

고속도로 자동요금징수시스템의 차량 통행시간 산정을 위한 다중서비스 대기행렬이론 연구

Application of Multi-Server Queuing Theory to Estimate Vehicle Travel Times at Freeway Electronic Toll-Collection Systems

성현진*
(Hyunjin Sung)

최재성**
(Jaisung Choi)

김상엽***
(Sangyoun Kim)

요약

본 논문은 고속도로 톨게이트에서 통행 요금징수로 인해 교통지체가 발생할 때 이를 최소화하기 위해 자동요금징수시스템을 설치하는 경우 차량들의 통과시간이 어떻게 변화하는지 분석한 연구결과를 제시하고 있다. 본 연구에서는 이 설치효과를 톨게이트를 빠져나가는 차량들의 통과시간 감소 편익이라고 생각했으며, 차량의 통과시간을 분석하기 위해 다중서비스 대기행렬이론을 적용해서 분석하였다. 본 연구에서 분석한 결과, 톨게이트로 진입하는 차량들의 입차 간격이 Poisson 분포를 따르고, 자동요금징수시스템의 서비스 시간이 지수 분포를 따를 때 다중서비스 대기행렬이론을 적용하여 차량들의 통과시간을 분석하는 것이 바람직하다는 것과, 자동요금징수시스템을 설치하더라도 통행 요금을 징수하는데 걸리는 시간이 다르기 때문에 톨게이트 출구 쪽이 입구 쪽보다 통과시간 감소효과가 더 크게 나타난다는 것, 그리고 자동요금징수시스템을 설치한다고 해서 항상 톨게이트를 통과하는 시간이 감소하는 것은 아니며, 자동요금징수시스템 차로에 너무 많은 차량들이 몰리는 경우 오히려 톨게이트 전체로 볼 때는 차량당 통과시간이 증가한다는 것을 밝혔다. 끝으로 본 연구에서는 다중서비스 대기행렬이론의 정확성을 판단하기 위해 실제로 톨게이트 현장조사에서 통과 차량들의 평균 통과시간을 조사해서 모형 값과 비교했는데, 그 결과 모형 값과 실제 값은 약 1~3초 정도의 미소한 차이만을 보여서 다중서비스 대기행렬이론을 실무에 적용해도 좋다는 결론을 얻었다.

Abstract

This paper presents the investigation results of a research on how engineers can analyze the economic effect of the ETCS(Electronic Toll Collection System) installed to minimize the vehicle delays on freeway tollgates during toll payments. This research considered this economic effect to occur in the form of vehicle passing time reductions at the ETCS, and the multi-service queuing theory was applied to estimate these values. This research found: 1) When vehicles approaching tollgates show Poisson distribution and the service time of the ETCS shows Exponential distribution, the multi-service queuing theory would be applicable for estimating vehicle passing times at toll-gates, 2) Despite the ETCS placement, exit sections of tollgates give a greater reduction of vehicle passing times than entering sections due to more delays at conventional toll payments, and 3)The ETCS would not guarantee vehicle passing time reductions all the time, because in such a case as many vehicles were queuing at the ETCS, the total delay level for a toll gate would increase greatly. In addition, in order to examine the accuracy of the estimated vehicle passing values, this research compared the values from the multi-service queuing theory with the observed values from a set of field survey values at freeway toll-gates, and found that the two values were in a good agreement with a very low error range of 1-3 seconds per vehicle. Based on this result, the multi-service queuing theory was recommended for practice.

Key words : Toll-Gate, Vehicle Passing Times, ETCS, Multi-Server Queuing Theory, Economic Feasibility Analysis

† 본 연구는 국토해양부 R&D사업(07교통체계-지능08) 지원으로 수행하였습니다.

* 주저자 : 서울시립대학교 교통공학과 석사

** 주저자 및 교신저자 : 서울시립대학교 교통공학과 교수

*** 공저자 : 서울시립대학교 교통공학과 연구교수

† 논문접수일 : 2011년 1월 5일

† 논문심사일 : 2011년 2월 1일(1차), 2011년 3월 24일(2차)

† 게재확정일 : 2011년 3월 25일

1. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

고속도로를 진출입하는 차량들은 통행료를 지불하기 위해 반드시 톨게이트를 통과해야 한다. 이때, 고속도로에서 차량들은 고속으로 주행하고 또 교통량 규모가 크기 때문에 톨게이트에서 통행료를 내기 위해 잠시 정차하면서 발생하는 교통 혼잡 규모가 전체적으로 보면 상당한 양이 된다. 예를 들어 한국도로공사에는 1999년 한 해 동안 톨게이트 혼잡비용이 약 2,700억원에 이르는 것으로 분석하였다[1]. 이러한 톨게이트 주변의 교통혼잡 비용을 줄이기 위해 한국도로공사에서는 우리나라에서 처음으로 2000년 6월 30일 개방식 요금소인 서울외곽순환 고속도로 성남, 청계, 판교 3개 톨게이트에 대해서 자동요금징수시스템(ETCS: Electronic Toll Collection System)을 설치하였다[1]. 또한 그 이후 한국도로공사는 폐쇄식 요금소로 자동요금징수시스템 설치 사업을 대폭적으로 확장하여 우리나라에는 2007년 기준으로 총 263개 톨게이트에 자동요금징수시스템이 설치되어 있다[2].

한편 이와 같이 자동요금징수시스템을 대폭적으로 설치하였으나 우리나라의 경우 정작 자동요금징수시스템의 설치에 따른 경제적 효과를 분석하는 연구는 거의 없으며, 특히 자동요금징수시스템을 설치하기 이전에 이 시스템의 경제적 타당성을 사전에 검토하고자 할 때 어떤 절차를 따라야 하는지에 대한 지침이 없어 매우 아쉬운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 자동요금징수시스템 설치에 따른 평균 통과시간의 변화를 경제적 효과로 분석하는 이론적 기법을 제시하였다.

이론적으로 볼 때 자동요금징수시스템의 경제적 타당성을 판단할 때 가장 중요한 편익 항목은 자동요금징수시스템을 통과해 지나가는 차량들의 평균 통과시간을 산정하는 것이다. 이 평균 통과시간이 길고 짧음에 따라 자동요금징수시스템의 설치효과가 달라지기 때문이다. 물론 이외에도 차량 연료소비 감소, 영업소 직원 인력 감축, 차량배기가스 감소, 승차인원

의 쾌적성 증가 등을 자동요금징수시스템의 편익 항목으로 분석한 연구결과들이 있기는 하나[3], 이들 편익 항목을 계량화하는 것이 상당히 힘들기 때문에 차량들의 평균 통과시간 감소를 산정하는 것이 현실적으로 타당하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 이 점을 충분히 감안하여 자동요금징수시스템 설치로 인한 편익으로 차량들의 통과시간 감소로 선정하였다.

한편 본 연구에서는 자동요금징수시스템을 통과하는 차량들의 통과시간을 합리적으로 산출하기 위해 다중서비스 대기행렬이론(Multi-Server Queuing Theory)을 적용하였다. 이 이론은 차량의 도착 간격이 Poisson 분포를 따르고 차량이 톨게이트에서 대기하고 서비스를 받는 시간을 의미하는 서비스 시간이 지수 분포를 따르며, 고속도로 본선 차로 수가 2개 이상인 도로에 설치된 톨게이트에서 적용할 수 있는 이론으로 알려져 있다[4-6]. 또한 자동요금징수시스템 설치를 위한 타당성 분석 연구에서도 이 기법을 적용한 바 있어서 국내·외적으로 그 효용성이 입증된 바 있다[4].

본 연구의 목적은 다음과 같다.

- 자동요금징수시스템 설치로 인한 평균 통과시간을 분석하는 방법을 제시하고 편익을 산출한다.
- 고속도로 톨게이트에서 실제 조사를 통해 실증 자료를 수집하고 이를 분석결과와 비교한다.

2. 연구의 범위 및 접근 방법

본 연구의 내용적 범위는 자동요금징수시스템 설치로 인한 평균 통과시간의 변화를 경제적 편익으로 분석하는 것이다. 한편 공간적 범위로는 자동요금징수시스템이 설치되어 있는 고속도로 톨게이트를 대상으로 했으며, 시간적 범위는 주말을 배제한 평일 교통류를 분석 대상으로 하였다.

한편 본 연구의 접근 방법은 다음과 같다. 첫째, 기존 연구 결과 검토 과정을 통해 자동요금징수시스템을 통과하는 차량들의 통과시간 산정에 사용되는 제반 분석 모형들을 검토하였다. 둘째, 기존 연구 결과를 통해서 선정한 다중서비스 대기행렬이론

에 대해 집중적으로 검토하고, 이 이론을 본 연구의 분석 대상인 자동요금징수시스템에 연결시킬 수 있을 지에 대하여 연구하였다. 끝으로, 다중서비스 대기행렬이론을 통해 분석한 평균 통과시간은 실제 고속도로에 설치한 자동요금징수시스템에서 나타나는 차량의 평균 통과시간과 차이가 있을 수 있으므로 본 연구에서 별도로 현장조사를 수행하고 실증 자료를 수집하여 이론적 수치와 비교하였다.

II. 기존연구 결과에 대한 검토

1. 자동요금징수시스템의 설치 효과 분석연구

전 절에서 이미 언급한대로 자동요금징수시스템의 설치 편익은 차량 연료소비 감소 등 여러 가지가 있으나, 우리나라의 경우 자동요금징수시스템을 설치하는 주된 목적은 톨게이트를 통과하는 차량들이 정지했다 다시 출발하면서 발생하는 교통혼잡비용을 최소화하려는 것이므로 본 연구에서는 이런 관점을 갖고 연구한 결과들에 주목하였다.

먼저 북미와 유럽의 연구 결과들로서 Pietrzyk 외(1990), K.Waersted(1998)의 연구를 검토하였다. Pietrzyk 외(1990)의 연구는 자동요금징수시스템을 설치한 톨게이트에서 실제 조사를 통해 교통류 분석을 수행한 것이다[7]. 이 연구에서 자동요금징수시스템 설치로 인해 이 시스템을 통과하는 차량 대수는 350대/시에서 1,200대/시로 증가하였으며, 평균 속도는 2.5miles/h에서 15miles/h로 증가한 것을 밝힌 바 있다[7]. 본 연구에서는 자동요금징수시스템을 설치하였을 때 톨게이트를 통과하는 차량들의 통과시간이 감소할 것으로 가정하고 있는데, 이 결과는 본 연구의 가정이 적절한 것임을 시사하고 있다.

북유럽 사례를 볼 때, Waersted(1998)의 연구에 의하면, 노르웨이 오슬로에서 자동요금징수시스템 설치로 인해 차량 지체가 3~5% 감소하였다고 제시하였다[3]. 또한 이 연구에서는 자동요금징수시스템 설치로 인해 톨게이트에서의 대중 교통수단 이용이 6~9% 정도 증가하였다고 제시하였다[3].

우리나라의 경우를 보면 지금까지는 주로 자동요금

징수시스템 설치로 인한 편익을 평균 통과시간 감소에 맞추어 분석한 특징을 갖고 있다[1,8]. 먼저 이상건 외(2002)의 연구는 자동요금징수시스템 시범사업 대상지인 성남, 청계, 판교의 효과를 분석하였다[1]. 이 연구는 평균 통행시간, 평균 대기행렬 길이를 현장조사를 통해 분석하였으며, 분석 결과를 통해 선형 회귀식을 정립하였고 그 회귀식을 통해 설치효과를 산정하였다.

한편 정희운(2002)의 연구는 대기행렬이론을 통해 대기행렬 감소에 의한 지체시간 감소를 분석하였다[8]. 이 연구는 국내에서는 유일하게 자동요금징수시스템의 설치효과를 경제성 관점에서 분석한 연구인데, 이 연구는 아쉽게도 우리나라 자동요금징수시스템의 평균 서비스 시간을 일정한 값으로 먼저 가정하여 분석을 수행했다는 한계점을 가지고 있다.

다음으로 본 연구에서는 자동요금징수시스템을 통과하는 차량들의 통행시간 분석을 위해 어떤 분석 이론을 적용하는 것이 좋을지 검토하였다. 먼저 미국의 Gross 외(2008)가 저술한 책에서는 차량의 도착률, 서비스 시간의 분포가 매우 다양한 조건 하에서 어떤 대기행렬이론을 적용하는 것이 좋은지 제시하였는데[5], 이 책에서는 본 연구에서 적용하고자 하는 자동요금징수시스템의 특성에 해당하는 대기행렬에 대한 적절한 분석 기법을 잘 제시하고 있다. 즉 본 연구에서 고려해야 할 분석 대상은 차량 도착률이 Poisson 분포를 따르고 서비스 시간이 지수 분포를 따르는 것인데, 이 책에서는 이런 경우 다중서비스 대기행렬 이론이 가장 적합한 것으로 제시하고 있다. 이러한 주장은 미국의 Smith (2002)의 연구에서 확인된 바 있는데, Smith는 차량 도착률이 Poisson 분포를 따르고 서비스 시간이 지수 분포를 따르며 서비스 시설이 2개 이상 일 때 다중서비스 대기행렬이론을 적용하여 분석을 수행하였으며, 이 연구에서는 매우 합리적인 분석 결과를 제시한 바 있다[6].

2. 본 연구를 위한 분석 방법의 선정

이미 지적한대로 기존 연구들에서는 자동요금징수시스템을 통과하는 차량들의 통과시간을 실제 현장조사를 통해 분석하였다. 이 방법이 갖고 있는 제

약점은 실제 자동요금징수시스템을 설치하고 운영하는 톨게이트에 현장조사 팀을 투입해서 매번 분석에 필요한 수치를 수집해야 한다는 점이다. 이 한계점을 극복하기 위해서는 자동요금징수시스템을 통과하는 차량들의 통과시간을 산정할 수 있는 이론적 분석 방법을 정립해야 하며, 본 연구에서는 이를 위해 다중서비스 대기행렬이론을 적용하였다.

Ⅲ. 대기행렬이론

1. 기본 개념

차량의 대기행렬은 교통 수요가 일시적으로 증가하거나 도로 용량이 일시적으로 감소하기 때문에 발생한다. 이와 같이 대기행렬이 일시적으로 발생하는 신호교차로 및 톨게이트에서 차량들의 서비스 특성을 분석하기 위해서는 일반적으로 대기행렬이론을 적용한다[7-9]. 대기행렬이론은 대기행렬이 발생하는 시설물에서 차량의 도착시간, 서비스 시스템의 서비스 특성 등을 확률식을 이용하여 분석하며, 그 분석 결과를 통해 서비스 시스템의 적정 규모를 연구하는 이론이다. 이 대기행렬이론에는 매우 다양한 분석이론이 있으나, 본 연구에서는 여러 개의 서비스 시설물이 있는 경우 사용할 수 있는 다중서비스 대기행렬이론을 적용하여 분석을 수행하였다.

2. 다중서비스 대기행렬이론

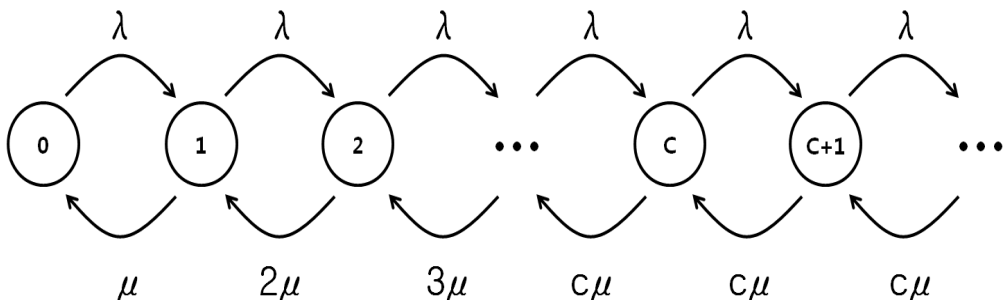
톨게이트의 대기행렬은 도착 교통량 특성, 서비

스 시간 특성, 서비스 수준(승객이 평균적으로 기다리게 되는 정도를 나타내는 서비스 척도)의 3가지 요소를 통해 정해진다[7-9]. 대기행렬이론을 적용할 때, 고객들이 Poisson 분포로 도착하고 서비스 시간이 IID(Independently and Identically Distributed) 지수 분포를 따르며 c개의 서비스 시스템을 가질 경우 M/M/c 라고 나타낸다. 본 연구에서는 자동요금징수시스템의 설치에 따른 평균 대기시간을 분석하기 위해 M/M/c 대기행렬이론을 적용하여 분석을 수행하였다. 다음은 이 이론에 대한 설명이다.

M/M/c 대기행렬이론의 고객 수 과정은 출생, 사멸률을 갖는 출생사멸과정이며, 이는 <그림 1>의 상태 전이도를 통해 분석할 수 있다. <그림 1>에서 고객의 도착률(출생률)은 λ 로 동일하며, 서비스율(사멸률)은 고객 수(n)가 차로 수(c)보다 적은 경우 $n\mu$, 고객 수가 차로 수보다 많은 경우 $c\mu$ 로 계산할 수 있다. 즉, 도착률과 서비스율은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[5,9].

$$\begin{aligned} \lambda_n (\text{출생률}) &= \lambda \quad (n \geq 0) \\ \mu_n (\text{사멸률}) &= \begin{cases} n\mu & (1 \leq n \leq c-1) \\ c\mu & (n \geq c) \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

M/M/c 대기행렬이론을 통한 대기 고객 수 및 대기시간은 고객의 도착확률을 통해 산출해야 하므로, 고객의 도착확률을 산출해야 한다. 고객의 도착확률은 도착률과 서비스율을 통해 산출할 수 있으며, 고객 수가 서비스 시설물의 처리용량보다 적은 경우와 많은 경우로 구분할 수 있다. 고객 수가 서



<그림 1> M/M/C 대기행렬이론의 상태전이도
 <Fig. 1> Rate transition diagram for the M/M/c queue

비스 용량보다 적은 경우의 고객의 도착확률은 식 (2)와 같다[6].

$$\begin{aligned}
 p_1 &= \frac{\lambda}{\mu} p_0 & (2) \\
 p_2 &= \frac{\lambda}{2\mu} p_1 = \frac{\lambda^2}{2\mu^2} p_0 \\
 p_3 &= \frac{\lambda}{3\mu} p_2 = \frac{\lambda^3}{3 \cdot 2\mu^3} p_0 \\
 &\vdots \\
 p_n &= \frac{\lambda^n}{n! \mu^n} p_0 \\
 p_n &= \frac{k^n}{n!} p_0 \quad (k = \frac{\lambda}{\mu})
 \end{aligned}$$

고객 수가 서비스 용량보다 많은 경우 고객의 도착확률은 식 (3)과 같다[6].

$$\begin{aligned}
 p_c &= \frac{\lambda}{c\mu} p_{c-1} = \frac{\lambda^c}{c! \mu^c} p_0 & (3) \\
 p_{c+1} &= \frac{\lambda}{c\mu} p_c = \frac{\lambda^{c+1}}{c \cdot c! \mu^{c+1}} p_0 \\
 p_{c+2} &= \frac{\lambda}{c\mu} p_c = \frac{\lambda^{c+2}}{c^2 \cdot c! \mu^{c+2}} p_0 \\
 &\vdots \\
 p_n &= \frac{k^n}{c^{n-c} \cdot n!} p_0
 \end{aligned}$$

식 (2)와 식 (3)에서 p_1 은 고객이 1명 도착할 확률, p_c 는 고객이 c 명 도착할 확률을 의미한다. 고객의 도착확률은 도착률, 서비스율, 서비스 시설물의 처리용량 등을 통해 산출하며, 고객이 1명도 없을 확률(p_0)을 항상 알고 있어야 한다. 이 값은 모든 경우를 고려했을 때 확률이 합이 1.0임을 이용하여 계산할 수 있으며, 고객이 1명도 없을 확률은 식 (4)와 같다[5].

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=0}^{\infty} p_n &= 1 & (4) \\
 p_0 + \frac{\lambda}{\mu} p_0 + \frac{\lambda^2}{2\mu^2} p_0 + \dots + \frac{\lambda^c}{c^{n-c} \cdot c! \mu^c} p_0 + \dots &= 1 \\
 p_0 + \sum_{n=0}^{c-1} \frac{\lambda^n}{n! \mu^n} p_0 + \sum_{n=c}^{\infty} \frac{\lambda^c}{c^{n-c} \cdot c! \mu^c} p_0 &= 1 \\
 p_0 &= (1 + \sum_{n=0}^{c-1} \frac{k^n}{n!} + \sum_{n=c}^{\infty} \frac{k^n}{c^{n-c} \cdot c!})^{-1}
 \end{aligned}$$

$\sum_{n=c}^{\infty} \frac{k^n}{c^{n-c} \cdot c!}$ 은 무한등비급수(등비수열의 합)에 의하여 식 (5)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=c}^{\infty} \frac{k^n}{c^{n-c} \cdot c!} &= \frac{k^c}{c!} \sum_{n=c}^{\infty} (\frac{k}{c})^{n-c} = \frac{k^c}{c!} \sum_{i=0}^{\infty} (\frac{k}{c})^i & (5) \\
 &= \frac{k^c}{c!} \frac{1}{1-k/c} = \frac{k^c}{c!} \frac{1}{1-r} \quad (r = \frac{k}{c} < 1)
 \end{aligned}$$

따라서 p_0 는 식 (6)으로 정리할 수 있다.

$$p_0 = (1 + \sum_{n=0}^{c-1} \frac{k^n}{n!} + \frac{k^c}{c!} \frac{1}{1-r})^{-1} & (6)$$

다음으로 M/M/c 대기행렬이론을 통한 고객 당 평균 대기시간을 산출해야 한다. 이 값은 대기 고객 수를 통해 산출할 수 있으며 식 (7)은 이 값을 나타내는 식이다[5,9].

$$\begin{aligned}
 L_q &= \sum_{n=c+1}^{\infty} (n-c) p_n = \sum_{n=c+1}^{\infty} (n-c) \frac{k^n}{c^{n-c} \cdot c!} p_0 & (7) \\
 &= \frac{k^c p_0}{c!} \sum_{n=c+1}^{\infty} (n-c) r^{n-c} = \frac{k^c p_0}{c!} \sum_{i=1}^{\infty} i r^i \\
 &= \frac{k^c r p_0}{c!} \sum_{i=1}^{\infty} i r^{i-1} = \frac{k^c r p_0}{c!} \frac{d}{dr} \sum_{i=1}^{\infty} r^i \\
 &= \frac{k^c r p_0}{c!} \frac{d}{dr} (\frac{1}{1-r} - 1) = \frac{k^c r p_0}{c! (1-r)^2} \\
 &= \frac{k^c}{c!} \frac{r}{(1-r)^2} p_0
 \end{aligned}$$

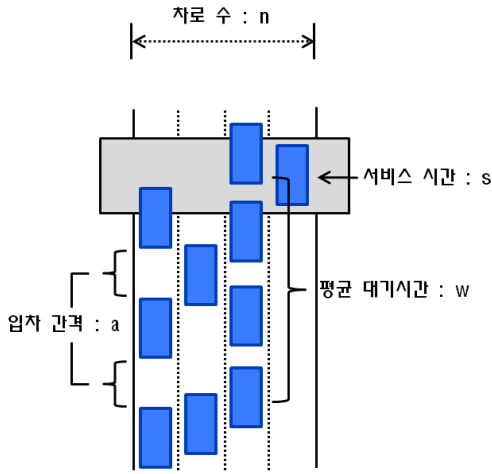
끝으로 고객 당 평균 대기시간은 대기 고객 수를 도착률로 나눈 식 (8)을 통해 산출할 수 있으며[7,9], 본 연구에서는 식 (8)을 통해 자동요금징수시스템을 통과하는 차량의 평균 대기시간을 산출하였다.

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} = \frac{k^c}{c \cdot c!} \frac{1}{\mu(1-r)^2} p_0 & (8)$$

IV. 평균 통과시간 분석

1. 대기행렬이론 적용

위에서 제시한 식을 통해 자동요금징수시스템 평균 통과시간을 분석하기 위해서는 그 입력 변수



〈그림 2〉 톨게이트 기본 개념도
 〈Fig. 2〉 Conceptual diagram of tollgate

인 도착 교통량, 서비스 시간 등의 변수를 알고 있어야 하며, 본 연구에서는 이 변수들을 어떻게 산출하는지 설명하기 위해 다음 <그림 2>와 같은 기본 개념도를 이용한다.

먼저 이 개념도에서 평균 입차 간격은 일정 시간 내에 톨게이트로 들어오는 차량들의 도착간격을 의미하며, 식 (9)와 같이 표시할 수 있다. 또한, 톨게이트에서는 차량의 도착 간격이 일정하지 않으며, 무작위적으로 도착하기 때문에 Poisson 분포를 따른다고 생각할 수 있다.

$$\text{평균 입차 간격 } a = \frac{3,600}{DHV} \quad (9)$$

DHV: 설계시간 교통량

다음으로 평균 통과시간은 각 차량이 요금 지불에 의해 톨게이트를 점유하는 시간에 대한 통계적 분포를 의미한다. 평균 통과시간은 평균 대기시간과 서비스 시간을 합한 개념이다. 한국도로공사에서는 일반적인 경우 입구에서 6초, 출구에서 13초의 서비스 시간이 소요된다고 밝히고 있다[10]. 그러나 자동요금징수시스템의 서비스 시간은 제시하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 차량들이 자동요금징수시스템을 통과하는데 걸리는 평균 서비스 시간에는 차량들이 나타내는 통과속도를 고려한

차두 간격을 반영해야 한다고 생각하였다. 또한 이론적으로 볼 때 차두 간격을 정확하게 분석하기 위해서는 차량 추종 이론(Car Following Model)을 적용하는 것이 바람직하므로 본 연구에서는 차량 추종 이론을 반영하여 자동요금징수시스템을 통과하는 차량들 간의 거리를 식 (10)과 같이 산출하였다.

$$L_i = x_i(t) - x_{i+1}(t) = T\dot{x}_{i+1}(t+T) + L \quad (10)$$

- L_i : i 번째, $(i+1)$ 번째 차량 간 간격
- $x_i(t)$: i 번째 차량의 위치
- $x_{i+1}(t)$: $(i+1)$ 번째 차량의 위치
- $x_{i+1}(t+T)$: $(i+1)$ 번째 차량의 속도
- T : 인지 반응 시간(초)
- L : 차량 길이(m)

본 연구에서는 우리나라 자동요금징수시스템의 제한속도가 30km/h이므로 이 속도를 차량속도로 반영하였고, 차량의 길이는 승용차를 생각하여 6m를 사용하였다. 그 결과 자동요금징수시스템을 통과하는데 소요되는 서비스 시간은 3.22초였다.

본 연구에서 제시하는 서비스 시간은 톨게이트에서 차량이 통과하기 위한 요금을 계산하기 위해 정차하는 시간만을 의미하지 않으며, 차량이 톨게이트를 통과하기 위해 대기하는 시간을 포함한 개념이다. 따라서 본 연구의 서비스 시간은 교통량 수준에 따라 지수 분포를 따른다. 즉, 도착 간격이 Poisson 분포를 따르고 서비스 시간이 지수 분포를 따르므로 톨게이트의 평균 통과시간을 다중서비스 대기행렬이론을 적용하여 분석하였다.

다중서비스 대기행렬이론으로 분석을 수행하기 위해 교통강도라는 개념이 필요한데, 교통강도란 차량 대기행렬에서 교통 지체가 발생하는 상황에서 차량의 평균 도착률에 대한 차량 한 대당 처리 소요시간의 비율을 말한다[10]. 1차로 교통강도는 다음 식 (11)에 의해 산출할 수 있다.

$$\text{교통강도 } k = \frac{s}{a} \quad (11)$$

$$\text{1차로 교통강도 } g = \frac{s}{an}$$

- a : 평균 입차 간격
- s : 평균 서비스 시간
- n : 차로 수

이제 모든 입력변수를 결정했기 때문에 우리는 자동요금징수시스템을 통과하는 차량들의 평균 대기시간을 식 (12)를 통해 얻을 수 있다.

$$\text{평균 대기시간 } w = \frac{k^n}{n \cdot n!} \frac{s}{(1-g)^2 p_0} \quad (12)$$

- a: 평균 입차 간격
- s: 평균 서비스 시간
- n: 차로 수
- k: 교통강도
- g: 1차로 교통강도
- p₀: 톨게이트에 차량이 1대도 없을 확률

결론적으로 본 연구에서 분석하고자 하는 자동요금징수시스템의 설치효과인 평균 통과시간은 식 (12)를 통해 얻은 평균 대기시간에 서비스 시간을 더한 값을 말한다. 그리고 자동요금징수시스템의 설치로 인해 발생하는 평균 통과시간 감소효과는 시스템을 설치하기 전에 나타나는 평균 통과시간에서 시스템을 설치한 후 나타나는 평균 통과시간을 뺀 값이며, 이는 식 (13)과 같이 표시할 수 있다.

$$\text{평균 통과시간 감소효과} = [v(s_3 + t_3) - v(1-u)(s_1 + t_2) + vu(s_2 + t_2)]/3,600 \quad (13)$$

- v: 교통량
- u: Hi-Pass 이용률
- s₁: 시스템 설치 후 일반식 차로의 서비스 시간
- s₂: 시스템 설치 후 Hi-Pass 차로의 서비스 시간
- s₃: 시스템 설치 전 일반식 차로의 서비스 시간
- t₁: 시스템 설치 후 일반식 차로의 평균 대기시간
- t₂: 시스템 설치 후 Hi-Pass 차로의 평균 대기시간
- t₃: 시스템 설치 전 일반식 차로의 평균 대기시간

2. 분석 방법 및 결과

본 연구의 목적은 자동요금징수시스템 설치로 인한 평균 통과시간 변화를 경제적 편익으로 계량화 하는 것이며, 평균 통과시간 분석은 자동요금징수시스템 설치 전후 차량들의 톨게이트 통과시간을 분석 하는 것이다. 이 분석을 위해 본 연구에서는 대기행렬이론을 사용하였는데, 대기행렬이론을 통해 얻은 값이 신뢰성을 확보하려면 1차로 교통강도가 1.0미만이어야 하다[8,10]. 따라서 본 연구에서도 1차로 교통강도가 1.0이 넘는 톨게이트는 고려하지 않았다.

대기행렬이론을 우리나라 톨게이트 현황에 적용해보기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 접근방법을 선택하였다. 먼저 톨게이트는 설치 위치에 따라

〈표 1〉 평균 통과시간 분석 범위
(Table 1) Range of analysis of passing times

		Case 1	Case 2
이용률(%)		20~40	
교통량(대/시)		1,000~2,500	2,000~6,000
차로 수	일반식 입구	3~6	4~8
	일반식 출구	5~8	10~19
	Hi-Pass	1~2	2~4

주) Hi-Pass는 자동요금징수시스템을 의미함

인터체인지 톨게이트와 본선 톨게이트로 구분할 수 있는데, 인터체인지 톨게이트 개소는 상당히 많은 반면 본선 톨게이트 개소는 매우 적다. 따라서 인터체인지 톨게이트는 1차로 교통강도가 1.0이 넘지 않는 톨게이트만을 선정하여 이를 Case 1 톨게이트라고 구분했으며, 본선 톨게이트는 소수이므로 모두 포함시켜 이를 Case 2 톨게이트라고 구분했다.

한편 본 연구에서 적용한 차량은 모두 승용차로 구성되어 있으며, 본 연구에서 선정한 톨게이트의 시설 개요는 다음 <표 1>과 같다. 그리고 한국도로공사에서는 자동요금징수시스템을 Hi-Pass라는 이름으로 명명하고 있기에 그 명칭을 그대로 사용하였다. 또한 본 연구에서 평균 통과시간 값은 차량 1대당 값으로 산출하여 쉽게 비교해 볼 수 있도록 하였다.

1) Case 1 분석 결과

먼저 한 톨게이트에 일반식으로 요금을 내는 차로와 자동요금징수시스템으로 요금을 내는 차로가 같이 설치된 방식에 대한 다중서비스 대기행렬이론 적용 결과를 살펴보았다. 이 분석결과, 톨게이트의 입구 쪽에서는 자동요금징수시스템 설치로 인해 오히려 통과시간이 증가하는 구간이 발생하였다. 이 분석 결과를 좀 더 세분해서 보면, 일반식 입구 3개 차로, 자동요금징수시스템 1개 차로인 톨게이트에서는 이용률이 20%일 경우 자동요금징수시스템을 설치한 차로 쪽에서 통과시간이 증가하기 때문에 톨게이트 전체적으로 보면 자동요금징수시스템 설치 이전에 비해 통과시간이 증가하였다. 이와 대조적으로 일반식 입구 5차로, 자동요금징수시스템 2차로인 톨게이트에서는 전체적으로는 자동요금징수시스템 설치 이전에 비해 통과시간이 감소하였다. 다만 그 감소량은 차량

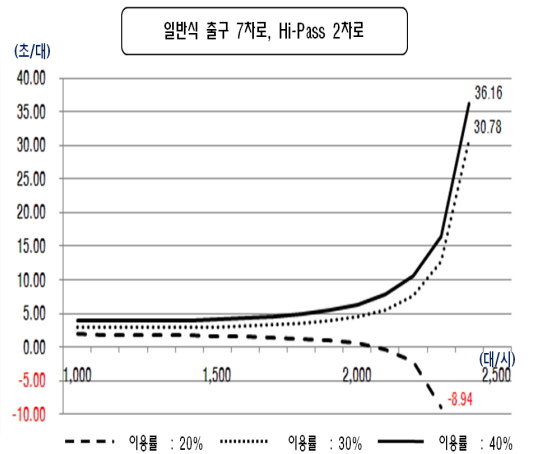
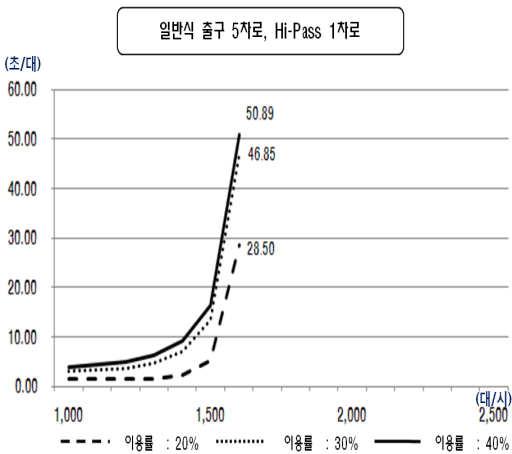
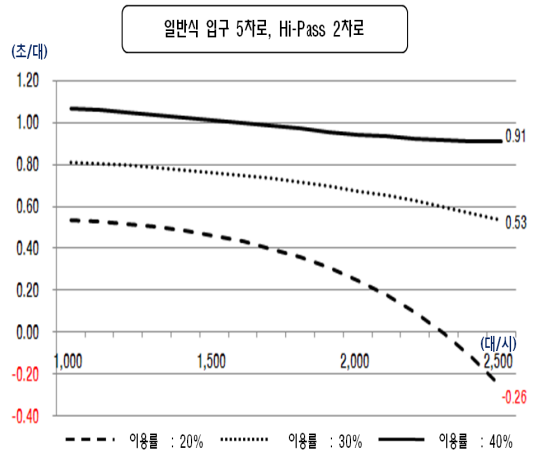
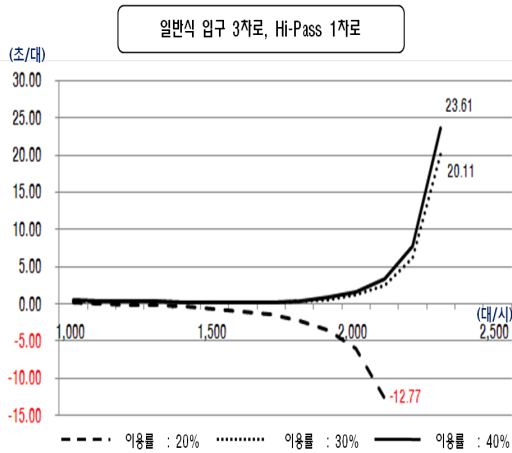
〈표 2〉 일반식 출구 차로의 평균 통과시간 분석 예
 (Table 2) Example of passing times in closed exit

사 례	교통량(대/시)	이용률(%)	차로수
A	2,500	30	8
입차 간격 (초/대)	$a = \frac{3,600}{2,500} = 1.44$		
한 차로 교통강도	$g = \frac{13}{1.44 \cdot 8} = 0.90$		
평균 대기시간(초)	$t = \frac{(0.90 \times 8)^8}{8 \cdot 8!} \frac{13}{(1 - 0.90)^2} = 0.00007 = 9.05$		
평균 통과시간(초)	$p = 13 + 9.05 = 22.05$		

1대당 1초 미만으로 나타나서 실제로 큰 효과는 기대할 수 없는 것을 알 수 있었다.

다음으로 위의 경우와 동일한 방식이지만 이번에는 입구 쪽이 아닌 출구 쪽에서 다중서비스 대기행렬이론을 적용했을 때 어떤 결과가 나타나는지 살펴 보았다. 이 경우 일반적으로 요금을 내는 차로에서 차량 1대를 서비스하는데 걸리는 시간이 <표 2>에서 보는 바대로 13초로 비교적 길다.

그 결과 출구 쪽에서는 자동요금징수시스템을 설치해서 나타나는 통과시간 감소효과가 입구 쪽보다 크게 나타났다. 일반식 출구 5개 차로, 자동요금징수시스템 1개 차로인 톨게이트에서는 자동요금징수시스템 차로가 1개 차로 밖에 되지 않아 대기행렬이 발생하여 교통량 약 1,700대/시 이상부터 1차



〈그림 3〉 평균 통과시간 분석 결과(Case 1)
 (Fig. 3) Analysis of passing times(Case 1)

로 교통강도가 1.0보다 큰 것으로 나타났다. 그러나 일반식 7개 차로, 자동요금징수 2개 차로로 구성된 톨게이트에서는 이용률이 증가하면 할수록 감소효과가 크게 나타났다. 그러나 이용률이 20%인 경우 약 2,100대/시부터 통과시간이 오히려 증가하였다.

본 연구에서 분석한 Case 1의 평균 통과시간 분석 결과는 <그림 3>과 같다. 본 연구에서 다중서비스 대기행렬이론을 통해 평균 통과시간 감소효과를 나타낸 그래프는 다음과 같이 분석할 수 있다.

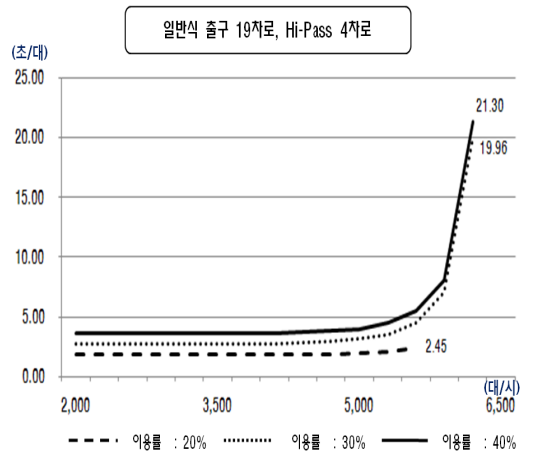
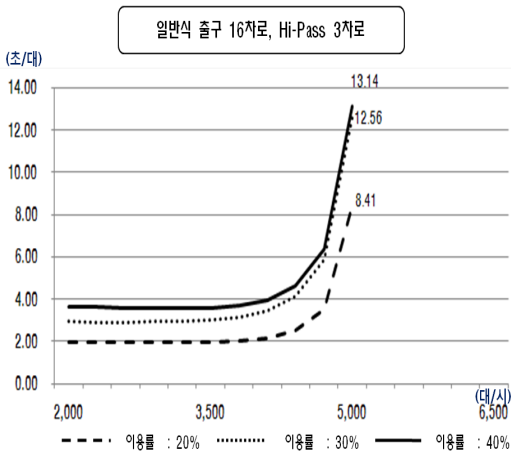
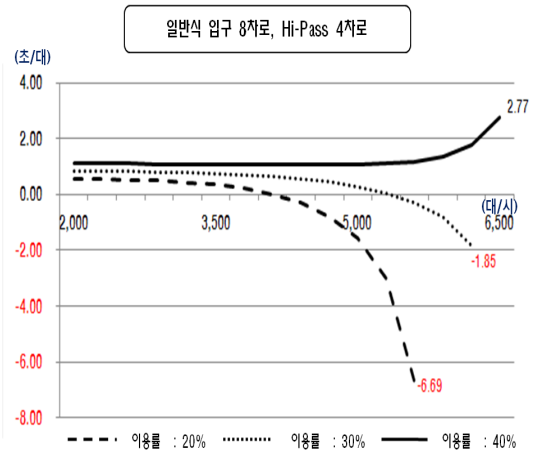
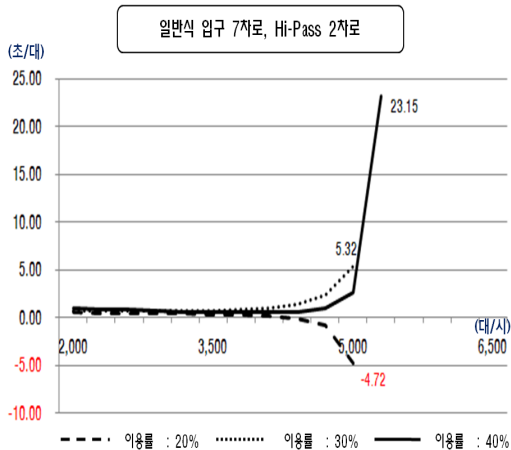
- 교통량과 이용률을 기준으로 차량들의 평균 통과시간 감소효과를 산출하였다.

- 그래프에서 나타내는 값은 평균 통과시간 수치가 아닌 평균 통과시간 감소효과로 해당 톨게이트에서 자동요금징수시스템을 설치할 경우 차량 1대당 감소한 통과시간을 의미한다.

- 따라서 그래프에서 음수값이 나타나는 경우는 시스템의 설치로 차량의 통과시간에 오히려 증가한 것을 의미하며, 평균 통과시간 감소효과를 제시하지 않은 부분은 1차로 교통강도가 1.0보다 커서 분석에서 제외하였기 때문이다.

2) Case 2 분석 결과

본 연구에서는 본선 톨게이트의 입구의 분석결



<그림 4> 평균 통과시간 분석 결과(Case 2)
<Fig. 4> Analysis of passing times(Case 2)

과, 먼저 이용률이 20%, 교통량 약 4,000대/시인 상황에서는 일반식 차로를 통과하려는 교통량은 많은 반면 자동요금징수시스템을 설치한 차로를 통과하려는 차량은 적어서 전체적으로 톨게이트를 통과하는 차량들은 상당한 지체를 겪는 결과를 얻었다. 그러나 자동요금징수시스템을 이용하는 차량 비율이 40%로 증가한 경우에는 평균 통과시간 감소효과가 크게 나타났다.

한편 출구 쪽의 경우 자동요금징수시스템을 설치한 이후 차량 통과시간 변화를 살펴본 결과, 교통량 규모가 크지 않을 때는 차량들이 톨게이트를 빠져나가는데 걸리는 통과시간이 대체로 변하지 않았으며, 일정 교통량 이상부터 평균 통과시간 감소효과가 커지는 것을 볼 수 있다. 일반식 출구 16차로, Hi-Pass 3차로인 톨게이트는 약 4,500대/시, 일반식 출구 19차로, Hi-Pass 4차로인 톨게이트는 약 5,500대/시의 교통량 이상부터 효과가 크게 나타났다.

본 연구에서 수행한 Case 2의 분석 결과는 <그림 4>와 같다.

3) 대기행렬이론 적용 결과의 의미

본 연구에서는 자동요금징수시스템의 설치 효과를 차량 통과시간 감소 편의의 관점에서 분석하고 있는데, 그 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 자동요금징수시스템의 서비스 시간은 티켓을 뽑는 시간과 요금을 계산하기 위한 시간이 필요하지 않기 때문에 일반식에 비해 통과시간이 짧다.
- 또한 톨게이트에서 차량 대기행렬이 발생하지 않는 경우 자동요금징수시스템을 설치한 차로를 통과하는 차량들은 정차하지 않고 약 30km/h 속도로 주행할 수 있기 때문에 통과시간이 감소한다.
- 그러나 자동요금징수시스템의 차로 수가 이를 이용하려는 차량수요에 비해 너무 적으면 대기행렬이 발생하여 오히려 차량들이 톨게이트를 빠져나가는데 걸리는 평균 통과시간은 전체적으로 볼 때 증가하는 것으로 나타났다.
- 본 연구에서 우리나라 톨게이트를 Case 1·2로

나누어 대기행렬이론을 적용하여 분석한 결과 자동요금징수시스템 이용률이 높다고 해서 항상 차량의 통과시간이 감소하지는 않는 것으로 나타났다. 비록 자동요금징수시스템의 통과시간은 일반식 입·출구를 통과하는 경우의 통과시간보다 짧으나 자동요금징수시스템에 교통량이 증가하여 시스템의 용량에 가까워지는 경우 오히려 톨게이트 전체로 볼 때는 통과시간이 증가할 수 있기 때문이다. 실제로 본 연구에서 분석한 결과를 보면, 일반식 입구 8개 차로, 자동요금징수시스템 4개 차로인 톨게이트에서 약 4,000대/시 이상 교통량을 보이게 되면 자동요금징수시스템을 설치해도 설치 이전보다 오히려 통과시간이 증가하는 것으로 나타났다.

3. 관측 통과시간과의 상호비교 결과

본 연구에서는 다중서비스 대기행렬이론을 적용하여 톨게이트에서의 평균 통과시간을 분석하였다. 그러나 대기행렬이론을 통한 평균 통과시간은 여러 가지 변수들을 가정해서 얻은 결과이므로 실제 톨게이트에 나가서 조사하여 얻은 값과 비교해 보아야 그 적정성을 판단할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 우리나라에서 자동요금징수시스템을 설치한 4개 톨게이트를 선정하여 현장 조사를 수행하였다.

이 현장 조사를 수행할 때 다음과 같은 사항에 유의하였다. 먼저 조사 시간대는 첨두시간과 비첨두시간으로 구분하였다. 또한 자동요금징수시스템을 설치한 차로수의 영향을 반영하기 위해 일반식으로 요금을 징수하는 출·입구 3차로와 자동요금징수시스템을 이용하여 요금을 징수하는 1~2개 차로를 조사하여 각 차로 유형별 차량 통과시간을 조사한 후 전수화해서 분석하였다. 이 때 조사 항목은

<표 3> 본 연구의 현장 조사 대상지 시설 개요
(Table 3) Outline of the field survey sites

차로 수	동서울		군자		동수원		북대전	
	입구	출구	입구	출구	입구	출구	입구	출구
일반식 차로	8	19	7	16	5	7	3	5
자동요금징수 차로	4	4	2	3	2	2	1	1

〈표 4〉 현장조사 개요
 (Table 4) The outline of site investigation

구분	내용	조사 방법
일시	2010년 12월 14일(화) ~ 23일(목)	<p>The diagram illustrates the data collection process at a toll plaza. It shows a sequence of vehicles (represented by blue rectangles) moving through a toll barrier. Key recording points are marked: '진출시간 기록' (Exit time recording) at the barrier exit, '진입시간 기록' (Entry time recording) at the barrier entrance, and '대기행렬 발생시 정차시점부터 진입시간으로 기록' (Recording from the stop point of the queue as entry time). Two researchers, '조사원 1' and '조사원 2', are shown observing and recording these times.</p>
장소	동서울, 군자, 동수원, 북대전 톨게이트	
대상	일반식으로 통행요금을 징수하는 입·출구 차로와 자동요금징수 방식으로 징수하는 차로를 통해 통과하는 모든 차량들	
방법	조사 인력을 통한 육안조사	
조사 내용	<ul style="list-style-type: none"> - 차종 및 차량의 진입 시간, 진출 시간 조사 - 차량의 진입 시간은 서비스를 제공받기 위해 정차하는 시간으로 적용 - 진입 시간과 진출 시간을 통해 차량의 대기시간 산출 	

차량의 진입 시각과 진출 시각이다. 한편 현장 조사 대상지는 수도권의 동서울, 군자, 동수원과 충청권의 북대전 톨게이트이었으며 조사 대상지의 차로 시설개요와 현장 조사 방법에 대한 개요는 각각 <표 3>과 <표 4>와 같다.

본 연구에서 현장 조사한 자료를 통해 우리나라 톨게이트 자동요금징수시스템을 통과하는 차량들의 통과시간을 분석한 결과는 <표 5>와 같으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 현장조사를 통해 얻은 톨게이트 통과 차량들의 평균 통과시간은 대기행렬이론을 적용한 평균

통과시간에 비해 침두시 약 1~2초, 비침두시 약 1초 정도 평균 통과시간이 길게 나타났다. 그러나 동수원, 북대전 톨게이트의 자동요금징수 차로 등에서는 평균 통과시간이 짧게 나타났다.

- 톨게이트를 통과하는 교통량 규모가 큰 톨게이트에서는 차이가 크게 나타났는데, 침두시 동서울과 군자 톨게이트에서 약 2~3초, 비침두시 동서울 톨게이트에서 약 2초의 평균 통과시간이 길게 나타났다. 이는 교통량이 많은 경우에서 대기행렬이론이 교통량이 적은 경우보다 정확하지 않다는 것을 의미한다. 그러나 시간차이는 최대 약 3초 정도에 불과하여 차량 통과시간은 유사하다고 볼 수 있다.

〈표 5〉 현장 조사를 통한 통행요금 징수방식에 따른 차량 평균 통과시간 분석 결과
 (Table 5) Results of field survey analyses of vehicle passing times for different toll collection systems

		동서울		군자		동수원		북대전		
		입구	출구	입구	출구	입구	출구	입구	출구	
교통량(대/시)	침두	6,112	6,079	4,928	4,916	2,174	2,189	1,219	1,235	
	비침두	3,933	3,954	2,842	2,837	1,613	1,599	724	741	
이용률(%)		33.7	31.8	28.4	27.5	30.2	29.7	22.6	21.3	
분석 결과 (초)	침두시	일반식	8.69	13.82	9.08	14.34	6.30	16.24	7.11	16.10
		Hi-Pass	3.43	3.39	5.29	3.48	3.49	3.48	4.27	4.19
	비침두시	일반식	6.14	13.01	6.11	13.01	6.09	13.60	6.22	13.29
		Hi-Pass	3.26	3.25	3.70	3.27	3.37	3.37	3.77	3.74
조사 결과 (초)	침두시	일반식	10.29	15.83	13.04	15.97	6.71	15.82	7.53	15.94
		Hi-Pass	5.05	4.94	6.85	5.12	4.45	4.30	4.93	5.01
	비침두시	일반식	7.34	14.92	6.21	13.83	6.23	13.11	6.57	12.75
		Hi-Pass	4.33	5.12	4.93	4.66	4.47	3.89	3.94	4.27

본 연구에서는 분석결과의 정확도를 검증하기 위해 T-test를 통해 분석결과와 조사결과를 비교하여 분석을 수행하였다. T-test를 수행하기 위해 사용한 귀무가설(H_0)과 대립가설(H_1)은 다음과 같다.

- H_0 : 분석결과와 조사결과의 차이가 없다.
- H_1 : 분석결과와 조사결과의 차이가 있다.

본 연구에서 T-test를 수행한 결과 95% 신뢰구간에서 유의확률이 통계적 유의수준 0.05보다 크게 나타나 귀무가설(H_0)를 기각하지 않는다. 따라서 본 연구의 분석결과와 조사결과는 차이가 없는 것으로 나타났다. T-test 분석 결과는 <표 6>과 같다.

<표 6> T-test 분석 결과
<Table 6> Analysis of T-test

	유의수준	t	유의확률
일반식 첨두시	0.05	-2.326	0.053
일반식 비첨두시		-1.314	0.230
Hi-Pass 첨두시		-1.049	0.329
Hi-Pass 비첨두시		-1.173	0.279

한편 본 연구에서 적용한 대기행렬이론은 한 차로당 교통강도가 1.0을 넘지 않는 톨게이트에서만 적용할 수 있다. 다행히 한국도로공사에서는 톨게이트를 설계할 때 교통량과 차로 수를 적정 분배하여 설계하며 항상 차로당 교통강도가 1.0을 넘지 않도록 설계하고 있다[1,2,10]. <표 7>은 대상지의 톨게이트 교통강도를 조사한 결과이다.

<표 7> 본연구의 톨게이트 교통강도 조사 결과
<Table 7> Observed traffic intensities in this research

		1차로 교통강도			
		일반식 차로		Hi-Pass	
		첨두	비첨두	첨두	비첨두
동서울	입구	0.84	0.54	0.55	0.35
	출구	0.79	0.51	0.52	0.33
군자	입구	0.87	0.50	0.68	0.39
	출구	0.81	0.47	0.48	0.28
동수원	입구	0.51	0.38	0.35	0.26
	출구	0.79	0.58	0.34	0.25
북대전	입구	0.52	0.31	0.29	0.17
	출구	0.69	0.41	0.28	0.16

V. 결 론

본 연구에서는 고속도로 톨게이트에서 자동요금징수시스템을 설치했을 때 나타나는 편익이 차량들이 톨게이트를 통과하는데 걸리는 시간의 감소라고 판단하여 이론과 실제를 통해 분석하였다.

본 연구에서는 다음과 같은 연구 결과를 얻었다.

- 톨게이트로 진입하는 차량들의 입차 간격이 Poisson 분포를 따르고, 평균 서비스 시간이 지수 분포를 따를 때 다중서비스 대기행렬이론을 적용하여 차량들의 통과시간을 분석할 수 있다.

- 다중서비스 대기행렬이론을 통해 차량들의 평균 통과시간을 분석한 결과, 자동요금징수시스템이 설치된 차로의 요금징수 서비스 시간 차이로 인해 톨게이트 출구 쪽이 입구 쪽보다 통과시간 감소효과가 더 크게 나타났다.

- 자동요금징수시스템을 설치한다고 해서 항상 통과시간이 감소하는 것은 아니며, 자동요금징수시스템 차로에 많은 차량들이 몰리는 경우 오히려 해당 차로에서는 차량 통과시간이 증가하였다.

- 이와 대조적으로 자동요금징수시스템을 설치한 차로에 차량들이 적으면 일반식으로 요금을 징수하는 입·출구 차로에서 통과시간이 증가하였다.

- 끝으로, 우리나라 톨게이트 현장조사를 통해 차량들의 평균 통과시간을 분석한 결과, 대기행렬이론을 통해 분석한 결과와 약 1~3초 정도의 미소한 차이만을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] 이상건, 조용성, 오세창, “자동요금징수시스템(ETCS)의 시범사업 효과분석(하이패스 시스템을 중심으로),” *대한교통학회지*, 제19권, 제4호, pp.59~68, 2001. 8.
- [2] 국회예산정책처, “하이패스 사업평가,” 국회예산정책처, 2008. 11.
- [3] K.Wærsted, “Urban Tolling in NORWAY - Practical Experiences, social and environmental impacts and plans for future systems,” PIARC Seminar on Road

- Pricing with emphasis on Financing, Regulation and Equity, April 2005.
- [4] G. U. Padayhag, R. G. Sigua, "Evaluation of metro manila's electronic toll collection(ETC) system," *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol.5, October 2003.
- [5] D. Gross, J. F. Shortle, J. M. Thompson and C. M. Harris, "Fundamentals of queuing theory," A John Wiley & Sons, INC., Publication, Fourth Edition, August 2008.
- [6] D. K. Smith, "Calculation of steady-state probabilities of M/M queues: further approaches," *Journal of Applied Mathematics and Decision Sciences*, March 2002.
- [7] M. C. Pietrzyk and E. A. Mierzejewski, "Electronic toll and traffic management(ETTM) systems," *Transportation Research Board, NCHRP Synthesis Report 194*, January 1993.
- [8] 정희운, "경제성 분석을 이용한 Hi-Pass의 효율적인 운영방안에 관한 연구," 한양대학교 석사논문, 2002. 12.
- [9] 이호우, "대기행렬이론 - 확률과정론적 분석 -," 시그마프레스, 제3판, 2006. 1.
- [10] 한국도로공사, "도로설계요령, 제3-3편: 영업소," 한국도로공사, 2009. 2.

저자소개



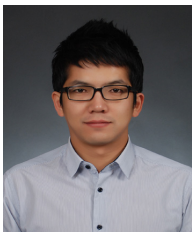
성 현 진 (Sung, Hyunjin)

2009년 3월 ~ 2011년 2월 : 서울시립대학교 공학석사 졸업 (교통공학전공)
 2003년 3월 ~ 2009년 2월 : 서울시립대학교 공학사 졸업 (교통공학전공)



최 재 성 (Choi, Jaisung)

1990년 ~ 현재 : 서울시립대학교 교통공학과 교수
 1988년 2월 ~ 1990년 8월 : 한국건설기술연구원 도로연구실 실장
 1984년 3월 ~ 1987년 12월 : 미국 위스컨신-매디슨 주립대 토목공학과 (공학박사)
 1982년 3월 ~ 1984년 2월 : 서울대학교 공학석사 졸업 (토목공학과)
 1975년 3월 ~ 1982년 2월 : 서울시립대학교 공학사 졸업 (토목공학과)



김 상 업 (Kim, Sangyoup)

2011년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 교통공학과 연구교수
 2006년 3월 ~ 2011년 2월 : 서울시립대학교 공학박사 졸업 (교통공학전공)
 2004년 3월 ~ 2006년 2월 : 서울시립대학교 공학석사 졸업 (교통공학전공)
 1998년 3월 ~ 2004년 2월 : 서울시립대학교 공학사 졸업 (교통공학전공)