

생애주기 비용 및 성능을 고려한 차세대 교량 유지관리기법 개발

Development of Bridge Management System for Next Generation based on Life-Cycle Cost and Performance

박 경 훈*
Park, Kyung-Hoon

요 약

생애주기비용뿐만 아니라 생애주기성능을 함께 고려하여 열화되는 교량의 수명동안 최적 유지관리전략을 수립하기 위한 실제적이고 실용적인 방법을 제시하였다. 제안된 방법은 비용 최소화와 성능 최대화라는 상충되는 목적사이에 최적의 유지관리 시나리오의 집합을 제공한다. 교량수명 동안의 성능 및 비용과 관련된 다중목적 조합 최적화 문제인 교량 유지관리 시나리오 집합의 생성을 위해 유전자알고리즘을 적용하였다. 최적 유지관리 시나리오를 생성하기 위한 프로그램이 제안된 방법에 기초하여 개발되었다. 교량 부재들 사이의 종속관계가 최적 유지관리 시나리오를 결정하는데 고려되었다. 개발된 프로그램은 국도상 강박스거더 교량의 최적 유지관리 시나리오를 찾기 위한 절차를 제시하는데 사용되었다. 개발된 방법 및 프로그램은 교량 유지관리 시나리오 분석을 통해 교량 관리자가 다양한 제약 및 요구조건을 만족하는 최적의 유지관리 전략을 수립하는데 효율적으로 사용될 수 있을 것이다.

키워드: 교량유지관리, 생애주기비용, 생애주기성능, 최적유지관리기법

1. 서 론¹⁾

1.1 연구의 배경 및 목적

경제흐름의 대동맥인 교통망의 연결고리 역할을 수행하는 교량은 하천, 계곡, 해상 등 가설되는 위치의 특성 상 열악한 환경에 놓이게 되는 경우가 많으며, 태풍, 홍수, 지진과 같은 자연재해뿐만 아니라 물동량의 증대와 운송수단의 대형화로 인해 교통량 및 통행하중의 지속적인 증가를 겪게 된다. 이러한 교량은 파손으로 인한 보수보강 및 교체에 따른 교통통제, 극단적인 경우 갑작스런 붕괴 등이 발생할 경우 사회경제적으로 커다란 손실을 가져오게 되며, 인명사상의 피해를 유발하기도 한다.

따라서 교량은 일반적인 사회기반구조물과는 달리 그 구조적 특수성과 역할의 중요성으로 인해 일찍부터 체계적이고 과학적인 관리를 위해 다양한 연구개발이 이루어져왔다 (TRB 2003, 한국건설기술연구원 1999). 그러나 최근의 미국 교량 붕괴사고는 교량의 구조적인 안전성에 대한 정확한 판단이 얼마나 어려운가를 다시 한 번 보여주고 있다. 또한 자산관리 개념에서 문제가 예상되는 교량에 대한 적

절한 예산의 할당 및 분배를 통해 시의적절한 조치가 이루어졌다면 붕괴와 같은 극단적인 사고의 발생은 막을 수 있었을 것이다.

최근 미국, 유럽, 일본 등 선진국을 중심으로 현재까지의 교량 유지관리체계에 대한 한계를 인식하고 보다 발전된 유지관리방법에 대한 다양한 연구개발이 진행 중에 있다 (Casas 2006). 본고에서도 이러한 관점에서 차세대 교량 유지관리 시스템의 개발을 위한 기초적인 연구결과(한국건설기술연구원 2006)를 제시하여 사회기반시설물 유지관리시스템의 전형으로 활용하고 유지관리체계의 발전에 일조하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본고에서는 기존의 교량 유지관리 방법의 현황 분석과 고찰, 최근 연구 및 개발 동향을 바탕으로 향후 교량을 비롯한 사회기반구조물 유지관리 방법의 새로운 모델을 제시하고자 한다. 최근 건설기술연구개발사업으로 수행되어 연구가 종료된 생애주기 비용 및 성능에 기초한 교량 유지관리 전략 수립 시스템 개발(한국건설기술연구원 2006)의 성과 위주로 소개하고자 한다.

2 새로운 교량 유지관리 모델

교량 유지관리의 궁극적인 목적은 대상 교량에 대해 요

* 일반회원, 한국건설기술연구원 복합구조연구실, 공학박사
paul@kict.re.kr

본 연구는 건설교통부/한국건설교통기술평가원의 건설기술기반 구축사업(R&D2002/기술혁신10)의 연구비 지원에 의한 연구의 일부임.

구되는 성능 및 안전 수준을 충분히 만족하면서 생애주기 비용(Life-Cycle Cost; LCC)이 최소로 되는 보수·보강 및 교체 시기와 보수·보강 공법을 결정하는 유지관리 전략을 수립하는 것이다. 이러한 목적을 만족하기 위해서는 교량의 생애주기 성능 및 비용의 고려와 성능과 비용이라는 상충되는 목적사이의 최적화를 통한 최적 유지관리 시나리오의 선정이 필요하다. 이러한 관계는 개념적으로 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

제안된 모델의 현실적인 적용성 확보를 위해서 생애주기 성능 및 비용의 평가, 예측, 추정과 최적 유지관리 시나리오의 선정을 위한 구체적인 방법론이 필요하다. 이러한 새로운 방법론에 대한 구체적인 설명과 교량의 성능을 평가하기 위한 성능지표와 생애주기분석에 적합한 성능평가 모델 및 보수보강 정량화 모델, 유지관리단계 LCC분석에 고려되는 비용의 구성 등은 참고문헌(한국건설기술연구원 2006)에 상세히 기술되어 있다. 본고에서는 전체적인 방법론과 이를 바탕으로 개발된 시스템 및 그 활용성을 위주로 논하였다.

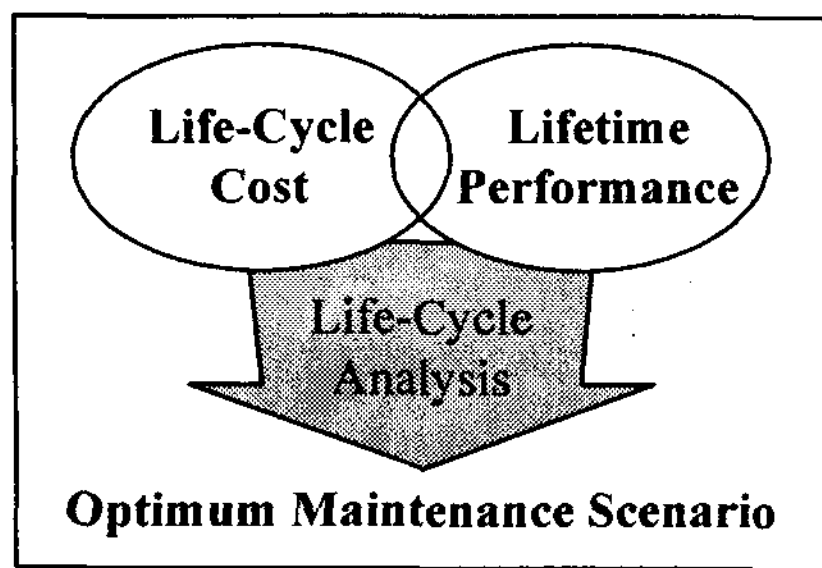


그림 1. 비용 및 성능을 고려한 최적 유지관리

2.1 생애주기비용 추정

LCC분석에 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 현재 가치 C_t^P 는 식 (1)과 같이 얻을 수 있다.

$$C_t^P(t_h) = \sum_{j=1}^n \{C_{M_j}^P(t_h) + C_{F_j}^P(t_h)\} \quad (1)$$

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 시스템은 한계상태확률을 구

하지 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 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$C_{F_j}^P(t_h) = \sum_{j=1}^n \left\{ \int_{t_b}^{t_h} C_j^P(t) dt \right\} \quad (2)$$

여기서, n =파손모드의 수, t_b =할인을 적용의 기준연도, 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 연구에서는 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 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{M.u} = C_{ud} + C_{vo} \quad (3)$$

여기서, C_{ud} =이용자지연비용; C_{vo} =차량운행비용.

2.2 생애주기성능 평가

열화되는 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 비용분석뿐만 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 평가모델이다. 프로젝트 수준의 교량 LCC 분석에 있어서 일반적인 성능평가의 객체는 교량의 구성부재이다. 성능평가 모델의 개발을 위해 신뢰지수와 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.

신뢰지수의 평가와 보수보강 효과의 정량화를 위해 시간이력 신뢰성해석이 필요하며, 본 연구에서는 확률론적 안전성평가방법의 하나인 응답면기법(response surface method; RSM)을 사용하였다. 응답면기법은 몇 개의 결정된 분석값과 이러한 결과의 회귀분석 값을 통하여 특성묘사함수를 근사 접근하는 방법이다. 본 연구에서는 국도 상 실교량의

통계분석을 통해 교량의 구조특성에 따라 범주화하여 구조 해석을 실시하고, 이 결과를 이용하여 응답면기법을 이용한 접근을 시도하여 열화모델과 보수·보강 효과의 정량화를 수행하였다(Kong et al. 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(한국건설기술연구원 2006).

일반적으로 교량에 어떠한 유지관리조치도 적용되지 않은 경우의 초기 성능이력곡선에 n 번의 유지관리조치가 실시된 교량의 성능지수 이력곡선은 중첩의 원리를 이용하여 식 (4)과 같이 평가할 수 있다.

$$P(t) = P_0(t) + \sum_{i=1}^n \Delta P_i(t) \quad (4)$$

여기서, $P(t)$ =초기성능이력곡선의 함수, P_0 =초기성능지수, n =교량의 수명동안 적용된 유지관리조치의 수, t =시간(년), $\Delta P_i(t)$ =유지관리조치(i)에 따른 성능이력곡선의 변화.

2.3 다중목적 최적화

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 교량 성능의 중요도에 따라 무수히 많이 존재할 수 있으며, 만족스러운 유지관리 시나리오는 구조성능의 향상과 유지관리비용의 감소라는 목적을 균형있게 만족시킬 수 있도록 결정되어야 한다.

대부분의 현존하는 최적화과정은 제약조건으로서 교량의 상이한 주요 성능기준을 다루는 동시에 특정한 시간까지의 기대되는 누적유지관리비용을 최소화하는데 목적을 두고 있다(Thompson et al. 1998, Miyamoto et al. 2000). 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 대한 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 위해 그림 2와 같이 분리된 목적함수로서 LCC를 최소화하고 신뢰도와 상태를 최대화하는 Pareto 최적해 개념(Marler and Arora 2004)을 사용하였다. 유지관리 시나리오 생성문제는 GA를 이용한 성능과 비용의 다중목적 조합최적화 문제로서 개념적으로 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 목적함수 사이의 최적 tradeoff 해는 물론, 관리주체의 요구조건 및 제약조건을 적용하는 경우에

대해서도 최적 tradeoff 해를 제공할 수 있도록 적합도 함수를 적용하였다. 또한 현실적 적용성 확보를 위하여 교량 구성부재간의 교체에 따른 종속적 관계를 고려하여 시스템 전체적인 최적 tradeoff 유지관리 시나리오를 선정할 수 있도록 하였다(한국건설기술연구원 2006).

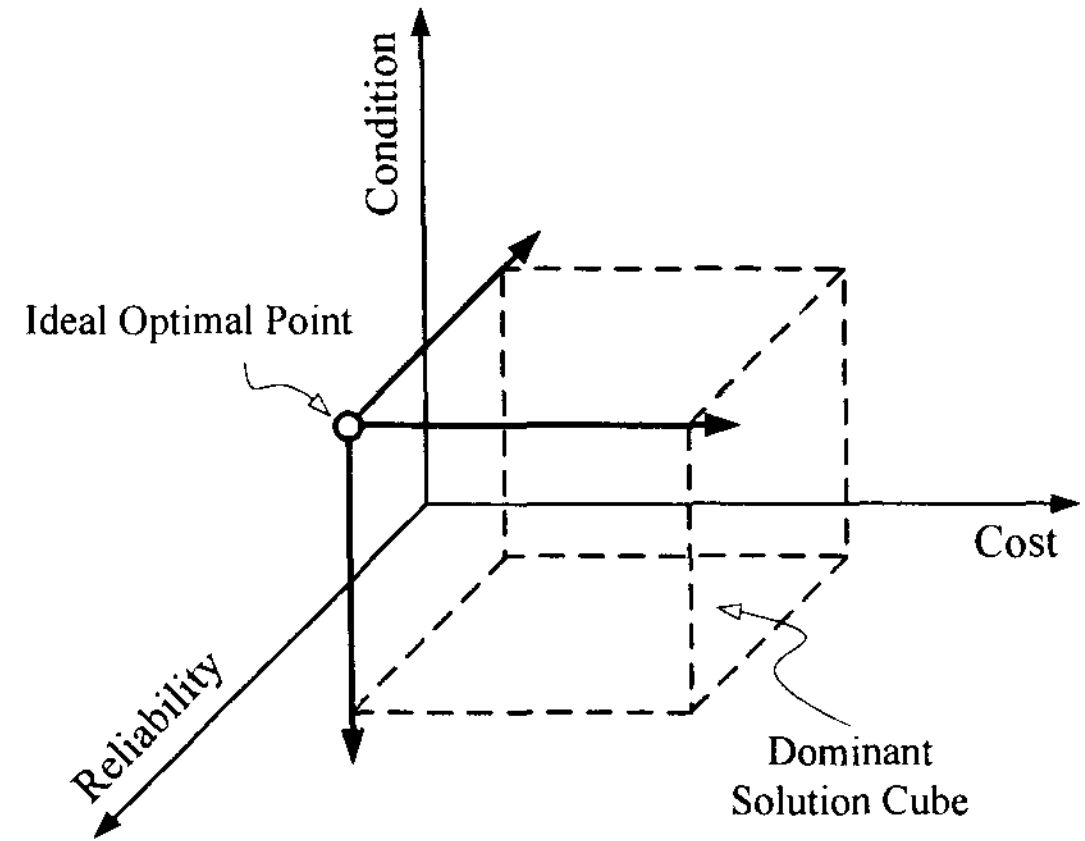


그림 2. Pareto 최적 해의 개념

Objectives :

$$F_1 = C_T^p = \sum_{t=t_p}^T C_t^p \rightarrow \min. \quad (5)$$

$$F_2 = \rho_t = \min[\rho_{t_p}, \rho_{t_p+1}, \rho_{t_p+2}, \dots, \rho_T] \rightarrow \max. \quad (6)$$

$$F_3 = \beta_t = \min[\beta_{t_p}, \beta_{t_p+1}, \beta_{t_p+2}, \dots, \beta_T] \rightarrow \max. \quad (7)$$

Subject to :

$$g_i(\cdot) \leq 0 \quad i=1,2,\dots,N_s \quad (8)$$

여기서, C_T^p =총 생애주기비용의 현재가치; ρ_t =생애주기 상태지수; β_t =생애주기 신뢰지수; t_p =현재시간; T =생애주기 전체시간; $g_i(\cdot)$ =예산, 성능 등에 관련된 제약조건 또는 관리주체의 요구조건; N_s =제약조건의 수.

3. 최적 유지관리 전략 수립 시스템

3.1 최적 유지관리 전략 수립 절차

최적 유지관리 시나리오는 교량 관리자에 의해 입력되는 대상 교량의 제원, 지역적 특성, 고려되는 비용항목, 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 그림 3과 같다.

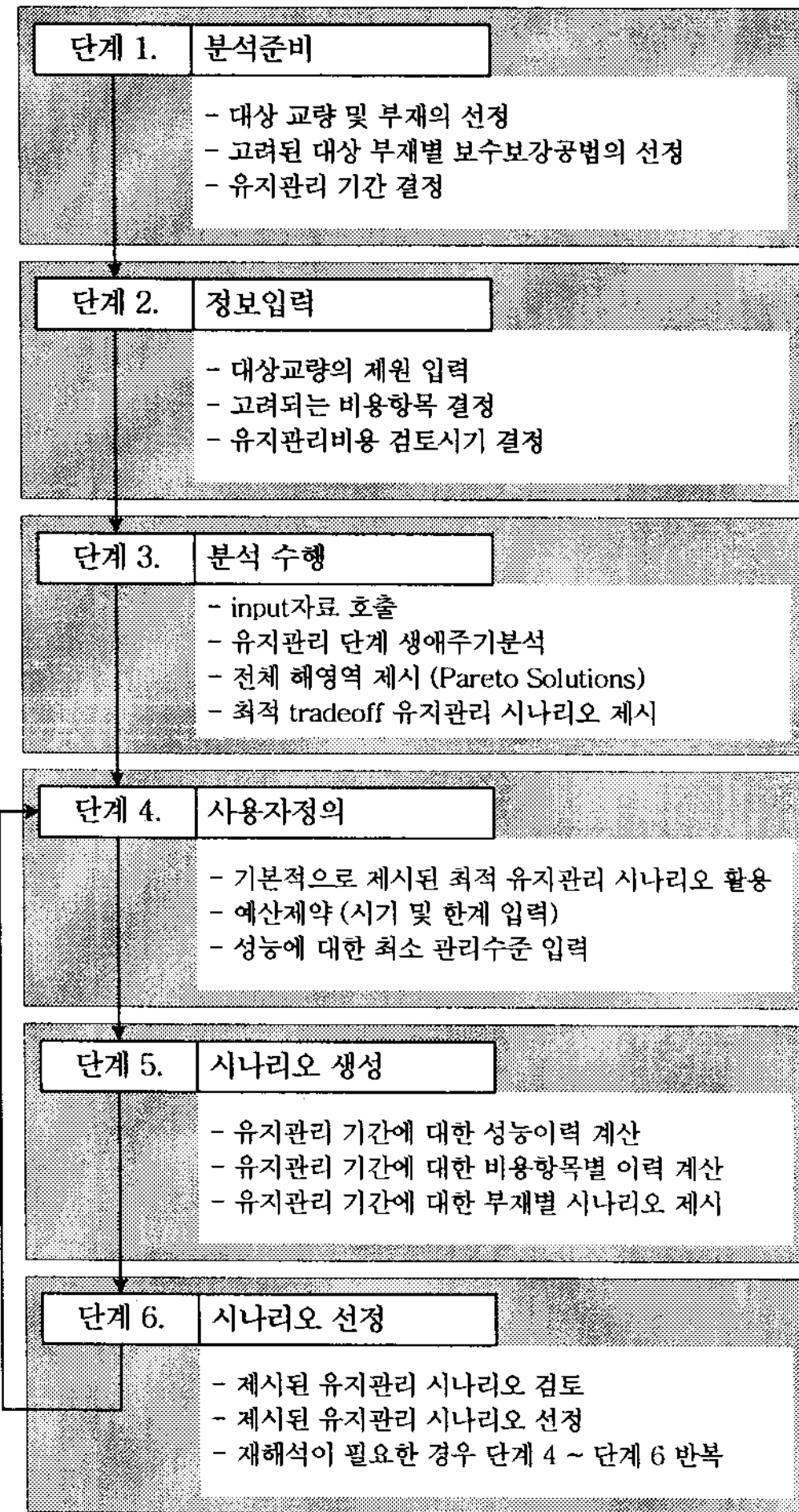


그림 3. 최적 유지관리 시나리오 선정 절차

3.2 최적 유지관리 시나리오 생성 시스템

최적 유지관리 시나리오 생성 시스템은 교량 성능의 추정에 대한 한계로 인해 일반적인 강교량을 대상으로 개발되었으며, LCMSTEB (Performance Based Life Cycle Maintenance System for Steel Bridges)으로 명명하였다.

LCMSTEB의 개발언어는 Visual C++을 이용하였으며, 내장된 데이터베이스는 MS-SQL을 이용하였다. 분석된 결과는 프로그램내에서 시각적으로 나타내어지며, 엑셀파일로 수치적 결과를 저장한다. LCMSTEB에서는 사용자의 최소한의 입력으로 해석을 수행할 수 있도록 하기 위해 데이터베이스에 입력되어있는 교량의 경우, 자원, 준공시기, 열화 및 보수보강 특성에 대한 데이터를 입력받을 수 있도록 하였다.

해석결과는 기본분석결과, 시나리오 생성, 시나리오분석결과 과정의 과정을 거쳐 확인, 검토 할 수 있다. 최적시나리오 분석을 수행하였을 경우, 가장 기본적인 분석결과로 그림 4와 같이 기본분석결과를 보여준다. 우선순위를 확인하고자 하는 ranking의 개수를 입력하면, 최적 해에 가까운 순서대로 테이블에 표시된다. 그림 4와 같이 비용, 상태, 신뢰도의 3가지 목적에 부합하는 최적해의 집합에서 각 점들은 각각의 유지관리 시나리오를 의미하며 비용, 상태지수 및 신뢰지수의 이력을 내포하고 있다.

시나리오 생성단계에서는 그림 5와 같이 기본분석결과를 포함하여 비용 제약, 성능 제약 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.

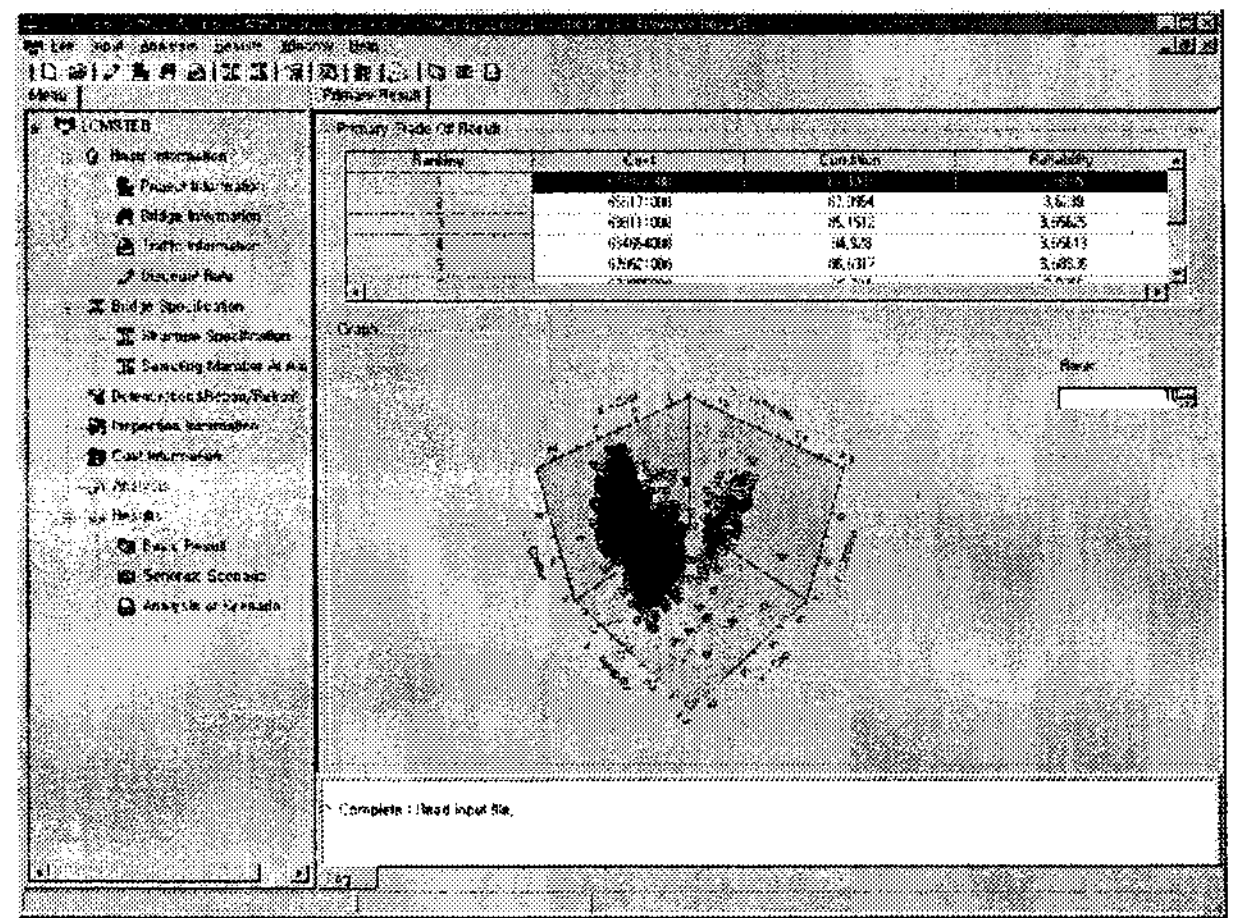


그림 4. 기본분석 결과화면

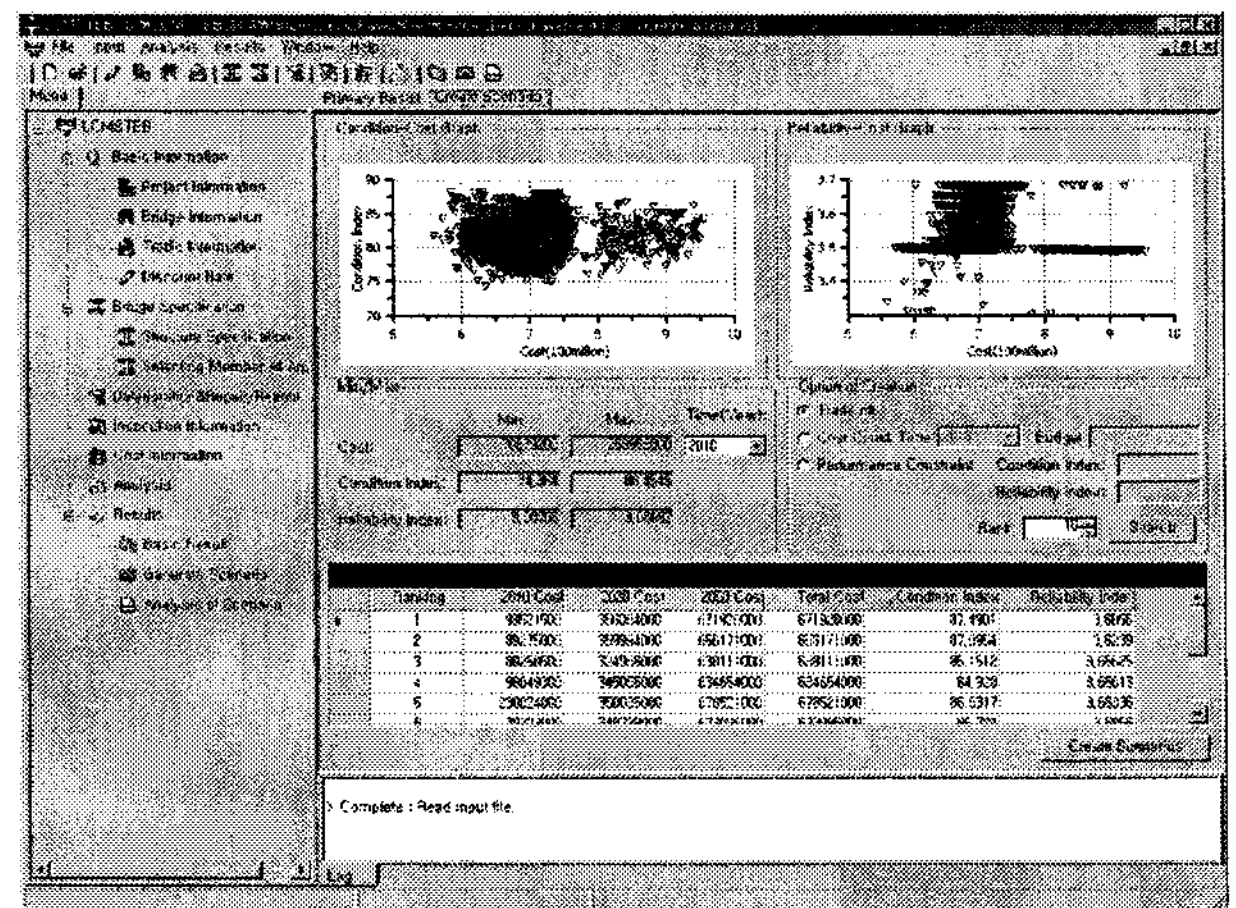


그림 5. 시나리오 생성단계 화면

시나리오 분석 결과단계에서는 시나리오 생성단계에서 결정한 유지관리 시나리오들에 대한 최종적인 해를 제시하며, 고려된 부재별 결과뿐만 아니라 시스템 수준의 분석결과를 확인할 수 있다. 그림 6 및 그림 7은 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.

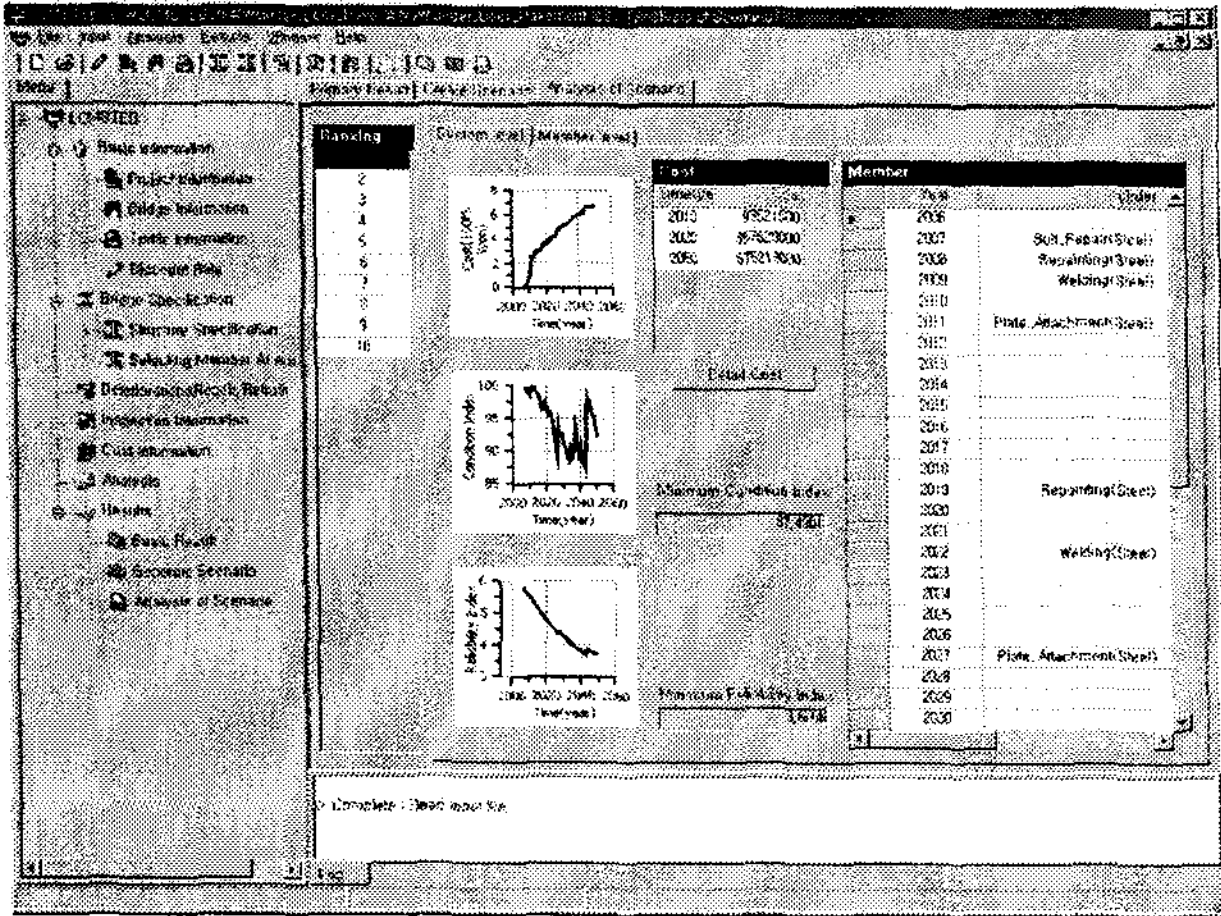


그림 6. 시나리오 분석 결과 화면 - 시스템 결과

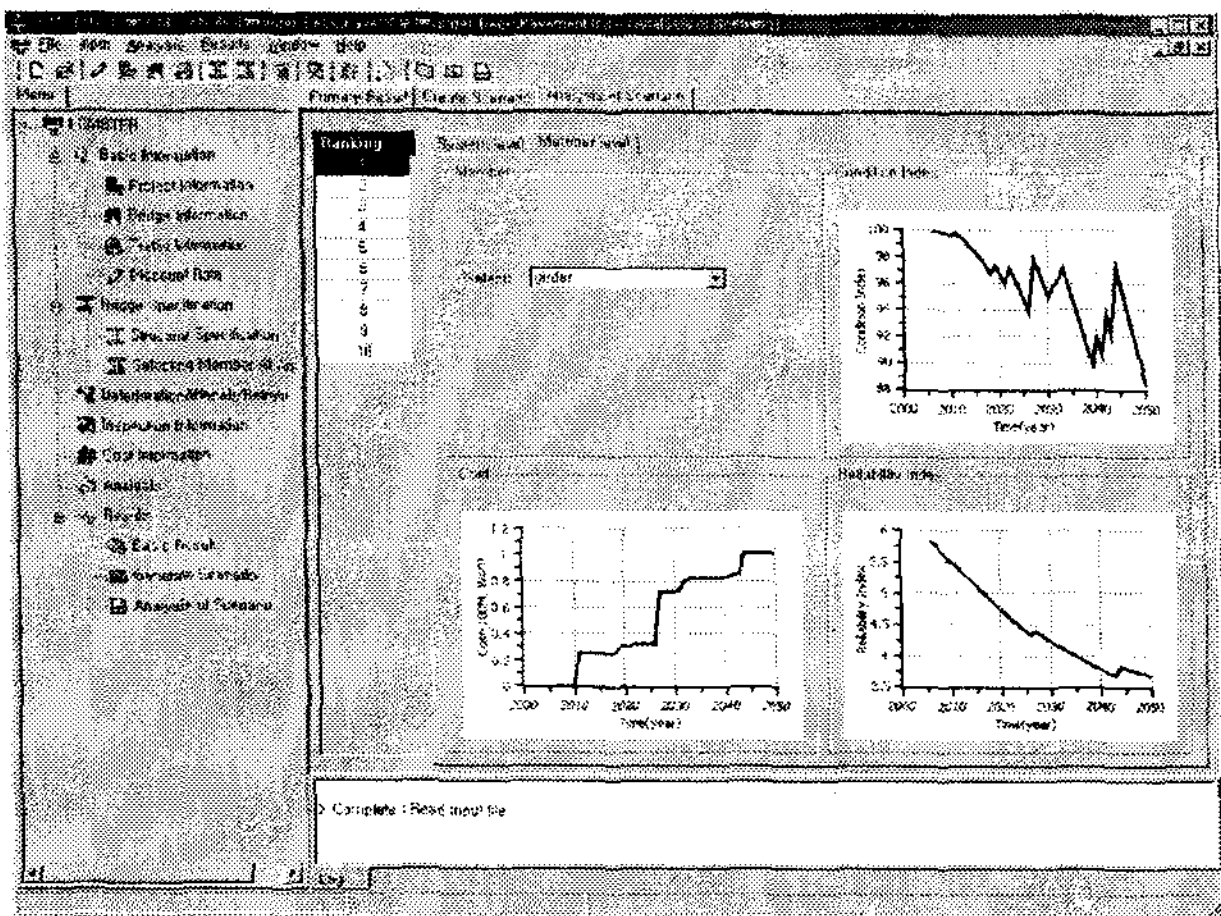


그림 7. 시나리오 분석 결과 화면 - 부재별 결과

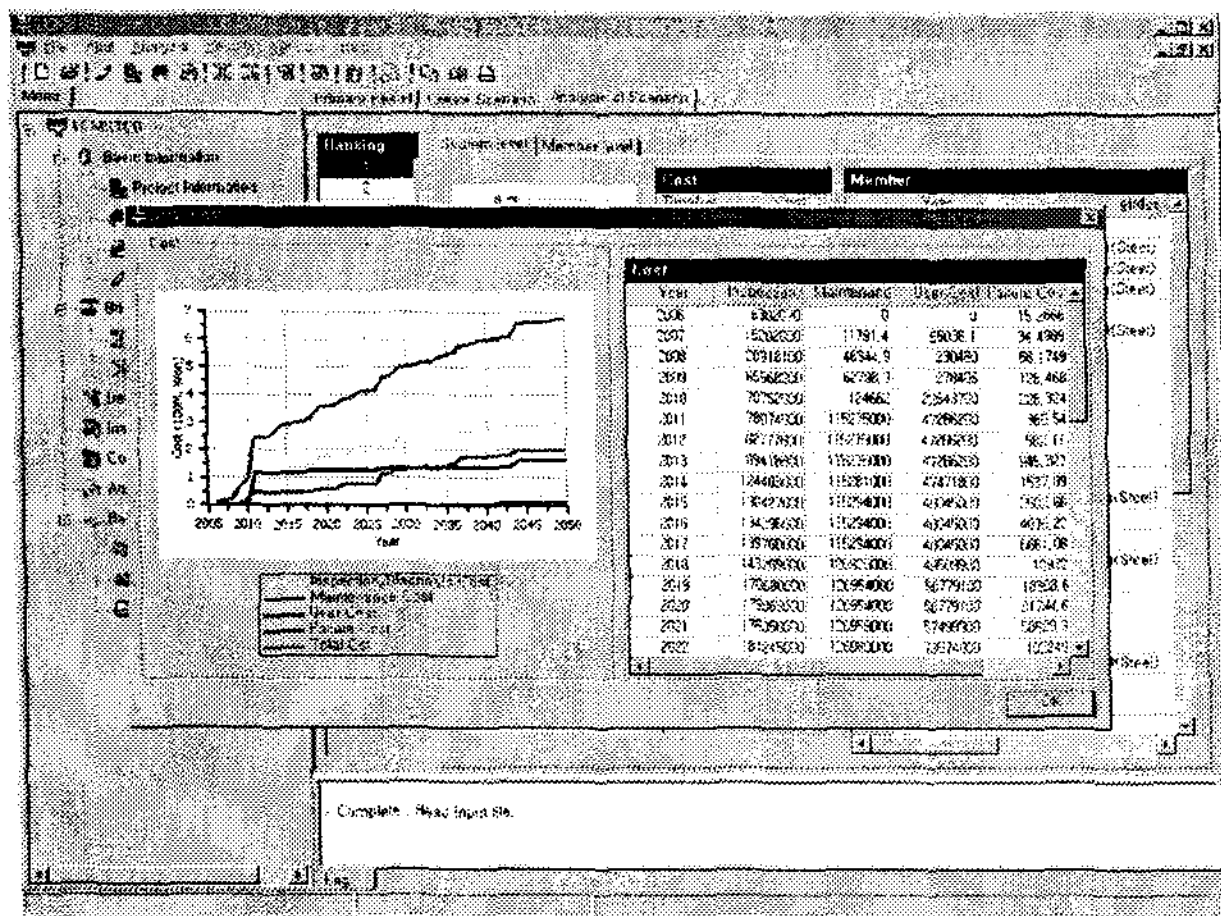


그림 8. 시나리오 분석 결과 화면 - 상세비용 분석결과

사용자가 최종적으로 선택한 해에 대한 시나리오 분석결과는 유지관리 시나리오를 결정하는데 있어서 다양한 정보를 제공해 줌으로써 유용하게 활용될 수 있다. 특히 그림 8과 같이 유지관리비용은 다양한 비용항목으로 구분되어, 사용자가 고려하고자 하는 비용에 대한 보다 상세한 분석이 가능하다.

이러한 분석결과들은 입력 및 적용된 데이터를 포함하여 엑셀파일로 자동 저장된다. 사용자는 분석된 결과를 바탕으로 보다 합리적인 최적 유지관리 의사결정이 가능하다.

3.3 최적 유지관리 시나리오 분석 사례

개발된 시스템을 이용하여 거더, 바닥판, 포장과 같이 교량을 구성하는 독립적인 개별 부재를 모두 고려한 시스템 수준에서 공용수명동안의 최적 유지관리 시나리오 분석을 수행하였다. 분석 대상 교량은 2001년 준공된 45m 지간의 단경간 3연 강박스거더 교량으로 교폭은 19.5m이다. 분석기간은 준공 후 50년, 분석시점에서 45년을 고려하였다. 분석과정에 각 부재의 상태평가모델과 거더의 신뢰도평가모델을 적용하여 열화모델 및 보수·보강 효과의 정량화를 고려하였다(Kong et al. 2006). 분석 프로그램의 GA 실행에 적용된 집단의 개체수 및 세대수는 1,000개체, 200세대이며, 교배확률은 50%, 변종확률은 5%를 적용하였다.

거더에 고려된 유지관리조치는 도장, 용접보수, 볼트교체, 강판접착, 교체이며, 바닥판의 경우 에폭시주입공법, 교면방수공법, FRP접착공법, 교체이며, 포장의 경우 표면처리공법, 팻칭공법, 절삭오버레이공법, 재포장을 고려하였다. 고려된 유지관리조치로 인한 직접비용만을 고려하였으며 각 비용은 기존 자료와 전문가 설문조사에 의해 가정되었다(한국건설기술연구원 2006).

유지관리 시나리오는 고려된 부재별로 고려된 분석기간 동안 연도별 유지관리조치를 제공하며, 적용된 교량의 경우 비용, 상태, 신뢰도라는 각 목적을 균형있게 만족하는 최우선순위의 연도별 유지관리 시나리오는 표 1과 같다. 또한 표 1에서 상위부재(바닥판)의 교체로 인한 하위부재(포장)의 교체를 고려하여 시나리오가 생성되는 것을 알 수 있다.

4. 최적 유지관리전략 수립 시스템의 활용성

교량을 관리하는데 있어서 다양한 요구조건과 제약조건이 발생할 수 있다. 일반적으로 자동화된 시나리오의 생성에서 주어지는 성능과 비용은 관리주체가 관리하고자 하는 성능수준과 유지관리 예산의 추정 또는 제한된 예산의 운용 등과 관련된 요구 및 제약조건을 고려하여 변경이 필요하게 된다. 따라서 개발된 생애주기분석 방법은 (1) 일정한 기간 동안의 예산 수립의 경우, (2) 정해진 유지관리 예산에 제약이 있을 경우, (3) 교량의 성능을 특정 목표 이상으로 관리하고자 할 경우 등에도 동일한 절차에 따라 적용될 수 있다.

표 1. 연도별 유지관리 시나리오

No.	년도	거더	바닥판	포장
1	2006			재포장
2	2007	도장보수		표면처리공법
3	2008	볼트교체	FRP접착공법	
4	2009		에폭시주입공법	
5	2010			
6	2011	용접보수	교면방수공법	절삭오버레이
7	2012			
8	2013			팻칭
9	2014			
10	2015		에폭시주입공법	표면처리공법
11	2016			절삭오버레이
12	2017			
13	2018			재포장
14	2019		교면방수공법	
15	2020	볼트교체		팻칭
16	2021			
17	2022	용접보수	에폭시주입공법	절삭오버레이
18	2023			
19	2024			팻칭
20	2025	도장보수	교면방수공법	
21	2026		교체	재포장
22	2027			절삭오버레이
23	2028			
24	2029	볼트교체	FRP접착공법	표면처리공법
25	2030			
26	2031	용접보수	교면방수공법	팻칭
27	2032		에폭시주입공법	표면처리공법
28	2033			
29	2034			재포장
30	2035			팻칭
31	2036			표면처리공법
32	2037	도장보수		
33	2038		에폭시주입공법	
34	2039	볼트교체		절삭오버레이
35	2040	용접보수		팻칭
36	2041			
37	2042			
38	2043			재포장
39	2044		교면방수공법	
40	2045			절삭오버레이
41	2046			
42	2047			표면처리공법
43	2048	볼트교체	에폭시주입공법	
44	2049			재포장
45	2050	용접보수	교면방수공법	표면처리공법
부재별 최소 상태지수		86.07	86.77	85.94
부재별 최소 신뢰지수		3.91	-	-
부재별 LCC (천원)		97,299	131,880	64,476
시스템 최소 상태지수			87.55	
시스템 LCC (천원)			293,655	

4.1 일정한 기간 동안의 예산 수립의 경우

최소의 비용으로 최대의 성능을 만족하는 시나리오로서 분석기간 전체에 걸친 비용 또는 해당 시나리오의 특정 년도에서의 비용을 바탕으로 최대의 성능을 확보할 수 있는 예산 결정의 문제에 활용될 수 있다. 총 분석기간에 대한 비용뿐만 아니라 예산 수립을 위해 정해진 특정 년도까지의 누적비용을 고려하면, 단편적으로 단기간의 유지관리 분석을 통해 예산을 수립하는 것 보다 장기적인 안목에서 합리적으로 예산 수립이 가능할 것으로 판단된다.

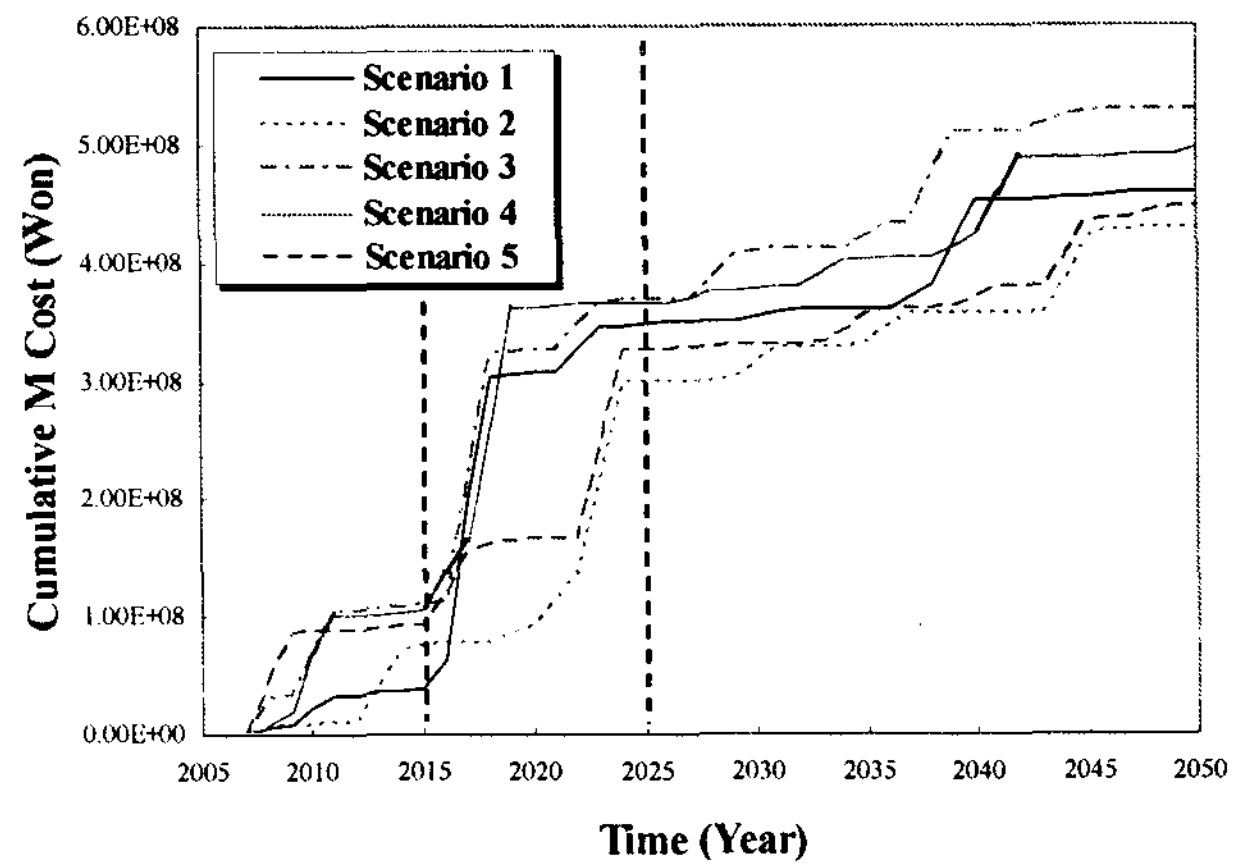


그림 9. 시나리오별 누적 유지관리 비용

4.2 정해진 유지관리 예산에 제약이 있을 경우

일반적으로 교량의 수가 증가하고 노후화 할수록 정해진 예산은 항상 충분하지 못한 경우가 현실적일 것이다. 이러한 경우 정해진 예산 내에서 교량의 성능이 최대로 발휘되는 대안을 제시하여야 한다. 만약 향후 10년 동안 수립된 예산이 제한되어 있을 때, 제한된 조건을 만족시키는 최적 유지관리 시나리오는 총 유지관리 기간 동안의 비용을 고려한 최적 유지관리 시나리오와는 다른 결과로 나타나게 될 것이다. 이러한 경우 얻어진 해에서 제한된 예산을 만족시키는 해만을 추출한 해집합에 대하여 최적 유지관리 시나리오의 우선순위를 결정함으로써, 예산의 제약을 만족시키면서 총 유지관리 기간 동안 성능 및 비용의 최적 tradeoff된 유지관리 시나리오를 선택할 수 있다. 일례로 10년 동안의 유지관리 예산이 3억 원으로 제한되어 있을 경우, 그림 10과 같이 전체 해들 중에 10년 동안의 비용이 3억 원 이하인 대안들을 선정하여 선택된 대안들 가운데서 tradeoff된 해를 찾을 수 있다.

4.3 특정 목표성능 이상으로 관리하고자 할 경우

예산을 수립하는 과정에서 교량을 특정 목표성능 이상으로 관리하고자 할 경우가 발생할 수 있다. 이러한 경우에는 목표성능을 만족하면서 최소비용이 발생하는 시나리오를

선정할 수 있다. 예를 들어 관리주체가 교량의 상태지수를 80이상으로 관리하고자 할 경우, 그림 11과 같이 엘리트 해 집합에서 상태지수가 80이상이면서 비용이 최소가 되는 해를 선택할 수 있다. 이러한 조건을 만족하는 해는 사용자의 입력에 따라 자동적으로 선정되어질 수 있도록 하였다.

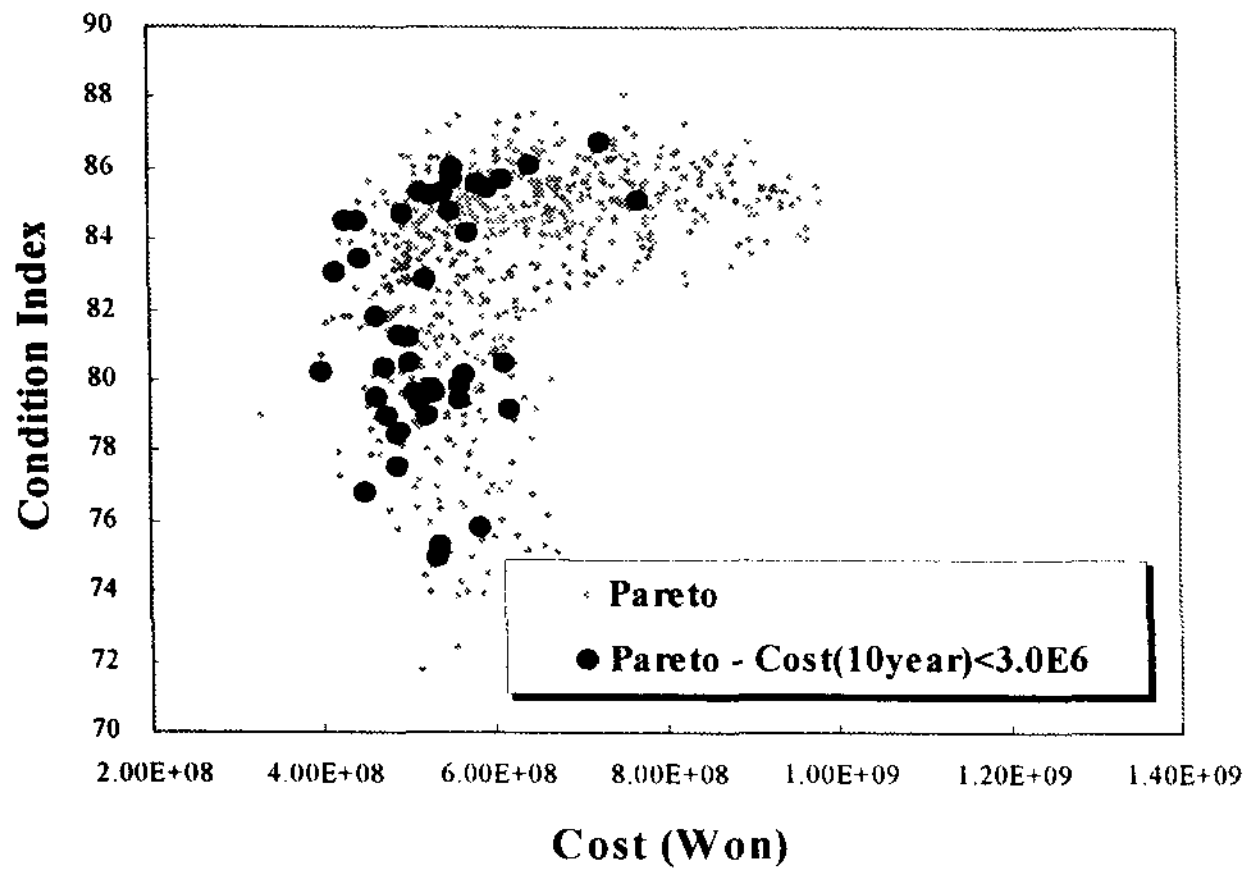


그림 10. 유지관리에산에 제약이 있을 경우

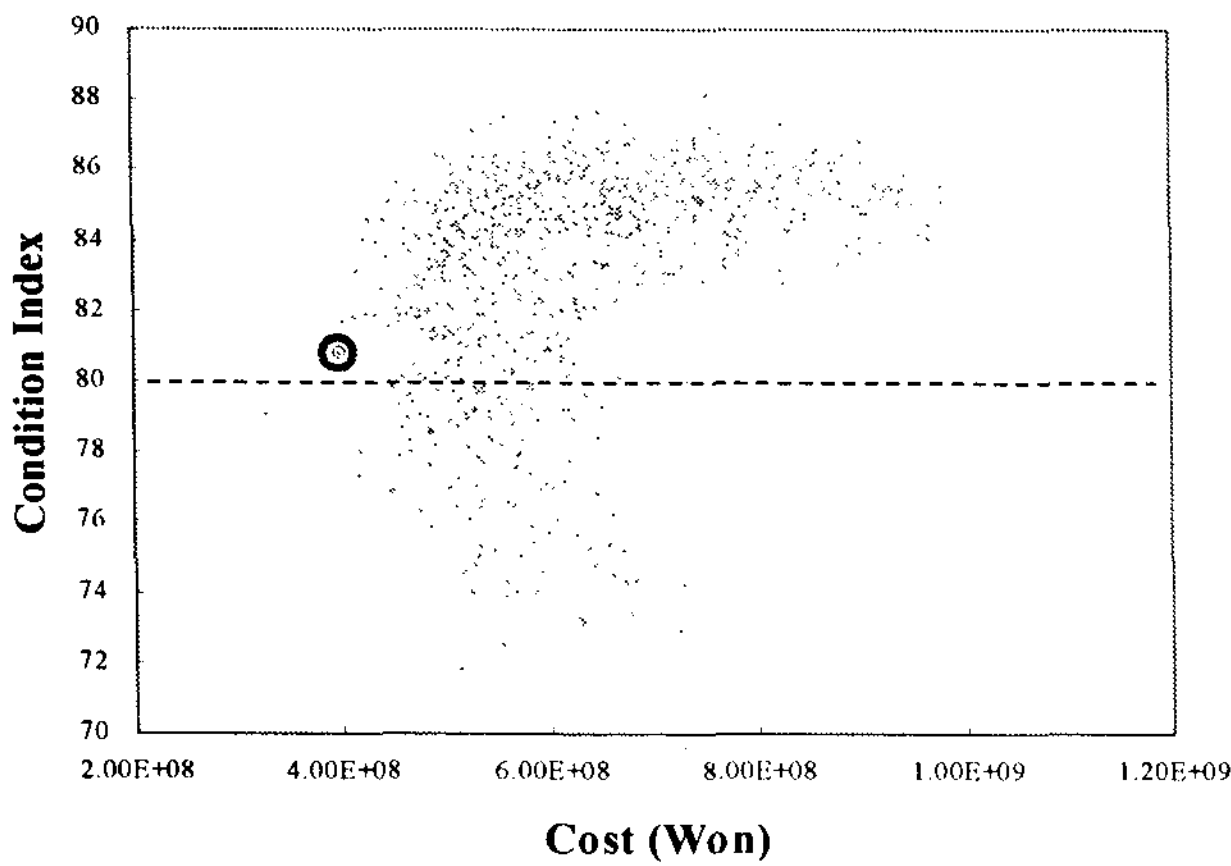


그림 11. 목표성능수준에 따른 최적해

5. 요약 및 제언

본고에서는 교량 수명동안의 성능변화와 비용의 연계를 통해 최적의 유지관리전략 수립을 위한 보다 실제적이고 현실적인 새로운 교량 유지관리기법의 개발을 위한 기본적인 연구결과를 소개하였다. 제시된 교량 유지관리기법은 생애주기 성능과 비용에 기초한 최적 유지관리전략의 수립을 통해 기존의 교량 유지관리방법의 한계를 극복하고 실제적인 예방유지관리 체계의 실현을 위한 차세대 교량 유지관리 시스템 개발의 전형으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 한편 본고에서 기술한 개별 교량 수준(project level)의 생애주기분석뿐만 아니라 관리대상 교량 전체(system level)에 걸친 생애주기분석을 통한 유지관리 의사결정과 관련된 연구개발이 이루어져야 할 것이다.

새로운 유지관리기법에 대한 연구개발에 있어서 가장 큰

난제는 이론적 연구와 실제적인 현실 적용성간의 간극을 얼마나 줄이느냐에 있을 것이다. 향후 보다 실제적이고 다양한 성능평가 결과와 비용관련 데이터의 확보를 통해 실용적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 이를 위해서는 보다 다양하고 체계적인 연구개발이 장기간에 걸쳐 심도 있게 진행되어야 할 것이다. 또한 급속히 발전하고 있는 정보통신기술, 이를 바탕으로 한 예측, 모니터링, 진단, 해석, 예측 기술의 발전과 다양한 유지관리 신기술, 신공법의 개발에 능동적으로 대처할 수 있는 높은 유연성을 지닌 체계로 개발되어야 할 것이다.

새로운 유지관리방법의 효과적 적용을 위해서는 관련 제도의 정비가 필수적이며, 제공되는 정보를 받아들여 최종적인 의사결정을 수행하게 되는 엔지니어가 합리적인 판단을 할 수 있도록 유지관리 전문가의 양성 및 교육 체계의 수립이 동반되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부/한국시설안전기술공단(2003), "안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(교량)", 건설교통부.
2. 한국건설기술연구원(1999), "98 교량관리체계(BMS) 개선에 관한 연구", 연구보고서, 건설교통부.
3. 한국건설기술연구원(2006), "강교량의 최적설계와 경제적 유지관리를 위한 생애주기비용 분석 기법 및 시스템 개발", 건설교통연구개발사업 연구보고서, 건설교통부/한국건설교통기술평가원.
4. Berthelot, C. F., Sparks, G. A., Blomme, T., Kajner, L. and Nickeson, M. (1996), "Mechanistic-probabilistic vehicle operating cost model", Journal of Transportation Engineering, ASCE, 122(5), pp. 337-341.
5. Casas, J. R. (2006), "Bridge management: actual and future trends, CD ROM of Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Performance and Cost, IABMAS, Porto, Portugal.
6. Kong, J.-S. and Frangopol, D. M. (2005), "Probabilistic optimization of aging structures considering maintenance and failure costs", Journal of Structural Engineering, ASCE, 131(4), pp. 600-616.
7. Kong, J.-S., Park, K.-H., Lim, J.-K. and Cho, H.-N. (2006), "Performance regression model for the optimal maintenance evaluation of steel box bridges", IABMAS, LCC5, Proc. intern. workshop, Seoul, Korea.
8. Liu, M. and Frangopol, D. M. (2005), "Multiobjective maintenance planning optimization for deteriorating bridges considering condition, safety, and life-cycle cost", Journal of Structural Engineering, ASCE, 131(5), 833-842.
9. Marler and Arora (2004), "Survey of multi-objective optimization methods for engineering", Struct. Multidisc Optim, 26, 369-395.
10. Miyamoto, A., Kawamura, K. and Nakamura, H. (2000) Bridge management system and maintenance optimization for existing bridges. Computer Aided Civil Infrastructure Engineering, 15(1), pp. 45-55.
11. Nowak, A. S. and Frangopol, D. M., eds. (2005).

"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, Cocoa Beach, Florida.

12. Thompson, P. D., Small, E. P., Johnson, M. and Marshall, A. R. (1998). "The Pontis bridge management system." Structural Engineering Institute, Zurich, 8(4), 303-308.

13. Transportation Research Board (2003), "Proceedings of 9th International Bridge Manage Conference", Transportation Research Circular No. E-C049, Orlando, Florida.

Abstract

This study proposes a practical and realistic method to establish an optimal lifetime maintenance strategy for deteriorating bridges by considering the life-cycle performance as well as the life-cycle cost. The proposed method offers a set of optimal tradeoff maintenance scenarios among other conflicting objectives, such as minimizing cost and maximizing performance. A genetic algorithm is used to generate a set of maintenance scenarios that is a multi-objective combinatorial optimization problem related to the and the life-cycle cost and performance as separate objective functions. A computer program, which generates optimal maintenance scenarios, was developed based on the proposed method. The subordinate relation between bridge members has been considered to decide optimal maintenance sequence. The developed program has been used to present a procedure for finding an optimal maintenance scenario for steel-girder bridges on the Korean National Road. Through this bridge maintenance scenario analysis, it is expected that the developed method and program can be effectively used to allow bridge managers an optimal maintenance strategy satisfying various constraints and requirements.

Keywords : Bridge maintenance, Life-cycle cost, Lifetime performance, Optimal maintenance method
