

차량 궤적 데이터를 활용한 연속웨이블릿변환 기반 충격파 검지 방법 개발

Development of a Shockwave Detection Method based on Continuous Wavelet Transform using Vehicle Trajectory Data

양 인 철* · 전 우 훈** · 이 조 영***

* 주저자 : 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 도로관리통합센터
 ** 교신저자 : 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 도로관리통합센터
 *** 공저자 : Dept. of Civil Engineering, New Jersey Institute of Technology

Inchul Yang* · Woo Hoon Jeon* · Jo Young Lee**

* Integrated Road Management Center, Dept. of Infrastructure Safety Research, KICT
 ** Dept. of Civil Engineering, New Jersey Institute of Technology
 † Corresponding author : Woo Hoon Jeon, cwmoon@kict.re.kr

Vol.18 No.5(2019)

October, 2019

pp.183~193

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

<https://doi.org/10.12815/kits.2019.18.5.183>

2019.18.5.183

Received 19 August 2019
 Revised 4 September 2019
 Accepted 16 September 2019

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

요 약

본 연구에서는 전/후방 차량 검지가 가능한 차량센서를 탑재한 프로브 차량으로 수집한 주행 궤적을 이용하여 연속웨이블릿변환 기반 충격파 검지 및 소멸 시점 예측 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 효과성 분석을 위하여 충격파 소멸점 간 거리오차와 충격파 소멸점 시간-위치 오차를 평가 지표로 제시하였고, 교통혼잡 수준, 속도 감소 현상 지속시간, 프로브 차량의 비율 등을 실험요인으로 하는 미시적 시뮬레이션 기반의 실험을 통하여 제안된 방법의 개념을 검증하였다. 그 결과, 두 가지 평가 지표 모두 교통혼잡 수준 및 속도 감소 지속시간에 크게 민감하지 않음을 보임으로서, 본 연구에서 제안하는 방법이 입의의 위치와 시간 동안 발생하는 속도 감소 현상으로 인한 충격파를 검지하고 그 소멸시점을 예측하는데 효과가 있음을 보였다. 그리고 그 정확도는 전체 차량 중 프로브 차량의 비율에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.

핵심어 : 차량센서, 프로브 차량, 연속웨이블릿변환, 충격파, 차량 궤적 데이터

ABSTRACT

This study developed a shockwave detection and prediction of their extinction point method based on continuous wavelet transform using trajectory data from probe vehicles equipped with automotive sensors.. To analyze the effectiveness of the proposed method, this paper proposed two measures which are a distance error between the extinction points of the predictor and an time-location error of the extinction points. The proposed concept was proved using the micro simulation based experiment with three exogenous variables of traffic volume, lane-close duration, market penetration of probe vehicles. The analysis results show that the proposed method is capable of detecting the traffic shockwaves as well as predicting their extinction point, and also that the accuracy of the proposed method is highly dependent on the rate of the probe vehicles.

Key words : Automotive sensor, Probe vehicle, Continuous wavelet transform, Traffic shockwave, Vehicle trajectory data

I. 서론

충격파 이론(Shockwave theory)은 안정적인 교통류 상태가 어떤 요인에 의하여 불안정한 상태로 변화하거나 혹은 그 반대 현상을 설명하는 교통류 이론으로, 지체체 등과 같은 교통혼잡뿐만 아니라 교통흐름의 안전성을 분석하는데 매우 중요한 단서를 제공한다. 최근에는 충격파 이론을 활용하여 실시간 가변 속도 제한(Variable Speed Limit) 기술이나 고속도로 속도-교통량 조화제어(Speed Harmonization) 기술 등과 같은 첨단 교통운영관리 전략을 수립하고 이를 실제 교통혼잡 완화 기술에 적용하고자 하는 노력들이 진행 중에 있다.

특히 과거 수십여 년 간 교통운영관리 측면에서 충격파의 실시간 검지 및 충격파 소멸 시점의 예측을 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다. 이러한 연구들은 주로 도로에 설치된 루프 검지기로부터 수집된 지점 속도, 교통량, 및 점유율 데이터를 가공하는 방식으로 이루어져 왔기 때문에 정밀한 충격파 검지를 위해서는 상당한 수의 검지기가 매우 조밀하게 설치되어야 했고, 이는 효율성 측면에서 바람직하지 못하다는 평가를 받아왔다.

최근 차량용 내비게이션, 스마트 폰 등 GPS를 장착한 무선통신 기기가 대중화되면서 개별차량의 실시간 위치정보 수집이 용이해졌고, 더욱이 ADAS(Advanced Driver Assist System)와 자율주행과 같이 최첨단 센서를 장착한 차량의 보급이 증가하면서 자차의 위치뿐만 아니라 주변 차량의 위치 데이터를 동시에 취득할 수 있게 되었다. 이러한 데이터를 이용하여 통행시간, 교통량, 교통밀도 등과 주요 정보를 실시간으로 검지하고 예측하는 기술들이 많이 연구되고 있으나 교통류에서 중요하게 다루어지는 충격파를 직접 검지하는 연구들은 아직 미미한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 전/후방 차량 검지가 가능한 차량센서를 탑재한 프로브 차량으로 수집한 주행 궤적을 이용하여 연속웨이블릿변환(Continuous Wavelet Transform, CWT) 기반 충격파 검지 및 소멸 시점 예측 방법을 개발하였다.

II. 문헌고찰

충격파 이론은 과거 오랜 기간 동안 교통류 이론을 활용한 다양한 응용기술에 광범위하게 적용되어 왔다. 본 장에서는 충격파 이론 기반의 국내외의 관련 연구들을 고찰하고 시사점을 논의한다.

Kang(2000)은 신호교차로에서 발생하는 지체를 추정하기 위하여 수평충격파이론(Horizontal Shockwave Theory)을 이용하였고, Lee et al.(2008)은 단속류 교통흐름을 모사하기 위한 충격파 기반 거시적 시뮬레이션 모형을 제안하였다. Kim et al.(2010)은 Kang(2000)의 연구를 확장하여 버스 및 승용차로 이루어진 비포화 혼합교통류 상황에서 수평충격파를 이용하여 신호교차로와 버스 정류장 사이에서 발생하는 지체를 산정하기 위한 모형을 제안하였는데, 이는 승용차와 버스가 섞인 혼합 교통류 상황에서 교차로 주변 버스의 정차로 인한 충격파 변화를 모형화 하였다.

Park et al.(2010)등은 충격파이론을 이용하여 속도 조화 알고리즘을 개발하고 미시적 시뮬레이션 모형을 통하여 그 효과성을 분석하는 연구를 수행하였고, 충격파 이론을 속도조화에 적용한 Hegyi et al.(2005)은 충격파를 제거하도록 고안된 상류부 속도 조정 알고리즘이 전체 본선 통행시간을 최대 21%까지 줄일 수 있음을 시뮬레이션 모형을 통하여 확인하였다. Hadiuzzaman et al.(2013)은 충격파의 발생을 예측하는 알고리즘을 개발하고 이를 선제적으로 적용하여 상류부 속도를 제어하는 방식으로 속도조화 기법을 수행하였고, 이러한 방식이 본선의 교통흐름을 더욱 원활하게 함을 이동성 지표 및 안전성 지표를 이용하여 입증하였다. Popov et al.(2008) 경우 실시간 교통량-속도 데이터를 모니터링 하고 교통량-밀도 곡선을 구축, 하류부 차로 감소 등으로 인한 충격파의 발생을 방지하는 내용을 골자로 하는 상류부 주행속도 결정 알고리즘을 개발하였으며,

거시적 시뮬레이션 모형을 통하여 그 효과성을 분석하였다.

현장에서 수집되는 교통량, 속도, 점유율 등의 데이터는 이른바 “데이터 잡음 (Data Noise)”을 포함하고 있어 충격파 검지를 위해 필수적인 교통량-속도 및 교통량-밀도 곡선을 정확히 추정하기에는 어려움이 많은 실정이다. 따라서 실제로 현장 데이터를 이용한 충격파 검지는 그 정확도를 담보하기가 용이하지 않은 것으로 알려져 있다. 이러한 현실적 문제를 극복하기 위하여 몇 가지 노력들이 수행되었는데, 그 중 최근 들어 각광을 받고 있는 기법으로 연속웨이블릿변환 (Continuous Wavelet Transform; CWT)이 있다. CWT는 전자공학 혹은 무선 통신 분야에서 많이 활용되는 신호처리 혹은 신호필터링 기술의 핵심 요소로서 다양하게 활용되고 있다(Huang et al., 2000; Ovanesova et al., 2004; Rucka et al., 2006; Solis et al., 2013; Rakowski et al., 2017). 특히, 데이터 잡음을 많이 포함하는 무선통신 분야에서 잡음을 효율적으로 제거하고 유의미한 신호를 검지하는 기술에 크게 활용되고 있다. 이러한 CWT의 특징과 현장에서 수집되는 교통 데이터 역시 상당량의 데이터 잡음을 포함하고 있다는 점에 착안하여, 최근에는 CWT기반 필터를 적용한 충격파 검지 알고리즘이 많이 제안되고 있는 실정이다. 본 연구 또한 CWT를 활용한 충격파 검지 알고리즘을 제안하고 있기 때문에 이와 유사한 연구사례를 고찰해 보았다.

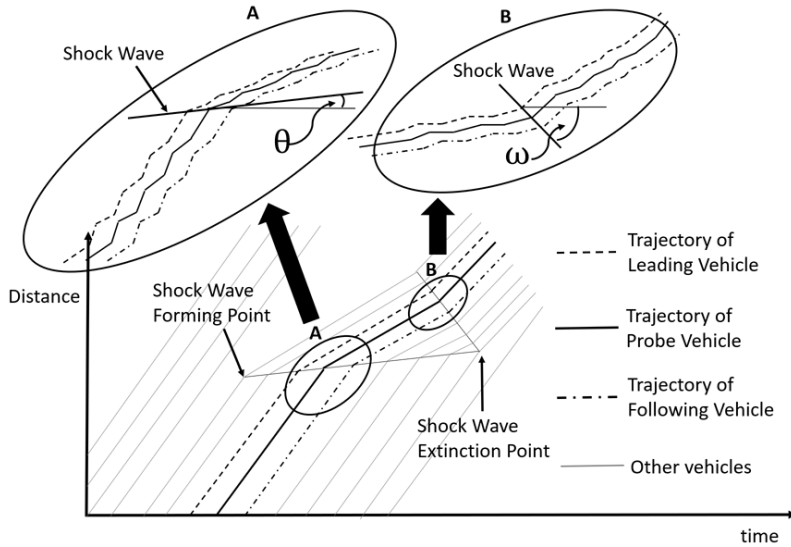
Zheng et al.(2011)은 루프검지기로 수집된 실시간 데이터를 CWT 기법에 적용하여 하류부의 병목 위치를 검지하는 알고리즘을 제안하고, 미국 캘리포니아 주 101번 국도(US Highway)상에서 수집된 데이터를 이용하여 제안된 알고리즘이 병목 지점들을 비교적 정확하게 검지한다는 사실을 증명하였다. Mohan et al.(2014)은 지점 속도자료를 분광 그래프 웨이블릿 변환 (Spectral Graph Wavelet Transform) 기법에 적용하여 특정지역의 도로망에서 발생하는 혼잡 위치를 검지하는 알고리즘을 제안하였는데, 수집된 시공간 속도자료를 웨이블릿 형태로 변환하고 이때 발생하는 에너지 차이를 검지하여 상습 혼잡과 일시적 혼잡 구간을 검지하는 방식을 적용하였다.

이상과 같이 검토한 기존 연구들은 주로 기존의 검지기 데이터와 (연속)웨이블릿변환 기법을 이용하여 충격파를 검지하고 이를 기반으로 상습/일시 혼잡 구간을 검지하는 방법을 개발하였다. 하지만 ADAS, 자율주행에서 활용되는 차량 센서 데이터를 활용한 연구 사례는 찾아보기 어려운 게 사실이다. Elfar et al.(2018)과 Xavier(2017) 등의 연구에서 connected vehicle 데이터를 활용하였으나 단순하게 속도 분포를 기반으로 충격파를 분석하였다. 따라서 본 연구에서는 차량 센서 데이터와 연속웨이블릿변환 기법을 활용하여 충격파를 검지하고 그 소멸점을 예측하는 방법을 개발하였다.

III. 충격파 검지 방법 개발

1. 방법론 개요

<Fig. 1>은 본 연구에서 제안하는 방법을 개략적으로 묘사한다. 우선, 주변 차량을 검지할 수 있는 차량 센서를 장착한 프로브 차량의 실시간 이동 궤적 데이터와 검지된 주변 차량들의 위치 및 속도 데이터를 융합하여 프로브 차량과 그 주변 차량의 궤적을 추정한다. 충격파 발생한 시점인 A의 경우, 프로브 차량과 전/후방 차량의 궤적을 이용하여 충격파 경계선의 진행각도를 계산한 후 충격파에 의한 경계선을 추정한다. 동일한 방법으로 충격파 소멸 시점인 B의 경우, 충격파 진행각도의 추정을 통해 충격파 경계선을 추정하고, 이 경계선이 초기 충격파의 경계선과 조우하는 시점을 파악하여 충격파 소멸시점을 예측한다. A와 B의 추정은 다양한 방법이 가능하겠으나, 본 연구에서는 선형회귀분석을 이용하여 그 값을 추정한다.



<Fig. 1> Concept of the proposed method

GPS, 레이더, 라이다, 영상과 같은 차량 센서를 이용하여 자차의 위치와 주변 차량의 위치 및 거동을 검지하는 경우 가감속 행태에 따른 미묘한 속도 변화와 차량 센서로부터 발생하는 실측 오차 등으로 인하여 수집된 데이터에 불규칙한 파형이 형성된다. 이러한 불규칙 파동을 연속웨이블릿변환(Continuous Wavelet Transform, CWT) 기법을 이용하여 데이터 잡음 제거 작업과 동시에 파동 변화에 따른 에너지 차이를 계산하여 가장 큰 에너지 차이를 보이는 시점을 찾음으로써 충격파를 검지할 수 있다.

2. 연속웨이블릿변환 (Continuous Wavelet Transform)

연속웨이블릿변환(CWT)은 푸리에변환(Fourier Transform), 단기 푸리에변환 (Short-time Fourier Transform), 위그너 분포(Wigner Distribution) 등과 함께 신호처리 응용분야에서 광범위하게 활용되는 기법 중 하나이다. 특히 CWT는 원 신호를 미세한 신호 파형으로 조밀하게 나누고 각 파형구간의 신호 세기의 평균값을 산출하는 방식으로, 원 신호에 포함된 잡음을 제거 혹은 약화시키는 역할을 한다. 이렇게 잡음이 제거된 신호를 이용하여 인접한 파형 구간 간의 신호 세기 차이를 에너지로 변환한 후 에너지 차이가 가장 크게 나타나는 곳을 검지한다. 즉, 시간에 따라 변화하는 어떤 파형 $\chi(t)$ 가 주어졌을 때, 연속웨이블릿변환 $Q_{\chi,\psi}$, 은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$Q_{\chi,\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \chi(t)(\alpha)^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-\beta}{\alpha}\right) dt \dots\dots\dots (1)$$

- 여기서,
- $\chi(t)$: 원 입력신호 (Original Signal)
- ψ : 파형변환함수 (또는 모(母)웨이블릿함수)
- α : 파형 스케일 조정 파라미터
- β : 파형 위치 조정 파라미터
- t : 시간

웨이블릿변환의 기본 원리는 원 신호에 파형변환 함수를 중첩시키는 것이다. 이때 원 신호를 파형변환 함수와 중첩시키기 위해 원 신호의 스케일 조정 및 위치 이동을 위한 파라미터들이 α 와 β 이다. 즉, α 와 β 를 지속적으로 조정함으로써 파형변환함수와 입력신호를 중첩시키고 이를 이용하여 파형의 급격한 변화를 검지한다. 식(1)에서 ψ 가 바로 파형변환함수 혹은 모(母)웨이블릿함수이다.

파형변환함수는 변환 대상 신호의 대칭성 및 직교성과 같은 특성에 따라 달리 적용할 수 있는데, CWT에서는 Morlet, Mexican Hat, Gaussian 함수 등이 주로 이용된다. 본 연구에서는 프로브 차량의 급작스런 변화 감지를 위해 Mexican Hat(MH) 파형변환함수를 채택하였는데, 이는 MH함수가 파형 내 가장 큰 낙차 구간, 즉 가장 두드러진 신호의 불연속성을 보이는 곳으로 입력신호를 중첩시킴으로써 급박한 속도 변화를 검지하는데 유용하기 때문이다 (Zheng et al., 2011). MH함수는 다음의 식(2)와 같이 정의된다.

$$\Psi\left(\frac{t-\beta}{\alpha}\right) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}\alpha^3} \left(e^{-\frac{t^2}{2\alpha^2}} \left(\frac{t^2}{\alpha^2} - 1 \right) \right) \dots\dots\dots (2)$$

CWT의 입력 신호로 시간에 따른 속도 $v(t)$ 를 이용한다. 따라서 속도에 따른 CWT는 식 (3)과 같으며, 이때 입력 신호의 위치 조정(β)에 따른 평균 웨이블릿 에너지 $E(\beta)$ 는 식 (4)를 이용하여 계산한다.

$$Q_{x,\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} v(t)(\alpha)^{-1/2} \frac{2}{\sqrt{2\pi}\alpha^3} \left(e^{-\frac{t^2}{2\alpha^2}} \left(\frac{t^2}{\alpha^2} - 1 \right) \right) dt \dots\dots\dots (3)$$

$$E(\beta) = \frac{1}{\max(\alpha)} \int_0^{\infty} |Q_x(\alpha, \beta)|^2 d\alpha \dots\dots\dots (4)$$

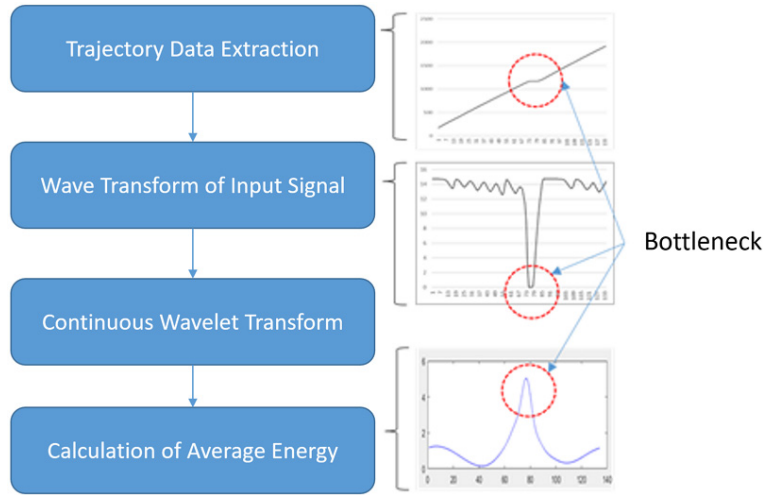
IV. 개념 검증

1. 개념 검증 개요

본 장에서는 개발된 방법의 효과성을 평가하기 위한 시뮬레이션 기반의 개념 검증(Proof of Concept; PoC) 분석을 수행하며, <Fig. 2>는 이러한 분석과정을 개략적으로 묘사한다. 우선, 현실 상황과 유사한 교통 시뮬레이션 환경을 구축한 후 프로브 차량과 그 주변 차량의 주행궤적을 수집한다. 수집된 차량 궤적 데이터는 식 (5)를 이용하여 입력신호 파형으로 변환되고, 다시 식 (3)을 이용하여 CWT 값이 계산되어진다. 변환된 웨이블릿 값을 이용하여 각 시간대별 에너지 변화를 계산하고 가장 낙차가 큰 구간을 병목구간으로 검지한다.

$$v(t) = d(t) - d(t-1) \dots\dots\dots (5)$$

여기서, $v(t)$: 시간 t 에 얻어진 입력신호
 $d(t), d(t-1)$: 시간 t, t-1에 주행궤적상 이동거리



<Fig. 2> PoC Analysis Process

현실 교통류에서 발생하는 충격파를 모사하기 위해 미시 교통 시뮬레이션 모형인 VISSIM을 활용하여 단방향 2차로 연속류 본선 구간 도로 4km를 모형화하고, 일시적 차로폐쇄모형을 이용하여 비주기적 속도 감소 현상을 모사하였다. 속도 감소 현상은 그 발생 빈도, 시간, 위치 등에 의하여 주기적(recurrent)이거나 혹은 비주기적(non-recurrent)일 수 있다. 주기적 속도 감소 현상은 과거 시계열 교통 데이터(속도, 교통량 등)를 이용하여 그 발생 위치와 지속 시간이 비교적 용이하게 예측이 되므로, 프로브 차량을 이용하여 검지할 필요성이 적다. 따라서 본 연구에서는 교통사고 및 유고 등으로 인한 발생 위치 검지와 지속시간 예측이 어려운 비주기적 속도 감소 현상만을 대상으로 개념을 검증하였다.

프로브 차량은 차량용 레이더 센서를 장착하여 전/후방 약 200m 내에 위치한 주변 차량을 검지 가능한 것으로 가정하였고, VISSIM의 COM 인터페이스를 이용하여 이를 구현하고 프로브 차량 및 주변 검지 차량의 주행궤적을 수집하도록 하였다.

추정된 충격파의 소멸 시점과 위치를 참값과 비교하기 위한 지표로서 식 (6)과 같은 유클리드 거리(Euclidian Distance) 개념을 활용한 충격파 소멸점 간 거리 오차(D)를 이용한다. 소멸의 시점과 위치에 대한 추정치와 참값이 유사할수록, 두 점간의 거리 D는 0에 가까워지고 반대의 경우 멀어진다. 거리오차 D와는 별도로, 이해의 편의를 위해 식 (7)에 정의된 충격파 소멸점의 시간-위치 오차(E) 또한 지표로 이용한다.

$$D = \sqrt{(t_1 - t_0)^2 + (d_1 - d_0)^2} \dots\dots\dots (6)$$

$$E = \frac{100 \times \frac{|t_1 - t_0|}{t_0} + 100 \times \frac{|d_1 - d_0|}{d_0}}{2} \dots\dots\dots (7)$$

- 여기서, t_0 : 충격파 소멸 시점의 참값 (관측) (단위: 초)
- t_1 : 충격파 소멸 시점의 추정치 (단위: 초)
- d_0 : 충격파 소멸 위치의 참값 (관측) (단위: 미터)
- d_1 : 충격파 소멸 위치의 추정치 (단위: 미터)
- D : 소멸 시점과 위치의 참값과 추정치 간 거리 오차 (단위: 초·미터)
- E : 소멸 시점과 위치 간 오차율 (단위: %)

2. 분석 시나리오 설정

개념 검증 시나리오 설정을 위해 <Table 1>과 같이 교통량, 차로폐쇄 지속시간, 프로브 차량 비율을 실험 인자로 설정하였고, 교통 시뮬레이션 모형인 VISSIM을 활용하여 2차로 연속류 도로 4km를 구축하여 대상 도로망으로 이용하였다.

교통 혼잡 수준의 모사를 위해 교통량을 비혼잡, 보통, 혼잡으로 구분하여 각각 600, 1200, 1800 (대/시/차로)로 설정하였는데, 이는 혼잡 상태에 따른 제안된 방법의 성능과 효과를 분석하기 위함이다.

본 연구에서는 속도 감소 현상에 따른 충격파의 발생을 재현하고 그 발생과 소멸 시점을 제안된 방법으로 찾는 것이 목표이기 때문에 속도 감소 현상의 재현이 무엇보다 중요하다. 이를 위해 도로의 일부 차로를 폐쇄하는 방법을 사용하였는데, 총 시뮬레이션 시간(900초) 중 차로 폐쇄 시작 시각을 처음 100초와 마지막 200초를 제외한 시간대에서 무작위로 발생하도록 하였고, 그 지속시간은 120, 180, 240, 300초의 4개로 설정하였다. 즉, 시뮬레이션이 수행되는 동안 무작위로 시작시각과 지속시간이 선택되는데, 예를 들어 시뮬레이션 시작 후 180초 후에 차로 폐쇄가 시작되어 120초 동안 지속될 수도 있고, 또는 500초 후에 300초 동안 차로가 폐쇄될 수도 있다.

제안된 방법은 프로브 차량에 장착된 센서를 이용하여 주변 차량을 검지한 데이터를 이용하기 때문에 성능과 효과 측면에서 교통류 내에 존재하는 프로브 차량의 비율에 민감하다. 본 연구에서는 교통류 내 프로브 차량의 비율을 센서를 장착한 차량의 시장점유율로 정의하였고, 시장점유율에 따른 성능과 효과 분석을 위해 시장점유율을 최소 5%에서 10% 간격으로 최대 35%까지로 설정하여 분석을 수행하였다.

<Table 1> Experimental variables of PoC

Experiment Variables	Range
Traffic Volume (veh/hour/lane)	600, 1200, 1800
Duration of lane-close (second)	120, 180, 240, 300
Market share of probe vehicles (%)	5, 15, 25, 35

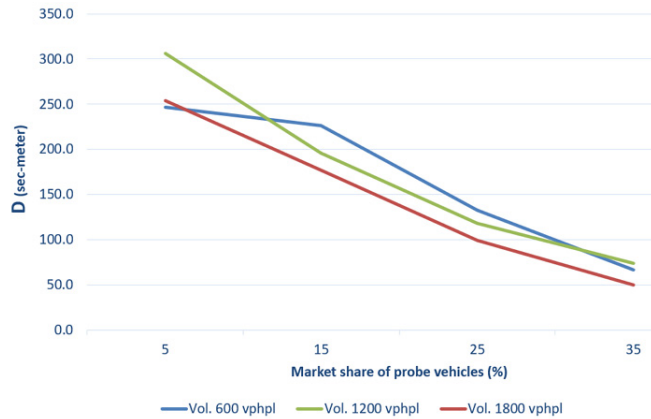
모든 실험인자 간 조합을 고려하여 총 48(=3×4×4)개의 시뮬레이션 시나리오가 선정되었고, 각 시나리오는 5회의 서로 다른 난수를 이용하여 반복 시뮬레이션을 수행함으로써 총 240회의 시뮬레이션 실험을 실시하였다. 신속한 시뮬레이션 결과 분석을 위하여 전체 시뮬레이션 시나리오는 3대의 서로 다른 서버 컴퓨터에서 80개씩 분산하여 수행하였다.

3. 결과 분석

<Table 2>는 전체 분석 시나리오 시뮬레이션 수행 결과를 식 (5)의 소멸점 간 거리 오차(D)와 식 (6)의 시간-거리 오차(E)의 평균치로 요약하여 나타내고 있다. D 의 최대치와 최소치는 각각 331.5와 21 (초·미터)로 나타났다. D 의 최대치는 5%의 프로브 차량 비율과 보통 수준의 혼잡 상황에서 나타났고, 최소치는 혼잡 상황 시 35%의 프로브 차량 비율에서 나타났다. 이는 E 에서도 동일하게 관측되었는데, 최대치와 최소치를 검토하였을 때 프로브 차량 비율이 높고 교통 혼잡이 클수록 제안된 방법의 정확도가 높아짐을 단순하게 생각할 수 있다. 하지만 동일한 프로브 차량 비율에 대해서 혼잡 수준에 따른 D 와 E 값의 차이가 크지 않고 특정 방향으로의 경향성을 보이지 않는 것으로 보아 정확도는 교통량보다는 프로브 차량 비율에 더 민감한 것으로 판단된다. 이는 프로브 차량이 많을수록, 즉 더 많은 궤적 데이터가 수집될수록 충격파를 더욱 정확하

게 추정할 수 있기 때문인 것으로 해석이 가능하다.

교통량과 차로폐쇄 시간을 고정할 경우 이러한 현상은 좀 더 명확하게 설명된다. <Fig. 3>에서 볼 수 있듯이, 프로브 차량 시장점유율의 변화에 따라 각 교통량에 따른 D 값은 뚜렷한 경향성을 보이고 있으며 이는 프로브 차량 비율이 높아질수록 오차가 줄어드는 음의 상관관계로 설명된다. 즉, 프로브 차량의 운행 비율이 높을수록 좀 더 정확하게 충격파의 소멸시점을 예측할 수 있다. 이러한 점은 시간-위치 오차(E)를 통해서도 동일하게 확인할 수 있다.



<Fig. 3> Distance errors by market share of probe vehicles

<Table 2> Experimental result

Market Share of Probes (%)	Duration of lane-close (sec)	Traffic Volume (veh/hour/lane)					
		600		1200		1800	
		D	E	D	E	D	E
5	120	287.3	21.6%	328.5	23.8%	291.3	22.2%
	180	329.9	26.6%	331.5	26.1%	310.2	22.6%
	240	158.0	19.4%	277.7	22.0%	241.5	19.0%
	300	212.6	19.2%	288.1	19.7%	173.5	14.2%
15	120	197.2	19.6%	258.5	19.9%	263.7	17.5%
	180	225.7	17.6%	249.0	20.1%	150.6	12.5%
	240	218.3	21.0%	107.8	14.0%	151.4	13.0%
	300	264.4	19.7%	167.3	13.4%	142.3	12.1%
25	120	144.2	11.9%	212.8	14.7%	108.3	9.9%
	180	183.7	14.2%	126.2	10.1%	166.1	11.1%
	240	114.7	11.1%	77.6	6.1%	70.8	5.8%
	300	89.2	7.7%	56.1	5.9%	50.8	4.3%
35	120	85.1	8.8%	115.4	8.6%	98.7	9.5%
	180	81.6	5.6%	113.5	8.2%	52.7	3.5%
	240	64.5	5.3%	38.0	3.0%	28.1	2.6%
	300	36.5	3.1%	28.4	2.4%	21.0	1.4%

차로 폐쇄 지속시간의 경우, <Table 2>에서 볼 수 있듯이, 교통 혼잡 수준이 낮은 경우 D 와 E 값에 뚜렷한 영향을 미치지 않는 것으로 분석된다. 일반적으로 차로 폐쇄 지속시간이 길수록 충격파를 관통하는 프로브 차량들이 증가할 확률이 높아지기 때문에 더 많은 주행궤적을 얻을 수 있을 것으로 기대되나, 교통량이 적고 프로브 차량 비율이 낮은 경우에는 이 효과가 미미한 것으로 나타났다. 다만, 프로브 차량 비율이 높아질수록 차로 폐쇄 지속시간의 증가에 따른 충격파 검지 정확도 향상의 경향성이 커지는 것으로 나타났다.

상기의 분석 결과를 종합해보면, 제안된 방법론의 정확도는 분석에서 고려된 세 가지 실험요인 중 프로브 차량의 시장점유율에 가장 영향을 크게 받고, 나머지 두 개 인자에 대해서는 그 영향이 미미한 것으로 나타났다. 이는 주변 차량을 검지 가능한 차량센서를 장착한 차량의 증가 시 대부분의 상황에서 효율적으로 교통류 내 충격파의 검지가 가능함을 의미하며, ADAS와 C-ITS, 자율주행 등의 기술 개발이 가속화되고 있는 시점에 매우 긍정적인 시사점이라 할 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 전/후방 차량 검지가 가능한 차량센서를 탑재한 프로브 차량 혹은 가까운 미래에 그와 유사한 성능을 가지는 차량으로 수집한 주행 궤적 데이터를 이용하여 연속웨이블릿변환 기반 충격파 검지 및 소멸 시점 예측 방법을 개발하였다. 이는 프로브 차량으로부터 수집한 자차와 주변 차량의 주행궤적 데이터에 연속웨이블릿변환을 적용하여 충격파의 진입 및 진출 시점을 검지하고 이를 활용하여 충격파의 소멸 시점과 위치를 예측하는 방법이다. 제안된 방법의 효과성 분석을 위하여 충격파 소멸점 간 거리오차와 충격파 소멸점 시간-위치 오차를 평가 지표로 제시하였고, 교통혼잡 수준, 속도 감소 현상 지속시간, 프로브 차량의 비율 등을 실험요인으로 하는 미시적 시뮬레이션 기반의 실험을 통하여 제안된 방법의 개념을 검증하였다. 그 결과, 두 가지 평가 지표 모두 교통혼잡 수준 및 속도 감소 지속시간에 크게 민감하지 않음을 보임으로서, 본 연구에서 제안하는 방법이 임의의 위치와 시간 동안 발생하는 비주기적 속도 감소 현상으로 인한 충격파를 검지하고 그 소멸시점을 예측하는데 효과가 있음을 보였다. 그리고 그 정확도는 전체 차량 중 프로브 차량의 비율에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.

제안된 방법은 효과성을 검증하는 개념 검증 단계의 분석에 국한되어 연구가 수행되었으나, 그 결과는 연속류 도로의 혼잡관리 전략 수립에 매우 중요한 단서를 제공할 것으로 기대된다. 예를 들어, 충격파의 소멸 시점과 위치의 예측이 가능할 경우 상류부 실시간 가변 속도 조정 혹은 본선 속도-진입교통량 조정과 같은 연속류 혼잡관리의 적용이 가능할 것이다. 이에 본 연구의 후속 연구로서 제안된 충격파 검지 방법을 적용한 다양한 연속류 혼잡관리 전략을 개발하고 그 효과성을 입증하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 또한 제안된 방법의 실용화를 위해 애프터마켓 시장에서 장착이 가능한 하드웨어에 관한 연구, 기존 ADAS 소프트웨어와의 연계 및 업그레이드에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 2019년 한국건설기술연구원 주요사업(차량센서 기반 주행환경 관측·예측·안전운행 도로기술 개발, 과제번호: 20190149-001)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Elfar A., Xavier C., Talebpour A. and Mahmassani H. S.(2018), “Traffic shockwave detection in a connected environment using the speed distribution of individual vehicles,” *Transportation Research Record*, vol. 2672, no. 20, pp.203-214.
- Hadiuzzaman M., Fang J., Luo Y. and Qiu T. Z.(2013), “Evaluating Performance of a Proactive Optimal Variable Speed Limit Control Using Different Objective Functions,” *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 96, pp.2895-2906.
- Hegyí A., De Schutter B. and Hellendoorn J.(2005), “Optimal coordination of variable speed limits to suppress shockwaves,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 6, no. 1, pp.102-112.
- Huang S. and Hsieh C.(2000), “Application of Continuous Wavelet Transform for study of voltage flicker-generated signals,” *IEEE transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 36, no. 3.
- Kang Y.(2000), *Delay, Stop, and Queue Estimation for Uniform and Random Traffic Arrivals at Fixed-Time Signalized Intersection*, Ph.D Dissertation., Virginia Tech, USA.
- Kim W., Kim B. and Park M.(2010), “Development of Shockwave Delay Estimation Model for Mixed Traffic at Unsaturated Signalized Intersection,” *Korean Society of Transportation*, vol. 28, no. 6, pp.75-84.
- Lee H., Jung Y., Kim Y. and Kim T.(2008), “A Development of Macroscopic Simulation Model for Interrupted Flow Using Shockwave,” *Korean Society of Transportation*, vol. 26, no. 1, pp.191-201.
- Mohan D., Asif M., Mitrovic N., Dauwels J. and Jaillet P.(2014), “Wavelets on graphs with application to transportation networks,” *IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Qingdao, China, October 8-11.
- Ovanosova A. V. and Suarez L. E.(2004), “Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures,” *Engineering Structures*, vol. 26, pp.39-49.
- Park E., Suh E., Ko M. and Oh H.(2010), “Developing a Freeway Flow Management Scheme Under Ubiquitous System Environments,” *Korean Society of Transportation*, vol. 28, no. 4, pp.167-175.
- Popov A., Hegyí A., Babuška R. and Werner H.(2008), “Distributed controller design approach to dynamic speed limit control against shockwaves on freeways,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2086, pp.93-99.
- Rakowski W. J.(2017), “Wavelet approach to damage detection of mechanical systems and structures,” *7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management*. pp.594-601.
- Rucka M. and Wilde K.(2006), “Application of continuous wavelet transform in vibration based damage detection method for beams and plates,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 297, pp.536-550.
- Solis M., Algaba M. and Galvín P.(2013), “Continuous wavelet analysis of mode shapes differences for damage detection,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 40, pp.645-666.
- Xavier C. B.(2017), *Speed Distribution Based Approach for Shockwave Detection in a Connected Driving Environment*, Doctoral dissertation.

Zheng Z., Ahn S., Chen D. and Laval J.(2011), “Application of wavelet transform for analysis of freeway traffic: Bottlenecks, transient traffic, and traffic oscillations,” *Transportation Research - Part B*, vol. 45, pp.372-384.