

스로틀 조절 방식에 기초한 TCS 슬립 제어 시스템의 HWILS 구현

HWILS Implementation of TCS Slip Control System Based on Throttle Adjustment Approach

송 재 복*, 홍 동 우**
J. B. Song, D. W. Hong

ABSTRACT

Traction control systems(TCS) improve vehicle acceleration performance and stability, particularly on slippery roads through engine torque and/or brake torque control. This research mainly deals with the engine control algorithm based on adjustment of the engine throttle valve opening. Hardware-in-the-loop simulation(HWILS) is carried out where the actual hardware is used for the engine/automatic transmission and TCS controller, while various vehicle dynamics are simulated on real-time basis. Also, use of the dynamometer is made in order to implement the tractive force that a road applies to the tire. Although some restrictions are imposed mainly due to the capability of the dynamometer, simplified HWILS results show that the slip control algorithm can improve the vehicle acceleration performance for low-friction roads.

주요기술용어 : TCS(구동력 제어 시스템), Longitudinal slip control(직진 슬립 제어), Hardware-in-the-loop simulation(HWILS), Dynamometer(동력계)

1. 서 론

최근 차량의 안전성에 대한 요구가 증가되면서, 에어백과 같은 수동 안전 시스템뿐만 아니라

ABS와 같은 능동 안전 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되어 실제 차량에 장착되고 있다. 또한, 전자 및 제어 공학의 발전에 힘 입어 차량에도 마이크로 프로세서를 이용하는 많은 제어 시스템들이 장착되어 차량의 안정성 향상 및 고급화에 기여하고 있다. 10여년 전에 개발된 구동력 제어 시스템(traction control system, TCS)은

* 정회원, 고려대학교 기계공학과
** 현대자동차

차량의 구동 성능 및 안정성을 향상시켜 주는 시스템으로, 미끄러운 노면에서의 발진 또는 가속시에 구동력을 증가시키는 직진 슬립 제어 기능과 차량의 선회시에 조향 안정성을 향상시키는 트레이스 제어 기능 등을 포함하고 있다.¹⁾ 본 논문에서 주로 취급하는 직진 슬립 제어는 운전자가 가속 페달의 조작을 통해서 엔진의 스로틀 밸브 개도를 조정함으로써 구동륜의 속도(대부분의 경우에 차량의 속도)를 조절하는 역할을, 미끄러운 노면에서의 발진이나 가속과 같은 상황에서는 슬립 제어 알고리즘에 의해서 운전자의 의지와는 상관 없이 대신 수행하는 것을 말한다.

한편, 최근에 고속 연산을 수행할 수 있는 컴퓨터나 DSP 등과 같은 하드웨어의 등장으로 종래에는 많은 시간이 소요되던 시뮬레이션을 실시간으로 수행하는 것이 가능해졌다. 이로 인해서 실차 시험과 전체 시뮬레이션의 중간 단계로 시험 대상이 되는 요소는 하드웨어로, 나머지는 실시간 시뮬레이션으로 처리함으로써 비용을 절감하고, 동일한 시험 조건에서 대상 요소를 검사할 수 있는 방식이 등장하게 되었는데, 이를 hardware-in-the-loop simulation(HWILS) 방식이라 한다.²⁾

본 논문에서는 엔진의 주 스로틀 밸브의 조절 방식을 통해서 차량의 직진 슬립을 적절히 제어하여 차량의 가속 성능을 향상시키는 제어 시스템에 대한 연구의 일부로서, 차량 및 제어기 전체를 시뮬레이션만으로 처리하였던 과거 연구³⁾의 다음 단계로 엔진/자동 변속기 및 제어기 등을 하드웨어로, 각종 차량 동역학을 실시간 시뮬레이션으로 처리하는 HWILS를 구현하고자 한다.

이를 위해서 우선 ETCS 방식에 기초한 직진 슬립 제어의 개념을 설명한다. 그리고 HWILS 방식을 이용한 슬립 제어 시스템의 구현에 대해서 자세히 언급하며, 또한 HWILS 구현에서 가장 중요한 역할을 담당하는 동력계에 대해서 그 운전 방식 및 제한 요소 등에 대해서 살펴보기로 한다.

2. ETCS 방식에 기초한 직진 슬립 제어

TCS는 크게 엔진 제어 방식(ETCS)과 브레이크 제어 방식(BTCS)으로 나뉘어진다. 엔진 제어 방식이란 엔진에서 발생하는 토크량을 직접적으로 제어하는 방식으로, 스로틀 밸브의 조절, 연료 분사량의 조절 또는 점화 시기의 조절 등의 방식이 사용되는데, 여기서는 엔진 ECU나 배기가스 등에 큰 영향이 없이 구현할 수 있는 스로틀 밸브 조절 방식을 채택하여 ETCS를 수행한다. 우선 차량의 가속 성능에 대해서 간략히 설명한 후에, ETCS 방식에 기초한 직진 슬립 제어 알고리즘에 대해서 살펴 보기로 한다.

2.1 차량의 가속 성능

일반적으로 차량의 가속 능력은 두 가지 요인에 의해서 결정된다.⁴⁾ 첫째 요인은 엔진에 의해서 발생하는 동력인데, 이 동력은 동력 전달 장치를 거쳐서 구동 토크의 형태로 구동축 및 구동륜에 전달되는데, 만약 노면과 타이어 사이에 접착이 충분하다면 이 구동 토크는 거의 전부 구동력으로 전환되어, 차량에 가해지는 각종 부하를 이겨내고 차량을 가속하는 데 사용된다.

차량의 가속 능력을 결정하는 둘째 요인은 노면과 타이어 사이의 접착으로, 이 요인은 빗길, 눈길 및 빙판과 같은 저마찰 노면에서의 가속시에 중요하게 된다. 즉, 이 경우에는 차량에 전달해 줄 수 있는 최대 구동력은 구동 토크의 크기에 상관 없이 노면과 타이어 사이의 마찰력에 의해서 결정되며, 이 값은 노면과 타이어 사이의 마찰 계수와 타이어에 가해지는 수직 하중의 곱으로 표시된다. 따라서 엔진으로부터 전달되는 구동 토크 중의 일부만이 실제 구동력으로 전환되며, 전환되고 남은 여분의 토크는 구동륜의 회전 속도의 급격한 증가를 초래하게 된다. 이러한 상황이 발생하게 되면, 슬립율이 급격히 증가하게 되고 이는 곧 마찰 계수의 저하를 초래하므로 구동력이 더 저하되는 악순환이 반복된다.

2.2 직진 슬립 제어

앞서 설명하였듯이 저마찰 노면에서는 타이어와 노면 사이의 점착의 정도가 차량의 가속 성능을 좌우한다. 타이어와 노면 사이의 점착(즉, 마찰 계수)에 영향을 주는 변수로는 노면의 종류 및 상태, 타이어의 종류 및 상태, 그리고 타이어에 작용하는 하중, 슬립각 및 슬립율 등을 들 수 있다. 이 중에서 주행 중에 비교적 쉽게 변화시킬 수 있는 변수로는 구동륜이 미끄러지는 정도를 나타내는 슬립율(slip ratio)이 있는데, 가속시의 슬립율은 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{V_w - V_v}{V_w} \times 100\% \quad (1)$$

여기서, λ 는 슬립율, V_w 는 구동륜의 속도(구동륜의 회전 속도(ω_w)×타이어의 반경(r_w)), V_v 는 차량의 속도를 각각 나타낸다.

Fig.1은 슬립율에 따른 구동력 계수(tractive force coefficient)를 나타내는 그림이다. 차량의 주행시에 타이어에서의 마찰력은 직진 방향의 구동력과 횡 방향의 횡력으로 나뉘어지는데, 본 연구에서는 직진 주행만을 고려하여 횡력이 0이 되므로 구동력이 바로 마찰력이 된다. 그림에서 알 수 있듯이, 슬립율이 0일 때는 구동력 계수, 즉 구동력이 0이 된다. 슬립율이 증가함에 따라 구동력이 거의 비례적으로 증가하여 대체로 15~25% 정도의 슬립율에서 최대 구동력이 발생

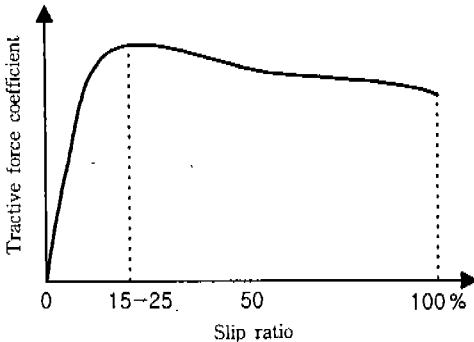


Fig.1 Plot of slip ratio vs. tractive force coefficient

하다가, 슬립율이 계속 증가함에 따라 구동력은 감소한다. 최대 구동력에 해당하는 슬립율은 노면 조건이나 타이어의 종류에 따라서 달라진다.

따라서, 저마찰 노면에서의 발진이나 가속 성능을 향상시키기 위해서는 구동력 계수를 극대화시키는 것이 가장 중요하다. 이 때, 운전자의 과도한 가속 페달 조작에 의해 야기되는 과도한 구동 토크는 가속 성능에 도움을 주지 못할 뿐만 아니라, 슬립율을 급격히 증가시켜서 구동력 계수를 오히려 감소시키는 역할을 하게 된다. 이러한 과잉 구동 토크는 원인이 되는 엔진 토크 자체를 줄이거나 제동 토크를 가해줌으로써 감소시킬 수 있다.

그러므로 ETCS의 직진 슬립 제어에서는 구동 토크를 적절히 제어하여 구동력 계수가 최대가 되는 슬립율을 유지할 수 있도록 한다.

2.3 ETCS 방식에 기초한 직진 슬립 제어

앞서 설명하였듯이, 직진 슬립 제어는 저마찰 노면에서 과도한 엔진 토크에 의해서 오히려 구동력이 감소하는 현상을 극복하기 위해서, 슬립율이 최적값에서 벗어나서 너무 커지면 우선 출력 토크의 감소를 통해서 슬립율이 최적값으로 유지 되도록 스로틀 밸브의 개도를 적절히 감소시킨다. 그 다음에는 스로틀 밸브의 개도의 지속적인 증가를 통해서 구동력, 즉 가속 성능을 향상시킨다. 최적 슬립율을 유지하도록 스로틀 개도를 조절하는 제어 방법은 다음과 같다.

우선 상황에 따라 목표로 하는 최적 슬립율 λ^* 를 결정한 다음, 목표 구동륜의 속도를 식 (1)로부터 다음과 같이 구한다.

$$V_w^* = \frac{V_v}{1 - \lambda^*} \quad (2)$$

여기서, 구동륜의 속도 V_w 와 차속 V_v 는 구동륜 및 비구동륜에 각각 장착된 차륜 속도 센서(wheel speed sensor)를 통해서 측정된 값이다. 이 경우에 구동륜의 속도 오차인 $e = V_w^* - V_w$ 가 0이 되면 목표 슬립율을 얻게 되므로, 이 오차가 최소화되도록 적절한 제어를 수행한다. 이러한

목적으로는 단순하지만 우수한 제어 성능을 보여 주는 PI 제어 기법을 많이 사용하는데, 본 연구에서는 실제 구현을 위해서 다음과 같은 디지털 PI 제어를 사용하였다.

$$\theta(k) = \theta(k-1) + (K_p + K_I)e(k) - K_p e(k-1) \quad (3)$$

위의 차분 방정식에서 K_p 및 K_I 는 각각 비례 이득 및 적분 이득을 나타내며, 제어기의 출력인 θ 는 스톱 밸브의 개도를 나타낸다.^{3,5)} 또한, 식 (3)에서 k 는 아날로그 제어 시스템에서의 시간 t 에 해당하는 디지털 제어 시스템에서의 시간 인덱스로, 샘플링 주기를 T_s 라 하면 $\theta(k-1)$ 은 현재 시간 k 보다 한 샘플링 주기 전의 시간인 $(k-1)T_s$ 에서의 스톱 밸브 개도를 나타낸다. 이렇게 산출된 제어기의 출력은 바로 스톱 밸브 액추에이터 시스템으로 입력되어 별도의 위치 제어 시스템을 통해서 산출된 스톱 밸브 개도를 최단 시간 내에 구현하게 된다.⁶⁾

3. Hardware-in-the-loop Simulation

3.1 HWILS의 개요

시스템의 성능을 시험할 때 일부 요소들은 실제 하드웨어로 구현하고, 나머지 요소들은 수학적 모델에 근거한 실시간 시뮬레이션으로 대체하여 구현하는 방식을 Hardware-in-the-loop simulation(HWILS)이라 한다. 이러한 HWILS은 시뮬레이션과 실차 시험의 중간 단계로 볼 수 있으므로, 이 두 경우의 장점을 취할 수 있다. 즉, 시험의 대상이 되는 하드웨어를 직접 사용함으로써 시뮬레이션보다는 현실감을 더 확보할 수 있는 동시에, 많은 하드웨어 부분을 시뮬레이션으로 대체함으로써 실차 시험에 소요되는 비용을 절감할 수 있고, 실험실 환경에서도 실차 시험을 할 수 있는 장점이 있다. 또 다른 장점은 완전히 동일한 조건하에서 시험 대상이 되는 하드웨어를 반복하여 시험해 볼 수 있다는 점이다.⁷⁾

이러한 HWILS를 구현하기 위해서는 시뮬레이션이 실시간으로 수행되어야만 한다. 따라서

시뮬레이션을 단순화시키거나 고속 연산 수행 기능을 가진 컴퓨터나 DSP를 사용하여야 한다. 최근에 실험실 환경에서 엔진 및 변속기에 연결되는 동력계를 통해서 차량 동역학 등을 구현할 수 있는 HWILS 개념의 고가의 장비가 자동차 회사의 연구소 등에서 사용되고 있다. 이러한 시스템은 실험실 환경에서도 실제 주행 시험과 비슷한 효과를 발휘할 수 있으나, 가격이 매우 높다는 단점이 있다. 본 연구에서는 저가의 동력계와 PC를 사용하여, ETCS에 기초한 슬립 제어를 HWILS 개념으로 구현하고자 한다. 본 연구에 사용하는 동력계의 성능 및 기능의 제한으로 인하여 다소 제한적이며 단순화된 형태로 구현하지만, 모든 과정을 시뮬레이션으로 처리하는 것보다는 실차 시험에 접근한 방식이라 할 수 있다.

여기서는 HWILS를 이용하여 직진 슬립 제어를 구현하는 방법과 구동력의 계산 및 구현 방식에 대해서 간략히 언급한다. 또한, 사용하는 동력계의 기능상의 한계로 인한 HWILS 구현의 제한 사항 등에 대해서도 설명하기로 한다.

3.2 HWILS를 이용한 직진 슬립 제어의 구현

HWILS를 구현하기 위해서는 일부 요소는 하드웨어로, 나머지 요소는 시뮬레이션으로 처리된다. Fig.2는 HWILS 구현을 나타내는 흐름도이다. 이 그림에서 하드웨어로 처리한 부분은 다음과 같다:

- 엔진 및 자동 변속기
- 구동륜의 속도 측정
- 노면에서 구동륜에 제공하는 구동력의 구현
- 스톱 밸브의 구동부
- ETCS 직진 슬립 제어부

여기서 엔진 및 자동 변속기는 수학적 모델링에 의해서 정확히 기술하기 어려우므로 실제 하드웨어를 사용하여서 구현하였다. 또한, 구동륜의 속도 측정과 구동력의 구현 등은 구동축에 연결되어 있는 동력계를 사용하였다. 스톱 밸브를 구동하기 위해서는 모터에 의해서 구동되는 스톱 밸브 액추에이터 시스템을 사용하였고, ETCS 제

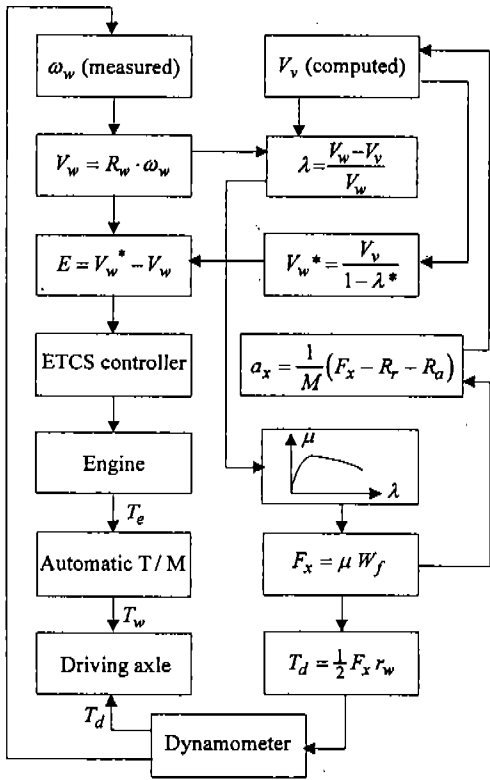


Fig.2 Flowchart for HWILS implementation

어부는 디지털 제어 방식을 채용하였다.

한편, Fig.2에서 실시간 시뮬레이션으로 처리한 부분은 다음과 같다:

- 차량의 가속 성능 산출에 의한 차속의 계산
- 슬립율에 기초한 구동력 계수 및 구동력의 계산
- 주행 저항 산출을 포함한 기타 차량 동역학

Fig.3는 HWILS의 구현에 사용된 실험 장치를 개략적으로 나타낸 것이다. 자동 변속기에서 나오는 두 구동축 중에서 한 축은 동력계의 회전자와 플렉서블 커플링을 사용하여 연결하였으며, 다른 축은 지면에 고정하여 놓았다. 이상적으로는 두 대의 동력계를 사용하여 각 차축에 연결하는 것이 바람직하나, 본 연구에서는 동력계가 한 대밖에 없으므로 동력계에 연결되지 못하는 차축을 회전하지 못하도록 고정한 것이다. 이 경우 차동 장치(differential)에 의해서, 지면에 고정된 차축의 회전 속도가 0이므로 동력계

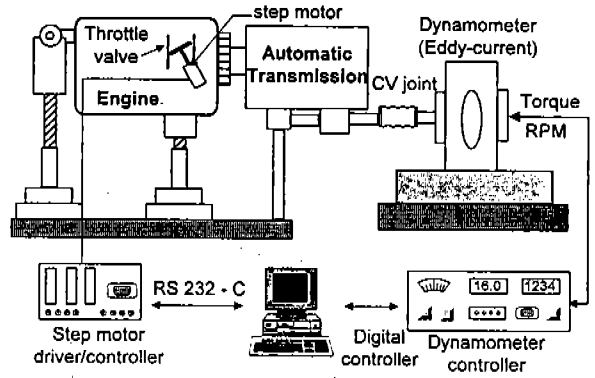


Fig.3 Schematic of experimental setup

에 연결된 차륜의 속도는 변속기의 출력 속도의 2배가 된다. 그러나 변속기에서 나오는 출력 토크는 양 구동축으로 동일하게 배분된다.

3.3 구동력의 계산 및 구현

HWILS의 구현에 있어서 구동력의 계산 및 계산된 구동력을 실제 구동축에 전달해 주는 과정이 매우 중요하다. 우선 구동륜에 적용되는 회전 동역학을 고려해 보자. 구동축에 전달된 구동 토크 T_w , 구동력 F_x 및 구동륜(즉, 구동축)의 회전 속도 ω_w 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$I_w \dot{\omega}_w = T_w - F_x r_w = T_w - T_d \quad (4)$$

여기서, I_w 는 구동축 및 구동륜의 관성 모멘트, r_w 는 타이어의 반경을 나타낸다. 즉, 구동축에 전달된 토크 중에서 구동력으로 전달되는 토크 T_d 를 제외한 잉여 토크는 구동축을 가속시키는 데 사용된다.

한편, 앞에서 설명한 바와 같이 구동력 F_x 는 전륜 구동 차량의 경우에 다음과 같이 표현된다.

$$F_x = \mu W_f \quad (5)$$

여기서, μ 는 Fig.1에서의 구동력 계수로 슬립율 λ 의 함수로 주어지며, W_f 는 두 전륜에 가해지는 수직 하중으로 다음과 같이 주어진다.

$$W_f = \frac{L_r}{L} W - \frac{h}{L} \frac{W}{g} a_x \quad (6)$$

이 때, L 은 축거(wheel base), L_r 은 차량의 무게 중심에서 후륜까지의 거리, W 는 차량의 총 중량, h 는 노면에서 차량의 무게 중심까지의 높이, a_x 는 직진 가속도를 각각 나타낸다. 이 때, 첫째 항은 정적 하중을, 둘째 항은 동적 하중을 나타낸다. 차량이 가속될 때, 수직 하중이 전차축(front axle)에서 후차축으로 전달됨에 따라 전차축에 걸리는 수직 하중이 감소함을 알 수 있다.

위의 식 (5)에서 계산된 구동력 F_x 과 타이어의 반경 r_w 을 곱한 토크의 절반(구동축이 2개이므로)에 해당하는 T_d 를 구동축에 인가해 주어야 하는데, 이 목적으로 와전류식 동력계(극동 기전사의 ECD-130 모델)를 사용하였다. 이 때, 동력계의 여러 운전 모드 중에서 정토크(constant torque) 방식을 이용하였는데, 이 운전 모드에서는 사용자가 제동 토크를 설정하여 놓으면 동력계 내부의 제어가 설정한 토크값을 유지하도록 내부적으로 제어를 수행한다. 이 동력계는 운전 중에 사용자가 온라인으로 제동 토크를 변화시킬 수 있도록 0~10V 범위의 아날로그 신호를 받아들일 수 있으므로, 매 순간 변화하는 구동력을 정확히 구동축에 전달할 수 있다. 본 실험에서는 구동력 등의 차량 동역학 계산에 소요되는 시간 및 ETCS 제어기의 특성상 샘플링

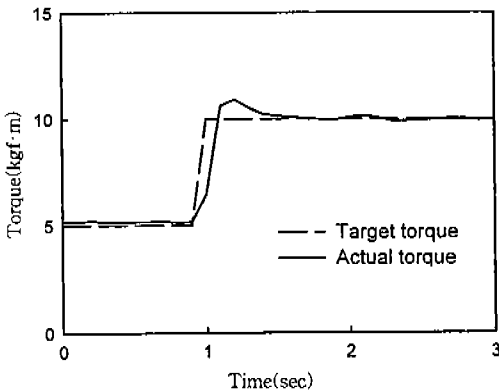


Fig.4 Dynamic response of braking torque of dynamometer subject to step change in reference torque

주기를 $T_s=50ms$ 로 선정하여, 매 샘플링 주기마다 새로 산출된 구동력에 기초한 제동 토크를 동력계에서 구현하도록 하였다.

Fig.4는 동력계의 성능을 조사하기 위해서 목표 제동 토크를 $5kgf \cdot m$ 에서 $10kgf \cdot m$ 로 스텝 형태로 변화시켰을 때의 동력계에서 실제로 구현하는 토크의 응답을 나타낸 것이다. 토크 응답은 전반적으로 약간의 오버슈트를 가진 2차 지연 시스템의 특성을 보여 준다. 초반부의 정상 상태에서 약간의 오차가 존재하지만, 이는 무시할 수 있는 양이다.

차량 동역학의 계산시에 구름 저항과 공기 저항 등과 같은 주행 저항의 영향을 고려하였다. 구름 저항 R_r 은

$$R_r = \mu_r W \quad (7)$$

로 표현되며, μ_r 은 구름 저항 계수로 차속에 따라서 비례적으로 증가한다고 가정하였다. 또한, 공기 저항은

$$R_a = C_D \frac{1}{2} \rho V_v^2 A \quad (8)$$

로 표현되며, 이 때 C_D 는 공기 저항 계수, ρ 는 공기 밀도, A 는 차량의 전면 면적, V_v 는 차속을 각각 나타낸다.

한편, 실차에서는 차속을 비구동륜인 후륜(전류 구동 차량의 경우) 속도의 평균으로 산출하나, 여기서는 다음과 같은 식에 의하여 산출하였다.

$$V_v(k) = V_v(k-1) + a_x T_s \quad (9)$$

즉, 현재 시간 k 에서의 차속은 전 시간의 차속에 한 샘플링 주기 T_s 동안의 차량 가속도 $a_x = (F_x - R_r - R_a)/M$ 에 의한 차속의 변화를 더하여 구하게 된다. 이 때, 차속은 가속도를 적분한 값에 해당하지만, 디지털 제어 시스템의 특성상 한 샘플링 주기 동안에 가속도가 일정한 값을 가지므로, 식 (9)와 같이 간단하게 표현할 수 있게 된다.

3.4 동력계에 의한 제약 요소

본 연구에 사용한 동력계는 와전류식으로 그 작동 원리는 다음과 같다. 동력계의 여자 코일에 직류 전류를 공급하면 코일 주위에 자속이 발생하게 된다. 엔진이나 변속기에 연결되어 있는 동력계의 회전자가 이 자속 중에서 회전하게 되면 자속이 변화하게 되며, 이 결과로 동력계 본체에 고정되어 있는 와류 링에 와류 전류가 유도된다. 이 때, 회전자와 와류 링 사이에 상호 작용에 의해서 회전자에는 회전을 방해하는 제동 토크가 인가되며, 그 반작용으로 와류 링에는 크기가 같고 방향이 반대인 제동 토크가 걸리게 되는데, 이 토크를 측정하는 것이다.

이러한 와전류식 동력계는 직류 입력에 의해서 제동 토크를 쉽게 제어할 수 있으며, 가격이 저가라는 장점을 갖는다. 반면에, 동력계의 회전자가 회전해야만 와류가 발생되므로, 기본적으로 회전자가 정지해 있으면 전혀 토크를 발생시키지

못하며, 회전자의 저속 회전에 대해서도 단지 작은 제동 토크만을 발생시킬 수 있다는 단점을 지니고 있다. 저속에서의 이러한 제약 요소를 알아보기 위해서 Fig.5와 같은 실험을 수행하였다. 스티로틀 개도를 4°, 10°, 12° 및 16°로 일정하게 고정된 채로, 동력계의 정토크 모드에서 설정 토크를 서서히 증가시키면서 실제로 동력계에 의해서 제공되는 제동 토크의 응답을 살펴보았다. 각 스티로틀 개도에 대해서 목표 토크가 서서히 증가함에 따라 실제 제동 토크도 점차 증가하게 되고, 따라서 식 (4)에 의하여 구동축의 속도가 점차 감소하게 된다. 하지만 어느 한계 이상이 되면 제동 토크의 값은 더 이상 증가하지 못하고 일정한 값을 유지하게 되며, 구동축도 일정한 속도를 유지하게 되는데, 구동축의 회전 속도가 높아질수록 인가할 수 있는 제동 토크가 더 커지게 된다. 즉, 구동축의 저속 회전에 대해서는 동력계가 가해 줄 수 있는 제동 토크에 한계가 존재한다.

이러한 저속에서의 단점은 ETCS에 기초한 슬립 제어 시스템의 구현에 있어서 큰 제약 요소가 될 수 있다. 즉, 저마찰 노면에서 차량의 출발 가속 성능에 대한 실험을 수행할 때, 처음 발전시 구동륜의 속도는 당연히 작게 된다. 이 때 계산된 구동력에 해당하는 토크를 목표 토크로 설정해 주더라도 동력계가 이러한 토크를 구현하지 못하게 된다. 물론 이러한 단점은 와전류식이 아닌 고가의 동력계에서는 발생하지 않는다.

4. 결과 및 고찰

앞서 설명한 바와 같이 동력계의 제약 요소에 의해서 출발 가속시의 ETCS 슬립 제어는 구현하기가 어렵다. 따라서 이에 대한 HWILS 실험은 수행하지 못하였지만, 본 연구의 목적이 시뮬레이션에서만 수행하였던 ETCS 슬립 제어 알고리즘을 보다 실제 실차 시험 환경에 가깝게 구현하여 실차 적용 여부를 평가하는 것이고, 차후 출발 가속을 포함한 다양한 주행 환경에서의 실차 시험을 위한 데이터를 수집하는 것이므로, 이와 같은 동력계에 의한 제약에도 불구하고 본 연구에서의 실험이 충분한 의의가 있다고 판단된다.

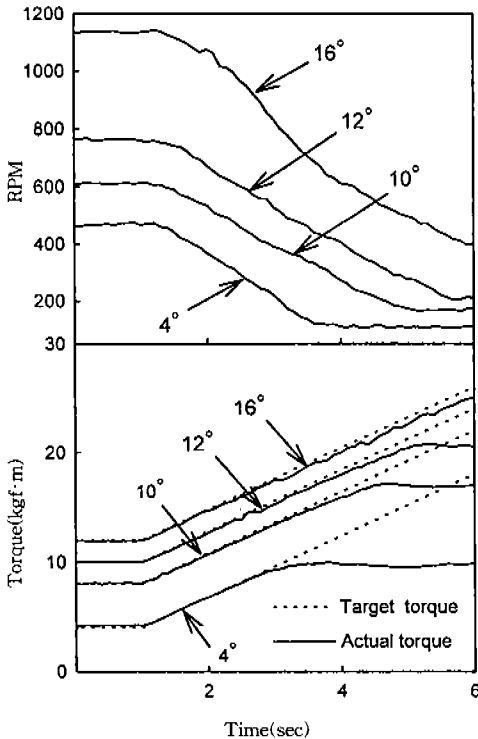


Fig.5 Limits of dynamometer torque for various driving wheel speeds

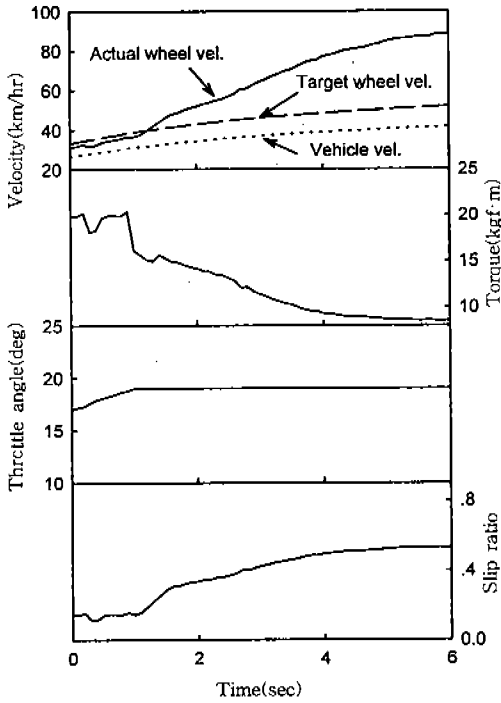


Fig.6 Vehicle responses when no ETCS slip control is carried out

이 장에서는 차량이 저속 주행 중에 미끄러운 노면을 만나게 되는 상황에 대해서 슬립 제어 알고리즘의 적용시와 비적용시를 비교하여 보았다. Fig.6은 ETCS 슬립 제어를 수행하지 않은 경우에 대한 HWLS 구현의 결과이다. 차량이 발전 후에 스로틀 개도를 증가시키면서 가속하다가 저마찰 노면을 만나는 상황으로, 그림에서 약 1초에서 저마찰 노면을 만나게 된다. 이 때, 스로틀 개도를 약 19°로 계속 유지시키도록 하였다. 마찰이 충분한 노면에서는 이 정도의 스로틀 개도에 의해서 공급되는 엔진 토크는 전혀 문제가 되지 않지만, 저마찰 노면이므로 공급된 구동 토크가 과도한 상태로 되고, 따라서 구동륜의 속도가 급격히 상승하게 된다. 그러므로 슬립율은 최적 슬립율(여기서는, 0.2로 가정하였음)에서 훨씬 벗어나서 약 0.5정도가 되며, 구동력은 계속해서 감소하게 되어 차량의 가속 성능이 저하된다.

이번에는 제어가 수행되는 Fig.7을 살펴보자. 이 경우에는 저마찰 노면을 만나서 슬립율이 어

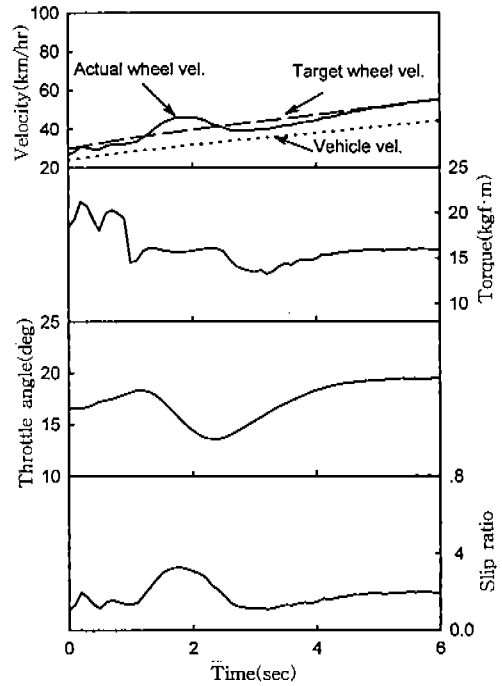


Fig.7 Vehicle responses when ETCS slip control is carried out

느 범위를 벗어나게 되면 ETCS 슬립 제어 기능이 수행되기 시작하여, 실제 구동륜의 속도가 목표 구동륜의 속도를 잘 추종하게 되고, 이 결과로 실제 슬립율이 목표 슬립율인 0.2에 근접한 상태로 유지되고 있음을 알 수 있다. 즉, ETCS 슬립 제어기인 디지털 PI 제어기에 의해서 최적 슬립율을 유지할 수 있는 스로틀 밸브의 개도가 산출되며, 운전자가 작동시킨 엑셀 페달의 위치에 상관 없이 서보 시스템을 통해서 스로틀 개도가 조절된다. 제어 동작 초기에는 과도한 구동륜의 속도를 줄이기 위해서 스로틀 개도를 급격히 감소시켜서 최적의 슬립율을 확보한 후에는, 가속을 위해서 스로틀 개도가 계속해서 증가하게 된다.

이러한 슬립 제어의 결과로, 약 5초 후에 약 45km/h 정도의 차속을 얻게 되어, 비제어의 37km/h보다 우수한 가속 성능을 보여 준다. 시간이 경과되면 이 차이가 더 커지게 된다. 또한, 비제어 시에는 노면이 제공하는 토크 T_d 가 저마찰 노면을 만나면 계속 감소하여 약 10kgf·m 정도

에 머물렀지만, 제어 시에는 이 토크가 약 15kgf·m로 유지되는 것을 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 과도한 엔진 토크, 즉 과도한 구동륜 속도는 오히려 차량의 가속 성능을 저하시킨다는 점을 이 두 경우의 비교로부터 알 수 있다.

5. 결 론

엔진 스톱들을 제어하는 TCS 방식에 기초한 슬립 제어를 HWLS 방식으로 구현하여 TCS 슬립 제어 알고리즘을 검증하는 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서 개발한 TCS 슬립 제어 알고리즘에 의해서 저마찰 노면에서 슬립율을 최적으로 유지함으로써, 구동축에 전달된 토크 중에서 차량의 가속에 사용되는 구동력으로 변환되는 토크를 증가시킬 수 있었으며, 따라서 차량의 가속 성능이 비제어시에 비하여 많이 향상되었음을 확인하였다.
- 2) 저가의 와전류식 동력계를 사용한 HWLS 방식의 실험 수행으로부터 동력계의 성능에 기인하는 제약 요소는 있었지만, TCS 시스템 전체를 시뮬레이션으로 처리하는 경우에 비해서는 보다 현실성이 있는 ETCS 슬립 제어 시험을 수행할 수 있었다. 이렇게 얻은 데이터는 실차 실험에서의 시간과 비용을 감소시킬 수 있으므로, 본 연구에서의 HWLS 방식의 실험은 충분히 가치가 있다고 판단된다.

1. 송재복, "차량 구동력 제어 시스템의 개발", 대한기계학회 동역학 및 제어 부문 학술강연회 논문집, pp. 69~76, 1996.
2. H. Hanselmann, "Hardware-in-the-loop Simulation as a Standard Approach for Development, Customization, and Production Test of ECU's", SAE Paper 931953, 1993.
3. 장종호, 송재복, "스톱 조절 방식에 의한 차량의 직진 슬립 제어 시뮬레이션", 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, pp. 414~420, 1995.
4. T. D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE, 1992.
5. K. Yamata, M. Hashiguchi, and M. Ito, "Traction Control System: Simulation Analysis of the Control System", International Journal of Vehicle Design, Vol. 12, No. 1, pp. 89-96, 1991.
6. 송재복, 김효준, 민덕인, "TCS용 스톱 액추에이터 제어 시스템", 한국자동차공학회 논문집, Vol. 5, No. 3, SAE NO 97370062, pp. 191-201, 1997.
7. W. G. Wang et al., "Transient Response in a Dynamometer Power Absorption System", SAE Paper 920252, 1992.