

직각 코너에서의 레이싱라인에 따른 주행 소요시간 예측 프로그램 개발에 관한 연구

장 성 국*

한라대학교 기계공학부*

A Study on the Program Development of Estimating the Elapsed Time Considering the Various Racing Lines on the 90 Degree Corner

Sungkuk Jang*

*Department of Automotive Engineering, Halla University, Kangwon-do 220-712, Korea
(Received 31 March 2003 / Accepted 4 June 2003)

Abstract : In this paper, various types of racing line are analyzed for the best time to go through a 90 degree corner. 'Best' means the least time, at the greatest average speed. The corner concerned here has the long straights before and after the corner so that the vehicle is able to run with its maximum speed along the straights. It is shown that both inside and outside driving lines including the modified outside driving lines never beat classical racing line. It is also found that outside driving line is better than inside driving line as long as there are straight lines before and after the corner.

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

Nomenclature

v : 속도, ft/s
a : 가속도, ft/s²
S : 주행거리, ft
t : 시간, sec

Subscripts

I : inside
o : outside
m : middle

1. 서론

자동차 경주장의 코스는 직선 주로(straight line)

와 곡선 주로(corner)로 나뉘어진다. 곡선 주로에서 180도의 각도를 가진 코너를 헤어핀(hair pin)이라 하며 그 외의 경우는 코너라고 부른다. 자동차 경주의 승패를 좌우하는 여러 요인 중에 코너 주행기술이 가장 중요한 것으로 인식된다.^{1,2)} 특히 코너 직후에 존재하는 직선 주로의 길이에 비례하여 코너의 중요성은 더욱 강조된다. 그리하여 코너를 주행하는 최적의 기법을 찾고자하는 많은 노력이 있어왔으나 국내에서는 이론적인 접근보다는 시행착오를 거듭하는 실제 주행을 통한 접근이 대부분이었다. 최근에는 90도 코너를 주행하는 최적의 기법을 이론적으로 제시한 연구³⁾가 소개되었는데, 코너 주행시 최단 기록이 가능한 레이싱라인의 형상을 유도하였으며 코너의 폭과 반경에 따라 코너를 주행하는데 소요되는 시간도 계산하였다. 그러나, 출발점에서 차량의 속도가 이미 충분히 감속되어 있어

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

out-in-out의 주행라인을 선택한 차량이 in-in-in이나 out-out-out을 선택한 차량보다 당연히 유리할 수 있다는 반론이 가능하다. 그리하여 본 연구에서는 출발점을 코너의 입구에서 충분한 거리를 가진 직선 주로에 위치시켜 여러 주행라인에 대한 코너 주행 소요시간을 알아본다. 또한 out-out-out의 회전반경을 가지는 수정 주행라인을 제시하고 그 결과를 비교하여 충분한 거리의 직선 주로를 가지는 코너의 최적 주행 기법을 결정한다.

2. 코너의 형상

본 연구에서는 90도 각도로 우회전하는 코너를 분석한다. 코너 진입 전 및 진출 후에도 긴 직선 주로가 존재하여 차량의 성능을 충분히 발휘한 후의 결과를 비교하여 최적의 주행라인을 결정한다. 실제 코스에서는 코너와 직선 주로가 복합 배치되어 있으므로 주어진 코스를 전체적으로 고려하여 각각의 코너의 진입속도, 출구속도와 주행라인을 결정하여야 한다. 그러나 본 연구에서는 단 하나의 직각 코너만이 존재한다고 가정한다. 효과적인 분석을 위하여 시험용 차량은 가속, 감속, 제동을 어느 때라도 용이하게 할 수 있으며 노면과 타이어의 그립(grip)력도 손실이 없고 0.5g의 가속능력과 1g의 제동감속능력이 있다고 가정하였다. Fig 1에 우회전하는 직각 코너가 표시되어 있다. 코너는 입구와 출구에 각각 긴 직선 주로가 존재하며(AB, EF구간) 코너의 형상은 아래와 같다.

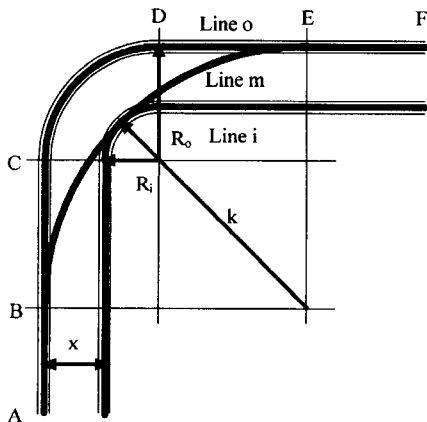


Fig. 1 90 degree right hand corner

r = 코너 센터라인의 반경 = 75ft

W = 코스의 폭 = 30ft

r_o = 코너 외측의 반경 = 90ft

r_i = 코너 내측의 반경 = 60ft

코스 주행 시 일반적으로 타이어가 코스를 벗어나지 않도록 하므로 타이어의 궤적보다는 차량 중심점의 궤적을 분석하는 것이 비교적 용이하다. 차량의 폭을 6ft로 가정하면 주행 가능한 코스의 형상은 아래와 같다.

w = 차량의 폭 = 6ft

R_o = 코너 외측의 유효반경 = $r_o - w/2 = 87ft$

R_i = 코너 내측의 유효반경 = $r_i + w/2 = 63ft$

X = 코스의 유효폭 = $W - w = 24ft$

Fig 1에서 굵은 실선으로 나타낸 것이 유효코스이다.

3. 운동 방정식

반경이 r 인 코너에서의 속도와 가속도는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$a = v^2 / r \quad (1)$$

차량과 타이어의 특성으로부터 구심 가속도 a 가 결정되면 코너를 최대한 빠르게 주행하기 위해서는 코너의 반경 r 을 최대한 크게 하여야 한다. Fig 1에 코너의 내측을 주행하는 Line i와 코너의 외측을 주행하는 Line o가 표시되어 있다. 외전상 Line i의 총 주행거리가 Line m이나 Line o의 총 주행거리보다 짧으므로 선회속도가 작더라도 소요시간이 적을 것이라고 추정된다. 더욱이 Line m이 전체코너를 등속 주행하는 반면 Line i나 Line o는 코너 입구(BC구간) 및 출구의 직선 구간(DE구간)을 가속하여 달릴 수 있으므로 상대적으로 시간을 단축할 수 있을 것으로 예상된다.

실제로 코너를 주행하는데 소요되는 시간을 구해보자. Fig 1에서 Line m의 반경 k 는 다음 식으로부터 구한다.

$$(k - R_i) \cos 45^\circ = k - R_o \quad (2)$$

경주용 차량의 종류에 따라 타이어가 견딜 수 있는 구심 가속도 값은 다르게 나타난다. 본 연구에서는 국내에서 가장 많은 경기가 개최되고 있는 박스(Box)형 차량의 일반적인 타이어를 고려하여 구심 가속도 값을 1.1g로 가정한다. 가속도 값이 1.1g를 상회하면 차량은 더 이상 정상 선회가 불가능하여 코스를 이탈하게 된다. 여기서 회전에 따르는 하중 이동 현상에 의한 언더스티어나 오버스티어가 발생하지 않아 회전 가능 구심 가속도 값의 변화는 없는 것으로 가정하였다. 식 (1)과 (2)로부터 각각의 주행 라인에 대한 코너 구간만의 선회속도 및 소요시간을 구하면 Table 1과 같다.

Line i와 Line o의 경우 C점까지는 직선 주로를 주행하며 CD구간은 각각 v_i 와 v_o 로 등속 주행을 한 후 D점부터 가속을 하여 최대 속도에 도달한다. Line m의 경우 B점까지는 직선 주로를 주행하며 BE구간에서는 v_m 으로 등속 주행을 한 후 E점부터 가속을 하여 직선 주로를 주행하게 된다. 코너를 주행할 때의 시간에 따른 속도의 변화를 그림으로 표시하면 Fig 2와 같다.

v_{max} 는 차량의 최대 속도이며 $v_{코너링}$ 은 각각의 주행 라인에 따른 선회 속도 v_i , v_o , v_m 을 의미한다. 그림에서는 코너 진입 전의 직선 주로를 최대 속도로 등속 주행하는 구간, 코너에 진입하기 직전에 감속하는 구간, 코너를 등속으로 주행하는 구간, 코너를 통과한 후 직선 주로에서 가속하는 구간, 최대 속도

Table 1 Cornering speed for various driving lines

Drive Line	속도	소요시간
Line i	32.16mph	2.098초
Line o	37.79mph	2.466초
Line m	48.78mph	3.182초

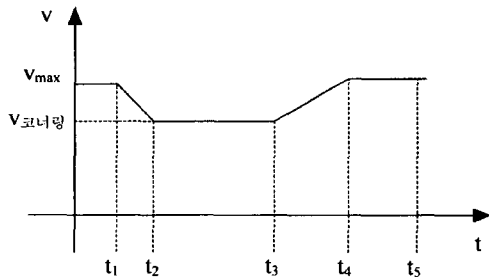


Fig. 2 Variation of velocity vs time based on driving lines

에 도달하여 직선 주로를 등속 주행하는 구간 등으로 코스를 나눌 수 있다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다. 여기서는 Line m과 관련된 식을 도출한다.

$$\frac{v_m - v_{max}}{t_2 - t_1} = -g \quad (3)$$

$$\frac{v_{max} - v_m}{t_4 - t_3} = \frac{g}{2} \quad (4)$$

$$v_m(t_3 - t_2) = \frac{\pi}{2} k = S_m \quad (5)$$

$$v_{max} t_1 + \frac{(v_{max} + v_m)(t_2 - t_1)}{2} = S_1 \quad (6)$$

$$v_{max}(t_5 - t_4) + \frac{(v_{max} + v_m)(t_4 - t_3)}{2} = S_4 \quad (7)$$

여기서

S_1 = AB구간의 직선 거리

S_4 = EF구간의 직선 거리

직선 주로 S_1 과 S_4 가 주어지면 Fig 1에 주어진 코스(AF구간)를 주행하는데 소요되는 시간을 구할 수 있다. Line i나 Line o의 경우 S_2 는 BC구간의 직선 거리이며 S_3 는 DE구간의 직선 거리로서 k-R_o의 값을 가지므로 코스의 형상에 따라 다른 값을 갖게 된다. 먼저 코너 부분만(BE구간)을 주행할 경우의 소요 시간을 알아본다. B점에서의 속도는 모두 같다고 가정한다. Table 2에 폭이 일정한 경우 반경의 변화에 따른 소요 시간과 Table 3에 반경이 일정한 경우 폭의 변화에 따른 소요 시간을 나타내었다.

BE구간에서 소요시간을 비교해 보면 반경이 작을수록 Line m이 Line i보다 단축되며 Line i가 Line o보다 더 유리함을 알 수 있다. 국내의 대표적 경주장인 스피드웨이의 경우 전체 코스를 주행하는데 소요되는 시간(랩타임; lap time)이 1분 10초대인 것을 감안하면 반경 75ft인 단 하나의 코너에서 0.9초 차이가 나면 누적된 시간 손실은 매우 커져 경기에서 좋은 성적을 거둔다는 것은 불가능하다. Line o를 선택하게 되면 소요시간 차이는 더욱 커지게 되는 것도 Table 2로부터 확인할 수 있다. 실제 스피드웨이에 헤어핀을 포함하여 코너가 9개 존재하며 그 반경도 작게는 54ft부터 150ft까지 다양하며 헤어

Table 2 Elapsed time for various radius (width=30ft)

반경	30.0	45.0	60.0	75.0	90.0	105.0
t _o	3.99	4.06	4.15	4.24	4.35	4.48
t _i	3.94	3.94	4.00	4.08	4.17	4.27
t _m	2.64	2.83	3.01	3.18	3.34	3.50

Table 3 Elapsed time for various width (radius=75ft)

폭	10.0	30.0	50.0	70.0	90.0
t _o	2.68	4.24	5.47	6.50	7.41
t _i	2.62	4.08	5.32	6.45	7.51
t _m	2.46	3.18	3.77	4.27	4.73

Table 4 Elapsed time for various radius (width=30ft)

반경	30.0	45.0	60.0	75.0	90.0	105.0
t _o	22.87	22.67	22.51	22.38	22.27	22.17
t _i	23.34	23.02	22.79	22.61	22.46	22.33
t _m	21.76	21.66	21.57	21.50	21.44	21.38

Table 5 Elapsed time for various width (radius=75ft)

폭	10.0	30.0	50.0	70.0	90.0
t _o	22.03	22.38	22.74	23.11	23.49
t _i	22.07	22.61	23.16	23.74	24.34
t _m	21.86	21.50	21.29	21.17	21.11

핀 코너도 반경이 36ft부터 195ft까지 매우 다양하다. 이렇게 코너가 많은 코스의 경우 코너 주행 라인의 선택은 경기의 승패를 가늠하는 절대적인 것이다.

Table 3에서 폭이 넓어질수록 소요 시간 차이는 더욱 커짐을 알 수 있다. 흥미 있는 것은 폭이 어느 정도 커지면 외측 코너를 주행하는 것이 내측보다 빨라진다는 것이다. 이는 외측을 주행하는 속도가 매우 빨라져서 내측보다 주행거리는 길지만 소요시간이 적기 때문이다. 그러나 어떠한 경우에도 Line m이 소요 시간을 최대한 단축하는 라인임을 알 수 있다.

4. 긴 직선 주로를 가진 코너 주행

여기서는 A점에서 최대속도로 주행 중이라고 가정하여 AF구간의 전체 코스를 주행할 때 소요시간을 비교하여 최선의 주행라인을 알아본다. 먼저 AB와 EF구간이 충분히 길어서 최대 속도가 가능한 지 다음의 공식으로 확인한다.

$$S = \frac{v_{\text{corner}}^2 - v_{\text{max}}^2}{2a} \quad (8)$$

직선 주행에서 발생 가능한 공기저항, 주행저항, 기울기저항 및 각종 저항은 없는 것으로 가정하였다. 위의 식으로부터 AB구간의 최소 길이는 약 720ft 이상이 되어야 함을 알 수 있다. 또한, 제동능력이 가속능력의 2배로 가정되었기 때문에 EF구간(가속구간)은 AB구간(제동구간)의 2배 정도의 거리가 필요하게 되므로 최소한 1440ft 이상이 되어야 한다. 그러므로 AB구간의 길이는 1000ft, EF구간의 길이는 2000ft, 차량의 최대 속도는 150mph로 가정한다. Table 4에는 폭이 일정한 경우 반경의 변화에 따른 소요시간을, Table 5에는 반경이 일정한 경우 폭의 변화에 따른 소요시간을 나타내었다.

Table 2, 3에서는 Line i가 Line o 보다는 소요시간을 단축할 수 있는데 Table 4, 5에서는 Line o가 소요시간이 적다. 그럼에도 여전히 Line m을 따라 주행할 경우가 최소한의 소요시간을 필요로 한다. 또한, 폭이 일정한 경우 반경이 커지면 3가지 주행라인 모두 소요시간이 단축되는데 이것은 R_i나 R_o가 커지게 되어 선회속도가 증가되어 코너 후에 신속히 최대 속도에 도달하기 때문이다. 반경이 일정하고 폭이 커지면 R_o는 커지고 R_i는 감소하게 된다. 즉 v_o는 커지고 v_i는 작아져서 소요시간의 격차는 커지게 된다. 내, 외측 주행 라인 모두 소요시간이 증가하는 반면, Line m은 소요시간이 단축된다. 이것은 선회시간은 늘어나지만 Line m의 반경 k가 증가하여 선회속도의 증대를 가져와 최대속도에서 선회속도까지 감속하는 시간 및 선회속도에서 최대속도까지 가속하는 시간이 단축되어 전체적인 시간의 단축이 가능하기 때문이다. 즉, 코너 출구 속도가 큰 차량일수록 코너 후에 긴 직선 주로가 존재할 경우 유리하다. Line i와 Line o가 D점에 도달하는 시간은 반경이 75ft이고 폭이 30ft인 경우 각각 9.02초와 9.19초가 된다. 즉, 내측 라인을 따르는 경우 외측 라인보다 먼저 D점에 도달한다. 그러나 여기서부터 F점까지는 긴 직선 주로가 존재하며 D점에서의 속도가 v_i와 v_o가 되어 F점에 이르기 전에 외측 라인을 주행하는 차량이 내측 라인을 주행하는 차량을 추월한다. 본 연구의 코스에서 외측 라인을 주행하는 차량이 D점에서부터

1.5초 후에 내측 라인을 주행하는 차량을 추월하게 된다. 결국 DF 구간의 길이에 따라 내측 혹은 외측 라인을 선택하여야 한다. 이것은 본 연구의 서두에 언급한 것처럼 전체 코스를 하나의 단위로 보고 모든 코너가 직선에, 모든 직선이 코너에 영향을 준다는 점을 고려하여 차량의 주행 라인을 결정하여야 한다는 점을 다시 한번 확인시켜 주는 것이다.

직선 주로가 충분히 길지 않을 경우 소요시간의 변화에 대하여 알아보았다. Fig 1의 A점에서 최대 속도로 주행중이며 바로 감속을 시작하도록 AB구간의 거리를 800ft로 제한하고 EF구간의 거리도 500ft로 제한하여 최대속도에 도달하지 못하게 하였다. 이것은 다음 코너가 근접하여 있어서 최대속도에 도달하지 못하고 바로 다음 코너로 진입하는 경우를 가정한 것으로 경계에서 흔히 접하는 경우이다. Table 6과 7에 반경과 폭에 따른 소요시간의 변화를 나타내었다.

주목할 점은 외측 라인이 내측 라인보다 어떠한 경우에도 소요시간이 적다는 점과 Line m의 경우 폭이 일정하고 반경이 증가하는 경우 소요시간이 단축되지만 반경이 일정하고 폭이 증가하는 경우는 소요시간이 단축되다가 다시 증가한다는 점이다. 이 경우 폭이 증가하면 내측 반경(R_i)이 작아져서 결국에는 코너 선회속도의 감소를 가져와 소요시간이 증가된다. 결국 코스의 폭과 반경을 함께 고려하여야 최적의 주행라인을 결정할 수 있다.

5. 수정 주행 라인

지금까지 주행 라인에 따른 주행 소요시간을 단축하기 위해서는 Line m이 가장 유리하며 긴 직선

Table 6 Elapsed time for various radius (width=30ft)

반경	30.0	45.0	60.0	75.0	90.0	105.0
t_o	14.22	14.07	13.95	13.85	13.78	13.72
t_i	14.62	14.34	14.15	14.02	13.91	13.82
t_m	13.12	13.07	13.02	12.99	12.96	12.94

Table 7 Elapsed time for various width (radius=75ft)

폭	10.0	30.0	50.0	70.0	90.0
t_o	13.35	13.85	14.35	14.83	15.31
t_i	13.38	14.02	14.66	15.32	15.99
t_m	13.18	12.99	12.92	12.92	12.96

주로가 코너 진입 전과 후에 존재할 경우 내측 라인보다 외측 라인이 유리하다는 것도 밝혔다. 그러므로 여기서는 외측 라인과 같은 반경을 가지는 수정 주행라인을 제시하여 최대한 주행거리를 단축할 경우를 Line o를 주행하는 경우와 비교하여 본다. Fig 3에 수정 주행라인을 나타내었고 Table 8과 9에 반경과 폭의 변화에 따른 소요시간을 기존의 외측 라인과 함께 비교하였다. Line ①과 Line ②의 두 경우 모두 코스의 폭 만큼 주행하여야 하는 직선 거리가 단축되므로 기존의 외측라인 (Line o)보다 소요시간을 단축시킨다.

그러나 두 수정 주행라인 모두 F점까지 소요되는 시간이 동일하다. 이것은 가정된 코스가 코너의 전과 후에 매우 긴 직선 주로가 존재하기 때문이다. Fig 2에 주어진 각 구간별 소요시간을 두 수정 주행라인에 대하여 각각 계산해 보면 Table 10과 같다. 여기서 코스의 폭은 30ft, 반경은 75ft이다.

Line ①이 Line ② 보다는 각 구간에서 앞서는 것

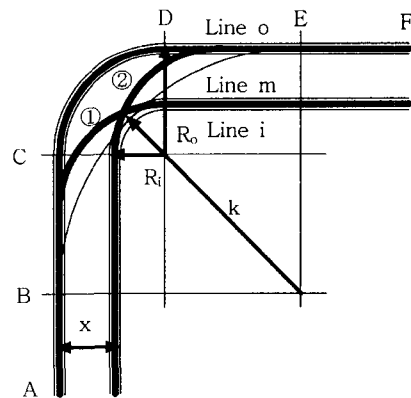


Fig. 3 Modified driving lines

Table 8 Elapsed time for various radius (width=30ft)

반경	30.0	45.0	60.0	75.0	90.0	105.0
Line o	22.87	22.67	22.51	22.38	22.27	22.17
Line ①	22.76	22.56	22.41	22.27	22.16	22.06
Line ②	22.76	22.56	22.41	22.27	22.16	22.06

Table 9 Elapsed time for various width (radius=75ft)

폭	10.0	30.0	50.0	70.0	90.0
Line o	22.03	22.38	22.74	23.11	23.49
Line ①	22.01	22.27	22.54	22.82	23.11
Line ②	22.01	22.27	22.54	22.82	23.11

Table 10 Elapsed time for each sector

폭	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅
Line ①	1.49	6.62	9.08	19.34	22.27
Line ②	1.60	6.73	9.19	19.45	22.27

Table 11 Elapsed time for each sector

폭	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	v _e
Line ①	0.58	5.71	8.17	13.75	144.85
Line ②	0.69	5.82	8.28	13.69	142.17

처럼 보이지만 실제로는 위치가 다르기 때문에 우월을 논하기 어렵다. 그러나 F점에 도달하는 시간은 같다.

직선 주로가 길지 않은 경우에도 두 주행라인이 동일한 소요시간을 보이는 지를 검토하였다. 앞에서와 마찬가지로 코너 전의 AB구간은 800ft, 코너 후의 EF구간은 500ft로 가정하여 결과를 Table 11에 비교하였다. Table 11에서 v_e는 F점을 통과하는 속도이다.

Line ②는 직선 주로가 비교적 짧을 때에는 더욱 비교 우위에 설 수 있는 주행라인이다. 또한 F점에서의 속도가 Line ① 보다 작음에도 소요시간이 적다는 것에 주목하여야 한다. 이것은 코너 출구 지점이 Line ②가 Line ①보다 매우 앞서있기 때문이다. 그러므로 기존의 Line ①보다는 수정 주행라인 중에서 하나를 선택하며 선택의 기준은 다음 코너의 형상과 직선 주로의 길이, 현재 주변 차량의 위치 여부에 따라 정한다.

6. 결론

본 연구에서는 90도 각도를 가지는 우회전 코너에서 주행라인에 따른 소요시간을 알아보았다. 코너의 전, 후에 존재하는 직선 주로의 길이에 관계없이 Line m이 최적의 주행라인임을 확인할 수 있다. Line m을 따라 주행하는 경우 내측 라인이나 Line ②를 주행하는 차량을 코너에서 추월하려고 할 경우, 추돌의 우려가 있으므로 주의 기울여야 한다. 물론 동시에 A점을 통과하게 되면 클립핑 포인트에는 Line m을 주행하는 차량이 먼저 도달하게 되므로 추돌의 위험은 없다.

본 연구를 통하여 그동안 많은 시행착오를 통하여 찾아내었던 최적의 주행라인을 이론적으로 규명할 수 있는 길이 제시되었다. 이번 연구의 결과물은 드라이버를 꿈꾸는 미래의 드라이버와 운전을 배우고자 하는 일반인에게도 교육용으로 제공될 수 있으며 경주용 차량을 세팅하는데도 기본 자료로 활용될 수 있다.

References

- 1) C. Lopez, Going Faster!, Bentley Publishers, 1997.
- 2) C. Smith, Drive to Win, Carroll Smith Consulting, Inc. 1996.
- 3) B. Beckman, S. K. Jang, H. J. Won, "Vehicle Performance Simulation Program Development Considering the Racing Lines on the 90 Degree Corners", 2002 KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1481-1485, 2002.