

■ 論 文 ■

도시고속도로 엇갈림 구간의 합리적 설계를 위한 교통 특성 분석 (I)

Traffic Flow Analysis for The Weaving Section Design on Urban Freeways (I)

최재성

(서울시립대학교 교통공학과 교수)

이승준

(서울시립대학교 교통공학과 박사과정)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구의 배경 및 목적
 - 2. 연구의 범위 및 방법론
- II. 기존 연구의 검토
 - 1. 차두시간 분포식
 - 2. 최대 진입 가능 교통량 산정 모형
- III. 차두시간 분포 함수의 정립
 - 1. 차두시간 분포의 형태
 - 2. 자료수집
- 3. 엇갈림 구간의 실측 차두시간 분포와 기본 구간의 이론적 차두시간 분포(Pearson Type III)의 비교
- 4. 차두시간 분포 함수식의 개발
- 5. 구축된 차두시간 분포의 검증
- IV. 최대 진입 가능 교통량 산정
 - 1. 정적 최대 진입 가능 교통량
 - 2. 동적 최대 진입 가능 교통량
- V. 결론
- 참고문헌

Key Words : 도시고속도로 엇갈림구간, 차두시간분포, 최대진입가능교통량, 동적평형, 합리적 설계

요 약

본 연구는 도시고속도로 엇갈림 구간에서 나타나는 다양하고 독특한 교통 특성을 분석하는 일련의 연구 중의 한 부분으로서, 엇갈림 구간의 차두시간 분포의 특성과 최대 진입 가능 교통량의 산출을 통해 엇갈림 구간의 합리적 설계의 기초를 마련하고자 이루어졌다.

지금까지 합류 구간과 엇갈림 구간에서의 최대 진입 가능 교통량을 산정할 때, 본선 기본 구간의 차두시간 분포가 이용되어 왔다. 그러나 합류 구간 및 엇갈림 구간 진입부에서의 차두시간 분포는 기본 구간의 차두시간 분포와는 다른 특성을 보인다. 본 연구에서는 이를 규명하기 위해 도시고속도로 엇갈림 구간에서 현장조사를 통해 차량 도착 분포 자료를 수집하였고, 본선 교통류뿐만 아니라 진입 교통류의 영향을 반영한 새로운 차두시간 분포 함수를 도출하였다. 도출된 차두시간 분포의 검증을 위해서는 관측된 차두시간 분포 자료, 기존에 기본 구간에 적용되던 차두시간 분포(Pearson Type III 분포), 새로이 개발된 분포에 대하여 카이제곱 검정을 통하여 통계적 검정을 실시하였다. 그 결과, 새로이 개발된 차두시간 분포가 엇갈림 구간 진입부의 차두시간 분포를 가장 정확히 설명할 수 있는 분포로 나타났다. 더불어 본 연구에서는 새로이 개발된 차두시간 분포를 이용하여 연결로에서 본선으로 진입 가능한 최대 진입 가능 교통량을 산출하였으며, 이를 Drew 모형의 결과와 비교하였다.

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

고속도로 엇갈림 구간 진입부에서의 차두시간 분포는 진입 교통류와 직진 교통류의 상충으로 인해 기본 구간 차두시간 분포와는 다른 특성을 보인다. 따라서 진입 가능 교통량은 기본 구간 차두시간 분포 대신 진입부 차두시간 분포로부터 구해야 한다는 주장이 제기되었다.¹⁾ 본 연구는 현장조사를 통해 엇갈림 구간 진입부 차두시간 분포 특성을 규명하고, 이로부터 진입부 차두시간 분포식을 도출하여 최대 진입 가능 교통량을 산출하였다. 이러한 도시고속도로 엇갈림 구간의 교통 특성에 관한 일련의 연구를 통해 엇갈림 구간의 교통 특성을 보다 세밀히 이해함으로써, 엇갈림 구간에 대해 보다 합리적인 설계가 가능해질 것이다. 본 연구는 엇갈림 구간에서 나타나는 다양하고 독특한 교통 특성을 분석하는 고속도로 엇갈림 구간 시리즈 연구 중의 한 부분으로서, 엇갈림 구간의 차두시간 분포의 특성과 그로부터 최대 진입 가능 교통량의 산출을 통해 엇갈림 구간의 합리적 설계의 새로운 기초를 마련하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 방법론

연구의 범위 및 방법론은 다음과 같이 구분된다.

첫째, 엇갈림 구간의 차두시간 분포와 기본 구간 차두시간 분포(Pearson Type III 분포)의 비교

(중간 교통량 수준)

둘째, 엇갈림 구간 차두시간 분포의 정립

셋째, 엇갈림 구간의 최대 진입 가능 교통량 산정

II. 기존 연구의 검토

본 연구와 관련한 기존 연구는 차두시간 분포 이론에 관한 내용과 최대 진입 가능 교통량 산정 모형에 관한 내용으로 나눌 수 있다.

1. 차두시간 분포식

차두시간 분포 이론은 고속도로 기본 구간의 차량도착 분포에 관하여 이루어져 왔으며, 다음과 같이 구별된다. 각 분포의 확률밀도함수 형태는 <표 1>에 제시되어 있다.

- 교통량이 적을 때는 음지수 분포(Negative exponential distribution)를 사용한다. 최소 차두시간 개념을 적용한 이동 음지수 분포(Shifted negative exponential distribution)도 이 범주에 포함된다.
- 교통량이 많을 때는 차두시간 분포가 정규 분포에 가까워진다.
- 위 두 교통량의 중간 상태일 때는 다음 세 가지 방법이 있다.
 - Pearson Type III 분포 : 이 범주에는 Pearson Type III 분포 외에 Erlang 분포와 Gamma 분포 등이 포함된다.

<표 1> 차두시간 분포식의 종류

분 포	K 추정치	λ 계산치	확률밀도함수, f(t)
Pearson Type III (K, α)	$\frac{i - \alpha}{s}$	$\frac{K}{i - \alpha}$	$\frac{\lambda}{\Gamma(K)} \cdot [\lambda(t - \alpha)]^{K-1} \cdot e^{-\lambda(t - \alpha)}$
Gamma (K, α=0)	$\frac{i}{s}$	$\frac{K}{i}$	$\frac{\lambda}{\Gamma(K)} \cdot [\lambda(t - \alpha)]^{K-1} \cdot e^{-\lambda(t - \alpha)}$
Erlang (K=양의정수, α=0)	$\frac{i}{s}$	$\frac{K}{i}$	$\frac{\lambda}{\Gamma(K)} \cdot [\lambda(t - \alpha)]^{K-1} \cdot e^{-\lambda(t - \alpha)}$
Negative exponential (K=1, α=0)	$\frac{i}{s}$	$\frac{1}{i}$	$\frac{\lambda}{\Gamma(K)} \cdot [\lambda(t - \alpha)]^{K-1} \cdot e^{-\lambda(t - \alpha)}$
Shifted negative exponential (K=1, α>0)	$\frac{i - \alpha}{s}$	$\frac{1}{i - \alpha}$	$\frac{\lambda}{\Gamma(K)} \cdot [\lambda(t - \alpha)]^{K-1} \cdot e^{-\lambda(t - \alpha)}$
Normal	-	-	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$

주 : i와 s는 각각 관측 자료의 산술평균 차두시간과 표준편차를 의미함

- 조합한 형태 : 차량 군을 이루어 주행하는 차량들에 대해서는 정규 분포를, 그리고 자유 주행 차량들에 대해서는 음지수 분포를 차두시간 분포로 하여 조합한 방식을 취한다. 이 때 필요한 네 개의 독립 매개변수에는 정규 분포의 평균(차두시간)과 표준편차, 전체 교통량에 대한 차량 군을 이루는 차량들의 비율, 그리고 차량 군에 속하지 않는 차량들의 최소 차두시간이 포함된다. 음지수 분포(K=1)의 평균 차두시간과 표준편차는 식(1) 및 식(2)와 같이 구한다.

$$t^m = t_p^m \cdot P_p + t_{np}^m \cdot P_{np} \quad (1)$$

$$s = t^m - \alpha \quad (2)$$

여기서,

t^m : 평균 차두시간(초)

s : 음지수 분포의 표준편차

α : 차량 군에 속하지 않은 차량들의 최소 차두시간(초)

t_p^m : 정규 분포의 평균 즉, 차량 군에 속한 차량들의 산술평균 차두시간(초)

t_{np}^m : 음지수 분포의 평균 즉, 차량 군에 속하지 않은 차량들의 산술평균 차두시간(초)

P_p : 차량 군에 속한 차량들의 비율

P_{np} : 차량 군에 속하지 않은 차량들의 비율

혼합 분포의 확률밀도함수는 식(3)과 같다.

$$f(t) = P_p \cdot f^N(t) + P_{np} \cdot f^{NE}(t) \quad (3)$$

여기서,

$f(t)$: 혼합 분포의 확률밀도함수

$f^N(t)$: 정규 분포의 확률밀도함수

$f^{NE}(t)$: 음지수 분포의 확률밀도함수

- 기타 형태 : Schuhl이 제안한 방법을 대표적인 예로 들 수 있다. Schuhl은 혼합 분포와 비슷한 방식을 취했으나, 차량 군에 속한 차량들의 분포를 이동 음지수 분포로 보았다는 점에서 차이를 보인다. 따라서 Schuhl이 제안한 차두시간 분포는 다음과 같이 구성된다.

$$f(t) = P_p \cdot f^{SNE}(t) + P_{np} \cdot f^{NE}(t) \quad (4)$$

여기서,

$f(t)$: Schuhl이 제안한 분포의 확률밀도함수

$f^{SNE}(t)$: 이동 음지수 분포의 확률밀도함수

한편, "확률모형을 이용한 엇갈림 구간의 교통류 분석"에 관한 연구는 합류 구간 및 엇갈림 구간의 진입부에서는 차량간의 상충으로 인해 차두시간 분포가 기본 구간과는 다르게 나타난다고 보았다.¹⁾ 그러나 이 연구에서는 기본 구간의 차두시간 분포와 엇갈림 구간의 차두시간 분포가 어떻게 다른지 확인하지는 않았으며, 엇갈림 구간의 차두시간 분포가 Pearson Type III분포(K=2)를 따른다고만 가정하였다. 또한 기본 구간과 엇갈림 구간에서의 차두시간 분포 차이를 진·출입 등에 의한 차량 주행 특성에 기인하는 것으로 보아 매개변수 λ 를 식(5)와 같이 추정하였다. 그러나 아직까지 차두시간 분포 함수식에 대한 검증이 이루어지지 않았다.

$$\lambda = \frac{K}{\frac{3600}{Q_m + Q_{w2} \cdot (1 - \frac{Q_{w1}}{Q_m})} - \alpha} \quad (5)$$

여기서,

Q_m : 엇갈림 구간 상류부 본선 접속차로의 교통량(대/시/차로)

Q_{w1} : 엇갈림 구간 내 본선의 진출 교통량(대/시/차로)

Q_{w2} : 엇갈림 구간으로의 연결로 진입 교통량(대/시/차로)

2. 최대 진입 가능 교통량 산정 모형

Drew는 합류부에서의 최대 진입 가능 교통량을 산정하기 위하여 본선 기본 구간 차두시간 분포를 음지수 분포로 가정하여 연결로에서 critical gap (T_c) 값에 따라 최대 진입 가능 교통량을 산출하였다. 그러나 본선 교통량이 많아지면 음지수 분포의 적용이 적합하지 않은 문제점이 있다. Drew에 의한 최대 진입 가능 교통량 산출식은 식(6)과 같다.

$$Q_{\max} = \frac{Q \cdot e^{-\lambda \cdot T_1}}{1 - e^{-\lambda \cdot T_1}} \quad (6)$$

한편, 국내 연구에서는 엇갈림 구간의 차두시간 분포를 기본 구간과는 다르게 λ 값을 추정하여 Pearson Type III 분포로 적용하였으며, 이를 통해 최대 진입 가능 교통량을 식(7)과 같이 산출하였다.¹⁾

$$Q_{\max} = Q_m \cdot P(m) + \frac{1}{2} \cdot Q_{w1} \cdot P(w1) - Q_{w1} \cdot P(m) \quad (7)$$

여기서,

$P(m)$: 본선 접속차로의 교통류로부터 구한 진입 가능 확률

$P(w1)$: 본선 진출 교통류로부터 구한 진입 가능 확률

이 연구 결과는 엇갈림 구간의 차두시간 분포를 실측자료에 의해 검증하지 않고 단순히 λ 를 식(5)와 같이 가정한 제약점을 갖고 있다.

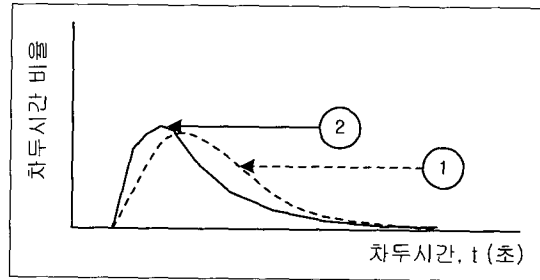
III. 차두시간 분포 함수의 정립

1. 차두시간 분포의 형태

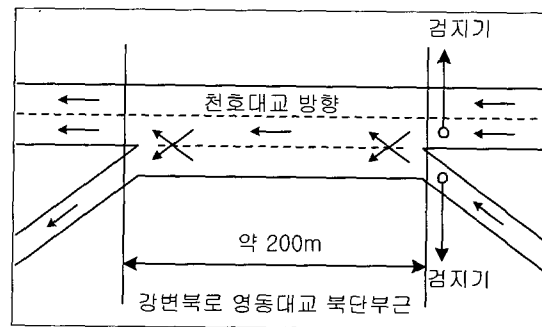
일반적으로 엇갈림 구간에서 발생하는 지체는 엇갈림 구간뿐만 아니라 엇갈림 구간 상류부까지 전파될 수 있다. <그림 1>은 기본 구간의 차두시간 분포(①)와 엇갈림 구간 진입부 상류의 차두시간 분포(②) 변화의 경향을 도시한 것이다. 이 그림에서 ② 곡선은 엇갈림 구간을 앞둔 운전자의 감속으로 인해 기본구간과 다른 형태를 보인다.

2. 자료수집

강변북로 영동대교 복단 부근의 엇갈림 구간(천호대교 방향)에서 현장 조사를 수행하였다. <그림 2>에서 보는 바와 같이, 엇갈림 구간의 길이는 약 200미터이며, 엇갈림 구간의 형태는 Type A이고, 본선 1



<그림 1> 차두시간 분포의 비교(1)



<그림 2> 자료수집 엇갈림 구간의 개략도

차로(좌측 차로)가 접속차로에 해당한다. 조사 기간은 2000년 3월 8일(수) 13시 40분~15시 40분까지 2시간이다. 조사된 자료의 종류는 엇갈림 구간의 본선 교통량 및 차두시간, 진입교통량 및 차두시간, 진출교통량 및 차두시간이다.

조사를 위해 Lap-Top PC와 전자식 Stop Watch 및 Printer를 병행하여 조사하였다. 엇갈림 구간의 본선 교통량 및 차두시간은 교통량이 많으므로 Lap-Top PC에 조사를 위해 특별히 고안된 프로그램과 간단한 장비를 설치하여 조사원이 수동으로 차두시간을 입력하여 조사하였다. 교통량이 적은 진출입구간의 교통량과 차두시간은 전자식 Stop Watch와 Printer를 사용하여 수동으로 입력하였다. 또한 조사된 자료의 신뢰성을 보완하기 위해 NC97 Portable 검지기와 비디오 카메라를 사용하였다.

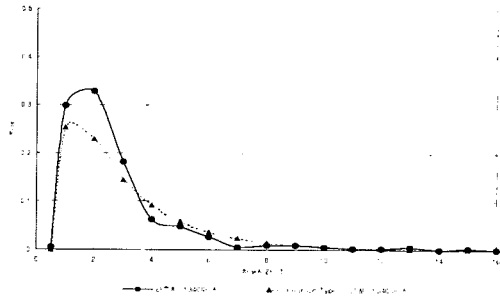
3. 엇갈림 구간의 실측 차두시간 분포와 기본 구간의 이론적 차두시간 분포(Pearson Type III)의 비교

기본 구간과 엇갈림 구간에서의 차두시간 분포는

1) 참고문헌 1에는 $Q_{\max} = Q_m \cdot (A+B) + \frac{1}{2} \cdot Q_{w1} \cdot (C+D) - Q_{w1} \cdot (A+B)$ 로 기술되어 있음.

같은 교통량 수준에서도 현격한 차이를 나타낼 수 있다. 이는 엇갈림 구간에서 발생하는 차량간의 상충에 기인하는 것으로, 본 연구에서 관측한 엇갈림 구간의 차두시간 분포와 이론적인 기본구간의 차두시간 분포인 Pearson Type III 분포의 비교 예가 <그림 3>에 제시되어 있다. <그림 3>에 제시된 분포 곡선을 살펴보면, 엇갈림 구간과 기본 구간의 교통량이 1,340대/시로 같음에도 불구하고 교통량이 많은 상태의 차두시간 분포처럼 엇갈림 구간의 실측 차두시간 분포 곡선의 첨도가 더 높고 차두시간 분포가 좌측으로 치우친 것을 볼 수 있다. 그러나 도식적인 비교만으로는 두 분포가 같은 분포인지 혹은 다른 분포인지를 검증할 수 없으므로, 엇갈림 구간의 차두시간 분포와 이론적인 기본구간의 차두시간 분포인 Pearson Type III 분포에 대해 카이제곱 검정을 실시하였다.

Pearson Type III 분포의 최소 차두시간은 0.5초이며, 현장 조사 자료의 최소 차두시간은 관측된 자



<그림 3> 엇갈림 구간의 실측 차두시간 분포와 기본구간에 적용되는 Pearson Type III 분포의 비교

료의 최소 차두시간을 그대로 적용하였는데, 대부분 0.5초 내외였다. 카이제곱 검정 시 급간 수는 0.5초부터 6.5초까지 1초 간격으로 6개의 급간을 설정하였다. 0.5초 이하의 차두시간 관측치는 그 수가 적어 0.5~1.5초 사이에 포함시켰다. 차두시간 6.5초 이상의 차량이 차지하는 비율은 전체 교통량 중 5% 내외에 지나지 않아 비교를 생략하였다.

카이제곱 검정 결과는 <표 2>에 제시되어 있는데 검정 결과 엇갈림 구간의 차두시간 분포와 기본구간의 분포인 Pearson Type III 분포가 같다는 가설이 모두 기각되었다.

이상에서 살펴본 바와 같이 엇갈림 구간의 차두시간 분포와 기본구간의 차두시간 분포의 차이는 엇갈림 구간에서 발생하는 차량간의 상충이 원인으로 해석될 수 있으며, 이로 인해 연결로로부터 본선으로의 진입 가능 확률이 줄어들게 된다.

4. 차두시간 분포 함수식의 개발

본 연구에서 제시하는 엇갈림 구간에 대한 차두시간 분포 함수는 Pearson Type III 분포를 토대로 한 것으로서, 본선 교통류뿐만 아니라 진입 교통류를 동시에 고려한 함수이다.

일반적인 Pearson Type III 분포의 확률밀도함수 형태는 식(8)과 같다.

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(K)} \cdot [\lambda(t-a)]^{K-1} \cdot e^{-\lambda(t-a)} \quad (8)$$

<표 2> 카이제곱 검정 결과(관측자료와 Pearson Type III 분포) (귀무가설: 관측 자료의 분포는 이론적인 분포와 같다)

시간대	엇갈림 구간의 본선 교통량 (대/시)	\bar{t}	s	추정된 매개변수(p)		자유도 = (I-1) - p	카이제곱 계산 값	카이제곱 표 값	
				K	λ			$\alpha=0.05$	$\alpha=0.025$
								7.82	9.35
13:40~13:55	1,460	2.61	1.93	1.09	0.52	(6-1)-2 = 3	22.30	기각	기각
13:55~14:10	1,396	2.59	1.87	1.12	0.53	3	29.50	기각	기각
14:10~14:25	1,260	2.86	2.22	1.07	0.45	3	25.21	기각	기각
14:25~14:40	1,308	2.75	2.18	1.03	0.46	3	39.42	기각	기각
14:40~14:55	1,340	2.69	2.26	0.97	0.44	3	25.58	기각	기각
14:55~15:10	1,448	2.47	1.71	1.15	0.59	3	28.08	기각	기각
15:10~15:25	1,476	2.44	1.64	1.19	0.61	3	31.69	기각	기각
15:25~15:40	1,344	2.68	2.21	0.98	0.45	3	28.55	기각	기각

주 : 이론적인 분포로 Pearson Type III 분포가 적용됨.

본 연구에서는 $K=2$, $\alpha=0.5$ 인 Pearson Type III 분포를 선택했다.

$$f(t) = \lambda^2 \cdot (t-0.5) \cdot e^{-\lambda(t-0.5)} \quad (9)$$

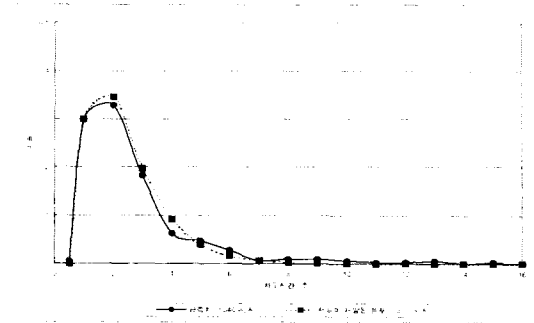
$$\lambda = \frac{2}{\frac{3600}{Q_m + W \cdot Q_{w2}} - 0.5}, \quad W = \frac{Q_m}{3600} \quad (10)$$

본 연구에서는 본선 교통류와 진입 교통류를 차두 시간 분포 변화를 초래하는 인자로 생각했다. 본선 교통류 평균 차두시간의 역수인 가중치 W 를 설정하여 진입 교통량에 곱함으로써 교통량 수준별로 진입 교통류의 영향이 달리 반영되도록 하였다. 이를 통해 본선 교통량이 적을 때에는 진입 교통류의 영향도 적으며, 본선 교통량이 많을 때에는 진입 교통류의 영향도 커지도록 하였다. 따라서, 본선 교통량과 진입 교통량이 모두 증가할 경우에는 새로이 개발된 차두 시간 분포와 기본구간 차두시간 분포의 차이가 더욱 커지게 된다. 이는 현실적으로 맞는 가정이다.

5. 구축된 차두시간 분포의 검증

〈그림 4〉는 엇갈림 구간의 차두시간 분포를 검증하기 위해, 새로이 개발된 분포 및 관측 자료를 도수 분포 표로 작성하여 그린 그래프이다.

관측 자료에 대한 새로이 개발된 차두시간 분포 합수의 통계적 검정은 카이제곱 검정을 통해 이루어졌다.



〈그림 4〉 엇갈림 구간의 실측 차두시간 분포와 새로이 개발된 분포의 비교

〈표 3〉은 유의수준별로 카이제곱 검정 결과를 나타낸 표이다. 검정 결과를 살펴보면, 관측된 자료들은 유의수준 0.05 및 0.025에서 15:10~15:25 자료를 제외하고 새로이 구축된 분포를 따르는 결과를 나타냈다.

이러한 통계적 검정 결과는 본 연구에서 제시된 이론적인 차두시간 분포가 엇갈림 구간에서 차량 도착 분포를 설명하는 분포로 채택될 수 있음을 보여준다.

IV. 최대 진입 가능 교통량 산정

1. 정적 최대 진입 가능 교통량

본 연구에서는 새로이 정립된 차두시간 분포식을 통해 엇갈림 구간의 최대 진입 가능 교통량을 산정했다. 엇갈림 구간의 차두시간 분포를 이용한 최대 진입 가능 교통량 산정은 식(11)와 같이 산출할 수 있다. 이는 기존 연구인 "확률모형을 이용한 엇갈림 구간의 교통

〈표 3〉 카이제곱 검정 결과(관측자료와 새로운 Pearson Type III 분포)
(귀무가설:관측 자료의 분포는 이론적인 분포와 같다)

시간대	엇갈림 구간의 본선 교통량 (대/시)	엇갈림 구간의 연결로 교통량 (대/시)	λ	자유도= (I-1) - p	카이제곱 계산 값	카이제곱 표 값	
						$\alpha=0.05$	$\alpha=0.025$
						9.50	11.10
13:40~13:55	1,460	580	1.23	(6-1)-1=4	7.19	기각 못함	기각 못함
13:55~14:10	1,396	560	1.15	4	3.32	기각 못함	기각 못함
14:10~14:25	1,260	500	1.00	4	5.76	기각 못함	기각 못함
14:25~14:40	1,308	568	1.07	4	7.37	기각 못함	기각 못함
14:40~14:55	1,340	564	1.10	4	4.40	기각 못함	기각 못함
14:55~15:10	1,448	512	1.19	4	6.09	기각 못함	기각 못함
15:10~15:25	1,476	564	1.24	4	12.67	기각	기각
15:25~15:40	1,344	520	1.09	4	8.26	기각 못함	기각 못함

주 : 이론적인 분포로 새로이 개발된 차두시간 분포가 적용됨.

류 분석"을 바탕으로 일부 수정한 방식이다.

$$Q_{\max} = Q_m \cdot P(m, w2) + Q_{w1} \cdot P(w1, w2) - Q_{w1} \cdot P(m, w2) \quad (11)$$

여기서,

$P(m, w2)$: 본선 접속차로 교통량 및 진입 교통량의 함수로 얻어진 진입가능 확률

$P(w1, w2)$: 진입 교통량 및 진출 교통량의 함수로 얻어진 진입가능확률

다음은 최대 진입 가능 교통량 산정의 이해를 돕기 위해, 본선 차두시간 분포를 이용하여 연결로에서 본선으로의 진입 교통량 산정 방식을 설명한 것이다.

본선의 차두시간을 이용한 연결로의 최대 진입 가능 교통량은 다음과 같은 다중진입으로부터 유도된다.

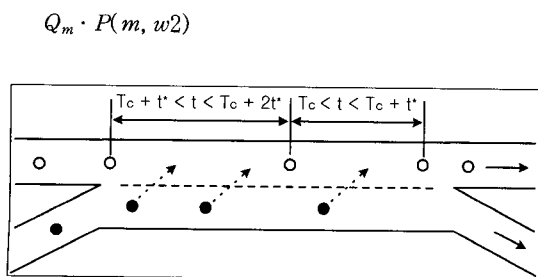
$$\begin{aligned} & \textcircled{1} P\{T_c < t < T_c + t^*\} \quad \rightarrow \text{1대 진입} \\ & \textcircled{2} P\{T_c + t^* < t < T_c + 2t^*\} \quad \rightarrow \text{2대 진입} \\ & \textcircled{3} P\{T_c + 2t^* < t < T_c + 3t^*\} \quad \rightarrow \text{3대 진입} \\ & \quad \quad \quad \vdots \\ & = \sum_{n=0}^{\infty} P\{T_c + nt^* < t < T_c + (n+1)t^*\} \times (n+1) \\ & = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \lambda(T_c + nt^* - \alpha + \frac{1}{\lambda}) \cdot e^{-\lambda(T_c + nt^* - \alpha)} \right\} \\ & = P(m, w2) \end{aligned}$$

여기서,

T_c : Critical Gap(초)

t^* : 다중진입시 이용되는 차간간격(초)

그러므로, 본선의 차두시간을 이용한 연결로로부터 본선으로의 최대 진입 가능 교통량은 다음과 같다.



<그림 5> 진입 가능 교통량 산정 개념도

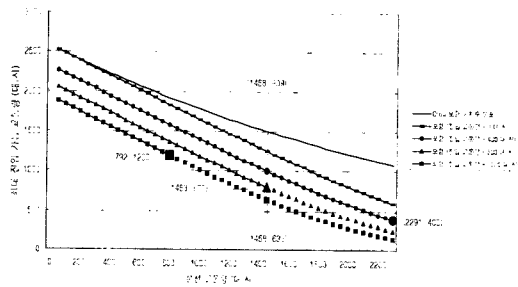
기존 연구들과 비교할 때, 본 연구에서 제시하는 최대 진입 가능 교통량 산정이 갖는 특징은 기존 연구들과 같은 정적 최대 진입 가능 교통량의 산정에 그치는 것이 아니라 본선 교통량과 진입 교통량의 변화를 반영한 동적 최대 진입 가능 교통량을 산정한다는 것이다.

본 연구에서 개발된 모형의 장점을 설명하기 위해 <그림 6> 및 <그림 7>에 제시된 바와 같이 진입 교통량 수준별로 네 가지 경우를 나누어 예시하였다.

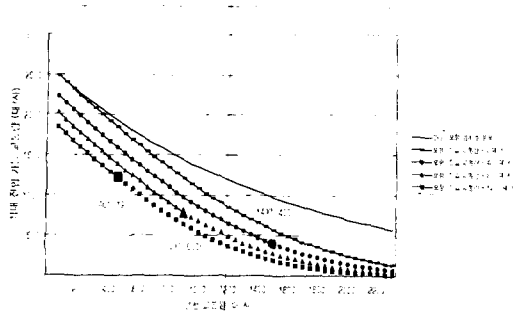
Drew 모형은 합류부의 최대 진입 가능 교통량을 산정한 모형이므로 같은 조건이 되도록 네 가지 경우 모두 진출 교통량을 0대/시로 하여 최대 진입 가능 교통량을 산정하였다. 따라서, <그림 6> 및 <그림 7>에서 진입 교통량이 0대/시 인 경우는 기본구간의 차두시간 분포를 적용하여 최대 진입 가능 교통량을 산정한 방식이 된다. 진입 교통류의 영향을 비교하기 위해 진입 교통량이 400대/시, 800대/시 및 1,200대/시인 세 가지 경우를 함께 제시하였다. 또한 Critical Gap (T_c)이 변화함에 따라 각 모형의 최대 진입 가능 교통량이 변화할 것이므로 T_c 가 2초(<그림 6>)과 3초(<그림 7>)인 경우에 대해서 함께 비교하였다.

<그림 6>과 <그림 7>에서 실선부와 점선부는 본 연구에서 개발한 모형을 통해 진입 교통량 수요를 모두 받아들일 수 있는 본선 교통량 구간과 모두 받아들일 수는 없는 본선 교통량 구간을 구별하여 표시한 것이다. T_c 값이 커짐에 따라 최대 진입 가능 교통량 곡선이 아래로 처지는 것을 관찰할 수 있다.

<그림 6>에 예시된 결과에 대해 기존 모형과 본 연구에서 제시한 모형을 비교·분석하면 다음과 같다.



<그림 6> 최대 진입 가능 교통량 곡선($T_c=2$ 초)



(그림 7) 최대 진입 가능 교통량 곡선($T_c=3$ 초)

Drew 모형의 경우, 진입 교통류를 반영할 수 없고 본선 교통량의 변화에 의해서만 최대 진입 가능 교통량을 산정하므로 네 가지 경우(진입 교통량 0, 400, 800, 1,200대/시)에 대해 동일한 최대 진입 가능 교통량을 나타내고 있어 비현실적인 결과를 나타낸다. 또한 차두시간 분포를 음지수 분포로 적 용함으로써, 본선 교통량이 늘어날수록 본 연구에서 제시한 모형보다 많은 최대 진입 가능 교통량을 도출하였다.(이는 음지수 분포의 경우 Pearson Type III 분포보다 진입 가능 확률이 높게 계산되기 때문이다). 특히 <그림 6>에서 본선 교통량이 2,300대/시 일 때 최대 진입 가능 교통량을 1,000대/시 이상으로 산정하여 비현실적인 결과를 나타내고 있다.

본 연구에서 제시한 모형은 전반적으로 Drew 모형보다 적은 최대 진입 가능 교통량을 산정한다. 이는 본선 교통량이 늘어날수록 그 차이가 커지는 경향을 보인다. 또한 진입 교통류에 의해서도 영향을 받아 진입 교통량이 늘어날수록 최대 진입 가능 교통량은 감소하는 현실적 결과를 보인다.

2. 동적 최대 진입 가능 교통량

현실적으로 볼 때, 정적 최대 진입 가능 교통량의 산정만으로는 특정 본선 교통량 상태에 대한 최대 진입 가능 교통량을 결정할 수 없다. 왜냐하면, 최대 진입 가능 교통량은 진입 수요와 진입 가능 교통량 중 최소 값으로 결정되며, 진입 교통량과 본선 교통량의 변화에 따라 동적으로 결정되기 때문이다. 결국 동적 최대 진입 가능 교통량이란 본선 및 진입 교통량의 변화가 발생할 때 최종적으로 동적 평형을 이루는 최대 교통량 상태라 할 수 있다.

<그림 6>을 토대로 동적 최대 진입 가능 교통량 결정 원리를 기술한다.

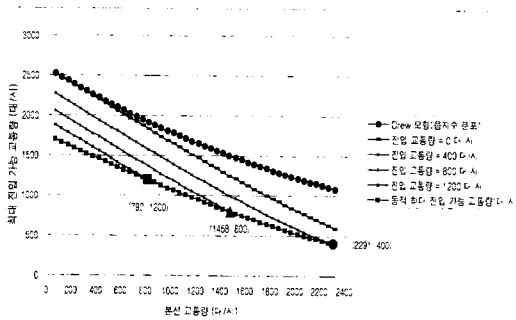
<그림 6>을 보면, 최대 진입 가능 교통량 산정 곡선들이 ■(본선 교통량 792대/시, 진입 교통량 1,200대/시), ▲(본선 교통량 1,458대/시, 진입 교통량 800대/시), ●(본선 교통량 2,291대/시, 진입 교통량 400대/시) 세 점을 기준으로 좌측은 실선으로, 우측은 점선으로 구분되어 있는 것을 볼 수 있다. 이처럼 구분한 이유는, 진입 교통량이 800대/시인 경우에 ▲의 우측에 있는 점선부는 최대 진입 가능 교통량이 800대/시 이하로 진입 교통류(800대/시)를 모두 받아들일 수는 없는 본선 교통량 구간을 의미하고, ▲의 좌측에 있는 부분은 최대 진입 가능 교통량이 800대/시 이상으로 진입 교통류(800대/시)를 모두 받아들일 수 있는 본선 교통량 구간을 의미한다.

위의 경우, ▲는 진입 교통량 800대/시와 본선 교통량 1,458대/시에 의해 결정된 최대 진입 가능 교통량을 나타낸다. 그 첫째 이유는 실제 연결로 의 진입 수요가 800대/시이므로 본선 교통량이 1,458대/시 이하가 되더라도 800대/시 이상의 교통량이 진입해 들어오지 못하며, 본선 교통량이 1,458대/시를 넘어서면 계산된 최대 진입 가능 교통량이 800대/시 이하가 되기 때문이다.

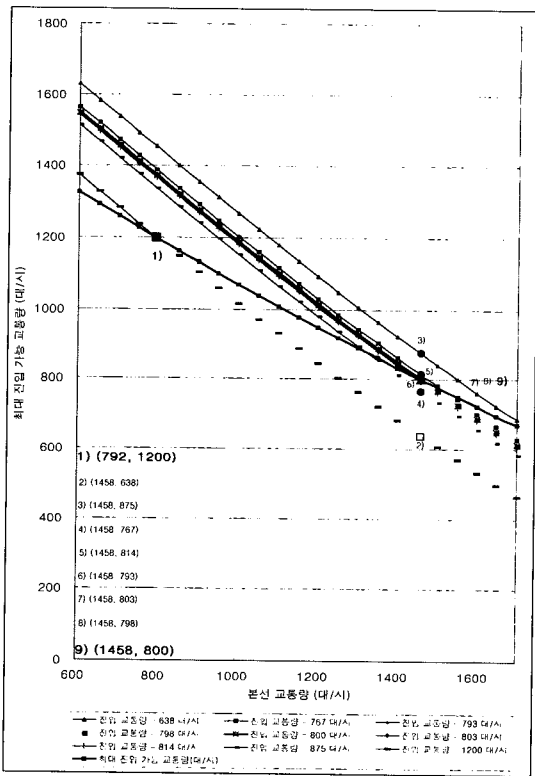
둘째 이유는, 본선 교통량 1,458대/시 수준에서, 진입 수요가 800대/시 이하, 예를 들어 진입 수요 400대/시인 진입교통류의 최대 진입 가능 교통량은 999대/시이나 진입 수요가 400대/시이므로 최대 진입 교통량이 800대/시에 도달할 수 없으며, 진입 수요가 800대/시 이상, 예를 들어 진입 수요 1,200대/시인 진입 교통류의 최대 진입 가능 교통량은 638대/시로 역시 최대 진입 교통량이 800대/시에 도달할 수 없다. 따라서, 본선 교통량 1,458대 /시에 해당하는 최대 진입 가능 교통량은 800대/시가 되는 것이다.

이와 같이 하여 모든 본선 교통량 수준에 대하여 계산하면 최대 진입 가능 교통량을 결정할 수 있다. 그 결과는 <그림 8>에 가장 하단의 곡선으로 제시되어 있다($T_c=2$ 초).

<그림 9>는 교통량이 변할 때 동적 평형을 거쳐 최대 진입 가능 교통량이 결정되는 것을 도식적으로 표현한 것이다($T_c=2$ 초). <그림 9>에서 본선 교통량이 792대이고 진입 교통류의 수요가 1,200대/시 이상이라면, ■에서 최대 진입 교통량이 1,200대/시로



〈그림 8〉 동적 최대 진입 가능 교통량 곡선($T_c=2$ 초)



〈그림 9〉 최대 진입 가능 교통량 변화 및 동적 평형 ($T_c=2$ 초)

유지될 것이다. 이 때 본선 교통량이 1,458대/시로 증가된다면, 최대 진입 가능 교통량은 □(최대 진입 가능 교통량 638대/시)로 떨어지게 될 것이다. 이에 따라 연결로 진입 교통량은 638대/시가 되며, 최대 진입 가능 교통량은 875대/시로 다시 증가하게 된다. 이처럼 최대 진입 가능 교통량이 변화함에 따라 실제 진입 교통량이 변하고, 이에 따라 다시 최대 진입 가능 교통량이 변하는 과정을 거쳐 최대 진입 가능

교통량은 최종적으로 ▲에 도달하여 800대/시로 유지된다.

동적 평형 상태는 운전자가 교통류 상태에 순응할 때 도달되며, 연결로로부터 이를 무시한 강제 진입이 시도된다면 그로 인한 영향(지체 등)이 본선에 파급될 것이다. 따라서, 이러한 경우에는 동적 최대 진입 가능 교통량의 산정을 통해 미터링 rate을 결정하여 램프 미터링을 실시하는 등의 교통류 운영 방안 등이 도입될 수 있다.

이처럼 최대 진입 가능 교통량의 산정을 통해 교통류의 혼잡 발생 교통량 수준을 예측하고, 적절한 교통류 관리를 위한 설계 조건을 설정할 수 있다.

V. 결론

지금까지 잇갈림 구간의 합리적 설계를 위해 필요한 차두시간 분포와 이를 이용한 최대 진입 가능 교통량의 산정에 관하여 살펴보았다. 차두시간 분포에 관한 기존 연구들은 기본 구간만을 대상으로 하였고 잇갈림 구간 및 합류 구간에 대해서는 차두시간 분포에 대한 연구가 없었던 것으로 보아 이들 구간에서의 차두시간 분포가 기본 구간과 동일하다고 보았다. 따라서, 최대 진입 가능 교통량 산정에 있어서, 기존 연구들은 진입 교통량 수준에 관계없이 본선 교통량만을 독립변수로 하여 최대 진입 가능 교통량을 산출하는 불합리성을 보여왔다. 반면에 본 연구에서는 기본 구간과는 다른 특성을 보이는 잇갈림 구간의 차두시간 분포를 규명하고, 이를 바탕으로 본선 교통류와 진입 교통류를 동시에 고려함으로써 보다 현실적인 최대 진입 가능 교통량 값을 도출하였다. 이와 더불어 미시적인 접근으로 잇갈림 구간에서의 Critical Gap 및 가·감속도 등을 결정하기 위한 주행 행태 분석과 속도, 교통량, 밀도, 지체시간에 관한 거시적 분석 등의 후속 연구를 통해 잇갈림 구간 길이, 테이퍼 비율, 차로수의 결정 등을 포함한 합리적인 설계가 가능해질 것이다.

다음은 본 연구와 관련한 향후 연구과제이다.

- 본 연구에서 구축된 차두시간 분포를 적은 교통

량 수준 및 많은 교통량 수준의 차두시간 분포와 비교

- 최대 진입 가능 교통량 산정 결과의 검증
- 타 엇갈림 구간에의 적용 및 검증
- Critical Gap 및 가·감속도 등을 결정하기 위한 주행 행태 분석과 속도, 교통량, 밀도, 지체시간 등에 관한 거시적 분석

참고문헌

1. 이승준, 이정도, 최재성, 확률모형을 이용한 엇갈림 구간의 교통류 분석, 대한교통학회지, 제17권 제2호, 1999. 6, 대한교통학회.
2. Drew, Donald R., Traffic Flow Theory and Control, McGraw-Hill, 1968.
3. May, Adolf D., Traffic Flow Fundamentals, Prentice Hall, 1990.

♣ 주 작 성 자 : 최재성

♣ 논문투고일 : 2000. 4. 28

논문심사일 : 2000. 5. 26 (1차)

2000. 7. 27 (2차)

2000. 9. 4 (3차)

심사완료일 : 2000. 9. 4