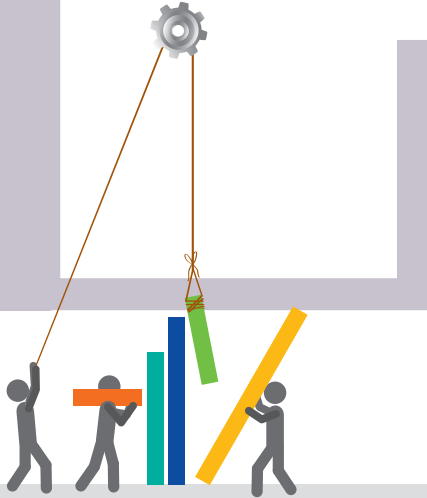


교량 사용수명 100년을 위한 유지관리전략 연구

Study on Bridge Maintenance Strategy for Service Life beyond 100 Years



SCIENTIFIC ARTICLE

1. 머리말

현재 국내 대형 시설물의 안전 및 유지관리는 “시설물의 안전관리에 관한 특별법(이하 시특법)”에 근거하여 수행되고 있다. 이에 따른 “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(이하, 세부지침)”에서는 진단 및 점검 시점에서 시설물의 물리적인 상태와 구조적인 안전성을 근거로 시설물을 평가하도록 규정하고 있다. 지금 공용중인 교량 또한 세부지침에 근거하여 유지관리가 이루어지고 있다. 그러나 국내의 교량은 관리수량의 증가(Fig. 1)와 함께 교량의 노후화(Fig. 2)가 진행되고 있으며 이에 따라 사용수명을 연장시키기 위한 점검, 진단, 보수, 보강, 개량 등의 적절한 유지관리가 절실히 요구되고 있다. 교량의 사용수명은 교량의 개통부터 유지관리를 거쳐 사용한계상태에 이르러 교통차단 시점까지 기간으로 정의될 수 있다. 국내의 경우 관리교량개소는 지속적으로 증가하고 있다(Fig. 1.).

고속도로 교량의 경우 2012년의 8,018 개소에 이르던 관리 교량은 신축교량의 증가로 인해 2022년에는 10,985 개소로 증가될 것으로 예상된다. 이들 교량은 제설제의 사용과 과적차량 등의 요인에 의해 교량의 열화와 손상이 발생하고 있으며 동시에 교량의 고령화에 따라 교량의 안전등급 또한 감소 추세에 있다.

이러한 문제에 대응하기 위하여 교량의 사용수명을 연장시키기 위한 효율적인 유지관리를 위한 합리적이고 체계적인 유지관리목표 및 세부전략이 요구되고 있다.

미국의 2013 Report Card for America's Infrastructure [5]에서 나타나 있듯이 평균 교량의 공용연수는 42년으로 국내교량의 공용연수 25년보다 더욱 빨리 고령화가 진행되고 있으며, 대도시 주변의 교량들을 중심으로 급속한 열화가 진행되고 있다. 또한, 총 607,380 개소



정유석 Jeong, Yoseok
충남대학교,
건설방재 연구소 박사후 연구원
yosoksi@gmail.com



김우석 Kim, WooSeok
충남대학교,
토목공학과 조교수
wooseok@cnu.ac.kr



이일근 Lee, Ilkeun
한국도로공사 도로교통연구원,
구조물연구실 책임연구원
lik@ex.co.kr



이재하 Lee, Jaeha
한국해양대학교,
건설공학과 조교수
jaeha@kmou.ac.kr

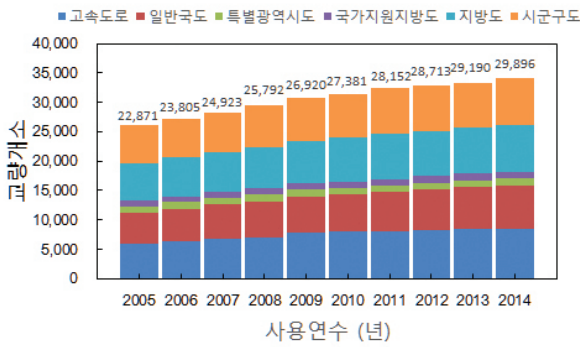


Fig. 1 관리교량개소 (2005-2014년) [1]

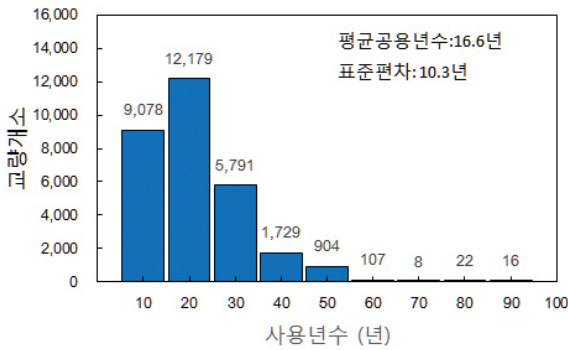


Fig. 2 관리교량 사용연수 분포 (2005-2014년) [1]

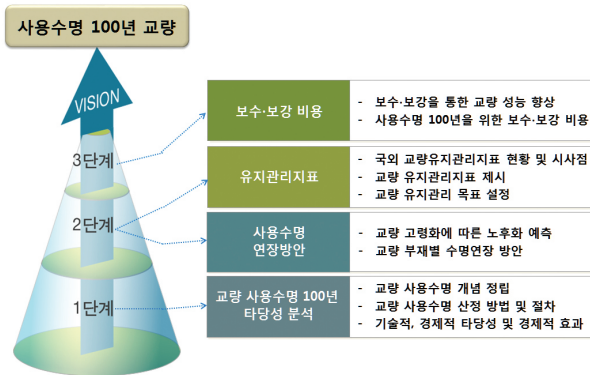


Fig. 3 교량사용 수명 100년을 위한 유지관리 전략

의 교량에 대한 보수, 보강을 통한 유지관리 비용으로 매년 205 억 달러의 비용이 매년 필요하나 예산부족으로 인해 현재 매년 128억 달러의 비용만이 사용되고 있다.

적절한 유지관리가 이루어지지 않아 발생한 교량의 결함으로 인해, 교통이 차단된 교량은 2007년부터 2012년까지 2,816 개소에서 3,585 개소로 증가 추세에 있으며 적절한 시기에 교량의 보수, 보강을 통한

유지관리를 하지 못함으로 인해 많은 사회적 비용이 낭비되고 있다. 실제 교량의 노후화로 인해 미국의 Mianus River Bridge 붕괴사고(1983), 미네소타 교량 붕괴사고(2007)과 같은 인명 또는 재산피해가 발생하여 인적 물적 피해를 입었다. 미국의 사례를 정리하면, 교량의 고령화가 진행되기 전에 적절한 예방적 유지관리(Preventive Maintenance) 전략을 마련하지 못함으로서 교량의 설계수명 대비 교량의 사용수명을 단축시키는 결과를 가져왔다.

국내 교량 또한 고령화에 따른 유사한 상황이 예측되고 있다. 현재 국내에는 준공 30년 이상의 교량이 꾸준히 증가하고 있으며 미국의 사례를 타산시적으로 삼아 미리 적절한 유지관리 전략을 마련하여 교량의 사용수명을 100년 이상으로 연장시킴과 동시에 최소의 유지관리 비용으로 최대의 효과를 얻기 위한 방안이 절실한 실정이다.

본 기술기사에서는 교량 사용수명 100년 달성을 위한 유지관리 전략 수립을 단계적으로 소개하고자 한다(Fig. 3). 먼저, 교량의 사용수명 100년에 대한 기술적, 경제적 타당성 검토과정과 교량 사용수명 연장방안에 대해 소개하고 이를 바탕으로 교량의 유지관리 체계 효율화를 위한 유지관리 지표 등을 소개하며 마지막 단계에서 사용수명 100년 달성을 위한 유지관리 비용 산정을 소개 하고자 한다.

2. 사용수명 100년을 위한 유지관리전략

2.1 교량 사용수명 100년 타당성 분석

국내 교량의 유지관리를 위한 교량의 사용수명의 개념을 우선적으로 정립하고 이를 명확히 하여 교량의 사용수명에 대한 범위를 확립한다. 이를 기초로 하여 국내외의 교량수명 관리현황을 파악하여 현재 유지관리수준에서의 교량사용수명을 산정한다. 이러한 결과를 활용하여 교량의 사용수명 100년에 대한 기술적, 경제적 타당성에 대한 분석을 실시한다.

2.1.1 사용수명의 개념 정립

교량의 사용수명은 설계수명과 다른 개념으로서 교량의 전체 수명동안 교량이 사용되는 기간을 의미한다.

사용수명개념은 교량의 안전성, 사용성 그리고 기능을 종합적으로 나타내는 척도가 되어야 한다. 그리고 교량이 제 기능을 수행할 수 있도록 교량의 부재나 부재구성이 교체나 보수가 가능하다면 교량의 사용수명은 설계수명보다 긴 것이 일반적이다. 이는 교량의 사용수명은 교량의 부재나 부재구성이 경제적으로 보수나 교체가 불가능할 때나 요구되는 성능 또는 교통량이 증가될 때 끝나는 것으로 볼 수 있기 때문이다. 따라서 교량의 사용수명은 '교량의 부재와 상부구조, 하부구조가 경제적으로 보수나 교체가 불가능할 경우 교량이 더 이상의 기능을 상실할 것으로 예상되는 유한한 기간' 또는 '교량의 상태, 안전성 또는 다른 기능이 일정이하로 감소하는 때까지의 기간'으로 정의 할 수 있다.

2.1.2 사용수명의 산정

교량의 수명을 연장하기 위해서는 교량의 교체 불가능한 부재에 초점을 맞춰야 한다. 교량의 전체 시스템은 각 부재의 조합으로 이루어진다. 따라서 부

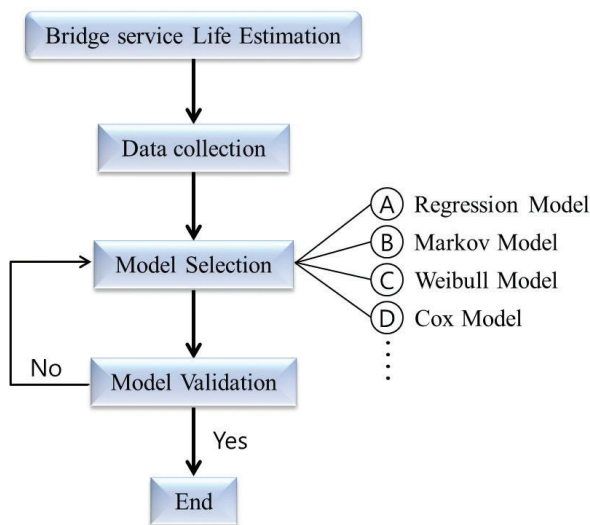


Fig. 4 교량 사용수명 산정 절차

재의 수명종료는 교량 시스템의 수명종료로 이어질 수 있다. 하지만, 교량의 사용수명산정은 유지관리를 고려한 교량 시스템의 수명종료를 고려하여야 한다. 즉, 만약 교량 부재가 교체 가능하다면 부재의 수명은 일정기간 이후 수명종료된 것으로 간주되거나 교량 시스템의 수명은 그렇지 않을 것이다. 따라서 교량 시스템의 수명종료는 교체 불가능한 부재의 수명종료로 보는 것이 적절할 것이다.

교량의 사용수명 산정 절차를 Fig 4 에 나타내었다. 교량의 사용수명 산정방법은 데이터 획득, 모델 선택 및 분석, 모델검증 순서로 이루어진다.

2.1.3 사용수명 100년 기술적·경제적 타당성

교량의 사용수명 100년을 위해서는 설계, 시공, 유지관리의 세 요소가 충실히 이루어져야한다. 과거에 비해 비약적인 발전을 이룬 설계, 시공 방법은 이미 외국의 경우 과거의 설계법과 시공방법으로 건설된 100년 이상의 공용연수를 가지는 교량이 다수 존재하는 사실로도 교량의 사용수명 100년은 충분한 설득력을 가진다. 미국의 경우 Brooklyn bridge(147년), Eads bridge(141년), Williamsburg bridge(118년), Manhattan bridge(105년)등의 교량들은 공용연수 100년 이상을 가지고 있다. 이들의 공통점은 사회적/경제적 중요도로 고려한 철저한 유지관리와 과다 설계를 하였던 경우가 많다. 또한, 이들로부터 과거의 기술로 설계, 시공된 교량일지라도 철저한 유지관리는 사용수명 100년을 이루는데 가장 중요한 요소임을 나타내고 있다. 국내의 경우, 과거 허용응력 설계법의 교량 설계수명은 50년이었으나 현재 한계상태설계법 [2]은 100년의 설계수명을 제시하고 있다. 국외 교량의 사례에서 나타내었듯 실제 과거의 설계기술로 설계된 교량도 적절한 설계와 유지관리가 시행된다면 100년 이상의 수명을 달성 할 수 있다. 따라서 최신의 설계기준으로 설계된 국내의 교량들 또한 적절한 유지관리가 이루어진다면 사용수명 100년을 달성 할 수 있을 것이다.

현재 도로공사 구조물처의 분석에 따르면 현 고속도로 교량의 자산가치는 총 24조 4천억원이다. 단순계산으로 현재의 목표 사용수명인 50년을 100년 이상으로 연장시킬 수 있다면 교량 개축시 현재와 동일한 금액이 필요한 것을 가정하여 이에 대한 경제적 효과는 현 교량 자산가치의 2배에 해당하는 24조 4천억원의 효과를 얻을 수 있다. 이는 100년간의 공용연수를 가정할 때 연간 2,440억원의 효과를 거둘 수 있을 것이다. 따라서, 연간 2,440억원의 추가적인 유지관리 예산을 사용하는 것을 가정하더라도 100년간의 공용연수 동안 개축 비용 24조 4천억원을 절감하는 효과를 가져온다.

2.2 사용수명 연장 방법

교량의 사용수명 연장은 설계수명 동안의 불확실성을 고려한 하중에 대한 설계, 그리고 설계에 따른 정확한 시공과 교량의 노후화에 따른 적절한 유지관리, 마지막으로 이를 위한 적정 수준의 예산확보가 필수 요소이다. 기존 교량에 대해서는 유지관리와 예산확보가 적용될 수 있다. 유지관리 측면에서 교량 사용수명 연장을 위해서는 예방적 유지관리의 입장에서 교량의 열화가 급속하게 진행되기 전 교량의 공용연수에 따른 적절한 상태등급을 유지할 수 있도록 주기적인 관리가 요구된다. 이러한 유지관리의 항목들은 다음을 포함할 것이다.

- ① 주기적인 단순 유지관리 : 오염 부재의 세척과 누수 가능성이 있는 균열과 변형 부분의 실링(sealing).
- ② 보수 : 손상 보호 시스템의 보수 또는 손상의 가속화 유발방지를 위한 페인팅(painting)과 패칭(patching).
- ③ 재건 : 손상 또는 열화 재료나 부재의 교환, 교체를 통한 완전한 기능의 회복과 손상진전 방지.

교량의 일상적 유지관리 뿐만 아니라 유지관리의 전략적 측면에서 교량의 노후화를 예측하고 이를 유

지관리 지표에 반영하는 것이 필요할 것이다. 또한, 교량의 부재별 점검 및 유지관리 주기를 최적화하여 교량의 부재의 수명을 연장시키는 것이 결국 전체 교량 시스템의 사용수명을 연장시키는 것으로 이어질 것이다.

2.3 교량 유지관리 지표 개발

교량 유지관리 지표 개발을 위해 먼저 국내외의 현재 유지관리 지표에 대한 점검이 필요하다. 이를 통해 국내 유지관리 지표에 대한 문제점과 개선점을 파악하고 교량 선진국의 개선방향을 비교하여 국내실정에 적합한 유지관리 지표를 제시하여 교량 사용수명 100년 이상의 장수명화를 위한 기초를 마련할 수 있을 것이다.

유지관리지표는 주로 교량관리자의 의사결정에 사용된다. 교량의 사용수명 100년을 달성하기 위해서 교량관리자는 제한된 시간과 자원을 배분하여 전체 교량의 상태를 일정이상 수준으로 유지하여야 한다. 그러나 제한된 자원으로 인해 교량관리자는 각 교량의 상태정보를 바탕으로 어느 교량에 자원이 우선적으로 투입되어야 하는지, 어떠한 조치가 필요한지를 결정하여야 한다. 교량의 상태정보는 교량의 안전진단 보고서, 또는 교량관리자가 직접 확인하는 것이 더 정확하고 수준 높은 정보를 얻을 수 있으나 많은 자료를 분석하기 위한 시간과 노력이 필요하므로 빠른 의사결정에 오히려 방해가 된다. 전체 교량을 관리하고 우선순위와 방법을 정하는 의사결정단계에서

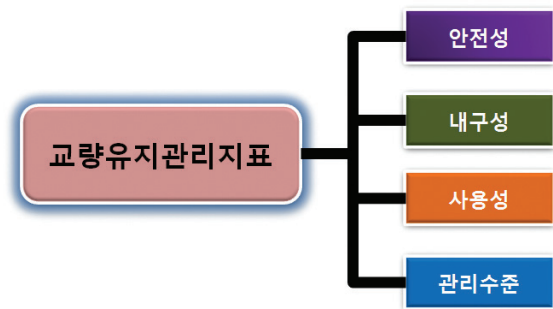


Fig. 5 교량 유지관리지표가 제공하는 정보

는 교량관리자가 원하는 정보를 객관적이고 신속히 전달하는 유지관리지표가 필요하다.

교량의 유지관리지표에는 Fig. 5와 같이 안전성, 내구성, 사용성 그리고 관리수준으로 분류 할 수 있다. 안전성은 교량의 하중저항능력, 지진, 홍수와 같은 예기치 못한 상황에 대한 고려, 설계기준만족여부 등이 포함된다. 구조적 안전성이 확보되지 않으면 재산피해, 인명피해, 교통차단 등의 원인이 되므로 교량관리자에게 최우선으로 전달되어야 하는 항목일 것이다.

내구성은 교량이 열화나 손상에 저항하는 능력으로 정의할 수 있으며 이는 교량의 수명을 관리하기 위하여 고려되어야 할 것이다. 교량의 사용성은 교량이 제공하는 편의성으로 나타낼 수 있으며 관리수준은 예산집행상황, 인적자원, 운용상황을 나타낼 수 있다. 각 항목들은 교량관리자가 유지관리지표를 통해 얻고자 하는 정보를 포함할 것이다.

교량의 사용수명 100년 달성을 위해서 이를 위한 구체적인 유지관리 목표와 방법이 필요하며 합리적인 근거가 있어야한다. 국내에서는 현재의 고속도로 교량의 유지관리 지표는 유지관리지침[4]에 따라 사용수명을 2025년까지 50년으로 연장하는 것을 목표로 하고 있으며, 10년 이하 A등급, 25년 이하 B등급, 40년 이하 C등급의 목표를 제시하고 있다. 즉 A등급 교량의 잔여수명은 40년, B등급 교량의 잔여수명 25년, C등급 이하 교량의 잔여수명을 10년으로 이해될 수 있다. 그러나 이러한 지침은 교량관리자에게 관리목표를 제시할 수 있으나 교량의 잔여수명에 대한 정보와 근거, 그리고 상태등급에 따른 사용수명의 합리적인 검토가 부족한 실정이다.

유지보수 필요성을 결정하기 위하여 교량의 상태에 따른 잔여수명을 계산하고 교량의 수명과 잔여수명의 합이 100년 이상이라면 유지관리를 필요로 하지 않으나 100년 미만이라면 유지관리가 필요하다고 판단 할 수 있을 것이다.

교량의 잔여수명은 다음의 과정을 통해 계산할 수

있다. 본 과업의 내용 중에서 교량의 사용수명 산정을 통해 교량의 수명분포, 수명밀도함수 $f(t)$ 와 수명 분포함수 $F(t)$, 생존함수 $R(t)$ 를 알 수 있다. 여기서 t 시간동안 운용해온 교량이 x 시간동안 더 운용할 수 있는 확률은 식 (1)와 같다[3].

$$R(x|t) = P(T > x + t | T > t) = \frac{P(T > x + t)}{P(T > t)} = \frac{R(x + t)}{R(t)} \quad (1)$$

t 시간만큼 운용해온 교량의 평균잔여수 Mean Residual Life, MRL은 식 (2)로 나타난다.

$$MRL(t) = \mu(t) = \int_0^{\infty} R(x|t)dx = \frac{1}{R(t)} \int_0^{\infty} R(x + t) \quad (2)$$

위의 식을 이용하여 상태등급, 내하력과 같이 고려하는 교량의 상태에 따라 교량의 평균잔여수명을 계산할 수 있다. 고려하는 교량의 상태등급이 A등급에서 E등급까지 정의된다면 각 등급에 해당하는 $MRL(t)$ 과 공용년수의 합이 100년 이상인가를 확인하여 유지관리 필요성을 판단할 수 있을 것이다.

2.4 보수·보강 비용

교량의 유지관리지표와 전략의 수립 후에는 이들을 적용했을 경우에 대한 교량의 수명동안의 교량유지관리비용산정이 필요하다. 교량의 유지관리 비용은 크게 두 가지로 나눌 수 있다[6].

첫 번째는 실제의 유지관리 작업이며, 두 번째는 매니지먼트, 관련 법령 등을 포함하는 유지관리 지원이 있다. 첫 번째의 유지관리 작업은 또다시 유지관리 활동과 유지관리 활동 지원으로 나눌 수 있다. 교량의 사용수명 100년을 위해서는 유지관리 활동에 대한 비용을 고려하여야 할 것이다. 비용 산정의 일반적인 순서는 다음과 같다.

① Establish Design Alternatives : 각각의 시나

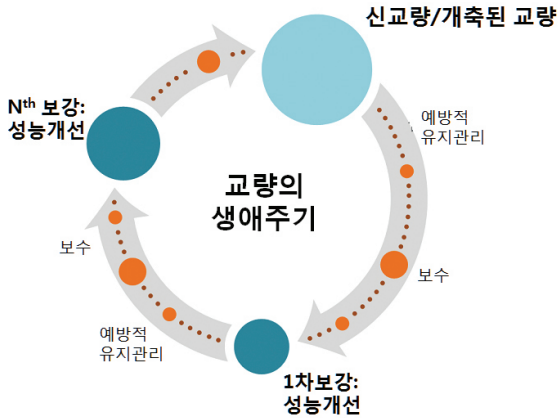


Fig. 6 일반적인 교량의 생애주기 동안의 유지관리

리오에 따른 교량의 초기설계와 교량수명 동안의 유지관리, 보수, 부재 교체 등의 교량에 관련된 모든 자료가 준비되어야 한다.

- ② Determine Activity Timing : 교량 유지관리와 관련되 모든 활동들에 대한 적용시점에 관한 정보가 준비되어야 한다.
- ③ Estimate Costs : 초기 건설비용과 교량 수명동안의 각종 유지관리 활동(점검, 진단, 보수, 보강, 개량 등)에 관한 비용산정이 필요하다.
- ④ Compute Life-Cycle Costs : 초기 건설비용을 포함한 모든 유지관리 활동에 대한 현재의 가치로 계산하는 단계이다.
- ⑤ Analyze Results : 초기와 생애주기비용에 대한 분석을 통해 최적의 해결책을 모색하는 단계이다. 교량의 수명동안 장기간 동안 가장 높은 사용성수준 Level of Service을 나타내는 시나리오를 선택하는 것이 일반적이다.

2.4.1 사용수명 100년을 위한 보수·보강 비용

교량의 사용수명 100년을 위한 보수·보강 비용을 산출하고 필요한 예산과 지원을 파악하는 것이 필요하다. 교량의 유지관리 전략은 교량의 생애주기 동안의 모든 단계(Fig. 6)에서 투입되는 전체유지관리 비용을 최소화하는데 있다. 교량의 유지관리 비용 산정방법에 있어 생애주기비용 평가기법은 성능 및

비용예측 모델을 활용하여 구성요소별 수명주기 동안 소요되는 비용을 분석하는 방법으로 가장 널리 사용되는 방법이다.

생애주기비용 평가기법을 사용하여 유지관리비용을 추정하기 위해, 구조물의 구성요소별 기대 수명 혹은 수명주기 개념을 적용하여 유지관리비용을 계층적으로 분류한다.

이때 예방적 유지관리, M&R Maintenance and Repair 빈도수 산출, Task 비용 데이터 축적 및 적용이 필요하다. 생애주기비용방법은 성능예측결과에 따른 비용/성능 예측을 통해 합리적/정량적인 비용을 산출할 수 있다.

3. 맺음말

본 학술기사에서는 교량 사용수명 100년을 위한 유지관리전략을 기술하였으며 합리적인 유지관리 전략을 세우기 위한 기본 방향을 소개하였다. 본고에서 언급한 단계를 통하여 연구결과가 누적될 경우 Fig. 7과 같은 성능저하곡선의 도출 및 성능저하 예측, 적정 보수·보강 시행 시점 및 규모 판단하는 한편 보수보강의 우선항목에 대한 의사결정 도구로도 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 교량의 성능평가 항목에 대한 민감도 분석 또는 시기별 외부조건에 따른 수요 등을 고려하여 교량의 관리목표를 가변적으로 조정할 수 있다. 한편 교량의 노후화에 따른

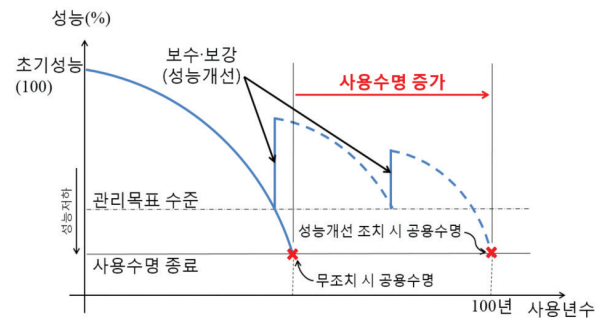


Fig. 7 유지관리 전략에 의한 성능저하곡선 변화 예시

자연적 성능저하와 함께 외부환경 요인에 따른 영향을 평가에 반영함으로써 보다 현실성 있는 평가를 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 48

● 참고문헌 references ●

- 1 국토교통부 (2015), 도로교량 및 터널 현황, 국토교통부.
- 2 국토해양부 (2012), 도로교 설계기준 (한계상태설계법), 국토해양부
- 3 서순근, 김호균, 권혁무, 차명수, 윤원영, 차지환 (2010), 신뢰성공학, 교보문고
- 4 한국도로공사 (2011) 구조물자산관리지침서, 한국도로공사 구조물처.
- 5 ASCE (2013). 2013 Report Card for American's Infrastructure, American Society of Civil Engineering.
- 6 NCHRP Report 688 (2011) "Determining Highway Maintenance Costs", Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C