

# 철근콘크리트 슬래브교의 노후화 예측모델에 관한 연구

A study on the Life Cycle Profiles(LCP) for RC Slab Bridge

안 영 기\*

이 채 규\*\*

이 진 완\*\*\*

Ahn, Young-Ki

Lee, Chae-Gue

Lee, Jin-Wan

## Abstract

LCP(Life Cycle Profiles) of bridge structures are indispensable for the LCC(Life Cycle Cost) evaluations of bridge system. The bridge under considerations may be newly-designed one or one in service. Thus, a systematic study of LCP is essential for both reliable LCC evaluation and strategic bridge management. LCP is mainly influenced by the structural environment in nature. However, in Korea, LCC evaluation has been performed with the LCP of foreign research results or only with the pieces of professional engineers' opinion. Therefore, to alleviate the drawbacks of foreign LCP and to enhance the reliability of current LCP, LCP should be established using the available data in bridge management system(BMS). In this study, LCP along with a subset of the BMS data was investigated and several mathematical expressions were proposed and evaluated. The condition ratings of a bridge were transformed into the numerical indices through fuzzy logics with real field data. From the numerical results, it is concluded that the mathematical LCP model of  $y = \sqrt{y_0^2 - at}$  is shown to be the fittest one ( $R=0.815$ ) to express the condition rating varied with the age. This has been drawn from the case study of slab bridges under the similar conditions.

## 요 지

교량의 건설계획단계에서 LCC을 고려한 의사결정이나 공용중인 교량의 체계적인 유지관리 전략을 수립하기 위해서도 최소한의 점검결과만으로 노후화를 예측할 수 있는 LCP가 필요하다. 본 연구에서는 국내외 연구결과를 토대로 무리함수  $y = \sqrt{y_0^2 - at}$ 로 표현되는 LCP를 제안하여 국내외연구결과에서 적용한 D/B에 적용한 결과 상관계수가 0.99이상으로 노후화 경향을 표현할 수 있었으며, 전국에 분포되어 있는 슬래브교량을 대상으로 정밀점검 및 정밀안전진단의 BMS를 Fuzzy Logic을 이용하여 정량적 평가하여 회귀분석을 실시한 결과 0.81의 상관계수를 갖는 노후화 예측모델을 도출할 수 있었다.

**Keywords :** LCP(Life Cycle Profiles), Fuzzy logic, Condition ratings

\* 정회원, 쌍용엔지니어링 대표이사, 본학회 부회장

\*\* 정회원, 한국건설품질연구원 이사, 공학박사

\*\*\* 감사원 제3국4과 감사관, 박사과정 수료

E-mail : chaegue@chollian.net

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2004년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

건설단계에서 LCC(life cycle cost)개념의 적용이 갖는 중요한 의미는 시설물의 안전 및 유지관리에 초점을 맞추어 목표내구수명에 따라 시설물을 계획하여 경제적인 투자를 결정할 수 있기 때문이다. LCC평가는 시설물에 대한 기획·조사단계부터 유지관리 및 철거단계까지 전체 단계에 걸쳐서 소요되는 총 비용을 추정하는 것이다. 교량에서 LCC를 구성하는 비용항목은 초기 건설비용을 포함한 관리주체비용, 도로사용자비용, 간접적 지역손실비용으로 구분된다. 관리주체비용의 직접비는 구조물의 노후화에 의한 유지관리조치에 의해 결정되며 사용자 비용 및 간접적 경제적 손실은 유지관리 조치로 인하여 발생하는 간접비용이다. 따라서 교량의 공용기간 중 유지관리에 따른 직·간접비를 산출하기 위해서는 최초 유지관리조치 시기 및 목표내구수명동안의 유지관리조치 횟수가 결정되어야 하는데, 이를 위하여 노후화 진행과정을 예측할 수 있는 LCP(life cycle profile)의 구축이 필수적이다.<sup>(2)</sup>

또한 유지관리담당자는 건설계획단계에서 수립한 유지관리계획을 이용하여 유지관리계획을 수립하도록 함으로 체계적인 유지관리를 할 수 있다. 이와 같이 건설계획단계에서의 LCC평가를 위한 유지관리계획은 건설단계에서 구조재료나 공법선택 등의 의사결정뿐만 아니라 초기 유지관리방향을 결정하는데 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 국내에서는 LCP를 이용한 유지관리계획을 수립하여 유지관리비용을 평가하는 것보다는 즉흥적으로 응급 보수를 하거나 각종 유지관리조치의 단순 통계적인 빈도에 의존함으로써 LCC평가의 신뢰도를 확보하기 곤란한 실정이다. 따라서, 신뢰성 있는 LCC를 평가하기 위해서는 국내에서도 미국과 같은 수많은 교량을 대상으로 실시한 안전점검이나 진단결과를 반영한 LCP의 구축이 반드시 필요하다.

교량을 준공한 후 시설물의 노후화는 시공중의 발생하는 각종 변수로 인하여 초기에 가정하였던 LCP와 상이하게 나타날 수 있다. 따라서 유지관리기간동안 교량의 노후화를 반영한 유지관리계획을 수립하기 위해서는 교량의 점검자료에 의한 단위교량의 LCP 구축이 필요하게 된다. 그러나 단위교량의 점검자료에

의한 D/B의 구축은 수년 혹은 십수년이 소요된다. 즉 공용기간중 축적된 D/B를 이용한 노후화의 평가는 대수선에는 적절할 수 있으나 초기 유지관리계획을 수립하는데는 적용할 수 없다. 따라서 공용기간 중의 최소한의 점검자료에 의해서도 노후화를 예측할 수 있는 표준적인 LCP가 구축되어 있어야만 유지관리조치시기 및 예산수립 등의 계획적인 유지관리를 할 수 있다.

이와 같이 교량을 신설하기 위한 의사결정을 위해서는 교량의 형식별 표준 LCP가 필요하며, 공용중인 교량의 체계적인 유지관리계획을 수립하기 위해서도 최소한의 점검결과만으로도 시간경과에 따른 노후화를 예측할 수 있는 표준 LCP의 구축이 필요하다. 그러나 국내에서는 이러한 표준 LCP에 관한 연구가 미진하여 국내 실정에 맞지 않은 국외 연구결과를 아무런 수정없이 사용하거나 전문가 집단의 설문조사결과에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 신뢰성 있는 LCC를 평가하기 위해서는 BMS(Bridge Management System)를 이용하여 국내 실정에 맞는 LCP를 시급히 구축하여야 한다.

그러나 국내에서는 기대내구년한 또는 기대공용수명을 판단할 수 있는 LCP에 대한 연구가 아직은 초기 단계에 머무르고 있어 일부 터키 등의 대형공사에서는 국내 실정에 맞지 않는 국외의 프로그램을 수정없이 사용하거나, 유지관리조치에 대한 단순 통계적인 주기를 활용하거나, 전문가 집단의 설문조사에 의한 이론적인 LCP를 이용하고 있는 실정이다. 이러한 방법은 국내조건과 국외조건을 동일시하거나, 전국에 가설되어 있는 동일 형식의 교량이 시간경과에 따라 동일 수준의 노후화가 진전된다고 가정하는 결과를 초래한다.

그러나 교량의 기대내구년한은 교량의 조건(구조형식, 교량재원, 사용재료, 자연적 및 물리적 사용환경, 유지관리이력, 교통량 및 활하중의 크기)에 따라 매우 상이하게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 교량역사가 깊은 미국 여러 주에서 실시한 LCP구축 사례를 고찰하여 보고 국내의 교량을 대상으로 교량 유지관리 시스템인 BMS(Bridge Management System)의 D/B를 이용하여 LCP를 구축하고자 한다.

## 2. 교량의 LCP에 대한 연구동향

### 2.1 미국

1967년 Point Pleasant Bridge 낙교이후 교량의 유지관리에 지속적인 투자를 시행해온 미국은 유지관리 담당기관인 연방도로국을 주축으로 유지관리가 이루어져 왔다. 미 의회가 1991년 Intermodal Surface Transportation Efficiency Act를 제정하게 하였는데, 이 법에서 모든 주는 1995년까지 주의 모든 교량을 포함한 교량 관리 시스템(BMS)을 갖추도록 하였다. 이와 같은 배경아래 미국의 각 주정부는 교량의 DB화가 활발하게 추진되었다. 주정부에서는 효과적으로 시설물의 안전 및 유지관리업무를 수행하기 위하여 LCC 예측기법을 기초로 하는 시설물 안전 및 유지관리시스템의 개발에 박차를 가하였다. 주정부에서는 LCC 예측기법을 이용한 유지관리시스템을 개발하기 위하여 가설되어 있는 모든 교량을 미연방도로국의 상태등급을 기준으로 교량을 조사, 주정부 소유의 교량 특성을 반영한 열화율을 제시하였다.<sup>(8)</sup>

#### 2.1.1 Massachusetts TSC Study

1985년에 Massachusetts의 TSC (Transportation Systems Center)에서는 미국내 교량 손상에 대한 경험적 LCP의 연구를 실시하였다. 교량 상태등급(CR: Condition Rating)에 관해 구축되어 있는 Data Base인 National bridge inventory(NBI)를 이용하였으며 151,933개의 교량을 대상으로 하였다. 조사대상 교량의 선정은 공용년수가 25년 이상인 교량은 조사대상에서 제외하고 비교적 신교량을 대상으로 하였다. 주요 연구는 공용년수, 일평균교통량, 상부구조 형식, 경간 수, 유지관리주체로 구분하여 상태등급변화에 영향을 주는 정도를 연구하였다. 실제 회귀분석에서는 위의 독립변수를 정량적으로 측정할 수 있는 변수로 공용년수(age), 일평균교통량(Average daily traffic ; ADT), 상부구조형식, 경간수, 교량관리주체 등을 독립변수를 선정하고 각 독립변수간의 선형관계를 가정한 후 여러 조합에 대해 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석 결과 Eqs. 1과 같이 공용년수

와 ADT가 교량의 노후화에 영향을 주는 것으로 평가되었다.

$$\begin{aligned} \text{바닥판} &: CR=9-0.119(\text{age})-2.185E-6(\text{ADTage}) \\ \text{상부구조} &: CR=9-0.103(\text{age})-1.982E-6(\text{ADT}) \quad (1) \\ \text{하부구조} &: CR=9-0.105(\text{age}) - 2.051E-6(\text{ADT}) \\ & \quad (\text{ADTage}=\text{ADT} \times \text{age}/10) \end{aligned}$$

(1)에서 ADT를 20,000대로 가정한 교량의 경우 열화등급은 다음 Fig1과 같이 공용년수에 따라 변화한다. 이 모델에 따르면 공용년수에 따른 교량 바닥판의 손상은 상부구조나 하부구조보다 더 빠르게 진행되고 상부구조와 하부구조는 비슷한 정도로 손상이 진행되는 것으로 나타났다.

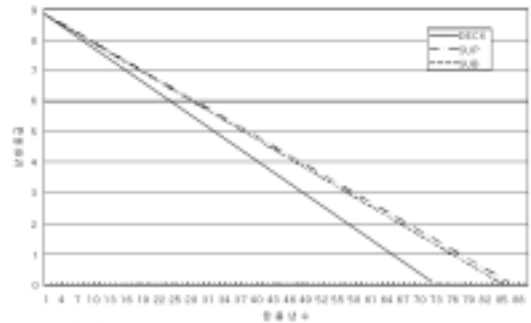


Fig. 1 Massachusetts TSC Study의 LCP

#### 2.1.2 Wisconsin DOT(Department of transportation)

Wisconsin DOT는 4,463개의 교량을 대상으로 공용수명에 따른 상태등급변화를 조사하였다. 조사대상의 모든 데이터를 회귀분석하여 0~45년의 범위에서는 0.07, 45~70년까지는 0.19의 노후화율로 표현되는 서로 다른 2개의 1차식을 갖는 LCP를 도출하였다.

#### 2.1.3 New York DOT

New DOT에서는 New York 시내의 교량을 대상으로 공용수명에 따른 상태등급의 변화를 조사하였다. 교량의 조사는 2년을 주기로 2회에 걸쳐서 실시하였다. 조사자료를 바닥판, 상부구조 및 하부구조로 분류하여 회귀분석을 통해 0.122의 기울기를 갖는 1차식의 LCP를 제안하였다.

### 2.1.4 City of New York Bridge Study

뉴욕시에 있는 2,034개의 교량을 조사하여 공용년수에 따른 상태등급변화를 도식한 결과 Fig. 2와 같은 결과를 도출하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 처음 50년 동안은 상태등급이 1차식과 같은 경향을 갖으며 변화하였으나, 다음 50년 동안에는 거의 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 이와 같이 후반부 50년동안의 등급이 일정하게 나타난 것은 교량의 성능개선에 의한 것으로 분석하였다. 따라서 성능개선을 실시한 시기를 기준으로 재분류한 결과 Fig. 3과 같은 경향을 도식할 수 있었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 성능개선 후 교량의 열화율은 원래 교량의 열화율보다 다소 크지만 그 차이가 굉장히 미소하여 성능개선 후의 열화율의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

### 2.1.5 University of Alabama/ALDOT Study

알라바마 대학은 ALDOT에 구축되어 있는 BMS를 이용하여 LCP를 개발하기 위한 연구를 수행했다. 연구자들은 1990부터 1991까지 2년間に 걸쳐서 알라바마주에 가설되어 있는 15,500개 교량 및 암거를 조



Fig. 2 CR vs. Age for 2,304 Bridges in New York



Fig. 3 CR vs. Age with and without Rehabilitation in New York

사하였다. 조사결과의 모든 자료들을 바닥판, 상부구조 및 하부구조로 분류하여 교량의 평균공용년수와 상태등급사이의 관계를 도식한 결과 Fig. 4와 같은 결론을 얻었다. 그러나 Fig. 4를 표현하는 적절한 함수식을 찾지 못하였다. 따라서 주정부 소유의 교량에 한하여 도식하여 본 결과 Fig. 5와 같은 2개의 직선식으로 구성되는 도식적 모델을 제안하였다. 이를 근거로 주정부 소유의 교량 3,540개와 주정부 소유가 아닌 교량 7,150개를 분리하여 각각의 교량군에 대해 회귀 분석하여 Fig. 6과 같이 바닥판, 상부구조 및 하부구조에 대해 2개의 직선식으로 구성된 LCP를 제안하였다. 연구결과 교량의 노후화율은 Table 1과 같다.

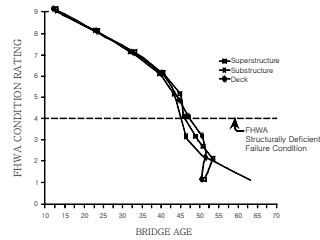


Fig. 4 CR vs. Average Ages for Various Condition Categories

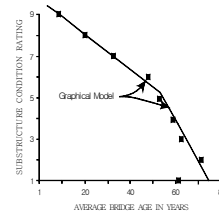


Fig 5 Graphical Model for CR vs. Average Ages

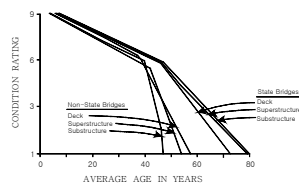


Fig. 6 Recommended Deterioration Models

### 2.1.6 Auburn University/ALDOT Study

Ramey와 Wright는 ALDOT내의 교량중 1980-1992년 사이에 개축된 166개 교량에 대한 조사를 실시하였다. 조사결과를 교량의 주요 구성요소 즉 바닥판, 상부구조, 하부구조로 분류하여 전체 교량에 대한 상태등급을 도식한 결과 Fig. 7과 같은 경향을 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 시간경과에 따른 상태등급의 변화는 3차식에 근접한 경향을 나타내고 있으나 특정한 함수식의 경향이 나타나지 않아 전체교량을 나타낼 수 있는 모델을 제시할 수 없었다. 이러한 결과는 AU/ALDOT 연구결과뿐만 아니라 North

Carolina DOT의 연구결과에서도 주정부내의 모든 교량에 대해서 단순 통계적인 절차만으로는 교량 열화에 대한 적절한 모델을 제공할 수 없다는 결론에 도달했다. 따라서 조사대상 시설물을 유지관리주체별, 구조물 종류별로 분류하여 노후화경향을 분석하였다.

동일 데이터를 ALDOT가 관리하고 있는 교량에 한하여 교량의 구성요소별로 도식한 결과 바닥판은 Fig. 8과 같고, 상부구조는 Fig. 9와 같으며, 하부구조는 Fig. 10과 같이 2개의 1차식으로 표현할 수 있었다. 이를 노후화율을 정리하여 보면 Table 1과 같다.



Fig. 7 CR versus Age for Auburn University Subset

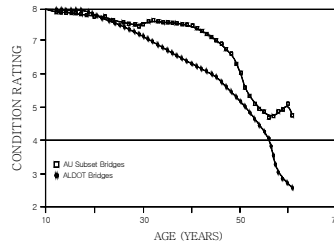


Fig. 9 Superstructures CR vs. Age for Auburn University Subset

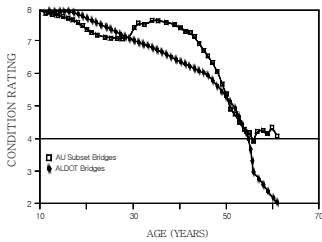


Fig. 8 Deck CR vs. Age for Auburn University Subset

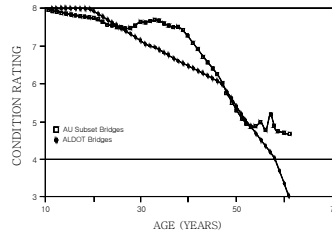


Fig. 10 Substructure CR vs. Age for Auburn University Subset

Table 1 ALDOT Study 결과의 Average Deteriorating Rate

Investigating Agency	Bridge Sample	Average Deteriorating Rate			Comments
		Deck	Super-structure	Sub-structure	
UA/ALDOT	3,540 <sup>(1)</sup>	0.076	0.082	0.078	Approximately 0-46 year
		0.225	0.178	0.182	Approximately 46-77 year
UA/ALDOT	7,150 <sup>(2)</sup>	0.093	0.096	0.085	Approximately 0-40 year
		0.320	0.447	0.695	Approximately 40-53 year
AU/ALDOT	143 <sup>(3)</sup>	-	-	-	Approximately 0-43 year
		0.21	0.13	0.18	insignificant deterioration rate( $\neq 0.01$ ) Approximately 40-60 year

(1) Approximately 3,540 state-owned Alabama bridges

(2) Approximately 7,150 non-state-owned Alabama bridges

(3) All state-owned nontimber bridge replacements in Alabama between 1980-1992

## 2.2 국내

국내에서는 LCP를 구축하기 위하여 Table 2와 같이 총 31명의 교량 유지관리분야의 전문가들에게 공용기간의 증가에 따른 교량 부재의 노후화 정도에 대해 설문조사를 실시하였다. 설문조사 내용은 결과 준공 후 아무런 조치가 취해지지 않았을 경우 각 상태등급에 도달할 때 소요되는 공용년수였다. 응답자들의 각 상태등급별 소요 공용년수들을 평균한 결과 Table 3과 같았다. 이때 사용된 각 상태등급별 손상판정기준은 시설안전기술공단에서 제시한 상태등급기준을 적용하였다. 전문가집단에 대한 조사 결과를 이용하기 위하여 A~E의 상태등급을 5~1의 수치로 정량화하여 Table 3의 조사결과를 회귀분석한 결과 3차 함수일 때가 상관계수가 0.99이상으로 나타났다. 제안된 회귀분석식을 이용하여 주형이 존재하는 바닥판 경우 Fig. 11에, 슬래브교는 Fig. 12에 LCP를 나타내었다.<sup>(1), (2)</sup>

## 3. 교량 LCP의 정식화

기존의 연구결과들을 고찰한 바에 의하면 국내의 기준식은 교량을 직접 조사하지 않고 제안된 식이므로 신뢰성을 확보할 수 없다. 또한 미국에서 제안된 각종 연구결과와 내구수명은 국내의 연구결과에서 제시한 내구수명과 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 교량을 직접 조사한 결과를 반영하면서 시간경과에 따른 등급변화를 근접하게 표현할 수 있는 새로운 LCP의 구축이 필요하다.

### 3.1 기본 가정

초기 LCP를 구축하기 위한 기본 가정을 정리하여 보면 다음과 같다.

- (1) LCP의 주요변수는 공용년수  $t$  로만 한다.
- (2) 교량의 등급분류는 건설교통부 기준에 의거 5단계로 하며, A등급은 5, B등급은 4, C등급은 3, D등급은 2, E등급은 1로 정량화한다.
- (3) LCP에서  $y_0$ 는 최상평가 등급으로 한다.
- (4) LCP는 1개 미지수를 갖는  $y=f(t)$ 로 표현한다.

Table 2 수명조사를 위한 전문가집단 구성

분야	인원(명)	구성비(%)
산업계	7	22.6
학계	6	19.4
관계	10	32.3
연구계	8	25.8
합계	31	100.0

Table 3 설문조사에 따른 교량 부재별 공용년수

등급	부재	바닥판		RC 슬래브교
		주형 有	주형 無	
A	5	3	4	4
B	4	6	6	7
C	3	14	14	14
D	2	23	22	25
E	1	31	29	32

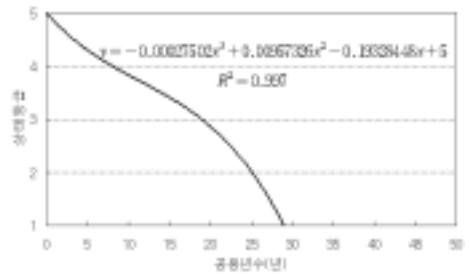


Fig. 11 주형이 존재할 경우 바닥판의 열화등급 곡선

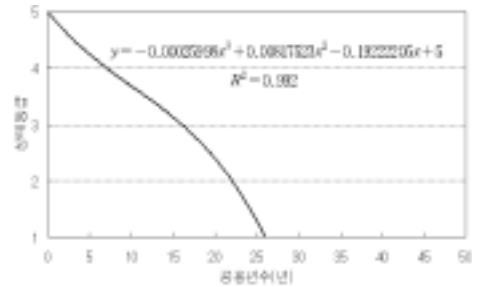


Fig. 12 슬래브교나 라멘교 바닥판의 열화등급 곡선

기존의 연구를 고찰하여 보면 교량의 열화는 공용년수, ADT, 상부구조형식, 경간수, 교량관리주체 등에 의하여 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 그러나 대부분의 연구결과 LCP의 주요 변수로서 공용년수를 취하였으며 국내의 BMS는 정밀안전진단 및 정밀 점검 결과에 대해 D/B를 구축하고 있으며 ADT를 관리하고 있지 않는 상태이다. 따라서 본 연구에서는 공용년수를 주요변수로 취하였다.

### 3.2 LCP 표현식 제안

국내의 LCP의 함수식을 분석한 결과, 미국은 많은 교량을 대상으로 직접 조사를 실시하여 제안된 모델로서 가장 신뢰성이 있는 연구결과로 분류할 수 있다. ALDOT에서 제안된 LCP는 9등급(건설당시의 상태, 국내 A등급)부터 6등급(Satisfactory, 국내기준 C등급)까지는 완전한 기울기를 갖는 1차식이나, 6등급 이하에서는 기울기가 급한 1차식으로 정의되었다.

또한 국내의 기존식에서도 미국의 연구결과와 유사하게 C등급을 기준으로 초기 열화속도와 후기열화속도로 구분되어짐을 알 수 있다. 따라서 초기등급변화는 ALDOT 등의 연구에서와 같이 C등급이내에서는 완전한 변화를 보이나 C등급 이상에서는 급격히 변화하는 경향을 1개의 함수로 표현되는 수학적 LCP모델을 추적하였다. 이러한 경향에 가장 근접하게 나타나는 것은  $y=\sqrt{f(t)}$ 로 표현되는 함수로 나타났다.  $y=\sqrt{f(t)}$  함수는 1차 미분을 하였을 때도 공용년수  $t$ 의 1차식을 갖고 있어 1차식과 같은 경향을 나타내나  $t$  값이 어느 정도 증가하게 되면  $y$ 가 급격히 변하는 성질을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 수학적 LCP모델로  $y=\sqrt{y_0^2-at}$ 로 표현되는 무리식을 제안한다.

### 3.3 기존 연구결과와 비교

본 연구에서 제안된  $y=\sqrt{y_0^2-at}$  함수식이 LCP 모델에 적합한가를 검토하기 위해 국내 기존식과 UA/ALDOT연구 결과에 적용하여 본다. 국내 기존식의 최상 등급으로  $y_0=5$ 를 취하였다. 국내 기존식의 상태등급  $y=3\sim 2$ 구간의 등급 변화율을 최대한으로 나타낼 수 있도록 시행착오법을 거쳐 제시된 수학적 LCP모델의 미지수를 산정하고 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 무리식으로 표현되는 LCP와 국내의 기존식의 LCP와의 상관관계를 산정한 결과  $R=0.995$ 로서 본 연구에서 제안한

$y=\sqrt{y_0^2-at}$ 모델이 국내 기존식의 경향을 충분히 반영할 수 있음을 알 수 있다.

또한 AU/ALDOT연구의 알라바마주 소유의 교량에 대해 제안된 LCP에 대해 제시된 수학적 LCP모델의 적용성을 비교 검토하여 본다. AU/ALDOT에서는 미연방도로국의 9단계로 교량의 상태등급을 분류하고 있으므로  $y_0=9$ 를 취한다. AU/ALDOT는 공용년수가 0~46까지는 0.082, 공용년수가 46~76까지는 0.178의 기울기를 갖는 1차함수식을 적용하였다. 무리식으로 표현되는 LCP의 미지수는 AU/ALDOT의 후반기 기울기에 최대한으로 근접하도록 시행착오법에 의하여 결정하여 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 14에서 보는 바와 같이 본 연구에서 제안한  $y=\sqrt{y_0^2-at}$  모델은 AU/ALDOT에서 제안된 함수식과  $R=0.996$ 의 상관계수를 갖는 정도로 정확히 노후화를 나타내고 있음을 알 수 있다.

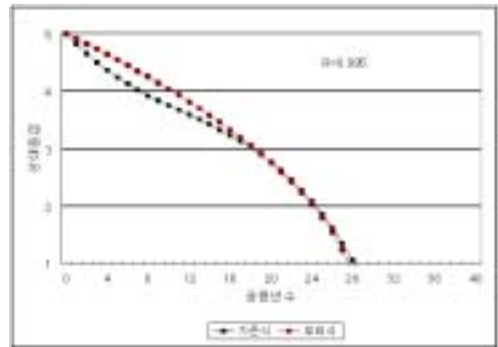


Fig. 13 국내 기존식 조건에서 제시모델 적용

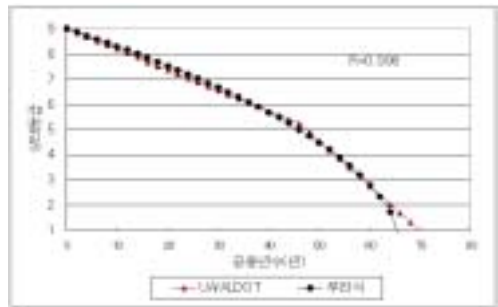


Fig. 14 UA/ALDOT조건에서 제시모델 적용

## 4. 제안식의 적용 예

### 4.1 개설

제안된 LCP를 검증하기 위해서는 동일 교량에 대해 십수년간의 등급변화에 대한 D/B를 구축하여 검증하여야 하나 국내의 교량점검 및 진단 역사가 짧을뿐만 아니라 기존의 조사결과 조차도 체계적인 D/B관리가 되어 있지 않은 상태이므로 동일교량의 등급변화에 대한 데이터를 수집하는 것은 불가능한 상태이다. 또한 가능한 동일 지역이나 동일 노선상에 위치하고 있

는 교량중에서 공용년수가 다른 교량에 대해 자료를 수집하여 공용년수에 따른 교량 등급변화를 파악하여야 하나 데이터 수집이 곤란한 상태이다. 따라서 전국에 가설되어 있는 교량에 대한 자료를 수집하여 상태지수를 산정한 후 공용년수에 따른 교량의 상태지수를 기준으로 제안식을 검증한다. 건설교통부 발행 “2002 교량현황조사”에 따르면 2002년 12월 31일 현재 전국의 교량 총 17,150개교중에서 슬래브교는 8,278개로서 48.3%에 달한다. 따라서 본 연구에서는 LCP의 적용대상으로 슬래브교를 선정하였다.

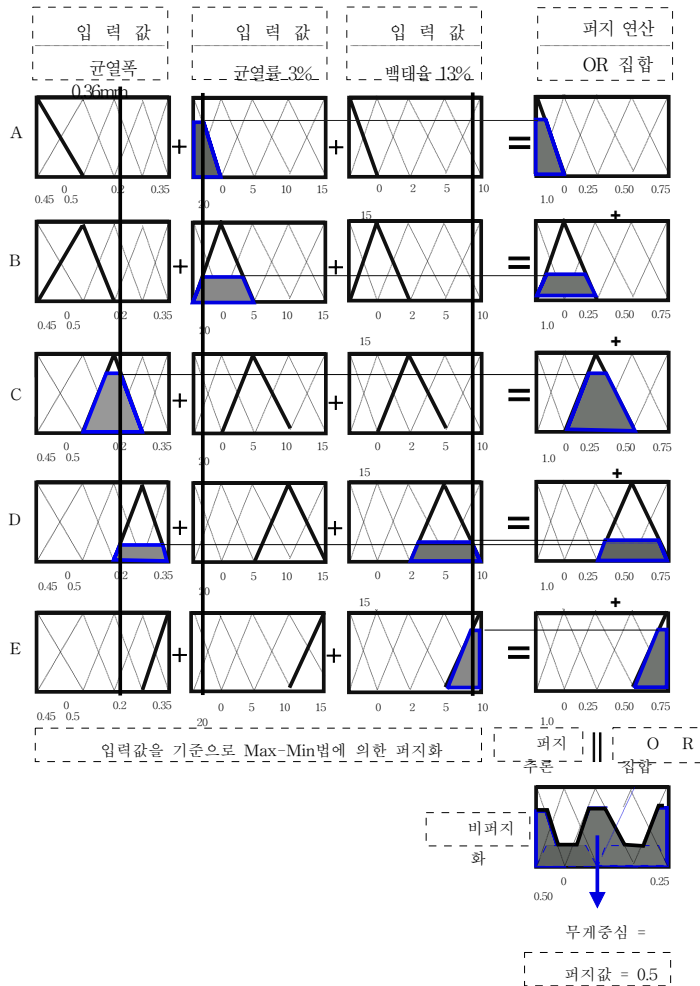


Fig. 15 Fuzzy logic에 의한 손상평가 모식도



## 4.2 Fuzzy logic에 의한 상태평가

교량은 수개의 구조체로 형성되어 있으며 각 구조체를 평가하기 위해서는 각구조체별로 외관조사, 내구성 조사 및 안전성 검토를 실시한다. 외관조사에 의해 구조체를 평가하기 위해서는 구조체에 발생 가능한 현상에 대한 각종 자료를 조사하여야 한다. 또한 구조체의

내구성을 평가하기 위해서는 내구성에 영향을 줄 수 있는 각종 인자에 대해 현장조사 혹은 시험실에서 시험을 실시하여야 한다. 즉 1개의 구조체를 평가하기 위해서는 수 많은 자료를 수집하고 모든 자료를 고려해야 한다. 그러나 조사과정중 점검자의 불확실성이 포함되며 평가과정에서는 많은 자료를 고려하여야 하므로 판단의 불확실성이 포함될 수 밖에 없는 실정이다.

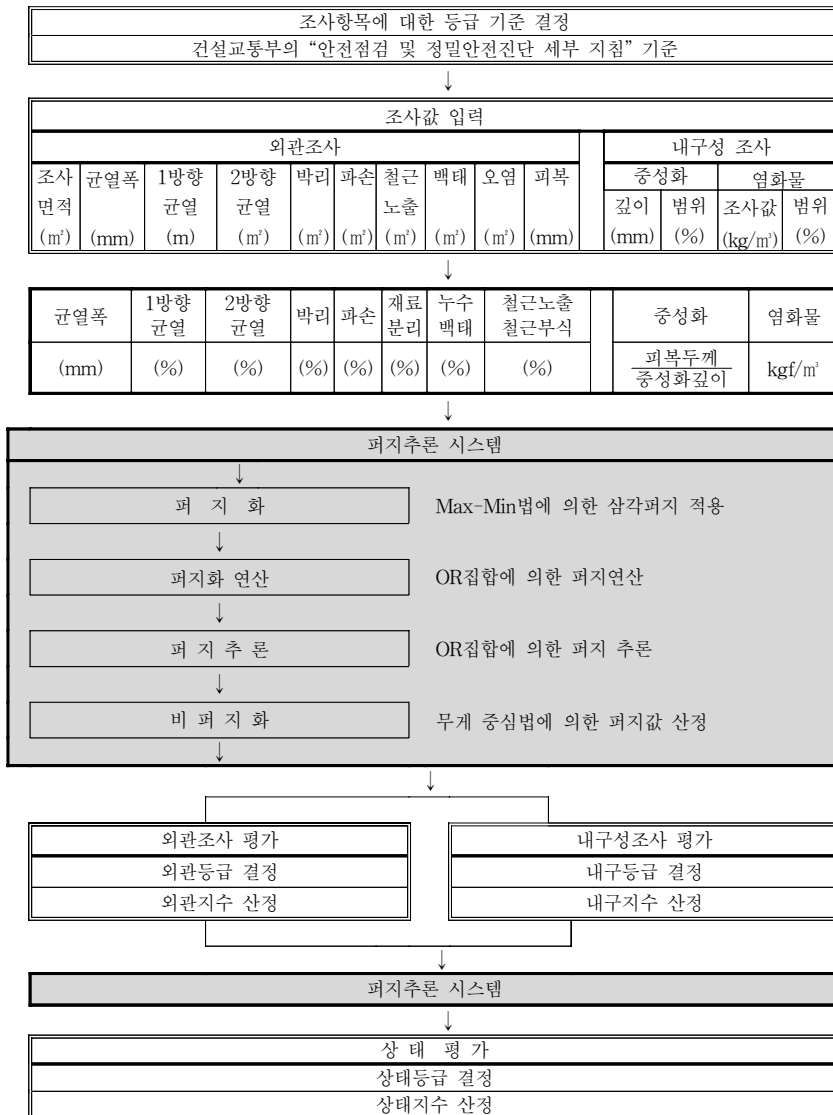


Fig. 16 Overlay method에 의한 상부구조 상태평가 흐름

이러한 불확실성을 최소화하기 위해 인간의 사고와 판단을 대신해 줄 수 있는 능력을 컴퓨터에 부여하려는 시도중의 하나가 Fuzzy 이론이다. 본 연구에서는 조사 및 평가시의 불확실성을 최소화하기 위하여 퍼지 logic을 도입한다.

본 연구에서 도입한 퍼지logic은 조사자의 조사결과에 대한 평가의 불확실성을 최소화하고 평가에 대한 조사자간의 편차를 최대한으로 감소시키기 위해 각 조사항목에 대한 조사된 규모를 직접 입력하도록 하였다. 입력된 조사규모를 이용하여 퍼지추론을 위한 일련의 과정을 Fig. 15의 모식도를 이용하여 나타내었다. Fig. 15에서 보는 바와 같이 입력값을 기준으로 각 등급의 범위를 결정하였으며, 주변 등급과의 관계는 1:0의 직선형 관계를 갖는 삼각형방법을 이용하였다. 조사된 값이 입력되면 입력값에 의해 산정된 최대-최소멤버십 값이 산정되는 삼각형에 대해 Max-Min 법에 의해 퍼지화를 실시하였다.

즉, 최대 멤버십값 이하의 삼각형 면적과 최소 멤버

십값 이하의 삼각형 면적에 퍼지화를 실시하였다. 각 입력값마다 등급범위가 상이하므로 퍼지연산을 위해서는 0~1.0까지 단위범위로 등급범위를 치환하여야 한다. 치환되는 등급범위는 Fig. 15의 퍼지연산에서 보는 바와 같이 규칙적인 등급범위로 정의되며, 각 등급별 퍼지연산은 일반적인 IF-THEN 형식을 이용한 OR집합을 이용하였다. 최종적인 퍼지추론은 각 등급별 퍼지합집합을 구하는 과정으로서 OR집합을 이용하였다.

비퍼지화는 퍼지추론에 의한 퍼지합집합의 무게중심을 이용하여 퍼지값을 산정하는 무게중심법을 이용하였다. 이러한 일련의 퍼지추론을 위한 프로그램은 수치연산 전문 프로그램인 MATLAB의 Fuzzy logic toolbox를 이용해 작성하였다.<sup>(7)</sup> Fig. 15에 나타난 퍼지logic을 이용하여 상부구조의 상태지수를 산정하기 위한 일련의 과정을 Fig. 16에 나타내었다. Fig. 16에서 입력창에서 Table 3의 조사결과를 직접 입력하도록 하였다.

Table 3 대상교량의 상부구조 조사 결과

번호	교량명	위 치	교량 등급	준공 년도	조사 년도	공영 연수	조사 면적 (㎡)	균열폭 (mm)	1방향 균열(m)	2방향 균열(㎡)	박리 (㎡)	파손 (㎡)	철근굴 (㎡)	백태 (㎡)	오염 (㎡)	피복 (mm)	중 성 화		연 화 물	
																	깊이 (mm)	범위 (%)	조사값 (kg/㎡)	범위 (%)
1	들골교	영월(군도)	2	1976	1996	20	150	0.1	16	13.6	0	0	1.5	0	0	40	10	0	0.21	0
2	연암교	대천(지방)	2	1982	1997	15	375	0.2	22	4.7	0	0	0	2.1	2	48	5	0	0.05	0
3	양지2교	안양(지방)	2	1983	1998	15	252	0.2	0	70	0	0.3	15	0.8	12	33	15	0	0.34	45
4	양지3교	안양(지방)	2	1983	1998	15	249	0.2	10	95	0	0	0.1	6	0	30	20	50	0.38	50
5	양지4교	안양(지방)	2	1983	1998	15	501	0.2	0	10.6	0	5.3	67	7.17	0	45	40	50	0.36	50
6	양지5교	안양(지방)	2	1983	1998	15	225	0.2	0	15	0	0.87	45	60.9	0.4	20	20	0	0.37	50
7	월산1교	공주(지방)	2	1976	1997	21	288	0.2	490	49	0	1.5	11	0	0	22	60	100	0.37	50
8	미구1교	영 월	2	1983	1999	16	250	0.3	0	7.1	0	0	0	8	0	26	12	0	0.13	0
9	을지교	화 천	2	1992	1999	7	189	0.3	41.6	0	0	0.56	0.7	8.54	0.04	21	2	0	0.07	0
10	신용교	은 평	2	1978	2001	23	1600	0.2	385	1.56	0	48.65	0	34.7	0	32	3.5	0	0.29	0
11	포서교	진도(국도)	2	1986	2001	15	600	0.3	5.3	50.4	0	0	0.5	2	0	49	9	0	0.50	43
12	송정고가	광산(지방)	2	1986	2001	15	315	0.3	4.92	1.08	0	0	1.6	0	0	40	9	0	0.17	0
13	화암교	유성(고속도)	2	1970	2001	31	316	0.3	28.8	233	0	0	0	4	0	45	12	0	0.13	0
14	유성육교	유성(고속도)	2	1975	2001	26	304	0	0	0	0	0	0.02	0	0	45	10	0	0.11	0
15	금북교	논산(고속도)	2	1970	2001	31	554	0.1	2	14.6	0	0	0.7	1.66	0	35	12	0	0.17	0
16	원주육교	익산(고속도)	2	1970	2001	31	514	0.1	0	429	0	0	1.5	19.5	0	35	11	0	0.16	0
17	화은1교	공주(지방)	2	1970	1997	27	200	0.2	16.25	18	0	0	0.5	0	0	25	60	100	0.31	50
18	만천교	공주(군도)	2	1977	1997	20	409	0.2	17.2	3	0	0	0.24	0	0	48	45	38	0.30	0
19	작천교	강 진	2	1980	2000	20	114	0.2	27.1	0.32	0	0	0	1.68	0	38	40	60	0.03	0
20	물곡교	진안(국도)	2	1980	2002	22	110	0.2	45	7.08	0	0	0	9	0	28	30.5	100	0.05	0
21	군자교	춘천국도	2	1992	2000	8	207	0.2	55	0	0	0	20	0	0	40	20	0	0.22	0
22	남광교	광주국도	2	1985	2000	15	2100	0.2	54	0	0	2	0	60	0	40	20	0	0.30	20
23	반포교	서 울	2	1982	2002	20	660	0.2	84	0	0	0.25	158	6	0	50	9	0	0.21	0

### 4.3 적용결과

전국에 분포되어 있는 교량 중 최근 정밀 점검을 실시하였거나 정밀안전진단을 실시하였던 슬래브교 중 2등급의 23개 교량을 대상으로 자료수집하여 상부구조에 대한조사결과를 Table 3에 정리하였다.

이에 대한 퍼지추론 결과 퍼지값(x1)을 이용하여 교량 평가지수(y)는 에 의해 산정하여 Table 4에 나타내었다. Table 4의 공용년수(t)와 상태지수(y)를 이용하여 회귀 분석한 결과 Fig. 17과 같이 상관계수가 0.831인 회귀분석식을 구할 수 있었다.

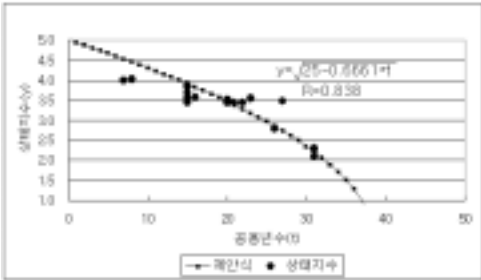


Fig. 17 회귀분석 결과

### 5. 결론

본 연구에서는 국내 교량의 사용조건을 반영한 LCC 산정 및 유지관리계획을 수립하기 위하여 BMS를 이용한 LCP를 구축하기 위한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 국내의 연구결과를 토대로  $y = \sqrt{y_0^2 - at}$ 의 LCP모형을 제안하여 국내의 연구결과 비교하고, 전국에 가설되어 있는 23개 슬래브를 대상으로 적용하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 본 연구에서 LCP모дел로 제안한  $y = \sqrt{y_0^2 - at}$ 함수식은 국내 기존 연구식 및 미국의 ALDOT 연구결과의 LCP와 비교한 결과 본 연구에서 제안한 LCP모델은 상관계수 0.99이상으로 기존의 연구결과의 경향을 잘 표현하는 것으로 나타났다.
- 2) 본연구에서 제안한 LCP모델을 검증하기 위하여 국내의 슬래브교에 적용한 결과 상관계수가 0.83 정도의 노후화를 예측할 수 있었다.

Table 4 퍼지추론결과와 교량지수

번	교량명	교량등급	공용년수	퍼지 값 (x1)			교량 지수 (y1)		
				외관평가	내구평가	상태평가	외관지수	내구지수	상태지수
1	을지교	2	7	0.245	0.238	0.249	4.021	4.049	4.002
2	군자교	2	8	0.244	0.220	0.248	4.023	4.121	4.009
3	연암교	2	15	0.276	0.234	0.283	3.897	4.066	3.868
4	양지2교	2	15	0.476	0.342	0.385	3.095	3.634	3.461
5	양지3교	2	15	0.435	0.364	0.387	3.259	3.546	3.453
6	양지4교	2	15	0.441	0.348	0.383	3.238	3.609	3.469
7	양지5교	2	15	0.496	0.367	0.393	3.015	3.532	3.428
8	포서교	2	15	0.360	0.355	0.362	3.558	3.578	3.553
9	송정고가	2	15	0.338	0.247	0.336	3.647	4.014	3.656
10	남광교	2	15	0.284	0.261	0.293	3.864	3.955	3.828
11	미구1교	2	16	0.384	0.304	0.361	3.464	3.785	3.557
12	들골교	2	20	0.440	0.233	0.370	3.241	4.068	3.519
13	만천교	2	20	0.423	0.374	0.389	3.306	3.503	3.446
14	작천교	2	20	0.406	0.361	0.380	3.377	3.555	3.480
15	반포교	2	20	0.472	0.245	0.374	3.110	4.020	3.504
16	월산1교	2	21	0.457	0.372	0.392	3.172	3.514	3.430
17	물곡교	2	22	0.445	0.372	0.391	3.222	3.511	3.435
18	신용교	2	23	0.417	0.280	0.368	3.332	3.881	3.530
19	유성육교	2	26	0.415	0.753	0.554	3.339	1.988	2.785
20	화은1교	2	27	0.438	0.359	0.386	3.250	3.566	3.458
21	화암교	2	31	0.565	0.734	0.730	2.740	2.064	2.081
22	금복교	2	31	0.696	0.755	0.689	2.215	1.980	2.246
23	원주육교	2	31	0.675	0.745	0.672	2.300	2.019	2.312

본 연구에서는 LCP모델로 제안한  $y = \sqrt{y_0^2 - at}$  함수식을 검증하기 위하여 정밀점검을 실시하였거나 정밀안전진단을 실시한 슬래브교를 대상으로 자료를 수집하였으나 보다 신뢰성 있는 LCP를 구축하기 위해서는 본 연구에서 적용한 Fuzzy logic을 기준으로 조사를 실시하여 노선별, 지역별, 교량형식별 등 유지관리조건을 반영한 연구가 수행되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

1. 건설교통부(1999), “ ’98 교량관리체계(BMS) 개선에 관한 연구” .
2. 건설교통부(2000), “도로교의 공용수명 연장방안 연구” .
3. 건설교통부(2000), “시설물의 상태평가 기준정립(교량)”.
4. 건설교통부(2002), “LCC개념을 도입한 시설안전관리 체계 선진화방안연구”.
5. 박철수, 손용우, 이증빈(2002), “퍼지의사결정기법을 이용한 RC 구조물의 건전성평가”, 한국전산구조공학회 논문집, 제15권 제1집, pp 274-283.
6. 시설안전기술공단(2002), “교량의 LCC분석모델개발 및 DB구축방안 연구”.
7. 이현엽, 문경일(1999), “MATLAB을 이용한 퍼지-뉴로”.
8. Turner, D. S., Richardson, J. A., and Wong, K. S.(1991), “Development of bridge deterioration models for the ABIMS.”, Interim Rep. No. 3, Bureau of Engrg. Rep. 548-39, Univ. of Alabama, Tuscaloosa, Ala.

(접수일자 : 2003년 6월 11일)