▣ 論 文 ▣

소형 삼지 회전교차로의 용량분석을 위한 승용차 환산계수에 관한 연구

Determination of Passenger Car Equivalents When Estimating Capacity at Small 3-leg Roundabouts

이 용 재 (중앙대학교 도시공학과 교수)
이 인 경 (중앙대학교 도시공학과 석사과정)
이 동 민 (한국교통연구원 연구위원)

목 차

Ⅰ. 서론
Ⅱ. 선행연구
1. 차두시간기반 방법
2. 속도기반 방법
3. 밀도기반 방법
4. 통행시간 또는 지체기반 방법
Ⅲ. 실험모형의 정산
Ⅳ. 실험결과에 대한 평가
Ⅴ. 결론
참고문헌

Key Words : 승용차 환산계수, 효과척도, 용량, 제어지체, 회전교차로
PCE, MOE, Capacity, Control Delay, Modern Roundabout

요 약

이 연구는 다양한 차종의 차량이 혼합되어 운영되는 소형 3지 회전교차로에서 용량과 지체를 산정할 때 고려될 수 있는 새로운 형태의 승용차 환산계수의 모형과 이를 이용한 보정계수의 개발에 관한 것이다. 연구를 위하여 현재 회전교차로의 효과척도로 사용되고 있는 제어지체(Control Delay)를 기반으로 한 산정모형을 개발하고 현장에서 직접 수집한 실험자료를 적용하여 결과를 도출하고, 이를 이용재 외(2001)에서 제의한 모형의 결과와 비교 분석한다. 신호 교차로와는 달리, 회전교차로에서는 아직 중차량에 대한 영향을 객관적으로 감안할 수 있는 승용차 환산계수의 모형이 아직 제시되고 있지 않다. 두 가지 접근법에 의한 분석의 결과는 상호 높은 상관성을 보이고 있으며, 외국의 다른 연구결과와도 유사한 결과를 보이고 있어 향후 이 분야의 연구에 도움을 줄 것으로 판단된다.

This study aims at developing a method for estimating passenger car equivalency (PCE) values for various vehicle types that could be considered in estimating capacity and delay at intersections without traffic signals, especially at modern small 3-leg roundabouts. Unlike signalized intersections, the PCE value has not yet been treated explicitly in traffic operations involving unsignalized intersections. Both empirical and theoretical approaches for determining the PCE values at modern small 3-leg roundabouts were evaluated. As a result, the PCEs derived in this study were highly correlated with those of field measurements.

이 논문은 2006년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

Ⅰ. 서론

승용차 환산계수(Passenger Car Equivalents; PCE)라는 용어는 1965년 미국 도로용량편람(HCM)(1965)에서 처음 사용된 것으로 알려져 있으며, 아래와 같이 정의하고 있다.

"The number of passenger cars displaced in traffic flow by a truck or a bus, under the prevailing roadway and traffic conditions."(HCM)(1965)

일반적으로 도로의 용량이나 지체분석에는 대개 차로당 한 시간 단위의 승용차 단위로 환산된 PCE 단위로 표현하게 된다. 특히 혼합된 교통류가 존재할 때의 상황에서 용량이나 지체시간을 추정할 때 중요한 변수는 중차량의 승용차 환산계수 값이다. 하지만 용량이나 지체시간의 추정과정에서 이런 유형의 연구가 중요함에도 불구하고, 대부분의 방법은 여전히 차량의 종류, 교통량, 교통류의 중차량 비율과는 관계없는 상수 값의 승용차 환산계수를 이용한다. 이 결과는 용량이나 지체시간을 분석할 때 심각한 오류를 초래할 수 있다.

교통류에서 중차량의 영향은 크게 두 가지 요인에 기인하고 있다. 먼저, 중차량에 의한 차간거리(Gap Spacing)는 승용차의 것보다 길다. 이는 주로 중차량의 크기가 일반적으로 승용차보다 크고 중차량이 앞이나 뒤에 있을 때의 차간시간(Time Gap)이 승용차만 있을 때보다 상대적으로 길기 때문이다. 둘째, 가속도와 감가속도 기동성 등과 같은 중차량의 운영 특성이 승용차와는 현저히 다르다.

많은 연구 중에서도 Krammes과 Crowley(1986) 그리고 Webster와 Elefteriadou(1999)의 연구에 따르면 승용차 환산계수는 교통운영을 분석하는 시설의 서비스 수준(Level of Service; LOS)을 정의하는 효과척도(Measure of Effectiveness; MOE)를 기반으로 추정해야 한다고 주장한다. 예를 들면 도로용량편람에서는 고속도로의 기본구간에 대한 서비스 수준을 정의하기 위해서 교통 밀도를 효과척도로 사용하고 있기 때문에, 고속도로 기본구간에서의 승용차 환산계수의 값은 이 교통 밀도를 기반으로 결정해야한다는 뜻이다.

위의 주장을 이 연구에 적용한다면 회전교차로에서의 승용차 환산계수 값은 제어지체에 기반을 두어 추정해야 한다. 왜냐하면, 현재 적용하고 있는 미국의 도로용량편람(TRB, 2000)에서는 비신호 교차로의 효과척도는 제어지체이기 때문이다. 우리나라에서는 아직 회전교차로의 효과척도에 대한 공식적인 언급은 없으나 호주와 영국 등 회전교차로가 활성화되어 있는 국가에서는 제어지체를 효과척도로 사용하고 있음을 상기할 때 본 연구에서도 이를 효과척도로 사용해도 큰 무리가 없을 것으로 생각된다. 운전자의 제어지체는 일반적으로 초기 감속에 따른 지체, 대기행렬 내에서 정지지체 그리고 마지막 가속에 따른 지체가 포함된다.

이 연구는 승용차 환산계수에 대한 일반적 접근방법을 통하여 결과를 추정하고, 이용재 외(2001)에서 제안한 비신호 교차로의 중차량 용량 보정계수에 관한 연구와 비교분석을 통하여, 새로운 승용차 환산계수의 모형과 이를 이용한 보정계수의 유용성을 밝혀 주고 있다. 본 연구에서는 Sumner 외(1984)가 개발한 승용차 환산계수의 산정모형을 활용하였으며, 실제 현장에서 수집한 자료를 이용하여 상기의 두 가지 모형의 결과를 비교하였다. 제2장에서는 중요한 승용차 환산계수에 관한 선행연구를 소개하고 있다. 새로운 형태의 승용차 환산계수와 보정계수에 대한 상세한 설명은 제3장에서 다룬다. 마지막 장에서는 현장에서 수집한 실험자료를 통하여 두 가지 모형의 타당성과 그 결과를 비교·분석한다.

Ⅱ. 선행연구

1965년 미국 도로용량편람에서 승용차 환산계수의 개념이 처음 도입된 이후, 많은 관련 연구가 실시되었다. 일반적으로 승용차 환산계수의 값은 주로 현장의 실험에 의해 경험적으로 결정된다. 하지만 도로용량편람의 신호교차로에서는 승용차 환산계수의 직접적인 값을 사용하지 않고, 중차량 보정계수를 사용하여 왔다. 즉, 기본 포화교통류율은 승용차를 기준으로 하고 있지만 실제 교통류가 혼입되어 있기 때문에 이를 중차량 보정계수로 보정하여 포화교통류율을 실 교통량과 같은 단위로 산정하게 된다. 도로용량편람에서의 중차량 보정계수, f_{HV}는 식(1)과 같이 정의한다.

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_{HV}(E_{HV} - 1)} \quad (1)$$

여기서 E_{HV}가 중차량에 대한 승용차 환산계수이고 P_{HV}는 중차량의 비율이다.

보정계수에서는 일반적으로 트럭의 유형이나 교통상

태와는 상관없이 E_{HV} 의 값을 1.8이나 2.0 등 상수값을 사용한다. 이 장에서는 승용차 환산계수의 추정을 위해 각기 다른 접근방식을 사용한 선행연구에 대해서 간략하게 살펴본다.

1. 차두시간기반 방법

차두시간기반 방법은 Greenshields (1947)에 의해 처음으로 제안되었다. 차두시간 (시간 또는 거리)을 사용한 개념은 차량이 실제로 차지하는 공간의 크기를 측정한 것이다. 이 경우, 승용차 환산계수는 식(2)와 같이 승용차의 평균 차두시간과 중차량의 평균 차두시간의 비율로 정의 된다.

$$PCE_t = \frac{\overline{h_t}}{\overline{h_b}} \quad (2)$$

여기서 PCEt 는 t 유형 중차량에 대한 승용차 환산계수이고 $\overline{h_t}$는 t 유형 차량의 평균 차두시간, $\overline{h_b}$는 승용차의 평균차두시간이다.

이 방법은 신호 교차로에서 승용차 환산계수를 측정하는데 가장 일반적으로 사용되는 방법이다. 이 방법은 고속도로의 기본구간과 지방부 일반도로에 적용되고 때로는 시간 대신 거리가 사용되기도 한다. 이 방법의 단점은 중차량에 의해서 대기행렬에 있는 전체 차량에 미치는 추가적인 지체발생을 감안하지 못한다는 점이다. Molina(1987)는 신호 교차로에서 대기행렬내 위치하는 순서에 따라 추가적인 차두시간을 고려한 식(3)과 같은 수정된 방식을 제시했다.

$$PCE_t = \frac{(h_t + \triangle H)}{h_b} = [\frac{(TT_t - TT_b)}{h_b}] + 1 \quad (3)$$

여기서 PCE_t는 t 유형 차량의 승용차 환산계수이고, h_t는 t 유형 차량의 차두시간, h_b는 승용차의 포화차두시간, $\triangle H$는 대기열에서 차량 t로 인하여 증가된 차두시간, TT_t는 녹색시간 시작부터 측정한 t차량의 총 통행시간, TT_b는 녹색시간 시작부터 측정한 승용차의 총 통행시간을 초단위로 나타낸 것이다.

앞에서 설명한 차두시간 기반법과는 달리, Molina (1987)의 접근법은 신호 교차로에서 트럭의 뒤에서 대기중인 차량의 증가된 지체시간을 고려하였지만, 대기행렬에 있는 전체 차량의 지체 증가는 고려하지 못하였다. Benekohal와 Zhao(2000)는 이 접근법을 개선하고, 차량의 유형과 교통량 트럭의 비율을 고려하는 새로운 승용차 환산계수 방법을 제시하였다.

2. 속도기반 방법

속도는 2차로와 다차로의 고속도로에서의 운행성능을 대표하는 척도이다. Linzer 외 (1979)는 다차로 고속도로에 대한 매개 변수로 운행 속도를 사용하였다. Van Aerde and Yagar (1984) 또한 2차로 도로의 다른 차량군의 승용차 환산계수를 추정하기 위해 속도를 매개변수로 사용하였다.

3. 밀도기반 방법

Webster와 Elefteriadou (1999)는 고속도로 기본구간에서의 트럭의 승용차 환산계수를 산정하기 위해 밀도를 사용하였다. FRESIM의 소프트웨어을 이용하여 다양한 시나리오의 밀도 자료를 생성하였다. 이들이 승용차 환산계수를 결정하는데 사용한 방법론은 Sumner 외(1984) 가 개발한 방법론에 기반을 두었다. Sumner 외는 도시 간선도로상 연속적인 신호 교차로 사이의 승용차 환산계수 값을 추정했다. 승용차 환산계수의 값은 교차로 사이의 도로의 길이에 누적되었고, 중차량이 교통류에 합류되면 추가되는 도로활용의 차량시간을 반영하고 있다. 이 방법에 대해서 다음 장에서 자세히 설명한다.

4. 통행시간 또는 지체기반 방법

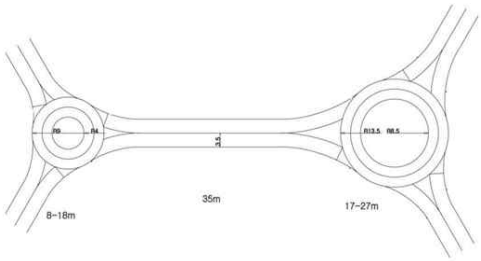
신호 교차로의 운영에 독창적인 기법을 개발하고, 중차량의 승용차 환산계수 값을 이용한 지체 방정식을 개발한 Webster(1958)의 최초 연구가 수행된 이후, Keller와 Saklas (1984)는 매개 변수로서 교통흐름에서 통행시간을 이용하여 도시간선도로의 승용차 환산계수 값을 산정하였다. 이 접근방법에서의 승용차 환산계수는 중차량의 통행시간과 승용차의 통행시간의 비율로 정의됐다. 통행시간을 추정하기 위해서 그들은 거시적 시뮬레이션 모델인 TRANSYT/7N 사용했다. 결과분석을 위해서 7가지 차종과 6 개의 LOS, 3가지 유형의 신호 설정이 동원되었다. Craus, Polus과 Grinberg (1980)도 2차로 고속도로에서 지체를 기반으로 둔 승용

차 환산계수 계산법을 제안하였다. 그들은 반대방향의 교통류에 의한 지체를 고려하였다. 이 경우 트럭의 승용차 환산계수는 승용차로부터 야기되는 평균 지체와 트럭으로부터 야기되는 평균지체의 비율에 의해 얻어진다. 그러나 승용차 환산계수에 대해 이러한 접근방법은 중차량이 혼합되어 있는 경우와 승용차만으로 구성되어 있는 교통흐름의 총 지체시간이 같음을 확인하지 못한다. Benekohal과 Zhao (2000)는 지체에 기반을 둔 신호교차로의 승용차 환산계수 계산을 위한 새로운 방법론을 제시하였다. 이 방법의 기본 개념은 혼합된 교통류와 승용차만으로 구성되어 있는 교통류의 총지체가 같다는 것이다. 승용차 환산계수와 교통량 그리고 중차량의 비율 사이의 관계를 규명하기 위하여 TRAF-NETSIM 시뮬레이션 모형이 사용되었다.

III. 실험모형의 정산

회전교차로에서 적용할 수 있는 승용차 환산계수의 모형을 개발하기 위하여 Sumner 외(1984)에 의해 개발된 모형을 사용하고 현장에서 수집된 같은 자료를 적용하여 그 결과를 산출하였다. 본 연구에 사용된 자료는 한국교통연구원(KOTI)와 국토해양부의 재정지원아래 실시된 회전교차로의 실험현장에서 직접 수집된 자료를 활용하였다. 이 실험의 주된 목적은 한국에서 향후 설치될 예정인 각종 현대식 회전교차로의 임계간격, 추정시간, 차두시간과 같은 매개변수를 추정하는 것이었다. 여러 가지 어려움에도 불구하고 한국에서 현대식 회전교차로에 관한 객관적이고 과학적인 자료를 생성하는 의미 있는 첫 시도라고 판단되며, 국내의 운행여건을 최대한 반영한 최초의 소형 회전교차로의 기초사업으로 인식된다.

실험은 경상북도 울진에 있는 군용 비상 활주로에서 실시되었다. 이곳은 너비 50m, 길이 2.5km의 장소로써 소형 회전교차로에 대한 다양한 실험 프로젝트를 실시하기에 길이는 적합하였으나, 너비의 부족으로 3지 접근로만을 가지며 내접원의 지름이 각각 15m, 18m, 21m, 24m, 27m, 30m의 6가지 종류의 일차로(차로폭=5m) 회전차로를 갖는 회전교차로를 설치하여 실험하였다. <그림 1>은 내접원 지름이 18m 와 27m 인 회전교차로의 실험현장을 단편적으로 보여준다. 6가지 회전교차로에서 <표 1>에서 보여주는 승용차(즉 기본차량), 트럭 그리고 관광버스(45인용)을 포함한 3개의 차량 15대~18대를 동원하여 반복적으로 운행하게 하여 간격수



<그림 1> 실험장 설계도면

<표 1> 실험 차량 제원

단위 (mm)	승용차 (NF소나타)	버스 (45승)	트럭 (1.5톤)
길이	4,800	12,000	4,870
차폭	1,830	2,490	1,740
높이	1,475	3,415	1,965
축간거리	2,730	6,500	2,430
마력(hp)	140	380	140
중량(kg)	1470	14300	2550

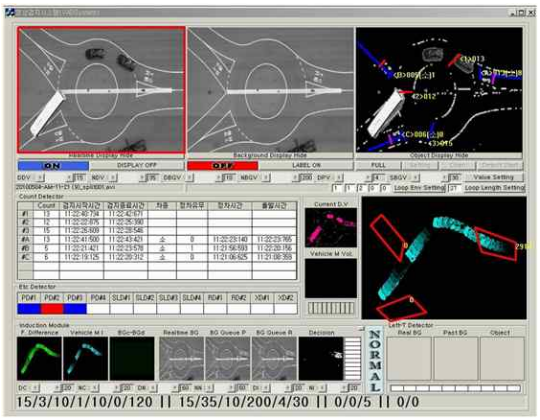
<표 2> 실험계획표

시간	auto (%)	bus (%)	truck (%)	속도(km/h)
09:00~09:30	100	0	0	20
09:40~10:10				30
10:20~10:50	60	20	20	20
11:00~11:30				30
11:30~12:30	점심식사 및 실험준비			
12:30~13:00	33	33	33	20
13:10~13:40				30
13:50~14:20	0	100	0	20
14:30~15:00				30
15:10~15:40	0	0	100	20
15:50~16:20				30

락 행태를 측정하였다.

실험은 2010년 5월 2일부터 2010년 5월 4일까지 6개의 교차로에 대해서 총 15시간동안 비디오 녹화가 이루어졌으며 3일간 진행한 실험계획표는 <표 2>와 같다. 여기서 속도는 권장 운행속도로써 실험운전자에게 사전에 교육을 통하여 숙지시켰다.

교차로에서 차량의 움직임을 관찰하기 위해 본 실험에서는 60m 높이에 있는 카고 크레인의 상단에 비디오 카메라를 설치하여 촬영하였다. 비디오 카메라는 교차로 각각에 한 개씩 설치하였고 실험의 한 세트에서는 총 두 대의 카메라가 동원되었다. <그림 2>에서 카메라에서 내려다 본 실험현장의 일부 모습을 볼 수 있다. 비디오 자료는 수락과 거절된 시간간격의 시간과 빈도를 추정하기



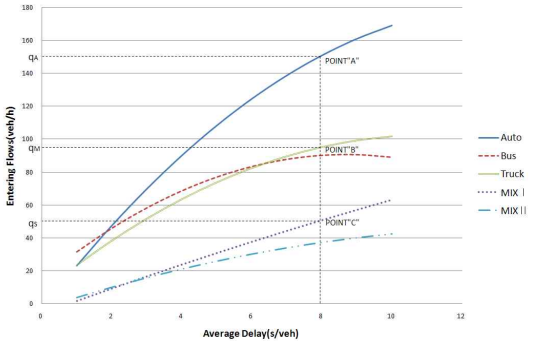
<그림 2> 비디오 녹화 모습

<표 3> 교통류율과 평균제어지체의 관계의 회귀방정식

	회귀방정식	(n,t-value)	R^2
승용차	$y=-0.212x^2+5.716x-0.733$	(111,-7.1719)	0.946
트럭	$y=-0.162x^2+3.593x+1.452$	(62,-5.1761)	0.550
버스	$y=-0.207x^2+3.607x+3.134$	(91,-3.6424)	0.585
MIX I	$y=-0.019x^2+1.630x-1.251$	(56,-4.2400)	0.870
MIX II	$y=-0.051x^2+1.450x-0.640$	(100,0.7584)	0.440

위해 상용적인 소프트가 아닌 실험분석을 위하여 별도 제작 주문한 소프트웨어를 이용해 분석되었다. 실험분석에 적용가능성을 판단하기 위하여 사전에 수작업에서 구한 추정치와 소프트웨어에서 추정한 파라메타 값과 비교를 통하여 그 오차한계가 ∓10% 인 것을 확인한 후 사용하였다. 지체시간 역시 현장에서 수집한 비디오 자료에서 별도의 과정을 통하여 수집하였다. 녹화자료는 비디오 화면의 저장파일크기 문제로 카메라에 의해 자동으로 매 750초단위로 나누어 저장되었다.

<표 3>에서는 현장의 관측자료로부터 교통류율과 평균 지체시간 사이의 관계식을 5개의 회귀방정식으로 도출했다. R^2 값의 범위는 0.440부터 0.946이며, 관측자료수와 t-통계량이 각각 제시되어 있다. 방정식에서 x는 평균 지체시간(초/대)이고 y는 지체에 해당하는 교통류율 (대/750초)이다. MIX I 은 승용차 60%, 버스 20%, 트럭 20%를 혼합했을 경우이고, MIX II는 교통류의 모든 차량의 분포가 균등하게 분포되어 있을 때를 나타낸다. <그림 3>는 차량이 5가지 차종으로 혼합되었



<그림 3> 교통량과 평균제어지체의 관계

을 때 교통류율과 평균 제어지체 사이의 관계를 그래프로 나타낸 것이다.

개발된 회귀방정식과 Sumner 외(1984)에 의해 제안된 방법을 이용하여 중차량의 승용차 환산계수를 직접 추정하였다. 이 방법은 원래 교통 밀도에 기반을 둔 것이었지만, 이 방법의 개념을 제어지체에 대해서 똑 같은 방법으로 적용하였다. Sumner 외(1984)에 의해 제안된 승용차 환산계수의 추정방법은 다음의 3단계를 적용한다.

(1) 기본 차량(즉, 승용차) 회귀방정식을 <그림 3>와 같이 교통량-지체시간 곡선을 표현한다.
(2) 기본 차량과 다른 유형의 혼합된 교통류에 대해서도 교통량-지체시간 곡선을 표현한다.
(3) 상기 (2)의 조합에서 다른 조건은 동일하게 하고 기본 차량의 일부분을 분석의 대상인 중차량과 교체한 다음 교통량-지체시간 곡선을 추정한다.

각 A, B, C 지점이 동일한 평균 지체시간을 갖는다는 가정에서 유도된 방정식을 이용하여 혼입된 차종에 대한 승용차 환산계수를 추정할 수 있다. <표 4>에서는 모형식의 매개변수를 정리한 것이다.

Point B에서,

$$E_1 \times 1 \times q_A = E_1 p_1 q_M + E_B p_B q_M \quad (1 = p_1 + p_B) \qquad (4)$$

<표 4> 승용차 환산계수 매개변수

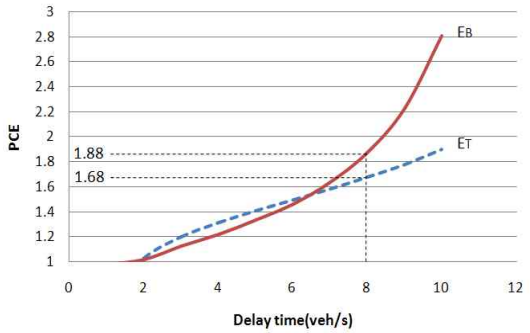
Point	PCE	Fleet type	혼합률	Flows
A	E_1	Base only	1.	q_A
B	E_1	Base +Mix	p_1	q_M
	E_B		p_B	
C	E_1	Base +Mix + Subject	p_1	q_S
	E_B		p_B	
	E_T		p_T	

Point C에서,

$$E_1 \times 1 \times q_A = E_1 p_1 q_S + E_B p_B q_S + E_T p_T q_S \quad (5)$$
$$(1 = p_1 + p_B + p_T)$$

만약 식(4)에서 E_B를 추정하였다면, 식(5)에서는 2개의 혼합된 교통류율, q_A,q_S를 이용하여 E_T를 구할 수 있다. 다른 종류의 차량에 대해서도 같은 방법으로 계속하여 승용차 환산계수를 구할 수 있다. 본 실험에서는 승용차, 트럭과 버스의 각 차종별 독립된 실험이 별도로 실시되어 대단히 간단하게 실험결과를 얻을 수 있었으며, 추정에 직접적으로 사용은 하지 않았지만, 혼합교통류인 MIX I 과 MIX II에 대해서는 실험과정과 결과를 재검증할 수 있는 좋은 기회가 주어졌다.

<표 5>와 <그림 4>는 각기 주어진 기준 평균 제어지체에 대한 버스와 트럭에 대한 승용차 환산계수의 결과를 보여준다. 평균 지체가 증가할 때 버스의 승용차 환산계수 값인 E_B는 급격히 증가하고, 트럭의 승용차 환산계수 E_T는 천천히 증가한다. 이런 차이는 실험에 동원된 두 차량의 종류 사이에서 발견되는 서로 다른 운영 특징으로부터 설명된다. <그림 4>에서 지체시간이 2초와 7초 사이에서 곡선이 겹치는 문제는 <표 3>에서 보여준 적합성의 정도가 영향을 미친 것으로 판단된다. <그림 4>를 읽는 방법은 평균 지체시간 8.0(초/대)가 관측되었다면 이 때 트럭의 승용차 환산계수 E_T와 버스의 승용차 환산계수 E_B는 각각 1.68, 1.88로 추정된다. 지체시



<그림 4> 현장관측에 의한 승용차 환산계수

<표 5> 현장 조사의 지체시간으로부터 얻은 승용차 환산계수

Delay / PCE	2 (초/대)	4 (초/대)	6 (초/대)	8 (초/대)	10 (초/대)
E_T	1.03	1.32	1.50	1.68	1.90
E_B	1.02	1.22	1.47	1.88	2.81

간의 크기로 미루어 보아 실험현장에서의 대상 교통류의 포화도가 대단히 낮았음을 알 수 있다. 이러한 실험결과를 간단한 표로 나타내면 <표 5>의 결과를 얻을 수 있다.

IV. 실험결과에 대한 평가

이 장에서는 실험에서 얻어진 결과와 이용재 외(2001)의 연구에서 제안된 이론적 연구결과, 그리고 외국의 연구결과와의 비교분석을 통하여 본 연구를 위하여 실시된 실험결과의 유용성을 입증하고자 한다.

2000년 도로용량편람에서의 회전교차로의 용량은 간격수락(Gap Acceptance)의 행태에 바탕을 두어 추정하고 있다. 임계간격(Critical Gap)과 추종시간(Follow-up Time)은 간격수락 행태를 기반으로 하는 회전교차로의 용량추정에 있어 중요한 매개변수이며, 임계간격은 부도로 교통흐름에서 교차로로 들어오는 운전자가 진입을 판단하는 주도로 교통흐름에서의 최소시간간격으로 정의된다. 추종시간은 부도로 교통흐름에서 연속되는 대기 상태에서 앞 차량이 진입한 직후 출발선(정지선 혹은 양보선)에 바로 뒤 차량이 도착하는 순간까지의 부도로 차량의 시간 간격이다.

미국 도로용량편람에서 기본(잠재)용량 모형식을 유도하는 과정에서는 모든 차량이 동일한 임계간격을 갖고 동일한 행태를 갖는다는 가정은 전제로 하고 있어 실제 현장에서 용량을 추정할 경우 많은 비현실적인 결과를 초래할 수 있다. 특히 중차량과 승용차가 혼재하는 경우, 동일한 임계간격을 적용한다는 것은 운영분석에 많은 문제를 가져올 수 있다. 이 문제에 대해서 이용재 외(2001)에서는 Catchpole과 Plank(1986)의 연구결과를 이용하여 아래와 같은 승용차 환산계수 식(6)과 중차량 보정계수 식(7)을 제시한 바 있다.

$$\begin{Bmatrix} E_2 = e^{q(\alpha_2 - \alpha_1)} & \text{for} \quad \alpha_2 \geq \alpha_1, \\ E_3 = e^{q(\alpha_3 - \alpha_1)} & \text{for} \quad \alpha_3 \geq \alpha_1, \\ \vdots & \\ E_n = e^{q(\alpha_n - \alpha_1)} & \text{for} \quad \alpha_n \geq \alpha_1 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + p_2(E_2 - 1) + p_3(E_3 - 1) + \cdots + p_n(E_n - 1)} \quad (7)$$

여기서, $1 = p_1 + p_2 + p_3 + \cdots + p_n$이며 p_1은 혼합교통류에서 승용차의 비율이며, q 는 회전차로의 교통류율, α_1은 승용차 운전자의 임계간격, α_n은 n 유형 중차량의 임

계간격이다.

상기의 승용차 환산계수 값은 주도로의 혼잡상태를 반영하는 주도로의 교통류율과 회전교차로 용량의 계산을 위하여 이미 확보된 각 차종의 임계간격으로부터 비교적 쉽게 결정될 수 있으며 식(7)에서 $0 \le f_{HV} \le 1$라는 사실로 Catchpole과 Plank(1986), Troutbeck(1988)의 실험결과와 일치하고 있다.

식(6)에서 제안된 승용차 환산계수를 구하기 위해서는 동일한 실험환경을 가진 회전교차로의 부도로 교통류에서 차량의 임계간격과 주도로 교통류에서의 교통류율(회전차로의 교통량)을 알아야 한다. 이 연구에서는 회전교차로의 내접원의 지름이 18m인 경우에 대해서만 실시하였으며 이 때 추정된 임계간격 (T_c) 와 추종시간 (T_f) 를 표본크기와 표준편차와 함께 <표 6>에 제시하였다. 본 연구에서 추정한 임계간격과 추종시간은 일반 연구에서 제시되고 있는 값과 비교하여 차이가 있다. 그 부분적인 이유로는 실험에 임하는 실험운전자의 운전태도가 너무 경직되어 있어, 권장 운행속도 등 교통질서의 준수에 너무 많은 시간을 소비하였고, 승용차 실험에 동원된 교통량이 상대적으로 적었고, 또한 회전교차로의 크기가 초소형과 소형이고 실험장에 가설치된 형태이기 때문에 실제 실험운전상의 유의가 필요하는 등 이상적인 결과를 초래하고 있어, 현실에서 추정될 수 있는 파라메타 값과의 차이가 발생한 것으로 판단되며, 결과를 실제 현장에 적용하는 경우 이를 충분히 감안하여 분석해야 한다.

본 연구의 임계간격을 추정하기 위하여 Wu(2006)의 방법이 사용되었는데 이 방법은 최대거절간격(Maximum Rejected Gap)만을 사용하는 Troutbeck(1992)의 최우추정법보다 더 우수한 것으로 평가되고 있다. 아래에서는 Microsoft에서 개발한 EXCEL 프로그램을 이용할 때의 Wu(2006)의 추정과정을 간단히 정리한다.

1. 측정된 모든 gap 관련자료를 스프레드 시트의 1열에 주도로의 gap t 로 삽입

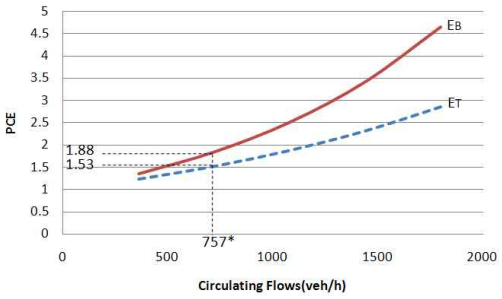
<표 6> 차종별 임계간격과 추종시간의 추정
(ϕ=8m, ICD=18m)

구분	승용차	트럭	버스
T_c, mean	6.2805	8.3128	9.2828
Std.	3.3780	8.0925	5.8870
T_f, mean	1.5987	2.4373	3.5814
자료 수	107	30	57

2. 스프레드 시트의 열 2에 각각 accepted gaps은 “a”, rejected gaps은 “r”로 표기
3. 모든 gap(“a”와 “r”로 입력된 것 모두)을 오름차순으로 정렬
4. 스프레드 시트의 열 3에 rejected gap, n_{rj}를 누적빈도로 계산 (즉 주어진 j행에서 만약 “r”로 표시되어 있을땐 $n_{rj}=n_{rj+1}$ 또는 $n_{rj}=0$이면 $n_{rj}=n_{rj}$)
5. 스프레드 시트의 열 4에 accepted gap, n_{aj}를 누적빈도로 계산 (즉 주어진 j행에서 만약 “a”로 표시되어 있을면 $n_{aj}=n_{aj}+1$ 또는 $n_{aj}=0$이면 $n_{aj}=n_{aj}$)
6. 스프레드 시트의 열 5에 rejected gap의 PDF인 $F_j(r)$를 계산 (즉 주어진 j행에서 $F_j(r)=n_{rj}/n_{rj,max}$ 이고 $n_{rj,max}$=모든 rejected gap의 수)
7. 스프레드 시트의 열 6에 accepted gap의 PDF인 $F_j(t_j)$를 계산 (즉 주어진 j행에서 $F_j(t_j)=n_{aj}/n_{aj,max}$ 이고 $n_{aj,max}$=모든 accepted gap의 수)
8. 스프레드 열 7에 추정된 임계간격(주어진 방정식에 따라서)의 PDF인 $F_{tc}(t_j)$를 계산 (즉 주어진 j행에서 $F_{tc}(t_j)= F_a(t_j)/[F_a(t_j)+1-F_r(t_j)]$
9. 스프레드 열 8에 j행과 j-1행 사이의 추정된 임계간격의 빈도 $p_{tc}(t_j)$를 계산 (즉 $p_{tc}(t_j)=F_{tc}(t_j)-F_{tc}(t_{j-1})$)
10. 스프레드 열 9에 j행과 j-1행 사이의 평균값, t_{dj}를 계산 (즉 $t_{dj}=(t_j+t_{j-1})/2$)
11. 추정된 임계간격의 값과 편차를 평균하여 계산 (즉 $t_{c,average}=sum[p_{tc}(t_j)*t_{dj}]$, $\sigma^2=sum[p_{tc}(t_j)*t_{dj}^2]-sum[p_{tc}(t_j)*t_{dj}^2]$)

<그림 5>에서는 식(6)에서 제안된 방정식으로부터 계산된 승용차 환산계수의 결과를 보여준다.

중차량의 임계간격과 승용차의 임계간격이 일정하다면, 추정된 승용차 환산계수는 주도로의 교통류율이 증



<그림 5> 제안된 모형에 의한 승용차 환산계수의 추정치

가하면 함께 증가하게 된다. 이러한 현상은 승용차의 환산계수가 차량의 종류, 교통량 등 고려해야 할 주요한 속성을 반영하고 있다고 생각되며, 중차량의 비율은 함께 제의된 보정계수에 의해서 산출이 된다. 즉, 새로 제안하는 중차량의 승용차 환산계수는 주도로의 혼잡상태를 반영할 수 있으며, 중차량의 종류와 혼합 교통류의 영향을 추정된 임계간격으로 대체하여 매우 간단하면서도 쉽게 이해되는 장점을 보여주고 있다. 또한 모형식의 유도과정에서 알 수 있듯이 간격수락 모형의 범주내에서 일관성을 보이고 있다.

<그림 4>와 <표 5>에서와 같이 평균 지체시간을 8(초/대)로 가정하면 버스의 승용차 환산계수, E_B는 1.88, 트럭의 환산계수, E_T는 1.68이다. 그러나 <그림 5>에서는 버스의 승용차 환산계수를 <그림 4>와 같이 하였을 때 트럭의 승용차 환산계수는 1.53으로 관측자료에 의해서 추정된 1.68과 비교하여 약 9%의 오류가 있다. 다른 기준 지체시간에 대해서도 분석하여 보면 큰 오차가 발견되지 않는다. 또한 추정한 승용차 환산계수의 값들은 <표 7>의 선행연구에서 보여주고 있는 다른 연구 결과와도 매우 높은 관련성을 보이고 있다. 또한 <그림 4>와 <그림 5>의 결과를 보면 승용차 환산계수의 변화폭에도 매우 유사한 경향을 가지고 있음을 발견할 수 있다.

<표 7> 참고문헌의 승용차 환산계수

방법론	승용차 환산계수
Webster's Method	
Webster and Cobbe(1966)	트럭 1.75, 버스 2.25 포화교통류율 가정
Regression Method	
Branston and Gipps(1981)	상업용 차량 1.28, 좌회전 상업용차량 1.33 녹색신호시간으로부터 회귀분석식 유도
Headway Ratio Method	
Branston and Gipps(1981)	대기열에서 첫 번째 위치에 있지 않은 중차량 2.69, 첫 번째 위치에 있는 중차량 4.05
Molina (1987)	중차량 3.7, 경차량 1.7
West and Thurgood (1995)	일반 트럭 1.7, 대형트럭 4.4 다이아몬드 교차로에서 일반트럭과 대형트럭의 좌회전 경우
Delay-Based Method	
Keller et al.(1984)	LOS가 C, 7가지 차량군의 승용차 환산계수, 6종류의 서비스 수준, 3가지 종류의 교통신호제어 조건에서 수행. 일반트럭 1.09, 트랙터-트레일러 1.53
Sumner et al.(1984)	LOS D일 때 2차선도로에서 일반트럭 1.10, 5축 콤비네이션 트럭 1.45 LOS B일 때 2차선도로에서 일반트럭 1.18 5축 콤비네이션 트럭 1.53
Kimber et al.(1985)	트럭 2.3 최소 지체시간을 기준
Benekohal and Zhao (2000)	일반적인 교통류에서 일반트럭 1.07-1.47, 콤비네이션 트럭 1.19-1.81

V. 결론

본 연구에서는 현대식 회전교차로의 용량 및 지체 등 운영상태를 분석할 때 필수적인 중차량이 혼합된 교통류에 대한 승용차 환산계수를 산정하는 새로운 모형식을 제안하고 있다. 산정모형식을 개발하기 위하여 제어지체를 함수로 표현하는 각 차종의 용량 모형식을 유도하고, 동일한 제어지체 값에 대한 용량을 비교함으로써 회전교차로에서의 승용차 환산계수를 계산하였다.

본 연구에서 제안하는 승용차 환산계수의 모형의 타당성을 검증하기 위해서 기존에 제안한 바 있는 다른 형태의 모형과 함께 두 가지 모형에 대해서 실험현장에서 수집한 동일한 자료를 활용하여 비교 평가하였다. 결과적으로 주어진 실험환경 아래에서 두 가지 방법의 추정결과의 유사성과 다른 연구결과와의 높은 상관성을 확인할 수 있었다.

그러나, 연구의 한계로 지적된 제한된 실험차량의 종류와 포화도가 매우 낮은 교통류 상태에서 자료가 수집되어 결과치의 현실적용에는 많은 유의가 필요하다. 따라서, 향후 연구에서는 다른 유형의 중차량과 다른 혼잡상태의 혼합교통류, 다른 기하구조 상태의 교차로에서의 연구가 더 필요할 것으로 생각된다. 이러한 연구의 한계에도 불구하고 이 연구에서 제시된 접근방법과 비교방법은 비신호 교차로 특히 현대식 회전교차로의 용량과 지체의 추정 능력을 향상시키는데 도움이 될 것으로 생각한다.

참고문헌

1. 이용재·김석근(2001), "비신호 교차로의 중차량 용량 보정계수에 관한 연구", 대한교통학회지, 제19권 제2호, 대한교통학회, pp.89~98.
2. Highway Research Board(1965), "Highway Capacity Manual". Special Report 87, Washington D.C., 1966.
3. Benekohal, R. F., and W. Zhao(2000), "Delay-Based Passenger Car Equivalents

for Trucks at Signalized Intersections", Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 34, No.

4. Branston, D., Gipps, P.(1981), "Some experience with a multiple linear regression method of estimating parameters of the traffic signal departure process", Transportation Research 15, pp.445~458.
5. Branston, D., van Zuylen, H.(1978), "The Estimation of saturation flow, effective green time and passenger car equivalents at traffic signals by multiple linear regression", Transportation Research 12, pp.47~53.
6. Catchpole, E.A., Plank, A. W. (1986), "The Capacity of Priority Intersection", Transportation Research 20B(6), pp.441~456.
7. Craus, J., A. Polus, and I. Grinberg(1980), "Revised Method for the Determination of Passenger Car Equivalencies", Transportation Research, Vol. 14A, pp.241~246.
8. Evans, L., Rothery, R.(1981), "Influence of vehicles size and performance on intersection saturation flow", Proceedings of the Eighth International Symposium on Transportation and Traffic Theory.
9. Greenshields, B. D., D. Shapiro, and E. L. Erickson(1947). "Traffic Performance at Urban Intersection", Bureau of Highway Traffic, Yale University, New Haven, Connecticut.
10. Keller, E. L., and J. G. Saklas(1984), "Passenger Car Equivalents from Network Simulation", Journal of Transportation Engineering, Vol. 110, No. 4, pp.397~411.
11. Keller, E.L.(1984), "Passenger car equivalents from network simulation", ASCE Journal of Transportation Engineering 110, July.
12. Kimber, R.M.(1985), "Passenger car units in saturation Flows: concept, definition, derivation", Transportation Research B 19, pp.39~61.
13. Krammes, R. A., and K. W. Crowley(1986), "Passenger Car Equivalents for Trucks on Level Freeway Segments", In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1091, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.10~17.
14. Linzer, E., R. Roess, and W. McShane(1979), "Effect of Trucks, Buses, and Recreational Vehicles on Freeway Capacity and Service Volume", In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 669, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.17~26.
15. Molina, C. J.(1987), "Development of Passenger Car Equivalents For Large Trucks at Signalized Intersections", ITE Journal, Vol. 57, No. 11, pp.33~37.
16. Sumner, R, D. Hill, and S. Shapiro(1984). "Segment Passenger Car Equivalent Values for Cost allocation on urban arterial roads", Transportation Research A 18, pp.399~406.
17. Transportation Research Board(2000), "Highway Capacity Manual", Special Report 209, Third Edition. Transportation Research Board, National Research Council: Washington, D.C.
18. Troutbeck, R.J.(1988), "Current and Future Australian Practices for the Design of Unsignalized Intersections", Intersections Without Traffic Signals. Edited by W. Brilon. New York, NY: Springer-Verlag, pp.1~19.
19. Troutbeck, R.J.(1992), "Estimating the Critical Acceptance Gap from Traffic Movements", Research Report 92-5. Qeensland University of Technology, Brisbane.
20. Van Aerde, M., and S. Yagar(1984), "Capacity, Speed, and Platooning Vehicle Equivalents for Two-Lane Rural Highways", In Transportation Research Record: Journal

of the
21. Webster, F.V.(1958), “A Controlled experiment on the capacity of junctions with traffic signals”, Road Research Lab. Res. Note No. RN/3313/FVW. BR 587.
22. Webster, F.V., Cobbe, B.M.(1966), “Traffic Signals”, Road Research Technical Paper No. 56, HMSO, London.
23. Webster, N., and L. Elefteriadou(1999), “A simulation study of truck passenger car equivalents (PCE) on basic freeway sections”, Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 33, No. 5, pp.323~336.
24. West, J.E., Thurgood, G.S.(1995), “Developing passenger car equivalents for left-turning trucks at compressed diamond interchanges”, Presented at the 74th TRB annual meeting,
25. Wu, Ning (2006), “A New Model for Estimating Critical Gap and Its Distribution at Unsignalized Intersections Based on the Equilibrium of Probabilities”, In: Proceeding of the 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service. Yokohama, Japan, July 25-29.

♧ 주 작 성 자 : 이용재
♧ 교 신 저 자 : 이용재
♧ 논문투고일 : 2010. 8. 12
♧ 논문심사일 : 2010. 9. 15 (1차)
2010. 11. 11 (2차)
2010. 12. 15 (3차)
♧ 심사판정일 : 2010. 12. 15
♧ 반론접수기한 : 2011. 4. 30
♧ 3인 익명 심사필
♧ 1인 abstract 교정필