

차간거리 경보시스템의 HiLS 구현

An Experimental Investigation of a Collision Warning System for Automobiles using Hardware-in-the-Loop Simulations

송 철 기*, 김 성 하**, 이 경 수***
C. K. Song, S. H. Kim, K. S. Yi

ABSTRACT

Collision warning systems have been an active research and development area as the interests and demands for ASV's (Advanced Safety Vehicles) have increased. This paper presents an experimental investigation of a collision warning system for automobiles. A collision warning HiLS (Hardware-in-the-Loop Simulation) system has been designed and used to test the collision warning algorithm, radar sensors, and warning displays under realistic operating conditions in the laboratory. The collision warning algorithm is operated by a warning index, which is a function of the warning distance and the braking distance. The computer calculates velocities of the preceding vehicle and following vehicle, relative distance and relative velocity of the vehicles using vehicle simulation models. The relative distance and the relative velocity are applied to the vehicle simulator controlled by a DC motor.

주요기술용어 : ASV(Advanced Safety Vehicle, 선진 안전차량), CWS(Collision Warning System, 차간거리 경보시스템), HiLS(Hardware-in-the-Loop Simulation, 장치실험적 검증), Warning Index(경보지수), Warning Distance(경보거리), Braking Distance(제동거리), Kalman Filter(칼만 필터)

1. 서 론

자동차 도로에서 대부분의 많은 사고는 운전자

가 위험 상황을 인식하지 못하는 데서 기인한다. 따라서 사고의 위험을 조금이라도 미리 운전자가 알 수 있다면 운전자 및 다른 운전자의 안전의 확보에 큰 도움이 된다. 차간거리 경보시스템은 이와 같은 상황에서 운전자 및 차량의 안전을 확보하기 위한 장치로서, 위험상황을 미리 감지하고

* 정회원, 경상대학교 기계설계학과

** 기아자동차 기아기술센터

*** 정회원, 한양대학교 기계공학부

그 정도에 따라 경보등 및 경보음 등을 이용하여 운전자에게 이를 알리는 기능을 한다.^{1~4)} 이와 같은 차간거리 경보시스템을 개발하기 위해서는 선행차량과의 상대거리 및 상대속도를 측정할 수 있는 센서와 측정된 정보를 이용하여 돌발 상황을 판단하는 알고리즘이 필요하며, 실제 차량에 시스템을 장착하기 전에 그 성능을 검증하고 필요한 관련기술들을 습득하는 과정이 요구된다.⁵⁾

따라서, 본 논문에서는 컴퓨터, 밀리미터파 레이더 센서(mm-wave Radar Sensor), 차간거리 시뮬레이터(CW Simulator), 경보표시장치(Warning Display Panel)등을 이용하여 HiLS 시스템을 구현하고, 실차실험 이전단계의 차간거리 경보 알고리즘 및 시스템에 대한 성능을 검증하고자 한다. 차간거리 시뮬레이터의 기준신호를 생성하기 위한 자기차량과 선행차량의 속도 및 거리의 계산은 차량모델을 이용하고, 레이더 센서 신호를 통한 속도신호의 계산은 칼만 필터를 이용하도록 한다.

2. 차간거리 시뮬레이터 HiLS의 구성

차간거리 경보 시스템의 성능을 검증하기 위한 HiLS 시스템은 Fig.1에서 나타난 바와 같이 자기차량과 선행차량의 상대거리를 구현해주는 차간거리 시뮬레이터, 시뮬레이터의 선행차량 표적까지의 거리를 측정하는 밀리미터파 레이더 센서, 제어를 담당하는 컴퓨터, 위험정도의 판단에 따라 그 결과를 표시해 주는 경보표시장치등으로 이루어져 있다.

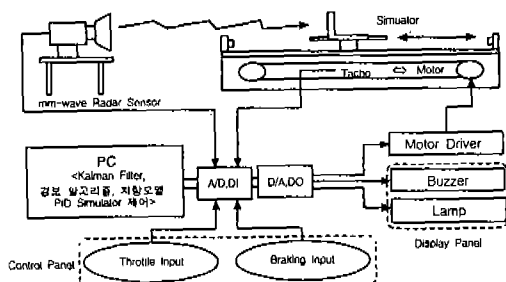


Fig.1 차간거리 경보시스템의 검증을 위한 HiLS 구성도

선행차량과 자기차량과의 상대거리를 구현해주는 시뮬레이터는 5.2m의 이동거리를 가지며, 10 : 1의 비율을 가지고 400W의 속도 제어방식 DC 모터에 의해 구동된다. 시뮬레이터에 입력되는 기준신호는 차량모델을 통해서 얻어지며, PID제어를 위한 피드백 신호는 모터에 연결된 타코미터에서 생성된다. 데이터 인터페이스는 NI사의 DAQ card-1200을 이용하였으며, 제어 프로그램은 C 언어로 작성하였다.

밀리미터파 레이더 센서는 시뮬레이터 내에서 움직이는 선행차량 표적까지의 거리를 측정하기 위해서 사용되며, 컴퓨터는 0.1msec마다 센서의 신호를 점검하여 상승순간(Rising Edge)과 다음 상승순간 사이의 주기를 측정함으로써 그 거리를 인식한다. 또한, 차간 경보 알고리즘에서는 상대거리 뿐만 아니라 상대속도에 대한 정보도 필요하므로 상대속도를 구하기 위해서 레이더 센서에 의해서 측정된 거리신호에 칼만필터를 적용한다. 이들 두 정보로부터 컴퓨터는 경보 알고리즘에 의한 경보지수를 구하고, 이에 따라 Fig.2의 경보 표시장치는 부저(Buzzer)와 램프(Lamp)를 통하여 경보의 정도를 표시하게 된다.

경보의 정도가 약할 때부터 강할 때까지의 표시는 경보지시기(Warning Indicator)의 램프가 점등되는 수로 나타나고, 컴퓨터 내의 차량모델중에서 자기차량의 구동은 경보표시장치의 오른쪽에 있는 차량입력단자를 통하여 구현되며 이때 생성되는 자기차량의 속도정보는 차간거리 알고리즘에 입력된다. 선행차량의 경우는 미리 컴퓨터에 입력된 트로틀과 브레이크⁶⁾의 궤도(Profile)에 의해서 구동되며, 이 결과에 의해서 두 차량간에 상대거리가 발생한다.

차간거리 시뮬레이터는 이때 발생하는 상대거리

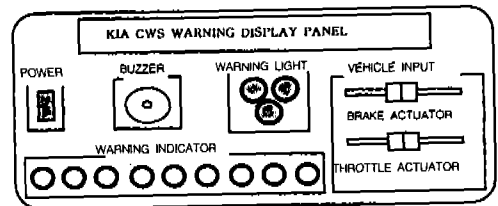


Fig.2 경보표시장치 및 차량모델 입력단자

를 정해진 비율만큼 축소해서 구현하게 되며 이와 같은 과정을 통하여 차간거리 경보시스템의 검증이 수행된다.

3. 상대 거리의 측정 및 상대 속도의 추정

사용된 밀리미터파 레이더의 출력신호는 Fig.3과 같이 구형(矩形)파 형태로 나타나며 거리에 따라 주파수가 33Hz/m의 관계를 가지고 변한다. 제어 프로그램에서는 Fig.4 (a)의 경우와 같이 타이머 인터럽트(Timer Interrupt)를 0.1msec마다 발생시켜 레이더 센서 출력신호의 상승순간과 다음 상승순간 사이의 시간을 측정한다. 이를 주파수로 변환하여 전방 차량과의 상대거리를 구한다. 반면에, 실제 차량에 시스템이 장착될 경우에는 감지거리가 실험실에서 실험을 수행할 경우보다 거의 10배 이상이 커지므로 Fig.4 (b)의 경우와 같이 일정한 측정 시간마다 상승순간의 개수를 세어 구형파의 주기를 측정하는 것이 훨씬 효과적이다.

차간거리 경보 알고리즘에서 위험상황을 파악하기 위해서는 앞 차량에 대한 거리 뿐만 아니라 속도에 대한 정보도 필요하다. 따라서 레이더 센서를 통해 측정된 상대 거리에 대한 신호에서 잡음을 제거하고 속도 정보를 얻기 위해서 다음 식 (1), (2)와 같이 칼만 필터를 적용하였다. 칼만 필터는 잡신호와 외란에 대한 제거능이 우수하다. x_1 은 측정된 상대 거리, x_2 는 상대 속도를 나타내며, \hat{x}_1 , \hat{x}_2 는 추정된 상대 거리와 상대 속

도를 나타낸다. 또한, a 는 상대 가속도, \bar{n} 은 잡음을 나타낸다. 즉,

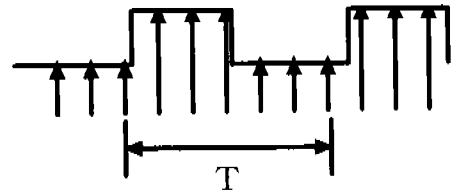
$$\begin{aligned} x_1 &= x & \dot{x}_1 &= x_2 & y &= x_1 + \bar{n} \\ x_2 &= v & \dot{x}_2 &= a \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 \bar{n} 은 측정오차로서, 평균값이 0인 백색 잡음과 유사하며, 칼만 필터는 다음 식과 같이 나타낸다.

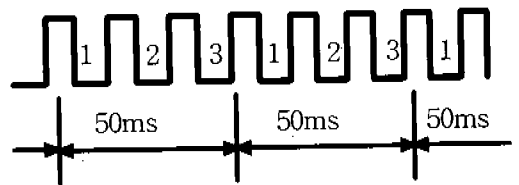
$$\begin{aligned} \hat{x}_1 &= \hat{x}_2 + l_1(y - \hat{y}) \\ \hat{x}_2 &= l_2(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= \hat{x}_1 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 l_1 , l_2 는 칼만 필터의 이득이다. 한편, 여러 동력학은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_1 &= x_1 - \hat{x}_1, & \dot{e}_1 &= e_2 - l_1 e_1 - l_1 \bar{n}, \\ e_2 &= x_2 - \hat{x}_2, & \dot{e}_2 &= a - l_2 e_1 - l_2 \bar{n} \end{aligned} \quad (3)$$



(a) 근거리에서 구형파의 주기측정방법
(주파수=1/T[Hz], 거리=주파수/33.0[m])



(b) 원거리에서의 구형파의 주기측정방법
(주기= $\frac{h}{n}$, n : Counting 수, h : 단위 측정시간,
거리= $\frac{n}{h}$ / 33.0[m])

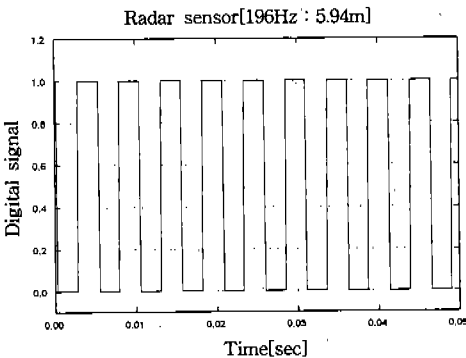


Fig.3 밀리미터파 레이더 센서의 출력신호

Fig.4 거리에 따른 구형파 주파수 측정방법

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} -l_1 & 1 \\ -l_2 & 0 \end{bmatrix} e + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} a - \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} \ddot{n} \quad (4)$$

4. 차간거리 경보 알고리즘⁷⁾

실제 차량에서 차간거리 경보 알고리즘은 센서를 통해서 입력된 신호들을 바탕으로 ECU가 현재 차량의 위험을 판단하는 근거가 된다. 경보거리가 너무 짧으면 경보가 너무 자주 발생하기 때문에 운전자는 불쾌감을 가질 수가 있고 경보에 둔감하게 될 수 있다. 이와는 반대로 매우 긴 경보거리의 설정으로 경보가 제때에 충분히 작동하지 않는다면 운전자가 위험에 대처할 충분한 시간을 확보할 수 없게 되어 매우 위험할 수 있다. 따라서 경보거리를 설정하는 기준이 되는 알고리즘의 파라미터들은 경보가 제때에 작동할 수 있도록 결정되어야 하며 실차실험을 통한 검증 및 튜닝이 꼭 필요하다. 위와 같은 조건들을 만족시키기 위하여 식 (5)와 같은 경보지수를 이용한 알고리즘을 제안하였다.

경보지수(Warning Index) :

$$x = \frac{d - d_{br}}{d_w - d_{br}} \quad (5)$$

$1 < x$: No warnings

$k < x < 1$: Light warning(Visual)

$0 < x < k$: Heavy warning(Visual/Audio)

$x < 0$: rake

$$d_w = \frac{1}{2} \left(\frac{v^2}{\alpha_1} - \frac{(v - v_{rel})^2}{\alpha_2} \right) + v \cdot (\tau_1 + \tau_2) + d_0 \quad (6)$$

$$d_{br} = v_{rel} \cdot (\tau_1 + \tau_2) + \frac{\alpha_2}{2} \cdot (\tau_1 + \tau_2)^2 \quad (7)$$

여기서 k 는 일정상수, d_w 는 경보거리, d_{br} 는 제동거리, d_0 는 초기 차간거리, v 는 차량의 속도,

v_{rel} 는 상대속도, τ_1, τ_2 는 작동지연시간, α_1, α_2 는 적정 감속도를 나타낸다.

경보지수 알고리즘은 매 순간마다 경보지수를 계산하여 그 값에 따라 경보의 정도를 조절한다. 레이다 센서에 의해 측정된 상대거리가 식 (6)의 경보거리와 같아지면 경보지수는 1이 되고 식 (7)의 제동거리와 같아지면 0이 된다. 여기서, 경보거리가 갖는 물리적 의미는 두 차량간의 상대거리가 이보다 작으면 운전자에게 경보를 발생시켜야 한다는 것이고 제동거리의 경우는 상대거리가 이 거리보다 작아지게 되면 브레이크를 작동시켜야 안전을 최대한 확보할 수 있다는 것이다. 경보거리와 제동거리를 구하는 공식은 다음 식 (6), (7)과 같으며 향후 노면과의 마찰계수에 대한 인자를 포함시킬 예정이다.

Fig.5는 경보지수의 값에 따라 경보하는 방법을 제시하는 그림이다. x 가 1보다 크면 두 차량간의 거리가 경보거리보다 더 큰 경우이므로 경보를 할 필요가 없다. 만약 상대거리가 경보거리 안에 들어오게 되면 x 의 값은 0과 1사이에 있게 되므로 경보를 발생시킨다. 이 사이에 적당한 k 값을 두어 약한 경보와 강한 경보의 경계로 설정한다. 또한 x 의 값이 0보다 작게되는 경우에는 상대거리가 제동거리보다 작아지므로 브레이크를 작동시킨다.

차간거리 경보시스템의 검증을 위하여 차량모델이 필요한 이유는 차간거리 시뮬레이터에 입력되는 기준 신호와 차간거리 경보 알고리즘에 필요한 자기차량의 속도신호를 실제에 가깝게 생성하

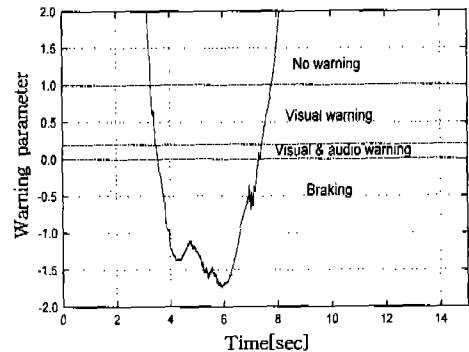


Fig.5 경보지수에 따른 경보방법

기 위함이다. HiLS 시스템을 구현하기 위한 컴퓨터의 계산속도와 차량모델의 타당성이라는 두 가지 조건을 만족하기 위하여 다음과 같이 모델링하였다. 선행차량과 자기차량의 모델 중 자기차량은 경보표시장치의 트로틀 단자와 브레이크 단자를 통하여 제어하고, 선행차량은 미리 입력된 궤도에 의해서 움직인다. 이와 같이 두 개의 간단한 차량모델을 이용하여 자기차량과 선행차량의 상대거리를 구하고, 차량의 주행상황을 시뮬레이터를 이용하여 구현하였다. 차량모델은 엔진 각속도 w_e , 터어빈 각속도 w_t , 차량 속도 v 등의 인자로 구성되며, 각 인자는 다음 식 (8)~(10)과 같이 표현된다.

$$\text{엔진 각속도 } w_e : \dot{w}_e = \frac{T_e - T_p}{I_e} \quad (8)$$

여기서 T_e 는 트로틀 개도량 α 와 엔진 각속도 w_e 에 의해 결정되는 엔진의 성능토크, 즉, $T_e = T_e(\alpha, w_e)$ 이며, T_p 는 펌프 각속도 w_p 와 터어빈 각속도 w_t 로 나타낼 수 있는 펌프 토크, 즉, $T_p = T_p(w_p, w_t)$ 이며, I_e 는 엔진과 토크 컨버터의 회전관성이다. 펌프 각속도 w_p 는 엔진 각속도 w_e 와 같다고 가정한다.

$$\text{터어빈 각속도 } w_t : \dot{w}_t = \frac{T_t - R \cdot T_s}{I_t} \quad (9)$$

여기서 T_t 는 터어빈 토크, T_s 는 구동축 토크, R 은 기어비(변속기어와 최종 감속비의 곱), I_t 는 터어빈 축으로 환산한 기어의 등가 회전관성이다.

$$\text{차량 속도 } v : \dot{v} = \frac{T_s - T_b - 2T_{rr} - rF_a}{\left(\frac{I_w}{r} + mr\right)} \quad (10)$$

여기서 T_b , T_{rr} 는 각각 브레이크 토크, 주행저항 토크이고, F_a 는 주행공기 저항력, I_w 는 바퀴의 회전관성, m 은 차량질량, r 은 타이어 반경이다.

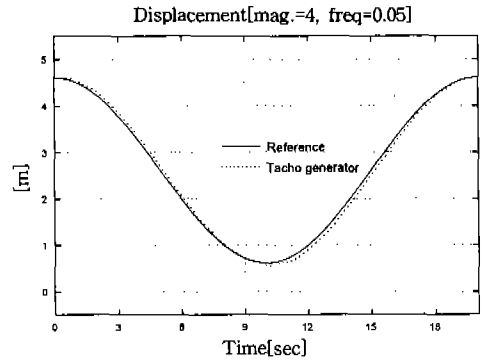


Fig.6 시뮬레이터의 PID제어 결과

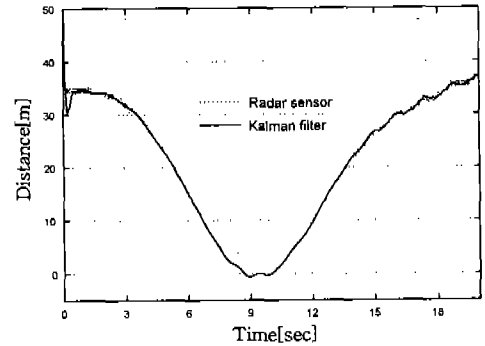


Fig.7 레이더 센서 및 칼만필터에 의한 거리신호

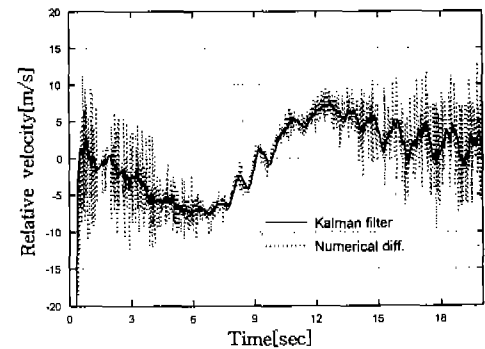


Fig.8 수치미분과 칼만필터를 이용하여 생성한 속도신호의 비교

5. 실험 결과

Fig.6은 DC 모터를 이용하여 차간거리 시뮬레이터를 PID 제어한 결과를 나타낸 것이다. 시뮬레이터의 큰 관성과 마찰력에도 불구하고 기준신

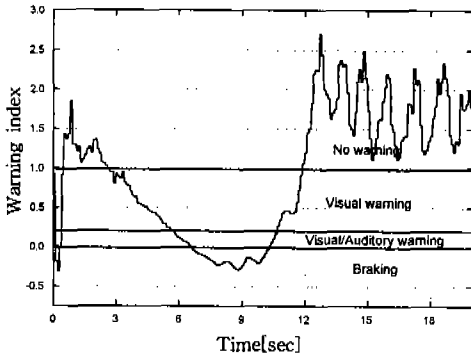


Fig.9 차간거리 경보알고리즘의 작동결과

호를 잘 추종하는 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 이동거리의 값은 모터에 직접 연결된 타코미터에서 되먹임되는 모터의 속도신호를 적분하여 얻을 수 있다.

Fig.7은 주행상황을 시뮬레이터에서 구현하고 레이더 센서로 감지한 상대 거리와 칼만 필터를 통과 시켜 계산출한 상대 거리를 비교한 것으로 거의 일치하지만 칼만 필터를 사용한 데이터에 오차성분이 많이 제거되었음을 알 수 있다.

Fig.8은 상대 속도신호를 구하기 위해서 칼만 필터를 이용한 경우와 상대 거리를 수학적으로 미분하여 계산한 경우를 비교한 것이다. 특히 상대 속도의 경우에는 칼만 필터의 잡음제거 성능이 매우 우수함을 알 수 있다.

Fig.9는 위와 같은 주행상황에 대해서 차간거리 경보알고리즘을 적용하여 경보지수를 구하고 그 값의 영역에 따른 경보방법의 변화를 나타낸 것이다. 앞에서 언급한 바와 같이 경보지수가 1보다 클 때는 경보를 발생하지 않고 1에서부터 시작하여 0까지는 약한 경보와 강한 경보를 그 위험 정도에 따라 발생시킨다. 약 7초 정도에서는 경보지수가 0보다 더 작아지는 데, 이는 아주 위험한 상황이 도래함을 나타내므로 브레이크가 작동되어야 함을 알 수 있다.

6. 결 론

이상에서 차간거리 시뮬레이터, 레이더 센서, 컴퓨터, 경보표시장치 등을 이용한 차간거리 경보시

스템의 HiLS 시스템을 구성하여 선행차량과 자기차량과의 상대거리를 구현하고 차간거리 경보알고리즘의 성능을 검증하였다.

또한 선행차량에 대한 거리정보를 얻기 위한 레이더 센서의 검증과 속도신호를 얻기 위한 칼만 필터 및 차간거리 시뮬레이터의 기준신호를 생성하기 위한 차량모델의 적용도 함께 구현되었다. 이와 같은 차간거리 경보시스템의 검증을 통해서 향후 자동 제동 시스템 및 차간거리 유지시스템까지도 확장하여 적용할 수 있는 기초를 마련하였다.

참 고 문 헌

1. ITS America, "Collision warning system", 1996.
2. H. Hayakawa, M. Maruyama, and S. Yabuta, "Vehicle distance warning system for passenger cars", JSAE Review, 15(1), pp. 73~86, 1994.
3. T. Butsuen, A. Doi, and H. Sasaki, "Development of a collision avoidance system with automatic brake control", Proceedings, the First World Congress on Applications of Transport Telematics and IVHS, volume 4, pp. 2079~2086, 1994.
4. P.E. An and C.J. Harris, "An intelligent driver warning system for vehicle collision avoidance", IEEE 26(2) pp. 254~261, March 1996.
5. D. Baum, C.D. Hamann, and E. Schubert. "High performance acc system based on sensor fusion with distance sensor, image processing unit and navigation system", International Symposium on Advanced Vehicle Control. pp. 1379~1391, June 1996.
6. Sei-Bum Choi, Peter Devlin, "Throttle and Brake Combined Control for Intelligent Vehicle Highway Systems", SAE 951897.
7. 이성철, 김건상, 오태일, 민준호, 김성하, "차간거리 경보시스템의 개발", G7 차세대 자동차 기술 W/S, pp. 759~767, 1997.