

■ 論 文 ■

통계적 분석에 의한 정상상태조건을 만족하는 교통량-밀도 관계 도출

Flow-density Relations Satisfying Stationary Conditions using Statistical Analysis

김 영 호

(한국교통연구원 도로교통연구실)

목 차

<p>I. 서론</p> <p>II. 정상상태</p> <p style="padding-left: 20px;">1. 정상상태의 정의</p> <p style="padding-left: 20px;">2. 정상상태를 만족하는 시공간적 범위</p> <p>III. 교통류 자료</p> <p>IV. 유사정상상태 자료의 추출</p>	<p style="padding-left: 40px;">1. Cassidy의 방법</p> <p style="padding-left: 40px;">2. 통계적 방법</p> <p>V. 통계적 방법을 적용한 결과</p> <p>VI. 결론 및 향후 연구방향</p> <p>참고문헌</p>
--	---

Key Words : 교통량-밀도 관계, 정상상태, 유사정상상태, 통계적 분석, 재현가능성
 flow-density relations, stationary state, nearly-stationary state, statistical analysis
 reproducibility

요 약

교통류 이론에서 fundamental diagram이라고 불리는 교통량-밀도 관계는 stationary 상태에서의 교통량과 밀도 사이의 평형관계 (equilibrium relation)를 나타낸다. 본 연구에서는 개별차량 데이터를 이용하여 교통량-밀도 관계의 전제조건인 stationary 조건을 만족하는 데이터를 추출하는 방법을 제시하였고, stationary 조건을 만족하는 데이터를 교통량-밀도 평면에 도시하였다. 개별차량의 흐름이 자유교통류상태와 혼잡교통류상태에서 상이하며 지점에서 관측된 데이터가 서로 다른 특성의 시계열특성을 보인다는 점에 근거하여 두가지 상태에 따라 서로 다른 stationary 조건을 제시하였다. 본 논문에서 제시된 stationary 조건을 실제로 관측된 데이터에 적용한 결과 자유교통류상태의 stationary 조건을 만족하는 데이터는 현재까지 알려진 바와 같이 교통류-밀도 관계의 왼쪽가지에 위치하고, 혼잡교통류상태의 stationary 조건을 만족하는 데이터는 교통류-밀도관계의 오른쪽 가지에 위치한다. 또한 본 연구에서 제시된 방법론에 따라 교통류-밀도관계의 전범위에 걸쳐 stationary 조건을 만족하는 데이터를 구별하여 교통류-밀도평면에 도시한 결과 교통류의 거의 전영역에 걸쳐 재현가능한 관계가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

The flow-density relations represent equilibrium relations between flow and density in the stationary state. Using individual vehicle data this paper proposed a method to filter traffic data in the stationary state and showed flow-density relations produced by the traffic data in the stationary state. The proposed method is based on the idea that free flow and congested flow show totally different traffic behaviors and time series of the traffic data observed at detection stations. The traffic data collected from the stationary state in the free flow using this filtering method consist in the left branch of the flow-density relation and the traffic data collected from the stationary state in the congested flow consist in the right branch of the flow-density relation. The traffic data in the stationary state show reproducible flow-density relation in the almost whole range of the traffic flow.

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업(05기반구축D02)의 지원으로 이루어졌습니다.

I. 서론

도로에서 실제 관측 자료를 바탕으로 작성된 교통류-밀도 관계는 자유 교통류에서는 거의 직선에 가까운 형태를 나타내고 용량을 지나 혼잡교통류 상태에서는 넓은 범위에 걸쳐 불규칙한 데이터 산포 (data scattering) 를 나타낸다. 혼잡교통류에서 존재하는 데이터 산포로 인하여 교통량과 밀도의 함수적 관계를 명확히 규명하는 것은 매우 어려운 과제이다. Cassidy (1998)는 관측 데이터 중 정상상태 (stationary state)에 가까운 데이터만을 추출하고 교통량-밀도 관계에 존재하는 데이터 산포를 제거하여 교통량-밀도 관계가 관측데이터를 통해 재현 가능한 (reproducible) 평형관계식 (equilibrium relation)으로 표현될 수 있음을 처음으로 보였다. Kim과 Hall (2006)은 교통량-밀도 관계의 재현 가능성을 Cassidy가 제시하지 않았던 극심한 혼잡교통류 범위까지 확장하여 이론적으로만 가정되어 온 교통량-밀도를 실제 데이터로부터 거의 전 영역에 걸쳐 도출하는 것이 가능함을 보였다.

본 논문의 목적은 첫째, 교통량-밀도 관계 도출의 가장 근본적인 가정인 정상상태조건 (stationary condition)을 개별차량자료를 통해 만족시킬 수 있는 방법을 규명하고 둘째, 정상상태조건을 만족시키는 교통자료로부터 교통량-밀도 관계를 2차원평면에서 도출하는 것이다.

본 논문의 구성은 2장에서 정상상태의 개념에 대해 설명하고 3장에서는 본 논문의 분석에 사용된 개별차량자료에 대해 설명한다. 이어지는 4장에서는 개별차량자료를 이용하여 정상상태 조건을 만족시키는 데이터를 분류하는 방법에 대해서 기술한다. 5장에서는 4장에서 소개된 데이터 분류방법을 이용하여 도출된 교통량-밀도 관계를 제시하고 마지막으로 본 논문을 통해 얻은 결론과 시사점을 제시한다.

II. 정상상태 (stationary state)

1. 정상상태의 정의

수학적으로는 확률변수의 분포가 시공간상에서 변하지 않을 때 그 확률변수는 정상상태 (stationary state)에 있다고 말한다. 그런데 교통류 이론에서는 한 도로 구간에서 일정 기간 동안 기록한 개별차량의 전체 궤적 (trajectory)을 작은 창을 통해 살펴볼 때, 관찰자가 작

은 창속의 차량궤적의 일부분을 보고 관측시점과 관측지점에 대한 어떠한 단서도 찾을 수 없으면 교통류가 그 관측구간에서 관측기간 동안 정상상태에 있다고 말한다 (Daganzo). 교통류가 정상상태에 있다는 것을 차량의 궤적을 통해 설명하면 첫째, 관측구간에서 관측시간 동안 모든 차량의 궤적이 평행하고 등간격이거나 둘째, 속도 차이가 많은 차량들의 궤적이 무작위하게 중첩되는 경우이다.

자유교통류 (free flow)에서는 이론적으로 첫번째 정상상태조건이나 두번째 정상상태조건이 만족될 수 있다. 그러나 자유 교통류 상태에서는 차량들 간의 상호작용 (interaction)이 매우 미약하고 한 차량의 궤적과 다른 차량의 궤적이 서로 독립적이므로 현실적으로 차량들 간의 궤적이 평행하고 등간격인 상황은 발생하지 않는다. 다만, 속도가 빠른 차량이 속도가 느린 차량을 별다른 제약 없이 추월하므로 속도차이가 많은 차량들의 궤적이 무작위적으로 중첩되며 개별차량의 속도와 차두시간 (headway)도 시공간적으로 무작위하게 분포한다.

혼잡교통류 상태에서는 첫 번째 정상상태 조건만 만족될 수 있다. 혼잡교통류 상태에서는 주행속도가 빠른 차량이 주행속도가 느린 차량을 추월하는 것이 용이하지 않으므로 차량간의 궤적이 중첩될 수 없고 후속차량의 궤적은 선두차량의 궤적을 평행이동 시켜놓은 형태를 나타낸다. 따라서 혼잡 교통류에서는 차량들의 궤적이 평행하고 등간격이라면 정상상태를 만족하고 정상상태에서는 개별차량의 속도와 차두시간이 시공간적으로 일정하다.

2. 정상상태를 만족하는 시공간적 범위

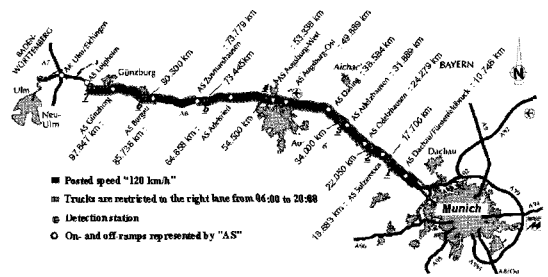
교통류 이론에서 엄밀한 의미의 정상상태란 무한히 긴 도로에서 무한히 긴 시간동안 앞에서 제시한 정상상태 조건이 만족되는 경우이다. 그러나 현실적인 교통상황에서는 엄밀한 의미의 정상상태는 관측될 수 없고, '적정한 시공간 범위'에서 앞에서 제시한 정상상태 조건을 일정한 오차범위 내에서 만족시키는 유사정상상태 (nearly-stationary state) 조건을 만족하는 교통데이터를 찾는 것이 가능할 뿐이다. 유사정상상태를 판별하기 위해 교통류가 만족시켜야 할 '적정한 시공간 범위'에 대해서 연구자들 사이에서 일치된 견해를 보이지는 않는다. Zhang (2001)은 공간적 범위에 대한 적

정한 값으로 1-mile을, 시간적 범위에 대한 적절한 값으로 15분을 제안하였다. 그러나 현실적인 상황에서 대부분의 교통류자료는 매우 짧은 거리 (5m)가 관측 영역인 루프검지기 자료이며, 루프검지기는 일반적으로 1km간격으로 설치되어 있다. 따라서 현재까지 교통류 분석 자료로 널리 이용되는 루프검지기 자료를 이용하여 차량의 궤적을 공간적으로 표현할 수 없으므로 적절한 공간적 범위에 대해서는 본 연구에서 논의하지 않는다. Cassidy는 1998년에 발표한 교통량 밀도 관계의 재현 가능성 논문에서 루프검지기로부터 취득한 교통류 자료를 이용하여 정상상태 교통류가 만족시켜야할 시간적 범위에 대한 합리적인 값으로 10분을 제안하였지만, 혼잡교통류 상태에서 정상상태 조건을 10분 동안 만족시키는 데이터를 수집하기가 매우 어렵다는 것을 파악하였다. 따라서 혼잡교통류상태에서 더 많은 유사 정상상태에 속하는 교통자료를 얻기 위하여 4분이라는 완화된(10분보다 짧은) 시간적 기준을 적용하였다.

본 논문에서는 Edie(1961)의 정의에 의한 교통변수의 값을 정확히 구하기 위하여 Cassidy와 Coifman(1997)이 제시하였듯이 일정한 차량대수를 기준으로 교통데이터를 집계하였다. 따라서 유사정상상태에 속하는 데이터를 분류하기 위해 교통류가 만족시켜야 할 합리적인 집계 시간의 값은 고정되지 않고 교통상황에 따라 변한다. 집계차량대수로 큰 값을 사용하면 정상상태 조건을 만족하는 교통류자료의 수가 줄어들고 집계대수로 작은 값을 사용하면 정상상태조건을 만족하는 교통류 자료의 수가 많아진다. 정상상태를 판별하기 위해 교통류가 만족시켜야 할 시간적 범위가 짧아진다. 따라서 취득할 교통류 자료의 수와 교통류가 만족시켜야 할 시간적 범위를 함께 고려하여 적절한 집계차량대수를 정하여야 한다.

III. 교통류 자료

본 연구에 사용된 교통류자료는 <그림 1>과 같이 독일 남부지방의 두 도시 Muenchen과 Ulm을 연결하는 고속도로 A8의 7개 지점에서 관측된 자료이다. 본 연구에서 분석된 구간은 독일에서 가장 혼잡한 구간 중의 하나로 양방향 4차로이며 최고속도 120km/h의 속도 제한과 함께 화물차와 버스는 06:00부터 20:00까지 우측차로로만 주행하여야 한다. 교통류자료는 2001년 5월 2일부터 2001년 10월 11일까지 <그림1>에 표시



<그림 1> Muenchen과 Ulm사이의 고속도로 A8

된 7개의 관측지점에서 24시간 단위로 수집되었다.

본 연구를 위하여 280개의 교통류자료가 분석되었다. 화물차와 버스는 2차로 구간인 분석구간에서 06:00부터 20:00까지 추월이 금지되고 우측차로로만 주행하도록 규정되어 있으므로 좌측차로에서 관측된 교통류자료는 원칙적으로 승용차통행에 의해서 발생한 자료만으로 구성되어야 한다. 본 연구에서는 가능한한 승용차통행으로만 구성된 균일화된 자료를 사용하기 위하여 06:00부터 20:00까지 좌측차로에서 관측된 자료만 분석하였다.

교통류자료 취득 소프트웨어를 통해서 개별차량의 속도, 검지기 점유시간, 검지기 비점유시간 값이 얻어지며 개별차량의 길이가 계산되어지고 통과차량의 길이와 검지기 인덕턴스의 형태 (inductance signature)를 기반으로 차량의 종류가 결정된다. 앞에서 밝힌 바와 같이 좌측차로에서 관측된 자료는 원칙적으로 승용차만으로 구성되어야 하나 관측된 자료 중 차종이 버스나 화물차로 분류된 자료가 존재한다. 이러한 자료는 차로제한규정을 위반한 실제 버스나 화물차로부터 관측되었거나 극심한 혼잡상태에서 발생한 검지기의 오류로부터 기인할 수 있다. 극심한 혼잡상태에서 루프검지기 에 의해 관측된 교통류자료는 주행하는 차량의 속도가 낮고 차간거리가 짧은 경우 연속되는 두 대의 차량이 한 대의 차량으로 오인되어 예외적으로 긴 버스나 화물차로 분류될 수 있다. 본 논문을 위한 분석에서 검지기의 오류에 의한 데이터를 배제하기 위하여 정해진 차량대수로 그룹화한 데이터 중 길이가 6m 이상인 버스나 화물차가 포함된 경우는 분석에서 제외하였다. 반면에, 6m이하의 버스나 화물차는 교통류에 미치는 영향이 승용차와 같을 것이라는 가정 하에 분석에 포함시켰다.

교통변수간의 기본적인 관계식인 $q = \mu k$ 는 개별차량의 trajectory로부터 각각 구한 교통량, 밀도, 속도의 값을 사용한다면 정확하게 일치시킬 수 있다. 그러나 현재까지 trajectory를 정확하게 구하는 것은 보편적인

방법으로 자리 잡지 못하고 있으며 본 논문에서도 루프 검지기를 통하여 교통류변수 값을 약 5m 정도의 관측 구간에서 측정하였다. 루프검지기로부터 관측된 개별차량자료를 이용한 본 연구에서 계산된 교통류 변수는 다음과 같다. 평균속도 (u)는 약 5m의 관측구간에서 차량속도가 일정하다는 가정 하에 n 대의 차량그룹으로부터 개별차량속도의 조화평균에 의해 계산되었다. 교통량 (q)은 그룹 내의 차량대수 n 을 차량들의 차두시간의 합으로 나눈 값($n/\sum headways$)에 의해 계산되었다. 차량의 속도가 일정하다는 가정을 수용한다면 밀도를 교통량과 공간평균속도의 값으로부터 구하는 것에 이론적인 문제가 없으므로 밀도 (k)는 교통량을 평균속도로 나눈 값 (q/u)으로부터 계산되었다.

IV. 유사정상상태 자료의 추출

Cassidy는 집계간격이 30초인 교통류데이터를 이용하여 차량의 도착과 점유율에 대한 누적곡선을 이용하여 유사정상상태를 구분하였다. 본 연구에서는 개별 차량의 수준으로 관측된 자료를 이용하였기 때문에 유사정상상태를 구분하기 위하여 Cassidy와 달리 통계적 방법을 사용하였다. 이 장에서는 집계자료를 이용하는 Cassidy의 방법과 개별차량자료를 이용하는 통계적 방법을 소개한다.

1. Cassidy의 방법

정상상태와 비정상상태 (non-stationary state)는 차량들의 도착율과 속도가 일정한지 여부를 판단함으로써 구별된다. 도착율과 속도가 일정하다는 것을 밝히기 위하여 관측지점 x 에서 관측시각 t 까지의 차량의 도착과 점유율에 대한 누적곡선 $N(x,t)$ 와 $T(x,t)$ 을 이용한다. 누적곡선의 기울기의 변화를 쉽게 파악하기 위하여 누적곡선 $N(x,t)$ 와 $T(x,t)$ 로부터 일정 비율의 값 (background value) q_0t 와 b_0t 을 뺀다.

유사정상상태는 두 단계의 과정을 거쳐서 비정상상태로부터 구별된다. 첫 번째 단계는 누적도착곡선에서 도착율이 일정한 직선형태의 구간을 구분하고, 이 구간에서 시각적으로 가장 근사한 직선식을 구한다 (visual curve fitting). 이렇게 구한 직선식과 $N(x,t) - q_0t$ 곡선의 차이가 10대 이하인 자료는 정상상태에 포함될 가능성이 있는 자료로 간주하고 두 번째 단계로 넘어간다.

두 번째 단계는 첫 번째 단계를 통과한 데이터를 대상으로 차량들의 속도가 거의 일정함을 보임으로써 유사정상상태를 확정하는 단계이다. Cassidy는 자료관측 당시에 속도를 직접 관측하지 못했던 기술적 한계를 극복하기 위하여 차량도착과 점유율의 누적곡선으로부터 속도를 유추할 수 있는 방법을 개발하였다. Cassidy는 차량들의 속도가 일정하고 차량길이가 모두 같다면 도착율과 점유율의 변동은 밀접히 연관되어 있다고 가정하였고, 도착율의 변동과 점유율의 변동간의 유사성을 파악하기 위하여 도착율과 점유율 누적곡선에 서로 다른 축소 계수 (scale factor) α 와 β 를 각각 곱하고 일정비율의 값 q_0t 와 b_0t 을 뺀 누적곡선 $\alpha N(x,t) - q_0t$ 와 $\beta T(x,t) - b_0t$ 을 하나의 좌표축 상에서 비교하였다. 두 누적곡선이 명백히 유사한 구간은 차량들의 평균속도가 일정한 것으로 판정하였다.

2. 통계적 방법

개별차량자료는 검지점의 교통상황에 대하여 집계 교통류자료보다 더욱 자세한 정보를 제공한다. 그러나 개별차량자료는 개별 운전자의 확률적인 특성에 의한 통계적 잡음 (statistical noise)을 포함하고 있으므로 개별차량자료를 그대로 이용하여 유사정상상태를 판별하는 것은 매우 어렵다. 본 연구에서 제시하는 통계적 방법은 이러한 개별차량자료를 일정한 원칙에 의하여 그룹화하고 관측 그룹의 통계적 성질을 근거로 유사정상상태와 비정상상태를 구분하는 것이다.

본 연구에서는 차량그룹내의 개별차량의 속도와 도착율이 시간적으로 일정하다면 유사정상상태조건을 만족하는 것으로 가정하였다. 일정한 속도는 차량그룹내의 개별차량속도의 표준편차에 의해 파악될 수 있고, 차량도착율이 일정하다는 것은 차량들의 길이가 거의 일정하다는 가정하에 차량그룹내의 개별차량들의 차두시간 (headway)의 표준편차를 계산함으로써 판단할 수 있다.

통계적 방법은 교통데이터의 전범위에 걸쳐 적용될 수 있다. 그러나 앞에서 언급하였듯이, 자유교통류와 혼잡교통류에서 차량들의 주행행태가 크게 다르기 때문에 개별차량 데이터를 이용하여 유사정상상태조건을 만족시키는 데이터를 효과적으로 구분하기 위하여 교통상황에 따라 서로 다른 판별기준이 적용되어야 한다.

자유교통류에서는 개별차량간 상호작용이 크지 않고

차량들은 자신이 원하는 속도로 앞차와 원하는 차두간격을 유지한 채 주행하며 다른 차량에 의한 가감속이 자주 발생하지 않는다. 교통수요가 점차 증가하여 개별 차량간 상호작용이 일정수준에 도달하기 전까지 개별 차량의 속도와 차두시간의 변화가 교통상태에 직접적으로 영향 받지 않는다. 개별차량의 속도와 차두시간자료는 데이터산포가 크게 나타나지만 이러한 산포는 운전자의 통계적 (stochastic) 특성에 기인하고 특별한 경향을 보이지는 않는다. 즉, 한 차량의 속도 (또는 차두시간)가 다른 차량의 속도 (또는 차두시간)와 다르게 관측되었다더라도 그것이 교통조건 변화에 기인하는 것은 아니다. 따라서, 자유교통류에서는 개별차량간의 직접적인 비교보다는 그룹에서 관측된 통계량의 변화여부를 관측함으로써 교통 데이터가 유사정상상태에 속하는지를 판단할 수 있다. 차량그룹의 통계적인 특성을 나타내는 평균과 표준편차가 정해진 시간동안 정해진 오차범위 안에서 일정하다면 그룹간의 확률변수의 분포가 변하지 않은 것으로 판단할 수 있으며, 이러한 상황에서 관측된 교통데이터는 유사정상상태조건을 만족한다고 할 수 있다.

혼잡교통류상대에서는 개별차량간의 상호작용이 크며 차량들은 원하는 속도와 원하는 차두간격을 유지한 채 운행하지 못한다. 개별차량은 앞선 차량의 주행행태에 영향을 받으며 주행속도의 변화와 차두시간의 변화는 교통상태에 직접적인 영향을 받는다. 혼잡교통류에서는 차량그룹에서 관측된 개별차량의 속도와 차두시간의 표준편차가 일정한 임계치 이하인 경우에 유사정상상태조건을 만족한다고 가정한다. 이것은 하나의 관측 지점에서 차량들의 속도와 차량의 도착간격이 일정하게 유지되는 상황을 의미하며, 차량들의 궤적이 평행하고 등간격인 경우이다.

V. 통계적 방법을 적용한 결과

앞에서 제시한 <그림 1>에서와 같이 고속도로 A8의 7개 관측지점 5개월 동안 관측된 290개의 교통류자료를 대상으로 관측자의 주관적인 판단을 배제하고 자유교통류와 혼잡교통류에서의 판별기준만을 적용하여 유사정상상태에 속하는 데이터를 분류하였다. 관측지점의 차로수가 동일하고 기하구조가 크게 상이하지 않으므로 자유교통류와 혼잡교통류에서 각각의 판별기준에 따라 구분된 자료는 하나의 교통류-밀도 평면에 혼합하여 도

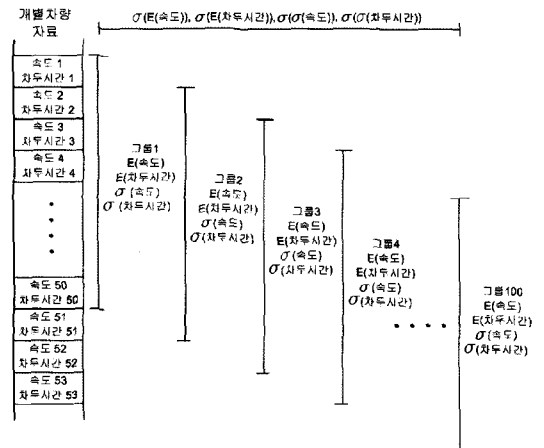
시하였다.

자유교통류에서는 차량그룹의 평균과 표준편차가 정해진 오차범위 안에서 일정한 시간동안 변하는지 여부를 관측하기 위하여 검지기를 통과하는 개별차량들을 도착한 순서대로 50대씩 중첩을 시키면서 그룹화하여 연속적으로 속도와 차두시간에 대한 이동평균 (moving average)과 이동표준편차 (moving standard deviation)를 구하였다. 50대씩 묶여진 차량그룹의 평균과 표준편차를 연속적으로 100회 동안 <그림 2>와 같이 계산하였다.

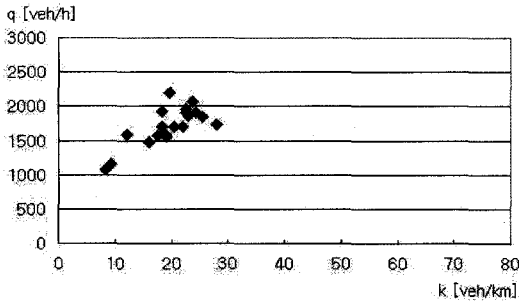
100회 동안 관측된 속도와 차두시간에 대한 평균과 표준편차를 바탕으로 각각 계산한 속도와 차두시간의 평균에 대한 표준편차와 속도와 차두시간의 표준편차에 대한 표준편차가 임계값을 넘지 않으면 유사정상상태로 분류하였다. 본 논문에서 사용된 임계값으로는 속도의 평균에 대한 표준편차에 대해서 1km/h, 차두시간의 평균에 대한 표준편차에 대해서 0.5초, 속도의 표준편차에 대한 표준편차에 대해서 0.5km/h, 차두시간의 표준편차에 대한 표준편차에 대해서 0.5초의 값을 적용하였다.

위와 같은 기준을 교통류자료에 적용하여 유사정상상태조건을 만족하는 데이터를 분류한 결과 <그림 3>과 같이 교통량은 1000대/시~2300대/시, 밀도는 10대/km~30대/km의 범위에서 유사정상상태조건을 만족하는 데이터가 구해졌다. 이 데이터는 7개의 관측지점에서 자유교통류에서의 유사정상상태조건을 만족하는 데이터를 혼합한 자료이다.

자유 교통류 상태에서 유사정상상태조건을 만족하는 데이터는 잘 알려진 바와 같이 교통량-밀도 관계 곡선



<그림 2> 자유교통류에서 유사정상상태 데이터



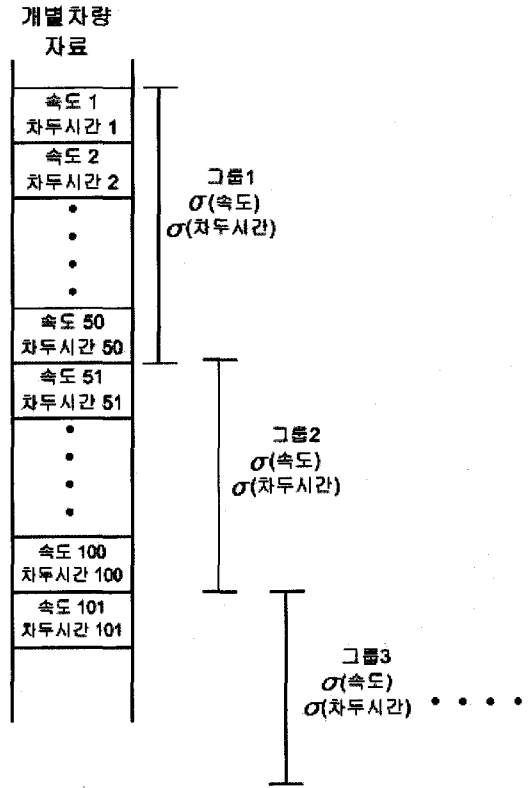
〈그림 3〉 자유교통류에서 유사정상상태 데이터

의 왼쪽 가지부분에 분포되어 있다. 교통량-밀도 관계 곡선에서 밀도가 약 30대/km 보다 큰 오른쪽 가지 부분과 밀도가 약 10대/km보다 작은 범위에서는 앞의 조건을 만족하는 자료는 관측되지 않았다. 밀도가 30대/km보다 큰 범위에서는 차량간의 상호작용이 크기 때문에 혼잡교통류의 판별기준을 적용하여 유사정상상태에 속하는 데이터를 분류할 수 있으며, 밀도가 10대/km보다 작은 범위에서는 개별차량운전자들의 확률특성에 의한 통계적 잡음 (statistical noise)이 다른 범위에서보다 더 크기 때문에 유사정상상태에 속하는 데이터를 추출하기 위하여 다른 범위에서보다 큰 차량집계대수로 그룹화하여 평균치를 구함으로써 통계적 잡음을 줄여야 한다.

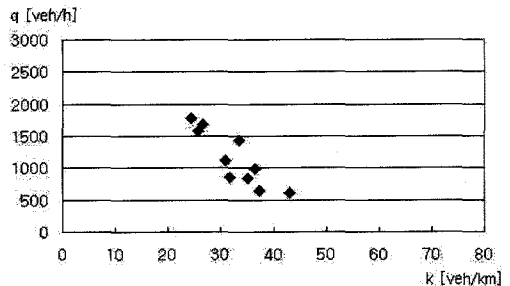
혼잡교통류에서 유사정상상태조건을 만족하는 데이터를 구분하기 위하여 검지기를 통과하는 개별차량들을 도착 순서대로 50대씩 중첩되지 않도록 그룹화하여 그룹내 차량들의 속도와 차두시간의 표준편차가 임계값 이하인 것을 유사정상상태로 〈그림 4〉와 같이 계산하였다. 본 논문에서 사용된 임계값으로는 속도의 표준편차에 대해서 2.5 km/h, 차두시간의 표준편차에 대해서 2초를 적용하였다.

위와 같은 기준을 적용하여 유사정상상태조건을 만족하는 데이터를 구분한 결과 〈그림 5〉와 같이 교통량은 600대/시~1800대/시, 밀도는 25대/km~45대/km의 범위에서 유사정상상태에 속하는 데이터가 구해졌다. 이 데이터는 앞의 자유교통류상태에서와 마찬가지로 7개의 지점에서 관측된 290개 교통류자료를 대상으로 혼잡교통류에서 유사정상상태조건을 만족하는 데이터를 혼합한 자료이다.

본 논문에서 사용한 통계적 방법을 적용하여 혼잡교통류상태에서 유사정상상태조건을 만족하는 데이터는 이미 잘 알려진 바와 같이 교통량-밀도 관계 곡선의 오



〈그림 4〉 혼잡교통류의 유사정상상태조건 계산과정



〈그림 5〉 혼잡교통류에서 유사정상상태 데이터

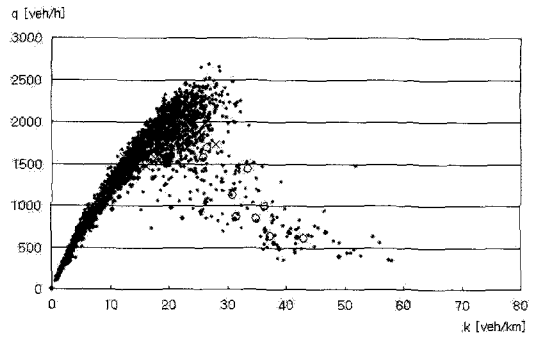
른쪽 가지부분에 자료들이 분포되어 있다. 교통량-밀도 관계 곡선에서 밀도가 약 25대/km 보다 작은 왼쪽 가지부분과 밀도가 약 45대/km보다 큰 범위에서는 혼잡교통류의 유사정상상태조건을 만족하는 자료는 관측되지 않았다. 밀도가 25대/km보다 작은 범위에서는 차량간의 상호작용이 작기 때문에 자유교통류의 판별기준을 적용하여 유사정상상태에 속하는 데이터를 분류할 수 있으며, 밀도가 45대/km보다 큰 범위에서는 교통류의 변화가 매우 심하여 앞에서 제시한 유사정상상태

조건을 만족시키는 데이터가 존재하지 않는다. 밀도가 45대/km보다 큰 범위에서 유사정상상태를 만족하는 데이터를 분류하기 위해서는 다른 범위에서보다 더 작은 차량집계대수로 그룹화하여 유사정상상태를 만족하는 시간적 범위를 줄여야 한다.

자유교통류상태와 혼잡교통류상태에서 유사정상상태 조건을 만족하는 데이터를 혼합한 결과를 <그림 6>와 같이 하나의 교통량-밀도 평면에 나타내었다. <그림 6>에서 x는 자유교통류에서 유사정상상태조건을 만족하는 데이터이고 o는 혼잡교통류상태에서 유사정상상태 조건을 만족하는 데이터이다. 회색으로 표시된 데이터는 유사정상상태조건에 관계없이 나타낸 데이터이다.

유사정상상태 조건에 관계없이 나타낸 회색의 데이터는 밀도가 10대/km보다 낮은 영역을 제외하면 교통량-밀도 평면에 무질서하게 분포함을 볼 수 있다. 이에 비해 유사정상상태조건을 만족시키는 데이터는 밀도가 10대/km~45대/km이고 교통량이 약 600대/시~2400대/시의 범위에 걸쳐 재현 가능한 교통류-밀도 관계를 나타내며, 밀도가 20대/km~30대/km이고 교통량이 1500대/시~2000대/시인 범위에서 자유교통류와 혼잡교통류의 유사정상상태조건을 만족하는 데이터가 겹쳐져 나타난다. 겹쳐지는 부분은 자유교통류에서 혼잡교통류로의 전이가 발생하는 구간으로 자유교통류의 기준에 의해서도 데이터가 관측될 수 있고 혼잡교통류의 기준에 의해서도 데이터가 관측될 수 있는 영역이다. Hall과 Agyemang-Duah (1991)의 연구를 비롯하여 관측된 모든 데이터를 이용하여 분석한 여러 연구에서 교통량-밀도관계의 용량감소 (capacity drop) 현상이 나타났으나, 유사정상상태 조건을 만족하는 데이터만을 이용하여 분석한 본 연구에서는 뚜렷한 용량 감소현상은 나타나지 않았다.

자유교통류와 혼잡교통류의 유사정상상태를 구분하기 위하여 본 연구에서는 50대의 차량을 기준으로 그룹화 하였고 특정한 임계값을 적용하였다. 만약 데이터의 수집간격과 임계값이 달라지면 본 연구의 <그림 6>에서 관측된 데이터와 다른 밀도와 교통량 범위에서 데이터가 관측될 수 있을 것이다. 그러나 데이터가 나타나는 패턴은 <그림 6>과 같이 밀도가 아주 낮은 부분에서는 데이터가 관측되지 않고 밀도가 서서히 증가하면서 자유교통류만의 유사정상상태 데이터, 자유교통류와 혼잡교통류의 유사정상상태 데이터의 중복, 혼잡교통류만의 유사정상상태 데이터를 나타내다가 밀도가 아



<그림 6> 자유/혼잡교통류의 유사정상상태 데이터

주 높은 부분에서는 데이터가 관측되지 않는다. 이와 같은 영역의 구분은 김영호 (2004)가 제시한 교통류를 5개의 영역으로 구분한 것과 비교할 만하다.

VI. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 개별차량데이터를 이용하여 자유교통류상태와 혼잡교통류상태에서 유사정상상태를 만족하는 데이터를 구별하는 방법을 제시하였다. 본 연구에서 제시된 방법에 따라 구분된 데이터는 현재까지 알려진 바와 같이 교통류-밀도 관계의 왼쪽가지에 자유교통류자료가 위치하고 오른쪽 가지에 혼잡교통류자료가 위치한다. 이것은 본 연구에서 제시된 방법이 개별차량자료를 이용하여 자유교통류와 혼잡교통류를 합리적으로 분류하는 방법임을 입증하는 것이다.

본 연구에서 제시된 방법론에 따라 교통류-밀도관계의 전범위에 걸쳐 유사정상상태를 만족하는 데이터를 구분하여 교통류-밀도평면에 도시한 결과 교통류의 거의 전영역에 걸쳐 재현가능한 관계를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 또한 교통류 변수의 통계적 특성 (stochastic properties)으로 인해 교통류 상태간의 전이 과정이 불명확하여, 현재까지 여러 형태의 교통류 상태 구분은 객관적인 기준 없이 연구자의 주관적인 판단에 의해 좌우되었으나, 본 연구에서 제시한 방법론은 개별차량자료를 이용하여 연구자의 주관적인 판단을 완전히 배제한 채 교통류상태를 구분하였다는 점에서 기존의 방법론과 차별성이 있다.

데이터의 수집 간격과 임계값에 따라 교통량-밀도관계가 변화하는 양상은 다량의 개별차량자료를 분석함으로써 파악될 수 있을 것이다. 또한 데이터 관측기술의

발전으로 인하여 지점관측자료뿐만 아니라 시공간도 (time-space diagram) 상에 표현된 차량의 궤적 (vehicle trajectories)을 구할 수 있다면 교통변수간의 근본적인 관계가 보다 명확히 밝혀질 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Cassidy, M. J. (1998) "Bivariate Relations in Nearly Stationary Highway Traffic", Transportation Research 32B, pp.49~59.
2. Edie L. C. (1961) "Car-Following and Steady-State Theory for Noncongested Traffic", In Operations Research, Vol. 9, pp.66~76.
3. Zhang, M. H. (2001) "New Perspectives on Continuum Traffic Flow Models", Networks and Spatial Economics 1, Kluwer Academic Publishers, pp.9~33.
4. Daganzo, C. F. (1997) "Fundamentals of Transportation and Traffic Operations", Pergamon, pp.76~79
5. Kim, Y. and Hall F.L. (2006) "Reproducibility of Flow-Density Relations in Heavily Congested Flow Based on Individual Vehicle Data", CD Proceedings of the 85th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C., USA.
6. Cassidy, M. and Coifman, B. (1997) "The Relation Between Density and Occupancy and the Analogous Relation Between Density and Occupancy", Transportation Research Record 1591, pp.1~6.
7. Hall F.L. and Agyemang-Duah, K. (1991) "Freeway Capacity Drop and the Definition of Capacity", Transportation Research Record 1320, pp.91~98.
8. 김영호, 이시복 (2004) "동적 교통량-밀도 관계의 특성분석과 교통류 모형으로의 응용", 대한교통학회지, 제22권 제3호, 대한교통학회, pp.179~201.

✉ 주 작성자 : 김영호

✉ 교신저자 : 김영호

✉ 논문투고일 : 2006. 5. 16

✉ 논문심사일 : 2006. 7. 5 (1차)

2006. 7. 9 (2차)

✉ 심사판정일 : 2006. 7. 9

✉ 반론접수기한 : 2006. 12. 31