

코너 출구속도가 직선주로 주행 소요시간에 미치는 영향

장 성 국*

한라대학교 기계공학부/자동차공학전공*

Effect of Corner Exit Speed on the Time to Go Down a Straight

Sungkuk Jang*

*Department of Automotive Engineering, Halla University, Gangwon-do 220-712, Korea

(Received 25 May 2003 / Accepted 2 September 2003)

Abstract : This paper calculates the elapsed time to go down a straight as a function of the corner exit speed and considers air resistance, rolling resistance, and slope resistance to figure out the force for forward acceleration. In a car racing, the most critical corner in a course is the one before the longest straight. A driver can lose a quite amount of time by taking a bad line in a corner. Taking a bad line also causes poor corner exit speed which in turn costs more elapsed time to go down a straight.

The results are not so dramatic as in the case of cornering but are showing why one should take the correct corner racing line to get the maximum exit speed. Also, for the case of drag race, the elapsed time to go 1/4 mile is calculated.

Key words : Corner(코너), Driving line(주행라인), Racing line(레이싱라인), Course(코스), Straight line(직선주로), Entering speed(진입속도)

Nomenclature

F : 힘, lb_f
 a : 가속도, ft/sec^2
 v : 속도, ft/sec
 x : 주행거리, ft
 t : 시간, sec
 m : 질량, lb_m

1. 서론

일반적으로 자동차 경주하면 차량의 최고속도에 모든 관심이 집중된다. 하지만 경주의 승자는 최고속도를 기록한 차량이 아니라 가장 단시간에 결승

선을 통과한 차량이다. 이를 위해서는 랩타임(lap time)을 최소화하여야 하며 가장 빠른 랩타임을 기록하기 위해서는 3가지의 중요한 요소가 있다.^{1,2)} 첫째는 주어진 코스의 가장 적절한 주행라인을 찾는 일이다. 둘째는 코너에서의 주행속도를 최적으로 유지하여 코너 다음에 존재하는 직선주로에서 최고의 성능을 발휘하여야 한다. 셋째는 직선주로에서 최적의 방법으로 제동을 하여 다가오는 코너에서 가장 적절한 라인과 선회속도를 선정하는 것이다. 위와 같은 3가지 요소를 만족시키지 못하면 코너 선회 시 적절한 주행라인을 따르지 못하게 되어 적지 않은 시간을 잃을 수 있다.³⁾ 코너 직후에 긴 직선주로가 존재하는 경우 코너 출구속도가 직선주로 주행 소요시간에 큰 영향을 주기도 한다.⁴⁾ 참고 문헌 4)에서는 엔진토크 값이 엔진의 회전수에 무관

*To whom correspondence should be addressed.
skjang@halla.ac.kr

하게 상수 값으로 가정되어 실제 현상보다 높은 진출속도와 낮은 소요시간이라는 결과로 나타났다.

본 연구에서는 공기저항, 구름저항, 기울기저항을 고려하면서 엔진회전수에 따른 엔진 토크 값, 휠스핀 여부를 고려한 변속시점의 효과도 고려하여 실제 주행 상황을 재현하며 상기 언급한 3가지 요소 중에서 2번째 요소인 코너 출구속도가 직선주로 주행 소요시간에 미치는 영향을 알아본다. 그리고 정지상태에서 출발하여 주어진 일직선상의 거리를 달리는 드래그 경주에도 본 연구의 개념을 적용한다.

2. 모델링

본 연구의 대상 차량은 0.5g의 가속능력을 가지며 급가속 시 하중 이동에 의한 가속 능력의 변화는 없는 것으로 가정하였다.

2.1 저항을 고려하지 않을 경우

널리 알려진 물리 공식으로부터 초기속도와 가속도가 주어진 경우 시간에 따른 주행거리를 계산할 수 있다. 이 경우 각종 저항은 없다고 가정한다.

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (1)$$

직선주로의 길이가 주어지면 소요시간 t 를 구할 수 있다. 직선주로 끝에서의 진출속도는 다음의 식에서 구할 수 있다.

$$v = v_0 + a t \quad (2)$$

2.2 저항을 고려할 경우

뉴턴(Newton)의 제2법칙으로부터

$$F = m a \quad (3)$$

여기서 F 는 차량을 전진하게 하는 힘(구동력)이며 m 은 차량의 질량, a 는 차량의 가속도 값이다. 자동차 경기를 분석하는 경우 일정한 시간마다의 각종 정보가 차량세팅 및 드라이버의 상황 점검에 도움이 되므로 시간 증가분 Δt 마다 관련 식을 표현한다. 그러므로

$$\Delta t = t_i - t_{i-1} \quad (4)$$

식 (3)으로부터 속도에 대한 식을 구할 수 있다. 즉,

$$a_i = \frac{F_i}{m} = \frac{v_i - v_{i-1}}{\Delta t} \quad (5)$$

그러므로

$$v_i = v_{i-1} + \frac{F_i}{m} \Delta t \quad (6)$$

속도와 거리의 관계식으로부터 다음 식을 구할 수 있다.

$$v_i = \frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} \quad (7)$$

$$x_i = x_{i-1} + \Delta t \cdot v_i \quad (8)$$

식 (8)로부터 시간에 따른 주행거리를 계산할 수 있다. 상기 식에서 t_0 와 x_0 는 0이 된다. v_0 는 초기속도이므로 코너 출구속도가 된다.

일반적으로 수치해석에서 Δt 의 선택은 매우 중요하다. 선택에 따라 구하고자 하는 값이 수렴하거나 발산을 할 수도 있다. 본 연구의 경우 식 (5)~식 (8)은 선형방정식이며 식 (5)와 식 (6)의 F_i 의 경우에도 속도의 제곱에 비례한다. 즉, 최고차 항이 제곱에 불과하므로 Δt 의 값 선택이 구하고자 하는 값들의 정밀도에는 거의 영향을 주지 않는다. 본 연구에서는 자동차 경주의 경우 계측을 0.001초까지 수행하므로 Δt 도 0.001초로 한다.

엔진에서 발생하는 출력이 모두 차량의 구동에 소비되지는 못한다. 공기저항(drag), 구름저항(rolling resistance) 및 도로의 경사에 따른 저항(기울기저항: slope resistance) 등 발생 가능한 각종 저항에 의하여 엔진의 출력이 저하된다. 그러므로 실제 구동력은 각종 저항을 고려하여 다음 식으로 표현된다.

$$F = F_w - F_d - F_r - F_s \quad (9)$$

여기서

F = 실제 구동력

F_w = 휠에서 발생하는 구동력

F_d = 공기저항

F_r = 구름저항

F_s = 기울기저항

식 (9)에서 구한 구동력을 차량 질량으로 나누면 가속도를 결정할 수 있다. 이로부터 식 (5)~식 (8)을 활용하여 속도와 주행거리를 결정한다.

먼저 공기저항 F_d 는 다음과 같다.

$$F_d = \frac{1}{2} C_d A \rho v_i^2 \quad (10)$$

여기서 분석된 차량은 전 세계적으로 시판되고 있는 2인승 스포츠차량으로서(Fig. 1)

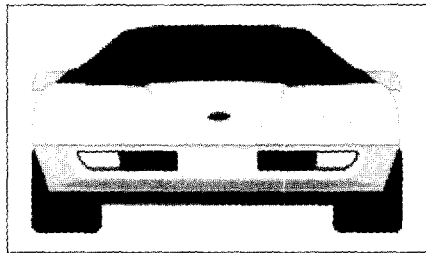


Fig. 1 Sample car analyzed

C_d = 공기 저항 계수 = 0.3
 A = 차량의 정면 투영 면적 = 20ft²
 ρ = 공기 밀도 = 0.0025slug/ft³
 구름저항 F_r 은 아래와 같다.

$$F_r = r v_i \quad (11)$$

식 (11)에서 r 은 구름저항 계수로서 결정이 용이하지 않다. 실험적으로 결정할 수 있으며 본 논문에서는 주어진 속도에서 구름저항을 극복하는데 필요한 마력 수를 연관시킨 자동차 제작사의 자료 (55mph 속도에서 구름저항을 극복하는데 8.2마력 소요)를 참조하여 0.693lb_f/(ft/sec)를 사용하였다. 휠에서 발생하는 구동력은 엔진과 드라이브 트레인으로부터 노면에 전달되는 힘으로 다음과 같다.

$$F_w = \frac{T_E R g_k}{d/2} \quad (12)$$

여기서
 R = 종감속비 = 3.07
 T_E = 엔진토크
 g_k = k단 기어비 (k=1,2,3,4)
 $g_1 = 2.88, g_2 = 1.91, g_3 = 1.33, g_4 = 1.00$
 d = 타이어 직경 = 26인치

식 (12)에서처럼 전진 방향의 순수 구동력을 구하려면 체결중인 기어 단수를 알아야 하는데 다음과 같은 방법을 활용한다. 먼저 차량의 속도로부터 휠의 회전수를 결정한다.

$$W = \frac{60v_i}{\pi d} (rpm) \quad (13)$$

여기서 v_i 의 단위는 ft/sec, d 의 단위는 ft이다. 그러면 엔진 회전수는

$$E = WR g_t \quad (14)$$

주어진 시간 단계마다 엔진 회전수를 확인하여 최대 토크를 발생시키는 회전수를 초과하였으면 바로 위의 단수로 기어 변속을 한다.

기울기저항 F_s 는 등판저항이라고도 하며 다음과 같은 식으로 표현한다.

$$F_s = mg \sin \theta \quad (15)$$

여기서
 mg = 차량중량 = 3210lb_f
 θ = 도로의 경사각

본 연구에서는 국내 온로드 경기장 중의 하나를 선택하였다. 이 경우 코너 직후의 직선주로의 길이는 1000피트 이상이며 경사는 45/1500의 일정한 기울기를 갖는다.

3. 단순모델해석

일반적인 경기장 코스에 많이 존재하는 200피트와 500피트의 직선주로에 대하여 주행 소요시간을 코너 출구속도에 따라 비교하였다.

3.1 저항을 고려하지 않을 경우

식 (1)과 (2)를 이용하여 출구속도에 따른 직선주로 주행 소요시간과 직선주로 완주 후의 진출속도를 Table 1에 나타내었다. 저항은 고려하지 않았지만 도로의 기울기에 따른 기울기저항은 도로의 고유한 저항이므로 고려되었다. 이 경우 차량의 가속 능력은 0.5g에서 $g \sin \theta$ 만큼을 감한 값을 갖는다.

초기속도가 25mph와 50mph로 2배 차이가 나는 경우에도 각 직선주로의 주행 소요시간이 1초와 1.4초 정도밖에 차이가 나지 않는다. 이것은 가속도가

Table 1 Elapsed time and exit speed

출구 속도 (mph)	200피트		500피트	
	진출 속도 (mph)	소요 시간 (sec)	진출 속도 (mph)	소요 시간 (sec)
25	58.570	3.263	87.399	6.066
27	59.451	3.155	87.992	5.929
29	60.386	3.051	88.626	5.796
31	61.371	2.953	89.301	5.668
35	63.486	2.769	90.767	5.421
40	66.373	2.564	92.809	5.134
45	69.501	2.382	95.071	4.868
50	72.838	2.220	97.538	4.621

0.5g로 일정하다고 가정하였기 때문이다. 이론적으로는 가능하지만 실제 주행에서 가속도를 일정하게 유지하기는 어렵고 저항을 배제한 결과이므로 실제 달성 불가능한 결과이다.

3.2 저항을 고려할 경우

본 연구에 사용된 차량은 4200rpm에서 최대 토크 값이 330ft-lb_r로, 계산의 용이성을 위하여 모델을 단순화시켜 토크 값이 엔진 회전수에 관계없이 상수 값을 갖는다고 가정하였다. 토크 값을 상수로 가정하게 되면 회전수에 따라 토크가 변화하는 경우에 비하여 속도와 시간에 대한 결과가 상대적으로 빠른 값이 나오는 경향을 보이게 된다. Table 2에 공기 저항, 구름저항, 기울기저항을 고려한 소요시간과 직선주로 진출속도를 나타내었다.

200피트 직선주로에서 진입속도가 25mph와 27mph의 경우 소요시간의 격차는 6/100초 정도이다. 진입속도가 31mph가 되어야 비로소 2/10초 정도

Table 2 Elapsed time and exit speed

출구 속도 (mph)	200피트		500피트	
	진출 속도 (mph)	소요 시간 (sec)	진출 속도 (mph)	소요 시간 (sec)
25	59.938	3.019	79.729	5.942
27	60.288	2.954	79.900	5.865
29	60.662	2.893	80.075	5.790
31	61.053	2.834	80.266	5.718
35	61.916	2.727	80.688	5.582
40	63.570	2.571	81.503	5.372
45	65.632	2.416	82.541	5.154
50	67.864	2.284	83.684	4.958

의 격차가 발생하였다. 진입속도가 6mph 정도 차이 라면 코너에서 주행라인을 잘 못 선정하였을 개연성이 높은 상황임에도 200피트와 500피트 직선주로에서의 소요시간 격차는 각각 불과 0.2초 정도이다. 이는 참고문헌 3)에서처럼 코너 주행라인 선택에 따라 1초 정도의 격차가 발생한다는 점을 감안하면 직선주로보다는 코너 주행기술이 얼마나 중요한가를 보여주는 것이다. 200피트 직선주로의 끝에서 진출속도의 차이는 진입속도가 25mph와 50mph인 경우에도 8mph 정도밖에 되지 않는다. 이것은 차량이 고속으로 주행할수록 각종 저항에 의한 출력 손실이 커지기 때문이다. 진출속도의 차이는 미미하지만 소요시간은 0.7초 이상 격차가 벌어진다. 진출속도의 차이가 적은 또 다른 이유는 엔진토크 값이 엔진의 회전수와 무관하게 상수라고 가정하였기 때문이다. 토크 값이 매우 크므로 200피트라는 짧은 거리에서도 속도 차이를 용이하게 극복하는 것이다. 500피트 직선주로의 경우는 속도차이가 더욱 작아져서 4mph 정도 된다. 그러나 자동차 경주에서 중요한 것은 속도가 아니라 소요시간이며 단 하나의 직선주로서 1초 정도의 차이가 발생한다는 것을 주목하여야 한다.

Table 1과 2를 비교해보면 진입속도가 낮을 때는 저항을 고려한 Table 2에서의 결과가 진출속도와 소요시간 측면 모두 좋게 나와있다. 그 원인은 엔진토크가 상수 값을 갖는다고 가정하여 각종 저항에 의한 손실보다는 실제보다 높게 가정된 엔진 토크에 의한 가속력이 높기 때문이다. 그러나 진입속도가 높아지면 각종 저항이 커지며 특히 공기저항은 속도의 제곱에 비례하여 커지므로 소요시간은 증가하고 진출속도는 낮아져서 예상했던 결과를 나타낸다.

4. 수정모델해석

더욱 정확한 분석을 위하여 엔진 회전수에 대응하는 토크 값을 활용하여야 한다. 또한 가속도 값이 0.5g를 넘어가지 않도록 하여 휠 스핀을 방지하여야 한다. 차량 하중의 50%에 해당하는 구동력이 구동바퀴에 전달되면 가속도 값이 0.5g가 된다. 급가속에 의하여 후륜에 하중이 집중될 수도 있지만 하중

이동에 따른 주행 가능한 가속도의 증감은 없다고 가정하였다. 본 연구에서는 1단 기어 체결 시 최대 2702lb_r의 구동력이 타이어에 전달된다. 차량의 하중이 5:5로 배분되었으므로 구동 축에는 1605lb_r의 하중이 작용한다. 이 경우 휠 스핀이 일어나게 되므로 1단 기어를 사용할 수 없게 되거나 가속페달의 답력을 조절하여야한다.

Fig. 2에 있는 엔진 토크 곡선을 이용하고 휠 스핀이 발생되지 않도록 개선한 결과 값을 Table 3에 나타내었다. Table 2와 3을 비교해 보면 코너 출구속도가 저속인 경우 직선주로 주행 소요시간의 격차가 0.3초 정도임을 알 수 있다. 출구속도가 고속이 되면 소요시간의 격차는 매우 작아지게 된다. 이것은 저속에서도 토크 값이 330ft-lb_r로 가정된 Table 2와 엔진 회전수에 따라 토크 값을 규정한 Table 3의 차이인 것이다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 엔진 회전수에 따라 토크 값은 큰 변화가 있으며 저속으로 회전하

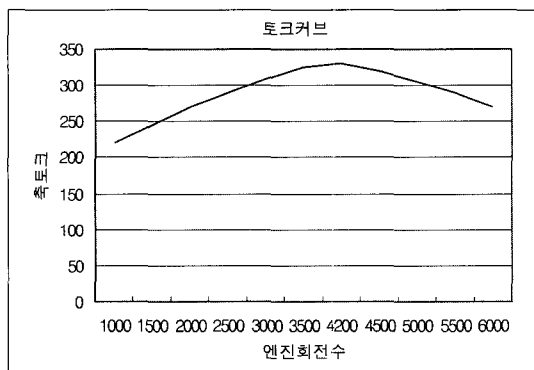


Fig. 2 Engine torque curve

Table 3 Elapsed time and exit speed

출구 속도 (mph)	200피트		500피트	
	진출 속도 (mph)	소요 시간 (sec)	진출 속도 (mph)	소요 시간 (sec)
25	57.471	3.305	77.767	6.332
27	58.134	3.183	78.257	6.183
29	58.817	3.069	78.770	6.043
31	59.531	2.965	79.297	5.911
35	61.028	2.779	80.114	5.670
40	63.015	2.584	81.074	5.407
45	65.126	2.424	82.103	5.179
50	67.359	2.293	83.216	4.983

는 경우 최대 토크 값과의 차이가 두 Table의 진출속도와 소요시간의 차이로 나타난 것이다. Table 2에서는 저속 시 코너 출구속도에서의 차이에 따른 소요시간의 격차는 0.06초 정도로 그리 크지 않았으나, Table 3에서는 소요시간의 격차가 0.12초 정도로 2배정도 크게 나타났다. 즉 실제 상황을 예측해 본 Table 3의 결과에서 적절한 코너주행에 따른 출구속도의 중요성을 확인할 수 있다.

5. 드래그

Table 1, 2, 3에서 직선주로 진입속도를 0이라고 하면 정지상태에서 출발하는 것을 의미한다. 이와 같은 자동차 경주에 드래그(drag)가 있으며 1/4마일(1320피트)을 달리게 된다. 실제 시험 결과와 비교하기 위하여 하중이동과 출발 직전의 엔진 고속 공회전의 효과를 고려한 계산 결과를 Table 4에 나타내었다. 각종 저항을 고려하지 않을 경우 식 (1)과 (2)로부터 이론적인 소요시간은 12.825초가 된다. 각종 저항을 고려하고 토크가 상수 값이라고 가정하면 소요시간은 12.902초가 된다. 저항을 무시했을 때와 비교하면 0.077초 차이밖에 없다. 이것은 토크 값이 실제보다 높게 가정되어 가속도 값이 크게 작용하였기 때문이다. 수정 모델에서 계산된 것처럼 실제 토크 곡선을 이용하고 휠 스핀이 발생하지 않도록 가속도 값을 0.5g 이하가 되게 하며, 하중이동과 출발 직전의 엔진 고속 공회전의 효과를 고려하지 않을 경우(수정모델1) 소요시간이 15.254초가 된다. 상기 효과를 고려한 경우(수정모델2) 소요시간은 14.173초가 되어 실제 시험 차량의 소요시간 13.900초와 매우 유사한 값을 보인다. Fig. 3과 4에 주행거리 1320피트에서 속도의 변화 패턴을 실험과 계산 값에 대하여 나타내었다. 기어변속에 따른 급격한 엔진 회전수의 변동에 따라 토크는 급격한 변화(맥동)가 있게 된다. 이에 따른 속도의 맥동 현상이 예상될 수 있지만 관성주행 등의 영향으로 급격한 변화 없이 속도는 꾸준히 증가한다. 동일차종이지만 차량의 사양이 달라서 속도의 차이를 보이고 있으나 속도의 변화 패턴이 매우 유사함을 알 수 있다.

Table 4 Elapsed time for drag

	진출속도 (mph)	소요시간 (sec)
이론값	140.349	12.825
저항고려	108.239	12.902
수정모델1	104.464	15.254
수정모델2	106.887	14.173
시험값	100.000	13.900

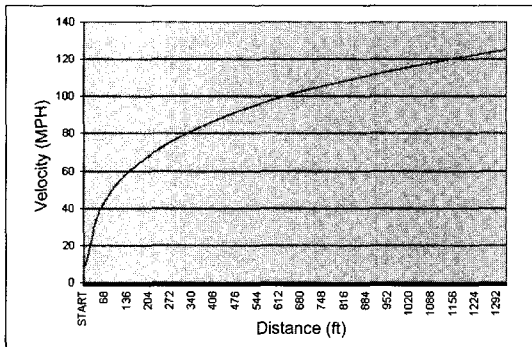


Fig. 3 Velocity curve (Test)

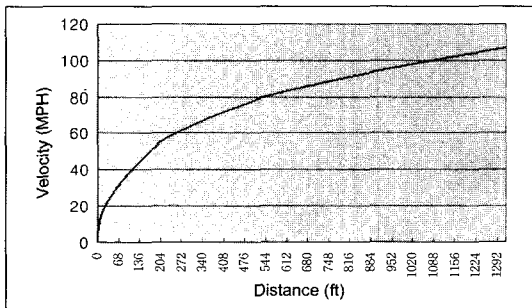


Fig. 4 Velocity curve (Simulation)

6. 결론

본 논문에서는 200피트 직선주로의 경우 코너 출구속도가 25mph에서 50mph로 100% 증가함에 따라 직선주로 진출속도는 57.471mph에서 67.359mph로 17% 증가하게되며 소요시간은 3.305초에서 2.293초로 31% 감소하는 결과가 나왔다. 500피트의 경우 진출속도의 증가폭은 7%이며 소요시간은 21%의 감소폭을 보였다. 직선 주행거리가 길어지면 코너 출구속도에 따른 진출속도의 증가폭과 소요시간의 감소폭도 작아진다. 즉, 속도의 증가와 더불어 저항값이 커져서 코너 출구속도의 영향이 작아지게 될 수 있다.

비록 코너 출구속도가 낮더라도 토크 값이 크면 직선주로의 주행속도를 신속히 만회할 수 있음을 보았다. 그러나 500피트 직선주로 주행 소요시간이 1초 이상의 격차를 보이고 이 격차는 매 랩마다 누적되어 경기 결과에서는 많은 차이를 보이게 된다. 직선주로에서 드라이버의 기량은 크게 차이가 나지 않으므로 결국은 코너 출구속도가 직선주로에서의 모든 것을 결정한다고 할 수 있다. 즉, 코너의 출구속도는 직선주로의 주행 소요시간과 밀접한 관계에 있으며 코너 주행 소요시간의 격차와 더불어 직선주로에서도 소요시간의 격차가 발생하여 경기에서는 도저히 추월이 불가능함을 알 수 있다.

본 논문을 통하여 코너 출구속도의 중요성을 확인하였으며 코너 출구속도를 이용하여 코너에서 레이싱라인을 정확히 구현했는가를 확인할 수 있다. 이를 근거로 드라이버가 감속과 선회, 가속을 최적의 상태로 구현하여 코너 출구속도 및 직선주로 진출속도를 최대로 만들 수 있도록 차량과 드라이버가 충분한 준비를 할 수 있다. 드래그 경주의 경우에도 본 연구에서 제시한 이론적으로 달성 가능한 소요시간을 바탕으로 운전자의 기능 향상과 차량의 성능 향상을 이룰 수 있다.

후 기

본 연구를 수행하는데 자료와 도움을 준 한국자동차경주협회에 감사 드린다.

References

- 1) C. Lopez, Going Faster!, Bentley Publishers, 1997.
- 2) C. Smith, Drive to Win, Carroll Smith Consulting, Inc. 1996.
- 3) S. K. Jang, "A Study on the Program Development of Estimating the Elapsed Time Considering the Various Racing Lines on the 90 Degree Corner," Transactions of the KSAE, Vol.11, No.4, pp.220-225, 2003.
- 4) S. K. Jang, B. Beckman, "A Study on the Relation Between the Time to Go Down a Straight and the Speed Entering the Straight," 2002 KSAE Autumn Conference Proceeding, pp.1058-1062, 2002.