

■ 論 文 ■

차로별 속도차가 차로변경에 미치는 영향

An Impact of Lane Speed Differentials on Lane-Changing Behavior

정성봉

(서울대학교 지구환경시스템공학부 박사수료)

박상조

(교통개발연구원 책임연구원)

박창호

(서울대학교
지구환경시스템공학부 교수)

전경수

(서울대학교
지구환경시스템공학부 교수)

엄문성

(연세대학교
도시공학과 박사과정)

목 차

I. 서론

- 1. 연구의 배경과 목적
- 2. 연구의 범위 및 방법

II. 이론적 고찰

- 1. 차로변경의 기존 접근방법
- 2. Gipps의 의사결정구조모형
- 3. Ahmed 등의 이산확률모형
- 4. 간격수락모형

III. 모형의 개발

- 1. 기본알고리즘 및 모형식 구축
- 2. 조사지점의 선정 및 조사방법
- 3. 자료의 분석
- 4. 모형식 결정
- 5. 모형평가

IV. 결론 및 향후 연구과제

참고문헌

Key Words : 차로변경, 운전자 행태, 선택적 차로변경, 차로별 속도차, 현 차로속도, 임계간격, 차로변경률

요 약

차로변경이 발생하는 두 가지 상황 즉, 강제차로변경과 선택적 차로변경 중, 선택적 차로변경 상황에서 운전자가 수락가능한 간격을 발견했을 때, 차로별 속도차가 차로변경 의사결정에 미치는 영향을 모사할 수 있는 모형을 추정하였다. 즉, 선택적 차로변경은 운전자의 차로변경 여부에 대한 상황판단과 함께 목적차로의 간격수락여부에 대한 의사결정으로 이루어지는데, 본 논문에서는 목적차로에 수락가능한 간격이 존재할 경우 차로별 속도차가 운전자의 의사결정에 어떤 영향을 미치는지에 대해 분석하였다. 이를 위해, 운전자의 의사결정에 영향을 미칠 수 있는 다른 요소 즉, 중차량, 기하구조, 및 합·분류의 영향을 최소화하는 지점을 선택하여 표본조사를 실시하였으며, 보다 설명력있는 모형을 얻기 위해 상관분석 등을 수행하여 불필요하다고 생각되는 변수는 제외시켰다.

또한, 운전자의 희망속도와 주행속도차에 의한 영향을 반영하기 위해 현 차로속도를 부가적인 변수로 추가하였으며, 계수추정은 통계패키지인 SAS를 이용하였는데, 자료분석에 있어, 속도차 구간에 따라 다른 간격수락 특성을 보여 차로별 속도차를 0~2.0m/s구간과 2~11.52m/s구간으로 나누어 분석을 수행하였다.

분석결과 속도차 0~2.0m/s구간에서는 속도차가 증가할수록 차로변경률이 높아졌으나, 2~11.52m/s구간에서는 오히려 차로변경률이 낮아지는 것으로 나타났는데, 이는 속도차의 증감에 대해 운전자로 하여금 차로변경을 유도하는 요소와 함께 저항하게 하는 요소가 있다는 것을 알 수 있었다. 분석결과, 2.0m/s 이상의 속도차에서 차로변경에 대한 저항이 상대적으로 크게 작용한다는 것을 알 수 있었으며, 도로설계시 이를 반영하여 도로 기하구조 및 안전성 등을 향상시킬 수 있을 것으로 보인다.

1. 서론

1. 연구의 배경과 목적

일반적으로 교통류를 해석할 때 교통량, 밀도, 속도 등의 개념을 적용하여 거시적 관점에서 설명할 수 있으며, 미시적으로는 차량추종, 차로변경 등의 운전자행태를 이용하여 설명할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 이러한 교통류를 해석하는데 있어, 미시적 운전자의 행태인 차로변경, 특히 운전자의 효율을 극대화하기 위해 선택적으로 발생하는 차로변경에 대해 살펴보았다.

선택적 차로변경은 중차량의 영향, 선호차로 및 상대적으로 빠른 차로의 선택 등으로 발생하는데, 본 연구에서는 일반 도시부 가로에서 흔히 발생하는 빠른 차로로의 이동을 위한 운전자의 행태에 대해 살펴보았다.

차로변경은 다른 교통류 모형에 비해 다양한 상황에 따라 수행되는 운전자의 의사결정과정을 포함하기 때문에 매우 복잡하다.(Gipps, 1985) 이 때문에 기존의 차로변경모형은 의사결정과정과 차로변경의 중요한 요소인 간격수락을 반영하지 않은 채, 단순한 계산과정에 의한 모형으로 설명하려는 시도가 많았다. 즉, 차로변경의 기본구조는 간단하지만 다양한 교통상황에서 반응하는 운전자의 의사결정과정을 포함하기 때문에, 기본구조를 실제 모형화 하는데는 상당한 어려움이 따른다. 또한 차로변경은 결국 변경하고자 하는 차로에 수락간격이 존재하는가에 의해 변경여부가 결정되기 때문에 간격수락모형과도 결합된다.

따라서 현재까지 이러한 운전자의 의사결정과정과 간격수락을 포함한 모형은 거의 없었으며, 기존의 연구도 고속도로에서 발생하는 강제적 차로변경 상황에 한정되고 있는데, 특히 차로변경의 한 속성인 간격수락에 대한 연구에 많은 초점이 모아졌다. 하지만, 이는 단지 차로변경의 한 과정인 간격에 대한 수락여부라는 단순한 측면 밖에 보여주지 않기 때문에 차로변경의 다양한 측면을 설명하는데는 한계가 존재한다.

따라서 본 연구에서는 차로변경에 있어 중요한 두 요소인 운전자의 의사결정과 간격수락개념을 모형에 포함시키고자 하였다. 하지만 이러한 두 개념을 동시에 포함하는 모형은 현실적으로 어렵기 때문에 속도를 느낀 운전자가 목적차로의 적당한 간격을 수락

할 가능성을 보여주는 모형식을 구축하여, 수락가능 간격이 주어졌을 때 속도차가 운전자의 의사결정에 어떤 영향을 주는지에 대해 분석하였다.

2. 연구의 범위와 방법

일반적으로 차로변경이 발생하는 상황은 강제 차로변경(Mandatory lane changing)과 선택적 차로변경(Discretionary lane changing)의 두 가지 경우로 생각할 수 있다.(Ahmed et al., 1996) 강제 차로변경에서 주된 내용은 간격수락개념이며, 이는 많은 논문에서 이미 다루어진 내용이다. 그러나 선택적 차로변경에 대해서는 아직 많은 연구가 진행되고 있지 않고 있으며, 따라서 본 논문에서는 선택적 차로변경이 발생하는 경우를 모사할 수 있는 모형식 추정에 초점을 맞춰 연구에 임하였다.

차로변경의 복잡성으로 전반적인 차로변경 행태를 나타내는 모형식 개발은 거의 불가능하기 때문에, 본 논문에서는 선택적 차로변경에 영향을 주는 요소 중, 운전자가 수락가능한 간격을 발견한 경우, 차로별 속도차가 차로변경의 의사결정에 미치는 영향을 통계패키지(SAS)를 이용하여 분석하였다.

추정 모형식으로 로짓함수를 이용하였는데, 이는 차로변경의 행태가 속도차라는 효율에 대한 운전자의 반응으로 볼 수 있으며, 따라서 이러한 행태를 효과적으로 나타내는데 적합하기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 1)선택적 차로변경 모형의 기반이 되는 알고리즘을 구축하였으며, 2)현실에 타당한 이론적 모형식을 제시하여, 3)현장에서 수집한 자료를 이용하여 차로별 속도차를 변수로 하는 확률모형식을 만들어 다양한 관점에서 결과를 분석하였다.

II. 이론적 고찰

이 장에서는 차로변경 및 간격수락에 대한 기존 논문을 검토방향으로 각 교통상황에 있어서의 차로변경에 대한 다양한 접근을 시도했던 논문에 대해 검토한 후, 운전자의 의사 결정구조를 다루고 있는 Gipps (1985)의 논문과, 차로변경 가능성을 각 운전자의 행태와 간격수락에 대한 조건부확률로 표현한, Ahmed et al.(1996)이 1996년 Transportation and Traffic Theory 심포지움에 발표한 논문을 검토하였다.

간격수락모형에 대해서는 수락가능간격을 산정하기 위한 방법론 개발이라는 관점에서 임계간격의 추정 및 간격수락에 영향을 주는 요소 등을 중심으로 차로 변경시 고려되어야할 기본 요소들에 대해 살펴보았다.

1. 차로변경이론에 대한 기존 이론고찰

차로변경에 대한 이론은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 차로변경을 확률론적인 과정으로 보는 것이고 또 하나는 차량의 흐름을 연속된 유체의 흐름으로 분석 하는 것으로 전자는 Worrall(1971), Rorberch(1972) 등에 의해, 후자는 Gazis(1961), Munjal(1963) 등에 의해 연구가 이루어졌다.

1) 확률론적 접근방법

Worrall(1971)은 차로변경을 구성하는 요소를 차로변경의 발생빈도와 그 행태에 관한 것이라고 보고 식(1), 식(2)와 같이 발생빈도와 행태를 표현하는 식을 제시하였다.

$$\lambda = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{N_{ij}(t_m)}{L \cdot M \cdot t} \right\} \quad (1)$$

$$P_{ij} = \frac{[\sum_{m=1}^M N_{ij}(t_m)]}{[\sum_{m=1}^M V_i(t_m)]} \begin{cases} \text{if } i \neq j, & N_{ij} \geq 0 \\ \text{if } i = j, & N_{ij} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

여기서, $N_{ij}(t_m)$ 은 단위시간 t 동안 단위길이 L , 차로수 n 인 도로에서 차로 i 에서 j 로의 차로변경이 m 번째 간격에서 발생한 횟수이며, λ 는 단위시간과 단위길이에서 차로변경이 발생하는 빈도를 나타내며, $V_i(t_m)$ 은 단위시간 t 의 m 번째 간격 동안의 차로 i 의 교통량을 나타낸다.

이러한 기본개념과 함께 차로변경은 모든 차량에 대해서 발생하는 확률이 서로 독립적이라는 가정을 바탕으로 하여 식(3)과 같은 확률모형식을 제시하였다.

$$P(X_{ij}^{mt} = N) = \frac{\exp(-\lambda_{ij}^m) \times (\lambda_{ij}^m \cdot t)^N}{N!} \quad (3)$$

여기서, X_{ij}^{mt} 는 시간 t 동안 구간 m 내에서 차선 i 에서 j 로의 차로변경이 관측된 회수를 의미한다.

이 논문에서는 차로변경이 발생할 확률을 교통량과 차로변경 발생빈도의 함수로서 나타냈으나, 간격수락 및 운전자특성에 대한 변수는 모형내에 포함하고 있지 않고 있다.

또한, Rorbech(1972)는 운전자의 행태를 차로변경의 상태를 선택해 가는 마코프 과정으로 설명하는 확률모형을 연구하였다.

마코프 과정은 “어떠한 시도는 바로 이전의 시도에만 의존한다”는 일련의 기본적 가정을 전제로 하는데, Rorbech(1972)는 차로변경 이전의 상황과 차로변경 이후의 상황을 마코프 과정을 통하여 모형식으로 나타내었다. 즉, 시각 $t+1$ 에서 x_j 의 상태에 있을 확률은 시각 t 에서 각 상태확률에 모든 x_j 로 전이될 확률을 곱하여 통합하면 같아지게 된다. 시각 $t+1$ 에서 각각의 상태에 대한 상태확률은 식(4)와 같다.

$$P(t+1) = T \times P(t) \quad (4)$$

여기서, P 는 시각 t 와 $t+1$ 에서의 상태확률벡터이며, T 는 전이확률행렬인데, 모형에서는 상태확률벡터를 각 차로별 교통량 분포비율로, 전이확률행렬을 차로변경 확률로 적용하였다. 또한, 차로변경 확률은 두 차로의 교통량 분포의 차이에다가 열량분포와 감마분포의 누적확률식을 이용하여 구한 차두간격이 임계차두간격(3.28초)보다 클 확률을 곱해주어 구했으며, 이를 식으로 표현하면 식(5)와 같다.

$$P_{ij}(n) = [p_i(n-1) - p_j(n-1)] \times P(h \geq 3.28) \quad (5)$$

여기서, $[p_i(n-1) - p_j(n-1)]$ 은 $n-1$ 번째 구간에서 i 차로와 j 차로의 교통량 분포차이며, $P_{ij}(n)$ 은 n 번째 구간에서 i 차로에서 j 차로로 차로변경할 확률을 나타낸다.

이 모형은 다른 확률모형과는 달리 임계간격을 고려하였으나, 차로변경이라는 복잡한 상황을 단순한 행태로 가정하여 나타내었다는 한계를 가지고 있다.

2) 연속모형(continuum model)에 의한 접근방법

Gaziz, Munjal 등은 차로변경을 확률과정으로 보는 stochastic model이 가지고 있는 전이확률의 단순성을 지적하며 연속 방정식과 밀도의 진동원리에 기초한 연속모형을 제시하였다. 제시된 내용은 차로간의

이동을 완료하는데 필요한 상호작용 시간과 불연속적인 "속도-밀도" 관계나 평균도착율은 물론 시간에 따른 도착율과 같은 좀 더 현실적인 요소를 포함시켰다.

이러한 기본개념과 차로변경은 평형상태의 밀도와 차로간 밀도의 차이에 비례한다는 전제하에서 밀도차에 의한 연속모형식을 식(6)과 같이 제안하였다.

$$\frac{\partial q_i}{\partial x} + \frac{\partial k_i}{\partial t} = g + Q_i, \quad \frac{\partial q_i}{\partial x} + \frac{\partial k_i}{\partial t} = Q_i \quad (6)$$

여기서, t, x 는 각각 시간과 공간 좌표를 나타내며, q_i 는 i 번째 차로의 교통류율, k_i 는 i 번째 차로의 밀도, 그리고 q_i 는 차로별 차로변경율을 나타낸다.

이 모형은 다양한 상황하에서 발생하는 차로변경의 발생상황을 구분하지 않았을 뿐만 아니라, 차로변경에 있어 중요한 개념인 운전자의 의사결정과정과 간격수락개념을 고려하지 않았으나, 교통류를 분석하는데 있어 물리학적인 개념을 차로변경이라는 미시적 행태에 적용하였다는데 그 의의를 찾을 수 있다.

2. P.G. Gipps의 의사결정구조모형

이 논문은 차로변경 과정1에서 발생하는 운전자의 의사결정을 순차적인 과정으로 모형화 하였다. 즉, 한 운전자가 의사결정을 한 후 실행하는 행동방식에 관한 것이 아니라, 잠재적으로 상충하는 목적에 직면할 때, 어떻게 차로변경에 대한 의사결정이 이루어지는가에 대한 과정을 분석하는데 관심을 두고 있다.

이 모형은 차로변경에 관련된 몇 가지 질문을 제시하고 필요한 부분에 제약조건을 둬으로써, 합리적인 의사결정에 도달하도록 하는 구조를 가지고 있는데, 이러한 과정은 도시부 운전상황을 현실적으로 설명하려는 의도로서, 신호 및 중차량 등의 거의 모든 요소가 제약조건으로 제시된다.

이러한 제약조건들을 바탕으로 하여, 차로변경에 있어 우선적으로 중요한 몇 가지 질문을 함으로써, 행동결정에 있어 필요한 최소한의 의사결정과정을 보여주는 흐름도를 제시하고 있으며, 이러한 의사결정 과정에 따라 차로변경의 여부가 결정되는 모형을 제시하였다.

이 결정구조는 MULTISIM(Gipps & Wilson, 1980)의 매우 중요한 부분으로 쓰여졌으며, 오스트리아의

도시부 가로에서 실험되어, 다양한 상황에서 매우 타당한 것으로 판명되었다. 그러나 이 결정구조를 모형화하는데 있어, 운전자의 행태를 확일적으로 모사하였으며, 이러한 결정구조를 나타내는 모형의 모수들도 검증되지 않았다는 한계가 존재한다.

3. Ahmed 등의 이산확률모형

이 연구에서는 차로선택 모형을 이용하여 각 차로가 고려될 확률을 먼저 계산 후 수락가능한 간격을 탐색하여 차로변경 확률을 결정하는 구조를 가진 모형으로, 주된 특징은 차로변경 가능성과 간격탐색과정을 동시에 모형내에 포함하고 있다는데 있으며, 이러한 개념을 이용하여 강제 차로변경에 대한 모형식을 추정하였다.

이 논문에서의 차로변경 기본구조는 다음과 같은 행동의 선택과정으로 표현되는데, 우선, 교통상황을 고려하여 차로변경 여부를 결정한 후, 운전이 이익이 되는 차로를 선택하고, 선택차로에 수락가능한 간격을 탐색·발견하면 차로변경을 수행한다는 구조를 가진다. 여기서 제안된 간격수락모형은 현재까지 나온 모형들이 나타내지 못했던 운전자의 이질성반영과 state dependence(현재의 선택은 과거의 경험과 결정에 달려있다는 것)와 같은 한계를 잘 반영하고 있으며, panel data에 적합한 산정방법을 이용하고 있다.

또한, 운전자가 차로를 변경하기 위해 요구되는 최소한의 간격은 관찰되어 질 수 없는 것으로, 이러한 간격을 critical lead(lag) gap이라 하며, 이는 교통상황과 운전자에 의해 내려진 결정에 영향을 받는다 고 전제하였다. 이 논문에서는 운전자의 이질성 및 이러한 선택적 상황을 반영하여 임계간격을 Random 변수로 다루고 있다. 즉, ν_n 이라는 변수를 모형식에 추가함으로써 기존에 반영되지 못했던 운전자특성을 차로선택 및 간격수락모형에 반영하여 모형식을 구축하였다. 이러한 개념을 통해 구축된 차로변경모형은 binary logit함수형태로 가정되며, 시간 t 에 주어진 간격이 수락되어 차로변경이 발생할 확률은 식(7)과 같이 표현된다.

$$P_i(\text{차로변경} | \text{수락가능한간격}, \nu_n) = \frac{1}{1 + e^{-\mu^* z_n}} \quad (7)$$

여기서,

Z_m : 시간 t , 운전자 n 에 대한 설명변수 벡터

μ^T : 미지의 파라미터들의 벡터

결국, 이 연구는 차로선택과 간격수락에서 운전자 n 의 정보를 가지고 수락가능한 간격에 대해 운전자가 차로선택을 한 후, 차로변경을 수행할 확률을 결정하는 모형식이다.

이 연구는 기존의 모형들이 고려하지 않았던 여러 측면들을 반영한 모형을 구축하였는데, 강제차로변경에 대한 경우를 예로 들어 모형을 검증하였다.

따라서 본 연구에서는 이러한 모형구조(로짓모형)를 고려하고 현실적인 한계를 감안하여, 선택적 차로변경의 행태 중, 속도차로 인해 운전자가 차로변경의사선택을 할 확률, 즉 속도차가 차로변경이라는 의사결정에 미치는 영향을 분석하였다.

4. 간격수락모형(임계간격결정)

이 절에서는 수락가능간격을 추정하기 위해 간격수락에서 가장 중요하게 고려되는 임계간격의 추정이라는 관점에서 관련문헌을 검토하였다.

간격수락모형은 차로변경, 부가로에서 주가도로 진입, 비신호 운영교차로의 통과시 차량주행행태를 묘사하는데 이용되는 모형으로 용량분석에 주로 이용되어 왔는데, 간격수락모형에서 가장 중요한 것은 임계간격을 어떻게 결정하는가 하는 문제이다. 이러한 임계간격을 추정하는데 발생하는 어려움 중 하나는 관찰된 범위내에 그 운전자의 실제 임계간격의 확률분포는 여러 가지 상황에 따라 변하기 때문에 일정(uniform)하지 않으며, 근사값은 범위의 중간값 근처보다는 하한 경계값에 가까이 있다는 사실인데, 일반적으로 임계간격의 범위는 다음과 같다고 알려져 있다.

$$\text{Max}\{\text{rejected gaps}\} \leq \text{임계간격} \leq \text{수락간격}$$

일반적으로 임계간격의 추정은 HCM에서 정의한 방법을 많이 이용하고 있으나, HCM에서 정의된 임계간격은 많은 문제점을 내포하고 있어 현재까지 수

정·보완작업이 이루어져 왔음에도 불구하고 여전히 문제점을 내포하고 있는데, 이러한 문제점들은 모두 임계간격을 추정하는데 있어 수락된 간격자료만을 고려하기 때문이다. 따라서 보다 정확한 임계간격을 추정하기 위해서는 수락된 간격과 더불어 거부된 간격 또한 고려되어야 한다.

많은 학자들은 좀 더 신뢰성 있고 현실적으로 적용가능한 임계간격 추정을 위해 연구하였는데, 대표적인 학자로서 1960년대 초기의 Bissell 교수의 연구를 들 수 있다. 그는 임계간격을 "The medial probability of accepting a gap of a given size"로 정의하였다. 이러한 정의는 간격수락과 거부특성을 고려하고 있으며 HCM의 정의보다 우수하다고 알려져 있다.¹⁾

본 논문에서는 이러한 간격수락모형을 직접 적용하지 않고, 선택적 차로변경시 각 운전자에 의해 수락된 간격을 측정하여, 조사된 자료의 간격분포를 살펴보고 이 분포로부터 수락가능 간격을 결정하였다.

특히, 이러한 수락가능 간격은 직접 조사하여 구하는 것이 불가능하기 때문에, 간격을 수락한 운전자중 첫 번째 간격을 거부한 운전자들에 대해 수집된 자료를 분석하여 간접적으로 추정하였는데, 위에서 살펴본 간격수락모형을 고려해 본 결과, 본 연구의 목적에는 두 가지 방법이 다 적당하지 않기 때문에, 두 방법을 적절히 고려한 수락간격의 누적50%되는 간격을 수락가능간격으로 선정하여 분석에 임하였다.

III. 모형의 개발

1. 알고리즘 개발 및 모형식 구축

본 논문에서는 간격수락개념을 포함하는 선택적 차로변경모형, 특히 차로별 속도차를 효율함수로하여, 차로변경시 이 변수가 의사결정에 미치는 영향을 분석하였다.

문헌고찰에서 언급하였듯이, Gipps(1985)는 순차적 의사결정과정에서 운전자의 행태를 확일적으로 가정하였으며, 의사결정과정에 영향을 주는 모수에 대한 정산(calibration)은 하지 않았다는 문제가 있다.

그리고 Ahmed et al.(1996)은 차로변경의 가능

1) Wayne K. Kittelson & mark A. Vandehey가 이러한 정의를 이용하여 현장자료를 조사하여 검증하였음(TRR 1320).

성을 이산화물모형으로 제시하였는데, 실제 파라메타를 추정하여 구축된 모형은 강제 차로변경에 대한 확률식이었다. 그리고 여기에 간격수락개념을 포함시켜, 단일모형을 구축하였다.

따라서 본 연구에서는 위 두 연구에서의 장점은 취하고, 한계를 보완하여 두 모형에서는 언급하지 못한, 선택적차로변경에 대한 파라메타를 추정하고, 이에 대한 확률식을 구축하였다. Ahmed et al.(1996)이 구축한 강제차로변경 모형은 간격에 대한 수락 거부 개념이 모형식에 포함되었지만, 선택적차로변경 모형에서는 간격의 거부를 판단할 수 없으므로, 확률식에서 조건부 형태로 들어가게 된다.

따라서 Ahmed et al.(1996)은 차로변경시 먼저 각 차로가 고려될 확률을 구한 후, 간격의 수락여부를 결정하였으나, 본 연구에서는 선택적 차로변경의 특성상 수락가능한 간격이상에서 속도차로 인해, 각 차로를 고려할 확률을 결정하는 모형을 구축하였다.

그리고 본 연구는 속도차가 차로변경에 미치는 영향을 분석하는 것이므로 차로별 속도차 외의 다른 변수 즉, 선행차량과의 차두간격 및 차로별 교통량 변수 등의 영향은 제외하였다. 그러나 분석과정에서 모형의 설명력을 높이기 위해, 현차로의 속도 변수를 모형에 포함하여 추정하였다.

모형식에 대한 이러한 기본전제를 바탕으로, 현차로의 속도가 선행차로의 속도보다 낮고, 수락가능한 간격이 존재하면(Gipps의 의사결정구조를 적용) 즉, 차로변경이 가능하다고 하면, 한 운전자가 차로변경을 할 확률(Ahmed et al.의 이론 적용)은 식 (8)과 같은 조건부 확률식의 형태로 표현이 가능하다.

$$P_r(\text{차로변경} | \nu_n) = P_r(\text{차로변경} | \text{간격수락}, \text{속도차}, \nu_n) \times P_r(\text{간격수락} | \text{속도차}, \nu_n) \times P_r(\text{속도차} | \nu_n) \quad (8)$$

여기서 ν_n 은 운전자의 특성을 반영하는 벡터인데, 이를 모두 설명할 수 있는 ν_n 은 존재하지 않기 때문에, 이를 몇 가지 유형으로 나누어 설명하는 것이 타당할 것이나, 현실적으로 분석하는데 어려움이 많기 때문에 본 논문에서는 모든 운전자에 대해 동일한 값을 가정하였다.

또한, 간격수락모형에서 설명하였듯이 운전자별 임계간격의 추정은 매우 어렵고 복잡하기 때문에, 본

논문에서는 현장 조사된 자료를 바탕으로 수락간격에서 수락가능간격을 결정하여 모형식에 적용하였다.

본 연구에서는 차로변경모형을 이항로짓모형으로(차로변경할 가능성은 속도차로 인해 운전자가 느끼는 효용의 차이로 표현될 수 있기 때문)나타내었으며, 모형에 포함되는 효용함수(U)는 속도차 또는 현차로의 속도를 독립변수로 포함하였다.

특히, 변수선정에 있어 운전자의 희망속도 부분을 고려하였으나, 개별 운전자의 희망속도는 측정하기 불가능할 뿐만 아니라, 낮은 속도에서의 이러한 변수 반영은 모형식의 결정력을 떨어트렸기 때문에 모형식에서 제외하였다. 높은 속도의 경우 운전자는 희망속도에 가깝게 운행한다고 볼 수 있기 때문에 현차로의 속도가 이러한 부분에 대한 영향을 어느 정도 반영하는 것으로 나타났다. 이러한 내용을 바탕으로 개발된 모형식 기본형태는 식(9), 식(10)과 같다.

$$U(X) = a + b_1X_1 + b_2X_2 \quad (9)$$

$$\text{Logit}(P) = \text{Ln} \left(\frac{P}{1-P} \right) = a + b_1X_1 + b_2X_2 \quad (10)$$

식(10)을 P 에 대해 정리하면 식(11)과 같다.

$$P(\text{차로변경} | \text{Gap} \geq \text{Gap}_{cr}) = \frac{\exp(U(X))}{1 + \exp(U(X))} \quad (11)$$

여기서, X_1 은 속도차를 의미하며, X_2 는 현차로의 속도이다.

Gipps(1985)의 의사결정구조가 모형에 적용되기 위해서는, 의사결정을 판단하는 상황에 직면했을 때, 차로변경 여부를 결정하는데 필요한 각 요소의 기준 값이 결정되고, 개발된 확률모형식을 통해 운전자가 각 상황에서 행동하게 되는 행태를 확률적으로 결정하는 구조를 가져야 할 것이다.

본 논문에서는 차로별 속도차로 인해 선택적 차로변경을 수행하게 될 때, 이러한 속도차가 차로변경에 어떤 영향을 미치는 가를 자료를 수집하여, 모형식을 구축하였으며, 이 모형식을 분석하여 차로변경과 속도차 사이에 어떤 관계가 있는 지를 규명하였다.

이와 같은 방법으로 차로변경에 영향을 미치는 다른 요소들과 결합된 모형식을 추정할 수 있을 것이

며, 이로써 다양한 차로변경행태를 모사할 수 있는 모의실험기를 개발하여, 좀 더 현실적인 교통류 상황을 모사할 수 있는 기회를 제공할 것이다.

2. 조사지점의 선정 및 조사방법

본 연구의 목적을 감안하여 조사지점 선정하였는데, 각 차로별 속도차 외에 차로변경에 영향을 미칠 수 있는 다른 요소의 발생가능성을 배제하기 위해 조사지점은 다음과 같은 조건을 만족하는 도로구간으로 선정하였다.

- 조사지점 상·하류 500m내에 교차로 및 램프가 없어야 하며,
- 조사지점은 경사 및 굴곡의 영향이 적은 지점이어야 하며,
- 도로는 일반 도시부 가로이고, 중차량이 적은 지역일수록 유리하며,
- 차로의 속도분포가 다양한 지점일수록 유리하다.

본 논문에서는 위와 같은 조건을 만족하는 도로를 찾기 위해 사전조사를 수행하여 시흥IC에서 김포공항방면의 남부순환도로를 조사지점으로 선정하였으며, 이 구간 중 속도차에 의해 차로변경이 자주 발생하는 지점을 사전조사를 통해 선정하였다.

본 연구에서는 개봉2동 상우아파트 옥탑에서 비디오를 설치하여 해당구간을 촬영하였으며, 조사시간은 월요일, 목요일, 토요일 낮 시간과 퇴근시간으로 정하여 다양한 상황의 자료를 얻을 수 있도록 하였다.

본 연구의 목적이 속도차가 차로변경에 미치는 영향을 분석하는 것이므로, 중차량은 분석대상에서 제외하였기 때문에 차종은 한 차종(승용차, 소형버스 포함)만을 고려하였다. 따라서 간격 계산시 포함되는 차량길이는 일반 승용차(4.34m)와 소형버스(4.50m)의 평균길이 4.42m로 하였다.²⁾

3. 자료의 분석

조사된 자료를 분석한 결과 속도차는 0.05~11.52m/s

의 범위를 나타내고 있었는데, 로짓모형을 구축하기 위해서는 각 속도차 구간을 다시 범주값으로 환산하였다.(<표 1> 참조)

속도차에 따른 변경률을 분석한 결과 상이한 패턴을 보이는 두 개의 속도차 구간으로 구분하였는데, 낮은 속도차 구간의 경우 작은 속도차 변화에도 변경율이 민감하게 변했기 때문에 다시 0.5m/s구간으로 나누었으며, 높은 속도차, 즉 2m/s이상의 속도차를 보인 구간, 에 대해서는 1m/s 단위로 구간을 나누어 총 13구간으로 나누어 분석하였다. 분석된 자료의 속도차는 최저 0.05m/s, 최고 11.52m/s를 나타내었다.³⁾

<표 1>은 수집된 자료를 속도차 구간에 대해 정리한 결과인데, 속도차가 1.5~2.0m/s되는 구간에서 변경율이 가장 높았으며(<그림 1> 참조), 이를 경계로 감소하는 경향을 보였다.

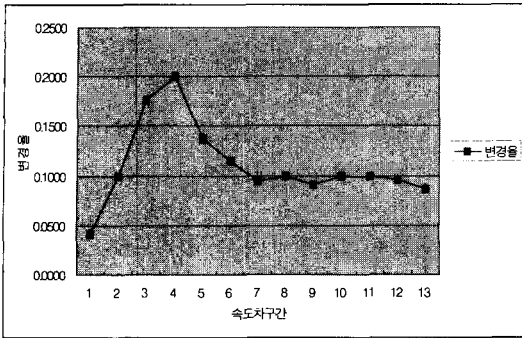
경계값을 기준으로 각 구간의 자료를 비교·분석한 결과, 이 값보다 작은 값으로 갈수록 각 차로의 교통량이 높아졌으며, 2m/s이상인 경우 속도차가 커질수록 교통량이 점차 감소하는 경향을 보였다. 이는 차로별 속도차와 교통량이 어느 정도 상관성을 가진다는 것을 보여주는 결과이며, 효율합수인 속도차에 대한 차로변경율이 비선형 형태로 변한다는 것을 의미한다.

<표 1> 속도차에 따른 차로변경률

범주값	속도차구 (m/s)	변경	유지	합계	변경율
1	0~0.5	1	23	24	0.042
2	0.5~1	3	27	30	0.100
3	1~1.5	6	28	34	0.176
4	1.5~2	4	16	20	0.200
5	2~3	4	25	29	0.138
6	3~4	3	23	26	0.115
7	4~5	2	19	21	0.095
8	5~6	2	18	20	0.100
9	6~7	2	20	22	0.091
10	7~8	2	18	20	0.100
11	8~9	2	18	20	0.100
12	9~10	2	19	21	0.095
13	10이상	2	21	23	0.087

2) 대한교통학회(1992), 도로용량편람, p.50.

3) 최고속도는 관측된 속도값의 최대값으로 적용함.



〈그림 1〉 속도차에 따른 차로변경률

따라서 선형함수인 로짓모형에서는 비선형 효용함수식을 쓸 수 없기 때문에, 경계값을 기준으로 두개의 모형식을 추정하였다.

본 연구에서는 이 경계값에 대해 각각 0~2.0m/s와 2.0~11.52m/s의 두 구간으로 나누어 두개의 모형식을 추정하였다.

4. 모형식 결정

1) 속도차 0~2.0m/s구간

이 구간 자료의 기초통계량은 〈표 2〉와 같다.

이 구간에서 속도차는 로짓모형의 적용을 위해 다시 4개의 범주로 나누었으며, 현 차로의 속도는 독립변수로서 의미는 있지만, 추가했을 경우 전체적인 모형의 likelihood ratio를 떨어트리기 때문에 분석대상에서는 제외하고, 속도차만을 독립변수로 하는 모형식을 추정하였다.

모형식은 절편을 추가했을 경우와 절편을 제외할 경우의 2가지로 추정하였는데, 모형식의 유의성은 절편을 포함하여 분석하였을 때에 더 타당하게 나타났기 때문에 절편을 포함한 모형식을 최종 선택하였다.

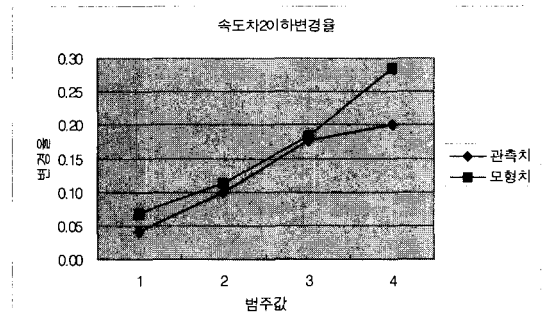
〈표 3〉에서 알 수 있듯이, 모형식 전체의 우도비는

〈표 2〉 속도차0~2.0m/s구간자료의 기초통계량

통계량 변수	자료수	평균	표준 편차	최소값	최대값
속도차	108	1.006	0.51	0.05	1.99
현차로 속도	108	14.18	3.11	5.79	20.01

〈표 3〉 속도차 0~2.0m/s구간의 모형식 분석표

MAXIMUM-LIKELIHOOD ANALYSIS OF VARIANCE TABLE					
Source	자유도	χ^2	확률		
절편	1	14.36	0.0002		
X	1	4.11	0.0427		
L.R	2	2.44	0.2950		
ANALYSIS OF MAXIMUM LIKELIHOOD ESTIMATES					
Effect	Para.	Est.	Std. Err.	χ^2	Prob.
절편	1	3.1804	0.8393	14.36	0.0002
X	2	-0.5642	0.2785	4.11	0.042



〈그림 2〉 관측치와 모형치의 변경률

0.295로 비교적 높은 값을 나타내고 있으며, 추정된 변량의 Chi-Square값 역시, 유의수준 95%에서 유의한 것으로 나타났다. 그리고 추정치의 표준오차가 추정치의 50%내에 있으므로 이 모형식은 타당하다고 볼 수 있다.⁴⁾ 선정된 모형식의 계수분석을 하면, $PS_b = \frac{1}{1 + \exp(-0.5642)} = 0.637$ 인데, 이는 이 속도차 구간에서 다른 조건이 일정하다면 어떤 차량이 차로변경을 수행할 가능성이 0.5라 할 때, 속도차가 한 단계 증가하면 차로변경을 수행할 가능성은 0.637로 증가한다는 것을 의미한다.

실제 관측치에서도 속도차가 한 단계 증가할 때, 변경율이 오차를 고려하여 거의 10%정도 증가하는 것으로 나타났으며, 이로써 개발된 모형식은 관측치를 유의하게 반영하고 있는 것으로 분석되었다.

〈그림 3〉은 관측치와 모형에 의해 도출된 결과를 비교하여 보여주고 있다.

4) 김충련(1996). SAS라는 통계상자.

2) 속도차 2~11.52m/s 구간

이 구간에 속한 자료의 기초통계량은 <표 4>와 같다.

모형식에 속도차에 대한 변수만을 포함시켰을 경우 전체적인 모형식의 결정력이 낮게 나타나, 현차로의 속도를 포함시켜 분석하였다. 일반적으로 차로별 속도차가 증가하면 변경을 또한 증가할 것으로 예상되나, 차로별 주행속도가 높을 경우 운전자가 차로변경시 감수하는 위험부담 역시 커지기 때문에 변경율은 오히려 감소하는 경향을 보였다. 이 경우 운전자는 희망속도에 근접하여 주행하기 때문에 굳이 위험을 감수하면서 차로변경을 수행하지 않을 것이라는 예상과 일치하는 결과이다. 이를 좀 더 구체적으로 살펴보면, 자료를 분석하는 과정에서 속도차가 5m/s 이상인 경우 차로변경을 수행한 차량들은 일정한 특징을 보여주었는데, 현 차로의 속도평균이 7.66 m/s (± 1.96 , max=11.36, min=5.38)로 비교적 낮았다. 이는 운전자들의 차로변경 행태에 있어, 현차로의 속도에 만족하지 못한 운전자들, 즉 희망속도와 많은 차이를 느낀 경우 차로변경을 했다고 볼 수 있다. 즉, 차로변경시 발생하는 위험보다 현 차로의 속도에 대한 불만이 더 큰 요소로 작용할 경우 5m/s이상의 속도차에서 위험을 감수하면서 변경을 하였다고 볼 수 있다.

이 값은 도로조건과 운전자의 성향에 따라 달라질 수 있는데, 도로설계시 이러한 점을 감안하여 각 차로별 속도차가 일정수준 이상이 되지 않도록 함으로써 차로변경으로 인한 사고를 줄이도록 설계할 필요가 있을 것이다.

따라서 모형에 현차로의 속도를 포함시키고, 절편의 추가여부를 대안으로 반영하여 모형식을 분석하였으며, 분석한 결과 절편을 제외했을 경우 좀 더 타당하게 나타났다.

<표 5>에서 보여주듯이, 모형식 전체의 결정력은 0.9959로 매우 좋았으며, 각 추정치의 오차 역시 무시할 정도로 낮았다.

<표 4> 속도차 2~11.52m/s구간의 기초통계량

통계량 변수	자료수	평균	표준편차	최소값	최대값
속도차	197	6.220	2.7143	2.04	11.52
현차로 속도	197	11.31	2.567	5.38	19.91

<표 5> 속도차 2.0~11.52m/s구간의 모형식 분석표

MAXIMUM-LIKELIHOOD ANALYSIS OF VARIANCE TABLE					
Source	자유도	χ^2		확률	
X_1	1	1.94		0.1637	
X_2	1	18.59		0.0000	
L.R	2	133.83		0.9959	
ANALYSIS OF MAXIMUM LIKELIHOOD ESTIMATES					
Effect	Para.	Est.	Std. Err.	χ^2	Prob.
X_1	1	0.0965	0.0693	1.94	0.1637
X_2	2	0.1423	0.0330	18.59	0.0000

그러나 속도차에 대한 Chi-Square값이 1.94로 상대적으로 낮게 분석되었는데, 이는 이 구간에서 속도차가 차로변경에 대한 영향이 그렇게 크지 않다는 것을 말한다. 이에 비해, 현 차로 속도값을 가지는 변수의 χ^2 값은 18.59로 매우 높게 나타나, 운전자의 희망속도와 실제 주행속도의 차가 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

이 모형식의 속도차와 현차로 속도에 대한 계수분석을 한 결과는 식(12), 식(13)과 같다.

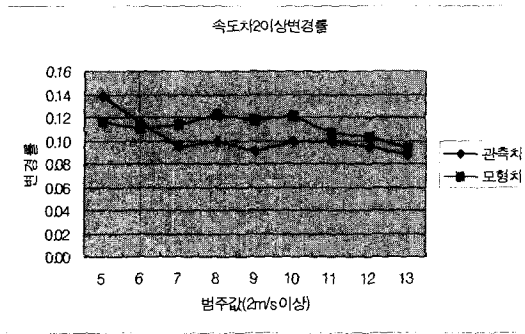
$$PS_{b_1} = \frac{1}{1 + \exp(0.0965)} = 0.476 \quad (12)$$

$$PS_{b_2} = \frac{1}{1 + \exp(0.1423)} = 0.464 \quad (13)$$

식(12)는 이 속도차 구간에서 다른 조건 즉, 속도가 일정하다면 어떤 차량이 차로변경을 수행할 가능성이 0.5라 할 때, 속도차가 한 단계 증가하면 차로변경을 수행할 가능성은 0.476으로 감소한다는 것을 의미한다.

그리고 식(13)은 일정 속도차에서 현 차로의 속도가 한 단계 증가할 때 그 운전자가 차로변경을 수행할 가능성이 0.464로 감소한다는 것을 의미하는데, 관측치와 비교해 봤을 때, 비교적 타당한 결과로 모형이 이 구간의 속도차에서 유의한 결과를 보여주고 있는 것으로 분석되었다.

<그림 3>은 실제 관측치와 모형에 의한 값을 비교한 결과이다.



〈그림 3〉 관측치와 모형치의 변경률

5. 모형평가

현장조사를 통하여 차로변경 확률을 분석하고 이를 토대로 구축된 모형을 살펴본 결과 선택적 차로변경 의사결정을 설명하는 변수로 차로간 속도차가 유의하다는 것을 알 수 있었다.

차로별 속도차가 미치는 영향은 속도차에 따라 다른 것으로 분석되었는데 즉, 속도차이가 2 m/s보다 작은 경우, 속도차가 0.5 m/s만큼 증가할 때마다 대략 10% 정도 차로변경률이 증가하였으나, 속도차이가 2 m/s보다 큰 경우는 속도차가 한 단계 증가할 때마다 차로변경률이 약 3%씩 줄어드는 경향을 보였다. 이 경우에는 차로별 속도차와 함께 차량의 운행 속도가 차로변경에 영향을 미치는 것으로 분석되었는데, 이는 현 차로의 속도가 높아질수록 운전자의 희망속도에 가까워짐에 따라 현 차로를 유지하려는 성향이 더 강하게 작용했다고 볼 수 있다.

이를 운전자의 행태측면에서 살펴보면, 차로별 상대 속도차가 일정 수준이 될 때까지 차로를 변경하지 않은 운전자는 다른 운전자에 비해 차로유지를 선호하는, 희망속도가 낮은 보수적인(conservative) 운전자일 것이며, 차로별 속도차가 커짐에 따라 보수적인 운전자의 비율이 커지고, 이에 따라 차로변경률이 작아지는 것으로도 추론할 수 있다. 또한 속도차가 클 경우 차로별 주행속도는 비교적 높게 나타났으나 차로변경율은 감소하였는데 이는 운전자의 성향외에도 현 차로의 주행속도가 운전자의 희망속도와 어느 정도 가까워졌기 때문에 위험을 감수하면서 차로변경을 수행하지 않을 것으로도 분석할 수 있다.

IV. 결론 및 향후 연구과제

1. 결론

본 연구에서 제시된 결과는 속도차가 차로변경에 미치는 영향을 보여주는 확률모형식이다. 그러나 본 연구의 의의는 수학적모형식 개발이라는 데 있기보다는 차로변경시 운전자의 의사결정을 하는데 있어 속도차라는 요소가 차로변경에 미치는 영향을 분석하기 위한 방법론을 개발한 것에 있다. 즉, 본 연구에서 개발된 방법론을 기반으로 선택적/강제적 차로변경에 영향을 미치는 요소들에 대한 수학적 모형화가 가능할 것이기 때문이다.

다음은 본 연구를 통해 얻은 몇 가지 결론을 정리해 보았다.

첫째, 속도차가 작은 구간에서, 속도차가 한 단계 변화시 약 10%의 차로변경 확률이 변화하였다. 또한 속도차가 큰 구간에서는 속도차가 한 단계 변화할 때, 확률은 대략 3%정도 감소하였으며, 현 차로의 속도에 대해서는 4%정도 감소하는 것으로 나타났다.

둘째, 일반적으로 차로별 속도차가 커질수록 차로변경율이 높아질 것으로 보이나, 실제 관측된 자료에 의하면, 어떤 값을 경계로 다시 감소하는 경향이 관찰되었는데, 이러한 경계값은 도로의 기하구조에 따라 달라질 수 있을 것이다.

셋째, 속도차가 5m/s이상인 경우 차로변경을 한 차량들은 일정한 특징을 보여 주었는데, 현차로의 속도평균이 $7.66(\pm 1.96, \max=11.36, \min=5.38)$ 으로 비교적 낮았다. 이 값은 도로조건과 운전자의 성향에 따라 달라질 수 있는데, 도로설계시 이러한 점을 감안하여 각 차로별 속도차가 일정수준 이상이 되지 않도록 함으로써 차로변경으로 인한 사고를 줄이도록 설계할 필요가 있을 것이다.

넷째, 차로별 속도차가 높게 나타난 경우, 각 차로의 평균주행속도 또한 높게 나타났는데 이 때 차로변경율은 속도차뿐만 아니라 현 차로의 주행속도에도 많은 영향을 받는 것으로 분석되었다. 이는 운전자의 희망속도와 주행속도의 차이가 어느 수준이하가 되면, 속도차로 인해 운전자가 판단하는 차로변경여부는 주변 차로에 대한 속도차보다는 현 차로의 속도에 더 많은 영향을 받는다는 것을 보여주는 결과이다.

이러한 현상은 교통량이 작은 도로에서 현 주행속도에 만족을 느끼지 못하는 운전자의 경우 차로를 변경함으로써 생기는 효용보다 현 차로의 속도를 희망속도에 가깝게 높임으로써 얻는 효용이 크기 때문에 차로변경의 가능성이 줄어드는 것으로 볼 수 있다.

2. 향후 연구과제

첫째, 임계간격을 결정할 때, 거부간격을 고려하는 것이 바람직하지만, 선택적 차로변경일 경우, 운전자 자신을 제외하고는 간격의 거부여부를 알 수 없기 때문 -이는 운전자의 의사결정여부를 알지 못하기 때문-에, 수락간격만을 가지고 임계값을 결정하였는데, 이는 향후 보완해야 할 점이다. 또한, 차로간의 속도차이가 클수록 차로변경을 위해 요구되는 수락가능간격은 커지게 되는데, 본 연구의 분석과정에서는 이러한 차이를 반영하지 못하고, 동일한 수락가능간격을 사용하였는데, 향후 차로별 속도 및 속도차에 따른 수락가능간격을 도출하여 분석에 적용한다면 좀 더 유의한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

둘째, 도로기하구조가 차로변경률에 대한 경제 속도차값에 어느 정도 영향을 주는지를 연구해 볼 필요가 있을 것이다. 즉, 운전자가 느끼는 희망속도가 도로의 기하구조에 따라 어떻게 변하는가에 대한 분석도 필요할 것이다.

셋째, 선택적 차로변경은 속도차뿐만 아니라 차두 간격 및 중차량에 의해서도 발생하는데, 이에 대해서도 추가적인 연구가 필요하다.

넷째, 본 연구에서 개발된 모형식의 효용함수는 차로별 속도차와 현 차로의 속도를 독립변수로 한 다항선형방정식으로 추정을 하였는데, 이는 좀 더 구체적인 검증이 필요한 부분으로 생각된다. 물론 모형식을 결정하기 위해서는 많은 대안모형과의 비교분석을 통해 결정해야 하지만, 효용함수를 다항선형회귀식으로 추정하여 정산결과 유의성이 있다고 나타났으므로 효용함수를 일차 선형회귀식을 적용하여 모형식을 개발하였다.

다섯째, 모형을 추정함에 있어, 자료구축시 실제 조사한 표본수는 600여 개에 달하였으나, 필요한 조건을 만족하는 표본을 추출한 결과, 자료수는 310여

개로 줄어들었으며, 이를 다시 속도차별로 나눌 경우, 각 해당 표본수는 평균해서 30여개 밖에 되지 않았는데, 이는 차로변경이라는 개별행태자료의 특성상 수집하는데 많은 제약조건이 따르기 때문이며, 향후 충분한 자료수집을 통한 모형식의 일반성을 검증할 필요가 있을 것이다.

여섯째, 추정된 모형식을 프로그램화하여 실제 교통상황을 제대로 모사할 수 있을 지에 대한 검증이 필요하다. 특히, 본 연구는 수락가능한 간격이 주어졌을 때, 현 차로 속도와 목적차로의 속도를 운전자가 비교하여 수락여부를 결정할 확률을 분석하였기 때문에 모형검증과정이 생략되었다. 하지만, 향후 이러한 확률모형식을 다른 도로에 적용시키기 위해서는 검증을 통한 모형식의 정립이 필요할 것이다.

참고문헌

1. 김충련(1996), "SAS라는 통계상자", 데이터플러스.
2. 대한교통학회(1992), "도로용량편람", p.50.
3. Donald R. Drew(1968), "Traffic Flow Theory And Control", McGraw-Hill, Chapter 9, pp. 173~222.
4. Kazi I. Ahmed, Moshe E. Ben-Akiva, Haris N. Koutsopoulos, Rabi G. Mishalani(1996), "Models Of Freeway Lane Changing And Gap Acceptance Behavior", Transportation and Traffic Theory, Pergamon, pp. 501~515.
5. P. G. Gipps(1985), "A Model For The Structure Of Lane-Changing Decisions", Transportation Research Part-B, Vol. 203, No. 5., pp.403~414, 1986.
6. R. H. Hewitt(1983), "Measuring Critical Gap", Transportation Science, Vol. 17, No. 1., pp.87~109.
7. Richard B. Darlington(1991), "Regression And Linear Models", McGraw-Hill, pp. 441~461.
8. Wayne K. Kittelson, mark A. Vandehey,

"Delay Effects On Driver Gap Acceptance
Characteristics At Two-Way Stop-Controlled

Intersections", Transportation Research Record
1320, pp.154~159.

✎ 주 작 성 자 : 정성봉

✎ 논문투고일 : 2002. 1. 9

논문심사일 : 2002. 2. 21 (1차)

2002. 3. 13 (2차)

2002. 7. 2 (3차)

2002. 11. 1 (4차)

심사판정일 : 2002. 11. 1

✎ 반론접수기간 : 2003. 4. 30