

교량의 유지관리를 위한 사용수명 정의, 종료 기준, 추정

정유석¹, 김우석^{2*}, 이일근³, 이재하⁴, 김진광⁵

Definition, End-of-life Criterion and Prediction of Service Life for Bridge Maintenance

Yo-Seok Jeong¹, Woo-Seok Kim^{2*}, Il-Keun Lee³, Jae-Ha Lee⁴, Jin-Kwang Kim⁵

Abstract: The present study proposes the definition of service life and the end-of-life criterion for bridge maintenance. Bridges begin to deteriorate as soon as they are put into service. Effective bridge maintenance requires sound understanding of the deterioration mechanism as well as the expected service life. In order to determine the expected service life of a bridge for effective bridge maintenance, it is necessary to have a clear definition of service life and end-of-life. However, service life can be viewed from several perspectives based on literature review. The end of a bridge's life can be also defined by more than one perspective or performance measure. This study presents definition of service life which can be used for bridge maintenance and the end-of-life criterion using the performance measure such as a damage score. The regression model can predict an average service life of bridges using the proposed end-of-life criterion.

Keywords: Bridge maintenance, End-of-life criterion, Regression model, Service life

1. 서 론

국내 교량은 관리수량의 증가(Fig. 1)와 함께 교량의 노후화가 진행되고 있다. 이에 따라 사용수명을 연장시키기 위한 점검, 진단, 보수, 보강, 개량 등의 적절한 유지관리가 절실히 요구되고 있다. 1980년 후반부터 저유가저금리·저달러 라는 3저 호황에 힘입어 매년 10%이상의 고도 경제 성장과 함께 사회기반 시설이 집중적으로 건설이 시작되어 2000년 초반 까지 지속적으로 건설이 이루어 졌다(Fig. 2). 1985~2005년 사이에 건설된 교량은 전체 교량의 63%(약 19,000개소)를 차지하고 있다. 고도 경제성장과 함께 집중적으로 건설된 이들 교량은 10여년 후 부터는 노후화가 시작되며 20여년 후부터는 급속도로 진행될 것이다. 특히 보수·보강 물량이 많아 질 것으로 예상되는 공용연수 30년 이상의 교량은 현재 약 2,500개소(8%)지만 10년 후 약 9,600개소(32%), 20년 후 약

21,000개소(71%)로 급격하게 증가하게 된다. 교량 노후화로 인하여 필요한 유지관리·개량비용도 비약적으로 증가하게 될 것이다. 이러한 문제에 대응하기 위하여 교량의 효율적인 유지관리를 위한 합리적이고 체계적인 유지관리전략이 필요하다.

교량의 유지관리 전략에서 교량의 사용수명은 예산, 인력, 조직 등의 분배와 계획을 위해 필요한 개념으로 유지관리 절차에 반드시 필요한 요소이다. 하지만, 고속도로 교량의 경우, 유지관리 목적의 교량 사용수명은 '내구수명'으로 칭해지고 있으며, '최근 10년간 개축교량의 평균 공용연수'로 정의하고 있다(KEC, 2011). 실제 교량의 사용수명은 교량의 준공부터 교통차단 시점까지로 볼 수 있으나, 현재의 '내구수명'은 교량의 수명종료 원인에 대한 명확한 규정을 하지 못하고 있다. 교량의 유지관리 목적에서의 수명종료는 교량의 노후화로 인한 구조성능의 하락으로 예상할 수 있으나, 국내 고속도로 교량의 경우 사회적인 요인(예, 노선변경, 교통용량초과 등)에 의한 수명종료가 대부분이므로 유지관리 목적으로 사용하기에는 무리가 따른다. 따라서 유지관리 목적을 위한 교량수명 정의가 필요하며 이를 본 논문에서는 '사용수명(Service Life)'이라 칭하고 이에 대한 정의를 제안하고자 한다.

효율적인 유지관리를 위한 합리적이고 체계적인 유지관리 전략을 위해서 사용수명 추정에 사용되는 교량의 사용수명 종료시점을 명확히 할 필요가 있다. NCHRP 713 보고서

¹정회원, 충남대학교 건설방재연구소 박사후연구원

²정회원, 충남대학교 토목공학과 부교수, 교신저자

³정회원, 도로교통연구원 구조물연구실 책임연구원

⁴정회원, 한국해양대학교 건설공학과 조교수

⁵정회원, 한국도로공사 재난안전처 처장

*Corresponding author: wooseok@cnu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Chungnam National University

•본 논문에 대한 토의를 2016년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

(2013)에서 ‘수명예측’은 교량의 수명시작과 수명종료사이 시간의 길이를 분석하는 것으로서 먼저 ‘언제’ 수명종료가 발생하는지 판단하는 기준인 수명종료(End-of-Life)를 정의해야 한다(Thompson et al., 2012). 수명의 시작은 교량의 공용시작일이 사용되는 것이 일반적이나 수명종료는 어떤 수명종료를 고려하는가에 따라 다르게 나타난다. 교량의 운용 시작시점은 교량의 개통과 같이 명확하게 정해지는 반면 교량의 수명종료는 다양하게 볼 수 있다(예, 물리적 수명, 기능적 수명, 경제적 수명 등). 교량의 성능부족으로 인한 보강 또는 교량의 노선변경, 사용량 감소와 같은 기능성 저하로 인한 폐쇄, 또는 화재, 충돌, 지진과 같이 극단적인 상황과 같이 다양한 원인으로 발생이 가능하다. 그러나 유지관리의 목적으로 모든 수명종료 유형을 고려하는 것은 부적절하므로 유지관리의 목적에 부합하는 구체적이고 명확한 교량의 사용수명 종료 시점이 필요하다.

본 논문에서는 교량의 유지관리를 위한 사용수명의 정의 및 수명 종료를 제안하고자 한다. 먼저 국내외 교량의 사용수명 용어 현황을 바탕으로 국내 교량의 사용수명 개념을 정립한다. 그리고 사용수명 종료 제안을 위해 국내외 수명종료 기준을 분석하고 교량에 발생 가능한 수명 종료 유형을 분류하여 유형을 결정한다. 사용수명 종료 제안 시, 교량의 결함도

점수 산정 방법을 활용하여 주요 부재 상태점수에 따른 교량의 결함도 점수에 대한 민감도 분석을 실시하여 제안된 교량의 사용수명 종료 시점의 타당성을 검토하고자 한다. 마지막으로 제안한 사용수명 종료 시점을 활용하여 현재 고속도로 교량의 평균 사용수명을 추정하고자 한다.

2. 교량의 사용수명 현황

2.1 국내외 교량의 사용수명 현황

교량의 유지관리를 위해서는 명확한 교량의 사용수명 정의가 선행되어야 한다. 유지관리를 계획, 실행하는 교량 관리자가 고려할 수 있는 가장 단순한 수명의 개념은 교량이 몇 년 이상 사용가능한지, 그리고 유지관리 활동을 통해 교량의 사용수명이 몇 년 더 지속 가능한지를 아는 것이다. Lemer(1996)는 사회기반시설의 수명관련 연구에서 ‘수명은 대상이 반드시 교체되어야 할 때까지의 시간’을 말하는 것으로 정의하였다. 반드시 교체되어야 할 사유들로서는 사용기준 미달, 열화, 적용규정의 변화, 수요자의 요구가치 변화 등을 들었다.

교량의 수명과 관련하여 국내 문헌에서 언급하는 수명의 개념을 살펴보면, 현재 도로공사에서 사용되는 ‘내구수명’은 최근 10년간 개축교량의 평균 공용연수로 나타내고 있다(KEC, 2011). 하지만, 내구수명이라는 용어는 다른 문헌에서는 도로공사에서 사용하는 것과 달리 정의되고 있다. 특히, 콘크리트 구조기준(2012)에 따르면 ‘내구수명’은 ‘성능저하인자가 최외측 철근 까지 도달하는 시간’으로 정의되고 있다(KCI, 2012). 또한 도로교 설계기준(2012)에서의 ‘설계수명’은 ‘고려하는 설계하중이 통과 할 것으로 예상되는 시간’으로

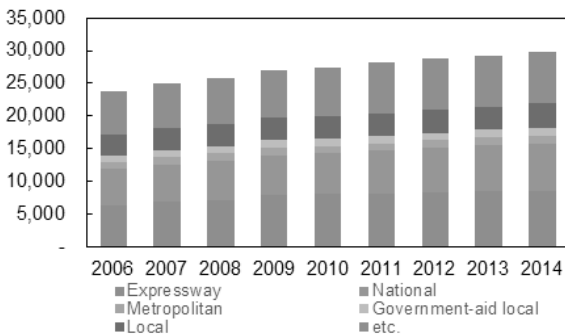


Fig. 1 Increase in numbers of bridges(KOSIS, 2015)

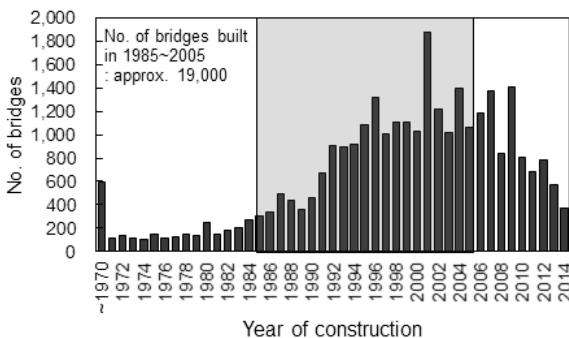


Fig. 2 Year of bridge construction(KOSIS, 2015)

Table 1 Definitions of bridge service life

Reference	Definition
SHRP2 (2013)	The time duration during which the bridge element, component, subsystem, or system provides the desired level of performance or functionality, with any required level of repair and/or maintenance Target Design Service Life: The time duration during which the bridge element, component, subsystem, and system is expected to provide the desired function with a specified level of maintenance established at the design or retrofit stage.
AASHTO LRFD (2010)	The period of time that the bridge is expected to be in operation.
Eurocode 0 (EC0, 2002)	Design Working Life: Period for which a structure or part of it is to be used for its intended purpose with anticipated maintenance but without major repair being necessary

정의 되어 있다(MOLIT, 2012b).

국외에서 사용되는 교량의 사용수명 현황(Table 1)을 살펴 보면 SHRP2보고서(2013)에서는 교량의 ‘사용수명(Service Life)’을 교량의 구성부재, 하부시스템, 또는 시스템이 원하는 수준에 도달하지 못하게 되는 기간으로 정의하고 있으며 ‘목표 사용수명(Target Service Life)’는 교량의 구성부재, 하부시스템, 또는 시스템이 원하는 기능을 수행할 것으로 기대되는 기간으로 정의하였다. AASHTO LRFD(2010)에서는 ‘사용수명’을 교량이 운용될 것으로 기대되는 기간으로 정의하였으며, Eurocode 0(2002)에서는 ‘설계사용수명(Design Working Life)’을 큰 유지관리활동 없이 구조물이 예상된 유지관리활동을 통해 의도된 기능을 수행할 것으로 예상되는 기간으로 정의하기도 한다.

이처럼 현재 국내외의 문헌에서 소개되어 있는 교량의 사용수명(내구수명 또는 설계수명)은 목적이 대부분 설계에 있고, 유지관리 목적의 사용수명일지라도 구체적인 수명종료 시점이나 원인에 대한 기술이 부족하다. 따라서 유지관리를 위한 국내 교량에 대한 구체적인 사용수명에 대한 개념 정립이 필요하다.

2.2 교량 사용수명 용어 제안

교량의 유지관리를 위해서는 그에 부합하는 사용수명에 대한 구체적인 정의가 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 교량의 사용수명을 ‘교량의 상태, 안전성 또는 다른 기능이 일정이하로 감소하는 때까지의 기간’으로 정의 하는 것이 적절할 것으로 보인다. ‘교량이 의도한 기능을 수행하는 기간’을 사용수명으로 정의할 경우 교량의 수명종료 시점이 명확하지 않다는 문제가 발생한다. 예를 들어 ‘구조적 결함이 발생하였지만 아직 공용중인 교량’의 경우 교량의 사용수명은 교량이 관리자에 의해 공용 중지되거나 또는 교량이 붕괴하는 시점이 될 것이다. 이는 교량의 관리자의 ‘주관적’인 판단 또는 ‘원치 않는 사건’에 의해 교량의 수명종료가 발생하는 것으로 이것 또한 수명종료시점이 명확하지 못하다.

반면에 교량의 사용수명을 ‘교량의 상태, 안전성 또는 다른 기능이 일정이하로 감소하는 때까지의 기간’으로 정의할 때는 수명종료시점이 이전 정의 보다 명확해진다. NCHRP 713 보고서(2012)에서는 교량의 구성부재의 수명종료를 NBI Rating 이 일정 이하로 떨어지는 때(NBI Rating 3~5)로 정의하고 각 수명종료 기준에 따라 사용수명을 산정하였다. 본 연구에서도 교량의 성능지표(구조적 지표 또는 사용성 지표 또는 그 외)가 일정이하로 감소하였을 때 사용수명 종료로 정의하여 교량사용수명 종료 시점과 원인을 명확히 하고자 한다. 교량의 사용수명을 다음과 같이 정의하였다.

교량의 사용수명이란:

“교량이 **유지관리**를 통해 **요구하는 수준의 기능**을 발휘하는 **기간**”

‘**유지관리**’의 정의:

- 유지관리는 점검 및 보수, 보강을 의미한다.
- 보수, 보강은 현재 기술로서 적용가능하며 보편적인 시점에서 크지 않은 범위의 유지관리활동을 말한다.

‘**요구하는 수준의 기능**’의 정의:

- 교량은 현재 운용되는 차량에 의해 발생하는 하중을 지지할 수 있는 내하력을 보유하여야 한다.
- 교량 전체의 상태등급이 ‘D’ 등급 이상을 만족하여야 한다.
- 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침-교량편(MOLIT, 2012)에서 규정하는 교량의 주요부재인 상부구조 및 하부구조의 상태등급이 ‘d’ 등급 이상을 만족하여야 하며, ‘중대한 결함’이 발생하지 않아야 한다.

‘**기간**’의 정의:

- 기간은 사용 시점부터 요구하는 수준의 성능을 확보할 수 있는 시점 또는 예측수명을 말한다.

3. 교량의 수명 종료

3.1 한국과 미국의 교량 수명 종료 기준

3.1.1 한국

한국의 교량유지관리는 ‘안전점검 및 정밀안전진단 세부지침-교량편(이하 세부지침)’에 의해 이루어진다(MOLIT, 2012). 교량의 상태평가 또한 세부지침에 규정되어 있는 결함도 점수 산정방법을 활용하여 이루어진다. 산정된 결함도 점수는

Table 2 Bridge condition ratings in Korea(MOLIT, 2012)

Condition State	Descriptions
A	Perfect, no problems
B	Minor problems in secondary elements, needs of small repairs for improvement in durability
C	Minor problems in primary elements or extensive problems in secondary elements, needs of repairs in primary elements or of rehabilitations in secondary elements
D	Problems in primary elements, needs of emergency repairs/rehabilitations
E	Serious problems in primary elements, out of service, needs of rehabilitations/replacements

A~E등급으로 구분되며 각 등급이 의미하는 교량의 상태는 Table 2와 같다.

세부지침에 따르면 A에서 C등급까지는 사용에 제한이 없으며 D등급은 사용제한여부를 검토하지만 사용금지 는 의무 사항이 아니다(MOLIT, 2012). 그러나 E등급의 교량은 사용이 즉시 금지된다. 즉 교량의 상태등급 기준으로 등급이 D등급에 도달하였을 때 사용제한 여부를 결정해야 하므로 대부분의 교량이 E등급에 이르기 전 수명종료가 결정될 수 있다. 이는 정기점검의 주기가 6개월인 것을 감안할 때, 실질적으로 교량의 사용제한(수명종료)은 D등급 내에서 발생 한다는 의미이다.

3.1.2 미국

미국 교량의 상태등급 산정은 ‘Bridge Inspector’s Reference Manual(이하 BIRM)’을 기준으로 이루어진다(FHWA, 2012). BIRM에 따르면 교량의 상부구조, 하부구조 및 교량 바닥판은 NBI Condition Rating(이하 NBI rating)을 기준으로 0에서 9등급까지, 10개의 등급으로 분류한다(Table 3).

NCHRP 713 보고서(2012)에 따르면, NBI rating 기준 4등급 이하의 교체를 위한 계획(Funding)에 착수하지만 예산 부족 등으로 인해 실제로는 NBI Rating 3등급에서도 수명 종료

가 발생하기도 한다(Thompson et al., 2012). 실제로 I-35W Mississippi River Bridge의 경우 주요부재(Deck, Superstructure, Substructure)의 NBI rating이 4등급 이하로 산정(안전미달 교량, Structural Deficient) 되었지만 교량의 사용제한 없이 계속 사용하여 붕괴된 사고가 있었다. 이는 NBI Rating 기준 4등급 이하를 수명종료 기준으로 사용 가능함을 의미한다. 실제로도 NCHRP 713 보고서(2012)에서, NBI Rating 기준 3, 4, 5등급을 수명종료 기준으로 삼고 수명분석을 수행하였다(Thompson et al., 2012).

본 장에서는 문헌조사를 통해 미국과 한국의 교량 수명 종료 시점을 분석하였다. 조사 대상인 두 나라 모두 교량의 성능 지표(결함도 점수, NBI rating)를 활용함으로써 교량 수명 종료의 객관성을 확보하였다. 그리고 수명 종료 시점을 어느 한 시점으로 특정 하지 않고 범위로 한정하는 것으로 보아 사용 수명 종료가 아직은 한 시점으로 특정 하는데 있어 공감대를 얻지 못함을 알 수 있었다. 수명 종료 시점을 특정 하는 것이 쉽지 않음에도 불구하고 필요한 이유는 이런 모호한 수명종료 기준은 I-35W Mississippi River Bridge 붕괴와 같은 참사를 낳을 뿐만 아니라 교량의 유지관리에 있어 교량의 생애주기를 활용한 합리적인 유지관리 전략 구축을 어렵게 한다. 따라서 다음 장에서는 교량에 발생 가능한 수명종료 유형을 분석하여 유지관리에 적합한 교량의 사용수명 종료 기준을 제안 하도록 하겠다.

Table 3 NBI condition ratings in U.S.(FHWA, 2012)

NBI Rating	Descriptions
N	Not Applicable
9	As-built condition
8	No problems noted
7	Some minor problems
6	Structural elements show some minor deterioration
5	All primary structural elements are sound but may have minor section loss, cracking, spalling or scour
4	Advance section loss, deterioration, spalling or scour
3	Loss of section, deterioration, spalling or scour have seriously affected primary structural components. Local failures are possible. Fatigue cracks in steel or shear cracks in concrete may be present.
2	Advanced deterioration of primary structural elements. Fatigue cracks in steel or shear cracks in concrete may be present or scour may have removed substructure support. Unless closely monitored it may be necessary to close the bridge until corrective action is taken.
1	Major deterioration or section loss present in critical structural components or obvious vertical or horizontal movement affecting structure stability. Bridge is closed to traffic but corrective action may put back in light service.
0	Out of service – Beyond corrective action.

3.2 교량에 발생 가능한 수명종료 유형

교량의 수명종료는 규정의 개정, 교량의 물리적 상태의 변화, 열화, 극단상황(Extreme Event)과 같이 다양한 원인에 의해 발생한다. 본장에서는 이러한 원인에 의해 발생하는 수명종료를 고찰하여 국내 교량에 적용 가능한 항목을 소개하고 적용가능성을 논의하고자 한다.

3.2.1 수명종료 유형 I : 극단상황에 의한 종료

첫 번째 수명유형은 대상이 화재, 충돌, 지진과 같이 극단상황(Extreme Event)에 의해 붕괴되면서 이루어진다면 교량의 수명과 수명종료는 Fig. 3(a)과 같이 모델링이 가능하다. 첫 번째 수명유형은 시간에 따른 열화나 성능감소는 중요하지 않거나 무시할 수 있는 수준인 대상에 적합하다. 이와 같은 경우는 교량의 구조부재보다는 사고가 발생하기 전에는 교체를 고려하지 않는 부재들의 수명종료(ex. 방풍벽, 방호벽 또는 교량 난간) 또는 지진, 홍수와 같은 극단상황에서의 교량의 생존 여부 평가에 더 적합할 것이다.

3.2.2 수명종료 유형 II : 규정 개정

두 번째 수명종료는 대상에 적용되는 기준(Standard)이 상

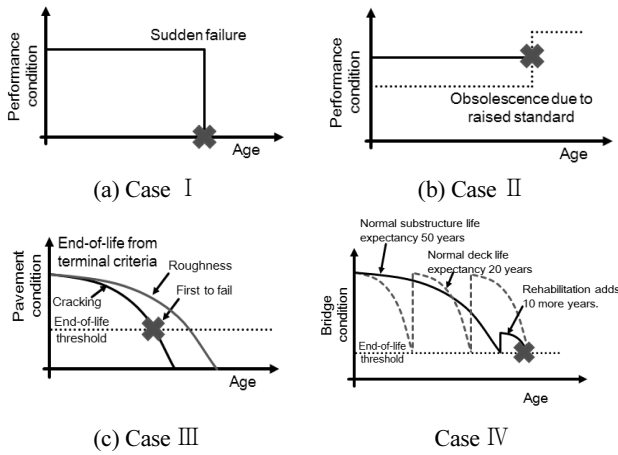


Fig. 3 End-of-life criteria

향되면서 대상의 요구조건이 변경된 기준에 미달될 경우 발생하는 수명종료이다. 이러한 요구조건은 구조적인 성능뿐만 아니라 교통량, 노선특성과 같은 사용성/기능성 요인일 수도 있다. 예를 들어 교량에 적용되는 하중기준이 DB-18에서 DB-24로 상향되면서 DB-18교량이 개축 우선순위로 배정되는 것을 들 수 있다(Fig. 3(b)).

3.2.3 수명종료 유형 III: 대상구조물의 성능 특성

세 번째 수명종료는 대상 시간에 따른 열화를 겪지만 확실한 결함상태나 관리자가 받아들이기 어려울 상태가 없을 경우이다. 이러한 대상의 수명종료는 최종적인 판단기준(Terminal Criteria) 또는 성능 특성(Performance Characteristics)으로 결정할 수 있다. 네 번째 유형의 수명종료는 교량과 가장 유사한 수명종료 유형이지만 명확한 수명종료기준이 필요하다. 이와 같이 수명종료의 불확실성 때문에 NBI rating과 같은 대상의 성능특성을 수명종료로 가정한 연구가 이루어지고 있다. 이러한 수명종료 유형은 도로 포장, 교량 구성부재에 적용 가능한 유형의 수명종료이며 때로는 ‘구조적 수명’으로 불리기도 한다(Fig. 3(c)).

3.2.4 수명종료 유형 IV: 대상구조물 부재의 교체가능

네 번째 수명종료 유형은 세 번째 수명종료 유형의 확장으로, 대상의 일부가 시간에 따른 열화를 겪지만 구성부재가 교체 가능하다면 대상의 수명은 교체 가능한 부재에 의해 결정될 것이다. 또한 관리자의 유지관리 활동에 의해 열화를 지연시킬 수 있다면 관리자가 바라는 최적의 수명종료 시점으로 연장 가능할 것이다(Fig. 3(d)). 이러한 유형의 수명종료는 교량 또는 복잡한 시스템으로 이루어진 대상에 적합하다. 하지만, 이러한 유형의 수명종료 시점을 설정하기 위해서는 각 단계에서 이루어지는 유지관리활동으로 인한 교량의 상태등

급의 향상정도를 정확히 파악하는 것이 필요하나 현실적으로는 많이 축적된 데이터가 필요하므로 현재 이를 교량에 적용하는 것은 불가능할 것으로 판단된다.

본 장에서는 교량에 발생 가능한 수명종료 유형을 살펴보았다. 살펴본 바와 같이 다양한 수명종료 유형이 존재하나 적용 대상에 따라 달리 적용되어야 할 것이다. 본 논문에서는 유지관리를 계획하고 실행하기 위한 교량의 사용수명 산정이 필요하므로 수명종료 유형 IV가 가장 적절한 것이나 현실적으로 사용가능한 데이터의 부족으로 인해 적용이 불가능할 것이다. 따라서 본 연구에서는 수명종료 유형 III에 의해서 수명종료를 설정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 하지만 유형 3의 경우는 명확한 수명종료 기준이 필요하다. 다음 장에서는 교량의 성능지표(예, 결함도 점수)를 사용하여 수명종료 기준을 제시하고 민감도 분석을 통하여 제시한 기준의 타당성을 검증 하도록 하겠다.

3.3 사용수명 종료 제안

지금 까지 사용수명에 관해서 명확한 정의 없이 사용하였다. 만약 사용제한을 교량의 수명종료라 한다면 세부지침에 의하면 D등급 이하에서 발생 한다고 할 수 있다. 이런 모호한 수명종료 기준은 교량의 안전성을 저하시키고 효율적인 유지관리 체계 구축을 어렵게 한다. 따라서 교량의 수명종료가 ‘언제’ 일어나는지에 대한 기준을 마련 할 필요가 있다.

3.3.1 교량의 결함도 점수 산정 방법

국내에서는 교량의 결함도 점수를 교량의 상태평가 성능 지표로 활용하고 있다. 교량의 결함도 점수 산정 방법은 세부지침(MOLIT, 2012)에 자세하게 기술되어 있으며 이번 장에서는 세부지침에 규정되어 있는 교량의 결함도 점수 산정 방법을 간략하게 소개 하도록 하겠다.

교량의 결함도 점수 산정 방법은 먼저 경간별로 각 개별부재의 최저등급을 집계하여 개별부재 상태평가에 반영한다. 또한 각 경간 내에 해당 부재가 여러 개 있는 경우(예: 거더, 바

Table 4 Criteria for evaluating condition rating of bridge/element based on damage score(MOLIT, 2012)

Condition State	Damage Index	Damage Score
A(a)*	0.1	$0 \leq X < 0.13$
B(b)	0.2	$0.13 \leq X < 0.26$
C(c)	0.4	$0.26 \leq X < 0.49$
D(d)	0.7	$0.49 \leq X < 0.79$
E(e)	1.0	$0.79 \leq X$

*A(a) represents that ‘A’ is the condition rating of the bridge and ‘a’ is the condition rating of the bridge element.

단판, 가로보 등) 각 부재의 상태평가 기준 중에서 각 부재의 최저값을 해당 경간의 상태평가 결과로 산정하게 된다. 전체 교량의 상태평가는 전 경간의 부재 상태를 부재별 가중치를 적용하여 평균한 값인 환산 결합도 점수에 의해 이루어진다. 환산 결합도 점수는 시설물 전체의 상태평가를 산정하는 기준이 되는 점수이며 결합도 점수 범위에 따른 교량의 상태등급은 Table 4와 같다.

3.3.2 민감도 분석

한국의 교량유지관리는 세부지침(MOLIT, 2012)에 의해 이루어지며 세부지침에 따르면 교량의 상태등급은 A에서 E까지 5개 등급으로 구분 된다. 상태등급을 활용한 교량의 사용제한 기준에 따르면 교량의 사용제한은 E등급에서는 즉각적으로 이루어지며 D등급에서 사용제한여부를 검토 하는 수준이다. 따라서 실제 교량의 사용제한이 결정될 수 있는 상황에 대한 민감도 분석을 통하여 교량 사용제한 시점의 상태등급(결합도 점수)에 대한 기준을 명확히 하고자 한다. 이를 위해 세부지침에 규정 하고 있는 주요부재(바닥판, 거더, 교대·교각)의 등급에 따른 교량전체의 등급변화에 대한 민감도 분석을 실시하여 명확한 수명종료 기준을 제안하고자 한다.

교량의 수명종료 시점을 결합도 점수를 활용하여 제안하기 위해 주요부재의 결합도 지수에 따른 교량의 결합도 점수 민감도 분석을 실시하였다. 일반적으로 세부지침(MOLIT, 2012)에 따른 교량의 상태등급이 교량의 개축이후 C등급으로 판정되었을 경우에 보수를 실시하며 보강의 경우 개축이후 상태등급이 지속적으로 감소하다가 D등급에 이르렀을 경우 실시한다. 또한 재보수 및 재보강의 경우는 개축 후 최초 보수 보강이후 다시 부재의 열화가 진행되어 보수(상태등급C(c)), 보강(상태등급D(d))가 필요할 때 이루어진다. Tables 5과 6은 2014년 기준 고속도로 교량의 상태등급별 공용연수와 주요부재의 최초 보수보강 시 교량의 공용연수를 나타내고 있다. Tables 5과 6에 따르면 상태등급이 C등급인 교량의 평균 공용연수는 33.8년이고 주요부재의 최초 보강 시기는 최대 25년으

Table 5 Average age of expressway bridges corresponding to condition rating in 2014

	A	B	C	D
Avg, age (yr)	8.8	17.4	33.8	-

Table 6 Age at 1st repair/rehabilitation for primary elements (KEC, 2003)

	Deck	Girder	Abutment/Pier
1 st repair (yr)	15-18	9-10	12-17
1 st rehabilitation (yr)	20-25	19-20	23

로 33.8년 이전에 실시되었음을 알 수 있다.

교량 전체 등급이 C등급으로 부여 받기 위해서는 보수적으로 추정 하였을 경우 각각의 부재 상태등급이 최소한 c등급을 부여 받아야 한다. 따라서 민감도 분석 시 주요부재를 제외한 나머지 부재의 등급은 c로 부여하고 주요부재의 등급은 d 또는 e를 부여하여 주요부재의 등급변화에 따른 전체교량의 상태등급변화의 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 분석은 효율을 감안하여 세부지침에 구분되어 있는 세 가지 구조형식(슬래브교량, 거더교량, 라멘교량)을 대상으로 실시하였다.

Table 7 그리고 Figs. 4와 5는 주요부재의 등급을 d 또는 e로 부여 할 때 교량전체의 상태등급 변화에 대한 민감도 분석 결과를 보여 주고 있다.

주요부재의 등급을 d 또는 e로 부여 할 때 교량전체 결합도 점수는 0.63와 0.73사이에 분포함을 알 수 있었다. 따라서 교량의 수명종료는 교량전체의 결합도 점수가 D등급의 중간값인 0.64에 도달 하였을 때 수명종료가 발생하는 것으로 간주 될 수 있다. 지침에 따르면 교량의 상태등급이 D등급에 도달 하면 교량의 사용제한을 논의 할 수 있으며 E등급에 도달하면 사용제한을 즉시 실시하므로, 실제로 교량의 사용중지는 보

Table 7 Results of sensitivity study

	Combinations	Damage Score
Girder bridge	ddd*	0.55
	edd	0.61
	ded	0.61
	dde	0.59
	eed	0.67
	ede	0.65
	dee	0.65
	eee	0.71
	Average	-
Slab bridge	dd**	0.56
	ed	0.66
	de	0.62
	ee	0.72
	Average	-
Rahmen bridge	dd	0.62
	ed	0.74
	de	0.73
	ee	0.84
Average	-	0.73

*ddd represents damage indices of three primary elements (deck, girder, and abutment/pier)

**dd represents damage indices of two primary elements (deck and abutment/pier)

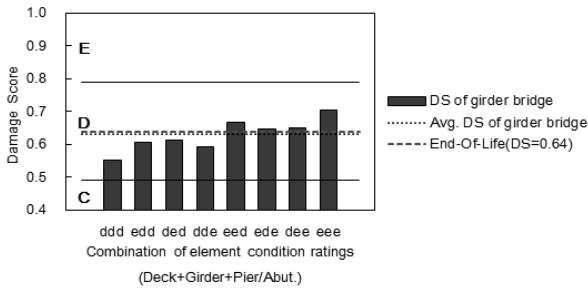


Fig. 4 Results of sensitivity study on a girder bridge

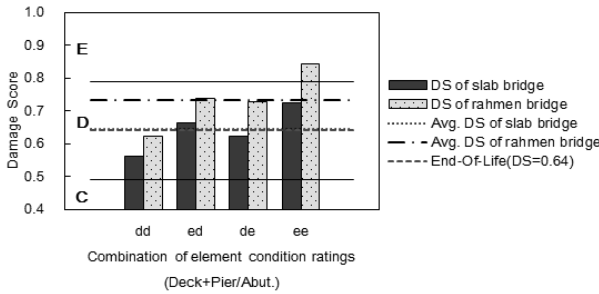


Fig. 5 Results of sensitivity study on slab/rahmen bridges

수적으로 D등급의 중간값인 0.64에서 이루어진다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지침의 제안과 민감도 분석의 결과를 바탕으로 교량의 사용수명 종료로 상태등급 D등급의 중간값인 결함도 점수 0.64로 제안하고자 한다.

4. 국내고속도로 교량 수명 추정

시간에 따른 교량의 물리적인 상태, 즉 ‘성능’을 산정하는 일은 불가능에 가깝다. 교량 노후화, 열화, 손상 매커니즘은 어떻게 발생하는지에 대해 많은 연구가 있지만 아직까지 시간에 대한 교량의 성능 변화를 예측하는 것은 불가능한 경우가 많다. 사람의 수명 예측시 사용하는 생명표를 교량에 적용할 경우 비교적 정확한 예측이 가능하나 사람과 같이 대상표본이 많아야 한다는 제한사항이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 NCHRP 713 보고서에서는 통계적 기법으로 회귀분석과 생존함수를 사용하여 교량의 사용수명을 산정하였다 (Thompson et al., 2012). 회귀분석의 경우 시간경과에 따른 교량의 상태등급을 곡선식을 이용하여 나타내는 방법으로 가장 간단하면서 적용하기 쉬운 장점이 있으나, 전체 수명기간에

대한 산포도가 작은 자료가 있어야 좋은 결과를 나타낼 수 있다. 생존함수의 경우 먼저 교량의 구성 부재의 수명자료를 수집하여 시간에 따른 교량 구성 부재 성능을 생존함수로 모델링 한 후 이를 통하여 교량의 수명을 예측하였다. 생존함수를 이용한 교량의 수명추정은 교량이 시간에 따른 성능변화를 ‘확률적’으로 제공해 준다. 예를 들어 교량이 50년 후에도 공용중인 확률 등으로 정보를 제공한다. 하지만, 생존함수 방법의 경우에는 현재 국내교량의 경우 교체실적이 있는 부재에는 사용가능하나 사용수명 종료로 인한 개축실적이 전무한 국내 교량의 경우에는 적용이 불가능하다. 그리고 국내 고속도로 교량의 공용기간별 상태등급은 A등급에서 E등급까지 불규칙하게 분포하므로 시간에 따른 상태변화 이력곡선을 결정론적으로 산정하는 것은 합리적이지 않을 것으로 판단하였다. 따라서 본 논문에서는 회귀분석 방법을 통해 교량의 사용수명 산정을 수행하였다.

회귀분석 방법에 사용한 식(1)과 같다. 식(1)은 미국 AASHTO의 포장 상태를 예측하기 위해 개발된 식을 참조하여 결정하였다 (Patterson, 1987). 일반적으로 회귀분석에 사용되는 다항식의 경우 식(1)과 달리 교량의 초기상태, 수명종료 시 상태등급, 사용수명과 같은 정보를 파악하고 특정 하는데 어려움이 따른다. 반면에 식(1)은 이러한 정보를 직관적으로 파악하고 특정할 수 있는 유용한 회귀분석식 형태라 할 수 있다. 이러한 점들을 고려하여 본 연구에서는 식(1)을 사용하여 교량의 사용수명 산정에 사용하였다.

$$HI = I - (I - HI_{EOL}) \left(\frac{T_a}{T_{as}} \right)^\beta \quad (1)$$

여기서, HI = 교량의 건전도 지수(Health Index, $HI=1$ -결함도 점수), I = 건전도 지수곡선의 시작점, β = 곡선의 비선형형상계수, T_{as} = 평균사용수명, T_a = 교량의 공용년수, HI_{EOL} = 교량의 사용수명 종료 시 건전도 지수($HI_{EOL}=1-DS_{EOL}=1-0.64=0.36$)이다. I 는 교량의 건전도 지수곡선이 시작되는 지점이다. 세부지침(2012)에 따르면 교량구성부재의 상태평가 시 가장 최상의 등급인 ‘a’등급의 건전도 지수는 0.9점이므로 $I=0.9$ 가 된다. 회귀분석 방법을 통해 교량의 사용수명 산정을 수행하기 위해서는 교량의 상태이력정보가 반드시 필요하다. 본 논문에서는 Table 8와 같이 2004년부터 2013년까지 한국도로공사의 HBMS에 있는 교량의 상태정보를 사용하여 교량의 사용수명산정을 수행하였으며 사용수명 산정에 사용된 교

Table 8 Number of bridges used to predict average service life

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
No.	4,395	5,669	5,768	5,815	6,459	6,943	7,186	7,627	8,002	6,386

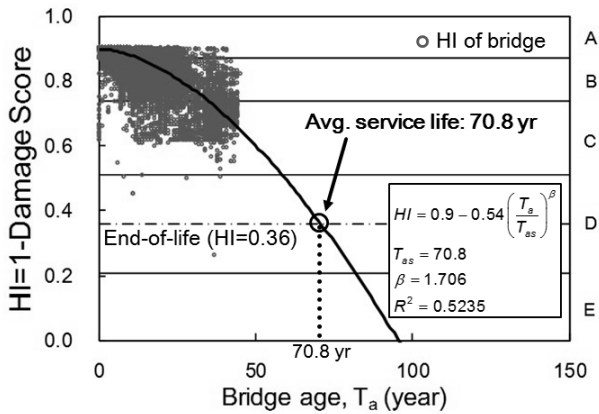


Fig. 6 Estimating average service life of highway bridges

량의 상태정보는 정밀(정기)점검 및 정밀안전진단의 결과로 산정된 교량의 건전도지수이다.

교량의 사용수명종료를 D등급의 중간값(HI = 0.36)으로 보았을 때, Fig. 6과 같이 교량 건전도지수 데이터를 식(1)을 이용한 회귀분석을 통해 평균교량건전도변화곡선을 도출할 수 있다. 이를 통해 현재 고속도로 교량의 평균 사용수명은 70.8년으로 추정 할 수 있다.

5. 결론

본 논문은 교량의 유지관리를 위한 사용수명을 정의하고 사용수명 종료 기준을 제안 하였다. 제안한 수명종료를 사용하여 현재 국내 고속도로 교량의 수명을 추정하였다. 이를 기초로 하여 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

- 1) 현재 사용하고 있는 교량수명의 문제점을 파악하고 유지관리활동을 위한 새로운 사용수명을 다음과 같이 정의하였다. 교량의 사용수명이란 “교량이 유지관리 통해 요구하는 수준의 기능을 발휘하는 기간”으로, 여기서 유지관리란 점검 및 보수, 보강을 의미 하며 요구하는 수준은 교량 및 부재의 상태등급이 “D(d)”이상을 의미한다.
- 2) 교량의 사용수명 종료를 명확하게 규정하기 위해 민감도 분석을 실시하였다. 민감도 분석을 통하여 교량의 사용수명 종료 기준을 제안 하였다. 지침(D등급 도달: 사용중지 고려, E등급 도달: 즉시 사용중지)과 민감도 분석을 바탕으로 교량의 사용수명 종료를 상태등급의 중간값인 결함도 점수(DS, Damage Score) 0.64 즉, 건전도지수(HI, Health Index) 0.36으로 제안하였다.
- 3) 회귀분석 방법을 사용하여 교량의 사용수명을 산정하였

다. 제안한 사용수명 종료 시점을 적용한 결과 현재 국내 고속도로 교량의 평균 사용수명은 70.8년으로 추정 하였다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통연구원과 충남대학교 학술연구비의 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사드립니다.

References

- AASHTO (2012), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, American Association for Highway and Transportation Officials, Washington D.C.
- EC0 (2002), Basis of structural design: British Standard, Eurocode 0, London: BSi, 2002.
- FHWA (2012), Bridge Inspector's Reference Manual, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation., Washington D.C.
- KCI (2012), Concrete Structure Design Standard, Korea Concrete Institute, Korea(in Korean).
- KEC (2003). Life cycle cost analysis(LCCA) for each type of expressway bridge, Korea Expressway Corporation, Korea(in Korean).
- KEC (2011), Guidelines for expressway assets, Korea Expressway Corporation, Korea(in Korean).
- KOSIS (2015), Status of the Nation's Bridges and Tunnels in Republic of Korea, Korea Statistical Information Service, Korea(in Korean)
- Lemer, A. C. (1996), Infrastructure Obsolescence and Design Service Life, *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, 2(4), 153-161.
- MOLIT (2012a), Guideline and Commentary of Safety Inspection and In-depth Safety Inspection for Structures-Bridge. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea(in Korean).
- MOLIT (2012b), Korea Bridge Design Specifications(Limited state design), Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea(in Korean).
- Patterson, W. D. O. (1987), Road Deterioration and Maintenance Effects, The World Bank Highway Design and Maintenance Standards Series.
- SHRP2 (2013), Bridges for Service Life beyond 100 Years: Service Limit State Design, Transportation Research Board.
- Thompson, P. D., Ford, K. M., Arman, M. H. R., Labi, S., Sinha, K. C., and Shirole, A. M. (2012), Estimating Life Expectancies of Highway Assets - Volume 1: Guidebook, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D. C.

Received : 03/09/2016

Revised : 04/21/2016

Accepted : 04/28/2016

요 지 : 본 논문에서는 교량의 유지관리를 위한 사용수명의 정의 및 수명 종료를 제안하였다. 먼저 국내외 교량의 수명용어 관련 현황을 바탕으로 교량의 사용수명을 정립하였다. 교량의 사용수명이란 ‘교량이 유지관리 통해 요구하는 수준의 기능을 발휘하는 기간’으로 정의 하였다. 그리고 사용수명 종료 제안을 위해 국내외 수명종료 기준을 분석하고 교량에 발생 가능한 수명 종료 유형을 분류하여 수명종료를 제안하였다. 사용수명 종료 제안 시, 교량의 성능지표(결함도 점수)를 활용하였으며 상태등급 ‘D’ 등급의 중간값인 결함도 점수 0.64를 수명종료 기준으로 제안하였다. 민감도 분석을 실시하여 제안된 교량의 사용수명 종료 시점의 타당성을 검토하였다. 마지막으로 제안한 사용수명 종료 시점을 활용하여 현재 고속도로 교량의 평균 사용수명을 70.8년으로 추정하였다.

핵심용어 : 교량 유지관리, 수명종료 기준, 회귀분석모델, 사용수명
