

시거를 고려한 곡선구간의 적정 설계기준 연구

A Study on Design Criteria in Circular Curves Based on the Sight Distance

김원기* · 이상화** · 손영태***

Kim, Won Ki · Son, Young Tae

1. 서론

도로설계시 규정상 최소곡선반경은 자동차의 역학적 안전만을 고려하여 규정한 것으로 터널이나, 중앙분리대, 방음벽 등의 구조물들이 있을 경우, 이 값을 적용하면 운전자에게 정지에 필요한 시거를 제공하지 못하게 된다. 단일 원곡선의 평면곡선부에서 시거 확보를 위해 차로 중심선부터 장애물까지의 거리(중앙종거)에 관하여 국내·외에선 이미 언급되어 있다. 그러나 이 값은 최소곡선반경 값에 비하여 매우 큰 곡선반지름을 나타내거나 많은 측방여유폭을 필요로하기 때문에 도로설계시 설계자에게 혼란을 야기한다. 그러므로, 본 연구에서는 최소곡선반경과 시거를 고려한 곡선반경의 차이를 인지하고, 설계시 최소곡선반경 사용에 내포되어 있는 안전상의 문제를 지적하고 이를 해결하기 위한 필요 설계값을 제시하고자 한다.

1.1 이론적 고찰

도로설계시 제시되고 있는 최소 평면곡선반경을 산정하는 식에 대하여 정리하며, 곡선부에서 정지시거를 고려하였을 때 필요한 곡선반경 값을 비교한다.

1) 최소 평면곡선반경의 산정

최소 평면곡선반경은 차량이 평면 곡선부를 주행할 때 작용하는 원심력으로 인해 곡선부의 바깥쪽으로 미끄러지거나 전도할 위험을 방지함과 동시에 주행의 쾌적을 확보할 수 있도록 산정 된다.

평면 곡선반경, 설계속도, 횡방향 미끄럼마찰계수 및 편경사에 관하여 평면 곡선부를 주행하는 자동차가 횡방향으로 미끄러지지 않을 조건의 관계식은 다음과 같다.

$$R = \frac{V^2}{g(i+f)} \quad (1)$$

V(km/h)를 m/s의 단위로 보정하고 $g = 9.8\text{m/sec}^2$ 을 대입하면,

$$R = \frac{V^2}{(3.6^2) \times 9.8 \times (i+f)} = \frac{V^2}{127(i+f)} \quad (2)$$

2) 최소 정지시거

운전자가 장애물을 발견한 후 브레이크를 작동하여 자동차를 정지시키는데 필요한 거리는 반응시간 동안의

* 명지대학교 교통공학과 석사과정 011-9011-3829 (E-mail : realdash21@mju.ac.kr)

** 명지대학교 교통공학과 석사과정 010-6423-8097 (E-mail : soboru2@hotmail.com)

*** 정회원 · 명지대학교 교통공학과 교수 011-778-7612 (E-mail : son@mju.ac.kr)



주행거리와 운전자가 제동장치를 작동시켜 자동차를 정지시킬 때 필요한 거리의 합과 같으며, 그 식은 다음과 같다.

$$D = \frac{V}{3.6} t + \frac{V^2}{254f} = 0.694 \cdot V + \frac{V^2}{254f} \quad (3)$$

여기서, D : 정지시거 (m) V : 설계속도 (km/h)
 t : 반응시간(2.5초) f : 종방향 미끄럼마찰계수

표 1. 설계속도별 최소곡선반경과 정지시거 계산

| 설계속도 | 최소 평면 곡선 반경(m) | | | 정지 시거(m) | | |
|------|-----------------|-----|-----|-----------------|-------|-----|
| | 횡방향 미끄럼 마찰계수 | 계산값 | 규정값 | 종방향 미끄럼 마찰계수 | 계산값 | 적용값 |
| 120 | 0.10 | 709 | 710 | 0.28 | 285.8 | 280 |
| 110 | 0.10 | 596 | 600 | 0.28 | 246.4 | 250 |
| 100 | 0.11 | 463 | 460 | 0.29 | 205.3 | 200 |
| 90 | 0.11 | 375 | 380 | 0.30 | 168.8 | 170 |
| 80 | 0.12 | 280 | 280 | 0.30 | 139.6 | 140 |
| 70 | 0.13 | 203 | 200 | 0.31 | 110.9 | 110 |
| 60 | 0.14 | 142 | 140 | 0.32 | 85.9 | 85 |
| 50 | 0.16 | 89 | 90 | 0.34 | 63.7 | 65 |
| 40 | 0.16 | 57 | 60 | 0.37 | 44.8 | 45 |
| 30 | 0.16 | 32 | 30 | 0.44 | 28.9 | 30 |
| 20 | 0.16 | 14 | 15 | 0.44 | 17.5 | 20 |

3) 원곡선에서 시거 확보

차로 중심선부터 장애물까지의 거리, 즉 중앙 종거는 아래와 같이 표현된다.

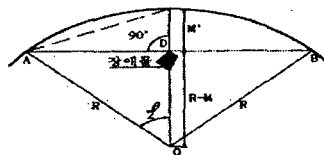


그림 1. 원곡선에서의 시거

$$M = R - R \cdot \cos \frac{\theta}{2}$$

$$= R(1 - \cos \frac{\theta}{2}) = R(1 - \cos \frac{D}{2R}) \quad (4)$$

우변을 Tailer의 급수로 전개하여, 식을 곡선반경에 의한 식으로 다시 정리하면 다음과 같다.

$$R = \frac{D^2}{8M} \quad (5)$$

여기서, D : 시거(ACB) R : 반경 M : 중앙종거



2. 본 론

2.1 곡선반경의 비교 및 분석

예를 들어 설계속도 80km/h일 때, 식2)에 의한 최소곡선반경은 280m가 되고, 이때의 정지시거는 식3)에 의해 140m라는 것을 알 수 있다. 그러므로 설계속도가 80km/h인 도로에서 최소곡선반경을 적용하였다면, 식 5)에 의한 필요한 중앙종거(M)은 8.75m가 된다. 원곡선에서 시거를 확보하기 위한 필요한 곡선반경의 산정 방법에는 최소곡선반경에서는 정의되지 않은 중앙종거가 포함되어 있다. 그러므로 두 곡선반경의 크기를 비교하기 위해선 먼저 중앙종거를 고정시킬 필요가 있다. 중앙종거는 도로의 횡단구성요소에 의해 각각 다른 값을 보이므로 분석을 위하여 임의의 도로를 가정하기로 한다.

1) 전제 조건

중앙분리대가 설치된 고속도로를 기본으로 한다. 중앙분리대 자체는 운전자의 눈높이 보다 낮아 운전자의 시야를 제한하지 않지만 최근 많이 설치되고 있는 방현망은 운전자의 시야를 제한하게 된다. 그리고 곡선부에서 왼쪽으로 굽은 도로의 1차로를 주행하는 차량의 경우 이러한 중앙분리대에 의해서 시거를 가장 많이 제약받게 된다. 차종이나 운전자 주행 특성에 의하여 실제 도로상에서 운전자의 눈 위치가 변하기 때문에 운전자의 눈 위치는 도로의 중앙으로 가정한다. 다음은 중앙종거를 계산하기 위해 정의한 도로에 대하여 간단히 정리한 것이며, 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설 및 지침에 있는 표1)을 통해 도로의 횡단면 구성과 중앙분리대의 표준폭을 구한다.

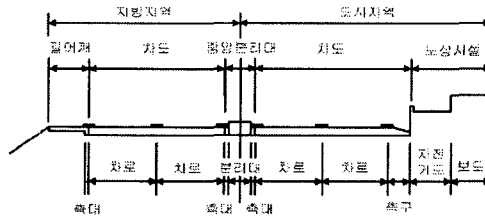


그림 2. 도로의 횡단면 구성

- 왼쪽으로 굽은 도로
- 중앙분리대에 방현망이 설치된 도로
- 고속도로 (차로폭:3.5m, 중앙분리대 폭:1.5m)
- 운전자는 1차로의 중앙에 위치

표 2. 중앙분리대의 표준 폭

| 도로의 구분 | | 표준 폭 |
|--------------------------------------|-----|------------------|
| 고속도로 | | 3.0 |
| 도시고속도로 | | 2.0 |
| 일반도로 | 지방부 | 1.5 |
| | 도시부 | 1.0 |
| 교차로에서 중앙분리대를 좌회전 차로로 활용할 경우 | | 최소 3.5 권장 4.0 |
| 광폭 분리대 | | 12이상 최소 10 |
| 식재를 고려한 광폭 분리대 (분리대 횡단경사는 1:4 이상) | | 18 |

2) 곡선 반경 산정 및 비교

최소곡선반경은 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설 및 지침에서는 편경사는 6%를 이용하였으며,



횡방향미끄럼 마찰계수는 운습한 상태일 때의 마찰계수이다. 위의 식2)에 의거하여 설계속도별 최소 평면곡선반경을 구한다. 시거를 고려한 곡선반경은 정지시거와 중앙 종거의 관계에 의해서 도출된다. 그러므로 시거를 고려한 곡선반경을 계산하기 위해서는 먼저 각 설계속도로 정지시거를 산정할 필요가 있다. 식3)에 의해서 계산된 설계속도별 정지시거이다. 가정에 의하면, 차로폭 3.5m일 때 운전자는 차로의 중앙에 위치하므로 3.5m/2의 도로 폭과 양 방향 도로의 중앙에 놓인 3.0m 폭의 중앙분리대로 3.0m/2의 측방여유폭을 가지게 된다. 그러므로 조건에 의해 구해지는 중앙종거는 3.25m이다. 최소곡선반경은 표1를 그대로 사용하였으며, 시거를 확보하기 위한 곡선반경의 계산은 가정된 조건인 중앙종거 3.25m를 이용하였을 때 필요한 곡선반경에 대하여 계산하였다. 다음의표는 두 곡선반경의 차이를 보여주고 있다. 표3)에서 시거확보 곡선반경은 중앙종거 3.25m를 적용했을 때 시거를 확보해주기 위해서 필요한 곡선반경을 의미하며, 최소곡선반경은 역학적 관점에서 전복이나 탈선등을 방지하기 위한 최소의 곡선반경을 의미한다. 필요 중앙종거는 최소곡선반경 적용시 시거를 확보해주기 위해 필요한 중앙종거를 계산한 것이다.

표 3. 최소곡선반경과 시거확보를 위해 필요한 곡선반경의 비교

| 설계속도(km/h) | 정지시거(m) | 시거확보 곡선반경(m) | 최소곡선반경(m) | 필요 중앙종거(m) |
|------------|---------|-----------------|-----------|---------------|
| 120 | 280 | 3141.8 | 710 | 13.8 |
| 110 | 250 | 2337.5 | 600 | 13.0 |
| 100 | 200 | 1619.6 | 460 | 10.9 |
| 90 | 170 | 1095.6 | 380 | 9.5 |
| 80 | 140 | 749.0 | 280 | 8.8 |
| 70 | 110 | 472.5 | 200 | 7.6 |
| 60 | 85 | 284.2 | 140 | 6.5 |
| 50 | 65 | 155.9 | 90 | 5.9 |
| 40 | 45 | 77.2 | 60 | 4.2 |
| 30 | 30 | 32.1 | 30 | 3.8 |
| 20 | 20 | 11.7 | 15 | 3.3 |

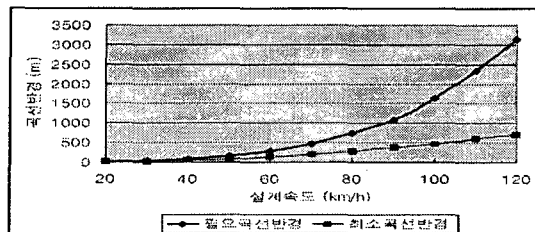


그림 3. 최소곡선반경과 필요곡선반경 비교

최소곡선반경 값과 시거확보를 위해 필요한 곡선반경 값의 차이는 설계속도가 증가할 수록 그 차이가 더욱 커짐을 알 수 있다. 설계속도가 60km/h 이상이 되면 필요곡선반경에 대한 최소곡선반경의 비율이 50%도 만족하지 못하고 있다. 이는 현재의 도로 설계기준인 최소곡선반경이 곡선부 주행시 시거를 전혀 확보해 주지 못하고 있음을 의미한다. 적용된 중앙종거에 의해 차이가 발생하지만 중앙종거를 2.5m로 하였을 때, 최소곡선반경 설계시 시거 확보를 위해서 설계 속도에 따라 0.8~11.3m의 중앙종거를 추가할 필요가 있는 것으로 나타났다. 최소곡선반경을 유지하기 위해 필요한 중앙종거를 보면, 최소한 한 차로 정도의 중앙종거부터 70km/h 이상 일 때 2차로, 100km/h 이상 일 때 3차로, 최대 120km/h 일 때 4차로에 해당하는 넓이의 확보를 필요로 한다. 결국, 최소곡선반경은 곡선부를 주행하는 운전자에게 시거를 전혀 확보해 주지 못하고 있으며, 최소곡선반경을 유지하는 도로설계를 위해 중앙종거를 확보해주는 방안이 있으나 경제적 측면에서 무리가 될 수 있다.



2.2 해결 방향

1) 인지반응 시간

대부분 국가의 경우 인지반응 시간을 2.0초로 이용하고 있으며, GM Model에서는 반응시간을 1.0~2.2초의 범위, 평균 1.55초를 이용하였다. 이러한 반응시간 범위를 이용하면 최소곡선반경에 좀더 접근한 곡선반경을 얻을 수 있다. 2001년 교통개발연구원에서 인적요인이 도로설계에 미치는 영향에 관한 연구(신호교차로에서 신호등에 의한 운전자들의 반응시간을 Unalerted하게 측정하였지만, 신호등 존재로 인한 Alerted라는 문제가 있다.)에 의하면 85th -percentile의 인지반응시간은 1.8초로 현재 설계 기준 2.5초는 약 39%정도 여유있게 고려되고 있다고 말하였다. 아울러 현재 국내 도로설계시 사용되고있는 2.5초는 조사집단의 99th -percentile에 해당한다.

표 4. 85-th, 90-th, 95-th, 99-th % 인지 반응 시간

| | 85th(sec) | 90th(sec) | 95th(sec) | 99th(sec) |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 지점1 | 1.886 | 2.091 | 2.366 | 3.773 |
| 지점2 | 1.875 | 2.100 | 2.271 | 2.653 |
| 지점3 | 1.745 | 1.891 | 2.118 | 2.482 |
| 전체 | 1.804 | 2.042 | 2.263 | 2.651 |

중앙종거를 5m로 했을때, 이 값들(1.0, 1.5, 2.0, 2.5초)을 이용해 정지시거를 다시 계산하여 최소곡선반경과 비교한 그래프는 그림4)와 같다. 중앙종거를 5m로 유지하였을 경우 최소곡선 반경은 설계속도 70km/h에서 시거에 무리가없는 반응시간 2.0초에 수락하며, 설계속도 80km/h까지 반응시간의 범위 안에 포함된다. 설계속도 70 km/h일때의 경우를 예로 설명하면, 최소곡선반경을 유지하기 위해 표4)에서는 7.6m의 중앙종거를 필요로 하였으나 반응시간을 2.0초로할 경우 중앙종거 5m정도만으로 운전자에게 안전을 제공해 줄 수 있다. 그러나 설계속도 80km/h이상 이 되면 중앙종거 5m를 확보해도 안전을 제공해 줄 수 없게 된다.

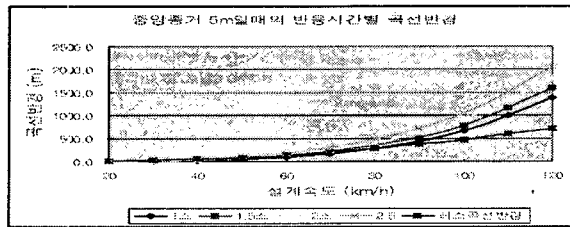


그림 4. 중앙종거 5m 일때의 반응시간별 곡선반경

2) 중앙종거

중앙종거는 넓을수록 시거를 확보해주지만 한계가 있다. 그렇기 때문에 우선 적정 중앙종거를 산정할 필요가 있다. 적정 중앙종거 산정을 위해 인지반응시간을 2.5초로 고정하고, 중앙종거를 2m부터 10m까지 1m씩 증가시켰을 때의 결과는 다음의 그림3)과 같다. 중앙종거를 1m단위로 증가시켜 곡선반경의 변화폭을 관찰한 결과 중앙종거 5m를 넘을 경우 그 효과의 폭이 작아지는 것을 볼 수 있다. 설계시 5m정도의 중앙종거 확보가 효율적이라할 수 있다. 중앙종거가 변할 때 특정 속도에서 곡선반경의 변화폭을 이용하여 추세선을 그려본 결과 그 곡선의 변곡점은 7.7m로 나왔다.

3) 곡선반경의 비교

다음의 표는 앞에서의 결과들을 다시 정리 하여 하나의 표로 나타낸 것이다. 시거확보 곡선반경을 보면 인



지반용 시간을 2.5초에서 2.0초로 했을 때, 설계속도 120km/h의 경우 약11.3% 감소하였다. 최소곡선반경과 비교했을때, 4.4배에서 3.9배로 감소하였다. 그러나 최소곡선반경과의 차이는 여전히 심하므로, 중앙증거를 3.25m에서 5.0m로 넓혀주면 최소곡선반경의 2.5배로 처음의 곡선반경보다 42.4%감소한 곡선반경 값을 나타낸다. 인지반응 시간을 2.5초에서 2.0초로 조정하고, 최소곡선반경시 필요한 중앙증거를 10.95m가 아닌 5m로 줄임으로 기존의 중앙증거에 1.75m의 증가만으로 큰 효과를 가질 수 있음을 의미한다.

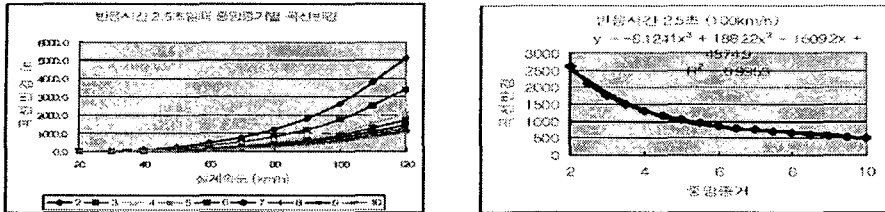


그림 5. 반응시간 2.5초 일때의 중앙증거별 곡선반경과 변화폭 추세선

3. 결론

두 곡선반경의 차이에 대하여 앞에서 언급했듯이 최소곡선반경에 의한 도로 설계는 도로상에서 발생할 수 있는 돌발상황에 대하여 도로이용자에게 안전을 전혀 확보해 주지 못할을 알 수 있다. 그렇다고 시거를 확보하기 위해 중앙증거를 넓히는 것 역시 효과적이지 못하며 한계가 있다. 시거를 확보하기 위한 곡선반경과 최소곡선반경의 심한 차이로 인한 곡선반경 설계시의 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 적정한 중앙증거 5m를 제시하였으며, 기존의 연구에서 제시된바 있는 반응시간을 적용함으로써 시거를 고려했을 때의 곡선반경이 최소곡선반경에 접근하도록 하였다. 기존의 방식에 비하여 안전한 곡선반경을 제공하였지만 설계속도 80km/h 이상이 되면 또다시 시거를 확보해줄 수 없는 범위로 나타나게 된다. 인지반응시간에 대한 국내외의 연구결과를 고찰한 결과 현재 우리나라에서 사용하고 있는 2.5초는 충분한 여유가 있다는 것을 알 수 있었으며, 인지반응 시간을 2.0초 정도로 하향조정하여도 문제가 없을 것으로 보인다. 기존에 이용하고 있는 인지반응시간 2.5초 대신 기존연구와 외국의 인지반응시간을 이용해 정지시거를 재계산 하므로써 시거를 고려한 곡선반경을 최소곡선반경에 어느 정도 접근시켰다. 또한 중앙증거 산정에 있어서도 경제적 측면 등 여러 가지 측면에서의 효과 분석을 통한 적정값을 도출해야 할 것이다.

표 5. 설계속도별 중앙증거에 따른 곡선반경

| 설계속도 | 중앙증거(m) | | | | | | | | | | |
|------|---------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 7 | 6.5 | 6 | 5.5 | 5 | 4.5 | 4 | 3.5 | 3 | 2.5 | 2 |
| 120 | 825.4 | 888.9 | 963.0 | 1050.6 | 1155.6 | 1284.0 | 1444.5 | 1650.9 | 1926.0 | 2311.3 | 2889.1 |
| 110 | 611.2 | 658.2 | 713.0 | 777.8 | 855.6 | 950.7 | 1069.5 | 1222.3 | 1426.0 | 1711.3 | 2139.1 |
| 100 | 429.0 | 462.0 | 500.5 | 546.0 | 600.6 | 667.4 | 750.8 | 858.0 | 1001.0 | 1201.3 | 1501.6 |
| 90 | 301.8 | 325.0 | 352.1 | 384.1 | 422.5 | 469.4 | 528.1 | 603.6 | 704.2 | 845.0 | 1056.3 |
| 80 | 216.1 | 232.7 | 252.1 | 275.0 | 302.5 | 336.1 | 378.1 | 432.1 | 504.2 | 605.0 | 756.3 |
| 70 | 161.2 | 173.6 | 188.0 | 205.1 | 225.6 | 250.7 | 282.0 | 322.3 | 376.0 | 451.3 | 564.1 |
| 60 | 100.4 | 108.2 | 117.2 | 127.8 | 140.6 | 156.3 | 175.8 | 200.9 | 234.4 | 281.3 | 351.6 |
| 50 | 54.0 | 58.2 | 63.0 | 68.8 | 75.6 | 84.0 | 94.5 | 108.0 | 126.0 | 151.3 | 189.1 |
| 40 | 28.6 | 30.8 | 33.3 | 36.4 | 40.0 | 44.4 | 50.0 | 57.1 | 66.7 | 80.0 | 100.0 |
| 30 | 16.1 | 17.3 | 18.8 | 20.5 | 22.5 | 25.0 | 28.1 | 32.1 | 37.5 | 45.0 | 56.3 |
| 20 | 7.1 | 7.7 | 8.3 | 9.1 | 10.0 | 11.1 | 12.5 | 14.3 | 16.7 | 20.0 | 25.0 |



참고문헌

1. 박영진 (2002.2), “개별차량의 운전행태를 이용한 위험도로 평가기법 개발” 서울대학교 공학박사학위 논문
2. 건설교통부 (2003.3), “도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설 및 지침”
3. 교통개발연구원 (2001.1) “인적요인이 도로설계에 미치는 영향 (1단계) -교차로 구간에서의 운전자 행태 분석을 중심으로”
4. Adolf D. May, “Traffic Flow Fundamentals”
5. Ruediger Lamm, Basil Psarianos and Theodor Mailaender, “Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook” McGRAW-HILL