

차량 추종자료의 파동해석을 통한 운전자 반응 특성 연구

채찬들^{1*} · 오세창² · 김영호³ · 이준³

¹ 한국교통연구원 도로교통연구본부, ²아주대학교 교통시스템공학과, ³ 한국교통연구원
교통안전도로본부

Study on the Drivers' Response Characteristics Using Spectral Analysis of Car Following Data

CHAE, Chandle^{1*} · OH, Sei-Chang² · KIM, Youngho³ · LEE, Jun³

¹ Dept. of Road Transport, The Korea Transport Institute, Sejong 339-007, Korea

² Department of Transportation Systems Engineering, Ajou University, Gyeonggi 411-710, Korea

³ Department of Transport Safety and Highway, The Korea Transport Institute, Sejong 339-007, Korea

Abstract

This paper developed a method analyze drivers' response characteristics using spectral analysis with car following data. Cross-correlation function and cross spectrum are produced by Fourier transform from speed fluctuations of leading vehicle and following vehicle during the designated time τ . Based on the analysis data, a process to calculate the reaction time and stimulus-adaption index of following vehicle was developed and 170 cases of field data was applied. It was reported average of 0.654 and 2.091 seconds of stimulus-adaption index and reaction time respectively. In conclusion, the developed indexes might contribute to enhance vehicle control of autonomous vehicle more efficient and safer.

본 논문에서는 파동해석 기법을 활용하여 추종관계인 두 차량의 속도 파동으로부터 개별 운전자의 반응특성을 분석할 수 있는 방법론을 개발하였다. 선행차량 속도 파동과 임의의 시간 τ 만큼 지연된 후행차량 속도 파동의 푸리에 변환을 통해 상호상관함수와 상호 스펙트럼을 산출하고 상호상관계수를 도출함으로써 ①후행차량의 반응시간과 ②후행차량의 자극응답지수를 도출하는 방법론을 개발하였고, 현장에서 수집된 170건의 추종 자료에 적용한 결과, 자극응답지수는 평균 0.654로 나타났고, 반응시간은 평균 2.091초인 것으로 분석되었다. 이러한 운전자 반응특성 지수는 자율주행차량과 일반차량이 혼재된 교통류에서 자율주행차량의 안전하고 효율적인 경로계획 수립을 위하여 주변 차량의 운전행태 특성을 반영한 의사결정과정에서 유효하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords

car following, driving behavior, fourier transform, spectral analysis, wave
운전행태, 추종관계, 파동, 파동해석, 푸리에 변환

* : Corresponding Author
culfield@koti.re.kr, Phone: +82-44-211-3156, Fax: +82-44-211-3235

Received 1 April 2015, Accepted 16 July 2015

서론

1. 연구의 배경 및 목적

자율주행차량(autonomous vehicle)은 운전자의 개입 없이 주행의 모든 과정을 스스로 판단하고 제어하는 차량으로 정의할 수 있다. 현재 자율주행차량 기술 개발이 가장 높은 수준에 도달한 것으로 평가되는 Google Car는 2010년에 미국 공공도로에서 70만 mile 자율주행에 성공하였고, 2012년에는 미국 네바다주에서 자율주행 최초로 시험주행 운전면허를 취득하였다. 이외에도 많은 자동차 제작사들이 2020년 기술개발 완료, 2025년 상용화를 목표로 자율주행차량을 개발하고 있다.

자율주행차량이 등장하면 현재 교통사고의 가장 큰 원인인 인적 오류(human error)가 제거됨으로써 교통안전성이 혁신적으로 향상되고, 운전자가 차량을 운전하는 대신 다양한 활동을 할 수 있게 됨에 따라 운전자의 편의성이 향상될 것이다. 그러나 이러한 효과는 모든 차량이 자율주행차량으로 대체될 때 실현될 수 있고, 그 전까지는 자율주행차량과 일반 차량이 혼재된 과도기가 필연적으로 나타나게 되며 이러한 상황에서 자율주행차량은 현행 미시교통류 모형과 같은 주행 알고리즘 이외에 주변 차량 운전자들의 주행 특성을 반영하여 안전한 판단 및 제어가 가능한 주행 알고리즘이 필요하다.

주행 특성 중 교통류 속에서 발생하는 자극에 대한 반응특성은 운전자마다 다양하게 나타나고, 반응특성의 차이로 인해 운전자는 많은 의사결정과 상호작용을 수행하면서 주행하게 된다. 자율주행차량이 이와 동일하게 다른 운전자와의 상호작용을 수행하기 위해서는 주변 차량의 반응특성을 파악하여 이를 판단 알고리즘에 반영하는 것이 반드시 필요하다. 이러한 배경에서 본 논문에서는 향후 개발될 자율주행차량에 탑재될 수 있는 안전하고 효율적인 자율주행 알고리즘 개발을 목적으로, 개별 차량 운전자의 반응특성을 실시간으로 분석할 수 있는 방법론을 개발하였다.

2. 연구내용 및 방법

본 논문은 추종관계에 있는 선행차량과 후행차량의 속도 변화가 시간의 흐름에 따라 일종의 '파동(wave)' 형태로 나타난다는 점에서 착안하여 파동해석 기법을 통

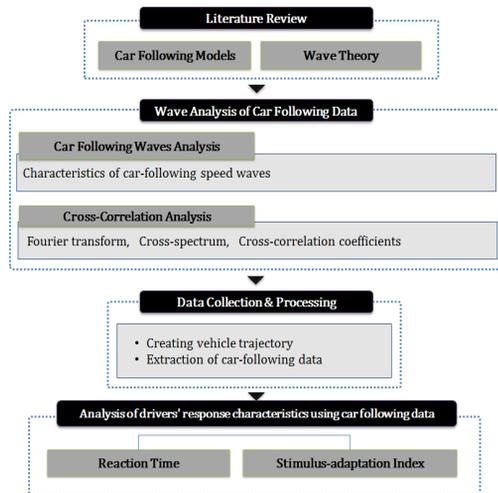


Figure 1. Research flow diagram

해 속도의 변화를 해석함으로써 후행차량 운전자의 반응 특성을 분석하였다.

개별차량 운전자의 반응특성 분석을 위하여 기존의 차량추종모형과 파동해석 이론을 검토하고, 이로부터 도출된 방법론을 활용하여 추종관계에서 나타나는 속도의 변화를 해석하였다. 추종관계인 선행, 후행차량의 속도 변화를 시간에 따라 관측해보면 특정 시간간격을 두고 유사한 파형(wave pattern)이 나타나게 되는데, 파형의 유사성을 분석하기 위하여 시계열 분석, 디지털 신호처리 등에서 적용되고 있는 상호상관분석(cross-correlation analysis) 방법을 적용하였다. 상호상관분석은 선행차량의 속도 변화를 시간 축에 따라 양의 방향으로 이동시키면서 상호상관계수를 계산하여 최댓값을 찾는 과정인데, 양의 방향으로 이동시킨 시간간격은 후행차량의 반응시간이 되고, 그때 상호상관계수 값은 후행차량이 선행차량의 자극에 순응하여 얼마나 반응했는지를 의미하게 된다. 이때 상호상관계수는 선행, 후행차량 속도 변화를 푸리에 변환(Fourier transform)하여 개별 고조파(harmonics)로 분리하고, 각 고조파의 상호 스펙트럼(cross spectrum)으로부터 산출하였다.

문헌 검토

추종관계에 있는 두 차량의 속도 변화에 대한 파동 해석을 통해 운전자의 반응 특성을 파악하기 위하여, 기존 차량 추종 모형(car following models)의 운전행태 특

성 분석 방법론을 검토하고, 추종관계에 있는 두 차량의 속도변화에 적용 가능한 파동해석 기법을 검토하였다.

1. 차량 추종 모형

Gerlough(1975)는 차량 추종 모형을 교통류 속에서 선행차량의 행태에 대한 후행차량의 반응 관계를 설명하는 수식의 형태로 정의하였다. 본 논문에서는 선행, 후행 차량의 관계를 설명하는 다양한 차량 추종 모형 중 운전자의 반응특성을 자극-반응식 형태로 수학적으로 모형화한 연구사례를 검토하였다.

자극-반응식 형태의 최초 모형은 Chandler et al. (1959)가 제안한 것으로 추종관계를 자극(stimulus), 반응(response), 민감도(sensitivity)로 설명하였으며, 운전자 특성인 민감도를 상수로 가정하였고 실제 모의주행실험을 통해 그 값을 산출하였다.

그 이후 민감도를 두 차량의 거리에 따라 최소, 최대 값으로 구분한 모형(Gazis et al., 1959), 민감도와 두 차량의 거리를 선형관계로 가정한 모형(Eddie, 1960) 등이 제안되었으며, 현재 가장 널리 활용되는 모형은 식 (1)과 같은 형태의 Gazis-Herman-Rothery(GHR) 모형이다(Gazis et al., 1961)

$$a_n(t) = c v_n^m(t) \frac{\Delta v(t-T)}{\Delta x^l(t-T)} \quad (1)$$

여기서 $a_n(t)$ 는 후행차량 n 의 시간 t 에서의 가속도를 의미하고, c 는 민감도 상수, $v_n(t)$ 는 후행차량 n 의 시간 t 에서의 속도, Δv , Δx 는 각각 선행차량과 후행차량의 속도차이, 거리차이, T 는 후행차량의 반응시간을 의미한다. 이후, 실제 도로에서 수집된 교통 자료를 활용하여 GHR 모형의 계수 l, m 의 현실적인 값을 찾기 위한 연구가 수행되었으나 GHR 모형과 같은 자극-반응식 형태의 모형은 ① 후행차량의 추종행태가 교통류 상황이나 운전자 성향에 따라 다양하게 나타나기 때문에 연구자마다 제안하는 l, m 이 달라지는 점과 ② 1950-70년대 수행된 연구에서 모형의 정산(calibration)에 적용된 데이터가 저속상황 또는 제한된 실험조건 하에서 수집되어 비현실적이었던 한계가 있다.

Gipps(1981)는 두 차량 간의 안전추종거리(safety

following distance)로 차량 추종(car following) 상황과 자유 주행(free flow) 상황을 설명하기 위한 가속 모형(acceleration model)을 제안하였다. 이 모형은 최대 정지율(maximum braking rate)등 운전자 개별 특성을 반영할 수 있는 운동학적 변수를 모형에 포함하여 현실성을 향상시켰지만, 운전자 마다 다르게 인식되는 안전추종거리 변수 등을 정산하지 못한 한계가 있다.

운전자가 특정 희망척도(desired measure)를 확보하고자 하는 성향에 따라 주행한다는 사실로부터 Helly(1959)는 후행차량이 선행차량과의 상대속도, 실제 공간 차두간격과 희망 차두간격 차이에 반응함을 가정하여 모형을 제안하였다.

$$a_n(t) = c_1 \Delta V_n(t - T_n) + c_2 [\Delta X_n(t - T_n) - D_n(t - T_n)] \quad (2)$$

여기서 D_n 은 차량 n 의 희망 공간 차두간격을 의미하고, c_1, c_2 는 계수를 의미하는데, Helly는 D_n 을 차량의 속도와 가속도에 따른 함수로 다음과 같이 정의하였다.

$$D_n(t) = \alpha + \beta v_n(t - T_n) + \gamma a_n(t - T_n) \quad (3)$$

이 모형은 기존 GHR 모형에서 두 차량의 속도가 같은 경우 두 차량의 거리에 상관없이 반응이 나타나지 않는다는 한계를 희망척도를 통해 극복하였다. 하지만 희망척도 모형은 '희망'이라는 개념이 겉으로 드러나지 않고 운전자마다 다르다는 점과 수집된 자료에서 정확히 파악하기 어렵다는 점에서 한계가 존재한다.

2. 파동 해석

1) 푸리에 급수

프랑스의 수리물리학자 Fourier(1878)는 열전도이론을 통해 주기를 갖는 파동은 아무리 복잡한 형태라도 단순한 파동의 결합으로 분리하여 해석할 수 있는 방법인 푸리에 급수(Fourier series)를 개발하였다.

1)임의의 $f(t)$ 라는 파동이 $f(t)$ 진동수의 정수 n 배 진동수를 갖는 sin, cos 파동으로 이루어진 함수형태라고 할 때, 푸리에 급수는 식(4)와 같이 표현된다.

1) 출처 : Transnational College of LEX, 파동의 법칙, Gbrain, pp.145, 2010

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (4)$$

이때, a_0 , a_n , b_n 을 푸리에 계수(Fourier coefficients)라고 하며, 각 푸리에 계수는 식(5)와 같이 산출한다.

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt \end{aligned} \quad (5)$$

이와 같이 시간 t 에 대하여 주기가 T 인 파동을 의미하는 함수 $f(t)$ 는 푸리에 계수로 이루어진 \sin 과 \cos 함수의 결합으로 해석되는데, 이때 개별함수는 파동을 구성하는 개별파동을 의미하고 주파수 성분이 낮은(n 의 값이 가장 작은) 순서대로 제1, 제2, 제3,...고조파(n -th harmonic)라고 하고, 특히 주파수 성분이 가장 낮은 제1 고조파를 기본파(fundamental wave)라고 한다. 이때 푸리에 계수는 기본파 및 고조파의 진폭을 의미하는 동시에 전체 파동 $f(t)$ 를 구성하는 비중을 의미한다.

2) 푸리에 변환

주기가 없는 비주기성 불규칙 파동의 경우에는 주기 $T \rightarrow \infty$ 로 무한대인 경우를 가정하고 관측된 시간에 대해서 파동을 해석하는 방법을 사용하는데, 이때 $f(t)$ 를 시간 t 에 대한 함수가 아닌 주파수 f 에 대한 함수로 변환하게 되며 이를 푸리에 변환(Fourier transform)이라고 하고, 변환된 함수는 본래 함수의 스펙트럼을 의미하게 된다. 이때, 스펙트럼은 파동을 구성하는 고조파들의 배열을 의미하고, 스펙트럼 해석을 통해 개별 고조파들의 성분과 특성을 분석할 수 있게 된다.

$$\text{-푸리에 변환 : } F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (6)$$

$$\text{-푸리에 역변환 : } f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (7)$$

푸리에 변환은 주기를 무한대로 확장했을 때 연속된

시간과 진동수 상에서 존재하는 $F(\omega)$ 를 산출하는 것이다. 하지만 무한한 주기를 실제로 관측하기는 불가능하며, 연속된 시간으로 관측하는 것 역시 쉽지 않다. 따라서 특정한 시간동안 N 개의 이산적 자료가 관측된 경우에는 식(8)의 이산 푸리에 변환(DFT, Discrete Fourier Transform) 공식을 활용한다. 이산 푸리에 변환은 제한된 시간동안 관측된 N 개의 자료로부터 비주기성 불규칙 파동 $f(t)$ 의 스펙트럼을 해석하기 위한 방법론이다.

$$F(n) = \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \tau \cdot f(k\tau) e^{-i2\pi k \frac{n}{N}} \right\} \quad (8)$$

이때, N 은 관측된 자료수, τ 는 관측간격, k 는 관측순서, n 은 주파수의 정수배를 의미한다.

3) 상호상관분석을 이용한 파동 해석

두 변수의 상관성(correlation)은 특정 변수의 변화에 따라 다른 변수가 변하는 관계를 의미하고, 상관분석(correlation analysis)은 두 변수 사이의 상관성을 분석하는 통계적 기법이며, 자기상관(auto-correlation)과 상호상관(cross-correlation)으로 구분된다. 본 연구에서는 서로 다른 두 변수의 상관성을 분석하는 상호상관분석을 통해 선행차량의 속도변화와 후행차량 속도변화의 상호상관성을 해석하고자 하였고, 이를 위하여 다른 분야에서 파동 해석에 상호상관분석을 적용한 사례를 조사하였다.

우선 시계열 해석의 경우, 서로 다른 두 변수가 시간 흐름에 대해 유사한 패턴이 나타나는지를 판단하기 위하여 상호상관함수(cross-correlation function)를 이용한다. 예를 들어 우체국의 시간에 따른 우편물 접수량과 발송량의 시계열 변동은 접수해서 발송까지 소요시간 간격으로 상관성이 있을 것으로 예측되는데, 이때 소요시간을 τ 라 하고, 시간 t 에서 접수량을 $x(t)$, 발송량을 $y(t+\tau)$ 로 정의하면, $x(t)$ 와 $y(t+\tau)$ 의 상호상관성을 상호상관함수 $C(\tau)$ 로 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} C(\tau) &= E[x(t)y(t+\tau)] = \overline{x(t)y(t+\tau)} \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t)y(t+\tau) dt \end{aligned} \quad (9)$$

상호상관함수는 $x(t)$ 와 $y(t+\tau)$ 두 변동 값의 기댓

값 또는 시간평균값으로 산출되며, $x(t)$ 와 $y(t+\tau)$ 가 주기가 없는 불규칙 파동인 경우에는 주기 T 를 무한대로 확장하여 적분을 통해 그 값을 산출할 수 있다.

상호상관함수를 $\tau=0$ 인 값 $C(0)$ 로 나누어 정규화한 값을 상호상관계수 $R(\tau)$ 라고 하는데, 상호상관계수는 x, y 두 파동의 상관성을 $-1 \leq R(\tau) \leq 1$ 의 범위의 실수로 설명하며 1에 가까울수록 높은 양의 상관관계가 존재하는 것으로 해석된다.

$$R(\tau) = \frac{C(\tau)}{\sqrt{C_x(0)} \sqrt{C_y(0)}} = \frac{\overline{x(t)y(t+\tau)}}{\sqrt{x^2} \sqrt{y^2}} \quad (10)$$

디지털 신호처리의 경우 수신된 신호를 구분할 때 상호상관분석이 적용된다. 예를 들어 방송국에서 복수의 방송신호를 송신하고 가정에서 이를 수신할 때 방송국과 각 가정의 거리에 따라 수신된 신호의 지연시간이 다르게 나타나기 때문에 수신된 2개의 신호를 시간 따라 이동시키면서 파형의 일치성을 검증하는데, 동일한 신호인 경우에는 k 만큼의 시간간격에 따른 자기상관성이 나타나고, 다른 신호인 경우에는 상호상관성이 나타나게 되며, 이를 판단하는 과정에 자기상관분석과 상호상관분석이 시행된다.

하지만 디지털 신호와 같은 파동의 상호상관분석은 상호상관함수로부터 두 변수의 상호상관성을 분석하는 시계열의 경우와 다르게, 상호상관함수의 푸리에 변환을 통해 얻어지는 상호 스펙트럼(cross spectrum)의 개별 고조파들의 에너지 스펙트럼 밀도 증감의 간의 상관성을 분석하는 스펙트럼 분석 방법론이 적용되는데, 이를 통해 두 신호의 파동을 구성하는 스펙트럼의 고조파 성분의 유사성을 통해 신호의 일치성을 판단한다.

3. 검토 결과

기존의 추종모형이 모사하고 있는 운전자 행태는 대부분 운전자 전체 모집단의 평균적인 특성을 설명하는 대푯값의 형태로 나타나는데, 이는 교통류 현상 전체를 설명하는데 적합한 반면 자율주행차량과 같이 특정 시간에서 특정 운전자의 운전행태 자료가 필요한 경우에는 적용의 한계가 존재한다.

문헌검토 결과로부터 본 연구에서 추종관계는 ‘동일한 차로를 주행하는 연속된 두 차량의 상호관계’로 전통적인 교통류 이론에 기반하여 정의하였고, 두 차량의 관계를 자극, 반응, 민감도로 해석한 GHR 모형(Gazis et al., 1961)에 기반하여 운전행태특성을 분석하였다.

특히, 교통의 추종상황에서 선행차량과 후행차량이 만들어내는 속도의 변화는 선행차량의 자극(힘)이 후행차량(매질)의 반응으로 전달(이동)되는 현상으로 파동과 유사하다고 할 수 있는데, 특히 후행차량 운전자 특성에 따라 반응이 달라지는 현상은 매질에 따라 이동특성이 달라지는 파동의 성질과 유사하다. 따라서 본 논문에서는 상호상관함수의 푸리에 변환으로 산출되는 상호 스펙트럼을 분석하는 방법론을 추종관계 해석과 운전자 반응 특성 분석에 적용하는 것이 적합한 것으로 판단하였다.

운전자 반응특성 분석 방법론 개발

1. 자기상관과 파워 스펙트럼 밀도

비주기성 불규칙 파동의 스펙트럼은 주기가 무한하기 때문에 푸리에 변환을 통해 각 고조파의 단위 시간당 평균 에너지를 산출하여 분석하는데, 이를 파동의 각속도 ω 에서의 파워스펙트럼 밀도(power spectrum density) $S(\omega)$ 라고 한다. 이때, $C(\tau)$ 는 시간 τ 에서 파동의 자기상관함수를 의미하는데, Wiener - Khinchin²⁾의 이론에 의해 $C(\tau)$ 의 푸리에 변환은 $S(\omega)$ 이고, $S(\omega)$ 의 푸리에 역변환은 $C(\tau)$ 가 되는 관계가 Table 1과 같이 존재한다.

Table 1. Generation of power spectrum density function using fourier transform

Auto-correlation function	
$C(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega$	
↓ Fourier transform	↑ Inverse fourier transform
Power spectrum density function	
$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$	

2) Wiener - Khinchin theorem : Norbert Wiener(1930)가 발표하고, Aleksandr Khinchin(1934)에 의해 정립된 이론으로, 모든 신호(파동)의 자기상관함수의 푸리에 변환은 에너지 스펙트럼 함수와 동일함을 증명한 이론임

이러한 관계를 2개의 비주기성 불규칙 파동에 적용하면, 자기상관함수를 상호상관함수로 변환하고 그 상호상관함수의 스펙트럼인 상호 스펙트럼을 통해 상호상관계수를 도출함으로써 두 속도 파동의 상관성을 분석할 수 있다.

2. 상호 스펙트럼을 이용한 속도파동 해석 방법론 정립

상호 스펙트럼을 이용한 파동해석 방법론을 교통류 추종관계 해석에 적용해 보면, 시간 t 에서의 선행차량의 속도를 $V_L(t)$, 선행차량보다 시간 τ 만큼 뒤에 위치한 후행차량의 속도를 $V_F(t+\tau)$ 라고 할 때, 두 차량 속도 변화의 상호상관함수 $C_{FL}(\tau)$ 는 식(11)과 같이 정의할 수 있다.

$$C_{FL}(\tau) = \overline{V_L(t) V_F(t+\tau)} \quad (11)$$

$$= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} V_L(t) V_F(t+\tau) dt$$

상호상관함수 $C_{FL}(\tau)$ 를 푸리에 변환하면 상호 스펙트럼 $S_{FL}(\omega)$ 가 식(12)와 같이 산출되며, $S_{FL}(\omega)$ 의 푸리에 역변환이 $C_{FL}(\tau)$ 인 관계가 존재한다.

$$S_{FL}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{FL}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (12)$$

$$\Leftrightarrow C_{FL}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{FL}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega$$

여기서 ω 는 파동의 각속도(단위: 라디안)를 의미하고 파동의 주기 T , 주파수 f 와는 $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ 의 관계를 갖는다. 두 차량의 속도 변화로부터 도출된 상호상관함수 $C_{FL}(\tau)$ 와 상호 스펙트럼 밀도 $S_{FL}(\omega)$ 를 적용하여 두 차량 속도 변화의 상관성을 해석할 수 있는 상호상관계수는 Table 2와 같이 도출할 수 있다.

Table 2의 과정을 통해 도출된 상호 상관계수 $R(\omega)$ 는 두 파동의 푸리에 변환을 통해 산출된 스펙트럼 개별 고조파들의 에너지 스펙트럼 밀도 간 상관성을 의미하기

Table 2. Generating process of cross-correlation coefficient between car-following speed waves

① 상호 상관함수

$$C_{FL}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} V_L(t) V_F(t+\tau) dt$$

② 상호 스펙트럼

$$S_{FL}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{FL}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

③ 선행차량 속도 $V_L(t)$ 파동의 푸리에 변환

$$F_L(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} V_L(t) e^{-i\omega t} dt$$

④ $F_L(\omega)$ 의 푸리에 역변환

$$V_L(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_L(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

⑤ 후행차량 속도 $V_F(t)$ 파동의 푸리에 변환

$$F_F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} V_F(t) e^{-i\omega t} dt$$

⑥ $F_F(\omega)$ 의 푸리에 역변환

$$V_F(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_F(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

⑦ ④,⑥을 ①에 대입

$$C_{FL}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} V_L(t) V_F(t+\tau) dt$$

$$= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} F_F(\omega) e^{i\omega(t+\tau)} d\omega \right\} V_L(t) dt$$

$$= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} F_F(\omega) e^{i\omega\tau} \left\{ \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} V_L(t) e^{i\omega t} dt \right\} d\omega$$

⑧ 관측시간 $-\frac{T}{2} \sim \frac{T}{2}$ 이외의 $V_L(t)$ 의 값을 0으로 가정하면 적분구간을 $-\infty \sim \infty$ 로 치환 가능하고, $F_L(\omega)$ 의 공액관계³⁾인

$$F_L^*(\omega) = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} V_L(t) e^{i\omega t} d\omega$$

$$C_{FL}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi T} \int_{-\infty}^{\infty} F_F(\omega) e^{i\omega\tau} \left\{ \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} V_L(t) e^{i\omega t} dt \right\} d\omega$$

$$= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi T} \int_{-\infty}^{\infty} F_F(\omega) F_L^*(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} F_F(\omega) F_L^*(\omega) \right] e^{i\omega\tau} d\omega$$

⑨ 상호상관함수 $C_{FL}(\tau)$ 의 푸리에 변환이 상호 스펙트럼

$S_{FL}(\omega)$ 인 것으로부터

$$C_{FL}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{FL}(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} F_F(\omega) F_L^*(\omega) \right] e^{i\omega\tau} d\omega$$

$$\therefore S_{FL}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} F_F(\omega) F_L^*(\omega)$$

$$= E [F_F(\omega) F_L^*(\omega)]$$

3) 공액관계 : 복소평면에서 복소축에 대하여 대칭인 관계로, $i \Rightarrow -i$ 인 관계를 의미함

⑩ 상호 상관계수 $R(\omega)$ 은 다음과 같이 산출함

$$\begin{aligned}
 R(\omega) &= \frac{S_{FL}(\omega)}{\sqrt{S_{FF}(\omega)} \sqrt{S_{LL}(\omega)}} \\
 &= \frac{S_{FL}(\omega)}{\sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{F_F(\omega) F_F^*(\omega)}{T}} \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{F_L(\omega) F_L^*(\omega)}{T}}} \\
 &= \frac{S_{FL}(\omega)}{\sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|F_F(\omega)|^2}{T}} \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|F_L(\omega)|^2}{T}}} \\
 &= \frac{S_{FL}(\omega)}{\sqrt{E[|F_F(\omega)|^2]} \sqrt{E[|F_L(\omega)|^2]}}
 \end{aligned}$$

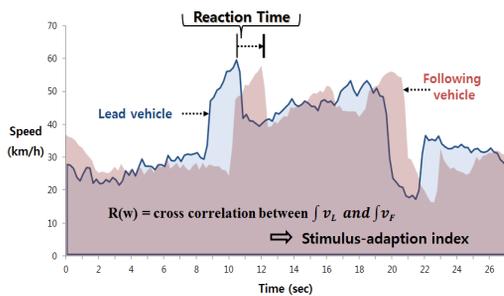


Figure 2. Methodology to analyze drivers' Response characteristics using cross-correlation coefficient

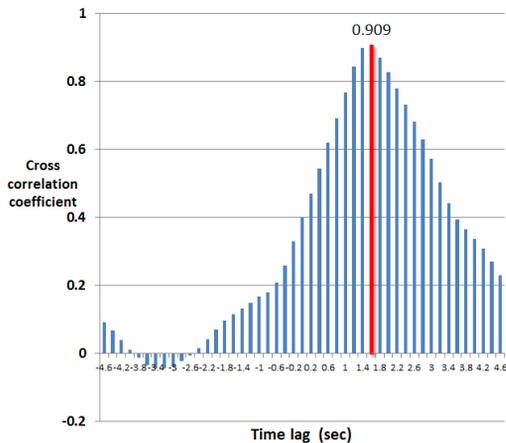


Figure 3. Result of searching for a maximum cross correlation coefficient

때문에, 두 변량 증감의 상관성을 분석한 상관계수보다 파동의 유사성 분석에 적합한 지표라고 할 수 있다. 이때, $R(\omega)$ 는 $-1 \leq R(\omega) \leq 1$ 범위의 값을 갖으며, 1에 가까울수록 두 파동의 양의 상관성이 높음을 의미한다.

3. 운전자 반응특성 분석 방법론 개발

파동해석 기법의 상호상관분석을 운전자 반응특성 분석에 적용하면 Figure 2와 같이 선행차량 속도 변화를 관측시간 간격에 따라 시간축 양의 방향으로 이동시키면서 상호상관계수를 도출함으로써 최대 상호상관계수를 탐색할 수 있다.

이때, 두 파동이 중첩되는 면적이 최대가 되는 지점에서 상호상관계수는 최댓값을 갖게 되며 그 때의 상호상관계수 값을 자극순응지수(Stimulus-adaption index)로, 이동된 시간간격을 반응시간(Reaction time)으로 정의하였다. 이때 반응시간은 후행차량이 선행차량의 자극(가속 또는 감속)을 인지하여 반응(가속 또는 감속)하기까지 소요된 시간을 의미하게 되고, 자극순응지수는 1에 가까운 값을 나타낼수록 선행차량의 속도변화 자극과 후행차량의 반응이 유사하다고 해석할 수 있으며, 이 경우 후행차량은 선행차량 자극과 유사하게 순응하여 반응하는 특성이 존재한다고 해석할 수 있다.

Figure 3은 선행차량 속도 파동을 0.2초 간격으로 이동시키면서 선행차량과 후행차량 속도 변화 간 상호상관계수를 연속적으로 산출한 결과의 예시이다.

Figure 3에서 선행차량 속도 변화 그래프를 양의 방향으로 1.6초 이동하였을 때 상호상관계수는 최댓값 0.909를 나타내었는데, 이것을 선행차량의 자극에 대해 후행차량이 반응하기 까지 소요된 시간으로 해석하여 후행차량의 반응시간을 1.6초로 판단할 수 있다. 또한 1.6초 이동 후 상호상관계수 0.909를 선행차량과 후행차량의 속도 변화에 대한 자극순응지수로 정의하고, 후행차량은 선행차량의 자극에 대하여 약 91% 수준의 유사한 반응특성을 나타내는 것으로 해석할 수 있다.

자료 구축

1. 자료 수집

본 논문에서 개발한 방법론 검증에 위하여 서울외곽 순환고속도로 김포IC에서 시흥IC방향 중동 나들목에서 송내 나들목 사이에 60m간격으로 설치된 영상검지기로부터 10일 간 수집된 영상자료를 적용하였다.

자료수집 구간은 설계속도 100km/h의 편도 4차로 고속국도에 해당하고, 상류부에서 인천공항 고속도로, 제1경인고속도로와 합류하기 때문에 유입된 교통류로

인해 교통량이 높은 특징을 보이며, 이로 인해 평균속도가 약 31km/h, LOS C 또는 D⁴⁾인 특징을 나타내고 있다.

촬영시간은 오전·오후 침두시간을 포함하는 오전 6시부터 오후 7시까지 13시간으로 초당 15프레임으로 촬영되었는데, 촬영된 영상은 이미지 역 원근변환을 통해 수직 영상으로 변환하고, 개별차량의 특징점(corner point)을 추출하여 차량을 인식한 후, 연속된 카메라 관측영역에서 동일 id로 추적함으로써 검지영역 내에서 약 0.067초 간격(15프레임/초) 개별차량 위치정보를 생성하였다.

2. 차량 궤적자료 생성 및 추종자료 추출

차량 궤적자료 생성을 위하여 분석간격을 0.2초 간격으로 설정하였는데, 이는 0.067초 간격 측정자료의 경우 과도한 처리용량과 분석시간이 증가하는 문제가 발생하고, 연속류에서 0.2초 간격의 자료로도 충분히 운전자 반응특성을 분석할 수 있을 것으로 판단했기 때문이다.

두 차량 간 추종관계 해석을 위하여 대상 차량들이 동일 차로를 주행하고 있는지 확인이 필요하다. 이를 위하여 수집·가공된 GIS 좌표가 실제 어떤 검지영역의 몇 번째 차로에 위치하는지 판단하고 관측간격별 이동거리, 속도, 가속도를 산출할 수 있는 프로그램을 Figure 4와 같이 Matlab 2007을 이용하여 작성하였다.

필터링 기법을 적용하여 이상치를 제거하고, 자료로부터 추종관계인 선행, 후행차량의 자료 추출을 위하여 ①추종관계 여부 판단, ②선행, 후행차량 자료 추출, ③두 차량의 상대속도, 공간 차두간격 등 추종관계 자료 생성 등, 총 3 단계의 자료가공을 수행하였다.

관측시간에 동일 검지영역, 동일 차로를 주행하고 있는 차량들 간의 거리를 계산하여 대상차량보다 위도값이 큰 차량 중 거리가 최소인 차량을 후행차량, 위도값이 작은 차량 중 거리가 최소인 차량을 선행차량으로 판단하였는데, 이는 조사구간인 서울외곽순환고속도로가 남북 방향으로 위도와 수직을 이루고 있기 때문이다.

이와 같은 방법으로 추종관계 여부가 판단되면, 검색된 선행, 후행차량 자료에서 관측시간 중에 ①선행차량 또는 후행차량의 차로변경이 일어나거나 ②다른 차량이 두 차량 사이로 차로를 변경하여 추종관계가 중단된 경우를 검색하여 제외하는 방식으로 선행, 후행차량 자료

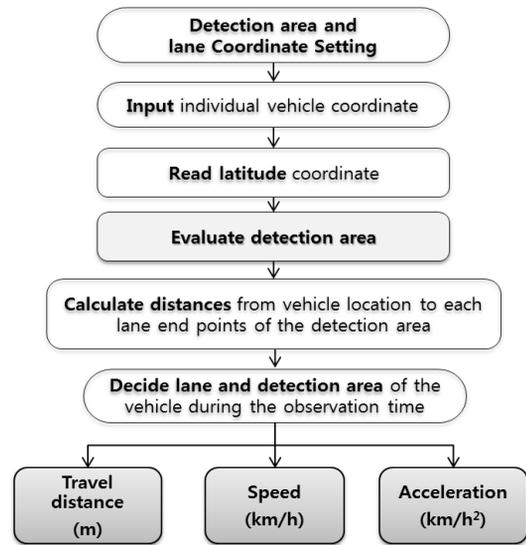


Figure 4. Algorithm to calculate a individual vehicle location and traffic information

를 추출하고, 마지막으로 추출된 추종관계인 두 차량의 자료로부터 두 차량의 공간 차두간격, 상대속도를 계산하여 차량 궤적자료를 생성하였다. 그 결과 추종관계를 10초 이상 유지한 총 170건의 추종자료 데이터셋이 산출되었다.

파동해석을 통한 운전자 반응특성 분석

자극순응지수, 반응특성 등 운전자 반응특성 분석 방법론을 수집된 170건의 추종관계 자료에 적용하기 위하여 Matlab 2007을 이용하여 상호상관함수와 상호상관계수를 산출하는 프로그램을 작성하였고, 상호상관계수의 최댓값을 탐색하기 위하여 탐색간격 τ 를 자료수집 간격과 동일한 0.2초 단위로 설정하여 선행차량 속도 파동을 ± 50 간격(± 10 초)까지 이동시키며 상호상관계수를 산출하였다.

1. 반응시간과 자극순응지수 산출결과

추종관계 자료 170건을 본 논문에서 제안한 방법론 적용하여 반응시간과 자극순응지수를 산출한 결과에 대한 예시는 Table 3과 같다.

4) 2013 도로교통량 통계연보, 국토교통부, pp.504, 2014

Table 3. Stimulus-adaption index and reaction time calculation results

Num.of Data	Date (mm/dd/hr)	Observation time (sec)	Stimulus-adaption index	Reaction time (sec)
1	051307	19.0	0.280	1.8
2	051308	11.4	0.535	2.8
3	051309	11.0	0.737	2
4	051310	14.2	0.691	1.8
5	051310	17.0	0.493	2
6	051310	17.4	0.477	3.2
7	051311	21.2	0.646	1.2
8	051311	10.8	0.760	1.6
9	051311	14.4	0.707	1.8
10	051311	13.6	0.649	1.8
...

Table 4. Statical analysis of stimulus-adaption index and reaction time

Item	Average	Median	Max	Min
Stimulus-adaption index	0.654	0.677	0.954	0.238
Reaction time(sec)	2.091	2.000	4.200	0.800

170건 추종자료의 반응시간과 자극순응지수에 대하여 통계분석을 수행한 결과, Table 3과 같이 자극순응지수는 평균이 0.654, 중앙값이 0.677로 유사하게 나타났고, 이는 관측된 후행차량 운전자는 선행차량의 속도변화 자극에 대하여 평균적으로 약 0.654의 상관도를 갖는 반응을 보이는 것으로 해석할 수 있다.

반응시간의 평균은 2.091초이고 중앙값 2초, 최빈값 2.2초로 유사한 수준으로 분석되었는데, 이는 자료가 수집된 구간이 지정체가 상승적으로 발생하여 공간 차두간격이 상대적으로 짧은 특징을 보이는 것에 영향을 받은 것으로 해석된다.

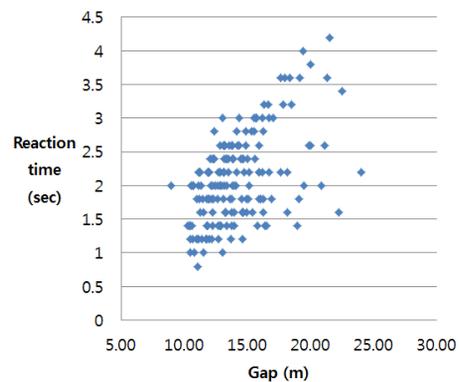
2. 반응시간과 자극순응지수 특성 분석

자극순응지수 및 반응시간의 산출결과에 영향을 주는 요인을 분석하기 위하여 운전행태 특성 지표와 평균 공간 차두간격, 후행차량 속도와 상관분석을 수행하였다.

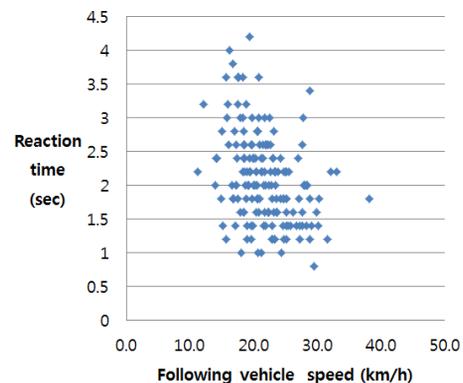
그 결과, Table 5와 같이 자극순응지수는 공간 차두간격과는 통계적으로 유의한 상관관계가 존재하지 않는 것으로 나타났고, 후행차량 평균 속도와는 0.272 크기의 양의 상관관계가 존재하는 것으로 나타났다. 이를 통해 후행차량이 선행차량의 자극에 순응하는 정도는 두

Table 5. Correlation analysis between driving characteristic index and gap/speed

Item	Gap (m)		Average speed of following vehicle (km/h)	
	Correlation coefficient	p-value	Correlation coefficient	p-value
Stimulus-adaption index	-0.011	0.889	0.272	0.000
Reaction time	0.533	0.000	-0.347	0.000



(a) Gap vs. reaction time



(b) Following vehicle speed vs. reaction time

Figure 5. Correlation between reaction time and gap/speed

차량 간 거리와는 무관하지만 후행차량의 속도가 빠를수록 커지는 것으로 해석할 수 있다.

반면, 반응시간은 공간 차두간격, 후행차량 평균 속도 모두와 통계적으로 유의미한 상관성이 존재하는 것으로 분석되었는데, 후행차량 평균 속도와는 -0.347의 음의 상관관계가 있는 것으로 나타났고, 공간 차두간격과는 0.533의 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

Figure 5의 (a)와 (b)는 이러한 상관관계를 그래프

로 나타난 것으로, 이 결과로부터 반응시간의 경우 공간 차두간격이나 후행차량 평균 속도와 같은 교통류 변수에 따라 다르게 나타나는 반응특성인 반면, 자극순응지수는 교통류 변수와 상관없이 운전자에 따라 다르게 나타나는 반응특성인 것을 알 수 있다.

이러한 상관분석의 결과는 자료가 수집된 교통환경 특성이 반영된 것으로 일반적인 운전행태특성으로 해석

할 수 없다. 하지만 위 결과를 통해 개발된 방법론에 의해 산출된 운전행태특성 지수값이 일관성을 갖으며, 적용가능성이 있음을 판단할 수 있다.

3. 자율주행차량 주행판단 알고리즘 적용방안

본 논문을 통해 개발된 운전자 반응특성 지수는 자율주행차량이 검지한 주변 차량의 속도정보로부터 주변차량의 반응특성을 분석함으로써, 보다 안전하고 효율적인 주행판단을 하는데 적용될 수 있을 것이다. 특히 자율주행차량과 일반차량이 혼재된 교통류에서 자율주행차량의 안전하고 효율적인 경로계획 수립을 위하여 주변 차량의 운전행태 특성을 반영한 의사결정과정에 유효하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 주행 상황별 자율주행 알고리즘 반영방안 예시를 정리하면 Table 6과 같다.

실제 자율주행차량에 적용하는 사례로 전방차량 충돌경보 시스템(FCWS, Forward Collision Warning System)알고리즘에 운전행태 특성 지수를 적용하는 방안에 대하여 구체적으로 검토해보면 Figure 6와 같다. 기존 FCWS는 특정 TTC 이하인 경우에 한하여 경고하는 방식이지만, 운전행태특성 지수를 활용하면 선행차량 이외에 후행차량까지 포함하여 충돌을 회피할 수 있는 안전거리를 산출하여 이를 운전자에게 안내하거나 직접 해당 거리를 유지하도록 차량을 제어하는 기술 개발이 가능하다. 이를 위하여 다음의 과정을 기존 알고리즘에 추가하는 방안을 검토해 볼 수 있다.

Table 6. Applying driving behavior index to decision making process of autonomous vehicle

Driving behavior index	Car following situation	Lane changing situation	others
Reaction time	Safe braking considering following vehicle's reaction time	Safe speed selection after LC considering target lane vehicle's reaction time	Cruise control with non-autonomous vehicle Safe emergency stop
Stimulus-adaption index	Keeping safe distance considering following vehicle's stimulus-adaption index	Predicting gap size considering following vehicle's stimulus-adaption index	Making trip plan with minimizing travel time
Effect	Prevent head-on & rear-end collision	Safe lane changing with minimizing inconvenience to vehicles on target lane	Maximize road utility

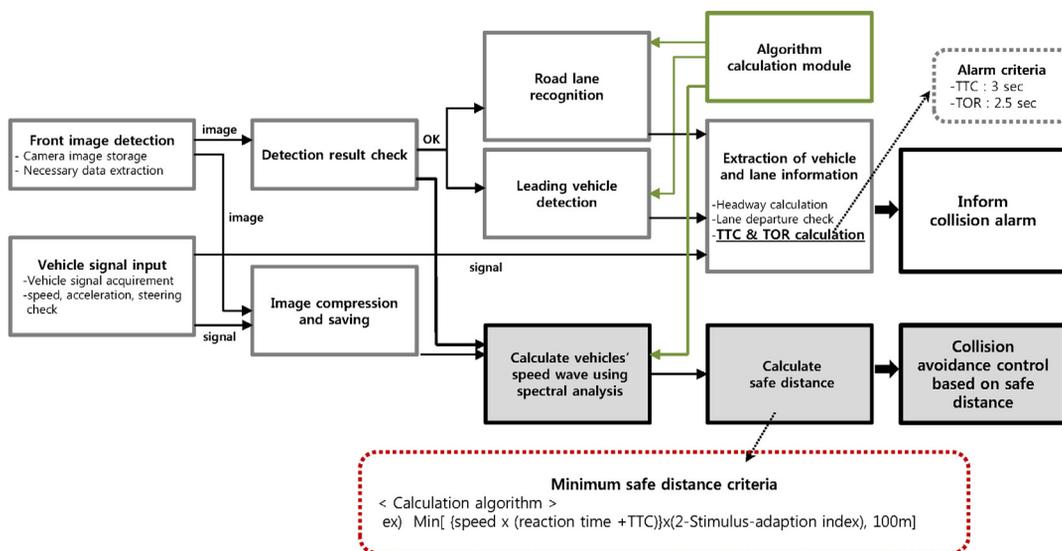


Figure 6. Implement to FCWS (Forward Collision Warning System)

① 선행, 후행차량 속도파동의 스펙트럼을 분석하여 반응시간과 자극순응지수 산출

② 반응시간과 자극순응지수를 이용한 최소 안전거리 산출

예시) 최소 안전거리 (m) =

$$Mm \left[\begin{array}{l} \{속도 \times (반응시간 + TTC)\} \\ \times (2 - 자극순응지수), 100m \end{array} \right]$$

③ 충돌회피를 위한 최소 안전거리 정보 제공 및 차량 제어

이러한 알고리즘을 추가함으로써 기존의 충돌위험성을 경고하던 FCWS는 충돌을 회피할 수 있는 안전거리를 산출하여 안내하고 이를 제어하는 기능이 추가될 수 있고, 이를 통해 보다 능동적으로 전방차량과의 충돌상황을 회피할 수 있게 된다.

결론

본 논문에서는 파동해석 기법을 활용하여 추종관계인 두 차량의 속도 변화자료로부터 개별 운전자의 반응특성을 분석할 수 있는 방법론을 개발하였다.

불규칙한 비주기성 파동들의 상관성을 분석하기 위하여 상호상관함수의 푸리에 변환을 통해 산출되는 상호 스펙트럼과 상호상관계수 산출방법을 교통류의 추종관계에 적용하여, 선행차량 속도 변화와 임의의 시간 τ 만큼 지연된 후행차량 속도 변화의 푸리에 변환을 통해 상호상관함수와 상호 스펙트럼을 산출하고 상호상관계수를 도출함으로써 ①후행차량의 반응시간과 ②후행차량의 자극순응지수를 도출하는 방법론을 개발하였다.

방법론의 검증을 위하여 서울외곽순환고속도로 중동 나들목 600m 구간에서 수집된 170건의 추종자료를 파동해석 방법론에 적용한 결과, 자극순응지수는 평균 0.654, 반응시간은 평균 2.091초인 것으로 분석되었고, 자극순응지수는 후행차량 평균 속도와 0.272의 상관계수가 도출되어 후행차량의 속도가 빠를수록 선행차량 자극에 순응하는 경향이 있는 것으로 나타났으며, 반응시간의 경우에는 후행차량 평균 속도와 -0.347, 공간차두간격과 0.533의 상관계수가 산출되어 선행차량과의 거리가 짧고 후행차량 속도가 빠를수록 후행차량 운전자의 반응시간이 짧아지는 것으로 분석되었다. 이러한 결과로부터 반응시간은 교통류 변수에 따라 다르게 나타나는 반응특성 지수이고, 자극순응지수는 운전자에 따라

다르게 나타나는 반응특성 지수인 점을 도출하였다.

본 연구는 추종관계에서 선행차량과 후행차량의 속도가 시간에 따라 변화하는 것을 파동이론으로 해석한 점과 이를 통해 자율주행차량 주행판단 알고리즘에 필요한 개별 운전자의 반응특성을 분석할 수 있는 방법론을 개발했다는 점에서 가치가 있다고 할 수 있다. 연구에서 개발된 두 지수를 자율주행차량 주행 알고리즘에 적용할 경우, 주변 차량 운전자의 반응특성을 분석함으로써 보다 안전하고 효율적인 주행이 가능할 것으로 판단된다.

하지만 본 연구에서 제안한 자극순응지수 및 반응시간 산출방법 적용을 위해서는 10초 이상 관측된 자료가 필요한 점에서 자율주행차량에 실시간으로 적용하기 어려운 한계가 존재하며, 향후 연구에서는 10초 미만의 추종 자료로부터 운전행태특성 지수를 산출하는 방안이 검토되어야 하고, 아울러 선행차량의 자극 유형을 구분하거나(예를 들어 감속 자극과 가속 자극의 구분 등), 추종상황의 공간차두간격을 구분하여, 각 유형별 후행차량의 운전행태특성을 분석함으로써 자율주행차량의 적용성을 향상시킬 수 있는 연구가 수행되어야 할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

The vehicle trajectory data used in this thesis were supported by the Smart Highway project - Development for traffic flow analysis & evaluation technologies.

REFERENCES

Chandler R. E., Herman R., Montroll E. W. (1958), Traffic Dynamics: Studies in Car Following, Operations Research, 6(2), 165-184.
 Edie L. C. (1960), Car Following and Steady State Theory for Non-congested Traffic, Operations Research, 9(1), 66-76.
 Gazis D. C., Herman R., Potts R. B. (1959), Car Following Theory of Steady State Traffic Flow, Operations Research 7(4), 499-505.
 Gazis D. C., Herman R., Rothery R. W. (1961), Nonlinear Follow the Leader Models of Traffic Flow, Operations Research, 9(4), 545-567.

- Gerlough D. L., Huber M. J. (1975), Traffic Flow Theory, TRB Special Report 165, 87.
- Gipps P. G. (1981), A Behavioural Car-following Model for Computer Simulation, Transportation Research part B, 15(2), 105-111.
- Helly W. (1959), Simulation of Bottlenecks in Single Lane Traffic Flow, In Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow, Research Laboratories, General Motors, 207-238.
- Hino M. (2000), Spectral analysis, Science & Technology, 40-85.
- Jean Baptiste Joseph baron Fourier (1878), The Analytical Theory of Heat, Cambridge University Press, 168-209.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009), Explanation Book of Standards for Highway Design and Facilities, 288.
- Transnational College of LEX (2010), Rules of Waves, Gbrain, 92-548.
- Vinay L. Ingle, John G. Proakis (2014), Essentials of Digital Signal Processing Using MATLAB, CENGAGE Learning, 61-108.

- ☞ 주 작성 자 : 채찬들
- ☞ 교 신 저 자 : 채찬들
- ☞ 논문투고일 : 2015. 4. 1
- ☞ 논문심사일 : 2015. 6. 12 (1차)
2015. 7. 16 (2차)
- ☞ 심사판정일 : 2015. 7. 16
- ☞ 반론접수기한 : 2015. 12. 31
- ☞ 3인 익명 심사필
- ☞ 1인 abstract 교정필