



# 퍼지근사추론을 이용한 유료도로의 적정요금 산정

- 거가대교를 중심으로 -

## Optimal Toll Estimate of a Toll Road Using Fuzzy Approximate Reasoning

- Forced on the Geoga Bridge -

하 만 복\*      김 경 환\*\*      김 영\*\*\*  
 Ha, Man Box      Kim, Kyung Whan      Kim, Yeong

### Abstract

For a private toll road project, deciding optimal toll is an important element of economic analysis for the project and a challengeable work. In this study, the optimal toll of a private toll bridge, Geoga Bridge which connects Geoje Island of Gyeongnam Province and Gaduk Island of Busan was estimated using Stated Preference (SP) data. The SP data were collected by interviewing the passenger car drivers travelling on the National Road 14. They are latent users of the bridge. A fuzzy approximate reasoning model to estimate the optimal toll was built using the SP data. For the input variable of the model, the saved travel time and toll level were employed and the diversion rate to the bridge was employed for the output variable. The diversion rates for each toll level and saved travel time were estimated and the toll level which had maximized the toll revenue was decided as optimal toll. The optimal toll was tested by comparing with the average pay rate of passenger car drivers. Since the optimal toll for passenger cars at one hour saving, the 6,250 won is about 50 % of the average pay rate of passenger car drivers, the toll was evaluated not to be high. The technique employed in this study may be used for the estimation of the optimal tolls for other kinds of vehicles.

**Keywords :** fuzzy approximate reasoning, SP data, optimal toll, diversion rate

### 요 지

유료도로 건설계획시 적정 통행료의 산정은 사업의 경제성 분석에 매우 중요한 요소가 되며, 또한 어려운 일이다. 본 연구에서는 경남의 거제도과 부산의 가덕도를 연결하는 유료 거가대교를 대상으로 하여 SP(Stated Preference)자료를 이용하여 적정요금을 산정하고자 하였다. 이를 위해 거가대교의 잠재이용자인 국도 14호선을 이용하는 승용차 운전자들에 대해 거가대교가 개통된다는 가정하에서 다양한 절약시간 및 요금체계에 대해 설문조사를 하여 SP자료를 수집하였다. 이 SP자료를 이용하여 인간이 개략적인 추론을 통하여 결론에 도달하는 과정을 퍼지이론을 이용하여 모형화한 퍼지근사추론모형을 구축하였으며, 이 모형을 이용하여 적정요금을 산정하고 조사대상 승용차 이용자들의 시간가치에 의해 검증하였다. 퍼지추론 모형 구축을 위해서는 통행절약시간과 요금이 입력변수로 선정되었으며 이용률이 출력변수로 선정되었다. 절약시간은 3개의 퍼지집합으로, 요금과 이용률은 각각 5개의 퍼지집합으로 구분되었다. 각 퍼지집합들은 triangular 형태와 trapezoidal 형태의 멤버쉽함수를 사용하였으며 총 12개의 퍼지규칙이 정립되었다. 구축된 퍼지근사추론 모형을 이용하여 각 요금수준에서의 이용률을 추정하고 수입을 최대로 하는 요금수준을 적정요금으로 산정하였다. 순위프로빗 모형에 의한 결과치와의 평균에 의해 추정된 절약 통행시간별 적정요금은 1시간30분 절약시는 요금수준 8,350원, 1시간 절약시는 6,250원, 30분 절약시는 3,900원으로 산정되었다. 절약 통행시간 1시간에서의 적정요금 6,250은 승용차 운전자들의 시간가치의 50% 수준으로 과도한 요금은 아니므로 본 연구에서 적용한 기법이 타당성이 결여되지 않는 것으로 판단된다.

**핵심용어 :** 퍼지근사추론, SP자료, 최적요금, 이용률

\* 정회원 · 경상대학교 환경및지역발전연구소 연구원 · 공학박사  
 \*\* 정회원 · 경상대학교 건설공학부 교수, 환경및지역발전연구소 교문 · 공학박사  
 \*\*\* 경상대학교 도시공학과 교수 · 공학박사



# 1. 서론

## 1.1 연구의 배경 및 목적

최근 정부는 사회간접자본(SOC)부문에 민간투자를 적극 유치함으로써 정부의 재정부담을 완화하며, 민간투자의 확대를 통하여 얻게된 재정의 투자 여력을 낙후지역 등의 국토개발에 투자함으로써 균형적인 국토개발의 실현에 노력하고 있다. 또한 수익성이 있는 사업을 민간투자사업으로 추진하여 민간부문의 역할 확대 및 수익자 부담원칙을 강화하고자 한다. 이에 사회간접자본 투자사업의 수익성을 평가할 수 있는 합리적인 분석 방법이 요구된다. 특히 유료도로 사업에 있어서 적절한 요금을 산정하는 것은 사업의 수익성 분석에 중요한 요소가 된다.

현재 경상남도 거제도과 부산광역시의 가덕도를 연결하는 8.2km의 부산-거제간 연결도로(거가대교)가 민자유치 사업에 의해 건설중이며, 이러한 사업에 있어서 적정요금 산정은 사업의 수익성 분석에 매우 중요하다.

이에 본 연구에서는 신설 거가대교가 개통된다는 가정하에서 다양한 요금체계에 대한 운전자들의 이용 여부를 설문 조사한 SP자료를 이용하여 요금수준별 이용행태를 분석코자 하였다. 이를 위해 인간이 개략적인 추론을 통하여 결론에 도달하는 과정을 퍼지이론을 이용하여 모형화한 퍼지근사추론모형을 구축하여 거가대교의 적정요금을 산정하였으며, 본 연구에서 산정된 절약 통행시간별 요금수준과 조사대상 승용차 이용자의 시간가치(임금률법 적용)를 비교함으로써 본 연구결과가 유의한지를 검증하였다.

## 1.2 연구의 방법 및 범위

### 1.2.1 연구의 범위

신설 거가대교 통행자의 절대다수를 차지할 것으로 예측되는 국도 14호선 고성-통영-거제구간을 통행하는 승용차 이용자를 주 대상으로 거가대교 신설시 다

양한 요금체계에서의 이용 여부를 설문조사 하였다. 대상노선의 노선도 및 사업개요는 그림 1, 표 1과 같다.

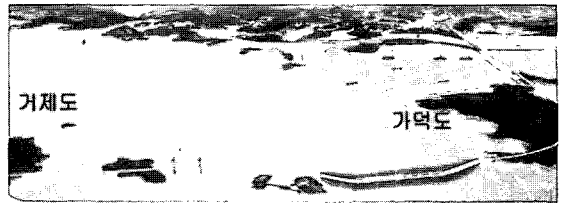


그림 1. 대상 노선도

표 1. 거가대교 사업 개요

구 간	거제 장목 ~ 부산 가덕도간 해상구간
규 모	L = 8.2km, 왕복 4차로 [침매터널 3.7, 사장교 2.2, PSC교 2.3]
사업비	14,469억원
완공시기	2010년 목표

### 1.2.2 연구의 방법

본 연구에서는 거가대교의 개통이라는 가정하에 통행 여부를 묻는 설문조사를 통해서 SP자료를 수집 하였다. 기존의 연구(GK주식회사, 1998)는 SP자료 자체에 기초한 이용률('아마도 이용' 이상은 이용하는 것으로 간주)을 이용하여 적정요금을 산정하고 있으나 SP조사 설문답변의 어의척도에 '모르겠다(무차별)'라는 항목이 없을 뿐만 아니라 '아마도 이용' 이상 응답자 전원이 이용하는 것으로 간주함으로써 그 연구 결과의 신뢰성이 크게 떨어진다.

조사된 이 SP자료를 이용하여 인간이 개략적인 추론을 통하여 결론에 도달하는 과정을 퍼지이론을 이용하여 모형화한 퍼지근사추론모형을 구축하였으며, 이 모형을 이용하여 적정요금을 산정하고 조사대상 승용차 이용자들의 시간가치와 비교함으로써 검증하였다.

본 연구에서는 통계패키지 SPSS 10.0과 모형추정프로그램 LIMDEP 7.0, MATLAB 6.0을 사용하여 자료의 분석과 모형을 추정하였다.



## 2. 문헌 연구

SP자료를 이용하여 적정요금을 산정하였다.

### 2.1 통행요금 이론

### 2.2 퍼지이론

통행요금 이론은 주로 경제학자들에 의해 꾸준히 이론적 발전을 거듭해 왔으며, 연구분야도 확장되어 왔다. 적정통행요금에 관한 국내외의 연구 사례를 소개하면 다음과 같다.

#### 2.2.1 퍼지의 개념

최근 인간과 비슷하게 생각하고, 일하는 컴퓨터를 만들고자 하는 인공지능 연구가 활발하게 진행되고 있다. 컴퓨터가 인공지능을 가지고 인간이 원하는 바를 제대로 수행하기 위해서는 인간이 사용하는 숫자는 물론이고 애매한 표현을 처리할 수 있어야 한다. 이러한 인간의 애매한 표현을 처리할 수 있는 이론적인 바탕을 제공하는 것이 바로 퍼지이론(fuzzy theory)이다.

국의 연구 사례로는 Viton(1980)은 단기균형의 관점에서 샌프란시스코-오클랜드의 교량을 대상으로 혼잡통행요금을 구하였다. 그의 연구는 개별행태모형을 통하여 혼잡통행요금을 부과했을 때 통행자의 반응을 파악하였으며, 통행자가 교통수단만 변경할 수 있는 것으로 가정하였을 때 적정통행요금을 부과하더라도 대중교통수단으로 전환하는 효과는 거의 없는 것으로 나타났다.

퍼지이론은 현상의 불확실한 상태를 그대로 표현해 주는 방법으로서 1965년 미국 버클리 대학의 Lofti A. Zadeh교수에 의해서 처음 소개되었다. 퍼지이론에서 다루고 있는 애매한 상황은 모호성(ambiguity)과 애매성(vagueness)으로 구분되지만 일반적으로 집합의 경계, 즉 범위 자체가 불확실한 상황을 말한다. 퍼지이론에서는 불확실한 상황을 표현할 때 숫자보다는 자연어의 구문식 표현을 사용하는 경우가 많다. 물론 이때 애매한 표현은 미리 정의되어 있어야 한다. 이러한 이유에서 퍼지이론을 적용할 때 다음과 같은 혜택을 얻을 수 있다.

Florian(1998)은 multi-class deterministic 및 logit-based stochastic 모형을 이용하여 운전자의 유료도로 노선선택 행태를 분석하고 최적 통행료를 산정하였으며 Hai Yang et al.(2003)은 traffic equilibrium 모형을 이용하여 노선선택 행태 분석 및 유료도로 최적 통행료를 산정하였다.

- 인간의 지식을 있는 그대로 처리할 수 있다.
- 인간의 애매한 특성을 반영하는 것이 가능하다.
- 복잡한 과정을 단순하게 기술할 수 있어 시간과 비용을 절약할 수 있다.
- 상황에 따라 융통성(robustness)을 발휘할 수 있다.

국내 연구 사례로는 임영태(1993)는 대체도로를 고려한 평형통행배정모형을 이용해서 차량이용자의 총 통행비용을 최소화하는 방법을 사용하여 경인고속도로의 통행요금을 구하였으며 한재일(1995)은 모든 차종을 대상으로 통행자의 비용에 시간비용과 차량운행비용을 모두 포함시켜 고속도로 통행요금을 장기적인 관점에서 구하였다.

퍼지이론의 주요한 응용분야에는 퍼지 집합, 퍼지 논리, 퍼지 척도론 등으로 근사추론과정을 통한 전문가 시스템(expert system)에의 적용이 있고 퍼지 데이터베이스에의 적용, 퍼지 의사결정, 선형계획법 등에 응용되고 있다. 이외의 많은 부분에서 퍼지이론이 사용되고 있다.

김일환(2001)은 교통망 평형통행배정모형의 알고리즘에 의해 교통량과 총 통행비용을 구하고 시나리오별 민감도 분석을 수행하여 총통행비용을 최소화시키는 통행요금을 적정통행요금으로 정의하였다.

위의 연구들에서와 같이 행태모형에 기초한 유료도로의 적정요금산정 기법은 본 연구의 연구대상과 같이 기존 통행체계에 큰 변화가 예상되는 경우에는 그 적용에 어려움이 있다. 이에 따라 본 연구에서는



### 2.2.2 퍼지근사추론

일반적으로 인간이 어떤 결정을 할 경우 수치나 정확한 계산에 의해서가 아니라 개략적인 추론을 통해 결론에 도달한다. 이와 같은 과정을 퍼지이론을 이용하여 모형화한 것이 퍼지근사추론(fuzzy approximate reasoning)이다.

일반적인 모형에서는 반드시 추론과정에서 특정사실과 규칙을 구성하는 조건부가 일치해야 하지만 실제 상황에서는 사실과 규칙의 조건부가 반드시 일치하지는 않는다. 예를 들어 보통 실제 상황에서는 정확히 A→B가 되는 경우는 드물고, A에 가까운 값이 B에 가까운 값이 되는 경우가 많다. 이러한 과정을 추론하는 것을 근사추론이라고 한다.

퍼지근사추론은 퍼지화 변수의 입력(fuzzify inputs), 퍼지운영의 적용(apply fuzzy operation), 함축기법 적용(apply implication method), 집합기법 적용(apply aggregation method), 비퍼지화(defuzzify)의 순서로 진행된다.

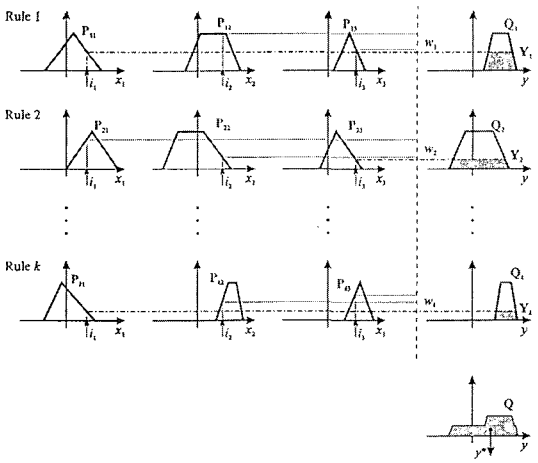


그림 2. 퍼지근사추론과정

퍼지규칙은 조건부(if)와 결론부(then)의 형식을 가지며 조건부의 조건을 만족하는 입력 값이 들어올 때 결론부의 명제를 실현시킨다. 대체로 조건부와 결론부는 각각 입력공간과 출력공간의 일정한 영역을 나타낸다. 따라서 퍼지규칙은 입력공간의 특정영역을 출력공간의 특정영역으로 변화시키는 기능을 가

지며, 이로 인해서 퍼지추론의 비선형 변환을 가능하게 한다. 이러한 규칙을 얻는데는 전문가의 지식으로부터 추출하는 방법과 측정된 데이터를 이용하는 방법이 있다. 전자의 경우에는 전문가의 경험이나 주관적 판단에 의존하므로 규칙이 정해짐과 동시에 각 퍼지집합의 멤버쉽 함수의 형태와 그 파라메타(parameter)도 정해진다. 후자의 경우는 수집된 자료를 이용해서 멤버쉽 함수의 파라메타와 퍼지규칙(fuzzy Rule)이 형성된다.

추론부는 퍼지화된 입력자료와 퍼지규칙을 이용해서 출력공간의 퍼지집합으로 변환하는 과정이다. 이는 퍼지개념에 기초를 둔 인간의 의사결정을 모형화할 수 있다.

비퍼지화는 퍼지화의 역기능을 갖는 장치이다. 즉 퍼지집합으로 표시되는 퍼지 값으로부터 보통의 수치 값(crisp number data)을 얻는 변환 장치이다. 따라서 퍼지논리에 의한 추론결과는 언어적인 표현이므로 이는 비퍼지화 과정을 반드시 거쳐야 한다. 비퍼지화에 사용되는 방법으로는 합중심법, 최대면적중심법, 최대치 평균법, 무게중심법 등이 있다.

■ 최대치 평균법(middle of maxima method)  
소속함수 값이 최대인 변수 값들의 중간치 또는 평균치를 취하는 방법이다. 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$u_0 \in \{u : \mu(u) = \text{Max}_u \mu(u)\} \quad \text{식 1}$$

여기서,  $u_0$  : 명확한 제어입력

■ 최대 평균법(mean of gravity method)  
출력부 퍼지집합에서 소속함수가 최대 값을 가지는 곳의 값들의 평균을 내는 방법으로 다음 식과 같다.

$$u_0 = \sum_{j=1}^k \frac{u_j}{k} \quad \text{식 2}$$

여기서,  $u_0$  : 명확한 제어입력

$u_j$  : 소속 값이 최대가 되는 제어 값

$k$  : 최대 값이 되는 제어 값의 개수



■ 무게 중심법(center of gravity method)

가장 많이 쓰는 비퍼지화법이다. 합성된 출력 퍼지 집합의 무게 중심을 구하여 그에 해당하는 제어 값을 제어 입력 값으로 사용하는 방법이다. 단, 계산이 복잡하고 따라서 추론결과를 얻는데 시간이 걸리는 단점이 있다.

$$u_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(u_j) \cdot u_j}{\sum_{j=1}^k \mu(u_j)}$$

식 3

- 여기서, n : 관련규칙의 수
- k : 최대 값이 되는 제어 값의 개수
- u<sub>j</sub> : 소속도가 최대가 되는 제어 값

### 3. 자료의 수집 및 분석

#### 3.1 자료의 수집

본 연구에서는 유료 거가대교 개통이라는 가상의 사실을 가정하고 그 수요를 추정하므로 신설 거가대교 이용 가능성이 있는 차량에 대하여 각종 절약시간과 요금에 대한 SP조사를 실시하였다. 통행자가 가장 많은 부산에서 거제까지의 통행은 거가대교의 건설로 통행시간이 1시간 절약될 것으로 예상되므로, 설문지의 절약시간 수준은 1시간 30분, 1시간, 30분의 3가지로 구분하였다. 설문의 통행요금 수준은 이전의 연구결과(평균 9,000원)에 기초하여 9,000원을 중심으로 4,000원에서 16,000원까지 5개의 계급으로 구분하였다.

SP조사 설문은 다음과 같은 시나리오로 구성하였다.

- ① 거가대교가 개통되었다고 가정한다.
- ② 두 개의 통행노선을 가정한다. 하나는 운전자가 현재 이용하고 있는 노선이며, 다른 하나의 노선은 거가대교로서 차량별로 차별화된 통행요금을 내고 이용하는 노선이다. 이 경우 전자의 노선에 비해 시

간 절약이 기대되는 노선이다.

SP조사의 경우 설문답변에 어의척도(semantic differential)를 사용하여 5단계, 즉, '반드시 이용', '아마 이용', '무차별', '아마 이용하지 않음', '반드시 이용하지 않음'으로 구분하여 운전자가 선호도를 나타내게 하였다.

설문대상은 신설 거가대교의 잠재이용자인 경남 고성군, 통영시, 거제시 일대를 관통하는 일반국도 14호선을 통행하는 운전자를 대상으로 하였으며, '신대교 휴게소', '바다 휴게소', '학섬 휴게소' 등 주변 휴게소를 이용하는 운전자를 대상으로 면접조사를 실시하였다.

설문대상자 280명에 대한 설문조사가 이루어져 최종적으로 276부가 회수되었으며 이들 모두가 유효한 응답이었다. 차종별로 보면 승용차 65%, 소형트럭 16%, 버스와 대형트럭이 각각 10%를 차지하였다. 설문지 배포 및 수거 결과는 표 2와 같으며, 승용차를 제외한 타 교통수단의 경우 표본수가 적어 신뢰성있는 분석이 어려웠으므로 본 연구는 승용차 이용자를 대상으로 연구하였다.

표 2. 설문지 배포 및 회수 결과

구분	내용
조사 방법	노측면접조사
배포수	280부
회수수(회수율)	276부(98.6%)
유효회답수(유효율)	276부(100%)
차종별 배포율	· 승용차: 179부(65%) · 소형트럭: 43부(16%) · 버스: 27부(10%) · 대형트럭: 27부(10%)

#### 3.2 자료의 분석

##### 3.2.1 통행특성 분석

■ 통행특성 분석

설문대상자 179명 중 남자가 163명(91.1%)이었



고, 연령대는 31-40대가 76명(42.5%)으로 가장 많았으며, 다음으로 41-50대가 69명(38.5%)을 차지하였다. 통행에서의 비용부담은 자기부담 139명(77.7%), 회사부담 40명(22.3%)으로 나타났다.

■ 승용차 이용자의 개인별 통행특성

일반국도 14호선의 이용빈도는 월 1~2회를 이용한다는 응답자가 79명(44.1%)으로 가장 많았으며, 다음으로 주 1~2회 57명(31.8%), 주 3~4회 29명(16.2%)의 순서였다.

현 통행에서의 통행시간은 2시간-2시간 30분이라고 한 응답자가 67명(37.4%)으로 가장 많았으며, 그 다음으로 2시간 30분~3시간이라고 한 응답자가 59명(33.0%)이었다.

O/D조사결과 출발지는 부산 53명(29.6%), 마산 44명(24.6%), 고성 18명(10.1%)순서였으며, 도착지는 거제 85명(47.5%), 통영 45명(25.1%), 부산 14명(7.8%)순이었다.

3.2.2 요금수준에 따른 이용 여부 분석

승용차 이용자의 절약시간 및 요금수준별 거가대교 이용에 대한 SP조사 결과는 표 3, 4와 같다. 통행시간 1시간 30분 절약의 경우 4,000원의 통행료 지불시 거가대교 이용 여부를 묻는 질문에 승용차 응답자 179명 중 100%에 해당하는 179명 전원이 '반드시 이용한다' 라고 응답하였고, 6,000원 통행료 지불

표 4. 승용차 이용자의 개인통행 특성

구 성		구 성 비	
문 항			
개인 통행 특성	이용 빈도	· 주 1-2회: 57(31.8) · 주 3-4회: 29(16.2) · 주 5회 이상: 8(4.5) · 월 1-2회: 79(44.1) · 월 3-4회: 8(4.5) · 월 5회 이상: 3(1.7)	
	현 통행 시간	· 30분-1시간: 2(1.1) · 1시간-1시간 30분: 13(7.3) · 1시간 30분-2시간: 22(12.3) · 2시간-2시간 30분: 67(37.4) · 2시간 30분-3시간: 59(33.0) · 3시간-3시간 30분: 10(5.6) · 3시간 30분-4시간: 5(2.8) · 4시간 이상: 1(0.6)	
	출발지	· 창원: 10(5.6) · 거제: 17(9.5) · 고성: 18(10.1) · 부산: 53(29.6) · 마산: 44(24.6) · 진주: 6(3.4) · 울산: 3(1.7) · 기타: 28(15.6)	
	도착지	· 거제: 85(47.5) · 통영: 45(25.1) · 부산: 14(7.8) · 대구: 7(3.9) · 마산: 10(5.6) · 고성: 8(4.5) · 대구: 7(3.9) · 기타: 3(1.7)	

시 179명 중 174(97%)명이 '반드시 이용한다'고 응답한 반면, 16,000원 통행료 지불 시에는 179명 전원이 '반드시 이용하지 않는다' 라고 응답하였다.

통행시간 1시간 절약 시 4,000원의 통행료 지불 시는 1시간 30분 절약 시와 비슷하게 99%에 해당하는 178명이 '반드시 이용한다' 라고 응답하였다. 6,000원 통행료 지불 시에는 1시간 30분보다 적은 89%에 해당하는 159명이 '반드시 이용한다' 라고 응답하였고, 16,000원 통행료 지불 시는 1시간 30분과 같이 179명 전원이 '반드시 이용하지 않는다'고 응답하였다.

통행시간 30분 절약 시는 1시간 30분 및 1시간 절약 시와 비교해서 전반적으로 이용하겠다는 응답이 적었다. 4,000원 통행료 지불 시는 179명 중 48%에 해당하는 86명이 '반드시 이용한다'고 응답하였

표 3. 승용차 이용자의 사회·경제적 특성

(단위: 인. %)

구 성		구 성 비	
문 항			
사회· 경제적 특성	성별	· 남: 163(91.12) · 여: 16(8.9)	
	연령	· 20-30세: 24(13.4) · 31-40세: 76(42.5) · 41-50세: 69(38.5) · 51-60세: 10(5.6)	
	비용 부담	· 본인: 139(77.7) · 회사: 40(22.3)	
	소득 수준	· 50만원이하: 2(1.1) · 50-100만원: 12(6.7) · 101-150원: 39(21.8) · 151-200: 69(38.5) · 201-250원: 41(22.9) · 251-300만원: 13(7.3) · 301-350만원: 2(1.1) · 351만원이상: 1(0.6)	



표 5. 절약시간 및 요금수준별 승용차 이용 여부

절약시간	요금	어 의 척 도(%)				
		4	3	2	1	0
1시간30분	4000원	100	0	0	0	0
	6000원	97	1	2	0	0
	9000원	40	25	22	1	13
	12000원	4	4	17	0	75
	16000원	0	0	0	0	100
1시간	4000원	99	0	0	0	1
	6000원	89	0	6	0	5
	9000원	11	9	24	0	56
	12000원	1	2	1	16	80
	16000원	0	0	0	0	100
30분	4000원	48	1	19	18	14
	6000원	7	2	16	31	44
	9000원	1	0	11	14	74
	12000원	0	0	2	13	85
	16000원	0	0	0	0	100

주) \* 4: 반드시 이용함, 3: 아마도 이용함, 2: 무차별,  
1: 아마도 이용 안 함, 0: 반드시 이용 안 함.

고, 6,000원 통행료 지불 시는 179명중 7%에 해당하는 12명만이 '반드시 이용한다' 라고 응답하였다.

## 4. 모형 추정 및 적정요금 산정

### 4.1 퍼지근사추론 모형 구축

#### 4.1.1 입·출력변수에 관한 멤버십 함수 결정

퍼지근사추론 모형 구축을 위한 입력변수로는 절약시간과 요금을 선정하고 출력변수로는 이용률을 선정하였으며 이들 변수들의 언어적인 표현 즉, 퍼지 변수로의 표현은 표 6과 같다.

앞에서 결정된 각 요인에 대해 설문조사를 실시하여 서비스 수준에 관여하는 각 변수들의 수준 정도를 설정하였다. 설문조사는 전문가 50명을 대상으로 실

표 6. 퍼지 입·출력변수의 분류

입·출력 변수		퍼지 변수	
입력 변수	절약시간	절약시간이 적다. 절약시간이 보통이다. 절약시간이 많다.	low medium high
	요금	요금이 매우 높다. 요금이 높다. 요금이 보통이다. 요금이 적다. 요금이 매우 적다.	very High high medium low very Low
출력 변수	이용률	이용률이 매우 높다. 이용률이 높다. 이용률이 보통이다. 이용률이 낮다. 이용률이 매우 낮다.	very High high medium low very Low

표 7. 입·출력 퍼지변수의 수준 정도

입력 변수		출력 변수	
절약시간(분)		이용률(%)	
적다(small)	20 ~ 49 (30분)*	이용률이 매우 낮다.(VL)	0~29
보통이다 (midium)	41 ~ 79 (1시간)		
많다(large)	71 ~ 100 (1시간30분)	이용률이 낮다.(L)	14~46
요금(원) (0~ 20)		이용률이 보통이다.(M)	34~66
매우 낮다(VL)	0 ~ 6000 (4000원)		
낮다(L)	4 ~ 8500 (6000원)	이용률이 높다.(H)	54~86
보통이다(M)	6500~11500 (9000원)		
높다(H)	9500~15000 (12000원)	이용률이 매우 낮다.(VL)	76~100
매우 높다(VH)	13000~20000 (16000원)		

주) \* 귀속도 1의 값

시하였다. 설문조사 결과에 기초한 입·출력 퍼지변수 멤버십 함수의 수준 정도는 표 7과 같다.

퍼지변수는 크게 연속형과 이산형으로 나누어 나



타낼 수 있는데 그 중 연속형은 중형 또는 triangular와 trapezoidal 형태의 멤버십 함수 형태가 있다. triangular와 trapezoidal 형태의 멤버십 함수는 다음 식과 같이 정의된다.

$$f(x : a, b, c) = \left. \begin{cases} 0, x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, b \leq x \leq c \\ 0, d \leq x \end{cases} \right\} \text{ 식 4}$$

$$f(x : a, b, c, d) = \left. \begin{cases} 0, x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, a \leq x \leq b \\ 1, b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, c \leq x \leq d \\ 0, d \leq x \end{cases} \right\} \text{ 식 5}$$

본 연구에서는 계산이 좀 더 쉬운 Triangular 형태와 Trapezoidal 형태의 멤버십 함수를 사용하였다. 설정한 멤버십 함수 형태는 그림 3~그림 5와 같으며 세로축은 퍼지 귀속도(degree of relationship)

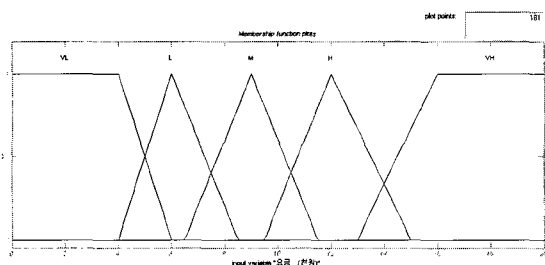


그림 3. 요금의 멤버십 함수 형태

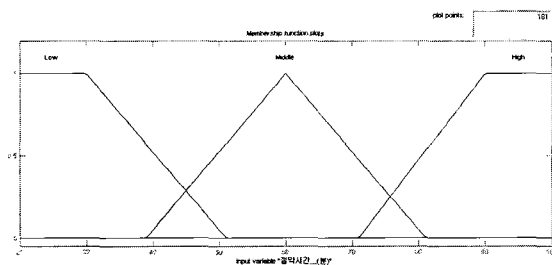


그림 4. 절약시간의 멤버십 함수 형태

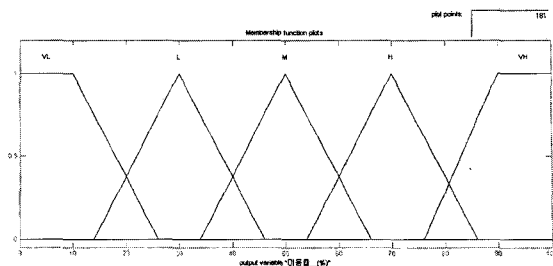


그림 5. 이용률의 멤버십 함수 형태

로서 0과 1사이의 값을 가지고 가로축은 기저변수라고 하고 정량화 된 값을 가진다.

#### 4.2 퍼지제어규칙(fuzzy rule)의 구축

입·출력변수가 선정되면 제어규칙을 결정하게 되는데 다음의 4가지 방식으로 결정하게 된다.

- ① 전문가의 경험 및 제어 지식을 도입하는 방법
- ② 인간 조작자의 기능을 추출하는 방법
- ③ 제어되는 프로세스의 퍼지모형을 이용하는 방법
- ④ 제어기에 학습능력을 추가하는 방법

본 연구에서 퍼지 제어규칙 결정의 방법은 전문가의 경험 및 제어지식을 도입하는 방법을 채택하였다. 이 방법은 조건부와 결론부가 애매한 퍼지표현을 도입한 if - then 형식으로 이루어져 있고 전문가의 지식과 경험을 자연스러운 언어로 기술할 수 있게 하는 방법으로 복잡한 시스템의 조작지식을 일반 제어로 구현할 수 없을 때 매우 효과적인 방법이다. 따라서 전문가의 제어에 대한 전문지식과 경험을 정성적인 언어로 표현하고, 퍼지 제어규칙의 형태로 논리화함으로써 제어규칙을 설정하는 방법을 택했다.

##### 4.2.1 절약시간이 '적다(Small)' 인 경우

첫 번째로 '절약시간이 적다'를 기준으로 요금 및 이용률의 상관관계를 분석하였다. 절약시간 및 요금의 각 수준에 따른 운전자들의 평균이용률은 5단계 이의척도에 일반적으로 적용되는 이용률(Ortugar





et al. 1994)을 적용하여 추정하였다. '절약시간이 적다'라는 것은 앞에서 언급한 표 7에서와 같이 절약시간이 30분 이하인 경우를 말한다. 이러한 상관관계를 표로 나타내면 표 8과 같다.

표 8. '절약시간이 적다' 일 경우 이용률

요금	이용률
very low (VL)	medium (M)
low (L)	low (L)
medium (M)	very low (VL)
high (H)	very low (VL)
very high (VH)	very low (VL)

절약시간이 적을 경우 요금수준 보통(9,000원)이상에서는 이용률이 매우 낮은 것으로 분석되었다.

'절약시간이 적다' 일 경우 요금과 이용률의 상관관계를 그림으로 나타내면 그림 6과 같다.

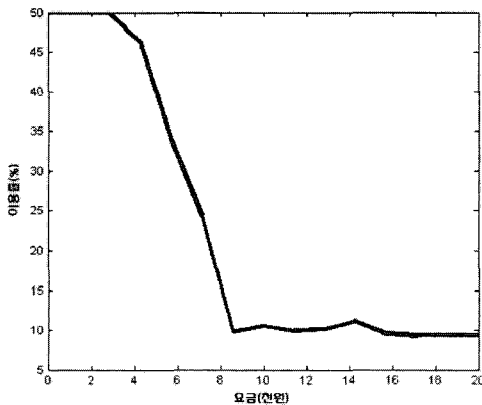


그림 6. 이용률과 요금과의 관계 ('절약시간이 적다' 일 경우)

#### 4.2.2 절약시간이 '보통이다(medium)' 일 때

두 번째로 '절약시간이 보통이다'를 기준으로 요금과 이용률의 상관관계를 분석하였다. '절약시간이 보통이다'라는 것은 앞에서 언급한 표 7에서와 같이 절약시간이 1시간(60분)인 경우를 말한다. 이러한 상관관계를 표로 나타내면 표 9와 같다.

표 9. '절약시간이 보통이다' 일 경우 이용률

요금	이용률
very low (VL)	very high (VH)
low (L)	very high (VH)
medium (M)	low (L)
high (H)	very low (VL)
very high (VH)	very low (VL)

'절약시간이 보통이다'에서는 요금이 '매우낮다'와 '낮다' 모두에서 높은 이용률을 나타내었고, 요금이 '보통이다'에서는 낮은 이용률, '높다'와 '매우높다'에서는 매우 낮은 이용률을 나타내었다. '절약시간이 보통이다'에서는 이용률이 요금에 민감한 것을 볼 수 있었다.

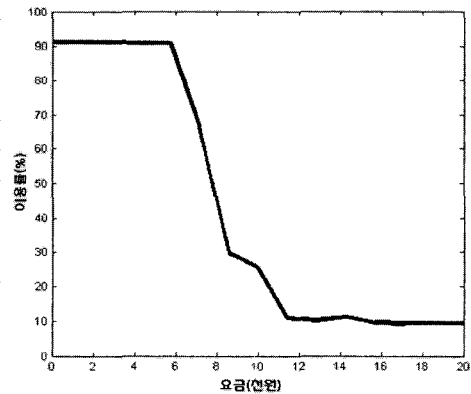


그림 7. 이용률과 요금과의 관계 ('절약시간이 보통이다' 일 경우)

'절약시간이 보통이다' 일 경우 요금과 이용률의 상관관계를 그림으로 나타내면 그림 7과 같다.

#### 4.2.3 절약시간이 '많다(large)' 일 때

세 번째로 '절약시간이 많다'를 기준으로 요금과 이용률의 상관관계를 분석하였다. '절약시간이 많다'라는 것은 앞에서 언급한 표 7에서와 같이 절약시간이 1시간 30분(90분)이상인 경우를 말한다. 이러한 상관관계를 표로 나타내면 표 10과 같다.

'절약시간이 많다'에서는 요금이 '매우 낮다', '낮



표 10. '절약시간이 많다' 일 경우 이용률

요금	이용률
very low (VL)	very high (VH)
low (L)	very high (VH)
medium (M)	high (H)
high (H)	low (L)
very high (VH)	very low (VL)

다'에서 매우 높은 이용률을 나타내었고 '보통이다'에서는 높은 이용률을 나타내었으며, 요금이 '높다'에서 낮은 이용률, '매우 높다'에서 매우 낮은 이용률을 나타내었다. '절약시간이 많다'에서는 요금이 이용률에 크게 영향을 미치는 것을 볼 수 있었다.

'절약시간 많다' 일 경우 요금과 이용률과의 상관

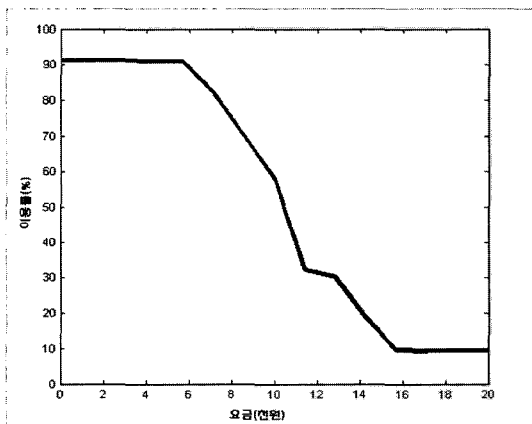


그림 8. 이용률과 요금과의 관계  
( '절약시간이 많다' 일 경우)

관계를 그림으로 나타내면 그림 8과 같다.

이상에서의 결과를 요약하면 절약시간이 많을수록 요금이 이용률에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

### 4.3 퍼지제어 규칙의 정립

퍼지제어 규칙은 입력변수의 퍼지변수와 출력변수의 퍼지변수와의 관계정립을 통해 이루어진다. 조건부인 if에는 절약시간과 요금의 2개의 변수가 입

력변수이고, 결론부인 then에는 이용률이 출력변수이다. 설정한 퍼지제어규칙(fuzzy rule)은 다음과 같다.

#### ■ 퍼지제어규칙

- ① IF 절약시간 is Low and 요금 is Very Low then 이용률 is M
- ② IF 절약시간 is Low and 요금 is Low then 이용률 is L
- ③ IF 절약시간 is Low and 요금 is Medium then 이용률 is VL
- ④ IF 절약시간 is Low and 요금 is High then 이용률 is VL
- ⑤ IF 절약시간 is Low and 요금 is Very High then 이용률 is VL
- ⑥ IF 절약시간 is Medium and 요금 is Very Low then 이용률 is VH
- ⑦ IF 절약시간 is Medium and 요금 is Low then 이용률 is VH
- ⑧ IF 절약시간 is Medium and 요금 is Medium then 이용률 is L
- ⑨ IF 절약시간 is Medium and 요금 is High then 이용률 is VL
- ⑩ IF 절약시간 is Medium and 요금 is Very High then 이용률 is VL
- ⑪ IF 절약시간 is High and 요금 is Very Low then 이용률 is VH
- ⑫ IF 절약시간 is High and 요금 is Low then 이용률 is VH
- ⑬ IF 절약시간 is High and 요금 is Medium then 이용률 is H
- ⑭ IF 절약시간 is High and 요금 is High then 이용률 is L
- ⑮ IF 절약시간 is High and 요금 is Very High then 이용률 is VL

위의 규칙을 간단히 표로 나타내면 표 11과 같다.



표 11. 퍼지제어 규칙(fuzzy rule)

Rule	입력 변수		출력 변수
	절약시간	요금	이용률
1	Low	Very Low	Medium
2		Low	Low
3		Medium	Very Low
4		High	Very Low
5		Very High	Very Low
6	Medium	Very Low	Very High
7		Low	Very High
8		Medium	Low
9		High	Very Low
10		Very High	Very Low
11	High	Very Low	Very High
12		Low	Very High
13		Medium	High
14		High	Low
15		Very High	Very Low

#### 4.4 퍼지근사추론 모형에 의한 적정요금 산정

퍼지근사추론 모형을 이용하여 절약시간대 30분, 1시간 및 1시간 30분에서의 요금수준에 따른 이용률을 추정하여 최대수입을 가져오는 요금수준을 적정 요금으로 산정하였으며, 퍼지근사추론을 이용하여 비교·검증하였다.

그림 9 ~ 14는 퍼지근사추론 모형에 의한 승용차의 절약 시간대별 이용률곡선과 최대수입곡선을 나타내고 있다. 이용률곡선은 퍼지근사추론 모형에 의해 추정된 이용률을 나타내며 최대수입곡선은 수입이 최대가 되는 요금수준에서의 수입에 대한 상대적 수입을 비율로 나타낸 것이다.

그림 9~14에서 절약 통행시간별 최대수입과 이용확률을 살펴보면 1시간 30분 절약시는 요금수준 8,700원, 1시간 절약시 6,200원, 30분 절약시는 4,000원에서 최대수입을 얻을 수 있으며, 이들 적정

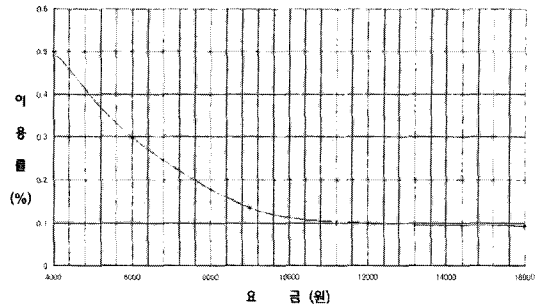


그림 9. 퍼지근사추론 모형에 의한 승용차의 이용률 (절약 통행시간:30분)

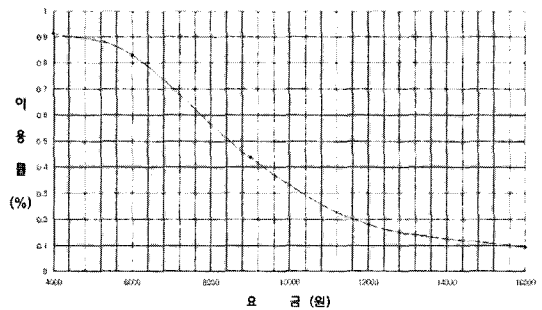


그림 10. 퍼지근사추론 모형에 의한 승용차의 이용률 (절약 통행시간:1시간)

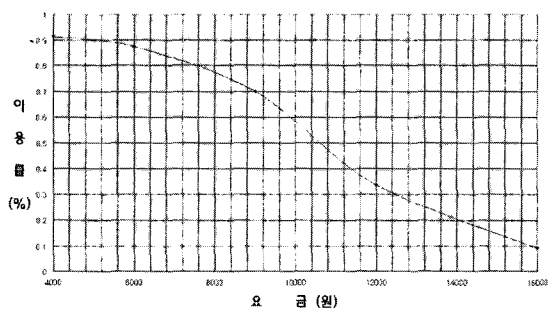


그림 11. 퍼지근사추론 모형에 의한 승용차의 이용률 (절약 통행시간:1시간30분)

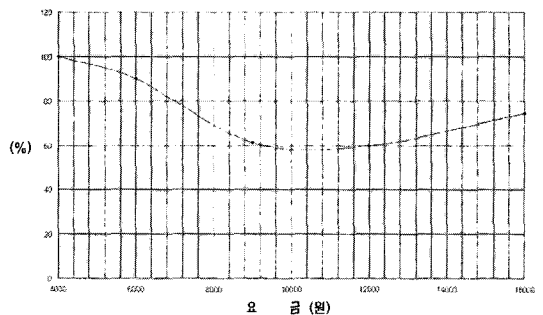


그림 12. 퍼지근사추론 모형에 의한 승용차의 최대수입곡선 (절약 통행시간:30분)

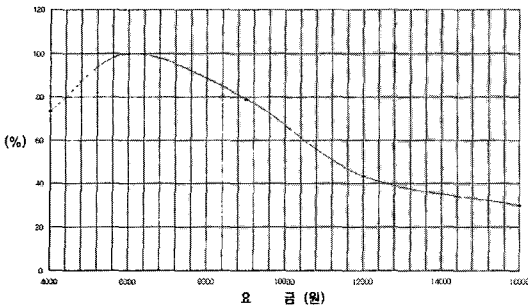


그림 13. 퍼지근사추론 모형에 의한 승용차의 최대수입곡선 (절약 통행시간: 1시간)

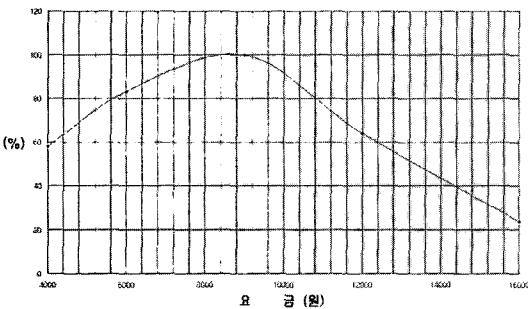


그림 14. 퍼지근사추론 모형에 의한 승용차의 최대수입곡선 (절약 통행시간: 1시간30분)

요금에서의 이용률은 각각 75%, 81%, 50%로 나타났다.

본 유료도로에 대해 순위프로빗 모형(김경환 외, 2004)으로 추정한 승용차의 적정요금과 본 연구의 근사추론모형에 의해 추정된 적정요금을 비교하면 표 12와 같다. 두 기법간의 이용률에는 큰 차이가 있었으나 적정요금에서는 절약시간 1시간 30분에서 다소 차이가 있을 뿐 여타 절약시간에서는 매우 근사

표 12. 모형간 적정요금의 비교

절약시간 차 종	1시간 30분	1시간	30분
순위프로빗 모형	8,000원 (92%)*	6,300원 (94%)	3,800원 (33%)
퍼지근사추론	8,700원(75%)	6,200원 (81%)	4,000원 (50%)
평 균	8,350원	6,250원	3,900원

주) \* 이용률

한 값을 보이고 있다. 거가대교의 적정요금으로는 두 기법에 의한 적정요금의 평균치가 제안된다.

#### 4.5 시간가치에 의한 적정성 여부

본 연구에서 산정된 절약 통행시간별 요금수준과 조사대상 승용차 이용자의 시간가치(임금률법 적용)를 비교하여 본 연구결과가 유의한지를 검토할 필요가 있다.

시간가치 산정의 일반적인 접근방식으로는 한계임금율과 한계대체율 방법이 있는데, 본 연구에서는 교통투자사업에서 일반적으로 적용하는 한계임금율을 적용하였다. 한계임금율 방법에서 시간가치는 통행인의 임금수준과 상관관계를 갖는 것으로 보고 월평균소득을 산출하여 월평균근로시간으로 나누어 시간당 임금을 계산한다.

승용차 이용자의 소득분포별 중간값(Mid-point)을 이용하여 승용차 이용자의 소득합계(40,550만원)와 평균소득(소득합계/응답자수=40,550만원/179명=226.5만원)을 구하였다. 월평균근로시간의 경우 "근로기준법(법률 제6507호) 제49조(근로시간) 1항 1주간의 근로시간은 휴게시간을 제하고 44시간을 초과할 수 없다."를 근거로 하여 월평균근로시간을 176시간(44시간×4주)으로 산정하였다. 이에 근거하여 승용차 이용자의 시간가치는 226.5만원÷176시간=1.2869만원/시간으로 추정되며, 이를 이용하여 통행시간 절감액을 구할 수 있다.

표 13의 시간가치 비교에서 보는 바와 같이 본 연구에서 추정된 적정요금은 시간가치에 비하여 충분히 낮은 것으로 판단된다.

표 13. 시간가치에 의한 적정요금의 검토

절약시간 구분	1시간 30분	1시간	30분
시간가치에 의한 절감액	19,303원	12,869원	6,435원
적정요금 수준	8,350원	6,250원	3,900원



## 5. 결론

본 연구는 부산과 거제를 연결하는 거가대교가 개통된다는 가정하에서 다양한 요금체계에 대한 승용차 이용자들의 이용 여부를 설문 조사한 SP자료를 이용하여 요금수준별 이용행태를 분석하고자 인간이 개략적인 추론을 통하여 결론에 도달하는 과정을 퍼지이론을 이용하여 모형화한 퍼지근사추론모형을 구축하였으며, 이 모형을 이용하여 적정요금을 산정하고 조사대상인 승용차 이용자들의 시간가치에 의해 검정하였다.

신설 거가대교의 잠재이용자인 국도 14호선을 이용하는 승용차 운전자를 대상으로 SP조사가 실시되었다. 이 자료에 기초하여 1시간 30분 통행시간 절약시는 '6,000원의 통행료 지불'을 1시간 및 30분 통행시간 절약시는 '4,000원의 통행료 지불'이라는 설명변수를 기본대안으로 하여 각 요금수준에 대한 이용의 상대적인 정도를 이용하여 분석하였다.

퍼지추론 모형 구축을 위해서는 통행절약시간과 요금이 입력변수로 선정되었으며 이용률이 출력변수로 선정되었다. 절약시간은 3개의 퍼지변수로, 요금과 이용률은 각각 5개의 퍼지변수로 구분되었다. 각 퍼지변수들은 Triangular 형태와 Trapezoidal 형태의 멤버십함수를 사용하였으며 총 12개의 퍼지규칙이 정립되었다. 통행절약시간이 적을 경우 요금수준 보통에서는 이용률이 동일하게 매우 낮은 반면 통행절약시간이 많을 경우 요금이 이용률에 크게 영향을 미치는 것을 볼 수 있었다.

구축된 퍼지근사추론 모형을 이용하여 각 요금수준에서의 이용률을 추정하고 수입을 최대화하는 요금수준을 적정요금으로 산정하였다. 순위프로빗 모형에 의한 결과치와의 평균에 의해 추정된 절약 통행시간별 적정요금은 1시간 30분 절약시는 요금수준 8,350원, 1시간 절약시는 6,250원, 30분 절약시는 3,900원으로 산정되었다.

절약 통행시간 1시간에서의 적정요금 6,250원은 승용차 운전자들의 시간가치의 50% 수준으로 과도

한 요금은 아닌 것으로 판단된다. 본 연구에서 사용된 퍼지근사추론을 이용한 유료도로 적정요금 산정 기법은 화물차, 버스와 같은 다른 차종들의 적정요금 산정에도 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. (가칭) GK주식회사(1998. 5), "부산-거제간 연결도로 종합보고서(교통량 추정 보고서)."
2. 김경환, 하만복, 정연탁(2004), "유료도로 적정요금 산정에 관한 연구," 대한토목학회논문집 제23권 30호, pp.355-361.
3. 김은정, 박양규, 박중재 공저(2001), "원도우용 SPSS 통계분석 10," 21세기사
4. 김일환(2001), "적정통행요금 부과를 통한 고속도로 이용효율의 극대화 방안에 관한 연구," 석사학위논문, 서울대학교.
5. 임정국, 원성현(1992), "기초퍼지이론과 응용시스템." 정보시대.
6. 이광용, 오길록 공저(1997), "퍼지이론 및 응용 I, II", 홍릉과학 출판사.
7. 이현엽, 문경일 공저(1999), "MATLAB을 이용한 퍼지-뉴로," 도서출판 아진.
8. 임영태(1993), "총통행비용의 최소화를 위한 유료도로의 통행료 결정에 관한 연구." 석사학위논문, 서울대학교.
9. 진재엽(2002), "부산시 부가교통정보시스템의 이용수요 예측 및 적정이용료 산정에 관한 연구." 석사학위논문, 부산대학교.
10. 한재일(1995), "고속도로의 최적통행료 결정에 관한 연구." 석사학위논문. 서울대학교.
11. Ayyub, B. M., M. M. Gupta. (1997), "Uncertainty Analysis in Engineering and Sciences," Fuzzy Logic, Statistics, and Neural Network Approach, Kluwer Academic Publishers.
12. Ben-Akiva and R. Lerman. (1985), "Discrete Choice Analysis," Theory and Application to Travel Demand. MIT Press.
13. Domencich, T. A. and D. McFadden. (1975), "Urban Travel Demand," A Behavioral



- Analysis. Amsterdam, North Holland.
14. Florian, M. (1998), "Network equilibrium models for analyzing toll highways. In," *Proceedings of the International Conference on Transportation into the Next Millenium*, pp. 9-11 September (1998), Singapore.
  15. *Fuzzy Logic Toolbox for Use with Matlab User's Guide Version 4.0 (2000)*, The Mathworks, Inc.
  16. Hines, J. W. (1997), "Matlab Supplement to Fuzzy and Neural Approaches in Engineering," John Wiley & Sons, Inc.
  17. Ortuzar, J. D. and L. G. Willumsen. (1994), "Modelling Transport. John Wiley & Sons," pp.252-271.
  18. Pearmain, D. and E. Kroes. (1990), "Stated preference techniques," A Guide to Practice. Steer Davies & Gleave Ltd.
  19. Tomas, R. (1991), "Traffic assignment techniques. Avebury Technical," pp. 42-46.
  20. "Transit Capacity and Quality of Service Manual 2nd Edition". *Transportation Research Board(2003)*,
  21. Viton, P. A. (1978), "Optimal tolls on the bay bridge," Institute of Urban & Regional Development, University of California, Berkeley.
  22. Yang, H., X. Zhang. and Q. Meng. (2003), "Modeling private highways in networks with entry-exit based toll charges," *Transportation Research Part B in press*.
  23. Zavoina. R and W. McElvey. (1975), "A statistical model for the analysis of ordinal level dependent variables," *Journal of Mathematical Sociology, Summer, pp.103-120*.

접 수 일 : 2006. 5. 10  
심 사 일 : 2006. 8. 28  
심사완료일 : 2006. 9. 7