

■ 論 文 ■

차간시간(Time Gap) 변수를 이용한 교통기본도(Fundamental Diagram)의 미시적 해석

A Microscopic Analysis on the Shapes of Fundamental Diagram Using Time Gap

김 태 완

(중앙대학교 도시공학과 조교수)

김 영 호

(영산대학교 네트워크정보공학부 전임강사)

김 상 구

(여수대학교 교통공학전공 조교수)

손 영 태

(명지대학교 교통공학과 부교수)

목 차

- | | |
|---|---|
| <p>I. 서론</p> <p>1. 연구배경 및 목적</p> <p>2. 연구범위 및 방법</p> <p>II. 차간시간과 교통기본도</p> <p>III. 자료수집 및 분석</p> <p>1. 조사지점 및 검지기 위치</p> | <p>2. 차간시간 산정</p> <p>IV. 데이터 분석결과</p> <p>1. 교통류 특성 및 차간시간 분포</p> <p>2. 교통기본도와 차간시간</p> <p>V. 결론 및 향후 연구과제</p> <p>참고문헌</p> |
|---|---|

Key Words : 차간시간, 교통기본도, 확률분포, 차간시간-속도 분포도, 운전자 형태

요 약

교통기본도(Fundamental Diagram)는 교통류와 관련된 다양한 연구에서 중요한 요소로 생각되어져 왔다. 지금까지 다양한 형태의 교통기본도가 제시되었고 실제 데이터를 가장 잘 설명하는 교통기본도의 형태에 대해 많은 논의가 이루어졌지만, 서로 다른 형태의 교통기본도를 결정하는 원인에 대한 분석이 충분히 이루어지지 않고 있다. 본 연구는 서로 다른 지점과 교통조건에서 운전자의 행태차이를 이해하는데 중요한 파라메타로서 차간시간(time gap)을 소개하였고, 차간시간과 교통기본도의 형태와의 연관성을 분석하였다. 개별차량 검지기 자료를 토대로, 차간시간은 확률분포를 따르고 평균값은 지점에 따라 변화하는 것과 다른 통행속도에서 다른 차간시간을 보이는 것으로 분석되었다. 또한, 차간시간-속도 분포도의 3가지 형태들이 확인되었고 이것들은 교통류율-밀도 교통기본도로 전환되면 기존의 Greenberg, 역 λ , 전도된 V형태의 교통기본도와 일치하였다. 본 연구는 미시적 교통변수인 차간시간을 이용하여 교통기본도의 특징을 해석하였고, 운전자들의 행태에 관한 특성을 교통조건과 도로의 기하구조에 따라 설명하였다.

1. 서론

1. 연구배경 및 목적

교통류율, 속도, 밀도 등 거시적 교통변수 사이의 관계는 교통계획, 설계, 운영에 관한 다양한 연구를 하는데 있어서 주요한 관심사항이었다. 이러한 교통변수들 사이의 관계를 설명하는 다양한 교통류 모형들이 제안되었지만, 실제 교통자료를 가장 잘 묘사하는 모형에 관하여 여전히 논쟁거리로 남아있다. 문헌상 가장 초기의 교통류 모형은 Greenshields의 선형모형으로 거슬러 올라간다. Greenshields는 지상사진 데이터를 이용하여 속도는 밀도의 선형 감소함수라는 것을 찾아내었다. Greenshields의 선형 속도-밀도모형으로부터 생겨난 교통량(q)-밀도(k) 관계의 교통기본도(Fundamental Diagram)는 포물선형태이고, 이것은 최대교통류율을 가질 때 임계밀도를 기준으로 대칭적인 형태를 가지고 있다.

또 하나의 교통류모형은 Greenberg에 의해 개발되었는데, Greenberg는 유체역학의 유사성으로부터 비선형 속도-밀도 관계를 유도하였고, 이 관계식이 Lincoln 터널 데이터에 잘 맞다는 것을 보여주었다. Greenberg의 속도-밀도 관계식으로부터 유도된 교통기본도는 임계밀도가 혼잡밀도의 약 1/3에 해당되는 비대칭 포물선 형태를 나타낸다(〈그림 1(a)〉 참조).

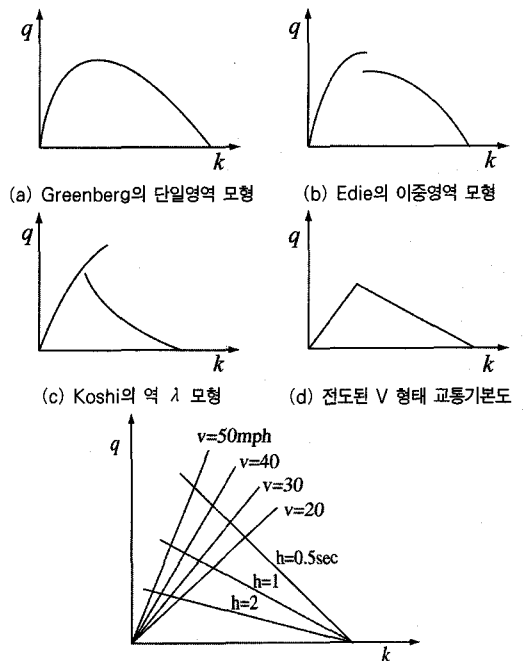
이러한 두 가지 모형들은 간편성과 GM 차량추종모형과의 연결성으로 인해 일반적으로 인정되고 지금까지 가장 널리 사용되는 모형들이다. 그러나, 교통량-밀도 산점도를 주의깊게 살펴보면 소위 이중영역 교통류모형이라 불리는 형태와 유사하다는 것을 알 수 있다. Edie와 Foote는 교통량-밀도 기본도에 자유교통류 영역의 것과 혼잡교통류 영역에 해당되는 두 개의 다른 산점도 집단이 있으며 그들 사이에는 불연속이 존재한다고 주장하였다. Edie는 Greenberg가 사용하였던 같은 Lincoln 터널자료를 분석하여 두 개의 분명한 곡선들을(자유교통류 영역과 혼잡교통류 영역) 가진 교통량-밀도 산점도를 제시하였다(〈그림 1(b)〉 참조). Edie의 이중영역 모형은 이후에 다른 몇몇 연구자들에 의해서 검증받았다.

이중영역 교통기본도의 특징은 용량감소라 묘사되는 불연속의 존재이다.(혼잡교통류에서 얻어지는 최대교통류율은 안정교통류의 것보다 유의하게 낮음) 용량감소의 존재와 고속도로 용량값에 관한 수많은 논쟁이 있어

왔고 최근에 운전자 행태모형들이 용량감소 현상을 설명하기 위하여 개발되어왔다.

교통기본도의 또 다른 현저한 특징은 일본 고속도로 데이터로부터 제시되었다. Koshi 등은 동경고속도로의 교통데이터를 분석하여 안정교통류가 아래로 오목하고 정체류가 위로 오목한 역 λ 형태의 모형을 제안하였다. 이러한 두 곡선 사이에도 불연속이 존재하며 역 λ 형태의 교통기본도는 일본외의 다른 장소에서도 흔히 관측되었다. Banks는 역 λ 와 전도된 V 형태들은 보통 내측차로에서 관측된다고 설명하였고, 전체차로에 대한 데이터는 전도된 V 형태가 가장 일반적으로 관측된다고 하였다. 전도된 V 형태는 최초로 Athol과 Hillegas 등에 의해 언급되었다.

Hall 등은 Oakville과 Toronto 사이의 Queen Elizabeth의 한 구간에서 얻은 5분 평균데이터를 분석하여 불연속은 확실하지 않고, 차라리 전도된 V형태가 교통기본도에 논리적으로 일치한다고 결론을 내렸다. 정체교통류 영역에서의 선형성은 운전자들이 일정한 차간시간을 갖는 것을 의미하기 때문에 훨씬 간단하고 직접적인 해석이 전도된 V형태 교통기본도에서 가능하게 되었다. 전도된 V 형태 모형은 그 간편성과 운전자의 행태적 연관성 때문에 최근의 많은 교통류 연구



(e) 다양한 차간시간과 속도에 의한 교통량-밀도 관계(Forbes, 1963)

〈그림 1〉 교통기본도

에서 인용되고 있다.

교통량-밀도 관계에 관한 많은 연구들이 있어왔으나, 교통량-밀도 관계에 대한 일관성있고 범용적으로 적용가능한 모형식은 개발되지 못하였고, 여전히 교통기본도의 다양한 특징들이 가지는 의미를 완전히 이해하지 못하고 있다. 이러한 교통기본도의 복잡성은 주로 운전자들이 서로 다른 지점이나 교통조건에서 다르게 행동하기 때문이다. 따라서, 교통기본도에 숨겨진 운전자 행태를 밝혀내는 것이 교통기본도에 대한 좀 더 나은 이해를 얻을 수 있는 것이다. 그러나, 교통기본도에 대한 대부분의 경험적인 연구들이 주로 시각적인 조사에 의존하고 교통기본도의 특징을 설명하는데 있어서 미시적인 접근을 사용하려는 시도는 거의 없었다. 본 논문에서는 교통기본도를 설명하기 위한 주요한 파라메타로서 개별차량의 차간시간(Time Gap)을 도입하여 차간시간 분포를 조사하고 교통기본도와 연관시킴으로써 운전자 행태로부터 교통기본도의 다양한 특징들을 설명하는데 그 목적이 있다

2. 연구범위 및 방법

본 연구는 미국 캘리포니아 주 버클리 소재 I-80 고속도로에서 수집된 교통자료를 대상으로 한다. 수집된 자료는 차량의 검지기 통과 시간이 표시된 event data 이며 이 자료를 분석하여 속도와 위치에 따른 차간시간의 변화를 분석하고 속도-차간시간의 관계를 이용하여 서로 다른 형태의 교통기본도가 나타내는 운전자의 행태를 연구한다.

II. 차간시간과 교통기본도

혼잡교통류 상태에서 운전자의 주 관심사는 앞차량과 충돌을 피하는 것이고 안전한 행을 위하여 운전자는 적당한 거리를 유지하는 것이 필요하다. 만약에 선두차량과 추종차량의 감속도가 같고 추종차량의 반응시간이 없다고 가정한다면 두 차량간 간격은 필요하지 않을 것이다. 만약에 추종차량의 운전자가 반응시간을 갖는다면 충돌을 피하기 위해 요구되는 최소간격은 정적교통류 상태에서 속도와 반응시간의 곱에 해당되는 거리이다. 차간시간이 반응시간(최소 차간시간)보다 훨씬 크다면 추종차량 운전자는 여유있는 상태에서 주행할 수 있을 것이다. 실제적으로 감속성능과 개별차량의 주

행 안락감에 대한 불확실성으로 인해 실제 차간시간은 반응시간보다 더 크게 유지하는 경향이 있다. 현장 관측 결과를 보면 실제 차간시간은 운전자 집단과 개별운전자의 통행시간대에 따라 다르게 나타나고, 다른 차간시간들은 다른 교통기본도를 나타낸다. Forbes는 일정한 차간시간은 교통량과 밀도사이의 선형관계와 일치한다는 것을 보여주었다(〈그림 1(e)〉 참조).

Zhang과 Kim은 반응시간으로도 표현되는 차간시간(h)은 차간거리(s)의 함수로 가정하고, 교통기본도의 다양한 형태는 차간시간과 차간거리의 다양한 관계로부터 도출된다는 것을 보여주었다. 예를 들어, 시간 t에서 차량 n의 차간시간은 식(1)을(차간시간-차간거리 함수로부터 교통기본도의 유도) 따를 때 단일포물선 교통기본도는 얻어진다.

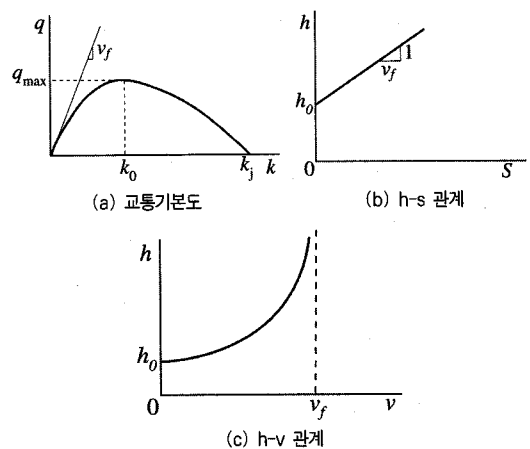
$$h_n(t) = h_o + \frac{1}{v_f} s_n(t) \tag{1}$$

여기서,
 v_f : 자유교통류 속도
 h_o : 상수

또한 $s_n(t)$ 를 $v_n(t) \cdot h_n(t)$ 로 대체하면 차간시간은 속도함수로서 표현될 수 있다.

$$h_n(t) = \frac{h_o}{1 - \frac{v_n(t)}{v_f}} \tag{2}$$

〈그림 2〉는 연속포물선 형태의 교통기본도(a), 그것에



〈그림 2〉 Greenberg 형태의 교통기본도

상응하는 h-s 관계(b), h-v 관계(c)를 나타낸 것이다.

〈그림 3〉에서처럼 역 λ 교통기본도는 차간시간이 혼잡교통류에서 일정하고 자유교통류에서 차간거리의 선형 증가함수일 때 얻어질 수 있다.

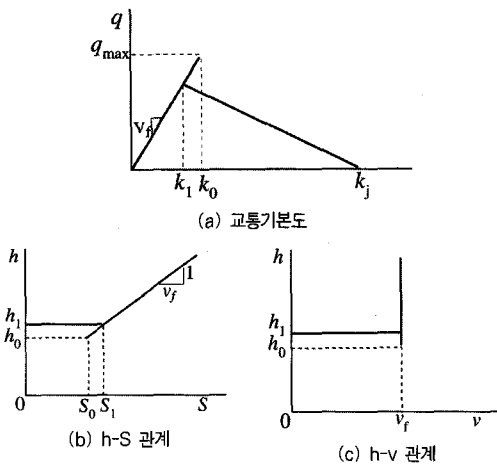
$$\begin{aligned}
 h_n(t) &= \frac{s_n(t)}{v_f} & \text{if } S_1 \leq s_n(t) \\
 &= h_1 & \text{if } 0 \leq s_n(t) < S_1 \\
 &= \frac{s_n(t)}{v_f} & \text{if } S_0 \leq s_n(t) < S_1 \text{ and } v_n(t) = v_f \\
 &= h_1 & \text{if } S_0 \leq s_n(t) < S_1 \text{ and } v_n(t) < v_f
 \end{aligned}$$

차간시간-차간거리 함수는 다음과 같이 차간시간-속도함수로 전환될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 h_n(t) &\geq h_0 & \text{if } v_n(t) = v_f \\
 &= h_1 & \text{if } v_n(t) < v_f
 \end{aligned}$$

역 λ 교통기본도에 일치하는 차간시간-차간거리와 차간시간-속도함수는 〈그림 3(b)〉와 〈그림 3(c)〉에 그려져 있다. 혼잡교통류에서 차간시간이 속도의 감소함수라면 역 λ의 혼잡영역은 아래로 볼록한 곡선이며, 이것은 Koshi 등에 의해 제안된 본래 역 λ 교통기본도와 훨씬 유사하다.

분석적으로 다양한 교통기본도 형태들은 상응하는 차간시간-차간거리(속도) 함수와 일치하고, 그것으로부터 운전자의 행태를 이해하는 것이 훨씬 더 쉽게 된다. 다음 장부터는 고속도로 교통자료를 조사하여 교통기본도에 관한 연구와 운전자 행태 측면에서 그것들을 해석하고자 한다.

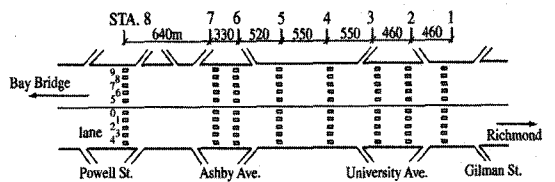


〈그림 3〉 역 λ 행태의 교통기본도

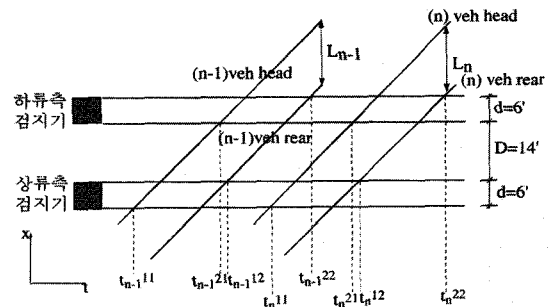
III. 자료수집 및 처리

1. 조사지점 및 검지기 위치

교통데이터는 캘리포니아 버클리의 I-80 고속도로에서 수집되었다. 이 구간은 평지이고 직선구간의 10차로 고속도로이며 서측방향으로 Bay Bridge가 있고 이 쪽은 주로 San Francisco로 들어가는 많은 교통량으로 인하여 자주 혼잡하다. 평일 오전과 저녁 첨두시에 Bay Bridge 입구근처에서 발생한 혼잡이 상류부 멀리 연구대상 구간까지 전파된다. 동측방향은 Richmond이고 혼잡은 주로 동측방향 교통량으로 인해 발생되나 서측방향보다 심하지는 않다. 다인승차로는 0차로과 5차로이고 오전 5시부터 10시까지, 오후 3시부터 7시까지 운영된다. 대상구간내 8개의 지점에 검지기가 설치되어 있으며 각 지점의 차로는 이중루프를 가진다. 검지기의 크기는 1.83m × 1.83m이고 쌍루프는 4.27m 떨어져 설치되어 있다(〈그림 4(b)〉 참조). 본 연구에서 사용한 원시 검지기 자료는 개별차량 검지기 데이터로서, 이는 이중루프검지기에서 차량들의 on/off 시점을 기록하여 얻은 자료들이다. on/off 시점은 1/60초 단위로 기록되고 이러한 event 데이터는 교통량과 점유율과 같은 집계자료보다 개별차량의 차간시간을 계산하는 데 더 적합한 정보를 제공한다.



(a) 검지기 위치



(b) 검지기 On,off 시간

〈그림 4〉 조사지점 및 검지기 배치

2. 차간시간 산정

검지기를 점유한 시간은 선두차량이 첫 번째 검지기의 앞부분을 접촉하여 두 번째 검지기를 떠날 때까지를 의미한다(〈그림 4(b)〉 참조). 검지기의 기계적 편이나 에러는 본 연구에서 고려하지 않았다. n번째 차량이 첫 번째 검지기에 접촉한 시점과 분리된 시점을 t_n^{11} 과 t_n^{22} 이라하면 두 번째 검지기의 접촉과 분리시점은 t_n^{21} 과 t_n^{12} 로 표시되고, 정적교통류 상태에서 n번째 차량의 속도는 다음과 같이 계산된다.

$$v_n = (D + d) / (t_n^{21} - t_n^{11}) \quad (3)$$

여기서,

d : 검지기 길이(1.83m)

D : 검지기쌍의 거리(4.27m)

n번째 차량의 차간시간(h_n)은 n-1번째 차량의 후미와 n번째 차량의 선두가 검지기의 앞부분을 통과한 시간차이로 계산된다.

$$h_n = t_n^{11} - (t_{n-1}^{12} - d/v_{n-1}) \quad (4)$$

본 논문에서 언급되는 교통류율, 속도, 점유율, 그리고 밀도는 매 60초 동안 계산된 것이다. 교통류율은 매 60초 동안 상류검지기를 통과한 차량들의 수를 1시간단위로 환산한 값이고, 공간평균속도는 식(3)에서 계산된 차량속도의 조화평균이다. 점유율은 60초 동안 상류검지기가 점유된 시간의 %이다. 밀도는 다음과 같이 계산된다.

$$k = (\% \text{ 점유율}) / (\bar{L} + d) \quad (5)$$

여기서,

\bar{L} : 평균차량길이이고 5m로 가정

교통데이터는 2001년 12월 7일 0:00 AM ~ 12:00 PM 사이에 수집되었고, 이 중 Sta. 8의 전체차로와 Sta. 5의 0차로에 있는 검지기는 하루 중 일정한 시간동안 작동하지 않아서 본 분석에서는 고려하지 않았다. 다른 측정지점들의 경우, 개별차량 데이터는 다음

과 같은 기준에 의해 확인되고 사용되었다.

- 접촉시각은 분리시각보다 항상 앞서야 함
: $t_n^{11} > t_n^{12}$, $t_n^{21} > t_n^{22}$
- 동일한 차량에서 상류검지기의 on/off 시각은 하류검지기의 on/off 시각보다 앞서야 함
: $t_n^{11} > t_n^{21}$, $t_n^{12} > t_n^{22}$
- $t_n^{11} - t_{n-1}^{11}$ 를 만족하는 차량 n과 n-1은 다음 부등호를 가져야 함
: $t_n^{12} > t_{n-1}^{12}$, $t_n^{21} > t_{n-1}^{21}$, $t_n^{22} > t_{n-1}^{22}$
- 속도는 물리적으로 가능한 크기 이하이어야 함
: $v_n^m < 60m/s$ 및 $v_n^{off} < 60m/s$
- on/off 시각을 이용하여 계산된 속도차는 10m/s 이하가 되어야 함 : $|v_n^m - v_n^{off}| < 10m/s$
- 차간시간은 양수임 : $h_n > 0$

상기의 기준을 만족하지 않는 차량들의 on/off 시각 데이터는 에러로 간주하고, 한 차량 데이터가 에러로 판명되면 추종차량의 계산된 차간시간도 역시 오류가 있기 때문에 추종차량의 데이터도 분석에서 제외시켰다.

기준에 의해 모든 데이터를 검증한 결과 에러율이 각 측정지점별로 계산되고, 몇 개 측정지점들이 높은 에러율을 가진 반면 대부분 측정지점들은 1.0%이하의 에러율을 보였다. 5%이상의 에러율을 가진 측정지점들은 분석에서 제외하였고, 그 지점들은 Sta. 4의 2차로(8.72%), 3차로(45.94%), 그리고 Sta. 6의 1차로(11.29%), 2차로(99.66%), Sta. 7의 9차로(18.84%)이다. 또한, Sta. 7의 0차로는 교통량-밀도 그래프에서 9대/km 이상의 관측점들이 없어서 제외하였고, 6차로는 측정된 많은 점들이 낮은 밀도(30대/km 이하)와 낮은 교통량(1,000대/시) 수준을 보였기 때문에 제외하였다. 최종적으로 총 51개 측정지점들이 본 분석에서 사용되었다.

IV. 데이터 분석결과

1. 교통류 특성 및 차간시간 분포

고속도로의 분석대상구간에서 데이터가 수집된 날의 양방향 교통상황을 파악하기 위하여 Sta. 4에서 Richmond 방향의 1차로에서 24시간동안 관측된 속도

값을 <그림 5(a)>에, Bay Bridge 방향의 6차로에서 관측된 속도 값을 <그림 5(b)>에 나타내었다. 여기서 사용된 속도는 공간평균속도이며 집계간격은 60초이다. Richmond방향의 다른 관측지점에서 수집된 자료들은 <그림 5(a)>와 같이 오전에는 정체가 발생하지 않고 14:00시부터 20:00시까지 심각한 정체가 발생하는 패턴을 보인다. 정체시간동안 관측된 속도는 20~60km/hr 정도이다. Bay Bridge방향에서 수집된 자료들은 <그림 5(b)>와 같이 06:00시부터 10:00시까지 경미한 정체를 보이고, 14:00시부터 20:00시까지 심각한 정체가 발생하는 패턴을 보인다. 정체가 심각하지 않은 06:00시부터 10:00시까지는 속도는 60~80km/hr 정도이고, 심각한 정체를 보이는 14:00시부터 20:00시까지는 속도가 10~50km/h로 감소하였다. 양방향의 자유속도 (free flow speed)는 차로별로 약간의 차이를 보이나 대체적으로 내측차로의 경우는 120km/hr로 관측되었고 외측차로의 경우는 100km/hr로 관측되었다.

본 논문에서는 혼잡교통류에 한정하여 차간시간에 대한 분석을 하였는데, 그 이유는 비혼잡 교통류의 경우 차간시간이 운전자의 행태보다는 교통량에 의해 결정되고, 차간시간의 분포와 운전자의 행태가 직접적으로 연관되지 않기 때문이다. 따라서 Richmond 방향에서는 14:00시부터 20:00시사이의 교통데이터를, Bay Bridge방향에서는 6:00시부터 10:00시사이와 14:00

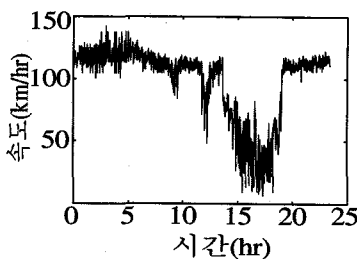
시부터 20:00시까지의 교통데이터를 이용하여 차간시간을 구하였다.

관측지점과 차로에 따른 차간시간의 차이를 살펴보기 위하여 모든 관측지점과 차로에서 측정된 차간시간의 산술 평균값을 <그림 6(a)>에 나타내었다. 차간시간의 평균값들은 Sta. 4의 1차로에서 관측된 1.7초와 Sta. 2의 4차로에서 관측된 2.94초 사이의 값을 갖는다. 양방향에서 관측된 데이터들이 동일한 패턴을 보이는데, 양방향의 가장 내측차로인 0차로와 5차로의 평균차간시간은 비교적 큰 값을 보인다. 이에 대한 원인은 다음과 같이 두 가지로 살펴볼 수 있다. 첫째, 양방향의 가장 내측차로는 HOV 차로이므로 여기서 관측된 교통량은 다른 차로들에 비해서 상대적으로 적다. 둘째, HOV 차로의 왼쪽에 설치되어 있는 중앙선분리대로 인한 심리적 부담으로 인하여 운전자들은 다른 차로에서보다 긴 차간시간을 유지하기를 원한다. HOV 차로의 옆차로(1차로와 6차로)에서는 비교적 짧은 차간시간이 관측되었는데, 이것은 짧은 차간거리를 유지하며 운전하는 공격적(aggressive)인 운전자가 두 번째 내측차로를 선호한다는 것으로 설명할 수 있다.

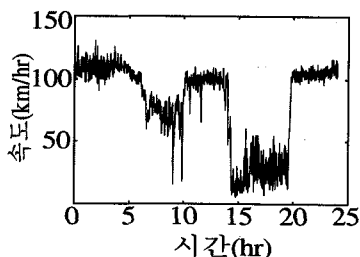
또한, Bay Bridge방향에서 관측된 평균차간시간 값이 Richmond방향에서 관측된 값보다 대체적으로 크다. 이것은 속도가 약 10m/초(36km/시) 이하의 저속에서는 속도가 낮을수록 차간시간은 증가하는 경향이 있는데(<그림 9> 참조) 정체기간 중 Bay Bridge 방향의 속도(10~50 km/시)와 Richmond 방향의 속도(10~80 km/시)를 비교하여 볼 때(<그림 5> 참조) Bay Bridge 방향에서 속도 36km/시 이하의 경우가 훨씬 많이 발생하기 때문이다.

<그림 6(b)>는 모든 Sta.과 차로에서 측정된 차간시간에 대한 표준편차를 나타낸다. 관측지점 5를 제외하면 차간시간의 표준편차와 평균값은 유사한 패턴을 따른다. 즉, 차간시간의 평균값이 크면 표준편차의 값도 크고, 평균값이 작으면 표준편차의 값도 작은 값을 나타낸다. 그러나 Sta. 5에서 표준편차가 가장 큰 값을 갖는 이유는 명확하게 알 수가 없었다.

일반적으로 차두시간이 어떠한 확률적 분포를 가진다는 것은 알려진 사실이나, 본 논문에서는 앞서 언급한 바와 같이 운전자의 반응시간과의 연관성을 가지고 있으며 차두시간과는 그 특성이 구별되는 차간시간이 어떠한 확률적 분포를 가지는지 알아보려고 한다. 특히 최근에 많이 사용되고 있는 전도된 V형태의 교통기본

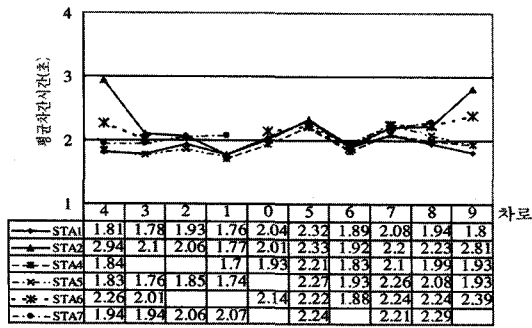


(a) Sta. 4의 1차로 (Richmond 방향)

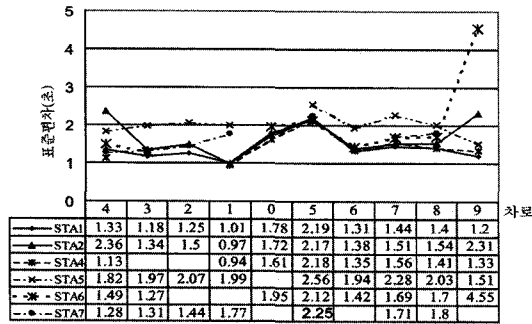


(b) Sta. 4의 6차로 (Bay Bridge 방향)

<그림 5> Sta. 4의 전일 속도전이

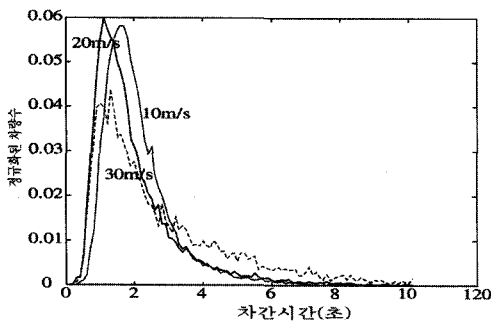


(a) 평균 차간시간



(b) 차간시간의 표준편차

(그림 6) 차간시간의 평균 및 표준편차



(그림 7) 차간시간의 표준화된 차량분포

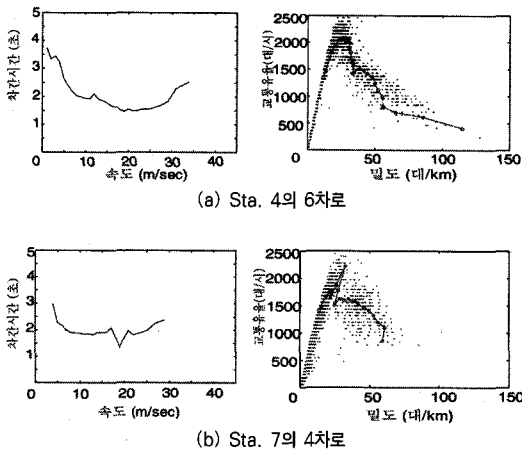
도는 정체상태에서 차량의 차간시간이 모두 동일하다는 가정을 근거로 하고 있으므로 차간시간의 확률적 분포와 속도에 따른 차이 유무를 밝혀내는 것은 의미있는 일이라 하겠다.

(그림 7)은 Bay Bridge 방향으로 운행하는 전체 차량들을 먼저 속도별로 분류하고, 같은 속도로 달리는 차량들 중에서 주어진 차간시간을 갖는 차량의 비율을 나타낸다. 가로축은 차간시간을 나타내고 세로축은 정규화된 차량 수를 나타낸다. 정규화된 차량 수는 미리 분류된 속도 (10m/초, 20m/초, 30m/초)로 달리는 전체 차량 중에서 주어진 차간시간을 갖는 차량의 수로 구해진다.

차간시간은 오른쪽으로 긴 꼬리를 갖고 왼쪽으로 치우친 형태의 분포를 보인다. 최빈값은 분류된 속도에 따라 다르게 관측된다. 속도가 20m/초인 경우에 최빈값이 가장 작으며, 속도가 10m/초인 경우에 최빈값이 가장 크게 나타난다. (그림 7)에서 보는 바와 같이 차간시간은 확률적(stochastic)인 성질을 가지며, 차간시간의 확률분포는 통행 속도에 따라 다르다는 것을 알 수 있다. 다음으로는 속도에 따른 차간시간의 변화와 차간시간과 교통기본도간의 관계에 대해 기술한다.

2. 교통기본도와 차간시간

Sta. 4의 6차로에서 수집된 데이터로부터 통행속도에 따른 평균차간시간을 (그림 8(a))의 좌측에 나타내었다. 평균차간시간은 같은 속도로 관측지점을 통과하는 차량들의 차간시간의 산술평균값이다. 평균차간시간은 속도가 10m/초 이하 또는 30m/초 이상인 경우 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 차량이 10m/초와 30m/초 사이의 속도로 운행할 경우 평균차간시간은 1.5초~2.0초 사이의 값을 갖는다. 평균차간시간은 속도가 20m/초로 증가함에 따라 지속적으로 감소하며, 속도가 20~25m/초인 범위에서 평균차간시간의 최소값을 보였다. 앞에서 기술한 바와 같이, 속도가 증가함에 따라 차간시간이 감소하면 교통량-밀도 곡선은 아래로 볼록한 형태를 나타낸다. (그림 8(a))에서 보듯이 차간시간이 속도가 25m/초보다 큰 범위에서 속도가 증가할 때 함께 증가하면 교통량-밀도 곡선은 이 범위에서 위로 볼록한 형태를 나타낸다. 이와 같이 차간시간-속도 관계로부터 유도된 교통량-밀도 곡선은 위로 볼록한 곡선과 아래로 볼록한 곡선으로 구성되어 있다. 이러한 관계를 실제 데이터와 비교하기 위해서, 차간시간-속도 관계로부터 유도된 교통량-밀도 곡선과 실제 데이터로부터 얻어진 교통량-밀도 값을 (그림 8(a))의 우측에 표시하였다. (그림 8(a))의 우측 다이어그램에 표시된 교통량과 밀도 값은 24시간 전일 교통데이터를 대상으로 집계간격 60초를 근거로 산출되었다. 교통량-밀도 곡선은 차간시간-속도 관계식을 밀도 ($l/vh + L$)와 교통량 ($v/vh + L$)으로 변형함으로써 얻어진다. 실제 교통량과 밀도 값은 역 λ 형태를 나타내고, 교통량-밀도 곡선은 산포된 점들의 거의 가운데를 지나며 위로 볼록한 구간과 아래로 볼록한 구간으로 이루어진다. 정체 교통류상태에서 교통량-밀도곡선은 아래로 볼록한 형태



〈그림 8〉 차간시간과 교통기본도

를 나타내는데, 이것은 운전자들이 정체교통류상태에서 속도가 증가함에 따라 차간시간을 줄이는 경우에 발생하는 Koshi에 의해 밝혀진 역 λ 형태의 오른쪽 부분에 해당한다는 것을 보여준다.

Sta. 7의 4차로의 교통데이터로부터 구한 다른 형태의 평균차간시간-속도 곡선과 교통량-밀도 값을 〈그림 8(b)〉에 나타내었다. 실제 데이터로부터 교통량-밀도 값은 전도된(inverted) V자 형태의 곡선을 보여준다. 속도가 7~25 m/초 범위의 차간시간은 속도가 19 m/초에서 급격한 감소를 보이는 부분을 제외하고 일정한 수준(약 2초)을 유지한다. 평균차간시간이 일정한 값을 유지하는 부분은 교통량-밀도 곡선으로 변형될 때 전도된 V자 형태 곡선의 오른쪽 직선부분에 해당된다. 〈그림 8〉에 대한 해석을 통하여 교통량-밀도 곡선의 다양한 형태가 운전자들의 통행속도에 대한 차간시간의 선택에 따라 다양하게 결정된다는 것을 알 수 있다.

차간시간-속도 관계가 차로에 따라 다르게 나타나는지를 알아보기 위하여 교통데이터들을 차로별로 집계하여 차간시간-속도 곡선을 도출하였다. 〈그림 9〉에서 보는 바와 같이 차간시간-속도 관계를 서로 다른 3가지 형태로 분류하였고 각각의 차간시간-속도 관계에 대응하는 교통량-밀도 곡선을 도출하였다(Greenberg의 단일영역 형태, 역 λ 형태, 전도된 V자 형태). 〈그림 9(a)〉는 4차로에 대해 집계한 차간시간-속도 관계와 그에 대응하는 교통량-밀도 곡선을 나타낸다. 차간시간-속도 관계는 감소 구간과 증가 구간을 갖고, 속도가 15m/초에서 차간시간이 최소값을 갖는 완만한 U자

형태의 곡선을 이룬다. 속도가 작은 범위에서 차간시간-속도관계가 감소 패턴을 보인다는 것은 운전자들이 거의 정지할 정도로 감속할 때 좀 더 긴 차간시간을 유지한다는 것을 의미한다. 낮은 속도에서 긴 차간시간을 유지하는 것은 낮은 속도에서 앞에 달리던 차량이 갑자기 정지할 때 뒤 따르는 차량의 반응이 늦을 경우 충돌하는 확률을 줄일 수 있다는 점에서 합리적인 운전자행태라고 여겨진다. 반면에, 속도가 높고 두 차량간의 차간거리(spacing)가 크다면 뒤따르는 차량이 앞에 달리던 차량의 감속에 대해 늦게 반응하더라도 반드시 충돌로 이어지지는 않는다. 예를 들면, 차량들이 모두 차간시간(반응시간) 1초의 간격을 두고 운행한다고 가정할 때 속도가 30km/sec인 경우 차간거리는 30m, 속도가 3m/sec일 경우 차간거리는 3m이다. 만약 차량의 감속율이 3m/sec²이고 앞차가 감속을 하였다(뒤틀차는 원래 속도로 주행) 가정하면 앞차가 감속하고 2초뒤 차간거리는 고속의 경우 약 24m로 2초뒤 뒤틀차가 보다 큰 감속율로 감속하면 충돌은 피할 수 있다. 그러나 저속의 경우 충돌을 피할 수 없을 것으로 보여진다. 따라서 저속의 경우 운전자가 안전을 위하여 보다 큰 차간거리를 유지해야한다고 할 수 있다.

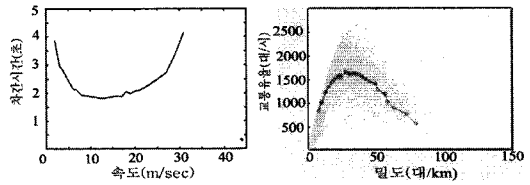
속도가 20m/초보다 큰 범위에서 차간시간-속도 관계가 증가하는 것은 다음과 같이 두 가지 이유로 설명할 수 있다. 이 구간은 정체와 자유흐름의 전이구간으로서 차량의 가속과 관련이 있는데 만약 트러파 같이 가속력이 적은 차량이나 반응시간이 느린 차량이 가속하는 승용차를 따라가고 있을 경우 속도의 증가에 따라(시간이 흐름에 따라) 차간시간은 증가한다. 이러한 완만한 U자 형태의 차간시간-속도 관계로부터 유도된 교통량-밀도 곡선은 일정한 밀도범위에서는 위로 불록하고 일정한 밀도 범위에서는 아래로 불록한 형태를 나타낸다. 교통량-밀도 곡선이 밀도범위에 따라 위로 불록하고 아래로 불록한 형태를 취할 때 두 개의 서로 다른 충격파 전파 특성이 존재한다.

속력이 15m/초 이하인 아래로 불록한 부분에서는 하류부의 가속파가 상류부의 가속파보다 빠르게 상류로 전파하여 가속 충격파를 형성한다. 반면에, 교통류가 감속하는 경우 rarefaction wave가 형성된다. 위로 불록한 부분에서는 충격파의 전파는 반대의 경향으로 나타난다(감속 충격파와 가속 rarefaction wave가 형성된다). 이러한 현상은 대부분의 교통량-밀도 곡선이 가정하고 있는 오목성(concavity)이 정체가 아주 심각

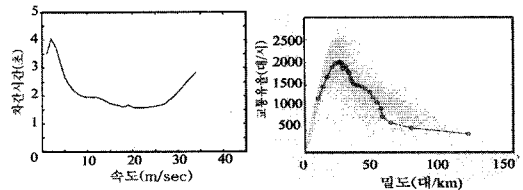
할 경우에는 타당하지 않으며 볼록성(convexity)이 이러한 경우 함께 고려되어야한다는 것을 의미한다. <그림 9(a)>의 실제 관측된 교통량-밀도 값이 보여 주듯이 밀도가 50대/km 이하에서의 교통량-밀도 곡선은 Greenberg의 단일영역 (single regime) 교통량-밀도 곡선과 유사하다. 용량 상태를 나타내는 임계밀도는 30-40대/km의 범위에서 관측된다.

<그림 9(b)>는 6차로에서 수집한 교통 데이터를 이용하여 생성한 역 λ 형태와 유사한 교통량-밀도 곡선을 보여준다. 차간시간-속도 곡선은 완만한 U자 형태를 보여준다. 차간시간-속도 곡선에서 차간시간의 최소값은 속도가 20m/초의 값에서 나타나며 이것은 4차로에서 나타난 값보다 높다. 이 경우, 볼록성은 교통량-밀도곡선의 정체교통류 전반에 걸쳐 나타나며 교통량-밀도 곡선은 Koshi의 역 λ 교통량-밀도곡선과 유사하다. 임계밀도는 20-30대/km의 범위에 위치하며 교통량-밀도 곡선의 오른쪽 부분과 왼쪽 부분이 Greenberg의 단일 영역 (single-regime) 교통량-밀도 곡선처럼 매끄럽게 연결되지 않고 임계밀도 부근에서 교통량이 급격히 감소하는 부분이 존재한다. 이렇게 교통량의 차이를 보이는 부분이 역 λ 형태 곡선의 윗부분의 형태와 유사하다.

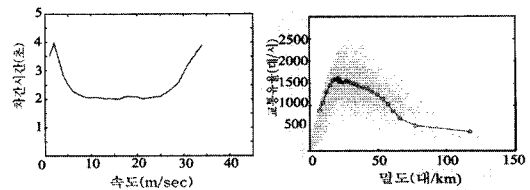
<그림 9(c)>는 8차로에서 수집한 교통 데이터를 이용하여 생성한 전도된 V자 형태의 교통량-밀도 곡선을 나타낸다. 평균차간시간은 속도가 10m/초에서 23m/초에 이르기까지 거의 일정하고, 아래 부분이 평평한 U자 형태의 곡선을 생성한다. 전도된 V자 형태는 밀도가 50대/km 이하의 범위에서 교통량-밀도 곡선에서 명확하게 나타난다(U자 형태의 평균차간시간-속도 곡선의 평평한 부분은 전도된 V자 형태의 교통량-밀도 곡선의 오른쪽 직선 부분에 대응된다). 6차로의 경우와 같이 밀도가 50대/km 이상인 구간에서 아래로 볼록한 곡선이 나타난다. 임계밀도는 역 λ 형태의 교통량-밀도 곡선에서와 같이 20-30대/km 범위에 위치하며 Greenberg의 단일 영역 교통량-밀도 곡선의 임계밀도보다 다소 낮게 관측된다. 다른 차로에서도 유사한 형태의 교통기본도를 얻을 수 있었는데 2, 3, 9차로에서 관측된 교통 데이터는 <그림 9(a)>에서와 같이 Greenberg의 단일영역 교통량-밀도 곡선과 그에 대응되는 차간시간-속도 곡선을 생성하였고 5차로는 <그림 9(b)>와 같은 Koshi의 역 λ 형태의 교통량-밀도 곡선, 0, 1, 7차로는 <그림 9(c)>에서와 같이 전도된 V



(a) 4차로



(b) 6차로



(c) 8차로

<그림 9> 차간시간과 교통기본도(4, 6, 8차로)

자 형태의 교통량-밀도 곡선을 생성하였다.

U자형 곡선은 차간시간-속도 관계의 공통적인 특징이며, 교통량-밀도 곡선의 형태를 결정하는 중요한 요소는 U자형 차간시간-속도 곡선의 바닥 부분의 형태이다. 이것은 속도가 20~25m/초의 범위의 차간시간의 값에 따라 변한다. <그림 9>와 <그림 10>의 차간시간-속도 곡선을 살펴보면, 속도가 20~25m/초의 범위에서 차간시간 값들이 역 λ 교통량-밀도 곡선을 생성하는 경우 2초보다 작고, 전도된 V자 형태의 교통량-밀도 곡선을 생성하는 경우 2초이며, Greenberg의 단일 영역 교통량-밀도 곡선을 생성하는 경우 2초보다 크다는 것을 알 수 있다. U자형 차간시간-속도 곡선에서 바닥의 기울기는 차간시간 값이 감소하는 형태, 일정한 형태, 증가하는 형태로 나타나며 이에 해당하는 세 가지 형태의 교통량-밀도 곡선이 각각 결정된다. 이러한 현상은 공격적(aggressive)인 운전자들과 가속능이 좋은 차량들이 주로 운행하는 내측차로에서 관측된 결과와도 일치한다. 역 λ 형태와 전도된 V자 형태의 교통량-밀도 곡선은 일반적으로 내측차로에서 관측되고, Greenberg의 단일영역 교통량-밀도 곡선은 일반적으로 바깥차로(shoulder lane)에서 관측된다.

V. 결론 및 향후 연구과제

교통기본도는 교통류의 특성을 분석하거나 변화를 예측하는데 기본이 되는 주요한 자료이다. 현재까지 여러 가지 형태의 교통기본도가 개발되었으나 어느 것이 현실적인 교통류를 가장 잘 나타내고 있는지에 관하여는 아직 논란이 계속되고 있다. 특히 다양한 형태의 교통기본도가 생기는 운전자의 행태적 원인에 대한 미시적 분석은 많이 이루어지지 못하고 있다. 본 연구는 운전자의 행태와 밀접한 관련이 있으나 이제까지 상대적으로 연구대상이 되지 않았던 차간시간이라는 변수를 도입하여 서로 다른 도로의 위치 및 교통조건에 따른 운전자의 행태변화를 설명하였다. 또한 속도에 따른 차간시간의 변화를 가지고 서로 다른 형태의 교통기본도가 발생하는 원인과 그 속에 내재된 운전자의 행태를 설명하였다. 본 연구에서의 차간시간은 I-80 고속도로에 설치된 루프검지기에서 관측된 개별차량 데이터(event data)로부터 얻어졌다. 관측자료를 바탕으로 평균차간시간의 분포와 평균차간시간-속도 관계가 연구되었으며, 평균차간시간-속도 관계는 교통량-밀도관계로 변환되었고 실제로 관측된 교통량-밀도 값과 비교되었다. 세 가지 서로 다른 형태의 차간시간-속도 관계가 존재함을 확인하였으며 Greenberg의 단일영역 형태, 역 λ 형태, 그리고 전도된 V자 형태의 교통량-밀도 곡선이 이에 해당함을 알 수 있었다. 즉 서로 다른 형태의 교통량-밀도 곡선은 운전자들이 주어진 속도에서 다른 차간시간을 유지함으로써 발생하는 것으로 분석되었다.

또한, 본 논문에서는 운전자들의 행태에 관한 흥미로운 특성들을 교통조건과 도로의 기하구조와 연관하여 설명하였는데, 평균차간시간은 HOV 차로를 제외한 가장 왼쪽차로에서 가장 작으며 HOV 차로와 가장 우측차로에서 가장 크게 나타났다. 또한 아주 낮은 속도에서 운전자는 차간시간을 크게 유지하는 것으로 나타났다. 이것은 운전자들이 교통조건과 기하구조에 따라 서로 다른 차간시간을 유지하려는 경향이 있다는 것을 보여주는 것이다.

본 논문은 운전자의 미시적 행태분석이 상대적으로 어려웠던 교통기본도를 차간시간이라는 변수와 연계시킴으로써 운전자 행태분석이 가능하게 하였다는데 의미가 있다고 할 수 있다. 본 연구에서는 속도에 따른 차간시간의 변화를 위주로 연구하였으나 속도이외의 다른

변수들이 운전자들의 차간시간 선택에 영향을 미칠 수 있을 것이다. 차간시간에 영향을 미치는 다른 변수들에 대한 연구와 차간시간과의 관계를 밝히는 것은 향후 연구과제로 남겨둔다.

참고문헌

1. Greenshields, B. D. (1934) "A Study of Traffic Capacity", Proc. Highway Research Board Vol.14, pp.448~477.
2. Greenberg, H. (1959) "An Analysis of Traffic Flow", Operations Research, Vol.7, pp.79~85.
3. Edie, L.C. and Foote, R. S. (1958) "Traffic Flow in Tunnels" Highway Research Board Vol.37, pp.334~344.
4. Edie, L. C.(1961) "Following and Steady-State Theory for Non-congested Traffic", Operations Research, Vol.9, pp.66~76
5. Drake, J. S., Schofer, J. L., and May, A. D. (1967) "A Statistical Analysis of Speed Density Hypothesis" Highway Research Record 154, pp.53~87.
6. Mika, H.S., Kreer, J.B., and Yuan, L.S. (1969) "Dual Mode Behavior of Freeway Traffic," Highway Research Record 279, HRB, pp.1~12.
7. Cedar, A. and May, A.D. (1976) "Further Evaluation of Single- land Two-Regime Traffic Flow Models," Transportation Research Record 567, pp.1~15.
8. Hall, F. L., Allen, B.L., and Gunter, M.A. (1986) "Empirical Analysis of Freeway Flow-Density Relationships," Transportation Research A, Vol.20A, No.3. pp.197~210.
9. Banks, J.H.(1991) "Two-Capacity Phenomenon at Freeway Bottleneck: A Basis for Ramp Metering?" Transportation Research Record 1320, pp.83~90.
10. Agyemang-Duah K. and Hall F.L.(1991) "Some Issues Regarding the Numerical Value of Freeway Capacity," Highway Capacity and

- Level of Service, Proceedings of the International Symposium on Highway Capacity, Karlsruhe, 24-27 July, pp.1~16.
11. Zhang, H.M.(2001) "A Note on Highway Capacity," Transportation Research Part B 35, pp.929~937.
 12. Zhang, H.M and Kim, T.(2002) "A Car-Following Theory for Multiphase Vehicular Traffic Flow," Transportation Research Part B.
 13. Koshi, M., Iwasaki, M., Ohkura, I. (1983) "Some Findings and an Overview on Vehicular Flow Characteristics," Proc. 8th Intl. Symp. on Transportation and Traffic Flow Theory, pp.403~426.
 14. Banks, J.H.(1989) "Freeway Speed-Flow-Concentration Relationships: More Evidence and Interpretations" Transportation Research Record 1225, pp.53~60.
 15. Kerner, B.S.(1998) "Experimental Features of Self-Organization in Traffic Flow. Physical Review Letters Vol.81, No.17, pp.3797~3800.
 16. Banks, J. H.(2002) "Review of Empirical Research on Congested Freeway Flow," TRR
 17. Atho, P.(1965) "Interdependence of Certain Operational Characteristics within a Moving Traffic Stream," Highway Research Record 72, pp.58~57.
 18. Hillegas, B.D., Houghton, D.G., and Athol, P.J.(1974) "Investigation of Flow-Density Discontinuity and Dual-Mode Traffic Behavior," Trans. Research Record 495, pp.53~60.
 19. Daganzo, C.F.(1999) "A Behavioral Theory of Multi-Lane Traffic Flow Part I: Long Homogeneous Freeway Sections, UCB-ITS-RR-9-5, ITS UCB.
 20. Newell G.F.(2002) "A Simplified car-following theory: a lower order model," Trans. Research Part B 36, pp.195~205.
 21. Forbes, T.W., Zagorski, H.J., Holshouser, E.L., and Deterline, W.A. (1958) "Measurement of Driver Reaction to Tunnel Conditions," Highway Research Board Proc. 37, pp.345~357.
 22. Forbes, T.W. (1963) "Human Factor Consideration in Traffic Flow Theory," Highway Research Record 15, HRR, pp.60~66.
 23. Banks, J.H. (2001) "Characteristics of Average Time Gaps in Congested Freeway Flow," Presented at SIAM Annual Meeting, San Diego, CA, July 2001.

✉ 주 작 성 자 : 김상구
 ✉ 논문투고일 : 2004. 5. 4
 논문심사일 : 2004. 5. 24 (1차)
 2004. 6. 7 (2차)
 심사관정일 : 2004. 6. 7
 ✉ 반론접수기한 : 2004. 10. 31