

생애주기비용을 고려한 성능기반 교량 최적 유지관리 전략 수립 시스템 개발

Development of the Performance-Based Bridge Maintenance System to Generate Optimum Maintenance Strategy Considering Life-Cycle Cost

박 경 훈* 이 상 윤* 황 윤 국** 공 정 식*** 임 종 권****

Park, Kyung-Hoon Lee, Sang-Yoon Hwang, Yoon-Koog Kong, Jung-Sik Lim, Jong-Kwon

Abstract

In this study, a bridge maintenance system is developed to generate performance-based optimum maintenance strategy by considering the life-cycle cost. A multi-objective combinatorial optimization problem is formulated to generate a tradeoff maintenance scenarios which satisfies the balance among the conflicting objectives such as the performance and cost during the bridge lifetime and a genetic algorithm is applied to the system. By using the developed program, this study proposes a process of optimum maintenance scenario applying to the steel girder bridge of national road. The developed system improves the current methods of establishing the bridge maintenance strategy and can be utilized as an efficient tool to provide the optimum bridge maintenance scenario corresponding to the various constraints and requirements of bridge agency.

요 지

본 연구에서는 생애주기비용을 고려한 성능기반 최적 유지관리 전략 수립 시스템을 개발하였다. 교량 수명 동안 비용과 성능이라는 상반되는 목적을 균형있게 만족시킬 수 있는 유지관리 시나리오의 생성을 다중목적 조합최적화 문제로 정식화하고 유전자알고리즘을 적용하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 국도 상 강거더 교량의 최적 유지관리 시나리오를 제공하는 과정을 제시하였다. 개발된 시스템은 현재의 교량 유지관리 전략 수립의 방법을 개선하여 교량 관리주체에게 다양한 제약 및 요구조건에 부합하는 최적의 교량 유지관리 시나리오를 제공할 수 있는 효율적인 도구로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Bridge maintenance system, Optimum maintenance strategy, Life-cycle cost, Bridge performance

핵심 용어 : 교량유지관리시스템, 최적 유지관리 전략, 생애주기비용, 교량성능

* 정희원, 한국건설기술연구원 연구원

** 정희원, 한국건설기술연구원 구조연구부장

*** 정희원, 교신저자, 고려대학교 교수

**** 정희원, (주)아이엠기술단 대표

E-mail : jskong@korea.ac.kr 02-3290-3323

•본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 2007년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

교량과 같이 구조적 특수성과 그 역할의 사회적, 경제적 중요성으로 인해 유지관리의 필요성이 높은 구조물의 경우 유지관리를 위해 다양한 기법과 시스템의 개발이 이루어지고 있다. 생애주기비용(life-cycle cost; LCC) 분석기법이 교량의 유지관리 전략을 위한 다양한 대안의 평가에 유용한 도구로 활용될 수 있다. 대부분의 교량관리시스템에서 이러한 LCC 분석기법을 구현하기 위하여 노력하고 있다(Thompson et al., 1998; Hawk and Small, 1998; 한국건설기술연구원, 1999). 일반적으로 교량 관리자는 교량의 수명동안 성능과 유지관리비용이 효율적으로 조화된 유지관리 시나리오를 요구할 것이다. 최근 생애주기 성능과 비용을 동시에 고려하여 기존의 교량관리시스템의 한계를 극복하고 상충되는 목적사이의 균형을 이룬 최적 유지관리 전략 수립을 위한 연구(Frangopol and Liu, 2004; Liu and Frangopol, 2005)가 진행되고 있으나 실용적 적용을 위한 시스템화는 미미한 실정이다.

교량의 성능과 비용의 예측을 통한 유지관리 전략의 수립을 위해서는 단순히 이론적인 접근에 그칠 것이 아니라 국내 실정에 맞는 표준화된 교량 유지관리 전략 수립방법의 정립이 필요하며, 실무자가 이해하고 활용하기 쉬운 형태로 전산화시스템의 개발이 뒤따라야 한다(한국건설기술연구원, 2006). 이를 위해 본 연구에서는 시간의 경과에 따라 열화되는 강교량의 유지관리조치에 따른 구조 수명동안의 성능 및 비용을 기반으로 최적의 유지관리 시나리오 선정을 위한 방법에 대하여 기술하고, 시스템화를 위한 프로그램의 개발과 활용에 대해서 논하였다. 본 연구는 개별 교량 수준(project level)의 연구이며, 교량을 구성하는 부재수준(member level)뿐만 아니라 부재들의 결합으로 구성된 시스템 구조체인 교량의 특성을 반영하여 시스템수준(system level) 또한 고려하였다.

2. 성능 및 비용기반 최적 유지관리 전략 수립

2.1 생애주기성능평가

열화되는 구조물의 생애주기 성능과 비용을 고려하기 위하여 구조물의 성능 평가 및 예측을 위한 다양한 연구가 지속적으로 광범위하게 진행되고 있다. 최근에는 부재의 한계상태 분석 및 교량 상태평가를 위해 연속함수로 표현되는 건강지수(health index)를 이용한 관련 연구가 증가하고 있다. 이러한 연구들은 기존 방법에서 주로 관심을 가지고 있던 보수·보강의 비용분석 뿐만 아니라 다양한 보수·보강 대안들의 효과를 정량화하여 고려함으로써 복수의 가용한 유지관리 대안들로부터 가장 효율적인 유지관리 대안을 파악하고자 한다(Nowak and Frangopol, 2005).

교량의 성능평가에 있어 두 가지 중요 관점은 성능평가의 객체와 평가 모델이다. 프로젝트 수준의 교량 LCC 분석에 있어서 일반적인 성능평가의 객체는 교량의 구성부재이다. 성능평가 모델의 개발을 위해 성능지수(본 논문에서는 신뢰지수를 의미함)와 상태지수의 복수의 성능지표를 도입하였다. 두 성능지표는 각각 체계신뢰성방법과 교량 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(건설교통부/한국시설안전기술공단, 2003)의 가중치 적용을 통해 교량 시스템수준으로 통합될 수 있다.

성능지수의 평가와 보수보강 효과의 정량화를 위해 시간이력 신뢰성해석이 필요하며, 본 연구에서는 확률론적 안전성평가방법의 하나인 응답면기법(response surface method; RSM)을 사용하였다. 응답면기법은 몇 개의 결정된 분석 값과 이러한 결과의 회귀분석 값을 통하여 특성묘사함수를 근사 접근하는 방법이다. 본 연구에서는 국도 상 실교량의 통계분석을 통해 교량의 구조특성에 따라 범주화하여 구조해석을 실시하고, 이 결과를 이용하여 응답면기법을 이용한 접근을 시도하여 열화모델과 보수·보강 효과의 정량화를 수행하였다(박승현 외, 2006). 본 연구에서 사용되는 상태지수는 현재 교량 유지관리(건설교통부/한국시설안전기술공단, 2003)에 적용되고 있는 점검에 기초한 불연속 값을 연속화하여 세분화한 것이다. 상태지수를 통한 성능평가에 요구되는 정보는 기존자료 또는 전문가 조사자료 등의 통계분석을 통해 수행하였다(한국건

설기술연구원, 2006).

생애주기 성능 및 비용의 이력해석은 유지관리조치의 효과를 고려한 생애주기 이력곡선의 생성이 가능한 MLTR(Kong and Frangopol, 2001) 프로그램을 이용하여 수행하였다. 일반적으로 교량에 어떠한 유지관리조치도 적용되지 않은 경우의 초기 성능이력곡선에 n 번의 유지관리조치가 실시된 교량의 성능지수 이력곡선은 중첩의 원리를 이용하여 식 (1)과 같이 평가하였다(Kong and Frangopol, 2003).

$$P(t) = P_o(t) + \sum_{i=1}^n \Delta P_i(t) \quad (1)$$

여기서, $P(t)$ = 초기성능이력곡선의 함수, P_o = 초기 성능지수, n = 교량의 수명동안 적용된 유지관리조치의 수, t = 시간(년), $\Delta P_i(t)$ = 유지관리조치(i)에 따른 성능이력곡선의 변화.

2.2 생애주기비용평가

생애주기분석에 있어서 관리주체가 직접적으로 부담하게 되는 비용과 더불어 이용자비용, 파손비용 등 간접적인 비용의 추정 또한 중요한 문제이다. n 개의 파손모드를 갖는 교량과 관련된 기대 총(유지관리 및 파손) 누적비용의 현재가치 C_t^P 는 식 (2)와 같이 얻을 수 있다(Kong and Frangopol, 2005).

$$C_t^P(t_h) = \sum_{j=1}^n \{C_{M,j}^P(t_h) + C_{F,j}^P(t_h)\} \quad (2)$$

여기서, $C_{M,j}^P$ = 파손모드 j 와 관계된 기대 총누적 유지관리비용의 현재가치, $C_{F,j}^P$ = 파손모드 j 와 관계된 기대 총누적 파손비용의 현재가치, n = 파손모드의 수, t_h = 고려된 분석기간.

파손비용을 고려하기 위해서는 구조물의 파괴 또는 한계상태에 대한 확률을 구하는 과정이 필수적이다. 하지만 한계상태 확률의 계산은 쉬운 작업이 아니다. 이러한 이유 때문에 기존의 대부분 LCC분석 시스템

은 한계상태확률을 구하지 않아도 되는 비용 산출식을 이용하고 있다. 최근 Kong and Frangopol(2005)은 최적 유지관리를 위해 시간에 따른 신뢰도 감소의 함수로 파괴비용을 평가하고자 하였다. 일정 분석기간까지 적용된 각 파손모드에 의한 모든 발생비용의 합에 의해 얻어지는 총누적 파손비용의 기대가치는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_F^P(t_h) = \sum_{j=1}^n \left\{ \int_{t_b}^{t_h} C_j^P(t) dt \right\} \quad (3)$$

여기서, n = 파손모드의 수, t_b = 할인을 적용의 기준 연도, t_h = 고려된 분석기간, C_j^P = 기대 년 파손비용의 현재가치.

교량의 유지관리조치로 인해 발생하는 이용자비용은 시간지연비용, 차량운행비용, 교통사고비용, 환경비용 등이 정식화 모델에 고려될 수 있다(Berthelot et al., 1996). 본 논문에서는 기존의 연구에서 고려하였던 운전자비용을 차량에 탑승한 모든 이용자로 확대한 이용자지연비용(user delay cost)과 차량운행비용(vehicle operating cost)을 고려하였다(한국건설기술연구원, 2006). 따라서 이용자비용은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{Mi,u} = C_{ud} + C_w \quad (4)$$

여기서, C_{ud} = 이용자지연비용; C_w = 차량운행비용.

2.3 최적 유지관리 전략 수립

최적의 유지관리 시나리오란 교량의 생애주기 동안 발생하는 유지관리비용을 최소화하고, 교량 관리자가 생애주기 동안 요구하는 목표성능에 부합할 수 있는 유지관리 시나리오를 말한다. 그러나 최적의 유지관리 시나리오는 교량 관리자가 원하는 유지관리비용과 교량의 성능의 중요도에 따라 무수히 많이 존재할 수 있으며, 만족스러운 유지관리 시나리오는 구조성능의 향

상과 유지관리비용의 감소라는 목적을 균형있게 만족시킬 수 있도록 결정되어야 한다.

대부분의 현존하는 최적화과정은 상응하는 제약조건으로서 교량의 상이한 주요 성능기준을 다루는 동시에 특정한 시간까지의 기대되는 누적유지관리비용을 최소화하는데 목적을 두고 있다. 이러한 전통적 LCC 최적화 접근법으로부터 얻어지는 유일한 최적 유지관리 해 대신에, 좀 더 강력한 접근법으로서, 고려되어지는 모든 대응되는 목적함수 사이의 균형 잡힌 해(tradeoff solutions)의 집합에 대해서 선택적 탐색방법이 연구되고 있다(Liu and Frangopol, 2005). 이러한 연구의 대부분은 수치최적화 도구로써 유전자알고리즘(genetic algorithm: GA)을 사용하고 있다. 본 연구에서도 열화하는 교량의 생애주기 유지관리 최적화를 GA를 이용한 성능과 비용의 다중목적 조합최적화 문제로 정식화하였다.

3. 최적 유지관리 전략 수립 시스템

3.1 GA를 이용한 조합최적화

교량의 최적 유지관리 의사결정을 위해서는 최적화와 다양한 수치적 기법이 필요하다. 대부분의 전통적인 최적화 알고리즘들은 일반적으로 탐색과정을 유도하기 위해 gradient 정보를 이용하고, 설계변수를 연속된 값으로 가정한다. 이러한 방법은 본 연구의 유지관리 최적화 문제와 같이 설계변수가 이산형 값을 취하는 경우에는 상당히 곤란하다. 따라서 다양한 유지관리 행위가 연도별로 시간계획 되어야하는 유지관리 계획 문제에 있어서 GA가 유용한 도구로써 사용될 수 있다.

많은 기존의 다중목적 GA가 domination의 개념에 기초하여 모든 해의 순위를 정하기 위하여 non-dominated sorting 기법을 적용한다. 해가 밀집되는 것을 가능한 방지하기 위해서 다양한 비지배적 해(non-dominated solutions)의 집합을 가지고 있어야 한다(Liu and Frangopol, 2005). 이러한 비지배적 집합은 소위 Pareto front라고 불린다. 성공적인 다중목적 최적화 알고리즘은 전역 Pareto

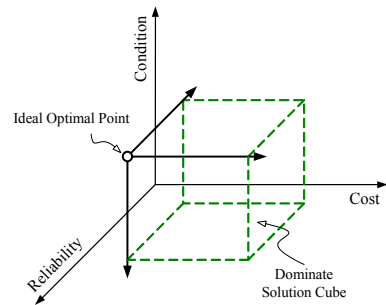


Fig. 1 Pareto 최적 해의 개념

optimal front에 가까운 해의 비지배적 집합을 얻을 수 있으며, Pareto front의 개체는 해의 공간에서 다른 어떤 개체에 의해서도 지배받지 않는다. 따라서 이러한 해는 어떤 다른 해와 최소한의 객관적 상충관계를 갖게 되며, 이를 통해 의사결정을 위한 최선의 대안을 제공하는 것이 가능하게 된다. Fig. 1은 본 연구에서 고려하고 있는 비용, 상태지수, 신뢰지수 사이의 Pareto 최적해를 개념적으로 보여주고 있다.

3.2 성능 및 비용평가 프로그램

앞서 기술된 성능과 관련된 평가모델 및 비용모델에 기초하여, 상충되는 목적 사이의 최적의 균형 잡힌 해를 다중목적 GA에 기반하여 선정하는 체계적인 절차를 제시하였다(박경훈 외, 2006). 분석결과로 제시되는 해는 유지관리기간의 각 연도별 유지관리 조치방법, 즉 유지관리 시나리오로 표현되며, 어떤 유지관리 조치에 대한 적용시간은 1년 시간 간격 내에서 균일하게 분포되는 것으로 고려된다. 유지관리 기간 내에 교량 부재별 열화 과정과 관련된 불확실성에 따른 확률적인 구조성능과 생애주기 유지관리비용을 예측하기 위해 MCS 기법이 사용되었다.

생애주기분석은 교량을 구성하는 부재 중 고려된 모든 부재에 적용되어 수행되며, 한 부재의 교체가 다른 부재에 영향을 미치는 경우 영향을 받는 부재의 교체가 동시에 발생하도록 부재간의 종속적 관계를 고려하여 부재수준뿐만 아니라 시스템수준에서도 현실적인 유지관리 시나리오를 제시할 수 있도록 하였다. 또한 최적 유지관리 시나리오 선정을 위해 고려되는 비용항

목을 선택적으로 고려할 수 있도록 하여, 고려된 비용 항목에 적합한 최적 유지관리 시나리오를 제공하도록 하였다.

제시된 방법에 의한 교량 시스템의 최적 유지관리 시나리오 선정을 위하여 생애주기 성능 및 비용 이력 해석도구인 MLTR(Kong and Frangopol, 2001)을 사용한 GA 기반 프로그램으로 GA_MLTR을 개발하였다(박경훈 외, 2006).

3.3 최적 유지관리 시나리오 선정 절차

최적 유지관리 시나리오는 교량 관리자에 의해 입력되는 대상 교량의 제원, 지역적 특성, 고려되는 비용 항목, 고려되는 부재에 대한 정보에 따라 시스템으로 통합된 성능과 비용 사이에 최적의 균형 잡힌 해로서 제공된다. 교량 관리자의 특별한 요구조건이 없는 경우, 대상 교량의 유지관리 시나리오는 최적의 균형 잡힌 유지관리 시나리오들 간의 우선순위에 따라 자동으로 제공된다. 하지만 교량 관리자의 특별한 요구조건이나 관리주체의 제약조건이 있을 경우, 대상 교량의 유지관리 시나리오는 요구 및 제약 조건을 만족시키는 시나리오들 중 최대 성능 또는 최소 비용을 나타내는 시나리오가 교량 관리자의 선택에 의해 결정될 수 있다. 따라서 최종적으로 대상 교량의 유지관리 시나리오는 교량 관리자의 의도에 따라 (1) 최적의 균형 잡힌 유지관리 시나리오, (2) 예산에 대한 제약을 만족시키면서 최대 성능을 나타내는 유지관리 시나리오, (3) 최소 관리수준을 만족시키면서 최소 비용을 나타내는 유지관리 시나리오들 중에서 선택적으로 적용될 수 있다.

대상 교량의 유지관리 시나리오를 선정하기 위한 분석절차는 Fig. 2와 같다.

3.4 최적 유지관리 시나리오 생성 시스템

GA_MLTR에 기반 한 최적 유지관리 시나리오 생성 시스템은 교량 성능의 추정에 대한 한계로 인해 일반적인 강교량을 대상으로 개발되었으며, LCMSTEB (Performance Based Life Cycle Management

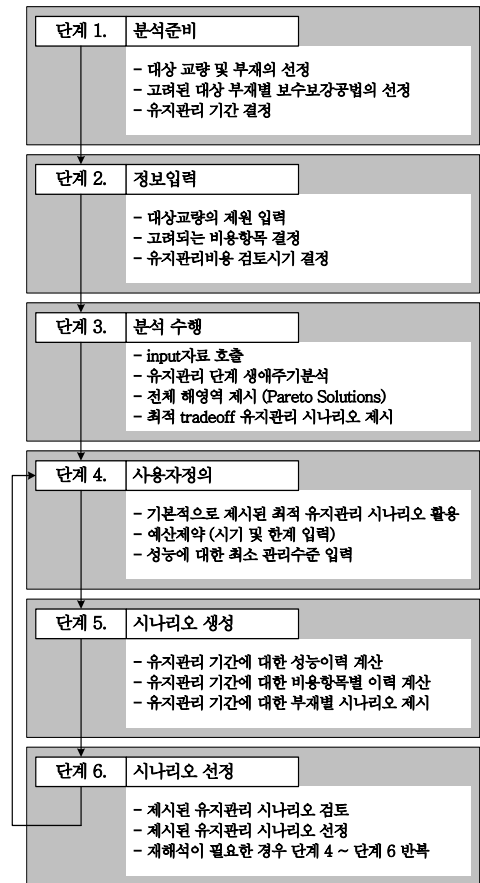


Fig. 2 최적 유지관리 시나리오 선정 절차

System for Steel Bridge)으로 명명하였다.

LCMSTEB의 개발언어는 Visual C++을 이용하였으며, 내장된 데이터베이스는 MS-SQL을 이용하였다. 분석된 결과는 프로그램내에서 시각적으로 나타내어지며, 엑셀파일로 수치적 결과를 저장한다. LCMSTEB의 초기화면은 Fig. 3과 같다. LCMSTEB에서는 사용자의 최소한의 입력으로 해석을 수행할 수 있도록 하기 위해 Fig. 4와 같이 데이터베이스에 입력되어있는 교량의 경우, 제원, 준공시기, 열화 및 보수보강 특성에 대한 데이터를 입력받을 수 있도록 하였다. GA_MLTR에 의해 분석된 해(시나리오)의 수렴성을 고려하여 GA 수행을 위해 적용된 집단의 개체수 및 세대수는 1,000개체, 30세대이며, 교배확률은 50%, 변종확률은 5%를 적용하였다.



Fig. 3 LCMSTEB 구동시 화면

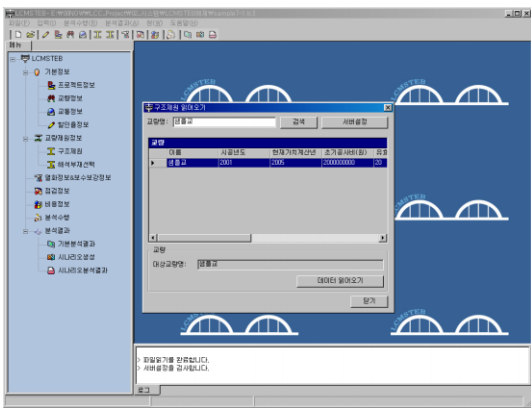


Fig. 4 트리메뉴 및 데이터베이스 호출 화면

4. LCMSTEB을 통한 최적 유지관리 전략 수립

본 연구에서 제안된 최적 유지관리기법과 개발된 시스템의 적용성 및 합리성을 판단하기 위해 국도상 강교량 중 단순하면서도 전형적인 경우를 분석 대상 교량으로 선정하였다. 분석 대상교량은 교장 45m 단순경간에 교폭 19.5m 4차로의 3연 강박스거터교로 2001년 준공되어 특별한 보수·보강 조치 없이 공용중인 교량이다. 본 분석사례에서는 교량의 주요 구성부재인 거더, 바닥판, 포장을 고려하고, 신뢰도지수를 의미하는 성능지수와 상태지수를 고려하였다. 또한 유지관리비용뿐만 아니라 이용자비용, 파손비용을 고려하였다.

4.1 교량 정보 및 분석 정보 입력

4.1.1 교량 기본정보 입력

기본정보 입력단계에서는 Fig. 5와 같이 프로젝트의 가장 기본적인 프로젝트 명, 관련 메모, 대상교량에 대한 기본적인 정보, 해석과 관련된 정보, 교통정보 및 할인율을 입력한다. 교통정보는 이용자비용 추정을 위해 개발되어 시스템에 내장된 회귀모델 중 적합한 모델의 선정에 이용된다. 주도로 및 우회도로에 대한 년도 별 교통량 데이터, 차량의 구성비, 평균 재차인원, 유류비용, 차량의 하중 분포 등이 포함된다.

4.1.2 교량 제원정보 입력

제원정보 입력단계에서는 Fig. 6과 같이 분석을 수행할 교량의 거더, 바닥판, 가로보(또는 브레이싱)에 대한 구조제원을 입력하며, Fig. 7과 같이 유지관리 시나리오 분석의 대상이 되는 부재, 부재별 재료 및 보수보강 공법을 선택한다. 교량의 제원정보는 RSM을 통해 추정된 성능이력 모델의 선정에 사용된다.

4.1.3 열화 및 보수보강 정보 입력

열화 및 보수보강 정보 입력단계에서는 선택된 부재에 대한 열화곡선과 보수보강 효과를 정량적으로 정의하며, 각 보수보강 공법에 대한 적용률을 입력한다. 적용률은 보수보강과 관련된 교량의 전체 제원 중에서 해당 보수보강 공법이 적용되는 비율을 의미하며, 확률분포(평균, 변동계수) 형태로 입력한다.

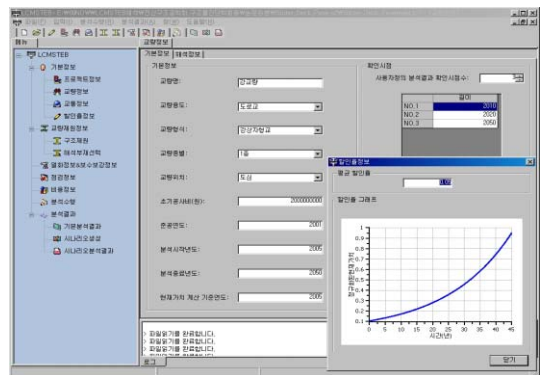


Fig. 5 기본정보 입력화면

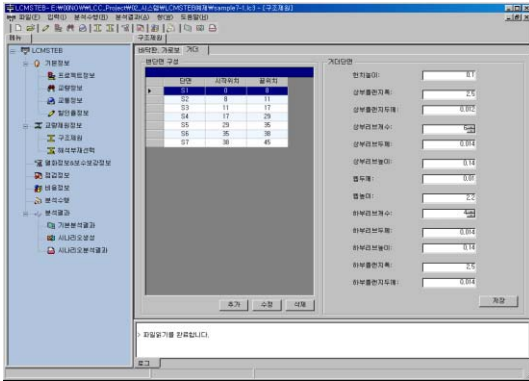


Fig. 6 구조제원 입력화면

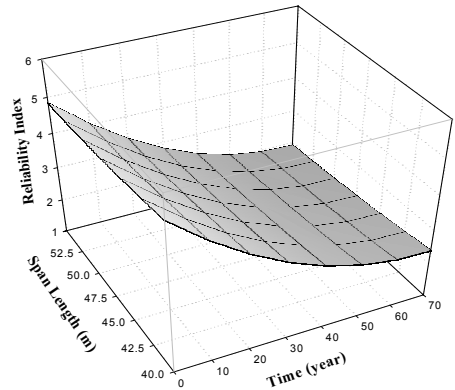


Fig. 9 단경간 교장별 거더의 초기 성능지수이력

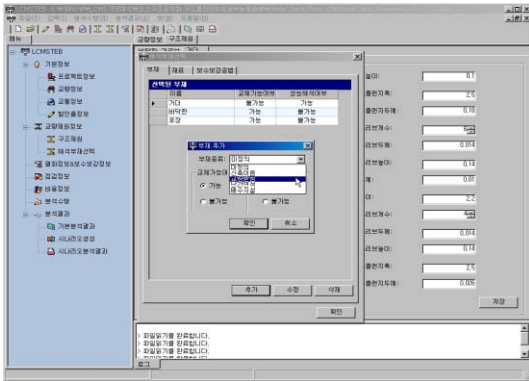


Fig. 7 해석부재 선택화면

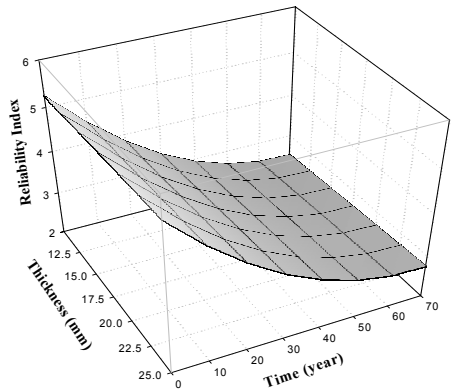


Fig. 10 강판점착에 따른 성능지수분포

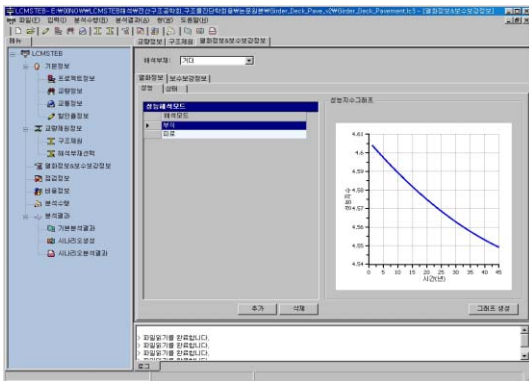


Fig. 8 성능지수에 대한 열화정보 입력화면

성능지수와 관련된 열화 및 보수보강 효과는 Fig. 8과 같이 파괴모드를 선택함으로써 정의할 수 있다. 구체적으로 단경간 교량의 길이에 따른 성능지수의 변화는 RSM을 이용하여 Fig. 9와 같이 추정되며, 시스

템 내에서 함수로서 고려된다. 또한 보수보강 효과는 적용된 유지관리조치의 주요변수를 고려하여 미리 구성된 RSM에 의해 고려된다. Fig. 10은 강판점착의 두께에 따라 변화되는 성능지수의 분포를 보여주고 있다.

상태지수와 관련된 열화 및 보수보강 효과는 기존 데이터베이스 및 문헌, 전문가 설문조사 등을 통해 얻어진 자료를 분석하여 교량의 상태등급(A~E등급)을 세분화한 상태지수의 형태로 정의하여 표현하였다. A~E등급에 대응하는 상태지수는 Table 1과 같이 정의하였다. 무조치시의 상태지수이력곡선은 초기의 상태지수, 초기 상태지수의 유지기간, 최저 상태지수(60) 도달시기 등으로부터 추정된 시간(년)과 상태지수의 데이터들을 이용하여 3차원의 감소곡선형태의 추세선으로 표현된다.

Table 1 상태등급별 상태지수

상태등급	상태지수 (ρ)
A	$90 < \rho \leq 100$
B	$80 < \rho \leq 90$
C	$70 < \rho \leq 80$
D	$60 < \rho \leq 70$
E	$50 < \rho \leq 60$

Table 2 강교량 구성 부재별 대표적인 유지관리조치

부재	유지관리조치
포장	표면처리공법, 절삭오버레이공법, 오버레이공법, 재포장
바닥판	에폭시주입공법, 교면방수공법, FRP접착공법, 교체
거더	도장, 용접보수공법, 강관접착공법, 교체

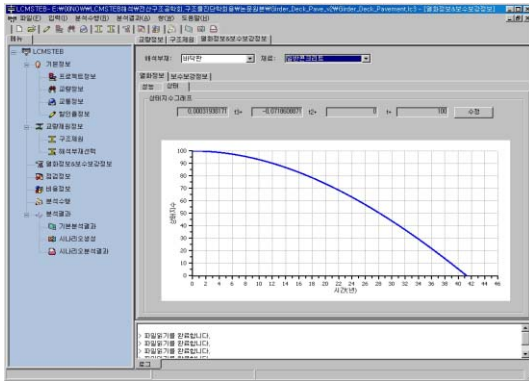


Fig. 11 상태지수에 대한 열화정보 입력화면

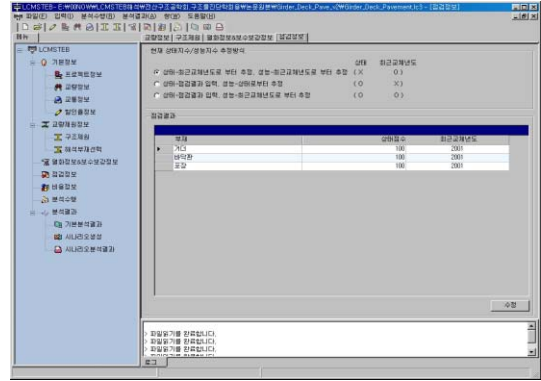


Fig. 12 점검정보 입력화면

Fig. 11은 거더에 대한 무조치시의 상태지수이력곡선을 나타내고 있으며, 사용자에게 상태지수곡선의 조정이 가능하다.

교량의 구성 부재별 손상의 종류는 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침에 점검부위별, 구성재료별로 상세히 정의되어있다. 그러나 손상에 따른 보수·보강은 손상원인간의 상관성과 손상원인에 따른 보수·보강 공법의 다양성으로 인해 세부지침 상에는 구체적으로 제시되어있지 않다. 본 연구에서는 교량구조물의 보수보강편람(건설교통부/한국건설기술연구원, 1995)과 교량조사기입지침서, BMS에 입력되어 있는 보수·보강 공법 적용 데이터에 근거하여 각 부재별 대표적인 보수·보강 공법을 선정하였다. Table 2에는 본 논문에서 고려된 구성부재별로 교체를 포함한 대표적인 유지관리조치를 나타내었다.

4.1.4 점검정보 입력

본 시스템에서는 교량의 점검자료를 활용하여 현재의 교량상태를 고려할 수 있도록 하였다. 우선 현재의 상태를 고려하지 않을 경우, 상태지수와 성능지수는 준공된 시점, 혹은 최근에 교체된 시점을 기준으로 시

스템에서 고려된 상태 및 성능 이력을 적용한다. 한편 현재의 점검정보를 이용할 경우에는 성능지수를 상태지수와 연계하여 추정할 것인가의 여부에 따라 구분할 수 있다. 따라서 상태지수 및 성능지수의 고려방법은 Fig. 12와 같이 세 가지로 구분할 수 있도록 하였다.

4.1.5 비용정보 입력

비용정보 입력단계에서는 유지관리비용을 계산하기 위한 비용관련 정보를 입력한다. 비용정보는 크게 보수보강비용 정보와 기타비용 정보로 나뉘어 있으며, 기타비용 정보에는 점검/진단비용, 파손비용, 이용자 비용 정보가 포함된다.

Fig. 13과 같이 보수보강비용 정보에서 각 보수보강 공법의 단위비용을 입력하면 시스템에서 각 공법의 적용률과 교량의 제원을 고려하여 실제 해석에 적용되는 비용을 자동으로 산출하여 적용한다. 점검/진단비용은 안전점검 및 정밀안전진단 대가기준을 준용하거나 사용자가 직접 입력할 수 있으며, 파손비용에 포함되는 비용항목을 결정하고 초기공사비에 대한 관리주체비용의 비율을 결정하면 시스템 내에서 파괴확률에 따라 파손비용을 추정한다.

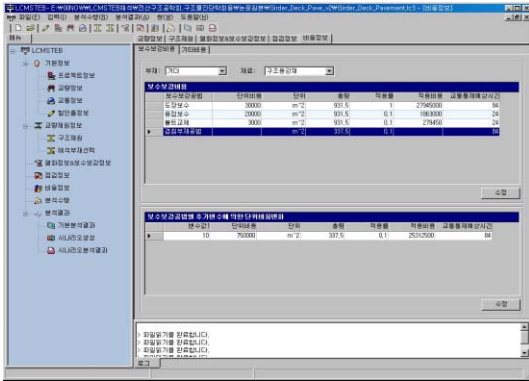


Fig. 13 보수보강비용 정보 입력화면

Table 3 비용분류체계

	직접비용	간접비용
기대 유지관리 비용	유지관리 직접비용 - 점검·진단비용(주기적) - 보수·보강비용 - 교체비용	유지관리 간접비용 - 이용자비용 ·이용자지연비용 ·차량운행비용
기대 파손비용	파손 직접비용 - 파손비용	파손 간접비용 - 이용자비용 - 사회경제손실

이용자비용에서는 각 보수보강 공법별로 이용자 비용 추정에 필요한 통제차선수와 작업구간길이를 입력한다. 본 시스템에서 구분하여 고려된 비용분류체계는 Table 3과 같다.

4.1.6 해석 옵션 입력

해석 옵션 입력단계에서는 유지관리 시나리오 분석 조건을 입력하고, 해석을 수행한다. Fig. 14와 같이 분석조건은 크게 분석의 종류와 비용 옵션으로 구분된다. 분석의 종류는 최적 시나리오 분석과 사용자 지정 시나리오 분석으로 구분된다. 최적시나리오 분석은 앞서 기술한 방법에 의해 시스템 내에 구현된 방법을 적용하여 시스템이 최적 유지관리 시나리오의 집합을 우선순위별로 제공하는 것을 말한다. 교량 관리자가 직접 원하는 유지관리 시나리오를 작성하여 분석을 수행하거나, 최적 시나리오 분석결과를 참고하여, 시나리오 일부를 수정하여 분석을 수행하는 것이 가능하도록 시스템을 구성하였다. 비용 옵션은 Table 3에 고려된 비용항목을 선택적으로 고려할 수 있도록 하였으며, 아래와 같이 구분된다.

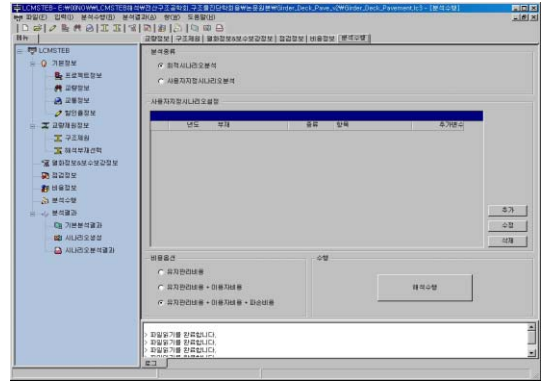


Fig. 14 해석옵션 입력화면

- 1) 유지관리 직접비용
- 2) 유지관리 직접비용+유지관리 간접비용
- 3) 유지관리 직접비용+유지관리 간접비용+파손비용(직접 및 간접비용)

4.2 생애주기분석 수행

해석결과를 기본분석결과, 시나리오생성, 시나리오 분석결과와 과정을 거쳐 확인, 검토 할 수 있다. 최적 시나리오 분석을 수행하였을 경우, 가장 기본적인 분석결과로 Fig. 15와 같이 기본분석결과를 보여준다. 우선순위를 확인하고자 하는 ranking의 개수를 입력하면, 최적 해에 가까운 순서대로 테이블에 표시된다. Fig. 15와 같이 비용, 성능, 상태의 3가지 목적에 부합하는 최적해의 집합에서 각 점들은 각각의 유지관리

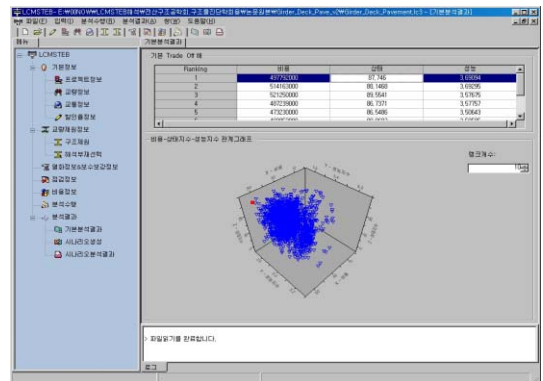


Fig. 15 기본분석 결과화면

시나리오를 의미하며 비용, 상태지수 및 성능지수의 이력을 내포하고 있다.

4.3 유지관리 시나리오 생성 및 선정

시나리오 생성단계에서는 Fig. 16과 같이 기본분석 결과를 포함하여 비용계약, 성능계약 조건에 따라 우선순위를 재배열하여 사용자에게 제시해주며, 사용자의 최종적인 확인이 완료되면 우선순위로 고려된 해에 대한 분석기간 동안의 유지관리비용 이력, 상태지수의 이력, 성능지수의 이력을 추정하기 위해 해석이 수행된다. 교량을 관리하는데 있어 유지관리 예산의 제한 또는 성능의 최소 기준과 같이 다양한 요구조건과 제약조건이 발생할 수 있으며, 제약조건에 따라 해석 결과의 재배열된 결과를 확인 할 수 있다.

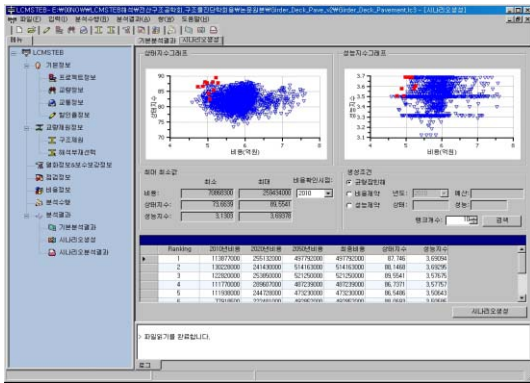


Fig. 16 시나리오 생성단계 화면

시나리오 분석 결과단계에서는 시나리오 생성단계에서 결정한 유지관리 시나리오들에 대한 최종적인 해를 제시하며, 고려된 부재별 결과뿐만 아니라 시스템 수준의 분석결과를 확인할 수 있다. Fig. 17 및 Fig. 18은 각각 시스템 및 부재별 분석결과 화면을 보여주고 있다. 또한 해석옵션 입력단계에서 사용자지정 시나리오 분석을 선택한 경우, 사용자가 직접 정의한 유지관리 시나리오에 대한 시나리오 분석결과를 제공한다.

사용자가 최종적으로 선택한 해에 대한 시나리오 분석결과는 유지관리 시나리오를 결정하는데 있어서 다양한 정보를 제공해 줌으로써 유용하게 활용될 수 있다. 특히 Fig. 19와 같이 유지관리비용은 다양한 비용항목으로 구분되어, 사용자가 고려하고자 하는 비용에 대한 보다 상세한 분석이 가능하다.

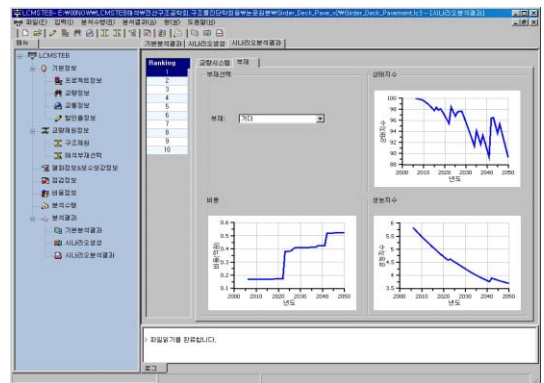


Fig. 18 시나리오 분석 결과화면 - 부재별 결과

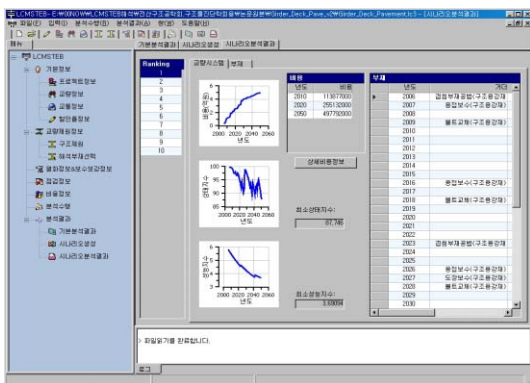


Fig. 17 시나리오 분석 결과화면 - 시스템 결과

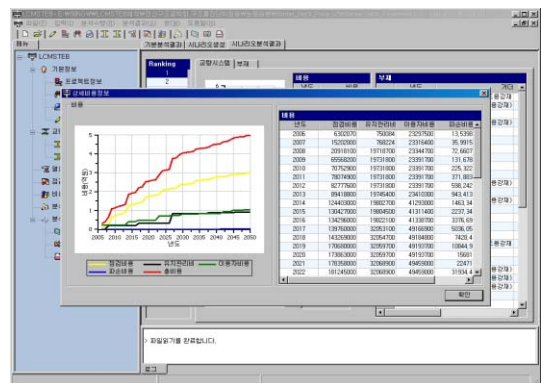


Fig. 19 시나리오 분석 결과화면 - 상세비용 분석결과

Table 4 연도별 유지관리 시나리오

No.	년도	거더	바닥판	포장
1	2006	접침부재공법	교면방수공법	표면처리
2	2007	용접보수		
3	2008			재포장
4	2009	볼트교체	에폭시주입공법	표면처리
5	2010			
6	2011			
7	2012			
8	2013			절삭오버레이
9	2014		FRP접착공법	표면처리
10	2015		에폭시주입공법	
11	2016	용접보수		팻칭
12	2017		교면방수공법	재포장
13	2018	볼트교체		
14	2019			표면처리
15	2020			
16	2021			절삭오버레이
17	2022			
18	2023	접침부재공법	에폭시주입공법	팻칭
19	2024			
20	2025			
21	2026	용접보수		절삭오버레이
22	2027	도장보수	교체	재포장
23	2028	볼트교체		
24	2029			표면처리
25	2030		교면방수공법	
26	2031		에폭시주입공법	
27	2032			팻칭
28	2033			
29	2034			
30	2035	용접보수		표면처리
31	2036			
32	2037			
33	2038	도장보수		재포장
34	2039			
35	2040			표면처리
36	2041			
37	2042	접침부재공법		팻칭
38	2043	볼트교체	에폭시주입공법	표면처리
39	2044			
40	2045		FRP접착공법	팻칭
41	2046	용접보수		재포장
42	2047			절삭오버레이
43	2048			표면처리
44	2049			팻칭
45	2050			
상태지수	89.30	80.95	72.62	
신뢰지수	3.69	-	-	
LCC (천원)	52,333	94,025	48,972	

Fig. 17은 사용자가 선택한 유지관리 시나리오를 보여주고 있다. 유지관리 시나리오는 고려된 부재별로 고려된 분석기간 동안 연도별 유지관리조치를 제공하며, 적용된 교량의 경우 비용, 성능, 상태 각 목적을 균형있게 만족하는 최우선순위의 연도별 유지관리 시나리오는 Table 4와 같다. 또한 상위부재(바닥판)의 교체로 인한 하위부재(포장)의 교체를 고려하여 시나리오의 생성이 가능하다. 이러한 분석결과들은 입력 및 적용된 데이터를 포함하여 엑셀파일로 자동 저장된다. 사용자는 분석된 결과를 바탕으로 보다 합리적인 최적 유지관리 의사결정이 가능하다.

5. 결론

본 연구에서는 생애주기비용을 고려한 성능기반 교량 최적 유지관리 전략 수립 시스템(LCMSTEB)을 개발하였으며, 사용의 편의성을 도모하기 위해 사용자 위주의 전·후처리 시스템을 개발하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 교량의 생애주기 동안의 성능과 비용을 고려한 최적 유지관리 시나리오를 제공하는 과정을 국도 상 강거더교량을 대상으로 제시하였다. 이러한 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 생애주기 동안의 비용만을 최소화하는 단일한 유지관리 시나리오를 찾는 것을 목표로 하는 전통적인 교량 유지관리 방법과 다르게, 생애주기비용뿐만 아니라 생애주기성능을 함께 고려하여 두 가지 상충되는 목적사이의 다수의 균형 잡힌 유지관리 시나리오를 제공하는 실제적인 방법을 제시하였다.
- 2) LCMSTEB은 강교량의 상태지수, 성능지수(신뢰도지수)와 비용 사이의 균형 잡힌 최적 유지관리 시나리오를 제공해주며, 각 부재수준의 최적 유지관리 시나리오뿐만 아니라 시스템수준에서도 성능과 비용 사이에 최적의 연도별 유지관리 시나리오의 생성이 가능하다. 또한 부재간의 교체에 따른 종속관계를 고려하여 실제적인 최적의 연도별 유지관리 시나리오의 생성이 가능한 것으로 나타났다.
- 3) LCMSTEB은 사용자의 활용 목적에 따라 비용 및 성능(상태지수, 신뢰지수)에 대한 요구 및 제약조건을 고려하는 것이 가능하며, 사용자의 목적에 부

합하는 최적의 유지관리 시나리오를 제공해 줌으로써 교량 시스템에 대한 유지관리 전략 및 예산의 수립에 유용하게 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

- 4) 개발된 시스템은 사용자위주의 전후처리시스템과 자체적인 데이터베이스를 내장하고 있어, 복잡한 생애주기분석 과정에 대한 깊은 이해와 방대한 데이터의 준비 등이 없이도 실제 교량에 대해서 다양한 생애주기 유지관리 시나리오의 분석이 실용적으로 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부/한국건설교통기술평가원의 건설기술기반구축사업 “강교량의 최적설계와 경제적 유지관리를 위한 Life-Cycle Cost 분석기법 및 시스템 개발(R&D2002/기술혁신10)” 및 고려대학교 교수특별연구비(2004)의 지원에 의해 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부/한국건설기술연구원, “교량구조물의 보수보강 공법 편람”, 건설교통부, 1995.
2. 건설교통부/한국시설안전기술공단, “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(교량)”, 건설교통부, 2003.
3. 박경훈, 이상윤, 공정식, 황윤국, 조효남, “생애주기비용과 성능을 고려한 강교량의 최적 유지관리 시나리오 선정 모델” 한국강구조학회 학술발표대회논문집, 제17권1호, 2006, pp. 552-557.
4. 박승현, 김성훈, 임종권, 박경훈, 공정식, “Response Surface 방법에 의한 보수보강 정량화 모델”, 한국전산구조공학회 학술대회논문집, 제19권1호, 2006, pp. 557-564.
5. 한국건설기술연구원, “98 교량관리체계(BMS) 개선에 관한 연구”, 건설교통부, 1999.
6. 한국건설기술연구원, “강교량의 최적설계와 경제적 유지관리를 위한 생애주기비용 분석 기법 및 시스템 개발”, 건설교통부/한국건설교통기술평가원 연구보고서, 2006.
7. Berthelot, C.F., Sparks, G.A., Blomme, T., Kajner, L. and Nickeson, M., “Mechanistic-probabilistic vehicle operating cost model”, J.

of Transportation Eng., ASCE, 122(5), 1996, pp. 337-341.

8. Frangopol, D.M. and Liu, M., “Maintenance and management of civil infrastructure based on condition, safety, optimization, and life-cycle cost.” International Workshop on Integrated Life-Cycle Management of Infrastructures, Hong Kong, 2004.
9. Hawk H. and Small E., “The BRIDGIT bridge management system.” Structural Engineering Institute, IABSE, Zurich, Switzerland, 8(4), 1998, pp. 309-314.
10. Kong, J.S. and Frangopol, D.M., “MLTR user’s manual,” Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, Colorado, 2001.
11. Kong, J.S. and Frangopol, D.M., “Life-cycle reliability-based maintenance cost optimization of deteriorating structures with emphasis on bridges.” Journal of Structural Engineering, 129(6), 2003, pp. 818-828.
12. Kong, J.S. and Frangopol, D.M., “Probabilistic optimization of aging structures considering maintenance and failure costs.” Journal of Structural Engineering, 131(4), 2005, pp. 600-616.
13. Liu, M. and Frangopol, D.M., “Multiobjective maintenance planning optimization for deteriorating bridges considering condition, safety, and life-cycle cost.” Journal of Structural Engineering, 131(5), 2005, pp. 833-842.
14. Nowak, A.S. and Frangopol, D.M., eds., “Advances in Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems.” Proceedings of the 4th International Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems, 2005.
15. Thompson, P.D., Small, E.P., Johnson, M. and Marshall, A.R., “The Pontis bridge management system.” Structural Engineering Institute, Zurich, 8(4), 1998, pp. 303-308.

(접수일자 : 2006년 12월 8일)