

# 베이지안 기법을 이용한 교량 점검 타당성 분석 및 유지관리 시나리오 제안

이진혁\* · 이경용\*\* · 안상미\*\*\* · 공정식\*\*\*\*

Lee, Jin Hyuk\*, Lee, Kyung Yong\*\*, Ahn, Sang Mi\*\*\*, Kong, Jung Sik\*\*\*\*

## Proposal of Maintenance Scenario and Feasibility Analysis of Bridge Inspection using Bayesian Approach

### ABSTRACT

In order to establish an efficient bridge maintenance strategy, the future performance of a bridge must be estimated by considering the current performance, which allows more rational way of decision-making in the prediction model with higher accuracy. However, personnel-based existing maintenance may result in enormous maintenance costs since it is difficult for a bridge administrator to estimate the bridge performance exactly at a targeting management level, thereby disrupting a rational decision making for bridge maintenance. Therefore, in this work, we developed a representative performance prediction model for each bridge element considering uncertainty using domestic bridge inspection data, and proposed a bayesian updating method that can apply the developed model to actual maintenance bridge with higher accuracy. Also, the feasibility analysis based on calculation of maintenance cost for monitoring maintenance scenario case is performed to propose advantages of the Bayesian-updating-driven preventive maintenance in terms of the cost efficiency in contrast to the conventional periodic maintenance.

**Key words :** Monitoring, Uncertainty, Bayesian update, Maintenance, Cost efficiency

### 초 록

교량 유지관리 전략 수립 시 현재 상태를 기반으로 미래 상태를 예측할 수 있어야 하며, 상태예측모델의 신뢰도가 높아질수록 효과적인 유지관리 의사결정이 가능하다. 그러나 인력기반 반복주기적인 현행유지관리는 관리자가 목표하는 관리(등급)수준의 교량 상태를 정확히 예측하지 못해서 막대한 보수보강비용이 발생될 가능성이 있고, 합리적인 유지관리 의사결정을 도모하는데 어려움을 겪는다. 이에 따라 본 논문에서는 국내 교량 점검 이력 데이터를 이용하여 불확실성을 고려한 교량 부재별 대표 상태예측모델을 개발하고, 개발된 상태예측모델을 실제 유지관리 대상 교량에 보다 높은 정확도로 적용 가능한 베이지안 업데이트 기법을 제안하였다. 또한, 모니터링 업데이트 상태예측모델 기반 예방적 유지관리가 기존 현행유지관리 대비 비용 효율성 측면에서 유리함을 제안하기 위해 각각의 유지관리비용 산출에 따른 교량 점검 타당성 분석을 수행하였다.

**검색어 :** 모니터링, 불확실성, 베이지안 업데이트, 유지관리, 비용 효율성

## 1. 서론

국내 사회기반시설은 1970년대 경제성장과 함께 그 개체수를 급격히 늘려왔다. 특히, 최근 국토교통부의 2016년 도로교량 및 터널 현황조사에 따르면 전국 교량 수는 2006년 말부터 2016년까지 증가하는 추세(Fig. 1)를 보이며, 2016년 12월 말 기준 전국의 교량

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

\*\* 고려대학교 건축사회환경공학과 공학석사 (Korea University · lkykingta@naver.com)

\*\*\* 고려대학교 건축사회환경공학과 공학석사 (Korea University · asm206@naver.com)

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

Received November 28, 2017/ revised December 26, 2017/ accepted May 25, 2018

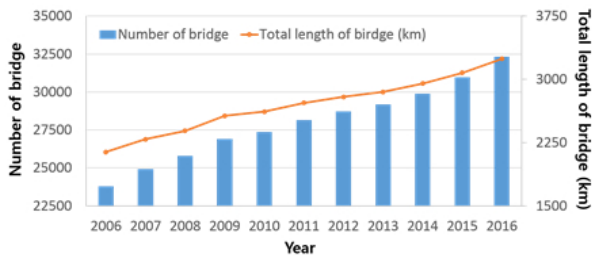


Fig. 1. Trend and Variation in Domestic Bridges

수는 32,325개소로서 2006년 말 대비 8,520개소(+36%)가 증가하였으며, 연장은 1,105km (+52%)가 증가하였다. 이처럼 국내 교량 시설물이 증가하는 추세를 보이고, 공용수명이 30년 이상 되는 노후교량의 수 또한 점차 증가될 것으로 예상되며, 이에 따라 사회적으로 시설물 유지관리에 대한 관심이 급증하였다. 여기서 노후 교량에 대한 기준은 「법인세법 시행규칙」 제15조(내용연수와 상각률) 제3항 관련 별표5에 제시된 ‘철근콘크리트’구조물의 법정 내용연수(최소 30년, 최대 50년) 하한치(30년)를 적용한 것이다.

한편, 최근 국내의 연구동향을 살펴보면 인력 기반의 안전 진단 및 유지관리 체계를 보완하기 위해 센서 및 드론이나 로봇 등의 무인 검사 장비를 활용한 유지관리 체계 구축에 대한 중요성이 사회적 이슈로 대두되고 있다(KAIA, 2016). 또한, 최근 국외 선진국을 중심으로 교량의 상태평가, 붕괴 취약부 모니터링, 보수/보강 공법 정량화 등 교량 생애주기에 걸친 모니터링 기술을 통해 교량의 유지관리 비용 절감과 함께 장수명화를 위한 유지관리 전략 수립과 관련된 연구가 진행 중이다(KAIA, 2013). 이처럼 교량을 포함한 사회기반시설의 유지관리에 대한 개념은 현재 시점을 기반으로 미래의 상태성능 및 비용을 예측하는 확률적 분석에 근거하고 있기 때문에 구조물의 생애주기비용, 미래 상태예측 등에 대한 신뢰성 있는 분석이 필요하다(Jung et al., 2007; Frangopol et al., 2008; Cha et al., 2015; Kim and Jang, 2017).

위에서 언급한 바와 같이 사회기반시설물의 손상유형을 바탕으로 구축된 점검 진단 데이터 기반 상태예측모델 개발, 구조물 취약부의 센싱 및 모니터링을 통한 광역 및 국부 손상 감지 등에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으나 개발된 모니터링 기술에 따른 확률적 상태예측모델 기반 예방적 유지관리 의사결정 수립에 관련된 연구는 상대적으로 미비한 실정이다.

기존 인력 기반 반복주기적인 유지관리가 아닌 보다 신뢰성 있는 점검 장비를 통한 스마트 모니터링 기술 기반 교량의 예방적 유지관리 의사결정 시스템 구축을 위해서는 유지관리의 실제 대상이 되는 교량의 주요 열화 요인을 정확히 파악하고 대상 교량 부재별 열화에 의한 상태 성능 변화에 따른 상태성능 및 불확실성 예측이 반드시 필요하다. 만약 교량에 아무런 유지관리 조치가

없다면 교량의 생애주기 동안 육안 점검을 통해 판단이 어려운 부식, 피로균열 등과 같은 다양한 열화인자들에 의해 대상 교량의 상태가 최초 예측한 바와 일치하지 않을 확률이 커진다. 따라서 발생 가능한 열화인자들을 스마트 모니터링을 통해 사전에 점검하여 기존 상태예측모델의 신뢰도를 높이고, 이러한 업데이트 상태예측모델을 기반으로 유지관리 활동(보수보강 및 교체)을 실시했을 때 교량의 상태는 유지관리 측면에서 교량 관리자가 목표로 하는 상태성능 지수(상태등급 또는 상태점수)를 확보할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 교량의 공용 중 모니터링 기반 상태예측모델의 확률 특성치(평균 및 표준편차)를 베이지안 기법에 따라 업데이트하였고, 대상 교량의 특정시점에서 상태점검을 실시했을 때, 판정된 교량의 확률적 상태예측모델이 교량 관리자가 원하는 관리(등급) 수준에 도달한 시점에서 발생 가능한 보수보강공법 적용 확률을 예측하였다. 예측된 보수보강공법 적용 확률을 대상 교량의 등급별 보수보강 비용모델과 연계하여 유지관리 비용 분석 모델을 제시하고, 예측된 열화모델이 생애주기 비용분석 측면에서 얼마나 경제적인 효과를 가져올 수 있는지를 판단하였다.

## 2. 베이지안 기법을 이용한 상태예측모델 업데이트

### 2.1 교량 부재별 상태예측모델

본 절에서는 상태예측모델의 영향인자 및 개발 절차에 대해 수록하였다. 상태등급의 점검종류는 정기점검, 정밀진단, 정밀안전진단, 긴급점검으로 크게 나누어진다. 본 논문에서 정밀진단과 정밀안전진단의 상태등급 데이터가 다른 종류의 상태등급 데이터 보다 점검절차를 고려하였을 때 신뢰도가 높기 때문에 이 상태등급 데이터를 이용하였다. 정밀안전진단은 1995년부터 시작하였기 때문에 이용 데이터의 점검일 범위는 1995년 이후의 각 국도 교량의 정밀점검 및 정밀안전진단 데이터를 수집(한국건설기술연구원 교량관리시스템(BMS)에 수록된 1,2종 및 기타 교량 등급이력 데이터 수집 범위 : 1995~2016년)하였다. 또한, 무조치 시의 상태예측모델을 개발하는 것이므로 1990년 이후 준공된 교량에 대한 상태등급 데이터를 사용하였다. 국내/외 부재구분을 참고하여 총 10개의 대표부재(바닥판, 거더, 2차부재, 교대/교각, 기초, 교량받침, 신축이음, 교면포장, 배수시설, 난간연석)과 연계된 69개의 세부대표부재를 정의하였고, 본 논문에서는 69개의 세부대표부재 중 강박스(ST BOX) 거더를 예시로 상태예측모델 개발 절차에 대해 나타내었다. 먼저, Fig. 2와 같이 대상 교량 부재가 포함된 개별 교량들의 각 경간별 상태이력 데이터에서 보수보강 효과가 포함되어 시간 경과에 따라 추세곡선이 상승하는 것을 방지하고자 보수보강으로 인한 상태 향상 데이터를 제거하고, 각 경간별 상태이력 데이터가 1개의 데이터만 있는 경우 열화 경향성 파악 및 보수보강 조치여부

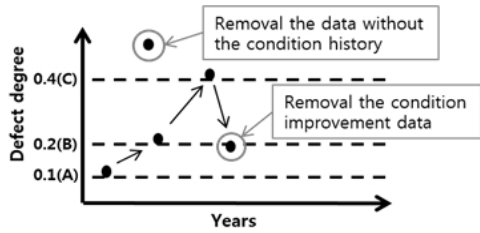


Fig. 2. Schematic for Prior Data Processing

를 파악할 수 없으므로 제거하는 데이터 전처리 작업을 수행한다.  $y$ 축은 세부지침(MOLIT, 2012)에서 기술된 결함도 점수를,  $x$ 축은 공용연수(점검일자-준공일자)를 나타낸다.

상태등급 데이터는 상태가 양호한 것에 따라서 A, B, C, D, E등급으로 나뉜다. 국도 상 교량의 상태등급이력 데이터 중 특히, 상/하부구조 부재의 경우, 전반적으로 B등급에 많이 분포하고 있어 모든 데이터에 대해 회귀분석을 할 경우, 열화경향성이 파악되지 않고 실제적인 데이터의 경향성을 파악할 수 없다. 따라서 대상 교량 부재의 각 경간별 상태이력데이터에 대해서 단변수 회귀분석을 실시하여 각 열화 기울기를 계산하였다.

등급별 데이터 분포를 살펴보면 A등급 데이터는 6,622개→5,124개, B등급 데이터는 7,642개→6,912개, C등급 데이터는 687개→620개로 처리되었다. 또한, 각 등급별 데이터 분포를 살펴보면 A등급 데이터는 평균 5.1년, 표준편차 3년, B등급 데이터는 평균 10년, 표준편차 4.2년, C등급 데이터는 Fig. 3(b)와 같이 평균 13.8년, 표준편차가 4년인 정규분포의 특성을 나타내었다.

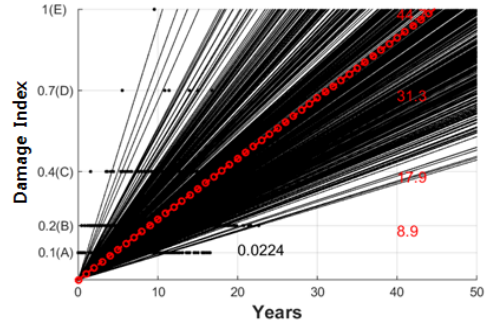
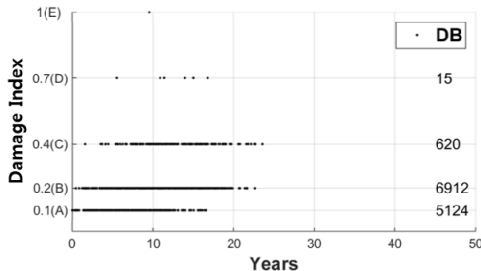
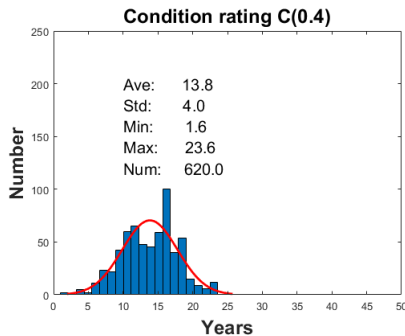


Fig. 4. Univariate Regression Analysis for ST BOX Girder

Fig. 4에서는 강박스 거더의 교량별(경간별) 단변수 회귀분석에 따른 각각의 열화기울기와 그들의 평균 열화기울기 결과를 가시화하였다. 예를 들어, 1991년에 준공된 신남교(010042)의 각 경간별/등급별 점검이력 데이터를 이용하여 하나의 추세곡선을 산출할 수 있다. 이때 추세곡선인 회귀식은 직선, 2차 곡선, 지수곡선 등 다양한 형태로 회귀결정계수( $R^2$ )를 산출하고, 가장 회귀결정계수( $R^2$ )가 높은 모델을 최종 상태예측모델로 선정하였다. 본 논문에서 사용된 강박스 거더(상부구조)의 경우 1차 직선 회귀식이 가장 회귀결정계수( $R^2$ )가 높은 것으로 분석되었다. 즉, 위에서 언급한 바와 같이 데이터 전처리 후 교량은 670개소이고, 이에 해당하는 각각의 추세곡선과 세 가지 회귀식에 따른 회귀결정계수( $R^2$ )를 산출 및 비교 후 그들의 평균 열화기울기(0.0224)를 산정하였다. 그에 더하여, 각 교량 부재별 상세제원 데이터 및 다중회귀분석을 위한 영향인자 데이터를 수집하여 구축하였다. 교량의 부재는 일반적인 요소(공용연수, 경간수, 경간장 등), 구조적 요소(거더 형식 등), 교통량, 환경적 요소(염화물, 습도, 온도 등) 등의 영향으로 열화가 된다. 본 논문에서는 국내의 교량 열화모델 연구(MLTMA, 2012)에서 고려된 영향인자 종류를 참고하여 공용연수, 경간장, 교통량, 표면염화물량, 평균습도, 적설량 등을 영향인자로 우선 선정하고, 영향인자들 간의 상관분석을 실시한다. 상관분석의 경우, 각 개별 영향인자별 열화율 증가량과 비례 관계 여부를 분석하였다. 예를 들어, 교량 부재의 일반적 요소인 경간장이 늘어날수록 열화기울기도 증가하는 경향을 보인다. 즉, 이러한 상관분석을 통해 각 영향인자 요소별 열화율 증가량에 가장 크게 영향을 미치는 4가지 주요 영향인자(경간장, 평균 일 트럭교통량, 표면염화물량, 평균습



(a) ST BOX Girder for Prior Data Processing



(b) Normal Distribution at C Grade

Fig. 3. Prior Data Processing and Distribution at C Grade

Fig. 3은 본 논문에서 사용된 강박스 거더의 데이터를 기반으로 단변수 회귀분석 전처리 후 데이터(분포)를 나타낸다. 데이터 전처리 후 강박스 거더 교량의 개소수는 1,071개→670개로 줄어들었고,

도)를 선정하였다. 앞 단계의 공용연수를 고려한 단변수 회귀분석 열화를 기울기를 종속변수로 하고, 선정된 4가지 영향인자에 대해서 다변수 회귀분석을 실시하여 최종 상태예측모델을 산출하였다. Eq. (1)은 부재별 상태예측모델 산출을 위한 다변수 회귀분석 식이다.

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_1x_2 + a_6x_1x_3 + a_7x_1x_4 + a_8x_2x_3 + a_9x_2x_4 + a_{10}x_3x_4 \quad (1)$$

여기서,  $Y$ 는 교량 부재별 상태예측모델의 기울기를 나타내며,  $a_i$  ( $i = 0 \sim 10$ )는 다변수 회귀분석을 통해 산출된 계수 값이며,  $x_i$  ( $i = 1 \sim 4$ )는 각각 경간장, 평균 일 트럭교통량(1일당의 평균 트럭교통량), 표면염화물량 및 평균습도를 나타낸다.

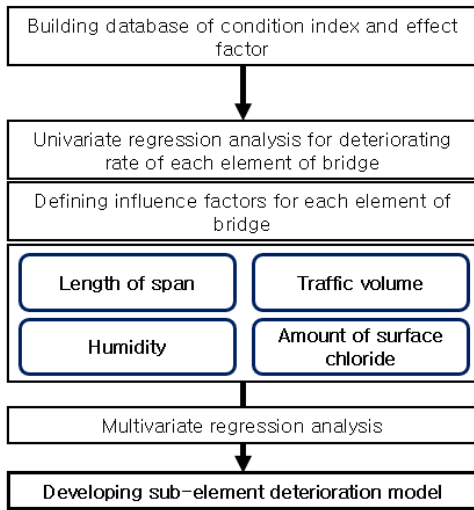


Fig. 5. Processes Developing a Bridge Sub-element Deterioration Model with Multivariate Regression Analysis

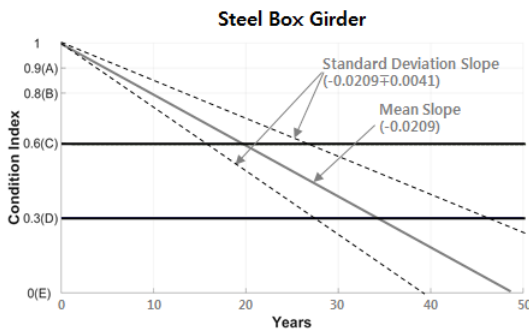


Fig. 6. Deterioration Model of Steel Box Girder

Fig. 5와 같은 다변수 회귀분석을 통해 교량 부재별 열화모델 산출이 가능하다. Fig. 6에서는 다변수 회귀분석을 통해 산출된 강박스 거더의 최종 열화모델을 나타내었다. 실선으로 표시된 기울

기는 강박스 거더 교량군의 평균( $\mu_1$ ) 열화 기울기를, 점선으로 표시된 기울기는 평균( $\mu_1$ )  $\pm$  표준편차( $\sigma_1$ ) 열화 기울기를 나타낸다. 이때,  $y$ 축은 상태점수(1-결함도 점수)로 변환하였는데, 이는 교량 부재의 열화를 보다 직관적으로 확인하고자 함이다. 이러한 교량 부재별 상태예측모델은 최적 유지관리 전략 수립 및 교량의 상태예측, 유지관리 시기 결정, 보수보강 투입 예산 산정 등 의사결정 시나리오 구축 시 활용하게 된다.

## 2.2 모니터링 기반 베이지안 업데이트 적용

### 2.2.1 베이즈 정리

본 절에서는 사전(Prior)에 알고 있는 교량 부재별 상태예측모델의 향후 특정 시점( $t$ )에서 추가되는 실제 대상 교량의 손상에 따른 점검이력 데이터 특성(Likelihood)을 기반으로 상태예측모델 업데이트(Posterior)를 위한 하나의 확률 기법인 베이즈 정리 적용방안에 대해 기술하였다.

시간에 연속적인 형태로 상태가 저하되는 교량 열화모델을 조건부 확률과 전확률 정리의 개념을 토대로 정리한 베이즈 이론(Ang and Tang, 2007)에 적용할 때, 아래의 Eq. (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$f(\mu|x) = \frac{f(\mu)f(x|\mu)}{f(x)} = \frac{f(\mu)f(x|\mu)}{\int_{-\infty}^{\infty} f(\mu)f(x|\mu)d\mu} \quad (2)$$

$$= kf(\mu)f(x|\mu)$$

여기서,  $x$ 는 교량 관리자가 정한 모니터링 시점( $t$ )에서 대상 교량(혹은 부재) 경간의 점검 및 모니터링을 통해 관측된 손상유형으로부터 얻어진 상태등급 데이터(A, B, C, D, E)로써 대체로 정규분포를 따르고, Eq. (3)과 같이 표현할 수 있다.  $\sigma^2$ 은 점검 및 모니터링 기법에 따른 불확실성(정확도)을 나타내며, 기존에 알고 있는 값이라고 가정하였다(Sun et al., 2010; KAIA, 2013).

$$x \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (3)$$

또한, 확률변수들에 대한 정의는 다음과 같다.  $\mu$ (즉,  $x$ 의 평균 파라미터)는 Eq. (4)와 같이 정규분포를 따른다고 가정한다.

$$\mu \sim N(\mu_1, \sigma_1^2) \quad (4)$$

Eqs. (2)~(4)의 함수들에 대한 정의는 다음과 같다.  $f(\mu)$ 는 점검 및 모니터링 시점( $t$ )에서의 모니터링 실시 전에 알고 있는 평균이  $\mu_1$ 이고, 분산이  $\sigma_1^2$ 인 정규분포 확률밀도함수로 사전(Prior) 정보에 해당하고,  $f(x|\mu)$ 는 점검 및 모니터링 시점( $t$ )에서 모니터링

실시 후 사전분포에서 점검이력 데이터  $x$ 가 발견될 정규분포 확률 밀도함수로 우도(Likelihood)함수에 해당하며,  $f(\mu|x)$ 는 점검 및 모니터링 시점( $t$ )에서 모니터링 실시 후, 관측된 점검이력 데이터  $x$ 를 통해 추정(업데이트)된  $\mu$ 의 새로운 확률밀도함수로 사후(Posterior)확률로 정의할 수 있다.  $k$ 는 확률밀도함수의 성질을 갖게 하기 위한 정규화 계수로 전확률 정리에 따라서 Eq. (5)와 같이 정의된다.

$$k = \frac{1}{\int_{-\infty}^{\infty} f(\mu)f(x|\mu)d\mu} \quad (5)$$

### 2.2.2 정규분포에 대한 베이지안 추론

앞 절에서 밝혔듯이 사후확률밀도함수  $f(\mu|x)$ 는 정규화 계수 ( $k$ )와 사전 정규분포 확률밀도함수인  $f(\mu)$ , 우도함수(정규분포 확률밀도함수)  $f(x|\mu)$ 의 곱, 즉, 세 가지 항의 곱으로 표현된다. 본 절에서는 이러한 세 가지 항의 곱으로 이루어진 사후확률밀도함수의 파라미터(평균, 분산) 분포에 대한 추정을 목적으로 한다.

본격적인 통계적 추론에 앞서, 고려한 초기 조건과 사전 및 우도함수형태의 정의는 각각 Eqs. (6)~(8)과 같다.

$$\sigma^2 > 0, \sigma_1^2 > 0 \quad (6)$$

$$f(\mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} \exp\left\{-\frac{(\mu-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right\} \quad (7)$$

$$f(x|\mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (8)$$

Eq. (6)은 사전 및 우도함수의 확률변수인 각각의 분산이 0보다 크다는 초기조건을 나타내고, Eqs. (7) and (8)은 사전 및 우도함수를 정규분포 확률밀도함수의 형태로 표현한 것이다. Eqs. (7) and (8)을 Eq. (2)에 대입하여 정리하면 Eq. (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$f(\mu|x) = k \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} \exp\left\{-\frac{(\mu-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right\} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (9)$$

Eq. (9)에 Eq. (5)에서 언급한  $k$ 를 대입하고,  $\mu$ 를 기준으로 각각의 항들로 정리하면 Eq. (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$f(\mu|x) = \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi\frac{\sigma_1^2\sigma^2}{\sigma_1^2+\sigma^2}}\right)} \times \exp\left\{-\frac{\left(\mu - \frac{\mu_1\sigma^2 + x\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma^2}\right)^2}{2\frac{\sigma_1^2\sigma^2}{\sigma_1^2 + \sigma^2}}\right\} \quad (10)$$

즉, Eq. (10)은 정규분포 확률밀도함수를 나타낸다. 또한, 관측된 상태점검이력 데이터  $x$ 가  $n$ 개인 경우, 단일 관측된 결과의 사후확률 분포의 형태와 동일하며, 이때  $x$ 는 평균값  $\mu_2$ 로,  $\sigma^2$ 은  $\sigma^2/n$  또는  $\sigma_2^2$ 으로 표현할 수 있다. 이를 통해  $k$ 와 사전 정규분포 확률밀도함수인  $f(\mu)$ , 우도함수(정규분포 확률밀도함수)  $f(x|\mu)$ 의 곱, 즉, 세 가지 항의 곱인 사후 확률밀도함수[ $f(\mu|x)$ ]가 새로운 정규분포 확률밀도함수임을 증명하였고, 새로운 정규분포함수의 파라미터(평균 및 분산)와 사후 확률밀도함수는 각각 Eqs. (11) and (12)와 같이 정리할 수 있다.

$$\mu_3 = \frac{\mu_1\sigma_2^2 + \mu_2\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \sigma_3^2 = \frac{\sigma_1^2\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (11)$$

$$f(\mu|x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_3^2}} \times \exp\left\{-\frac{(\mu-\mu_3)^2}{2\sigma_3^2}\right\} \quad (12)$$

### 2.2.3 베이지안 업데이트에 따른 불확실성 감소

본 절에서는 베이지안 추론을 통해 산출된 확률 특성치( $\mu_3, \sigma_3^2$ )와 사전( $\mu_1, \sigma_1^2$ ) 및 우도함수의 확률 특성치( $\mu_2, \sigma_2^2$ ) 간의 상관관계를 다룬다. Eqs. (6) and (11)로부터 Eqs. (13) and (14)와 같은 결론을 도출할 수 있으며, Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다.

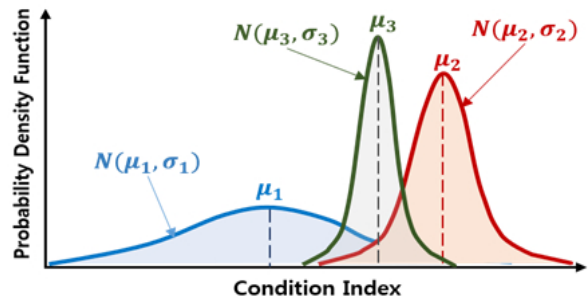


Fig. 7. Schematic for Prior Distribution Update

$$\sigma_1^2 \times (\sigma_1^2 + \sigma_2^2) > \sigma_1^2 \times \sigma_2^2 \Rightarrow \sigma_1^2 > \frac{\sigma_1^2 \times \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \Rightarrow \sigma_1^2 > \sigma_3^2 \quad (13)$$



$$\sigma_2^2 \times (\sigma_1^2 + \sigma_2^2) > \sigma_2^2 \times \sigma_1^2 \Rightarrow \sigma_2^2 > \frac{\sigma_1^2 \times \sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \Rightarrow \sigma_2^2 > \sigma_1^2 \quad (14)$$

즉, 베이지안 정리를 통해 업데이트된 사후 정규분포 확률밀도함수의 분산( $\sigma_3^2$ )은 사전 확률밀도함수의 분산( $\sigma_1^2$ )과 우도 확률밀도함수의 분산( $\sigma_2^2$ )보다 항상 작다(Ang and Tang, 2007).

### 3. 모니터링 기반 유지관리비용 모델 제안

#### 3.1 단계별 유지관리비용 분석 개요

교량의 총 생애주기비용은 초기투자비용, 유지관리비용, 해체폐기비용 세 가지로 분류되는데 본 논문에서는 유지관리비용 항목을 고려하였다. 유지관리비용 산출 시, 필요한 유지관리 시나리오는 크게 설계계획단계와 운영단계 두 가지로 구분할 수 있다. 설계계획단계는 가설 혹은 건설된 교량의 운영 전 단계로 볼 수 있다. 이는 생애주기가 진전됨에 따라 교량의 각 부재들의 불확실성을 포함한 상태나 성능을 예측하고, 특정 시기 또는 발생 가능한 손상유형에 따라 다양한 보수보강 공법 적용에 따른 시물레이션(시나리오)이 가능하다. 수학적으로 교량의 상태 혹은 성능이 갖는 다양한 불확실성의 분포에 따라서 등급을 판단하고, 특정 등급에 해당하는 보수보강 공법 적용을 기초한 시물레이션을 할 수 있다. 이러한 시물레이션 결과를 종합하여 특정 목표수명 기반의 평균 생애주기 비용을 산출할 수 있는데, 이를 설계계획단계로 정의한다.

운영단계는 실제 공용 중인 대상 교량에 발생한 손상유형을 기반으로 개발된 교량 부재별 상태예측모델의 모니터링 업데이트에 따른 총 생애주기비용을 산출 또는 예측하는 것이다. 설계계획단계와 차별화되는 점은 교량 생애주기 동안 특정 시점( $t$ )에서 모니터링 기반 베이지안 업데이트를 통해 대상 교량 부재 상태예측모델 확률 특성치(평균, 표준편차)를 계산한다는 점이다. 특정 시점( $t$ )에 모니터링을 통한 상태등급 데이터를 기반으로 기존 상태예측모델을 업데이트하면 단순한 주기적 보수보강이 아닌 특정 등급에 맞는 보수보강 공법을 높은 신뢰수준을 갖고 적용 및 선택이 가능해진다. 즉, 실제 대상 교량에 발생한 손상유형에 따라서 적용 가능한 보수보강공법들의 적용 및 선택에 대한 확률이 산출된다.

#### 3.2 모니터링 기반 운영단계 유지관리 비용분석 모델

교량 또는 교량 부재가 열화되는 과정에서 교량 관리자가 예측한 등급별 도달 시기에 유지보수를 할 경우 상태 혹은 성능 향상을 통해 경제적으로 구조물 활용이 가능하나, 적정시기를 놓칠 경우 열화작용은 사용연한이 지날수록 가속화되어 대규모 공법을 적용해야 하거나 구조물을 교체해야 하는 시점에 이르게 된다.

이에 따라 본 연구에서는 실제 운영단계 시 발생 가능한 유지관리 시나리오를 고려하고, 기존 정밀점검 및 정밀안전진단에 추가적으로 센서(모니터링 기기)를 통한 유지관리비용 산정 모델을 제시한다. 센서 기반 점검에 따른 유지관리비용 산정 모델은 베이지안 기법을 고려한 상태예측모델 갱신에 따른 보수보강주기 업데이트를 통하여 대상 교량 부재의 최적 보수시점 예측이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서 적용한 모니터링 기반 운영단계 유지관리 비용분석 모델은 Eq. (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{MAL,UP}^{TOT}(t) = C_{SEN}(t_0) + \sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+q)^t} \{C_{INS,UP}(t)\} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{(1+q)^{t_i}} \{C_{MAL,UP}(t_i) \times P_{MAL,UP}(t_i)\} \quad (15)$$

여기서,  $C_{MAL,UP}^{TOT}(t)$ 는 스마트 모니터링 기술 기반 특정시점( $t$ )까지 발생한 총 유지관리비용이고,  $C_{SEN}(t_0)$ 는 초기( $t_0$ ) 센서 설치비용이며,  $C_{INS,UP}(t)$ 는 업데이트 모델 기반 안전점검 및 정밀안전진단 비용이고,  $C_{MAL,UP}(t_i)$ 는 유지보수시점( $t_i$ )에서 업데이트 모델 연계 기반 적용 보수보강공법 비용이며,  $P_{MAL,UP}(t_i)$ 는 유지보수시점( $t_i$ )에서 업데이트 모델 기반 적용 보수보강확률이고,  $q$ 는 할인율(discount rate)이다.

한편, 모니터링이 적용되지 않은 경우, 즉, 기존 운영단계 유지관리 비용분석 모델은 센서 관련 비용항목( $C_{SEN}(t_0)$ ,  $C_{SEN,MAL}(t)$ )을 고려하지 않고, 나머지 기존 안전점검 및 정밀안전진단비용( $C_{INS,EXI}(t)$ )과 보수보강공법 비용( $C_{MAL,EXI}(t_i)$ ) 및 적용 확률( $P_{MAL,EXI}(t_i)$ )을 고려한다. 기존 유지관리 비용( $C_{MAL,EXI}^{TOT}(t)$ )은 Eq. (16)과 같다.

$$C_{MAL,EXI}^{TOT}(t) = \sum_{t=0}^T \frac{1}{(1+q)^t} \{C_{INS,EXI}(t)\} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{(1+q)^{t_i}} \{C_{MAL,EXI}(t_i) \times P_{MAL,EXI}(t_i)\} \quad (16)$$

본 연구에서 제시하고 있는 스마트 모니터링 기술 기반 예방적 유지관리 비용분석방법은 생애주기비용 분석 시 기존 상태예측모델이 갖는 불확실성( $\sigma_1$ )을 베이지안 기법을 통해 업데이트된 확률 분포의 형태, 즉 발생분포 및 누적분포의 형태로 가시화하여 비용 및 위험요소에 대한 불확실성이 감소된, 보다 정확한 예측을 통하여 실제 교량 운영단계 비용계획 수립 시 유리한 방법이다. 또한 베이지안 업데이트 전과 후의 유지관리비용을 비교하여 스마트 모니터링 기술 기반 예방적 유지관리가 기존 유지관리 대비 비용 효율성

측면에서 유리함을 검증할 수 있다.

#### 4. 모니터링 기반 유지관리비용 산정 예시

##### 4.1 유지관리비용 산정을 위한 입력변수 및 가정사항

본 연구에서는 위에서 제안된 모니터링 기반 유지관리비용 분석 모델을 현재 공용되고 있는 영종대교 왕복 4차선 300m 강교의 강박스 거더(Fig. 8)에 적용하였다. 적용된 영종대교 강박스 거더의 면적은 600m<sup>2</sup>이고, 피로균열 모니터링용 센서노드에 대한 정보 및 가정사항은 Table 1과 같다. Table 1로부터 스마트 모니터링 기술 기반 총 유지관리비용 산정 Eq. (15)의 초기( $t_0$ ) 센서 설치비용

( $C_{SEN}(t_0) : 326,000won + 345,000won \times 60EA$ )을 계산한다. 또한, 영종대교 강재거더 피로균열 모니터링 기술을 반영하였고, 센서노드의 점검오차( $\sigma_2$ )는 0.05 (정확도 95%)로 가정하였다. 영종대교 강박스 거더의 센서노드 부착위치는 Fig. 9와 같다. 센서노드 사용 시 직접인건비는 기존 유지관리 직접인건비의 25%로 가정하였고, 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 2와 같이 가정하였다(KAIA, 2013; Lim et al., 2016).

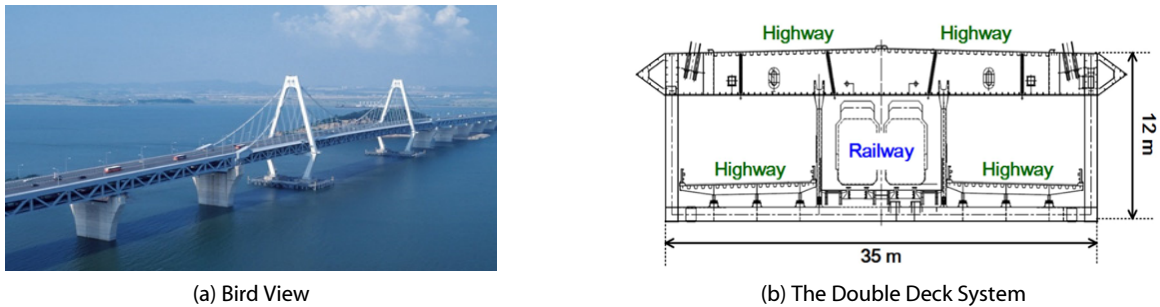


Fig. 8. Overview of Youngjong Grand Bridge

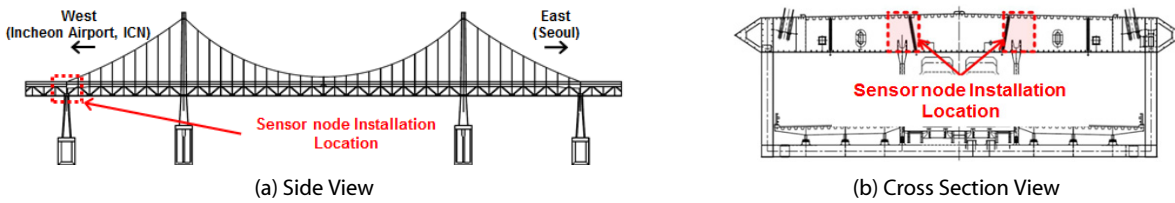


Fig. 9. The Installation Locations of the Sensor Node on Youngjong Grand Bridge

Table 1. Assumption of Sensor Node

Division	Quantity
Cost of sensor node	345,000 won
The number of sensor node	60 EA
Cost of sensor node installation	326,000 won
Probability of misclassification (Sensor node)	5%

Table 2. A 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)	1,037	1,318	4,970	2,353	17,880	5,715
Inspection time	Once every 6 months		Once every 2 years		Once every 5 years	

### 4.2 대상 교량 부재의 적용된 보수보강 공법

강재 거더의 균열은 응력집중부 및 용접결합부 등에서 손상이 누적되어 피로 균열로 발전하거나 면외변형 및 2차 응력 등에 의해서도 발생된다. 한편, 한국건설기술연구원 교량관리시스템(BMS)상의 보수보강기록 DB로부터 각 교량 대표 부재별, 공법별 발생 빈도분석 결과를 통해서 산출한 보수보강리스트에 대해서 상태등급향상데이터와 전문가 의견을 바탕으로 상태등급향상 모델을 만들었다. 예를 들어, 피로균열 손상에 적용 가능한 보수보강 공법으로 용접보수, 외부긴장, 보강재 덧댐 공법, 균열방지공법, 거더증설, 거더교체와 같이 6가지 대표 공법을 정의하고, 각 공법들의 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 계산하고, 위에서 언급한 피로균열 손상 발생에 따른 적용 가능한 6가지 대표 보수보강 공법들의 등급별 누적 보수보강비용을 산정하였다. Fig. 10은 면적이 600m<sup>2</sup>(전체면적)인 강박스 거더의 등급별 보수보강비용(단가와 보수율과 전체면적(600m<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 6가지 공법들 중 낮은 등급(C~D)에서는 거더 증설(또는 교체)과 같은 단가가 높은 공법들의 적용에 따른 보수율이 높기 때문이다(Jung et al., 2009; MLTMA, 2012; Sun et al., 2016).

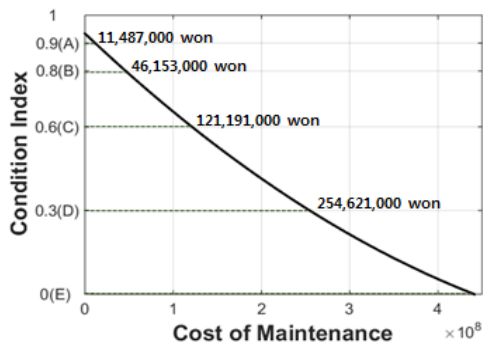


Fig. 10. Cost of Maintenance by Grade : Steel Box Girder (600m<sup>2</sup>)

### 4.3 유지관리비용 산정

본 연구에서 유지관리비용은 모니터링 업데이트 유무에 따라 유지관리 시나리오 및 보수보강 공법 비용을 연계하여 산출하였고, 기존 대비 모니터링 업데이트 시 초기 손상유형 검측을 통한 대상 교량 부재로의 상태예측모델 업데이트에 따라 발생 가능한 대표

유지관리 시나리오별(Case 1~3) 비용 효율성 측면에서의 유리함을 정량적으로 검증하였다. 모니터링 기반 베이지안 업데이트 시점은 Table 2에서 제시한 정밀안전진단 시기와 같은 5년으로 계산하였는데, 이는 센서노드 부착위치(Fig. 9)와 같은 용접부의 피로균열이 정밀안전진단이 필요한 시기동안 발생할 가능성이 존재하기 때문이다(Lim et al., 2016). 센서노드의 점검오차( $\sigma_2$ )는 0.05 (정확도 95%)로 가정하며, 센서노드의 초기비용은 Table 1의 정보를, 기존 및 센서노드 기반 1회 점검비용 및 점검 시점은 Table 2의 정보를 활용하였고, 할인율은 3%로 가정하였다.

#### 4.3.1 Case 1 : 업데이트 평균 상태( $\mu_3$ ) = 기존 평균 상태( $\mu_1$ )

모니터링 결과 베이지안 업데이트 시점(5년)에서 평균 상태가 기존 평균 상태와 같다면, 보수보강 공법 적용 시점은 기존 평균 상태예측모델( $\mu_1$ )이 B-C등급 사이(0.7)에 도달하는 시점(14년)으로 산정하였는데, 이는 1995~2016년의 BMS상 보수보강기록 데이터 분석 결과 ST BOX거더의 경우, B와 C등급에서의 보수보강 조치 빈도가 가장 높게 산출됐기 때문이다. 기존 상태예측모델에 대한 정보만 있는 경우, Fig. 11과 같이 실제 대상 부재의 평균 상태는 알 수 있으나, 감소된 불확실성( $\sigma_3$ )은 예측할 수 없으므로 기존 상태예측모델의 불확실성( $\sigma_1 = 0.0041$ )을 고려한다. B-C등급 사이(0.7)에 도달하는 시점(14년)에서 기존 상태의 보수보강 적용 확률( $P_{MAI,EXI}(t_i)$ )과 매칭되는 보수보강공법 비용( $C_{MAI,EXI}(t_i)$ )의 곱으로 1회 보수보강비용을 산출하였다.

Fig. 12는 모니터링 기반 베이지안 업데이트를 적용한 상태예측 모델을 나타낸다. 5년에서 업데이트 전 강박스 거더 상태예측모델을 통해 알고 있는 정보( $\mu_1 = 0.8955, \sigma_1 = 0.0205$ )와 센서노드를 통해 얻은 정보( $\mu_2 = 0.8955, \sigma_2 = 0.05$ )를 Eq. (11)에 대입하여 대상 교량 부재의 갱신된 상태예측모델( $\mu_3 = 0.8955, \sigma_3 = 0.019$ )을 산출하고, B-C등급 사이(0.7)에 도달할 시(14년)의 보수보강공법 적용확률 및 비용을 고려한다. 위에서 언급한 바와 같이 모니터링을 통해 기존 불확실성( $\sigma_1$ )에 비해 업데이트 기반 감소된 불확실성( $\sigma_3$ )을 고려하면 B-C등급 사이(0.7)에 도달하는 시점(14년)에서 업데이트 상태모델의 확률분포를 알게 된다. B-C등급 사이(0.7)에 도달 시점(14년)에서 업데이트 상태의 보수보강 적용 확률( $P_{MAI,UP}(t_i)$ )과 매칭되는 보수보강공법 비용( $C_{MAI,UP}(t_i)$ )의 곱으로 1회 해당 등급(0.7)에서의 보수보강비용을 산출하였다.

Table 3의 결과, 모니터링 업데이트 전과 후의 14년에서 각각의 총 유지관리비용을 Eqs. (15) and (16)에 근거하여 산출하였는데 약 9%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(-7,800천원)이 발생한 원인은 다음과 같다.

센서노드 기반 모니터링 시점(5년)에서 베이지안 업데이트를



통해 기존 상태가 갖는 불확실성( $\sigma_1$ ) 대비 대상 구조물의 불확실성( $\sigma_3$ )이 감소되어 업데이트 상태가 목표한 관리수준(B-C등급 사이(0.7))에 도달하는 시기(14년)에서 해당되는 보수보강 비용이 감소하여 보다 정확히 예측할 수 있다. 즉, 모니터링 기반 특정 대상 구조물의 불확실성( $\sigma_3$ )이 감소되면 기존 상태의 불확실성( $\sigma_1$ )에 비해, B(0.8)-C(0.6)등급 보수보강 비용 면적에 해당하는 확률분포의 불확실성이 감소하여 목표한 유지관리비용 산출시점(14년)에서의 1회 보수보강 비용을 줄일 수 있다.

**4.3.2 Case 2 : 업데이트 평균 상태( $\mu_3$ ) > 기존 평균 상태( $\mu_1$ )**

모니터링 결과 베이지안 업데이트 시점(5년)에서 업데이트 열화 모델의 평균 기울기가 기존 상태예측모델의 상부경계치의 기울기(-0.017)와 같은 경향을 따른다는 사실을 알았다고 가정하면, 특정

대상 교량 강박스 거더의 상태는 기존 상태예측모델의 B-C등급(0.7) 도달시점(14년)에서 B(0.8)등급 근처에 존재할 확률이 커지게 된다. 기존 상태예측모델에 대한 정보만 알고 있는 경우, Fig. 13과 같이 B-C등급(0.7) 도달시점(14년)에서 피로 균열에 따른 강박스 거더의 상태를 예측할 수 없을 것이다. 즉, 본 논문에서 언급한 피로 균열과 같이 열화 초기에 예측이 어려운 손상유형 식별에 따른 보수보강시기 판단과 그에 따른 보수보강 공법 적용성이 떨어지므로 불필요한 유지보수비용이 산정될 수 있다.

Fig. 14는 Eq. (11)을 이용하여 모니터링 기반 베이지안 업데이트를 통해 대상 교량 부재의 갱신된 상태예측모델( $\mu_3, \sigma_3$ )을 산출하고, 업데이트 열화모델이 목표 관리 수준(0.7) 도달 시(18년)의 보수보강공법 적용확률 및 비용을 고려한다. 즉, 5년에서 베이지안 업데이트를 통해 산출된 새로운 열화모델 기반 B-C등급(0.7) 도달

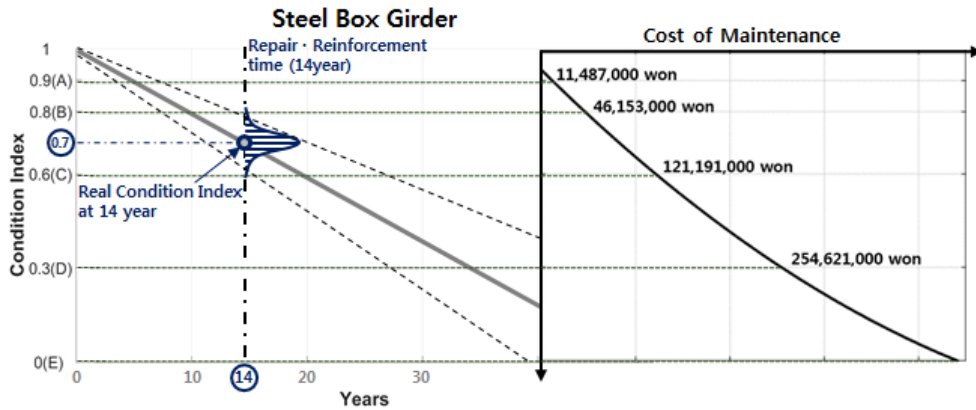


Fig. 11. Case 1 : Existing Deterioration Model and Cost of Maintenance by Grade

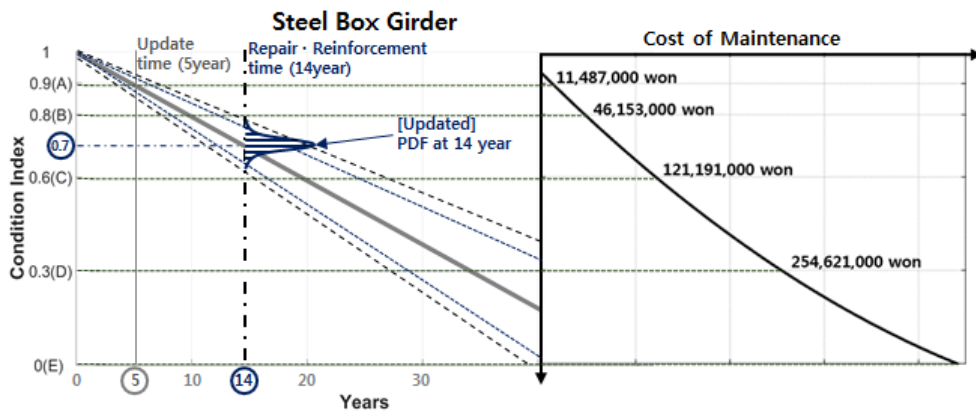


Fig. 12. Case 1 : Updating Deterioration Model and Cost of Maintenance by Grade

Table 3. Case 1 : Comparison between Total Maintenance Cost of Existing and Updating Scenario at 14 Years

Case 1	$C_{MAI,EXI}^{TOT}(14)$	$C_{MAI,UP}^{TOT}(14)$
Total maintenance cost	87,854,000 won	80,084,000 won

시점(18년)에서 업데이트 상태의 확률분포를 산출하고, B-C등급(0.7) 도달시점(18년)에서의 업데이트 상태의 보수보강 적용 확률( $P_{MAL,UP}(t_i)$ )과 매칭되는 보수보강공법 비용( $C_{MAL,UP}(t_i)$ )의 곱으로 1회 해당 등급(0.7)에서의 보수보강비용을 산출하였다.

Table 4의 결과, 모니터링 업데이트 전과 후의 18년에서 각각의 총 유지관리비용을 Eqs. (15) and (16)에 근거하여 산출하였는데 약 19%의 비용 절감 효과가 발생됨을 알 수 있다. 업데이트 평균 상태( $\mu_3$ )가 기존 예측 상태( $\mu_1$ )보다 좋은 경우에 이러한 유지관리 비용 절감(-21,900천원)이 발생한 원인은 다음과 같다.

센서노드 기반 모니터링 시점(5년)에서 베이지안 업데이트를 통해 대상 강박스 거더의 상태가 기존 예측치보다 양호하다고 판단하게 되고, 업데이트 상태가 목표한 관리수준(B-C등급 사이(0.7))에 도달하는 시기(18년)를 보다 정확히 예측할 수 있다. 모니터링 기반 특정 대상 구조물의 상태를 보다 정확히 예측할 시,

기존 상태예측모델의 정보만으로는 실제 강박스 거더의 상태를 예측하지 못해 18년에서 C등급에 가까운 1회 보수보강 비용이 발생하는데 비해, 업데이트 상태예측모델에 따라 유지관리 시나리오 계획을 세울 경우, 18년에서 B-C등급 사이(0.7)에 해당하는 1회 보수보강 비용이 발생된다.

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

모니터링 결과 베이지안 업데이트 시점(5년)에서 업데이트 열화 모델의 평균 기울기가 기존 상태예측모델의 하부경계치의 기울기(-0.025)와 같은 경향을 따른다는 사실을 알았다고 가정하면, 기존 상태예측모델에 대한 정보만 있는 경우, Fig. 15와 같이 실제 대상 부재의 상태를 예측하지 못하므로 기존의 B-C등급(0.7)에서 발생하는 보수보강비용이 아닌, C등급에 가까운 비용이 적용된다.

Fig. 16은 모니터링 기반 베이지안 업데이트를 적용한 상태예측

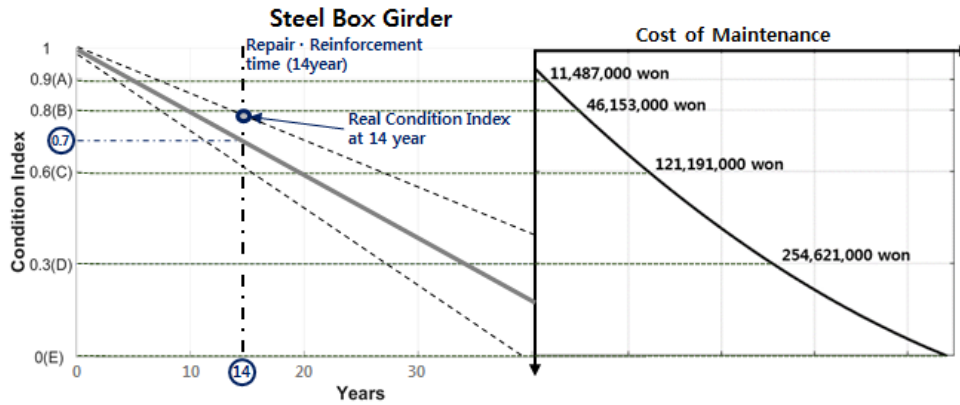


Fig. 13. Case 2 : Existing Deterioration Model and Cost of Maintenance by Grade

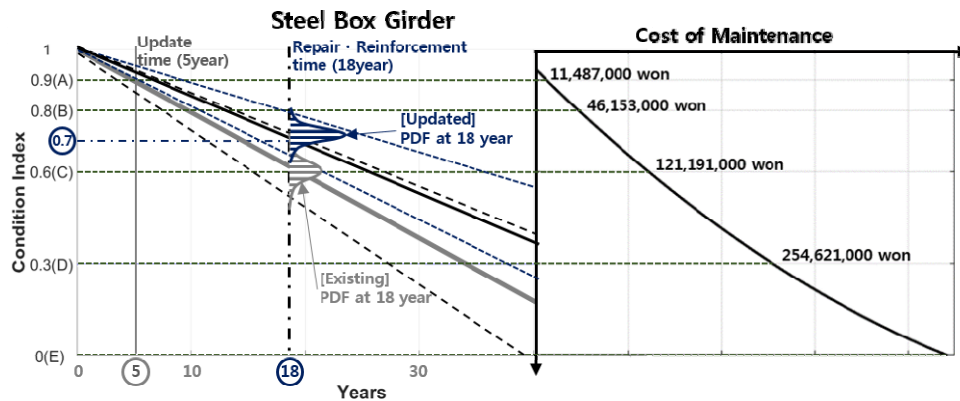


Fig. 14. Case 2 : Updating Deterioration Model and Cost of Maintenance by Grade

Table 4. Case 2 : Comparison between Total Maintenance Cost of Existing and Updating Scenario at 18 Years

Case 2	$C_{MAL,EXI}^{TOT}(18)$	$C_{MAL,UP}^{TOT}(18)$
Total maintenance cost	116,900,000 won	94,955,000 won

모델에 따른 발생 가능 시나리오를 나타낸다. 5년에서 업데이트를 통해 대상 교량 부재의 갱신된 상태예측모델( $\mu_3, \sigma_3$ )을 Eq. (11)을 이용하여 산출하고, 업데이트 열화모델이 목표한 관리수준(B-C등급 사이(0.7))에 도달하는 시기(12년)에 보수보강공법 및 비용을 고려한다. 위에서 언급한 바와 같이 모니터링을 통해 대상 교량의 강박스 거더의 열화가 기존 대비 더욱 빠르게 진전된다는 정보를 알게 되고, 이에 따라, 보다 정확히 목표한 관리수준(B-C등급 사이(0.7))에 도달시점(12년)을 산출하게 된다. 12년에서 업데이트 열화모델의 보수보강 적용 확률( $P_{MAL,UP}(t_i)$ )과 매칭되는 보수보강공법 비용( $C_{MAL,UP}(t_i)$ )의 곱으로 1회 해당 등급(0.7)에서의 보수보강비용을 산출하였다.

Table 5의 결과, 모니터링 업데이트 전과 후의 14년에서 각각의 총 유지관리비용을 Eqs. (15) and (16)에 근거하여 산출하였는데

약 22%의 비용 절감 효과가 발생됨을 알 수 있다. 업데이트 평균 상태( $\mu_3$ )가 기존 예측 상태( $\mu_1$ )보다 좋지 않은 경우에 이러한 유지관리비용 절감(-22,000천원)이 발생한 원인은 다음과 같다.

센서노드 기반 모니터링 시점(5년)에서 베이지안 업데이트를 통해 대상 강박스 거더의 상태가 기존 상태보다 양호하지 못하다고 판단하게 되고, 업데이트 상태가 목표한 관리수준(B-C등급 사이(0.7))에 도달하는 시기(12년)를 보다 정확히 예측할 수 있다. 모니터링 기반 대상 구조물의 상태를 보다 정확히 예측할 시, 기존 시나리오의 경우 실제 강박스 거더의 상태를 예측하지 못해 14년에서 C등급에 가까운 1회 보수보강 비용이 발생하는데 비해, 업데이트 상태 모델 기반 유지관리 시나리오를 따를 경우 12년에서 B-C등급 사이(0.7) 해당하는 1회 보수보강 비용이 발생된다.

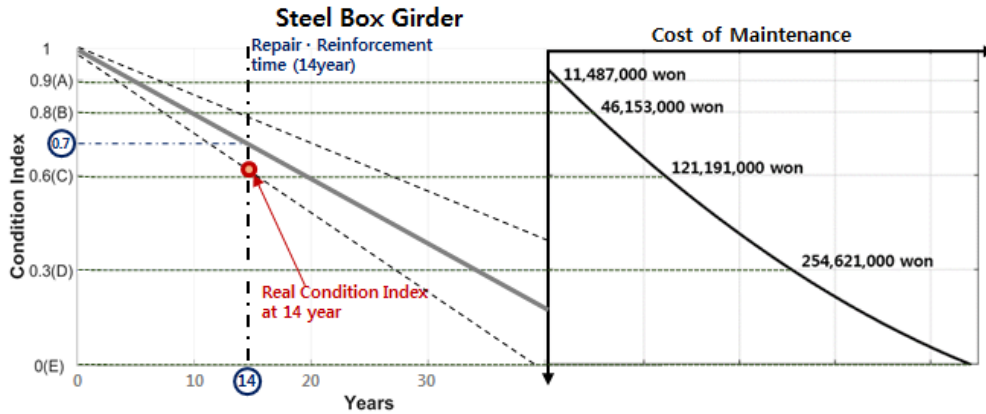


Fig. 15. Case 3 : Existing Deterioration Model and Cost of Maintenance by Grade

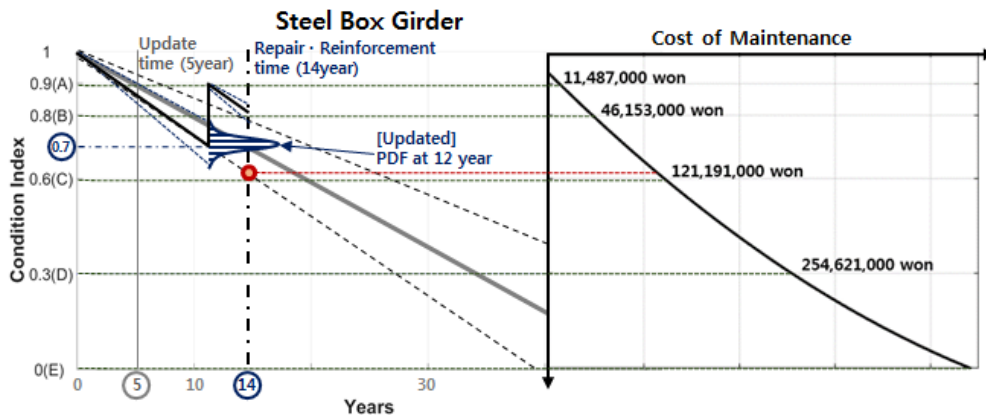


Fig. 16. Case 3 : Updating Deterioration Model and Cost of Maintenance by Grade

Table 5. Case 3 : Comparison between Total Maintenance Cost of Existing and Updating Scenario at 14 Years

Case 3	$C_{MAL,EXI}^{TOT}(14)$	$C_{MAL,UP}^{TOT}(14)$
Total maintenance cost	101,330,000 won	79,294,000 won

## 5. 결론

본 논문에서는 교량 상태예측모델 개발과 센서노드 기반 모니터링을 통해 얻어진 데이터 결과를 베이지안 기법을 고려하여 확률적으로 결합한 업데이트된 상태예측모델 기반 예방유지관리가 기존의 반복주기적인 점검 기반 현행유지관리 대비 비용 효율성 측면에서 유리함을 제안하였다. 실제 대상 교량(부재)의 보다 정확한 상태를 예측하여 불필요한 시기의 보수보강 비용을 줄일 수 있고, 이를 통해 교량 운영단계에서의 목표수명 기반 체계적·효율적인 유지관리가 가능할 것으로 판단되며, 이러한 연구를 통해 얻은 결론은 아래와 같다.

- (1) 교량 운영단계 시 모니터링 업데이트 기반 발생 가능한 유지관리 시나리오(Case 1~3)를 제시하고, 영종대교 특정 부재(강박스 거더)에 적용함으로써 관리수준(등급) 설정에 따른 베이지안 업데이트 유무로 발생된 비용의 차이를 확인하였다. 이러한 비용의 차이는 본 연구에서 고려한 강박스 거더의 등급별 유지보수비용(Fig. 10)이 낮은 등급(D, E등급)으로 갈수록 2차 곡선의 경향으로 증가하기 때문인 것으로 분석하였다.
- (2) 본 연구에서 고려한 유지관리비용 산정 예시(4.3절)에 따르면 교량의 관리수준(등급)을 B-C등급 사이(0.7)로 정하고 특정시점에서 유지관리비용을 발생시켰을 때, 특정 시점(5년)에서 베이지안 업데이트 시 기존 상태예측모델의 기술기보다 가파른 기울기 경향을 갖는 Case 3에서 약 22%의 유지관리 비용 절감 효과를 산정하였다. 이는 피로 균열과 같이 열화 초기에 타 손상유형 대비 점검이 어려운 손상유형을 검출하고, 사후 손상 발생을 미리 예측하여 1회 예방적 보수보강수행에 따른 결과로 분석하였다.
- (3) 본 모니터링 업데이트 기반 유지관리 시나리오 모델은 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 업데이트 기반 유지관리 시나리오 모델은 현행 인력기반 유지관리와 비교했을 때, 초기 열화의 원인을 판단하지 못해 발생 가능한 막대한 보수보강비용을 절약할 수 있을 것으로 기대한다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설기술A01)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Ang, A. and Tang, W. (2007). (2<sup>nd</sup> edition) *Probability concepts in Engineering : Emphasis on applications in Civil & 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, H. J., Park, H. M., Kong, J. S., Zi, G. S. and Kim, G. S. (2009). "Development of a successive LCC model for marine RC structures exposed to chloride attack on the basis of bayesian approach." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 3, pp. 359-366 (in Korean).
- 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).
- Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) (2013). *Bridge life-span extension using ICT, partial replacement and low-carbon materials*, 18SCIP-B066018-06 (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).
- 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).
- Sun, J. W., Park, K. H., Kwang, J. K., Kong, J. S. and Park, D. H. (2010). "Study on bayesian probability model for estimation of bridges performance." *Proc. of Conf, KSCE*, pp. 1345-1348.