

# 베이지안 추론법을 이용한 교량 운영단계에서의 예방적 유지관리 전략

이진혁\* · 최양록\*\* · 안호준\*\*\* · 공정식\*\*\*\*

Lee, Jin Hyuk\*, Choi, Yang Rock\*\*, Ann Hojune\*\*\*, Kong, Jung Sik\*\*\*\*

## The Preventive Maintenance Strategy in Operation Stage of Bridge using Bayesian Inference

### ABSTRACT

In this paper, the preventive maintenance strategy in operation stage of a bridge using Bayesian inference is proposed. The proposed technique can be used to predict the variation in the performance (or condition) of the bridge with higher accuracy, considering the uncertainty of monitoring. The applicability of the proposed method to the existing bridges is verified and analyzed that have an advantage in terms of maintenance cost efficiency compared to the conventional periodic maintenance system, which establishes maintenance after damage. It is expected that the proposed preventive maintenance method can be used to overcome the limitation of the conventional periodic maintenance method and to make practical bridge maintenance decision.

**Key words :** Bayesian inference, Operation stage, Monitoring, uncertainty, Cost efficiency, Preventive maintenance

### 초록

본 논문에서는 베이지안 추론법을 이용한 교량 실제 운영단계에서의 예방적 유지관리 전략 수립 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 모니터링의 불확실성을 고려하여 실제 대상 교량의 상태 변화를 높은 확률로 예측할 수 있다. 실제 공용 중인 교량에 제안된 기법의 적용성을 검토함과 동시에, 손상이 발현된 후 유지보수 조치계획을 수립하는 현행 유지관리체계와 비교하여 유지관리 비용 효율성 측면에서 유리함을 분석하였다. 제안된 기법을 이용하여 기존 유지관리방법의 한계를 극복하고, 공용 중인 교량의 실질적인 유지관리체계 수립을 위한 교량 유지관리 의사결정에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

**검색어 :** 베이지안 추론, 운영단계, 모니터링, 불확실성, 비용 효율성, 예방적 유지관리

## 1. 서론

우리나라와 약 2~30년의 격차를 두고 사회기반시설의 노후화 문제를 겪어온 미국, 일본, 호주 등과 같은 선진국들은 교량 유지관리체계 정립과 실질적인 유지관리시스템의 개발을 위한 노력이 진행되어왔다. 현 시점에서 국내의 교량 시설물들 살펴보면, 1970~80년대에 급격한 경제성장과 함께 교량 개체수를 급격히 늘려왔다. 공용수명이 30년 이상 되는 교량이 점차 증가할 것으로 예상되며, 본격적인 교량 노후화 시대에 진입했다고 볼 수 있고, 이에 따라 사회적으로 교량 유지관리에 대한 관심이 급증하였다. 1970~80년대 당시 교량에 대한 이해도와 설계 및 시공능력이 부족했던 상황을 고려할 때, 노후 교량에 대한 기준은 「법인세법 시행규칙」 제15조(내용연수와

\* 정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정 (Korea University · sg30539@korea.ac.kr)

\*\* 정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 (Korea University · azsxdc93@korea.ac.kr)

\*\*\* 고려대학교 건축사회환경공학과 공학석사 (Korea University · 2015020674@korea.ac.kr)

\*\*\*\* 종신회원 · 교신저자 · 고려대학교 건축사회환경공학과 교수 (Corresponding Author · jskong@korea.ac.kr)

Received November 29, 2018/ revised December 13, 2018/ accepted December 14, 2018

상각률) 제3항 관련 별표5에 제시된 ‘철근콘크리트’구조물의 법정 내용연수(최소 30년, 최대 50년) 하한치(30년)로 설정할 수 있다 (KAIA, 2017; Kim and Choi, 2018).

한편, 교량과 같은 사회기반시설물의 유지관리는 안전점검 및 정밀안전진단 시점에서 교량의 정보를 정확히 파악하고, 이를 바탕으로 미래의 성능 변화와 비용 예측이 가능한 확률적 분석이 필요하다(Jung et al., 2007; Frangopol et al., 2008; Cha et al., 2015; Kim and Jang, 2017).

국내의 교량 유지관리에 관련된 연구 동향을 살펴보면 교량 생애주기 동안 교량을 구성하는 부재들의 열화로 인해 손상이 발생된 후 유지보수 조치계획을 수립하여 실행하는 현행 유지관리 체계를 탈피하고자, 무인 검사 장비(센서, 드론, 로봇 등) 기반 모니터링 기술을 이용하여 교량의 성능 변화를 높은 정확도로 예측하고, 이를 반영한 최적 유지관리 의사결정 시스템 구축에 대한 연구들이 진행되고 있다(KAIA, 2016). 또한, 최근 설계 및 운영단계에 대상이 되는 교량을 선정하고, 교량의 목표수명 동안 성능변화와 보수/보강비용의 연계를 통해 최적의 유지관리 시나리오 분석 기반 현실적인 유지관리기법 개발과 관련된 연구가 진행 중이다(KAIA, 2018).

위에서 언급했듯이 사공 직후, 시간이 지남에 따라 다양한 원인으로 성능이 저하되는 교량의 안전점검 및 정밀안전진단 데이터를 이용한 교량 구성요소들의 상태예측모델 개발, 교량 점검 취약부의 계측/모니터링 기기를 이용한 손상 감지 기술 등에 대한 연구는 활발히 진행되고 있지만, 개발되고 있는 모니터링 기술을 실제 운영 중인 교량에 접목하였을 때, 적용 가능한 실질적인 유지관리 전략 수립에 관련된 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

본 논문에서는 실제 공용 중 교량에 초기 손상 감지에 따른 높은 정확도의 상태 판정이 가능한 모니터링 기술을 반영한 새로운 예방 유지관리기법을 제안한다. 우선, 교량의 노후화 특성을 반영한 교량 부재별 상태예측모델을 개발하고, 상태예측모델의 확률 특성치(평균 및 표준편차)에 모니터링 정보를 이용하여 공용 중 대상 교량의 성능 변화를 보다 정확히 예측할 수 있는 베이지안 추론법을 고려하였다. 안전점검 및 정밀안전진단 및 모니터링을 통해 교량의 등급을 판정하고, 이를 통해 개발된 상태예측모델이 운영 중 대상 교량 관리자(관리업체)가 원하는 관리(등급) 수준에 도달한 시점에서 수행 가능한 보수/보강공법들과 적용 및 그에 따른 확률을 예측하였다. 보수/보강공법 적용 확률을 대상 교량의 등급별 보수/보강공법 비용모델과 연계하여 유지관리 비용 분석 모델을 제시하고, 현행 공용 중 대상 교량 유지관리 시나리오 대비 베이지안 업데이트에 따른 갱신된 상태예측모델 기반 예방적 유지관리 시나리오가 생애주기 비용 효율성 측면에서 얼마만큼의 경제적인 효과를 가져올 수 있는지를 판단하였다.

## 2. 예방적 유지관리 전략

### 2.1 교량 부재별 상태예측모델 개발

본 연구에서는 국도 교량의 상태예측모델을 효율적이고 합리적인 모델로 개발하기 위해서 결정론적 모델(Deterministic models)의 단변수 및 영향인자를 고려한 다변수 회귀분석을 수행하였고, 추계학적 모델(Stochastic models)의 장점인 불확실성을 고려하기 위해 통계적인 값(표준편차)을 이용하였다.

먼저, 단변수 회귀분석을 이용한 교량을 구성하는 부재들의 상태예측모델을 개발하기 위해 안전점검 및 정밀안전진단 수행에 따른 상태등급 데이터가 구축되어야 한다. 본 논문에서는 1990년 이후 각 국도 교량의 정밀점검 데이터와 정밀안전진단 데이터를 수집하여 교량별, 부재별 상태이력 데이터를 구축하였다(한국건설기술연구원 교량관리시스템(Bridge Management System, BMS)에 입력된 1,2종 국도 교량 등급이력 데이터 수집 범위 : 1995~2017년).

현재 국내에서 사용하고 있는 BMS의 경우, 1994년부터 본격적으로 유지관리조치 자료가 축적되어 있지만, 보수보강이력 입력 및 자료 부족으로 인해 선행 유지관리조치 확인이 어렵다. 따라서 보수보강 조치시기를 도출하기 어려우며, 유지관리조치 이력이 있는 경우에도 상당수의 데이터가 보수, 보강, 교체에 대한 구분이 되어 있지 않기 때문에 곧바로 정확한 유지관리조치 이력자료로 활용하는데 어려움이 있다. 그러므로 모든 데이터를 분석 DB로 활용할 경우, 일반적 범위 외의 DB자료까지 반영된 교량 부재별 상태예측모델이 개발될 가능성이 있다. 이와 같이 위에서 언급한 특이사항들은 상태예측모델 구축 시, 도출된 상태예측모델의 신뢰도를 저하시키는 요인으로 작용할 수 있다. 이에 따라 본 논문에서는 현재 상태등급 데이터의 문제점을 보완하고, 모델의 신뢰도를 높이기 위한 상태등급 데이터를 처리하였다. 이러한 데이터 전처리 작업 과정을 Fig. 1과 같이 나타내었다.

Fig. 1에서 명시한 바와 같이 신뢰도 확보를 위한 데이터 전처리

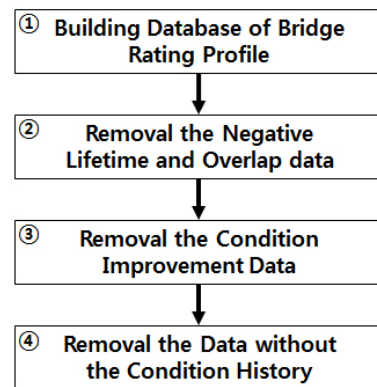


Fig. 1. Data Processing for Reliability

작업 과정은 4가지 단계로 구분할 수 있다. 먼저, 앞서 언급한 바와 같이 교량의 형식별, 부재별, 경간별로 데이터를 구축한다. 다음으로 공용수명(점검일자-준공일자)이 음수인 경우와 특정 교량의 특정 부재에 같은 점검종류의 동일한 날짜에 중복되어 상태등급 데이터가 입력된 경우, 상태등급에 대한 단변수 회귀분석에 영향을 주는 데이터 입력 오류로 판단하여 제거한다. 세 번째로 보수/보강 효과가 포함되어 시간이 지남에 따라 단변수 회귀분석 결과 추세곡선이 상승하는 것을 방지하기 위해 각 부재별로 공용수명에 따라 상태등급이 향상되는 데이터를 제거하여 고려한다. 네 번째로 특정 교량의 특정 경간에서 상태등급 데이터가 1개인 경우 대상 부재의 열화 경향성을 파악할 수 없으므로 제거한다.

교량의 상태등급 데이터는 상태가 양호한 것에 따라서 5가지 등급(A, B, C, D, E등급)으로 나뉜다. 본 연구에서는 실제 적용 대상 교량(3장에 상세 수록)을 상부형식이 강박스(ST BOX)인 삼승교로 선정하였는데, 이에 따라 강박스(ST BOX) 거더의 상태 예측모델 개발이 필요하고, 국도상 1,2종 교량 중 강박스(ST BOX) 거더를 구성하는 각 교량별 상태이력데이터에 대해 단변수 회귀분석을 시행하여 각 열화 기율기를 계산하였다. 또한, 시간이 지남에 따라 열화 가속화로 인해 등급이 저하될수록 상태등급 저하 속도가 가속화되는 무조치 시의 상태예측모델을 개발하기 위해 C등급

이하의 상태이력이 존재하는 교량들에 대해서 회귀분석을 실시하였다. C등급 이하의 상태이력이 존재하는 교량들에 대해 고려함으로써 공용 중 노후화 교량들의 열화 특성을 보다 실질적으로 반영할 수 있다. Figs. 2 and 3과 같이 국도상 1,2종 교량들에서 강박스(ST BOX) 거더를 갖는 부재의 상태예측모델 개발을 위한 데이터 전처리 작업 후의 데이터 분포를 나타내었다.

Fig. 2의 y축은 세부지침(MOLIT, 2012)에서 기술된 결합도 점수를 상태점수로 변환(1-결합도 점수)하였는데, 교량의 열화를 보다 직관적으로 확인가능하다. x축은 공용연수(점검일자-준공일자)를 나타낸다. Fig. 1에서 언급한 4가지 데이터 전처리 작업과 C등급 이하의 이력이 존재하는 강박스(ST BOX) 거더 부재를 갖는 교량들에 대해서 필터링한 결과이다. Fig. 3은 Fig. 2의 C등급 데이터 분포 경향을 나타낸 것이다.

Fig. 4에서는 강박스(ST BOX) 거더 부재를 갖는 교량별 단변수 회귀분석에 따른 각각의 열화기율기와 그들의 평균 열화기율기 및 평균 열화기율기의 각 등급별 도달 시기(C등급 15.4년)를 가시화하였다. 예를 들어, 1994년에 준공된 고당교(000840)의 각 경간별 점검에 따른 상태등급 데이터를 이용하여 하나의 추세곡선을 산출할 수 있고, 이런 식으로 총 655개소 교량에 대해 655개의 열화기율기를 산출하고 그들의 평균 열화기율기(-0.0017)를 나타낸 것이다. 이때 하나의 교량에 대한 추세곡선 산정은 회귀 분석을 기반으로 직선, 2차 곡선, 지수곡선 등 다양한 형태로 회귀결정계수( $R^2$ )를 산출하고, 가장 회귀결정계수( $R^2$ )가 높은 모델을 최종 상태 예측모델로 선정하였다. 본 논문에서 사용된 노후화 특성 반영 강박스(ST BOX) 거더는 2차 곡선 회귀식이 가장 회귀결정계수( $R^2$ )가 높은 것으로 분석되었다. 즉, 위에서 언급한 바와 같이 데이터 전처리 후 교량은 655개소이고, 이에 해당하는 각각의 추세곡선과 세 가지 회귀식에 따른 회귀결정계수( $R^2$ )를 산출 및 비교 후 그들의 평균 열화기율기(-0.0017)를 산정하였다. 또한, 단변수 회귀분석 식을 산출하기 위해 국/내외 교량 열화모델 연구 (MLTMA, 2012)에서 고려된 영향인자 종류를 참고하여 각 영향인

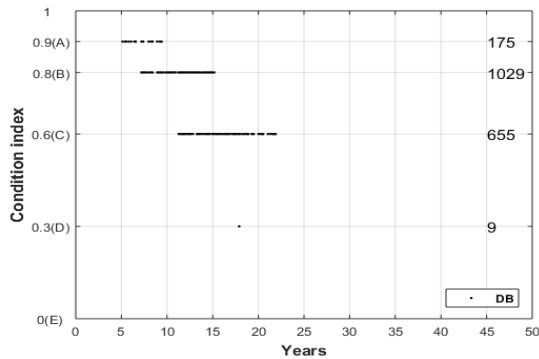


Fig. 2. ST BOX Girder for Prior Data Processing

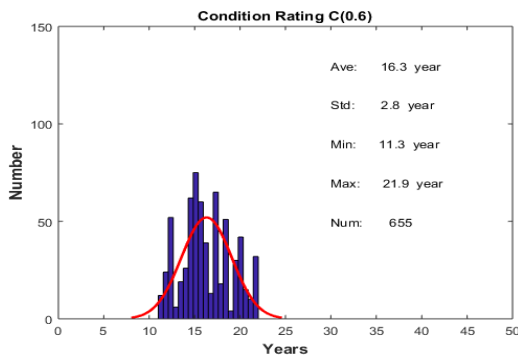


Fig. 3. Normal Distribution at C Grade

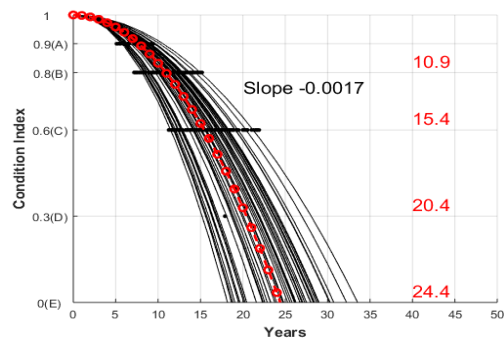


Fig. 4. Univariate Regression Analysis for ST BOX Girder

자 요소별 열화를 증가량에 가장 크게 영향을 미치는 4가지 주요 영향인자(경간장, 평균 일 트럭교통량, 표면연화물량, 평균습도)를 선정하였다. 앞 단계의 공용연수를 고려한 다변수 회귀분석 열화율 기울기를 종속변수로 하고, 선정된 4가지 영향인자에 대해서 다변수 회귀분석을 실시하여 최종 상태예측모델을 산출하였다. Eq. (1)은 부재별 상태예측모델 산출을 위한 다변수 회귀분석 식이다.

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_1^2 + a_6x_2^2 + a_7x_3^2 + a_8x_4^2 \quad (1)$$

여기서,  $Y$ 는 교량 부재별 상태예측모델의 기울기를 나타내며,  $a_i$  ( $i = 0 \sim 8$ )는 다변수 회귀분석을 통해 산출된 계수 값이며,  $x_i$  ( $i = 1 \sim 4$ )는 각각 경간장, 평균 일 트럭교통량(1일당의 평균 트럭교통량), 표면연화물량 및 평균습도를 나타낸다. 이러한 다변수 회귀분석 식에 실제 대상 교량들의 해당 주요 영향인자 값들을 대입하여 각 교량별 열화 기울기를 다시 산출하게 되면, 영향인자들의 열화경향성을 반영하여 보다 현실적인 상태예측모델 구축이 가능하다.

Fig. 5에서는 다변수 회귀분석을 통해 산출된 강박스(ST BOX) 거더의 최종 상태예측모델을 나타내었다. 실선으로 표시된 기울기는 강박스 거더 교량군의 평균( $\mu_1$ ) 열화 기울기를, 점선으로 표시된 기울기는 평균( $\mu_1$ )  $\pm$  표준편차( $\sigma_1$ ) 열화 기울기를 나타낸다.

### 2.2 점검/모니터링 불확실성 기반 베이지안 업데이트

사전(Prior)에 알고 있는 교량 부재의 상태예측모델에 향후 특정 시점( $t$ )에서 추가되는 실제 대상 교량의 손상에 따른 점검이력 데이터 특성(Likelihood)을 반영하여 기존 상태예측모델 업데이트(Posterior)를 위한 하나의 확률 가법인 베이지안 추론에 대해서는 참고문헌(Lee et al., 2018)에 상세히 기술하였다. 또한, 사전 및 우도 확률밀도함수가 정규분포를 따를 때, 갱신된 사후 확률밀도함수가 새로운 정규분포 확률밀도함수가 되고, 업데이트된 사후 정규

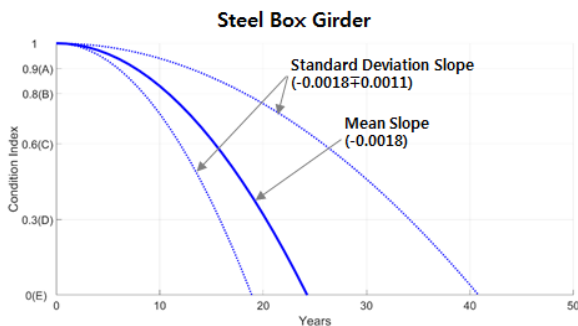


Fig. 5. Deterioration Model of Steel Box Girder

분포 확률밀도함수의 표준편차( $\sigma_3$ )는 사전 확률밀도함수의 표준편차( $\sigma_1$ )와 우도 확률밀도함수의 표준편차( $\sigma_2$ )보다 항상 작다(Ang and Tang, 2007).

Fig. 6에서 제시한 바와 같이, 대상 교량의 관리자(관리업체)가 정한 모니터링 시점( $t$ )에서 대상 교량 부재의 모니터링기반 점검(Inspection with Monitoring)을 통해 얻어진 상태등급 데이터(A, B, C, D, E) 정보( $\mu_2, \sigma_2$ )를 이용하여 기존에 개발된 상태예측모델(Existing Model)의 사전 확률 특성치( $\mu_1, \sigma_1$ )를 사후 확률 특성치( $\mu_3, \sigma_3$ )기반 업데이트 상태예측모델(Updated Model)로 갱신할 수 있다. 이때, 사후 확률 특성치( $\mu_3, \sigma_3$ )는 Eq. (2)와 같다.

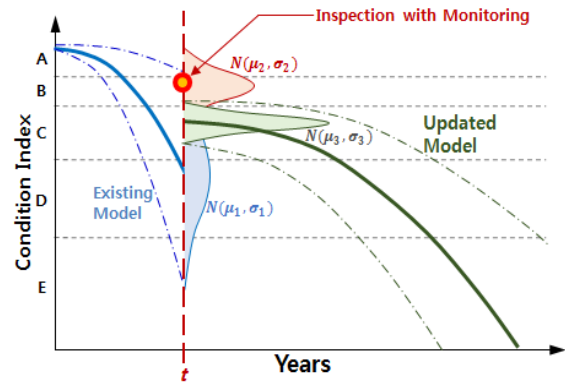


Fig. 6. Schematic for Existing Model Update

$$\mu_3 = \frac{\mu_1\sigma_2^2 + \mu_2\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \sigma_3 = \sqrt{\frac{\sigma_1^2\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (2)$$

### 2.3 운영단계 교량의 예방적 유지관리 시나리오

#### 2.3.1 운영단계 교량의 유지관리

사회기반시설의 하나인 교량은 크게 설계·계획단계와 운영단계 두 가지로 구분할 수 있는데, 이 두 가지 단계에 대한 정의 및 관련 내용은 참고문헌(Lee et al., 2018)에 상세히 수록하였다. 계획단계의 유지관리와 달리, 운영단계는 실제 공용 중 대상 교량의 생애주기 동안 특정 시점( $t$ )에서 모니터링 기반 베이지안 업데이트를 통해 대상 교량 부재의 상태를 보다 현실적으로 예측할 수 있다. 기존의 주기적인 정밀점검 및 정밀안전진단에 따른 점검에 교량 취약부의 손상을 높은 정확도로 잡아낼 수 있는 모니터링 기술을 반영하여 대상 교량 관리자(관리업체)가 적재적소에 원하는 관리 등급(수준)에 연계된 보수보강 공법을 선택 및 적용이 가능해진다. 즉, 기존 유지관리에 모니터링 기술을 접목하여 대상 교량의 상태예측 신뢰도를 높이고, 이를 통해 예방적 유지관리 전략을 수립할 수 있다.

### 2.3.2 운영단계 교량의 유지관리 비용분석 모델

교량의 총 생애주기비용은 사용재료, 제원, 사용 환경과 시간의 함수로 고려되며, 크게 초기투자비용, 유지관리비용, 해체폐기비용 세 가지로 분류할 수 있다. 이때, 유지관리비용은 교량 관리주체가 지불하는 직접적인 비용으로, 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침에서 제시한 주기적인 점검/진단 비용과 유지관리 시나리오 분석 시에 선택된 각 교량 등급별 보수보강비용으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 이러한 유지관리비용의 점검/진단 및 보수보강비용 두 가지 항목을 고려하였다.

한편, 교량은 시간에 따라 상태 및 성능이 저하되며 교량 관리자가 예측한 등급별 도달 시기에 유지보수를 할 경우, 상태 및 성능 향상을 통해 경제적으로 구조물 활용이 가능하다. 그러나 적정 보수보강시기를 놓칠 경우, 대규모 공법을 적용해야 하거나 구조물 전체를 교체해야 하는 시점에 이르게 되어 교량 관리주체가 부담해야 하는 비용이 증대된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 교량의 예방적 유지관리 시나리오 전략을 수립해야 한다.

본 논문에서는 실제 공용 중인 교량에서 발생 가능한 유지관리 시나리오를 고려하고, 기존 정밀점검 및 정밀안전진단에 추가로 모니터링 기술을 접목한 유지관리비용 산정 모델을 제시한다. 모니터링 기반 점검에 따른 유지관리비용 산정 모델은 베이지안 기법을 이용한 기존 상태예측모델 갱신에 따른 보수보강시기 판단을 통해 대상 교량 부재의 보수보강시점을 손상 발생 전 예측이 가능할 것으로 판단된다.

일반적인 운영단계에서 특정시점( $t$ )까지 발생한 총 유지관리비용( $C_{MAL,EXI}^{TOT}(t)$ )은 Eq. (3)과 같이 정의하였다.

$$C_{MAL,EXI}^{TOT}(t) = \sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+q)^t} \{C_{INS,EXI}(t)\} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{(1+q)^{t_i}} \{C_{MAL,EXI}(t_i) \times P_{MAL,EXI}(t_i)\} \quad (3)$$

여기서,  $C_{INS,EXI}(t)$ 는 점검비용으로 정기점검비용, 정밀점검비용, 정밀안전진단비용 세 가지 항목의 합으로 계산된다.  $t$ 는 대상 교량의 기대수명동안 임의 시간을 의미하고,  $C_{MAL,EXI}(t_i)$ 와  $P_{MAL,EXI}(t_i)$ 는 각각 보수보강공법 비용과 보수보강공법 적용 확률을 나타낸다.  $t_i$ 는 대상 교량의 보수보강공법 적용 시기를,  $q$ 는 할인율(discount

rate)을 나타낸다.

한편, 모니터링 기술 적용 시 운영단계에서 특정시점( $t$ )까지 발생한 총 유지관리비용( $C_{MAL,UP}^{TOT}(t)$ )은 Eq. (4)와 같이 정의하였다.

$$C_{MAL,UP}^{TOT}(t) = C_{SEN}(t_0) + \sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+q)^t} \{C_{INS,UP}(t)\} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{(1+q)^{t_i}} \{C_{MAL,UP}(t_i) \times P_{MAL,UP}(t_i)\} \quad (4)$$

여기서,  $C_{SEN}(t_0)$ 는 초기( $t_0$ ) 센서 설치비용이며,  $C_{INS,UP}(t)$ 는 모니터링 기술 적용 베이지안 업데이트 상태예측모델 기반 점검비용으로 정기점검비용, 정밀점검비용, 정밀안전진단비용 세 가지 항목의 합으로 계산된다.  $C_{MAL,UP}(t_i)$ 는 대상 교량의 보수보강공법 적용 시점( $t_i$ )에서 업데이트 상태예측모델에 연계된 보수보강공법 비용이며,  $P_{MAL,UP}(t_i)$ 는 대상 교량의 보수보강공법 적용 시점( $t_i$ )에서 업데이트 상태예측모델 기반 보수보강공법 적용 확률을,  $q$ 는 Eq. (3)의 할인율(discount rate)과 같다.

본 연구에서 제시하고 있는 모니터링 기술 적용 베이지안 업데이트 기반 예방적 유지관리 비용분석방법은 생애주기비용 분석 시 기존 상태예측모델이 갖는 불확실성( $\sigma_1$ )을 베이지안 기법을 통해 업데이트된 확률분포의 형태, 즉, 불확실성이 감소된, 보다 정확한 대상 교량 예측을 통해 실제 공용교량에 투입되는 유지관리비용 산정 시 유리한 방법이다. 또한, 모니터링 기술 적용 베이지안 업데이트 수행 전과 후의 유지관리비용을 비교하여 모니터링 기술 적용 예방적 유지관리가 기존 유지관리 대비 비용 효율성 측면에서 유리함을 검증할 수 있다.

## 3. 대상 교량 선정 및 분석 조건

### 3.1 유지관리비용 산정을 위한 입력변수 및 가정사항

베이지안 기법을 이용한 교량 예방적 유지관리 시나리오 전략의 적용성 및 합리성을 제안하기 위해 2007년에 준공되어 현재 공용 중인 국도상 강교량의 하나로 분류되는 삼승교 강박스(ST BOX) 거더를 분석 대상 교량으로 선정하였다. 삼승교의 일반사항은 Table 1과 같고, 전경과 종단면도는 Fig. 7과 같다.

삼승교 강박스 거더의 전체 면적은 외부 둘레(5.6 m)와 경간장

Table 1. General Information of Target Bridge

| Division        | Quantity   | Division             | Quantity |
|-----------------|------------|----------------------|----------|
| Design Load     | DB-24      | Lane                 | 3        |
| Number of Span  | 1          | ST BOX Periphery (m) | 5.6 m    |
| Completion Date | 2007.12.21 | Span Length (m)      | 53 m     |

(53 m)과 4개의 거더의 곱인 1,185 m<sup>2</sup>이고, 피로균열 모니터링용 센서노드에 대한 정보 및 가정사항은 Table 2와 같다. 피로균열 감지 센서노드 기술은 본 논문에서 적용하고자 하는 교량과 같은 강구조물에 발생하는 피로균열을 감지하여, 구조물의 피로파괴로 인한 대형사고 및 인명피해를 방지하는 것을 목표로 하는 기술이다. 이러한 센서노드 기술은 구조물에 초음파를 가진하고, 피로균열에 의해 발생하는 비선형 초음파의 응답을 통해 폭 50 $\mu$ m 수준의 피로균열을 조기 진단할 수 있으며, 구조물에 최초 설치 후 추가적인 접근 없이 해당 설치 부분의 균열 모니터링을 상시 수행할 수 있다(KAIA, 2018). 이러한 피로균열 센서노드의 손상 검출에 대한 정확성을 반영하여 점검오차( $\sigma_2$ )는 0.05 (정확도 95 %)로 가정하며, 센서노드의 초기비용은 Table 2의 정보를, 기존 및 센서노드 기반 1회 점검비용 및 점검 시점은 Table 3의 정보를 활용하였고, 한국은행경제통계시스템의 10년 간 실질할인율을 반영하여 할인율은 1.01 %로 가정하였다. Table 2로부터 모니터링 기술 적용 총 유지관리비용 산정식 Eq. (4)의 초기( $t_0$ ) 센서 설치비용 [ $C_{SEN}(t_0) : 195,600won + 1,035,000won \times 12EA$ ]을 계산한

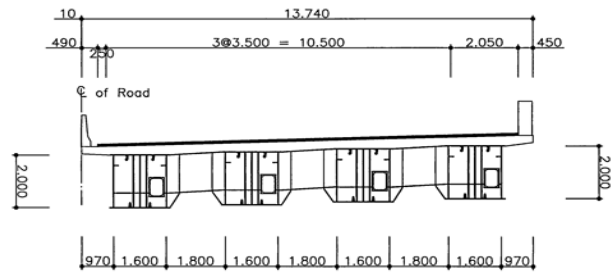
다. 구조해석을 통한 삼승교의 피로균열에 취약부위로 예상되는 거더 중앙부와 양 끝단 받침부에 Fig. 8과 같이 거더 당 3개의 센서노드를 설치하는 것으로 가정하였다. 피로균열 센서노드 사용 시, 기존 비파괴검사 기술을 통해 검사자가 직접 구조물을 진단평가 시, 상시 검사 불가, 노동집약적, 점검 취약부, 미세 균열 검사 불가능 등의 한계점들과 비교를 위해 직접인건비는 기존 유지관리 직접인건비의 50 %로 가정하였다. 또한, 안전점검 및 정밀안전진단 대가(비용산정) 기준(국토교통부 고시(2016.12.06. 개정))을 참고하여 기존 및 센서노드 사용 시 각각의 1회 점검 비용(정기점검비용, 정밀점검비용, 정밀안전진단비용)은 Table 3과 같이 가정하였다 (KAIA, 2018).

### 3.2 대상 교량 부재의 적용된 보수보강 공법 및 비용

강구조물의 경우, 운영 중 가해진 반복하중에 의해 피로균열이 발생할 가능성이 높은 것으로 알려져 있다. 파손 또는 파괴 원인 중 약 90 % 이상이 피로균열 손상에 의한 것이며, 피로균열은 구조물의 피로수명에 가까워지면 급격히 파괴로 진행되는 특성이 있으며



(a) Bird View



(b) 4 ST BOX Girder (Cross Section)

Fig. 7. Overview of Samseung Bridge

Table 2. Assumption of Sensor Node

| Division                                       | Quantity      |
|--|---------------|
| Cost of sensor node                            | 1,035,000 won |
| The number of sensor node                      | 12 EA         |
| Cost of sensor node installation (12 EA)       | 195,600 won   |
| Probability of misclassification (Sensor node) | 5 %           |

Table 3. Comparison between Inspection of Existing Method and Inspection with Sensor-node

| Division                                    | Regular routine inspection |             | Precise inspection |             | Precise safety diagnosis |             |
|---|----------------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------------|-------------|
|   | Existing                   | Sensor node | Existing           | Sensor node | Existing                 | Sensor node |
| One time inspection cost (unit : 1,000 won) | 2,991                      | 2,899       | 16,618             | 11,048      | 48,155                   | 27,929      |
| Inspection time                             | Once every 6 months        |             | Once every 2 years |             | Once every 5 years       |             |

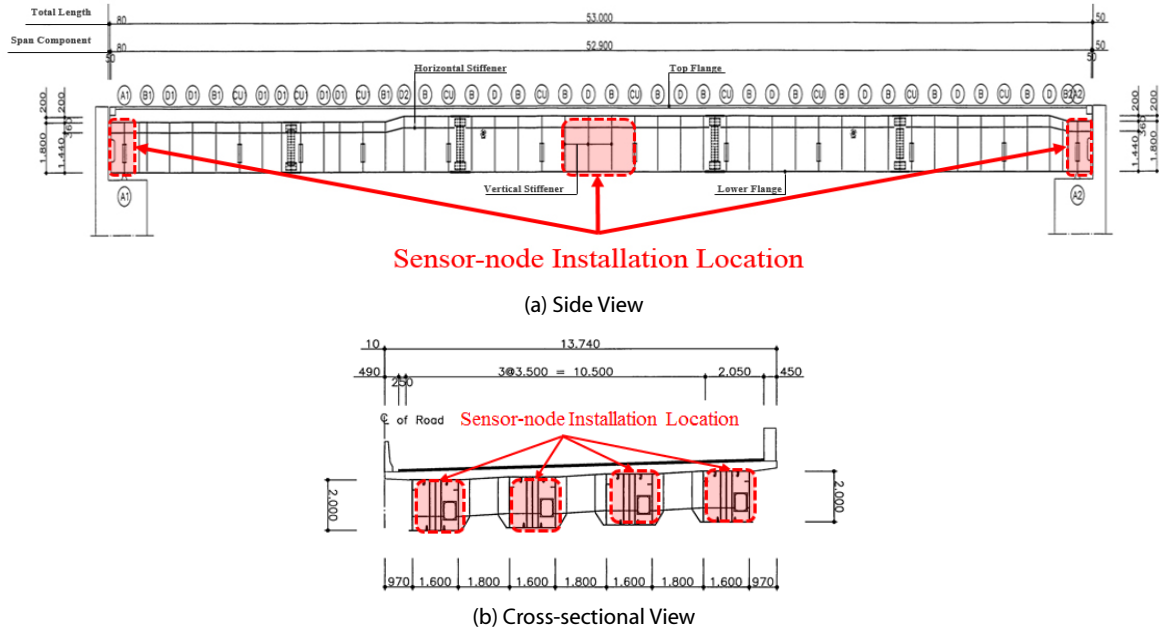


Fig. 8. The Installation Locations of Sensor-node on Samseung Bridge

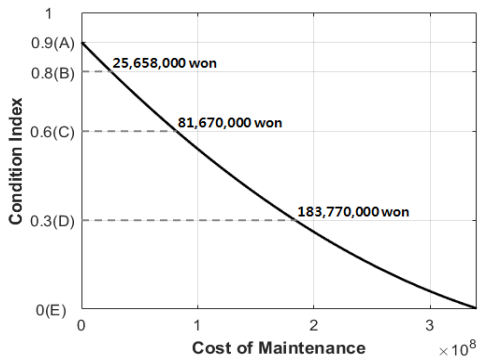


Fig. 9. Cost of Maintenance by Grade : Steel Box Girder about Fatigue Cracks (1,185 m<sup>2</sup>)

로 조기에 손상을 검출하여 예방하는 것이 매우 중요하다.

한편, 한국건설기술연구원 교량관리시스템(BMS)상의 보수보강기록 DB로 부터 각 교량 대표 부재별, 공법별 발생 빈도분석 결과를 통해서 산출한 보수보강리스트에 대해서 상태등급향상 데이터와 전문가 의견을 바탕으로 상태등급향상 모델을 만들었다 (MLTMA, 2012).

본 논문에서는 피로균열 손상에 적용 가능한 보수보강 공법으로 용접보수, 보강재 덧댐 공법, 거더증설, 거더교체와 같이 4가지 대표 공법을 정용하고, 각 공법의 등급별 상태향상정도와 보수보강 공사내역서를 참고한 공법단가를 연계하였다. 먼저 BMS상의 기존 공사내역서들의 공법별 적용보수물량 및 보수보강비용 실적을 통해 부재별 적용 공법의 상태 등급별 보수보강 단가(보수보강비용

/적용보수물량)와 등급별 평균 보수율(보수면적/전체면적)을 계산 하고, 위에서 언급한 피로균열 손상 발생에 따른 적용 가능한 4가지 대표 보수보강 공법의 등급별 누적 보수보강비용을 산정하였다. Fig. 9는 면적이 1,185 m<sup>2</sup>(전체면적)인 삼승교 강박스 거더의 등급별 보수보강비용(단가와 보수율과 전체면적(1,185 m<sup>2</sup>)의 곱)을 나타내고, 각 등급별 누적 보수보강비용에 대한 회귀분석에 따른 2차 곡선 경향을 나타낸다. 이때, 낮은 등급(C~D)으로 갈수록 비용이 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 위에서 언급한 4가지 공법들 중 낮은 등급(C~D)에서는 거더 증설(또는 교체)과 같은 단가가 높은 공법들의 적용에 따른 보수율이 높기 때문이다 (MLTMA, 2012; Sun et al., 2016).

### 3.3 유지관리비용 산정

유지관리비용의 항목인 생애주기 동안의 보수보강비용은 페이지안 업데이트 여부에 따라 변화되는 상태예측모델로부터 얻어지는 등급별 보수보강 적용 확률과 등급별 평균 보수보강공법 비용 면적의 곱으로 산출하였다. 기존 유지관리 시나리오 대비 모니터링 기술 적용 페이지안 업데이트 시, 교량 운영단계 조기에 피로균열과 같은 손상을 검출하여 설계계획 단계에서 예측했던 대상 교량 부재의 상태예측모델의 불확실성을 감소시키는 방향으로 업데이트가 가능하다. 본 논문에서는 이러한 운영단계에서 발생 가능한 3가지 대표 유지관리 시나리오별(Case 1~3) 유지관리비용 효율성 측면에서의 유리함을 정량적으로 검증하였다.

3가지 대표 유지관리 시나리오별(Case 1~3) 페이지안 업데이트

시점은 Table 2에서 제시한 정밀안전진단 시기와 같은 5년으로 선정하였는데, 이는 센서노드 부착위치(Fig. 8)와 같은 강제 거더 양 끝단 받침부와 중앙부에서 피로균열이 정밀안전진단이 필요한 시기동안 발생할 가능성이 존재하기 때문이다(Lim et al., 2016).

**3.3.1 Case 1 : 업데이트 평균 상태( $\mu_3$ ) = 기존 평균 상태( $\mu_1$ )**

피로균열 센서노드 적용 베이지안 업데이트 시점(5년)에서 평균 상태가 기존 평균 상태와 같은 경우, 보수보강공법 적용 시점은 기존 평균 상태예측모델( $\mu_1$ )이 C등급(0.6)에 도달하는 시점(15년)으로 산정하였는데, 이는 1995~2017년의 BMS상 보수보강기록 데이터 분석 결과, 강박스(ST BOX) 거더의 경우, C등급에서의 보수보강 조치 빈도가 가장 높게 산출됐기 때문이다. 기존 상태예측

모델에 대한 정보만 있는 경우, Fig. 10과 같이 실제 대상 부재의 평균 상태는 알 수 있으나, 감소된 불확실성( $\sigma_3$ )은 예측할 수 없으므로 기존 상태예측모델의 불확실성( $\sigma_1(5) = 0.028$ )을 고려한다. C등급(0.6) 도달 시점(15년)에서 기존 상태의 보수보강 적용 확률 [ $P_{MAI,EXI}(15)$ ]과 매칭되는 보수보강공법 비용 [ $C_{MAI,EXI}(15)$ ]의 곱으로 1회 보수보강비용을 산출하였다.

Fig. 11은 피로균열 센서노드 적용 베이지안 업데이트 기반 갱신된 상태예측모델을 나타낸다. 5년에서 베이지안 업데이트 전 강박스 거더 상태예측모델을 통해 알고 있는 정보( $\mu_1(5) = 0.955$ ,  $\sigma_1(5) = 0.028$ )와 센서노드를 통해 얻은 정보( $\mu_2(5) = 0.955$ ,  $\sigma_2(5) = 0.05$ )를 Eq. (2)에 대입하여 대상 교량 부재의 갱신된 확률 특성치( $\mu_3(5) = 0.955$ ,  $\sigma_3(5) = 0.024$ )를 산출하고, C등급

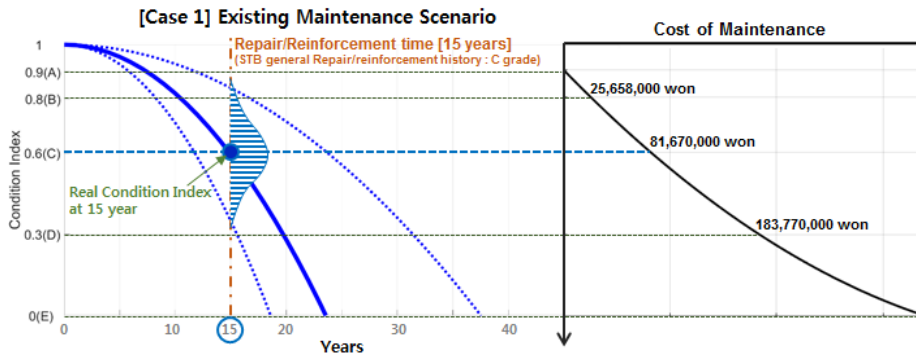


Fig. 10. [Case 1] Existing Deterioration and Cost of Maintenance by Grade

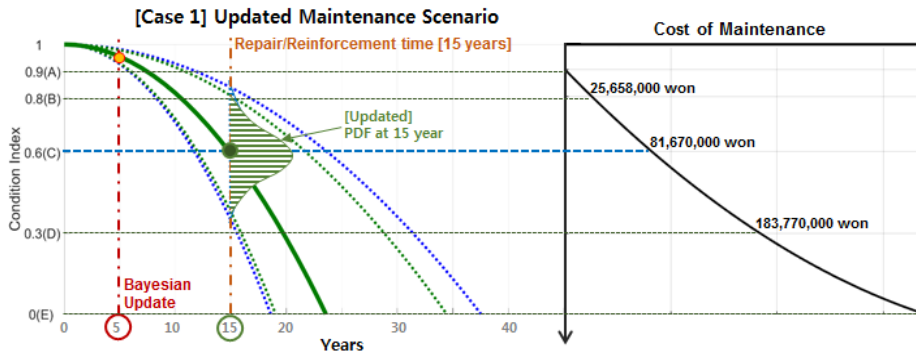


Fig. 11. [Case 1] Updated Deterioration and Cost of Maintenance by Grade

Table 4. Comparison between Total Maintenance Cost of Existing and Updating Scenario by Case

|                                 | $C_{MAI,EXI}^{TOT}(15)$ | $C_{MAI,UP}^{TOT}(15)$ |
|---------------------------------|-------------------------|------------------------|
| [Case 1] Total Maintenance Cost | 324,310,000 won         | 247,170,000 won        |
|                                 | $C_{MAI,EXI}^{TOT}(18)$ | $C_{MAI,UP}^{TOT}(18)$ |
| [Case 2] Total Maintenance Cost | 389,600,000 won         | 288,820,000 won        |
|                                 | $C_{MAI,EXI}^{TOT}(15)$ | $C_{MAI,UP}^{TOT}(15)$ |
| [Case 3] Total Maintenance Cost | 336,450,000 won         | 244,590,000 won        |



(0.6) 도달 시(15년) 보수보강공법 적용확률 및 비용을 고려한다. 위에서 언급한 바와 같이 센서노드를 사용하여 기존 불확실성( $\sigma_1$ )에 비해 업데이트 기반 감소된 불확실성( $\sigma_3$ )을 고려하면 C등급 (0.6)에 도달하는 시점(15년)에서 업데이트 상태모델의 확률분포를 알게 된다. C등급(0.6)에 도달시점(15년)에서 업데이트 상태의 보수보강 적용 확률[ $P_{MAI,UP}(15)$ ]과 매칭되는 보수보강공법 비용[ $C_{MAI,UP}(15)$ ] 면적의 곱으로 1회 해당 등급(0.6)에서의 보수보강비용을 산출하였다.

Table 4의 Case 1에 따르면, 베이지안 업데이트 전과 후의 15년에서 각각의 총 유지관리비용을 Eqs. (3) and (4)에 근거하여 산출하였는데 약 24 %의 비용 절감 효과가 발생됨을 알 수 있다. 업데이트 평균 상태( $\mu_3$ )가 기존 예측 상태( $\mu_1$ )와 같은 경우에 이러한 유지관리비용 절감(-77,144천원)이 발생한 원인은 다음과 같다.

피로균열 센서노드 적용 베이지안 업데이트 시점(5년)에서 기존 상태가 갖는 불확실성( $\sigma_1$ ) 대비 대상 구조물의 불확실성( $\sigma_3$ )이 감소하여 업데이트 상태예측모델이 목표한 관리수준(C등급 [0.6])에 도달하는 시기(15년)에서 해당하는 보수보강비용 면적이 기존 상태예측모델 대비 감소함을 알 수 있다. 즉, 대상 교량 부재의 불확실성( $\sigma_3$ )이 감소하면 기존 상태의 불확실성( $\sigma_1$ )에 비해, D (0.3)등급 보수보강비용 면적에 해당하는 확률분포의 불확실성이

감소하여 목표한 유지관리비용 산출시점(15년)에서의 1회 보수보강비용을 줄일 수 있다.

### 3.3.2 Case 2 : 업데이트 평균 상태( $\mu_3$ ) > 기존 평균 상태( $\mu_1$ )

피로균열 센서노드 적용 베이지안 업데이트 시점(5년)에서 업데이트 열화모델의 평균 기울기가 기존 상태예측모델의 상부경계치에 가까운 기울기(-0.0012) 경향을 따르는 경우에 대해 고려하면, 대상 교량 부재의 상태는 기존 상태예측모델의 C등급(0.6) 도달시점(15년)에서 B~C등급(0.7) 근처에 존재할 확률이 커지게 된다. 기존 상태예측모델에 대한 정보만 알고 있는 경우, Fig. 12와 같이 C등급(0.6) 도달시점(15년)에서 피로 균열에 따른 강박스 거더의 상태를 예측할 수 없을 것이다. 즉, 본 논문에서 언급한 피로 균열과 같이 열화 초기에 기존 비파괴 점검 기술만으로는 예측이 어려운 손상을 탐지하지 못하게 되면, 교량 관리자가 원하는 적정 보수보강 시기 판단과 그에 따른 보수보강 공법 적용성이 떨어지므로 불필요한 유지보수비용이 산정될 수 있다.

Fig. 13은 Eq. (4)를 이용하여 센서노드 기술 적용 베이지안 업데이트를 통해 대상 교량 부재의 갱신된 상태예측모델( $\mu_3, \sigma_3$ )을 산출하고, 업데이트 열화모델이 목표 관리 수준인 C등급(0.6) 도달 시(18년) 보수보강공법 적용확률 및 비용을 고려한다. 즉, 5년에서

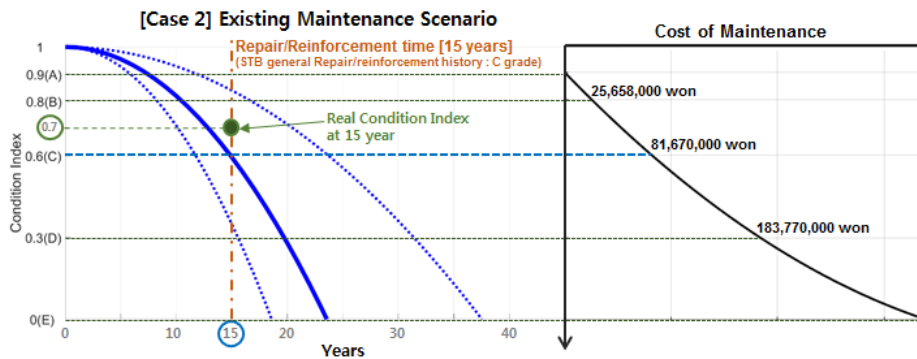


Fig. 12. [Case 2] Existing Deterioration and Cost of Maintenance by Grade

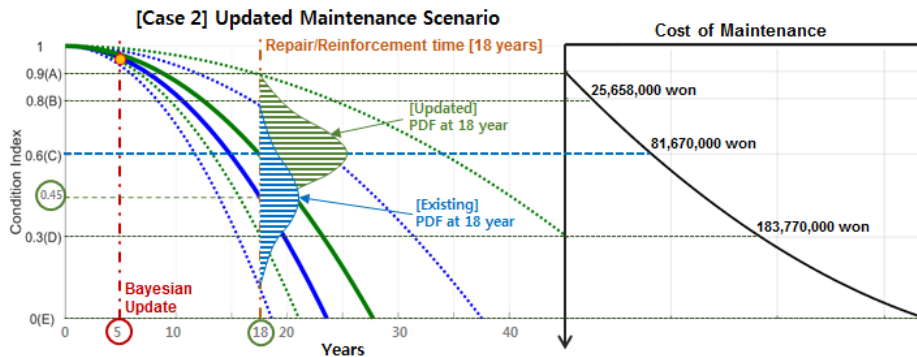


Fig. 13. [Case 2] Updated Deterioration and Cost of Maintenance by Grade

베이지안 업데이트를 통해 산출된 새로운 열화모델 기반 C등급(0.6) 도달시점(18년)에서 업데이트 상태의 확률분포를 산출하고, C등급(0.6) 도달시점(18년)에서의 업데이트 상태의 보수보강 적용 확률 $[P_{MAI,UP}(18)]$ 과 매칭되는 보수보강공법 비용 $[C_{MAI,UP}(18)]$ 의 곱으로 1회 해당 C등급(0.6)에서의 보수보강비용을 산출하였다.

Table 4의 Case 2에 따르면, 베이지안 업데이트 전과 후의 18년에서 각각의 총 유지관리비용을 Eqs. (3) and (4)에 근거하여 산출하였는데 약 26 %의 비용 절감 효과가 발생함을 알 수 있다. 업데이트 평균 상태( $\mu_3$ )가 기존 예측 상태( $\mu_1$ )보다 좋은 경우에 이러한 유지관리비용 절감(-100,078천원)이 발생한 원인은 다음과 같다.

5년에서 피로균열 센서노드 적용 베이지안 업데이트를 통해 기존 상태예측모델의 열화 기울기보다 더 완만한 열화기울기를 판단하게 되고, 업데이트 상태가 목표한 관리수준(C등급[0.6])에 도달하는 시기(18년)를 보다 정확히 예측할 수 있다. 센서노드 적용 베이지안 업데이트 기반 대상 구조물의 상태를 보다 정확히 예측할 시, 기존 상태예측모델의 정보만으로는 실제 강박스 거더의 상태를 예측하지 못해 18년에서 C~D등급(0.45) 사이에 가까운 1회 보수보강 비용이 발생하는데 비해, 업데이트 상태예측모델에 따라 유지관리 시나리오 계획을 세울 경우, 18년에서 C등급(0.6)에

해당하는 1회 보수보강 비용이 발생한다.

### 3.3.3 Case 3 : 업데이트 평균 상태( $\mu_3$ ) < 기존 평균 상태( $\mu_1$ )

피로균열 센서노드 적용 베이지안 업데이트 시점(5년)에서 업데이트 열화모델의 평균 기울기가 기존 상태예측모델의 하부경계치에 가까운 기울기(-0.0024) 경향을 따르는 경우에 대해 고려해보면, 기존 상태예측모델에 대한 정보만 있는 경우, Fig. 14와 같이 실제 대상 부재의 상태를 예측하지 못하므로 기존의 C등급(0.6)에서 발생하는 보수보강비용이 아닌, C~D등급(0.45)에 가까운 비용이 적용된다.

Fig. 15는 피로균열 센서노드 적용 베이지안 업데이트 기반 갱신된 상태예측모델에 따른 발생 가능 시나리오를 나타낸다. 5년에서 베이지안 업데이트를 통해 대상 교량 부재의 갱신된 상태예측 모델( $\mu_3, \sigma_3$ )을 Eq. (4)를 이용하여 산출하고, 업데이트 열화모델이 목표한 관리수준(C등급 사이[0.6])에 도달하는 시기(13년)에 보수보강공법 및 비용을 고려한다. 위에서 언급한 바와 같이 모니터링을 통해 대상 교량의 강박스 거더의 열화가 기존 점점 대비 더욱 빠르게 진전된다는 정보를 알게 되고, 이에 따라, 보다 정확히 목표한 관리수준(C등급 사이[0.6])에 도달시점(13년)을 산출하게 된다. 13년에서 업데이트 열화모델의 보수보강 적용 확률

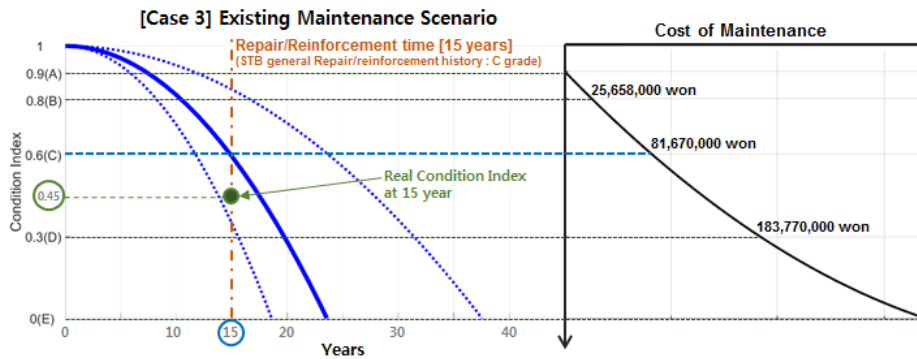


Fig. 14. [Case 3] Existing Deterioration and Cost of Maintenance by Grade

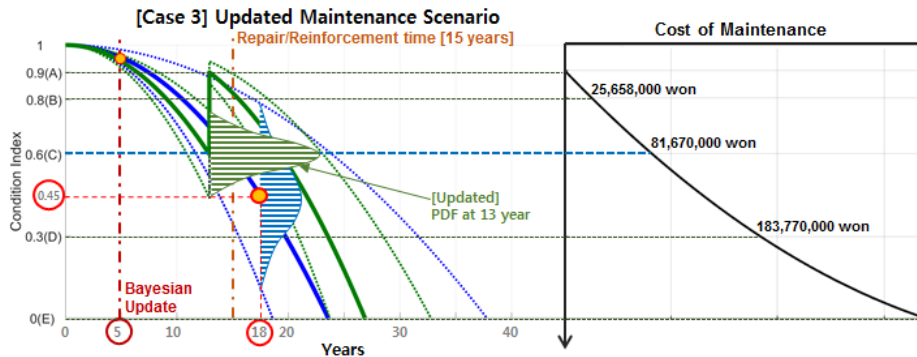


Fig. 15. [Case 3] Updating Deterioration and Cost of Maintenance by Grade

$[P_{MAL,UP}(13)]$ 과 매칭되는 보수보강공법 비용 $[C_{MAL,UP}(13)]$ 의 곱으로 1회 해당 등급(0.6)에서의 보수보강비용을 산출하였다.

Table 4의 Case 3에 따르면, 베이지안 업데이트 전과 후의 15년에서 각각의 총 유지관리비용을 Eqs. (3) and (4)에 근거하여 산출하였는데 약 27 %의 비용 절감 효과가 발생함을 알 수 있다. 업데이트 평균 상태( $\mu_3$ )가 기존 예측 상태( $\mu_1$ )보다 좋지 않은 경우에 이러한 유지관리비용 절감(-91,857천원)이 발생한 원인은 다음과 같다.

센서노드 적용 모니터링 기술을 이용한 유지관리 시나리오 고려 시, 베이지안 업데이트 시점(5년)에서 대상 강박스 거더의 상태가 기존 상태보다 양호하지 못하다고 판단하게 되고, 업데이트 상태가 목표한 관리수준(C등급[0.6])에 도달하는 시기(13년)를 보다 정확히 예측할 수 있다. 센서노드 적용 베이지안 업데이트 기반 대상 강박스 거더의 상태를 보다 정확히 예측할 시, 기존 유지관리 시나리오의 경우, 실제 강박스 거더의 상태를 예측하지 못해 15년에서 C~D등급 사이(0.45)에 가까운 1회 보수보강 비용이 발생하는데 비해, 업데이트된 상태예측모델 기반 유지관리 시나리오를 따를 경우, 13년에서 C등급(0.6)에 해당하는 1회 보수보강 비용이 발생한다.

#### 4. 결론

최근 국내의 노후 교량시설물 증가에 따른 유지관리시장이 확대되면서, 고도화된 유지관리 전략 수립에 관한 연구들이 필요성이 증대되었다. 본 논문에서는 유지관리 시나리오 전략 수립 시, 시간에 연속적인 교량 상태 및 성능의 변화를 보다 실질적으로 반영한 모델을 구축하고자, 공용교량의 초기상태유지 및 가속화 구간 반영이 가능한 2차 함수 기반의 부재별 상태예측모델을 개발하였다. 또한, 센서노드 기반 모니터링 기술을 통해 얻어진 상태 점검 데이터 결과를 확률적으로 결합하여 업데이트 가능한 베이지안 기법을 통해 설계-계획단계에서 예측한 교량 상태예측모델의 업데이트 방안을 제시하였다. 이때, 업데이트된 상태예측모델 기반 예방유지 관리가 기존의 반복주기적인 점검 기반 현행유지관리 대비 비용 효율성 측면에서 유리함을 제안하였다. 개발된 2차 함수 기반 상태예측모델을 통해 실제 대상 교량(부재)의 보다 정확한 상태를 예측하여 불필요한 시기의 보수보강 비용을 줄일 수 있고, 이를 통해 교량 운영단계에서의 생애주기 동안 체계적·효율적인 유지관리가 가능할 것으로 판단된다. 지속적으로 발전하는 교량 취약부위 점검 모니터링 기기를 대상 교량에 설치 시, 초기에 모니터링 기기 설치비용이 발생하지만, 기존 육안조사에서 소요되는 직접 인건비를 줄일 수 있고, 베이지안 기법을 통해 기존 상태예측모델을 업데이트하여 상태예측모델의 정확도를 높이게 되면 중·장기적인 운영단계 예방

적 유지관리계획 수립이 가능하며, 이에 따라, 보수보강비용을 확연히 줄일 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 연구를 통해 얻은 결론은 아래와 같다.

- (1) 공용교량 운영단계에서 모니터링 기술을 이용한 베이지안 업데이트를 고려하여 발생 가능한 유지관리 시나리오(Case 1~3)를 제시하고, 삼승교 특정 부재(강박스 거더)에 적용함으로써 일반적인 관리수준(C등급) 설정에 따른 기존 상태예측모델 업데이트 유무로 발생된 비용의 차익을 확인하였다. 이러한 비용의 차익은 본 연구에서 고려한 강박스 거더의 등급별 유지보수비용(Fig. 9)이 낮은 등급(D, E등급)으로 갈수록 2차 곡선의 가속화 경향이 반영되어 증가하기 때문으로 분석하였다.
- (2) 본 연구에서 고려한 유지관리비용 산정 예시(3.3절)에 따르면 교량의 관리수준(등급)을 C등급(0.6)으로 정하고 특정 시점(5년)에서 베이지안 업데이트 시, 기존 상태예측모델의 기술기보다 가까운 기술기 경향을 보이는 Case 3에서 약 27 %의 유지관리 비용 절감 효과를 산정하였다. 이는 강제 피로 균열과 같이 조기에 기존 육안 점검 및 비파괴 검사로 탐지가 어려운 손상유형을 점검하고, 사후 손상 발생을 미리 예측하여 1회 예방적 보수보강수행에 따른 결과로 분석하였다.
- (3) 본 베이지안 추론법을 이용한 공용교량의 예방적 유지관리 시나리오 모델은 C~D등급(0.45) 사이에서 점검진단을 통해 손상 발생 시, 대응적으로 유지관리를 수행하는 현행 유지관리 체계를 탈피하고, 보다 정확한 관리 대상 구조물이 갖는 상태를 예측함으로써 최적의 보수보강시기 판단 등 유지관리 의사결정 수립 시, 유용한 근거자료로서의 적용 가능성을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 모니터링 기술 적용 베이지안 업데이트 기반 유지관리 시나리오 모델은 현행 인력기반 유지관리와 비교했을 때, 초기 열화의 원인을 판단하지 못해 발생할 수 있는 막대한 보수보강비용을 절감할 수 있을 것으로 기대한다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(18SCIP-B066018-06)에 의해 수행되었습니다.

본 논문은 2018 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

#### References

- Ang, A. and Tang, W. (2007). (2<sup>nd</sup> edition) *Probability concepts in Engineering : Emphasis on applications in Civil and Environmental Engineering*, Willey, pp. 346-365.

- Cha, K. H., Kim, S. W., Kim, J. H., Park, M. Y. and Kong, J. S. (2015). "Development of the deterioration Models for the port structures by the multiple regression analysis and Markov Chain." *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 28, No. 3, pp. 229-239 (in Korean).
- Frangopol, D. M., Strauss, A. and Kim, S. (2008). "Use of monitoring extreme data for the performance prediction of structures : general approach." *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 12, pp. 3644-3653.
- Jung, T. Y., Park, H. M., Lee, H. and Kong, J. S. (2007). "Updating inspection data to estimate probability of failure." *Conference of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 20, No. 1, pp. 645-650 (in Korean).
- Kim, J. K. and Jang, I. Y. (2017). "Proposal of domestic road bridge deck deterioration models and forecast of replacement demand." *Journal of the Korea Institute for Maintenance and Inspection*, Vol. 21, No. 4, pp. 61-68 (in Korean).
- Kim, Y.-M. and Choi, G. H. (2018). "Institutional improvement plan for maintenance and management of deteriorated bridges." *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 30, No. 4, pp. 27-31 (in Korean).
- Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) (2016). *Large-scale infrastructure monitoring and management using unmanned inspection units*, 15RDPP-C104426-01 (in Korean).
- Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) (2017). *Research on Evaluation of Performance and Repair-Strengthening for Deteriorated Short-medium Span Bridges Based on Full-Scale Experimental Verifications*, 18SCIP-B128492-02 (in Korean).
- Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) (2018). *Bridge life-span extension using ICT, partial replacement and low-carbon materials*, 18SCIP-B066018-06 (in Korean).
- Lee, J. H., Lee, K. Y., Ahn, S. M. and Kong, J. S. (2018) "Proposal for maintenance scenario and feasibility analysis of bridge inspection using bayesian approach." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 38, No. 4, pp. 505-516 (in Korean).
- Lim, H. J., Kim, Y., Koo, G., Yang, S., Sohn, H., Bae, I. H. and Jang, J. H. (2016). "Development and field application of a nonlinear ultrasonic modulation technique for fatigue crack detection without reference data from an intact condition." *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, No. 9, 095055 (p. 14).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2012). *Guideline and Commentary of Safety Inspection and In-depth Safety Inspection for Structures-Bridge* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2012). *Developing Bridge Management System considering Life-Cycle Cost and Performance of Bridges* (in Korean).
- Sun, J. W., Lee, D. Y. and Park, K. H. (2016). "Development on repair and reinforcement cost model for bridge life-cycle maintenance cost analysis." *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 17, No. 11, pp. 128-134 (in Korean).