

■ 論 文 ■

교통제어를 위한 고속도로 용량 산정에 관한 연구

Freeway Capacity Estimation for Traffic Control

김 점 산

(서울대학교 공학연구소 객원연구원)

고 승 영

(서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수)

목 차

- | | |
|------------------------|------------------------|
| I. 서론 | 3. 모형을 통한 용량감소의 해석 |
| II. 기존연구검토 | IV. 제어용량 산정모형의 정산 및 평가 |
| 1. 기존의 용량과 용량산정기준 | 1. 정산교통자료 |
| 2. 대안적 용량과 용량산정방법 | 2. 모형의 정산 |
| III. 제어용량 산정모형의 개발 | 3. 모형의 적용 |
| 1. 모형의 기본개념 | V. 결론 |
| 2. 모형의 기본식과 최소차두시간의 결정 | 참고문헌 |

Key Words : 교통제어, 고속도로, 용량, 제어용량, 최소차두시간

요 약

본 연구의 목적은 연속류의 미시적 행태분석을 통해 새로운 용량개념을 정의하고 이에 대한 용량 산정방법을 개발하고 제안하는데 있다. 교통자료 검지체계의 기술적 발전은 기존 미국 도로용량편람에서 활용된 자료에 비해 정확하고 많은 자료의 수집을 가능하게 하고, 이에 따라 교통류 해석에 대한 다양한 학문적 접근이 시도되면서 기존 도로용량의 정의와 산정기준의 한계점이 드러나고 있다.

대안적 용량개념은 교통류-밀도 관계에서 용량감소와 이력현상을 포함한 혼잡교통류의 특징을 포괄적으로 해석하려는 시도로써, 확률적 모형과 행태적 또는 역학적 모형으로 구분할 수 있다. 그러나 대안적 용량개념으로 제안된 두 가지 모형 역시 연속류의 다양한 상태와 상태변동을 설명하기에는 한계점을 가지고 있다.

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위하여, 연속류의 미시적 행태자료를 통해 시추이 속도-밀도 관계, 집계 간격과 교통량-속도-밀도 관계, 차두시간 분포특성, 그리고 자유속도 분포특성 분석을 수행하고, 용량의 기준이 되는 차두시간을 통계적으로 결정함으로써 교통제어를 위한 새로운 용량개념을 정의하고 이에 대한 용량산정방법을 개발하였다.

This study is to define new road capacity concept, and to develop and propose an estimation method, through the analysis of individual vehicular behaviors in continuum flow. Developments in detection technology enable various and precise traffic data collection. The U.S. HCM (Highway Capacity Manual) method does not require such various and precise traffic data, and outputs only limited results.

Alternative capacity concepts, which can be classified into a stochastic model and behavioral or deterministic model, are attempts for modeling some prominent traffic flow features, namely so-called a capacity drop and a traffic hysteresis, using such various and precise traffic data. Yet, no capacity concept up-to-date can describe both features.

The analysis of individual vehicular behaviors, including speed-density plot per time lap, traffic flow-speed-density diagram per each sampling interval, time headway distribution, and free flow speed distribution, is performed for overcoming the limits of the previous capacity concepts. A stochastic methods are applied to determine time headway for estimating freeway capacity for traffic control.

I. 서론

고속도로 교통제어는 단위시간에 안전하고 신속하게 최대교통량을 처리하는데 목적이 있다. 따라서 고속도로 교통제어를 위해서는 고속도로에서 단위시간에 발생할 수는 있는 모든 교통상태를 수용할 수 있는 도로용량모형이 필수적이라 할 수 있다.

현재 고속도로 교통제어에 가장 많이 적용되고 있는 교통용량모형은 미국 도로용량편람(HCM, highway capacity manual)을 기준으로 각국에서 현지화한 도로용량모형이다. 그러나 최근에 와서 교통검지체계의 기술적 발전으로 기존 도로용량모형에 활용된 자료에 비해 정확하고 많은 자료의 수집이 가능하게 되고, 이에 따라 교통류 해석에 대한 다양한 학문적 접근이 시도되고 성취되면서 기존 도로용량모형의 한계점이 드러나고 있다.

본 연구의 목적은 고속도로 교통제어를 위해 고속도로에서 단위시간에 발생할 수는 있는 용량초과, 용량감소 등 모든 교통상태를 수용할 수 있는 제어용량 산정모형을 제안하는 것으로 구체적 내용은 다음과 같다.

첫째, 기존연구검토에서는 기존의 용량개념 및 용량산정기준, 대안적 용량과 용량산정방법에 대한 검토를 수행하였다.

둘째, 제어용량 용량산정모형의 개발에서는 모형의 기본개념, 모형의 기본식, 그리고 용량의 기준이 되는 최소차두시간의 방법론을 정립하고, 이를 통해 교통운영과정에서 발생할 수 있는 용량감소 또는 용량초과를 해석하였다.

셋째, 제어용량 산정모형의 정산 및 적용에서는 모형을 정산하고 교통상태별 적용을 수행하였다.

마지막으로, 결론에서는 연구의 결과 및 의의를 정리하고, 연구의 한계를 제시하였다.

II. 기존연구검토

1. 기존의 용량과 용량산정기준

1) 용량의 정의

미국의 1985년, 2000년판 도로용량편람(7)은 용량을 "일반적인 도로, 교통, 그리고 제어조건에서 주어진 시간동안 동질적인 차로 또는 도로구간이나 한 지점을

지나가리라 합리적 수준에서 기대할 수 있는 시간당 최대 사람 또는 차량의 수"로 정의하고 있다.

용량의 정의에서 가장 중요한 개념은 "합리적 기대(reasonable expectation)"이다. McShane과 Roess는 합리적 기대수준에서 용량은 관측된 절대 최대교통량(absolute maximum flow)이 아닌 충분한 수요가 있는 경우, 매 침두시 반복적으로 관측될 수 있는 교통량이라 제안하고 있다. 그러나 용량을 분포로 볼 때, 용량이 최대값이 아니라는 것은 확실하지만 용량을 해당분포의 어떤 수준(또는 부분)이 대표할 수 있는지는 명확하지 않다. 한편, 미국 도로용량편람은 "복미 평균", "national average"을 교통특징으로 이용하고, "제안된 2,000pcphpl은 복미평균을 대표한다"고 주장한다. 그러나 만약 용량의 분포가 정규분포를 따른다면, 평균은 대략 반시간 교통량에도 미치지 못한다(F. L. Hall과 K. Agyemang-Duah (3)).

2) 기존의 고속도로 용량산정기준

미국의 2000년판 도로용량편람 (7)은 고속도로 용량(freeway capacity)을 "15분 동안 유지되는 한 방향 최대교통류율을 시간당 승용차대수로 환산한 값으로 일반적인 교통과 도로조건 하의 동질적인 고속도로 도로구간에 적용된다"고 정의하고 있다.

고속도로 기본구간의 용량은 자유속도(FFS, Free-Flow Speed)에 의해 결정될 수 있으며, 자유속도는 보통의 교통량(1,300pcphpl)이하에서 측정된 승용차의 평균속도이다. 만약 자유속도의 현장측정이 가능하지 않다면, 자유속도는 고속도로 해당구간의 조사(연구)된 물리적 특징을 기반으로 간접적으로 추정할 수 있다. 물리적 특징은 차로폭과 측방여유폭, 차선수, 그리고 인터체인지 밀도를 포함한다.

$$C_i = f(FFS) \tag{1}$$

$$FFS = BFFS - f_{LW} - f_{LC} - f_N - f_{ID} \tag{2}$$

- 여기서, FFS : 자유교통류 속도(km/h),
- $BFFS$: 기초 자유교통류 속도(110 또는 120km/h)
- f_{LW} : 차로폭 보정계수
- f_{LC} : 측방여유폭 보정계수
- f_N : 차로수 보정계수

f_{ID} : 인터체인지 밀도 보정계수

이와 같이 미국의 2000년판 도로용량편람에서 도로 구간의 용량을 자유속도에 의해 결정하고, 자유속도를 해당구간의 물리적 특징만으로 결정할 수 있다고 정의하는 데에는 자유속도가 도로의 물리적 특징이 같은 한 시공간적으로 변화 없이 일정하다는 가정을 기반으로 한 것이다.

그러나 실제로 자유속도는 도로구간의 물리적 특징이 같다 할지라도 다른 요인에 의해 시공간적으로 변화하며, 해당구간의 모든 시점에 대한 특정한 자유속도를 추정하는 데에는 무리가 따른다(Stewart, J. A., 등 [6]). 더불어 어떤 도로구간의 자유속도가 일정하다면, 해당구간에서 다양한 속도를 가진 차량군집을 발견할 수 없어야 하지만, 실제 도로상에는 다양한 속도의 차량군집이 형성되고 존재한다(안성철 등 [12]).

이러한 사실을 뒷받침하듯 최근의 가장 진보된 형태의 교통시뮬레이션 프로그램이라 할 수 있는 VISSIM v3.70 [5]에서는 각 교통구성 내 차종별로 희망속도(자유속도)를 통계적 분포로 정의함으로써 시뮬레이션 과정에서 다양한 차량군집을 형성하게하고 나아가 통행속도가 상대적으로 높은 차량군집이 다른 차량군집을 추월할 수 있는 기회를 제공하고 있다.

미국의 1985년판 이후 도로용량편람에서 또 하나의 가정은 고속도로의 용량을 15분 동안 유지되는 한 방향 최대교통류율로 정의하는 것이다. 이러한 정의는 고속도로에서 어떤 도로구간의 교통상태(또는 통행상태)가 15분내에서 시간에 따른 변화가 거의 없이 일정하다는 가정을 기반으로 한 것이다.

그러나 실제로 어떤 도로구간의 교통상태는 15분내에서 상당한 변화가 있다(김점산 등 [11]). 따라서 도로용량편람에서 용량의 기준으로 삼는 15분 동안의 최대교통류율은 교통시설의 설치시 시설 규모의 적정성을 파악하고자 하는 경우에는 사용할 수 있지만, 교통시설의 운영 및 제어에 있어서는 한계를 드러내게 된다.

2. 대안적 용량과 용량산정방법

대안적 용량(alternative capacity)의 정의문제는 기존개념에 반해 모호할 수 있지만(Zhang [10]), 교통류-밀도 관계에서 용량감소와 이력현상을 포함한 혼잡교통류의 특징을 포괄적으로 해석하려는 시도로서,

이는 용량을 확률적 변동으로 설명하고자하는 확률적 모형(Kittelson 등)과 교통국면(traffic phase)에 대응하는 운전자의 행태(driver's behavior)의 차이로 설명하고자하는 행태적 또는 역학적 모형(Daganzo, Zhang, 그리고 Kim 등)으로 구분할 수 있다.

대안적 용량의 산정방법은 용량을 분포로 볼 때, 해당분포의 어떤 수준(또는 부분)을 용량으로 대표할 수 있는지 정의하는 문제를 다루고 있으며, 용량의 기준이 되는 최대교통류율을 속도(speed), 반응시간(reaction time), 차두시간(time headway), 그리고 집계간격(duration of sampling interval)에 종속된 분포로 제시하고 있다.

1) Kittelson과 Roess의 연구

Kittelson과 Roess [9]는 교통류의 특징은 본질적으로 명백히 확률적이기 때문에 어떤 주어진 시간에서 순간 또는 접근용량(capacity of a movement or an approach) 또한 확률적 현상(stochastic phenomenon)이라 주장하면서, 미국의 도로용량편람에서 용량을 통계적으로 정의하여야 한다고 주장하였다. 그들은 미국의 2000년판 도로용량편람에서조차 용량의 통계적 정의를 광범위하게 무시하고, 여전히 용량을 "합리적 기대(reasonable expectancy)"로 정의하고 있는 사실을 비판하면서 다음과 같은 의문점을 제시하였다.

첫째, 만약 최대교통량이 주어진 지점에서 시간에 따라 또는 단위시간에서조차 변한다면, 15번째 백분위수(percentile), 중위값(median), 85번째 백분위수(percentile) 중 어떤 통계량으로 공식적 수치를 정의할 수 있는가?

둘째, 주어진 지점에서 최대교통량의 표준편차는 얼마인가? 낮은 신뢰구간을 기초로 용량이 정의되지는 않았는가?

셋째, 만약 표준 백분위수(percentile)가 정의되었지만 다른 비슷한 조건의 지점에서 역시 다른 결과를 보인다면, 어떤 측정치가 사용되어야 하는가?

또한 그들은 추가적으로 검토되어야 할 문제로 고속도로 기본구간과 차차로 도로구간에 대해 용량을 최대교통류율로 정의함에 따라 발생하는 교통와해(breakdown)를 제시하였다.

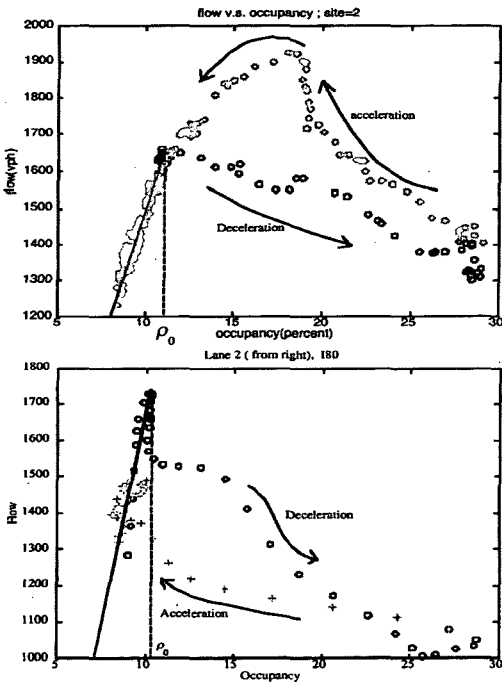
2) Daganzo, Cassidy, 그리고 Bertini의 연구

Daganzo, Cassidy, 그리고 Bertini [1]는 교통

류의 여러 현상(용량감소 등)을 확률적이고, 자생적 또는 임의적인 것으로 보는 견해를 비판하고, 운전자행태와 역학적 관계에서 병목구간의 용량(capacity on bottleneck) 등을 제안하였다.

3) Zhang의 연구

Zhang [10]은 미국의 도로용량편람에서 어떤 도로구간이 항상 같은 이상적 용량(ideal capacity)을 가진다는 정의를 비판하고, 운전자의 교통국면에 따른 지체된 반응시간에 의해, 모든 도로구간은 세 가지 종류의 용량, 즉 가속용량, 감속용량, 그리고 평형용량을 가진다고 주장하였다(그림 1).



〈그림 1〉 Zhang의 연구에서 교통량과 점유율 관계

4) Hyde와 Wright의 연구

Hyde와 Wright [4]는 통계적 방법론을 기반으로, 일반적인 도로조건하에서 시추이 발생하는 교통량의 차이와 한계교통량(extreme value)의 특징을 고려한 관측교통량의 상한선을 추정할 수 있는 방법론을 제시하였다.

구체적으로, 그들은 도로구간의 어떤 지점을 통과할 수 있는 한계용량(limiting capacity)의 측정을 시도

한 기존의 연구결과는 일관적이지 않다는 사실을 밝히고, 이러한 원인으로 첫째, 관측시점에 도로구간을 포화(saturate)시킬 수 있을 만큼 충분한 수의 차량이 없을 수 있다. 둘째, 교통량이 상류 또는 하류부의 병목에 의해 제약될 수 있다. 셋째, 충분한 교통조건을 갖추었더라도 실제 포화상태에서 관측된 교통량의 편차는 상당히 크다는 점을 제시하였다.

III. 제어용량 산정모형의 개발

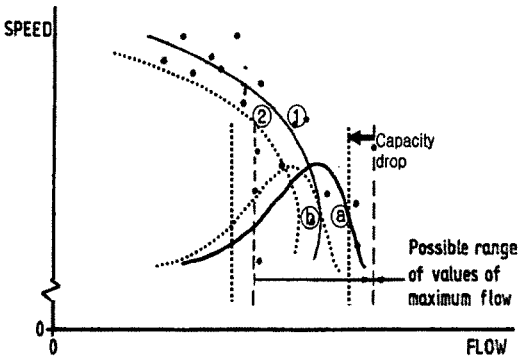
1. 모형의 기본개념

교통제어를 위한 도로용량 산정모형의 기본개념은 다음과 같이 기존 및 대안적 용량개념의 한계를 극복할 수 있는 전략으로부터 도출할 수 있다.

첫째, 기존의 미국 도로용량편람에서 용량산정의 기준이 되는 어떤 도로구간의 자유속도는 해당도로의 물리적 특징이 같다고 하더라도 결정적이기보다는 가변적(variable)이라 판단할 수 있다. 용량산정의 기준 교통자류인 최대교통류율은 차량추종이론으로부터 운전자의 반응시간, 차량의 속도, 차량의 성능, 차량의 길이의 함수로 정의할 수 있으며, 여기서 통행여건의 변화를 반영할 수 있는 변수는 운전자의 반응시간, 차량의 속도로 한정할 수 있다.

둘째, 새로운 도로용량 산정모형이 용량감소를 포함한 통행여건의 변화를 반영하기 위해서는 차량속도의 함수로 구성되어야한다. 용량산정의 기준이 되는 차량군집(vehicle group or platoon)내 차량속도는 운전자의 희망속도(DDS, Driver's Desire Speed)로 정의할 수 있으며, 본 연구에서는 실제 운전자가 희망속도를 통행여건에 대응하여 갱신할 수 있다는 사실을 반영하여 새로운 도로용량 산정모형에서 용량의 기준이 되는 차량속도를 운전자의 채택속도(DAC, Driver's Acceptable Speed)로 정의하고자 한다. 운전자의 채택속도는 어떤 도로구간을 단위시간에 지나가는 차량군집 내의 차량평균속도로부터 추정할 수 있다.

셋째, 기존의 미국 도로용량편람에서 용량정의의 가장 중요한 개념은 "합리적 기대(reasonable expectation)"로, 용량을 분포로 볼 때, 용량이 최대값이 아니라는 것은 확실하지만 용량을 해당분포의 어떤 수준(부분)이 대표할 수 있는지는 명확하지 않다. 따라서 용량의 정의를 시공간적으로 다른 도로구간에 일괄적으로 적용하



〈그림 2〉 자유속도의 변화와 최대교통류율의 통계적 정의

기 위해서는 용량의 기준이 되는 최대교통류율의 통계적 정의가 선행되어야한다.

정리하면, 〈그림 2〉와 같이 운전자의 채택속도가 ①에서 ②로 감소하는 경우 최대교통류율의 범위 또는 분포는 ③에서 ④로 이동(shift)하면서 용량감소가 발생한다. 여기서 채택속도별 최대교통류는 해당 분포의 평균, 최빈값, 또는 백분위수로 정의될 수 있다.

2. 모형의 기본식과 최소차두시간의 결정

1) 모형의 기본식

산정모형은 기존 미국 도로용량편람의 용량의 정의로부터 도로구간의 물리적 특징 외에 해당도로의 어떤 시점에서의 통행여건과 여기에 대응하는 운전자의 행태(driver's behavior)를 반영함으로써 정의할 수 있다.

미국의 도로용량편람 [7]에서는 고속도로 용량의 정의를 일반화하면 식(3)과 같다.

$$C_i = \text{Max}(n_1, n_2, \dots, n_s) \times \frac{3600}{\tau} \quad (3)$$

여기서 C_i : 도로구간 i 의 용량

τ : 집계간격,

n : 집계간격 τ 에서 관측교통류율,

s : 관측교통류율 n 의 개수

따라서 도로구간 i 의 용량은 관측교통류율 n 의 개수 s 가 충분히 커야 의미를 가질 수 있다. 그러나 차두시간 ht 을 이용하면 짧은 시간동안에도 충분한 개수의 교

통류율을 다음과 같이 산정할 수 있다

$$C_i = \left\{ \text{Max}(n, \dots) \times \frac{3600}{\tau} \mid \text{Max}(n, \dots) = \frac{\tau}{ht_{\min}} \right\} \quad (4)$$

여기서 Forbes [2]의 차량추종이론을 적용하면, 최소차두시간 ht_{\min} (초)은 감속을 결정하는데 필요한 반응시간 Δt (초)와 차량길이 L_n (m)을 차량속도 \bar{x}_n (m/s)로 나눈 값의 합으로 산정할 수 있다.

$$C_i = \left\{ \frac{3600}{ht_{\min}} \mid ht_{\min} = \Delta t + \frac{L_n}{\bar{x}_n} \right\} \quad (5)$$

Forbes [2]의 차량추종이론에서 반응시간 Δt (초)과 차량길이 L_n (m)가 일정하다는 가정을 받아들이고, 도로용량편람의 용량이 자유속도 v_f (FFS, Free-Flow Speed, km/h)에 의해 결정된다는 가정을 받아들이면, 도로구간 i 의 용량은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$C_i = \left\{ \frac{3600}{ht_{\min}} \mid ht_{\min} = \bar{\Delta t} + 3.6 \frac{\bar{L}_n}{v_f} \right\} \quad (6)$$

여기서 $\bar{\Delta t}$: 반응시간의 평균(초),

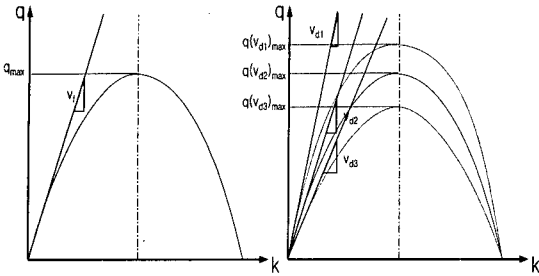
\bar{L}_n : 차량길이의 평균(m),

τ : 집계간격-도로용량편람을 기준으로 할 때 900초(15분)

새로운 도로용량 산정모형의 경우, 도로구간 i 의 용량 DC_i 는 모형의 기본개념과 정의에 따라 식 6의 자유속도 v_f 를 운전자의 채택속도 v_d (DAS, Driver's Acceptable Speed, km/h)로 대체하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$DC_i(t) = \left\{ \frac{3600}{h(t)_{\min}} \mid h(t)_{\min} = \bar{\Delta t} + 3.6 \frac{\bar{L}_n}{v_d(t)} \right\} \quad (7)$$

여기서 운전자의 채택속도 v_d 는 운전자가 도로구간의 물리적 특징과 통행여건을 고려하여 채택한 속도도로 도로구간에서 집계간격 τ 에 지나가는 차량군집 내의 차량평균속도로 추정할 수 있다. 운전자의 채택속도 v_d 는 도로구간의 차량군집 간 추월, 추종, 그리고 추종포기의 기준이 된다(〈그림 3〉).



〈그림 3〉 교통량-밀도 관계에서 v_f 와 v_d 의 개념도

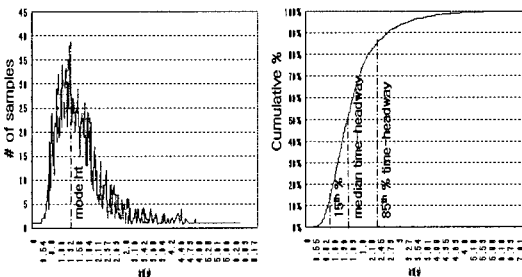
2) 최소차두시간의 결정

용량의 정의를 시공간적으로 다른 도로구간에 일괄적으로 적용하기 위해서는 용량의 기준이 되는 종속변수인 최소차두시간의 통계적 결정이 필요하다.

교통운영 및 제어의 기준이 될 수 있는 제어용량은, 교통제어의 목적이 혼잡(congestion)의 제거 또는 완화에 있다는 관점에서 본다면, 운전자의 채택속도 v_d 의 평균차두시간 \bar{ht} 보다는 해당 속도에서 혼잡을 일으키지 않는 최소차두시간(최대교통류율)의 결정을 통해 산정되어야 한다.

구체적으로 개념상 “모래를 치우고 깃발 안 넘어트리기 게임” 방식과 같이, 제어용량 산정모형에서 용량산정의 기준이 되는 집계간격 τ 에서 어떤 속도의 최소차두시간 ht_{min} 의 통계량은 작은 값으로부터 순차적으로 적용하여 산정된 교통류율과 실제 혼잡 없이 관측되는 최대교통류율의 비교를 통해 선정할 수 있다. 여기서 차두시간의 통계량별 최대교통류율은 식 7의 정산을 통해 산정할 수 있으며, 차두시간의 통계량은 차두시간 누적분포의 백분위수(percentile)를 사용하는 것이 적합하다(〈그림 4〉).

$$Max(n_1, n_2, \dots, n_s) \approx \frac{\tau}{ht_{min}} \tag{8}$$



〈그림 4〉 다차로 고속도로에서 차두시간의 통계적 분포 사례

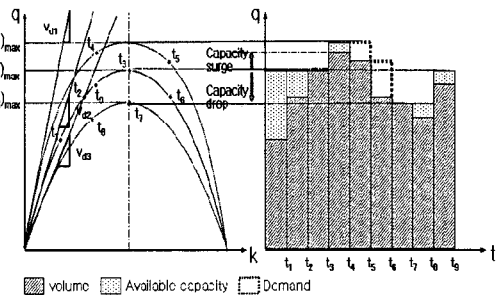
$$ht_{min} \in \{ht_1, ht_2, ht_3, ht_4, \dots\}, ht_n < ht_{n+1}$$

여기서 관측한 최대교통류율은 교통자료의 집계간격(sampling interval)뿐만 아니라 해당 도로구간의 교통상태(traffic condition)에 따라 달라질 수 있다.

$$Max(n_1, n_2, \dots, n_s) = f(\text{sampling interval, traffic condition}) \tag{9}$$

3. 모형을 통한 용량감소의 해석

새로운 도로용량 산정모형은 용량감소의 요인으로 판단되는 운전자의 채택속도를 포함한 함수로 정의함으로써 기존의 용량 및 용량산정기준과 달리 교통운영과정에서 관측되는 용량감소와 용량초과를 해석 또는 예측할 수 있다. 구체적으로 〈그림 5〉에서 도로구간 i 의 시점 t_1 에서 t_3 사이의 자유교통류상태로, t_1 와 t_2 사이에서 차량군집은 vd_2 의 속도로 긴 차두간격을 가지고(낮은 밀도로) 통행하고, t_3 에서 차량군집은 차두간격이 짧아지면서(밀도가 높아지면서) vd_2 에 의해 결정된 용량에 도달한다. 시점 t_4 는 새로운 용량모형에서는 자유교통류 상태지만 기존의 용량개념으로는 용량초과(capacity surge, $v/c > 1$)로, 차량군집은 vd_1 의 속도로 시점 t_3 에 비해 상대적으로 긴 차두시간으로 통행한다. 시점 t_5 와 t_6 사이에는 해당구간의 통과교통량이 수요를 모두 처리할 수 없는 강제(혼잡)교통류상태이다. 시점 t_7 은 강제(혼잡)교통류상태에서 자유교통류상태로 회복되는 시점으로 차량군집은 vd_3 의 속도로 주행하면서 이전 단위시간에 처리 못한 수요를 처리하기 위하여 최소차두시간을 유지한다. 여기서 시점 t_7 에서 도로구간 i 의 용량은 해당 단위시간에서 차량군집의 속도인 vd_3 에 의해 결정된



〈그림 5〉 새로운 도로용량 산정모형을 통한 용량감소의 해석

q(vd3)이며, 시점 t3에서 용량 q(vd2)비해 낮은 값을 갖는데, 이것을 기존 용량개념에서 용량감소(capacity drop)라 할 수 있다.

IV. 제어용량 산정모형의 정산 및 평가

1. 정산교통자료

본 연구에서 미국 FHWA의 차량간섭 연구를 위한 고속도로 수집 자료 [8]를 가지고 전장에서 제안한 도로용량 산정모형을 정산하고 적용하였다. 해당연구에서 교통자료는 다양한 기하학적 형태를 가지고 있는 고속도로 구간에서 시추이(tim-lapse) 촬영된 항공사진으로부터 차량의 위치를 계수화(digitizing)함으로써 수집되었다.

본 연구에서는 이상의 FHWA의 연구결과 수집된 자료 중 본 연구의 목적에 부합한다고 판단되는 도로구간 3개소(차로감소 1개소, 연결로 합류부 2개소)를 선정하여 전장에서 제시한 모형의 정산과 적용에 이용하였다. 구체적으로 교통상태를 분석한 결과, 벤투라 고속도로는 자유교통류 상태, 백릭로는 자유교통류와 혼잡(강제)교통류의 경계상태, 그리고 산타모니카대로는 용량상태로 확인되었다. 본 연구에서 모형의 정산을 위해서는 용량상태에 있는 산타모니카대로 4차로(최상위 차로)의 승용차 교통자료를 사용하였으며, 해당도로의 선정에 대한 구체적 이유는 다음과 같다.

첫째, 상위차로로 용량산정의 기준이 되는 승용차 교통이 주를 이룬다.

둘째, 동일구간의 1, 2차로와 달리 합류연결로의 영향을 받지 않은 상태로 판단된다.

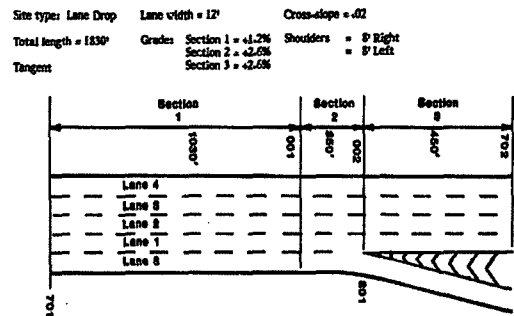
셋째, 해당구간의 교통류에 영향을 주는 어떤 교통

사고도 발생하지 않았다.

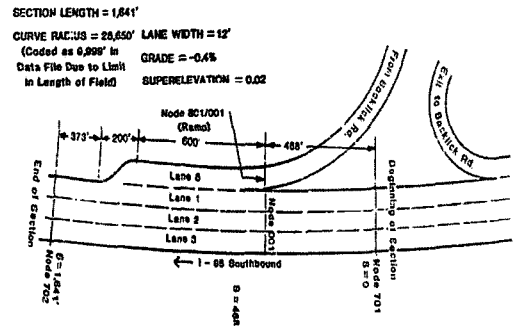
넷째, 해당구간의 하류부의 교통상황에 영향을 받지 않는 상태이다.

마지막으로, 해당구간은 용량상태인 서비스수준 E의 밀도 28pc/km/ln를 유지한다(그림 6)).

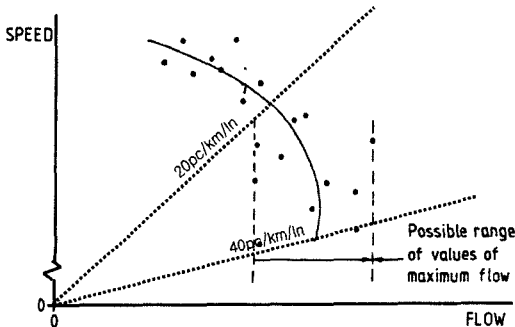
모형의 적용을 위해서는 자유교통류 상태인 벤투라 고속도로 4차로, 경계교통류상태인 백릭로3차로, 그리고 혼잡교통류상태인 산타모니카대로 1차로(최하위차로)의 교통자료를 사용하였다(그림 7, 8, 9)).



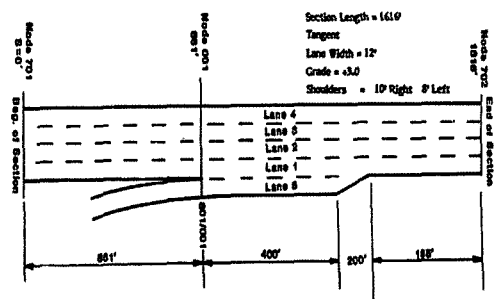
〈그림 7〉 벤투라 고속도로 U.S. 101 남측 도로구간의 기하구조



〈그림 8〉 백릭로 I-95 남측 도로구간의 기하구조



〈그림 6〉 산타모니카대로 4차로의 조사시간 내의 밀도범위



〈그림 9〉 산타모니카대로 I-405 남측 도로구간의 기하구조

2. 모형의 정산

1) 최대교통류율의 산정

교통운영 및 제어의 기준이 될 수 있는 제어용량은, 집계간격 τ 에서 속도별 차두시간 누적분포의 백분위수(percentile)의 작은 값으로부터 순차적으로 적용하여 산정한 교통류율과 실제 혼잡 없이 관측되는 최대교통류율의 비교를 통해 산정할 수 있다.

차두시간의 백분위수별 최대교통류율을 산정하기 위해서는 식 7의 최소차두시간 ht_{\min} (초)을 종속변수(y), 운전자의 채택속도 v_d (km/h)를 독립변수(x)로 한 선형회귀분석을 수행하여 모형의 계수인 평균반응시간 $\bar{Z}t(a)$, 평균차량길이 $\bar{L}(b)$ 을 추정하여야한다.

$$y = a + 3.6 \frac{b}{x} \quad (10)$$

여기서 속도별 차두시간의 도수값이 10이하인 경우 모형의 정산에 사용하지 않았다.

〈표 1〉 차두시간 백분위수별 최대교통류율 산정모형의 계수 추정결과

$DC_i(t) = \left\{ \frac{3600}{ht(t)_{\min}} \mid ht(t)_{\min} = \bar{Z}t + 3.6 \frac{\bar{L}_n}{v_d(t)} \right\}$				
차두시간 백분위수 (percentile)	결정계수 (R^2)	구분	평균반응시간 ($\bar{Z}t$, 초)	평균차량길이 (\bar{L}_n , m)
5th	0.8997	값	0.3763	7.9092
		t 통계량	15.815	20.534
15th	0.9151	값	0.5603	8.1620
		t 통계량	25.022	22.520
30th	0.8456	값	0.8072	7.7783
		t 통계량	26.954	16.047
35th	0.7560	값	0.9118	7.3308
		t 통계량	24.297	12.068
40th	0.6839	값	1.0607	6.2248
		t 통계량	27.815	10.084
45th	0.4567	값	1.2007	5.3708
		t 통계량	22.747	6.286
50th	0.3437	값	1.3733	4.0884
		t 통계량	26.978	4.962
85th	0.2816	값	3.2025	-9.7839
		t 통계량	20.068	-3.764
최빈값	0.0012	값	1.6197	-1.8182
		t 통계량	4.917	-0.247
평균값	0.0006	값	1.8755	-0.1816
		t 통계량	29.478	-0.176

선형회귀분석을 통한 차두시간 백분위수별 최대교통류율 산정모형의 계수인 평균반응시간 $\bar{Z}t(a)$, 평균차량길이 $\bar{L}(b)$ 의 추정결과와 해당모형의 통계적 결정계수(R^2)는 〈표 1〉과 같다.

백분위수별 최대교통류율 산정모형의 평균반응시간 $\bar{Z}t(a)$, 평균차량길이 $\bar{L}(b)$ 의 추정결과를 요약하면, 차두시간 백분위수 30-45번째 범위에서 평균반응시간은 0.8-1.2초, 평균차량길이는 5.37-7.77m로 합리적인 수준에서 결정되었다.

백분위수별 최대교통류율 산정모형의 통계적 결정계수(R^2)는 차두시간의 백분위수가 작을수록 높은 값을 가진다. 다시 말해 차두시간의 백분위수가 작을수록 차량간 추종관계가 명확히 형성되기 때문으로, 최대교통류율 산정 시 차량추종모형에 기반 한 모형의 설명력이 높다.

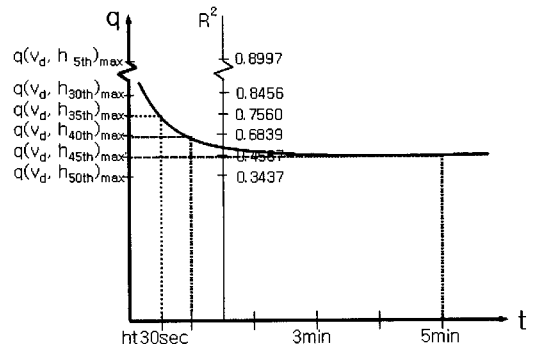
2) 집계간격별 제어용량 산정모형

본 연구에서는 집계간격별 제어용량 산정모형을 기존 고속도로 교통자료 집계체계 하에서 교통제어를 위한 의미 있는 집계간격(제어간격)인 30초, 1분, 3분, 그리고 5분을 기준으로, 백분위수 모형별 추정값과 관측값의 비교를 통해 선정하였다(〈그림 10〉).

비교 선정결과를 정리하면, 제어용량 산정모형으로 제어간격이 30초의 경우 35번째 백분위수 모형, 집계간격 1분의 경우 40번째 백분위수 모형, 그리고 집계간격 3분이상의 경우는 식(11)과 같은 45번째 백분위수 모형이 유의한 것으로 선정되었다.

$$DC_i(t) = \left\{ \frac{3600}{ht(t)_{\min}} \mid ht(t)_{\min} = 1.2007 + 3.6 \frac{5.3708}{v_d(t)} \right\}$$

if sampling interval \geq 3min (11)



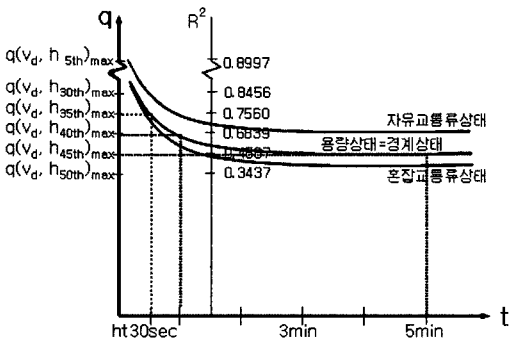
〈그림 10〉 집계간격별 백분위모형의 선정결과비교

여기서 30번째 이하의 작은 백분위수 모형은 제어간격 30초 이상에서 유의한 모형으로 선정되지 못했다. 이와 같은 결과는 해당 차두시간이 제어간격 내에서 연속적으로 또는 빈번히 관측되지 않기 때문에 실제 집계간격 내에서 전체 관측값의 평균을 기초로 환산된 교통류율에 반영되지 못하기 때문이다.

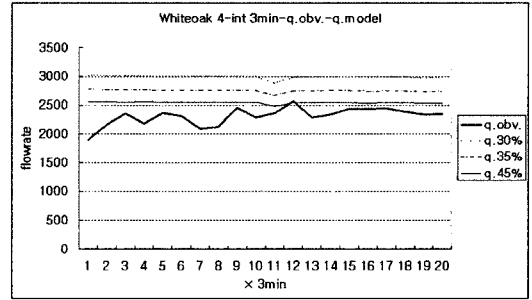
3. 모형의 적용

본 연구에서는 집계간격별 제어용량 산정모형으로 용량상태의 교통상태를 기준으로 선정된 차두시간 백분위 모형을 상이한 교통상태인 벤투라 고속도로 4차로, 백리로 3차로, 그리고 산타모니카대로 1차로를 기준으로 선정한 차두시간 백분위 모형과 비교하여, 모형의 시공간적 전이성을 평가하였다(〈그림 11~17〉).

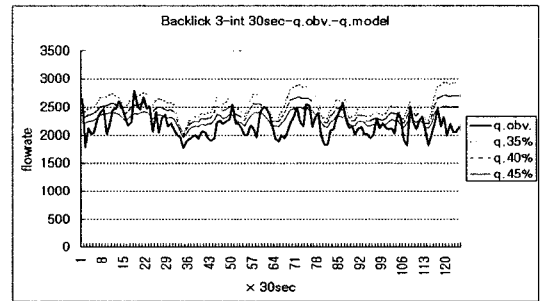
교통상태별 적용결과를 정리하면, 집계간격별 제어용량 산정모형은 자유교통상태를 기준으로 선정된 백분위 모형은 용량상태 기준보다 작은 차두시간에서 용량이 결정되었다. 반면, 경계상태와 혼잡상태를 기준으로 선정된 백분위 모형은 용량상태 기준과 거의 같은 차두



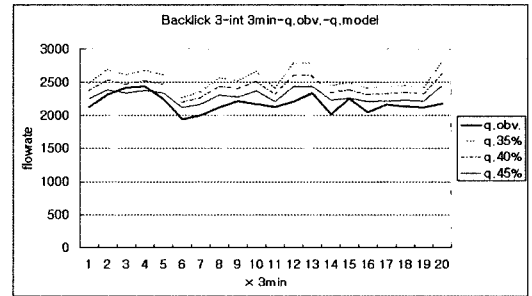
〈그림 11〉 교통상태별 백분위모형의 선정결과비교



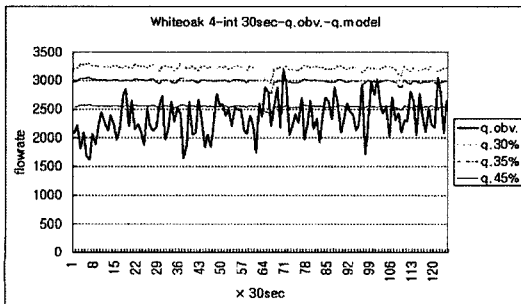
〈그림 13〉 자유교통상태 집계간격 3분에서 관측값과 모형별 용량추정값의 비교



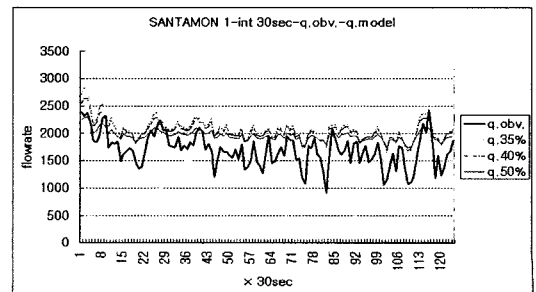
〈그림 14〉 경계교통상태 집계간격 30초에서 관측값과 모형별 용량추정값의 비교



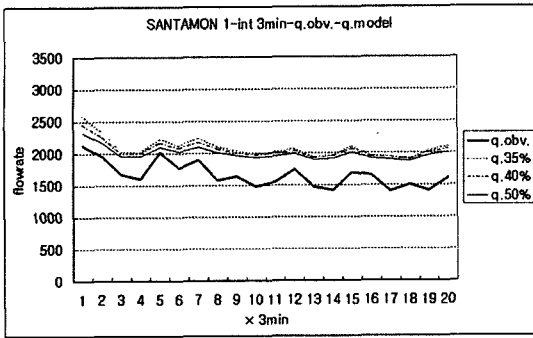
〈그림 15〉 경계교통상태 집계간격 3분에서 관측값과 모형별 용량추정값의 비교



〈그림 12〉 자유교통상태 집계간격 30초에서 관측값과 모형별 용량추정값의 비교



〈그림 16〉 혼잡교통상태 집계간격 30초에서 관측값과 모형별 용량추정값의 비교



〈그림 17〉 혼잡교통상태 접계간격 3분에서 관측값과 모형별 용량추정값의 비교

시간에서 용량이 결정되었다. 따라서 실제 교통제어의 목적이 혼잡의 제거 또는 완화에 있다는 점을 고려할 때 본 연구에서 제어용량 산정모형으로 용량상태를 기준으로 선정된 백분위 모형이 교통상태의 시공간적 차이에 불구하고 유의하다고 평가할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 고속도로 교통제어를 위한 고속도로에서 단위시간에 발생할 수는 있는 용량초과, 용량감소 등 모든 교통상태를 수용할 수 있는 제어용량 산정모형을 제안하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 기존연구검토에서는 기존의 용량개념 및 용량산정기준, 대안적 용량과 용량산정방법에 대한 검토를 수행하였다.

둘째, 제어용량 용량산정모형의 개발에서는 모형의 기본개념, 모형의 기본식, 그리고 용량의 기준이 되는 최소차두시간의 방법론을 정립하고, 이를 통해 교통운영과정에서 발생할 수 있는 용량감소 또는 용량초과를 해석하였다.

셋째, 제어용량 용량산정모형의 정산 및 적용에서 본 연구의 모형을 정산하고 교통상태별 적용을 수행한 결과, 집계간격 3분이상의 경우 최소차두시간을 45번째 백분위수로 결정하여 구축한 모형이 모든 교통상태에서 유의한 것으로 선정되었다.

본 연구에서는 연속류의 분석과 새로운 도로용량의 정산을 위하여 미국 도로국의 "차량간 간섭연구를 위한 고속도로 자료수집" 연구의 교통자료를 사용하였다. 따라서 본 연구의 연속류의 분석 결과가 국내 고속도로의 미시적 행태와 다를 수 있다.

참고문헌

1. Daganzo, C. F., Cassidy, M. J., and Bertini, R. L.(1999), "Possible Explanations of Phase Transitions in Highway Traffic", Transportation Research, Part B33, pp.365~379.
2. Forbes, T. W.(1963), "Human Factor Considerations in Traffic Flow Theory", Highway Research Record 15, pp.60~66.
3. Hall, F. L., and K. Agyemang-Duah(1991), "Freeway Capacity Drop and the Definition of Capacity", Transportation Research Record 1320, pp.91~98.
4. Hyde, T. and Wright, C. C.(1986), "Extreme Value Methods for Estimating Road Traffic Capacity", Transportation Research, Part B, Vol. 20, No. 2, pp.125~138.
5. PTV Planung Transport Verkehr AG(2003), "User Manual-VISSIM 3.70", PTV AG, Stumpfstrabe, Germany, pp.4.20~4.21.
6. Stewart, J. A., Rakha, H., and Van Aerde, M.(1995), "Analysis of Temporal and Spatial Variability of Free Speed along a Freeway Segment", Transportation Research Record 1494.
7. Transportation Research Board(2000), "Highway Capacity Manual", NCHRP, TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp.2.1~2.6, pp.13.1~13.30, pp.23.1~23.30.
8. U.S. DOT Federal Highway Administration (1985), "Freeway Data Collection for Studying Vehicle Interactions Technical Report", FHWA, Washington, D. C.
9. Wayne, K. Kittelson, and Roger, P. Roess (2001), "Highway Capacity Analysis after the HCM 2000", 80th TRB Annual Meeting.
10. Zhang, H. M.(2001), "A Note on Highway Capacity", Transportation Research, Part B35, pp.929~937.
11. 김점산·황준환·이성모·박창호(2003), "실시간 동적용량산정 기법에 관한 연구", 대한국토·도시계획 학회지, 국토계획, 제38권 제2호(통권127호),

pp.145~155.

12 안성철 · 전경수 · 박창호(2003), “고속도로 기본구

간에서 추월차로 이용행태가 서비스수준에 미치는 영향”, 대한교통학회 제44회 학술발표회.

✉ 주 작 성 자 : 김점산

✉ 논문투고일 : 2005. 4. 12

논문심사일 : 2005. 5. 20 (1차)

2005. 6. 9 (2차)

심사판정일 : 2005. 6. 9

✉ 반론접수기한 : 2005. 10. 30