

도로 공사구간 동적표지판 안전효과 평가: 사례 연구

Evaluating the Safety Effects of Dynamic Message in a Work Zone: A Case Study

문재필* · 이석기** · 조중호***

* 주저자 및 교신저자 : 한국건설기술연구원 수석연구원

** 공저자 : 한국건설기술연구원 연구위원

*** 공저자 : 서울시립대학교 박사과정 및 (주)레도 기술연구소장

Jae-Pil Moon* · Suk-Ki Lee* · Jung-Ho Cho**

* Korea Institute of Civil Engineering and Building Tech.

** Seoul University & LEDO Co., Ltd.

† Corresponding author : Jae-Pil Moon, jpmoon@kict.re.kr

Vol.18 No.3(2019)

June, 2019

pp.46~57

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

[https://doi.org/10.12815/kits.](https://doi.org/10.12815/kits.2019.18.3.46)

2019.18.3.46

Received 12 February 2019

Revised 22 February 2019

Accepted 25 June 2019

© 2019. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요약

일반적으로 도로 공사구간에서 발생하는 사망 포함한 심각한 부상의 주요 발생 원인중 하나가 과속이다. 이로 인해 도로 관리자는 열악한 도로 공사구간에서 도로 작업자와 운전자의 안전 개선에 관심을 가지고 있다. 본 연구에서는 속도 준수를 유도하기 위한 하나의 방안으로 이동식 가변 도로전광표지판을 적용하는 것이며 이에 대한 안전효과를 현장에서 평가하였다. 본 연구에서 적용한 안전효과 측정 방법은 평균 속도와 제한속도 준수 비율이다. 이러한 안전효과를 정량화하기 위해 선형회귀와 로지모델을 적용하였다. 그 결과는 가변 도로전광표지판 설치 전에 비해 설치후에서 대부분 관측 지점에서 통계적으로 유의하게 평균 속도가 감소하였으며 과속의 비율도 대략 50~80% 감소한 것으로 나타났다. 따라서 동적인 가변 도로전광표지판은 정적인 표지판보다 도로 공사구간에서 안전 편익을 더 제공할 수 있는 것으로 나타났다.

핵심어 : 도로 공사장, 동적 표지판, 안전, 속도

ABSTRACT

Generally speeding appeared to be the most contributing factor of fatalities occurred in work zones, and highway agencies in South Korea have concerned of the safety of workers and drivers in the poor circumstances. In this study, a portable variable message signs (PVMS) system as an alternative of control speeding in work zones was implemented. This study evaluated the safety effectiveness of the PVMS based on speeds and the compliance with the speed limit. Linear regression and logistic regression models were adopted to quantify the safety effect of the PVMS between the 'before' and 'after'. The results showed that most of points had statistically significant speeds reduction experience after PVMS installation. Also, the percentage of vehicle exceeding the speed limit by 10 km/h or more was decreased significantly between 50 and 80% in the 'after' periods compared to the 'before' periods. Therefore, the PVMS would be contributed to benefit safety in work zones which there is a difference in design speed of the adjacent normal section.

Key words : Work zone, Variable message sign, Safety, Speed

I. 서론

1. 개요

과속은 도로 공사구간에서 발생하는 교통사고의 사망·심각한 부상 주요 원인중 하나이기 때문에, 열악한 도로 공사구간에서 도로 작업자와 운전자의 안전 확보는 도로 관리자에게 큰 관심사이다. 특히, 도로 작업자는 주행 중인 자동차에 직접적으로 위험에 노출되기 때문에 일반구간에 비해 부상 심각도가 높다고 볼 수 있다. 2013년 산업안전보건연구에서 발간한 업무상 사망·재해 원인 분석에 의하면, 도로 공사구간의 재해발생이 다른 사업장에 비해 가장 높은 것으로 나타났다. 또한 2015년에서 2017년 간의 도로 공사구간에서 발생한 도로교통공단의 교통사고 통계자료에 의하면, 연간 약 700건이 발생하였으며 3년간 총 약 100명 사망과 총 약 3,600명이 부상한 것으로 나타났다.

도로 공사구간에서 속도를 통제하는 대안 중 하나는 과속 단속하는 것이다. 관련 연구에 의하면, 과속을 억제하고 제한속도 준수를 위해 과속 단속이 가장 효과적인 방법인 것으로 보여주고 있다. 그러나 과속 단속의 임무 수행 및 권한을 가지고 있는 경찰청이며 보유하고 있는 과속 단속 장비와 인원이 제한적이기 때문에 전체 도로 공사구간에 대해 과속 단속을 한다는 것은 어느 정도 한계가 있을 것으로 판단된다. 과속 단속 이외에 다른 방안 중 하나는 동적표지판, 가변도로전광표지판(Variable message sign) 적용이다. 이 방안은 안전속도로 유도하는 데 효과적이며 전 세계의 지능형 교통 시스템에 널리 사용하고 있다. 가변도로전광표지판을 통해 주의·규제·지시 정적 표지판과 운전자에게 전방 위험성 정보를 제공하는 것이다. 그러나 일반구간에서 사용하고 있는 가변도로전광표지판을 도로 공사구간과 같은 일시적으로 도로환경이 변경되는 구간에 설치 및 운영하기가 쉽지 않다. 그 이유는 설치 공간이 충분하지 않으며 일시적인 기간 동안 도로전광표지판을 설치 및 운영 그리고 철거가 경제적으로 비효율적일 수 있다. 만약 <Fig. 1>과 같은 이동식 가변도로전광표지판(Portable Variable Message Sign, PVMS)을 적용한다면 이러한 잠재적 문제 해결이 가능하다고 판단된다. 이를 위해, 본 연구에서는 도로 공사구간에서 PVMS를 적용에 따른 안전효과를 수행하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성하였다. 먼저, 기 수행된 문헌을 고찰하여 도로 공사구간의 안전증대를 위한 방안과 안전효과 평가 방법을 검토하였다. 평가 방법론을 정립한 다음, PVMS의 안전효과 평가 대상인 도로 공사구간을 선정하여 관련 자료를 수집하였다. 최종적으로 통계적 분석을 통해 PVMS의 안전 효과를 정량적으로 제시하였다.



<Fig. 1> PVMS implemented in a work zone

II. 기존연구 고찰

Santoago-Chaparro et al.(2012)는 미국 위스콘주에서 속도 피드백 표지판(Speed Feedback Sign, SFS)가 속도에 미치는 공간적 효과를 평가하였다. 또한 SFS의 최적 설치 위치를 결정하는 방법도 제시하였다. 그 연구 결과는 SFS가 도로안전에 대한 긍정적인 효과를 미치는 것으로 보여주고 있다. Cruszad and Donnell(2009)도 제한속도가 변경되는 전이 영역에서 동적 속도 표지판의 효과를 평가하였다. 그 결과에서도 이런 동적 표지판이 과속단속의 법 집행의 대안이라는 것을 보여주고 있다.

Hajbabaie et al.(2011)은 도로 공사구간에서 속도 감속 유도를 위한 다양한 방안을 적용하여 효과를 비교하였다. 본 연구에서 적용한 방안은 무인 과속단속 카메라, 동적 속도 피드백 표지판, 경찰 순찰 차량 및 경찰 순찰차와 속도 피드백 표지판의 조합이다. 이런 방안 중 무인단속 카메라가 평균 속도와 과속 비율 감소효과가 가장 큰 것으로 나타났으며, 경찰 순찰차와 속도 피드백 표지판의 조합, 속도 피드백 표지판 및 순찰차 순으로 효과가 나타났다. Median et al.(2009)도 도로 공사구간에서 다양한 속도 감속 유도 방안 설치에 따른 속도 감속 효과를 평가하였다. 마찬가지로 무인 과속단속 카메라가 가장 속도 감속효과가 있는 것으로 나타났다.

그 밖에, Benekohal et al.(2009)는 미국의 도로 공사구간을 대상으로 무인 과속단속 카메라에 대한 안전 효과를 평가하였다. 그 결과, 무인 카메라에 의한 과속 단속은 도로 공사구간의 안전 개선을 유도한 것으로 나타났다. 즉, 자유속도는 약 3~8mph 정도 감속한 것으로 나타났으며 과속의 비율은 약 15~50 %까지 감소한 결과를 보여주고 있다. Gates et al.(2011)은 도로 공사구간에서 야간 작업시 안전을 개선하기 위해 개발된 경고등을 교통콘에 부착할 경우에 대한 운전자의 반응을 평가하였다. 그러나 운전자 반응 분석 결과는 조명이나 야간 운전자 행동에 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 보여주고 있다.

이러한 안전 개선 방안 이외에도, 도로 공사구간에서 발생하는 혼잡을 완화하기 위한 방안도 있다. 즉, 조기 차로 합류 유도 시스템(The early lane merge system), 추후 차로 합류 유도 시스템(The later lane merge system), 동적 정보 제공 시스템(dynamic information system) 등이 도로 공사구간의 교통운영 상태를 개선하는데 포함된다. 이러한 교통운영 개선 방안 중에서는 교통사고의 위험을 감소시키는 데 기여하는 것으로 나타났다.

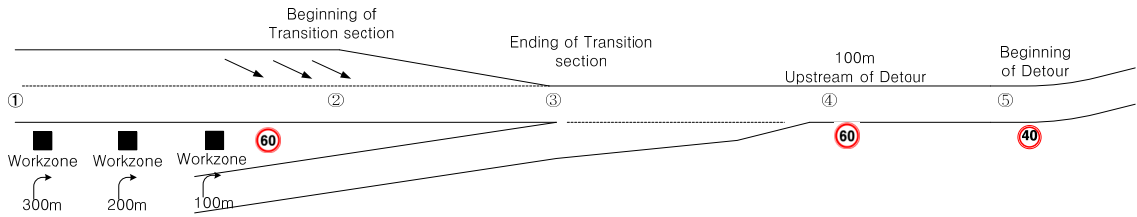
III. 안전효과 평가 방법

1. 현장조사 지점 선정

PVMS의 안전효과 평가는 충청남도 신양면에 위치한 국도 32호선의 한 공사구간에서 수행되었다. 해당 도로 공사구간은 2차로에서 4차로로 확장 공사구간이다. <Fig. 2>는 해당 도로 공사구간을 보여주고 있다. 도로 공사구간의 상류부는 중앙 분리대가 설치된 4차로도로인 반면, 하류부는 확장 공사관계로 임시 2차로도로로 운영하고 있다. 4차로에서 임시 2차로로 전이되는 구간의 길이는 200m이며, 전이구간이 끝나는 지점에서 해당도로에 접속한 도로는 도로 공사구간 동안 폐쇄되었다. 4차로도로의 제한속도는 80km/h, 전이구간은 60km/h, 임시 2차로도로는 40km/h이다. 해당 구간의 일평균 교통량은 3000대/일이며 자유속도는 87km/h인 것으로 관측되었다.

현 도로 공사구간에 설치된 정적 표지판은 전이구간 종점으로부터 상류부 300m, 200m, 100m 지점에 ‘전

방 차로 감소 및 우측 합류' 정보를 제공하는 정적 표지판이 설치되었다. 또한 상류부 100m 지점은 추가로 제한속도 60km/h의 규제표지판도 설치되었다. 제한속도 60km/h 적용구간은 임시 2차로도로로 시점까지이며, 임시 도로로부터 상류부 100m 지점에 제한속도 60km/h 표지판이 설치되었다. 그 밖에, 임시 2차로도로로 진입하는 시점부터 제한속도 40km/h 표지판이 설치되었다.



<Fig. 2> Layout of the work zone

본 연구에서 적용한 동적표지판은 임시 도로 시점으로부터 상류부 500m와 200m지점에 각각 설치하였다. 그러나 기 운영중인 임시 표지판은 현 상태로 유지시켰다. 상류부 500m지점에서 설치된 PVMS에서 제공되는 정보 내용은 '1차로'와 '폐쇄'가 교대로 표출하도록 설정하였다. 또한 상류부 100m지점의 PVMS는 제한속도 60km/h의 규제형태와 '감속' 두 가지 정보가 교대로 표출하도록 설정하였다. <Fig. 3>에서 두 개의 PVMS 운영상태를 보여주고 있다.



<Fig. 3> PVMS employed in 200m and 500m upstream of the work zone

2. 데이터 수집 방법

동적표지판의 안전효과를 평가하기 위해 PVMS 설치전과 후에 대해 주간과 야간으로 구분하여 현장조사를 수행하였다. 여기서 주간은 오전 6시부터 오후 6시 사이, 야간은 오후 6시부터 익일 오전 6시까지 구분하였다. 그러나 야간 현장조사는 PVMS의 제한적인 전력으로 인해 12시간동안 수행하지 못하고 오후 7시부터 9시까지 이루어졌다. '설치전'의 현장자료 수집은 2013년 10월 28일과 2014년 3월3일에 각각 수행되었다. '설치후'의 현장조사는 각 설치전의 현장조사 완료 후 다음날 이루어졌으나 7일 지나서 '설치후'에 대한 관련 교통자료를 수집하였다. 그 이유는 PVMS 설치에 의해 발생할 수 있는 새로운 효과(Novel effect)를 제거하여 PVMS의 순수 안전효과를 정량화하기 위한 것이다. 따라서 2013년 10월29일과 2014년 3월 4일에 PVMS 설치된 약 7일후에 2013년 11월 5일과 2014년 3월11일에 각각 설치후에 대한 관련 속도자료를 수집하였다.

속도자료는 이동식 검지기(NC-97)를 사용하여 개별 차량의 속도를 수집하였다. 속도측정 지점은 임시 2차

로도로의 시점으로부터 상류부 5개 지점에 설치되었다. <Fig. 2>와 같이, 속도측정 지점은 도로 기하구조 혹은 제한속도가 변경되는 지점을 중심으로 설정되었다. 즉, <Fig. 2>에서 ①은 상류부 500m 지점이며, ②는 전이구간 시점, ③은 전이구간 종점, ④는 상류부 100m 지점, ⑤는 임시 우회도로 시점에 해당된다. 야간은 PVMS의 제한적인 전력량으로 인해 제한적으로 운영하였다. 이전 기간의 데이터 수집은 2013년 10월 28일과 2014년 3월 3일에 각각 수행되었습니다. 디스플레이의 새로운 효과를 줄이기 위해 2013년 10월 29일과 2014년 3월 4일에 구현된 약 7일 후에 2013년 11월 5일과 2014년 3월 11일에 수집된 데이터가 각각 수집되었습니다. 주간 시간에 관측된 샘플수는 총 3,870이며, ‘설치전’의 자료수는 2,001, ‘설치후’의 자료수는 1,869이다. 야간의 경우는 총 1,320대가 관측되었으며, 이 중에서 ‘설치전’의 표본수는 810이며 ‘설치후’의 표본수는 510이다.

관측된 자료에 의하면, 전반적으로 ‘설치전’과 ‘설치후’의 시간당 교통량은 70~120 대인 것으로 나타났다. 비록 조사기간 동안 낮은 교통량일지라도, 차량간 상호작용에 의해 미치는 속도 영향을 제거하기 위해 각 차량간 10초 이하의 차두시간은 안전효과 분석 시 제외시켰다. 또한 차량간 상호작용이외에, 악천후 등 속도에 부정적 영향을 미치는 요인이 발생한 시간에 해당되는 자료도 효과 분석에 제외시키기 위해 각 해당조사일에 대한 실시간 기상정보 또는 현장 확인을 통해 수행되었다. 그러나 해당조사일 동안 기상조건에 따른 영향은 없는 것으로 나타났다.

3. 안전효과 분석방법

본 연구에서 다음과 같은 내용을 분석하였다.

- ‘설치전’과 ‘설치후’간 각 속도 관측 지점별 평균속도와 편차에 대한 통계적 차이
- ‘설치전’에 비해 ‘설치후’의 정량적 속도 감소 효과
- ‘설치전’에 비해 ‘설치후’의 과속(제한속도보다 10km/h 이상)의 비율 감소 효과

위에서 제시한 안전효과 분석을 수행하기 위해 Ramsey and Schafer(2002)가 기술한 통계적 기법을 적용하였다. 먼저, 각 속도 관측 지점별로 ‘설치전’과 ‘설치후’간 평균속도와 편차에 대한 통계적 차이가 있는지를 평가하기 위해 F-test와 t-test를 수행하였다. 두 번째로, PVMS 설치로 인해 발생하는 순수 안전효과(속도와 과속 비율)를 정량화시키기 위해 속도 감소 효과의 경우는 선형 회귀모델(Liner regression), 과속 비율의 경우는 로지스틱 회귀모델(Logistic regression)을 각각 적용하였다. 일반적으로 종속변수가 연속형 변수인 경우는 선형 회귀모델을 적용하며, 이산형 변수인 경우는 로지스틱 회귀모델을 적용한다. <Table 1>에서는 회귀모델에 적용한 독립변수들을 보여주고 있다.

<Table 1> Variables of the regression analyses

Variable	Description	Level
Point	Each speed collection point	5 points
Time	Day time: 06:00 AM to 06:00 PM, Night time: 06:00 PM to 06:00 AM	Day Night
Period	Before and after implementing PVMS	Before After

IV. 분석결과

1. '설치전'과 '설치후'간 평균속도와 분산 차이

0.05의 통계적 유의수준을 토대로 각 속도 관측 지점별 '설치전'에 비해 '설치후'의 속도와 분산에 차이가 있는지를 t-test와 F-test를 주간과 야간에 대해 각각 수행하였다. <Fig. 4>는 각 지점별로 '설치전'과 '설치후'의 속도 분산을 주간과 야간에 대해 각각 비교하였다. 또한 <Table 2>에서는 양측검증(two-tailed) F-test를 수행한 결과를 보여주고 있다. <Table 2>에 의하면, 주간의 경우는 두 개 지점 그리고 야간의 경우는 세 개 지점에서 '설치전'과 '설치후'간 속도의 분산은 0.05의 유의수준에서 통계적으로 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 '설치전'과 '설치후'에서 속도의 분산 차이는 일정한 감소 혹은 증가 경향보다는 무작위하게 발생한 것으로 판단되며 전체 구간을 고려할 경우는 분산 값이 큰 변화가 없다고 판단된다.

<Fig. 5>는 각 지점별로 '설치전'과 '설치후'의 평균속도를 주간과 야간에 대해 각각 비교하였다. '설치후'의 대부분 지점에서 '설치전'에 비해 속도가 5~10km/h 정도 감속한 것으로 나타났다. 그러나 상류부의 첫 번째 지점은 다른 지점에 비해 '설치전'과 '설치후'의 속도 변화가 없는 것으로 나타났다. <Table 3>에서는 유의수준 0.05에서 양측검증(two-tailed) t-test를 수행한 결과를 보여주고 있다. 이 t-test는 앞에서 수행한 F-test의 결과에 의해 두 그룹간 동일한 분산의 경우에 대해 적용하였다. 그 결과는 주간과 야간에 대해 '설치전'과 '설치후'간 통계적으로 유의하게 속도 차이가 있는 것으로 보여주고 있다. 그러나 주간과 야간 간의 평균 속도에서 뚜렷한 차이가 있는 것으로 나타났지만, 전체적으로 주간과 야간 간의 감속효과는 거의 비슷한 것으로 보여주고 있다. 그 밖에, <Table 4>에서는 각 지점에 따른 통계적으로 속도 차이가 있는지를 분석하였다. 대부분 조건에서 상류부에서 도로 공사장 시점에 접근할 수 록 차량의 속도를 점진적으로 감소하는 것으로 나타났으며 통계적으로 감속 차이가 유의한 것으로 보여주고 있다. 그러나 야간의 '설치후'의 조건에서는 도로 공사장의 상류부부터 감속된 속도를 유지하여 도로 공사구간에 접근하는 것으로 나타났다. 즉, 상류부 속도, 중간부 속도 그리고 공사장 시점간의 속도 차이가 통계적으로 유의하지 않는 것으로 나타났다.

<Table 2> Results of F-test for variance

Time	Point	Variance			p-value	Test Results
		Before	After	Difference1)		
Day	1	21.4	17.4	-4.0	0.0001	Reject
	2	17.4	20.3	2.9	0.0001	Reject
	3	17.0	15.7	-1.3	0.116	No reject
	4	14.8	15.9	1.1	0.238	No reject
	5	15.5	13.0	-2.5	0.001	Reject
Night	1	19.7	20.7	1.0	0.601	No reject
	2	18.5	18.0	-0.5	0.803	No reject
	3	15.2	15.5	0.3	0.753	No reject
	4	14.9	12.4	-2.5	0.01	Reject
	5	12.9	15.3	2.4	0.01	Reject

1) 'after'-'before'

<Table 3> Results of t-test for mean speeds between 'Before' and 'After' by each point

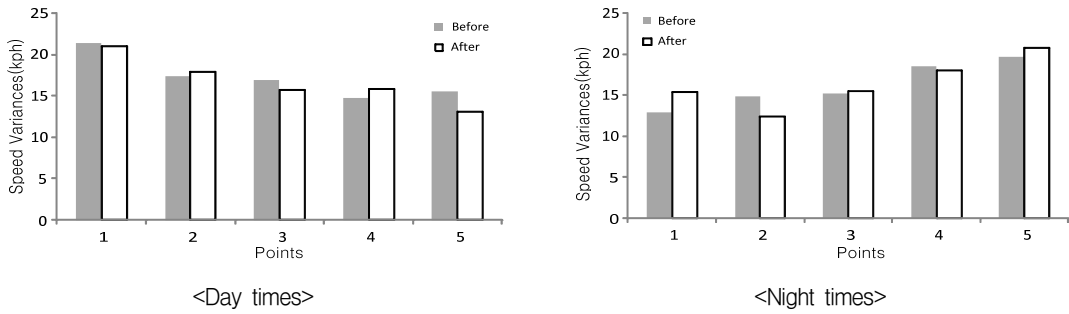
Time	Point	Variance			p-value	Test Results
		Before	After	Difference1)		
Day	1	82.6	83.0	0.4	0.78	No reject
	2	83.9	79.5	-4.4	0.0005	Reject
	3	78.9	74.4	-4.5	< 0.0001	Reject
	4	78.6	66.3	-12.2	< 0.0001	Reject
	5	68.1	68.4	-0.3	0.77	No reject
Night	1	78.1	69.0	-9.1	0.007	Reject
	2	79.2	70.6	-8.6	0.0003	Reject
	3	77.3	71.5	-5.7	0.0007	Reject
	4	73.9	69.6	-4.3	0.0007	Reject
	5	66.5	66.6	0.1	0.941	No rejectt

1) 'after'-'before'

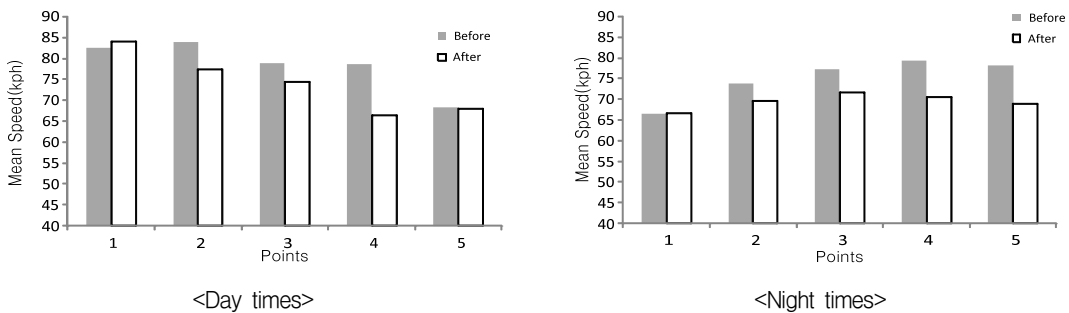
<Table 4> Results of t-test for mean among points by each period

Time	Comparing Points	Before					After				
		1th1)	2nd2)	Diff3)	p-value	Test Results	1th	2nd	Diff	p-value	Test Results
Day	1 and 2	82.6	83.9	1.3	0.241	No reject	83.0	79.5	-3.5	0.006	Reject
	1 and 3	82.6	78.9	-3.7	0.0003	Reject	83.0	74.4	-8.6	< 0.0001	Reject
	1 and 4	82.6	78.6	-4	< 0.0001	Reject	83.0	66.3	-16.7	< 0.0001	Reject
	1 and 5	82.6	68.1	-14.5	< 0.0001	Reject	83.0	68.4	-14.6	< 0.0001	Reject
	2 and 3	83.9	78.9	-5	< 0.0001	Reject	79.5	74.4	-5.1	< 0.0001	Reject
	2 and 4	83.9	78.6	-5.3	< 0.0001	Reject	79.5	66.3	-13.2	< 0.0001	Reject
	2 and 5	83.9	68.1	-15.8	< 0.0001	Reject	79.5	68.4	-11.1	< 0.0001	Reject
	3 and 4	78.9	78.6	-0.3	0.662	No reject	74.4	66.3	-8.1	< 0.0001	Reject
	3 and 5	78.9	68.1	-10.8	< 0.0001	Reject	74.4	68.4	-6	< 0.0001	Reject
Night	4 and 5	78.6	68.1	-10.5	< 0.0001	Reject	66.3	68.4	2.1	0.273	No reject
	1 and 2	78.1	79.2	1.1	0.505	No reject	69.0	70.6	1.6	0.667	No reject
	1 and 3	78.1	77.3	-0.8	0.497	No reject	69.0	71.5	2.5	0.462	No reject
	1 and 4	78.1	73.9	-4.2	0.0004	Reject	69.0	69.6	0.6	0.862	No reject
	1 and 5	78.1	66.5	-11.6	< 0.0001	Reject	69.0	66.6	-2.4	0.475	No reject
	2 and 3	79.2	77.3	-1.9	0.207	No reject	70.6	71.5	0.9	0.691	No reject
	2 and 4	79.2	73.9	-5.3	0.0004	Reject	70.6	69.6	-1	0.647	No reject
	2 and 5	79.2	66.5	-12.7	< 0.0001	Reject	70.6	66.6	-4	0.088	No reject
	3 and 4	77.3	73.9	-3.4	0.0011	Reject	71.5	69.6	-1.9	0.281	No reject
3 and 5	77.3	66.5	-10.8	< 0.0001	Reject	71.5	66.6	-4.9	0.013	Reject	
4 and 5	73.9	66.5	-7.4	< 0.0001	Reject	69.6	66.6	-3	0.077	No reject	

1) leading position 2) lagging position 3) 2nd-1th



<Fig. 4> Speed variances between 'before' and 'after'



<Fig. 5> Mean speeds between 'before' and 'after'

2. 선형회귀 모델을 이용한 속도 저감효과 분석

PVMS 설치·운영에 따른 순수 속도 저감효과를 통계적으로 정량화하기 위해 다음과 같이 선형회귀 모델을 적용하였다. 여기서, 'Point' 변수는 PVMS요인이외에 다른 요인으로 인해 속도와 과속비율의 이질성 (heterogeneity)을 설명하여 PVMS 효과를 과소 혹은 과도하게 평가하는 것을 극복하기 위해 'fixed effect'보다 'random effect'로 적용하였다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 \times Period + \beta_2 \times Time + \beta_3 \times Period \times Time + \beta_4 \times Point \quad (1)$$

여기서,

y : 속도(km/h)

Period : PVMS '설치전'과 '설치후'

Time : 주간과 야간

Point : 검지기 설치 지점

회귀모델은 식(1)과 총 관측 수 3,870개를 토대로 각 독립변수와 독립변수간 교호작용(intersection)에 대한 통계적 유의검정을 통해 모형 적합도를 단계적으로 평가하였다. 이러한 통계적 유의검정이외에 모형의 적합도 기준으로 각 모델에 대한 AIC와 BIC를 고려하여 식(2)와 같이 최종 모델을 결정하였다. <표 5>에서 최종 모델의 각 변수에 대한 속성값을 보여주고 있으며, R² 값은 0.78이다. 최종 모델에 의하면, '설치전'보다 '설치후'의 해당 구간에 대한 평균속도가 약 5km/h 감소한 것으로 나타났다. 또한 '설치전'과 '설치후'에서 주간에 비해 야간의 평균속도는 약 4km/h 정도 낮은 것으로 보여주고 있다.

이러한 최종 선형회귀 모델을 기반으로 PVMS의 순수 속도저감 효과를 평가하였다. 그 결과는 <Table 6>에서 보여주고 있다. 주간은 '설치전'보다는 약 3km/h, 야간의 경우는 약 4km/h정도 속도가 감소하는 것으로 나타났다.

$$y = \beta_1 \times Period + \beta_2 \times Period \times Time + \beta_3 \times Point \tag{2}$$

<Table 5> Fixed effect of each factor of the best linear regression model

Variable	Level	Num DF	Estimate	Standard Error	95% Confidence Limit		Pr>t
Period	After	1	74.99	0.88	73.2	76.7	< 0.001
	Before		79.43	0.55	78.4	80.5	< 0.001
Period*Time	After*Day	2	4.45	0.88	2.7	6.2	< 0.001
	After*Night		0	-	-	-	-
	Before*Day		3.37	0.48	2.4	4.3	< 0.001
	Before*Night		0	-	-	-	-

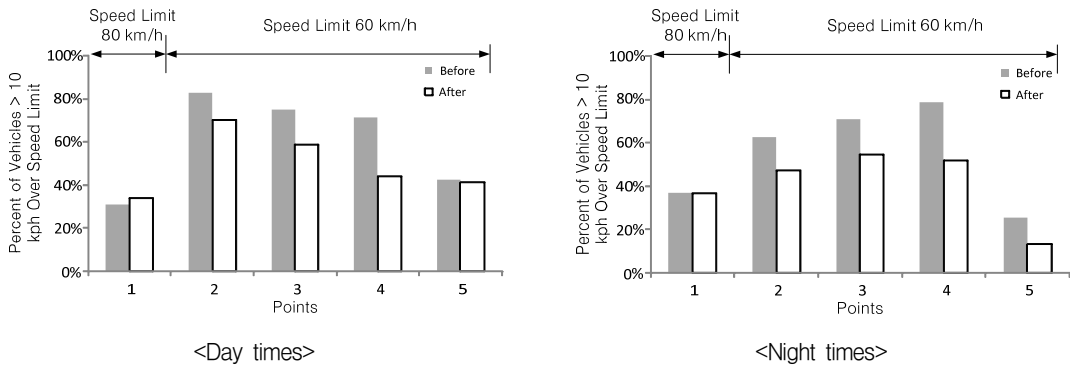
<Table 6> Net decrement effect of the PVMS on speeds

Time	Estimate of Difference ¹⁾ (km/h)	Standard Error	p-value	Test Results	
				Lower	Upper
Day	-3.4	0.53	<0.0001	-2.3	-4.4
Night	-4.4	0.87	<0.0001	-2.7	-6.2

1) 'after'-'before'

3. Logistic 회귀모형을 이용한 과속비율 저감효과 분석

<Fig. 6>은 각 주간과 야간에 대해 각 지점별로 '설치전'과 '설치후'간 과속 비율을 보여주고 있다. 주간은 우회도로 시점과 첫 번째 지점(공사구간 시점으로부터 상류부 500m를 제외하고는 대부분 속도 측정 지점에서 과속 비율 감소하는 경향을 타났다. 특히, 야간의 경우는 첫 번째 지점제외하고는 모든 지점에서 주간에 비해 상당히 과속비율이 감소한 것으로 나타났다.



<Fig. 6> Percentage of vehicles more than 10km/h over speed limit between 'before' and 'after'

선형 회귀모델과 같이 PVMS 설치·운영에 따른 순수 과속 비율 저감 효과를 통계적으로 정량화하기 위해 로지스틱 회귀모델을 적용하였다. 선형 회귀모델에서 적용한 독립변수들을 적용하였으며, 종속변수는 속도 대신 과속 여부를 적용하였다. 마찬가지로 ‘Point’변수는 ‘random effect’로 고려하였다. 그 밖에 각 독립변수와 독립변수간 교호작용(interaction)에 대한 통계적 유의검정 수행과 모형의 적합도 판단기준으로 가장 작은 QIC(Quasilikelihood Information Criterion) 값을 가지는 최종 모델을 개발하였다. 최종 로지스틱 회귀모형은 식(3)과 같다.

$$\text{Logit}(\pi) = \beta_0 + \beta_1 \times \text{Period} + \beta_2 \times \text{Period} \times \text{Time} + \beta_3 \times \text{Point} \tag{3}$$

여기서,
 π : 과속 비율

<Table 7>은 로지스틱 회귀모형을 이용하여 PVMS 설치에 따른 과속비율 모형 개발결과를 보여주고 있다. 최종 모델에 의하면, ‘Period’의 매개변수 값의 승산비(Odds ratio)는 1.31로 ‘설치후’보다 ‘설치전’의 과속 비율이 1.31배만큼 높다는 의미이다. 또한 ‘Period’와 ‘Time’간 교호작용의 매개변수 값의 승산비 0.44와 0.89에 대한 의미는 야간에 비해 주간의 과속비율이 ‘설치전’의 경우는 56%, ‘설치후’는 11% 낮다는 것이다.

이러한 개발된 모델을 가지고 PVMS운영에 따른 과속비율에 미치는 순수 영향정도를 주간과 야간에 대해 평가하였다. 그 결과는 <Table 8>에서 보여주고 있다. <Table 8>에 의하면, 주간의 경우는 ‘설치전’의 과속 비율은 ‘설치후’의 과속 비율의 1.49배, 야간의 경우는 ‘설치전’에 비해 ‘설치후’의 과속 비율 1.76배로 나타났다. 이것은 ‘설치후’의 과속 비율이 ‘설치전’에 비해 주간의 경우 49% 그리고 야간의 경우 76% 감소했다는 것을 의미한다.

<Table 7> Fixed effect of each factor of the best logistic regression model

Variable	Level	Estimate	Standard Error	95% Confidence Limit		Pr> Z
Intercept	-	-1.4750	0.1485	-1.7661	-1.1838	< 0.001
Period	Before	0.5673	0.1773	0.2198	0.9147	0.0014
	After	0	0	0	0	-
Period*Time	Before*Day	0.3042	0.0614	0.1839	0.4245	< 0.001
	Before*Night	0	0	0	0	-
	After*Day	0.4706	0.1745	0.1286	0.8125	< 0.001
	After*Night	0	0	0	0	-

<Table 8> Net effect of the PVMS on speeding

Time	Estimate of Difference1)	Standard Error (km/h)	p-value	Test Results	
				Lower	Upper
Day	1.49	0.2886	<0.0381	1.022	2.181
Night	1.76	0.3126	<0.0014	1.246	2.496

1) ‘after’-‘before’

V. 결 론

본 연구에서는 도로 공사구간에서 발생하는 사망사고의 주요 원인인 과속을 줄이기 위한 하나의 방안인 동적 표지인 가변도로전광표지판의 안전효과를 정량적으로 평가하였다. 안전효과 척도로는 가변도로전광표지판 설치전과 설치후에 대한 속도감속과 과속(제한속도보다 10km/h 이상) 비율을 적용하였다. 속도관련 자료는 도로 공사장으로 접근하는 상류부에서부터 공사시점까지 일정한 간격으로 설치된 검지기를 통해 수집하였다. 이러한 방법으로 관측된 속도자료를 토대로 ‘설치전’과 ‘설치후’ 간 각 속도 관측지점별로 평균속도와 속도편차에 대한 통계적 차이 분석, 선형 회귀모형을 통해 ‘설치전’에 비해 ‘설치후’의 정량적 속도 감속 효과, 로지스틱 회귀모형을 통해 과속 비율 감소 효과를 평가하였다. 이러한 분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 어떤 속도 관측 지점에서 ‘설치전’과 ‘설치후’간 속도편차는 통계적으로 차이가 있는 것으로 나타났으나, 다른 관측 지점에서는 속도편차가 통계적으로 유의하지 않는 것으로 나타났다. 전체 구간을 고려할 경우는 ‘설치전’과 ‘설치후’간 속도편차에서 뚜렷한 변화가 없는 것으로 판단된다.
- 속도편차가 변화가 없는 반면, 대부분 지점에서 평균속도는 ‘설치전’에 비해 ‘설치후’에서 낮아지는 경향이 나타났다. 또한 주간과 야간에서 이런 감속 현상이 유사한 것으로 나타났다.
- 선형 회귀모형을 통해 주간의 경우는 약 3km/h 그리고 야간의 경우는 약 4km/h로 ‘설치전’에 비해 ‘설치후’의 속도가 도로 공사장 접근도로에서 감소하는 것으로 나타났다.
- 로지스틱 회귀모형을 통해 ‘설치전’에 비해 ‘설치후’의 과속 비율은 주간의 경우는 약 50%, 야간의 경우는 약 80%정도 감소하는 것으로 나타났으며 평균속도에 비해 감소의 효과가 상당히 큰 것으로 보여주고 있다. 또한 주간에 비해 야간에서 과속 비율의 감소효과가 더 두드러지는 것으로 나타났다.

비록 속도편차의 변화가 뚜렷하게 보이지 않았지만, 평균속도와 과속차량 비율 감소 결과는 정적 표지판에 비해 동적 표지판은 모든 차량에게 도로 공사구간의 안전효과에 긍정적으로 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 도출된 결과는 제한적인 지점, 데이터 그리고 기간을 기반으로 이루어졌기 때문에 장기적인 측면에서 다양한 도로 공사구간 조건에서 동적 표지판의 효과를 모니터링하는 것이 필요하다고 판단된다. 그 밖에, 동적표지판에 표출되는 정보내용이 도로 공사장에 접근하는 운전자에게 어떤 영향을 미치는 지도 정량적으로 분석할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통기술사업화 지원사업(17TBIP-C111467-02-000000)의 지원을 받아 수행하였습니다.

REFERENCES

- Benekohal R. F., Wang M. -H., Chittrui M. V., Hajbabaie A. and Median J. C.(2009), “Speed Photo-Radar Enforcement and Its Effects on Speed in Work Zones,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2096, pp.88-97.

- Brewer M. A., Pesti G. and Schneider IV W.(2006), "Improving Compliance with Work Zones Speed Limits: Effectiveness of Selected Devices," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 1948, pp.67-76.
- Cruzado I. and Donnell E. T.(2009), "Evaluating Effectiveness of Dynamic Speed Display Signs in Transition Zones of Two-Lane, Rural Highways in Pennsylvania," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2122, pp.1-8.
- Cunningham C. M., Hummer J. E. and Moon J. P.(2004), *An Evaluation of the Safety Effects of Speed Enforcement Cameras in Charlotte*, NC. Institute for Transportation Research and Education, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
- Gates T. J., Savolainen P. T., Datta T. K. and Nannapaneni P.(2011), "Impact on Driver Behavior of Steady-Burn Warning Lights on Channelizing Drums in Work Zones," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2258, pp.25-31.
- Grillo L. F., Datta T. K. and Hartner C.(2008), "Dynamic Late Lane Merge System at Freeway Construction Work Zones," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2055, pp.3-10.
- Hajbabaie A., Median J. C., Wang M. -H., Benekohal R. F. and Chittrui M.(2011), "Sustained and Halo Effects of Various Speed Reduciton Treatments in Highway Work Zones," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2265, pp.118-128.
- Median J. C., Benekohal R. F., Hajbabaie A., Wang M. -H. and Chittrui M. V.(2009), "Downstream Effects of Speed Photo-Radar Enforcement and Other Speed Reduction Treatments on Work Zones," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2107, pp.24-33.
- Ramsey F. L. and Schafer D. W.(2002), *The Statistical Sleuth: A Course in Methods of Data Analysis(Second Edition)*, DUXBURY.
- Santiago-Chaparro K. R., Chitturi M., Bill A. and Noyce D. A.(2012), "Spatial Effectiveness of Speed Feedback Signs," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2281, pp.8-15.
- Tooley M. S., Gattis J. L., Janarthanan R. and Duncan L. K.(2004), "Evaluation of Automated Work Zone Information System," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 1877, pp.69-76.