



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩 士 學 位 論 文

패턴분석을 이용한 도시고속도로
가변속도제어 운영에 관한 연구
-서울내부순환 도시고속도로를 중심으로-



漢城大學校 大學院

情報시스템工學科

情報시스템工學專攻

林 寬 洙

碩 士 學 位 論 文

指導教授 南 斗 熙

패턴분석을 이용한 도시고속도로

가변속도제어 운영에 관한 연구

-서울내부순환 도시고속도로를 중심으로-

An Study on Operation of Expressway Variable Speed
Limits Using Pattern Analysis

2008年 12月 日

漢城大學校 大學院

情報시스템工學科

情報시스템工學專攻

林 寬 洙

碩 士 學 位 論 文

指導教授 南 斗 熙

패턴분석을 이용한 도시고속도로

가변속도제어 운영에 관한 연구

-서울내부순환 도시고속도로를 중심으로-

An Study on Operation of Expressway Variable Speed
Limits Using Pattern Analysis

위 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2008年 12月 日

漢城大學校 大學院

情報 시스템 工學科

情報 시스템 工學專攻

林 寬 洙

林寬洙의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

2008年 12月 日



HANSUNG
UNIVERSITY

審査委員長 이 기 원 (印)

審査委員 남 두 희 (印)

審査委員 강 경 표 (印)

- 목 차 -

I 서론	1
1. 연구배경 및 목적	1
2. 연구의 범위	2
3. 연구수행방법	3
II 도시고속도로와 가변속도제어	4
1. 도시고속도로 현황	4
가. 운영 현황 및 계획	4
나. 교통류 관리	6
다. 운영 문제점	8
2. 데이터 마이닝	9
가. 교통류 데이터 처리	9
나. 패턴분석	15
다. 교통류 특성 분석	20
3. 교통류 관리 방법론	23
가. 교통류 현상 분석	23
나. 가변속도제어 효과	27
4. 가변속도제어 모형	30
5. 가변속도제어 운영효과 검증	33
가. 대상지역 네트워크 설계	33
나. 시뮬레이션 시나리오	34
다. 시뮬레이션 결과	35

Ⅲ. 가변속도제어운영 방안	43
Ⅳ 결론	45
참고문헌	47
ABSTRACT	49



- 표 목 차 -

<표 1> 국가별 일평균 주행거리	4
<표 2> 서울시 교통량 증가율 및 차량 속도	5
<표 3> 간선도로 연장 및 ITS 도입 비율	5
<표 4> 공간 추세 활용법(예)	12
<표 5> 패턴분석에 따른 패턴(상태)별 중심값(밀도, 속도)	19
<표 6> 시뮬레이션 결과 네트워크 상태(1)	37
<표 7> 시뮬레이션 결과 네트워크 상태(2)	42
<표 8> 감속도에 따른 가변속도제어 유효범위	43



- 그림 목 차 -

<그림 1> 연구방법	3
<그림 2> 영국 M25에서 설치 운영 중인 가변속도제어	9
<그림 3> 차량검지기로 수집된 데이터 처리과정	13
<그림 4> 평활화된 30초 데이터의 밀도산출법에 따른 속도-밀도 관계 ...	13
<그림 5> 평활화된 1시간 데이터의 속도-밀도	14
<그림 6> Z-score로 변환된 속도, 밀도	15
<그림 7> k-means 알고리즘에 의한 패턴분석 결과	20
<그림 8> 교통량-밀도	21
<그림 9> 속도-밀도	22
<그림 10> 교통량-속도	23
<그림 11> 거리에 따른 밀도와 속도 그리고 대기행렬	26
<그림 12> 가변속도제어 알고리즘 순서도	29
<그림 13> 효과측정을 위한 시뮬레이션 변수설정	30
<그림 14> 가변속도적용 순서도	32
<그림 15> 시뮬레이션 대상지역 네트워크 설계	34
<그림 16> 시뮬레이션 시나리오	35
<그림 17> 네트워크의 세그먼트별 밀도 변화(제어여부)	38
<그림 18> 네트워크의 세그먼트별 밀도 변화(감속도 -10km/h)	39
<그림 19> 진입교통량에 따른 통과교통량 변화	40
<그림 20> 진입교통량에 따른 평균속도 변화	40
<그림 21> 진입교통량에 따른 속도분산 변화	41
<그림 22> 가변속도제어 운영방안	42

I 서론

1. 연구배경 및 목적

현재 서울시의 도시고속도로는 올림픽대로, 강변북로, 동부간선도로, 서부간선도로, 북부간선도로, 내부순환로 등으로 동서축, 남북축, 환형태의 축으로 이루어져 있으며, 총 연장은 130.7km에 달한다. 이러한 도시고속도로는 연속류의 특성을 지니며 도심내의 교통 정체를 감소하고 장거리 이동자의 이동성을 제공하는 등의 역할을 하게 된다. 그리고 서울시 전체 총도로연장은 8,011km이고 이 중 도시고속도로는 130.7km로 도시고속도로는 전체 도로에 있어 1.63%에 해당되나 교통량 및 화물수송량은 각각 15%, 45%에 해당되어 도심 관통 및 도심으로의 유출입 통행을 담당하고 있다.

그러나 특히 내부순환도시고속도로의 경우 도로선형 및 유출입 램프 구조/위치 등 도로의 기하구조 및 교통량 증가로 인하여 본래의 역할을 하지 못하고 있는 실정이다.(손봉수, 1999:20~23) 또한 교통류관리에 있어 초기 램프미터링은 시민들의 반대로 운영하고 있지 못하며 선형기하구조 및 터널 부근에서의 사고발생과 진출입램프 구간의 혼잡으로 인하여 내부순환로뿐만 아니라 이와 인접해있는 도심지 도로에까지 영향을 미치고 있어 전반적인 교통류관리에 개선이 필요하다.

또한 모든 도로는 도로용량편람 및 설계지침에 준거하여 도로설계 및 운영 중에 있으나 도로유형별 특히 도시고속도로의 교통류 특성을 반영하고 있지 못하여(신판식, 2001:147~148) 현재 구축되어 있는 FTMS(고속도로교통관리시스템)는 실시간 제어 및 돌발상황관리가 자동이 아닌 인력에 의한 수동으로 이루어지고 있으며 가변전광판을 통한 소통정보를 제공해주는 정도이다. 그리고 FTMS의 핵심은 실시간 정보를 활용하여 혼잡예방 및 완화에 있음에도 불구하고 현재 교통류의 유형분류가 도로상에 설치된 검지기의 수집된 데이터로부터 자동 분류가 되고 있지 않으므로 도시고속

도로 실시간 제어가 곤란한 상황이다.

그러나 국내와는 달리 유럽에서는 연속류에서 실시간으로 수집되는 차량검지기 데이터를 이용하여 가변전광판을 통한 교통정보제공 및 속도제어, 램프미터링을 통하여 혼잡 및 사고 발생률을 완화 시키고 있다. (Rijkswaterstaat, UK-ITS website)

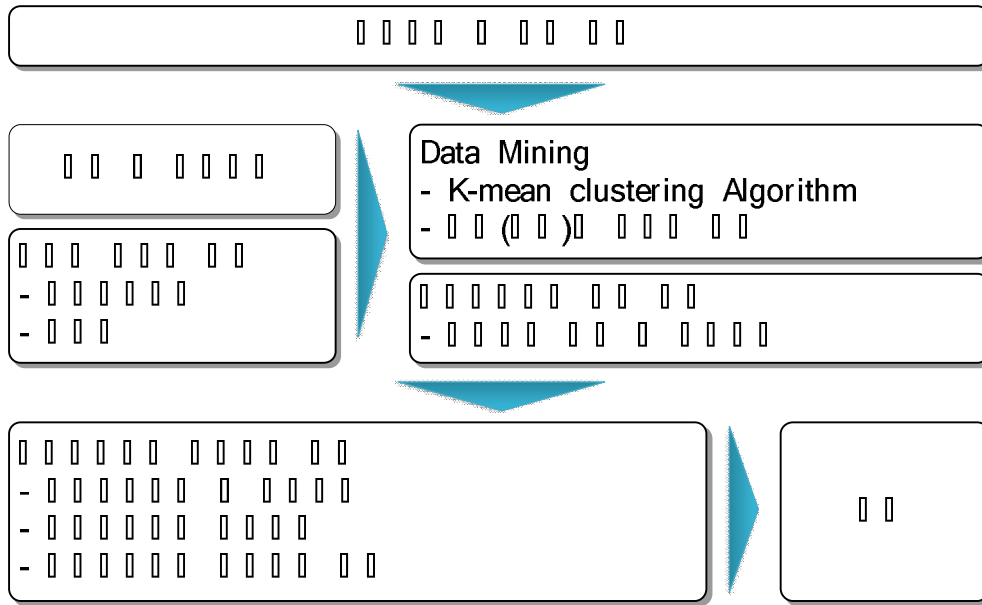
따라서 본 연구의 목적은 국내에서도 소극적인 교통류 관리에서 벗어나 적극적인 교통류 관리를 운영하기 위하여 도시고속도로의 본선 교통류 제어기법 중 하나인 가변속도제어의 적극적인 운영을 위해 초기 단계로 우선 교통류 유형분류 세분화 및 이를 통한 교통류 상태 판별범위 값을 산출하고 다음으로 이를 활용하여 가변속도제어를 운영하기 위한 활용 방안을 시뮬레이션 결과를 통해 제시하는데 있다. 또한 이는 가변속도제어를 통한 도시고속도로의 제 기능 확보 및 향후 도시도속도로의 실시간 교통 제어 및 돌발상황을 판별할 수 있는 중요 판단 기준이 될 것이다.

2. 연구의 범위

연구의 범위로 공간적 범위와 내용적 범위로 구분할 때 우선 본 연구의 공간적 범위는 도시고속도로 중 서울내부순환 도시고속도로 중 홍은사거리에서 홍지문터널 방향의 구간을 설정하였으며 이 구간을 대상지로 설정한 이유는 홍지문터널 및 홍은램프의 유입교통량으로 인한 내부순환 도시고속도로 본선의 혼잡이 출퇴근 시간외에도 발생되고 있으며 이 혼잡으로 인한 충격파가 빠르게 전달되어 홍제램프 구간까지 영향을 미치고 있으므로 이곳에 가변속도제어를 통해 본선 교통류의 속도관리를 하고자 한다.

내용적 범위로는 대상구간에 적합한 가변속도제어 운영방안을 제시하고자 검지기데이터 처리, 데이터 패턴분석, 가변제한속도로의 적정 감속도와 지속시간을 측정하고자 시뮬레이션을 수행, 적정 가변속도제어 운영방안 검증으로 설정하였다.

3. 연구수행방법



<그림 1> 연구방법

도시고속도로 중 서울내부순환 도시고속도로에 적합한 가변속도제어 운영방안을 도출하기 위하여 우선적으로 연구배경 및 목적을 설정하고 이에 대한 연구의 배경이 되는 서울시 도시고속도로 또는 광역간선도로의 현황과 가변속도제어를 수행하기 위해 근본이 되는 이론적인 고찰을 수행한다.

다음으로 본 연구의 대상이 되는 구간에서 수집된 검지기 데이터를 보정하고 평활화 하여 패턴분석을 위한 기초준비를 하고 데이터간의 관계를 분석한다. 그리고 평활화된 데이터로 이론적 고찰에서 제시된 방법에 의하여 패턴분석을 수행하여 패턴별 밀도, 속도 범위를 산출한다.

마지막으로 가변속도제어의 운영방안을 도출하기 위하여 시나리오 및 모형을 설정하고 이에 따른 효과척도를 분석하여 최적의 운영방안을 제시하고 향후 보완될 연구내용으로써 연구를 마무리 한다.

II 도시고속도로와 가변속도제어

1. 도시고속도로 현황

가. 운영 현황 및 계획

서울시의 인구는 현재 사회, 경제, 정치, 문화 중심지인 서울로 집중되어 왔으며 한정된 개발 부지로 인해 더 이상 개발이 이루어 질 수가 없어 서울 주변 도시로 인구가 분산되고 있는 상대적 분산기에 있다고 볼 수 있다.

이러한 현상으로 인하여 서울시 권역은 점차 광역화 되고 있어 향후 경기도 전체가 서울시 광역권에 포함될 것이며 서울시와 주변 도시와의 기능 분산이 이루어지지 않는 상태에서 단순 인구 이동이 이루어 질 경우 교통 집중화 현상은 더욱 심해질 것이다.

특히 주요 기능이 밀집되어 있는 서울과 주거 기능을 갖고 있는 주변 도시 간에는 출퇴근, 등하교 업무 등의 목적 통행 및 통행거리의 증가로 더욱 문제가 심각해진다.

수도권의 차량등록 대수 및 차량구성비는 승용차 구성비가 줄어들고는 있으나 여전히 70%를 넘고 있으며 서울시의 경우 2002년에 차량등록대수 200만을 돌파 하였다. 경기도의 경우 서울 보다 높은 증가 추세를 보이고 있다.

<표 1> 국가별 일평균 주행거리

단위 : km/대

구분	서울	미국	일본	영국
일평균 주행거리	57.9	55.6	28.0	45.2

참조 : 2020 서울도시기본계획 (서울시, 2006:223)

이는 앞서 언급된 서울로의 기능 집중으로 인하여 차량 통행거리 증가

현상으로 보여 진다. 실제 선진국과의 일평균 통행거리를 비교해 볼 때 다른 나라에 비해 우리나라의 일평균 통행거리가 높은 수준임을 알 수 있다.

또한 서울시의 교통량과 승용차 주행속도를 보면 IMF(International Monetary Fund)인 1998년 이후 도심을 제외한 간선, 시계 부분에서 증가하는 추세를 보이며 이와는 반대로 차량 주행속도에 있어서는 점차 도심 외곽 모든 부분에서 감소하는 추세를 보이고 있다.

<표 2> 서울시 교통량 증가율 및 차량 속도

단위 : %, km/h

교통량 증가율	1998	1999	2000	2001	속도	1998	1999	2000	2001
도심	-6.8	-0.1	-0.14	-0.35	전체	25.4	25.4	22.9	21.7
간선	-2.8	2.6	-1.96	0.6	도심	17.7	21.2	18.5	16.6
시계	-1.4	1.3	3.25	3.9	외곽	25.9	25.7	23.2	22.1

참조 : 2020 서울도시기본계획 (서울시, 2006:232~235)

이러한 현상으로 볼 때 도시고속도로 교통량 증가 및 주행속도 저하 현상이 발생함을 알 수 있다.

서울시에서 제시한 도시기본계획에 의거 수도권 광역도시계획 간선도로망에서는 격자 순환망을 제시하고 있는데 이 부분의 도로는 도시고속도로를 포함하고 있으며 남북축 5개, 동서축 5개, 순환축 2개로 구성되어 있다. 시계간 유출입 차량의 우회, 순환축을 이용하여 통행속도를 높이하고자 하고 있다.

<표 3> 간선도로 연장 및 ITS 도입 비율

구분	2000	2005	2010	2015	2020
간선도로 총연장	870	960	1,050	1,140	1,220
광역간선도로 총연장	509	580	650	725	800
ITS도입 도시고속도로 비율(%)	-	50	80	90	100

* 주간선도로+보조간선도로-고규격 주간선도로(101.5km)

참조 : 2020 서울도시기본계획 (서울시, 2006:278)

서울시에서는 도로망의 골격을 형성할 수 있도록 크게 도시고속도로를 중심으로 하는 광역간선도로와 주간선도로를 중심으로 하는 간선도로 네트워크로 나누어 계획하고 있다. 이중 도시고속도로는 도시기능이 도심에 편중되는 것을 방지하고 광역 물류 교통의 원활한 흐름을 보장하는 역할을 하게 된다.

또한 기본계획상의 ITS(Intelligent Transportation Systems; 지능형교통체계)도입 도시고속도로의 비율을 보면 2005년을 기점으로 하여 비율을 증가하여 2020년도에는 100% 도입하는 것으로 되어 있어, 향후 도시고속도로에서의 ITS 서비스가 활발해 질 것이며 이중 본선의 교통류를 관리/제어하는 방법 중 하나인 가변속도제어가 현재 시범운영중인 올림픽고속도로뿐만 아니라 나머지 다른 도시고속도로에서 활용될 전망이다.

나. 교통류 관리

도시고속도로(연속류) 본선에 대한 교통류관리는 통행효율을 최대화시키기 위하여 교통정보를 제공하는 방안과, 차로할당기법, 다인승전용차로(HOV : High-occupancy vehicle lane) 또는 전용차로, 램프미터링, 가변속도제한 등 임의적으로 통행권을 제한하는 방안으로 구분된다.

국내의 경우 1998년에 서울 올림픽도시고속로에 교통관리시스템이 적용되어 현재는 연속류 대부분의 도로에서 교통관리시스템이 적용되고 있으나 한국도로공사에서 관리운영하고 있는 유료고속도로에서는 교통정보제공, 버스 및 다인승전용차로제를 운영하고 있고 서울시에서 관리운영하고 있는 도시고속도로에서는 교통정보제공과 시험적인 가변속도제어가 운영되고 있다.

반면, 유럽 및 미국 등의 선진국에서는 연속류 본선의 통행효율을 최대화 하기위해 많은 운영제어기법의 연구개발 및 도입되어 왔으며 그 중 국내에 도입되어 운영 가능한 기법으로 VMS를 통한 교통정보제공, 차로제어, 가변속도제어가 가능할 것으로 분석하였다.(강정규, 1993:91~102)

본 논문에서 적용하고자 하는 제어기법으로는 가변속도제어로 현재 국내의 도로에는 제한속도가 고속도로는 100~110km/h로 도시고속도로는 70~90km/h, 간선도로 등의 일반도로는 60km 내외로 고정값으로 설정되어 있으나 도로상황에 따라 제한속도가 유동적으로 변경되어 운영할 수 있도록 하는 것이다.

제한속도를 유동적으로 변경 운영하는 이유는 차량운전자의 경우 교통 상황, 도로상황, 기상조건 및 운전자 개인의 특성에 따라 차량 운행 속도를 조절하게 되는데 이는 사람마다 상이하여 군집운행중인 차량에서 일부 조건 변경으로 인한 교통류 평형상태(안정상태)가 와해되어 불안전 상태로 전이되므로 전후, 인접 차량과의 사고 위험이 커지게 된다.

또한 교통 밀도가 용량에 해당하는 최적 밀도 이상으로 증가하게 되면 불안정류 상태가 되며, 교통량과 평균속도가 감소하게 된다. 불안정류 상태에서는 속도 분산이 매우 크며 특히 1~5분과 같이 짧은 시간에는 변동이 더욱 크게 된다.(강정규, 1993:94)

이러한 속도 분산을 줄이기 위하여 가변속도 제어를 실시하므로 속도가 균일하게 유지되어 교통류를 안정상태로 만들며 또한 2차 사고 및 영향감소 등의 장점이 있다. 그러므로 돌발적인 교통사고, 차량자체 결함으로 인한 고장, 도로 및 시설물 공사, 안개, 폭우, 폭설 및 상습지체, 행사 등의 이벤트 발생시 교통류를 관리하기 위해 설치 및 운영된다.

예를 들어 도로 하류부에 교통사고가 발생시 도로의 일부 차로가 폐쇄되어 사고지점에서 병목현상이 발생하게 되는데 이로 인하여 사고지점의 상류부에 대기행렬이 발생되어 지점에서 구간으로 지체범위가 급속으로 커지게 된다. 유입되는 차량의 속도가 빠르고 유입량이 많을수록 지체범위 즉 영향범위가 빠르게 퍼지게 되므로 유입속도와 유입량을 줄이므로 이를 해결할 수 있게 된다. 대기행렬은 형성되는데 소요되는 시간보다 해소시키는데 소요되는 시간이 크므로 사고지점 후방부에서 속도를 관리(가변속도 제어)하여 대기행렬의 길이를 줄임으로써 지체시간 절감 효과를 얻을 수 있게 된다.

다. 운영 문제점

도시고속도로의 역할은 앞서 제시된 바와 같이 도시기능의 도심으로 편중되는 것을 방지하고 광역물류 교통의 원활한 흐름을 보장하기 위한 것이나, 점차 도시고속도로의 교통량이 증가하고 주행속도가 저하됨에 따라 본래의 역할을 제대로 수행하지 못하고 있다.

서울시에서는 간선도로 중심으로 물리적인 도로연장 증가와 네트워크화를 추진하고 있으나 현재까지의 추세로 보아 연장에 따른 교통량의 증가로 현재와 같은 수준으로 될 것은 자명한 일이다.

또한 도로연장 뿐만 아니라 ITS를 2020년까지 모든 간선도로에 도입을 하겠다고 기본계획상에 명시되어 있으나 이에 대한 기초적인 연구가 이루어져 있지 못한 상태이며 차량 검지기 데이터에 의한 실시간 교통정보를 활용한 방법론에 대한 연구가 없는 상황이다

서울내부순환 도시고속도로의 경우 선형 불균형으로 도로의 평면 선형 굴곡이 많으며 고가로 되어 있어 오르막/내리막 구간이 많이 존재하게 되었다. 이로 인하여 사고발생이 빈번하며 또한 사고 발생시 차량 대피 구간으로 사용할 수 있는 길어깨 등 측방 여유폭이 갖추어져 있지 못한 상태이다. 이는 사고 발생시 지점사고가 구간 정체로 급속히 확장되며 또한 유출입 차량에도 영향을 미치게 된다. 특히 유출입 구간이 제한되어 있어 본선의 정체를 가중 시키고 있으며 유출 램프와 접해 있는 도심부 교차로의 혼잡이 도시고속도로 본선에 영향을 주고 있는 실정이다.

이러한 문제점을 도시고속도로 건설 초기에 인지하고 램프미터링을 설계 운영하고자 하였으나 유입램프 부근 주민 및 유출입램프 사용자들의 민원제기로 인하여 실제적인 운영은 못하고 있는 실정이다. 그러나 북 유럽의 경우 우리나라의 경우와는 달리 램프미터링의 효과를 얻고 있으며 (Rijkswaterstaat, UK-ITS website), 이러한 상황에서는 램프가 아닌 도시고속도로 본선에서 모든 운영제어가 이루어 질 수밖에 없으며 대표적인

제어 기법으로는 VMS (Variable Message Signs)를 이용한 교통정보제공, 차로이용안내와 LCS (Lane Control System)를 이용한 차로제어, VMS + LCS를 합한 의미가 되는 가변속도제어를 들 수 있으나 현재 우리나라에서는 올림픽도시고속도로에 제한적인 시범운영을 시행하고 있는 상황이다.



<그림 2> 영국 M25에서 설치 운영중인 가변속도제어

올림픽 도시고속도로의 경우 FTMS (Freeway Traffic Management System)를 위한 데이터 검지 및 가공, 정보제공이 이루어져 있기는 하나 실제 가변속도제한 운영에 있어서는 단순 표지판으로 속도제한 하던 것을 LED (Light-emitting Diode) 등으로 변경한 수준의 운영을 하고 있는 실정이므로 가변속도제어 본래의 용도에 맞도록 운영하기 위한 제어전략이 필요한 상황이다.

2. 데이터 마이닝

가. 교통류 데이터 처리

본 논문에 사용되는 데이터는 기간 상으로 볼 때 서울내부순환고속도로

의 교통류 패턴을 대표적으로 나타낼 수 있는 데이터를 선택하기 위하여 2007년 10월 4일과 10월 11일 이틀간 6시부터 24시까지의 데이터를 수집하였으며, 공간상으로는 내부순환 고속도로 구간 중 서울도심방향으로의 홍지문터널 입구에 설치된 영상검지기로부터 수집된 속도, 점유율, 교통량 데이터를 대상으로 하였다.

교통류의 특성을 나타내는 요소로는 주로 Greenshield 모형과 같이 교통류율, 속도, 밀도가 있으나 차량검지기로부터 수집된 데이터는 교통량, 시간평균속도만 산출되므로 패턴 분석을 하기 위해서는 공간평균속도와 밀도를 산출해야 된다.

단위 구간을 점유하고 있는 차량의 대수를 의미하는 밀도는 3가지 방법으로 산출되어 진다. 첫째 교통류율을 공간평균속도로 나누어 산출할 수 있으며, 둘째 차량검지기로부터 수집되는 밀도 방식으로 차량의 전장과 검지기의 길이를 이용한 방식으로 다음과 같은 식으로 표현된다.(Roser, 2004:114)

$$K = \frac{5,280 \times O}{L_v + L_d}$$

여기서 K 는 밀도, O 는 점유율, L_v 는 차량 전장, L_d 는 검지기의 길이

셋째 차량검지기로부터 수집된 데이터의 차종분류를 통해 일반 승용차와 대형차량의 길이를 고려하는 Wang and Nihan(2000)이 제시한 방법으로 다음과 같다.(Wang, 2000:120~126)

$$\bar{l}(i) = \bar{l}_c(i) + p(i) \cdot [\bar{l}_t(i) - \bar{l}_c(i)]$$

- 여기서, i : i 번째 시간간격, $\bar{l}_c(i)$: 승용차 길이(PCs), $\bar{l}_t(i)$: 7.9m(26ft) 이상의 차량길이(LVs), $p(i)$: LVs 의 퍼센트
- 그러므로 밀도는 $5,280 \times \text{점유율} / \bar{l}(i)$ 로 구해질 수 있으나 서울도시고속도로의 경우 자동차전용도로로 7.9 이상의 차량이 일일교통량 중 0.7%로 대형차량의 의미가 크지는 않다.

Lu Sun의 연구 결과에 의하면 첫 번째 방법과 두 번째 방법을 사용한 결과 유사한 결과가 유추(Lu Sun, 2005:66)되었으나, 본 연구의 대상지의 차량 검지기 데이터를 이용한 paired T-test 결과($t=4.611$, $p=0.000$)는 서로 상이한 값으로 분석되었다. 그러므로 본 연구에서는 세 번째 방법을 사용하여 영상검지기로부터 얻어진 차종별 교통량데이터에서 평균차량의 길이를 산출하여 점유율을 이용한 세 번째 방식을 사용하였다.

속도는 한 지점을 통과하는 모든 차량의 평균 속도를 나타내는 시간평균속도(TMS)와 주어진 구역을 점유하는 모든 차량의 평균 속도를 나타내는 공간평균속도(SMS)로 나누어지며, 차량검지기로부터 수집되는 속도는 시간평균속도에 해당된다. 시간평균속도와 공간평균속도 산출식은 다음과 같다.(Roser, 2004:112)

$$- TMS = \frac{\sum_i (d/t_i)}{n}$$

$$- SMS = \frac{d}{\left(\sum_i t_i / n\right)} = \frac{nd}{\sum_i t_i}$$

- 여기서, d 는 주행거리, n 관측된 차량 대수, t_i 는 지점 또는 구간을 차량 i 가 소요한 시간을 말한다.

Lu Sun에 의하면 Wordrop의 논문을 인용하여 “시간평균속도는 공간평균속도에 공간평균속도의 분산율을 더하는 것과 같다.”(Lu Sun, 2005:66)라고 하며 이러한 내용은 Maxwell G. Lay 저서에서도 언급되어 있다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$- TMS = SMS + \frac{\sigma}{SMS}, \sigma \text{는 공간평균속도의 분산}$$

또한 시간평균속도 데이터의 산출되는 간격이 작으므로 공간평균속도의 분산은 매우 작아 공간평균속도는 시간평균속도에 수렴하므로 차량검지기 및 같이 30초 간격으로 수집되는 데이터는 동일한 값으로 사용하였으므로 본 논문에서도 이와 같은 내용을 수렴하여 시간평균속도를 공간평균속도

로 사용하였다.

데이터가 포함하고 있는 패턴, 규칙, 관계 등의 정보를 탐색하고 발굴하는 공학 및 통계기법을 데이터마이닝이라 하며 본 논문에서 교통류의 상태를 파악하기 위한 교통량, 점유율, 속도 데이터의 패턴, 관계 정보를 알아내고자 사용하는 기법이라 할 수 있다.

데이터마이닝(데이터 분석)을 원활히 하기 위하여 데이터 처리를 수행하게 된다. 데이터 처리기법에는 크게 2단계로 이루어지며 첫째 원시자료보정 단계로 실시간(30초 간격)으로 수집되는 지점 데이터 중 패턴을 왜곡시키는 요소들을 제거하기 위한 이상치 제거방법, 수집된 데이터 중 누락자료 및 속도-점유율-교통량 데이터간 관계가 이론상의 관계를 벗어난 경우 또는 미리 정해진 데이터 규칙을 벗어난 경우 이러한 데이터를 누락시키는 오류자료 판단, 이상치 제거 및 오류자료로 판단되어 누락시킨 경우 이러한 데이터를 보정하기 위한 결측자료 보정이 해당된다.

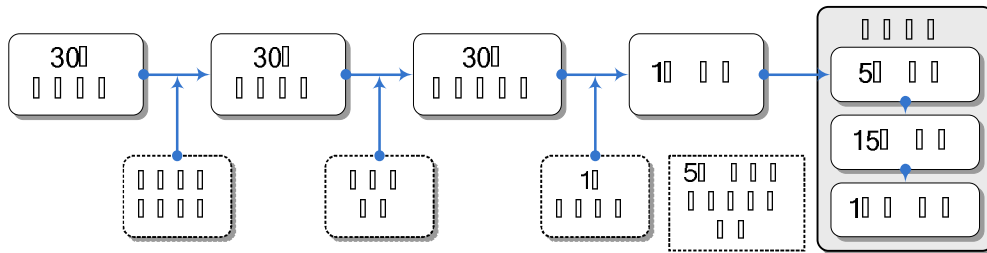
<표 4> 공간 추세 활용법(예)

사례	CASE1	CASE2	CASE3
데이터 상태	A 정상 B 누락 C 정상	A 누락 B 누락 C 정상	A 정상 B 누락 C 누락
보정식	$B=(A+C)/2$	$B=C$	$B=A$

두 번째 단계로는 평활화 단계로 짧은 주기(30초) 동안 수집되는 속도, 점유율, 교통량 데이터에서 일시적인 변동으로 수집 데이터가 불안정하게 되므로 이러한 현상을 방지하기 위하여 원시자료 보정된 자료에 최종보정 방법으로 평활화 기법을 활용하여 처리하게 되며 다음의 식과 같다.

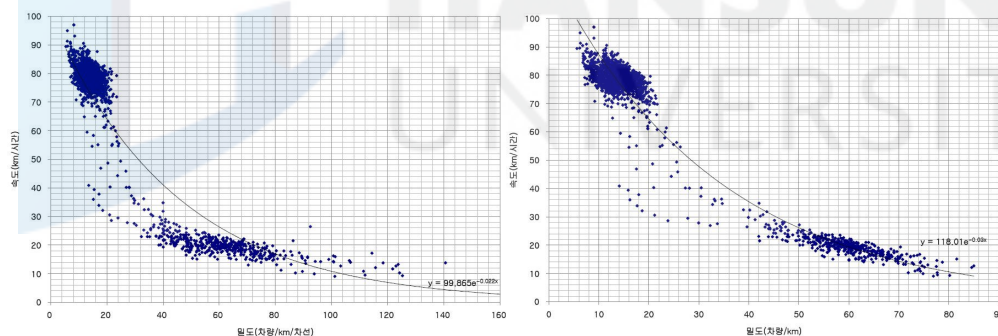
- $\overline{x_m} = \overline{x_{m-1}} + K(x_m - \overline{x_{m-1}})$
- $\overline{x_m}$ 은 시점 m 에서의 평활화된 데이터값, x_m 은 시점 m 에서의 실제값, K 는 평활화 계수($0 \leq K \leq 1$)

본 논문에서는 데이터 처리기법으로 이상치 제거에서는 z-score가 ± 3 이외의 값을 이상치로 판단하여 누락시키는 MAD(Median Absolute Deviation) 방법을 사용하였으며 통신장애 및 속도-점유율-교통량 관계식을 기초로하여 서로 상관관계를 유지하지 못하는 경우 또한 연속된 4개 검지기에서 수집된 속도, 점유율, 교통량 데이터가 동일한 경우를 누락시키고 누락된 데이터에 대해서는 공간 추세 활용법을 사용하여 보정하였다.



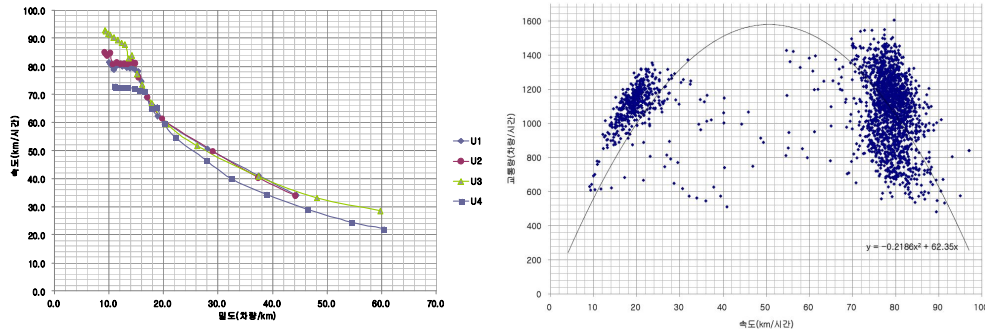
<그림 3> 차량검지기로 수집된 데이터 처리과정

차량검지기로부터 수집되는 데이터 처리는 일반적으로 사용되는 데이터 처리과정은 앞의 그림과 같으며 본 논문에서는 패턴분석을 위하여 원시자료로부터 보정 및 평활화를 거친 데이터를 5분 자료로 가공하였다.



<그림 4> 평활화된 30초 데이터의 밀도 산출법에 따른 속도-밀도(좌:속도, 우:점유율) 관계

이러한 방식으로 누락된 데이터는 전체 데이터에 있어서 0.5% 이하로 미비 하며 연속된 4개의 영상검지기로부터 수집된 데이터를 보정 및 평활화 처리가 된 30초 평활화 자료 및 1시간 자료를 밀도-속도의 2차원 데이터를 표출하면 그림과 같다.



<그림 5> 평활화된 1시간 데이터의 속도-밀도와 30초 교통량 속도 관계

패턴분석을 하기 위하여 사용된 속도, 밀도는 각 각 단위가 상이하어 이들을 서로 비교하는 것에는 오류가 발생하게 된다. 그러므로 이들 속도와 밀도 단위를 표준화 시키므로 상호간의 관계를 분석할 수 있도록 하는 방법이 편차치(Standard score), Z-score, 정상화 점수라고 한다.

Z-score는 데이터의 분포를 정규분포로 만들고 개개의 경우가 표준편차 상에 어떤 위치를 차지하는지 보여주는 차원 없는 수치로 다음과 같은 식에 의해서 Z-score를 산출한다.

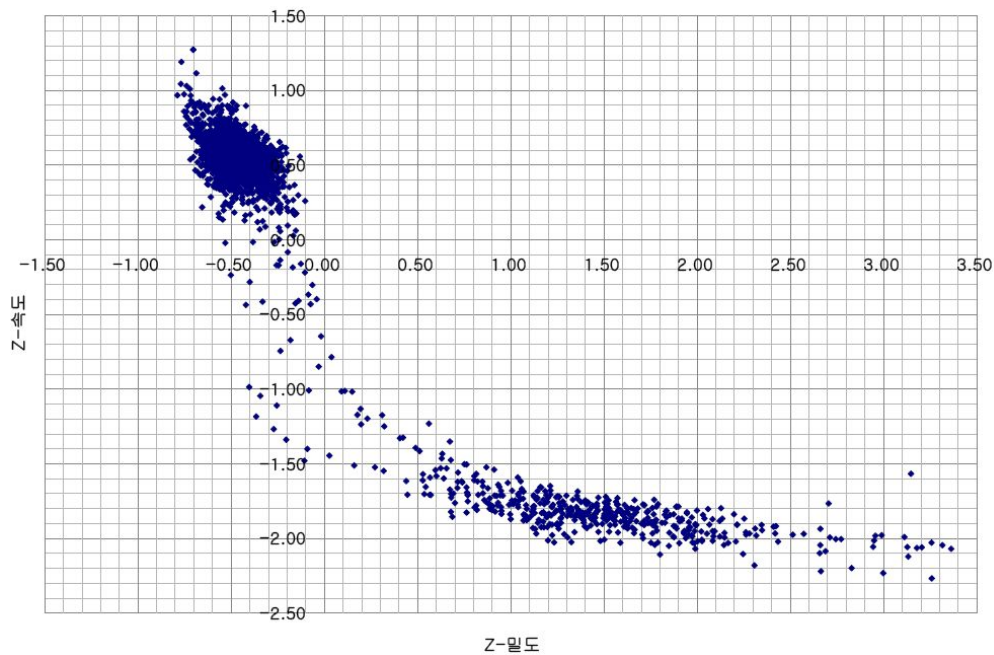
$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

- 여기서, x 는 원본 데이터, σ 는 모집단의 표준편차, μ 는 모집단의 평균

본 논문에서는 2차원 벡터를 다루게 되므로 다음과 같이 벡터로 표기할 수 있다.

$$X = \frac{X_{original} - X_{average}}{X_{std}}$$

이러한 방식으로 속도와 밀도 데이터를 Z-score로 전환하여 평면상에 표출하면 다음과 같다.



<그림 6> Z-score로 변환된 속도, 밀도

나. 패턴분석

교통류의 패턴분석의 주요목적은 교통류의 특성을 파악하는 것이다. 패턴분석에 주로 사용되는 변수로는 교통량(veh/h), 속도(km/h), 밀도(veh/km/lane) 등이 있으나 상호관계에 의해 일대일 대칭 관계를 보이는 속도-밀도 관계를 위주로 분석한다. 특히 패턴분석에 사용되는 알고리즘은 다양하나 그 중 구현이 상대적으로 용이하고 계산 속도가 빠른 K-means 알고리즘을 주로 사용하고 있다.

교통 분야에서 패턴분석은 초기에는 혼잡/비혼잡 두 가지 상태로 구분하였으나 세부적인 특성을 분석 또는 분석 목적에 따라 혼잡/비혼잡/복구 상태의 세 가지 형태로 구분하기도 한다. 또 다른 형태로는 HCM (Highway Capacity Manual) 또는 도로용량 편람과 같이 6가지 형태로 구분하기도 한다.

Lu Sun은 이러한 여러 가지 형태로 구분하는 것에 대하여 연구를 하였

으며 특히 2단계와 3단계로 구분했을 경우 결과값을 비교하였다. 패턴분석 알고리즘의 목적함수는 각 중심값과 모든 변수값 사이의 거리가 최소가 되는 것을 선택하였으며 3가지 형태로 구분시 자유교통류, 혼잡교통류, 전이교통류로 구분하였다.(Lu Sun, 2005:64~71)

교통상황 검지기로부터 얻어지는 데이터 중 ‘시간평균속도는 공간평균속도와 유사하다’라고 가정하였으며, 밀도는 교통류율을 공간평균속도로 나눈 값을 사용하였다. 이러한 가정을 하여 분석한 결과 3단계로 구분시 교통류의 특성을 보다 잘 반영하였으며 통계적으로 95% 신뢰도를 갖는다고 하였다. 또한 임계 밀도 값을 제시하였으며 미국 I-10 도로의 경우 자유 상태 - 23.5veh/km/lane, 전이 상태 - 23.5~68.6veh/km/lane, 혼잡 상태 - 68.6veh/km/lane으로 제시하였다.

점차 교통분야에 ITS가 도입되므로 실시간으로 수집되는 데이터를 이용하여 교통류의 상태를 파악하고 상태에 따른 교통정보를 제공하고자 하는 연구가 증가되었으며 그 중 하나가 (Jingxin, 2007:15~24)이다.

교통류 상태 검지기로부터 수집되는 데이터는 교통량, 속도, 점유율로 교통류의 특성을 분석하는데 필요한 밀도를 산출함에 있어 점유율을 밀도로 변환하는 변환계수 ‘g’를 사용하였다.(Jingxin, 2007:17) 앞서 제시된 논문과 같이 K-means 알고리즘을 사용하였으며 교통류 상태분류를 HCM과 유사하게 6단계로 구분하였으나 최종적으로 5단계로써 교통류 상태를 해석하였으며 속도보다 교통류율이 패턴분석을 수행함에 있어 유용한 것으로 분석되었다. 단 분석결과 값을 사용하는 방안에 대해서는 향후 연구로 미루어 활용방안에 대한 연구가 필요하다.

(1) 방법론(모형)

데이터 군집화와 벡터 양자화는 같은 의미로 사용되어지며 여기서 말하는 벡터 양자화는 N개의 특징 벡터들의 집합 $x = [x_1, \dots, x_N]$ 을 K개의 특징 벡터들의 집합 $y = [y_1, \dots, y_K]$ 으로 사상시키는 것을 말한다. 여기서 y_i 를 코

드워드(code words) 또는 클러스터(cluster)라고 하며, 집합 y 를 코드북(codebook)이라 한다.

특징 벡터 집합 x 가 새로운 벡터 집합 y 로 양자화 되는 과정에서 양자화 오차가 발생하게 되며, 벡터 양자화는 특징 벡터들 간에 정의된 거리 척도와 관련이 있다. 왜곡 척도(distortion measures)로는 여러 가지가 사용되는데 일반적으로 유클리디안 거리를 사용한다. 유클리디안 거리는 다음과 같은 식으로 얻어진다.

$$- d(x,y) = \|x-y\| = \sqrt{(x-y)^T(x-y)}$$

거리 척도를 이용하여 집합의 특징 벡터들과 거리의 합을 최소화하는 점들로 구성하는 과정으로 집합 x 의 중심을 계산하여 결정한다. 유클리디안 거리의 경우 중심은 단순 집합의 중심 평균이 되며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$- c(x) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n, \text{ 여기서 } x = \{x_n | n = 1 \dots N\}$$

양자화 대상이 N 개의 벡터라 가정하면 평균 왜곡(distortion)은 다음의 식과 같다.

$$- D = \sum_{n=1}^N d(x_n, y_{i(n)}), \text{ 여기서 } i(n) = k, \text{ if } x_n \in x_k$$

그러므로 평균 왜곡을 최소화 하는 코드북을 찾으면 양자화는 완료된다. 코드북 구성 알고리즘으로는 k-means, 비균일 이진 분할(non-uniform binary split), 앞의 두 알고리즘을 혼합한 LBG 알고리즘이 있다.

K-means 알고리즘은 임의의 초기 값에서부터 추정(Expectation)과 최대화(Maximization) 과정을 반복하여 최적의 값으로 수렴하도록 반복시키면서 중심을 찾는 방법으로 간단하고, 직접적이다. K-means 알고리즘을 요약하면 다음과 같이 5단계로 구분된다.(Duda, 1973:187)

- 1단계(시작) : 데이터 집합 $[x_1, \dots, x_n]$ 으로부터 임의의 K 개의 벡터를 선택

하여 K개의 초기 중심 집합 $[y_1, \dots, y_n]$ 을 만든다. (무작위로 클러스터 중심을 선택)

- 2단계(추정) : 만약 데이터 x_n 이 y_i 에 가장 근접시 클러스터 X_i 에 포함하도록 하고, 결국 데이터 집합을 K개의 클러스터들 $\{X_1, \dots, X_K\}$ 로 나누어 진다. (각 vector들을 가장 가까운 cluster centroid에 연결)

$$X_i = \{x_n | d(x_n, y_i) \leq d(x_n, y_j), j=1, \dots, K\}$$

- 3단계(최대) : 2단계에서 구한 새로운 클러스터들에서 각각의 중심을 갱신한다.

(각 vector들과 cluster centroid 사이의 값을 전부 더한 후 평균 산출)

$$C_j = \frac{1}{n_j} \sum V_j, \text{ 이결과로 클러스터 중심을 갱신 } y_i = c(X_i), i=1, \dots, K$$

- 4단계 : 데이터와 가장 가까운 클러스터 중심들과 거리의 합으로 총 왜곡(distortion)을 구한다.

$$D = \sum_{n=1}^N d(x_n, y_{i(n)}), \text{ 여기서 } i(n) = k, \text{ if } x_n \in X_k$$

- 5단계. 2~4단계를 총 왜곡 값에 변동이 없거나 설정된 반복 횟수에 도달할 때까지 반복한다.

왜곡의 안정도를 측정하는 방법으로는 이전 왜곡과 현재 왜곡의 상대적인 감소치가 10^{-4} 보다 작으면 안정됐다고 판단하며, 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\Delta D = \frac{D_{\text{pre}} - D_{\text{cur}}}{D_{\text{pre}}} < 10^{-4}$$

반복횟수는 정해진 것은 없으나 일반적으로 100회를 기준으로 한다.

비균일 이진 분할 알고리즘은 초기 데이터 집합을 두 개의 클러스터로 나누고, K개의 클러스터가 남을 때까지 2개의 클러스터로 나누는 과정을 반복하는 방법으로 데이터의 수가 많을 경우 K-mean 알고리즘 보다 빠른 시행 결과를 보이나 정확도 면에서는 떨어지는 결과를 보여주고 있다.

K-means 알고리즘이 주된 결점은 결과가 초기 클러스터 중심들의 선택에 민감하다는 것이며, 비균일 이진 분할 알고리즘은 군집화 결과가 K-mean 알고리즘 결과보다 좋지 않다는 것에서 비균일 이진 분할 알고리즘을 이용하여 초기 중심을 선택하고 K-mean 알고리즘을 통해서 추정-최대 과정을 반복 하므로 최적의 군집화 결과를 얻고자하는 방법으로 Linde, Y., A. Buzo, R. M. Gray 세 사람의 연구자가 만든 LBG 알고리즘 있으나 본 연구에서 비교한 결과 교통류 상황 데이터를 다룸에 있어서는 K-means 알고리즘이 정확하게 구분하는 것으로 분석되었다.

(2) 분석결과

패턴분석은 공학 시뮬레이션 툴인 Matlab을 이용하였으며 적용된 알고리즘은 K-means, LBG을 적용하였으나 LBG 알고리즘의 경우 결과물의 산출시간과 임계값이 적당하지 못하여 K-means 알고리즘의 결과물로 패턴 분석을 수행하였다.

우선 본 논문의 목적인 가변속도제한 운영에 사용될 코드북(중심값) 산출 및 운영방식의 편의성을 위하여 앞서 수행되었던 ‘자료 수집 및 처리’를 통해 얻어진 교통량, 속도, 밀도 데이터를 분석 개체로 선정하고 패턴의 수는 4개로 정하여 패턴분석을 수행한 결과 26번의 시행에 걸쳐 다음과 같이 패턴분석이 이루어 졌다.

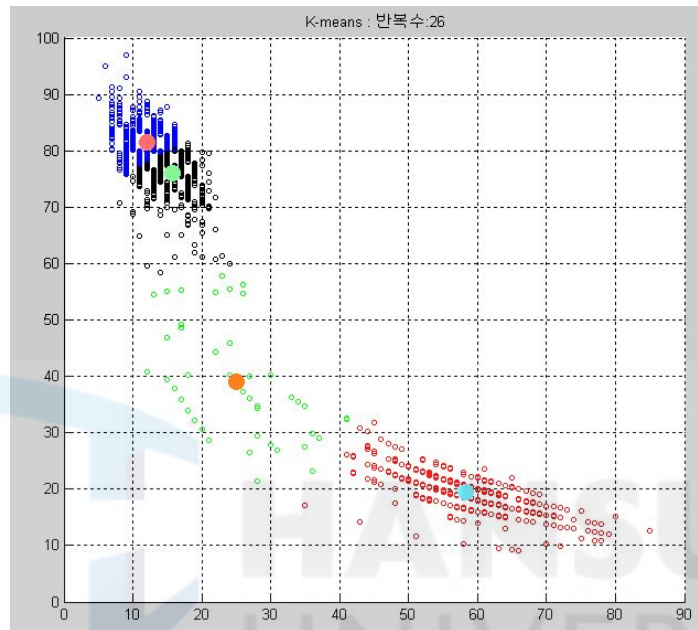
<표 5> 패턴분석에 따른 패턴(상태)별 중심값(밀도, 속도)

구분		밀도(대/km)	속도(km/h)
1	자유교통류	12.0784	81.5244
2	전이교통류	15.5821	76.1057
3		25.0930	38.9512
4	혼잡교통류	58.4478	19.4957

패턴 분석결과는 속도-밀도 관계에서 제시된 바와 같이 직선구간 부분

에서 하나의 패턴이 산출되었으며 패턴분석의 중심값은 밀도가 12(대/km/차선)이고 속도는 81(km/h)로 되었으며 이는 자유교통류에 해당된다.

그리고 지수관계를 갖는 구간은 2개의 교통류 상태(전이/혼잡)에서 3개의 패턴으로 분석 되었으며 앞서 제시된 관계분석에서와 같이 패턴 2, 3의 구분이 약간 모호한 부분이 있으나 평균거리에 의해 또한 향후 가변속도 제어를 위해 2개로 구분하였다.



<그림 7> k-means 알고리즘에 의한 패턴분석 결과

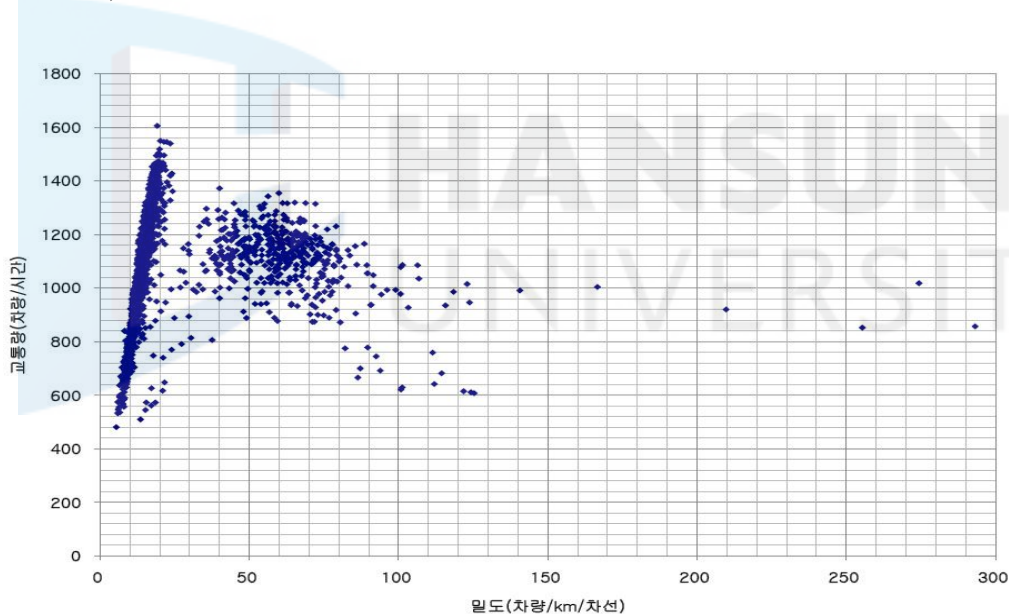
다. 교통류 특성 분석

서울시 내부순환 고속도로는 3차로로 구성되어 있으며 1차로는 자유속도로 운영되며 2차로는 1차로와 3차로의 차선변경이 이루어지고 3차로에서는 유출 및 유입교통량과의 상충이 발생되고 있다. 그 중 2차로에 교통량이 집중되어 혼잡이 발생하고 있다.

이에 2차로를 대상으로 데이터 분석 결과 오전 7시 ~ 오후 7시 까지

가장 많은 교통량을 보이고 있으며 또한 일일 최대 교통류율은 1,680대/시이고 최대속도는 최대교통량이 발생한 시점에서 19.6km/h로 분석되었다.

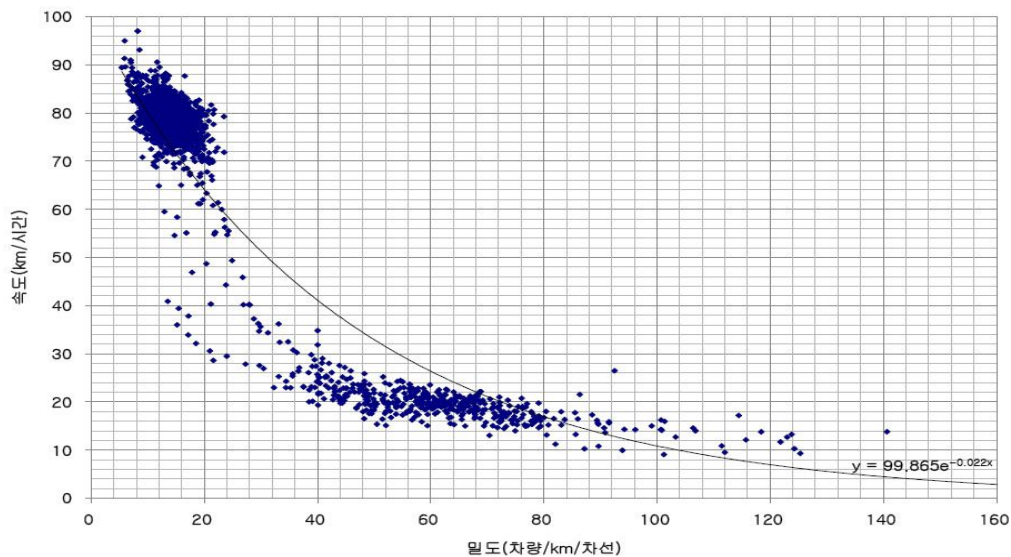
가변속도제어 운영을 시뮬레이션하기 위하여 서울시 내부순환 고속도로의 교통량-밀도-속도간의 관계를 보면 다음의 그림과 같이 교통량-밀도관계는 밀도가 10~26veh/km/lane일 때 교통량과 밀도가 선형관계로 증가하며 밀도가 26veh/km/lane을 넘을 경우 밀도는 증가하나 교통량은 완만한 변화를 보이고 있다. 이는 도시부도로에서 한 차선의 용량을 대략 1800veh/h로 추정하는 것과 달리 교통량이 800~1400veh/h에 범위에 있음에도 불구하고 교통량과 밀도의 관계가 불규칙하며 전체적으로 볼 때 교통량의 변화는 일정하며 밀도만 증가하는 것은 완전한 혼잡에 들어서지 않은 상태에서 정체가 발생되므로 이로 인한 도로 본래의 능력을 활용하고 있지 못한 것으로 판단된다. 또한 Jingxin Xia의 연구결과에서도 "이러한 상황은 객관적인 해석을 할 수 없다"(Jingxin, 2007:16)고 하였으며 속도-밀도, 속도-교통량으로 교통류 상황을 분석하였다.



<그림 8> 교통량-밀도

속도와 밀도의 관계는 선형구간(밀도 8~22veh/km/lane)과 비선형구간(밀도 22~60veh/km/lane)으로 구분되며 위의 교통량과 밀도의 관계에서

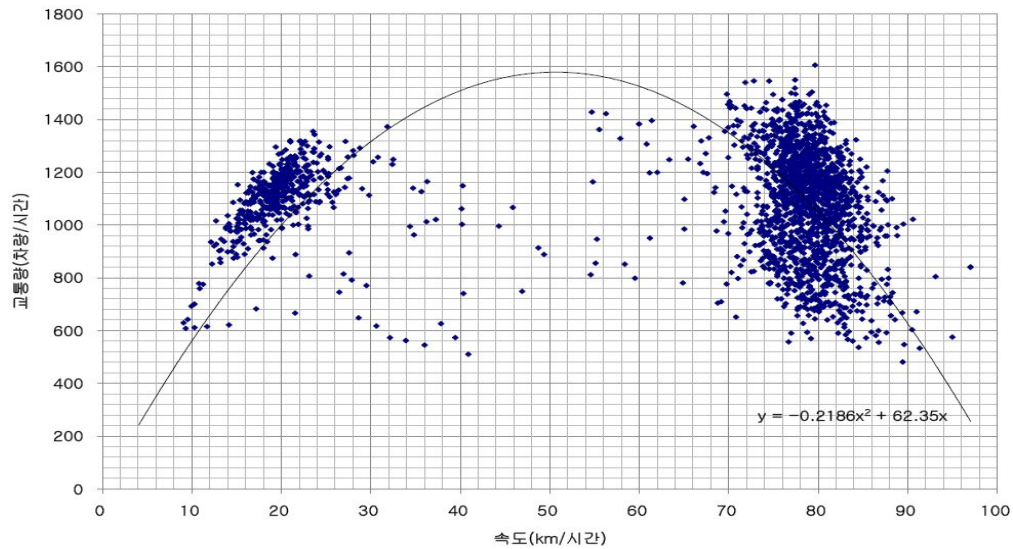
보듯이 밀도 20~150veh/km/lane에서 교통량의 분산이 커지는 것과 관계하여 속도-밀도 측면에서 볼 때 비선형으로 나타나게 된다.



<그림 9> 속도-밀도

교통량과 속도의 관계는 교통량-밀도 관계와 유사하게 본 대상구간에서의 교통량 속도 관계는 명확한 관계를 보여 주지는 못하나 용량상태에 도달하지 않은 상태에서의 교통량과 속도의 반비례 관계만을 보여 주고 있다. 이는 대상 구간이 사고 등으로 인한 완전 도로에 차량이 통행할 수 없는 상태의 혼잡상황에 대한 데이터의 부족으로 여러 가지 상황 데이터를 갖추고 있지 못하여 발생한 것으로 판단된다.

서울시 내부순환 고속도로는 평일에는 용량상태에 도달 하지 않은 상태로 정체가 발생되고 있으며 오전 오후 첨두시간이 따로 있는 것이 아니라 오전 7시부터 오후 7시까지 12시간 동안 첨두 상태를 유지하고 있다.



<그림 10> 교통량-속도

또한 혼잡과 비혼잡의 2가지 상태를 보이고 있으며 이들 간의 전이상태는 뚜렷하게 구분되지가 않아 비혼잡인 자유교통류 상황에서 급속하게 혼잡상태로 전이되는 것으로 분석된다.

3. 교통류 관리 방법론

가. 교통류 현상 분석

(1) 충격파(Shockwave)

Richard는 교통류에 충격파를 1956년 Shock Wave On The Highway의 제목의 논문에 최초로 도입했다. 논문에서 그는 선형 속도 밀도 관계를 가정했으며, 밀도의 불연속성에 관심을 가졌다. 그 다음해에 아직도 충격파 이론과 관련되는 논문에 많이 인용되고 있는 On “Kinematic Waves : A Theory of Traffic Flow on Long Crowd Roads”를 Lighthill과 Whitham이 병목구간, 교차로, 교통류 밀집도로 등을 포함하는 광범위한 주제를 다루는 논문을 제시하였다.

1950년대 후반과 1960년대 초반 몇몇 연구원들이 충격파 이론에 관심을 가지고 연구를 시작했으며, 이러한 연구에는 Greenberg, Edie, 그리고 Foote와 같은 사람들이 관심을 가졌다. 1960년대 후반 TRB에서 An Introduction to Traffic Flow Theory가 출판되었다. 이 책에서 Lighthill과 Whitham의 논문과 Pipes의 논문도 포함되었다. Wohl과 Martin은 그들의 책 Traffic System Analysis for Engineers and Planners에서 Hydrodynamic Analogic의 적용에 관한 내용을 포함하였다. 가장 최근의 Michalopoulos는 신호교차로에서의 충격파를 연구하였다.

이렇게 충격파와 관련한 많은 연구는 그간 충격파에 대한 발전을 가져왔으나 다른 방면에 비해서는 그 연구가 충실히 이행되지 못한 영역이다. 그 이유는 대부분의 보고서들이 최초의 Richard의 보고서를 인용하는가 하면 그 적용에 많은 어려움이 있기 때문인 것으로 풀이된다. 1990년 후반 Denos Gazis, Robert Herman 등의 활동에 힘입어 관련 연구가 많이 증가하고 있다.

이와 유사하게 물리학에서 인문사회분야로 다시 공학분야로 전파되는 파국이론(Catastrophe Theory)이 교통분야에도 1980년대를 기점으로 하여 연구되고 있다. 파국이론은 1972년 Rene Thom에 의해 소개되었으며 이는 수학이론 중 위상수학 분야에 해당된다. 존재론에서 모든 물질의 규정과 물성의 극한에 의해서 물체가 형상을 가진다고 할 때 그 존재는 다시 시간이란 개념에서 연속성을 가질 때 그 존재를 제대로 인식할 수 있게 된다. 그래서 Thom이 이루고자 하는 우선 대상은 구조적 안정성인데 이는 등질적 공간에서 아무런 변화가 일어나지 않을 때는 안전성이 있다고 할 수 있으나 어떤 작은 범위내에서 급작스런 변화가 일어나면 이공간은 불연속성이 존재하는 공간이며 이 불연속 점은 Catastrophe의 점이된다.(이정우譯, 1995:72) 이 점은 하나의 형태가 다른 형태로 넘어가는 형태발생을 구성하게 된다.

파국이론은 시간에 따른 비선형적인 변화, 비연속적 변화의 유형을 설명하는데 적합한 것으로 알려져 있으며, 미세한 차이에 의해서 커다란 변화가 일어나는 것을 설명하는 카오스 이론과 유사한 점이 있다. 파국이론은

기본적으로 접읍형(fold), 첨두형(cusp), 제비꼬리형(swallowtail), 나비형(butterfly), 쌍곡선형(hyperbolic), 타원형(elliptic), 포물선형(parabolic)등 7가지가 있으나 접읍형, 첨두형, 나비형 등이 많이 사용되고 있다. 교통분야에서는 Hall(1988)에 의해 고속도로 30초 검지기 데이터를 이용하여 파국이론을 적용하고자 하였으며 파국이론 중 첨두형을 사용하여 교통류 상태를 혼잡/비혼잡으로 구분하여 모형화하고, 상태전이에 따른 운영전략을 이론적으로나마 제시하였다.(Persuad, 1998:103-113) 또한 1993년 본인의 이론을 실제 적용한 결과에 비추어 교통류 변수 예측 결과를 제시하였다.(Jorge, 1994:235~250)

현재까지는 모형 구축의 어려움으로 인하여 첨두형으로만 교통류를 해석하고 있으나 향후에는 나비형으로 복잡한 교통류 상태를 보다 자세히 설명할 수 있을 것이다.

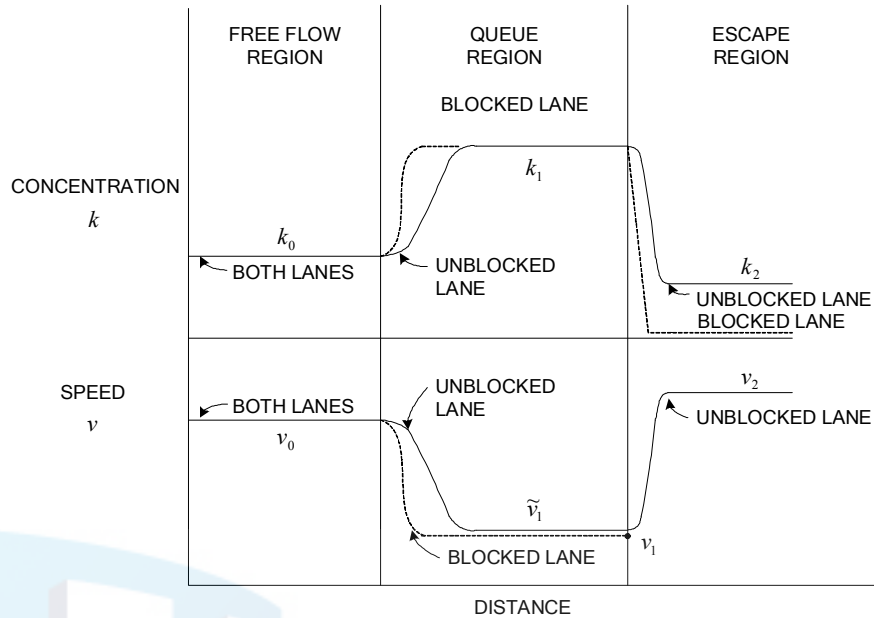
(2) 병목(Bottleneck)

장애물 또는 고장으로 짐작되는 지점으로부터 점차 교통혼잡이 발생하였으나 해당지점 통과시 어떠한 장애물도 없이 교통류가 원래의 상태로 바르게 복귀될 때 이러한 현상을 도깨비병목이라 한다. 이러한 병목현상은 대개 저속차량으로 인해서 대기행렬이 발생하고, 해당지점의 상류부의 교통류율이 높을 경우 발생하게 되며 일반적으로 Moving bottleneck(이동병목)이라 하고 도깨비병목은 이동병목의 한 형태이다.

도깨비병목 현상을 정형화된 형식으로 나타내기 위하여 모형식을 제시하고자 저속차량을 피하고자하는 운전자 행위 등을 가정하여 기초적인 모형식을 표현 하였다. 모형 정립에는 교통류와 밀도 간의 현상론적 관계를 사용하여 장애물로 인해 발생하는 이동대기행렬의 행태를 정형적 설명을 통해 도출하였고 모형 입증 절차 및 고속도로상의 최저속도 설계시 모형 적용 방법을 제시하였다.

상류부와 저속차량의 속도차가 작을 경우 교통류율은 낮고 저속차량으로 인하여 다른 차량이 영향을 거의 받지 않으나 속도차가 크고 상류부의

밀도가 클 경우 다른 차량에 영향을 많이 주게 되어 혼잡상황이 심해진다. 저속차량으로 인해 모든 차선의 속도가 떨어지며 차선 변경으로 인해 더욱 악화된다.(Denoc, 1992:225)



<그림 11> 거리에 따른 밀도와 속도 그리고 대기행렬(Denoc, 1992:225)

다음으로 대기행렬의 행태에 관련된 내용으로 밀도는 자유교통류에서 k_0 , 대기행렬에서 k_1 , 탈출에서 저속차량이 있는 차선에서는 0에 근접하고 저속차량 옆차선에서는 k_2 가 된다. 또한 밀도로 볼 때 저속차량으로 인하여 상류부에는 영향을 미치지 않으나 하류부에는 영향을 준다.

속도를 보면 자유교통류에서 v_0 , 대기행렬에서 저속차량이 있는 차선에서는 v_1 이고 저속차량이 있는 옆차선에서는 $\tilde{v}_1$ 이 되며 $\tilde{v}_1 > v_1$ 이다. 또한 탈출에서 저속차량이 있는 차선은 정의가 안 되며, 저속차량이 있는 옆차선에서는 v_2 가 된다. 대기행렬에서의 $\tilde{v}_1$ 은 $q = vk$ 관계식과 앞서 제시된 교통량 산출식에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tilde{v}_1 = \frac{Q}{2k_1} = v_1 + (v_2 - v_1) \frac{k_2}{2k_1} \quad (\text{Denoc, 1992:225})$$

이동대기행렬은 대기행렬의 전두 보다 후미의 속도가 더 낮을 경우 커지게 된다. 대기행렬의 전두 속도가 v_1 , 후미 속도가 v_s 로 이동하면 이동 대기행렬의 성장률은 다음과 같다.

$$R = v_1 - v_s = \frac{k_0(v_0 - v_1) - \frac{k_2}{2}(v_2 - v_1)}{k_1 - k_0} \text{ (Denoc, 1992:227)}$$

도깨비병목은 이동병목을 발생시키는 저속차량을 감지하지 못한 운전자에게 나타나며 이것은 저속차량이 저속으로 움직이다가 일반속도로 움직일 때 나타나게 되는 현상이다. Lighthill-Whitham 방법론을 사용하여 전이 현상을 설명할 수 있으며 또한 대기행렬 해소에 요구되는 시간과 같은 매개변수 유도에 사용될 수 있다. 교통량 밀도 관계를 가정한다면 교통에서 저속차량의 영향 정도를 파악하는 유용한 정보를 얻을 수 있다.

나. 가변속도제어 효과

고속도로상에서 혼잡으로 인해 발생하는 충격파를 해소하기 위하여 가변속도제어로 충격파를 소진하기 위한 제어 알고리즘을 제시하는 것으로 두 가지의 목적이 같은 논문이 존재하는데 하나는 이상적인 시뮬레이터상의 가상공간을 가정한 것과(Breton, 2002:225~230) 도로공사로 인하여 일부 차선이 폐지된 상황에서의 가변속도제어 효과측정(Pei-wei, 2004:155~168)을 하는 것이다.

Breton의 논문에서는 교통조건에 관한 것으로 제어를 통해 차량이 교통네트워크에서 소비하는 시간을 최소화 하는 것을 목적함수로 하고 있다. 사용된 변수로는 유출교통량, 밀도, 평균속도, 제한속도, 유출교통량으로 하였으며 다음과 같다.(Breton, 2002:227~228)

- 유출교통량 : $q_{m,i}(k) = p_{m,i}(k)v_{m,i}(k)\lambda_m$
- 밀도(이전 밀도 + (유입교통량 - 유출교통량)) :

$$p_{m,i}(k+1) = p_{m,i}(k) + \frac{T}{l_m \lambda_m} (q_{m,i-1}(k) - q_{m,i}(k))$$

- 평균속도(이전 속도 + (완화(경제속도 도달) + 전달(유입교통량 영향) +

$$\text{예상(하류부 밀도)} : v_{m,i}(k+1) = v_{m,i}(k) + \frac{T}{\tau} (V(p_{m,i}(k)) - v_{m,i}(k)) + \\ \frac{T}{L_m} v_{m,i}(k) (v_{m,i-1}(k) - v_{m,i}(k)) - \\ \frac{\nu T}{\tau L_m} \frac{p_{m,i+1}(k) - p_{m,i}(k)}{p_{m,i}(k) + \kappa}$$

$$\text{- 제한속도 : } V(p_{m,i}(k)) = v_{free,m} \exp \left[- \frac{1}{a_m} \left(\frac{p_{m,i}(k)}{p_{crit,m}} \right)^{a_m} \right]$$

- 대기모형(이전 대기길이 + 수요(제어와는 독립적) - 유출교통량) :

$$w_o(k+1) = w_o(k) + T(d_o(k) - q_o(k))$$

- 유출교통량(수요($d_o(k)$)의 최소값, 본선에 진입할 수 있는 최대 교통량)

$$: q_o(k) = \min \left[d_o(k) + \frac{w_o(k)}{T}, Q_o \frac{p_{max} - p_{\mu,1}(k)}{p_{max} - p_{crit,\mu}(k)} \right]$$

- 적정속도(앞의 식의 적정속도와 속도제한 중 최소값을 선택) :

$$V(p_{m,i}(k)) = \min \left(v_{crit,m,i}(k), \right. \\ \left. v_{free,m} \exp \left[- \frac{1}{a_m} \left(\frac{p_{m,i}(k)}{p_{crit,m}} \right)^{a_m} \right] \right)$$

$$\text{- 교통량 : } q_o(k) = \min \left[d_o(k) + \frac{w_o(k)}{T}, q_{lim,\mu,1}(k) \right]$$

- 목적함수(링크를 통과하는데 소요되는 총 통행시간) : 총통행시간을 목적함수로 사용하였으며 목적함수는 총통행시간 + 변수 :

$$J(k) = T \sum_{l=k}^{k+N_p-1} \left\{ \sum_{m,i} p_{m,i}(l) L_m \lambda_m + \sum_o w_o(l) \right\} + \\ a_{speed} \sum_{l=k}^{k+N_c-1} \sum_{(m,i) \in I_{speed}} \left(\frac{v_{ctrl,m,i}(l) - v_{ctrl,m,i}(l-1)}{v_{free,m}} \right)^2$$

모형을 검증한 결과 총통행시간은 1321.9 → 1162.9veh · hour 로 12% 향상되고 저밀도파와 충격파가 상충하여 충격파가 점차 제거(Breton, 2002:230)됨을 보임으로 가변속도제어 모형의 효과가 있음을 나타내었으나 모형 모수에 있어서 가정 사항과 사용된 네트워크 변수들의 가정 사항이 많아 실제 데이터에 대한 검증이 필요하다.

Pei-wei의 논문에서는 제어변수를 산출함에 있어 시간가중치(β) 및 공간가중치(α)를 사용하여 현장 데이터에 대한 보정을 하였으며 교통량보존 법칙에 근거하여 밀도와 전이 교통량을 산출하였다. 가변속도제어 운영을 위하여 가변속도제어 트레일러의 위치 및 가변속도 최적화를 수행 하였다.(Pei-wei, 2004:155~168)

- 평균속도 :

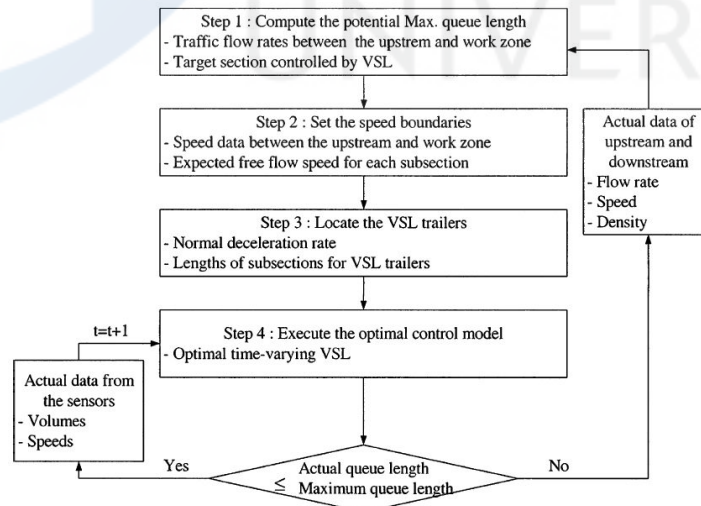
$$u_i(k) = u_i(k-1) + \rho_i \cdot \{S[d_i(k-1), v_i(k-1)] - u_i(k-1)\} + \gamma_i \cdot w_i(k-1)$$

- 목적 함수 : 통과 교통량 최대 $Max \sum_k \left(\sum_i^N [q_{wz}(k) + Q_i(k)] \times T \right)$

- 트레일러 위치 $x_i = u_{i+1}^f \times t + \frac{1}{2} a \times t^2$

이외의 상태변수와 제어변수, 모형 모수 등을 설정하여 공사구간에서의 가변속도제어(트레일러에 의한 정보제공)를 수행한 결과 대기행렬감소와 통과교통량증대의 효과를 보였으며, 또한 속도 변화를 비교함으로 도로의 안전성 측면을 측정하였다. 특징으로는 현장데이터와 시뮬레이션간의 데이터 보정에 여러 가지 방법을 사용하였다.

이 논문에서 사용된 알고리즘은 대기행렬길이 계산, 경계조건 설정, 트레일러 위치선정, 모형 최적화 4단계로 이루어지며 순서도는 다음과 같다.



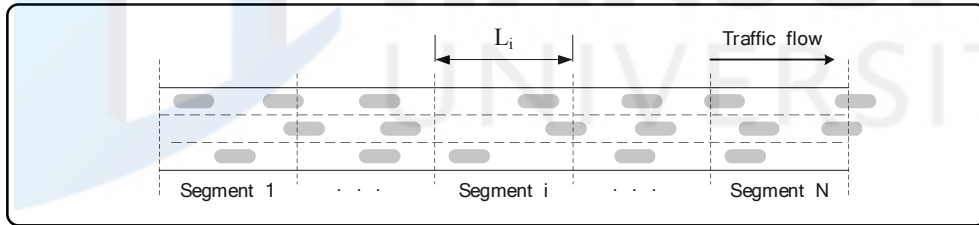
<그림 12> 가변속도제어 알고리즘 순서도(Pei-wei, 2004:161)

가변속도제어 효과에 관련된 논문에서 사용된 밀도, 충격파와 상태변수는 동일하며, 평균속도, 교통량에 있어서는 현장데이터 보정계수와 모형의 가정에 따라 차이가 있었으며 의미로써는 동일하였다.

4. 가변속도제어 모형

가변속도제어를 운영하기 위해서는 우선적으로 몇 가지 상태변수를 설정해야 된다. 도로상에 차량이 운행될 때 도로의 상태를 나타낼 수 있는 것으로 교통량, 밀도, 속도가 있으며 운영의 효과를 나타낼 수 있는 것으로 도로의 효율성을 나타내는 유출 교통량, 안정성을 나타내는 충격파가 있다. 이러한 변수들을 수식화 하기 위해 다음의 그림과 같이 도로가 1개 이상의 세그먼트로 이루어지며 각 세그먼트는 1개 이상의 차선수를 가지고 세그먼트의 길이를 L_i 이라 정의한다.

그리고 t 를 시뮬레이션을 수행하는 시간이라 할 때 시뮬레이터는 일정간격의 시뮬레이션 시간 T 와 각 시뮬레이션을 수행 횟수를 의미하는 값 k 를 가지게 된다. 그러므로 시뮬레이션 수행시간은 $t=kT$ 로 나타낼 수 있다.



$t = kT$ (t : simulation time, k : time instance, T : time step)

$$q_i(k) = \alpha_i Q_i(k) + (1 - \alpha_i) Q_{i-1}(k)$$

$Q_i(k)$: seq i의 k 번째 교통량

$q_i(k)$: seq i의 k 번째 평균교통량

$$d_i(k+1) = d_i(k) + (T/(L_i \cdot \lambda_i)) \cdot (q_{i-1}(k) - q_i(k))$$

$d_i(k)$: seq i의 k 번째 밀도

$\omega_i(k)$: seq i의 k 번째 충격파

$$\omega_i(k) = (Q_i(k) - Q_{i-1}(k)) / (d_i(k) - d_{i-1}(k))$$

λ_i : seq i의 λ_i , L_i : seq i의 길이

<그림 13> 효과측정을 위한 시뮬레이션 변수설정

또한 각 세그먼트의 위치 및 구분을 위한 변수 i 와 시점을 구분하기 위한 k 를 이용하여 다음과 같이 전이교통량, 교통밀도, 충격파를 산출하게 된다.

- 전이교통량($q_i(k)$) : $\alpha_i Q_i(k) + (1 - \alpha_i) Q_{i-1}(k)$

k 시점에서의 세그먼트 $i-1$ 에서 i 로 전이되는 교통량을 의미하며, 여기서 α 는 공간가중치상수로 모형 매개변수, Q_i 는 검지기로부터 수집된 교통량이다. 공간가중치상수는 검지기부터 수집된 데이터를 보정한 결과 $[0.6, 0.9]$ 사이의 값을 가지게 되며 Pei-wei 논문(Pei-wei, 2004:158)에서는 0.95를 사용하였다.

- 교통밀도($d_i(k)$) : $d_i(k-1) + \frac{T}{L_i \lambda_i} \times (q_{i-1}(k) - q_i(k))$

교통량 보전법칙에 의해 이전 시점에서의 밀도에 세그먼트 $i-1$ 과 i 의 전이교통량 차이를 더하므로 현재 세그먼트 i 의 밀도를 산출한다. 여기서 L_i 는 세그먼트 i 의 길이, λ_i 는 세그먼트 i 의 차선수이다.

- 충격파($\omega_i(k)$) : $\frac{Q_i(k) - Q_{i-1}(k)}{d_i(k) - d_{i-1}(k)}$

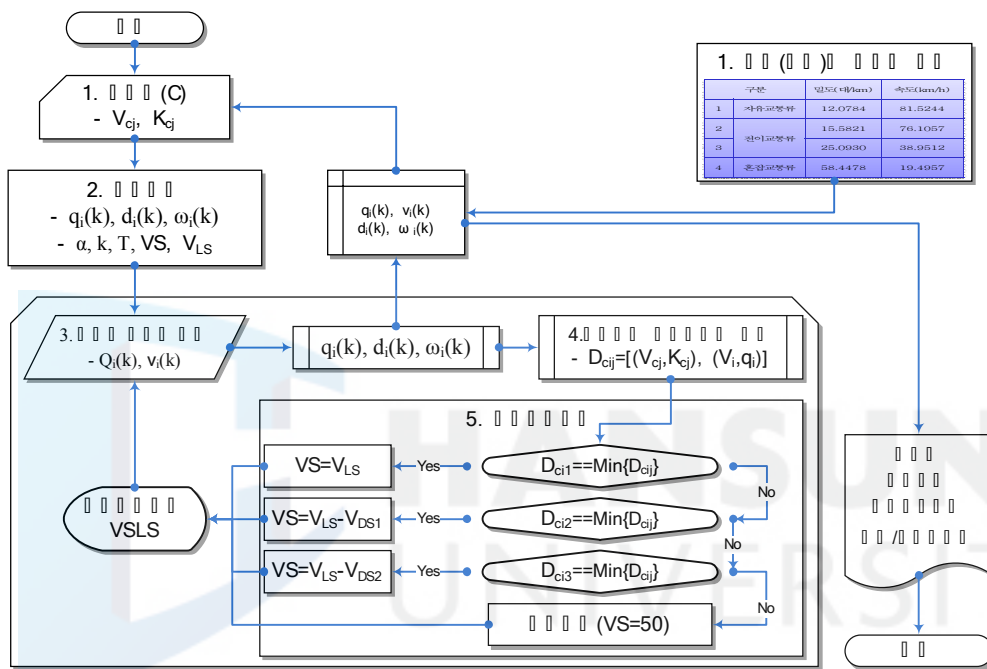
세그먼트 i 와 $i-1$ 간의 충격파를 산출하기 위하여 교통량의 변화를 밀도 변화로 나눔으로 산출한다. Newell에 의하면 밀도와 교통량의 편미분 ($\omega(q, x) = \partial k^*(q, x) / \partial q$)으로 충격파를 나타내었다(Newell, 1993:281).

다음의 그림은 가변속도제어 운영 판단 및 적용에 관한 순서도이다. 이는 5단계로 이루어지며 1, 2단계는 초기준비 단계이고 3~5단계가 가변속도적용을 판단하고 시행하는 부분이 된다.

- 1단계 : 패턴분석에 의해 패턴(상태)별 중심값(C)이 산출한다.
- 2단계 : 가변속도제어를 위한 변수를 설정한다. 상태변수인 $q_i(k)$, $Q_i(k)$, $d_i(k)$, $\omega_i(k)$, v_i , 제어변수인 VS , 매개변수인 α , k , T , V_{LS} 가 있다.
- 3단계 : 검지기 데이터로부터 30초 단위로 $Q_i(k)$, $v_i(k)$ 를 수집하고 이를

사용하여 2단계에서 설정한 $q_i(k)$, $d_i(k)$, $\omega_i(k)$ 에 대한 값을 산출한다.

- 4단계 : 기존의 패턴(상태)별 중심값과 3단계에서 얻어진 $Q_i(k)$, $d_i(k)$, v_i 간의 거리(패턴분석에서 사용된 유클리디안 거리)를 계산하여 가장 가까운 중심으로 상태를 배정하게 된다.
- 5단계 : 배정된 상태에 따라 제한속도를 변경한다. 단 자유상태에서는 현재 제한속도와 동일하며, 전이상태에서는 현재 제한속도에 추가 감속도를 적용한다. 또한 혼잡상태에서는 제한속도 하한값을 적용하도록 한다.



<그림 14> 가변속도적용 순서도

이러한 단계에 의하여 제한속도상한 값 변경 및 제한속도상한 값을 가변속도제어표시(VSLS)에 표출하여 실제적인 교통류 관리를 하게 된다. 속도제한변경에 의해 네트워크 상태를 검지기 데이터로부터 수집하여 교통류 상태를 나타낼 수 있는 상태변수 및 제어변수를 저장하고 반복적으로 수행된다.

5. 가변속도제어 운영효과 검증

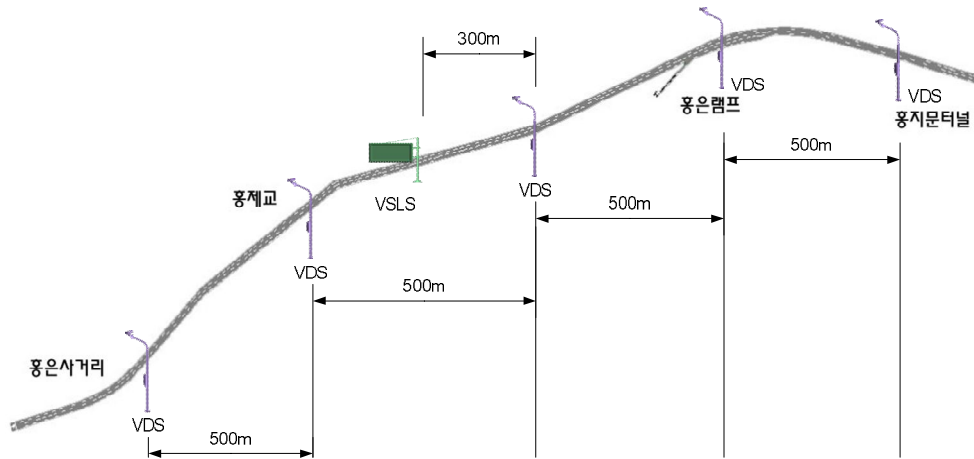
가변속도제어는 본선 교통류를 제어하는 방법 중 하나로 반복정체 및 비반복정체(돌발상황) 지점으로의 유입 교통량을 제어 하므로 정체의 확산을 최소화 시킬 뿐만 아니라 반복정체 지점의 혼잡을 예방하는 운영기법이다. 즉 도로 운영의 효율성 및 안전성을 높이하고자 하는 기법이다.

가변속도제어는 포화상태인 도로구간에서 교통류의 안정화, 교통류 상황이 원활한 도로에서 과속차량 감속유도, 혼잡으로 인한 추돌사고 방지, 악천후 조건에서의 감속유도, 진입램프에서의 원활한 합류 등을 목적으로 국내에서는 올림픽도로에서 시범운영 중이며 특히 유럽에서는 실시간교통류 제어기법으로 많이 운영되고 있다.

패턴분석으로부터 얻어진 각 패턴(상태)별 속도, 밀도 중심값을 가변속도제어 판단에 응용시 효과 및 영향을 분석하기 위하여 실제 도로에서 검증하기 어려우므로 본 연구에서는 시뮬레이션을 통하여 적용 전후의 상태를 비교하였다. 또한 가변속도제어시 임의의 감속 적용 유용시간 및 교통류 상태에 따른 유효 감속률을 파악하고자 하였다.

가. 대상지역 네트워크 설계

본 연구의 대상지역과 동일한 환경을 구현하기 위하여 서울내부순환 고속도로의 설계도면에 따라 네트워크를 구성하였다. 대상이 되는 구간으로는 일산->서울 방향으로 주행하는 홍은사거리~홍지문터널이 해당되며 이 구간의 속도제한은 70km/h로 운행되고 있다. 또한 해당구간에는 4개의 검지기로부터 얻은 교통류상태 데이터를 기반으로 구축되었으나 시뮬레이션상의 효과를 측정하기 위하여 가상의 검지기를 홍지문터널 입구에 추가로 설치하여 총 5개의 검지기를 통하여 구간 소통상황을 파악하고자 하였다.



<그림 15> 시물레이션 대상지역 네트워크 설계

실제 대상구간에 VMS는 홍은램프로부터 약 4.5km 떨어진 곳에 설치되어 있으나 시물레이션 네트워크상에서는 홍은램프로부터 0.8km 떨어진 곳에 VSLs(가변속도제어 표시기)가 운영되는 것으로 가정 하였다.

도로의 구조는 직선구간과 곡선구간이 혼합되어 있으며 평면구배, 종단구배 또한 0~3%에 해당된다. 또한 차로구성은 편도 3차로로 구성되어 있고 차종구성은 자동차 전용도로로 2륜 전동기는 진입이 불가하며, 차량의 전장은 3~15m로 되어 있다. 본선은 진행방향이 중앙 분리대로 구분되어 있는 연속류 특성을 가진다.

본선 구간을 이용하기 위해서는 현 시물레이션 네트워크상에서는 홍은램프를 통한 진입을 허용하고 있으며 상류부인 홍제램프와 연희램프를 통해서 진입할 수 있으나 본 시물레이션에서는 제외 하였다.

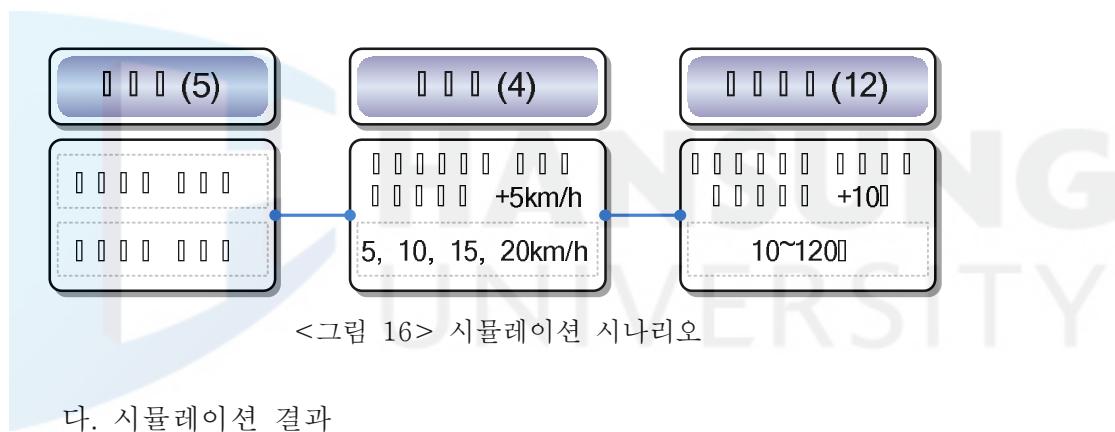
나. 시물레이션 시나리오

패턴분석 결과 교통류 상태별 중심값을 이용한 가변속도제어 운영의 효과를 측정하기 위한 시물레이션 시나리오는 크게 2가지로 구분되어진다. 첫째 가변속도제어를 운영하고 있지 않는 현재의 상태, 둘째 가변속도제어를 운영하되 본 연구에서 제시한 교통류 특성을 반영하기 위해 검지기 테

이터의 4개의 패턴으로 구분하여 얻어진 임계값을 활용하는 경우 이다.

가변속도제어가 운영되지 않는 현재 상태에서는 일일평균 교통량과 혼잡상황으로 전이되는 전이단계의 교통량을 포함하는 교통량으로 3,600veh/h~6,000veh/h로 다섯 가지 시나리오를 가지며 가변속도제어가 운영되는 시나리오에서는 현재 상태와 같은 교통량 변화에 따른 시나리오에 교통류 상태에 따른 제한속도 감속률에 따라 시뮬레이션을 수행하되 각 시나리오별 감속정도는 5km/h로 설정하여 5~20km/h까지 변화를 주어 세부적으로 총 4개의 시나리오가 주어진다. 또한 가변속도제어를 함에 있어 각 감속도에 따른 가변제한속도를 유지하는 지속시간을 10~60분까지 증가량을 10분 단위로 하여 세부시나리오를 구성하게 된다.

그러므로 최종적인 시나리오는 가변속도제어를 운영하지 시나리오는 5가지가 되며, 가변속도제어를 운영하는 시나리오는 세부적 변수인 감속률 4가지, 지속시간 12가지로 총 125가지 시나리오를 수행하였다.



다. 시뮬레이션 결과

본 연구의 시뮬레이션을 수행하기 위한 시뮬레이터는 TSIS 버전 5.01을 사용하였으며 TSIS에서는 네트워크를 구성하는 요소로 노드와 링크가 존재한다. 연속류의 경우 노드는 차량을 생성하는 시점 노드와 차량이 소멸되는 종점 노드가 있으며 노드와 노드는 링크로 연결된다.

링크는 차량이 운행되는 실제 도로와 같으며 세부 링크를 세그먼트라 한다. 각 세그먼트는 차선수와 부가차선(감가속 및 복합차선)수, 평면선형,

종단선형의 특징값, 자유교통류 상태의 속도 값을 가지게 된다.

TSIS에서는 가변속도제어라는 시뮬레이션 모듈을 제공하지 있지 않은 관계로 사용자 정의에 의한 모듈을 추가함으로써 가변속도제어의 시뮬레이션을 수행할 수 있게 되는데 가변속도제어의 효과를 측정하기 위해서는 전이교통량, 교통밀도, 충격파를 측정할 수 있는 모듈을 가변속도제어 모형에서 제시된 내용을 추가하였다.

제시된 시나리오에 따라 시뮬레이션을 수행하였다. 단 시나리오 중 가변속도제어를 하지 않는 현재 상황의 경우 교통량의 변화만으로 시뮬레이션을 수행하였다.

가변속도제어를 운영하는 시뮬레이션의 경우 크게 4가지 단계로 구분되어 수행이 된다.

- 1단계 패턴분석에 의한 중심값 산출로 시뮬레이션 수행 이전에 현재의 대상지역의 차량검지기로부터 수집된 데이터를 패턴분석하여 밀도, 속도 또는 교통량, 밀도에 의한 중심값을 산출하여 패턴(상태)을 결정하는 기준값으로 사용한다.
- 2단계 시뮬레이션 네트워크상에 설치된 차량검지기로부터 실세계와 동일한 30초 간격으로 교통량, 속도, 밀도를 수집한다. 시뮬레이션이 종료될 때까지 계속 수집된다.
- 3단계 가변속도제어 실행방법으로 2단계에서 30초 간격으로 수집되는 데이터와 1단계에서 시뮬레이션 이전에 산출된 중심값 간의 거리를 측정하여 최단 거리인 패턴으로 상태를 분류한다. 상태 분류 결과 자유상태에 해당될 경우 속도제한의 변화는 없으며, 전이상태 중 상태 2에 해당될 경우 속도제한을 변경하게 된다. 단 속도제한의 변화는 시나리오에서 정해진 방법과 같이 5~20km/h 범위내에서 감속도를 5km/h를 증가 시키며 감속하게 된다. 전이상태 상태 3도 상태 2와 동일한 방법이나 감속도를 상태 2에 비하여 추가로 감속도를 증가시키게 된다. 수집된 데이터값이 2단계 각 중심값과 거리비교에 의해 혼잡상태에 해당될 경우 이는 가

변속도제어의 범위를 넘어 돌발상황이라 가정하여 가변속도의 최저 한계 값인 50km/h로 제한하게 된다.

- 마지막으로 4단계에서는 2~3단계 동안 저장되어진 세그먼트별 속도, 밀도, 교통량, 충격파, 대기행렬길이, 전이교통량과 가변속도제어감속도와 운용시간에 따른 결과를 비교하므로 본 시뮬레이션을 마무리 한다.

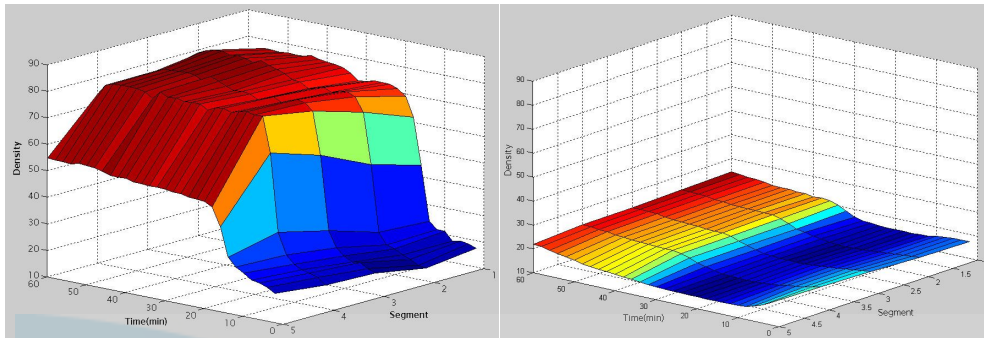
시뮬레이션을 수행하기에 앞서 실제 교통량과 시뮬레이터 간의 교통량을 보정하였다. 수집된 교통량은 4,421veh/h로 시뮬레이션 한 결과 4,426veh/h가 유입되는 것으로 나타나 유입교통량을 4,420veh/h로 보정하였다. 그리고 다양한 교통량에 따른 시뮬레이션 결과를 얻기 위해 네트워크상 초기 홍은사거리에서 유입되는 교통량을 와같이 3,600~6,000veh/h로 차선당 교통량으로는 1,200~2,000veh/h하였으며 홍은램프는 1차선으로 이루어진 램프이며 유입되는 교통량은 1,200veh/h로 하였다. 홍은램프의 실제 유입교통량은 오전 첨두시 842veh/h 이고 오후 첨두시 13,373veh/h이다.

이러한 유입교통량을 가지고 시나리오에 따라 시뮬레이션 한 결과 전체 네트워크에 대한 상태를 나타내는 평균속도와 지체시간은 다음과 같다.

<표 6> 시뮬레이션 결과 네트워크 상태(1)

구분 \ 유입교통량		3600 veh/h	4200 veh/h	4800 veh/h	5400 veh/h	6000 veh/h
감속도 미적용	이동시간(시)	89.3	101.5	100.3	99.8	99.8
	지체시간(시)	5.2	8.1	192.6	196.1	195.3
	이동/총시간	0.94	0.93	0.34	0.34	0.34
	평균속도(km/h)	60.3	59.4	21.7	21.4	21.5
감속도 -5km/h	이동시간(시)	94.0	106.9	119.2	127.3	126.1
	지체시간(시)	4.8	5.6	10.2	121.4	163.1
	이동/총시간	0.95	0.94	0.92	0.51	0.44
	평균속도(km/h)	57.8	57.3	56.5	31.2	26.5
감속도 -10km/h	이동시간(시)	96.3	109.3	122.2	135.0	145.9
	지체시간(시)	4.3	5.8	8.0	13.3	62.7
	이동/총시간	0.96	0.95	0.94	0.91	0.70
	평균속도(km/h)	56.7	56.5	56.1	54.7	42.0

평균속도와 이동시간을 총시간으로 나눈 값을 볼 때 가변속도를 적용하지 않은 상태에서는 유입교통량이 4,800veh/h 이상 일 때 네트워크가 혼잡상태로 진입하여 지체시간은 늘어나고 평균속도는 감소하게 되었다. 그러나 가변속도를 적용하였을 때 감속도에 따라 상황은 조금 다른 결과가 나왔다. 감속도를 -5km/h로 했을 경우에는 유입교통량이 5,400veh/h 이상에서 혼잡상황이 되며 감속도를 -10km/h로 적용했을 경우에는 유입교통량이 6,000km/h 이상에서 혼잡으로 전이됨을 알 수 있었다.

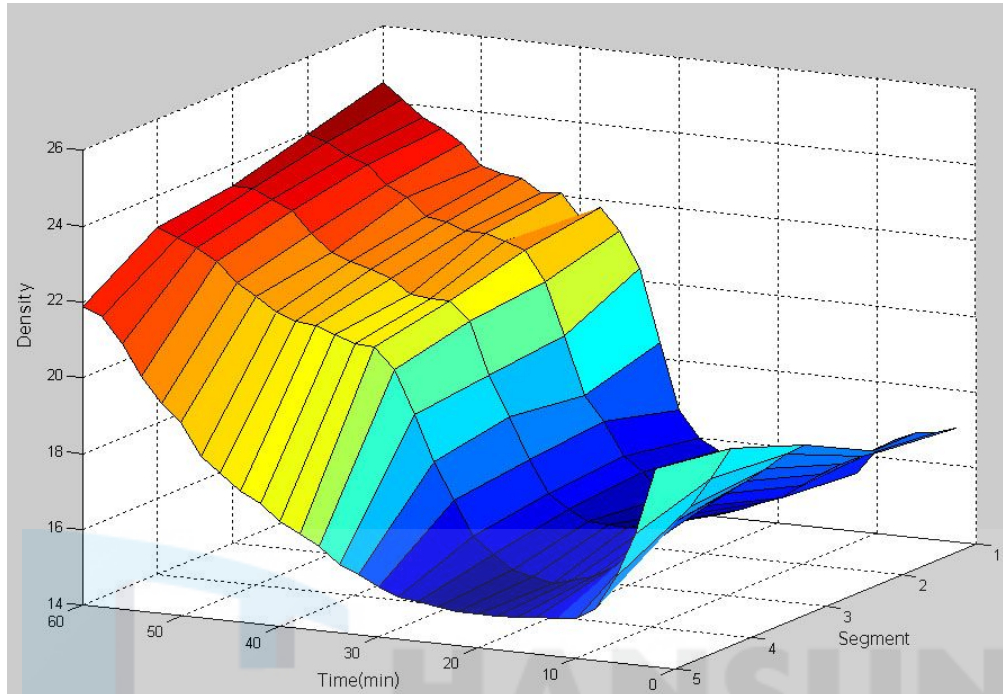


<그림 17> 네트워크의 세그먼트별 밀도 변화(좌:가변속도미적용, 우:가변속도적용)

가변속도제한을 적용하지 않았을 경우 시뮬레이션 시작 후 14분 후부터 밀도가 증가하게 되어 20분이 경과되면 네트워크 전체가 혼잡상태로 접어들게 된다. 또한 세그먼트 4를 기점으로 충격파가 상류부 방향으로 이동하게 되므로 전체 네트워크가 혼잡(마비)하게 되며 시뮬레이션이 종료될 때까지 혼잡은 완화 또는 제거되지 않았다.

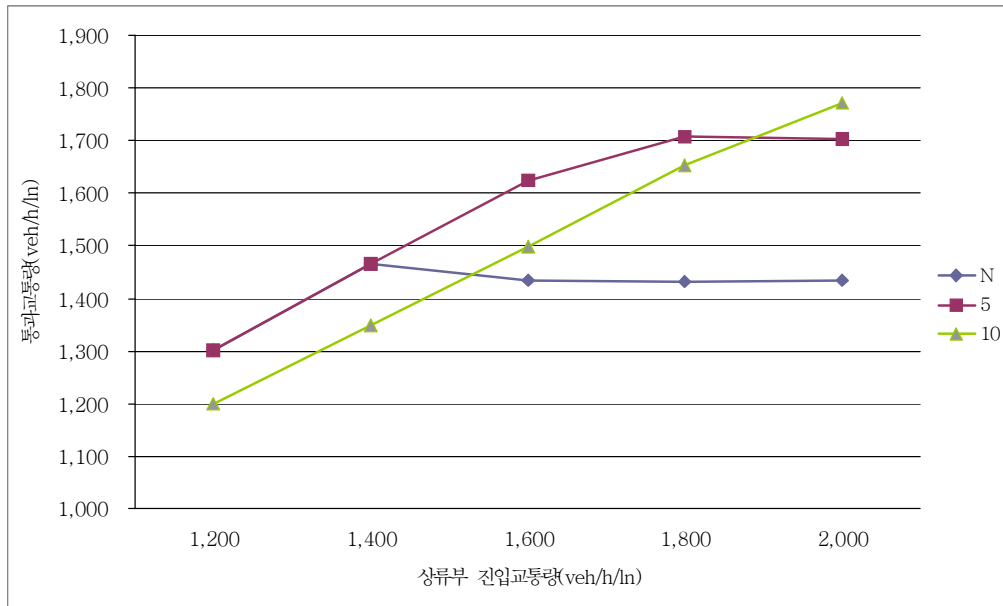
이와 반면 가변속도제한을 적용하였을 경우 그중 감속도를 -5km/h로 적용한 결과 40분경과 후 가변속도제한이 적용된 구간에서 충격파가 하류부로 역전파가 되었으며 효과는 진입교통량이 4,800veh/h까지는 네트워크 상태가 혼잡상태로 전이되는 것을 완충할 수 있으나 그 이상의 교통량이 진입시에는 효과가 없었다. 그리고 감속도를 -10km/h로 적용한 경우 최대 적용시간은 30분으로 측정되었으며 30분 이상 적용시 감속도 -5km/h로 적용한 경우와 마찬가지로 역 충격파가 발생되어 혼잡을 발생하나 진입교통량은 6,000veh/h에서도 상태 3로 있으며 그 이상의 진입교통량이 발생

하였을 경우 혼잡상태로 전이되었다. 그러나 본 대상도로는 용량이 6,468veh/h로(손봉수, 1999:30) 거의 용량상태일 경우에 혼잡상황으로 전이됨을 알 수 있다.

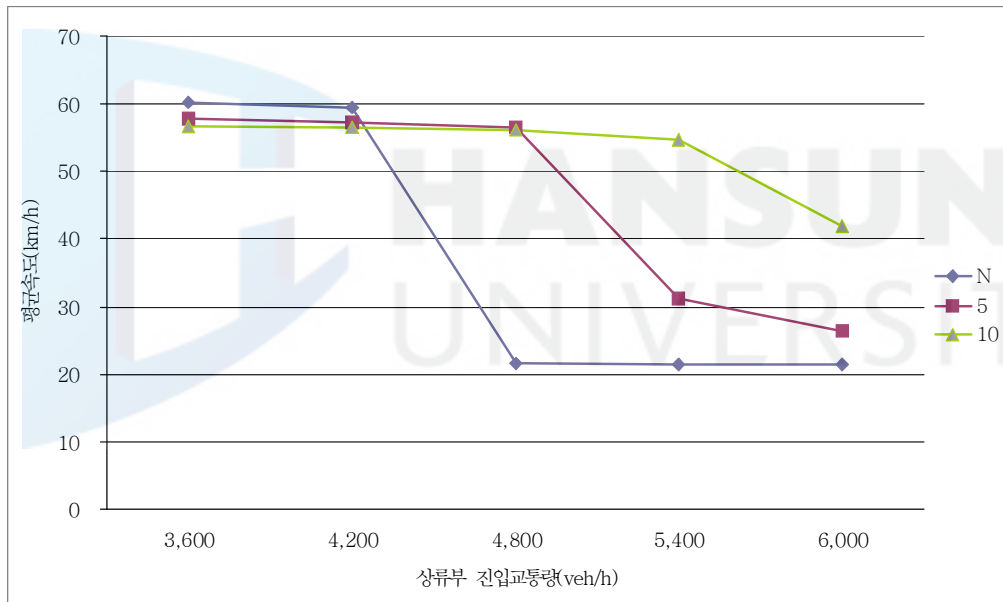


<그림 18> 네트워크의 세그먼트별 밀도 변화(감속도 -10km/h로 적용)

네트워크의 효율성을 나타내는 통과교통량과 평균주행속도 그리고 안전성을 나타내는 속도분산의 결과를 살펴본다. 우선 통과교통량에 있어서는 가변속도제어를 하지 않을 경우 진입교통량이 4,200veh/h를 기점으로 하여 더 이상 증가하지 않으며 가변속도제어를 하는 경우 감속도 -5km/h로 할 경우 진입교통량 5,400veh/h를 기점으로 더 이상 증가하지 않으며 감속도를 -10km/h로 할 경우 시험 최대치인 진입교통량 6,000veh/h일 때 까지 통과교통량이 계속 증가함을 보여 효율성이 높은 것으로 분석되었다. 그리고 평균주행속도 측면에서는 통과교통량 보다는 진입교통량이 단계씩 앞서 임의의 값으로 수렴하는 것으로 나타났다.



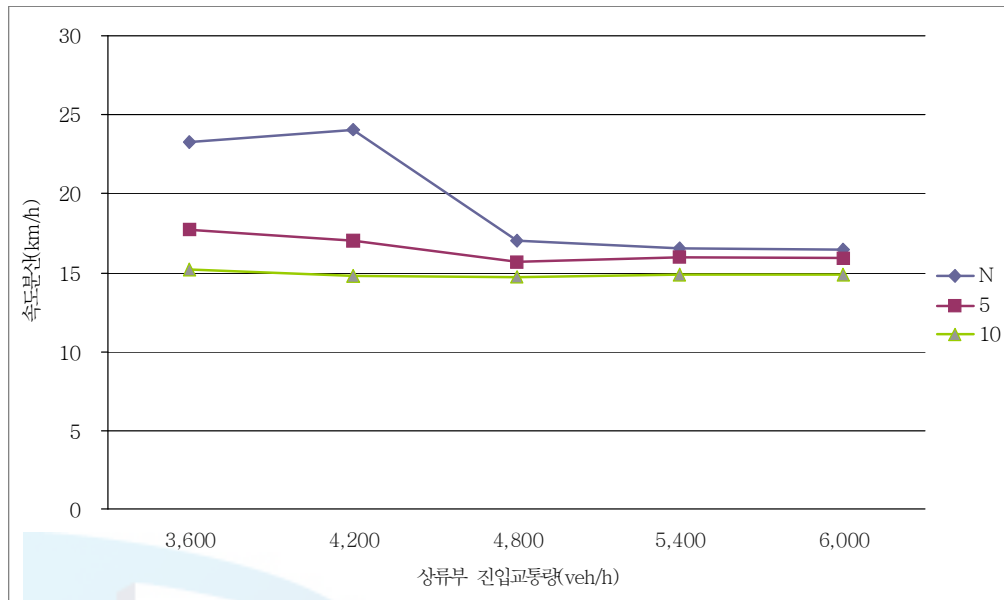
<그림 19> 진입교통량에 따른 통과교통량 변화



<그림 20> 진입교통량에 따른 평균속도 변화

마지막 네트워크의 안전성을 보여주는 속도 분산의 경우 가변속도를 제어하지 않을 경우 진입교통량이 4,200veh/h까지 분산이 증가하다가 혼잡으로 인해 점차 분산이 감소하며 가변속도제어의 경우 진입교통량에 상관

없이 15~17km/h 사이의 값으로 변화가 거의 없다. 이는 지속적인 본 선 교통류의 속도제어로 인한 결과로 보이며 감속도 -10km/h로 적용시보다 안정적인 것으로 판단된다.



<그림 21> 진입교통량에 따른 속도분산 변화

추가적으로 위와 같이 일반적인 시뮬레이션 환경의 범위를 벗어나고자 시뮬레이션 수행시 진입교통량을 포아송분포를 이루는 한 시간 교통량을 대신하여 보다 급변하는 상황을 반영하도록 15분 주기로 진입교통량을 증가시켜 보았다. 단, 교통량의 변화에 있어 처음보다 교통량이 낮아 질 경우에서 본 논문에서 검증하고자 하는 가변속도제어 효과와 유사한 성격을 가지므로 초기 진입교통량 보다는 증가되는 형상을 나타내도록 하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그 결과 가변속도제어를 하지 않은 경우 네트워크 상태를 보면 평균속도는 낮고 평균밀도가 높게 나왔고 효율성을 나타내는 이동시간/총시간을 산출한 결과 0.6으로 되어 전체적으로 볼 때 혼잡상태에 있음을 알 수 있다. 또한 가변속도제어를 하는 경우 감속도에 따른 차이는 거의 없으나 감속도 -10km/h일 경우가 통과교통량에서 조금 많고 지체시간은 조금 작아

이동시간/총시간 값을 보면 0.03정도 효율이 있는 것으로 판단되었다. 이에 반면 감속도 -5km/h는 통과교통량은 조금 적으나 밀도나 평균속도를 볼 때 상대적으로 약간의 좋은 상태를 나타내고 있다. 평균속도에서 차이를 보이는 이유는 감속도 정도에 따른 차이로 판단된다.

<표 7> 시뮬레이션 결과 네트워크 상태(2)

구분	통과교통량 (veh/h/ln)	평균속도 (km/h)	속도분산 (km/h)	평균밀도 (veh/km/ln)	지체시간 (시)	이동시간/ 총시간(*)
감속도 미적용	1357	38.66	21.34	62.4	65.89	0.6
감속도 -5km/h	1443	69.60	28.51	40.5	11.68	0.9
감속도 -10km/h	1487	55.79	28.51	42.0	8.01	0.93

* 총시간 = 이동시간 + 지체시간



Ⅲ. 가변속도제어운영 방안

2장의 시뮬레이션 결과를 종합하면 서울내부순환 도시고속도로 홍제-홍은 구간의 경우 차량검지기로부터 얻어진 평일 첨두시 교통량이 4,421veh/h로 시뮬레이션 결과 감속도 -5km/h로 최대 40분간 적용이 가능하며 감속도 -10km/h로 운영시 30분까지 적용할 수 있는 것으로 분석되었다.

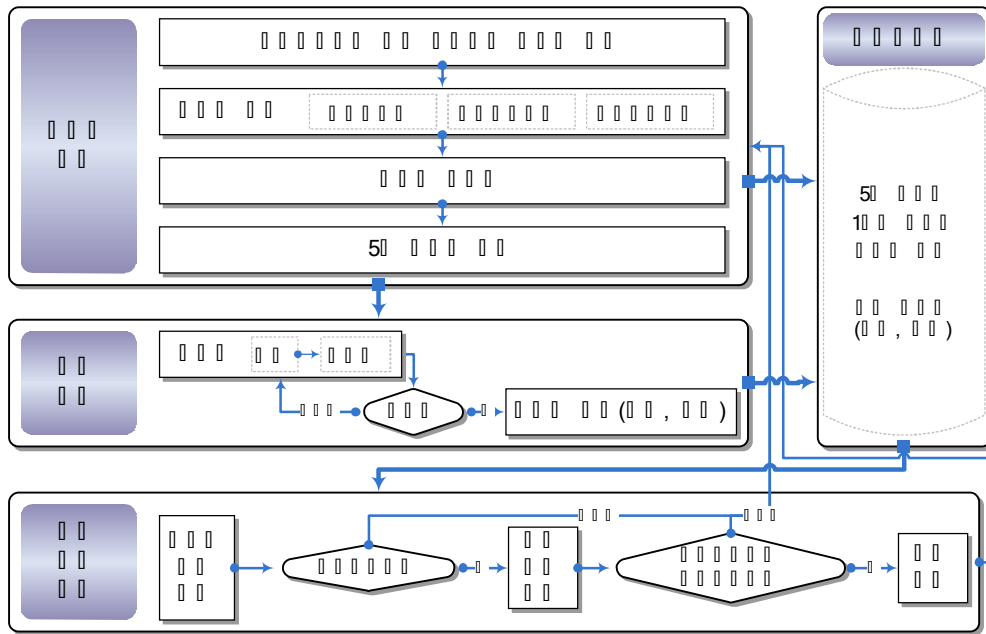
다음의 표는 평일 교통상태에서의 감속도에 따른 시뮬레이션 검증 결과에 따른 가변속도제어 유효범위를 나타내고 있다.

<표 8> 감속도에 따른 가변속도제어 유효범위

구분	유효 진입교통량	유효 적용시간
감속도 -5km/h	최대 4,800veh/h	40분
감속도 -10km/h	최대 6,000veh/h	30분

가변속도제어를 도시고속도로 본선 교통류에 적용하기 위해서는 도시고속도로 본선에 차량검지기가 설치되어 있어야 한다. 차량검지기는 검지방식에 상관없이 교통량, 속도 및 밀도를 산정할 수 있는 특성 값을 검지할 수 있으면 된다. 이러한 검지기로부터 데이터를 얻어 데이터 보정과정을 거쳐 30초 데이터를 생산한다.(교통정보제공을 위한 데이터 보정과정과 동일하다.)

검지기로부터 수집되는 30초 데이터는 상태 중심값 산출을 위한 이력 데이터 및 현재 교통류 상태를 분류하기 위한 값으로 사용된다. 중심값과 30초 데이터의 속도, 밀도간 벡터 유클리디안 거리를 이용하여 4개의 중심값과 최소 거리를 가지는 상태로 할당을 한다. 30초 데이터는 빠른 수행결과를 보여주는 K-mean 알고리즘에 의해 패턴분석을 수행하며 이력데이터에 추가 되어 시간대별, 요일별, 계절별 등의 특징을 갖는 주기로 갱신을 하게 된다.



가변속도제한을 위한 적용기준으로는 평일의 경우 <표 7>과 같이 진입 교통량에 따라 적용할 수 있으며 유효 시간 이상을 적용할 경우에는 가변 속도제어의 역효과를 발생시키게 되므로 유효시간 범위를 벗어 날 경우 가변속도에 적용된 감속도를 해제하여야 한다. 단, 본 연구는 평일 교통량에 대하여 실험 검증한 것이므로 평일을 제외한 경우에는 적합하지 않을 수 있다. 추후의 연구를 통하여 모든 상황(차로폐쇄(공사, 사고), 기상악화, 저속차량)에 대한 적용 범위를 제시할 수 있다.

IV 결론

도시고속도로는 도심내의 교통 정체를 감소하고 장거리 이동자의 이동성 제공 및 화물 수송의 주요 이용도로로써 중요성을 가지고 있으나 현재 수요에 따른 공급의 부족, 진입교통류 및 본선 교통류 제어를 관리하지 못하는 상황으로 점차 교통류 상태가 악화되고 있는 실정이다. 그러나 유럽의 경우 교통정보를 활용한 우회정보제공 및 다양한 교통류제어 기법을 개발/운영함으로써 도시고속도로 뿐만 아니라 연속류 제어를 통해 원활한 서비스를 제공하고 있다. 이에 서울내부순환 도시고속도로를 중심으로 하여 본선 교통류 제어 방안을 제시하고 검증하고자 하였다.

가변속도제어를 위해 우선 차량검지기로부터 수집된 데이터를 보정후 평활화를 수행하였으며 이를 패턴분석을 수행함으로써 서울내부순환 도시고속도로의 평일 상태를 4가지로 분류하고 중심값을 산출하였다. 이 중심값을 가변속도제어를 수행함에 있어 상태분류를 위한 기준값으로 활용하였다.

가변속도제어를 위해 도로를 세그먼트로 구분하고 각 세그먼트별 상태를 판단하기 위한 상태변수로 전이교통량, 평균밀도, 평균속도를 설정하였으며 제시된 모형과 시나리오에 근거하여 검증한 결과 본선 교통류에 속도제어를 함으로써 안전성 및 효율성을 향상시킬 수 있음이 증명되었고 진입교통량에 따라 가변속도제어의 감속정도와 유효 적용시간을 산출하였다. 감속도 -5km/h 로 적용시 유효 진입교통량은 최대 $4,800\text{veh/h}$, 유효 적용시간은 40분이며 감속도 -10km/h 로 적용시 유효 진입교통량은 최대 $6,000\text{veh/h}$, 유효 적용시간은 30분으로 분석되었다. 또한 교통류 상태변화가 심할 경우에는 감속도에 따른 영향은 미비하나 감속도 -10km/h 로 적용시 평균속도는 낮고 평균밀도는 약간 높은 상태이나 통과교통량이 높고 속도분산은 동일하여 효율성 측면에 있어 조금 좋은 결과를 보였다.

이러한 연구 결과인 가변속도제어 운영 방안은 국내 연속류 FTMS를 운영 및 관리자에게 본선 교통류 제어 기법으로 모든 도로에서 운영이 가

능하며 제시된 유효 범위는 서울내부순환 도시고속도로 평일 교통류 상태에 한하여 검증된 결과이다. 다만, 그 외의 상황에서는 검증이 되지 않은 상태이므로 모든 상황 및 조건에 대하여 적합하지 않을 수 있다. 또한 패턴 분석시 수집된 데이터 기간이 다년간 데이터로 다양한 상황과 조건의 데이터를 포함하지 못하여 여러 상황에 따른 적용 방안의 적합성이 낮아질 수 있다.

이러한 점으로 볼 때 향후 연구로는 본 연구에서 가정 및 보정하여 사용된 서울내부순환 도시고속도로에 적합한 교통밀도 산정식, 실제 서울내부순환 도시고속도로에 적용하기 위해서는 다양한 조건 및 장기간의 데이터를 이용한 시뮬레이션 검증 또는 올림픽고속도로와 같은 가변속도제어 시범운영 구간에서의 적용 연구가 필요하다.

또한 실험 검증시 시뮬레이션 환경이 실제 환경과 가능한 유사한 조건을 갖추기 위하여 보정을 하게 되는데 가변속도제어를 위해 실제 상황과 동일한 조건과 결과 값 산출을 위한 전용 시뮬레이터 개발이 요구된다.



참고문헌

강정규, 정철훈, 「도시고속도로 교통류 관리를 위한 가변전광판 정보 제공 방안 평가」, 대한교통학회 제17권 제1호, 1999.3

손봉수, 『서울시 내부순환로 기능강화 방안 연구』, 서울시정개발연구원, 1999

서울시, 『2020년 서울도시기본계획』, 서울특별시, 2006

신판식, 「도시고속화도로의 교통류 특성과 그 적용성에 관한 연구」, 대한교통학회 제19권 제4호, 2001.8

이정우 譯, 『Thom, Rene, Paraboles et Catastrophes, Flammarion』, 솔출판사, 1995

Denos C. Gazis, Robert Herman. 「The Moving and "Phantom" Bottlenecks」, Transportation Science vol 26, 1992, pp. 223-229

Duda. R.O., Hort P.E. 『Pattern Classification and Scene Analysis』, New York, 1973, p. 187

G. F. Newell, 「A Simplified Theory of Kinematic Waves in Highway Traffic, Part I: General Theory」, TRB Part B, 27B, 1993, pp. 281-287

Jingxin Xia and Mei Chen 「Defining Traffic Flow Phases Using Intelligent Transportation Systems-Generated Data」, Journal of ITS, 11(1), 2007, pp. 15-24

Jorge A. Acha-daza, and Fred L. Hall 「Application of Catastrophe Theory to Traffic Flow Variables」, TRB Part B, 28B, 1994, pp. 235-250.

Lu Sun and Jie Zhou, 「Development of Multiregime Speed-Density Relationships by Cluster Analysis」, TRR 1934, 2005, pp. 64-71

Pei-wei Lin, Kyeong-pyo Kang, and Gang-len Chang, 「Exploring the Effectiveness of Variable Speed Limit Controls on Highway Work-Zone Operations」, Intelligent Transportation Systems, 2004, pp. 155-168

Persaud, B. N. and Hall, F. L. 「Catastrophe Theory and Patterns in 30-Second Freeway Traffic Data-Implications for Incident」, TRB Part A, 23A, 1989, pp. 103-113

P. Breton, A. Hegyi, B. De Schutter, and H. Hellendoorn. 「Shock wave elimination/reduction by optimal coordination of variable speed limits」, Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC'02), Singapore, 2002, pp. 225-230

Roser P. Reoss, 「Traffic Engineering, Third Edition」, Pearson Prentice Hall, 2004, pp. 105-118.

Wang, y. and Nihan, N. 「Freeway traffic speed estimation with Single-loop output」, TRR 1727, 2000, pp. 120-126

Rijkswaterstaat (<http://www.rijkswaterstaat.nl>)

UK-ITS (<http://www.its-uk.org.uk>)

ABSTRACT

An study on operation of expressway Variable Speed

Limits using pattern analysis

Lim, Kwan-Su

Major in Information System Engineering

Dept. of Information System Engineering

Graduate School, Hansung University

An expressway is an important roadway to relieve congestion of traffic, serve the mobility, and transport the freight in urban area, but the traffic flow in the expressway has been becoming worse due to not only unbalanced demand and supply but also inadequate control of the traffic flow on entrances and trunk road sections. In cases of European countries, however, the provision of detour information based on traffic information and various control methods referring the traffic flow has been developed and operated, resulting smooth service provisions by controlling the free flow. With these contexts, this paper tries to verify the proposed method of controlling traffic flow on the truck road sections of Seoul Naebu Expressway.

To implement the variable speed control, a smoothing method under study was first conducted based on the adjusted data from vehicle detectors on the target roadway. Second, a pattern analysis enables us to discriminate four types of daily traffic situation of the Seoul Naebu Expressway and to compute its centralized value which used as a criterion for dividing the level of the variable speed control.

Specifically, to apply the variable speed control we set up a

transferable traffic volume, an average density, and an average speed as standard factors to determine the situation of the segmented roadway. Based on the proposed model and scenario, the analysis result reveals that traffic safety and efficiency can be improved by means of controlling speed of traffic flow on the trunk road sections. Additionally, we calculated an effective application time and the degree of reduction of the variable speed control according to the inflowing traffic volume. In case of speed reduction of -5km/h and -10km/h, the maximum inflowing traffic volume was 4800veh/h and 6000veh/h, and the effective application time was 40 and 30 minutes, respectively. As well as in case of large variance of the traffic flow, the influence of the speed reduction was mild. However, when imposing the speed reduction with -10km/h this paper shows a good result in terms of efficiency, showing that passing traffic was high and variance of speed was constant in spite of low average speed and a bit high average density.

The proposed method under study, i.e., operating method of the variable speed control, is useful to control the traffic flow on the trunk road sections to FTMS managers in Korea. However, it is still limitation that the application range of the findings under study wouldn't be applicable to other sites without verifying because newly estimated in this paper values have conformed based on only daily traffic flow of the Seoul Naebu expressway. In addition, the data used in the pattern analysis has accumulated by multi-years without various conditions and situations, which would cause the reduction of its transferability

Keywords Traffic Flow, Traffic Control, Variable Speed Limits, Pattern, Operation