

# 전구간 주행 및 충돌회피 제어 알고리즘 설계

문승욱<sup>†</sup> · 이경수<sup>\*</sup>

## Design of a Full-range Adaptive Cruise Control Algorithm with Collision Avoidance

SeungWuk Moon, Kyongsu Yi

**Key Words :** Adaptive Cruise Control (적응순항제어), Collision Avoidance(충돌회피), Warning Index(충돌경보지수), Time-To-Collision(역충돌시간)

### Abstract

This paper describes design and tuning of a full-range Adaptive Cruise Control (ACC) with collision avoidance. The control scheme is designed to control the vehicle so that it would feel natural to the human driver and passengers during normal safe driving situations and to avoid rear-end collision in vehicle following situations. In this study, driving situations are determined using a non-dimensional warning index and time-to-collision (TTC). A confusion matrix method based on natural driving data sets was used to tune control parameters in the proposed ACC System. An ECU-Brake Hardware-in-the-loop Simulation (HiLS) was developed and used for an evaluation of ACC System. The ECU-Brake HiLS results for alternative driving situation are compared to manual driving data measured on actual traffic way. The ACC/CA control logic implemented in an ECU was tested using the ECU-Brake HiLS in a real vehicle environment.

### 기호설명

- $\tau$  : 타임갭, 시상수(s)  
 $c$  : 차간거리(m)  
 $c_0$  : 최소 차간거리(m)  
 $v_s$  : 제어차량 속도(m/s<sup>2</sup>)  
 $v_p$  : 선행차량 속도(m/s<sup>2</sup>)  
 $v_{rel}$  : 상대속도(m/s)

### 1. 서 론

자동차는 현대인의 필수품으로 자리잡았지만 자동차로 인한 사고는 지속적으로 늘어나고 있다. 세계보건기구(WHO)가 발표한 자료에 의하면 2000

년대 자동차 관련사고는 전세계 사망 원인 가운데 9위를 차지했지만, 2010년경에는 그 순위가 3위로 뛰어오를 것으로 전망하고 있다. 이에 대한 대책으로 자동차의 안전성과 편의성을 향상시키기 위하여 고급 운전자 지원 시스템(Advanced Driver Assistant System)과 능동 안전장치(Active Safety)에 대한 관심이 대두되며 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>1)</sup> 센서와 액추에이터 기술의 발달로 인해 고급 운전자 지원시스템과 능동안전 시스템의 요소 기술의 하나인 자동주행 시스템(ACC)과 충돌회피 시스템은 일부 고급 차량에 탑재되어 판매되고 있으며 점차 대중적으로 확산되고 있는 추세이다.

이러한 자동주행 및 충돌회피 시스템은 일반 주행 상황에서 운전자에게 거부감을 주거나 승차감을 저하시키지 않는 범위 내에서 작동해야 하며, 충돌 위험이 있거나 예상되는 경우에는 신속히 대응하여 운전자에게 경고하고 필요한 경우에는 능동적으로 주행 차량의 안전성을

<sup>†</sup> 서울대학교 기계항공공학부  
E-mail : moonriver73@hanmail.net  
TEL : (02)888-7194 FAX : (02)882-0561

<sup>\*</sup> 서울대학교 기계항공공학부

확보해야 한다. 따라서 자동주행 및 충돌회피 제어기를 설계하는 단계부터 운전자의 일반적인 주행 특성이 고려되어야 한다. 다시 말하면 운전자의 상황 인식체계와 유사하게 제어기의 구조를 설계하고 제어인자의 설정도 운전자의 주행 데이터를 기반으로 결정되어야 할 것이다.<sup>6)</sup>

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 2 장에서 운전자의 주행 데이터로부터 운전자의 일반적인 주행특성에 대해 분석하고, 3 장에서 전구간 주행 및 충돌회피 제어 알고리즘에 대하여 설명한다. 그리고 4 장에서는 제안한 제어 알고리즘을 시뮬레이션과 HILS 를 구성하여 성능을 검증하고 5 장에서 결론을 맺는다.

## 2. 운전자 주행특성 분석

### 2.1 운전자 속도-차간거리 특성

운전자 주행 실험 데이터는 Lidar/Radar 센서, CCD Camera, 가속도 센서, 조향각 센서, 브레이크 페달압력 및 ON/OFF 신호, Yaw-Rate 센서 등이 장착된 실험차량을 이용하여 일반주행 상황에 대하여 125 명(남 65 명, 여 60 명)의 주행 데이터를 수집하였다. 또한 -8 (m/s<sup>2</sup>) 정도의 큰 감가속도를 사용하는 급감속 상황에 대한 분석을 위하여 62(EA)의 급감속 주행 데이터를 추가적으로 수집하였다.

우선, 운전자 주행 데이터를 분석하기 위해 정상상태 주행을 정의할 필요가 있다. 정상상태 주행은 선행차량이 일정한 속도로 주행하는 경우, 운전자가 일정한 속도로 추종하여 상대 거리 변화가 작고, 가속도 변화가 작은 상태를 의미한다. 이러한 상태는 식(1)의 TTC<sup>-1</sup> 를 이용해서 정의할 수 있다

$$TTC = \frac{c}{v_s - v_p} \quad (1)$$

선행차량의 속도가 일정할 때 운전자는 대부분 선행차량의 속도를 일정하게 추종한다. 이 때, 운전자의 타임갭은 일정한 값을 유지한다.<sup>2)</sup> 따라서 정상상태 주행은 결국 식(2)의 관계를 만족하는 상황으로 정의한다.

$$|TTC^{-1}| \leq \varepsilon, (\varepsilon = 0.05) \quad (2)$$

이러한 정상상태 주행 데이터로부터 운전자의 속도에 대한 상대거리 관계를 식(3)과 같이 표현

할 수 있다.

$$c = c_0 + \tau \cdot v_p \quad (3)$$

Table.1. Distribution of time-gap in steady-state

Following-Data (125person, 523min)					
Percentile	5%	25%	Mean	75%	95%
Time-gap[s]	0.74	1.07	1.36	1.69	2.27

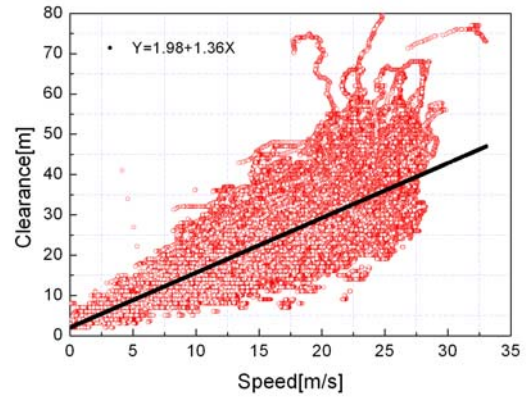


Fig. 1 Steady-state following data collected from 125 driver test and the linear regression

### 2.2 가속도 특성

Fig. 2 는 정상상태 주행 상황을 고속(70km/h 이상), 중속(40~70km/h), 저속(40km/h 이하)으로 분류한 경우의 가속도 분포를 보여주고 있다. 속도-가속도 분포를 통하여 속도가 증가할수록 운전자가 사용하는 가속도의 크기가 작아짐을 확인할 수 있으며 -2(m/s<sup>2</sup>) 이상의 감가속도는 거의 사용하지 않음을 확인할 수 있다.

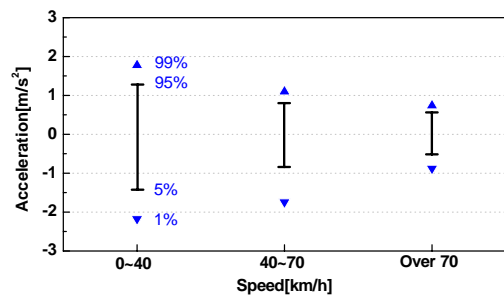


Fig. 2. Acceleration analysis based on speed region in steady-state driving situations

한편, 급감속 상황이 제외된 일반 감속상황에서의 주행 데이터를 살펴보면, 고속에서는 저속에 비하여 상대적으로 작은 감가속도를 사용함을 확인할 수 있다. 또한 Fig.3 에서 보는 바와 같이 일반 감속상황에서 90%의 감가속도가 -0.77(m/s<sup>2</sup>)와 -2.97(m/s<sup>2</sup>)의 범위 내에 분포하고 있다.

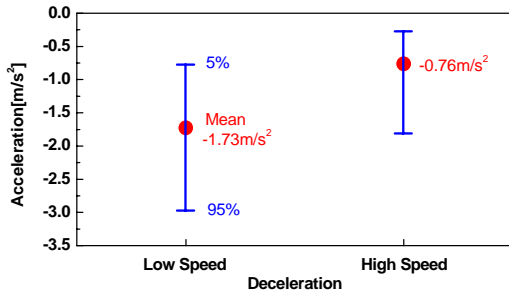


Fig. 3. Acceleration analysis based on speed region in braking decelerations

### 3. 전구간 주행 및 충돌회피 제어기

#### 3.1 제어기의 구조

전구간 주행 및 충돌회피 제어기는 Fig. 4 와 같이 충돌경보지수와 역충돌시간의 두 가지 인덱스를 통하여 주행 상황을 인식하며, 이러한 인덱스 값의 변화에 따라 작동모드를 변경하여 상황에 맞게 자동주행과 충돌회피 기능을 수행하도록 설계하였다.

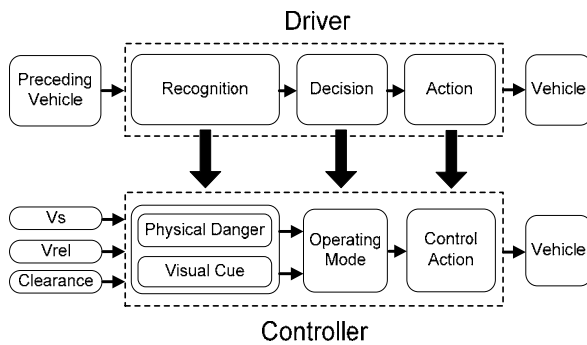


Fig. 4. Scheme of a Full-range ACC with CA

충돌경보지수는 식(4)와 같이 표현되는 물리적인 충돌 위험을 의미하는 무차원수의 인덱스이다.

$$x = \frac{d - d_{br}}{d_w - d_{br}} \quad (4)$$

$$d_w = v_s \cdot T_{delay} + \frac{(2v_s - v_{rel})v_{rel}}{2a_{max}} + v_s \cdot T_{h,min}$$

$$d_{br} = v_s \cdot T_{delay} + \frac{(2v_s - v_{rel})v_{rel}}{2a_{max}}$$

여기서  $d_{br}$  는 최소 정지 거리로 선행 차량과 제어 차량이 최대 감가속도로 감속한다는 가정에서 필요한 정지 거리와 시스템의 시간 지연 동안 이동한 거리를 더한 값이며,  $d_w$  는 최소 안전 거리로 최소 정지 거리에 운전자의 반응 시간 동안 이동한 거리를 더한 값이다.  $T_{delay}$  는 시스템의 작동

시간 지연값이며,  $T_{h,min}$  는 운전자의 최소 타임갭값으로 운전자의 반응 시간 지연값을 의미하며,  $a_{max}$  은 차량의 최대 감가속도를 의미한다.

한편, 역충돌시간은 Fig. 5 에 도식화한 바와 같이 운전자의 시각에 의해 보여지는 선행차량의 크기와 거리를 수치화한 인덱스이다. 만약 운전자와 선행차량 사이에 상대운동이 있다면 차간거리는 변하게 되며 차간거리의 변화율은 운전자의 뷰각(View)과 관계가 있다.

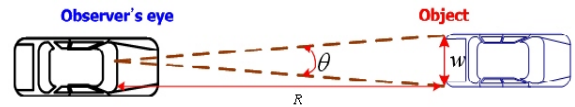


Fig. 5. Illustration of the looming effect

이러한 효과를 Looming-Effect 라고 하며 식(5)와 같이 표현할 수 있다.<sup>3)</sup> 이를 통해 운전자가 인식하는 선행차량까지의 차간거리의 변화율의 관계는 TTC와 동일함을 알 수 있다.

$$w = R \cdot \theta, \quad \frac{dw}{dt} = \dot{R}\theta + R\dot{\theta} \quad (5)$$

$$\frac{\theta}{\dot{\theta}} (\text{looming effect}) = -\frac{R}{\dot{R}} = TTC$$

본 논문에서는 앞에서 언급한 두 인덱스를 충돌회피를 위한 상황판단 인자로 사용하기로 한다. 충돌 가능성이 높은 급감속 주행 데이터를 기반으로 감가속도와 인덱스간의 관계를 분석하면 Fig. 6 과 같이 정리할 수 있으며 두 인덱스가 상황판단 인자로서 타당함을 확인할 수 있다.

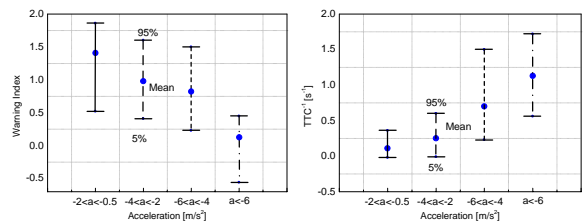


Fig. 6.  $x, TTC^{-1}$  Analysis based on Acceleration Region at Deceleration-State

감가속도가 커질수록 충돌경보지수는 감소하는 경향을 보이며 역충돌시간은 증가하는 경향을 보인다. 따라서 두 가지 인덱스 값의 변화를 통하여 주행 상황의 충돌위험 정도를 판단한다. 이를 기준으로 일반주행에서는 자동주행을 수행하고, 충돌위험이 예상되는 상황에서는 상대적으로 큰 감가속도를 사용하여 충돌을 방지한다.

### 3.2 인덱스 설정

본 논문에서는 충돌경보지수와 역충돌시간이라는 두 가지 인덱스를 통하여 자동주행과 충돌회피 제어를 수행하므로 각 인덱스의 경계값을 설정하는 것이 중요하다.

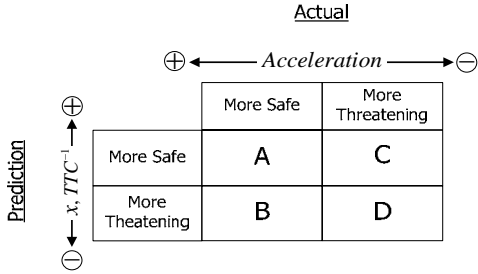


Fig. 7. Formation of Confusion matrix

Confusion 행렬을 이용한 분류방법을 통하여 각 감가속도에 대한 충돌경보지수와 역충돌시간의 경계값을 결정한다. 운전자의 실제 주행 데이터로부터 각 감가속도에 대한 두 인덱스의 경계값을 계산하기 위해 Confusion 행렬을 이용하였다.<sup>7)</sup> Fig. 7은 본 연구에서 사용한 Confusion 행렬의 구성된 형태이며 A, B, C, D는 운전자의 주행 데이터에서 해당영역에 포함되는 샘플 데이터의 개수를 의미한다. Confusion 행렬은 가속도에 의한 분류와 인덱스에 의해 분류된 결과의 유사성을 식(6)과 같은 형태로 수치화하여  $g_{mean1}$  이라고 정의하고, 이 수치가 클수록 두 분류의 결과가 상대적으로 유사함을 의미한다.

$$G(g_{mean1}) = \sqrt{TP \cdot P}$$

$$\left( TP = \frac{D}{C+D}, P = \frac{D}{B+D} \right) \quad (6)$$

TP는 실제 위험상황 중에서 올바르게 예측된 위험상황의 비율을 의미하며 P는 예측한 위험상황 중에서 실제 위험상황의 비율을 의미한다.

특정 감가속도에 대해 운전자 주행 데이터에서 충돌경보지수와 역충돌시간의 모든 범위에 대한  $g_{mean1}$  값을 계산한 후, 식(7)과 같이 계산된 값들 중, 최대  $g_{mean1}$  을 가지는 경우의 충돌경보지수와 역충돌시간을 경계값으로 선정한다.

$$x_{th}(a) = \arg \max_i \{ G_i \} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

$$TTC_{th}^{-1}(a) = \arg \max_i \{ G_i \} \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

본 논문에서는  $-2[m/s^2]$ ,  $-4[m/s^2]$ ,  $-6[m/s^2]$  에 대한 각각의 인덱스 경계값을 이러한 방법으로 계산하였

으며 결과는 Table. 3 과 같다.

Table. 3 Threshold values for x, TTC<sup>-1</sup>

Acceleration	x	TTC <sup>-1</sup>
-2[m/s <sup>2</sup> ]	1.3	0.2
-4[m/s <sup>2</sup> ]	0.9	0.5
-6[m/s <sup>2</sup> ]	0.7	0.7

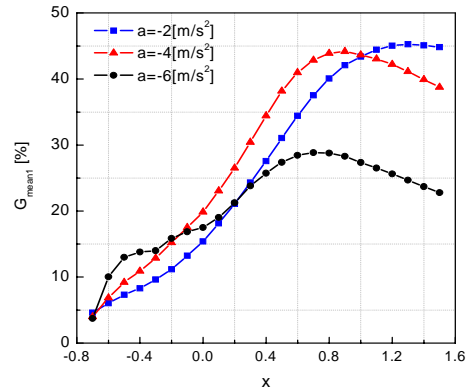


Fig. 8.  $g_{mean1}$  computed for three acceleration

### 3.3 제어기의 작동모드

본 논문에서의 제어기는 충돌경보지수와 역충돌시간의 두 가지 인덱스를 이용하여 현재의 작동모드를 결정하게 되며 이러한 작동모드는 크게 세 가지로 구성하였다. 일반주행 상황과 충돌회피 상황, 그리고 두 경우의 교차상황으로 구성하였으며, Fig. 9에 도식화한 바와 같이 상황에 따라 각각 목표가속도를 결정한다.

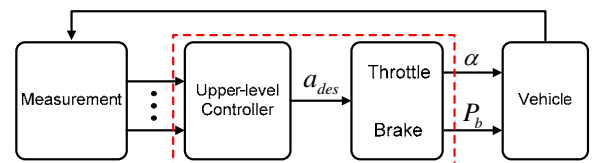


Fig. 9. Structure of ACC Controller with CA

일반주행 상황의 경우, 승차감을 저하시키기 않기 위해 운전자의 주행 특성에 기반하여 계산된 목표가속도를 식(8)과 같이 제한한다.

$$a_{des}(t) = \begin{cases} a_{max}(v_s(t)) & \text{if } a_s > a_{max}(v_s) \\ a_s(t) & \text{if } a_{min}(v_s) \leq a_s \leq a_{max}(v_s) \\ a_{min}(v_s(t)) & \text{if } a_s < a_{min}(v_s) \end{cases} \quad (8)$$

$$a_s(t) = -k_1(v_s(t)) \cdot (c_d(t) - c(t)) - k_2(v_s(t)) \cdot (v_p(t) - v_c(t))$$

그러나 충돌회피 상황에는 승차감보다도 충돌로부터의 안전성에 우선 순위를 두어 큰 감가속도를 사용할 수 있도록 설계하였다. 이런 상황에서는

목표가속도를 식(9)와 같이 제어차량의 속도에 대한 가중치를 적용시킨 충돌경보지수와 역충돌시간으로부터 계산된다. Fig.10 에서 보는 바와 같이  $a_1(\bullet)$ 와  $a_2(\bullet)$ 는 앞 절의 Confusion 행렬을 이용하여 구해진 감가속도와 인덱스간의 관계를 토대로 생성되었으며, 각 인덱스에 대한 함수로 표현된다.

$$a_{des}(t) = W_1(v_s) \cdot a_1(x) + W_1(v_s) \cdot a_2(TTC^{-1}) \quad (9)$$

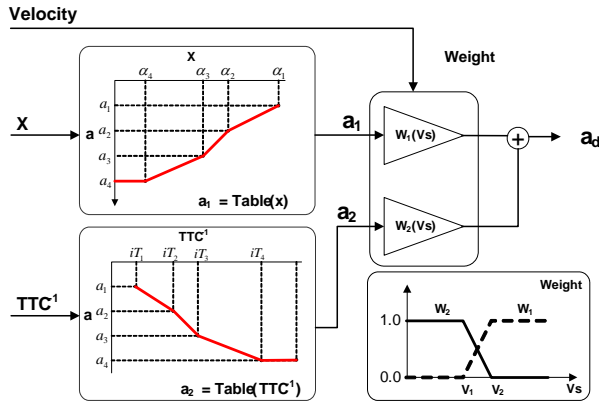


Fig. 10. Design of the desired acceleration in severe braking situations

식(10)은 제어기의 작동모드의 변경시점을 보여주고 있다.  $\alpha_1, \alpha_2, iT_1, iT_2$ 는 작동모드간의 변경시점을 결정하는 경계값을 나타내며, 앞 절에서 Confusion 행렬에 의해 구해진 각각의 감가속도에 대응되는 값으로 설정한다.

$$\begin{aligned} \text{Mode 0} &: x \geq \alpha_1 \text{ or } TTC^{-1} \leq iT_1 \\ &\Rightarrow \text{ACC mode } (a > -2[m/s^2]) \\ \text{Mode 1} &: \alpha_2 < x \leq \alpha_1 \text{ or } iT_1 < TTC^{-1} \leq iT_2 \quad (10) \\ &\Rightarrow \text{ACC+CA mode } (a > -4[m/s^2]) \\ \text{Mode 2} &: x \leq \alpha_2 \text{ or } iT_2 < TTC^{-1} \\ &\Rightarrow \text{CA mode} \end{aligned}$$

#### 4. 시뮬레이션 및 HILS 결과

##### 4.1 시뮬레이션

자동차 주행 및 충돌회피 제어기의 성능을 평가하기 위해 급감속 상황에 대한 제어기의 거동을 살펴보았다. Fig. 11 에서 보는 바와 같이 선행차량이 급감속한 직후, 충돌경보지수가 감소하기 시작하고 역충돌시간도 증가함을 확인할 수 있다. 또한 작동모드가 충돌을 회피하기 위해 모드 2 로 변경

되며 큰 감가속도를 사용하여 제동한다는 것을 확인할 수 있다.

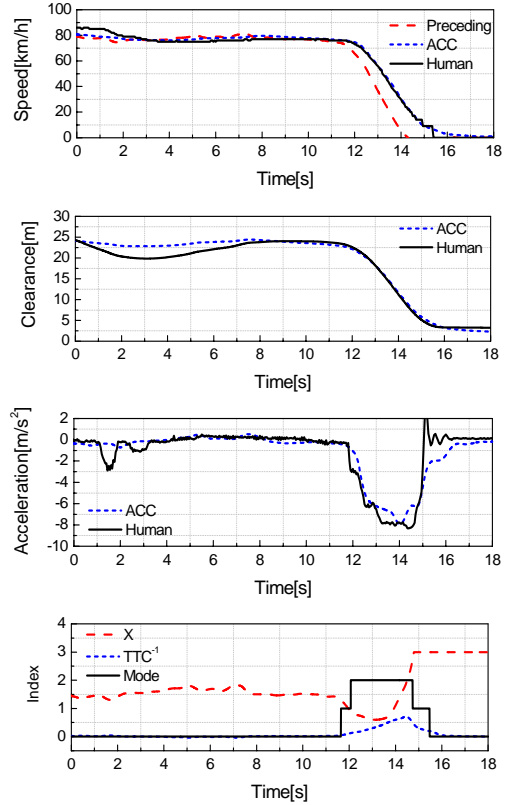


Fig. 11. Comparison between cruise control and human driving in a severe braking situation on a high speed

##### 4.2 Hardware-In-the-Loop 시스템

Fig.12 는 본 연구를 위해 제작한 브레이크 압력 제어 모듈과 HILS 의 구성도를 보여준다.

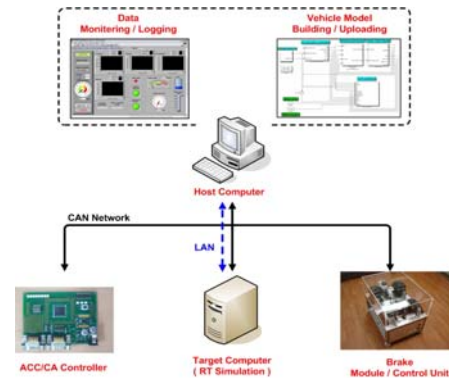


Fig. 12. Configuration of HiLS

차량의 브레이크 시스템과 동일한 환경을 구현하기 위해 실제 차량의 A/S 부품으로 제작하였으며 마스터 실린더, ESP 모듈, 브레이크 유압라인,



캘리포퍼와 디스크로 구성하였다. Fig. 13 은 선행차량이 40(km/h) ~ 0(km/h)의 속도로 정지서행을 반복하는 상황에서의 실험 결과이다.

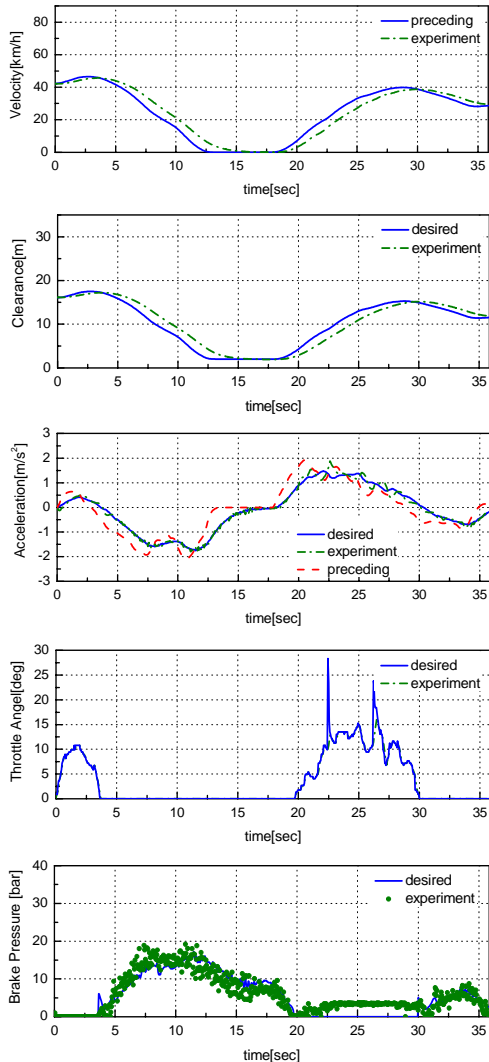


Fig. 13. Results of HILS in stop and go situation

## 5. 결론

본 논문에서는 전구간 주행 및 충돌회피 제어 알고리즘을 제안하였다. 일반주행 상황과 급감속 상황에 대한 운전자의 주행 데이터를 기반으로 운전자의 각 상황에 대한 가속도 특성을 분석하였다. 주행 상황의 상태와 충돌 위험 정도를 파악하기 위해 역충돌시간과 충돌경보지수의 두 가지 인덱스를 사용하였으며 인덱스의 값 변화를 통하여 세 가지 작동모드를 결정하게 된다. 세 가지 작동모드를 결정하는 각각의 인덱스 경계값은 급감속 데이터를 포함하는 운전자 주행 데이터로부터 Confusion 행렬을 이용하여 설정하였다. 제안한 전

구간 주행 및 충돌회피 제어 알고리즘을 검증하기 위해 시뮬레이션과 실제 차량과 유사한 HILS 를 통하여 제안한 제어 알고리즘의 성능을 확인하였다.

## 후 기

이 연구는 (주)현대자동차의 연구지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Kodaka, K., 2004, "Collision Mitigation brake System (CMS)", *Proc. of AVEC International Workshop 2004*, 20 December 2004, Tokyo, Japan
- (2) Venhovens, P., et al., 2000, "Stop and Go Cruise Control," *Proc. Of Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress*, June 12-15, Seoul, Korea
- (3) P. Fancher, Z. Bareket, and R. Ervin., 2000, "Human-Centered Design of an ACC-with-Braking and Forward-Crash-Warning System" *Proc. Of AVEC 2000 5<sup>th</sup> Int'l Symposium on Advanced Vehicle Control*, Ann Arbor, Michigan, USA
- (4) Yi, K., Yoon, H., Huh, K., Cho, D., and Moon, I., 2002, "Implementation and Vehicle Tests of a Vehicle Stop-and-Go Cruise Control System", *Journal of Automobile Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D*, Vol. 216, Part D, pp.537-544
- (5) Yi, K., Hong, J. and Kwon, Y., 2001, "A Vehicle Control Algorithm for Stop-and-Go Cruise Control", *Journal of Automobile Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Vol 215 Part D*, pp.1099-1115
- (6) Fancher, P., Bareket, Z., Ervin, R., Peng, H., 2004, "Relationships between Manual Driving and Driving with Adaptive Cruise Control," *Proc. Of AVEC2004, 7th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, August 23-27, Arnhem, The Netherlands
- (7) Kangwon Lee, Huei Peng, 2004, "Data-baesd Evaluation and Design of Automotive Collision Warning/Collision Avoidance Algorithm" *Proc. Of AVEC2004, 7th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, August 23-27, pp. 637-642