

회귀크리깅 기법을 이용한 도시부 차량주행거리 산정

Estimation of the VKT(vehicle kilometers traveled) in Urban Areas using Regression Kriging

김 현 승* · 박 동 주** · 홍 다 희*** · 허 태 영**** · 이 철 기***** · 서 태 교*****

* 주저자 : 서울시립대학교 교통공학과 연구교수
 ** 교신저자 : 서울시립대학교 교통공학과 교수
 *** 공저자 : 한국교통연구원 부연구위원
 **** 공저자 : 충북대학교 정보통계학과 교수
 ***** 공저자 : 아주대학교 교통·ITS대학원 교수
 ***** 공저자 : ㈜태영알앤디 대표이사

Hyunseung Kim* · Dongjoo Park* · Dahee Hong** · Taeyoung Heo***
· Chulgee Lee**** · Tae-Gyo Seo*****

* Dept. of Transportation Eng., Univ. of Seoul
 ** Dept. of Road transport research, Korea Transport Institute
 *** Dept. of Information Statistics, Univ. of Chungbuk
 **** Graduate School of Transport · ITS, Ajou Univ.
 ***** Representative Director, TaeYoung R&D

† Corresponding author : Dongjoo Park, djpark@uos.ac.kr

Vol.16 No.4(2017)

August, 2017
pp.132~152ISSN 1738-0774(Print)
ISSN 2384-1729(On-line)
<https://doi.org/10.12815/kits.2017.16.4.132>Received 22 June 2017
Revised 7 July 2017
Accepted 22 July 2017© 2017. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

도시부 도로의 혼잡 및 지체가 매년 증가 추세를 보이고 있는 중 국내외에서 교통네트워크 성능평가에 대한 관심이 높아지고 있다. 교통네트워크 성능평가의 대표적인 항목은 차량주행거리를 들 수 있다. 차량주행거리는 해당 도로를 이용한 모든 차량들의 이동거리 합으로 다양한 교통정책분석의 기초자료로 활용되고 있다. 본 연구는 국내 6대 광역시를 대상으로 차량주행거리 산정방법론을 정립하고 이를 적용하여 차량주행거리를 산정하는 것을 목적으로 한다. 본 논문에서는 6대 광역시 대상 수집된 도로교통량과 회귀크리깅을 이용하여 추정된 교통량 미수집 구간의 교통량을 활용하여 차량주행거리를 산정하였다. 도시부 도로의 네트워크 형상과 교통량 미수집구간 위치에 따라 본 연구에서 제시한 교통량 추정방법을 향후 차량주행거리 산정에 있어 큰 효용이 있을 것으로 기대된다.

핵심어 : 차량주행거리, 교통량 추정, 회귀크리깅, 도시부 도로

ABSTRACT

Network performance measure has been more and more important in transportation sector because traffic congestion has been steadily increasing in urban area. VKT is defined a sum of traveled distances of whole vehicles on the road network and one of the most important measure of effectiveness (MOE) for network performance measure. This paper aims to propose a methodology for estimating VKT and to apply it to calculate VKT in 6 major cities in Korea. We calculate VKT in 6 major cities by estimating traffic volumes on the uncollected road sections using regression kriging. It is expected that the proposed methodology can be applied various cities.

Key words : VKT, estimation of traffic volume, regression kriging, urban area

I. 서 론

1970년대 이후 건설 중심의 도로정책으로 경제 활성화, 균형발전 등의 효과는 있었으나 도로혼잡, 지체 등의 사회적 문제는 지속적으로 발생하고 있다. 특히 도시부 도로의 혼잡 및 지체는 매년 증가 추세를 보이고 있다. 교통 혼잡 및 지체를 해소하기 위해 다양한 방안이 마련되어왔으나 여전히 문제는 줄어들지 않고 있다. 미국, 영국, 호주 등에서는 이러한 교통문제를 해결하기 위해 교통DB를 기반으로 한 교통네트워크 성능평가(Network performance measure)를 시행하고 있다. 특히 미국의 경우 2012년 Performance based Planning인 MAP-21(Moving Ahead for Progress in the 21st century) 입법화를 통하여 각 주 정부별 교통네트워크 성능평가 계획과 실적 달성에 따라 예산지원을 달리 하고 있다. 국내에서도 교통부문의 IT기술발달과 더불어 교통네트워크 성능평가에 대한 관심이 높아지고 있다. 교통네트워크 성능평가의 대표적인 항목은 차량주행거리를 들 수 있다.

차량주행거리(VKT, Vehicle Kilometers Traveled)는 해당 도로를 이용한 모든 차량들의 이동거리 합으로, 혼잡(량) 및 혼잡요금 산정, 온실가스 배출량 산정 등 다양한 교통정책분석의 기초자료로 이용되는 중요 지표이다. 해외에서는 1990년대부터 교통DB를 이용하여 교통량 기반 차량주행거리를 산정해오고 있으나, 국내에서는 교통량 부재로 차량주행기록계를 기반으로 한 차량주행거리만이 제공됨에 따라 도로별·지역별 정확한 차량주행거리는 존재하지 않는 실정이다.

본 논문은 국내 6대 광역시를 대상으로 도시부 차량주행거리 산정방안을 정립하고 이 방법을 적용하여 차량주행거리를 산정하는데 목적이 있다. 2장에서는 차량주행거리 산정과 관련된 기존문헌 고찰을 통해 차량주행거리 산정 오차발생 원인을 살펴보고 본 논문에서 차량주행거리를 산정함에 있어 시사점을 도출하였다. 3장에서는 차량주행거리 산정방법론을 정립하고, 국내 6대 광역시 대상 차량주행거리 산정에 필요한 자료수집(4장)을 통해 회귀크리깅기법을 활용하여 차량주행거리를 산정하였다(5장). 마지막으로 도시부의 차량주행거리 산정에 있어 교통량 미수집구간의 교통량 추정 시 회귀크리깅의 효율이 클 수 있는 조건을 도출함으로써 결론과 향후 연구 과제를 도출하였다.

II. 기존문헌고찰

1. 차량주행거리 산정 사례

1) 차량주행거리 산정방법론

차량주행거리 산정은 크게 교통량에 기초한 산정방법과 그렇지 않은 방법으로 구분할 수 있다. 교통량에 기초한 차량주행거리 산정방법(traffic count-based model)은 차량이동에 대한 실적 값을 활용하는 방법으로 현재 가장 선호되고 있는 방법이다. 이 방법은 표본구역의 24시간 교통량을 기준으로 산정한 ‘표본구역 차량주행거리’에 표본구역의 중심 주행거리를 곱하여 산출한다. 모든 도로에 대해 교통량 수집이 가능할 경우 차량주행거리 추정이 불필요하나, 대부분 교통량 수집은 표본 추출에 의한 표본구역 자료를 통해 얻어진다. 표본 추출 과정에서 도로의 기능별 구분 정도가 차량주행거리 산정결과에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

교통량에 기초하지 않은 차량주행거리 산정방법(non-traffic count-based model)은 연료판매, 가구크기, 가구수입, 연구, 운전면허자수, 통행발생행태 등의 사회경제적 자료, 즉 비교통량 자료를 활용하여 차량주행거리를 산정한다. 이 방법은 사회경제적 자료의 정기적인 수집을 위해 많은 비용이 소요되며 정확도가 낮은 단점이 있다. 또한 교통량에 기초하지 않은 차량주행거리 추정치는 대상지역의 거주자와 비거주자 사이의 차량주행거

리 분포와 관련하여 문제가 있을 수 있다. 예컨대, 특정지역의 연료판매량에 기초한 차량주행거리 추정치의 경우 해당지역에서 판매된 연료가 모두 동일 대상 지역에서 사용되지 않을 수 있다는 한계를 가질 수 있다.

2) 국내외 차량주행거리 산정 사례

국내에서는 교통안전공단(Korea Transportation Safety Authority, 2012)에서 ‘자동차 주행거리 실태분석 연구’를 통해 차량주행거리를 산정한 바 있다. 교통안전공단에서는 자동차관리법에 근거하여 16개 광역시·도를 대상으로 자동차검사통합시스템(VIMS, vehicle inspection management system)의 자동차등록마스터 자료를 이용하여 차량주행거리를 산정한다. 여기에서는 VIMS의 자동차등록마스터 자료로부터 개별표본의 총주행거리를 주행일수로 나눈 값들을 합산하고 이를 다시 표본수로 나누어 1일 평균 주행거리(DVKT, daily vehicle kilometers traveled)를 산출하고, 여기에 다시 연간일수(365일)를 곱하여 연평균 주행거리를 산정한다. 교통안전공단에서 산정하는 차량주행거리는 실제 자동차의 운행기록자료를 기반으로 산출하므로 총량적 수치는 유의미할 수 있으나, 조사자의 편의성만을 고려하여 편의표본을 추출하기 때문에 표본의 대표성이나 일반화된 결과를 도출하기 어려운 한계가 있다. 또한 출고 후 4년 미만의 신차는 조사에서 누락되는 점, 차량 등록지와 실제 운행지가 다를 경우 지역별 차량주행거리는 실제와 다를 수 있는 한계를 갖는다.

한국건설기술연구원에서는 도로교통량 통계연보 작성 시 차량주행거리를 산정한다. 한국건설기술연구원에서는 고속도로(483개 지점), 일반국도(1,587개 지점), 국지도(339개 지점), 지방도(1,144개 지점)(이상 지점 수는 2011년 기준)를 대상으로 국토교통부의 12종 차종분류 기준 소구간(segment, 지방도 이상의 교차로 간 구간)과 대구간(section, 일반국도 이상의 교차로 구간)의 연평균 일평균 교통량과 해당구간 연장을 곱하여 차량주행거리를 산정한다. 여기서 연평균 일평균 교통량은 수집 방법상 지점교통량이지만 소구간 및 대구간 설정시 도로의 교차로 교통류의 변화가 생기는 구간을 구분하였으므로 실질적으로는 구간교통량과 같다고 볼 수 있다. 이 방법에 의한 차량주행거리 산정은 교통량 조사 자료와 조사 지점간 거리를 이용하므로 비용대비 효율적이며 계산도 용이한 장점이 있다. 그러나 도시부 차량주행거리 산정은 불가능하며, 교통량 수집 구간 간 거리가 길어 구간과 구간 사이 교통량 변화가 없다고 가정하기가 어려워 그 산정결과의 한계를 내포하고 있다.

국외에서는 미연방도로국(FHWA) 및 주도로국(SHAs)에서 사용하는 HPMS(highway performance monitoring system) 방법이 있다. HPMS방법론은 i) 표본구역의 DVMT(daily vehicle miles traveled) 산정, ii) 지역 내 DVMT 산정, iii) Universe DVMT 산정, iv) 주 전체의 DVMT 산정의 4단계로 구분할 수 있으며, 첫 번째 표본구역의 DVMT 산정 이후 각 단계별 확장 시 확장계수를 적용한다. 확장계수(EF, expansion factors)는 지역을 확장하고 각 기능상의 종류나 지리적 지역을 나타내는 데 있어 VMT(차량주행거리) 추정치와 표본구역 자료를 변형시키거나 추론하는 역할을 하는 것으로, 표본 구역 데이터를 면적 단위 VMT 추정치로 변환할 때 사용한다. HPMS방법은 일부도로 및 중심선 주행거리에 대한 차량 이동 실측치를 사용하고, 거주자와 비거주자의 차량주행거리 배분과 대상구역 안과 밖을 통행하는데 있어 발생할 수 있는 문제점을 해결할 수 있는 장점이 있다. 그러나 입력자료로서 대상구역 내 모든 도로에 대한 중심선 거리를 요구하는 단점이 있다.

2. 차량주행거리 산정 방법론관련 시사점

1) 차량주행거리 추정 오차발생 원인

RKumapley and Fricker(1996)은 교통량 기반 차량주행거리 산정방법(traffic count-based model)과 비교통량 기반 차량주행거리 산정방법(non-traffic count-based model)의 한계점을 제시하고 있는데, 특히 교통량 기반 차량주행거리 산정방법에 의한 추정 결과의 오차는 표본추출 과정에서 발생할 수 있으며, 이를 개선하기 위해

계층화, 표본크기 및 조사구간 결정 등 논리적인 표본추출이 필요함을 강조하였다. Gadda et al.(2007)은 차량 주행거리 산정 시 필수적인 교통량 자료, AADT 추정의 오차발생 원인을 factor(일 변동계수, 월 변동계수 등) 산정오류, 시·공간적 오류 및 기타오류로 제시하였다. 이에 검지기 자료를 활용할 경우, AADT 추정의 오차는 대부분 공간적 오류(단위구간 선정)에 의해서 발생할 것으로 판단된다. 이에 적절한 단위구간 선정기준 마련이 필요할 것으로 판단된다.

2) 단위구간 설정 방법

FHWA(2012)에서는 HPMS방법으로 차량주행거리 추정을 위한 sampling 방법을 제시하고 있다. 여기에서는 단위구간(TOPS, table of potential sample)이 중요한데, 설정한 단위구간의 수가 표본크기를 결정하는 주요 변수로 활용되기 때문이다. 단위구간은 동일한 특성을 갖는 구간으로서, AADT, 도로등급, 도시화구분, 직진차로수, Facility type을 기준으로 설정하는데, 이 5가지 기준을 모두 충족하는 구간을 단위구간으로 설정한다. 즉, 교통류나 도로 기하구조 특성을 고려한 단계적 단위구간 설정방법을 제시하고 있다. Lim(2005)은 일한국도의 교통조사를 위한 구간설정에 있어 AADT, 점두시간교통량, 도시부 유출입 구간, 방향별 교통량, 중차량비, 속도, 밀도, V/C를 변수로 선정하여 단위구간을 분류한바 있다.

3) 표본크기 결정 및 표본추출 방법론

FHWA(2012)은 HPMS방법으로 차량주행거리 추정을 위한 표본크기와 표본추출 과정을 제시하고 있다. 여기에서는 도로기능별 AADT 범위에 따라 12개 표본그룹을 설정하였는데, 표본그룹 내 AADT의 변동(variation), 신뢰구간(confidence intervals) 및 정확도(precision level), 표본그룹 내 가능한 단위구간(TOPS) 개수에 따라 표본수가 결정된다. Frawley(2007)은 Local street의 차량주행거리 추정 정확도를 높이기 위한 교통량 조사지점 선정과정을 제시한바 있는데 교통량 조사지점은 임의 표본추출(random sampling)방법을 적용하여 선정하고 조사지점 수는 표준오차(standard error)를 기준으로 산정하였다. 그러나 Frawley(2007)은 교통량 조사지점 수에 따른 차량주행거리 추정치의 오차율 검증은 하지 못하였으며, 도로의 기능구분 없이 임의 표본추출에 의존하여 표본에서의 교통량 가중을 반영하지 못하는 한계를 갖고 있다.

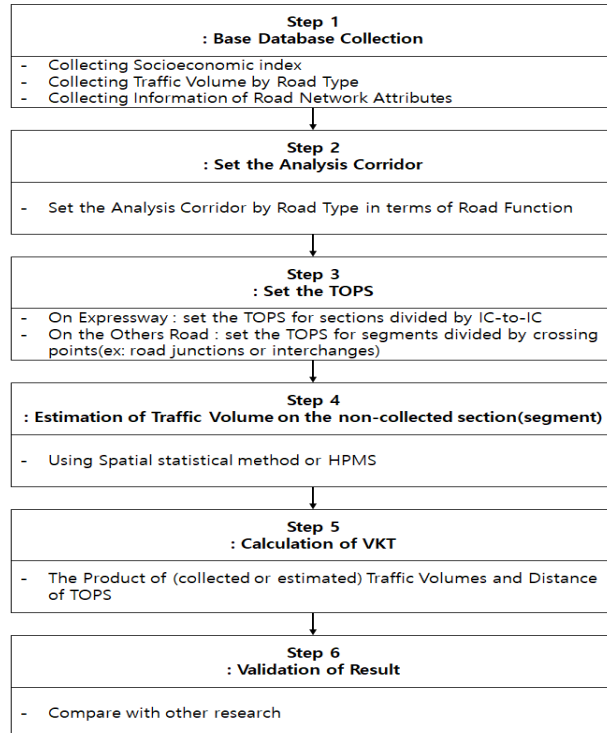
4) 교통량 추정 방법

Kim(2010)은 공간통계기법인 Kriging을 이용하여 교통량을 추정하였는데, 이를 위해 수집된 교통량 자료 간 공간적 상호관계와 연속성을 파악하기 위하여 variogram을 설정하였다. variogram은 일정한 거리에 있는 일정거리 만큼 떨어진 두 데이터간의 차이를 제공한 것의 기댓값이며, 데이터들의 유사성을 나타내는 척도 역할을 한다. variogram을 위해서 동일한 위치에 있는 표본지점 간 존재하는 분산값(nugget), 공간적 자기상관성이 나타나지 않는 한계지점(sill)과 한계지점(sill)까지의 수평거리로 표본지점 간 공간적 의존성이 나타나는 범위값(range)으로 표현된다. 이 외에도 최근 공간통계기법을 이용한 교통량 추정 연구가 많은데, Selby and Kockelman(2011)은 variogram 모델 유형별·적용한 거리산정 기준별로 구분하고 범용 kriging을 이용하여 AADT를 추정하였으며, Wang and Kockelman(2009)은 단순 kriging을 이용하여 AADT를 추정, Eon et al.(2006)은 범용 kriging을 이용하여 AADT를 추정한 바 있다. 최근 교통망에서의 교통량 수집 장비의 보급으로 교통량 미수집지점(또는 구간)의 교통량 추정을 위해 공간통계기법이 많이 활용되고 있는 것으로 보인다. 한편, 공간통계기법 적용 시 거리산정 기준방법에 따라 euclidean distance 또는 network distance로 산정이 가능한데, Selby and Kockelman(2011)에서는 이 두 방법 간 AADT 추정 오차율 차이는 거의 없는 것으로 밝힌바 있다.

이를 볼 때, 자료 구축이 상대적으로 용이한 euclidean distance로 거리를 산정하는 것이 분석의 효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

Ⅲ. 차량주행거리 산정방법론 정립

차량주행거리를 산정하는 방법은 교통량 자료 기반(traffic count-based model) 방법과 비교통량 자료 기반(non-traffic count-based model) 방법이 있다. 본 논문에서는 Kumapley and Fricker(1996)에서 상대적으로 정확성이 높다고 알려져 있는 교통량 자료 기반방법을 사용하였다. 특히 도시부에서는 검지기를 통해 교통량 자료가 수집되고 있기 때문에 이를 활용하는 방법을 적용하는 것이 정확성 측면에서 더 합리적이라고 판단된다. 다만, 교통량 자료 기반 차량주행거리 산정에 있어 분석 대상지역의 모든 도로구간에서 교통량 자료가 수집되는 것이 아니기 때문에 교통량 미수집 구간의 교통량 자료 추가 수집 및 교통량 추정과정이 요구된다. 이에 본 연구에서는 공간통계기법을 적용하여 분석 대상지역 내 교통량 미수집 구간의 교통량을 추정하고 이를 기반으로 차량주행거리를 산정하였다. 이 과정은 크게 6단계로 나누어 볼 수 있다. 우선, 분석 대상지역 내 수집 가능한 교통량 자료와 교통량 미수집 구간의 교통량 추정을 위한 사회경제지표 및 도로속성정보 등으로 기초DB를 구성하였다(Step 1). 그리고 기초DB를 이용하여 분석 대상지역 내 교통축을 설정하고(Step 2), 각 교통축 별 단위구간을 설정하였다(Step 3). 이후 단위구간별로 (교통량 자료가 수집되는 단위구간 대상) 교통량 산정 또는 (교통량 미수집 단위구간 대상) 교통량 추정(Step 4)과정을 거쳐, 차량주행거리를 산정(Step 5)하고, 최종적으로 산정된 차량주행거리 결과를 검증(Step 6)하였다(<Fig. 1> 참고).



〈Fig. 1〉 VKT estimation process

1. 기초DB 구축

기초DB는 차량주행거리 산정을 위한 교통축 설정, 교통축 내 단위구간 설정, 단위구간별 교통량 추정으로 이루어지는 이후의 전 분석 과정을 위한 필요자료들로 구성된다. 여기에는 도로연장, 위치(좌표), 차로수와 같은 도로의 물리적 속성자료와 교통량 자료와 같은 교통류 속성자료가 포함된다. 또한 교통량 미수집 구간의 교통량 추정을 위한 사회경제지표, 예컨대, 도로의 기능 및 등급구분, 제한속도, 자동차전용도로 유무, 버스전용차로 유무, 일방통행 유무, 해당 도로의 위치에 기반한 행정구역의 인구수 등과 같은 자료도 포함된다.

1) 도로 물리적 속성자료

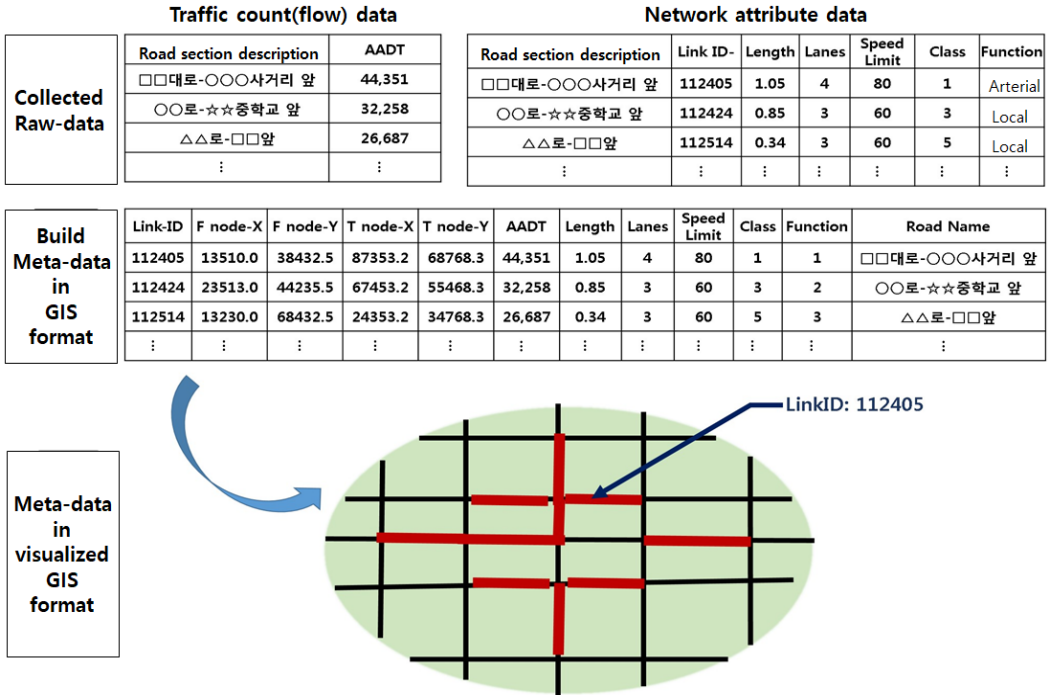
도로의 물리적 속성자료 중 차량주행거리 산정과 가장 직접적인 영향이 있는 자료는 도로연장이다. 기본적으로 차량주행거리 산정에 있어 차량이 이동한 거리의 합을 계산해야 하는데, 차량의 이동거리는 도로의 연장과 같다고 볼 수 있기 때문이다. 도로연장 자료는 KTDB가 제공하는 교통주제도와 국토교통부에서 제공하는 ITS표준노드링크자료를 활용하였다. 각기의 활용자료는 도로연장 외 부수적으로 차로수, 위치(디지털정보로 구성된 도로속성자료는 링크단위로 분절되어 구성되기 때문에 ‘위치’자료는 링크 중심점의 좌표와 같음) 등 도로의 물리적 속성자료도 함께 제공된다. 이들 자료는 ITS표준노드링크체계에 맞추어 링크단위로 구축하였다.

2) 교통류 속성자료

교통량 자료 기반 차량주행거리 산정방법(traffic count-based model)에서 교통량 자료는 도로연장과 함께 필수적인 자료이다. 국내 6대광역시에서는 ITS시스템이 구축되어 차량검지기를 통해 교통량 자료가 수집된다. 뿐만 아니라, 6대광역시에서는 자체적으로 현장조사를 통해 교통량 자료를 수집하고 있다. 본 연구에서는 이 두 가지 자료(ITS 차량검지기 자료와 광역시 자체 현장조사 자료)를 혼합하여 교통량 자료를 수집하였다. 수집된 교통량 자료는 ITS표준노드링크체계에 맞도록 재구축하였으며, 조사지점과 동일한 위치의 단위구간의 교통량이 된다.

3) 교통량 추정을 위한 메타데이터(Meta-Data)

상기한 도로 속성자료와 교통류 자료는 ITS표준노드링크체계에 맞추어 GIS data 형태의 메타데이터(meta-data)로 구축하였다. 이는 교통량 미수집 구간의 교통량 추정 시 공간통계기법을 사용하기 위한 필수 작업으로서, 교통량이 수집되는 구간(링크)과 미수집 구간 간 공간적 상호연관성을 검토하기 위한 기반자료가 된다. 공간통계기법에서는 공간적 자기상관성이 나타나지 않는 한계지점(sill)과 표본지점 간 공간적 의존성이 나타나는 범위값(range)으로 한계지점(sill)까지의 거리를 측정하여야 하는데, 이를 위해서 GIS data 형태의 메타데이터 구축이 필수적이라고 판단하였다.

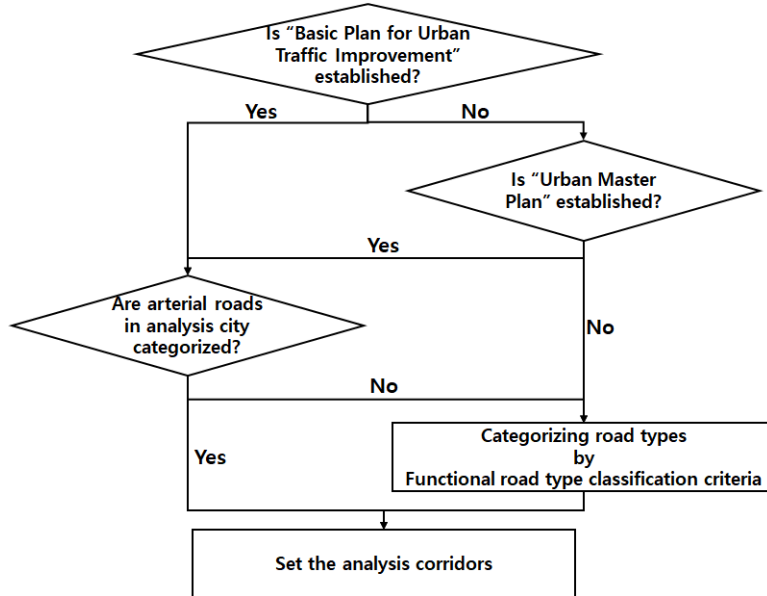


〈Fig 2〉 Example of building a meta-data for estimation traffic volumes on non-collected sections

Data source: KOTI(2014)

2. 교통축 설정

교통축 설정 과정은 차량주행거리 산정 대상도로를 설정하는 단계이다. 도시지역 내 도로위계구분상의 집분산도로 수준까지 관련 자료획득이 어려워 집분산도로 수준까지 차량주행거리를 산정하는 것은 현실적으로 불가능에 가깝다. 이에 적절한 기준으로 차량주행거리 산정 대상 도로 및 교통축을 선별하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 도시지역 내 집분산도로를 제외한 간선도로(도시고속화도로(urban expressway), 주간선도로(main-arterial), 보조간선도로(sub-arterial))만을 차량주행거리 산정 대상으로 설정하였다. 단, 도로의 기능구분은 도로의 물리적 속성과는 별개로 기능적 속성으로 구분되며, 도로의 기능적 속성은 분석대상 도시 내 교통량 처리량 또는 도시계획상 해당 도로에 부여(설정)된 정책적 역할(기능)에 따라 나뉘는 것으로 가정하였다. 이에 각 도시마다 명목상·실질적 도로의 기능이 부여된 도시교통정비계획(Basic Plan for Urban Traffic Improvement)이나 도시기본계획(Urban Master Plan)에 준하여 각 분석 대상도시 내 도로 기능구분을 하였다. 도시교통정비계획이나 도시기본계획으로 도로 기능구분이 명확하지 않은 경우에는 『도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설-일부개정(MOLIT(2012))』의 ‘도시부 도로 특성’ 중 ‘교차로 최소간격(Min. intersection spacing offset)’, ‘설계속도(design speed)’, ‘중앙분리유형(direction separation)’ 기준을 통해 도로기능구분을 하였다. 이 3가지 기준으로 도로기능 구분 결과는 다시 ‘도로전체길이백분율(Percent ratio of a route(corridor) length to total road length, %)’과 ‘도로 최소폭(Min. width, m)’으로 검증하였다.



〈Fig. 3〉 Flow chart for deciding the analysis corridors

〈Table 1〉 Applicable criteria for functional classification with respect to characteristics of urban road

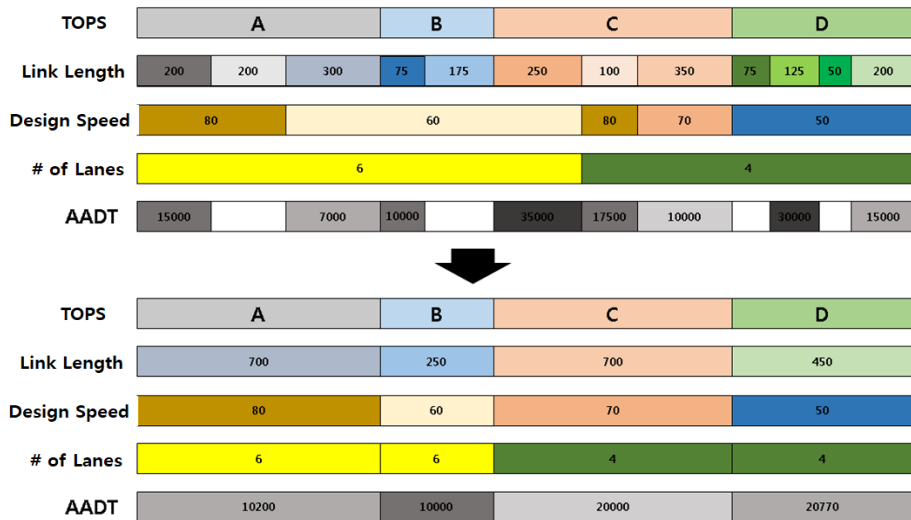
Criteria	Urban expressway	Main-Arterial	Sub-Arterial	Distributed Road	Local Road	Application way in this study
Percent ratio of a route(corridor) length to total road length (%)	5~10		10~15	5~10	60~80	used for validation of functional road type classification
Min. Intersection Spacing Offset (km)	1.00	0.50~1.00	0.25~0.50	0.10~0.25	0.03~0.10	used for functional classification
Design Speed (km/h)	100	80	60	50	40	used for functional classification
Min. width (m)	-	35	25	15	8	used for validation of functional road type classification
Direction Separation	Separated with median	Separated with median	separated / non-separated	non-separated	non-separated	used for functional classification

Data source: MOLIT(2012)

3. 단위구간 설정

단위구간(TOPS, table of potential sample)은 같은 성격의 도로기능 및 속성을 가지는 구간으로 차량주행거리를 산정하기 위한 가장 기초적인 도로구간이다. KOTI(2013)에서는 단위구간 구분 기준은 도로기하구조 특성 기준에 의한 구분법 보다 신호교차로 기준 구분이 더 우수한 결과를 보이는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 교통축으로 설정한 도시지역 내 간선도로인 도시고속화도로(urban expressway), 주간선도로(main-arterial), 보조간선도로(sub-arterial)를 대상으로 신호교차로 기준으로 단위구간을 구분하였으며, ITS표준노드링크체계의 개별 링크별로 구축된 기초DB를 단위구간 체계로 변환하였다. 이 때 1개의 단위구간이 ITS표준노드링크체계 상 2개 이상의 개별 링크로 구성될 수 있는데, 동일 단위구간 내 개별 링크의 교통량 자료

(교통류 속성)가 상이할 경우에는 개별 링크의 거리가중평균교통량을 해당 단위구간의 교통량으로 설정하였다. 또한 동일 단위구간 내 개별 링크의 도로 속성자료가 상이할 경우에는 해당 단위구간을 구성하는 개별 링크들 중 지배적(dominated)인 속성을 해당 단위구간의 속성으로 부여하였으며, 이 때 개별 링크들 간 지배 성향여부는 거리를 기준으로 구별하였다.



〈Fig. 4〉 Example of process for setting TOPS

4. 교통량 미수집 구간의 교통량 추정

본 논문에서는 교통량 미수집 단위구간의 교통량 추정 시 공간통계기법인 회귀크리깅을 이용하였다. 회귀크리깅은 회귀접근법과 크리깅을 결합한 방법으로 회귀모형보다 정확도를 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 회귀크리깅은 회귀분석 단계와 크리깅 단계로 나누어 수행하였다.

1) 회귀크리깅(Regression Kriging)

회귀크리깅은 설명변수로 설명 가능한 공간적 경향성을 회귀식으로 추정하고 잔차(residual)에 대해서 크리깅을 이용하는 방법이다. 공간통계기법을 이용하여 공간상에서 발생하는 다양한 현상의 패턴을 모형화 할 때, 공간적 자기상관성이 존재할 경우 예측값이 편향(biased)될 수 있다. 자료에 공간적인 경향성이 없을 때는 약한 불변성(weak stationarity)을 가정하고 있는 단순크리깅(simple kriging)이나 정규크리깅(ordinary kriging)을 사용할 수 있다. 최근 자료에 공간적 경향성을 고려한 모형으로 두 개 이상의 보간법을 결합한 하이브리드 모형이 사용되고 있다(Alex B. et al., 2000). 하이브리드 모형은 다시 모형의 설명변수에 따라 3가지 유형으로 구분할 수 있는데, i) 경향성을 모형화 할 때 다른 보조변수의 이용 없이 표본지점의 좌표만을 이용하는 경우는 일반 크리깅(universe kriging), ii) 좌표값만이 아닌 다른 변수를 활용하면 외부 추이를 이용한 크리깅(KED, kriging with external drift), iii) 경향성과 잔차의 추정이 개별적으로 이루어진 다음 결과를 통합하여 예측하는 방법을 회귀크리깅(regression kriging)으로 구분한다.

$$\begin{aligned}\hat{z}(s_0) &= \hat{m}(s_0) + \hat{e}(s_0) \\ &= \sum_{k=0}^p \hat{\beta}_k \cdot q_k(s_0) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot e(s_i)\end{aligned}\quad (1)$$

$\hat{z}(s_0)$: s_0 지점에서의 회귀크리깅 예측값

$\hat{m}(s_0)$: 적합된 추이(drift)

$\hat{e}(s_0)$: 내삽된 잔차

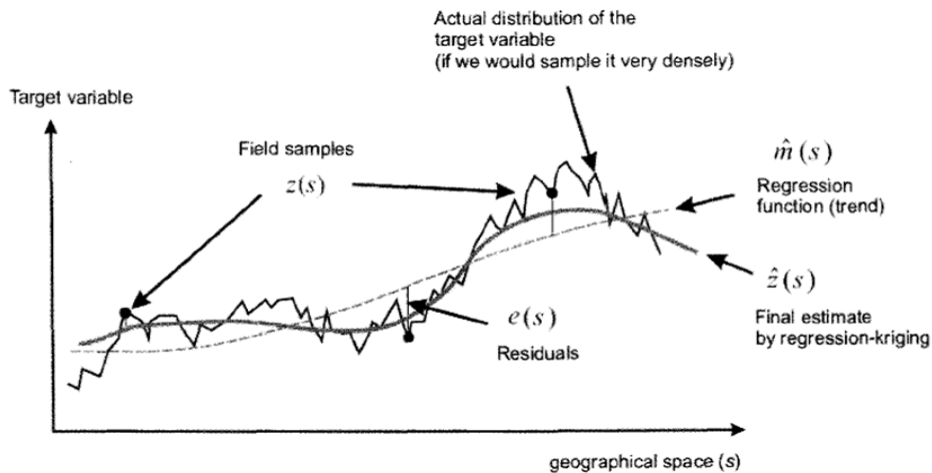
$q_k(s_0)$: s_0 지점에 대한 독립변수의 값

$\hat{\beta}_k$: 추정된 회귀모형의 계수

p : 독립변수의 개수

λ_i : 잔차의 공간적 의존 구조를 반영한 크리깅 가중값

$e(s_i)$: 표본 위치(s_i)에서의 잔차값



<Fig. 5> Conceptual graph of regression kriging

Data source: KOTI(2014) recite

회귀크리깅은 설명 가능한 변이를 회귀분석으로 추정한 후 설명되지 않은 변이(잔차)에 대해서 기댓값이 0(zero)인 단순크리깅(simple kriging)을 이용하여 내삽(interpolation)하는 방법으로, 일반 크리깅(universal kriging)이나 외부 추이를 이용한 크리깅(KED)과 내삽 방법 측면에서는 수학적으로 동일하다.

2) 회귀분석 단계

회귀크리깅의 첫 번째 단계인 회귀분석 단계는 종속변수인 교통량에 유의한 영향을 미치는 독립변수를 선별하는 단계적 회귀분석(stepwise regression)과정이다. 본 연구에서는 i) 도로기능, ii) 차로 수, iii) 제한속도, iv) 중앙분리대유무, v) 평균교차로간격, vi) 시가화여부, vii) 행정구역, viii) 주간선도로접속여부를 독립변수로 설정하고, 모든 독립변수를 고려하여 통계적으로 중요한 변수를 첨가하고 통계적으로 의미 없는 변수를 제거하며 설명력이 뛰어난 회귀모형을 선택하였다. 교통량이 수집되는 단위구간을 대상으로 관측된 교통량과 최종 선택된 회귀모형으로부터 추정된 추정교통량 간 차이(잔차)를 계산하고, 이 잔차를 크리깅 단계에서 입력 자료값 즉, 추정대상으로 사용하였다.

3) 크리깅 단계

크리깅 단계는 회귀분석 단계에서 모형 추정에 사용된 교통량 자료 참값과 모형 추정에 사용되지 않은 추정값의 차이를 줄이는 크리깅 과정이다. 크리깅(kriging)은 관심 있는 지점에서 어느 특정한 값을 알기 위해 이미 값을 알고 있는 주위 값들의 선형조합으로 그 값을 예측하는 기법이다. 크리깅은 i) 관심변수의 표본공간 정의, ii) 표본공간 내 자료수집, iii) 표본공간의 자료를 이용한 실험적 베리오그램(experimental variogram) 계산, iv) 실험적 베리오그램을 가장 잘 묘사하는 이론적 베리오그램(theoretical variogram) 모델링, v) 크리깅기법을 이용한 예측값 및 예측오차 추정의 5단계로 이루어진다.

본 논문의 표본공간은 단위구간으로 구분된 (차량주행거리 산정 대상) 6대광역시 도로 네트워크로 정의된다. 표본공간은 도로 속성정보와 사회경제지표로 구축된 메타데이터로써 단위구간별로 구축되어 있다. 이 때 표본공간 내 자료 수집 시에는 회귀분석단계에서 설정한 독립변수 외 공간정보(위도와 경도의 좌표정보)가 추가된다. 베리오그램(variogram)은 일정한 거리에 있는 자료의 유사성을 나타내는 척도로 <식 2>과 같이 분리거리 h (lag distance)만큼 떨어진 두 자료 간 차이를 제공한 것의 기댓값으로 정의된다.

$$2\gamma(h) = E[(z(x) - z(x+h))^2] \quad (2)$$

$\gamma(h)$: Variogram (데이터 간 공간적 유사성 척도)

h : 분리거리(lag distance)

x : 자료의 위치

$z(x)$: 특정 위치 x 에서의 관측값(자료값)

반베리오그램(semi-variogram)은 베리오그램의 절반에 해당하는 값이며, 분리거리 h (lag distance)만큼 떨어진 자료수가 n 개 일 때 <식 3>와 같이 계산되고, <Fig. 5>와 같이 표현된다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i+h)]^2 \quad (3)$$

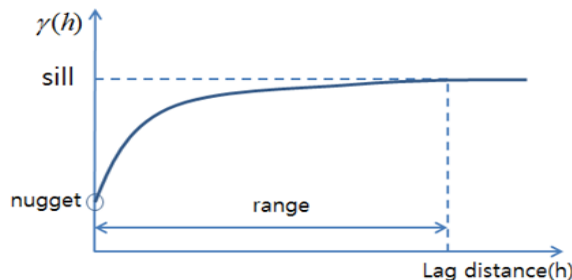
$\gamma(h)$: Variogram (데이터 간 공간적 유사성 척도)

h : 분리거리(lag distance)

n : 크리깅 예측을 위해 사용한 자료의 총 개수

x_i : 각 자료 i 의 위치

$z(x_i)$: 자료 i 의 위치 x_i 에서의 관측값(자료값)



<Fig. 6> General shape of semi-variogram with steady sill

실험적 베리오그램(experimental variogram)은 주어진 자료로부터 계산된 베리오그램이며 이를 가장 잘 대표하는 이론적 베리오그램을 추정하기 위해 필요하다. 즉, 실험적 베리오그램(반베리오그램)으로부터 문턱값(sill, 자료들이 상관관계를 나타내지 않는 일정한 반베리오그램 값), 상관거리(range, 자료들이 상관관계를 보이는 최대 분리거리), 너겟(nugget, 분리거리가 0일 때 나타날 수 있는 상수값)을 찾아내어 이론적 베리오그램 모델링에 전달해주는 과정으로 볼 수 있다.

이론적 베리오그램(theoretical variogram)은 구형모델(spherical model), 지수모델(exponential model), 가우시안 모델(Gaussian model) 등이 있는데, 본 논문에서는 일반적으로 가장 많이 사용되는 구형모델을 활용하였다. 일반적인 구형모델은 <식 4>, <식 5>와 같이 표현된다.

$$\gamma(h) = Sph_a(h) \quad (4)$$

$$\gamma(h) = C_0 Sph_a(h) = \begin{cases} C_0 \left[1.5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & \text{for } h \leq a \\ C_0, & \text{for } h > a \end{cases} \quad (5)$$

$\gamma(h)$: Variogram (데이터 간 공간적 유사성 척도)

C_0 : 공간적 자기상관성이 나타나지 않는 한계지점(문턱값, Sill)

a : 표본지점들 간 공간적 의존성이 나타나는 거리(상관거리, Range)

h : 데이터 간의 공간적 거리(분리거리)

본 논문에서 베리오그램 계산 시 활용된 자료는 회귀모형의 잔차이다. 즉, 이론적 베리오그램 모델링의 역할은 표본공간 내에서 회귀모형의 잔차들 간 공간적 유사성을 추정하는 것이다. 크리깅단계에서 추정된 단위구간별 ‘잔차 추정치’는 회귀분석 단계에서 추정된 (단위구간별) ‘교통량 추정치’와 합하여 최종적인 교통량 예측값을 도출하였다.

5. 차량주행거리 산정

각 대상도시별 차량주행거리는 회귀크리깅을 통하여 추정된 ‘단위구간별 교통량 예측치’와 ‘단위구간의 길이’를 곱하여 산정한 ‘단위구간별 차량주행거리’를 바탕으로 모든 단위구간의 합으로 계산하였다(<식 6> 참고).

$$VKT = \sum_{t=1}^n (V_t \times AD_t) \quad (6)$$

V_{tk} : 단위구간별·차종별 교통량(대/일)

AD_{tk} : 단위구간별·차종별 연장(m)

t : 표본공간 내 단위구간의 수

IV. 자료 수집

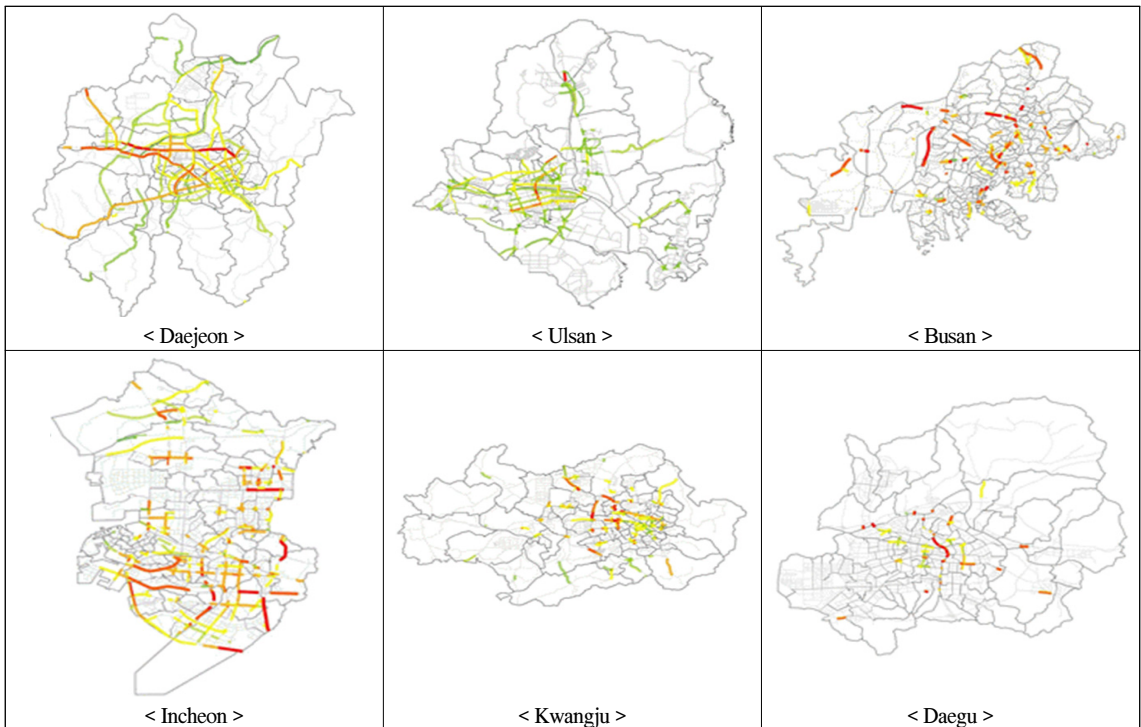
KTDB가 제공하는 교통주제도에는 도로 네트워크의 교차로 명칭, 노드유형, 회전제한 유무, 도로등급, 차로수, 제한속도, 도로번호, 자동차전용도로 유무, 버스전용차로 유무, 일방통행 유무, 교통분석존, 존 센터로이드, 행정구역 구분 정보가 제공된다. 국토해양부의 ITS표준노드링크에는 도로망을 링크단위로 구분하여 차로수, 도로등급, 도로유형, 도로번호, 도로명, 최고제한속도, 통과제한차량, 통과제한하중, 통과제한높이, 행정권역구분, 연장 등의 정보가 제공된다. 각기의 자료 중 6대광역시에 해당되는 자료를 활용하여 도로 속성

정보를 수집하였다. 교통량자료는 6대광역시의 ITS 검지기를 통해서 수집되는 자료와 현장조사 자료를 혼합·수집하였으며, 각 도시별 교통량 수집율은 <Table 2>와 같다. ITS 검지기를 통해서 수집된 교통량 자료는 각 도시별 ‘군’지역을 제외한 지역을 대상으로 2013년 1년간 수집된 데이터의 평균을 산출하여 AADT를 산출하였으며, 현장조사를 통해서 수집된 교통량 자료는 조사시기와 조사기간에 따라 시간보정, 요일보정, 월보정을 통하여 AADT를 산출하였다.

<Table 2> Conditions of traffic count data collection in 6 major cities

City	No. of links in city	by ITS system		by Field survey		Total	
		No. of links collecting traffic count1)	Collection rate2)	No. of links collecting traffic count1)	Collection rate2)	No. of links collecting traffic count1)	Collection rate2)
Daejeon	2,796	739	26.4%	229	8.2%	776	27.8%
Ulsan	2,514	175	6.9%	312	12.4%	442	17.6%
Busan3)	3,536	-	0%	145	4.1%	145	4.1%
Incheon	2,722	97	3.6%	293	10.8%	336	12.3%
Kwangju4)	3,471	123	3.5%	220	6.3%	308	8.9%
Daegu4)	2,119	-	0%	71	3.4%	71	3.4%

- 1) ‘No. of links collecting traffic count’ means that the no. of links which traffic count data can be collected based on links by MOLIT ITS standard Node-Link System.
- 2) ‘Collection rate’ means that percent ratio of no. of links collecting traffic count to no. of total links in each cities based on links by MOLIT ITS standard Node-Link System.
- 3) Raw-data collected by ITS in Busan is recorded as ‘0(zero)’ value on all of links
- 4) Raw-data collected by ITS in Daegu is recorded as ‘0(zero)’ value on all of links



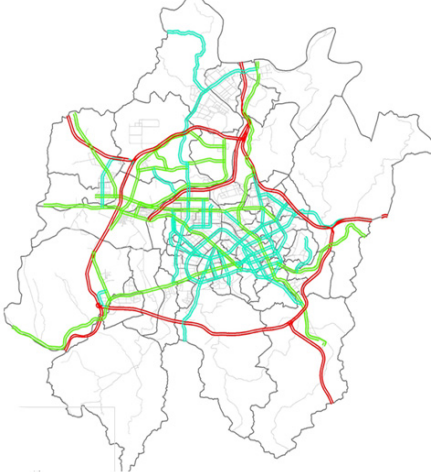
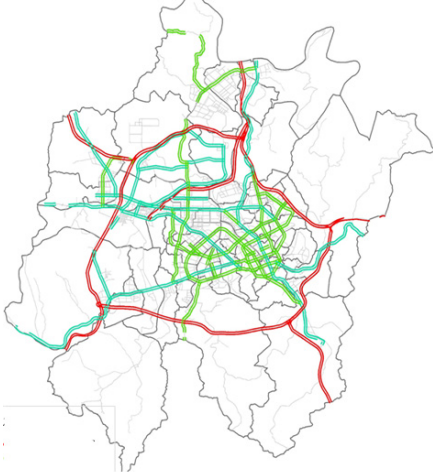
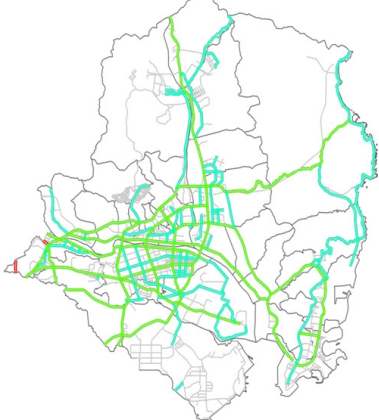
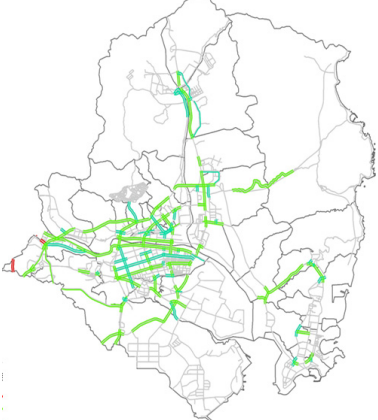
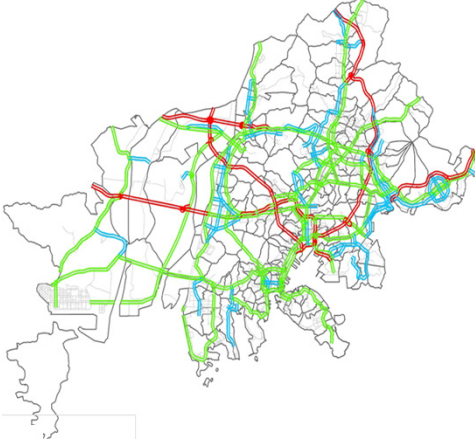
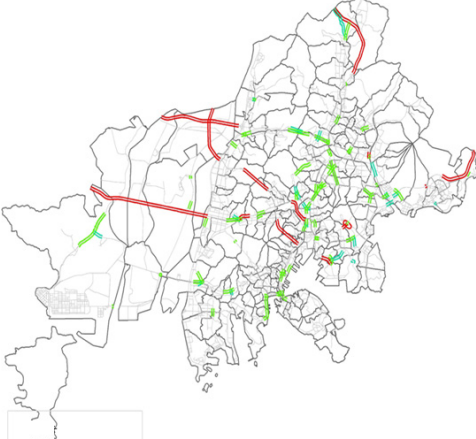
<Fig. 7> Geographical conditions of traffic count data collection in 6 major cities

제3장에서 기술한 방법으로 각 도시별 교통축 및 단위구간 설정 후 각 도시의 단위구간별 교통량 구축 현황은 <Table 3>과 같다.




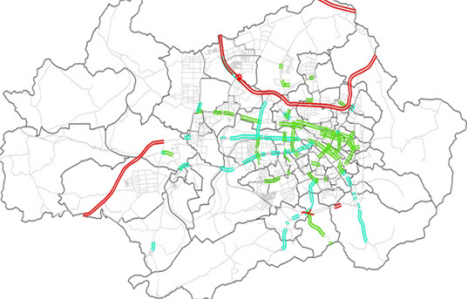
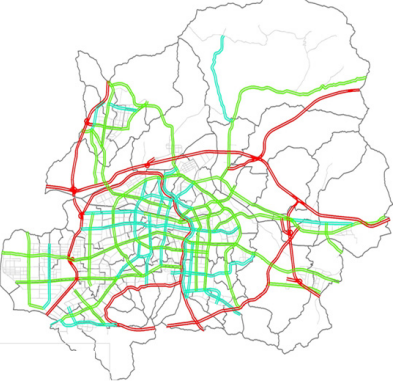
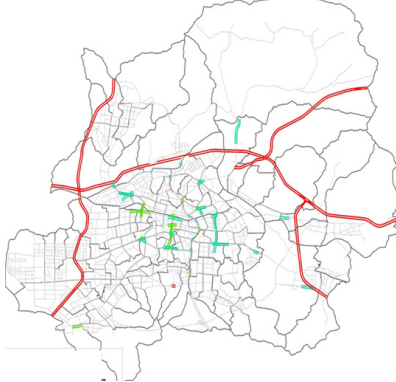
<Table 3> Conditions of traffic count data by TOPS in 6 major cities

		Daejeon			Ulsan			Busan		
No. of corridors		51			77			105		
Condition of Traffic counts collection		Total (A)	Collected (B)	Ratio (B/A)	Total (A)	Collected (B)	Ratio (B/A)	Total (A)	Collected (B)	Ratio (B/A)
	Urban Expressway	28	28	100.0	2	2	100.0	39	19	48.7
	Main-arterial	192	187	97.4	238	168	70.5	459	100	21.7
	Sub-arterial	257	200	77.8	242	83	34.3	258	25	9.6
	sum	477	415	87.0	482	253	52.4	756	144	19.0
Traffic count data		Mean (μ)	Std. (σ)	Var. (σ/μ)	Mean (μ)	Std. (σ)	Var. (σ/μ)	Mean (μ)	Std. (σ)	Var. (σ/μ)
	Urban Expressway	35,287	27,811	0.7881	32,935	22,315	0.6775	61,795	27,655	0.4475
	Main-arterial	40,088	21,750	0.5426	31,835	19,223	0.6038	56,439	21,437	0.3798
	Sub-arterial	23,838	13,708	0.5751	16,628	12,540	0.7541	30,389	11,747	0.3865
	sum	31,932	20,390	0.6385	26,855	18,579	0.6918	52,623	23,353	0.4438
		Incheon			Kwangju			Daegu		
No. of corridors		93			38			75		
Condition of Traffic counts collection		Total (A)	Collected (B)	Ratio (B/A)	Total (A)	Collected (B)	Ratio (B/A)	Total (A)	Collected (B)	Ratio (B/A)
	Urban Expressway	21	21	100.0	20	10	50.0	49	16	32.6
	Main-arterial	355	195	54.9	118	56	47.4	297	38	12.7
	Sub-arterial	476	80	16.8	211	108	51.1	201	21	10.4
	sum	852	296	34.7	349	174	49.8	547	75	13.7
Traffic count data		Mean (μ)	Std. (σ)	Var. (σ/μ)	Mean (μ)	Std. (σ)	Var. (σ/μ)	Mean (μ)	Std. (σ)	Var. (σ/μ)
	Urban Expressway	120,828	62,075	0.5137	51,761	34,180	0.6603	78,393	37,989	0.4846
	Main-arterial	44,810	17,608	0.3929	35,324	21,643	0.6127	42,159	22,488	0.5334
	Sub-arterial	29,296	11,682	0.3988	28,963	16,711	0.5770	29,884	19,676	0.6584
	sum	46,011	31,255	0.6793	32,320	20,352	0.6297	46,452	30,951	0.6663

<Table 4> Spatial distribution of TOPS with collected traffic count data(1)

City	Analysis corridors	TOPS with collected traffic count data only
Daejeon		
Ulsan		
Busan		

<Table 5> Spatial distribution of TOPS with collected traffic count data(2)

City	Analysis corridors	TOPS with collected traffic count data only
Incheon		
Kwangju		
Daegu		

V. 차량주행거리 산정 결과

1. 교통량 추정 결과

단위구간별 교통량 자료를 종속변수로 설정하고 i) 도로기능, ii) 차로 수, iii) 제한속도, iv) 중앙분리대유무, v) 평균교차로간격, vi) 시가화여부, vii) 행정구역, viii) 주간선도로접속여부를 독립변수로 설정하여, 독립변수 중 차로수, 제한속도, 평균교차로간격과 같은 연속형변수(continuous variables)는 Pearson 상관분석을, 도로기능, 중앙분리대유무, 시가화여부, 행정구역, 주간선도로접속여부와 같은 범주형변수(categorical variables)는 Spearman 상관분석을 수행하였다. 상관분석 결과 대부분의 도시에서 차로수, 제한속도가 교통량과 연관성이 높은 것으로 나타났다.

〈Table 6〉 Results of correlation analysis between independent and dependent variables

		Daejeon	Ulsan	Busan	Incheon	Kwangju	Daegu
Road Function(urban expressway)	correlation coefficient	0.063	0.025	0.188	0.366	0.138	0.191
	P-value	0.168	0.692	0.000	0.000	0.070	0.000
Road Function(main-arterial)	correlation coefficient	0.419	0.411	0.100	0.229	0.104	-0.029
	P-value	0.000	0.000	0.006	0.000	0.174	0.495
Road Function(sub-arterial)	correlation coefficient	-0.442	-0.418	-0.191	-0.456	-0.166	-0.083
	P-value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029	0.052
Median	correlation coefficient	0.477	0.453	0.131	0.404	0.339	0.072
	P-value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.092
No. of lanes	correlation coefficient	0.345	0.381	0.123	0.358	0.327	0.147
	P-value	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001
Speed limit	correlation coefficient	0.355	0.237	0.101	0.319	0.172	0.139
	P-value	0.000	0.000	0.005	0.000	0.024	0.001
Urbanization area	correlation coefficient	0.055	0.149	-0.155	-0.172	-0.014	-0.097
	P-value	0.228	0.017	0.000	0.003	0.856	0.024
Avg. spacing offset of intersection	correlation coefficient	0.159	0.040	0.207	0.126	0.156	0.143
	P-value	0.000	0.531	0.000	0.031	0.040	0.001
Administrative area_1	correlation coefficient	-0.077	0.173	0.065	0.136	0.064	-0.044
	P-value	0.092	0.006	0.076	0.019	0.404	0.304
Administrative area_2	correlation coefficient	0.179	-0.233	0.014	0.079	-0.023	-0.108
	P-value	0.000	0.000	0.709	0.173	0.760	0.012
Administrative area_3	correlation coefficient	0.002	-0.312	0.088	-0.111	-0.232	0.029
	P-value	0.968	0.000	0.016	0.057	0.002	0.504
Administrative area_4	correlation coefficient	-0.014	0.239	0.021	-0.087	0.125	0.003
	P-value	0.755	0.000	0.557	0.136	0.101	0.937
Administrative area_5	correlation coefficient	-0.035	-	0.077	0.024	0.017	0.023
	P-value	0.439	-	0.034	0.676	0.820	0.586
Administrative area_6	correlation coefficient	-	-	0.093	0.037	-	-0.038
	P-value	-	-	0.010	0.526	-	0.374
Administrative area_7	correlation coefficient	-	-	-0.052	-0.050	-	0.197
	P-value	-	-	0.156	0.387	-	0.000
Administrative area_8	correlation coefficient	-	-	-0.064	-0.211	-	-
	P-value	-	-	0.081	0.000	-	-
Administrative area_9	correlation coefficient	-	-	-0.028	-	-	-
	P-value	-	-	0.437	-	-	-
Administrative area_10	correlation coefficient	-	-	-0.036	-	-	-
	P-value	-	-	0.319	-	-	-
Administrative area_11	correlation coefficient	-	-	-0.054	-	-	-
	P-value	-	-	0.139	-	-	-
Administrative area_12	correlation coefficient	-	-	0.000	-	-	-
	P-value	-	-	0.993	-	-	-
Administrative area_13	correlation coefficient	-	-	-0.053	-	-	-
	P-value	-	-	0.143	-	-	-
Administrative area_14	correlation coefficient	-	-	0.019	-	-	-
	P-value	-	-	0.600	-	-	-
Administrative area_15	correlation coefficient	-	-	-0.073	-	-	-
	P-value	-	-	0.043	-	-	-
Connecting main-arterials	correlation coefficient	-0.044	-0.022	0.313	0.249	0.143	0.129
	P-value	0.335	0.728	0.000	0.000	0.060	0.003

교통량과 상관관계분석 결과를 이용하여 단계적 회귀분석(stepwise regression)방법으로 각 도시별 가장 설명력이 높은 회귀모형을 추정(1차 회귀모형 추정)하였다. 이 때 교통량 자료가 구축된 단위구간을 대상으로 (1차)회귀모형에 의한 교통량 추정치와 수집된 교통량 간 오차율을 분석하였는데, 교통량이 적은 단위구간일 수록 오차율이 크다는 것을 발견하였다. 또한 교통량이 적은 구간은 주로 도시부 외곽에 존재하고 있기 때문에 ‘도시중심지(central point)로부터의 거리’를 고려하여 회귀모형을 수정(2차 회귀모형 추정)하였다. 즉, 도시 중심지로부터의 거리를 기준으로 내부지역과 외부지역으로 구분된 별도의 회귀모형을 추정하였는데, 이를 위해서는 내부지역과 외부지역 모두 회귀모형 추정이 가능한 적정 샘플수가 확보되어야 하므로 인천, 대전, 울산만을 대상으로 하였다. 또한 이들 3개 도시는 중심지로부터의 거리에 따른 (1차 회귀모형에 의한)오차율의 분포를 검토하여 급변지점을 내부지역과 외부지역으로 나누는 임계점으로 설정하였다. 최종적으로 추정된 각 도시별 회귀모형은 <Table 7>과 같다.

<Table 7> Results of estimation of regression model for 6 major cities

	Daejeon		Ulsan		Busan	Incheon		Kwangju	Daegu
	Inner area	Exterior area	Inner area	Exterior area		Inner area	Exterior area		
Y-intercept	7.491 (27.749)	8.479 (400.91)	9.609 (58.603)	6.485 (4.503)	10.468 (-68.058)	9.506 (71.793)	10.655 (76.362)	-8.203 (-21.401)	8.586 (47.689)
Urban expressway	-1.310 (-6.612)	-	-	-	-	1.734 (8.856)	-	-	0.994 (8.524)
Main-arterial	0.282 (4.160)	0.607 (38.842)	-	-	-	0.317 (4.793)	-	-	-
Sub-arterial	-	-	-0.444 (-4.350)	-1.071 (-3.361)	-0.508 (-4.507)	-	-0.627 (-3.070)	-	-
No. of lanes	0.129 (0.328)	0.088 (15.935)	0.117 (4.742)	-	0.060 (-2.643)	0.125 (6.535)	-	-0.107 (-4.130)	0.231 (9.369)
Speed limit	0.021 (4.211)	-	-	0.054 (2.399)	-	-	-	-0.018 (-3.829)	-
Median	-	1.449 (131.17)	-	-	-	-	-	-	-
Urbanization area	0.421 (4.525)	-	-	-	-	-	-	-	-
Avg. spacing offset of intersection	0.470 (7.759)	-	-	-	-	-0.200 (-3.251)	-	-	-
Connecting main-arterials	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Administrative area	Yusonggu :-0.585 (-8.184)	-	Bukgu :-0.709 (-6.510)	-	-	Namgu :0.218 (2.862) Bupyeonggu :0.172 (2.429)	-	Donggu :-0.332 (-1.972) Bukgu : 0.357 (2.822)	-
R^2 / adj R^2	0.476 / 0.467	0.771 / 0.714	0.367 / 0.359	0.469 / 0.420	0.213 / 0.202	0.438 / 0.426	0.420 / 0.376	0.234 / 0.216	0.702 / 0.685
MAPE(%)	48.5		71.5		53.3	38.7		83.5	31.5

2. 차량주행거리 산정 결과

차량주행거리 산정 전에 회귀모형을 통해 추정된 교통량 구축 단위구간의 잔차로부터 크리깅을 이용하여 교통량 미구축 단위구간의 잔차를 추정하였다. 크리깅으로 추정된 교통량 미구축 단위구간의 잔차와 회귀모형을 통해 추정된 교통량 추정치를 합하여 최종적으로 교통량 미구축 단위구간의 교통량을 추정하였다. 각 도시별 차량주행거리 산정 결과는 <Table 8>과 같다. 회귀크리깅을 이용한 차량주행거리 추정결과의 적절성 검토를 위해 FHWA의 HPMS방법을 적용하여 추정된 차량주행거리와 비교하였다. HPMS방법과 비교 결과

대상도시별 전체 도로 대상 $\pm 15\%$ 이내의 차이를 보였다. HPMS방법도 현재 사용되고 있는 방법임을 감안할 때 회귀크리깅에 의한 차량주행거리 산정 결과는 정확성 여부와는 별개로 적절한 값임을 알 수 있었다.

<Table 8> Results of estimation of traffic count and VKT using regression kriging

City	Category by function	No. of TOPS	No. of TOPS's with un-known traffic count	Sum of distance of TOPS's with un-known traffic count (km)	Avg. traffic count (veh/day)	Std. of traffic count	Avg. VKT (veh · km/day)	Std. of VKT	observed VKT (veh · km/day)	estimated VKT (veh · km/day)	Total VKT (veh · km/day)
Daejeon	Total	477	62	30.6	21,228	6,587	10,297	12,583	10,363,963	638,444	11,002,407
	Urban expressway	28	0	-	-	-	-	-	3,692,825	-	3,692,825
	Main-arterial	192	5	2.7	18,679	5,558	8,694	3,579	4,599,748	43,471	4,643,218
	Sub-arterial	257	57	27.9	21,451	6,666	10,438	13,088	2,071,391	594,973	2,666,364
Ulsan	Total	482	229	130.5	15,935	8,645	9,236	11,012	5,494,390	2,115,069	7,635,613
	Urban expressway	2	0	-	-	-	-	-	153,787	-	153,787
	Main-arterial	238	70	48.0	24,038	9,483	16,312	16,066	4,596,101	1,141,861	5,737,962
	Sub-arterial	242	159	82.5	12,367	5,165	6,121	5,505	744,502	973,208	1,743,864
Busan	Total	756	612	319.1	42,640	12,212	22,852	22,104	7,908,754	13,985,456	21,894,210
	Urban expressway	39	20	33.1	46,109	4,515	76,581	47,599	3,205,994	1,531,626	4,737,620
	Main-arterial	459	359	187.6	51,847	11,311	27,068	19,026	4,233,293	9,717,298	13,950,591
	Sub-arterial	258	233	98.4	28,156	2,121	11,745	9,078	469,467	2,736,532	3,205,999
Incheon	Total	852	556	271.9	28,836	10,043	14,159	13,374	14,716,113	7,872,520	22,588,633
	Urban expressway	21	0	-	-	-	-	-	7,460,509	-	7,460,509
	Main-arterial	355	160	93.0	40,973	9,236	22,732	20,664	5,885,159	3,637,191	9,522,350
	Sub-arterial	476	396	178.9	23,932	4,858	10,695	6,136	1,370,445	4,235,329	5,605,773
Kwangju	Total	349	175	98.8	24,780	6,778	15,210	21,245	4,716,174	2,661,708	7,377,882
	Urban expressway	20	10	22.1	36,658	9,259	82,378	38,552	1,553,504	823,784	2,377,288
	Main-arterial	118	62	31.4	25,284	5,684	13,179	11,367	1,703,030	817,083	2,520,112
	Sub-arterial	211	103	45.3	23,324	5,946	9,911	9,400	1,459,641	1,020,841	2,480,482
Daegu	Total	547	472	285.3	35,106	23,374	19,297	32,092	6,517,857	11,032,689	17,550,546
	Urban expressway	49	33	44.0	72,454	21,589	92,327	71,989	5,176,460	3,046,776	8,223,235
	Main-arterial	297	259	157.4	35,983	16,785	22,083	21,661	1,086,261	5,719,524	6,805,786
	Sub-arterial	201	180	84.0	26,997	12,884	12,591	10,555	255,136	2,266,389	2,521,525

〈Table 9〉 Comparison between Regression kriging and HPMS

City	Category by function	Length (km)	Results of estimating VKT (veh · km/day)				
			Regression kriging (A)	HPMS (B)	(A-B) / B	HPMS by road function (C)	(A-C) / C
Daejeon	Total	325.3	11,002,407	10,554,784	-5.7%	11,096,435	-5.1%
	Urban expressway	84.3	3,692,825	2,974,694	-10.4%	3,692,825	0.0%
	Main-arterial	121.0	4,643,218	4,783,130	-4.7%	4,704,730	-3.1%
	Sub-arterial	120.0	2,666,364	2,796,960	-0.3%	2,698,881	-14.0%
Ulsan	Total	331.8	7,635,613	7,862,907	4.2%	8,333,831	-0.8%
	Urban expressway	3.6	153,787	118,566	24.1%	153,787	0.0%
	Main-arterial	202.2	5,737,962	5,973,392	-2.9%	6,026,794	-1.3%
	Sub-arterial	126.1	1,743,864	1,770,948	-4.7%	2,153,250	-1.2%
Busan	Total	456.4	21,894,210	20,647,473	12.8%	23,992,361	-10.9%
	Urban expressway	82.5	4,737,620	3,902,085	12.5%	5,354,140	-10.1%
	Main-arterial	259.6	13,950,591	13,521,785	15.3%	15,263,373	-11.7%
	Sub-arterial	114.3	3,205,999	3,223,603	10.6%	3,374,848	-10.9%
Incheon	Total	527.4	22,588,633	23,944,742	6.0%	23,804,351	-8.7%
	Urban expressway	68.9	7,460,509	8,325,049	21.4%	7,460,509	-11.5%
	Main-arterial	232.0	9,522,350	9,994,792	3.2%	9,822,711	-8.6%
	Sub-arterial	226.5	5,605,773	5,624,901	-0.5%	6,521,130	-5.0%
Kwangju	Total	226.6	7,377,882	6,540,361	-2.9%	8,283,660	-8.4%
	Urban expressway	53.6	2,377,288	2,113,180	29.7%	2,643,423	0.0%
	Main-arterial	77.8	2,520,112	2,184,935	-3.9%	2,855,512	-4.8%
	Sub-arterial	95.2	2,480,482	2,242,246	-1.5%	2,784,726	-19.0%
Daegu	Total	384.5	17,550,546	17,206,383	2.0%	18,970,803	-7.5%
	Urban expressway	107.8	8,223,235	7,983,021	3.0%	8,746,432	-6.0%
	Main-arterial	183.2	6,805,786	6,709,334	1.4%	7,713,295	-11.8%
	Sub-arterial	93.5	2,521,525	2,514,028	0.3%	2,511,075	0.4%

VI. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 6대광역시를 대상으로 차량이 대상 도시에 실제로 주행한 거리인 차량주행거리(VKT, Vehicle Kilometers Traveled)를 산정하기 위해 교통량 부재 구간의 교통량을 추정하였다. 이를 위해 신호교차로 기준으로 단위구간을 설정하고, 단위구간별 추정교통량 및 차량주행거리의 정확도를 향상시키기 위해 회귀크리깅을 이용하여 교통량을 추정하였다. 교통량 추정 시 ‘도시 중심부에서의 거리’ 라는 변수를 이용하여 도시 중심부에서의 거리별 수집교통량을 분석해 거리의 따른 교통량 변화정도가 큰 지점을 기준으로 분석범위를 이원화하고 구역(내부, 외부)별 회귀모형을 추정하였다. 회귀크리깅을 통한 차량주행거리 추정결과와 FHWA의 HPMS방법을 적용하여 추정한 결과를 비교하였을 때 회귀크리깅에 의한 차량주행거리 산정 결과는 적절한 값을 알 수 있었다.

그러나 현재 전체 링크에 대한 교통DB수집링크의 비율을 나타내는 DB수집율과 같은 지표를 통해서 지역별 수집현황을 나타내고 있으나, 수집구역에 대한 밀집도는 파악하기 어려워 교통DB수집분포도와 공간통계기법이 기여하는 오차율 감소도의 연관성을 규명하기 어려운 측면이 있다. 향후 도시별 수집지점의 공간적 분포도를 나타내는 방안과 교통량 수집률 및 수집지점의 공간적 분포정도에 따른 공간통계기법의 교통량 추

정 측면의 유용성에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 아울러 대도시에서의 교통량 수집 장비 확대 보급으로 실제 교통량 관측데이터를 확보하는 제도적 보완도 시급하다고 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

이 논문은 2015년도 서울시립대학교 연구년교수 연구비에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

- Korea Transportation Safety Authority(2012), 2011 Vehicle Kilometers Traveled(VKT) Analysis.
- Kumapley R. K. and Fricker j. D.(1996), "Review of Methods for Estimating Vehicle Miles Traveled," *Transportation Research Record*, vol. 1551.
- Gadda S., Kochelman K. and Maggon A.(2007), "Estimates of AADT: Quantifying the Uncertainty," presented at the World Conference on Transportation Research(WCTR).
- FHWA(Federal Highway Administration)(2013), "Highway Performance Monitoring System Field Manual".
- Lim S. H.(2005), "Classification Method of Homogeneous Road Sections for Traffic Survey of National Highway," *Seoul Studies*, vol. 6, no. 3, pp.127-135.
- Frawley W. E.(2007), "Random Count Site Selection Process for Statistically Valid Estimations of Local Street Vehicle Miles Traveled," *Transportation Research Record*.
- Kim H. Y.(2010), "A Geostatistical Approach for Improved Prediction of Traffic Volume in Urban Area," *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, vol. 13, no. 4, pp.138-147.
- Selby B. and Kockelman K.(2011), "Spatial Prediction of AADT in Unmeasured Location by Universal Kriging," Transportation Research Board 90th Annual Meeting, no.11-1665.
- Wang X. and Kockelman K. M.(2009), "Forecasting Network Data," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2105, no. 1, pp.100-108.
- Eom J. K., Park M. S., Heo T. Y. and Huntsinger L. F.(2006), "Improving the prediction on annual average daily traffic for nonfreeway facilities by applying a spatial statistical method," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1968, no. 1, pp.20-29.
- MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure and Transportation)(2012), "Guide book for Structure and facility of Highway-Revised Version".
- KOTI(Korea Transport Institute)(2013), Estimation of VKT Estimation in Kwacheon City.
- Alex B., McBratney, Inakwu O. A. Odeh, Thomas F. A. Bishop, Marian S. Dunbar, Tamara M. Shatar(2000), "An overview of pedometric techniques for use in soil survey," *Geoderma*, vol. 97, Issues 3-4, pp.293-327.
- KOTI(Korea Transport Institute)(2014), Estimation of VKT Estimation using Kriging in Bucheon City.