

파워트레인 HILS를 이용한 차량간격 제어장치의 실험기법 개발에 관한 연구

A Study on the Development of Experimental Method for ACC Using Powertrain HILS

백 창 현*, 윤 원 석**, 장 광 수***
Changhyun Paik, Wonseok Yoon, Kwangsoo Chang

ABSTRACT

HILS system consists of hardwares which are engine and dynamometer and softwares which is vehicle model without the engine. It is well-known that because of engine's nonlinearity it is difficult to describe an engine exactly and not to lose its reality coincidentally. But HILS system is the high technology that can compensate this weakness by using a real engine instead of model. The various experiments regarding the ACC which are not normally available for real vehicle tests have been performed by the HILS system. From the results, the HILS system is expected to decrease the experimental accident rate and save costs and time. Compared with simulation, HILS experimental results show similarities and expected to increase road capacity.

주요기술용어 : ACC(Autonomous Cruise Control : 차량 간격 자동 제어), HILS(Hardware In the Loop Simulation), DSP(Digital Signal Process : 디지털 신호 처리)

1. 서론

본 논문의 목적은 차량간격 자동주행 시스템을 개발하는데 있어 반드시 수행해야만 할 시스템 검증 장치 및 그 기법을 개발하는 데 있다. 현재 세계적으로 많이 사용되

고 있는 방법은 시뮬레이션과 실차 실험을 위주로 검증하나 이 방법은 안전성 측면에서 주의를 요하는 작업이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위해서 실험실내의 시스템 검증 실험 장치 및 그 기법을 개발하였다.

최근 Hardware-in-the-loop-simulation (HILS)기법이 DSP기술의 저변화와 함께 관심을 끌기 시작하고 있으며 본 연구에서도 이를 주축으로 한 실험 기술을 개발하고자 한다.

* 정회원, 홍익대학교 기계공학과 대학원

** 홍익대학교 기계공학과 대학원

*** 정회원, 홍익대학교 기계공학과

본 논문에서는 HILS를 이용하여 실험실내에서 실차 실험과 가장 근접한 차량 환경을 구현한 후 컴퓨터를 이용한 차량 제어를 수행할 경우 실차 실험에서 발생할 수 있는 문제점을 해결할 수 있으며 더 나아가 실차 실험으로는 할 수 없는 여러 가지 극한 테스트도 임의로 수행할 수 있는 장점이 있다.

2. 간략화 된 차량 모델

슬라이딩 모드 제어 이론에 적용하기 위한 엔진모델은 공기와 연료의 동적 거동에 중점을 두고 개발한 Dobner¹⁾의 모델이 근간을 이루며 이는 Hedrick²⁾과 Moskwa³⁾에 의해 보다 정교하게 모델로 재구성된다. 토크컨버터는 성능 실험 데이터를 통하여 입출력간의 대수적인 관계식을 구한 Kotwicki⁴⁾모델을 기반으로 하였으며 트랜스미션과 차체사이에 동력 전달 장치로서의 역할을 하는 드라이브트레인은 Pacejka⁵⁾의 타이어 모델을 사용하였다. 본 논문에서는 이를 종합하고 몇 가지 가정 하에 중요도가 높은 4개의 상태 변수들을 추출한 간략화된 모델^{6,7)}을 사용하였다.

3. 슬라이딩 모드 제어를 이용한 ACC 제어기 설계

기본적으로 ACC 제어기에서 설정되는 슬라이딩 평면(sliding surface)은 차량의 추종오차에 관련된 하나의 슬라이딩 평면과 추종 오차로부터 계산된 이상적인 가속도를 얻기 위한 스로틀 밸브의 개도량과 브레이크 토크에 연관된 두 개의 슬라이딩 평면으로 구성된다. ACC제어기에서 추종 오차로서 고려되는 값은 상대속도 v_r 와 일탈거리 δ 이고 첫 번째 슬라이딩 평면은 선행 차량과의 일탈거리만으로 슬라이딩 평면을 설정

하게 된다.

$$S_1 = \delta = x_r - S_d \quad (1)$$

$$\dot{S}_1 = \dot{\delta} = v_r - \dot{S}_d = v_r - h\dot{v} = -\eta_1 F_s(S_1) \quad (2)$$

이 때 δ 는 선행차량과의 상대 거리, v_r 은 상대 속도, h 는 차량 간격 정책에 따른 시간 정책 간격(time headway: 단위 sec)이다. 우변은 모델링되지 않은 동역학 요소에 대한 영향을 보상하기 위한 항으로 η_1 은 제어기의 수렴 특성을 결정하는 설계 변수이고 F_s 는 슬라이딩 함수로서 부호(sign)함수 또는 포화(saturation)함수 등이 쓰인다. 위 식으로부터 원하는 가속도는 S_1 과 \dot{S}_1 을 0으로 만들게 되고 \dot{S}_1 을 0으로 만드는 원하는 가속도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{v}_{f,des} = \frac{v_r + \eta_1 F_s(S_1)}{h} \quad (3)$$

두 번째 슬라이딩 평면은 첫 번째 슬라이딩 평면으로부터 얻어진 원하는 가속도를 낼 수 있는 스로틀의 개도량을 결정하는 슬라이딩 평면이다. 따라서 이 슬라이딩 평면은 가속 특성과 토크 값을 결정하는 역할을 하게 된다. 스로틀 개도량의 결정은 스로틀을 통한 공기 유입으로부터 차량 가속도가 생성되는 일련의 상태 방정식을 역으로 계산하여 결정하게 된다. 우선적으로 $\dot{v}_{f,des}$ 를 얻을 수 있도록 하는 엔진의 토크 $T_{net,des}$ 은 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$J_{eq} \dot{\omega}_e = T_{net} - T_{load} \quad (4)$$

여기서 J_{eq} 는 유효관성이며 ω_e 는 엔진의 각속도(rad/s)이다. 다음은 $T_{net,des}$ 를 생성하기 위한 흡기다기관의 압력 $P_{m,des}$ 를 구하고 이상기체 상태방정식을 이용하여 흡기

다기관을 공기 질량 $m_{a,des}$ 를 구한다.

$$P_{m,des} = P_m(w_e, T_{net,des}) \quad [\text{engine map}] \quad (5)$$

$$m_{a,des} = \frac{P_{m,des} V_m M_{air}}{RT_m} \quad (6)$$

여기서 V_m 은 흡기다기관의 부피, M_{air} 는 공기의 분자량, R 은 일반기체상수, T_m 은 흡입공기 온도이다. 설계되는 제어기에서 설정되는 또 하나의 슬라이딩 평면은 흡기다기관의 공기 질량 $m_{a,des}$ 과 현재 흡기다기관의 공기 질량 m_a 와의 오차로 구성된다. 이때 m_a 는 흡기다기관의 압력센서로부터 측정된 압력값 P_m 과 이상기체 상태 방정식으로부터 얻어진다.

$$S_2 = m_a - m_{a,des} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{S}_2 &= \dot{m}_a - \dot{m}_{a,des} \\ &= \dot{m}_{ai,des} - \dot{m}_{ao} - \dot{m}_{a,des} \\ &= -\eta_2 F_s(S_2) \end{aligned} \quad (8)$$

m_a 는 흡기 다기관내의 공기 질량을 나타내고, 아래첨자 i, o 는 유입, 유출되는 공기 질량을 나타낸다. 따라서 스로틀을 통과해야 하는 이상적인 공기 유량 $\dot{m}_{ai,des}$ 는 식(8)로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{m}_{ai,des} = \dot{m}_{ao} + \dot{m}_{a,des} - \eta_2 F_s(S_2) \quad (9)$$

\dot{m}_{ao} 는 1차 미분방정식으로 구할 수 있으며 $\dot{m}_{ai,des}$ 가 구해지면 TC (throttle characteristics)라는 스로틀 각의 정규화된 함수를 이용하여 스로틀 밸브 액추에이터로 입력될 개도량 α_{des} 을 결정할 수 있다.

$$TC_{des}(\alpha) = \frac{\dot{m}_{ai,des}}{MAX \cdot PRK(P_m)} \quad (10)$$

$$\alpha_{cmd} = TC^{-1}(TC_{des}(\alpha)) \quad (11)$$

여기서 MAX 는 스로틀을 통과하는 최대의 공기 유량이고 PRK 는 대기압과 흡기다기관내의 압력비로 나타낸 정규화된 함수이다. 식(10)에 의해 TC_{des} 의 값이 결정되면 TC^{-1} (TC inverse)에 의해 TC_{des} 값에 해당하는 스로틀 밸브의 개도량 α_{des} 가 식(11)에 의해 구해진다. 세 번째 슬라이딩 평면의 역할은 차속의 감속이 필요한 경우 즉 첫 번째 슬라이딩 평면에서 계산된 $\dot{v}_{f,des}$ 가 0 이하의 가속도 값일 경우, 주어진 가속도 $\dot{v}_{f,des}$ 로 감속할 수 있는 브레이크 토크를 내도록 하는 브레이크 제어 입력을 결정하는 역할을 한다. 브레이크 토크를 계산하기 위한 세 번째 슬라이딩 평면은 브레이크 토크에 직접 설정된다.

$$S_3 = T_b - T_{b,des} \quad (12)$$

$$\dot{S}_3 = \dot{T}_b - \dot{T}_{b,des} = -\eta_3 F_s(S_3) \quad (13)$$

여기서 T_b 는 브레이크 토크이고 $T_{b,des}$ 는 원하는 브레이크 토크이다. 윗 식으로부터 브레이크 제어 입력 $T_{b,cmd}$ 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\dot{T}_{b,cmd} = \dot{T}_{b,des} - \eta_3 F_s(S_3) \quad (14)$$

$$T_{b,cmd} = T_b + \tau_b \dot{T}_{b,cmd} \quad (15)$$

식(15)는 일차원 브레이크 시스템을 나타내며 τ_b 는 시정수이다. 이상에서 차량을 감속시키기 위하여 브레이크 토크를 구하였으며 이 값은 바퀴로 직접 입력되어 차속을 줄이게 된다.

4. Powertrain HILS

4.1 HILS의 구성

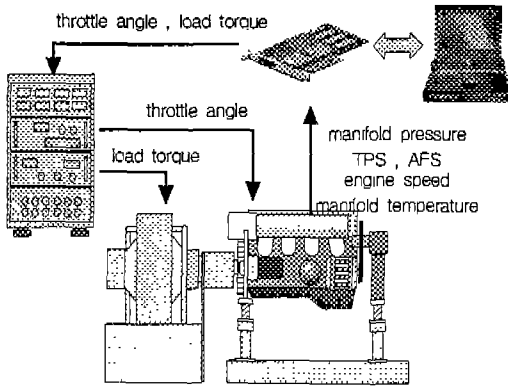


Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

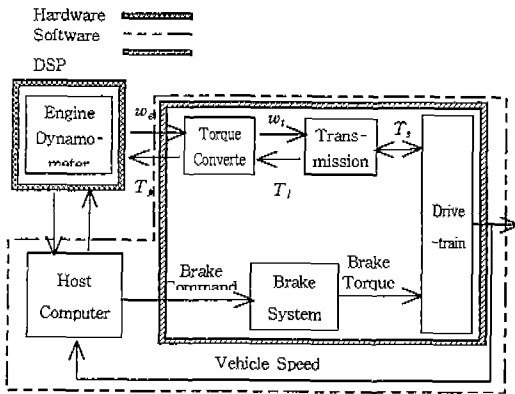


Fig. 2 Block diagram of powertrain HILS

HILS의 실험 장치 구성은 엔진, 동력계(dynamometer), 스로틀 제어기 및 액츄에이터(actuator), 자료 취득 장치 등으로 구성된다.(Fig. 1) 본 실험에서 사용된 동력계는 수냉식 와전류(eddy-current)방식의 전기 동력계이며 최대 제동 토크는 $39 \text{ Kg} \cdot \text{m}$ 이다. 동력계에 설치된 엔진은 국내 K사에서 사용되고 있는 직렬 4기통 DOHC 1793cc 가솔린 엔진이다. 엔진의 구동은 0.9도의 스텝각으로 1초당 900도를 회전할 수 있는 스텝모터를 이용하였으며 흡기다기관 압력을 측정하기 위한 압력센서

가 장착되어 있다. 엔진을 구동시키기 위한 신호를 내보내거나 엔진의 상태를 얻기 위한 장치로서 엔진의 부하토크와 스로틀 각을 출력으로 내보내고 엔진 RPM, 흡기다기관 압력, AFS 센서 값 등을 받아 실시간 HILS를 하기 위해 데이터 취득 장치가 사용된다.

4.2 실시간 HILS

차량 간격 제어를 위한 기본 개념은 Fig.2와 같다. Fig.2에서 HILS의 구성은 크게 하드웨어부분과 소프트웨어부분으로 나누어지며 다시 하드웨어는 엔진과 동력계와 동력계 제어기로, 소프트웨어 부분은 실시간 연산을 가능하게 하는 DSP(DS1102 board)와 호스트 컴퓨터로 나누어진다.

4.3 동력계의 문제점 해결방안

위에서 언급한 동력계의 부하 토크의 시간 지연과 스로틀 개도에 따른 엔진 RPM 변화는 HILS에 있어서 그 성능에 영향을 미친다. 만약 이와 같은 현상을 고려하지 않은 채 실험을 한다면 정확한 제어 이득값을 찾을 수 없을뿐더러 실제 차량과는 전혀 다른 상황에서 실험하는 것이 된다. 따라서 실제 HILS 실험에서는 다음과 같은 가정이 필요하다.

- 주행중 차량의 RPM은 차속이 0이 아니라면 스로틀 각도가 0이라도 900~1000RPM이 넘기 때문에 HILS에서는 각도를 최소 1° 는 항상 개도한 상태에서 실험을 한다.
- 스로틀 밸브 각도가 0이 되었을 때 차량은 관성에 의해 주행 속도가 서서히 감소하지만 HILS에서는 엔진만이 구축되어 있는 관계로 차량의 질량에 관한 관성을 물리적으로 구현할 수 없기 때문에 스로틀 각도가 0이 되는 순간의 엔진 RPM과 정미 토크값(T_{net} : 차량 구동에 쓰

이는 순수 엔진 토크값)을 입력받아 0이 아닌 스로틀 각도를 엔진맵을 통하여 찾은 후 그 값을 스로틀에 입력 시켜서 차량속도를 유지한다.

5. 실험 결과

5.1 실험조건 1

5.1.1 일반적인 선행차량 속도 프로파일

선행차량의 주행 프로파일 조건은 다음과 같다. 초기 ($t=0\sim 12\text{sec}$)구간에서는 10 m/s 의 등속도로 주행을 하고 가속구간 ($t=12\sim 28\text{sec}$)에서는 0.5 m/s^2 로 가속한다. 다시 정속구간 ($t=28\sim 32\text{sec}$)에서는 18 m/s 으로 등속 주행을 하고 감속구간($t=32\sim 48\text{sec}$)에서는 0.5 m/s^2 로 감속을 한다. 선행차량의 속도 프로파일을 위의 조건과 같이 주었을 때 Fig.3, 4, 5, 6은 시뮬레이션결과와 HILS 실험결과와의 비교이다.

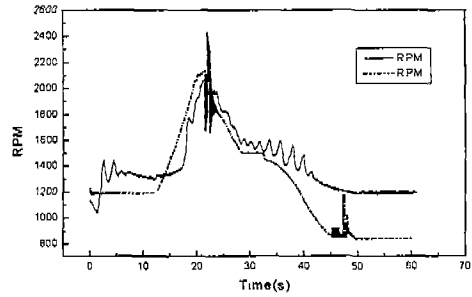


Fig. 5 RPM

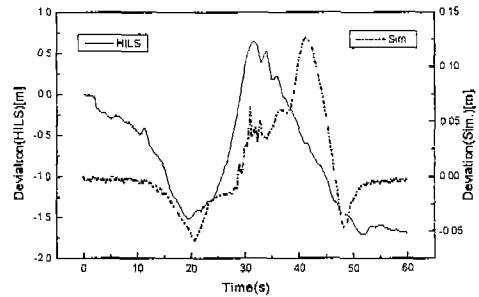


Fig. 6 Deviation

그림에서 보면 선행차량의 속도는 어느 정도 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 스로틀 개도가 0이 되었을 때의 RPM 변화에서 감소하는 경향이 있긴 하지만 차속을 유지하기 위해 스로틀 개도가 열려 RPM이 1000 이상 발생하는 것을 볼 수 있다.

5.1.2 극한 상황

실제 차량운행에 있어서 발생 할 수 있는 극한 상황 중 선행차량의 급가속과 외부에서 들어오는 부하 (노면의 영향, 언덕길 운행 등)에 대해서도 제어 성능을 발휘하는지를 실험하였다. 급가속은 선행차량 프로파일에서 2.0 m/s^2 으로 주었고, 부하는 등속 운행 중에 170초구간부터 1000 Nm 의 토크로 바퀴에 직접 적용되도록 하였다. 또한 ACC를 실제 차량에 적용하기 위해서는 선행 차량의 속도 정보와 상대거리 정보를 알아야 한다. 이는 거리센서와 속도센서를 사

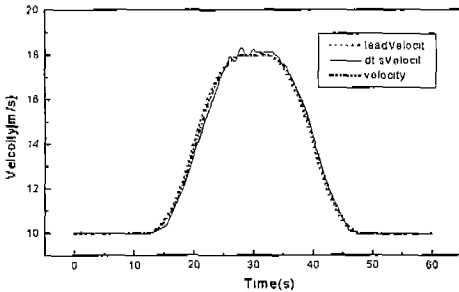


Fig. 3 Velocity

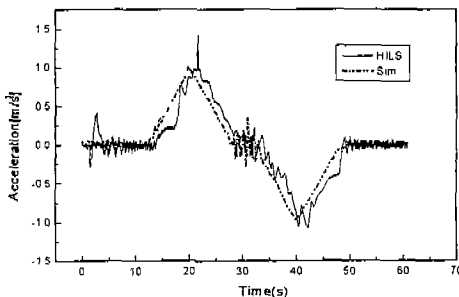


Fig. 4 Acceleration

용하여 알아내는데 이때 센서의 출력신호에 노이즈(noise)가 포함되면 제어 성능이 좋지 않은 영향을 미칠 것이다. 따라서 HILS 실험으로 이를 검증하고 그런 상황에서도 강한 제어 성능을 가짐을 확인 하고자 한다.

● 노이즈가 없는 경우

Fig.7과 Fig.8은 센서 노이즈를 넣지 않고, 급가속과 부하만 주었을 때의 시뮬레이션과 HILS의 비교이다.

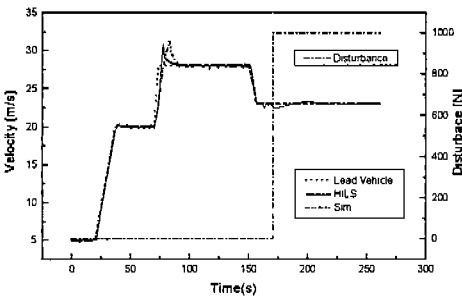


Fig. 7 Velocity (without noise)

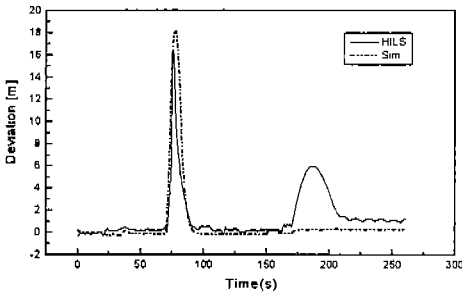


Fig. 8 Deviation (without noise)

속도 프로파일에서 보면 시뮬레이션과 HILS 모두 선행차량의 급가속 부분에서 오버슈트(overshoot)가 발생하는 것을 볼 수 있고, HILS에서는 정속 구간과 외부 부하가 적용되는 170초 구간에서 약간의 진동이 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 일탈 거리도 선행 차량의 급가속 부분과 부하가 들어간 부분에서 증가하였다가 다시 감소하는 것을 볼 수 있다.

● 노이즈가 있는 경우

다음 Fig.9과 Fig.10은 센서 노이즈가 포함된 경우의 시뮬레이션과 HILS의 실험 결과이다. 노이즈는 가우시안 노이즈(Gaussian random noise)를 선행차량 속도 프로파일에 첨가하였다.

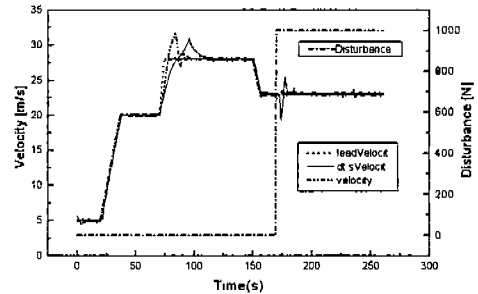


Fig. 9 Velocity (with Gaussian noise)

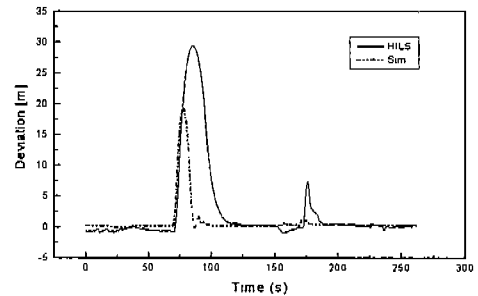


Fig. 10 Deviation (with Gaussian noise)

노이즈가 없는 경우와 유사한 결과를 얻을 수 있었으나 90초 부분의 정속구간에서 노이즈의 영향으로 약간 진동하는 현상을 볼 수 있고, 170초 부근의 부하가 가해진 부분에서 시뮬레이션보다 HILS가 더 큰 속도 변화가 있었다. 그리고 급가속 부분에서 선행 차량과의 상대거리가 멀어지는 것을 확인할 수 있다.

5.2 실험조건 2

일반적으로 ACC를 적용하는 차량 주행 상황은 여러 가지가 있을 수 있다. 앞의 실

협조건 1은 선행차량과 추종 차량간의 상대 거리가 초기에 안전거리와 동일하다고 가정 을 하고 실험하였다. 하지만 실차 실험에 있어서 초기에 상대거리를 안전거리와 같게 한다는 것은 무리가 따른다. 그리고 ACC 시스템에서 가장 중요한 작업 중 하나는 차 량 주행 중 선행 차량과 유지해야 할 간격을 결정하는 것이다. 차량 간격을 결정하는 방법에 따라 도로 용량에 많은 차이를 가져 오고 제어 성능도 차이가 크다. 따라서 안 전거리를 결정하는 방법에서 시간 정책 간 격을 변화시켜 실차에서 테스트하기 힘든 안전거리가 아주 작을 경우도 HILS에서는 실험할 수 있다.

5.2.1 초기 상대거리가 안전 거리보다 멀 경우

안전거리는 차량의 속도에 따라 변하지만 초기 속도에 의해 결정되는 안전거리 보다 상대거리가 멀 경우의 시뮬레이션과 HILS 실험 결과이다. 초기 10 m/s 의 속도로 추 종 차량이 주행하고 있을 때의 안전거리는 5 m인데 반해 상대거리는 7 m 일 때의 경 우이다.

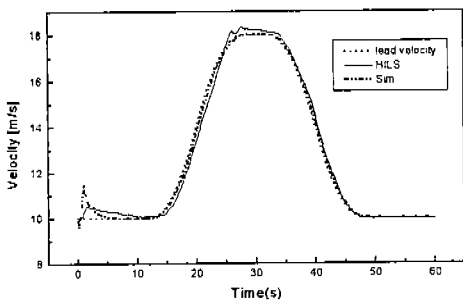


Fig. 11 Velocity (initial relative distance 7m)

Fig.11과 Fig.12에서는 초기에 거리 오차 가 크므로 스톱 앤드 가이드 시스템이 작동하여 차속이 크게 증가하였다가 다시 감소하는 경향을 볼 수 있다.

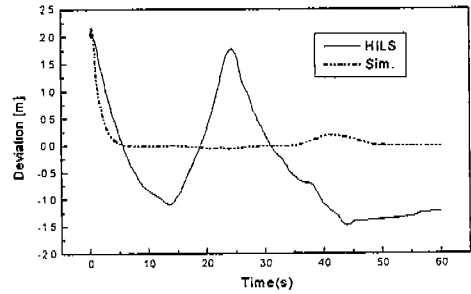


Fig. 12 Deviation (initial relative distance 7m)

선행차량 속도는 시뮬레이션 과 HILS 실험 결과와 비슷한 경향을 보이나 일탈 거리 에서 HILS 실험 결과가 좀 더 큰 오차를 보인다.

5.2.2 초기 상대거리가 안전거리 보다 가까울 경우

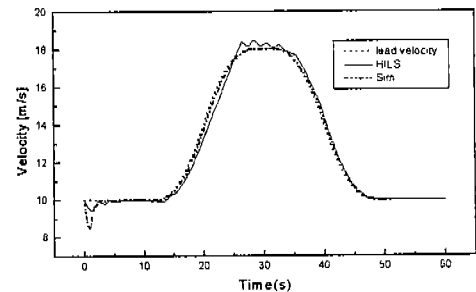


Fig. 13 Velocity (initial relative distance 3m)

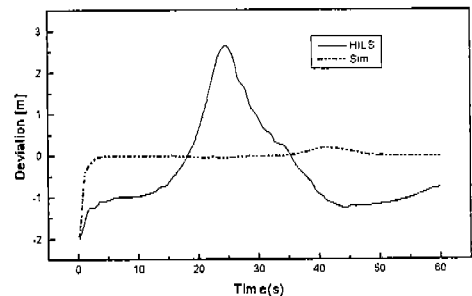


Fig. 14 Deviation (initial relative distance 3m)

Fig.13과 Fig.14는 초기 안전거리가 5 m인데 반해 상대거리가 3 m 일 경우의 시뮬레이션과

HILS 실험 결과이다. 초기 상대거리가 안전거리보다 가까우므로 브레이크가 작동하여 차속이 감소하였다가 다시 증가하는 경향을 볼 수 있다.

5.2.3 시간 정책 간격이 0.1 인 경우

안전거리를 결정 짓는 변수 중에 시간 정책 간격은 어느 한 지점에서 차량 1대가 통과하는데 걸리는 시간을 나타낸다. 따라서 시간 정책 간격이 작으면 도로 용량은 증가하게 되며 그에 따라 차량 간격은 줄어들게 되어 주행 안정성을 확보하는데 제이기 설계가 그만큼 중요하게 된다. 이번 실험에서는 시간 정책 간격을 0.1로 안전 거리를 1.3 m로 설정하고 실험을 수행하였다.

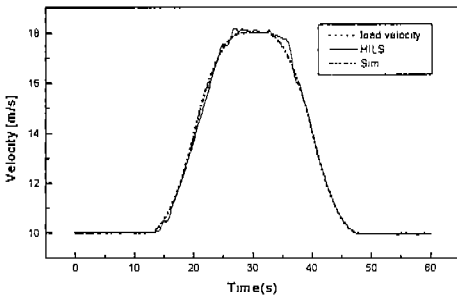


Fig. 15 Velocity (time headway 0.1)

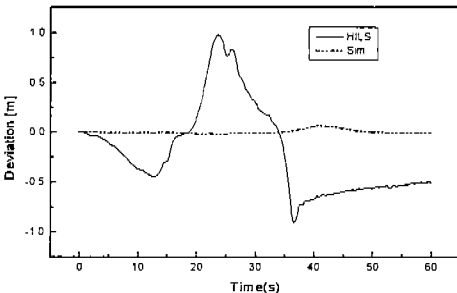


Fig. 16 Deviation (time headway 0.1)

Fig.15에서 후속차량의 속도 프로파일을 비교하였을 때 시뮬레이션과 HILS의 후속 차량 속도 프로파일이 매우 흡사한 결과를 보임을 알 수 있으며 Fig.16의 일탈 거리에

서도 값에서는 약간의 차이가 있지만 안전 거리를 1.3 m로 설계한 점을 감안하면 HILS도 만족할 만한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구의 궁극적인 목적은 자체적으로 실차 실험을 수행하기 어려운 점과 극한 상황(차간 간격, 가속도, 노면 상태 등등) 실차 실험 중 발생할 수 있는 사고에 대한 안정성을 예측하기 위해 실험실내의 엔진과 동력계와 차량에 대한 수학적 모델을 이용하여 차량 자동 간격 제어 실험 기법을 개발하는데 있으며 이를 위하여 실시간 powertrain HILS 실험 기법을 개발하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 실시간 HILS는 적용 대상에 따라 다양한 구성을 가질 수 있으며 기본적으로 동역학적 모델, 시스템 제어 로직과 같은 이론적인 분야와 실시간 연산이 가능한 CPU등으로 구성될 수 있는 시스템 설계를 위한 종합적인 실험 평가 수단으로서 본 연구의 실시간 powertrain HILS의 구성은 차량 모델 중 비선형성이 강한 엔진은 하드웨어가 되며 나머지 부분은 소프트웨어로서 DSP(DS1102)에서 실시간 연산을 하여 실험을 하였고 ACC뿐만이 아니라 이와 유사한 실험을 위한 기초를 마련하였다.

2) 실차 실험에서 수행하기 어려운 선행 차량의 급가속, 외부 부하와 센서 노이즈 현상과 같은 여러 극한 상황을 설정하여 powertrain HILS에 적용하여 실차 실험의 결과를 예측 가능케하였다. 그리고 실제적인 차량 주행 상황을 기반으로 하여 초기에 안전거리 보다 상대거리가 멀 경우와 가까운 경우에 대해서도 실험하였다.

3) 또한 수학적으로 모델링되어 있는 차량 모델의 시뮬레이션 결과와 powertrain

HILS의 실험 결과를 비교하여 수학적 차량 모델이 실제 차량과 유사한 거동을 보임으로써 모델의 정확성을 확인할 수 있었다. 앞으로 이 같은 결과를 토대로 실제 차량에 직접 적용하여 ACC 시스템을 구성할 수 있을 것이다.

향후 과제로서 본 논문에서 고려하지 않은 극한상황에 해당하는 급제동 실험과 차량의 속도 증감에 따른 적절한 차량간격의 조정(시간정책간격의 조정) 등과 같은 다양한 실험이 수행되어야 한다.

참 고 문 헌

1. Dobner, D. J., "A Mathematical Engine Model for Development of Dynamic Engine Control", SAE Paper 800054, 1980.
2. Moskwa, J. J., and Hedrick, J. K., "Modeling and Validation of Automotive Engine for control Algorithm Development", Transactions of the ASME, Vol.114, pp. 278-285, June 1992.
3. Moskwa, J. J., "Automotive Engine Modeling for Real Time Control", Ph.D. Thesis, M.I.T., 1988.
4. Kotwicki, A. J., "Dynamic Models for Torque Converter Equipped Vehicle", SAE paper 820391.
5. Bakker, D., Nyborg, L., Pacejka, H. B., "Tire Modelling for Use in Vehicle Dynamics Studies", SAE paper 870421.
6. 임철훈, 장광수, 김영원 "차량 제동장치의 동역학적 모델링 및 해석", 한국자동차공학회 1997 춘계학술대회논문집, Vol. 2, pp. 270-277.
7. 이동현, 장광수, "슬라이딩 모드를 이용한 차량 간격 자동제어", 한국자동차공학회 1997 춘계학술대회논문집, Vol. 1, pp. 592-597.