■ 論 文 ■

혼잡교통류 상태에서의 연결로 합류부 교통류 특성에 관한 기초 연구

A Study on Characteristics of Traffic Flow in Congested Traffic at On-Ramp Influence Area

김 상 구
(여수대학교 교통물류시스템공학부 조교수)

김 영 호
(영산대학교 네트워크정보공학부 전임강사)

김 태 완
(중앙대학교 도시공학과 조교수)

손 영 태
(명지대학교 교통공학과 부교수)

목 차

Ⅰ. 서론
1. 연구배경 및 목적
2. 연구범위 및 방법
Ⅱ. 합류부 교통류 특성 고찰
1. 합류특성 및 영향권
2. 교통변수들간 관계
Ⅲ. 자료수집 및 분석
1. 자료수집 및 지점
2. 교통자료
3. 자료분석 방법론
Ⅳ. 연결로 진입교통량의 영향
1. Indicator 분석
2. 상관관계 분석
Ⅴ. 결론 및 향후 연구방향
참고문헌

Key Words : 고속도로-연결로 합류부, 혼잡교통류, Indicator, 상관분석, t 검정

요 약

고속도로-연결로 합류부는 대표적인 고속도로 정체구간으로서 본선 교통류와 연결로 교통류가 서로 공간 확보를 위하여 상충되는 구간이다. 현재까지 연결로 교통류와 본선 교통류간의 관계에 대한 연구는 이루어져 왔지만 주로 자유교통류 상태에서의 관계를 분석하였고, 혼잡교통류 상태에서의 두 교통류에 대한 최근 연구도 이론적인 수학적 모형연구에 그쳐있는 상태이다. 본 연구는 3개의 서로 다른 고속도로-연결로 합류부에서 수집한 실제 교통 데이터를 이용하여 혼잡교통류 상태에서 연결로 교통류와 본선 교통류간의 관계에 대한 분석을 수행한 것으로써, 본선 교통류 변수(교통량, 속도, 밀도)와 연결로 교통량의 값을 이용하여 개발된 Indicator에 의한 분석과 Indicator간의 상관분석 및 t 검정을 통하여 연결로 교통량이 본선 교통류에 미치는 영향을 살펴보았다. Indicator 분석결과, 연결로 진입교통량은 본선 접속차로의 교통량과 부의 상관관계를 보였고, 가속차로길이 내 본선 교통류의 속도와 밀도와도 의미 있는 관계가 존재함을 보였다. 혼잡교통류 상태에서의 두 교통류 관계 분석을 통하여 고속도로-연결로 합류 하류부의 용량을 결정하는 요인에 대한 보다 엄밀한 분석이 가능하게 되었다. 또한 실제데이터 분석을 통하여 밝혀진 결과는, 본선 교통류의 상태에 따른 연결로 진입교통량의 크기를 정확하게 규명할 수 있는 모형식 개발의 기초를 마련하였으며, 현재 고속도로-연결로 합류부의 혼잡교통류 시뮬레이션에서 취약점으로 지적되고 있는 연결로 교통량의 추정에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10764-0)지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

Ⅰ. 서론

1. 연구배경 및 목적

고속도로-연결로 합류부는 대표적인 고속도로 정체 구간으로서 본선 교통류와 연결로 교통류가 서로 공간 확보를 위하여 상충되는 구간이다. 과거부터 연결로 교통류와 본선 접속차로 교통류간의 관계에 대한 연구는 있어왔지만 주로 자유교통류 상태에서의 연구에 국한되어 있었으며, 혼잡교통류 상태에서의 두 교통류에 대한 최근 연구도 이론적 모형연구에 그쳐있는 상태이다.

합류부(merge area)는 고속도로 연속교통류 중에서 가장 상충이 심한 구간으로서 본선교통류와 연결로 교통류간의 관계에 의해서 교통운영상태가 결정되고, 이러한 교통류에 대한 연구는 주로 미국 HCM 방법론에 의한 경험적 연구에 국한되어 수행되어 왔다.

US HCM(1985)에서는 연결로교통량과 본선 교통량간의 추정된 회귀식을 통하여 서비스수준을 결정하였고, US HCM(2000)에서도 계산된 1, 2차로 교통량을 토대로 밀도를 추정하는 방식으로 발전되어 왔으며 한국형 도로용량편람에서는 이러한 방법론을 그대로 수용하여 일부 계수만 현장 데이터에 맞게 수정하여 사용하고 있다.

그러나, 도로용량편람에서 제시하고 있는 모형식들은 자유교통류 상태에서 수집된 교통데이타를 사용하기 때문에 혼잡교통류 상태를 설명하는데 한계가 있으며, 따라서 이러한 모형식으로부터 도출된 결과들은 대도시 주변의 유출입시설에서 자주 발생하고 있는 혼잡교통류 상태를 정확하게 묘사하기에는 어려움을 가지고 있다.

본 연구는 혼잡교통류 상태에서 연결로의 진입 교통량의 증감이 본선 교통류에 미치는 영향을 실제 데이터를 통해 분석한 것으로써, 본 연구에서 도출된 결과는 본선교통류의 교통상태와 연결로교통량의 크기에 따라 다양하게 변하는 하류부 용량에 대한 상세한 분석을 가능하게 한다. 또한 본선 교통류의 상태와 연결로 진입 교통량의 크기와의 상호 관련성을 추정할 수 있는 매우 유용한 단서를 제공한다.

2. 연구범위 및 방법

본 연구는 연결로 교통류로 인한 본선교통류의 차로별, 거리별 영향을 Indicator의 값과 Indicator간의 상관관계를 이용하여 분석하였다. 이를 위해 고속도로-연결로 접속부 구간의 3개 지점을 선정하여 자료를 수집, 분석하였으며 교통류 수준은 연결로 진입교통량으로 인한 본선교통류의 영향을 살펴보기 위하여 높은 교통량 수준의 안정류와 교통와해가 발생되기 직전과 정체류를 포함하는 혼잡교통류 상태를 대상으로 분석하였다. 본 논문에서 사용된 교통데이터는 혼잡교통류 상태를 포함하면서 본선 개별차로의 평균속력이 약 60km/h이하인 것을 중점적으로 분석하였다.

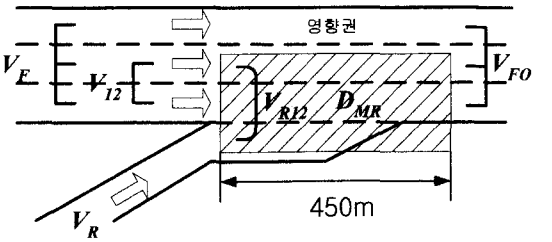
Ⅱ. 합류부 교통류 특성 고찰

1. 합류특성 및 영향권

고속도로-연결로 접속부 중 합류부는 연결로를 통해 본선으로 진입하는 차량들이 접속차로의 차간간격을 찾아서 가속과 합류를 시도하는 공간으로서 본선 교통류의 상태에 따라 연결로를 통해 진입하는 차량이 본선교통류에 서로 다른 영향을 미친다. 혼잡교통류에서 연결로를 통해 진입하는 차량이 본선교통류의 차량들과 갖는 상호작용은 자유교통류 상태에서 발생하는 상호작용보다 훨씬 크게 나타난다. 따라서 혼잡교통류에서 연결로 교통량이 본선교통류에 미치는 영향은 자유교통류 상태에서 관측되는 것과 다르게 분석되어야 할 것이다.

도로용량편람(2004)은 유입연결로에서 진입하는 연결로교통량에 의한 영향으로 본선 외측 2개 차로, 가속차로와 하류부 약 450m 구간을 영향권으로 설정하여 분석하도록 하고 있다(<그림 1> 참조).

또한, 합류부의 운영상태를 분석하기 위하여 본선 전체차로에 대한 차로 1, 2의 교통량 비율(P_{FM})을 산출하여 영향권내 교통량을 구한 후 연결로교통량(V_R)과 1, 2차로 교통량(V_{12})을 가지고 영향권의 밀도(D_{MR})를 추정한 후 서비스수준을 결정하게 된다.



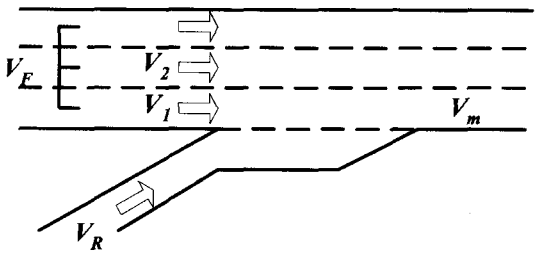
출처 : 대한교통학회(2004) "도로용량편람"

<그림 1> 연결로 접속부 영향권의 정의

2. 교통변수들간 관계

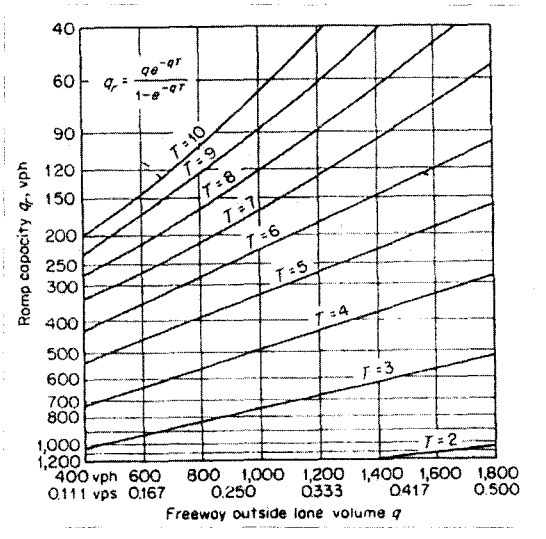
현재까지 연결로 합류구간에서의 교통류 특성분석은 연결로의 교통량과 본선교통량의 상관관계에 대한 분석 없이 두 교통량이 서로 독립적이라는 가정 하에 이루어졌다. 그러나 다양한 지역에서 관측된 합류부 교통데이터를 이용한 분석에서 연결로 교통량과 본선교통량은 밀접한 상관관계를 가지고 있으며 그 상관관계는 본선 교통류의 교통상태에 따라 변하는 것으로 나타났다. 따라서 연결로 구간에서 보다 합리적인 교통류 분석이 이루어지기 위해서는 본선교통류의 교통상태에 따른 본선과 연결로 교통량의 상호작용의 변화에 대한 분석이 수행되어야 한다.

US HCM(1985)은 독립연결로 접속부의 서비스수준(LOS)을 계산하는 과정에서 효과척도(MOE)로 합류교통량을 사용하였고 이때 본선 접속차로 교통량(V_1), 연결로교통량(V_R), 합류구간으로 접근하는 본선 전체 교통량 (V_F)과의 관계를 아래 회귀모형식을 이용하여 계산하게 된다.



V_1 : 본선 접속차로교통량
V_R: 진입연결로의 교통량
V_m: 합류교통량(본선 접속차로교통량과 진입연결로교통량의 합)

〈그림 2〉 연결로 합류부 교통변수 정의



출처 : Drew(1968) "Traffic Flow Theory and Control

〈그림 3〉 본선 접속차로 교통량과 연결로 용량

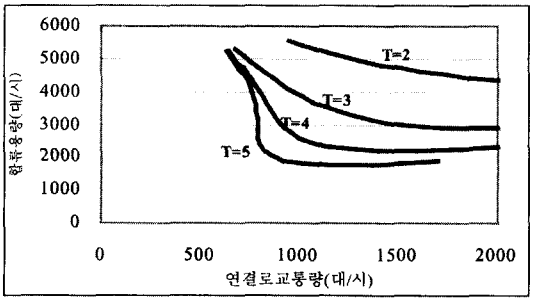
$$V_1 = 136 + 0.345V_F - 0.115V_R \quad (1)$$

그러나, 식(1)에서 보는 바와 같이, 정해진 연결로 교통량이 교통상태에 관계없이 접속차로교통량에 일정한 영향을 미치는 것으로 설명되어지고 있다. 이것은 비록 연결로교통량이 일정한 값을 갖더라도, 접속차로 교통량에 미치는 영향이 자유교통류와 혼잡교통류에서 차이가 나는 현실을 설명하지 못한다.

Drew(1968)는 간격수락모형을 이용하여 Erlang 계수가 1일 때, 본선 접속차로 교통량에 따른 연결로 용량을 식(2)와 같이 제시하였고 〈그림 3〉은 이를 그림으로 표현하였다. 식(2)에서 q_r은 연결로용량을 q는 접속차로교통량을 T는 임계간격을 나타낸다. 그러나, 이 두 변수들간의 관계는 본선 접속차로 교통량이 주어졌을 때 연결로에서 본선으로 진입할 수 있는 최대 연결로교통량을 수학적 모형식으로 산출한 것으로써 두 교통량이 모두 같은 비중으로 증가되는 실제적인 교통상황에서는 적용하는데 한계가 있다.

$$q_r = \frac{qe^{-qT}}{1-e^{-qT}} \quad (2)$$

김상구와 손영태(2003)는 〈그림 4〉에서처럼 합류용량(V_{mc})과 연결로교통량(V_R)의 관계를 본선 접속차로 교통량을 이용하여 결정하였는데, 연결로 진입교통량이 증가할수록 합류용량은 감소하는 패턴이 있고, 이는 연결로교통량 크기가 증가할수록 본선 교통류에 미치는



〈그림 4〉 연결로교통량과 합류용량과의 관계

영향이 커져서 상대적으로 합류용량 값이 더 크게 감소하는 것으로 제시하였다.(〈그림 4〉 참조)

Ⅲ. 자료수집 및 분석

1. 자료수집 및 지점

본 연구에서는 정체교통류에서 교통류 변수(교통량, 속도, 밀도) 특성을 파악할 수 있고, 연결로 합류부를 포함한 일정 구간길이 이상의 지점들을 선정하여 분석하였다. 자료 기준으로는 연결로와 본선 개별차로의 교통변수값을 포함하고 있어야 하며, 미세한 분석을 위하여 매우 짧은 시간간격 동안의 교통변수값을 제공하여야 한다.

본 연구에서는 고속도로 차량들간 상호작용을 분석하기 위하여 미국 FHWA(1985)에서 수행하였던 항공촬영사진으로부터 차량의 위치를 계수화(digitizing)한 자료를 본 연구의 목적에 맞게 일부 가공하여 사용하였다. 고속도로 교통자료가 수집된 18개 지점 중에서 본 연구의 대상구간인 연결로 합류부의 3개 지점을 대상으로 자료수집 및 변환을 수행하였다.

3개 대상지점의 기하구조 및 공간적 범위는 〈그림 5〉와 같다.

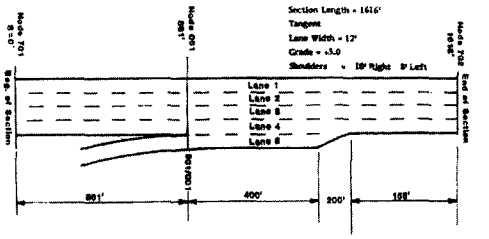
원시자료 파일은 합류부의 하류부에서 상류부의 끝까지 연속적인 순서에 따른 차량을 포함한 1초 프레임(frame) 순으로 정리되어 있다. 각 지점별 원시자료 파일은 계수화된 1시간(약 3,600프레임) 정도가 포함되어 있으며, 차량ID, 차종, 차량길이, 주행속도, 차로위치 등 1초 단위로 항공촬영 영역내 모든 차량들의 움직임을 알아볼 수 있는 매우 유용한 자료이다.

원시자료는 1초 단위로 해당공간내 차량위치와 관련된 자료를 제공하므로, 일반적으로 교통분석에서 사용하는 지점별 교통변수로 변환하는 작업이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 해당 원시자료를 일정 간격(50m)과 수집간격(30초) 단위의 교통변수를 산출할 수 있는

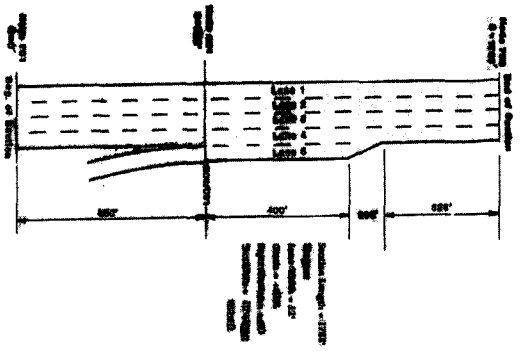
〈표 1〉 자료수집 지점 현황 (단위:ft)

지점	구간길이	차로수
Santa Monica Blvd.(I-405)	1,616	4/1
Roscoe Blvd.(I-405)	1,788	4/1
Backlick Rd.(I-95)	1,641	3/1

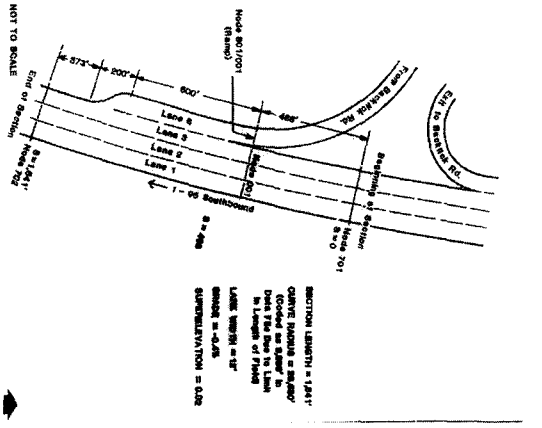
주 : 차로수는 본선/연결로 차로수임.



a. Santa Monica I-405 고속도로



b. Roscoe I-405 고속도로



c. Backlick I-95 고속도로

〈그림 5〉 조사지점의 연결로 합류부의 기하구조

프로그램을 작성하였으며 이를 이용하여 각 관측지점별 분석단위 동안 교통량, 속도, 밀도를 생성하였다.

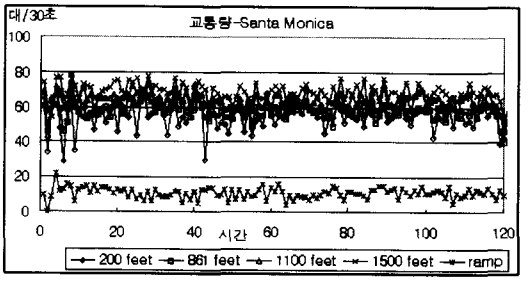
2. 교통자료

관측구간의 교통상황을 알아보기 위하여 진입부와 상류부, 하류부의 관측지점에서 관측시간동안의 교통량, 속도, 밀도의 변화추이를 살펴보았다. 교통량은 30초동안 관측지점을 통과한 차량대수로 나타내었고, 속

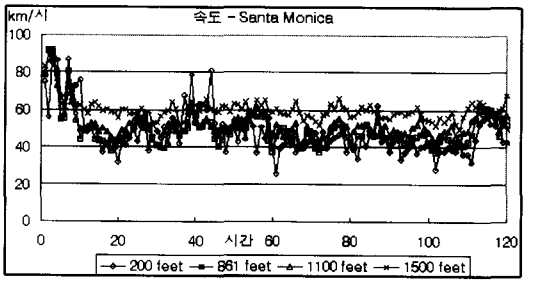
도는 각 차로의 평균속도, 밀도는 각 차로에서 일정구간(150ft)의 차량대수로 나타내었다.

1) Santa Monica 교통특성

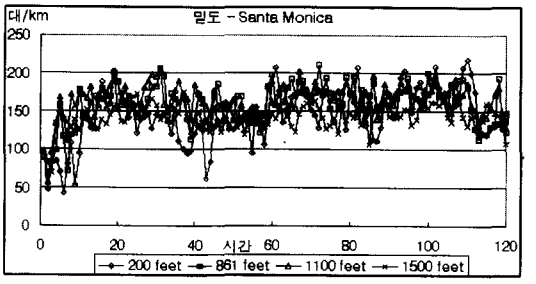
Santa Monica 구간에서는 〈그림 5(a)〉에서 보는 바와 같이 861ft 지점에 고어부가 위치하며 1,100ft 지점 주위에서 합류가 주로 이루어진다. 따라서 이 구간의 교통특성을 알아보기 위하여 본선에서는 시작지점부터 200ft의 상류부 지점과, 고어부가 위치한 861ft 지점, 합류가 주로 일어나는 1,100ft 지점, 그리고 하류부인 1,500ft지점과 고어부에 위치한 연결로 지점에서 교통변수들의 변화추이를 살펴보았다.



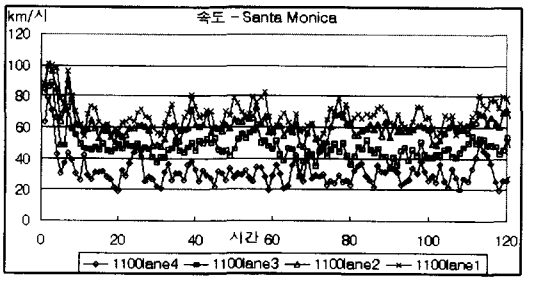
a. 지점별 교통량 변화



b. 지점별 속도 변화



c. 지점별 밀도 변화



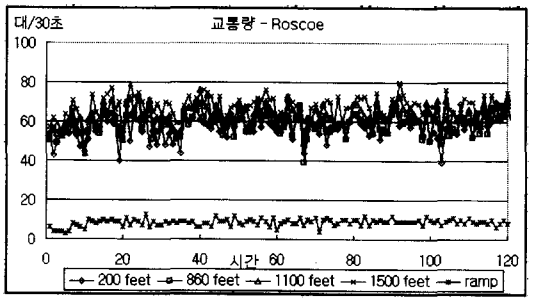
d. 차로별 속도 변화(1,100ft 지점)

〈그림 6〉 교통변수들의 변화 추이(Santa Monica)

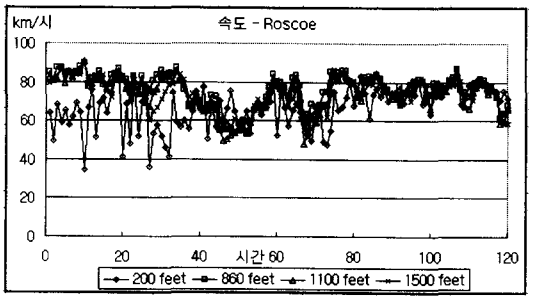
〈그림 6〉의 속도와 교통량 변화추이를 살펴보면, 관측시작 후 처음 몇 분동안 자유교통류(free flow)를 유지하다 맨 우측차로에서 교통와해(breakdown)가 시작되어 정체교통류가 된 후, 이 상태로 관측이 끝날 때까지 지속되었다. 합류가 주로 일어나는 본선의 1,100ft 지점에서 관측된 각 차로의 속도를 살펴보면 (〈그림 6(d)〉 참조), 오른쪽 2개 차로와 왼쪽 2개 차로간의 속도 차이가 많이 나는 것을 알 수 있다. 데이터 수집에 관한 FHWA 보고서(1985)는 이 상황을 관측지점으로부터 멀리 떨어지지 않은 하류부의 I/C를 통해서 본선을 빠져나가려는 차량이 미리부터 준비하는 과정에서 생겨난 것으로 설명하고 있으며, 이 구간에서는 어떠한 돌발상황도 발생하지 않았다.

2) Roscoe 교통특성

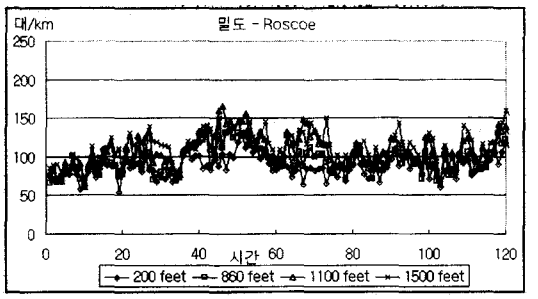
Roscoe 구간에서의 기하구조는 Santa Monica 구간과 거의 동일하다. 〈그림 5(b)〉에서 보는 바와 같이 860ft 지점에 고어부가 위치하며, 1,100ft 지점 주위에서 대부분의 합류가 이루어진다. 따라서 이 구간에서도 200ft 지점, 860ft지점, 1,100ft 지점, 1,500ft



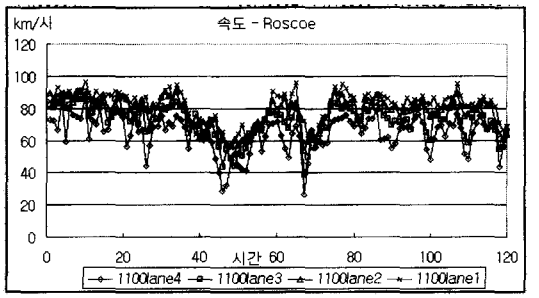
a. 지점별 교통량 변화



b. 지점별 속도 변화



c. 지점별 밀도 변화



d. 차로별 속도 변화(1,100ft 지점)

〈그림 7〉 교통변수들의 변화 추이(Roscoe)

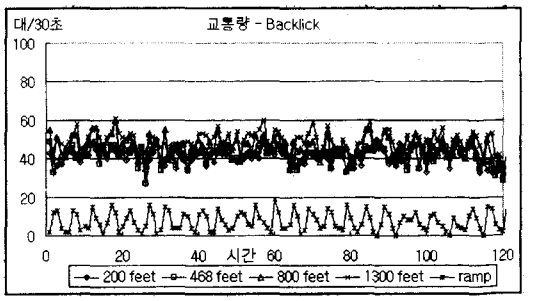
지점에서 교통변수들의 변화추이를 관측하였다.

FHWA(1985)에 따르면, 이 지역의 진입교통량은 연결로 진입제어(ramp metering)에 의해 진입 제한을 받고 있으며, 약 10~15대 가량의 차량으로 이루어진 대기행렬이 전체 관측기간동안 연결로차로에 형성되어 있다. 따라서 진입교통량이 매우 균일하게 관측되고 있고, 본선의 교통량도 전체 관측기간동안 비교적 일정하다. 본선의 1,100ft 지점에서 관측된 각 차로의 속도를 살펴보면, 앞의 Santa Monica와는 달리 각 차로의 속도가 정체기간(30~60 frame) 동안 비슷한 것을 알 수 있다.

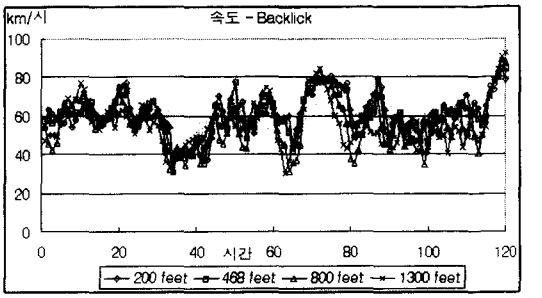
3) Backlick 교통특성

Backlick 구간은 468ft 지점에 고어부가 위치하며, 800ft 지점 주위에서 합류가 주로 이루어진다. 따라서 이 구간에서는 200ft 지점, 468ft 지점, 800ft 지점에서 교통변수들의 변화추이를 관측하였다.

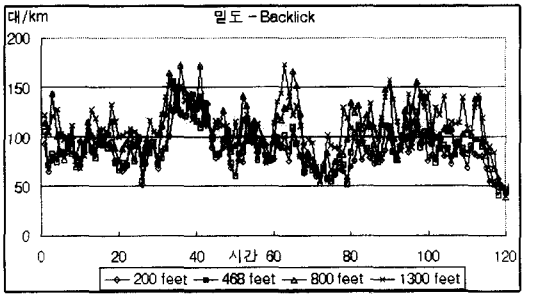
Backlick 구간에서는 관측 대상구간을 벗어나서 전파되는 대기행렬은 형성되지 않았다. 진입 교통량은 다른 구간에 비해 상대적으로 큰 변화가 있으나, 본선의 교통량이 일정하게 유지되는 것으로 보아 합류부의 용량에는 심각한 영향을 미치지 않은 것으로 해석된다. 본선의 800ft 지점의 각 차로의 속도를 살펴보면 각



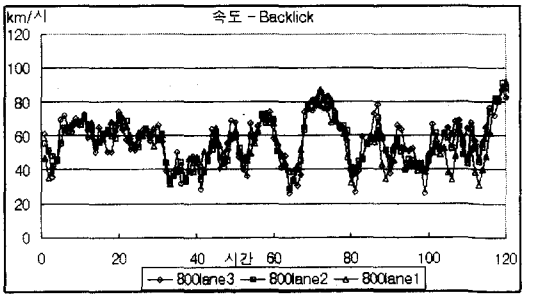
a. 지점별 교통량 변화



b. 지점별 속도 변화



c. 지점별 밀도 변화



d. 차로별 속도 변화(800ft 지점)

〈그림 8〉 교통변수들의 변화 추이(Backlick)

차로의 속도가 비슷한 값을 갖으며 변하는 것을 볼 수 있다. FHWA 보고서(1985)에 따르면, 관측이 종료되기 5분전에 대상구간의 상류부에서 사고가 발생하여 평소보다 적은 교통량이 관측대상구간에 유입되었고, 이 영향으로 관측기간의 후반부에 교통량과 밀도가 감소하며 속도가 증가하였다.

3. 자료분석 방법론

본 연구는 혼잡교통류 상태에서 본선으로 진입하는 연결로 교통류에 대한 본선교통류의 관계 및 영향을 각 지점별 본선 각 차로의 교통변수와 연결로교통량을 이용하여 분석하고자 한다. 상류부와 진입부의 본선차로는 진입교통량으로 인해 차로변경, 가감속등과 같은 교통행태를 보이며 하류부는 본선과 연결로 교통류가 혼합되어 진행되는 교통행태를 보인다.

원시자료로부터 생성된 각 지점별 교통변수들(교통량, 속도, 밀도)의 실제변동부분 (low frequent component)의 값들은 〈그림 6〉, 〈그림 7〉, 〈그림 8〉과 같이 임의변동 부분(random fluctuation)의 영향으로 인해 파악하기 어렵다. 이러한 임의 변동의 영향을 최소화하는 동시에 실제 교통 상태의 변화를 더욱 상세하게 분석하기 위하여 본 연구에서는 교통변수 값의 변화 분석에 효과적인 indicator라는 변수를 사용하였다(김영호, 2003).

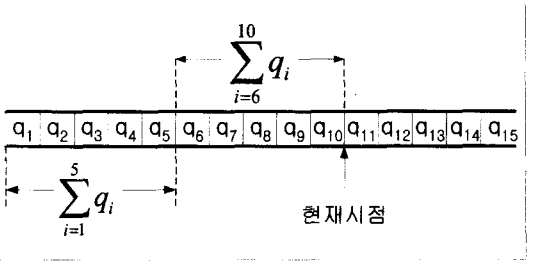
본 연구에서 사용되는 indicator는 아래 〈그림 9〉와 같이 원시자료로부터 얻어진 30초 간격 데이터 5개 단위(2분 30초)를 누적한 값을 사용하며, 현재 시점으로부터 과거 5단위 누적 데이터와 그 전 5 단위 누적데이터의 차를 합(10단위 누적데이터)으로 나눈 값으로 구해진다.

$$q_{indicator} = \frac{\sum_{i=n-4}^{n} q_i - \sum_{i=n-9}^{i=n-5} q_i}{\sum_{i=n-9}^{n} q_i} \quad (3)$$

$$v_{indicator} = \frac{\sum_{i=n-4}^{n} v_i - \sum_{i=n-9}^{i=n-5} v_i}{\sum_{i=n-9}^{n} v_i} \quad (4)$$

$$k_{indicator} = \frac{\sum_{i=n-4}^{n} k_i - \sum_{i=n-9}^{i=n-5} k_i}{\sum_{i=n-9}^{n} k_i} \quad (5)$$

위에서 정의된 교통량(q), 밀도(k), 속도(v)에 대한 indicator는 해당 변수값들의 변화율을 보여준다. 또한, 3개의 indicator들이 공통적으로 -1에서 1의 범위에서 변화하는 값을 가지므로 3개 변수들의 indicator 간의 직접적인 분석이 가능하다는 특징을 가지고 있다.



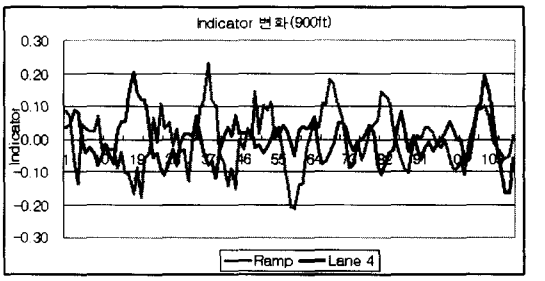
〈그림 9〉 indicator를 위한 데이터 누적도

Ⅳ. 연결로 진입교통량의 영향

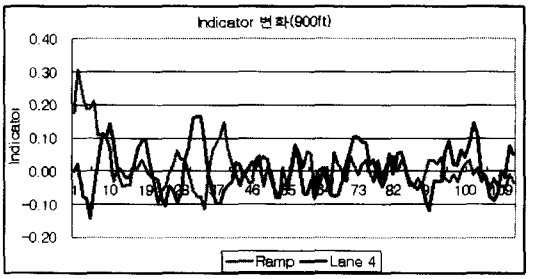
1. Indicator 분석

1) 지점별 교통량 Indicator 분석

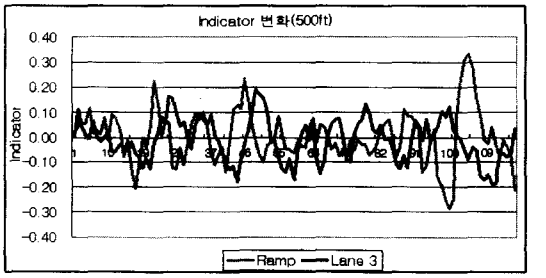
조사대상 지점인 Santa Monica, Roscoe, Backlick을 대상으로 합류부내 연결로와 본선 접속차로(4차로 혹



(a) Santa Monica



(b) Roscoe



(c) Backlick

〈그림 10〉 조사지점별 Indicator 변화

은 3차로)의 교통량 Indicator 값을 산출하여 2개 차로 간 교통류의 관계를 분석하였다. 〈그림 10〉에서 보는 바와 같이 전반적으로 연결로의 진입교통량에 따른 접속차로 교통량의 Indicator값의 변화는 부의 관계로서 연결로 교통량의 Indicator값이 증가하면 접속차로 교통량의 Indicator값은 감소하는 패턴을 가지고, 반대의 경우도 역시 성립한다. 이는 연결로 진입교통량 크기변화가 본선 접속차로 교통량의 크기변화에 영향을 미치고, 두 교통류가 상호 유기적인 관계를 유지하면서 합류부의 교통류를 형성하는 것을 알 수 있다.

3개 지점들에 대한 〈그림 10〉은 연결로교통량이 진입하는 노즈부에 해당되는 그림들로서, 진입교통량에 대한 접속차로 교통량의 indicator 변화는 시간차이(time lag)에 의한 결과로 보기가 어렵다.

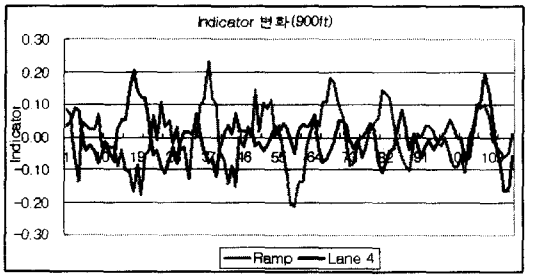
〈그림 10(a)〉의 후반부에서 2개의 indicator 변화 패턴이 서로 겹치는 것은 〈그림 6〉에서 보는 바와 같이 관측시간 후반부에서 하류부(1500ft)의 교통류가 풀리면서 접속차로 교통량과 진입교통량의 indicator가 같이 변화하는 패턴을 보이는 결과이다.

2) 차로별 교통량 Indicator 관계 분석

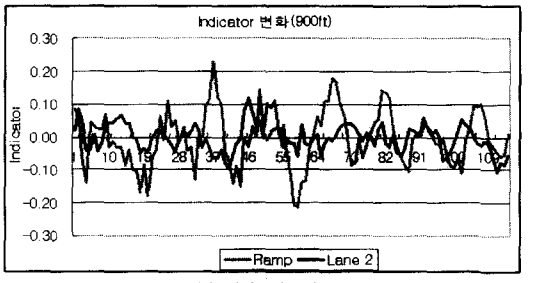
3개 조사지점 중 자유교통류에서 혼잡교통류 상태까지를 나타내는 Santa Monica 지점을 대상으로 연결로 진입교통량에 따른 본선 차로별 Indicator 값의 변화를 살펴보았다. 이 경우 연결로가 접속차로인 4차로에 가장 큰 영향을 주는 것으로 분석되고 Indicator값의 변화도 크게 나타난다. 내측차로인 2차로와 1차로에서는 진입교통량에 따른 Indicator의 변화가 작은 것을 볼 수 있다. 이는 기존에 사용하였던 교통류 변수만을 분석해서 보여줄 수 없었던 관계를 indicator라는 새로운 변수를 이용하여 막연하게 추정된 관계를 보다 명확히 보여줄 수 있다는 것을 의미한다.

3) 거리별 교통량 Indicator 관계 분석

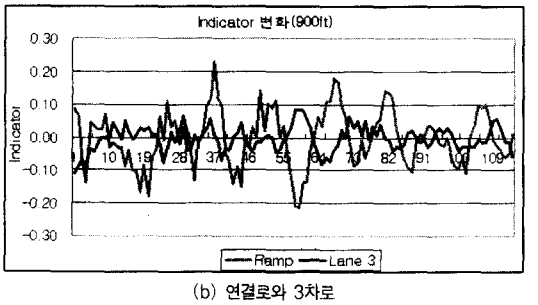
본 분석에서는 Santa Monica 지점의 본선 접속차로를 공간적으로 상류부, 고어부, 진입부, 하류부로 구분하고 각 구간별로 연결로 진입교통량에 따라 교통량 Indicator가 어떻게 변화하는지를 살펴보고자 한다. 〈그림 12〉에서 보는 바와 같이, 본선 접속차로(4차로)에서 상류부와 고어부의 Indicator값이 연결로 진입교통량에 민감하게 변화하는 것을 알 수 있고, 진입부와 하류부의 Indicator값은 시간이 경과하면서 작은 진동을 보이는 것으로 나타났다. 하류부의 교통량 변화는 진입교통량에 의해 거의 변화하지 않는 것으로 나타나는데 이는 하류부 교통량이 연결로 교통량과 진입부 본선교통량의 합으로 표현되므로, 연결로 교통량의 변화패턴과 부의 관계를 보이는 본선교통량의 변화패턴이 서로 상쇄하기 때문이다.



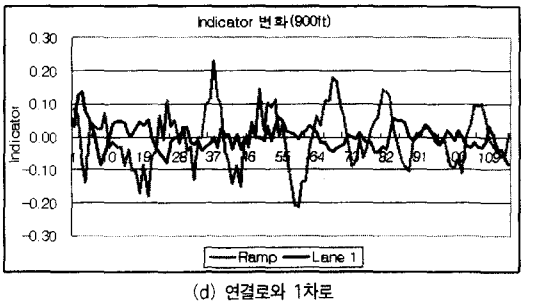
(a) 연결로와 4차로



(c) 연결로와 2차로

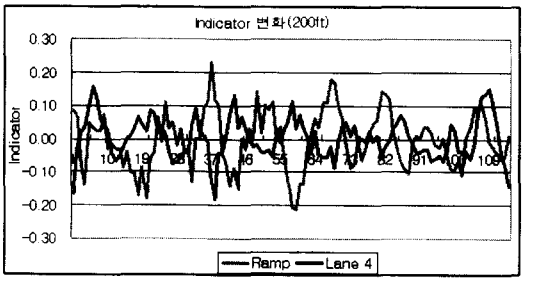


(b) 연결로와 3차로

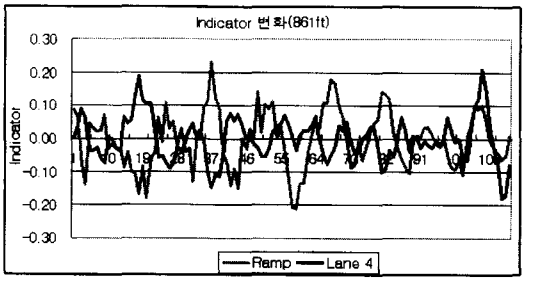


(d) 연결로와 1차로

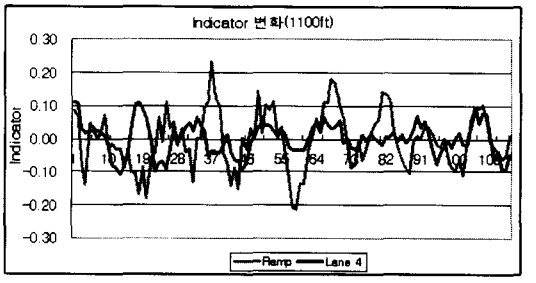
〈그림 11〉 연결로와 차로별 Indicator 변화(900ft)



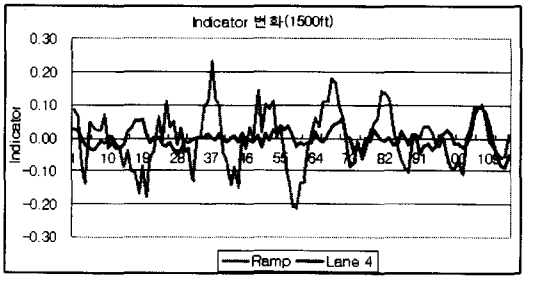
(a) 상류부(200ft)



(b) 고어부(861ft)



(c) 진입부(1,100ft)



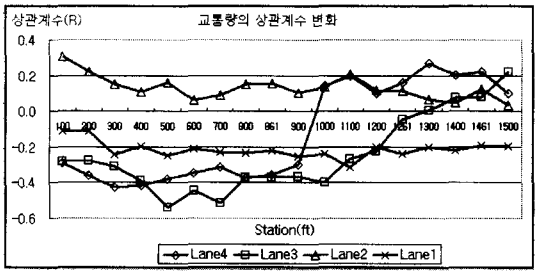
(d) 하류부(1,500ft)

〈그림 12〉 거리별 교통량 Indicator 변화

2. 상관관계 분석

1) 교통량

Indicator 분석에서 개략적으로 연결로교통량과 본선 차로별 교통량과의 관계를 살펴보았고, 여기서는 3개 지점 중 가장 넓은 정체교통류 상태를 보이는 Santa Monica 지점을 대상으로 Indicator들간의 상관관계 분석을 통하여 두 교통량간의 상관성을 분석하고자 한다.



〈그림 13〉 차로별 교통량 상관계수

〈그림 13〉은 연결로 진입교통량과 본선 차로별 교통량의 Indicator에 대한 상관관계 분석을 수행하여 전체구간을 100ft 단위로 구분하여 상관계수를 표현한 것이다. 전체적으로 상관계수의 값은 작은 범위를 나타내고 있으나 각 차로별로 상관계수의 변화패턴이 유의하게 보여서 연결로 진입교통량의 영향을 파악해 볼 수 있다.

본선 내측차로인 1차로는 거의 상관관계를 보이지 않는 것으로 나타났고, 본선 4차로는 고어부가 시작되는 861ft이후부터 상관계수가 증가하기 시작하여 1,000ft 이후로는 양의 상관관계를 가지는 것으로 분석된다. 이는 연결로 진입교통량이 증가하면서 본선 접속차로인 4차로의 하류부 교통량이 함께 증가하는 경향을 뚜렷하게 나타낸다.

본선 3차로의 경우도 4차로와 비슷한 패턴을 보이나 가속차로가 끝나는 1,261ft이후부터 양의 상관관계를 가진다. 이러한 이유는 연결로 진입교통량의 직접적인 영향이 본선 4차로에 미치고 본선 3차로는 4차로의 영향으로 하류부로 가면서 양의 상관관계를 가지는 것으로 해석된다. 본선 1, 2차로는 연결로 진입교통량과의 특별한 상관관계 변화를 보이지 않았다.

4차로의 교통량과 연결로 진입교통량의 indicator에 대한 상관관계분석에서 나타난 상관 계수 (ρ)의 값은 900ft 이전 구간에서 -0.4253과 -0.2922사이의 값을 가지며, 1000ft이후 구간에서는 0.097과 0.2681사이의 값을 갖는다.

본선 3차로와 4차로에서 도출된 상관계수(ρ)의 값이 indicator들간의 상관성을 나타내는가를 확인하기 위하여 귀무가설 H_0: $\rho = 0$을 설정하고 t-검정통계량 $\left(\frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}\right)$을 사용하여 양측검정을 시행하였다. 여기서, n은 표본의 수를, r은 피어슨의 표본상관계수

〈표 2〉 관측지점별 t-검정통계량(3차로, 4차로)

관측지점	t-검정 통계량		관측지점	t-검정 통계량	
	3차로	4차로		3차로	4차로
100 ft	-3.05	-3.20	1000 ft	-4.56	1.49
200 ft	-3.01	-4.02	1100 ft	-2.89	2.14
300 ft	-3.42	-4.92	1200 ft	-2.43	1.05
400 ft	-4.40	-4.81	1261 ft	-0.47	1.73
500 ft	-6.73	-4.30	1300 ft	0.07	2.92
600 ft	-5.20	-3.89	1400 ft	0.81	2.19
700 ft	-6.27	-3.45	1460 ft	0.87	2.40
800 ft	-4.16	-4.25	1500 ft	2.38	1.03
861 ft	-4.16	-4.01			
900 ft	-4.10	-3.29			

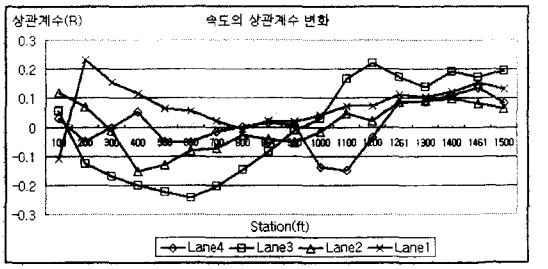
$\left(\frac{S_{XY}}{\sqrt{S_{XX}S_{YY}}}\right)$를 나타낸다. 본선 3, 4차로를 대상으로 각 관측지점에서 구해진 t-검정통계량은 〈표 2〉와 같다.

신뢰수준 95%의 양측검정에서 귀무가설을 기각하려면 t-검정 통계량의 값이 1.65이상이거나 -1.65이하의 값을 가져야한다. 4차로의 경우, 900ft 구간까지는 t-검정 통계량이 -1.65보다 작은 값을 나타내므로 귀무가설 H_0를 신뢰수준 95%로 기각할 수 있으며, 상관계수 (ρ)가 0과 다르다고 할 수 있다. 또한, 3차로의 경우 가속차로길이에 해당되는 1,261ft 이전구간까지 귀무가설을 기각하여 상관계수가 0가 다르다고 할 수 있다. 4차로의 1000ft 이후 구간에서는 1000ft, 1200ft, 1500ft이외의 관측지점에서 구한 t-검정 통계량이 1.65보다 큰 값을 나타내며 신뢰수준 95%로 귀무가설을 기각할 수 있다. 3차로의 경우, 1,500ft를 제외한 1,261ft 이후 구간에서 통계적으로 상관계수가 의미가 없는 것으로 나타났다.

2) 속도

속도에 대한 상관관계 분석은 연결로 진입교통량의 Indicator 값과 본선 차로별 속도 Indicator 값과의 상관분석을 통하여 이루어진다. 연결로의 속도 Indicator 계수를 사용하지 않은 이유는 가속차로길이 내에서 연결로차량의 속도 변화가 거의 없는 것으로 분석되었기 때문에 연결로교통량 Indicator를 대신 사용하였다.

〈그림 14〉에서 보는 바와 같이, 차로별 속도에 대한 상관계수는 1차로를 제외하고는 고어부 근처인 900ft를 중심으로 상관계수 부호가 변화하는 것을 알 수 있다. 가속차로 구간에 해당되는 본선 4차로 구간에서 연결로 진입교통량의 증가에 따라 속도는 감소하는 부의 상관관계를 가지는 것으로 분석된다.



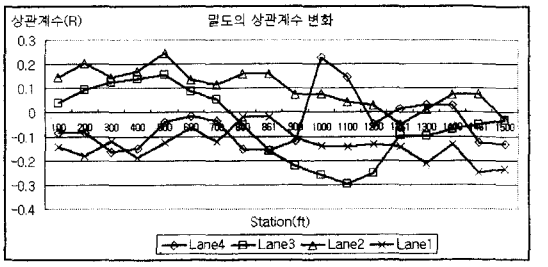
〈그림 14〉 차로별 속도 상관계수

본선 3차로의 경우, 상류부(861ft 이전)에서 연결로 교통량 Indicator와 부의 관계를 분명하게 보이는데 이는 연결로에서 차량이 진입하는 것에 대비하여 미리 가감속과 같은 속도변화를 보이는 것으로 해석되고, 4차로는 고어부까지 속도변화가 없다가 연결로교통량이 본격적으로 진입하는 지점부터 속도변화를 보이기 시작하여 이러한 경향은 합류가 완료되는 지점까지 계속적으로 유지된다.

3) 밀도

진입교통량의 Indicator값과 본선교통류의 밀도의 Indicator 값에 대한 상관관계 분석결과, 가장 두드러진 특징은 본선 3차로와 4차로의 상관계수 변화라고 할 수 있다. 본선 4차로의 경우, 진입부인 가속차로 길이내에서 연결로 교통량의 변화와 동일하게 양의 상관관계를 보이는 것으로 분석된다. 즉, 연결로 진입교통량이 증가하면 이에 대한 영향으로 접속차로인 4차로의 밀도도 증가하게 된다.

이와는 반대로 본선 3차로의 경우, 상류부에서는 연결로교통량의 영향으로 4차로의 교통량이 차로변경을 내측차로로 수행하므로 밀도의 증가를 나타내는 양의 상관관계를 가지나, 고어부(861ft) 이후부터 연결로교



〈그림 15〉 차로별 밀도 상관계수

통량의 Indicator 증가에 따라 밀도가 부의 상관관계를 가진다. 이것은 이 구간의 3차로 교통량이 다른 차로로 변경하여 상대적으로 밀도가 감소하는 경향을 의미한다.

V. 결론 및 향후 연구방향

본 연구는 혼잡교통류 상태에서 연결로 교통류와 본선 교통류간의 관계를 이론적인 접근이 아니라 실제 교통변수 데이터를 이용하여 분석하였다. 교통변수들(교통량, 속도, 밀도)의 교통상황의 변화를 반영하는 실제 변동부분을 부각시키고 임의 변동 부분의 영향을 최소화하기 위하여 indicator라는 변수를 사용하였고, 본 연구를 통하여 혼잡교통류 상태에서의 복잡한 교통류 변화상태를 분석하는데 있어 Indicator의 유용성을 보여주었다.

Indicator 분석결과, 연결로 진입교통량은 본선 접속 차로의 교통량과 부의 상관관계를 보였고, 특히 가속차로길이 내 본선 교통류의 속도와 밀도와도 의미 있는 관계가 존재함을 보였다. 그리고, 기존 HCM에서 제시하고 있는 합류부 영향권이 본선 바깥 2개 차로에 해당되는 것을 확인하였고, 구간별로 상류부, 진입부, 하류부에 대한 교통류 변화를 정성적으로 확인할 수 있었다.

또한, indicator들 간의 상관관계 분석을 통하여 각 차로별로 상관계수를 제시하였고, 결과로서는 낮은 상관계수 값으로 인하여 연결로와 본선 교통류간의 높은 상관성을 가지고 있지는 않으나 각 차로별 상관계수의 변화패턴이 관측지점별로 유의하게 나타나서 연결로 진입교통량이 본선 교통류에 미치는 공간적 범위를 파악할 수 있었다.

본 연구의 의의로는 혼잡교통류 상태에서의 두 교통류 관계 분석을 통하여 유입연결로에서 합류교통량을 결정하는 요인에 대한 보다 엄밀한 분석이 가능하게 되었다는 것이다. 또한 본 연구를 통하여 밝혀진 결과는 본선 교통류의 상태에 따른 연결로 진입교통량의 크기를 정확하게 규명할 수 있는 모형식 개발의 기초를 마련하였으며, 현재 고속도로-연결로 합류부의 혼잡교통류 시뮬레이션에서 취약점으로 지적되고 있는 연결로 교통량의 추정에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

향후 본 연구에서 밝혀진 합류부의 두 교통류간의 관계를 토대로 본선 교통류가 혼잡교통류 상태일 때, 연결로 진입교통량을 실제 교통상황에 맞게 산정할 수 있는 모형식을 개발하여야 하며, 이를 위한 연결로 진입교통량에 영향을 미치는 변수들의 개발이 이루어져야 한다.

참고문헌

1. 대한교통학회(2004) "도로용량편람"
2. Drew, D. R.(1968) "Traffic Flow Theory and Control", McGRAW-HILL, pp 217-218.
3. FHWA(1985) "Freeway Data Collection for Studying Vehicle Interactions (Technical Report)" FHWA/RD-85/108.
4. Kim, S. G.(2003) "Model Development Determining Probabilistic Ramp Merge Capacity Including Forced Merge Type" 대한교통학회지 제21권 제3호 pp107-120.
5. Kim, S. G. and Son, Y. T.(2003) "Development of A New Merge Capacity Model and the Effects of Ramp Flow on the Merge Capacity", CD Proceedings of the 82nd Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C., USA.
6. Kim, Y.(2003) "Online Traffic Flow Model Applying Dynamic Flow-Density Relation", PhD Thesis in Munich University of Technology.
7. TRB(1985) "Highway Capacity Manual (Special Report 209)".

♧ 주 작 성 자 : 김상구
♧ 논문투고일 : 2004. 5. 10
논문심사일 : 2004. 6. 7 (1차)
2004. 8. 3 (2차)
2004. 9. 2 (3차)
심사판정일 : 2004. 9. 2
♧ 반론접수기한 : 2005. 2. 28