

고속도로 합류구간 첨단 차로변경 보조 시스템 개발 : 최적 차로변경 시작 지점 Positioning 알고리즘

Advanced Lane Change Assist System for Automatic Vehicle Control in Merging Sections : An algorithm for Optimal Lane Change Start Point Positioning

김진수* 정진한** 유성현** 박장현** 장경영*
(Jinsoo Kim) (Jin-han Jeong) (Sung-Hyun You) (Janhg-Hyon Park) (Jhang-Kyung Young)

·Corresponding author : Jhang-Kyung Young(Hanyang University), E-mail jkyjhang@hanyang.ac.kr

요약

차로변경은 운전자의 숙련된 주변인식 및 운전기술이 요구되어 심각한 교통사고를 야기한다. 그리하여 우리는 불가피한 차로변경이 대두되는 고속도로 합류구간에서 본선으로 합류하는 차량의 차로변경을 보조하는 차량 자동제어 시스템 (ALCAS; Advanced Lane Change Assist System)을 개발한다. 본 연구에서는 ALCAS 중 조향이 수행되기 이전에 최적 차로변경 시작지점(Optimal Lane Change Start Point; OLCSP)을 생성하고 그 지점까지 도달하는 종방향 제어 알고리즘 개발에 초점을 두었다. 이를 위해 우선 고속도로 합류구간의 차로변경 행태를 분석하였고, 실제 차량의 가속도 함수 행태를 통해 차로변경 특징모형(Lane Change Feature Model)을 설계하였다. 그 후 차로변경 수행 단계를 정립하였으며, 이 알고리즘 성능과 타당성을 검증하기 위하여 다양한 주변차량 주행환경에 따른 시나리오 시험을 수행하였다. 또한 개발된 알고리즘의 효과를 미시적 교통류 시뮬레이션 (VISSIM)을 통해 확인하였다. 개발한 알고리즘을 합류차량에 적용한 결과 안정류 상태에서 합류성능이 두드러지게 개선되는 것을 확인하였다. 이 차량 자동제어 시스템은 교통 자동차 분야 융합기술의 일환으로 개발되었으며, 운전자의 부하와 오류를 감소시켜 효율성과 안전성을 향상시킬 뿐만 아니라 교통류의 안정성, 임계용량, 주행 효율성의 증대로 사회비용 감소를 기대할 수 있다.

핵심어 : 첨단운전자보조시스템(ADAS), 지능형교통시스템(ITS), 자동차 자동제어, 고속도로 합류구간, 차로변경 행태, 첨단차로변경 보조시스템(ALCAS), 최적차로변경시작지점(OLCSP)

ABSTRACT

A lane change maneuver which has a high driver cognitive workload and skills sometimes leads to severe traffic accidents. In this study, the Advanced Lane Change Assist System (ALCAS) was developed to assist with the automatic lane changes in merging sections which is mainly based on an automatic control algorithm for detecting an available gap, determining the Optimal Lane Change Start Point (OLCSP) in various traffic conditions, and positioning the merging vehicle at the OLCSP safely by longitudinal automatic controlling. The analysis of lane change behavior and modeling of fundamental lane change feature were performed for determining the default parameters and the boundary conditions of the algorithm. The algorithm was composed of six steps with closed-loop. In order to confirm the algorithm performance, numerical scenario tests were performed in various surrounding vehicles conditions. Moreover, feasibility of the developed system was verified in microscopic traffic simulation(VISSIM 5.3 version). The results showed that merging vehicles using the system had a tendency to find the OLCSP readily and precisely, so improved merging performance was observed when the system was applied. The system is also effective even during increases in vehicle volume of the mainline.

Key words : Advanced Driver Assist System(ADAS), Intelligent Transportation System(ITS), Automatic Vehicle Control, Merging Section, Lane Change Behavior, Advanced Lane Change Assist System(ALCAS), Optimal Lane Change Start Point(OLCSP)

† This work was supported by the National Research Foundation of Korea grant funded by the Korea government (MEST) (NRF-2014-038479, NRF-2013-034204)

* 주저자 및 교신저자 : 한양대학교 기계공학과

** 공저자 : 한양대학교 미래자동차공학과

† Received 19 March 2015; reviewed 26 May 2015; Accepted 22 June 2015

I. 서 론

최근 미국 도로교통 안전국(NHTSA) 보고에 따르면, 연간 고속도로 교통사고의 90%는 운전자의 과실과 부주의 등의 인적요인에 의해 발생되며, 이 중 39%이상은 차로변경으로부터 비롯된 사망에 이르는 심각한 사고로 조사되었다. [1,2] 차로변경 행태는 교통상황, 도로구간 특성 등에 따라 다양하다. 특히, 고속도로 합류, 분류, weaving구간은 필수적인 차로변경으로 많은 상충이 동반되는 지역이고 차량간 상대거리, 상대속도 등 실시간으로 복잡한 주변 상황을 판단해야하므로 높은 운전자의 집중이 요구된다. 또한 운전자의 판단오류로 인한 부적절한 차로변경 동작은 사고를 유발할 뿐만 아니라 원활한 본선의 흐름을 간섭하고 충격과를 전파하여 정체를 야기하는 요인이 된다. 그러므로 인간의 인지, 반응, 판단의 오류를 최소화하는 자동 인식 및 제어, 인공지능 등 첨단기술을 통한 차로변경 보조 시스템 개발이 요구된다.

최근 자동차, 교통, 제어, 통신 등 다양한 분야에서 치명적인 사고를 줄이고 교통흐름을 개선하기 위해 인간의 인지반응시간 및 판단오류를 감소시키는 노력이 활발히 수행되어왔다. ADAS (Advanced Driver Assist System) 및 ASV (Active Safety Vehicle)와 같은 지능형 자동차 분야에서는 ACC (Adaptive Cruise Control), Pre-Brake, LKAS (Lane Keeping Assist system), SPAS (Smart Parking Assist System) 등 다양한 중, 횡방향 차량 자동제어 시스템을 개발하였다. 이중 현재 차로변경 보조와 관련된 기술로는 사각지대 충돌경보, 조향시 차량안정성 확보, 충돌회피 차선변경 제어 등의 [1-5] 수준에 머물러있다. 즉, 다양한 주변 및 교통상황에 적절히 대응하며 중, 횡방향 제어가 복합적으로 적용된 차로변경 제어기술 연구는 매우 미흡한 실정이다. 또한 AHS (Advanced Highway System) 및 ITS (Intelligent Transportation System) 분야에서도 Positive guidance, SSM (Surrogate Safety Measures) 기법, 차량간(V2V), 차량-인프라간(V2I) 무선통신 등 다양한 첨단 기술을 기반으로 교통상황 및 위험요인을 미리 인지, 경

고하는 시스템을 개발해왔다. 이러한 연구는 주로 교통상황 및 경고 정보 생성, 가공 및 제공에 초점을 맞추어 교통류를 제어한다. 이처럼 ITS 및 UTIS 기술로부터 방대한 교통정보가 도로 인프라에 축적되고 있고 이를 이용한 보다 효과적인 교통류 운영 방안 및 정책의 연구가 활발히 이루어지고 있다. [6] 아직까지는 통신 지연, 표준화, 정확성 등의 문제로 인프라 정보를 활용한 차량 자동제어 기술은 매우 미흡한 실정이지만 그 필요성은 나날이 대두되고 있으며, 특히 최근 대두된 스마트 하이웨이, 군집주행 연구에서는 차량 자동제어 구현에 요구되는 실시간 교통정보를 수집, 가공, 제공하는 노력이 이루어지고 있다. 아직까지 차로변경 자동제어 기술에는 이러한 기술 적용이 못 미쳐있지만, 보다 다양한 교통 흐름에 능동적으로 차량을 제어하기 위해서 그 필요성이 나날이 증대되고 있다.

교통류에 외란을 전파 시키지 않으며 다양한 교통 흐름에 적응 가능한 차로변경 자동제어를 구현하기 위해서는 다음과 같은 두 가지 핵심 문제를 해결해야한다. 첫째로 다양한 도로특성과 교통상황을 반영하는 차로변경 제어모형(control model) 개발이 필요하다. 현재까지 개발된 차로변경 모형은 대부분 그 행태(behavior)를 묘사하기 위한 목적으로 연구되어왔으며, 이는 자유(discretionary), 의무(mandatory) 강제(forced) 상황으로 분류되어 다양한 상황에 적합하도록 개발되었다. Gipps, 허용간격모형(Gap Acceptance Model) [11]이 대표적이며, 교통류 구현, 평가, 예측이 목적인 CORSIM, MITSIM, SITRAS, PARAMICS, AIMSUN [7-11] 등 다양한 미시적 교통류 시뮬레이션에 적용되었다. 이 행태모형들은 이산확률함수, 의사결정트리, 선형선택함수 등 확률기반으로 구축되었고 ad-hoc 과정에 의해 불확실 변수들을 채택한다. [12-19] 이처럼 확률기반 행태모형은 자동 제어에 적용하기 부적합하다고 판단되어 최소정지거리, 가감속, 조향, jerk, tire slip, constant time gap 등 차량동역학적 특성을 반영한 차로변경 제어모형이 새롭게 개발되어야한다.

둘째로 차량 제어 로직은 넓은 범위의 가변적인 주변차량 주행상황을 반영해야 한다. 차로변경은

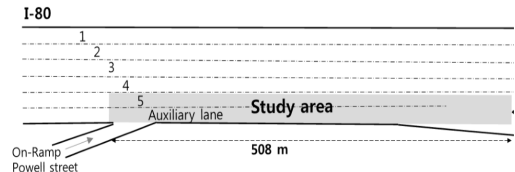
어떠한 차량제어 기술보다 주변상황 요인에 더 민감하고 복잡한 문제를 지닌다. 차로변경시 운전자는 자차의 주행상태뿐만 아니라 변경할 차로의 상황, 주변차량과의 충돌가능성 등 복잡한 관계를 동시다발적으로 반영해야한다. 이를 위해서는 넓은 범위에서 교통흐름을 간섭하지 않고 안전하게 수용될 수 있는 최적의 허용공간(acceptable gap)을 실시간으로 산정해야한다. 그리고 이를 기반으로 차량을 제어하기 위해서는 순차적인 절차를 정립하여 동시다발적인 복잡한 판단 문제를 해결해야하는데, 이 또한 광범위한 주변상황 정보가 필수적이다.

우리는 불가피한 차로변경이 대두되는 고속도로 합류구간에서 본선으로 합류하는 차량의 차로변경을 보조하는 차량 자동제어 시스템 (ALCAS; Advanced Lane Change Assist System)을 개발하고 있다. 이 연구는 지능형 차량과 교통 기술의 융합으로 차량의 안전성(Safety), 편리성(Comfort), 교통류의 안정성(Stability) 향상을 목적으로 한다. 이 연구는 크게 주변 교통상황 계측, 종방향, 횡방향 제어 등 다양한 부분으로 나뉘어 최적의 차로변경 자동제어를 구현한다. 이 중, 본 연구에서는 앞에서 언급한 핵심 문제들의 해결을 목표로 다음과 같은 부분에 초점을 두었다. 우선 고속도로 합류구간의 차로변경 행태를 분석하였고, 실제 차량의 가속도 합수 형태를 통해 차로변경 특징모형(Lane Change Feature Model)을 설계하였다. 그리고 차로변경 수행 단계(steps)를 정립하였으며, 이를 기반으로 최적 차로변경 시작지점(Optimal Lane Change Start Point; OLCSP)을 생성하고 그 지점까지 도달하는 종방향 제어 알고리즘을 개발하였다.

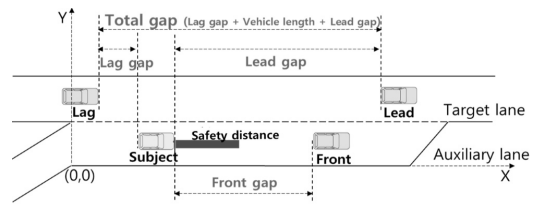
II. 차로변경 행태 분석

1. 분석구간 및 변수 설정

차로변경 행태분석을 위해 미연방도로관리청(FHWA)에서 실험한 NGSIM [21] 항공영상자료를 기반으로 추출한 개별 차량주행궤적 자료를 사용하였다. 이 구간은 샌프란시스코 만의 동부지역의



<그림 1> 차로변경 분석구간 I-80
<Fig. 1> Data collection area I-80



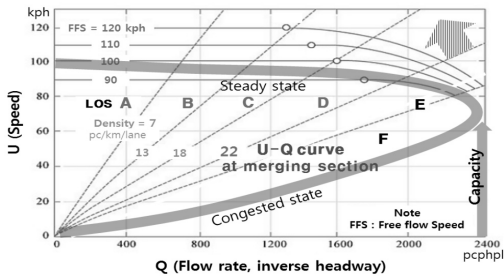
<그림 2> 차로변경 분석변수 설정
<Fig. 2> Basic parameters for lane change

I-80 지역이며, <그림 1>과 같이 속도제한 90km/h인 본선 5차로와 508m의 보조차로로 구성되어 있다. 수집된 자료는 0.1초 간격의 차량주행궤적으로 45분간 총 5648대의 궤적이 추출되었다. 이 raw 자료를 이상치, 필터링 가공처리를 통해 각 차량의 궤적 자료의 신뢰도를 높였고 본선차량, 중차량, 이중차로 변경, 끼어들기와 같은 불필요한 차로변경 자료는 제외시켜 최종적으로 908대의 합류차량 주행궤적을 추출하였다. 이 자료는 안정류, 정체류의 교통상황을 반영하고 있어 충분히 다양한 차로변경 행태를 반영한다.

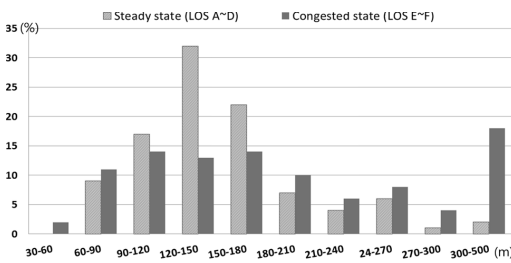
차로변경 행태 분석을 위한 변수는 <그림 2>와 같이 정의하였으며, 대상(subject)차량과 주변(front, lead, lag)차량과의 상대적인 관계로 설정되었다.

2. 합류차량의 차로변경 행태 분석

합류차량의 차로변경 행태를 분석하기 위해 우선 교통상황을 두 가지 형태로 (안정류 : LOS (Level of Service) A-D, 정체류 : LOS E-F) 분류하였고, 각 상황에 따른 차로변경 시작 지점(Lane Change Strat Points; LCSP) 분포를 분석하였다. 각각의 LOS는 <그림 3>과 같이 미시적인 차량속도와 Inversed headways로 표현된 U(속도) - Q(교통류율) 관계에서 밀도를 기준으로 분류되어진다. 본 연구



〈그림 3〉 속도-교통량 관계를 통한 서비스수준 분류
 〈FIG 3〉 Classification of Level of Service (LOS) by U-Q relationship



〈그림 4〉 I-80의 보조차로상의 LCSP 분포비율 결과
 〈FIG 4〉 Distribution of LCSP Proportion on auxiliary lane of I-80

에서는 합류차량이 차로변경을 수행하는 때 시간마다 밀도를 측정하였고, 그때의 밀도가 도로용량편람 (HCM)에서 정의한 22 pc/km/lane를 기준으로 낮은 경우를 안정류로 간주하였다. 그리하여 합류차량 주행궤적을 안정류 615대, 정체류 293대로 분류하였다.

각각의 다른 교통류 상태에서의 LCSP 분포 비율은 <그림 4>와 같다. 이는 보조차로의 30m 간격으로 나누어 차로변경 횟수를 카운트하여 비율화 하였다. 그 결과 안정류에서는 대부분의 합류차량이 180m 이내에서, 특히 130m 부근에서 가장 많은 차로변경이 수행되었다. 반면에 정체류에서는 300m 이후에 대부분의 차로변경이 수행되었고, 나머지 LCSP는 보조차로에 넓게 분포됨을 확인하였다. 이 분석을 통해 안정류 상태에서는 본선의 비어있는 공간을 선택하는 행태를 보이나, 정체류 상태에서는 대부분 합류 차량이 보조도로 중점부근에서 본선차량의 주행을 간섭을 주어 공간을 만들어내는 강제적 형태가 보이는 것을 확인하였다. 이를 통해

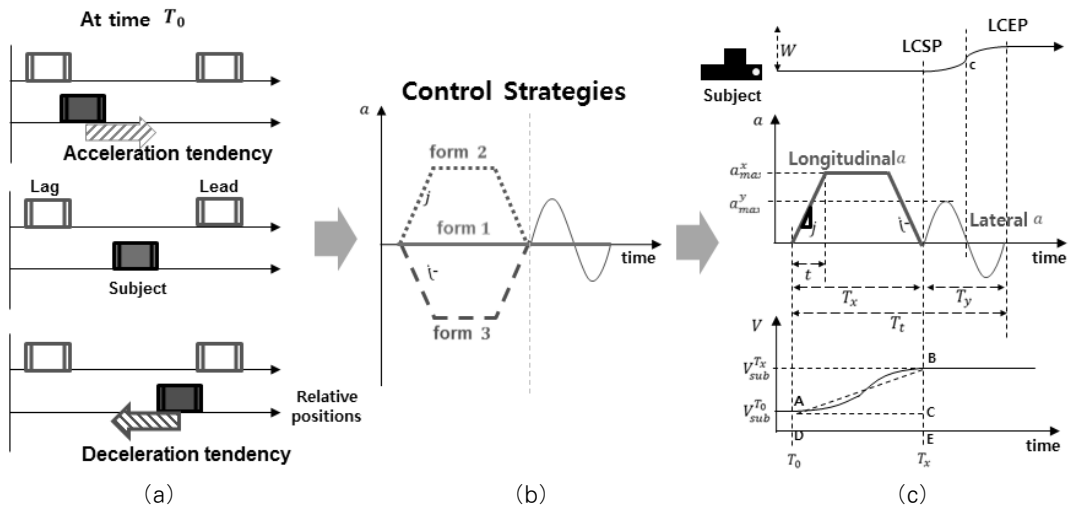
〈표 1〉 안정류 상태의 차로변경 파라미터 분석 결과
 〈Table 1〉 Statistical Values of Parameters at Steady state

Behavior parameters	Min.	Mean.	Max.
Subject vehicle Speed (m/s), V_{sub}	14.7	20.1	24.8
Subject vehicle Acceleration (m/s ²)	-1.53	0.2	1.49
Front vehicle Speed (m/s)	15.2	21.12	23.9
Lead vehicle Speed (m/s), V_{lead}	18.2	21.2	22.3
Lag vehicle Speed (m/s), V_{lag}	18.1	19.1	21.8
$V_{lead} - V_{lag}$ (m/s)	-3.1	0.1	4.2
$V_{sub} - V_{lead}$ (m/s)	-3.9	-0.5	2.9
$V_{sub} - V_{lag}$ (m/s)	-2.8	0.6	3.7
Front gap (m)	8.8	45.3	306.4
Lead gap (m)	12.8	34.8	287.7
Lag gap (m)	10.7	23.6	218.3

안정류 상태에서는 합류차량 자체만으로 자동제어가 구현될 수 있어 보이나, 정체류에서는 목표차로 차량과 연계되어 양보의 개념이 반영된 제어가 함께 이루어져야만 가능하다고 판단된다. 또한 다양한 주변조건 교통 환경에 따른 차로변경 형태는 차량동역학 매커니즘과 조향 제어로직 또한 크게 상이하기 때문에 하나의 로직으로 구성되기 어렵다고 판단된다. 그리하여 본 연구에서는 제어차량을 본선으로 합류하는 차량으로 한정지었으므로 본선차량의 제어까지 요구되는 정체류 상황은 배제하고 안정류 상황에 국한하여 연구를 수행하였다.

안정류 상태에서 분석한 세부적인 변수들의 통계 결과는 <표 1>과 같다. 이는 개별 합류(대상)차량마다 본선 5차로로 차로변경을 시작하는 시점을 기준으로 분석되었다. 그 분석결과 대부분의 대상차량은 25m/s 이내 속도에서 차로변경을 수행하였으며, 그 속도 편차는 목표차로 차량들에 비해 큰 것을 확인하였다. 그리고 대상차량과 lead차량, lag차량과의 속도차이 평균은 -0.5, +0.6m/s로, 보편적으로 대상차량이 주변차량과 비슷한 속도에서 차로변경을 수행하는 것을 확인하였다.

이 분석에서 차량간 속도차이를 나타내는 $V_{lead} - V_{lag}$, $V_{sub} - V_{lead}$, $V_{sub} - V_{lag}$ 변수를 주목할 필요가 있다. 보편적으로 lag차량이 lead차량보다 느린 경우, 대상차량이 lead차량보다 느리고 lag차량보



<그림 5> (a) 세 가지 개념적 종방향 제어 전략, (b) 제어 전략에 따른 이상적인 종방향 가속도 profile, (c) 종방향 가속도, 속도 기반 기준 차로변경 특성 모형 정립
 <FIG 5> (a) Three conceptual acceleration control strategies at initial time . (b) Profiles of longitudinal acceleration curves by control strategies. (c) Fundamental lane change feature model of longitudinal acceleration and velocity.

다 빠른 경우가 안전한 차로변경이 수행된다고 간주할 수 있다. 그러나 분석결과 lag차량이 lead차량보다 3.1m/s 빠른, 대상차량이 lead차량보다 2.9m/s 빠른, lag차량보다 2.8m/s 느린 상황까지도 차로변경을 수행하는 것을 확인하였다. 이는 보편적인 상황을 위배하는 결과이지만 각 차량과의 충분한 안전거리가 확보될 경우로 차로변경을 허용할 수 있는 수준으로 간주할 수 있다.

이러한 사항은 이상적인 조건을 벗어나는 상황에도 적용할 수 있도록 제어에 반영된 것이며 3장의 OLCSP Positioning 알고리즘에서 목표차로의 안전성, 적응성 확인 단계에 반영될 뿐만아니라 최적의 안전거리, 차간간격 등 default parameters의 제어값(value) 및 한계치(thresholds)를 설정하는데 기여한다.

3. 차로변경 특징 모형 정립

본 절에서는 대상차량이 차로변경을 수행하면서 보이는 동적 특징을 가속도, 속도 profile을 통해 최종적으로 가속도 함수로 표현한 차로변경 특징 모형을 정립하였다. 이 모형은 OLCSP를 생성하고 이

에 도달하기위한 종방향 제어전략을 수립한다.

<그림 5(a)>는 초기시간 T_0 에 대상차량과 lead, lag차량 사이의 상대거리, 속도 관계에 따라 가속, 등속, 감속하여 OLCSP에 도달하는 종방향 제어 전략을 개념적으로 표현한 것이다. 제어전략에 따른 대상차량의 이상적인 가속도 profile은 <그림 5(b)>와 같이 표현된다. 이 profile은 실제로 대상차량이 LCSP 직전까지 목표차로에 적응 가능한 주행상태와 안전거리를 만족하는 상황에 도달하는 형태를 반영하며 주변상황에 따라 다양한 진폭의 사다리꼴 형태를 보인다.

이를 바탕으로 <그림 5(c)>와 같이 대상차량의 종방향 가속도 profile을 기준으로 특징 변수를 정립하였고, 차로변경 특징 모형(Lane Change Feature Model)을 설계하였다. 여기서 사다리꼴 형태의 함수는 차로변경 직전까지 OLCSP Positioning을 위한 종방향 가속도이며, sine 형태의 함수는 차로변경을 수행하면서 생성되는 횡방향 가속도를 표현한 것으로 OLCSP 도달시간 T_x 에서 생성된다. a_{max}^x 와 a_{max}^y 는 각각 종방향과 횡방향 가속도의 진폭을 의미하며, T_x 와 T_y 는 각각의 가속도 종료시간을 의미한다.

이 횡방향 모형은 본 연구 범위이외의 부분으로 추 후 연구에 사용된다. J (jerk)는 가속도의 1차 미분을 의미하며, 그 값은 가속도 증가시와 감소시에 동일한 절댓값을 갖도록 설계하였다. 이 변수 값은 제어 되는 차량별, 주행 속도별 가, 감속 성능을 고려하여 설정된다. t 는 대상차량이 J 를 수행하여 a_{max}^x 에 도달하는데 요구되는 시간을 의미한다.

종방향 가속도 함수의 적분(덮여진 넓이)은 대상 차량의 T_0 와 T_x 때의 속도차이를 의미하며, 그 수식은 (1)과 같다.

$$a_{max}^x \cdot (T_x - t) = V_{sub}^{T_x} - V_{sub}^{T_0} \quad (1)$$

$V_{sub}^{T_x} - V_{sub}^{T_0}$ 은 대상차량의 T_0 시간에서부터 T_x 까지의 속도차이를 나타낸다. 그리고 a_{max}^x 는 다음과 (2)와 같이 정의된다.

$$a_{max}^x = J \cdot t \quad (2)$$

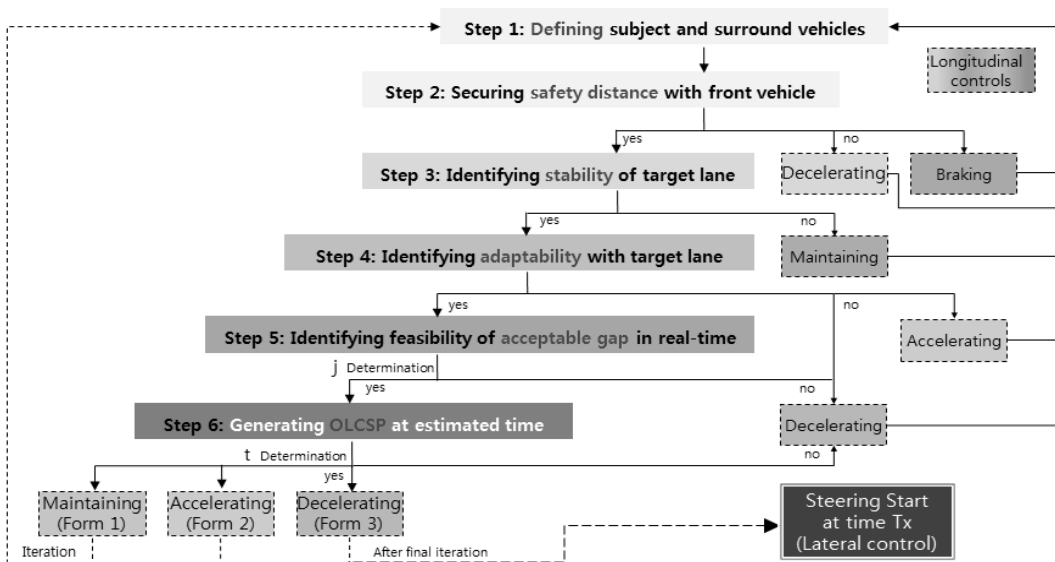
여기서 $+J$ 를 적용시 Form 2, $-J$ 를 적용시 Form 3로 표현할 수 있으며, Form 1의 경우는 t 가 0초로

설정되어 어떠한 J 가 적용되어도 등속을 유지하는 형태로 나타난다.

III. OLCSP Positioning 알고리즘 설계

본 연구에서 개발하는 OLCSP Positioning 알고리즘은 차로변경 자동 제어를 위한 상위제어부에 속한다. 이 알고리즘은 다양한 주변상황에서 차로변경가능 여부 판단, OLCSP 생성, 종방향 제어를 통한 OLCSP 도달하는 것을 목표로 제안되었다. 본 개발한 알고리즘은 <그림 6>과 같이 여섯 단계로 구성되었으며, 우리가 정립한 다음 여섯 가지 법칙(rules)을 기반으로 설계되었다.

- 1) 합류차량은 주변차량들과 충돌을 방지하기 위해 최소한의 안전거리를 만족해야 한다.
- 2) 주변 상황은 계속 변경되기 때문에 주변차량 결정은 매 단계마다 수정되어야 한다.
- 3) 목표차로의 차량들은 속도편차가 작은 안정한 상태이어야 한다.
- 4) 합류차량은 목표차로의 차량과 비슷한 주행속도를 만족하여야 한다.



<그림 6> OLCSP Positioning 알고리즘
<FIG 6> Algorithm of an OLCSP positioning control

- 5) 목표차로의 정체 혹은 위험한 상황으로 차로 변경 가능공간이 확보되지 못한 경우에 제어되는 대상차량은 보조차로의 종점에 안전하게 정지하여 차로변경가능공간을 모색해야 한다.
- 6) 시스템의 높은 성능을 만족하기 위해서는 대상차량과 센서, 통신 성능을 반영하여 J , OLCSP 도달 시간 T_x , 반복(iteration) 간격 등을 적절하게 정의해야한다.

1. Step 1: 대상차량과 주변차량 정의

대상차량은 보조차선을 진입한 직후부터 정의되며, 이를 기준으로 기본 네 대의 차량이 결정된다. 노변 항공 센서와 대상차량에 탑재된 360도 LIDAR/radar 센서의 융합에 의해 이들의 상대위치 정보가 획득되고, 이 프레임 정보의 차분을 통해 각 차량의 속도와 가속도를 추정한다. 광범위 노변 항공 센서로부터 획득한 실시간 정보를 통해 대상차량과 그 주변차량의 초기 위치는 (3)과 같이 각각 정의되어진다.

$$\begin{aligned}
 x_{sub} &= \min \cdot x_{n0}^{aux} \\
 x_{front} &= \min \cdot \{x_n^{aux} - x_{sub} > 0\} \\
 x_{lead} &= \min \cdot \{x_n^{tar} - x_{sub} \geq 0\} \\
 x_{lag} &= \min \cdot \{x_n^{tar} - x_{sub} < 0\}
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 x_n^{aux} 과 x_n^{tar} 은 보조차로와 목표차로를 주행하는 전체 차량 각각의 Global Coordinate 상 중방향 (x축) 위치를 의미한다. 이는 매 0.1초 시간 간격으로 산정되어진다. 만약 보조차로의 대상차량 전방에 차량이 존재하지 않는다면, x_{front} 를 보조차로 종점을 정지된 선두차량으로 대체하여 차로변경 불가 시에도 보조차로 종점에 안전하게 정지할 수 있도록 설계되었다.

2. Step 2: 선두차량과의 안전거리 확보

제어되는 대상차량은 우선적으로 선두차량과의 충돌이 발생되지 않아야한다. 이때 필요한 선두차

량과의 최소 안전거리 $d_{front}^{min.safe}$ 는 (4)와 같이 산정된다.

$$d_{front}^{min.safe dist.} = \frac{V_{sub}^2}{2a_{sub}^{brake}} - \frac{V_{front}^2}{2a_{front}^{brake}} + V_{sub} \cdot t_r^{front} + d_{ci} \tag{4}$$

여기서 V_{sub} 과 V_{front} 는 대상차량과 선두차량의 실시간 속도를 의미하며, a_{sub}^{brake} 과 a_{front}^{brake} 는 급정지 상황을 반영하는 감속도 상수이다. t_r^{front} 와 d_{ci} 는 시간지연과 허용차간거리(clearance gap)이다. 본 연구에서 감속은 일반적인 마른 노면에서 수행되어진다 고 가정하였다. 이러한 변수의 상수값은 Constant Time Gap policy를 만족하는 수준으로 설정되었다.

$$x_{front} - x_{sub} - l_{front} > d_{front}^{min.safe dist.} \tag{5}$$

알고리즘 상 이 단계에서 만약 대상차량이 제약식 (5)와 같이 선두차량과의 안전거리가 확보된다면 등속도를 유지하면서 다음 단계로 넘어간다. 반면에 확보되지 못한 경우에는 충돌가능 성이 높다고 판단되어 감속 제어가 수행된다.

3. Step 3: 목표차로의 안정성 확인

대상차량이 안전한 차로변경을 수행하기 위해서는 목표차로의 안정성이 확보되어야한다. 이를 확인하기 위한 제약식은 (6)과 같다.

$$V_{lag} \leq V_{lead} + V_{th}^{stability} \tag{6}$$

여기서 V_{lag} 와 V_{lead} 는 lag차량과 lead차량의 실시간 속도를 의미한다. $V_{th}^{stability}$ 는 default parameters의 하나로 lag차량이 빠르게 주행하여도 안전성을 반영할 수 있는 수준의 보상 한계(threshold)속도차이다.

알고리즘 상 이 단계에서는 lag차량이 한계속도 안에서 lead차량보다 느리면 즉, (6)을 만족하면, 목표차로는 차로변경하기에 충분히 안정하다고 간주되고 다음 단계로 넘어간다. 반면에 (6)이 위배되는 경우에는 목표차로가 불안정하다고 판단되어 대상차량은 현재 상태를 유지하면서 주변차량을 재 정의한다.

4. Step 4: 목표차로에 적응성 확인

이 단계는 목표차로와 적응 가능한 대상차량의 주행상태 여부를 확인한다. 이를 적응성이라고 표현하였으며, 이를 확인하기 위한 제약식은 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} V_{sub} &\geq V_{lag} - V_{th}^{adaptability} \quad \text{and} \\ V_{sub} &\leq V_{lead} + V_{th}^{adaptability} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $V_{th}^{adaptability}$ 또한 default parameters의 하나로 대상차량이 lead차량보다 빠르게, lag차량보다 느리게 주행하여도 안전성을 반영할 수 있는 수준의 보상 한계(threshold)속도차이다.

알고리즘 상 이 단계에서는 대상 차량이 한계속도 안에서 lead차량보다 느리고, lag 차량보다 빠르면 즉, (7)을 만족하면, 목표차로에 적응 가능하다고 간주되고 다음 단계로 넘어간다. 반면에 (7)을 위배되는 경우에는 바로 적용할 수 없는 주행상태로 판단되어 대상차량은 종방향 가감속을 수행하며 차로변경 수행 이전까지 목표차로와 비슷한 수준의 주행상태를 확보한다.

5. Step 5: 실시간 차로변경 허용간격 확인

이전의 단계까지를 만족하면 대상차량의 주행상태는 주변차량과 비슷한 수준으로 어느 정도 차로변경을 위한 준비가 된 상태이다. 그러나 아직 lead와 lag차량 사이에 적절한 차로변경 허용간격(acceptable gap) 길이가 보장되었는지는 알 수 없다. 그리하여 이 단계에서는 그 길이 확보 여부를 제약식 (8)을 통해 실시간으로 확인한다. 이 제약식은 대상차량과 lead, lag차량 사이의 임계안전 길이 d_{lag} , d_{sub} 를 반영하였다.

$$x_{lead} - x_{lag} - l_{lead} \geq d_{lag} + d_{sub} + l_{sub} \quad (8)$$

여기서 l_{lead} 와 l_{sub} 은 대상차량과 lead차량의 전장을 표현하며, lead와 lag차량과의 임계안전거리는 다음 (9)와 (10)과 같이 각각 계산된다.

$$d_{lag} = \frac{(V_{lag})^2}{2a_{cap}} - \frac{(V_{sub})^2}{2a_{cap}} + V_{lag} \cdot t_r^{lag} + d_{cl} \quad (9)$$

$$d_{sub} = \frac{(V_{sub})^2}{2a_{cap}} - \frac{(V_{lead})^2}{2a_{cap}} + V_{sub} \cdot t_r^{sub} + d_{cl} \quad (10)$$

여기서 a_{cap} 은 차량의 감속 성능을 나타내며, t_r^{lag} , t_r^{sub} , d_{cl} 는 식(4)의 변수와 동일한 의미를 갖는다.

알고리즘 상 이 단계에는 (8)의 좌변 즉, <그림 2>의 Total gap 길이가 각각의 임계안전 길이를 만족하여 충분히 대상차량이 수용될만한 공간이 확보되었다고 판단되면 다음 단계로 넘어간다. 반면에 그 공간이 미 확보되면 대상차량은 종방향 감속을 수행하면서 다시 step 1으로 돌아가 주변차량을 재정렬하고 새로운 차로변경 허용간격을 확인한다.

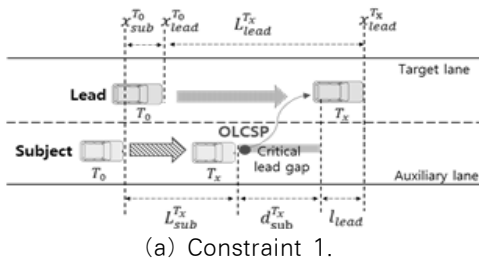
이 단계는 단순히 허용간격의 길이 확보 여부를 확인하는 단계이며, 대상차량이 최적의 차로변경을 위한 위치에 있는지의 여부는 알 수 없다. 즉, 대상차량이 허용될 수 있는 공간이 lag, lead차량 사이에 존재하여도 이 차량들 중 어떤 하나에 치우쳐 근접한 상황에서의 차로변경은 본선의 간섭과 충돌을 유발한다. 이를 방지하기 위해 lag차량과 근접한 경우에는 약간의 가속, lead차량과 근접한 경우에는 약간의 감속이 요구되고 이를 위한 가감속을 결정하는 변수 J 부호는 다음 (11), (12)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{If } x_{sub} - x_{lag} - \frac{1}{2}(x_{lead} - x_{lag} - d_{sub} - d_{lag}) \leq 0, \\ \text{then } +J \text{ 적용} \end{aligned} \quad (11)$$

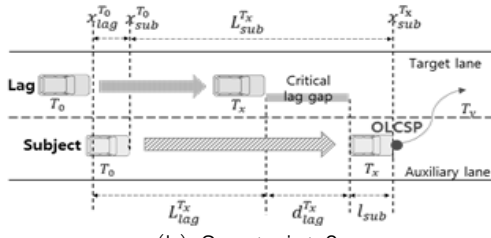
$$\begin{aligned} \text{If } x_{sub} - x_{lag} - \frac{1}{2}(x_{lead} - x_{lag} - d_{sub} - d_{lag}) > 0, \\ \text{then } -J \text{ 적용} \end{aligned} \quad (12)$$

6. Step 6: 예측 도달시간의 OLCSP 생성

이 단계에서는 예측 LCSP 도달시간 T_x 이내에 OLCSP에 도달하는 종방향 가감속량을 결정한다. 여기서 T_x 는 기본 설정값이며, OLCSP는 <그림 7>과 같이 두 가지 제약조건으로 정의된다.



(a) Constraint 1.



(b) Constraint 2.

<그림 7> OLCSP를 생성하기 위한 두 가지 제약조건
<FIG 7> Two constrains for generating OLCSP
in step 6

제약조건 1은 대상차량이 T_0 부터 예측 도달시간 T_x 이내에 lead차량과의 임계안전거리(critical lead gap)을 확보하는 조건을 의미한다. 그리고 제약조건 II는 같은 시간 이내에 lag차량과의 임계안전거리(critical lag gap)을 확보하는 조건을 의미한다. OLCSP는 이 제약조건들을 교집합 관계로 동시에 만족하는 최소한의 J 가 적용되는 시간 t 로 정의된다. 제약조건 I는 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{lead}^{T_0} - x_{sub}^{T_0} + L_{lead}^{T_x} \geq L_{sub}^{T_x} + d_{sub}^{T_x} + l_{lead} \quad (13)$$

여기서 $L_{sub}^{T_x}$ 은 LCSP에 도달하기 위해 요구되는 시간 T_x 까지의 종방향 주행거리를 의미한다. 이는 식 (14)와 같이 추정될 수 있다.

$$L_{sub}^{T_x} = x_{sub}^{T_x} - x_{sub}^{T_0} = \int_{T_0}^{T_x} V_{sub}^{T_0} + \int_{T_0}^{T_x} (V_{sub}^{T_0} - V_{sub}^{T_0}) \approx S_{ADECA} + S_{ACBA} \quad (14)$$

여기서 S_{ACBA} 는 <그림 5> (c)의 속도 그래프에 표현한 삼각형 ACB의 넓이를 의미한다. (14)는 (2)를 적용하여 (15)와 같이 대체할 수 있다.

$$L_{sub}^{T_x} = V_{sub}^{T_0} \cdot T_x + \frac{1}{2} \cdot T_x \cdot J \cdot t \cdot (T_x - t) \quad (15)$$

또한 시간 T_x 까지의 lead차량의 종방향 주행거리 $L_{lead}^{T_x}$ 는 (16)과 같다.

$$L_{lead}^{T_x} = V_{lead}^{T_0} \cdot T_x + \frac{1}{2} \cdot a_{lead}^{T_0} \cdot (T_x)^2 \quad (16)$$

대상차량이 T_x 에서 차로변경시 확보되어야 하는 예상 critical lead gap $d_{sub}^{T_x}$ 은 (17)과 같이 산정된다.

$$d_{sub}^{T_x} = \frac{(V_{sub}^{T_x})^2}{2a_{cap}} - \frac{(V_{lead}^{T_x})^2}{2a_{cap}} + V_{sub}^{T_x} \cdot t_r^{sub} + d_{cl} \quad (17)$$

여기서 $V_{lead}^{T_x} = V_{lead}^{T_0} + a_{lead}^{T_0} \cdot T_x$

$$V_{sub}^{T_x} = J \cdot t \cdot (T_x - t) + V_{sub}^{T_0}$$

최종적으로 이 (15)~(17)를 (13)에 대입하고 t 로 정리하면 (18)과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$A \cdot t^4 + B \cdot t^3 + C \cdot t^2 + D \cdot t^1 + E \cdot t^0 \geq 0 \quad (18)$$

여기서

$$\begin{aligned} A &= -J^2 \\ B &= 2 \cdot J^2 \cdot T_x \\ C &= -J^2 \cdot T_x^2 + 2 \cdot J \cdot V_{sub}^{T_0} + 2 \cdot a_{cap} \left(\frac{1}{2} T_x \cdot J + J \cdot t_r^{sub} \right) \\ D &= -2 \cdot J \cdot T_x \cdot V_{sub}^{T_0} - 2 \cdot a_{cap} \left(\frac{1}{2} T_x^2 \cdot J + J \cdot T_x \cdot t_r^{sub} \right) \\ E &= 2 \cdot a_{cap} (x_{lead}^{T_0} - x_{sub}^{T_0} + V_{lead}^{T_0} \cdot T_x - V_{sub}^{T_0} \cdot T_x - V_{sub}^{T_0} \cdot t_r^{sub} - d_{cl} - l_{lead}) - (V_{sub}^{T_0})^2 + (V_{lead}^{T_0})^2 \end{aligned}$$

제약조건 II는 (19)와 같이 표현된다.

$$x_{sub}^{T_0} - x_{lag}^{T_0} + L_{sub}^{T_x} \geq L_{lag}^{T_x} + d_{lag}^{T_x} + l_{sub} \quad (19)$$

여기서 $L_{sub}^{T_x}$ 는 제약조건 I의 (15)와 동일하며 시간 T_x 까지의 lag차량의 종방향 주행거리는 (20)과 같다.

$$L_{lag}^{T_x} = V_{lag}^{T_0} \cdot T_x + \frac{1}{2} \cdot a_{lag}^{T_0} \cdot T_x^2 \quad (20)$$

대상차량이 T_x 에서 차로변경시 확보되어야 하는 예상 critical lag gap $d_{lag}^{T_x}$ 은 (21)과 같이 산정된다.

$$d_{sub}^{T_x} = \frac{V_{lag}^{T_x}}{2a_{cap}} - \frac{V_{sub}^{T_x}}{2a_{cap}} + V_{lag}^{T_x} \cdot t_r^{lag} + d_{cl} \quad (21)$$

여기서 $V_{lag}^{T_x} = V_{lag}^{T_0} + a_{lag}^{T_0} \cdot T_x$
 $V_{sub}^{T_x} = J \cdot t \cdot (T_x - t) + V_{sub}^{T_0}$

최종적으로 이 (15), (20), (21)을 (19)에 대입하고 t로 정리하면 (22)과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$A' \cdot t^4 + B' \cdot t^3 + C' \cdot t^2 + D' \cdot t + E' \cdot t^0 \geq 0 \quad (22)$$

여기서

$$A' = J^2$$

$$B' = -2 \cdot J^2 \cdot T_x$$

$$C' = J^2 \cdot T_x^2 - 2 \cdot J \cdot V_{sub}^{T_0} - a_{cap} \cdot T_x \cdot J$$

$$D' = 2 \cdot J \cdot T_x \cdot V_{sub}^{T_0} + a_{cap} \cdot T_x^2 \cdot J$$

$$E' = 2 \cdot a_{cap} (x_{sub}^{T_0} - x_{lag}^{T_0} + V_{sub}^{T_0} \cdot T_x - V_{lag}^{T_0} \cdot T_x - V_{lag}^{T_0} \cdot t_r^{lag} - d_{cl} - l_{sub}) - (V_{lag}^{T_0})^2 + (V_{sub}^{T_0})^2$$

정리하자면 제약조건 I, II의 최종식 (18)과 (22)를 동시에 만족하는(교집합) 0보다 큰 t의 최소값이 최종적으로 산출되는 변수이며, 그 값을 통해 OLCSP

가 결정된다. 그리고 이 알고리즘에 적용된 모든 수식의 변수들은 default parameter로 그 값들은 2 장 차로변경 행태분석에서 분석한 결과를 기반으로 <표 2>와 같이 설정되었다. 또한 critical lag, lead gap은 최소정지 거리 개념을 도입하여 차로변경 직후에 앞차가 급정지 하더라도 상충이 일어나지 않는 수준의 길이로 설계되었으며, 이 값은 차로변경 시 대상차량과 lag, lead차량과 약 0.8초의 차두시간

<표 2> default parameter 설정값
 <Table 2> Default Parameter Values

Category	Application	Default parameter and the value				
Initial	Initial setting	initial T_x	T_y	J	W	
		4 s	2 s	± 0.75 m/s ³	3.5 m	
Step 2	Safety distance	a_{sub}^{brake}	a_{front}^{brake}	t_{front}	d_{cl}	
		4 m/s ²	7 m/s ²	0.5 s	1.5 m	
Steps 3 & 4	Velocity threshold	$V_{stability_{th}}$		$V_{adaptability_{th}}$		
		3 m/s		3 m/s		
Step 5	Critical lag & lead gap	$l_{sub} \& \text{lead}$	a_{cap}	t_r^{lag}	t_r^{sub}	d_{cl}
		4 m	7 m/s ²	1 s	0.5 s	1.5 m
Step 6	Boundary condition	$-3 \leq V_{sub}^{T_x} - V_{sub}^{T_0} \leq 3$ m/s			$0 \leq t \leq \frac{T_x}{2}$	
Iteration	Initial setting	P_i			#i	
		0.1 s			40 times	

<표 3> 다양한 주행상황을 반영한 시나리오 설정과 그 분석 결과

<Table 3> Scenarios Set-up by Various Driving Conditions and Results

Scenarios									
Initial set-up	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{lag}^{T_0}$ (km/h)		70			65			75	
$V_{sub}^{T_0}$ (km/h)		70			70			70	
$V_{lead}^{T_0}$ (km/h)		70			75			65	
Relative_distance_Lead : $x_{lead} - x_{lag}$ (m)				60					
Relative_distance_Sub : $x_{sub} - x_{lag}$ (m)	15	35	55	15	34	55	15	36	55
Parameter determinations									
Critical gap : $d_{lag} + d_{sub} + l_{sub}$ (m)		36.2			28.0			44.3	
J determinant Eq. (m)		34.9			34.3			35.7	
J (m/s ³)	+ 0.75	- 0.75	- 0.75	+ 0.75	+ 0.75	- 0.75	+ 0.75	- 0.75	- 0.75
Results									
Constraint 1 (t range)	0.95 ~ 3.04	-0.67 ~ 4.67	$-\infty \sim \infty$	-0.02 ~ 4.02	-1.19 ~ 5.19	$-\infty \sim \infty$	-	0 ~ 0.05	-
Constraint 2 (t range)	-8.81 ~ 12.85	-8.58 ~ 0.81	0.92 ~ 3.07	-8.91 ~ 12.95	-8.70 ~ 12.74	0.08 ~ 3.92	-	0 ~ 16.77	-
Shortest t (s)	0.953	0	0.923	0	0	0.081	-	0.	-
$V_{sub}^{T_x}$ (km/h)	77.84	70	62.33	70	70	69.14	70	70	70
Next process for i	Accel.	Maintain	Decel.		Maintain		No i	Maintain	No i

(headway or constant time gap)을 갖는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 초기(Initial) T_x 를 4초로 설정하였으며, 이는 2 장으로부터 차로변경시점에 도달하기까지 130m 정도 걸리는 점을 반영한 수치이다. 이보다 빠르게 OLCSP에 도달하기 위해서는 이 값을 짧게 기본 설정하면 가능하지만 그만큼을 보상하는 가속도는 크게 산정된다. 또한 lead와 lag차량은 T_0 에서 T_x 까지 가속도 변화 없이 T_0 시의 속도를 유지한다고 가정하였다. 즉, (17)과 (21)의 $a_{lead}^{T_0}$ 와 $a_{lag}^{T_0}$ 는 0으로 간주된다. 이는 이전 step 5까지의 절차를 거쳐 이미 그 차량들이 안정성과 적응성 제약조건을 만족하였기 때문에 정속 주행상태로 간주할 수 있기 때문이다. 또한 이 알고리즘은 단계마다 iteration이 첫 단계부터 수행되기 때문에 만약 이 차량들이 목표차로의 안정성과 적응성을 위배하는 가감속을 가지면, 이를 만족하는 상태에 도달하는 제어가 이루어진 후에 OLCSP를 생성하게 된다. 이러한 현상은 대상차량이 목표차로의 차량을 앞지르거나 뒤처지며 차로변경이 가능한 공간을 찾는 현상으로 반영된다. 본 연구의 OLCSP에 도달하기 위한 자동제어iteration interval P_i 는 0.1초로 설정하였고, step 6의 iteration 횟수 #는 T_x/P_i 와 같이 정의 된다. 그리하여 매 iteration 계산에 사용되는 T_x 는 (23)과 같이 수정된다.

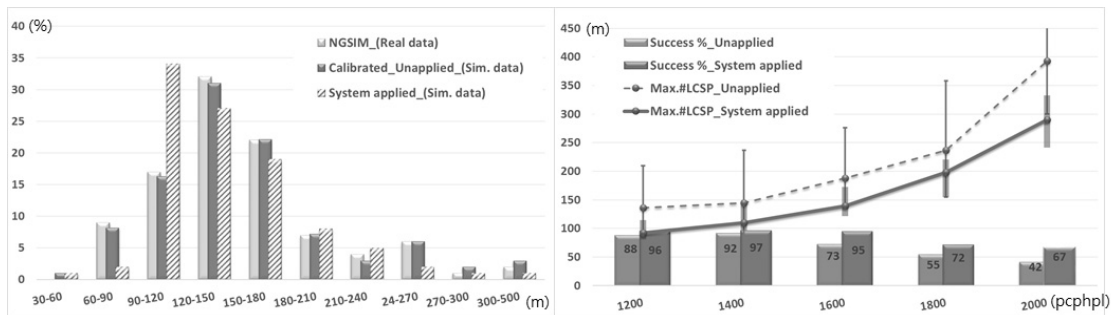
$$T_x = initial T_x - P_i \cdot \text{반복단계} \tag{23}$$

IV. 알고리즘 수행 결과

1. 시나리오 시험

본 절에서는 알고리즘 성능을 검증하기 위해 다양한 주행상황 시나리오에 따른 t 의 관계를 수치적으로 시험하였다. 초기 주행상황의 시나리오를 아홉 가지로 설정하였으며, 이는 step 5까지 만족하는 수준에서 이상적, 비이상적 상황을 모두 반영한다. 시나리오 설정과 시험 결과는 <표 3>에 정리하였다.

우선 목표차로의 lead와 lag차량 사이의 간격은 60m 즉, 약 3초의 차두시간(headway)을 갖도록 설정하였고 이는 적절한 안정류 상태를 반영한 수치이다. 대상차량과 lead, lag차량과 근접한 정도와 각각의 초기 주행속도는 다양하게 설정되었다. 시나리오 2, 5, 8은 (11)과 (12)의 계산으로 초기에 대상차량이 OLCSP에 위치하도록 설정하였고, 시나리오 1, 4, 7은 lag차량과, 시나리오 3, 6, 9는 lead차량과 근접하게 설정하였다. 또한 시나리오 1, 2, 3은 모든 차량이 70kph로 등속하는 상황으로 설정되었으며, 시나리오 4, 5, 6은 대상차량과 5kph 속도차이를 가지고 lag차량이 느리게, lead차량이 빠르게 주행하는 상황으로 Total gap이 점점 길어지는 현상을 반영하



(a) 안정류 상태에서의 LCSP 분포 비교
 <그림 8> VISSIM을 통한 알고리즘 적용 전 후 시뮬레이션 결과 비교
 <FIG 8> Results of before and after comparison experiment by microscopic simulation. (a) Results of the calibration and LCSP distribution according to system application in steady traffic flow state.(b) Success rates, maximum number of LCSP and the 85th percentile distributions in various traffic conditions.

여 설정하였다. 반면에 시나리오 7, 8, 9는 이와 반대로 설정하여 Total gap이 점점 좁아지는 상황을 반영한다.

시나리오 1, 3 결과를 통해 대상차량의 가감속 제어는 lag와 lead차량과의 상대거리와 강한 상관관계를 갖는 것을 확인하였다. 시나리오 1은 OLCSP에 도달하기 위한 t 는 0.953초로 산출되었고 그만큼 가속되어 T_x 에서 77.84kph로 증가하였다. 시나리오 3은 t 가 0.923초로 산출되어 그만큼 감속하여 T_x 에서 62.33kph로 감소하였다. 비록 T_0 에서 T_x 사이의 속도의 차이는 OLCSP에 도달하기 위해 7.84kph, -7.67 kph가 생기지만, 알고리즘 step 4 목표차로의 적응성을 충분히 만족할 수 있는 수준이다. 시나리오 2, 5, 8는 T_0 에서 이미 OLCSP에 위치하므로 t 는 0으로 등속하는 형태를 잘 반영도록 산정되었다. 특히, 시나리오 8은 Total gap이 점점 좁아짐에도 불구하고 T_x 에서 허용간격이 확보되어 t 가 0으로 도출될 수 있었다. 시나리오 4, 6에서 t 는 거의 0에 가까운 값으로 도출되었다. 이는 초기에 대상차량이 lag 또는 lead차량에 근접하였음에도 불구하고 Total gap이 점점 길어져 가감속 없이도 T_x 에서 OLCSP에 잘 도달하는 상황을 의미한다. 반면에 시나리오 7, 9에서는 실수의 t 값을 도출하지 못하였으며, 이는 Total gap이 점점 좁아져 T_x 에 OLCSP를 산정하지 못함을 의미한다. 이와 같은 경우에는 step 6가 반복 수행될 수 없고 알고리즘 처음 단계부터 다시 수행되어 다른 lead와 lag차량으로부터 OLCSP를 산정하게 된다. 이 시험의 결과로부터 개발한 알고리즘의 일관성과 타당성이 확보되었음을 검증하였다.

2. 미시적 교통류 시뮬레이션 적용 결과

개발된 알고리즘의 타당성과 효과를 확인하기 위하여 PTV사에서 개발한 미시적 교통류 시뮬레이션 VISSIM 5.3을 이용하여 적용하였다. 알고리즘을 적용하기 이전에 2장에서 분석한 교통상황과 유사한 상태를 구현하기 위해 정산(calibration)하였다. 차로당 입력 교통량(volum)은 본선차로에 1480pcphpl, 보

조차로에서 1210pcphpl로 현실과 같게 설정하였고, 제한속도는 각각 90kph, 80kph로 설정하였다. 차로별 교통류율, 차로변경을 통한 각 차로의 O-D (origin- destination), 주행 속도를 효과적도(MOE)로 설정하였고, NGISIM 분석 결과를 기준(reference)로 driving behavior parameters인 Look ahead distance (max), Number of observed preceding vehicle, Aver. Standstill distance, Additive part of safety distance, Multiplic part of safety distance, Wating time before diffusion, Safety distance reduction factor (Reduction rate)를 정산변수로 하여 유전자 알고리즘 (Genetic Algorithm)으로 산정한 최적해를 적용하여 정산하였다. 이때의 모든 차량들은 VISSIM에 기본으로 적용된 Sparmann 차로변경 모형에 의해 동작한다. 각각의 기준에 따른 정산 결과는 2.3, 5.7, 3.6 RMSPE (Root Mean Square Percent Error)로 도출되었고, <그림 8(a)>와 같이 시뮬레이션의 LCSP 분포는 실제 (NGSIM) 분석 결과와 거의 동일한 것을 확인할 수 있다.

정산된 시뮬레이션 환경을 기반으로 본 연구에서 개발한 알고리즘을 C# VISSIM 5.3 Com-interface로 구현하여 합류하는 모든 차량에 적용하였다. 대기행렬에서의 정지 혹은 저속의 차로변경은 이 알고리즘을 통해 구현되기 어려우므로 이와 같은 강제적 합류상황에서는 default Sparmann 모델을 적용하였다. 그 결과 알고리즘이 적용되었을 때의 최대 LCSP비율은 <그림 8(a)>의 사선 bar와 같이 적용되지 않았을 경우보다 30m 이전(보조차로의 90~120m)에 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

다양한 교통상황에서 알고리즘 효과를 확인하기 위해 위 시뮬레이션 환경을 기준으로 본선차로의 입력교통량을 1200에서 2000pcphpl까지 200pcphpl로 증가시켜 분석하였다. 각각의 시나리오는 random seed로 30번씩 한 시간으로 수행되었다. 그리고 현실적인 다양한 차량의 속도분포와 차간거리를 생성하기 위해 차량투입의 주기는 stochastic distribution으로 설정하였다. 각 입력교통량 시나리오에 따른 알고리즘 적용 전, 후 비교 결과는 <그림 8(b)>와 같다. 종점에서 대기하지 않고 차로변경을 수행하

는 비율을 성공률(success %)이라고 정의하였고, 85 percentile 이상의 LCSP 분포구간과 LCSP 최대지점(max.#LCSP)분석결과를 그래프로 나타내었다. 그 결과 알고리즘을 적용한 경우, 모든 시나리오에서 성공률은 더 향상되었으며, 특히 입력교통량이 1600pcphpl 이상의 시나리오들에서 성공률이 22% 이상으로 향상되는 것을 확인하였다. 또한 모든 시나리오에서 max.#LCSP가 평균적으로 약 50m 이전에 형성되고, 그 분포 길이가 현저하게 좁아지는 것을 확인할 수 있었다. 특히 2000pcphpl 경우에는 알고리즘을 적용한 경우 LCSP가 93m 일찍, 그 분포가 73m 가량 더 짧게 형성되어 알고리즘 적용 이전보다 일관적이고 최적의 차로변경 상황을 구현하는 것을 확인하였다.

V. 결 론

본 연구에서 우리는 ALCAS 연구 중 종방향 제어 부분에 초점을 두어 고속도로 합류구간의 차로변경 행태를 분석하였고, 실제 차량의 가속도 함수 형태를 통해 차로변경 특징모형(Lane Change Feature Model)을 설계하였다. 그리고 차로변경 수행 단계를 정립하였으며, 이를 기반으로 최적 차로변경 시작지점(OLCSP)을 생성하고 그 지점까지 도달하는 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘 성능과 타당성을 검증하기 위하여 다양한 주변차량 주행환경에 따른 시나리오 시험이 수행되었다. 그리고 개발된 알고리즘의 효과를 미시적 교통류 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 개발한 알고리즘을 합류차량에 적용한 결과 안정류 상태에서 합류성능이 두드러지게 개선되는 것을 확인하였다. 이 자동제어 시스템은 본 연구는 교통 자동차 분야 융합기술의 일환으로 개발되었으며, 운전자의 부하와 오류를 감소시켜 효율성과 안전성을 향상시킬 뿐만 아니라 교통류의 안정성, 임계용량, 주행 효율성의 증대로 사회비용 감소를 기대할 수 있다.

본 시스템의 성능을 보다 극대화하기 위해서는 다음과 같은 추가적인 연구가 필요하다. 우선 더 다양한 구간과 교통, 주행 상황에 따른 차로변경 행태

분석을 면밀하게 수행하여 각 상황에 적절한 default parameters의 설정값 및 안전거리 기준 등 tuning을 통해 시스템의 성능을 개선할 필요가 있다. 그리고 빠른 응답성과 효과적인 제어를 위해 공간 domain상 상태공간방정식으로 재구성할 필요가 있다. 본 연구는 이를 위한 초기단계로 시간 domain상 가속도 reference 설계에 초점이 맞춰져있다. 본 연구에서는 차로변경 이전에 종방향 제어에 국한되어 개발되었으나, 추후 차량동역학기반 횡방향 제어방식을 추가할 필요가 있다. 또한 OLCSP 생성, 제어량, 제어시간 등 다양한 결정변수는 교통류 충격과 오실레이션을 고려하여 수정되면 보다 효과적인 성능을 확보할 수 있을 것이다. 가까운 미래의 완전한 (fully) 자동제어 시대 구현을 위해서는 강제적 차로변경 자동제어 연구 또한 필요하다. 본 시스템의 성능을 확보하고 상용화를 위해서는 HIL (Hardware-In-Loop) 시뮬레이션과 실차 시험을 통한 검증이 이루어져야 할 것이다.

REFERENCES

- [1] Wang, X., T. Miyagi and J. Ying. "A Simulation Model for Traffic Behavior at Merging 35 Sections in Highways", *Proceedings of the Second International Conference on Innovative 36 Computing, Information and Control*, pp.30-43, 2007.
- [2] Rajesh Rajamani, "Vehicle Dynamics and Control", Springer Verlag, second edition, ISBN 978-1461414322, 2012.
- [3] Huang, S., Ren, W. and Chan, S.C. "Design and performance evaluation of mixed manual and automated control traffic." *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A, Syst., Humans*, vol. 30, no. 6, pp.661-673, 2000.
- [4] Schmitt, K. and Isermann, R. "Vehicle state estimation in curved road coordinates for a driver assistance system for overtaking situations", *Proceedings of 21st IAVSD Symposium*, Stockholm, 2009.

- [5] Shladover, Steven E., "Dependence of Cooperative Vehicle System Performance on Market Penetration". In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2000, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp.121 - 127, 2007.
- [6] Jung-Hoon Song, "Design of u-Transportation Communication Systems for Next-Generation ITS Services", *Journal of KITS*, vol. 5, no. 12, pp.61-72, 2013.
- [7] Halati, A., H. Lieu, and S. Walker. "CORSIM - Corridor Traffic Simulation Model", *Proc., Conference on Traffic Congestion and Traffic Safety in the 21st Century*, pp.570 - 576, 1997.
- [8] Yang, Q., and H. N. Koutsopoulos. "A Microscopic Traffic Simulator for Evaluation of Dynamic Traffic Management Systems", *Transportation Research C*, vol. 4, pp.113 - 129, 1996.
- [9] Hidas, P., and K. Behbahanizadeh. "Microscopic Simulation of Lane Changing Under Incident Conditions", *Proc., 14th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation*, pp.53 - 69, 1999.
- [10] Zhang, Y. "Multiregime Approach for Microscopic Traffic Simulation", *Transportation Research Record 1644*, TRB, *National Research Council*, Washington, D.C., pp. 103 - 115, 1998.
- [11] T. Vu, R. Roess "Simulation of a weaving section", *Transportation Research Board 2007 Annual Meeting CD-ROM*, 2007.
- [12] Gipps, P. G. "A Model for the Structure of Lane Changing Decisions", *Transportation Research B*, vol. 20, pp.403 - 414, 1986.
- [13] Ahmed K. I., "Models of Freeway Lane Changing and Gap Acceptance Behavior", *Proc., 13th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation*, pp.501 - 515, 1996.
- [14] Ahmed, K. I. "Modeling Drivers' Acceleration and Lane Changing Behavior", Ph.D. dissertation. Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1999.
- [15] A. Skabardonis, "Estimating and Validating Models of Microscopic Driver Behavior with Video Data", Technical report, California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), 2005.
- [16] A. Kesting, "General Lane-Changing Model MOBIL for Car-Following Models", *Transportation Research Record 1999*, pp.86 - 94, 2007.
- [17] Sun, D. and A. Kondyli. "Modeling Vehicle Interactions During Lane-Changing Behavior on Arterial Streets", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 25, no. 8, pp.557-571, 2010.
- [18] V. Goswami and G. H. Bham, "Gap Acceptance Behavior in Mandatory Lane Changes under Congested and Uncongested Traffic on a Multi-lane Freeway", *Transportation Research Board 2007 Annual Meeting CD-ROM*, 2007.
- [19] Schakel, W.J. "An Integrated Lane Change Model with 27 Relaxation and Synchronization", *Transportation Research Board 2012 Annual Meeting*. Washionton. D. C. 2012.
- [20] Vahidi, A. and Eskandarian, A. "Research advances in intelligent collision avoidance and adaptive cruise control", *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 4, no. 3, pp.143-153, 2003.
- [21] US Department of Transportation, NGSIM - Next Generation Simulation, <http://www.ngsim.fhwa.dot.gov> - Access date, 2007.

저자소개



김진수 (Kim, Jin-Soo)

2013년 9월 ~ 현재 : 한양대학교 융합기계공학 박사과정
2012년 8월 ~ 현재 : 한양대학교 기계기술연구소 전문연구원
2011년 9월 ~ 2013년 8월 : Hanyang University, Master of Engineering
2007년 3월 ~ 2011년 8월 : Hanyang University, Bachelor of Engineering
e-mail : 84wlsm@gmail.com



정진한 (Jeong, Jin-han)

2013년 9월 ~ 현재 : 한양대학교 미래자동차공학 박사과정
2011년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 자동차전자제어연구소 전문연구원
2011년 9월 ~ 2013년 8월 : Hanyang University, Master of Engineering
2007년 3월 ~ 2011년 8월 : Yeungnam University, Bachelor of Engineering
e-mail : pegasus815@hanyang.ac.kr



유성현 (You, Sung-hyun)

2015년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 미래자동차공학과 석사과정
2009년 3월 ~ 2015년 2월 : Handong University, Bachelor of Engineering
e-mail : sunghyunyou@naver.com



박장현 (Park, Jahng-Hyon)

1995년 ~ 현재 : 한양대학교 공과대학 미래자동차공학과 교수
1992년 ~ 1994년 : Massachusetts Institute of Technology Ph.D
1985년 ~ 1986년 : Seoul National University, Master of Engineering
1983년 ~ 1985년 : Seoul National University, Bachelor of Engineering
e-mail : jpark@hanyang.ac.kr



장경영 (Jhang-Kyung Young)

1995년 ~ 현재 : 한양대학교 공과대학 기계공학과 교수
1988년 ~ 1991년 : Tokyo Institute of Technology, Doctor of Engineering
1983년 ~ 1985년 : Graduate School of Hanyang University, Master of Engineering
1979년 ~ 1983년 : Hanyang University, Bachelor of Engineering
e-mail : kyjhang@hanyang.ac.kr