

연속류 시설의 이동병목구간에서 지체산정방법 -모의실험을 통한 교통류의 평균지체분석-

論 文
8-4-3

The Analysis of Traffic Flow Characteristics on Moving Bottleneck

김 원 규*, 정 명 규**, 김 병 종*, 서 은 채*, 김 송 주*

Wonkyu Kim, Myeong Kyu Jeong, Byung Jong Kim, Eun Chae Seo, and Song Ju Kim

Abstract

When a slow-moving vehicle occupies one of the lanes of a multi-lane highway, it often causes queuing behind, unlike one is caused by an actual stoppage on that lane. This happens when the traffic flow rate upstream from the slow vehicle exceeds a certain critical value. This phenomena is called as the Moving Bottleneck, defined by Gazis and Herman (1992), Newell (1998) [3], and Munoz and Daganzo (2002), who conducted the flow estimates of upstream and downstream and considered slow-moving vehicle speed and the flow ratio exceeding slow vehicle and the microscopic traffic flow characteristics of moving bottleneck. But, a study of delay on moving bottleneck was not conducted until now. So this study provides a average delay time model related to upstream flow and the speed of slow vehicle. We have chosen the two-lane highway and homogeneous traffic flow. A slow-moving vehicle occupies one of the two lanes. Average delay time value is a result of AIMSUN[9], the microscopic traffic flow simulator. We developed a multiple regression model based on that value. Average delay time has a high value when the speed of slow vehicle is decreased and traffic flow is increased. Conclusively, the model is formulated by the negative exponential function.

Keywords : moving bottleneck, microscopic traffic flow characteristics of moving bottleneck

1. 서 론

교통공학[10]의 병목구간(bottleneck)은 기하구조상의 문제점으로 혹은 교통사고나 일시적인 공사로 인하여 도로상의 차로가 감소하는 구간이다. 병목구간을 통과하는 개별 차량들은 도로의 용량 감소에 따라 일정 수준의 지체를 경험하게 된다. 고정된 병목구간은 주로 결정론적 대기행렬 분석(deterministic queueing)이나 충격파(shock wave)로 해석을 하게 된다.

도심부의 버스나 고속도로상의 저속차량(대형트럭, 운전미숙차량)에 의해서 발생하는 움직이는

병목구간을 동적 병목구간(moving bottleneck)이라고 한다. 이러한 동적 병목구간에 대한 연구는 1992년 Gazis와 Herman[2]에 의해서 처음 시도되어 최근에는 Daganzo[1]에 의해서 여러 관련된 연구가 진행되고 있다. 기존의 연구에서는 동적 병목구간에서 저속차량의 속도와 추월차량의 교통량 등을 고려한 동적 병목구간 상류부와 하류부의 교통량 측정과 병목구간 주변의 미시적인 교통류의 현상에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 그러나 동적 병목구간에 의해서 차량들이 경험하는 지체에 대한 연구는 거의 수행된 적이 없는 상태이다[1-2].

이에 따라 본 연구에서는 고속도로에 동적 병목구간이 형성될 때 상류부의 유입 교통량과 저속차량의 속도 변화에 따른 차량들의 평균지체시간을 미시적인 교통류 시뮬레이션에 의하여 분석하고 지체를 산정하는데 그 목적이 있다.

접수일자 : 2009년 07월 21일

최종완료 : 2009년 12월 21일

*한국항공대학교 항공교통물류학부

교신저자, e-mail : wkim@kau.ac.kr

**LG CNS U-엔지니어링사업본부

본 연구에서는 2차로 고속도로 상에서 저속차량의 뒤를 따라오는 동질의 교통류(homogeneous traffic flow)가 저속차량의 통행속도와 교통류의 접근 교통량에 따라 경험하는 평균지체시간을 미시적 교통류 시뮬레이션 패키지인 AIMSUN[9]을 이용하여 분석해 보았다.

본 연구는 총 5장으로 구성되어 있으며, 제 1장에서는 연구의 배경과 목적, 방법 등을 제시하고, 제 2장에서는 이론적 고찰을 통하여 동적 병목구간 상에서 나타나는 교통류의 현상을 파악한다. 제 3장에서는 모의실험을 위한 전제조건과 방법을 수립하여 분석을 수행한 후, 제 4장에서는 분석된 결과를 바탕으로 평균지체에 대한 회귀모형을 도출하도록 한다. 마지막으로 제 5장에서는 연구의 결과 및 향후 연구 과제를 제시한다.

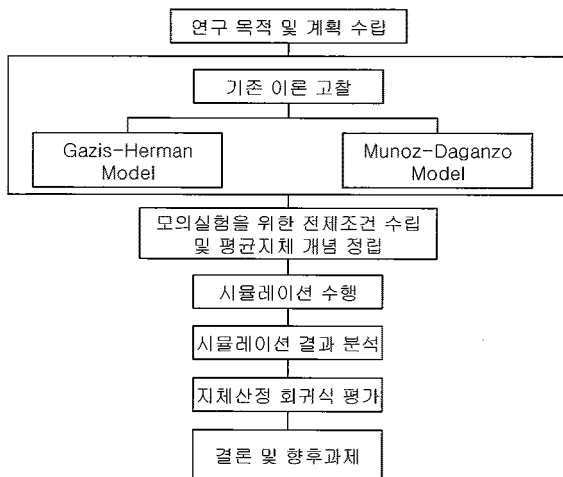


그림 1. 연구의 과정

II. 관련문헌 및 이론적 고찰

1. 단속류(신호 교차로) 상의 지체 산정 이론

단속류(신호 교차로) 상에서 지체를 산정하기 위한 방안으로는 크게 대기행렬(queueing) 이론과 충격파(shock wave)를 이용한 방안 두 가지가 있다.

대기행렬 이론과 충격파 분석이론에서 교통류의 속도 변화는 가·감속 없이 이루어진다고 전제하고 분석이 이루어진다. 두 이론의 차이점은 교차로 상에서 차량의 대기행렬을 나타내는 방법이다. 대기행렬 분석은 차량의 대기행렬이 수직형태로 나타난다고 가정하는 반면, 충격파 분석은 차량의

대기행렬이 수평적으로 나타난다고 가정한다.

1.1. 대기행렬(queueing) 분석

대기행렬 분석을 위해 필요한 요소는 다음의 5가지이다.

- 평균 도착 값
- 도착 분포
- 평균 서비스 값
- 서비스 분포
- 차량 유출입 형태(discipline)

평균 도착 값과 평균 서비스 값은 대/시간과 같은 교통량의 비율 또는 초당 대수와 같은 시간 차두시간으로 나타낼 수 있고, 유입분포와 유출분포는 결정론적(deterministic) 분포 또는 확률(stochastic) 분포로 나타낼 수 있다. 대기행렬 유출입 형태는 차량의 유입순서에 따른 유출순서를 나타내는 것으로 가장 일반적인 것은 FIFO(first in, first out)의 형태이다. FIFO는 가장 먼저 도착한 차량이 가장 먼저 출발하는 형태이며, 그 외 FILO(first in, last out), SIRO(served in random out)의 형태가 있다.

대기행렬 분석은 차량의 입출력 분포에 따라 결정론적 대기행렬(deterministic queueing) 분석과 확률적 대기행렬(stochastic queueing) 분석으로 구분할 수 있다. 결정론적 대기행렬 분석은 차량의 유입이 일정한 시간간격으로 이루어진다고 가정하여 분석하는 방법이고, 확률 대기행렬 분석은 차량의 유입이 일정한 확률분포를 따른다고 가정하여 분석하는 방법이다.

분석의 유출입 형태를 구분하기 위한 분류 체계는 결정론적 또는 확률적 대기행렬 분석 중 적당한 방법을 선택하기 위해 필요하다. 유입 또는 유출 분포 중 하나라도 확률 분포의 특성을 가진다면 확률 대기행렬 분석을 사용하여야 하는데 그 이유는 개별 차량의 정확한 도착 및 서비스 시간을 알 수 없기 때문이다. 반면 유입과 유출 분포가 균일한 패턴에 의해 이루어지면 개별 차량의 도착 및 서비스 시간을 예측 가능하므로 결정론적 대기행렬 분석을 사용한다.

(1) 결정론적(deterministic) 대기행렬 분석

그림 2는 신호교차로의 결정론적 대기행렬의 형

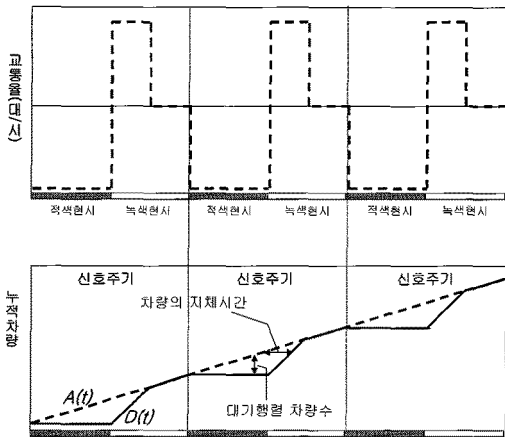


그림 2. 신호교차로 상에서 결정론적 대기행렬의 형태

태를 나타낸 것이다. 유입과 유출형태가 일정할 경우 비포화 상태에서 시간의 경과에 따라 신호교차로를 통과하는 차량의 누적대수를 알 수 있다. 유입율($A(t)$)은 균일한 시간간격으로 교차로에 유입되는 차량의 누적값을 나타내며 유출율($D(t)$)은 신호교차로에서 신호 운영에 따른 차량의 누적 유출값을 나타낸 것이다. 유출율($D(t)$)은 교차로 상의 신호현시에 따라 기울기가 다른 형태로 나타나는데 적색 현시 동안은 차량의 유출이 없으므로 기울기가 0의 값으로 나타난다. 녹색 현시 신호 동안은 교차로에서 대기행렬을 이루고 있던 차량들이 용량상태로 유출하게 되고, 대기행렬을 이루던 차량이 모두 유출된 후에는 차선의 유입률과 같은 크기의 누적 차량 값을 가지게 된다.

결정론적 대기행렬에서 적색현시 동안 발생하는 차량의 대기행렬은 그림 2에서와 같이 녹색현시가 시작될 때 해소되기 시작하므로 녹색현시가 시작되기 직전의 수직적 차이는 대기행렬의 최대길이가 되고 유입률($A(t)$)과 유출률($D(t)$)의 수평적 차이는 차량의 지체시간을 나타낸다.

(2) 확률적(stochastic) 대기행렬 분석

교통류의 임의성(randomness)과 교차로 용량에 영향을 끼치는 다양한 불확실성으로 확률적 분석을 이용한 차량의 지체에 대한 정확한 측정은 힘들다. 확률적 대기행렬 분석을 이용하여 신호교차로에 대한 기존연구[8]와 정지-제어(Stop-Controlled) 교차로에 대한 연구[8]가 있지만 정확한 측정결과를 얻기 어렵기 때문에 확률적 대기행렬 분석에 대한 기존 연구는 많지 않다. 현재 사용되고 있는 확률적 대기행렬 분석은 단순화된 수학적 모형을 이용한

다. 분석의 단순화를 위해 일반적으로 사용하는 가정은 평균 도착량이 분석기간 동안 일정한 값을 가지는 포아송 분포를 따른다는 것이다. 확률 대기행렬 모형은 비포화 상태에서만 사용될 수 있다.

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \tag{1}$$

여기서, ρ = 교통 밀집도
 λ = 평균 차량 유입율
 μ = 평균 차량 유출율

확률적 대기행렬 분석에서 비포화 교통 상황은 식 (1)의 교통 밀집도(intensity)가 1보다 작을 경우이다. 만약 밀집도가 1보다 크다면 확률적 대기행렬을 이용하여 문제를 해결할 수 있는 수학적 해법은 없다.

1.2. 충격파 분석(Shock Wave Analysis)

신호교차로에서 충격파(shock wave)[7] 분석은 대기행렬의 최대도달지점 및 해소시간을 산정할 수 있는 방법이다. 충격파는 교차로에 유입되는 교통량과 밀도, 유입 교통류의 특성을 파악할 수 있다면 분석이 가능하다.

충격파 모형[7]은 식 (2)와 식 (3)과 같다. 식 (2)는 속도, 밀도, 교통량의 관계를 설명하고 식 (3)은 교통류의 밀도와 교통량이 변하는 지점의 충격파에 대하여 설명한다.

$$q_i = k_i \cdot u_i \tag{2}$$

$$SW_{ij} = \frac{q_j - q_i}{k_j - k_i} \tag{3}$$

여기서,
 SW_{ij} = 지점 i와 j사이의 충격파 속도(미터/초)
 q_i = 지점 i의 교통량(대/초)
 k_j = 지점 i의 밀도(대/미터)
 u_i = 지점 i의 속도(미터/초)

그림 3은 충격파(shock wave) 분석을 통해 차량의 대기행렬 형성과 분산을 설명하고 있다. X_m 은 신호교차로에서 발생하는 충격파의 최대지점을 나타낸다. 충격파 이론의 특징은 현실 교통류에서 흔히 발생하는 적색현시에서 녹색현시로 신호가 변한 후에도 대기행렬 형성이 계속 이루어

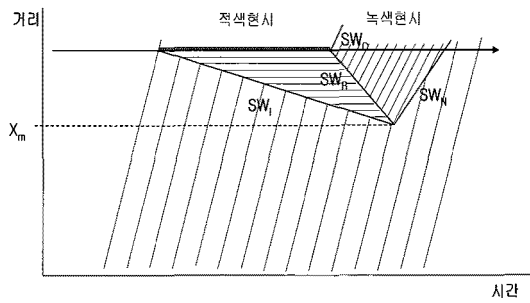


그림 3. 신호교차로 상에서 충격파 형태

지는 현상을 설명할 수 있다는 것이다.

2. 동적 병목구간의 일반적인 특징

2.1. 시간-거리 다이어그램

그림 4와 그림 5는 일반적인 병목 구간에서의 시공도와 동적 병목구간에서의 시공도를 각각 표현한 것이다. 그림에서 얇은 직선은 파동을 나타내고 두꺼운 직선은 교통류의 상태가 다른 지역간의 경계선, 즉 충격파를 의미한다. 그리고 두 개의 선으로 이루어진 것은 차량의 궤적을 나타낸 것이다. 파동이라 함은 교통류의 상태가 변하는 경계선의 용량(q), 밀도(k), 속도(u) 등의 상태가 일정하고 경계의 값이 같은 지역을 연결한 선이다. O 영역은 병목 구간에 의한 지체를 경험하지 않은 지역이고 B 영역은 병목에 의해 발생하는 대기행렬의 상류부를 나타내며 C 영역은 병목구간의 대기행렬 지역을 나타낸다. 그리고 A 영역은 합류점을 통과하여 병목구간을 빠져나간 차량들이 진행하는 지역을 의미한다.

그림 4는 일반적인 병목구간의 시공도를 보여준다. 시간 t_1 일 때 병목은 \hat{x} 에서 발생한다. 이 경우에는 합류점이 \hat{x} 로 고정되어 있어 대기행렬의 끝은 항상 \hat{x} 의 상류부를 향하여 진행된다. 반면, 그림 5에서 표현하고 있는 동적 병목구간의 시공도에서는 시간 t_1 일 때 병목이 발생한 후 합류점은 기울기가 \hat{v} 인 직선을 따라 이동하기 때문에 대기행렬의 끝이 \hat{x} 의 하류부나 상류부를 향하여 진행할 수 있다. 다시 말해서 대기행렬의 끝이 진행되는 방향은 \hat{v} 의 기울기와 접근 교통량에 따라서 달라진다. 그림 4와 그림 5에서 표현된 병목구간은 접근 교통량이 많지 않아 대기행렬의 길이를 알 수 있지만 합류점에서 차량이 탈출하는 비율보다 대기행렬로 접근하는 차량의 비율이 더 많으면 대기행렬은 계속적으로 증가하여 대기행

렬의 길이를 측정할 수 없게 된다.

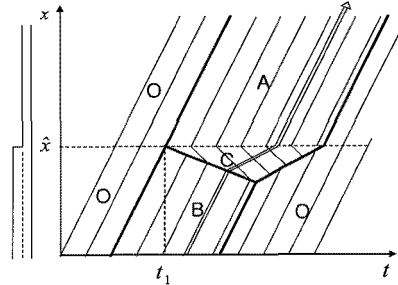


그림 4. 일반적인 병목구간의 시간-거리 다이어그램

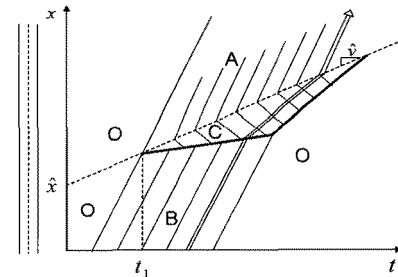


그림 5. 동적 병목구간의 시간-거리 다이어그램

2.2. 거리-밀도, 거리-속도 다이어그램

대기행렬 움직임의 정성적인 그림은 그림 6에서 보여주고 있다. 고속도로를 따라 세 가지 지역이 형성된다. 대기행렬 이전에 저속차량의 영향을 받지 않는 지역은 “교통량 한산 지역”으로 정의된다. 그리고 “대기행렬 지역”이 이어지고 그 다음에 “탈출 지역”이 이어진다. 차량의 전형적인 밀도-거리 선은 그림 6의 위쪽에 해당한다. K_0 으로 지칭된 “교통량 한산 지역”에서 K_0 으로 지칭된 교통류의 밀도에 해당하는 값이 형성된다. 그 값은 “대기행렬 지역” 내에서 밀도 K_b 까지 증가하며 K_0 부터 K_b 까지 변화는 저속차량에 의해 교통류의 흐름이 방해되지 않은 차로보다 방해된 차로에서 더욱 급격히 나타난다. 그리고 결국 교통류의 흐름이 방해된 차로는 “탈출 지역”에서 밀도가 0에 가까운 값까지 감소하고 방해되지 않은 차로는 K_c 까지 변화한다. 교통류는 저속차량의 하류부 2개 차로에서 점차적으로 퍼져나가지만 그 현상이 저속차량의 상류부 교통류의 행동에 영향을 미치지 않는다는 것이 그림 6의 위쪽에서 말하는 주된 논점이다.

그림 6의 아래 부분은 2개 차로의 속도를 정성적으로 보여주고 있다. 그 차량들은 “교통량 한산 지역”의 양 차로에서 속도 U_0 로 같다. 그들이 “대

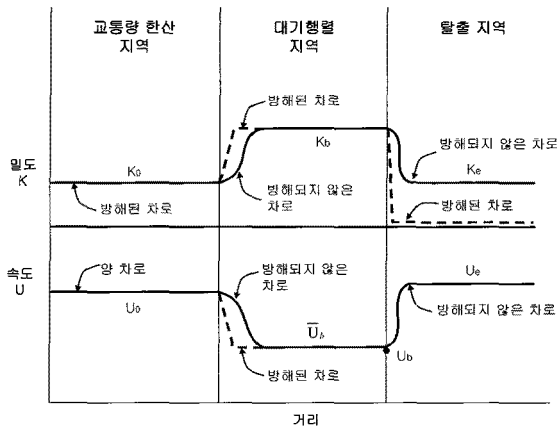


그림 6. 2차로, 세지역의 거리-밀도, 거리-속도 다이어그램
기행렬 지역” 내로 들어오면 속도 U_b 보다 조금 높은 \bar{U}_b 까지 감소하며 저속차량에 의해 교통류의 흐름이 방해되지 않은 차로보다 방해된 차로에서 더욱 급격히 감소한다. “탈출 지역”에서 방해된 차로의 속도는 결정되지 않으며 방해되지 않은 차로의 속도는 U_e 와 같다. 대기행렬 내에서 저속 차량의 속도는 대기행렬의 앞부분을 향하여 천천히 접근하기 때문에 원래의 속도 U_b 보다 약간 높은 \bar{U}_b 가 되는 것이다.

2.3. Gazis와 Herman 모형

(1) 동적 병목구간의 교통량

동적 병목구간에서 발생하는 교통류의 현상을 연구하면서 다음과 같은 조건을 가정하였다[2].

- 가정 1. 저속차량은 2차로 고속도로의 한 차로를 따라 주행한다.
- 가정 2. 접근하는 승용차 교통량이 많고 저속차량과의 속도의 차가 크다.
- 가정 3. 저속차량은 승용차들이 이용하는 모든 차로에 각각 독립적으로 영향을 주어 승용차의 속도를 감소시킨다.

그림 7에서 저속차량이 움직일 때, 저속차량의 상류부 양 차로의 차량평균속도는 U_b 라고 하고, 상류부 한 차로의 밀도는 k_b 라고 하였다. Gazis와 Herman은 대기행렬 내 차량들이 속도 U_e 로 저속 차량의 옆을 지나갈 때 그 병목구간으로부터 탈출하는 것이며, 이 속도 U_e 를 “탈출속도”라고 정의하였다. 중요한 점은 속도는 탈출 밀도 K_e 와

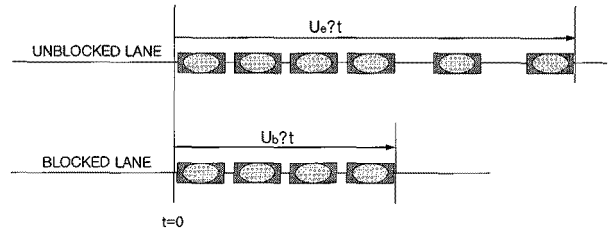


그림 7. 동적 병목구간 주변의 차량 행동 모형

같이 일정하며 모형에서의 설계속도보다 더 높은 값으로 가정된다는 점 t 옆을 또한 대기행렬로 인해지체를 겪어 통행시간이 증가된 운전자들이 증가된 통행시간을 회복하기 위한 어떤 행동을 한다는 점을 고려하였다. 결론적으로 $t=0$ 일 때 차량이 탈출한다고 가정하면 Δt 이후에 2차로 고속도로에서 동적 병목구간에 해당하는 교통량은 저속차량을 추월하는 일정한 교통량과 저속차량 뒤에 지체된 교통량의 합이라고 볼 수 있다.

$$Q = Q_e + Q_a = K_e(U_e - U_b) + 2k_b U_b \quad (4)$$

여기서,

- Q = 동적 병목구간 주변에 발생하는 교통량
- Q_e = 저속차량을 추월하는 교통량
- Q_a = 저속차량 뒤를 따라오는 교통량
- k_b = 저속차량 뒤의 한 차로 밀도
- K_e = 탈출지역의 밀도
- U_e = 탈출속도
- U_b = 저속차량의 속도

(2) 밀도-교통량 다이어그램

그림 8에서 보는 바와 같이 대기행렬 모형[2]에서 교통류 상태의 균형점 U 는 2개 차로의 근본적인 형태의 밀도-교통량 다이어그램과 고정된 점 $(K_e, K_e U_e)$ 을 따라가면서 기울기가 U_b 인 직선이 교차하는 높은 밀도에서 낮은 속도를 나타내는 점이다. 점 U 는 동적 병목구간 이전의 교통류 상태를 나타내는 반면에 고정된 점 E 는 병목구간 옆의 교통류 상태를 나타낸다. Gazis와 Herman에 의해서 표현된 이 상태 E 는 단지 병목구간이 형성된 이후에 지속될 수 있지만 사실 그 상태는 빠르게 점 D 의 상태를 향하여 이동하게 된다. 점 D 는 E 의 상태처럼 동일하고 적절한 교통량을 가진 2개 차로의 균형 상태이다. 만약 승용차 운전자가 높은 속도로 저속차량을 추월해서 대기행렬을 탈출하고자 한다면, 그들은 저속차량을 추월한

이후에 그 속도를 유지할 필요가 없으며 교통류는 점차 균형 상태로 돌아가게 된다.

Gazis와 Herman 모형에서 대기행렬이 발생하는 교통류 상태는 균형 다이어그램의 점 D와 U 사이에 위치하는 점들이다. 병목구간이 빠르게 움직일수록 대기행렬에 미치는 영향은 더 적어진다.

승용차는 추월차로의 용량보다 높은 교통량 상태로 저속차량을 추월할 수 없기 때문에 그림 8에서 두꺼운 직선 위에 불룩하게 올라온 곡선의 얇은 부분에는 밀도-교통량 관계가 존재할 수 없다. 또한, 저속차량이 승용차보다 더 빠른 속도로 주행할 수 없기 때문에 두꺼운 선 아랫부분의 곡선의 얇은 부분에도 역시 밀도-교통량 관계는 존재할 수 없다. 그래서 단지 밀도-교통량 곡선의 두꺼운 부분에서만 동적 병목구간의 밀도-교통량 관계가 존재할 수 있다.

병목구간이 움직일 때, 상류부와 하류부에서 대기행렬이 발생하지 않는 가장 높은 교통량은 점 D에서 나타난다. 이것은 병목구간이 움직일 때 하류부의 교통량이 존재하기 때문에 점 D에 해당하는 교통량은 일반적으로 병목구간 용량이라고 불린다. 그리고 점 D와 점 U를 잇는 직선은 용량 유지선이라고 불린다.

Gazis와 Herman은 동적 병목구간에서 저속차량의 뒤에 형성되는 대기행렬의 교통량과 용량 상태를 유지하면서 추월차로를 통해 병목구간을 빠져나가는 차량들의 교통량을 측정하여 병목구간 주변의 용량을 측정하는 방법을 나타내었다. 이 경우 승용차들이 저속차량 뒤의 대기행렬에 포함되는 시점부터 추월차로를 통하여 병목구간을 빠져나가는 시점까지의 시간이나 구간을 측정할 수 없으므로 이 모형을 통해 승용차들이 동적 병목구간에서 겪는 지체를 산정하기는 어렵다.

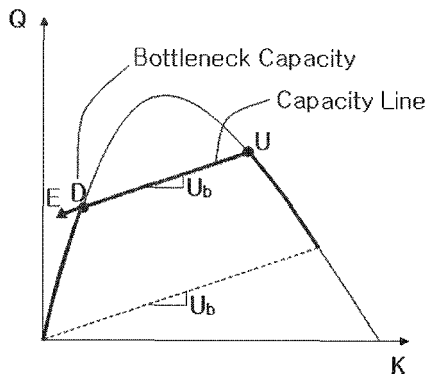


그림 8. Gazis와 Herman 모형의 밀도-교통량 다이어그램

2.4. Munoz와 Daganzo 모형

(1) 동적 병목구간의 교통량

실제 현장에서 수집된 자료를 바탕으로 동적 병목구간에서 발생하는 교통류의 현상에 대해 연구하면서 모형의 개발을 위해 다음과 같은 두 가지 조건을 가정하였다[4].

가정 1. 병목구간이 움직일 때, 병목구간 속도 U_b 와 병목구간을 추월하는 교통량 Q_r 사이에는 현상학적인 관계가 있다. 이것은 또한 승용차가 저속차량을 추월할 수 있는 최대 교통량이다.

가정 2. 동적 병목구간의 상태가 불연속적으로 변화할 때 $Q_r = Q - KU_b$ 을 동적 병목구간의 경계 조건(boundary condition)으로 사용하고, 가정 1에서 암시된 관계가 항상 $0 \leq Q - KU_b \leq Q_r$ 을 유지한다면 동적 병목구간의 교통량을 묘사하기 위한 LWR(Lighthill-Whitham-Richard)이론[5]을 사용하는 것이 가능하다. 그래서 이 상태는 설계속도 U_f 와 관련된 교통량이 $Q_r = Q - KU_b$ 로 유지되는 두개 차로를 위한 삼각형의 균형 상태 밀도-교통량 관계선 상에 위치하게 된다.

병목구간이 움직일 때 병목구간 속도(U_b)에 따른 하류부의 교통량(Q_r)을 나타내는 모형의 형태는 다음 식 (5)와 같다.

$$\begin{cases} Q_d(U_b) = Q_r(U_b) \frac{U_f}{U_f - U_b} = Q_r(0) + \frac{[Q_D - Q_r(0)]U_b}{U_{max}} \\ Q_D = Q_d(U_{max}) \end{cases} \quad (5)$$

여기서,

$Q_d(U_b)$ = 병목구간 속도에 따른 하류부의 교통량

$Q_r(U_b)$ = 병목구간 속도에 따른 추월차로의 교통량

$Q_r(0)$ = 추월차로의 용량

Q_D = 관측된 추월차로의 교통량

U_f = 구간의 설계속도

U_b = 병목구간의 속도

U_{max} = 병목구간의 최대 속도(U_f 와 같음)

U_{max} 는 병목구간의 최대 속도이다. 이 관계는 분석 대상 구간에 관련된 교통량과 병목구간의 속도 사이의 오목성(concave) 관계에 부합된다.

(2) 밀도-교통량 다이어그램

병목구간이 움직일 때 상류부와 하류부의 상태는 밀도-교통량 관계선 상에 Gazis와 Herman 모형과 같은 상태로 위치한다. 다시 말하면 그림 9의 첫 번째 그림과 같이 병목구간이 움직일 때 이 두 가지 상태들은 밀도-교통량 관계선과 $Q_r(U_b)$ 을 따라 움직이는 기울기가 U_b 인 직선이 교차하는 점에 해당한다. 그래서 대기행렬이 발생하지 않는 가장 높은 교통량은 점 D에서 나타난다.

Munoz와 Daganzo는 관측된 교통량을 바탕으로 추월차로의 용량을 가정하여 그림 9의 두 번째 그림과 같이 저속차량의 속도에 따른 동적 병목구간 하류부의 교통량을 측정하는 방법을 제시하였다. 그러나 이 경우에도 승용차들이 저속차량 뒤의 대기행렬에 포함된 후 병목구간을 빠져나갈 때 까지 이동하는 구간 혹은 시간에 대한 측정이 불가능하기 때문에 이 모형으로 동적 병목구간의 지체를 추정하기는 불가능하다.

2.5. 기존 동적 병목구간 모형의 한계

Gazis와 Herman 모형은 교통량이 존재할 때 균형 상태의 밀도-교통량 관계는 독립적인 위치

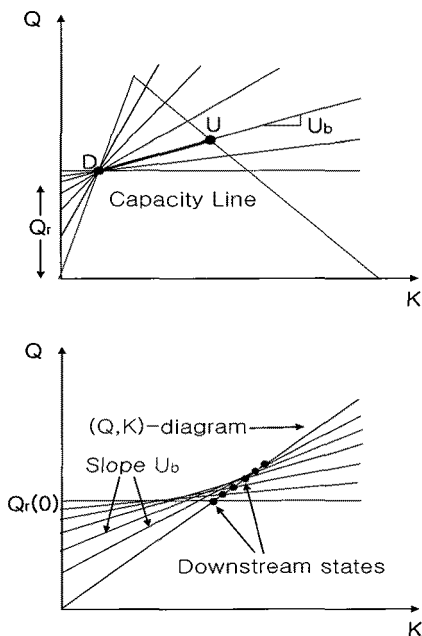


그림 9. Munoz와 Daganzo 모형의 밀도-교통량 다이어그램

에 존재하고 용량 상태와 병목구간의 적절한 속도를 가정하여 병목구간 뒤에 형성되는 대기행렬의 속도와 같은 교통류의 특징을 평가하였다. Munoz와 Daganzo 모형은 현장에서 수집된 데이터를 바탕으로 추월하는 교통량을 가정하여 병목구간의 속도와 추월차량 교통량에 따른 하류부의 교통량을 예측하는 모형을 개발하였다.

도로상의 일정 구간에서 동적 병목구간이 발생하면 그 구간을 주행하는 교통류의 평균속도가 감소하여 통행시간이 증가하게 된다. 두 모형은 모두 동적 병목구간 주변의 교통량을 예측하거나 상류부에서 일어나는 교통류의 현상을 설명하는데 그치고 있어 교통류가 일정한 구간을 이동할 때 동적 병목구간에 의해 경험하는 지체에 대한 측정이나 평가는 불가능하다. 이에 따라 제 3장에서는 동적 병목구간이 교통류의 통행시간에 미치는 영향을 파악하여 지체를 계산하기 위한 연구를 수행하도록 한다.

III. 모의실험을 통한 교통류의 평균지체분석

1. 모의실험의 목적

본 실험에서는 일정한 구간에서 동적 병목구간에 의해 지체를 경험하여 통행시간이 증가된 차량들의 평균지체 시간을 분석해 보고자 한다. 차량들의 평균지체 시간의 분석은 현장실측을 통한 자료를 바탕으로 하는 것이 가장 효과적이거나 분석을 위한 조건의 데이터를 얻기가 쉽지 않고 많은 노력과 비용이 소요된다. 다시 말해서 실측 자료에서는 저속차량이 차로를 변경할 수 있고 운전자들의 주행 특성도 모두 다르기 때문에 승용차들의 속도가 매우 다양하여 특정구간의 실측자료가 일반적인 동적 병목구간의 교통류를 표현한다고 보기는 어렵다. 그러므로 일반적인 교통상황을 반영하는 시뮬레이션을 통해 동적 병목구간이 나타나는 상황을 구현하여 차량들의 평균지체 시간을 추정할 수 있는 모형을 개발하도록 한다. 실험은 대표적인 미시적 교통류 시뮬레이터 모델의 하나인 AIMSUN(ver. 4.1)[9]을 사용하였다.

2. 모의실험 환경 구성

AIMSUN은 2차로 고속도로를 구현했을 때 2개

차로의 차량들이 차량추종이론에 따라 주행하도록 할 수 있으며, 앞 차와 해당 차 사이의 속도 차이와 추월차로의 차간 간격을 고려하여 추월 차량의 비율을 조정할 수 있다. 이러한 변수들을 고려하여 모의실험을 위한 환경은 다음과 같이 구성되며 그림 10과 같이 나타낼 수 있다.

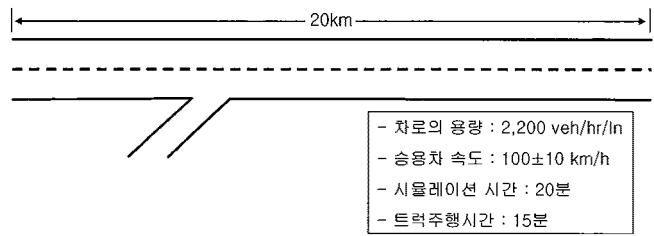


그림 10. 모의실험을 위한 분석구간의 형태

- 분석 구간은 기존 이론에서 사용했던 구간과 동일하게 편도 2차로 고속도로의 평지 20Km 구간으로 설정한다.
- 차로의 용량은 이상적인 도로 및 교통조건 이라고 가정하여 도로용량편람에서 제시한 2,200 대/시/차로 로 한다.
- 접근하는 차량은 동질의 승용차 교통류로 하고 병목을 발생시키는 저속 차량은 트레일러로 구성한다.
- 승용차는 모의실험 환경에서 무작위로 발생되지만 일정 수준의 균일한 차량군의 형태를 유지하면서 분석구간의 시점으로 유입된다.
- 트럭은 분석 구간의 시점으로부터 약 900m 지점에 설치된 램프에서 본선으로 1대가 진입하여 본선을 진행하는 승용차들과 동적 병목구간을 형성하도록 한다.
- 실험에서 트럭이 승용차에게 영향을 미치는 시간은 15분으로 한다.
- 승용차의 속도는 우리나라 대부분 고속도로의 제한속도인 100Km/h로 설정하고 10Km/h의 편차를 둔다.
- 승용차 유입량은 900대/시/차로 부터 1600대/시/차로 까지 변화시킨다.
- 트럭의 속도는 30Km/h부터 5Km/h씩 증가시켜 55Km/h까지 6가지 경우의 수를 고려한다.
- 트럭이 움직일 때 트럭 상류부의 차량들은 인접차로의 차량 속도에 영향을 받아서 트럭이 이용하지 않는 차로의 차량 속도도 인접 차로의 속도와 비슷한 수준까지 감소한다.
- 트럭의 뒤를 따라오는 차량들은 트럭의 속도와 추월 차로의 차량 간격을 고려하여 가능한 최대의 비율로 트럭을 추월하도록 설정한다.
- 트럭을 추월한 차량들은 트럭으로 인해 속도가 감소되기 전의 원래 상태까지 급격히 속도를 회복한다.

3. 모의실험에 따른 차량들의 평균지체

3.1. 평균지체의 개념

일반적으로 지체는 단속류에서 산정하는 것으로서 어느 일정한 구간을 이동하는 교통류가 교차로의 신호에 의해 통행시간이 증가할 때 그 증가된 시간을 포함한 총 통행시간을 의미한다. 하지만 본 연구에서는 승용차들이 특정 구간을 주행할 때 트럭에 의해 증가된 통행시간만을 개별 차량들의 지체로 설정하고 이를 순수지체(net delay)라고 정의한다. 트럭의 속도가 변화하면 트럭이 15분 동안 주행하는 거리가 바뀌므로 승용차들이 트럭에게 영향을 받는 구간의 길이가 각각 달라진다. 또한 트럭의 속도가 같더라도 승용차의 교통량이 변화하면 트럭 뒤의 대기행렬에 속하는 승용차 교통량이 변화하기 때문에 이 또한 트럭에 의해 영향을 받는 구간이 변화하게 된다. 그러므로 트럭이 승용차들에게 영향을 주는 시간과 승용차들의 주행구간을 동일하게 하기 위해서 트럭이 15분 간 승용차들에게 영향을 미친 후에 분석 구간의 끝까지 주행하지 못한 차량들은 나머지 구간을 트럭이 없을 때의 평균주행속도로 이동한다고 가정하여 개별 차량들의 구간이동 시간을 계산한다.

트럭이 본선에 진입하여 차량들에게 영향을 미치는 동안 트럭의 상류부에 위치한 차량들은 두 가지 경우의 거리-속도 관계를 나타내게 된다. 트럭에 의해 속도가 감소했다가 트럭을 추월하여 속도를 회복한 차량은 그림 11의 위쪽 그림과 같은 형태의 거리-속도 관계를 나타낼 것이고, 트럭이 이동하는 동안 트럭을 추월하지 못하고 트럭 뒤의 대기행렬에 속하여 주행하는 차량은 그림 11의 아래 그림과 같은 형태의 거리-속도 관계를 나타낼 것이다. 두 경우 모두 트럭에 의해 영향을 받아서 일정 구간을 주행하는 데 걸린 시간이 증가할 것이다. 이에 따라 본 연구에서는 트럭의 방해로 받

지 않고 구간을 통과할 때 나타난 개별 차량들의 통행시간과 트럭의 방해를 받아 속도가 감소하여 개별 차량들의 통행시간의 증가량을 비교하여 차량들의 평균 지체를 계산하도록 한다. 차량들의 평균 지체 계산은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{\sum_i^N \left(\frac{l}{v_i} - \frac{l}{\tilde{v}_i} \right)}{N} \quad (6)$$

여기서,

T = 차량들의 평균지체시간

v_i = 트럭이 없을 때 i 번째 차량의 구간 평균 속도

\tilde{v}_i = 트럭이 있을 때 i 번째 차량의 구간 평균 속도

l = 분석 대상 구간의 길이

N = 승용차 교통량

3.2. 모의실험 결과 분석

트럭의 속도와 승용차의 교통량에 따른 48가지 조합으로 모의실험을 수행하여 얻은 차량의 평균 지체는 표 1과 같다. 승용차 교통량이 동일할 때 트럭의 속도가 증가함에 따라 차량들의 평균 지체는 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 트럭의 속도가 동일할 때 승용차 교통량이 증가하면 차량들의 평균지체는 증가하는 것으로 나타났다. 그러므로 트럭의 속도가 낮고 승용차의 교통량이 많을수록 차량들이 경험하는 평균지체는 높아진다고 볼 수 있다.

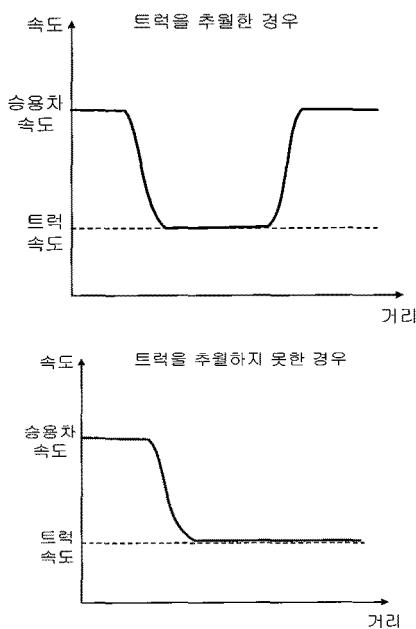


그림 11. 트럭의 영향에 따른 승용차의 거리-속도 다이어그램

표 1. 트럭속도와 승용차 교통량에 따른 평균지체시간
단위 : (초)

		트럭 속도(km/h)					
		30	35	40	45	50	55
승용차 교통량 (veh/h/m)	900	49.97	17.10	16.09	9.52	5.74	3.15
	1000	42.36	25.33	20.89	12.52	9.46	4.53
	1100	47.47	31.56	24.15	17.10	11.33	5.78
	1200	49.32	31.49	24.35	19.45	11.90	6.44
	1300	63.91	37.31	30.10	21.93	14.75	8.59
	1400	69.36	53.60	35.88	23.67	17.95	9.25
	1500	93.88	56.58	41.64	30.14	19.43	11.46
	1600	97.20	64.94	46.70	30.47	22.69	12.98

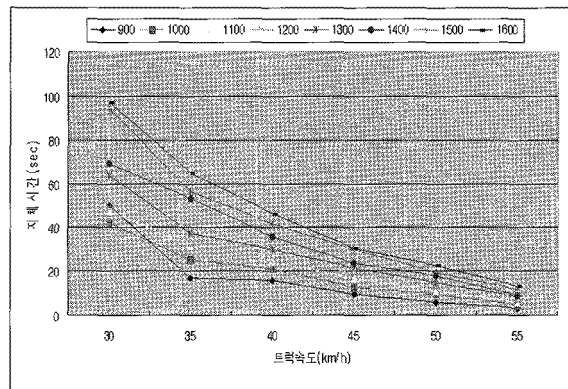


그림 12. 트럭속도에 따른 평균지체시간(모의실험)

그림 12에서 트럭 속도에 따른 차량의 평균지체 시간은 트럭의 속도가 30Km/h에서 35Km/h로 증가할 때는 감소폭이 크고 40Km/h부터는 감소폭이 거의 균일한 형태로 나타나고 있다. 트럭의 속도가 30Km/h 일 때는 승용차 교통량과 지체시간의 관계가 일정하지 않은 것을 볼 수 있는데 이는 승용차 교통량과 트럭의 속도차가 어떤 수준 이상이 될 때 영향력이 일정하지 않다는 것을 알 수 있다.

IV. 지체 추정을 위한 모형 개발

1. 평균 지체 모형

제3장에서는 모의실험을 통하여 트럭의 속도와 승용차 교통량에 따른 48가지 경우의 조합에서 차량들이 경험하는 평균지체시간을 계산하였다. 이 결과를 통하여 본 장에서는 동적 병목구간에 의한 차량의 평균지체를 추정할 수 있는 회귀 모형을 만들고자 한다. 모형은 상용화된 통계 패키지인 SAS(ver 8.2)[11]를 이용하여 시뮬레이션의 결과 48가지를 바탕으로 트럭 속도와 승용차 교통량을

표 2. 선정된 회귀모형의 결과

$Y = e^{-0.08152x_1 + 0.00163x_2 + 4.51774}$				
Analysis of variable	F-Value		805.91	
	Prob > F		< .0001	
	R-square		0.9728	
	Adj - R-square		0.9716	
Parameter Estimates		Parameter Estimate	t Value	Prob > t
	Intercept	4.51774	30.81	< .0001
	x_1 (트럭속도)	-0.08152	-35.38	< .0001
	x_2 (승용차 교통량)	0.00163	18.98	< .0001

독립변수로 하는 다중회귀분석을 통하여 도출해 내었다. 그 결과 14가지의 회귀 모형이 도출되었으며 그 중 가장 적합한 모형은 표 2와 같다.

회귀모형에 대하여 유의수준 0.05에서 F-검정을 하면 검정통계량 값 F^* 는 805.91이고, 검정 통계량의 p-값은 유의수준 보다 매우 작으므로 도출된 회귀모형은 차량의 평균지체시간을 추정하는데 매우 유의하다고 할 수 있다. 다중결정계수 (R^2)는 0.9728이므로 트럭 속도와 승용차 교통량인 2개의 독립변수를 포함한 회귀모형이 종속변수인 평균지체시간의 값에 대해서 97.28%만큼 설명할 수 있음을 의미한다. 개별회귀계수의 유의성을 검정하기 위한 t-검정에서는, 2개의 독립변수 모두 검정통계량의 p-값이 유의수준 0.05보다 매우 작으므로 종속변수인 평균지체시간의 값에 영향을 미치는 유의한 변수라고 판단할 수 있다.

2. 모의실험 결과와 회귀모형의 비교

도출된 회귀 모형 표 2를 이용하여 트럭 속도와 승용차 교통량을 고려한 차량들의 평균지체시간을 계산한 결과는 표 3과 그림 13, 그림 14에서 나타나는 것과 같다. 계산된 평균지체시간은 트럭과 승용차의 속도차가 크고 승용차의 교통량

표 3. 회귀모형을 이용하여 계산된 평균지체시간

		트럭 속도(km/h)					
		30	35	40	45	50	55
승용차 교통량 (veh/h/ln)	900	34.44	22.91	15.24	10.14	6.75	4.49
	1000	40.53	26.97	17.94	11.93	7.94	5.28
	1100	47.71	31.74	21.11	14.05	9.34	6.22
	1200	56.16	37.36	24.85	16.53	11.00	7.32
	1300	66.10	43.97	29.25	19.46	12.95	8.61
	1400	77.80	51.76	34.43	22.91	15.24	10.14
	1500	91.57	60.92	40.53	26.96	17.94	11.93
	1600	107.79	71.70	47.70	31.73	21.11	14.04

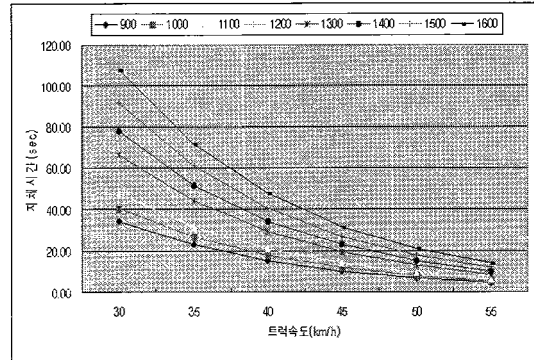


그림 13. 트럭속도에 따른 평균지체시간(회귀모형)

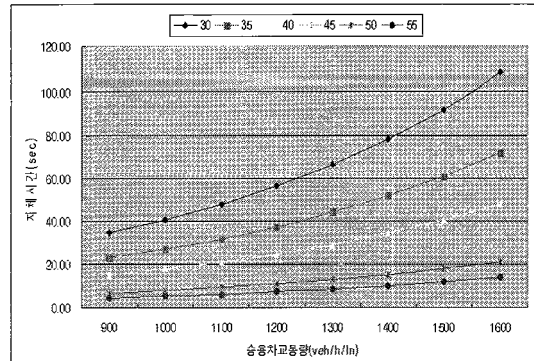


그림 14. 승용차 교통량에 따른 평균지체시간(회귀모형)

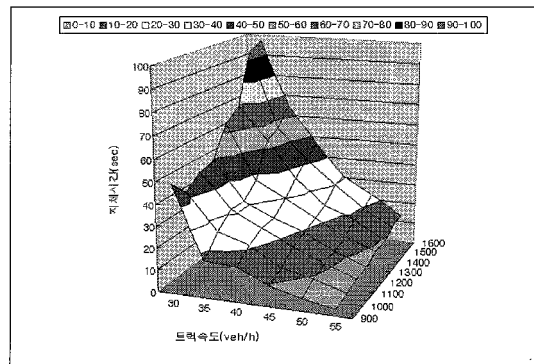


그림 15. 모의실험 결과에 따른 평균지체시간

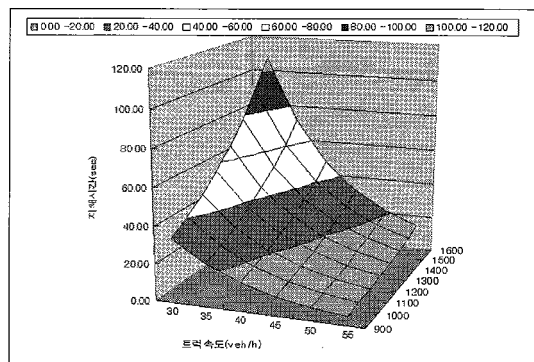


그림 16. 회귀모형 계산 결과에 따른 평균지체시간

이 많을수록 높게 나타났다. 트럭의 속도가 낮을수록 차량들이 겪는 평균지체시간은 높게 나타났다. 또한 승용차 교통량이 증가할수록 차량들이

경험하는 평균지체시간도 조금씩 증가하는데 트럭의 속도가 낮고 교통량이 용량에 가까워질수록 평균지체시간의 증가량이 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 모의실험의 결과와 회귀모형의 계산 결과에 따른 평균지체시간의 차이는 그림 15와 그림 16에서 비교할 수 있다.

V. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 편도 2차로 고속도로의 일정 구간을 주행하는 동질의 교통류(승용차)가 한 차로를 따라 움직이는 저속차량(트럭)에 의해 경험하게 되는 평균지체 시간을 모의실험을 통해 산정하였고 이 결과를 바탕으로 평균지체시간을 추정하는 모형을 개발하였다.

차량의 평균지체시간은 트럭과 승용차의 속도차가 크고 승용차의 교통량이 많을수록 높은 것으로 나타났다. 트럭과 승용차의 속도차가 커질수록 차량들이 겪는 평균지체시간은 조금씩 증가하다가 속도차가 일정 수준 이상으로 큰 상태가 되면 차량들의 평균지체시간 증가폭도 급격히 커지는 것으로 나타났다. 또한 승용차 교통량이 증가할수록 차량들이 경험하는 평균지체시간도 조금씩 증가하다가 교통량이 용량에 가까워질수록 평균지체시간의 증가량이 급격히 커지는 것을 알 수 있었다.

그러므로 개발된 지체 추정 모형은 트럭의 속도에 대해서는 역의 관계를 가지고 승용차 교통량에 대해서는 양의 관계를 갖는 음지수 함수의 형태로 도출되었다.

개발된 모형을 이용하여 도로의 특정 구간에 저속차량이 유입될 경우 일반적인 차량들의 증가된 구간통행시간을 추정할 수 있으며 고속도로의 제한최저속도의 기준을 마련할 수 있다. 또한 교통량이 많은 특정 구간에 저속차량의 통행을 제한할 수 있는 근거를 본 모형을 통해서 제시할 수 있다.

본 논문에서 개발한 모형은 몇 가지 한계점을 가지고 있다.

먼저, 본 연구에서는 실제 도로상에서 수집된 자료가 아닌 모의실험을 통하여 얻어진 자료를 바탕으로 지체 모형을 추정하였기 때문에 실제

현장에서 수집된 값과 모형에서 도출된 값은 차이가 있을 수 있다. 따라서 향후 실제 현장에서 수집된 자료와 비교·검증하는 작업이 필요하다. 또한 실제 도로상에서 자료를 수집하기 위해서는 차량간 통신(UVS-to-UVS)이나 차량과 인프라시설간 통신(UVS-to-UIS)을 통해 실시간 통행시간을 산출할 수 있는 IT기술과 융합함으로써 자료를 수집하는 연구가 필요할 것이다.

둘째, 본 연구에서는 분석을 위해 트럭의 속도는 5Km/h 간격으로 변화시키고 승용차 교통량은 100대/시/차로 간격으로 변화시켰다. 변화시키는 값의 간격을 더욱 세분화하여 값을 도출하면 현재 개발된 모형보다 더욱 설명력이 높은 모형을 개발할 수 있을 것이다.

셋째, 개발된 모형은 저속차량이 본선에서 주행하는 시간을 동일하게 설정할 때 속도의 변화에 따른 교통류에 미치는 영향을 분석한 모형이기 때문에 저속차량이 주행하는 구간을 동일하게 설정하고 속도를 변화시킬 때 교통류에 미치는 시간에 따른 영향력을 반영한 모형을 도출해 볼 필요가 있다.

넷째, 현재 분석 대상 구간의 기하구조는 편도 2차로이고 평지로 이루어져 있다. 차로수가 증가하면 저속차량을 추월하는 승용차의 비율이 높아질 것이고 분석구간이 오르막 경사 구간일 때는 저속차량의 속도와 교통류의 추월속도 또한 변화하기 때문에 현재 모형으로는 차량들의 평균지체시간을 추정하는 것은 적합하지 않다. 따라서 경사 구간의 동적 병목구간에 대한 지체추정모형에 대한 연구 또한 향후 과제로 남겨둔다.

감사의 글

본 논문은 2006년 한국항공대학교 교비 특성화연구 과제 연구비에 의하여 지원된 연구결과입니다.

[참고 문헌]

- [1] C. F. Daganzo, *Fundamentals of Transportation and Traffic Operations*, Elsevier, New York, 1997.
- [2] D. C. Gazis and R. Herman, "Moving and "Phantom" bottlenecks," *Transportation Science*, vol. 26, no.3, pp. 223-229, 1992.

[3] G. F. Newell, "A moving bottleneck," *Transportation Research*, vol. 32B, no. 8, pp. 531-537, 1998.

[4] J. C. Munoz and C. F. Daganzo, "Moving bottlenecks: A theory grounded on experimental observation," M. A. P. Taylor (Ed.), in *International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, pp. 441-462, 2002.

[5] L. Leclercq, S. Chanut, and J. B. Lesort, "Moving bottlenecks in Lighthill-Whitham-Richards model - A unified theory," in *Transportation Research Record, 1883, TRB, National Research Council, Washington, D. C.*, pp. 3-13, 2004.

[6] M. J. Lighthill, and G. B. Whitham, "On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads," in *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 229, no. 1178, pp. 317-345, 1955.

[7] P. I. Richards, "Shock waves on the highway," *Operations Research*, vol. 4, pp. 42-51, 1956.

[8] A. D. May, *Traffic Flow Fundamentals*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.

[9] *Transportation Simulation Systems*, AIMSUN User Manual, 2002.

[10] 도철웅, *교통공학(상)*, 청문각, 1996.

[11] 김종섭, *SAS v.8.2를 이용한 통계분석의 이해*, 한울출판사, 2003.

Biography

서은채

2009년 한국항공대학교 항공교통물류학부 졸업
 2009년~현재 한국항공대학교 항공교통물류학과
 교통전공 석사과정
 <관심분야> 지능형교통체계, u-Transportation,
 교통시스템분석

<e-mail> sprisis@kau.ac.kr

정명규

2004년 한국항공대학교 항공교통물류학부 졸업
 2006년 한국항공대학교 항공교통물류학과 교통
 전공(이학석사)
 현재 (주)LC CNS U-엔지니어링사업본부
 <관심분야> 교통시스템분석, 교통공학, 교통계획

<e-mail> Jeong.mk@lgcns.com

김원규

1988년 연세대학교 건축공학과 졸업
 1990년 연세대학교 본 대학원 건축공학과 도시
 계획전공(공학석사)
 1996년 Virginia Tech 토목공학과 교통공학전공(Ph.D)
 1997년 ~ 1999년 한국교통연구원 책임연구원

1999년~현재 한국항공대학교 항공교통물류학부 교수
 <관심분야> 지능형교통체계, u-Transportation, 교통시스템 분석
 <e-mail> wkim@kau.ac.kr

김병중

1982년 고려대학교 산업공학과 졸업
 1990년 Virginia Tech 토목공학과 교통공학전공
 (공학석사)
 1993년 Virginia Tech 토목공학과 교통공학전공
 (공학박사)

1993년 국토개발연구원 교통연구실 책임연구원
 1994년~현재 한국항공대학교 항공교통물류학부 교수
 <관심분야> 교통시스템분석, 교통계획, 공항계획

<e-mail> bjkim@kau.ac.kr

김송주

1996년 한국항공대학교 항공교통학과 졸업
 2001년 Best of Science University of California,
 Berkeley 교통공학전공(공학석사)
 2006년 Best of Science University of California,
 Berkeley 교통공학전공(공학박사)

2008년~현재 한국항공대학교 교통물류연구실 선임연구원
 <관심분야> 지능형교통체계, 교통시스템분석, 교통계획
 <e-mail> songjuk@kau.ac.kr