

CAV 혼재 상황(Mixed Traffic)에서의 교통혼잡세 추정 방안 연구

김형준¹ · 이우재

¹서울대학교 건설환경공학부 교통연구실

Research on Estimation Method of Traffic Congestion Tax in Mixed Traffic Environment

KIM, Hyung-Jun¹ · Lee, Woo-Jae¹ ·

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Republic of Korea

Abstract

There is a difference between the User Equilibrium (UE) state, where each transport user minimizes their travel time, and the System Optimum (SO) state. The SO state reduces traffic congestion and utilizes time and resources efficiently, making it crucial to bridge the gap between these two states in traffic engineering. Meanwhile, with the recent advancements in Autonomous Vehicle (AV) technology, the importance of infrastructure and environments where autonomous vehicles can coexist with Human Driven Vehicles (HDVs) has been emphasized. Therefore, this study aims to estimate the appropriate traffic congestion tax to achieve the SO state by introducing congestion pricing in a mixed traffic environment where Connected Autonomous Vehicles (CAVs) follow the SO and HDVs follow the UE.

To achieve this, the study simulates a mixed scenario of CAVs and HDVs as a Bi-Level Problem and develops a model for traffic assignment based on the CAV ratio using Gradient Projection. By applying this model to the Sioux Falls Network with daily traffic volumes, it was found that if the CAV ratio exceeds a certain level, both CAVs and HDVs benefit in terms of Total Cost compared to the current situation, even with congestion tax imposed on HDVs. The study presents three methods to estimate the appropriate congestion tax by calculating the travel time difference between CAVs and HDVs and converting this difference into a reasonable travel time value.

First, the average congestion tax estimation method allows for a simple and uniform calculation of congestion tax but does not fully consider the beneficiary-pays principle. The second method, which estimates individual congestion tax for specific O-D pairs, has the advantage of fully considering the beneficiary-pays principle but did not show a clear trend according to the CAV ratio. Lastly, the method of estimating congestion tax based on the entry and exit points of zones was able to estimate congestion tax for the O-D pairs (7, 13) and (13, 7) as specific amounts respectively.

Keywords: Autonomous Vehicles, User Equilibrium (UE) State, System Optimum (SO) State, Traffic Congestion Tax, Mixed Traffic environment

초록

교통 이용자 개인의 통행시간을 최소화 하는 이용자 평형(User Equilibrium, UE) 상태와 사회적 최적(System Optimum, SO) 상태는 차이가 있다. 사회적 최적 상태에서는 교통 혼잡이 감소하고 시간과 자원을 효율적으로 활용할 수 있기 때문에 두 상태 사이의 간극을 줄이는 것은 교통 공학에서 중요한 과제 중 하나이다. 한편, 최근 자율주행 자동차(Autonomous Vehicle, AV)기술이 발전하면서 자율주행 자동차가 일반 자동차(Human Driven Vehicle, HDV)와 도로 위에 함께 다닐 수 있는 환경 및 인프라의 중요성이 강조되고 있다. 따라서 본 연구에서는 CAV(Connected Autonomous Vehicle)는 SO를, HDV는 UE를 따르는 상황을 가정하여 두 종류의 차량이 함께 운행되는 CAV 혼재 상황에서, 교통혼잡세를 도입하여 사회적 최적 상태로 만드는 적정 교통혼잡세

를 추정하는 방안을 마련하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 CAV와 HDV가 혼재되어 있는 상황을 Bi-Level Problem으로 가정하여 모사하고, Gradient Projection을 활용하여 CAV 비율(e)에 따라 CAV와 HDV의 통행을 배정하는 모델을 개발하였다. 이 모델을 활용하여 Sioux Falls Network에 일일 교통량을 대입함으로써 CAV 비율이 $e_{cr} = 0.245$ 를 넘을 경우 교통혼잡세를 HDV에 부과하여도 CAV와 HDV 모두 $e = 0$ 인 상황보다 Total Cost 측면에서 이득을 본다는 것을 알 수 있었다. 또한, CAV와 HDV의 소요 시간 차이를 구하고, 두 시간 차이를 적정 통행 시간가치로 환산하여 적정 교통혼잡세를 추정하는 3가지 방법을 제시하였다. 첫 번째로, 평균적 교통혼잡세 추정 방안에서는 간단하고 일괄적으로 교통혼잡세를 산정할 수 있으나 수혜자 지불 원칙을 충분히 고려하지 못했다. 두 번째 방안인 특정 O-D에 대한 개별적 교통혼잡세 추정 방안은 수혜자 지불 원칙을 충분히 고려할 수 있다는 장점이 있으나, CAV 비율에 따른 특정 경향성이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 마지막으로 Zone의 진입 지점과 진출 지점에 따른 교통혼잡세 추정 방안은 (7, 13)과 (13, 7)의 O-D쌍에 대해서 각각 1575원, 1510원으로 교통혼잡세를 추정할 수 있었다.

주요어: 자율주행 자동차, 이용자 평형 상태, 사회적 최적 상태, 교통혼잡세, 혼재 상황

서론

교통 혼잡세는 수혜자 지불 원칙에 따라 개인이 네트워크에 혼잡을 야기한 만큼 지불해야 한다. 하지만, 개인화된 교통 혼잡세 산정을 위해서는 개별 차량의 이동 경로 정보를 알아야 한다. 또, 개별 차량 경로 정보를 모두 알 수 있더라도 방대한 경로 정보를 이용해 실시간으로 교통 혼잡세를 산정하여 부과하기에 어려움이 있다. 이러한 이유로 현재 교통 혼잡세는 특정 구간을 지나는 차량에 대해 교통 혼잡세를 부과하고 있다. 교통 혼잡세의 예시로 국내에는 남산터널, 국외에는 싱가포르의 ERP(Electronic Road Pricing)가 있다. 남산터널 교통 혼잡세의 경우 도심 방향으로 진입하는 차량에 대해서 교통 혼잡세를 부과하고, 강남 방면으로 나가는 차량에 대해서는 교통 혼잡세를 부과하지 않고 있다. ERP의 경우 도로의 혼잡도, 시간대, 구간에 따라 혼잡세를 책정하여 특정 시간에 해당 구간을 지나는 차량에 대해 교통 혼잡세를 부과하고 있다.

최근 자율주행 자동차(Autonomous Vehicle, AV)기술이 발전하면서, 자율주행 자동차가 도입될 경우 나타날 긍정적인 효과에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히, CAV(Connected Autonomous Vehicle) 도입에 따른 다양한 효과에 대한 연구가 진행되고 있다. 한 번에 모든 차량이 CAV가 될 수는 없기 때문에, CAV와 HDV(Human Driven Vehicle)이 혼재되어 있는 경우에 대한 연구도 진행되고 있다(Guo et al., 2021). CAV가 도입될 경우, 탑승자는 이동할 목적지를 입력해야 하고, 정책 결정자는 해당 차량의 출발지와 목적지를 알 수 있고, 개인화된 교통 혼잡세 산정이 가능하다.

Wardrop, J. G.에 따르면 교통 흐름 평형 상태에는 SO(System Optimum)와 UE(User Equilibrium) 두 가지 상태가 있다. UE는 각 차량이 자신의 목적지까지 가장 빠르게 가는 경로를 선택하여 균형을 이루는 상태이다. UE 상태에 대한 수식은 다음과 같다.

$$\min \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} T(f) df \quad (1-1)$$

한편, SO는 시스템 전체의 총소요 시간(Total Travel Time)을 최소화하는 균형 상태이다. SO에 대한 수식은 다음과 같다.

$$\min \sum_{a \in A} x_a T(x_a) \quad (1-2)$$

또한, 식 (1-2)를 적분 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\min \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} MT(f)df \quad (1-3)$$

SO 차량은 시스템 전체 소요 시간을 최소화하기 위해 같은 출발지-도착지 쌍을 가지는 UE 차량보다 시간상으로 손해를 보게 된다. 이에 따라 경로 기반으로 교통 혼잡세를 산정하기 위해 같은 O-D(Origin-Destination)을 가지는 SO 차량과 UE 차량의 통행 시간 차이를 바탕으로 교통 혼잡세를 부과할 수 있다. 적정 교통혼잡세를 부과하여 SO 차량과 UE 차량의 Total Cost의 평형을 맞추어주면 교통 흐름이 SO 상태에 가까워질 수 있다. SO 상태에서는 교통 혼잡이 감소하고 시간과 자원을 효율적으로 활용할 수 있으며, 물류 운송 효율성이 증대되어 전체적인 경제에 긍정적인 영향을 끼칠 수 있기 때문에 적정 교통혼잡세를 추정하는 것은 중요하다.

본 연구의 목표는 (1)CAV와 HDV가 혼재되어 있는 상황에 대한 정적 통행 배정(Static Traffic Assignment) 모델을 구현하고, (2)구현한 모델을 이용해 적정한 교통혼잡세 추정 방안을 모색해 보는 것이다. 본 연구에서는 적정한 교통혼잡세를 추정하기 전에 어떠한 상황에서 교통혼잡세를 부과하였을 때 CAV와 HDV 모두 이득을 보는지 알아볼 것이다. 이를 위하여 CAV의 비율이 0일 때의 평균 통행시간과 비교하였을 때 CAV가 손해를 보지 않는 CAV 혼합 비율인 CAV 비율 임계치(e_{cr})를 추정하여 볼 것이다. 이후, 적정한 교통혼잡세 추정 방안을 평균적 교통혼잡세 추정 방안, 특정 O-D에 대한 개별적 교통혼잡세 추정 방안, Zone의 진입 지점과 진출 지점에 따른 교통 혼잡세 추정 방안으로, 총 세 가지 방안으로 나누어서 제시할 것이다.

기존 문헌 고찰

O-D가 같은 CAV와 HDV의 경로 통행 시간의 차이를 구하기 위해서 경로 기반 통행 배정 모델이 필요하다. Jayakrishnan, R., et al.(1994)의 연구에서 Newton's method를 이용한 Gradient Projection을 통해 경로 기반 통행 배정 모델을 소개한다.

Guo, et al.(2021)에서는 SO를 따르는 CAV와 UE를 따르는 HDV가 혼재되어 있는 상황에서 Dynamic Traffic Assignment 모델을 DQ(Double Queue)를 이용하여 구현하였다. 해당 모델에서는 CAV와 HDV가 혼재되어 있는 상황을 CAV가 upper level, HDV가 lower level인 bi-level problem으로 가정하여 구현하였다. 해당 연구에서 다양한 CAV 비율에 따라 통행 배정을 해본 결과, CAV의 비율에 따라 HDV와 CAV 간의 통행 시간 차이가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었고, 이를 통해 CAV 비율에 따른 통행 배정 모델의 필요성을 보였다.

통행 배정 모델 구현 방법론

본 연구에서는 몇 가지 가정을 바탕으로 CAV와 HDV가 혼재되어 있는 상황에서의 통행 배정 모델을 구현하였다. 해당 모델은 기존 문헌에서 참고하여 Newton's method를 이용한 Gradient Projection을 통해 경로 기반 통행 배정 모델을 구현하여 각 O-D에 대해 CAV와 HDV의 최적 상태에서의 경로를 파악할 수 있다. 또, Bi-Level Problem으로 가정하여 CAV와 HDV가 혼재되어 있는 상황을 모사하여 CAV비율(e)에 따라 CAV와 HDV의 경로 배정이 가능하게 하였다. 이 논문에서 사용한 표기법에 대한 설명은 부록 A에 정리하였다.

1. 주요 가정

본 연구에서는 CAV는 SO를 따르고, HDV는 UE를 따른다고 가정한다. Guo, et al.(2021)에서는 동적인 상황에서의 통행 배정 모델을 만들고, CAV 도입에 따른 도로용량 증가 효과를 고려하였다. 본 연구에서는 정적인 상황에서의 통행 배정 모델을 만들고, CAV와 HDV의 경로 시간 차이를 알아내는 것이 목적이기 때문에 도로용량 증가에 따른 효과는 고려하지 않는다. 또 링크에서의 VDF(Volume-Delay Function)으로는 BPR Function을 사용하였다.

$$T(x) = t_0(1 + 0.15(\frac{x}{C})^4) \quad (2-1)$$

$$MT(x) = (xt_0(1 + 0.15(\frac{x}{C})^4))' = t_0(1 + 0.75(\frac{x}{C})^4) \quad (2-2)$$

2. Gradient Projection

경로 기반 통행 배정 모델에서 UE와 SO에 대한 목적함수는 다음과 같다.

$$F_1 = \sum_{a \in A} \int_0^{\sum_{\pi \in \Pi} \delta_{i,j}^{\pi} h^{\pi}} T(f) df \quad (2-3), \quad F_2 = \sum_{a \in A} \int_0^{\sum_{\pi \in \Pi} \delta_{i,j}^{\pi} h^{\pi}} MT(f) df \quad (2-4)$$

BPR Function의 도함수는 항상 양의 값을 가지기 때문에, 두 목적함수 모두 Convex 함수인 것은 자명하다. 또, 두 목적함수 모두 두 번 미분 가능하다. 따라서 두 목적함수의 local optimum은 global optimum이다. 이때, 통행량이 음수가 될 수 없고, 경로 통행량의 합이 O-D 통행량과 같아야 한다는 제약 조건이 있다. 따라서 Newton's method를 이용한 Gradient Projection을 통해 Iterative한 방법으로 최적해를 구할 수 있다.

$$h_{i+1}^{\pi} = h_i^{\pi} - \alpha \frac{\nabla F(h_i^{\pi})}{\nabla^2 F(h_i^{\pi})} \quad (2-5)$$

Gradient Projection 알고리즘의 순서는 다음과 같다.

- (1) 해집합 Π 초기화
- (2) 각 O-D별 최소 시간 경로(π_{rs}^*) 탐색
 - 경로 탐색은 우선순위큐를 이용한 dijkstra algorithm을 사용하였다.
- (3) $\pi_{rs}^* \notin \Pi^{rs}$ 인 경우, π_{rs}^* 를 Π^{rs} 에 추가
- (4) 경로 통행량 업데이트
- (5) 링크 통행량 업데이트
- (6) 2~5 과정 반복

(5)의 과정에서 식(2-5)를 이용해 링크 통행량을 업데이트하기 위해 $\nabla F_1(h_i^{\pi})$ 와 $\nabla^2 F_1(h_i^{\pi})$ 를 유도하면 다음과 같다.

최소시간 경로의 통행량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h^{\pi^*} = d^{rs} - \sum_{\pi \in \Pi^{rs} : \pi \neq \pi_{rs}^*} h^{\pi} \quad (2-6)$$

식 (2-3,4)를 (2-3,4)에 대입하여 경로 통행량 h^{π} 에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\nabla F_1(h^{\pi}) = \frac{\partial F_1}{\partial h^{\pi}} = \sum_{(i,j) \in A} (\delta_{ij}^{\pi} - \delta_{ij}^{\pi^*}) T_{ij} \left(\sum_{\pi' \in \Pi} \delta_{ij}^{\pi'} h^{\pi'} \right) = \sum_{(i,j) \in A} (\delta_{ij}^{\pi} - \delta_{ij}^{\pi^*}) T_{ij}(x_{ij}) \quad (2-7)$$

$$\nabla F_2(h^{\pi}) = \sum_{(i,j) \in A} (\delta_{ij}^{\pi} - \delta_{ij}^{\pi^*}) MT_{ij} \left(\sum_{\pi' \in \Pi} \delta_{ij}^{\pi'} h^{\pi'} \right) = \sum_{(i,j) \in A} (\delta_{ij}^{\pi} - \delta_{ij}^{\pi^*}) MT_{ij}(x_{ij}) \quad (2-8)$$

식 (2-7,8)을 h^{π} 에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\nabla^2 F_1(h^{\pi}) = \frac{\partial^2 F_1}{\partial h^{\pi^2}} = \sum_{(i,j) \in A_3 \cup A_4} \frac{dT_{ij}}{dx_{ij}} \quad (2-9)$$

$$\nabla^2 F_2(h^{\pi}) = \frac{\partial^2 F_2}{\partial h^{\pi^2}} = \sum_{(i,j) \in A_3 \cup A_4} \frac{dMT_{ij}}{dx_{ij}} \quad (2-10)$$

위의 식을 식(2-5)에 대입하면 h_{i+1}^{π} 를 구할 수 있다. 하지만, 경로 교통량인 h_{i+1}^{π} 은 음수가 될 수 없기 때문에, h_{i+1}^{π} 의 계산 결과가 음수가 나오면 0으로 업데이트 해준다. $h_{i+1}^{\pi^*}$ 의 값은 식 (2-6)을 통해 업데이트 해준다. 수식들의 유도 과정은 부록 B에 정리하였다.

3. 혼재 상황 구현

두 목적함수 각각을 최소화하는 방향으로 경로 선택을 하는 HDV와 CAV가 혼재되어 있는 상황은 Bi-Level Problem으로 모사하였다. 본 연구에서는 CAV를 upper level로, HDV를 lower level로 두고 그림 2-1의 순서로 통행 배정을 진행하였다. 테두리가 점선인 부분에서 Gradient Projection을 이용해 각 목적함수에 맞는 최적화를 진행하였다.

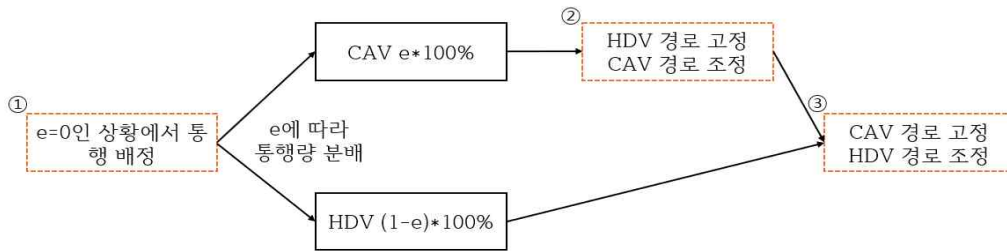


Figure 1. Schematic diagram of Bi-Level Problem

①, ②, ③에서 Gradient Projection을 통해 최적화를 진행하는 과정에서, 식(2-5)의 a 값은 다음 표와 같이 설정하여 각각 300번의 iteration을 진행하였다.

Table 1. Step Size a at each sequences

각 단계에서의 step size a (i : iteration number)	
①	$0.13 \cdot 0.98^i$
②	$0.002 \cdot 0.99^i$
③	$0.002 \cdot 0.99^i$

https://github.com/shadzig152/static_mixed_traffic_assignment에서 실제 구현한 코드를 확인할 수 있다.

4. 네트워크

본 연구에는 Sioux Falls Network를 사용하였다. 네트워크의 링크 용량 데이터와 O-D 통행량 데이터는 Larry, J., et al.(1952)의 연구에서 사용된 데이터를 사용하였다. O-D 통행량 데이터는 혼잡 상황을 야기하기 위해 해당 연구에서 사용한 일일 O-D 통행량 데이터의 100배 데이터를 사용하였다. 네트워크 데이터에 대한 구체적인 내용은 부록 C에 정리하였다.

분석결과

1. CAV(Connected Autonomous Vehicle) 비율 임계치 e_{cr} 추정

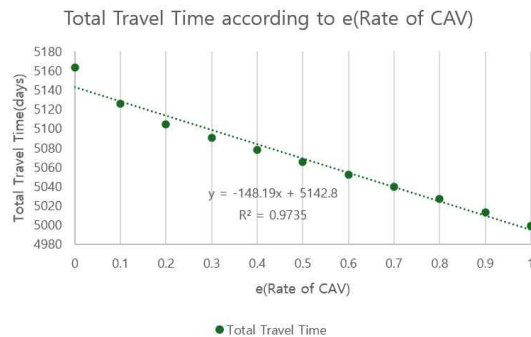


Figure 2. Total Travel Time according to Rate of CAV

Sioux Falls Network에서 평균 교통량을 구현하였을 때 도로 위 CAV의 비율(e)에 따른 모든 차량의 소요 시간(Travel Time)을 더한 총소요 시간(Total Travel Time)을 그래프로 나타내면 위와 같이 나타나진다. CAV의 비율에 따른 총소요 시간을 $y(\text{min})$ 로, CAV의 비율을 x 로 선형 회귀 분석을 해보면 $y = -148.19x + 5142.8$ 로 CAV의 비율이 커질수록 총소요 시간이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 특히, 이 선형 회귀의 상관계수(R^2) 값이 0.9735로 1과 근사한 값을 갖는 것을 보아 총소요 시간 값이 e 의 값에 대하여 유의미하게 선형적으로 줄어든다고 할 수 있다. 이는 CAV의 비율이 커질수록 SO를 따르는 차량의 비율이 커지므로 도로 위의 교통 혼잡이 줄어들어 전체적인 총소요 시간이 줄어드는 것으로 판단된다.

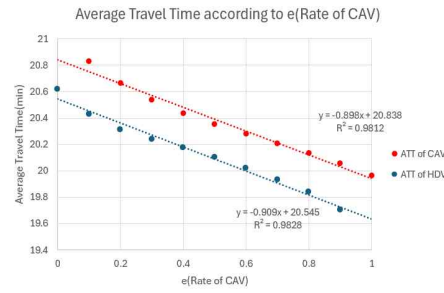


Figure 3. Average Travel Time of CAV and HDV according to Rate of CAV

같은 상황에서 차량의 종류별로 나누어 결과를 정리하였다. 도로 위 CAV의 비율에 따른 모든 CAV와 모든 HDV의 각각의 평균 소요 시간(Average Travel Time)을 구하여 위와 같이 그래프로 나타내면 위와 같다. 이때 CAV의 평균 소요 시간은 도로 위 모든 CAV 차량의 소요 시간의 총합을 CAV 차량 대수로 나눈 값을 사용하였다. HDV의 평균 소요 시간 또한 같은 방식으로 구하여 그래프로 표기하였다. 각각의 경우에 대하여 평균 소요 시간을 $y(\text{min})$ 로, CAV의 비율을 x 로 선형회귀 분석을 해보면, CAV와 HDV 각각의 경우 $y = -0.898x + 20.838$, $y = -0.909x + 20.545$ 로 나타났고, 상관계수(R^2) 값이 각각 0.9812와 0.9828로 1과 근사한 값을 갖는다. 즉, 그래프에서 보이는 것처럼 실제로도 CAV와 HDV의 평균 소요 시간 모두 도로 위 CAV의 비율(e)이 커짐에 따라 선형적으로 줄어드는 것을 알 수 있다. 이 또한 앞서 언급한 전체 차량의 총소요 시간이 선형적으로 줄어드는 것과 같은 원인에 의한 효과로 판단된다.

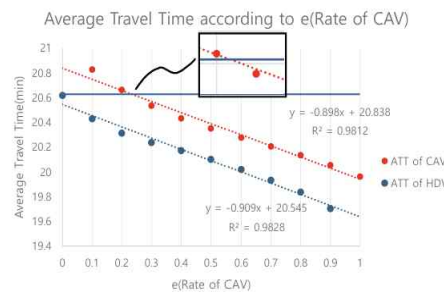


Figure 4. Average Travel Time of CAV and HDV according to Rate of CAV

이때, $e = 0$ 일 때의 평균 통행시간과 비교하였을 때 CAV도 손해를 보지 않는 CAV 혼합 비율인 e_{cr} 은 그래프 2에서 구한 CAV와 HDV의 선형회귀식을 활용하여 추정할 수 있다. $e = 0$ 인 경우 HDV의 평균 소요 시간은 20.62분이므로, CAV의 선형회귀식인 $y = -0.898x + 20.838$ 가 20.62보다 낮아지는 경계값인 e_{cr} 을 구하면 $e_{cr} = 0.245$ 로 나타난다. 즉, 도로 위의 CAV 비율이 24.5%보다 작은 혼재 상황에서는 SO를 따르는 CAV 차량은 현재 상태인 $e = 0$ 인 상황보다 Travel Time 측면에서 손해를 보게 된다. 따라서, 이 경우 HDV 차량에 교통혼잡세를 부과하여 CAV와 HDV의 Total Cost의 평형을 맞추면 현재 상황인 $e = 0$ 인 상황보다 두 차량 모두 Total Cost 측면에서 손해를 보게 된다. 반대로, 도로 위의 CAV 비율이 24.5%보다 큰 혼재 상황에서는 CAV 차량이 현재 상태보다 Travel Time이 작게 나타나고, 교통혼잡세를 부과하여 평형을 맞추면 현재 상태보다 CAV와 HDV 모두 Total Cost 측면에서 이득을 보는 것을 알 수 있다.

아래의 표와 같이 예시를 들면, $e = 0.1$ 인 상황에서는 CAV 차량의 평균 소요 시간이 20.83분, HDV는 20.43분으로 나타나기 때문에 시간 차이를 금전 단위로 환산한 값인 133원의 교통혼잡세

를 HDV에 부과하여 Total Cost가 20.83분으로 평형을 이루게 되는데, 이때의 평형점인 20.83분은 $e = 0$ 일 때의 Travel Time인 20.62분보다 크게 형성되어 두 차량 모두 손해이다. 하지만, $e = 0.5$ 인 상황에서는 CAV 차량의 평균 소요 시간이 20.35분, HDV는 20.10분으로 나타나기 때문에 83원의 교통혼잡세를 HDV에 부과하여 Total Cost가 20.35분으로 평형을 이루게 되는데, 이때의 평형점은 20.62분보다 작아 두 차량 모두 이득을 볼 수 있다.

이때 교통혼잡세를 추정하기 위해 사용하는 교통 이용자의 통행시간가치는 한국개발연구원 KDI의 2012년도 정책연구 보고서 “예비타당성조사 수행을 위한 통행시간가치 산정에 관한 연구”에 의거하여 1시간당 2만 원으로 책정하였다.

Table 2. Total Cost at $e=0.1$, $e=0.5$ condition

	ATT of CAV	ATT of HDV	Difference	CongestionTax	Total Cost
$e = 0.1$	20.83(min)	20.43(min)	0.40(min)	133원	20.83(min)
$e = 0.5$	20.35(min)	20.10(min)	0.25(min)	83원	20.35(min)

2. 평균적 교통혼잡세 추정

앞서 구한 CAV와 HDV의 CAV 비율에 따른 평균 소요 시간의 차이를 이용하여 평균적인 교통혼잡세를 추정하면 아래와 같은 그래프로 나타낼 수 있다. $e = 0$, $e = 1$ 일 때에는 각각 CAV와 HDV가 존재하지 않는 상황이기 때문에 비교 대상이 없어 그래프에서 제외하였다. 이때 1시간당 2만 원으로 통행 시간가치를 환산하면, $e = 0.1$ 일 때 평균 교통혼잡세가 133원으로 나타났고 CAV 비율이 증가할수록 감소하다가 $e = 0.5$ 일 때 83원으로 최소치를 찍은 뒤, 다시 증가하여 $e = 0.9$ 일 때 117원으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

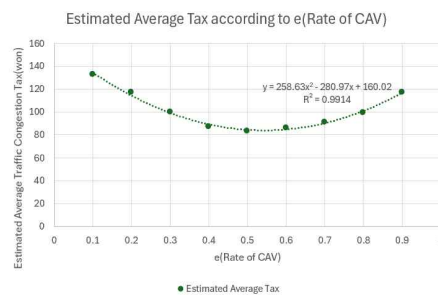


Figure 5. Estimated Average Tax according to Rate of CAV

Sioux Falls Network의 크기에 비하여 추정 교통혼잡세의 크기가 작은 것을 볼 수 있는데, 이는 O-D에 따라 특정 O-D는 CAV와 HDV의 경로 차이가 생기지 않아 평균 소요 시간 차이가 없는 경우가 잦아 교통혼잡세가 0이 되는 구간이 많기 때문으로 추정된다. 이 결과의 추세선을 그려보면 아래로 볼록한 2차 함수와 상관계수가 0.9914로 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 이에 상관 여부를 알아보기 위해 교통량을 달리한 경우에서도 같은 방법을 사용하여 CAV 비율에 따른 교통혼잡세를 추정해 보았다.

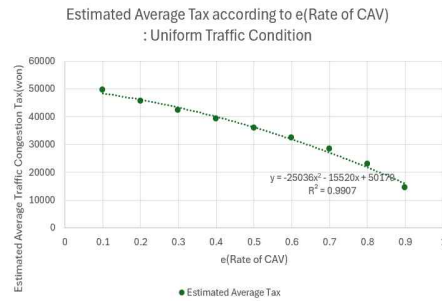


Figure 6. Estimated Average Tax according to Rate of CAV in Uniform Traffic Condition

위의 결과는 Sioux Falls Network 안의 교통량을 모든 O-D에 대해 균일하게 교통량을 가정하였을 때의 CAV 비율에 따른 추정 교통혼잡세 결과이다. 각 O-D의 교통량은 평균 하루 Sioux Falls Network의 교통량 중 가장 교통량이 많은 O-D의 교통량인 하루 4400대로 설정하였다. 이 경우 처음의 결과와 같은 경향성이 나타나지 않았다. 즉, CAV 비율에 따른 추정 교통혼잡세는 각 O-D의 교통량 분포에 따라 경향성이 다르게 나타남을 알 수 있다.

3. 같은 O-D쌍을 가지는 차량에 대한 개별적 교통혼잡세 추정

평균적으로 교통혼잡세를 추정하는 방법은 간단하고 일괄적으로 교통혼잡세를 산정할 수 있으나, 이는 본 연구의 목적이었던 수혜자 지불 원칙을 충분히 고려하였다고 볼 수 없다. 따라서, 각각의 O-D에 대하여 차량 개별적으로 교통 흐름에 악영향을 끼치는 만큼을 고려하여 교통혼잡세를 부과하기 위하여 특정 O-D에 대해 개별적으로 결과를 도출해보았다. 이때 교통 흐름에 큰 영향을 끼치는 O-D를 선택하기 위하여 CAV와 HDV의 경로 선택에 큰 차이가 나 소요 시간 차이가 크게 나는 O-D인 (2, 17), (17, 2), (2, 19), (19, 2)의 쌍을 선택하였다. 전에 구한 방식과 같은 방법으로 CAV의 비율에 따른 CAV와 HDV의 평균 소요 시간, 교통혼잡세 추정치를 다음과 같이 산출할 수 있었다.

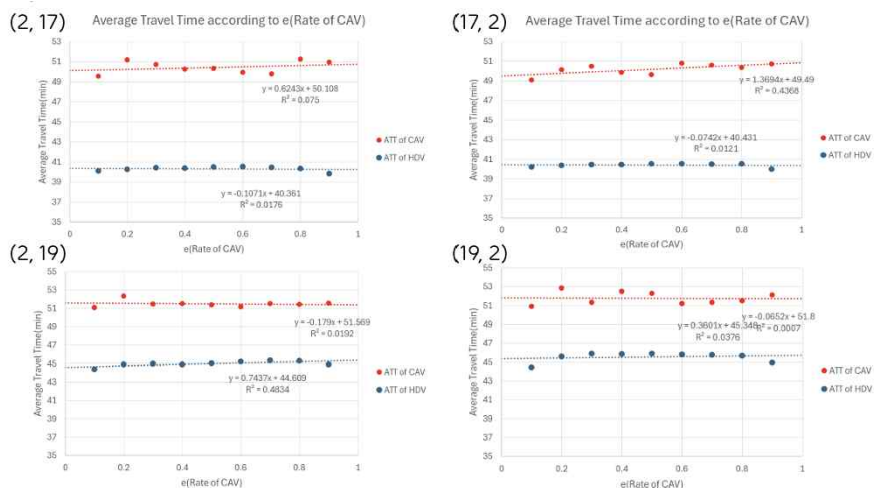


Figure 7. Average Travel Time according to Rate of CAV in specific O-D

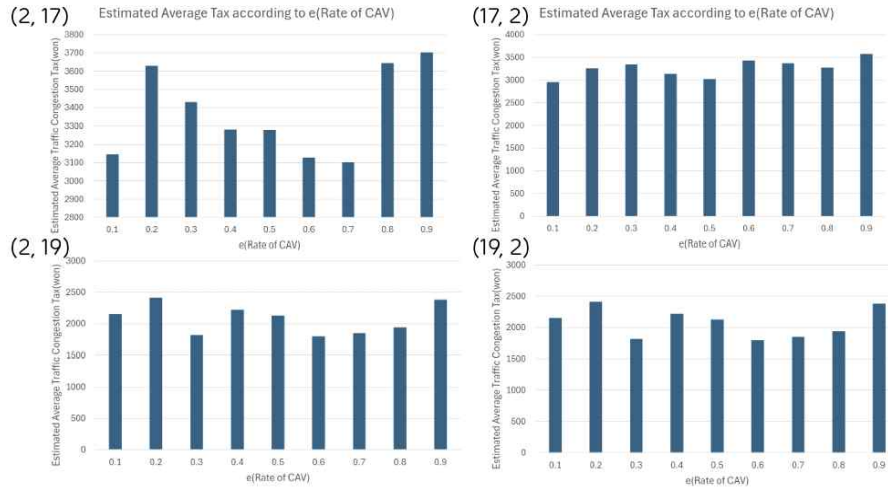


Figure 8. Estimated Average Tax according to Rate of CAV in specific O-D

각각의 O-D쌍에 대하여 CAV의 비율에 따른 적정 교통혼잡세를 위와 같이 추정하는 데 성공하였으나, 앞서 평균적으로 교통혼잡세를 구할 때와는 달리 교통혼잡세는 물론이고 CAV와 HDV의 평균 소요 시간 또한 CAV 비율에 따른 특정 경향성이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 CAV가 SO를 따라 경로를 선택하는 과정에서 Sioux Falls Network를 지나는 전체 교통량의 총소요 시간을 최소로 하는 방향으로 경로를 설정하기 때문에, CAV의 비율이 커질수록 전체 총소요 시간은 전에 확인했던 바와 같이 선형적으로 줄어드는 모습을 보이거나 특정 O-D의 총소요 시간과는 연관성이 없는 것으로 판단할 수 있다. 즉, CAV는 해당 O-D를 지나는 총소요 시간이 늘어나더라도, 전체 차량의 총소요 시간이 줄어드는 경로로 경로를 설정하기 때문에 직접적인 연관성을 가지지 못한다. 이는 Sioux Falls Network 안의 교통량을 모든 O-D에 대해 균일하게 교통량을 가정하였을 때도 동일하게 나타난다. 실제로, (6, 16)에서는 CAV의 비율이 증가하여도 CAV와 HDV의 평균 소요 시간 모두가 감소하지 않고 오히려 증가하는 모습을 보였고, (14, 16)에서는 CAV의 비율이 커짐에 따라 CAV의 경로가 계속 변경되는 모습을 나타내 선형적인 경향성을 보이지 않았다.

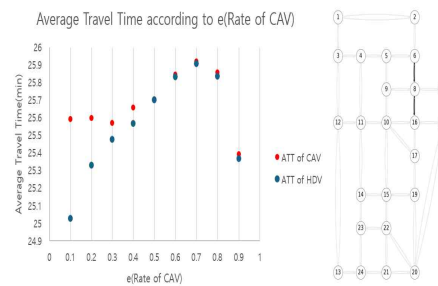


Figure 9. Average Travel Time according to Rate of CAV in (6, 16)

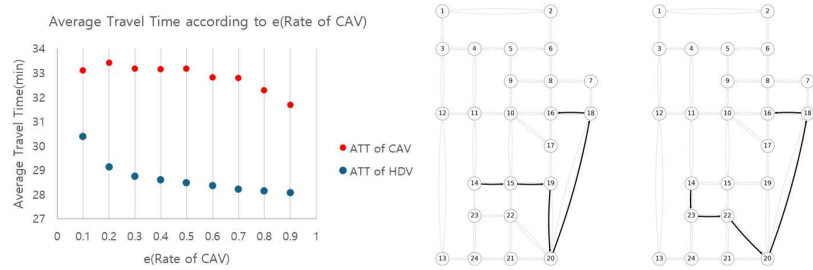


Figure 10. Average Travel Time according to Rate of CAV and two types of CAV Route in (14, 16)

4. Zone의 진입 지점과 진출 지점(In-Out)에 따른 교통혼잡세 추정

기존의 진입 지점만을 고려한 교통혼잡세와는 달리 차량의 진입 지점과 진출 지점에 따라 교통혼잡세를 추정하는 방법을 제시하기 위해서 Sioux Falls Network를 다음과 같이 간단히 도식화하였다.

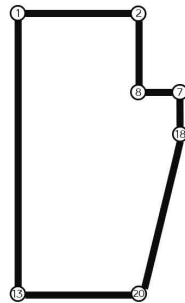


Figure 11. Brief Zone of Sioux Falls Network

보다 Sioux Falls Network에 맞는 정확한 진입, 진출 지점에 따른 교통혼잡세 추정치를 구하기 위해선 Sioux Falls Network 외곽의 전체 12개의 노드에 대한 O-D쌍 각각의 교통혼잡세를 구해야 하나, 간단히 Zone의 진입, 진출 지점에 따른 교통혼잡세 추정 방법에 대한 효율만 알아보기 위하여 다음과 같은 7개의 노드로 구성된 Network로 설정하였다. 또한, 도로 위 CAV의 비율은 앞서 구한 e_{cr} 값인 0.245를 넘는 $e = 0.3$ 인 경우를 가정하였다.

위의 7개의 노드로 구성된 O-D에 대해서 CAV와 HDV의 평균 소요 시간 차이에 따른 적정 교통혼잡세를 추정해본 결과 (7, 13)과 (13, 7)의 O-D쌍에 대해서만 평균 소요 시간 차이가 다음과 같이 나타났고, 나머지 O-D쌍에 대해선 차이가 나타나지 않았다. 즉, (7, 13)과 (13, 7)의 In-Out쌍을 가지는 HDV만 SO를 따르는 CAV와 비교하여 교통혼잡을 야기시켜 교통혼잡세 부과 필요성이 있었고, 다른 In-Out쌍을 가지는 HDV는 CAV와 경로 차이가 나지 않아 교통혼잡세가 필요하지 않았다. 한국의 남산 1, 3호 터널에 징수되는 교통혼잡세가 2000 원이고, 싱가포르 ERP(Electronic Road Pricing)는 아침과 저녁의 러시아워 때 1달러씩 교통혼잡세가 부과되는 것과 비교하여, 여기서 추정된 1500 원 정도의 교통혼잡세는 교통 이용자들의 정서에도 적절한 정도의 세금일 것이라 예상할 수 있다.

Table 3. Estimated Congestion Tax in (7, 13) and (13, 7)

	ATT of CAV	ATT of HDV	Difference	Congestion Tax
(7, 13)	46.53(min)	41.81(min)	4.72(min)	1575원
(13, 7)	46.10(min)	41.57(min)	4.53(min)	1510원

결론

본 연구에서는 자율주행 자동차의 개발이 지속될수록 도로 위의 CAV 비율이 계속하여 증가함에 따라 CAV와 HDV가 혼재된 상황에서, CAV는 System Optimum을 따르고 HDV는 User Equilibrium을 따른다 가정하였을 때 교통 흐름을 SO으로 이끌기 위한 적정 교통혼잡세를 추정하기 위한 방안을 마련하고자 하였다. 이를 위하여 도로 위의 CAV의 비율에 따라 CAV와 HDV의 경로를 확정하는 통행 배정 모델을 개발하였다.

적정 교통혼잡세 추정 방안 제시에 앞서, 어떠한 상황에서 교통혼잡세를 부과하였을 때 CAV와 HDV 모두 이득을 보는지 알아보기 위하여 $e = 0$ 일 때의 평균 통행시간과 비교하였을 때 CAV도 손해를 보지 않는 CAV 비율 임계치인 e_{cr} 를 $e_{cr} = 0.245$ 로 구하였다. 즉, 도로 위의 CAV 비율이 24.5% 이상이 될 때 CAV와 HDV 모두 현재 상태보다 Total Cost 측면에서 이득을 보지만, 24.5%보다 비율이 작은 경우에선 교통혼잡세를 부여하면 SO으로 평형이 이동하긴 하나 두 차량 모두 Total Cost 측면에서 손해를 보아 이상적인 SO이라고 볼 수 없다.

첫 번째로 제시한 교통혼잡세 추정 방안인 평균적 교통혼잡세 추정 방안은 앞서 개발한 통행 배정모델을 바탕으로 Sioux Falls Network에 일일 교통량을 대입하여 전체 CAV와 HDV의 총소요 시간을 구하고, 두 시간 차이를 적정 통행 시간가치로 환산하여 평균적 교통혼잡세를 추정할 수 있었다. 본 방법으로 교통혼잡세를 추정하면 간단하고 일괄적으로 교통혼잡세를 산정할 수 있으나, 이는 본 연구의 목적이었던 수혜자 지불 원칙을 충분히 고려하였다고 보기 힘들었다.

두 번째로 제시한 교통혼잡세 추정 방안인 특정 O-D에 대한 개별적 교통혼잡세 추정 방안은 같은 O-D쌍을 가지는 차량에 대해 평균 소요 시간을 구하여 O-D에 따라 개별적으로 교통혼잡세를 추정하였다. 이 경우에는 수혜자 지불 원칙을 충분히 고려할 수 있다는 장점이 있으나, CAV 비율에 따른 특정 경향성이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 CAV의 경로 선택 과정이 O-D쌍의 총소요 시간을 최소로 하는 것이 아닌 전체 교통의 총소요 시간을 최소로 하는 것이기 때문으로 해석되었다.

마지막으로 제시한 교통혼잡세 추정 방안인 Zone의 진입 지점과 진출 지점에 따른 교통혼잡세 추정 방안은 Sioux Falls Network를 외곽의 7개의 Node만 남겨둔 채로 단순화시켜 진입과 진출 지점에 따라 따로 교통혼잡세를 추정하였다. 이 경우 $e = 0.3$ 일 때 (7, 13)과 (13, 7)의 O-D쌍에 대해서 각각 1575원, 1510원으로 추정할 수 있었고, 나머지 O-D에 대해선 교통혼잡세가 필요하지 않았다. 여기서 추정한 1500 원 가량의 교통혼잡세는 한국의 남산 1,3호 터널과 싱가포르의 ERP 사례를 참고하였을 때 교통 이용자들의 정서에도 적절한 정도의 세금일 것이라 예상할 수 있었다.

향후 연구과제로는 교통혼잡세의 추정 방안의 합리성을 높이는 연구와 CAV 비율에 따른 교통혼잡세를 일반화하는 연구로 나누어 볼 수 있다. 본 연구에서 교통혼잡세를 추정하는 방안은 CAV와 HDV가 서로 다른 경로를 선택하는 것 때문에 생기는 소요 시간의 차이에 기인하였다. 따라서 보통의 교통혼잡세 추정 방안과 같이 특정 link에 교통혼잡세를 부과하는 데에는 한계가 있었으며, 이 때문에 실제로 해당 link에 교통혼잡을 야기시키는 차량에 대한 교통혼잡세가 적절히 부과되지 못하는 문제가 발생하는 경우가 생겼다. 이러한 합리성을 보완하기 위하여 향후 연구에서는

본 연구에서 추정한 각 O-D쌍 별 교통혼잡세를 활용하여 혼잡을 야기하는 각 link마다 교통혼잡세를 부과하는 방안을 제안하고자 한다. 본 연구에서 추정한 교통혼잡세를 HDV가 지나는 경로의 각 link에서 소요되는 시간에 비례하도록 link에 각각 배분한다. 이를 해당 link를 지나는 HDV 경로를 가진 모든 O-D쌍에 대하여 반복하여 이를 합산하면 각 link에 대한 교통혼잡세를 산정할 수 있다. 이렇게 생긴 각 link 별 교통혼잡세를 HDV의 경로가 지나는 link에 대하여 더하면 최종적으로 각 HDV에 대한 교통혼잡세를 추정할 수 있다. 두 번째로, 본 연구에선 CAV 비율에 따른 교통혼잡세를 일반화하는 단계까지는 발전시키지 못하였는데, 이를 위하여 더 간단한 Network에서 반복 시행하여 경향성이 안 나타나는 원인을 분석하고, Network, O-D, 통행량, CAV가 경로를 결정하는 방식 등을 바꾸어 가면서 일반화를 위한 경향성이 나타나는 지점을 확인하며 향후 연구를 발전시킬 수 있을 것이다.

REFERENCES

- Boyles, S. D., N. E. Lownes, and A. Unnikrishnan. *Transportation Network Analysis, Volume I*, Version 0.91. 2023.
- Guo, Qiangqiang, Xuegang Jeff Ban, and HM Abdul Aziz. "Mixed Traffic Flow of Human Driven Vehicles and Automated Vehicles on Dynamic Transportation Networks." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 128 (2021): 103159.
- Jayakrishnan, R., et al. "A Faster Path-Based Algorithm for Traffic Assignment." 1994.
- Lee, Seung-Hun, Kim Se-Hwan, Kim Dong-Gyu, Jo Mi-Jeong, Kim Myung-Hyun, Kim Sung-Jin, and Yang Se-Jung. "예비타당성조사 수행을 위한 통행시간가치 산정에 관한 연구" Korea Development Institute, 2012.
- Lazar, D. A., S. Coogan, and R. Pedarsani. "Capacity Modeling and Routing for Traffic Networks with Mixed Autonomy." IEEE, December 2017, pp. 5678-5683.
- LeBlanc, Larry J., Edward K. Morlok, and William P. Pierskalla. "An Efficient Approach to Solving the Road Network Equilibrium Traffic Assignment Problem." *Transportation Research* 9.5 (1975): 309-318.
- Transportation Networks for Research Core Team. *Transportation Networks for Research*. 2024. GitHub, <https://github.com/bstabler/TransportationNetworks>. Accessed 15 May 2024.
- Wardrop, J. G. "Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 1.3 (1952): 325-378.

부록 A

Table 4. Notation

notation	
A	링크 집합
$A_3 \cup A_4$	부록 B의 3, 4번째 경우에 해당하는 링크 집합
x_a	링크 a의 통행량
Π	경로 집합
Π^{rs}	출발지와 도착지가 r, s인 경로 집합
δ_{ij}^π	경로 π 가 링크(i, j)를 지나면 1, 아니면 0
h^π	경로 π 의 통행량
h_i^π	i번째 iteration의 경로 통행량
π_{rs}^*	Π^{rs} 의 경로들 중 통행시간이 최소인 경로
d^{rs}	출발지와 도착지가 r, s인 통행량
a	step size

부록 B

식(2-3)에 식(2-6)을 대입할 때, 링크 (i, j) 의 통행량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x_{(i,j)} = \sum_{\pi' \in \Pi: \pi' \neq \pi, \pi^*} \delta_{ij}^{\pi'} h^{\pi'} + \delta_{ij}^\pi h^\pi + \delta_{ij}^{\pi^*} (d^{rs} - \sum_{\pi' \in \Pi^s: \pi' \neq \pi, \pi_{rs}^*} h^{\pi'} - h^\pi) \quad (\text{B-1})$$

위 식을 h^π 에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{dx_{(i,j)}}{dh^\pi} = \delta_{ij}^\pi - \delta_{ij}^{\pi^*} \quad (\text{B-2})$$

따라서 합성함수 미분법에 따라 식(2-3)에 식(2-6)을 대입한 후 미분한 결과는 식(2-7)과 같다. 또한, 식(2-7)을 식(B-1)을 이용하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\sum_{(i,j) \in A} (\delta_{ij}^\pi - \delta_{ij}^{\pi^*}) T_{ij} \left(\sum_{\pi' \in \Pi, \pi' \neq \pi, \pi_{rs}^*} \delta_{ij}^{\pi'} h^{\pi'} + \delta_{ij}^\pi h^\pi + \delta_{ij}^{\pi_{rs}^*} (d^{rs} - \sum_{\pi' \in \Pi: \pi' \neq \pi, \pi_{rs}^*} h^{\pi'} - h^\pi) \right) \quad (\text{B-3})$$

이 식을 (B-2)를 참고하여 h^π 에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\sum_{(i,j) \in A} (\delta_{ij}^\pi - \delta_{ij}^{\pi^*})^2 T_{ij}'(x_{ij}) \quad (\text{B-4})$$

이때, 4가지의 경우가 가능하다.

1. 경로 π 와 π_{rs}^* 가 모두 링크 (i, j) 를 지나는 경우

2. 경로 π 와 π_{rs}^* 가 모두 링크(i, j)를 지나지 않는 경우
3. 경로 π 는 링크(i, j)를 지나고, π_{rs}^* 는 링크(i, j)를 지나지 않는 경우
4. 경로 π 는 링크(i, j)를 지나지 않고, π_{rs}^* 는 링크(i, j)를 지나는 경우

1, 2의 경우 $\delta_{ij}^\pi - \delta_{ij}^{\pi^*}$ 의 값이 0이기 때문에, 식(B-4)의 값은 0이 된다.

3, 4의 경우 $(\delta_{ij}^\pi - \delta_{ij}^{\pi^*})^2$ 의 값이 1이 되기 때문에, 식(B-4)의 값은 다음과 같다.

$$\sum_{(i,j) \in A} (\delta_{ij}^\pi - \delta_{ij}^{\pi^*})^2 T_{ij}'(x_{ij}) = \sum_{(i,j) \in A_3 \cup A_4} \frac{dT_{ij}}{dx_{ij}} \quad (B-5)$$

따라서 식(2-7)을 h^π 에 대해 미분한 결과는 식(2-9)와 같다. F_2 에 대해서도 같은 방식으로 식을 유도할 수 있다.

부록 C

Table 5. O-D Traffic Volume used in the Study (Unit: 100 Vehicles)

O-D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	1	1	5	2	3	5	8	5	13	5	2	5	3	5	5	4	1	3	3	1	4	3	1
2	1	0	1	2	1	4	2	4	2	6	2	1	3	1	1	4	2	0	1	1	0	1	0	0
3	1	1	0	2	1	3	1	2	1	3	3	2	1	1	1	2	1	0	0	0	0	1	1	0
4	5	2	2	0	5	4	4	7	7	12	14	6	6	5	5	8	5	1	2	3	2	4	5	2
5	2	1	1	5	0	2	2	5	8	10	5	2	2	1	2	5	2	0	1	1	1	2	1	0
6	3	4	3	4	2	0	4	8	4	8	4	2	2	1	2	9	5	1	2	3	1	2	1	1
7	5	2	1	4	2	4	0	10	6	19	5	7	4	2	5	14	10	2	4	5	2	5	2	1
8	8	4	2	7	5	8	10	0	8	16	8	6	6	4	6	22	14	3	7	9	4	5	3	2
9	5	2	1	7	8	4	6	8	0	28	14	6	6	6	9	14	9	2	4	6	3	7	5	2
10	13	6	3	12	10	8	19	16	28	0	40	20	19	21	40	44	39	7	18	25	12	26	18	8
11	5	2	3	15	5	4	5	8	14	39	0	14	10	16	14	14	10	1	4	6	4	11	13	6
12	2	1	2	6	2	2	7	6	6	20	14	0	13	7	7	7	6	2	3	4	3	7	7	5
13	5	3	1	6	2	2	4	6	6	19	10	13	0	6	7	6	5	1	3	6	6	13	8	8
14	3	1	1	5	1	1	2	4	6	21	16	7	6	0	13	7	7	1	3	5	4	12	11	4
15	5	1	1	5	2	2	5	6	10	40	14	7	7	13	0	12	15	2	8	11	8	26	10	4
16	5	4	2	8	5	9	14	22	14	44	14	7	6	7	12	0	28	5	13	16	6	12	5	3
17	4	2	1	5	2	5	10	14	9	39	10	6	5	7	15	28	0	6	17	17	6	17	6	3
18	1	0	0	1	0	1	2	3	2	7	2	2	1	1	2	5	6	0	3	4	1	3	1	0
19	3	1	0	2	1	2	4	7	4	18	4	3	3	3	8	13	17	3	0	12	4	12	3	1
20	3	1	0	3	1	3	5	9	6	25	6	5	6	5	11	16	17	4	12	0	12	24	7	4
21	1	0	0	2	1	1	2	4	3	12	4	3	6	4	8	6	6	1	4	12	0	18	7	5
22	4	1	1	4	2	2	5	5	7	26	11	7	13	12	26	12	17	3	12	24	18	0	21	11
23	3	0	1	5	1	1	2	3	5	18	13	7	8	11	10	5	6	1	3	7	7	21	0	7
24	1	0	0	2	0	1	1	2	2	8	6	5	7	4	4	3	3	0	1	4	5	11	7	0