Computer Graphics

Prof. Jibum Kim

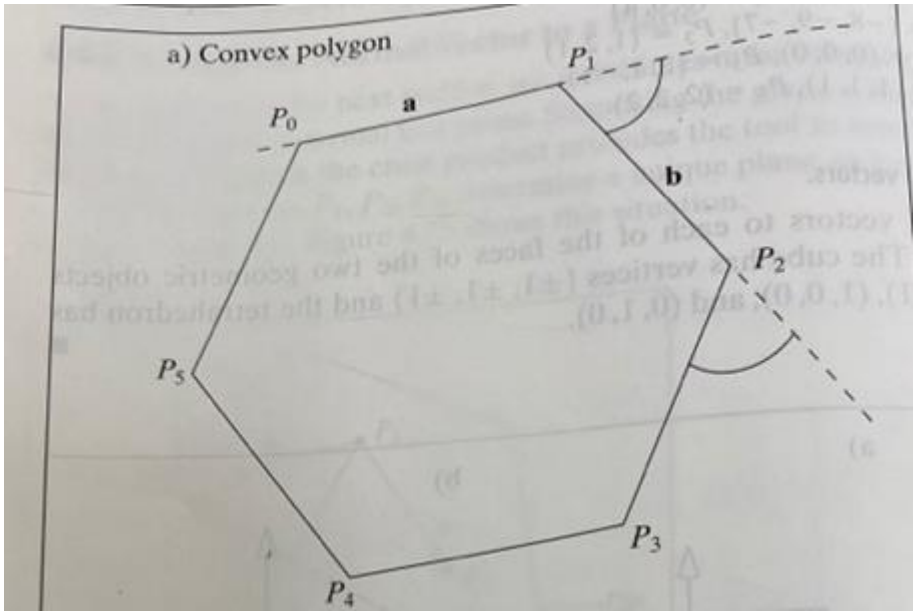
Department of Computer Science & Engineering

Incheon National University

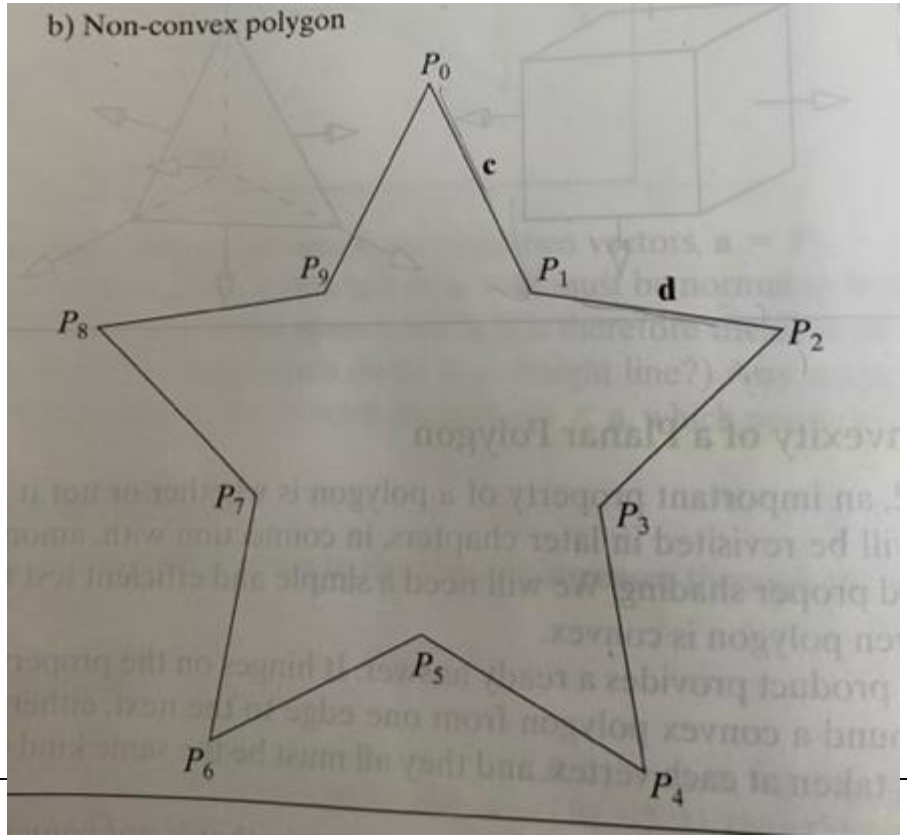
- **Convexity of a planar polygon**

- OpenGL에서 다루는 polygon은 convex한 polygon 이었다
- Edge vector의 외적을 이용한 convex polygon 여부를 판별하는 알고리즘이 있다
- 알고리즘
- 1. Polygon의 각 edge에 edge vector를 만든다 (한 방향)
- 2. 인접한 edge vector들을 방문하면서 edge vector의 외적의 방향 (부호)을 계산한다
- 3. 외적의 방향이 모두 한 방향인지 판단한다
- (Edge vector가 left-turn인지 right-turn인지 판별한다)
- 4. 모두 한 방향이면 convex polygon이다 (아니면 non-convex)
- (즉, 모두 left-turn 혹은 모두 right-turn이면 convex polygon)

- **Convex polygon**
- **P0, P1,…P5로 edge vector 만들고 left-turn인지 right-turn인지 따짐. 모두 같은 방향의 turn인지?**



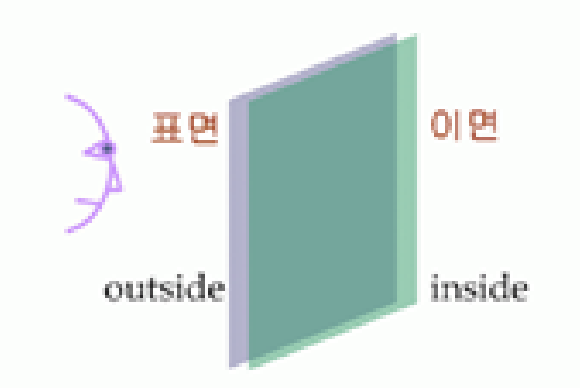
- **Non-convex polygon**
- **P0, P1,…P9로 edge vector 만들고 left-turn인지 right-turn인지 따짐. 모두 같은 방향의 turn인지?**



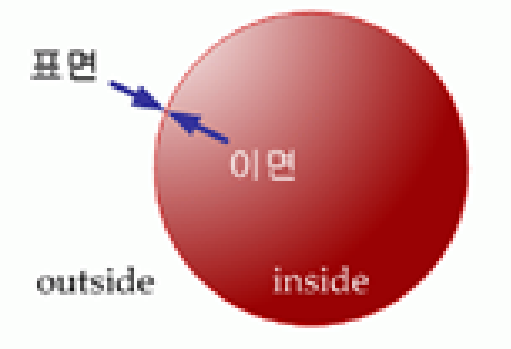
- **Observation**
- **A polygon is convex if the cross products between each edge vector and the next all point into the plane or out of the plane**

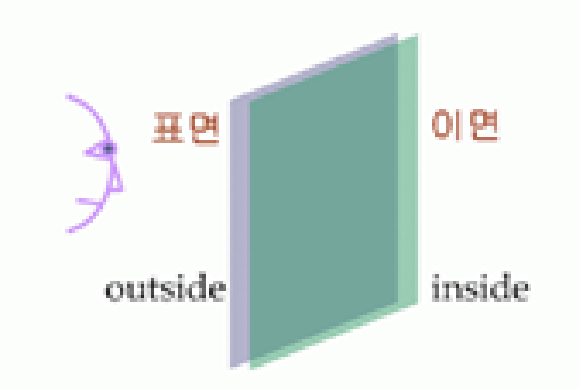
- **Backface culling (후면 제거)**

- 정의
- Given a polygon (e.g., 2D triangle, 2D quad)
- Front face (앞면): viewer (카메라)에게 보이는 면
- Back face (후면): viewer에게 보이지 않는 면



- 아래 왼쪽과 같이 구와 같은, 닫힌 다각형 (closed polygon)의 경우 안쪽 면은 viewer의 위치와 상관 없이 (viewer가 구 내부에 있지 않은 한) 안쪽 면은 항상 viewer가 볼 수 없는 back face가 된다. 이런 경우 front face와 back face가 명확하다
- 하지만, 아래 오른쪽과 같은 열린 다각형 (open polygon)은 viewer의 위치에 따라서 front face와 back face가 결정 된다





- Back face는 어차피 viewer에게 보이지 않는 면이므로 제거하는 것이 효과적일 수 있다. 이와 같이 후면을 제거하는 것을,이를 back face culling (후면 제거)이라고 한다. 혹은, back face removal 이라고도 한다
- 수만/수십만 개의 polygon으로 이루어진 복잡한 object의 경우 후면 제거를 사용하면 큰 시간 절약 가능
- 또한, 경우에 따라서 front face나 back face만 보여야 하는 경우도 있고, 또 서로의 색이 다를 수도 이다
- https://en.wikipedia.org/wiki/Back-face_culling

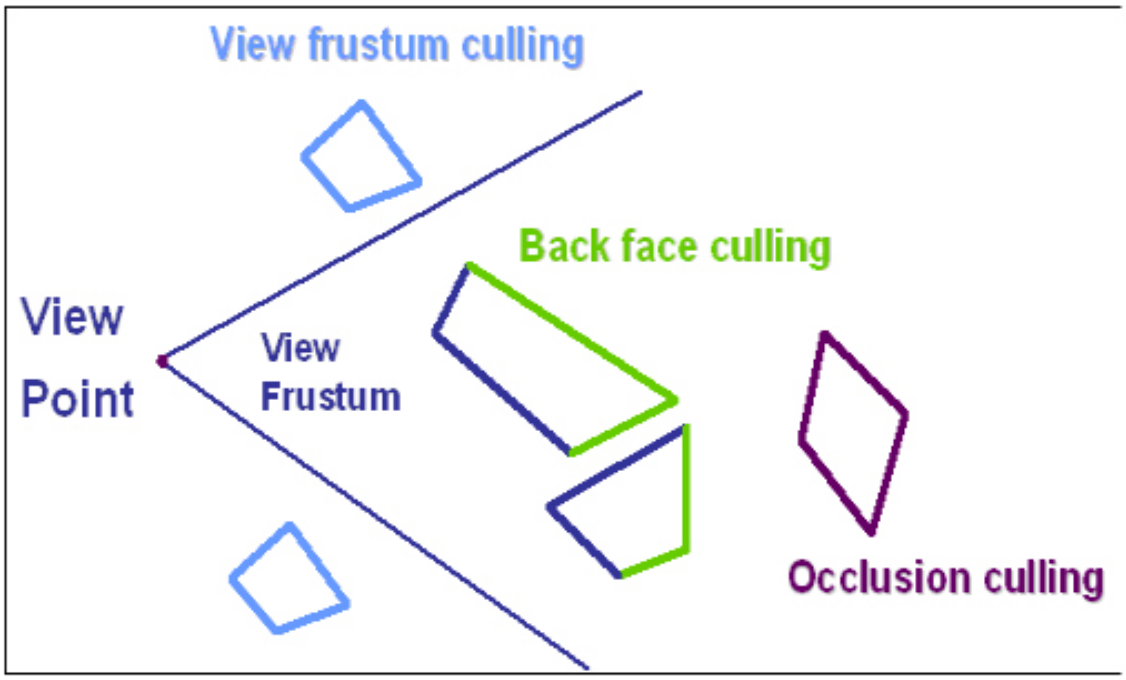
- **후면제거, 은면 제거의 차이점**

- **Backface culling (후면 제거): viewer에게 보이지 않는 뒷면에 위치하는 back face를 제거**

- **Hidden surface removal (은면 제거): 다른 물체에 가려서 보이지 않는 hidden surface 은면 제거 OpenGL에서는 Depth buffer (Z-buffer) 사용하여 은면을 제거함**

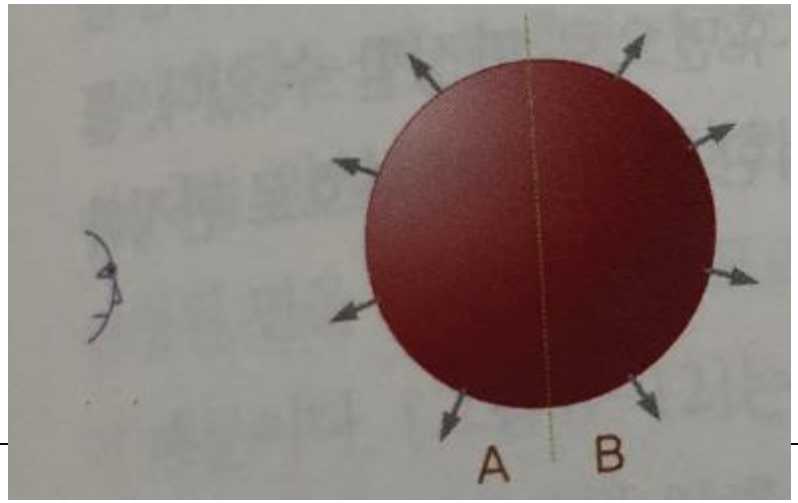
View frustum culling: clipping

Occlusion culling: hidden surface removal

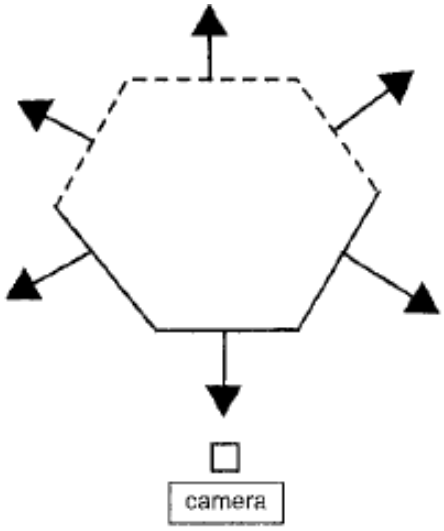


- **Normal vector와 backface culling**

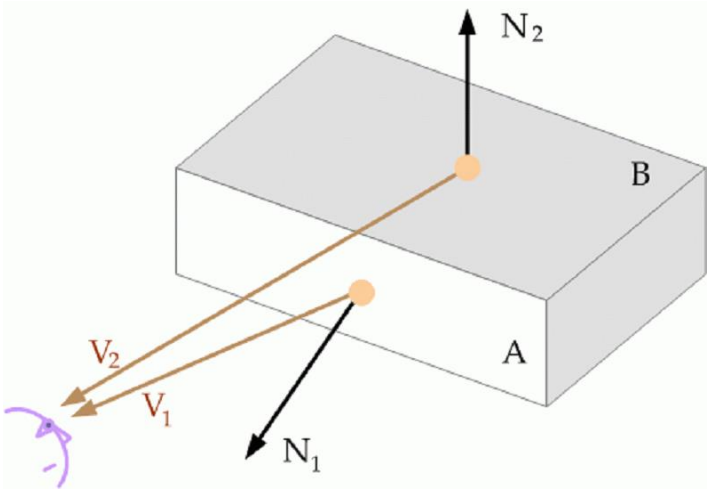
- 구의 화살표는 평면 다각형의 법선 벡터를 의미한다
- Viewer가 보았을 때 B부분의 polygon들은 보이지 않는다. 그 이유는 이 면들의 법선 벡터가 시점 반대쪽 (viewer로 부터 멀어지는 방향)을 바라보기 때문이다. 즉, B부분의 면들은 backface이다
- Viewer가 보았을 때 A부분의 polygon들은 보인다. 그 이유는 이 면들의 법선 벡터가 viewer 쪽을 향하기 때문이다. 즉, A 부분의 면들은 frontface이다



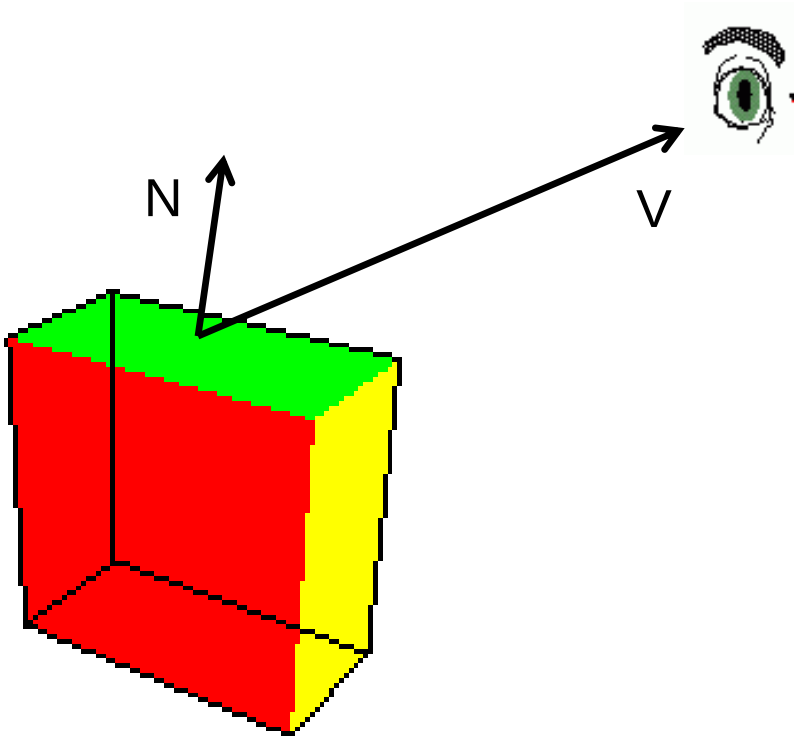
- **Observation**
- **1. viewer로 부터 멀어지는 방향의 normal vector를 갖는 polygon의 면은 back face 이다**
- **2. viewer쪽을 향하는 방향의 normal vector를 갖는 polygon의 면은 front face이다**



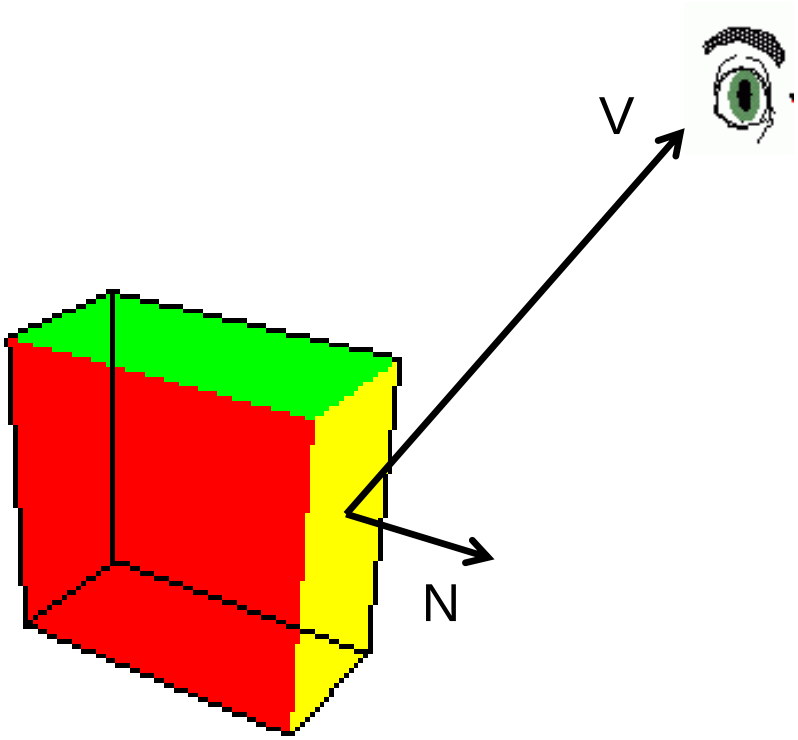
- 정의: view vector (V): polygon 면으로부터 viewer를 향한 벡터
- 정리: polygon 면의 법선 벡터 (N)과 view vector가 이루는 각이 90도가 넘으면 back face 이다
- 앞에서의 벡터 정리를 이용하면
- 즉, $V \cdot N < 0$ 인 polygon 면은 viewer로부터 back face 이다
- 예)
- Face A: $V1 \cdot N1 > 0$, front face



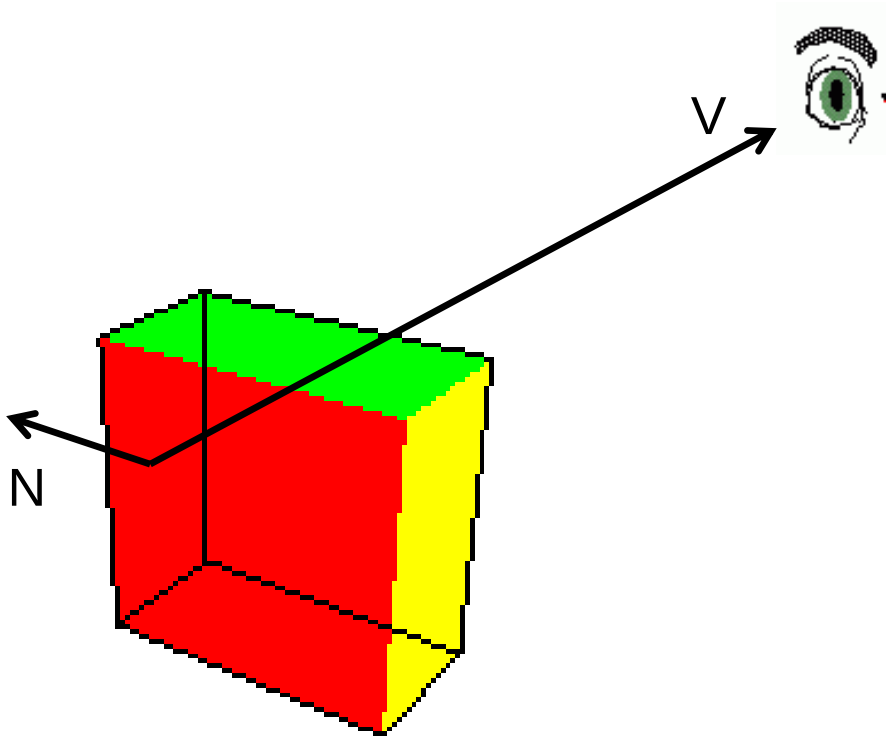
- **Face (green) : front face**
- **Why?**



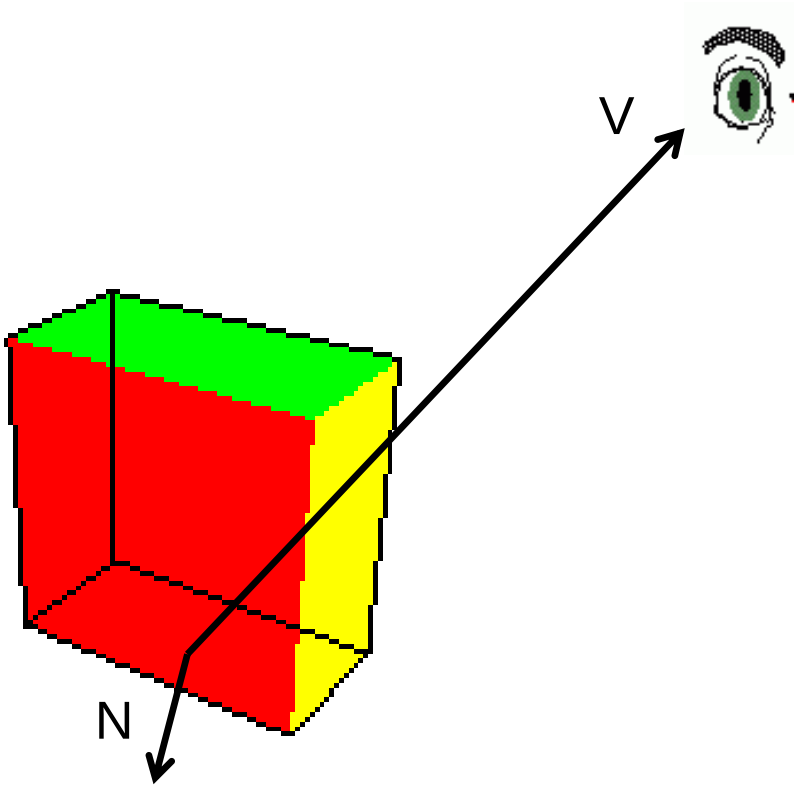
- **Face (Yellow) : front face**
- **Why?**



- **Left face : back face**
- **Why?**

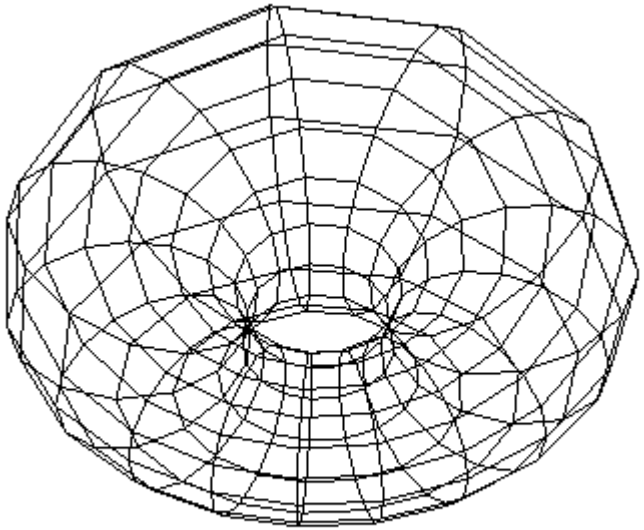


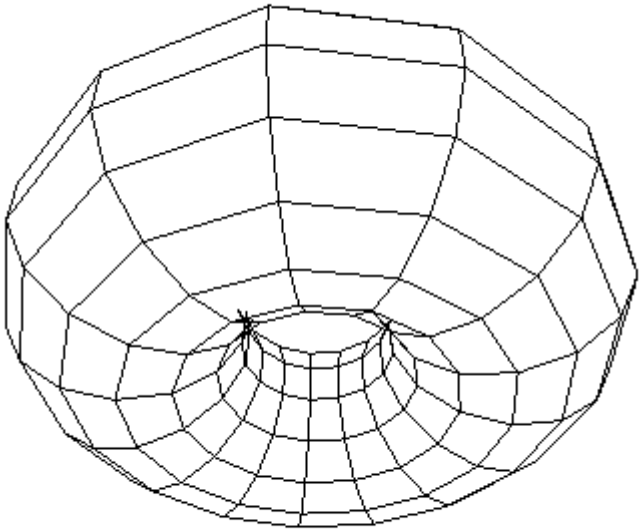
- **Bottom face : back face**
- **Why?**



- **OpenGL에서의 backface culling 예 1**

- // glEnable(GL_CULL_FACE);
- // glcullFace(GL_BACK);
- // back face culling
- 주석을 제거 전후를 비교해 보자





```
#include <GL/glut.h>

// Drawing routine.
void drawScene(void)
{
   glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);
   glColor3f(0.0, 0.0, 0.0);
   gluLookAt(0.0, 10.0, 10.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0, 0.0);
  // glEnable(GL_CULL_FACE);
// glCullFace(GL_BACK);
   glutWireTorus(3.0, 5.0, 15, 15);
   glFlush();
}

// Main routine.
int main(int argc, char **argv)
{
   glutInit(&argc, argv);

   glutInitDisplayMode(GLUT_SINGLE | GLUT_RGBA);
   glutInitWindowSize(500, 500);
   glutInitWindowPosition(100, 100);
   glutCreateWindow("squareOfWalls.cpp");
   glutDisplayFunc(drawScene);
   glMatrixMode(GL_PROJECTION);
   glLoadIdentity();
   glFrustum(-5.0, 5.0, -5.0, 5.0, 5.0, 100.0);
   glClearColor(1.0, 1.0, 1.0, 0.0);
   glutMainLoop();
```

- **OpenGL에서의 backface culling 예 2**

- OpenGL에서 viewing frustum을 사용시 어떠한 polygon이 다음과 같은 orientation으로 정의되었다. Camera의 위치는 (0, 7, 10)에 위치한다고 하자
- Q) 이 polygon 면은 viewer에게 front-face일까? Back-face일까?

```
glVertex3f(-5.0, 1.0, 5.0);  //P1
glVertex3f(-5.0, -1.0, 5.0);  // P2
glVertex3f(5.0, 1.0, 5.0);   // P3
```

N: normal vector, V: view vector
N ·V >0 => front face
N ·V <0 => back face

1. 이 polygon (P1, P2, P3)의 normal vector, *N*을 계산해 보자

2. View vector (polygon의 점으로부터 viewer로의 벡터) 계산

3. 이 polygon 면은 viewer에게 front-face? Back-face?

- OpenGL에서는 front face와 back face를 쉽게 구별하기 위하여 다음과 같은 mode를 제공한다
- glPolygonMode(GL_FRONT, GL_FILL);
- // front face: filled
- glPolygonMode(GL_BACK, GL_LINE);
- // back face: outlined
- OpenGL에서 viewer (카메라)의 위치는 어떻게 조정할 수 있을까?

```
#include <GL/glut.h>

void drawScene(void)
{
glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);
glColor3f(0.0, 0.0, 0.0);
gluLookAt(0.0, 7.0, 10.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 1.0, 0.0);

// Front faces filled, back faces outlined.
glPolygonMode(GL_FRONT, GL_FILL);
glPolygonMode(GL_BACK, GL_LINE);

glBegin(GL_POLYGON);
glVertex3f(-5.0, 1.0, 5.0);  //P1
glVertex3f(-5.0, -1.0, 5.0);  // P2
glVertex3f(5.0, 1.0, 5.0);   //P3
glEnd();

glFlush();
}

// Main routine.
int main(int argc, char **argv)
{
glutInit(&argc, argv);
glutInitDisplayMode(GLUT_SINGLE | GLUT_RGBA);
glutInitWindowSize(500, 500);
glutInitWindowPosition(100, 100);
glutCreateWindow("squareOfWalls.cpp");
```

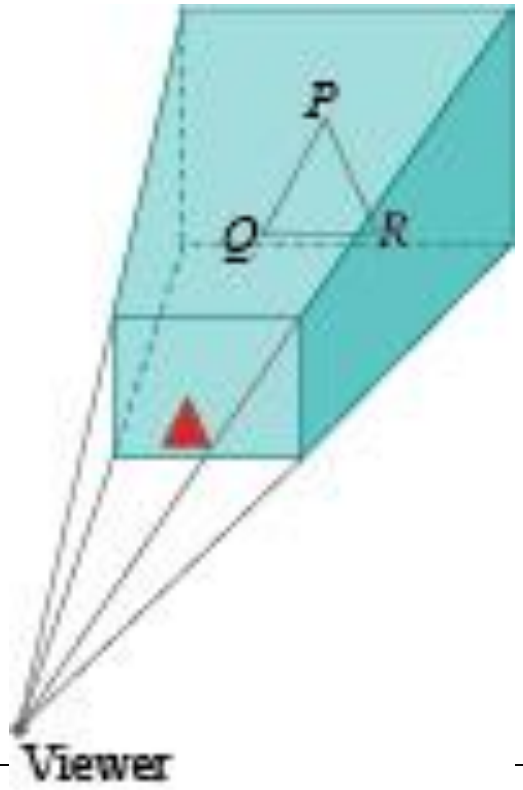
- Polygon을 명시할 때 vertex의 순서는 그 polygon 면의 normal vector의 방향을 결정 짓고 카메라가 위치한 view vector와의 연산을 통해 back-face인지 front-face인지 결정된다. 이를 orientation이라 한다

- 앞에서 세 vertex의 orientation을 바꿔 보자. 어떻게 보이는가?

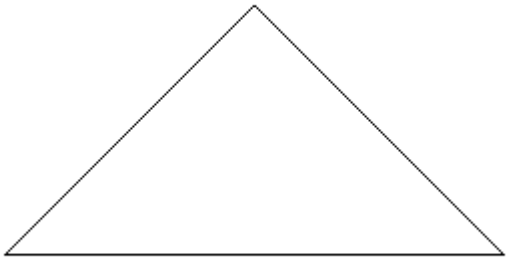
```
glBegin(GL_POLYGON);
glVertex3f(-5.0, 1.0, 5.0);  //P1
glVertex3f(5.0, 1.0, 5.0);   //
glVertex3f(-5.0, -1.0, 5.0);  // P2
glEnd();
```

- Orientation: how are vertices ordered?
- Orientation은 viewer가 보았을 때 시계 방향 (Clockwise)이나 반 시계 방향 (counter-clockwise)로 정의될 수 있다
- 일반적으로, 반 시계 방향 (CCW) 의 orientation을 viewer는 앞면 (front face)라고 판단한다
- Viewer가 보았을 때 CW이면 후면 (backface)이라 판단한다

- 예: viewer (0,0,0)
- Q) Triangle의 vertex들의 orientation이 QPR일 때 이 triangle은 viewer로 부터 CCW로 보일까? CW로 보일까?



```
#include <GL/glut.h>

void drawScene(void)
{
glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);
glColor3f(0.0, 0.0, 0.0);

// Front faces filled, back faces outlined.
glPolygonMode(GL_FRONT, GL_FILL);
glPolygonMode(GL_BACK, GL_LINE);

glBegin(GL_POLYGON);
glVertex3f(-5.0, 0.0, -10.0);  // Q
glVertex3f(0.0, 5.0, -10.0);   // P
glVertex3f(5.0, 0.0, -10.0);   // R
glEnd();

glFlush();
}

// Main routine.
int main(int argc, char **argv)
{
glutInit(&argc, argv);
glutInitDisplayMode(GLUT_SINGLE | GLUT_RGBA);
glutInitWindowSize(500, 500);
glutInitWindowPosition(100, 100);
glutCreateWindow("squareOfWalls.cpp");
glutDisplayFunc(drawScene);
```

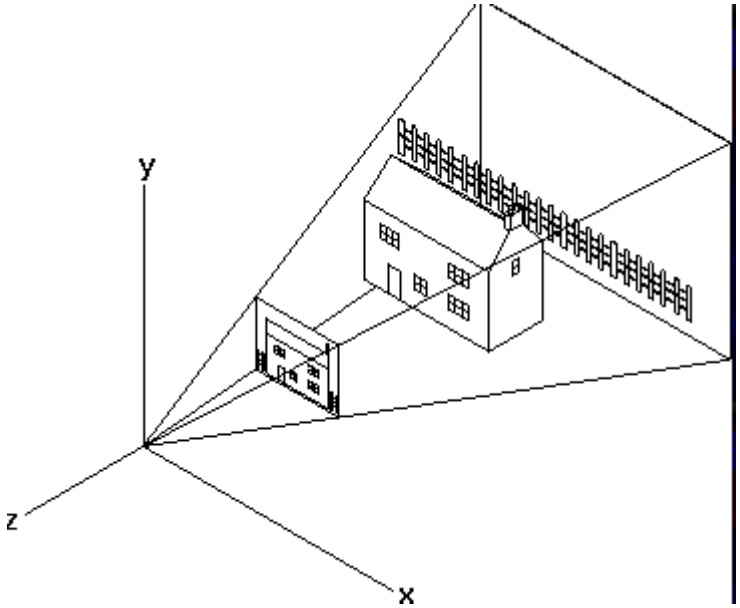


- 1. 다음의 코드는 viewer가 보았을 때 orientation이 CW인가? CCW인가? 그렇다면 front-face라고 판단하는가? Back-face라고 판단하는가?
- 2. Polygon 모드에서 front-face인 경우에는 fill이고 back-face이면 outline만 그린다. 어떻게 그려지는지 확인해 보자
- 3. 이 polygon의 normal vector를 계산해 보고 V • N 의 부호를 판단해 보자 1의 결과와 일치하는지 확인해보자
- N=
- V=
- V • N

```
glBegin(GL_POLYGON);
glVertex3f(-5.0, 0.0, -10.0);  // Q
glVertex3f(0.0, 5.0, -10.0);   // P
glVertex3f(5.0, 0.0, -10.0);   // R
glEnd();
```

- **Hidden surface removal**

- 앞 물체에 가려서 Viewer에게 보이지 않은 물체 (면)를 제거하는 작업을 **hidden surface removal (은면 제거)**라고 한다



- OpenGL에서 frame buffer내의 color buffer를 사용하여 각 pixel의 색깔 정보를 2차원 배열로 저장한다. 추가적으로 hidden surface removal (은면 제거)을 위하여 depth buffer (깊이 버퍼)를 사용할 수 있다

- OpenGL에서는 depth-buffer 를 사용하여 viewer가 볼 때 다른 물체에 가려서 뒤에 있는 물체 (즉, 은면)을 제거할 수 있다

- Depth buffer를 z-buffer라고도 한다. 기본적으로 z값은 viewer와 물체와의 거리를 의미한다

- Z-buffer 알고리즘은 각 픽셀 별로 동작한다 (Frame buffer의 하나)
  그래서 memory를 많이 사용하는 단점이 있다
- Z-buffer 알고리즘
- 1. The depth buffer is initialized to a value that corresponds to the farthest distance from the viewer
- 2. When each polygon is rasterized, the depth of each pixel (how far the corresponding point on the polygon is from the viewer) is calculated
- 3. If the depth is less (closer) than what is already in the z-buffer, we use the color of the polygon to replace the color of the pixel and update the depth in the z-buffer.

- OpenGL에서의 depth-buffer 사용

1. Main 함수

```
glutInitDisplayMode(GLUT_SINGLE | GLUT_RGB | GLUT_DEPTH)
// 디스플레이 모드 설정 , color buffer= single, RGB, DEPTH buffer 사용
// bitwise OR 연산 사용
```

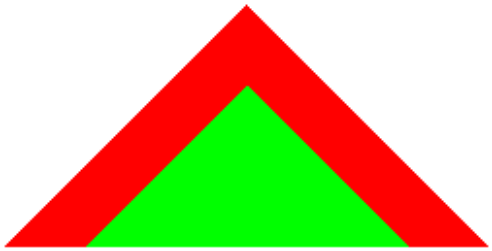
2. Display 콜백 함수

```
glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT | GL_DEPTH_BUFFER_BIT);
// bitwise OR 연산 사용
```

3. Display 콜백 함수

```
glEnable(GL_DEPTH_TEST);
```

- Frustum을 사용하고 camera의 위치 및 방향을 변경하지 않고 같은 크기의 두 개의 polygon에 대하여 z값을 다르게 주고 Viewer에게 z-buffer를 사용하지 않고 실행해 보았다. 나중에 그린 삼각형 (초록색)이 먼저 그린 삼각형 (빨간색) 위에 그려진다



```
#include <GL/glut.h>

void drawScene(void)
{
   glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);
   // glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT | GL_DEPTH_BUFFER_BIT);

   // glEnable(GL_DEPTH_TEST);
    // Front faces filled, back faces outlined.
    glPolygonMode(GL_FRONT, GL_FILL);
    glPolygonMode(GL_BACK, GL_LINE);
    glColor3f(1.0, 0.0, 0.0);
    glBegin(GL_POLYGON);
    glVertex3f(-5.0, 0.0, -10.0);
    glVertex3f(5.0, 0.0, -10.0);
    glVertex3f(0.0, 5.0, -10.0);
    glEnd();
     glColor3f(0.0, 1.0, 0.0);
    glBegin(GL_POLYGON);
    glVertex3f(-5.0, 0.0, -15.0);
    glVertex3f(5.0, 0.0, -15.0);
    glVertex3f(0.0, 5.0, -15.0);
    glEnd();

    glFlush();
}

// Main routine.
int main(int argc, char **argv)
{
```

- 초록색 삼각형이 빨간색 삼각형 보다 camera에서 더 멀리 있다
- hidden-surface removal (은면 제거)을 적용해보자
- Depth buffer 적용후의 실행 화면 왜 빨간색 삼각형만 보이는가?

```
#include <GL/glut.h>

void drawScene(void)
{
//glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);
 glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT | GL_DEPTH_BUFFER_BIT);

glEnable(GL_DEPTH_TEST);
// Front faces filled, back faces outlined.
glPolygonMode(GL_FRONT, GL_FILL);
glPolygonMode(GL_BACK, GL_LINE);
glColor3f(1.0, 0.0, 0.0);
glBegin(GL_POLYGON);
glVertex3f(-5.0, 0.0, -10.0);
glVertex3f(5.0, 0.0, -10.0);
glVertex3f(0.0, 5.0, -10.0);
glEnd();
glColor3f(0.0, 1.0, 0.0);
glBegin(GL_POLYGON);
glVertex3f(-5.0, 0.0, -15.0);
glVertex3f(5.0, 0.0, -15.0);
glVertex3f(0.0, 5.0, -15.0);
glEnd();

glFlush();
}

// Main routine.
int main(int argc, char **argv)
{
glutInit(&argc, argv);
//glutInitDisplayMode(GLUT_SINGLE | GLUT_RGBA);
  glutInitDisplayMode(GLUT_SINGLE | GLUT_RGBA | GLUT_DEPTH);
glutInitWindowSize(500, 500);
glutInitWindowPosition(100, 100);
glutCreateWindow("squareOfWalls.cpp");
glutDisplayFunc(drawScene);
glMatrixMode(GL_PROJECTION);
glLoadIdentity();
glFrustum(-5.0, 5.0, -5.0, 5.0, 5.0, 100.0);
glClearColor(1.0, 1.0, 1.0, 0.0);
glutMainLoop();
}
```