



## 연속류도로 합류영향구간 교통류 나류현상 분석

## Analysis of Turbulence on a Merge Influence Section in Uninterrupted Facility

김 현 상\* 도 철 웅\*\*

Kim, Hyun Sang Do, Tcheol Woong

### Abstract

Sections under the influence of merging in an uninterrupted facility create irregular interaction between vehicles, such as lane change, speed acceleration and deceleration because of the merging of ramp traffic flows which have traffic characteristics different from those of the main line. This causes a confused traffic flow phenomenon(turbulence), which is considered an unstable traffic characteristic between various continuous points in consideration of traffic conditions. In this study, in merge influence sections, detectors by lane-point were installed to create time and space-series traffic data. The least significant difference(LSD), as the criteria for discriminating a significant speed change between points, was calculated to examine the turbulence. As a result, turbulence in merge influence section was found to change the zones of such occurrence and the seriousness levels according to traffic condition. Thus, the maximum merge influence section due to the turbulence was created in the traffic condition before congestion when traffic increases. According to characteristics of changes in speed, merge influence section was divided into upstream 100m~downstream 100m(a section of speed reduction), and downstream 100m~downstream 400m(a section of reduced speed maintenance and acceleration).

**Keywords :** merge influence section, turbulence, instability, spatial speed variation, LSD : least significant difference

요지

연속률도로 합류영향구간에서는 본선과 다른 교통특성을 가진 연결로교통류의 합류로 차로변경 및 가감속과 같은 차량간의 불규칙한 상호작용이 발생하여 교통류의 난류현상을 야기한다. 따라서, 난류현상은 운행상태를 고려하여 연속된 지점간의 불안정한 교통특성으로 판단하여야 한다. 본 연구에서는 합류영향구간에 차로-지점별 검지기를 설치하여 시공간적으로 연속된 교통자료를 구축하였으며, 지점간에 유의한 속도변화를 판단하는 기준으로 최소유의차(LSD) 통계값을 산정하여 난류현상을 분석하였다. 분석결과, 합류영향구간 난류현상은 운행상태에 따라 발생구역 및 심각도가 변화되는 것으로 나타났다. 이에 따라 난류현상에 의한 최대 합류영향권역은 교통량이 증가하는 혼잡전 운행상태에서 보여지며, 속도변화 특성에 따라 상류 100m~하류 100m의 “감속구간”과 하류 100m~하류 400m의 “검속속도유지 및 가속구간”으로 구분할 수 있었다.

**핵심용어:** 합류영향구간, 난류현상, 불안정성, 공가적 속도변화, 최소유의차

\* 정희원·한양대학교 대학원 교통공학과 박사과정(E-mail : ihy.insang@naver.com)

\*\* 정희원 · 한양대학교 대학원 교수(E-mail : tcbeol@yu.ac.kr)

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

합류구간은 기하구조 기준으로 가속차로 접속구간에 해당되지만, 교통류 측면에서 보면 기하구조 범위를 넘어 교통특성의 변화로 난류현상이 발생하는 본선구간까지도 포함된다. 합류구간 난류현상은 본선과 다른 교통특성을 가진 연결로교통류가 합류하면서 발생하는 차로변경 및 가·감속과 같은 차량간의 불규칙한 상호작용으로 나타나며, 연속류의 상충으로 정의된다.

따라서, 합류구간 난류현상을 분석하기 위해서는 우선 난류에 대한 정의와 자료범위가 명확하게 정립되어야 한다. 그러나, 기존 연구들은 지점별 속도 표준편차를 난류 발생의 평가지표로 설정함에 따라, 자료범위가 시간적으로 특정시간대에 국한하거나 인접한 지점을 동일 시간대가 아닌 유사한 운행상태로 구분하였으며, 공간적으로는 불연속 지점별 자료를 이용하여 난류현상을 판단함으로서 합류영향권역에서 시공간적으로 연속된 교통특성 변화를 규명하지는 못하였다.

이에 따라 본 연구는 합류구간 난류현상을 연속된 지점간의 유의한 속도변화로 정의하고, 24시간의 연속된 시공간 자료를 4가지 운행상태로 구분하였다. 또한, 운행상태별 교통류의 안정상태를 고려한 지점간의 속도변화를 기준으로 객관적인 난류현상의 발생 권역 및 심각도를 분석하였다.

이로써 본 연구에서는 합류구간 난류현상을 분석하기 위한 자료구축 및 분석방법을 제시하였으며, 분석결과로는 합류에 의해 발생하는 교통류 난류현상을 기준으로 합류 영향권역 및 영향 심각도를 도출하였다.

### 1.2 연구의 범위와 절차

#### 1.2.1 연구의 범위

본 연구는 합류영향구간의 난류현상을 분석하기 위하여, 본선 및 연결로 운행상태의 변화가 다양하며 일정한 첨두시간대 반복정체를 나타내는 동부간선도로 상행 군자교 합류구간(본선 3차로, 연결로 1차로)을 조사대상 구간으로 선정하였다.

공간적 범위는 합류연결로 접속구간 뿐만 아니라 상류 400m~하류 500m(총 1.08km) 영향구간을 포함하였으며, 시간적 범위는 24시간의 다양한 교통상황을 포함하기 위하여 2회 조사(2008/7/7, 7/29 월요일, 13~14시간/1회)로 연속된 시공간자료를 구축하였다.

조사방법은 그림 1과 같이 일정간격(100m, 합류구간 60m)으로 NC-97 검지기를 설치(총 40개)하여 각 지점별 개별 차량의 통과시각, 속도, 차량길이 자료를 5분단위의 교통량, 속도, 밀도 교통특성변수로 정리하였다. 여기서, 밀도(K)는 단위구간내 점유한 차량대수로서, 5분 교통유율(Qi)을 공간평균속도(Usi)로 나누어 산정( $K = Qi / Usi$ )한 값을 이용하였다.

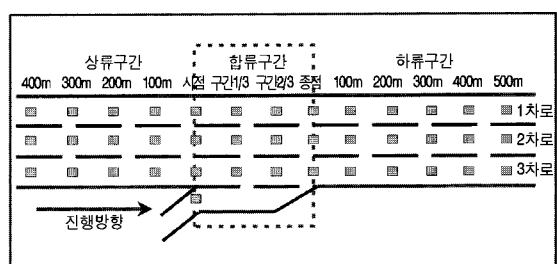


그림 1. 연구의 공간적 범위 및 검지기(NC-97) 설치도

#### 1.2.2 연구의 절차

합류영향구간에서 교통류의 공간적 난류현상을 분석하기 위한 과정은 그림 2와 같이 4단계로 수행되었다.

개로 본선 차로별 13개 지점(3차로), 총 39개 지점에서 12,108개, 연결로는 1개 지점 396개 이다.

조사된 교통량의 범위는 84vphpl~2,040vphpl이며, 차로당 평균 교통량은 본선 1,007vphpl, 연결로 1,081vphpl으로 본선과 연결로가 비슷한 수준으로 나타났다. 차로별로는 1차로 1,073vphpl, 2차로 1,165vphpl, 3차로 830vphpl으로 2차로 교통량이 가장 많으며, 3차로 교통량이 상대적으로 가장 적은 것으로 조사되었다.

속도는 다양한 운행 상태를 포함하는 15.56kph~113.57kph 범위이며, 평균 속도는 본선 72.22kph, 연결로 60.64kph로 본선 평균 속도에 비해 연결로의 속도가 확연히 낮은 것으로 분석되었다.

밀도는 1.00vpk~84.49vpk의 범위를 형성하며, 평균 밀도는 본선 17.77vpk, 연결로 20.58vpk로서 연결로의 밀도가 상대적으로 높은 이유는 본선과 교통량은 유사하지만 속도가 낮기 때문이다.

표 3. 교통량, 속도, 밀도의 기본 통계치

구 분		1차로	2차로	3차로	본선 (1,2,3 차로)	연결로	전체 (본선+ 전체)
교통량 (vphpl)	평균	1,072.14	1,164.14	829.93	1,006.66	1,080.73	1,009.01
	표준편차	382.85	352.40	425.09	416.91	319.19	414.36
	범위	1,872	1,728	1,872	1,956	1,440	1,956
	최소값	108	312	84	84	252	84
	최대값	1,980	2,040	1,956	2,040	1,692	2,040
	관측수	3,768	3,672	4,668	12,108	396	12,504
속도 (kph)	평균	75.22	69.99	71.27	72.11	60.64	71.75
	표준편차	21.79	20.00	18.35	20.08	13.85	20.02
	범위	96.04	85.45	94.64	98.01	77.11	98.01
	최소값	17.53	17.47	15.56	15.56	17.92	15.56
	최대값	113.57	102.92	110.20	113.57	95.03	113.57
	관측수	3,768	3,672	4,668	12,108	396	12,504
밀도 (vpk)	평균	18.24	20.84	14.97	17.77	20.58	17.86
	표준편차	14.51	15.29	13.88	14.72	12.86	14.67
	범위	74.96	81.21	76.92	83.49	74.93	83.49
	최소값	1.04	3.28	1.00	1.00	3.41	1.00
	최대값	75.99	84.49	77.92	84.49	78.34	84.49
	관측수	3,768	3,672	4,668	12,108	396	12,504

#### 4. 자료분석

합류구간의 교통류 난류현상 지표로 이용되어온 지점별 속도 표준편차로는 연속된 지점간의 공간적 교통특성 변화를 나타내지 못하는 한계와 객관적인 판단지표를 설정하기 어려운 문제로 인하여 난류현상을 설명하는데는 한계가 있어왔다.

따라서, 본 연구에서는 “합류구간 난류현상”을 ‘합류영향구간에서 연속된 지점간의 유의한 속도변화’로 정의하였으며, 이를 기준으로 객관적인 난류현상의 발생권역 및 심각도를 분석하였다.

분석방법은 운행상태별 분석시간대를 구분하였으며, 다중 분산 분석 (ANOVA : Analysis of Variation)을 활용하여 조합이 가능한 모든 군을 검정하는 방법으로 최소유의차(LSD : Least Significant Difference) 통계값을 산정하였다.

운행상태는 그림 6 및 표 4와 같이, 24시간 교통량 및 밀도변화에 대하여 도로용량편람(2001)의 고속도로 연결로 접속부 서비스수준 기준과 운행상태를 반영하여 원활 및 혼잡상태의 시간대를 판단하였

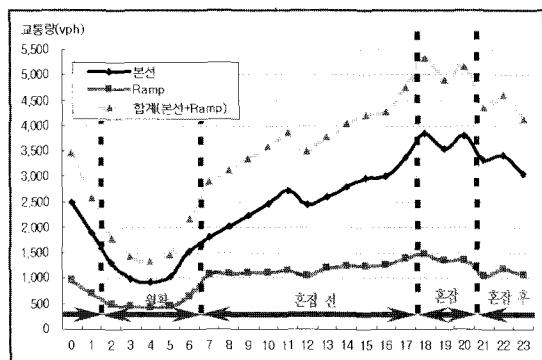


그림 6. 운행상태를 고려한 시간대 구분 기준

운행상태	시간대	교통량		밀도 (vpk)
		총(vph)	차로(vphpl)	
원활	02~06	1800 미만	600 미만	6 이하
혼잡 전	07~17	1800~4500	600~1500	6~22
혼잡	18~20	4500 이상	1500 이상	22 초과
혼잡 후	21~01	1800~4500	600~1500	6~22

하게 규명할 수 없다. 따라서, 본 절에서는 객관적인 합류구간 교통특성 변화를 분석하기 위한 자료의 범위 및 내용을 제안하고자 한다.

### 3.1 시공간적 범위

합류구간 교통류 난류현상은 본선 및 연결로의 운행상태에 따라 발생 범위 뿐만 아니라 심각도도 변화한다. 따라서, 한정된 시간(첨두, 비첨두)의 분석은 운행상태에 따른 교통특성을 반영하지 못한다. 특히, 속도 표준편차로 난류현상을 분석하는 경우 표준편차는 운행상태에 따라 변화 폭이 다르기 때문에 특정 시간대의 표준편차 범주를 다른 운행상태에 적용할 수 없다. 따라서, 다양한 운행상태를 포함하는 연속된 시간 자료가 구축되어야 한다.

또한, 난류현상을 야기하는 차로변경, 가감속 등의 행태는 연결로 접속구간에서 주로 나타나지만, 예상적 판단, 합류 여파 등의 상황으로 상류 및 하류구간에서도 발생한다. 따라서, 공간적 범위는 기존 문헌의 합류영향권역을 포함하는 최소 상류 300m~하류 400m 이상으로 확대하여 조사되어야 한다.

시공간적 기준으로 난류현상은 연속된 지점간에 동일한 시간대의 교통특성 변화로 분석되어야 한다. 그러나, 불연속적인 지점자료를 시간대가 아닌 운행 상태 기준으로 분류하여 분석하면 자료특성은 유사한 운행상태를 나타내지만, 실제로는 다른 시간대, 다른 운행상태의 교통특성 자료인 것이다. 따라서, 이 자료에 의한 난류현상 판단은 오류를 야기할 수 있다. 그러므로, 연속된 지점간 속도변화로 난류현상을 분석하기 위해서는 운행상태 기준이 아닌 운행상태를 고려한 시간대를 기준으로, 또한 시공간적으로 연속된 자료가 구축되어야 한다.

### 3.2 내용적 범위

합류영향에 의한 난류현상의 평가척도로 이용되는 속도 표준편차는 통계적 의미로 상대적 또는 상호 비

교적 관점에서 변동 또는 불안정성을 판단하는데 이용될 수 있다. 그러나, 지점별 표준편차를 상호 비교하여 상대적인 난류 발생구간을 판단하는 경우에는 교통흐름에 대한 지점간의 공간적인 속도변화가 아니라 특정 지점의 시간에 대한 상대적인 불안정성을 나타내는 것이다. 예를 들어, 지점별로 같은 시간대가 아닌 유사한 운행상태에서 표준편차를 비교하면 지점간 속도변화를 알 수 없으며, 단지 지점별 운행상태에 대한 불안정성을 판단하는 것이 된다.

또한, 난류현상 지표로서 운행상태와 무관하게 고정된 표준편차를 사용하는 경우에는 운행상태에 따른 난류현상의 차이를 나타낼 수 없다. 예를 들어 높은 속도와 낮은 속도의 표준편차가 동일하다고 해서 합류에 의한 난류현상의 심각도가 동일하지는 않기 때문이다.

마지막으로, 속도 표준편차집단의 표준편차를 지표로 설정하면 공간적 속도변화를 고려하지 못하기 때문에 난류현상 분석결과를 해석하는데 오류를 내포할 수 있다. 예를 들어, 인접한 두 지점의 속도가 변했지만 표준편차는 비슷한 경우, 실제로는 합류영향에 의한 가감속으로 난류현상이 발생했지만 속도 표준편차집단의 표준편차로는 난류현상을 나타내지 못한다. 또한, 혼잡상태와 같이 교통류가 불안정한 경우에는 차량간의 내부간섭에 의한 잦은 가감속으로 지점별 속도 표준편차는 커지면서 범위는 비슷하게 나타난다. 이 경우 속도 표준편차집단의 표준편차 값은 작아지기 때문에 모든 구간에서 합류에 의한 심각한 난류현상이 발생한 것으로 잘못 판단할 수 있다.

이에 따라 본 연구에서는 합류구간 상류 400m~하류 500m의 구간에서 시공간적으로 연속된 24시간 자료를 구축하여, 지점간의 유의한 속도변화를 기준으로 합류구간 교통류 난류현상을 분석하였다.

### 3.3 자료특성 분석

본 연구에서 수집된 교통자료의 기본적인 통계치는 표 3과 같다. 5분단위로 집계한 표본수는 12,504

한국도로공사(1996)는 본선 4차로와 연결로 2차로로 구성된 신갈 JC에서 차로별, 트랩(trap)별 개별차량 교통자료를 조사하여 난류현상을 분석하였으며, 난류의 정량적 평가를 위한 효과척도는 속도 표준편차를 사용하였다. 난류현상 분석결과, 그럼 4와 같이 연결로는 1차로, 본선은 연결로와 접속된 차로에서 가장 심각하게 나타났으며, 난류 진행방향은 연결로 합류차량으로 인해 연결로 가속차로에서 내측 차로로 갈수록 하류방향으로 진행하는 통행패턴을 보였다.

표 1. 속도 표준편차에 의한 범주 구분

구 분	범주 I	범주 II	범주 III
속도표준편차	8.0~12.0	12.1~16.0	16.1 이상

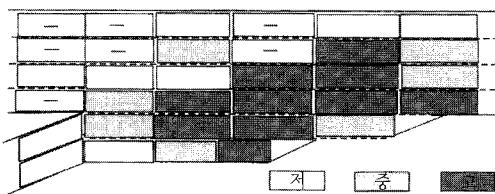


그림 4. 합류구간의 난류발생 분포도

노창균(2008)은 고속도로 합류부의 난류현상을 우측합류부와 좌측합류부로 구분하여 분석하였다. 분석자료는 도시고속도로에 설치된 영상검지기를 이용하였으며, 시공간적으로 불연속 자료에 의한 교통류 특성 오류를 최소화하기 위하여 기하구조가 유사한 합류부를 선정하고, 서비스수준별로 분류하였다. 난류현상의 분석지표는 표 2와 같이 속도 표준편차집단의 표준편차로 설정하고, 기준값 2배 이상의 표준편차를 나타내는 경우 난류현상이 높은 지점으로 구분하였다.

분석결과, 우측합류부의 경우 연결로 접속차로의 상류부에서 높은 난류현상이 나타났다. 이는 합류로 인한 속도 감소가 합류와 접한 차로에 큰 영향을 미치며, 차로변경이 상류부에서 이루어진 이유로 해석하였다. 그림 5는 우측합류부 서비스수준 B의 난류

발생 분포도를 나타낸 것이다.

표 2. 서비스수준에 따른 난류현상의 판정기준(우측합류부)

구분	범주 I	sigma	범주 II	sigma	범주 III
LOS A	저	2.6	중	5.2	고
LOS B		2.7		5.3	
LOS C		2.4		7.3	
LOS D		4.8		9.6	
LOS E		4.3		8.6	
LOS F		1.4		2.9	

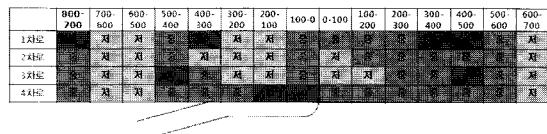


그림 5. 우측합류부 서비스수준 B의 난류발생 분포도

이와 같이, 난류현상 분석은 합류구간의 미시적인 운행특성의 결과를 거시적인 지표로 판단하기 위하여 개발된 방법론이다. 기존에는 속도 표준편차의 상호관계를 기준으로 교통류의 불안정성을 설명하는 연구가 주를 이루었으나, 속도 표준편차는 이론적 배경의 모호성, 불안정성 판단기준 객관성의 부족, 교통특성 변화 즉, 차로변경 및 가감속에 의한 공간적 속도변화에 대한 설명의 어려움 등의 문제점을 나타낸다. 따라서, 본 연구에서는 자료 범위의 확대와 시공간적 연속성을 기존 연구와 차별화하였으며, 합류구간에서 발생하는 불안정성의 내용을 교통특성의 변화로 명확하게 파악함으로서, 난류의 정의 및 분석 결과를 이론적이고 객관적으로 제시도록 하였다.

### 3. 자료수집 및 자료특성 분석

합류구간 교통특성 변화를 분석하기 위해서는 공간, 시간, 내용적으로 폭넓은 범위의 교통자료가 구축되어야 한다. 시공간적으로 제한적이거나 불연속적인 자료, 내용적으로 객관적인 교통상태를 설명하기 어려운 자료로는 합류구간 교통특성 변화를 명확

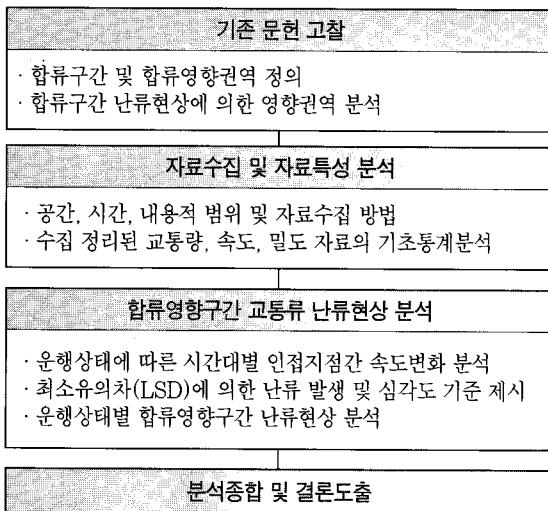


그림 2. 연구의 방법 및 절차

## 2. 문헌고찰

합류구간은 본선과 연결로 교통의 상충이 발생하는 구간으로 기본구간보다 많은 차로변경이 발생하여 불안정한 교통류를 형성하며 혼잡 또는 사고발생 가능성이 큰 구간이다. 합류구간의 운행특성은 합류 차량의 합류특성과 합류로 인한 혼란을 피하기 위한 본선 차량의 차로변경 및 감속으로 구분된다.<sup>1)</sup> 따라서, 합류구간의 교통특성을 파악하기 위하여 차로변경과 가감속 행태를 분석한 연구들이 진행되어 왔다.

차로변경은 발생구간, 원인, 상황 등에 의한 형태적 특성에 따라 강제적, 선택적, 예상적 차로변경으로 구분된다(Henry et al., 1997, Zhang et al., 1998). 이 중 강제적 차로변경에 해당하는 합류 차로변경 행태에 관한 연구로 Kita(1993)는 합류 차로변경의 간격수락행태를 추정하는 모형을 제시하여 가속차로 길이에 따른 차간간격의 변화를 분석하였으며, AASHTO(1994)와 Reilly et al.(1989)은 본선 차량과 상대속도가  $\pm 8\text{km/h}$ 이내에서 주로 (60% 미만) 합류가 이루어지는 결과를 도출하였다.

또한, Drew(1968)와 Wattleworth et al.(1967)은 합류부 연결형태 등 다양한 기하조건에서 운전자 합류형태를 연구하여 가속차로 길이가 합류형태에 가장 큰 영향을 미치는 결과를 제시하였다. 그러나, 이 연구들은 강제적 차로변경 중 합류 차로변경의 미시적 행태특성을 국한되기 때문에, 합류구간에서 발생한 차로변경을 행태적으로 구분하거나 합류영향에 의한 차로변경 행태로 합류구간의 교통특성 변화를 분석하지 못하고 있다.

이에 따라, 합류구간 차로변경 행태의 결과로 형성되는 교통상태로서 불안정한 교통류를 분석하는 방법론이 개발되었다. N. Theophilopoulos(1986)와 한국도로공사(1996)는 합류구간에서 본선과 연결로교통류가 합류하면서 교통흐름 측면에서 비정상적인 형태, 즉 난류현상이 발생한다고 정의하며, 합류구간 교통류 상태를 평가하는 의미있는 지표로 제안하였다.

난류현상이 발생하는 주요요인으로는 합류차량의 진입, 본선차량이 합류차량과의 상충을 피하기 위한 내측 차로변경, 더 빠른 차로로의 이동, 저속차량의 추월 등의 행태에 의한다. 따라서, 난류현상은 합류 영향으로 나타나는 차로변경 및 가감속의 행태와 직접적으로 연계되며, 난류현상 결과로는 본선 밀도, 속도 등 교통특성 변화된 형태로 나타난다.

연속류도로 합류구간의 교통류 난류현상 분석으로 N. Theophilopoulos(1986)는 속도 표준편차의 상호관계를 이용하여 나타냈으며, 접속차로에서 시작된 난류현상은 그림 3과 같이 하류부로 갈수록 내측 차로로 과급되어 합류에 의한 영향의 범위 및 크기가 전차로에 순차적으로 미치는 것으로 분석하였다.

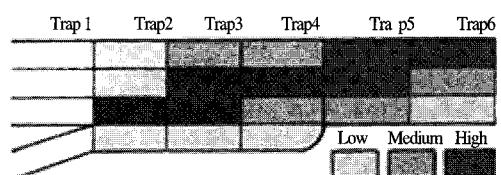


그림 3. 합류부 난류발생 분포도(Theophilopoulos, 1986)

1) 도로용량편람(2001) 대한교통학회, p.74, 77

으며, 원활상태와 혼잡상태를 연결하는 연속된 시간대는 교통량 변화형태에 따라 교통량이 증가하는 혼잡 전 상태와 감소하는 혼잡 후 상태로 구분하였다. 운행상태가 변화되는 시간대를 서비스수준별로 세분하지 않은 이유는 연속된 시간대를 하나의 운행상태로 분석하여 인접지점간의 속도변화를 판단하는데 오류를 줄이기 위함이며, 유사한 운행상태에서도 교통량이 증가하거나 감소하는 상황에 따라 교통류의 안정성 및 난류현상이 다르게 나타날 것이라는 가정에 의한 것이다.

난류현상의 발생기준으로서 연속된 지점간 평균속도의 변화가 통계적으로 유의한지를 판단하는 최소유의차(LSD)는 다중비교검정법의 대표적인 방법이다. 여기서 최소유의차는 합류영향구간의 전반적인 교통류 안정상태를 고려한 상황에서 비교하고자 하는 인접한 지점의 모집단 평균속도( $\mu_i$ 와  $\mu_j$ )간에 차이가 있는지를 판정하는 통계값이다. 즉, 인접한 지점  $i$ 와 지점  $j$ 로부터 얻은 표본의 크기가 각각  $n_i$ ,  $n_j$ 이고 유의수준을  $\alpha$ 라고 할 때, 다음과 같이 정의한다.

$$LSD = t_{\alpha/2} \sqrt{s^2 \left( \frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)}$$

여기서,  $s^2$ 는 오차의 분산,  $\sigma^2$ 의 추정치이다.

결과는 모집단  $i$ 와  $j$ 의 표본집단 평균속도인  $y_i$ 와  $y_j$ 의 차가 LSD보다 크면 ( $|y_i - y_j| > LSD$ ),  $\mu_i$ 와  $\mu_j$ 는 유의수준  $\alpha$ 의 범위에서 통계적으로 유의한 차이가 있다고 판정한다.

표 5는 운행상태별 차로별 난류현상의 발생 및 심각도 판단의 기준으로서, 연속된 지점간에 최소유의차(LSD) 이상의 속도 변화시 난류현상의 발생으로 판단하며, 2배 LSD, 3배 LSD를 기준으로 난류의 심각도를 구분하였다.

분석결과, 혼잡상태와 혼잡 후 상태에서 난류현상 판단기준이 상대적으로 높게 나타났다. 이는 교통류가 불안정하기 때문에 합류영향이 아니더라도 본선

지점별 속도의 변화가 크게 나타나고 있다는 점을 설명한다. 이러한 결과는 교통류의 안정상태를 고려하여 객관적으로 유의한 속도변화 통계값을 제시하였기 때문이며, 이에 따라 기존의 지점별 속도 표준편차에 의한 불안정성으로 난류현상을 판단하는 연구 결과와는 상충되는 판단지표가 제시된 것이다.

표 5. 운행상태별 차로별 난류 심각도 판단기준

운행상태	차로	난류 심각도		
		저(1LSD)	중(2LSD)	고(3LSD)
원활	1차로	2.188	4.377	6.565
	2차로	2.057	4.115	6.172
	3차로	2.546	5.093	7.639
혼잡 전	1차로	2.510	5.021	7.531
	2차로	2.142	4.285	6.427
	3차로	1.532	3.063	4.595
혼잡	1차로	7.518	15.035	22.553
	2차로	6.946	13.891	20.837
	3차로	7.234	14.468	21.702
혼잡 후	1차로	5.332	10.664	15.996
	2차로	5.691	11.381	17.072
	3차로	4.675	9.350	14.024

다음 표 6과 그림 7, 8은 운행상태별 지점별 평균속도 변화에 난류현상 판단기준을 적용하여 분석한 결과이다. 동일 차로에서 최대속도와 최소속도의 차이는 원활상태 10.77kph, 혼잡상태 24.81kph로 혼잡상태가 크며, 차로별로는 3차로 속도변화가 가장 크게 나타났다. 이는 교통류가 불안정하거나 합류의 직접적인 영향이 클수록 속도변화도 커지는 결과를 나타낸다.

구간별 속도변화 특징을 보면, 합류구간에 접근하는 상류구간에서 가감속이 변동적으로 나타나고, 합류구간을 통과하는 상류 100m~하류 100m 구간에서는 점차 감소하는 형태가 나타난다. 하류 100m~300m 구간에서는 합류구간의 감속속도가 유지되다가 하류 300m 이후 교통류가 회복되면서 증가하는 형태를 보인다. 이는 합류구간을 통행하는



일반적인 속도변화 형태로서 합류구간을 접근하고 통과하면서 감속하고, 합류구간 통과 후 감속된 속도가 일정구간 유지되다가 정상교통류로 회복되는 과정에서 가속하는 일련의 과정을 나타낸다.

지점간 속도변화의 가장 주요한 특징은 운행상태에 따라 난류 발생권역 및 심각도가 변한다는 것이다. 원활상태에서는 속도 변화폭도 작고, 짧은 구간에서 속도 증가 및 감소가 반복되는 특징을 보인다. 이는 합류에 의한 영향의 심각도가 낮으며, 차량간의 간섭도 작기 때문에 감속에 대한 회복이 빠르게 나타

나기 때문이다. 또한, 차로별로 1차로에 미치는 합류 영향은 미미한 것으로 나타났다.

반면에, 혼잡상태에서는 교통류의 불안정성으로 난류현상 판단기준인 LSD 값이 커지지만, 합류시점부~하류 100m 구간에서 합류영향으로 현저한 속도 변화를 보였다. 특히, 합류시점부에 접근하면서 본선 3개 차로 모두 급감속하는 행태를 보이는 것은 합류구간 본선에서 합류혼잡 회피 목적의 차로변경이 발생하고 있는 것으로 판단된다.

표 6. 운행상태에 따른 평균속도 및 평균속도 변동계수(분석시간 간격 5분)

구분	운행 상태	차로	상류				합류				하류				
			400m	300m	200m	100m	시점	1/3	2/3	종점	100m	200m	300m	400m	500m
평균속도	원활	1차로	94.98	99.34	96.80	97.03	98.19	96.90	-	97.84	-	94.74	95.04	96.52	92.93
		2차로	-	92.66	91.48	86.92	91.04	84.51	90.88	91.38	-	86.51	85.73	90.57	93.39
		3차로	85.47	88.03	83.74	88.87	83.14	84.22	-	88.22	84.28	79.48	80.61	78.67	78.10
	혼잡 전	1차로	80.38	84.21	83.81	89.14	76.63	81.38	80.57	77.21	73.66	75.13	75.19	76.40	72.01
		2차로	71.51	80.82	77.41	78.17	75.07	71.51	75.02	72.27	68.73	70.68	71.01	73.85	76.43
		3차로	78.86	81.61	79.29	84.49	73.63	68.55	62.44	65.65	68.88	67.88	72.54	69.85	70.68
	혼잡	1차로	39.73	47.34	47.08	51.24	42.93	36.49	38.04	34.01	36.70	42.43	41.21	39.43	34.46
		2차로	42.54	48.39	52.85	50.54	37.79	33.32	33.75	33.57	37.18	42.15	40.21	38.73	38.49
		3차로	44.66	49.83	51.06	55.78	39.57	44.82	43.70	30.97	35.65	41.70	40.54	37.86	37.29
	혼잡 후	1차로	78.74	80.45	78.34	86.50	80.11	80.63	80.45	77.01	69.42	74.99	78.68	79.50	75.01
		2차로	71.22	80.75	76.24	78.59	75.00	69.64	74.25	74.33	48.04	69.50	74.01	77.05	80.52
		3차로	79.05	82.23	79.26	84.48	74.75	69.06	56.93	69.68	68.05	66.29	72.72	69.97	70.75
평균속도 변동계수	원활	1차로	5.51	7.69	5.20	6.90	8.50	4.92	-	4.13	-	3.68	3.38	3.45	3.19
		2차로	-	5.40	3.43	6.88	4.88	4.65	4.35	4.64	-	2.88	2.92	4.02	3.87
		3차로	10.57	8.67	9.98	9.02	10.76	5.99	-	3.73	6.18	6.14	6.11	6.11	12.83
	혼잡 전	1차로	9.93	5.36	6.26	6.98	14.21	11.67	13.78	13.47	10.80	10.82	4.26	4.33	4.76
		2차로	5.95	5.23	3.18	4.84	11.33	11.05	12.60	13.74	14.36	8.41	3.71	4.27	4.32
		3차로	6.17	4.60	5.12	4.57	8.43	11.94	14.47	12.79	11.67	8.23	6.14	7.05	11.53
	혼잡	1차로	51.16	49.61	48.54	49.48	47.31	49.42	50.50	46.47	38.24	25.73	28.66	31.42	34.77
		2차로	48.42	46.90	42.95	46.29	47.57	50.12	49.93	46.17	37.33	24.33	28.83	33.02	33.43
		3차로	50.80	51.01	46.70	47.97	46.65	41.67	38.70	44.91	32.86	23.20	28.47	29.68	25.11
	혼잡 후	1차로	21.18	24.13	22.73	20.72	21.99	21.09	24.99	22.36	23.74	18.30	14.96	15.22	15.87
		2차로	22.45	19.06	21.11	18.49	21.54	22.70	22.95	24.97	35.23	18.65	13.12	13.74	14.62
		3차로	19.23	19.00	17.95	18.32	20.35	24.54	24.73	27.64	22.43	17.16	12.96	12.65	12.95

1) “-”로 표시된 구간은 유의한 자료의 불충분으로 분석에서 제외하였음.

2) 평균속도 변동계수=(표준편차/평균속도×100)

3) 주 : ■■■■■은 난류 심각도(저), ■■■■■은 난류 심각도(중), ■■■■■은 난류 심각도(고) 상태를 나타냄.

또한, 교통량이 유사한 혼잡 전과 혼잡 후 상태에서 발생한 난류현상 특징을 비교해 보면, 혼잡 전 운행상태에서는 정체가 발생하지 않았더라도 교통량이 점차 증가하는 상황이기 때문에 합류구간 속도 감소의 여파가 상류구간으로 확대되는 특징을 보이며, 합류 영향범위가 가장 넓게 나타났다. 하류구간에서는 합류구간에서 감속된 속도가 회복되는데 시간이 걸리기 때문에 일정구간 유지되는 형태를 보인다. 반면에, 혼잡 후 운행상태에서 난류현상은 주로 하류구간에서 나타나는데, 이유는 혼잡 후 운행상태가 시간이 지남에 따라 교통량이 점차 감소하는 상황이기 때문에 합류 및 상류구간에서의 감속영향보다는 하류구간의 가속영향이 뚜렷하게 나타나며, 하류구간에서 교통류가 회복되는 시간 및 구간이 다른 운행상태에 비해 짧아지기 때문이라 판단된다. 이로써, 교통량이 유사하더라도 교통량이 증가하는 상황과 감소하는 상황에 따라 합류구간을 중심으로 속도변화에 의한 난류현상 발생 구간은 서로 다른 형태를 보이는 것으로 분석되었다.

추가적으로 평균속도 변동계수(표준편차/평균속도×100)로 교통류의 불안정성을 비교 분석하였다. 평균속도의 크기를 고려하면서, 동일한 속도에서도 표준편차가 큰 불안정상태 일수록 높은 값을 나타낸다. 분석결과, 원활상태에서는 합류에 직접적인 영향으로 3차로가 높게 나타난 반면 다른 운행상태에서는 1차로에서 높게 나타났다. 이는 교통량이 증가하면서 차로별 속도는 비슷하지만 합류 혼잡을 피하기 위한 내측방향 차로변경이 증가하면서 잦은 가감속에 의한 속도 표준편차가 커진 결과로 볼 수 있다. 또한, 구간별로는 상류구간에서 높게 나타났다. 이는 하류구간에서 속도가 높아지고 교통류가 안정적으로 되면서 표준편차가 작아지기 때문이다. 평균속도 변동계수 분석결과에서 보듯이, 표준편차의 크기 또는 표준편차집단의 표준편차만으로는 합류에 의한 교통류의 불안정성 또는 교통특성의 변화를 판단하기 어려우며, 평균속도의 변화를 고려하는 것이 합류영향 구간의 교통현상을 객관적이고, 합리적으로 파악하는데 적합한 방법으로 판단된다.

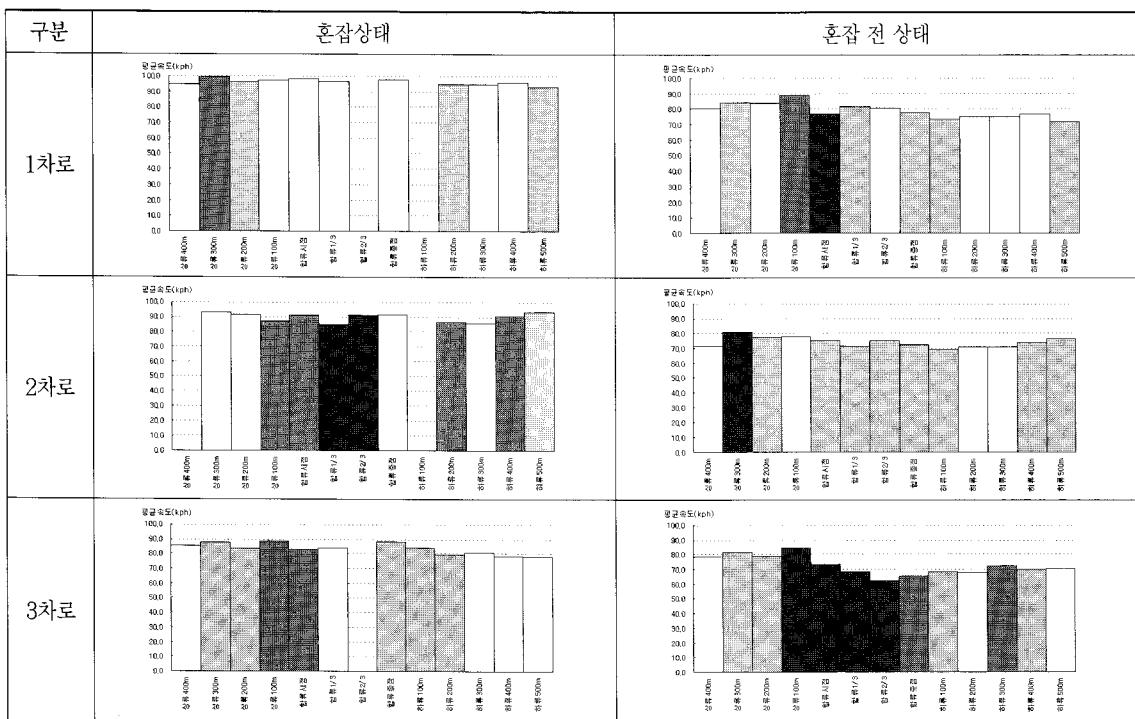


그림 7. 운행상태에 따른 차로별 인접지점간 속도변화(원활 및 혼잡 전 상태)

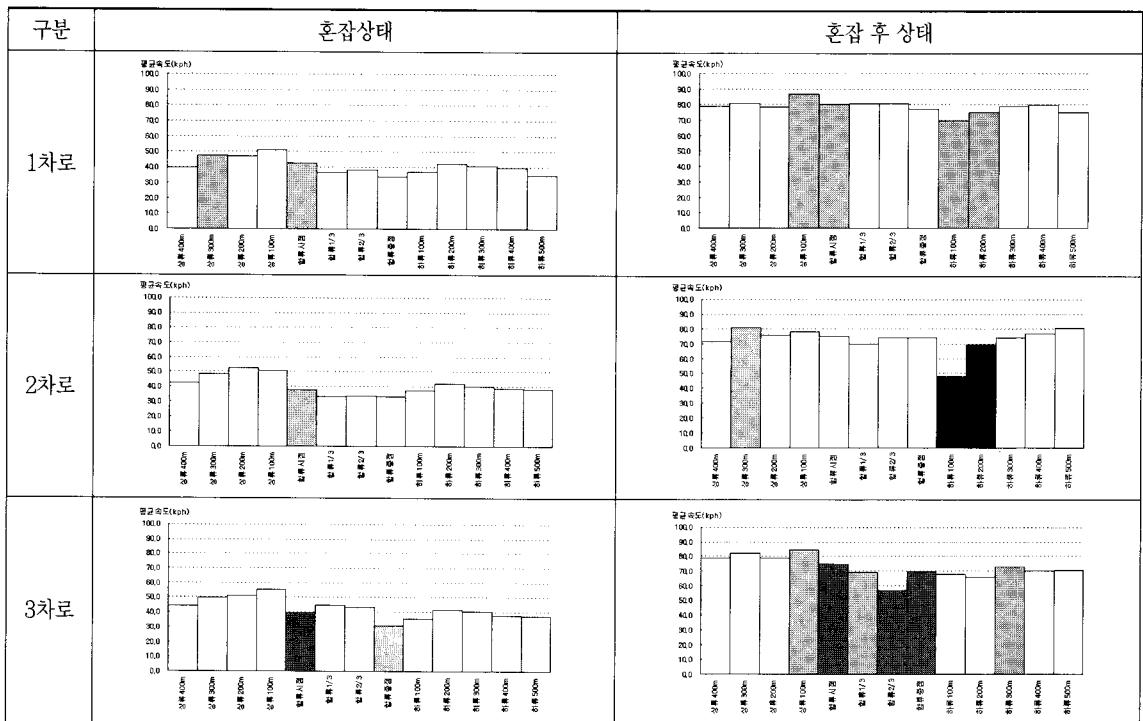


그림 8. 운행상태에 따른 차로별 인접지점간 속도변화(원활 및 혼잡 후 상태)

이상의 결과에서, 연속된 지점간 속도변화의 특이 점 중 하나는 연결로교통류가 본선에 합류된 하류구간에서 유의한 속도 변화가 나타나지 않는다는 사실이다. 이러한 특징은 차로별로 차이가 있지만, 하류 100m~400m 범위에서 합류에 의해 본선 교통량은 증가한 반면 속도는 일정하게 유지되는 형태로서, 속도 단일변수의 변화는 미미하지만 속도-밀도 상관관계에는 변화가 발생하였을 것으로 예상할 수 있다.

결론적으로 연속된 지점간 속도변화에 의한 난류 현상은 운행상태에 따라 원활상태에서는 합류구간, 혼잡 전 상태에서는 상류구간과 합류구간, 혼잡 후 상태에서는 하류구간에서 나타났으며, 이를 종합하여 보면, 상류 100m~하류 100m(총 380m)의 “감속구간”과 하류 100m~하류 400m의 “감속속도유지 및 가속구간”으로 구분할 수 있었다. 따라서, 도로용량편람(2001)에서 제시된 합류영향권역은 본 연구의 “감속구간”에 해당되는 것으로 분석되었으나, 영향권역의 내용측면에서 운행상태에 따라 영향

구간이 변한다는 점과 상류구간부터 합류영향이 나타난다는 사실이 보완되어야 할 것으로 사료된다.

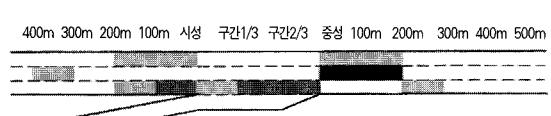
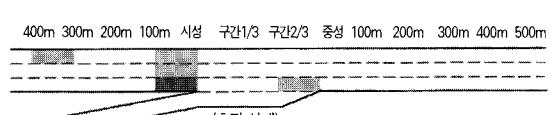
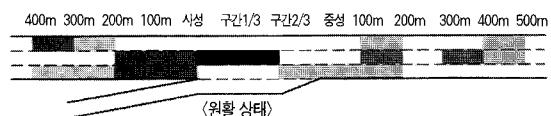


그림 9. 운행상태별 난류현상 분포도

## 5. 결론 및 향후 연구과제

연속류도로 합류구간에서는 본선과 다른 교통특성을 가진 연결로교통류의 합류로 차로변경 및 가감속과 같은 차량간의 불규칙한 상호작용이 발생하여 교통류의 난류현상을 야기한다.

본 연구에서는 합류구간 난류현상을 연속된 지점 간의 유의한 속도변화로 정의하였으며, 합류영향구간에서 시공간적으로 연속된 교통자료를 구축하여 난류현상을 분석하였다.

연구결과를 종합적으로 정리하면 다음과 같다.

① 합류구간을 통행하는 과정의 속도변화는 합류구간을 접근 및 통과하면서 감속하고, 합류구간 통과 후 일정구간 속도를 유지하다가 정상교통류로 회복하면서 증가하는 형태를 나타낸다.

② 합류구간 난류현상은 운행상태에 따라 난류 발생권역 및 심각도가 변화한다. 원활상태에서는 합류접속구간에서 난류현성이 나타나며, 교통량이 증가하면서 합류구간 감속의 여파가 상류구간으로 확대된다. 혼잡상태에서는 교통류의 불안정성으로 합류영향이 미미하며, 혼잡 후 혼잡교통류가 풀어지면서 하류구간에서 현저한 속도 증가형태를 보였다.

③ 난류현상에 의한 합류영향권역은 상류 100m~하류 100m의 “감속구간”과 하류 100m~하류 400m의 “감속속도유지 및 가속구간”으로 구분되었다.

본 연구는 합류영향구간에서 연속된 시공간 자료를 활용하여 지점간 유의한 속도변화로 교통류의 불안정 특징 뿐만 아니라 변화내용을 분석하였으며, 이를 기준으로 합류구간 교통류의 난류현상을 규명한 점에서 의의를 찾을 수 있다. 활용방안으로는 원활한 합류교통류를 유도하기 위한 교통류 제어방식의 구성요소로서 구체적인 교통류 제어시간 및 제어공간 뿐만 아니라 제어내용을 구축하는데 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

합류구간 교통류 난류현상에 대한 분석은 차로별, 구간별 속도의 표준편차 또는 유의한 속도변화, 즉 속도라는 단일변수에 국한되어 왔다. 속도는 실제 운

전자들이 느낄 수 있는 교통특성으로서, 지점간 속도변화를 분석하여 난류 발생구간 및 심각도를 파악할 수 있는 장점이 있다.

그러나, 교통류 특성은 속도뿐만 아니라 속도-밀도의 상관관계로도 나타난다. 본 연구결과에서도 하류구간에서 합류에 의한 교통량은 증가한 반면 속도는 일정하게 유지되는 형태를 보임에 따라, 속도-밀도 상관관계가 변화하였음을 예상할 수 있다. 따라서, 속도-밀도 상관관계를 나타내는 모형 기본형태의 변화를 분석함으로서 합류영향구간에서의 교통류 변화특성을 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

### 참고 문헌

건설교통부(2001), 도로용량편람

노창균(2008), “고속도로 합류부의 난류현상 분석”, 석사학위논문, 연세대학교

한국도로공사 도로연구소, 서울대학교 공학연구소 (1996), “고속도로 유출입 교통행태 분석 및 가감속 차로 설계운영 기준 연구”, 연구보고서, 도로연 96-46-3, 한국도로공사

AASHTO (1994), “A Policy on Geometric Design of Highways and Streets”, FHWA

Drew, D.R. (1969), “Traffic Flow Theory and Control”, McGraw-Hill, p.217~218

Henry, C. and A. Halati (1997), “CORSIM-Corridor Traffic Simulation Model”, TRB 76th Annual Meeting.

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, p.37~51, Berkeley, California.

Reilly, W.R., et al (1989), “Speed-Change Lane”, Final Report NCHRP p.3-35, Transportation Research Board

Theophilopoulos, N.(1986), “A Turbulence Approach



*at Ramp Junctions*", Ph.D. Dissertation  
Polytechnic University, Brooklyn, NY

Wattleworth, J.A., et al (1967), "Operational  
*Effects of Some Entrance Ramp Geometrics  
on Freeway Merging*", HRR 208, p.79~122

Zhang, Y., L.E. Owen, and E.C. James (1998),  
*"Multiregime Approach of Microscopic  
Traffic Simulation"*, TRR 1644.

접수일: 2009. 3. 23  
심사일: 2009. 3. 30  
심사완료일: 2009. 5. 14