

■ 論 文 ■

# 차로이용률을 유도하는 차로변경모형의 개발

Development of a Lane Changing Model Yielding Realistic Lane Usage

**연 지 윤**

(한양대학교 첨단도로연구센터 연구원)

**장 명 순**

(한양대학교 교통시스템공학과 교수)

**김 진 태**

(한양대학교 첨단도로연구센터 연구교수)

**손 봉 수**

(연세대학교 도시공학과 부교수)

## 목 차

- I. 서론
    - 1. FRESIM 차로변경모형의 문제점
    - 2. 연구의 범위 및 목적
  - II 문헌고찰
  - III. 모형개발
    - 1. 현장조사
    - 2. 자료분석 방법
    - 3. 분석결과
  - 4. 차로변경 동기모형의 개발
  - 5. 모의실험 전산모형의 개발
  - IV. 모형검증
    - 1. 차로이용률 기준
    - 2. 차로별 주행속도 기준
  - V. 결론 및 향후과제
- 참고문헌

Key Words : 모의실험, 차로변경, 차로변경시간, 차로이용률, FRESIM

## 요 약

전산기술의 발달에 힘입어 근래에 모의실험을 이용한 연속교통류의 미시적 분석이 활발히 수행되고 있고 다양한 모의실험 전산모형이 소개되고 있다. 미시적 연속교통류 전산모의실험은 차량추종모형과 차로변경모형을 적용하여 다양한 운전자들의 차량운행태를 모사하여 분석하는 실험이다. 전산모형은 난수를 토대로 차량의 자유속도와 초기 발생 차로를 배정하기 때문에 낮은 자유속도를 할당받은 차량이 높은 속도의 차로(예:1차로)로 발생하는 경우가 발생한다. 많은 모의실험모형이 사용하고 있는 차로변경의 가정이 "운전자는 자신이 원하는 속도(자유속도)를 유지한다"는 것이며 그러한 가정만의 적용으로 인해 현실적이지 않은 차로이용률이 결과되고, 따라서 전산모형을 통한 교통류 흐름분석에 문제를 제공하고 있다.

본 논문에서는 미국 도로국에서 20여년 동안 개발되고 수정되어왔으며 현재 실용적으로 가장 많이 사용되고 있는 Freeway Simulation(FRESIM) 전산모형이 내재한 차로변경모형을 토대로 고속도로기본구간에서의 선택적 차로변경모형을 제시한다. 제시된 모형에서는 (1)저속의 선행차량이 고속의 후행차량에게 차로를 양보하는 가정이 새롭게 추가되고 (2)FRESIM모형에서 사용하는 상수값을 국내 현장조사를 통하여 도출된 분포식을 통한 값으로 대체하였다. 수집된 자료분석결과 연속 교통류에서의 15% 차두시간은 1.34초이며 차로변경시간은 평균 2.22초인 F분포를 따르고, 자유속도는 정규분포를 따르는 것으로 결과되었다. 모의실험결과, 무작위난수를 토대로 배정된 차로로 생성된 차량들이 새롭게 제시된 차로변경모형의 적용으로 현장 차로이용률을 95% 신뢰수준에서 모사하는 것으로 분석되었다.

본 논문은 과학기술부(한국과학재단)에서 지원한 첨단도로연구센터의 연구수행 결과입니다.

## 1. 서론

미시적 모의실험 전산모형은 개개의 차량 움직임을 (1)차량추종모형과 (2)차로변경모형의 적용으로 모사하여 교통류의 흐름을 분석하는 도구이다. 차량추종모형은 선행차량과 후행차량의 운행관계를 설명하는 모형으로 많은 교통공학자들에 의해 연구가 활발히 진행된 반면, 차로변경모형은 차로변경행태를 설명하기 위한 자료수집에 한계가 있어 상대적으로 연구가 미비한 것이 현실이다.

미국의 연방도로교통국은 연속교통류의 모의실험 도구로 Freeway Simulation(FRESIM) 전산모형을 개발하여 교통공학자들에게 제공하여왔다<sup>1)</sup>. FRESIM은 20여 년간에 걸쳐 여러 전문가들에 의해 내부적인 수학적 모형이 수정, 보완되어 왔기 때문에 현재로서는 타 모형에 비해 그 신뢰도가 높다. 예로 미국의 일부 주 교통국에서는 연속교통류의 모의실험에 FRESIM 모의실험전산모형을 사용할 것을 지침으로 정하고 있다. FRESIM 모형은 국내를 포함한 세계 여러 지역에서 다양한 교통류 모의실험에 널리 이용되고 있는 모형이기에, 기존에 개발된 차로변경모형 중 FRESIM의 차로변경 모형이 교통공학자들에게 실용적으로 가장 많이 사용되는 모형이라 할 수 있다.

### 1. FRESIM 차로변경모형의 문제점

FRESIM의 차로변경모형은 크게 (1)선택적(discretionary)차로변경모형, (2)강제적(mandatory) 차로변경모형, (3)예상적(anticipated) 차로변경 모형으로 구분된다<sup>1)</sup>. 선택적 차로변경 모형은 크게 세 가지 세부모형으로 나누어진다. 첫째는 차로변경 실시여부를 결정짓는 (1)차로변경동기모형, 둘째는 차로변경의사결정 후 차로변경 실시를 결정짓는 (2)간격수락모형, 셋째는 간격수락 후 차량이 실제로 인접차로로 이동하는 (3)차로변경이행모형이다. FRESIM의 차로변경모형은 (1)차로변경동기모형과 (2)차로변경이행모형에서 다음과 같은 문제점을 포함한다.

#### 1) 차로변경 동기모형

FRESIM의 차로변경동기모형은 운전자가 자유속도에 근접한 속도로 주행할 수 있는 차로로 차로변경한다는 가정을 토대로 한다. 그러나 그러한 가정으로

개발된 동기모형은 차로이용률을 배제하는 독립적인 모형으로 현실적인 차량흐름모사에 의문이 제기된다.

모의실험모형의 차량발생과 자유속도배정이 난수를 기준으로 결정되기 때문에 경우에 따라 낮은 자유속도를 할당받은 차량(예:트럭)이 주행속도가 높은 차로(예:1차로)로 배정되는 경우가 존재한다. 다음은 그러한 상황발생시 FRESIM모형의 문제점을 요약한 것이다.

1. 낮은 자유속도를 가지는 차량은 이미 자유속도로 주행하고 있어서 차로를 변경할 동기가 없다.
2. 낮은 자유속도를 가지는 차량이 주행속도가 높은 차로(1차로)로 목적지점까지 주행한다 (선택적 차로변경의 경우).
3. 높은 속도의 후행 차량들이 인접차로(2차로)로 차로변경하여 주행한다.
4. 이러한 차로변경으로 인하여 차로이용률 및 차로별 주행속도에 변화를 가져온다.

또한 FRESIM 차로변경 동기모형은 최소차두간격값으로 2초를 사용하고 있다. 이는 미국 도로용량편람에서 제시하고 있는 단속류의 평균차두시간과 동일한 값이다. 비단속류의 최소차두시간은 이와는 차이가 있을 것이라 예상되나 지침의 부재로 2초의 기본값을 지속적으로 적용하고 있다.

이러한 차로변경동기모형의 문제점 때문에 FRESIM 전산모형은 사용자가 직접 차량발생지점에서의 '차로당 차량발생률'을 입력값으로 조절하도록 제시하고 있다. 그러나 입력된 차로이용률은 차로변경모형의 영향으로 모의실험 진행과정에서 변하게 되므로 그 의미가 없다.

#### 2) 차로변경 이행모형

차로변경시간은 차량이 차로변경 과정동안 두개의 차로에 동시에 걸쳐 있는 시간이다. FRESIM의 차로변경이행모형에서는 차로변경시간을 사용자가 정의할 수 있도록 하고 있으며 기본값으로 1초를 쓰고 있다. 1초의 기본값은 비현실적인 값으로 추측되어 교통흐름이 모의실험을 통해 제대로 모사할 수 없을 것이라 예상된다. 하지만 변수값 선정의 기준이 되는 특정한 지침이 없어 1초의 기본값이 지속적으로 적용되어지고 있다. 현장조사를 통하여 차로변경시간에

대한 지침마련이 요구된다.

## 2. 연구의 범위 및 목적

본 연구는 FRESIM에서 사용하고 있는 차로변경 모형을 검토하고 기술된 문제점을 해결하는 새로운 차로변경모형을 개발/제시함을 목적으로 한다. 본 연구는 선택적 차로변경모형 중 (1)차로변경동기모형과 (2)차로변경이행모형의 개발을 세부연구범위로 정한다. 새로운 (1)차로변경동기모형과 (2)차로변경이행모형의 개발을 위하여 다음의 세부 연구목적 및 범위를 설정하였다.

1. 기존에 연구되어진 다른 차로변경모형들과 FRESIM 차로변경모형을 비교/검토하여 기존 연구된 차로변경모형들의 장점/단점과 모의실험모형으로의 적용가능성을 연구한다.
2. FRESIM모형에서 상수값(가정값: 1초)으로 사용되어지고 있는 차로변경시간을 현장조사를 통하여 분포식을 산정하고 이를 모형에 적용한다.
3. FRESIM모형에서 2초로 제시하고 있는 '최소차두시간'을 현장조사를 통해 평균과 표준편차를 반영한 분포식으로 대체한다.
4. FRESIM모형에서 기본값으로 정의하고 있는 '차량자유속도'의 분포를 현장조사를 통해 개선하고 그 분포식을 도출하여 모형에 적용한다(FRESIM 모형은 평균자유속도를 기준으로 10개의 값으로 변화(균일분포)하여 각 운전자의 자유속도를 배분하는 방법을 기본절차로 사용한다).

## II. 문헌고찰

운전자의 차로변경행태는 많은 외부요소들의 영향에 의해서 결정되어진다. 이러한 외부요소들 중 많은 부분이 주변차량 운전자들에 의하여 결정되어지므로 현장조사를 통한 자료수집이 매우 어렵다. 그런 이유로 현재 개발된 차로변경모형은 현장자료를 토대로 개발되어진 모형(empirical model)보다는 이론적 접근을 통한 모형(analytical model)이 주를 이룬다.

Gipps<sup>2)</sup>는 차로변경행태를 하나의 의사결정과정이라고 보고 '차로변경 구조모형'을 개발하였다. 그의 차로변경 구조모형은 일련의 조건문(If clause)을 토대

로 차로변경의 의사를 결정하는 하나의 가지(tree)구조로 되어있다. 그는 차로변경에 대해 운전자가 최종 목적지로 도달하기 위하여 적절한 차로의 지속적인 탐색과 적절한 속력을 유지하려는 노력의 산물이라는 가정을 가지고 모형을 개발하였으며 차중에 의한 영향은 작다고 보았다. 다음의 요소들이 운전자의 차로변경에 영향을 미친다고 Gipps는 정의하고 있다.

1. 차로변경의 물리적 가능성 및 안전성
2. 지속적인 장애가 일어나는 장소
3. 대중교통을 위한 전용차로의 존재
4. 운전자 의도에 의한 회전이동
5. 중차량의 존재 그리고 속력

Gipps 모형은 운전자가 차로변경하는 일련의 의사결정과정에 초점을 두었기 때문에 '의사결정도'형식으로 제시되어 있어 실제의 모형적용으로는 그 한계가 있다.

Ahmed<sup>3)</sup>는 운전자의 차로변경 행태가 '주어진 주변상황 하에 본인에게 높은 효용을 제공하는 차로를 선택하고 변경하는 과정'이라고 가정하고 이를 토대로 편도 3차로상의 차로선택 로짓(Logit)모형을 개발하였다. 다음은 Ahmed가 제시한 효용식으로 운전자  $n$ 이 차로  $i$ 로부터 시간  $t$ 에 가지는 효용( $U_{tmi}$ )을 추정한다.

$$U_{tmi} = r^T X_{tmi} + v_m + \epsilon_{tmi} \quad (1)$$

여기서,

$r$  : 파라미터(벡터)

$X_{tmi}$  : 외생변수들의 벡터

$v_m$  : 운전자 특성

$\epsilon_{tmi}$  : 시간  $t$ 에서 운전자  $n$ 의 특성

시간  $t$ 에 차량  $n$ 이  $L_1$ 차로로 차로변경을 할 확률은 식(2)로 추정된다.

$$P_n(L_1) = e^{U_{n1}} / (e^{U_{n1}} + e^{U_{ni}}) \quad (2)$$

Ahmed모형은 각 단계별로 차로를 변경할 것인지 변경하지 않을 것인지에 대한 판단을 확률로 추정하는 모형으로 운전자의 행태를 반영한 모형이라 할 수

있다. 그러나 이 모형은 운전자들의 강제적 간격수락 행태만을 고려한 것이다. 또, 차로변경의 동기부분을 설명할 수 없는 단점이 있다.

정성봉은 Gipps모형과 Ahmed모형에서의 접근을 수용하여 편도 2차로 상에서의 운전자 차로변경 의사 결정과정에 이은 간격수락행태를 설명하였다.<sup>4,5)</sup> 정성봉은 강제적인 외부조건이 없는 상황에서 선택적 차로변경에 따른 효용을 식(3)으로 추정하였다.

$$U_{L_i} = a^{L_i} + \sum b_j^{L_i} X_j + v_n \quad (3)$$

여기서,

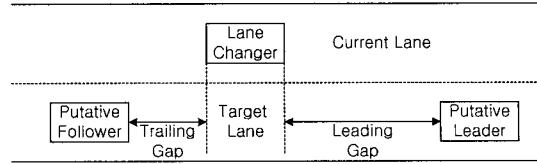
- $U_{L_i}$  : 차로 i의 효용
- $a$  : 파라미터
- $X_j$  : 외생변수들의 벡터
- $b_j$  : 파라미터
- $v_n$  : 파라미터

$X_j$ 는 차로 효용을 설명하는 변수로 (1)다른 차로와의 속도차이, (2)주행차로의 속도 등이다. 차로변경 의사 결정을 로짓(Logit)모형으로 구현하였다. 다음은 차로  $L_1$ 을 선택할 확률이다.

$$P(L_1) = \frac{e^{(a^{L_1} + \sum b_j^{L_1} X_j)}}{e^{(a^{L_1} + \sum b_j^{L_1} X_j)} + e^{(a^{L_2} + \sum b_j^{L_2} X_j)}} \quad (4)$$

정성봉모형은 선택적인 차로변경에 대한 모형을 설명하고자 하였다. 정성봉모형은 이론적으로 Gipps모형과 Ahmed모형보다 발전된 모형이다. 그러나 현실적으로 파라미터값의 도출(calibration)에 사용될 '간격거부 행태'는 현장조사를 통해서 수집하기가 어렵다. 예를 들어 현장자료 중, 차량이 차로변경을 실시하는 과정에서 간격수락이 되지 않아 차로변경을 하지 않는 것인지, 또는 차로변경을 하려는 운전자의 의도자체가 없는 것인지 구분하기가 어려워 모형의 정산이 현실적으로 어렵다.

미국의 연방도로국의 지원으로 개발된 FRESIM전산모형은 차로변경행태를 (1)'강제적(mandatory)차로변경', (2)'선택적(Discretionary)차로변경', (3)'예상적(Anticipated)차로변경'으로 나누어서 적용하고 있다. 또 그러한 차로변경 모형은 크게 (1)차로변경 의사결



〈그림 1〉 FRESIM의 차로변경 설명변수

정과정, (2)차로간격을 평가/수락하는 과정, (3)차로변경을 이행하는 과정으로 구성되어 있다.

이 중 간격수락행태는 차로변경과 목적차로의 후미 차량이 lead/trailing gap을 받아들이는지 거부하는지에 대한 결정을 하는 과정으로 lead gap이 받아들여지기 위해서는 차로변경 차량에 의해 acceptance risk를 초과하지 말아야 하는데 acceptable risk level은 차로변경 시 최대 감속도로 선언되어진다(〈그림 1〉 참조).

강제적 차로변경의 경우 차로변경 대상차로는 합류차로 또는 분류차로이며 이때 각 상황에 따른 가감속도를 계산하여 적용한다. 식(5)는 유입부의, 식(6)은 유출부에서의 가감속도를 결정하는 식이다.

$$a_1 = a_{\min} + (e - a_{\min}) \sqrt{\frac{d}{l}} \quad (5)$$

여기서,

- $a_1$  : 수용가능한 감속률(m/sec<sup>2</sup>)
- $a_{\min}$  : 최소수용 가능한 감속률(m/sec<sup>2</sup>)
- $e$  : 비상시 감속률
- $d$  : 차량과 유입램프 교어와의 거리(m)
- $l$  : 가속차로의 길이(m)

$$a = \begin{cases} e & , d > 200 \\ a_{\min} + (e - a_{\min}) \sqrt{\frac{d}{l}} & , d \leq 200 \end{cases} \quad (6)$$

여기서,

- $d$  : 상류부 유출램프 안내표지와와의 거리(m)
- $l$  : 유출램프와 안내 표지와와의 거리(m)

예상적 차로변경의 경우는 (1)차로감소(lane drop) 혹은 (2)하류부의 정체시에 적용되는 것이며 차로변경 대상차로는 인접차로(adjacent lane)이다. 차로변경차량의 가감속도는 식(7)로 계산된다.

$$a_1 = a_{min} + (e - a_{min}) \frac{d}{l} \quad (7)$$

여기서,

$d$  : 정체상황정보 표지와와의 거리(m)

$l$  : 정체상황정보 표지와 유고 또는 차로 소멸되는 시점까지의 거리(m)

선택적 차로변경의 경우, FRESIM 모형은 차로변경 동기를 각 차로에 대한 운행효용함수를 기준으로 계산한다. 운행효용함수는 운전자의 운행속도와 자유속도의 차이로 설명된다. 즉, 주행차로상의 선두차량으로 인하여 운전자가 원하는 속도(자유속도) 미만의 속도로 주행 시, 운전자는 자유속도에 보다 근접한 속도로 주행할 수 있는 차로로 주행차로를 변경한다.

FRESIM은 주행차로의 효용을 Lead factor( $F_L$ )로, 차로변경 대상차로의 효용을 Putative factor( $F_P$ )로 정의하고 이들을 토대로 차로변경 여부를 결정한다.  $F_L$ 은 차로변경 없이 현 주행차로로 주행시 운전자가 느끼는 비효용(disutility) 수준으로 0과 1 사이의 값으로 정의되며, 식(8)에 의해서 계산된다.

$$F_L = \begin{cases} 1 & , h \leq h_{min} \\ 1 - \frac{h - h_{min}}{h_{max} - h_{min}} & , h_{min} < h < h_{max} \\ 0 & , h \geq h_{max} \end{cases} \quad (8)$$

여기서,

$h_{min}$  : 최소 차두시간(sec)

$h_{max}$  : 최대 차두시간(sec)

$h$  : FRESIM 보정 차두시간(sec)

FRESIM보정 차두시간은 식(9)로 계산된다.

$$h = \frac{D_r - F_s v_d}{V_{ff}} \quad (9)$$

여기서,

$D_r$  : 현 차로에서 선두차량과의 간격(m)

$F_s$  : 임계속도 백터(default 값 2초)

$v_d$  : 선두차량과의 속도차이(m/sec)

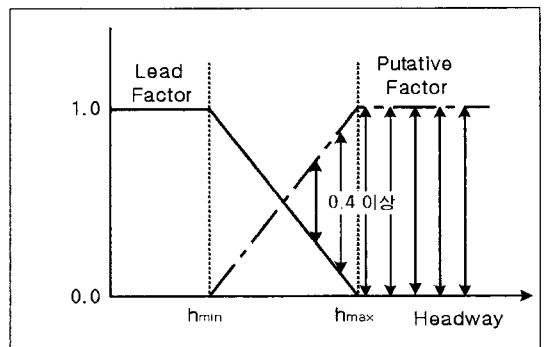
$V_{ff}$  : 운전자의 자유운행속도(m/sec)

$F_P$ 는 대상 차로로 차로를 변경함으로써 얻는 운전자의 효용수준(utility)이며, 수식(10)에 의해서 계산된다.

$$F_P = \begin{cases} 0 & , h \leq h_{min} \\ \frac{h_{max} - h}{h_{max} - h_{min}} & , h_{min} < h < h_{max} \\ 1 & , h \geq h_{max} \end{cases} \quad (10)$$

대상 차로로 차로를 변경하여 얻는 효용과 현 차로로 계속 주행함으로써 얻는 효용(disutility)의 차이가 0.4 이상일 경우 ( $F_P - F_L \geq 0.4$ ) 차로변경이 실시된다. <그림 2>는 이러한 판단과정을 도식화 한 것이다.

기존의 많은 차로변경모형이 운전자 행태분석을 위한 접근을 통하여 개발되었으며 이들 중 선형선택함수를 활용한 차로변경모형은 거부된 차간간격 자료수집에 그 한계가 있어 전산모형으로 적용하기에 어려움이 있다. 모의실험 전산모형에 현재 사용되고 있는 FRESIM 차로변경모형은 현실적인 차로이용률을 반영하지 못하는 단점이 있다. 이는 무작위 난수를 토대로 초기 생성차로가 결정되며 상황에 따라 차로변경모형에 의하여 주행차로가 변하는 과정에 대한 영향이다. 현재 모의실험 전산모형들은 균일분포, 또는 초기 사용자 지정분포에 의하여 발생하는 무작위 난수를 토대로 각 차량의 초기 생성차로를 설정하고 있으나 차량이 구간을 주행함에 따라 차로변경모형이라는 블랙박스에 따라 차로이용률이 변화하지만 이러한 차로이용률이 현실적인 차로이용률을 반영하지 않는다. 본 연구에서 현실적인 차로이용률을 모사하는 새로운 차로변경 동기모형을 개발한다.



<그림 2>  $F_L$ 과  $F_P$ 를 나타내는 개념도

### III. 모형개발

차로변경모형의 개발 및 검증을 위하여

- (1) 현장조사를 통한 교통특성자료수집
- (2) 차로변경모형의 개발

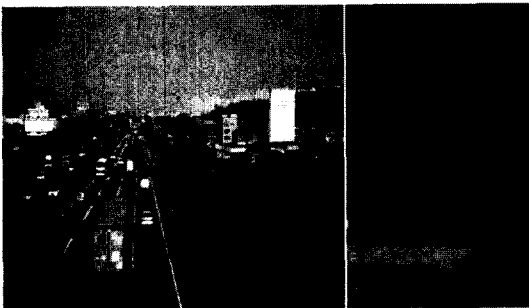
의 과정을 수행하였다. 현장조사를 통하여 수집된 항목은 (1)차로변경시간 분포, (2)최소차두시간, (3)자유속도분포, (4)차로이용률과 (5)차로별 평균주행속도이다. 앞의 세 개 항목은 모의실험 전산모형의 개발 및 적용에 사용된 항목이고 뒤의 두 개 항목은 차로변경 모형검증과정에서 사용하는 항목이다.

#### 1. 현장조사

현장조사구간으로 구배와 곡선부가 없는 4차로 고속도로 기본구간으로 조사구간 전후 2km 이내에 유/출입시설이 없는 구간을 선택하였다(고속도로 안내표지판이 유출부 전방 2km, 1km, 500m에 설치되어 있다). 유/출입부를 포함한 구간에서의 자료는 '강제적 차로변경'과 '예상적 차로변경' 자료를 포함하기 때문에 조사지점의 선정을 통해 강제적 차로변경과 예상적 차로변경 자료를 수집 자료에서 제외하였다.

현장조사시간으로 첨두시간에서 비첨두시간으로 전환되는 전이시간대를 조사하였다. 이는 다량의 자료수집을 위한 것으로 교통량이 극단적으로 적거나 많을 시 많은 수의 표본수집이 어려울 것이므로 예상하였기 때문이다.

경부고속도로 32.5km 지점 상행구간을 현장조사 지점으로 선정하여 주중(목요일) 4시간(오전 8시~12시)동안을 비디오로 녹화하였다. <그림 3>은 촬영된 현장조사구간과 촬영에 사용된 녹화 카메라이다.



<그림 3> 녹화된 현장화면과 녹화에 이용된 카메라

### 2. 자료분석 방법

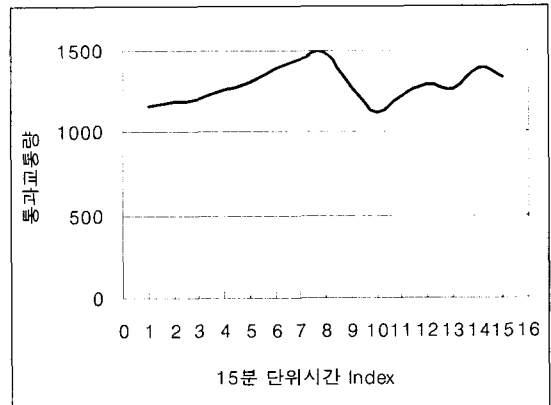
녹화된 비디오영상을 Camera and Computer Aided Traffic Sensor(CCATS) 영상분석기를 이용하여 분석하였다. CCATS영상분석기는 벨기에에서 개발된 것으로 차량의 영상화면을 동영상처리장치(Video Image Processing Board)에 입력시킨 후 이를 분석, 처리하여 필요한 교통정보(교통량, 속도 등)를 수집하는 장비이며 검지 오차는 5%이내이다.

최소차두시간 및 차로변경시간 분포의 경우 영상분석기를 이용한 조사가 불가하여 비디오 화상을 이용한 조사원 조사를 추가로 실시하였다. 비디오의 영상을 프로젝터로 재생시켜 10명의 조사원들이 스톱워치를 사용하여 차로변경시간자료, 최소차두시간자료와 자유운행속도를 추정하였다. 10명의 조사원들이 조사한 10개의 측정치 중 최대값과 최소값을 제외한 나머지 8개의 자료 값들의 평균값을 하나의 표본(sample)으로 사용하였다.

### 3. 분석결과

현장조사 시간동안 15분 단위 교통량의 변화는 <그림 4>와 같으며 이는 최소 4,492vph에서 최고 5,932vph 교통류율의 범위에 해당된다. 이는 교통량대 용량비율이 0.56~0.74 사이의 수준이다.

현장에서 조사된 차로변경시간, 최소차두시간, 자유속도분포, 차로이용률, 차로별 평균주행속도를 분석한 결과는 아래와 같다.

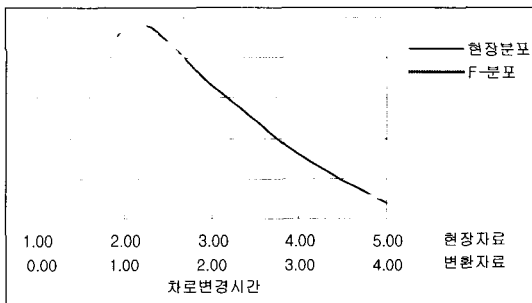


<그림 4> 조사된 교통류의 단위시간별 변화

1) 차로변경시간

수집된 차로변경시간 모두가 1초 이상의 값으로 분석되었다. 오차를 줄이기 위한 방법을 통하여 자료가 수집되었으며 그 내용은 자료분석방법에 제시하였다. 차로변경시간을 설명할 수 있는 분포식을 추정하기 위하여 조사된 자료 값에서 1초를 감하여 최소값을 0으로 하는 자료들로 변환(data mapping)하였다. 변환된 차로변경시간 분포와 이를 설명하는  $F(10,5)$  분포가 <그림 5>에 제시되었다. 그림의 수평축 시점을 1초로 하여 실제 현장 값을 나타낼 수 있도록 하였다.

현장자료와 정규분포, 감마분포, F분포들과 적합도 검정실험(Goodness-of-fit test)을 실시하였고 그 결과  $F(10,5)$ 분포가 현장 조사된 차로변경시간의 분포를 가장 높은 설명력으로 설명한다는 결론을 통계검정실험을 통해 도출하였다.  $F(a, b)$ 은 이론적으로 자유도 a과 b를 가지는 두개의 변수기 분자, 분모형태로 나타나는 하나의 무작위변수(random variable)의 분포를 나타내지만 차로변경시간의 경우 이러한 이론에 의하여 도출된 것이 아니며, 자유도 10과 5를 가지는 알지 못하는 두 변수의 조합에 의하여 나타나는 분포가 가장 차로변경시간을 잘 설명하는 것으로 결과 되었다. <표 1>은 이러한 검증결과를 나타낸 것으로 통계프로그램인 Statistical Analysis System (SAS)에서 도출된 결과이다. '차로변경시간은  $F(10,5)$  분포를 따르지 않는다'라는 귀무가설을 기각( $\alpha=0.05$ )하여 차로변경시간은  $F(10,5)$ 분포를 따른다고 분석되었다.



<그림 5> 차로변경시간 분포와 추정분포함수의 비교

<표 1> 차로변경시간 추정분포함수의 통계적 검정

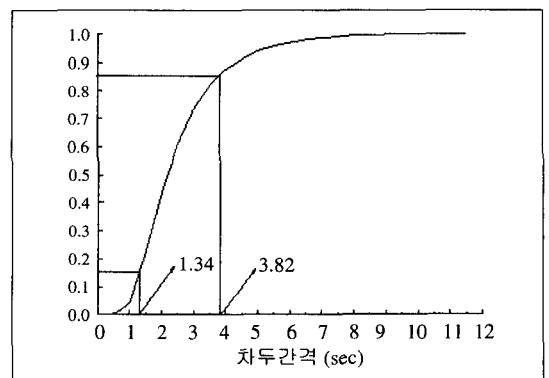
분포	검정통계량	$\chi^2_{0.05,4}$	귀무가설
정규분포	1.48	9.49	Reject

2) 최소 차두시간

최소차두간격은 4차로 고속도로 전 차로에서 차량군(platoon)내의 차두간격만을 대상으로 수집한 것이다(차두간격이 5초 이상일 경우 기존 차량군의 종료와 새로운 차량군의 시작으로 간주). 현장에서 조사된 그러한 차두시간 값을 최소값에서 최대값으로 정렬하고 이를 누적하였다(<그림 6>참조). 오차를 줄이기 위한 방법을 통하여 자료가 수집되었으며 그 내용은 자료분석방법에 제시하였다. 모의실험모형으로의 적용을 위하여 조사구간에서 관측된 차두시간분포를 기준하여 '15% 차두시간'으로 '최소차두시간'을 추정하였다. 15% 차두시간(최소 차두시간)은 1.34초, 85% 차두시간은 3.82초로 계산되었다.

FRESIM에서는 최소차두간격을 차로변경시 운전자가 순간적으로 감수할 수 있는 최대 부하수준으로 정의하며 이를 최소차두간격으로 반영하고 있다. 현장에서는 차두간격이 최소 0.4초까지 관측이 되었으나 이러한 극단적인 값을 대신하여 15% 차두간격인 1.34초를 이용하여 운전자 효율을 계산한다(참고로 FRESIM은 1초의 가정치를 사용).

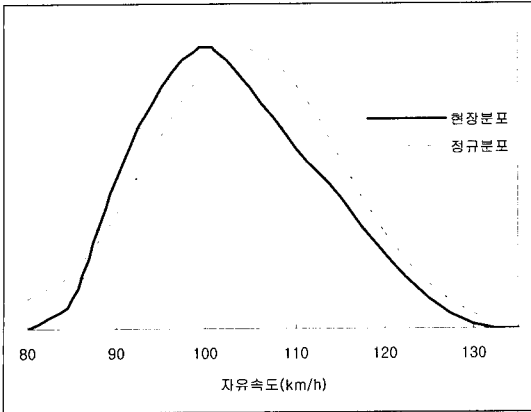
최소 차두간격은 포화 차두간격과 다르다. 포화상태에서의 교통류의 수준이 포화 교통류용이고, 이 때의 평균 차두간격이 포화 차두간격이므로 실제로 현장에서 관측되는 차간간격은 포화 차두간격보다 작을 수 있다.



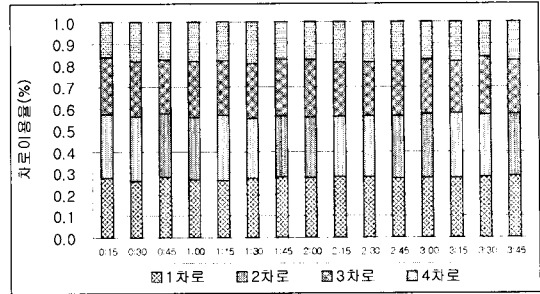
<그림 6> 최소 차두시간 산정을 위한 누적곡선

3) 자유속도 분포

현장조사에서 수집된 차량들의 자유속도분포와 이를 설명하는  $N(101.82, 10.63)$  분포가 <그림 7>에 제시되어 있다. 분석된 결과를 모의실험모형으로 적



〈그림 7〉 정규분포와 현장 자유유행속도 분포의 비교



〈그림 8〉 15분 단위 차로이용률의 변화

〈표 2〉 운전자 자유속도 추정분포함수의 통계적 검정

분포	검정통계량	$\chi^2_{0.05, 11}$	귀무가설
이용률	11.79	19.68	Reject

용하기 위하여 현장치를 설명할 수 있는 분포식을 선정하였다.

통계적 검증을 통하여 정규분포가 자유속도의 분포를 설명할 수 있다는 결론을 도출하였다. 적합도 검정은 통계 프로그램인 SAS를 사용하였고 실험결과는 〈표 2〉에 제시하였다. 검증 결과 현장분포는 정규분포를 따르지 않는다는 귀무가설을 기각( $\alpha=0.05$ )하였다.

4) 차로 이용률

조사자료 분석결과 차로이용률은 2차로, 1차로, 3차로, 4차로의 순으로 그 정도가 높은 것으로 판명되었다. 〈표 3〉은 현장조사에서 분석된 전체 평균 차로이용률이다.

차로이용률의 변동을 15분 단위로 구분하여 비교한 결과, 교통량 수준에 따라 큰 변화가 큰 변화가 없는 것으로 나타났다(〈그림 8〉 참조). 본 연구에서 사용하는 차로이용률은 '승용차환산 이용률'(거시적 분석에서 사용됨: 평균 중차량 차두간격 사용 승용차 환산)이 아닌 '차량이용률'이다.

〈표 3〉 현장에서 조사된 평균 차로이용률 (단위:%)

차로	1차로	2차로	3차로	4차로
이용률	0.26	0.31	0.25	0.18

5) 차로별 평균주행속도

〈표 4〉는 조사된 차로별 평균주행속도를 제시하고 있다. 1차로의 속도가 112.4km/h로 가장 높으며 4차로의 경우 89.7km/h로 가장 낮게 나타났다.

〈그림 9〉는 각 차로별 평균주행속도에 따라 분포식을 그래프로 나타낸 것으로 표준편차의 크기를 도식화한다. 차로별 주행속도의 표준편차는 1차로부터 4차로까지 각각 13.93, 8.73, 9.05, 11.92로 분석되었다.

모의실험에서는 개개 차량의 자유속도와 초기 주행차로를 무작위난수를 토대로 설정한다. 각 차량의 자유속도 설정을 위하여 현장 전체 차로 조사를 통하여  $N(101.82, 10.63)$ 의 분포를 도출하였으나 현장에서나 모의실험에서의 차량 각각의 자유속도는 최소 80km/h 에서 최고 130km/h 정도의 수준에서 평균 101.82km/h, 표준편차가 10km/h인 분포를 따른다(〈그림 7〉참고). 그러므로 1, 2차로의 경우 평균주행속도가 112km/h, 105km/h로 나타난 것은 고속주행 성향이 높은 차량(자유속도가 높은 차량)이 1, 2차로를 이용하여 주행한 것을 뜻하며 반대로 3, 4차로는 평균값보다 낮은 자유속도를 가지는 차량(예 중차량)들이 사용한 것을 나타낸다.

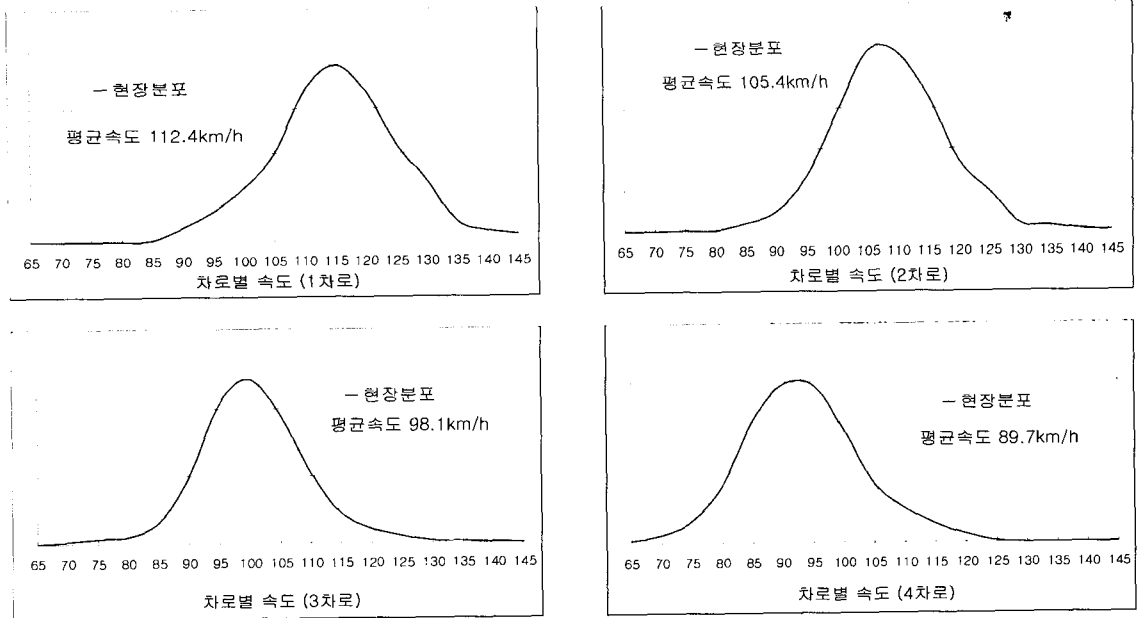
〈표 4〉 현장조사된 차로별 평균주행속도 (단위:km/h)

차로	1차로	2차로	3차로	4차로
주행속도	112.4	105.4	98.1	89.7

4. 차로변경 동기모형의 개발

FRESIM의 차로변경동기모형에 의해서 제약되지 않는 비현실적인 현상(낮은 자유속도의 차량이 고속주행차로로 생성/유입되었을 때 영향 받는 차로이용





〈그림 9〉 차로별 평균주행속도의 분포

률의 변화)을 통제하기 위해 다음의 가정을 설정하고 모형을 개발하였다.

1. 낮은 자유속도로 주행하고 있는 차량(차량A)의 후미에 높은 주행속도의 차량(차량B)이 근접할 시 이로 인해 운전자는 부담감을 느끼게 된다.
2. 차량A가 우측 인접차로로의 차로변경 후에도 자유속도로의 주행이 가능할 경우, 차량A는 차로변경을 실시한다.

즉, 낮은 자유속도로 주행하는 차량(차량A)의 후미에 높은 주행속도의 차량(차량B)이 근접하였고, 차량A가 차량 B로 인하여 느끼는 부담감을 피하기 위하여 우측 차로로 차로변경하여도 효용 값의 차이가 없는 상황이라면 우측 차로로 차로변경(양보의 목적)한다는 가정을 추가한다. 저속의 자유속도를 갖는 차량이 우측 차로로 차로변경하여 후행차량에게 본 주행차로를 양보를 하고, 이로 인해 도로의 좌측차로(고속 주행차로)가 우측차로(저속 주행차로)보다 (1)높은 차로이용률과 (2)높은 주행속도를 편파적(biased)으로 가지게 된다.

본 연구를 통해 새롭게 정의하는 '차로변경 동기모형'은 다음과 같다. 이는 선택적 차로변경모형에서 FRESIM이 사용한 모형을 토대로 응용한 것이다.

$$F_A = \begin{cases} 0 & , h \leq h_{\min} \\ \frac{h_{\max} - h}{h_{\max} - h_{\min}} & , h_{\min} < h < h_{\max} \\ 1 & , h \leq h_{\min} \end{cases} \quad (11)$$

$$F_B = \begin{cases} 0 & , h \leq h_{\min} \\ 1 - \frac{h - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}} & , h_{\min} < h < h_{\max} \\ 0 & , h \leq h_{\min} \end{cases} \quad (12)$$

$$P_{L_1} = \begin{cases} 1 & , F_A - F_B > \alpha \\ 0 & , F_A - F_B \leq \alpha \end{cases} \quad (13)$$

여기서,

$P_{L_1}$  :  $L_1$  차로로 차로변경하는 확률

$F_A$  : 차로를 변경함으로써 얻게 되는 이익(After Factor)

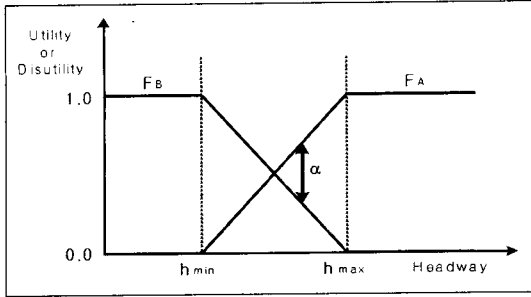
$F_B$  : 현 차로의 후미차량이 고속으로 접근함으로써 얻게 되는 불안감(Before Factor)

$h_{\min}$  : 최소 차두시간(sec)

$h_{\max}$  : 최대 차두시간(sec)

$h$  : FRESIM 보정 차두시간(sec)

$F_A$ 는 주행차로에서 기준차량과 차로변경 대상차



〈그림 10〉  $F_A$ 와  $F_B$ 의 개념

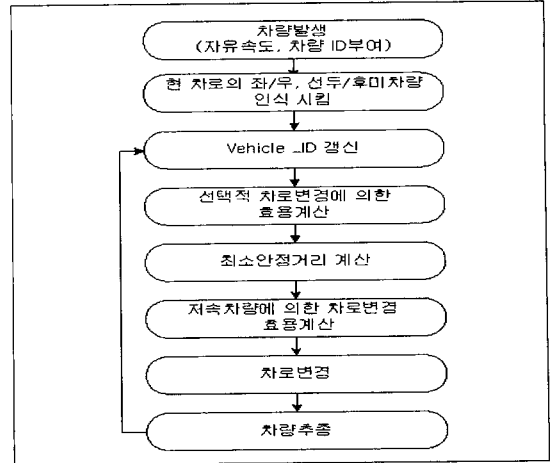
로(우측 인접차로)의 선두차량과의 관계이고  $F_B$ 는 주행차로에서 기준차량과 후미차량과의 관계로 고속으로 접근하는 차량으로 인한 불안감이다. 〈그림 10〉은  $F_A$ 와  $F_B$ 의 관계를 도식화한 것이다.

모형에 사용된 파라미터  $\alpha$ 값으로 FRESIM에서 사용되는 0.4를 채택하여 적용하였다.

### 5. 모의실험 전산모형의 개발

본 연구에서 제시된 차로변경모형의 실험 및 검증을 위하여 비주얼 베이직 컴퓨터 프로그래밍 언어를 사용하여 Hanyang Transportation Simulation(HYTSIM) 모의실험전산모형을 개발하였다. HYTSIM에 FRESIM의 차로변경모형도 탑재하여 (1)본 연구에서 제시된 차로변경모형과 (2)FRESIM 모형을 필요에 따라 적용할 수 있게 하였다. 〈그림 11〉은 HYTSIM의 입력 화면이다.

모의실험에서 개개의 차량은 차량발생시 자유운행 속도와 차량고유번호를 부여 받으며 난수를 토대로 생성차로를 할당(균일분포) 받는다. 매 단위시간마다



〈그림 12〉 시뮬레이션구현 흐름도

각 차량은 주변차량(주행차로와 인접차로에서의 선두 차량과 후미차량)들의 번호, 주행속도, 위치정보를 갱신한다. 이러한 주변차량정보를 토대로 차로변경모형과 차량추종모형을 적용한다. 〈그림 12〉는 HYTSIM의 이러한 차량모의실험절차를 요약한 흐름도이다.

차량추종모형은 김창모<sup>6)</sup>의 연구결과를 적용하여 주행속도가 90km/h 이상일 경우 식(14)에 제시되어 있는 모형을, 90km/h 미만일 경우 식(15)에 제시되어 있는 모형을 적용하였다. FRESIM모형은 차량추종모형으로 Pittsburgh 모형을 사용하지만, 본 실험에서는 차로변경모형의 영향만을 비교실험에 반영하기 위하여 동일한 차량추종모형을 적용하였다.

$$\dot{x}_{n+1}(t+T) = 11.11 \times \frac{\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)}{x_n(t) - x_{n+1}(t)} \quad (14)$$

$$\dot{x}_{n+1}(t+T) = 27.78 \times \frac{\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^2} \quad (15)$$

여기서,

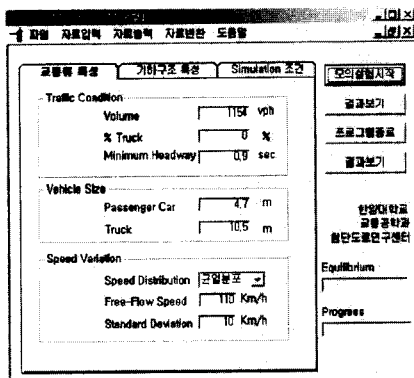
$T$  : 단위시간

$x_n(t)$  : 시간  $t$ 에서의 차량  $n$ 의 위치

$\dot{x}_n(t)$  : 시간  $t$ 에서의 차량  $n$ 의 속도

$\dot{\dot{x}}_n(t)$  : 시간  $t$ 에서의 차량  $n$ 의 가속도

모의실험 단위시간으로 FRESIM 모형과 본 연구를 통하여 제안된 모형의 비교를 위하여 1초를 이용하였으며 이는 FRESIM의 기본단위시간 값이다. 모



〈그림 11〉 시뮬레이션 프로그램 입력화면

의실험에서 차로변경시간은 반올림하여 적용하였다. 모의실험에서 차로 수, 구간길이, 교통량, 자유속도의 분포(중차량에 의한 영향을 포함함), 평균차량길이, 모의실험초기화거리(dummy link length), 모의실험시간이 통제되었다. 모의실험통제를 위한 입력자료 값으로는 현장에서 조사된 자료를 사용하였다. 출력자료로는 차로별 속도와 차로별 통과교통량이다. 출력값인 차로별 속도와 차로별 통과교통량은 구간(링크거리)의 85% 되는 지점에서 수집하였다.

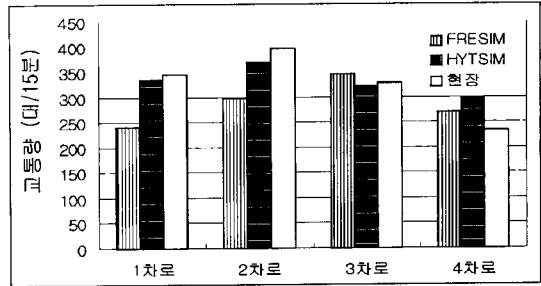
#### IV. 모형검증

HYTSIM모형을 이용하여 (1)본 연구를 통하여 제시된 모형과 (2)FRESIM차로변경모형을 적용하여 결과값들을 현장 관측치와 비교하였다. 본 연구를 통해서 개발된 차로변경 동기모형은 수집된 자료를 토대로 차로변경 행태를 조립하거나 학습시킨 경험모형(empirical model)이 아닌 이론과 가정을 바탕으로 개발된 수리모형(analytical model) 이고, 현장에서 조사 분석된 자료들이 모의실험상의 교통류 자유속도와 차로변경시간을 위해 적용된 것이지 차로변경동기 모형의 개발에 이용되지 않았다.

현장조사에서 수집된 동일한 교통조건과 기하구조 조건 하에서 1km 구간거리를 3,600초 동안 모의실험 전산모형을 통하여 분석하였다. 각 모형 당 10번(총 20번)의 모의실험을 10개의 난수 초기값(random seed number)으로 실시하였으며 그 평균값을 대표값으로 사용하였다. 모형의 검증지표로 차로이용률과 차로별 주행속도를 사용하여 쌍체검정(Paired *t*-test)을 실시하였다.

##### 1. 차로이용률 기준

차로이용률의 비교결과를 <그림 13>에 그래프로 제시하였다. 현장조사에서 차로이용률이 2차로가 가장 높으며 다음이 1차로, 3차로, 4차로 순으로 관측되었다. FRESIM차로변경모형을 이용한 모의실험결과는 3차로, 2차로, 4차로, 1차로의 순으로 현장조사 값과 상이하게 나타난 반면 본 연구를 통해 제시된 차로변경모형을 이용한 모의실험결과는 현장조사 값과 유사하게 2차로, 1차로, 3차로, 4차로 순으로 나



<그림 13> 차로이용률

타났다. 여기서 사용하는 차로이용률은 '승용차환산 이용률'이 아닌 '차량이용률'이다. HYTSIM모형은 고속도로 기본구간 안전주행상태에서의 중차량 가감속 능력이 승용차의 그것과 다르지 않다고 가정하여 중차량 집단을 낮은 자유속도 차량군으로(연속함수로 의하여) 차종별 구분없이 모의실험에 반영하였다. 이러한 미시적 모의실험모형의 결과로 도출되는 차로이용률은 '차량이용률'이며 이는 모든 기존 모의실험 전산모형에서 사용하는 차로이용률의 정의와 동일하다.

제시된 모형을 이용한 모의실험에서의 차로이용률이 현장에서 조사된 차로이용률을 설명할 수 있는지 가설검증을 실시하였다. 다음은 검증을 위하여 설정된 가설이다.

$H_0$  : 모의실험과 현장자료에서 차로 *n*의 이용률은 다르다.

$H_1$  : 모의실험과 현장자료에서 차로 *n*의 이용률은 같다.

가설검증으로 쌍체검정실험(paired *t*-test)을 SAS를 이용하여 실행하였다. 실험을 통하여 모의실험 결과가 현장에서의 차로이용률을 95% 이상 설명할 수 있다는 통계적 결론을 도출하였다(<표 5> 참조).

<표 5> 현장자료와 시뮬레이션 결과와의 비교

구분	검정 통계량	기각역	귀무가설 기각여부
1차로	-2.11	$-t_{0.05,11}/2 > \text{검정통계량}$ or $t_{0.05,11}/2 < \text{검정통계량}$ ( $t_{0.05,11}/2 = 0.898$ )	Reject
2차로	-1.55		Reject
3차로	-2.21		Reject
4차로	16.17		Reject

## 2. 차로별 주행속도 기준

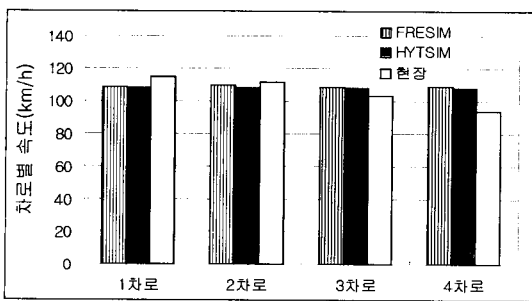
현장조사, FRESIM차로변경모형을 이용한 모의실험, 제시된 차로변경모형을 이용한 모의실험에서 얻어진 차로별 주행속도 값들을 <그림 14>에 도식화 하였다. 현장에서는 1차로에서의 주행속도가 가장 높으며, 그 다음이 2차로, 3차로, 4차로 순으로 나타났다. 반면에 FRESIM차로변경모형과 제시된 차로변경모형을 이용한 모의실험결과와는 각 차로별 주행속도가 크게 상이하지 않게 나타났다.

제시된 차로변경모형을 이용한 모의실험에서의 차로별 주행속도가 현장치를 설명할 수 있는지 검증하기 위하여 가설 검정을 실시하였다. 다음은 검증을 위하여 설정된 가설이다.

$H_0$  : 모의실험결과와 현장에서 조사된 차로  $n$ 의 주행속도는 다르다.

$H_1$  : 모의실험결과와 현장에서 조사된 차로  $n$ 에서의 주행속도는 같다.

가설검정으로 쌍체검정실험(paired  $t$ -test)을 SAS를 이용하여 실행하였다. 실험을 통하여 모의실험결과가 현장에서의 차로별 주행속도를 95% 이상 설명할 수 있다는 통계적 결론을 도출하였다(<표 6> 참조).



<그림 14> 차로별 속도분포

<표 6> 현장자료와 시뮬레이션 결과와의 비교

구분	검정 통계량	기각역	귀무가설 기각여부
1차로	-1.86	$-t_{0.05,11}/2 > \text{검정통계량}$ or $t_{0.05,11}/2 < \text{검정통계량}$ ( $t_{0.05,11}/2 = 0.898$ )	Reject
2차로	-2.33		Reject
3차로	7.63		Reject
4차로	15.49		Reject

제시된 차로변경모형으로 변화된 차로이용률의 영향을 받아 변화될 것으로 기대되었던 차로별 속도는 모의실험결과 그다지 크지 않은 것으로 결과되었다.

## V. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 고속도로 시뮬레이션 분석에 국제적으로 사용되고 있는 FRESIM모형에서 사용되고 있는 선택적 차로변경 모형 중 새로운 (1)차로변경 동기모형과 (2)차로변경 이행모형을 개발하여 새로운 선택적 차로변경모형을 제시하였다. 모의실험에서의 차량생성이 난수를 기초로 한 무작위 초기차로배정임을 감안하여 현실적인 차로이용률을 유도해 내는 차로변경모형을 개발하였다. 새로운 모형의 검증을 위하여 비주어일 베이직 프로그래밍 언어를 사용 HYTSIM 모의실험모형을 개발하였다. 현장조사를 통하여 발견한 사실과 현장자료와 제시된 차로변경모형을 이용한 모의실험과 FRESIM차로변경모형을 이용한 모의실험에서 도출된 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1. Logit 모형을 이용한 차로변경모형은 수락거부 차간간격 자료를 수집할 수 없어 전산모형으로의 적용에 그 한계가 있다. FRESIM 차로변경모형은 차로변경 결정여부를 단순화된 수리모형(analytical model)에 의지하여 현실적인 차로이용률을 모의실험에 반영하지 못한다.
2. 고속도로 기본구간에서의 운전자의 차로변경시간은 평균 2.29초이며 표준편차가 0.77초인  $F$ -분포함수를 따르는 것으로 조사되었다.
3. 고속도로기본구간에서의 누적 15% 최소 차두시간은 1.34초로 조사되었고 FRESIM에서 사용하고 있는 최소 차두시간인 2초는 도심부 평균차두시간과 같은 값으로 현실적이지 못하다.
4. 조사지점인 고속도로 기본구간에서 운전자 자유속도 분포는 정규분포를 따르는 것으로 조사되었다.
5. 국내 고속도로 기본구간 4차로 고속도로에서의 차로이용률은 6시간자료를 15분 단위로 차로이용률을 분석한 결과 1차로, 2차로, 3차로, 4차로별로 0.26, 0.31, 0.25, 0.18 인 것으로 조사되었으며 조사지점에 따른 편차는 적은 것으로 도출되었다.
6. 낮은 자유속도를 가지는 차량이 높은 주행속도를 가지는 후미차량의 접근으로 생기는 불안감으로

차로변경하는 동기모형의 추가로 기존 모형보다 보다 현실적인 차로이용률을 유도해 낼 수 있다.

본 연구는 FRESIM 차로변경모형에서의 차량흐름의 무작위성(고속주행차량과 저속주행차량이 서로의 주행관계를 고려하지 않고 오로지 무작위 난수에 의해 생성되며 이가 차로변경에 의해 보정되지 않음)의 문제점을 발견하고 이를 수정하기 위한 노력으로 새로운 차로변경 동기모형을 개발하여 차로변경모형에 추가하였다. 모형의 평가를 위해 사용된 현장자료의 한계로 인하여 제안된 모형의 일반적인 필요성을 판단하기에는 어려움이 있다. 본 연구는 단순히 난수에 의하여 차량흐름특성이 결정되는 기존의 모의실험모형의 문제점을 발견하고 차량운행특성에 따라 저속차량은 도로의 우측 차로들을 이용하게 하는 새로운 차로변경 동기모형을 모의실험모형에 부여하여 보다 현실적으로 차량흐름이 모사되는 실험을, 차로변경 모형개발 학문분야에 논쟁주제를 그리고 차로변경모형의 발전방향을 제시하는 것으로도 그 의미가 크다.

차로변경 모형 및 본 연구에서 제시하는 차로변경 동기모형의 발전을 위하여 다음을 향후연구과제로 제시한다.

1. 본 연구에서 평가를 위하여 사용된 현장자료는 단일구간에서 수집된 것이고 근포화와 저포화 교통상황이 포함되지 않은 자료이다. 이것은 고속도로 기본구간 교통류특성을 유지하면서 높은 지점에서의 촬영이 가능한 현장조사지점선정이 용이하지 않았기 때문이다. 보다 다양한 상황을 반영하는 현장자료를 수집하여 과포화, 저포화 상태 하에서 본 논문이 제안하는 모형을 이용한 모의실험 결과와 현장자료와의 비교연구를 향후과제로 제시한다.
2. 모형에 사용되어진 간격수확률은 효율값을 토대

로 0.0과 1.0 두 가지 값으로 결정된다. 즉, 모든 운전자에 대해 획일적인 효율값이 적용된다. 다양한 운전자 형태(type)를 반영할 수 있는 효율값의 개발을 향후과제로 제시한다.

3. 차로별 주행속도의 현실적인 반영을 위해 차로별 운전자의 운행행태에 대한 분석이 있어야 한다. 운전자의 차로별 주행선행호는 기존의 차량추종모형과 차로변경모형으로는 설명되지 않는다. 운전자의 차로별 선행호를 설명하는 모형의 개발을 향후연구과제로 제시한다.
4. 본 연구에서는 모의실험 단위시간이 FRESIM 모의실험 단위시간인 1.0초를 사용하였다. 차로변경모형과 차량추종모형의 보다 세밀한 분석 및 검증을 위하여 본 연구에서 제시한 모형을 0.1초 단위로 적용, 검토하는 것을 향후연구과제로 제시한다.

### 참고문헌

1. Abolhassan Halati(1997), "CORSIM - Corridor Traffic Simulation Model", Transportation Research Board 76th Annual Meeting.
2. Gipps, P. G.(1986), "A model for the structure of lane-changing decisions", Transportation Research Part B. Vol.203.
3. Ahmed, K. I.(1996), M. E. Ben-Akiva, N. Haris, "Models of freeway lane changing and gap acceptance behavioral", Transportation and Traffic Theory.
4. 정성봉(1998), "차로별 속도차가 차로변경에 미치는 영향에 관한 연구", 서울대학교 석사학위논문.
5. 박창호(1999), "교통관리 효과분석을 위한 모의실험모형 개발", 서울대학교 공학연구소.
6. 김창모(2000), "차량추종모형 시뮬레이션 프로그램 개발", 한양대학교 석사학위논문.

✉ 주 작 성 자 : 김진태

✉ 논문투고일 : 2002. 4. 12

논문심사일 : 2002. 7. 2 (1차)

2002. 7. 19 (2차)

2002. 7. 22 (3차)

심사판정일 : 2002. 7. 22

✉ 반론접수기간 : 2003. 2. 28