

엔진맵에 기초한 엔진제어 TCS 슬립제어 알고리즘의 개발

송재복* · 김병철**

(1997년 7월 23일 접수)

Development of Engine Control Based TCS Slip Control Algorithm Using Engine Map

Jae-Bok Song and Byong-Cheol Kim

Key Words : Traction Control System(TCS : 구동력제어 시스템), Slip Control(슬립제어), Engine Performance Curve(엔진맵), Throttle Control(스로틀제어), Hardware-in-the-Loop Simulation(HWILS)

Abstract

A TCS slip control system improves acceleration capability and steerability on slippery roads through engine torque and/or brake torque control. This research mainly deals with the engine control algorithm via the adjustment of the engine throttle angle. The following new control strategy is proposed and investigated; the TCS slip controller whose input is the difference between the desired driving wheel speed corresponding to the optimum slip ratio and the actual speed yields the target engine torque and then estimates the throttle angle based on the engine performance curve. Various simulation and hardware-in-the-loop simulation have been carried out. The results show the proposed strategy may compensate for the inherent nonlinearity between variation of the throttle angle and variation of the engine torque and produce better performance than the previous strategies without the engine map, especially in the high speed region.

1. 서론

구동력제어 시스템(Traction Control System : TCS)이란 저마찰 노면이나 비대칭 노면에서의 발진이나 가속시에 구동륜의 과도한 슬립을 방지하여 가속성능을 향상시키는 슬립제어(slip control) 기능과 선회가속시에 원하는 선회궤도에서 이탈하지 않도록 하여 선회 안정성을 향상시키는 선회제어(trace control) 기능을 갖는 능동 안전 시스템이다. 이러한 TCS에는 엔진의 출력토크를 제어하는

방식과 브레이크에 의한 제동토크를 제어하는 방식 등이 있다. 브레이크제어방식의 TCS는 좌우 구동륜의 독립된 제어를 통해서 비대칭 노면에 대처할 수 있고 응답속도가 빠르다는 장점이 있지만, 고속 주행시에 작동하면 승차감에 나쁜 영향을 줄 수 있고, 브레이크패드의 과도한 마모 등을 유발하게 되는 단점이 있다. 또한, 균일한 저마찰 노면에서 헛팅(hunting) 현상에 의해서 안정성이 저하되는 경우가 발생되기도 한다. 이 반면에 엔진제어 TCS 방식은 응답속도가 다소 느리지만, 고속 주행시에도 무리없이 작동할 수 있는 장점이 있다. 따라서 이상적으로는 엔진제어를 주 수단으로 수행하며, 비대칭 노면이나 경사로 발진 등과 같은 상황에서

*회원, 고려대학교 기계공학과

**회원, 고려대학교 대학원 기계공학과

브레이크제어를 보조로 병행하는 방식이 가장 바람직하나, 아직은 대부분의 경우 이 두 방식중 하나만을 채택하여 TCS를 구현하고 있다.^(1~3) 차량의 엔진에 장착되어 있는 스로틀밸브는 보통 가속기페달과 케이블을 통해 연결되어 운전자의 조작에 따라 엔진에 흡입되는 공기량을 조절함으로써 궁극적으로 엔진의 출력을 직접 조절해 주는 역할을 수행한다. 최근에 이러한 스로틀밸브의 개도(opening)를 액츄에이터를 사용하여 정확하고 신속하게 제어해 주는 시스템이 사용되기 시작하였는데, 대표적인 경우로 저마찰 노면에서의 차량의 가속성능 및 고속 선회시에 차량의 선회 안정성을 향상시키는 구동력제어 시스템(traction control system ; TCS), 운전자가 설정한 속도로 차량의 속도를 계속 유지해 주는 정속 주행제어(cruise control) 시스템 등이 있다. 또한, 미래에는 가속기페달과 스로틀밸브사이의 기계적인 케이블을 대신에 운전자의 가속기페달 조작을 센서로 감지하여 액츄에이터를 통해서 스로틀밸브를 직접 조절해 주는 DBW(drive-by-wire) 시스템이 도입될 전망이다, 이 때에도 액츄에이터에 의한 스로틀밸브의 정확한 제어가 중요하게 된다.

엔진제어방식이란 엔진에서 발생하는 출력토크를 직접적으로 제어하는 방식으로, 스로틀밸브개도의 조절, 연료분사량의 조절 또는 점화시기의 조절 등의 방식이 사용된다. 스로틀제어방식은 엔진 ECU나 배기가스 등에 큰 영향이 없이 구현할 수 있으나, 공기의 흡입에서 실제 토크발생까지는 어느 정도 전달 지연이 존재하므로 응답이 다소 느리다는 단점이 있다. 한편, 점화시기 조절은 스로틀제어보다 신속하게 엔진토크를 증감시킬 수 있는 반면에, 출력시킬 수 있는 엔진토크 변화량에는 한계가 있다. 본 논문에서는 엔진제어 TCS 중 가장 널리 사용되는 스로틀제어방식에 기초하는 엔진제어방식을 채택하여 TCS 슬립제어 기능에 대한 연구를 수행하였다.

스로틀제어방식의 TCS 슬립제어 시스템에서는 TCS가 필요한 상황이 되면 슬립제어 시스템에서 산출한 스로틀개도를 스로틀 액츄에이터를 통해서 구현함으로써 차량의 구동력을 최대화시키게 된다. 이에 대한 연구로 도요타사에는 제어기의 출력으로 직접 스로틀개도를 산출하는 방식을 적용하였으며,⁽⁹⁾ 승 등도 이와 유사한 방식으로 TCS 슬립제어 알고리즘을 개발하였다.⁽⁴⁾ 이들 방식에서는 알고리즘

은 비교적 단순하지만, 엔진의 회전속도나 토크 등에 대한 정보가 슬립제어에 포함되지 않으므로 성능이 다소 저하되는 단점이 있다. 한편, 미쓰비시사에서는 최대 구동력을 얻기 위한 목표차륜속도로부터 구동륜의 요구토크를 구한 다음, 이에 주행저항 및 동력전달 특성을 고려하여 필요한 목표 엔진토크를 구하고 엔진맵을 사용하여 스로틀개도를 구하는 방식의 TCS 알고리즘을 선보였으며, 이는 국내의 그랜저에도 적용된 바 있다.^(1,5) 그러나 이 방식은 스로틀 조절 및 점화시기 조절을 병행하고 있는데, 제어로직 자체가 많은 보정계수를 포함하고 있으므로 많은 실차 시험의 수행을 필요로 하며, 다른 차종에 쉽게 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 본 연구에서는 앞서의 연구들의 장점을 취하여 엔진맵을 사용하되 가능한 한 적용이 단순한 TCS 슬립제어 알고리즘을 개발하고자 한다. 또한, 시뮬레이션에 기초한 연구를 다소 보완하기 위해서 HWILS(hardware-in-the-loop simulation) 방식을 일부 구현하고자 한다.

2장에서는 스로틀제어방식의 TCS 알고리즘 연구에 필요한 시스템의 모델링에 대해서 간략히 소개하며, 특히 엔진 모델의 비선형성에 대해서 논하기로 한다. 3장에서는 일반적인 TCS의 개념과 스로틀제어방식 TCS 로직에 대해서 살펴보고, 위에서 언급한 2가지 제어방식에 대해서 논한다. 4장에서 엔진 모델링 및 HWILS 구현에 사용되는 실험 장치에 대해서 간략히 설명한 다음, 시뮬레이션 및 HWILS 구현의 결과에 대해서 고찰하기로 한다.

2. 시스템 모델링

본 장에서는 TCS 슬립제어 알고리즘의 개발을 위한 시뮬레이션 연구에 필요한 엔진, 자동변속기 및 차량동역학에 관련된 모델링에 대해서 언급하고자 한다. 한편, 본 연구에서 시뮬레이션과 병행하여 수행하는 HWILS에서는, 엔진과 자동변속기는 실제 하드웨어가 사용되므로 차량동역학 부분에 대한 모델링만이 시뮬레이션으로 구현된다. 이들 모델링에 대해서는 이미 여러 문헌 등에서 잘 설명되어 있으므로, 여기서는 본 연구와 직접 관련이 되는 모델링에 대해서만 간략히 살펴보기로 한다.^(6,7)

2.1 엔진 시스템의 모델링

엔진의 정상상태에서의 성능을 보여 주는 엔진

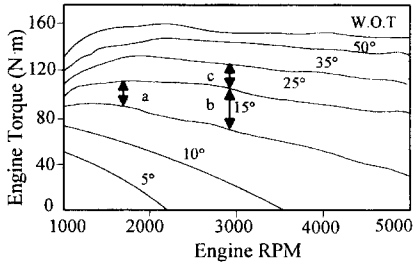


Fig. 1 Engine performance curve.

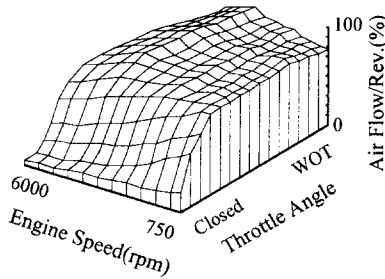


Fig. 2 Engine RPM-throttle angle-air flow rate.

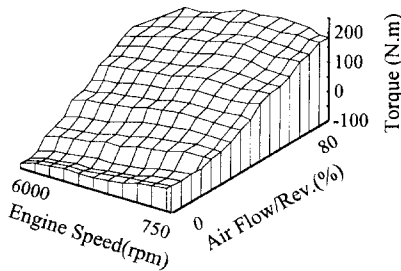


Fig. 3 Engine RPM-air flow rate-engine torque.

성능곡선은 엔진의 특성을 나타내는 수단으로 널리 사용되고 있다. 특히, 본 연구에서 개발하고자 하는 TCS 슬립제어 알고리즘은 맵(map)의 형태로 저장된 엔진성능곡선의 정보를 사용하므로, 이에 대한 고찰은 매우 중요하다. Fig. 1은 스로틀개도를 매개변수로 하여 엔진의 회전속도(rpm)와 엔진의 출력토크(N.m) 간의 관계를 나타낸 일반적인 엔진 성능곡선이다. 이 곡선은 엔진속도를 일정하게 고정시키고 스로틀개도를 조금씩 증가시키면서 엔진의 정상상태 토크를 측정하는 방법을 사용하였으며, 이 실험을 여러 엔진속도에 대하여 반복 수행함으로써 가능한 한 넓은 운전범위에 대한 모델을 수립하였다.

일반적으로 가솔린엔진은 스로틀개도의 동일한 변화량에 대해서 운전점마다 서로 다른 출력토크의

변화량을 발생시킨다는 점에서 비선형적이라 할 수 있다. 이는 Fig. 1의 엔진특성곡선으로부터 확인할 수 있는데, 예를 들어 동일한 엔진 회전속도에 해당하는 영역인 b와 c에서 스로틀개도의 10° 변화에 대한 엔진토크의 변화량이 서로 다르다는 점을 관찰할 수 있다. 일반적으로 스로틀개도가 커질수록 개도변화량에 대한 출력토크 변화량이 작아지게 되며, 스로틀개도가 어느 한도를 넘으면 스로틀개도 변화에 대해서 출력토크 변화가 거의 없어지게 된다. 한편, 동일한 스로틀개도 범위에서도 엔진의 회전속도가 다른 영역(예를 들어, a와 b)에서는 스로틀개도의 동일한 변화량에 대해서 출력토크의 변화가 서로 다르다는 점도 쉽게 관찰할 수 있다.

이러한 비선형성은 여러 다른 문헌에서도 관찰할 수 있는데, 그 중 한 예로 미쓰비시사의 자료를 인용한 Fig. 2와 3의 경우를 살펴보자.⁽⁸⁾ Fig. 2에서 엔진의 스로틀개도와 공기흡입량은 서로 비선형적인 특성을 가지며, Fig. 3에서는 동일한 엔진속도에 대해서 토크는 대체로 공기흡입량에 비례하므로, 스로틀개도와 엔진토크는 비선형적 관계를 가지게 된다. 따라서 구동轮的 가속도는 엔진 토크의 변화량과 직접적으로 비례관계에 있으므로, TCS 슬립제어에 필요한 구동轮的 속도제어를 위해서는 엔진토크의 제어가 필요하게 된다. 이에 대해서는 3.2절에서 자세히 다루기로 한다.

한편, 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 엔진, 자동변속기, 동력전달장치 등에 대한 모델링이 필요하게 된다. 본 연구에서는 Fig. 1과 유사한 엔진의 성능곡선으로 표시되는 엔진의 정적 모델과 스로틀개도의 변화에 따른 엔진의 출력토크의 동적인 변화를 나타내는 엔진의 동적 모델을 직접 동력계 실험에 기초하여 수립하였으며, 이를 시뮬레이션에 사용하였다. 따라서 위에서 설명한 엔진의 비선형성도 시뮬레이션에서 고려하였다.⁽⁹⁾ 또한, 자동변속기에 대해서는 복잡한 과도응답특성은 무시하고 단순히 정적특성만을 고려하여, 토크컨버터에서의 입력토크와 출력토크를 토크용량 계수와 토크비의 향으로 표현하였다. 이 때, 토크용량 계수와 토크비는 자동변속기의 제작자가 공급한 데이터를 사용하여 정확성을 높였다.

2.2 차량동력학

HWLS의 구현에 있어서 구동력의 계산 및 계산된 구동력을 실제 구동축에 전달해 주는 과정이

매우 중요하다. 우선 구동륜에 적용되는 회전동역학을 고려해 보자. 엔진으로부터 구동축에 전달된 구동토크 T_w , 구동력 F_x 및 구동륜(즉, 구동축)의 회전속도 ω_w 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$I_w \dot{\omega}_w = T_w - F_x r_w = T_w - T_d \quad (1)$$

여기서, I_w 는 구동축 및 구동륜의 관성모멘트, r_w 는 타이어의 반경을 나타낸다. 즉, 구동축에 전달된 토크 중에서 구동력으로 전환되는 토크 T_d 를 제외한 잉여토크는 구동축을 가속시키는데 사용된다.

한편, 앞에서 설명한 바와 같이 구동력 F_x 는 전륜 구동차량의 경우에

$$F_x = \mu W_f \quad (2)$$

와 같이 표현되는데, 여기서 μ 는 노면의 마찰계수이며, W_f 는 전륜에 가해지는 수직하중으로 다음과 같이 주어진다.

$$W_f = \frac{L_r}{L} W - \frac{h}{L} \frac{W}{g} a_x \quad (3)$$

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

$$a_x = (F_x - R_r - R_a) / M \quad (4)$$

여기서, M 은 차량의 질량, R_r 은 노면의 구름저항, R_a 는 공기 저항력을 각각 나타낸다. 또한, 차량속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_v(t) = \int_0^t a_x(\tau) d\tau + V_v(0) \quad (5)$$

3. TCS 슬립제어

3.1 차량의 가속 성능

일반적으로 차량의 가속능력은 두 가지 요인에 의해서 결정된다. 첫째 요인은 엔진에 의해서 발생하는 동력으로 동력전달장치를 거쳐서 구동토크의 형태로 구동륜에 전달되는데, 만약 노면의 상태가

양호하다면 이 구동토크는 전부 구동력(=구동토크/타이어의 반경)의 형태로 노면으로 전달되어, 차량에 가해지는 각종 부하를 이겨내고 차량의 가속에 사용된다.

차량의 가속능력을 결정하는 둘째 요인은 타이어와 노면 사이의 점착이다. 이 요인은 빗길, 눈길 및 빙판과 같은 저마찰 노면에서의 가속시에 중요하게 되는데, 이 경우에는 차량에 전달해 줄 수 있는 최대 구동력은 엔진으로부터의 구동토크의 크기에 상관없이 노면과 타이어 사이의 마찰력에 의해서 결정되며, 이 값은 노면과 타이어 사이의 마찰계수와 타이어에 가해지는 수직하중의 곱으로 표시된다. 따라서 엔진으로부터 전달되는 구동토크 중의 일부만이 실제 구동력으로 전환되며, 전환되고 남은 여분의 토크는 구동륜의 회전속도의 급격한 증가를 초래하게 된다. 이러한 상황이 발생하게 되면, 슬립률(아래에 정의됨)이 급격히 증가하게 되고, 이는 곧 마찰계수의 저하를 초래하므로 구동력이 더 저하되는 악순환이 반복된다.

구동륜의 미끄러지는 정도를 나타내는 슬립률(slip ratio)은 구동륜속도에 대한 구동륜속도와 차량속도와의 차이로 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{V_w - V_v}{V_w} = 1 - \frac{V_v}{V_w} \quad (6)$$

여기서, λ 는 슬립률, V_w 는 구동륜속도, V_v 는 차량속도를 각각 나타낸다. Fig. 4는 슬립률의 변화에 따른 구동력계수 μ_T 와 횡력계수 μ_L 의 변화를 보여 준다. Fig. 4에서 보듯이 슬립률이 증가함에 따라 구동력계수는 0에서부터 증가하다가 약 0.2 정도의 슬립률에서 최대값을 가진 다음, 조금씩 감소하여 슬립률 1(구동륜은 회전하나 차속은 0인 상황)에서 최소의 값을 갖게 된다. 한편, 횡력계수는

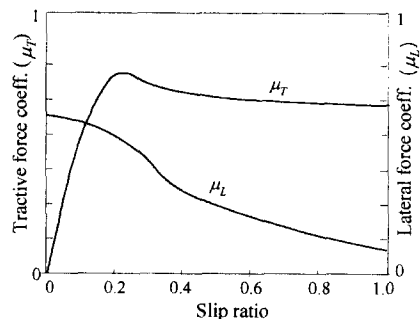


Fig. 4 Tractive force and lateral force coefficients as a function of slip ratio.

슬립률이 증가함에 따라 계속해서 감소하여, 역시 슬립률 1에서 최소의 값을 갖게 된다. 만약 슬립률이 상당히 커지면 구동력의 저하에 의한 가속 능력의 감소뿐만 아니라, 횡력의 감소에 의한 선회 안정성의 저하를 수반하게 되므로, 구동력과 횡력이 적절한 값을 유지할 수 있도록 슬립률을 조절하는 것이 필요하게 된다. 결국, 저마찰 노면으로부터 최대 구동력을 얻을 수 있는 슬립률은 노면의 조건이나 타이어의 종류에 따라서 조금씩 차이가 있지만, 약 0.2 전후라는 것을 알 수 있다. TCS 슬립제어방식은 엔진 출력토크의 조절을 통해서 구동륜의 속도를 적절히 제어함으로써 최대의 구동력계수를 가지는 슬립률을 유지하도록 하는 제어 방식이다.

3.2 TCS 슬립제어 알고리즘

엔진제어방식의 TCS 슬립제어 시스템은 엔진 출력토크의 조절을 통해서 구동륜의 속도를 적절히 제어하여 최대 구동력에 해당하는 슬립율을 유지시

킴으로써, 저마찰 노면에서의 가속성능 및 안정성을 향상시키는 시스템이다. 본 연구에서는 엔진의 출력토크를 조절할 수 있는 여러 수단 중에서 가장 널리 사용되는 스로틀개도를 조절하는 방식으로 슬립제어를 구현하고자 한다.

우선 노면 및 운전상황에 따라 목표로 하는 최적 슬립률 λ^* 를 결정한다 다음, 목표구동륜의 속도를 식 (6)으로부터

$$V_w^* = V_v / (1 - \lambda^*) \tag{7}$$

와 같이 산출한다. 이 경우에 목표구동륜의 속도와 실제 구동륜의 속도의 차이로 정의되는 구동륜 속도 오차 $e = V_w^* - V_w$ 가 0이 되면 목표슬립률을 얻게 되므로, 이 오차가 최소화되도록 적절한 제어를 수행한다. 이러한 목적으로 보통 단순하지만 우수한 제어성능을 발휘하는 PI 제어기법을 많이 사용하는데, 본 연구에서는 엔티와인드업(antiwindup) 기능을 갖는 디지털방식의 PI 제어를 적용하였다.

이 때, PI 제어기의 입력은 위에서 언급한 속도 오차이지만, 제어기의 출력은 다르게 설정할 수 있다. 본 연구에서는 제어기의 출력으로 엔진토크를 선정하였는데, 이 토크 값과 현재의 엔진속도에 기초하여 엔진성능맵에서 보간을 통해서 속도오차를 최소화시키는데 필요한 스로틀개도의 변화량을 계산해내는 방식을 제안하기로 한다(이하 제어 방식 1이라 칭함). 한편, 제어기의 출력으로 직접 스로틀개도를 선정하여 엔진맵을 사용하지 않는 슬립제어방식도 고려할 수 있으며, 이 방식에 대한 연구는 이미 과거에 수행된 바가 있다(이하 제어 방식 2라 칭함).⁽⁴⁾ Fig. 5는 엔진맵을 사용하는 제어방식 1에 대한 흐름을 나타내는 블록선도이다. 한편, 제어방식 2는 Fig. 5에서 T_e^* 및 θ 에 해당하는 블록을 생략하고, θ 를 PI 제어기의 출력으로 대체한 것에 해당한다.

위의 두 방식의 차이는 엔진맵의 사용여부로, 방식 2의 경우 엔진맵을 필요로 하지 않으므로, 엔진의 운전영역에 상관없이 동일한 속도오차에 대해서는 동일한 스로틀개도의 변화량이 제어기에 의해서 산출될 것이다. 그러나 Fig. 1에서 관찰 바와 같이 스로틀개도의 동일한 변화량에 대한 엔진 토크의 변화량은 운전조건에 따라서 크게 달라지게 되는데, 방식 1에서는 엔진성능맵에 기초하여 엔진속도 및 스로틀개도의 범위 등이 고려되어 동일한 토크 변화량에 대해서도 서로 다른 스로틀개도의 변화량

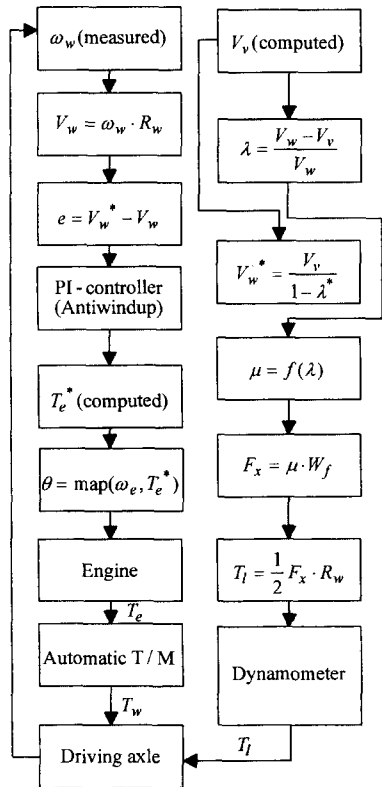


Fig. 5 Block diagram of control strategy 1 (with engine map).

이 산출된다. 예를 들어, 5 km/h의 속도 오차에 대해서 스로틀개도가 큰 영역이 작은 영역보다 훨씬 더 큰 개도변화량을 요구되는데, 방식 1에서는 이러한 사실이 반영되지만, 방식 2에서는 반영되지 않게 된다. 물론 방식 2에서도 속도오차를 감소시키는 방향으로 제어신호를 산출하므로 궁극적으로 목표슬립률을 얻게 되지만, 방식 1에 비해서는 몇 샘플링주기만큼 뒤지게 되므로 응답성이 다소 저하되게 된다.

한편, 제어방식 1의 경우에는 엔진맵의 사용으로 알고리즘이 다소 복잡하게 되는데, 이는 운전환경 등에 따라서 엔진성능곡선 자체가 조금씩 달라지게 되므로 이에 대한 보정이 필요하기 때문이다. 그러나 이러한 보정은 비교적 쉽게 수행될 수 있다. 이러한 복잡성을 고려하면 엔진맵을 사용하는 방식 1이 방식 2보다 반드시 유리하지는 않음을 알 수 있다. 그러나 방식 1의 진가는 스로틀개도의 제어와 더불어 점화시기제어를 병행하는 경우에 나타나는데, 이러한 경우에는 스로틀제어방식이 약간의 전달지연을 불가피하게 초래하므로, 보다 응답성이 우수한 점화시기 조절방식으로 이를 보상하려는 것이다. 이 경우에는 스로틀개도의 변화량과 점화시기 지연에 의한 엔진토크의 변화량을 같이 고려하여야 하므로 방식 2에서와 같이 단순히 스로틀개도를 출력으로 계산하는 것이 어렵게 된다. 즉, 오차를 최소화시키는 데 요구되는 엔진토크의 변화량 중에서 스로틀개도의 조절이 담당할 부분과 점화시기의 지연이 담당할 부분을 적절히 배분하여야 한다. 즉, PI 제어기에 의해서 목표슬립률을 얻기 위해 필요한 엔진토크의 변화량을 산출한 후에, 적절한 로직에 의해서 스로틀이 담당할 토크변화량을 결정하여 엔진맵에 의해서 요구되는 스로틀개도의 변화량을 구하게 된다.

한편, 두 방식 모두 산출된 스로틀개도를 구현하여야 하는데, 이렇게 산출된 스로틀개도는 가속 페달에 의한 운전자의 의도와는 다르므로 별도의 스로틀 액츄에이터에 의해서 구현되는 것이 보통이다.⁽⁴⁰⁾

4. 결과 및 고찰

4.1 HWLS 구현을 위한 실험장치

본 실험에서 사용한 실험장치가 Fig. 6에 나타나 있다. 가솔린엔진과 연결된 토크컨버터를 내장한 자동변속기의 출력토크 및 회전속도를 측정하기 위

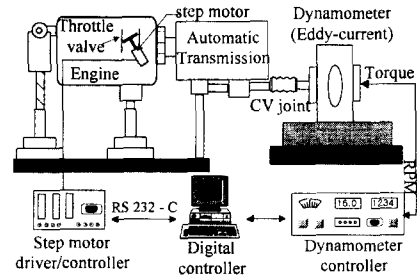


Fig. 6 Experimental setup for HWLS implementation.

해서 와전류식 동력계를 사용하였으며, 엔진의 스로틀밸브개도를 조절하기 위해서 마이크로 스텝핑 기능을 가진 스텝모터 시스템을 사용하였다. 한편, PC를 사용하여 실험장치를 종합적으로 제어하였으며, 실험데이터의 수집을 위해서 데이터 수집보드를 PC에 설치하였다.

앞의 식 (1)에서 시뮬레이션에서 계산된 구동력과 타이어의 반경을 곱한 토크 T_d 를 구동축에 가해 주어야 하는데, 이 목적으로 동력계를 사용하였다. 양 구동축에 동력계를 각각 설치하는 것이 바람직하나, 본 연구에서는 단지 한 대의 동력계만이 사용되었으므로 동력계에 연결되지 않은 차축은 지면에 고정하였다. 그러므로 HWLS 구현에서 차량이 직진 주행한다고 가정한 경우에 하드웨어인 실험장치로부터 측정된 차축속도의 절반에 해당하는 값이 구동륜의 속도가 된다.

한편, HWLS 구현에서는 동력계의 여러 운전 모드 중에서 정토크방식을 이용하였는데, 이 운전 모드에서는 사용자가 제동토크를 설정하여 놓으면 동력계 내부의 제어기가 설정한 토크 값을 유지하도록 내부적으로 제어를 수행한다. 이 동력계는 운전 중에 사용자가 온라인으로 제동토크를 변화시킬 수 있도록 0~10 V 범위의 아날로그신호를 받아들일 수 있으므로, 매 순간 변화하는 구동력을 정확히 구동축에 전달할 수 있다. 본 실험에서는 구동력 등의 차량동역학 계산에 소요되는 시간 및 TCS 제어기의 특성상 약 50 ms마다 새로 산출된 구동력에 기초한 제동토크를 동력계에서 구현하도록 하였다.

4.2 저속영역에서의 슬립제어

우선 저속영역에서의 TCS 슬립제어 시뮬레이션 및 HWLS 결과를 살펴보기로 하자. 시뮬레이션

에서는 최대 마찰계수가 0.2 정도인 미끄러운 노면을 가정하였으며, 초기에는 구동륜 및 차량 속도가 모두 0이라 가정하였다. Fig. 7은 TCS 슬립 제어를 수행하지 않고 스로틀개도를 약 15°로 유지한 채로 직진하는 경우에 대한 시뮬레이션결과를 나타낸다. 이 경우에는 노면으로부터 마찰력에 의해서 얻을 수 있는 구동력보다 훨씬 더 큰 토크가 구동륜에 전달되어 구동륜에서 과도한 슬립이 발생하게 된다. 그 결과로 슬립률 약 0.4 정도로 매우 커져서 노면이 제공할 수 있는 구동력은 더욱 감소하게 되고 가속성능이 저하된다.

Fig. 8은 엔진맵을 사용하는 제어방식 1에 의해서 슬립제어를 수행한 시뮬레이션결과를 나타낸다. 즉, 초기에 약 15°의 스로틀개도에 의해서 앞의 비제어시와 마찬가지로 슬립률이 급속히 증가하면서 최적값의 범위를 벗어나게 되면, 이를 감지하여 슬립제어 기능이 동작하게 된다. 그 결과로 스로틀개도는 급격히 감소하게 되는데, 스로틀 개도가 전제 상태가 되지 않도록 하한을 3°로 설정하였다. 이러한 동작에 의해서 과도하였던 구동륜의 속도가 감소하고 슬립률이 저하하게 되어 최적 슬립률 근처에 머무르게 된다. 그러면 스로틀개도가 서서히 증가하게 되며, 구동력이 증가되어 차량이 가속하게 된다.

한편, Fig. 7 및 8에서 4.5초 후의 차량의 속도가 거의 유사하게 나왔는데, 이는 슬립제어시에 가속성능이 향상된다는 점과 약간 상치하는 것처럼 보인다. 이는 다음과 같이 설명될 수 있다. 우선 Fig. 7의 비제어시 시뮬레이션의 경우에는 스로틀개도가 약 15°정도로 유지된다고 가정하였는데, 이는 시뮬레이션결과와 비교대상이 되는 HWILS 구현에 사용되는 동력계의 용량상의 문제로 스로틀개도를 크게 할 수 없기 때문이었다. 만약에 Fig. 7의 비제어시에 운전자가 스로틀개도가 15°보다 훨씬 큰 개도가 되도록 가속페달을 밟는 경우에는 구동륜속도가 더욱 과도하게 되어 슬립률이 더 커지므로 구동력이 저하되어 가속성능이 많이 저하되었을 것이다. 또한, 비제어시의 경우 슬립률이 제어시에 비해서 상당히 커지게 되는데, 이 경우에는 Fig. 4에서 보듯이 횡력이 저하되어 조향시의 안정성이 저하되는 등의 문제점이 발생하게 된다. 따라서 슬립제어를 수행하는 경우가 비제어시보다 여러 면에서 유리함을 알 수 있다.

Fig. 9는 HWILS 구현에 의해서 저속영역에서의

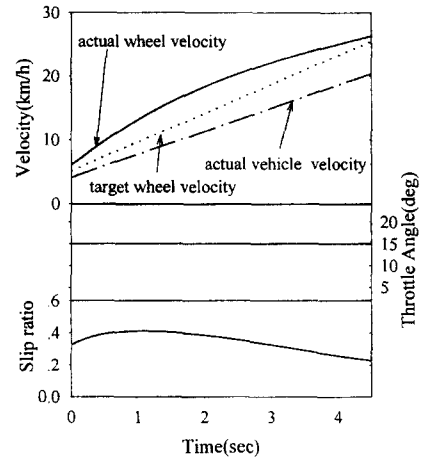


Fig. 7 Simulation result of no control ($\theta=15^\circ$).

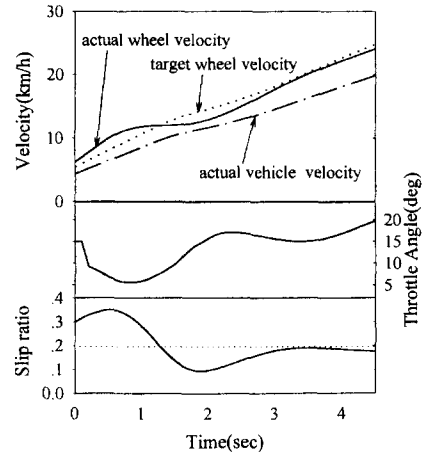


Fig. 8 Simulation results of control strategy 1 with engine map ($\theta=15^\circ$).

슬립제어 성능을 살펴본 결과이다. 노면조건은 시뮬레이션과 동일하게 설정되었지만, 차량의 초기속도는 약 4 km/h, 구동륜의 초기속도는 약 6km/h로 설정하였다. 또한, 스로틀개도도 약 15°로 일정하게 유지한 후 약 0.2초 후부터 슬립제어가 수행되기 시작하였다. HWILS 실험의 경우에는 측정 잡음 등에 의해서 속도응답이나 슬립률 응답에 약간의 변동이 있으며, 동력계의 용량 및 한 차축을 고정시키는 등의 제약으로 시뮬레이션과 동일한 결과를 얻기는 무척 어렵다. 하지만 엔진, 자동변속기, TCS 슬립제어기 등이 실제 하드웨어로 수행되므로 개발된 알고리즘의 실용성을 시험해 본다는 의미에서는 어느 정도 의의가 있다고 생각된다.

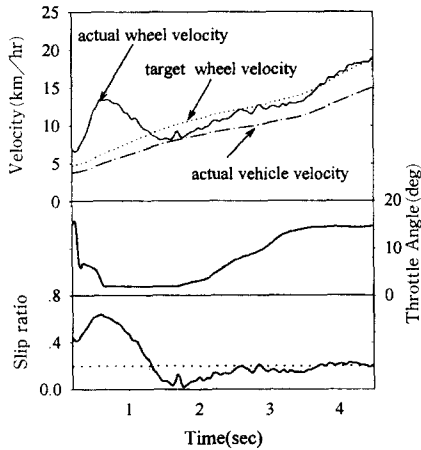


Fig. 9 HWILS results of control strategy 1 with engine map ($\theta=15^\circ$).

4.3 고속영역에서의 TCS 슬립제어

이번에는 차속이 비교적 큰 경우에 대해서 살펴보기로 한다. 그러나 스로틀개도가 큰 경우에는 본 연구에 사용하는 와전류식 동력계의 한계로 인하여 HWILS 실험이 매우 어렵고 위험하므로, 시뮬레이션만을 통해서 두 방식의 차이를 고찰하였다. 이때, 노면조건은 앞서의 저속의 경우와 거의 동일하지만, 스로틀개도는 약 50° 정도로 유지하였다. 또한, 일반 노면(최대 마찰계수 0.75)에서 출발하여, 차속이 약 12 km/h에 도달하였을 때 저마찰 노면(최대 마찰계수 0.2)을 만나는 상황을 가정하였다. 한편, 슬립제어는 슬립률이 최적의 범위를 벗어나서 약 0.3에 도달하였을 때 수행되기 시작한다고 가정하였다.

Fig. 10과 11은 각각 엔진맵을 사용하는 제어방식 1과 엔진맵을 사용하지 않는 제어방식 2로 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 제어가 시작된 후 목표 슬립률에 도달하는 시간은, 방식 1이 4.9초 정도로 방식 2의 5.4초보다 약 0.5초 정도 빠르게 나타났다. 앞서 언급한 바와 같이 동일한 속도변화를 얻기 위해서 스로틀개도가 큰 영역에서는 스로틀개도가 작은 영역에 비해서 훨씬 더 큰 스로틀 개도의 변화량이 요구되는데, 방식 1에서는 엔진 맵에 의해서 이러한 점이 고려되지만, 방식 2에서는 고려되지 않기 때문에 응답성에 있어서 차이가 발생한 것이다. 결론적으로 고속영역에서는 엔진성능맵을 사용하는 제어방식 1이 방식 2보다 더 우수한 제어 성능을 발휘한다는 점을 알 수 있다. 이러한 경향

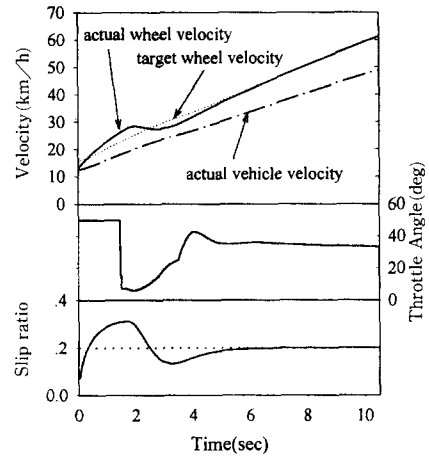


Fig. 10 Simulation results of control strategy 1 with engine map ($\theta=50^\circ$).

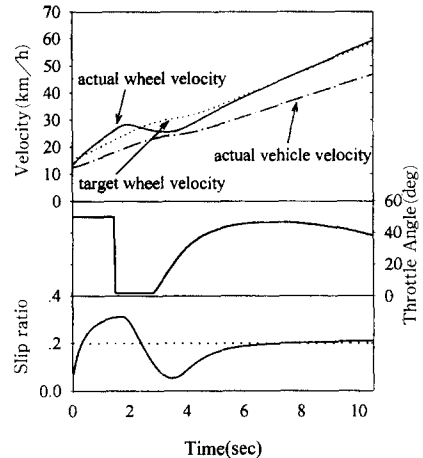


Fig. 11 Simulation results of control strategy 2 without engine map ($\theta=50^\circ$).

은 고속영역에서의 여러 다른 시뮬레이션결과에서도 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 TCS 슬립제어를 구현하는 제어방식으로 제어기의 출력으로 목표엔진토크를 구하고 엔진맵으로부터 요구되는 스로틀개도를 구하는 제어 알고리즘을 개발하였으며, 이를 엔진맵을 사용하지 않고 스로틀개도를 바로 제어기의 출력으로 구하는 기존의 제어방식과 비교하였다. 이를 위해서 시뮬레이션과 일부 HWILS 실험을 병행하여 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 엔진은 비선형적인 특성을 가지므로 스로틀 개도의 동일한 변화량에 대한 엔진토크의 변화량은 운전점마다 크게 다르게 된다.

(2) TCS 슬립제어에서 엔진맵을 사용하지 않는 경우에는 엔진의 비선형성에 의해서 고속 영역에서의 응답성이 다소 저하된다. 그러나 엔진맵을 사용하면 이러한 비선형성을 보상해 줄 수 있으므로 응답성이 다소 개선된다.

(3) 슬립제어를 위해서 스로틀개도의 제어만을 수행하는 경우에는 본질적으로 다소의 전달 지연이 존재하게 된다. 따라서 점화시기의 제어를 병행하여 이러한 단점을 보완하는 방식에 대한 연구가 필요하다. 이러한 경우에 엔진맵을 사용하면 스로틀 제어와 점화시기제어에 의해서 수행될 토크변화를 적절히 배분할 수 있으므로 효과적으로 두 방식을 병행할 수 있게 된다.

참고문헌

- (1) Yamada, K., Hashiguchi, M. and Ito, M., 1991, "Traction Control System-Simulation Analysis of the Control System," *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 12, No. 1, pp. 89~96.
- (2) 송재복, 1996, "차량 구동력제어 시스템의 개발," 대한기계학회지, 제36권, 제7호, pp. 644~653.
- (3) Ise, I., Fujita, K., Inoue, Y. and Masutomi, S., 1990, The Lexus Traction Control(TRAC) System, *SAE Paper 900212*, pp. 153~160.
- (4) 송재복, 홍동우, 1996, "TCS 엔진제어방식에 기초한 슬립제어의 HWILS 구현," 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 852~857.
- (5) 현대자동차, 1993, 그랜저 정비 교육 교재.
- (6) Gillespie, T. D., 1992, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers.
- (7) Wong, J. Y., 1978, *Theory of Ground Vehicles*, John Wiley & Sons.
- (8) Yoshiaki, D., Kazuhide, T., Toyooki, F. and Makoto, S., 1989, "Powertrain Control by DBW System-Strategy and Modeling," *SAE Paper 890760*, pp. 85~98.
- (9) 송재복, 장중호, 1995, "엔진/자동 변속기 시스템의 속도제어," 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp. 542~547.
- (10) 송재복, 김효준, 민덕인, 1997, TCS용 스로틀액츄에이터 제어 시스템, 한국자동차공학회 논문집, Vol. 5, No. 3, pp. 191~201.