

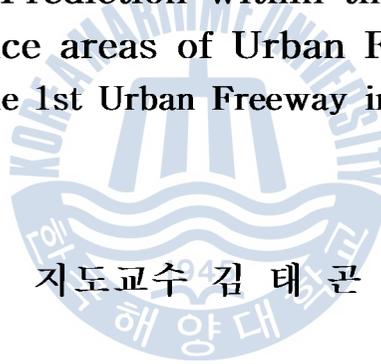
공학석사 학위논문

도시고속도로의 연결로 접속영향권내
평균속도 추정에 관한 연구

- 부산광역시 제1도시고속도로를 대상으로 -

Average Speed Prediction within the Ramp Junction
Influence areas of Urban Freeway

- Based on the 1st Urban Freeway in Busan City -



지도교수 김태곤

2011년 2월

한국해양대학교 해사산업대학원

토목환경공학과

지 승 근

本 論 文 을 지 승 근 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함.

위원장 김도삼 (인)

위 원 경갑수 (인)

위 원 김태곤 (인)



2011년 2월

한국해양대학교 해사산업대학원

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 연구 배경	1
1.2 연구 목적	1
1.3 자료 수집	2
제 2 장 자료 분석	6
2.1 교통량	6
2.2 속도	13
2.3 밀도	21
제 3 장 자료의 상관특성	28
제 4 장 속도 추정 및 검증	38
4.1 속도 추정	38
4.2 속도 검증	40

제 5 장 결론 및 향후 연구과제 42

참 고 문 헌 44



Nomenclature

v_i	Flow rate for 15min.($pc/15min$)
f_{HV}	Heavy-vehicle adjustment
P_m	Proportion of medium size vehicles(%)
P_l	Proportion of large size vehicles(%)
e_m	Passenger-car equivalent of medium size vehicles(1.5)
e_l	Passenger-car equivalent of large size vehicles(2.0)
q	Flow rate for 1 hour(pc/h)
q_i	Flow rate for 15min.($pc/15min$)
u_s	Space mean speed(km/h)
u_i	Time mean speed within each speed interval(km/h)
n	Number of vehicles
u_{us}	Mean speed of upstream at the ramp junction(km/h)
u_{ds}	Mean speed of downstream at the ramp junction(km/h)
u_{ui}	Mean speed of upstream in 1 lane at the ramp junction(km/h)
u_{uo}	Mean speed of upstream in 2 lane at the ramp junction(km/h)
u_{do}	Mean speed of downstream in 2 lane at the ramp junction(km/h)
u_{di}	Mean speed of downstream in 1 lane at the ramp junction(km/h)
u_j	Space mean speed at the ramp junction(km/h)
q_r	Flow rate at the ramp junction(pc/h)
q_{ui}	Flow rate of upstream in 1 lane at the ramp junction(pc/h)
q_{uo}	Flow rate of upstream in 2 lane at the ramp junction(pc/h)
q_{di}	Flow rate of downstream in 1 lane at the ramp junction(pc/h)
q_{do}	Flow rate of downstream in 2 lane at the ramp junction(pc/h)

s_h	Length of headway(m)
t_h	Time of headway(sec)
u_t	Time mean speed(km/h)
k	Density(pc/km)
k_{u1}	Density of upstream in 1 lane(pc/km)
k_{u2}	Density of upstream in 2 lane(pc/km)
k_{d1}	Density of downstream in 1 lane(pc/km)
k_{d2}	Density of downstream in 2 lane(pc/km)
k_u	Average density at the upstream(pc/km)
k_d	Average density at the downstream(pc/km)
k_r	Average density at the ramp junction(pc/km)
k_j	Average density within the ramp junction(pc/km)
β_0, \dots, β_5	Regression coefficient
u_{jon}	Upstream average travel speed at the ramp junction area(km/h)
u_{jof}	Downstream average travel speed at the ramp junction area (km/h)
q_u	Average travel flow rate on lane of upstream section at the ramp junction area(km/h)
q_d	Average travel flow rate on lane of upstream section at the ramp junction area(km/h)
q_r	Average travel flow rate at the ramp junction area(km/h)
u_u	Average travel speed on lane of upstream section at the ramp junction area(km/h)
u_d	Average travel speed on lane of downstream section at the ramp junction area(km/h)
u_r	Average travel speed of ramp at the ramp junction area(km/h)

List of Tables

Table 1	Geometric of ramp junctions under the study	5
Table 2	Flow rate statistics at the inbound ramp junctions	9
Table 3	Flow rate statistics at the outbound ramp junctions	10
Table 4	Speed statistics at the inbound ramp junctions	17
Table 5	Speed statistics at the outbound ramp junctions	18
Table 6	Density statistics at the inbound ramp junctions	24
Table 7	Density statistics at the outbound ramp junctions	25
Table 8	SMS predictive models constructed	40



List of Figures

Fig. 1	Sketch of the 1st urban freeway under the study	3
Fig. 2	Entrance and exit ramps of the 1st urban freeway	4
Fig. 3	Sketch of ramp junction influence areas	4
Fig. 4	Flow rate distribution at the directional ramp junctions(pcph) ..	11
Fig. 5	Flow rate distribution at the ramp junctions(pcph)	12
Fig. 6	Speed distribution at the directional ramp junctions(kph)	19
Fig. 7	Speed distribution at the ramp junctions(kph)	20
Fig. 8	Density distribution at the directional ramp junctions(pcpk)	26
Fig. 9	Density distribution at the ramp junctions(pcpk)	27
Fig. 10	Flow–speed relationship at the directional ramp junctions	30
Fig. 11	Flow–speed relationship at the ramp junctions	31
Fig. 12	Density–Flow relationship at the directional ramp junctions	32
Fig. 13	Density–Flow relationship at the ramp junctions	33
Fig. 14	Density–Speed relationship at the directional ramp junctions	34
Fig. 15	Density–Speed relationship at the ramp junctions	35
Fig. 16	Q–K–U scatter–plot matrices	37
Fig. 17	Sketch of ramp junction influence area	38
Fig. 18	Average speed verification at the directional ramp junctions	40
Fig. 19	Average speed verification at the ramp junctions	41

Average Speed Prediction within the Ramp Junction
Influence areas of Urban Freeway
– Based on the 1st Urban Freeway in Busan City –

Seung Keun, Ji

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

Abstract

Urban freeway is generally a high-speed roadway facility carrying the tremendous automobiles and keeping the free flow speed except for the rush hours as a primary arterial highway connected between the downtown area and the suburban area or circulated along the circumference of the suburban area in the big city. However, most of the urban freeways are suffering from severe traffic congestion due to the increased traffic volumes regardless of the rush hours. Thus, it is strongly needed to study an appropriate measure for increasing the efficiency of existing urban freeway instead of constructing the new urban freeway.

This study was to collect real-time traffic characteristic data (flow, speed, occupancy, headway, etc.) at the upstream sections, the downstream sections, and the ramp sections within the urban freeway ramp influence areas under the study, analyze the correlation between traffic characteristic data at the above sections within the urban freeway

ramp influence areas, and finally suggest the optimal speed models using the traffic characteristic data within the urban freeway ramp influence areas.

From the traffic characteristic analyses, and development and verification of speed models in the urban freeway ramp junctions, the following conclusions were drawn:

i) Analysis of traffic characteristics showed that there was a distinct difference in lane-based traffic characteristics, especially higher traffic volumes, lower speed and higher density in the 2nd lane than those in the 1st lane in the urban freeway ramp influence areas.

ii) Average speed within the urban freeway on-ramp influence areas showed a high correlation with upstream flow and speed, and ramp flow and speed, but average speed within the urban freeway off-ramp influence areas showed a high correlation with downstream flow and speed, and ramp speed.

iii) Speed models in the urban freeway ramp influence areas under the study showed a high explanatory power with the determination coefficients(R^2) of 0.99 in the on-ramp influence areas and 0.96 in the off-ramp influence areas, respectively.

iv) Speed models in the urban freeway ramp influence areas under the study proved a high correlation between observed speeds and expected speeds with the high correlation coefficients(r) of about 0.996 in the on-ramp influence areas and 0.938 in the off-ramp influence areas, respectively.

1. 서론

1.1 연구 배경

일반적으로 도시고속도로(urban freeway)란 도시지역 내 설치 운행되는 고속화도로로서 도시교통체계의 중추적인 역할을 담당하고 있고, 도시지역 내 대용량의 통행수요를 신속하게 처리하는 핵심 도로교통시설로서 출퇴근시간대를 제외하고는 거의 자유흐름속도(free flow speed)를 유지하는 도로라 할 수 있다.

이러한 도시고속도로가 그 기능과 역할을 제대로 발휘하기 위해서는 국외의 경우처럼 도시고속도로의 적절한 배치와 규모로 통행수요의 급격한 변화에 적절히 대처할 수 있도록 계획, 설계, 유지 및 관리가 이루어진다면 문제 제기가 되지 않겠으나, 국내의 경우 대부분의 도시고속도로에서 도시권역의 확대와 함께 그 처리용량에 비하여 통행수요의 급격한 증가와 주변 간선도로와의 연계성 부족 등으로 인하여 출퇴근시간대에 관계없이 극심한 교통체증에 상시 시달리고 있어서 도시고속도로의 특성을 제대로 파악하고 적절한 교통대책을 강구해야 할 상황이다.

더구나 국내 대부분의 도시지역에서는 기존의 도로고속도로가 통행수요에 비해 상당히 부족한 상태이고 도시권역의 확대와 인구유출입에 따라 새로이 유발되는 통행수요에 비해 새로운 도로고속도로의 공급은 턱없이 부족하다. 그러나 새로운 도로고속도로의 공급에 있어서는 한계가 있기 때문에 재원과 시설여건의 허용범위 내에서 새로운 도시고속도로를 지속적으로 공급하면서 동시에 기존 도시고속도로에 대한 효율성 증대방안에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다.

1.2 연구 목적

도시고속도로는 그 구성에 있어서 고속도로(expressway)와 같이 기본구간,

엇갈림구간, 연결로구간 및 연결로 접속구간으로 되어 있다. 그러나 고속도로와 달리 도시고속도로는 도시지역 내에 위치하고 있기 때문에 고속도로에 비해 토지이용의 한계, 도로연장, 제한속도, 구배 및 폭원 등에 있어서 상당한 차이를 보이고 있고, 도시고속도로에 있어서 정체영역과 비정체영역의 구분이 명확하며, 고속도로에 비해 통행수요가 상대적으로 많고 통행 장이 짧은 특징을 보이고 있다(김 갑수 등, 1998).

더구나 도시고속도로는 고속도로에 비해 통행 장이 짧고 진출입연결로가 상대적으로 많기 때문에 진출입 연결로의 접속구간 내에서 연결로를 통한 진출입 차량의 차로변경에 따른 상충과 엇갈림으로 인해 차량의 가다 서다(stop-and-go)행위가 반복됨으로써 상대적으로 교통정체와 사고가 자주 발생되고 있는데, 이러한 차량의 상충과 가다 서다 행위는 진입연결로 접속구간에서 많이 발생되고 있는 반면, 진출연결로의 접속구간 내에서는 해당 서비스도로의 교통여건에 따라 다소 차이는 있겠으나 진입연결로 접속구간에 비해 다소 적게 나타나고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 도시고속도로의 진출입연결로 접속구간 내 통행특성을 파악하여 교통시설의 효율성 증대를 도모하기 위해 도시고속도로의 진출입연결로 접속구간을 대상으로 기초자료를 수집하고, 수집된 기초자료를 중심으로 자료 분석을 실시하며, 그 자료 분석결과를 바탕으로 설명력 있고 신뢰성이 높은 평균속도의 추정모형을 제시함으로써 도시고속도로의 서비스수준(level of service, LOS) 평가를 통한 교통관리체계 구축에 기여하고자 한다.

1.3 자료수집

본 연구대상지역으로는 인구 360만 명의 국내 제2의 대도시이고 국내 최대의 국제무역항이며 배산임해의 지형적 특징을 가진 부산지역이 선정되었고, 연구대상구간으로는 부산지역의 남과 북을 축으로 연결하며 도심권역과 부도심권역을 연결하는 대표적인 도시고속도로인 제1 도시고속도로를 중심으로 차량의

진입연결로 접속구간 4곳과 진출연결로 접속구간 4곳이 선정되었다.

한편, 본 연구대상 제1 도시고속도로는 양방향 4차로의 입체도로시설로 8개의 진출입연결로와 8개의 진출연결로 그리고 5개소의 터널로 구성되어 있었고, 제한속도는 본선에서 80km/h, 연결로에서 50km/h로 운영되고 있었으며, 차량의 과속을 통제하기 위하여 본선 상에 방향별로 각각 3개의 속도 감시카메라가 설치 운영되고 있었다.

그런데 본 연구를 위한 기초자료의 수집을 위해 연구대상 제1 도시고속도로의 진출입연결로 접속구간 내 설치된 검지기의 위치(상류부 1, 2차로(U), 하류부 1, 2차로(D) 및 연결로(R))와 제1 도시고속도로의 기하구조특성은 Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3과 Table 1과 같았다.



Fig. 1 Sketch of the 1st urban freeway under the study

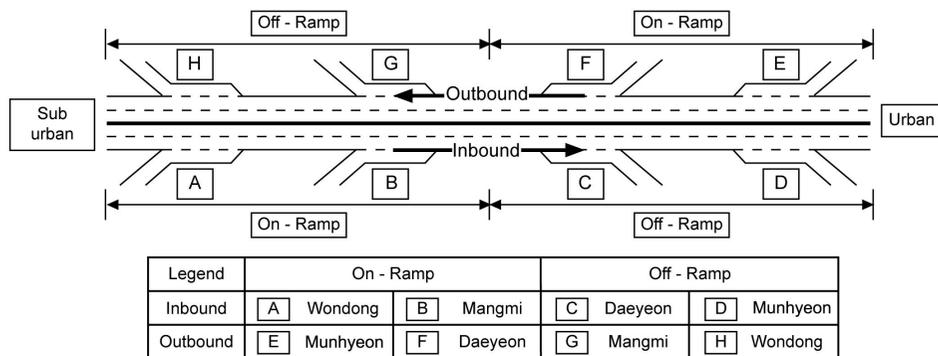


Fig. 2 Entrance and exit ramps of the 1st urban freeway

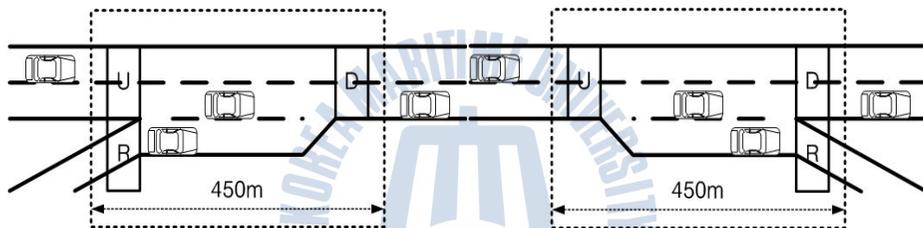


Fig. 3 Sketch of ramp junction influence areas

특히, 본 연구를 위해 연구대상 제1 도시고속도로의 도심방향과 부도심방향에서 각각 2개씩 4개의 진입연결로(도심방향은 원동(A)과 망미(B), 부도심방향은 문현(C)과 대연(D))와 4개의 진출연결로(도심방향은 대연(E)과 문현(F), 부도심방향은 망미(G)와 원동(H))가 선정되었고, 선정된 진출입연결로의 접속 구간 내 5개 지점(상류부 1, 2차로, 하류부 1, 2차로 및 연결로)에 대해 2008년 3월부터 5월 사이에 4주 동안 매 15분 단위로 1일 24시간씩 실시간의 교통특성의 기초자료가 반복적으로 수집되었다.

그리고 수집된 기초자료 중에서 오류를 배제한 주중(화, 수, 목)자료만이 본 연구에 사용되었으며 자료의 비교 분석, 평균속도의 추정 및 검증을 위해 MS Office 2007과 SPSS(Ver. 12.0)등의 소프트웨어가 사용되었다.

Table 1 Geometry of ramp junctions under the study

Ramp junctions	Munhyeon		Daeyeon		Mangmi		Wondong	
가속차로길이(m)	E	70	F	170	B	80	A	170
감속차로길이(m)	D	80	C	170	G	150	H	120
변속차로의 형식	평행식							
차로 수	2(본선) / 1(연결로)							
차로 폭(m)	3.7(본선) / 3.7~5.0(연결로)							
제한속도(km/h)	80(본선) / 50(연결로)							
측방여유폭(m)	1.2(중앙분리대측) / 2.0(도로우측)							



2. 자료 분석

본 연구대상 도시고속도로의 진출입연결로 접속구간 내에서 관측된 기초자료 중에서 화요일과 수요일 자료가 자료 분석에 사용되었고, 각 차로별/방향별 교통특성의 비교 분석을 위해서 가공되었다. 특히 교통량(volume)은 교통류율(flow rate)로 환산되었고, 속도(speed)는 지점평균속도와 속도등급분포를 바탕으로 공간평균속도로 전환되었으며, 밀도(density)는 차두거리(headway distance)와의 역비례관계로부터 산정되어 기초자료의 분석에 사용되었다.

2.1 교통량

일반적으로 교통량(flow)이란 일정한 시간동안 관측된 차량대수를 의미하는데, 교통량자료의 특성분석을 위해서는 단위시간동안의 교통류율로 전환되어야 한다.

따라서 본 연구대상 진출입연결로의 접속구간 내에서 관측된 교통량은 단위 시간 중심의 교통류율로 전환되었고, 중 차량 보정계수가 고려된 승용차 환산대수의 교통류율(flow rate)로서 그 단위는 passenger car per hour(pc/h)로 표현되었으며, 특히 1시간단위의 교통량으로서 다음과 같이 산정되어 교통량자료의 특성분석에 사용되었다.

$$q_i = \frac{v_i}{f_{HV}} \quad (1)$$

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + p_m(1 - e_m) + p_l(1 - e_l)} \quad (2)$$

$$q = \sum_{i=1}^4 q_i \quad (3)$$

여기서,

- v_i : 15분 단위시간의 교통류율(veh/15min)
- f_{HV} : 중 차량 보정계수
- p_m : 중형차량(6m~12m)의 비율(%)
- p_l : 대형차량(12m 이상)의 비율(%)
- e_m : 중형차량의 승용차 환산계수(1.5)
- e_l : 대형차량의 승용차 환산계수(2.0)
- q : 1시간 단위시간의 교통류율(pc/h)
- q_i : 15분 단위시간의 교통류율(pc/15min)

한편, 도심방향의 진출입연결로 접속구간 내 교통량 자료를 분석해 보면, 연결로별로 다소 차이는 있었으나 차로별 평균통행량이 약 800pc/h~1,200pc/h의 분포를 보였고, 오전·오후 출퇴근시간대에는 약 1,100pc/h~1,700pc/h의 통행량 분포를 보였다. 특히 부도심지역에 근접한 진입연결로 A(원동)에서는 오후 퇴근시간대가 오전 출근시간대보다 많은 약 1,350pc/h의 통행량이 집중되는 것으로 나타났고, 도심지역에 근접한 진출연결로 D(문현)에서는 오전 출근시간대에 오후 퇴근시간대보다 많은 약 1,450pc/h 통행량이 집중되는 것으로 나타났다. 그러나 도심과 부도심지역사이의 진입연결로 B(망미)와 진출연결로 C(대연)에서는 출퇴근시간대 통행량이 각각 약 1,700pc/h와 1,550pc/h로 오전·오후 출퇴근시간대의 통행량에 있어서 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.

또한, 부도심방향의 진출입연결로 접속구간 내 교통량 자료를 분석해 보면, 역시 연결로별로 차이는 있었으나 차로별 평균통행량이 약 900pc/h~1,200pc/h로 나타났고, 오전·오후 출퇴근시간대에는 약 1,100pc/h~1,600pc/h의 통행량 분포를 보였다. 특히 부도심지역에 근접한 진출연결로 H(원동)에서는 오전 출근시간대가 오후 퇴근시간대보다 많은 약 1,400pc/h의 통행량이 집중되는 것으로 나타났고, 도심지역에 근접한 진입연결로 E(문현)에서는 오후 퇴근

시간대가 오전 출근시간대보다 많은 약 1,300pc/h 통행량이 집중되는 것으로 나타났다. 그러나 도심과 부도심지역사이의 진입연결로 F(대연)와 진출연결로 G(망미)에서는 오전 출근시간대에 통행량이 다소 높은 1,600pc/h를 보이는 것으로 나타났다(참조 Table 2 and 3과 Fig. 4 and 5).

따라서 방향별 교통량의 자료 특성분석결과로부터 오전·오후 출퇴근시간대를 중심으로 차량집중정도에 따라 도시고속도로의 서비스수준이 최대로 유지될 수 있도록 진출입연결로 접속구간에 대해 실시간의 가변정보표지판(variable message sign, VMS)과 같은 교통관리체계의 구축여부를 검토할 필요가 있다고 판단되었다.

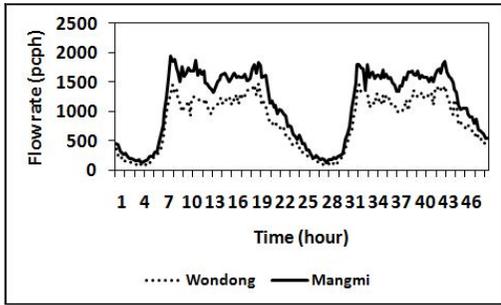


Table 2 Flow rate statistics at the inbound ramp junctions

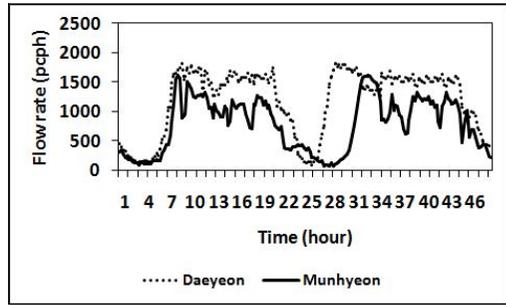
Ramp junction			Flow rate(pch)		
			Lane 1	Lane 2	
Inbound	On-ramp	A	Max.	1,528	1,808
			Min.	36	108
			Avg.	837	
			AM Peak	1,258	
			PM Peak	1,343	
		B	Max.	1,948	2,380
			Min.	80	148
			Avg.	1,119	
			AM Peak	1,708	
			PM Peak	1,687	
	Off-ramp	C	Max.	1,952	2,172
			Min.	60	136
			Avg.	1,188	
			AM Peak	1,547	
			PM Peak	1,555	
		D	Max.	1,484	1,884
			Min.	4	100
			Avg.	778	
		AM Peak	1,418		
		PM Peak	1,101		

Table 3 Flow rate statistics at the outbound ramp junctions

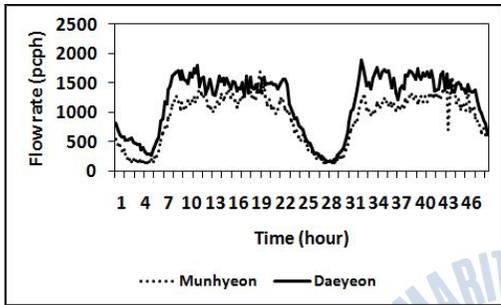
Ramp junction			Flow rate(pcp)		
			Lane 1		Lane 2
Outbound	On-ramp	E	Max.	1,356	2,064
			Min.	80	172
			Avg.	912	
			AM Peak	1,112	
			PM Peak	1,304	
		F	Max.	1,716	2,468
			Min.	128	188
			Avg.	1,192	
			AM Peak	1,601	
			PM Peak	1,466	
	Off-ramp	G	Max.	2,004	1,880
			Min.	96	184
			Avg.	1,206	
			AM Peak	1,607	
			PM Peak	1,566	
		H	Max.	1,504	1,840
			Min.	56	160
			Avg.	957	
		AM Peak	1,390		
		PM Peak	1,178		



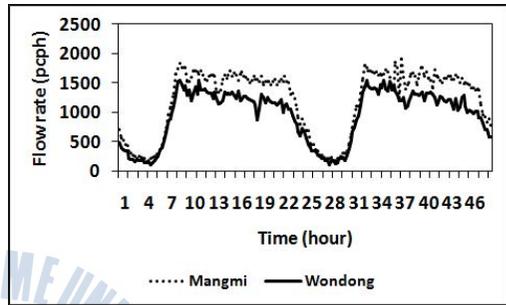
Inbound on-ramp



Inbound off-ramp

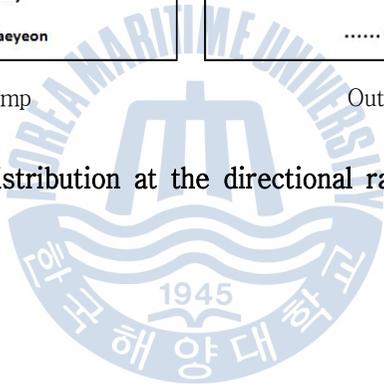


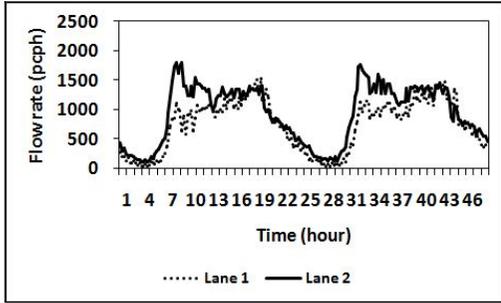
Outbound on-ramp



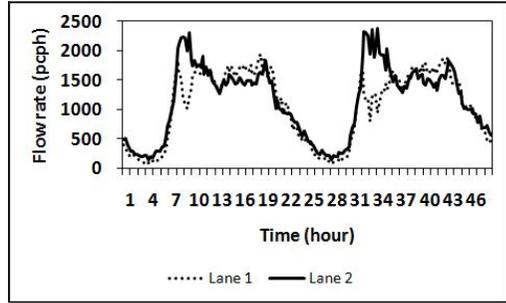
Outbound off-ramp

Fig. 4 Flow rate distribution at the directional ramp junctions(pcph)

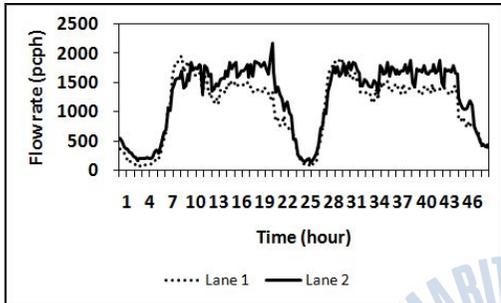




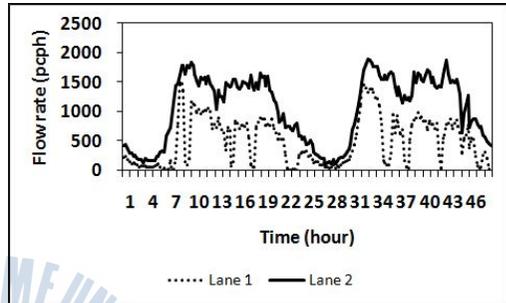
On-ramp junction A



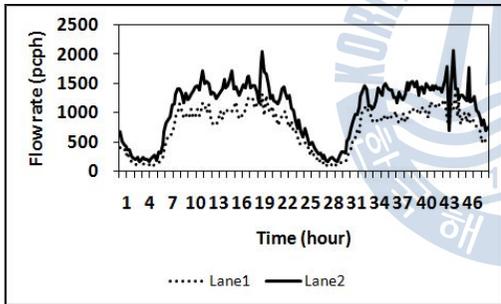
On-ramp junction B



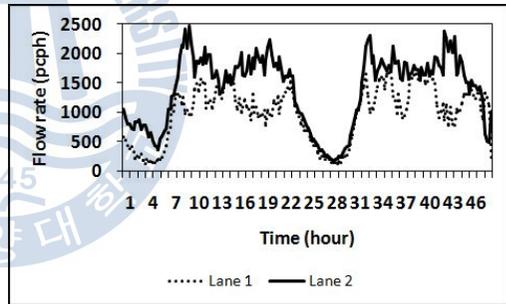
Off-ramp junction C



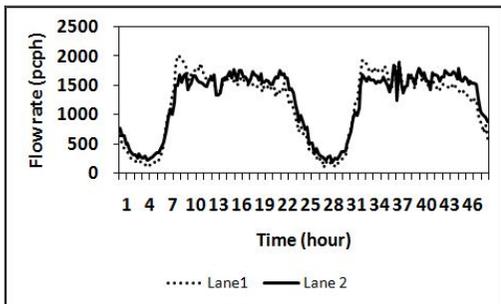
Off-ramp junction D



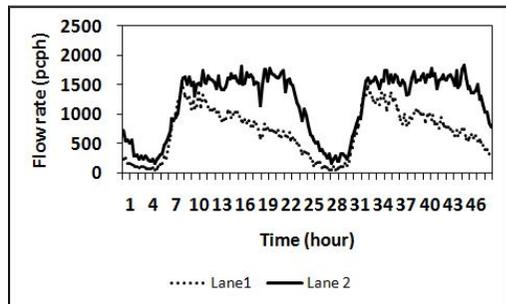
On-ramp junction E



On-ramp junction F



Off-ramp junction G



Off-ramp junction H

Fig. 5 Flow rate distribution at the ramp junctions(pcph)

2.2 속도

일반적으로 속도(speed)란 단위시간동안에 차량이 주행한 거리로서 kilometer per hour(km/h)나 mile per hour(mph)로 표현되지만, 속도자료의 특성분석을 위해서는 지점평균속도(spot mean speed)보다는 공간평균속도(space mean speed)로 전환되어야 한다.

따라서 본 연구대상 진출입연결로의 접속구간 내 관측된 속도는 지점평균속도(u_i)로 아래와 같은 계산과정을 통해서 공간평균속도(u_s)로 전환되어 속도자료의 특성분석에 사용되었다.

$$u_s = \frac{1}{\frac{1}{n} \sum \frac{1}{u_i}} \quad (4)$$

여기서,

- u_s : 공간평균속도(km/h)
- u_i : 속도등급 내 지점평균속도(km/h)
- n : 차량대수

그리고 본 연구대상 진출입연결로의 접속구간 내 전체 평균속도(u_j)는 상류부, 하류부 및 연결로지점의 관측 자료와 함께 다음과 같은 계산과정을 거쳤는데, 특히 진입연결로 접속구간 내 평균속도는 식 (5) ~ 식 (8)으로부터 산정되었고, 진출연결로 접속구간 내 평균속도는 식 (9) ~ 식 (12)으로부터 산정되어 자료 분석에 사용되었다.

$$u_{us} = \frac{q_{ui} + q_{uo}}{\left(\frac{q_{ui}}{u_{ui}} + \frac{q_{uo}}{u_{uo}}\right)} \quad (5)$$

$$u_{ds} = \frac{q_{ui} + q_{uo} + q_r}{\left(\frac{q_{ui}}{u_{ui}} + \frac{q_{uo} + q_r}{u_{do}}\right)} \quad (6)$$

$$u_{do} = \frac{k_{uo} \times u_{uo} + k_r \times u_r}{k_{uo} + k_r} \quad (7)$$

$$u_j = u_{us} \quad \text{if } (u_{us} + u_{ds})/2 \geq u_{us},$$

$$= (u_{us} + u_{ds})/2 \quad \text{otherwise} \quad (8)$$

$$u_{ds} = \frac{q_{di} + q_{do}}{\left(\frac{q_{di}}{u_{di}} + \frac{q_{do}}{u_{do}}\right)} \quad (9)$$

$$u_{us} = \frac{q_{di} + q_{do} + q_r}{\left(\frac{q_{di}}{u_{di}} + \frac{q_{do} + q_r}{u_{do}}\right)} \quad (10)$$

$$u_{uo} = \frac{k_{do} \times u_{do} + k_r \times u_r}{k_{do} + k_r} \quad (11)$$

$$u_j = u_{ds} \quad \text{if } u_{us} \geq u_{ds}$$

$$= (u_{us} + u_{ds})/2 \quad \text{otherwise} \quad (12)$$

여기서,

- u_{us} : 상류부 평균속도(km/h)
- u_{ds} : 하류부 평균속도(km/h)
- u_{ui} : 상류부 1차로 평균속도(km/h)
- u_{uo} : 상류부 2차로 평균속도(km/h)
- u_{do} : 하류부 2차로 평균속도(km/h)
- u_{di} : 하류부 1차로 평균속도(km/h)
- u_j : 접속구간 내 평균속도(km/h)
- q_r : 연결로 통행량(pc/h)

- q_{ui} : 상류부 1차로 통행량(pc/h)
- q_{uo} : 상류부 2차로 통행량(pc/h)
- q_{di} : 하류부 1차로 통행량(pc/h)
- q_{do} : 하류부 2차로 통행량(pc/h)

한편, 도심방향의 연결로 접속구간 내 평균속도의 자료를 분석해 보면, 연결로별로 약간 차이는 있었으나 차로별 평균속도가 약 60km/h~65km/h의 분포를 보였고, 오전·오후 출퇴근시간대에는 약 32km/h~68km/h의 속도 분포를 보였다. 특히 부도심지역에 근접한 진입연결로 A(원동)에서는 오후 퇴근시간대에 오전 출근시간대보다 높은 약 58km/h의 속도를 유지하는 것으로 나타났고, 도심지역에 근접한 진출연결로 D(문현)에서는 오전·오후 출퇴근시간대에 약 55km/h정도로 유사한 속도를 유지하는 것으로 나타났다. 그러나 도심과 부도심지역사이의 진입연결로 B(망미)에서는 오전 출근시간대에 통행량의 집중과 함께 속도가 약 32km/h로 낮게 나타나 다른 연결로와 뚜렷한 차이를 보였다.

또한, 부도심방향의 연결로 접속구간 내 속도 자료를 분석해 보면, 역시 연결로별로 차이는 있었으나 차로별 평균속도가 약 52km/h~65km/h의 분포를 보였고, 오전·오후 출퇴근시간대에는 약 28km/h~70km/h의 속도 분포를 보였다. 특히 부도심지역에 근접한 진출연결로 H(원동)에서는 오전 출근시간대에 오후 퇴근시간대보다 높은 약 70km/h의 속도를 유지하는 것으로 나타났고, 도심지역에 근접한 진입연결로 E(문현)에서는 오후 퇴근시간대가 오전 출근시간대보다 낮은 약 44km/h의 속도를 유지하는 것으로 나타났다. 그러나 도심과 부도심지역사이의 진입연결로 F(대연)에서는 퇴근시간대에 속도가 현저하게 낮은 약 28km/h를 보이는 것으로 나타났다(참조 Table 4 and 5와 Fig. 6 and 7).

따라서 방향별 평균속도의 자료 특성분석결과로부터 오전·오후 출퇴근시간대를 중심으로 차량집중정도에 따라 도시고속도로의 서비스수준이 최대로 유지될 수 있도록 진출입연결로 접속구간에 대해 실시간 가변정보표지판(VMS)과 연

결로 진입제어시스템(ramp metering system)과 같은 교통관리체계의 구축여부를 검토할 필요가 있다고 판단되었다.

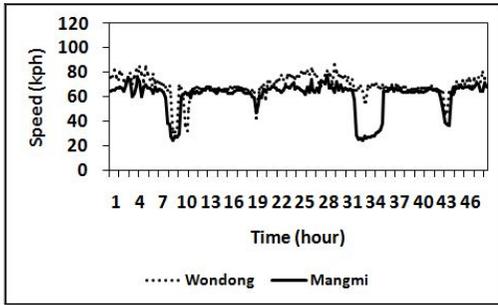


Table 4 Speed statistics at the inbound ramp junctions

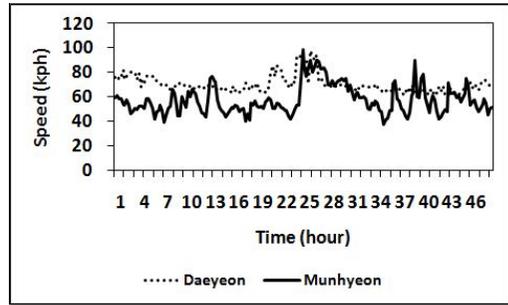
Ramp junction			Speed(kph)		
			Lane 1	Lane 2	
Inbound	On-ramp	A	Max.	110	63
			Min.	30	29
			Avg.	61	
			AM Peak	51	
			PM Peak	58	
		B	Max.	87	74
			Min.	22	26
			Avg.	61	
			AM Peak	32	
			PM Peak	58	
	Off-ramp	C	Max.	104	104
			Min.	71	37
			Avg.	65	
			AM Peak	68	
			PM Peak	62	
		D	Max.	116	89
			Min.	20	53
			Avg.	60	
		AM Peak	55		
		PM Peak	56		

Table 5 Speed statistics at the outbound ramp junctions

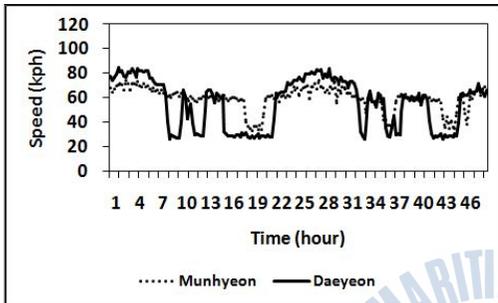
Ramp junction			Speed(kph)		
			Lane 1	Lane 2	
Outbound	On-ramp	E	Max.	85	65
			Min.	33	30
			Avg.	56	
			AM Peak	56	
			PM Peak	44	
		F	Max.	101	67
			Min.	22	26
			Avg.	52	
			AM Peak	39	
			PM Peak	28	
	Off-ramp	G	Max.	84	72
			Min.	41	37
			Avg.	63	
			AM Peak	69	
			PM Peak	56	
		H	Max.	103	72
			Min.	65	32
			Avg.	65	
		AM Peak	70		
		PM Peak	57		



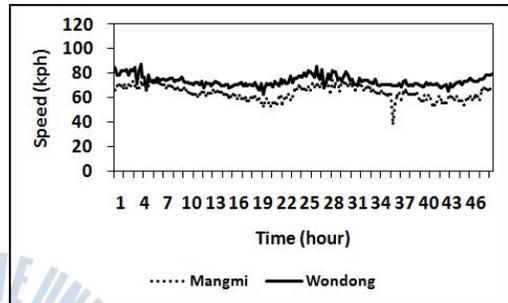
Inbound on-ramp



Inbound off-ramp

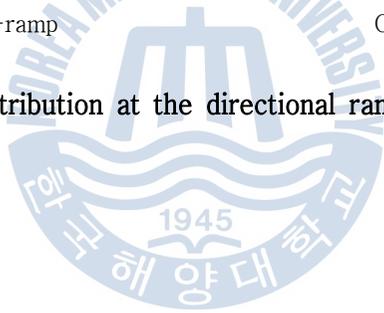


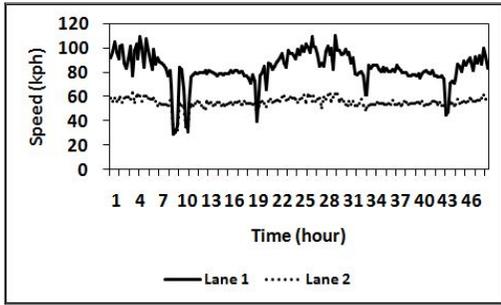
Outbound on-ramp



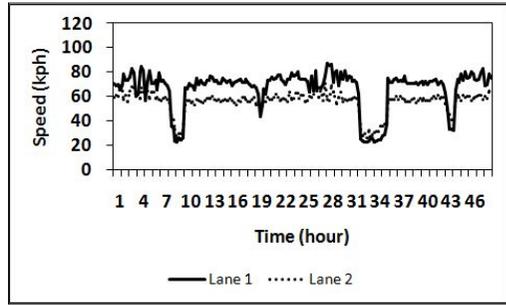
Outbound off-ramp

Fig. 6 Speed distribution at the directional ramp junctions(kph)

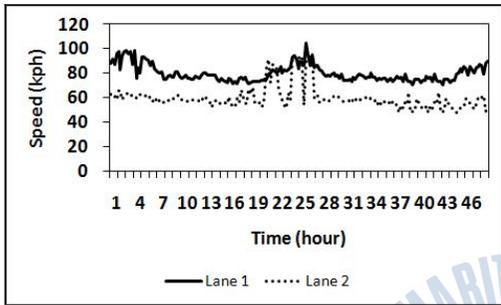




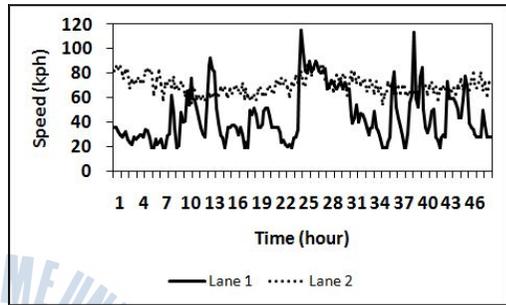
On-ramp junction A



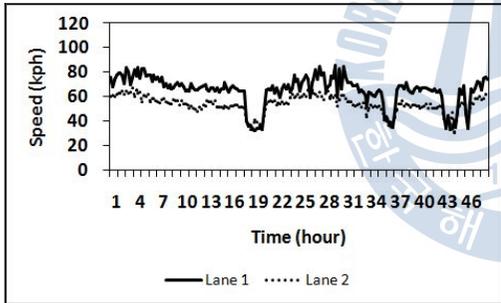
On-ramp junction B



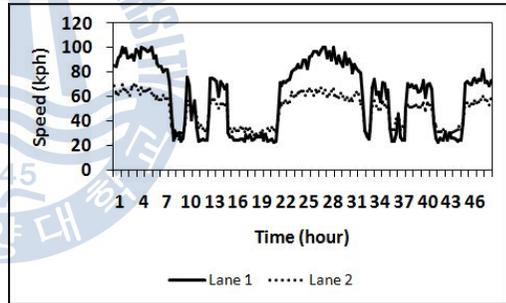
Off-ramp junction C



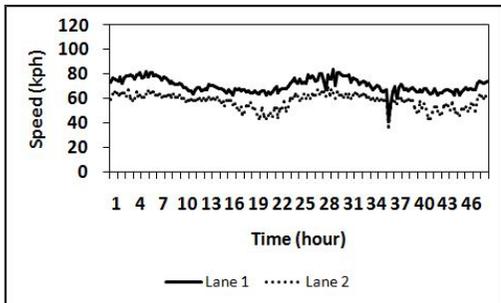
Off-ramp junction D



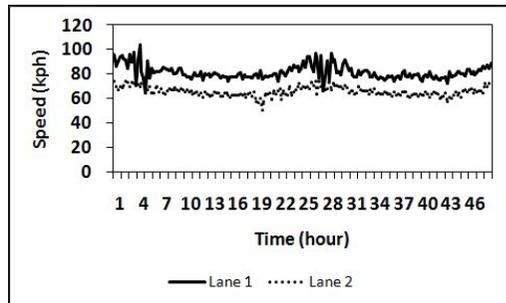
On-ramp junction E



On-ramp junction F



Off-ramp junction G



Off-ramp junction H

Fig. 7 Speed distribution at the ramp junctions(kph)

2.3 밀도

일반적으로 밀도(density)란 단위구간 내 통행하고 있는 차량대수로서 단위는 passenger car per kilometer(pc/km)나 passenger car per mile(pc/m)로 표현되지만, 밀도자료의 특성분석을 위해서 단위구간 내 이동차량의 대수를 직접 관측한다는 것은 쉽지 않기 때문에 차량과 차량사이의 평균 차두거리로부터 산정되어야 한다.

따라서 본 연구대상 진출입연결로의 접속구간 내 관측된 밀도는 관측된 평균 차두거리와의 역비례관계로 아래와 같이 산정되어 밀도자료의 특성분석에 사용되었다.

$$s_h = t_h \times u_t \quad (13)$$

$$k = \frac{1}{s_h \times f_{HV}} \quad (14)$$

$$k_u = \frac{k_{u1} + k_{u2}}{2} \quad (15)$$

$$k_d = \frac{k_{d1} + k_{d2}}{2} \quad (16)$$

$$k_j = \frac{k_u + k_d + k_r}{3} \quad (17)$$



여기서,

s_h : 차두거리(m)

t_h : 차두시간(sec)

u_t : 지점평균속도(km/h)

k : 밀도(pc/km)

k_{u1} : 상류부 1차로의 밀도(pc/km)

k_{u2} : 상류부 2차로의 밀도(pc/km)

- k_{d1} : 하류부 1차로의 밀도(pc/km)
- k_{d2} : 하류부 2차로의 밀도(pc/km)
- k_u : 상류부의 평균밀도(pc/km)
- k_d : 하류부의 평균밀도(pc/km)
- k_r : 연결로의 평균밀도(pc/km)
- k_j : 접속구간 내 평균밀도(pc/km)

한편, 도심방향의 연결로 접속구간 내 평균밀도의 자료를 분석해 보면, 연결로별로 약간 차이는 있었으나 차로별 평균밀도가 약 13.7pc/km~21.3pc/km의 분포를 보였고, 오전·오후 출퇴근시간대에는 약 20.1pc/km~55.7pc/km의 밀도 분포를 보였다. 특히 부도심지역에 근접한 진입연결로 A(원동)에서는 오전 출근시간대에 오후 퇴근시간대보다 다소 높은 약 25.5pc/km의 밀도를 보이는 것으로 나타났고, 도심지역에 근접한 진출연결로 D(문현)에서는 오전 출근시간대에 약 26.3pc/km의 밀도를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 도심과 부도심지역 사이의 진입연결로 B(망미)에서는 오전 출근시간대에 통행량의 집중과 함께 밀도가 약 55.7pc/km로 높게 나타나 다른 연결로와 현저한 차이를 보였다.

또한, 부도심방향의 연결로 접속구간 내 평균밀도의 자료를 분석해 보면, 연결로별로 차이는 있었으나 차로별 평균밀도가 약 15.0pc/km~29.1pc/km의 분포를 보였고, 오전·오후 출퇴근시간대에는 약 19.9pc/km~52.2pc/km의 밀도 분포를 보였다. 특히 부도심지역에 근접한 진출연결로 H(원동)에서는 오후 퇴근시간대에 오전 출근시간대보다 약간 높은 약 21.1pc/km의 밀도를 유지하는 것으로 나타났고, 도심지역에 근접한 진입연결로 E(문현)에서는 오후 퇴근시간대에 오전 출근시간대보다 높은 약 30.9pc/km의 밀도를 유지하는 것으로 나타났다. 그러나 도심과 부도심지역사이의 진입연결로 F(대연)에서는 오후 퇴근시간대의 밀도가 오전 출근시간대보다 현저하게 높은 약 52.2pc/km를 보이는 것으로 나타났다(참조 Table 6 and 7과 Fig. 8 and 9).

따라서 방향별 평균밀도의 자료 특성분석결과로부터 오전·오후 출퇴근시간대를 중심으로 차량집중정도에 따라 도시고속도로의 서비스수준이 최대로 유지될 수 있도록 진출입연결로 접속구간에 대해 실시간 가변정보표지판(VMS)과 연결로 진입제어시스템(ramp metering system)과 같은 교통관리체계의 구축여부를 검토할 필요가 있다고 판단되었다.

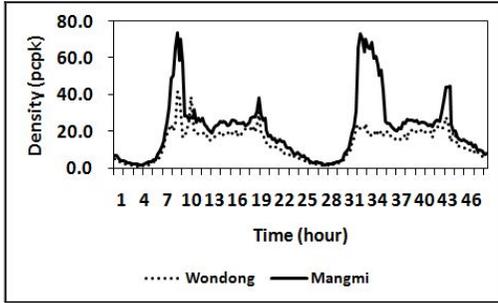


Table 6 Density statistics at the inbound ramp junctions

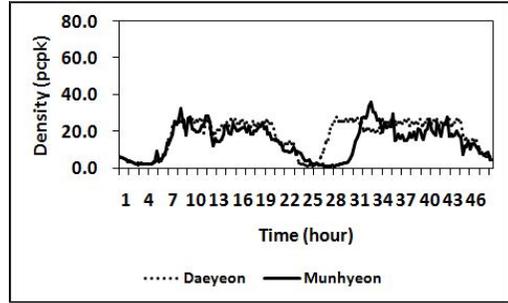
Ramp junction			Density(pcpk)		
			Lane 1		Lane 2
Inbound	On-ramp	A	Max.	31.9	55.1
			Min.	0.4	1.8
			Avg.	14.3	
			AM Peak	25.5	
			PM Peak	23.3	
		B	Max.	67.6	84.6
			Min.	0.9	2.5
			Avg.	21.3	
			AM Peak	55.7	
			PM Peak	30.2	
	Off-ramp	C	Max.	25.5	44.0
			Min.	0.6	1.6
			Avg.	18.8	
			AM Peak	22.8	
			PM Peak	25.3	
		D	Max.	46.4	30.6
			Min.	0.7	1.2
			Avg.	13.7	
		AM Peak	26.3		
		PM Peak	20.1		

Table 7 Density statistics at the outbound ramp junctions

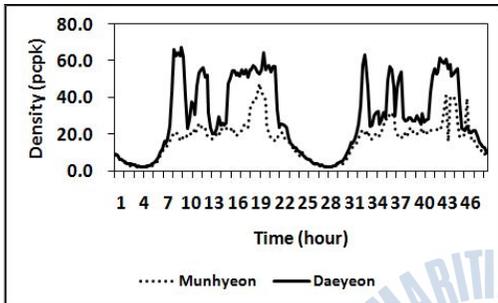
Ramp junction			Density(pcpk)		
			Lane 1		Lane 2
Outbound	On-ramp	E	Max.	44.0	52.6
			Min.	1.1	2.7
			Avg.	17.6	
			AM Peak	20.0	
			PM Peak	30.9	
		F	Max.	60.3	84.0
			Min.	1.3	3.0
			Avg.	29.1	
			AM Peak	46.6	
			PM Peak	52.2	
	Off-ramp	G	Max.	36.0	44.4
			Min.	1.2	2.7
			Avg.	20.0	
			AM Peak	24.2	
			PM Peak	28.2	
		H	Max.	18.9	49.4
			Min.	0.7	2.5
			Avg.	15.0	
		AM Peak	19.9		
		PM Peak	21.1		



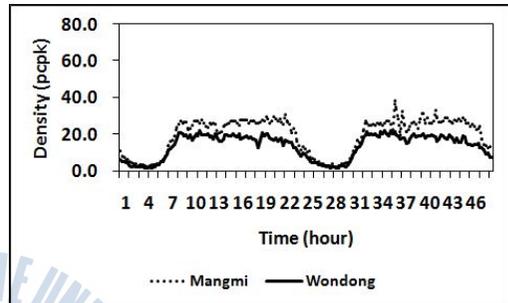
Inbound on-ramp



Inbound off-ramp

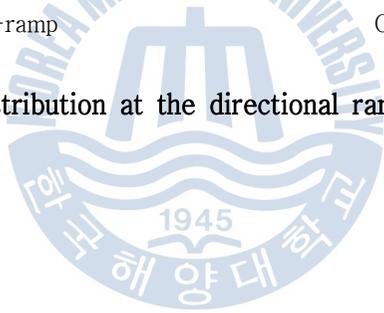


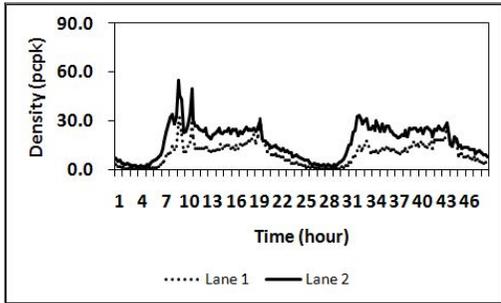
Outbound on-ramp



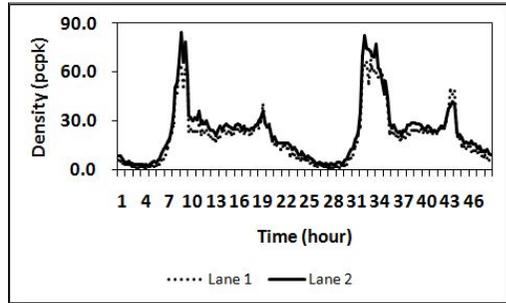
Outbound off-ramp

Fig. 8 Density distribution at the directional ramp junctions (pcpk)

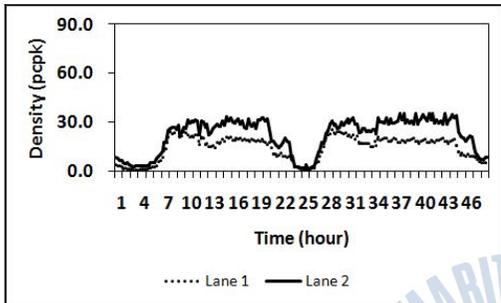




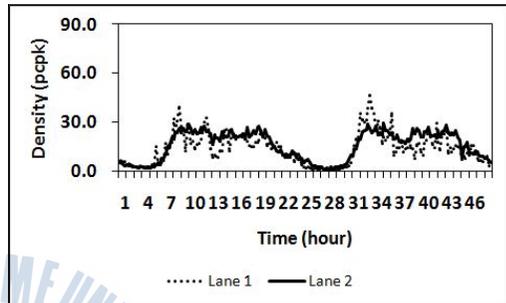
On-ramp junction A



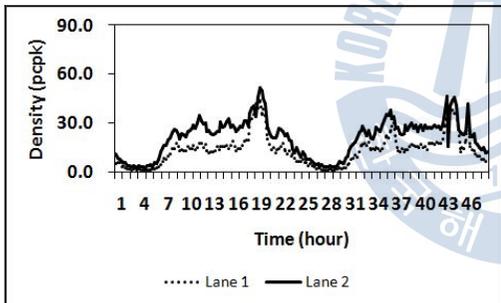
On-ramp junction B



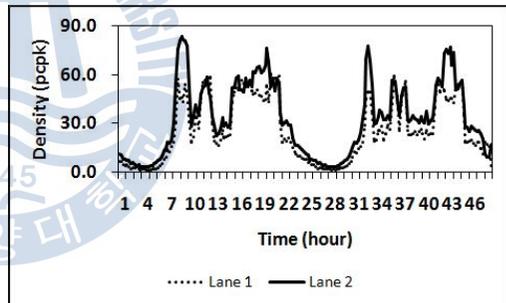
Off-ramp junction C



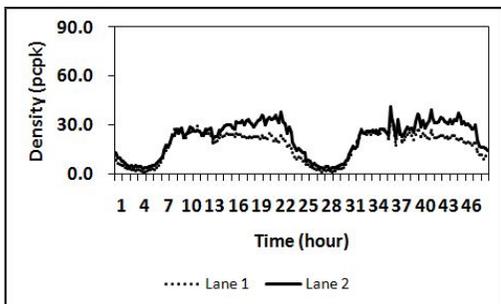
Off-ramp junction D



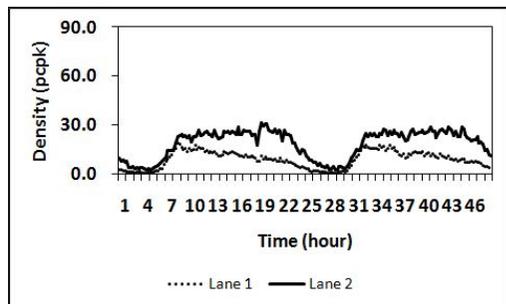
On-ramp junction E



On-ramp junction F



Off-ramp junction G



Off-ramp junction H

Fig. 9 Density distribution at the ramp junctions(pcpk)

3. 자료의 상관특성

본 연구대상 도시고속도로의 진출입연결로 접속구간 내 교통특성 기초자료의 상호관계를 파악하기 위하여 교통량과 속도, 교통량과 밀도 그리고 속도와 밀도사이의 상관특성을 비교·분석 하였다.

한편, 교통량과 속도사이에는 다음의 Fig. 10에서 보는 바와 같이 도심방향의 진출연결로 접속구간을 제외하고는 교통량이 최대 교통량(용량) 상태에 도달할 때까지 차량의 증가와 함께 속도가 점차 감소하였고, 최대 교통량 상태에 도달한 후 추가적인 차량 진입과 더불어 속도는 한층 더 감소함으로써 전형적인 포물선 형태를 보이는 것으로 나타났다. 특히, 첨두시간대 교통량이 약 1,100~1,700pc/h로 나타나 KHCM에서 제시하고 있는 고속도로 기본구간의 설계속도 80km/h일 때의 최대 교통량(2,000pc/h)보다 최대 45%까지 낮은 통행상태를 보이는 것으로 나타났다.

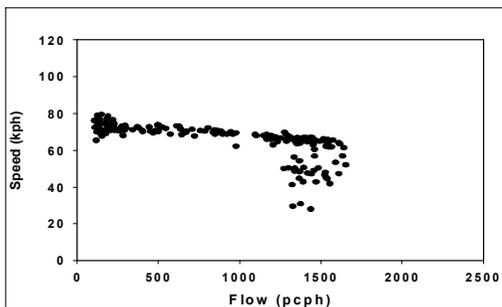
또한, 교통량과 밀도사이에는 다음의 Fig. 12에서 보는 바와 같이 진출연결로를 제외하고는 최대 교통량 상태에 도달하기 전까지 밀도증가와 함께 교통량이 계속 증가하였고, 최대 교통량 상태에 도달한 후에는 밀도증가와 함께 통행량도 감소하는 포물선 형태를 보이는 것으로 나타났다. 특히, 도심과 부도심지역에 근접한 진입연결로 A, E와 진출연결로 D, H에서는 첨두 교통량이 약 1,100~1,400pc/h 일 때 혼잡밀도가 대략 20~40pc/km 정도로 나타났고, 도심과 부도심지역사이의 진입연결로 B, F와 진출연결로 C, G에서는 첨두교통량이 약 1,500~1,700pc/h 일 때 혼잡밀도가 약 20~60pc/km 정도로 나타났다.

그리고 속도와 밀도사이에는 다음의 Fig. 14에서 보는 바와 같이 도심방향의 진출연결로를 제외하고는 밀도증가와 함께 속도는 점점 감소하는 직선 형태를 보이는 것으로 나타났다. 특히, 첨두시간대 도심과 부도심지역에 근접한 진입연결로 A, E와 진출연결로 D, H에서 혼잡밀도가 약 20~40pc/km일 때 통행속도는 약 30~70km/h로 나타났고, 도심과 부도심지역사이의 진입연결로 B, E와

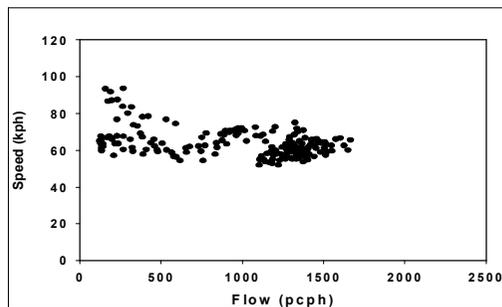
진출연결로 C, G에서 혼잡밀도가 약 20~60pc/km일 때 통행속도는 약 30~70km/h 정도로 나타났다(참조 Fig. 14, 15).

따라서 본 연구대상 도시고속도로의 연결로 접속구간 내 기초자료의 상호관계를 비교 분석한 결과, 교통량과 속도, 교통량과 밀도 그리고 속도 및 밀도사이에 전형적인 상관특성이 존재하고 있음을 확인할 수 있었다.

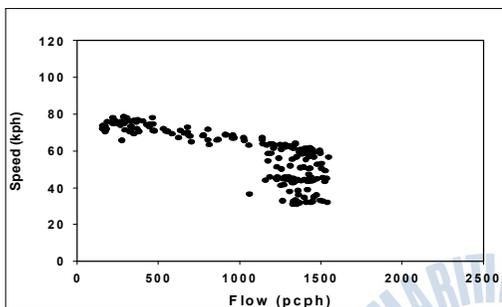




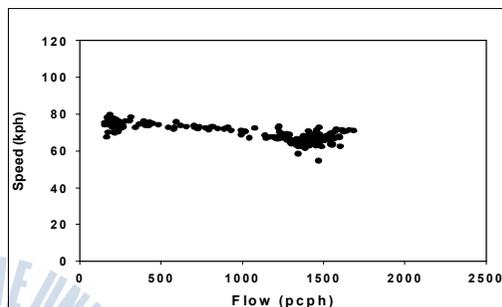
Inbound on-ramp



Inbound off-ramp



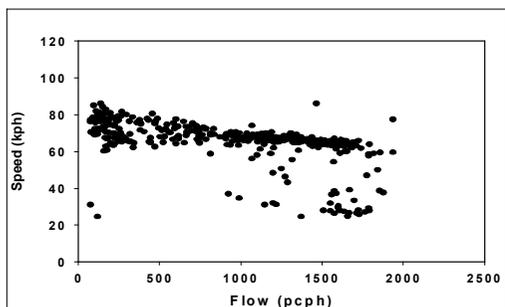
Outbound on-ramp



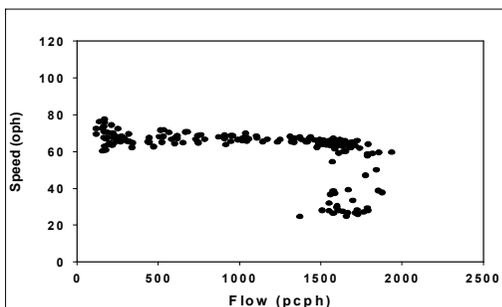
Outbound off-ramp

Fig. 10 Flow-speed relationship at the directional ramp junctions

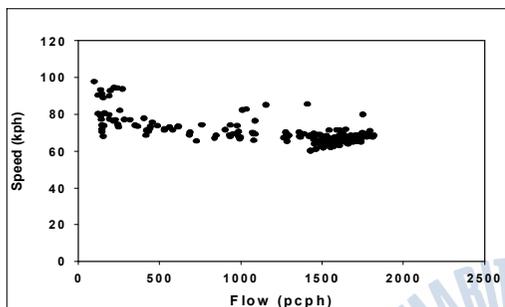




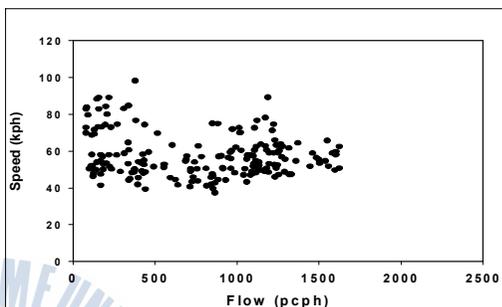
On-ramp junction A



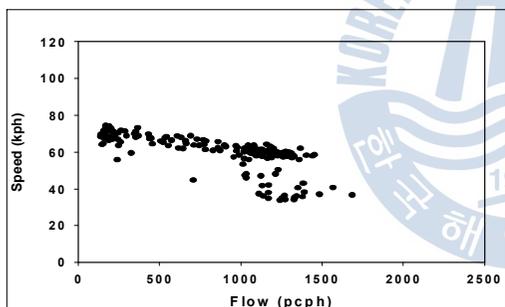
On-ramp junction B



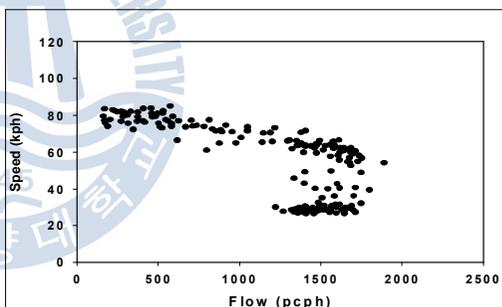
Off-ramp junction C



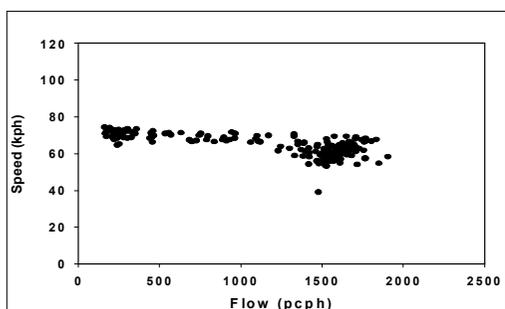
Off-ramp junction D



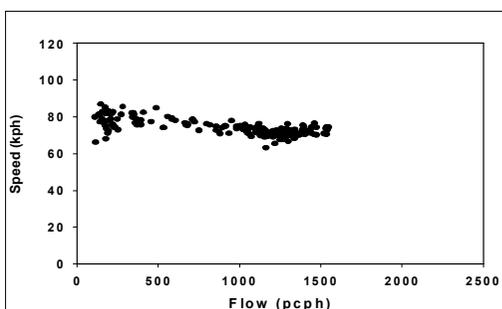
On-ramp junction E



On-ramp junction F

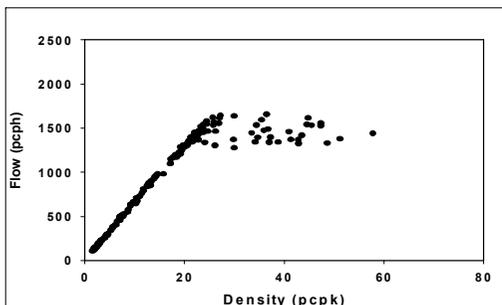


Off-ramp junction G

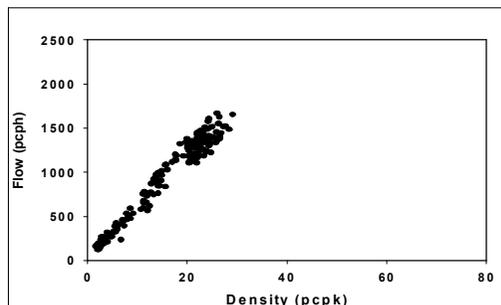


Off-ramp junction H

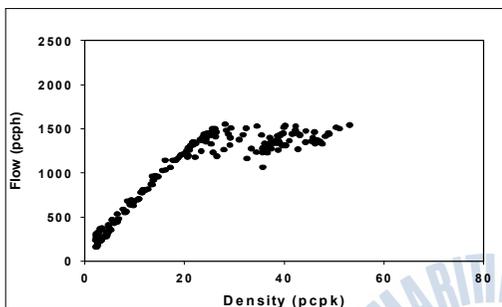
Fig. 11 Flow-speed relationship at the ramp junctions



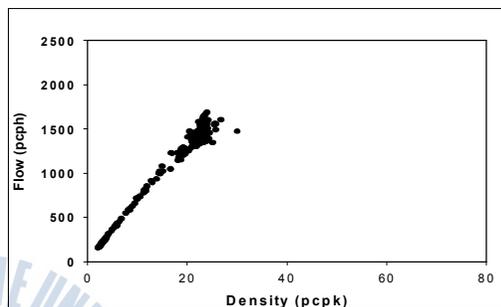
Inbound on-ramp



Inbound off-ramp



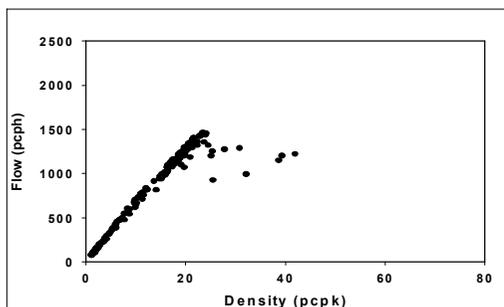
Outbound on-ramp



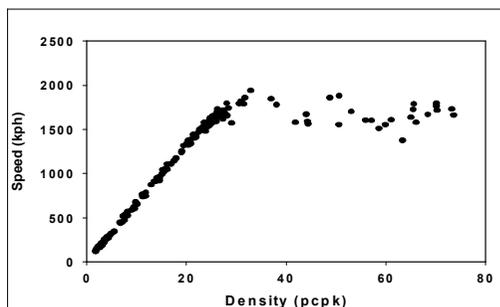
Outbound off-ramp

Fig. 12 Density–Flow relationship at the directional ramp junctions

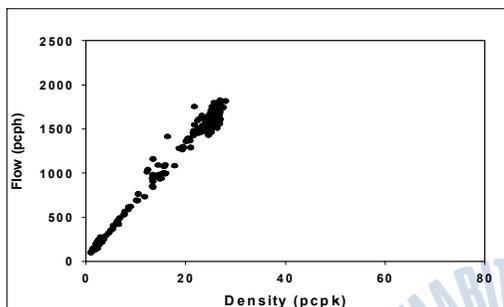




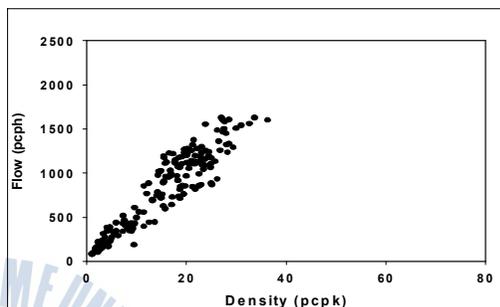
On-ramp junction A



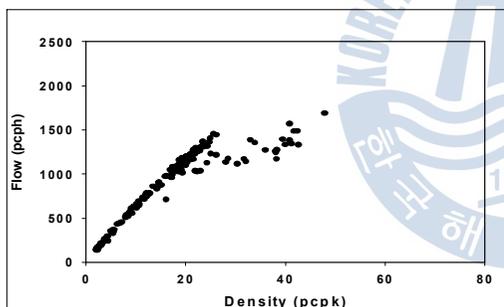
On-ramp junction B



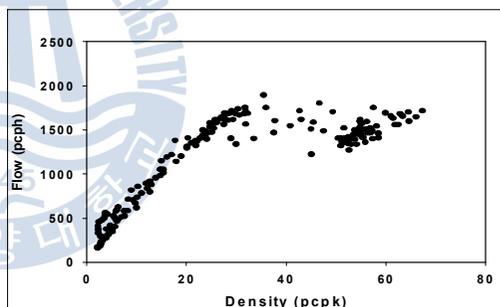
Off-ramp junction C



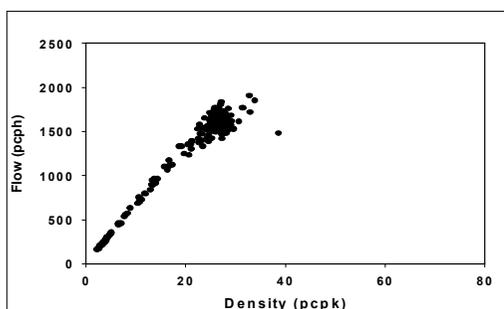
Off-ramp junction D



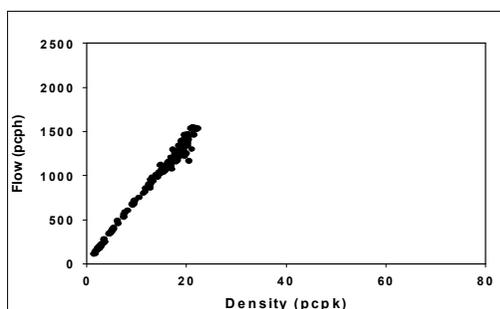
On-ramp junction E



On-ramp junction F

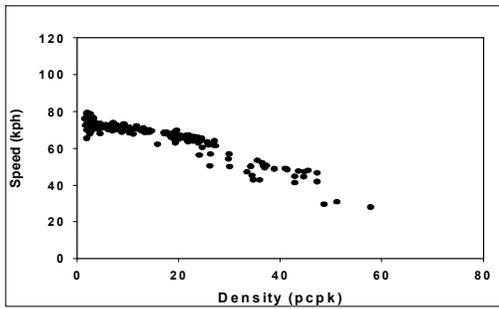


Off-ramp junction G

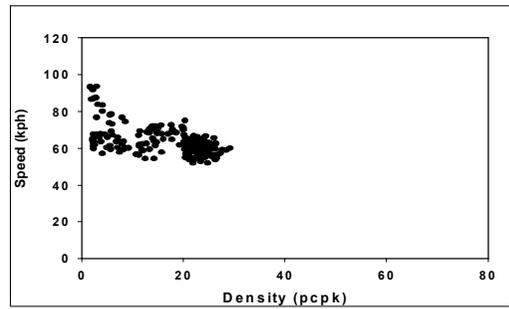


Off-ramp junction H

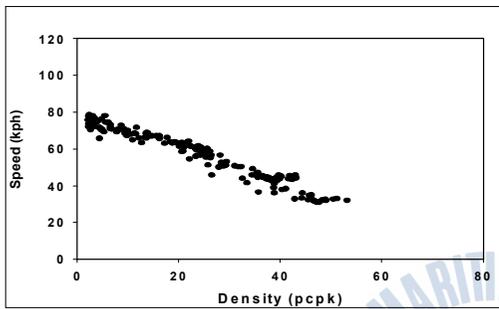
Fig. 13 Density-Flow relationship at the ramp junctions



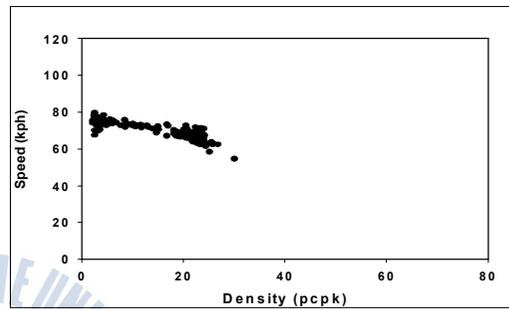
Inbound on-ramp



Inbound off-ramp

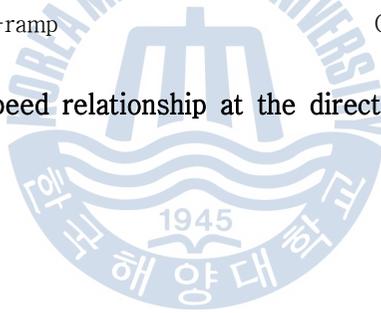


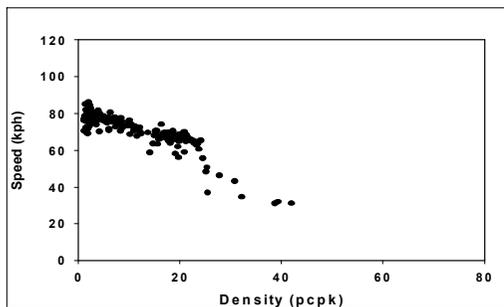
Outbound on-ramp



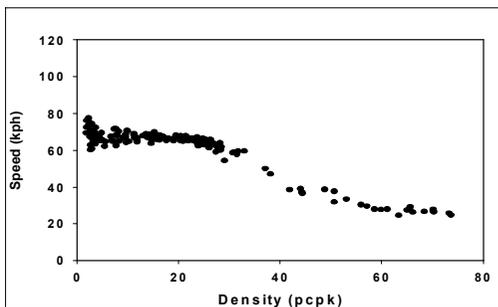
Outbound off-ramp

Fig. 14 Density-Speed relationship at the directional ramp junctions

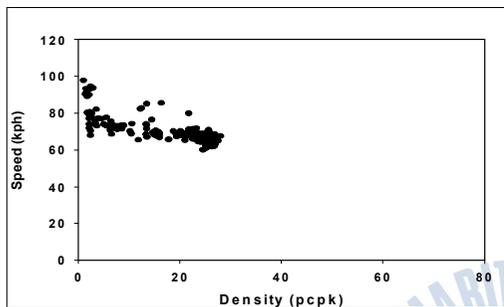




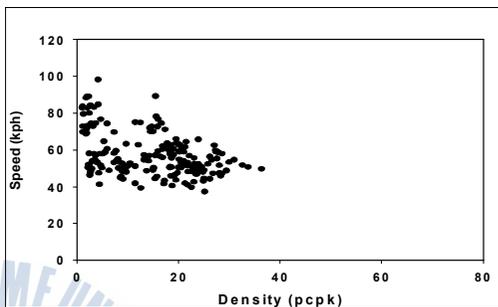
On-ramp junction A



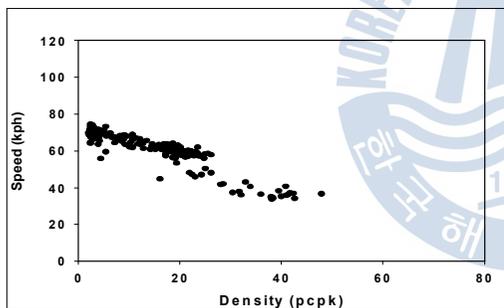
On-ramp junction B



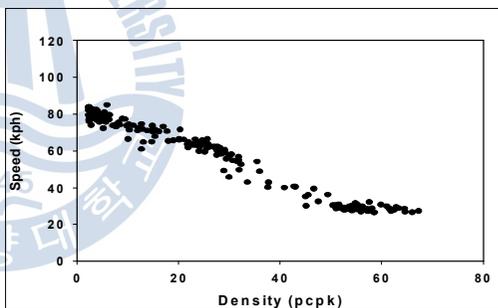
Off-ramp junction C



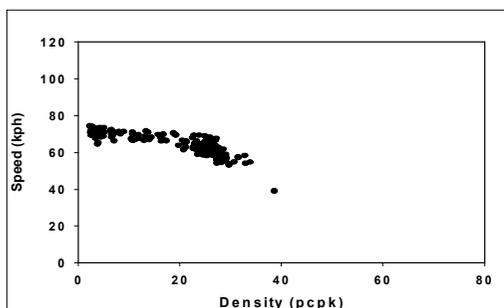
Off-ramp junction D



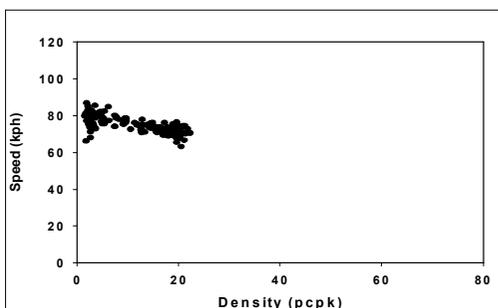
On-ramp junction E



On-ramp junction F

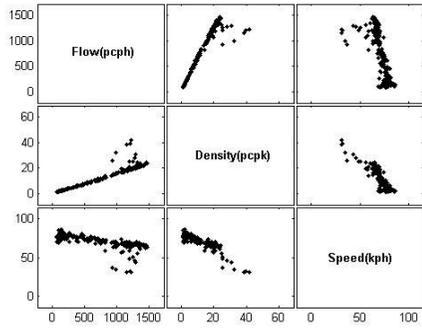


Off-ramp junction G

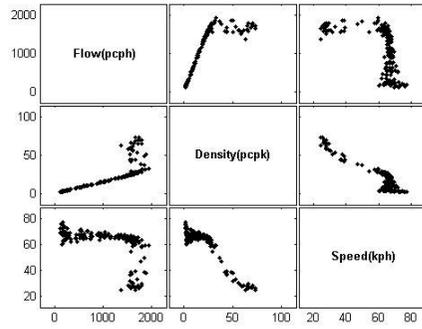


Off-ramp junction H

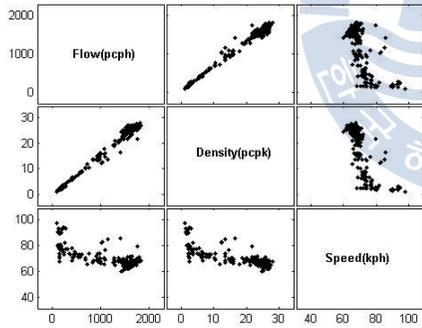
Fig. 15 Density-Speed relationship at the ramp junctions



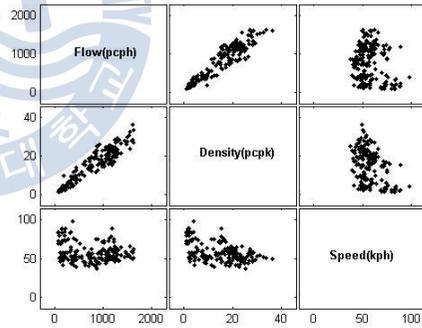
On-ramp junction A



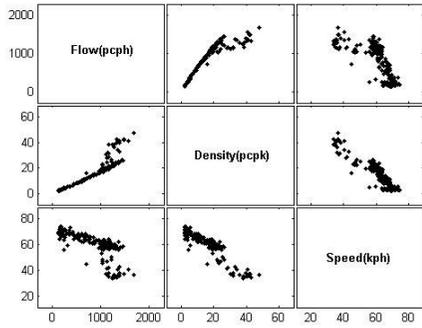
On-ramp junction B



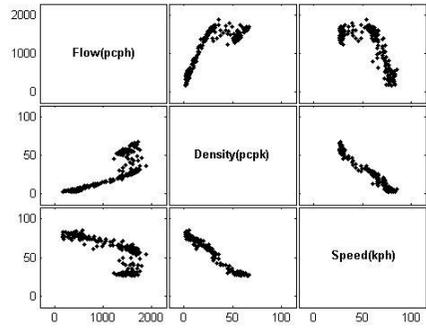
Off-ramp junction C



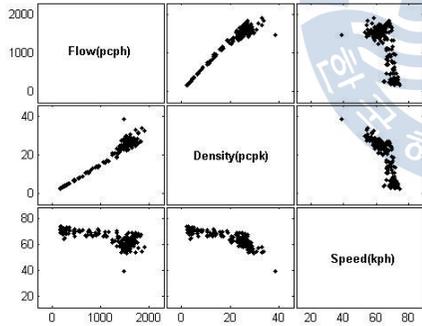
Off-ramp junction D



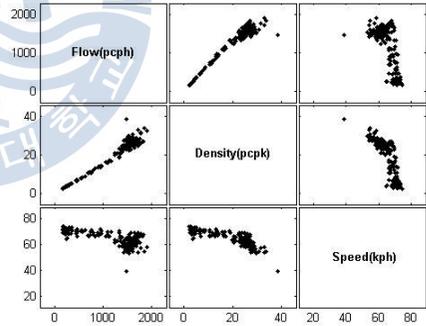
On-ramp junction E



On-ramp junction F



Off-ramp junction G



Off-ramp junction H

Fig. 16 Q-K-U scatter-plot matrices

4. 속도 추정 및 검증

본 연구대상 도시고속도로의 진출입연결로 접속구간 내 평균속도를 추정하기 위해 교통특성의 기초자료와 함께 중 회귀분석(multiple regression analysis)이 사용되었으며, 또한 추정된 평균속도를 검증하기 위해 상관관계분석(correlation analysis)이 수행되었다.

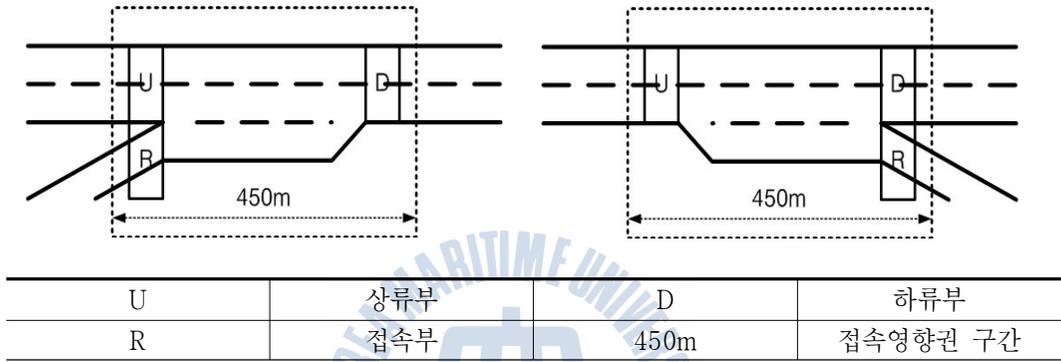


Fig. 17 Sketch of ramp junction influence area

4.1 속도 추정

본 연구대상 도시고속도로의 진출입연결로 접속구간 내 평균속도를 추정하기 위해 사용된 추정식의 종속변수로는 진출입연결로 접속구간 내 평균속도로 u_{jon} 과 u_{jof} 가 각각 사용되었고, 독립변수로는 접속구간 내 상류부, 하류부 및 연결로의 교통특성변수가 다음과 같이 사용되었다.

진입연결로 접속구간:

$$u_{jon} = \beta_0 + \beta_1 \cdot q_u + \beta_2 \cdot u_u + \beta_3 \cdot q_r + \beta_4 \cdot u_r \quad (18)$$

진출연결로 접속구간:

$$u_{jof} = \beta_0 + \beta_1 \cdot q_d + \beta_2 \cdot u_d + \beta_3 \cdot q_r + \beta_4 \cdot u_r \quad (19)$$

여기서,

β_0, \dots, β_4 : 회귀계수

u_{jon} : 진입 연결로접속구간 내 평균속도(km/h)

u_{jof} : 진출 연결로접속구간 내 평균속도(km/h)

q_u : 상류부 차로별 평균 통행량(pc/h)

q_d : 하류부 차로별 평균 통행량(pc/h)

q_r : 연결로 평균 통행량(pc/h)

u_u : 상류부 차로별 평균속도(km/h)

u_d : 하류부 차로별 평균속도(km/h)

u_r : 연결로 평균속도(km/h)

한편, 위의 평균속도의 추정에서는 중 회귀분석이 사용되었는데, 중 회귀분석을 이용한 속도추정에서 발생할 수 있는 다중공선성(multicollinearity)의 문제 해결을 위해 축차변수선택법(stepwise)이 이용되었다. 특히, 평균속도의 추정에서 결정계수(R^2)값이 진입연결로에서 0.99와 진출연결로에서 0.96으로 높은 설명력을 보이는 것으로 나타났다.

또한, 평균속도의 추정에 대한 유의확률을 나타내는 F-통계량도 0.000으로 나타나 매우 유의한 것으로 분석되었으며, 개별독립변수의 유의성을 나타내는 값들 역시 유의확률이 모두 0.000으로 매우 유의한 것으로 나타났다. 특히 진입연결로에서 연결로교통량(q_r)이 증가함에 따라 접속구간의 평균속도는 감소하는 ‘-’부호를 나타냈고, 진출연결로에서 접속구간의 하류부와 연결로속도가 증가함에 따라 접속구간의 평균속도가 증가하는 ‘+’부호를 나타냄으로써 회귀계수의 부호가 실제현상에 부합되며 합리적인 것으로 판단되었다(참조 Table 8).

Table 8 SMS predictive models constructed

On-ramp speed Model	
$u_{jon} = -2.637 + 0.825u_u + 0.207u_r + 0.003q_u - 0.004q_r$	
R^2	0.99
(Prob > F)	0.000
Off-ramp speed Model	
$u_{jof} = -4.071 + 0.877u_d + 0.120u_r + 0.002q_d$	
R^2	0.96
(Prob > F)	0.000

Note : $(P > |T|) = (P\text{-value})$

4.2 속도 검증

본 연구대상 도시고속도로의 진출입연결로 접속구간 내 추정속도를 검증하기 위하여 평균속도의 추정식으로부터 예측된 평균속도자료와 관측된 평균속도자료 사이에 상관관계분석이 수행되었다.

특히, 두 속도자료 사이에 상관관계분석을 수행한 결과, 상관계수(r)값이 진입연결로에서 0.996, 진출연결로에서 0.938로 매우 높게 나타남으로써 평균속도 추정식의 유효성이 높은 것으로 판단되었다(참조 Fig 18).

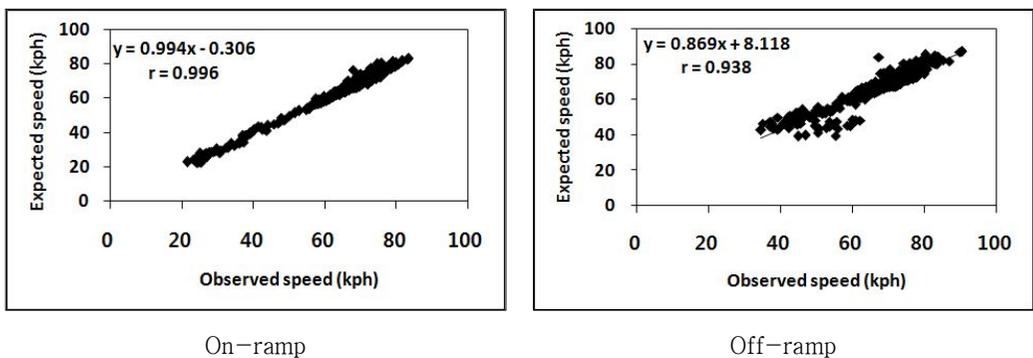
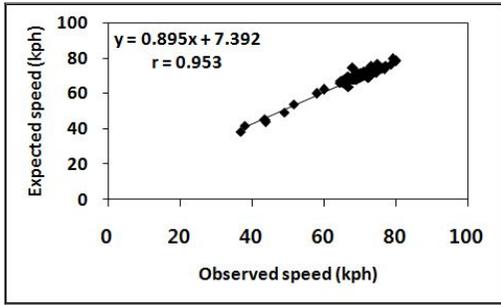
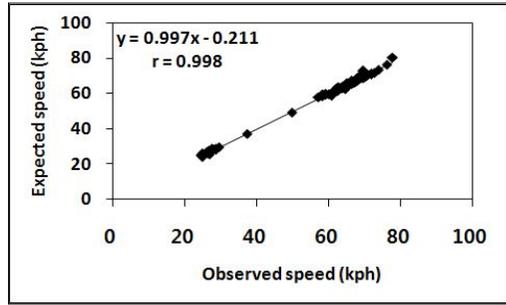


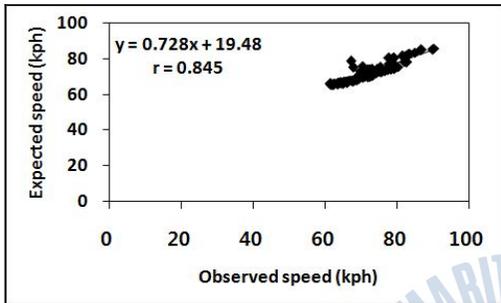
Fig. 18 Average speed verification at the directional ramp junctions



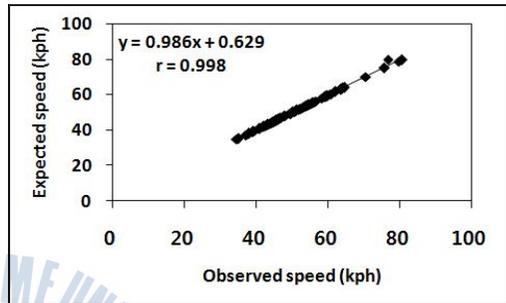
On-ramp junction A



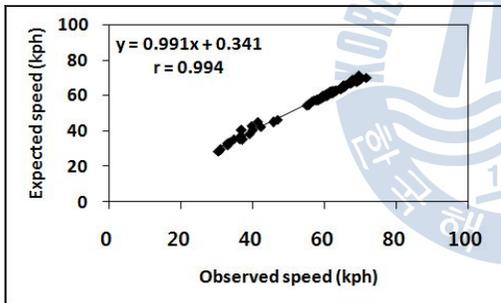
On-ramp junction B



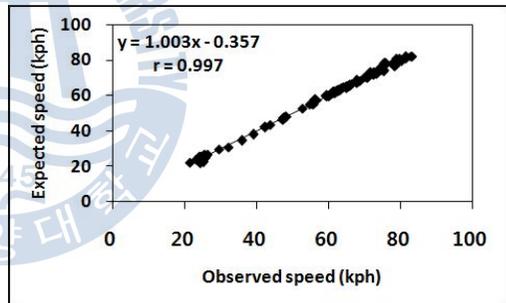
Off-ramp junction C



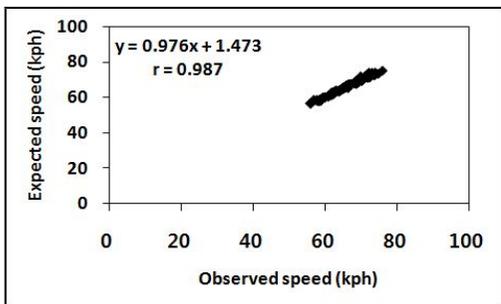
Off-ramp junction D



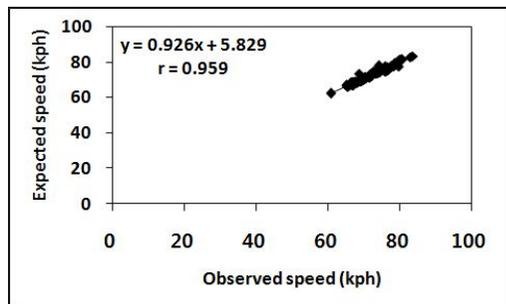
On-ramp junction E



On-ramp junction F



Off-ramp junction G



Off-ramp junction H

Fig. 19 Average speed verification at the ramp junctions

5. 결론 및 향후 연구과제

도시고속도로의 진출입 연결로접속구간 내에서 관측된 자료 분석과 평균속도 추정식의 구축 및 검증을 통해서 다음과 같은 결론에 도달할 수 있었다.

i) 본 연구대상의 교통특성 분석 결과, 각 차로별로 뚜렷한 차이를 보였다. 특히, 연결로 접속구간 내 1차로보다 2차로에서 높은 교통량, 낮은 속도 그리고 높은 밀도를 갖는 것으로 나타났다.

ii) 본 연구대상 진입연결로 접속구간 내 평균속도는 상류부의 교통량과 속도 그리고 연결로의 교통량과 속도에 높은 상관관계를 보였으나, 연구대상 진출연결로 접속구간 내 평균속도는 하류부 교통량과 속도 그리고 연결로의 속도에 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다.

iii) 본 연구대상 연결로 접속구간 내 평균속도의 추정은 결정계수 값(R^2)이 0.99와 0.96으로 높게 나타났고, 평균속도의 추정에 대한 유의확률을 나타내는 F-통계량도 0.000으로 나타나 매우 유의한 것으로 분석되었으며, 개별독립변수의 유의성을 나타내는 값들 역시 유의확률이 모두 0.000으로 매우 유의한 것으로 나타났다.

iv) 본 연구대상 진출입연결로의 접속구간 내 평균속도의 추정에 대한 검증을 위하여 추정식에 의한 추정속도와 관측속도 사이에 상관관계분석을 실시한 결과, 상관계수(r)값이 진입연결로의 접속구간 내에서 0.996, 진출연결로의 접속구간 내에서 0.938로 매우 높게 나타남으로써 평균속도 추정식의 유효성이 높은 것으로 판단되었다.

따라서 본 연구에서 제시된 평균속도의 추정식은 유사한 기하구조와 교통특성을 가지는 도시고속도로 연결로 접속구간 내에서 평균속도를 추정할 수 있는 척도로 사용되어질 수 있을 것으로 판단되며, 향후 다양한 기하구조특성을 고려한 진출입연결로에 대한 추가적인 연구가 계속 수행되어야 할 것으로 생각된다.



참고문헌

김갑수 외 1인(1998), 도시고속도로 연결로 접속부에 있어서 KHCM모형의 적용성 분석. 공업기술연구소논문집, 영남대학교공업기술연구소, 제 26권, 제2호, pp.1-20

정유나(2010), 도시고속도로의 연결로 접속영향권역내 통행지체 예측모형 구축에 관한 연구, 석사학위논문, 한국해양대학교

김태곤 외 3인(2006) 도시고속도로의 진입연결로 접속부내 선형의 밀도예측모형 구축에 관한 연구. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, Vol.26, No.1D, pp.59-66

표종진(2008) 도시고속도로의 진출입연결로 접속구간에서 밀도예측모형 구축에 관한 연구, 석사학위논문, 한국해양대학교

이주철(2008) 도시고속도로의 유입연결로 접속영향권내 속도의 상관모형 구축에 관한 연구, 석사학위논문, 한국해양대학교

김정서(2006) 도시고속도로의 유입연결로 접속부내 선형의 속도-밀도모형 구축에 관한 연구, 석사학위논문, 한국해양대학교

김동수(2000) ITS 상황하에서 도시고속도로의 유출입램프 접속구간내 속도 예측모형 구축에 관한 연구, 석사학위논문, 한국해양대학교

손상렬(1999) 연속 교통류에 대한 교통용량 및 속도 모델 구축, 석사학위논문, 경일대학교

신치현(1995) 고속도로 램프 접속부에서의 속도예측모형, 대한교통학회지 제 13권, 제3호, pp.99-120

국토해양부(2005) 도로용량편람, pp. 73-108

도철용(1999) 교통공학원론(상), 청문각, pp.54-108

May, A. D.(1990), Traffic Flow Fundamentals, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632.

TRB(1975), Traffic Flow Theory, Special Report 165, Transportation Research Board, Washington, D. C.

TRB(2000), Highway Capacity Manual, Transportation Research Board, Washington, D.

