ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 65, No. 12, pp. 2046~2052, 2016
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2016.65.12.2046

이산 슬라이딩모드 제어를 이용한 램프 미터링 제어

Ramp Metering under Exogenous Disturbance using Discrete-Time Sliding Mode Control

김 흠* · 좌 동 경† · 홍 영 대*
(Xin Jin · Dongkyoung Chwa · Young-Dae Hong)

Abstract - Ramp metering is one of the most efficient and widely used control methods for an intelligent transportation management system on a freeway. Its objective is to control and upgrade freeway traffic by regulating the number of vehicles entering the freeway entrance ramp, in such a way that not only the alleviation of the congestion but also the smoothing of the traffic flow around the desired density level can be achieved for the maintenance of the maximum mainline throughput. When the cycle of the signal detection is larger than that of the system process, the density tracking problem needs to be considered in the form of the discrete-time system. Therefore, a discrete-time sliding mode control method is proposed for the ramp metering problem in the presence of both input constraint in the on-ramp and exogenous disturbance in the off-ramp considering the random behavior of the driver. Simulations were performed using a validated second-order macroscopic traffic flow model in Matlab environment and the simulation results indicate that proposed control method can achieve better performance than previously well-known ALINEA strategy in the sense that mainstream flow throughput is maximized and congestion is alleviated even in the presence of input constraint and exogenous disturbance.

Key Words : Ramp metering, Intelligent transportation system, Discrete-time sliding mode control, Input constraint, Exogenous disturbance

1. 서 론

도로 교통의 혼잡이 점점 심해지면서 교통 안정성에도 많은 문제를 일으키는 등 그 해결의 필요성이 커지고 있는 실정이다. 이의 해결을 위해 교통 흐름 제어에 효과적인 해결 방안으로서 램프 미터링과 같은 교통 흐름 제어가 연구되어 오고 있다[1]. 램프 미터링 기법은 demand-capacity (DC) 기법, occupancy (OCC) 기법 [2], ALINEA [3] 등이 있는데, 이 중에서 [4]에서도 밝혔듯이 ALINEA는 DC 및 OCC 기법에 비해 더 나은 성능을 보임에 따라 무척 많이 사용되고 있다. 보다 최근에는 궤환선형화 및 신경회로망을 이용한 방법[5], 퍼지이론 및 유전알고리즘[6], 모델예측제어 알고리즘[7] 역시도 램프 미터링에 적용되어 왔다.

기존의 대부분의 램프 미터링 기법은 선형모델에 기반하고 있으나 실제 교통 흐름의 특성은 강한 비선형성을 지니고 있을 뿐만 아니라 모델 정확성에 크게 의존하며, 모델에 존재하는 외란 특성을 고려하지 않았다[8]. 한편 기존의 방법들은 연속시간 모델에 기반한 경우가 대다수이나[9], 교통 흐름을 파악하는 것은 이산적으로 행해지므로 이산시간 모델에 기반하여 램프미터링을 수행하는 것이 보다 바람직하다.

본 논문에서는 이산슬라이딩모드 제어기법[10]-[13]을 이용한 램프미터링 방법을 제시함으로써 입력제한 및 오프램프상의 외란이 존재하더라도 교통 혼잡을 완화하고 교통 흐름이 원하는 수준을 잘 유지할 수 있도록 한다. 제안된 방법의 유효성을 검증하기 위해 모의실험에서는 ALINEA[14] 방법과의 성능을 비교한 결과를 포함한다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Korea
E-mail : dkchwa@ajou.ac.kr
* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Korea
Received : November 10, 2016; Accepted : November 17, 2016

2. 교통 흐름 모델

본 절에서는 모델 기반 교통 제어기 설계에 적합한 2차 교통 흐름 모델[1],[15]를 설명하고, 이를 바탕으로 다음 절에서는 램프 미터링 기법을 제안한다. 그림 1에서와 같이 고속도로는 N개의 구간으로 나뉘어지고, 길이는 각각 L로서 각 구간마다 온램프 및 오프램프가 존재한다.

i번째 구간은 교통밀도 ρ_i, 평균속도 v_i, 교통흐름 q_i로 표시되며 모델식은 다음과 같다.

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \frac{T}{L_i}[q_{i-1}(k) - q_i(k) + r_i(k) - s_i(k)] \quad (1)$$

$$q_i(k) = \rho_i(k) v_i(k) \quad (2)$$

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

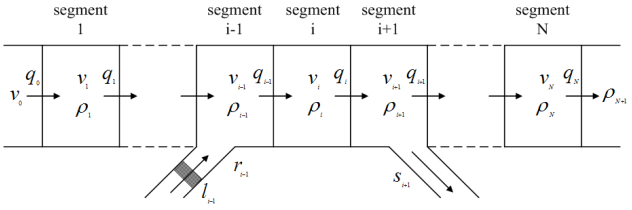


그림 1 온램프 및 오프램프가 있는 도로 시스템.
Fig. 1 A freeway system with on/off ramps.

$$v_i(k+1) = v_i(k) + \frac{T}{\tau}[V[\rho_i(k) - v_i(k)]] + \frac{T}{L_i} v_i(k)[v_{i-1}(k) - v_i(k)] - \frac{\upsilon T}{\tau L_i} \frac{[\rho_{i+1(k)} - \rho(k)]}{[\rho_i(k) + \kappa]} + \xi_i(k) \tag{3}$$

$$V[\rho_i(k)] = v_f \left\{ 1 - \left[\frac{\rho_i(k)}{\rho_{\max}} \right]^n \right\}^m. \tag{4}$$

여기서 T는 샘플링 시간, k는 시간별 구간, $\rho_i(k)$(vehicles/lane/km)는 kT 시간에서의 교통 밀도, $q_i(k)$(vehicles/h)는 i구간에서 나가고 $i+1$구간으로 들어가는 교통 흐름, $v_i(k)$는 i구간에서의 평균속도, $r_i(k)$(vehicles/h) 및 $s_i(k)$(vehicles/h)는 각각 온램프상에서 i구간으로 들어가는 교통량 및 i구간에서 오프램프로 빠져나가는 교통량, L_i는 i구간의 길이, $\xi_i(k)$는 (-0.5, 0.5)상에 값을 지니는 랜덤 외란, τ, υ, κ, v_f, $\rho_{\max}$, n, m은 도로 특성을 결정하는 모델 변수이며, 본 논문에서는 편의상 모든 구간에서 값은 가진다고 가정한다. 첫 번째 구간 및 마지막 구간의 경우는 밀도 및 속도를 아래와 같이 설정할 수 있다.

$$\rho_0(k) = q_0(k)/v_0(k) \tag{5}$$
$$v_0(k) = v_1(k) \tag{6}$$
$$\rho_{N+1}(k) = \rho_N(k) \tag{7}$$
$$v_{N+1}(k) = v_N(k). \tag{8}$$

온램프 상에서의 차량의 대기 길이는

$$l_i(k+1) = l_i(k) + T[q_i^{demand}(k) - r_i(k)] \tag{9}$$

에 의해 결정되며, 여기서 $q_i^{demand}(k)$는 온램프로 진입하는 교통 흐름의 명령치, $r_i(k)$는 제어변수 $u_i(k)$에 해당하는 값, $u_i^{\min}(k) = \max\{u_i^{\min}(k), q_i^{demand}(k) - [l_i^{\max} - l_i(k)\}$ 및 $u_i^{\max}(k) = \min\{u_i^{\max}(k), l_i(k)\}$에 대하여 $u_i^{\min}(k) < u_i(k) < u_i^{\max}(k)$와 같이 제한되어 있다고 가정한다. $l_i^{\max}$는 온램프상의 최대 대기 길이이다. 밀도 $\rho(k)$는 차량 통과량을 결정짓는 상태변수이고, 원하는 밀도 ρ_d는 그림 2에서와 같이 임계 밀도 ρ_{cr}보다는 약간 적게 설정함으로써 교통 혼잡을 방지하면서 차량 통과량을 최대화하도록 한다. 램프 미터링 제어 문제는 외란 보상을 하면서 출력을 추종하는 문제로 볼 수 있다. 즉, 제어 목적은 온램프상의 교통 흐름 $r(k)$을 적절히 설정함으로써 실제 온램프 상에서 주류선(main stream)으로 들어가는 교통 흐름이 원하는 값 ρ_d으로 수렴하도록 하는 것이다. 이를 위해 다음 절에서는 이산 슬라이딩 모드 제어기법을 이용한 램프 미터링 기법을 제시한다.

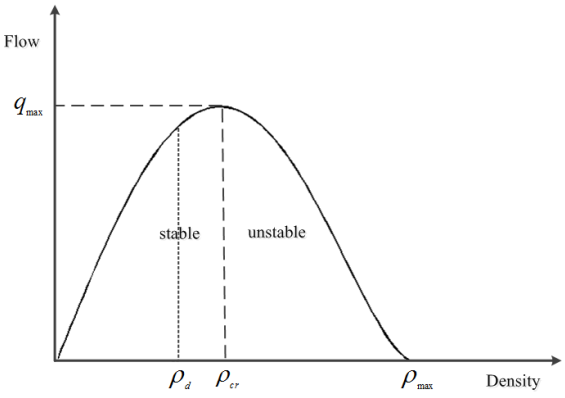


그림 2 교통 흐름의 기본도
Fig. 2 Fundamental diagram of the traffic flow.

3. 이산 슬라이딩 모드 기반 램프 미터링 제어기 설계

이산 슬라이딩 모드 제어기법은 불확실성을 지닌 비선형 시스템에 적용가능하며 강인성을 유지할 수 있도록 한다[10]-[13]. 램프 미터링 문제에 적용할 경우 교통 밀도 추종 및 외란 보상이 가능하다. 본 절에서는 i 구간과 관련된 첨자 표기는 편의상 생략하고, 원하는 밀도 ρ_d와 평균 속도 v_d는 구간별로 일정하면서 $V[\rho_d] = v_d$를 만족한다고 가정한다. 상태변수 x_1 및 x_2는 각각 교통 밀도 및 속도 추종오차로서 다음과 같이 정의된다.

$$x_1(k) = \rho_d - \rho(k),\ x_2(k) = v_d - v(k). \tag{10}$$

이때 오차 동역학은

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ m_1 & m_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{T}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} f_1(k) \\ f_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T}{L} s(k) \\ \xi(k) \end{bmatrix}$$
$$y(k+1) = Cx(k+1) \tag{11}$$

으로 정리할 수 있다. 여기서

$$p_1 = 1 - \frac{T}{L} v_d \tag{12a}$$

$$p_2 = -\frac{T}{L} \rho_d \tag{12b}$$

$$m_1 = 0 \tag{13}$$

$$m_2 = 1 - \frac{T}{\tau} - \frac{2T}{L} v_d \tag{14}$$

$$f_1(k) = \frac{T}{L} x_1(k) x_2(k) + \frac{T}{L} \rho_d v_d - \frac{T}{L} q_{in}(k) \tag{15}$$

$$\begin{aligned} f_2(k) = & -\frac{T}{\tau} v_f \left\{ 1 - \left[\frac{\rho_d - x_1(k)}{\rho_{\max}} \right]^n \right\}^m \\ & + \frac{vT}{\tau L} \frac{[\rho_{out}(k) - \rho_d + x_1(k)]}{[\rho_d - x_1(k) + \kappa]} \\ & + \frac{T}{L} v_{\in}(k) + \frac{T}{L} x_2^2(k) + \frac{T}{\tau} v_d^2 \\ & - \frac{T}{L} v_{\in}(k) v_d + \frac{T}{L} v_d^2 \end{aligned} \tag{16}$$

$$C = [1, 0] \tag{17}$$

이다.

교통 밀도의 제어 문제는 우선 슬라이딩 평면 $S(k) = y_d - y(k)$을 설정한 후에 제어기 설계를 통해 상태변수가 슬라이딩 평면상으로 이동하도록 한 후 계속해서 평면상에서의 움직임을 유지하도록 하는 것이다. 그림 2에서도 확인 가능하듯이 $y(k) = y_d$, 즉 $\rho(k) = \rho_d$가 유지되면 차량 통과량이 최대화되므로, 제어입력 $u(k)$를 통해 슬라이딩 평면 $S(k)$가 0으로 수렴토록 하려면 아래 식을 [12]에서와 같이 고려할 수 있다.

$$S(k+1) - S(k) = -qTS(k) - Tsgn(S(k)) \tag{18a}$$

하지만 채터링 현상까지 고려한다면 [13]에서와 같이 변형된 아래 식을 고려하는 것이 보다 바람직하다.

$$S(k+1) - S(k) = -qTS(k) - e^{-|S(k)|} S^2(k) Tsgn(S(k)). \tag{18b}$$

여기서 q는 $|1 - qT| < 1$를 만족하여야 한다. 이를 위해 제어입력을 아래와 같이 설계한다.

$$u(k) = u_{eq}(k) + u_s(k). \tag{19}$$

여기서

$$u_{eq}(k) = -v_d x_1(k) - \rho_d x_2(k) + x_1(k) x_2(k) + \rho_d v_d - q_{in}$$

는 이상적인 슬라이딩 모션하에서의 등가 슬라이딩 모드 제어입력이며, 스위칭 항이 포함된 입력

$$u_s(k) = -L\{-qS(k) - e^{-|S(k)|} S^2(k) sgn(S(k))\}$$

는 슬라이딩 평면으로의 도달 조건을 보장한다. 이때 전체 시스템의 안정성은 아래의 정리와 같이 요약 가능하다.

정리 1. 시스템 (11)에 대해 초기조건 $|S(0)| < \frac{2 - qT}{T}$가 만족될 경우 제어입력(19)는 시스템 궤적이 슬라이딩 평면에 도달토록 하면서 슬라이딩 평면상에서 계속 유지되어 결국 추종오차가 영으로 수렴하게 되며, 특히 제어입력의 크기가 적은 값을 유지할 수 있다.

증명: 제안된 제어기(19)에 의해 오차 동역학 모델(11)은 아래과 같이 정리된다.

$$S(k+1) = (1 - qT) S(k) - e^{-|S(k)|} S^2(k) Tsgn(S(k)). \tag{20}$$

먼저 상태변수 값이 슬라이딩 평면과 멀리 떨어져 있어서 $S(k)$의 값이 클 경우는 아래 식이 성립한다.

$$\lim_{S(k) \to \infty} e^{-|S(k)|} S^2(k) T = 0 \tag{21}$$

.

따라서 (18b)의 항 $(1 - qT) S(k)$이 주로 동작하여 $S(k)$가 슬라이딩 평면에 빨리 도달할 수 있다.

반면에 $S(k)$가 슬라이딩 평면 부근에 있어서 무척 작을 경우는 아래 식이 성립한다.

$$\lim_{S(k) \to \infty} e^{-|S(k)|} S^2(k) T = S^2(k) T. \tag{22}$$

이때 (18b)의 관계식은 아래 식처럼 근사화가 가능하다.

$$\begin{aligned} S(k+1) &\approx (1 - qT) S(k) - S^2(k) Tsgn(S(k)) \\ &= (1 - qT) S(k) - \frac{S^3(k)}{|(S(k)|} T \end{aligned} \tag{23}$$

이는 결국 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$S(k+1) = \beta S(k) \tag{24}$$

여기서

$$\beta = 1 - qT - \frac{S^2(k)}{|S(k)|} T \tag{25}$$

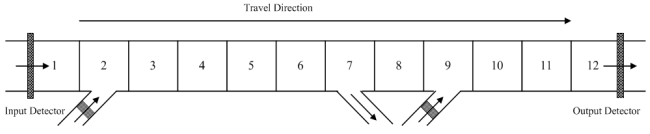
이다. 만약 $|\beta| < 1$, 즉 $|S(k)| < \frac{2 - qT}{T}$이면, $|S(k)|$는 결국 영으로 수렴가능하므로, 초기치를 $|S(0)| < \frac{2 - qT}{T}$가 성립하도록 q를 선정하면 추종오차가 결국 영으로 수렴함이 보장된다.

(증명끝)

표 1 교통 모델의 초기치 및 매개변수

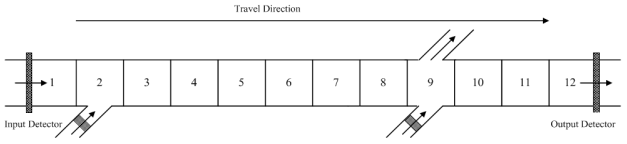
Table 1 Initial values and parameters in the traffic model.

구간	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ρ_0 vehicles/lane/km	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
v_0 km/h	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
매개변수	v_{free}	ρ_{jam}	l	m	K	τ	T	v	$q_0(k)$			
값	80 km/h	80 vehicles/lane/km	1.8	1.7	13 vehicles/km	0.01	15 s	35 km	1500 vehicles/h			



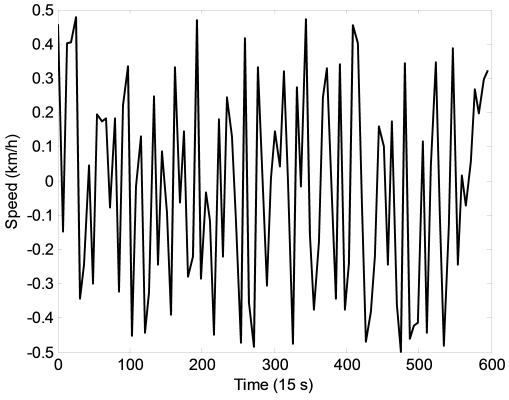
(a) 구간 7에서 오프램프를 가지는 도로시스템

(a) A simulation diagram of freeway system with off-ramp 7.



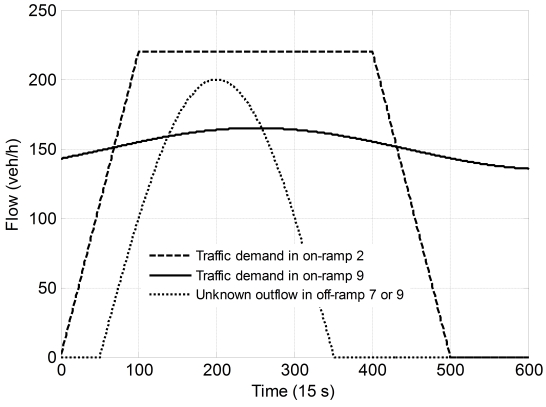
(b) 구간 9에서 오프램프를 가지는 도로시스템

(b) A simulation diagram of freeway system with off-ramp 9.



(c) 구간상에 분포된 속도 램프 외란

(c) Speed ramp disturbance distributed on the interval.



(d) 온램프 2, 9의 교통 요구치 및 오프램프 7 혹은 9에서의 미지의 차량 유출 흐름

(d) Traffic demands in on-ramps 2 and 9 and the unknown outflow in off-ramp 7 or 9.

그림 3 도로 시스템의 모의실험 다이어그램.

Fig. 3 Simulation diagram of freeway system and traffic demands in on-ramps and outflow in off-ramp.

4. 모의실험

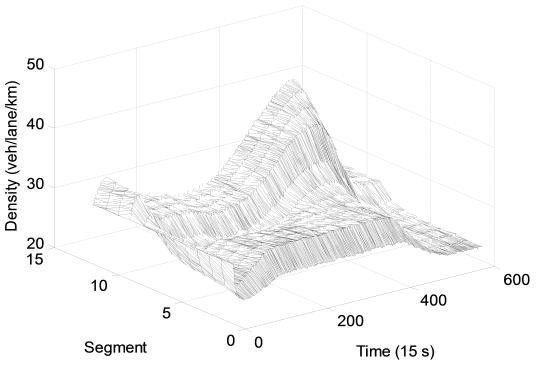
본 절에서는 모의실험을 통해 제안된 기법의 타당성을 확인한다. 제안된 기법의 유효성을 보다 잘 확인하기 위하여 기존의 ALINEA 기법[3]의 성능을 비교하였다. 샘플링 시간은 [16]에서와 같이 15초로 설정하였다. 즉, 그림 3-6에서의 x축에서의 숫자 100은 1500초를 나타낸다. 반면에 교통 밀도는 90초마다 확인가능하다고 가정하였는데, 이는 [16]에서의 15초보다도 더 완화되고 현실적인 조건이다.

원하는 밀도값은 $\rho_d = 30$vehicles/km/lane, 이론적인 임계 밀도값은 $\rho_{cr} = 36.75$vehicles/km/lane으로 두었고, 이외의 매개변수들은 표 1과 같이 설정하였다. 그림 3에서와 같이 구간 2, 구간 9에서 온램프가 존재하고, 구간 7 혹은 구간 9에서 오프램프가 존재하도록 하였다. 오프램프를 통해 나가는 흐름은 알 수 없는 값인데 이의 영향은 그림 3(a), 3(b)에서 확인할 수 있다. 그림 3(c)에서는 속도 램프 외란이 나타나 있고, 출퇴근 시간 상황을 모의하기 위해 그림 3(d)에서는 온램프 2 및 9의 교통 요구

치 및 오프램프에서의 미지의 차량 유출 흐름을 보인다. 운전자의 불규칙한 행동을 고려하여 그림 3(c)처럼 속도 외란 $\xi_i(k)$ 값이 구간 (-0.5, 0.5) 상에 분포한다고 가정하여 식 (3)에서와 같이 포함하였다. 다음에서는 비 제어인 경우, 온램프와 오프램프가 다른 구간인 경우, 온램프와 오프램프가 같은 구간에 있는 경우 세 가지에 대한 결과를 기술한다.

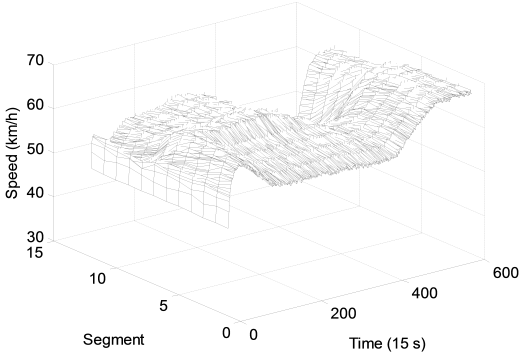
비 제어시에는 온램프 2 및 9로 부터의 차량 유입에 의해 주류선의 교통 흐름이 막힐 수 있다. 그림 4(a)에서 보면 밀도가 커짐을 명확히 알 수 있는데, 차선당 42vehicles/km로서 임계밀도인 36.75vehicles/km보다도 높으므로 차량 혼잡이 발생된다. 동시에 그림 4(b)에서와 같이 차량 속도가 현저히 내려가고, 그림 4(c)에서와 같이 구간 9에서의 밀도가 증가함을 알 수 있다. 구간 2의 경우에는 밀도가 항상 30 이하이고, 램프 미터링 제어 기법의 영향이 전혀 나타나지 않는다.

구간 7에서 오프램프를 갖는 경우에는 ALINEA 게인을 [16]에서와 같이 40으로 설정하였다. 그림 5에서는 제어 성능을 확인



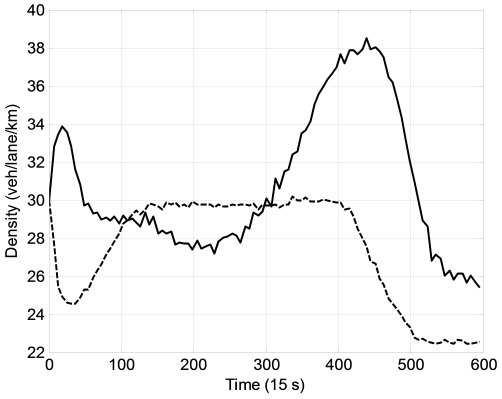
(a) 비 제어시의 밀도 측면도

(a) Density profile without control.



(b) 비 제어시의 속도 측면도

(b) Speed profile without control.

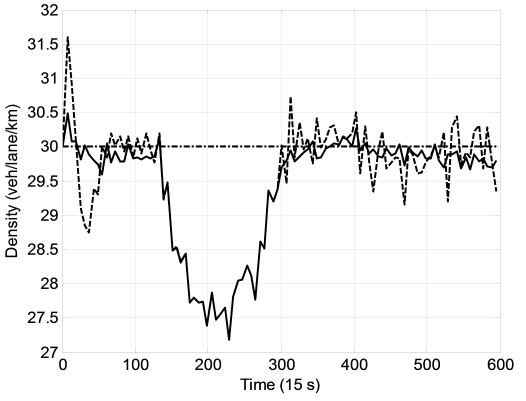


(c) 구간 2, 9에서의 차량 밀도 추종 성능 (실선: 구간 9, 파선: 구간 2)

(c) Density tracking performance in segments 2 and 9. (solid: segment 9, dashed: segment 2).

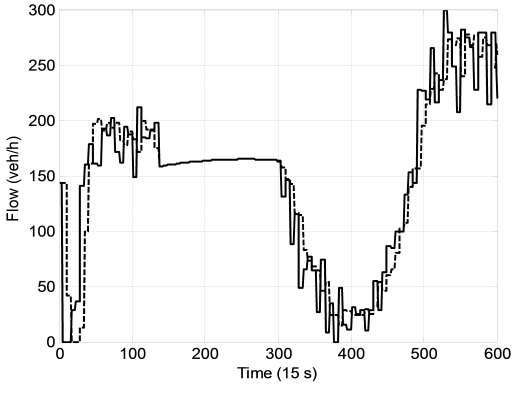
그림 4 비 제어시의 모의실험

Fig. 4 Simulation results without control



(a) 구간 9에서의 밀도 추종 성능 (실선: 제안된 방법, 파선: 기존 ALINEA 방법, 쇄선: 기준값)

(a) Density tracking performance in segment 9 (solid: DSMC, dashed: ALINEA, dash-dotted: reference).

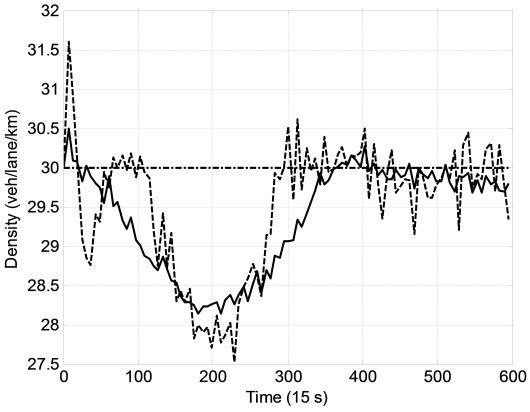


(b) 온램프 9의 차량 유입 흐름 (실선: 제안된 방법, 파선: 기존의 ALINEA 방법).

(b) Entering flow of on-ramp 9 (solid: DSMC, dashed: ALINEA).

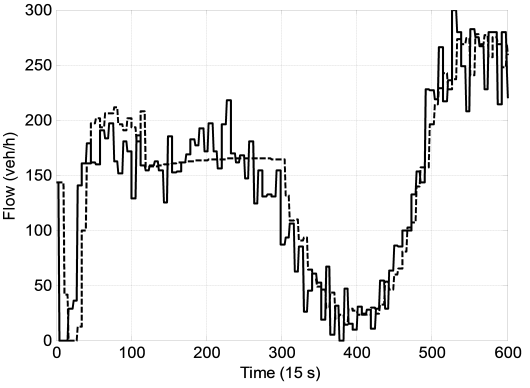
그림 5 구간 7에서 오프램프를 갖는 경우의 성능

Fig. 5 Simulation results with off-ramp in segment 7.



(a) 구간 9에서의 밀도 추종 성능 (실선: 제안된 방법, 파선: 기존 ALINEA 방법, 쇄선: 기준값)

(a) Density tracking performance in segment 9 (solid: DSMC, dashed: ALINEA, dash-dotted: reference).



(b) 온램프 9의 차량 유입 흐름 (실선: 제안된 방법, 파선: 기존의 ALINEA 방법).

(b) Entering flow of on-ramp 9 (solid: DSMC, dashed: ALINEA).

그림 6 구간 9에서 오프램프를 갖는 경우의 성능

Fig. 6 Simulation results with off-ramp in segment 9.

할 수 있는데, 그림 5(a)의 경우 제안된 방법이나 ALINEA 방법 모두 구간 9에서의 최대 밀도가 임계 밀도 이하인 것으로 확인된다. 하지만 ALINEA에 의해 교통 혼잡이 줄어들기는 하였으나, 원하는 수준인 30 vehicles/km에서 밀도 평면의 오실레이션이 여전히 발생하였는데 이는 운전자의 특성으로 인한 외란에 의한 것이다. 또한 ALINEA 및 제안된 방법의 최대 밀도는 각각 32.79vehicles/lane/km 및 31.19vehicles/lane/km이고, 제안된 방법의 경우 급격히 밀도의 오실레이션을 줄일 수 있다. 그림 5(b)는 온램프 9의 유입 흐름을 보이고 있는데, 이로부터 제안된 방법이 ALINEA에 비해 외란 존재하에서도 더 만족스러운 밀도를 유지한다.

구간 9에서 오프램프를 갖는 경우의 모의실험 결과는 그림 6와 같다. 초반 240초 동안에는 제안된 방법이 ALINEA보다 밀도를 빨리 낮추며, 750초에서 2250초 사이에는 ALINEA의 경우 오실레이션이 덜 감소됨을 알 수 있다. 3000초 근처에서는 두 가지 방법 모두 온램프의 입력제한에 의해 보다 작은 값을 지니고, 5250초 이후에는 제안된 방법이 원하는 밀도 추종성능을 지니는 반면에 ALINEA는 여전히 외란에 민감한 것을 알 수 있다. 따라서, 이 경우에서도 제안된 방법의 성능이 ALINEA의 것보다 나음을 확인할 수 있다.

이상의 모의실험 결과 모두 제안된 방법에 의한 밀도 추종 곡선이 ALINEA보다 램프 입력 제한 및 외란의 존재하에서도 개선됨을 알 수 있으며, 제안된 방법의 강인성을 충분히 보여주는 것이다.

6. 결 론

본 논문에서는 제안된 이산 슬라이딩 제어 기법을 램프 미터링에 적용 가능함을 보였다. 수행된 모의실험 환경은 신호 출력을 받는 주기가 시스템의 샘플링 시간보다 클 경우에 대해서 얻은 것으로서 오프램프에 의한 외란 영향과 더불어 온램프 상의 입력제한을 고려한 점에서도 볼 때 보다 일반적이라고 할 수 있다. 또한 제안된 방법이 도로 환경을 고려하여 볼 때 기존에 많이 사용되고 있는 ALINEA에 비해 더 효과적임은 교통 밀도의 점근적인 추종 성능이 입력 제한 및 외란하에서도 유지된다는 점에서도 알 수 있다. 이는 주류선에서의 교통 흐름을 최대화하면서 교통 혼잡을 최소화한다는 점에서 램프 미터링 제어 문제에 있어서 무척 중요한 결과이다.

감사의 글

본 연구는 2015학년도 아주대학교 일반연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

[1] M. Papageorgiou and A. Kotsialos, “Freeway ramp metering: An overview,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 3, no. 4, pp. 271-280, Dec. 2002.

[2] D. P. Masher, D. W. Ross, P. J. L. Tuan, P. L. Zeidler, and S. Peracek, Guidelines for design and operating of ramp control systems, Stanford Research Institute, Menlo Park, CA, Tech. Rep. NCHRP 3-22, 1975. SRI Project 3340.

[3] M. Papageorgiou, H. Haj-Salem, and J. M. Blosseville,

"ALINEA: A local feedback control law for on-ramp metering," Transportation Research Record, vol. 1320, pp. 58-64, 1991.
[4] E. Kenis and R. Tebebos, Ramp metering synthesis, Report of the Centrico Project, European Commission (DG TREN), Brussels, Belgium, 2001.
[5] H. M. Zhang, S. G. Ritchie, R. Jayakrishnan, "Coordinated traffic responsive ramp control via nonlinear state feedback," Transportation Research Part C, vol. 9, no. 6, pp. 337-352, 2001.
[6] A. Hosein Ghods, A. Rahimi Kian, M. Tabibi, "Adaptive freeway ramp metering and variable speed limit control: a genetic-fuzzy approach," IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 1, no. 1, pp. 27-36, Spr. 2009.
[7] J. Ramon Dominguez Frejo and Eduardo Fernandez Camacho, "Global versus local MPC algorithms in freeway traffic control with ramp metering and variable speed limits," IEEE Transactions on Intelligent Trans- portation Systems, vol. 13, no. 4, pp. 1556-1565, Dec. 2012.
[8] J. Xu, W. S. Yu, and F. Y. Wang, "Ramp metering based on adaptive critic designs," Proceedings of the 2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Toronto, Canada, pp. 1531-1536, Sep. 2006.
[9] X. Sun and R. Horowitz, "A localized switching ramp-metering controller with a queue length regulator for congested freeways," Proceedings of the 2005 American Control Conference, Portland, OR, USA, pp. 2141-2146, Jun 2005.
[10] K. Furuta, "Sliding mode control of discrete system," System and Control Letters, vol. 14, no. 2, pp. 145-152, Feb. 1990.
[11] S. Z. Sarpturk, Y. Istefanopulos, and O. Kaynak, "On the stability of discrete-time sliding mode control system," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 32, no. 10, pp. 930-932, Oct. 1987.
[12] G. Weibing, Y. Wang, and A. Homaifa, "Discrete-time variable structure control systems," IEEE Transactions on Industrial Electonics, vol. 42. No. 2, pp 117-122, Apr. 1995.
[13] Y. Zheng, Y.-W. Jing, and G.-H. Yang, "Design of approximation law for discrete-time variable structure control systems," Proceedings of the 45th IEEE conference on Decision and Control, Manchester Grand Hyatt Hotel San Diego, CA, USA, December 13-15, 2006.
[14] Farid Golnaraghi, Benjamin C. Kuo, "Automatic Control Systems," John Wiley & Sons, Inc. New York, USA, 2002.
[15] M. Cremer and A.D. May, An extended traffic model for freeway control, Research Report UCB-ITS-RR-85-7, 1985.
[16] Z. Hou, J.-X. Xu, and H. Zhong, "Freeway traffic control using iterative learning control-based ramp metering and speed signaling," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 56, no. 2. pp. 466-477, Mar. 2007.

저 자 소 개

김 흠 (Xin Jin)
2006년 아주대 전자공학과 졸업(석사).
현재 아주대 전자공학과 박사과정.
Tel : 031-219-2489
E-mail : jinxin@ajou.ac.kr

좌 동 경 (Dongkyoung Chwa)
1995년 서울대 제어계측공학과 졸업. 2001년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(공박).
2005년~현재 아주대 전자공학과 교수.
Tel : 031-219-1815
Fax : 031-212-9531
E-mail : dkchwa@ajou.ac.kr

홍 영 대 (Young-Dae Hong)
2007년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업.
2013년 동 대학원(공박). 2014년~현재 아주대학교 전자공학과 조교수.
Tel : 031-219-2482
E-mail : ydhong@ajou.ac.kr