

군집주행 기동을 위한 하이브리드 모델링 및 제어기 설계

Hybrid Modeling and Control for Platoon Maneuvers in Automated Highway Systems

전 성 민, 최 재 원

(Seong Min Jeon and Jae Weon Choi)

Abstract : An objective of Automated Highway Systems (AHS) is to increase the safety and throughput of the existing highway infrastructure by introducing traffic automation. AHS is an example of a large scale, multiagent complex dynamical system and is ideally suited for a hierarchical hybrid controller. We discuss a design issue of efficient hybrid controllers for the platoon maneuvers on AHS. For the modeling of a hybrid system including the merge and split operations, a safety distance policy is introduced for the merge and split operations. After that, the platoon system will be modeled by a hybrid system. In addition, a hybrid controller for the proposed merge and split operation models is presented. Finally, the performance of the proposed hybrid control scheme is demonstrated via scenarios for platoon maneuvers.

Keywords : automated highway systems, hybrid control, merge and split operations, safety distance policy, platooning

I. 서론

이산적 및 연속적 동역학의 상호작용을 포함하는 시스템인 하이브리드 시스템(Hybrid System)은 최근에 연구자들의 새로운 도전의 영역으로 여겨지는 한 분야이다. 최근의 많은 연구자들의 노력으로 하이브리드 시스템의 모델링과 시뮬레이션 등의 기본적인 연구가 많이 진행된 상태이다[1]-[3].

하이브리드 시스템에 대한 최근의 활발한 연구의 동기 부여는 자동차의 전기·전자 공학적인 발달, 실시간 소프트웨어, 통신 프로토콜, 그리고 운송 시스템의 발달 등에 의해 더욱 가속화되고 있다. 그 중에서 자동화 고속도로 시스템(Automated Highway Systems: AHS)은 최근의 하이브리드 시스템에 대한 주요한 연구대상 중 하나로 많이 다루어지고 있다 [4]-[15].

자동화 고속도로 시스템은 최근에 고속도로 정체 문제의 해결책으로 대두된 새로운 분야로 고속도로의 효율성을 증가시켜 교통정책을 감소시키는데 그 기본 목적이 있다. 또한 이 시스템은 고속도로의 통행량만을 증가시키는 것이 아니라 각각의 운전자를 안전하고 편안한 여행이 되도록 하는 장점이 있다. 이것은 새로운 고속도로를 건설하지 않고 도로의 자동화 및 차량의 자동화를 통해서 이루어진다. 자동화된 고속도로는 지능형 교통 시스템(Intelligent Transportation Systems: ITS)의 한 구성요소로서, 1980년대 말에 미국에서 연구가 시작되어 일본과 유럽에서도 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내에는 1990년대 초에 지능형 교통 시스템의 개념이 도입되어 차량 자동주행 시스템에 대한 연구도 진행되기 시작하였다.

자동화 고속도로의 차량 자동주행 시스템은 전자 제어장치를 사용하기 때문에 인간의 조작보다 빠르고 정확하게 동작하여 안전한 주행을 확보할 가능성이 크지만, 센서를 통해

들어온 정보를 이용하여 상황을 판단하고 여러 가지 주행 기동을 수행하는 능력이나 돌발상황 및 긴급상황 등에 대처하는 능력과 같은 고차원적인 작동을 구현하는 것은 아직 초보 단계에 머물러 있어 계속해서 연구되고 있는 부분이다. 이러한 연구의 일환으로 Varaiya [5]는 자동화 고속도로 시스템에 대한 계층적 제어구조를 도입하여 각 계층별로 필요한 정보만을 처리하여 계산의 부담을 줄이고 효율성을 높이는 방법을 제안하였다. Godbole 등[6]은 자동화 고속도로 시스템의 차량 자동주행 시스템을 구현하기 위해서는 기존의 연속변수 운동시스템(continuous-variable dynamic systems)에서의 제어만으로는 부적절하다는 것을 보이고, 계층적 하이브리드 제어 방법을 새롭게 제안하였다. 그리고, Godbole 등[7],[8]은 게임이론과 최적제어 기법을 이용하여 차선 변경 기동에서의 장애물 회피 문제를 다루었고, Lygeros 등[9]은 감독 제어기(supervisor)를 이용하여 고장상황과 고장정도를 판단하여 고장에 대처하는 제어기를 설계하였다.

본 논문에서 다루는 고속도로에서의 군집 차량 제어 문제는 연속적인 종방향 및 횡방향 제어를 포함할 뿐만 아니라 군집의 구성이나 분리, 차선 변경, 자동화된 차선으로의 전입 및 이탈 등의 이산적인 제어 문제도 포함한다. 각 차량은 추종, 판단 및 결정 등의 제어가 동시에 이루어져야 하기 때문에 각 차량의 연속적인 운동시스템 특성과 이산적인 기동의 제어를 위한 이산사건 운동 시스템(discrete-event dynamic systems) 특성을 동시에 가지는 전형적인 하이브리드 시스템으로 고려될 수 있으며, 이러한 시스템을 제어하기 위해서는 하이브리드 제어기의 도입이 필요하다.

본 논문에서는 연속적으로 차량을 제어하게 되는 종방향 제어와 군집주행시의 이산적인 병합 및 분리 기동의 제어로 이루어진 하이브리드 시스템을 다룬다. 군집주행 기동 중 가장 복잡한 형태의 기동인 차선 변경을 포함하는 병합 및 분리 기동을 수행하기 위하여, 먼저 새로운 안전거리 기준(safety distance policy)을 제안하고 그것을 이용해 병합 및 분

리 기동을 하이브리드 시스템으로 모델링한다. 그리고 제안된 모델링에 대한 하이브리드 제어기를 설계한다. 마지막으로 설계된 제어기의 성능을 평가하기 위하여 병합 및 분리 기동 시나리오를 이용해 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 고찰한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1 장의 서론에 이어, 2 장에서는 군집주행 기동의 하이브리드 모델링과 제어기의 설계를 위한 군집주행 기동 상황을 기술하고 그 구체적인 시나리오를 설명한다. 3 장에서는 먼저 일반적인 군집주행을 위한 안전거리 기준을 설명하고, 군집주행 기동을 위한 새로운 안전거리 기준을 제안하며, 4 장에서는 새롭게 제안한 안전거리 기준을 이용해서 차선 변경을 포함하는 군집주행 기동에 대한 하이브리드 모델링을 수행한다. 5 장에서는 연속시간 제어기와 이산사건 감독제어기를 구성된 하이브리드 제어기를 설계하고, 6 장에서 본 논문에서 설계한 제어기로 시뮬레이션을 수행하고 결과를 고찰한다. 마지막으로 7 장에서 본 논문의 결과를 정리하고 결론을 맺는다.

II. 문제 설정

1. 군집주행 기동

AHS 하에서의 군집주행을 위해서는 많은 기동을 필요로 한다. 그 중에서 병합(merge), 분리(split) 및 차선 변경(lane change) 기동이 그 기본이 된다. 분리 및 병합 기동은 동일한 차선에서의 기동 시나리오를 포함할 뿐만 아니라 다른 차선으로의 변경으로 인한 병합 및 분리를 모두 의미한다. 본 논문에서는 병합 및 분리 기동이 차선 변경을 통해서 수행되는 경우만을 다룬다. 이러한 상황은 병합 및 분리 기동의 가장 복잡하고 어려운 형태 중의 하나로서 단일의 병합, 분리 및 차선 변경 등의 기동 제어가 필요하게 된다. 그림 1은 차선 변경을 포함하는 병합 기동 시나리오의 형태를 결정하는 요소는 기동의 속도, 군집 차량대수, 시간, 거리 제한 및 그 차량의 종류 등이 있다.

차선 변경을 하는 병합 기동은 A 및 B 형이 안전성 및 제어의 용이성의 관점에서 보면 C 형보다 더 적당하고 쉬운 방법이기 때문에 많이 다루어져 왔다. 그러나, 때때로 군집의 크기가 아주 크거나 주행 차량간의 주행거리가 제한을 받을 때, C 형과 같은 군집주행 차량 사이로의 병합 기동이 필요하게 된다. 이것은 군집주행을 하는 차량의 자동화된 차선으로 병합을 하고자 하는 차량이 군집 차량 사이로의 차선 변경으로 이루어진다. 이 때 군집 차량 사이로 병합하고자 하는 차량이 끼어들기 위한 새로운 공간 확보가 필요하게 된다.

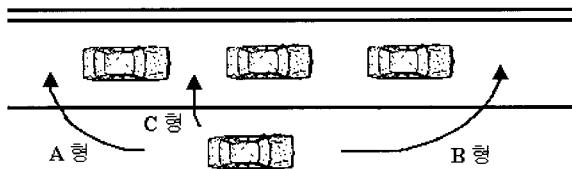


그림 1. 차선 변경을 포함하는 병합 기동.

Fig. 1. Merge operation types with lane change.

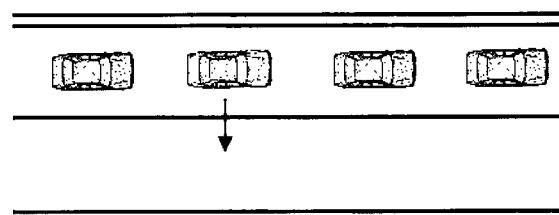


그림 2. 차선 변경을 포함하는 분리 기동.

Fig. 2 Split operation type with lane change.

그림 2는 다른 차선으로 이동을 통해 이루어지는 분리 기동 시나리오를 나타내며 병합 기동 순서의 역으로 구성된다.

본 논문에서는 그림 1의 C 형과 그림 2와 같은 형태의 차선 변경을 포함하는 복잡한 분리 및 병합 기동을 수행하기 위해, 군집주행 기동을 차량의 연속적인 종방향 제어와 기동 상태를 결정하는 이산 사건 제어기로 구성되는 하이브리드 시스템으로 다룬다. 이러한 기동을 위해서는 차량간에 통신 네트워크가 구성되어 있으며 또한 그것을 통해 차량간의 정보(위치, 속도 및 가속도)와 Reg (차량상태 변환신호) 명령을 주고 받는다고 가정한다[12].

2. 군집주행 기동 시나리오

본 절에서는 차선 변경을 포함하는 병합 및 분리 기동의 시나리오에 대하여 설명한다. 각 기동은 여러 단계로 구성되며 각 단계는 on/off 의 개념을 가지는 Reg 명령으로 구분된다. Reg 명령은 차량의 현재 상태 정보를 통신 수단을 통해 다른 차량으로 전달하는 것으로, 그 정보를 받은 차량은 현재의 차량 상태 및 조건이 맞는 차량 상태로 변환시키는 차량 상태 변환 신호이다. 병합 기동시의 Reg 명령은 다음과 같은 합집(Reg_m)으로 정의된다.

$$Reg_m = \{reg_m_1, reg_m_2, reg_m_3, reg_m_4\}$$

$$Reg_m \in \{0, 1\}$$

여기서, reg_m_1 은 병합 기동의 시작, reg_m_2 는 차선 변경 가능, reg_m_3 은 새로운 병합 간격 확보 완료, reg_m_4 는 차선 변경 기동 완료를 각각 의미한다. 그리고, 1의 값은 on을 의미하고, 0은 off를 의미한다.

그림 3은 병합 기동 시나리오를 도시한 것이다. 선도차량 1 및 추종차량 1과 3으로 구성된 자동화된 고속도로를 주행하고 있는 하나의 차량 군집과 일반도로를 주행하고 있는 자율주행 차량 2가 있다. 차량 2가 군집주행을 하는 차량 1과 3 사이로 차선 변경을 통해서 병합이 이루어진다.

먼저 그림 3(a)와 같이 차량 2가 차량 1과의 안전거리를 유지하는 병합 기동의 시작 준비를 뜻하는 Reg 명령인 reg_m_1 을 각 차량에게 보내면서 병합 기동이 시작된다. 차량 2가 군집 사이로 차선 변경을 하기 위한 차량 1과의 안전거리를 확보한 후 reg_m_2 명령을 보내게 된다.

reg_m_2 명령을 받은 차량 3은 차량 2의 병합 기동을 위해 병합간격이 포함된 새로운 안전거리로 변환되며, 안전거리가 정상상태로 유지되면 reg_m_3 명령을 통신 네트워크

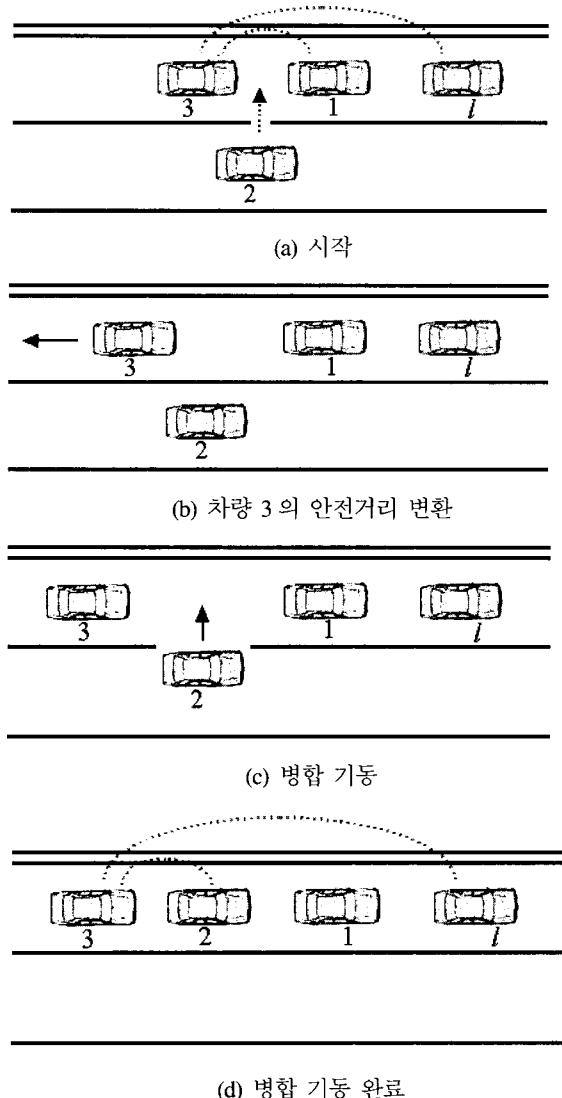


그림 3. 차선 변경을 포함하는 병합 기동 시나리오.
Fig. 3. Scenario of merge operation with lane change.

를 통해 차량 2에게 보낸다. 이후 차량 2는 차선 변경을 수행하고 완료되면 reg_m_4 명령을 각 차량에게 보낸다. 차량 2로부터 reg_m_4 명령을 받은 차량 3은 다시 추종 모드로 변환하며 병합 기동을 완료하게 되어 차량 4 대로 구성된 새로운 군집을 만든다. 그림 3(a)에서 점선은 차량 3의 군집 내에서의 네트워크 통신을 나타내는 것으로 그림 3(d)에서는 선도차량과 차량 1의 정보를, 그림 3(d)에서는 선도차량과 차량 2의 정보를 통신 네트워크를 통해 전달한다.

차선 변경을 포함하는 분리 기동의 시나리오는 병합 기동 시나리오의 역으로 구성할 수 있다. 분리 기동시의 Reg 명령은 다음과 같은 집합(Reg_s)으로 정의된다.

$$Reg_s = \{reg_s_1, reg_s_2, reg_s_3, reg_s_4\}$$

$$Reg_s \in \{1, 0\}$$

여기서, reg_s_1 은 분리 기동의 시작, reg_s_3 은 차선 변경 가

능, reg_s_3 은 새로운 분리 간격 확보 완료, 그리고 reg_s_4 는 차선 변경 기동 완료를 각각 의미한다.

분리 기동은 차량 2로부터의 reg_s_1 명령을 발생시킴으로 시작된다. reg_s_1 명령은 발생한 후 차량 2가 차선 변경을 위한 준비가 되면 reg_s_3 명령을 보낸다. 그러면 차량 3은 분리를 위한 안전거리 스위칭을 통해 차량 2의 분리를 준비한다. 분리 간격의 확보가 완료되면 reg_s_3 명령을 차량 2에게 보낸다. 차량 2는 차선 변경을 통해 분리 기동을 완료하고 reg_s_4 명령을 각 차량에게 보내어 분리 기동이 완료된다. 최종적으로 선도차량, 차량 1과 차량 3으로 구성된 하나의 군집과 차량 2의 자율주행 차량으로 분리된다.

III. 군집주행 시스템 구성

1. 군집주행 모델링

군집주행은 같은 차선에서 차량들이 일렬로 서서 아주 좁은 간격으로 주행하는 것으로, 미국의 PATH (Partners of Advanced Transit and Highways) 프로젝트를 통해 처음으로 연구되었다. 군집주행에서 차량들은 서로 통신수단을 통해서 거리, 속도, 가속도 등의 정보를 교환하게 된다.

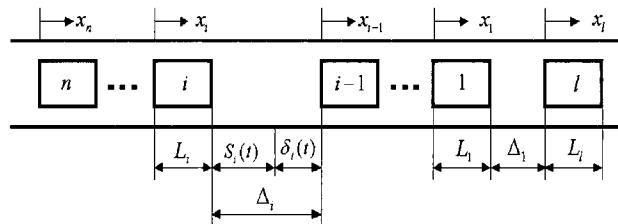


그림 4. $n+1$ 차량의 군집 모델링.

Fig. 4. A platoon model of $n+1$ vehicles.

그림 4는 $(n+1)$ 대의 차량으로 이루어진 군집의 형태를 보여주고 있다. 군집주행의 방향은 원쪽에서 오른쪽으로 움직인다고 상정한다. 기준점 0 으로부터 i 번째 차량의 뒤 범퍼 까지의 거리를 x_i 로 나타낸다. 그리고, x_i 은 선행차량까지의 거리를 나타낸다. 여기서, L_i 는 i 번째 차량의 길이를 나타낸다. 그럼에서 보듯이 Δ_i 는 i 번째 차량과 $i-1$ 번째 차량 사이의 거리를 나타내며, i 라는 첨자를 사용한 것은 그 거리는 i 번째 차량의 센서에서 감지한 거리이기 때문이다.

$S_i(t)$ 는 원하는 안전거리(desired safety distance)이며, $\delta_i(t)$ 는 실제 차량 사이의 거리 Δ_i 와 원하는 안전거리 $S_i(t)$ 와의 차이를 나타낸다. 이것은 양의 값과 음의 값을 모두 가질 수 있는 변수이다. 안전거리 오차식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_i(t) = x_{i-1} - x_i - S_i(t) - L_i \quad (1)$$

2. 차량 동역학

군집주행의 종방향 제어에 관한 연구를 위한 차량 동역학은 여러 형태가 있다. 본 논문에서는 스스로 텔브 입력

α_i 를 가지는 다음의 3 차 모델을 사용한다[13].

$$\ddot{x}_i = a_i(\dot{x}_i)\alpha_i + b_i(\dot{x}_i, \ddot{x}_i) \quad (2)$$

여기서 a_i 와 b_i 는 $a_i(\dot{x}_i) \neq 0$ 를 만족하는 복잡한 비선형 함수를 나타낸다. 차량군내에서의 각 차량은 선행차량과 일정한 거리를 유지하면서 안전한 주행이 가능해야 한다. 이를 위한 차량 제어시스템의 역할은 선행차량의 속도를 잘 추종할 수 있도록 하는 것이다. 이 장에서는 이와 같은 속도 추종제어를 위하여, 참고문헌 [14]에 기술된 설계방법에 따라 다음과 같은 출력 피드백 선형화(output feedback linearization) 기법을 사용한다. (2)에서 보여진 차량의 비선형 동역학을 선형화시키기 위하여 외부 제어 입력 신호 u_i 를 포함하는 스스로를 벨브 입력 α_i 를 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\alpha_i = \frac{1}{a_i(\dot{x}_i)} [u_i - b_i(\dot{x}_i, \ddot{x}_i)] \quad (3)$$

(3)을 (2)에 대입하면 최종적으로 다음과 같은 상태 피드백으로 선형화된 차량의 종방향 모델식을 구할 수 있으며, 선형 제어기 설계 기법을 사용해서 제어기를 설계하게 된다.

$$\ddot{x}_i = u_i \quad (4)$$

IV. 안전거리

1. 안전거리 기준(safety distance policy)

군집에서 선행차량의 속도가 변할 때 차량들간에 충돌 없이 선행차량의 움직임을 따르기 위해서는 항상 일정한 거리를 확보해야 한다.

임의의 차량들이 같은 가속도 및 저크(jerk)의 제한을 가지는 종방향 주행 중에 있다고 가정하자. 안전한 기동을 위해서는, 앞 차량이 갑자기 멈추었을 때 군집에서 모든 차량들의 충돌을 피하기 위해서 충분한 안전거리를 유지하여야 한다. 이 때, i 번째 차량의 안전거리 기준은 다음과 같이 정의 될 수 있다[14].

$$S_i = S_{m_i} + S_{a_i} \quad (5)$$

여기서, S_{m_i} 는 뒤따르는 차량이 선행차량의 급정거 시에 충돌을 회피할 수 있는 최소한의 거리간격을 나타낸다. S_{a_i} 는 안전 여유를 높이기 위해 추가된 간격을 나타내며 다음의 식 (6)에서 보여지는 λ_2 에 해당한다. 그러므로 S_i 는 앞 뒤 차량 간의 원하는 차량간격이 된다.

극단적인 급정거 상황은 선행차량이 최대 음의 가속도를 가지고, 그때 뒤따르는 차는 최대 양의 가속도를 가지는 상황을 의미한다. Ioannou 등[14]이 제안한 규정을 근거로 군집 주행의 안전거리 기준은 속도에 따라 변화하도록 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$S_i = \lambda_1 v_i + \lambda_2 \quad (6)$$

여기서, λ_1 와 λ_2 는 모두 상수이며, 이 값들은 실험적으로 구하여진다. 본 논문의 시뮬레이션에서는 군집의 속도가 $30 m/s$ ($108 km/h$)일 때 안전거리를 $4 m$ 로 유지하고 정지시에는 $1 m$ 을 유지하기 위해 λ_1 과 λ_2 를 각각 0.1과 1의 값을 사용한다.

2. 군집주행을 위한 안전거리 기준

본 절에서는 군집주행 하에서 병합 및 분리 기동을 위한 안전거리 기준식을 유도한다. 먼저 그림 5와 같이 차량 2의 병합 기동을 고려하자. 차량 2가 군집을 이루고 있는 차선으로 차량 1과 차량 3 사이로 차선 변경을 하면서 병합 기동을 한다. 군집을 이루고 있는 차량들 속으로 병합 기동을 수행하기 위해서는 새로운 병합간격 P^m 이 필요하게 된다. 병합간격은 병합을 하려는 차량(여기서는, 차량 2)의 차량길이 (L_m)와 병합 차량(차량 2)과 병합 간격을 유지하려는 차량(차량 3) 사이의 안전거리(S^*)의 합으로 나타낼 수 있다. 따라서, 병합 기동을 위한 안전거리 기준은 다음과 같이 설정 할 수 있다.

$$S_i = \lambda_1 v_i + \lambda_2 + P^m \quad (7)$$

$$P^m = S^* + L_m \quad (8)$$

여기서, P^m 은 병합 기동을 위해 새로이 추가된 병합 간격을 나타낸다. (8)은 병합 및 분리 기동 모두에게 적용될 수 있다. 따라서, 병합 및 분리 기동을 위한 기동 간격 P 는 다음과 같이 정의 된다.

$$P = \begin{cases} P^m, & \text{in merge case} \\ P^s, & \text{in split case} \end{cases}$$

병합 및 분리 기동을 위한 기동 간격 P 는 다음 장에서 이산사건 변수로 모델링되고, 제어기 설계 부분에서 하이브리드 제어기의 이산사건 제어기의 출력이 된다.

V. 군집주행 기동의 하이브리드 모델링

먼저 군집주행 기동을 위한 차량 상태 Q 를 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$Q = \{L, M, S, C, F, O\}$$

여기서, L 은 군집을 이끄는 선도차량 모드 상태(Lead car mode), M 은 군집으로 병합을 수행하려고 하는 병합차량 모드 상태(Merge car mode), S 는 군집에서 분리되려고 하는 분리차량 모드 상태(Split car mode), C 는 차선 변경을 하고 있는 차량인 차선 변경 모드 상태(Changing car mode), F 는 군집을 이루고 있는 추종차량 모드 상태(Following car mode), 그리고 O 는 병합 및 분리 기동을 위해서 군집내의 새로운 안전거리를 유지하는 차량을 의미하는 수행차량 모드 상태(Operation car mode)를 나타낸다. 각 차량의 상태는 2 장에서 설명한 Reg 명령의 발생으로 변환되며, 차량 상태의 변환은

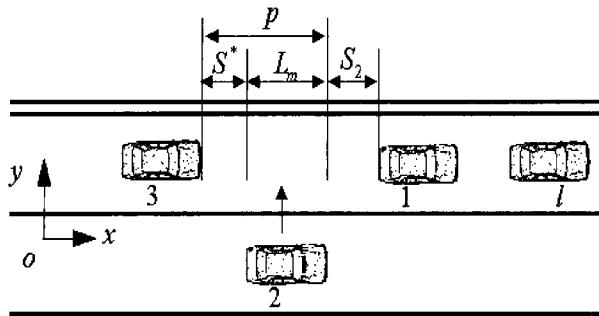


그림 5. 병합 기동의 안전거리.

Fig. 5. Safety distance for merge operation.

안전거리의 스위칭을 야기한다.

각 차량은 다음과 같은 집합으로 정의되는 병합간격 P^m 및 분리간격 P^s 를 통해서 군집주행 기동을 수행하게 된다.

$$P^m = \{ p_f, p_m, p_t \}$$

$$P^s = \{ p_f, p_s, p_e \}$$

여기서, p_f 는 추종모드 안전거리 병합간격, p_m 과 p_s 는 차량 상태가 수행차량 모드 ($Q=O$) 일 때의 차량 3의 모드로 각각 병합 기동과 분리 기동에 대한 안전거리 간격을 나타내며, p_t 와 p_e 는 차량 2의 안전거리 간격으로 각각 병합 기동과 분리 기동시의 안전거리를 의미한다.

차량 상태 조건과 Reg 명령으로 구성된 병합 기동 시나리오와 분리 기동 시나리오의 상태 변환도를 각각 그림 6과 7에 도시하였다. 그림에서 차선 변경이 일어나는 동안은 안전거리의 변화가 없다는 것을 알 수 있다. 그림 6과 7은 차선 변경을 포함하는 병합 및 분리 기동의 전체 과정에서의 차량 상태의 변환과 안전거리의 변화와의 관계를 나타낸다.

VI. 하이브리드 제어기

Varaiya [5]가 제안한 계층적 제어 구조는 네트워크 계층(network layer), 링크 계층(link layer), 코디네이션 계층(coordination layer), 레귤레이션 계층(regulation layer), 물리 계층(physical layer)의 5 가지 계층을 가진다. 이 중 네트워크 계층, 링크 계층, 코디네이션 계층은 이산사건 운동시스템의 특성을 가지고, 물리 계층은 연속변수 운동시스템의 특성을 가진다. 그리고 레귤레이션 계층은 이 두 시스템간의 상호 작용을 원활히 할 수 있도록 하는 인터페이스 부분을 담당한다. 본 논문에서 제어대상 시스템으로 삼고 있는 차량 군집주행 시스템은 전형적인 하이브리드 시스템으로 볼 수 있으며, 군집주행 시스템을 위한 계층적 제어 구조를 각 계층별 역할을 통해 간단하게 살펴보면 다음과 같다.

먼저, 네트워크 계층이라 불리는 가장 최상위 계층은 전체 고속도로 시스템에서 교통의 흐름을 담당하게 된다. 링크 계층이라 불리는 두 번째 계층은 고속도로를 여러 개의 섹션(section)으로 나누어 각 섹션의 운용을 담당한다. 이 계층은

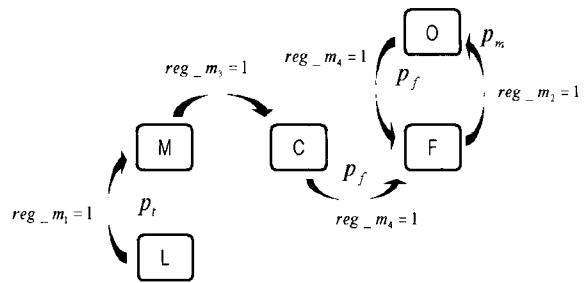


그림 6. 병합 기동 시나리오의 차량 상태 변환도.

Fig. 6. Vehicle states for merge scenario.

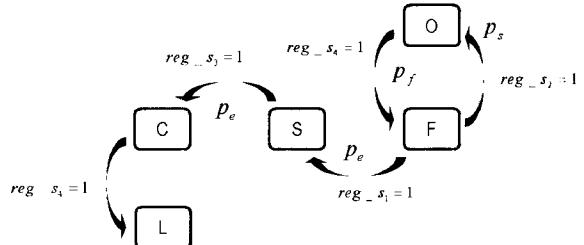


그림 7. 분리 기동 시나리오의 차량 상태 변환도.

Fig. 7. Vehicle states for split scenario.

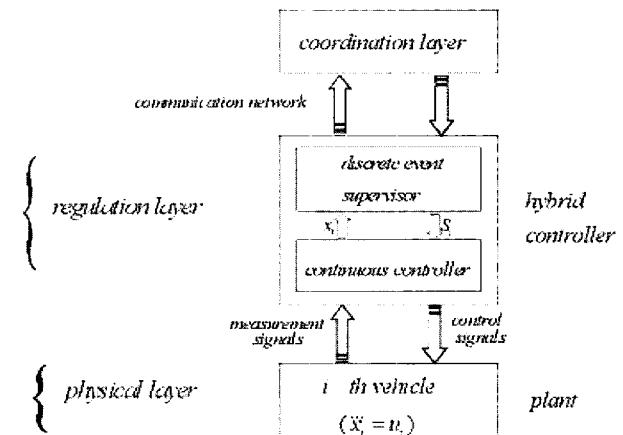


그림 8. 하이브리드 제어기 구조

Fig. 8. Structure of closed-loop hybrid system

각 섹션내의 차량들의 교통량을 안전이 보장되는 한도 내에서 최대화한다. 코디네이션 계층은 군집과 주위의 군집과의 상호작용을 고려한 군집의 주행에 대한 명령 생성을 담당한다. 이 계층은 링크 계층의 명령을 받아 군집들이 수행해야 할 기동 명령을 생성한다. 제어 계층구조의 다음 계층은 레귤레이션 계층이다. 이 계층은 코디네이션 계층으로부터 명령을 받아 차량을 구동하기 위한 스로틀(throttle), 조향(steering) 및 제동(brake) 입력을 생성한다. 정해진 기동을 수행하기 위해 센서 정보, 통신 정보를 읽어 들여 구동기 제어 명령을 생성한다. 제어 계층구조의 가장 하위 계층인 물리 계층은 실제 차량 자체에 해당된다.

본 논문에서 설계하는 하이브리드 제어기는 그림 8과 같

이 2 개의 부분으로 나눌 수 있다. 코디네이션 계층에서 생성된 기동명령을 처리하는 이산사건 감독 제어기(discrete-event supervisor controller)와 차량의 연속적인 종방향 제어를 위한 연속제어기로 레귤레이션 계층의 하이브리드 제어기를 구성한다. 연속적 종방향 제어기는 센서와 통신수단으로 얻은 정보를 이용해서 가속 제어 입력을 생성시킨다. 그리고 이산사건 제어기는 각 차량의 기동 상태를 나타내는 *Reg* 명령과 현재 차량의 정보를 처리하여 분리 및 병합 기동을 위한 차량 간격(P^m , P^s)을 앞의 4 장에서 기술한 새로운 안전 거리 기준을 이용하여 군집주행 기동 제어를 수행하게 된다.

1. 연속적인 종방향 제어기

먼저 하이브리드 제어 기법을 위한 연속적인 종방향 제어 부분을 설계해야 한다. 차량의 연속적 종방향 제어에 관해서는 이미 많은 연구가 수행되어 왔다[12]. 여기서는 각 차량의 종방향 제어의 분석을 위해서 3.2 절에서 주어진 선형화된 차량 모델을 사용하며, (4)에서 다음과 같은 선형화된 페루프 시스템을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_i \\ \dot{x}_i \\ \ddot{x}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ \dot{x}_i \\ \ddot{x}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_i \quad (9)$$

(9)의 선형화된 i 번째 차량 모델에 대한 새로운 입력 u_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다[13].

$$u_i = k_a \ddot{x}_{i-1} + k_v \dot{\delta}_i + k_p \delta_i + k_l a_l + C_v (\dot{x}_i - \dot{x}_l) \quad (10)$$

여기서, a_l 은 선도 차량의 가속도를 의미하며, k_a , k_v , k_p , k_l , C_v 는 설계 파라미터인 제어계인으로 제어목적에 맞게 선정되어져야 한다. 각각의 제어계인은 각 상태값들과의 핵심으로 제어입력을 결정하게 되므로, 제어계인은 그 상태의 물리적인 특성의 정도를 나타내며, 제어입력이 0이 되는 정상상태에서는 상태값 즉 물리적인 속도나 가속도의 변화가 발생하지 않는다. 본 논문에서는 페루프 시스템의 안정성과 추종성능에 대하여 그 제어목적을 두고 설계하였다.

2. 이산 사건 감독 제어기 설계

이산 사건 감독 제어기는 외부 입력과 연속제어기로부터의 정보를 이용한 이산 출력으로 차량 기동을 제한하고 제어하게 된다. 그리고 이산 사전 제어기의 출력은 연속 제어기의 입력이 된다. 먼저 병합 기동을 위한 감독 제어기의 출력을 고려해 보자. (7)과 (8)을 이용하면 다음과 같은 이산 사전 제어기의 출력식을 구할 수 있다.

$$S_i = \lambda_1 v_i + \lambda_2 + P \quad (11)$$

병합 기동을 위한 안전거리 간격을 구하는 스위칭 규칙(switching logic)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

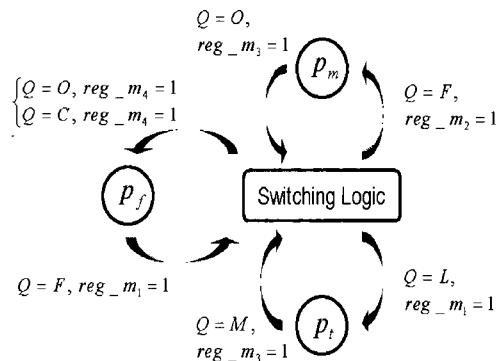


그림 9. 병합 기동을 위한 스위칭 규칙.

Fig. 9. Switching logic for merge operation.

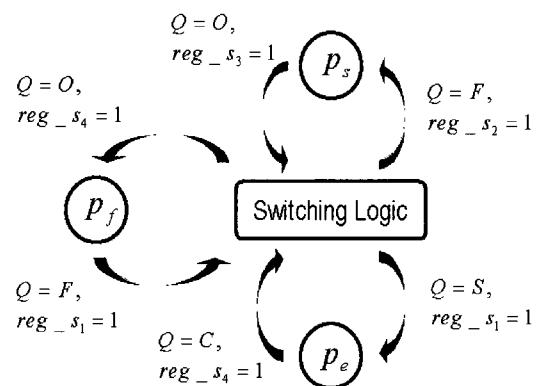


그림 10. 분리 기동을 위한 스위칭 규칙.

Fig. 10. Switching logic for split operation.

$$P^m = \begin{cases} P_i : \text{if } Q = L \text{ and } reg_m_1 = 1 \\ p_m : \text{if } Q = F \text{ and } reg_m_2 = 1 \\ p_f : \text{if } Q = O \text{ and } reg_m_4 = 1 \\ \quad \quad \quad \text{or if } Q = C \text{ and } reg_m_4 = 1 \end{cases}$$

군집주행 기동을 위한 병합간격의 선택은 차량 상태와 *Reg* 명령 조건이 동시에 만족할 때 스위칭 규칙을 통해 이루어진다. 그림 9에 도시한 바와 같이 *Reg* 명령 중에서 *reg_m1*과 *reg_m3*은 스위칭 규칙을 작동시키는 리셋(reset) 기능을 하며 리셋 조건은 다음과 같다.

분리 기동에 대한 이산 사전 감독제어기의 출력은 병합

$$\begin{aligned} &\text{if } \{Q = F \text{ and } reg_m_1 = 1\} \text{ or} \\ &\quad \{Q = O \text{ and } reg_m_3 = 1\} \text{ or} \\ &\quad \{Q = M \text{ and } reg_m_3 = 1\} \end{aligned}$$

기동과 같은 방법으로 쉽게 구할 수 있다. 그림 10은 분리 기동을 위한 스위칭 규칙을 나타내고 있으며, 안전거리의 변환은 차량 상태와 *Reg* 명령으로 결정된다는 것을 보여주고 있다. 스위칭 규칙과 리셋 조건을 기술하면 다음과 같다.

$$p_i^* = \begin{cases} P_e : \text{if } Q = S \text{ and } \text{reg_}s_1 = 1 \\ p_s : \text{if } Q = F \text{ and } \text{reg_}s_2 = 1 \\ p_f : \text{if } Q = O \text{ and } \text{reg_}s_3 = 1 \\ \text{if } \{ Q = F \text{ and } \text{reg_}s_1 = 1 \} \text{ or} \\ \{ Q = O \text{ and } \text{reg_}s_3 = 1 \} \text{ or} \\ \{ Q = C \text{ and } \text{reg_}s_4 = 1 \} \end{cases}$$

VII. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 장에서는 앞장에서 차량 상태와 스위칭 규칙을 이용하여 설계한 하이브리드 제어기를 이용하여 차선 변경을 포함하는 병합 및 분리 기동 시나리오에 대한 시뮬레이션을 각각 수행한다. 제안된 하이브리드 제어기의 군집주행 기동을 위한 성능을 고찰하기 위하여 2.2 절에서 설명된 1 대의 선도 차량과 3 대의 추종차량으로 구성된 군집에 대한 병합 기동과 분리 기동에 관한 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 고찰한다.

1. 병합 기동 시뮬레이션

그림 3에 도시된 병합 기동 시나리오에 따라 시뮬레이션을 수행한다. 모든 차량은 정상 상태 속도 30 m/s (108 km/h)의 초기속도를 가진다. 시뮬레이션을 시작하면 먼저 그림 3(a)와 같이 차량 2는 차량 1과 3 사이로 차선 변경을 하기 위해 차량 1과의 안전거리를 현재 진행 중인 차선에서 유지해야 한다. 차량 2는 속도 30 m/s 의 안전거리인 4 m 를 유지할 때까지 속도를 감속한다. 5 초가 되면 차량 3은 병합간격을 유지하기 위해 이산 사건 제어기의 출력인 병합 기동 안전거리를 유지하기 위해 속도가 줄어든다. 차량 2가 차량 1과의 안전거리가 확보되고 차량 3의 병합간격을 유지하면 병합 기동이 시작된다. 즉, 차량 2가 차량 1과 3 사이로 끼어들기 위한 차선 변경을 시작한다. 여기서, 횡방향 속도는 차선 변경을 하는 동안 이상적으로 일정하다고 가정한다. 마지막으로 차선 변경을 완료하면 4 대의 차량으로 구성된 군집주행을 이루게 된다.

그림 11은 선도차량(차량 1)과 각 차량간의 상대거리를 도시하고 있다. 차량간의 상대거리는 차량 자체의 길이와 안전거리의 합으로 나타나며, 선도차량에 대한 상대거리는 0의 값을 가진다. 약 25초에서 차량 2의 차선 변경이 완료되어, 각 차량의 상대거리가 9 m (차량길이 5 m + 안전거리 4 m)로 유지되는 차량 4 대로 구성된 새로운 군집으로 완전 병합된 것을 알 수 있다. 그리고 그림 12와 그림 13은 각각 차량 2와 차량 3에 대한 병합 기동 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 차량 2는 약 15초에서 차선 변경을 수행하지만 차량의 종방향 속도는 변화가 없는 것을 알 수 있다. 또한 그림 13(a)를 보면 차량 3의 안전거리 변환은 10초와 20초에서 각각 수행되는 것을 알 수 있다.

2. 분리 기동 시뮬레이션

분리 기동 시나리오의 초기 조건과 각각의 파라미터는 병합 기동 시나리오와 같다. 분리 기동 시나리오는 병합 기동 시나리오의 역으로 생각할 수 있다. 그런데 분리 기동은 차량 2가 차선 변경을 통해 분리가 완료된 후 안전거리를 유지할 필요가 없기 때문에 병합 기동 보다 단순한 시나리오를 가진다.

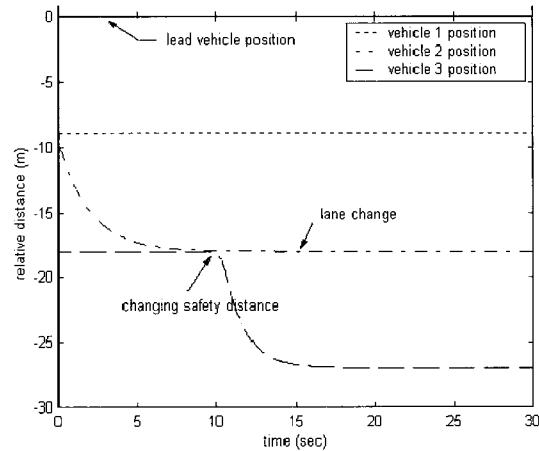


그림 11. 선도차량과의 상대거리.

Fig. 11. Relative distance from lead vehicle (merge).

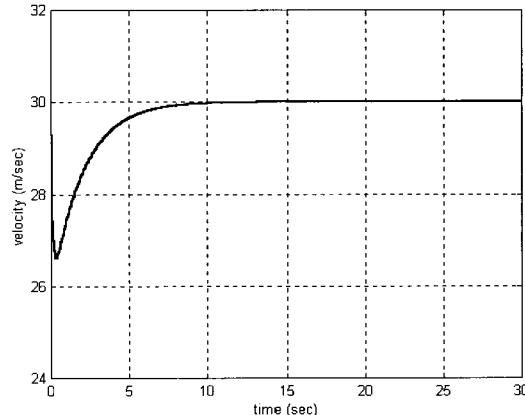


그림 12. 병합 기동시의 차량 2의 속도.

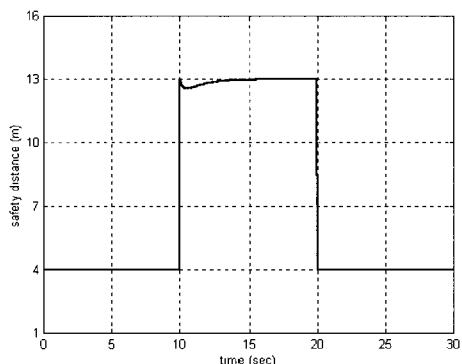
Fig. 12. Velocity of vehicle 2 in merge operation.

그림 14에서 분리 기동시의 선도차량과 각각의 차량간의 상대거리를 도시하고 있다. 약 25초 정도에 분리 기동이 완료되어 선도차량, 차량 1, 3으로 이루어진 차량 군집과 1 대의 개별적인 차량으로 분리된 것을 보이고 있다. 그림 15는 차량 3의 기동 결과를 나타내고 있으며 안전거리 스위칭이 10초와 15초에서 이루어진 것을 알 수 있다.

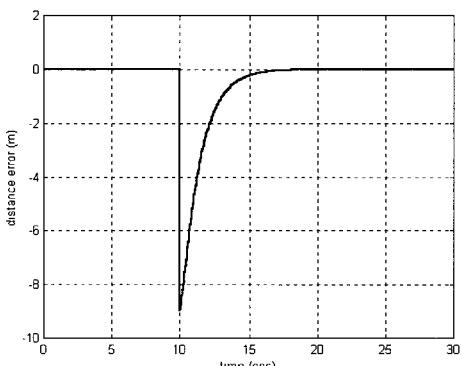
VIII. 결론

자동화 고속도로(AHS)하의 각 차량은 추종, 판단 및 결정 등의 제어가 동시에 이루어져야 하기 때문에 각 차량의 연속적인 운동시스템에 대한 제어 문제와 이산 적인 기동의 제어 문제를 동시에 고려할 수 있는 하이브리드 시스템으로 다루어져야 하며, 이러한 시스템을 제어하기 위해서는 하이브리드 제어기의 도입이 필요하다.

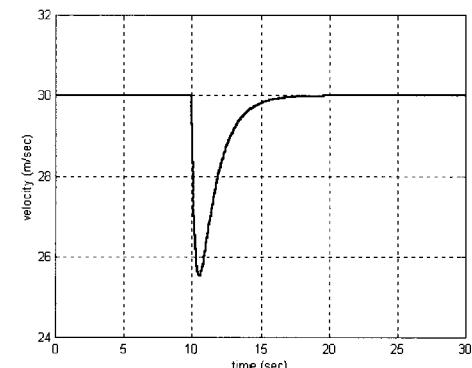
본 논문에서는 자동화 고속도로에서 차선 변경을 포함하는 군집주행 상황하의 병합 및 분리 기동의 문제를 하이브리드 시스템으로 모델링하고 모델링된 군집주행 기동의 하이브리드 제어기를 설계하였다. 먼저 차선 변경을 포함하는 병합 및 분리 기동의 수행을 위해 새로운 안전거리 개념을 제안하여, 군집주행 기동의 하이브리드 모델링을 수행하였다.



(a) 안전거리 변화



(b) 안전거리 오차



(c) 병합 기동시의 속도

그림 13. 병합 기동시의 차량 3의 결과.

Fig. 13. Result of vehicle 3 in merge operation.

또한 각 차량의 거리 및 속도 추종 성능을 위한 연속적인 종방향 제어기와, 차량 상태와 *Reg* 명령을 이용한 안전거리 스위칭 규칙으로 구성된 이산 사건 감독 제어기로 이루어진 하이브리드 제어기를 설계하였다. 그리고 4 대의 차량으로 구성된 군집주행 기동 시나리오의 시뮬레이션을 통해 제안된 하이브리드 제어기의 군집주행시의 병합 및 분리 성능의 타당성을 검증하였다.

결론적으로 본 논문에서 제안한 새로운 안전거리 기준은 복잡한 형태의 군집주행 기동에 대한 새로운 방법의 하이브리드 시스템으로의 해석과 접근 방법을 제시하여 군집주행 기동을 효과적으로 제어할 수 있는 방법이라 할 수 있다.

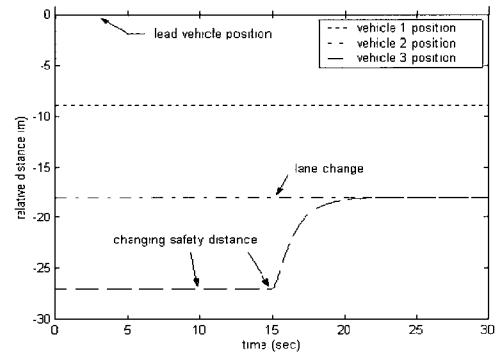
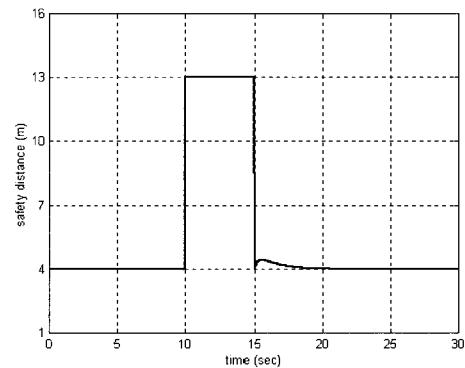
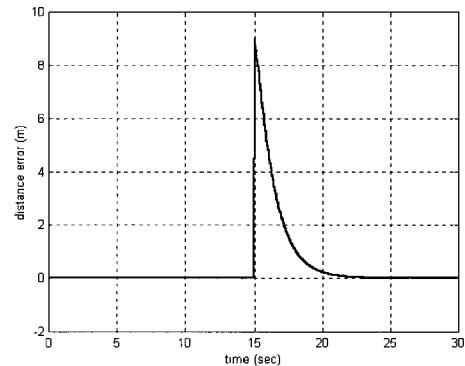


그림 14. 분리 기동시의 선도차량과의 상대거리.

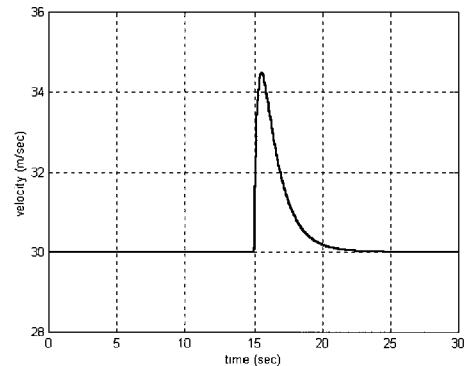
Fig. 14. Relative distance from lead vehicle (split).



(a) 안전거리 변화



(b) 안전거리 오차



(c) 분리 기동시의 속도

그림 15. 분리 기동시의 차량 3의 결과.

Fig. 15. Result of vehicle 3 in split operation.

향후 과제로는 본 연구에서는 다루지 않았던 차량 동역학의 가속도 및 저크의 제한이 어떠한 영향을 주고 그 것이 안정도에 미치는 영향에 대한 연구가 필요할 것으로 생각되며, 제안된 안전거리 및 하이브리드 제어기를 좀 더 다양하고 복잡한 기동으로 확대 적용하는 문제도 검토되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] R. Brockett, "Hybrid systems in classical mechanics," *Proceedings of the 13th IFAC World Congress*, pp. 473-476, June 1996.
- [2] R. Alur, C. Courcoubetis, T. A. Henzinger, and P.-H. Ho, "Hybrid automata: an algorithmic approach to the specification and verification of hybrid systems," *Proceedings of the Workshop on Theory of Hybrid Systems*, Lyngby, Denmark, pp. 209-229, 1992.
- [3] S. Pettersson, Analysis and Design of Hybrid Systems, *Ph. D. Dissertation, Department of Signals and Systems, Chalmers University of Technology*, Goteborg, Sweden, 1999.
- [4] J. Lygeros, D. N. Godbole, and S. Sastry, "Verified hybrid controllers for automated vehicles," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 43, No. 4, pp. 522-539, 1998.
- [5] P. Varaiya, "Smart cars on smart roads: Problems of control," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 38, No. 2, pp. 195-207, February 1993.
- [6] D. N. Godbole, J. Lygeros, and S. Sastry, "Hierarchical hybrid control : an IVHS case study," *Proceedings of the 33th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1592-1597, December 1994.
- [7] D. N. Godbole, V. Hagenmeyer, R. Sengupta, and D. Swaroop, "Design of emergency maneuvers for automated highway systems: Obstacle avoidance problem," *Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 4774-4779, 1997.
- [8] D. N. Godbole, R. Sengupta, and V. Hagenmeyer, "Distributed hybrid controls for automated vehicle lane changes," *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 2639-2644, 1998.
- [9] J. Lygeros, D. N. Godbole, and M. Broucke, "A fault tolerant control architecture for automated highway Systems," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 8, No. 2, pp. 205-219, March, 2000.
- [10] K. Yi, S. Lee, and K.-I. Lee, "Estimation of vehicle Driving-load with application to vehicle intelligent cruise control," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 6, pp. 720-726, 2001
- [11] 김진변, 최재원, 김영호, "다중 Lyapunov 기반 하이브리드 시스템의 안정화 제어기 설계 및 군집 차량의 종방향 거리 제어시스템에의 응용," *제어·자동화·시스템 공학 논문지*, 제 7 권, 제 6 호, pp. 477-486, 2001.
- [12] H. Raza, and P. A. Ioannou, "Vehicle following control design for automated highway systems," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 16-6, pp. 43-60, 1996.
- [13] S. Sheikholelam, and C. A. Desoer, Longitudinal Control of a Platoon of Vehicles ; III : Nonlinear Model, PATH Report UCB-ITS-PRR-90-1, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, 1994.
- [14] P. A. Ioannou, and C. C. Chien, "Autonomous Intelligent Cruise Control," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 43, No. 4, pp. 657-672, 1993.
- [15] 최재원, 이석, 이만형, 박운식, "ITS 분야에서의 계측제어 및 통신기술," *한국정밀공학회지*, 제 18 권, 제 1 호, pp. 12-20, 2001.

전 성 민

1976년 4월 19일 출생. 2000년 부산대학교 기계공학부 졸업(공학사). 2002년 부산대학교 대학원 지능기계공학과(공학석사). 2002년~현재 모토닉㈜ 기술연구소 근무. 관심분야 : 하이브리드 제어, 지능형 교통 시스템, 전자식 Actuator 등.

최 재 원

제어·자동화·시스템 공학 논문지 제 8 권 제 5 호 참조.