

# 고속도로 엇갈림구간 교통와해 발생 여건 분석

## Conditions of Breakdown Occurrence at Freeway Weaving Area

김상구

(전남대학교, 교수)

김영춘

(전남대학교, 석사과정)

Key Words : 엇갈림구간, 교통와해, 시공간도, 교통류

### 목 차

#### I. 서론

#### II. 자료수집 및 분석방법

##### 1. 자료수집 및 가공

##### 2. 엇갈림구간 분석방법

#### III. 엇갈림구간 교통류 특성분석

##### 1. 교통류특성

##### 2. 시공간도

#### IV. 교통와해 발생 여건 분석

#### V. 결론 및 향후 연구방향

#### 참고문헌

## I. 서론

엇갈림 현상은 고속도로에서 동일 방향을 진행하는 두 교통류가 연결로에 의해 다른 도로와 연결됨으로써 교통류간에 합류 또는 분류가 일어남에 따라 발생하는 교차현상을 말한다. 엇갈림 현상은 짧은 구간에서 집중적으로 발생하는 운영특성 때문에 다른 도로구간에서 발생하는 교통혼란보다 더 과도한 혼란이 생기기 쉬우며 이는 도로 전체 서비스수준 저하를 초래하는 원인이 되기도 한다.

본 연구는 개별차량에 대한 미시적 분석이 가능한 고속도로의 항공사진 자료를 분석함으로써 교통와해 발생시 고속도로 엇갈림구간의 교통류 특성을 차로별로 미시적인 방법을 통하여 관찰하는 것을 목적으로 한다. 본 연구에서는 엇갈림구간의 진출입교통량으로 인한 본선 교통류의 정체과정을 분석하기 위해 고속도로의 엇갈림구간에서 수집한 항공사진 원시 자료를 차로별 30초 단위의 교통량, 속도, 밀도자료로 생성하고, 이 자료를 토대로 차로별 안정류에서 정체류로 변화하는 시간대와 구간을 파악하여 교통와해 특성을 분석하며, 또한, 개별 차량데이터를 이용하여 시간과 거리에 따른 시공간도를 작성하여 엇갈림구간의 특성에 대해 해석하여 교통와해 발생 여건을 분석하고 차로별 교통류 전과과정을 면밀히 관찰한다.

본 연구는 혼잡교통류 상태의 고속도로 엇갈림 구간에 대한 미시적 분석을 수행하여 교통와해 현상을 실제 자료를 토대로 확인하고, 혼잡교통류에 대한 기초이론을 제공한다는 데에 의의가 있다.

교통와해 현상이란 교통수요가 교통용량을 넘어서 교통류 흐름이 무너진 상태 또는 차로를 바꾸지 못 할 정도로 혼잡스러운 불안정한 흐름을 나타내는 상태를 말한다. 즉 도로 서

비스 수준이 E에서 F로 낮아질 때를 말한다.

J.Ringert와 T.Urbanik II(1993)는 차로별 교통류 분석에서 차로간 상호작용(Lane Interaction)으로 자유교통류 상태에서 최대 교통류용량의 도단없이 대기행렬 풀림 상태로 미리 전이 된다고 해석하고 있는데 이는 차로별 용량이 존재하더라도 모든 차로에서 자유 교통류용량 상태의 최대 교통류용량이 관측되는 것이 아니라는 것이다.

엇갈림구간의 교통류 특성에 영향을 미치는 도로 기하구조 요소에는 다음 3가지가 있다.

- 엇갈림 구간의 형태
- 엇갈림구간의 길이
- 엇갈림구간의 폭(차로수)

엇갈림구간의 형태는 엇갈림을 하는 차량이 차로를 변경해야 하는 최소 횡수와 출입지점의 위치에 따라 여러 가지 형태가 생긴다. 차로변경 횡수는 진입 차로와 진출 차로의 위치와 차로수에 따라 결정 되는데, 이들은 차로변경을 포함한 엇갈림 구간의 운행특성에 큰 영향을 미치기 때문에 엇갈림구간의 설계에서 매우 중요하다.

엇갈림 차량들은 진입로와 본선이 만나는 지점에서 진출로 시작 부분까지의 엇갈림 구간내에서 필요한 차로 변경을 수행해야 하기 때문에, 엇갈림구간의 길이는 운전자가 엇갈림에 필요한 차로를 변경하는 데 드는 시간과 공간을 제한한다. 따라서, 다른 요인은 일정하다고 가정할 때, 엇갈림 구간 길이가 짧을수록 운전자가 차로를 변경하기가 어려워지며, 그로 인한 혼란의 정도는 높아진다.

엇갈림 구간의 폭은 엇갈림 구간의 운영 상태에 큰 영향을 미치는 요소이다. 엇갈림 구간의 폭이 넓을수록 엇갈림 교통류가 이 구간에 미치는 영향은 작으며, 통행속도도 그만큼 덜 제약받는다.

## II. 자료수집 및 분석방법

### 1. 자료수집 및 가공

본 연구에서는 정체교통류에서 교통류 변수(교통량, 속도, 밀도) 특성을 파악할 수 있고, 엇갈림구간을 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 항공 촬영사진으로부터 차량의 위치를 계수화(digitizing)한 자료를 본 연구의 목적에 맞게 일부 가공하여 사용하였다. 고속도로 교통자료가 수집된 18개 지점 중에서 본 연구의 대상구간인 엇갈림 구간 1개 지점을 대상으로 자료수집 및 변환을 수행하였다.

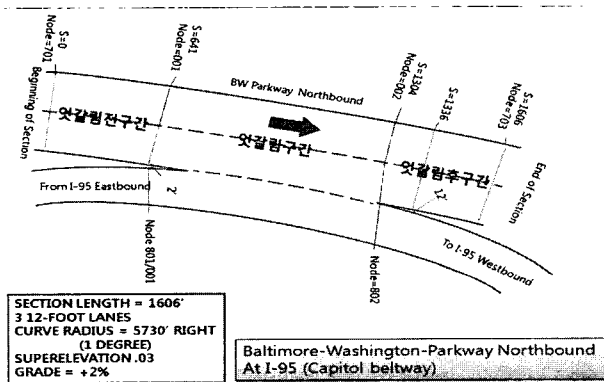
대상지점의 기하구조 및 공간적 범위는 <그림 1>와 같다.

원시자료 파일은 엇갈림구간의 합류전 구간에서 합류후 구간까지 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.

<표 1> 자료수집 지점 현황

지점	구간길이(ft)	차로수
Baltimore Washington Blvd.( I-405)	1,606	2/1

주 : 차로수는 본선/연결로 차로수임



<그림 1> 조사지점의 연결로 합류부의 기하구조

원시자료는 1초 단위로 해당공간내 차량위치와 관련된 자료를 제공하므로, 일반적으로 교통분석에서 사용하는 지점별 교통변수로 변환하는 작업이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 해당 고속도로 구간을 세 구간(엇갈림전, 엇갈림, 엇갈림후)으로 분할하여 원시자료를 일정 간격과 수집간격(30초) 단위의 교통변수를 산출할 수 있는 프로그램을 작성하였으며 이를

이용하여 각 관측지점별 분석단위 동안 교통량, 속도, 밀도 데이터를 생성하였다. 또한, 좀 더 미세한 분석을 수행하고자 차로별 시간대별 시공간도를 작성하기 위한 시간과 거리 데이터를 생성하였다.

차량ID	변종	차종	모기	도움값	속도	거리	색상	번호
203	3	1	17	57	1381	11	1	1
204	3	1	17	56	1463	10	1	1
205	3	1	17	57	1548	8	1	1
200	5	1	14	0	1080	9	1	1
201	5	1	14	40	1150	9	1	1
202	5	1	14	49	1223	8	1	1
203	5	1	14	48	1294	10	1	1
204	5	1	14	47	1363	10	1	1
1	2	3	4	5	6	7	8	9

- |                |                     |
|----------------|---------------------|
| 1: 프레임 번호      | 5: 속도(mile/hour)    |
| 2: 차량 ID       | 6: 시점으로부터의 거리(feet) |
| 3: 차종 코드       | 7: 길어깨부터의 거리(feet)  |
| 4: 차량 길이(feet) | 8: 차량 색상 코드         |
|                | 9: 차로 번호            |

<그림 2> 계수화된 항공사진 원시자료 파일

### 2. 엇갈림구간 분석방법

본 연구는 본선으로 진입 또는 연결로로 진출하는 교통류로 인해 발생하는 혼잡에 대한 영향을 각 지점별 본선 각 차로의 교통변수와 연결로 교통류의 교통변수를 이용하여 시공간적으로 분석하고자 한다.

먼저, <그림 1>의 Baltimore Washington 기하구조와 같이 전체 엇갈림구간을 세 구간 즉 엇갈림전, 엇갈림, 엇갈림후 구간으로 구분하여 각 구간을 대표하는 지점을 선정하여 각 지점의 차로별 속도, 밀도, 교통량 변화추이를 분석하며 차로별 개별차량 차두시간의 변화추이를 분석한다. 엇갈림구간의 미시적인 분석을 위하여 50ft간격의 속도, 밀도, 교통량의 시간에 따른 변화추이를 분석하며 시간에 따른 개별차량 속도 변화추이와 거리에 따른 개별차량 속도변화추이를 분석하여 교통와해 발생 여건 및 현상을 해석하고자 한다.

본 연구에서는 미국 FHWA의 자료를 그대로 사용하였기 때문에 미국 차로 구분에 따라 본선 외측차로부터 1차로로 시작되고, 연결로 가속차로는 8차로로 표시된다.

## III. 엇갈림 구간 교통류 특성분석

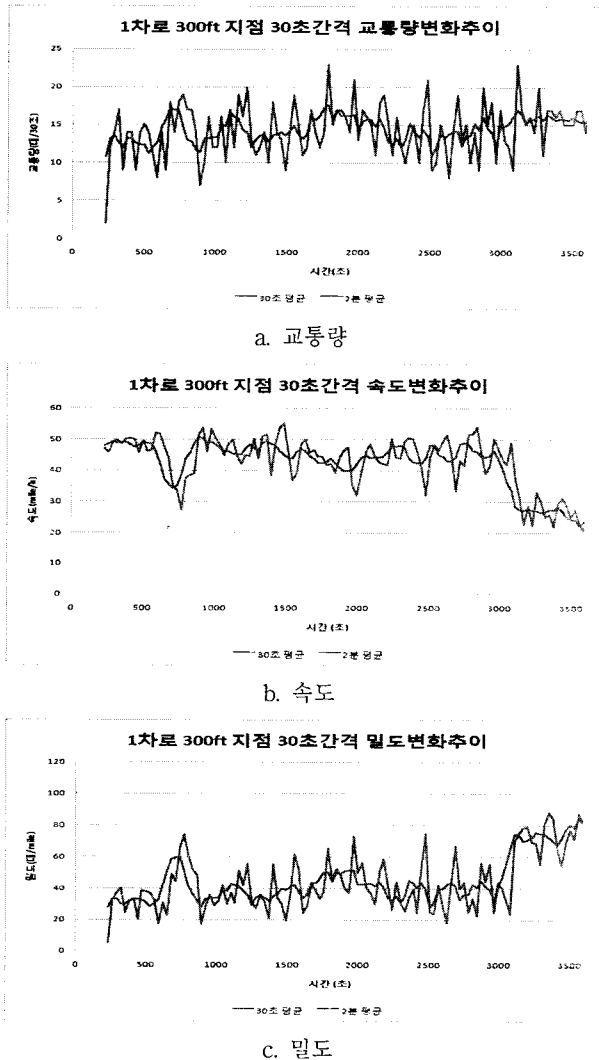
### 1. 교통류 특성

#### 1) 엇갈림전구간(300ft)

Baltimore Washington 1차로의 엇갈림전 구간(300ft)의 교통류 특성을 살펴보면, 엇갈림전 구간에 속한 300ft 지점의 교통량변화추이의 30초 평균데이터에서는 3,300초 전까지는 큰 폭으로 진동하는 패턴을 나타내다가 3,300초 후에는 교통

량이 14대/30초~17대/30초 사이로 진동하는 폭이 줄어든 것으로 나타났고 2분 평균데이터에서는 15대/30초를 기준으로 교통량이 진동하지만 교통와해에 대한 뚜렷한 특징은 나타나지 않는다.

반면, 속도변화추이와 밀도변화추이의 30초평균과 2분평균 데이터에서는 3000초~3200초 사이에 속도는 급격히 떨어지고 (49mile/h→22mile/h) 떨어진 후에는 속도가 회복되지 않았고 밀도는 급격히 증가하여(22대/mile→80대/km) 증가된 후에는 평균적으로 일정 수준(70대/mile)의 밀도를 유지하고 있는 것으로 보아 3000초~3300초 시간대에 교통와해(Breakdown)의 영향이 나타난 것으로 판단된다.

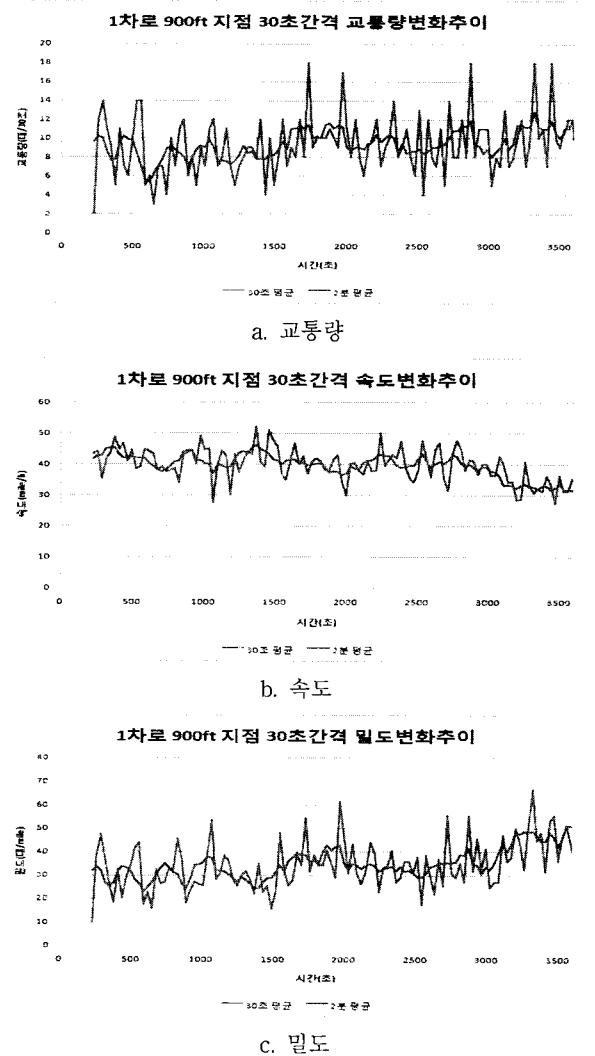


<그림 3> 교통량, 속도, 밀도변화추이(엇갈림전 구간)

## 2) 엇갈림구간(900ft)

Baltimore Washington 1차로의 엇갈림구간(900ft)의 교통류특성을 살펴보면, 엇갈림구간에 속한 900ft 지점의 교통량 변화추이에서는 전반적으로 큰 폭으로 진동하는 패턴을 보이고, 속도변화추이에서는 3000초~3100초 사이에 속도가 소폭 감소하고(42mile/h→32mile/h) 떨어진 후에는 속도가 회복되지 않았고, 밀도변화추이에서는 전반적으로 큰 폭으로 진동하

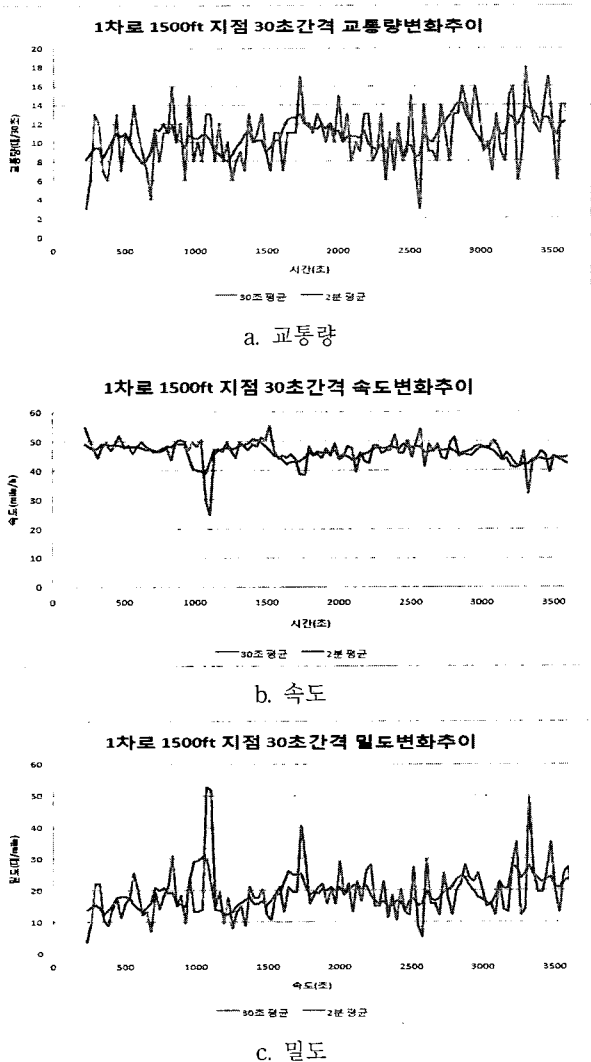
는 패턴을 보이며 3000초~3100초 사이에 밀도가 증가(32대/mile→48대/km)한 것으로 나타났다. 엇갈림전구간인 300ft 지점보다 엇갈림구간에서 교통량, 속도, 밀도데이터들의 변화가 적은 것은 900ft 지점의 교통류가 교통와해(Breakdown)지점의 하류부에 위치해 있어서 정체교통류에서 풀려나면서 가속하는 상태의 교통류이기 때문에 영향이 적은 것으로 판단된다.



<그림 4> 교통량, 속도, 밀도변화추이(엇갈림구간)

## 3) 엇갈림후구간(1500ft)

Baltimore Washington 1차로의 엇갈림후구간(1500ft)의 교통류특성을 살펴보면, 엇갈림후구간에 속한 1500ft 지점의 교통량, 속도, 밀도변화추이에서는 3,000초 이후의 데이터에서 소폭 증가 또는 감소된 특성을 나타냈으며, 이러한 특성은 엇갈림구간의 900ft지점과 같은 이유로 엇갈림후구간이 교통와해지점의 하류부에 포함되어 교통류가 정체지점에서 풀려나가속하는 구간에 해당하기 때문이고, 엇갈림전구간의 900ft 지점보다는 교통와해의 영향이 적은 것으로 판단된다.



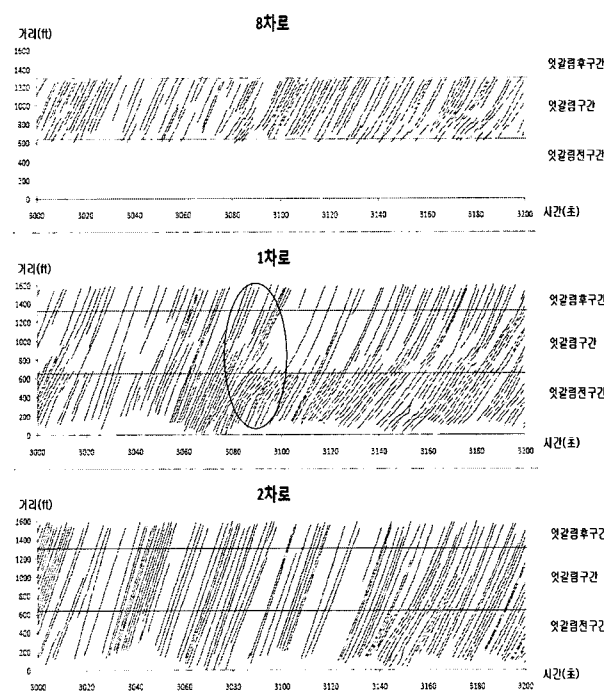
<그림 5> 교통량, 속도, 밀도변화추이(엇갈림후구간)

## 2. 시공간도

Baltimore Washington 구간의 엇갈림 교통류에 따른 본선 차로의 교통특성을 알아보기 위해 각 차로별 시공간도를 비교분석해 보았다. <그림 6>은 교통류 특성 분석에서 3,000초~3,200초 사이에 교통와해가 발생한 것으로 분석되었기 때문에 이 시간대의 시공간도를 작성하였다. 본선 1차로와 2차로의 시공간도 기울기를 보면 1차로는 3,080초 이후에 기울기의 변화가 있는 것으로 보아 속도의 변화가 있는 것으로 보이는 반면, 2차로는 기울기의 변화가 거의 없다가 3,150초 이후에 기울기가 변화하여 속도의 변화가 나타났다. 각 차로 시공간도의 개별차량 데이터를 보면 연결이 끊어진 데이터는 차로를 변경한 차량들인데, 이러한 차로변경 차량들을 보면 1차로에서 가장 많이 나타났으며 특히, 엇갈림전, 엇갈림, 엇갈림후구간 중 엇갈림구간에서 가장 많은 차로 변경이 발생한 것으로 보인다. 이러한 이유는 엇갈림구간이 연결로인 8차로에서 본선 1차로에 진입하기 위한 연결로 차량들과 본선 1차로에서 연결로로 진출하기 위해 본선 차량들이 차로변경을 실시한 결과라고 해석된다. 전체 차로 중 대부분의 차로변경 데이터가 1차로에서 나타나고 기울기 변화 또한 1차로에서 명확

히 나타났으며 연결로 진입 또는 진출 교통량에 의한 영향이 2차로에는 60초 후인 3,140초에 나타난 것으로 보여진다. 1차로의 시공간도를 살펴보면 엇갈림전구간에서 시작되어 엇갈림구간에서 끊어진 데이터는 2차로의 차로변경 데이터가 거의 없는 것으로 보아 본선 1차로에서 연결로 8차로로 차로변경하여 진출한 차량들이고, 엇갈림구간에서 시작되어 엇갈림후구간으로 이어지는 데이터는 대부분 연결로 8차로에서 본선 1차로로 진입하는 차량들이며 Baltimore Washington 구간에서는 진출하는 차량들이 진입하는 차량들보다 많은 것으로 판단된다. 그리고 본선 1차로의 3,080초에서 600ft~800ft 구간의 데이터와 같이 진출하는 교통류와 진입하는 교통류사이의 엇갈림 현상이 발생했을 때 본선 1차로의 교통량이 연결로로 진출하기 위하여 속도를 감속하면서 교통와해가 발생했을 것으로 판단된다. 즉, 본 연구의 분석대상 구간인 Baltimore Washington 구간의 교통와해 현상은 진입하는 차량들로 인해 진출하는 차량이 진출하지 못하고 본선 1차로에서 감속하면서 교통와해가 시작된 것으로 보여진다. 또한, 교통와해 발생 후 통과 또는 진입교통량보다 진출하는 교통량이 많아 엇갈림전구간으로 교통와해의 영향이 전이되는 것으로 판단된다.

각각의 차로의 교통류의 진행방향 특성을 보면, 엇갈림구간의 본선 1차로는 대부분 본선으로 진입하거나 연결로로 진출하는 차량들이며 직진하는 통과차량은 진출하거나 진입하는 차량들에 비해 확연히 적은 것으로 나타나는 반면, 본선 2차로 차량들의 진행방향 특성은 대부분이 직진하는 통과차량들이며 이러한 결과는 <그림 6>의 시공간도를 통해 알 수 있다.



<그림 6> 분석대상구간의 차로별 시공간도

#### IV. 교통와해 발생 여건분석

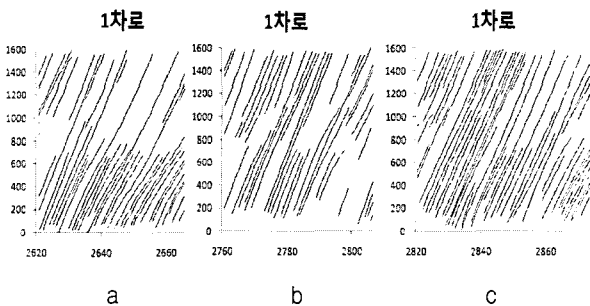
시공간도 분석결과 엇갈림 구간의 교통와해가 발생하기 위해서는 몇가지 여건이 갖춰져야 할 것으로 분석된다.

본 연구의 분석구간의 교통와해는 본선에서 연결로로 진출하는 교통량 수준(17대/30초)이 높은 경우로 엇갈림 현상이 발생했을 때 연결로에서 본선으로 진입하는 교통량 수준(10대/30초)이 상대적으로 높은 수준을 나타내어 교통와해가 발생하였으며 그 후 정체가 지속되었다.

<그림 7>은 교통와해가 발생할 것으로 보여지지만 발생하지 않는 경우로 a의 시공간도를 보면 400ft 지점의 본선 교통량이 19대/시로 매우 높은 수준을 나타내며 800ft~1000ft 사이에 엇갈림 현상 또한 나타났지만 교통와해는 발생하지 않았다. 발생하지 않은 이유는 엇갈림 현상 발생시 연결로에서 본선으로 진입하는 교통량 수준이 4대/30초로 낮아 본선에서 연결로로 진출하는 차량들이 속도를 감속하지 않아도 진출이 가능했기 때문으로 판단된다. b의 시공간도를 보면 800ft~1200ft 사이에 엇갈림 현상이 자주 발생하고 연결로에서 본선으로 진입하는 교통량 또한 10대/30초로 높은 수준의 교통량을 나타내지만 교통와해는 발생하지 않았다. b의 경우 교통와해가 발생하지 않은 이유는 본선의 교통량 수준이 10대/30초로 높지 않아서 교통와해가 발생하지 않는 것으로 판단된다. c의 경우를 보면, 본선 1차로의 교통량이 20대/30초로 매우 높은 수준을 나타내고 연결로에서 진입하는 교통량 또한 9대/30초로 높은 수준을 나타내지만 교통와해는 발생하지 않았다. 발생하지 않은 이유는 본선차로의 교통량 중 통과교통량이 많고 본선에서 연결로로 진출하는 교통량과 연결로에서 본선으로 진입하는 교통량 사이에 엇갈림 현상이 발생하지 않았기 때문으로 생각된다.

<표 2> 교통와해 분석 대상별 유출입 교통량 (단위 : 대/30초)

구분	시공간도 a	시공간도 b	시공간도 c	분석구간 시공간도
본선1차로 교통량	19	10	20	17
연결로 유입교통량	4	10	9	10
엇갈림 현상	발생	발생	미발생	발생



<그림 7> 교통와해 미 발생시 시공간도

고속도로 엇갈림 구간에 교통와해가 발생하려면 다음과 같

은 여건을 만족해야 할 것으로 분석된다.

- 첫째, 본선 차로의 교통량 수준이 높아야 하며 본선차로 중 연결로와 접해있는 본선 1차로의 교통량 중 연결로로 진출하는 교통량의 비중이 매우 높아야 한다.
- 둘째, 연결로에서 본선으로 진입하는 교통량의 수준이 높아야 한다.
- 셋째, 본선에서 연결로로 진출하는 차량들과 연결로에서 본선으로 진입하는 차량들 사이에 엇갈림 현상이 발생하여야 한다.

#### V. 결론 및 향후 연구방향

본 연구는 개별차량에 대한 미시적 분석이 가능한 고속도로의 실제 항공사진자료를 분석함으로써 교통와해 발생시 고속도로 엇갈림구간의 교통류 특성을 차로별로 미시적인 분석을 통하여 교통와해 현상을 관찰함으로써 교통와해 발생 여건에 대한 연구를 수행함을 목적으로 하였다.

이를 위해 거시적 분석으로 교통량, 속도, 밀도 변화추이를 통해 교통류 특성을 분석하였고, 미시적 분석으로 시공간도를 이용하여 시간과 공간적인 관점에서 교통류 자료들을 분석하였다.

교통류 특성분석을 통해 거시적으로 교통와해가 발생했음을 확인하였고 교통와해 발생시 세 구간(엇갈림전, 엇갈림, 엇갈림후)의 교통류 특성에 대해 살펴보았다. 또한, 엇갈림구간에서 연결로 차량의 진입과 본선 차량의 진출에 따른 본선과 연결로 차량들의 차로변경, 가감속 행태들이 시공간도를 통하여 관측되었다. 그리고 교통와해 발생시 시공간도와 교통와해 미 발생시 시공간도를 비교하여 교통와해 발생 여건에 대해 확인하여 설명하였다.

본 연구에서 사용한 Baltimore Washington의 엇갈림 구간의 시공간도 분석을 통해 다음의 여건을 만족해야 교통와해가 발생할 수 있음을 확인하였다.

첫째, 본선차로의 높은 교통량 중 연결로로 진출하는 교통량의 비중이 높아야 하며, 둘째, 연결로에서 본선으로 진입하는 교통량의 수준이 높아야 하며, 셋째, 본선에서 연결로로 진입하는 차량들과 연결로에서 본선으로 진입하는 차량들 사이에 엇갈림 현상이 발생하여야 한다.

본 연구는 엇갈림구간을 대상으로 혼잡교통류 상태의 연결로 교통류와 본선 교통류간의 관계에 대한 미시적 분석을 수행하여 교통와해 발생 여건에 대한 분석을 하였으며 교통와해에 대한 특성분석을 토대로 향후 미시적 시뮬레이션 모형개발의 기초이론을 제공하는데 의의가 있다.

본 연구는 고속도로 엇갈림구간 한구간의 데이터만을 분석하였으므로 일반화하기 어려운 한계성을 내포하고 있다. 따라서 향후에는 본 연구에서 확인된 내용이 다양한 엇갈림구간에서도 동일하게 관측되는지에 대한 추가 분석이 필요할 것으로 생각된다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 2006년 국가교통핵심기술개발사업의 일환으로 현재 수행중인 “u-연속류 운영관리 알고리즘개발”의 지원을 받아 수행되었음.

## 참고문헌

1. 대한교통학회(2004) “도로용량편람”, p49-55.
2. 류경수(1988), “고속도로 위빙 구간의 교통행태에 대한 경험적 분석”, 대한교통학회지, 제6권 제1호, p17-31.
3. 이승준, 이정도, 최재성(1999), “확률모형을 이용한 엇갈림 구간의 교통류분석”, 대한교통학회지 제17권 제5호, p137-149.
4. Drew, D. R.(1968) “Traffic Flow Theory and Control”, McGRAW-HILL, pp 217-218.
5. FHWA(1985) “Freeway Data Collection for Studying Vehicle Interactions (Technical Report)” FHWA/RD-85/108.
6. Hall, F.L., and Agyemang-Duah, K.(1991), “Freeway Capacity Drop and the Definition of Capacity,” Transportation Research Record 1320, TRB, pp.91-98.
7. TRB(2000), Highway Capacity Manual, Fourth Edition.