

차량추종모형의 반응시간 다양화 방안

Discrete reaction times for Car-Followings

장 경 욱

(서울대학교 지구환경시스템공학부, 석사과정)

전 경 수

박 창 호

(서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수)

Key words : 인식 경계, 시간차, Discrete wavelet transform

목 차

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적
2. 연구의 범위 및 내용

II. 선행연구 고찰

1. 차량 추종 이론
2. 반응시간

III. 자료수집 및 가공

1. 자료수집
2. 자료가공

IV. 분석 결과

1. 인식 경계 추정
2. 반응 시간 추정

V. 결론 및 향후 연구과제

참고문헌

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

최근 Advanced vehicle and Highway systems (AVHS) 등 ITS 부분에서 추종모형이 다양하게 이용되고 있으며, 이는 사람의 인지 판단의 오류를 제거함으로써 사고 발생가능성을 배제하고, 도로이용의 효율성을 높여 도로 용량의 증대에 그 목적이 있다. 또한, 도로의 개선이나 새로운 정책에 대한 평가시스템으로 미시시물레이션이 각광을 받고 있으며, 차량추종 모형이 핵심을 이루고 있다.

차량 추종행태에 관한 연구는 1950년대부터 지속적으로 연구되어 왔으며 대부분의 경우 모형들의 결과를 실제 현상에 적용하는 사례가 많지만 이들의 결과물에 대한 정확한 검증이 이루어지지 않고 있으며, 특히 대부분의 모형들에서 반응시간에 대해 고정값을 사용하는 것이 일반적이며 random값을 사용하는 모형도 있다. 하지만 이는 운전자 반응시간에 대하여 실제 도로상에서 운전자들의 반응시간의 다양성을 무시함으로써 모형에 경직성을 가지며, 상대속도와 차간간격의 자극에 대하여 다양한 반응시간을 갖지 못하여 현실과의 괴리가 발생하여 실제 현상을 적절하게 모사하지 못하고 있다. 또한 운전자의 가·감속 행태에는 인식 경계(perceptual threshold)가 존재함에도 불구하고 이를 반영하지 못하여 모형에서 구사하는 가·감속행태는 매우 불안정하게 나타나는 것이 특징이다.

따라서, 반응시간을 상대속도와 차두거리 그리고 속도의

함수로 정의한 반응시간 함수를 추정하여 기존 모형들에서 나타나는 시간차(time difference)¹⁾를 제거하고 인식경계(perceptual threshold)의 설정을 통해 불안정 요소를 최소화함으로써 현실과의 적합도를 높여 교통안전, 새로운 정책의 도입에 따른 평가시스템으로 이용될 수 있으며, ITS의 다양한 부분에 혁신적으로 이용될 수 있을 것이다.

2. 연구의 범위 및 내용

본 연구에서는 실제 현장 실험자료(미시적 주행특성을 반영한 교통류 위험도 평가 기법 개발, 정 성봉, 2003)를 바탕으로 5대의 차량을 이용한 도시부 고속도로 실험 자료를 이용하여 차량의 감·가속도, 상대속도, 차두거리 그리고 차간 간격을 추정하고 이를 통해 실제 반응시간을 추정하여 상대속도와 가속도 그리고 차량의 속도 변화에 따른 반응시간 함수를 추정하도록 하였다.

또한, 상대속도와 감·가속도의 분포 그리고 이에 따른 차두시간의 변화를 통합적으로 고려하여 인식경계(perceptual threshold)를 구분 짓는 상대속도를 추정하였다.

상대속도와 해당 차량의 속도 그리고 차두거리에 따른 다양한 반응 시간을 적용함으로써 실제 자료와 모형에서 나타나는 시간차 (time difference)를 제거하여 모형의 적합성을 높이고 신뢰성을 얻고자 한다.

1) 시간차 : 감·가속 시점의 불일치

II. 선행연구 고찰

1. 차량 추종 모형

1) Gazis-Herman-Rothery(GHR) 모형

$$a_n(t) = cv_n^m \frac{\Delta v(t-T)}{\Delta x^l(t-T)}$$

GHR 모형의 l, m, n 모수추정에 있어서 너무나도 다양하고 모순된 결과들을 제시하였기 때문에 많이 사용되지는 않는다. 그 이유는 모수 추정에 있어서 평균을 이용한 결과의 예측하였고, 항공기술과 loop 검지기 자료와 빌딩 옥상에서 촬영을 기반으로 한 것으로 구간이 짧으며 이로 인해 오차 발생을 제어할 수가 없다. 또한 교통 상황에 따라 너무나도 다양한 추종행태를 보이며 저속 혹은 급정지에 관해서는 경험적인 모형이 대부분이어서 일반적인 추종 모형에서는 반영되지 못한다.

2) Safety distance or collision avoidance models(CA)

$$\Delta x(t-T)$$

$$= \alpha v_{n-1}^2(t-T) + \beta v_n^2(t) + \beta v_n(t) + b_0.$$

이 모형의 기원은 Kometani and Sasaki(1959)로 돌아갈 수 있다. GHR 모형처럼 자극과 반응에 의한 형식은 아니다. 일정한 안전거리를 유지하면서 차량을 추종하게 된다 (Newton 방정식 이용). 만약 선행차량의 운전자가 예측가능하지 않은 행태를 보일 경우 충돌을 피할 수 없다.

Gipps(1981)는 위의 모형을 보완한 새로운 모형을 제안하였다. 이전 모형에서 간과한 몇 가지의 요소들을 고려하였다. 어떠한 경우에도 운전자는 충돌을 회피할 수 있는 추가적인 안전 반응시간 ($T/2$)를 고려한다고 보았고, 속도 term의 경우 ($-1/2 b_n$)braking rate과 ($n-1$)번째 차량의 braking rate ($-1/2 b^*$)과의 연관을 가지며 이때 (b_n)은 (n) 번째 차량의 최대 braking rate이며 (b^*)는 ($n-1$)번째 차량의 최대 braking rate다.

문제점으로 저속에서 실험이 이루어졌으며 운전자마다 저마다 다른 운전 행태 즉 운전자내 다양성이 고려되지 않아 일반적인 모형으로 보기에는 다소 오류가 있다.

3) Linear(Helly) 모형

GHR 모형의 모태가 된 모형으로 다음의 형태를 갖는다. 선행 차량이 braking을 하는지에 따라 가속도의 적용성을 위한 추가적인 term을 이용하였다.

$$a_n(t) =$$

$$C_1 \Delta v(t-T) + C_2 (\Delta x(t-T) - D_n(t)),$$

$$D_n(t) = \alpha + \beta v(t-T) + \gamma a_n(t-T)$$

Hanken and Rockwell(1967, 1968) : 위계가 다른 두 도로에서 각각 실험이 이루어졌다. 주목할 만한 결과는 실험이 반복 될수록 선행차량의 속도와 관계의 지체 시간이 감소한다는 것이다. 이 모형에서는 낮은 가 감속은 잘 모사해 내지만 진동 폭이 커질수록 심각한 error 즉 너무나 큰 차두시간을 가지게 되는 것이다.

또 다른 모형으로 500 대의 차량을 이용하여 실제로 궤적을 그려 모형을 제안하였지만 가 감속 사이에 너무나 부드러운 전이과정을 보인다.

$$a(t+0.1) = 1.64(x - 1.14v) + 0.5v$$

“앞만 보라”라는 행동으로 인해 지수 함수적으로 짧아지는 반응시간을 지적할 수 있다.

Xing(1995) : Helly와 GHR 모형을 부분적으로 도입한 complex 모형을 제안하였다. 네 가지의 주된 term으로 분리하였는데 첫째, “standard” driving, 둘째, standing queue 의 가속도, 셋째, the effect of gradient, 넷째, free flow.

$$a = \alpha \frac{\Delta v(t-T)}{\Delta x(t-T_i)^l}$$

$$+ \beta \frac{\Delta x(t-T_2) - D_n(v(t-T_2))}{\Delta x(t-T_2)^m}$$

$$- \gamma \sin \theta + \lambda (v_{Des} - v_n)$$

$$D_n(v) = a_0 + a_1 v + a_2 v^2 + a_3 v^3.$$

위의 모형은 항공사진을 이용하여 개발한 것이나 몇 분간의 자료를 이용하였는지는 언급되지 않았다.

GHR 모형의 결점은 선형 모형에서도 거의 비슷하게 나타나고 있으며, 또한 두 가지의 다른 점으로는 첫째, Δv (상대속도)와 Δx (차간간격)에 반응의 크기는 GHR 모형에 비해 4-10배정도 작게 나타난다. 이는 너무 작은 차두거리를 유지하면서 차량들이 추종을 하는 결점이 있다.

4) Psychophysical or action point models(AP)

Michaels(1963) : 운전자는 우선 차량이 접근한다는 것을 상대속도를 통해 인지할 수 있다고 보고 인식계(θ)를 정하여 위험 접근거리의 한계를 두고 운전을 한다고 보았다.

여러 연구가 있었지만 인식 경계에 대한 명확한 정의를 내리는 것은 쉽지 않다는 것이 증명되었다.

5) Fuzzy logic-based models

(IF 'close' AND 'closing' THEN 'brake')의 로직으로 0.5초 보다 차간간격이 작으면 'too close' 따라서 'membership' 1. 2 초 보다 크면 0. 중간은 0 과 1 사이의 소수를 갖는다.

이 모형은 변화가 반영되는 것을 기대한 모형이지만 두 가지 이유 즉, 차량의 가속도가 감지되는 것을 가정하였지만 이는 불가능하다는 논쟁의 여지가 남아있으며 일반적인 선형모형의 단점인 Δx 가 너무 작다는 것이 결점이다.

2. 인지 반응시간

반응시간은 인지를 포함한 자극의 시작부터 운전자가 행동을 완료하기까지의 시간간격을 말한다. 운전 중에 감지되는 충돌의 위험은 반드시 연속적으로 평가되고 조정되어야 한다. 다음 상황의 운전자의 반응은 현 상황에서 교통환경을 반영한 자신의 차량의 위치에 의해 제어된다.

반응시간은 고속도로나 교차로 용량, 운전자들 사이의 안전간격, 제어 장치들의 위치, 기하 구조 설계와 같은 교통문제에 있어 가장 중요한 인간 요소(human parameter)이다.

인지하고 지각하는데 걸리는 시간은 자극의 행태와 수에 의존한다. 하나의 값으로 주어진 운전조건에서의 반응시간을 대표하여 나타낼 수 없다. 개인간의 차이뿐만 아니라 개개인의 반응시간은 경우에 따라 다양할 것이다. 반응시간의 측정은 어렵고 보고된 결과도 적다.

비록 개개인의 차이가 반응시간 측정의 어려운 요인이 될 수는 있지만, 전문가들은 운전자의 반응시간의 다양성은 중요한 요소라고 믿고 있다.

Johanson과 Rumer (1971): 실제 교통류 흐름내에서 sample을 얻어 정지반응시간의 분포를 추정하여 운전자가 소리를 듣고 정지할 때, 브레이크 전조등이 들어오는 시간까지를 측정하였다.

Lerner et al (1995): 반응시간 분포를 추정하고 예상하지 못하는 상황에서의 정지반응시간 측정하기 위해 사슬로 감겨있는 원통을 이용하였다.

GM 모형의 반응시간 (Δt)의 파라미터값을 정량화하기 위해서 수행하였다. 이 실험을 통하여 평균값을 모형에 적용하여 반응시간의 경직성을 갖는다.

3. GM 모형 현장실험 수행 자료

수행방법 : 선행차량은 지정된 속도 유형으로 운행하고 후행차량은 최소 안전거리를 유지하면서 운행한다. 이 결과로 다음의 표를 보자.

<표 1> 1st 모형 연구결과의 보기

측정된 값	반응시간 (sec)
최소	1.00
평균	1.55
최대	2.20

<표 2> 3sd 모형 연구결과의 보기

Location	반응시간 (sec)
GM test track	1.5
Holland Tunnel	1.4
Lincoln Tunnel	1.2

III. 자료수집 및 가공

1. 자료수집

현장조사가 이루어진 조건은 다음과 같다.

- 날 짜 : 2003년 4월 11,15,17,22,24,28일(6일)
- 위 치 : 강변북로 서강대교~원효대교 구간
- 시 간 대 : 07:00-19:00
- 날 씨 : 맑음
- 시험차량 : 총 5대
- 자료수집 장비 : 타코미터, Laptop

타코미터를 이용하여 시간에 따른 바퀴의 회전수를 측정하고 바퀴의 재원에 따른 주행거리를 추정하여 속도 및 가속도, 차두거리 등을 계산하였다.

운전자내 다양성과 운전자가 다양성을 고려하기 위하여 20명의 운전자를 동원하여 동일 구간에서 5회 이상 반복실험을 하였다.

2. 자료가공

실험 장비와 노면상태에 의해 발생할 수 있는 오차를 보정하기 위하여 실제 구간의 거리에 비례하여 주행거리를 보정하였다. 우선 주행속도를 기준으로 하여 이상점 보정하였으며 Discrete wavelet transform²⁾을 적용하여 재 보정을 하였다.

IV. 분석결과

1. 인식경계추정

추종차량은 추종 경계 내에 있더라도 상대속도에 항상 민감하게 반응하는 것이 아니라 인식경계(perceptual threshold)를 두고 추종한다는 것을 가정하여 감·가속의

2) 반복적 평균 분할 기법

지속적인 변화가 없는 상태의 상대속도와 차두거리를 추출하였다. 다중 회귀 분석을 통하여 인식 경계의 회귀식을 구성한 결과는 다음과 같다.

추종차량이 선행차량과 멀어지고 있다는 것을 감지하는 경계를 Opening, 접근한다는 것을 감지하는 경계를 Closing이라 하였다. 단위는 차두거리 Δx 를 상대속도 Δv 와 같은 단위를 사용하였다.

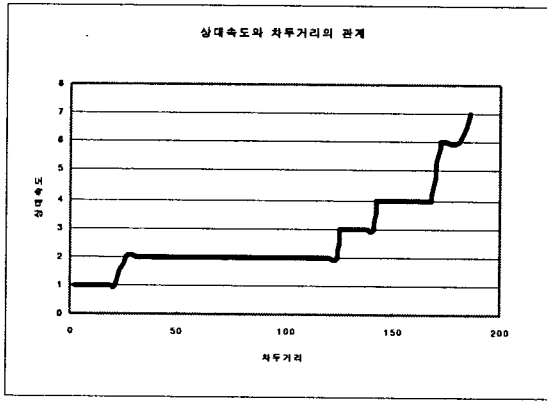
$$OPENING : \Delta v = 0.0213\Delta x + 0.7015$$

$$R^2 = 0.822$$

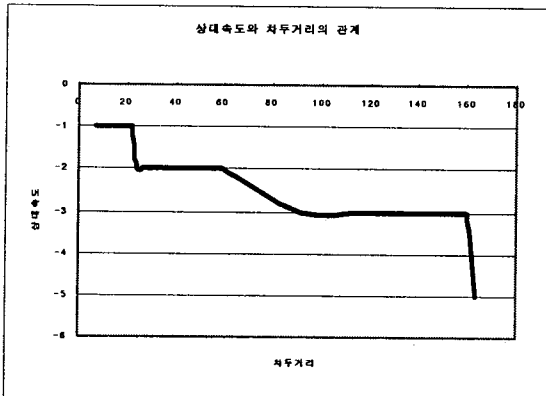
$$CLOSING : \Delta v = -0.0187\Delta x - 0.9284$$

$$R^2 = 0.806$$

<그림 1> Opening 인식경계



<그림 2> Closing 인식경계



또한 추종 상태와 free flow의 임계 차두거리를 기존 연구들에서는 150m로 정의하고 있으며 이를 벗어나면 free flow 상태라고 정의하고 있으며, 이 실험에서도 볼 수 있듯이 160m 보다 차두거리가 커지면서 급격한 상대속도의 증가를 보이며 이때 free flow 상태로 접어든다고 할 수 있다.

2. 반응시간 추정

선행차량의 감·가속 시점을 기준으로 추종차량의 감·가속을 분석하여 반응시간을 구하였다.

<표 3> 분석 범위

구분	속도 (km/s)	반응시간(sec)	
		실험치	추정치
최소	3.6	0.5	0.4
최대	61.2	2.5	2.1

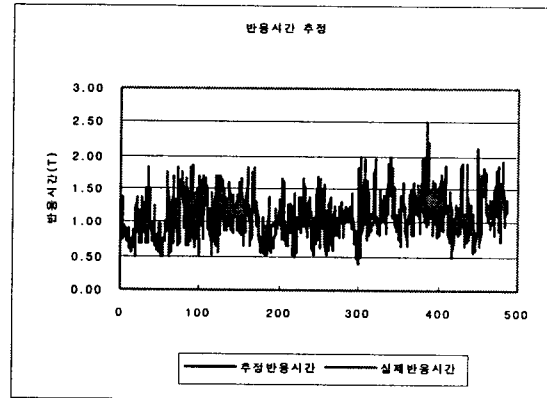
반응시간은 항상 일정한 것이 아니라 상황에 따라 즉, 상대속도와 해당차량의 속도에 반비례하고 차두거리에 비례한다는 가정하에 반응시간에 대하여 다중 회귀 분석한 결과 다음과 같은 식을 추정할 수 있었다.

$$T = 1.06 \left| \frac{\Delta x}{v_n \cdot \Delta v} \right|$$

$$R^2 = 0.63$$

실제 반응시간 분포와 추정 반응시간간의 상당히 높은 상관관계를 가진다.

<그림 3> 측정 반응시간과 추정치 비교



<표 4> 실제 반응시간 분포

구분	감속시(sec)	가속시(sec)
최소	0.5	0.5
최대	1.8	2.5

<표 5> 추정 반응시간 분포

구분	감속시(sec)	가속시(sec)
최소	0.5	0.4
최대	1.9	2.1

추종차량이 가속하는 경우에 감속하는 경우보다는 민감도가 떨어지는 것을 알 수 있으나, 감속시 가속시를 분리하여 자료를 분석하였을 경우에도 감·가속 두 경우 R^2 값이 감속시 0.62, 가속시 0.64로 차이가 거의 없고 모형을 분리하였을 경우 연산과정의 복잡성을 감안하여 통합모형으로 설정하는 것이 유리하기에 모형을 두 가지로 분리하지 않고 통합하였다.

반응시간의 다양화를 통하여 기존 모형들에서 적용하고 있는 반응시간의 고정값 사용으로 발생하는 시간차(time difference)를 최소화 할 수 있으며 적절한 감·가속 시점을 제공할 수 있어 모형의 적합도 높일 수 있을 것으로 기대된다.

VI. 결론 및 향후 연구과제

운전자가 선행차량을 추종하는 경우 추종 경계 즉 기존 연구에서 밝혔듯이 150m 내에 존재하더라도 상대속도에 항상 민감하게 반응하는 것이 아니기 때문에 이에 대한 인식 경계(perceptual threshold)를 설정함으로써 모형에서 나타날 수 있는 불안정한 가·감속 행태를 제거할 수 있을 것이다.

실제로 자료를 분석한 결과 R^2 가 가속시 0.822, 감속시 0.806로 상당히 높은 적합도를 가진다.

또한, 현재까지 microsimulation 내에 적용되고 있는 모형들은 반응 시간에 대해 고정값을 사용하는 것이 대부분이며 반응 시간을 random으로 발생시켜 모형에 적용하고 있다. NETSIM의 경우 24개의 다양한 반응시간을 사용하기도 하지만 추종차량의 속도, 선행차량과의 상대속도 그리고 차두거리에 대해 연관성을 지니지 않기 때문에 현실과의 괴리가 작용하는 것은 당연한 결과라고 볼 수 있다.

따라서 다양한 교통 상황에 적합한 운전자 반응시간과 불안정한 감·가속 행태를 제거함으로써 모형의 적합도와 신뢰도를 높여 새로운 정책 결정과정과 ITS의 다양한 분야에서 다양하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

타코미터와 다양한 차종 그리고 사양이 다른 Laptop을 이용하였기 때문에 자료의 오차를 얼마나 제거할 수 있었는가가 문제이며,

현재 민감도함에 반응시간 함수에 적용하였던 관점을 적용하여 새로운 추종 모형을 개발 중에 있으며 이 새로운 모형과 기존의 모형들 그리고 현실자료와의 적합성 검증이 이루어져할 것이다.

참고문헌

1. Ahmed, K.I., Modeling Drivers' Acceleration and Lane Changing Behavior, Ph. D. Dissertation, MIT,

February 1999

2. Aycin, M.F., & Benekohal, R.F., Analysis of Stability and Performance of

Car - Following Models in Congested Traffic, Submitted for publication in Transportation Research Board 79th Annual Meeting Preprints, January 2000

3. Aycin, M.F., & Benekohal, R.F. Comparison of Car-Following Models for Simulation, Accepted for publication in Transportation Research Records. 1999

4. Aycin, M.F., & Benekohal, R.F., Linear Acceleration Car - Following Model Development and Validation, In Transportation Research Record, No:1644, pp:10- 19, 1988

5. Ben-Akiva, M., & Lerman, S.R., Discrete Choice Analysis, Massachusetts Institute of Technology, 2nd Edition, 1987

6. MAY, A.D., Traffic Flow Fundamentals, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1990

7. McShane, R.M., Roess, R.P., & Prassas, E.S., Traffic engineering, 2nd Edition, Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, pp: 282- 305,

8. Ozaki, H., Reaction and Anticipation in the Car-Following Behavior, In Proceedings of the 13th International Symposium on Traffic and Transportation Theory, pp: 349- 366, 1993

9. Qi Yang, "A simulation Laboratory for Evaluation of Dynamic Traffic Management Systems", Ph.D. Dissertation, MIT, 1997

운전자 인지 반응 시간

1. 과학기술부, 교통류 평가기술 개발, 2000.

2. May, A. D., Traffic Flow Fundamentals CH6 pp.167-173, Prentice Hall, 1990.

3. 오동섭, 운전자 행태 도출을 위한 신호교차로 황색신호시 인지반응시간 연구, 아주대 대학원 공학석사 학위논문, 2001.