

# 최적화 모형을 이용한 고속도로 측정교통량 보정

## Correction of Measured Traffic Volume on Expressways Using Optimization Model

김 동 호\* · 박 동 주\*\* · 김 도 경\*\*\* · 신 승 진\*\*\*\*

\* 주저자 : 서울시립대학교 교통공학과 박사수료  
 \*\* 공저자 : 서울시립대학교 교통공학과 교수  
 \*\*\* 공저자 : 서울시립대학교 교통공학과 교수  
 \*\*\*\* 교신저자 : 한국교통연구원 Post-Doc

Dong ho Kim\* · Dong joo Park\*\* · Do gyeong Kim\*\*\* · Seung jin Shin\*\*\*\*

\* Dept. of Transportation Eng., Univ. of Seoul  
 \*\* Dept. of Transportation Eng., Univ. of Seoul  
 \*\*\* Dept. of Transportation Eng., Univ. of Seoul  
 \*\*\*\* The Korea Transport Institute  
 † Corresponding author : Seung jin Shin, sjshin434@koti.re.kr

Vol.17 No.4(2018)

August, 2018  
 pp.41~53

ISSN 1738-0774(Print)  
 ISSN 2384-1729(On-line)  
<https://doi.org/10.12815/kits.2018.17.4.41>

Received 14 June 2018  
 Revised 10 July 2018  
 Accepted 1 August 2018

© 2018. The Korea Institute of  
 Intelligent Transport Systems. All  
 rights reserved.

### 요 약

본 연구는 도로교통량통계연보에서 제시하고 있는 고속도로 교통량을 보정하기 위해 측정오차를 최소화하면서 TCS 교통량과 교통량 균형을 만족시키는 최적화 모형을 개발하였다. 이를 위해 본 연구에서 구축한 모형을 실제교통량과 비교·검증하였다. 모형 검증 결과, 교통량 균형에 만족하도록 측정교통량을 보정할 경우, 보정교통량은 측정교통량에 비해 실제교통량과의 차이가 적은 것으로 나타났다. 경부고속도로 40개 구간에 적용 결과, 전체 구간에 대한 측정교통량은 -8.1%~9.6% 보정되었으며, 보정된 교통량만큼 측정오차가 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구는 고속도로의 규모와 역할이 증대되고 있는 가운데 고속도로 측정교통량의 정확성을 향상시켰다는 점에서 의미가 있다.

핵심어 : 교통량 보정, 교통량 균형, 최적화모형, 도로교통량통계연보, TCS

### ABSTRACT

This study developed the optimization method to correct the measured traffic volume of the expressway that minimizes the measurement error and satisfies the traffic balancing with TCS. For this purpose, the model constructed in this study was compared and verified with the true traffic volume. Verification result of the model, it was found that the measurement error is reduced when the measured traffic volume is corrected for the traffic volume balance. As a result of applying it to 40 links of the Kyoungbu expressway, the measured traffic volume was corrected by -8.1%~9.6% and the measurement error was decreased as much as the corrected traffic volume. This research is meaningful in improving the accuracy of the measured traffic volume of the expressway, while the scale and role of the expressway are increasing.

Key words : Traffic Volume Correction, Traffic Volume Balancing, Optimization Model, Annual Traffic volume Report, TCS(Toll Collection System)

## I. 서론

최근 고속도로의 규모와 역할이 증가하고 있는 상황에서 고속도로 교통량은 고속도로의 운영·관리, 노선 계획, 대기오염 및 이산화탄소 배출량 산정 등 많은 분야에서 활용되고 있다. 고속도로 교통량의 활용가치가 증대됨에 따라, 국내에서는 도로법 제 102조에 의거하여 매년 교통량을 조사하여 도로교통량 통계연보를 작성하고 있다(MOLIT, 2016). 도로교통량 조사는 수시조사와 상시조사로 구분하여 차종별, 방향별, 시간대별 교통량을 수집한다. 수시조사는 10월 셋째 주 목요일 하루 동안 VDS, CCTV 등을 이용하며, 상시조사는 AVC 장비를 사용하여 1년 동안 교통량을 수집한다. 그러나 수집된 고속도로 교통량은 수집 기술의 한계, 검지기 오류 등으로 부정확성을 내포하고 있다(Vanajakshi and Rilett, 2004; Lee et al., 2013). 이렇게 부정확성을 내포하고 있는 고속도로 교통량을 다양한 분야에 활용시 신뢰성 있는 결과를 도출하기 어렵기 때문에 고속도로 교통량을 활용하기 전에 정확성을 측정하여 보정해야 한다. 교통량을 보정하기 위해 고속도로 본선과 램프의 실제교통량을 조사해야 하나 많은 시간과 비용이 소요된다.

과거부터 고속도로 검지기에서 수집된 교통량(이하, 측정교통량)을 보정하기 위해 많은 연구가 수행되어 왔다(Jagadeesh et al., 2013). 대부분의 연구는 교통류 이론이나 과거 자료(Historical data)와의 일관성에 기반하여 보정하였으나, 공간적 일관성(Network consistency)에 기반한 교통량 균형(balancing)을 고려하지 않았다(Hu, 2001; Chen et al., 2003; Zheng et al., 2012; Turner et al., 1999). 다시 말해, 도로에 유입하고 유출하는 교통량은 해당 구간에 남아있는 교통량과 일치해야 하는 교통량 보존 법칙을 만족하지 못하고 있다. 일부 연구에서는 이러한 한계를 고려하여 검지기로부터 수집된 측정교통량을 실제교통량으로 가정하고, 일정 구간 내에 측정교통량이 교통량 균형에 만족하도록 보정하였다(De Oña et al., 2012; Zhao et al., 1998; Kwon et al., 2008; Jagadeesh et al., 2013; Shaw and Noyce, 2014). 그러나 검지기로부터 수집된 측정교통량은 오차가 포함되어 있기 때문에 교통량 균형에 맞게 보정할 경우 보정된 측정교통량은 더 큰 오차를 야기할 수 있다.

따라서 본 연구의 목적은 매년 조사를 통해 수집하고 있는 고속도로 측정교통량을 보정하기 위해 TCS (Toll Collection System) 교통량 자료를 이용하여 측정오차를 최소화하고, 교통량 균형을 만족시키는 최적화 모형을 구축하는데 있다. 또한 본 연구에서 구축한 모형을 고속도로에 적용하여 실제교통량과 비교·검증하였다. 본 연구는 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 교통량 보정 방법 및 교통량 균형에 관한 기존 연구를 검토한다. 3장에서는 TCS 교통량과 측정교통량을 이용하여 교통량 균형을 정립한다. 4장에서는 교통량 균형을 기반으로 측정교통량을 보정하는 방법론을 수립한다. 5장에서는 4장에서 수립한 방법론을 실제 고속도로 노선에 적용한다. 마지막으로 6장에서는 본 연구의 결론과 향후 연구 방향을 제시한다.

## II. 선행 연구 고찰

과거부터 고속도로 교통량의 정확성 향상을 위해 측정교통량 보정 연구가 많이 수행되어 왔다. 측정교통량 보정에 관한 연구는 <Table 1>과 같이 크게 근본적 일관성(Fundamental consistency), 과거 자료와의 일관성(Historical consistency), 공간적 일관성(Network consistency) 방법으로 분류될 수 있다. 근본적 일관성 보정 방법은 교통류 이론 등에 근거하여 측정교통량의 오차를 보정하나, 매우 작은 오차가 발생할 경우 측정교통량을 보정하는 것은 불가능하다(Jagadeesh et al., 2013). 과거 자료와의 일관성 보정 방법은 과거 이력 교통량을 기반으로 측정교통량의 오차를 보정한다. 그러나 교통사고, 도로신설 등으로 인해 교통량 패턴이 변화된 경우 교통량을 보정하는데 한계가 있다(De Oña et al., 2012). 공간적 일관성 방법은 본선 또는 램프의 정확한 실제교통량을 필요로 하나, 정확한 실제교통량을 수집하는 것이 어렵다(Kikuchi and Miljkovic, 1999). 본 연구

에서는 실제교통량 수준인 TCS 교통량 자료를 활용할 수 있기 때문에 공간적 일관성 방법을 중심으로 선행 연구를 검토하였다.

<Table 1> Correction Methods of Measured Traffic Volume

Category	Description
Fundamental consistency	<ul style="list-style-type: none"> <li>Data should be consistent with basic notions of traffic theory and should be physically plausible; establishes upper and lower boundaries for traffic values (e.g. negative value and vehicle volume that exceed the road's capacity cannot be measured)</li> </ul>
Historical consistency	<ul style="list-style-type: none"> <li>The historical data constitutes a basis for determining the boundaries of the interval in which normally consistent values must be found</li> <li>This method correct the historical data with similar characteristics (e.g. if the past average traffic volume of link A is 100, the current traffic volume is also 100)</li> </ul>
Network consistency	<ul style="list-style-type: none"> <li>It is based on flow conservation when several connected nodes in a transport network are studied</li> <li>It is assumed that the traffic characteristic of adjacent links are similar (e.g. if 10 vehicles flow into link A and 5 vehicles flow out of it, then the remaining traffic volume of link A is 5 vehicles)</li> </ul>

주 : De Oña et al.(2011)를 재정리함

Shaw and Noyce(2014)는 일정 도로 구간의 양 끝단에서 수집된 측정교통량을 기준으로 구간 내 본선과 램프의 측정교통량을 교통량 균형에 만족하도록 보정하였다. 도로 구간의 양 끝단에서 수집되는 측정교통량은 도로 구간 내 본선과 램프의 측정교통량을 보정하는 기준이 되기 때문에 정확성이 높아야 한다. Kwon et al.(2008)은 Matrix 기반 가중 최소제곱 회귀모형을 이용하여 본선에서 수집된 측정교통량의 균형 문제를 해결하였다. 이 모형은 각 교통량 검지기에 대한 신뢰수준을 기반으로 설정하였다. Xin et al.(2006)은 검지기에서 수집된 측정교통량이 일정 범위의 오차를 가진다고 가정하였다. 최적화 모형을 이용하여 오차 범위 내에서 교통량 균형이 만족하도록 본선과 램프의 측정교통량을 보정하였다. Vanajakshi and Rilett(2004)는 고속도로 본선의 검지기에서 유출하는 측정교통량과 인접한 검지기로 유입되는 측정교통량을 비교함으로써 교통량 균형을 검증하였다. 비교를 통해 차이가 발생할 경우 교통량 균형에 위배된다고 간주하고 비선형 최적화 모형을 적용하여 측정교통량을 보정하였다. Wall and Dailey(2003)은 고속도로 본선의 측정교통량을 검증하고 보정하기 위해 기준이 되는 검지기를 설정하고, 이 검지기에서 수집된 측정교통량을 초기값으로 설정하였다. 초기값으로 설정된 측정교통량은 인접한 측정교통량이 교통량 균형을 만족하는지를 검증하기 위해 사용되었다. 만약 교통량 균형을 만족하지 못할 경우 보정계수를 적용하였다. 보정된 측정교통량은 다시 인접한 측정교통량들을 검증·보정하기 위해 사용되었다. FHWA Traffic Monitoring Guide(2001)에서는 교통량 균형을 위해 램프 교통량을 조정하는 모형을 제시하고 있다. TMG에서는 본선의 측정교통량이 정확하다고 가정하였다. 그러나 교통량 불균형은 단지 램프 교통량에 의해서만 발생하지 않고, 본선에서 수집된 측정교통량에서도 발생할 수 있다. Zhao et al.(1998)은 최소제곱 회귀모형을 이용하여 교통량 균형을 만족시키고, 동시에 보정 전후의 교통량 차이를 최소화함으로써 고속도로 본선과 램프의 측정교통량을 보정하였다. 제안한 모형은 측정교통량에 대한 표준편차를 필요로 하고, 오차는 정규분포를 가진다고 가정하였다. <Table 2>는 공간적 일관성에 기반하여 고속도로 측정교통량을 보정한 선행연구를 정리한 것이다.

본 연구는 실제교통량인 TCS 교통량을 이용하여 측정오차를 최소화하고, 교통균형을 만족시키는 측정교통량 보정 방법론을 개발한다는 점에서 기존 연구와 차별화된다. 공간적 일관성에 기반을 둔 기존 연구에서

는 본선 또는 램프에서 수집된 측정교통량을 실제교통량으로 가정하고, 측정교통량을 교통량 균형에 만족하도록 보정하는 방법론을 개발하였다.

<Table 2> Correction Methods of Measured Traffic Volume Based on Network Consistency

Category	Measured traffic volume	True traffic volume
Shaw and Noyce(2014)	Traffic Detector Volume (Link and Ramp of Analysis Road)	Traffic Detector Volume (Starting and Ending Link of Analysis Road)
Kwon et al.(2008)	Traffic Detector Volume (Link of Analysis Road)	Traffic Detector Volume (Link of Analysis Road)
Xin et al.(2008)	Traffic Detector Volume (Link and Ramp of Analysis Road)	Traffic Detector Volume (Link and Ramp of Analysis Road)
Vanajakshi and Rilett (2004)	Traffic Detector Volume (Link of Analysis Road)	Traffic Detector Volume (Link of Analysis Road)
Wall and Dailey(2003)	Traffic Detector Volume (Link of Analysis Road)	Traffic Detector Volume (Link of Analysis Road)
FHWA Traffic Monitoring Guide(2001)	Traffic Detector Volume (Link and Ramp of Analysis Road)	Traffic Detector Volume (Link of Analysis Road)
Zhao et al.(1998)	Traffic Detector Volume (Link and Ramp of Analysis Road)	Traffic Detector Volume (Link and Ramp of Analysis Road)
This Paper	Traffic Detector Volume (Link of Analysis Road)	TCS Traffic Volume (Ramp of Analysis Road)

### Ⅲ. 교통량 균형 개념 정립 및 측정

#### 1. 자료 수집

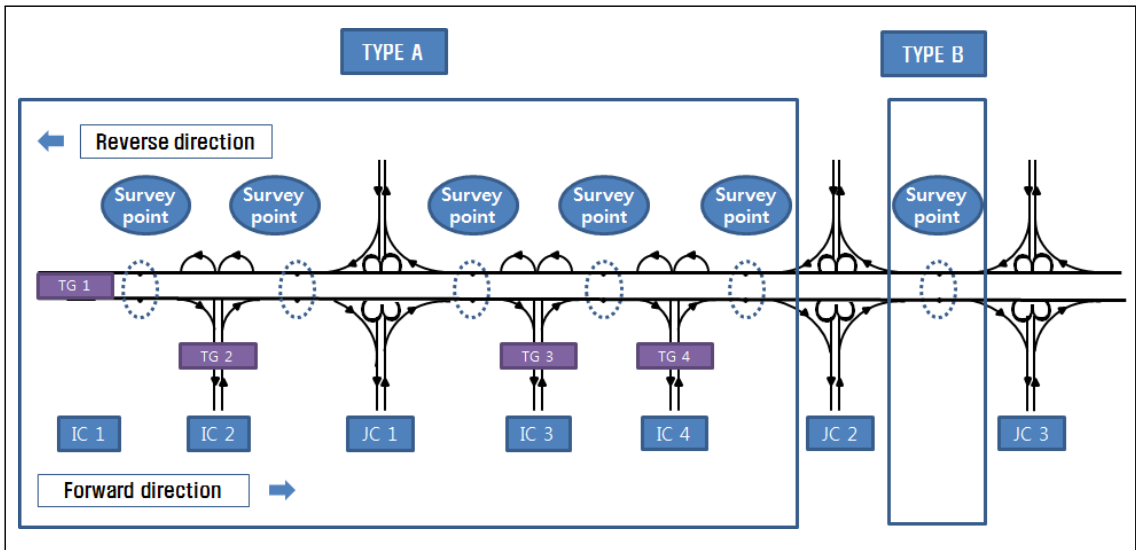
본 연구에서는 고속도로 교통량 보정을 위한 최적화 모형 구축을 위해 <Table 3>과 같이 2015년 10월 셋째 주 목요일 수시조사 및 상시조사에 의해 수집한 고속도로 측정교통량과 TCS 교통량 자료를 이용하였다. 도로교통량 통계연보 자료 중 고속도로 측정교통량은 IC와 IC, IC와 JC, JC와 IC, JC와 JC 사이의 본선 구간을 이용하는 차량에 대해 방향별로 집계한 자료이다. TCS 교통량은 요금징수기계화 설비에 의하여 고속도로 영업소를 이용하는 차량을 집계한 자료로써, 고속도로 영업소를 유출하고 유입하는 교통량을 알 수 있다. 본 연구는 천제지변, 도로공사, 교통사고 등의 사유로 2015년 10월 셋째 주 목요일에 조사되지 않은 고속도로 측정교통량은 제외하였다. 또한 TCS 교통량(6종, 경차포함)과 고속도로 측정교통량(12종)의 차종이 다르기 때문에 본 연구에서는 차종 구분없이 모든 차종을 합한 총교통량을 활용하였다.

<Table 3> Data Collection Outline

Category	TCS Traffic Volume	Traffic Volume of Expressway
Date of Collection	3 <sup>rd</sup> Thursday of October 2015	3 <sup>rd</sup> Thursday of October 2015
Time of Collection	24H	24H
Target of Collection	Traffic Volume between Expressway Business Offices	Traffic Volume of Links between IC-IC, IC-JC, JC-IC, and JC-JC
Vehicle Type	5 Types	12 Types

## 2. 교통량 균형 개념 정립

고속도로 측정교통량은 수집 위치에 따라 <Fig. 1>과 같이 크게 2가지 유형(TYPE A, TYPE B)로 분류될 수 있다. TYPE A는 IC와 IC, IC와 JC, JC와 IC 사이의 본선 구간에서 방향별로 측정교통량이 수집되는 유형으로, 고속도로 영업소를 유출입하는 TCS 교통량을 이용하여 본선 구간으로의 유출입 교통량을 파악할 수 있다. TYPE B는 JC와 JC 사이의 본선 구간에서 방향별로 측정교통량이 수집되는 유형으로, JC와 JC 사이에 영업소가 없기 때문에 TCS 교통량으로 본선 구간으로의 유출입 교통량을 파악할 수 없다. 이에 본 연구에서는 TCS 교통량을 이용하여 본선 구간으로 유출입 교통량을 파악할 수 있는 TYPE A를 대상으로 교통량 균형을 정립한다.



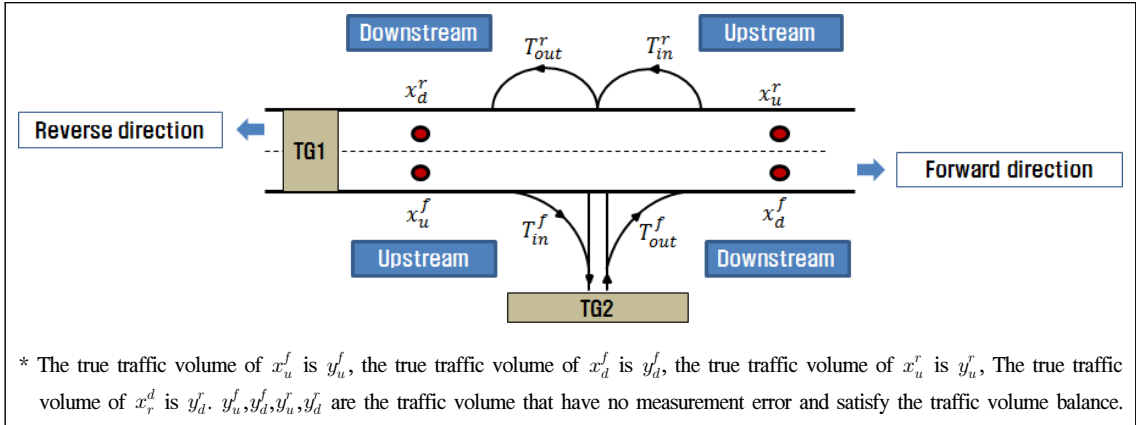
<Fig. 1> Collection Types of Measured Traffic Volume on Expressway

본 연구의 분석 대상인 TYPE A 중 특정 지점인 영업소 2(TG 2)를 세부적으로 살펴보면, <Fig. 2>와 같다. 여기서, 고속도로 측정교통량은 공간적 일관성에 기반하여 교통량 균형을 만족해야 한다는 개념을 토대로 교통량 균형식을 정립하면 식 (1), 식 (2)와 같다.

$$x_d^f = x_u^f - T_{in}^f + T_{out}^f \tag{1}$$

$$x_d^r = x_u^r - T_{in}^r + T_{out}^r \tag{2}$$

여기서,  $x_u^f$  =정방향(f) 상류부(u) 교통량,  $x_d^f$  =정방향(f) 하류부(d) 교통량  
 $x_u^r$  =역방향(r) 상류부(u) 교통량,  $x_d^r$  =역방향(r) 하류부(d) 교통량  
 $T_{in}^f$  =정방향(f) 영업소 유입교통량,  $T_{out}^f$  =정방향(f) 영업소 유출교통량  
 $T_{in}^r$  =역방향(r) 영업소 유입교통량,  $T_{out}^r$  =역방향(r) 영업소 유출교통량



<Fig. 2> Traffic Volume of Expressway Link and Ramp by Direction and Point

TCS 교통량은 영업소에서의 방향별 유입교통량( $T_{in}^f, T_{in}^r$ )과 유출교통량( $T_{out}^f, T_{out}^r$ )을 알 수 없다. 따라서 식 (1)과 식 (2)를 연립방정식으로 정리하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (3)은 영업소 유입 TCS 교통량과 유출 TCS 교통량 차이는 영업소 좌측과 우측에 위치한 본선의 방향별 교통량 차이의 합계와 같음을 의미한다. 좌측항  $T_{in}^f + T_{in}^r$ 는 영업소로 유입하는 TCS 교통량이고,  $T_{out}^f + T_{out}^r$ 는 영업소에서 유출하는 TCS 교통량이다. 우측항  $x_u^f - x_d^f$ 는 영업소 좌측에 위치한 본선의 방향별 교통량 차이이고,  $x_u^r - x_d^r$ 는 영업소 우측에 위치한 본선의 방향별 교통량 차이를 나타낸다. 여기서 TCS 교통량을 이용한  $(T_{in}^f + T_{in}^r) - (T_{out}^f + T_{out}^r)$ 와 고속도로 측정교통량에 기반한  $(x_u^f - x_d^f) + (x_u^r - x_d^r)$ 와의 차이가 적을수록 교통량 균형을 만족한다고 정의한다.

$$(T_{in}^f + T_{in}^r) - (T_{out}^f + T_{out}^r) = (x_u^f - x_d^f) + (x_u^r - x_d^r) \tag{3}$$

### 3. 교통량 균형 측정

앞서 언급했듯이 TCS 교통량과 고속도로 측정교통량의 차종이 다르기 때문에 총교통량 측면에서 교통량 균형을 측정하였다. <Table 4>는 경부 고속도로 40개 구간의 교통량 균형 측정 결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 모든 구간에서 교통량 불균형이 나타나고 있다. 이와 같이 교통량 불균형이 나타나고 있는 고속도로 측정교통량은 교통량 균형을 만족하도록 보정할 필요가 있다.

<Table 4> Estimation Results of Traffic Volume Balancing on Kyoungbu Expressway

Category		$(x_u^f - x_d^f) + (x_u^r - x_d^r)$ (1)	$(T_{in}^f + T_{in}^r) - (T_{out}^f + T_{out}^r)$ (2)	Difference (1)-(2)
Yangsan	Yangsan JCT ~ Yangsan IC	7,154	332	6,822
	Yangsan IC ~ Tongdoshipass IC			
Tongdoshipass	Yangsan IC ~ Tongdoshipass IC	521	-1,498	2,019
	Tongdoshipass IC ~ Tongdosa IC			
Tongdosa	Tongdoshipass IC ~ Tongdosa IC	-2,214	1,726	-3,940
	Tongdosa IC ~ Seulsan IC			
Seulsan	Tongdosa IC ~ Seulsan IC	-2,893	-193	-2,700
	Seulsan IC ~ Eonyang JCT			

Category		$(x_u^f - x_d^r) + (x_u^r - x_d^f)$ (①)	$(T_{in}^f + T_{in}^r) - (T_{out}^f + T_{out}^r)$ (②)	Difference (①-②)
Gyeongju	Eonyang JCT ~ Gyeongju IC	1,057	127	930
	Gyeongju IC ~ Geoncheon IC			
Geoncheon	Gyeongju IC ~ Geoncheon IC	-373	537	-910
	Geoncheon IC ~ Yeongcheon IC			
Yeongcheon	Geoncheon IC ~ Yeongcheon IC	-6,753	-15	-6,738
	Yeongcheon IC ~ Gyeongsan IC			
Gyeongsan	Yeongcheon IC ~ Gyeongsan IC	4,543	96	4,447
	Gyeongsan IC ~ Dongdaegu JCT			
Bukdaegu	Dodong JCT ~ Bukdaegu IC	3,521	3,706	-185
	Bukdaegu IC ~ Geumho JCT			
Chilgokmulryu	Geumho JCT ~ Chilgokmulryu IC	4,642	358	4,284
	Chilgokmulryu IC ~ Waegwan IC			
Waegwan	Chilgokmulryu IC ~ Waegwan IC	-3,793	862	-4,655
	Waegwan IC ~ Namgumi IC			
Namgumi	Waegwan IC ~ Namgumi IC	-623	592	-1,215
	Namgumi IC ~ Gumi IC			
Gumi	Namgumi IC ~ Gumi IC	551	96	455
	Gumi IC ~ Gimcheon JCT			
Donggimcheon	Gimcheon JCT ~ Donggimcheon IC	209	442	-233
	Donggimcheon IC ~ Gimcheon IC			
Gimcheon	Donggimcheon IC ~ Gimcheon IC	664	-158	822
	Gimcheon IC ~ Chupungryung IC			
Chupungryung	Gimcheon IC ~ Chupungryung IC	-1,030	-26	-1,004
	Chupungryung IC ~ Hwanggan IC			
Hwanggan	Chupungryung IC ~ Hwanggan IC	53	-749	802
	Hwanggan IC ~ Yeongdong IC			
Yeongdong	Hwanggan IC ~ Yeongdong IC	-168	253	-421
	Yeongdong IC ~ Geumgang IC			
Geumgang	Yeongdong IC ~ Geumgang IC	463	76	387
	Geumgang IC ~ Okcheon IC			
Okcheon	Geumgang IC ~ Okcheon IC	1,105	-1,585	2,690
	Okcheon IC ~ Biryong JCT			
Daejeon	Biryong JCT ~ Daejeon IC	1,567	-600	2,167
	Daejeon IC ~ Hoedeok JCT			
Sintanjin	Hoedeok JCT ~ Sintanjin IC	462	-157	619
	Sintanjin IC ~ Cheongwon IC			
Namcheongju	Sintanjin IC ~ Cheongwon IC	-1,626	-133	-1,493
	Cheongwon IC ~ Nami JCT			
Cheongju	Nami JCT ~ Cheongju IC	-4,594	1,148	-5,742
	Cheongju IC ~ Mokchon IC			
Mokchon	Cheongju IC ~ Mokchon IC	2,339	1,400	939
	Mokchon IC ~ Cheonan JCT			
Cheonan	Mokchon IC ~ Cheonan JCT	-4,147	-5,960	1,813
	Cheonan JCT ~ Cheonan IC			
Bukcheonan	Cheonan IC ~ Bukcheonan IC	5,085	535	4,550
	Bukcheonan IC ~ Anseong IC			
Anseong	Bukcheonan IC ~ Anseong IC	2,648	1,420	1,228
	Anseong IC ~ Anseong JCT			
Giheung	Dongtan JCT ~ Giheung IC	-15,888	1,221	-17,109
	Giheung IC ~ Suwon IC			
Suwonsingal	Giheung IC ~ Suwon IC	4,258	1,691	2,567
	Suwon IC ~ Singal JCT			

## IV. 모형 구축 및 검증

### 1. 모형 구축

도로교통량 통계연보를 기반으로 한 고속도로 측정교통량은 식 (4)와 같이 측정오차를 포함하고 있다. 정확한 실제교통량을 알 수 없기 때문에 측정오차는 항상 존재하게 된다. 이로 인해 공간적 일관성 측면에서 교통량 불균형이 발생하게 된다.

$$y_i^j = x_i^j + e_i^j \quad (4)$$

여기서,  $y_i^j$ =실제교통량(=보정교통량)  
 $x_i^j$ =고속도로 측정교통량  
 $e_i^j$ =측정 오차  
 i=상류부 or 하류부, j=정방향 or 역방향

본 연구에서는 측정오차를 최소화하고 동시에 교통량 불균형을 보정하기 위해 식 (5)와 같이 최적화 모형을 사용한다. 최적화 모형의 목적함수는 측정오차를 최소화하는 보정교통량을 산출한다. 제약조건은 첫째, 교통량의 균형을 만족시킨다. 식 (3)을 이용하여 영업소 좌측과 우측에 위치한 본선의 방향별 교통량 차이의 합계가 영업소 유입 TCS 교통량과 유출 TCS 교통량 차이와 동일하게 측정교통량을 보정한다. 둘째, 측정교통량이 교통량 균형을 만족시키는 교통량으로 보정될 때 극단적인 보정될 수 있기 때문에 교통량 불균형 차이만큼 보정한다. 셋째, 측정교통량이 불균형 차이만큼 보정될 때  $y_u^f + y_u^r$ 와  $y_d^f + y_d^r$ 의 상한값 또는 하한값을 설정한다. 영업소 TCS 유입 교통량과 TCS 유출 교통량 차이 즉,  $(T_{in}^f + T_{in}^r) - (T_{out}^f + T_{out}^r) \geq 0$ 이면  $(y_u^f - y_d^f) + (y_u^r - y_d^r) \geq 0$ 이기 때문에  $y_u^f + y_u^r \geq y_d^f + y_d^r$ 이어야 한다. 반대로  $(T_{in}^f + T_{in}^r) - (T_{out}^f + T_{out}^r) \leq 0$ 이면  $y_u^f + y_u^r \leq y_d^f + y_d^r$ 이어야 한다.

$$\text{Minimize } \sum [y_i^j - x_i^j]^2, \quad i=u \text{ or } d, j=f \text{ or } r \quad (5)$$

s.t.

$$\text{Conservation : } (T_{in}^f + T_{in}^r) - (T_{out}^f + T_{out}^r) = y_u^f - y_d^f + y_u^r - y_d^r$$

$$\text{Correction total amount : } (T_{in}^f + T_{in}^r) - (T_{out}^f + T_{out}^r) - (x_u^f - x_d^f + x_u^r - x_d^r) = (y_u^f - x_u^f) + (y_d^f - x_d^f) + (y_u^r - x_u^r) + (y_d^r - x_d^r)$$

$$\text{Correction range : } (y_u^f + y_u^r) \geq (y_d^f + y_d^r) \text{ if, } (T_{in}^f + T_{in}^r) - (T_{out}^f + T_{out}^r) \geq 0$$

$$(y_u^f + y_u^r) \leq (y_d^f + y_d^r) \text{ if, } (T_{in}^f + T_{in}^r) - (T_{out}^f + T_{out}^r) \leq 0$$

$$\text{Non-negative : } y_u^f, y_d^f, y_u^r, y_d^r \geq 0$$

여기서,  $y_u^f$ =정방향(f) 상류부(u) 보정교통량,  $y_d^f$ =역방향(r) 하류부(d) 실제교통량  
 $y_u^r$ =역방향(r) 상류부(u) 보정교통량,  $y_d^r$ =역방향(r) 하류부(d) 실제교통량  
 f=정방향, r=역방향, u=상류부, d=하류부



## 2. 모형 검증

본 연구는 TCS 자료를 이용하여 실제교통량이 확인 가능한 고속도로 노선의 시점 또는 종점에 인접한 12개 구간을 대상으로 모형을 검증하였다. 가령, 시점 구간의 실제교통량  $y_u^f$ 는 <Fig. 2>와 같이 영업소 1에서 유출하는 TCS 교통량과 같다. 실제교통량  $y_d^f$ 는 식 (1)에 의해 실제교통량  $y_u^f$ 에서 유입교통량  $T_{i_n}^f$ 를 빼고 유출교통량  $T_{out}^f$ 를 더하여 산출할 수 있다. 여기서, 유입교통량  $T_{i_n}^f$ 는 영업소1에서 영업소2로 유입하는 TCS 교통량이고, 유출교통량  $T_{out}^f$ 는 영업소2에서 유출하는 총교통량 중 영업소1로 유출하는 교통량을 제외한 TCS 교통량이다. 실제교통량  $y_u^f$ 와  $y_d^f$ 도 동일한 방법으로 산출할 수 있다. 모형 검증 결과, <Table 5>와 같이 보정교통량은 보정 전의 측정교통량에 비해 실제교통량과의 차이가 적게 나타났다. 이는 교통량 불균형이 나타나고 있는 측정교통량을 교통량 균형에 만족하도록 보정할 경우 측정오차가 감소한다는 것을 의미한다.

<Table 5> Results of Model Verification

Category		Balancing before and after correction		Measured traffic volume and corrected traffic volume				
		Balancing before correction (①)	Balancing after correction (②)	True traffic volume (③)	Measured traffic volume (④)	Corrected traffic volume (⑤)	Difference(%)	
							(④-③)/③	(⑤-③)/③
Seopohang	Bukyeongcheon IC ~ Seopohang IC	-19	0	26,077	26,245	26,236	0.64%	0.61%
	Seopohang IC ~ Pohang IC			27,344	27,645	27,635	1.10%	1.07%
Mangsang	Donghae IC ~ Mangsang IC	-24	0	14,120	14,374	14,362	1.80%	1.71%
	Mangsang IC ~ Okgye IC			18,028	18,600	18,588	3.17%	3.11%
Namgangneung	Okgye IC ~ Namgangneung IC	245	0	19,081	18,049	18,171	-5.41%	-4.77%
	Namgangneung IC ~ Gangneung IC			22,044	15,107	15,230	-31.47%	-30.91%
Hajodae	Yangyang IC ~ Hajodae IC	57	0	4,281	4,247	4,276	-0.79%	-0.13%
	Hajodae IC ~ Hyunnam IC			10,160	9,245	9,273	-9.01%	-8.73%
BukyeoJu	Yangpyeong IC ~ BukyeoJu IC	-51	0	8,097	8,156	8,130	0.73%	0.41%
	BukyeoJu IC ~ SeoyeoJu IC			8,251	8,965	8,940	8.65%	8.34%
Buktongyeong	Tongyeong IC ~ Buktongyeong IC	-1,014	0	17,981	20,843	20,336	15.92%	13.10%
	Buktongyeong IC ~ Tongyeong IC			22,630	26,842	26,335	18.61%	16.37%

### V. 모형 적용 및 결과 분석

본 연구는 <Table 6>에서 보는 바와 같이 교통량 불균형이 나타나고 있는 경부고속도로 40개 구간에 본 연구의 모형을 적용해 보았다. 모형 적용 결과, 경부고속도로 40개 구간의 측정교통량은 -8.1%~9.6% 보정되었으며, 보정된 교통량만큼 측정오차가 감소한 것으로 나타났다. 다시 말해 모든 구간의 보정교통량은 교통량 균형을 만족시켜 보정교통량이 측정교통량에 비해 측정오차가 감소하였다. 특히, 측정교통량이 가장 크게 보정된 구간은 기흥 영업소(동탄JCT ~ 기흥IC, 기흥IC ~ 수원IC)사이의 구간으로 17,109대가 보정되어, 교통량 불균형이 가장 크게 개선되었다.

<Table 6> Results of Measured Traffic Volume Correction on Kyoungbu Expressway

Category		Balancing before vs after correction		Measured traffic volume vs Corrected traffic volume			
		Balancing before correction	Balancing after correction	Measured traffic volume	Corrected traffic volume	Difference	
						Traffic volume	%
Yangsan	Yangsan JCT ~ Yangsan IC	6,822	0	97,606	94,396	-3,210	-3.29%
	Yangsan IC ~ Tongdoshipass IC			68,418	64,806	-3,612	-5.28%
Tongdoshipass	Yangsan IC ~ Tongdoshipass IC	2,019	0	68,418	64,806	-3,612	-5.28%
	Tongdoshipass IC ~ Tongdosa IC			66,917	68,510	1,593	2.38%
Tongdosa	Tongdoshipass IC ~ Tongdosa IC	-3,940	0	66,917	68,510	1,593	2.38%
	Tongdosa IC ~ Seulsan IC			65,181	67,528	2,347	3.60%
Seulsan	Tongdosa IC ~ Seulsan IC	-2,700	0	65,181	67,528	2,347	3.60%
	Seulsan IC ~ Eonyang JCT			62,146	62,499	353	0.57%
Gyeongju	Eonyang JCT ~ Gyeongju IC	930	0	45,807	48,102	2,295	5.01%
	Gyeongju IC ~ Geoncheon IC			42,808	39,583	-3,225	-7.53%
Geoncheon	Gyeongju IC ~ Geoncheon IC	-910	0	42,808	39,583	-3,225	-7.53%
	Geoncheon IC ~ Yeongcheon IC			43,275	47,410	4,135	9.55%
Yeongcheon	Geoncheon IC ~ Yeongcheon IC	-6,738	0	43,275	47,410	4,135	9.55%
	Yeongcheon IC ~ Gyeongsan IC			50,788	53,391	2,603	5.13%
Gyeongsan	Yeongcheon IC ~ Gyeongsan IC	4,447	0	50,788	53,391	2,603	5.13%
	Gyeongsan IC ~ Dongdaegu JCT			87,107	80,057	-7,050	-8.09%
Bukdaegu	Dodong JCT ~ Bukdaegu IC	-185	0	153,936	154,029	93	0.06%
	Bukdaegu IC ~ Geumho JCT			162,233	162,325	92	0.06%
Chilgokmulryu	Geumho JCT ~ Chilgokmulryu IC	4,284	0	126,925	123,856	-3,069	-2.42%
	Chilgokmulryu IC ~ Waegwan IC			126,099	124,884	-1,215	-0.96%
Waegwan	Chilgokmulryu IC ~ Waegwan IC	-4,655	0	126,099	124,884	-1,215	-0.96%
	Waegwan IC ~ Namgumi IC			110,326	116,196	5,870	5.32%
Namgumi	Waegwan IC ~ Namgumi IC	-1,215	0	110,326	116,196	5,870	5.32%
	Namgumi IC ~ Gumi IC			93,061	88,406	-4,655	-5.00%
Gumi	Namgumi IC ~ Gumi IC	455	0	93,061	88,406	-4,655	-5.00%
	Gumi IC ~ Gimcheon JCT			85,784	89,984	4,200	4.90%

Category		Balancing before vs after correction		Measured traffic volume vs Corrected traffic volume			
		Balancing before correction	Balancing after correction	Measured traffic volume	Corrected traffic volume	Difference	
						Traffic volume	%
Donggimcheon	Gimcheon JCT ~ Donggimcheon IC	-233	0	45,414	47,181	1,767	3.89%
	Donggimcheon IC ~ Gimcheon IC			39,467	37,933	-1,534	-3.89%
Gimcheon	Donggimcheon IC ~ Gimcheon IC	822	0	39,467	37,933	-1,534	-3.89%
	Gimcheon IC ~ Chupungryung IC			35,421	36,133	712	2.01%
Chupungryung	Gimcheon IC ~ Chupungryung IC	-1,004	0	35,421	36,133	712	2.01%
	Chupungryung IC ~ Hwanggan IC			36,959	37,251	292	0.79%
Hwanggan	Chupungryung IC ~ Hwanggan IC	802	0	36,959	37,251	292	0.79%
	Hwanggan IC ~ Yeongdong IC			36,776	35,682	-1,094	-2.97%
Yeongdong	Hwanggan IC ~ Yeongdong IC	-421	0	39,088	40,603	1,515	3.88%
	Yeongdong IC ~ Geumgang IC			39,088	40,603	1,515	3.88%
Geumgang	Yeongdong IC ~ Geumgang IC	387	0	39,088	40,603	1,515	3.88%
	Geumgang IC ~ Okcheon IC			40,569	38,667	-1,902	-4.69%
Okcheon	Geumgang IC ~ Okcheon IC	2,690	0	40,569	38,667	-1,902	-4.69%
	Okcheon IC ~ Biryong JCT			54,724	53,936	-788	-1.44%
Daejeon	Biryong JCT ~ Daejeon IC	2,167	0	77,414	76,331	-1,083	-1.40%
	Daejeon IC ~ Hoedeok JCT			85,723	84,639	-1,084	-1.26%
Sintanjin	Hoedeok JCT ~ Sintanjin IC	619	0	98,348	97,438	-910	-0.93%
	Sintanjin IC ~ Cheongwon IC			118,504	118,795	291	0.25%
Namcheongju	Sintanjin IC ~ Cheongwon IC	-1,493	0	118,504	118,795	291	0.25%
	Cheongwon IC ~ Nami JCT			98,836	100,038	1,202	1.22%
Cheongju	Nami JCT ~ Cheongju IC	-5,742	0	79,457	83,598	4,141	5.21%
	Cheongju IC ~ Mokchon IC			83,839	85,440	1,601	1.91%
Mokchon	Cheongju IC ~ Mokchon IC	939	0	83,839	85,440	1,601	1.91%
	Mokchon IC ~ Cheonan JCT			86,716	84,176	-2,540	-2.93%
Cheonan	Mokchon IC ~ Cheonan JCT	1,813	0	86,716	84,176	-2,540	-2.93%
	Cheonan JCT ~ Cheonan IC			153,187	153,795	608	0.40%
Bukcheonan	Cheonan IC ~ Bukcheonan IC	4,550	0	176,218	173,797	-2,421	-1.37%
	Bukcheonan IC ~ Anseong IC			167,263	165,134	-2,129	-1.27%
Anseong	Bukcheonan IC ~ Anseong IC	1,228	0	167,263	165,134	-2,129	-1.27%
	Anseong IC ~ Anseong JCT			164,067	164,968	901	0.55%
Giheung	Dongtan JCT ~ Giheung IC	-17,109	0	155,284	167,546	12,262	7.90%
	Giheung IC ~ Suwon IC			217,164	222,011	4,847	2.23%
Suwonsingal	Giheung IC ~ Suwon IC	2,567	0	217,164	222,011	4,847	2.23%
	Suwon IC ~ Singal JCT			215,400	207,986	-7,414	-3.44%

## VI. 결론 향후 연구과제

본 연구에서는 측정교통량을 보정하기 위해 측정오차를 최소화하면서 동시에 TCS 교통량과 교통량 균형을 만족시키는 최적화 모형을 구축하였다. 최적화 모형을 고속도로 측정교통량에 적용한 결과, 보정교통량은 보정 전의 측정교통량에 비해 실제교통량과의 차이가 적은 것으로 나타났다. 이를 통해 교통량 불균형이 나타나고 있는 측정교통량이 교통량 균형에 만족되도록 보정할 경우 측정오차가 감소하는 것을 알 수 있었다. 구축된 모형을 교통량 불균형이 나타나고 있는 경부고속도로 40개 구간에 적용한 결과, 경부고속도로 40개 구간의 측정교통량이 -8.1%~9.6% 보정되었고, 보정된 교통량만큼 측정오차가 감소한 것으로 나타났다.

본 연구는 고속도로의 규모와 역할이 증가하고 있는 가운데 고속도로 측정교통량의 정확성을 향상시켰다는 점에서 의미가 있으나, 많은 개선사항이 필요하다. 첫째, 본 연구는 IC와 IC, IC와 JC, JC와 IC 사이에서 수집된 측정교통량으로 공간적 범위를 한정하였다. 다시 말해 JC와 JC 사이 영업소가 없는 구간에서 수집된 측정교통량은 보정하지 않았다. 향후에는 이러한 한계점을 고려하여 고속도로 측정교통량을 보정할 필요성이 있다. 둘째, 본 연구는 차종구분 없이 총 교통량 측면에서 분석하였으나, 승용차, 버스 등 차종을 구분한 분석이 수반되어야 할 것이다. 셋째, 본 연구는 경부고속도로를 대상으로 모형에 적용하였으나, 다른 고속도로 노선에도 적용이 필요할 것으로 판단된다. 마지막으로 본 연구에서는 TCS 교통량을 실제교통량으로 가정하였으나, TCS 자료 또한 오차가 내재하고 있을 것으로 판단된다. 따라서 향후에는 본 연구에서 실제교통량으로 가정한 TCS 교통량이 실제교통량으로 활용해도 되는지에 대한 규명이 필요할 것이다.

## REFERENCES

- Chen C., Kwon J., RTGe J., Skabardonis A. and Varaiya, P.(2003), "Detecting Errors and Imputing Missing Data for Single-Loop Surveillance Systems," *TRR*, 1855, TRB, pp.160-167.
- De Oña, Juan, Penélope Gómez and Enrique M. -C.(2012), "Method to detect malfunctioning traffic count stations," *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 6. no. 4, pp.364-371.
- Hu P. S.(2001), *Proof of Concept of ITS as An Alternative Data Resource: A Demonstration Project of Florida and New York Data*, ORNL Oak Ridge National Laboratory(US), p.33.
- Jagadeesh, George R., George R. Dhinesh and Thambipillai S.(2013), "Method for accuracy assessment of aggregated freeway traffic data," *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 8, no. 4, pp.407-414.
- Kikuchi S. and Miljkovic D.(1999), "Method to Preprocess Measured Traffic Data for Consistency : Application of Fuzzy Optimization Concept," *TRR*, 1679, TRB, pp.73-80.
- Kwon J., Petty K., Shieh E., Kopelias P. and Papandreou K.(2008), "Automatic Method for Imputing and Balancing Link Traffic Counts," *TRB 87rd Annual Meeting*, No. 08-2322, pp.1-7.
- Lee H. P., NamKoong S., Kim S. H. and Kim J.(2013), "Improvement of A Preprocessing of Archived Traffic Data Collected by Expressway Vehicle Detection System," *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 12, no. 1, pp.15-27.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2016), Annual traffic volume report, p.5.
- Shaw J. W. and Noyce D. A.(2014), "Automated Optimal Balancing of Traffic Volume Data for Large Access-Controlled Highway Networks and Freeway-to-Freeway Interchanges," *TRB 93rd Annual Meeting*, No. 14-3565, pp.1-13.

- Turner S. M., Eisele W. L., Gajewski B. J., Albert L. P. and Benz R. J.(1999), *ITS Data Archiving: Case Study Analysis of San Antonio TransGuide Data*, pp.90-113.
- US Department of Transportation, Fhwa(2001), *Traffic Monitoring Guide*, pp.3-41.
- Vanajakshi L. and Rilett L.(2004), "Loop Detector Data Diagnostics Based on Conservation-of-Vehicles Principle," *TRR 1870*, TRB, pp.162-169.
- Wall Z. R. and Dailey D. J.(2003), "Algorithm for Detecting and Correcting Errors in Archived Traffic Data," *TRR, 1855*, TRB, pp.183-190.
- Xin W., Hourdos J. and Michalopoulos P.(2006), *Streamlining of the Traffic Modeling Process for Implementation in the Twin Cities Freeway Network-Phase II*, No. MN/RC-2006-14, pp.15-18.
- Zhao M., Garrick N. and Achenie L.(1998), "Data Reconciliation-Based Traffic Count Analysis System," *TRR, 1625*, pp.12-17.
- Zheng P. and Mike M.(2012), "An Investigation on the Manual Traffic Count Accuracy," *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 43, pp.226-231.