

# 교량 유지관리 전략 수립을 위한 실용적 도로이용자비용 추정 모델

Practical Model to Estimate Road User Cost for Bridge Maintenance Strategy

박 경 훈\*

선 종 완\*\*

이 상 윤\*

이 중 순\*\*

조 호 남\*\*\*

Park, Kyung-Hoon

Sun, Jong-Wan

Lee, Sang-Yoon

Lee, Jong-Soon

Cho, Hyo-Nam

## Abstract

The road user cost in indirect costs as well as direct costs such as the inspection/diagnosis cost and the repair/reinforcement cost should be considered as one of the important items in the life-cycle cost-effective design and maintenance of the bridges. To estimate the road user cost, this paper formulates the road user cost as a sum of the user delay cost and the vehicle operating cost considering the detour effect. A numerical traffic simulation and a regression analysis are performed to develop a regression model due to a time delay. The proposed regression model is applied to the generation of the maintenance strategy based on the life-cycle cost and performance, and its effectiveness and applicability is investigated. The road user cost has a great influence on establishing the maintenance strategy, and the proposed regression model could be successfully utilized to estimate the road user cost of a bridge.

## 요 지

생애주기비용을 고려한 교량의 설계 및 유지관리에 있어서, 점검진단, 보수보강 등에 소요되는 직접적인 비용뿐만 아니라 간접적인 비용인 도로이용자비용은 중요한 비용항목으로 고려되고 있다. 직접비용과 비교하여 상대적으로 추정이 곤란한 도로이용자비용의 추정을 위하여 우회도로의 효과를 고려한 이용자자연비용과 차량운행비용의 정식화를 수행하고, 시간지체에 따른 도로이용자비용의 추정을 위한 회귀모델 개발을 위하여 교통해석과 회귀분석을 수행하였다. 개발된 회귀모델을 생애주기 비용 및 성능 기반 유지관리 전략 수립에 적용하여 도로이용자비용이 생애주기분석에 미치는 영향을 분석하고, 개발된 모델의 적용성에 대해서 고찰하였다. 도로이용자비용은 생애주기분석에 기초한 유지관리전략수립에 큰 영향을 미치며, 개발된 회귀모델은 교량의 도로이용자비용의 추정에 실용적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**Keywords :** Road user cost, User delay cost, Vehicle operating cost, Regression model, Bridge maintenance strategy

**핵심 용어 :** 도로이용자비용, 이용자자연비용, 차량운행비용, 회귀모델, 교량 유지관리 전략

\* 정회원, 한국건설기술연구원 연구원

\*\* 학생회원, 한양대학교 박사과정

\*\*\* 정회원, 한양대학교 건설환경시스템공학과 교수, 교신저자

E-mail : ryfid@hanyang.ac.kr 031-400-4027

• 본 논문에 대한 토의를 2007년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2008년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

교량에 유지관리조치를 적용하는 것은 교량 구조물의 안전성과 기능성을 유지하기 위한 기본적인 요구이다. 교량의 유지관리와 관련되어 발생하는 비용항목에 대해서는 다양한 논의가 진행되어 왔다. Ehlen and Marshall,<sup>(5)</sup> Hawk,<sup>(7)</sup> Kong and Frangopol,<sup>(9)</sup> 이것은 분류기준의 다양성에도 기인하겠으나 현실적인 적용가능성의 문제와 결부되어있다. 교량의 유지관리 단계에서의 비용항목은 유지관리 행위로 인해 유발되는 모든 비용이 포함되도록 구성되어야 한다. 또한 이러한 비용항목은 합리적으로 정량화 할 수 있어야 한다.

일반적으로 점검, 유지관리, 파손 비용은 공용중인 교량의 LCC분석의 주요 비용항목이다. 이러한 비용은 다시 직접비용과 간접비용으로 구분 될 수 있다. 관리 주체비용(agency cost)이라고 부르는 직접비용은 재료비, 노무비, 점검장치 등의 비용으로 구성된다. 간접 비용의 주요소는 교통지체와 같은 사용성 손실을 정량화함으로써 얻어지는 이용자비용이다. 최근 들어 도로의 유지관리 작업 등으로 인해 교통의 통제를 유발하는 작업구간(work zone) 발생에 따른 교통지체와 이로 인한 발생비용 등에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. Chien and Schonfeld,<sup>(4)</sup> Jiang and Adeli<sup>(8)</sup> 그러나 교통공학 관점에서 도로 네트워크를 고려한 정교한 모델이 대부분으로 본 연구와 같은 교량의 LCC 산정을 위한 이용자비용의 추정을 위해 그대로 적용하기는 어려운 실정이다. 따라서 본 논문에서는 개별 교량 수준(project level)에서 교량의 유지관리단계에서 발생할 수 있는 조치에 따른 이용자비용의 발생을 실용적으로 추정하기 위한 연구를 수행하였다.

지금까지 개발되어온 이용자비용 모델 및 시스템에 대한 고찰을 바탕으로 교량이 속한 교통 네트워크에서 우회도로의 효과를 고려하여 교량 LCC분석의 이용자 비용 추정을 위한 정식화를 수행하고 정식화에서 고려된 교통량에 따른 지체시간의 함수로 회귀모델을 개발하였다. 개발된 도로이용자비용 추정 회귀모델을 바탕으로 생애주기 성능 및 비용을 고려한 생애주기

최적 유지관리 시나리오의 선정(박경훈,<sup>(1)</sup> 한국건설기술연구원<sup>(2)</sup>)을 수행하고, 유지관리비용의 고려 유무에 따른 유지관리 시나리오간의 차이를 비교, 분석하였다.

## 2. 도로이용자비용의 정식화

### 2.1 비용분류체계

교량의 기능적 또는 구조적 결함에 의한 유지관리 조치로 인해 발생하는 이용자비용은 시간지연비용, 차량운행비용, 교통사고비용, 환경비용 등을 정식화 모델에 고려할 수 있다. Berthelot et al.<sup>(3)</sup> NIST Ehlen and Marshall<sup>(5)</sup>에서는 사용자 비용으로 운전자지연비용(driver delay costs), 차량운행비용(vehicle operating costs), 사고비용(accident costs)을 고려하고 있다. 운전자지연비용은 유지관리 작업으로 인해 지연되는 운전자에 대한 개인적인 비용이며, 차량운행비용은 유지관리 작업으로 인해 지연되는 차량의 기본적인 비용을 의미한다. 사고비용은 유지관리 작업에 기인한 차량의 손상과 이용자의 부상에 따른 비용이다. 이중 운전자지연비용과 차량운행비용은 이용자비용에 대부분을 차지하며 주요 비용항목으로 고려되어 왔으며, 사고비용, 환경비용, 불편비용 등은 데이터의 부족, 계량화 또는 화폐화의 한계 등으로 인해 현실적으로 고려되어 적용되기는 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구에서 고려하였던 운전자지연비용을 차량에 탑승한 모든 이용자로 확대하여 고려한 이용자지연비용(user delay costs)과 차량운행비용을 고려하였다.

### 2.2 이용자지연비용

교통혼잡으로 차량운행속도가 변화하는 경우 운전자는 물론 차량에 승차하고 있는 승객에게는 통행시간이 달라지는 결과를 가져오게 된다. 대부분 업무통행과 비업무통행으로 구분하여 각 통행목적에 따라 상이한 시간가치가 적용되고 있다. NIST에서는 단지 교량이 속한 주도로의 교통지체로 인해 운전자에게 발생하는

비용만을 고려하였으나, 본 논문에서는 주도로 및 우회도로에서의 교통혼잡으로 인한 속도 저하에 의해 발생하는 시간지연에 따른 효과를 차량 운전자뿐만 아니라 동승한 탑승자 모두를 고려하여 반영할 수 있도록 하였다. 이러한 이용자지연비용은 주도로에서의 시간지연비용과 우회도로에서의 시간지연비용의 합을 의미하며, 식(1)과 같이 정식화 할 수 있다.

$$C_{ud} = \left( \begin{array}{l} \left( \sum_{j=1}^J n_{oj} \cdot Q_{oj} \cdot u_j \right) \cdot \left( 1 - \sum_{i=1}^I r_i \right) \cdot \Delta t_{o_w} \\ + \sum_{i=1}^I \left( r_i \cdot \sum_{j=1}^J n_{oj} \cdot Q_{oj} \cdot u_j \right) \cdot \Delta t_{o_i} \\ + \sum_{i=1}^I \left( \sum_{j=1}^J n_{ij} \cdot Q_{ij} \cdot u_j \right) \cdot \Delta t_i \end{array} \right) \cdot W_{day} \quad (1)$$

여기서,  $o$  = 교통네트워크에 속해 있는 주도로에 대한 인덱스;  $i$  = 교통네트워크에 속해 있는 우회도로에 대한 인덱스;  $j$  = 차량의 종류에 대한 인덱스;  $n_{ij}$  = 재차인원;  $Q_{oj}$  = 주도로의 평균일교통량 (average daily traffic: ADT);  $Q_{ij}$  = 우회도로의 교통량(ADT);  $u_j$  = 차종별 이용자의 평균시간가치;  $r_i$  =  $i$  번째 우회도로의 우회율;  $\Delta t_{o_w}$  = 주도로의 작업구간 통과에 따른 지연시간 ( $=L_w/\bar{v}_w - L_w/v_o$ );  $\Delta t_{o_i}$  = 주도로의 교통중 우회도로로 배분된 교통량의 우회도로 통과 지연시간 ( $=L_i/\bar{v}_i - L_o/v_o$ );  $\Delta t_i$  = 주도로에서 배분된 교통량에 의한 우회도로 교통량의 지연시간 ( $=L_i/\bar{v}_i - L_i/v_i$ );  $L_w$ ,  $L_o$ ,  $L_i$  = 각각 교통해석에서 고려된 작업구간 길이, 주도로 길이, 우회도로 길이;  $v_o$ ,  $v_i$  = 각각 정상상태에서의 주도로 및 우회도로의 교통속도;  $\bar{v}_w$ ,  $\bar{v}_o$ ,  $\bar{v}_i$  = 각각 작업구간 발생 시 작업구간의 통과속도, 주도로 및 우회도로의 교통속도;  $W_{day}$  = 작업소요일수.

### 2.3 차량운행비용

교통혼잡에 따라 발생하는 차량운행비용을 NIST에서는 단지 교량이 속한 주도로의 교통지체로 인한 추가적인 차량운행으로 인해 발생하는 비용만을 고려하였으나, 본 논문에서는 주도로 및 우회도로에서의 교

통혼잡으로 인한 속도저하 및 시간지연에 의한 효과를 반영할 수 있도록 식(2)와 같이 정식화하였다. 식(2)에서  $f_{oj}$ 와  $f_{ij}$ 는 각각 주도로 및 우회도로의 단위 길이당 평균유류비용(속도의 함수)를 나타내며, 기타 기호는 식(1)과 같다.

$$C_w = \left( \begin{array}{l} \left( \sum_{j=1}^J Q_{oj} \cdot f_{oj} \cdot L_w \right) \cdot \left( 1 - \sum_{i=1}^I r_i \right) \cdot \Delta t_{o_w} \\ + \sum_{i=1}^I \left\{ r_i \cdot \sum_{j=1}^J Q_{oj} \cdot \left( f_{ij} \cdot L_i - f_{oj} \cdot L_o \right) \right\} \cdot \Delta t_{o_i} \\ + \sum_{i=1}^I \left( \sum_{j=1}^J Q_{ij} \cdot f_{ij} \cdot L_i \right) \cdot \Delta t_i \end{array} \right) \cdot W_{day} \quad (2)$$

식(1)과 식(2)는 주도로 및 우회도로로 구성된 교통네트워크의 작업구간 발생 전과 발생 후에 우회도로의 영향을 고려할 수 있는 일반화된 모델로, 각 변수들을 도식화된 네트워크에 나타내면 Fig. 1과 같다.

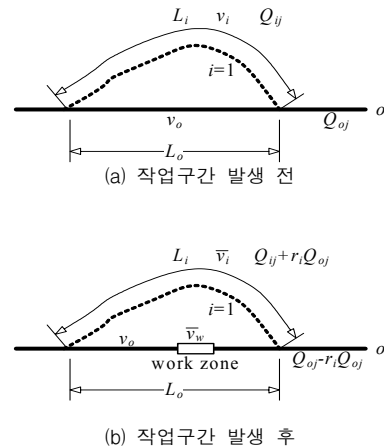


Fig. 1 교통네트워크의 구성정보

### 3. 도로이용자비용 추정을 위한 회귀모델 개발

식(1)과 식(2)에 제시된 정식화에 따른 이용자비용의 산출을 위해서는 다수의 입력자료와 교통해석 등이 요구된다. 하지만 교량의 LCC분석을 위한 이용자비용의 실용적 추정을 위하여 정확한 교통해석을 수행하는

것은 어려운 일이며 분석자 입장에서 불가능할 수도 있다. 따라서 교통네트워크의 효과를 고려하고 다양한 교통관련 변수들을 적용하여 기본적인 교통해석을 실시하고, 이용자비용에 영향을 미치는 주요 파라미터들을 도출하여 범주(category)화하였다. 각 범주에 따라 교통해석을 수행하고 정식화된 변수들 중 교통해석을 통해 제공되어야 하는 주도로 및 우회도로의 속도, 우회율을 구하였다. 기존의 정성적으로 예측되던 교통지체시간의 정량적, 해석적 추정을 위하여 유지관리로 인한 교통의 속도변화와 우회도로가 있는 경우의 교통분배 효과 등을 고려하여 각 범주별 시간지연 회귀모델을 개발하였다.<sup>(2)</sup>

### 3.1 교통해석

교통흐름해석은 전반적인 교통네트워크 분석을 고려할 수 있는 종합적인 범용 교통해석패키지 프로그램인 EMME/2(1999)를 이용하여 일반적인 국도 네트워크에 부합하는 정형화된 가상 교통네트워크에 대해 수행하였다. 회귀모델을 개발하기 위하여 수행하는 교통해석 시 반영되어야 하는 변수들은 주도로 및 우회도로의 교통량, 차로수, 길이, 설계속도와 작업구간의 길이, 통제차로수와 같은 공사구간의 조건 등이 있다.

우회도로가 존재하는 경우 교통 시뮬레이션을 실시한 결과 우회도로의 길이가 상대적으로 긴 경우에 우회율이 현저하게 낮아지며, 다수의 우회도로가 있더라도 대부분 가장 짧은 거리의 우회도로로 교통량이 배분되었다. 따라서 가상 네트워크의 유형은 우회도로가 없는 경우(Type I)와 우회도로가 1개인 경우(Type II)로 단순화하여 정의하였다. Fig. 2는 EMME/2의



Fig. 2 교통네트워크 입력 예

그래픽도구를 이용하여 우회도로가 1개 존재하는 경우의 입력 예를 보여주고 있다. 이와 같은 가상 교통네트워크를 고려한 교통해석 시에 각 유형별로 입력변수들이 고려되었고, 교통흐름 변화의 민감도 분석을 통해 교통네트워크에 영향을 미치는 각 입력변수에 대해 적용한 조건은 Table 1과 같다.

### 3.2 교통지체에 따른 회귀모델

교통네트워크의 특성을 고려하여 교통지체에 따른 배분교통량, 통과속도에 근거하여, 지체시간에 대한 회귀모델은 다음과 같은 절차를 통해 개발하였다.

- step 1 : 교통네트워크 모델링
- step 2 : 교통네트워크 조건 및 변수 입력
- step 3 : EMME/2를 이용한 시뮬레이션
- step 4 : 교통 통제로 인한 지체거리산정 (QUEWZ 모형)
- step 5 : 교통네트워크 시뮬레이션 결과 분석 (배분교통량, 통과속도)
- step 6 : 각 네트워크의 범주에 따른 지체시간의 회귀모델 개발
- step 7 : 연속변수 보간을 위한 다중 선형 및 비선형 회귀분석
- step 8 : 회귀모델 검증

Table 1 교통해석에 영향을 미치는 각 입력변수에 대한 조건

입력변수	주도로	우회도로
교통량	1,000~40,000대/일	주도로 교통량의 80~120%
차로수	왕복 2차로, 4차로	왕복 2차로, 4차로
도로길이	3~5km 범위	주도로의 1.5~5배(4.5~25km)
설계속도	60km/h, 80km/h	60km/h, 80km/h
작업구간 길이	50m, 100m	-
통제 차로수	1차로, 2차로 차단	-

### 3.2.1 우회도로 미고려 회귀모델

우회도로가 존재하지 않는 구간은 교량 유지관리 조치로 인해 주도로의 일부분을 통제하여 차로의 축소에 의한 병목현상이 발생하게 되고, 이로 인해 교통 통과속도가 현저히 저하되게 된다. 그러므로 우회도로를 고려하지 않는 경우 교통해석 결과는 통행속도 저하에 따른 지체시간의 발생으로 표현할 수 있다. 작업구간의 통과속도 저하는 Fig. 3과 같이 지체시작구간 거리( $l_f$ )와 지체회복구간 거리( $l_b$ )에서 정상속도( $v_o$ )와 작업구간 통과속도( $\bar{v}_w$ ) 사이에서 선형 변화되는 것으로 가정하였다.

우회도로를 고려하지 않는 경우(Type I)의 교통해석 관련 변수는 Fig. 4와 같다. 주요 입력변수에 대한 조건은 Table 1에서 주도로만을 고려한 경우로, 주도로의 차로수( $n_o$ )는 4차로와 2차로를, 주도로의 설계속도( $v_o$ )는 60km/h, 80km/h를, 작업구간길이( $L_w$ )는 50m와 100m를 고려하였고, 통제차로수( $n_w$ )는 2차로일 경우 1차로, 4차로일 경우 1차로 또는 2차로 통제를 고려하였다. 교통량의 경우 차종별 구성비를 승용차로 환산한 pcu(passenger car units) 교통량을 적용하였다. 이러한 경우의 수의 조합은 Table 2와 같이 총 12 범주(Type I-1 ~ I-12)로 구분된다. Table 2의 각 범주에 대하여 교통량에 따른 교통해석을 실시하여 교통지체에 따른 속도감소 영향과 TTI(Texas Transportation Institute) QUEWZ(Queue and User Cost Evaluation of Work Zones)모형에 따른 지체거리를 산정하였다. 산정된 결과를 이용하여 지체시간에 대한 회귀곡선을 pcu 교통량에 따라 나타내면 Fig. 5와 같다.

Fig. 5(a)는 주도로의 차로수가 4차로, 통과속도 80km/h인 경우에 통제차로수가 1, 2차로이고 작업구간 길이가 50m, 100m인 경우이다(Type I-1~4). pcu 교통량에 따라 통제차로수가 1차로인 경우가 2차로인 경우와 비교하여 더 낮은 지체시간을 보였다. 하지만 교통량이 증가할수록 작업구간의 길이가 긴 Type I-2의 경우가 Type I-3에 비해 지체가 증가하는 것을 보여주고 있다. Fig. 5(b)는 주도로가 4차로이며 1차로 통제일 경우 주도로의 설계속도 차이에 따른 비교를

보여주고 있다(Type I-1,2와 I-5,6). 교통량이 상대적으로 적은 경우에 이러한 차이로 인해 지체시간의 변화는 크지 않은 것으로 나타났으나 교통량이 증가할 경우 주도로의 설계속도가 낮은 경우가 상대적으로 높은 지체를 보이고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 5(c)는 주도로의 차로수 차이에 따른 비교를 보여주고 있다(Type I-1,2와 I-9,10). 설계속도와 통제차로수가 같은 경우 보다 적은 차로수의 도로에서 지체시간이 증가하는 것을 알 수 있다.

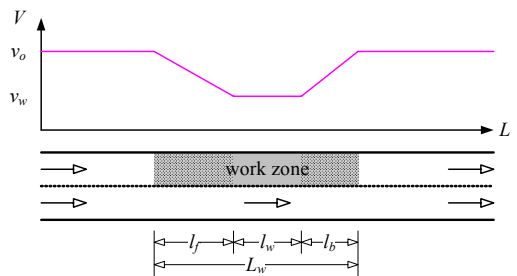


Fig. 3 작업구간에서의 속도변화

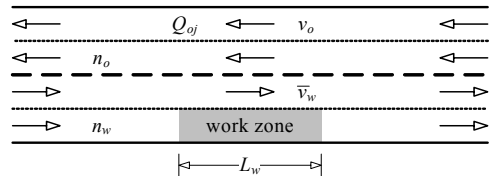
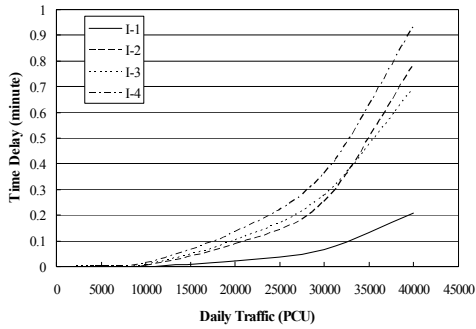


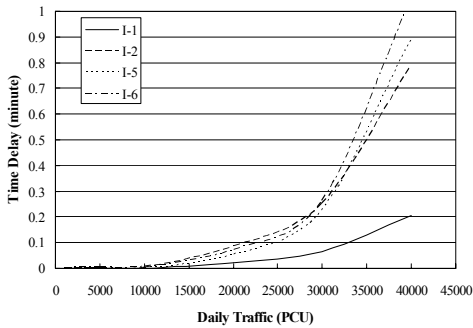
Fig. 4 우회도로 미고려시 교통해석 관련변수

Table 2 우회도로를 고려하지 않는 경우의 범주 분류

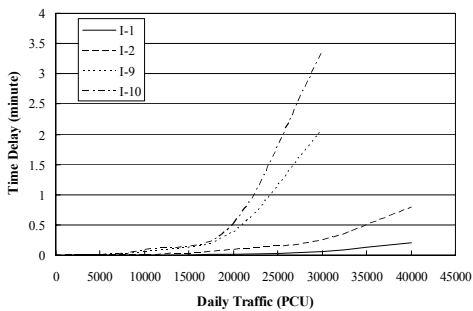
Type I	주도로 차로수 $n_o$	주도로 설계속도 $v_o$ (km/h)	통제 차로수 $n_w$	작업구간 길이 $L_w$ (m)
I-1	4	80	1	50
I-2	4	80	1	100
I-3	4	80	2	50
I-4	4	80	2	100
I-5	4	60	1	50
I-6	4	60	1	100
I-7	4	60	2	50
I-8	4	60	2	100
I-9	2	80	1	50
I-10	2	80	1	100
I-11	2	60	1	50
I-12	2	60	1	100



(a) 통제차로수 및 작업구간 길이에 따른 시간지체



(b) 주도로 설계속도 및 작업구간 길이에 따른 시간지체



(c) 주도로 차로수 및 작업구간 길이에 따른 시간지체  
Fig. 5 교통량에 따른 시간지체 모델(Type I)

교통량에 따른 지체속도를 추정하기 위해서는 확정적인 이산형 변수인 차로수, 설계속도, 통제차로수 등을 구분할 수 있으나 작업구간의 경우 연속적으로 변화하게 된다. 따라서 작업구간 길이와 교통량을 독립변인으로 하고 지체속도를 종속변인으로 하는 다중변수에 따른 선형 및 비선형 회귀분석을 수행하여 Table 3과 같이 최종적인 회귀모델을 개발하였다. 최

종적으로 구해진 교통지체에 따른 회귀모델은 전체적인 적합도가 우수한 것을 확인할 수 있으며, 이와 같은 회귀식은 이용자비용을 구하기 위해 보다 시스템적으로 활용될 수 있다.

### 3.2.2 우회도로로 고려 회귀모델

국도 네트워크 상에서 우회도로를 고려하는 경우에 주도로의 부분통제 및 완전통제에 따른 주도로의 통고속도 저하와 우회에 따른 시간지체를 고려하고, 교통배분에 따른 우회도로의 교통량 증가 및 이로 인해 우회도로의 교통속도 저하가 발생할 경우 등을 고려하여 교통해석 결과를 바탕으로 회귀모델을 개발하였다. 우회도로를 고려하는 경우(Type II) 교통해석과 관련된 주요 변수는 Fig. 6과 같다. 우회도로를 고려한 경우의 주요 변수에 대한 조건은 Table 1을 적용하였다. 각 변수의 조건별로 조합된 범주는 총 196 범주(Type II-1~196)로 구분된다. 각 범주별 분석 결과 중 모델의 합리성을 판단하기 위하여 선정된 대표적인 범주 12가지를 Table 4에 나타내었으며, 범주별 변수에 따라 pcu 교통량에 대한 주도로 시간지체의 곡선을 Fig. 7에 나타내었다. 시뮬레이션 결과, pcu 교통량 20,000대 이하에서는 작업구간에 의한 차선 통제시 교통지체가 발생하지 않을 정도로 소통이 원활하였으나 20,000대 이상의 경우에 지체시간이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 7(a)는 Table 4의 Type-5~8까지의 범주에 대한 결과 중 일교통량에 따른 지체시간을 분석한 결과이다. 작업구간 길이가 길어질수록, 우회도로의 교통량이 증가할수록 지체길이는 증가하는 것을 알 수 있다. Type II-6과 7을 비교해보면 작업구간의 길이가 짧더라도 우회도로 교통량이 많을 경우 지체시간이 늘어날 수 있다는 것을 알 수 있다. Fig. 7(b)는 주도로 차로수에 따른 지체시간의 차이를 보여주고 있다. 주도로의 차로가 4차로일 경우(Type II-73, 74)가 2차로일 경우(Type II-5, 6)에 비해 지체시간이 크게 감소하는 것을 보여주고 있다. Fig. 7(c)는 주도로의 설계속도 차이에 따른 비교를 보여주고 있다. 설계속도가 높은 구간(Type II-73, 74)에서 낮은 구간(Type II-137, 138)보다 상대적으로 지체시간이 적게 나타나고 있다.

Table 3 우회도로를 고려하지 않은 경우의 회귀모델

Type I	$n_0$	$v_0$	$n_w$	회귀식	$R^2$
I-1,2	4	80	1	$\bar{v}_w = 0.0425L_w - 0.00202Q_{oj} + 102.4575$	0.996
I-3,4	4	80	2	$\bar{v}_w = -0.0329L_w - 0.0020368Q_{oj} + 95.3525$	0.993
I-5,6	4	60	1	$\bar{v}_w = -0.01925L_w - 0.00138285Q_{oj} + 78.08375$	0.938
I-7,8	4	60	2	$\bar{v}_w = -0.0288L_w - 0.0013754Q_{oj} + 73.6974999$	0.944
I-9,10	2	80	1	$\bar{v}_w = -0.0624L_w - 0.005258Q_{oj} + (6.04 \times 10^{-8})Q_{oj}^2 + 117.440$	0.971
I-11,12	2	60	1	$\bar{v}_w = -0.028L_w - 0.0036011Q_{oj} + (3.71 \times 10^{-8})Q_{oj}^2 + 85.470$	0.932

Table 4 우회도로를 고려한 경우의 범주 분류

Type II	주도로 차로수 $n_o$	주도로 통과속도 $v_o$ (km/h)	우회도로 차로수 $n_i$	우회도로길이 $L_i$ (km)	우회도로 통과속도 $v_i$ (km/h)	통제 차로수 $n_w$	작업구간 길이 $L_w$ (m)	우회도로 교통량 $Q_{ij}$
II-5	2	80	2	4.5	60	1	50	0.8Q
II-6	2	80	2	4.5	60	1	50	1.2Q
II-7	2	80	2	4.5	60	1	100	0.8Q
II-8	2	80	2	4.5	60	1	100	1.2Q
II-73	4	80	2	4.5	60	1	50	0.8Q
II-74	4	80	2	4.5	60	1	50	1.2Q
II-75	4	80	2	4.5	60	1	100	0.8Q
II-76	4	80	2	4.5	60	1	100	1.2Q
II-137	4	60	2	4.5	60	1	50	0.8Q
II-138	4	60	2	4.5	60	1	50	1.2Q
II-139	4	60	2	4.5	60	1	100	0.8Q
II-140	4	60	2	4.5	60	1	100	1.2Q

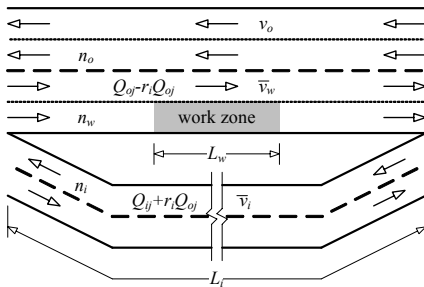


Fig. 6 우회도로 고려 시 교통해석 관련 변수

주도로의 차로수와 통과속도, 우회도로의 차로수와 통과속도, 통제차로수 등의 확정적 변수와 연속 변수화 되어야하는 작업구간길이, 우회도로 길이를 고려하여 선형 및 비선형 회귀분석을 수행하였다. 이때 회귀분석의 독립변인은 주도로 교통량, 우회도로 교통량, 작업구간의 길이, 우회도로의 길이이며, 종속변인은 작업구간 통과속도, 우회도로 통과속도, 우회율이다. 즉 4개의 독립변인에 따라 작업구간 통과속도, 우회도로 통과속도, 우회율 등 3개의 회귀식을 얻을 수

있다.

회귀식의 기본 형태를 추정하기 위해서 각 독립변인에 따른 종속변인의 변동추이를 분석한 결과, 작업구간 통과속도 및 우회도로 통과속도는 주도로 교통량에 따라 교통용량을 초과하지 않는 경우에는 선형적으로, 용량을 초과한 이후에는 비선형으로 통과속도가 감소되는 것으로 나타났다. 또한 우회율은 주도로 교통량이 증가함에 따라 선형 증가 하였으며, 우회도로교통량, 작업구간의 길이에 따라 각 종속변인은 선형적인 변화 추이를 보였다. 따라서 본 논문에서는 다중 독립변인에 따른 종속변수의 변화 추이를 나타낼 수 있도록 식(3)~식(5)를 기본 회귀식으로 선정하였다. 우회도로의 영향을 고려한 Type II의 각 범주별 회귀식은 참고문헌 한국건설기술연구원<sup>(2)</sup>을 통해 확인 할 수 있다.

$$\bar{v}_{wi} = c_1 L_i + c_2 L_w + c_3 Q_{ij} + c_4 Q_{oj} + c_5, \quad Q_{oj} \leq 20,000 \quad (3a)$$

$$\bar{v}_{i2} = c_1 L_i + c_2 L_w + c_3 Q_{ij} + c_4 Q_{oj} + c_5 Q_{oj}^2 + c_6, Q_{oj} > 20,000 \quad (3b)$$

$$\bar{v}_i = c_1 L_i + c_2 L_w + c_3 Q_{ij} + c_4 Q_{oj} + c_5 Q_{oj}^2 + c_6 \quad (4)$$

$$r_i = c_1 L_i + c_2 L_w + c_3 Q_{ij} + c_4 Q_{oj} + c_5 \quad (5)$$

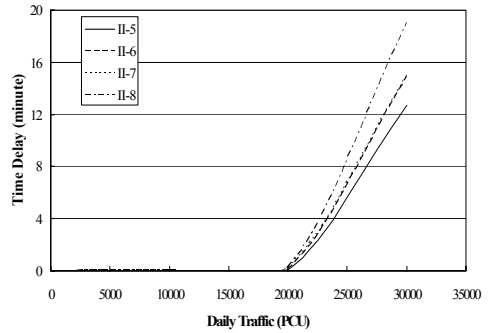
여기서,  $\bar{v}_{i1}$ ,  $\bar{v}_{i2}$  = 각각  $Q_{oj} \leq 20,000$ ,  $Q_{oj} > 20,000$ 일 때 작업구간 발생 시 작업구간의 통과속도;  $\bar{v}_i$  = 작업구간 발생 시 우회도로의 교통속도;  $r_i$  = 주도로의  $i$ 번째 우회도로의 우회율;  $c_6$  = 회귀분석을 위한 계수;  $L_i$  = 교통해석에서 고려된 우회도로 길이;  $L_w$  = 교통해석에서 고려된 작업구간 길이;  $Q_{ij}$  =  $j$ 번째 우회도로의 교통량;  $Q_{oj}$  = 주도로의 교통량. 우회도로 미고려 시 분석한 바와 마찬가지로 범용 통계처리 프로그램인 SPSS 12.0을 이용하여 회귀분석을 수행하였으며, 각 범주에 따른 최종적인 회귀모델은 다음절의 도로이용자비용 추정 모델에 포함되어 도로이용자비용의 추정에 활용되었다.

#### 4. 생애주기분석을 위한 도로이용자비용 추정 모델

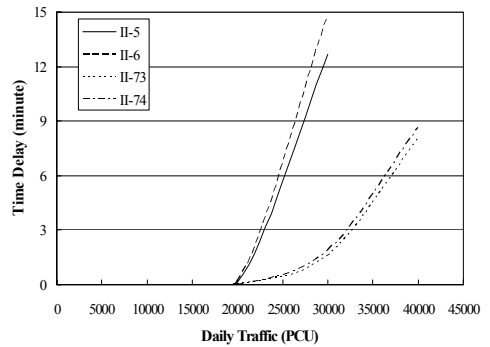
##### 4.1 비용 및 성능 기반 생애주기분석

최근 구조 수명 동안의 성능 및 비용을 기반으로 시간의 경과에 따라 열화되는 강교량의 최적 유지관리 시나리오를 선정하는 프로그램이 개발되었다.<sup>(1)</sup>

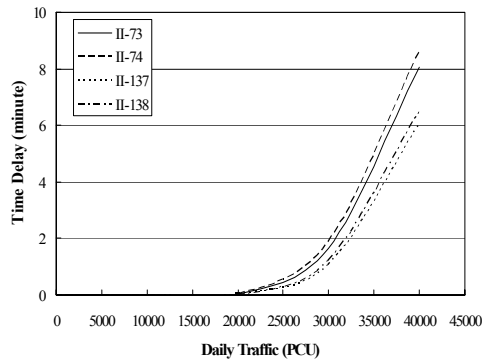
기본적으로 구조물의 상태등급을 표현하는 상태지수, 구조 안전도를 표현하는 신뢰도지수와 비용에 기초하여, 상충되는 목적들(상태지수, 신뢰도지수, 비용) 사이에서 Pareto 최적 의미의 균형잡힌 (tradeoff) 해를 다중목적 GA(Genetic Algorithm)에 기반하여 선정할 수 있다. 또한 강교량을 구성하는 모든 부재 중 최적 유지관리 시나리오 해석에 고려된 모든 부재에 대한 상태지수, 신뢰도지수, 비용을 계산하여 시스템으로 통합하며, 시스템으로 통합된 상태지수, 신뢰도지수, 비용으로부터 다중목적 GA를 이용하여 최적화 문제의 해를 구한다.<sup>(2)</sup>



(a) 작업구간길이 및 우회도로교통량에 따른 시간지체



(b) 차로수 및 우회도로 교통량에 따른 시간지체



(c) 설계속도 및 우회도로 교통량에 따른 시간지체

Fig. 7 교통량에 따른 시간지체 모형(Type II)

개발된 회귀모델을 이용한 이용자비용모델은 비용 및 성능 기반 생애주기분석에서 유지관리조치에 따른 도로이용자비용 분석에 적용된다.



## 4.2 도로이용자비용 추정 모듈

앞서 언급된 개발과정에 의해 제안된 지체속도 모델을 이용하여 이용자비용을 추정하기 위하여 총 6개의 서브모듈로 구성된 원시프로그램을 개발하였다. 프로그램의 흐름도는 Fig. 8과 같고, 각 단위 서브모듈의 기능은 다음과 같다. 서브모듈 `adv_life`는 사용자가 지정해준 일일교통량 증가모델에 따라 연도별 교통량을 추정해주는 모듈이며, 이를 이용하여 `estimate_speed`, `detour_rate`, `unit_fuel_cost` 모듈을 통해 연도별로 유지관리 조건에 따른 지체속도, 우회율, 단위 유류비용을 계산할 수 있다. 서브모듈 `daily_road_user_cost`는 앞에서 계산된 각종 인자를 통합하여 단위 도로이용자비용을 계산해주는 모듈이며, 본 연구에서 개발된 식(1)과 식(2)의 정식화모델을 이용하여 개발되었다. 단위 도로이용자비용에 서브모듈 `discount_rate`와 `maintenance_cycle`에서 계산된 할인율과 유지보수 조치 시기의 발생확률을 곱하여 연도별 유지관리 조치에 따른 도로이용자비용을 추정할 수 있다.

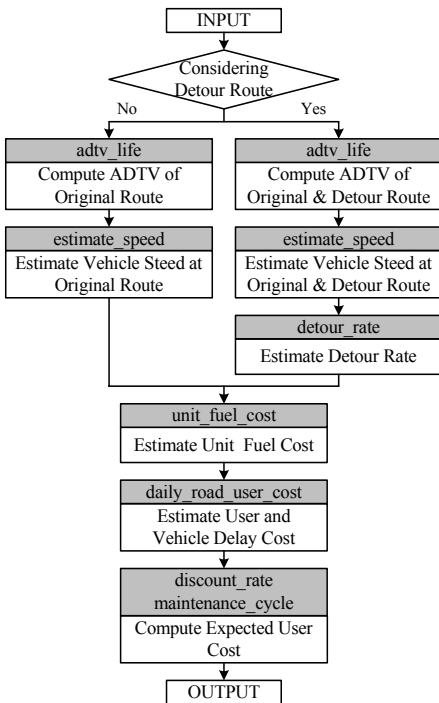


Fig. 8 도로이용자비용 추정 프로그램의 흐름도

## 4.3 도로이용자비용 추정 모듈 분석

우회도로의 유무에 따라, 개발된 도로이용자비용 추정 모듈에 대하여 각종 파라미터 변화에 따른 분석을 수행하였다. 이용자비용 추정을 위해 입력된 사항 중 교량정보 및 공사형식은 적절하게 가정된 것이며, 주도로 교통정보 및 우회도로 교통정보는 국가교통 DB에서 예측된 실제 국내 지역을 대상으로 분석된 결과이다. 일반적인 교통사업평가에서와 같이 교통량의 예측은 20년 동안 증가하여 이후 일정하게 유지되는 것으로 가정하였으며, 본 분석사례에서 우회도로의 길이는 10km를 적용하였다.<sup>(2)</sup>

교통량의 증가에 따라 작업구간의 속도는 감소하고, 지체시간은 증가하여 20년동안의 이용자비용은 지속적으로 증가하며, 우회도로가 없는 경우가 있는 경우에 비해 동일한 작업구간 조건하에서 보다 높은 비용이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 교통량이 도로 용량에 미치지 못하는 분석 초기에는 작업구간 길이에 따른 이용자비용의 차이가 크지 않으나 시간에 따라 교통량이 증가하면서 작업구간이 길어질수록 차이는 커지는 것으로 나타났다. Fig. 9는 우회도로 미고려시와 고려시에 대해 ADTV에 따른 주도로의 속도를 비교해본 결과로서 우회도로의 효과에 의해 우회도로 고려시가 미 고려시에 비해 최대 12.79km/hr 빠른 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 10을 살펴보면, Fig. 9의 주도로 속도차이에 의해 우회도로 미고려시의 도로이용자비용이 고려시에 비해 대체적으로 큰 것으로 분석되었다. 그러나 교통량이 상대적으로 적은 분석 초기에는 실제 주도로를 통행하는 차량이 우회하여 더 먼 거리를 돌아가는 경우에, 실제 주도로를 통과하는 것보다 시간적으로 불리하기 때문에 도로이용자비용이 높게 나오는 것으로 분석되었다.

한편 우회도로 길이에 따른 도로이용자비용의 변동 추이를 살펴보기 위하여 우회도로 길이를 변화시켜가면서 분석한 결과, 우회도로의 길이가 길어질수록 도로이용자비용은 급속한 증가를 나타내었다. 이를 통해 작업구간의 길이에 비해 우회도로의 길이가 비용에 민감한 것을 알 수 있었다.<sup>(2)</sup>

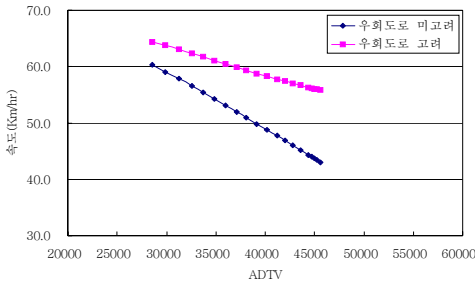


Fig. 9 ADTV에 따른 주도로 속도

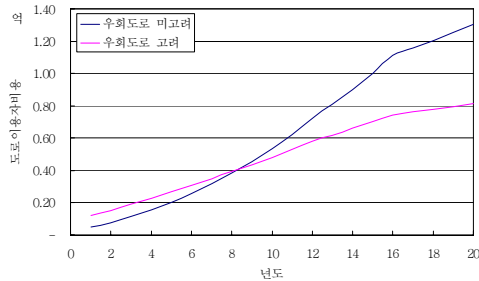


Fig. 10 우회도로 유무에 따른 도로이용자비용

## 5. 이용자비용을 고려한 최적 유지관리 시나리오

생애주기분석 프로그램<sup>(1)</sup>을 이용하여 유지관리 시나리오에 적용되는 유지관리조치 중 이용자비용을 유발하는 조치들의 비용발생을 고려하여 유지관리 시나리오를 생성하였다. 유지관리조치에 따라 발생하는 교통흐름의 변화를 고려하여 선정된 최적 유지관리 시나리오 오는 Fig. 11 및 Table 5와 같다.

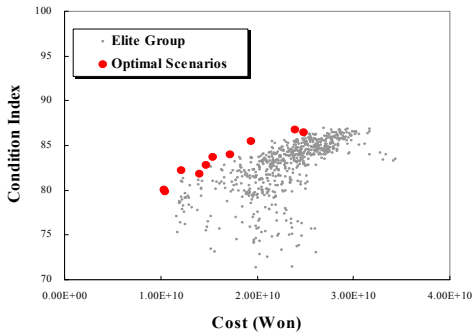


Fig. 11 최적 유지관리 시나리오

Table 5 최적 tradeoff 유지관리 시나리오 순위

순위	비용(천원)	상태지수	중요도	
			비용	상태
1	12,076,000	82.2	0.926	0.696
2	15,355,000	83.7	0.790	0.794
3	19,326,000	85.5	0.625	0.910
4	10,299,000	80.1	1.000	0.556
5	23,930,000	86.8	0.434	0.988
6	17,186,000	84.0	0.714	0.813
7	10,464,000	79.8	0.993	0.542
8	14,700,000	82.8	0.817	0.733
9	24,833,000	86.4	0.396	0.968
10	13,961,000	81.9	0.848	0.674

Table 6 이용자비용 고려 유무에 따른 유지관리 시나리오

No.	년도	이용자비용을 고려한 시나리오		이용자비용을 고려하지 않은 시나리오	
		바닥관**	포장*	바닥관	포장
1	2006	2	2	1	
2	2007	1	1		1
3	2008				3
4	2009		3	3	2
5	2010				
6	2011		4		1
7	2012			1	
8	2013	1			
9	2014				2
10	2015	2		2	
11	2016			4	4
12	2017		3		2
13	2018		2	1	
14	2019	1			
15	2020				
16	2021	3	2	2	2
17	2022		4		
18	2023	2			3
19	2024		2	1	
20	2025		3		
21	2026				2
22	2027				
23	2028		2		
24	2029			3	
25	2030			1	
26	2031	2	2		2
27	2032				1
28	2033	1	3		
29	2034		1		
30	2035				2
31	2036		2	2	3
32	2037	2			
33	2038		1	4	4
34	2039	4	4		
35	2040	1	2		2
36	2041				
37	2042				3
38	2043	3	1		2
39	2044				1
40	2045		2	3	
41	2046		3		
42	2047	1			
43	2048	2			
44	2049				3
45	2050				1
부재별 상태지수		78.6	78.1	85.4	77.8
부재별 LCC (백만원)		254.0 † (9.470) ‡	488.1 (2.606)	177.5 (26.730)	280.6 (1.674)
시스템 상태지수		82.2		85.6	
시스템 LCC		742.1(12,076)		458.1(28,404)	

\*포장의 유지관리 조치 1 : 표면처리공법, 2 : 절삭오버레이공법, 3 : 오버레이공법, 4 : 계포장  
 \*\*바닥관의 유지관리 조치 1 : 예폭시주입공법, 2 : 교면방수공법, 3 : FRP접착공법, 4 : 교제  
 † : 유지관리 직접비용, ‡ : 유지관리 직접비용 + 이용자비용

또한 동일한 개체수와 세대수를 적용하여 이용자비용을 고려하지 않은 시스템수준의 생애주기분석을 수행하였으며, 이용자비용의 고려 유무에 따른 1순위의 최적 tradeoff 유지관리 시나리오를 비교하여 Table 6에 나타내었다. 이용자비용을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우의 시스템수준에서 성능의 비교는 Fig. 12와 같이 큰 차이를 나타내지 않고 있다. 그러나 직접 유지관리비용의 경우에 이용자비용을 고려한 경우가 고려하지 않는 경우와 비교하여 상당히 크게 나타나는 것을 Fig. 13과 Table 6에서 알 수 있다. 이용자비용의 고려 여부에 따른 이러한 직접 유지관리비용의 큰 차이는 이용자비용을 고려한 시나리오의 경우 이용자비용의 발생이 최소화 되도록 이용자비용을 적게 유발하는 조치들이 빈번하게 수행되는 시나리오가 구성되나, 이용자비용을 고려하지 않은 시나리오의 경우 단지 직접 유지관리비용의 절감에 중점을 두고 시나리오가 생성되기 때문으로 판단된다.

이용자비용이 고려되지 않고 생성된 시나리오에 추가적으로 이용자비용을 고려한 가상의 이용자비용 적

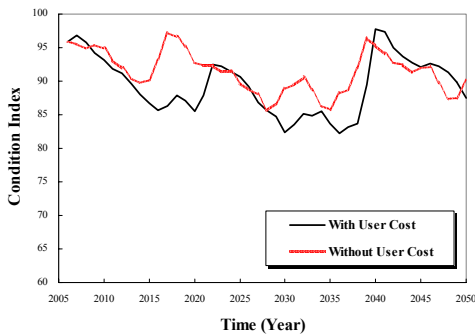


Fig. 12 상태지수의 비교

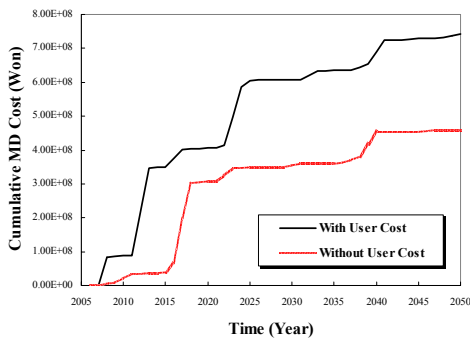
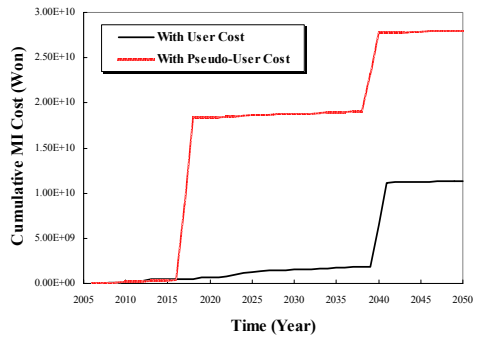
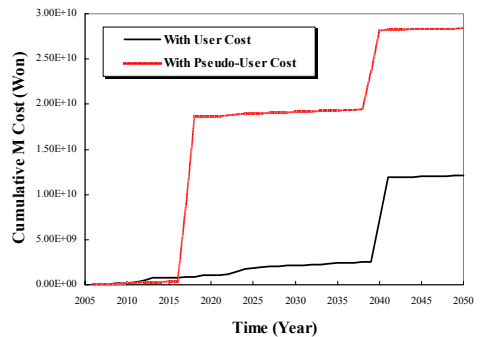


Fig. 13 직접 유지관리비용의 비교



(a) 간접 유지관리비용



(b) 총 유지관리비용

Fig. 14 이용자비용의 적용에 따른 비용 비교

용 시나리오를 이용자비용이 처음부터 고려되어 생성된 시나리오와 비교 분석하였다. Fig. 14와 같이 이용자비용을 고려하지 않고 선택된 시나리오에 추가적으로 가상의 이용자비용을 고려하여 생성된 시나리오가 이용자비용을 초기부터 고려하여 생성된 시나리오에 비해 매우 높은 비용 발생을 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 유지관리 시나리오 생성을 위한 생애주기 분석 시에는 초기부터 이용자비용의 발생을 고려하여 분석이 수행되어야 하며, 이를 통해 이용자비용의 발생이 최소화 되는 유지관리조치가 적용되어야 할 것이다. 따라서 교체를 포함한 유지관리조치의 적용이 적게 발생하는 장수명 내구성 재료 및 부재의 적용이 필요하며, 이를 통해 직접적인 유지관리비용뿐만 아니라 사회적인 간접비용의 절감을 도모할 수 있을 것이다.

## 6. 결론

본 연구에서는 교량의 생애주기비용 중 도로이용자

비용을 보다 합리적이고 실용적으로 추정할 수 있는 회귀모델 개발하고, 생애주기 비용 및 성능 기반 유지관리 전략 수립에 적용하여 도로이용자비용이 생애주기분석에 미치는 영향과 그 적용성에 대해서 고찰하였다. 이러한 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 간접비용의 주요 비용항목인 이용자지연비용과 차량운행비용의 추정을 위하여 교통네트워크 효과를 고려한 정식화를 수행하였다. 제안된 정식화 모델은 운전자뿐만 아니라 차량에 탑승한 이용자 모두를 고려하였으며, 사전 교통해석을 통해 파악된 주요변수를 고려하여 보다 합리적인 도로이용자비용의 추정이 가능할 것으로 판단된다.
- 2) 국도 네트워크의 분석과 시뮬레이션을 통해 우회도로의 영향을 검토한 결과, 우회도로의 길이가 상대적으로 긴 경우에 우회율이 현저하게 낮아지며 다수의 우회도로가 있더라도 대부분 가장 짧은 거리의 우회도로로 교통량이 배분되므로 한 개의 우회도로만을 고려하는 것이 실용적이며 합리적인 것으로 판단된다. 우회도로의 고려 유무에 따라 국도 특성을 반영하여 주요 입력변수를 적용하고 범주화하여, 교통분석의 곤란이나 지체시간의 가정으로 인한 이용자비용 추정의 한계를 극복하기 위하여, 교통해석 및 회귀분석을 통해 교통량 및 작업구간 길이에 따른 지체시간, 통과속도, 배분교통량의 회귀모델을 개발하였다.
- 3) 생애주기분석 시 매번 교통해석을 수행하지 않고서 개발된 회귀모델을 이용하여 도로이용자비용을 산정할 수 있도록 이용자비용 추정 모듈을 개발하였다. 개발된 모듈은 가상의 네트워크 유형분석을 통해 교통량의 증가, 우회도로의 유무에 따라 합리적인 결과를 나타내었으며, 이용자비용을 보다 실용적이고 합리적으로 추정할 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 개발된 모듈을 최적 유지관리 전략 수립에 적용하였다. 유지관리 전략 수립에 있어서 이용자비용의 효과가 처음부터 고려되어 수행된 생애주기분석과 이용자비용이 고려되지 않고 선정된 시나리오에 추가적으로 가상의 이용자비용을 고려한 분석을 비교한 결과, 최적 유지관리 시나리오는 이용자비용을 유발하는 조치의 비용효과를 타 유지관리비

용의 발생항목과 동시에 고려하여 선정하는 것이 합리적인 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부/한국건설교통기술평가원의 건설기술기반구축사업 “강교량의 최적설계와 경제적 유지관리를 위한 LCC분석기법 및 시스템 개발(기술혁신 10)”의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 박경훈, 이상운, 황윤국, 공정식, 임종권, “생애주기비용을 고려한 성능기반 교량 최적 유지관리 전략 수립 시스템 개발”, 한국구조물진단학회 논문집, 11권, 4호, 2007, pp. 109-120.
2. 한국건설기술연구원, “강교량의 최적설계 및 경제적 유지관리를 위한 Life Cycle Cost 분석기법 및 시스템 개발”, 건설교통부/한국건설기술교통평가원, 2006. 5.
3. Berthelot, C. F., Sparks, G. A., Blomme, T., Kajner, L. and Nickeson, M., “Mechanistic-probabilistic vehicle operating cost model”, J. of Transportation Engineering, ASCE, 122(5), 1996, pp. 337-341.
4. Chien, S. and Schonfeld, P., “Optimal work zone lengths for two-lane highways”, J. of Transportation Engineering, ASCE, 128(2), 2002, pp. 145-155.
5. Ehlen, M. A. and Marshall, H. E., “The economic of new technology materials: a case study of FRP bridge decking”, NIST, 1996.
6. EMME/2, “EMME/2 User’s Manual, Software Release 9.0”, Inro Consultants Inc., Montreal, Canada, 1999.
7. Hawk, H., “Bridge Life Cycle Cost Analysis - Final Report”, NCHRP Project 12-43, National Cooperative Highway Research Program, 2002.
8. Jiang, X. and Adeli, H., “Freeway work zone traffic delay and cost optimization model”, J. of Transportation Engineering, 129(3), 2003, pp. 230-241.
9. Kong, J. S. and Frangopol, D. M., “Cost-reliability interaction in life-cycle cost optimization of deteriorating structures”, J. of Structural Engineering, 130(11), 2004, pp. 1704-1712.

(접수일자 : 2006년 12월 8일)