

운전자 주행 특성을 고려한 차량 적응 순항 제어기 설계

구 자 성¹⁾ · 이 경 수^{*2)}

한양대학교 자동차공학과¹⁾ · 한양대학교 기계공학과²⁾

A Vehicle Adaptive Cruise Control Design in Consideration of Human Driving Characteristics

Jasung Gu¹⁾ · Kyongsu Yi^{*2)}

¹⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 24 June 2005 / Accepted 13 October 2005)

Abstract : A vehicle adaptive cruise control strategy based on human drivers' driving characteristics has been investigated. Human drivers driving characteristics have been analyzed using vehicle test data obtained from 125 participants. The control algorithm has been designed to incorporate the driving characteristics of the human drivers and to achieve natural vehicle behavior of the controlled vehicle that would reduce the workload of the human driver. Vehicle following characteristics of the cruise controlled vehicle have been compared to real-world driving radar sensor data of human drivers using a validated vehicle simulator, and compare nominal cruise control and adaptive cruise control.

Key words : Adaptive cruise control(적응 순항 제어), Human driver driving data(운전자 주행 데이터), Clearance(상대거리), Time-gap(시간 간격), Time to collision(충돌 시간), Steady state following(정상상태 추종)

Nomenclature

- c : relative clearance[m]
- v : vehicle speed[kph]
- τ : time-gap[sec]
- a : acceleration[m/s²]

Subscripts

- d : desired
- s, p : subject(test) vehicle, preceding vehicle
- 0 : minimum or initial value
- max/min : maximum/minimum

1. 서론

적응 순항 제어(ACC) 시스템은 능동 제어 기술을 기반으로 운전자의 스톱/브레이크 입력 없이 선행 차량을 안전하게 추종하는 시스템이다. ACC는 충돌경보 및 충돌회피, 차선 유지 시스템, 충돌 경감 브레이크 시스템과 같이 ASV(Advanced Safety Vehicle)를 이루는 핵심 기술이다. ACC의 목적은 차량의 종방향 속도와 거리를 제어하고, 운전자의 운전 부하를 최소화 시켜주는데 있다.¹⁾ 이러한 시스템은 21C 자동차 문화 산업의 발달에 따른 텔레매틱스 환경 속에서 운전자의 운전 부하를 감소시켜, 사고 예방과 방지에 유용한 시스템이 될 것이다. 이러한 ACC 시스템은 운전자의 정상 상태 주행과 유사

*Corresponding author. E-mail: kyongsu@hanyang.ac.kr

하게 작동해야 한다. 따라서 ACC 시스템은 실제 운전자의 주행 데이터로부터 분석된 주행 특성이 제어기 설계에 반영해야 한다.²⁾

이 논문에서는 125(남 65, 여 60)명의 실험 참가자들로부터 획득한 운전자 주행 실험 데이터로부터 운전자 주행 특성을 분석하였다. 속도에 따라 선행 차량과 적절한 차간 거리를 유지하려는 운전자의 거동을 분석하여, 목표 차간거리 오차에 초점을 맞추어 ACC 제어기를 설계하였으며,³⁾ 운전자 주행 특성 분석을 통해 제안된 ACC 제어기의 성능 검증은 운전자 주행 실험 데이터를 이용해 비교, 평가하였다.

2. 운전자 주행 특성 분석

125명의 실험 참가자들에게 Fig. 1과 같은 실험 차량을 이용해 약 한 시간 동안 정해진 시나리오(시내/고속화 도로 주행, 차선 변경(Lane Change), 끼어들기(Cut-In/Out)...)에 따라 운전하는 방법으로 운전자 주행 실험 데이터를 수집하였다. 실험 차량은 밀리미터 웨이브 레이더(mmW-Radar) 센서, 레이저 레이더(Laser-Radar) 센서, 가속도 센서, 브레이크 페달 센서, 조향각 센서, 요 속도(Yaw-Rate)센서, 비전 카메라, 데이터 저장용 컴퓨터, 모니터, 컨트롤러로 구성되어 있다. 상대거리와 상대속도는 mmW-Radar 센서, Laser-Radar 센서를 사용하여 측정하였으며, 차속, 엔진 RPM, 토크 컨버터의 터빈 스피드, 스로틀 개도각, 기어 단수 등은 엔진 컨트롤 유닛(ECU)로부터 CAN을 이용하여 수집하였다.

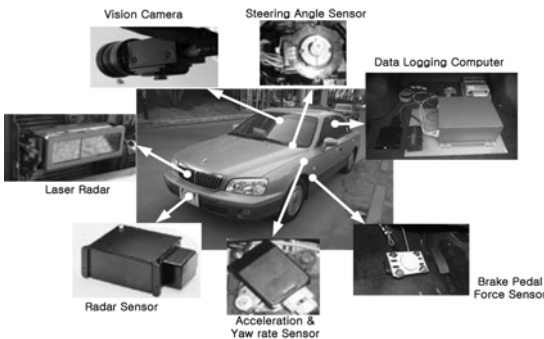


Fig. 1 Test vehicle for analysis of driving characteristics

2.1 운전자의 추종 Type(Speed-Clearance관계)

운전자 주행 실험 데이터로부터 운전자의 정상 상태 주행 하에서 속도에 따른 상대거리를 분석하였다. 분석 방법은 Constant Time-Gap/Clearance를 사용하는 방법과 이차 방정식을 이용해 운전자 추종 Type을 정의 하는 방법을 사용하였다.^{4,9)}

운전자의 정상 상태 주행을 정의하기 위해 충돌 시간(TTC: Time to Collision)를 이용하였다. TTC는 식 (1)과 같이 상대 속도와 상대 거리로 정의된다.

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

운전자가 주행할 때 선행차량의 속도가 일정할 경우 자기 차량의 속도도 선행차량의 속도와 비슷해지고, 일정한 상대거리를 유지하는 주행 특성이 나타난다. 이때, 추종차량의 타임 갭은 일정하게 유지된다.¹⁾ 이 연구에서는 TTC^{-1} 을 사용하여 식 (2)와 같이 TTC^{-1} 값이 작은 범위 안에 존재할 때, 운전자는 속도와 가속도 변화가 적고 일정한 상대거리를 유지하는 정상상태 추종 상황으로 정의 할 수 있었다.

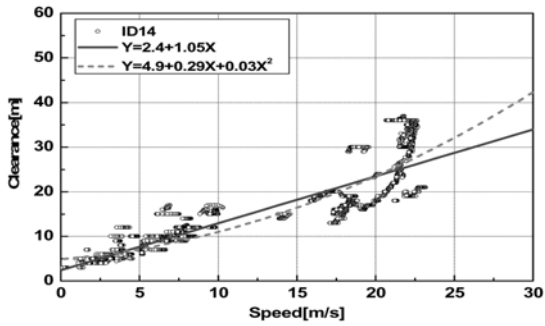
$$|TTC^{-1}| \leq \epsilon ; (\epsilon = 0.05) \quad (2)$$

운전자 주행 실험 데이터로부터 위와 같이 정의한 데이터를 추출하여 정상 상태 주행 상황에서의 운전자의 속도에 따른 상대거리 관계를 식 (3)과 같이 나타내었다.

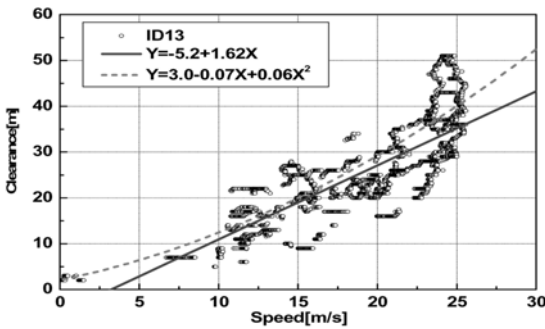
$$c = c_0 + \tau v, \quad c = c_0 + \tau^* v + \gamma v^2 \quad (3)$$

여기서 τ^* 는 선형 계수, γ 는 큐빅(Cubic)계수로 정의하였다. Fig. 2은 운전자의 추종 특성을 3가지 형태로 분석한 것이다. 일반적인 운전자의 추종 특성은 Fig. 2의 (a)와 같이 나타났고, 40,50대의 중장년층의 여성들의 주행 특성은 (b)와 같이 나타났으며, 30대 남성들은 (c)와 같은 특성을 나타냈다.

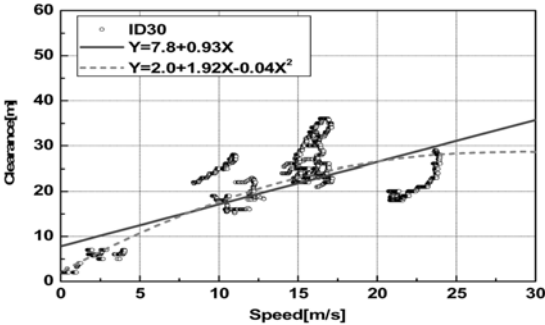
운전자 주행 실험 데이터로부터 실험에 참여한 125명의 시간 간격(Time-Gap)의 평균값은 1.396[s]로 나타났으며, 정지 했을 때의 최소 유지 거리(c_0)의 평균값은 1.995[m]로 나타났다.



(a) Linear type with a zero cubic parameter



(b) Cubic type with a positive cubic parameter



(c) Cubic type with a negative cubic parameter

Fig. 2 The types of human drivers' following characteristics

2.2 운전자의 감속 특성

운전자의 감속 특성은 선행 차량의 감속에 따라 실험 차량이 감속할 때 발생하는 접근 가속도 크기와 정상 상태 주행 상황에서 사용하는 가속도 크기를 분석하였다.

접근 가속도 특성 분석을 위해 40kph 이하는 저속/감속 상황, 70kph 이상은 고속/감속 상황으로 구분한 후, 운전자 주행 실험 데이터로부터 조건에 맞는 데이터를 추출, 분석하였다. Table 1은 분석 결과를

Table 1 Closing acceleration([m/s²])

Percentile	Low Speed	High Speed	High Speed ⁵⁾
75%	-0.43	-0.29	-0.21
Mean	-0.74	-0.33	-0.29
5%	-1.00	-0.36	-0.38

Table 2 Following acceleration([m/s²])

	Max.	95%	5%	Min.
Acceleration	2.34	0.62	-0.49	-2.4

정리한 것으로 저속/감속 상황이 고속/감속 상황 보다 더 큰 감속도를 사용하는 것을 알 수 있었다. 또한, 고속/감속 상황의 접근 감속도 분석을 Fancher의 연구와 비교한 결과 유사한 가속도 분포가 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.⁵⁾

정상 상태 주행 상황에서 사용하는 가속도 영역은 운전자 주행 실험 데이터로부터 정상 상태 데이터를 추출한 후, 사용하는 가속도 영역을 Table 2와 같이 95-5% Percentile로 나타내었다. 이것은 선행 차량을 정상상태로 추종할 때 사용하는 가속도의 크기가 작다는 것을 의미한다. 즉, 운전자는 작은 가속도를 이용해 선행 차량을 추종한다는 것을 의미한다.

2.3 운전자의 시간지연(Time-Delay)

운전자 주행 실험 데이터로부터 실험 차량과 선행 차량 사이의 상대 속도, 실험차량의 가속도, 운전자의 스톱/브레이크 입력 등을 분석하여 선행 차량의 감속에 의한 실험 차량의 감속 상황과, 정지/출발 상황에 대한 운전자의 시간지연(Time-delay)을 분석하였다.

선행 차량의 감속에 대한 실험 차량의 감속까지의 시간지연(Time-delay)은 운전자의 스톱/브레이크 전환 시 발생하는 시간 지연을 이용해 분석하여, Table 3에 정리하였으며, 평균값은 0.9[s]로 나타났다.

정지/출발 상황의 시간지연(Time-delay)은 선행

Table 3 Time-delay characteristics of human drivers([s])

Percentile	75%	Mean	25%
감속상황	1.42	0.9	0.54

차량의 출발 후 운전자의 브레이크 입력 해제 거동이 나타날 때까지를 의사결정 지연(Decision-Delay)으로, 브레이크 입력 해제 거동이 발생한 시점부터 스로틀 입력이 발생 할 때까지를 동작 지연(Motion-Delay)으로 정의하였다. 분석 결과 정지/출발 상황의 의사결정 지연(Decision-Delay) 평균값은 0.53[s]이고, 동작 지연(Motion-Delay) 평균값은 1.25[s]로 나타났다.

3. ACC 설계

ACC 시스템은 안정된 승차감을 요구한다. 운전자와 승객이 편안하게 느껴지기 위해서, ACC 시스템은 실제 운전자의 주행 상태와 유사하게 부드럽고 자연스런 거동을 보이도록 설계되어야 한다. 본 논문에서는 125명의 운전자 주행 실험 데이터 분석을 통해 2장에서와 같이 운전자 추종 Type, 가속도 특성, Time-delay 등 운전자 주행 특성을 분석하였다. 이러한 분석 결과를 기반으로 ACC 시스템을 설계하였다.

ACC 차량의 속도와 거리를 제어하기 위한 목표 가속도는 레이더 센서를 사용하여 측정된 차량의 속도와 거리 정보를 이용해 최적 제어 이론을 통해 구하였으며, 제어 차량의 목표 가속도를 추종하기 위해 스로틀/브레이크 제어를 설계하였다.

3.1 목표 가속도 설계

선행 차량 추종을 위한 목표 가속도를 설계하기 위해서 최적 제어 이론을 적용하였다. 먼저 목표 상대거리는 식 (4)와 같이 정의하였다.

$$c_d = c_0 + \tau \cdot v_p \quad (4)$$

목표 상대거리는 운전자 주행 실험 데이터 분석으로부터 구한 τ, c_0 를 사용하여 계산하였다. 식 (5)는 선행차량과 제어차량 사이의 상태 방정식이다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + \Gamma w \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \tau \\ 1 \end{bmatrix} w \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 u 는 제어 차량의 가속도 값으로 입력 요소이며, w 는 선행 차량의 가속도로 외란 요소이다. 시스템의 상태 변수는 식 (6)과 같다.

$$x^T = [x_1 \ x_2] = [(c_d - c) \ (v_p - v_s)] \quad (6)$$

식 (7)과 같은 성능 지수(Performance Index)를 정의하고 입력 $u = -kx$ 에서 게인 k 값은 성능 지수를 최소화 하도록 선정하였다.

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (7)$$

식 (7)의 Q, R 은 가중치 요소로서 추종 성능, 승차감, 주행 특성 등을 고려하여 선정하였다.⁷⁾

목표 가속도는 식 (8)과 같이 정의하였다.

$$a_{des}(t) = \begin{cases} a_{\max}(v) & \text{if } a_{\max}(v) < a_*(t) \\ a_*(t) & \text{elseif} \\ a_{\min}(v) & \text{if } a_*(t) < a_{\min}(v) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{here, } a_*(t) &= -k_1(v) \cdot (c_d(t) - c(t)) \\ &\quad - k_2(v) \cdot (v_p(t) - v_s(t)) \end{aligned}$$

$$v = v_s(t)$$

여기서 $k_1(v), k_2(v), a_{\min}, a_{\max}$ 는 제어 차량의 속도 함수로 정의하였다.

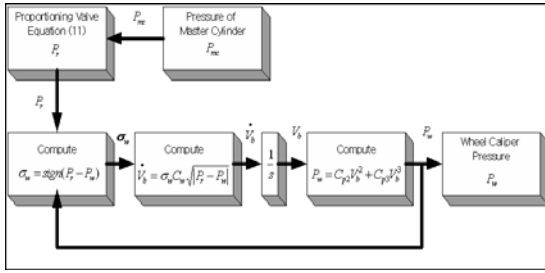
제어기 설계에 사용한 $\tau, c_0, k, a_{\min}, a_{\max}$ 등의 파라미터 들은 제어기 설계 후 시뮬레이션 결과와 운전자 주행 실험 데이터를 비교, 분석하여 모든 속도 영역의 운전자 주행 거동과 유사하도록 운전자 주행 특성 분석을 기초로 조정하였다.

3.2 스로틀/브레이크 제어기 설계

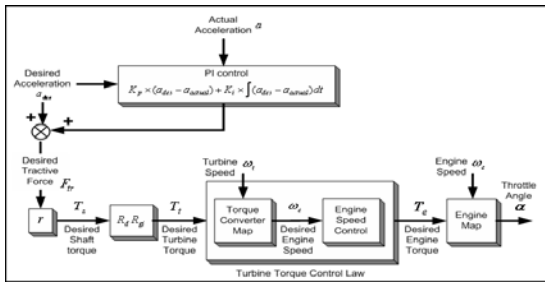
스로틀-브레이크 제어기는 3.1절에서 설계한 목표 가속도를 추종하기 위해 스로틀-브레이크 액추에이터를 제어하는 것이다. 차량 동역학을 이용한 모델링을 통해 엔진 맵과 토크 컨버터 맵, 기어 비등을 이용하여 Fig. 3의 (a), (b)와 같이 스로틀-브레이크 제어를 설계하였다.^{6,9)}

Fig. 4는 차량의 Zero-Throttle 가속도 실험으로부터 구한 변환 곡선이다.⁷⁾ 이 변환 곡선은 특정 속도에서 스로틀 입력이 0일 때 차량에 발생한 최소 가속도를 나타낸다. 이러한 가속도 곡선에 적절한 경계층을 설정하여 잦은 스로틀-브레이크 변환을 방지하도록 설계하였다.

이 논문에서 제안된 순항 제어 알고리즘은 정상 상태 주행 상황 하에서의 ACC를 설계한 것이다. 따



(a) Brake controller



(b) Throttle controller

Fig. 3 Brake/Throttle controller

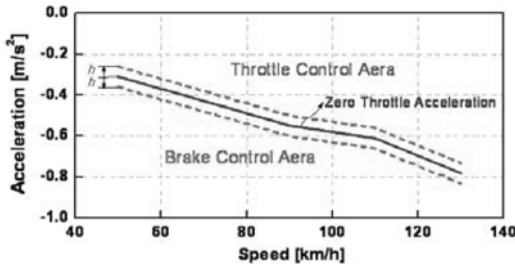
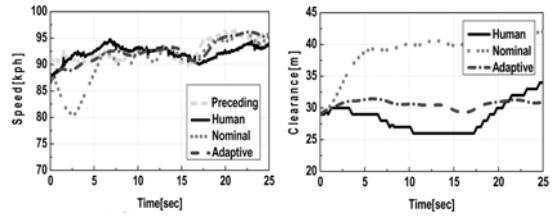


Fig. 4 Switching logic with hysteresis

라서 급격한 감속이 발생하는 불안정한 주행 영역에 대한 차량 대 차량 거리는 안전하게 제어 할 수 없다.

4. ACC와 운전자 주행 실험 데이터 비교

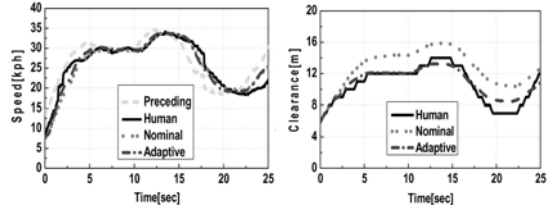
제안된 ACC제어기에 의해 제어된 차량의 성능은 운전자 주행 실험 데이터를 사용한 시뮬레이션을 통해 비교하였다. Fig. 5, 6은 고속과 저속 상황에서의 운전자 주행 실험 데이터를 운전자의 운전 특성을 고려하지 않은 선형 연구에서 제안한 순항제어 알고리즘(Nominal)⁷⁾과 주행 특성을 고려한 적응 순항제어 알고리즘(Adaptive)의 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 주행 특성을 고려하지 않은 제어기



(a) Speed

(b) Clearance

Fig. 5 ACC and human driving at high speed



(a) Speed

(b) Clearance

Fig. 6 ACC and human driving at low speed

의 타임갭은 1.5[s]인 모든 운전자에게 고정된 값이 적용되었으나, 주행 특성을 고려한 제어기는 운전자의 주행 특성을 분석(RLS:Recursive Least Squares Method)¹⁰⁾으로부터 산출된 운전자마다 다른 타임갭과 운전자 주행 특성 파라미터들을 적용하였다. 결과적으로, 운전자 주행 특성을 반영한 제어기는 실제 운전자의 속도, 거리 특성과 유사한 결과가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Table 4는 저속과 고속 데이터의 운전자의 주행 특성인 타임갭과, 실제 운전자의 상대거리에서 주행 특성을 고려하지 않은 순항 제어기의 상대거리와 주행 특성을 고려한 순항 제어기의 상대 거리의 오차를 평균값으로 나타낸 것이다. 운전자 주행 특성을 고려한 적응 순항 제어기의 오차가 상당히 작은 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 고속의 도심 고속도로 상황에서 실험 차량보다 느린 선행 차량에 천천히 접근하는 경우의 주행 실험 데이터와 제어 차량의 시뮬레이션 결과

Table 4 Time-gap and mean of clearance error

	Time-gap[s]	Mean(Clearance-Error)[m]	
		Nominal	Adaptive
High Speed (ID57)	1.08	Nominal	10.59(4.17)
		Adaptive	2.54(1)
Low Speed (ID81)	1.21	Nominal	2.17(3.81)
		Adaptive	0.57(1)

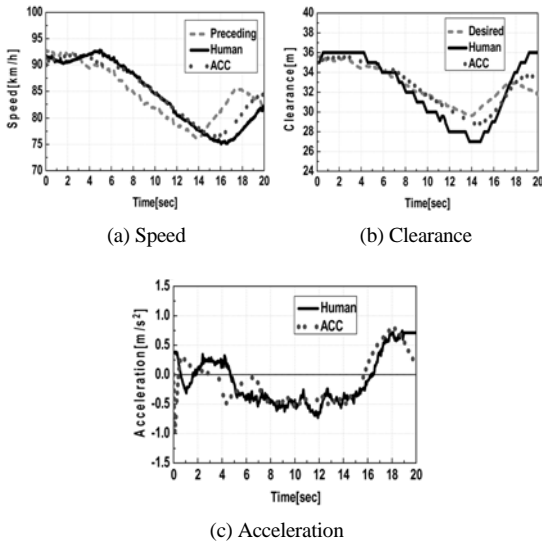


Fig. 7 ACC and human driving at deceleration

Table 5 Closing acceleration([m/s²])

Percentile	Preceding	Human	ACC
75%	-0.38	-0.39	-0.4
Mean	-0.44	-0.46	-0.43
25%	-0.51	-0.52	-0.49
Variance	0.02	0.01	0.01

를 비교한 것이다. Fig. 7은 제어 차량, 선행 차량의 속도, 상대거리, 가속도를 나타내고 있다. 선행 차량의 접근 가속도 특성에 대한 주행 실험 결과와 ACC의 결과는 Table 5에 정리하였다. Table 5의 평균값, 75-25% Percentile 값은 ACC의 가속도 분포가 운전자 주행 실험 데이터와 유사함을 보여준다.

5. 결론

본 논문에서는 운전자 주행 실험 데이터에 기초한 차량 순항 제어기를 제안하였다. 125명의 참가자들로부터 얻어진 고속도로나 고밀도의 도심 도로 등의, 다양한 도로 상황을 포함하는 운전자 주행 실험 데이터로부터 시간 간격(Time-gap)과 충돌 시간(TTC)를 이용해 운전자 주행 특성을 분석하였으며, 운전자의 시간지연과 가감속시 사용하는 가속도 영역 등을 분석하였다. 이러한 분석 결과를 적응 순항 제어기 설계에 적용하여, 운전자의 주행 특성에 기반한 적응 순항 제어기를 제안하였다.

적응 순항 제어기는 두 단계로 구성하였다. 먼저 제어 차량의 목표 가속도를 설계하기 위한 제어기를 구성하였고, 목표 가속도를 추종하기 위한 스톱-브레이크 제어기를 설계하였다. 제어 차량의 목표 가속도는 레이더 센서로부터 측정된 속도와 상대거리 정보를 사용하여 설계하였으며, 스톱/브레이크 제어기는 목표 가속도 궤적을 적응 순항 차량의 가속도가 추종하도록 설계하였다.

제안된 순항 제어기의 성능은 다양한 도로 환경에서 주행 실험을 통해 측정된 데이터를 사용한 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 시뮬레이션 결과로부터 운전자가 편안함을 느낄 수 있도록 급격한 가속도 변화 없이 자연스럽게 제어된 차량의 거동을 확인 할 수 있었다. 정상상태 주행 영역에서 일반적인 순항 제어기보다 적응 순항 제어기는 운전자 주행 거동 특성과 유사한 거동 특성을 보이며 우수한 추종 성능을 나타내었다. 또한, 가감속 상황에서 사용하는 가속도의 크기도 실제 운전자와 유사한 값을 나타낼 수 있도록 설계되어 실제 운전자와 유사한 응답 특성을 보일 수 있었다.

정상 상태 주행 상황이 아닌 급감속 같은 불안정한 영역에서의 제어 차량의 안전을 보장하기 위한 적응 순항 제어기와 충돌 경보 및 회피알고리즘의 통합에 대한 연구, 순항 제어 차량의 주행 안정성에 관한 연구가 향후에 이루어지는 것이 필요하다.

후 기

이 연구는 과학 기술부 국가 지정 연구실(NRL) 사업 지원과 현대 자동차의 연구 지원에 의해 수행 되었습니다.

References

- 1) H. Peng, "Evaluation of Driver Assistance Systems-A Human Centered Approach," Proc. Of AVEC2002, 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2002, Japan.
- 2) P. Venhovens, K. Naab and B. Adiprasito, "Stop and Go Cruise Control," Proc. Of Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, Seoul, Korea, 2000.

- 3) Germann, St. and Isermann, R., "Nonlinear Distance and Cruise Control for Passenger Cars," Proceedings of the 1995 American Control Conference, Seattle, Washington, pp.3081-3085, 1995.
- 4) R. Rajamani, S. B. Choi, J. K. Hedrik and B. Law, "Design and Experimental Implementation of Control for a Platoon of Automated Vehicles," Proc. of the ASME Dynamic Systems and Control Division, ASME, pp.681-689, 1998.
- 5) P. Fancher, Z. Bareket, R. Ervin and H. Peng, "Relationships between Manual Driving and Driving with Adaptive Cruise Control," Proc. Of AVEC2004, 7th Int. Symp. on Advanced Vehicle Control, August 23-27, 2004, Arnhem, The Netherlands.
- 6) K. Yi, H. Yoon, K. Huh, D. Cho and I. Moon, "Implementation and Vehicle Tests of a Vehicle Stop-and-Go Cruise Control System," Journal of Automobile Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol.216, Part D, pp.537-544, 2002.
- 7) K. Yi, J. Hong and Y. Kwon, "A Vehicle Control Algorithm for Stop-and-Go Cruise Control," J. of Automobile Engineering, Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Vol.215, Part D, pp.1099-1115, 2001.
- 8) K. Yi and Y. Kwon, "Vehicle-to-Vehicle Distance and Speed Control Using an Electronic Vacuum Booster," JSAE Review 22, pp.403-412, 2001.
- 9) C. Lee and K. Yi, "An Investigation of Vehicle-to-Vehicle Distance Control Laws Using Hardware-in-the Loop Simulation," J. of KSME, Part A, Vol.26, No.7, pp.1401-1407, 2002.
- 10) I. Moon and K. Yi, "Human Drivers' Driving Pattern Analysis and An Adaptive Cruise Control Strategy," Journal of KSAE, Vol.12, No.4, pp.191-197, 2004.
- 11) S. Min and K. Yi, "Driver Adaptive Control Algorithm for Intelligent Vehicle," J. of KSME, Part A, pp.1146-1151, 2003.