

# 유한요소법을 이용한 고속도로 곡선구간에서의 눈부심 유발구간 산정에 관한 연구

FEM based Glare section Estimation at curve sections

손영태\* · 이정근\*\*

Son, Young Tae · Lee, Jeong Geun

## 1. 서 론

고속도로는 입·출입 통제 및 방향별로 교통류가 분리된 연속류 시설로써 도로의 두 가지 기능(접근성 및 이동성)중 이동성을 주목적으로 하는 최상급도로이다.

고속, 장거리운행을 원칙으로 하기 때문에 운전자의 쾌적성 또한 배제할 수 없는 문제이다. 운전자의 쾌적성은 도로서비스수준의 척도이기도 하다. 이는 도로의 폭, 선형 이라는 시설변수와 교통량변수 또 한 가지는 차량과 운전자 변수이다. 주간운전 시 운전자 쾌적성에 고려되는 변수들은 야간운전 시에도 그대로 적용되며 추가로 적용되는 부분은 야간시거를 결정짓는 헤드라이트 변수이다. 고속도로에서는 방현망을 이용하여 대향방향차량의 헤드라이트불빛을 차단함으로써 운전자 시거방해를 방지한다.

그러나, 중단곡선구간 및 복합곡선구간(중단곡선+평면곡선) 구간에서는 헤드라이트의 불빛이 방현망을 통과하여 대향방향 운전자에게 투시되는 구간이 있음을 발견 할 수 있다. 이에 본 연구에서는Y. Hassan의 3D 헤드라이트시거 분석 모형을 이용하여 헤드라이트의 특성과 중단곡선 및 복합곡선의 기하구조의 특성을 연구, 경사 및 회전반경에 따른 대향방향 헤드라이트 불빛의 대향방향 침투구간을 찾아내어 제거하거나 추후 설계시 반영 하는데 그 목적이 있다.

## 2. 운전자 시각탐색 패턴

운전자의 시각적 탐색패턴은 운전자의 시각적 요구를 규명하는 중요한 요소이다. 오하이오 주립대학교의 운전행동 연구실은 야간운전 시 운전자의 시각적 탐색행위를 정하는 방법을 개발하고, 주야별로 이러한 탐색행위를 관찰하였다. 주요 연구결과는 다음과 같다.

\* 정회원 · 명지대학교 교통공학과 부교수 · 공학박사 · (E-mail: son@mju.ac.kr)

\*\* 명지대학교 교통공학과 석사과정 · 공학학사 · (E-mail: sanai@mju.ac.kr)



표 1. 운전자 시각 탐색패턴

루트	시간	평균 수직위치 (도,a)	평균 수평위치 (도,b)	집중지수(CI) (%,c)
비조명고속도로	주	0.16	0.07	84.0
	야	-0.85	-0.98	69.0
조명고속도로	주	0.07	-0.60	71.1
	야	-0.48	0.52	75.4
2차로 지방 국도	주	-0.38	0.61	76.0
	야	0.41	0.02	78.0

주) a: 수평선 위(+), b:전방의 우측(+), c: 3×3° 영역을 본 시간

위 표 1에서 비조명고속도로 상에서 안구운동 패턴은 야간으로 갈 때 아래와 좌측으로 약1° 정도 옮겨간다. 이런 이동은 부분적으로 나타나는 마주 오는 차량의 전조등을 보는 것 때문인 것으로 판단된다. 운전자들은 주간 시행에서는 아래로 0.5° 정도, 우측으로 0.1°정도 옮겨간다. 반면, 조명고속도로에서는 아래로 0.5° 정도, 우측으로 0.1° 정도 옮겨 간다. 3×3° 영역을 본 시간인 집중지수는 비조명고속도로 에서 야간에 가장 작은 것 (69.0%)으로 나타났다.

기타 운전자의 시각적 탐색패턴에 대한 오하이오 주립대학교 운전행동 연구실\*의 연구결과는 다음과 같다. 비조명고속도로 상에서 길가장자리 구역선과 도로 표면을 보는 것은 주간의 1%에서 야간에 거의 45%까지 증가한다. 반면 전방을 주시하는 비율은 야간에 감소한다. 조명고속도로에서는 주야간 시행간의 차이점은 거의 없다. 조명고속도로에서의 주간시행은 비조명고속도로 에서의 야간 시행과 유사하다. 지방 국도에서는 전방을 주시하는 비율이 주간보다 야간에 높았다. 이는 야간에는 장애물 탐색이 곤란하기 때문이다. 조명은 시각 탐색 행위에서 여러 가지 변화를 유발하였다. 조명이 있는 지점에서 운전자들은 왼쪽을 보는 시간을 적게 사용하였으며, 이는 정보를 습득하는데 더 짧은 시간이 걸린다는 것을 나타낸다.

### 3. 현광방지시설

건설교통부 도로설계편람의 방현광의 설치장소 및 기준을 알아보면 다음과 같다.

#### 3.1 설치장소

현광(顯光) 방지시설은 교통량, 설계속도, 도로 선형등을 감안하여 필요하다고 인정되는 구간에 설치한다. 다음의 항에 해당되는 도로 구간에는 설치하지 않을 수 있다.

- 중앙 분리대의 폭이 7m를 초과하는 경우
- 상·하 차도 중심 높이의 차가 2m 이상일 경우
- 연속적으로 도로 조명을 설치하는 경우

상하 차도의 높이의 차이가 2m 정도가 되면, 방호울타리가 대향차 전조등의 불빛을 차단하는 역할을 함으로써 현광방지시설을 별도로 설치하지 않을 수 있다.

중앙분리대 폭이 좁을 경우 (2m 이하) 에는 현광방지시설이 넘어지면 이것이 차도에서 장애물로 작용할 수 있으므로, 형식을 충분히 검토한다. 또, 적설지역에서는 눈(雪)에 시설이 가릴 염려도 있으므로 적당한 형식을 검토한다.

현광방지시설의 차광각도는 눈부심의 영향이 가장 큰 추월차로 대 추월차로의 경우에 있어 운전자의 눈과 대

\* Nick J Rackoff (Pennsylvania State Univ.) and Thomas H. Rockwell(Ohio state Univ.), Driver search and scan patterns in night driving, in Driver visual needs



향차량의 전조등의 관계를 고려하여 약 10°로 한다. 추월 차로 대 주행 차로일 경우는 이 이상의 차광 각도를 필요로 하지만, 완전 차광하게 되면 오히려 운전 시야를 좁히고 대향차로에 대한 전망을 저해하는 등의 단점이 있으므로 부분 차광하는 것으로 한다.

그림 12는 추월차로대 추월차로의 경우에 있어, 운전자의 눈과 대향 차량 사이의 종방향 거리를 50m로 하고, 운전자의 눈과 대향차량의 전조등과의 횡방향 거리를 8.5m로 하는 경우의 차광각도를 보여준다.

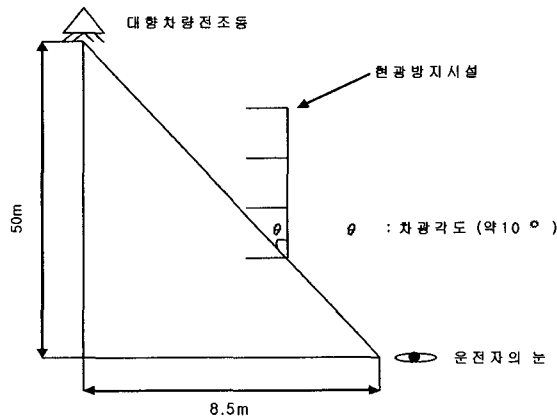


그림 12. 차광 각도

실제 좌·우측 헤드라이트를 모두 고려한다 하여도 운전자의 눈과 대향차량 전조등과의 횡방향 거리는 8.5m 보다 짧은 경우가 대부분이다. 이 경우 차광각도는 10° 이하로 작아진다.

또한, 헤드라이트의 성능에 따라 운전자의 눈과 대향차량 전조등과의 종방향 거리도 50m 이상이 될 수 있다. 이 경우 또한 차광각도는 10° 이하로 작아진다.

#### 4. 도로선형의 입체적 모형화

도로의 선형을 모형화 하는데 있어서 유한요소법을 기초한 Y. Hassan의 헤드라이트시거분석 모형을 사용한다. 직선구간은 4절점 직사각형 모형 곡선구간은 6절점 직사각형 모형을 사용한다. 여기서, 4·6절점 직사각형 모형들은 2절점 및 3절점 선형 모형으로 나타낼 수 있다. 그림으로 알아보면 다음과 같다.

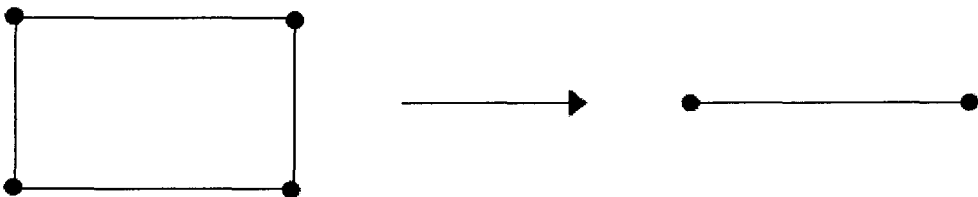


그림 1. 4절점 직사각형 요소의 분할

위 그림에서와 같이 4절점 직사각형 요소는 2절점 선형요소의 결합이다.

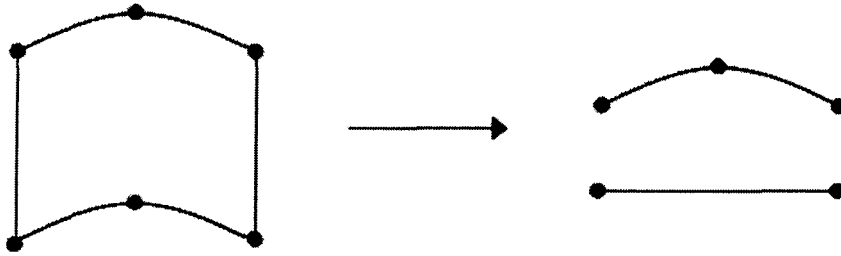


그림 2. 6절점 직사각형 요소의 분할

이와 비슷하게 6절점 직사각형 요소는 2절점 및 3절점 선형요소의 결합이다. 2차원 선형설계에서 분리하여 사용된 2절점 선형요소와 3절점 선형요소는 글로벌 좌표계에서는 3차원으로 이루어져 있다. 그림 3, 4는 글로벌 좌표계에서의 선형요소가 일반화(Generalized) 좌표계에서 직선으로 단순화 되는 과정이다.

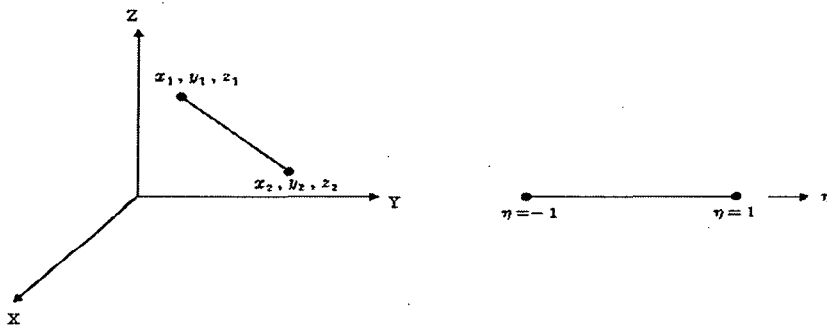


그림 3. 2절점 선형요소의 일반화좌표계로 단순화 되는 과정

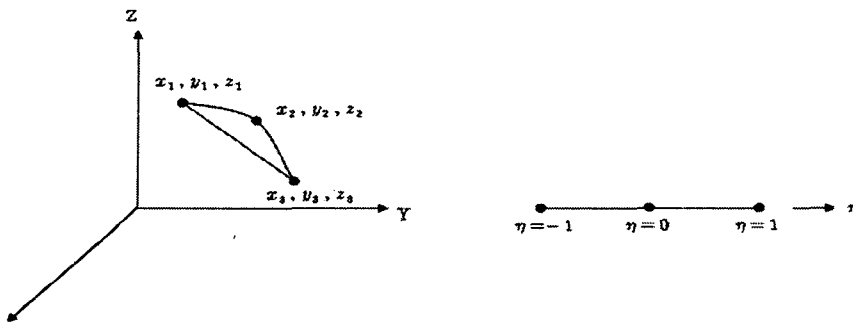


그림 4. 3절점 선형요소의 일반화좌표계로 단순화 되는 과정



정확한 절점의 개수를 가진 요소들의 형상함수(shape function)는 가우스 보간법 및 라그랑제 보간법으로 구할 수 있다. 그림 3 의 2절점 선형요소의 형상함수(shape function)는 다음과 같다.

$$N_{e1} = \frac{1}{2} (-n + 1)$$

$$N_{e2} = \frac{1}{2} (n + 1)$$

이와 비슷하게 그림 4 의 3절점 선형요소의 형상함수(shape function)는 다음과 같다.

$$N_{e1} = \frac{1}{2} (n^2 - n)$$

$$N_{e2} = - (n^2 - 1)$$

$$N_{e3} = \frac{1}{2} (n^2 + n)$$

이 두 가지 요소는 평면이나 종단 요소에 연속적인 차선이나 포장 면 을 형상화 할 수 있으며 만약 그 부분이 직선이라면 하나의 2절점 선형요소는 그것의 길이에 상관없이 전체부분의 정확한 모델을 적용할 것이다. 이와 비슷하게 평면이 직선이고 종단곡선이 오목하거나 볼록한 커브를 갖는 포물선곡선을 갖고 있다면 하나의 3절점 선형요소는 그것의 길이에 상관없이 전체부분의 모델을 제공 할 것이다. 또한 어떤 도로의 곡률이 평면곡선반경과 종단경사를 포함하면 작은 3절점 선형요소들로 그 부분의 설계에 근접한 모델을 적용한다.

### 5. 헤드라이트 빔의 모형화

헤드라이트 빔은 4면의 피라미드를 구성하는 4개의 삼각형으로 표현될 수 있다. 각각의 피라미드는 축과 방위각을 가지고 있다. 도로의 지점 각은 헤드라이트의 축각과 같다. 헤드라이트를 표현하는 삼각형요소는 3개의 절점으로 정의 될 수 있다.(각 요소의 꼭지점) 그리고 그것은 형상 함수와 일치한다.

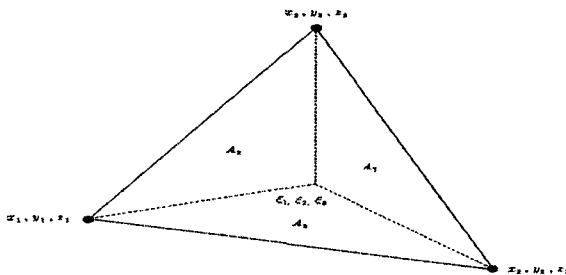


그림 5. 3절점 3차원 삼각형 요소



그림에 의하면 글로벌 좌표체계는 이 경우에 아래의 식에서 정의되는 것과 같이 일반화좌표계( $\xi_1, \xi_2, \xi_3$ )로 나타낼 수 있다.

$$\xi_i = \frac{A_i}{A} (i=1, 2, 3)$$

A 는 그림에서와 같이 sub삼각형  $A_i (A_1, A_2, A_3)$  로 나눌 수 있다.

이 요소에서의 형상함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 1$$

### 6. 헤드라이트의 대향방향 침투구간 산정과정

도로선형요소와 삼각형요소의 교차점은 다음 식을 만족해야 한다.

$$\sum N_{ci} x_{ci} = \sum N_{hi} x_{hi}$$

$$\sum N_{ci} y_{ci} = \sum N_{hi} y_{hi}$$

$$\sum N_{ci} z_{ci} = \sum N_{hi} z_{hi}$$

여기서,

$x_{ci}, y_{ci}, z_{ci}$  = 선형요소에서의 절점의 좌표 (global Cartesian coordinates)

$x_{hi}, y_{hi}, z_{hi}$  = 삼각형요소에서의 절점의 좌표(global Cartesian coordinates)

#### 6.1 직선구간

요소 shape function 을 치환하여  $\eta$ 와  $\xi$ 로 다시 쓰여질 수 있다.

$$x_{h1}\xi_1 + x_{h2}\xi_2 + x_{h3}\xi_3 + \left(\frac{x_{c1} - x_{c2}}{2}\right)\eta = \frac{x_{c1} + x_{c2}}{2}$$

$$y_{h1}\xi_1 + y_{h2}\xi_2 + y_{h3}\xi_3 + \left(\frac{y_{c1} - y_{c2}}{2}\right)\eta = \frac{y_{c1} + y_{c2}}{2}$$

$$z_{h1}\xi_1 + z_{h2}\xi_2 + z_{h3}\xi_3 + \left(\frac{z_{c1} - z_{c2}}{2}\right)\eta = \frac{z_{c1} + z_{c2}}{2}$$



6.2 곡선구간

직사각형 요소와 삼각형요소의 교차점은 각 요소 shape function 을 치환하여  $\eta$ 와  $\xi$ 로 다시 쓰여질 수 있다.

$$\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 1 \tag{1}$$

$$x_{k1}\xi_1 + x_{k2}\xi_2 + x_{k3}\xi_3 = -\left(\frac{-x_{c1} + 2x_{c2} - x_{c3}}{2}\right)\eta^2 - \left(\frac{x_{c1} - x_{c3}}{2}\right)\eta + x_{c2} \tag{2}$$

$$y_{k1}\xi_1 + y_{k2}\xi_2 + y_{k3}\xi_3 = -\left(\frac{-y_{c1} + 2y_{c2} - y_{c3}}{2}\right)\eta^2 - \left(\frac{y_{c1} - y_{c3}}{2}\right)\eta + y_{c2} \tag{3}$$

$$z_{k1}\xi_1 + z_{k2}\xi_2 + z_{k3}\xi_3 = -\left(\frac{-z_{c1} + 2z_{c2} - z_{c3}}{2}\right)\eta^2 - \left(\frac{z_{c1} - z_{c3}}{2}\right)\eta + z_{c2} \tag{4}$$

1), 2), 3), 4) 방정식은 다음과 같은 해를 가질 수 있다.

1. 만약, 방정식이 쓸모없다면 해는 없다 : 이 경우는 헤드라이트 요소를 방해하는 장애물이 없으므로 대향방향으로 침투함을 나타낸다.
2. 0으로 나누어지기 때문에 무한한 해가 존재 한다 : 방해물이 없으므로 헤드라이트 불빛이 대향방향으로 침투함을 나타낸다.
3. 2개의 허근 : 교차가 없으므로 헤드라이트 불빛이 대향방향으로 침투함을 나타낸다.
4. 1개의 실근 : 이 경우는 방해물이 있다는 것을 표현하므로 헤드라이트 불빛이 대향방향으로 침투하지 않음을 나타낸다. ( $-1 \leq \xi \leq +1, 0 \leq \eta \leq +1$ ).
5. 2개의 실근 : 일반적인 도로 선형에서는 적용될 수 없다.

7. 결론

본 제안에서는 가정된 구간에서의 헤드라이트 대향방향 침투구간 산정을 통해 실제 존재하는 헤드라이트의 대향방향 침투구간을 수학적으로 증명하였으며, 종단경사가 없는 단일 평면곡선 구간에서도 편경사 접속구간의 해 침투구간이 발생함을 확인하였다.

실제 도로선형과 차종 및 헤드라이트 종류의 다양함에 따라 본 제안의 분석결과보다 작게 혹은 크게 헤드라이트 대향방향 침투구간이 발생할 수 있고 종단곡선 내리막 구간의 헤드라이트가 미치지 못하는 구간(Headlight dip)의 고려는 배제되었다. 그러나 본 연구는 전체 차종의 85%를 차지하고 있는 승용차를 기준으로 침투구간을 산정하였고 고속도로 설계기준에 따른 정확한 도로설계 구간을 가상의 분석구간으로 하였기 때문에 실제 고속도로 곡선구간의 방현망 설치기준의 근거가 될 수 있을 것이다.

유한요소법(FEM)을 이용한 Hassan의 HLSD분석모형은 정확하고 수식의 이해가 편리하나 이 모형의 한계는 분석자가 입력 자료를 만들어야하는 불편함을 가지고 있고 현재의 3체인단위 분석은 헤드라이트 침투구간의 길이가 정밀하게 산정되지 않는 단점이 있다.

현재 설계프로그램에 적용하여 자동화 방법을 모색하여 자동화가 가능해지면 실제도로 좌표의 세밀한 단위의 좌표(x,y,z)를 구할 수 있어야 하며 차종 과 헤드라이트종류에 따른 헤드라이트의 거리별 좌표(x,y,z)도 구할 수 있어야만 좀 더 정밀한 눈부심 구간(glare section)이 산정 될 수 있을 것이다.



참고문헌

1. 건설교통부, 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙, 1999
2. 김영진 최희균, 도로교통공학, 청문각, 2000
3. 건설교통부, 안전성 향상을 위한 도로 선형 해석 및 평가자동화 기술개발, 2000
4. 도로교통안전관리공단, 야간 교통사고 방지대책, 2000
5. 정상권, 유한요소법, 민음사, 1991
6. 이성렬, 임병오, 하종률, 김원배, 자동차 공학, 2001
7. Robert D Cook, CONCEPTS AND APPLICATION OF FINITE ELEMENT ANALYSIS, 1999
8. A Policy on Geometric Design of Highway and Streets. AASHTO, Washington, D.C., 1994
9. Richtlinien fur die Anlage Von Straben ; RAL-K\_2, 1976
10. Hassan, Y.S. M. Easa, and A.O Abd EL Halim. Sight Distance on Horizontal Alignment with Continuous Lateral Obstruction. In Transportation Research Record 1500, TRB,
11. Hassan, Y.S. M. Easa, and A.O Abd EL Halim. Three-Dimensional Highway Alignment
12. Hassan, Y.S. M. Easa, and A.O Abd EL Halim. Sight Distance Evaluation on Complex Highway Vertical Alignment, Canadian Journal of Civil Engineering 1997
- 13 Hassan, Y.S. M. Easa, and A.O Abd EL Halim. Design Consideration for Combined Highway Alignment Journal of Transportation Engineering American Society of Civil Engineers Vol 123