

□ 論 文 □

도시내 다차선도로의 교통류특성 및 모형 연구 - 한남대교 지역을 중심으로 -

Traffic Flow Characteristics and Model on Multi-lane Roads in Urban Areas

김 성 우

((주)우대기술단 교통부)

김 동 녕

(단국대학교 토목공학과 교수)

목 차

I. 서론

- 1. 연구의 목적
- 2. 연구의 범위 및 방법

II. 문헌고찰

- III. 조사방법 및 자료
- IV. 이론적 방법

V. 분석방법

- 1. 자료분석 방법
- 2. 자료의 선형화

VI. 분석결과

- 1. 지점별 · 모형별 추정식의 유용성 검증
- 2. 지점별 · 모형별 회귀분석결과
- 3. 지점별 · 모형별 최대교통량

VII. 결론

ABSTRACT

Traffic flow characteristics is analysed on eight multi-lane roads which are unsignalized in urban areas. Data of traffic flow rates by classification and average speed were gathered every ten minutes interval for twenty-four hours. Machine(NC-90A) was used to acquire the field data.

The major purpose of this study is to build up speed-density models on urban arterial roads. Five different kinds of models were tested. Those models are Greenshields' model, Greenberg's model, modified Greenberg's model, Underwood's model and Drake's model. The modified Greenberg's model fits best at six points and the Greenshield's model fits best at two points out of eight points. The breakpoint(Kb) of modified Greenberg's model is between 10 and 32 pcphpl.

Capacity drawn from speed-volume relationships were appeared to be around 2,000 and 2,200 pcphpl at the Hannam Bridge and the Hannam Overpass and 1,100 and 1,700 pcphpl at Namsan Tunnel(Nol) and the beginning point of Gyeong-Bu Expressway.

I. 서론

1. 연구의 목적

도로의 이용효율을 증대시키려면 도로용량의 올바른 분석을 통한 효과적인 도로의 계획과 설계가 절실히 필요하며 이러한 분석에 기초가 되는 것이 교통류모형이다.

이러한 교통류모형은 도로에서의 교통량과 속도, 밀도의 관계를 수식화한 것으로 과거부터 수십년 동안 정립되어 왔다. 그러나 이러한 모형들은 운전자, 차량, 도로의 조건이 변화함에 따라 많은 변화를 보이고 있기 때문에 각 도로의 교통류특성과 완전히 일치되는 모형을 하나로 단정하는대는 많은 어려움이 있다.

지금까지는 기존의 교통류모형들이 연속류인 고속도로를 대상으로 제시되어 왔으나 본 연구에서는 대상구간을 경부 고속도로 기점부터 한남대교, 한남고가도로, 남산1호터널 입구에 이르는 구간을 대상으로 하여 기존의 교통류모형 중에 신호등 없이 입체처리된 도시내 다차선도로에서의 교통특성을 반영할 수 있는 모형을 제시하고자 한다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 연구에서 논의할 대상지점은 경부고속도로 기점, 한남대교, 한남고가도로, 남산1호터널 입구에 이르는 양방향 8개지점으로 본 구간은 도심과 연결되는 시가지도로로 생각되기 쉬우나 신호등, 횡단보도 등의 교통을 단절시키는 시설이 없음을 고려할 때 단속류가 아닌 연속류로 간주함이 합리적인 것이다.

본 연구 대상지역의 8개지점의 교통량 및 속도를 측정하여 밀도자료를 산출하였다. 측정된 자료를 바탕으로 하여 회귀분석을 수행하여 속

도-밀도 관계곡선을 찾아내어 여러학자들이 주장한 교통류모형 중에서 대상 지점에 적합한 교통류모형을 선정 한 후에 선정된 속도-교통량 모형을 통하여 각 지점들의 최대교통량(Q_m)을 구해 용량분석을 하고자 한다.

본 연구에서 사용될 자료는 교통류의 3요소인 교통량, 속도, 밀도로서 과거에는 이런 요소들을 동시에 측정하기가 매우 어려웠으나, 근래에 교통량과 속도를 동시에 측정할 수 있는 교통측정기(NC-90A)가 개발되어 본 연구에 최대한 활용하였다.

측정시설치는 경부고속도로시점, 한남대교, 한남고가도로, 남산1호터널 입구의 양방향 1개 차선씩 8개지점에 설치하여 10분단위로 24시간을 측정하였다.

또한 기존의 교통류모형들을 이용하여 회귀분석을 수행하여 속도와 밀도의 관계식을 유도하여 대상구간의 교통류특성을 잘 반영할 수 있는 모형을 선정하였다.

회귀분석하여 얻어낸 지점모형과 현장모형의 속도-밀도, 속도-교통량 곡선을 비교하여 적합성(fitting)을 검토한 후에 선택된 교통량-속도-밀도관계 중에 속도-교통량 곡선을 이용하여 최대교통량(Q_m)을 구하였다.

II. 문헌고찰

미국의 HCM(Highway Capacity Manual)¹⁾에서는 실제 도로상에서 운전자나 차량, 도로 등의 환경조건이 변하기 때문에 이상적인 조건하에서 용량에 도달한 교통량을 관찰한다는 것은 어려운 일이며, 교통량, 속도, 밀도 간의 관계는 연속류의 용량추정 및 용량하에서의 운행상태를 추정하는데 이용된다고 한다.

이때 용량이라고 하는 것은 속도-교통량, 교

통량-밀도곡선상의 첨두점을 최대교통량으로 정의하고 있다. 그러나 대부분의 용량상태 부근에서 명확한 범위가 관찰되지 않기 때문에 정확하게 규정하기가 매우 어렵지만 많은 연구자들은 이와 같은 문제점을 해결하고 이들의 관계를 설명하는 분석적인 모형을 발전시켜 왔으며 이들 모형으로 부터 도로용량 또는 각 서비스수준에 상응하는 실용용량을 추정할 수 있다.

Greenshields⁽¹⁾는 1934년 용량연구에서 속도와 밀도의 관계를 단순화 한 직선관계로 가정하였다. 이 모형은 수학적으로 간단하고 많은 경우 관측된 자료에 잘 부합되는 경향이 있었으나, 현실적인 K_j 의 값을 나타낼 수 없고 직선이라는 가정이 관측자료와 일치하지 않는 불합리한 면이 있어 모든 영역에 걸쳐 고르게 적합한 것은 아니었다.

Greenberg⁽²⁾의 대수모형은 혼잡한 교통류에는 잘 맞아 현실적인 K_j 값을 얻을 수 있으나, 밀도가 낮은 교통류에서는 log함수의 특성상 속도가 무한대로 커지기 때문에 관측치와 잘 맞지 않는 경향이 있었다.

Underwood⁽³⁾는 지수모형을 제안하였는데 이 모형은 낮은 밀도에 잘 맞으나 낮은 속도에서의 추정값이 현장 측정값과 맞지 않는 경향이 있다. 이 모형 역시 지수함수의 특성상 속도가 0으로 수렴할 때 밀도가 무한대로 증가하기 때문에 속도가 0인 상태를 잘 나타내지 못하였다.

Drake, Schofer, May⁽⁴⁾는 S자형태로 나타나는 Drake(Bell-Curve)모형을 주장했는데 이 모형은 자유속도(U_f)와 한계밀도(K_m)을 이용하였으며 속도가 0으로 수렴할 때 밀도가 무한대로 증가한다는 면에서 Underwood 모형과 유사성이 있었다.

또한 기존에는 고속도로에서 교통류모형을 정립해 왔었으나, Dick⁽⁵⁾은 도시에서의 속도-밀도모형을 제시하였다. 이 모형은 밀도 0에서 어

느정도 낮은 밀도까지는 일정한 속도값을 갖는 것으로서 그후에 Dick은 이 모형을 Green berg 모형의 가정과 연결시켜 통합하였다.

이런 주장과 관련하여 Hurdle⁽⁶⁾은 TRB보고서에서 다음과 같이 주장하였다. 속도를 제한하고 몇몇 차량들은 평균속도보다 매우 빠르게 운행하도록 되어 있는 미국 북부지역의 경우에는 속도-교통량 곡선상의 높은 속도(upper branch)에서 직선화(flat)부분이 발생한다고 하였으며 이것은 교통량이 용량에 도달하기 이전에는 속도의 변화가 크지 않으며 용량부근에서 급격한 속도감소 경향을 보인다고 하였다.

이후에 본 연구에서 언급할 수정Greenberg 모형은 한마디로 기존의 단일(Single-Regime)모형의 결점을 보완하여 2단(Two-Regime)모형으로 제안한 것이라고 할 수 있다. Edie⁽⁷⁾는 1961년에 구체적으로 2단(Two-Regime)모형을 최초로 제안하였으며, 낮은 밀도구간에서 Under wood 모형을, 높은 밀도구간에서는 Green berg 모형을 적용 하였다. 이후에도 계속하여 복합(Multi-Regime)모형이 제안되었으며, 이와 같은 복합모형은 속도-밀도의 모든 영역에 적합하지 못하는 기존의 단일모형의 결점을 보완해 주었다.

1992년 한국건설기술연구원에서 나온 '도로용량편람 연구조사 제3단계 최종보고서'를 살펴보면 우리나라에서도 우리 현실에 맞는 적합한 모형을 정립하려는 연구가 시도되었다. 위의 연구에서는 우리나라 고속도로의 속도-밀도 관계특성은 불연속적인 경향이 있음을 주장하고 분석모형 중에 Edie모형을 기준으로 하여 1차선 도로용량이 2,200pcphpl 라는 사실을 주장하기도 하였다. 이와 같이 우리나라 고속도로에서는 복합모형이 적합하나, 복합모형의 경우 용량(최대 교통량)값이 한개가 아닌 두개로 나타나므로 불연속적인 곡선보다는 Greenshields와 같이 연속곡선으로 설명하는 것이 실제로 적용할 때

편리할 것이라고 주장하기도 하였다.

또한 서울시정개발연구원에서는 1994년에 88올림픽 도시고속도로를 대상으로 하여 '간선도로 교통류 관리방안연구⁶⁾' 보고서를 펴냈으며 이 보고서에서는 도시고속도로인 88올림픽도로에 교통량-속도-밀도 관계를 적용하여 한남대교 남단구간에서의 최대교통량을 도출하였으며 88올림픽 도로의 교통량-속도-밀도 관계곡선의 특징을 살펴보면 비정체류와 정체류간에 불연속적인 경향이 심하게 나타남을 알 수 있다.

Springer-Verlag가 지은 '교통류이론의 개론' 16)에서는 밀도를 차두 간격의 역수로서 일반도로에서 K_j 의 값은 대략 150pcphpl이라 밝히고 있으며 또한 실제현장의 속도와 밀도관계에서는 임계속도 값을 알기가 어려워 확실히 증명하기는 어려우나 속도-밀도관계가 불연속적일 경우 대략 임계속도 값은 불연속점 근처에 있을 것이라 주장했다.

III. 조사방법 및 조사자료

1. 조사방법

측정기에서 자료를 얻기 위해서 노면에 설치하기 전에 LP(Laptop Programmer) Software를 사용하여 Laptop이나 PC에서 측정할 시간대

를 셋업하고, 교통량측정기를 가지고 교통량을 측정할 대상지점의 차선중앙에 부착하면 셋업된 시간부터 자동적으로 On-Line되어 측정이 시작된다.

셋업된 시간이 완료되면 자료가 입력된 측정기를 현장의 노면에서 분리하여 Cable을 가지고 Laptop이나 PC에 연결하여 HDM(Hi-Star Data Management) Software로 자료를 전송하게 하여 전송된 자료는 HDM화면에서 보게 된다. 그후에 결과를 출력하여 EXCEL 프로그램에서 자료를 정리하고 회귀분석을 수행하였다.

교통량측정기는 각 Period당(본 연구는 10분으로 셋업)의 교통량(Q)(대형, 소형), 평균속도(U), 차두시간(H), 차종의 구분 및 노면온도 등을 측정해 주며 아울러 차선수, 차선폭, 종단경사 등의 기하구조를 조사하였다.

또한 측정기는 속도 12가지, 차량의 길이 6가지로 분류해서 측정하도록 셋업하였다.

본 연구의 대상지점의 기하구조를 살펴보면 아래의 <표3-1>와 같다. 한남대교와 한남고가도로는 가변차선을 적용하고 있으며 한남고가도로는 오전에는 북향(주방향)에 가변차선을 두어 북향차량이 3개 차선을 이용 하며, 반대로 오후에는 남향(주방향)에 가변차선을 두어 남향차량이 3개 차선을 이용하도록 유도하고 있다. 한남대교는 7차선중 중앙차선이 가변차선으로 이용되어 오전에는 북향차량, 오후에

<표 3-1> 조사지점의 기하구조현황 및 교통측정기 설치차선

방 향 지 점	남 향			북 향			총차 선수
	편도차선수	설치차선	경사(%)	편도차선수	설치차선	경사(%)	
경부고속도로	2	1차선	평지	2	1차선	평지	4
한 남 대 교	3(4)*	1(2)차선**	평지	3(4)*	1(2)차선**	평지	7
한남고가도로	2(3)*	2(3)차선**	3.0	1(3)*	2(3)차선**	3.0	4
남산터널입구	2	1차선	-4.0	2	1차선	4.0	4

주) *()는 가변차선 실행시의 한방향 총차선수임.

** ()는 가변차선 실행시 변경되는 측정기 설치차선임.

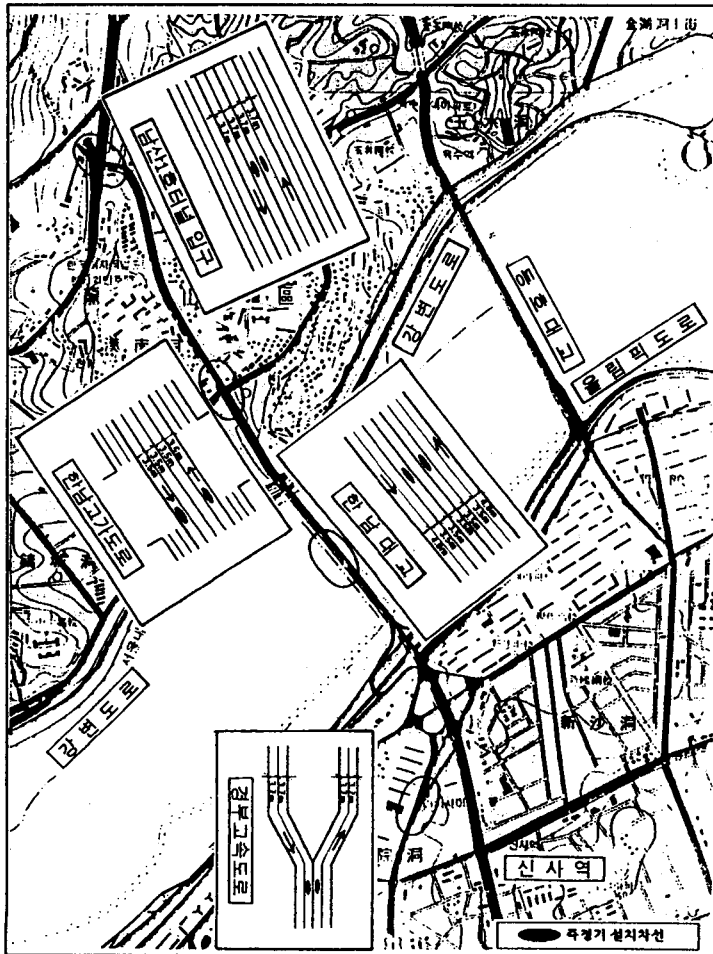
는 남향차량이 이용하도록 되어 있다.

또한 한남고가도로는 고가도로 특성상 상하향 종단곡선이 동시에 존재하고 있으며, 남산 1호터널과 경부고속도로는 종단곡선과 평면곡선이 혼합되어 있는 상태로서 운전자의 시거확보에 어려움이 많은 지점이다. 특히 남산1호터널의 경우에는 경사가 5.0% 이상이 되어 설계속도가 다른 지점에 비해 낮은 편이다.

다음의 <그림3-1>은 본 연구 대상지역의 공간적 범위 및 측정기 설치지점과 대상지점의 기하구조를 나타내고 있다.

또한 측정기는 대부분 1차선에 설치하였으며 한남고가도로와 한남대교는 가변차선을 제외한 1차선에 설치하였다. 이와 같이 측정기를 1차선에 설치한 이유는 다음과 같다.

측정기의 부족으로 인하여 측정기를 동시에 8개지점의 모든 차선에 설치할 수 없었기 때문에 가장 표준이 되는 1차선을 선택하게 되었다. 실제로 1차선은 소형차량이 많이 이용하는 차선으로서 대형차혼입율이 적어 다른 차선에 비하여 비교적 안정적인 교통류를 나타낼 것이라 판단하였다.



<그림 3-1> 측정기 설치차선 및 설치지점

다음의 <표3-2>는 인력조사에 의한 오전첨두·비첨두·오후첨두 6시간 동안 차종별 구성비와 측정기에 의한 대형차비율을 수록한 것이다.

차종별 구성비를 살펴보면 대형트럭의 경우 경부고속도로 남북향이 9.8%, 5.1%로서 고속도로의 특성상 다른 지점보다 화물차의 이용율이 높게 나타나며, 한남대교 남북향은 2.0%, 2.4%로서 약간 높은 편이다. 또한 한남고가도로와 남산1호터널 남북향은 대형차량의 진입규제로 인하여 다른 두지점에 비하여 대형차혼입율이 훨씬 적게 나타나고 있다.

승용차환산계수(PCE: Passenger Car Equivalent)의 경우 경부고속도로 남북향은 각각 1.5, 한남대교 남북향은 각각 1.4, 한남고가도로는 각각 2.0, 남산1호터널은 각각 2.0, 3.0을 적용하여 각 지점의 pcu를 구하였다. 또한 위에서 논했듯이 대형차혼입율이 실제보다 더 크게 측정됨으로 인하여 승용차로 환산하는 과정에서 우리나라 KCM의 이상적인 조건하의 1차선 도로용량인 2,200pcphpl(passenger car per hour per lane)을 초과하는 과다한 교통량이 발생하기도 하였다.

<표 3-2> 지점별·차종별 구성비

< 단위 : % >

차 종		인 력 조 사				측 정 기		합 계
		소 형	대 형			소 형	대 형	
			버 스	트 릭	소 계			
경부고속도로	남 향	88.5	1.7	9.8	11.5	93.9	6.1	100.0
	북 향	94.2	0.7	5.1	5.8	93.5	6.5	100.0
한 남 대 교	남 향	94.6	3.4	2.0	5.4	91.6	8.4	100.0
	북 향	94.3	3.3	2.4	5.7	90.6	9.4	100.0
한남고가도로	남 향	96.8	2.0	1.2	3.2	92.8	7.2	100.0
	북 향	97.2	1.6	1.2	2.8	92.7	7.3	100.0
남산1호터널	남 향	96.8	2.1	1.0	3.1	91.5	8.5	100.0
	북 향	97.1	1.9	1.0	2.9	92.7	7.3	100.0
평 균		94.9	2.1	3.0	5.1	92.4	7.3	100.0

본 연구에서 북향 4개지점의 교통량을 조사하기 위해 8월 13일 PM8:00시에 교통량측정기를 대상지점들의 차선에 설치하여 15일 AM7:00시에 회수하였고, 남향 4개지점의 교통량 조사는 8월 15일 PM8:00시에 교통량측정기를 설치하여 17일 AM7:00시에 회수하였다. 이

조사기간 동안의 실질적인 교통량은 14일 AM0:00~PM12:00, 16일 AM0:00~PM12:00로 2일 24시간씩 측정된 것을 자료로 사용하였다. 조사일은 주말과 공휴일을 피하여 평일을 선택하였다.

<표 3-3> 자료 조사기간 및 시간

종 류	기 간	조 사 기 간	조 사 시 간
교통량 및 속도		8월 14일, 8월 16일(24시간 씩)	00:00-24:00
기 하 구 조		8월 15일	11:00-17:00

IV. 이론적 배경

연속교통류의 교통분석 및 설계할 때에는 그 대상지점의 교통류특성을 나타내는 변수들의 상관관계를 이해할 필요가 있으며, 이들 상관관계에서 최대교통량(Q_m), 즉 용량을 찾아내어 분석할 수도 있다. 교통류의 3변수 즉 속도(U), 밀도(K), 교통량(Q)의 상관관계를 구체적인 함수관계로 나타낸 것을 거시적 교통류모형이라 부르며, 이들간의 기본적인 관계는 다음과 같다.

$$Q(\text{vph}) = U(\text{kph}) \cdot K(\text{vpk}) \quad \langle \text{식 4-1} \rangle$$

여기서, Q=평균교통류율(vph)

U=공간평균속도(kph)

K=평균밀도(vpk)

이와 같은 변수에 관련된 다른 부호의 정의

는 다음과 같다.

Q_m=최대교통류율

U_f=자유속도

U_m=임계속도(최대교통량시의 속도)

K_j=한계밀도

K_m=임계밀도(최대교통량시의 밀도)

초기의 연구자들은 밀도(고속도로상의 차량들), 속도 사이에 밀접한 상호작용이 존재함을 알고 속도와 밀도 사이의 관계를 상세히 연구하여 그들의 관계에 대한 형태를 찾아가 하였다.

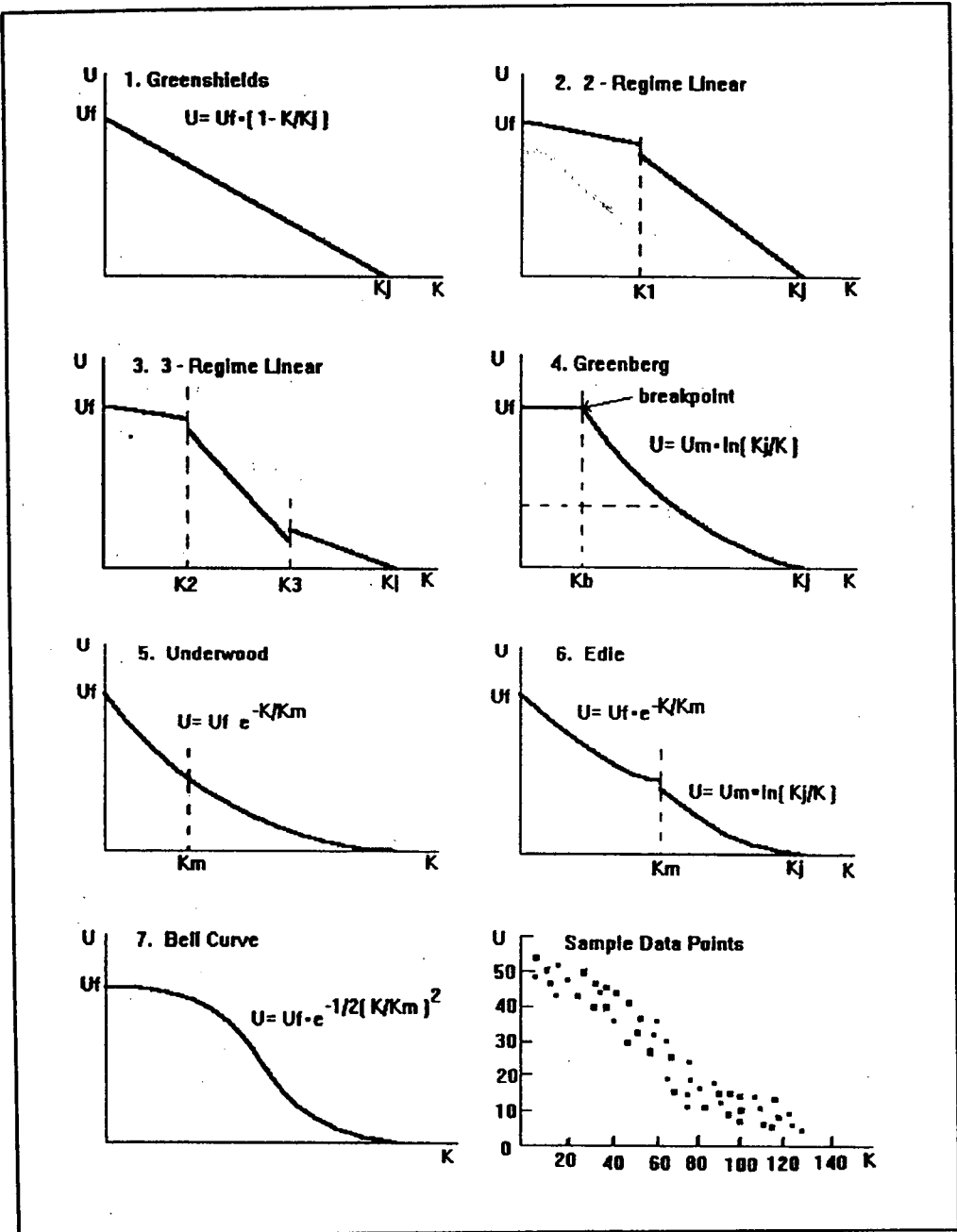
그에 따라 연구 자들에 의해 직선모형(Green shields), 대수모형(Greenberg), 지수모형(Underwood), Drake(Bell-Curve)모형 등이 포함된 단일(Single-Regime)모형과 2단(Two-Regime)모형, 3단(Three-Regime)모형 등이 포함된 복합(Multi-Regime)모형이 개발되어 제시되었다.

〈표 4-1〉 교통류 모형의 유형

구 분	모 형 식	매개 변수	임계 밀도	임계 속도	용량 (대/시)	특 징
Grenshields 모형	$U = U_f \cdot (1 - \frac{K}{K_j})$	U_f, K_j	$K_j/2$	$U_f/2$	$K_j \cdot U_f/4$	식의 형태가 단순함 자유속도 및 한계밀도가 쉽게 결정됨 실제 속도-밀도관계는 비선형이나 이 식은 완전한 선형으로 나타남
Grenshields 모형	$U = U_m \cdot \ln(\frac{K_j}{K})$	U_m, K_j	K_j/e	U_m	$U_m \cdot K_j/e$	속도-밀도관계를 대수형태로 가정 높은 밀도에서 적합
Underwood 모형	$U = U_f \cdot e^{-\frac{K}{K_m}}$	U_f, K_m	K_m	U_f/e	$K_m \cdot U_f/e$	속도-밀도관계를 지수형태로 가정 낮은 밀도에서 적합
Drake Bell-curve 모형	$U = U_f \cdot e^{-\frac{1}{2}(\frac{K}{K_m})^2}$	U_f, K_m	K_m	U_f/\sqrt{e}	$K_m \cdot U_f/\sqrt{e}$	속도-밀도관계를 지수형태로 나타냄 속도-밀도관계곡선은 S형태임 Underwood모형과 비슷한 형식임
Edie 모형	$U = U_f \cdot e^{-\frac{K}{K_m}}$ $U = U_m \cdot \ln(\frac{K_j}{K})$	U_f, K_m U_m, K_j	K_m $K_j/2$	U_f/e U_m	$K_m \cdot U_f/e$ $K_j \cdot U_m/e$	낮은 밀도에서 Underwood 모형, 높은 밀도에서 Green-berg모형을 사용하여 적합성을 높임 2개의 분리된식으로 속도-밀도곡선도 불연속

주) 참고문헌 : 도로용량편람 연구조사 제3단계 최종보고서, 한국건설기술연구원 1992.10

아래의 <그림4-1>은 여러모형들의 속도-밀도관계곡선을 나타낸 것이다.



<그림 4-1> 속도-밀도 관계곡선의 유형

Edie는 자유속도 조건하에서 관찰이 어렵고 모형을 토대로 하는 추종이론의 제한이 있기 때문에 처음으로 2단(Two-Regime)모형을 제안하였다. 이 모형은 Greenberg모형과 Underwood 모형을 복합적으로 사용하여 속도- 밀도관계를 나타냈으며, Greenberg모형은 밀도가 높은 경우, Underwood모형은 밀도가 낮은 경우에 사용하였다.

실제로 복합모형은 그래프상의 밀도(K) 중에 어느 값을 결절점(Break point, K_b)로 선택할 것

인가에 대한 어려움이 있다. 그러나 복합모형 발전으로 인하여 단일모형의 불완전한 요소들이 많이 해소되어 모형정립에 상당한 발전이 있었으나 아직까지도 단일·복합모형은 각각의 장단을 가지고 있다.

미국의 노스웨스턴 대학의 연구진들은 고속도로 자료를 가지고 4개 종류의 복합모형에 대한 식과 결절점(Break Point)을 < 표4-2 >와 같이 제시하였다.

<표 4-2> 복합모형들의 속도-밀도 관계식 및 결절점(Break point)

복합모형	자유구간 (Free Flow Regime)	변이구간 (Transitional Flow)	혼잡구간 (Congested Flow Regime)
Edie 모형	$U=54.9 \cdot e^{-\frac{K}{103.9}}$ ($K \leq 50$)	--	$U=26.8 \cdot \ln(\frac{162.5}{K})$ ($K \geq 50$)
Two regime 모형	$U=60.9 - 0.515K$ ($K \leq 65$)	--	$U=40 - 0.265K$ ($K \geq 65$)
수정 Greenberg 모형	$U=48$ ($K \leq 35^*$)	--	$U=32^{**} \cdot \ln(\frac{145.5}{K})^{***}$ ($K \geq 35$)
Three regime 모형	$U=50 - 0.098K$ ($K \leq 40$)	$U=81.4 - 0.913K$ ($40 \leq K \leq 65$)	$U=40.0 - 0.265K$ ($K \geq 65$)

주) 참고문헌 : Traffic Flow Fundamentals, Adolf D.MAY
단위는 K=vpm, U=mph임. (* K=35vpm은 22vpk, ** $U_m=32\text{mph}$ 은 51.2kph,
*** $K_j=145.5\text{vpm}$ 은 90.9vpk)

속도-밀도모형이 일단 결정되면 그것으로부터 밀도-교통량모형을 얻을 수 있다. 모든 실제적인 속도-교통량모형은 밀도가 0일때 U는 자유속도 U_f 가 된다. 따라서 속도-교통량 곡선상의 최고점은 U가 U_f 이고 K가 0인 점이 된다. Greensheids가 제안한 것과 같이 속도-밀도곡선이 직선이면 속도-교통량 곡선은 포물선이 된다.

Greensheids모형에 해당되는 속도-교통량 곡선식은 다음과 같이 얻는다.

$$Q=U \cdot K=U \cdot K_j \cdot (1 - \frac{U}{U_f})$$

$$=K_j \cdot (U - \frac{U^2}{U_f})$$

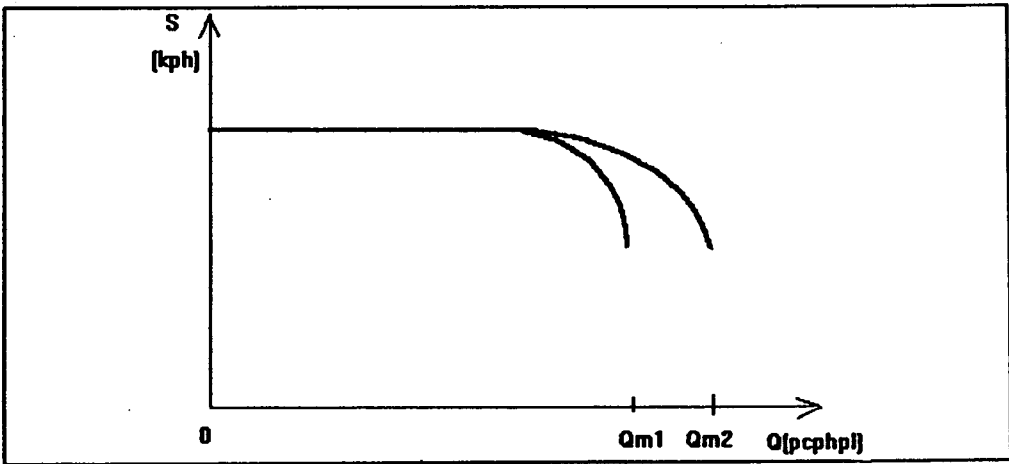
< 식 4-2 >

위의 속도-밀도관계에서 구해낸 속도-교통량 곡선은 설계분석에 필요한 서비스수준을 구하는데 사용되는 자료로서 최대교통량을 찾아내어 그 도로의 서비스수준을 판단할 수 있게 해준다.

연구 초기에 Walker와 같은 사람은 최대교통량(Q_m)과 초기점(U=0) 사이는 곡선으로 보고 Q_m을 지나는 점부터는 속도와 교통량과의 관계

를 직선형으로 가정하였다.

또한 II. 문헌고찰에서 언급했듯이 Hurdle과 Datta는 다음의 <그림4-2>와 같이 속도-교통량 관계곡선을 제안하였으며 이와 같은 주장은 높은 속도(낮은 밀도)일때 어느 구간값 까지는 속도가 일정하다는 수정Greenberg 모형의 이론과도 유사한 면을 보이고 있다.



<그림 4-2> Hurdle과 Datta의 속도-교통량 관계곡선

V. 자료 분석방법

1. 자료분석 방법

교통분야에서 여러 변수들, 즉 밀도, 속도, 교통량은 서로 관련되어 있고, 인과관계를 형성하기 때문에 모집단들의 관련성을 통계적인 수치로 추정하기가 쉽지 않다.

그러나 하나의 종속변수 y(속도)와 하나의 독립변수 x(밀도)가 선형 관계라고 가정했을 때 이들 관계를 분석가능한 수치적인 함수관계로 표시되며 이것을 함수관계로 표시하도록 만드는 분석기법을 회귀분석이라하며, 이것을 이용하여 속도와 밀도 사이의 관계를 유도하게

된다. 따라서 속도(y)와 밀도(x)의 상관정도와 밀도(x)를 이용하여 속도(y)의 미지값을 예측할 수 있으며 기본식은 다음과 같다.

$$y = ax + b \quad \langle \text{식 5-1} \rangle$$

y = 종속변수(속도)

x = 독립변수(밀도)

a, b = 상수

종속변수 y를 독립변수 x에 관련시키는 가장 단순한 방법은 그래프 상에서 두 변수의 선형 관계(Linear relationship)를 갖는다는 가정을 이용하는 방법으로 본 연구에서는 구해낸 회귀분석식의 유용성을 t분포로 검정하므로 x계수(a)가 어떤 특정한 값을 갖는다는 것을 밝혀서 두

변수의 선형관계가 존재함을 검증하게 된다.

결정계수(R^2)는 회귀모형이 주어진 자료에 얼마나 적합한가, 즉 독립변수(밀도)들이 종속변수(속도)에 공헌하는 정도를 포괄적으로 나타내는 것으로 밀도에 의해서 속도의 예측오차가 얼마나 감소했는가를 나타내는 값으로 상관계수(r)의 제곱과 같다.

따라서 결정계수의 값이 높다는 것은 밀도가 속도에 많은 영향을 주고 있음을 의미하며 회귀식이 속도의 변동을 잘 설명하고 있음을 의미한다.

본 연구에서도 두변수의 관계를 선형관계로 가정하고 그 관련정도를 나타내는 결정계수(R^2)를 구하여 값이 가장 큰 것을 적합한 식으로 선정하였다.

2. 모형의 선형화

1) Greenshields 모형

$$U = U_f \cdot \left(1 - \frac{K}{K_i}\right)$$

$$U = U_f - \frac{U_f}{K_i} K$$

여기서 U_f 를 U 의 절편으로, U_f/K_i 를 K 의 상수로 보면 <식5-2>와 같이 선형식으로 가정할 수 있다.

$$U = b + aK \quad \langle \text{식 5-2} \rangle$$

2) Greenberg 모형

$$U = U_m \cdot \ln\left(\frac{K_i}{K}\right)$$

위식의 $\ln(K_i/K)$ 을 \ln 으로 풀면 다음과 같은 식이 된다.

$$U = U_m \cdot (\ln K_i - \ln K) \quad \langle \text{식 5-3} \rangle$$

$$U = U_m \cdot \ln K_i - U_m \cdot \ln K \quad \langle \text{식 5-4} \rangle$$

여기서 $U_m \cdot \ln K_i$ 를 U 의 절편으로, U_m 를 $\ln K$ 의 상수로 보면 <식5-5>와 같이 선형식으로 가정할 수 있다.

$$U = b + a \cdot \ln K \quad \langle \text{식 5-5} \rangle$$

3) Underwood 모형

$$U = U_f \cdot e^{-\frac{K}{K_m}}$$

위의 식의 양변에 \ln 을 취하면 <식5-6>과 같은 식이 된다.

$$\ln U = \ln U_f - \frac{K}{K_m} \quad \langle \text{식 5-6} \rangle$$

$$\ln U = \ln U_f - \frac{1}{K_m} \cdot K \quad \langle \text{식 5-7} \rangle$$

여기서 $\ln U_f$ 를 $\ln U$ 의 절편으로서 $1/K_m$ 을 K 의 상수로 보면 <식5-8>와 같이 선형식으로 가정할 수 있으며, 회귀분석시에 종속변수 y 를 $\ln U$ 로 치환하여 분석한다.

$$\ln U = b + a \cdot K \quad \langle \text{식 5-8} \rangle$$

4) Drake(Bell-Curve) 모형

$$U = U_f \cdot e^{-\frac{1}{2} - \left(\frac{K}{K_m}\right)^2}$$

위의 식의 양변에 \ln 을 취하면 <식5-9>과 같은 식이 된다.

$$\ln U = \ln U_f - \frac{1}{2} - \left(\frac{K}{K_m}\right)^2 \quad \langle \text{식 5-9} \rangle$$

$$\ln U = \ln U_f - \left(\frac{1}{2K_m^2}\right) \cdot K^2 \quad \langle \text{식 5-10} \rangle$$

여기서 $\ln U_f$ 를 $\ln U$ 의 절편으로, $1/2K_m^2$ 을 K 의 상수로 보면 <식5-11>와 같이 선형식으로 가정할 수 있다. 또한 Underwood식과 마찬가지로 종속 변수 y 를 $\ln U$ 로, 독립변수 x 를 K^2 으로 치환하여 회귀분석하였다.

$$\ln U = b + a \cdot K^2 \quad \langle \text{식 5-11} \rangle$$

VI. 분석 결과

1. 지점별 · 모형별 추정식의 유용성 검증

앞의 5장 분석방법에서 밝혔듯이 결정계수 값이 높다는 것은 밀도가 속도에 많은 영향을 주고 있음을 의미하며, 또한 회귀식이 속도의 변동을 잘 설명하고 있음을 의미하기 때문에 결정계수(R^2)가 높은 모형을 선택하게 될 것이다.

그러나 단순회귀모형에서는 결정계수(R^2)에

의한 모형선택에 앞서 모형전체가 유용한가를 평가해야 하는데 그 과정으로 첫째 σ^2 에 대한 추정치인 S^2 을 가지고 모형들의 선택여부를 판단하고, 둘째 t 검정을 이용하여 회귀식의 기울기 및 절편이 0이 아닌지를 검정하게 된다.

<표6-1>에서 보듯이 선택된 추정식의 분산추정치가 다른 추정식의 분산추정치보다 더 작은 것을 알 수 있으며, 이것은 모형들 중에 편차값이 최소인 모형이 선택되며, 결정계수(R^2) 값이 증가함을 증명하는 것으로 판단된다. 또한 Greenberg모형의 경우 수정후의 분산추정치가 수정전의 분산추정치보다 1.5~2.0배 감소한 것을 볼 수 있다.

<표6-2>은 지점별 · 모형별 t 통계량을 나타낸 것으로 이 통계량들은 결정계수(R^2)와 같이 추정식을 선정할 때에 기준으로 이용하는 것이 아니라 다만 지점별 · 모형별 추정식들의 K (밀도)계수와 U (속도)절편이 유용한지를 판단하는 것이다.

<표6-2>의 지점별 · 모형별 t 통계량을 보면 $t(0.05,157)$ 일 때의 1.645로서 모든 지점의 t 값이 1.645보다 매우 크므로 지점별 · 모형별 추정식들의 K (밀도)계수와 U (속도)절편이 유용하다고 판단할 수 있다.

<표 6-1> 속도-밀도 회귀식에 대한 분산(σ^2)의 추정치(S^2)

<단위 : kph^2 >

모형 \ 지점	경부고속도로		한남대교		한남고가도로		남산1호터널	
	남향	북향	남향	북향	남향	북향	남향	북향
Greenshields	21.74	16.60	6.65	7.65	9.44	.40	18.61	8.02
Greenberg	14.24	13.47	8.80	8.64	8.45	10.40	13.24	13.14
수정Greenberg	13.50	10.36	4.85	4.72	4.86	3.83	10.75	5.24
Underwood	10.41	7.05	9.17	7.26	8.55	9.25	9.48	9.14
Drake(Bell-Curve)	18.12	14.74	5.02	6.35	6.59	4.14	20.49	6.83

주) 표시는 각 지점에서 가장 적합한 모형을 나타냄.

〈표 6-2〉 지점별 · 모형별 t통계량

모 형		지 점		경부고속도로		한 남 대 교		한남고가도로		남산1호터널	
		남향	북향	남향	북향	남향	북향	남향**	북향		
Y절편 t(0.05,157) =1.645	Greenshields	31.5	47.7	114.9	100.5	72.6	122.2	40.0	101.2		
	Greenberg	38.5	40.8	50.9	50.9	55.3	43.4	45.5	39.0		
	수정Greenberg*	34.6	42.5	59.0	76.5	62.8	73.1	43.4	64.4		
	Underwood	137.7	275.5	230.9	294.1	195.9	226.8	159.9	247.1		
	Drake(Bell-Curve)	85.0	140.3	453.7	354.4	280.9	549.3	81.3	344.2		
X계수 t(0.05,157) =1.645	Greenshields	14.3	18.9	42.7	36.9	30.7	44.1	17.9	35.6		
	Greenberg	26.1	25.0	31.2	32.1	34.8	25.3	28.0	19.3		
	수정Greenberg*	25.4	30.7	45.1	55.1	49.7	56.7	31.3	47.3		
	Underwood	50.3	94.5	79.0	100.5	69.1	76.0	58.8	80.2		
	Drake(Bell-Curve)	27.5	44.3	141.1	110.4	89.4	170.7	26.8	107.2		

주) * 절편과 x계수의 경우 자유도(n-k-1)가 30개이상이면 $t(0.05,30 \leq \infty) = 1.645$ 임.

** 남산1호터널 남향의 경우 불합리한 Data가 측정되어 157개 관찰수 중에 15개를 제외시켰다. 따라서 이 지점의 관찰수는 142개로서 회귀분석함. $t(0.05,140) = 1.645$

2. 지점별 · 모형별 회귀분석 결과

각 구간별 상관계수, 표준편차, U의 모형식은 위에서 언급한 각 종속변수와 독립변수들의 회귀분석을 통하여 얻는다. 또한 분석결과 중에 구해진 U의 절편과 K의 계수를 가지고 각각 모형들의 특성 (U_m , U_i , K_m , K_i)들을 계산해 낸다. 4개 모형들에 대한 결정계수 및 U의 회귀식은 〈표6-3, 4, 5, 6, 7〉에 나타나 있다.

〈표6-3〉의 Greenshields모형을 살펴보면 경부고속도로, 한남대교, 한남고가도로 양방향, 남산1호터널 북향에서는 결정계수 값들의 범위가 56~93%로서 지점에 따라 다르게 나타나고 있다. 또한 U_i (자유속도)는 4개지점 양방향에서 72~84kph로 비교적 고르게 나타나는 것을 볼 때 안정적인 것으로 관찰되며, K_i (혼잡밀도)의 경우는 123~150pcplpk로서 심한 변동을 보이고 있다.

〈표6-4〉의 Greenberg 모형을 살펴보면 경부고속도로, 한남대교, 한남고가도로 양방향, 남산

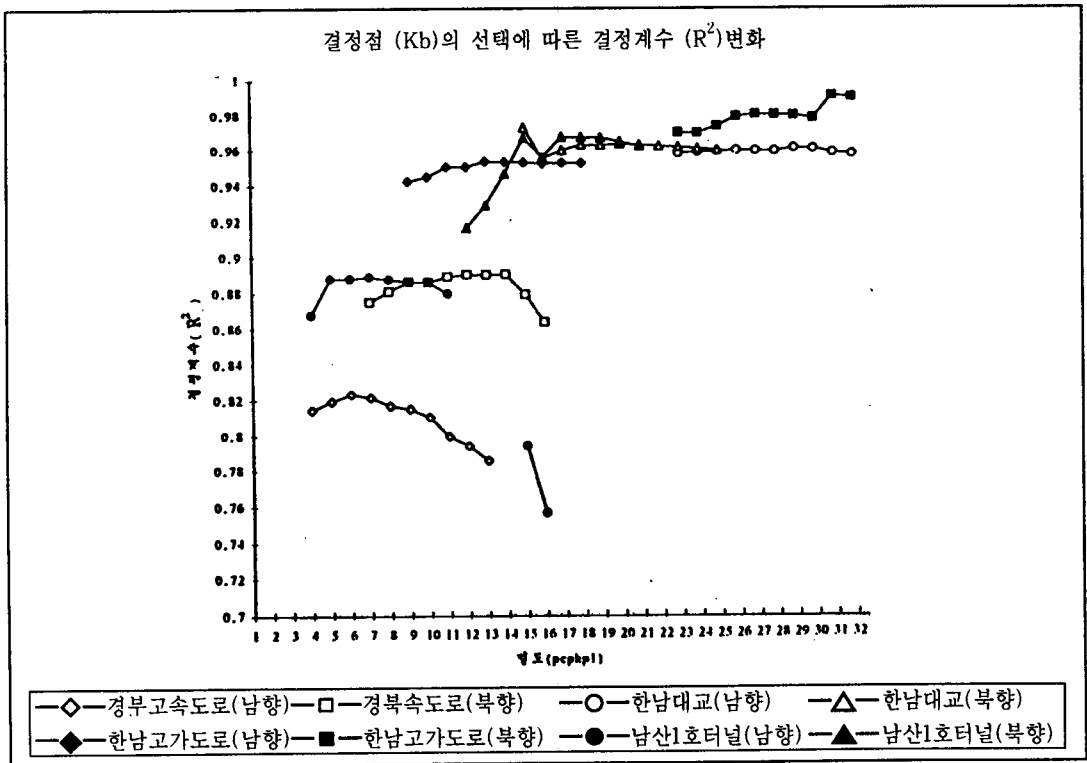
1호터널 남향에서는 결정계수 값들의 범위가 70~89%로서 다른 모형에 비해 낮게 나타났으며 남산1호터널 북향은 70%로 나타났다. 이 모형의 결정계수 값들은 수정Greenberg 모형보다 10% 정도 낮게 나타났다. U_m 는 4개지점 양방향에서 19~30kph로서 편차가 크고 불안정한 것으로 나타났으며 또한 값들이 전체적으로 다른 지점들보다 낮게 나타났다. K_i 는 120~428pcplpk로서 비정상적인 값들이 나타났으며 이것을 볼 때 이 모형은 현장의 상태를 잘 반영하지 못하는 것으로 판단된다. 따라서 Greenberg모형은 수정이 필요하며 다음의 〈표6-5〉는 수정한 Greenberg모형에 대한 회귀분석결과를 나타낸 것이다.

〈표6-5〉의 수정Greenberg 모형을 살펴보면 모든 지점에서 결정계수 값들의 범위가 82~98%로서 높게 나타났다. 또한 U_m 는 4개지점 양방향에서 32~41kph로 나타나 비교적 고르게 나타나며, K_i 는 64~157pcplpk로서 편차가 심한

것을 볼 때 불안정한 것으로 나타났다. 특히 결절점 (breakpoint, K_b)의 선정범위가 7~29pcplpk, 이 때의 속도도 72~84kph로 나타났으며, 이것은 4장 이론적 배경의 <표4-2>에서 언급했듯이 수정Greenberg모형의 자유구간(Free Flow Regime) 값이 $K \leq 21.9pcpk$ 이고, $U=76.8kph$ 라고 제시한 것을 참고해 볼 때 본 조사 구간에서는 결절점 범위값 및 그 구간에서의 속도값이 비교적 유사한 것으로 나타났다.

수정Greenberg 모형은 직선구간과 곡선구간으로 구분된다. 경계지점의 밀도(K)를 결절점 (breakpoint, K_b)이라고 하여 각지점에서 결절점 (K_b)를 어떤 값으로 할 것인가에 따라 결정계수 (R^2)가 변하게 되며, <그림6-1>은 결절점 (K_b)의 변화에 따른 결정계수(R^2)의 변화를 그림으로 나타낸 것이다. 각각의 경우에 회귀분석을 수

행하여 결정계수(R^2)가 가장 클 때의 밀도를 최적의 결절점(K_b)으로 판단하고 선택하였다. 그러나 일정한 범위안에서는 K 가 변하더라도 결정계수가 그다지 민감하지 않음을 알 수 있다. Greenberg모형의 특성상 밀도가 0으로 증가하면 속도가 무한대로 커지므로 낮은 밀도에서는 적합성이 떨어지는 경향이 있어 결절점(K_b) 이전, 즉 낮은 밀도에서는 속도-밀도 관계 추정식을 수평선(낮은 밀도의 속도값들의 평균치)으로 일정한 값을 갖는다고 간주하였다. 결절점 값은 경부고속도로의 남북향과 남산1호터널 남향 및 한남고가도로 남북향과 같이 지체상태가 오래 지속되는 곳에서는 대체로 낮은 밀도(6~14 pcplpk)에서 나타나고 한남대교 남북향과 한남고가도로 북향, 남산1호터널 북향은 높은 밀도 (17~29 pcplpk)에서 결절점이 나타난다.



<그림 6-1> 수정Greenberg 모형의 결절점(breakpoint, K_b)선택에 따른 결정계수(R^2) 변화도

<표 6-3> Greenshields' Model의 회귀분석결과

지 점		관찰수 n	결정계수 R ²	표준오차 S	U의 절편 U _f	K의 계수 U _f /K _j	혼잡밀도 K _j	임계밀도 K _m =K _j /2	임계속도 U _m =U _f /2	U의 회귀식 U = U _f - (U _f /K _j) · K
경부고속도로	남향	159	0.56	21.74	71.98	0.59	122.76	61.38	35.99	U = 71.98 - (71.98/122.76) · K
	북향	159	0.69	16.60	80.02	0.59	135.37	67.69	40.01	U = 80.02 - (80.02/135.37) · K
한 남 대 교	남향	159	0.92	6.65	84.37	0.56	149.76	74.88	42.18	U = 84.37 - (84.37/149.76) · K
	북향	159	0.90	7.65	83.24	0.56	149.31	74.65	41.62	U = 83.24 - (83.24/149.31) · K
한남고가도로	남향	159	0.86	9.44	77.37	0.56	138.38	69.19	38.68	U = 77.37 - (77.37/138.38) · K
	북향	159	0.93	6.40	82.89	0.55	151.28	75.64	41.45	U = 82.89 - (82.89/151.28) · K
남산1호터널	남향	159	0.67	18.61	74.30	0.60	123.17	61.58	37.15	U = 74.30 - (74.30/123.17) · K
	북향	159	0.89	8.02	79.11	0.53	149.72	74.86	39.56	U = 79.11 - (79.11/149.72) · K

<표 6-4> Greenberg's Model의 회귀분석결과

지 점		관찰수 n	결정계수 R ²	표준오차 S	U의 절편 U _f lnK _j	K의 계수 U _m	lnK _j	혼잡밀도 K _j	임계밀도 K _m =K _j /e	U의 회귀식 U = U _m · ln(K _j /K)
경부고속도로	남향	159	0.81	14.24	143.36	29.93	4.79	120.31	44.26	U = 29.93 · ln(120.31/K)
	북향	159	0.80	13.47	144.74	28.14	5.14	171.23	62.99	U = 28.14 · ln(171.23/K)
한 남 대 교	남향	159	0.86	8.80	154.80	27.81	5.57	261.46	96.19	U = 27.81 · ln(261.46/K)
	북향	159	0.87	8.64	162.28	30.32	5.35	211.20	77.70	U = 30.32 · ln(211.20/K)
한남고가도로	남향	159	0.89	8.45	137.38	25.08	5.48	239.08	87.95	U = 25.08 · ln(239.08/K)
	북향	159	0.80	10.40	144.41	25.41	5.68	294.09	108.19	U = 25.41 · ln(294.09/K)
남산1호터널	남향	159	0.83	13.24	125.95	25.37	4.97	143.34	52.73	U = 25.37 · ln(143.34/K)
	북향	159	0.70	13.14	117.62	19.14	6.06	428.07	157.48	U = 19.14 · ln(428.07/K)

<표 6-5> 수정Greenberg's Model의 회귀분석결과

지 점		관찰수 n	결절점 K _b	결정계수 R ²	표준오차 S	U의 절편 U _m · lnK _j	K의 계수 U _m	lnK _j	혼잡밀도 K _j	임계밀도 K _m =K _j /e	U의 회귀식 U = U _m · ln(K _j /K)
경부고속도로	남향	141	6	0.82	13.50	160.98	38.68	4.16	64.17	23.61	U = 38.68 · ln(64.17/K)
	북향	119	14	0.89	10.36	180.41	37.81	4.77	118.07	43.44	U = 37.81 · ln(118.07/K)
한 남 대 교	남향	87	29	0.96	4.85	205.45	40.67	5.05	156.29	57.50	U = 40.67 · ln(156.29/K)
	북향	120	20	0.96	4.72	195.58	38.91	5.03	152.33	56.04	U = 38.91 · ln(152.33/K)
한남고가도로	남향	124	13	0.95	4.86	174.15	34.45	5.06	156.92	57.73	U = 34.45 · ln(156.92/K)
	북향	70	27	0.98	3.83	199.74	39.52	5.05	156.59	57.61	U = 39.52 · ln(156.59/K)
남산1호터널	남향	125	7	0.89	10.75	152.48	32.62	4.67	107.21	39.44	U = 32.62 · ln(107.21/K)
	북향	79	17	0.97	5.24	179.98	35.86	5.02	151.17	55.61	U = 35.86 · ln(151.17/K)

<표 6-6> Underwood's Model의 회귀분석결과

지 점	관찰수 n	결정계수 R ²	표준오차 S	U의 절편 lnU _f	자유속도 1/K _m	K의 계수 K _m	임계밀도 U _m =U _f /e	임계속도 U _m =U _f /e	U의 회귀식 U=U _f · e ^{K/K_m}	
경부고속도로	남향	159	0.94	10.41	4.55	94.73	0.03	33.36	34.85	U=94.73 · e ^{K/33.36}
	북향	159	0.98	7.05	4.72	112.59	0.03	33.05	41.42	U=112.59 · e ^{K/33.05}
한 남 대 교	남향	159	0.98	9.17	5.02	150.24	0.03	32.40	55.27	U=150.24 · e ^{K/32.40}
	북향	159	0.98	7.26	4.97	143.60	0.03	32.28	52.83	U=143.60 · e ^{K/32.28}
한남고가도로	남향	159	0.97	8.55	4.88	131.13	0.03	34.03	48.24	U=131.13 · e ^{K/34.03}
	북향	159	0.97	9.25	4.92	137.04	0.03	33.11	50.41	U=137.04 · e ^{K/33.11}
남산1호터널	남향	159	0.96	9.48	4.52	91.47	0.03	33.10	33.65	U=91.47 · e ^{K/33.10}
	북향	159	0.98	9.14	4.70	110.38	0.03	34.46	40.61	U=110.38 · e ^{K/34.46}

<표 6-7> Drake(Bell-Curve)'s Model의 회귀분석결과

지 점	관찰수 n	결정계수 R ²	표준오차 S	U의 절편 lnU _f	자유속도 U _f	K의 계수 1/(2K _m ²)	임계밀도 K _m	임계속도 U _m =U _f /e	U의 회귀식 U=U _f · e ^{($\frac{1}{2}(\frac{K}{K_m})^2$)}	
경부고속도로	남향	159	0.83	18.12	3.98	53.29	0.00	54.23	32.32	U=53.29 · e ^{($\frac{1}{2}(\frac{K}{54.23})^2$)}
	북향	159	0.93	14.74	4.22	67.79	0.00	54.23	41.12	U=67.79 · e ^{($\frac{1}{2}(\frac{K}{54.23})^2$)}
한 남 대 교	남향	159	0.99	5.02	4.36	78.56	0.00	52.70	47.65	U=78.56 · e ^{($\frac{1}{2}(\frac{K}{52.70})^2$)}
	북향	159	0.99	6.35	4.34	76.63	0.00	52.70	46.48	U=76.63 · e ^{($\frac{1}{2}(\frac{K}{52.70})^2$)}
한남고가도로	남향	159	0.98	6.59	4.24	69.73	0.00	54.23	42.30	U=69.73 · e ^{($\frac{1}{2}(\frac{K}{54.23})^2$)}
	북향	159	0.99	4.14	4.35	77.49	0.00	52.70	47.00	U=77.49 · e ^{($\frac{1}{2}(\frac{K}{52.70})^2$)}
남산1호터널	남향	159	0.82	20.49	4.03	56.13	0.00	54.23	34.04	U=56.13 · e ^{($\frac{1}{2}(\frac{K}{54.23})^2$)}
	북향	159	0.99	6.83	4.30	73.58	0.00	54.23	44.63	U=73.58 · e ^{($\frac{1}{2}(\frac{K}{54.23})^2$)}

<표6-6>의 Underwood모형을 살펴보면 모든 지점에서 결정계수 값들이 94~99% 까지로서 매우 높게 나타난다. 또한 U_f는 4개지점 양방향에서 91~150 kph로 상당히 높은 편이고 변동이 크기 때문에 불안정하게 나타나며, K_m의 범위는 32~34pcplpk로서 안정적으로 나타났다. U_m의 범위는 34~55 kph로서 다소 변동이 있는 편이다.

<표6-7>의 Drake(Bell-Curve)모형을 살펴보면 경부고속도로, 한남대교, 한남고가도로, 남산1호터널 남북향에서는 결정계수 값들이 82~99%까지로서 비교적 높게 나타난다. 또한 U_f는 4

개지점 양방향에서 53~79kph로서 낮은 편이며 그 편차도 크기 때문에 불안정한 편이다. K_m의 범위는 53~54pcplpk로서 그 변동이 적고 매우 안정적으로 나타났다. U_m의 범위는 32~48 kph로서 범위가 다소 넓은 편이다.

각 선택된 모형들의 결정계수들을 살펴보면 <표6-9>와 같다. 경부고속도로 남북향은 각각 94%, 98%(Underwood), 한남대교 남북향은 각각 99%씩(Drake)이고, 한남고가도로는 남북향이 98% 및 99%(Drake)이다. 또한 남산1호터널 남향은 96%(Underwood), 북향은 99%(Drake)로 나타났다.

종합적으로 보면 결정계수가 가장 큰 모형을 선정할 때 Drake 모형이 5개 지점, Underwood 모형이 3개 지점 선정되었다. 그 다음으로는 수정 Greenberg 모형이 크게 나타났고 Greenberg 모형, Greenshields 모형은 잘 맞지 않는 것으로 나타났다.

8개 지점중 지체가 매우 심하여 교통류의 상태가 매우 불안정하며, 용량상태의 교통량이 측정되지 못한 경부고속도로 남·북향과 남산1호 터널 남향은 모든 모형에서 결정계수가 낮게 나타났다. Drake 모형이 선정되지 않은 3개 지점도 이 지점들과 일치한다는 점에 유의할 필요가 있다. 3개의 지점은 모두 Underwood모형이 다른 모형에 비해 가장 적합한 것으로 나타났다.

Drake모형은 교통량 자료가 잘 분포된 지점 즉, 저밀도, 중밀도, 고밀도 상태가 골고루 관측되는 지점에서 가장 잘 맞는 모형으로 평가되며 U_f 값이 다소 낮은 감이 있다는 점이 지적된다.

Underwood모형은 모든 지점의 결정계수가 골고루 높게 나타나고 있지만 U_f 값이 지나치게 크게 나타난다는 점과 저밀도 부근에서 밀도의 증가에 따라 속도가 급속하게 떨어지는 곡선형태를 보이고 있어서 일반적인 상식과 일치하지 않는다는 문제점을 안고 있다. 이 모형은 최대 교통량을 과소평가하는 경향이 있다. 그러나 지체가 심한 지역에서는 다른 모형보다는 적합한 것으로 나타났다.

수정Greenberg모형은 지체가 심한 3개 지점을 제외한 5개 지점에서 상당히 높은 결정계수를 보여주고 있으며 K_f 값이 151~157pcphpl로서 매우 안정되어 있고 U_m 값도 고른 편이다. 이 모형은 최대교통량 부근에서는 다른 모형보다 우수하다고 평가된다. 그러나 이 모형은 결절점 (K_b)의 위치를 알아야 한다는 불편함과 K 가 0

에서 결절점까지는 속도가 균일하다는 전제에도 다소 무리가 있다는 점이 지적된다.

Greenberg모형은 K_f 값의 범위가 지나치게 유동적이며 밀도가 0부근일 때 속도가 너무 크게 된다는 문제점이 있으며 전체적으로 적합도가 낮은 모형이다.

Greenshield모형은 혼잡이 심한 3개 지점을 제외한 지점에서는 결정계수가 85%이상으로서 모형의 단순성에 비해서는 설명력이 있는 편이다. 그러나 이 모형은 최대 교통량을 과도하게 예측하는 것으로 나타났다.

교통류모형은 지점에 따라 계수가 달라지겠지만 본 연구범위와 유사한 지점에 적용할 수 있는 대표적인 모형을 제시함으로써 이용할 수 있도록 할 필요가 있다고 생각된다. 모형은 용량상태의 교통상태가 관측되는 지점과 용량상태가 관측되지 않은 지점으로 구분하고 각 계수는 각 지점의 평균값을 이용하였다.

〈용량상태의 자료가 관측될 수 있는 지점 : Drake 모형〉

$$U = 75.2 \cdot e^{-\frac{1}{33.3}U}$$

〈용량상태의 자료가 관측되지 않는 지점 : Underwood 모형〉

$$U = 99.6 \cdot e^{-\frac{K}{33.3}}$$

다음의 〈표6-9〉는 8개지점의 지점별·모형별 속도-밀도 추정식으로 개개 추정식의 계수들은 각지점들의 교통류특성들을 나타내고 있다. 또한 이와 같은 교통류모형들을 통하여 현장에서 실측을 하지 않고도 교통량, 속도, 밀도 등의 교통류요소들을 구할 수가 있다.

<표 6-8> 지점별 · 모형별 결정계수(R²)

지 점		경부고속도로		한 남 대 교		한남고가도로		남산1호터널	
모 형	회 귀 식	남 향	북 향	남 향	북 향	남 향	북 향	남 향	북 향
Greenshields	$U=U_f-(U_f/K_f) \cdot K$	0.56	0.69	0.92	0.90	0.86	0.93	0.67	0.89
Greenberg	$U=U_m \cdot (K_f/K)$	0.81	0.80	0.86	0.87	0.89	0.80	0.83	0.70
수정 Greenberg	$U=U_{ave}$ $U=U_m \cdot (K_f/K)$	0.82	0.89	0.96	0.96	0.95	0.58	0.89	0.97
Underwood	$U=U_f \cdot e^{-K/K_m}$	0.98	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.98
Drake (Bell-Curve)	$U=U_f \cdot e^{-1/2 \cdot (K/K_m)^2}$	0.83	0.93	0.99	0.99	0.98	0.99	0.82	0.99
최 대 값		0.94	0.98	0.99	0.99	0.98	0.99	0.96	0.99

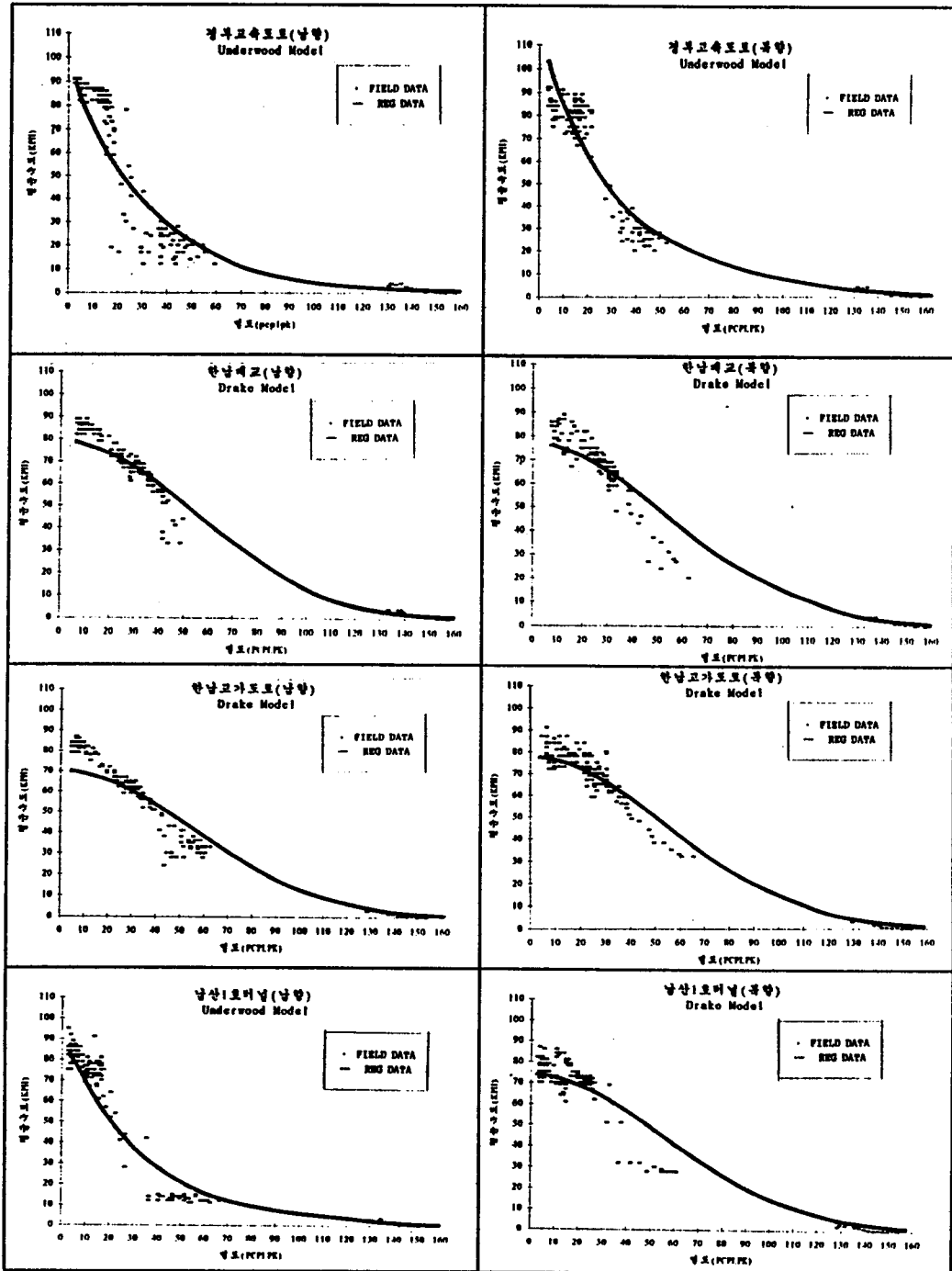
주) 여기서 은 선택된 모형의 R²값을 표시한 것임.

<표 6-9> 지점별 · 모형별 속도-밀도 추정식

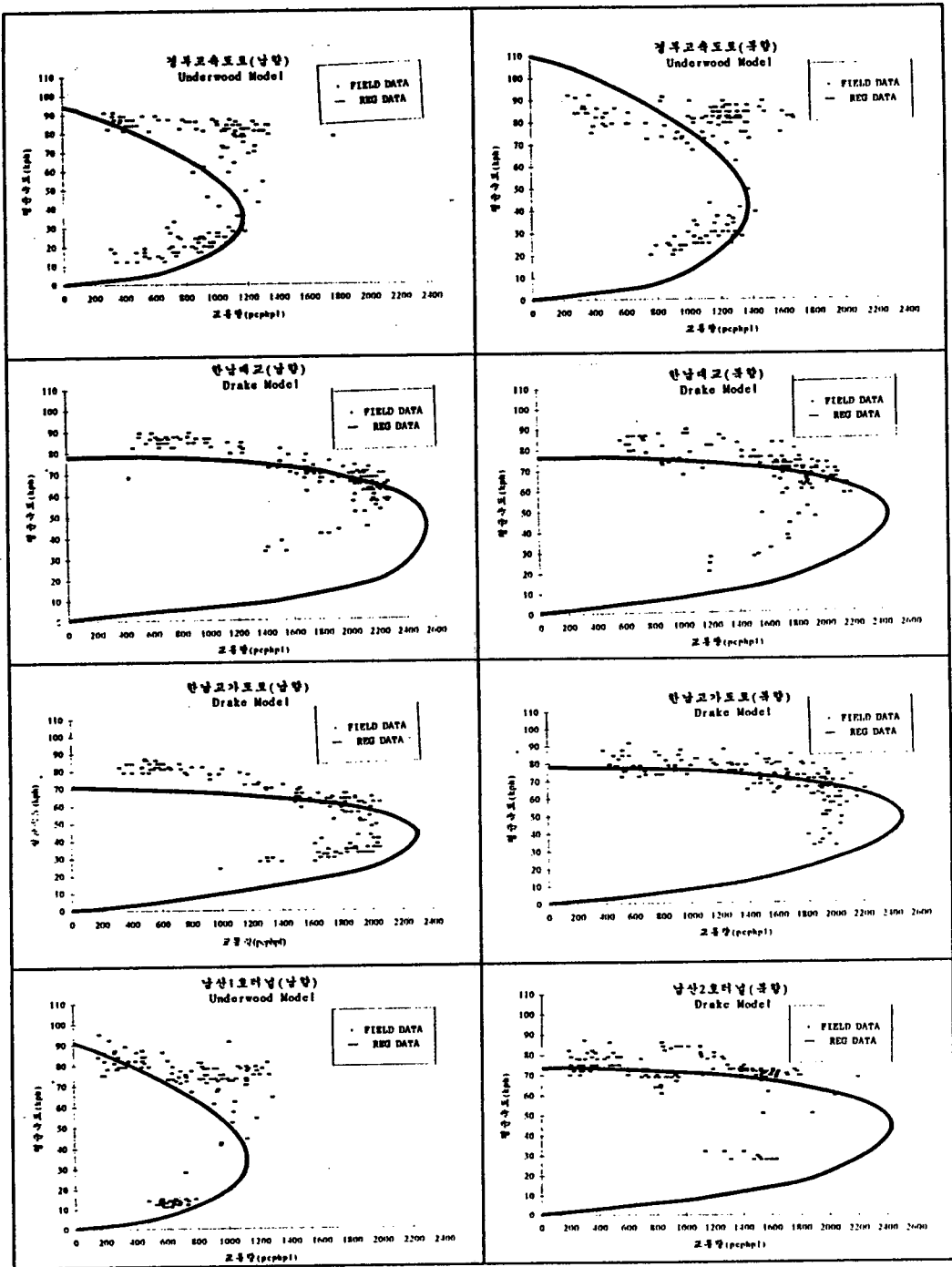
모형식		Greenshields	Greenberg	수정Greenberg	Underwood	Drake (Bell-Curve)
지 점		$U=U_f-(\frac{U_f}{K_f}) \cdot K$	$U=U_m \cdot \ln(\frac{K_f}{K})$	$U=U_{ave}$ $U=U_m \cdot \ln(\frac{K_f}{K})^{**}$	$U=U_f \cdot e^{-\frac{K}{K_m}}$	$U=U_f \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot (\frac{K}{K_m})^2}$
경부 고속 도로	남 향	$U=72.0-\frac{72.0}{122.8}K$	$U=29.9 \cdot \ln(\frac{120.3}{K})$	$U=86, K_b=6$ $U=38.7 \cdot \ln(\frac{64.2}{K})$	$U=94.7 \cdot e^{-\frac{K}{34.4}}$	$U=53.3 \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot (\frac{K}{54.2})^2}$
	북 향	$U=80.0-\frac{80.0}{135.4}K$	$U=28.1 \cdot \ln(\frac{171.2}{K})$	$U=82, K_b=14$ $U=38.7 \cdot \ln(\frac{118.1}{K})$	$U=112.6 \cdot e^{-\frac{K}{30}}$	$U=67.8 \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot (\frac{K}{54.2})^2}$
한남 대교	남 향	$U=84.4-\frac{84.4}{149.8}K$	$U=27.8 \cdot \ln(\frac{261.5}{K})$	$U=78, K_b=29$ $U=40.7 \cdot \ln(\frac{156.3}{K})$	$U=150.2 \cdot e^{-\frac{K}{32.3}}$	$U=78.6 \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot (\frac{K}{52.7})^2}$
	북 향	$U=83.2-\frac{83.2}{149.3}K$	$U=30.3 \cdot \ln(\frac{211.2}{K})$	$U=80, K_b=20$ $U=38.9 \cdot \ln(\frac{152.3}{K})$	$U=143.6 \cdot e^{-\frac{K}{43}}$	$U=76.6 \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot (\frac{K}{52.7})^2}$
한남 고가 도로	남 향	$U=77.4-\frac{77.4}{138.4}K$	$U=25.1 \cdot \ln(\frac{239.1}{K})$	$U=82, K_b=13$ $U=34.3 \cdot \ln(\frac{156.9}{K})$	$U=131.1 \cdot e^{-\frac{K}{34.0}}$	$U=69.7 \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot (\frac{K}{54.2})^2}$
	북 향	$U=82.9-\frac{82.9}{138.4}K$	$U=25.4 \cdot \ln(\frac{294.1}{K})$	$U=76, K_b=27$ $U=39.5 \cdot \ln(\frac{156.6}{K})$	$U=137.0 \cdot e^{-\frac{K}{31}}$	$U=77.5 \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot (\frac{K}{52.7})^2}$
남산 1 호 터널	남 향	$U=74.3-\frac{74.3}{123.2}K$	$U=25.4 \cdot \ln(\frac{143.3}{K})$	$U=83, K_b=7$ $U=32.6 \cdot \ln(\frac{107.2}{K})$	$U=91.5 \cdot e^{-\frac{K}{31}}$	$U=56.1 \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot (\frac{K}{54.2})^2}$
	북 향	$U=79.1-\frac{79.1}{149.7}K$	$U=19.4 \cdot \ln(\frac{428.1}{K})$	$U=75, K_b=17$ $U=35.9 \cdot \ln(\frac{151.2}{K})$	$U=110.4 \cdot e^{-\frac{K}{34.5}}$	$U=73.6 \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot (\frac{K}{54.2})^2}$

주) *는 결절점(breakpoint, K_b) 이전의 낮은 밀도에서의 속도들의 평균값임.

**는 결절점(breakpoint, K_b) 이후의 높은 밀도에서 적용되는 추정식임.



< 그림 6-2 > 지점별 속도-밀도 모형비교



〈그림 6-3〉 지점별 속도-교통량 모형비교

모 형 식		현장자료 최 대 치	Greenshields	Greenberg*	수 정 Greenberg	Underwood	Drake (Bell-Curve)
경부고속 도 로	남 향	1,329	2,210	1,324	913	1,158	1,728
	북향	1,408	2,708	1,770	1,640	1,366	2,214
한 남 대 교	남 향	2,270	3,160	2,674	2,340	1,760	2,444
	북 향	2,185	3,107	2,354	2,178	1,705	2,392
한남고가 도 로	남 향	2,039	2,678	2,200	1,985	1,638	2,268
	북 향	2,108	3,129	2,748	2,275	1,650	2,476
남산 1호 터 널	남 향	1,280	2,291	1,338	1,284	1,112	1,842
	북 향	2,182	2,996	3,055	1,996	1,400	2,417

주) 여기서 은 선택된 모형의 Q_m 값을 표시한 것임
 *는 위에서도 밝혔듯이 회귀분석결과 비정상적인 특성값들이 도출되므로
 최대교통량 분석에서 제외시켰음.

3. 지점별 · 모형별 최대교통량 분석

〈표6-10〉은 현장자료와 모형의 속도-교통량 곡선의 최대교통량(Q_m)을 비교해 놓은 것으로 경부고속도로 남북향의 실측 최대교통량은 1,329pcphpl, 1,408pcphpl, 한남대교 남북향은 2,270pcphpl, 2,185pcphpl이고 한남고가도로 남북향은 2,039pcphpl, 2,108pcphpl로 또한 남산1호터널 남북향은 1,280pcphpl, 2,182pcphpl로 분석되었다.

한남대교는 양방향 최대교통량은 우리나라 HCM의 차선당 도로용량인 2,200pcphpl를 초과 또는 근접하는 것으로 나타났다. 이와 같이 현상이 이상적인 조건이 아님에도 불구하고 교통량이 2,200 pcphpl를 초과 또는 근접함으로써 한남대교는 상당히 높은 용량을 유지하는 것으로 나타났다으며 한남고가도로 또한 2,039pcphpl, 2,208pcphpl로서 높은 용량을 나타내고 있다.

그러나 한남대교는 높은 용량과 속도를 유지하고 있기 때문에 양호한 서비스수준을 제공하고 있는 것처럼 보이나 현장상황을 살펴보면 한남대교 남북단에서의 합류, 위빙 등으로 인한

병목현상으로 정체가 발생하여 진출입이 어려운 상태를 보이고 있다.

경부고속도로 남북향은 1,329pcphpl, 1,408pcphpl로서 도로용량인 2,200pcphpl에 약 60%정도 밖에 도달하지 못하고 있는 것을 알 수 있다. 이와 같이 경부고속도로의 도로용량이 상당히 미달되는 이유는 북향의 경우 고속도로에서 한남대교 남단I·C로 유입하려는 차량들이 신사동에서 한남대교로 유입하는 본류와 합류되어 위빙이 일어나 정체가 발생하여 그 충격파가 경부고속도로시점에서 후방까지 전파되기 때문이며, 남향의 경우는 오전첨두시 경부고속도로에서 반포, 서초, 양재I·C에서 유출입하는 차량들의 증가로 인하여 병목현상과 위빙현상이 발생하여 북향과 마찬가지로 충격파가 경부고속도로 시점까지 전파되기 때문이라 판단된다.

남산1호터널은 최대교통량이 남향은 1,280pcphpl로서 경부고속도로와 마찬가지로 HCM 도로용량의 58%정도 밖에 안되며 북향은 2,182pcphpl로서 매우 양호하게 나타났다. 남향의 경우 오전첨두시에 한남고가도로 상에서 가변차선제를 실시함으로 인하여 남향의 차선이 2차선에서 1차선으로 줄어들어 용량이 현저하

게 감소하여 지체가 발생하며 고가도로로 진입하지 못한 차량은 한남사거리를 통과하여 한남대교로 진입하려고 한다. 이와 같은 이유들로 인해 한남사거리의 교통량이 증가함으로 인하여 용량이 부족하게 되어 필연적으로 지체가 발생하여 남산1호터널 고가도로 전방내지는 위까지 대기행렬이 뻗게 되어 터널에서 유출하는 차량들이 제대로 소통을 하지 못하게 된다. 북향의 경우는 오전첨두시를 제외하면 높은 속도를 유지하며 운행되기 때문에 용량에 도달하지 못하고 있는 것으로 판단되며 남산1호터널의 측정자료를 살펴보면 오전 첨두시 외에는 65~75kph의 속도로 운행하는 것을 알 수 있다.

각 모형에서 예측된 최대 교통량을 살펴보면 Drake 모형은 5~10% 정도의 범위에서 과다 예측되는 경향이 있고 Underwood 모형은 10~15% 정도 과소 예측되는 현상을 보인다. 수정 Greenberg 모형은 최대교통량예측에서는 Drake 모형보다 더 잘 예측하는 것으로 보인다. Greenberg 모형과 Greenshields 모형은 전반적으로 최대교통량을 지나치게 크게 예측하는 경향이 있으므로 주의하여 이용하여야 할 것이다.

〈표 6-10〉 속도-교통량 추정식에 의한 지점별·모형별 최대교통량(Q_m) 〈단위 : pcphpl〉

VI. 결론

1. 교통류모형 즉 Greenshields모형, Greenberg 모형, 수정Greenberg 모형, Underwood모형, Drake(Bell-curve)모형 중에서 대상지역에 가장 적합한 모형은 Drake 모형과 Underwood 모형으로 나타났고 8개 지점 중 Drake 모형은 혼잡시간대와 정상류 상태의 자료가 관측된 5개 지점에서, Underwood 모형은 거의 종일 혼잡하여 용량부근의 자료가 관측되지 않는 3개 지점에

서 최적합모형으로 분석되었다. 선정된 두 모형은 다음과 같다.

Drake 모형

$$U = 75.2 \cdot e^{-\frac{1}{2}(\frac{U}{K_i})^2}$$

Underwood 모형

$$U = 99.6 \cdot e^{-\frac{U}{K_i}}$$

2. Drake모형은 U_f 값이 다소 낮으며 저밀도에서 속도가 낮게 추정된다. Underwood모형은 저밀도 부근에서 밀도의 증가에 따라 속도가 급속하게 떨어져 현실과 일치하지 않는다는 문제점을 안고 있다. 이 모형은 지체가 심한 지역에서는 다른 모형보다는 적합한 것으로 나타났다.

3. 수정Greenberg모형은 지체가 심한 3개 지점을 제외한 5개 지점에서 상당히 높은 결정계수를 보여주고 있으며 K_f 값이 151~157pcphpl로서 매우 안정되어 있고 U_m 값도 고른 편이다. 이 모형은 결정점(K_b)의 위치를 알아야 하기 때문에 불편하다. Greenberg모형은 K_f 값의 범위가 지나치게 유동적이며 밀도가 0부근일 때 속도가 너무 크게 된다는 문제점이 있으며 전체적으로 적합도가 낮은 모형이다. Greenshield모형은 혼잡이 심한 3개 지점을 제외한 지점에서는 결정계수가 85%이상으로서 모형의 단순성에 비해서는 설명력이 있는 편이다.

4. 자유속도(U_f)는 큰 것부터 Underwood모형, Greenshields모형, Drake모형 순으로 나타났으며 한계밀도(K_i)는 큰 것부터 Greenberg모형, 수정Greenberg 모형, Greenshields모형순으로 나타났다. 임계밀도(K_m)는 대체로 Underwood모형이 Drake모형보다는 더 크게 추정되었다.

5. 수정Greenberg모형에서 교통밀도가 결정되는 경계지점(K_b)는 지점에 따라 다소 차이를 보이고 있으나 대체로 6~29대/km/차선에 속하고 있는 것으로 나타났고 심한 지체가 오랫동안 지속되는 지점일수록 결정점의 밀도가 작게 나타났다.

6. 회귀식에 의해서 구해낸 8개 지점의 용량을 분석해 보면 큰 순으로 Greenshields모형, Greenberg모형, Underwood모형, 수정Greenberg모형, Drake(Bell-curve)모형으로 나타났으며 이 중에서 수정Greenberg모형으로 예측한 용량이 조사치와 가장 근접하는 것으로 해석 되었다. 이것은 용량을 계산할 때 쓰이는 임계밀도와 임계속도 부근에서 이 모형이 현실을 가장 잘 설명한다는 뜻이다.

7. 경부고속도로 시점 남북향 최대교통량은 1,329 pcphpl, 1,408 pcphpl이고, 남산1호터널 남향 최대교통량은 1,280 pcphpl로서 HCM의 이상적인 용량에 미달하는 것으로 나타났다. 즉 이 지점들은 하류부의 병목현상으로 시설이 가지고 있는 용량이 충분히 활용되지 못하고 있다.

참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원, '도로운영개선 실무서', 1993.10
2. 건설부, '도로용량편람', 1992
3. 한국건설기술연구원, '도로용량편람 연구조사 제3단계 최종보고서', 1992.10
4. 한국건설기술연구원, '도로용량편람 교육교재', 1993.10
5. 서울시정개발연구원, '간선도로 교통류 관리 방안 연구', 1994
6. 도철용, '교통공학원론(상)', 청문각, 1995
7. 박성현, '회귀분석', 민영사, 1994
8. 안상형, 이명호, '현대통계학', 학현사, 1994
9. 최병선, 'PC SAS 입문', 전영사, 1994
10. 김동녕, '고속도로에서의 대형차의 승용차환산계수의 산정', 서울대, 1990
11. Transportation Research Board, 'Highway Capacity Manual', Special Report 209, TRB, Washington D.C, 1985
12. Wolfgang S. Homburger, 'Fundamentals of Traffic Engineering 13th ed. Course Notes, 1992
13. Adolf D.may, 'Traffic Flow Fundamentals', Presentice Hall, 1990
14. Daniel, Gerlough and Matthew, 'Traffic Flow Theory', Special Report 165, TRB, Wasington D.C, 1975
15. Dick, A.C, 'Speed-Flow Relationships within an Urban Area', Traffic Eng.Control 8, 1966
16. Wilhelm Leutzbach, 'Introduction to the Theory of Traffic Flow', Springer-Verlag, 1988
17. William R. Mcshane, 'Traffic Engineering', Prentice Hall, 1990
18. Roger P.Roess, 'Developing Capacity Analysis Procedures for Freeways in Korea, Workshop on the Development of KHCM, Seoul, Korea/July 1988
19. Drake, Schofer and May, 'A Statistical Analysis of Speed-Density Hypotheses', HRR 154, TRB, New York, 1967
20. Hurdle, Datta, 'Speed and Flows on an Urban Freeway', CRR 1194, TRB, 1983