

■ 論 文 ■

모의실험 전산모형을 위한 도심고속도로 합류부 간격수락행태모형 개발

Development of a Gap Acceptance Model for
the Simulation of Merging Area on Urban Freeways

김 준 현

(한국도로교통협회 선임연구원)

김 진 태

(한양대학교 첨단도로연구센터 연구교수)

장 명 순

(한양대학교 교통시스템공학과 교수)

문 영 준

(교통개발연구원 책임연구원)

목 차

I. 서론	2. 진입 차로변경 수락간격분포
1. 연구의 범위 및 목적	3. 합류위치별 후방수락간격분포
II. 문헌고찰	4. 상대속도와 합류위치와의 관계
1. 간격수락	V. 간격수락모형의 개발
2. 전후방 차량과의 관계	VI. 모형의 검증
3. 가속차로 위치 및 길이	1. 본선의 밀도별 합류위치
III. 연구방법	2. 진입차량의 합류 시 상대속도
IV. 자료분석결과	3. 현장자료와 시뮬레이션의 간격수락분포
1. 각 가속차로 구간별 본선의 밀도에 따른 합류비율	VI. 결론 및 향후과제
	참고문헌

Key Words : 합류부, 간격수락, 밀도별 합류위치, 상대속도, 모의실험

요 약

고속도로 합류부는 본선과 유입램프가 만나는 부분으로 유입교통에 의한 교통량의 증가로 빈번히 고속도로 상류부 혼잡의 원인이 되어 고속도로 운영관리에 있어 중요한 관심을 요구한다. 근래에 들어 이러한 합류부 교통류의 분석을 위하여 운전자의 다양한 운행행태를 고려하는 모의실험모형이 적용되어왔다. 그러나 현존하는 모의실험모형은 운전자의 운행행태가 주어진 교통상황에 따라 능동적으로 변하지 않아 상황에 따라 변하는 복잡한 합류부에서의 운전자 간격수락행태를 현실적으로 모사함에 문제가 있다.

본 연구에서 수행한 현장자료 분석을 통하여 진입차량의 간격수락행태는 정규분포를 따르며 '가속차로 상의 주행위치' 대 '가속차로 길이'의 비율에 의해 영향을 받아 그러한 정규분포의 평균과 분산이 변화하는 것으로 도출되었으며, 합류 운전자는 본선 주행 전방차량과의 간격보다 후방차량과의 간격에 더 많은 영향을 받는 것으로 도출되었다.

본 논문은 모의실험 전산모형으로의 적용을 위하여 현장자료를 토대로 개발된 새로운 합류차량 간격수락행태 모형을 제시한다. 제시된 간격수락모형을 사용하여 수행된 모의실험 결과와 현장자료를 비교한 결과 합류 시 (1)본선 밀도수준 별 가속차로에서 본선으로의 차로변경 위치분포, (2)합류 시 본선 후방차량과의 간격분포, (3)본선 후방차량과의 상대속도가 95% 신뢰수준에서 현장자료(모형개발에 사용되지 않은 자료)와 통계적으로 동일한 것으로 분석되었다.

본 논문은 한국과학기술부, 한국과학재단에서 지원한 첨단도로연구센터의 연구수행 결과입니다.

I. 서론

고속도로는 장거리 육상교통을 원활하게 처리하게 하는 기능을 담당하고 있으며 램프를 통해 본선으로의 유입과 유출이 통제된다. 고속도로 본선과 유입램프가 만나는 합류부는 차량유입으로 인해 고속도로 본선속도 저하가 빈번히 발생하고, 고속도로 상류부에서의 혼잡원인이 되어 전체 고속도로시스템 운영에 중대한 영향을 미친다. 고속도로의 효율적인 운영을 위하여 이러한 합류부에서의 교통상황을 파악하고 그에 대한 해결책을 마련하기 위하여 교통공학자들은 다 수의 수리모형 및 모의실험 전산모형을 개발하여 연구에 적용하여 왔다.

모의실험 전산모형은 다양한 운전자의 운전성향을 연구에 반영하기 위하여 일련의 운전행태 특성을 토대로 구분된 운전자 집단(drivers' types)을 모의실험에 사용한다. 예를 들어 미국 도로연방국의 지원으로 개발된 Freeway Simulation(FRESIM)의 경우, 차분한 운전성향을 가지는 집단에서 과격한 운전성향을 가지는 집단까지 10개의 운전자집단을 구분하여 모의실험에 적용하고 있다. 이는 수리모형으로 반영하기 어려운 운전자의 운행행태 다양성을 반영하고자 하는 노력이며 모의실험모형의 대표적인 장점이다.

그러나 이러한 일련의 운전자 집단을 이용한 방법만으로는 합류부에서의 복잡한 운행특성을 고려하기가 어렵다. 이는 실제 운전자의 운전성향이 지속적이지 않고 주어진 교통상황에 따라 변하기 때문이며 합류부에서는 제한된 가속차로의 길이로 인하여 더욱 그 변화의 정도가 크다. 일련의 운전자집단 고려를 통한 방법에 의하면 하나의 운전자 집단에 속하게 된 진입차량은 본선의 교통량이 적고 많음에 상관없이 항상 같은 크기의 차간간격을 찾아서 합류 차로변경을 수행하나, 실제 합류부에서 본선으로 진입하기 위하여 사용하는 본선에서의 차간 간격은 (1)개개의 운전자의 특성에 따라 다르고 (2)또한 그러한 운전자의 특성은 주행하고 있는 가속차로의 위치에 따라 다시 변한다. 그렇기 때문에 가속차로 시점과 종점에서 일정한 차간간격에 대한 운전자의 반응이 다르다. 보다 현실적인 합류부 모의실험을 위하여 운전자 집단별 및 가속차로 위치별로 진입차량의 특성을 반영하는 모형의 개발이 필요하다.

1. 연구의 범위 및 목적

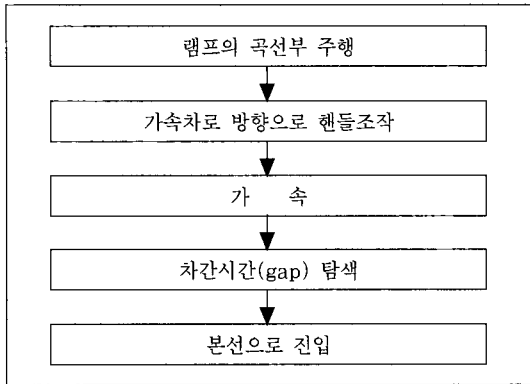
운전자의 차로변경행태를 설명하는 차로변경모형은 (1)차로변경을 반드시 하여야만 하는 상황에서의 강제적(mandatory) 차로변경, (2)주행의 편의성을 높일 수 있는 상황에서의 임의적(discretionary) 차로변경, (3)하류부에서 예상되는 속도의 감속을 피할 수 있는 상황에서의 예상적(anticipated) 차로변경모형으로 구분된다(Henry et al., 1997). 본 연구의 범위는 고속도로 합류부 진입램프와 연결된 가속차로상의 차량들이 진입한 본선 차로로 진입하기 위하여 수행하는 강제적 차로변경으로 제한한다.

본 연구의 목적은 고속도로 합류부에서 가속차로로 진입하는 차량들이 본선으로 합류하는 합류행태를 설명하는 간격수락모형의 개발이다. 연구의 세부적인 목적을 나열하면 아래와 같다.

1. 고속도로 본선의 교통흐름상태에 따라 합류부 차량진입행태가 반응하는 모형을 개발한다.
2. 진입차량이 주행하는 가속차로에서의 위치에 따라 변화하는 임계 차간간격을 제시한다.
3. 다양한 운전자의 특성을 반영하여 진입차로변경(강제차로변경)을 허용하는 임계 차간간격의 분포를 제시한다.
4. 진입차량의 주행상태와 차로변경 대상 본선 차로를 주행중인 전/후방 차량의 주행상태와의 관계와 진입차로변경(강제차로변경)과의 관계를 제시하여,
5. 본선 차량과 진입 대상 차로를 주행중인 주변 차량의 주행상태에 따라 임계간격의 수락을 보장한다.

II. 문헌고찰

운전자가 고속도로 본선으로 합류하는 과정은 전체 다섯 단계로 설명될 수 있다. 첫째는 가속차로로의 진입을 위하여 램프를 통하여 주행하는 단계이고, 둘째는 가속차로로의 진입이다. 셋째는 본선으로 안전한 진입을 위하여 본선 차량흐름 속도와 유사한 속도로 주행하도록 가속을 하는 단계이다. 넷째는 본선으로 진입이 가능한 차간간격 및 주변차량의 상황조건을 탐색하는 단계이고, 다섯째는 차로변경이 허락되는 간격을 발견하고 본선으로 차로변경하여 합류하는 단계이다. 이러한 과정을 도식화하여 <그림 1>에 제



〈그림 1〉 운전자의 합류 흐름도

시하였다. 본 연구에서는 네 번째 단계인 ‘차간시간 탐색’을 설명하는 모형의 개발이 연구의 범위이며 목적이다.

고속도로 합류부 차량흐름의 특성에 대해 많은 학자들에 의하여 다양한 연구가 수행되어 왔다. 본 연구의 수행에 앞서 기존의 문헌을 통하여 합류부 교통흐름해석으로의 접근방법을 고찰하였다. 합류부에서의 (1)차간간격 수락모형, (2)전/후방 차량과의 관계, (3)가속차로 위치 및 길이에 관한 기존의 연구를 고찰하였고 다음의 세부단락에 요약하였다.

1. 간격수락

Drew (1968)는 가속차로의 길이, 본선 주행차량과 합류하는 차량의 진행방향의 각 (합류각), 그리고 가속차로의 형태를 독립변수로 사용하여 운전자의 임계간격을 추정하는 중회귀분석모형을 제시하였다. 그의 연구는 가속차로의 길이가 동일할 경우 운전자들은 ‘평행식 가속차로’에서 보다 ‘직접식 가속차로’에서 더 큰 간격을 요구하며 차로변경한다는 분석을 도출하였다. Drew의 모형은 거시적 분석을 위한 모형으로 모의실험 전산모형으로의 적용에는 무리가 있다.

Kita(1993)는 운전자가 차로변경하기 위하여 수행하여야 하는 간격수락행태를 확률모형으로 제시하였다. 그는 모형의 독립변수로 (1)가속차로에서의 잔여거리와 (2)본선 후방차량과 진입차량과의 상대속도를 사용하였고 간격수락행태모형으로 이항 로짓(Binary Logit)모형을 제안하였다. 그는 본선 후방차량과 진입차량과의 상관관계를 상대속도로 설명하여 모형에 반영하였고 운전자는 가속차로의 잔여거리가 짧아질

수록 보다 적은 차간시간으로 합류하는 경향을 보이는 것으로 제시하였다.

2. 전후방 차량과의 관계

Michaels et al.(1989)은 ‘각속도’를 이용하여 (1)설계속도, (2)가속차로 길이, (3)운전자의 합류행태를 설명하는 모형을 개발하였다. 각속도는 단위시간(초)에 관측되는 진입차량과 본선차량사이의 각의 변화량이다. 그들은 각속도를 두 차량간의 속도차이, 차간거리, 진입차량의 운전석에서 후방차량의 전면 범퍼까지의 거리를 사용하여 추정하였다. 이러한 각속도를 토대로 한 운전자의 합류행태를 기준으로 교통량에 따른 가속차로 길이 설계방식을 제시하였다. 각속도는 가속차로 진입부에서 값의 변화가 있으나 가속차로를 진입부를 통과한 후에는 두 차량의 각의 변화가 미비하다. 값의 변화가 두드러지는 경우 그 값은 차로변경 수행 판단이 이루어진 후의 값이므로 본 연구의 변수로는 적절하지 않다.

Worrall et al.(1967)은 본선 후방차량과 진입차량의 속도 차이인 상대속도를 변수로 하여 고속도로 합류부에서 운전자의 운행행태를 분석하였다. 그는 연구를 통해 (1)진입 운전자의 차로변경 이행 의사결정에 본선의 교통량은 크게 영향을 미치지 않으며 (2)본선차량과 진입차량의 속도차이로 정의되는 상대속도의 절대값이 적을수록 진입차량 운전자의 임계 차로변경시간이 짧은 것으로 발표하였다.

미국의 도로설계 지침 시방서에서는 진입차량의 합류가 본선차량과 진입차량의 상대속도가 $\pm 8\text{km/h}$ 이내에서 합류가 이루어진다고 제시하고 있다(AASHTO, 1994). 그러나, Reilly et al.(1989)은 현장조사를 통한 연구에서 합류 상대속도가 $\pm 8\text{km/h}$ 미만인 경우는 운전자의 60% 미만이며 $\pm 8\text{km/h}$ 이상인 경우도 운전자의 40% 이상인 것으로 제시하였다.

3. 가속차로 위치 및 길이

Wattleworth et al.(1967)은 합류부의 연결로 형태, 가속차로의 길이, 램프의 종단경사, 합류각 등을 이용하여 다양한 기하 조건에서 운전자의 합류행태를 연구하였으며 여러 변수 중 가속차로의 길이가 합류행태에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석하였다.

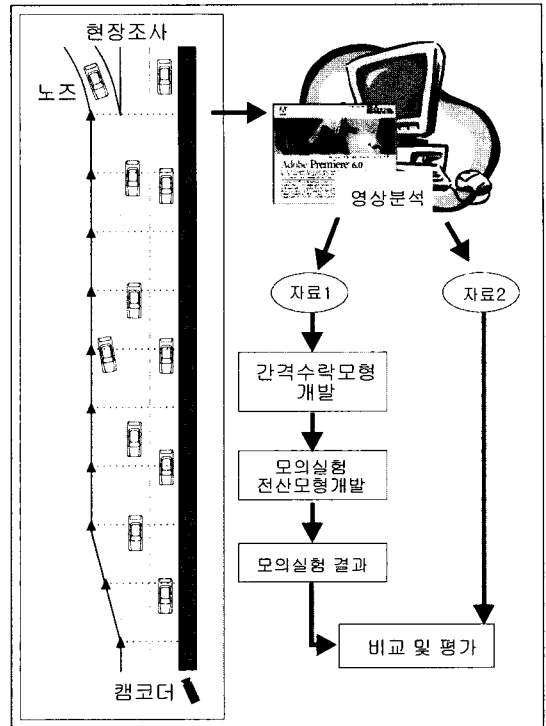
그는 합류각이 클수록 가속차로 내에서의 속도변화가 크고 가속차로의 길이가 짧을수록 진입차량의 가속율이 커진다고 분석하였으며, 또 가속차로의 길이가 길고 합류각이 작을수록 본선차량과의 차간시간을 거부하는 횟수가 작다고 분석하였다. 그들은 가속차로에서 합류위치의 분포가 감마분포와 유사하다고 제시하였다.

III. 연구방법

고속도로 합류부에서 진입차량의 강제차로변경을 설명하는 간격수락모형의 개발을 위하여 현장조사를 실시하였다. 가속차로 전 구간을 한 영상화면에 담아야 하는 자료수집과정의 제약으로 인하여 도심부 고속도로를 연구대상으로 설정하였다. 14개의 도심부 고속도로 합류부 가속차로의 길이를 실시 설계도면을 토대로 조사한 결과 가속차로의 길이가 150m~250m 범위 내에 있는 것으로 분석되었다. 조사된 도심부 고속도로¹⁾는 강변북로, 올림픽대로, 내부순환도로, 동부간선도로, 서부간선도로, 서울외곽순환고속도로이다. 이 중 다른 길이의 가속차로를 가지는 (1)목동교 합류부(가속차로 길이 170m)와 (2)오목교 합류부(가속차로 길이 236m)를 선정하여 현장조사를 실시하였다. 이 두 현장조사지점을 본 논문에서 지점 A와 지점 B로 칭하기로 한다. 지점 A와 지점 B에서의 제한속도는 70 km, 차로 폭은 3.8m 이다.

선정된 조사지점 A와 B의 가속차로 종료지점에 디지털 비디오영상 녹화기를 설치하였으며 정확한 거리 자료의 수집을 위하여 가속차로 길 어깨에 10개의 러버콘(Rubber Cone)을 등간격으로 설치하였다. 시간 자료로는 영상재생기에서 제시하는 1/30초 단위의 프레임 단위 값을 사용하였다.

이 두 지점에서 첨두시 2시간(오전 7시~오전 9시), 비첨두시 2시간(오전 10시~오후 12시)동안 비디오 영상녹화를 수행하였다. 영상녹화는 1/30초 단위로 분석이 가능한 디지털방식으로 이루어졌으며 녹화된 영상을 영상재생기를 이용 반복적인 정지와 재생작업을 거쳐 개별 차량의 위치, 속도, 일련의 통과시간 자료를 추출하였다. 추출된 자료를 토대로 자료분석, 모형개발, 모형검증을 수행하였으며 이러한 일련의 연구진행 과정이 <그림 2>에 도식화하여 제시하였다.



<그림 2> 연구수행 절차

각각의 조사지점에서 추출된 자료를 두개의 그룹(자료1 과 자료2)으로 분류하였다. 자료1은 모형의 개발에 자료2는 모형의 평가에 사용되었다. 자료1과 자료2는 전체 수집된 자료의 75%와 25%에 해당되는 것으로 자료의 분류는 무작위 난수에 의하였다.

자료1을 토대로 합류부에서의 운전자의 간격수락 행태모형이 개발되었으며 비주일 베이직 전산언어를 이용하여 본 연구를 통해 제시된 간격수락모형을 활용하는 모의실험 전산모형을 개발하였다. 개발된 전산모형을 이용하여 합류지점 A와 B에서의 상황을 자료2를 토대로 모의실험을 수행하였고 모의실험결과와 현장자료(자료2)를 비교하여 모형의 설명력을 검증하였다.

IV. 자료분석결과

조사지점 A와 B에서 영상분석을 통해 추출된 시간대별 본선 1차로 교통량 및 유입램프를 통한 본선 진입교통량을 <표 1>에 정리하였다. 본선 1차로 교통량의 경우 최소 1,129vphpl 에서 최대 1,851vphpl 까지의

1) 서울시 건설안전관리본부, 실시설계도면.

변동이 있으며 램프를 통한 진입교통량의 경우 최소 73vphpl 에서 최대 256vphpl 까지 변동이 있다. 조사지점 A에서의 첨두시간과 비첨두시간 동안의 본선 교통량 변화가 조사지점 B보다 크다.

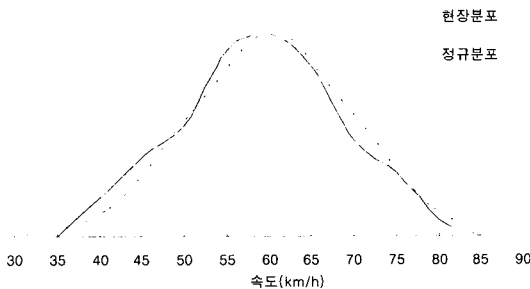
조사지점 A와 B는 같은 70km/h의 제한속도를 가지며 조사시간동안 관측된 본선 교통류의 주행속도는 평균 60km/h로 유사하였다. 이러한 이유로 두 지점에서 관측된 속도자료를 합하여 정규분포와 비교하였다. 현장분포와 정규분포(평균 60 km/h, 표준편차 10km/h)를 비교하여 현장속도분포가 정규분포에 의하여 설명될 수 있는지 적합도 검증시험(χ^2 -test)을 수행하여 검증하였다. 두 분포의 비교를 <그림 3>에 제시하였다.

속도분포를 설명하는 확률분포를 추정하는 과정은 모형의 (1)평가과정에서 사용될 모의실험 전산모형으로의 적용을 위한 것이며 (2)자유속도 대신 평균주행속도를 모의실험에 적용함으로 도로기하구조에 의해서 운행속도에 영향을 받지않는 모의실험의 단점을 극복하기 위함이다. 적합도 검증결과 95% 신뢰수준에서 현장 주행속도분포는 통계적으로 정규분포와 동일하다는 결론을 도출하였다.

조사지점 A와 B에서 수집된 전체자료를 무작위 난

<표 1> 조사지점별 교통량

지점	조사시간대	본선 1차로 교통량(vph)	램프 진입 교통량(vph)
A (가속차로 길이 170m)	07:00~08:00	1,851	235
	08:00~09:00	1,820	223
	10:00~11:00	1,320	81
	11:00~12:00	1,129	73
B (가속차로 길이 236m)	07:00~08:00	1,731	256
	08:00~09:00	1,845	241
	10:00~11:00	1,520	94
	11:00~12:00	1,210	84



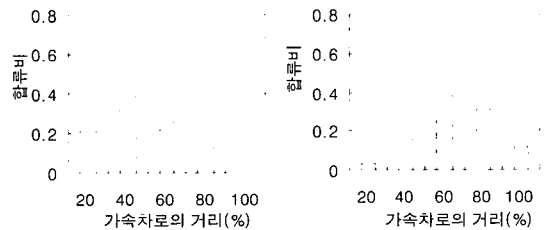
<그림 3> 현장의 속도분포와 정규분포의 비교

수를 토대로 하여 75% 대 25%의 비율로 두 개의 집단(자료1:자료2)으로 분류하였다. 다음의 세부단락은 모형의 개발에 사용된 첫번째 집단에 포함된 자료(자료 1)로 분석된 (1)본선의 밀도에 따른 합류비율, (2)진입차량 간격수락분포, (3)상대속도를 요약하여 제시한다.

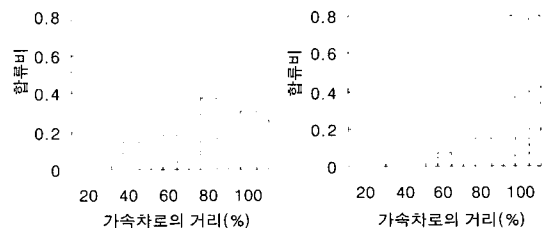
1. 각 가속차로 구간별 본선의 밀도에 따른 합류비율

고속도로 본선 교통흐름상태에 따른 진입차량의 합류행태를 분석하기 위하여 본선 교통흐름상태에 따른 진입차량의 합류위치의 분포를 정리하였다. 합류위치의 분포를 현장조사 지점별로 정리하여 두 지점에서의 행태를 비교하였고 본선 교통흐름상태의 측량척도로 밀도(대/km)를 사용하였다. 진입차량의 합류위치 분포는 진입차량이 본선으로 합류한 위치를 전체 가속차로의 길이의 비율로 제시한 값이다. 고속도로 본선에서의 밀도는 진입하는 차량이 가속차로의 시점을 통과하는 순간을 기준으로 가속차로 구간내의 밀도를 구하고 이를 km단위로 환산한 값이다.

가속차로 시점과 종점을 0(%)과 100(%)로 설정하고 가속차로 구간상의 합류위치를 0~20, 20~40, 40~60, 60~80, 80~100(%)으로 구분하여 본선차량의 밀도에 따른 진입차량의 합류위치분포를 <그림 4>와 <그림 5>에 각각 제시하였다. 조사지점A(170m)

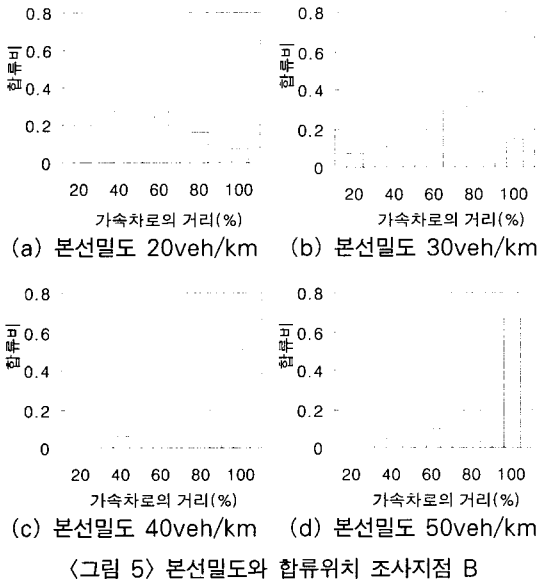


(a) 본선밀도 20veh/km (b) 본선밀도 30veh/km



(c) 본선밀도 40veh/km (d) 본선밀도 50veh/km

<그림 4> 본선밀도와 합류위치 조사지점 A



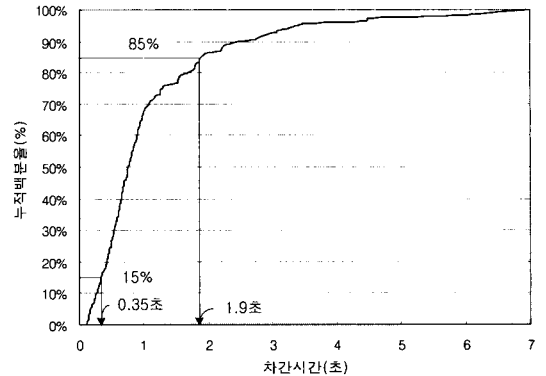
에서의 분포는 〈그림 4〉이며 조사지점B(236m)에서의 분포는 〈그림 5〉이다.

조사지점 A와 B에서 본선밀도가 낮을수록 가속차로에서의 진입차량 합류위치가 시점부근으로, 높을수록 종점부근으로 나타나는 것으로 분석되었다. 가속차로의 길이의 상이하더라도 합류위치의 분포는 가속차로의 길이에 비례하는 경향이 나타났다. 이 두 지점에서의 분포가 통계적으로 동일한 분포인지 확인하기 위하여 각 지점에서의 수락간격분포를 비교하였다.

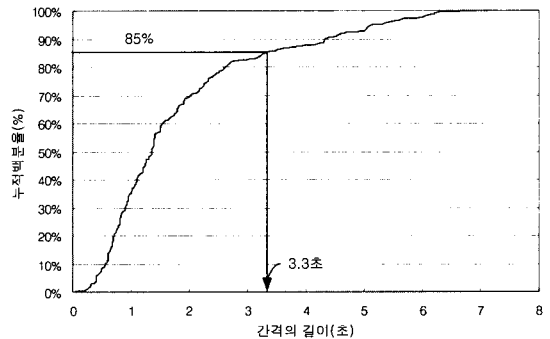
2. 진입 차로변경 수락간격분포

진입하는 차량은 본선으로 합류하기 위하여 강제차로변경을 실시하며 차로변경 대상 차로를 주행중인 두 차량사이의 간격을 사용한다. 진입차량이 본선으로 진입하는 과정에서 진입차량 운전자가 고려하는 간격은 전방차량과의 간격과 후방차량과의 간격이다. 전방차량과 진입차량의 간격을 누적하여 분포표로 정리하여 〈그림 6〉에 제시하였고 후방차량과 진입차량의 간격을 누적하여 분포표로 정리하여 〈그림 7〉에 제시하였다.

도출된 수락간격 누적분포는 본선의 밀도수준에 따라 정리된 자료집단에서 동일한 수의 표본을 무작위 선택하여 구성한 자료군을 사용한 것이다. 이는 각 본선 밀도수준별 교통량 균등분배를 통하여 교통량의 변화에 따른 오차를 최소화하기 위함이다. 각 본선 밀도수준별로 추출한 표본 수는 60개로 전체 300개의



〈그림 6〉 전방차량과의 간격수락분포



〈그림 7〉 후방차량과의 간격수락분포

수락간격자료를 이용한 수락간격 누적분포이다.

전방차량과 진입차량과의 간격수락의 경우 운전자의 15%가 0.35초를, 운전자의 85%가 1.9초를 사용하는 것으로 분석되었다. 후방차량과의 간격수락의 경우 운전자의 85%가 3.3초의 간격을 사용하고 있는 것으로 분석되었다.

문헌조사를 통하여서도 진입차량과 후방차량 사이의 간격이 합류를 결정하는 임계요소로 제시되어왔다. 본 분석을 통하여서도 나타나듯이 운전자의 85%가 차로변경 대상차로 주행 전방차량과의 간격으로 1.9초인 것으로 나타난 반면 차로변경 대상차로 주행 후방차량과의 간격은 3.3초인 것으로 나타났다. 운전자들은 후방차량과의 간격으로 전방차량과의 간격보다 1.7배 이상의 간격을 요구하고 있는 것이며 이는 진입차량의 합류 차로변경에 더 많은 영향을 미치고 있음을 뜻한다.

3. 합류위치별 후방수락간격분포

본선의 밀도수준에 따라 진입차량의 합류위치분포

는 가속차로 길이와 관계없이 본선의 밀도가 낮을 시는 가속차로의 시점 또는 중반부근에서, 높을 시는 가속차로의 종점부근에서 발생하는 것으로 분석되었다. 또, 합류부에서의 차로변경 간격수락은 진입차량과 후방차량과의 간격이 전방차량과의 간격에 비해 합류에 미치는 영향이 큰 것으로 분석되었다.

따라서 가속차로의 위치에 따라 후방차량과의 간격 분포가 서로 다른 두 곳의 조사지점(서로 다른 가속차로 길이)에서 동일한 형태를 나타내는지 실험하였다. 우선 가속차로의 길이를 동일한 수의 구간으로 분류하고 각각의 구간에서 보이는 후방차량간격분포를 비교하였다.

가속차로 세부구간 수의 산정을 위해 Sturges 방법을 적용하였다. Sturges 방법은 수집된 표본의 수를 토대로 통계적으로 유의한 세부 표본집단의 수를 결정하는 방법으로 식(1)에 제시되어 있다(양, 1997).

$$k = 1 + 3.32 \cdot \log n \quad (1)$$

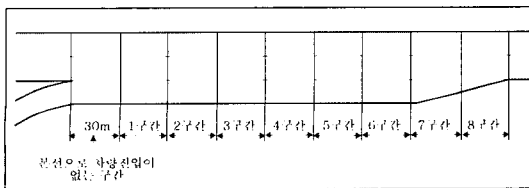
여기서,

k : 계급(class)의 개수

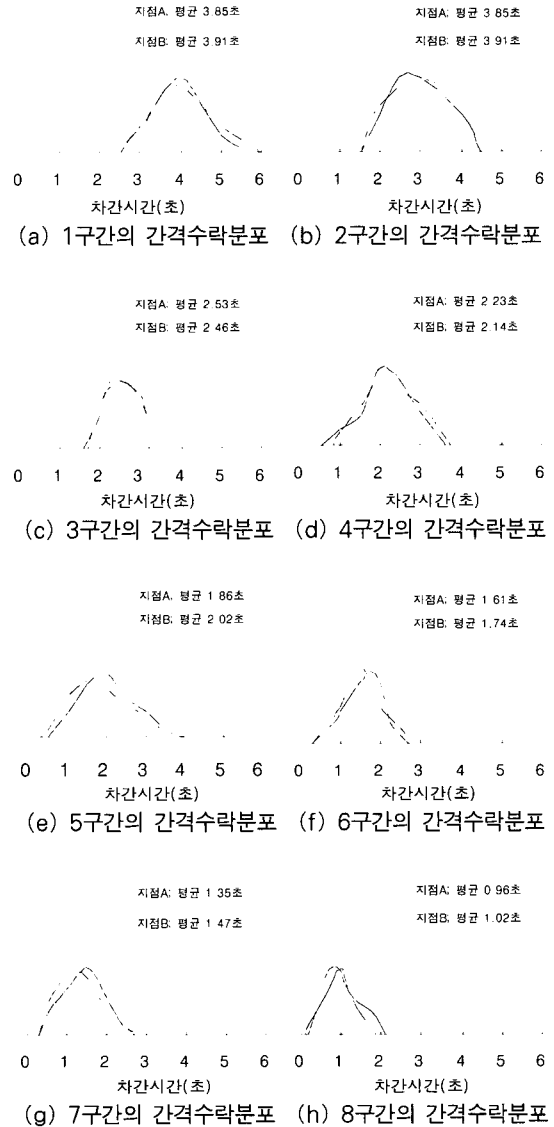
n : 데이터 수

Sturges의 방법에 의하여 산정된 구간의 수는 8개이며 이에 따라 가속차로를 <그림 8>과 같이 8개의 구간으로 분류하였다. 가속차로의 시점에서 30m 구간까지는 진입하는 차량이 없는 것으로 현장조사 관측이 되었다. 따라서 가속차로 시점에서 30m까지를 제외한 나머지 부분을 8개의 구간으로 분할하였다.

합류부 조사지점 A(가속차로 길이 170m)와 B(가속차로 길이 236m)의 각각의 8개 구간에서 관측된 후방차량수락간격 분포를 비교하였다. 각 구간에서 두 개의 다른 조사지점에서의 후방차량과의 수락간격분포의 비교를 <그림 9>에 제시하였다.



<그림 8> 가속차로의 구간분할



<그림 9> 지점1과 지점2에서의 각 구간별 후방차량과의 간격수락분포

본 연구를 통하여서도 진입차량이 가속차로의 하류 부분으로 갈수록 진입차량이 수락하는 차간시간의 평균값이 감소하는 것으로 나타났으며 이러한 분석은 Kita(1993)의 연구결과와 동일하다.

가속차로의 길이가 다른 두 조사지점에서 관측된 후방차량기준 수락간격분포가 8개의 세부구간을 기준으로 통계적으로 동일한 것인지 분석하기 위한 가설검증실험(χ^2 -test)을 95% 유의수준에서 수행하였다. 가설검증 실험에 사용된 귀무가설과 대안가설은 아래와

〈표 2〉 간격수락분포의 동일성 검정결과

구간	검정통계량	χ^2	H_0
1	1.52	$\chi^2_{0.05,3} = 7.81$	Reject
2	0.56	$\chi^2_{0.05,3} = 7.81$	Reject
3	1.51	$\chi^2_{0.05,3} = 7.81$	Reject
4	1.44	$\chi^2_{0.05,4} = 11.07$	Reject
5	3.85	$\chi^2_{0.05,4} = 11.07$	Reject
6	0.61	$\chi^2_{0.05,3} = 7.81$	Reject
7	1.82	$\chi^2_{0.05,3} = 7.81$	Reject
8	1.15	$\chi^2_{0.05,3} = 7.81$	Reject

같은 각 구간별 실험결과는 〈표 3〉에 정리하여 제시하였다.

H_0 : 조사지점 A, B의 구간 i에서의 수락간격분포는 서로 상이하다.

H_1 : 조사지점 A, B의 구간 i에서의 수락간격분포는 동일하다.

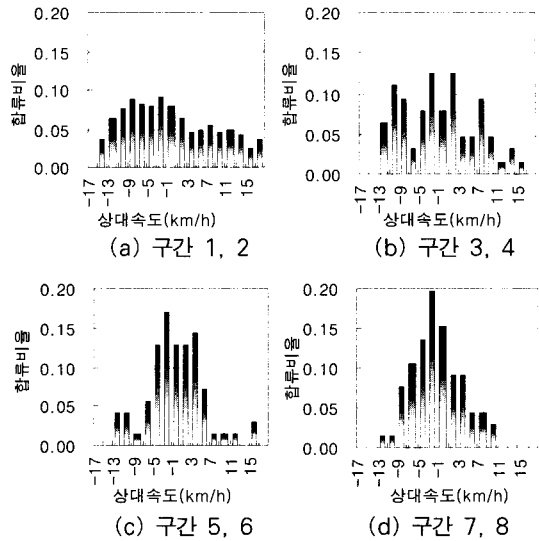
가설검증실험 결과 8개 구간 모두 귀무가설을 기각하여 진입차량이 합류부에서 본선으로의 차로 변경을 위해 수락하는 후방차량과의 간격 분포는 가속차로의 절대 길이와는 상관없이 전체 가속차로 길이 중 차량이 주행한 거리의 비율에 영향을 받는 것으로 분석되었다. 이러한 결론은 가속차로의 길이가 다른 두 조사지점 (A, B)에서 관측된 수락간격분포가 통계적으로 동일하다는 결론을 바탕으로 한 것이다.

4. 상대속도와 합류위차와의 관계

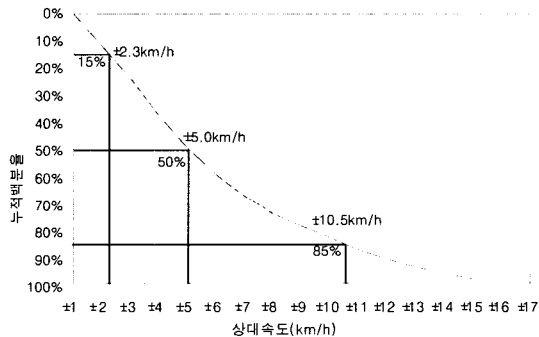
합류부 가속차로에서 본선으로 진입하는 차량은 본선의 차량속도와 유사한 속도를 내어 안전하게 차로 변경을 하기 위하여 가속 또는 감속을 하게 된다. 상대속도는 이러한 본선 후방차량속도와 가속차로를 주행 중인 진입차량의 속도의 차이이다.

조사지점 A와 B에서 관측된 속도자료를 동시에 고려하여 가속차로 구간 1 과 2, 3 과 4, 5 와 6, 7 과 8의 집단별로 상대속도를 정리하여 〈그림 10〉에 그래프로 나타내었다. 분석결과 고속도로 합류부에서 본선으로 합류하는 진입차량과 본선 후방차량과의 속도 차이는 $\pm 15\text{km/h}$ 이내인 것으로 분석되었다.

상대속도는 〈그림 10〉에서 나타나듯이 상대속도는



〈그림 10〉 상대속도와 합류위차와의 관계



〈그림 11〉 상대속도의 누적분포

가속차로 합류부(〈그림 (d)〉)의 경우가 상류부(〈그림 (a)〉)의 경우보다 적은 것으로 분석되었다. 이는 Worrall et al. (1967)의 연구내용과 같은 내용으로 가속차로의 여유길이가 적게 남아 있기 때문이고 운전자는 안전한 진입을 도모하고 있기 때문이다.

관측된 상대속도자료를 누적하여 〈그림 11〉에 제시하였다. 운전자의 85%는 상대속도가 $\pm 10.5\text{km/h}$ 이내에서, 운전자의 50%는 $\pm 5\text{km/h}$ 이내에서 합류를 수행하는 것으로 분석되었다. ASSHTO(1994)에서 제시하고 있는 $\pm 8\text{km/h}$ 의 상대속도는 운전자의 73%에 해당하는 값이다.

V. 간격수락모형의 개발

고속도로 합류부 조사지점 A와 B에서 유입램프를

통해 진입하는 차량이 본선 차량들간의 간격을 수락하며 차로변경하는 행태를 분석하였다. 본 연구에서 수행된 분석을 바탕으로 전산모의실험에서의 사용을 위하여 (1)다양한 운전자집단을 반영하고 (2)가속차로상의 위치를 고려하는 간격수락행태 모형의 개발하였다.

가속차로의 길이를 8개 구간으로 분류하여 두 곳의 조사지점에서 관측된 수락간격을 비교하여 각 구간별 두 조사지점에서의 수락간격분포가 95% 유의수준에서 통계적으로 동일하다는 결론을 얻었다. 이에 분류된 8개의 가속차로 구간을 기준으로 조사지점 A와 B에서 수집된 수락간격분포자료를 합하여 이 현장분포를 (1)정규분포와 (2)감마분포로 비교하였다.

선정된 확률분포식이 현장에서 수집된 수락간격분포에 대한 설명력을 검증하기 위하여 95% 유의수준에서 적합도 검증실험(Goodness-of-fit test: χ^2 -test)을 실시하였고 적합도 검증에 사용한 귀무가설과 대안가설은 다음과 같다.

H_0 : 현장에서 관측된 수락간격분포는 실험대상 확률분포식과 상이하다.

H_1 : 현장에서 관측된 수락간격분포는 실험대상 확률분포식과 동일하다.

각 구간별로 실시된 적합도 실험 결과를 <표 3>에

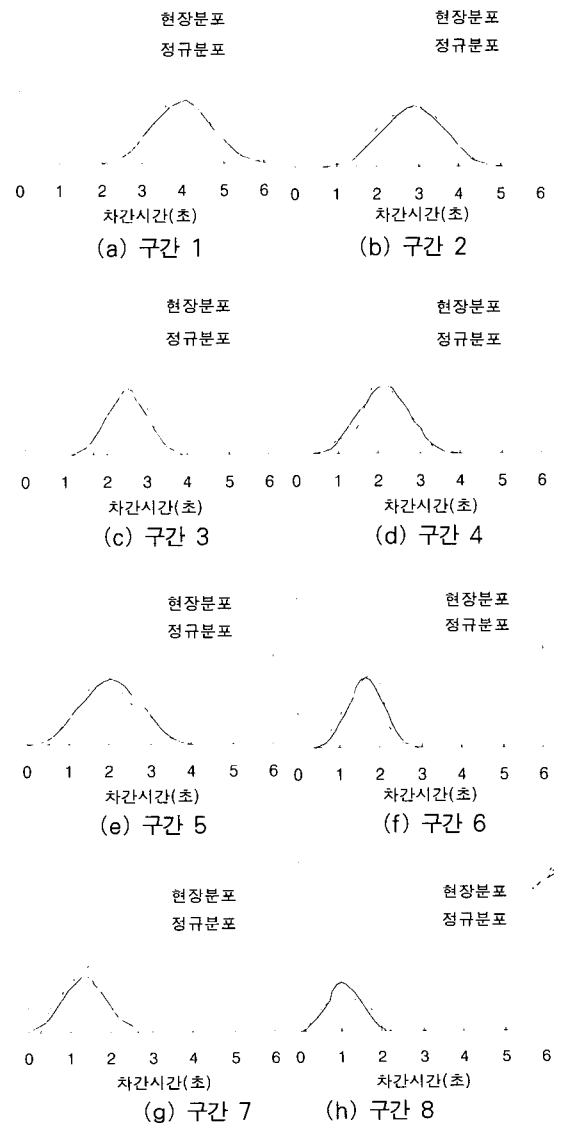
<표 3> 간격수락분포의 적합도 검정

구간	분포	검정통계량	χ^2	H_0
1	정규분포	4.95	$\chi^2_{0.05,3} = 7.81$	Reject
	감마분포	57.83		Accept
2	정규분포	3.12	$\chi^2_{0.05,3} = 7.81$	Reject
	감마분포	20.15		Accept
3	정규분포	4.07	$\chi^2_{0.05,3} = 7.81$	Reject
	감마분포	21.43		Accept
4	정규분포	5.02	$\chi^2_{0.05,4} = 11.07$	Reject
	감마분포	8.53		Reject
5	정규분포	9.88	$\chi^2_{0.05,4} = 11.07$	Reject
	감마분포	19.32		Accept
6	정규분포	5.52	$\chi^2_{0.05,4} = 7.81$	Reject
	감마분포	6.53		Reject
7	정규분포	5.54	$\chi^2_{0.05,3} = 7.81$	Reject
	감마분포	11.21		Accept
8	정규분포	4.84	$\chi^2_{0.05,3} = 7.81$	Reject
	감마분포	10.55		Accept

요약하였다. 합류부 진입차량이 수락하는 후방차량과의 간격은 정규분포가 모든 실험에서 귀무가설을 기각하여 통계적으로 현장자료는 정규분포를 따르는 것으로 도출되었다.

현장에서 관측된 수락간격의 분포와 정규분포를 이용하여 추정한 분포를 그래프로 비교하여 <그림 12>에 제시하였다.

모의실험 전산모형으로의 적용을 위하여 다양한 운전자집단이 모형에 설명되어야 한다. 각 운전자 집단에게 할당되는 임계수락간격의 값이 진입차량이 수행



<그림 12> 1~8구간의 현장분포와 정규분포의 비교

하는 가속차로의 구간에 따른 변화를 모형에 반영함이 본 연구의 목적이다. 따라서 본 연구에서는 각각의 가속차로 구간별로 10개의 운전자집단으로 운전자를 분류하고, 분류된 운전자는 가속차로 주행구간별로 임계수락간격 값을 갱신하는 모형을 개발하기 위하여 다음의 간격수락모형 적용과정(모의실험으로)을 설계하였다.

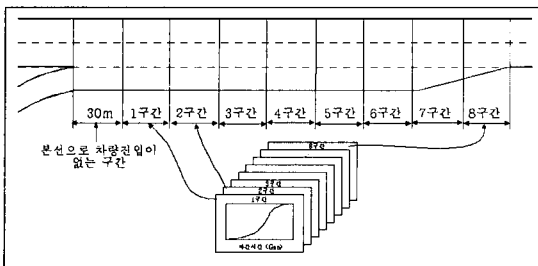
1. 각 가속차로 구간별로 추정된 정규분포식을 이용하여 10%에서 100%까지 10%씩 증가하며 10개의 임계 차간간격 값을 정하고 이를 10개의 운전자집단에게 각각 배정한다.
2. 각 운전자들은 가속차로를 진행함에 따라 구간의 변화가 있고, 구간의 변화에 따라 임계 차간간격 값들이 갱신된다.
3. 갱신되는 임계 차간간격의 값은 초기에 배정 받은 운전자 집단에 준한다. 모의실험에서는 전체구간에서 동일한 운전자집단 지표값(driver's type)을 사용한다.

요약하면 전체 8개의 가속차로 구간별로 8개의 정규분포가 추정되었으며 운전자의 임계수락간격은 자신에게 배정된 운전자집단지표에 준하여 주행위치에 따라 갱신된다. 이러한 과정을 <그림 13>에 제시하였다.

<표 4>는 개개의 가속차로 구간별로 10개의 다른 운전자집단에 대해 설정된 임계 수락간격 값이며 이는 추정된 정규분포에 의하여 도출되었다.

도출된 임계수락간격의 값들을 식(2)에 적용하여 고속도로 합류부에서 본선으로 진입하는 진입차량의 간격수락행태를 모의실험에 반영한다.

$$\begin{aligned} \mu_{ij} &= 1 \quad \text{if, } g_{ij} \leq g \\ &= 0 \quad \text{if, } g_{ij} > g \end{aligned} \quad (2)$$



<그림 13> 구간별 간격수락분포의 적용

<표 4> 운전자 집단과 구간별 임계간격(g) (단위:초)

비고	구간								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
운전자집단지표	1	6.00	5.30	4.00	3.80	4.00	2.97	2.70	2.05
	2	4.80	3.67	3.20	2.85	2.90	2.25	2.06	1.61
	3	4.60	3.50	2.80	2.60	2.60	2.00	1.82	1.42
	4	4.30	3.25	2.75	2.45	2.42	1.93	1.67	1.31
	5	4.20	3.05	2.60	2.30	2.25	1.80	1.53	1.20
	6	3.85	2.90	2.50	2.10	2.04	1.68	1.38	1.10
	7	3.70	2.65	2.40	1.90	1.85	1.55	1.23	0.95
	8	3.60	2.40	2.31	1.80	1.65	1.42	1.10	0.70
	9	3.35	2.20	2.10	1.65	1.40	1.25	0.95	0.58
	10	3.00	1.90	1.80	1.30	1.10	1.08	0.68	0.42

여기서

μ_{ij} : 간격수락(=1) 혹은 거부(=0)

g_{ij} : i (운전자타입), j (구간)에서의 임계간격(초)

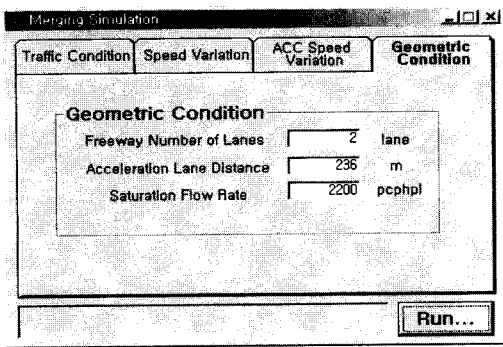
g : 본선후방차량과 진입차량간의 차간시간(초)

본선 후방차량과의 진입대상 차량간의 간격의 수락여부가 식(2)에 의하여 모의실험에서 결정된다. 본선 전방차량과의 간격수락을 반영하기 위하여 현장에서 조사된 운전자의 15% 수락간격을 최소수락간격으로 사용하여 전방차량 수락간격이 최소수락간격을 만족하지 않을 경우 본선으로의 진입이 불가능한 것으로 모의실험에서 적용한다. 또, 분석에서 도출된 최대 상대속도를 고려하여 후방차량과 진입차량의 상대속도가 $\pm 15\text{km/h}$ 이내일 경우만 진입을 허락한다.

IV. 모형의 검증

본 연구를 통해 제시된 간격수락모형의 실험을 위하여 세 개의 지표를 선정하였다. 첫째는 본선의 밀도별 합류 위치이고, 둘째는 진입차량의 합류 시 상대속도, 셋째는 합류 시 간격수락 분포이다. 이 세 개의 지표를 이용하여 현장에서 수집된 자료2 와 전산 모의실험 결과와 비교하고 검증한다.

본 연구를 통해 제시된 간격수락모형의 실험을 위하여 비주얼 베이직 전산언어를 사용하여 1초 단위 모의실험을 실행하는 Merging Simulation(MS) 전산모의실험모형을 개발하였다. MS모형은 먼저 본선과 가속차로에서 차량이 발생하게 되면 진입하고자



〈그림 14〉 시뮬레이션 프로그램의 입력 창

〈표 5〉 자료 2의 특성(전산 모의실험에 사용된 입력 값)

조사지점	램프진입 교통량(vph)	본선 하위1차로 교통량(vph)
지점1(가속차로 170m)	235	1,851
지점2(가속차로 236m)	256	1,731

하는 차량은 1초 간격으로 본선의 전방과 후방차량의 위치와 간격을 추적하게 된다. 유입램프에서 발생된 진입차량은 가속차로 상에서 본선 전방 및 후방 차량과의 차간간격을 검토한다. 가속차로의 위치에 따라 임계간격이 정하여 지고 진입 차로변경이 가능할 경우 본선으로 합류한다. MS모형은 최종 차량의 합류위치, 상대속도, 차간간격을 결과물로 출력한다. 〈그림 14〉는 MS의 입력 창을 보여준다.

MS 모형의 입력 값으로는 본선과 램프의 교통량, 초기속도분포, 최소 차간시간, 가속차로의 길이, 모의 실험시간, 포화교통량 등이며 출력값으로는 본선의 밀도, 개별 진입차량의 진입위치와 차간시간, 본선 진입 시 본선 후방차량과의 상대속도 등이다.

현장조사를 통하여 수집되었으나 모형의 개발에 사용되지 않은 자료2의 자료값을 정리하여 〈표 5〉에 제시하였고 이를 입력값으로 사용하였다.

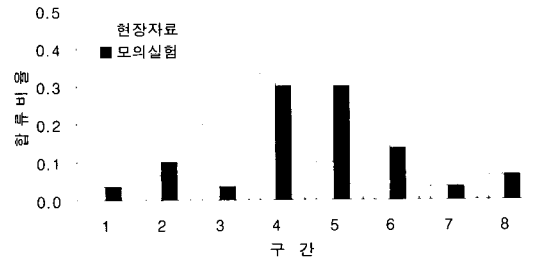
다음의 세부단락은 모의실험결과와 현장에서 수집된 자료를 (1)본선의 밀도별 합류위치, (2)합류 시 진입차량과 후방차량의 간격수락분포, (3)합류 시 진입차량과 후방차량의 상대속도를 지표로 비교하여 제시한다.

1. 본선의 밀도별 합류위치

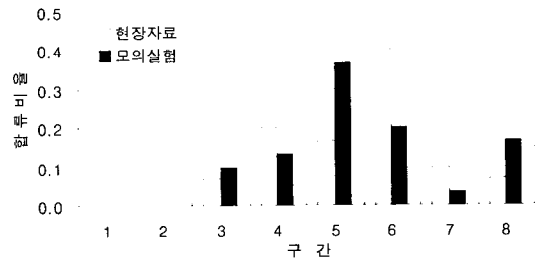
고속도로 본선 밀도의 변화에 따라 진입차량의 가속차로에서 본선으로 차로변경하는 위치의 변화를 비

교하여 〈그림 15〉에 나타내었다. 본선의 밀도 수준에 따라 밀도가 낮을 시에는 가속차로 진입부에서 중심부근에, 높을 시에는 가속차로 종료부에서 진입이 이루어지는 경향이 모의실험결과와 현장자료 모두에게서 발견되었다.

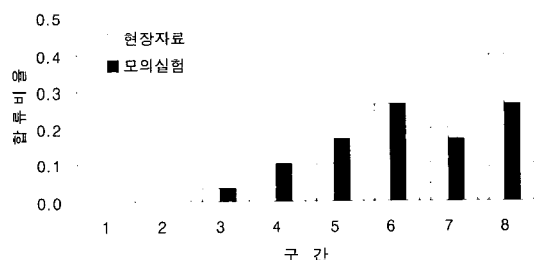
모의실험결과가 현장에서 수집된 합류위치의 경향을 따르는지 적합도 검증실험을 신뢰수준 95% 에서 다음의 귀무가설과 대안가설을 사용하여 수행하였다.



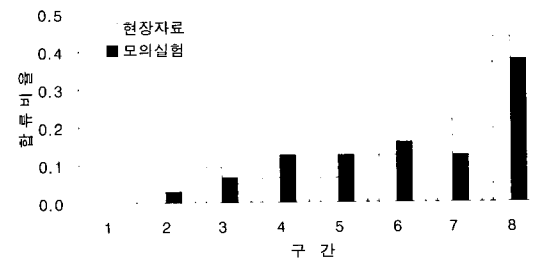
(a) 본선의 밀도 20대/km



(b) 본선의 밀도 30대/km



(c) 본선의 밀도 40대/km



(d) 본선의 밀도 50대/km

〈그림 15〉 가속차로 길이 조사지점의 밀도별 합류위치

H₀ : 현장자료와 시뮬레이션 결과는 다르다.

H₁ : 현장자료와 시뮬레이션 결과는 같다.

두 집단의 합류위치의 동일성 검증결과 4개의 밀도 수준에서 모두 귀무가설을 기각하였고, 따라서 현장자료에서 나타나는 합류위치의 경향이 본 연구에서 제시된 간격수락모형을 사용하는 모의실험을 통해 설명될 수 있다는 결론을 도출하였다. <표 6>은 가설검증실험 결과를 요약한 것이다.

조사지점 A와 B에서 수집된 자료를 분리하여 각각의 가속차로 길이에 따라 동일한 결론의 도출여부를 평가하기 위하여 두 개의 조사지점에 따라 본선의 밀도에 따른 진입차량 합류위치 자료를 기준으로 신뢰수준 95%에서 쌍체검정(Paired t-test)실험을 수행하였다. 쌍체검정은 관측표본 간의 차이를 이용하여 검증하는 방법이다. 두 개의 조사지점 A(가속차로 길이 170m)와 B(가속차로 길이 236m)에 대하여 현장자료와 시뮬레이션 결과를 비교하였으며 검증결과를 <표 8>에 요약하였다. 조사지점 A와 B 모두에서 귀무가설을 기각하므로 현장자료와 모의실험 결과는 통계적으로 차이가 없는 것으로 결론을 도출하였다.

<표 6> 합류위치의 동일성 검정결과

밀도(대/km)	검정통계량	χ^2	H ₀
20	6.94	$\chi^2_{0.05,7} = 14.07$	Reject
30	7.13	$\chi^2_{0.05,7} = 14.07$	Reject
40	4.39	$\chi^2_{0.05,7} = 14.07$	Reject
50	2.62	$\chi^2_{0.05,7} = 14.07$	Reject

<표 7> 현장자료와 시뮬레이션 결과의 통계적 검증

현장조사 지점	본선의 밀도 (대/km)	검정통계량	기각역	H ₀ 기각 여부
지점1 (170m)	20	-1.83	T =2.145 (= t _{0.025, 14})	Reject
	30	-1.70		Reject
	40	1.16		Reject
	50	1.41		Reject
지점2 (236m)	20	-1.60	T =2.145 (= t _{0.025, 14})	Reject
	30	1.28		Reject
	40	1.59		Reject
	50	1.72		Reject

2. 진입차량의 합류 시 상대속도

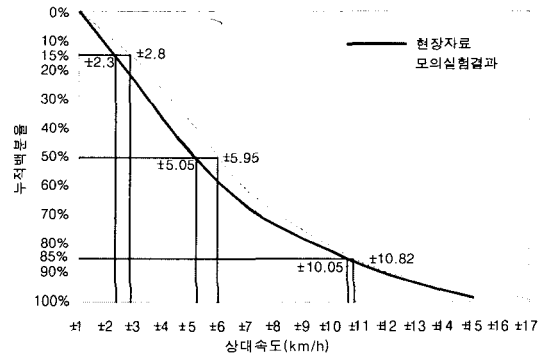
현장에서 관측된 합류부 차로변경 시 본선 후방주행차량과 진입차량의 상대속도수준을 모의실험결과와 비교하여 <그림 16>에 제시하였다. 그림은 상대속도를 누적한 그래프로 현장자료와 모의실험결과가 크게 다르지 않은 것을 가시화한다.

운전자의 85%를 기준으로 현장자료는 ±10.05km/h에서 합류를 하며 시뮬레이션 결과에서는 ±10.82km/h에서 합류를 하는 것으로 도출되었다. <표 8>은 모의실험을 이용한 결과가 현장에서 관측된 진입차량의 상대속도분포를 설명하고 있는지 통계적 유의성을 검증하기 위해 신뢰수준 95%에서 적합도 검정을 수행하였으며 검정에 다음의 귀무가설과 대립가설을 적용하였다.

H₀ : 현장자료와 시뮬레이션 결과는 다르다.

H₁ : 현장자료와 시뮬레이션 결과는 같다.

통계적 검증결과 귀무가설이 기각되므로 모의실험의 결과가 현장에서 관측한 자료와 통계적으로 다르지 않다는 결론을 도출하였다.



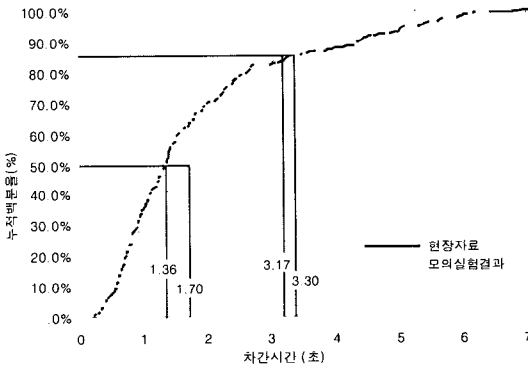
<그림 16> 현장자료와 모의실험 결과의 상대속도 비교

<표 8> 상대속도분포의 통계적 검증

검정통계량	χ^2	H ₀
11.07	$\chi^2_{0.05, 211} = 245.88$	Reject

3. 현장자료와 시뮬레이션의 간격수락분포

현장에서 관측된 합류부 후방차량과 진입차량의 간격수락분포와 모의실험에서 결과된 간격수락분포를 비교하여 <그림 17>에 제시하였다. 그림은 수락간격



〈그림 17〉 현장자료와 모의실험결과의 간격수락분포 비교

〈표 9〉 간격수락분포의 통계적 검증

검정통계량	χ^2	H ₀
14.47	$\chi^2_{0.05, 312} = 354.19$	Reject

을 누적한 그래프로 현장자료와 모의실험결과가 크게 다르지 않음을 가시화한다.

현장에서는 진입차량과 본선후방차량과의 차간시간은 3.3초인 경우 운전자의 85%가 진입을 하는 것으로 관측되었으며 모의실험 결과는 운전자 85%가 3.17초를 사용하는 것으로 분석되었다. 운전자의 50%를 기준으로 하는 하였을 시 현장자료에서는 1.36초로 모의 실험에서는 1.7초인 것으로 비교되었다. 〈표 9〉는 본선후방차량의 간격수락분포에 대한 현장분포와 시뮬레이션 결과와의 동일성 여부를 판단하기 위하여 신뢰수준 95%에서 적합도 검정실험을 수행하였다.

통계적 검증결과 귀무가설이 기각되므로 모의실험의 결과가 현장에서 관측한 자료와 통계적으로 다르지 않다는 결론을 도출하였다.

V. 결론 및 향후연구과제

본 연구에서는 단순히 운전자 집단만을 고려하는 기존의 모의실험방법의 단점을 극복하기 위하여 가속차로를 일정 구간으로 세분하여 그 해당구간에 따라 다른 운전자 간격수락행태를 반영하는 모형을 제시하였다. 제시된 모형은

1. 본선 전방차량과 진입차량과의 간격
2. 본선 전/후방차량과 진입차량과의 최소간격수락 행태
3. 본선 후방차량과 진입차량의 상대속도

를 토대로 합류부에서의 강제차로변경을 모사한다. 현장자료와 제안된 방법이 사용된 모의실험의 출력물과의 비교결과 (1)본선의 밀도별 가속차로에서의 합류위치, (2)본선 후방차량과 진입차량과의 상대속도, (3)수락간격 누적분포 모두 95% 신뢰수준에서 모의 실험분석결과와 조사된 현장자료가 통계적으로 동일한 것으로 분석되었다.

연구결과와 현장에서 수집된 조사자료의 분석을 통하여 도출된 국내 합류부 교통류의 특성을 요약하면 아래와 같다.

1. 본선의 밀도의 변화에 따라 가속차로 시점에서 종점까지 각 위치별 간격수락분포가 다르며 이 때 수락간격분포는 정규분포를 따른다.
2. 도심부 고속도로 합류부 진입차량의 합류 간격수락행태는 가속차로의 절대길이에 영향을 받지 않으며 '가속차로 주행 잔여거리 대 가속차로 절대길이의 비(%길이)'에 영향을 받는다.
3. 진입차량 운전자는 본선주행 후방차량과의 간격이 본선주행 전방차량과의 간격보다 1.7배 큰 간격을 요구한다. 이는 합류부 진입차량의 간격수락행태에 미치는 영향이 본선주행 전방차량보다 후방차량이 더 큰 것을 뜻한다.
4. 진입차량 운전자의 85%는 본선 후방차량과 진입차량의 속도차이(상대속도)가 $\pm 10.5\text{km/h}$ 보다 같거나 적을 경우 차로변경을 실시한다.

본 연구에서는 가속차로에서 본선으로 진입하는 차량의 간격수락행태만을 고려하였으나 보다 발전된 합류부 모의실험분석을 위하여 다음의 과제를 향후연구로 제시한다.

1. 고속도로 합류부 상류 본선에서 합류부에서의 상충을 예상하여 수행하는 차로변경(예상 차로변경)에 의하여 변화하는 합류부 본선 차로이용률에 대한 연구를 향후연구과제로 제시한다.
2. 국내 운전자의 특성을 반영하고 않는 해외 모의 실험 전산모형이 활발하게 국내 분석에 사용되고 있다. 그러나 이러한 모형이 사용하고 있는 변수기분값은 국내 운전자의 운전행태를 반영하고 있지않아 국내연구에 활용함에 무리가 있다. 이에 국내 운전자의 특성을 반영하는 고속도로

모의실험 전산모형의 개발을 향후과제로 제시한다.

참고문헌

1. AASHTO(1994), "A Policy on Geometric Design of Highways and Streets", FHWA.
 2. Drew, D. R.(1969), "Traffic Flow Theory and Control", McGraw-Hill.
 3. Henry, C. and A. Halati(1997), "CORSIM - Corridor Traffic Simulation Model", TRB, 76th Annual Meeting, Tape of Session 197.
 4. Kita, H.(1993), Effects of Metering Lane Length on the Merging Behavior at Expressway On-Ramp, Proceedings of the Twelfth International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation, 37-51, Berkeley, California.
 5. Michaels, R. M. and J. Fazio(1989), Driver Behavior Model of Merging, TRR 1213, 4-10.
 6. Reilly, W.R., et al(1989), Speed-Change-Lanes. Final Report NCHRP 3-35, Transportation Research Board.
 7. Wattleworth, J.A., et al(1967), Operational Effects of Some Entrance Ramp Geometrics on Freeway Merging, HRR 208, 79-122.
 8. Worrall, R. D., et al(1967), Merging Behavior at Freeway Entrance Ramps: Some Elementary Empirical Considerations, HRR 157, 77-106.
 9. 양완연(1997), 일반통계학, 연학사.
- ✉ 주 작 성 자 : 김진태
 ✉ 논문투고일 : 2002. 6. 14
 논문심사일 : 2002. 9. 9 (1차)
 2002. 11. 21 (2차)
 심사판정일 : 2002. 11. 21
 ✉ 반론접수기간 : 2003. 4. 30