

TCS 및 WIM 데이터를 활용한 고속도로 화물수송실적 산정 알고리즘 개발

Algorithm for Freight Transportation Performance Estimation on Expressway Using TCS and WIM Data

강 유 정* · 홍 정 열** · 최 윤 혁***

* 주저자 : 계명대학교 도시계획 및 교통공학과 석사과정

** 교신저자 : 계명대학교 교통공학전공 조교수

*** 공저자 : 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원

Youjeong Kang* · Jungyeol Hong* · Yoonhyuk Choi**

* Dept. of Transportation Eng., Kiemung Univ.

** Dept. of Transportation Research, Korea Expressway Corporation Research Institute

† Corresponding author : Jungyeol Hong, jyhong9868@kmu.ac.kr

Vol. 22 No.3(2023)
June, 2023
pp.116~130

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.3.116>

Received 31 March 2023
Revised 11 April 2023
Accepted 19 May 2023

© 2023. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

고속도로는 중장거리 지역 간을 연결하는 자동차 전용도로로 철도 및 항공 수단보다 접근성과 이동성이 우수하여 화물 수송의 중추적인 역할을 담당하고 있다. 그러나 기존의 고속도로를 이용하는 화물수송실적은 차종 구분의 혼재, 개별 화물차량의 화물적재량 파악의 어려움으로 정확한 산정에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 고속도로 온라인 데이터의 분석을 통하여 보다 신뢰성있는 화물수송실적 산정 방법론의 틀을 제시하고자 하였다. 자동요금징수시스템으로부터 수집된 데이터를 활용하여 고속도로 구간별 통행실적(대·km/일)을 도출하였으며 차량제원정보데이터와 고속 및 저속축중기 데이터로부터 차종별 화물 적재 원단위(톤/대)를 도출하였다. 본 연구는 기존에 제시되고 있지 않은 고속도로 구간별, 차종별 화물수송실적을 산정하는데 주요 목적이 있으며, 개방식 영업소, 민자고속도로 등을 모두 연계한 수송실적산정 방법을 제시하였다는데 기존 연구와의 차별성을 가진다.

핵심어 : 고속도로, 화물수송실적, 축중기 데이터, 자동요금징수시스템, 화물 적재 원단위

ABSTRACT

Expressways play pivotal roles in cargo transportation because of their superior accessibility and mobility compared to rail and air. On the other hand, there is a limit to the accurate calculation of cargo transportation performance using existing highways owing to the mixture of vehicle types and difficulty in identifying cargo loads of individual cargo vehicles. This paper presents an algorithm for calculating more reliable cargo transportation performance using big data. The traffic performance (veh·km/day) was derived using the data collected from Toll Collecting System. The average tolerance weight for each vehicle type and the cargo load unit (ton/unit) considering it was calculated using vehicle specification information data and high-speed and low-speed axis data. This study calculated the cargo transportation performance by section and type using various online integrated highway data and presented a method for calculating the transportation performance by linking open business offices and private highways.

Key words : Expressway, Freight performance, HS/LS Weight in Motion, TCS, Cargo load unit

I. 서론

교통 SOC(Social Overhead Capital) 투자 예산은 2018년 이후 지속적인 증가 추세를 나타내고 있다. 특히 도로 부문 SOC 투자액은 2016년에서 2020년까지 약 15.6% 감소하였으나 철도 부문의 SOC 투자액은 약 6.8% 증가하고 있는 추세이다(KOTI, 2021). 이러한 국내 SOC 투자액의 변화로 최근 교통수단 간 경쟁력이 화두에 오르고 있으며 신뢰성 있는 화물 수송경쟁력을 평가하기 위한 지표 개발의 필요성이 대두되고 있다.

철도, 해상, 항공은 화물 중량(톤)과 수송거리(km) 기반으로 요금을 부과하므로 화주가 화물 수송 전 입력한 해당 정보데이터들을 통해 정확한 화물 수송실적(톤, 톤·km)을 산정할 수 있다. 그러나 고속도로는 진출입 영업소간 최단거리를 기준으로 고속도로 이용 요금을 책정하여 수납하고 있으며, 각 화물차들의 적재량에 대해서는 화물 연대 및 조합, 화물운송기록 등을 통한 화물 적재량 수집이 가능하나 해당 정보는 업체의 수익과 직결되는 민감한 정보로 공개되지 않고 있다. 따라서 고속도로는 타 수단보다 접근성, 주행성 등이 우수하여 활발한 화물 수송이 이루어지는 인프라에도 불구하고 개별 화물차량들의 적재량과 통행거리에 대한 정보가 모호하여 고속도로를 통하여 이동된 정확한 수송실적(톤·km)을 알기 어렵다. 이에 본 연구에서는 화물수송경쟁력 평가를 위한 대표적인 지표인 화물수송실적을 산정하기 위하여 WIM(Weigh-in-Motion), TCS(Toll Collecting System)로부터 수집한 데이터 등 다양한 고속도로 온라인 데이터를 활용하여 화물차량의 통행량(대·km)과 화물 적재량(톤/대)을 도출하고 이를 기반으로 화물수송실적(톤·km/년)을 산정하는 방법론의 틀을 제시하고자 한다.

본 연구는 크게 4가지의 내용적 범위를 가진다. 첫째, 기존 연구 및 사례 고찰을 통해 화물 수송경쟁력 평가 지표 개발과 데이터를 활용한 화물 적재 원단위 산정의 기존 방법론을 검토하였으며, 이를 통해 고속도로 온라인 데이터를 활용한 화물수송실적 산정의 필요성을 규명하였다. 둘째, 분석에 활용한 고속도로 온라인 데이터들의 한계점을 진단하고 이를 극복하기 위한 전처리 방법을 제시하였으며, 구축된 데이터를 기반으로 화물 차종별 고속도로 통행실적(대·km/년)을 산정하였다. 셋째, 고속 및 저속 축중기의 화물차량별 무게와 차량제원정보 매칭을 통해 공차무게를 제함으로써 차종별 화물적재 원단위를 도출하고 최종적으로 고속도로 O/D 구간별 화물수송실적(톤·km/년)을 제시하였다. 마지막으로 본 연구의 한계점과 향후 연구 방향을 논의하였다.

II. 기존 연구 고찰

1. 화물 운송 평가 지표 산정

기존 연구들은 화물 운송에 대한 평가를 위하여 다양한 지표들을 제안하였다. Heo et al.(2012)의 연구에서는 도로 등급별, 톤수별 화물자동차 대수 및 수송거리를 평가지표로 선정하였으며 차종별 교통량 통계자료를 활용하여 영업용 화물차를 대상으로 한 화물 수송실적(톤·km/년)을 추정하였다. 또한 Yang et al.(2012)의 연구에서는 물류 수송 측면에서의 고속도로 효율성 평가 지표로써 도로등급별 교통수단별 화물 수송실적(톤·km), 화물자동차 통행실적(대·km), 연료소모량(l/km), 온실가스 배출량을 선정하였다. 여기서 평가지표로 선정된 화물자동차 통행실적은 링크별 배정 교통량과 평균 통행거리, KTDB 통계자료를 통한 화물 적재량 등을 이용하여 산정하였다. Oh(2017)의 연구에서는 고속도로 화물자동차 및 화물의 규모를 가늠할 수 있는 지표를 선정하였으며 HS WIM(High speed Weigh-in-Motion) 데이터를 활용하여 화물자동차 통행실적(대·km),

화물수송실적(톤·km), 화물자동차 통행효율(대·km/km), 화물 수송효율(톤·km/km) 등의 지표를 개발하였다.

이와 같이 기존 연구들은 화물차량수송대수(대/년) 또는 통행실적(대·km), 화물수송실적(톤·km), 연료 소모량, 수송 효율(톤·km/km) 등을 주요 평가지표로 선정해 왔다. 본 연구에서는 기존 연구에서 제시된 다양한 경쟁력 지표 중 타 수단에서 현재 주요 경쟁력 지표로 사용하고 있는 화물수송실적(톤·km/년)을 선정함으로써 교통수단 간 객관적인 비교를 수행하였다.

2. 화물 적재 원단위 도출

화물수송실적(톤·km/년) 산정을 위해서는 통행하는 화물자동차가 얼마만큼의 화물을 적재하고 운행하는지에 대한 정보가 필수적이다. Gomez et al.(2019)의 연구에서는 IoT 기반의 화물 무게 추적 시스템을 구축하였으며 이 시스템을 통해 화물 운송 과정에서 실시간 화물 무게의 추적이 가능하다는 것을 증명하였다. 화물 무게 추적 시스템은 화물차에 부착된 IoT 센서를 통해 화물 무게를 측정하고, 이를 서버에 전송하여 실시간으로 화물 무게, 운송경로 등을 모니터링함으로써 화물 운송 과정을 효율적으로 관리한다. Gil and Kang (2013)의 연구에서는 HS WIM으로부터 수집한 데이터를 기반으로 차종별, 요일별 총 중량의 특성을 분석하였다. 트럭의 총중량 분포 형태는 쌍봉우리형으로 나타났는데 그 이유는 당시 HS WIM은 김천, 선산 지역에 설치되어 지역에 따른 총중량 분포에 차이가 있기 때문이었다. Hwang and Lee(2010)의 연구에서는 교통량이 많은 지점에 WIM을 설치하여 화물차량의 중량 정보를 수집하고, 중량의 정확도 제고를 위해 최대 및 최저 기온에 따른 보정식을 개발하여 보정 중량을 산정하였다. Kim(2003)의 연구에서는 WIM 데이터와 동시간대 동일지점의 현장 영상 자료 비교를 통하여 개별차량의 중량 데이터를 구축하였다. Joo(2016)의 연구에서는 고속도로 영업소의 TCS (Toll Collecting System) 데이터를 활용하여 화물자동차 교통량을 집계하였으며, HS WIM 설치 지점 자료를 기반으로 화물자동차의 입·출구 영업소, 차종별 비율을 추정하였다. Jung(2006)의 연구에서는 화물통행실태조사의 설문을 통해 수집한 물동량 데이터를 활용하여 화물 물동량 O/D를 추정하였다.

화물 수송실적(톤·km/년)을 산정하기 위해서는 화물 적재량에 대한 원단위가 필수적이며 이는 WIM을 활용하는 것이 설문조사를 통한 방법보다 신뢰성이 높다는 것을 기존 문헌들을 통해 알 수 있었다. 그러나 WIM을 통해서 구축되는 하중 데이터는 차량 무게가 포함된 하중으로 대부분의 연구에서는 차량 무게를 제하지 않은 총 하중을 통해 화물 적재량을 산정해왔다는 한계가 있었다.

따라서 본 연구는 기존의 설문조사를 통한 화물수송실적 추정 방법의 한계를 극복하고자 TCS, HS/LS WIM, 차량제원정보, 통계연보, 고속도로 구간별 거리 데이터 등 다양하고 방대한 양의 온라인 데이터를 통합하고, 데이터를 기반으로 화물수송실적을 도출하였는데 차별성을 가지며 TCS 데이터에서 누락되는 개방식, 민자 고속도로 구간 등을 연계하여 교통량을 보정하는 방법, 5종 차종 구분을 12종으로 변환하고 개별 차량제원정보를 매칭시켜 총 하중에서 차량의 중량을 제한 실제 적재화물 중량을 도출하는 과정을 체계적인 방법론 구축을 통해 재정립하였다는 점에서 기존연구들과의 차별성이 있다. 고속도로 수송실적 산정을 위하여 미시적 시공간 범위로 수집 및 집계되는 TCS 통행량 데이터와 WIM 하중 데이터를 활용함으로써 다양한 분석 주기의(1일, 1개월, 1년)의 화물수송실적의 산정이 가능하다. 기존에 수행되어 오던 공로의 화물수송실적 산정은 설문조사를 통한 샘플집단의 정보를 수집하여 전수화하는 방법이 적용되어 왔으나 본 연구에서는 실시간 수집·구축되는 TCS, WIM 데이터를 활용함으로써 화물수송실적 산정 결과의 정확도를 보다 향상시킬수 있다. 더 나아가 고속도로를 주행하는 화물 차종별 적재원단위, 화물수송실적 산정 알고리즘을 체계화하여 제시함으로써 향후 고속도로 화물정책 및 관련 제도 수립, 도로운영자의 의사결정에 기여할 수 있다는 장점이 있다.

Ⅲ. 데이터 수집 및 기초분석

국토교통부에서는 2006년 이후부터 여러 분야에서 활용할 수 있도록 통합 12종의 차종 분류 기준을 정립하였으며 이는 다양한 교통분석 연구를 위한 기초 자료로써 활용되고 있다(MOLIT, 2023). 그러나 고속도로 TCS(Toll Collection System) 데이터는 5종(경차 포함 6종)으로 화물 차량과 승용 및 승합차가 혼재되어 차종이 분류되므로 3종부터 12종까지의 화물 차량을 명확히 구분할 수 있는 국토교통부 12종 기준으로 재분류할 필요성이 있다. 본 연구에서는 수집된 TCS 데이터를 활용하여 12종의 차종으로 매칭하고, 화물 차종별 영업소 O/D별 통행실적(대·km)을 집계하였다.

또한 고속도로를 주행하는 과적 차량은 도로 노면, 교량 등 도로 포장 및 시설물의 내구성에 영향을 주며, 곡선 구간 주행 시 전도·전복 사고, 악천후 기상상태에 따른 미끄러짐 사고 등 대형사고로 연결될 가능성이 있으므로 한국도로공사에서는 과적 차량을 단속하기 위하여 고속 및 저속 축중기(High/Low Speed Weight in Motion: HS/LS WIM)를 고속도로 영업소 및 본선구간에 설치하고 있다. 이렇게 축중기 데이터로부터 화물 차량의 총 중량 값을 알 수 있으므로 화물 차량 자체의 무게정보를 포함한 차량제원정보 데이터와의 매칭을 통하여 화물차종별로 화물 적재량 원단위(톤/대)를 도출할 수 있다.

그러므로, 본 연구에서 활용된 데이터는 구간별, O/D별 교통량 산정을 위한 TCS 데이터와 통계연보의 교통량 데이터, 영업소 간 거리 산정을 위한 주행거리 요금표 데이터, 화물 적재량 산정을 위한 HS-WIM 및 LS-WIM 데이터, 차종별 평균 공차 중량 파악을 위한 차량제원정보 데이터 등이며, <Table 1>과 같이 데이터의 활용목적과 시공간적 범위, 단위 등을 정의하였다.

<Table 1> Characteristics of Available Data

Data	Objective	Coverage	Unit	Class
TCS	Toll Collection	- Spatial : 586 TG - Temporal : 2021.10.18. ~ 2021.10.24. - Object : All vehicles	vehicle/day	5
Statistical Yearbook	Traffic survey statistics	- Spatial : IC to IC, IC to JC - Temporal : 2021 - Object : All vehicles	AADT (vehicle/day)	12
Mileage Table	Distance data for toll calculation	- Spatial : All Closed TG to Closed TG - Object : All TG	km	-
HS-WIM	Weight Measurement Data on High Speed	- Spatial : Installed HS-WIM System (near by Gwangju TG and Namphohang TG) - Temporal : 2021.10. - Object : All vehicles	0.01ton/vehicle	12
LS-WIM	Weight Measurement Data on Low Speed	- Spatial : Installed LS-WIM System (Cargo-only Lanes in All ICs) - Temporal : 2021.10. - Object : All vehicles	ton/vehicle	5
Vehicle Specification Information	Information about the vehicle such as Name, weight etc	- Object : Vehicles registered in KOTSA*	-	12/16

* KOTSA:Korea Transportation Safety Authority

TCS 데이터는 고속도로 통행료 징수 시스템을 통해 수집되는 데이터를 의미하며 TCS의 수납 방식은 크게 2가지로 구분된다. 창구를 이용해 서행 및 정차를 통해 통행권을 발급받아 통행료를 지불하는 수납 시스템(이하 통행권 수납)과 하이패스 카드를 삽입한 단말기(OBU)를 차량에 장착하여 무선통신을 통해 통행료를


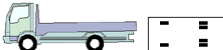






지불하는 전자요금 수납 시스템(이하 Hi-Pass)이다. Hi-Pass 데이터와 통행권 수납 데이터는 <Table 2>에서 제시된 바와 같이 각 통행별 동일한 형태로 구축되어 있으며 암호화된 차량번호, 진입일시, 진입 영업소, 진출 일시, 진출영업소, 5종, 12종, 16종 차종 구분 데이터를 포함하고 있다. 본 연구를 위하여 TCS 데이터의 시간적 범위는 고속도로 AADT의 대표성을 가지는 10월 셋째주 목요일을 포함한 2021년 10월 18일부터 2021년 10월 24일로 설정하였다.

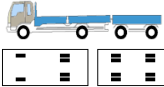


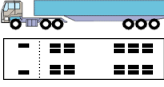
<Table 2> Structure of TCS

Secret Number of Car	Date of Enter	Name of Enter TG	Date of Advance	Name of Advance TG	Car Class		
					5	12	16
3031EAB1B031313631	20211018114900	Dongkimhae	20211018115330	Bukbusan	1	1	1
3031EAB5AC33313030	20211018110000	Bukthongyoung	20211018144841	Dongseoul	1	1	4
...
ECB6A9EBB6813939	20211018001000	Songtan	20211018005911	Seosan	5	10	15

각 차종은 축과 단위를 통해 구분되며 12종 차종 분류 체계는 아래 <Table 3>과 같다. 본 연구에서는 TCS의 5종(경차 포함 6종) 데이터를 12종으로 변환하기 위하여 차종 매칭 과정을 표를 통해 나타냈다.

<Table 3> Classification of vehicle Classes

Classes by MOLIT		Typical body and axle arrangement	Classes by TCS	
Vehicle Class	Criteria		Vehicle Class	Criteria
Class 1	a passenger car (two-axis one unit)		Class 1	[2nd axis, under 279.4mm in width] · a passenger car · Small cargo (1~2.5 tons)
Class 3	Small cargo (1~2.5 tons) (two-axis one unit)			
Class 2	Buses (16-32 seats or less) Bus (33 seats or more) (two-axis one unit)		Class 2	[2 axis, width of the wheel exceeds 279.4mm], [Lightening less than 1,800mm] · Buses (16-32 seats or less) · Medium cargo (2.5~8.5 tons) (Lubrication of 1,800mm or less)
Class 4	Medium cargo (two-axis, 2.5~8.5 tons) (two-axis one unit)		Class 3	[2 axis, width of the wheel exceeds 279.4mm, Over 1,800mm] · Bus (33 seats or more) · Medium cargo (2.5~8.5 tons) (Over 1,800mm of lubrication)
Class 5	Medium cargo (three-axis one unit)		Class 4	[3 axis] Medium cargo (3 axis one unit)
Class 6	Large cargo (4-axis 1 unit)		Class 5	[Over 4 axis] · Large cargo (4 axis 1 unit) · Large cargo (5 axis 1 unit) · a semi-trailer · Full Trailer
Class 7	Large cargo (5 axis 1 unit)			
Class 8	Semi-trailer (4-axis 2 units)			

Classes by MOLIT		Typical body and axle arrangement	Classes by TCS	
Vehicle Class	Criteria		Vehicle Class	Criteria
Class 9	Full trailer (four axis two units)			
Class 10	Semi-trailer (5 axis 2 units)			
Class 11	Full trailer (5 axis 2 units)			
Class 12	Semi-trailer (6-axis 2 units)			

* Source : Ministry of Land, Infrastructure and Transport & Korea Expressway Corporation

화물통행실적 산정에 앞서 TCS 데이터의 차종별 교통량 데이터를 검토하였으며, 그 결과는 아래 <Table 4>와 같다. 분석의 시간적 범위 동안 발생한 일 평균교통량은 약 450만대/일이며 Hi-Pass는 3,837,375대/일로 약 85%를, 통행권 수납은 676,452대/일로 약 15%를 차지하였다. 12종 차종과 미분류, 미분류(9종), 미분류(11종), 미분류(9종 or 11종), 공백 등의 데이터를 가지고 있는 것이 특징이며 미분류 교통량의 경우 전체 교통량의 약 24%를 차지하고 있다. 미분류(9종), 미분류(11종)가 나타나는 이유는 2단위의 풀 트레일러는 선미와 후미가 분리되어 있어 TCS 차종 분류 시스템에서 일부 분리된 차량으로 인식되는 것으로 확인되었다. 또한 9종과 11종에 포함된 풀 트레일러는 국내 도로 기하구조 여건상 주행이 어려운 고속도로 교통량 자체가 매우 적으므로 미분류 교통량을 분석대상에서 제외할 경우 충분한 표본 수를 확보하지 못하는 한계가 내재되어 있다. 따라서 본 연구에서는 표본 수 확보를 위해 미분류(9종)과 미분류(11종)을 미분류 카테고리 내 각각의 차종에 포함하여 분석하였다.

<Table 4> Analysis Traffic Volume of TCS

(Unit : vehicle/7day, %)

Car Class	Total (TCS)		Hi-pass		Toll Road Ticket	
	Volume	Percentage	Volume	Percentage	Volume	Percentage
Class 1	16,800,390	53.17	14,591,189	54.32	2,209,201	46.66
Class 2	378,621	1.20	369,131	1.37	9,490	0.20
Class 3	3,864,223	12.23	3,140,488	11.69	723,735	15.28
Class 4	1,117,513	3.54	739,899	2.75	377,614	7.97
Class 5	705,605	2.23	534,118	1.99	171,487	3.62
Class 6	225,802	0.71	179,481	0.67	46,321	0.98
Class 7	169,272	0.54	143,219	0.53	26,053	0.55
Class 8	12,069	0.04	10,391	0.04	1,678	0.04
Class 9	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Class 10	177,275	0.56	153,068	0.57	24,207	0.51
Class 11	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Class 12	1,311	0.00	1,018	0.00	293	0.01
Not classified	7,397,413	23.41	6,358,686	23.67	1,038,727	21.94

Car Class	Total (TCS)		Hi-pass		Toll Road Ticket	
	Volume	Percentage	Volume	Percentage	Volume	Percentage
Not classified (class 9)	222	0.00	214	0.00	8	0.00
Not classified (class 11)	327	0.00	303	0.00	24	0.00
Not classified (9 or 11)	7	0.00	7	0.00	-	-
Null	746,738	2.36	640,412	2.38	106,326	2.25
Sum (veh/7day)	31,596,788	100.00	26,861,624	100.00	4,735,164	100.00
Average (veh/day)	4,513,827	-	3,837,375	-	676,452	-

1. 고속 및 저속 축중기(HS WIM, LS WIM)

HS WIM 데이터는 고속도로 본선 상의 축중 차로를 통행한 모든 화물 차량의 일시, 축수, 차종, 총 하중, 차량번호(암호화) 등의 정보를 포함하고 있다. 본 연구에서는 현재 국내 고속도로 2곳에 설치·운영되고 있는 HS WIM(남포항 TG ~ 동경주 IC 구간과 북광산 IC ~ 광주 TG 구간)의 데이터를 활용하였으며, TCS와 동일한 시간적 범위의 2021년 10월 한달 간의 화물차량 하중정보를 대상으로 하였다. LS WIM 데이터는 최대 적재량이 4.5톤 이상인 화물 차량들에 대한 통행 영업소명, 영업소 코드, 통행 시각, 차량번호, 통행속도, 총중량 등의 정보를 가지고 있으며 모든 영업소 내 화물 차로에 설치되어 있어 표본 수 확보가 우수하다는 장점이 있다. LS WIM으로부터 수집된 차량 하중 정보는 5종(경차 포함 6종)의 차종으로 구축되나 분석데이터의 활용성을 제고시키기 위해 12종 차종 분류로 변환해야 한다. 영상 AVC 검지기는 자동 차종 분류 조사 장비(Automatic Vehicle Classification)로 차량을 12종 차종으로 분류한다. 따라서 동기간 내 LS WIM을 통과한 차량의 번호를 AVC 검지기 데이터에 저장된 차량번호와 매칭하여 5종의 차종구분을 12종으로 재분류하였다. <Table 5>와 <Table 6>는 HS WIM과 LS WIM의 원시데이터의 구조를 보여준다.

<Table 5> Structure of HS WIM

(Unit : 0.01t)

<Table 6> Structure of LS WIM

(Unit : ton)

Date	Car Class	Weight	...	Secret Number of Car
20211001000006600	7	2809	...	50902C76EA1BEB0
20211001000015200	10	1616	...	334916BF7460F9F5
...
20211031235904900	3	316	...	12BB9B6DA11C2F

Name of TG	Code of TG	Date	...	Weight
KimPho	068	20211003080557	...	13
KimPho	068	20211003080200	...	15
...
SeoBusan	244	20211003000135	...	8

HS WIM과 LS WIM 데이터의 화물 차종에 대한 기초통계 분석 결과는 아래 <Table 7>과 같다. HS WIM 데이터의 3종은 평균 중량이 약 2.7톤, 12종은 약 41톤으로 도출되었다. HS WIM은 화물 차량이 적재량 측정을 위해 브레이크를 밟아 저속으로 통과 시 화물 쏠림 등으로 인해 측정에 오류가 발생할 수 있는 LS WIM에 비하여 측정에 대한 신뢰성이 높지만 9종과 11종 등의 화물 차량에 대해 표본 수가 매우 부족하다는 한계점이 있다. LS WIM은 측정 정확도를 확보하고자 서행 상태에서 단속이 이루어지거나 검측 과정에서 다양한 형태의 축 조작 행위를 통해 계측을 방해하므로 정확한 차량의 적재량 측정이 어려운 한계점(Kim et al.,

2016)이 존재한다. 따라서 LS WIM으로부터 측정된 3종의 평균 중량은 약 11.1톤, 12종은 약 15.1톤으로 상이하게 도출되었다.

<Table 7> Summary Statistics of HS and LS WIM

(Unit : ea, 0.01t, t)

Car Class	HS WIM					LS WIM				
	Number of Data (ea)	Mean (0.01t)	Standard Deviation (0.01t)	Max (0.01t)	Min (0.01t)	Number of Data (ea)	Mean (t)	Standard Deviation (t)	Max (t)	Min (t)
Class 3	73,844	277	144	2,664	0	221,632	11.1	5.44	63.6	0
Class 4	42,227	873	330	2,158	83	2,468,572	12.4	5.18	76.9	0
Class 5	34,678	1,776	438	10,356	0	1,821,329	20.7	9.21	89.9	0
Class 6	21,575	2,244	951	16,340	0	763,922	24.1	10.4	84.0	0
Class 7	12,028	3,960	473	5,235	1,491	418,042	27.0	10.6	76.1	0
Class 8	2,774	1,796	360	3,419	276	29,920	23.9	9.72	61.2	0
Class 9	29	2,101	783	2,879	373	409	21.1	5.99	39.8	5.35
Class 10	11,471	3,746	850	14,178	0	445,510	25.1	10.4	88.2	0
Class 11	79	2,570	649	4,588	0	800	26.9	11.6	44.5	6.3
Class 12	6,096	4,111	779	18,344	0	2,028	15.1	8.56	43.6	4.54

IV. 분석 결과

1. 통행실적(대·km) 산정

TCS 데이터를 통한 화물 차량의 차종별·구간별 교통량(대/일)과 주행거리 요금표 데이터의 영업소 간 거리(km)를 활용하여 화물차량의 통행실적(대·km)을 산정하였다. 통행실적을 산정하기에 앞서 본 연구에서 수집된 TCS 데이터의 신뢰성 확인하고자 고속도로 일별 교통량 데이터와 비교하였다. 고속도로 일별 교통량 데이터는 한국도로공사에서 운영하는 재정 구간의 폐쇄식 영업소뿐만 아니라 개방식 영업소, 민자도로의 연계 및 비연계 구간, 민자도로 내부통행 등 모든 고속도로 구간의 교통량이 집계된 데이터이다. 그러나, 고속도로 일별 교통량 데이터는 차종별, 노선별 교통량 정보 등 상세한 정보 없이 전체 교통량만을 제시하기 때문에 전체 교통량 보정 후 단순 검증을 위한 자료로써 활용하였다. TCS 데이터는 재정(수탁 민자 포함) 고속도로 및 재정 고속도로와 연계된 고속도로를 통행하는 차량에 대한 통행료 징수 기록 데이터이므로 민자고속도로 비연계 구간 및 내부 통행량은 포함되지 않았다. 따라서 <Table 8>에서 보여주는 바와 같이 고속도로 일별 교통량 데이터에서는 평균 일 교통량이 약 496만 대/일이나 TCS 데이터에서는 약 450만 대/일로 집계되어, 민자고속도로 비연계 구간 및 민자도로 내부 통행의 약 40만 대가 누락되었다는 것을 알 수 있다. 따라서 누락된 교통량 비율을 반영한 교통량 보정 과정이 추가로 수행되었다.

<Table 8> Comparison of Traffic Volume by Day Data and Payment Data

(Unit : vehicle/day)

Date	Day Traffic Volume in Expressways	Total (TCS)	Hi-Pass	Toll Road Ticket
10/18	4,915,995	4,465,756	3,795,854	669,902
10/19	4,819,541	4,379,622	3,732,330	647,292
10/20	4,869,125	4,453,232	3,790,122	663,110
10/21	4,913,567	4,489,127	3,823,633	665,494
10/22	5,340,597	4,855,111	4,133,362	721,749
10/23	5,239,073	4,746,073	4,016,985	729,088
10/24	4,653,050	4,207,867	3,569,338	638,529
Average	4,964,421	4,513,827	3,837,375	676,452

TCS 데이터는 5종(경차 포함 6종)으로 분류되어 있으므로 12종으로 재분류하기 위하여 차종별 데이터 표본 수를 검토하였다. 전체 TCS 데이터 약 3.2천만 개 중 5종과 12종 차종이 매칭되는 데이터는 약 2.2천만 개로 약 68%가량이 매칭 가능하며 약 32%의 데이터는 차종 재분류가 필요하다는 것을 알 수 있다.

화물 차량 통행실적을 산정하기 위하여 O/D별, 차종별 통행량 DB를 구축하였으며, 그 결과 105,408개의 O/D가 구축되었다. TCS 데이터를 활용한 영업소 간 통행실적 산정식은 아래 Eq. (1)로 정의한다.

$$T_{od} = \sum (V_{od} \times L_{od}) \dots\dots\dots (1)$$

여기서, T_{od} 는 통행실적(대·km/일), V_{od} 는 O/D간 일 교통량, L_{od} 는 O/D간 주행거리를 의미한다.

주행거리 요금표 데이터의 영업소 간 거리(km)를 활용하여 매칭이 가능한 O/D 리스트를 구축하였다. 일부 폐쇄식 간 주행거리가 누락되어 매칭이 어려운 O/D의 교통량은 7일 기준 약 3만 대 가량 존재하는 것으로 나타났으며 해당 교통량에 대한 통행실적을 보완하기 위해 진출 영업소를 기준으로 가중평균 거리를 산정하여 매칭하였다. 진출 영업소를 기준으로 가중평균한 주행거리는 실제 맵 상에서 나타내는 최단 주행거리와 유사한 값을 나타내었다. 그 결과 약 16,090만대·km/일로 산정되었으며 고속도로 일별 교통량 데이터와의 오차비율을 고려하여 보정한 결과 국내 고속도로 화물통행실적은 약 17,694만대·km/일로 도출되었다. 해당 과정을 통하여 산정된 화물 차량 통행실적은 재정(수탁민자 포함) 고속도로의 폐쇄식 통행실적이며, 개방식, 무료구간, 개방식과 폐쇄식이 동시에 운영되고 있는 혼용구간 및 민자고속도로 등은 포함이 되지 않은 결과이다.

본 연구에서는 누락된 교통량을 보정하기 위해 교통량정보제공시스템(TMS)에서 제시하는 통계연보의 구간별 고속국도 이용 교통량을 적용하였다. 통계연보의 각 노선별 구간을 폐쇄식 영업소가 포함된 구간, 개방식 영업소가 포함된 구간으로 구분하고, 각 구간별 연계 영업소에 따른 폐쇄식, 개방식, 무료구간, 민자고속도로 등으로 재분류한 후 통계연보의 12종 차종 교통량(대/일)과 각 구간의 연장(km)을 반영하여 누락된 구간의 통행실적을 산정하였다. 그 결과 <Table 9>와 같이 민자고속도로는 약 3,807만 대·km/일, 재정고속도로의 무료구간, 혼용구간, 개방식 구간 등의 경우 약 2,895만 대·km/일로 도출되었다. 또한 누락된 구간의 통행실적 합산을 통하여 국내 전체 고속도로의 통행실적은 약 24,390만대·km/일인 것으로 산정되었다.

<Table 9> Result of transport performance for freight vehicles

(Unit : vehicle·km/day)

Car Class	Total	TCS	Non-Linked Private Expressway	Non-Linked Financial Expressway
Class 1	170,546,501	121,491,747	26,862,888	22,191,866
Class 2	4,533,880	3,689,303	568,726	275,852
Class 3	29,095,818	20,876,920	4,377,380	3,841,518
Class 4	10,439,931	7,829,813	1,752,923	857,195
Class 5	12,871,326	10,216,679	1,892,387	762,259
Class 6	5,391,173	4,163,774	844,080	383,319
Class 7	4,844,905	3,825,698	744,642	274,566
Class 8	496,253	365,086	118,408	12,759
Class 9	43,479	24,612	16,800	2,068
Class 10	4,795,235	3,854,474	699,023	241,738
Class 11	87,277	63,586	11,826	11,865
Class 12	756,593	535,508	180,446	40,640
Sum	243,902,372	176,937,200	38,069,527	28,895,644

본 연구에서 제시된 방법론을 통해 도출한 화물차량 통행실적의 타당성을 검증하기 위하여 국가통계로 발표되고 있는 통계연보와 본 연구에서 산출한 결과를 비교하였다. 그 결과 2021년 기준 통계연보에서 공표한 고속도로 통행실적(대·km/일)의 값은 약 24,816만 대·km/일이었으며 본 연구에서 도출된 통행실적은 약 24,390만 대·km/일로 약 1.7%의 차이가 있는 것으로 나타났다.

2. 화물 적재 원단위(톤/대) 산정

WIM을 통해 구축되는 화물차량의 하중은 공차중량과 적재량이 합산된 하중으로 측정된다. 본 연구에서는 화물 적재량에 대한 수송실적을 산정하기 위하여 각각의 차량에 싣고 운송되는 순수 화물적재량이 필요하다. 따라서 WIM을 통해 측정되는 하중에서 공차중량을 제외한 적재량을 추출하였으며, 이를 위해 정의된 화물 적재량 원단위 산정식은 아래 Eq. 2와 같다. 여기서, i 는 12종 차종이며 $Unit_i$ 는 i 차종의 화물 적재 원단위(톤/대)이다. WW_i 는 WIM을 통해 측정된 i 차종의 하중 값, EW_i 는 i 차종의 공차 중량을 의미한다.

$$Unit_i = Avg(WW_i - Avg(EW_i)) \dots\dots\dots (2)$$

화물차량의 공차 중량을 산정하기 위해 차량제원 DB와 해당 제원정보를 12종 차종으로 구분한 데이터를 통합하여 각 차종별 평균 공차 중량을 산정하였다. 각각의 측정기를 통해 구축된 하중정보 중 최솟값이 0으로 도출되는 차종이 있으며 최댓값이 각 차종의 최대 적재량 보다 높게 도출된 수치가 포함되어 있다. 따라서 0이하의 값을 도출하는 차량에 대해서는 공차 차량으로 간주하고, 적재량이 이상치보다 높게 도출된 차량에 대해서는 과적 차량으로 분류하여 분석을 진행하였다. HS WIM과 LS WIM 데이터로부터 수집한 총중량에 공차 중량을 제외한 후 화물 적재 원단위(톤/대)를 산정하였으며 그 결과는 <Table 10>과 같다. HS WIM과 LS WIM 데이터로부터 산정된 차종별 화물 적재 원단위를 비교한 결과 3종과 12종에서의 원단위 차

이가 크게 도출되었다.

HS WIM의 경우 화물 차량이 감속 없이 측정기를 통과하여 적재량 측정에 대한 신뢰도는 높으나 설치 지점이 많지 않아 수집된 표본 수가 적다는 한계점이 있다. 반면, LS WIM은 대부분의 영업소마다 설치되어 있어 수집되는 표본 수는 많으나 주행 상태의 변화 및 축 조작 등으로 적재량 측정에 대한 신뢰도가 낮고, 4.5톤 미만의 차량에 대해서는 측정의 의무가 없어 샘플 수집이 어려웠다. 또한 두 측정기로부터 수집된 데이터 모두 국내에서 잘 운행되지 않는 폴 트레일러 차종에 대한 표본 수가 부족하다는 한계가 나타났다. 따라서 본 연구에서는 두 가지 WIM의 단점을 서로 보완하기 위하여 3종과 12종의 원단위는 HS WIM, 그밖의 4종에서 11종까지의 화물차종은 LS WIM로부터 도출된 원단위를 최종값으로 선정하였다.

<Table 10> Summary units of freight weight

(Unit : ton/vehicle, ea)

Car Class	EW_i	HS-WIM		LS-WIM		Unit from the study
		Unit	Number of sample	Unit	Number of sample	
Class 3	2.15	0.62	73,844	8.93	221,632	0.62
Class 4	7.10	1.63	42,227	5.33	2,468,572	5.33
Class 5	10.20	7.56	34,678	10.51	1,821,329	10.51
Class 6	13.55	8.89	21,575	10.60	763,922	10.60
Class 7	13.34	26.26	12,028	13.69	418,042	13.69
Class 8	7.15	10.81	2,774	16.79	29,920	16.79
Class 9	12.31	8.70	29	8.78	409	8.78
Class 10	8.59	28.27	11,471	16.56	445,510	16.56
Class 11	10.61	15.09	79	16.30	800	16.30
Class 12	8.74	32.37	6,096	6.38	2,028	32.37

3. 화물수송실적(톤·km)의 산정

측정기의 화물 적재 원단위를 활용한 화물 수송실적 산정식은 Eq. 3과 같이 정의하였으며 FP_i 는 화물 수송실적(톤·km/년), $Unit_i$ 은 측정기 활용 화물 적재 원단위(톤/대), T_{od} 는 각 O/D간 통행실적(대·km/일)을 의미한다.

$$FP_i = \sum (Unit_i \times T_{od} \times 365) \dots\dots\dots (3)$$

Eq. 3에 의하여 2021년 총 화물 수송실적은 약 162,962백만톤·km/년이며, 각 차종별 화물 수송실적은 <Table 11>에서 보여준다.

<Table 11> Freight transport performance by vehicle types

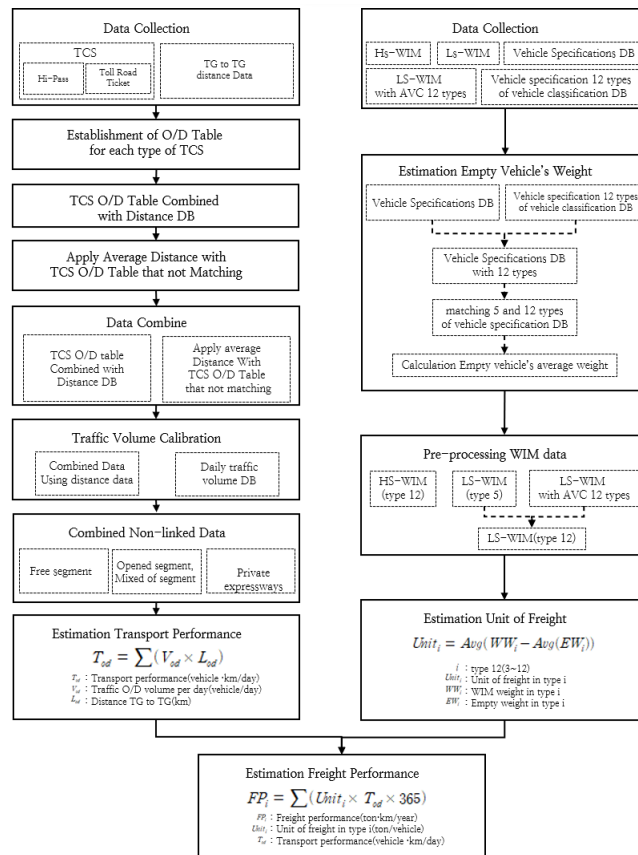
(Unit : ton·km/year)

Car Class	HS WIM	LS WIM	Final value from the study
Class 3	6,584,383,696	94,836,363,980	6,584,383,696
Class 4	6,211,237,078	20,310,363,764	20,310,363,764

Car Class	HS WIM	LS WIM	Final value from the study
Class 5	35,517,135,914	49,376,337,235	49,376,337,235
Class 6	17,493,546,137	20,858,448,337	20,858,448,337
Class 7	46,437,930,719	24,209,263,549	24,209,263,549
Class 8	1,958,041,187	3,041,212,073	3,041,212,073
Class 9	138,068,014	139,337,151	139,337,151
Class 10	49,479,872,318	28,984,318,434	28,984,318,434
Class 11	480,709,878	519,254,512	519,254,512
Class 12	8,939,184,568	1,761,878,119	8,939,184,568
Sum	173,240,109,509	244,036,778,689	162,962,103,319

4. 화물 수송실적 산정 알고리즘 프레임워크

위 과정을 통해 제시하는 본 연구의 화물 수송실적 산정을 위한 전체 알고리즘의 구성은 <Fig. 1>과 같다. 본 연구는 크게 화물 차량 통행실적(대·km)의 도출, 공차 증량을 제외한 화물 적재 원단위(톤/대) 도출, 화물 수송실적(톤·km) 도출 등의 과정으로 구축되었다.



<Fig. 1> Algorithm of Estimation Freight Performance

V. 결 론

2019년 기준 고속도로를 포함한 공로의 화물 수송 부담률은 약 93%로 도로의 화물수송은 항공, 철도 등 타 수단과 비교하여 우수한 접근성과 저렴한 통행비용으로 국내 화물 수송의 중추적인 역할을 수행하고 있다. 그러나 고속도로는 타 수단과 비교 가능한 수송실적(톤·km/년) 지표의 부재로 수송 경쟁력을 비교·평가하기 어려운 실정이다. 이에 본 연구에서는 TCS와 WIM 데이터를 활용하여 보다 신뢰성이 있는 화물수송실적(톤·km) 산정방법의 알고리즘을 구축하고 결과를 도출하고자 하였다.

본 연구는 TCS, WIM 데이터, 차량제원데이터 등 다양한 온라인 데이터들의 통합 및 처리과정을 체계적으로 구축하여 화물수송실적을 산정했다는 측면에서 차별성을 가지며, 그동안 기존 연구들에서 고려되지 않았던 개방식 영업소, 민자고속도로 등을 연계한 구간별 화물수송실적 산정 방법을 제시하였다. 또한, 현재 설문조사를 통하여 제시되고 있는 화물차종별 원단위를 HS WIM과 LS WIM을 활용하여 샘플수를 대량화하고 이를 통하여 보다 신뢰성 있는 화물 적재 원단위를 도출하고자 하였다.

TCS 데이터를 활용한 통행실적 산정 결과 국내 고속도로 중 한국도로공사에서 운영하는 재정 고속도로의 폐쇄식 영업소간 화물 차량 통행실적은 약 17,694만대·km/일로 도출되었다. TCS 데이터에서 누락된 개방식 구간, 무료구간, 민자고속도로 내부통행 등의 비연계 구간은 통계연보의 구간별 통행량 값을 적용하여 보완하였으며 그 결과 민자고속도로는 약 3,807만대·km/일, 재정 고속도로의 무료구간, 혼용구간, 개방식 구간 등은 약 2,895만대·km/일로 도출되었다. 따라서 국내 전체 고속도로의 화물 차량 통행실적은 약 24,390만대·km/일로 산정되었다. 화물 적재 원단위(톤/대)를 도출하기 위해 HS WIM 및 LS WIM, 차량제원 정보DB를 활용하여 화물차량의 총중량, 공차 중량을 산정하였으며 이를 기반으로 차종별 화물 적재량을 산출하였다. 그 결과 2021년 총 화물 수송실적은 약 162,962백만톤·km/년으로 도출되었다.

HS WIM의 경우 정적 주행에서 동적 주행으로 변한다는 요인이 없음에 적재량에 대한 신뢰도는 높으나 설치 기기가 많지 않아 수집 표본 수가 적고 지역적, 경로적 편차가 있다는 한계점이 있으며 LS WIM의 경우 영업소 화물 차로마다 설치되어 있어 수집 표본 수는 충분하나 화물차량들의 주행 상태의 변화 및 운전자의 축 조작 등으로 인해 적재량에 대한 신뢰도가 낮다는 한계점이 있다. 본 연구에서는 적재 원단위의 신뢰성에 주목하였으며 3종과 12종의 경우 LS WIM보다 HS WIM의 적재 원단위가 고속도로의 화물 수송실적을 대표하기에 적절하다고 판단하였으며 4종부터 11종은 샘플이 많은 LS WIM으로부터 도출된 원단위에 신뢰성이 높다고 판단하였다.

현재 국내에서 구축되고 있는 화물수송실적은 화물통행실태조사로부터 구득한 설문결과를 활용하여 화물 적재량 원단위 및 수송실적을 추정하고 있다. 또한 이 추정된 값은 고속도로 뿐만 아니라 국도, 지방도 등 국내 전체 공로의 화물수송실적이다. 그러므로 고속도로 화물수송실적에 대한 공식적인 결과자료의 부재로 본 연구에서 제시한 고속도로 화물수송실적과는 비교 검증이 어렵다는 한계가 있다. 그러나 본 연구에서 축중기 데이터를 이용하여 화물수송실적을 산정한 방법론의 틀은 기존 설문조사를 통한 화물수송실적 추정보다 대규모의 표본 수를 활용함으로써 신뢰성을 향상할 수 있으며, 온라인으로 실시간 수집되는 데이터에 기반한 객관적인 결과라는 측면에서 기존의 화물 수송실적보다 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단하였다.

향후 본 연구를 통하여 12종 차종 구분이 가능한 화물 O/D의 수송실적(톤·km)을 구축할 수 있으며, 결과를 바탕으로 향후 화물차 통행 특성 분석, 화물차 전용 차로 도입, 화물차 과적 단속 시스템 설치 위치 선정 등 여러 연구에서 활용되기를 기대한다. 또한, 현재 국내에서는 톤·km로 제시되는 고속도로 화물수송실적 산정 체계가 구체적으로 수립되어 있지 않으므로 본 연구에서는 통행실적산정, 화물 적재 원단위 산정, 화물 수송실적 산정으로 연계되는 알고리즘의 프레임워크를 통해 각 단계별 도출 과정을 제시하였다. 따라서 제

시된 프레임워크 내의 각 과정 및 방법론은 학술적 의의를 가지며 제시된 방법론을 기반으로 향후 고속도로 관리자들의 신속한 정책 의사결정을 위한 화물수송실적 도출이 가능할 것으로 기대한다.

마지막으로 본 연구에서 활용한 수납데이터는 1주일간의 데이터를 분석하여 1년 화물 수송실적 산정에 활용하였다. 이는 요일별, 계절별, 노선별 특성이 반영되지 않은 결과이므로 향후 연구에서는 보정계수 산정을 통해 교통량 보정이 필요하다. 또한, 통행거리 산정 시 사용된 영업소간 거리는 최단 거리를 기준으로 산정되었으며 실제 주행거리와 일부 차이가 있다는 한계점이 있어 향후 DSRC 등을 활용하여 실제 주행거리를 산정하여 보다 정확한 통행실적을 산정할 필요성이 있다. 현재 O/D구축시 개방식, 무료구간, 혼용구간, 민자 고속도로는 TMS의 통계연보 구간별 교통량을 매칭하여 누락된 교통량 정보를 보정하였으나 향후 DSRC를 활용하여 통행량을 보정하는 방법을 고려할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 한국도로공사 도로교통연구원 “고속도로 수송 경쟁력 분석체계 구축 및 사례분석 연구” 지원으로 수행하였습니다.

REFERENCES

- Gil, H. B. and Kang, S. G.(2013), “Characteristics of Heavy Vehicles Using Expressway Networks Based on Weigh-in-motion Data”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, vol. 33, no. 5, pp.1731-1740.
- Gomez, D., Vitoria, C., Llerena, S. and Tinoco, N.(2019), “IoT Cargo Weight Tracking System for Supply Chains”, *Computational Logistics. International Conference on Computational logistics 2019. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 11756, pp.365-379.
- Heo, E. J., Choi, Y. H. and Baek, S. K.(2012), “The Estimation of Freight Transportation Share on Expressway”, *Proceedings of the Korean Society of Transportation Conference*, vol. 66, pp.163-168.
- Hwang, E. S. and Lee, S. W.(2010), “Calibration Method of Vehicle Weight Data from Weigh-In-Motion System According to Temperature Effects”, *International Journal of Highway Engineering*, vol. 12, no. 4, pp.187-196.
- Joo, J. H.(2016), *Estimating Truck and Freight Transportation Statistics*, Master's Thesis, University of Seoul, Korea.
- Jung, G. H.(2006), *A Study on the Freight O-D Estimation Method using Truck Trip Data in Freight Studies*, Master's Thesis, Seoul National University, Korea.
- Kim, H. J.(2003), *A Study of Concern in the WIM Data Practical Use Way: Laying stress on decision whether or not freight giving a summary for cargo weight analysis*, Master's Thesis, Myongji University, Korea.
- Kim, J. W., Jung, Y. Y. and Kwon, S. M.(2016), “Study on the Dynamic Load Monitoring Using the Instrumented Vehicle”, *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol.

15, no. 5, pp.95-107.

Korea Transport Institute(KOTI)(2021), *2021 Transportation SOC Investment Outlook*, pp.3-13.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT), <https://www.molit.go.kr/USR/policyTarget/dtl.jsp?idx=161>, 2023.03.23.

Oh, J. H.(2017), *A Study on Estimation for Freight Transportation Indices on Expressway Using TCS and WIM Data*, Master's Thesis, University of Seoul, Korea.

Yang, H. M., Park, D. J., Sin, S. J., Choi, Y. H., Jeong, S. Y. and Heo, E. J.(2013), "A Diagnose Study of Expressway in The Context of Transport Logistics", *Proceedings of the Korean Society of Transportation Conference*, vol. 68, pp.89-94.