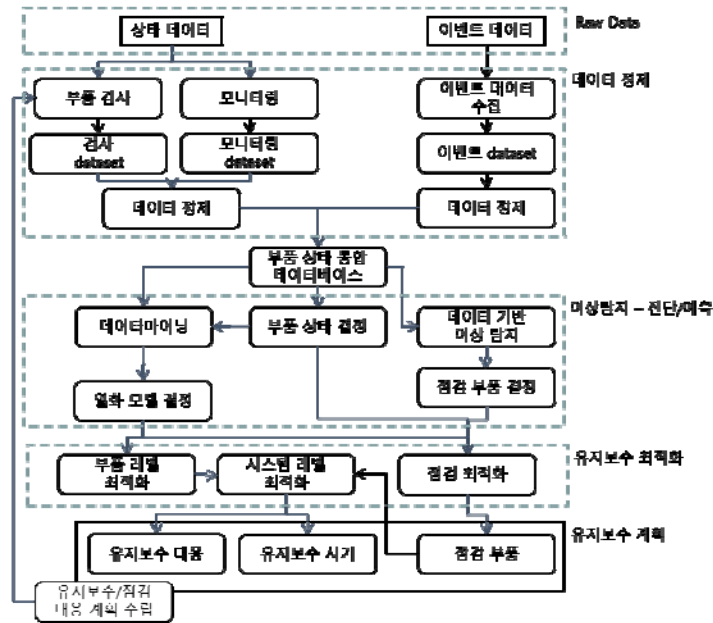


Fig. 1 CBM Framework

상태기반 유지보수를 수행하기 위해서는 각 부품의 현재 상태를 나타내는 상태 데이터와 부품의 사고, 유지보수 등을 기록한 이벤트 데이터를 각각 정제하여 데이터베이스에 통합하여야 한다. 이후 데이터를 통해 각 부품별로 현재 상태를 진단하고, 부품의 열화모델을 결정하고 미래 상태를 예측하여 현재 취해야 할 바람직한 유지보수 행동을 결정한다. 이어서 시스템 전체의 제약조건을 고려하여 전체 시스템의 유지보수 대응을 최적화한다. Fig. 1은 이를 나타낸 상태기반 유지보수의 전체 프레임워크이다.

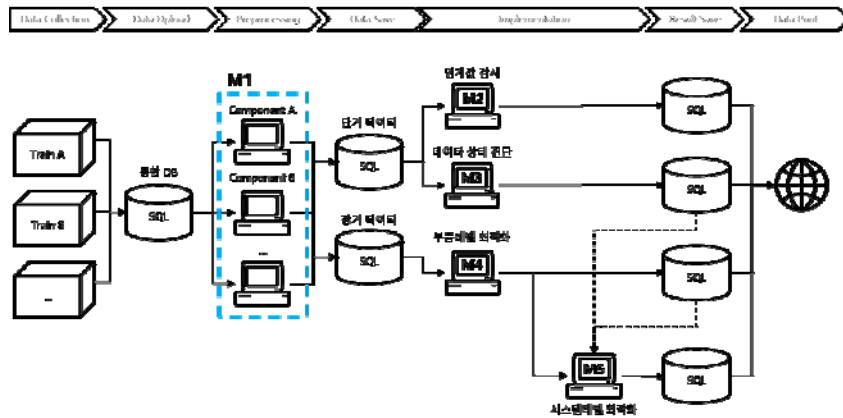


Fig. 2 CBM Program Architecture Concept

이러 상태기반 유지보수 프레임워크를 소프트웨어로 구현하기 위한 프로그램 아키텍처가 Fig. 2에 묘사되어 있다. 각 데이터는 수집, 업로드, 전처리, 저장, 분석 수행, 결과 저장, 출력의 과정을 거치게 된다. 각 열차의 상태 데이터와 이벤트 데이터를 수집하여 통합 데이터베이스에 저장하고, 이를 첫 번째 모듈(M1)에서 부품별로 분류하여 처리한다. 이후 분류된 데이터는 데이터 특성에 따라 나뉘어 저장되며, 이후 각 모듈별(M2~M5) 분석과정을 수행하고 결과를 출력하여 유지보수 결정을 지원한다.

2.3 철도 상태기반 유지보수 프로그램 구성 모듈별 설명

2.3.1 데이터 전처리 (M1)

각 철도기관의 전사적 자원 관리 시스템에 보유중인 각종 이력 데이터와 향후 수집하게 될 각종 센서 데이터는 다양한 형태로 존재할 것이다. 본 연구에서 다루는 프로그램 아키텍처에서 데이터 전처리 모듈은 각종 원시데이터를 전처리하여 상태 데이터와 이벤트 데이터로 분류한다. **Table. 1**은 두 가지 분류에 따른 데이터 특성을 요약하고 있다. 상태기반 유지보수에서 활용할 데이터는 부품의 상태를 정량적으로 표현할 수 있어야 한다. 각각의 분류를 나누는 가장 큰 기준은 데이터 수집 주기이며, 따라서 각종 센서로부터 실시간으로 수집되는 무수히 많은 데이터는 상태 데이터로, 주단위 혹은 월단위로 기록되는 각종 차량 유지보수 행동에 대한 데이터는 이벤트 데이터로 분류될 것이다.

Table 1 Data Classification in CBM Program

데이터 종류	상태 데이터	이벤트 데이터
데이터 주 소스	각종 센서 데이터	기본 보유 이력데이터
데이터 내용	주기적으로 자동 모니터링/수집되는 정량 데이터	주기적/간헐적으로 발생하는 사고, 유지보수행동 등의 기록데이터 및 일부 정량 데이터
데이터 길이	단기+장기 데이터	장기 데이터
예시	진동기 데이터	차륜 삭정 데이터

2.3.2 임계값 감시 (M2)

부품의 파단과 같이 순식간에 일어나는 부품 손상에 즉각적으로 대처하기 위하여 임계값 감시가 필요하다. 임계값 감시 모듈은 실시간으로 수집되는 각종 센서 데이터를 모니터링하여 특정 임계값을 기준으로 정상/이상을 결정하고 이상상태일 경우 경고하는 과정을 수행한다. 각 모니터링 부품에 대하여 상태 데이터와 임계값을 입력하고, 임계값 초과량, 초과시간, 정상/이상 진단을 결과값으로 출력한다.

2.3.3 부품 상태 진단 (M3)

모니터링하고 있는 각종 부품의 데이터의 상태를 판별하기 위해 부품 상태 진단 모듈을 구성한다. **Fig. 3**은 부품 상태 진단 과정을 설명하고 있다. 상태 데이터를 구간별로 수집하고, 구간별 상태를 미리 수집한 뒤, 상태를 알고자 하는 새로운 데이터가 입력되었을 때, 기존 데

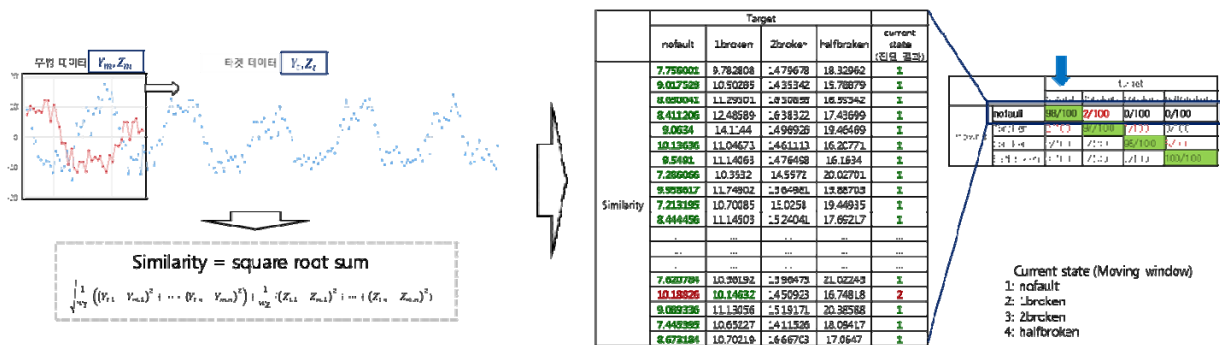


Fig. 3 Component Condition Diagnostic Process

이터들과의 유사도를 계산하여 가장 근접한 상태를 결과값으로 결정한다. 유사도는 무빙 윈도우 기법을 사용하여 구한 두 데이터 간 편차의 제곱평균 중 가장 작은 값을 선택한다. 부품 상태 진단 모듈에서 부품의 상태를 정상이 아닌 것으로 판별하였을 경우, 그 결과를 시스템 레벨 최적화 과정에서 제약조건으로 설정하여 해당 부품의 유지보수에 우선순위를 둔다.

2.3.4 부품 단위 최적화 (M4)

부품 단위 최적화 모듈에서는 각 부품의 이벤트 데이터를 입력받아 부품별 전이행렬 및 현 시점의 유지보수행동 우선순위를 출력한다. (Fig. 4) 먼저, 이벤트 데이터로부터 부품의 정상적 상태 및 그에 따른 유지보수행동을 파악하고, 각 유지보수행동별 전이행렬을 도출한다. 이후 동적계획법을 수행하여 각 유지보수활동에 따른 최소 기대비용을 계획대상기간의 종료시점부터 역으로 추적해 나가 현 시점의 기대비용이 적은 순으로 유지보수활동 우선순위를 결정한다.

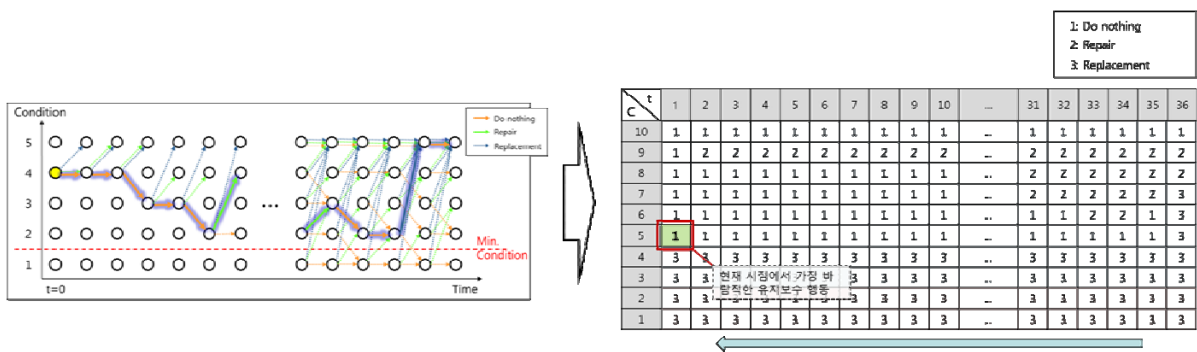


Fig. 4 Component Level Maintenance Optimization

2.3.4 시스템 단위 최적화 (M5)

시스템 단위 최적화 모듈에서는 부품별 최적화 결과(M4)를 바탕으로 유전알고리즘, 진화알고리즘을 수행한다. 그 결과로 현 시점에서 시스템에 수행해야 할 부품별 최적 유지보수행동 조합을 결정한다. 이러한 과정은 Fig. 5에 묘사되어 있으며, 부품의 진단 결과(M3)와 가용예산을 제약조건으로 고려한다.

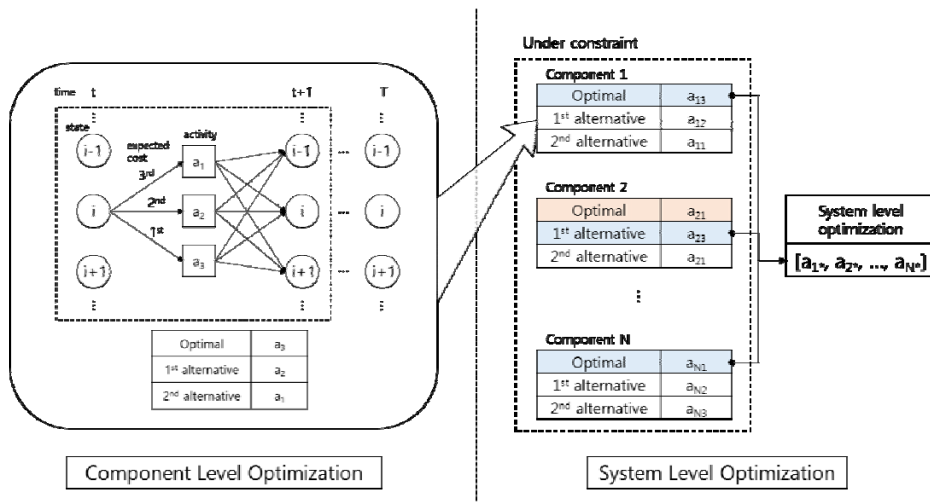


Fig. 5 System Level Maintenance Optimization

3. 결 론

철도의 각종 고장은 운행지연 및 취소로 연결되어 이용객의 불편은 물론 안전문제, 관리 비용 증가를 야기한다. 철도보급의 확대와 함께 기존 설비의 노후화로 인해 크고 적은 철도 고장이 우려되고 있으며, 여러 나라에서 철도시스템의 안정적인 운영을 위해 다양한 유지보수 기법을 연구하고 있다.

본 연구에서는 국내 철도분야에 상태기반 유지보수를 도입하기 위한 프로그램 아키텍처의 구성에 대해 논의하였다. 본 연구에서 제안하는 구성은 개념 단계로, 현재는 부품의 상태 모니터링 및 데이터 수집에 대한 어려움으로 인해 연구 검증에 한계가 있다. 향후 상태기반 유지보수와 관련된 인프라가 마련되면 실제 데이터를 활용한 다양한 검증이 가능할 것으로 예상되며, 본 연구에서 제안한 구성 방안이 국내 철도분야의 상태기반 유지보수 도입에도 기여할 것으로 기대한다.

후 기

본 논문은 국토교통과학기술진흥원에서 시행하는 상태기반 스마트 유지보수 핵심기술 개발 연구(과제번호 : 13RTRP-C068243-01)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Carnahan, J. V. (1988) Analytical framework for optimizing pavement maintenance, *Journal of Transportation Engineering*, 114(3), pp. 307-322.
- [2] Madanat, S. and Ben-Akiva, M. (1994) Optimal inspection and repair policies for infrastructure facilities, *Transportation science*, 28(1), pp. 55-62.
- [3] Tian, Z., and Liao, H. (2011). Condition based maintenance optimization for multi-component systems using proportional hazards model, *Reliability Engineering & System Safety*, 96(5), pp. 581-589.
- [4] Yeo, H., Yoon, Y. and Madanat, S. (2013) Algorithms for bottom-up maintenance optimisation for heterogeneous infrastructure systems, *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(4), pp. 317-328.
- [5] Kim, J., Ahn, Y., and Yeo, H. (2016). A comparative study of time-based maintenance and condition-based maintenance for optimal choice of maintenance policy, *Structure and Infrastructure Engineering*, pp. 1-12.
- [6] Costello, S. B., Premathilaka, A. S. and Dunn, R. C. (2012) Stochastic Rail Wear Model for Railroad Tracks, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2289(1), pp. 103-110.
- [7] Shafahi, Y. and Hakhamaneshi, R. (2009) Application of a Maintenance Management Model for Iranian Railways Based on the Markov Chain and Probabilistic Dynamic Programming, *International Journal of Science and Technology Transaction A: Civil Engineering*, 16(1), pp. 87-97.
- [8] 송성준, 여화수 (2015) 데이터 기반 패턴매칭 기법을 활용한 철도 부품 상태진단, *한국철도학회 춘계학술대회논문집*, pp. 326-331.
- [9] 송성준, 최준용, 여화수 (2015) 철도 차륜 데이터를 활용한 열화모델 추론 연구, *한국도시철도학회 춘계학술대회논문집*.