

〈논 문〉 SAE NO. 97370099

## 그림자 계산을 이용한 운전자의 시계성 해석

### Analysis of Driver's Field of View using a Shadow Algorithm

김 재 정\*, 하 용 수\*\*, 김 용 철\*\*\*  
J. J. Kim, Y. S. Ha, Y. C. Kim

#### ABSTRACT

To ensure drive's field of view, obstruction area generated by a steering wheel, hub and spoke must be considered at the early stage of automobile design. The current approach to computing obstruction area proposed by SAE is based on 2D drafting procedures so that it is not precise and errorprone. In the paper we discuss the novel approach which models the obstruction area as the shadows of the steering wheel, hub and spoke by assuming the human eye as light sources. The approach is based on ray tracing and space transformations so that it can be applied when free form curves are hired to represent the steering wheel, hub and spoke in CAD environment. As a result, it gives more precise and reliable results than SAE approach.

주요기술용어 : Obstruction Area(암부), SAE, Shadow(그림자), Ray Tracing(방사 추적), Space Transformation(공간 변환), CAD

#### 1. 서 론

각종 수송기기가 소형화 되고 또한 내부의 계기판이나 조작기기가 복잡함을 더해가는 최근의 추세에서는 운전자의 시계성을 설계 초기에 정확히 파악하여 수송기기의 조작시 안전도를 높이는 일은 매우 중요하다. 예를 들면 Fig.1에

서 처럼 운전석 앞의 운전대, 허브(Hub) 그리고 스포크(Spoke)들은 운전자의 시야에 있으므로 자동차의 각종 계기들은 이들에 의해 가려지는 부분(이하 암부(Obstruction Area)라 칭한다)을 피하여 위치되도록 고려되어야 할 것이다. 현재 SAE(Society of Automotive Engineers)에서 제안하고 있는 암부 계산 방법은 인간의 눈의 분포를 통계적으로 나타낸 아이립스(Eyellipse= Eye+Ellipse의 합성어)를 이용한 2D 作圖법으로 오차를 포함하고 있을 뿐 아니라 수시로 일어나는 초기 설계 변화에 효율적인 해결책이 될 수

\*정회원, 한양대학교 기계설계학과

\*\*한양대학원 기계설계학과

\*\*\*기아자동차 중앙연구소

없다.<sup>1)</sup> 더구나 최근에는 운전대에 에어백까지 장착되어 허브와 스포크의 기하학적 형상이 복잡성을 더해가므로 기존의 SAE방식은 그 한계에 부딪혔다고 볼 수 있다.

암부 계산을 위해서는 우선 운전자의 눈의 위치를 설정해야 하는데 물론 각 운전자의 신체조건에 따라 눈의 위치는 일정치 않다. 따라서 다양한 인종과 남녀 성 비율에 따라 운전자의 눈의

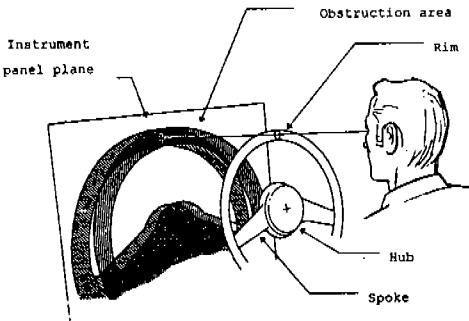
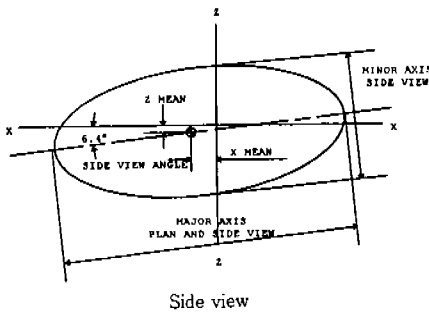
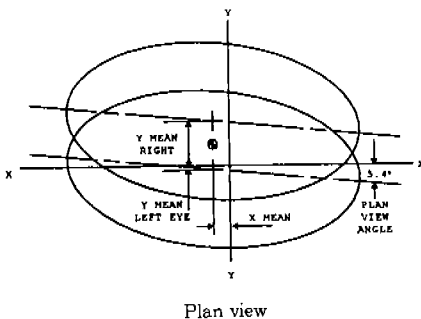


Fig.1 Obstruction Area of Driver's Instrument Panel View



Side view



Plan view

Fig.2 Eyellipse Side and Plan View

위치를 SAE에서 통계적으로 조사한 것을 사용하는데 그 눈의 위치 분포가 타원체를 이루므로 아이립스라고 불리운다(Fig.2 참조). SAE에서는 90, 95, 99퍼센타일(%ile, Prcentile)의 아이립스를 템플릿의 형태로 제공하는데 퍼센타일은 누적분포도 상에서 현재의 위치를 표시하는 통계학 용어로 Fig.3과 같이 95퍼센타일 아이립스는 측면 방향에서 바라볼 때 아이립스의 접평면인 접선의 위쪽에 전체 대상 운전자 중에서 5% 운전자의 눈이 위치하고 접선의 아래쪽 부분에 95% 운전자의 눈이 위치함을 나타낸다. 본 연구에서는 참고문헌 2, 3, 4에서 제공하는 기존의 SAE방식에 따라 타원체 아이립스의 크기와 위치를 선정하였다.

일단 눈의 위치 분포를 나타내는 아이립스의 크기와 위치가 차량 내부에 선정되면 암부 계산 문제는 아이립스를 타원체의 光源으로 가정할 때 운전대와 주변 부품에 의해 발생하는 그림자 계산 문제로 요약된다. 하지만 현재까지 개발된 그림자 계산 알고리즘들은 점 광원(Point Light Source), 면적 광원(Area Light Source) 그리고 부피 광원(Volume Light Source)은 구(Sphere)인 간단한 경우에 대해서 다각형(Polygon) 물체에 의해 발생하는 그림자 계산에 국한되었다.<sup>5), 6), 7), 8)</sup> 따라서 본 연구에서는 아이립스의 형상이 2차 곡면 중의 하나인 타원체(Ellipsoid)라는 점에 착안, 다각형뿐 아니라 임의의 형상을 갖는 물체에 의해 시야의 가려지는 부분을 계산하는 3D 알고리즘을 개발하였다. 타원체는 2차식으로 표현되므로 여러가지 기하학적인 문제들을 해석적으로 접근할 수 있으며 이 접근 방법

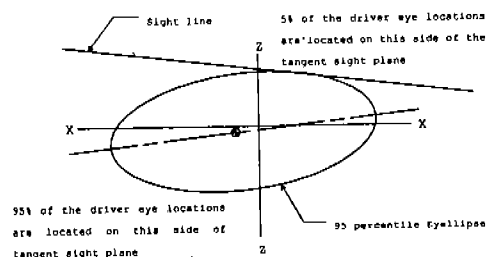


Fig.3 95 Percentile Eyellipse and Sight Plan

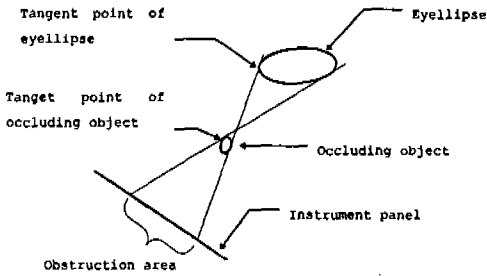


Fig.4 2D View of Obstruction Area of Occluding Object & Eyellipse

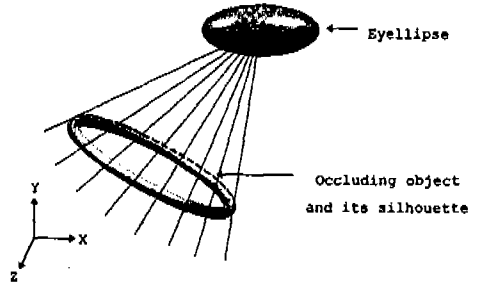


Fig.6 Occluding Object and Its Silhouette

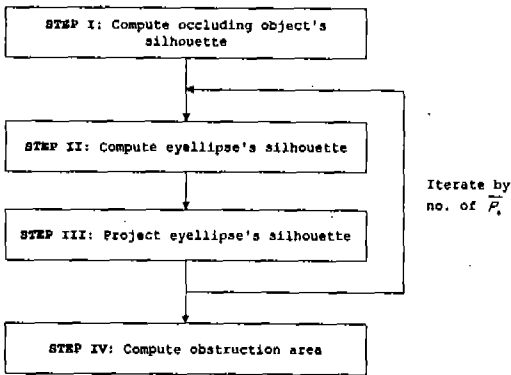


Fig.5 Flowchart of Shadow Algorithm

은 효율성이나 정확도 면에서 작도법에 의존하는 기존 SAE 방법을 능가하고 있다.

## 2. 암부 계산 알고리즘

3차원에서의 암부 계산 알고리즘의 개념적 이해를 돕기 위해 2차원에서 암부 생성 과정을 먼저 살펴보기로 한다. Fig.4에서 아이립스를 광원으로 가정하고 대상 물체와 아이립스에 공통 접선을 만들 때 이 접선의 연장선이 계기판과 만나는 점점(Tangent Point)들이 암부의 경계를 생성하는 점임을 알 수 있다. 따라서 이들 점점을 구하는 것이 암부 계산에서 중요한 과제가 되는데 2차원의 경우 점점의 형태로 나타나지만 3차원에서는 대상 물체와 아이립스가 부피를 갖고 있으므로 이들의 공통 점점은 무수히 많이 있고 따라서 이 점들의 집합을 곡선인 실루엣으로 표현하

여 다루게 된다. 또한 2차원에서 실루엣 즉 공통 점점을 구하는 것은 용이하지만 3차원에서 두 물체에 대한 공통 실루엣을 직접적으로 구하는 것은 어려우므로 본 연구에서는 아이립스를 일단 점 광원으로 가정하여 우선 물체의 실루엣을 구한 후, 이 실루엣과 접선을 이루는 아이립스 실루엣을 구하는, 두 가지 단계로 나누어 근사하여 계산하는 접근법을 사용하였다. 이와같은 접근법을 3D에 확대 적용시킨 본 연구의 암부 계산 알고리즘을 정리하여 보면 Fig.5와 같이 대상 물체의 실루엣(Occluding Object's Silhouette)을 구하는 단계, 대상 물체의 실루엣에서 임의의 개수의 점을 샘플링(Sampling)하여 각 점들에서 보이는 아이립스의 실루엣(Eyellipse's Silhouette)을 계산하는 단계, 계산된 아이립스의 실루엣을 계기판 평면에 투영시키는 단계, 그리고 계기판에 투영된 아이립스에 최종의 암부(Obstruction Area)를 구성하는 단계의 네 단계로 구분된다. 각 단계에 대한 상세한 설명은 운전대를 그림자 대상 물체(Occluding Object)로 선정하여 설명한다(Fig.6 참조).

### STEP I : 운전대의 실루엣 생성

암부의 경계부(Boundary)는 대상 물체(Occluding Object)인 운전대의 실루엣에 의해 만들어지므로 암부 생성을 위한 첫번째 단계로 아이립스를 광원으로 가정하여 운전대의 실루엣을 구한다. 2차원의 경우 공통 점점인 실루엣을 찾는 것은 쉽게 구할 수 있지만(Fig.4 참조) 부피 광원의 경우 물체의 실루엣을 정확하게 계산하기

어려우므로 본 연구에서는 광원을 아이립스의 도심(Centroid)에 위치한 점 광원으로 근사하여 운전대의 실루엣을 구하였다(Fig.6 참조). 즉 아이립스의 도심에서 운전대의 표면과 접선을 이루는 레이(Ray)를 쏘아 점점의 집합을 스플라인(Spline) 곡선으로 연결하여 운전대의 실루엣으로 근사하였다. 운전대의 실루엣에서 바라보는 아이립스의 실루엣은 보는 위치에 따라 달라지므로 운전대 실루엣 상의 임의 간격으로 떨어져 있는  $n$ 개의 점을 샘플링(Sampling)하여 각 점에 대하여 STEP II와 STEP III 과정을 수행한다.

**STEP II : 아이립스 실루엣 생성**

STEP II는 운전대의 시루엣(Occluding Object's Silhouette)에서 샘플링된 임의의 점을  $\bar{P}_s$ 라 하면 이점에서 바라 보이는 아이립스의 실루엣을 생성하는 과정인데, 실루엣은 구의 경우 평면에 놓이는 곡선이 되지만 아이립스 즉 타원체의 경우 임의의 곡선이므로(Fig.7 참조) 본 연구

에서는 계산의 효율을 위하여 아이립스를 단위 구(Unit Sphere)로 변환시킨 공간에서 실루엣을 계산한 후, 이를 다시 역 변환 시키는 해석적인 방법을 사용하였다. 이는 원추곡선의 하나인 원의 경우 접선과 접점이 원이 크기 변하여 타원이 되었을 때 그에 상응하는 접선과 접점의 상대적인 위치가 변하지 않는다는 기하학적인 성질을 3차원에 확장시킨 것이다(Fig.8 참조).<sup>9)</sup>

이때 기하학에서는  $\bar{P}_s$ 에 해당하는 점을 극점(Pole)이라고 부르고 실루엣이 놓이는 평면을 극평면(Polar Plane)이라 정의한다(Fig.9 참조).<sup>9)</sup>

우선 아이립스를 단위 구로 좌표 변환시키는  $4 \times 4$  변환 행렬  $M$ 은 아이립스의 장, 단축의 길이를 각각  $a_x, a_y, a_z$ 라고 정의하고 아이립스의 장축이 Fig.2의 측면도와 평면도에서 보이듯이 수직과 수평 방향에 대해 기울어져 있으므로  $y, z$ 축을 중심으로 회전된 각도를 각각  $\theta_y, \theta_z$ 로 정의하며 마지막으로 도심의 좌표를  $\bar{P}_c$ 라 정의하면 이때 변환 행렬  $M$ 은 아래와 같이 계산되어진다.

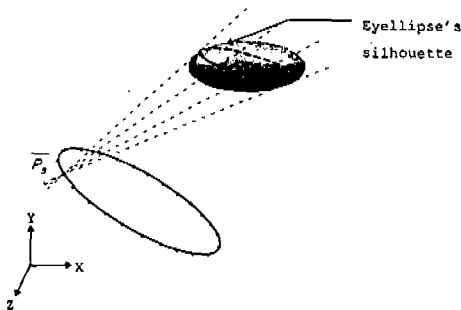


Fig.7 Eyellipse's Silhouette

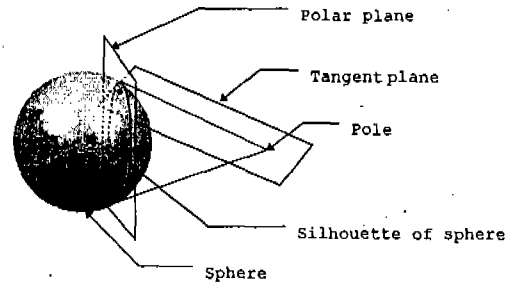


Fig.9 Pole and Polar Plane of Sphere

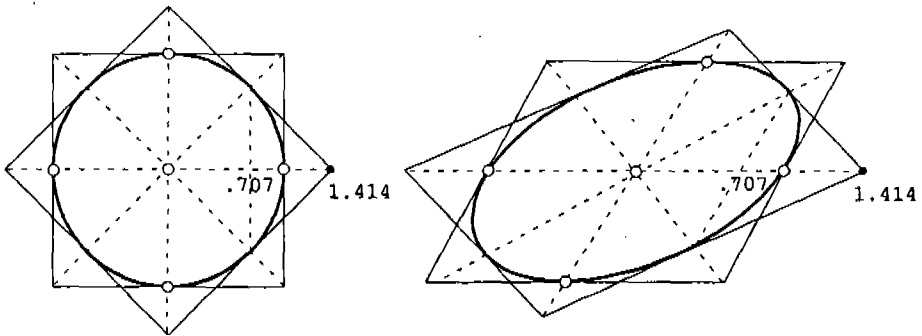


Fig.8 Tangent Octagon of an Ellipse

$$M = S(1/a, 1/a, 1/a) \cdot R(0, -\theta, -\theta) \cdot T(-\bar{P}_c) \quad (1)$$

여기서  $S, R, T$ 는 각각 크기 변환(Scale), 회전 변환(Rotation), 그리고 이동 변환(Translation)을 나타내는  $4 \times 4$  호모지니어스(Homogeneous) 변환 행렬이다. 따라서 운전대의 실루엣 위의 점  $\bar{P}_s$ 가 좌표 변환된 단위 구의 극점  $\bar{P}_{ss}$ 는 다음과 같이 구해진다(Fig.10 참조).

$$\bar{P}_{ss} = M \cdot \bar{P}_s \quad (2)$$

다음은 단위 구의 실루엣과 극점  $\bar{P}_{ss}$ 의 관계를 3차원에서 보여주는 Fig.11(a)를 간단하게 극평면과 접하는 방향에서 본 2차원의 Fig.11(b)로 나타내면 기하학적인 관계로부터 단위구 실루엣의 반지름

$$r = \sqrt{\ell^2 - 1} \cdot \sin\theta = \frac{\sqrt{\ell^2 - 1}}{\ell}, \quad \ell = |\bar{P}_{ss}| \quad (3)$$

임을 알 수 있다. 또한 단위 구 실루엣의 중심의 위치

$$\bar{P}_c = \frac{\sin\theta}{\ell} \cdot \bar{P}_{ss} = \frac{1}{\ell^2} \cdot \bar{P}_{ss} \quad (4)$$

가 됨을 알 수 있다.

식 (2)와 (4)로 표현되는  $\bar{P}_{ss}$ 와  $\bar{P}_c$ 를 이용하여 단위 구의 실루엣을 매개변수식으로 나타낼 수 있는데 이를 위하여 몸체 좌표계  $x, y, z$ 축이 고정 좌표계  $x, y, z$ 축과 일치하여  $xy$ 평면에 놓이고 중심이 원점에 놓인 반지름이  $r$ 인 원을 가정하자(Fig.12 참조).

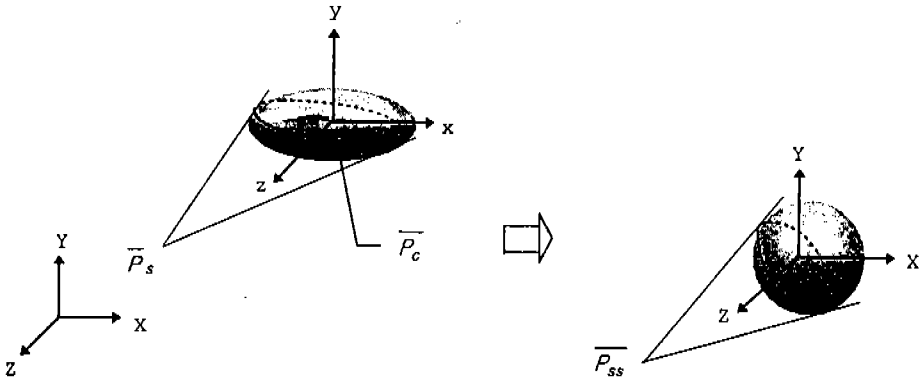


Fig.10 Ellipsoid and Sphere

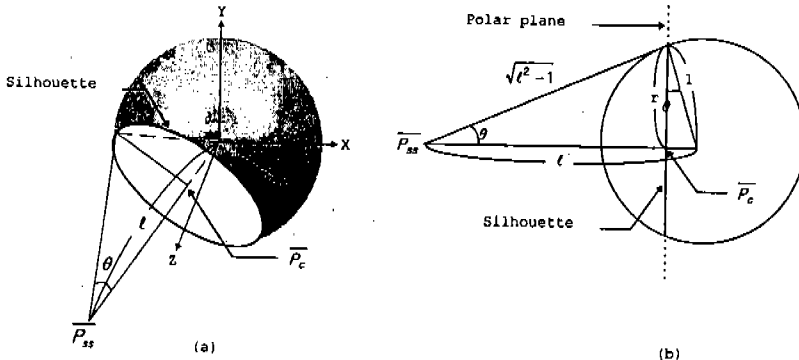


Fig.11 Silhouette of a Unit Sphere

원의 몸체 좌표계의 z축을 원점과 극점  $\bar{P}_s$ 를 잇는 축과 회전 변환을 통하여 일치시킨 후  $\bar{P}_c$ 만큼 이동 변환을 시키면 xy평면 위에 놓였던 반지름 r인 원이 곧 단위 구의 실루엣으로 변환되는데 이를 가능하게 하는 변환 행렬

$$U = \begin{bmatrix} \bar{a} & \bar{n} & \frac{\bar{P}_s}{\ell} & \bar{P}_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (5)에서  $\bar{a}$ 와  $\bar{n}$ 는  $\bar{P}_s/\ell$ 와 특수 직교(Special Orthogonal)를 만족시키는 임의의 벡터이면 되므로 단위 벡터(0, 0, 1)을 이용하여 다음과 같이

$$\bar{a} = \frac{\bar{P}_s}{\ell} \times (0,0,1), \quad \bar{n} = \bar{a} \times \frac{\bar{P}_s}{\ell} \quad (6)$$

로 간단히 구할 수 있다. 따라서 아이립스의 실루엣 위의 점의 집합을  $\bar{P}_E$ 라 하면 식(1)의 역변환과 식(5)를 이용하여  $\bar{P}_E$ 는 아래와 같이 매개변수  $\alpha$ 를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \bar{P}_E \\ 1 \end{bmatrix} = M^{-1} \cdot U \cdot \begin{bmatrix} r \cdot \cos\alpha \\ r \cdot \sin\alpha \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad 0 \leq \alpha < 2\pi \quad (7)$$

STEP III :  $\bar{P}_E$ 를 계기판에 투영

앞부 생성의 세 번째 단계는 STEP II에서 계산된 아이립스 실루엣 위의 점의 집합  $\bar{P}_E$ 를 운

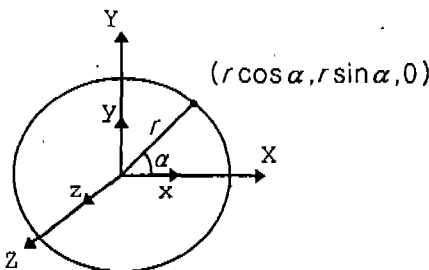


Fig.12 Circle on the XY Plane

전대 실루엣 위의 점  $\bar{P}_E$ 를 통과시켜 계기판 평면에 투영시키는 과정이다(Fig.13 참조).

$\bar{P}_E$ 가  $\bar{P}_s$ 를 지나 계기판에 투영되어 생성된 점을  $\bar{P}_i$ 라 하면  $\bar{P}_i = V\bar{P}_E$ 의 관계를 만족시키는 투영 행렬 V는  $\bar{P}_i$ 가 계기판과  $\bar{P}_E$ 와  $\bar{P}_s$ 를 잇는 직선의 교점인 관계에서 구할 수 있다(Fig.14 참조).

즉 V는  $\bar{P}_s$ 와  $\bar{P}_E$ 를 지나는 직선의 방정식

$$\frac{x - P_{Ex}}{P_{sx} - P_{Ex}} = \frac{y - P_{Ey}}{P_{sy} - P_{Ey}} = \frac{z - P_{Ez}}{P_{sz} - P_{Ez}} \quad (8)$$

과 벡터  $\bar{N}$ 에 수직이고 계기판 위의 임의의 점  $\bar{P}$  ( $P_x, P_y, P_z$ )를 지나는 평면의 방정식

$$N_x(x - P_x) + N_y(y - P_y) + N_z(z - P_z) = 0 \quad (9)$$

을 이용하면 다음과 같이 구해진다.

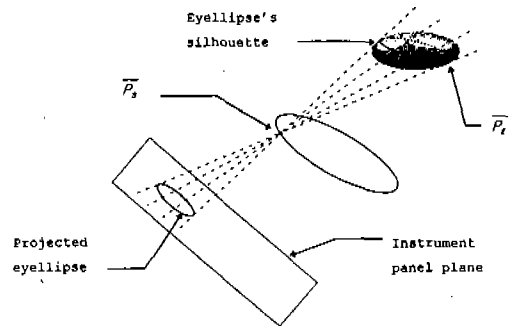


Fig.13 Generate Projected Eyellipse

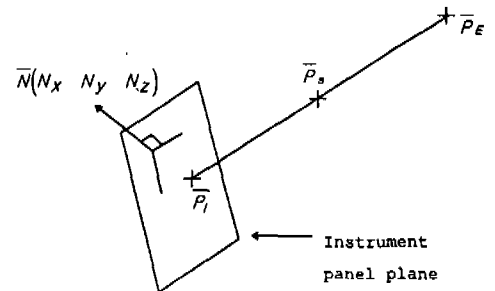


Fig.14 Intersection of Line and Plane

$$V = \begin{bmatrix} N_x(-P_x) \\ +N_x(P_y - P_z) & -P_x N_y & -P_x N_z & P_x(N_x P_x + N_y P_y + N_z P_z) \\ +N_x(P_x - P_z) & & & \\ & N_x(P_x - P_z) & & \\ -P_y N_x & +N_x(-P_y) & -P_x N_z & P_x(N_x P_x + N_y P_y + N_z P_z) \\ & +N_x(P_x - P_z) & & \\ & & N_x(P_x - P_z) & \\ -P_x N_x & -P_x N_y & +N_x(P_y - P_z) & P_x(N_x P_x + N_y P_y + N_z P_z) \\ & & +N_x(-P_z) & \\ -N_x & -N_y & -N_z & (N_x P_x + N_y P_y + N_z P_z) \end{bmatrix} \quad (10)$$

따라서 아이립스 실루엣 위의 점들의 집합  $\bar{P}_E$ 가 계기판에 투영된  $\bar{P}$ 는 최종적으로 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_{ix} \\ P_{iy} \\ P_{iz} \\ 1 \end{bmatrix} = V \cdot M^{-1} \cdot U \cdot \begin{bmatrix} r \cos \alpha \\ r \sin \alpha \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad 0 \leq \alpha \leq 2\pi \quad (11)$$

식 (11)에서  $\alpha$ 값을 0에서  $2\pi$ 까지 변화시키면 계기판 평면에 투영된 아이립스를 Fig.13과 같이 구할 수 있다.

이상 STEP II와 STEP III의 과정을 운전대의 실루엣에서 샘플링한 점  $n$ 개 모두에 적용하여 각  $\bar{P}_E$ 점에 대해서 투영된 아이립스를 구한다.

STEP IV : 투영된 아이립스들에서 암부 생성  
계기판 평면에 투영된 개개의 아이립스들은 평

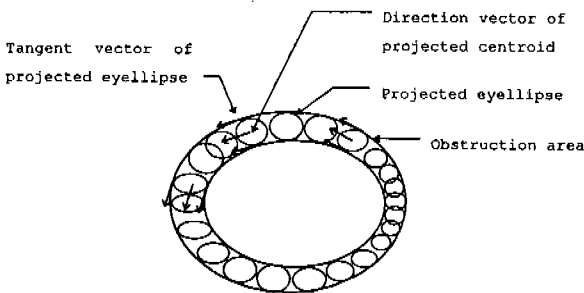


Fig.15 Projected Eyellipse and Envelope

면에서 수직인 방향에서 바라볼 때 Fig.15와 같이 원형의 군(Group)을 이루는데 이들의 엔벨롭을 구하여 운전자 시계의 암부를 만든다. 투영된 아이립스에서 엔벨롭을 구하는 것은 계기판에 투영된 아이립스 도심의 방향 벡터(바로 이웃한 아이립스의 도심과 연결한 방향)와 동일한 접선 벡터를 갖는 투영된 아이립스의 점을 연결함으로써 얻을 수 있다.

### 3. 적용 사례

본 연구에서 개발한 암부 계산 알고리즘을 범용 CAD 시스템인 CATIA 상에 자동차 전용 설계 모듈로 구현하였다. 이를 이용하여 암부 계산의 대상 물체인 림 단면을 갖는 원 모양의 운전대(①,②)와 직선의 스포크(③) 그리고 원 모양의 허브(④)와 허브의 복잡한 모양을 보조하기 위해 스플라인으로 만들어진 허브 하단(Lower Hub, ⑤)을 CATIA의 곡선 모델링 기능을 이용하여 Fig.16에 나타내고 있다. 그림에서 림의 단면(⑥)은 단면에 평행한 방향에서 바라보므로 직선만으로 나타냈지만 실제로는 원, 타원 그리고 타원형의 스플라인 곡선이 될 수 있고, 허브 하단은 허브가 운전대의 위아래 방향으로 크기가 변하는 것을 고려하여 스플라인 곡선으로 나타내었다.

이상과 같이 모델링(Modeling)된 운전대에 대해 운전자 시계의 암부 계산 결과를 Fig.17에 나

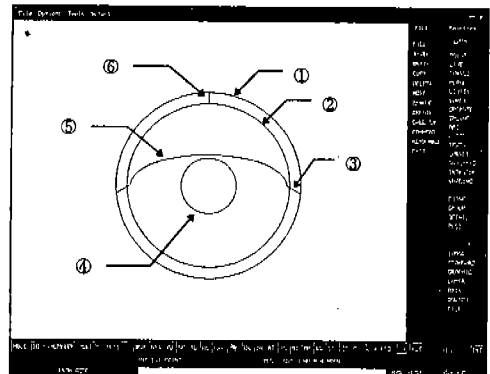


Fig.16 Steering Wheel

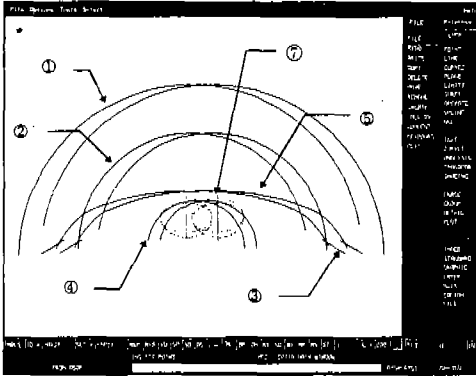


Fig.17 Driver's Field of View Results

타내었다. 이 예에서 운전대 상부와 주변 부품은 각각 9개의 P,점으로 샘플링 하였고, IBM 워크스테이션 RS/6000-355 모델에서 40초의 계산 시간이 소요되었다. 그림에서 ⑦번은 계기판 평면에 수직인 방향에서 보이는 아이리프스를 나타내고, ①~⑤번은 각각 운전대의 외곽 부분, 안쪽 부분, 스포크, 허브 하단 그리고 허브에 대한 암부의 경계(운전자 시계 계산 결과)를 나타내는 곡선이다. 암부 계산 결과가 원형이 아니고 반원 모양만으로 나타난 것은 운전자의 계기판 시계가 운전대의 상부에 의해서만 가려지므로 아래쪽 부분은 일반적인 계산에서 제외된다. 또한 모든 결과 곡선들이 쌍(Pair)을 이루고 인접하고 있는 이유는 왼쪽과 오른쪽 눈의 아이리프스에 의해 각각 2개씩의 곡선이 계산되어지기 때문이다.

암부 계산을 위한 SAE의 방법이 도면상에서 원과 직선만으로 근사하여 많은 오차를 포함하지만<sup>1)</sup>, 본 연구에서 개발한 암부 계산 방법은 3D CAD시스템에서 타원과 스플라인 곡선의 허브, 스포크 형상까지도 계산하여 좀더 정확한 암부 계산이 가능하도록 하였다. 따라서 Fig.17을 일본 마즈다(MAZDA)에서 자동차 전용 CAD시스템으로 개발되어 상용화된 GNC의 것과 비교해본 결과 암부 계산의 정확도 면에서 훨씬 우수함을 자동차 설계자들에 의해 인정받았다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 운전대와 주변기기에 의해 생성되는 운전자의 암부를 그림자 계산 방법으로 접근하는 알고리즘을 개발하였다. 이는 3D 공간상에서 해석적인 투영법을 사용했으며 또한 운전대와 주변기기가 스플라인 등으로 표현된 자유 곡면일 경우에도 적용이 가능하여 기존의 SAE 방법보다 훨씬 정확한 계산 결과를 준다.

## 후 기

본 연구는 기아 자동차와 1996년도 교육부 학술 연구 조성비(기계공학 ME96-E-37)에 의한 기술적인 지원과 재정적인 지원을 받았습니다.

## 참 고 문 헌

1. Society of Automotive Engineering Recommended Practice, "Describing And Measuring The Driver's Field of View" SAE J1050a.
2. Society of Automotive Engineering Recommended Practice, "Motor Vehicle Drivers' Eye Range", SAE J941 OCT85.
3. Roe, R. W., "Describing the Driver's Work Space : Eye, Head, Knee, and Seat Positions" SAE paper 750356.
4. Hammond, D. D. and Roe, R. W., "Driver Head and Eye Positions." SAE Transactions, vol.81, SAE paper 720200.
5. Folly, J., van Dam, A., Feiner, S., Hughes, J., "Computer Graphics" 1990.
6. Woo, A., Poulin, P. and Fournier, A., "A Survey of Shadow Algorithms", IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 10, no. 6, Nov 1990, pp. 13~32.
7. Teller, S. J., "Computing the Antipenumbra of an Area light Source", Computer Graph-



- ics(Proc. SIGGRAPH 92), vol. 26, no. 2, July 1992, pp. 139~148.
8. Drettakis, G., Fiume, E., "A Fast Shadow Algorithm for Area Light Sources Using Backprojection", (Proc. SIGGRAPH 94) pp. 223~30.
9. Boehm, W., Prautzsch, H., "Geometric Concepts for Geometric Design", 1994.