

# 합리적 교량유지관리 의사결정을 위한 구조성능의 추계학적 예측

## Probabilistic Prediction of Structural Performance for Rational Bridge Management Policy

오 병 환\*

김 동 욱\*\*

Oh, Byung-Hwan

Kim, Dong-Wook

### Abstract

Reasonable prediction of bridge deterioration is the most important factor in the determination of repair time or optimized maintenance policy for bridges. To accomplish these purposes, the proposed method is composed of quantitative condition assessment, Markov chains and Bayesian estimates. Example predictions of concrete slab bridges in Korea were illustrated with higher reasonability than those of existing methods such as expert opinion and visual inspection only.

### 요 지

현재의 교량의 유지관리시에 적절한 보수시기나 최적화된 유지관리 정책을 결정하기 위하여 교량의 성능 저하를 정확히 예측하는 것은 가장 중요한 일이다. 이를 위하여 제안된 방법은 정량적 평가, 마르코프체인, 베이시안 추정법 등으로 구성되었다. 제안된 방법에 따라 국내의 콘크리트 슬래브 교량을 예로서 예측을 하는데, 기존의 전문가 의견조사 및 외관조사에 의한 예측보다 좀 더 합리적인 결과를 보여주었다.

**Keywords** : BMS, quantitative assessment, deterioration, Markov chain, Bayesian

**핵심 용어** : 교량유지관리시스템, 정량적 평가, 열화, 마르코프체인, 베이시안

\* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

\*\* 정회원, (주)유신코퍼레이션 연구원

E-mail bhohcon@snu.ac.kr 02-880-7350

• 본 논문에 대한 토의를 2004년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2005년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

# 1. 서론

## 1.1 개요

교량 구조물의 성능 평가시에 현재의 성능결정뿐만 아니라, 장애의 성능저하가 어떻게 발생할 것이며, 한계 성능수준의 도달시점을 결정하는 것이 매우 중요하다 이에 관한 교량유지관리시스템 (Bridge Management System: BMS) 문헌을 검토해 보면 구조물 손상률 (Deterioration Rate) 및 사용수명 (Service Life) 등의 손상모델 결정을 위해 많은 노력들이 이루어지고 있다 특히, 그중에서도 마르코프체인(Markov Chain ; MC)을 이용한 성능예측에 많은 연구가 수행되고 있다 이러한 연구의 흐름은 교량의 손상모델의 결정을 위해서는 수십 년 동안 많은 점검자료가 수집되어야 하나, 현행 유지관리시스템에서는 거의 불가능하기 때문이다. 또한, 이 자료들은 일반적으로 정량적으로 표현되지 않으며, 평가의 불확실성으로 낮은 신뢰성을 갖고 있다<sup>(3)</sup> 그래서, 일반적으로 교량유지관리시스템에서는 초기에 전문가의견 등에 의존하며, 점차 정성적인 상태등급을 적용하게 된다 그럼에도 불구하고, 전문가의견 및 외관조사 등급결정은 부정확한 기술과 개인적 편견으로 구조물들이 정성적 평가에 의해 이루어지고 있다

## 1.2 합리적 예측 평가 과정

이러한 문제점들에 대하여 본 연구에서는 Fig 1 과 같이 합리적으로 성능평가하는 과정을 개발하였으며, 기존에 전문가 의견 대신에 정량적 구조 상태평가를 적용하여 신뢰성 자료가 부족한 초기 및 중기에도 확률론적 성능예측을 하도록 하였다.<sup>(7)</sup> 교량 손상을 합리적으로 예측하기 위해 Fig 1의 흐름도와 같이 성능함수(Performance Function)결정, MC기법, 베이시안 추론(Bayesian Updating) 등의 세 가지 과정을 도입하였다<sup>(2)</sup> 가장 먼저, 외관조사등급자료(v1) 및 구조적 성능의 정량적 평가과정(q1)이 기본적으로 필요하다 이의 결과를 바탕으로 q2 및 v2의 성능함수의 결정이 이루어져야 마르코프 모델에 사용될 수 있다

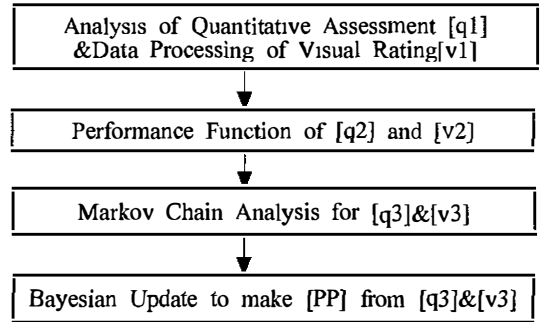


Fig 1 합리적 예측기법의 주요 흐름도

전이확률(Transition Probability ; TP)매트릭스를 결정하기 위해서 성능함수와 MC의 의한 예측상태와의 절대거리를 최소화 하여 전이확률 q3, v3을 결정한다. 이러한, MC 과정은 논리적 구조체를 손상모델에 포함시키면서, 회기분석이나 다항식모델에서 불가능했던 자료한계 밖의 조건에서도 성능예측을 할 수 있는 장점을 갖게 된다

유지관리시스템에 걸차 정성적인 외관조사 결과가 쌓이게 되면, 정량적인 평가 결과와 함께 평가될 수 있다. 이런 경우 베이시안 방법은 정성적 평가결과를 사후확률 (Posterior Probability, PP)을 결정을 위한 추가적 자료로 활용한다

## 2. 정량적 평가

### 2.1 콘크리트 교량의 정량적 평가

본 연구의 선행연구에서 콘크리트 교량의 정량적 평가기법이 제시되어 유지관리정책 및 생애주기비용 분석에 사용될 수 있도록 제시되었다.<sup>(4)</sup> 해석적 과정을 통하여 염해와 중성화를 포함한 환경적 요인과 하중의 효과를 고려하여 단면의 성능함수에 포함되도록 모델링 되었다 힘과 전단으로 이루어진 단면저항능력은 Fig 2 처럼 교량의 사용수명 동안 시간의 함수로서 정의될 수 있다 이러한 접근법을 통하여 정성적인 평가방식의 결점을 극복하며, 신뢰성 있는 외관평가 자료가 얻어져 독립적인 평가가 이루어 질 때까지 중요한 역할을 할 수 있다 뿐만 아니라, 외관조사평가에서 불가능한 사용수명이 이상의 장기성능평가를 가능케 하였다

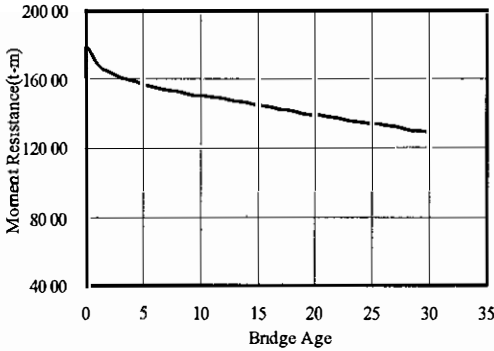


Fig 2 정량적 평가의 예

## 2.2 성능지수 결정

교량 구조물에 대하여 정량적 평가의 결과는 설계 강도를 기준으로 상대적인 성능을 평가하며, 이를 성능지수(Performance Index: PI)라 한다<sup>(1)</sup> 성능지수의 결정은 MC 분석이나 베이지안 보정 시에 균일한 평가기준의 역할을 하게 되므로 성능평가의 편리성을 제공한다 Fig 3은 이러한 전후 관계를 설명한다.

영역별로 평가된 성능지수는 서로 다른 수준의 지수를 결정한다 교량의 대표 성능지수는 가장 작은 값을 취하도록 하며 시간에 따른 성능함수(Performance Function, PF)을 정의한다

$$PF = \min(Mt/Md, Vt/Vd, ) \quad (1)$$

여기서, M=저항모멘트, V=저항전단력,  
침자 t=평가시점, 침자 d=설계시점

## 3. 모델의 구성

### 3.1 MC 모델

MC의 상태등급에 대한 확률적 모델은 결정적 모델, 또는 경험적 모델과는 달리 각 공용년수에 해당하는 상태등급을 불확실성을 포함하는 확률변수로 가정한다<sup>(7)</sup> 공용년수에 따라 확률변수로 가정한 상태등급이 변화하는 과정은 확률론에서는 추계적인 진행상태로



Fig 3 성능지수 결정 전·후 과정

나타난다 MC 진행상태는 시간에 따른 추계적인 확률 P의 진행상태를 다음 식 (2)와 같이 표현한다<sup>(9)</sup>

$$P[X(n+1) = x_{n+1} | X(n) = x_n] \quad (2)$$

위 식에서 n+1 번째 사건의 확률은 바로 그전 단계, 즉 n번째 사건의 확률에만 영향을 받는다 상태가 연속적이지 않은 이산적인 경우 Markov 진행상태를 특히 Markov Cham 이라고 한다

주어진 기간 동안 한 상태(i)에서 다른 상태(j)로 전이하는 분포(P<sub>ij</sub>)를 가지게 되며, 전이행렬 매트릭스를 정의할 수 있다.<sup>(6)</sup> 국내의 경우 일반적으로 5 등급으로 상태가 평가가 이루어지므로 전이행렬은 Table 1와 같은 형태이고, 매년 상태평가의 전이한 등급 이상의 전이가 이루어지지 않음을 가정을 하였다

임의의 시간 T에서 상태 벡터 Q<sub>(T)</sub>는 초기상태벡터 Q<sub>(0)</sub>와 전이행렬을 알면 다음 식 (3)와 같이 구할 수 있다

$$Q_{(T)} = Q_{(0)} \times P \times \dots \times P = Q_{(0)} \times P^T \quad (3)$$

여기서, Q<sub>(0)</sub>= 초기상태벡터,

전이확률 요소의 각 미지 값을 결정하기 위하여 회귀분석을 통해 유도된 공용년수별 상태등급의 기대값(E)과 성능함수(PF)의 차이를 최소화하는 최적화 문제로 다음 식 (4)와 같이 정식화하였다<sup>(2)</sup>

Table 1 전이행렬의 정의

P1	1-P1	0	0	0
0	P2	1-P2	0	0
0	0	P3	1-P3	0
0	0	0	P4	1-P4
0	0	0	0	1

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N |PF(i) - E(t, P)| \quad (4)$$

여기서,  $0 \leq p(i) \leq 1$ ,  $\sum_{i=1}^{\infty} p(i) = 1$ ,

$E(t, P) = Q_{(t)} \times R$ ,  $R = \{5, 4, 3, 2, 1\}^T$   
 , 외관조사 5등급일 경우

### 3.2 Bayesian Update

일반적으로 자료의 수가 부족할 경우, 산정된 결과의 신뢰도를 떨어뜨릴 수 있다 이러한 단점을 보완하기 위해 새로운 정보가 수집될 때마다 전이행렬을 수정하는 방법을 사용하는데 이것이 바로 베이시안 기법(Bayesian Method)이라 하며 식 (5)와 같은 다항식 모델을 사용한다

$$E(P_y | \epsilon_y) = c_i P_y^0 + (1 - c_i) \frac{\epsilon_y}{n_i} \quad (5)$$

여기서,  $c_i$ 는 사전확률분포에 대한 가중치를 의미하는 것으로 0부터 1사이의 값을 갖는다 또한,  $\epsilon_y/n_i$ 는 새로 관측된 자료에 의한 확률을 의미한다

본 연구에서는 정량화된 평가 자료를 사전확률분포(Prior Probability Distribution)의 역할을 하며 자료의 신뢰성이 낮은 외관상태평가 자료를 보완토록 한다 시간이 흐를수록 점점 많은 자료의 수집을 통하여 신뢰성이 높아지면 그 비중을 높이도록 한다

## 4. 모델의 적용

### 4.1 교량의 선정

건설교통부 발행 "2002 교량현황조사"에 따르면 2002년 12월 31일 현재 전국의 교량 총 17,150개교 중에서 슬래브교는 8,278개로서 48.3%에 달한다<sup>(6)</sup> 따라서 본 연구에서는 합리적 성능예측 대상형식으로 슬래브교를 선정하였다

## 4.2 정량화 자료분석 및 전이확률 결정

정량화를 위한 하중 및 환경자료 분석은 프로젝트(독립교량) 및 네트워크(그룹별 교량) 레벨로 나누어 분석하였다

(1) 프로젝트 레벨 이 경우, 등급크기 결정에 사용된 조건인, ADTT 5000, 교량개통후 12년부터 부식이 시작하는 교량을 선정하였다 이에 따른 성능저하 및 전이확률은 Fig. 4 및 Table 2에서 각각 설명된다

Table 2에서의 각 전이확률을 보면, 시간그룹이 미래로 갈수록 작아진다 이 의미는 현재의 등급에 머무르기 보다는 다음의 등급으로 전이할 확률이 큼을 의미하는 것으로, 극심한 손상을 받은 교량의 상태전이를 합리적으로 잘 평가하고 있다.

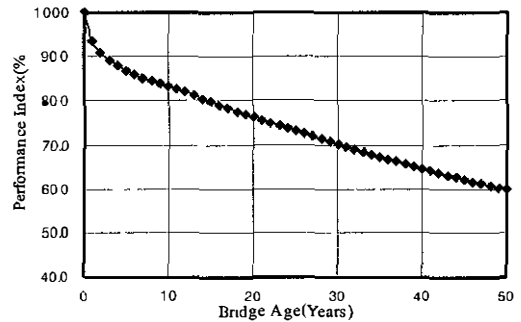


Fig 4 프로젝트 레벨 교량의 성능곡선

Table 2 상태벡터 그룹별 전이확률

공용년수	P1	P2	P3	P4
0~5	0.999	1.000	1.000	1.000
6~10	0.978	0.933	0.826	0.974
11~15	0.965	0.938	0.910	0.860
16~20	0.965	0.937	0.888	0.905
21~25	0.928	0.940	0.896	0.918
26~30	0.916	0.937	0.891	0.927
31~35	0.907	0.931	0.885	0.929
36~40	0.893	0.925	0.876	0.927
41~45	0.876	0.915	0.863	0.921
46~50	0.847	0.900	0.844	0.912

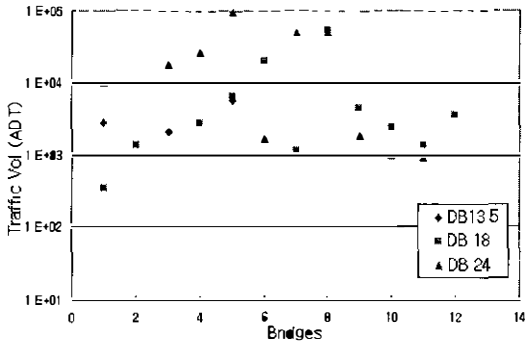


Fig 5 개별 교량들의 교통량 분포

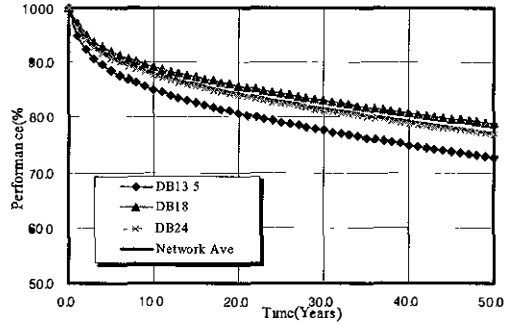


Fig 7 네트워크 수준의 성능저하 결정

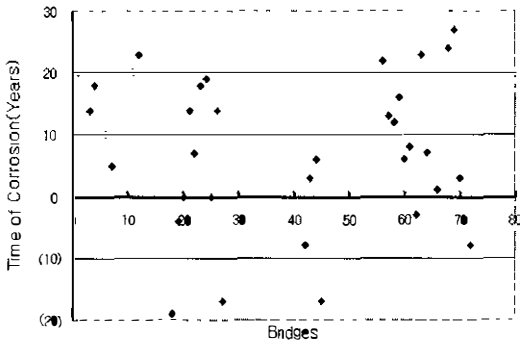


Fig 6 교량의 중성화 기준 부식시기 결정

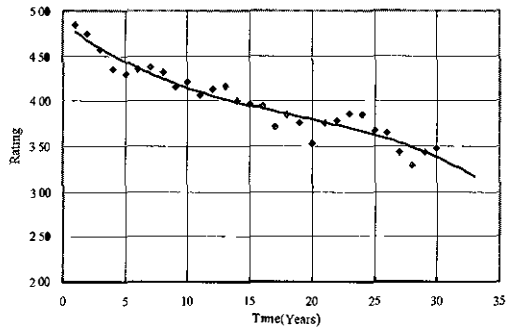


Fig 8 슬래브교 상부구조의 외관조사 성능함수

(2) 네트워크 레벨 이 경우엔, 가능한 현장의 시험결과를 통하여, 기본적인 교통량 분포와 중성화부식시기 등에 관한 Fig 5~6과 같은 자료에 대한 정량적 분석을 하여 대표성능을 결정하였다. 이러한 환경조건을 고려하여 네트워크 수준의 평균적 성능함수 도출은 부식 교량과 비부식 교량에 가중치 평균을 적용할 수 있는데, 본 연구에서는 조사된 슬래브교량 76개에 대한 손상을 정량화하여 평가한 결과를 바탕으로 분석한 결과로서 Fig 7과 같은 경향을 보여준다. Table 3은 이에 대한 전이확률 분포를 보여준다.

Table 3 상태벡터 그룹별 전이확률

공용년수	P1	P2	P3	P4
0~5	0.855	1.000	0.950	0.993
6~10	1.000	0.998	0.251	0.000
11~15	0.937	1.000	1.000	1.000
16~20	1.000	0.983	0.878	1.000
21~25	0.970	0.998	0.978	1.000
26~30	0.973	0.997	0.984	1.000
31~35	1.000	0.989	0.972	0.982
36~40	1.000	0.991	0.956	0.951
41~45	1.000	0.988	0.952	0.957
46~50	1.000	0.983	0.945	0.956

### 4.3 외관조사 회기분석 및 전이확률 결정

외관조사 상태평가는 건설교통부에서 관리하는 KOBMS 시스템의 데이터를 활용하였으며, 그 중에서

슬래브교의 상부구조 평가 자료를 활용하였다. Table 4 및 Fig 8은 상태등급의 분포와 공용수명 동안 성능저하 회기분석을 보여주고 있다. Table 5은 전이확률을 보여주고 있다.

Table 4 전국 슬래브교량 공용수명별 등급분포

Rating Age	A(5)	B(4)	C(3)	D(2)
1	283	42	5	
2	467	95	26	1
3	546	169	63	14
4	430	287	105	16
5	414	349	104	20
6	366	277	104	
7	338	306	51	12
8	287	302	67	5
9	196	296	78	13
10	184	249	63	7
11	126	286	80	5
12	141	209	76	3
13	128	163	53	8
14	118	184	81	18
15	61	126	57	6
16	81	150	71	13
17	33	156	68	22
18	26	115	49	3
19	15	122	45	7
20	1	45	33	3
21	10	44	18	5
22	13	52	16	8
23	9	56	14	3
24	19	36	15	8
25	11	31	22	6
26	7	26	26	1
27	2	26	15	8
28	1	24	19	10
29	2	15	10	5
30	3	8	6	4

Table 5 상태벡터 그룹별 전이확률

공용년수	P1	P2	P3	P4
0~5	8.47E-01	1.00E+00	9.97E-01	1.00E+00
6~10	8.82E-01	9.70E-01	1.00E+00	9.99E-01
11~15	1.00E+00	9.36E-01	1.00E+00	9.98E-01
16~20	9.82E-01	9.63E-01	9.78E-01	1.00E+00
21~25	1.00E+00	9.87E-01	9.46E-01	8.26E-01
26~30	9.84E-01	9.61E-01	9.27E-01	8.78E-01

#### 4.4 Bayesian 업데이트

정량적 평가결과와 정성적인 평가 결과는 이미 각각

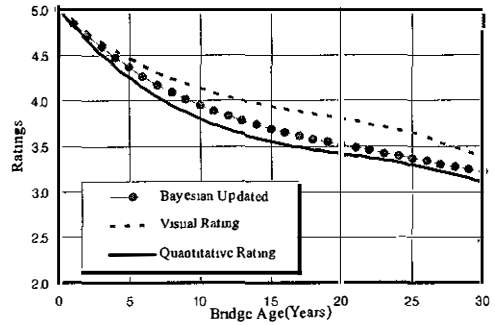


Fig 9 베이시안 업데이트

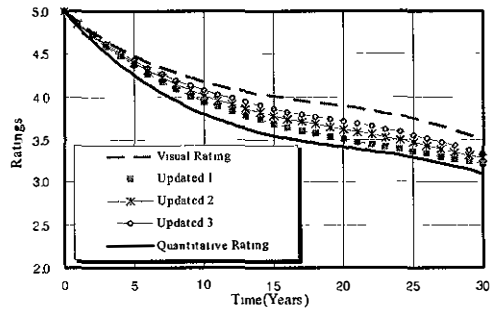


Fig 10 보정후 베이시안 업데이트

에 대한 추세분석 및 MC분석을 하였다

정성적인 평가 결과는 사후확률 결정에 사용되며, 반면 정량적 평가결과를 사전확률로 사용한다 이와 같은 방식은 베이시안 기법에 기초를 두고 있다 프로젝트 레벨에 대하여 자료를 분석한 경우 Fig. 9과 같은 결과를 보여준다

이와 더불어, 추가적인 신뢰성 있는 외관자료 조사 자료를 반영시에는 추가적인 업데이트를 함으로써, 외관조사의 비중을 높일 수 있다 아직까지는 외관조사 자료가 충분치 못하여 사전확률분포인 정량평가 곡선의 의존도를 줄이면서 비교한 보았는데, Fig 10에서 업데이트가 반복될수록 정량적인 평가결과 점점 일치되어 감을 알 수 있다

현재까지의 제안된 기법은 외관조사 기간에만 적용이 되었으나, 외관조사 결과기간을 넘는 장기수명을 정량적 평가결과를 이용하여 Fig 11처럼 예측결과를 보여주고 있다

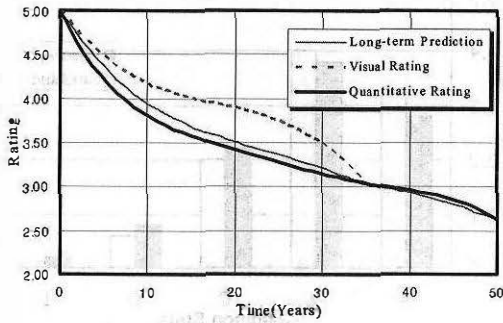


Fig. 11 공용수명 이상의 장기수명 예측

## 5. 추계적 성질의 응용

본 연구에서 제안된 기법의 특징은 상태평가에 추계적 성질과 공용수명 이상의 장기성능 예측을 할 수 있다는 것이다. 그 동안 해결하기 어려웠던 추세선 밖의 개별 교량의 성능예측 및 보수보강 정책결정을 합리적으로 할 수 있다.

### 5.1 개별교량 성능 예측

교량유지관리시스템에서는 무수히 많은 수의 교량을 관리하기 때문에, 일반적으로 네트워크 수준의 대표적 성능저하함수를 사용하게 된다. 이러한 함수를 통하여 미래의 성능예측 및 유지관리 정책을 시행하게 된다. 그러나 모든 교량이 대표 성능곡선을 따르는 것은 아닐 것이며, 오히려 많은 분산을 보여준다. 그래서 성능곡선의 경향을 따르지 않는 교량에 대한 예측이 필요한데, 본 연구에 사용한 MC 방법에서는 가능하다. Fig. 12의 예를 들면, 한 교량이 공용수명 10년이 되었으며, 현재 바닥판 상태등급이 3.5(5등급 기준)로 평가되었다면, 5년 후에는 성능이 어떻게 변할까를 생각해 본다. 회기식을 사용할 경우 Fig. 12의 실선 혹은 점선처럼 3.8일 것이나 이 결과는 오히려 지금의 상태등급보다 좋으므로 잘못된 결과이다. 그러나 MC를 사용할 경우 2.9로 합리적 예측결과를 보여준다.

본 연구에 사용된 슬래브의 외관조사 손상곡선의 경우 Fig. 13와 같이 등급에 따른 개별적으로 손상이

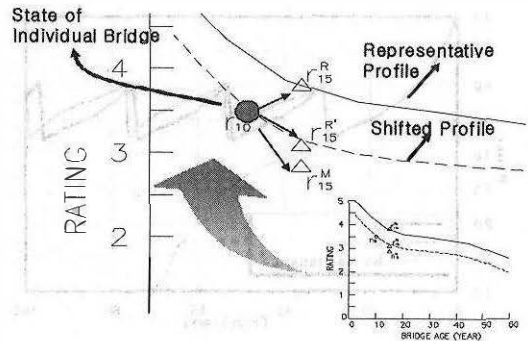


Fig. 12 MC를 이용한 성능예측 개념도

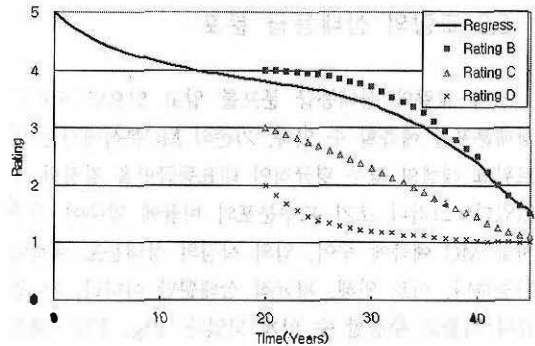


Fig. 13 등급에 따른 독립적 손상진행

진행되고 단순한 회기곡선과 다른 결과를 보여준다. 이는 등급마다 시간함수에 따라 전이가 달라지는 MC 모델의 특성의 결과이다.

### 5.2 생애주기비용분석 및 정책결정

교량의 성능이 C 및 D 등급은 단순한 보수 뿐만 아니라, 보강이나 교체를 요구하게 된다. 적절한 관리정책이 시행된 후 성능이 Fig. 14처럼, 1~2등급 상향이 될 것이다. 이때에도 많은 교량은 평균적인 회기식을 따르기 보다는, 조금씩 다른 추세를 보이는 상태이므로, 보수보강에 의한 성능향상의 정도나 보수보강 시점이 다를 것이다. 이러한 독립적인 상태변화를 MC를 사용하여 합리적으로 성능변화를 예측하면서 생애주기비용분석(Life Cycle Cost)을 하게 된다. 따라서 단순한 회기분석식에 의존한 경우보다 합리적으로 비용분석을 할 수 있게 된다.

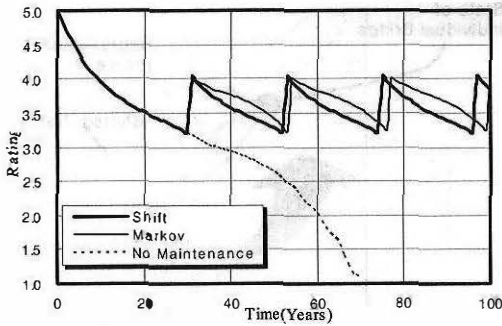


Fig. 14 기존의 관리정책후 성능예측

### 5.3 교량의 상태등급 분포

초기 교량의 상태등급 분포를 알고 있으면 미래의 상태분포를 예측할 수 있다. 기존의 MC분석에서는 네트워크 레벨의 경우 평균적인 대표등급만을 결정할 수 있었다. 그러나 초기 도수분포의 비율에 맞추어 가중치를 MC 예측에 주어, 임의 시점의 상태분포 예측이 가능하다. 이로 인해, 평균적 상태뿐만 아니라, 각 등급의 비율도 추정할 수 있게 되었다. Fig. 15는 예측치와 실측치를 비교한 것을 보여준다.

## 6. 결론

본 연구에서는, 공용기간 중의 최소한의 점검 및 진단 자료를 활용하여 노후화를 예측하는 합리적인 방법을 제시하였다. 이로 인하여, 유지관리조치시기 및 예산수립 등의 계획적인 유지관리를 할 수 있을 것이다. 이에 대한 구체적인 연구내용 및 결과는 다음과 같다.

- 1) 정성적인 외관상태평가의 낮은 신뢰성을 극복하기 위하여 정량적 상태평가 결과를 적용하였다.
- 2) 정량적 모델은 차량하중 및 환경인자의 영향을 고려한 콘크리트 교량 성능함수로 표현하였다. 휨, 전단, 강성 중 최소의 성능지수를 교량의 대표 성능함수로 정하였다.
- 3) MC모델을 외관조사 및 정량평가의 회기분석결과에 적용하여 각각의 전이확률을 결정하였으며, 이를 통하여 프로젝트 수준은 물론 네트워크 레벨의 교량에 적용하였다. 네트워크의 경우, 선정된 교량

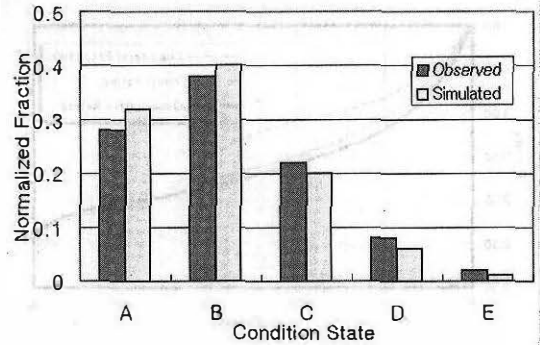


Fig. 15 예측치와 실측치의 상태등급분포

들로부터 대표성능 곡선을 결정하고 개별적 교량 성능에도 적용토록 하였다..

- 4) 사후확률이 점점 더 자료가 많이 축적되고 신뢰도가 향상됨에 따라 이를 베이시안 기법을 통하여 두 분포의 거리가 좁아졌다.
- 5) 선정된 전이확률을 통하여 장래성능을 예측한 결과, 회기분석 결과와 거리가 있는 교량의 성능에 대해서도 합리적으로 장래의 성능저하를 예측할 수 있었다.
- 6) 초기의 상태등급 분포를 알고 있을 경우, 평균성능 분포 뿐만 아니라, 개별등급에 해당하는 분포를 예측할 수 있었다.
- 7) 개발된 기법을 통하여 보수 보장 회수 분석을 기준의 회기식을 통한 분석보다 합리적으로 생애주기비용을 분석할 수 있었으며, 유지관리 정책을 신뢰성 있게 결정할 수 있도록 하였다.

### 참고문헌

1. EC Innovation Program, "A Validated Users Manual for Assessing the Residual Service Life of Concrete Structures", GEOCISA, Spain, 2002.
2. Jiang, Yi, and Sinha, K. C., "Development of Optimal Strategies for Maintenance, Rehabilitation and Replacement of Highway Bridges", Final Report, Indiana DOT, 1989.
3. King, N. S., "Survival Analysis and Semi-Markov Bridge Deterioration Modeling", PhD Thesis, University of Pittsburg, 1996.
4. Chakravorty, M., "Quantitative Condition Ratings



- 
- for Steel Girder Bridges”, PhD Thesis, University of Colorado, 1995.
- 5 Korea Highway Corporation, “Development and Application of Bridge Management System”, 1999
- 6 Ministry of Construction and Transportation, “A Study on the improvement of Bridge Management Systems”, 1999 & 1998
- 7 Bulusum, S. and Sinha, K., “Comparison of Methodologies to Predict Bridge Deterioration”, Transportation Research Record 1597, pp 34~42
- 8 Enright, M P. and Frangopol, D M., “Survey and Evaluation of Damaged Concrete Bridges”, Journal of Bridge Engineering, Vol 5. No 1, Feb 2000, pp 31~38
- 9 Ross S M., “Introduction to Probability Models, Fourth Edition”, University of Berkeley, Academy Press, 1989

(접수일자 : 2004년 2월 3일)