

3차원 입체시거 산정모형에 관한 연구

Development of 3-Dimensional Sight Distance Model for Highway Alignments

하태준* · 박제진** · 박태훈***

Ha, Tae Jun · Park, Je Jin · Park, Tae Hoon

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

정지시거란 운전자가 진행방향의 전방에 있는 장애물 또는 위험요소를 인지하고 제동을 걸어 정지할 수 있는 길이를 말하는데, 도로선형에 의해 운전자의 시야에 방해가 되지 않도록 도로 전구간에 걸쳐 정지시거가 확보되도록 설계하는 것은 매우 중요하다.

도로구조형에서는 평면이나 종단선형이 단순한 구간에 대한 시거계산방법이 제시되어 있다¹⁾. 하지만 이 방법을 이용하여 선형이 연속적으로 연결되거나 평면곡선과 종단곡선이 합성된 입체선형에서의 시거를 계산하기는 매우 어렵다. 지금까지 이러한 복잡한 선형에서의 시거를 계산하는 방법을 제시하기 위해 많은 연구들이 수행되었으나, 그래픽적인 알고리즘에 의한 방법거나 정확하지 못한 근사해를 구하는 방법들이었다. 이러한 근사법을 이용하는 이유는 입체적인 본질을 지닌 도로선형의 정보를 공간좌표에 정확히 표현하는 수식을 만드는 것이 어렵고 복잡하다고 알려져 있기 때문이다.

이에 본 연구에서는 입체선형을 공간좌표에 표현하고 시거를 분석할 수 있는 수학적 계산을 시도하여 시거분석이 필요한 도로안전 연구에 기여하고자 한다.

1.2 연구범위 및 방법

2차원적 설계에서 쓰이는 간단한 수식과는 달리 3차원 시거계산을 가능케 하는 수식은 불가피하게 복잡할 수 밖에 없다. 평면과 종단선형이 조합되어 생겨나는 입체선형의 종류만을 보더라도 2차원적 설계에서보다 훨씬 많은 실정이다. 따라서 본 연구의 입체시거 계산모형에서도 이러한 선형조합으로 발생하는 입체선형의 종류들을 모두 고려하였다.

각 선형의 종류별로 운전자의 투시선이 만나게 되는 지형 능선상의 시거접점을 구하고, 그 투시선이 시거접점을 지나고 장애물과 일직선으로 만나는 경우의 장애물 위치를 구하게 된다. 운전자 위치에서의 시거는 그 때의 운전자 위치에서부터 도로를 따라 장애물까지 도달하는 거리로 선정하였다.

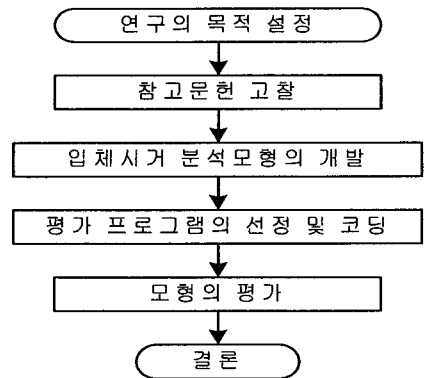


그림 1. 연구수행 흐름도

* 정회원 · 전남대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사 · 062-530-1658 (E-mail:tjha@chonnam.ac.kr)
** 정회원 · 전남대학교 공업기술연구소 선임연구원 · 공학박사 · 062-530-0658 (E-mail:jjpark@chonnam.ac.kr)
*** 정회원 · 전남대학교 토목공학과 박사과정 · 공학석사 · 062-530-0657 (E-mail:th-park2105@hanmail.net)

2. 기존 연구문헌 고찰

2.1 그래픽적 방법에 의한 입체시거분석

그래픽 소프트웨어를 이용하여 시거를 분석하는 방법은 도로를 삼각망과 같은 작은 요소들로 모델링한 후 시거선과 삼각망이 만나게 되는 조건을 이용하여 시거를 결정한다. 대표적인 연구로는 Sanchez(7)의 인터체인지 접속부에서의 입체시거 분석에 관한 연구를 들 수 있으며, 국내의 시거분석 소프트웨어인 SD 2000(2)도 그래픽적 방법을 이용한 것이다.

2.2 유한요소법을 이용한 입체시거분석

다소 분석시간이 많이 소요되는 그래픽적 방법과는 달리 Hassan의 유한요소법을 이용한 방법(8)은 분석환경을 구성하는 유한요소의 개체의 표현이나 시거방해조건식 등이 계산적인 방법에 토대를 두고 있다. 하지만 이 방법 역시 유한요소개체가 도로를 정확히 표현하지 못하는 근사적 방법이라는 단점을 가지고 있다.

2.3 연속된 선형에서의 평면시거분석

Lovell은 연속된 평면선형에서 시거프로파일을 계산할 수 있는 모형을 개발하였다.(4),5),6) 시거분석방법은 <그림 2>와 같은 평면선형에서 도로중앙선의 좌표를 표현하고, 중앙선의 접선벡터와 법선벡터를 이용하여 기타 요소들을 생성한 후 투시선과 측방장애물선이 접하는 조건을 이용하였다.

본 연구에서는 Lovell의 평면시거프로파일 계산방법의 개념을 공간좌표로 확장시켜 입체시거를 계산하는 방법에 이용하였다.

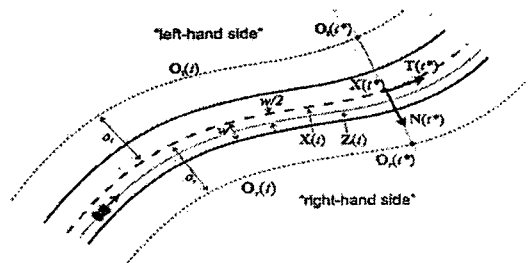


그림 2. Lovell의 평면시거프로파일

3. 입체시거 모형의 개발

3.1 가정 설정

횡단면의 구성을 <그림 3>과 같이 가정하였다. 좌우 비탈면의 경사각은 일정하고 차량은 차로 중심선을 따라 주행하며 측방여유폭은 일정한 것으로 가정하였으며, 편구배의 영향은 무시하였다. 또한, 시거분석시 문제가 되는 기하구조는 도로 측방에 장애물이 있는 횡단면이므로 <그림 3>과 같은 절취형 단면으로 가정하였다. 횡단면이 일정하면 도로의 노면과 좌우 비탈면은 <그림 4>와 같이 선들이 적분된 선적면이 된다. 투시선이 선적면상의 볼록한 면에 접하고 장애물이 보이기 시작할 때를 기준으로 최대시거가 계산된다. 이러한 상황은 결과적으로 시거투시선이 선적면상의 한 직선과 교차하는 상황이라고 볼 수 있다.

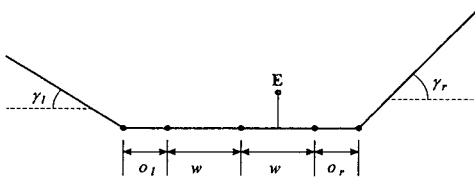


그림 3. 도로의 절취형 횡단면

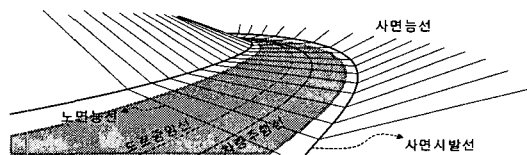


그림 4. 입체적 도로형상의 구성요소

또한 시야의 방해는 <그림 5>와 <그림 6>에서처럼 측방사면과 도로노면에 의해서도 발생하는데, 이때의 시거는 2차원적인 종단시거프로파일 작성방법을 이용하여 계산될 수 있다.

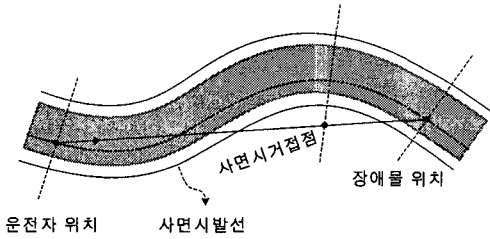


그림 5. 측방사면의 시야방해에 의한 시거

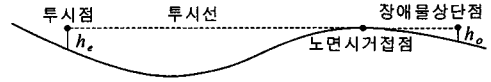


그림 6. 도로노면 시야방해에 의한 시거

3.2 입체시거 계산의 절차

입체시거를 계산하는 과정은 크게 세부분으로 구분된다. 우선 시거분석에 필요한 도로나 주변 지형요소들을 공간좌표에 표현하기 위해 평면좌표를 계산한다. 그리고 모든 지점에서의 표고, 즉 종단좌표를 계산한다. 마지막으로 평면좌표 종단좌표가 합성된 입체선형의 도로 및 지형자료와 운전자투시선의 공간직선식을 이용하여 입체시거를 계산한다. 세부적인 방법은 <그림 7>에 제시하였다.

3.3 평면선형에서의 좌표

평면선형상의 좌표 표현은 Lovell의 방법을 이용하였다. 식 (1)은 x축을 기준으로 반시계방향으로 θ 의 각만큼 회전된 단위벡터이고, 식 (2)는 임의의 평면벡터를 θ 만큼 회전시키는 행렬이다. 식 (1)과 식 (2)는 수식의 간소화를 위해 이용하는 식이다.

$$W(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \tag{2}$$

1) 평면선형이 직선일 경우

평면선형이 직선인 경우에는 <그림 8>과 같이 x축과 선형이 이루는 각이 일정하며 선형의 시·중점과 선형상 임의의 점에서의 좌표는 식 (3)에서 식 (6)까지의 수식으로 나타낼 수 있다.

$$C_i = C_{i-1} + l_i W(\alpha_i) \tag{3}$$

$$C(s) = C(s_{i-1}) + (s - s_{i-1}) W(\alpha_i) \tag{4}$$

$$C'(s) = W(\alpha_i) \tag{5}$$

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i \tag{6}$$

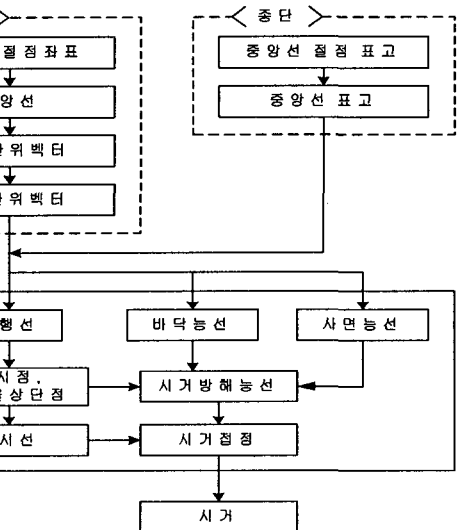


그림 7. 입체시거 계산 절차

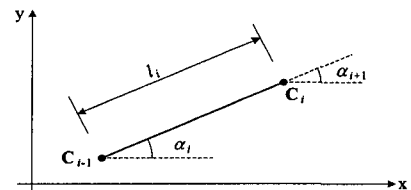


그림 8. 직선구간의 평면좌표

2) 평면선형이 원곡선일 경우

$$r_i = \frac{l_i}{\Delta_i} \quad (7)$$

$$\mathbf{N}_{i-1} = -\text{sign}(\Delta_i) \mathbf{W}(a_i - \pi/2) \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{C}_{i-1} + r_i \mathbf{N}_{i-1} \quad (9)$$

$$\mathbf{C}_i = \mathbf{P}_i + r_i \mathbf{W}\left(a_i + \Delta_i - \text{sign}(\Delta_i) \frac{\pi}{2}\right) \quad (10)$$

$$\mathbf{C}(s) = \mathbf{C}(s_{i-1}) + r_i \mathbf{N}_{i-1} + r_i \mathbf{W}\left(a_i + \text{sign}(\Delta_i) \left[\frac{s-s_{i-1}}{r_i} - \frac{\pi}{2}\right]\right) \quad (11)$$

$$\mathbf{C}'(s) = \text{sign}(\Delta_i) \mathbf{R}\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \mathbf{W}\left(a_i + \text{sign}(\Delta_i) \left[\frac{s-s_{i-1}}{r_i} - \frac{\pi}{2}\right]\right) \quad (12)$$

$$a_{i+1} = a_i + \Delta_i \quad (13)$$

평면선형이 원곡선일 경우는 식 (7)에서 식 (13)까지의 수식으로 나타낼 수 있다.

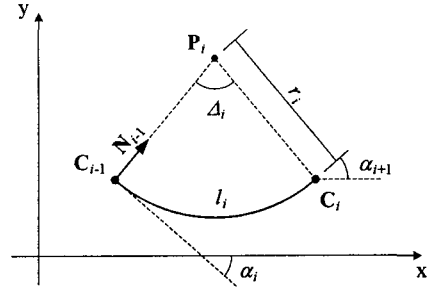


그림 9. 원곡선구간의 평면좌표

3) 평면선형이 완화곡선일 경우

$$|\Delta_i| = \frac{l_i}{2r_i} = \frac{l_i A_i}{2} \quad (14)$$

$$\mathbf{U}(\Delta) = \begin{pmatrix} \sum_{j=0}^3 \frac{(-1)^j \Delta^{2j}}{(4j+1)!(2j)!} \\ \sum_{j=0}^3 \frac{(-1)^j \Delta^{2j+1}}{(4j+3)!(2j+1)!} \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{C}_i = \mathbf{C}_{i-1} + l_i \mathbf{R}(a_i) \mathbf{U}(\Delta_i) \quad (16)$$

$$\mathbf{C}(s) = \mathbf{C}(s_{i-1}) + (s-s_{i-1}) \mathbf{R}(a_i) \mathbf{U}\left(\frac{\text{sign}(\Delta_i)(s-s_{i-1})^2}{2r_i l_i}\right) \quad (17)$$

$$\mathbf{C}'(s) = \mathbf{R}(a_i) \mathbf{W}\left(\frac{\text{sign}(\Delta_i)(s-s_{i-1})^2}{2r_i l_i}\right) \quad (18)$$

$$a_{i+1} = a_i + \Delta_i \quad (19)$$

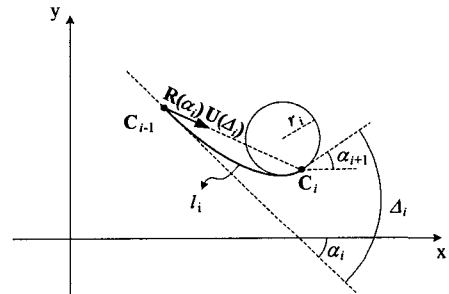


그림 10. 완화곡선구간의 평면좌표

먼저, 평면선형이 직선에서 원곡선으로 연결되는 완화곡선의 경우는 식 (14)에서 식 (19)까지의 수식으로 나타낼 수 있다.

평면선형이 곡선부에서 직선부로 연결되는 완화곡선의 경우는 식 (20)에서 식 (23)까지의 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{C}_i = \mathbf{C}_{i-1} - l_i \mathbf{R}(a_i + \Delta_i - \pi) \mathbf{U}(-\Delta_i) \quad (20)$$

$$\mathbf{C}(s) = \mathbf{C}(s_{i-1}) + (l_i - s + s_{i-1}) \mathbf{R}(a_i + \Delta_i - \pi) \mathbf{U}\left(\frac{-\text{sign}(\Delta_i)(l_i - s + s_{i-1})^2}{2r_i l_i}\right) \quad (21)$$

$$\mathbf{C}'(s) = -\mathbf{R}(a_i + \Delta_i - \pi) \mathbf{W}\left(\frac{-\text{sign}(\Delta_i)(l_i - s + s_{i-1})^2}{2r_i l_i}\right) \quad (22)$$

$$a_{i+1} = a_i + \Delta_i \quad (23)$$

3.4 종단선형에서의 표고

종단선형의 좌표는 $s-z$ 좌표계로서 s 는 도로중앙선상의 거리(Station)이다.



1) 종단선형이 직선일 경우

$$z_i = z_{i-1} + l_i \tan \beta_i \tag{24}$$

$$z(s) = z_{i-1} + (s - s_{i-1}) \tan \beta_i \tag{25}$$

$$z'(s) = \tan \beta_i \tag{26}$$

$$\beta_{i+1} = \beta_i = \beta(s) \tag{27}$$

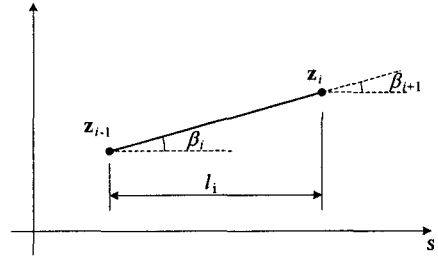


그림 11. 직선구간의 종단좌표

2) 종단선형이 포물선인 경우

$$z_i = z_{i-1} + \frac{1}{2K_i} l_i^2 + l_i \tan \beta_i \tag{28}$$

$$z(s) = z_{i-1} + \frac{1}{2K_i} (s - s_{i-1})^2 + (s - s_{i-1}) \tan \beta_i \tag{29}$$

$$z'(s) = \frac{1}{K_i} s + \tan \beta_i = \beta(s) \tag{30}$$

$$\beta_{i+1} = \frac{1}{K_i} l_i + \tan \beta_i \tag{31}$$

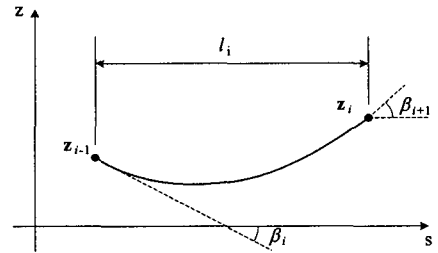


그림 12. 곡선구간의 종단좌표

종단선형이 포물선인 경우는 식 (28)에서 식 (31)까지의 수식으로 나타낼 수 있다.

3.5 입체선형에서의 시거계산

1) 선형의 분류

<표 1>과 같이 도로의 평면선형의 종류는 3가지이며 종단선형의 종류는 2가지이다. 따라서 평면과 종단이 합성된 도로의 입체선형은 합성형태에 따라 6가지의 선형으로 분류된다.

표 1. 도로선형의 분류

평면선형	종단선형	합성선형
직선(T)	직선(T)	TT
	포물선(P)	TP
원곡선(C)	직선(T)	CT
	포물선(P)	CP
완화곡선(S) (클로소이드)	직선(T)	ST
	포물선(P)	SP

2) 입체선형에서의 시거제한

시거방해능선은 투시선이 접할 수 있는 구간, 즉 도로나 사면이 볼록한 구간에서 존재한다. 따라서 사면시거방해능선은 평면선형이 곡선인 구간의 곡선반경의 중심이 존재하는 쪽(도로가 굽어지는 쪽)의 사면에 존재하며, 노면시거방해능선은 종단선형이 볼록형 포물선인 구간의 도로면에 존재한다.

3) 시거방해능선의 Station

(1) 노면시거방해능선

시거방해능선 중 노면시거방해능선의 Station은 투시선과 종단선형의 기울기가 일치하는 위치이다. 이 위치는 식 (32)의 조건을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\frac{z(s) - z(s_0) - h_e}{s - s_0} = z'(s) \tag{32}$$



(2) 사면시거방해능선

다음으로 사면시거방해능선의 Station을 결정하기 위해 원뿔곡면을 관찰하는 상황을 고려해 보자. 관찰자에게 실루엣으로 보여지는 곡면의 가장자리는 직선이며, 관찰점 높이에서의 수평면과 원뿔곡면의 교선은 원형이다. 이 직선은 관찰점의 높이에 있는 원형단면에 관찰자의 투시선이 접하는 점을 지나게 된다. 이와 유사하게 본 연구의 경우에서도 운전자 관찰점과 높이가 동일한 측방사면 상의 등고선과 수평투시선의 접점에 시거방해능선이 존재하는 것으로 설정하였다.

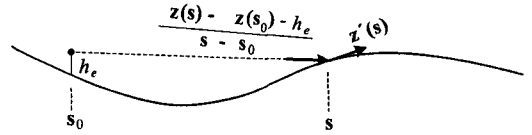


그림 13. 노면시거방해능선의 Station

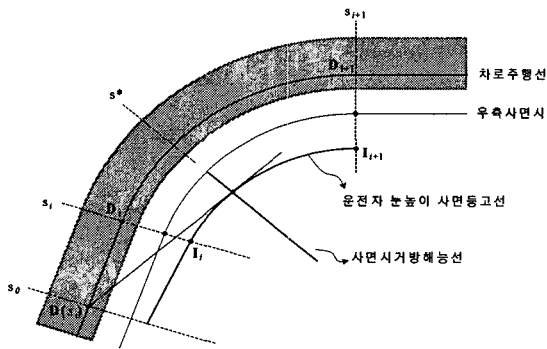


그림 14. 사면시거방해능선의 Station

<그림 14>에서는 우측사면시발선과 운전자눈높이 사면등고선 사이의 간격이 점점 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 종단선형이 내리막이라는 것을 의미하며 곡선부가 오르막, 혹은 볼록곡선이나 오목곡선일 경우에는 등고선의 형태가 달라지므로 결과적으로는 시거방해능선의 Station이 변하게 된다.

식 (33)은 우측사면의 운전자눈높이 사면등고선이며, 식 (34)는 등고선과 수평투시선이 접하게 되는 조건이다. 이 조건식을 만족시키는 s 값이 사면시거방해능선의 Station(s^*)이 된다.

$$I(s) = C(s) + \left(w + o_r + \frac{h_e + z(s_0) - z(s)}{\tan(\gamma_r)} \right) N_R(s) \tag{33}$$

$$\frac{\partial I_y / \partial s}{\partial I_x / \partial s} = \frac{I_y(s) - D_y(s_0)}{I_x(s) - D_x(s_0)} \tag{34}$$

여기서, $N_R(s)$ 은 주행방향에 대한 우측방향의 도로중앙선 법선단위벡터이다.

4) 최대시거의 계산

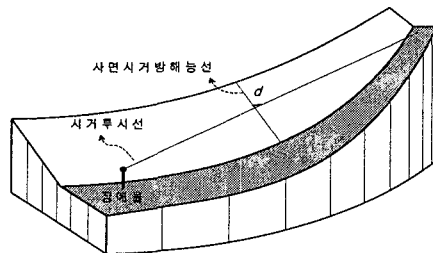


그림 15. 시거투시선과 사면시거방해능선

<그림 15>에서 장애물의 위치가 변함에 따라 사면시거방해능선과 시거투시선 사이의 거리도 변하게 되는데,



이 간격이 "0"이 되게 하는 장애물의 위치를 결정함으로써 장애물과 운전자 간의 거리인 시거를 계산할 수 있다.

$$\frac{x - D_x(s_0)}{D_x(s) - D_x(s_0)} = \frac{y - D_y(s_0)}{D_y(s) - D_y(s_0)} = \frac{z - (D_x(s_0) + h_e)}{D_x(s) + h_e - D_x(s_0) - h_e} \tag{35}$$

$$\frac{x - C_x(s) - (w + o_r)N_x}{N_x \cos \gamma} = \frac{y - C_y(s) - (w + o_r)N_y}{N_y \cos \gamma} = \frac{z - z(s)}{\sin \gamma} \tag{36}$$

식 (35)는 투시선의 시거방정식이고, 식 (36)은 사면시거방해능선의 직선의 방정식이다. 두 직선간의 거리는 두 직선 사이의 최단거리로서, 두 직선 위의 임의의 점을 연결하고 두 직선 모두에 수직인 선분의 길이이다.

4. 모형의 평가

4.1 평가 소프트웨어

앞서 제시된 모형을 평가하기 위하여 수식들을 Matlab 프로그램 언어로 코딩하고 입력되는 도로선형 자료에 의해 시거 프로파일이 계산될 수 있도록 하였다.

4.2 자료의 입력

평면선형의 자료는 Lovell의 시거프로파일에 사용된 분석예의 입력값을 <표 2>와 같이 동일하게 적용하였다. 분석에 사용된 상수값인 운전자눈높이(h_e)와 장애물높이(h_o)는 각각 1.0m, 0.15m이며, 차로폭(w)과 측방여유폭(o_l, o_r)은 각각 3.6m, 9.2m로 하였다. 입체선형의 표현을 위해 종단선형을 추가시켰는데, 평면선형의 사이에 종단경사구간과 2개의 곡선이 포함되도록 <표 3>과 같이 설정하였다.

표 2. 평면선형 입력자료

No.	Curve Type	시점	종점	길이	곡선반경
1	T	0.000	305.000	10.000	∞
2	S	305.000	433.000	73.304	-366.000
3	C	433.000	944.000	100.000	-366.000
4	S	944.000	1072.000	168.904	-366.000
5	T	1072.000	1529.000	150.000	∞
6	S	1529.000	1742.000	40.000	610.000
7	C	1742.000	2274.000	32.723	610.000

표 3. 종단선형 입력자료

No.	Curve Type	시점	종점	길이	G1	G2
1	T	0.000	433.000	433.000	-2	-2
2	P	433.000	944.000	511.000	-2	2
3	T	944.000	1500.000	556.000	2	2
4	P	1500.000	1700.000	200.000	2	0
5	T	1700.000	2274.000	574.000	0	0

4.3 모형의 비교평가

평면시거와의 입체시거의 비교를 위하여, 평면시거의 경우에는 측방사면의 경사를 ∞ 로 하였으며, 입체시거의 측방사면의 경사는 2:1로 한 후, 두 경우의 값을 <그림 16>과 같이 비교하였다. 비교결과 오목곡선부의 합성선형에 의하여 10~20m의 시거의 차이를 볼 수 있었다.

5. 결론 및 향후 연구과제

5.1 결 론

현행의 시거계산 방법은 평면선형과 종단선형 각각의 경우에 대해 고려되고 있다. 또한 지금까지 제시된 입체시거에 관한 연구들은 그래픽적 소프트웨어를 사용하거나 유한요소법을 이용하여 도로와 주변지형을 모델링한 후 시거를 계산하는 방법이 전부이다. 전자의 방법은 시거를 결정하는 방법이 계산적이지 못하고, 그래픽

프로그램을 필요로 하며, 분석시간이 다소 많이 소요된다. 또한 유한요소법을 이용한 방법은 유한요소개체가 실제의 도로형상을 정확히 표현하지 못하는 근사적인 방법이다.

- 본 연구에서는 도로 본래의 성질인 3차원적인 형상에서의 입체시거를 계산할 수 있는 모형을 개발하였다. 본 연구에서 시도한 시거분석방법은 $x-y-z$ 공간 좌표계 상에 분석요소들을 직선의 요소들로 표현하는 등의 정확한 수학적 개념을 이용하였다.
- 개발된 모형을 이용하여 실제 도로선형을 가정한 후 시거 프로파일을 작성해 보았으며, 기존의 2차원적 시거와 비교를 실시하였다.
- 비교 결과, 평면곡선과 오목곡선이 합성된 구간은 평면시거보다 입체시거가 큰 값을 보여, 측방사면에 의한 시거의 영향을 확인할 수 있었다.

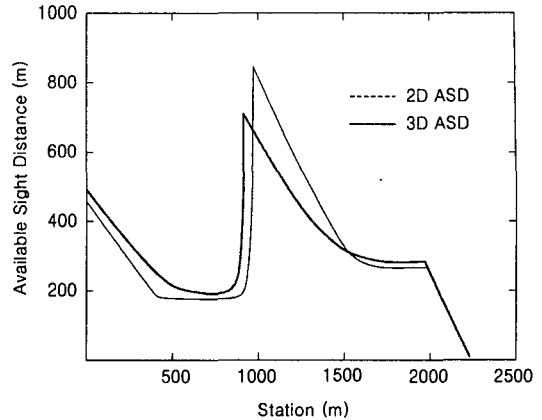


그림 16. 평면시거와 입체시거의 비교

5.2 향후 연구과제

제안된 모형을 직접 설계에 이용하기에는 다소 무리가 있을 수 있다. 설계자가 복잡한 많은 수식들을 이용해야 하는 불편함을 감수해야 하고, 또한 가정으로 단순화시킨 횡단면과 균일하게 설정한 측방여유폭 등을 고려대상에 포함해야 한다. 그러나 본 연구의 주된 목적은 입체시거모형을 당장 도로설계에 반영하기 위함이 아니라 도로안전에 관한 연구에 있어서 시거분석이 요구되는 연구에 이용될 수 있도록 하기 위한 것으로 향후 모형이 보완과 더불어 모형에 대한 프로그램화가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. 건설교통부(2001). 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 「해설 및 지침」.
2. (주)평화엔지니어링(2000). 3차원 뷰 소프트웨어(SD 2000)를 이용한 도로시거 산정기술, 신기술지정등록서 제 228호.
3. AASHTO(2001). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets.
4. D. J. Lovell(1999). Automated Calculation of Sight Distance from Horizontal Geometry, Journal of Transportation Engineering, ASCE, 124(2).
5. D. J. Lovell, J. C. Jong, and P. C. Chang(2000). Generating Sight Distance Profiles for Arbitrary Horizontal Alignments with Nonuniform Lateral Clearance, Proceedings, 2nd Int. Symp. on Hwy. Geometric Des..
6. D. J. Lovell, J. C. Jong, and P. C. Chang(2001). Improvements to Sight Distance Algorithm, Journal of Transportation Engineering, ASCE, 127(4).
7. Eddie Sanchez(1994). Three-Dimensional Analysis of Sight Distance on Interchange Connectors, Transportation Research Record 1445.
8. Y. Hassan, S. M. Easa and A. O. Abd El Halim (1996). Analytical Model for Sight Distance on 3-D Highway Alignment, Transportation Research Record 1523.
9. Y. Hassan, S. M. Easa and A. O. Abd El Halim (1995). Sight Distance on Horizontal Alignments with Continuous Lateral Obstructions, Transportation Research Record 1500.