

강재 교량의 노후화에 따른 확률적 보수·보강 주기 추정에 관한 연구

A Study on the Estimation of Probabilistic Repair · Reinforcement Cycles from Rating Curve of Steel Girder Bridges

김 현 배* 김 용 수**

Kim, Hyun Bae Kim, Yong Su

요 약

교량구조물의 유지관리비용은 크게 증가하는 추세이며 이에 대한 교량의 점검은 많은 비용뿐만 아니라 시간과 노력이 소요된다. 따라서 사전에 교량의 보수 또는 보강이 필요한 시점을 파악하고 그 주기를 예측하는 것은 비용의 절감뿐만 아니라 교량 구조물에 대한 안전성을 확보하는데 크게 도움이 된다. 따라서 본 연구에서는 강박스 도로교량에 대한 신뢰성 있는 보수 또는 보강 주기를 추정하기 위하여 노후화에 따른 기존의 성능등급 곡선을 우선적으로 분석하였다. 이를 바탕으로 보수보강 확률함수를 정의하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확률적으로 보수보강 주기를 추정하는 독자적인 방법을 정립하여 제시하였다. 또한 결과에 대한 통계적 분석을 통하여 신뢰성을 검증하였으며 강박스 도로교량에 대한 통계자료에서 얻어진 보수 또는 보강 주기와 그 결과가 유사하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 강재 교량 구조물에 대한 신뢰성 있는 보수 또는 보강 주기를 예측하는데 크게 기여할 것으로 판단된다.

키워드 : 확률적 모델, 교량의 노후화, 보수보강 주기 추정

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

도로 및 교량 등을 포함하는 시설물은 완공된 후에 매우 오랜 기간 동안에 걸쳐서 사용된다. 시간이 지날수록 시설물을 구성하는 부재나 부품 등은 노후화 되어 기능의 상실과 더불어 때로는 붕괴에 이르기기도 한다. 특히 교량의 경우 구조물의 기능 상실 또는 붕괴에 따른 사회적, 경제적 손실은 대단히 크다.

또한 차량의 대형화, 교통량의 증가 등에 따라 구조물의 열화는 건설 당시 설계보다 더욱 빠른 속도로 진행되며 이에 대한 체계적인 관리는 필수적이다. 따라서 국내에서는 교량유지관리시스템 하에서 교량에 관련한 기본 자료의 저장, 정기적인 점검 및 특수점검을 통한 교량의 상태 및 수명에 대한 판단, 노후 교량의 보수 또는 보강법의 결정을 도모하고 있다.

그러나 이러한 정기적인 점검에는 많은 시간과 비용이 소요되

므로 사전에 교량의 노후에 따른 보수 또는 보강 주기를 예측하고 이에 대한 적절한 조치를 취하는 것은 유지관리비용을 절감하고 교량의 안전을 확보할 수 있는 유용한 수단이 된다.

따라서 본 연구에서는 강박스 거더 교량에 대한 노후화를 고려하여 확률적으로 보수 또는 보강 주기를 판단하는 알고리즘을 개발하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 그 주기를 추정하는 독자적인 확률적 보수보강 주기추정 모델을 개발하는 한편, 이 모델의 신뢰성을 검증하는데 본 연구의 주요 목적을 두었다.

1.2 연구의 범위 및 방법

교량구조물은 구조물의 수명기간에 걸쳐서 시간이 지남에 따라서 그 성능이 점차적으로 감소하게 되고 최종적으로 폐기된다. 따라서 본 연구에서는 시간이 지남에 따라서 보수 또는 보강이 발생할 확률이 높아진다는 사실에 근거하여 기존 교량의 상태평가와 성능등급을 통하여 성능등급곡선을 정밀 분석하였다.

이에 따라 강재교량 상부구조물의 거더를 중심으로 보수 또는 보강 함수를 정의하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 독자적인 확

* 일반회원, 중앙대학교 일반대학원, kimhb@poscoenc.com

** 종신회원, 중앙대학교 건축학부 교수, yongsu@cau.ac.kr

물적 보수보강주기를 도출하는 것을 연구의 범위로 설정하였다. 이를 위한 방법으로 보수 또는 보강 주기를 판단하는 알고리즘을 개발하고 보수 또는 보강 주기를 추정하는 모델을 개발 정립하였다. 한편 확률적 보수 또는 보강 주기는 마이크로소프트의 엑셀 스프레드시트를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션의 반복적 수행을 통하여 산정하였다.

또한 확률적 보수 또는 보강 주기를 유사한 교량 형식에 대한 기존의 자료와 결과를 비교하고, 통계적 분석을 통하여 그 신뢰성을 검증하였다. 연구의 범위와 방법을 요약정리하면 그림 1의 연구의 흐름도와 같다.



그림 1. 연구의 흐름도

2. 확률적 보수보강 주기 추정법

2.1 교량의 상태평가와 성능등급

교량의 수명은 더 이상 교량의 필요성이 없어졌거나, 안전에 문제가 발생하거나, 또는 기대되는 서비스를 더 이상 제공할 수 없는 경우에 도달한 상태를 의미한다. 이러한 교량의 물리적 수명에 관해서는 많은 연구가 수행되어 왔으며 다음의 표 1에서는 일반적인 교량의 형식별 공용수명을 50~80년으로 보고 있음을 알 수 있다.

강교량의 경우 위의 표에서 알 수 있듯이 그 수명은 80년이며, 국내에서도 설계 기대수명을 75년을 목표로 내구성 설계가 이루어지고 있다.

표 1. 교량구조물의 공용수명

종 류	공용수명	근거문헌
일반교량	75년	AASHTO LRFD 설계시방서
철근콘크리트교량	50 ~ 70년	Piringer(1993), Nishikawa(1997)
Prestressed 콘크리트 교량	70년	Piringer(1993)
강교량	80년	Piringer(1993)
고성능강교량	200년 이상	Nishikawa(1997)
강합성교	70년	Piringer(1993)

어지고 있다.²⁾

따라서 시간이 지남에 따라 교량의 성능은 자연적으로 감소하게 되며 이와 관련하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 기존의 통계자료 및 전문가 의견을 바탕으로 각 교량의 부재가 나타내는 성능등급과 교량의 사용연수와의 연관성은 그림 2 및 다음의 식에서와 같이 나타낼 수 있는 것으로 밝혀졌다.³⁾

$$R = \beta_1 X^3 + \beta_2 X^2 + \beta_3 X + 5.0$$

여기서 R = 교량의 성능등급

X = 각 부속품에 대한 사용 기간 (년)

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ = 감소계수 및 상관계수(표 2)

표 2. 감소계수 및 상관계수

부재	거더가 있는 상판	거더가 없는 상판	콘크리트 거더	PSC 거더	강재 거더
β_1	-0.00018672	-0.00025988	-0.00022252	-0.00017159	-0.00012974
β_2	0.00625422	0.00817523	0.00786476	0.00700464	0.00587187
β_3	-0.16619957	-0.19222205	-0.18206941	-0.16058476	-0.14538235

국내의 교량은 6개월에서 10년의 주기적인 간격으로 정기점검, 정밀점검 및 정밀안전진단을 실시하고 이에 따른 성능을 표 3과 같이 기록하도록 하고 있다. 국내의 경우, 교량등급은 모두 5등급으로 나누어지는데, 성능등급이 5.0인 경우, 그 교량은 손상부위가 없으며 전반적인 상태가 건전함을 의미한다.

성능등급이 가장 나쁜 1인 경우, 그 교량은 심각한 손상을 입었음을 나타내며 통행제한이 필요하고 보수 또는 보강이 즉각적으로 이루어져야 함을 의미한다. 보수란 손상된 부위를 고쳐서 원래의 기능을 회복시키는 작업으로서 시설물에 대한 안전점검 및 정밀안전진단과 같은 작업을 통하여 교량의 손상상태에 대한 분석을 하고 그 수행 여부를 판단하게 된다.

도로시설물 유지관리 기본계획 종합보고서를 참조하면 다음

표 3. 시설물의 상태평가 표준법

성능 등급	교량 상태
5	- 무손상 - 상태가 건전함
4	- 미미한 손상, 결함 또는 부식 발생 - 보수가 필요
3	- 일반적인 손상, 결함 또는 부식 발생 - 안전, 내구성 및 기능의 유지를 위하여 후속 진단이 필요함
2	- 넓은 부위에 손상 발생 - 정밀 진단이 필요함 - 진단에 따라 즉각적인 보수 여부가 판단됨
1	- 심각한 손상 - 교통 통제 필요함 - 진단에 따라 즉각적인 보수 또는 보강이 이루어져야 함

2) “유지관리를 고려한 교량의 설계 및 시공지침”, 건설교통부, 2001

3) “교량관리시스템의 성능개선에 관한 연구”, 건설교통부, 1999

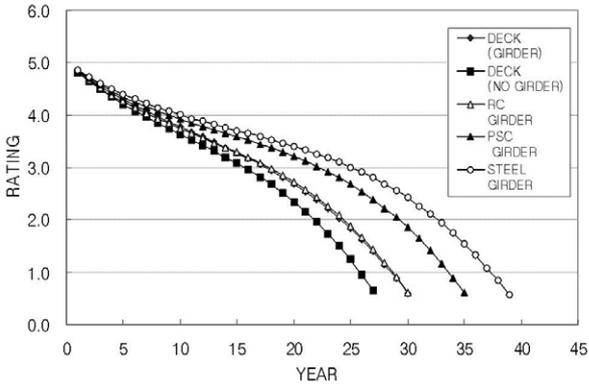


그림 2. 교량 형식별 성능등급 곡선

의 표 4와 같이 진단대상 교량 중 강교의 총 경간수에 대한 각 손상유형의 경간비와 강재 주형의 손상이 발견된 각 경간에 대하여 해당 손상현황이 차지하는 손상분포율을 보여주고 있다. 강재주형 손상의 원인은 전체 강재 주형 손상중에 부식에 의한 손상과 볼트이완·탈락에 의한 손상이 차지하는 비율이 각각 91.3%와 49.5%로서 상부구조가 강재주형인 경간의 대부분은 부식에 의해서 손상이 발생됨을 알 수 있다.

표 4. 강재 주형의 손상유형 분포

강재주형의 손상유형	손상 경간수	손상 경간비(%)	손상분포율(%)
부식	293	43.0	91.3
볼트탈락·이완	159	23.2	49.5
도장불량	117	17.2	36.4
부재변형	72	10.6	22.4
용접불량	67	9.8	20.9
균열	24	3.5	7.5

보강은 현 상태의 손상진행 방지는 물론 교량의 구조적 내하력 및 지지력을 현 상태 이상으로 향상시키는 것을 목적으로 수행하는 것으로 과거에 설계시공된 교량을 대상으로 행해진다. 경년에 따라서 허용 차량 하중, 지진에 대한 안정성, 기타 교량의 안전기준 등이 강화되고 있다.

따라서 과거에 설계, 시공되어 많은 시간이 흐른 경우 그 교량은 현재의 설계기준에 부적합하게 되고 보강을 필요로 하게 되는 것이다.

2.2 강재 교량의 보수보강 확률

본 연구에서 적용된 강재교량의 경우 보수보강이 생애주기 동안 전혀 적용되지 않았을 경우의 자연적인 성능등급의 감소는 다음의 그림 3에서와 같이 나타낼 수 있다. 그림에서와 같이 대략 사용연한이 25년 이상을 초과하게 되면 그 성능등급은 초기 시공이 이루어진 직후보다 대체적으로 급격하게 떨어짐을 알 수 있

다. 그러나 대부분의 경우 교량은 그림 3과 같은 성능곡선을 나타내게 되지 않는다. 그 이유는 교량의 공용수명을 연장시키고 공공시설물에 대한 안전을 확보하기 위하여 보수·보강 또는 교체 등의 행위를 통하여 구조물의 안전수준을 유지하기 때문이다.

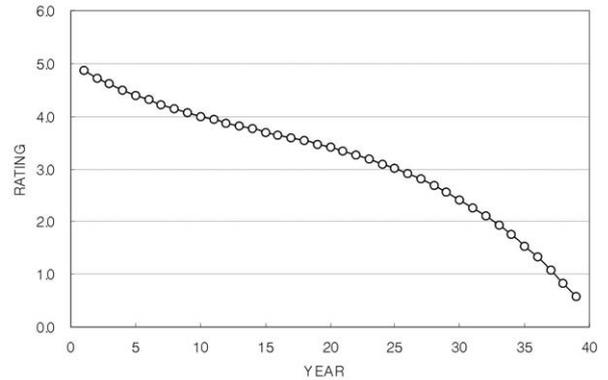


그림 3. 강교량의 성능 등급 감쇄 곡선

예를 들면 그림 4에서와 같이 강교량의 공용 사용연한이 20년이 되었을 때 보수보강이 이루어져 그 성능등급이 1.0 만큼 증가하게 된다면 그림 4에서와 같이 교량의 전체적인 수명은 통계적으로 약 15년이 증가함을 알 수 있다.

이와 같이 사용연한에 따라서 그 자연적인 성능등급의 감소가 예측되고 그에 대비한 적절한 보수 또는 보강은 구조물의 수명을 효과적으로 늘려준다. 따라서 국내에서는 교량관리시스템⁵⁾을 운용하여 모든 교량에 대한 성능등급에 대한 이력을 정기점검, 정밀점검 및 정밀안전진단을 통하여 관리하고 있다.

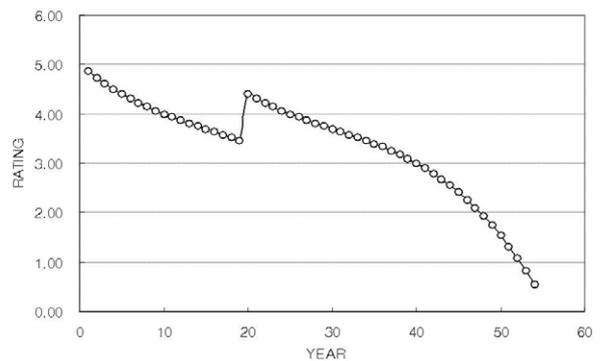


그림 4. 1회 보수·보강 발생 시의 강교량 성능등급 변화 예

여기에 포함되는 정보로는 교량의 전체적인 성능등급 뿐만 아니라 교량의 상판, 상부구조, 하부구조, 접속도로 등의 부속품에

4) “도로시설물 유지관리 기본계획 종합보고서”, 건설교통부, 2003

5) 교량관리시스템, Bridge Management System, BMS

대한 성능등급도 포함하고 있다. 또한 이러한 시스템에 의해 축적된 자료를 바탕으로 교량에 대한 보수, 보강 또는 교체 수행을 위한 우선순위를 결정하고 예산에 따라 적절한 유지관리가 이루어지고 있다.

2.3 보수보강 확률 함수의 정의

본 연구에서는 교량의 성능 등급 곡선에 지배되는 확률적 보수 또는 보강 주기 함수를 도출하였다. 즉 교량의 자연적인 노후화에 따른 성능 등급 곡선에 따라서 보수 또는 보강이 이루어질 확률이 높다는 사실에 근거하여 그 주기를 확률적으로 추정하는 함수식을 다음과 같이 정의하였다.

$$P = F(X, R)$$

$$= a \times [(1.0 - R / 5.0)]^b \times 100(\%)$$

여기서 P = 보수 또는 보강이 이루어질 확률 (%)
 X = 교량의 사용 기간 (년)
 R = 교량의 자연 성능 등급
 a, b = 확률값 보정 계수, a = b = 2.0 가정

즉, 공용연수가 X년째인 교량의 보수 또는 보강이 발생할 확률 P(%)는 교량의 자연 성능등급 R의 제곱에 반비례하는 것으로 정의하였다.

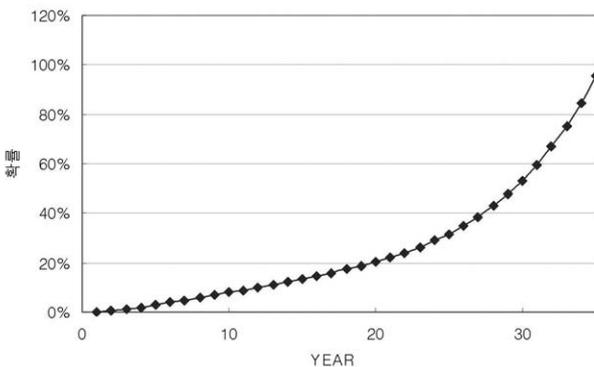


그림 5. 보수보강 확률 곡선

이 상관관계 함수를 그래프로 나타내면 그림 5와 같다. 그림에서 보듯이 교량이 초기에 시공된 직후에는 보수 또는 보강이 이루어질 확률이 0%임을 나타내고 있으며 20년째에는 그 확률이 20%로, 그리고 약 30년이 되었을 때에는 그 확률이 50%이상으로 증가됨을 알 수 있다.

또한 공용기간이 40년째가 되면 그 확률은 거의 100%로서

40년 동안의 공용기간 중에는 반드시 1회 이상의 보수 또는 보강이 일어날 것임을 알 수 있다.

2.4 확률적 보수보강 주기 추정법의 도출

보수 또는 보강이 발생할 확률(%)이 사용연한의 함수로 정의되었다. 이 확률적 함수를 사용하여 보수 또는 보강을 판단하고 주기를 산정하기 위해서 본 연구에서는 엑셀 스프레드 시트⁶⁾를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

이 시뮬레이션에서는 보수 또는 보강이 일어났는지에 대한 판단을 하기위하여 컴퓨터에서 무작위로 발생하는 난수가 사용되었다. 이 난수는 0부터 1사이의 값으로서 그 발생횟수를 무한히 하였을 때 각 값에 대한 발생빈도는 동일한 것으로 알려져 있다. 따라서 발생한 난수와 보수 또는 보강 확률 함수를 비교하여 보수 또는 보강에 대한 판단을 내리게 된다. 구체적으로 임의의 연도에 보수 또는 보강에 대한 계산된 확률이 발생한 난수보다 높을 경우 보수 또는 보강이 이루어지는 것으로 정의하였다.

표 5는 1년에서부터 30년까지 교량의 공용기간 동안에 대한 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 첫 열에서는 공용연수를 나타내고 있고 두 번째 열은 교량의 성능등급을 나타내고 있으며 연수가 증가할수록 자연적으로 감소하고 있음을 나타내고 있다. 세 번째 열은 보수 또는 보강이 발생할 확률함수로서 0.0(0%)에서부터 1.0(100%)사이의 값으로서 성능등급이 감소함에 따라 증가됨을 보여주고 있다. 다음으로 네 번째 열은 컴퓨터에서 발생한 난수값으로 마찬가지로 0.0(0%)에서부터 1.0(100%)사이의 값을 나타내고 있다.

공용연수가 1년에서부터 14년째까지는 발생한 난수값이 확률값보다 크므로 보수 또는 보강이 발생하지 않았음을 알 수 있다. 예를 들어 공용연수가 10년째에서는 교량의 성능등급이 4.0을 나타내고 있으며 보수 또는 보강이 일어날 확률은 정의된 함수에 따라서 0.08(8%)로 계산되었다. 여기서 컴퓨터에서 발생한 난수는 0.81(81%)로서 확률값보다 더 크므로 보수 또는 보강을 하지 않는 것으로 판단하였다.

그러나 공용연수가 15년째에는 교량의 성능등급이 3.7로 떨어지며 보수 또는 보강확률에 의해 정의된 함수값은 0.13(13%)로서 발생한 난수값인 0.12(12%)보다 크므로 보수 또는 보강을 실시하는 것으로 판단하였다.

따라서 사용연한이 늘어남에 따라서 확률함수에 의해 산정된 값은 점차적으로 증가를 하므로 발생한 난수가 이 값보다 작을

6) Microsoft Office "Excel" (Version 2003) 및 Embedded Visual Basic

가능성이 증가하게 되는 것이다. 또한 보수 또는 보강이 발생하게 될 경우에는 교량의 성능등급을 1.0만큼 증가를 시킴으로써 보수 또는 보강에 대한 효과를 반영하였고 이렇게 증가된 성능등급으로 인하여 또다시 보수 또는 보강이 발생할 확률은 감소하게 된다. 표 5는 본 연구에서 개발된 시뮬레이션 프로그램을 수행한 하나의 사례로서 결과적으로 총 2회의 보수 또는 보강이 발생하였음을 알 수 있다.

표 5. 연도별 난수발생 및 보수보강 판단 사례

연도	Rating	$2 \times (1-R/5.0)^2$	난수	판단
1	4.86	0.00	0.37	
2	4.73	0.01	0.54	
3	4.61	0.01	0.10	
4	4.50	0.02	0.77	
5	4.40	0.03	0.75	
6	4.31	0.04	0.10	
7	4.23	0.05	0.85	
8	4.15	0.06	0.82	
9	4.07	0.07	0.77	
10	4.00	0.08	0.81	
11	3.94	0.09	0.59	
12	3.88	0.10	0.34	
13	3.82	0.11	0.38	
14	3.76	0.12	0.22	
15	3.70	0.13	0.12	보수보강
16	4.70	0.01	0.70	
17	4.59	0.01	0.45	
18	4.53	0.02	0.74	
19	4.47	0.02	0.85	
20	4.40	0.03	0.92	
21	4.33	0.04	0.49	
22	4.26	0.04	0.56	
23	4.18	0.05	0.09	
24	4.10	0.06	0.62	
25	4.01	0.08	0.39	
26	3.91	0.10	0.26	
27	3.80	0.11	0.92	
28	3.68	0.14	0.60	
29	3.56	0.17	0.10	보수보강
30	4.56	0.02	0.97	

이러한 일련의 과정을 컴퓨터에서 반복적으로 수행하기 위하여 그림 6과 같이 확률적 보수보강 주기 추정법의 알고리즘을 개발하였다.

이 알고리즘에서는 30년을 기준으로 반복적인 작업을 하는데 먼저 앞에서 정의된 교량의 성능등급 및 보수보강 확률값을 산정한다. 그리고 난수를 발생시켜 계산된 확률값과 난수와의 비교를 통하여 보수보강 실시 여부를 판단하게 되는 것이다.

여기서 보수보강이 실시되는 경우는 교량의 성능 등급과 관련된 기존의 연구⁷⁾에 근거하여 교량의 성능 등급이 한 등급 상향되는 것으로 가정을 하였다. 단 여기서 상향된 등급값은 교량의 건

전성이 100% 확보되는 등급인 5.0을 넘지 않는 것으로 하였다.

또한 사용연수를 1만큼 증가하게 되는 과정을 반복하여 사용연수가 30년이 될 때까지 위와 같은 과정을 반복하도록 한다.

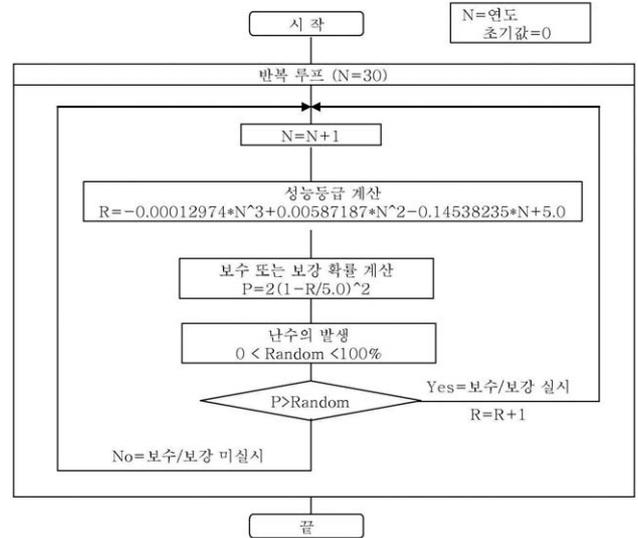
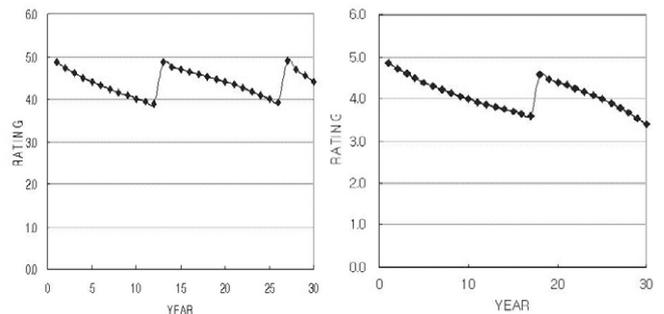


그림 6. 확률적 보수보강 주기 추정법의 알고리즘

따라서 위와 같은 과정을 수행할 때마다 발생 되는 보수 또는 보강의 빈도 및 발생 시점은 다르게 되며 그림 7의 (a)에서는 보수보강이 2회 발생한 경우를 그리고 (b)에서는 1회 발생한 경우를 나타내고 있다.



(a) 2회 보수보강/30년

(b) 1회 보수보강/30년

그림 7. 보수보강 횟수에 따른 교량 성능등급

그림 8은 30년 동안 1회의 보수보강이 발생하는 경우, 각 연도에 해당하는 보수보강 확률값과 컴퓨터에서 발생한 난수의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 성능등급이 그림 7의 (b)에서와 같이 해가 갈수록 자연적으로 감소하게 되고 이에 따라 그림 8의 보수보강 확률값은 주어진 함수에 따라서 점차적으로 증가한다.

또한 이 확률값을 불규칙적으로 발생하는 난수와 비교를 하여

7) 임명재, “확률적 방법을 이용한 생애주기비용 분석프로그램 개발”, 한양대학교 석사학위논문, 2002

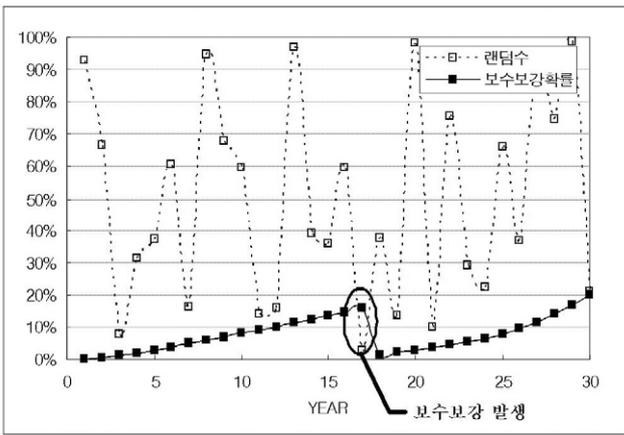


그림 8. 1회 보수보강 발생 시 보수보강 확률값 및 랜덤수 변화

보수보강 유무를 판단하게 되는데 그래프에서는 17년째에 발생한 랜덤수가 보수보강 확률값보다 적으므로 보수보강이 발생하였다. 따라서 성능등급은 1등급만큼 증가하게 되고 여기에 대응하여 보수보강 확률값은 18년부터 다시 감소하게 된다.

본 연구에서는 이러한 확률적 보수 또는 보강 주기의 산정을 위하여 마이크로소프트의 엑셀 스프레드시트를 사용하였으며 그림 9에서와 같이 반복적인 시뮬레이션을 단시간에 수행할 수 있어 효율성과 정확성을 제고할 수 있게 하였다.

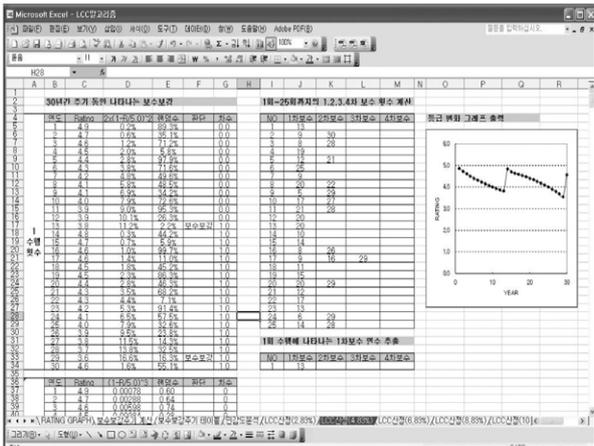


그림 9. 컴퓨터 시뮬레이션 수행 화면 예시

그림 9의 좌측 표에서는 1년부터 30년까지의 보수 또는 보강 주기가 발생하는 시뮬레이션을 수행하고 있음을 나타내고 있다. 가운데 표에서는 1년부터 30년까지의 시뮬레이션을 25회 수행한 이후 축적된 데이터를 수집하여 매년 1차 보수, 2차 보수, 3차 보수 또는 4차 보수가 일어난 횟수를 자동적으로 계산하여 표시하는 화면을 보여주고 있다. 그림의 오른쪽에는 원하는 시뮬레이션 수행에 대한 교량 성능등급의 변화를 그래프로 자동적으로 표시하고 있는 화면이다.

3. 보수보강 주기 추정법의 신뢰성 검토

본 연구에서 도출한 보수 또는 보강 주기 추정법의 신뢰성에 관하여 검토하였다. 결과에 대한 충분한 신뢰성을 확보하기 위하여 1년부터 30년까지 보수 또는 보강이 발생하는 주기를 산정하는 시뮬레이션을 총 10,000회 수행하였다.

그 결과 표 6과 같이 교량의 공용연수 1년차에는 보수 또는 보강이 전혀 발생 하지 않았다. 또한 2년차에 1차 보수 또는 보강이 발생한 경우는 총 54회였으며, 14년차에 1차 보수 또는 보강이 발생한 경우는 10,000회의 시뮬레이션 중 총 629회로서 가장 많이 발생하였다. 그리고 1차 보수가 발생한 이후 2차 보수의 경우에는 28년차에 826회로서 가장 많이 발생 하였다. 또한 3차 또는 4차 보수의 경우는 10,000회의 시뮬레이션 중 그 발생 빈도가 매우 낮음을 알 수 있다.

이렇게 얻어진 시뮬레이션 결과를 그래프로 나타내면 그림 10과 같다. 그래프에서 알 수 있듯이 30년 동안 1차 보수 또는 보

표 6. 10,000회의 시뮬레이션에 따른 보수/보강 횟수 결과표

YEAR	1차보수	2차보수	3차보수	4차보수
1	0	0	0	0
2	54	0	0	0
3	129	1	0	0
4	188	3	0	0
5	282	2	0	0
6	357	6	0	0
7	405	3	3	0
8	507	0	0	0
9	569	2	0	1
10	622	0	0	0
11	619	0	0	0
12	611	3	0	0
13	628	7	0	0
14	629	17	0	0
15	570	35	0	0
16	563	69	0	0
17	550	112	4	0
18	467	116	4	0
19	430	157	6	2
20	365	203	3	2
21	351	263	6	0
22	261	323	8	0
23	240	411	3	0
24	157	504	2	2
25	131	597	0	0
26	91	640	2	1
27	90	698	7	0
28	41	826	25	0
29	42	819	66	2
30	35	823	136	1
합계	9984	6640	275	11

강이 발생한 연도는 평균값을 중심으로 거의 좌우대칭을 이루고 있으며 2차 보수 또는 보강이 발생한 연도는 30년에 가까울수록 증가하는 형태를 보이고 있다.

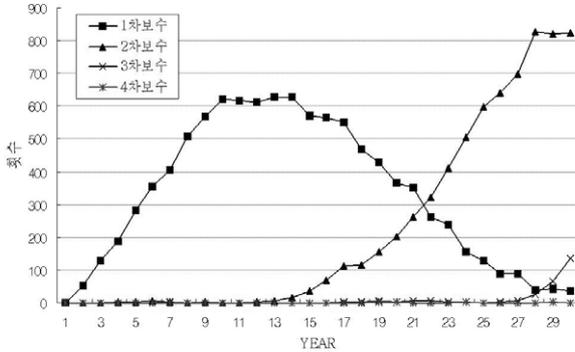


그림 10. 10,000회의 시뮬레이션에 따른 보수보강 횟수 결과

얻어진 데이터에 대한 통계적 분석을 수행한 결과 1차 보수 또는 보강이 발생한 연도는 평균 13.90년이며 5%의 유의수준에서 그 범위는 13.79년째 해부터 14.02년이었다.

또한, 평균값인 13.90년을 중심으로 좌우대칭의 정규분포에 가까운 분포형태를 나타내고 좌우 대칭을 이루고 있으므로 13.90년에 1차 보수 또는 보강이 발생한다는 사실에는 신뢰성이 있는 것으로 판단되었다.

표 7. 보수연도별 평균 및 표준편차

	평균	표준 편차	유의 수준	신뢰구간	
1차보수 연도	13,90	5,81	5%	13,79	14,02
2차보수 연도	25,50	3,78	5%	25,42	25,57
3차보수 연도	27,96	3,91	5%	27,88	28,04

표 7에서 나타난 것과 같이 2차 보수의 경우는 평균적으로 25.50년째에 발생을 하였으며 5%의 유의수준으로 25.42년째에서 25.57년째에 발생을 하였다. 또한, 3차 보수의 경우는 평균적으로 27.96년째에 발생을 하였으며 5%의 유의수준으로 27.88년째에서 28.04년째에 발생을 하였다. 또한, 1차, 2차, 3차 및 4차 보수가 10,000회의 시뮬레이션에서 발생한 횟수는 9,984회, 6,640회, 275회 및 11회로서 차수가 증가할수록 현저히 감소함을 알 수 있다.

이를 확률적으로 나타내면 그림 11과 같이 30년 동안 1차 보수 또는 보강이 발생할 확률은 99.84%, 2차 보수는 66.40%, 그리고 3차 보수는 2.75%로서 그 발생빈도가 매우 낮았다.

이와 같이 확률적으로 얻어진 보수 또는 보강 주기를 기존의 고속도로 일반 강교량에서 통계적으로 얻어진 보수 및 보강 주기와 비교할 때 표 8에서와 같이 매우 유사함을 발견할 수 있었다. 표 8에서 일반 고속도로 강교량의 경우에 보수 또는 보강시

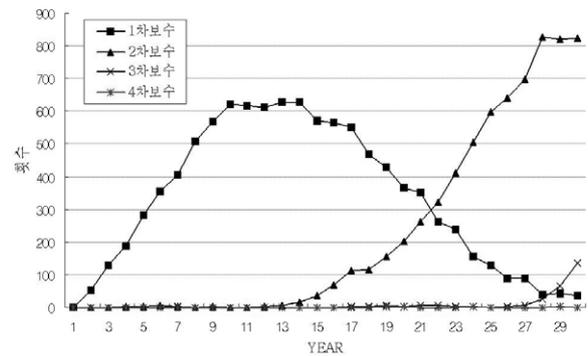


그림 11. 10,000회의 시뮬레이션에 따른 보수연도별 발생횟률

표 8. 도로교량의 거더 형식별 보수 또는 보강 주기⁸⁾

구조 형식	적용주기(년)					
	1차 보수/보강 평균		2차 보수/보강평균			
	1차 보수	1차 보강	2차 보수	2차 보강		
Steel Box 거더교	10	20	15,0	17	32	24,5
Steel Plate 거더교	8	18	13,0	15	33	24,0
PSC 거더교	10	19	14,5	18	30	24,0
PSC Box거더교	10	20	15,0	18	32	25,0
IPC 거더교	8	20	14,0	15	31	23,0
프리플렉스 거더교	9	20	14,5	17	33	25,0
Double-T 거더교	6	15	10,5	12	25	18,5

점은 본 연구의 교량 형식과 유사한 Steel Box 거더교 또는 Steel Plate 거더교에서 평균적으로 최초 13~15년째에 발생을 하였고 재보수 또는 재보강이 발생하는 시점은 그로부터 평균적으로 약 10년 뒤인 24~24.5년째에 발생을 한다는 사실이 연구에 의해 밝혀진 바 있다.⁸⁾ 따라서 본 연구에서 도출한 확률적 보수 또는 보강주기 추정법은 10,000회 이상의 시뮬레이션을 거칠 때 평균값을 중심으로 정규분포를 나타내며 유사한 교량의 실적데이터에 근거한 보수 또는 보강 주기와 유사하므로 그 결과에 대한 신뢰성은 확보된 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 교량의 유지관리비용을 절감하고 교량의 안정성을 확보할 수 있도록 보수 또는 보강 주기를 추정하는 독자적인 모델을 개발하고 그 신뢰성을 검증코자 하였다.

이를 위하여 강재교량 상부구조물의 거더를 중심으로 보수 또

8) 건설교통부, “강교량의 최적설계와 경제적 유지관리를 위한 Life Cycle Cost 분석 기법 및 시스템 개발”, 2004

는 보강 함수를 정의하고 보수보강 주기 추정 알고리즘을 개발하여 반복적 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 과정을 거쳐 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 강재 거더 교량구조물의 보수 또는 보강 주기를 확률적으로 추정하는 독자적인 방법을 정립하여 제시하였다. 이 추정법은 노후화를 고려한 기존의 교량구조물이 가지는 성능곡선에 근거하여 보수보강 확률함수의 정의와 주기 추정 알고리즘을 개발하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 도출하였다.

기존의 통계적인 방법은 장기간에 걸쳐서 축적된 데이터와 그에 대한 분석이 필수적이었다. 그러나 본 연구에서 얻어진 추정법을 이용할 경우 간단한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 교량의 보수 또는 보강 주기를 확률적으로 산정할 수 있는 큰 장점이 있다.

둘째, 결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 기존의 형식과 유사한 고속도로 교량의 통계치에서 나타나는 보수 또는 보강 주기와 비교할 때 정립된 추정법에 의하여 산정된 보수 또는 보강 주기는 일치하였다. 또한 10,000회에 이르는 시뮬레이션을 통하여 주기의 분포는 평균값을 중심으로 정규분포를 나타내므로 추정된 결과에 대한 신뢰성이 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서 정립한 확률적 보수보강주기 추정법은 강재 교량 구조물에 대하여 신뢰성 있는 보수 또는 보강주기를 예측함으로써 교량에 대한 보수시기를 제시하고 나아가 유지관리비용을 절감하는데 크게 도움이 될 것이다.

그러나 향후의 연구에서는 교량의 주요 부재인 거더 뿐만 아니라 상판, 신축이음 등을 포함하는 교량 구조물에 대하여 그 적용을 확대하는 연구가 필요하다.

8. Ramey and Wright, "Bridge Deterioration Rates and Durability/Longevity Performance", Practice Periodical on Structural Design and Construction, 1997

논문제출일: 2008.09.12

심사완료일: 2008.12.08

참고문헌

1. 건설교통부, "강교량의 최적설계와 경제적 유지관리를 위한 Life Cycle Cost 분석 기법 및 시스템 개발", 2004
3. 건설교통부, "도로시설물 유지관리 기본계획 종합보고서", 2003
4. 건설교통부, "교량관리시스템의 성능개선에 관한 연구", 1999
5. 건설교통부, "유지관리를 고려한 교량의 설계 및 시공지침", 2001
6. Ang, A., Lee, J. C and Pires, J. A., "Cost Effectiveness Evaluation of Design Criteria", Proceedings of International Workshop on Optimal Performance of Civil Infrastructure Systems, 1997
7. De Brito, J. and Branco, F.A., "Road Bridges Functional Failure Costs and Benefits", Canadian Journal of Civil Engineering, 1998

Abstract

The cost for maintenance of bridge structures such as repair or reinforcement is increasing. In addition, the efforts for inspection of bridge structures is becoming more important since the proper repair or reinforcement should be performed to save the maintenance cost and ensure the safety for public infrastructure. Therefore, it is studied on this paper to estimate the repair or reinforcement cycles using probabilistic approach for the steel-box girders of bridge superstructure. In addition, a computer simulation program is uniquely developed based on probabilistic approach to calculate the cycles derived from the function of age of bridge and performance rating curve which were previously studied. In order to ensure the reliability of results and appropriateness of the model, statistical analyses were performed. Also, the results were compared and proved to be similar with ones from previous statistical data related to the repair or reinforcement cycles. The results from this study is expected to be useful for the determination of proper time to repair or reinforce the bridge structure and raise the safety of bridge structure in advance.

Keywords : Probabilistic Model, Bridge Rating, Bridge Aging, Estimation of Repair or Reinforcement Cycles
