엇갈림 구간의 길이 산출 모형 개발

Development of Design Standards for Weaving Lengths Using Stochastic Models

이 정 도
(동명기술공단 전무이사)

이 승 준
(서울시립대학교 도시공학과 박사과정)

최 재 성
(서울시립대학교 도시공학과 교수)

목 차

I. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

기존 엇갈림 구간의 길이 산정은 현장조사를 통하여 속도에 영향을 미치는 여러 요소 즉, 구간길이, 차로수, 엇갈림 비, 교통량 등을 독립변수로 하는 속도예측 회귀식을 산출한 후, 길이의 함수로 역산하는 방법이 주종을 이루고 있다. 그러나 엇갈림 구간이 많이 존재하지 않으므로 기존 연구들처럼 현장조사를 통해 회귀식에 필요한 매개변수 값들을 추정하는데 어려움이 있다. 따라서, 엇갈림 구간의 길이를 산정하기 위해 새로운 분석 방법론 개발의 필요성이 대두하게 되었다. 이를 위해 본 연구에서는 엇갈림 구간의 기본적인 특성을 규명하고 이를 수학적 확률식에 의거 엇갈림 구간의 길이 산출 모형을 개발함으로써, 엇갈림설계에서 가장 중요한 요소인 엇갈림 구간의 길이에 관한 해석적인 방법론을 구축하고자 하였다.

2. 연구의 범위 및 방법론

연구의 수행 범위는 다음과 같이 크게 4가지 범주로 구분된다.

- 엇갈림 교통류의 수학적 해석
- 엇갈림 영향권에서의 차두간격 분포 파악
- 엇갈림 구간 길이의 산정
- 엇갈림 구간 길이 모형의 비교 평가

연구는 수학적 확률 식을 바탕으로 다음과 같은 3가지 방법에 의해 수행된다.

첫 째, 고속도로 기본구간과 엇갈림 구간에 있어서 차두간격 분포의 변화를 파악

둘 째, 새로이 생성된 엇갈림 영향권의 차두간격 분포를 이용하여 확률모형에 적용

셋 째, 확률모형을 이용 엇갈림 구간의 길이 산정

3. 기존 연구의 검토

1) 94 US HCM(HCM-94)

HCM-94는 엇갈림 형태를 Type A, B, C로 나누었으며, 제약과 비제약의 운행특성을 구분

하여 회귀식 형태의 속도추정식을 개발하였으며, 엇갈림 길이는 속도 추정식을 역산하여 계산한다.

2) 1992년 한국 도로 용량 편람 (KHCM-92)

1992년 한국 도로 용량 편람은 단순 엇갈림 구간으로 TYPE A의 램프 엇갈림 형태에 대하여 중점적으로 다루었다. 엇갈림 길이는 엇갈림 차량이 엇갈림을 수행하는 데 필요한 최소길이와 관계가 있다고 규정하고 속도추정식을 역산하여 산출한다.

이상의 엇갈림 구간에 대한 연구들은 평균적인 도로 및 교통특성을 바탕으로 회귀식을 도출하였으므로, 우리 나라와 같이 엇갈림 구간이 많이 존재하지 않는 경우에는 이러한 속도추정식을 역산하여 구한 길이 값을 엇갈림 구간의 길이 설계를 위해 바로 현장에 적용하기가 곤란하다.

II. 엇갈림 구간의 길이 산정법

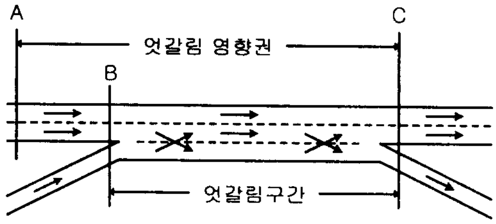
1. 가정

본 논문에서 사용한 가정은 다음과 같다.

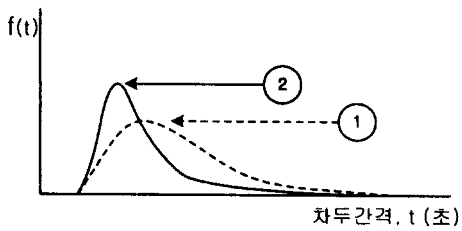
- 엇갈림 영향권 본선 접속차로의 차량 도착분포는 Pearson Type Ⅲ Distribution(k=2)의 변형을 따름.
- 엇갈림 구간 연결로의 차량 도착분포 역시 본선 접속차로와 같은 형태의 차량 도착분포를 따름.
- 본선의 진출 엇갈림 차량들은 엇갈림 구간 도착 전 모두 접속차로로 이동함.
- 엇갈림 주행을 통해 속도변화(감・가속)를 경험한 차량의 엇갈림 구간 내 평균 최소 차두간격은 기본구간의 평균 최소 차두간격(α)보다 크며, 일정한 간격을 유지함.
- 엇갈림 차량은 엇갈림 기회가 주어질 때까지 강제 엇갈림을 수행하지 않고 주행 차로 상에서 주행하면서 대기함.
- 차량은 승용차로만 구성되어 있음
- 본 연구에서 다루는 엇갈림 형태는 Type A에 한정함.

2. 차두간격 분포의 변화 및 엇갈림 영향권

일반적으로 엇갈림 구간은 <그림 1>에서 보는 바와 같이 B와 C 사이의 구간으로 정의된다. 엇갈림 구간에서 차량들의 엇갈림 주행 가능 여부는 본선 상류부 교통류에 의해 제공되는 엇갈림 기회에 달려 있고 엇갈림 기회는 차두간격을 이용하여 확률적으로 계산할 수 있다.



<그림 1> 엇갈림 구간 및 영향권



<그림 2> 엇갈림 구간 상류부에서의 차두간격 분포 변화

<그림 2>는 기본구간과 엇갈림 영향권 내 상류부(구간 A~B)의 차두간격 분포 변화의 예를 도시한 것이다. 고속도로 기본구간의 차량도착(차두간격) 분포가 <그림 2>의 ①과 같은 형태의 분포를 따른다고 하더라도 엇갈림 영향권 내 상류부(구간 A~B)의 차두간격 분포는 엇갈림 구간에서 발생되는 엇갈림 현상에 의해 그 분포 형태가 변화될 것이다. 즉, 엇갈림 구간 내의 증가된 차량 상호작용에 의해 엇갈림 영향권 내 상류부(구간 A~B)의 차두간격 분포는 <그림 2>의 ②와 같이 좌측으로 치우친 형태로 바뀌게 된다. 이 때 고속도로 기본구간에서의 차두간격 분포를 변화시키는 요인으로는 증가된 교통량 및 엇갈림 주행으로 인한 차량간의 상호작용을 들 수 있다.

차두간격 분포가 바뀌게 되면 엇갈림 기회가 변화하기 때문에 엇갈림 차량에 필요한 엇갈림 길이도 줄어들거나 늘어나게 된다.

3. 차두간격 함수의 기본식

Pearson Type Ⅲ 분포의 확률밀도 함수는 다음과

같다.

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

여기서,

λ = 평균 도착율(대/초)

K = 매개변수

t = 차두간격(초)

α =최소 차두간격(초)

그러므로, K=2인 Pearson Type Ⅲ 분포의 확률밀도 함수는 다음과 같이 간단한 형태가 된다.

$$f(t) = \lambda^2 \cdot (t-\alpha) \cdot e^{-\lambda(t-\alpha)}$$

가정에 의해 엇갈림 영향권 내 상류부(구간 A~B)의 차두간격 분포는 K=2인 Pearson Type Ⅲ 분포의 변형으로서, 그 형태는 다음과 같다.

$$f_m(t) = \lambda_m^2 \cdot (t-\alpha) \cdot e^{-\lambda_m(t-\alpha)}$$

$$f_r(t) = \lambda_r^2 \cdot (t-\alpha) \cdot e^{-\lambda_r(t-\alpha)}$$

여기서,

$f_m(t)$ = 본선 접속차로 차두간격 확률밀도 함수

$f_r(t)$ = 연결로 차두간격 확률밀도 함수

λ_m = $\Omega \times$ {본선 접속차로의 평균 도착율}(대/초

λ_r = $\Omega \times$ {연결로의 평균 도착율}(대/초)

Ω = 매개변수

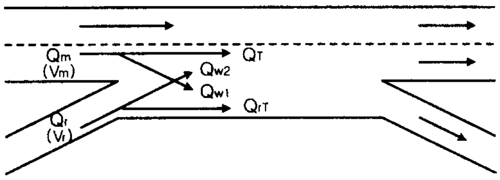
따라서, 확률함수는 다음과 같다.

$$F_m(t) = \int f_m(t)\,dt$$

$$= -\lambda_m \cdot \left(t-\alpha+\frac{1}{\lambda_m}\right) \cdot e^{-\lambda_m(t-\alpha)}$$

4. 엇갈림 진입 가능 확률

차두간격 분포를 이용한 수학적 확률모형을 통해 연결로로부터 본선으로 진입하는 차량과 본선으로부터 연결로로 진출하는 차량에 필요한 엇갈림 구간의 길이를 구할 수 있다. 다음에는 연결로 진입부에서 본선으로 진입하는 경우만의 엇갈림 길이 산정 방법을 제시하였으며, 본선에서 연결로로 진출하는 경우는 같은 방식으로 구할 수 있으므로 생략하였다. <그림 3>은 엇갈림 이동류를 도시한 것이다.



<그림 3> 엇갈림 이동류

1) 본선의 차두간격을 이용한 진입 가능 확률

이상적 엇갈림 구간 길이란 엇갈림을 위해 교통류가 대기 또는 저속주행하지 않고 평균 속도로 주행하면서 엇갈림 기회를 찾을 수 있는 길이를 의미한다. 엇갈림 차량이 진입기회를 찾고 있다가 임계간격보다 큰 차두간격이 존재하게 되면 진입기회를 갖게 된다. 본선의 차두간격 분포를 이용한 연결로로부터 본선으로의 진입 가능한 확률은 다음과 같다.

본선 차두간격을 이용한 진입 가능 확률

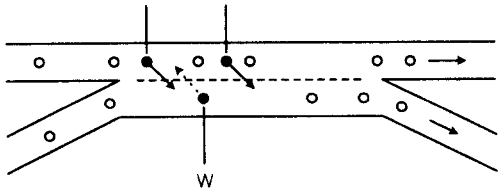
$$= \int_{T_c}^{\infty} f_m(t)\,dt$$

여기서,

T_c = Critical Gap(초)

2) 본선의 진출 교통류를 이용한 진입 확률

본선으로부터 연결로로 진출하는 엇갈림 교통류로부터 제공되는 차두간격은 엇갈림 교통량 수의 1/2만큼 제공되며, 차두간격의 크기는 평균적으로 본선 차두간격의 2배에 해당한다. <그림 4>에서 보는 바와 같이, 본선에서 연결로로 진출하려는 차량이 연결로에서 본선으로 진입하는 차량의 앞 또는 뒤에 위치할 수 있는 확률은 각각 1/2이며, 뒤쪽에서 진출할 경우 연결로에서 본선으로 진입하려는 차량에게는 진입기회가 제공된다.



<그림 4> 엇갈림 교통류의 상대적 위치 및 진입기회

또한, 차두간격의 크기는 진출차량이 빠짐으로 인해서 평균적으로 본선 차두간격의 2배가된다. 따라서, 본선으로부터 진출하는 엇갈림 교통류로 인해 제공되는 차두간격 확률밀도 함수는 본선의 차두간격 확률밀도 함수와는 다르며 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$f_{\frac{m}{2}}(t) = \left(\frac{\lambda_m}{2}\right)^2 \cdot (t-\alpha) \cdot e^{-\frac{\lambda_m}{2}(t-\alpha)}$$

본선의 차두간격을 이용한 최대 진입 기회 산정과 같은 방식으로 구하면 본선으로부터 진출하는 엇갈림 교통류를 이용한 진입 가능 확률은 다음과 같다.

엇갈림 교통류를 이용한 진입 확률

$$= \frac{Q_{w1}}{2Q_m} \cdot \int_{T_c}^{\infty} f_{\frac{m}{2}}(t)\,dt$$

여기서,

Q_m = 본선 접속차로의 교통량(대/시)

Q_{w1} = 본선 접속차로의 진출 교통량(대/시)

3) 중복 진입 확률

그런데, 본선 엇갈림 교통류를 통해 제공되는 차두간격이 상당히 클 경우에는 엇갈림 주행이 발생하기 전에 연결로 교통류가 본선의 차두간격을 이용하여 합류할 수 있다. 이러한 중복 진입 기회는 본선 차두간격 분포를 이용해 구할 수 있으며, 엇갈림 교통류의 앞과 뒤에서 차두간격이 발생하므로, 앞에서와 같은 방식으로 구하면 다음과 같이 표현된다.

$$= \frac{Q_{w1}}{Q_m} \cdot \int_{T_c}^{\infty} f_m(t)\,dt$$

4) 진입 가능 확률

1)과 2), 3)로부터 연결로에서 본선으로의 진입 가능 확률은 다음과 같다.

$$\int_{T_c}^{\infty} f_m(t)\,dt + \frac{Q_{w1}}{2Q_m}\left[\int_{\alpha}^{T_c} f_{\frac{m}{2}}(t)\,dt - 2\int_{\alpha}^{T_c} f_m(t)\,dt\right]$$

5. 이상적 엇갈림 구간 길이의 산정

1) 엇갈림 대기시간의 산정

연결로에서 본선으로 진입할 수 없는 확률은 본선의 차두간격 분포 중 Critical Gap보다 작은 차두간격 수에 의해 결정된다. 그러나 Critical Gap보다 작은 차두간격을 유지한 차량들 중에 연결로로 진출하려는 엇갈림 차량들이 존재한다면, 이 진출 차량들에 의해 본선으로 진입할 수 있는 기회는 늘어나게 되며, 진출 차량수의 1/2만큼이 진입기회로 이용될 것이다. 따라서, 엇갈림을 위한 대기시간은 본선 차두간격 분포로부터 결정된 대기시간에서 진출 엇갈림 교통류로 인해 제공받는 시간만큼 줄어들게 된다.

시간에 따라 운전자의 Gap Acceptance가 변하지 않는다고 가정하면, 개별 대기시간은 기하분포를 이룬다. 따라서, 진입 엇갈림 주행을 할 수 없는 간격을 n번 기다려야할 확률(P_n)은 다음과 같다.

$$P_n = p^n(1-p) \qquad n = 1, 2, 3, \cdots$$

여기서,

p(진입 엇갈림 주행을 할 수 없는 확률)

$$= \int_{\alpha}^{T_c} f_m(t)\,dt - \frac{Q_{w1}}{2Q_m}\left[\int_{T_c}^{\infty} f_{\frac{m}{2}}(t)\,dt - 2\int_{T_c}^{\infty} f_m(t)\,dt\right]$$

또한, 평균 대기간격 회수($E(n)$)은 다음과 같다.

$$E(n) = \frac{p}{1-p}$$

$$= \frac{\int_{\alpha}^{T_c} f_m(t)\,dt - \frac{Q_{w1}}{2Q_m}\left[\int_{T_c}^{\infty} f_{\frac{m}{2}}(t)\,dt - 2\int_{T_c}^{\infty} f_m(t)\,dt\right]}{\int_{T_c}^{\infty} f_m(t)\,dt + \frac{Q_{w1}}{2Q_m}\left[\int_{T_c}^{\infty} f_{\frac{m}{2}}(t)\,dt - 2\int_{T_c}^{\infty} f_m(t)\,dt\right]}$$

진입 엇갈림 주행을 할 수 없는 차두간격의 평균 길이($E(L)$);

$$E(L) = \frac{\int_{\alpha}^{T_c} t \cdot f_m(t)\,dt - \frac{Q_{w1}}{2Q_m}\left[\int_{T_c}^{\infty} t \cdot f_{\frac{m}{2}}(t)\,dt - 2\int_{T_c}^{\infty} t \cdot f_m(t)\,dt\right]}{p}$$

평균대기시간(μ_r);

$$\mu_r = E(n) \cdot E(L) = \frac{\int_{\alpha}^{T_c} t \cdot f_m(t)\,dt - \frac{Q_{w1}}{2Q_m}\left[\int_{T_c}^{\infty} t \cdot f_{\frac{m}{2}}(t)\,dt - 2\int_{T_c}^{\infty} t \cdot f_m(t)\,dt\right]}{\int_{T_c}^{\infty} f_m(t)\,dt + \frac{Q_{w1}}{2Q_m}\left[\int_{T_c}^{\infty} f_{\frac{m}{2}}(t)\,dt - 2\int_{T_c}^{\infty} f_m(t)\,dt\right]}$$

위와 같은 방식으로 본선에서 연결로로 진출하는 차량에 대한 평균 대기시간(μ_m)을 구하면 다음과

같다.

$$\mu_m = \frac{\int_{\alpha}^{T_c} t \cdot f_r(t)\,dt - \frac{Q_{w2}}{2Q_r}\left[\int_{T_c}^{\infty} t \cdot f_{\frac{r}{2}}(t)\,dt - 2\int_{T_c}^{\infty} t \cdot f_r(t)\,dt\right]}{\int_{T_c}^{\infty} f_r(t)\,dt + \frac{Q_{w2}}{2Q_r}\left[\int_{T_c}^{\infty} f_{\frac{r}{2}}(t)\,dt - 2\int_{T_c}^{\infty} f_r(t)\,dt\right]}$$

2) 이상적 엇갈림 구간의 길이

본선 교통류와 연결로 교통류의 평균주행속도를 고려하면, 진입 엇갈림 주행 전 대기시간은 상대속도 차에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$T^{r}_{waiting} = \frac{V_m}{|V_m - V_r|} \cdot \mu_r, \quad V_m \neq V_r$$

여기서,

V_m = 본선 교통류의 평균 주행속도(m/s)

V_r = 연결로 교통류의 평균 주행속도(m/s)

진입 엇갈림 차량이 대기 이후 본선으로 진입할 때 필요한 가속(진입)거리($S^{r}_{merging}$)는 다음과 같다.

$$S^{r}_{merging} = \frac{V_m^2 - V_r^2}{2 \cdot Acc}$$

여기서,

Acc = 평균 가속도(m/s^2)

또한 진입 엇갈림 차량이 주어진 진입기회를 활용하여 진입하지 못할 경우가 발생할 수 있으므로, 이를 대비하여 재차 진입을 시도할 수 있도록 안전시간(T^{r}_{safety})을 확보해 주어야한다. 이 때, 안전시간은 $T^{r}_{waiting}$ 의 상수 배로서, 다음과 같이 표현된다.

$$T^{r}_{safety} = c \cdot T^{r}_{waiting}$$

여기서,

c = 상수

따라서, 진입 차량의 대기시간, 진입거리 및 안전거리를 고려하여 이상적 엇갈림 구간의 길이를 산출하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L^{*}_{r} &= (T^{r}_{waiting} + T^{r}_{safety}) \cdot V_r + S^{r}_{merging} \\ &= c^{*} \cdot T^{r}_{waiting} \cdot V_r + S^{r}_{merging} \end{aligned}$$

여기서,

c^{*} = 상수

또한, 본선에서 연결로로 진출하는 경우에 있어서,

$$T^{m}_{waiting} = \frac{V_r}{|V_m - V_r|} \cdot \mu_m, \quad V_m \neq V_r$$

$$S^{m}_{merging} = \frac{V_m^2 - V_r^2}{2 \cdot Dec}$$

$$T^{m}_{safety} = c \cdot T^{m}_{waiting}$$

이며, 같은 방식으로 L^{*}_{m}는 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} L^{*}_{m} &= (T^{m}_{waiting} + T^{m}_{safety}) \cdot V_m + S^{m}_{merging} \\ &= c^{*} \cdot T^{m}_{waiting} \cdot V_m + S^{m}_{merging} \end{aligned}$$

여기서, 이상적 엇갈림 구간의 길이(L^{*})는 L^{*}_{r}와 L^{*}_{m}를 비교하여 더 큰 값으로 결정하여야 한다.

III. 모형의 평가 및 결과 분석

1. 모형의 평가 시나리오

엇갈림 구간의 길이 추정 결과의 평가에 있어서 최적해의 기준은 이론적으로나 경험적인 수치로로서 완벽하게 제시되는 것이 없기 때문에 기존모형과 상대적인 비교 분석만이 가능하다. 이에따라 모형자체에 대해 교통류의 특성을 나타내는 변수로서 확률밀도 함수와 확률밀도 함수에 내재된 매개변수인 최소차두간격(α), 임계차두간격(T_c), 교통량, 주행속도, 평균차량도착함수(λ_m) 등을 <표 1>와 같이 다양한 값으로 설정하여 모형의 실험 시나리오를 작성하였다.

모형의 실험은 서비스 수준별 ×축의 본선 교통량 Q_m의 값과 이에 대응하는 V_m, V_r값을 적용하여 임계간격(T_c)이 1.5~4.0일 때 엇갈림 길이를 산정하는 것으로 그 결과는 <그림 5 >와 같다.

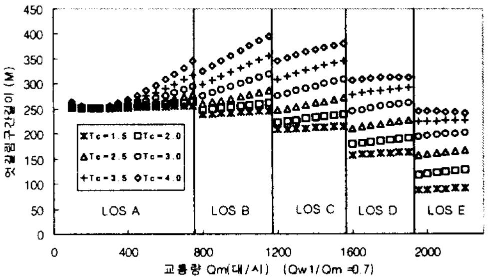
< 그림 5 >에서는 임계간격만을 간격 수락 모형과는 달리 교통량에 따른 서비스 수준의변화를 고려하여 길이 산정을 한 것이다.

또한 <그림 5>의 결과에서 교통류의 일반적인 특성인 교통량의 증가와 속도가 감소함에 따라 엇갈림 길이가 줄어드는 현상을 고려하고 있음을 볼 수 있다.

< 표1 >모형의 실험 환경

변수명	용어정의	설정값					
α	최소차두간격(초)	0.5					
T_c	임계간격	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Q_{wl}/Q_m	본선진출 교통량 / 본선 교통량	0.7					
Q_m	본선 교통량 PCU/시	LOS					
		A	B	C	D	E	
		750	1150	1550	1900	2000	
V_r	램프 진입차량의 평균주행속도(km/시)	LOS					
		A	B	C	D	E	
		50	45	40	35	30	
V_m^*	본선 차량의 평균 주행속도(km/시)	LOS					
		A	B	C	D	E	
		95	90	82	70	50	
$\lambda_m(\lambda_r)$	본선(연결로)평균 도착차량함수 대/초	q×(Ω=3)					
q	평균도착 차량수 대/초	교통량에 따라 변화					
Acc	평균가속도(m/sec^2)	1.0					
c	상수	2					

* V_m은 KHCM-94의 고속도로 기본구간의 서비스 수준을 참고한 것임



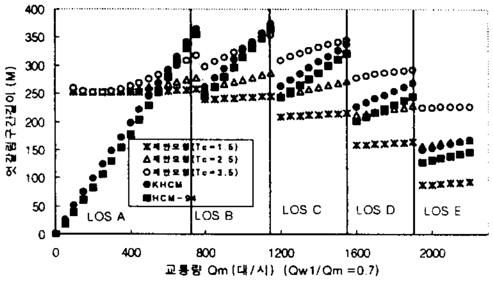
< 그림 5 > 시나리오에 따른 엇갈림 길이산정

2. 기존모형과의 비교분석

기존모형인 HCM-94와 KHCM-92를 본 모형과 비교하였다. <표 2>는 기존모형인 HCM-94와 KHCM-92와 비교를 하기위한 환경설정 내용이다. 비교분석결과 <그림 6>과 같이 나타났으며 본 모형의 결과와 기존모형과 거의 비슷하게 분포하는 상태는 본 모형의 임계간격이 T_c=1.5~2.5 일 때인데 이는 본 모형이 교통 특성을 임계간격으로 반영할 수 있다는 사실을 증명하고 있다. 또한 모형의 경향이 기존 회귀식과 거의 유사하여 수학적으로 구한 엇갈림 길이가 경험적으로 구한 기존 모형식을 대체할 수 있는 충분한 근거가 될 수 있음을 말해준다.

< 표 2 > 제안모형과의 비교를 위한 기존모형 환경

변수명	용어정의	설정값				
$\frac{V}{N}$	차선당평균교통량	0~2200PCU				
N	차선수(n+1)	5				
VR	엇갈림 교통량비	0.14				
LOS	서비스 수준	A	B	C	D	E
S_W	엇갈림 속도(km/시)	A	B	C	D	E
		82	75	67	58	47



<그림 6 >기존 모형과의 비교분석 결과

IV. 결 론

본 모형은 기존 연구들과 비교해 지니고 있는 장점은 보다 일반화된 이론적 구조를 취함으로서, 길이 추정식의 구축 시 범용적으로 적용할 수 있다는 것이다. 즉, 이론 구조가 일반화된 형태를 띠므로, 교통 및 운전자 특성 등이 지역적으로 서로 다른 경우에 이를 확률모형에 반영하여 엇갈림 구간에서의 길이를 산출할 수 있다.

그러나 확률모형은, 가정에 의해 극복해야 할 몇가지 한계점들을 내포한다. 다음은 이러한 한계점을 극복하고 보다 정확한 길이 산출을 위하여 보완되어야 할 과제이다.

- 교통량 전 범위에 적용할 수 있고 보다 근사한 차두간격 확률밀도 함수의 개발
- 엇갈림 교통특성을 고려한 보다 미시적인 접근방법의 개발

참고문헌

1. 건설부, KICT, KOTI, 도로용량편람, 1992
2. Drew, Donald R., Traffic Flow Theory and Control, McGraw-Hill, 1968
3. May, Adolf D., Traffic Flow Fundamentals, Prentice Hall, 1990
4. Highway Capacity Manual, Special Report 209, TRB, Washington, D.C., 1985