

■ 論 文 ■

### 고속도로 합류부 임계차두간격 및 용량 산정에 관한 연구

Analysis of Critical Time Headway and Capacity for Freeway Merging Area

**최재성**

(서울시립대학교 교통공학과 교수)

**이승준**

(서울시립대학교 교통공학과 박사수료)

#### 목 차

- I. 서론
  - 1. 연구의 배경 및 목적
  - 2. 연구의 수행 방법
- II. 기존 연구의 검토
  - 1. 임계차간격의 정의
  - 2. 임계차간격의 국내 적용 예
- III. 새로운 임계차두간격 산출 모형
  - 1. 가정 및 조건
  - 2. 모형구축
  - 3. 임계차두간격 산출
- IV. 최대 진입 및 최대 통과 가능 교통량 산정
  - 1. 최대 진입 가능 교통량
  - 2. 본선 접속차로의 최대 차로변경 가능 교통량
  - 3. 방향 당 최대 통과 가능 교통량
- V. 결론  
참고문헌

Key Words : 임계차두간격, 상대속도 차, 합류부, 최대 진입 가능 교통량, 최대 차로변경 가능 교통량

#### 요 약

본 연구는 고속도로 합류부의 교통 특성 분석을 목적으로 한다. 합류부가 기본구간과 구별되는 가장 큰 특징은 연결로 차량의 본선합류이며, 이로 인해 합류부의 교통 특성은 기본구간과 크게 대별된다. 이러한 합류부의 교통 특성을 파악하기 위하여 본 연구에서는 합류 시 요구되는 임계차두간격과 이로 인해 결정되는 최대 진입 가능 교통량이라는 두 요소에 초점을 맞추었다.

본 연구에서는 확률 모형을 통해 합류 용량 산정 시 임계차간격(Critical time gap)대신 임계차두간격(Critical time headway)이 적용될 수 있도록 모형을 구축하였다. 기존 연구에서는 합류 용량 산정 시, 합류하고자 하는 진입 차량은 본선을 주행하는 차량들 사이의 차간격이 임계차간격 이상이면 모두 진입하는 것으로 간주되어왔다. 또한 임계차간격은 교통류 상태와는 관계없이 항상 동일한 값으로 적용되었다. 그러나, 합류 과정에서 필요한 차간격은 동일한 운전자에 대해서도 다른 교통류 상태 예를 들어, 교통류의 상대속도 차이 등에 따라 다르게 나타날 수 있으므로 정해진 임계차간격이 합류 과정 시 불충분한 값으로 인식될 수도 있게된다. 따라서, 본 연구에서는, 먼저 모든 교통류 상태에 대한 임계차두간격 산출 원리를 제시하였다. 또한 도출된 임계차두간격을 통해 최대 진입 가능 교통량 및 합류부의 최대 통과 교통량을 산출하였다.

## I. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

본 연구는 고속도로 합류부의 교통 특성 분석을 목적으로 한다. 합류부가 기본구간과 구별되는 가장 큰 특징은 연결로 차량의 본선합류이며, 이로 인해 합류부의 교통 특성은 기본구간과 크게 대별된다. 이러한 합류부의 교통 특성을 파악하기 위하여 본 연구에서는 합류 시 요구되는 임계차두간격과 이로 인해 결정되는 최대 진입 가능 교통량이라는 두 요소에 초점을 맞추었다.

본 연구에서는 확률 모형을 통해 합류 용량 산정 시 임계차간격(Critical time gap)대신 임계차두간격(Critical time headway)이 적용될 수 있도록 모형을 구축하였다. 기존 연구에서는 합류 용량 산정 시, 합류하고자 하는 진입 차량은 본선을 주행하는 차량들 사이의 차간간격이 임계차간격 이상이면 모두 진입하는 것으로 간주되어왔다. 또한 임계차간격은 교통류 상태와는 관계없이 항상 동일한 값으로 적용되었다. 그러나, 합류 과정에서 필요한 차간간격은 동일한 운전자에 대해서도 다른 교통류 상태 예를 들어, 교통류의 상대속도 차이 등에 따라 다르게 나타날 수 있으므로 정해진 임계차간격이 합류 과정 시 불충분한 값으로 인식될 수도 있게된다. 따라서, 본 연구에서는, 먼저 모든 교통류 상태에 대한 임계차두간격 산출 원리를 제시하였다. 또한 도출된 임계차두간격을 통해 최대 진입 가능 교통량 및 합류부의 최대 통과 교통량을 산출하였다.

### 2. 연구의 수행 방법

본 연구에서는 관련 문헌고찰을 통해 기존 연구에서 제시된 임계차간격의 정의 및 적용 사례를 검토하고 문제점을 파악하여 보다 합리적인 임계차두간격 도출을 위한 모형을 구축하고 이를 통해 최대 진입 가능 교통량 및 최대 통과 교통량을 산출했다.

## II. 기존 연구의 검토

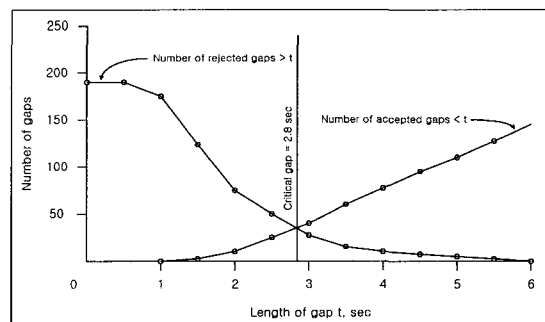
### 1. 임계차간격의 정의

임계차간격은 합류과정에 필요한 수락 간격으로서, 진입 용량 산정 시 임계차간격 이상의 차간간격이 확보되면 합류 차량은 모두 합류하는 것으로 본다.

임계차간격을 결정하는 대표적인 정의 두 가지는 Greenshield와 Raff에 의해 제시되었는데, Greenshield는 절반에 해당하는 운전자가 수락하는 차간간격을 임계차간격으로 정의하였으며, Raff는 진입을 수락하는 차간간격의 누적곡선과 진입을 수락하지 않는 차간간격의 누적곡선이 만나는 점의 값을 임계차간격으로 정의하였다. Raff에 의해 제시된 임계차간격 산출 예가 <그림 1>과 <표 1>에 제시되어 있다.<sup>1)</sup>

<그림 1>에서 보여지는 임계차간격은 <표 1>에 나타난 세 가지 경우 중 모든 차량을 대상으로 결정된 임계차간격을 의미한다. 그러나, <표 1>에서 보는 바와 같이, 정지한 차량과 주행중인 차량 그리고 모든 차량에 대해 서로 다른 값의 임계차간격이 결정되는 것을 볼 수 있다. 즉 서로 다른 교통류 상태에 대해서 다른 임계차간격이 결정된다고 해석할 수 있으며, 이러한 사실 때문에 Drew는 Raff의 정의에 의해 제시된 임계차간격 분포의 평균 값을 임계차간격으로 재 정의하였다.

한편 Drew의 경우, 기하구조(특히 본선과 연결로가 이루는 각) 및 연결로 진입 차량의 속도에 의해 임계차간격이 영향을 받음을 기술하였으며, 여러 가지 경우에 대하여 임계차간격이 어떻게 변화하



<그림 1> Dumble ramp에서 조사된 임계차간격

1) Drew, Donald R., Traffic Flow Theory and Control, McGraw-Hill, 1968.

는가에 대한 사례를 보여주고 있다. 그러나, 접속부 기하구조 및 진입 차량의 속도가 어떻게 임계차간격에 영향을 미치는가에 대해선 규명이 되지 못하였다.

## 2. 임계차간격의 국내 적용 예

다음 식(1)은 엇갈림구간에 대해 개발된 국내 연구를 합류부에 적용한 예로서 본선 기본구간의 차두간격분포로 사용된 확률밀도함수는  $K=2, \alpha=0.5$ 인 Pearson Type III 분포이다.<sup>2)</sup>

확률밀도함수는 식(1)과 같으며, 다중진입의 개념은 <그림 2>에 제시되어 있다.

$$f(t) = \lambda^2 \cdot (t-0.5) \cdot e^{-\lambda(t-0.5)} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{2}{\frac{3600}{Q_m + W \cdot Q_r} - 0.5}, \quad W = \frac{Q_m}{3600}$$

여기서,

$Q_m$  : 본선 접속차로의 교통량(대/시)

$Q_r$  : 연결로 진입 교통량(대/시)

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

- ①  $P\{T_c < t < T_c + t^*\}$  → 1대 진입
- ②  $P\{T_c + t^* < t < T_c + 2t^*\}$  → 2대 진입
- ③  $P\{T_c + 2t^* < t < T_c + 3t^*\}$  → 3대 진입
- ⋮
- ⋮

여기서,

$T_c$  : 임계차간격(초)

$t^*$  : 다중진입 시 이용되는 차간격(초)

그러므로,

$$Q_{MAX} = Q \cdot \sum_{n=0}^{\infty} P\{T_c + nt^* < t < T_c + (n+1)t^*\} \times (n+1) \quad (2)$$

이 때, 속도가 높을 경우에는 차간격과 차두간격에 큰 차이가 없겠지만, 교통류의 속도가 낮아질수록 차량 길이만큼의 거리 차이에 대한 시간 비중이 커지게 되므로 두 값은 상당한 차이를 나타내게 된다.

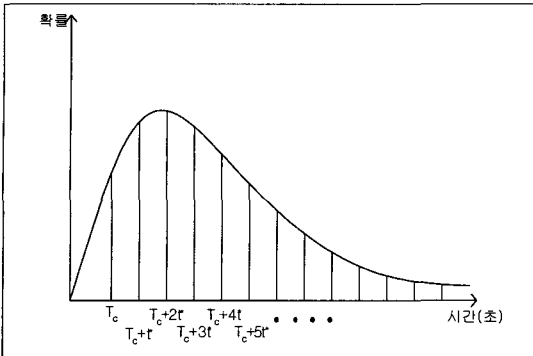
<표 1> 임계차간격 계산치

Length of gap t, sec	Stopped vehicles		Moving vehicles		All vehicles	
	Accepted gaps < t	Rejected gaps > t	Accepted gaps < t	Rejected gaps > t	Accepted gaps < t	Rejected gaps > t
0.0	0	100	0	89	0	189
$\Delta t=0.5$	0	100	0	89	0	189
1.0	0	95	0	80	0	175
1.5	0	71	1	52	1	123
2.0	2	49	7	27	9	76
2.5	11	34	a=13	c=16	a=24	c=50
3.0	a=15	c=20	b=26	d=7	b=41	d=27
3.5	b=23	d=10	38	4	61	14
4.0	32	5	46	3	78	8
4.5	41	4	55	3	96	7
5.0	48	2	63	2	111	4
5.5	57	0	70	1	127	1
10.0	100	0	106	0	206	0

$$\text{Critical gap } T = t + \frac{(c-a)\Delta t}{(b+c)-(a+d)}$$

T(stopped)=3.1 T(moving)=2.5 T(all)=2.8

2) 최재성·이승준, 도시고속도로 엇갈림 구간의 합리적 설계를 위한 교통특성 분석(1), 대한교통학회지 제18권 제5호, 2000.



〈그림 2〉 확률밀도 함수와 다중 진입을 고려한 진입 가능 교통량 계산 개념도

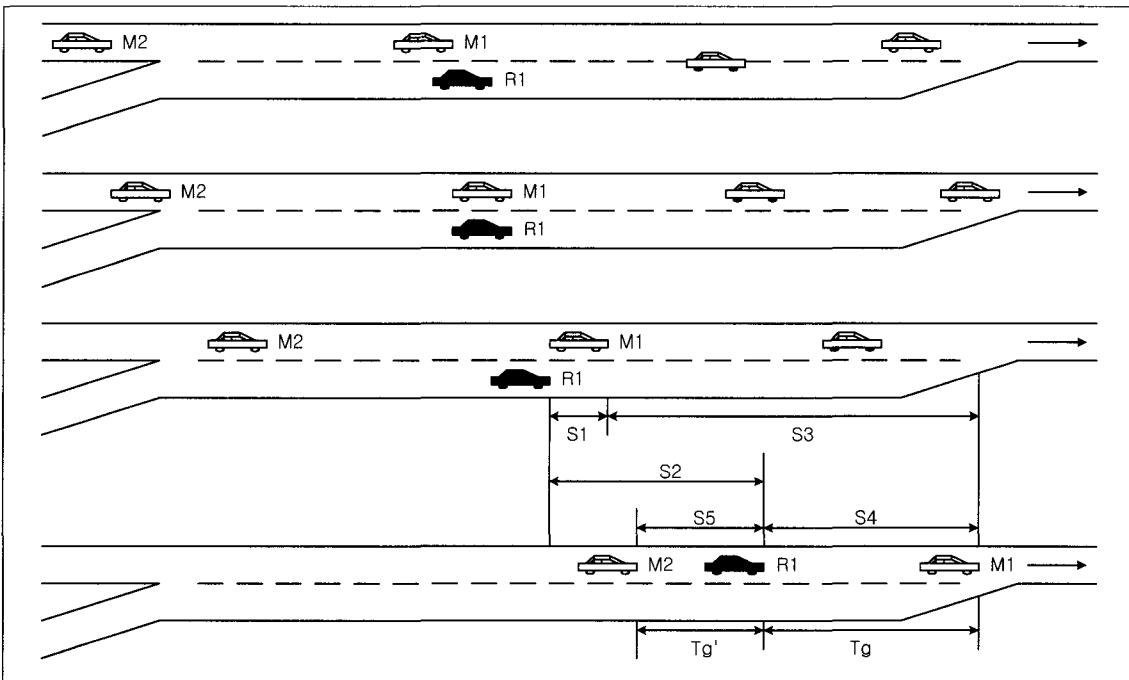
### Ⅲ. 새로운 임계차두간격 산출 모형

문헌연구에서 살펴본 바와 같이, 임계차간격은 정지한 차량과 주행중인 차량에 대해서 뿐만 아니라, 교통류의 상태가 상이한 경우 즉, 상대 속도 차가 발생하는 경우에 대하여 다른 값을 지니게 된다. 또한 기하구조에 의해서도 두 교통류 사이의 상대속도 차가 달라지게 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 교통류의 상대속도 차이를 반영할 수 있는 모형을 구축하였다. 〈그림 3〉은 연결로 진입 차량 R1이 본선 주

행 차량 M1과 M2 사이의 차간간격을 이용하여 진입하는 예를 도시한 것이다. 〈그림 3〉에서 연결로 진입 차량 R1은 본선 주행 차량 M1 보다 앞서 있으나 M1 앞으로 가속하여 진입할 수 없다. 따라서, 본선 차량 M1이 지나간 후 M1과 M2 사이의 차간간격을 이용하여 진입하게 된다. 임계차두간격 산출 과정은 다음과 같다.

- 1 단계(S1 계산) : 진입시도 시 차량 R1과 차량 M1 사이의 차두거리
- 2 단계(S2 계산) : 차량 R1이 본선 진입을 완료할 때까지 주행한 거리
- 3 단계(S3 계산) : 차량 R1이 본선에 진입할 동안 차량 M1이 주행한 거리
- 4 단계(S4 계산) : 진입 완료 후 차량 R1과 차량 M1 사이의 차두거리
- 5 단계(Tg 계산) : 차두거리 S4에 해당하는 차두간격
- 6 단계(Tg' 계산) : 차량 R1과 M2 사이에 여유 차두간격
- 7 단계(임계차두간격(Tc) 계산) :  $T_g + T_g'$

이 때, 차량 M1과 M2 사이의 거리는 연결로 차량 R1



〈그림 3〉 임계차두간격 산출 개념도

의 진입 전·후 동일하게 유지된다. 또한 진입 완료 시점에서 차량 M2가 차량 R1의 바로 뒤에 와 있다면, 차량 M1과 R1 사이의 차두거리 S4가 차량 M1과 M2 사이의 차간거리가 된다.

**1. 가정 및 조건**

- 차량은 모두 승용차로만 구성되며, 차량 길이 또한 모두 동일함
- 가속차로의 길이는 가속주행 및 본선 진입에 충분한 길이로 설계되어짐
- 연결로 진입 차량 R1의 속도 : Vr(m/s)
- 본선 주행 차량 M1 및 M2의 속도 : Vm(m/s)
- 연결로 차량 R1이 본선으로 진입 시 본선 차량 M1과의 차두거리 : 차량길이(L)(m)
- 연결로 차량 R1이 본선으로 진입할 때 가속도 : a( m/s<sup>2</sup>)
- 연결로 차량 R1이 본선으로의 진입 후 본선 차량 M1과의 최소 유지 차간거리 : ℓ (m)
- 평균 최소 차두간격 : α(초)
- 최소 차두거리 : L+ ℓ (m)
- 연결로 차량 R1이 본선으로 진입 한 때, 본선 차량 M2가 유지하는 여유 차두간격 : Tg'(초)

**2. 모형 구축**

- 연결로 차량 R1이 본선으로의 진입 시도 시 본선 차량 M1과의 차두거리(S1)

$$S_1 = L(\text{차량길이})$$

- R1의 가속거리(S2, 가속 시 사용된 총 주행시간 =t)

$$S_2 = V_r \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

$$= \frac{V_m^2 - V_r^2}{2a} \tag{3}$$

$$\therefore t = \frac{1}{2} \cdot \left[ -\frac{2}{a} \cdot V_r \pm \sqrt{\left(\frac{2}{a} \cdot V_r\right)^2 + \frac{4}{a^2} \cdot (V_m^2 - V_r^2)} \right]$$

- t 시간 동안 M1이 주행한 거리(S3)

$$S_3 = V_m \cdot t \tag{4}$$

- 진입 완료 후 M1과 R1의 거리 차(S4)

$$S_4 = (S_1 + S_3) - S_2 \tag{5}$$

- S4에 대한 차두간격(Tg)

$$MAX \left[ \frac{S_4}{V_m}, \frac{L + \ell}{V_m}, \alpha \right] \tag{6}$$

- S5에 대한 차두간격(Tg')

$$MAX \left[ \frac{L + \ell}{V_m}, \alpha \right] \tag{7}$$

- 임계차두간격( Tc )

$$T_c = T_g + T_g' \tag{8}$$

**3. 임계차두간격 산출**

구축된 모형을 토대로 산출된 임계차두간격이 <표 5>에 제시되어 있다. 이는 본선 교통류에 대해서 5 km/h~120km/h, 연결로 교통류에 대해서는 5km/h~80km/h의 속도범위를 대상으로 한 것이다. 이 때 사용된 제한은 다음과 같다.

**1) 임계차두간격 산출 제한**

- 가속도 : a

연결로에서 본선으로 합류하는 차량의 가속도는 <표 2>에 제시된 바와 같다. <표 3>은 <표 2>를 토대로 보간법을 적용하여 5km/h 간격으로 내삽 및 외삽하여 가속도를 결정한 것이다.

<표 2> 승용차의 평균 가속도(mile/h/s)

초기속도 (mph)	도달속도(mph)				
	15	30	40	50	60
0	3.3	3.3	3.3	3.1	2.9
30	-	-	3.3	2.9	2.5
40	-	-	-	2.6	2.3
50	-	-	-	-	2.0

출처 : ITE, Traffic Engineering Handbook.

〈표 3〉 속도 범위별 승용차의 평균가속도(m/s<sup>2</sup>)

		연결로 교통류 속도(km/h)															
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
본선 교통류 속도 (km/h)	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	1.470	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	15	1.470	1.470	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	1.470	1.470	1.470	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25	1.470	1.470	1.470	1.470	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	30	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	35	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	40	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	45	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	-	-	-	-	-	-	-	-
	50	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	-	-	-	-	-	-	-
	55	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	-	-	-	-	-	-
	60	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.247	-	-	-	-	-
	65	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.470	1.247	1.203	-	-	-	-
	70	1.437	1.434	1.431	1.428	1.425	1.422	1.419	1.416	1.413	1.410	1.247	1.203	1.160	-	-	-
	75	1.404	1.398	1.392	1.386	1.380	1.374	1.368	1.362	1.356	1.350	1.247	1.203	1.160	0.977	-	-
	80	1.371	1.362	1.353	1.344	1.335	1.326	1.317	1.308	1.299	1.290	1.247	1.203	1.160	0.977	0.933	-
85	1.338	1.326	1.314	1.302	1.290	1.278	1.266	1.254	1.242	1.230	1.191	1.152	1.113	0.977	0.933	0.890	
90	1.305	1.290	1.275	1.260	1.245	1.230	1.215	1.200	1.185	1.170	1.136	1.101	1.067	0.977	0.933	0.890	
95	1.272	1.254	1.236	1.218	1.200	1.182	1.164	1.146	1.128	1.110	1.080	1.050	1.020	0.977	0.933	0.890	
100	1.272	1.254	1.236	1.218	1.200	1.182	1.164	1.146	1.128	1.110	1.080	1.050	1.020	0.977	0.933	0.890	
105	1.272	1.254	1.236	1.218	1.200	1.182	1.164	1.146	1.128	1.110	1.080	1.050	1.020	0.977	0.933	0.890	
110	1.272	1.254	1.236	1.218	1.200	1.182	1.164	1.146	1.128	1.110	1.080	1.050	1.020	0.977	0.933	0.890	
115	1.272	1.254	1.236	1.218	1.200	1.182	1.164	1.146	1.128	1.110	1.080	1.050	1.020	0.977	0.933	0.890	
120	1.272	1.254	1.236	1.218	1.200	1.182	1.164	1.146	1.128	1.110	1.080	1.050	1.020	0.977	0.933	0.890	

• 차량길이 : L

차량길이는 『도로의 구조·시설기준에 관한 규칙 해설 및 지침』에 제시된 설계차량 중 소형자동차의 길이(4.7m)를 적용하였다.

$$\frac{1}{Capacity} = \frac{1}{2,400\text{대/시}} = 1.5\text{초/대}$$

이를 감안하여 본 연구에서는 임계차두간격 산출시 적용되는 평균 최소 차두간격( $\alpha$ )으로 1.5초를 적용하였다.

• 평균 최소 차두간격 :  $\alpha$

일반적으로 차두간격 확률밀도함수에 사용되는 최소 차두간격은 0.5초 또는 1.0초이다. 그러나 한 지점에서 아주 작은 값, 예를 들어 0.5초의 차두간격이 관측되었다 할지라도 이 때 관측된 0.5초의 차두간격은 한 순간에 관측된 값이며 어느 정도 일정한 구간을 주행하면서 계속 0.5초를 유지하지는 않는다. 따라서 이렇게 작은 값을 교통류 분석에 사용할 수는 없다. 이론적으로 볼 때 평균 차두간격은 교통량의 역수이므로, 평균 최소 차두간격은 용량의 역수와 같게 된다.

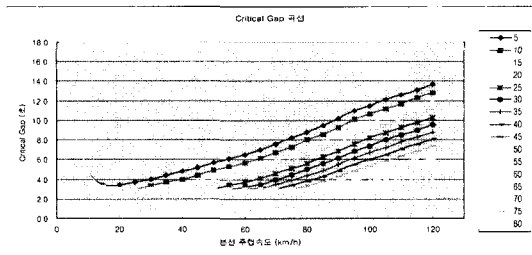
〈연결로 차량 R1이 본선으로의 진입 완료 후 본선 차량 M1과의 최소 유지 차간거리,  $l$ 〉

$l$  값은 교통량이 적을 때는 물론 교통량이 많을 때도 고려하기 위해 2m를 적용하였다.

2) 임계차두간격 산출 결과

〈표 5〉에서 볼 수 있는 임계차두간격의 산출 예로 〈표 4〉를 제시하였다. 〈표 4〉에서  $T_g$  값은 밀줄이 있는 값이며,  $T_g'$  값은 괄호에 해당하는 값이다.

〈표 5〉에서 본선 교통류의 주행속도가 30km/h



〈그림 4〉 상대속도 차이를 고려하여 산출된 임계차두간격(초)

이상인 부분에 대하여 4 초대에 해당하는 임계차두간격을 짧은 글자체로 표시하였다. 이에서 알 수 있는 것은 본선 교통류와 연결로 교통류간의 상대 속도 차가 4 초대의 임계차두간격에서는 일정한 대각선 관계를 보임을 알 수 있다. 이는 합류 과정 시 교통류의 실제 속도보다는 교통류 사이의 상대 속도 차이가 임계

〈표 4〉 임계차두간격 산출 예 (연결로 속도:5km/h)

본선 속도 (km/h)	$\frac{S_1}{V_m}$ (초)	$\frac{L+\ell}{V_m}$ (초)	$\alpha$ (초)	Tg (초)	Tg' (초)	Tc (초)
5	3.4	(4.8)	1.5	4.8	(4.8)	9.6
10	1.9	(2.4)	1.5	2.4	(2.4)	4.8
15	1.8	(1.6)	1.5	1.8	(1.6)	3.4
20	1.9	1.2	(1.5)	1.9	(1.5)	3.4
25	2.2	1.0	(1.5)	2.2	(1.5)	3.7
30	2.5	0.8	(1.5)	2.5	(1.5)	4.0

차두간격을 결정한다는 것과 같다. 따라서, 본선 교통류의 속도 100km/h, 연결로 교통류의 속도 50km/h에 대해서 결정된 임계차두간격은 4.8 초이며, 이 때, 본선 교통류의 속도가 감소하면 상대속도 차이가 감소하여 임계차두간격은 감소하고 연결로 교통류의 속

〈표 5〉 본선 및 연결로 교통량(상대속도 차이)을 고려하여 산출된 임계차두간격(초) (속도단위:km/h)

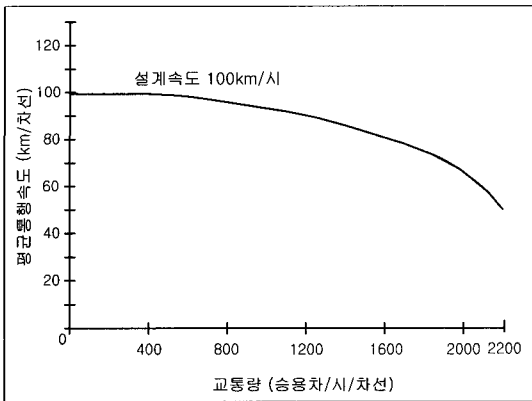
		연결로 교통류 속도															
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
본 선 교 통 류 속 도	5	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6
	10	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
	15	3.4	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
	20	3.4	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	25	3.7	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	30	<b>4.0</b>	3.3	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	35	<b>4.4</b>	3.7	3.1	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	40	<b>4.8</b>	<b>4.0</b>	3.4	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	45	5.2	<b>4.4</b>	3.8	3.2	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	50	5.7	<b>4.9</b>	<b>4.2</b>	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	55	6.1	5.3	<b>4.6</b>	3.9	3.4	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	60	6.5	5.7	5.0	<b>4.3</b>	3.7	3.2	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	65	7.0	6.2	5.4	<b>4.7</b>	<b>4.1</b>	3.5	3.1	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	70	7.6	6.7	5.9	5.2	<b>4.6</b>	<b>4.0</b>	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	75	8.2	7.3	6.5	5.8	5.1	<b>4.5</b>	3.9	3.4	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	80	8.8	8.0	7.1	6.4	5.6	5.0	<b>4.4</b>	3.8	3.3	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	85	9.5	8.6	7.8	7.0	6.3	5.6	<b>4.9</b>	<b>4.3</b>	3.8	3.3	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	90	10.2	9.3	8.5	7.7	6.9	6.2	5.5	<b>4.9</b>	<b>4.3</b>	3.8	3.4	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	95	11.0	10.1	9.2	8.4	7.6	6.9	6.2	5.5	<b>4.9</b>	<b>4.3</b>	3.8	3.4	3.0	3.0	3.0	3.0
	100	11.5	10.6	9.8	9.0	8.2	7.4	6.7	6.0	5.4	<b>4.8</b>	<b>4.3</b>	3.8	3.3	3.0	3.0	3.0
105	12.1	11.2	10.3	9.5	8.7	8.0	7.2	6.5	5.9	5.3	<b>4.7</b>	<b>4.2</b>	3.7	3.3	3.0	3.0	
110	12.6	11.7	10.9	10.1	9.3	8.5	7.8	7.1	6.4	5.7	5.2	<b>4.7</b>	<b>4.2</b>	3.7	3.3	3.0	
115	13.1	12.3	11.4	10.6	9.8	9.0	8.3	7.6	6.9	6.2	5.7	5.1	<b>4.6</b>	<b>4.2</b>	3.7	3.3	
120	13.7	12.8	12.0	11.1	10.3	9.6	8.8	8.1	7.4	6.8	6.2	5.6	5.1	<b>4.6</b>	<b>4.2</b>	3.7	

도가 감소하면 상대 속도 차이가 커져서 임계차두간격은 증가하는 것을 볼 수 있다.

〈그림 4〉는 〈표 5〉에서 산출된 임계차두간격을 본선 교통류와 연결로 교통류의 속도 별로 관계를 나타낸 것이다.

**IV. 최대 진입 및 최대 통과 가능 교통량 산정**

새로운 임계차두간격이 설정되었으므로 최대 진입 가능 교통량 및 최대 통과 교통량을 산출할 수 있다. 본선의 교통량별 평균통행속도는 1992년 KHCM에 제시되어있는 고속도로 기본구간 속도-교통량 관계 곡선(〈그림 5〉)을 이용하였다. 또한 연결로의 평균통행속도는 교통량에 관계없이 50km/h로 가정하였다. 1992년 KHCM의 고속도로 기본구간 속도-교통량 관계 곡선<sup>3)</sup>으로부터 속도를 5km/h 단위씩 끊어서 교통량을 찾았으며, 이를 통해 임계차두간격을 구한 것이 〈표 6〉에 제시되어있다. 특히 본선 교통량 1600대/시 이후부터는 본선 평균 통행속도와 연결로 평균 통행속도 차이가 30km/h 이하이고 임계차두간격이 3.0초로 일정한 것을 볼 수 있다.



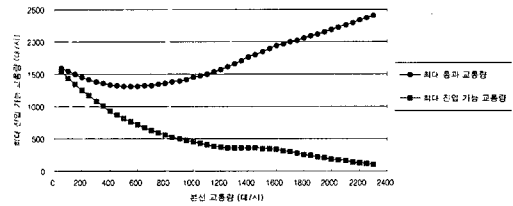
〈그림 5〉 고속도로 기본구간 속도-교통량 관계

**1. 최대 진입 가능 교통량 산정**

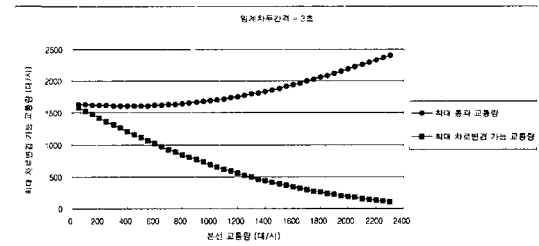
교통량별 임계차두간격을 적용하여 최대 진입 가능 교통량 및 최대 통과 교통량(연결로의 최대 진입 가능 교통량과 본선 접속차로 교통량의 합)을 산정한 결과가

〈표 6〉 본선 접속차로 교통량 수준별 임계차두간격

본선 설계속도=100km/h 연결로 진입속도=50km/h		
교통량(대/시)	속도(km/h)	임계차두간격(초)
0 - 400	100	4.80
800	95	4.30
1200	90	3.80
1400	85	3.30
1600	80	3.00
1800	75	3.00
1900	70	3.00
2000	65	3.00
2080	60	3.00
2150	55	3.00
2200	50	3.00



〈그림 6〉 최대 진입 가능 교통량 및 최대 통과 교통량 곡선



〈그림 7〉 최대 차로변경 가능 교통량 및 최대 통과 교통량 곡선

〈그림 6〉 및 〈표 7〉에 제시되어있다.

〈그림 6〉 및 〈표 7〉에서 볼 수 있듯이 최대 진입 가능 교통량은 본선 교통량이 증가함에 따라 감소하는 추세를 보이는 하나 그 관계성이 매우 불규칙적인 것을 볼 수 있다. 이는 본선 기본구간의 속도-교통량 관계에 기인하는 것으로써, 임계 차두간격이 3.0초

3) 본 논문에서 속도-교통량의 관계는 단지 교통량에 대응하는 교통류 속도를 적용하는 기준인 바, 새로운 형태의 속도-교통량의 관계가 설정되더라도 모형의 적용에 문제점이 없다.



〈표 7〉 최대 진입 가능 교통량 (단위:대/시)

모형에 의해 산출된 임계차두간격 적용, $t^*=1.5$ 초		
본선 접속차로 교통량	연결로의 최대 진입 가능 교통량	접속차로의 최대 통과 가능 교통량
50	1545	1595
100	1445	1545
150	1349	1499
200	1257	1457
250	1169	1419
300	1085	1385
350	1006	1356
400	932	1332
450	871	1321
500	814	1314
550	763	1313
600	716	1316
650	671	1321
700	631	1331
750	595	1345
800	561	1361
850	529	1379
900	499	1399
950	474	1424
1000	449	1449
1050	426	1476
1100	405	1505
1150	387	1537
1200	369	1569
1250	364	1614
1300	363	1663
1350	362	1712
1400	365	1765
1450	356	1806
1500	351	1851
1550	345	1895
1600	341	1941
1650	319	1969
1700	297	1997
1750	277	2027
1800	257	2057
1850	239	2089
1900	221	2121
1950	204	2154
2000	188	2188
2050	173	2223
2100	158	2258
2150	145	2295
2200	132	2332
2250	120	2370
2300	109	2409

〈표 8〉 최대 차로변경 가능 교통량 (단위:대/시)

임계차두간격=3초, $t^*=1.5$ 초		
본선 내측차로 교통량	본선 접속차로의 최대 차로변경 교통량	내측차로의 최대 통과 가능 교통량
50	1590	1640
100	1533	1633
150	1477	1627
200	1422	1622
250	1368	1618
300	1315	1615
350	1263	1613
400	1212	1612
450	1162	1612
500	1113	1613
550	1065	1615
600	1019	1619
650	973	1623
700	930	1630
750	887	1637
800	845	1645
850	805	1655
900	766	1666
950	729	1679
1000	692	1692
1050	657	1707
1100	622	1722
1150	589	1739
1200	557	1757
1250	527	1777
1300	497	1797
1350	468	1818
1400	441	1841
1450	415	1865
1500	389	1889
1550	365	1915
1600	341	1941
1650	319	1969
1700	297	1997
1750	277	2027
1800	257	2057
1850	239	2089
1900	221	2121
1950	204	2154
2000	188	2188
2050	173	2223
2100	158	2258
2150	145	2295
2200	132	2332
2250	120	2370
2300	109	2409

로 일정한 <그림 7>의 경우와는 다르게 본선 교통량에 따라 임계차두간격이 함께 변했기 때문이다. 최대 통과 교통량의 경우는 본선 교통량 550대/시 수준까지는 감소하다가 이후로 점차 최대 통과 교통량이 증가하는 것을 볼 수 있다.

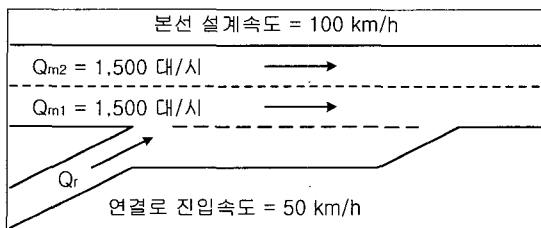
<그림 6> 및 <표 7>에 제시된 결과는 임계차두간격이 강제 진입을 배제한 정상류 상태의 값이기 때문에, 산출된 최대 진입 가능 교통량은 본선 지체를 유발하지 않는 정상류 상태에 대한 것으로서 강제진입 발생 시보다 적은 값을 나타내게 된다. 즉, 연결로로부터 본선으로 강제 진입이 발생하고 본선의 연결로 접속차로에서 내측차로로 차로변경이 일어난다면 더 많은 교통량이 연결로로부터 진입 가능하게 된다. 그러나, 용량을 초과한 강제진입은 혼잡을 유발시키는 주요한 요인으로 작용하며, 혼잡발생 이후로는 정상류 상태보다 진입 교통량이 줄어들게 된다.

**2. 본선 접속차로의 최대 차로변경 가능 교통량**

<표 8>에서 차로변경의 경우 본선 인접차로 교통류간의 상대 속도 차가 크지 않으므로 차로변경에 필요한 임계차두간격은 3.0초가 된다. 따라서 <표 8> 및 <그림 7>은 본선의 최대 차로변경 교통량 및 최대 통과 교통량을 나타낸다. <표 8>의 최대 차로변경 교통량은 기존의 연구(참고문헌3, 4 참조)에서 동일한 임계차두간격(3.0초)을 적용하여 산출한 최대 진입 가능 교통량과 동일하다.

**3. 방향 당 최대 통과 가능 교통량**

다음은 본선 교통량이 차로별로 1,500 대/시 인 편도 2차로 고속도로 한 방향에 대한 최대 통과 가능 교통량 산정 예이다.



**1) 정상류 상태**

- ① 본선 진입 시 임계차두간격=3.15초(<표 6>에서 보간법을 적용한 수치임)
- ② 차로변경 시 임계차두간격=3.0초(<표 8>)
- ③ 차로변경이 발생하지 않을 때의 최대 진입 가능 교통량=351대/시(<표 7>)

연결로 진입 교통량이 351대/시 이하의 수준일 경우, 본선 상류부 접속차로의 소통수준이 유지됨. 그러나 연결로 수요가 351대/시 이상일 경우는 본선 전체에 영향을 미침. 즉 접속차로의 통행속도가 떨어지게 되므로 접속차로에서 내측차로로 차로변경이 발생하게 되며, 이로써, 접속차로는 통행속도는 유지하나 차로변경 교통량이 발생하여 더 많은 진입 수요를 받아들일 수 있게 됨.

- ④ 최대 차로변경 가능 교통량=389대/시(<표 8>)
- ⑤ 본선 접속차로 교통량 =  $1,500 - 389 = 1,111$ 대/시
- ⑥ 최대 진입 가능 교통량(본선 접속차로 교통량 1,111대/시, 임계차두간격 3.15초) =  $574$ 대/시(식(2)의 모형식에 대입하여 계산, 참고문헌 3,4 참조)
- ⑦ 본선 내측차로 최대 통과 가능 교통량 =  $1,500 + 389 = 1,889$ 대/시
- ⑧ 본선 접속차로 최대 통과 가능 교통량 =  $1,111 + 574 = 1,685$ 대/시
- ⑨ 방향 당 최대 통과 가능 교통량 =  $1,889 + 1,685 = 3,574$ 대/시

연결로 진입수요 574대/시는 본선 상류부 내측차로 및 접속차로의 소통수준이 유지될 수 있는 진입 교통량 수준임. 그러나 연결로 수요가 574대/시 이상일 경우는 본선 상류부의 소통수준에 영향을 미쳐 통행속도 저하 및 혼잡을 유발시키게 됨.

**2) 혼잡 이행 과정**

위의 예에서 연결로 수요가 574대/시 이상일 경우, 연결로에서 접속차로로 강제 진입이 발생하게 되어 접속차로의 통행속도가 떨어져 임계차두간격이 최소치인 3.0초가 되는 순간이 발생하게 됨.

- ⑩ 최대 진입 가능 교통량(본선 접속차로 교통량

1,111 대/시, 임계차두간격 3.0초)  
=615대/시

- ⑪ 본선 접속차로 최대 통과 가능 교통량  
=1,111+615=1,726대/시
- ⑫ 방향 당 최대 통과 가능 교통량  
=1,889+1,726=3,615대/시

연결로 수요가 574대/시~615대/시 사이에서는 본선 접속차로의 통행속도가 내측차로와 비교하여 현저히 저하되는 불안정한 상태로서, 본선상의 용량을 초과한 차로변경만으로도 혼잡이 발생할 수 있는 혼잡 이행 시기로 볼 수 있음.

연결로 수요가 615대/시 이상이 되어 강제 진입이 발생할 경우는, 용량을 초과한 강제 진입 및 차로변경이 발생하여 본선 전체의 혼잡이 발생하게 됨. 따라서, 최대 차로변경 가능 교통량 및 최대 진입 가능 교통량이 줄어들게 되어 본선과 연결로를 포함한 합류부 전체의 혼잡이 발생하게 되며, 최대 통과 가능 교통량이 줄어들게 됨.

**결과에 대한 토론**

방향 당 최대 통과 가능 교통량 산정 시, <표 7> 및 <표 8>을 단순 적용하면 본선 접속차로의 최대 통과 가능 교통량은 1,851대/시, 본선 내측차로의 최대 통과 가능 교통량은 1,889대/시로 방향 당 최대 통과 가능 교통량은 3,740대/시가 된다. 이 결과에 의하면 연결로의 최대 진입 가능 교통량이 740대/시가 되는데, 이는 접속차로와 연결로 교통류에 의해 결정되는 최대 진입 가능 교통량을 초과한 수치로서 방향 당 최대 통과 가능 교통량 산정 시 <표 7> 및 <표 8>에 의한 단순 적용은 곤란함을 알 수 있다.

**V. 결론**

본 연구는 합류부의 교통 특성 분석에 관한 연구로서,

합류 시 요구되는 임계차두간격의 산출과 최대 통과 교통량의 산정이라는 큰 두 개의 틀로 구성되어있다. 임계차두간격은 기존처럼 대표 값 하나만을 적용하지 않고 모형 개발을 통해 다양한 교통류 상태에 대해 연속적인 값으로 산출하였다. 합류부의 최대 통과 교통량은 고속도로 한 방향에 대해 최대 진입가능 교통량과 최대 차로변경 교통량 산정을 통해 구하였다. 이러한 최대 통과 교통량의 산정은 합류부에서 정상류와 정체류 판정의 기준이 되며, 고속도로 합류부 분석의 새로운 틀을 제시한 것으로 판단된다.

향후 본 연구 방법론의 현장 적용을 위해 가속도, 차량길이, 최소차두간격 등 임계차두간격 산출 제원에 대한 세밀한 검증작업이 요구되며, 더 나아가 정체류에 대한 분석 방법론의 개발이 요구되어진다.

**참고문헌**

1. 도로용량편람, 대한교통학회, 1992.
2. 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설 및 지침, 건설교통부, 2000. 3.
3. 최재성, 이승준, 도시고속도로 엇갈림 구간의 합리적 설계를 위한 교통특성 분석(I), 대한교통학회지 제18권 제5호, 2000. 10.
4. 최재성, 이승준, 이정도, 확률모형을 이용한 엇갈림 구간의 교통류분석, 대한교통학회지 제17권 제5호, 1999. 12.
5. Drew, Donald R., Traffic Flow Theory and Control, McGraw-Hill, 1968.
6. Highway Capacity Manual, TRB, 2000.
7. Institute of Transportation Engineers, Traffic Engineering Handbook, 2nd Edition, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N., J., 1982, p.883.

☞ 주 작 성 자 : 최재성  
 ☞ 논문투고일 : 2001. 9. 4  
 논문심사일 : 2001. 11. 19 (1차)  
 논문심사일 : 2001. 11. 27 (2차)  
 심사판정일 : 2001. 11. 27