

교량 성능 모델의 개발 및 업데이트

Evaluation and Updating the Bridge Performance Model

1. 서론

국내의 경우 건설사업 분야에서 공공건설사업의 효율성을 제고하기 위한 방안의 하나로 건설교통부는 대통령령에 따라 “건설기술관리법시행령”을 개정하여 공공사업 수행 절차와 기준을 법제화 하였으며, 이후 시행령 38조 13의 “설계의 경제성 등 검토” 실시를 의무화하는 시행지침을 작성하여 시행하고 있다. 이에 따라 생애주기비용(LCC)를 고려하는 설계가 도입이 되었으며 생애주기비용 산정을 위한 성능모델에 대한 연구도 병행하여 이루어지고 있다. 시설안전기술공단(2000)에서는 다양한 교량의 열화모델 및 전문가의견과 자료 분석을 통한 교량의 상태등급곡선을 제안하고 있다. 그러나 최근까지 국내에서 교량의 성능모델에 관련된 심도 있는 선행 연구는 찾아보기 힘든 실정이고 전문가의견이 지배적이다. 또한 상태등급곡선이 재료적인 구분인 콘크리트와 강재를 기준으로 하고 있어 실제 교량에 적용하는데 한계점이 있다.

이에 따라 국토교통부에서는 생애주기 정보에 기초한 교량통합관리시스템(BMS)을 개발(국토교통부 2012)하여 국도교량의 상태이력데이터를 바탕으로 성능변화모델을 개발 구축하였다. 새로운 성능변화모델은 국도상 교량의 상세제원, 상태이력, 점검실적 등의 DB를 구축하여 교량형식별 부재별 성능예측을 제공하고 신규로 수행된 교량 점검결과를 이용하여 교량 성능변화 데이터 갱신 및 영향인자 데이터 분석을 통하여 개발된 교량성능변화모델의 업데이트를 통해 지속적인 성능변화모델의 기능 개선 및 프로그램 유지보수를 지원하는 업무를 수행한다. 본고에서는 개발된 성능변화모델과 기 구축된 성능모델의 업데이트에 대해서 기술하였다.

2. 국내외 성능평가모델 현황

2.1 국내 BMS 성능평가 모델 현황

국내의 경우 다른 국가들과 마찬가지로 경제성 등으로 인해 시설물 1차 안전진단은 겉보기 상태평가 결과를 기준으로 한다. 이를 위하여 시설안전공단에서는 교량을 비롯한 모든 시설물의 점검 및 정밀안전진단 지침을 제공하고 있다. 모든 1, 2종 시설물은 시특법이 제시하는 간격으로 점검 및 진단된다. 그 중 정기점검은 경험과 기술을 갖춘 자가 순찰정도 수준으로 진행하며, 전반적인 외관형태를 관찰하여 중대한 결함의 가능성을 조기에 발견하는 것을 목적으로 한다. 또한 육안 및 망원경, 거울 등의 보조기구를 사용하여 도보로 접근 가능한 교량의 전반적인 외관상태를 조사하며, 상



이 진 혁

고려대학교 건축사회환경공학과 석박통합과정



이 원 우

고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정



공 정 식

고려대학교 건축사회환경공학과 교수

태평가 등급은 매기지 않는다. 따라서 정기점검 자료를 통해서 성능의 변화를 분석하는 것은 타당하지 않다.

정밀점검은 시설물의 현 상태를 정확히 판단하기 위하여 외관망도를 이용하여 최초 또는 이전에 기록된 상태로부터의 상태의 변화를 확인하며 구조물이 현재의 사용 요건을 만족시키고 있는지 여부를 판단하는 것이 목적이다. 점검 결과를 이용하여 부재별, 전체에 대해 상태등급을 평가하며, 조사결과는 도면으로 보관해야 한다.

국내의 경우에 정밀점검은 필요 시 안전성평가를 수행하지만, 정밀안전진단은 반드시 검토해야 한다. 안전성평가는 안전율 및 재하시험에 의한 공용내하력 평가를 통해 이루어진다.

2.2 국외 BMS 성능평가 모델 현황

교량관리의 역사가 긴 선진국의 경우도 국내의 경우와 마찬가지로 전문가의 견해, 과거 점검 이력데이터 및 보수보강 이력데이터를 기반으로 한 결보기상태이력 모델을 주로 사용하지만 교량관리의 중요성이 커지고 교량 유지관리 데이터가 축적되면서 결보기상태이력 모델의 단점을 극복하고 안전 성능을 예측할 수 있는 성능지표들을 연구 개발하고 있다.

2.2.1 미국

1967년 Point Pleasant Bridge 낙교이후 교량의 유지관리에 지속적인 투자를 해온 미국은 유지관리 담당기관인 연방도로국을 주축으로 유지관리가 이루어지고 있다. 미 의회는 1991년 Intermodal Surface Transportation Efficiency Act를 제정하였는데, 이 법에서 모든 주는 1995년까지 교량관리시스템(BMS)을 갖추도록 규정하고 있다. 이와 같은 배경아래 미국의 각 주 정부는 교량의 DB화를 활발하게 추진하였으며, 이렇게 구축된 DB를 바탕으로 교량의 열화를 정량화하기 위한 노력이 진행되어 왔다.

1985년에 Massachusetts의 TSC(Transportation systems center)에서는 미국 내 교량 손상에 대한 경험적 LCP(Life-Cycle Profile)

의 연구를 실시하였다. 교량 상태등급에 관해 구축되어 있는 데이터베이스인 National Bridge inventory(NBI)를 이용하였으며 151,933개의 교량을 대상으로 하였다. 조사대상 교량의 산정시 공용년수가 25년 이상인 교량은 조사 대상에서 제외하고 비교적 신 교량을 대상으로 하였다. 주요 연구는 공용년수, 일평균 교통량, 상부구조 형식, 경간 수, 유지관리 주체로 구분하여 상태등급 변화에 영향을 주는 정도를 연구하였다.

2.2.2 네덜란드

네덜란드 교량관리 기본 개념은 다른 나라와 유사하게 열화를 고려한 상태등급을 기반으로하고 있다. 하지만 네덜란드 교량관리 시스템의 특징은 상태평가 수준의 단점을 극복하고자 성능평가 수준의 진단지표를 이용하여 관리한다는 점을 들 수 있다. 이러한 진단 지표를 RAMS라 통칭하며 reliability, availability, maintainability, safety의 4개 항목에 대한 진단을 수행하여 이를 기반으로 컴퓨터 기반의 교량관리 시스템을 구축하고 있다.

2.2.3 일본

일본의 경우 지자체 또는 교량 관리 주체에 따라 다양한 종류의 교량 관리 체계를 구축하고 있다. 이러한 체계에서 사용되고 있는 BMS 중 하나인 GOA는 다년간 축적된 진단 데이터를 근간으로 교량상태를 파악하고 있다. GOA는 구조물의 안전도, 도로의 안전도, 사용도 및 기능도 평가, 유지관리 비용효과 등의 기능을 제공하는데 이러한 결과는 데이터베이스에 축적된 자료를 이용해 산출된다(Bridge management system-GOA, 2006).

3. 생애주기를 고려한 성능변화모델 개발

새로운 BMS에서는 기존 BMS를 보완하기 위해 교량 진단/유지관리 DB를 이용한 회귀분석에 의한 생애주기 교량

표 1 국내외 교량 성능 평가 방법 비교(안전진단 체계 측면)

국내	국외
정기적 안전진단 체계 구축 사용	정기적 안전진단 체계 구축 사용
결보기 상태 등급에 의한 성능 평가가 기본 모듈임	국외의 경우 결보기 상태 등급에 의한 안전성능 평가의 한계를 극복하고자 다양한 형태의 안전성능 지표를 사용하고 있음
5단계의 상태 등급을 사용하고 있음	5단계, 9단계 또는 연속함수 형태의 성능등급 사용. 기타 지표의 사용
안전진단 전문가 육성 및 교육 미흡	안전진단 전문가 육성 및 인증 체계가 있으며 정기적 교육을 실시

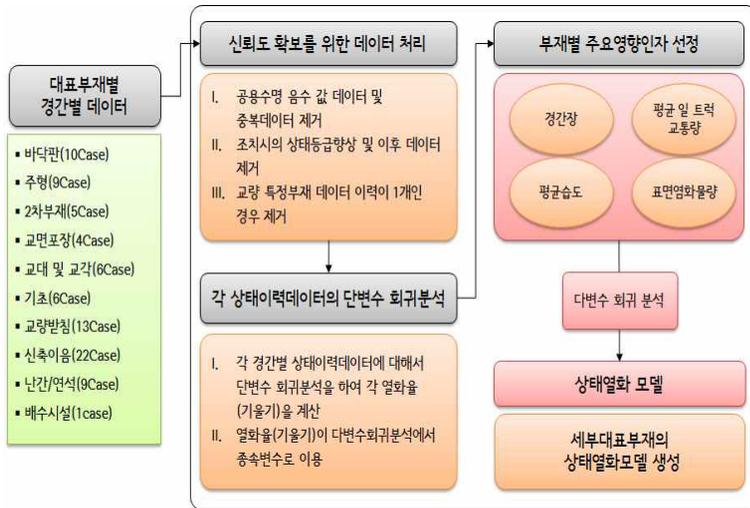


그림 1 성능변화모델 개발 절차

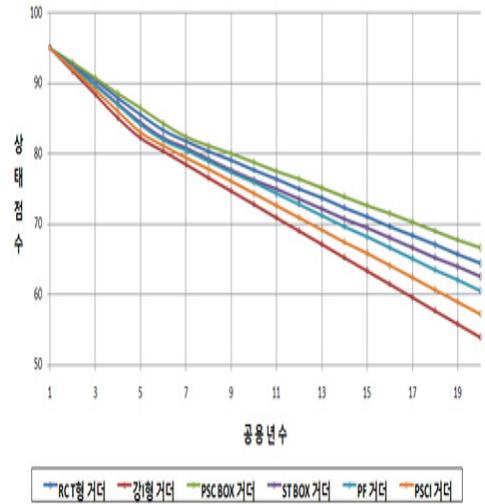


그림 2 성능변화모델 결과

의 성능변화모델을 구축하였다. 본 모델에서는 상태등급 DB를 이용하여 신뢰도 처리를 수행하고 여러 영향인자를 고려한 단변수, 다변수 회귀분석을 통하여 교량형식별 부재별 상태이력을 예측가능하게 한다. 또한 산출된 각 모델은 타당성을 검토하고 경향성을 분석하는 과정을 통해 가장 신뢰도 있는 성능이력양상을 보여준다.

그림 1과 그림 2는 교량생애주기 성능변화모델의 개발 절차 및 성능이력 결과를 보여준다. 위의 절차를 거쳐 개발된 모델을 이용해 전체 분석 대상 교량에 대한 성능 예측 모델 개발 및 열화모델을 구성하는 계수를 분석하고 이를 데이터

베이스 상에 적용시킴으로써 교량관리시스템을 구축한다.

4. 성능변화모델 업데이트

기 구축된 성능변화모델의 경우 데이터의 부재 및 오류 등의 신뢰도 문제로 인하여 영향인자별 타당성 및 경향성이 부족한 경우가 발생한다. 새로운 BMS에서는 매년 갱신되는 데이터의 축적을 통하여 기존 성능변화모델의 타당성을 검토하고 모델을 개선하고 있다. 기 구축된 모델의 성능이력의

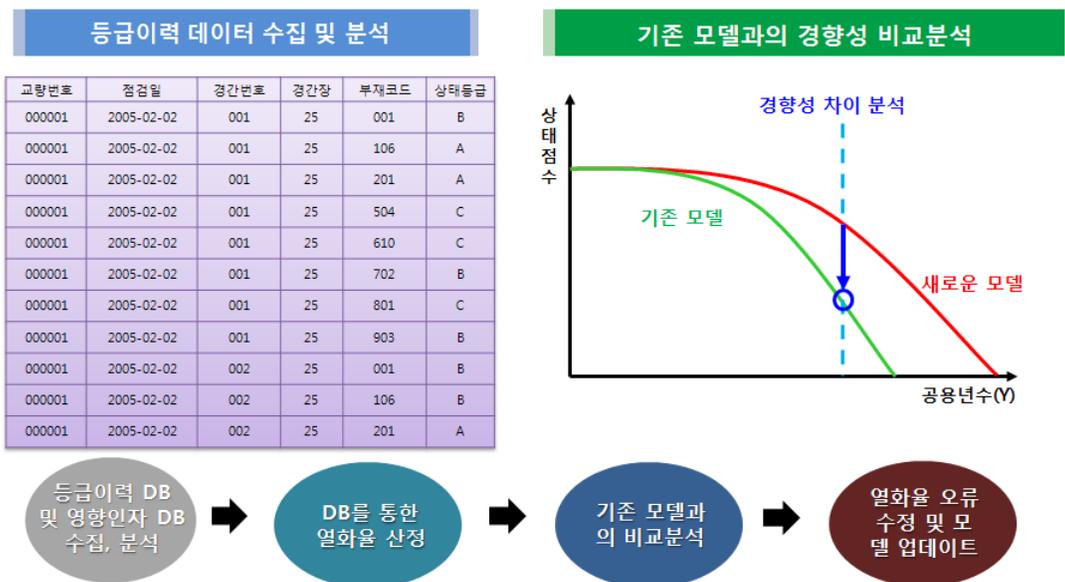


그림 3 성능변화모델 업데이트 수행절차

경향성이 일정하지 않거나 데이터의 부족으로 인한 한 부재의 성능모델 부재 등의 문제점을 해결하기 위해 갱신된 데이터를 통하여 성능변화모델의 업데이트를 수행한다.

그림 3은 성능변화모델업데이트 수행 절차를 나타내고 있다. 이와 같은 과정을 통하여 매년 갱신되는 DB를 통하여 기 구축된 모델의 업데이트를 수행한다.

5. 모니터링 시스템 기반 교량 성능 업데이트

일반적으로 교량의 열화정도를 파악할 때, 범용적으로 쓰이는 방법은 관측이나, 이는 불확실성과 오차에 대해서 자유롭지 못하다. 또한, 구조물의 상태검측을 실시하여 정확한 성능예측을 실시하는 것이 유지관리 측면에서 유리함을 직관적으로만 이해하고 있다. 때문에, 교량 열화 예측모델에 모니터링에 의한 관측결과를 적용시키는 것의 타당성을 검토해야 한다. 이러한 필요성에 따라, 본 기사에서는 교량의 상태 검측을 통해 얻어진 데이터를 베이지안 업데이트 기법을 통해 업데이트하여 성능 예측을 실시하고, 그에 따른 Case별 비용 분석을 통해 교량의 상태검측을 실시하는 것이 유지관리 측면에서 이론적으로 충분히 유리함을 보이고자 한다.

5.1 확률론적 기반 성능 예측 모델 업데이트 기법

성능 예측을 위한 확률적 업데이트 기법은 여러 가지가 존재하는데, 본 기사에서는 대표적으로 세 가지 업데이트 기법에 대해서 언급하고자 한다.

첫째로, 무작위 값을 활용하여 확률적으로 계산하는 알고리즘인 Monte Carlo Simulation은 통계 자료가 많고, 입력 값의 분포가 고를 때 주로 사용된다. 이 시뮬레이션은 변수간의 상관성, 상호의존성을 반영해주며 수학적으로 복잡한 모델도 쉽게 분석이 가능하므로 해석이 용이하다. 반복횟수를 높이면 시물

레이션의 정확성이 높아지므로 반복 작업을 하는 것이 좋다. 그러나 데이터가 적으면 현실적으로 발생할 수 없는 시나리오가 생기는 경우도 있다.

둘째로, 과거의 데이터를 근거로 미래의 변화를 연속으로 예측하는 Markov chain은 미래상태의 조건부확률 분포가 과거 상태와는 독립적으로 현재 상태에 의해서만 결정이 된다. 각 시행 결과는 바로 직전 시행결과에만 영향을 받으므로 결과는 현재상태에 의해 결정이 되며 연속적 시간의 변화를 고려하지 않고 이산적인 값들만 고려한다.

셋째로, 사전정보와 관측된 정보를 이용한 사후 확률을 추정하는 Bayesian Method는 초기정보의 사전 확률과 관측·실험 정보에 의한 우도함수를 안다면 특정 정보의 갱신된 사후 확률의 추정이 가능하다는 이론이다. 이는 소표본 모형에도 적합하여 적은 표본에도 사후분포 추정이 가능하고 복잡한 유형의 모형인 경우 발생하는 모수추론의 어려움을 해결해주어 해석이 용이하다. 또한 관측된 자료와 모수 자체에 대한 확률분포의 결합을 통해 모수를 추정하여 모호한 결과를 제공하지 않는다는 장점이 있으며 주관적 확률을 중요하게 인식하여 관측 이전 선행적 측면을 적극 수용하여 다수의 공통된 견해뿐만 아니라 개별적으로 가지는 특성을 고려할 수 있다.

5.2 모니터링 기법을 적용한 교량 유지관리 의사 결정 시나리오 개발

앞 절에서 교량의 성능 예측을 위한 확률론적 업데이트 기법에 대해 소개하였는데, 본 기사에서는 베이지안 업데이트 기법을 고려하였다. 한편, 교량 개별부재의 검측을 통해서 각 부재의 상태 평균 및 표준편차(불확실성)를 알 수 있다. 이러한 확률 특성치(평균, 표준편차)를 고려하여 기존에 구축한 성능 모델을 개선할 수 있는데, 업데이트 절차는 아래와 같다 (그림 4).



그림 4 검측 모니터링을 통한 상태성능 업데이트 절차

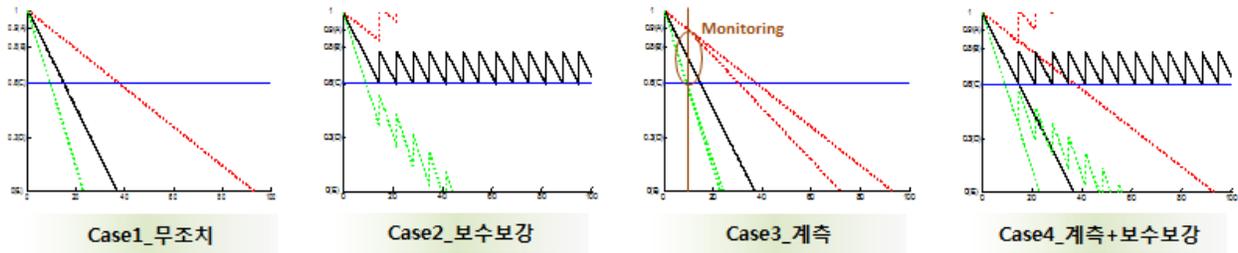


그림 5 교량 유지관리 의사결정을 위한 발생 가능 시나리오 분류

즉, 교량 검측 계획 시점에서의 실제 교량의 상태성능을 예측하고, 대상 교량(혹은 부재) 검측 방법의 정확도를 설정한다. 교량 검측에 의해 얻어진 자료를 바탕으로 교량상태를 재 판단하고, 베이지안 업데이트 기법을 통해 사전정보(Prior)와 점검/진단 결과(Likelihood)를 이용하여 업데이트된 성능(Posterior)을 얻어낸다. 이렇게 업데이트된 성능을 이용하여 새로운 생애주기 성능곡선 분석이 가능하게 된다.

모니터링 기법을 통해 교량 형식 혹은 부재의 상태성능을 예측하고, 이를 유지관리 의사결정에 적용하기 위해 아래와 같이 네 가지 Case를 나눌 수 있다.

Case1은 하나의 교량 부재에 초기 상태와 불확실성을 나타내고, Case2의 경우 보수보강공법을 적용하였을 때, Case3의 경우는 모니터링이 적용하였을 때, Case4는 검측 모니터링과 보수/보강공법을 적용한 개념도이다. 발생 가능한 시나리오를 나누고, 특정 시점에서의 비용 분석을 수행하게 되면, 검측 모니터링 기법 적용 교량(형식 또는 부재)의 불확실성을 고려한 경우에 대해 발생하는 타 Case 대비 비용 효율성을 산출할 수 있다.

기존 교량관리시스템에 모니터링기법 적용 성능 업데이트를 통해 교량의 불확실성을 고려한 생애주기 성능 예측하게 되면, 장기성능예측 결과의 신뢰도를 높일 수 있으며, 추후 하나의 전체 교량(시스템 수준)의 합리적인 의사결정이 가능할 것으로 판단된다.

6. 결론 및 향후계획

새로운 BMS에서의 효율적 교량 유지관리를 위해서 신뢰도 있는 데이터를 축적하고 교량형식별, 부재별로 수집된 데이터를 통하여 성능변화모델을 개발하였다. 또한 구

축된 성능변화모델의 신뢰도를 향상시키기 위해 매년 갱신되는 데이터를 축적하고, 모델의 경향성 및 타당성 분석을 통하여 매년 업데이트 업무를 수행하고 있다. 또한 효율적인 업데이트를 위해 본 고에서는 모니터링 시스템 기반 교량 성능 업데이트에 대하여 기술하였다.

본고에서 소개한 성능변화모델은 새로운 BMS에서 유지관리 전략 수립 및 예산의 합리적 배분 및 집행에 사용되며 이를 통해 최적의 의사결정을 수행하게 된다. 매년 수행되는 모델의 업데이트는 보다 정확한 성능이력예측을 가능케 한다. 또한 기존 교량관리시스템에 모니터링기법 적용 성능 업데이트를 통해 교량의 불확실성을 고려한 생애주기 성능을 예측하게 되면, 장기성능예측 결과의 신뢰도를 높일 수 있으며, 추후 하나의 전체 교량(시스템 수준)의 합리적인 의사결정이 가능할 것으로 판단된다.

7. 감사의 글

본 기획특집기사는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설기술A01)에 의해 수행되어 이에 감사드립니다.

8. 참고문헌

1. 국토교통부(2012), 생애주기를 고려한 교량통합관리시스템 구축 연구, 한국건설기술연구원.
2. 국토교통부(2015), 2015년 도로 교량 및 터널 현황조사, 한국건설기술연구원.
3. 한국시설안전공단(2009), 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침. 