

■ 論 文 ■

# 고속도로 최대통과교통량 산정 및 서비스수준 평가 기법 개발

Development of Capacity Analysis Procedure for Freeway Facility System

이 승 준

(한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원)

## 목 차

I. 서론	평가 방법론
II. 관련연구의 검토	VI. 검증
III. 고속도로의 용량 및 정체유형별 분석 방법론	VII. 본선 교통상태에 미치는 연결로 수요교통량의 영향 분석
IV. 최대통과가능교통량 및 최대통과교통량 산출 모형	VIII. 결론
V. 고속도로 교통운영상태 분석 및 서비스수준	참고문헌

Key Words : 최대통과가능교통량, 최대통과교통량, 가변용량, 교통운영상태분석, 서비스수준  
 maximum possible throughput rate, maximum throughput rate, variable capacity, traffic operating condition analysis, level of service

## 요 약

본 연구의 목적은 고속도로 교통운영상태 분석과 이로부터 도출된 하나의 평가척도(평균통행속도)에 의해 서비스수준 평가 방법론을 구축하는 것이다. 본 연구는 고속도로를 분석하기 위해서는 고속도로의 어느 구간에서 정체가 발생될 것이며, 발생된 정체의 영향은 어느 정도가 될 것인가를 파악하는 것이 우선되는 과제라는 관점에서 출발하였다. 따라서 고속도로 상에서 발생하는 정체를 유형화하였고(이는 곧 잠재적 병목구간 및 병목구간에서 발생하는 정체메커니즘의 유형화를 의미한다), 이를 통해 병목구간의 수요교통량에 따른 최대통과가능교통량 및 최대통과교통량의 산출을 통해 정체류 분석을 수행하였다. 본 연구가 기존의 연구들과 구별되는 가장 큰 특징들 중의 하나는 병목구간의 용량으로 볼 수 있는 최대통과가능교통량(정상류에서의 용량) 및 최대통과교통량(정체류에서의 용량)이 기존의 용량 개념과 같이 불변의 값이 아니고 수요교통량에 따라 변하는 가변적 용량이라는 점이다. 따라서 정체의 유형화와 가변적 용량 개념의 도입을 통해서 본 연구를 통해 구축된 고속도로 운영상태 분석 방법론은 고속도로 기하구조 조건에 의해 결정되는 물리적 병목구간에만 국한하지 않고 잠재적 병목구간(사고 및 공사 등의 돌발상황 발생구간 뿐만 아니라, 진출 연결로의 대기행렬이 본선으로 넘치는 분류부 등)에 대해서도 수요교통량에 따른 정체류 분석이 가능하였다.

The objective of this thesis is to develop a capacity analysis and to develop a methodology to evaluate Level of Service over the entire freeway sections by single MOE(Measure of Effectiveness). This study set forth from a following viewpoint: to analyze entire freeway sections as freeway facility system, it is important to identify the exact point where congestion would occur and the extent of the congestion. Therefore, in this thesis, congestion mechanism on freeways was figured out and congestion analysis methodology was developed. Thereby maximum possible throughput rate and maximum throughput rate in bottleneck sections were calculated and a congestion analysis was carried out. The difference between the new method and existing procedures is that maximum possible throughput rate and maximum throughput rate, that can be considered as capacities of un-congested and congested flow in the bottleneck section, are variable capacities dependent on demand flow.

\* 본 논문에서는 편의상 교통량의 단위를 (대/시)로만 명시하였으나, 엄밀한 의미로는 (승용차/시)임을 밝힌다.

## I. 서론

### 1. 연구 배경 및 목적

고속도로는 장거리의 기·중점을 연결하며 많은 통행자들이 이용하는 고속·대용량의 도로로서, 전체 도로망 구성요소 중 고속도로가 차지하는 비중은 아주 크다. 따라서 과거로부터 많은 교통 전문가 집단은 고속도로의 계획, 설계 및 운영의 관점에서 고속도로를 분석하려는 시도를 해왔으며, 각 분야별로 상당한 수준의 분석기법들이 제시되어 온바 현재에 이르러서는 이러한 분야들에 있어서 큰 성과를 이루었다고 말할 수 있다. 그러나 고속도로 운영상태 분석 및 운영상태의 질(서비스수준)을 평가함에 있어서, 고속도로를 하나의 유기적인 체계로 파악하여 고속도로에 대한 운영상태를 포괄적으로 평가하려는 노력이 극히 제한적이었다고 볼 수 있다. 그 예로, 우리나라 도로용량편람과 미국의 2000HCM에서는 고속도로를 기본구간, 엇갈림구간, 연결로 접속부로 나누어 분석하고 있으며, 고속도로 종합분석 역시 각 구간 분석 방법론을 개별적으로 적용하여 구간별 서비스수준을 산정하고 있는데서 찾을 수 있다. 다만 정체류 분석에 있어서는 수요-용량관계를 이용하여 고속도로의 교통 운영상태를 분석해야 한다고 제시하고 있지만, 정체류의 용량이 명확하게 규명되지 못함으로 인해서 정체 상황에 대한 개략적인 분석을 수행할 수밖에 없는 실정이다. 즉, 정상 교통류가 어떠한 상황에서 정체류로 전이되는가하는 문제와 정체류로 전이 시 어떠한 규모의 정체류가 되는가에 대해서 명쾌한 해답을 제시하지 못하고 있다. 이는 정체유발 지점인 병목구간에서 발생하는 차량상충으로 인한 충격 등 와해의 원인을 규명하는 미시적 접근이 부족하기 때문으로 풀이된다.

따라서 정상류와 정체류가 공존하는 고속도로의 분석을 위해서는 정체류에 대한 명확한 분석 기법이 제시되고 이를 통해 고속도로 운영상태의 질을 평가하는 새로운 방법론이 요구된다.

### 2. 연구 방법론

본 연구에서 제시하는 교통운영상태 분석 방법론의 핵심은 분석 시간대별 고속도로의 운영상태 분석이 되며, 운영상태의 질을 평가하기 위한 효과척도(MOE :

Measure Of Effectiveness)로는 평균통행속도가 된다. 본 연구에서 평균통행속도를 효과척도로 적용한 이유는, 일반적으로 고속도로 이용자가 느끼는 고속도로의 서비스 질이 통행시간(평균통행속도)에 크게 좌우되기 때문이다. 즉, 고속도로 상의 특정구간을 지날 때 잠시 정체되더라도(이 때 정체구간의 밀도는 상당히 높고 현재의 서비스수준 구분기준에 의하면 해당구간의 서비스수준은 F로 판정될 것임) 기준점간의 통행시간이 정체가 없는 상태에서 통행한 시간과 비교해 큰 차이가 없다면 고속도로 통행자는 개별 구간의 서비스수준과는 무관하게 전체 통행에 대하여 양호한 수준의 서비스수준이라고 판정할 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 고속도로 통행자의 관점에서 운영관리자와 이용자가 공감할 수 있는 서비스수준 기준의 도입을 통한 교통운영상태 분석 방법론을 개발하였다.

평균통행속도를 산출하기 위해서는 개별 분석구간의 교통류 상태를 알아야 하며, 교통류 상태의 판단은 수요와 최대통과가능교통량의 비교를 통해 이루어진다. 여기서 최대통과가능교통량은 교통상황에 따른 가변적인 값으로 인식된다. 본 연구에서는 본선 및 연결로 교통수요 별 최대통과가능교통량을 산출하고, 이를 통해 교통류를 정상류와 정체류로 구분한다. 특히, 교통류에 가해지는 충격(합류 및 차로변경 등으로 인한 차량상충의 영향)을 고려하여 정상류에서 정체류로 전이 시 어떠한 상태에서 정상류가 정체류로 전이되며, 전이된 정체류는 어느 정도의 정체규모를 가진 정체류가 되는가에 대한 분석을 시도하였다. 또한 정상류 및 정체류의 평균통행속도 산출을 통해 고속도로의 서비스수준을 평가하는 일련의 방법론을 구축하였다.

## II. 관련연구의 검토

### 1. 용량

#### 1) 용량의 정의

미국의 2000HCM에서 제시하는 고속도로 기본구간의 용량 정의를 살펴보면, “주어진 도로조건, 기하구조 조건, 교통조건, 환경조건 및 교통통제조건 하에서 일정 시간기간 동안 한 차로(또는 도로)상의 한 지점 또는 균일 구간을 사람 또는 차량이 합리적인 수준에서 통과할 것으로 예상되는 최대교통량(maximum flow rate)”으

로서, 대/시, 승용차/시 또는 인/시로 표현된다.

한편, 고속도로 합류부와 같은 병목구간에서 관찰되는 Queue discharge flow는 “병목구간을 통과하여 고속도로의 자유류 속도(free-flow speed)로 가속하는 교통류”로 정의되는데, 관찰을 통해 추정이 가능하며 관찰된 값으로부터 추정하는 방법은 다음과 같이 세 종류가 있다.

- maximum flow - queue discharge flow 중 최대 값.
- expected maximum flow - 순서 통계량(order statistics)에 의해 queue discharge flow를 정규분포로 가정하여 구한 최대 값.
- mean flow - queue discharge flow의 평균 값.

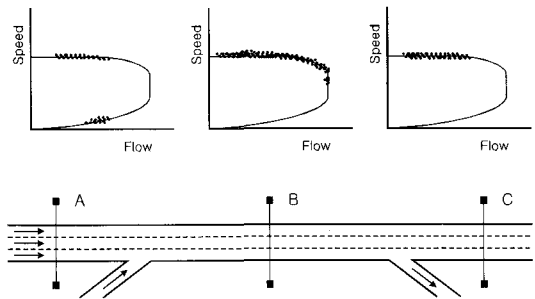
위의 세 가지 종류 중, mean flow가 Queue discharge flow의 정의로서 가장 적합한데, 그러한 이유로는 다음과 같다.

첫째, 전통적인 대기행렬 이론의 서비스율 개념과 일치하며, 둘째, 추정치가 매우 쉽게 관찰되며, 관찰된 추정치가 여러 기간 동안 관찰된 추정치와 큰 차이가 없어서 짧은 기간 동안 관찰하여 얻은 추정치의 신뢰성이 높으며, 셋째, 다른 두 정의와 달리 추정치가 데이터 수집주기에 덜 민감하여 크게 변화하지 않으므로 데이터 수집주기와 조사지점이 다른 경우에도 평균교통량간의 비교가 가능하다.

## 2) 용량에 대한 이슈(Issues)

선행 연구로부터 용량에 대한 대표적인 두 가지 이슈를 끌어내면 첫째, 현장 조사를 통한 용량 관측가능 지점에 대한 이슈와 둘째, 전통적 기본구간의 용량 값과 병목구간의 용량(Queue discharge flow) 차이에 대한 이슈를 들 수 있다.

Hall, Hurdle 그리고 Banks(1992)는 그들의 연구 결과로부터 속도-교통량 관계상의 세 영역(정상류, 용량 상태, 정체류)이 고속도로의 어느 지점에서나 관찰되는 않을 것이라고 강조했다. 그러한 이유로는, 충분한 수요가 있을 때 교통류가 용량 상태에 도달할 수 있으므로 <그림 1>의 지점 B와 같은 병목구간에서



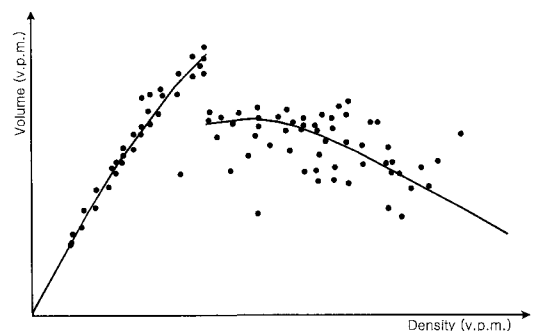
<그림 1> 관측자료 속성에 대한 관측 지점의 영향<sup>1)</sup>

만 정상류 상태 및 용량 상태의 관측이 가능하다고 주장하였다.

또한, <그림 1>의 지점 A와 같은 고속도로 기본구간에서는 정상류 상태의 영역이 관측 가능하나 용량 상태는 관측이 곤란하며, 병목구간에서 발생한 대기행렬이 상류부 기본구간으로 전파되었을 경우 기본구간 정상류 상태의 교통류는 용량상태에 도달하지 않고 급격히 정체류로 전이하게 된다고 보았다. 그리고 <그림 1>의 지점 C와 같이 병목구간의 하류부에서는 정상류 상태만이 관측된다고 보았다.

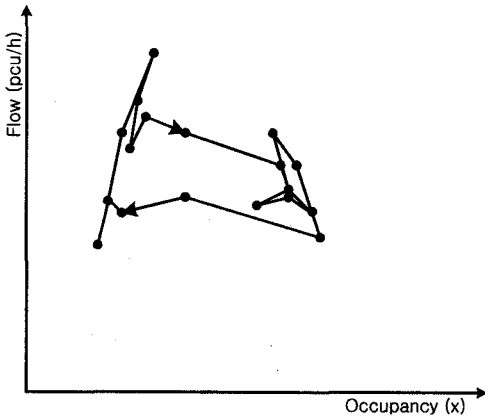
<그림 2>와 <그림 3>은 고속도로 기본구간에서의 교통량-밀도 및 교통량-점유율 관계를 보여주는 예로서, 정상류와 정체류 때 용량 값이 서로 다를 수 있음을 보이고 있다.

한편, 고속도로는 속성상 기본구간의 용량과 병목구간에서 나타나는 용량의 두 가지 종류의 용량을 가지며, 두 용량 값은 서로 다르다고 보는 시각이 있다.

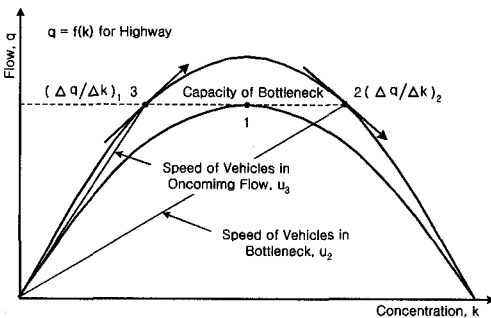


<그림 2> Edie의 불연속 교통량-밀도 관계 (Drake 등, 1967)<sup>2)</sup>

1) Traffic Flow Theory - A Monograph (Revised Edition), TRB Special Report 165, Transportation Research Board National Research Council Washington, D.C., 1997, p. 2-13, Figure 2.2  
 2) Traffic Flow Theory - A Monograph (Revised Edition), TRB Special Report 165, Transportation Research Board National Research Council Washington, D.C., 1997, p. 2-23, Figure 2.13



〈그림 3〉 교통량-점유율 변화 패턴(Hall 등, 1986)<sup>3)</sup>



〈그림 4〉 고속도로 본선과 병목구간의 교통량-밀도 관계 곡선<sup>4)</sup>

〈그림 4〉는 고속도로 본선과 병목구간의 교통량-밀도 관계 곡선을 통해 병목구간의 용량이 기본구간 용량보다 작게 나타난다는 것을 보인 예이다.

## 2. 최대진입가능교통량 산정 모형

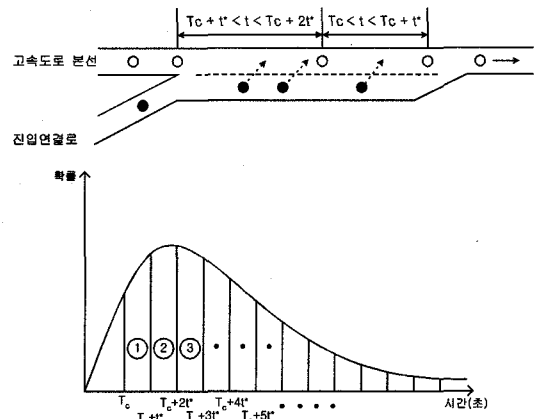
최대진입가능교통량(합류용량) 산정 방식은 연결로 교통류가 본선 교통류의 차간간격을 이용하여 본선으로 진입 할 수 있는 최대교통량을 산정하는 방식으로, 일반적으로 간격수락모형(Gap Acceptance Model)으로 알려져 있다. 그러나 기존의 간격수락모형을 이용한 최대진입가능교통량 산정 방식은 기본구간의 차두간격분포를 적용하기 때문에 본선 교통류만을 고려할 뿐 진입

교통류에 의해 발생하는 차량상충의 영향을 고려하지 않으므로 연결로 진입교통량과는 무관하게 언제나 동일한 값을 산출할 뿐만 아니라 최대진입가능교통량을 과대 추정하는 경향을 나타낸다. 이처럼 기존의 방식에 따라 산출된 최대진입가능교통량을 본 연구에서는 정적 최대진입가능교통량으로 정의한다. 반면 동적 최대진입가능교통량 산정 방식은 연결로 진입교통류의 영향을 반영할 수 있는 합류 영향권의 차두간격분포를 적용함으로써, 본선 교통수요와 연결로 교통수요의 조합에 따른 최대진입가능교통량을 산출한다.

### 1) 정적 최대진입가능교통량 산정 모형

임계차두간격을 이용한 최대진입가능교통량 산정은 차두간격 확률밀도함수를 다중진입 구간별로 나누어 각각의 다중진입량을 곱하여 합산하는 방식을 취한다. 이때, 각각의 다중진입 구간은 임계차두간격( $T_c$ , Critical Time Headway)<sup>5)</sup>과 다중진입 시 이용되는 차두간격( $t^*$ )에 의해 구분된다. 〈그림 5〉에서 보는 바와 같이, 차두간격 확률밀도함수  $f(t)$ 에 대해 1대의 진입가능 구간을 확률로 표현하면 식(1)과 같다.

$$P\{T_c < t < T_c + t^*\} = \int_{T_c}^{T_c + t^*} f(t) dt \quad (1)$$



〈그림 5〉 다중진입을 고려한 최대진입가능교통량 산출 개념도

3) Traffic Flow Theory - A Monograph (Revised Edition), TRB Special Report 165, Transportation Research Board National Research Council Washington, D.C., 1997, p. 2-26, Figure 2.15

4) Traffic Flow Theory - A Monograph, TRB Special Report 165, Transportation Research Board National Research Council Washington, D.C., 1975, p. 61, Figure 4.20

5)  $T_c$ 는 본래 임계차두간격(Critical Time Gap)을 의미하는 기호이나, 본 연구에서는 임계차두간격(Critical Time Headway)을 나타내는 기호로 정의함.

따라서 본선의 차두간격을 이용한 연결로의 최대진입가능교통량은 다음과 같이 산출된다.

$$\begin{aligned}
 & ① P\{T_c < t < T_c + t^*\} \rightarrow 1\text{대 진입} \\
 & ② P\{T_c + t^* < t < T_c + 2t^*\} \rightarrow 2\text{대 진입} \\
 & ③ P\{T_c + 2t^* < t < T_c + 3t^*\} \rightarrow 3\text{대 진입} \\
 & \quad \vdots \\
 & \quad \vdots \\
 \therefore Q_{MAX} & = \\
 Q_m \cdot \sum_{n=0}^{\infty} P\{T_c + nt^* < t < T_c + (n+1)t^*\} \times (n+1) & \quad (2)
 \end{aligned}$$

**2) 동적 최대진입가능교통량 산정 모형**

동적 최대진입가능교통량 산정 방식은 본선교통류와 연결로 진입교통류의 상호작용을 고려한 동적 개념의 최대진입가능교통량 산정 방식이 된다. 합류 영향권의 차두간격분포를 이용하여 식 (2)에 대입하여 최대진입가능교통량을 산출하면 다음과 같다.

**■ K=2, α=0.5인 Pearson Type III 분포**

$$\begin{aligned}
 f(t) & = \lambda_m^2 (t-0.5)e^{-\lambda_m(t-0.5)} \quad (3) \\
 \lambda_m & = \frac{2}{\frac{3600}{Q_m + WQ_r} - 0.5}, \quad W = \frac{Q_m}{3600} \quad (4)
 \end{aligned}$$

여기서,

$Q_m$  = 본선 접속차로 교통량(대/시)

$Q_r$  = 연결로 진입 교통량(대/시)

$$\begin{aligned}
 \therefore Q_{MAX} & = \\
 & = Q_m \cdot \sum_{n=0}^{\infty} P\{T_c + nt^* < t < T_c + (n+1)t^*\} \times (n+1) \\
 & = Q_m \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \lambda_m (T_c + nt^* - 0.5 + \frac{1}{\lambda_m}) \cdot e^{-\lambda_m(T_c + nt^* - 0.5)} \right\} \\
 & = Q_m \cdot \left[ \frac{\lambda_m (T_c - 0.5 + \frac{1}{\lambda_m}) \cdot e^{-\lambda_m(T_c - 0.5)}}{1 - e^{-\lambda_m t^*}} \right. \\
 & \quad \left. + \frac{\lambda_m t^* \cdot e^{-\lambda_m(T_c + t^* - 0.5)}}{[1 - e^{-\lambda_m t^*}]^2} \right] \quad (5)
 \end{aligned}$$

**■ 동적 최대진입가능교통량**

동적 최대진입가능교통량은  $Q_{MAX} = Q_r$ 의 관계가 성립할 때의  $Q_{MAX}$ 가 된다.

**3. 동적 용량**

박은미(2004)의 연구에서는 혼잡교통류 관리를 위한 동적 용량의 개념 및 산정방법을 제시하였는데, 연구의 핵심은 하류부에 병목구간이 존재하고 이로부터 발생한 혼잡에 의하여 대기행렬이 상류부 기본구간으로 파급되어 갈 때의 최대가능처리량(THi(ti))의 예측이다. 박은미의 연구는 혼잡 발생시 정상교통류로 가능한 빨리 회복시키기 위한 제어 기준으로서 기본구간의 동적 용량을 정의하고 그 예측 방법론을 제시한데 큰 의의가 있다. 그러나 본 연구에서는 상류부 기본구간의 교통량과 연결로 진입교통량을 통해 하류부 병목구간의 동적 용량(최대통과교통량)을 예측한다는 점에서 박은미의 연구와는 차이점이 있다고 하겠다.

**4. 고속도로 종합분석 연구**

**1) 도로용량편람**

우리나라의 도로용량편람에서 제시하는 고속도로의 운영상태 분석방법은 설계시의 접근 방법과 거의 동일하지만 여러 설계 대안을 고려하지 않는다는 점에서 보다 단순하다. 교통운영상태 분석을 위해서는 모든 교통량, 기하구조 및 교통상태 등을 알아야 하며, 연결로의 위치, 엇갈림 형태 및 기타 특성에 따라 고속도로를 소구간으로 나누어 분석한다. 교통운영상태 분석에 있어서는 교통수요와 용량의 관점에서 파악하여 정상류와 정체류로 구분하여 분석하여야 한다는 원론적인 원칙만 제시하고 있고 정체류 분석을 위한 구체적인 방법론을 제시하고 있지 않다. 다만, 정체가 발생하지 않은 정상류 상태를 분석할 때에는 고속도로를 균일한 소구간으로 나누어 개별 소구간의 분석 방법을 적용하여 각 소구간의 서비스수준을 결정한다.

**2) 2000HCM**

미국의 2000HCM에서는 고속도로의 분석 시, 우리나라의 도로용량편람과 마찬가지로 개별구간의 분석 방법을 토대로 전체구간 분석을 시도한다. 전체구간 분석의 중요한 핵심은 각 구간별 수요-용량 관계이다. 즉, 수요-용량 관계를 통하여 정상류와 정체류로 구분하여 각기 다른 방법을 적용한다. 이를 위해, 용량 감소 요인을 유형화하여 계량화하였고 정체류에 대하여 단순화

된 선형의 속도, 교통량, 밀도 관계를 적용하였다. 또한 교통운영상태 분석을 위해 시간대별, 기·종점 교통수요를 활용하였다.

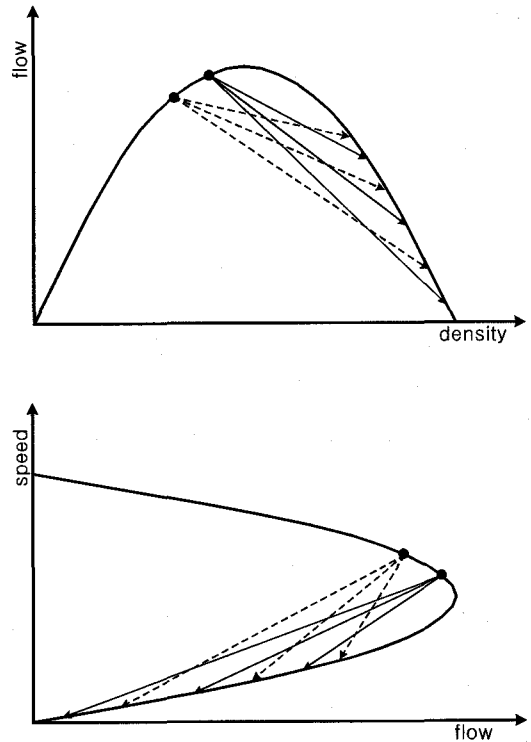
3) 종합

도로용량편람과 2000HCM의 경우 모두 고속도로 운영상태 분석을 수요-용량 관계를 통해 정상류와 정체류로 나누어 수행하여야 한다는 관점을 견지하였으며, 특히 2000HCM의 경우 도로용량편람 보다 세밀한 분석 방법론을 제시하였다. 그러나 두 가지 방법 모두 교통수요가 용량에 도달하기 전에 나타날 수 있는 정체상황은 고려하지 않았다. 즉 합류부, 진출 연결로 교통류의 대기행렬이 본선을 잠식한 경우 등과 같이 차로감소 현상이 나타나는 병목구간에서는 차량 거동에 따른 상층의 영향으로 교통수요가 용량에 도달하기 전에 정체가 발생할 수 있는데, 도로용량편람과 2000HCM에서는 교통류 사이에서 발생할 수 있는 상층의 영향을 반영하지 않으며, 불변의 용량을 적용함으로써 다양한 교통상황에서 정상류가 정체류로 전이되는 현상을 분석하는데 한계점을 내포하고 있다. 또한 정체 발생 시, 정체류 용량산정 방법이 제시되지 않아 정체류 분석의 한계성을 지니며, 이 때문에 고속도로의 분석에 있어서도 개략적인 분석에 치중할 수밖에 없는 한계점을 지닌다.

Ⅲ. 고속도로의 용량 및 정체유형별 분석 방법론

1. 문제제기

일반적으로 알려진 교통량-밀도 관계 및 속도-교통량 관계도 상에서 정체가 발생할 경우에 나타나는 교통류의 상태 변화는 <그림 6>에서 보는 바와 같이 정상류에서 용량상태에 도달하기 전에 정체류로 전이될 수 있다. 그러나 <그림 6>에서 볼 수 있는 바와 같이, 정상류 상태에서 정체류로 전이될 때의 정상류 상태가 모두 같은 것은 아니며 또한 정체류로 전이되더라도 전이된 정체류의 상태 또한 모두 다를 수 있다. 즉, 정상류 상태에서 어떠한 충격, 예를 들어 사고, 공사 등의 돌발상황을 포함하여, 본선 교통수요 및 연결로 진입교통수요의 증가 등이 원인이 되어 정체가 발생되며, 그 충격의 강도에 따라 정상류에서 정체류로 전이될 때, 정상류 및 정체류의 상태가 제 각각 다른 것으로 해석 할



<그림 6> 교통류 전이 예시

수 있다(이에 대하여는, “Ⅶ. 본선 교통상태에 미치는 연결로 수요교통량의 영향 분석”에서 다양한 분석 예를 다루었음). 따라서 정체류의 해석을 위해서는 정상류에서 정체류로 전이될 때 가해지는 충격과 전이 양상과의 관계성을 파악하는 것이 필요하다.

2. 최대통과가능교통량 및 최대통과교통량의 정의

본 연구에서는 상기에 기술된 전통적 개념의 용량과 최대통과가능교통량 및 최대통과교통량이란 세 가지 주요한 개념을 사용한다. 본 연구에서 정의하는 용량은 기존의 USHCM 및 KHCM에서 정의하는 기본구간의 용량을 의미하며, 최대통과가능교통량 및 최대통과교통량은 병목구간에서 정상류 상태 및 정체류 상태에서 나타날 수 있는 최대교통량으로 정의된다. 즉 최대통과교통량은 수요교통량이 병목구간의 최대통과가능교통량을 초과하여 정체가 발생한 경우 나타나는 정체류의 최대교통량이 된다. 선행 연구에서는 정상류 상태의 기본구간 용량과 병목구간의 용량(Queue discharge flow)

사이에 차이가 발생함을 관찰을 통해 확인하였으나, 병목구간에서의 최대교통량이 가변적으로 변할 수 있으며 어떠한 원인에 의해 정상류 상태의 기본구간 용량보다 작은 값으로 나타나는 것에 대해서는 이론적으로 입증하지 못하였다. 그러나 본 연구에서는 병목구간에서 합류로 인한 차량상충의 영향을 반영한 모형을 구축하였으며, 이를 통해 병목구간의 최대통과가능교통량과 최대통과교통량을 산출하였다. 본 연구에서 정의한 병목구간의 최대통과가능교통량과 최대통과교통량은 교통상태에 따라 가변적인 값으로 기존의 전통적인 불변의 값으로 정의되는 기본구간의 용량 및 병목구간의 용량(Queue discharge flow)과는 구별되는 개념이다.

### 3. 정체유형별 분석 방법

고속도로는 하나의 유기적인 시스템으로서, 고속도로의 어느 일부 구간에서 정체가 발생하면 그 영향이 다른 구간에 전파되며, 정체의 영향이 심각할 경우 네트워크 차원으로 정체가 파급될 수 있다. 따라서 고속도로 상에서 발생하는 정체를 유형별로 구분하여 이를 고속도로 종합분석에 반영하고자 한다.

#### 1) 차로감소 구간

고속도로 차로감소 구간에서 발생하는 정체는 차로감소 이전 본선 교통수요가 차로감소 구간의 용량(최대통과가능교통량)을 초과할 경우 발생된다. 이 경우, 최대통과가능교통량은 차로별 교통수요에 의해 결정되며, 가변적인 값이 된다. 차로감소 구간의 교통상태를 분석하기 위해서는 먼저, 차로감소 구간의 최대통과가능교통량을 산출하여야 하며, 수요교통량이 최대통과가능교통량을 초과한 경우는 정체상황이므로 정체류의 최대통과교통량을 산출하여야 한다. 차로감소 구간의 최대통과가능교통량의 산출은 차로감소 이전 구간의 차로변경교통량(최대차로변경가능교통량)과 감소차로 교통류의 합류 교통량(최대진입가능교통량)을 산정함으로써 가능해진다.

#### 2) 합류 구간

고속도로의 합류구간은 가속차로(진입부가차로)가 충분히 길기 때문에, 진입 교통수요가 많을 경우 차로감소 구간과 같은 메커니즘에 의해 정체가 발생할 수

있다. 그러나 교량 등의 일반도로에서 흔히 볼 수 있듯이, 가속차로(진입부가차로)가 없거나 매우 짧은 경우에는 연결로로부터의 진입이 본선의 차로변경을 유발하기보다는 본선 접속차로와의 관계에 의해서만 최대진입가능교통량이 결정되므로 정체류가 주로 연결로에 발생하게 된다. 다만, 연결로로부터 차량들이 본선으로 무리하게 진입하는 경우(강제진입)에는 본선에도 영향을 미쳐 본선의 차로변경을 유발하여 본선 정체를 유발할 수 있으나, 본 연구에서는 강제진입의 경우는 배제하였다. 따라서 합류구간에서 발생할 수 있는 본선 정체류의 유무는 합류구간의 기하구조 조건에 따라 결정되는 것으로 본다. 합류구간의 정체류 분석에 대해서도 차로감소 구간과 동일하게 수요교통량과 최대통과가능교통량의 비교를 통해 교통상태를 진단하고 정체상황의 경우 최대통과교통량 및 정체규모 산정을 통해 정체류 분석을 수행한다.

#### 3) 분류 구간

분류 구간에서 발생하는 정체는 연결로 진출 교통수요가 연결로 진출 용량을 초과하여 본선으로 대기행렬이 전파되는 경우에 발생된다. 이 때, 본선 교통류는 진출 교통류에 의해 접속차로의 이용이 제한되어 차로감소 구간과 같은 메커니즘에 의해 정체가 유발된다. 따라서 분류부의 경우는 차로감소 구간 및 합류부와는 다르게 세 가지의 고려사항이 대두되는데, 첫째는 진출 용량의 산정이며, 둘째는 진출수요가 진출용량을 초과시 대기행렬이 본선까지 파급되는가 여부이며, 셋째는 진출 연결로의 대기행렬이 본선으로 파급 시 본선의 교통상태 분석이 된다.

진출용량의 산정은 진출 연결로가 접속되는 도로의 특성에 따라 결정된다. 즉, 진출 연결로가 신호교차로와 접속되는 경우의 진출용량은 일반적으로 신호교차로의 처리 용량과 관련되어 결정되며, 진출 연결로가 연속류 특성을 보이는 교량 등과 같은 일반도로에 접속할 경우는 합류 구간에서 전술한 바와 같이 진출용량이 차로변경을 수반하지 않은 연속류 일반도로 접속차로로의 최대진입가능교통량과 같게 되므로 이를 산출하여 진출용량으로 결정한다. 진출수요가 진출용량을 초과하여 대기행렬이 본선으로 파급된 경우는 대기행렬의 본선 파급시간을 산출하고 이때로부터 본선에 대한 교통상태 분석을 차로감소 구간과 같은 방식에 의해 수행한다.

4) 고속도로 종점

고속도로 종점 구간은 일반적으로 영업소(Toll-gate)가 있거나 시가화도로와 접속되며, 진출용량은 영업소의 용량 또는 신호가로의 용량과 관련되어 결정된다. 따라서 진출수요가 진출용량을 초과한 경우 본선 상류부로 정체가 파급될 수 있으며, 이러한 형태의 정체는 고속도로 종점 구간뿐만 아니라, 고속도로 전체구간 중 일부구간에서 발생된 정체가 상류부로 전파될 때와 같은 형태가 된다. 그러나 고속도로 종점구간의 정체류 분석은 전형적인 Deterministic queueing 이론에 의해 분석하므로, 용량이 교통상태에 따라 가변적으로 변하는 병목구간의 분석과는 구별된다.

5) 엇갈림구간

엇갈림구간은 합류구간 및 분류구간의 정체 유형을 모두 포함하는 구간에 해당하므로, 엇갈림구간에서 발생하는 정체유형(합류 또는 분류)에 따라 분석 방법을 달리 적용한다.

IV. 최대통과가능교통량 및 최대통과교통량 산출 모형

1. 최대통과가능교통량 산출 모형

본 연구에서 정의하는 최대통과가능교통량은 합류 영향권에서 본선 교통류가 정상류를 유지하며, 합류부를 통과 할 수 있는 최대교통량으로서, 본선 교통수요와 최대진입가능교통량의 합으로 산출된다. 이는 교통수요와 관련된 공급측면의 가변적 용량 개념으로 볼 수 있으며, 실제 통과교통량을 의미하는 것은 아니다. 또한, 최대통과가능교통량은 고속도로 합류부를 지난 본선 모든 차로의 통과가능교통량의 합으로서, 최대진입가능교통량 및 최대차로변경가능교통량 산출 결과를 토대로 구해진다.

1) 최대차로변경가능교통량(2차로→1차로)

$$\lambda_{m1} = \frac{2}{\frac{3600}{Q_{m1} + WQ_{lc(2)}} - 0.5}, \quad W = \frac{Q_{m1}}{3600}$$

$$Q_{MAX(lc(2))} = Q_{m1}$$

$$\left[ \frac{\lambda_{m1} (T_c - 0.5 + \frac{1}{\lambda_{m1}}) \cdot e^{-\lambda_{m1}(T_c - 0.5)}}{1 - e^{-\lambda_{m1}t^*}} + \frac{\lambda_{m1} t^* \cdot e^{-\lambda_{m1}(T_c + t^* - 0.5)}}{[1 - e^{-\lambda_{m1}t^*}]^2} \right]$$

=  $Q_{lc(2)}$ 의 관계가 성립하는  $Q_{MAX(lc(2))}$  산정 (6)

여기서,

- $Q_{m1}$  : 본선 1차로 수요교통량(대/시)
- $Q_{lc(2)}$  : 2차로에서 1차로로의 차로변경요구량(대/시)

2) 동적 최대진입가능교통량

$$\lambda_{m4} = \frac{2}{\frac{3600}{(Q_{m4} - Q_{lc(4)}) + WQ_r} - 0.5}$$

$$W = \frac{Q_{m4} - Q_{lc(4)}}{3600}$$

$$Q_{MAX} = (Q_{m4} - Q_{lc(4)}) \cdot \left[ \frac{\lambda_{m4} (T_c - 0.5 + \frac{1}{\lambda_{m4}}) \cdot e^{-\lambda_{m4}(T_c - 0.5)}}{1 - e^{-\lambda_{m4}t^*}} + \frac{\lambda_{m4} t^* \cdot e^{-\lambda_{m4}(T_c + t^* - 0.5)}}{[1 - e^{-\lambda_{m4}t^*}]^2} \right]$$

=  $Q_r$  관계가 성립하는  $Q_{MAX}$  산정 (7)

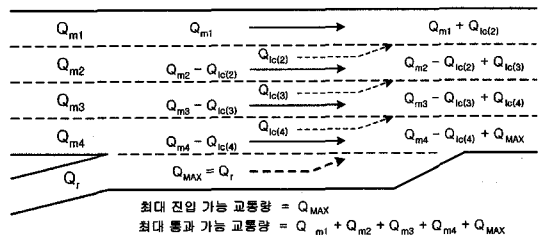
여기서,

- $Q_{m4}$  = 본선 4차로 수요교통량(대/시)
- $Q_r$  = 연결로 진입 교통량(대/시)

3) 최대통과가능교통량(편도 4차로 고속도로 기준)

최대통과가능교통량 =

$$Q_{m1} + Q_{m2} + Q_{m3} + Q_{m4} + Q_{MAX} \quad (8)$$



<그림 7> 최대통과가능교통량 산출 개념도

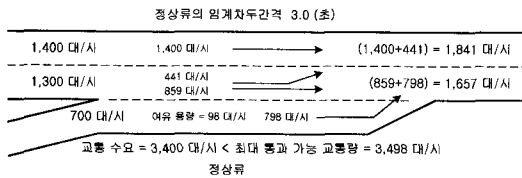


## 2. 최대통과교통량 산출 모형

### 1) 교통류 구분

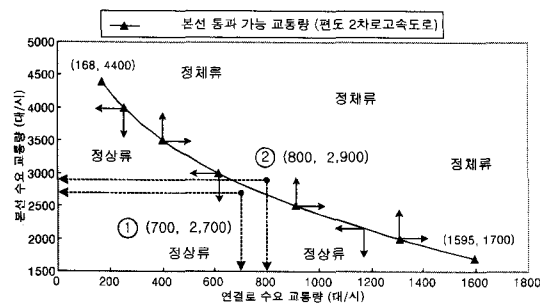
고속도로의 교통운영상태를 분석하기 위해서는 개별 구간의 교통류가 정상류인지 아니면, 정체류인지를 구분할 필요가 있다. 교통류의 구분은 수요교통량과 최대 통과가능교통량의 비교를 통해 결정되며, 최대통과가능 교통량을 직접 산정하여 수요교통량과 비교하는 방법과 본선 및 연결로 수요교통량 관계에 의해 간접적으로 교통류를 구분하는 두 가지 방법이 있다.

〈그림 8〉은 최대통과가능교통량을 직접 산정하여 교통류를 구분한 예로서, 합류 교통수요는 3,400(대/시)이며, 최대통과가능교통량은 3,498(대/시)이므로 정상류로 판정된다. 즉, 본선의 차로변경을 고려하여 산출된 최대진입가능교통량이 798(대/시)이므로, 연결로의 진입 교통수요 700(대/시)는 모두 진입 할 수 있으며, 정체는 발생되지 않는다.



〈그림 8〉 교통류 구분 예

한편, 〈그림 9〉는 본선 수요교통량과 연결로 수요교통량에 따른 본선 통과가능곡선을 도시한 것이다. 따라서 〈그림 9〉에 의하여 교통류를 정상류와 정체류로 쉽



〈그림 9〉 본선 및 연결로 수요교통량 관계에 의한 교통류 구분

게 구분할 수 있다. 그러한 교통류 구분의 예가 〈그림 9〉의 ① 및 ②에 해당한다. 즉, ①의 경우, 연결로 수요교통량 700(대/시)와 본선 수요교통량 2,700(대/시)가 만나는 좌표가 정상류 영역에 속하므로, 〈그림 8〉에서와 같이 최대통과가능교통량을 산정하지 않고도 쉽게 정상 교통류임을 판단할 수 있다. 한편, 〈그림 9〉의 ②는 정체류로 판정되므로 교통운영상태 분석을 위해서는 이후에 나오는 정체류 분석 과정을 수행하여야 한다.

### 2) 정체류의 최대통과교통량 산정

#### (1) 정체류 최대통과교통량 및 정체규모 산정 원리

본 연구에서는 정상류 상태(정상류 교통량)와 가해지는 충격(진입 및 차로변경 등의 합류 영향)과의 관계를 통해 정상류 최대통과가능교통량을 산정하여 정체류로 전이하게 되는 여부를 밝혔으며, 다음으로 정상류에서 정체류로 전이될 때 정체류 상태 중 어떠한 상태로 전이되는 가를 밝히기 위하여 다음과 같은 방법을 제시한다.

첫째, 차로별 대기행렬 등가 배분<sup>6)</sup>

둘째, 정체류 최대통과교통량 산정(정체류 임계차 두간격 적용)

셋째, 병목구간에서의 정체류 차량 거동(합류 및 차로변경) 메커니즘은 정상류와 동일

#### (2) 정체류 최대통과교통량 및 정체규모 산정 식

i) 정체규모 산정

$$Q_{j(1)} = D - MTR_{(1)} ,$$

$$D_{(1)} = D - Q_{j(1)}$$

$$Q_{j(2)} = Q_{j(1)} + [D_{(1)} - MTR_{(2)}] ,$$

$$D_{(2)} = D_{(1)} - Q_{j(2)}$$

$$Q_{j(3)} = Q_{j(2)} + [D_{(2)} - MTR_{(3)}] ,$$

$$D_{(3)} = D_{(2)} - Q_{j(3)}$$

⋮

$$Q_{j(n)} = Q_{j(n-1)} + [D_{(n-1)} - MTR_{(n)}] ,$$

$$\text{if } D_{(n-1)} = MTR_{(n)} ,$$

$$\text{then } Q_{j(n)} = Q_{j(n-1)} \tag{9}$$

6) 차로별 대기행렬 등가 배분은 본 연구에서 제시한 원칙으로서, 정체 상황에서 대기행렬 규모가 모든 차로에 대하여 동일하다는 것이다. 즉, 정체가 발생하여 대기행렬 충격파가 상류부로 전파될 때, 상류부 차량들의 자율적인 거동에 의해 모든 차로에 대해 대기행렬 규모가 동일하게 나타나는 것에 착안하여 본 연구에 적용하였다.

여기서,

$Q_{j(n)}$  : (n)번째 반복과정을 통해 최종 산출된 분석시간대 정체구간의 총 누적 정체규모 (대)

$D$  : 초기 수요 교통량(대/시)

$MTR_{(n)}$  : (n)번째 반복과정을 통해 산출된 최대통과교통량(대/시)

$D_{(n-1)}$  : (n-1)번째 반복 과정을 통해 산출된 감소 교통량(대/시)

■ 차로 당 누적 정체규모(연결로 포함)

$$q_j = \frac{Q_{j(n)}}{N+1}$$

여기서, N = 고속도로 본선 차로수

■ 고속도로 본선의 총 누적 정체규모

$$Q_j = Q_{j(n)} - \frac{Q_{j(n)}}{N+1} = Q_{j(n)} - q_j$$

ii) 최대차로변경교통량(2차로 → 1차로)

$$\lambda_{m1} = \frac{2}{\frac{3600}{(Q_{m1} - q_j) + W \cdot Q_{lc(2)}} - 0.5}$$

$$W = \frac{Q_{m1} - q_j}{3600}$$

$$Q_{max(lc(2))} = (Q_{m1} - q_j) \cdot$$

$$\left[ \frac{\lambda_{m1}(T_c - 0.5 + \frac{1}{\lambda_{m1}})e^{-\lambda_{m1}(T_c - 0.5)}}{1 - e^{-\lambda_{m1}t^*}} \right]$$

$$+ \frac{\lambda_{m1}t^* \cdot e^{-\lambda_{m1}(T_c + t^* - 0.5)}}{[1 - e^{-\lambda_{m1}t^*}]^2}$$

=  $Q_{lc(2)}$ 의 관계가 성립하는  $Q_{max(lc(2))}$  산정(10)

iii) 동적 최대진입교통량

$$\lambda_{m4} = \frac{2}{\frac{3600}{(Q_{m4} - q_j - Q_{lc(4)}) + W(Q_r - q_j)} - 0.5}$$

$$W = \frac{Q_{m4} - q_j - Q_{lc(4)}}{3600}$$

$$Q_{max} = (Q_{m4} - q_j - Q_{lc(4)}) \cdot$$

$$\left[ \frac{\lambda_{m4}(T_c - 0.5 + \frac{1}{\lambda_{m4}})e^{-\lambda_{m4}(T_c - 0.5)}}{1 - e^{-\lambda_{m4}t^*}} \right]$$

$$+ \frac{\lambda_{m4}t^* \cdot e^{-\lambda_{m4}(T_c + t^* - 0.5)}}{[1 - e^{-\lambda_{m4}t^*}]^2}$$

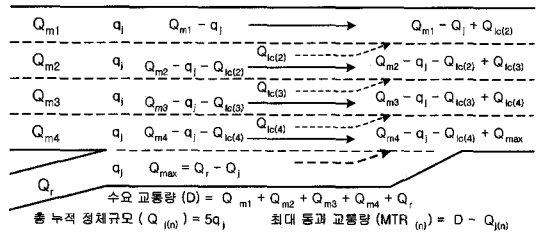
=  $(Q_r - q_j)$ 의 관계가 성립하는  $Q_{max}$  산정 (11)

iv) 최대통과교통량(편도 4차로 고속도로 기준)

$$\text{최대통과교통량}(MTR_{(n)}) = D - Q_{j(n)} \quad (12)$$

수요교통량(D) =

$$Q_{m1} + Q_{m2} + Q_{m3} + Q_{m4} + Q_r$$



<그림 10> 최대통과교통량 산출 개념도

V. 고속도로 교통운영상태 분석 및 서비스수준 평가 방법론

1. 고속도로 교통운영상태 분석

1) 교통운영상태 분석 방법론

고속도로의 교통운영상태 분석은 분석대상 구간의 분석시간대 수요교통량과 도로기하구조 자료가 먼저 구축되어야 한다. 기본적인 입력 자료의 구축 후에는 분석시간대 별 고속도로 개별구간의 정상류 최대통과가능 교통량을 산정하고, 이를 수요교통량과 비교하여 교통류 상태를 정상류와 정체류로 구분하게 된다. 정체류의 경우에는 우선 정체류의 최대통과교통량 및 정체규모를 산정하고, 개별 구간에서 발생한 정체가 상류부에 미치는 영향을 파악하여야 한다. 따라서 정체(대기행렬)도 달거리의 파악과 더불어 상류부 교통운영상태를 분석하게 된다. 한편, 정체구간은 하류부에 대한 수요 감소 유발구간이 되므로, 하류부에 대한 수요 감소 효과분석도 상류부에 대한 정체영향 분석과 함께 병행하여야 한다. 정상류의 평균통행시간은 고속도로 기본구간의 속도-교통량 관계를 적용하여 정상류 평균통행속도와 정

상류 통행거리를 비교하여 산출하고, 정체류의 평균통행시간은 정체류 최대통과교통량과 정체규모를 비교하여 산출한다. 정상류와 정체류의 평균통행시간의 합이 고속도로의 총 통행시간이 되므로, 전체구간 거리를 총 통행시간으로 나누어 고속도로의 평균통행속도를 산출하게 된다.

이와 같이, 분석 시간대별로 고속도로에 대하여 교통운영상태 분석을 수행하고 평균통행속도를 산출하게 되면, 이후에는 최종적으로 고속도로의 서비스수준을 평가하게 된다.

2) 상·하류부에 대한 정체 영향 분석

(1) 정체 도달거리 산정

$$K_{j(i)} = q_{j(i)} \times H_{dj(i)} \quad (13)$$

여기서,

$K_{j(i)}$  : 구간  $i$ 에 발생한 정체류  $j$ 의 정체도달거리 (km)

$q_{j(i)}$  : 구간  $i$ 에 발생한 정체류  $j$ 의 차로 당 누적 정체규모 (대)

$H_{dj(i)}$  : 구간  $i$ 에 발생한 정체류  $j$ 의 평균 차두거리 (km)

(2) 상·하류부에 대한 정체 영향 판단 및 분석

i) 상류부로 정체 영향 파급

$$L_i < K_{j(i)} \quad (14)$$

여기서,  $L_i$  = 개별구간  $i$ 의 거리 (km)

(i) 상류부 구간  $i-1$ 의 최대통과교통량

$$MTR_{(n)(i-1)} = MTR_{(n)(i)} - Q_{max(i)} + Q_{c(i)} \quad (15)$$

$$Q_{c(i)} = \frac{L_i}{H_{d(i)}} \times N$$

여기서,

$MTR_{(n)(i)}$  : 구간  $i$ 의 최대통과교통량(대/시)

$Q_{r(i)}$  : 구간  $i$ 의 연결로 수요교통량(대/시)

$Q_{max(i)}$  : 구간  $i$ 로의 연결로 최대진입교통량(대/시)

$Q_{c(i)}$  : 구간  $i$ 의 대기행렬 수용규모(대)

(ii) 상류부 구간  $i-1$ 의 정체규모

① 구간  $i-1$ 이 합류부인 경우

$$Q_{j(i-1)} = Q_{j(i)} - Q_{c(i)} - q_{j(i-1)} \quad (16)$$

② 구간  $i-1$ 이 분류부인 경우

$$Q_{j(i-1)} = Q_{j(i)} - Q_{c(i)} \quad (17)$$

(iii) 구간  $i-1$ 에서 상류부로의 정체 영향 파급 판단

$$L_{i-1} < K_{j(i-1)} \rightarrow \text{상류부 구간 } i-2 \text{ 분석} \quad (18)$$

$$K_{j(i-1)} \leq L_{i-1} \rightarrow \text{하류부 구간 } i+1 \text{ 분석} \quad (19)$$

ii) 상류부로 정체 영향이 파급되지 않음(하류부 분석)

$$K_{j(i)} \leq L_i \quad (20)$$

(i) 하류부 구간  $i+1$ 에 대한 수요교통량 결정

$$D_{(i+1)} = MTR_{(n)(i)} \pm Q_{r(i+1)} \quad (21)$$

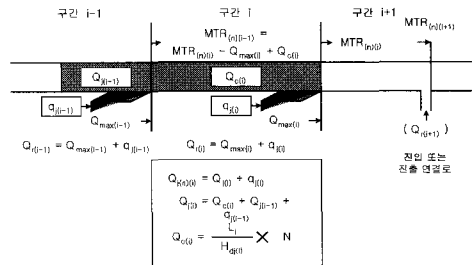
여기서,

$D_{(i+1)}$  : 구간  $i+1$ 의 수요교통량(대/시)

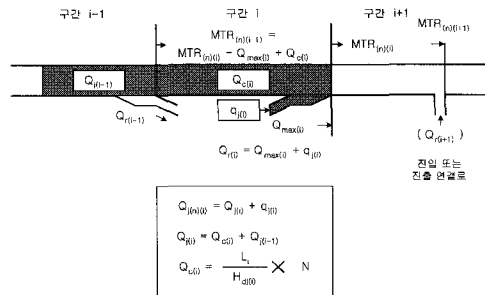
$Q_{r(i+1)}$  : 구간  $i+1$ 의 진입 또는 진출 수요교통량(대/시) ; 진입(+), 진출(-)

(ii) 하류부 구간  $i+1$ 에서의 정체 발생 여부 분석

- 정체 발생 여부에 따라 상·하류부에 대한 분석 수행



<정체구간 상류부가 합류부인 경우>



<정체구간 상류부가 분류부인 경우>

(그림 11) 상·하류부에 대한 정체영향 분석 개념도

## 2. 고속도로 평균통행속도 산정 방법

고속도로의 평균통행속도는 고속도로 분석구간 연장을 해당구간을 통행하는데 소요되는 시간으로 나누어 산출한다. 이 때, 고속도로 분석구간을 통행하는데 소요되는 시간은 정상류 상태의 통행시간과 정체류 상태의 통행시간으로 구분할 수 있다. 고속도로에서는 분석시간대별로 각 구간의 교통수요가 변할 뿐 아니라 정체가 발생될 경우 정체류의 최대통과교통량 또한 변하므로 정체규모의 성장 및 감소형태가 가변적으로 나타나게 된다. 따라서 고속도로의 평균통행속도 산정을 위해서 개별구간의 정체규모 산출이 선행되어야 하며, 이를 통해 고속도로의 평균통행속도 산출이 가능해진다.

〈그림 12〉는 고속도로 구간 중 정체구간의 차량 도착율과 서비스율(통과율)을 예시하고 그에 따른 누적 정체규모와 평균 정체규모를 도시한 것이다. 〈그림 12〉의 중간 부분은 대기행렬 형성 및 소멸과 관련된 누적 정체규모를 도시한 것이므로, 이를 분석 시간대 내 모든 시점에 대해 정체규모가 동일하게 나타나도록 평균 정체규모로 표현한 것이 〈그림 12〉의 맨 아래 부분에 해당한다.

평균통행속도는 분석시간대를 기준으로 산출하게 되는데, 이를 통해 산출된 평균통행속도는 해당 분석시간대의 고속도로 교통운영상태를 표현한 것으로서 실제 통행에 의해 산출된 평균통행속도와는 차이가 있다. 즉, 본 연구의 분석방법은 한 시점을 기준으로 동일한 분석시간대에 고속도로의 교통운영상태를 파악하는 시간기준의 방법(시간평균속도)이며, 실제 통행의 경우는 고속도로 전체구간을 통행하는 동안의 평균통행속도를 구하는 거리기준 방법(공간평균속도)이 된다.

### 1) 평균 정체규모 산정

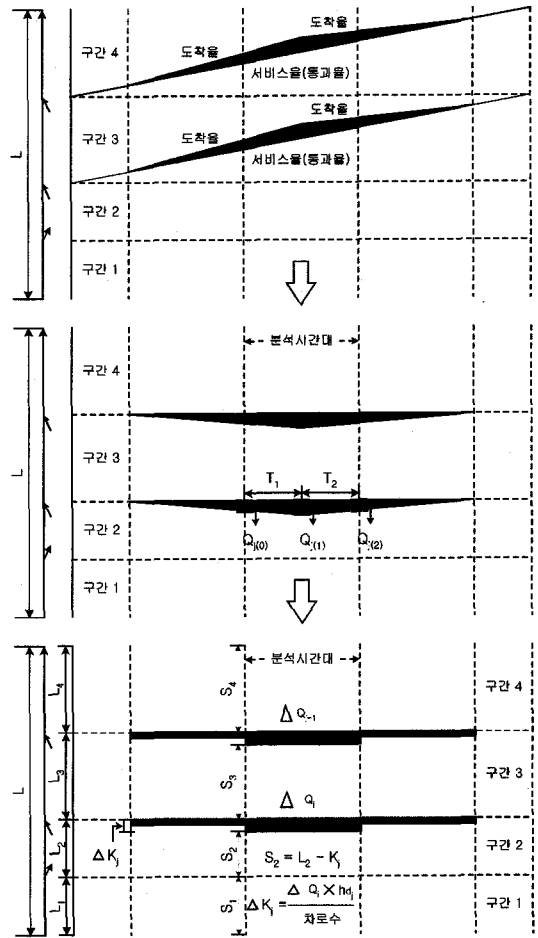
$$\Delta Q_j = \sum_{k=1}^n \frac{Q_j(k-1) + Q_j(k)}{2} \times T_k \quad (22)$$

여기서,

$Q_j(k)$  : 특정 분석 시간대 중 k 번째 누적 정체규모(대)

$T_k$  : 특정 분석 시간대 중 k 번째 대기행렬 형성(또는 감소) 지속 시간 비율

$\sum_{k=1}^n T_k$  : 1 ; 분석 시간대 중 대기행렬 형성(또는



〈그림 12〉 평균통행속도 산출을 위한 평균 정체규모 도시

감소) 지속 시간 비율의 총 합은 분석 시간 기간과 같음

$n$  : 분석 시간대 중 대기행렬 성장(또는 감소) 변화 횟수 ; 분석 시간대 중 대기행렬 형성(또는 감소)의 변화가 없다면  $n = 1$

### 2) 고속도로의 총 평균통행시간 산정

총 평균통행시간( $T$ ) =

$$\sum_i t_i + \sum_j d_j = \sum_i \left[ \frac{s_i}{u_i} \right] + \sum_j \left[ \frac{\Delta Q_j}{\mu_j} \right] \quad (23)$$

$$s_i = L_i - \Delta K_j = L_i - \frac{\Delta Q_j}{\text{차료수}} \times h_{d_j}$$

여기서,

$t_i$  = 개별구간  $i$ 의 정상류 평균통행시간 (시간)

$d_j$  = 정체류  $j$ 의 평균통행시간 (시간)

- $s_i$  : 개별구간  $i$ 에서 정상류 평균 통행 거리 (km)
- $L_i$  : 개별구간  $i$ 의 거리 (km)
- $\Delta K_j$  : 정체류  $j$ 의 평균 정체구간 거리 (km)
- $\Delta Q_j$  : 정체류  $j$ 의 평균 정체규모 (대)
- $h_{d_j}$  : 정체류  $j$ 의 평균 차두거리 (km/대)
- $u_i$  : 개별구간  $i$ 의 정상류 평균통행속도 (km/h)
- $\mu_j$  : 정체류  $j$ 의 서비스 교통량 (또는 최대통과교통량) (대/시)

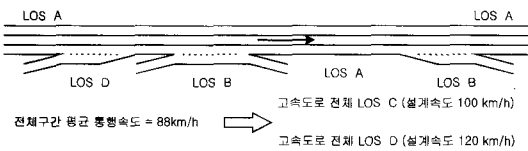
3) 고속도로의 평균통행속도 산정

$$\text{고속도로의 평균통행속도}(U) = \frac{L}{T} \quad (24)$$

여기서,  $L$  = 고속도로 분석구간 거리(km)

3. 고속도로 서비스수준 평가 방법

본 연구에서는 고속도로의 운영상태를 평가하기 위해 평균통행속도를 새로운 효과적도로 제시하였으며, 평균통행속도-서비스수준 관계를 적용하기 위해 1992년 도로용량편람의 내용을 인용하였다(2001년 도로용량편람 개정판에서는 기본구간의 서비스수준별 평균통행속도가 그래프모만 제시되고 구체적인 수치로는 제시되지 않음).



〈그림 13〉 고속도로의 서비스수준 판정 예

〈표 1〉 고속도로 서비스수준 평가 표

서비스수준		A	B	C	D	E	F
설계속도 100 km/h	평균 통행속도 km/h	≥ 95	≥ 90	≥ 82	≥ 70	≥ 50	< 50
설계속도 120 km/h	평균 통행속도 km/h	≥ 105	≥ 100	≥ 90	≥ 76	≥ 50	< 50

주: 도로용량편람, 〈표 4-1〉 고속도로 기본구간 서비스수준, 1992.

Ⅴ. 검증

본 연구에서 제시한 방법론의 검증을 위해 도시고속

도로 현장자료(내부순환 북부간선 외선 구간)와의 비교 분석을 수행하였다. 주요 비교 분석 사항으로는 정체발생 지점 및 시점, 정체 지속시간, 최대통과교통량 및 평균통행속도 등이다.

1. 자료수집

조사구간은 내부순환도로 북부간선의 외선구간으로 동부간선 분류지점을 시작하여 성산대교를 잇는 총 연장 22.94km구간이다. 분석구간의 진출·입 연결로는 진입 6개, 진출 5개로 총 11개의 연결로가 있다. 분석구간은 고속도로 기본구간과 연결로에 대하여 기본적으로 영상 검지기를 설치하여 자료를 수집하며, 기본구간의 영상 검지기는 평균 508.6m의 간격으로 차로마다 비교적 균일하게 설치되어 있다. 연결로 구간 중 마장(진입), 길음(진입), 정릉(진입), 홍은(진출), 홍제(진입), 성산(진출) 연결로는 루프 검지기가 설치된 구간이다. 수집된 자료는 2002년 6월 14일 전일치 자료이며, 분석에 사용된 시간은 14~22시까지이다. 검지기로부터 수집된 자료는 30(초) 단위의 자료이므로 5분, 15분 및 1시간 단위로 자료를 가공하였다. 검지기의 에러 등으로 인한 손실 데이터는 해당 지점의 전후 시간을 이용하여 보간법(내삽법)으로 보정하였으며, 데이터 손실시간과 손실량이 비교적 경미하였다. 최종적으로 분석에 사용된 시간 단위는 1시간이며, 이는 자료수집 기간의 내부순환 북부간선 외선 구간의 혼잡 수준이 15~21시까지 장시간에 걸쳐 지속되었기 때문이다.

〈표 2〉 자료손실 구간 및 시간대

자료수집 구간	시간대	검지기 번호
정릉터널 일부 구간	15:00 ~ 15:05	193, 194, 195, 169
북부간선 → 길음	21:05 ~ 21:10	43
북부간선 → 길음	21:50 ~ 22:00	43

2. 수요교통량 및 기하구조

내부순환 북부간선 분석에 있어서 사용된 수요교통량은 정상류와 정체류 및 진입수요와 진출수요로 구분하여 추정되었다. 즉, 검지기 자료 중 속도자료를 이용하여 정상류와 정체류를 구분하고 정상류의 경우에는 통과교통량을 수요교통량으로 처리하였다. 정체류의 경우에는 진입수요와 진출수요로 구분하였으며, 진입수요

의 경우에는 정체의 영향을 받지 않는(속도의 저하가 나타나지 않은) 상류부 검지기 교통량 자료를 수요교통량으로 활용하였다. 정체류 진출수요는 검지기 자료를 활용하여 명확히 진출수요를 추정하기 곤란하므로 다음의 두 가지 가정에 의해 <표 3>과 같이 추정하였다.

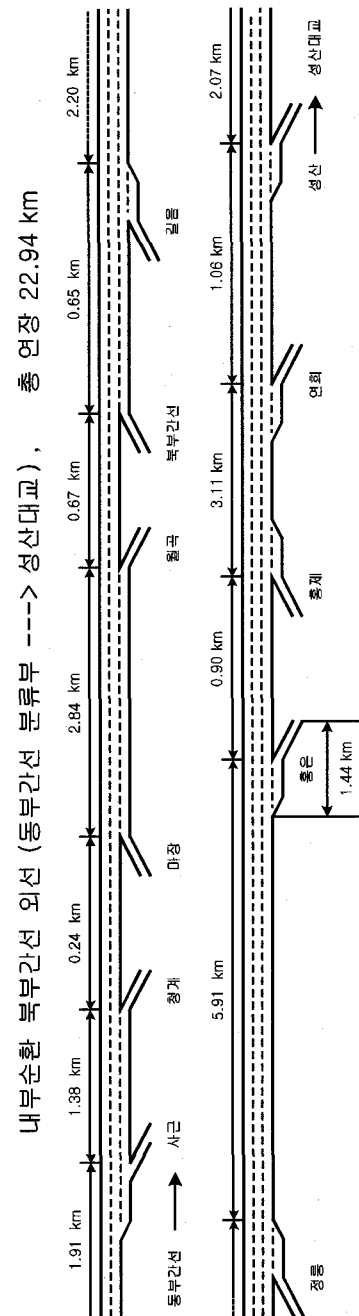
가정 1) 정체기간을 포함한 정체 전·후 시간대의 총 진출교통량은 정체 전·후 시간대의 총 진출수요와 같다.

<표 3> 진출수요 및 진출용량의 추정-홍은 진출연결로(대/시)

	13~14 (시)	14~15 (시)	15~16 (시)	16~17 (시)	17~18 (시)	18~19 (시)	19~20 (시)	20~21 (시)	총 수요
진출 교통량	676	643	526	482	488	465	799	1,117	5,196
상류부 기본 구간	3,813	4,157	4,350	4,142	4,424	4,198	5,182	3,144	33,410
진출 수요 비율	$5,196/33,410 = 0.1555$								
진출 수요	593	647	676	644	638	653	806	489	5,196
진출 용량	-	643	526	482	488	465	799	-	-

<표 4> 내부순환 북부간선 외선(동부간선→내부순환)의 수요교통량(대/시)

	14~15 (시)	15~16 (시)	16~17 (시)	17~18 (시)	18~19 (시)	19~20 (시)	20~21 (시)	21~22 (시)
기본 구간	2,343	2,227	2,314	2,293	2,361	2,294	1,652	523
진출1 (사근)	623	527	584	617	513	458	486	176
진출2 (청계)	901	866	820	703	583	568	411	145
진입1 (마장)	1,787	1,694	1,811	1,831	1,828	1,408	903	439
진출3 (월곡)	1,152	1,213	1,284	1,329	1,539	1,538	1,487	573
진입2 (북부)	1,314	1,378	1,353	1,387	1,386	1,349	692	307
진입3 (길음)	911	1,042	1,137	1,011	881	850	496	248
진입4 (정릉)	607	586	660	899	1,052	977	338	123
진출4 (홍은)	647	676	644	638	653	806	489	373
진입5 (홍제)	989	946	1,075	1,048	1,166	849	525	237
진출5 (연희)	818	879	866	908	915	1,363	1,251	170
진출6 (성산)	1,321	1,306	1,343	1,124	995	853	1,250	422



<그림 14> 내부순환 북부간선 외선 개략도

가정 2) 각 분석 시간대에 대해, 진출연결로 상류부 기본구간의 직진 교통수요와 진출교통수요의 구성비는 전체 분석시간대의 (총 직진 교통수요)/(총 진출 교통수요) 비와 동일하다.

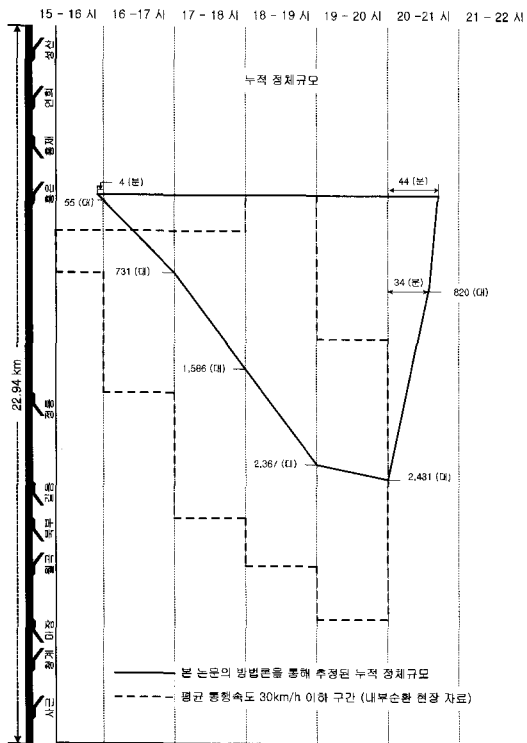
한편, 정체시의 진출용량은 검지된 진출교통량과 동일하게 적용하였으며, 추정된 총 수요교통량은 <표 4>와 같다.

### 3. 분석 결과

주어진 수요교통량과 기하구조 자료에 대해 분석 시간대별 누적 정체규모와 평균 정체규모 및 평균통행속도 산출 결과를 제시하였으며, 내부순환 교통관리시스템으로부터 산출된 평균통행속도와 비교하였다.

〈표 5〉 내부순환 북부간선 외선의 평균통행속도 산출 표

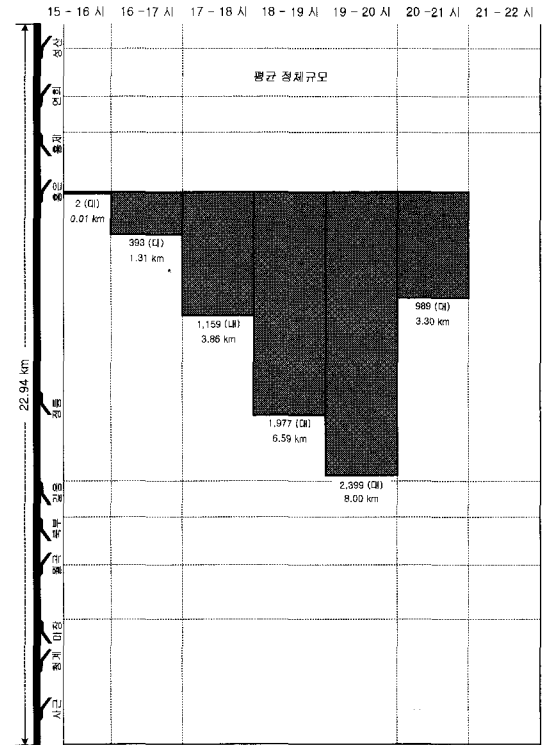
	14~15시	15~16시	16~17시	17~18시	18~19시	19~20시	20~21시	21~22시
정체류 평균 통행시간	-	0.03 (분)	6.03 (분)	17.75 (분)	31.11 (분)	36.64 (분)	10.50 (분)	-
전체구간 평균 통행시간	19.90 (분)	19.87 (분)	24.88 (분)	34.27 (분)	45.05 (분)	49.03 (분)	26.43 (분)	17.21 (분)
전체구간 거리	22.94 km	22.94 km	22.94 km	22.94 km	22.94 km	22.94 km	22.94 km	22.94 km
전체구간 평균 통행속도	69.2 km/h	69.3 km/h	55.3 km/h	40.2 km/h	30.6 km/h	28.1 km/h	52.1 km/h	80.0 km/h
내부순환 교통관리 시스템 평균 통행속도	71.5 km/h	63.6 km/h	52.9 km/h	39.1 km/h	30.4 km/h	29.4 km/h	60.9 km/h	80.7 km/h
추정속도 차이	2.4 km/h	5.7 km/h	2.4 km/h	1.1 km/h	0.2 km/h	1.3 km/h	8.8 km/h	0.7 km/h



〈그림 15〉 내부순환 북부간선 외선의 누적 정체규모

〈표 5〉에서, 분석 시간대별로 내부순환 현장자료와 본 연구를 통해 산출된 평균통행속도는 비교적 근사한 값으로 추정되었으며, 시간대별 평균속도의 변화경향도 비교적 일치하였다. 그러나 15~16시와 20~21시의 평균통행속도는 다소 큰 차이를 보였으며, 이 두 시간대는 본 연구의 분석결과와 정체의 발생시점과 종료시점에 해당하는 시간대였다. 즉, 〈그림 15〉에서 보는 바와 같이, 본 연구의 분석결과가 내부순환 현장자료와 비교해 정체의 발생 및 종료 시점에 대한 추정에 있어 다소 차이를 보인 까닭으로 판단된다.

이를 확인하기 위해 〈표 6〉과 같이 내부순환 현장자료를 통해 병목구간의 수요와 최대통과교통량을 비교하여 정체발생 및 정체종료 시점을 추정해 보았다. 본 연



〈그림 16〉 내부순환 북부간선 외선의 평균 정체규모

〈표 6〉 병목구간의 최대통과교통량 비교(홍은 → 홍제)(대/시)

분석 시간대	14~15시	15~16시	16~17시	17~18시	18~19시	19~20시	20~21시	21~22시
수요 교통량	3,639	3,645	3,943	4,084	4,220	3,508	1,208	373
본 연구 추정치	3,639	3,600	3,429	3,429	3,429	3,429	3,292	373
내부순환 시스템 자료	3,430	3,403	3,536	3,526	3,379	4,230	2,344	519

주 : 정상류Tc=3.0, 정체류Tc=4.0, t\*=1.5 적용

구의 분석 결과로는 정체발생 및 종료 시간이 15시 56분 및 20시 44분(〈그림 15〉 참조)으로 〈표 6〉의 수요교통량-최대통과교통량 관계에 의해 추정된 정체 발생 및 종료 시간대와 일치함을 보였다. 따라서 〈표 6〉의 결과로부터 내부순환 현장자료의 실제 정체 발생 및 종료 시점을 추정해 보면 14시 후반~15시 초반 및 19시 후반~20시 사이인 것으로 판단된다.

내부순환 교통관리시스템의 자료를 활용하여 본 연구의 방법론에 적용하여 분석하기 곤란했던 몇 가지 제약사항들이 있었으며, 이러한 이유들로 인해 평균통행속도의 추정에 있어 현장 자료와 다소 차이를 보일 수밖에 없었던 것으로 판단된다. 방법론 적용상의 몇 가지 제약사항들을 살펴보면 다음과 같다.

○ 정상류 평균통행속도 추정

- 설계속도가 상이한 고속도로마다 거시적 속도-교통량 관계를 적용하여 정상류 평균통행속도를 추정하는 방법은 비교적 간단하다는 장점이 있는 반면 다소 개략적이고 정확성에 한계가 있다.

○ 진출 수요교통량 추정

- 현장 자료를 통한 수요교통량의 추정에 있어 진출 수요교통량의 추정은 다소 부정확성을 내포한다. 본 연구에서는 〈표 3〉에 제시된 방식을 사용하여 개략적으로 진출수요를 추정하였으나, 추정의 부정확성으로 인하여 정체 발생 및 종료 시점의 추정이 다소 차이를 보였다. 즉, 홍은 진출 연결로의 진출 수요를 정확히 추정하지 못함으로 인해, 진출 연결로의 대기행렬이 본선으로 넘치게 되는 시간의 추정에 부정확성이 내포된 탓으로 여겨진다.

○ 초기 고속도로 상에 잔존해 있는 교통량 반영

- 본 연구의 방법론에서는 주어진 수요교통량 자료만을 활용함으로써, 분석 시작시점에 있어 고속도로 상에 존재하는 교통량을 반영하지 않는다. 따라서 현장자료와 분석결과의 도출에 있어 다소 차이가 발생하게 된다.

이상의 몇 가지 제약사항이 존재함에도 불구하고, 분석 시간대별 평균통행속도 산출결과 및 평균통행속도 변화경향이 대체적으로 일치하였다. 이는 정체구간(병목구간)의 최대통과교통량 산출결과가 실제 현장자료와 비슷한 수준의 최대통과교통량 값을 산출한 결과로 풀이된다.

Ⅵ. 본선 교통상태에 미치는 연결로 수요교통량의 영향 분석

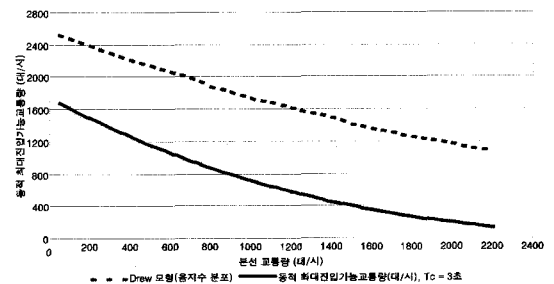
고속도로 본선 및 연결로 수요교통량에 따른 최대통과가능교통량의 변화 양상을 살펴보기 위해 민감도분석을 수행하였다. 분석시 매개변수 값 및 차로별 교통량 분담율에 따라 다양한 결과가 나타날 수 있는데, 본 분석에서는 〈표 7〉에 제시된 매개변수 값과 교통량 분담율을 적용하여 도출된 결과를 제시하였다.

〈표 7〉 매개변수 값 및 교통량 분담율

매개변수				
Tc = 3.0초		t* = 1.5초		
교통량 분담율				
고속도로	1차로	2차로	3차로	4차로
편도 2차로	0.5	0.5	-	-
편도 3차로	0.35	0.33	0.32	-
편도 4차로	0.27	0.25	0.25	0.23

1. 기존 간격수락모형(음지수분포)과의 비교

〈그림 17〉은 본 연구 결과와 기존 간격수락모형(음지수분포)의 결과를 비교한 것이다. 〈그림 17〉에서 최대진입가능교통량의 비교를 제시한 이유는 기존 간격수락모형의 경우 최대진입가능교통량의 산정에만 국한되므로, 불가피하게 최대통과가능교통량 산정 전 단계인 최대진입가능교통량 산정결과를 비교하였다. 이 두 결과를 비교해 볼 때, 음지수분포를 적용한 경우는 본선교통량과 최대진입가능교통량의 합으로 표현되는 최대통과가능교통량의 범위가 약 2,500~3,100대/시이며, 본 연구결과는 1,700~2,300대/시 수준으로 본 연구결과가 보다 현실적임을 알 수 있다.



〈그림 17〉 최대진입가능교통량 비교

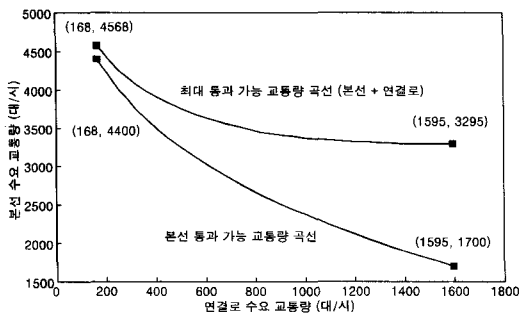


## 2. 최대통과가능교통량(및 본선 통과가능교통량)과 연결로 수요교통량의 관계

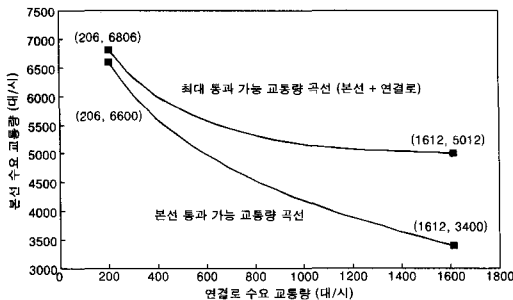
〈그림 18〉 ~ 〈그림 20〉은 편도 2,3,4 차로 고속도로에 대해 합류부에서 나타나는 정상류 상태의 최대통과가능교통량과 본선 통과가능교통량을 연결로 수요교통량에 따라 도출한 것이다. 분석 결과를 살펴보면, 연결로 진입 수요교통량이 증가할수록, 합류부 최대통과가능교통량 및 본선 통과가능교통량은 모두 줄어드는 추세를 보인다. 그러나 본선 통과가능교통량은 최대통과가능교통량에 비해 감소폭이 비교적 큰 것을 볼 수 있다. 그러한 이유로, 연결로의 진입 수요교통량이 증가할수록 본선 교통류는 영향을 받아 통과가능교통량이 줄어드나, 최대통과가능교통량은 본선교통량과 합류부 진입교통량의 합으로 표현되므로, 그 감소 추세가 본선 통과가능교통량보다는 적게 나타나는 것으로 볼 수 있다.

## 3 차로수별 본선 통과가능교통량과 연결로 수요교통량의 관계

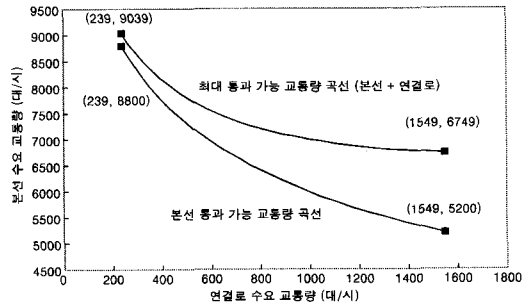
〈그림 18〉 ~ 〈그림 20〉으로부터 연결로 진입 수요교통량에 따른 차로수별 본선 통과가능교통량을 도출하



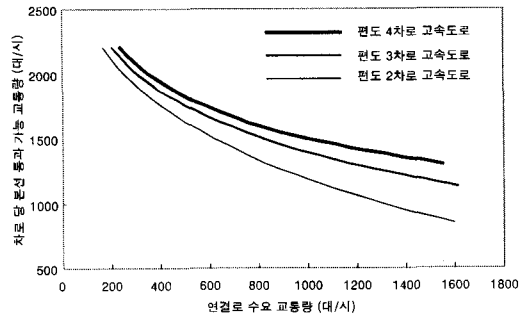
〈그림 18〉 최대통과가능교통량(편도 2차로)



〈그림 19〉 최대통과가능교통량(편도 3차로)



〈그림 20〉 최대통과가능교통량(편도 4차로)

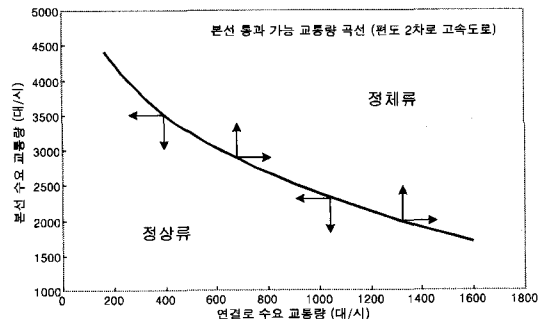


〈그림 21〉 차로수가 다른 고속도로의 차로 당 본선 통과가능교통량 비교

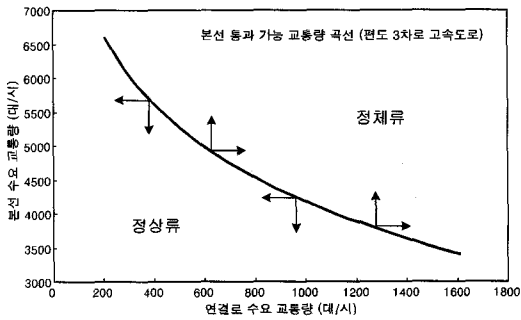
여 비교한 결과가 〈그림 21〉에 제시되어 있다. 분석결과를 살펴보면, 차로수가 많을수록 동일한 연결로 진입 수요교통량에 대해 보다 많은 본선교통량이 합류부를 통과할 수 있는 것으로 나타났다. 이 결과로부터, 차로수가 많아질수록 고속도로 본선교통류는 합류부 진입교통류의 영향을 덜 받게 되는 것으로 판단할 수 있다.

## 4. 본선 및 연결로 수요교통량 관계에 의한 교통류 영역 구분

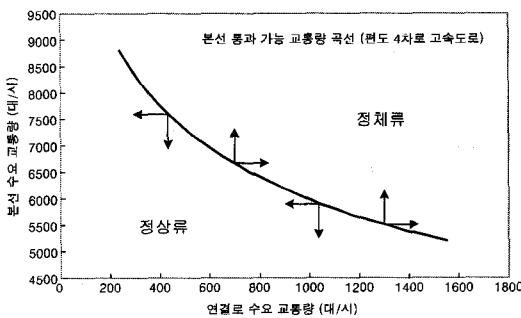
본선 통과가능교통량 곡선을 이용할 경우, 매우 쉽게



〈그림 22〉 교통류 구분(편도 2차로)



〈그림 23〉 교통류 구분(편도 3차로)

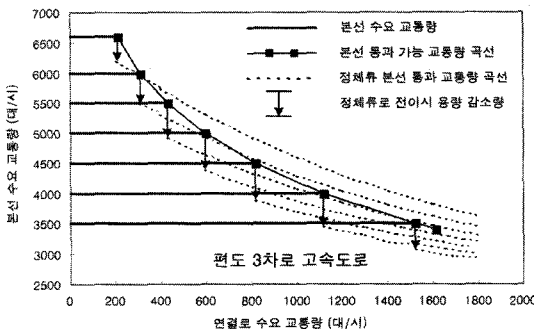


〈그림 24〉 교통류 구분(편도 4차로)

정상류와 정체류를 구분할 수 있다. 〈그림 22〉 ~ 〈그림 24〉는 차로수가 상이한 고속도로에 대하여 본선 통과 가능교통량 곡선을 이용한 교통류 영역 구분 방법을 도시한 것이다. 즉, 본선 통과가능교통량 곡선의 상단은 정체류 영역으로, 하단은 정상류 영역으로 구분된다.

5. 정체로 인한 용량 감소

정체가 발생하면 정상류와 비교해 용량이 감소한다. 〈그림 25〉는 편도 3차로 고속도로에 대하여 수요교통량(500대/시 단위)에 따른 용량 감소 및 정체류 본선

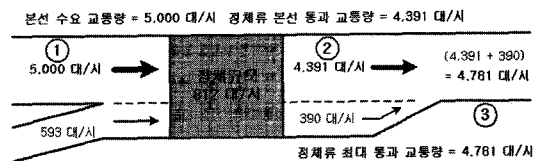
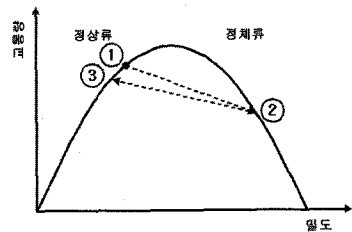
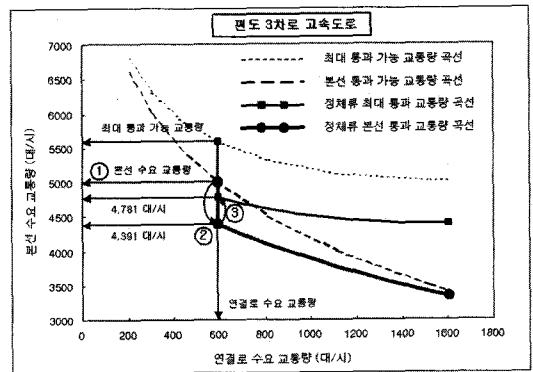


〈그림 25〉 정체로 인한 용량 감소

통과교통량 곡선을 도출한 것이다.

6. 정체구간에서의 본선 교통류 상태 변화

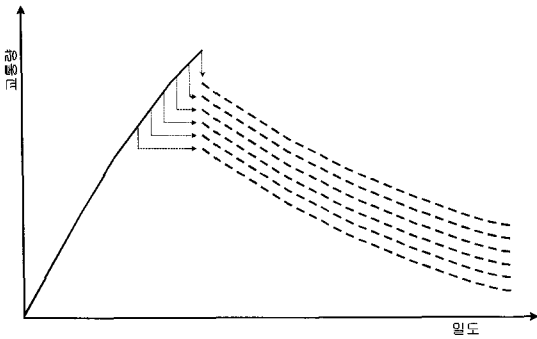
정체구간에서는 본선 교통류가 정체구간 및 정체구간의 전·후 구간에서 교통류 상태변화를 겪게 된다. 〈그림 26〉은 합류부 정체구간에서 본선교통류가 겪게 되는 상태변화를 나타낸 것이다.(정체류  $T_c=4.0$ 초 가정)



〈그림 26〉 정체구간 본선교통류 상태변화

7. 정체류 교통량-밀도 관계 유추

〈그림 25〉의 결과로부터 병목구간에서의 교통량-밀도 관계를 〈그림 27〉과 같이 유추해 볼 수 있는데, 이는 정체류로 전이 시, 정체류로의 전이 양상(전이된 정체류 상태)이 본선 및 연결로 수요교통량 관계에 의해 각기 다르게 결정되기 때문이며, 차량 합류로 인한 충격의 강도가 본선 및 연결로 수요교통량의 관계를 반영하기 때문으로 해석할 수 있다. 이는 〈그림 2〉에 나타난 바와 같이, 정상류에 비하여 정체류의 교통량-밀도 자료들의 산



(그림 27) 가변적 최대통과교통량 산출을 통해 유추된 교통량-밀도 관계

포도가 넓게 분포하는 데에서도 간접적인 유추를 가능케 한다. 그러나 이러한 유추된 정체류 교통량-밀도 관계는 실증된 관계는 아니며, 본 연구의 정체류 최대통과교통량 산출 결과를 반영하여 도출된 것이다.

**Ⅷ. 결론**

본 연구는 고속도로의 어느 구간에서 정체가 발생될 것이며, 발생된 정체의 영향은 어느 정도가 될 것인지를 파악하는 것이 우선되는 과제라는 관점에서 출발하였다. 따라서 고속도로 상에서 발생하는 정체를 유형화하였고(이는 곧, 수요가 용량을 초과하여 정체가 발생될 소지가 있는 잠재적 병목구간 및 병목구간에서 발생하는 정체 메커니즘의 유형화를 의미한다), 이를 통해 병목구간의 수요교통량에 따른 최대통과가능교통량 및 최대통과교통량의 산출을 통해 정체류 분석을 수행하였다. 본 연구가 기존의 연구들과 구별되는 가장 큰 특징들 중의 하나는 병목구간의 용량으로 볼 수 있는 최대통과가능교통량(정상류에서의 용량) 및 최대통과교통량(정체류에서의 용량)이 기존의 용량 개념과 같이 불변의 값이 아니고 수요교통량에 따라 변하는 가변적 용량이라는 점이다. 따라서 정체의 유형화와 가변적 용량 개념의 도입을 통해서 본 연구를 통해 구축된 고속도로 운영상태 분석 방법론은 고속도로 기하구조 조건에 의해 결정되는 물리적 병목구간에만 국한하지 않고 잠재적 병목구간(사고 및 공사 등의 돌발상황 발생구간 뿐만 아니라, 진출 연결로의 대기행렬이 본선으로 넘치는 분류부 등)에 대해서도 수요교통량에 따른 정체류 분석이 가능하였다.

한편, 본 연구에서는 고속도로에 대해 평균통행속도를 평가척도로 하여 서비스수준을 평가하는 방법론을 구축하였다. 또한 본 연구의 특징적인 성격의 하나는 고속도로의 계획 및 설계 기반의 방법론에 교통운영 분석기법이 함께 적용되었다는 점이다. 이러한 점에서 본 연구 결과가 기존 연구들과 차별성을 지니며, 방법론의 수행에 있어 다소 복잡성이 내재하더라도 고속도로를 하나의 유기적인 시스템으로 파악하여 분석함으로써 고속도로 종합 분석에 있어 새로운 틀을 제시한 것으로 평가할 수 있다.

본 연구를 수행함에 있어서 다음과 같은 보완 요구사항들이 있으며, 이에 대해서는 향후 연구과제로 남긴다.

- 다양한 병목구간의 현장조사 자료와 비교하여 본 연구의 최대통과교통량 산정 및 정체영향(상·하류부 및 연결로에 대한) 분석 시 적용된 매개변수 및 가정 치의 정산(calibration)
  - 임계차두간격( $T_c$ ) 및 다중진입 시간간격( $t^*$ )
  - 정체류 평균 차두거리
  - 가속차로의 길이에 따른 본선 및 연결로 정체 메커니즘
- 고속도로 전체구간 서비스수준 기준(평균통행속도의 범위) 재정립

**참고문헌**

1. 건설교통부(2000), 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설 및 지침
2. 대한교통학회(1992), 도로용량편람
3. 대한교통학회(2001), 도로용량편람
4. 박은미(2004), 혼잡교통류 관리를 위한 동적 용량의 개념 및 산정방법, 대한교통학회지, 제22권 제3호, 대한교통학회, pp.159~166
5. 이승준(1998), 도시고속도로 차로별 교통류특성에 관한 연구, 서울대학교 대학원 석사학위 논문
6. 이승준, 이정도, 최재성(1999), 확률모형을 이용한 엇갈림 구간의 교통류분석, 대한교통학회지, 제17권 제5호, 대한교통학회, pp.137~149.
7. 최재성, 이승준(2000), 도시고속도로 엇갈림 구간의 합리적 설계를 위한 교통 특성 분석 (I), 대한교통학회지, 제18권 제5호, 대한교통학회, pp.33~42.
8. 최재성, 이승준(2001), 고속도로 합류부 임계차두간격 및 용량 산정에 관한 연구, 대한교통학회지,

- 제19권 제6호, 대한교통학회, pp.195~205
9. Adolf D. May(1990), Traffic Flow Fundamentals, Prentice-Hall
  10. Donald R. Drew(1968), Traffic Flow Theory and Control, McGRAW-HILL
  11. Edited by C.J. Messer et al(1975), Traffic Flow Theory-A Monograph, Special Report 165, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
  12. Edited by C.J. Messer et al(1997), Traffic Flow Theory-A Monograph (Revised Edition), Special Report 165, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
  13. Hall, F. L. and K. Agyemang-Duah(1991), Freeway Capacity Drop and the Definition of Capacity, Transportation Research Record 1320, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.
  14. Hall, F. L., V. F. Hurdle and J. H. Banks (1992), A Synthesis of Recent Work on the Nature of Speed-Flow and Flow-Occupancy (or Density) Relationships on Freeways, Transportation Research Record 1325, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., pp. 12-18
  15. Transportation Research Board(2000), Highway Capacity Manual, Special Report 209, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
  16. Yasuji Makigami and William L. Woodie (1970), Freeway Travel Time Evaluation Technique, Highway Research Record 321, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C.

♣ 주 작성자 : 이승준

♣ 교신저자 : 이승준

♣ 논문투고일 : 2006. 2. 13

♣ 논문심사일 : 2006. 3. 27 (1차)  
2006. 5. 24 (2차)

♣ 심사판정일 : 2006. 5. 24

♣ 반론접수기한 : 2006. 10. 31