

ICT 기술을 활용한 교량의 확률기반 피로수명 평가

Probabilistic Fatigue Life Prediction for Bridges using ICT Technologies

1. 서 론

교량의 전 생애주기(설계, 시공, 유지관리, 교체)에 걸쳐 보다 효과적으로 교량을 관리하는 기술을 개발하기 위해 ‘ICT(Information & Communication Technology) 기술’을 활용, 궁극적으로는 최대 공용수명 및 친환경(탄소 저감) 수준이 미리 설정되고, 이에 따른 부재 결정, 점검 및 교체 계획 등이 사전 계획되어 첨단/친환경 기술 및 저탄소 소재 활용을 통해 능동적으로 관리되는 교량시스템의 개발을 도모하는 ICT 교량 연구단이 2013년 출범하였다.¹⁾ 한국과학기술원(KAIST)를 주관연구기관으로 (주)대우건설과 (주)포스코를 협동연구기관으로 하고, 국내외 여러 굴지의 기관과 연구진이 참여하여 국내 최고 수준의 연구수행 컨소시엄을 구성하였으며, ‘정밀 급속시공/부분조립 및 교체기술’, ‘저탄소 고성능 소재활용 친환경 교량기술’, ‘ICT 기반 교량 안전진단 및 통합관리 기술’의 3개 세부로 나뉘어 교량수명 연장, 탄소배출량 저감, 공기 단축, 비용 절감을 목표로 다양한 연구들이 수행되고 있다(그림 1).

이중 3세부에서는 ‘예방적 유지관리를 위한 지능형 친환경 통합 관리 기술’을 목표로 교량의 지능형 생애주기 유지관리에 관련된 다양한 기술들을 연구하고 있다(그림 2). 보다 효율적인 교량의 유지관리를 위해서는 LCC(life cycle cost)/LCP(life cycle performance)/LCA(life cycle assessment) 기반의 분석이 필수적이며, 이 중 LCC를 위한 핵심 기술 중의 하나는 바로 ‘교량의 수명 평가’라고 할 수 있다.



이 영 주

울산과학기술대학교 도시환경공학부 조교수



그림 1 ICT 교량연구단 연구내용¹⁾

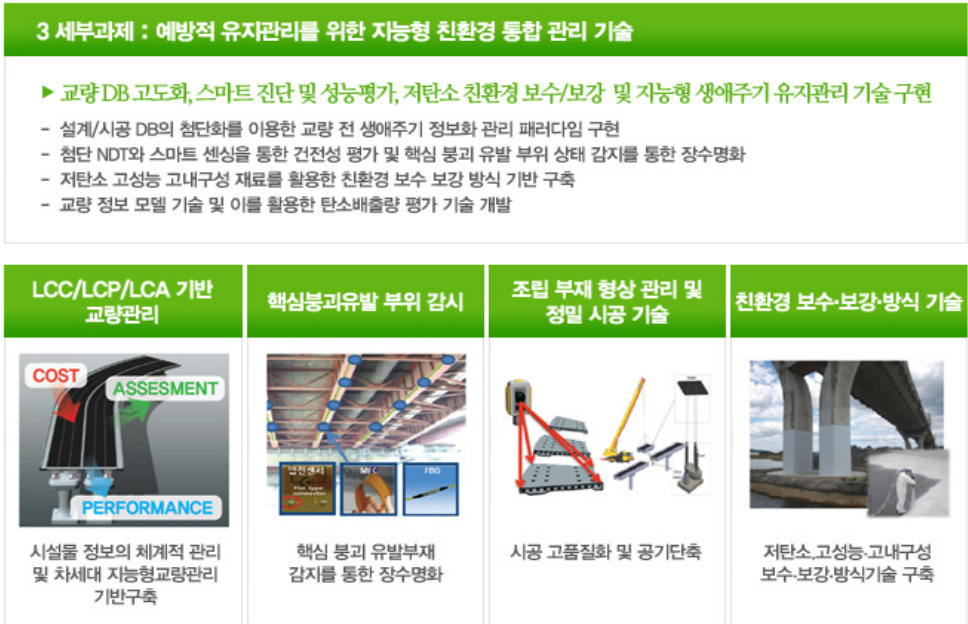


그림 2 ICT 교량연구단 3세부 연구내용¹⁾

교량 수명 평가에 있어 과거에는 교량에 작용하는 하중이나 건설재료들의 물성치가 일정한 불변의 값을 갖고 있다는 가정에 입각한 결정론적(deterministic) 방법을 사용하여 수명을 평가하였으나, 최근에는 급속한 도시화 현상과 전 세계적인 기후 변화 등의 현상과 맞물려 교량 구조물과 주변 환경에 내재되어 있는 불확실성이 크게 증가하기 시작하였다. 1950년대부터 토목 분야를 중심으로 이러한 불확실성 요인들을 고려하여 구조물들을 보다 합리적이고 체계적으로 이해, 분석하려는 시도가 나타났으며, 그 이후로 다양한 확률론적 기법들이 개발되어 폭넓게 활용되고 있다.²⁾

한편 피로(fatigue)는 그간 토목, 항공, 조선, 건축, 기계공학 등의 다양한 분야에 걸친 구조물에 있어 매우 중요하고도 어려운 문제로 받아들여져 왔다. 피로는 금속 재질로 이루어진 구조물의 파괴들 중 대략 50% 이상의 파괴 모드에 연관이 있는 것으로 알려져 있는데, 특히 교량의 경우 설계에 관련된 여러 변수들에 불확실성이 존재하고 있다고 알려져 있기 때문에 자연스럽게 이러한 요인들을 다룰 수 있도록 확률론적인 기법들이 적용되기 시작하였고, 따라서 피로신뢰성(fatigue reliability)이라는 새로운 연구 분야가 주목을 받게 되었다.³⁾

교량의 확률기반 피로수명 평가를 위한 기법은 크게 2가지로 나누어지는데, S-N 곡선(S-N curve)을 활용하는 기법들과 파괴역학(Fracture Mechanics)에 근거하는 기법들이 바로 그것이다.⁴⁾ S-N 곡선은 일정한 크기의 진폭을 갖고 반복적으로 가해지는 응력(stress) S와 파괴가 이루어지기까지 그 응력이 가

해지는 횟수(number) N의 관계를 나타낸 것으로서 주로 실험에 의해 결정되는데, 보통 Miner's rule⁵⁾이라고도 불린다. 반면 파괴역학에 기반을 둔 기법들은 보다 해석적인 경향을 갖는데, 주로 균열 끝(crack tip)에서의 응력장(stress field)을 고려하며 균열의 발생(initiation)과 성장(growth)에 초점을 맞춘다. 즉, 균열 주변의 응력 분포에 따라서 어떻게 균열이 발생하고 그 길이가 진전되는지를 이론적으로 분석하여 그에 관한 수치모델을 수립한 후 그 모델들을 다시 실험을 통해 검증하는데, 가장 대표적인 모델은 Paris' Law⁶⁾이다.

이 두 가지 기법들은 흔히 순서대로 적용이 되곤한다. 즉, 교량 설계 초기에는 S-N 곡선에 맞추어 피로수명을 평가하였다가, 공용 중인 교량의 유지관리 단계에서는 파괴역학에 기반을 둔 기법들을 사용한다.⁴⁾ 이는 보통 Paris' Law에 기반을 둔 파괴역학적 기법들이 보다 정확하고 효율적인 피로수명 평가를 가능케 해주기 때문이다. S-N 곡선은 피로파괴 응력과 하중반복 횟수만을 알려줄 뿐 파괴가 일어나기까지의 중간 과정에 관한 정보를 얻기가 어려운 반면, Paris' Law의 경우 균열 진전 속도가 현재 균열 길이와 가해지는 응력의 함수로 표현되기 때문에 초기 균열이 어떻게 자라나서 그 부재가 파괴에 이르게 되는지에 대한 정보를 제공함으로써 보다 정확한 피로수명 평가가 가능하다. 또한 이러한 균열진전 정량화는 확률론적 기법들과 결합하여 구조물에 관한 다양한 형태의 정보를 활용할 수 있도록 해주는데, 이러한 점은 교량의 확률기반 피로수명 평가에 있어서도 중요한 장점이 된다.

이러한 Paris' Law의 장점들을 활용하고, 한편으로는 공용 중인 교량에 각종 ICT 기술을 적용해서 획득한 정보들을 바탕으로 잔존수명을 평가하고자 하는 연구들이 최근 늘어나고 있다.⁷⁾ 우선 구조물 건전성 모니터링(structural health monitoring, SHM) 시스템은 오랜 기간에 걸쳐 교량의 가속도, 변위, 응력 등의 결과를 제공해주는데, 이를 토대로 광역적인 수준(global level)에서 교량의 성능, 내구성 등을 평가할 수 있으며, 그 결과는 교량 관리 시스템(bridge management system)에 종종 활용되어 보다 최적화된 교량의 유지관리를 가능케 해준다.

또한 피로는 그 특성상 교량의 부재단위나 재료단위에서 발생하는 매우 국부적인 문제의 특성을 갖는데, 이와 관련하여 사용 중인 교량에 대해 육안검사 내지는 비파괴평가(nondestructive evaluation, NDE)를 실시한다. 이는 교량의 현재 하중 조건이나 환경 조건은 물론, 균열발견 여부 및 균열길이에 따라 파괴역학적 모델에 근거해 교량의 수명을 예측하는 것을 의미하는데, 국부적인 수준(local level)에서 얻어진 교량에 관한 정보를 활용한 교량수명 평가라 말할 수 있다.

이렇듯 ICT 기술로부터 얻어진 교량에 대한 광역적·국부적 정보들을 활용하여 보다 정확하게 수명을 평가할 수 있다. 이에 본 기사에서는 최근 수행된 관련 연구 사례들에 대해 소개하고자 한다.

2. 광역수준 정보를 활용한 교량의 확률기반 피로수명 평가

앞서 밝혔듯이 교량에 작용하는 실제 하중이나 주변 환경, 교량 재료의 특성에는 다양한 불확실성 요인들이 내재되어 있고, 따라서 시간에 따라 변화하는 교량의 상태도 불확실성을 갖게 된다. SHM 시스템으로부터 얻어진 광역수준 정보를 활용하여 시간에 따라 변화하는 교량의 상태를 분석하고, 교량의 잔존수명을 확률론적으로 평가하고자 하는 시도들은 그간 여럿 있어 왔다.⁷⁾ Kwon and Frangopol⁸⁾은 SHM 데이터에서 얻어진 등가응력의 확률분포함수를 활용하여 강교량의 피로수명 평가를 수행하였으며, Ni 등⁹⁾은 SHM 데이터를 사용하여 교량의 피로수명을 평가하는 기법을 제안하면서 집중응력에 대한 확률분포를 Miner's rule에 적용하였다. 또한 Liu 등¹⁰⁾은 SHM 정보에 기반하여 교량의 수명을 평가하면서 교량을 하나의 구조계(system)로 보는 시스템신뢰성 해석기법을 적용하기도 하였다.

하지만 이러한 기법들은 모두 시간에 따라 변화되는 교량의 상태를 Paris' Law나 Miner's rule과 같은 피로수치모델의 변수로만 다루었을 뿐, 실제 교량을 물리적으로 해석하는 수치모

델, 즉 유한요소모델에 반영하지는 않았다. 한편 이와 관련하여 최근 매우 의미있는 연구가 있었는데, Yi 등^{11),12)}은 교량의 피로수명을 평가함에 있어 SHM 정보를 바탕으로 업데이트한 교량의 유한요소해석 모델을 피로수명 평가에 적용하였다. 비록 불확실성 요인들을 고려하지 않은 결정론적인 피로수명 평가기법을 사용하기는 하였으나, SHM 정보를 활용하여 유한요소모델의 변수들을 교량의 현재 상태를 가장 잘 표현할 수 있도록 업데이트하였다는 점에서 이 연구들은 큰 의의를 갖는다. 그리고 최근 Lee 등⁷⁾은 앞서의 연구에서 한 걸음 더 나아가 SHM 정보에 근거해 업데이트된 유한요소모델을 활용하여 교량의 확률기반 피로수명을 평가하는 기법을 제안하였다.

이 연구에서는 크게 2가지 제안이 이루어졌는데, 첫 번째는 바로 SHM 정보를 활용하여 유한요소모델을 업데이트하는 방법이다. 이는 앞서 이루어졌던 Yi 등^{11),12)}의 연구결과를 차용한 것으로써, 다음과 같은 단계를 따른다.

- (1) 교량의 설계도면에 따라서 초기 유한요소모델을 제작한다.
- (2) 사용 중인 교량의 암진동(ambient vibration)을 측정한다.
- (3) 측정된 정보로부터 교량의 각 모드들의 변수와 고유주파수, 형상, 감쇠비를 평가한다.
- (4) 평가된 모드 특성 값들과 가장 잘 맞도록 유한요소모델의 변수들을 업데이트한다.

Lee 등⁷⁾에서 제안된 또 다른 내용은 바로 Paris' Law에 근거한 피로수명 평가 수치모델의 개발이다. 이를 위해 Paris' Law를 사용, 피로파괴가 발생하기까지 소요되는 시간을 응력과 초기 균열길이, 피로파괴가 일어나는 시점의 균열길이 등의 함수로 수학적으로 유도하였다. 그 다음으로는 SHM 정보에 의해 업데이트되기 전후의 유한요소모델들로부터 얻어진 응력의 변화를 고려하여 피로수명을 재평가할 수 있는 수치모델을 또한 개발하였다. 이러한 수치모델은 피로신뢰성 해석에 있어 한계상태방정식(limit state function)으로 사용되며, 유한요소모델 업데이트 전후의 응력과 초기 균열길이, Paris' Law의 재료 특성과 관련된 변수들의 불확실성들을 고려하여 모두 확률 변수로 가정하였다.

이렇게 제안된 기법을 2002년도에 중부내륙고속도로에 지어진 삼승교(그림 3)에 적용하였다. 삼승교는 길이 40m의 단경간 강플레이트 거더교로써 5개의 강거더를 주요 부재로 하고 있다. 교량의 설계도면을 바탕으로 SAP2000 유한요소모델(그림 4)을 제작하였는데, 그림에서 붉은 색의 셸요소는 콘크리트 슬래브를, 푸른 색의 프레임요소는 강거더를 각각 나타낸다. 또한 5개의 거더는 아래 쪽부터 차례로 1번부터 5번까지

로 번호를 부여하였다.

삼승교에 대한 구조물 모니터링은 2004년부터 2006년까지 총 4차례에 걸쳐 이루어졌으며, 21개의 가속도계를 교량에 부착하여 정보를 수집하였다. 이를 기반으로 모드 특성들을 추출한 후, 기존의 SAP2000 유한요소모델을 업데이트하였다. 이렇게 업데이트된 유한요소모델과 초기 유한요소모델을 사용하여 동일한 통행트럭에 의해 5개 거더에 가해지는 응력을 비교한 결과는 표 1과 같다.

이렇게 얻어진 응력값을 활용하여 시간에 따른 피로파괴확률을 평가하고, 신뢰도지수(reliability index)로 나타낸 결과는 그림 5와 같다. 신뢰도지수는 확률을 나타내는 하나의 지수로서, 그 값이 클수록 낮은 확률을 의미하게 된다. 그림 4의 결과들을 보면, 우선 전체적으로 시간이 지나면서 피로파괴에 대한 신뢰도지수가 떨어짐을 알 수 있고, 또한 업데이트된 유한요소모델을 사용하여 얻은 신뢰도지수의 수준이 다소 더 높음을 알 수 있다. 이는 대상 교량이 설계 당시에 예상되었던 것보다 구조적

으로 조금 더 양호한 상태이기 때문인 것으로 판단된다.

미국 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials)에서는 목표 신뢰도지수 3.5(그림 5에서의 붉은색 선)에 대하여 피로수명 75년 이상을 권고하고 있다. 표 2는 삼승교의 피로수명 평가결과를 보여주고 있는데, 5개 거더 모두 수명이 AASHTO의 권고 수명인 75년 이상으로 분석되었다. 또한 업데이트된 유한요소모델로부터 얻어진 피로수명이 초기 유한요소모델로부터 얻어진 수명에 비해 4-5년씩 더 긴 것으로 나타났는데, 이는 앞서의 분석과 마찬가지로 삼승교가 예상보다 구조적인 손상을 덜 입었기 때문이다.

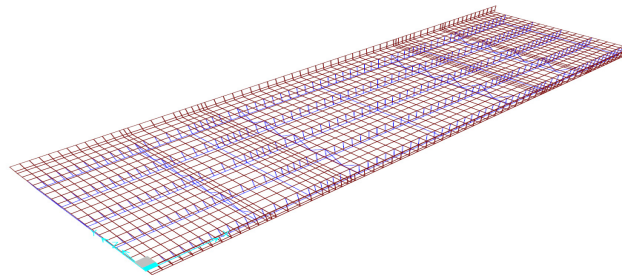


그림 4 삼승교 SAP2000 유한요소해석 모델



그림 3 삼승교 전면(좌)과 하면(우)

표 1 초기 유한요소모델과 업데이트 유한요소모델로부터 얻어진 거더 응력

응력(MPa)	거더 1	거더 2	거더 3	거더 4	거더 5
초기 모델	18.24	20.77	20.03	20.77	18.24
업데이트 모델	15.95	17.52	17.11	17.52	15.83

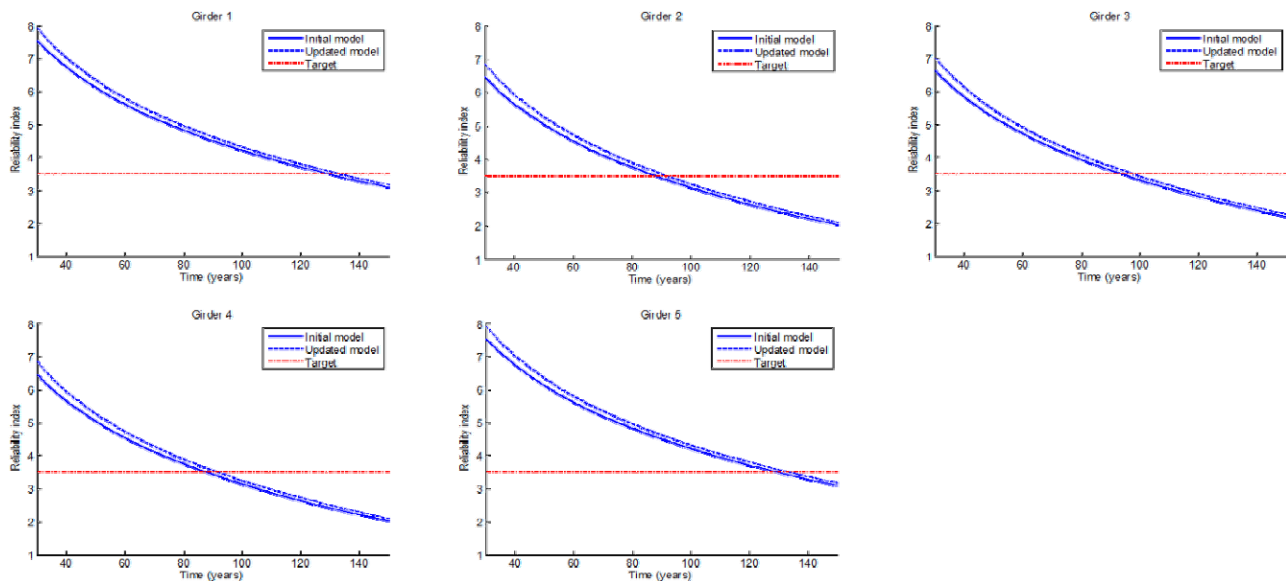


그림 5 삼승교 거더들의 시간에 따른 피로파괴확률

3. 국부수준 정보를 활용한 교량의 확률기반 피로수명 평가

앞서 소개된 광역수준 정보와는 달리 교량의 주요 부재에 대한 육안검사나 NDE 결과를 활용하여 현재 상태를 판단, 피로수명 평가에 활용할 수도 있다. 우선 NDE 기법들로는 동적 시험법(dynamic testing method), 방사선 검사법(radiographic inspection method), 전기 검사법(electric inspection method), 음파 및 초음파법(sonic and ultrasonic method), 음향방출법(acoustic emission method), 염색제 침투법(dye penetration method) 등이 있는데, 이 기법들은 주로 국부적인 피로균열이나 부식을 알아내기 위해 사용되지만 비용이 많이 들고 시간이 오래 걸리는 단점이 있다.⁴⁾

따라서 교량과 같은 대형 구조물의 경우에는 보다 간단한 육안검사에 의존하는 경우가 많은데, 이러한 육안검사는 검사자의 경험이나 검사에 사용하는 장비, 검사하고자 하는 손상의 특성 등에 따라서 검사 결과에 오차 내지는 불확실성이 존재

표 2 삼승교 피로수명 평가결과

피로수명(년)	거더 1	거더 2	거더 3	거더 4	거더 5
초기 모델	129	87	93	87	129
업데이트 모델	133	92	98	92	133

표 3 삼승교 육안검사 결과 가상시나리오

시나리오 번호	검사 결과
1	육안검사를 실시하지 않았다.
2	거더 2에서 균열이 발견되지 않았다.
3	모든 거더들에서 균열이 발견되지 않았다.
4	거더 2에서 균열이 발견되었으며 길이가 0.1mm로 측정되었다.
5	거더 2에서 균열이 발견되었으며 길이가 0.5mm로 측정되었다.
6	거더 2에서 0.5mm 균열이 발견되었으나, 다른 거더들에서는 균열이 발견되지 않았다.

표 4 육안검사 결과에 따른 피로수명 평가 결과

피로수명(년)	거더 1	거더 2	거더 3	거더 4	거더 5
시나리오 1	133	92	98	92	133
시나리오 2	140	102	104	97	140
시나리오 3	168	120	127	120	168
시나리오 4	137	98	102	95	137
시나리오 5	123	80	90	86	123
시나리오 6	159	108	120	112	159

하게 된다. 특히 검사를 수행하는 사람이나 장비가 찾아낼 수 있는 균열의 길이에도 불확실성이 존재하게 되는데, 이를 POD(probability of detection)이라고 하고 피로신뢰성 해석에 있어 주요한 확률변수로 다루어진다.¹³⁾

이러한 육안검사에 의한 결과를 활용하는 것은 그간 주로 해양구조물에 대하여 이루어져 왔다.¹⁴⁾⁻¹⁶⁾ 이 연구들을 바탕으로 최근 Lee와 Song¹³⁾은 여러 가지 육안검사 결과에 따라 피로수명 결과를 업데이트할 수 있는 기법을 제안하였는데, 이 기법은 해양구조물뿐 아니라 다양한 형태의 구조물들에 적용될 수 있다. 이 연구에서 가정된 육안검사 결과들은 다음과 같다.

- (1) 균열이 발견되지 않았다.
- (2) 균열이 발견되어 길이를 측정하였다.

이러한 육안검사 결과들을 Paris' Law를 활용하여 수치모델로 표현한 후, 조건부 확률을 이용하여 기존의 피로파괴 확률을 업데이트할 수 있다. 단, 이를 위해서는 2가지 이상의 사건들에 대한 교집합 사건의 확률을 구할 수 있는 시스템신뢰성 해석이 수행되어야 한다. Lee와 Song¹³⁾에서는 항공기 부속구조물 중의 하나를 예제로 선택하여 이 기법을 적용하였으나, 앞서 소개한 삼승교 예제에도 그대로 적용할 수 있다. 이를 위해 임의로 가정한 가상의 육안검사 결과 시나리오들은 표 3과 같으며, 육안검사를 실시한 시나리오 2~6에서는 교량 완공 후 4년 뒤에 검사를 실시한 것으로 가정하였다.

이러한 가상 시나리오에 따라 재평가된 피로수명 결과는 표 4와 같다. 이 표에서 알 수 있듯이 균열이 발견되지 않거나 작은 길이의 균열이 발견되면 피로수명이 늘어나는 반면, 큰 길이의 균열이 발견되는 경우 피로수명이 줄어들게 된다. 또한 여기에서 제안된 기법은 균열 발견 유무, 측정된 균열 길이에 관계없이 적용될 수 있으며, 또한 시나리오 2번과 6번에서 알 수 있듯이 여러 거더들에 대한 복수의 검사 결과를 활용할 수도 있다.

4. 맺음말


자연에 필연적으로 존재하는 여러 불확실성 요인들을 고려해 보다 합리적으로 구조물의 피로현상을 분석해 보고자 확률·통계의 개념들을 도입하면서 태동했던 피로신뢰성 공학은 이후 다양한 기법들이 개발되고 적용되면서 많은 발전을 이루었다. 또한, 최근 눈부시게 발전하고 있는 ICT 기술들을 활용하여 얻어진 정보들을 구조물에 활용하고자 하는 시도들도 다양하게 이루어지고 있다.

이러한 흐름에 발맞춰서, 시간에 따라 성능과 상태가 변화하는 공용 중 교량에 대해 ICT 기술들을 적용하여 얻은 광역적 또는 국부적 정보들을 활용해 교량의 현재 상태를 파악한 후, 그에 따라 잔존수명을 확률론적으로 평가하고자 하는 시도가 이루어졌고, 본 기사에서는 그 중 몇 가지 연구들에 대해 간략히 소개하였다. 현재 ICT 교량연구단 내에서는 이러한 기존 연구 성과들을 바탕으로 보다 높은 수준의 다양한 연구들이 서로 밀접한 관계를 가지면서 이루어지고 있다. 이러한 연구들을 통해 보다 정확한 교량 피로수명 평가가 이루어지고, 이를 기반으로 궁극적으로는 보다 효율적인 교량의 유지관리가 이루어지기를 기대해 본다.

5. 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(15SCIP-B066018-03)에 의해 수행되었습니다.

6. 참고문헌

- ICT 교량연구단. (2013). ICT 교량연구단 웹사이트. URL: <http://ictbridge.kaist.ac.kr/> [cited May 17th, 2015].
- 양영순, 서용석, 이재욱. (2002). 구조 신뢰성 공학. 서울대학교 출판부, 서울, 대한민국.
- Sobczyk, K. and Spencer, B.F. (1992). Random Fatigue: From Data to Theory. Academic Press, Inc., Boston, MA.
- Ye, X.W., Su, Y.H., and Han, J.P. (2014). "A state-of-the-art review on fatigue life assessment of steel bridges." *Mathematical Problems in Engineering*, 2014.
- Miner, M.A. (1945). "Cumulative damage in fatigue." *Journal of Applied Mechanics*, 12(3), 159-164.
- Paris, P.C. and Erdogan, F. (1963). "A critical analysis of crack propagation laws." *Journal of Fluids Engineering*, 85(4), 528-533.
- Lee, Y.-J., Cho, S., and Jin, S.-S. (2014). "Probabilistic fatigue life prediction for bridges using finite element model updating based on structural health monitoring." *The 6th World Conference on Structural Control and Monitoring (6WCSCM)*, Jul. 14 - 17, Barcelona, Spain.
- Kwon, K. and Frangopol, D.M. (2010). "Bridge fatigue reliability assessment using probability density functions of equivalent stress range based on field monitoring data." *International Journal of Fatigue*, 32(8), 1221-1232.
- Ni, Y.Q., Ye, X.W., and Ko, J.M. (2010). "Monitoring-based fatigue reliability assessment of steel bridges: analytical model and application." *Journal of Structural Engineering*, 132(2), 1563-1573.
- Liu, M., Frangopol, D.M., and Kwon, K. (2009). "Bridge system performance assessment from structural health monitoring: a case study." *Journal of Structural Engineering*, 135(6), 733-742.
- Yi, J.-H., Kim, D., Go, S., Kim, J.-T., Park, J.-H., Feng, M.Q., and Kang, K.-S. (2012). "Application of structural health monitoring system for reliable seismic performance of infrastructures." *Advances in Structural Engineering*, 15(6), 955-967.
- Yi, J.-H., Cho, S., Koo, K.-Y., Yun, C.-B., Kim, J.-T., Lee, C.-G., and Lee, W.-T. (2007). "Structural performance evaluation of a steel-plate girder bridge using ambient acceleration measurements." *Smart Structures and Systems*, 3(3), 281-298.
- Lee, Y.-J. and Song, J. (2014). "System reliability updating of fatigue-induced sequential failures." *Journal of Structural Engineering*, 140(3), 04013074-1~16.
- Wirsching, P.H., Torng, T.Y., Geyer, J.F., and Stahl, B. (1990). "Fatigue reliability and maintainability of marine structures." *Marine Structures*, 3(4), 265-284.
- Baker, M.J. and Descamps, B. (1999). "Reliability-based methods in the inspection planning of fixed offshore steel structures." *Journal of Constructional Steel Research*, 52(1), 117-132.
- Jiao, G. and Moan, T. (1990). "Methods of reliability model updating through additional events." *Structural safety*, 9(2), 139-153. 

[섭외: 심성한 편집위원]