

STEP 기반 LCC 분석 데이터구조를 이용한 LCC 분석모듈 개발

Development of LCCA Module Using STEP-based LCCA Data Structure

김 동 현* • Huang Meng-Gang** • 김 봉 근*** • 이 상 호****
Kim, Dong-Hyun • Huang, Meng-Gang • Kim, Bong-Geun • Lee, Sang-Ho

ABSTRACT

LCCA module enabling to estimate LCC and analyze time-variant reliability index of a plate girder bridge was developed. The developed module was based on the designed data structure following the standardized methodology of ISO/STEP. LCCA module consisted of LCC estimation module, which is composed of six sub modules according to the cost category, and reliability index analysis module, which is composed of time-variant corrosion sub module, time-variant live load sub module, and element reliability analysis sub module. The effectiveness of the developed LCCA module was verified by estimating LCC and analyzing time-variant reliability index of a plate girder bridge on the basis of the constructed test database.

Keywords: LCCA module, LCC, reliability index, data structure, STEP, plate girder bridge.

1. 서 론

국가 교통망의 중추적인 역할을 하는 교량을 체계적이고 효율적으로 관리하기 위해 정보기술을 이용한 교량유지관리시스템(Bridge Management System; BMS)이 구축되어 있으며, 설계단계 및 유지관리단계에서 투자비용의 효율성을 극대화하기 위해 생애주기비용(Life-Cycle Cost; LCC) 분석을 BMS 내에서 구현하기 위한 연구들이 활발히 이루어지고 있다. LCC 분석은 교량의 공용수명동안 발생하는 모든 단계와 관련된 사항을 고려해야 하며, 시설물 현황정보 Database(DB)를 비롯하여 점검 및 진단이력 DB등을 기초로 하여 수행되므로 효율적인 LCC 분석을 위해서는 체계적인 DB구축이 필수적이다. 그러므로 LCC 분석을 위한 DB구축을 위해 표준화된 방법으로 데이터구조를 설계하는 것이 가장 우선적이며, 설계된 데이터구조를 이용하여 LCC를 분석할 수 있는 응용모듈 또한 개발되어야 한다. 본 논문에서는 국제표준화기구(ISO)의 STEP(STandard for the Exchange of Product model data)을 적용해 설계된 데이터구조를 이용하여, 판형교의 LCC 산정과 주거더에 대한 시간이력 신뢰도지수를 분석할 수 있는 데이터베이스 기반 LCC 분석모듈을 개발하였다.

* 정회원 • 연세대학교 사회환경시스템공학부 연구원 Email: kdh@csem.yonsei.ac.kr
** 학생회원 • 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정 Email: huang@csem.yonsei.ac.kr
*** 정회원 • 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정 Email: bgkim@csem.yonsei.ac.kr
**** 정회원 • 연세대학교 사회환경시스템공학부 정교수 Email: lee@yonsei.ac.kr

2. 데이터베이스 기반 LCC 분석모듈 개발

BMS나 다른 시스템들과의 연계성을 가진 LCC 분석 시스템이 개발되기 위해서는 LCC 분석이 DB를 기반으로 수행되어야 한다. ISO/STEP의 방법론을 적용하여 설계된 LCC 분석 데이터구조(김동현, 2006)는 그림 1과 같이 비용단가정보, 비용변수정보, 사용자비용정보, 신뢰성해석정보로 분류되어 있으며, EXPRESS 언어로 정의된 각 정보모델요소는 ST-Developer를 통해 컴파일되고, 프로그래밍 라이브러리 파일로 변환되며, Oracle을 이용하여 데이터베이스에 정의된 데이터 스키마에 따라 테이블을 생성하게 된다. Microsoft Visual Basic.Net에서 구현된 LCC 산정모듈과 신뢰도지수 분석모듈은 Oracle에 구축된 DB로부터 필요한 데이터를 읽어 들여 LCC 분석을 수행하게 된다. LCC 분석모듈의 프레임워크는 그림 2와 같다.

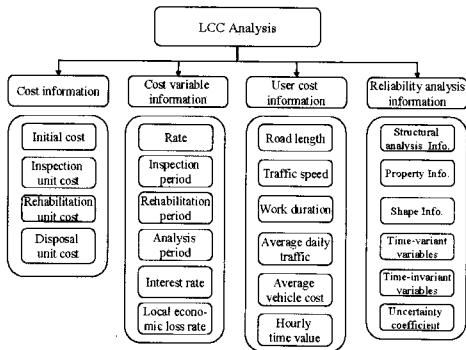


그림 1 LCC 분석 데이터구조의 정보모델요소

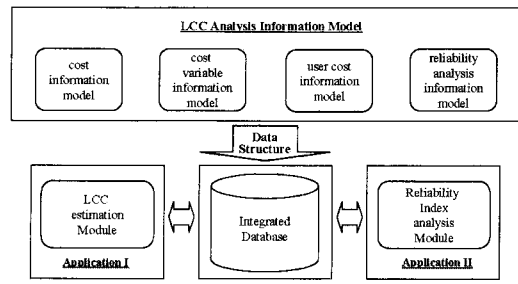


그림 2 LCC 분석모듈의 프레임워크

2.1 LCC 산정모듈의 구성과 LCC 산정 알고리즘

LCC 산정모듈은 LCC를 산정하는 모듈로서 NIST의 모델을 기초로 하여 그림 3과 같이 6개의 서브모듈로 구성하였다. 구성된 서브모듈은 초기비용, 관리비용, 점검비용, 직접복구비용, 간접복구비용, 해체·폐기비용이며, 서브모듈의 총합으로 LCC가 산정된다. 초기비용(initial cost) 서브모듈은 설계비용, 감리비용, 시공비용의 합으로 산정되며, 관리비용(management cost) 서브모듈은 초기비용의 직접공사비에 대한 비율로서 구할 수 있다. 점검·진단비용(inspection cost) 서브모듈은 생애주기동안 점검 및 진단에 사용되는 비용을 산정하는 모듈로서 정기점검, 정밀점검, 긴급점검, 정밀안전진단에 대한 비용의 합으로 구해진다. 각 점검마다 주기들이 다르기 때문에 점검이 이루어지는 해당년도마다 할인율을 적용하여 현재가치로 변환시켜주어야 한다. 직접복구비용(direct rehabilitation cost) 서브모듈은 생애주기동안 부재별 보수비, 보강비, 교체비에 대한 비용을 산정하는 모듈이다. 부재별로 보수비, 보강비, 교체비의 단가와 주기를 고려하여 산정하게 되며, 복구가 이루어진 해당년도마다 할인율을 적용하여 현재가치로 변환시켜준다. 간접복구비용(indirect rehabilitation cost) 서브모듈은 사용자비용과 지역경제손실비용을 산정하는 모듈로서, 지역경제손실비용은 사용자비용에 대한 지역경제손실률로써 산정하기 때문에 사용자비용을 구하는 것이 관건이다. 사용자비용은 시간지연비용과 차량운행비용의 합으로 산정되는데, 부재별 복구 중에서 해당부재의 복구로 인하여 교량을 통행하는 사용자들에 대해 간접적 손실이 나타날 때에만 적용된다. 해체·폐기비용(disposal cost) 서브모듈은 교량의 해체·폐기비용을 산정하는 모듈로서, 할인율을 적용하여 현재가치로 변환시켜주어야 한다.

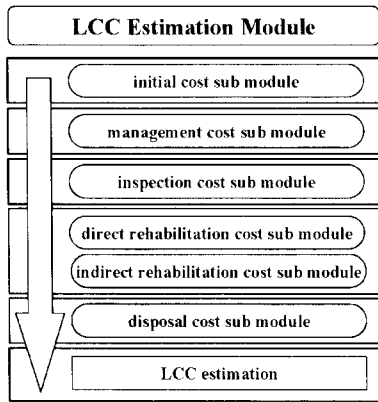


그림 3 LCC 산정모듈의 구성

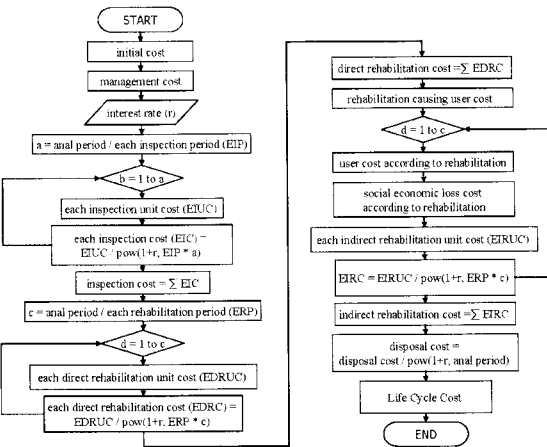


그림 4 LCC 산정 알고리즘

LCC를 산정하기 위해서는 비용정보모델, 비용변수정보모델, 사용자비용모델에서 제시된 데이터들을 필요로 하며, 산정절차는 LCC 산정 서브모듈의 순서와 동일하다. 그림 4에 제시된 LCC 산정 알고리즘에서는 세부적 데이터의 입력사항은 생략하고 비용 산정에 초점을 맞추어 계략적으로 나타내었다. 그림에서 보듯이, 점검·진단비용, 직접복구비용, 간접복구비용, 해체·폐기비용은 할인율을 적용하여 현재가치로 변환시켜준 것을 볼 수 있다. 그리고 간접복구비용은 직접복구조치 중에서 간접손실을 유발하는 조치만을 고려해야 하며, 따라서 간접복구비용이 발생하는 주기는 직접복구비용의 주기와 동일하게 사용된다.

2.2 신뢰도지수 분석모듈의 구성과 신뢰도지수 분석 알고리즘

신뢰도지수 분석모듈은 시간이력 부식모델과 시간이력 활화중모델을 고려하여 요소신뢰성해석을 수행함으로써 시간에 따른 부재의 신뢰도지수를 분석하게 되며, 요소신뢰성해석은 부재별 한계상태함수에 대해 수행

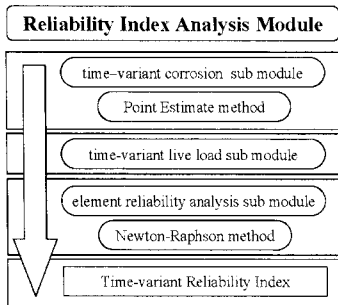


그림 5 신뢰도지수 분석모듈의 구성

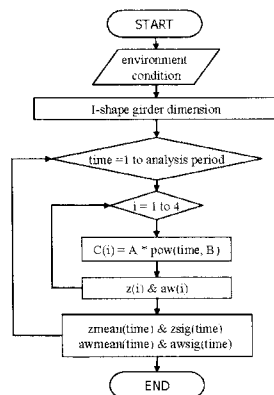


그림 6 시간이력 부식모델 알고리즘

된다. 신뢰도지수 분석모듈은 그림 5와 같이 시간이력부식 서브모듈, 시간이력활화중 서브모듈, 요소신뢰성해석 서브모듈로 구성된다. 요소신뢰성해석을 수행하는데 있어서 신뢰도지수에 대한 방정식의 해를 찾기 위해 Newton-Raphson 방법을 도입하여 요소신뢰성해석 서브모듈에 추가하였으며, 시간이력부식 서브모듈에서는 점 추정법(point estimate method)이 도입되었다. 시간이력부식(time-variant corrosion) 서브모듈은 시간에 따른 부재의 단면 감소를 분석하는 모듈이다. 본 논문에서 분석한 I형강의 경우, 환

경조건에 따라 부식 깊이가 산정되며, 산정된 부식 깊이는 휨강도의 경우 소성단면계수의 감소를 초래하고, 전단강도의 경우 웹의 면적 감소를 유발한다. 시간이력활하중(time-variant live load) 서브모델은 시간에 따른 활하중모멘트, 활하중전단력을 산정하는 모듈이며, 극치통계에 근거한 Nowak의 활하중 모델을 적용하였다. 요소신뢰성해석(element reliability analysis) 서브모델은 부재별로 생성된 한계상태함수에 대해 신뢰성해석을 수행하여 신뢰도지수를 산출하는 모듈이다. 본 논문에서는 AFOSM방법 중에서 Rackwitz-Fiessler의 등가정규분포변환 방법을 통해 신뢰도지수를 산출하였다.

시간이력 부식모델 알고리즘은 그림 6과 같으며 먼저 환경조건이 심각한 부식 환경과 일반 부식 환경 중에서 선택된다. 그러면 부식모델(Albrecht와 Naemi, 1984)에 따라 부식 깊이가 결정되고, 점추정법에 따라 소성단면계수의 평균과 표준편차, 웹 면적의 평균과 표준편차가 계산된다. 시간이력 활하중모델 알고리즘은 그림 7과 같고, Nowak(1993)의 그래프를 통해서 HS-20에 의하여 단 경간(simple span)에 발생하는 최대모멘트의 평균과 변동계수, 최대전단력의 평균과 변동계수를 읽는다. 그리고 알고리즘에 제시된 Ayyab와 white(1995)의 알고리즘에 제시된 식들을 이용하여 연도별 최대 활하중모멘트의 평균과 표준편차, 최대 활하중전단력의 평균과 표준편차를 얻게 된다. 요소신뢰성해석 알고리즘은 그림 8과 같다. 한계상태함수가 제시되면 시간이력 부식모델과 시간이력 활하중모델에서 얻어진 값들을 배열형태로 입력받고, 한계상태함수에 포함된 랜덤변수의 평균과 표준편차를 이용하여 Rackwitz-Fiessler의 등가정규분포변환 방법을 통해 신뢰도지수가 산출된다.

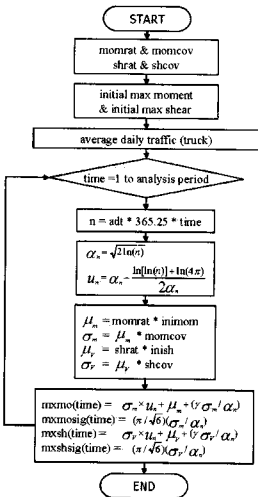


그림 7 시간이력 활하중모델 알고리즘

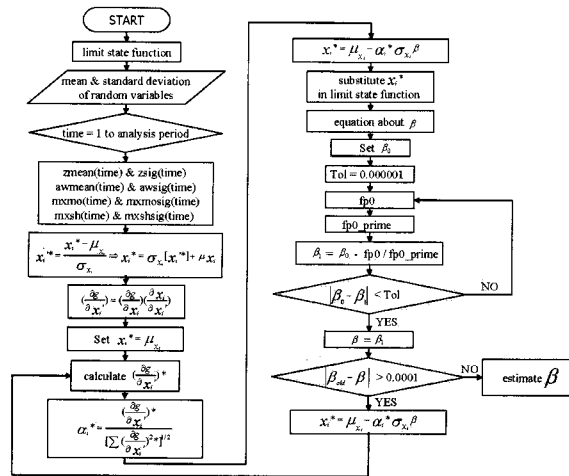


그림 8 요소신뢰성해석 알고리즘

3. LCC 분석모듈을 이용한 수치예제

본 연구에서 개발된 LCC 분석모듈을 검증하기 위해 판형교를 대상으로 ISO/STEP을 적용하여 설계된 데이터구조에 시범 데이터베이스를 구축하였으며, LCC 분석모듈을 이용하여 LCC를 산정하고 주부재의 신뢰도지수를 분석하였다. 한국도로공사에서 LCC 분석을 수행했던 교량(한국도로공사, 2002)을 수정하여 예제교량으로 선정하였으며 그림 9와 같다.

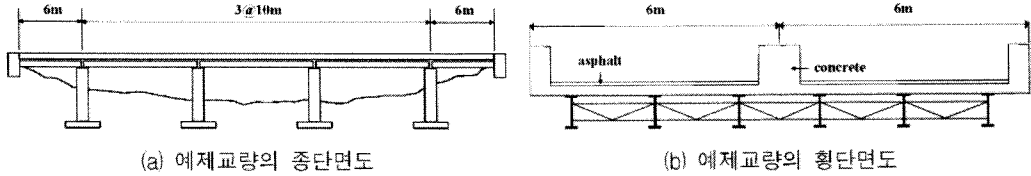


그림 9 예제교량의 종단면도 및 횡단면도

시범 데이터베이스를 기반으로 개발된 LCC 산정모형을 이용해 산정된 LCC는 표 1과 같다. 그림 3의 LCC 산정모형에 제시된 것처럼 서브모듈별로 나타나 있으며, 서브모듈의 총합이 LCC이다. 표에서 볼 수 있듯이, 초기비용이 40.20%로 가장 큰 비율을 차지하며, 보수비, 보강비, 교체비의 합인 직접복구비용이 33.47%를 차지한다. 구해진 값들은 통계청과 한국은행의 자료 분석을 통해 산출된 3.19%의 할인율을 적용하여 현재가치로 변환시킨 값들이다.

표 1 서브모듈별 LCC 산정결과

서브모듈 항목	비용 (단위: 백만원)	LCC에 대한 비율
초기비용	1,063.21	40.20%
관리비용	130.36	4.93%
점검·진단비용	324.38	12.26%
직접복구비용	885.08	33.47%
간접복구비용	214.64	8.12%
해체·폐기비용	27.09	1.02%
LCC	2,644.78	100%

또한, 시간에 따른 신뢰도지수의 분석을 통해 유지관리전략이 수립될 수 있도록, 개발된 신뢰도지수 분석모형을 이용하여 관형교의 주부재에 대하여 신뢰도지수의 변화를 분석하였다. 그림 10은 부식진전모형을 도심환경에 적용하여 시간이력부식 서브모듈을 통해 산출된 주부재의 웹 면적 변화에 대한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 시간이 지남에 따라 웹 부분이 부식되어 웹 면적의 평균값이 감소하고, 표준편차의 값이 증가함을 볼 수 있다. 그림 11은 신뢰도지수 분석모듈의 시간이력활하중 서브모듈을 통해 주형에 작용하는 최대전단력을 분석한 결과이다. 본 연구에서는 교량의 일일교통량을 20,000대로 가정하고, 트럭의 수는 5%인 1,000대로 가정하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, 시간이 지남에 따라 활하중 최대전단력이 증가하지만, 그림 10의 부식모형과는 다르게 시간에 따른 COV의 변화는 거의 없다. 또한, 경간이 10m인 경우가 6m인 경우에 비해 훨씬 큰 것을 볼 수 있다.

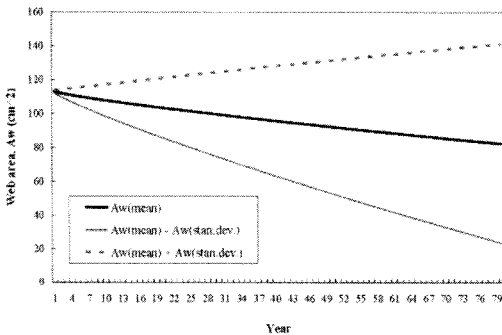


그림 10 시간이력부식 서브모듈에 의한 시간에 따른 웹 면적의 변화

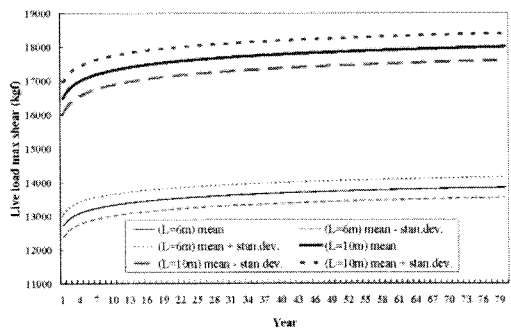


그림 11 시간이력활하중 서브모듈에 의한 시간에 따른 최대전단력의 변화

불확실계수의 분포, 시간이력 부식모델의 분포, 활하중모델의 분포를 가지고 각 거더별로 생성된 한계상태 함수에 대해 요소신뢰성해석 시브모델을 이용하여 주거더의 강도상태에 대한 신뢰도지수의 변화를 분석하였다. 그림 12는 예제교량의 주거더 중에서 하나의 거더에 대한 휨강도와 전단강도의 시간에 따른 신뢰도지수의

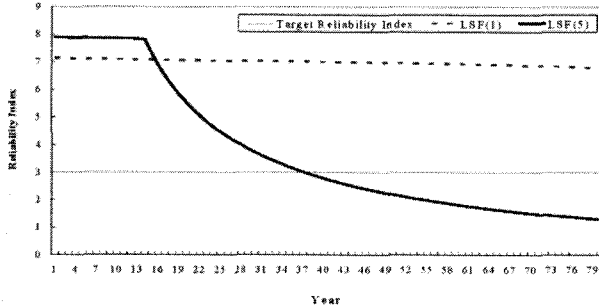


그림 12 신뢰도지수 분석모델에 의한 주거더의 신뢰도지수 분석

의 변화를 보여주고 있는데, LSF(5)인 전단강도의 감소가 LSF(1)인 휨강도의 감소보다 훨씬 큰 것을 볼 수 있다. 또한, 본 연구에서는 Neves 등(2004)에 따라 Target Reliability Index를 3.0(파괴확률=0.00135)으로 설정하였는데, 신뢰도지수가 3.0에 도달하게 되면 해당부재에 대한 복구조치가 이루어져야 하며, 혹은 그 시기가 되기 전에 사전예방유지관리가 이루어져야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 교량을 체계적이고 효율적으로 관리하며 투자비용의 효율성을 증대시키기 위한 LCC 분석 모듈을 개발하였다. 개발된 LCC 분석모델은 ISO/STEP의 표준화된 방법론에 따라 설계된 데이터구조를 기반으로 하였으며, 관형교의 LCC 산정이 가능하고 주부재의 신뢰도지수를 분석할 수 있다. LCC 분석모델의 검증을 위해 관형교를 대상으로 시범 DB를 구축하여 LCC를 산정하였고, 주거더의 강도한계상태에 대한 시간에 따른 신뢰도지수를 분석하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 실시한 건설핵심기술연구개발사업(교량설계핵심기술연구단)의 연구비 지원을 받아 수행된 연구이며, 이 논문의 일부는 2007년도 교육인적자원부 BK21사업의 일환인 연세대학교 사회환경시스템공학부 미래사회기반시설 산학연공동사업단의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

- 김동현 (2006) 관형교의 LCC 분석을 위한 데이터구조 설계 및 데이터베이스 기반 분석모델 개발, 석사학위 논문, 연세대학교.
- 한국도로공사 (2002) 고속도로 교량의 구성요소별 생애주기비용(LCC)분석 연구, 2002년도 연구보고서, 한국도로공사 기술심사실.
- Albrecht, P., Naeemi, A.H. (1984) Performance of weathering steel in bridge, *National Cooperative Highway Research Program, Report 272*, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.
- Ayyub, B.M., White, G.J. (1995) Probability-based life prediction, *Probabilistic Structural Mechanics Handbook*, Chapman & Hall, New York, pp.416~428.
- Neves, L.C., Frangopol, D.M., Cruz, P.S. (2004) Cost of life extension of deteriorating structures under reliability-based maintenance, *Computers and Structures*, 82(13-14), pp.1077~1089.
- Nowak, A.S. (1993) Live load model for highway bridges, *Structural Safety*, 13(1-2), pp.53~66.