



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.

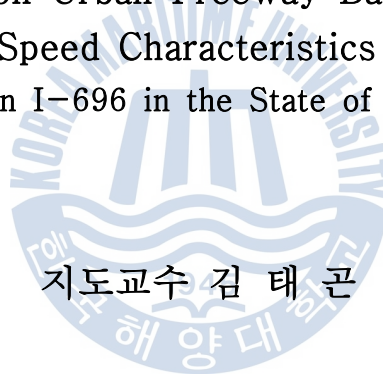
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

출근시간대 차로별 속도특성을 이용한 도시고속도로  
기본구간의 지체추정에 관한 연구  
- Michigan주 I-696을 대상으로 -

Delay Prediction on Urban Freeway Basic Segment Using  
Lane-based Speed Characteristics in Rush Hour  
- Based on I-696 in the State of Michigan -



2011년 8월

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과

임진호

本 論 文 을 林 珍 鎬 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함.

위원장 김도삼 (인)



위원 김태형 (인)



위원 김태곤



2011년 8월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

목 차 .....	i
Nomenclature .....	iii
List of Tables .....	v
List of Figures .....	vi
Abstract .....	vii
제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구배경 .....	1
1.2 연구목적 .....	3
1.3 문헌연구 .....	3
1.4 자료수집 .....	5
제 2 장 자료 분석 .....	7
2.1 교통량 .....	7
2.2 속도 .....	11
2.3 밀도 .....	15
제 3 장 자료의 상관특성 .....	19
3.1 $Q-K$ 의 상관특성 .....	19
3.2 $Q-U$ 의 상관특성 .....	23
3.3 $U-K$ 의 상관특성 .....	27

제 4 장 모형구축 및 검증 .....	32
4.1 모형결정 .....	32
4.2 모형구축 .....	35
4.3 모형검증 .....	38
4.4 모형평가 .....	43
제 5 장 결론 및 향후 연구과제 .....	44
참고문헌 .....	46



# Nomenclature

$n_t$	Transit time of observed vehicle(sec)
$q_i$	Flow rate in 2-min(veh/120sec)
$q$	Hourly flow rate(veh/h)
$u_s$	Means speed in basic segment(km/h)
$u_i$	Means speed for each vehicle(km/h)
$n$	Number of vehicle
$t_h$	Head way time(sec/veh)
$t_n$	Arrival time of nth vehicle(sec)
$k$	Density(veh/km)
$Q_1$	Flow rate in Lane 1(veh/h)
$Q_2$	Flow rate in Lane 2(veh/h)
$Q_3$	Flow rate in Lane 3(veh/h)
$Q_4$	Flow rate in Lane 4(veh/h)
$K_1$	Density in Lane 1(veh/km)
$K_2$	Density in Lane 2(veh/km)
$K_3$	Density in Lane 3(veh/km)
$K_4$	Density in Lane 4(veh/km)
$S_1$	Speed in Lane 1(km/h)
$S_2$	Speed in Lane 2(km/h)
$S_3$	Speed in Lane 3(km/h)
$S_4$	Speed in Lane 4(km/h)
$D$	Delay time(sec)
$L$	Length of basic segment(km)
$U_s$	Mean speed in basic segment(km/h)

$U_L$	Speed limit in basic segment(km/h)
$U_{Si}$	Mean Speed of in Lane in basic segment(km/h)
$\beta_j$	Factor of delay function( $j=0,1,2,3$ )



## List of Tables

Table 1.1 Geometry of urban freeway basic segment(I-696) .....	6
Table 2.1 Flow rate statistics at basic segment 2 .....	9
Table 2.2 Flow rate statistics at basic segment 4 .....	9
Table 2.3 Speed statistics at basic segment 2 .....	13
Table 2.4 Speed statistics at basic segment 4 .....	13
Table 2.5 Density statistics at basic segment 2 .....	17
Table 2.6 Density statistics at basic segment 4 .....	17
Table 3.1 Correlation characteristics of $Q_{\max} - K_M$ .....	20
Table 3.2 Correlation characteristics of $Q_{\max} - U_M$ .....	24
Table 3.3 Correlation characteristics of $K_M - U_M$ .....	28
Table 4.1 Correlation of $D - U_{S_i}$ at basic segments(I-696) .....	34
Table 4.2 Delay models at freeway basic segments .....	36
Table 4.3 Delay models at freeway basic segments using $U_{S_2}$ .....	37
Table 4.4 Delay models at freeway basic segments using $U_{S_3}$ .....	37
Table 4.5 Delay models at freeway basic segments using $U_{S_4}$ .....	37
Table 4.6 Verification results of delay model .....	42
Table 4.7 RMSE results of delay models on freeway basic segments ..	43



## List of Figures

Fig. 1.1 Freeway network around the Detroit metro area .....	2
Fig. 1.2 Basic segments of urban freeway(I-696) .....	6
Fig. 2.1 Flow distribution at basic segment 2 .....	10
Fig. 2.2 Flow distribution at basic segment 4 .....	10
Fig. 2.3 Speed distribution at basic segment 2 .....	14
Fig. 2.4 Speed distribution at basic segment 4 .....	14
Fig. 2.5 Density distribution at basic segment 2 .....	18
Fig. 2.6 Density distribution at basic segment 4 .....	18
Fig. 3.1 Q-K relationship at basic segment 2 .....	21
Fig. 3.2 Q-K relationship at basic segment 4 .....	22
Fig. 3.3 Q-U relationship at basic segment 2 .....	25
Fig. 3.4 Q-U relationship at basic segment 4 .....	26
Fig. 3.5 U-K relationship at basic segment 2 .....	29
Fig. 3.6 U-K relationship at basic segment 4 .....	30
Fig. 4.1 Verification 1 .....	38
Fig. 4.2 Verification 2 .....	39
Fig. 4.3 Verification 3 .....	39
Fig. 4.4 Verification 4 .....	40
Fig. 4.5 Verification 5 .....	40
Fig. 4.6 Verification 6 .....	41
Fig. 4.7 Verification 7 .....	41
Fig. 4.8 Verification 8 .....	42

# Delay Prediction on Urban Freeway Basic Segment Using Lane-based Speed Characteristics in Rush Hour

– Based on I-696 in the State of Michigan –

*Jin Ho, Lim*

*Department of Civil and Environmental Engineering,  
Graduate School, Korea Maritime University, Busan Korea*

## Abstract

Generally urban freeway means the intra-city freeway with 4 lanes or more, which plays a key role in the urban transportation system, carries the tremendous automobiles, and keeps the free flow speed except for the rush hours. Urban freeway (I-696) under this study is a divided ground-level freeway having 3 to 4 lanes in each direction from Novi in the west to St. Clair Shores in the east in the State of Michigan, and is also suffering from severe traffic congestion during the morning rush hours. So it was absolutely needed to study the appropriate travel characteristics on urban freeway basic segment congested during the rush hours.

The purpose in this study was to investigate roadway and traffic characteristic data on the 8-lane urban freeway basic segments congested during the rush hours (06:30~07:30), analyze the correlation between the lane-based traffic characteristics in the urban freeway basic segments congested, and finally suggest the optimal delay model for predicting travel delay on the urban freeway basic segments using the lane-based speed characteristics.

From the traffic characteristic analyses, and development and validation of delay model in urban freeway, the following conclusions were drawn;

i) Urban freeway traffic management system(UFTMS) using the lane-based traffic characteristics was thought to need for increasing traffic safety, reducing traffic congestion, and maximizing lane utilization because there was a distinct difference in the lane-based traffic characteristics.

ii) Urban freeway delay prediction technique using the lane-based traffic characteristics was thought to need for speed control on the urban freeway because there was a negative correlation between the lane-based speeds and travel delay in freeway, especially a high correlation between the 2nd lane speed and travel delay in urban freeway.

iii) Cubic model and exponential model proved to fit for predicting travel delay with the 2nd and 3rd lanes, and the 4th lane in urban freeway basic segment, respectively, but especially cubic model proved to fit for best predicting travel delay in urban freeway with the higher explanatory power of the determination coefficients( $R^2$ ) of 0.941.

iv) Cubic model in urban freeway especially proved a high correlation between observed delay and expected delay with the high correlation coefficients( $r$ ) of about 0.8124 to 0.9816, and also proved a high explanatory and valid delay predictive model with the low RMSE results of about 1.4 sec to 4.1 sec between the delay models using the lane-based speed characteristics.

# 제 1 장 서론

## 1.1 연구 배경

일반적으로 도시고속도로(urban freeway)란 도시지역에 설치 운행되는 4차선이상의 고속도로로서 도시교통체계의 중추적인 역할을 담당하고 있고, 도시지역에서 유발되는 대량의 통행수요를 신속하게 처리하기 위한 도로교통시설로서 출퇴근시간대를 제외하고는 거의 자유흐름속도(free flow speed)를 유지하는 고속도로라 정의할 수 있다.

그런데 본 연구대상이 된 I-696은 미국 Michigan 주의 핵심 고속도로로 Walter P. Reuther Freeway라고 알려져 있고, Detroit지역의 아우토반(Autobahn of Detroit)이라고 불릴 정도로 출퇴근차량이 집중되고 있는 핵심 고속도로이며, 또한 미국 동북부지역의 동서를 가로지르는 대표적인 고속도로 I-96의 Detroit북부지역을 통과하는 도시고속도로구간으로 아래 Fig. 1.1에서 알 수 있듯이 서쪽으로는 Novi지역으로부터 동쪽으로는 St. Clair Shores에 이르는 연장 47.06Km의 8차선의 대표적인 고속도로이다.

또한, 본 연구대상 도시고속도로 I-696의 서쪽 경계구역(west end)인 Novi 지역은 아래 Fig. 1.1에서 보여주듯이 I-96, I-275, M-5 및 I-696이 합·분류되는 지역으로 출퇴근통행량이 집중되는 지역이기 때문에 고속도로의 출퇴근 통행에 따른 교통특성에 관한 연구가 절실히 요구되고 있는 상황 하에서 미연방 교통부(United States department of transportation, USDOT)의 미시간 지능형 차량특성(Michigan IntelliDrive)에 관한 연구대상지역으로 선정된 지역이기도 하다.

이러한 도시고속도로에 있어서 선진외국에서는 도시계획의 시작단계에서부터 도시고속도로의 적절한 배치와 규모로 통행수요의 급격한 변화에 적절히 대처할 수 있도록 계획, 설계, 유지 및 관리가 이루어지고 있기 때문에 도시고속도로 본래의 역할을 제대로 수행함으로써 교통문제가 발생되지 않고 있다.

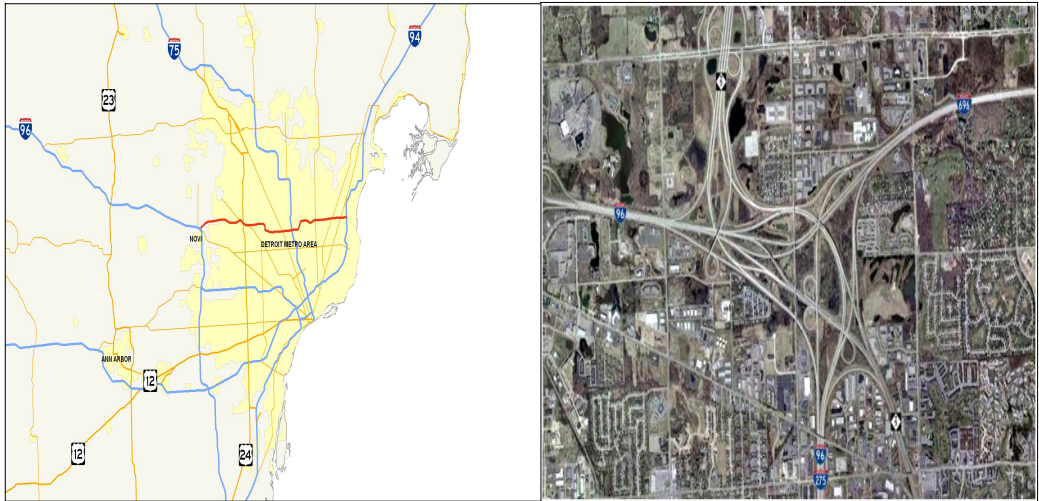


Fig. 1.1 Freeway network around the Detroit metro area

반면, 국내에서는 대부분의 도시고속도로가 장기 도로계획의 중간단계나 추가 확대단계에서 계획되어 도시고속도로 배치 및 규모의 한계, 통행수요예측의 부정확성 그리고 주변 간선도로와의 상호 연계성부족 등으로 인하여 심각한 교통문제가 발생되고 있다. 특히, 국내 도시고속도로는 그 규모가 통행수요에 비해 상당히 부족한 상태이고, 도시지역 내 유동인구의 증가에 따라 새로이 유발되는 통행수요에 비해 새로운 도시고속도로의 공급 역시 부족한 상태이며, 도시고속도로의 효율적인 운영을 위한 도시고속도로교통관리체계(urban freeway traffic management system, UFTMS)에 대한 연구도 아직 미흡하기 때문에 도시고속도로에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.

따라서 국내 도시고속도로의 교통문제를 다소나마 해소하기 위해서는 도시고속도로에 대한 투자재원과 시설여건의 허용범위 내에서 새로운 도시고속도로를 확충하는 방안도 필요하겠지만, 우선적으로 기존 도시고속도로의 교통관리체계에 관한 연구를 통해 도시고속도로의 효율성과 안전성을 증대시키는 연구가 선행되어야 할 필요가 있다.

## 1.2 연구 목적

도시고속도로는 그 구성에 있어서 고속도로와 같이 기본구간, 엇갈림구간, 연결로구간 및 연결로 접속구간으로 되어 있는데, 선진외국의 도시고속도로는 계획단계에서 도시지역을 통과하거나 우회하여 다른 고속도로와 연계되는 도시고속도로로 그 기능과 역할이 기존 고속도로와 큰 차이를 보이지 않고 있으나, 국내 도시고속도로는 기존 고속도로에 추가하여 차로수를 증대시키거나 새로운 도시고속도로를 건설해야 하기 때문에 토지이용의 한계, 도로연장, 구배 및 폭원 등에 있어서 상당한 제약을 받고 있다,

그런데 도시고속도로는 기존의 고속도로에 비해 차로수가 상대적으로 많기 때문에 차량의 차로변경에 따른 상충과 엇갈림으로 인한 교통정체와 사고가 자주 발생되고 있는데, 이러한 차량의 상충과 엇갈림행위는 출퇴근시간대를 중심으로 많이 발생되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 도시고속도로의 차량상충과 엇갈림 행위가 빈발하고 있는 오전 출근시간대(06:30 ~ 07:30)를 중심으로 연구대상 도시고속도로(I-696)의 8개 기본구간(basic segment)을 대상으로 차로별 도로·교통 특성자료를 수집하고, 수집된 자료를 중심으로 특성분석을 실시하며, 차로별 속도 특성의 상관분석 결과를 바탕으로 보다 설명력 있고 신뢰성이 있는 통행지체 추정모형을 제시하려는데 연구목적이 있다.

## 1.3 문헌연구

본 연구와 관련된 국외의 연구에서 미국의 Wattleworth, J. A. et al.(1967)은 미국 휴스턴지역과 시카고지역의 고속도로를 연구대상으로 고속도로의 평균 속도가 40mph로 감소할 경우 교통류(traffic flow)상에 지체가 발생하는 것으로 가정하여 오후 2:30~6:30사이에 고속도로의 진출입연결로에 대해 적절히 통제를 가할 때 고속도로의 정체가 약 45% 정도 감소된다고 보고함으로써 Ramp Metering과 같은 연결로 통행규제의 필요성을 역설하였다.

또한, 미국의 J. A. Lindley (1989)는 고속도로의 반복되는 교통체증으로 1987년에 미국에서는 약 7억 vehicle-hours 이상의 지체가 발생하였고, 시간과 연료소비 등의 사회적, 경제적 비용을 감안할 때 대략 59억불(US\$)의 초과비용이 유발되었다는 Federal Highway Administration(FHWA)의 연구결과를 근거로 2005년에는 약 30억 vehicle-hours 이상의 지체가 발생할 것으로 예측되었다라고 보고함으로써 고속도로의 지체를 감소시킬 수 있는 국가적인 차원의 대책마련의 시급성을 강조하였다.

그리고 Farhad J. Pooran과 Henry C. Lieu (1995)는, 고속도로의 램프 미터링과 서비스도로의 통합신호체계에 대한 시뮬레이션 연구에서 고속도로와 서비스도로의 상호연계체계를 구축함으로써 개별 램프 미터링과 같은 통합체계구축시 약 10%와 통합 램프 미터링과 같은 최대의 통합체계구축시 약 17%의 지체가 감소한다는 사실을 보고함으로써 고속도로의 지체감소를 위해 고속도로와 주변 서비스도로와의 연계체계 구축의 필요성을 강조하였다.

또한, Karl Westby와 Nancy Nihan (1996)은 혼잡한 도로를 대상으로 첨두 시간대의 지체예측에 비중을 둔 기존 지체모델과는 달리 전통적으로 수집된 제한된 자료를 이용해서 24시간 지체를 예측할 수 있는 모형을 최초로 개발하여 제시하였는데, 이 모형은 미국 위싱턴 주의 37개 교차로에서 수집된 자료를 바탕으로 교통량이 적고 지체도가 낮은 차로에서부터 교통량이 많고 과포화된 차로까지 폭넓게 적용하고자 하였다.

특히, Nick Thompson (1997)은 미국의 중서부 미네소타지역의 고속도로에 대해 첨단 통합교통관리체계(integrated corridor traffic management-ramp metering system, ICTM-RMS)를 구축하여 실시한 결과 고속도로의 본선교통량이 약 30%이상 증대하였고, 또한 본선구간의 속도가 평균 30mph에서 48mph로 약 60%정도 증가하였다고 보고함으로써 고속도로의 정체감소와 효율성 증대를 위해 통합교통관리시스템 도입의 필요성을 강조하였다.

한편, 본 연구와 관련된 국내의 연구에서 김정훈과 김태곤 (2000)은 미국의 Detroit지역과 Chicago지역을 동서로 연결하는 고속도로 I-94 연구대상으로

수집된 자료를 바탕으로 실험적 연구를 실시한 결과 고속도로의 연결로접속영향권역 내 하류부의 점유율(occupancy)이 연결로접속영향권역 내 지체와 상관성이 높다는 사실을 확인하였고, 특히 점유율을 기준으로 9%이내일 경우 지체모형이 높은 명력과 유효성을 보인 반면, 점유율이 9%를 초과할 경우 설명력과 유효성이 떨어진다는 것을 확인함으로써 점유율을 이용하여 지체모형을 구축할 경우 정체가 심하지 않는 9%이내의 점유율 상태에서 지체모형이 유효하다는 사실을 입증하였다.

지금까지의 국내외 문헌연구에서는 주로 고속도로를 연구대상으로 지체를 감소시키기 위해 Ramp Metering시스템 구축, 교통관리체계의 구축, 교통체증 예측기법의 도입 등에 집중되었으나, 본 연구에서는 출근시간대 정체가 심한 도시고속도로의 기본구간에 대해 차로별 교통특성을 이용한 교통특성분석과 통행지체 추정모형을 구축하는 시도에서 연구의 차별성이 있다고 생각되었다.

#### 1.4 자료수집

본 연구대상지역은 인구 약 5만 명이고 Michigan주의 Detroit에서 북서방향으로 40Km떨어져 위치한 Oakland County내의 Novi지역으로 Michigan주에서 급성장하고 있는 도시 중의 하나이며, 주변에 많은 호수들이 산재되어 있다.

특히, 이 Novi지역을 중심으로 동서로 통과하고 있는 고속도로 I-96의 도시지역 통과구간인 I-696은 양방향 8차로의 고속도로로 남북방향의 I-275와 입체교차하고 있고, 기본구간의 제한속도는 112km(70mile)/h이고, 연결로에서는 40km(25mile)/h로 운영되고 있다. 그런데 이 고속도로는 오전 출근시간대에 정체가 심하여 주변지역의 이동성과 접근성에 많은 문제가 제기됨으로써 출근시간대 고속도로 기본구간의 교통특성분석을 위해 교통정체가 심한 1.12km의 고속도로 기본구간을 설계속도 120km/h의 고속도로에 대해 차간거리의 최소정지거리 산정식(정지거리 =  $V^2/100$ )을 적용하여 140m의 간격으로 세분하여 오전 출근 1시간(06:30 ~ 07:30)동안 매 2분단위의 교통특성자료가 수집되었



다. 수집된 자료를 중심으로 구축된 교통특성을 이용하여 자료 분석, 상관 분석, 모형 구축 및 검증 등을 실시하였으며, 이를 위해 MS Office 2007과 SPSS(Ver. 12.0)등의 소프트웨어가 사용되었다(참조 Fig. 1.2).

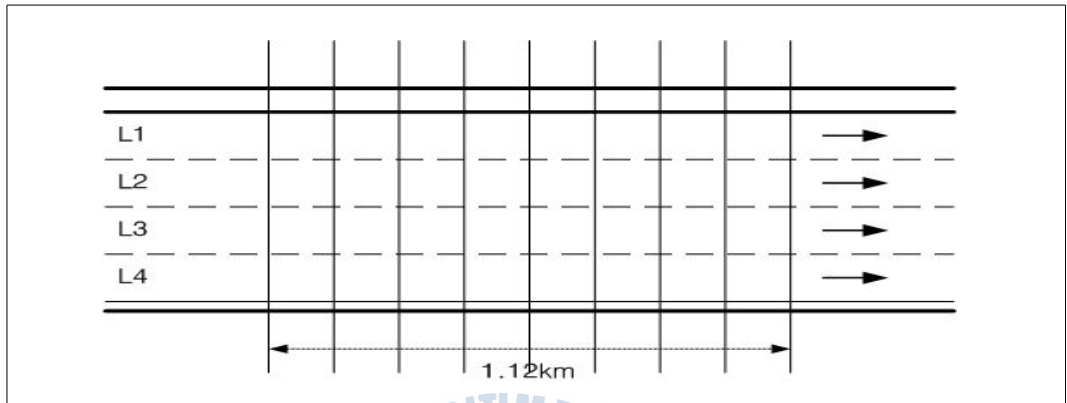


Fig. 1.2 Basic segments of urban freeway(I-696)

Table 1.1 Geometry of urban freeway basic segment(I-696)

Item	Geometric data
No. of lanes	4
Lane width	3.6m
Speed limit	112km/h
Right shoulder	$\geq 1.5\text{m}$
Left shoulder	$\geq 1.5\text{m}$
Length	1.12 km

## 제 2 장 자료 분석

본 연구대상 도시고속도로(I-696)의 기본구간에서 출근시간대 수집된 교통 특성자료는 각 차로별 특성자료로 가공 분류되었는데, 특히 도시고속도로의 교통특성분석에서 교통량(volume)은 1시간단위의 교통류율로 산정되었고, 속도(speed)는 구간속도를 이용하여 평균속도(mean speed)가 산정되었다. 또한 차두시간(headway)은 차로별 평균차두시간(mean headway)으로 산정되었고, 밀도(density)는 속도와 차두시간(headway)과의 관계를 이용하여 평균밀도(mean density)로 산정되어 기초자료의 특성분석에 사용되었다.

### 2.1 교통량

교통량(flow)이란 일정한 시간동안 수집된 차량대수를 의미하는데, 단위 교통량 자료의 상호 비교 분석을 위해서 1시간단위의 교통류율로 전환되었다.

그리하여 연구대상 도시고속도로의 8개 기본구간에서 매 2분단위로 수집 가공된 단위 교통량은 1시간단위의 교통류율로 전환되었고, 교통류율의 단위는 vehicle per hour(veh/h)로 표현되었으며, 다음과 같은 계산과정을 거쳐 특성분석에 사용되었다.

$$q_i = \sum_{t=1}^{120} n_t \quad (2.1)$$

$$q = \sum_{i=1}^{30} q_i \quad (2.2)$$

여기서,

- $n_t$  : 관측된 차량의 통과시간(sec)
- $q_i$  : 2분 단위의 교통량(veh/120sec)
- $q$  : 1시간 단위의 교통류율(veh/h)

한편, 본 연구대상 도시고속도로의 8개 기본구간 내 출근시간대 차로별 평균 통행량이 약 1,540veh/h/l, 최소 통행량이 약 930veh/h/l 그리고 최대 통행량이 약 1,980veh/h/l로 나타났는데, 각 구간별 통행량에 있어서는 미미할 정도로 거의 차이를 보이지 않았으나 차로별 통행량에 있어서 뚜렷한 차이를 보였다.

연구대상 도시고속도로의 기본구간 2와 4(segment 2와 segment 4)를 예로 들면, 오전 출근시간대 평균 통행량이 약 1,535veh/h/l, 최소 통행량이 약 960veh/h/l 그리고 최대 통행량이 약 1,995veh/h/l로 나타났는데, 각 차로별 통행량에 있어서 뚜렷한 차이를 보였다. 특히, 1차로의 평균 통행량이 약 1,130veh/h로 약 27% 감소하였고, 최소 통행량은 약 510veh/h로 약 47% 감소하였으며, 최대 통행량은 약 1,920veh/h로 약 4% 감소함으로써 낮은 차로 이용률을 보였다. 반면, 2차로의 평균 통행량은 약 1650veh/h로 약 7% 증가하였고, 최소 통행량은 약 750veh/h로 약 22% 감소하였으며, 최대 통행량은 약 2,090veh/h로 약 5%의 증가함으로써 분할구간 내 차로의 평균 이용률과 비슷한 차로 이용률을 보였다. 그러나 3차로의 평균 통행량은 약 2,210veh/h로 약 44% 증가하였고, 최소 통행량은 약 860veh/h로 약 10% 감소하였으며, 최대 통행량은 약 3,050veh/h로 약 53% 증가함으로써 가장 높은 차로 이용률을 보였다. 그리고 4차로의 평균 통행량은 약 1,180veh/h로 약 24% 감소하였고, 최소 통행량은 약 720veh/h로 약 25% 감소하였으며, 최대 통행량은 약 1,490veh/h로 약 4%정도 감소함으로써 1차로와 마찬가지로 낮은 차로 이용률을 보였다(참조 Table 2.1과 2.2, Fig. 2.1과 2.2).

따라서 연구대상 도시고속도로는 출근시간대 차로별 통행 집중도에 따라 현저하게 다른 차로 이용률을 보임으로써 도시고속도로의 기능이 극대화될 수 있도록 차로별 통행특성에 기초하여 실시간의 가변정보표지판(variable message sign, VMS)이나 이용자 안내표지판(traveler information system, TIS)과 같은 도시고속도로교통관리체계(urban freeway traffic management system, UFTMS)의 구축여부를 검토할 필요가 있다고 판단되었다.

Table 2.1 Flow rate statistics at basic segment 2

Basic segment		Flow rate(veh/h/l)	Shift(%)	
segment 2	Lane1	Max	1,980	-0.8
		Min	570	-42.0
		Avg	1,137	-25.8
	Lane2	Max	2,070	3.8
		Min	690	-29.8
		Avg	1,624	5.9
	Lane3	Max	3,000	50.4
		Min	990	0.7
		Avg	2,217	44.6
	Lane4	Max	1,530	-23.3
		Min	750	-23.7
		Avg	1,193	-22.2
Segment	Max	1,995	-	
	Min	983	-	
	Avg	1,533	-	

Table 2.2 Flow rate statistics at basic segment 4

Basic segment		Flow rate(veh/h/l)	Shift(%)	
segment 4	Lane1	Max	1,860	-6.8
		Min	450	-52.0
		Avg	1,116	-27.5
	Lane2	Max	2,100	5.3
		Min	810	-13.6
		Avg	1,680	9.2
	Lane3	Max	3,090	54.9
		Min	720	-23.2
		Avg	2,198	42.8
	Lane4	Max	1,440	-27.8
		Min	690	-26.4
		Avg	1,159	-24.7
	Segment	Max	1,995	-
		Min	938	-
		Avg	1,539	-

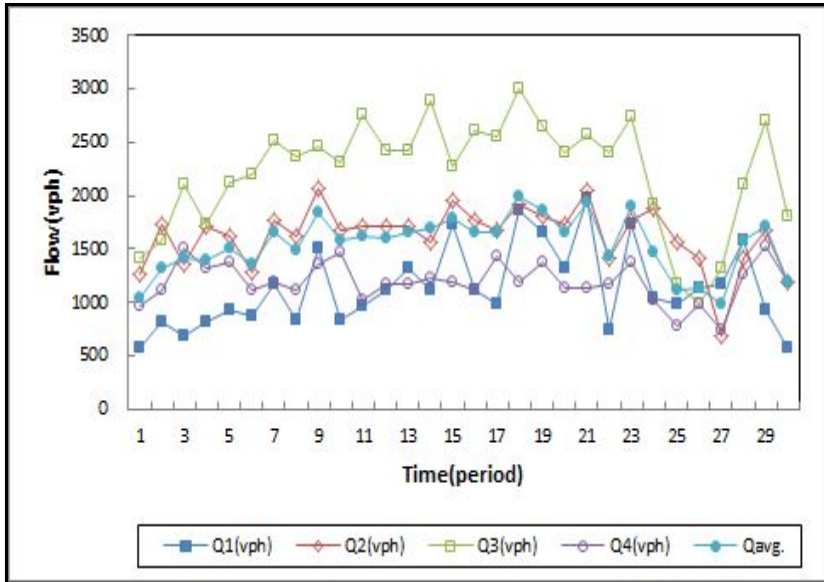


Fig. 2.1 Flow distribution at basic segment 2

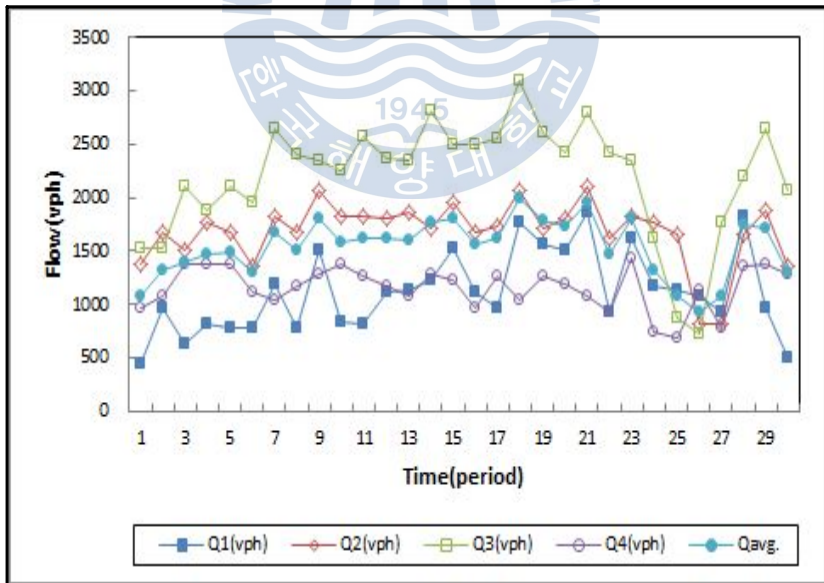


Fig. 2.2 Flow distribution at basic segment 4

## 2.2 속도

속도(speed)란 단위시간동안에 차량이 주행한 거리로서 속도 자료의 상호 비교 분석을 위해서 1시간 단위의 평균속도로 전환되었다.

그리하여 연구대상 도시고속도로의 8개 기본구간에 대해 개별차량으로 수집된 속도는 1시간단위의 평균속도로 전환되었고, 속도의 단위는 kilometers per hour(km/h)로 표현되었으며, 다음과 같은 계산과정을 거쳐 특성분석에 사용되었다.

$$u_s = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n} \quad (2.3)$$

여기서,

$u_s$  : 기본구간 내 평균속도(km/h)

$u_i$  : 개별차량의 속도(km/h)

$n$  : 차량대수

한편, 연구대상 도시고속도로의 8개 기본구간에서 출근시간대 평균 속도는 약 94km/h, 최소 속도는 약 26km/h 그리고 최대 속도는 약 113km/h로 나타났는데, 각 구간별 속도분포에서는 미미할 정도로 작은 차이를 보였으나 차로별 속도분포에서는 뚜렷한 차이를 보였다.

연구대상 도시고속도로의 기본구간 2와 4(segment 2와 segment 4)를 예로 들면, 오전 출근시간대 평균 속도는 약 96km/h, 최소 속도는 약 29km/h 그리고 최대 속도는 약 114km/h로 나타났는데, 각 차로별 속도 특성에 있어서 뚜렷한 차이를 보였다. 특히, 1 차로의 평균 속도가 약 122km/h로 약 27% 증가하였고, 최소 속도는 약 30km/h로 약 3% 증가하였으며, 최대 속도는 약 136km/h로 약 19% 증가함으로써 차로 중에서 가장 높은 속도특성을 보였다. 반면, 2차로의 평균 속도는 약 100km/h로 약 4% 증가하였고, 최소 속도는 약

8km/h로 약 72% 감소하였으며, 최대 속도는 약 123km/h로 약 8% 증가함으로써 분할구간 내 속도특성과 비슷한 속도특성을 보였다. 그리고 3차로의 평균 속도는 약 86km/h로 약 9% 감소하였고, 최소 속도는 약 10km/h로 약 66% 감소하였으며, 최대 속도는 약 112km/h로 약 2% 감소하였다. 그리고 4차로의 평균 속도는 약 85km/h로 약 11% 감소하였고, 최소 속도는 약 30km/h로 약 3% 증가하였으며, 최대 속도는 약 102km/h로 약 11% 감소함으로써 다소 낮은 속도특성을 보였다(참조 Table 2.3과 2.4, Fig.2.3과 2.4).

따라서 연구대상 도시고속도로는 출근시간대 차로별 통행 집중도에 따라 현저하게 다른 속도특성을 보임으로써 도시고속도로의 기능이 극대화될 수 있도록 차로별 속도특성에 기초하여 실시간의 가변정보표지판(variable message sign, VMS)이나 이용자 안내표지판(traveler information system, TIS)과 같은 도시고속도로교통관리체계(urban freeway traffic management system, UFTMS)의 구축여부를 검토할 필요가 있다고 판단되었다.



Table 2.3 Speed statistics at basic segment 2

Basic segment		Speed(km/h)	Shift(%)	
segment 2	Lane1	Max	135	18.4
		Min	43	22.9
		Avg	122	25.8
	Lane2	Max	122	7.0
		Min	8	-77.1
		Avg	100	3.1
	Lane3	Max	114	0.0
		Min	13	-62.9
		Avg	88	-9.3
	Lane4	Max	102	-10.5
		Min	23	-34.3
		Avg	85	-12.4
	Segment	Max	114	-
		Min	35	-
		Avg	97	-

Table 2.4 Speed statistics at basic segment 4

Basic segment		Speed(km/h)	Shift(%)	
segment 4	Lane1	Max	137	20.2
		Min	17	-22.7
		Avg	121	27.4
	Lane2	Max	123	7.9
		Min	7	-68.2
		Avg	99	4.2
	Lane3	Max	110	-3.5
		Min	7	-68.2
		Avg	85	-10.5
	Lane4	Max	101	-11.4
		Min	36	63.6
		Avg	84	-11.6
	Segment	Max	114	-
		Min	22	-
		Avg	95	-



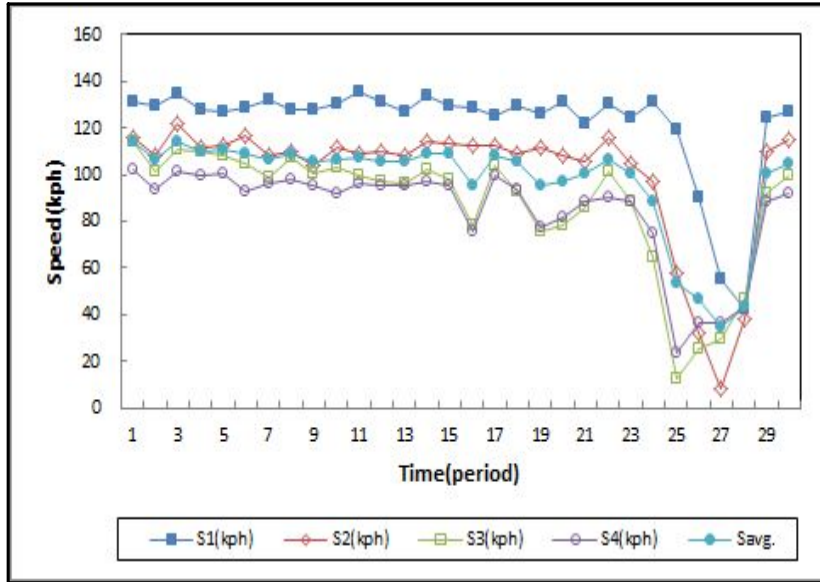


Fig. 2.3 Speed distribution at basic segment 2

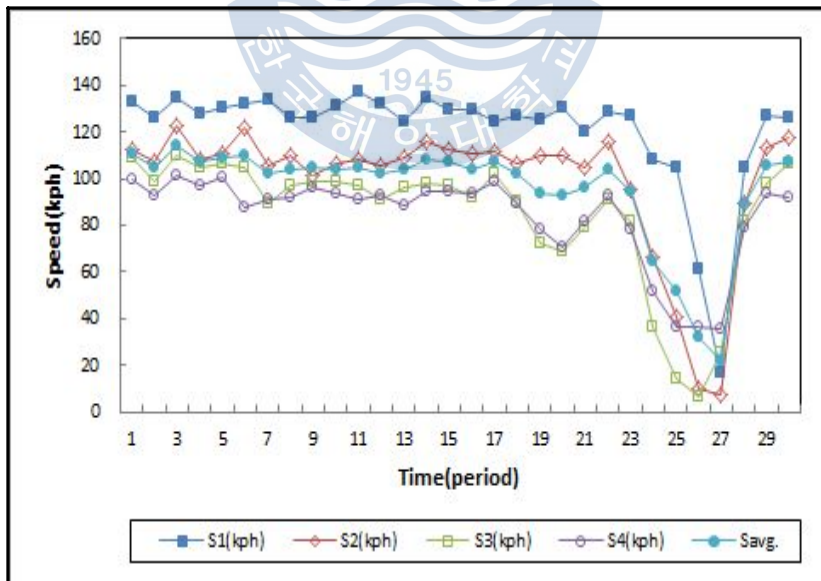


Fig. 2.4 Speed distribution at basic segment 4

## 2.3 밀도

밀도(density)란 단위구간 내 통행하고 있는 차량대수를 의미하는데, 밀도 자료의 신뢰성을 확보하기 위해 단위구간 내 이동차량의 대수를 직접 관측한다는 것은 쉽지 않기 때문에 1km 단위거리를 중심으로 속도와 차두시간으로부터 산정되었다.

그리하여 연구대상 도시고속도로의 8개 기본구간에서 매 1km 단위로 환산 가공된 밀도의 단위는 vehicle per kilometer(veh/km)로 표현되었으며, 다음과 같은 계산과정을 거쳐 특성분석에 사용되었다.

$$t_h = t_n - t_{n-1} \quad (2.4)$$

$$k = \frac{3,600}{t_h \times u_s} \quad (2.5)$$

여기서,

- $t_h$  : 차두시간(sec/veh)
- $t_n$  : n번째 차량의 도착시간(sec)
- $u_s$  : 기본구간의 평균속도(km/h)
- $k$  : 밀도(veh/km)

한편, 연구대상 도시고속도로의 8개 기본구간에서 출근시간대 평균 밀도가 약 18veh/km, 최소 밀도가 약 10veh/km 그리고 최대 밀도가 41veh/km로 나타났는데, 구간별 밀도분포에 있어서 미미할 정도로 작은 차이를 보였으나, 차로별 밀도분포에 있어서 뚜렷한 차이를 보였다.

연구대상 도시고속도로의 기본구간 2와 4(segment 2와 segment 4)를 예로 들면, 오전 출근시간대 평균 밀도가 약 18veh/km, 최소 밀도가 약 10veh/km 그리고 최대 밀도가 42veh/km로 나타났는데, 각 차로별 밀도 특성에 있어서

뚜렷한 차이를 보였다. 특히, 1 차로의 평균 밀도가 약 11veh/km로 약 39% 감소하였고, 최소 밀도는 약 4veh/km로 약 60% 감소하였으며, 최대 밀도는 약 48veh/km로 약 14% 증가함으로써 낮은 밀도특성을 보였다. 반면, 2차로의 평균 밀도는 약 22veh/km로 약 22% 증가하였고, 최소 밀도는 약 11veh/km로 약 10% 증가하였으며, 최대 밀도는 약 97veh/km로 약 131% 증가함으로써 높은 밀도특성을 보였다. 그리고 3차로의 평균 밀도는 약 30veh/km로 약 67% 증가하였고, 최소 밀도는 약 14veh/km로 약 40% 증가하였으며, 최대 밀도는 약 96veh/km로 약 128% 증가함으로써 가장 높은 밀도특성을 보였다. 그러나 4차로의 평균 밀도는 약 15veh/km로 약 17% 감소하였고, 최소 밀도는 약 10veh/km로 거의 변화가 없었으며, 최대 밀도는 약 33veh/km로 약 21% 감소함으로써 차로중에서 가장 낮은 밀도특성을 보였다(참조 Table 2.5와 2.6, Fig.2.5와 2.6).

따라서 연구대상 도시고속도로는 출근시간대 차로별 통행 집중도에 따라 현저하게 다른 밀도특성을 보임으로써 도시고속도로의 기능이 극대화될 수 있도록 차로별 밀도특성에 기초하여 실시간의 가변정보표지판(variable message sign, VMS)이나 이용자 안내표지판(traveler information system, TIS)과 같은 도시고속도로교통관리체계(urban freeway traffic management system, UFTMS)의 구축여부를 검토할 필요가 있다고 판단되었다.

Table 2.5 Density statistics at basic segment 2

Basic segment		Density(veh/km)	Shift(%)	
segment 2	Lane1	Max	37	2.8
		Min	4	-55.6
		Avg	10	-41.2
	Lane2	Max	83	130.6
		Min	11	22.2
		Avg	20	17.6
	Lane3	Max	89	147.2
		Min	12	33.3
		Avg	29	70.6
	Lane4	Max	34	-5.6
		Min	9	0.0
		Avg	15	-11.8
	Segment	Max	36	-
		Min	9	-
		Avg	17	-

Table 2.6 Density statistics at basic segment 4

Basic segment		Density(veh/km)	Shift(%)	
segment 4	Lane1	Max	58	20.8
		Min	4	-63.6
		Avg	11	-38.9
	Lane2	Max	110	129.2
		Min	11	0.0
		Avg	23	27.8
	Lane3	Max	103	114.6
		Min	15	36.4
		Avg	31	72.2
	Lane4	Max	31	-35.4
		Min	10	-9.1
		Avg	15	-16.7
	Segment	Max	48	-
		Min	11	-
		Avg	18	-

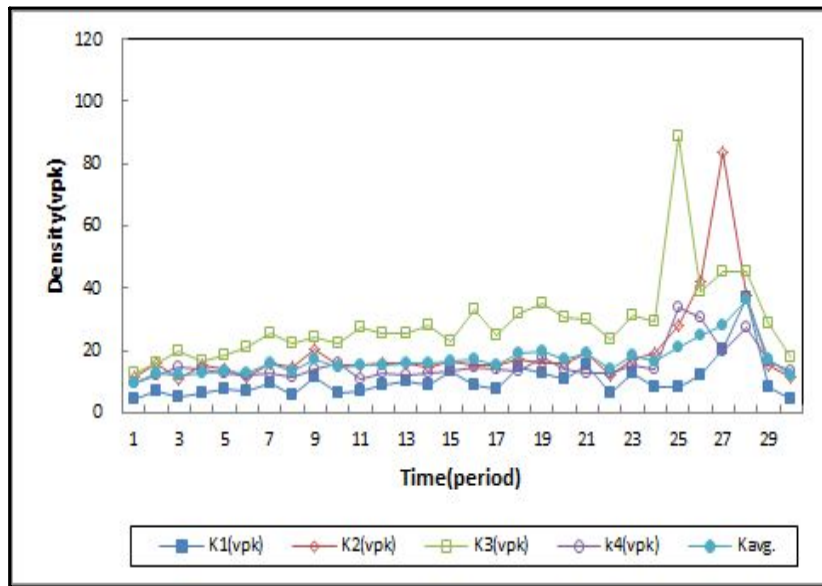


Fig. 2.5 Density distribution at basic segment 2

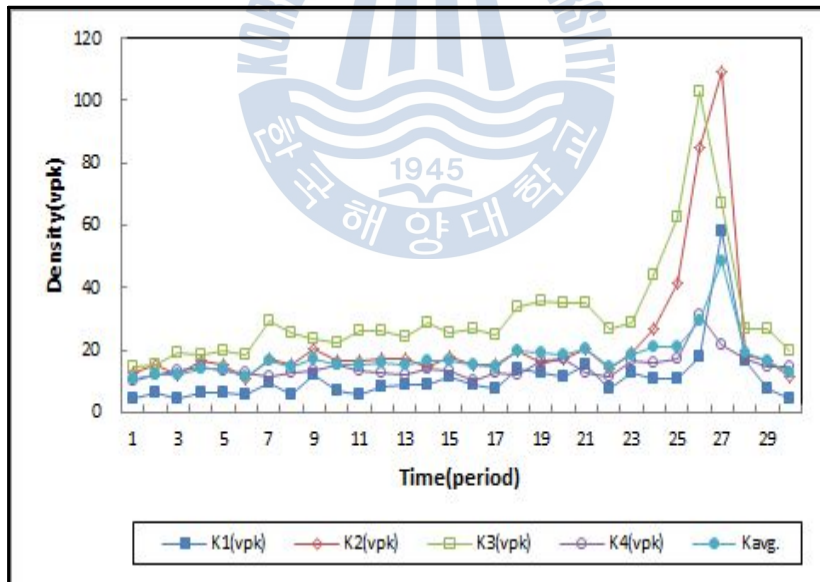


Fig. 2.6 Density distribution at basic segment 4

## 제 3 장 자료의 상관특성

본 연구대상 도시고속도로(I-696)의 8개 기본구간을 중심으로 교통량( $Q$ ), 밀도( $K$ ) 그리고 속도( $U$ )사이의 상관특성을 비교 분석하였다.

### 3.1 $Q-K$ 의 상관특성

연구대상 도시고속도로에 있어서 출근시간대 기본구간별 교통량( $Q$ )과 밀도( $K$ )사이의 상관특성을 비교해보면, 아래의 Fig. 3.1과 3.2에서 보는 바와 같이 진행방향의 우측 4차로를 제외하고는 대체적으로 유사한 상관특성을 보였고, 최대 교통량 상태에 도달하기 전까지 밀도증가와 함께 교통량이 계속 증가하였으며, 최대 교통량(용량) 상태에 도달한 후 지속적인 밀도증가와 함께 교통량이 감소하는 포물선 형태를 보이는 것으로 나타났다.

연구대상 도시고속도로의 기본구간 2와 4(segment 2와 segment 4)를 예로 들면, 구간별  $Q-K$ 곡선에 있어서 최대 교통량( $Q_{\max}$ )이 대체적으로 약 8,000veh/h에 적정 밀도( $K_M$ )는 약 20veh/km로 나타났다. 반면, 차로별  $Q-K$ 곡선에 있어서 3차로에서는 최대 교통량( $Q_{3_{\max}}$ )이 약 3,050veh/h에 적정 밀도( $K_{3_M}$ )는 약 33veh/h로 나타났고, 2차로와 1차로에서는 최대 교통량( $Q_{2_{\max}}$ 과  $Q_{1_{\max}}$ )이 약 2,100veh/h와 1920veh/h에 적정 밀도( $K_{2_M}$ 과  $K_{1_M}$ )는 약 20veh/h와 15veh/h로 나타난 반면, 4차로에서는 최대 교통량( $Q_{4_{\max}}$ )이 약 1,500veh/h에 적정 밀도( $K_{4_M}$ )는 약 17veh/km로 나타남으로써 기본구간 내 차로별 통행량 집중행태에서 상당한 차이를 파악할 수 있었다(참조 Table 3.1).

따라서 연구대상 도시고속도로의 출근시간대 차로 이용률을 극대화시키기 위해서는 각 차로별 통행패턴을 고려한 교통관리체계 구축의 필요성이 요구된다고 판단되었다.

Table 3.1 Correlation characteristics of  $Q_{\max} - K_M$

Segment		$Q_{\max}$	$Q1_{\max}$	$Q2_{\max}$	$Q3_{\max}$	$Q4_{\max}$
segment 2	$K_M$	19	7,980			
	$K1_M$		15	1,980		
	$K2_M$			20	2,070	
	$K3_M$				32	3,000
	$K4_M$					17
segment 4	$K_M$	20	7,980			
	$K1_M$		15	1,860		
	$K2_M$			20	2,100	
	$K3_M$				34	3,090
	$K4_M$					17



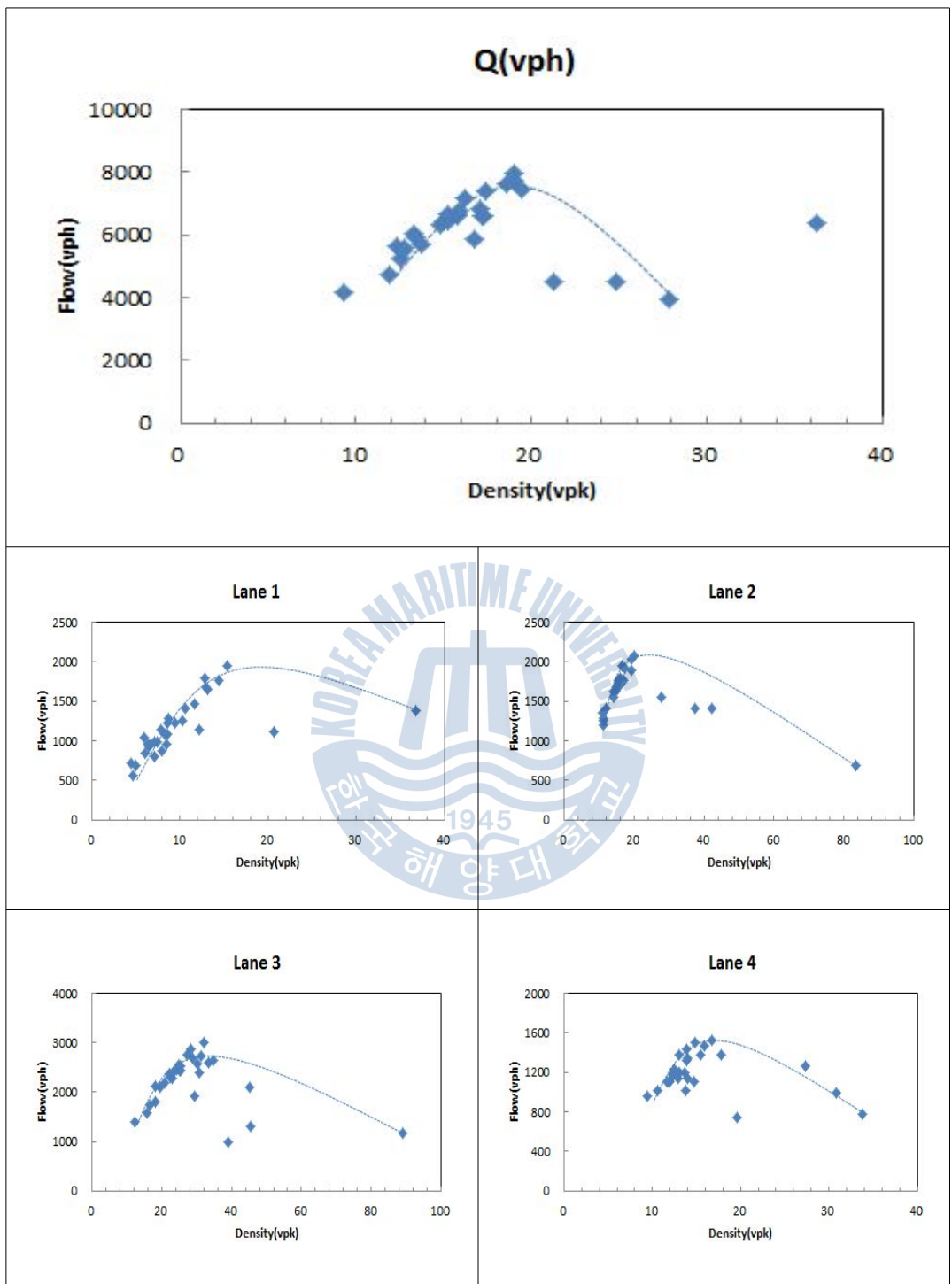


Fig. 3.1 Q–K relationship at basic segment 2



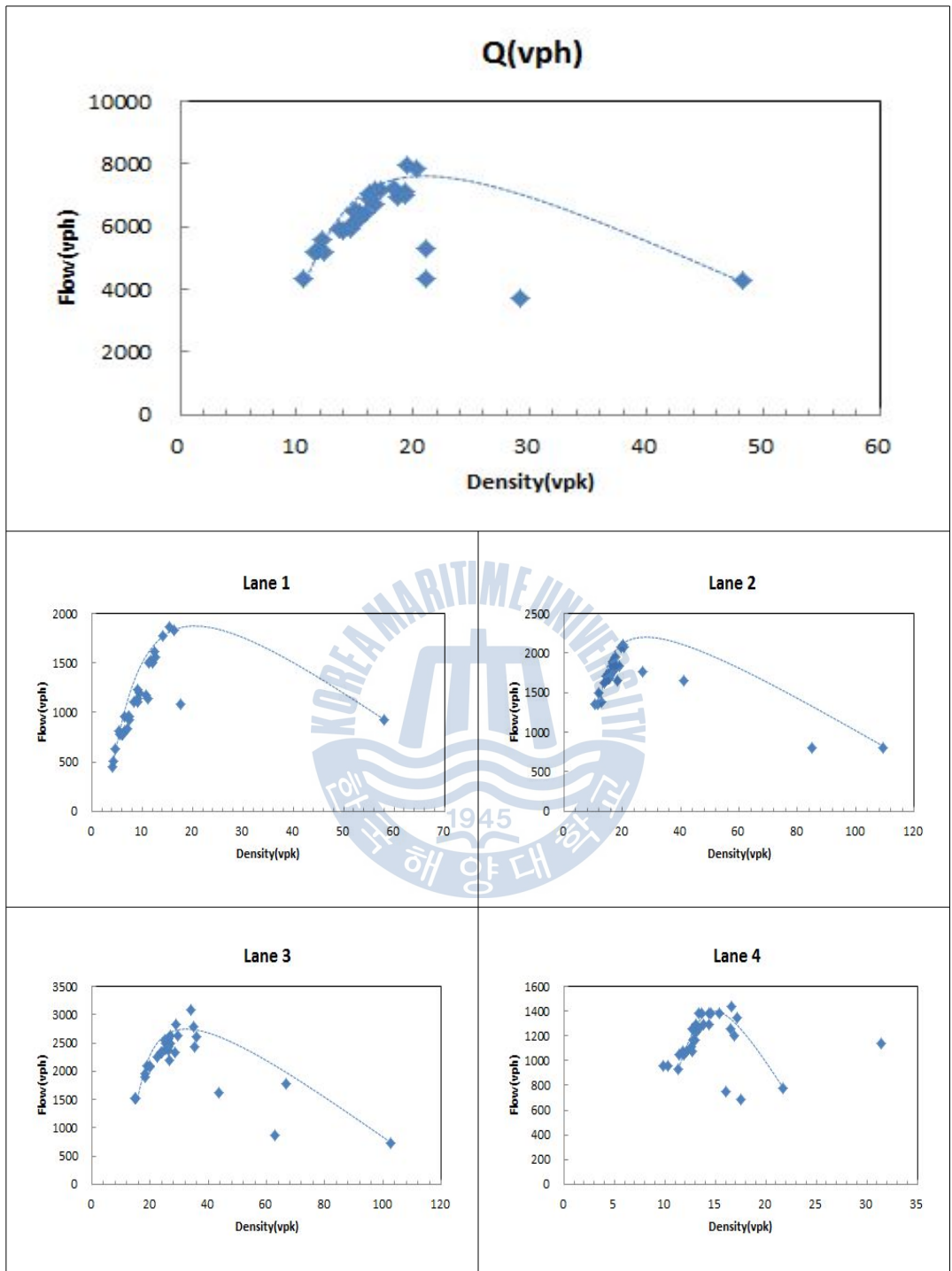


Fig. 3.2 Q–K relationship at basic segment 4

### 3.2 Q-U의 상관특성

연구대상 도시고속도로에 있어서 출근시간대 기본구간별 교통량(Q)과 속도(U)사이의 상관특성을 비교해보면, 아래의 Fig. 3.3과 3.4에서 보는 바와 같이 진행방향의 우측 4차로를 제외하고는 대체적으로 유사한 상관특성을 보였고, 최대 교통량 상태에 도달하기 전까지 속도감소와 함께 교통량이 계속 증가하였으며, 최대 교통량 상태에 도달한 후 지속적인 속도감소와 함께 교통량도 감소하는 포물선 형태를 보이는 것으로 나타났다.

연구대상 도시고속도로의 기본구간 2와 4(segment 2와 segment 4)를 예로 들면, 구간별 Q-U곡선에 있어서 최대 교통량( $Q_{max}$ )이 대체적으로 약 8,000veh/h에 적정 속도( $U_M$ )는 약 105km/h로 나타났다. 반면, 차로별 Q-U곡선에 있어서 3차로에서는 최대 교통량( $Q3_{max}$ )이 약 3,050veh/h에 적정 속도( $U3_M$ )가 약 92km/h로 나타났으며, 2차로와 1차로에서는 최대 교통량( $Q2_{max}$  과  $Q1_{max}$ )이 약 2,100veh/h와 1920veh/h에 적정 속도( $U2_M$ 과  $U1_M$ )가 약 105km/h와 120km/h로 나타난 반면, 4차로에서는 최대 교통량( $Q4_{max}$ )이 약 1,500veh/h에 적정 속도( $U4_M$ )는 약 85km/h로 나타남으로써 기본구간 내 차로별 통행량 집중행태에서 상당한 차이를 파악할 수 있었다(참조 Table 3.2).

따라서 연구대상 도시고속도로의 출근시간대 차로 이용률을 극대화시키기 위해서는 각 차로별 통행패턴을 고려한 차로별 교통관리체계 구축의 필요성이 요구된다고 판단되었다.

Table 3.2 Correlation characteristics of  $Q_{\max} - U_M$

Segment		$Q_{\max}$	$Q1_{\max}$	$Q2_{\max}$	$Q3_{\max}$	$Q4_{\max}$
segment 2	$U_M$	105	7,980			
	$U1_M$		122	1,980		
	$U2_M$			103	2,070	
	$U3_M$				93	3,000
	$U4_M$					89
segment 4	$U_M$	102	7,980			
	$U1_M$		120	1,860		
	$U2_M$			104	2,100	
	$U3_M$				91	3,090
	$U4_M$					78



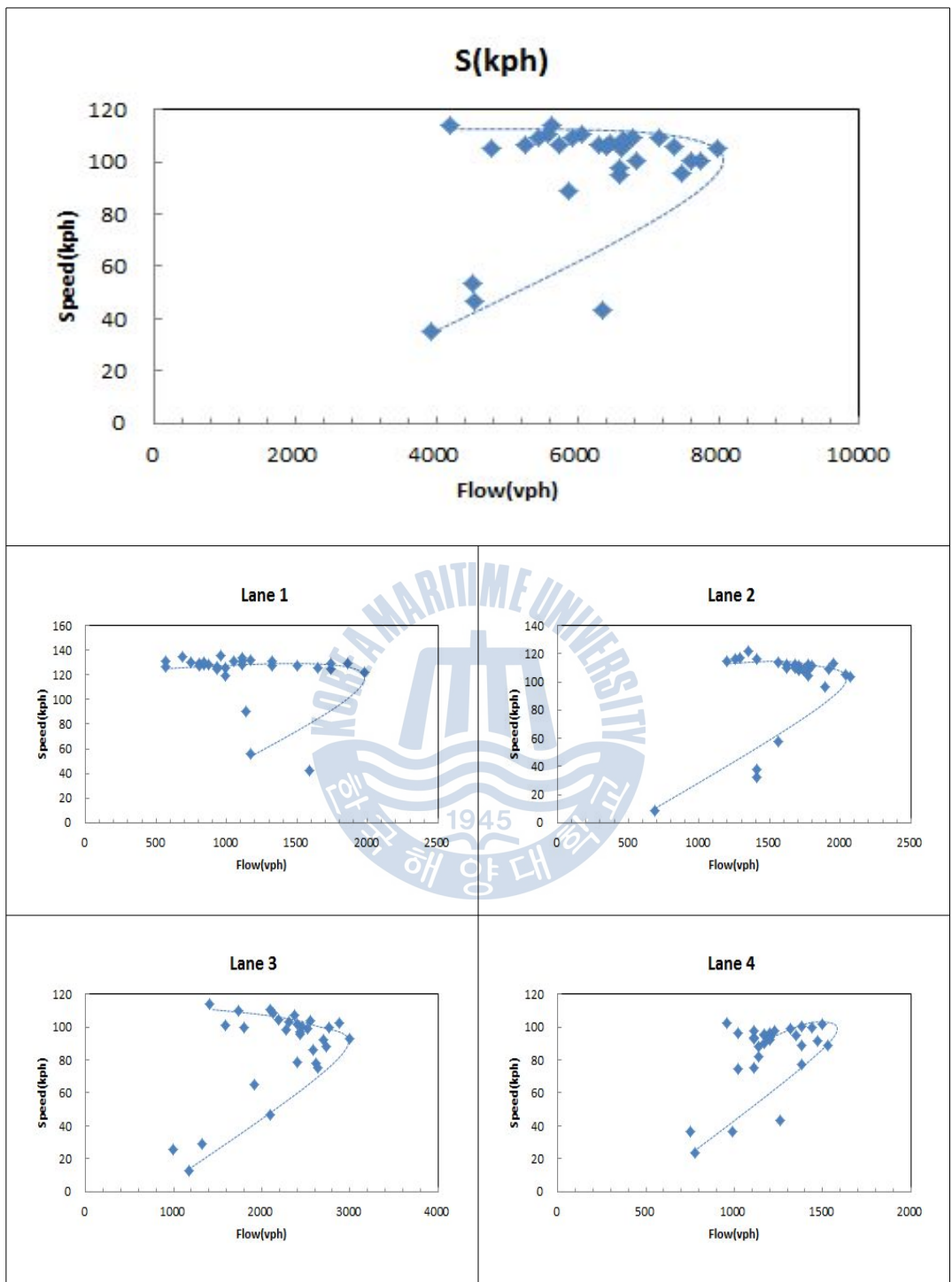


Fig. 3.3 Q–U relationship at basic segment 2

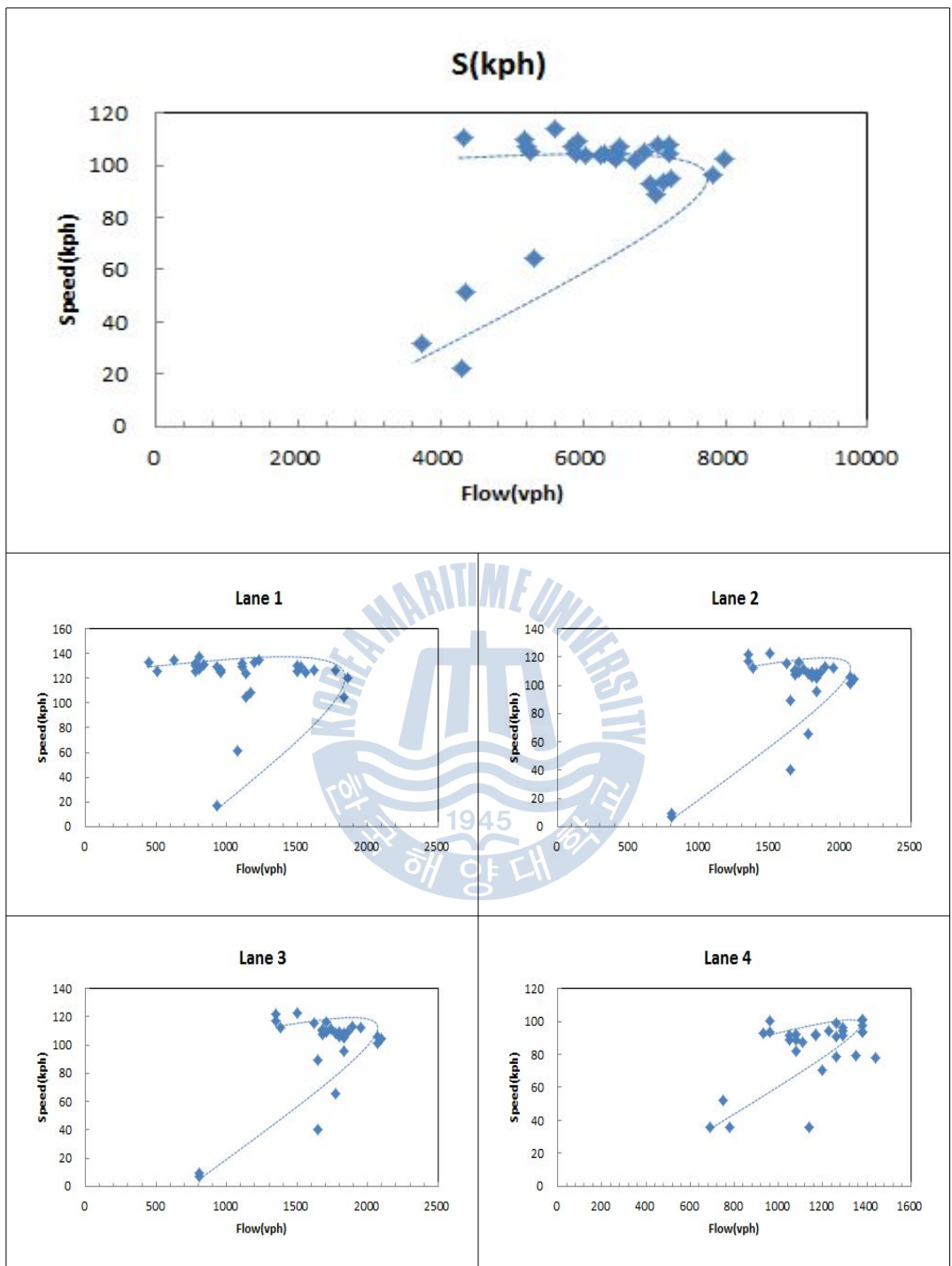


Fig. 3.4 Q-U relationship at basic segment 4

### 3.3 $U-K$ 의 상관특성

연구대상 도시고속도로에 있어서 출근시간대 기본구간별 속도( $U$ )와 밀도( $K$ )의 상관특성을 비교해보면, 아래의 Fig. 3.5와 3.6에서 보는 바와 같이 진행방향의 우측 4차로를 제외하고는 대체적으로 유사한 상관특성을 보였고 최대 속도에 도달한 후 지속적인 밀도증가와 함께 속도가 감소하는 3차함수의 형태를 보이는 것으로 나타났다.

연구대상 도시고속도로의 기본구간 2와 4(segment 2와 segment 4)를 예로 들면, 구간별  $U-K$ 곡선에 있어서 기본구간의 적정 밀도( $K_M$ )가 약 20veh/km 정도에 적정 속도( $U_M$ )는 약 105km/h로 나타났다. 반면, 차로별  $U-K$ 곡선에 있어서 3차로와 2차로에서는 적정 속도( $U_{3M}$ 과  $U_{2M}$ )가 약 92km/h와 104km/h에 밀도( $K_{3M}$ 과  $K_{2M}$ )는 약 33veh/km과 20veh/km로 나타났으며, 1차로에서는 적정 속도( $U_{1M}$ )가 약 121km/h에 밀도( $K_{1M}$ )가 약 15veh/km로 나타났고, 4차로에서는 적정 속도( $U_{4M}$ )가 약 84km/h에 적정 밀도( $K_{4M}$ )는 약 17veh/km로 나타남으로써 기본구간 내 차로별 통행량 집중행태에서 상당한 차이를 파악할 수 있었다(참조 Table 3.3).

따라서 연구대상 도시고속도로의 출근시간대 이용률을 극대화시키기 위해서는 각 차로별 통행패턴을 고려한 도시고속도로 교통관리체계 구축의 필요성이 요구된다고 판단되었다.

Table 3.3 Correlation characteristics of  $K_M-U_M$

Segment		$K_M$	$K1_M$	$K2_M$	$K3_M$	$K4_M$
segment 2	$U_M$	105	19			
	$U1_M$		122	15		
	$U2_M$			103	20	
	$U3_M$				93	32
	$U4_M$					89
segment 4	$U_M$	102	20			
	$U1_M$		120	15		
	$U2_M$			104	20	
	$U3_M$				91	34
	$U4_M$					78



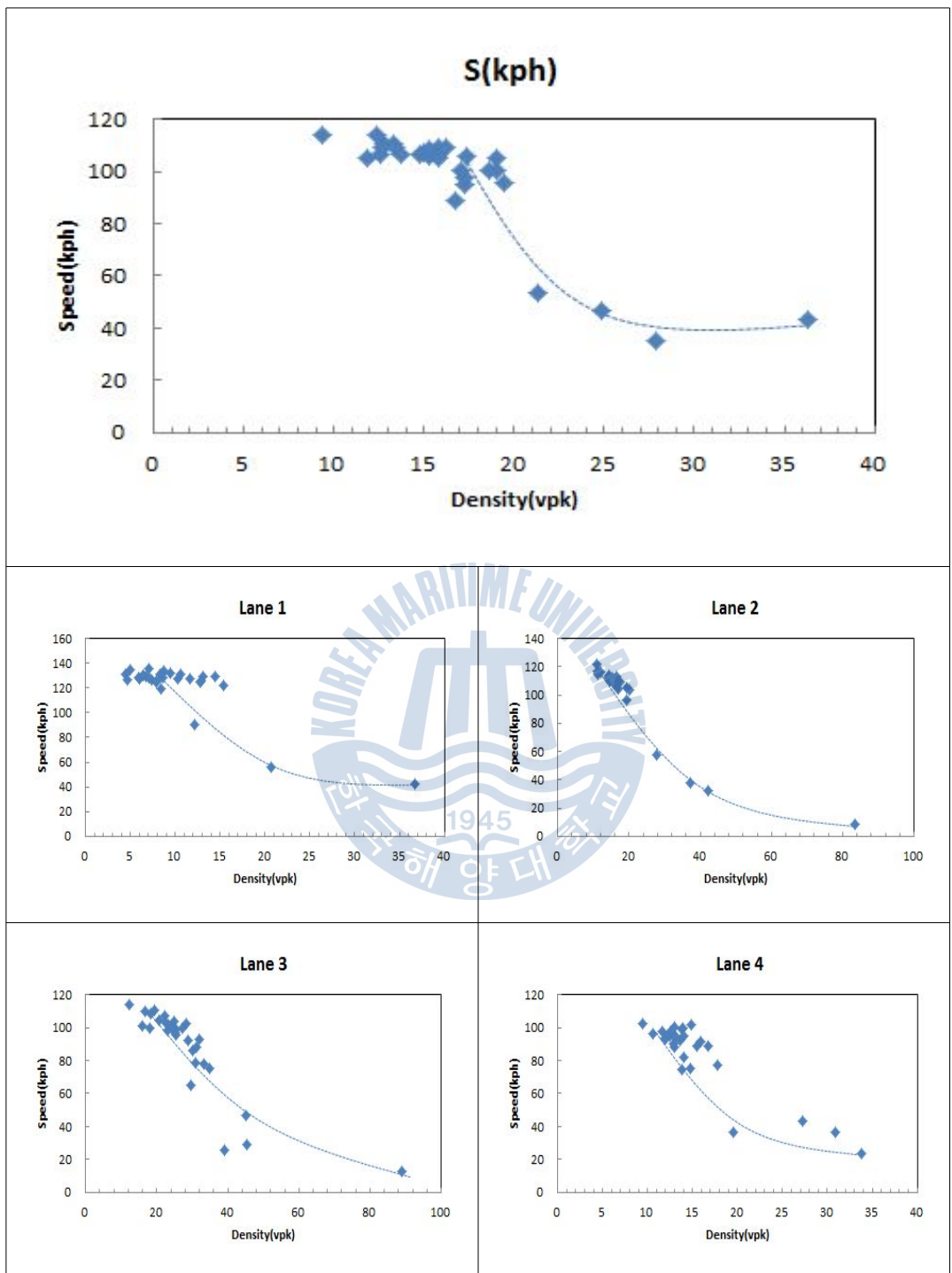


Fig. 3.5 U–K relationship at basic segment 2



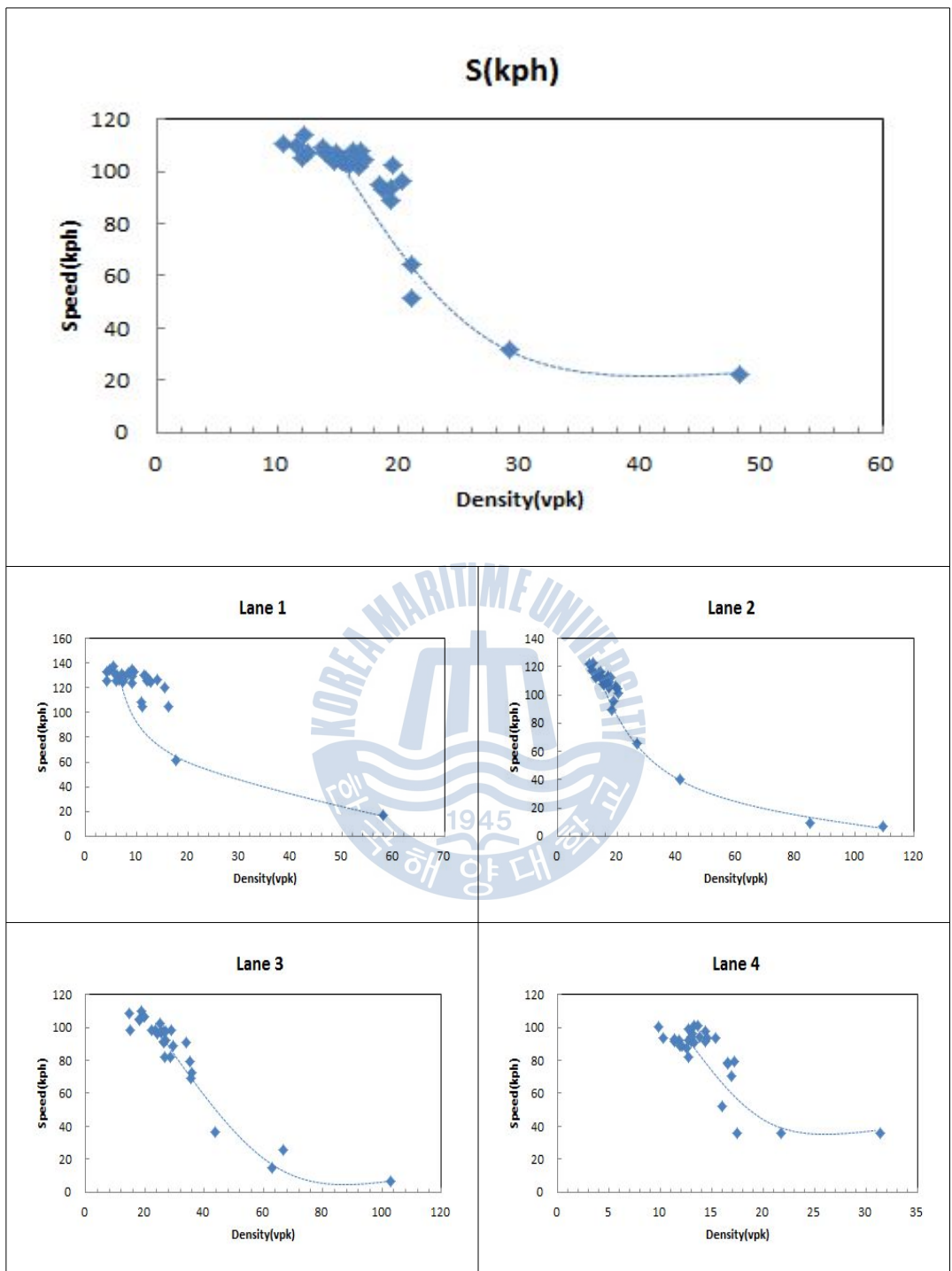


Fig. 3.6 U–K relationship at basic segment 4

이상과 같이 연구대상 도시고속도로(I-696)의 기본구간 내 출근시간대 차로별 교통자료의 상관특성을 비교 분석한 결과, 교통량과 밀도, 교통량과 속도 그리고 속도 및 밀도사이에 전형적인 상관특성이 존재하고 있음을 확인할 수 있었다.



## 제 4 장 모형구축 및 검증

본 연구대상 도시고속도로(I-696)의 8개 기본구간에 대해 출근시간대 기본구간의 통행지체( $D$ )와 차로별 평균속도( $U_{Si}$ )와의 상관특성을 검토하여 기본구간의 통행지체와 부합되는 차로를 중심으로 지체모형의 형태가 결정되었고, 기본구간의 통행지체와 부합차로의 평균속도를 중심으로 중 회귀분석(multiple regression analysis)을 통해 최적의 지체모형이 구축되었으며, 구축된 지체모형의 유효성을 비교 검토하기 위해 상관관계분석(correlation analysis)이 수행되었다.

### 4.1 모형결정

통행지체(travel delay)란 도로를 통행하는데 있어서 제한속도이하로 통행하면서 발생하는 손실시간을 의미한다. 그러므로 연구대상 도시고속도로의 기본구간에서 통행지체는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = L \left( \frac{3,600}{U_S} - \frac{3,600}{U_L} \right) \text{ if } U_S \leq U_L \quad (4.1)$$
$$= 0 \text{ if } U_S > U_L$$

여기서,

- $D$  : 지체시간(sec)
- $L$  : 기본구간의 길이(km)
- $U_S$  : 기본구간에서 차량의 평균속도(km/h)
- $U_L$  : 기본구간에서 차량의 제한속도(km/h)

또한, 이러한 통행지체를 특정 차로의 속도함수로 표시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D=f(U_{Si}) \quad (4.2)$$

여기서

$U_{Si}$  : 기본구간 내  $i$ 차로의 평균속도(km/h)

한편, 연구대상 도시고속도로에 있어서 출근시간대 기본구간의 통행지체와 가장 부합되는 차로 및 모형형태를 결정하기 위하여 8개의 기본구간에 대해 기본구간별 통행지체와 차로별 평균속도와의 상관특성이 높은 차로로부터 통행지체와 속도사이 선형 및 비선형 모형의 적합성이 검토되었다. 특히, 연구대상 기본구간의 모든 차로에 대해 서로 다른 형태의 선형 및 비선형모형을 적용하여 결정계수( $R^2$ )값을 상호 비교한 결과, 아래 Table 4.1에서 보여주듯이 2차로, 3차로, 또는 4차로의 속도특성이 기본구간의 통행지체와의 모형구축에 적합한 것으로 나타났고, 지체모형의 형태로는 대체적으로 3차 함수(cubic function, CUB)나 지수함수(exponential function, EXP)가 가장 적합한 것으로 나타났으며 일부 기본구간에서는 멱함수(power function, POW)나 로그함수(logarithmic function, LOG)도 통행지체를 표현하는 데 적합한 것으로 나타났다.

따라서 연구대상 도시고속도로의 출근시간대 지체모형을 구축하기 위해 기본구간의 통행지체( $D$ )를 종속변수로 하고 차로별 평균속도( $U_{Si}$ ,  $i=2, 3, 4$ )를 독립변수로 하여 3차 함수, 지수함수, 멱함수 및 로그함수 등의 지체모형을 구축한 후, 모형의 결정계수( $R^2$ )값을 기준으로 차로별 적합한 지체모형을 결정할 필요가 있다고 판단되었다.

Table 4.1 Correlation of  $D-U_{Si}$  at basic segments(I-696)

Segment 1		$U_{S1}$	$U_{S2}$	$U_{S3}$	$U_{S4}$
$D$	상관계수	-0.933	-0.983	<b><u>-0.989</u></b>	-0.981
	최적모형	CUB	CUB	EXP	EXP
	$R^2$	0.871	0.966	0.978	0.963
Segment 2		$U_{S1}$	$U_{S2}$	$U_{S3}$	$U_{S4}$
$D$	상관계수	-0.877	-0.977	-0.982	<b><u>-0.989</u></b>
	최적모형	QUA	CUB	EXP	CUB
	$R^2$	0.769	0.955	0.964	0.978
Segment 3		$U_{S1}$	$U_{S2}$	$U_{S3}$	$U_{S4}$
$D$	상관계수	-0.866	<b><u>-0.991</u></b>	-0.979	-0.975
	최적모형	CUB	CUB	EXP	EXP
	$R^2$	0.750	0.983	0.958	0.951
Segment 4		$U_{S1}$	$U_{S2}$	$U_{S3}$	$U_{S4}$
$D$	상관계수	-0.982	<b><u>-0.994</u></b>	-0.978	-0.982
	최적모형	CUB	LOG	EXP	EXP
	$R^2$	0.965	0.988	0.957	0.965
Segment 5		$U_{S1}$	$U_{S2}$	$U_{S3}$	$U_{S4}$
$D$	상관계수	-0.869	-0.960	<b><u>-0.979</u></b>	-0.976
	최적모형	CUB	CUB	EXP	EXP
	$R^2$	0.755	0.921	0.959	0.952
Segment 6		$U_{S1}$	$U_{S2}$	$U_{S3}$	$U_{S4}$
$D$	상관계수	-0.980	<b><u>-0.991</u></b>	-0.936	-0.915
	최적모형	CUB	CUB	EXP	POW
	$R^2$	0.960	0.982	0.876	0.837
Segment 7		$U_{S1}$	$U_{S2}$	$U_{S3}$	$U_{S4}$
$D$	상관계수	-0.957	-0.972	-0.956	<b><u>-0.977</u></b>
	최적모형	CUB	CUB	EXP	POW
	$R^2$	0.916	0.945	0.914	0.954
Segment 8		$U_{S1}$	$U_{S2}$	$U_{S3}$	$U_{S4}$
$D$	상관계수	-0.962	-0.955	-0.961	<b><u>-0.982</u></b>
	최적모형	CUB	CUB	EXP	EXP
	$R^2$	0.925	0.912	0.923	0.965
No. of lanes modeled		0	3	2	3

## 4.2 모형구축

본 연구대상 도시고속도로의 총 8개의 기본구간 중에서 4개의 기본구간을 중심으로 개별모형(S1~S4)과 통합모형(S)이 구축되었는데, 기본구간별 개별모형에서는 4개의 개별 기본구간자료가 개별모형구축에 사용되었고, 통합모형에서는 4개 기본구간의 통합자료가 통합모형구축에 사용되었으며, 나머지 4개의 기본구간자료는 통합모형의 검증에 사용되었다. 그리고 모형구축에 있어서 종속변수로는 기본구간의 통행지체( $D$ )가 사용되었고, 독립변수로는 차로별 평균속도( $U_{S2}$ ,  $U_{S3}$  또는  $U_{S4}$ )가 사용되었으며, 위의 4.1절에서 선정된 모형들에 이러한 변수들을 적용할 경우 아래와 같이 제시될 수 있었다.

$$\text{CUB: } D = \beta_0 + \beta_1 \times U_{Si} + \beta_2 \times U_{Si}^2 + \beta_3 \times U_{Si}^3$$

$$\text{EXP: } D = \beta_0 \times e^{\beta_1 \times U_{Si}}$$

$$\text{POW: } D = \beta_0 \times U_{Si}^{\beta_1}$$

$$\text{LOG: } D = \beta_0 + (\beta_1 \times \ln(U_{Si}))$$

여기서,

$U_S$  : 기본구간 평균속도(km/h)

$U_{Si}$  : 기본구간  $i$ 차로의 평균속도(km/h) ( $i=2, 3, 4$ )

$\beta_j$  : 지체함수의 계수 ( $j=0, 1, 2, 3$ )

한편, 위의 도시고속도로 기본구간에 대한 지체추정에서는 중 회귀분석이 사용되었는데, 중 회귀분석을 이용한 지체추정에서 발생할 수 있는 다중공선성(multi-collinearity)의 문제를 해결하기 위해 축차변수선택법(stepwise)이 이용되었다. 특히, 개별모형에서는 3차 함수와 지수함수를 포함하여 다양한 함수 형태를 보였고, 결정계수( $R^2$ )값은 0.978~0.988로 나타났다. 반면, 통합모형에서는 3개 차로(2차로, 3차로 및 4차로)의 평균속도에 각각 지수함수, 3차 함

수, 로그함수 및 멱함수가 검토되었는데, 2차로를 이용할 경우에는 3차함수 (CUB)가 최적의 지체모형으로 선정되었고, 3차로와 4차로를 이용할 경우에는 지수함수(EXP)가 최적의 지체모형으로 선정되었으며, 결정계수( $R^2$ )값은 각각 0.941, 0.963 및 0.962로 높은 설명력을 보였다.

또한, 지체추정에 대한 유의확률을 나타내는 F-통계량도 0.000으로 나타나 매우 유의한 것으로 분석되었고, 개별독립변수의 유의성을 나타내는 값들 역시 유의확률이 모두 0.000으로 매우 유의한 것으로 나타났으며, 지체모형에서는 차로별 평균속도( $U_S$ )의 증가에 따라 통행지체가 감소하는 ‘-’부호를 나타냄으로써 회귀계수의 부호가 실제현상에 부합되는 것으로 나타났다(참조 Table 4.2~4.5).

따라서 연구대상 도시고속도로의 출근시간대 통행지체추정을 위한 통합모형에서는 2차로의 평균속도를 이용할 경우 3차함수가 설명력이 높을 것으로 나타났고, 3차로와 4차로의 평균속도를 이용할 경우 지수함수가 높은 설명력을 보일 것으로 판단되었다.

Table 4.2 Delay models at freeway basic segments

Segment	Delay models	$R^2$	F-sig.
S1	$D = 74.5393 \times e^{-0.0507 \times U_{S2}}$	0.978	0.000
S2	$D = 11.7058 + 0.7281 \times U_{S4} - 0.0198 \times U_{S4}^2 + 0.0001 \times U_{S4}^3$	0.978	0.000
S3	$D = 22.8384 + 0.1653 \times U_{S2} - 0.0081 \times U_{S2}^2 + 0.000043 \times U_{S2}^3$	0.983	0.000
S4	$D = 59.6204 - 12.552 \times \ln(U_{S2})$	0.988	0.000

Table 4.3 Delay models at freeway basic segments using  $U_{S2}$

Section	Delay models	$R^2$	F-sig.
S	CUB $D = 29.4193 - 0.2846 \times U_{S2} - 0.0012 \times U_{S2}^2 + 0.000013 \times U_{S2}^3$	<b>0.941</b>	0.000
	EXP $D = 68.3429 \times e^{-0.0434 \times U_{S2}}$	0.863	0.000
	POW $D = 4231.98 \times U_{S2}^{-1.8773}$	0.717	0.000
	LOG $D = 54.3781 - 11.372 \times \ln(U_{S2})$	0.912	0.000

Table 4.4 Delay models at freeway basic segments using  $U_{S3}$

Section	Delay models	$R^2$	F-sig.
S	CUB $D = 26.1373 - 0.1970 \times U_{S3} - 0.0041 \times U_{S3}^2 + 0.000034 \times U_{S3}^3$	0.851	0.000
	EXP $D = 56.9825 \times e^{-0.0479 \times U_{S3}}$	<b>0.963</b>	0.000
	POW $D = 17222.9 \times U_{S3}^{-2.2572}$	0.863	0.000
	LOG $D = 54.3093 - 11.711 \times \ln(U_{S3})$	0.806	0.000

Table 4.5 Delay models at freeway basic segments using  $U_{S4}$

Section	Delay models	$R^2$	F-sig.
S	CUB $D = 13.0376 + 0.8587 \times U_{S4} - 0.0234 \times U_{S4}^2 + 0.0001 \times U_{S4}^3$	0.873	0.000
	EXP $D = 168.266 \times e^{-0.0620 \times U_{S4}}$	<b>0.962</b>	0.000
	POW $D = 5178885 \times U_{S4}^{-3.5470}$	0.906	0.000
	LOG $D = 82.4571 - 18.071 \times \ln(U_{S4})$	0.816	0.000



### 4.3 모형검증

본 연구대상 도시고속도로(I-696)의 8개 기본구간 중에서 모형구축에 사용되지 않은 4개의 기본구간(segment 5~segment 8)과 모형구축에 사용된 기본구간(segment 1~segment 4)을 대상으로 통합모형에 대한 모형검증이 실시되었으며, 모형검증의 유효성을 입증하기 위해 통행지체의 추정모형으로부터 예측된 통행지체( $D_{exp}$ )와 관측된 통행지체( $D_{obs}$ )사이의 상관관계분석을 수행한 결과, 상관계수( $r$ )값이 0.8124~0.9816으로 모형의 유효성이 매우 높게 나타났다(참조 Fig. 4.1~4.8).

따라서 연구대상 도시고속도로의 출근시간대 통행지체를 추정하기 위해서 2차로, 3차로 또는 4차로의 평균속도와 함께 3차 함수(CUB)모형이나 지수함수(EXP) 모형을 적용할 경우 모두 높은 설명력과 유효성을 기대할 수 있을 것으로 판단되었다.

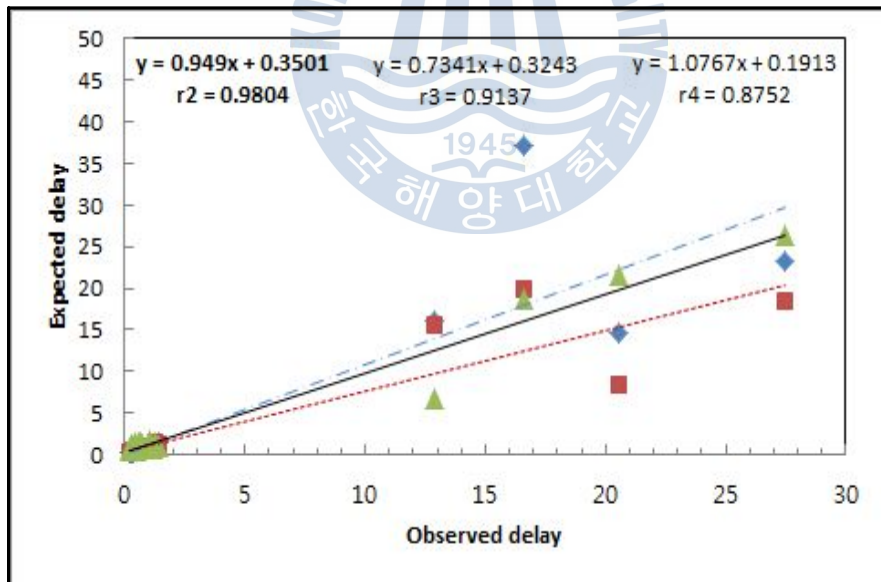


Fig. 4.1 Verification 1

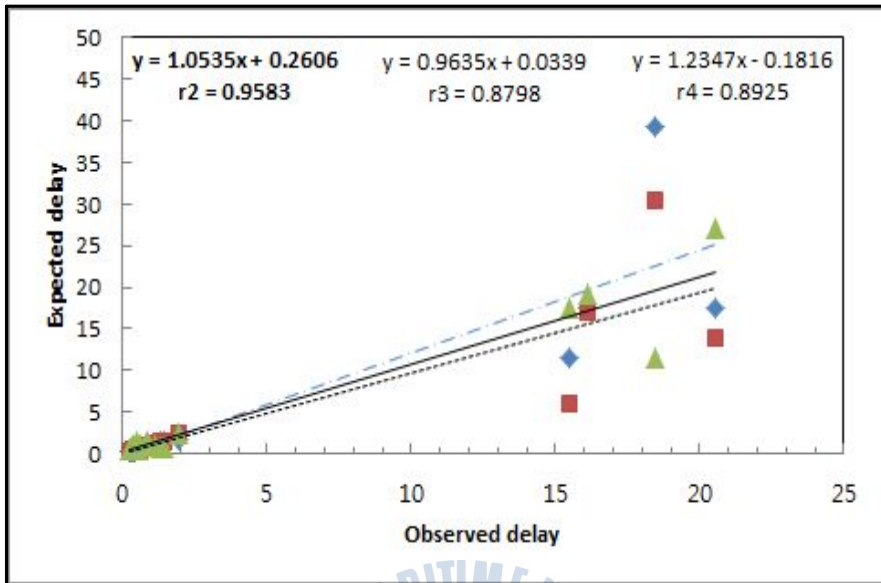


Fig. 4.2 Verification 2

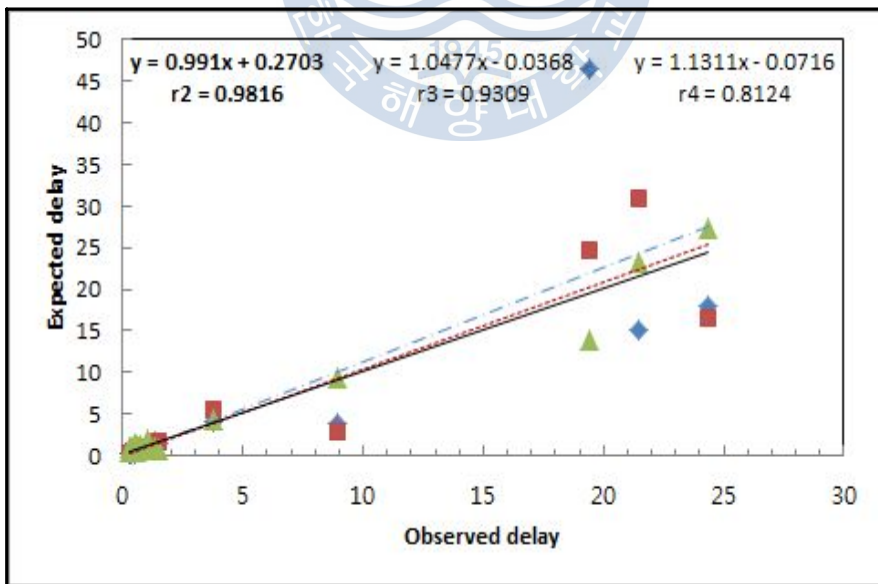


Fig. 4.3 Verification 3

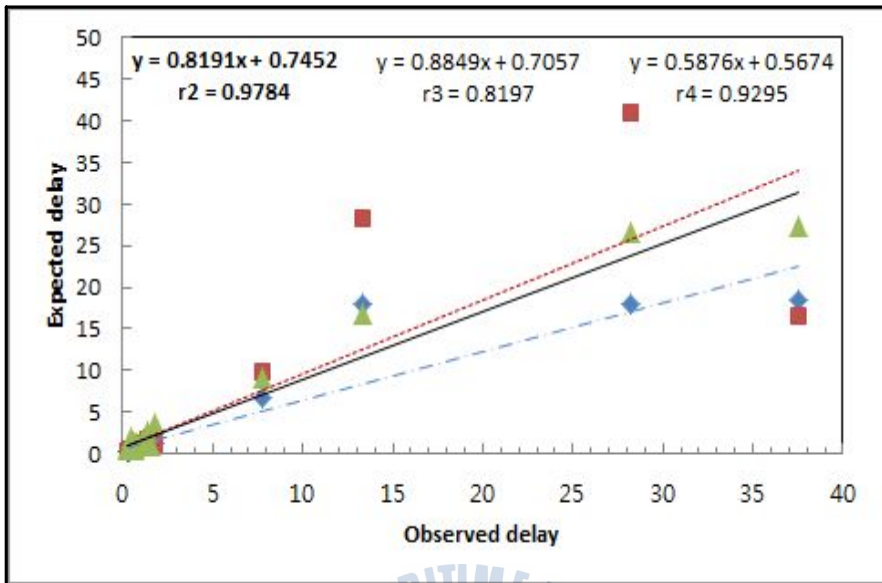


Fig. 4.4 Verification 4

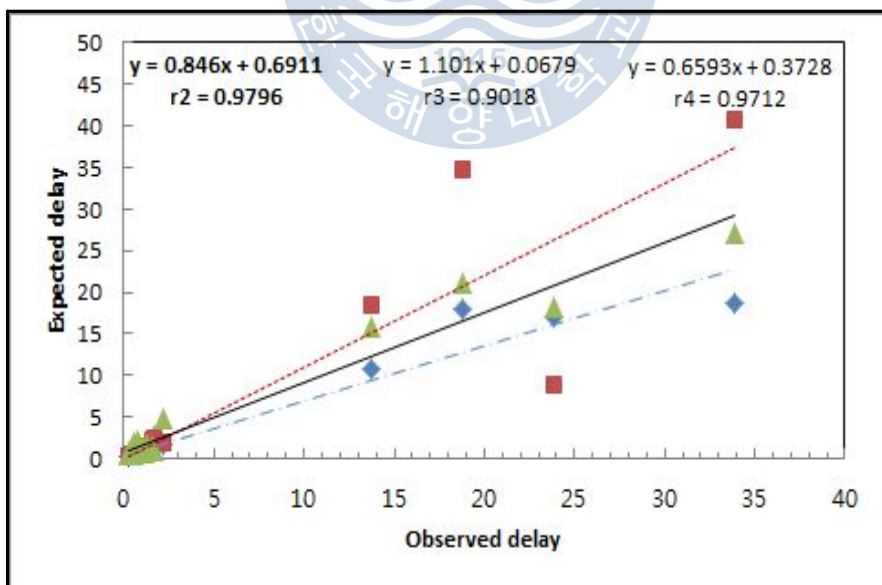


Fig. 4.5 Verification 5

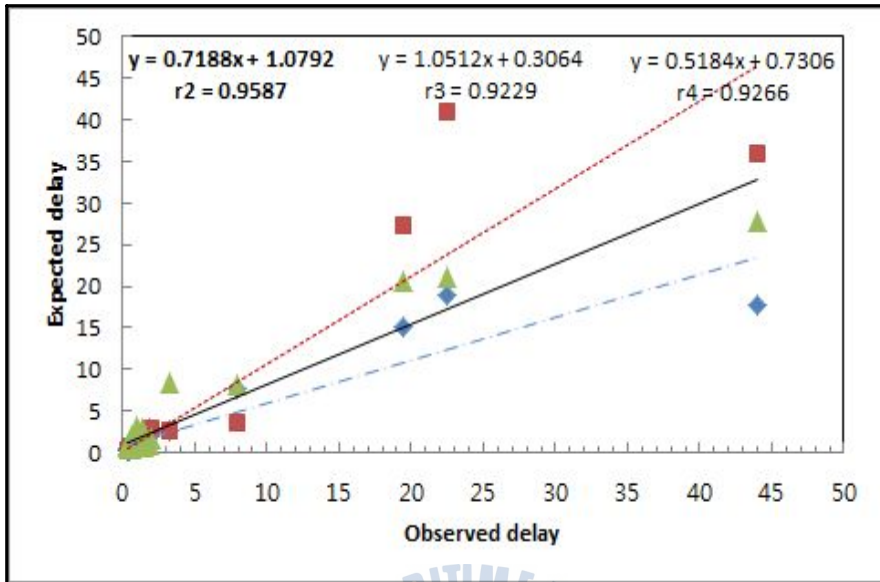


Fig. 4.6 Verification 6

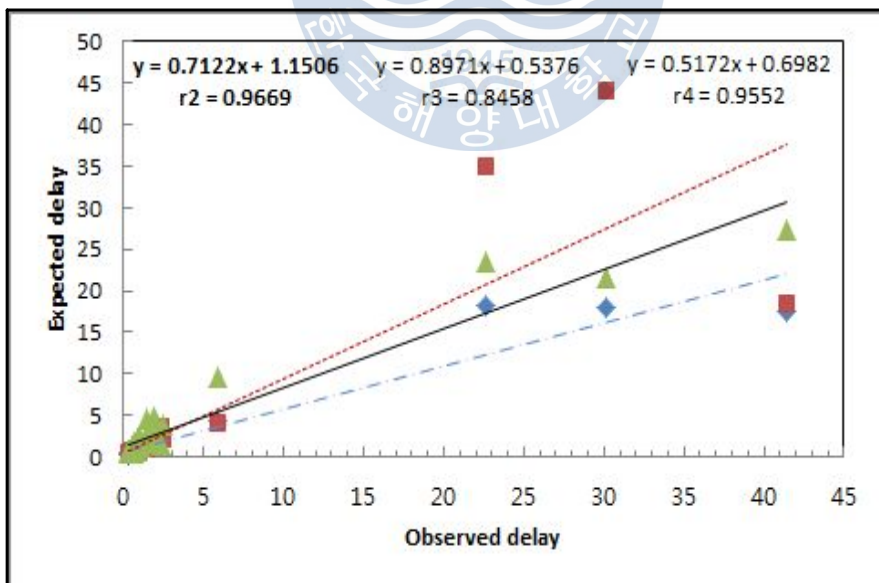


Fig. 4.7 Verification 7

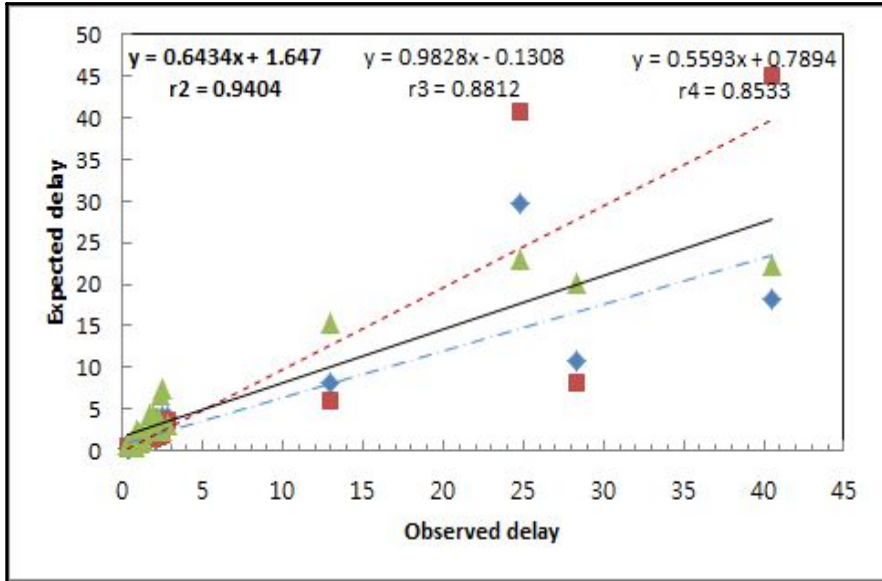


Fig. 4.8 Verification 8

Table 4.6 Verification results of delay model

Segment	Correlation coefficient( $r$ )		
	$r_2$	$r_3$	$r_4$
segment 1	0.9804	0.9137	0.8752
segment 2	0.9583	0.8798	0.8925
segment 3	0.9816	0.9309	0.8124
segment 4	0.9784	0.8197	0.9295
segment 5	0.9796	0.9018	0.9712
segment 6	0.9587	0.9229	0.9266
segment 7	0.9669	0.8458	0.9552
segment 8	0.9404	0.8812	0.8533

#### 4.4 모형평가

본 연구대상 도시고속도로의 8개 기본구간에서 출근시간대 지체추정을 위한 최적의 차로와 모형을 결정하기 위해 관측지체와 예측지체사이의 평균 제곱근 편차(root mean square error, RMSE)의 분석결과를 비교한 결과, 아래의 Table 4.7에서 보여주듯이 2차로의 3차 함수( $CUB_2$ )모형이 연구대상 도시고속도로의 모든 기본구간에서 가장 부합되는 것으로 나타났다.

따라서 연구대상 도시고속도로 기본구간의 출근시간대 통행지체를 추정하기 위해서 차로별 평균속도를 이용할 경우 대형차량과 혼재율이 상대적으로 낮은 2차로의 평균속도와 함께 3차 함수( $CUB_2$ )모형을 적용할 경우 지체추정에 있어서 가장 높은 설명력과 유효성을 기대할 수 있을 것으로 판단되었다.

Table 4.7 RMSE results of delay models on freeway basic segments

Segment	Model	$CUB_2$	$EXP_3$	$EXP_4$
	segment 1		<u>1.4</u>	2.9
segment 2		<u>1.9</u>	3.1	4.0
segment 3		<u>1.3</u>	2.7	5.4
segment 4		<u>2.1</u>	5.4	4.1
segment 5		<u>1.9</u>	4.3	3.2
segment 6		<u>3.2</u>	4.1	5.0
segment 7		<u>3.3</u>	5.5	5.1
segment 8		<u>4.1</u>	5.0	5.5

## 제 5 장 결론 및 향후 연구과제

본 연구대상 도시고속도로의 8개 기본구간에 대해서 수집된 도로·교통특성자료의 분석과 차로별 평균속도를 이용하여 출근시간대 지체모형의 구축 및 검증을 통해서 다음과 같은 결론에 도달할 수 있었다.

- i) 도시고속도로의 기본구간에 있어서 통행수요가 집중하는 출근시간대 교통특성자료가 각 차로별로 현저한 차이를 보이고 있기 때문에 도시고속도로의 안전성을 증대시키고, 통행지체를 감소시키며, 이용률을 극대화시키기 위해서는 각 차로별 특성을 고려한 도시고속도로 교통관리체계(UFTMS)의 수립이 필요할 것으로 판단되었다.
- ii) 도시고속도로의 통행지체는 평균속도와 음(-)의 높은 상관성을 보인다는 사실을 확인할 수 있었고, 도시고속도로의 통행지체와 차로별 평균속도와의 상관성 및 모형의 적합성을 비교 분석해본 결과, 도시고속도로의 2차로 평균속도( $U_{92}$ )를 이용하여 3차 함수 모형을 구축할 경우 지체모형의 설명력과 유효성이 상대적으로 높은 것으로 나타났다.
- iii) 도시고속도로의 통행수요가 집중하는 출근시간대 기본구간에서는 통행지체특성은 3차 함수, 지수함수, 역함수, 멱함수 및 로그함수 모형 등이 적합한 것으로 나타났으나, 차로별 특성을 고려할 경우 3차 함수 모형이 가장 적합한 것으로 나타났으며, 특히, 2차로의 속도특성과 함께 3차 함수 모형의 결정계수( $R^2$ )가 0.941로 가장 높은 설명력을 보이는 것으로 나타났다.
- iv) 도시고속도로의 통행수요가 집중하는 출근시간대 기본구간 내 통행지체모형의 검증을 실시한 결과, 상관계수( $r$ )값이 0.8124~0.9816으로 2차로의 특성을 이용한 3차 함수 모형이 도시고속도로의 기본구간 통행지체추정에 상대적으로 높은 유효성을 보이는 것으로 나타났다.

V) 외국의 도시고속도로와 국내 도시고속도로가 통행특성에서 다소 차이를 보일 수도 있겠으나, 통행수요가 집중하는 출근시간대에 국내 도시고속도로의 기본구간의 지체추정에서는 본 연구의 지체모형이 상당히 유효할 것으로 생각되며, 특히 출퇴근 통행특성이 강한 대도시 주변 도시고속도로에서는 높은 설명력과 유효성을 보일 것으로 판단되었다.

따라서 본 연구에서 제시된 도시고속도로의 기본구간 내 출근시간대 통행지체모형은 유사한 기하구조와 교통특성을 가지는 도시고속도로의 통행지체를 추정할 수 있는 척도로 사용되어질 수 있을 것으로 판단되며, 향후 다양한 기하구조특성과 교통특성을 고려한 도시고속도로에 대해 추가적인 연구가 계속 수행되어야 할 것으로 생각된다.





## 참 고 문 헌

- 1) 김정훈과 김태곤, “고속도로 진출입램프 접속부상의 지체예측모형 구축에 관한 연구”, 한국항만학회지 제14권 제2호, 2000, pp 175~185
- 2) 김태곤외 2인, “차로별 특성을 고려한 도시고속도로의 지체추정에 관한 연구”, 대한토목학회논문집 제30권 제5호, 2010, pp 467~476
- 3) 김정훈, “고속도로 진출입램프 접속부상의 지체예측모형 구축에 관한 연구”, 공학석사 학위논문, 2000.
- 4) 김경진, “실시간 교통특성에 기초한 도시고속도로 IC 합류부의 지체예측 모형 구축에 관한 연구”, 한국해양대학교 공학석사 학위논문, 2003.
- 5) 장태준, “실시간 교통특성에 기초한 도시고속도로 IC 분류부의 지체예측 모형 구축에 관한 연구”, 한국해양대학교 공학석사 학위논문, 2003.
- 6) 정유나, “도시고속도로의 연결로 접속영향권역내 통행지체 예측모형 구축에 관한 연구”, 한국해양대학교 공학석사 학위논문, 2010.
- 7) 김상구외 9인, “고속도로 교통소통 통합관리체계 개발 연구(I)”, 한국건설기술연구원 동향자료, 1999
- 8) 김승일, “연속류 교통특성을 활용한 실시간 구간 통행시간 예측에 관한 연구”, 서울시립대학교 공학박사 학위논문, 2006
- 9) 도철웅, “교통공학원론(상)”, 청문각, 2007.
- 10) 원제무 · 최재성, “교통공학”, 박영사, 2006.
- 11) 권세혁, “통계소프트웨어SAS · SPSS활용중심 회귀분석” 자유아카데미, 2010.
- 12) Transportation Research Board, "Highway Capacity Manual", Special Report 209 Washington. D.C., 1998
- 13) Lindley, J. A., “Urban Freeway Congestion Problem and Solution : An Update”, ITE Journal, December 1989.

- 14) Wattleworth, J. A., Wallace, C. E., and Moshe. L., "DEVELOPMENT AND EVALUATION OF RAMP METERING SYSTEM ON THE LODGE FREEWAY", Texas Transportation Institute Research Report 488-3, 1967.
- 15) Farhad J. Pooran & Henry C. Lieu, "EVALUATION OF SYSTEM OPERATING STRATEGIES FOR RAMP METERING AND TRAFFIC SIGNAL COORDINATION", Federal Freeway Administration, 1995.
- 16) Karl Westby and Nancy Nihan, "Predicting the 24-Hour Delay at Signalized", ITE Journal, September 1996
- 17) Nick Thompson, "Ramp up the volume", ITS International, 1997.

