

공학박사 학위논문

실시간의 *BIS* 자료를 이용한 간선도로의
버스도착시간 예측모형구축에
관한 연구

*Predictive Modeling of the Bus Arrival Time on the
Arterial using the Real-Time BIS Data*

지도교수 김 태 곤

2008년 2월

한국해양대학교 대학원

토목환경공학과 안 현 철

*Predictive Modeling of the Bus Arrival Time on the
Arterial using the Real-Time BIS Data*

Hyun Cheol, Ahn

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

Abstract

Bus information system(BIS), as a part of the intelligent transportation system(ITS), is one of the most advanced public transportation systems which provide the real-time bus traffic information for the users waiting the buses at the bus stop. So, bus information system is in haste introduced into their bus transportation systems in the cities, and also its extension taken into consideration in some of the cities which already imported the bus information system. However, bus information data such as the present bus location, the user waiting time, the bus arrival time, and so on are not correctly provided in most of the cities putting the bus information system into operation because the proper models for predicting the bus arrival time are not suggested yet.

The purpose in this study is to investigate the real-time bus traffic characteristic data for identifying the bus operation characteristics on the arterial under the study in the metropolitan City of Ulsan, analyze the real-time bus traffic characteristic data such as bus travel speed, inter-arrival time, the number of vehicles, etc. in the ID locations of the arterial under the study, construct the optimal unit segment models for the unit segments such as the bus stop, node and travel section using the exponential smoothing, weighted smoothing and Kalman Filter methods, respectively, and finally suggest the

optimal integrated model for the real-time bus arrival time prediction on the bus stops of the arterial under the study.

From the bus roadway and traffic characteristic analyses on the each unit segment, and the integrated model construction and verification for predicting the real-time bus arrival time on the bus stops of the urban arterial under the study, the following conclusions were drawn:

i) Roadway characteristics were found to show a little difference in the width and length of the roadway, the number of the unit segments, and the figure of intersection on the arterial under the study, but traffic characteristics were found not to show a distinct difference in the number of vehicles, the travel speeds, and the inter-arrival times on the arterial under the study.

ii) Signal operation characteristics were found to show a considerable difference in the Green time ratios depending on the signalized intersections and time periods within the study segments, but all the arterial under the study segments were found to be put in operation by the real-time signal progressive operation system with the bus information system, except the Samsanro.

iii) Bus traffic characteristics were found not to show a distinct difference in the number of buses and routes passed on the arterial, but they were found to be a distinct difference in the time intervals, the travel speeds and the travel times depending on the unit segment under the study. Especially, the travel times at the node were found to show a distinct difference in Green and Red signals.

iv) Unit segment models were needed to be differently constructed based on the unit segments and time periods. Particularly, the WSM1 was shown to be correlated with the bus traffic characteristics during the morning and 1-day periods, the WSM2 correlated during the noon period, and the ESM2 correlated during afternoon period at the bus stop, respectively.

v) ESM1 and ESM2 were shown to be correlated with the bus traffic characteristics during the 1-day period, and the WSM1 correlated during the

morning period at the intersection. Also, the ESM1 and ESM2 were shown to be correlated with the bus traffic characteristics during the noon period and afternoon period at the node, respectively.

vi) ESM1 and ESM2 were shown to be correlated with the bus traffic characteristics during the 1-day and morning periods, respectively at the travel section. And the WSM1 was shown to be correlated with the bus traffic characteristics during the noon period, and the ESM1 and ESM2 correlated during the afternoon period at the travel section.

vii) Integrated predictive model was shown to have a high explanatory power in the coefficient of determination (R^2) of 0.945 or more, and a high significance at the F-significance level of 0.000 and the t-significance level of 0.000. Also, integrated predictive model was found to be very valid in testing between the observed and expected travel times at the 95 % level of confidence.

Thus, it was concluded that the integrated predictive model would be very valid in predicting the real-time bus arrival time in the cities putting the bus information system(BIS) in operation.

목 차

Abstract	i
Nomenclature	vi
List of Tables	viii
List of Figures	ix
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적 및 필요성	2
1.3 연구내용 및 방법	3
1.3.1 연구내용	3
1.3.2 연구방법	3
제 2 장 문헌 연구	6
2.1 국외 문헌연구	6
2.1.1 AVL에 의한 운행자료 관측	6
2.1.2 GPS에 의한 운행자료 관측	8
2.2 국내 문헌연구	10
2.2.1 GPS에 의한 운행자료 관측	10
2.2.2 자료의 이상치 제거	11
2.2.3 모형에 의한 도착시간 예측	14
제 3 장 자료수집 및 분석	18
3.1 도로선정 및 분석	18
3.1.1 대상도로의 선정	18
3.1.2 대상도로의 분석	20

3.1.3 신호체계분석	31
3.2 자료수집	35
3.2.1 자료의 구성 체계	35
3.2.2 운행 자료수집	38
3.3 운행자료 분석	41
3.3.1 운행대수 분석	41
3.3.2 배차간격 분석	42
3.3.3 운행시간 분석	44
제 4 장 모형구축 및 검증	51
4.1 모형구축	51
4.2 구축방법	52
4.2.1 평활화기법(smoothing method, SM)	52
4.2.2 칼만 필터(Kalman Filter)기법	55
4.2.3 중 회귀기법	58
4.2.4 모형채택	59
4.3 개별모형	60
4.3.1 모형구축	60
4.3.2 버스정류장 모형	71
4.3.3 신호교차로 모형	75
4.3.4 순행구간 모형	78
4.4 통합모형	83
4.4.1 모형구축	83
4.4.2 모형검증	85
4.4.3 오차비교	91
제 5 장 결 론	94

Nomenclature

Y_t	Time-series data at time t
F_{t+1}	Expected data at time t+1
w	Weighted factors
a	Smoothing factors
v_t	Observation error at time t
x_t	Predicted values at time t
p_t	Expected error at time t
R	Variance of observation error
ϕ	Transition matrix from time t to time t+1
z_t	Observed values at time t
\widehat{z}_t	Expected values at time t
h	Transition matrix from state value to observation value
Q	Variance of state error after 1 cycle
K	Kalman gain
y	Dependent variable
x	Independent variable
$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$	Correlation coefficients for each independent variable
μ	Mean of population
σ	Standard deviation of population
X_{bs}	Expected values of travel time at bus stop(sec)
X_{nd}	Expected values of travel time at node(sec)
X_s	Expected values of travel time at section(sec)
R^2	Determination coefficients
r	Correlation coefficients
<i>t-value</i>	Values of t-test
<i>p-value</i>	Values of significant level
l	No. of bus stops

m	No. of nodes
n	Length of section(m)
t	t-statistic
\bar{d}	Mean difference in observed and expected values
V_d	Variance of difference in observed and expected values
SM	Smoothing method
MAM	Moving average method
ESM	Exponential smoothing method
WMAM	Weighted moving average method
SMAM	Simple moving average method
SESM	Simple exponential smoothing method
SRA	Simple regression analysis
MRA	Multiple regression analysis
TSD	Time-space diagram
Mo	Observed mean
Me	Expected mean
SD	Standard deviation
KFM	Kalman filtering method
ITS	Intelligent transportation system
BIS	Bus information system
AVL	Automated vehicle locator
GPS	Global positioning system
ID	Identification
WSM1	Weighted smoothing model based on 1 day period data
WSM2	Weighted smoothing model based on the peak period
ESM1	Exponential smoothing model based on 1 day period data
ESM2	Exponential smoothing model based on the peak period
MAFE	Mean absolute forecasting error
RMSE	Root mean squared error

List of Tables

Table 3.1	Roadway characteristics of bus routes within the study area	19
Table 3.2	Bus stops and nodes within the study segment of road A	21
Table 3.3	Bus stop and nodes within the study section of road B	24
Table 3.4	Bus stops and nodes within the study segment of road C	28
Table 3.5	Green time ratios of nodes with the bus flow direction	31
Table 3.6	Green time ratios of nodes with the bus flow direction	32
Table 3.7	Green time ratios of nodes with the bus flow direction	34
Table 3.8	Characteristics of the facility within the study segments	37
Table 3.9	Number of buses passed within the study segments(veh)	41
Table 3.10	Routes and time interval within the study segment of road A	42
Table 3.11	Routes and time interval within the study segment of road B	43
Table 3.12	Routes and time interval within the study segment of road C	43
Table 3.13	Service time characteristics at bus stop(sec)	44
Table 3.14	Service time characteristics at node(sec)	46
Table 3.15	Service time characteristics at section(sec/veh)	48
Table 4.1	Travel times observed within the study segment(sec)	60
Table 4.2	Travel times expected by each weighted factor of WSM	69
Table 4.3	Travel times expected by each exponential factor of ESM	70
Table 4.4	Weighted factors of WSM and ESM during each period	70
Table 4.5	Statistics of travel time observed and expected at bus stop	72
Table 4.6	Correlation coefficients of the models at bus stop	73
Table 4.7	Statistics of travel times observed and expected at node	76
Table 4.8	Correlation coefficients of the models at node	77
Table 4.9	Statistics of travel times observed and expected at section	79
Table 4.10	Correlation coefficients between the models at section	80
Table 4.11	Integrated models for predicting the bus arrival times	85
Table 4.12	Test results of models for predicting the bus arrival times	87
Table 4.13	Error comparison observed, WSM and ESM arrival times	92
Table 4.14	Error comparison observed, KFM and IM arrival times	93

List of Figures

Fig. 1.1	Flowchart of study process	4
Fig. 2.1	Site V (Newport Pike) : (a) collected data, (b) predicted	7
Fig. 2.2	Delays at bus stop	9
Fig. 2.3	P-P Plot between travel time intervals observed and expected	11
Fig. 2.4	Accuracy comparison of estimation methods	13
Fig. 2.5	Accuracy comparison of estimation methods	15
Fig. 2.6	Trend of same link travel time	17
Fig. 3.1	Spatial scope within the study segment of road A	20
Fig. 3.2	Plane figure of node ② within the study segment	21
Fig. 3.3	Plane figure of node ③ within the study segment	22
Fig. 3.4	Plane figure of node ⑤ within the study segment	22
Fig. 3.5	Plane figure of node ⑥ within the study segment	23
Fig. 3.6	Spatial scope within the study segment of road B	24
Fig. 3.7	Plane figure of node ① within the study segment	25
Fig. 3.8	Plane figure of node ② within the study segment	25
Fig. 3.9	Plane figure of node ④ within the study segment	26
Fig. 3.10	Plane figure of node ⑤ within the study segment	26
Fig. 3.11	Plane figure of node ⑦ within the study segment	27
Fig. 3.12	Spatial scope within the study segment of road C	28
Fig. 3.13	Plane figure of node ① within the study segment	29
Fig. 3.14	Plane figure of node ③ within the study segment	29
Fig. 3.15	Plane figure of node ⑤ within the study segment	30
Fig. 3.16	Plane figure of node ⑦ within the study segment	30
Fig. 3.17	Time-space diagram between Node② and Node ⑥	32
Fig. 3.18	Time-space diagram between Node ① and Node ⑥	33
Fig. 3.19	Time-space diagram between Node ① and Node ⑦	34
Fig. 3.20	Event data structure of bus information system(BIS)	36
Fig. 3.21	Real-time data example observed on the road	38
Fig. 3.22	Real-time service time data example calculated on the node	39
Fig. 3.23	Service time distribution at bus stop	45

Fig. 3.24	Service time distribution at node	47
Fig. 3.25	Service time distribution at section	49
Fig. 4.1	Flowchart of Kalman Filtering	56
Fig. 4.2	TSD within the study segment of road A(Day 1, M.P.)	61
Fig. 4.3	TSD within the study segment of road A(Day 1, N.P.)	61
Fig. 4.4	TSD within the study segment of road A(Day 1, A.P.)	62
Fig. 4.5	TSD within the study segment of road B(Day 1, M.P.)	62
Fig. 4.6	TSD within the study segment of road B(Day 1, N.P.)	63
Fig. 4.7	TSD within the study segment of road B(Day 1, A.P.)	63
Fig. 4.8	TSD within the study segment of road C(Day 1, M.P.)	64
Fig. 4.9	TSD within the study segment of road C(Day 1, N.P.)	64
Fig. 4.10	TSD within the study segment of road C(Day 1, A.P.)	65
Fig. 4.11	Count diagram of travel time at bus stop	67
Fig. 4.12	Count diagram of travel time at node	67
Fig. 4.13	Count diagram of travel time at section	67
Fig. 4.14	SD characteristics of travel time at bus stop	72
Fig. 4.15	Correlation characteristics between the models at bus stop	73
Fig. 4.16	Travel times expected at bus stop ① in road A(M.P.)	74
Fig. 4.17	Travel times expected at bus stop ① in road A(N.P.)	74
Fig. 4.18	Travel times expected at bus stop ① in road A(A.P.)	74
Fig. 4.19	SD characteristics of travel time at node	76
Fig. 4.20	Correlation characteristics of the models at node	77
Fig. 4.21	Travel times expected at node ③ in road C(M.P.)	77
Fig. 4.22	Travel times expected at node ③ in road C(N.P.)	78
Fig. 4.23	Travel times expected at node ③ in road C(A.P.)	78
Fig. 4.24	SD characteristics of travel time at section	80
Fig. 4.25	Correlation characteristics of travel time at section	81
Fig. 4.26	Travel times expected at section 10 in road C(M.P.)	81
Fig. 4.27	Travel times expected at section 10 in road C(N.P.)	81
Fig. 4.28	Travel times expected at section 10 in road C(A.P.)	82
Fig. 4.29	Observed and expected bus arrival times at road A(M.P.)	88
Fig. 4.30	Observed and expected bus arrival times at road A(N.P.)	88
Fig. 4.31	Observed and expected bus arrival times at road A(A.P.)	88

Fig. 4.32	Observed and expected bus arrival times at road B(M.P.)	89
Fig. 4.33	Observed and expected bus arrival times at road B(N.P.)	89
Fig. 4.34	Observed and expected bus arrival times at road B(A.P.)	89
Fig. 4.35	Observed and expected bus arrival times at road C(M.P.)	90
Fig. 4.36	Observed and expected bus arrival times at road C(N.P.)	90
Fig. 4.37	Observed and expected bus arrival times at road C(A.P.)	90

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

지난 1970년대 이후 급격한 경제성장과 함께 인구의 도시집중이 심화되었으며, 도시지역 내 개인의 활동영역이 확대되고 소득수준이 향상됨으로써 자동차의 폭발적인 증가를 불러오게 되었다. 이로 인하여 대부분의 도시들은 심각한 도시교통문제에 직면하게 되었고, 오늘날 도시교통문제는 일상적인 사회문제로 자연스럽게 받아들여지게 되었다. 그리고 우리나라의 도시교통문제는 세계의 주요 경쟁도시들에 비하여 상대적으로 심각한 상태에 있으며, 도시교통문제로 인한 사회적 비용은 매년 급증하는 추세에 있어 도시 경쟁력이 점점 뒤떨어지고 있다.

더구나 1980년대 이후 정부에서는 날로 가중되고 있는 교통 혼잡 또는 물류비용의 증가 등 여러 가지 사회적으로 자리 잡고 있는 도시교통문제에 적극적으로 대처하기 위해 도시지역 내 교통시설의 확충에 막대한 예산을 투입해 왔으나, 전반적으로 생활수준이 향상됨에 따라 차량보유가구도 증가하고 있고, 도시권역의 확대에 따라 출퇴근 통행차량도 증가함으로써 도시교통문제는 더욱 심화되고 있다.

그리하여 정부에서는 이러한 도시교통문제를 해결하기 위하여 새로운 도로건설 및 확장만으로는 한계가 있으므로 투자재원의 허용범위 내에서 지속적으로 도로시설용량 증대를 위한 노력은 기울이되 대중교통수단의 이용률 증대와 수송능력 확대에 역점을 두고 대량수송수단인 버스와 지하철을 비롯한 대중교통수단 및 시설 개선에 치중하고 있다.

그런데 지하철은 독립적인 궤도를 중심으로 도착과 출발시간 등이 일정한 운행계획 하에 운행되므로 정시성과 배차간격을 기약할 수 있어서 대중교통수단 이용자들이 버스보다는 지하철을 선호하고 있는 반면, 버스는 타 교통수단과 혼재되어 침두시간대와 비침두시간대, 도심지역과 부도심지역 그리고 도로여건

에 따라 통행속도가 달라짐으로써 정시성과 배차간격 등이 불규칙하여 버스 이용자들에게 많은 불편이 초래되어 오히려 버스를 기피하는 경향이 날로 심화되고 있다.

이로 인해 1990년대 이후 발달된 정보통신(information telecommunication, IT)과 컴퓨터 기술을 교통 분야에 접목시킨 지능형교통체계(intelligent transportation systems, ITS)의 일환으로 구축·운영되고 있는 버스정보시스템(bus information system, BIS)이 도입되어 버스 이용자들에게 버스운행 관련 정보를 제공함으로써 이용편의를 도모하고 있으나, 울산광역시를 포함하여 버스정보시스템을 도입하여 운영하고 있는 대부분의 도시에서는 버스의 현재위치, 버스대기시간 및 목적지까지 도달하는데 소요시간 등의 버스운행 관련 정보가 버스 이용자들에게 보다 정확하게 제공되지 못하고 있으며, 버스 이용자들의 지속적인 신뢰를 확보하기 위해서는 버스정보시스템에 대한 다양한 연구와 노력이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

1.2 연구목적 및 필요성

버스정보시스템(BIS)은 버스 정류장에 설치되어 있는 안내단말기를 통해서도 버스 도착시간 정보를 제공하고, 버스 내의 안내단말기에서는 다음 정류장 및 주요 목적지까지의 소요시간 정보를 제공하고 있다.

특히, 버스 도착시간 정보는 정류장안내단말기 뿐만 아니라 인터넷, 휴대폰을 이용한 문자정보, 자동 전화 안내 서비스 등으로도 제공되어 버스 이용자가 정류장에서 버스를 기다리는 시간을 버스정류장 인근이나 집, 회사에서 다른 활동을 가능하게 함으로써 승용차에 비하여 대중교통을 이용할 경우 발생하는 통행시간 증가분을 다소 감소시킬 수 있어 버스 이용자들에게 많은 호응을 얻고 있다.

그러나 버스정보시스템으로부터 제공되는 버스 도착시간 정보의 신뢰성이 결여될 경우 버스 이용자들에게 외면당하기 쉽고, 또한 실제 버스 도착시간 보다

과다하게 예측된 버스도착시간 정보가 제공된다면 오히려 버스정류장에서의 버스 대기시간을 증가시켜 버스정보시스템(BIS)의 효율성이 떨어지고 당초 목적인 대중교통수단의 활성화는 기대하기 어려울 것으로 예상된다.

그리하여 이 연구에서는 버스정보시스템(BIS)의 신뢰성 있는 버스 도착시간 예측모형을 구축하기 위하여 기존 연구에서 도로구간을 정류장에서 정류장까지 혹은 신호교차로와 버스정류장을 단위구간으로 선정한 것을 더욱 세분화하여 신호교차로, 버스정류장, 그리고 신호교차로와 버스정류장의 영향을 받지 않고 버스 통행이 가능한 순행구간으로 분류하였고, 예측모형으로는 보편적으로 사용되고 있는 평활화모형 및 칼만 필터모형을 시간대별 단위구간별로 분리 적용하여 관측 값과의 상관관계가 높은 예측모형을 선정한 후 이를 바탕으로 통합모형을 구축함으로써 버스 도착시간에 대한 최적의 통합모형을 구축 제시하고자 하였다.

1.3 연구내용 및 방법

1.3.1 연구내용

이 연구에서는 도시지역 내 대중교통수단의 이용률이 높고 유사한 도로 교통 특성을 갖는 간선도로 중에서 실시간의 버스정보시스템(BIS)이 가동되고 있는 간선도로를 연구대상도로로 선정하여 최적의 버스 도착시간 예측모형을 구축 제시함으로써 버스정보시스템(BIS)의 효율성을 극대화시키고 버스이용자들의 대기시간을 최소화하는 것을 연구내용으로 한다.

이를 위해 연구대상지역내 버스의 이용률이 높은 간선도로 중에서 버스통행에 상충요인이 적은 구간을 연구대상구간으로 선정하여 버스통행 및 기하구조 특성자료를 수집·조사하고, 수집·조사된 버스통행 및 기하구조 특성자료를 비교·분석하며, 비교·분석 결과를 바탕으로 버스도착시간 예측모형을 구축 및 검증함으로써 최적의 버스운행체계를 제시하도록 한다.

1.3.2 연구방법

이 연구에서는 버스정보시스템(BIS)이 구축·운영되고 있는 울산광역시의 간선도로 중에서 도로 및 버스 운행특성이 유사한 연구대상도로를 선정하고, 선정된 연구대상도로의 일정구간을 버스정류장, 신호교차로 및 순행구간의 단위구간으로 구분하며, 각 단위구간 내 위성항법장치의 수신을 통해 교통관리센터에서 수신된 실시간의 버스 운행 자료를 수집·분석하여 모의실험(simulation)을 통해 이상치(outlier value) 제거와 각 시간대별 단위구간별 평활화모형의 모형상수를 도출하였다.

또한, 평활화모형의 모형상수에 기초한 가중평활모형과 지수평활모형 그리고 칼만필터모형을 각 시간대별 단위구간별로 적용함으로써 최적의 단위구간 버스 운행시간 예측모형을 구축하였고, 각 단위구간별 버스운행시간 예측모형을 중심으로 연구대상 전 구간에 대한 최적의 버스도착시간 예측 통합모형을 구축 제시하였다.

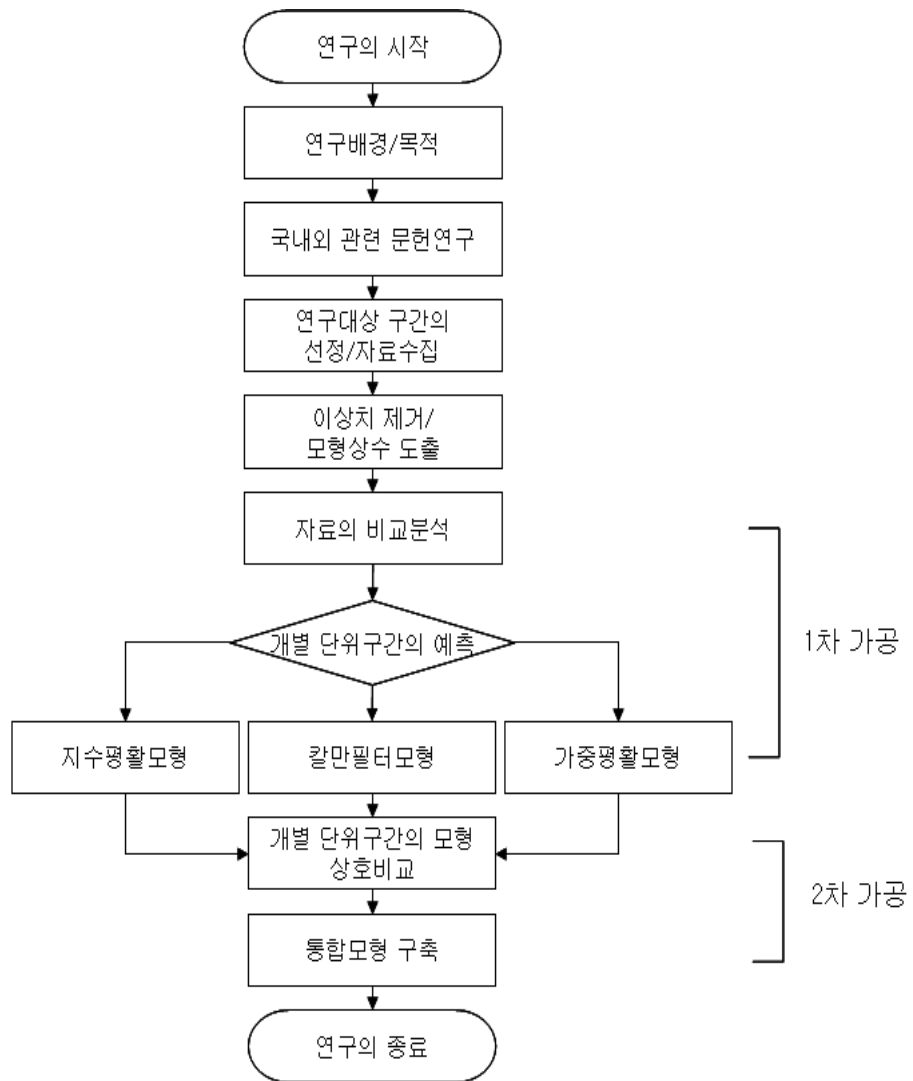


Fig. 1.1 Flowchart of study process

제 2 장 문헌 연구

2.1 국외 문헌연구

2.1.1 AVL에 의한 운행자료 관측

미국의 Kikuchi와 1인(2004)¹⁾은 버스의 통행시간 자료를 이용한 도시 가로상의 통행시간 추정에 관한 공동연구에서 실시간 통행시간 정보를 수집하는 것은 ITS 적용에 중요한 사항이기 때문에 도시가로의 승용차 통행시간을 수집하기 위해 버스를 조사차량으로 활용할 수 있는지에 대한 연구에서 자동 위치추적장치(automated vehicle locator, AVL)를 탑재한 버스와 승용차의 통행시간 상호관계를 조사하고 모형을 구축하였다.

그 결과 버스와 승용차의 통행시간 사이에는 안정적인 차이패턴을 보였으며, 승용차의 통행시간 추정을 위해 2개의 선형모형이 제시되었는데 하나는 자유흐름속도상태에서 승용차의 통행시간모형이었고, 다른 하나는 정지하지 않고 운행하는 버스의 통행시간모형이었다.

그러나 특정상황에서 통행시간모형을 적용하기 위해서는 지속적인 자료관측을 통해 모형수정 및 보다 정확한 자료가 요구되고, 특히 통행시간 산정에 시간대별 효과, 지역적 요인 및 모형이 적용될 가로구간 길이의 영향을 고려해야 한다고 보고함으로써 버스의 통행시간자료를 이용하여 승용차의 통행시간을 예측하기위한 선형모형 구축의 타당성에 대해서 역설하였다.

특히, 아래의 Fig. 2.1에서 (a)는 버스 통행시간(BTT)의 관측 자료와 승용차 통행시간(ATT)의 관측 자료를 나타내고, (b)는 버스 통행시간의 관측 자료를 이용한 승용차 통행시간의 예측 자료(Pre. ATT)를 나타내며, (c)는 버스 통행시간자료와 승용차 통행시간자료의 상호관계를 바탕으로 구축된 승용차 통행시간의 예측 자료(ATT_p, ATT_p*)를 나타내고 있다.

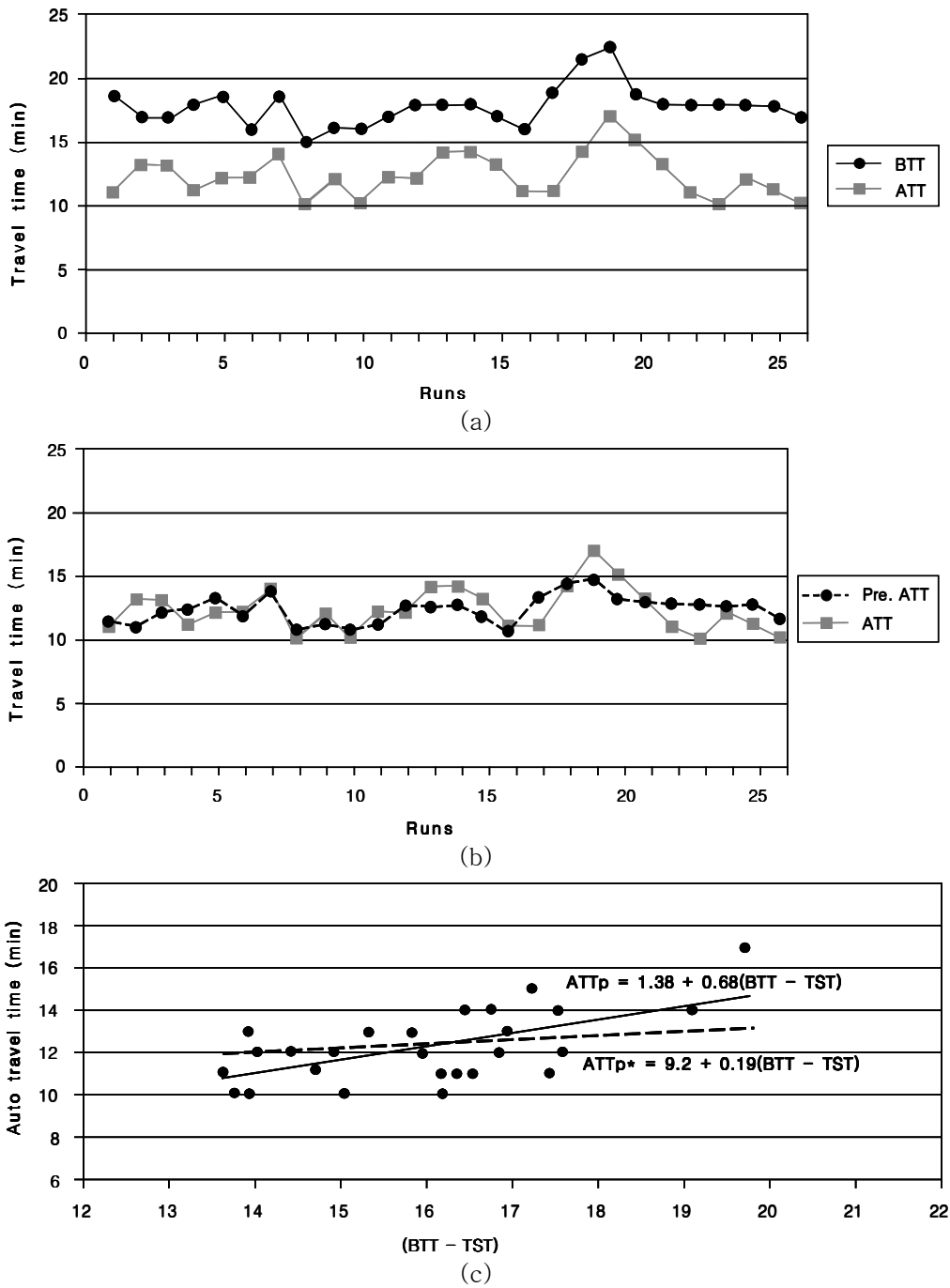


Fig. 2.1 Site V (Newport Pike) : (a) collected data, (b) predicted travel time and ATT, and (c) relation between BTT and ATT. (ATT_p is predicted based on Equation 3. ATT_p* is predicted on basis of Equation 4.)

2.1.2 GPS에 의한 운행자료 관측

미국의 Lin와 1인(1999)²⁾은 위성항법장치(global positioning system, GPS)자료를 이용한 실시간의 버스도착시간 예측에 관한 실험적 연구에서 버스의 도착시간예측은 첨단대중교통체계(advanced public transportation systems, APTS)의 중요한 사항이기 때문에 Virginia주의 Blacksburg에서 버스에 자동 위치추적 장치(AVL)를 장착하여 자료를 수집한 후 버스의 노선 표시, 자료의 특성 및 지체형태 등을 파악하기위한 GPS자료의 검증, 성과측정지표의 개발을 포함한 4개의 알고리즘을 개발한 결과 알고리즘은 특정지역의 버스운행특성이 반영된 지체형태에 기초하여 합리적으로 개발되었으며, 연구를 수행하는 과정에서 버스 정류장의 체류시간이 알고리즘의 성과지표에 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다.

그리고 규칙적으로 출발 도착이 가능한 버스 정류장의 도착시간과 출발시간은 미미한 시간차이로 인하여 같다고 가정할 수 있으나, 5분 이상 버스가 정차하여 출발 도착의 시간점검이 가능한 버스정류장에서 버스의 도착시간과 출발시간은 같다고 할 수 없었고, 또한 알고리즘의 신뢰성, 견고성 및 안정성을 비교한 결과 출발 도착의 시간점검이 가능한 버스정류장 정보의 알고리즘이 최고의 높은 성과지표를 나타냈다고 보고함으로써 GPS자료를 이용한 버스도착시간의 추정에서 출발도착 시간정보의 중요성을 강조하였다.

특히, 아래의 Fig. 2.2는 버스정류장에서 버스가 정차를 할 경우 계획된 도착시간에 비하여 어느 정도 시간차가 발생하는지를 조사한 것으로 지체시간에 음수(-)가 나타나는 것은 버스가 계획된 도착시간 보다 앞서 도착하여 출발한다는 것을 의미한다.

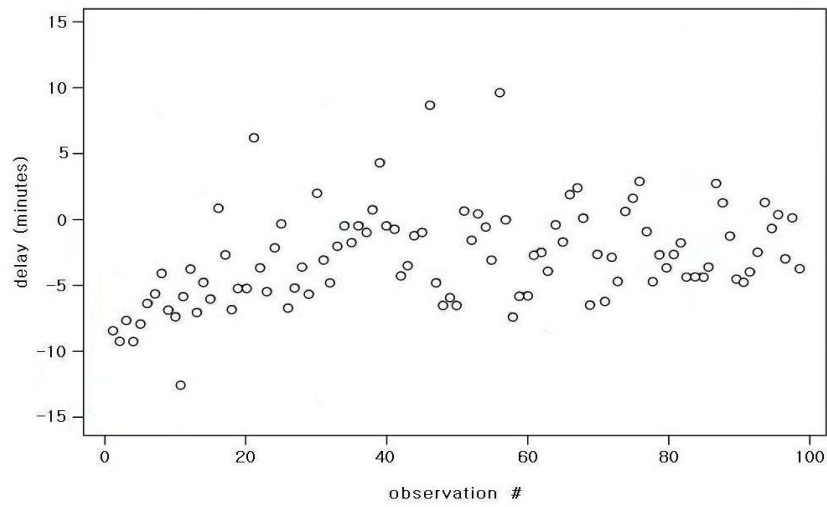


Fig. 2.2 Delays at bus stop

또한, 미국의 Jeong(2004)³⁾과 캐나다의 Shalaby와 1인(2004)⁴⁾은 공통적으로 AVL을 이용하여 도로 위를 운행하는 버스의 위치자료를 수집·가공하여 버스 통행시간의 예측 가능성을 제시하였고, 버스통행시간의 신뢰성 있는 예측을 위해서는 수집된 버스위치정보의 양과 질, 대상구간의 도로 및 교통여건이 버스의 통행시간예측에 높은 영향을 주었으며, 특히 버스 정류장의 정확한 체류시간정보가 버스의 통행시간예측에 높은 영향을 주었다고 보고함으로써 버스의 위치 정보가 버스의 통행시간예측에 중요한 요소임을 강조하였다.

이상의 국외문헌연구를 요약해보면 GPS나 AVL에 의해 수집된 버스운행 자료를 이용하여 버스의 통행시간을 예측하기 위해서는 버스의 위치정보와 출발 도착정보 그리고 도로 및 교통여건에 대한 정보가 매우 중요하다는 사실을 확인할 수 있었다.

2.2 국내 문헌연구

2.2.1 GPS에 의한 운행자료 관측

지금까지 우리나라에서는 버스의 통행시간 예측을 위해 GPS를 이용하여 도로위의 버스 위치 및 운행 자료가 실시간으로 수집되었으며, 또한 수집된 버스의 위치 및 운행 자료에 대한 타당성 검증 및 활용방안에 대해서도 많은 연구가 진행되어 왔다.

국내의 이영우(2002)⁶⁾는 첨단교통정보체계(advanced traveler information systems, ATIS)를 위한 경로통행시간 추정에 관한 연구에서 GPS를 이용한 실시간 교통자료 수집의 가능성 및 용이성에 대한 분석과 통행시간 분포비율 추정을 위한 링크통행시간의 분포특성분석 및 경로통행시간의 분포비율추정을 위한 알고리즘 구축 등을 실시하였다.

특히, GPS를 이용한 실시간 자료수집의 가능성 및 용이성에 대한 분석결과 최대 잔차량이 85mm로 조사되었고, 확률오차의 경우 최대 6mm로 나타났으며, 평균 3mm의 확률오차를 가지는 것으로 분석되어 교통 분야의 실시간 위치측정을 위한 GPS 사용에 무리가 없는 것으로 나타났다고 보고함으로써 경로통행시간 추정을 위해 GPS활용의 타당성을 역설하였다.

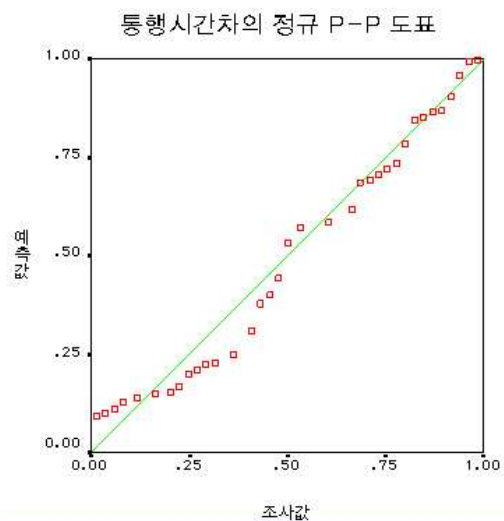


Fig. 2.3 P-P Plot between travel time intervals observed and expected

2.2.2 자료의 이상치 제거

일반적으로 분석대상자료 중에서 정상적인 자료들과 비교하여 편차가 큰 자료들을 이상치라고 하는데, 흔히 이상치는 자료를 측정할 때 오류를 범했거나 측정하고자 했던 자료 이외의 자료를 측정했거나 혹은 환경 또는 기기에 의한 여러 가지 오류 등에 기인함으로 이러한 이상치는 자료예측 결과에 신뢰성을 떨어지게 하는 요인으로 작용하게 되어 제거하는 것이 타당하다.

그리고 버스의 통행시간 예측관련 연구에서도 수집된 자료는 실시간의 버스 운행 자료를 사용하므로 이상치가 발생하게 되어 예측결과의 신뢰성을 저하시킬 수 있어서 지금까지 이상치 제거와 보정에 관한 연구로는 통계적인 분석과 시계열 자료 등 연속자료의 결측 값이나 유효 값의 범위선정 등에 많은 연구가 진행되어 있다.

국내의 배상훈 외 1인(2004)⁷⁾의 이상치 관련 연구에서 인접한 하류부 정류장(n+1 정류장)의 도착시간이 결측일 경우, 통행소요시간을 계산할 때 계산과정에서 오류가 발생하므로 오류 값들을 모두 0으로 처리하였고, 하류부 정류장(n+1 정류장)의 버스도착시간이 상류부 정류장(n 정류장)의 버스도착시간보다 작을 경우 하류부 정류장(n+1 정류장)의 버스통행시간을 0으로 하여 정리하였다.

또한, 상류부 정류장(n 정류장)에서 하류부 정류장(n+1 정류장)사이의 버스도착시간이 현저하게 짧거나 지연될 때, 현장의 여건을 고려하여 버스통행시간의 최소치를 6분, 최대치를 20분으로 한정하였으며, n 정류장과 n+1 정류장간의 버스통행시간이 6분 이하 및 20분 이상은 0으로 처리하였다. 특히, 이렇게 0으로 처리된 결측 자료의 보정을 위하여 동일 정류장 구간에 대해 앞서 지나간 3대의 버스통행시간을 이용하였다고 보고함으로써 이상치 제거의 필요성을 강조하였다.

국내의 김남선 외 2인(2005)⁸⁾은 이상치 관련 연구에서 관리도법(control chart method, CCM)에 기반을 두어 1σ(표준편차)를 지표로 삼아 분포상한(upper bound)을 설정하여 2단계에 걸쳐 이상치를 제거하였다.

특히, 분포상한에서만 이상치를 제거한 이유는 분포하한에서는 분산이 극히 적은 반면에 분포상한에서는 상대적으로 광범위한 분산을 갖고 있는 것으로 나타나 자료의 대표 값을 결정함에 있어서 대부분의 이상영향은 분포상한에서 작용하기 때문이었다.

또한 2단계에 걸쳐서 이상치를 제거한 이유는 1단계로 이상치를 제거할 경우 분포상한에서 분포의 분산이 커서 평균과 중위수의 차이가 크게 발생하므로 2단계에 걸쳐 이상치를 제거하였다고 보고함으로써 자료의 신뢰성 증대를 위해 역시 이상치 제거의 중요성을 강조하였다.

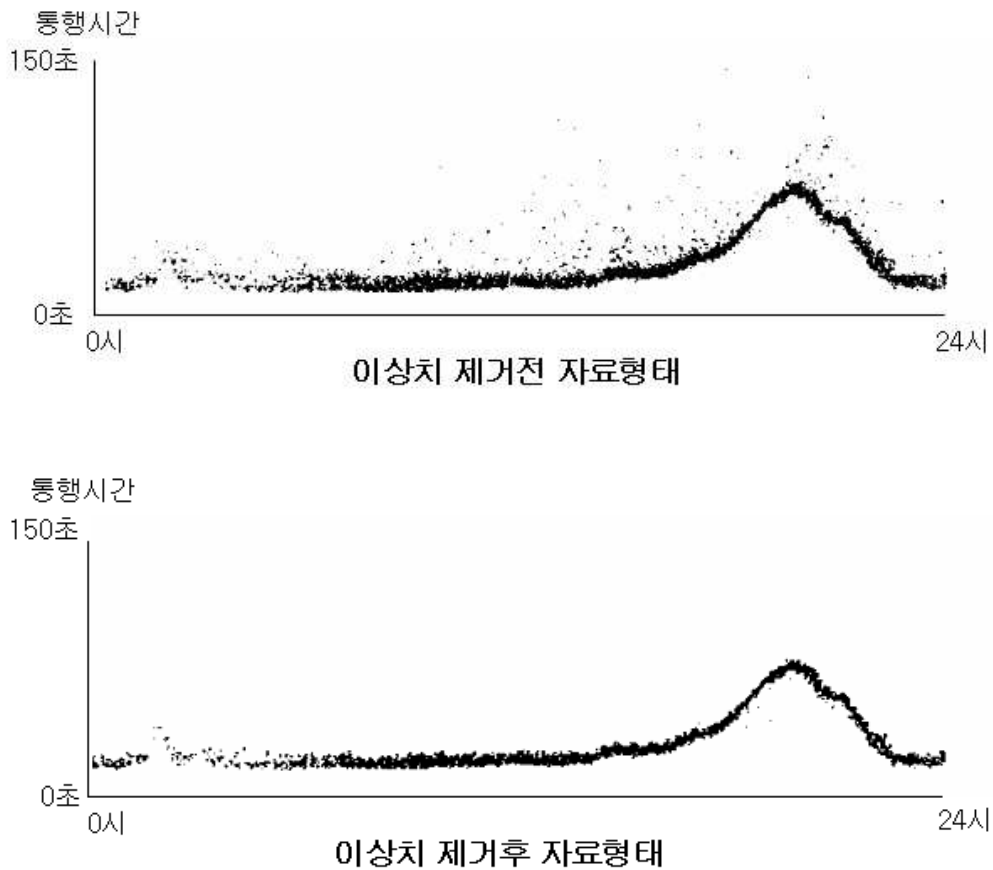


Fig. 2.4 Accuracy comparison of estimation methods

국내의 도명식의 1인(2004)⁹⁾의 이상치 관련 연구에서 수작업으로 기록된 probe 차량 자료(총 15회 운행)를 이용하여 최대값과 최소값의 기준을 선정 한 후 GPS를 통해 수집된 자료가 최대값과 최소값 범위 내에 존재하는 자료만을 유효한 자료로 간주하여 5분 단위 평균값을 통행시간으로 산출하였다.

2.2.3 모형에 의한 도착시간 예측

국내의 강태구의 1인(2003)¹⁰⁾은 신호교차로를 고려한 실시간의 버스도착시간 예측기법개발에 관한 연구에서 TOD방식의 신호교차로에서 고정된 신호계획에 따라 예측된 도착시간의 비교로 신호대기시간을 예측할 수 있다는 것에 기초하여 버스도착시간의 예측모형을 개발하였다.

그리고 개발된 예측모형과 기존에 연구된 평활화모형, ARIMA모형 및 칼만 필터모형 등을 비교한 결과 개발된 예측모형이 기존의 칼만필터모형에 의한 예측결과보다 침두·비침두시간대 최대·평균·최소오차에서 모두 50%정도 감소한다는 것을 알 수 있었으며, 모형의 예측력을 비교하기 위해 평균상대오차(mean relative error, MRE), 제곱근 제곱상대오차(root square error, RSE), 최대상대오차 등의 비교에서도 기존의 예측모형보다 평균 3배정도 우수한 예측력을 보이는 것으로 나타났다고 보고함으로써 버스도착 예측시간을 예측하기 위해서는 신호교차로를 고려한 예측모형의 필요성을 강조하였다.

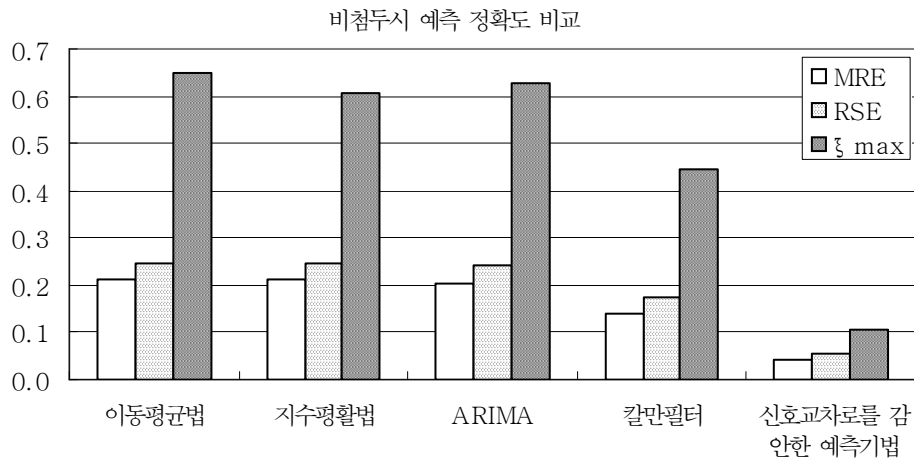
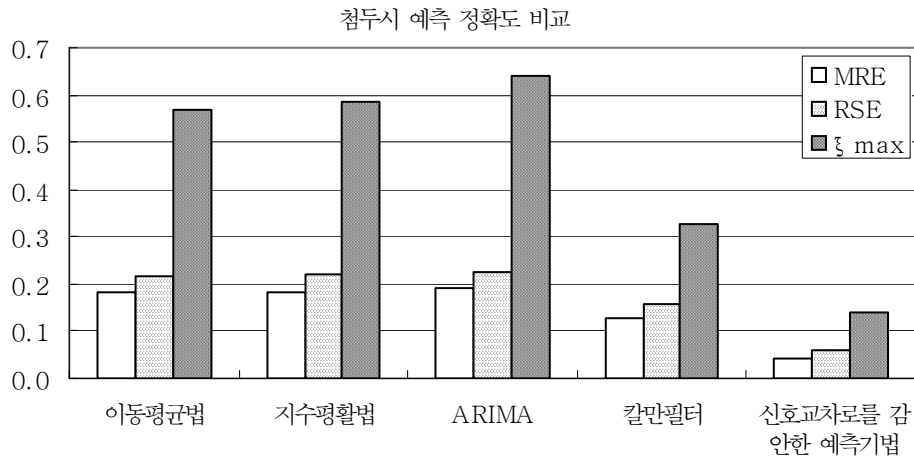


Fig. 2.5 Accuracy comparison of estimation methods

국내의 배상훈외 1인(2004)⁷⁾은 칼만필터모형의 실시간 교통정보적용에 관한 연구에서 버스이용자에게 실시간의 버스도착시간 예측정보를 제공하기 위해 칼만필터모형을 고려하고 현장자료를 통해 구축된 모형간의 비교분석을 수행한 결과 KF3모형(현재 예측대상이 되는 버스의 앞서 지나간 버스에 대하여 가중치를 부여한 데이터를 적용한 모형)이 다른 모형들에 비하여 정확성과 적합성을 가지는 것으로 판단되었다.

이는 관측방정식과 오차공분산으로 계속적으로 값을 갱신하며 오차를 줄여나

가는 칼만필터모형의 특징을 적절한 패턴자료의 구축으로 교통상황을 반영한 결과에 기인하는 것으로 사용되었다.

향후 실시간 교통정보 산출을 위해 검지기의 정확성 향상과 실시간의 대용량 자료처리기술이 요구되며 더 나은 예측결과를 얻기 위해 실제교통상황을 정확히 반영할 수 있는 칼만필터모형의 보완이 필요하며 적용범위를 확대하여 예측모형의 적합성을 검증하는 것이 필요하였다고 보고함으로써 실시간의 교통정보를 버스이용자에게 제공하기 위해서 칼만필터모형에 가중치를 고려한 모형적용의 필요성을 역설하였다.

국내의 도명식외 1인(2004)⁹⁾은 칼만필터모형을 이용한 구간 통행시간 예측에 관한 연구에서 연구대상지역으로 국도 3호선을 선정한 후 교차로별 통행시간모형(모형1)과 구간별 통행시간 예측모형(모형2)을 구축하여 칼만필터모형을 이용하여 통행시간을 예측한 결과 교차로별 통행시간의 예측오차가 구간별 통행시간 예측오차보다 크게 나타났다.

또한 평균오차의 함에서도 대부분의 시간대와 구간에서도 모형 1에 비하여 모형 2가 우수한 것으로 나타남으로써 단속류의 특성을 보이는 국도에서 칼만필터모형을 이용하여 통행시간을 예측할 경우 주요 교차로별 통행시간을 예측하기보다는 동질구간을 먼저 선정한 후 통행시간을 예측하는 것이 보다 나은 예측력을 기대할 수 있었다.

이는 단속류의 특성을 보이는 국도구간에서 통행시간의 변동이 신호주기의 영향과 연도토지이용 특성의 영향을 받기 때문에 짧은 구간별로 통행시간을 추정하는 것보다는 교통류의 특성이 비슷한 동질구간별로 구분하여 통행시간을 추정하는 것이 유리하다고 보고함으로써 교차로의 통행시간예측에 칼만필터모형의 상대적 우수성을 역설하였다.

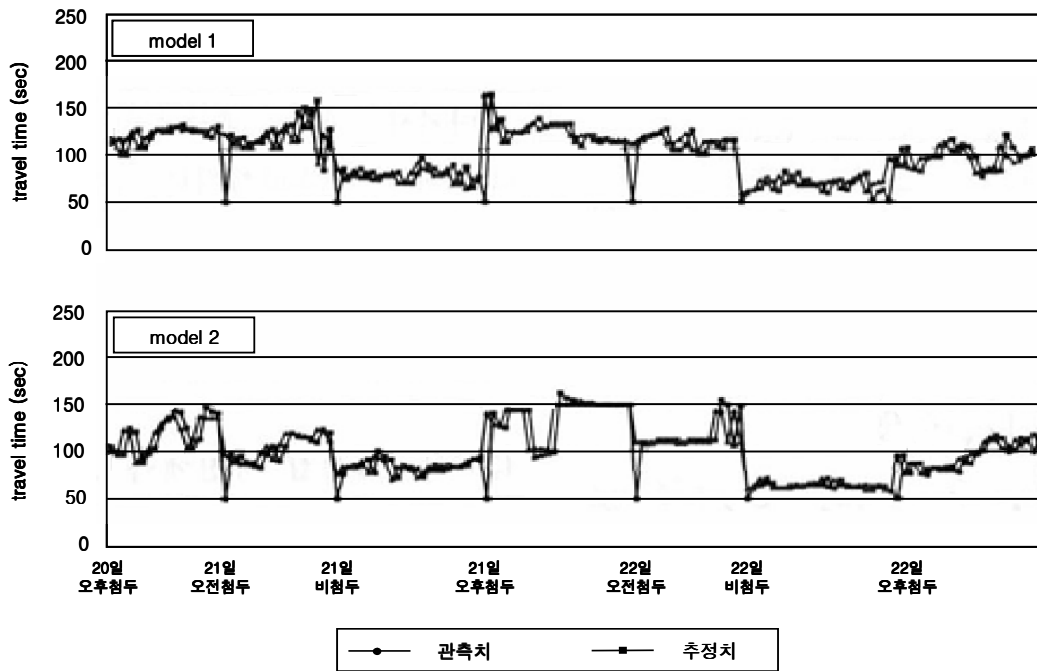


Fig. 2.6 Trend of same link travel time

국내의 임혜진의 2인(2005)¹¹⁾은 도시지역 내 도로의 교통정보 자료제공을 위한 통행시간예측에 관한 연구에서 지금까지는 통행시간자료 수집을 위해 승용차나 택시를 Probe차량으로 이용하였으나, 신뢰도가 낮고 효율성문제가 제기되어 보다 신뢰성 있는 버스통행시간 자료를 가공하여 활용하기 위해 버스통행시간 예측자료 중에서 버스정류장 서비스시간을 제외한 순수한 통행시간자료를 이용한 결과, 버스전용차로의 유무나 정류장 형태 등 일부 시설물의 특성과 교통특성을 감안할 경우 일반차량 통행시간을 산정하는 데 있어서 보다 높은 신뢰도를 기대할 수 있다고 보고하였다.

또한, 버스통행시간 예측이나 도로위의 차량에 대한 통행시간 예측을 위해서 택시나 Probe 차량보다는 AVL을 이용한 버스통행시간 자료를 활용하는 것이 보다 효율적이며, 버스통행시간은 버스정류장, 신호교차로, 교통류의 특성이 비

슷한 동질구간으로 구분하여 개별 구간의 특성을 감안하여 예측할 경우 신뢰도 향상에 도움을 줄 수 있고, 수집 자료의 정확성과 실시간 대용량 자료 처리기술 및 자동연산 기법인 칼만필터모형의 경우에는 보완이 필요하다고 보고함으로써 통행시간예측에 버스통행시간자료 활용의 필요성을 강조하였다.

이상의 국내문헌연구를 요약해보면 GPS에 의해 수집된 버스운행 자료에 대한 결측 자료 및 이상치의 제거방안, 결측 자료의 보정 및 이상치의 제거기준, 기존 자료를 바탕으로 한 평균과 표준편차 등의 활용방안, 연구대상 버스통행구간의 설정방안, 버스통행시간의 예측에 칼만필터모형을 적용할 경우 신중을 기할 필요가 있다는 사실을 확인할 수 있었는데, 연구대상구간을 간선도로의 버스정류장, 신호교차로 및 순행구간으로 구분하고 GPS자료를 이용하여 전 도로구간의 버스도착시간을 예측할 수 있는 통합모형의 구축과 관련된 연구는 없었다.

제 3 장 자료수집 및 분석

3.1 도로선정 및 분석

3.1.1 대상도로의 선정

이 연구에서는 지능형교통체계(ITS)에 관한 연구의 하나로서 버스정보시스템(BIS)이 운영되고 있고 또한 실시간의 버스운행 자료수집이 가능한 울산광역시 연구대상지역으로 선정되었다.

그리고 연구대상지역 내 연구대상도로는 동일한 조건 하에서 운행되는 버스노선이 많아 버스운행 자료수집이 용이하고, 도로의 굴곡정도나 도로변의 불법주정차량으로 인한 상충영향이 적으며, 버스정류장(bus stop)과 신호교차로(node) 그리고 버스정류장과 신호교차로사이의 순행구간(section)의 특성이 최대한으로 반영될 수 있는 간선도로를 중심으로 선정되었다.

그리고 이 연구대상도로를 선정하기 위하여 울산광역시의 지능형교통체계(ITS) 운영지역 내 28개의 주요 간선도로에 대하여 시내버스 운행노선 수 및 도로의 기하구조 특성 등을 살펴본 결과 아래 Table 3.1과 같았다. 특히, 버스노선 수는 삼산로 38개, 대학로 35개, 문수로 23개, 태화로 22개 순으로 운행되고 있었으며, 도로폭원은 번영로가 50m, 삼산로와 산업로가 40m, 대학로, 수암로, 문수로 및 두왕로가 각각 35m로 나타났다.

따라서 이 연구에서는 버스노선 수가 20개 이상 운행됨으로써 시간대별 버스통행수가 많고, 도로폭원은 좌회전으로 인한 직진차량과 상충이 심하지 않도록 최소 25m이상을 확보하고 있는 문수로, 삼산로, 염포로, 태화로, 대학로, 중앙로 등 총 6개의 간선도로로 1차 선정되었으며, 이 중에서 불법주정차량으로 인한 혼잡영향이 극심한 대학교 앞의 대학로와 도로변에 시장이 위치하여 조업차량으로 인한 마찰영향이 심한 중앙로, 그리고 공장지역으로서 첨두시와 비첨두시에 교통상황의 변화가 많은 염포로를 제외한 문수로(A), 삼산로(B), 태화로(C)가 최종 연구대상도로로 선정되었다.

Table 3.1 Roadway characteristics of bus routes within the study area

<i>No.</i>	<i>Name of Roadway</i>	<i>No. of Routes</i>	<i>Length(km)</i>	<i>Width(m)</i>	<i>Curvature</i>
1	방어진순환로	14	14.69	25	
2	염포로	21	7.81	30	
3	산업로	16	21.42	40	유
4	학성로	21	2.4	15	
5	태화로	22	3.16	25	
6	다운로	6	3.9	20	
7	대학로	35	1.82	35	
8	중앙로	31	2.2	30	
9	삼산로	38	4.21	40	
10	봉수로	8	5.8	20	
11	북부순환로	12	10.17	35	유
12	봉월로	8	1.78	25	
13	주전로	2	7.4	12	
14	범서로	13	7.45	10	
15	강북로	17	4.47	20	유
16	수암로	11	3.68	30	유
17	명륜로	3	1.91	20	
18	번영로	9	7.38	50	유
19	웅천로	3	13.62	35	
20	두왕로	15	3.38	35	
21	화합로	19	5.16	30	유
22	장생포로	3	7.27	30	
23	문수로	23	4.98	35	
24	삼남로	3	8.05	30	
25	독길로	1	4.6	30	
26	삼호로	2	2.3	20	
27	무룡로	1	16.06	25	
28	월평로	1	2.9	20	

3.1.2 대상도로의 분석

1) 연구대상도로 A

이 연구대상도로 A는 문수로이며 무거삼거리에서 공업탑로타리에 이르는 총 연장 4.98km의 양방향 8차로인데, 시점부인 무거삼거리에서 법원까지는 3.17km에 2개소의 신호교차로를 제외하면 대체로 마찰요인이 적은 연속류(uninterrupted flow)특성을 보이는 핵심 간선도로로서 전체 도로구간 중에서 신호교차로 간격이 1km이상 떨어져 있는 일부 연속류 구간과 로타리와 인접한 일부 구간을 제외하고 법원앞 버스정류장(①)에서 서여자중학교앞 버스정류장(⑦)사이의 1.12km 구간이 최종 연구대상구간으로 선정되어 특성분석에 사용되었다.

특히, 이 문수로의 연구대상구간 내에는 3개의 버스정류장과 4개의 신호교차로가 있고, 아래의 Fig. 3.1에 그 공간적 범위를 설명하고 있으며, Table 3.2에는 이 연구대상구간 내의 주요 버스정류장과 신호교차로들을 설명하고 있다.

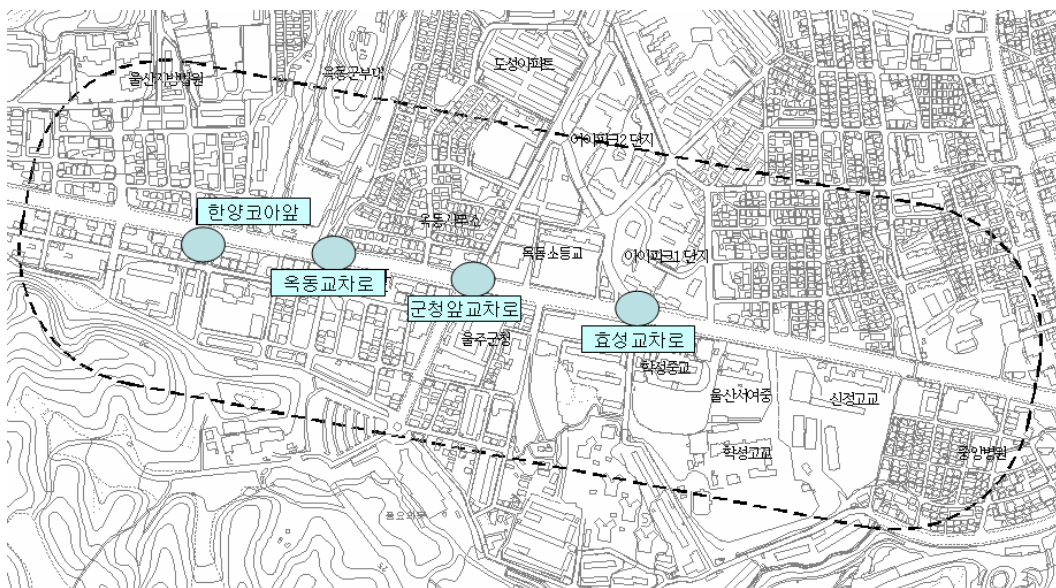


Fig. 3.1 Spatial scope within the study segment of road A

Table 3.2 Bus stops and nodes within the study segment of road A

No.	Facility	Name of Facility	Characteristics
①	Bus stop	법원앞 정류장	-
②	Node	한양코아앞 교차로	삼거리
③	Node	옥동 교차로	사거리
④	Node	군청앞 교차로	사거리
⑤	Bus stop	울주군청앞 정류장	-
⑥	Node	효성 교차로	사거리
⑦	Bus stop	서여자중학교앞 정류장	-

그런데 이 연구대상구간 내에 있는 4개의 신호교차로 중에서 3개가 4지 형태로 되어있고, 1개는 3지 형태로 되어있으며, 이들 신호교차로의 기하구조의 형태는 아래 Fig. 3.2~Fig. 3.5와 같다.

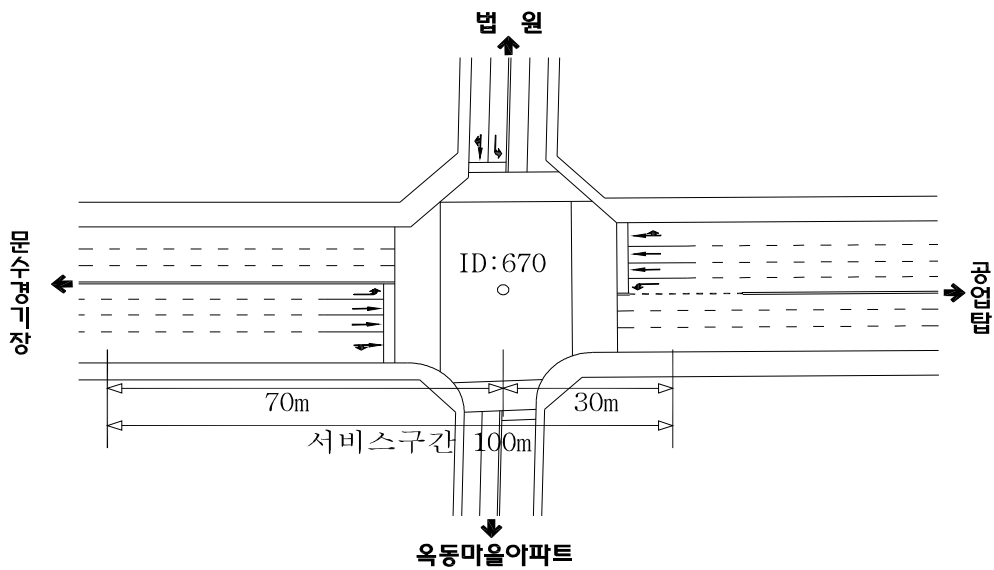


Fig. 3.2 Plane figure of node ② within the study segment

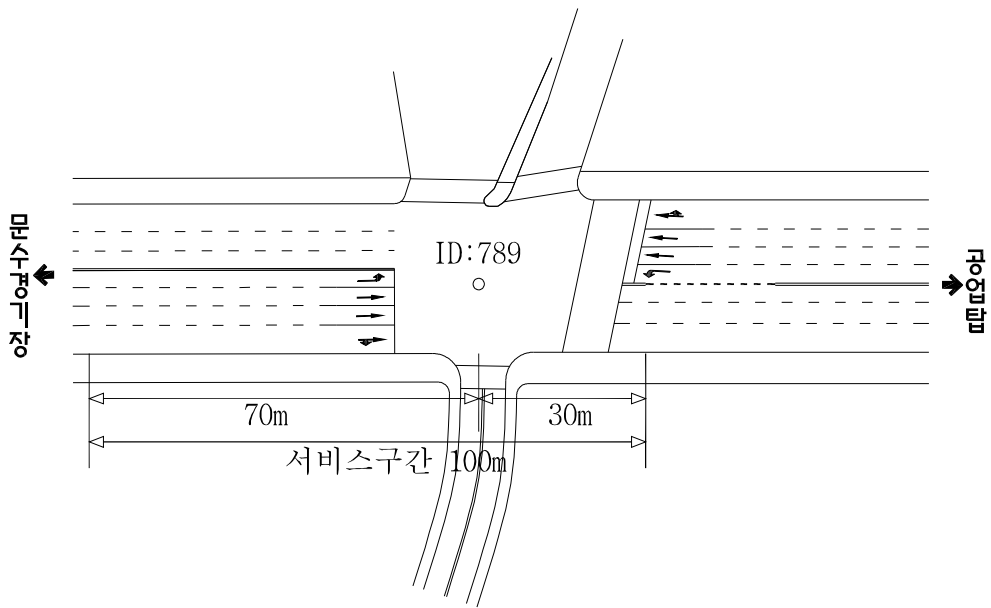


Fig. 3.3 Plane figure of node ③ within the study segment

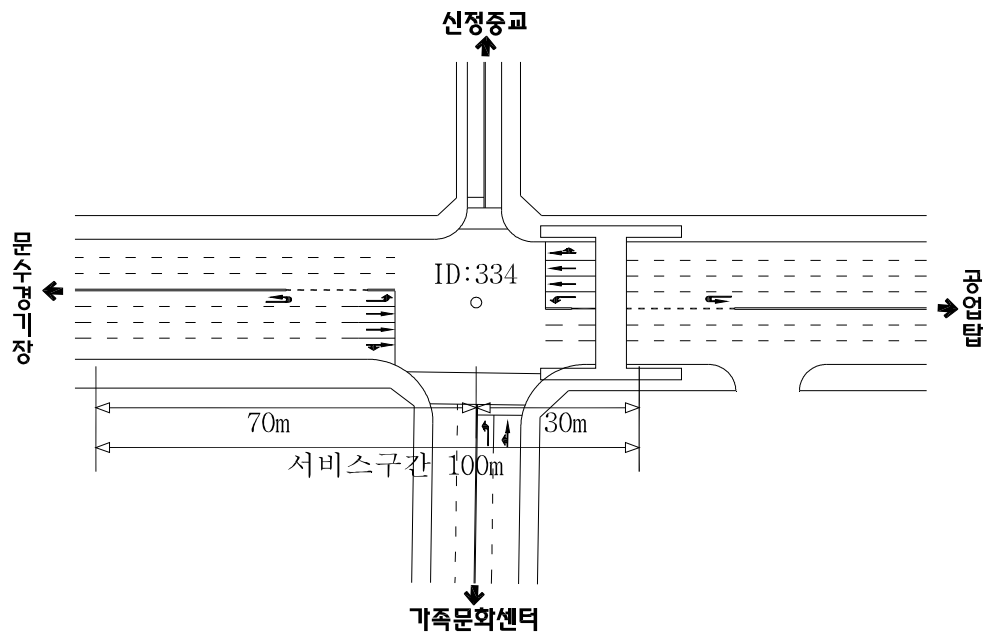


Fig. 3.4 Plane figure of node ⑤ within the study segment

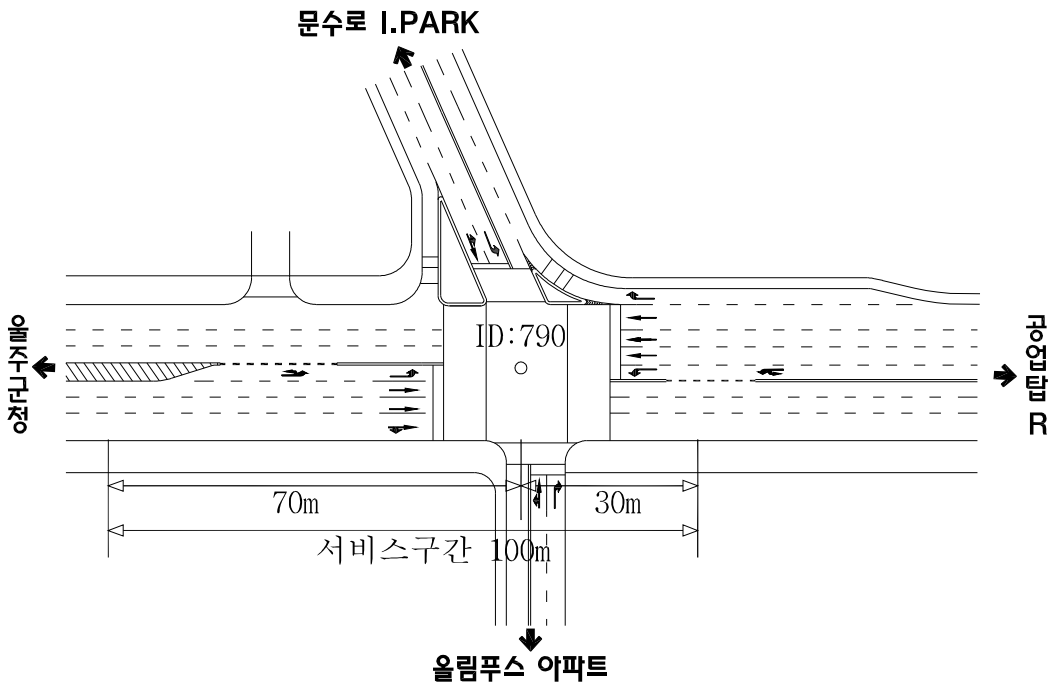


Fig. 3.5 Plane figure of node ⑥ within the study segment

2) 연구대상도로 B

이 연구대상도로 B는 태화로이고 다운교차로에서 태화교 교차로사이의 총 3.16km 연장의 양방향 7차로이며 연구대상지역을 동서로 횡단하는 핵심 간선 도로인데, 도로 대부분이 단속류(interrupted flow)구간이나 구배가 있는 일부 구간과 도로변의 보도에 시장이 형성되는 일부 구간을 제외한 명정교차로(①)에서 제일중학교앞 교차로(⑦)까지 1.15km구간이 최종 연구대상구간으로 선정되어 특성분석에 사용되었다.

특히, 이 연구대상구간 내에는 2개의 버스정류장과 5개의 신호교차로 있으며, 아래의 Fig. 3.6은 그 공간적 범위를 설명하고 있고, Table 3.3은 이 구간 내의 버스정류장과 신호교차로들을 설명하고 있다.



Fig. 3.6 Spatial scope within the study segment of road B

Table 3.3 Bus stop and nodes within the study section of road B

No.	Facility	Name of Facility	Characteristics
①	Node	명정 교차로	사거리
②	Node	학성여중앞 교차로	삼거리
③	Bus stop	학성여중앞 버스정류장	-
④	Node	명정초등학교앞 교차로	사거리
⑤	Node	난곡교차로	사거리
⑥	Bus stop	제일중학교앞 버스정류장	-
⑦	Node	제일중학교앞 교차로	삼거리

이 연구대상구간 내 5개의 신호교차로가 있는데, 그 중에서 3개는 4지 형태로 되어있고, 2개는 3지 형태로 되어있으며, 이들 교차로의 기하구조의 형태는 아래 Fig. 3.7~Fig. 3.11과 같다.

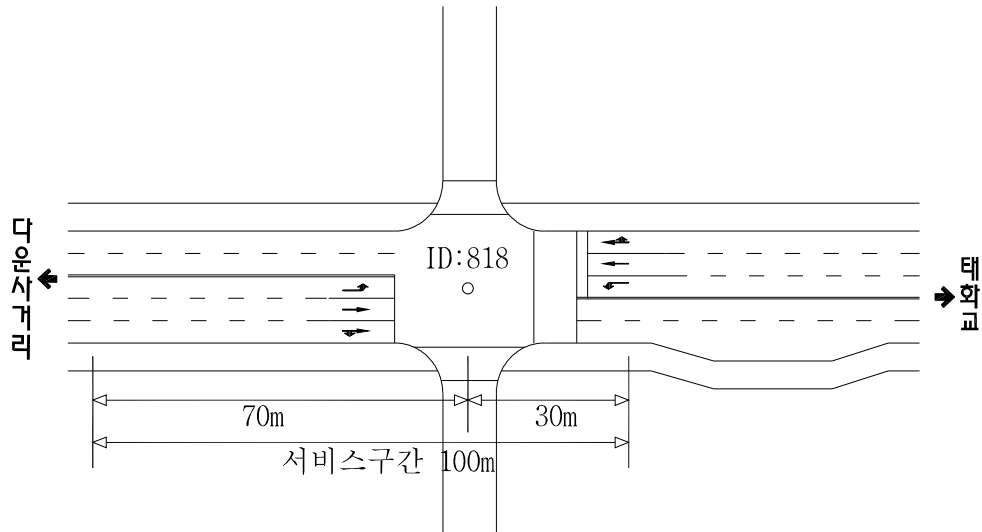


Fig. 3.7 Plane figure of node ① within the study segment

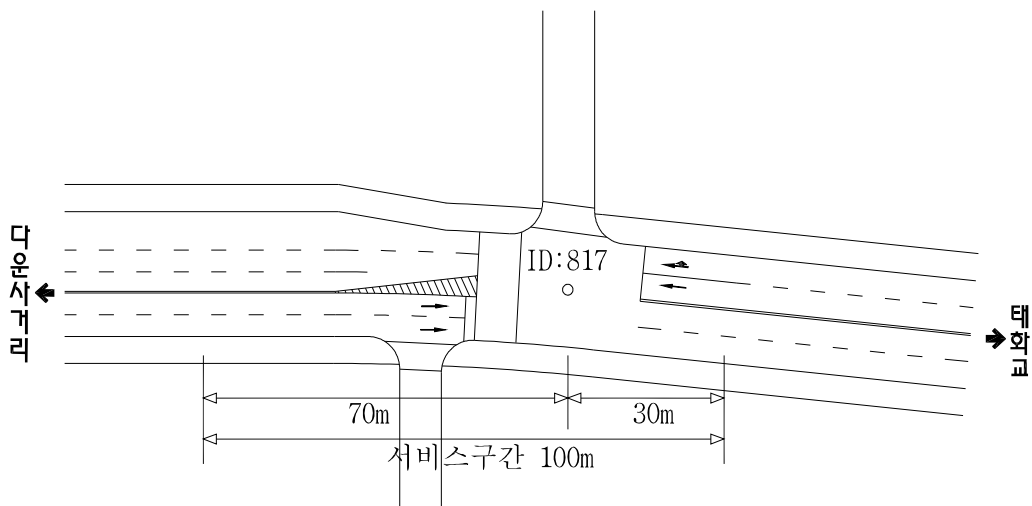


Fig. 3.8 Plane figure of node ② within the study segment

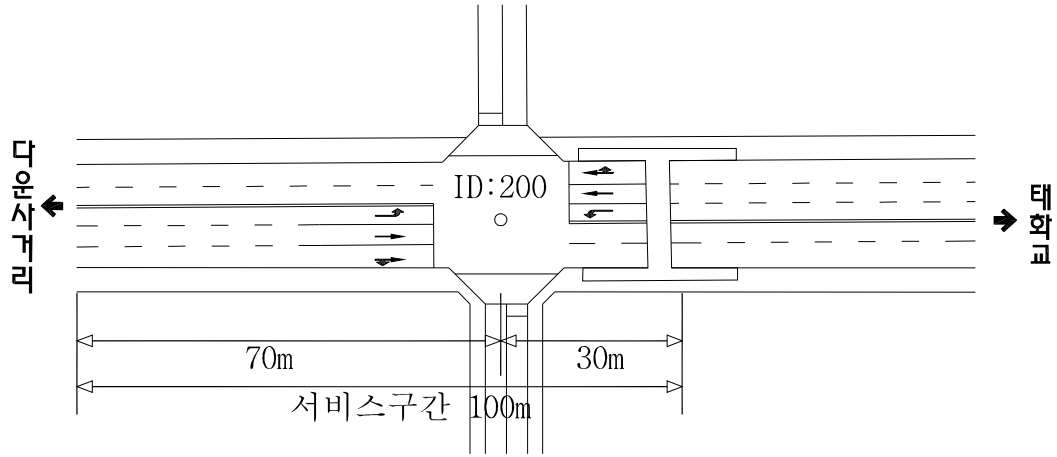


Fig. 3.9 Plane figure of node ④ within the study segment

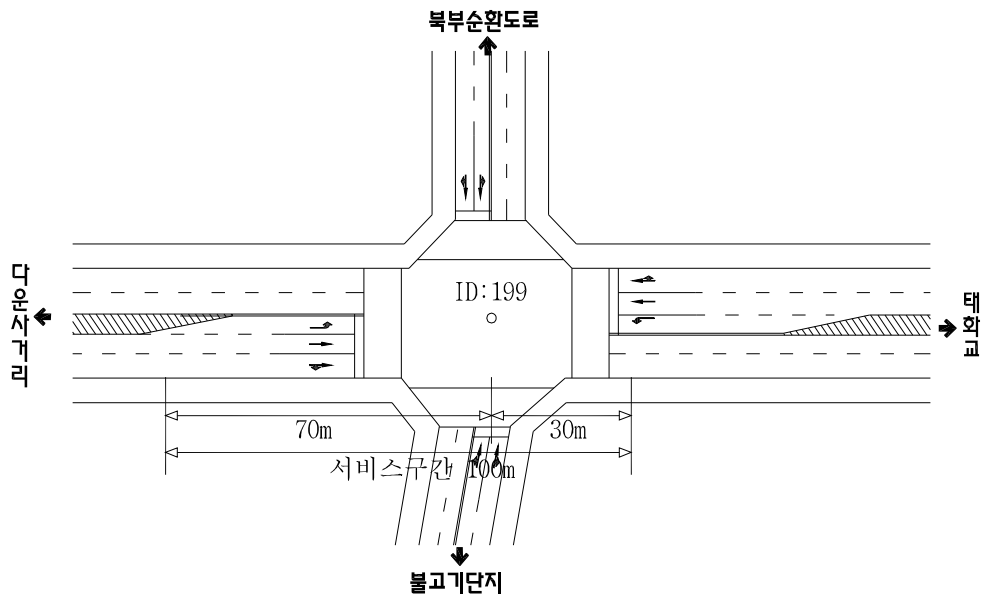


Fig. 3.10 Plane figure of node ⑤ within the study segment

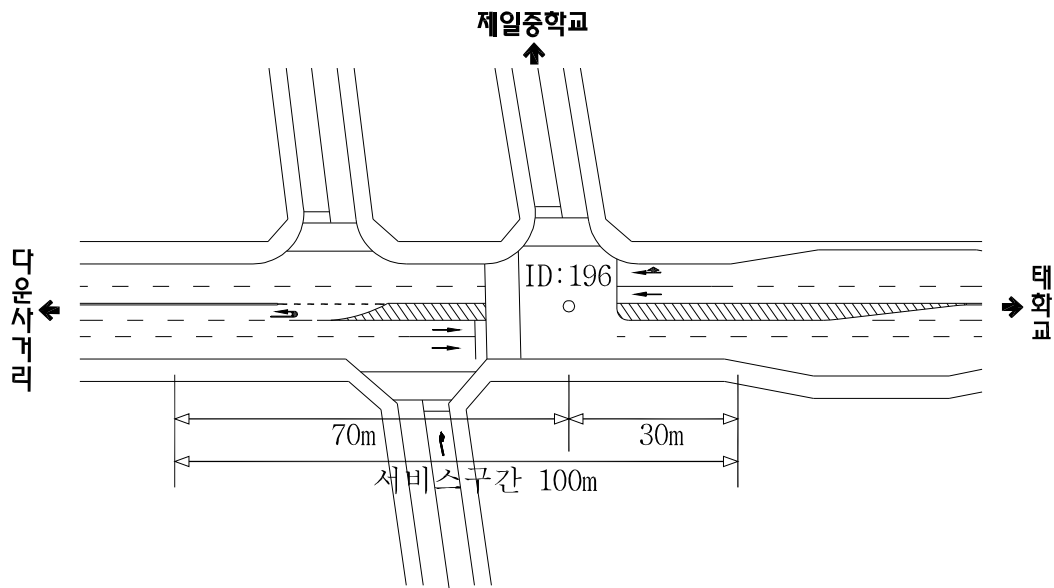


Fig. 3.11 Plane figure of node ⑦ within the study segment

3) 연구대상도로 C

이 연구대상도로 C는 삼산로이고 공업탑로타리에서 울산역삼거리에 이르는 총 연장 4.21km의 양방향 9차로이며, 간선도로로의 대부분이 단속류(interrupted flow)구간으로서 공업탑로타리와 현대백화점 주변지역은 주요 상업밀집지역으로서 불법주정차량이 많아 도로변 마찰 영향이 심한 지역이기 때문에 이 연구에서는 도로변 마찰요인이 많지 않고 차량이 통행에 장애요인이 되지 않는 목화예식장앞 교차로(①)와 동평 교차로(⑦)까지 1,03km구간이 연구대상구간으로 선정되어 특성분석에 사용되었다.

특히, 이 연구대상구간 내에는 버스정류장이 3개, 신호교차로가 4개가 있고, 아래의 Fig. 3.12는 공간적 범위를 설명하고 있고, Table 3.4는 이 연구대상구간 내의 버스정류장과 신호교차로들을 설명하고 있다.



Fig. 3.12 Spatial scope within the study segment of road C

Table 3.4 Bus stops and nodes within the study segment of road C

No.	Facility	Name of Facility	Characteristics
①	Node	목화예식장앞 교차로	사거리
②	Bus Stop	목화예식장앞 버스정류장	-
③	Node	번영교차로	사거리
④	Bus Stop	현대해상앞 버스정류장	-
⑤	Node	상호신용금고앞 교차로	사거리
⑥	Bus Stop	달동주공앞 버스정류장	-
⑦	Node	동평 교차로	사거리

이 연구대상구간 내 5개의 신호교차로는 모두 4지 형태로 되어있으며, 이들 신호교차로의 기하구조 형태는 아래 Fig. 3.13~Fig. 3.16과 같다.

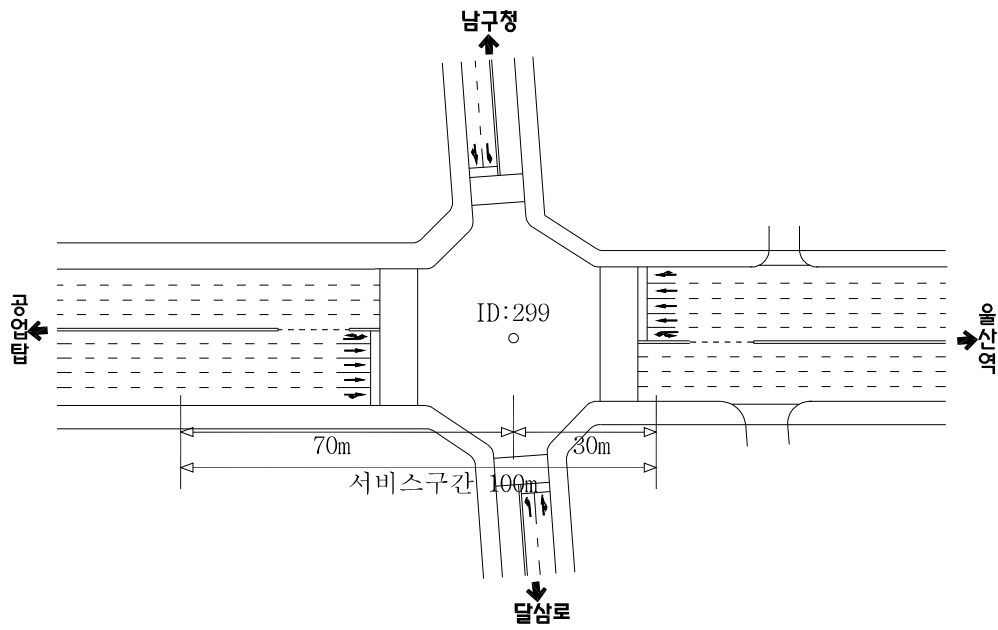


Fig. 3.13 Plane figure of node ① within the study segment

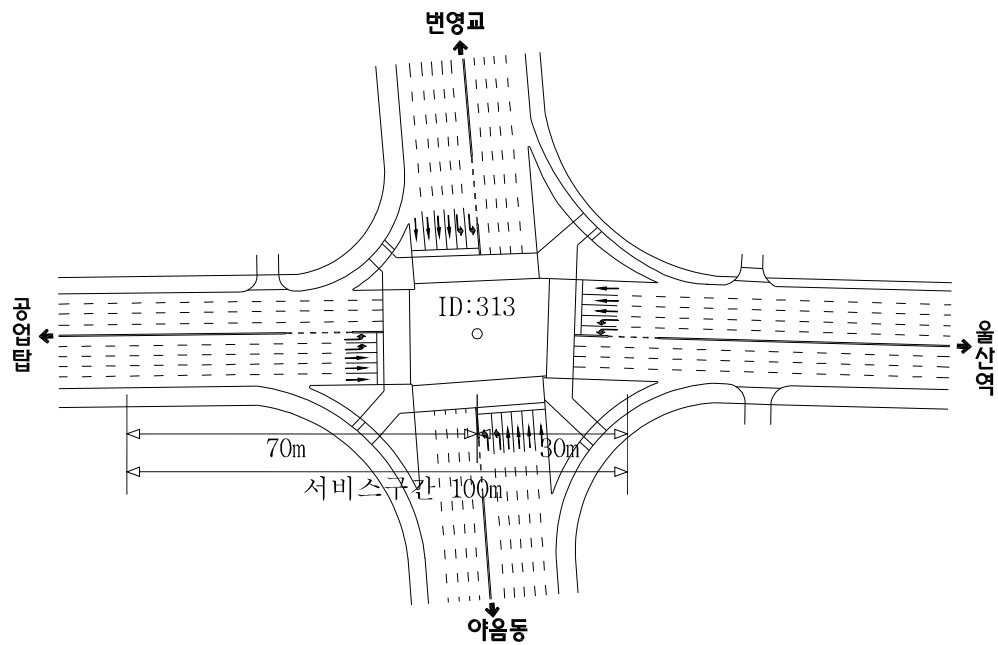


Fig. 3.14 Plane figure of node ③ within the study segment

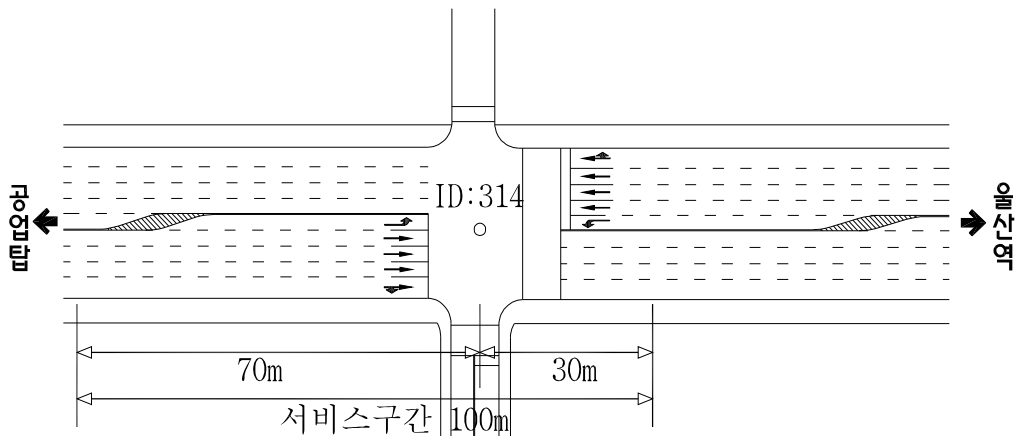


Fig. 3.15 Plane figure of node ⑤ within the study segment

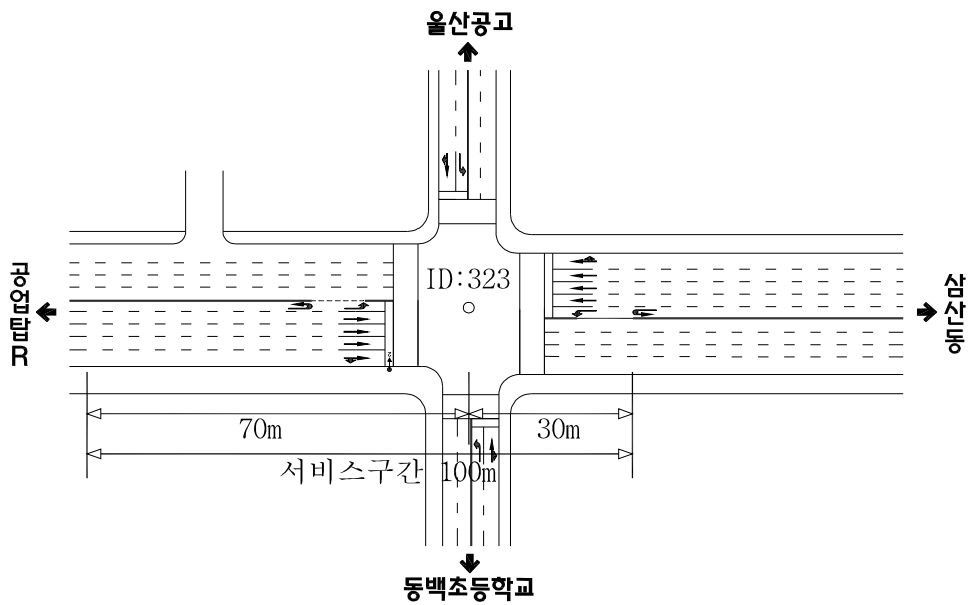


Fig. 3.16 Plane figure of node ⑦ within the study segment

3.1.3 신호체계분석

1) 연구대상도로 A

이 연구대상구간은 지능형교통체계(ITS) 사업에 따라 실시간으로 신호운영이 이루어지고 있는 연동구간의 일부로서 군청앞 교차로(②)가 핵심교차로로 주 교차로(major node)로 지정되어 있고, 나머지 교차로들은 다소 중요도가 낮은 부 교차로(minor node)로 지정되어 있는데, 주 교차로인 군청교차로(②)의 교통흐름에 따라 신호주기, 녹색시간 및 교차로사이의 이격시간(offset) 등이 결정되어지며, 각 교차로별로 1일 8회의 신호주기가 설정 운영되고 있다.

Table 3.5 Green time ratios of nodes with the bus flow direction

구 분	Node ②	Node ③	Node ④	Node ⑥
M.P. (08시 ~ 09시)	80.5%	56.0%	53.8%	49.4%
N.P. (13시 ~ 14시)	79.4%	57.0%	59.4%	47.0%
A.P. (18시 ~ 19시)	81.5%	60.5%	58.9%	53.6%

특히 위의 Table 3.5에서 보여주듯이 연구대상구간 내 교차로들은 시간대별 교차로별 녹색시간비율이 서로 다르게 적용되어 있으며, 최소 47.0%에서 최대 81.5%까지 녹색시간 비율변화를 보이는 것으로 나타났다.

또한 연구대상구간의 신호체계는 아래 Fig. 3.17의 시공간도(time-space diagram, TSD)에서 보여주듯이 연동체계로 운영되고 있기 때문에 첫 번째 교차로에서 녹색신호를 부여받은 차량들이 제한속도(60km/h)를 유지하고 운행될 경우 연구대상구간 내 대부분 교차로들은 녹색신호시간을 부여 받으면서 통행이 가능하도록 구축되어있다.

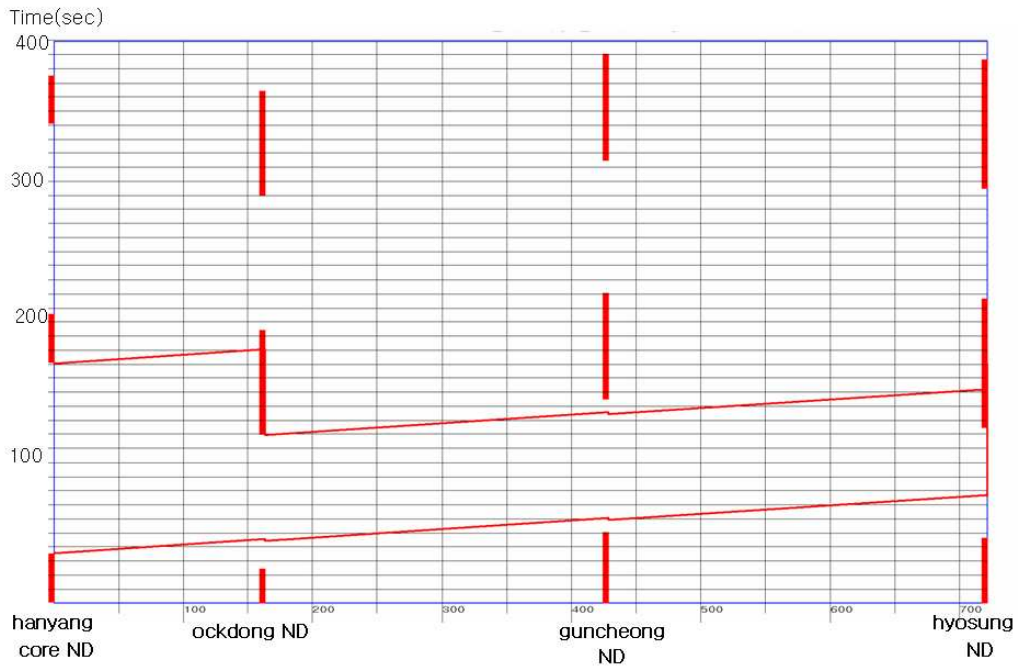


Fig. 3.17 Time-space diagram between Node ② and Node ⑥

2) 연구대상도로 B

이 연구대상구간 또한 실시간으로 신호운영이 이루어지고 있는 동일 연동구간이나 모든 교차로가 중요도가 낮은 부 교차로(minor node)로 지정되어 있으며, 주 교차로가 연구대상구간에서 벗어나 있다.

Table 3.6 Green time ratios of nodes with the bus flow direction

구 분	Node ①	Node ②	Node ④	Node ⑤	Node ⑥
M.P. (08시 ~ 09시)	56.4%	82.3%	82.3%	57.6%	79.4%
N.P. (13시 ~ 14시)	52.5%	81.2%	81.2%	53.7%	78.1%
A.P. (18시 ~ 19시)	54.1%	82.3%	82.3%	56.4%	79.4%

특히, 위의 Table 3.6에서 보여주듯이 연구대상구간 내 교차로들은 시간대별

교차로별 녹색시간비율이 다르게 적용되었으며, 최소 53.7%에서 최대 82.3%의 녹색시간 비율변화를 보이는 것으로 나타났으며, 이 연구대상구간은 아래 Fig. 3.18의 시공간도(TSD)처럼 연동체계로 운영되고 있다.

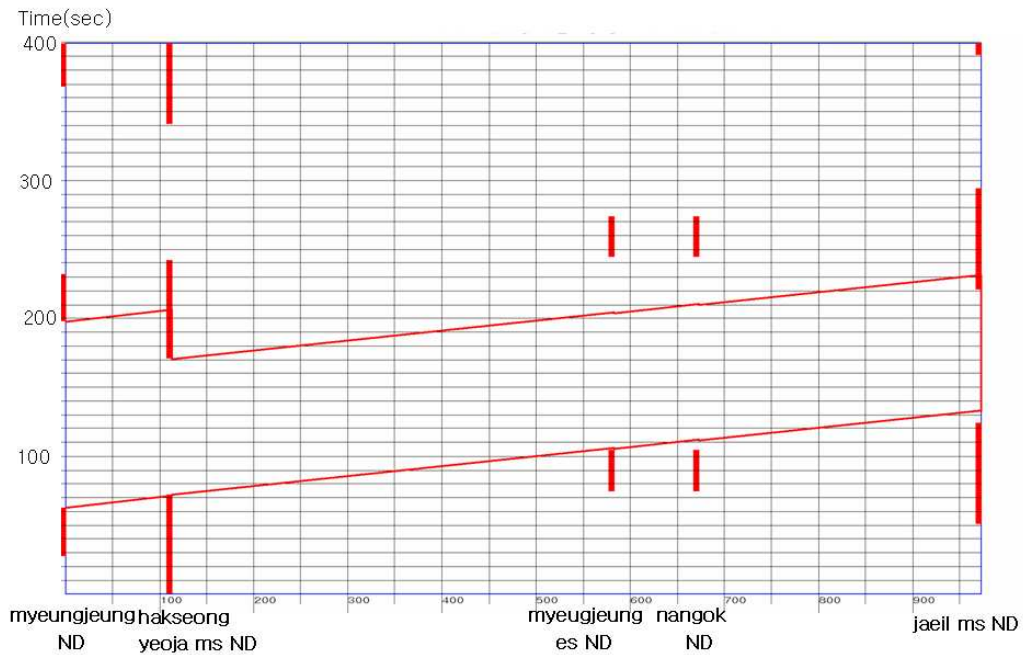


Fig. 3.18 Time-space diagram between Node ① and Node ⑥

3) 연구대상도로 C

이 연구대상구간의 교차로는 실시간으로 신호운영은 되고 있으나 동일한 연동구간이 아니며, 번영교차로(③)는 남북축으로 연계되어 있고, 목화예식장앞 교차로(①)와 상호신용금고앞 교차로(⑤)에서 동평교차로(⑦)는 연동구간이 별도로 형성되어 있다.

특히, 각 교차로는 1일 8회의 신호주기가 설정 운영되고 있으며, 아래의 Table 3.7에서 보여주듯이 시간대별 교차로별 녹색시간비율이 최소 28.3%에서 최대 65.0%의 녹색시간 비율변화를 보이는 것으로 나타났다.

Table 3.7 Green time ratios of nodes with the bus flow direction

구 분	Node ①	Node ③	Node ⑤	Node ⑦
M.P.(08시 ~ 09시)	45.5%	28.3%	65.0%	42.2%
N.P.(13시 ~ 14시)	45.5%	34.4%	63.8%	42.2%
A.P.(18시 ~ 19시)	42.7%	35.0%	63.8%	45.0%

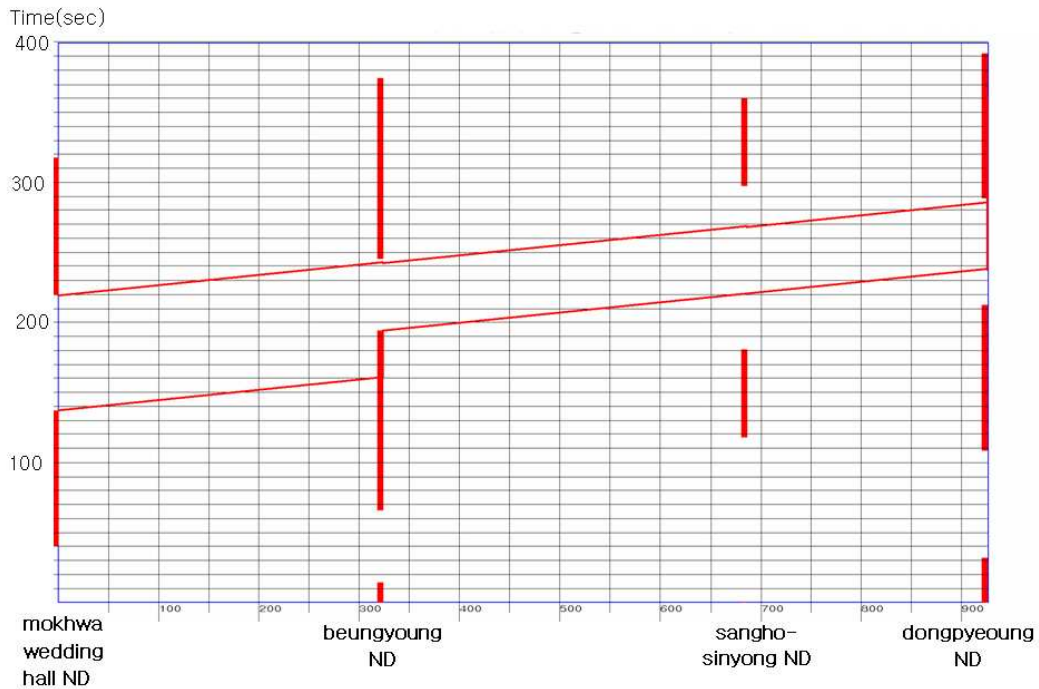


Fig. 3.19 Time-space diagram between Node ① and Node ⑦

따라서 이 연구대상도로는 주 간선도로들로 각 간선도로마다 버스정류장과 신호교차로 그리고 순행구간으로 구성되어 있고, 일부 간선도로는 버스정류장과 신호교차로가 근접해 있어서 순행구간이 거의 없는 현실을 최대한 반영할 수 있도록 되어 있었다. 다만, 이 연구대상구간이 모두 신호연동구간에 포함되어 있었지만, 도로 1개는 대상구간 내에서 연동이 단절되어 있었고 도로 2개는 대상구간이 동일 연동구간으로 설정되어 있는 것으로 나타났다.

3.2 자료수집

3.2.1 자료의 구성 체계

이 연구대상지역인 울산광역시의 버스정보시스템(BIS)은 도로상에서 운행되는 버스의 위치 파악을 위하여 매 20초 마다 버스위치가 정주기 정보로 교통관리센터에 송신되고 있으며, 이와는 별도로 버스의 통행시간 산정을 위해서 특정구간 즉 버스정류장 혹은 신호교차로를 통과할 때 이벤트 정보가 송신되고 있다.

그리고 연구대상지역내 버스운행 자료는 이벤트 정보에 의하여 수집되고 있는데, 이벤트 정보는 도로위의 버스정류장과 신호교차로에 각각 ID가 부여되어 있어 버스가 특정구간을 벗어날 경우 전방 ID구간의 진출지점부터 해당 ID진출지점까지의 여행시간과 해당 ID구간의 서비스시간 정보가 아래 Fig. 3.20과 같이 교통관리센터로 송신되고 있다.

그런데, 이벤트 정보는 특정지점 ID, 즉 버스정류장과 신호교차로의 중심에서 진행방향의 상류부 전방 70m에서 하류부 후방 30m 사이는 해당 ID구간의 영향권으로 간주되고, 버스정류장과 신호교차로의 영향권을 제외한 순행구간의 통행시간은 전방 ID구간의 진출지점부터 해당 ID 진출지점까지의 여행시간에서 해당 ID구간의 서비스시간을 차감함으로써 산정할 수 있었다.

또한, 기존의 연구가 대체적으로 버스정류장에서 버스정류장까지, 혹은 버스정류장과 신호교차로를 단위구간으로 설정한 것에 비해 이 연구에서는 아래의 Fig. 3.20에서 보여주듯이 단위구간을 버스정류장, 신호교차로 및 순행구간으로 구분 설정함으로써 단위구간별 통행특성의 비교 분석을 통해 각 단위구간별 예측력을 증대시킴과 동시에 연구대상 전 구간에 대한 통행특성을 파악할 수 있었다.

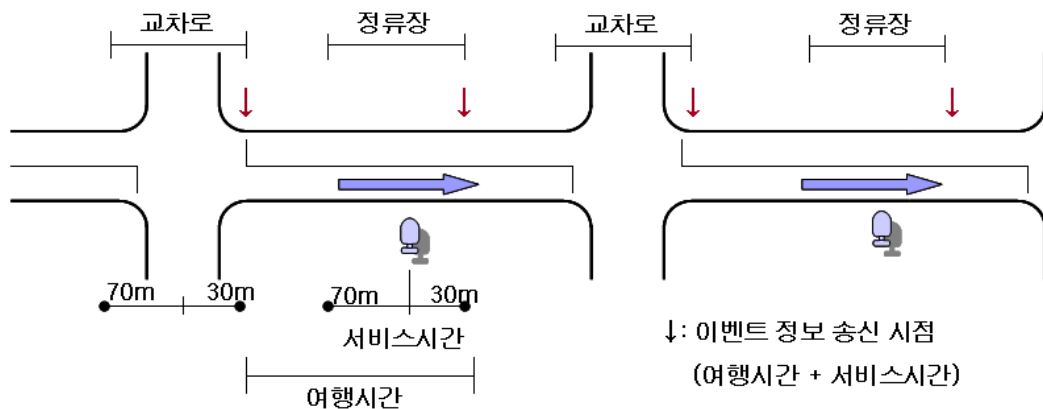


Fig. 3.20 Event data structure of bus information system(BIS)

따라서 이 연구대상도로 A, B, C의 각 대상구간 내 버스정류장, 신호교차로 및 순행구간을 구분하여 검토한 결과, 문수로 구간에는 버스정류소가 3개, 신호교차로가 4개, 순행구간이 6개로 나타났으며, 순행구간의 간격은 대체적으로 20m~98m 사이에서 분포하고 있었다.

반면 태화로 구간은 문수로 구간과 달리 대상구간 내 버스정류장이 2개, 신호교차로가 5개, 순행구간이 3개로 나타났으며, 순행구간의 간격은 150m~187m사이로 문수로 구간보다 넓게 분포하고 있었다.

그런데 태화로 구간에는 버스정류장과 신호교차로가 100m이내에 인접해 있어서 순행구간이 거의 없는 경우가 3개 있었고, 특히 버스정류장과 신호교차로가 100m 이내에 근접해 있어서 단위구간의 영향권이 서로 중복될 경우 후방에 위치한 단위구간의 영향권이 축소되는 것으로 간주되었으며, 이로 인해 학생여자중학교앞 버스정류장(③), 제일중학교앞 버스정류장(⑥)과 제일중학교앞 교차로(⑦)는 구간거리가 100m 이내로 설정됨으로써 이 구간에서는 순행구간이 배제되었다.

삼산로 구간에서는 버스정류장이 3개, 신호교차로가 4개, 순행구간이 5개로 나타났으며, 순행구간의 간격은 10m~119m 사이로 이 연구대상구간 중에서 편차가 가장 넓은 것으로 나타났다.

Table 3.8 Characteristics of the facility within the study segments

No.	Facility	Name of Facility	ID	Distance	
Sum				1,120m	
<i>Segment in road A</i>	1	Bus stop	법원앞 교차로	1,348	100m
	2	Section	순행구간 1		38m
	3	Node	한양코아앞 교차로	670	100m
	4	Section	순행구간 2		59m
	5	Node	옥동 교차로	789	100m
	6	Section	순행구간 3		166m
	7	Node	군청앞 교차로	334	100m
	8	Section	순행구간 4		20m
	9	Bus stop	올주군청앞 버스정류장	1,600	100m
	10	Section	순행구간		83m
	11	Node	효성 교차로	790	100m
	12	Section	순행구간 6		98m
	13	Bus stop	서여자중학교앞 버스정류장	1,425	56m
소 계				1,151m	
<i>Segment in road B</i>	14	Node	명정 교차로	818	100m
	15	Section	순행구간 7		187m
	16	Node	학성여중학교앞 교차로	817	100m
	17	Bus stop	학성여중학교앞 버스정류장	2131	62m
	18	Section	순행구간 8		150m
	19	Node	명정초교앞 교차로	200	100m
	20	Section	순행구간 9		175m
	21	Node	난곡 교차로	199	100m
	22	Bus stop	제일중학교앞 버스정류장	2132	77m
	23	Node	제일중학교앞 교차로	196	99m
소 계				1,027m	
<i>Segment in road C</i>	24	Node	목화예식장앞 교차로	299	100m
	25	Bus stop	목화예식장앞 버스정류장	1325	80m
	26	Section	순행구간 10		150m
	27	Node	변영 교차로	313	100m
	28	Section	순행구간 11		34m
	29	Bus stop	현대해상앞 버스정류장	1739	100m
	30	Section	순행구간 12		119m
	31	Node	상호신용금고앞 교차로	314	100m
	32	Section	순행구간 13		10m
	33	Bus stop	달동주공앞 버스정류장	1265	100m
	34	Section	순행구간 14		34m
	35	Node	동평 교차로	323	100m

3.2.2 운행 자료수집

이 연구대상구간 내 실시간 버스운행 자료는 교통관리센터의 DB서버를 통해 수집되었으며, 연구대상구간 중에서 문수로 구간에서는 2006년 6월 13일(화)~6월 15일(목), 2007년 1월 16일(화)~1월 18일(목)까지 총 6일 동안, 태화로 구간 및 삼산로 구간에서는 2007년 3월 27일(화)~3월 29일(목)까지 각각 3일 동안 수집되었고, 자료수집 시간대는 오전 출근시간대(07시~09시), 낮 시간대(12시~14시), 오후 퇴근시간대(17시~19시)로 각각 2시간씩 구분하여 수집되었다.

그리고 교통상황이 특정일의 예상치 못하는 사유로 인해 버스통행 특성이 왜곡되는 것을 방지하고 범용성을 갖는 버스통행 특성자료를 수집하기 위하여 구간별로 날짜는 다르게, 시간대는 동일하게 아래와 같이 수집되었다.

노선번호	버스단말기ID	지점ID	지점명	진입시각	진출시각	여행시간	서비스시간
307	102	743	법원앞	20060613053203	20060613053248	70	45
307	102	1348	법원앞	20060613053249	20060613053257	9	8
307	102	670	한양코아앞	20060613053258	20060613053304	7	6
307	102	789	옥동군부대앞	20060613053309	20060613053315	11	6
307	102	334	군청사거리	20060613053326	20060613053331	16	5
307	102	1600	울주군청앞	20060613053332	20060613053339	8	7
307	102	790	효성사택앞	20060613053342	20060613053347	8	5
307	102	791	학성고앞	20060613053354	20060613053359	2	5
307	156	1348	법원앞	20060613060334	20060613060358	24	24
307	156	670	한양코아앞	20060613060403	20060613060409	11	6
307	156	789	옥동군부대앞	20060613060413	20060613060417	8	4
307	156	334	군청사거리	20060613060427	20060613060433	16	6
307	156	1600	울주군청앞	20060613060435	20060613060459	26	24
307	156	790	효성사택앞	20060613060515	20060613060555	56	40
307	156	791	학성고앞	20060613060607	20060613060617	6	10
307	720	1348	법원앞	20060613064534	20060613064554	84	20
307	720	1600	울주군청앞	20060613064629	20060613064651	57	22
307	102	743	법원앞	20060613073354	20060613073403	83	9
307	102	1348	법원앞	20060613073403	20060613073423	20	20
307	102	670	한양코아앞	20060613073428	20060613073435	12	7
307	102	789	옥동군부대앞	20060613073439	20060613073444	9	5
307	102	334	군청사거리	20060613073455	20060613073501	17	6
307	102	1600	울주군청앞	20060613073504	20060613073529	28	25
307	102	790	효성사택앞	20060613073708	20060613073717	108	9
307	102	791	학성고앞	20060613073749	20060613073800	5	11

Fig. 3.21 Real-time data example observed on the road

특히, 수집된 버스 운행 자료는 버스정류장 혹은 신호교차로 등 각각 해당 ID 지점을 버스가 통과한 후 이에 해당하는 노선번호, 버스단말기 ID, 지점 ID, 지점명, 지점 진입시간, 지점 진출시각, 전방 ID의 끝 지점에서 해당 ID 끝 지점까지의 구간을 운행한 여행시간, 해당 ID(버스정류장 혹은 신호교차로)의 여행시간을 나타내는 서비스시간 등으로 이루어져 있다.

그리고 이들 버스 운행 자료로 버스통행 시간을 예측하기 위해서 우선적으로 교통관리센터의 DB에서 수집 자료를 Excel로 불러와 버스 운행 자료를 지점 ID 별로 분류한 후 ID별 서비스시간을 구하고, 여행시간에서 서비스시간을 차감하여 순행구간에 대한 운행시간을 아래와 같이 산정하였다.

한양코아앞 교차로								
노선	버스ID	지점ID	지점명	진입시각	진출시각	여행시간	Section	서비스시간
412	302	670	한양코아앞	20060613060116	20060613060124	15	7	8
307	156	670	한양코아앞	20060613060403	20060613060409	11	5	6
1104	178	670	한양코아앞	20060613060422	20060613060429	12	5	7
401	408	670	한양코아앞	20060613060842	20060613060849	11	4	7
406	244	670	한양코아앞	20060613061032	20060613061037	7	2	5
1402	343	670	한양코아앞	20060613061100	20060613061105	10	4	6
1114	187	670	한양코아앞	20060613061107	20060613061113	10	4	6
1401	471	670	한양코아앞	20060613061109	20060613061116	11	4	7
472	853	670	한양코아앞	20060613061348	20060613061354	9	3	6
406	243	670	한양코아앞	20060613061557	20060613061604	12	6	6
417	170	670	한양코아앞	20060613061605	20060613061611	11	5	6
412	326	670	한양코아앞	20060613061613	20060613061620	12	5	7
1104	268	670	한양코아앞	20060613061836	20060613061842	11	5	6
1124	801	670	한양코아앞	20060613062113	20060613062119	11	5	6
452	548	670	한양코아앞	20060613062116	20060613062123	11	4	7
401	255	670	한양코아앞	20060613062123	20060613062130	13	6	7
403	108	670	한양코아앞	20060613062548	20060613062555	12	5	7
432	532	670	한양코아앞	20060613062555	20060613062601	8	2	6
417	486	670	한양코아앞	20060613062818	20060613062823	7	2	5
412	315	670	한양코아앞	20060613063332	20060613063340	15	7	8
401	254	670	한양코아앞	20060613063555	20060613063601	11	5	6
1114	248	670	한양코아앞	20060613063609	20060613063615	9	3	6
1127	580	670	한양코아앞	20060613063806	20060613063813	9	2	7
411	730	670	한양코아앞	20060613063949	20060613064023	10	4	6
1402	568	670	한양코아앞	20060613064113	20060613064119	10	4	6

Fig. 3.22 Real-time service time data example calculated on the node

특히, 이 연구에서는 현재 운영되고 있는 울산광역시의 버스정보시스템(BIS)이 연구의 중심이 되었고, 또한 이 연구를 위한 버스운행 DB는 울산광역시 교통관리센터의 수집된 실시간 DB가 활용되었다. 그런데 수집된 DB의 구성 체계는 도로를 운행하는 버스가 상이한 통행특성을 갖는 각 단위구간(버스정류장, 신호교차로, 순행구간)별로 분류 수집되었고, 자료 또한 장비나 통신망에 하차 없다고 가정할 경우 매일 운행되는 버스의 모든 자료 역시 교통관리센터로부터 수집되었으며, 3개의 연구대상도로에 대한 대상구간과 특정 시간대를 기준으로 교통관리센터로부터 수집된 Excel 자료를 1차 가공하여 단위구간별로 분류 정리하여 최종적인 DB가 구축되었다.

3.3 운행자료 분석

3.3.1 운행대수 분석

이 연구대상구간을 통과한 일별 시간대별 2시간단위 버스통과대수를 살펴보면 아래 Table 3.9와 같이 문수로 구간은 약 100대/2시간, 태화로 구간은 약 70여 대/2시간, 삼산로구간은 약 90대/2시간으로 도로별로 다소 차이가 발생하였으며, 버스당 평균통과시간은 문수로 구간에서 72초/대, 태화로 구간에서 80초/대, 삼산로 구간에서 103초/대로 나타났다.

그리고 이 연구대상구간 내 운행대수에 있어서 날짜별 시간대별 큰 차이를 보이지 않았으며, 버스별 간격은 구간에 따라 차이를 보였으나 날짜별 시간대별로 일정수준을 유지하는 것으로 나타났다.

Table 3.9 Number of buses passed within the study segments(veh)

<i>Road</i>	<i>Date</i>	<i>Period</i>	<i>Day 1</i>	<i>Day 2</i>	<i>Day 3</i>	<i>Sum</i>
<i>Segment in road A</i>	Jun. 2006	M.P.(07시 ~ 09시)	95	99	101	295
		N.P.(12시 ~ 14시)	103	105	105	313
		A.P.(17시 ~ 19시)	101	104	108	313
	Jan. 2007	M.P.(07시 ~ 09시)	89	91	91	271
		N.P.(12시 ~ 14시)	91	89	83	263
		A.P.(17시 ~ 19시)	94	92	91	277
<i>Segment in road B</i>	Mar. 2007	M.P.(07시 ~ 09시)	69	66	67	202
		N.P.(12시 ~ 14시)	71	68	67	206
		A.P.(17시 ~ 19시)	67	67	67	201
<i>Segment in road C</i>	Mar. 2007	M.P.(07시 ~ 09시)	92	88	91	271
		N.P.(12시 ~ 14시)	91	90	91	272
		A.P.(17시 ~ 19시)	95	89	92	276

3.3.2 배차간격 분석

이 연구대상구간인 문수로 구간의 법원앞 버스정류장(①)에서 서여자중학교 앞 버스정류장(⑦)구간에는 아래 Table 3.10에서 보듯이 23개의 버스노선이 운행되고 있었고, 버스의 배차간격은 최소 9분에서 최대 164분까지 고루 분포되어 있었으며, 평균 43분의 배차간격으로 운행되고 있었다.

Table 3.10 Routes and time interval within the study segment of road A

<i>No.</i>	<i>Route</i>	<i>Interval</i>	<i>O · D</i>	<i>No.</i>	<i>Route</i>	<i>Interval</i>	<i>O · D</i>
Sum	23	-	-	12	452	86분	
1	307	46분	천상~울산역	13	462	47분	울리~연암
2	401	13분	울리~꽃바위	14	472	42분	언양~효문동
3	403	60분	울리~천상	15	503	85분	천상~온산
4	405	164분	울리~진하	16	714	16분	울산역~웅촌
5	406	35분	울리~장생포	17	724	100분	삼산~웅촌
6	411	60분	울리~북구	18	1104	12분	꽃바위~울리
7	412	15분	울리~모화	19	1114	12분	꽃바위~울리
8	415	25분	신정동~울리	20	1124	25분	방어동~울리
9	416	45분	울리~중구	21	1127	9분	남구~노포동
10	417	32분	웅촌~삼산동	22	1401	22분	무거~꽃바위
11	432	27분	울리~북구	23	1402	27분	울리~모화

태화로 구간에서는 명정 교차로(①)에서 제일중학교앞 교차로(⑦)까지 아래 Table 3.11에서 보듯이 20개의 버스노선이 운행되고 있었고, 버스의 배차간격은 최소 11분에서 최대 190분까지 다양하게 분포되어 있었으며, 평균 66분의 배차간격으로 운행되고 있었다.

Table 3.11 Routes and time interval within the study segment of road B

No.	Route	Interval	O · D	No.	Route	Interval	O · D
Sum	20	-	-				
1	103	85분	꽃바위 ~ 다운	11	422	26분	울리 ~ 쌍용아진
2	104	11분	꽃바위 ~ 울리	12	426	35분	울리 ~ 변전소
3	114	20분	꽃바위 ~ 울리	13	442	31분	울리 ~ 매곡
4	123	25분	꽃바위 ~ 천상	14	704	73분	울산역 ~ 영산대
5	203	16분	연암 ~ 다운	15	708	58분	울산역 ~ 녹동
6	317	148분	천상 ~ 울산역	16	718	58분	울산역 ~ 반용
7	327	23분	울산역 ~ 메가마트	17	728	137분	울산역 ~ 중촌
8	402	11분	울리 ~ 모화	18	802-1	87분	봉계 ~ 서동
9	403	60분	울리 ~ 천상	19	807	69분	울산역 ~ 석남사
10	421	190분	울리 ~ 신명	20	817	150분	통도사 ~ 울산역

삼산로 구간에서는 목화예식장앞 교차로(①)에서 동평 교차로(⑦)까지 아래 Table 3.12에서 보듯이 18개의 버스노선이 운행되고 있었고, 버스의 배차간격은 최소 8분에서 최대 80분까지 다양하게 분포되어 있었으며, 평균 66분의 배차간격으로 운행되고 있었다.

Table 3.12 Routes and time interval within the study segment of road C

No.	Route	Interval	O · D	No.	Route	Interval	O · D
Sum	18	-	-				
1	117	23분	꽃바위 ~ 울산역	10	718	58분	울산역 ~ 반용
2	126	31분	꽃바위 ~ 변전소	11	744	80분	울산역 ~ 언양
3	127	8분	꽃바위 ~ 울산역	12	807	69분	울산역 ~ 석남사
4	327	23분	울산역 ~ 메가마트	13	827	35분	성안 ~ 울산역
5	337	44분	울산역 ~ 메가마트	14	1104	12분	꽃바위 ~ 울리
6	401	13분	울리 ~ 꽃바위	15	1114	12분	꽃바위 ~ 울리
7	417	40분	울리 ~ 리비에르	16	1401	22분	무거 ~ 꽃바위
8	704	73분	울산역 ~ 영산대	17	1402	27분	울리 ~ 모화
9	708	58분	울산역 ~ 녹동	18	1705	20분	울산역 ~ 온천

3.3.3 운행시간 분석

1) 버스정류장

이 연구대상구간 내 운행되는 버스정류장의 서비스시간 자료는 아래 Table 3.13에서와 같이 6개의 서비스시간 그룹(10초 이하, 10초~20초, 20초~30초, 30초~40초, 40초~50초, 50초 이상)으로 분류되었다.

비록 도로별로 조사날짜는 다르지만 문수로 구간의 경우 6일간의 자료가 수집되었고, 대화로 구간과 삼산로 구간은 각각 3일간의 자료가 수집되었다.

서비스시간 분석결과에 따르면, 도로별 시간대별로 다소 차이는 있겠지만 대체적으로 20초~30초 사이에서 정류장의 서비스시간 빈도가 제일 높은 것으로 나타났다.

Table 3.13 Service time characteristics at bus stop(sec)

Segment	Period	≤ 10sec	≤ 20sec	≤ 30sec	≤ 40sec	≤ 50sec	> 50sec	Sum
Segment in road A	M.P.	288 (15.6%)	335 (18.2%)	697 (37.9%)	345 (18.7%)	95 (5.2%)	81 (4.4%)	1841 (100.0%)
	N.P.	344 (19.4%)	386 (21.8%)	515 (29.0%)	323 (18.2%)	124 (7.0%)	82 (4.6%)	1774 (100.0%)
	A.P.	226 (13.5%)	241 (14.4%)	439 (26.3%)	380 (22.8%)	188 (11.3%)	194 (11.6%)	1668 (100.0%)
Segment in road B	M.P.	64 (10.5%)	143 (23.5%)	200 (32.9%)	91 (15.0%)	68 (11.2%)	42 (6.9%)	608 (100.0%)
	N.P.	56 (9.3%)	168 (28.0%)	304 (50.7%)	38 (6.3%)	16 (2.7%)	18 (3.0%)	600 (100.0%)
	A.P.	21 (10.4%)	49 (24.4%)	75 (37.3%)	27 (13.4%)	16 (8.0%)	13 (6.5%)	201 (100.0%)
Segment in road C	M.P.	69 (8.4%)	265 (32.2%)	320 (38.9%)	105 (12.8%)	39 (4.7%)	25 (3.0%)	823 (100.0%)
	N.P.	91 (11.6%)	290 (36.9%)	304 (38.7%)	77 (9.8%)	19 (2.4%)	4 (0.5%)	785 (100.0%)
	A.P.	39 (4.9%)	226 (28.4%)	381 (47.9%)	110 (13.8%)	27 (3.4%)	12 (1.5%)	795 (100.0%)

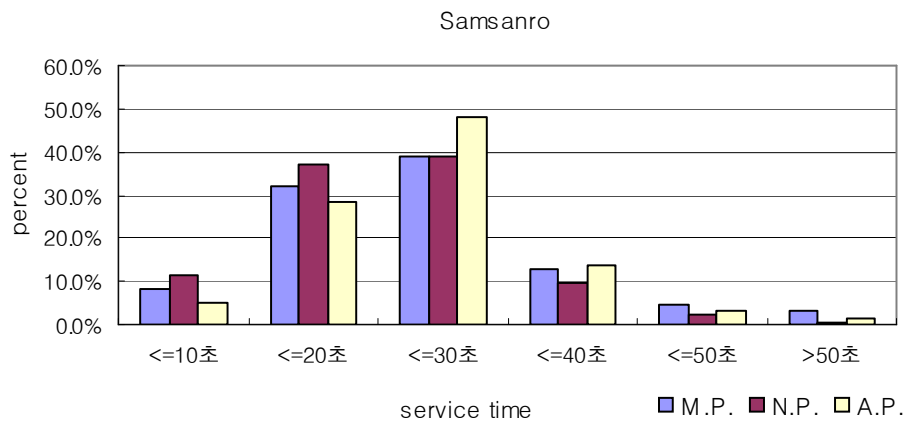
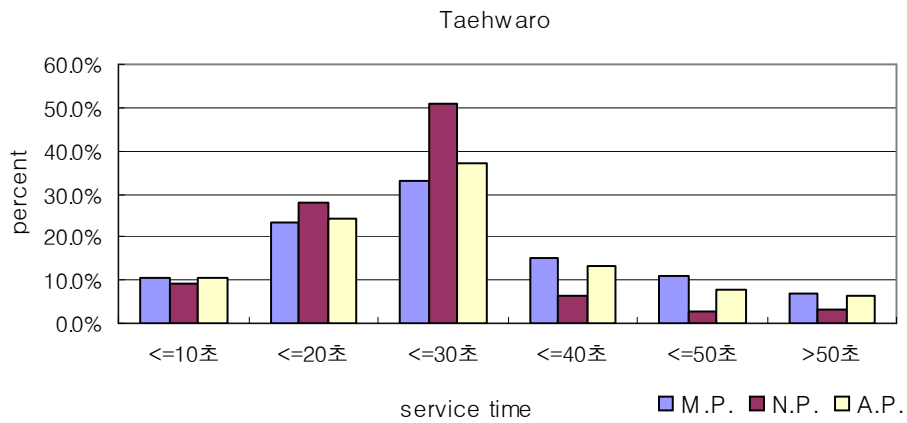
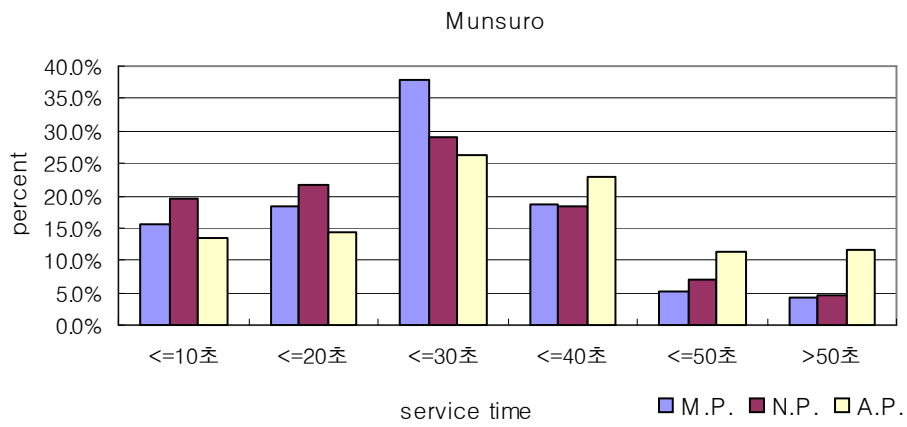


Fig. 3.23 Service time distribution at bus stop

2) 신호교차로

이 연구대상구간 내 운행되는 버스의 교차로 통과시간 자료는 아래 Table 3.14에서 보여주듯이 버스와 같이 6개의 서비스시간 그룹(10초 이하, 10초~20초, 20초~30초, 30초~40초, 40초~50초, 50초 이상)으로 분류되었다.

서비스시간의 분류결과에 따르면, 10초 이내의 서비스시간 빈도가 제일 높은 것으로 나타났는데 이는 실시간의 신호운영체계와 함께 대부분의 교차로가 신호연동으로 운영되고 있기 때문에 10초 이내 통과하지 못하는 버스는 대부분 신호주기만큼 50초 이상 서비스시간이 소요되는 것으로 나타났다.

Table 3.14 Service time characteristics at node(sec)

<i>Segment</i>	<i>Period</i>	$\leq 10sec$	$\leq 20sec$	$\leq 30sec$	$\leq 40sec$	$\leq 50sec$	$>50sec$	<i>Sum</i>
<i>Segment in road A</i>	M.P.	1630 (82.7%)	203 (10.3%)	9 (0.5%)	5 (0.3%)	5 (0.3%)	118 (6.0%)	1970 (100.0%)
	N.P.	1545 (78.2%)	222 (11.2%)	8 (0.4%)	9 (0.5%)	7 (0.4%)	184 (9.3%)	1975 (100.0%)
	A.P.	1493 (77.4%)	287 (14.9%)	12 (0.6%)	10 (0.5%)	3 (0.2%)	125 (6.5%)	1930 (100.0%)
<i>Segment in road B</i>	M.P.	660 (76.7%)	64 (7.4%)	12 (1.4%)	31 (3.6%)	16 (1.9%)	77 (9.0%)	860 (100.0%)
	N.P.	639 (78.7%)	30 (3.7%)	4 (0.5%)	24 (3.0%)	10 (1.2%)	105 (12.9%)	812 (100.0%)
	A.P.	684 (82.0%)	46 (5.5%)	7 (0.8%)	8 (1.0%)	8 (1.0%)	81 (9.7%)	834 (100.0%)
<i>Segment in road C</i>	M.P.	439 (43.6%)	45 (4.5%)	21 (2.1%)	73 (7.3%)	75 (7.5%)	353 (35.1%)	1006 (100.0%)
	N.P.	529 (55.7%)	89 (9.4%)	48 (5.1%)	10 (1.1%)	7 (0.7%)	267 (28.1%)	950 (100.0%)
	A.P.	412 (42.2%)	207 (21.2%)	42 (4.3%)	27 (2.8%)	10 (1.0%)	279 (28.6%)	977 (100.0%)

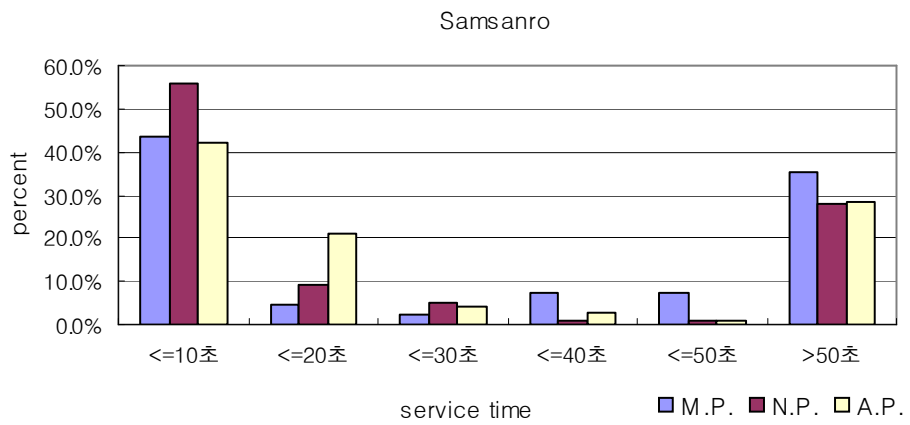
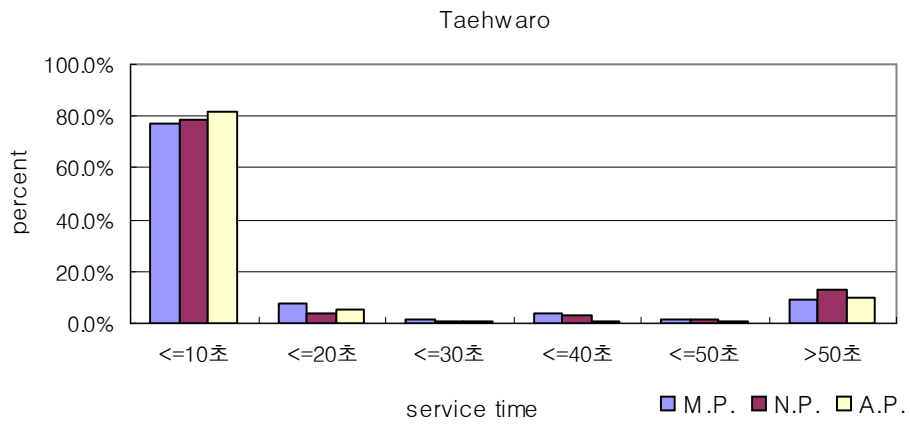
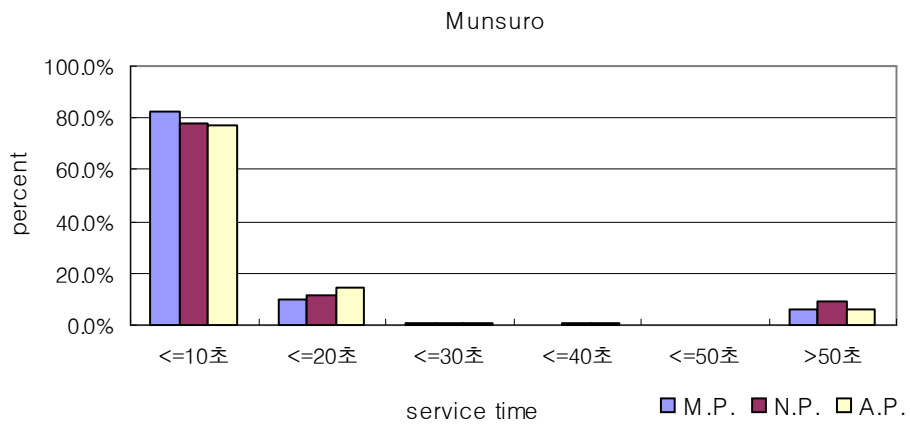


Fig. 3.24 Service time distribution at node

3) 순행구간

이 연구대상구간 내 운행되는 정류장과 교차로의 영향권을 벗어난 순수 운행 구간인 순행구간의 버스통행속도는 아래 Table 3.15와 같이 6개의 서비스시간 그룹(10km/h 이하, 10km/h~20km/h, 20km/h~30km/h, 30km/h~40km/h, 40km/h~50km/h, 50km/h 이상)으로 분류되었다.

순행구간의 버스통행속도의 특성분석결과에 따르면, 도로별 시간대별로 다소 차이는 있었으나, 문수로 구간과 삼산로 구간에서는 30km/h~40km/h, 태화로 구간에서에서는 40km/h~50km/h에서 통행빈도가 높았으며, 오전시간대 문수로 구간과 태화로 구간에서는 50km/h이상의 통행속도를 나타내었다.

이는 공단도시로서 출근시간대 특정 방향의 교통흐름이 두드러지게 나타남으로써 오전시간대 신호주기를 증가시켜 차량의 연동효과를 극대화시켰기 때문이라고 생각되었다.

Table 3.15 Service time characteristics at section(sec/veh)

Segment	Period	≤10km/h	≤20km/h	≤30km/h	≤40km/h	≤50km/h	>50km/h	Sum
Segment in road A	M.P.	277 (9.1%)	125 (4.1%)	564 (18.6%)	766 (25.2%)	433 (14.3%)	871 (28.7%)	3,036 (100.0%)
	N.P.	283 (9.5%)	118 (4.0%)	593 (19.9%)	802 (26.9%)	518 (17.4%)	668 (22.4%)	2,982 (100.0%)
	A.P.	301 (10.5%)	228 (7.9%)	680 (23.7%)	840 (29.2%)	421 (14.7%)	403 (14.0%)	2,873 (100.0%)
Segment in road B	M.P.	7 (1.3%)	18 (3.5%)	35 (6.7%)	118 (22.7%)	151 (29.1%)	190 (36.6%)	519 (100.0%)
	N.P.	11 (2.2%)	2 (0.4%)	35 (7.0%)	95 (18.9%)	185 (36.9%)	174 (34.7%)	502 (100.0%)
	A.P.	18 (3.5%)	6 (1.2%)	50 (9.7%)	117 (22.7%)	175 (34.0%)	149 (28.9%)	515 (100.0%)
Segment in road C	M.P.	15 (1.2%)	167 (12.8%)	372 (28.5%)	588 (45.1%)	123 (9.4%)	38 (2.9%)	1,303 (100.0%)
	N.P.	3 (0.2%)	179 (14.4%)	347 (28.0%)	515 (41.5%)	148 (11.9%)	49 (3.9%)	1,241 (100.0%)
	A.P.	74 (5.9%)	338 (26.9%)	346 (27.5%)	378 (30.0%)	102 (8.1%)	20 (1.6%)	1,258 (100.0%)

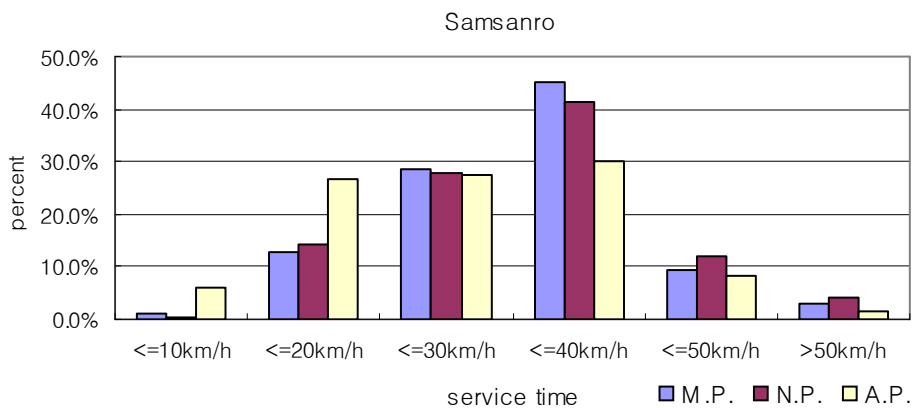
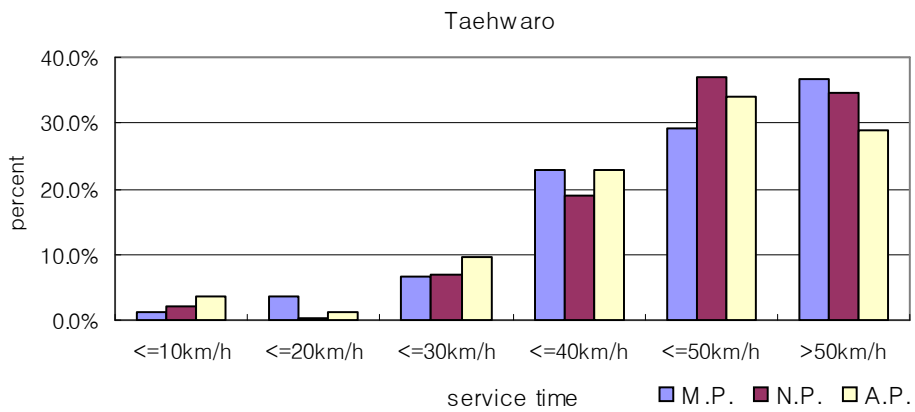
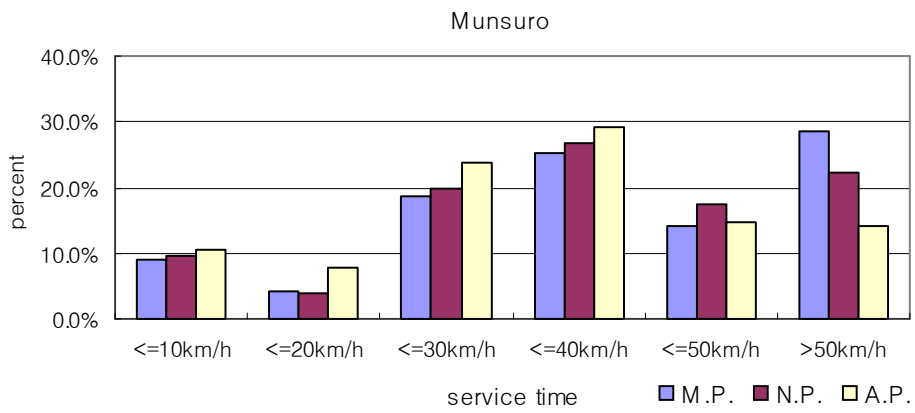


Fig. 3.25 Service time distribution at section

따라서 이 연구대상구간의 버스통과시간을 비교 분석해 보면, 문수로 구간에서 72초/대, 태화로 구간에서 80초/대, 삼산로 구간에서 103초/대로 나타났고, 버스노선별 배차간격은 최소 9분에서 최대 164분까지 고루 분포되어 있었으며, 평균 43분의 배차간격으로 운행되는 것으로 나타났다.

특히, 이 연구대상구간 내 버스정류장의 버스통과시간은 대체적으로 20초와 30초 사이에서 통과시간의 발생빈도가 제일 높게 나타났고, 20초와 30초 사이를 기준으로 통과시간의 발생빈도가 점점 감소하는 것으로 나타났다.

그리고 이 연구대상구간 내 신호교차로의 버스통과시간은 버스정류장이나 순행구간과는 다르게 10초 이내의 소요시간의 발생빈도가 높게 나타났고, 50초 이상이 소요시간 발생빈도가 높게 나타났다.

또한, 이 연구대상구간 내 순행구간의 버스통과속도가 문수로 구간과 삼산로 구간에서는 30km/h~40km/h, 태화로 구간에서는 40km/h~50km/h를 보이는 것으로 나타났으며, 오전시간대에는 문수로 구간과 태화로 구간에서 각각 50km/h이상의 통행속도를 보이는 것으로 나타났다.

한편, 이 연구대상구간에 대한 버스운행 특성자료를 비교 분석해 보면, 도로를 따라 운행되는 버스의 경우 버스정류장, 신호교차로 및 순행구간의 통과에 따른 버스의 통행특성이 서로 상이하다는 사실을 확인할 수 있었고, 버스가 신호교차로를 통과할 때 녹색신호를 부여받고 통과하는 차량과 부여받지 못하고 대기하는 차량과의 통행시간 측면에서 현저한 차이를 확인할 수 있었다.

제 4 장 모형구축 및 검증

4.1 모형구축

일반적으로 실제 도로 및 교통상황 하에서 버스운행 자료를 중심으로 버스도착시간을 예측한다는 것은 버스가 어느 한 지점을 출발하여 특정지점(정류장, 터미널 등)에 도착하는데 소요되는 시간을 산정하는 것으로서 그리 쉬운 일이 아니다.

통상적으로 버스도착시간이란 버스정보시스템(BIS)을 통해 버스정류장에서 버스를 기다리는 버스승객들에게 제공되는 버스도착시간 정보로서 1~2분의 예측오차에도 신뢰도가 떨어지게 되므로 버스도착시간의 예측과정에서 실제 도로 및 교통상황의 반영은 매우 결정적인 요소가 되고, 또한 예측모형의 구축에 사용되는 시계열 자료는 수집기간에 따라 실시간의 버스도착시간 예측결과에 상당한 차이를 보이게 된다.

즉, 도로 및 교통상황의 시간대별 변화에 따라 높은 편차를 보이는 대도시의 경우 버스도착시간 예측에 있어서 1시간 이상의 시계열자료를 적용할 때 침두 시간대와 같은 특정시점(단기적으로 돌발교통상황으로 변화가 발생한 시점)의 예측결과에 많은 편차를 보이게 된다.

그런데 실시간의 버스도착시간을 예측하고자 할 경우 버스도착시간 예측시점의 교통상황이 가장 잘 반영되어야 하고, 돌발교통상황이 아닌 일상적인 교통상황의 도로교통 특성자료가 중심이 되어야 하며, 현재의 버스통행패턴이 가까운 장래에도 계속 유지될 것이라는 가정 하에 최근 1분 내지 15분 동안에 수집된 버스운행 특성자료가 버스도착시간 예측에 활용되어야 한다.

따라서 이 연구에서는 단기 시계열자료를 이용하는 예측모형들 중 보편적으로 이해가 빠르고 일반적으로 사용되고 있는 시계열분석기법인 평활화기법(smoothing method, SM)과 최근에 교통 분야에서 널리 사용되고 있는 동적 예측기법인 칼만 필터(Kalman Filter)기법에 대해 개념과 특성 그리고 적용방법 등에 대해서

검토하였으며, 궁극적으로는 시계열모형으로 구축된 단위구간별 개별모형과 단위구간별 개별모형의 결과를 바탕으로 중 회귀기법을 이용하여 통합모형을 구축하는 것에 대해서 검토하였다.

4.2 구축방법

4.2.1 평활화기법(*smoothing method, SM*)

1) 기법의 개요

일반적으로 과거의 시계열자료를 평활화하여 불필요한 요인을 제거하고 간편하게 미래의 시계열자료를 예측하는 방법을 평활화기법이라고 하는데, 대표적인 평활화기법으로는 이동평균법(moving average method, MAM)과 지수평활법(exponential smoothing method, ESM)이 있다.

특히, 이동평균법(MAM)은 최근의 자료에 동일한 가중치를 부여하여 평균을 구하는 방법이고, 지수평활법(ESM)은 최근의 자료에 더 큰 가중치를 부여하고 과거의 자료에 지수적으로 낮은 가중치를 부여하여 평균을 구하는 방법이다.

대부분의 시계열자료는 시간이 경과함에 따라 시계열이 생성되는 시스템특성이 변화하게 된다.

그러므로 과거의 자료들을 이용하여 미래를 예측하고자 할 때 과거의 모든 시계열자료에 동일한 비중을 부여하기보다는 최근의 시계열자료에 더 큰 비중을 부여함으로써 예측능력을 향상시킬 수 있는 예측모형을 활용하는 것이 합리적이다.

그러나 버스통행 특성자료는 시간의 변화에 따라 일정한 경향으로 변하는 것이 아닌 정상적인 특성을 가짐에 따라 실측치와 예측치 사이의 간격을 최소화 할 수 있는 기법이 필요하므로 이 연구에서는 평활화기법(SM)의 일환으로 이동평균법(MAM)과 지수평활법(ESM)에 대하여 검토하도록 한다.

2) 이동평균법(moving average method, MAM)

이동평균법(MAM)이란 시간의 경과에 따라 관측 자료의 평균이나 분산이 변하지 않는 균일한 시계열을 반영하므로 최근에 관측한 임의의 n개 시계열 관측 자료들로부터 평균을 구하고, 이 평균을 이용하여 미래의 시계열 예측 자료를 예측하는 방법이다.

흔히, 이동평균법(MAM)은 단순이동평균법(simple moving average method, SMAM)과 가중이동평균법(weighted moving average method, WMAM)으로 구분할 수 있는데, 이 중에서 단순이동평균법(SMAM)은 최근의 관측 자료에 대한 가중치(weighted value)를 적용하지 않고 자료를 예측하는 기법이고, 가중이동평균법(WMAM)은 최근의 관측 자료에 대한 가중치를 적용하여 최근의 상황을 되도록 최대한으로 반영하여 예측하는 기법이다.

그러므로 새로운 시계열자료가 수집되면 최근 n개의 시계열 관측 자료들 중에서 가장 오래된 시계열자료를 제외시키고 새로운 시계열자료를 포함시킴으로써 이들 시계열자료의 평균도 새로워지게 된다.

임의의 N개 시계열자료에 대해 단순이동평균법(SMAM)과 가중이동평균법(WMAM)에 의한 예측 과정을 비교해 보면 아래와 같다.

먼저 단순이동평균법(SMAM)에 의한 예측은

$$\begin{aligned} F_{t+1} &= \frac{1}{N}(Y_t + Y_{t-1} + \dots + Y_{t-N+1}) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (Y_{t-i}) \end{aligned} \quad (4-1)$$

여기서,

Y_t : t시점의 시계열자료

F_{t+1} : t+1 시점의 예측자료

으로 나타낼 수 있다. 반면에 가중이동평균법(WMAM)에 의한 예측은

$$F_{t+1} = (w_0 Y_t + w_1 Y_{t-1} + \dots + w_{N-1} Y_{t-N+1}) \quad (4-2)$$

$$= \left(\sum_{i=0}^{N-1} w_i Y_{t-i} \right)$$

여기서,

w_i : 가중치

$$w_0 + w_1 + \dots + w_{n-1} = 1$$

으로 나타낼 수 있다.

3) 지수평활법(exponential smoothing method, ESM)

지수평활법(ESM)이란 최근에 수집된 시계열자료가 과거의 시계열자료보다 미래 시계열의 추이에 대한 정보를 더 많이 갖고 있으므로 최근의 시계열자료에 더 큰 가중치를 부여하고 과거로 갈수록 가중치의 크기를 지수적으로 감소시켜 나가면서 예측하는 방법이다.

특히, 단순지수평활법(simple exponential smoothing method, SESM)은 두 개의 시계열 관측치만 가지면 미래의 시계열 관측치의 예측이 가능한 방법으로서 최근의 관측치 Y_t 와 최근의 예측 값 또는 이전의 관측 값과 평활계수 α 값을 가지고 미래의 예측 값을 예측하는데, 평활계수 α 는 연구자의 주관에 따라 설정할 수 있고, 이 값이 1에 가까울수록 평활효과가 작아지며, 반대로 0에 가까울수록 평활효과는 커지게 된다.

$$F_{t+1} = \alpha Y_t + (1-\alpha)F_t \quad (4-3)$$

여기서,

F_{t+1} : $t+1$ 시점의 예측자료

Y_t : t 시점의 시계열자료

F_t : t 시점의 예측자료

α : 평활계수

4.2.2 칼만필터(Kalman Filter)모형

1) 모형의 개요

칼만필터(Kalman Filter)기법이란 무작위 교란(random perturbation)을 통해 동적체계의 최적상태를 예측하는 과정으로서 가우시안 백색잡음(white noisy)에 의해 교란되는 선형동적체계의 일시적인 상태를 반복적으로 추정하는 방법이다.

특히, 칼만 필터기법은 인간이 통제하지 못하는 분야의 예측방법으로 천체의 궤도, 홍수예보와 같은 미래의 동적 체계과정을 예측하는데 이용되고 있어서 어느 특정구간의 통행시간과 같이 정상적이고 불규칙성을 가지는 자료를 토대로 한 미래의 통행시간 예측에는 높은 예측력을 발휘하게 된다.

더구나 칼만 필터기법에 의한 모형은 상태평균과 공분산을 산정하기 위한 알고리즘으로 상태방정식(state equation)과 관측방정식(observation equation)으로 다음과 같이 구성된다.

$$\text{상태방정식 : } x_{t+1}(-) = \Phi x_t(+) + u_t \quad (4-4)$$

$$\text{관측방정식 : } z_t = h x_t(+) + v_t \quad (4-5)$$

$$Q = (u_t)^2 = (x_{t+1}(-) - \Phi x_t(+))^2$$

$$R = (v_t)^2 = (z_t - h x_t(+))^2$$

여기서,

$x_{t+1}(-)$: t+1시점에서 상태변수(x_{t+1})의 사전 예측 추정 값

Φ : t시점에서 t+1시점에서의 전이행렬

$x_t(+)$: t시점에서 상태변수(x_t)의 추정 값

u_t : t시점에서 상태 추정 값(z_t)과 상태 참값과의 오차

z_t : t시점에서의 관측 값

h : 상태 값을 관측 값으로 전이시키는 전이행렬

- v_t : t시점에서 관측 추정 값(z_t)과 관측 참값과의 오차
- Q : 상태 오차의 분산
- R : 관측 오차의 분산

2) 모형의 수행절차

칼만필터기법의 알고리즘은 다음과 같은 수행방법을 따르게 된다.

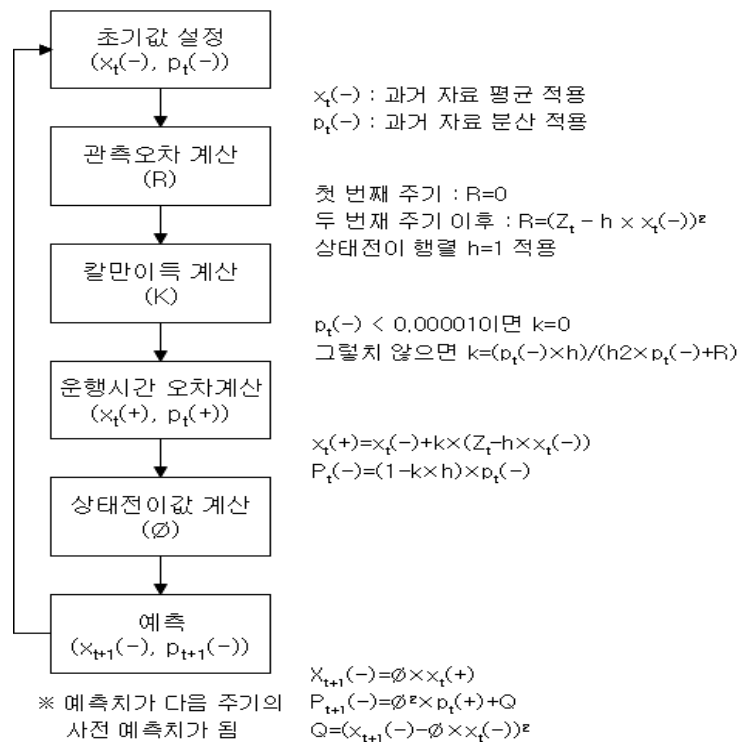


Fig. 4.1 Flowchart of Kalman Filtering

0 단계 : 초기 값 설정 ($x_t(-)$, $p_t(-)$)

예측시작 시 사전 예측 값이 없기 때문에 초기상태에서 $x_t(-)$ 는 과거 관측 자료의 평균, $p_t(-)$ 는 과거 관측 자료의 분산이 사용된다.

1 단계 : 관측 오차의 분산 (R)

- 첫 번째 주기에는 사전 예측 값이 없기 때문에 $R=0$ 이며,
- 두 번째 주기부터 $R=(z_t - h x_t(+))^2$
- 여기서, z_t 는 t시점의 관측 값
 h 는 상태 값을 관측 값으로 전이시키는 상태 전이행렬(1을 씀)

2 단계 : 칼만 이득의 계산(K)

- $p_t(-) < 0.00001$ 이면 $K=0$
- 그렇지 않으면 $K = \frac{p_t(-) \times h}{h^2 \times p_t(-) + R}$

3 단계 : 관측 값에 오차가 보정된 예측 값 ($x_t(+)$, $p_t(+)$)

- $x_t(+)=x_t(-)+K \times (z_t - h \times x_t(-))$
- $p_t(+)= (1 - k \times h) \times p_t(-)$

4 단계 : 상태전이 값 계산(Φ)

- 첫 번째 주기는 이전 관측 값이 없으므로 $\Phi=1$
- $\Phi = \frac{z_t}{z_{t-1}}$

5 단계 : 다음 주기의 평균과 분산 예측 ($x_{t+1}(-)$, $p_{t+1}(-)$)

- $x_{t+1}(-) = \Phi \times x_t(+)$
- $p_{t+1}(-) = \Phi^2 \times p_t(+)+Q$
- 여기서, $Q=(x_{t+1}(-)-\Phi x_t(+))^2$ (1주기 후 상태 오차의 분산)
- 예측 값이 다음 주기의 사전 예측 값이 된다.

4.2.3 중 회귀모형

1) 모형의 개요

일반적으로 회귀분석이란 변수사이의 상관관계를 알아보기 위한 통계적 기법을 말하며, 변수에는 종속변수(dependent variable)와 종속변수에 영향을 주는 독립변수(independent variable)로 구성되는데, 특히 종속변수에 하나의 독립변수가 상관모형을 구성하는 경우 이를 단순회귀분석(simple regression analysis, SRA)이라 하고, 종속변수에 2개 이상의 독립변수가 상관모형을 구성하는 경우 이를 중 회귀분석(multiple regression analysis, MRA)모형이라고 한다.

독립변수가 k 개($k \geq 2$)인 중 회귀분석모형의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (4-6)$$

여기서,

y = 종속변수

x_1, x_2, \dots, x_k = 독립변수

β_0 = y 축 절편

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 는 각 독립변수의 계수

2) 모형의 수행절차

회귀분석을 위한 모형구성은 아래와 같은 단계를 거친다.

- 1 단계 : 확률모형에서 확정된 부분에 대한 가설을 세운다. 즉, 종속변수와 독립변수 사이의 관계가 직선인가 혹은 곡선인가 등을 결정한다. 여기서 두 변수간의 관계가 선형모형이 적합하다고 판단되면 2단계로 넘어간다.
- 2 단계 : 표본의 측정값을 가지고 모형의 모수를 추정한다.
- 3 단계 : 임의의 오차 항을 계산하고 오차의 분포를 추정한다.
- 4 단계 : 모형의 유의수준을 통계적으로 검증한다.

5 단계 : 모형이 유용하다고 판단되면 예측과 추정에 이용한다.

4.2.4 모형채택

버스도착시간의 예측을 위하여 지점별 통행특성에 따른 단위구간(버스정류장, 신호교차로 및 순행구간) 및 연구대상 구간내의 모든 단위구간을 통합한 통합구간으로 분류하였으며, 단위구간별 예측에는 평활화기법(가중이동평균법, 지수평활법)과 칼만 필터모형이 사용되었고, 통합구간 예측에는 중 회귀모형이 사용되었는데, 평활화기법은 실시간으로 수집되는 버스통행 특성자료에 모형별 상수를 적용하여 예측 값을 산출하는데 모형에 사용되는 가중상수 및 지수상수에 따라 예측 값이 변화하게 되므로 상수 값을 임의로 설정하여 모형에 적용할 경우에는 모형의 특성보다는 적용된 상수에 따라 예측결과에 다소 차이를 보일 것으로 판단되므로 도로 및 교통상황에 따라 달리 적용을 해야 할 경우 그 기준과 범위를 정하는데 다소 어려움이 예상된다.

특히, 이 연구에서는 시간대별 교통상황별 통행특성을 모형에 최대한 반영하고 통상적으로 활용될 수 있는 모형구축을 위하여 모형에 적용되는 상수를 1일 전일 및 예측시간 1시간 전의 시뮬레이션을 통해 산출된 예측 값과 관측 값 사이의 오차가 가장 작게 도출된 상수를 각각 사용하였다.

더구나 1일 전일 및 예측시간 1시간 전의 시뮬레이션 결과를 통해 도출된 상수 값을 고려한 가중이동평균모형이 각각 가중 1, 가중 2로 구분되었고, 동일한 방법으로 지수평활모형도 각각 지수 1, 지수 2로 구분되었으며, 또한 상수 값이 필요 없는 칼만 필터모형 등 다섯 가지 모형을 통해 각 단위구간별 통행시간 개별모형이 채택되어 비교되었다.

결과적으로 각 시간대별 단위구간별 개별모형을 중심으로 예측 값과 관측 값 사이에 높은 상관관계를 보이는 단위구간별 최적의 모형으로 채택된 개별모형과 또한 개별모형을 중심으로 전 연구대상구간에 대해 최적의 통합모형이 구축되었다.

4.3 개별모형

4.3.1 모형구축

일반적으로 어느 특정 도로구간에 대하여 통합적으로 구축된 버스정보시스템(BIS)은 특정지점을 기준으로 버스가 위치한 지점에서 단위구간별로 세분화시켜 지점별로 예측한 후 그 결과를 통합하여 제공한다.

그러므로 기존의 모형이 어느 대상구간에 대한 일반화된 모형이라면 개별모형은 어느 대상 도로구간에 대하여 각 단위구간에 대해 최적의 상태를 예측하는 모형이라 할 수 있다. 따라서 이 장에서는 연속된 일정구간을 단위구간별로 세분화하고 단위구간별 최적의 개별모형을 구축 제시하고자 한다.

1) 자료구축

우선 단위구간별 개별모형을 구축하기 위하여 교통관리센터 DB로부터 수집된 지점별 운행자료(raw data)를 1대의 버스가 지나가는 경로에 따라 지점별 노선별 차량별로 연속되게 자료를 구축하였다.

연속된 자료는 Excel의 macro기능을 이용하여 어느 한 지점이라도 통신장애로 인해 결손자료가 있으면 그 해당 버스의 자료는 제외시켰다. 결과적으로 연구대상구간에서 관측된 버스도달 시간이 Table 4.1과 같이 평균은 152.3초/대~302.2초/대, 표준편차는 31.4초~65.5초로 나타났으며, 간선도로별 시공간도(time-space diagram, TSD)는 Fig. 4.2~4.10과 같이 나타냈다.

Table 4.1 Travel times observed within the study segment(sec)

<i>Period</i>	<i>Study segment of road A</i>		<i>Study segment of road B</i>		<i>Study segment of road C</i>	
	Mo	SD	Mo	SD	Mo	SD
<i>1 Day</i>	201.9	38.1	158.7	39.3	264.7	60.0
<i>M.P.</i>	197.2	43.0	172.2	41.0	302.2	56.5
<i>N.P.</i>	192.3	31.4	152.3	41.8	228.5	59.7
<i>A.P.</i>	218.9	41.9	147.8	38.4	258.8	65.5

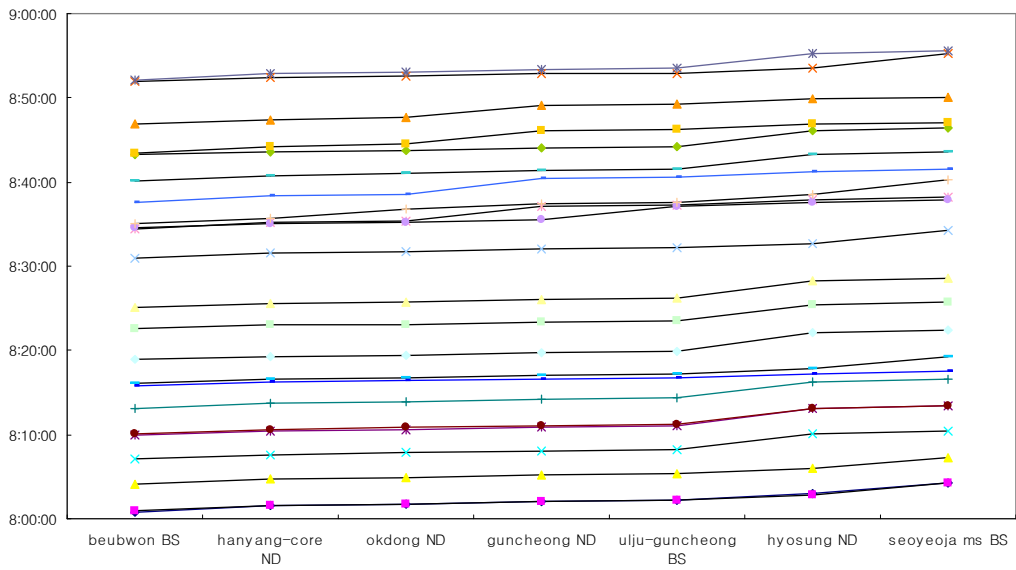


Fig. 4.2 TSD within the study segment of road A(Day 1, M.P.)

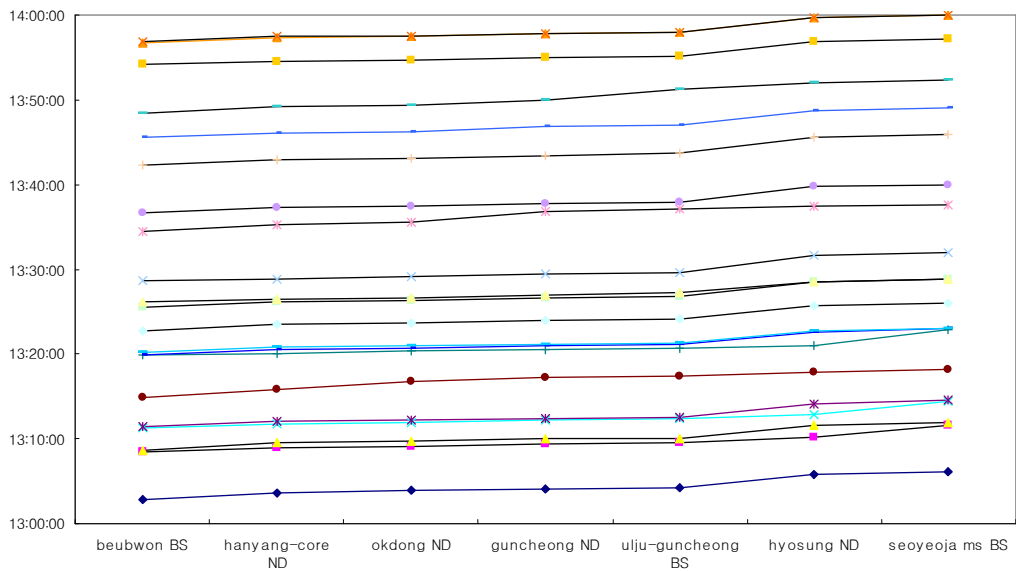


Fig. 4.3 TSD within the study segment of road A(Day 1, N.P.)

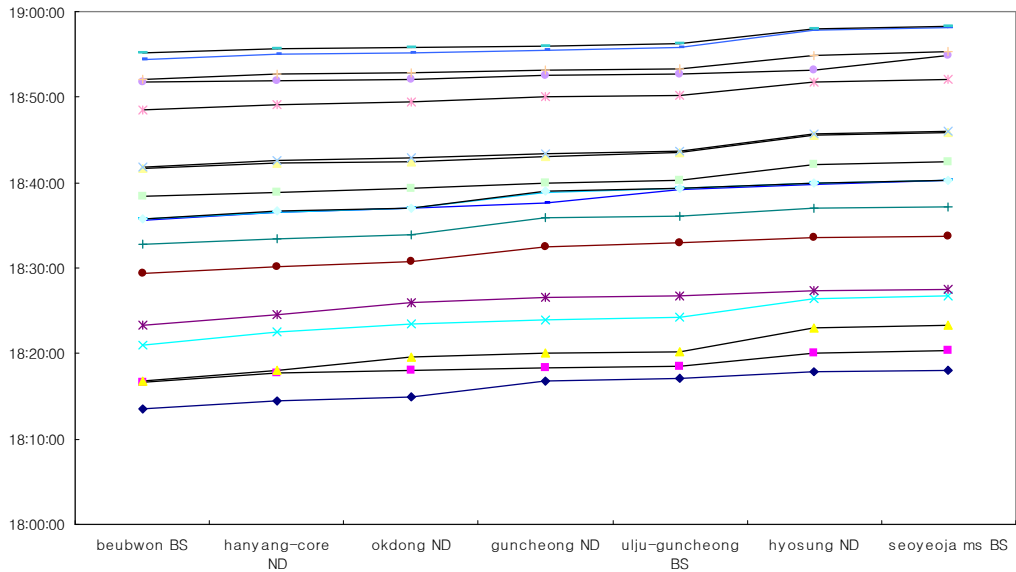


Fig. 4.4 TSD within the study segment of road A(Day 1, A.P.)

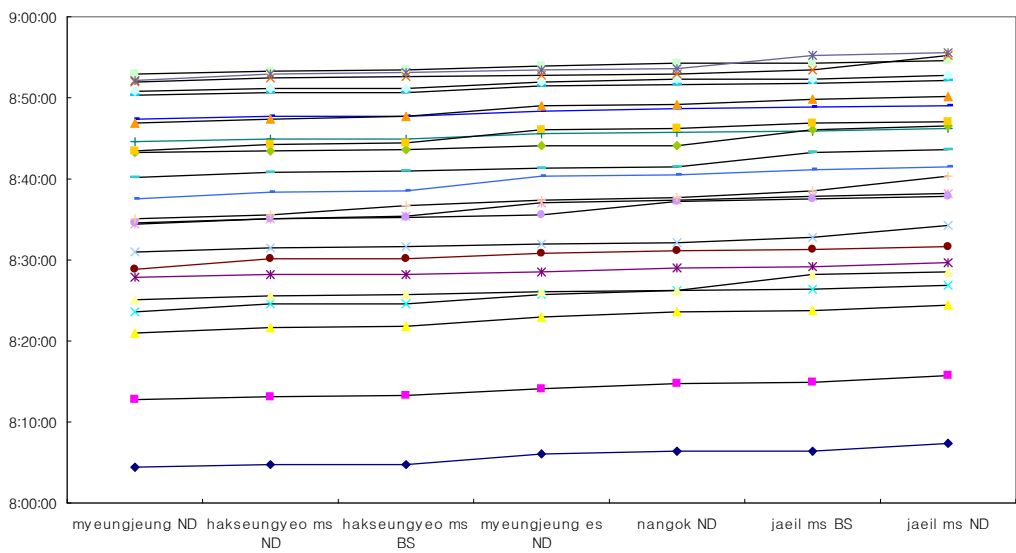


Fig. 4.5 TSD within the study segment of road B(Day 1, M.P.)

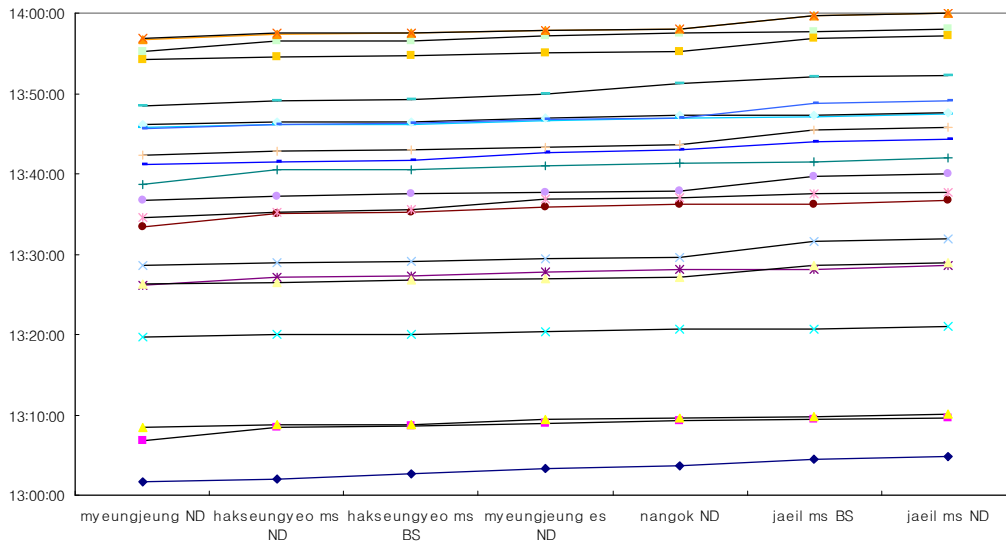


Fig. 4.6 TSD within the study segment of road B(Day 1, N.P.)

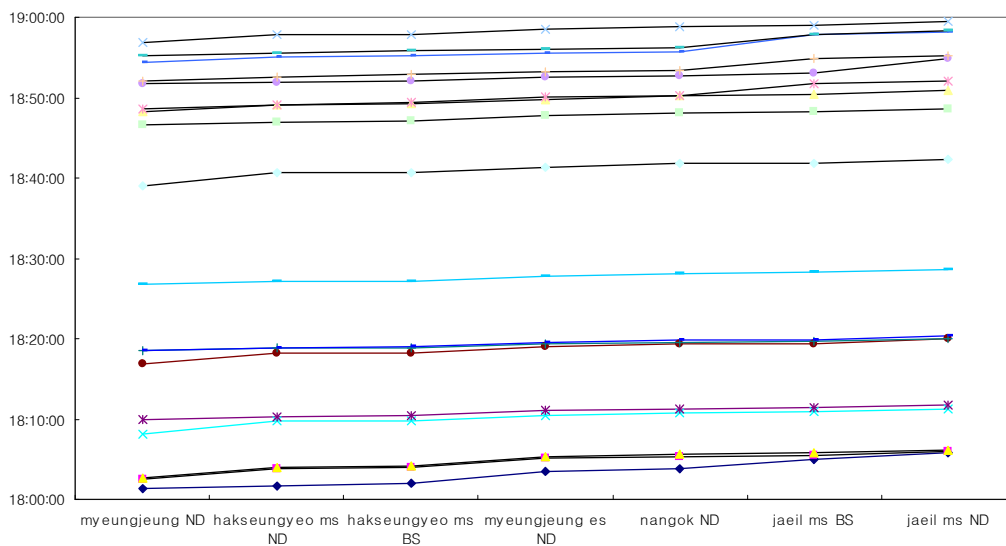


Fig. 4.7 TSD within the study segment of road B(Day 1, A.P.)

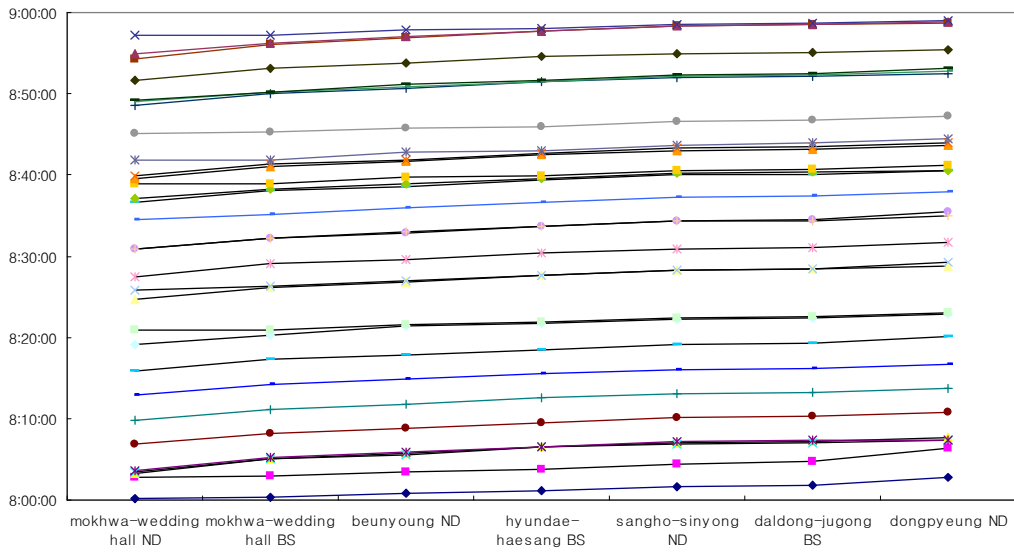


Fig. 4.8 TSD within the study segment of road C(Day 1, M.P.)

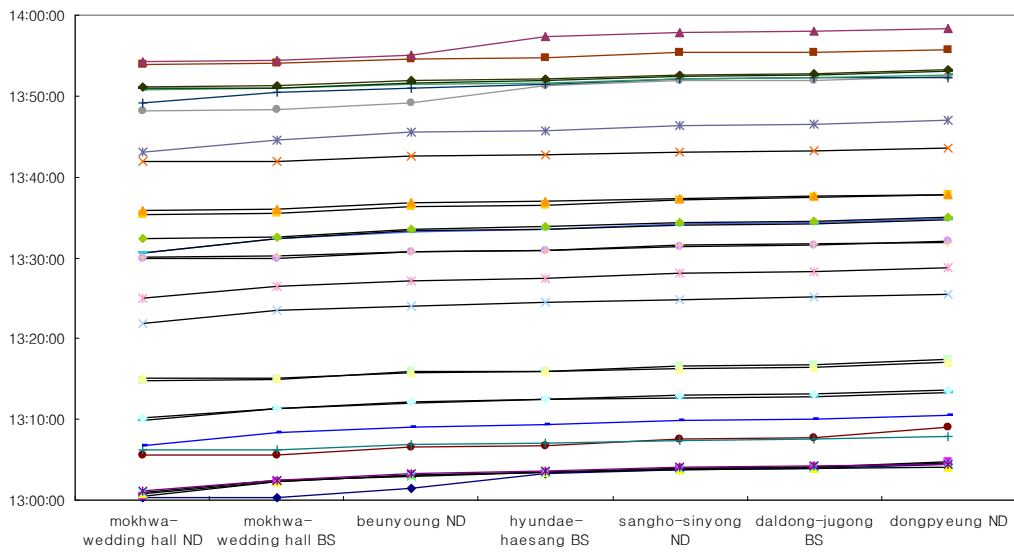


Fig. 4.9 TSD within the study segment of road C(Day 1, N.P.)

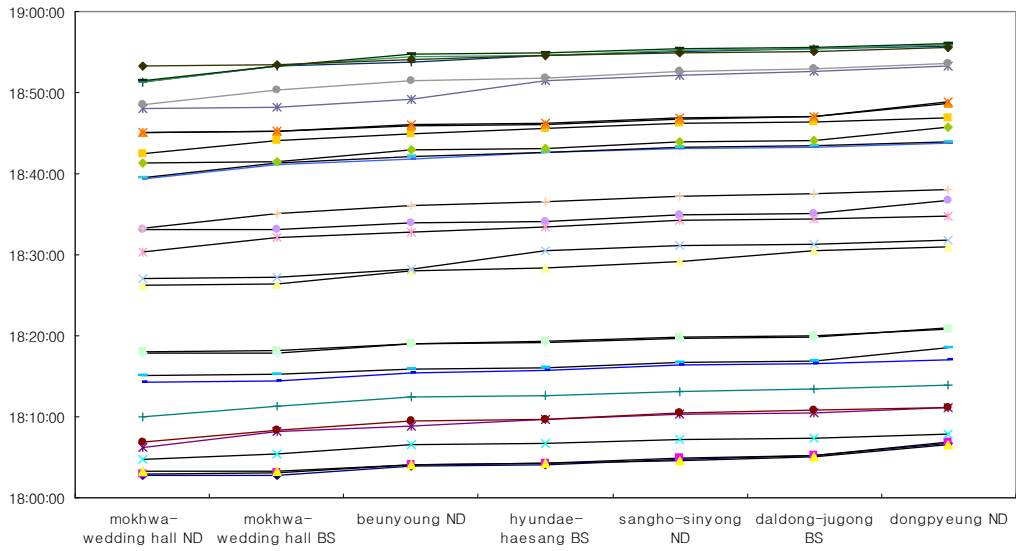


Fig. 4.10 TSD within the study segment of road C(Day 1, A.P.)

2) 이상치 제거

이 연구에서는 이상치를 제거하기 위하여 버스정류장, 신호교차로, 순행구간의 각 단위구간별 전방 3대의 운행 자료를 바탕으로 평균(μ)과 표준편차(σ)를 구하여 $\pm 1.645\sigma$ 를 초과하거나 미달되는 자료는 평균(μ)을 적용하였으며, 이상치 제거는 1단계에서 마무리 하였다.

이는 앞서 지나간 차량과의 운행시간이 90% 신뢰수준에서 벗어나지 않을 것으로 가정하였다.

또한 이 연구대상구간의 버스 운행간격이 문수로 구간에서는 72초/대, 태화로 구간에서는 80초/대, 삼산로 구간에서는 103초/대를 나타냄으로써 2분 이내에 1대 이상의 버스가 통과하고 있었으므로 통신장애로 인한 결측 자료는 무시하였다.

또한, 도로를 운행하고 있는 버스는 승용차와는 달리 동일 시간대 동일 구간이라 하더라도 버스운전자의 개인적인 운전행태와 신호 연동, 정류장 위치, 버스노선 등의 교통적인 요인과 기상상태나 교통사고 및 공사로 인한 외부적인 요인으로 인해 항상 교통흐름에 편차가 발생할 수 있으므로 현재의 교통상황이 최대한 반영된 버스도착시간을 예측하여 버스도착시간을 제공하기 위해서는 통계적인 이상치의 적정 수준만을 거론하기에는 다소 무리가 있어 이상치제거의 기준을 최대한 넓게 설정하여 가급적 도로 및 교통상황이 예측에 반영될 수 있도록 하였으며, 통신장애나 장비고장 혹은 통신음영구역은 운행 중에 항상 발생할 수 있는 사항으로써 추가적인 보정은 하지 않았다.

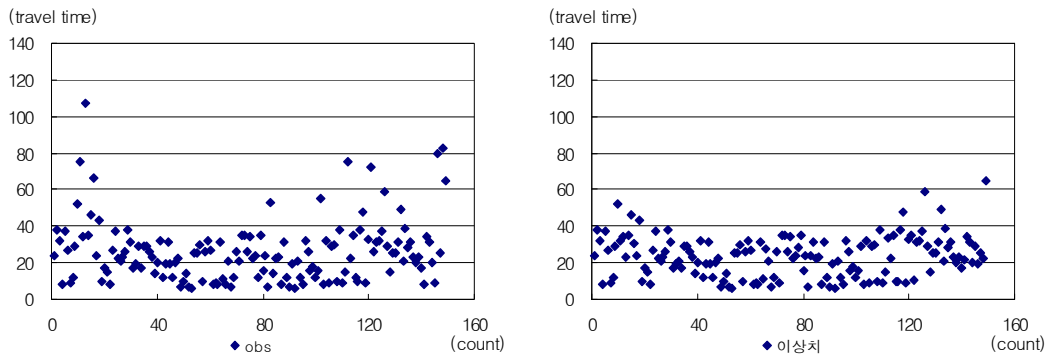


Fig. 4.11 Count diagram of travel time at bus stop

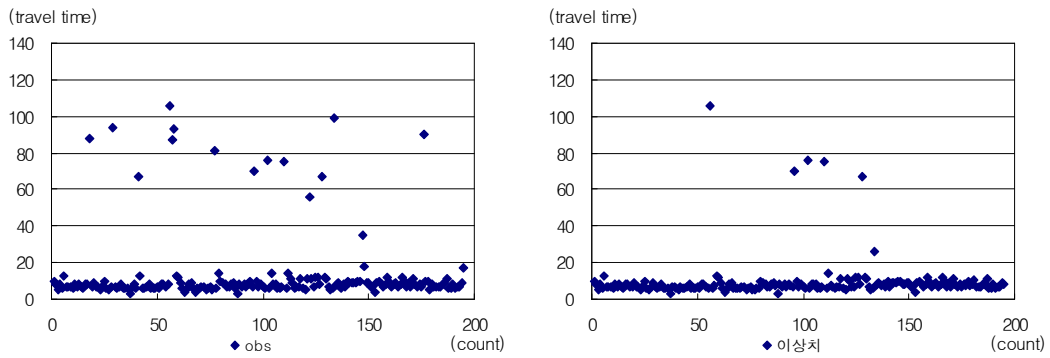


Fig. 4.12 Count diagram of travel time at node

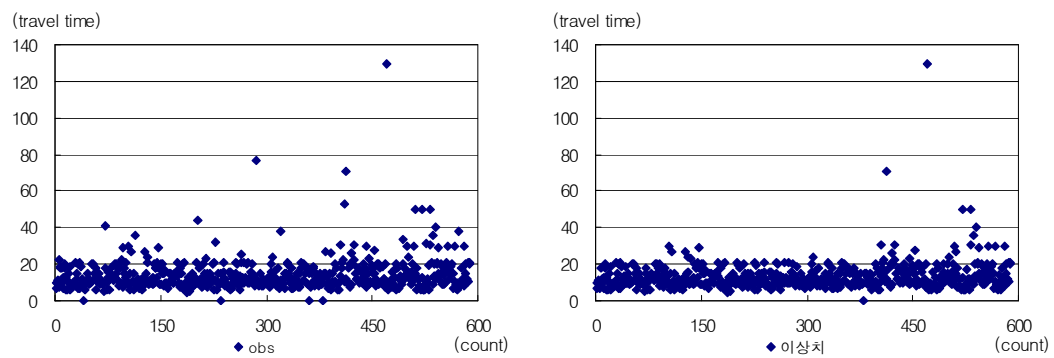


Fig. 4.13 Count diagram of travel time at section

3) 모형상수

각 단위구간별 평활화모형의 모형상수를 도출하기 위하여 각 단위구간별 자료를 바탕으로 모의실험(simulation)을 실시하였는데, 단위구간별 2일간의 자료에 기초하여 전일시간대(08시~19시), 오전시간대(08시~09시), 점심시간대(13시~14시), 오후시간대(18시~19시)로 나누어 모형상수를 비교 분석하였다.

특히 전일시간대의 가중평활 및 지수평활 모형상수에 의한 비교 분석을 각각 WSM1과 ESM1로 구분하였고, 오전 시간대, 낮 시간대, 오후 시간대의 가중평활 및 지수평활 모형상수에 의한 비교 분석을 각각 WSM2와 ESM2로 구분하였으며 그 결과는 Table 4.2~Table 4.3과 같이 나타났다.

먼저, 가중평활 모형상수를 비교해보면 버스정류장에서는 각 시간대별로 모형상수가 서로 달리 나타났다. 그리고 신호교차로에서는 전일시간대와 오후시간대의 모형상수가 달리 나타났으나, 오전시간대와 낮 시간대의 모형상수는 동일하게 나타났다.

또한 순행구간에서도 신호교차로에서와 마찬가지로 전일시간대와 오후시간대의 모형상수가 달리 나타났으나, 오전시간대와 낮 시간대의 모형상수는 동일하게 나타났다.

다음으로, 지수평활 모형상수를 비교해보면 버스정류장에서는 오전시간대를 제외하고 나머지 시간대에서는 동일하게 모형상수가 나타났다.

그리고 신호교차로와 순행구간에서는 각 시간대별로 차이를 보이지 않고 각 각의 모형상수가 동일하게 나타났다.

그런데 단위구간별 시간대별로 모형에 따라 달리 적용된 모형상수는 모의실험을 통해 도출된 모형상수로 모형구축의 신뢰성을 증대시킬 수 있지만, 모형구축에 임의의 모형상수를 적용하면 예측모형의 신뢰도를 낮출 수 있기 때문에 모형구축에는 반드시 모형상수의 도출과정과 함께 타당성 있는 모형구축이 선행되어야 할 것으로 생각되었다.

Table 4.2 Travel times expected by each weighted factor of WSM

No.	WSM			Bus Stop				Node				Section			
	α_1	α_2	α_3	WSM1	WSM2			WSM1	WSM2			WSM1	WSM2		
				1 Day	M.P.	N.P.	A.P.	1 Day	M.P.	N.P.	A.P.	1 Day	M.P.	N.P.	A.P.
1	0.1	0.1	0.8	354985	68866	47554	67198	2670299	453741	590555	408801	907189	127716	105159	168577
2	0.1	0.2	0.7	333110	65995	43765	61475	2524206	446043	568162	375895	845025	120371	98011	155149
3	0.1	0.3	0.6	319763	64725	41155	57385	2441835	448861	559819	352964	804370	116036	93392	145777
4	0.1	0.4	0.5	314946	65055	39721	54926	2423188	462193	565529	340007	785225	114711	91302	140461
5	0.1	0.5	0.4	318659	66986	39466	54098	2468264	486039	585289	337024	787589	116394	91741	139202
6	0.1	0.6	0.3	330900	70517	40388	54903	2577063	520400	619101	344016	811461	121087	94710	141999
7	0.1	0.7	0.2	351671	75649	42488	57339	2749586	565275	666965	360982	856843	128790	100207	148852
8	0.1	0.8	0.1	380971	82382	45765	61406	2985831	620665	728880	387923	923735	139502	108234	159761
9	0.2	0.1	0.7	327818	65184	43197	62396	2472129	422245	541384	375852	855498	120293	97449	157568
10	0.2	0.2	0.6	310544	63288	39970	57415	2361994	421973	527813	347661	804304	114606	91605	146053
11	0.2	0.3	0.5	301799	62993	37920	54064	2315583	432216	528294	329445	774619	111929	88291	138595
12	0.2	0.4	0.4	301584	64298	37048	52346	2332895	452972	542827	321203	766443	112261	87505	135193
13	0.2	0.5	0.3	309898	67204	37353	52259	2413931	484244	571411	322936	779776	115602	89249	135847
14	0.2	0.6	0.2	326742	71711	38836	53804	2558689	526030	614046	334643	814618	121953	93522	140558
15	0.2	0.7	0.1	352114	77818	41497	56981	2767171	578330	670733	356324	870969	131312	100325	149325
16	0.3	0.1	0.6	309854	63452	39966	59076	2345877	405600	509791	352279	825747	116186	92348	150386
17	0.3	0.2	0.5	297182	62531	37299	54835	2271702	412753	505043	328803	785522	112157	87809	140786
18	0.3	0.3	0.4	293039	63211	35811	52225	2261250	430420	514348	315302	766806	111137	85799	135241
19	0.3	0.4	0.3	297426	65492	35500	51247	2314522	458602	537703	311776	769600	113126	86318	133753
20	0.3	0.5	0.2	310341	69373	36366	51901	2431517	497299	575110	318223	793902	118125	89367	136320
21	0.3	0.6	0.1	331786	74854	38410	54187	2612235	546510	626569	334645	839714	126134	94944	142944
22	0.4	0.1	0.5	301094	63670	37860	57237	2291544	403805	495776	338082	817936	115395	89856	147032
23	0.4	0.2	0.4	293023	63724	35755	53736	2253328	418383	499852	319322	788680	113023	86622	139345
24	0.4	0.3	0.3	293482	65379	34827	51867	2278836	443475	517979	310536	780934	113661	85916	135714
25	0.4	0.4	0.2	302471	68635	35077	51630	2368067	479082	550158	311724	794697	117308	87740	136139
26	0.4	0.5	0.1	319988	73491	36504	53024	2521021	525204	596388	322887	829969	123965	92093	140620
27	0.5	0.1	0.4	301537	65837	36880	56879	2309130	416860	499339	333262	832064	117920	89973	147505
28	0.5	0.2	0.3	298068	66867	35335	54119	2306874	438863	512239	319217	813778	117206	88043	141731
29	0.5	0.3	0.2	303129	69497	34968	52991	2368341	471381	539189	315146	817001	119502	88643	140014
30	0.5	0.4	0.1	316719	73728	35779	53494	2493531	514413	580191	321049	841733	124806	91771	142353
31	0.6	0.1	0.3	311184	69955	37024	58002	2398635	444765	520481	337818	868132	123761	92700	151805
32	0.6	0.2	0.2	312317	71960	36041	55983	2432338	474193	542204	328487	860815	124705	92074	147945
33	0.6	0.3	0.1	321979	75565	36235	55595	2529765	514136	577978	329132	875007	128658	93978	148141
34	0.7	0.1	0.2	330034	76022	38295	60606	2560058	487520	559202	351749	926139	132918	98035	159932
35	0.7	0.2	0.1	335769	79002	37873	59328	2629721	524374	589747	347134	929792	135520	98714	157986
36	0.8	0.1	0.1	358088	84040	40691	64692	2793401	545126	615500	375058	1006086	145391	105980	171887

Table 4.3 Travel times expected by each exponential factor of ESM

No.	ESM	Bus Stop				Node				Section			
		<i>ESM1</i>	<i>ESM2</i>			<i>ESM1</i>	<i>ESM2</i>			<i>ESM1</i>	<i>ESM2</i>		
	α	1 Day	M.P.	N.P.	A.P.	1 Day	M.P.	N.P.	A.P.	1 Day	M.P.	N.P.	A.P.
1	0.1	1165005	200122	149791	181699	3541950	668586	674440	503426	1437737	211386	163886	262342
2	0.2	701123	125456	89524	112163	2719622	513208	555483	385501	1033679	151307	117775	187211
3	0.3	461463	86977	58544	76586	2347117	441047	507094	333127	839174	122197	95756	151188
4	0.4	353585	69634	44840	61022	2236278	416405	499331	319506	766842	111090	87861	138125
5	0.5	317724	63746	40632	56477	2269362	416978	513740	327812	761544	109794	87774	137798
6	0.6	317997	63549	41241	57578	2379009	429985	539953	348393	791456	113567	91819	144278
7	0.7	335038	65977	44130	61458	2531886	448996	572931	376496	840730	120022	98124	154585
8	0.8	360069	69685	48146	66869	2715996	471449	610873	410513	903709	128265	105967	167636
9	0.9	390399	74304	52938	73511	2931660	496860	653762	450752	980725	138268	115301	183478

Table 4.4 Weighted factors of WSM and ESM during each period

구 분		WSM			ESM
		α_1	α_2	α_3	α
<i>Bus Stop</i>	1 Day	0.4	0.2	0.4	0.5
	M.P.	0.3	0.2	0.5	0.6
	N.P.	0.4	0.3	0.3	0.5
	A.P.	0.3	0.4	0.3	0.5
<i>Node</i>	1 Day	0.4	0.2	0.4	0.4
	M.P.	0.4	0.1	0.5	0.4
	N.P.	0.4	0.1	0.5	0.4
	A.P.	0.4	0.3	0.3	0.4
<i>Section</i>	1 Day	0.2	0.4	0.4	0.5
	M.P.	0.3	0.3	0.4	0.5
	N.P.	0.3	0.3	0.4	0.5
	A.P.	0.3	0.4	0.3	0.5

4.3.2 버스정류장 모형

1) 모형비교

이 연구대상구간에 위치한 총 8개의 버스정류장에 대하여 전일시간대(08시~17시), 오전시간대(08시~09시), 낮 시간대(13시~14시), 오후시간대(18시~19시)로 구분하여 가중평활 및 지수평활의 최적 모형상수에 기초한 각 시간대별 예측모형식은 다음과 같이 나타났다.

$$\text{WSM1(1Day)} : F_{\text{bs}} = 0.4Y_t + 0.2Y_{t-1} + 0.4Y_{t-2} \quad (4-7)$$

$$\text{WSM2(M.P.)} : F_{\text{bs}} = 0.3Y_t + 0.2Y_{t-1} + 0.5Y_{t-2} \quad (4-8)$$

$$\text{WSM2(N.P.)} : F_{\text{bs}} = 0.4Y_t + 0.3Y_{t-1} + 0.3Y_{t-2} \quad (4-9)$$

$$\text{WSM2(A.P.)} : F_{\text{bs}} = 0.3Y_t + 0.4Y_{t-1} + 0.3Y_{t-2} \quad (4-10)$$

$$\text{ESM1(1Day)} : F_{\text{bs}} = 0.5Y_t + 0.5F_t \quad (4-11)$$

$$\text{ESM2(M.P.)} : F_{\text{bs}} = 0.6Y_t + 0.4F_t \quad (4-12)$$

$$\text{ESM2(N.P.)} : F_{\text{bs}} = 0.5Y_t + 0.5F_t \quad (4-13)$$

$$\text{ESM2(A.P.)} : F_{\text{bs}} = 0.5Y_t + 0.5F_t \quad (4-14)$$

특히, 버스정류장에서 관측된 버스통행시간의 평균과 표준편차를 비교한 결과 버스통행시간의 평균(observed mean, Mo)이 전일시간대에서는 약 24.7sec, 오전시간대에서는 약 26.1sec, 낮 시간대에서는 약 21.2sec, 오후시간대에서는 약 27sec로 나타났다.

반면 예측된 버스통행시간의 평균(expected mean, Me)은 관측된 통행시간의 평균(Mo)과 가중평활 모형상수를 고려한 전일시간대(WSM1)에서 거의 동일하게 나타났으며, 표준편차(standard deviation, SD)에서도 가중평활 모형상수를 고려한 예측 표준편차(SD)가 가장 낮게 나타났고 칼만 필터기법에 의한 표준편차(SD)에서 가장 높은 것으로 나타났다.

또한 각 시간대별 예측된 버스통행시간의 평균과 표준편차는 각 시간대별로

적용된 가중평활 모형상수에 따라 예측된 버스통행시간의 평균과 표준편차에서 최적의 값을 보이는 것으로 나타났다.

따라서 버스정류장의 버스통행시간을 최적의 상태로 예측하기 위해서는 각 시간대별 교통여건에 따라 최적의 가중평활 모형상수와 지수평활 모형상수를 추출하여 적용하는 것이 가장 효율적이라고 생각되었다.

Table 4.5 Statistics of travel time observed and expected at bus stop

<i>Period</i>	<i>Observed</i>		<i>WSM1</i>		<i>ESM1</i>		<i>WSM2</i>		<i>ESM2</i>		<i>KFM</i>	
	Mo	SD	Me	SD	Me	SD	Me	SD	Me	SD	Me	SD
1 Day	24.7	11.7	24.7	9.5	21.6	8.6	24.7	9.6	22.2	8.9	23.9	11.1
M.P.	26.2	12.6	26.7	10.6	23.3	9.4	26.7	10.9	24.9	10.2	26.2	12.5
N.P.	21.2	9.5	21.0	7.1	18.4	6.5	21.0	7.0	18.4	6.5	20.3	9.3
A.P.	27.0	13.0	26.7	10.6	23.5	9.5	26.7	10.6	23.5	9.5	25.4	11.2

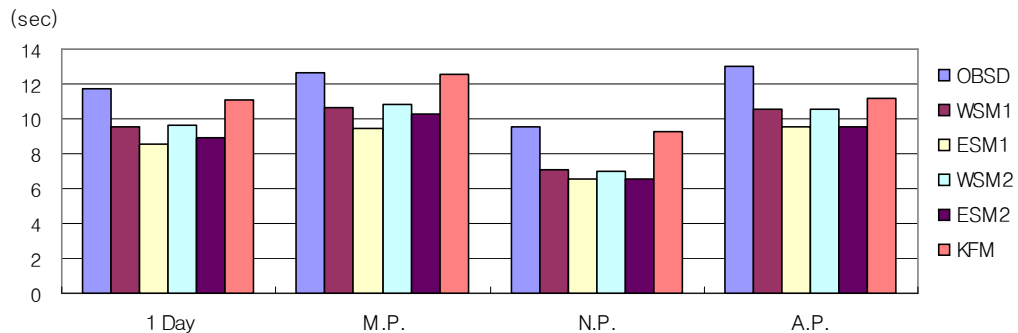


Fig. 4.14 SD characteristics of travel time at bus stop

2) 상관관계

이 연구대상구간 내 버스정류장의 서비스시간에 대한 관측 값과 각 시간대별 모형상수를 중심으로 예측 값을 기준으로 상관관계를 비교 분석한 결과, 다음 Table 4.6에서 보여주듯이 전일과 오전시간대에서는 WSM1의 상관계수가 가장 높게 나타났으며, 낮 시간대에서는 WSM2, 오후시간대에서는 ESM1과 ESM2가 가장 높게 나타났다.

Table 4.6 Correlation coefficients of the models at bus stop

<i>Period</i>	<i>WSM1</i>	<i>ESM1</i>	<i>WSM2</i>	<i>ESM2</i>	<i>KFM</i>
<i>1 Day</i>	0.57365	0.56182	0.56750	0.55638	0.47357
<i>M.P.</i>	0.60709	0.57898	0.60220	0.56710	0.47654
<i>N.P.</i>	0.47898	0.46729	0.48038	0.46670	0.40715
<i>A.P.</i>	0.52732	0.53182	0.51444	0.53182	0.44468

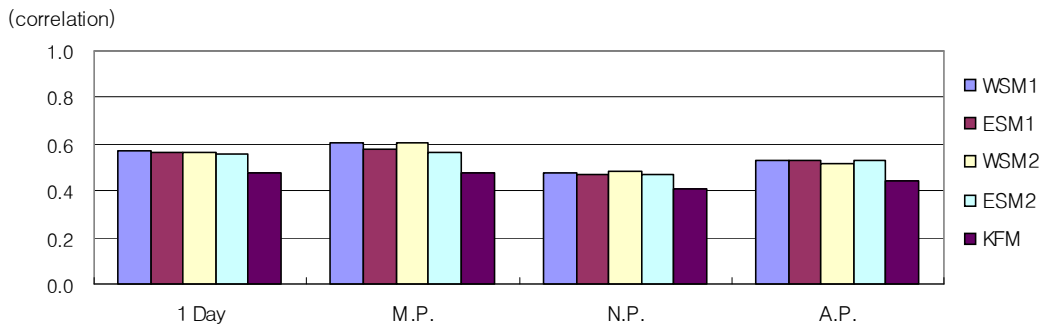


Fig. 4.15 Correlation characteristics between the models at bus stop

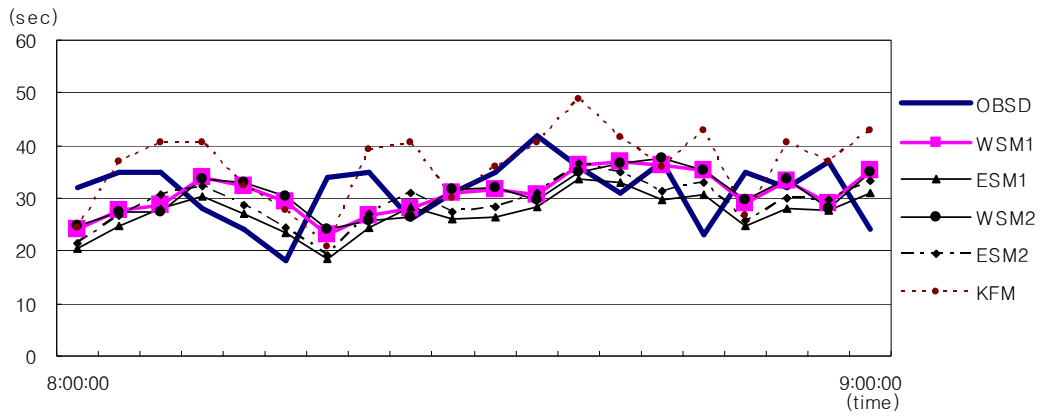


Fig. 4.16 Travel times expected at bus stop ① in road A(M.P.)

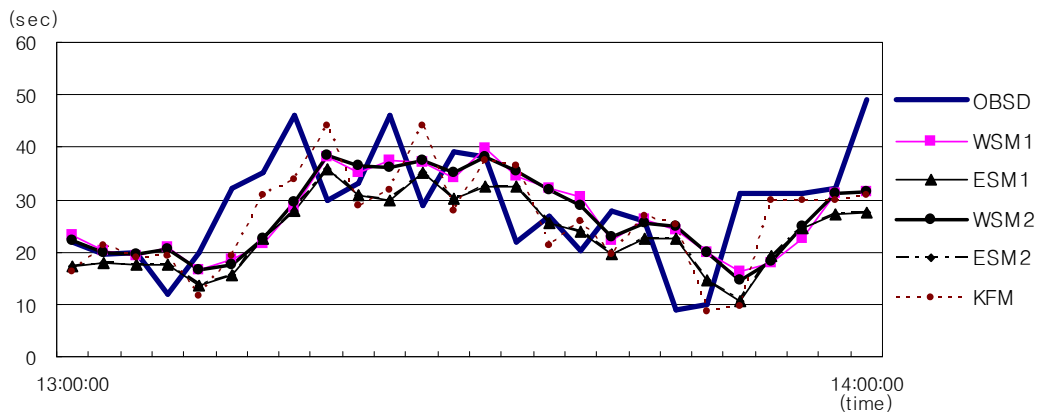


Fig. 4.17 Travel times expected at bus stop ① in road A(N.P.)

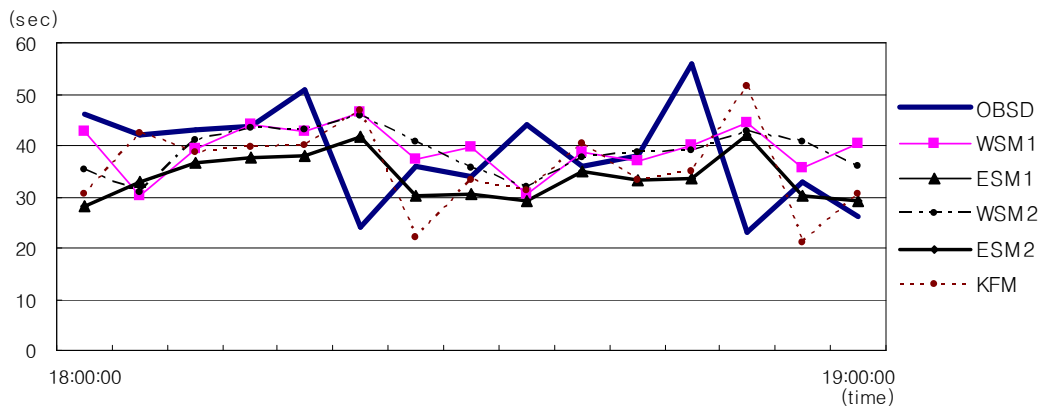


Fig. 4.18 Travel times expected at bus stop ① in road A(A.P.)

4.3.3 신호교차로 모형

1) 모형비교

이 연구대상구간에 위치한 총 13개의 신호교차로에 대해 전일시간대(08시~17시), 오전시간대(08시~09시), 낮 시간대(13시~14시), 오후시간대(18시~19시)로 구분하여 가중평활 및 지수평활의 최적 모형상수에 기초한 각 시간대별 예측모형 식은 다음과 같이 나타났다.

$$\text{WSM1(1Day)} : F_{nd} = 0.4Y_t + 0.2Y_{t-1} + 0.4Y_{t-2} \quad (4-15)$$

$$\text{WSM2(M.P.)} : F_{nd} = 0.4Y_t + 0.1Y_{t-1} + 0.5Y_{t-2} \quad (4-16)$$

$$\text{WSM2(N.P.)} : F_{nd} = 0.4Y_t + 0.1Y_{t-1} + 0.3Y_{t-2} \quad (4-17)$$

$$\text{WSM2(A.P.)} : F_{nd} = 0.4Y_t + 0.3Y_{t-1} + 0.3Y_{t-2} \quad (4-18)$$

$$\text{ESM1(1Day)} : F_{nd} = 0.4Y_t + 0.6F_t \quad (4-19)$$

$$\text{ESM2(M.P.)} : F_{nd} = 0.4Y_t + 0.6F_t \quad (4-20)$$

$$\text{ESM2(N.P.)} : F_{nd} = 0.4Y_t + 0.6F_t \quad (4-21)$$

$$\text{ESM2(A.P.)} : F_{nd} = 0.4Y_t + 0.6F_t \quad (4-22)$$

특히, 신호교차로에서 관측된 버스통행시간의 평균과 표준편차를 비교한 결과 버스통행시간의 평균(observed mean, Mo)이 전일시간대에서는 약 20.1sec, 오전시간대에서는 약 24.4sec, 낮 시간대에서는 약 18.0sec, 오후시간대에서는 약 18.0sec로 나타났다.

반면 예측된 버스통행시간의 평균과 표준편차에서는 다음 Table 4.7과 같이 나타났으며, 특히 WSM1과 WSM2에 의해 예측된 버스통행시간과 관측된 버스통행시간이 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 표준편차에 있어서는 ESM1과 2가 가장 적게 나타났다.

Table 4.7 Statistics of travel times observed and expected at node

Period	Observed		WSM1		ESM1		WSM2		ESM2		KFM	
	Mo	SD	Me	SD	Me	SD	Me	SD	Me	SD	Me	SD
1 Day	20.1	28.4	20.2	24.0	15.9	19.0	20.2	24.2	15.9	19.0	20.1	28.6
M.P.	24.4	31.9	24.4	28.5	19.2	22.6	24.4	28.7	19.2	22.6	24.9	33.2
N.P.	18.0	27.2	18.4	22.3	14.4	17.6	18.5	22.9	14.4	17.6	17.4	26.0
A.P.	18.0	25.6	17.6	20.2	13.8	16.1	17.6	20.1	13.8	16.1	17.8	26.0

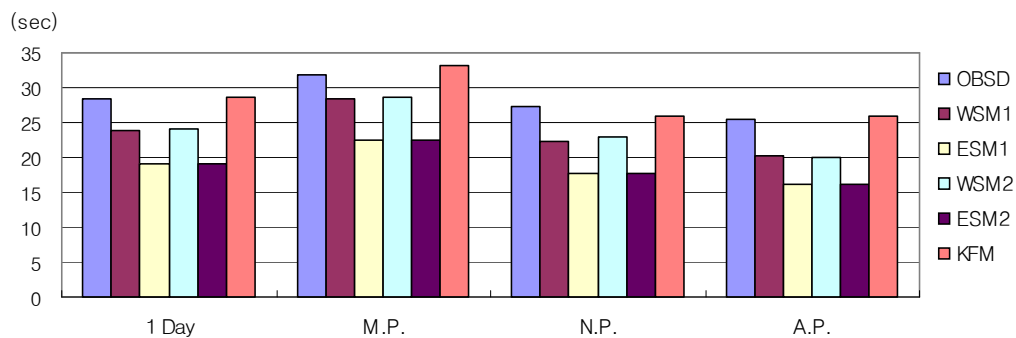


Fig. 4.19 SD characteristics of travel time at node

2) 상관관계

이 연구대상구간 내 신호교차로의 통행시간에 대한 관측 값과 각 모형별 예측 값을 기준으로 상관관계를 비교 분석한 결과, 아래의 Table 4.8에서 보여주듯이 ESM1과 2의 상관계수가 전 시간대에서 가장 높게 나타났다.

특히, 각 시간대별 상관계수를 비교해 보면, 오전시간대에는 WSM1의 상관계수가 가장 높게 나타났고, 낮 시간대와 오후시간대에는 ESM1과 2에서 상대적으로 높게 나타났다.

따라서 각 시간대별 적절한 가중평활 및 지수평활의 모형상수를 선정하여 신호교차로의 통행시간 예측에 활용하는 것이 보다 효과적일 것으로 생각되었다.

Table 4.8 Correlation coefficients of the models at node

Period	WSM1	ESM1	WSM2	ESM2	KFM
1 Day	0.63963	0.64256	0.63309	0.64256	0.56582
M.P.	0.77358	0.76696	0.76951	0.76696	0.70705
N.P.	0.52027	0.53054	0.49778	0.53054	0.42901
A.P.	0.52319	0.53540	0.53444	0.53540	0.46267

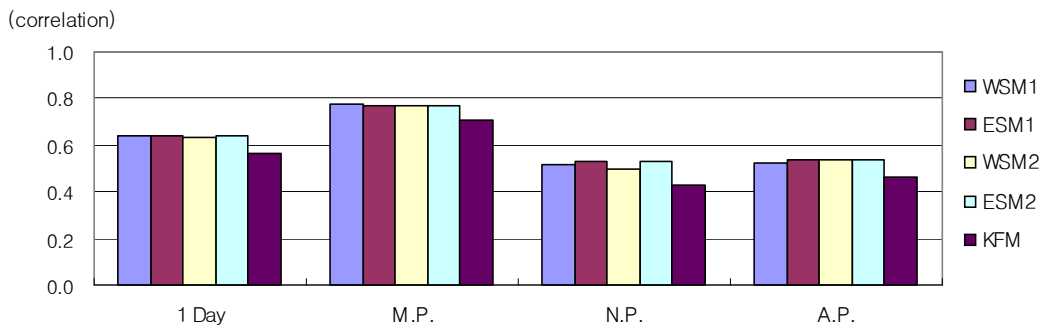


Fig. 4.20 Correlation characteristics of the models at node

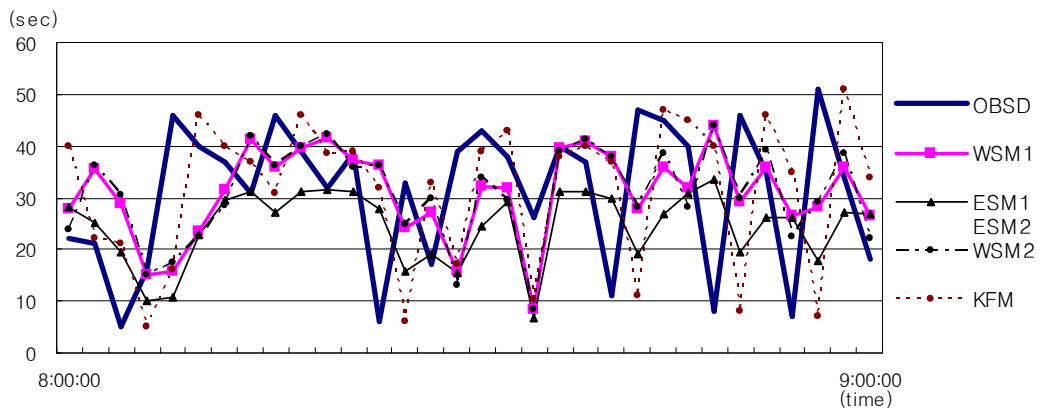


Fig. 4.21 Travel times expected at node ③ in road C(M.P.)

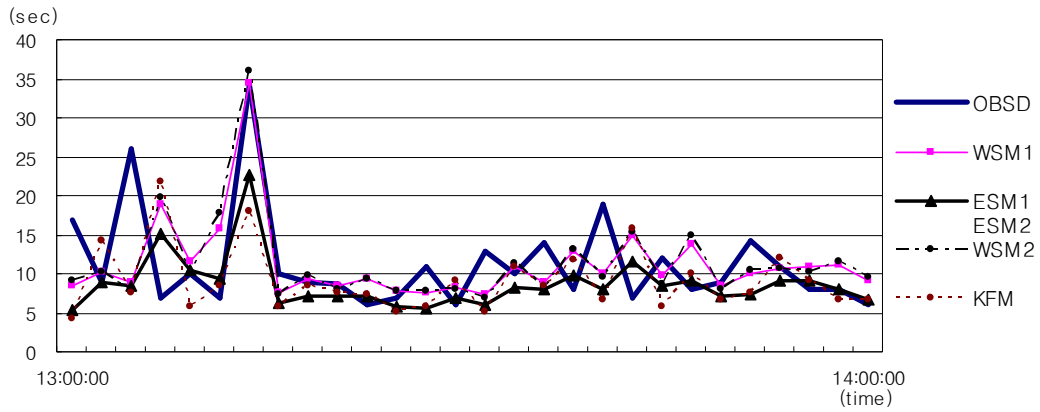


Fig. 4.22 Travel times expected at node ③ in road C(N.P.)

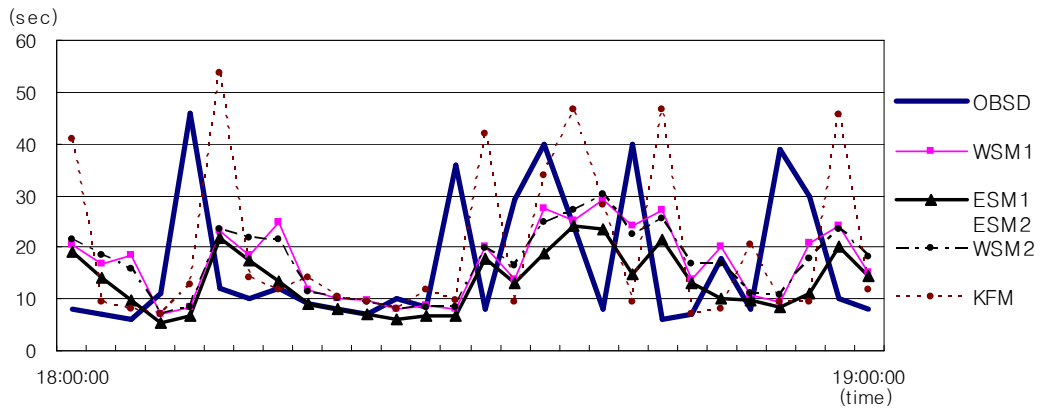


Fig. 4.23 Travel times expected at node ③ in road C(A.P.)

4.3.4 순행구간 모형

1) 모형비교

이 연구대상구간 내 위치한 전체 순행구간에 대해 전일시간대(08시~17시), 오전시간대(08시~09시), 낮 시간대(13시~14시), 오후시간대(18시~19시)로 구분하여 가중평활 및 지수평활의 최적 모형상수에 기초한 각 시간대별 예측모형식은 다음과 같이 나타났다.

$$\text{WSM1(1Day)} : F_{sc} = 0.2Y_t + 0.4Y_{t-1} + 0.4Y_{t-2} \quad (4-23)$$

$$\text{WSM2(M.P.)} : F_{sc} = 0.3Y_t + 0.3Y_{t-1} + 0.4Y_{t-2} \quad (4-24)$$

$$\text{WSM2(N.P.)} : F_{sc} = 0.3Y_t + 0.3Y_{t-1} + 0.4Y_{t-2} \quad (4-25)$$

$$\text{WSM2(A.P.)} : F_{sc} = 0.3Y_t + 0.4Y_{t-1} + 0.3Y_{t-2} \quad (4-26)$$

$$\text{ESM1(1Day)} : F_{sc} = 0.5Y_t + 0.5F_t \quad (4-27)$$

$$\text{ESM2(M.P.)} : F_{sc} = 0.5Y_t + 0.5F_t \quad (4-28)$$

$$\text{ESM2(N.P.)} : F_{sc} = 0.5Y_t + 0.5F_t \quad (4-29)$$

$$\text{ESM2(A.P.)} : F_{sc} = 0.5Y_t + 0.5F_t \quad (4-30)$$

특히, 순행구간에서 관측된 버스통행시간의 평균과 표준편차를 비교한 결과 버스통행시간의 평균(observed mean, Mo)이 전일시간대에서는 약 16.9sec, 오전시간대에서는 약 14.7sec, 낮 시간대에서는 약 15.7sec, 오후시간대에서는 약 20.6sec로 나타났다.

반면 예측된 버스통행시간의 평균과 표준편차에서는 다음 WSM1과 2에 의한 예측 값에 가장 근접한 것으로 나타났고, 관측 값과 예측 값 사이의 표준편차는 ESM1과 2에서 가장 적게 나타났다.

Table 4.9 Statistics of travel times observed and expected at section

<i>Period</i>	<i>Observed</i>		<i>WSM1</i>		<i>ESM1</i>		<i>WSM2</i>		<i>ESM2</i>		<i>KFM</i>	
	Mo	SD	Me	SD	Me	SD	Me	SD	Me	SD	Me	SD
1 Day	16.9	23.4	16.8	20.6	14.7	19.5	16.8	20.2	14.7	19.5	15.0	22.5
M.P.	14.7	18.3	14.6	16.1	12.8	15.1	14.6	15.8	12.8	15.1	12.4	16.9
N.P.	15.7	19.5	15.6	13.6	13.6	14.0	15.5	13.7	13.6	14.0	14.2	16.8
A.P.	20.6	31.1	20.3	29.4	17.8	27.3	20.3	28.7	17.8	27.3	18.5	31.3

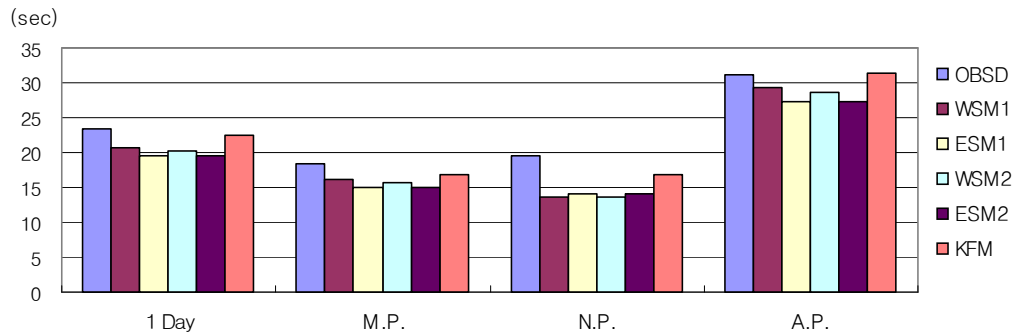


Fig. 4.24 SD characteristics of travel time at section

2) 상관관계

이 연구대상구간 내 순행구간의 통행시간에 대한 관측 값과 각 모형별 예측 값을 기준으로 상관관계를 비교 분석한 결과, 다음 Table 4.10에서 보여주듯이 전일 자료에서는 ESM1과 2의 상관계수가 모든 시간대에서 가장 높게 나타났다.

특히, 각 시간대별 상관계수를 비교해 보면, 오전·오후시간대에서는 ESM1과 2의 상관계수가 가장 높게 나타났고, 낮 시간대에는 WSM1에서 상대적으로 높게 나타났다.

따라서 각 시간대별 적절한 가중평활 및 지수평활의 모형상수를 선정하여 순행구간의 통행시간 예측에 활용하는 것이 보다 효과적일 것으로 생각되었다.

Table 4.10 Correlation coefficients between the models at section

Period	WSM1	ESM1	WSM2	ESM2	KFM
1 Day	0.55443	0.58994	0.56970	0.58994	0.52916
M.P.	0.54853	0.59259	0.56349	0.59259	0.52478
N.P.	0.72706	0.70528	0.72246	0.70528	0.59385
A.P.	0.46568	0.52590	0.49017	0.52590	0.49752

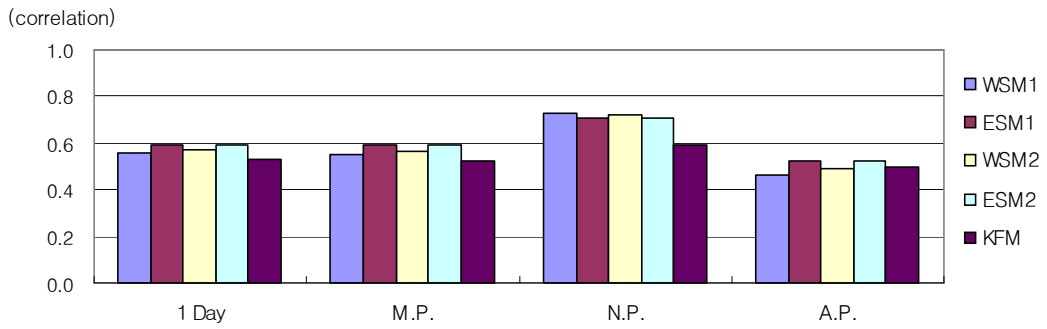


Fig. 4.25 Correlation characteristics of travel time at section

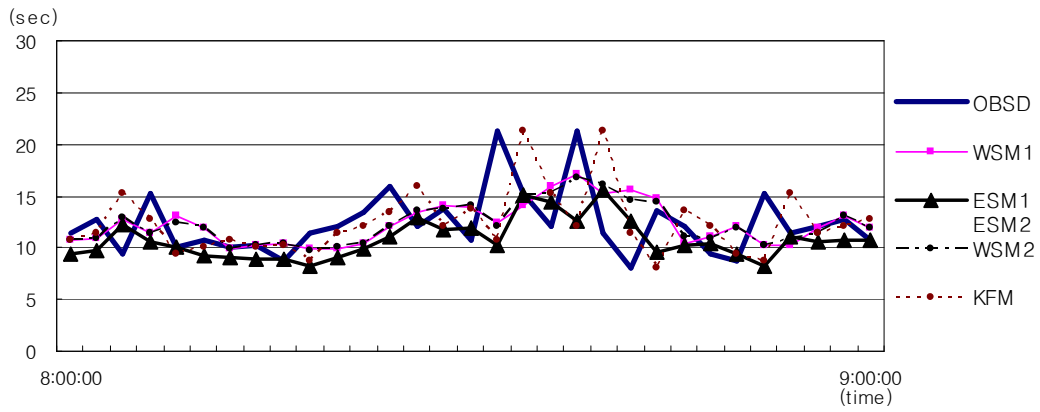


Fig. 4.26 Travel times expected at section 10 in road C(M.P.)

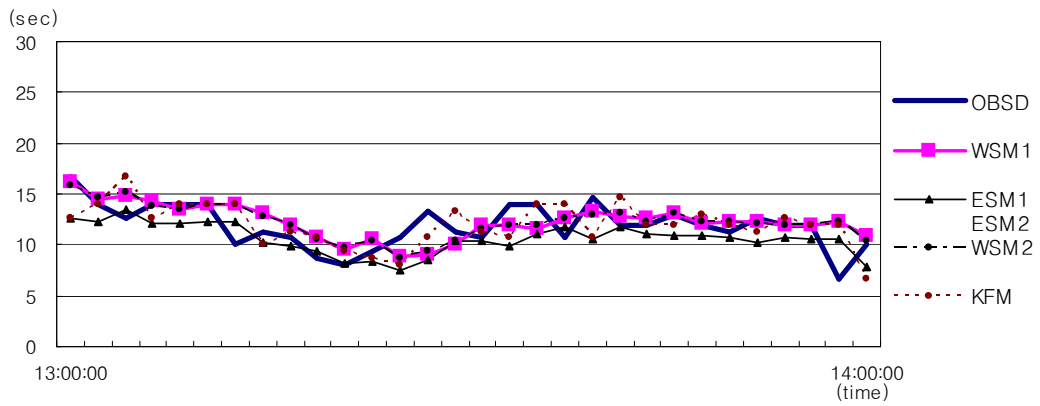


Fig. 4.27 Travel times expected at section 10 in road C(N.P.)

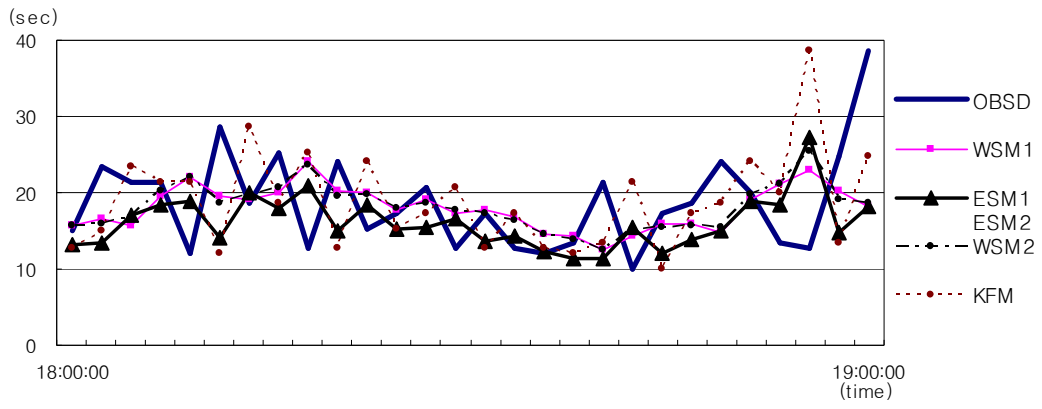


Fig. 4.28 Travel times expected at section 10 in road C(A.P.)

4.4 통합모형

4.4.1 모형구축

앞에서 언급한 개별모형이 어느 대상도로의 특정 단위구간에 대한 최적화모형이라면 통합모형은 어느 대상도로의 전체 구간에 대해 각 단위구간별 최적화모형으로 구축된 최적의 통합모형(Integrated model, IM)이라고 할 수 있다.

그러므로 이 연구대상도로구간은 버스정류장, 순행구간 및 교차로가 포함된 구간으로서 버스가 어느 버스정류장을 출발하여 다른 정류장에 도착하는데 소요되는 시간을 예측하기 위하여 교통관리센터로부터 수집된 실시간 버스운행 특성자료를 바탕으로 전일시간대(08시~19시), 오전시간대(08~09시), 낮 시간대(13시~14시), 오후시간대(18시~19시)로 분리하여 실시간의 버스도착시간 예측모형을 구축하였다.

특히, 이 통합모형을 위해 도로 및 교통여건이 유사한 문수로, 삼산로 및 태화로가 연구대상도로로 포함되었고, 문수로에서 2006년 6월 13일(화)~14일(수)과 2007년 1월 16일(화)~17일(수)까지 4일간의 관측 자료와 삼산로와 태화로에서 2007년 3월 27일(화)~28일(수)까지 각각 2일간씩의 관측 자료가 모형구축에 사용되었다.

1) 구축방법

이 연구대상도로구간에 대해 통합모형을 구축하기 위한 독립변수로는 버스정류장, 교차로 및 순행구간이 사용되었으며, 각 세부구간별 통행시간은 예측모형을 이용하여 예측한 각각의 예측 값 중에서 관측 값과의 상관관계가 높은 예측 값을 세부구간별 시간대별 통행시간으로 설정하여 아래와 같이 통합모형과 변수들을 선정하였다.

$$Y = \beta_1 X_{ts} + \beta_2 X_{nd} + \beta_3 X_{sc} \quad (4-31)$$

여기서,

종속변수

Y : 버스 도착 예정시간(sec)

독립변수

X_b : 버스정류장 통행시간 예측 값(sec)

X_m : 교차로 통행시간 예측 값(sec)

X_x : 순행구간 통행시간 예측 값(sec)

l : 버스정류장의 개수

m : 신호교차로의 개수

n : 순행구간의 길이

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$: 회귀계수

그리고 독립변수사이의 모형 설명정도를 나타내는 다중결정계수(R^2)와 개개 독립변수의 유의성을 나타내는 t -value, 모형전체의 유의성을 검증하는 F -value 등이 모형구축에 고려되었다.

2) 구축결과

이 연구대상구간에 각 시간대별로 도착한 버스도착시간을 예측하기 위한 통합모형을 구축한 결과, 모든 시간대에서 다중결정계수(R^2)가 0.945이상으로 나타남으로써 선택된 독립변수들이 모형구축에 높은 설명력을 제공하는 것으로 나타났고, F의 유의확률이 모든 모형에서 0.000으로 나타나 회귀식이 유의하다고 생각되었으며, t -sig.에서 0.000을 나타내어 변수사이에 유의성이 높은 것으로 분석되었다.

Table 4.11 Integrated models for predicting the bus arrival times

		Integrated models			R^2	prob > F
		Bus Stop	Node	Section		
1 Day	Models selected	WSM1	ESM1·2	ESM1·2	0.956	0.000
	Regression Coefficient	1.018	1.224	1.136		
	t-sig.	0.000	0.000	0.000		
M.P.	Models selected	WSM1	WSM1	ESM1·2	0.945	0.000
	Coefficient	0.965	1.254	1.190		
	t-sig.	0.000	0.000	0.000		
N.P.	Models selected	WSM1	ESM1·2	WSM1	0.965	0.000
	Regression Coefficient	0.962	1.219	1.089		
	t-sig.	0.000	0.000	0.000		
A.P.	Models selected	WSM1	ESM1·2	ESM1·2	0.959	0.000
	Regression Coefficient	1.119	1.155	1.021		
	t-sig.	0.000	0.000	0.000		

* Note : (p>|T| = p-value)

4.4.2 모형검증

이 연구대상구간의 버스도착시간 예측모형의 예측 값과 모형구축에 사용되지 않은 관측 값을 바탕으로 도로별 시간대별로 구분하여 통합모형의 검증이 수행되었다.

특히, 모형검증을 위해 문수로에 대해서는 2006년 6월 15일(목), 2007년 1월 18일(목) 2일간의 자료가 사용되었고, 삼산로와 태화로에 대해서는 2007년 3월 29일(목) 각 1일간의 자료가 사용되었다.

1) 검증방법

이 연구대상구간에 대한 검증에서는 실시간 버스도착시간 예측 값과 관측 값 사이의 유의한 차이 정도를 검증하는 것으로서 두 요소가 상호 독립적이며 각 요소 또한 독립적으로 구성되어 있으므로 모수적 검증방법인 한 쌍의 통계량을 계산하여 독립된 두 모집단으로부터 추출된 평균의 차이를 검증하는 아래의 Paired t-test가 사용되었다.

$$t = \frac{\bar{d}}{\sqrt{\frac{V_d}{n}}} \quad (4-32)$$

여기서,

t : 검정통계량

\bar{d} : 관측 값과 예측 값의 차이

V_d : 관측 값과 예측 값의 차이에 대한 분산

n : 표본 수

2) 검증결과

이 연구대상도로구간 내 실시간의 버스도착시간 예측모형에 의한 예측 값과 관측 값을 가지고 검증한 결과, t -value가 $-0.787 \sim 1.057$ 로 나타났으며, 유의 확률(p -value)이 0.315이상으로 나타나 양측검증 결과 유의수준 95%에서 관측 값과 예측 값이 다르다는 대립가설을 기각할 수 있는 것으로 나타났다.

Table 4.12 Test results of models for predicting the bus arrival times

		<i>Mean</i>	<i>SD</i>	<i>SE</i>	<i>t-value</i>	<i>p-value</i>	<i>Result</i>
<i>1 Day</i>	<i>Road A</i>	0.0765	12.7360	1.1981	0.064	0.949	<i>T</i>
	<i>Road B</i>	1.4573	15.4308	1.6544	0.881	0.381	<i>T</i>
	<i>Road C</i>	0.7217	7.0166	1.1535	0.626	0.535	<i>T</i>
<i>M.P.</i>	<i>Road A</i>	-1.9759	15.0735	2.5122	-0.787	0.437	<i>T</i>
	<i>Road B</i>	0.2046	15.6457	2.9568	0.069	0.945	<i>T</i>
	<i>Road C</i>	1.8502	5.8066	1.7507	1.057	0.315	<i>T</i>
<i>N.P.</i>	<i>Road A</i>	0.0505	12.0443	1.7758	0.028	0.977	<i>T</i>
	<i>Road B</i>	1.4663	15.5325	2.8843	0.508	0.615	<i>T</i>
	<i>Road C</i>	1.9579	7.6554	2.2099	0.886	0.395	<i>T</i>
<i>A.P.</i>	<i>Road A</i>	0.1435	10.1848	1.8293	0.078	0.938	<i>T</i>
	<i>Road B</i>	2.7640	14.9323	2.7262	1.014	0.319	<i>T</i>
	<i>Road C</i>	0.4259	8.1547	2.1794	0.195	0.848	<i>T</i>

※ Note : 1) *t*-검정통계량(*t-value*)과 유의확률값(*p-value*)은 유의수준($\alpha/2$) 0.025에서 *t-test* 양측검증의 결과 값임.

2) *T* : *t-test* 양측검증결과, 유의확률(*p-value*) > 유의수준($\alpha/2=0.025$)이면, 귀무가설이 지지되는 것을 의미하는 것으로 즉 "관측시간과 예측시간사이에 시간차이가 나지 않는다."는 것을 의미함.

3) *F* : *t-test* 양측검증결과, 유의확률(*p-value*) \leq 유의수준($\alpha/2=0.025$)이면, 귀무가설이 기각되는 것을 의미하는 것으로 즉 "관측시간과 예측시간사이에 시간차이가 난다"는 것을 의미함.

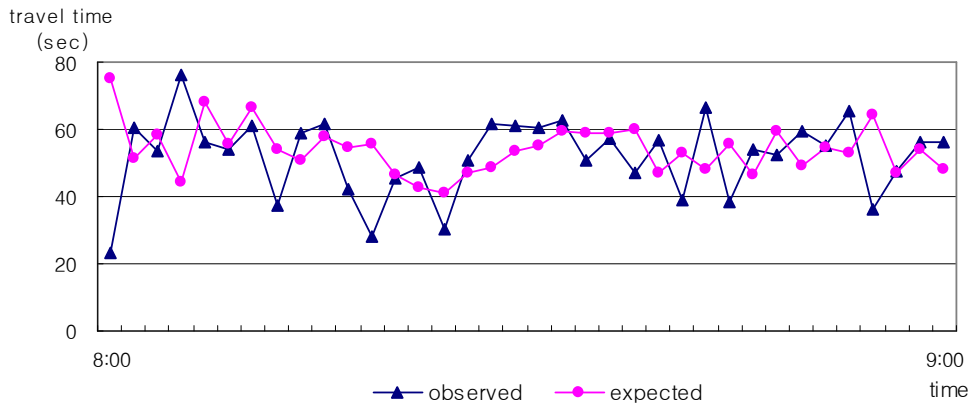


Fig. 4.29 Observed and expected bus arrival times at road A(M.P.)

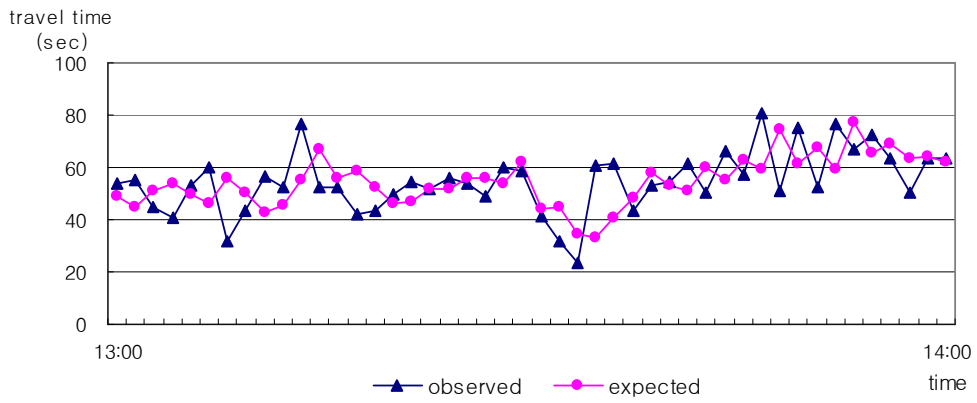


Fig. 4.30 Observed and expected bus arrival times at road A(N.P.)

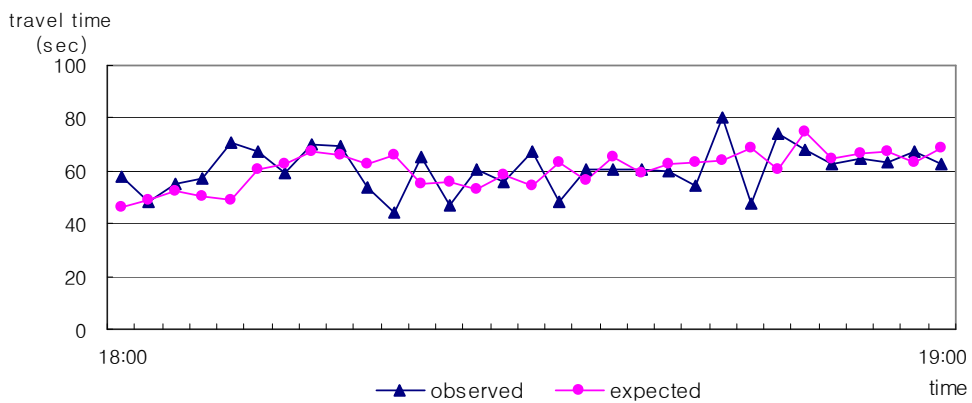


Fig. 4.31 Observed and expected bus arrival times at road A(A.P.)

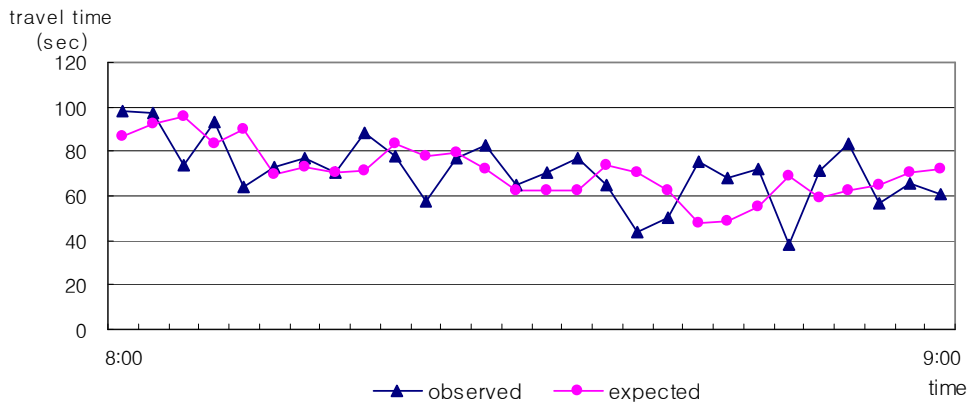


Fig. 4.32 Observed and expected bus arrival times at road B(M.P.)

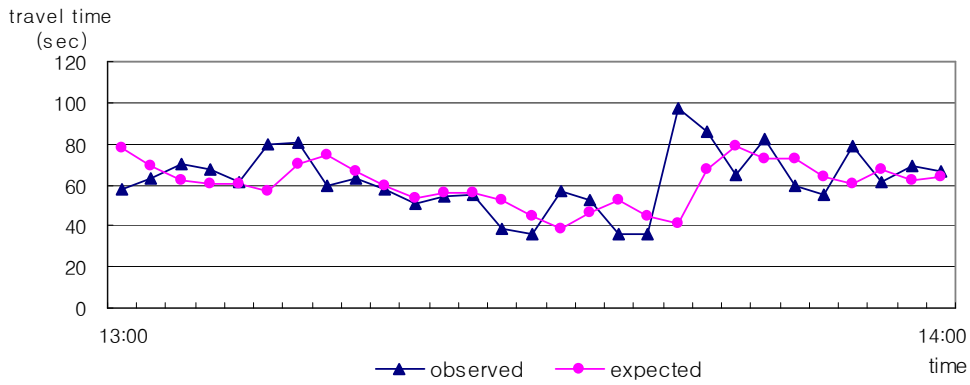


Fig. 4.33 Observed and expected bus arrival times at road B(N.P.)

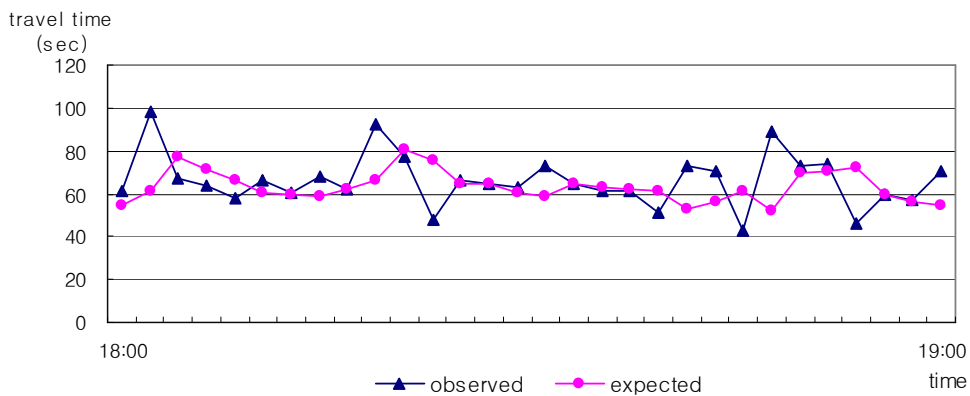


Fig. 4.34 Observed and expected bus arrival times at road B(A.P.)

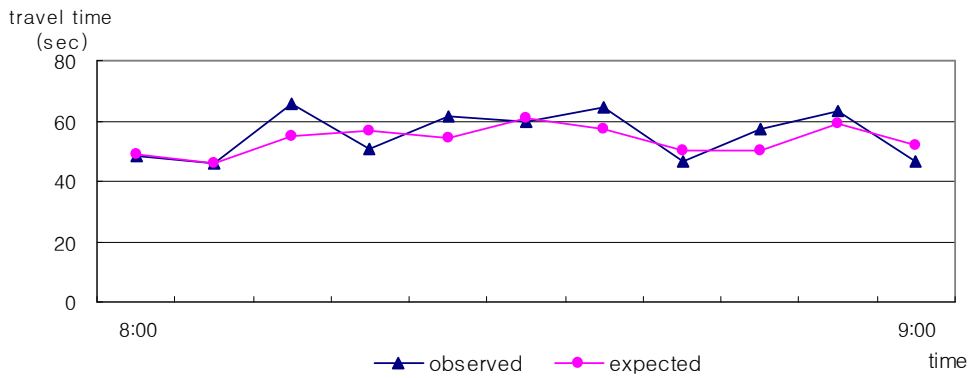


Fig. 4.35 Observed and expected bus arrival times at road C(M.P.)

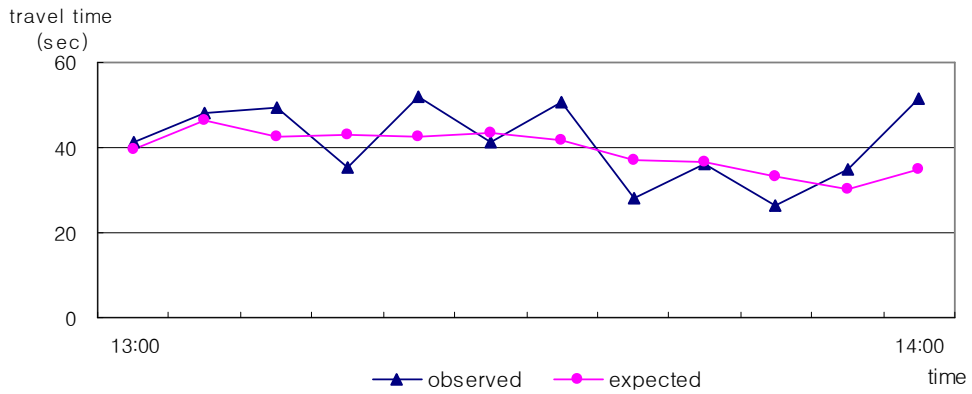


Fig. 4.36 Observed and expected bus arrival times at road C(N.P.)

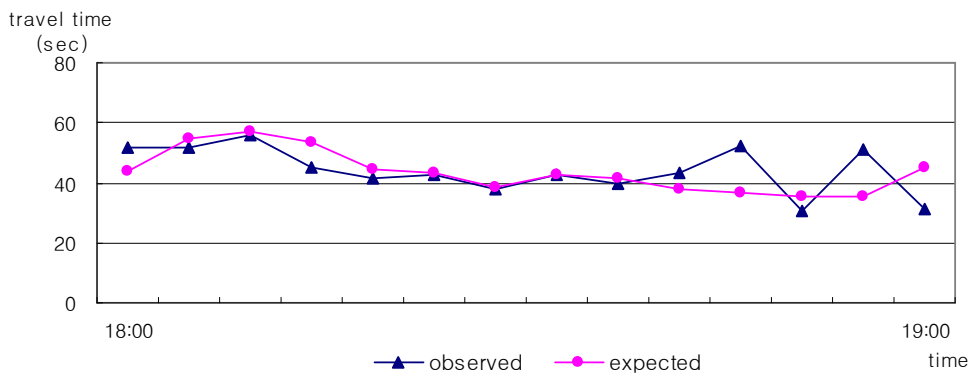


Fig. 4.37 Observed and expected bus arrival times at road C(A.P.)

4.4.3 오차비교

이 연구대상구간에 대하여 시계열 특성을 고려하여 현재 보편적으로 적용하고 있는 실제 값과 기존모형의 예측 값 사이의 평균절대 예측오차(mean absolute forecasting error, MAFE)와 평균 제곱근 오차(root mean squared error, RMSE)가 사용되었다.

1) 평균절대 예측오차(MAFE)

i 기간에 대해 z_i 의 값을 예측하였다고 하면, 절대 오차 $|z_i - \hat{z}_i|$ 의 평균을 평균절대 예측오차(MAFE)라 부르며, 다음과 같다.

$$MAFE = \frac{\sum |z_i - \hat{z}_i|}{n} \quad (4-33)$$

여기서,

z_i : 시간 t 에서 관찰된 실제 값

\hat{z}_i : 시간 t 의 예측 값

2) 평균제곱근 오차(RMSE)

i 기간에 대해 z_i 의 값을 예측하였다고 하면, 제곱오차 $(z_i - \hat{z}_i)^2$ 의 평균을 평균 제곱오차라 하며, 이것을 제곱근을 하여 평균 제곱근 오차(RMSE)라 부르며, 다음과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (z_i - \hat{z}_i)^2}{n}} \quad (4-34)$$

그 결과 통합모형을 적용할 경우 아래의 Table 4.13과 4.14에서 알 수 있듯이 모든 시간대에서 통합모형의 MAFE와 RMSE가 전반적으로 낮게 나타났으나, 삼산로의 경우 전일 시간대와 오후시간대에서 가중평활모형이 통합모형보다 다소 낮게 나타났다.

또한 삼산로에서 전일시간대와 오후시간대에 평균절대 예측오차가 다소 낮게 나타난 것은 신호연동화가 가동되지 않아 발생되었다고 생각되므로 신호연동화의 가동여부에 따른 통합모형에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단되었다.

Table 4.13 Error comparison between observed, WSM and ESM arrival times

		Mo	<i>WSM</i>			<i>ESM</i>		
			Me	RMSE	MAFE	Me	RMSE	MAFE
<i>1 Day</i>	<i>Road A</i>	234.6	234.2	51.9	39.2	155.7	91.7	80.9
	<i>Road B</i>	147.1	232.8	97.4	87.7	153.0	37.8	31.6
	<i>Road C</i>	265.1	297.2	80.5	66.7	195.3	94.6	75.3
<i>M.P.</i>	<i>Road A</i>	221.4	224.8	37.9	20.4	155.2	60.2	36.0
	<i>Road B</i>	160.5	265.2	111.4	104.8	174.0	31.8	29.6
	<i>Road C</i>	281.3	312.7	85.3	72.2	205.5	102.3	84.8
<i>N.P.</i>	<i>Road A</i>	233.5	231.3	40.2	21.5	151.9	67.6	41.9
	<i>Road B</i>	146.1	220.7	86.7	74.7	146.7	37.0	31.8
	<i>Road C</i>	245.7	277.6	79.0	64.5	182.1	90.1	64.3
<i>A.P.</i>	<i>Road A</i>	249.7	248.3	29.0	15.8	162.8	65.7	43.4
	<i>Road B</i>	137.5	217.5	94.2	85.5	141.9	42.6	33.2
	<i>Road C</i>	268.8	301.7	77.4	63.7	198.6	91.4	77.2
<i>Aug.</i>		215.9	255.3	72.6	59.7	168.6	67.7	52.5

Table 4.14 Error comparison between observed, KFM and IM arrival times

		Mo	<i>WSM</i>			<i>ESM</i>		
			Me	RMSE	MAFE	Me	RMSE	MAFE
<i>1 Day</i>	<i>Road A</i>	234.6	222.2	61.3	47.3	228.9	48.6	38.2
	<i>Road B</i>	147.1	154.1	44.8	36.7	150.5	34.4	27.4
	<i>Road C</i>	265.1	262.0	80.5	63.3	219.7	81.7	64.3
<i>M.P.</i>	<i>Road A</i>	221.4	217.1	42.4	23.3	217.8	35.0	20.5
	<i>Road B</i>	160.5	163.6	39.7	35.1	158.6	27.8	22.8
	<i>Road C</i>	281.3	279.7	84.2	71.3	288.5	69.8	54.9
<i>N.P.</i>	<i>Road A</i>	233.5	205.6	48.4	26.0	236.0	37.2	20.1
	<i>Road B</i>	146.1	153.6	45.8	39.0	153.4	33.8	28.7
	<i>Road C</i>	245.7	240.0	77.7	58.4	261.5	68.3	55.6
<i>A.P.</i>	<i>Road A</i>	249.7	252.7	36.0	20.4	240.8	28.0	16.0
	<i>Road B</i>	137.5	147.0	47.5	36.1	139.6	38.9	29.3
	<i>Road C</i>	268.8	266.7	79.8	60.6	194.8	92.5	75.7
<i>Avg.</i>		215.9	213.7	57.3	43.1	207.5	49.7	37.8

제 5 장 결 론

이 연구에서는 버스정보시스템(BIS)을 가동하고 있는 울산광역시의 핵심적인 3개의 간선도로를 연구대상도로로 선정하여 연구가 수행되었는데, 연구대상도로 중 교통여건이 유사한 연구대상구간을 중심으로 실시간의 버스통행특성 자료의 수집 및 조사결과를 바탕으로 버스정류장, 신호교차로 및 순행구간에 대한 교통체계분석을 실시하였으며, 분석결과를 중심으로 각 단위구간별 실시간의 버스도착시간 예측모형의 구축과 단위구간별 예측모형을 중심으로 통합모형을 구축한 결과 다음과 같은 결론에 도달하게 되었다.

1. 연구대상구간의 도로특성을 살펴보면, 도로폭원, 길이, 단위구간의 수 및 신호교차로의 형태에 있어서 상당한 차이를 보였으나, 연구대상구간 내 버스통행량, 운행속도 및 버스도착시간간격 등에 따른 버스교통특성에서 큰 차이를 보이지 않았다.

2. 연구대상구간 내 신호교차로의 신호운영특성을 살펴보면, 연구대상구간 내 교차로별 시간대별 녹색시간비에 있어서 상당한 차이를 보였으나, 연구대상구간은 지능형교통체계(ITS)의 하나인 버스정보시스템(BIS)이 가동 중인 것으로 확인되었다.

3. 연구대상구간 내 버스통행량이나 통행노선에 있어서 별다른 차이를 보이지 않았으나, 각 단위구간의 버스의 시간도착간격, 운행속도 및 운행시간에서 뚜렷한 차이를 확인할 수 있었다. 그런데 신호교차로에서 통행시간은 연동화시스템의 가동여부에 따라 확실한 차이를 확인할 수 있었다.

4. 단위구간별 예측모형은 시간대별로 달리 구축할 필요가 있었는데, 특히 버스정류장에서 WSM1은 오전시간대와 전일 시간대에 버스통행특성과 상관성이 상대적으로 높게 나타났고, 낮 시간대에는 WSM2와 오후시간대에는 ESM2가 버스통행특성과 상대적으로 상관성이 높게 나타났다.

5. 신호교차로에 대한 개별모형에서 ESM1과 2는 전일시간대, WSM2는 오전 시간대에 버스통행특성과 상관성이 상대적으로 높게 나타났다. 또한 ESM1과 2는 낮 시간대와 오후시간대에 각각 버스통행특성과 상대적으로 상관성이 높게 나타났다.

6. 순행구간에 대한 개별모형에서 ESM1과 2는 전일시간대와 오전시간대에 버스통행특성과 상관성이 상대적으로 높게 나타났고, 낮 시간대에는 WSM1과 오후시간대에는 ESM1과 2가 버스통행특성과 상대적으로 상관성이 높게 나타났다.

7. 연구대상구간 전체에 대한 통합모형에서 0.945이상의 결정계수와 함께 높은 설명력을 보이는 것으로 나타났고, 0.000의 F-value와 0.000의 t-value에 따라 높은 유의성과 유의확률을 확인할 수 있었으며, 95%의 신뢰수준에서 검증을 실시한 결과 통합모형은 매우 유효한 것으로 나타났다.

따라서 이 연구에서 제시된 통합모형은 교통여건이 유사한 도시지역에서 실시간의 버스도착시간을 예측하는데 매우 유효할 것으로 판단되며, 향후에는 단위구간을 버스정류장, 신호교차로, 순행구간을 더욱 세분화하고, 도로의 상층 및 신호연동화시스템의 가동여부를 고려한 통합모형의 구축에 대한 연구가 수행될 필요가 있다고 판단된다.