

과포화교통류에서 속도-교통량 관계에 관한 조사연구

A Survey On Speed-Flow Relationship Under Congested Conditions

박 성 균

(홍익대학교 도시계획과 대학원)

이 승 준

(홍익대학교 도시계획과 대학원)

목 차

- | | |
|---------------------|------------------------|
| I. 서론 | 4. 자료 수집 |
| II. 기존 연구 검토 | IV. 과포화시 속도-교통량 관계 분석 |
| III. 연구 수행 방법 | 1. 속도-교통량 관계 |
| 1. 조사의 수행 과정 | 2. 시간 변화에 따른 속도-교통량 관계 |
| 2. 조사대상지의 선정 및 기하구조 | 3. 기존 연구와의 비교 |
| 3. 자료 특성 | V. 결론 및 추후연구사항 |

ABSTRACT

기존 도로시설을 최대한으로 이용하고 교통의 흐름을 질적으로 향상시키기 위해서는 과포화 상태를 고려한 교통시설운영방법을 개선할 필요가 있다. 속도-교통량관계는 교통시설운영의 평가와 서비스수준 산정을 위한 주요 판단기준이 된다. 본 논문에서는 경부고속도로 중점부 구간의 현장조사를 통해 과포화상태의 속도-교통량 관계를 조사 분석하였고 그 결과 다음 몇가지 결론을 얻을 수 있었다. 첫째, 한국도로용량편람을 비롯한 우리나라 연구결과는 일반적으로 50km/hr일 때 용량상태가 나타난다고 알려져 있으나 본 조사결과에 의하면 약 85km/hr정도에서 용량상태가 발생함을 관측할 수 있었다. 둘째, 과포화구간에서 속도에 따른 통과교통량 증감추이는 대기행렬증가시 급격한 속도-교통량의 감소가 있는 반면에 대기행렬해소시 속도-교통량의 증가는 완만하게 회복됨을 보였다. 셋째, Ontario 고속도로의 경우와 본 조사연구결과를 비교해본 결과 과포화시 한국의 경우 미국과 동일한 통행속도에서 더 많은 교통량이 통행하는 것으로 확인되었다.

1. 서론

자동차 수요의 폭발적인 증가로 인하여 하루에도 수차례 발생하는 도로 과포화상태¹⁾는 교통혼잡과 교통사고와 같은 심각한 교통문제를 유발하고 있다. 이러한 교통문제에 대처하기 위해서는 정부차원에서 교통시설 투자규모를 늘려 도로를 개선하고 신설하는 방법이 있으나 이것만으로는 늘어나는 교통수요를 따라잡지 못하는 상태이다. 1990년 서울시 자동차 보유대수는 1,194(천대)에서 1997년 2,249(천대)로 연평균 13%의 증가를 보이고 있는 반면에 도로 연장 증가율은 1980년대 이후 연평균 약 1.9%에 머물고 있다는 점이 이를 뒷받침해주고 있다²⁾. 따라서 기존 도로시설을

1) 교통수요가 도로용량을 초과한 $V/C > 1$ 인 교통혼잡상태, 불안정류 또는 과용량상태라고도 함
2) '96-'97 서울시 교통센서스 결과, 서울시청

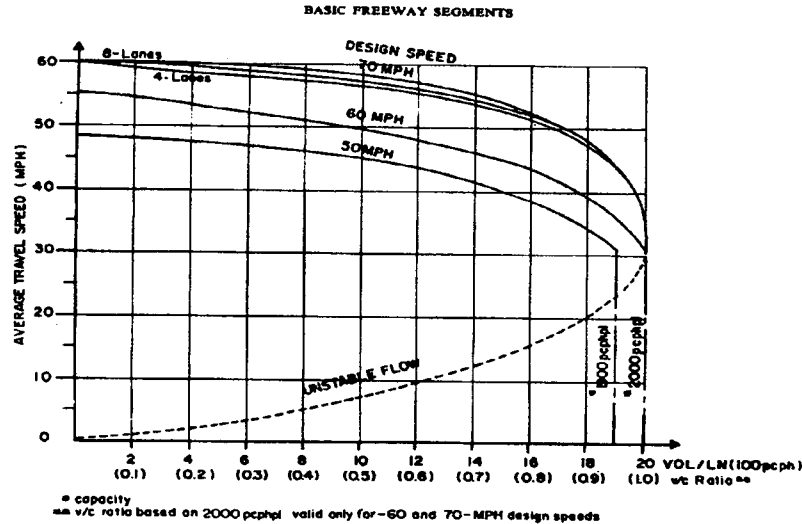
최대로 이용하고 교통의 흐름을 질적으로 향상시키기 위해서는 과포화 상태를 고려한 교통시설운영 방법을 개선해야만 한다.

과포화 상태의 교통시설운영방법을 개선하기 위해서는 과포화 교통류특성을 이해해야 한다. 이러한 교통류 특성중 속도-교통량관계는 교통시설운영의 평가와 서비스수준 산정을 위한 주된 판단기준이 된다. 현재까지 속도-교통량 관계에 대한 기초자료는 1985년 US HCM(US Highway Capacity Manual)을 인용한 것이 대부분이다. 그러나 이 자료에서 비포화상태에 비해 과포화상태를 설명하는 부분은 명확한 언급을 피하고 점선으로 표기되고 있는데 이것은 과포화상태가 자주 발생하지 않는 도로조건과 과포화 상태를 설명하는 자료수집의 한계, 그리고 연구의 필요성 부족 때문이라 이해할 수 있다. 이와 병행하여 1992년 발표된 한국형 도로용량편람인 KHCM(Korea Highway Capacity Manual)에서도 마찬가지로 과포화상태의 속도-교통량 관계를 명확하게 제시하고 있지 않다.

따라서 본 논문의 목적은 연속교통류를 대상으로 하는 현장조사를 통해 과포화상태의 속도-교통량 관계를 규명하여 실제 한국 도로 조건에 맞는 교통시설운영 평가의 기초자료를 제공하고 이에 따라 시설운영자가 더욱 합리적인 판단을 할 수 있도록 함에 있다.

II. 기존 연구 검토

<그림2-1>의 1985년 US HCM(US Highway Capacity Manual)³⁾에서 제시한 속도-교통량 관계를 살펴보면 이상적인 조건하에서 설계속도에 따라 용량이 1,900-2,000 pcph로 결정되고 그때의 속도는 약 30mph가 된다. 그러나 비포화상태에서 용량에 도달하기까지는 실선, 용량을 넘어선 과포화상태에 대해서는 점선으로 표기되어 있는데 이것은 과포화 상태 설명의 불확실성을 의미하는 것으로 판단할 수 있다.

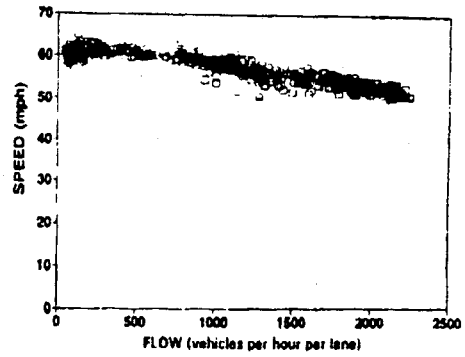
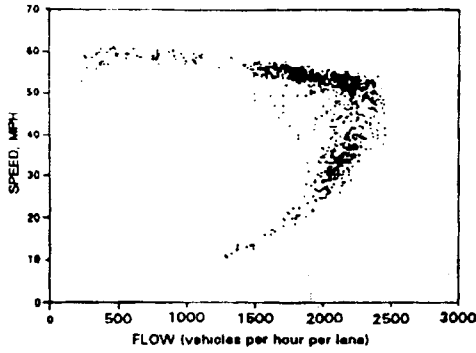


<그림2-1>1985년 HCM에서의 속도-교통량 관계

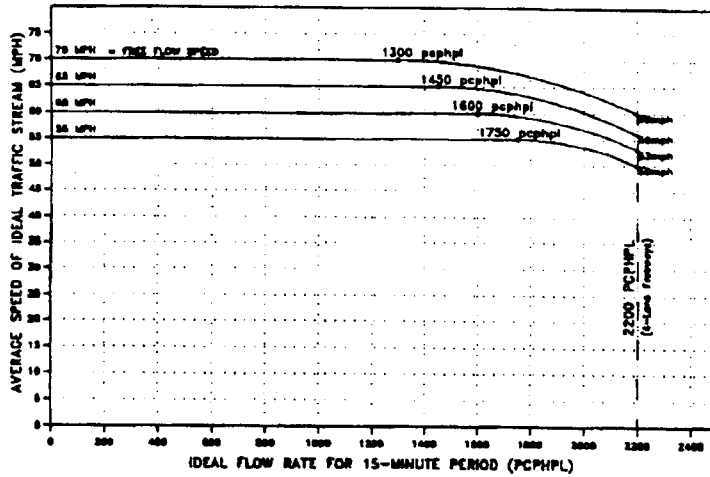
이후 동권 1994년 개정판⁴⁾에서 실측을 통해 조사된 속도-교통량 관계를 살펴보면 <그림2-2, 2-3>과 같다. 그리고 이를 통해 정리된 속도-교통량 관계는 <그림2-4>와 같다. 설계속도에 상관 없이 용량은 2,200-2,300 pcph이고 그때의 속도는 48-60 mph 정도를 나타낸다. 1985년에 비해서 용량이 300 pcph 증가하고 용량상태의 속도는 약 18-30 mph 정도 증가됨을 알 수 있다. 그러나 과포화구간은 명시되어 있지 않다.

3) Highway Capacity Manual Special Report 209, Transportation Research Board, 1985, page 3-5

4) US HCM, 1994, page 2-29, 3-4

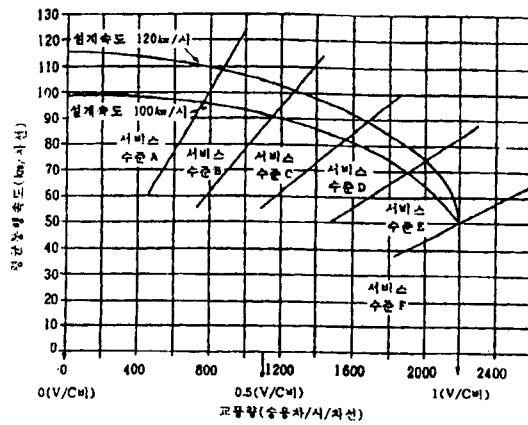


<그림2-2> 속도-교통량 관계(San Diego freeway) <그림2-3> 속도-교통량 관계(Caldecott Tunnel)



<그림2-4> 1994년 US HCM에서의 속도-교통량 관계

한국에서는 1992년 KHCM(Korea Highway Capacity Manual)⁵⁾에서 처음으로 속도-교통량 관계를 제시하였고 이를 통해 고속도로 서비스수준을 산정하였다. <그림2-5>를 보면 여기서 제시된 이상적인 도로조건하에서 도로용량은 설계속도와 상관없이 속도 50km/hr에서 2,200pcph를 보이고 있다. 이 결과는 1985년 HCM 결과와 비교할 때 용량이 다소 높은 것 외에는 전반적으로 유사하다. 그러나 1994년 HCM과 비교하면 용량과 비슷하나 임계속도는 우리가 25~45km/hr 낮다.



<그림2-5> 1992년 KHCM에서의 속도-교통량 관계

5) 도로용량권람, 건설부, 1992, page 122

이외에 다수의 연구자들을 통한 속도-교통량 관계 규명과 용량산정을 위한 연구결과를 요약하여 정리하면 <표2-1>과 같다.

<표2-1> 연구자별 교통류 관계 해석6)

연구자	Hurdle 과 Datta	Payne	Hall,Allen과 Gunter	F.L. Hall과 L.M. Hall	John Ringert
수행년도	1983	1984	1985,1986	1990	1993
자료수집위치특성	병목구간 내 1개 지점	병목구간 상류부 9개 지점	병목구간 상류부 3개 지점	병목구간내 및 상류부 2개 지점	병목구간 내 3지점
자료수집 시간간격	교통량, 속도 (사진촬영)	교통량 (검지기 자료)	교통량, 속도, 점유율(검지기 자료)	교통량,속도,점유율 (검지기 자료)	교통량,속도
추정자료	없음	점유율자료에서 밀도추정후 속도 추정	없음	없음	없음
차종구분	Sample 자료를 이용 2종 구분	수행하지 않음	2종 구분	수행하지 않음	중차량으로 2종 구분
이용관계식	속도-교통량	속도-밀도, 교통량-밀도	교통량-점유율	속도-교통량	속도-교통량
제시된 용량	1984	없음	임계밀도 19~20%리고만 제시	2300	2253
용량에서의 속도	80 km/hr (50mph)	없음	없음	70~90 km/hr	80 km/hr
제시된 관계식의 형태	결정하지 못함	이중 영역 속도-밀도	역 V형 교통량-점유율	sideway L형	결정하지 못함

III. 연구수행방법

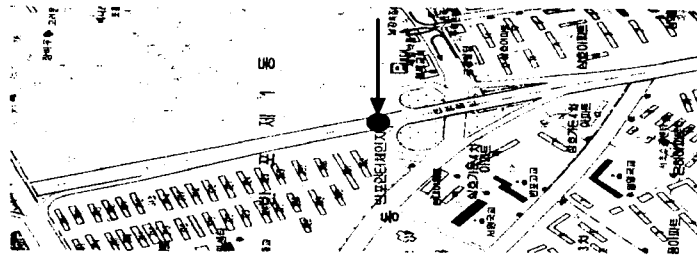
1. 조사의 수행과정

조사의 수행과정은 예비조사, 조사지점 선정, 본조사의 순으로 이루어 졌다. 예비조사는 고속도로 연속류구간을 답사하여 현장조사시 문제가 될 소지가 있는 여러 가지 여건을 사전에 보완했으며 조사를 위한 비디오 촬영이 가능한 곳을 선정하였고 과포화후 교통량과 속도의 관계를 조사하기 위해 하루 교통량 변화 패턴을 확인했다.

2. 조사대상지의 선정 및 기하구조

조사 지점은 한남대로 및 강남대로와의 합류부에서 약 2.5 km하류에 위치하며 반포 IC의 붐은 사로와 사평로로 연결되는 2개의 분류부에 의해 처음 4차로이던 구간이 IC통과 후 2차로로 줄어들어 드는 지점이다. IC 통과 이후에는 더 이상의 합·분류부가 없이 연속류 구간이 계속되며 출퇴근 시간에 한남대교의 대기행렬에 영향을 받아 교통수요가 도로용량을 초과하여 과포화상태가 발생하고 교통수요가 줄어들면서 해소된다. 자료수집은 경부고속도로 상행선 반포 IC의 편도2차로중 1차로를 대상으로 이루어졌다.

6) 고속도로 유출입 교통행태 분석 및 가감속차로 실제운영 기준 연구, 한국도로공사, 1996, page 27



<그림3-1> 조사 대상지

3. 자료특성

1998년 10월 9일 금요일 오전 오후 첨두시간(오전 07:28~09:13, 오후 16:45~18:30)의 총 3시간 30분 자료를 수집하였으며 오전에는 대기행렬 발생 직전부터 발생후 정체가 계속되는 동안을 오후는 대기행렬 발생후에서 소멸까지를 조사하였다.

4. 자료수집

교통량은 비디오 촬영을 통하여 1차로의 차량만을 대상으로 1분간격의 차량대수를 계산하였으며 차종의 구분은 수행하지 않았다. 1차로의 경우 중차량의 비율이 무시할 수 있을 만큼 적었으며 따라서 중차량의 보정도 수행하지 않았다. 차량의 속도는 비디오 화면을 통해 일정한 거리들 두고 통과하는 차량의 시간을 측정하여 1분 단위로 평균내었다.

IV. 과포화시 속도-교통량 관계 분석

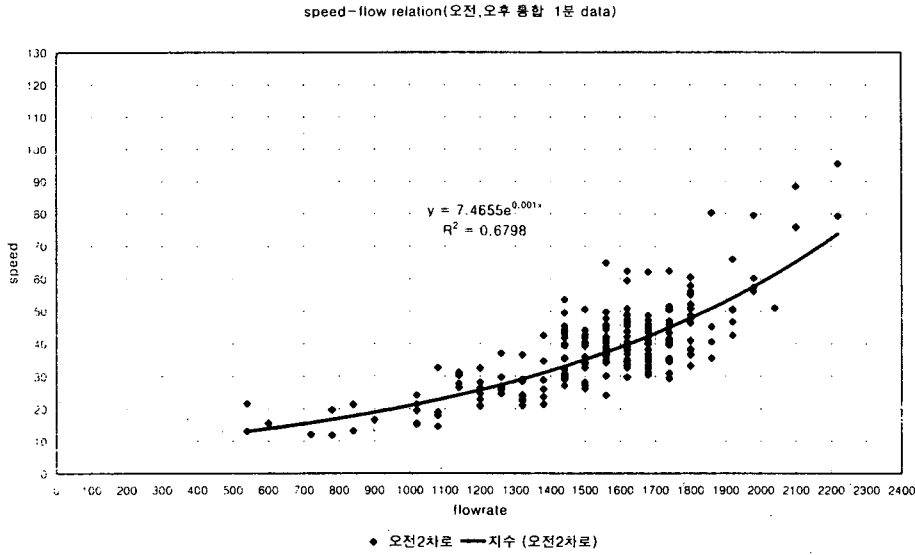
1. 속도 교통량 관계

오전 오후 첨두시 조사된 조사된 속도-교통량 자료를 5분단위로 평균내어 정리해본 결과는 <표3-1>과 같다. 그리고 1분, 2분, 5분, 15분 단위로 평균내어 그래프로 표현하면<그림3-2,3,4,5>와 같다.

<표3-1> 경부고속도로 5분단위 속도-교통량 조사자료

	오전첨두			오후첨두			
#	시간	flowrate(veh/hr)	speed(km/hr)	#	시간	flowrate(veh/hr)	speed(km/hr)
1	7:27			1	16:44		
1	7:32	2076	84.55	1	16:49	1164	22.82
2	7:37	1896	55.63	2	16:54	1476	34.15
3	7:42	1812	49.61	3	16:59	1524	37.91
4	7:47	1644	37.59	4	17:04	1536	39.87
5	7:52	1572	39.55	5	17:09	1464	36.66
6	7:57	1692	45.05	6	17:14	1584	40.77
7	8:02	1668	38.30	7	17:19	1512	32.45
8	8:07	1620	37.70	8	17:24	1824	53.67
9	8:12	1680	36.82	9	17:29	1464	45.46
10	8:17	1608	41.20	10	17:34	996	19.11
11	8:22	1668	40.91	11	17:39	1344	27.06
12	8:27	1608	35.24	12	17:44	1512	37.74
13	8:32	1728	40.42	13	17:49	1620	43.67
14	8:37	1740	51.56	14	17:54	1104	28.86
15	8:42	1836	45.10	15	17:59	1392	29.87
16	8:47	1224	29.07	16	18:04	1308	30.67
17	8:52	1332	31.73	17	18:09	1440	39.21
18	8:57	1224	27.24	18	18:14	1512	34.33
19	9:02	1188	22.77	19	18:19	1272	26.82
20	9:07	1608	37.60	20	18:24	1488	32.81
21	9:12	1716	48.95	21	18:29	1572	41.83

<그림3-2>의 1분 단위 평균 자료에서는 속도80-95km/hr에서 최대통과교통량 2200pcph가 관측되었고 교통류정지상태가 4번관측되었을 때 이를 포함한 자료에서평균 속도 약 15-20km/hr 정도에서 통과교통량 약 550pcph를 보였다. 그리고 지수함수로 회귀분석한 결과 R^2 가 약 0.6799정도 나타났다.



최대통과교통량-속도:
2250pcph-95km/hr

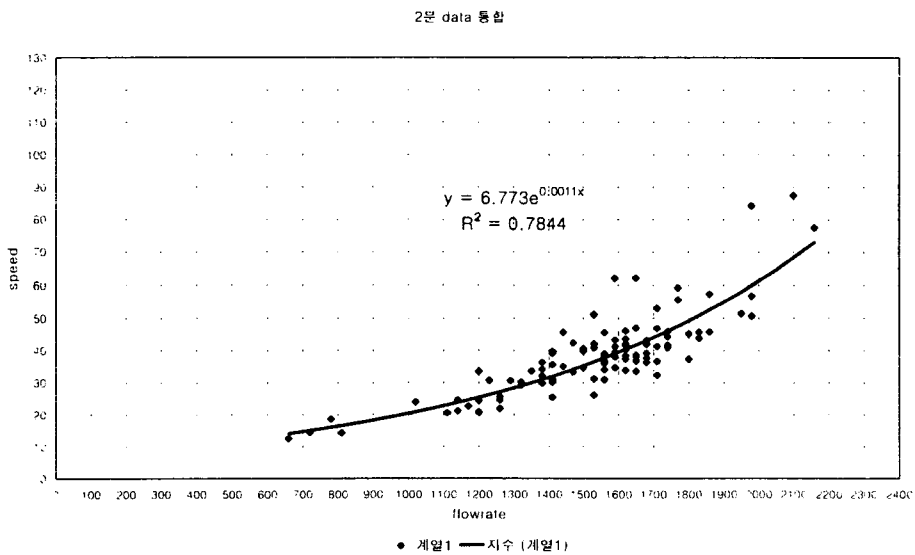
최소통과교통량-속도:
550pcph-14km/hr

회귀분석결과:
 $Speed = 7.4665 e^{0.001Flow}$

$R^2 = 0.6798$

<그림3-2> 경부고속도로 1분단위 평균 속도-교통량 관계

<그림3-3>의 2분 단위 평균 자료에서는 속도약 80km/hr 정도에서 최대통과교통량 2150pcph로 계산되었고 교통류 정지상태를 포함한 자료에서 평균 속도 약 15km/hr에서 통과교통량 약 650pcph를 보였다. 회귀분석결과 R^2 가 약 0.7844정도로 1분 평균 자료보다 약 0.11정도가 높게 나왔다.



최대통과교통량-속도:
2150pcph-80km/hr

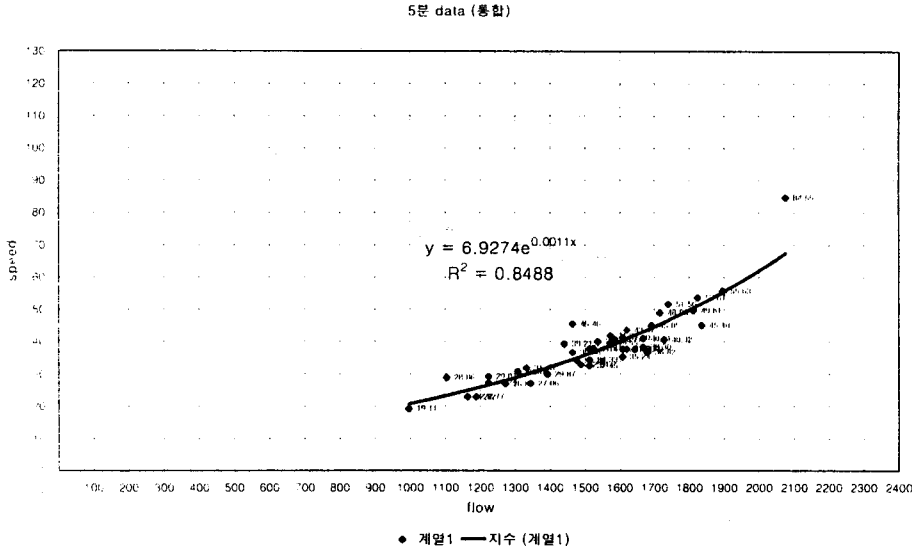
최소통과교통량-속도:
650pcph-15km/hr

회귀분석 결과:
 $Speed = 6.773 e^{0.0011Flow}$

$R^2 = 0.7844$

<그림3-3> 경부고속도로 2분단위 평균 속도-교통량 관계

<그림3-4>의 5분 단위 평균 자료에서는 속도 약 85km/hr 정도에서 최대통과교통량 2100pcph 정도로 계산되었고 교통류 정지상태를 포함한 자료에서 평균 속도 약 20km/hr에서 통과교통량 약 1000pcph를 보였다. 그리고 지수함수식으로 회귀분석한 결과 R^2 는 약 0.8488 정도로 1분평균 자료보다 약 0.17, 2분 평균 자료보다 약 0.06정도가 높았다.



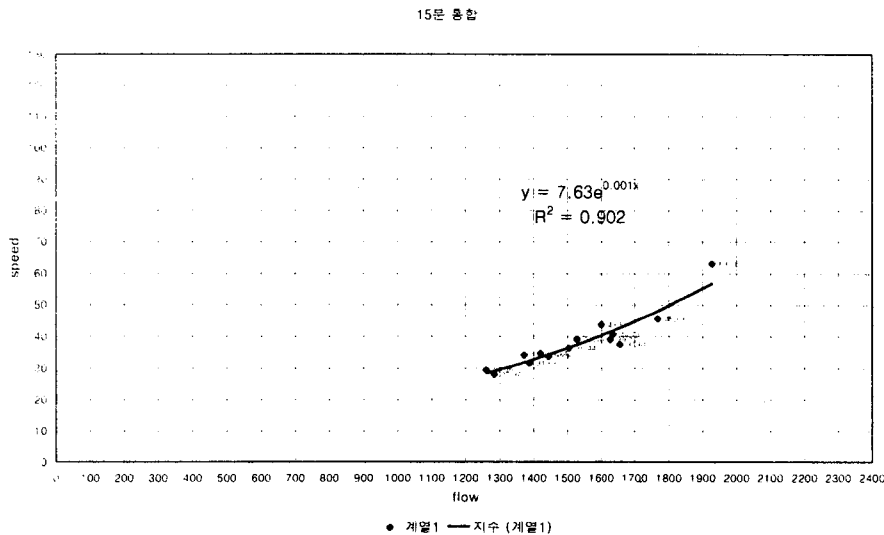
최대통과교통량-속도:
2100pcph-85km/hr

최소통과교통량-속도:
1000pcph-20km/hr

회귀분석결과:
 $Speed = 6.9274 e^{(0.0011)Flow}$
 $R^2 = 0.8488$

<그림3-4> 5분평균 속도-교통량 관계

<그림3-5>의 15분 단위 평균 자료에서는 속도 약 65km/hr 정도에서 최대통과교통량 1920pcph 정도로 계산되었고 교통류 정지상태를 포함한 자료에서 평균 속도 약 30km/hr에서 통과교통량 약 1250pcph를 보였다. 지수함수식으로 회귀분석한 결과 R^2 는 약 0.902 정도로 1분평균 자료보다 약 0.23, 2분 평균 자료보다 약 0.12, 5분 평균 자료보다 약 0.06정도 높았다.



최대통과교통량-속도:
1900pcph-65km/hr

최소통과교통량-속도:
1250pcph-30km/hr

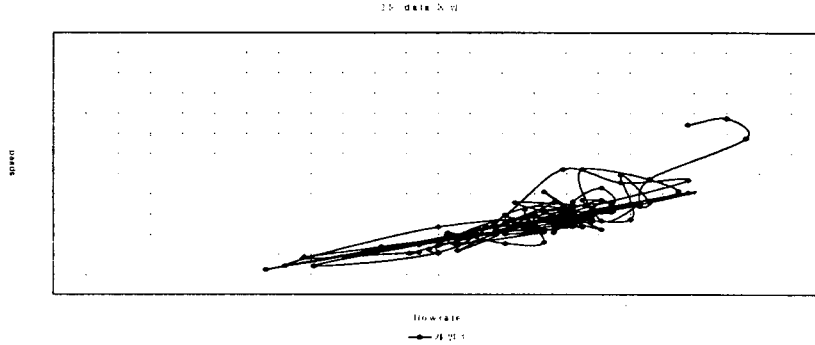
회귀분석결과:
 $Speed = 7.63 e^{0.001Flow}$
 $R^2 = 0.902$

<그림3-5> 경부고속도로 15분단위 속도-교통량 관계

위 분석 결과에서 알수있듯이 분석시간 단위를 크게 할수록 지수식의 R^2 가 높게 나왔다. 이는 분석시간 단위를 크게할수록 속도-교통량관계 자료값의 산포도가 낮기 때문으로 볼 수 있다.

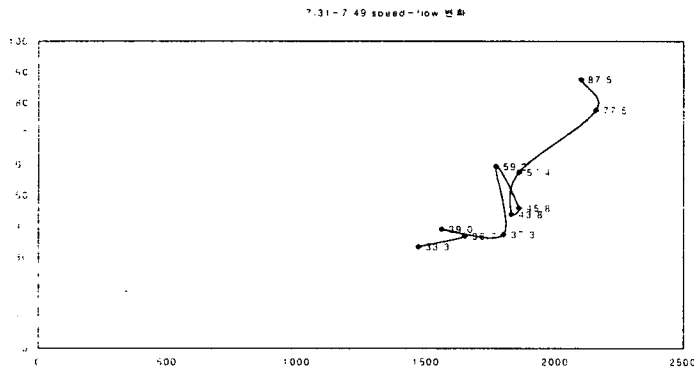
2. 시간변화에 따른 속도-교통량 관계

<그림3-6>은 오전, 오후 첨두시 속도-교통량 자료중에서 2분 평균 자료를 시간에 따라 그 변화과정을 추적해 본 것이다. 차량대기행렬의 증감으로 인하여 2분 평균자료분석에서도 속도-교통량 관계가 매우 복잡하게 변화함을 알 수 있다.



<그림3-6> 시간변화에 따른 2분 평균 속도-교통량 관계

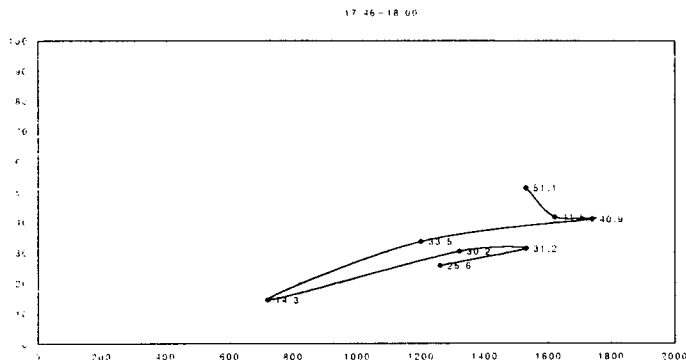
<그림3-7>은 오전 첨두시 불포화상태에서 교통수요가 증가하면서 도로용량상태에 도달해서 최대교통량을 통과시키며 과포화상태로 전이되는 순간 속도-교통량 변화가 매우 급격하게 일어나는 것을 보여주고 있다. 7시 29분에서 약 20분이 지난 후 평균속도는 약 54km/hr가 감소하였고 속도의 감소로 인하여 통과교통량 또한 2100pcph에서 1470pcph로 630pcph가 감소하였다.



조사시간	교통량(대/시)	속도(km/hr)
7:31:00	2100	87.48
7:33:00	2160	77.52
7:35:00	1860	57.36
7:37:00	1830	43.79
7:39:00	1860	45.81
7:41:00	1770	59.22
7:43:00	1800	37.26
7:45:00	1560	38.97
7:47:00	1650	36.71
7:49:00	1470	33.29

<그림3-7> 오전 첨두시 시간에 따른 2분단위 속도-교통량 변화

<그림3-8>은 오후 첨두시 17:44:00-17:54:00의 10분동안 평균속도가 약 50km/hr에서 14km/hr로 변할 때 통과교통량은 1530pcph에서 720pcph로 급격한 감소가 이루어졌다. 그리고 회복과정은 더디게 이루어짐을 관찰할 수 있었다.

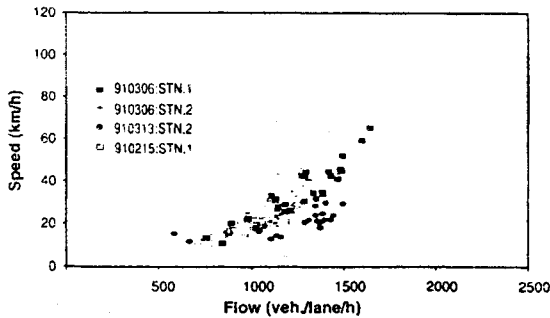


조사시간	교통량(대/시)	속도(km/hr)
17:46:00	1530	51.11
17:48:00	1620	41.49
17:50:00	1740	40.90
17:52:00	1200	33.52
17:54:00	720	14.33
17:56:00	1320	30.21
17:58:00	1530	31.22
18:00:00	1260	25.55

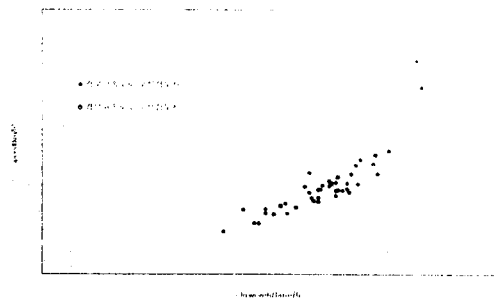
<그림3-8> 오후 첨두시 시간에 따른 2분단위 속도-교통량 변화

3. 기존 연구와의 비교

미국에서 과포화상태 속도-교통량 관계는 Fred. L. Hall 등에 의해 조사된 자료가 1994년 US HCM에 다소 반영되었다. <그림3-9>는 Fred. L. Hall등에 의해 관측조사된 자료이다. 그는 ontario 고속도로 두 개지점을 3일에 걸친 조사를 통해 5분 평균 과포화시 속도-교통량 관계 자료를 얻었다.⁷⁾ 이자료를 이차함수식으로 회귀분석한 결과는 $Speed = 0.0000166 Flow^2 + 0.003 Flow$ 이고 R^2 는 0.936이었다. 이 자료와 비교 분석하기 위하여 경부고속도로에서 조사된 자료를 <그림3-10>과 같이 5분평균내어 나타낼 수 있는데 회귀모형식의 비교를 위해 지수함수식과 함께 이차함수식을 도출해 보았다. 5분평균 속도-교통량 지수함수식은 $Speed = 6.9274 e^{0.0011 \cdot Flow}$ 이고 R^2 는 0.8488이었다. 이차함수식은 $Speed = 0.00001 Flow^2 + 0.0037 Flow$ 이고 R^2 는 0.805이다.

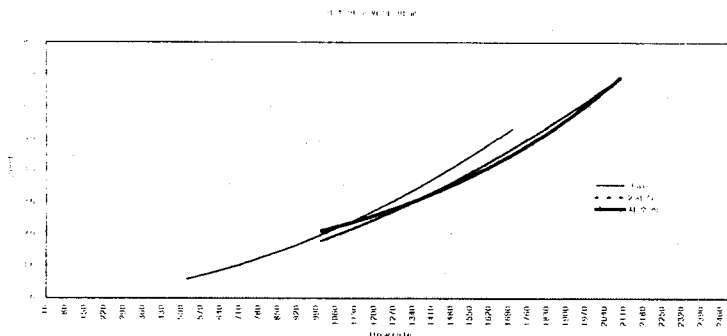


<그림3-9> ontario고속도로 속도-교통량관계



<그림3-10> 경부고속도로 속도-교통량 관계

<그림3-11>은 ontario 고속도로와 경부고속도로의 관측자료를 통한 회귀방정식을 overlap시켜본 것이다. 자료를 비교할 수 있는 구간을 살펴보면 20km/hr-50km/hr 속도에서 경부고속도로구간이 약 60pcph~150pcph의 교통량을 더 많이 사용되는 것을 알 수 있다. 결과를 정리하면 <표3-2>와 같다.



<그림3-10> Ontario 고속도로와 경부고속도로 비교

<표3-2> 회귀분석을 통한 Ontario 고속도로와 경부고속도로 비교

조사 대상지	조사 단위	회귀방정식	R^2	관측된용량 (대/시)	용량시속도 (km/h)	속도에 따른 교통량(대/시)			
						20km/h	30km/h	40km/h	50km/h
Ontario	5분	$Speed = 0.0000166 Flow^2 + 0.003 Flow$	0.936	관측안됨	관측안됨	1011	1257	1465	1648
경부 고속도로	5분	$Speed = 0.00001 Flow^2 + 0.0037 Flow$	0.805	2100	85	1080	1350	1590	1790
		$Speed = 6.9274 e^{0.0011 \cdot Flow}$	0.8488			970	1330	1600	1800

7) Some Observations on Speed-Flow and Flow-Occupancy Relationships Under Congested Conditions, Transportation Research Record, Fred L. Hall, Anna Pushkar, and Yong Shi, 1993

V. 결론 및 추후연구사항

현재까지 과포화상태에서의 속도와 교통량과의 명확한 규명이 이루어지지 않은채 교통상황의 진단이나 운영방법의 개선이 이루어져왔다. 따라서 교통상황의 진단결과나 운영방법의 개선에 의한 효율성을 충분히 기대하기 힘들었던 면이 있다. 본 조사연구는 이러한 문제점들을 해결하고자 하는 취지에서 과포화상태가 자주 발생하는 연속교통류 지역을 조사대상으로 하여 직접 속도와 교통량과의 관계를 규명하고자 하였다.

경부고속도로 조사결과를 통하여 본 논문에서는 다음과 같은 몇가지 결론을 내릴수 있었다. 첫째, 관측된 용량은 유용성 있다고 인정하는 5분평균자료에서 2100pcphpl로서 KHCM의 이상적인 조건하에서의 교통용량 2200pcphpl에는 다소 못미치는 것으로 분석되었다. 중요한 확인 사항은 KHCM을 비롯한 우리나라의 연구에서는 일반적으로 50km/h일때 교통용량이 나타난다고 알려져 있으나 본 경부고속도로 조사결과에 의하면 약 85km/h정도에서 교통용량이 발생하는 것으로 관측되었다. 둘째, 일반적으로 알려져 있던 과포화시의 속도에 따른 통과교통량 증감추이 현상이 본 조사대상구간에서도 확인되었다. 즉 과포화구간에서 대기행렬증가시 급격한 속도-통과교통량의 감소가 나타난 반면에 대기행렬해소시는 속도-통과교통량이 완만하게 증가하며 회복해가는 추세를 보인다. 셋째, 미국의 경우와 본 조사연구결과를 이차함수로 회귀분석을 통해 비교해본 결과 과포화시 한국의 경우 미국보다 동일한 통행속도에서 더 많은 교통량이 처리되는 것으로 확인되었다.

과포화상태의 속도-교통량 관계는 도로의 종류, 기하구조, 교통환경에 따라 다양하게 관측될 수 있다. 그렇기 때문에 추후 다양한 도로 조건에 따른 관측과 분석을 통해 본 조사연구결과를 보완해 나가야 할 것이다. 그리하여 정확한 임계속도와 아울러 이상적인 조건하에서의 용량도 재검토하여 편람화해야 할 것이다.

참고문헌

1. 도로용량편람, 건설교통부,1992.10.
2. 고속도로 유출입 교통행태 분석 및 가감속차로 설계운영 기준연구, 한국도로공사, 1996
3. Special Report 209: Highway Capacity Manual , TRB, 1985
4. Special Report 209: Highway Capacity Manual , TRB, 1994
5. Some Observations on Speed-Flow and Flow-Occupancy Relationship Under Congested Conditions. Transportation Research Record 1398, 1993
6. Special Report 165: Traffic Flow Theory , TRB, 1975