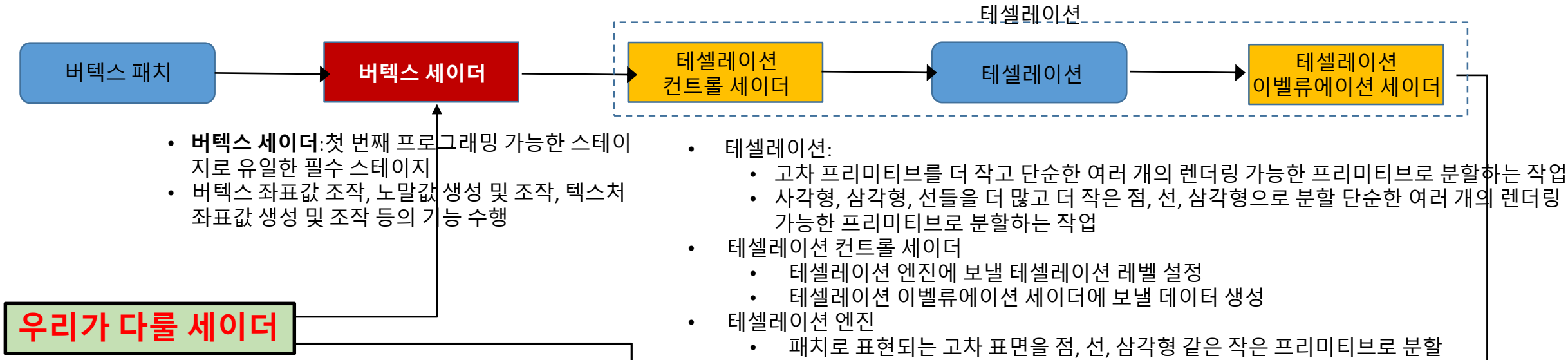
openGL 셰이더 사용하기 1

2023-2 컴퓨터 그래픽스

openGL 그래픽스 파이프라인



- **버텍스 세이더**:첫 번째 프로그래밍 가능한 스테이지로 유일한 필수 스테이지
- 버텍스 좌표값 조작, 노말값 생성 및 조작, 텍스처 좌표값 생성 및 조작 등의 기능 수행

- 테셀레이션:
  - 고차 프리미티브를 더 작고 단순한 여러 개의 렌더링 가능한 프리미티브로 분할하는 작업
  - 사각형, 삼각형, 선들을 더 많고 더 작은 점, 선, 삼각형으로 분할 단순한 여러 개의 렌더링 가능한 프리미티브로 분할하는 작업
- 테셀레이션 컨트롤 세이더
  - 테셀레이션 엔진에 보낼 테셀레이션 레벨 설정
  - 테셀레이션 이벨류에이션 세이더에 보낼 데이터 생성
- 테셀레이션 엔진
  - 패치로 표현되는 고차 표면을 점, 선, 삼각형 같은 작은 프리미티브로 분할
- 테셀레이션 이벨류에이션 세이더
  - 프리미티브를 변환하여 래스터라이제이션 가능한 상태로 만든다.

- **프레그먼트 세이더**: 프래그먼트의 색상을 결정, 프레임 버퍼로 전달
- 라이팅, 재질, 프래그먼트 깊이 결정하는 일을 수행

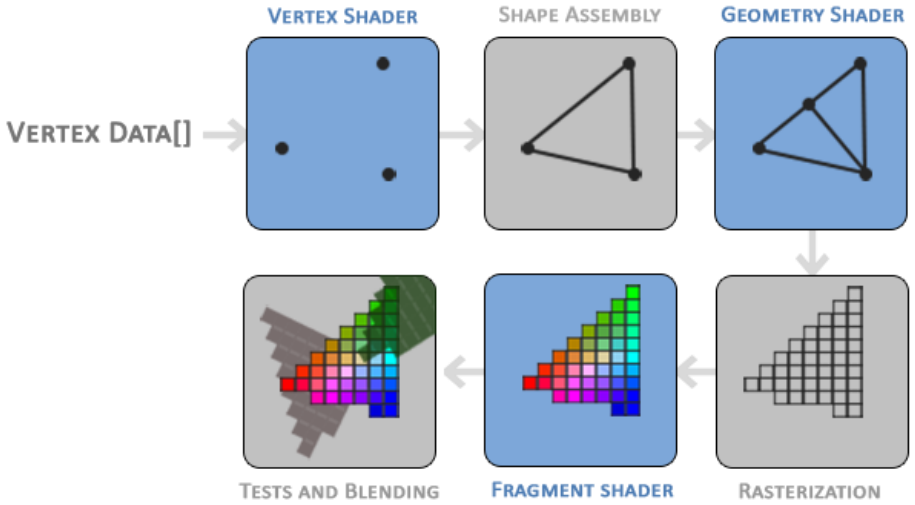
- 지오메트리 세이더:
- 기본 도형을 이루는 버텍스들의 모음을 입력받아 다음 세이더 단계에 보내기 전에 적절한 형태로 변환

- 프레임버퍼 동작: 화면에 출력
- 프레임버퍼: 화면에 보이는 영역, 색상 이외에도 픽셀당 값을 저장

- 래스터라이제이션: 프래그먼트들이 어떤 선이나 삼각형에 의해 채워지는지 결정

openGL 그래픽스 파이프라인

- 그래픽스 파이프라인에서
  - 이번 학기는 오픈지엘 3.3 이용하여 Vertex shader와 Fragment shader 구현
    - 두 shader 코드들은 메인 프로그램과는 분리해서 각각 따로 작성한다.
  - 모던 openGL (openGL 3.1 이상) 프로그래밍은
    - 모든 정점 (vertex)와 속성 (attribute) 정보를 배열(array)로 지정한다.
      - Vertex buffer Object와 Vertex Array Object 사용
    - 이 배열을 GPU에 보내어 저장하고 렌더링에 사용한다.



출처: www.learnopengl.com

Shader 프로그램 구조

- 프로그램 구조

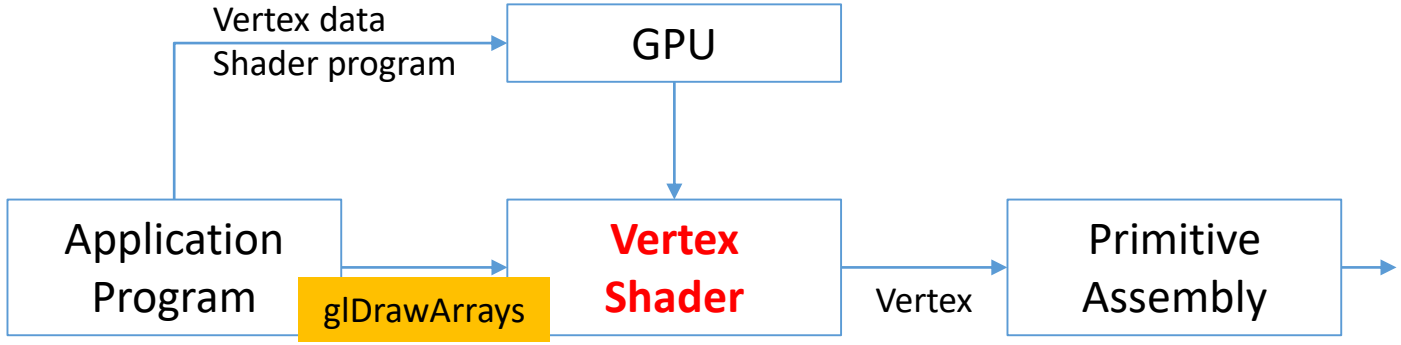
```
#version version_number  core                    //--- 사용 버전 선언

in type in_variable_name;                        //--- 변수 선언
out type out_variable_name;
uniform type uniform_variable_name;

void main(void)                                  //--- 메인 함수: 인자값 없음
{
        //--- 입력 값을 처리
        //--- 필요한 그래픽 작업 수행
        ...
        //--- 출력 변수 저장
        out_variable_name =  output data;
}
```

- 오픈지엘의 두 가지 프로파일
  - 코어 프로파일 (core profile): 현대 그래픽스 하드웨어로 가속하지 못하는 많은 기존 기능 제거
  - 호환성 프로파일 (compatibility profile): 오픈지엘의 모든 버전과 하위 호환성 유지

Shader 프로그램 구조

- **Vertex Shader**
  - 그리기 명령어에 의해 vertex array object로부터 버텍스 속성을 설정
  - 버텍스 변환
  - 텍스처 좌표 설정

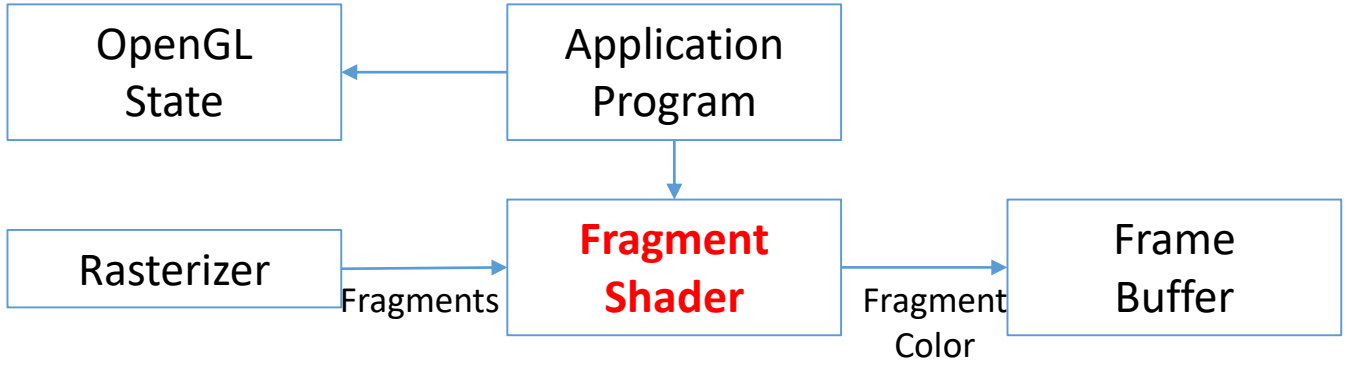
```
//--- 버텍스 세이더 예)
#version 330 core

in vec3 vPos;

void main ()
{
	gl_Position = vec4 (vPos.x, vPos.y, vPos.z, 1.0);
}
```



Shader 프로그램 구조

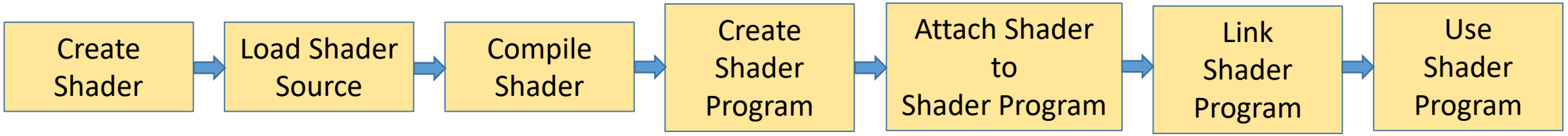
- **Fragment Shader**
  - Rasterizer에서 생성된 프래그먼트를 일련의 색상과 깊이 값으로 처리
  - 색상 설정
  - 조명 설정

```
//--- 프래그먼트 세이더 예)
#version 330 core

out vec4 FragColor;

void main ()
{
        FragColor = vec4 (1.0, 0.0, 0.0, 1.0);
}
```



세이더 작성하기

- openGL 세이더: GLSL(OpenGL Shader Language)로 작성한다.
  - GLSL:
    - C언어를 기초로 한 상위 레벨 세이딩 언어로 병렬 실행에 적합한 언어
    - 행렬(Matrices)과 벡터(Vectors) 타입이 기본 타입
    - GLSL에는 포인터 개념이 없음: 동적 할당이 없음
    - 함수 오버로딩을 지원
    - 재귀 호출이 허용되지 않음
    - C언어의 구조체 사용 가능
  - 세이더 처리 과정



GLSL 기본 문법

- 데이터 타입
  - 기본 C언어 스칼라 타입: **int, float, double, uint, bool**
  - 벡터 타입: **vec**
    - 지원하는 모든 스칼라 타입에 대한 벡터 타입 지원, 접미어 n은 인자 개수, 2 <= *n* <= 4
    - **vecn / dvec*n* / bvec*n* / ivec*n* / uvec*n***
      - Vec2, vec3, vec4: 2D, 3D, 4D float-타입 벡터
    - 벡터 요소들 필드로 대응되는 구조체로 접근 가능
      - x, y, z, w (좌표값) 또는 r, g, b, a (색상) 또는 s, t, p, q (텍스처 좌표)
    - 벡터의 요소들은 배열처럼 접근 가능
      - vec4 foo; float x = foo[0]; float y = foo[1];…
    - 스위즐링 (swizzling)
      - 특정 필드들을 묶어 벡터로 표현하는 것
  - 행렬 타입: **mat**
    - float와 double 타입에 대한 행렬 지원, 접미어 n과 m은 각각 행과 열의 개수, 2 ≤ *n* ≤ 4, 2 ≤ m ≤ 4
    - **mat*n* / mat*mxn* / dmat*n* / dmat*mxn***
      - mat2, mat3, mat4: 2x2, 3x3, 4x4 매트릭스(행렬)
    - 행렬은 배열처럼 다룰 수 있고, 열 우선으로 구성
  - 텍스처 샘플러: **sampler**
    - 텍스처 값 (texel)에 접근이 가능한 샘플러 타입
    - **sampler1D, sampler2D, sampler3D**

GLSL 기본 문법

- 생성자 (Constructor)
  - 변수의 초기화는 C++ 생성자 방식 이용
    - vec3 aPos = vec3 (0.0f, 0.5f, 0.0f);
  - 벡터 생성자는 저장할 값의 숫자를 지정한다.
    - vec3 position (1.0); //--- vec3 position (1.0, 1.0, 1.0);
  - 벡터에 하나의 스칼라값을 지정하면 벡터의 모든 요소에 할당
    - vec4 whiteColor = vec4 (1.0f); //--- vec4 whiteColor (1.0, 1.0, 1.0, 1.0);
  - 스칼라와 벡터, 행렬을 생성자 내에서 혼합해 사용할 수 있다.
    - vec4 aColor = vec4 (r, vec2(g, b), a); //--- vec4 aColor (r, g, b, a)
  - 배열 생성자는 다음의 문법에 따라 생성자를 호출한다.
    - const float array[3] = float[3] (2.5, 7.0, 1.5);
    - const vec4 vertex[3] = vec4[3] (vec4(0.25, -0.25, 0.5, 1.0), vec4(-0.25, -0.25, 0.5, 1.0), vec4(0.25, 0.25, 0.5, 1.0));
  - 행렬은 열 우선으로 구성되고, 단일 스칼라 값을 지정하는 경우 대각 행렬이 됨 (대각 요소 외에는 0으로 채워짐)
    - mat3 m = mat3 (
      1.1, 2.1, 3.1, //--- 첫번째 열
      1.2, 2.2, 3.2, //--- 두번째 열
      1.3, 2.3, 3.3); //--- 세번째 열
    - mat3 m = mat3 (1.0); //--- 대각선이 1.0이고 다른 요소들은 0.0인 3x3 행렬

GLSL 기본 문법

- 연산자
  - C 언어에서 사용하는 대부분의 연산자가 지원된다.
    - 산술 연산자: +, -, *, /, %
    - 비교 연산자: <, <=, >, >=, ==, !=
    - 비트 연산자: &, |, ^, ~, <<, >>
    - 삼항 연산자: ?
    - 논리 연산자: !, &&, ||
    - 대입 연산자: =, +=, -=
  - 대부분의 연산자는 C언어의 우선순위 규칙과 동일하게 연산자 사용 가능
  - 이항 연산일 경우, 벡터 연산은 요소별 연산으로 진행
    - 예)

```
vec3 a = vec3(1.0, 2.0, 3.0);
vec3 b = vec3(0.1, 0.2, 0.3);
vec3 c = a + b;                    // = vec3(1.1, 2.2, 3.3)
vec3 d = a * b;                    // = vec3(0.1, 0.4, 0.9)
```

    - 예)

```
mat2 a = mat2(1., 2., 3., 4.);
mat2 b = mat2(10., 20., 30., 40.);
mat2 c = a * b;                    // = mat2( 1. * 10. + 3. * 20., 2. * 10. + 4. * 20.,
                                   //         1. * 30. + 3. * 40., 2. * 30. + 4. * 40.)
```

    - 예)

```
vec3 a = vec3(1.0, 2.0, 3.0);
mat3 m = mat3(1.0);
float s = 10.0;
vec3 b = s * a;                    // vec3(10.0, 20.0, 30.0)
vec3 c = a * s;                    // vec3(10.0, 20.0, 30.0)
mat3 m2 = s * m;                   // = mat3(10.0)
mat3 m3 = m * s;                   // = mat3(10.0)
```

GLSL 기본 문법

- 예) 행렬-벡터 곱셈 (벡터는 행렬의 오른쪽에서 곱셈 진행해야 함)

```
vec2 v = vec2(10., 20.);
mat2 M = mat2(1., 2., 3., 4.);
vec2 w = M * v;                    // = vec2(1. * 10. + 3. * 20., 2. * 10. + 4. * 20.)
```

$$Mv = \begin{bmatrix} m11 & m12 \\ m21 & m22 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v1 \\ v2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m11v1 + m12v2 \\ m21v1 + m22v2 \end{bmatrix}$$

GLSL 기본 문법

- 연산자
  - 비트 연산은 허용되지 않음
  - 스위즐(swizzling) 연산자 (C의 선택 연산자(.))
    - 행렬 및 벡터형으로부터 복수의 구성 요소들을 선택
    - [] 또는 . 을 이용하여 벡터 및 행렬 요소에 접근 가능
      - vec4 타입의 변수는 각각
      - x, y, z, w → 좌표값으로 사용할 때
      - 또는 r, g, b, a → 색상으로 사용할 때
      - 또는 s, t, p, q → 텍스처 좌표값으로 사용할 때

      의 요소로 사용가능하다
        - vec4 a = vec3 (0.0f, 1.0f, 2.0f, 3.0f); //--- a[2] == a.z == a.b == a.p → 아무 요소로나 사용 가능

      - 요소 선택자를 이용하여 재배치 및 복제, 일부 요소 수정 가능
        - vec4 a;
        - vec4 b = a.xyxx;
        - vec3 c = b.zwx;
        - vec4 d = a.xxyy + b.yxzy;

GLSL 기본 문법

- 한정자 (qualifier)
  - 한정자는 변수나 함수의 형식 인자의 앞에 붙여 해당 변수나 인자의 특성을 결정짓는다.
    - 세이더로 정보를 주고 받을 때는 변수를 사용:
      - Built-in 변수
      - 사용자 정의 변수: 선언할 때 가장 앞에 한정자를 붙여 변수의 종류를 결정한다.
    - Storage 한정자
      - const, in, out (varying), uniform
    - Layout 한정자
      - layout

- 한정자 (qualifier)
  - const
    - 상수
    - 세이더에 의해 실행 중에 변수가 변경되는 것을 방지
    - 사용 예)
      - const float one = 1.0;
      - const vec3 origin = vec3 (1.0, 2.0, 3.0);

GLSL 기본 문법

- 한정자 (qualifier)
  - in/out (varying)
    - 입력/출력 변수로 CPU로부터 데이터를 전달받고 각 세이더의 연산 결과를 전달할 때 사용
    - 입력 변수는 이전 세이더 스테이지와 연결, 출력 변수는 다음 세이더 스테이지로 연결
      - 연결된 스테이지의 입력-출력 변수는 같은 이름으로 사용
      - 3.0 이전에는 varying으로 사용, 그 이후 버전에서는 varying 대신 in/out으로 사용
      - in: 함수 내부에서 읽기만 가능, 기본 한정자
      - out: 함수 시작 시점에는 정의되지 않은 값을 가지며, 함수 종료 시점에 가진 값을 호출자에게 전달함 (함수 내부에서 호출자로의 쓰기만 가능)

    - 사용 예)
      - //--- vertex shader

```
in vec3 position;          //--- CPU로부터 받는 정점 속성
const vec4 red = vec4 (1.0, 0.0, 0.0, 0.0);
out vec3 color;            //--- 프래그먼트 세이더로 보내기

void main ()
{
    gl_Position = vec4 (position, 1.0);
    color = red;
}
```

      - //--- fragment shader

```
in vec3 color;             //--- 버텍스 세이더에서 받기
out vec4 outColor;         //--- 프레임 버퍼로 보내기

void main ()
{
    outColor = vec4 (color, 1.0);
}
```

GLSL 기본 문법

- 한정자 (qualifier)
  - uniform: CPU위의 응용프로그램에서 GPU 위의 세이더로 데이터를 전달하는 한 방법
    - 모든 단계의 세이더에서 접근 가능한 전역 변수
    - 필요한 세이더에서 전역 변수 형태로 선언한 후 사용
      - 세이더가 아니라 응용 프로그램에서 값을 설정할 수 있고, 세이더에서는 디폴트 값으로 초기화할 수 있다.
    - 리셋을 하거나 업데이트를 하기 전까지 그 값을 계속 유지

  - 사용 예)
    - 변수 선언
      - 변수 선언 시 타입, 이름과 함께 uniform을 추가한다.
        - 예) uniform vec4 outColor;
      - 사용되지 않는 uniform 변수는 오류를 발생시킬 수 있다.
    - 값 가져오기
      - uniform 변수의 이름을 사용하여 위치(index)를 가져와서 값을 수정 가능
      - GLuint **glGetUniformLocation** (GLuint program, const GLchar *name);
        - uniform 변수의 위치를 가져온다.
        - program: 프로그램 이름
        - name: uniform 변수 이름
        - 리턴값: uniform 변수 위치 (-1: 위치를 찾지 못함)
      - void **glUniform{1|2|3|4}{f|i|ui}** (GLuint location, {GLfloat v0, GLfloat v1, GLfloat v2, GLfloat v3});
        - 현재 프로그램에서 uniform 변수의 값을 명시
        - location: 수정할 uniform 변수의 위치
        - v0, v1, v2, v3: 사용될 uniform 변수 값

GLSL 기본 문법

- 사용 예) uniform 변수를 사용하여 색상 설정하기
  - 프래그먼트 세이더에서 uniform 변수 선언

```
#version 330 core
out vec4 FragColor;

uniform vec4 outColor;                    //--- 메인 프로그램에서 변수 설정

void main()
{
   FragColor = outColor;
}
```

  - 메인 프로그램에서 변수에 값 지정

```
float r=0.2, g=0.3, b=0.7;

//--- shaderProgram에서 "outColor"라는 이름의 uniform 변수의 위치를 가져온다.
int vColorLocation = glGetUniformLocation (shaderProgram, "outColor");

glUseProgram (shaderProgram);                                    //--- 사용 세이더 프로그램 설정

//--- vColorLocation에 (outColor) 이름의 uniform 변수의 값에 r, g, b, 1.0값을 저장
glUniform4f (vColorLocation,  r, g, b, 1.0);
```

GLSL 기본 문법

- 한정자 (qualifier)
  - layout
    - 세이더 간에 연결되고 CPU코드와도 통신이 필요할 때 사용
    - 1개 이상의 속성을 가진 데이터들이 저장된 버퍼의 속성 순서를 설정
    - 형태: layout (qualifier, qualifier2 = value, …) variable definition
      - 버텍스 세이더:
        - **layout** (location = 1) in vec3 vColor; //--- 버텍스 세이더 입력 1번 위치에 vColor 값 지정
        - **layout** (location = 2) in vec4 values[4]; //--- 버텍스 세이더 입력 2, 3, 4, 5번 위치에 values[0]~values[3] 지정
        - **glBindAttribLocation** 함수를 사용하여 layout으로 설정된 변수의 입력 위치 사용
      - 프래그먼트 세이더:
        - **layout** (location = 6) out vec4 outColor; //--- 프래그먼트 세이더에서 출력할 데이터 6번에 outColor 지정
        - **glBindFragDataLocation** 함수를 사용하여 layout으로 설정된 변수 사용
  - attribute
    - 버텍스 세이더에서만 사용할 수 있고, 버텍스 세이더에 각 정점 입력을 지정하기 위해 사용
    - openGL 응용 프로그램으로부터 값을 전달받을 수 있다.
    - position, normal, texture coordinate, color 등의 정보가 전달
    - built-in attribute들 (버텍스 세이더): gl_Color, gl_Normal, gl_Vertex, gl_Position, gl_MultiTexCoord2…

GLSL 기본 문법

- 사용 예) layout을 이용하여 2개의 속성 변수 설정하기
  - 버텍스 세이더에서 속성 설정

```
#version 330 core
layout (location = 0) in vec3 aPos;          //--- 위치 변수:  attribute position 0
layout (location = 1) in vec3 aColor;        //--- 컬러 변수:  attribute position 1

out vec3 ourColor;                           //--- 컬러를 fragment shader로 출력

void main()
{
	gl_Position = vec4(aPos, 1.0);
	ourColor = aColor;                       //--- 컬러를 ourColor에 설정
}
```

GLSL 기본 문법

- GLSL에 이미 지정되어 있는 built-in 변수들
  - 버텍스 세이더:
    - int gl_VertexID: 현재 프로세스되고 있는 버텍스의 인덱스값
    - vec4 gl_Position: 현 버텍스의 위치

  - 프래그먼트 세이더
    - vec4 gl_FragCoord: 윈도우 공간에서 프래그먼트의 좌표값
    - vec4 gl_FragColor: 프래그먼트 색상값
    - float gl_FragDepth: 프래그먼트 깊이 값

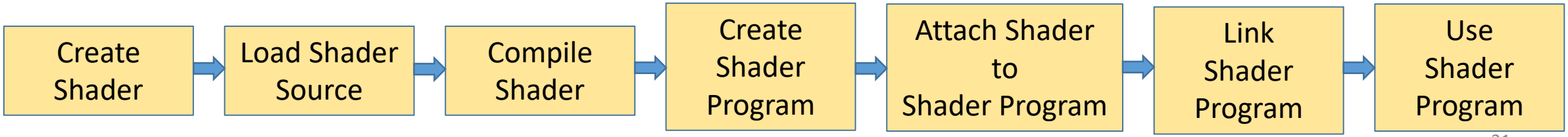
GLSL 기본 문법

- GLSL에 저장되어 있는 built-in 함수들
  - 삼각함수
    - sin, cos, tan
    - asin, acos, atan
  - 수학함수
    - pow, log, exp, sqrt, abs, max, min, round, mod, clamp, mix, step, smoothstep
      - mix (a, b, t): a + t(b-a)
      - step (limit, a): 0 when a < limit, 1 when a > limit
      - smoothstep (a0, a1, b): 0 when b < a0, 1 when b > a1
  - 기하학 계산 함수
    - length, distance, dot product, cross product, normalize

- 함수
  - 함수의 선언 및 정의는 C 문법과 거의 동일하게 지원, 사용자 정의 함수를 만들 수 있다.
  - C 문법과 거의 동일, 함수 overloading이 가능, 재귀 호출 할 수 없다, 포인터 타입이 없어 인자는 모두 call-by-value형태로 전달
- 그 외
  - 조건문, 반복문, 배열, 구조체 등은 C 문법과 거의 동일하게 지원됨

세이더 프로그램 만들기

- OpenGL 세이딩 언어 GLSL을 사용하여 세이더 작성
  - GLSL의 컴파일러는 openGL에 내장되어 있음
  - 세이더 프로그램을 만들려면
    1) 세이더 코드 작성: 필요한 세이더 코드 작성
       - 버텍스 세이더와 프래그먼트 세이더 메인 코드 작성 ➔ 버텍스 세이더 메인 코드, 프래그먼트 세이더 메인 코드 작성
    2) 세이더 객체 만들기: 작성한 버텍스 세이더, 프래그먼트 세이더 코드로 세이더 객체 만들기
       - 세이더 객체 만들기 ➔ 버텍스 세이더 객체와 프래그먼트 세이더 객체 만들기: **glCreateShader**
       - 세이더 객체에 세이더 코드 붙이기 ➔ 버텍스 세이더와 프래그먼트 세이더 코드를 각각 객체에 붙이기: **glShaderSource**
       - 세이더 객체 컴파일하기 ➔ 버텍스 세이더 객체와 프래그먼트 세이더 객체 컴파일하기: **glCompileShader**
    3) 세이더 프로그램 만들기: 버텍스 세이더 객체와 프래그먼트 세이더 객체를 링크하여 세이더 프로그램 만들기
       - 세이더 프로그램 생성 ➔ 세이더 객체를 링크 할 세이더 프로그램 생성: **glCreateProgram**
       - 세이더 프로그램에 세이더 객체들을 붙이기 ➔ 버텍스세이더와 프래그먼트세이더 객체를 세이더 프로그램에 붙이기: **glAttachShader**
       - 세이더 프로그램 링크 ➔ 세이더 프로그램을 링크: **glLinkProgram**
    4) 세이더 프로그램 활성화: 링크된 세이더 프로그램 사용하도록 세이더 프로그램 활성화 하기
       - 세이더 객체들이 링크된 세이더 프로그램을 활성화: **glUseProgram**



세이더 코드

- 세이더 코드 작성하기: Vertex shader
  - 버텍스 세이더: 버텍스를 배치하여 객체의 위치를 정한다.
    - 개별 정점의 처리를 하는 렌더링 파이프라인의 프로그래밍 가능한 첫번째 세이더 단계
    - 그리기 명령에 의해 정점 배열 객체에서 지정된 정점 속성 데이터가 제공된다.
    - 정점 스트림에서 단일 정점을 수신하고, 출력 정점 스트림에 단일 정점을 생성한다. 입력 정점에서 출력 정점으로 1:1 매핑
    - 투영 공간으로의 변환을 수행

```
#version 330 core
layout (location = 0) in vec3 vPos;
void main ()
{
        gl_Position = vec4 (vPos.x, vPos.y, vPos.z, 1.0);
}
```

세이더 코드

- 세이더 코드 작성하기: Fragment shader
  - 프래그먼트 세이더: 픽셀의 색상을 정하고 프레임 버퍼로 그 값을 전달한다.
    - 래스터화에 의해 생성된 fragment(조각)을 일련의 색상과 단일 깊이 값으로 처리하는 셰이더 단계
    - 각 픽셀에 대한 fragment 값이 생성: 위치, 정점당 출력 색상값 등이 포함
    - 프래그먼트 셰이더는 단일 프래그먼트를 입력으로 사용하고 단일 프래그먼트를 출력으로 생성

```
#version 330 core
out vec4 color;
void main ()
{
        color = vec4 (1.0, 0.0, 0.0, 1.0);
}
```

세이더 객체 만들기

- 세이더 객체 만들기: 버텍스 세이더 객체, 프래그먼트 세이더 객체를 각각 만든다.
  - 응용 프로그램에서 진행한다

```
GLchar * vertexSource;                    //--- 세이더 코드 저장할 문자열

//--- 버텍스 세이더 읽어 저장하고 컴파일 하기
//--- filetobuf: 사용자정의 함수로 텍스트를 읽어서 문자열에 저장하는 함수

vertexSource = filetobuf (“vertex.glsl");
vertexShader = glCreateShader (GL_VERTEX_SHADER);
glShaderSource (vertexShader, 1, &vertexSource, NULL);
glCompileShader (vertexShader);
```

세이더 프로그램 만들고 활성화 하기

- 만들어진 한 개 이상의 세이더 객체를 결합하여 한 개의 세이더 프로그램으로 만든다.
  - 세이더 객체를 만든 후 세이더 프로그램을 만든다.

```
GLuint shaderID;
shaderID = glCreateProgram();                    //--- 세이더 프로그램 만들기

glAttachShader (shaderID, vertexShader);         //--- 세이더 프로그램에 버텍스 세이더 붙이기
glAttachShader (shaderID, fragmentShader);       //--- 세이더 프로그램에 프래그먼트 세이더 붙이기

glLinkProgram (shaderID);                        //--- 세이더 프로그램 링크하기
```

- 세이더 프로그램 활성화

```
glUseProgram (shaderID);
```

함수 프로토타입

- 작성된 세이더 코드를 응용 프로그램에서 읽어와 런타임시에 세이더 소스코드를 동적으로 컴파일
  - 세이더 객체 생성
    - GLuint glCreateShader (GLenum shaderType);
      - 빈 세이더 객체를 생성하여 리턴한다.
        - shaderType: 생성할 세이더 타입
          - GL_VERTEX_SHADER, GL_FRAGMENT_SHADER, GL_COMPUTE_SHADER, GL_TESS_CONTROL_SHADER, GL_TESS_EVALUATION_SHADER, GL_GEOMETRY_SHADER
        - 리턴 값: 세이더 오브젝트
  - 세이더 코드 읽어오기
    - void glShaderSource (GLuint shader, GLsizei count, const GLchar **string, const GLint *length);
      - 세이더 소스코드를 세이더 객체로 전달해서 복사본을 유지한다.
        - shader: 세이더 오브젝트
        - count: string 배열의 구성요소의 개수
        - string: 소스코드가 저장되어 있는 배열 이름
        - length: 소스코드 크기
  - 세이더 컴파일
    - void glCompileShader (GLuint shader);
      - 세이더 객체에 포함된 소스코드를 컴파일한다.
        - shader: 컴파일 할 세이더 객체

함수 프로토타입

- 여러 세이더를 결합하여 한 개의 세이더 프로그램으로 링크
  - 세이더 프로그램 만들기
    - GLuint glCreateProgram ();
      - 세이더 객체에 붙일 프로그램 객체를 생성한다.
  - 세이더 객체들을 프로그램에 첨부
    - void glAttachShader (GLuint program, GLuint shader);
      - 세이더 객체를 프로그램 객체에 붙인다.
        - program: 세이더를 붙일 프로그램 객체
        - shader: 세이더 객체
  - 세이더 프로그램 링크
    - void glLinkProgram (GLuint program);
      - 프로그램 객체에 붙인 모든 세이더 객체를 링크한다.
        - program: 링크할 프로그램 객체
  - 세이더 객체 삭제하기
    - void glDeletShader (GLuint shader);
      - 세이더 객체를 삭제한다. 세이더가 프로그램 객체에 링크되면, 프로그램이 바이너리 코드를 보관하며 세이더는 더 이상 필요없게 된다.
        - shader: 삭제 할 세이더

함수 프로토타입

- 프로그램 활성화
  - 세이더 프로그램 사용
    - void glUseProgram (GLuint program);
      - 현재 렌더링 상태에 프로그램 객체를 활성화한다.
        - program: 실행 할 프로그램

함수 프로토타입

- 세이더 상태 가져오기
  - void glGetShaderiv (GLuint shader, GLenum pname, GLint *params);
    - 세이더 정보 가져오기
      - shader: 세이더 객체
      - pname: 객체 파라미터
        - GL_SHADER_TYPE, GL_DELETE_STATUS, GL_COMPILE_STATUS, GL_INFO_LOG_LENGTH, GL_SHADER_SOURCE_LENGTH)
      - params: 리턴 값
        - GL_SHADER_TYPE: 세이더 타입 리턴 (GL_VERTEX_SHADER / GL_FRAGMENT_SHADER)
        - GL_DELETE_STATUS: 세이더가 삭제됐으면 GL_TRUE, 아니면 GL_FALSE
        - GL_COMPILE_STATUS: 컴파일이 성공했으면 GL_TRUE, 아니면 GL_FALSE
        - GL_INFO_LOG_LENGTH: 세이더의 INFORMATION LOG 크기
        - GL_SHADER_SOURCE_LENGTH: 세이더 소스 크기
      - 에러 발생 시, GL_INVALID_VALUE, GL_INVALID_OPERATON, GL_INVALID_ENUM
  - void glGetShaderInfoLog (GLuint shader, GLsizei maxLength, GLsizei *length, GLchar *infoLog);
    - 세이더 객체의 information log 가져오기
      - shader: 세이더 객체
      - maxLength: information log 크기
      - length: infoLog 길이
      - infoLog: information log

함수 프로토타입

- 프로그램 상태 가져오기
  - void glGetProgramiv (GLuint program, GLenum pname, GLint *params);
    - 프로그램 객체 정보 가져오기
      - program: 프로그램
      - pname: 객체 파라미터
        - GL_DELETE_STATUS, GL_LINK_STATUS, GL_VALIDATE_STATUS, GL_INFO_LOG_LENGTH, GL_ATTACHED_SHADERS, GL_ACTIVE_ATOMIC_COUNTER_BUFFERS, GL_ACTIVE_ATTRIBUTES, GL_ACTIVE_ATTRIBUTE_MAX_LENGTH, GL_ACTIVE_UNIFORMS, GL_ACTIVE_UNIFORM_BLOCKS, GL_ACTIVE_UNIFORM_BLOCK_MAX_NAME_LENGTH, GL_ACTIVE_UNIFORM_MAX_LENGTH, GL_COMPUTE_WORK_GROUP_SIZE GL_PROGRAM_BINARY_LENGTH, GL_TRANSFORM_FEEDBACK_BUFFER_MODE, GL_TRANSFORM_FEEDBACK_VARYINGS, GL_TRANSFORM_FEEDBACK_VARYING_MAX_LENGTH, GL_GEOMETRY_VERTICES_OUT, GL_GEOMETRY_INPUT_TYPE, and GL_GEOMETRY_OUTPUT_TYPE.
      - params: 리턴 값
        - GL_DELETE_STATUS, GL_LINK_STATUS, GL_VALIDATE_STATUS, GL_ATTACHED_SHADERS…
  - void glGetProgramInfoLog (GLuint program, GLsizei maxLength, GLsizei *length, GLchar infoLog);
    - 프로그램 객체 information log 가져오기
      - program: 프로그램
      - maxLength: information log 크기
      - length: infoLog 길이
      - infoLog: information log
  - 이 함수들은 GL 2.0 이상에서 지원됨

세이더 사용하여 도형 그리기

- 세이더 프로그램을 만든 후, 세이더 프로그램을 사용하여 도형을 그린다.

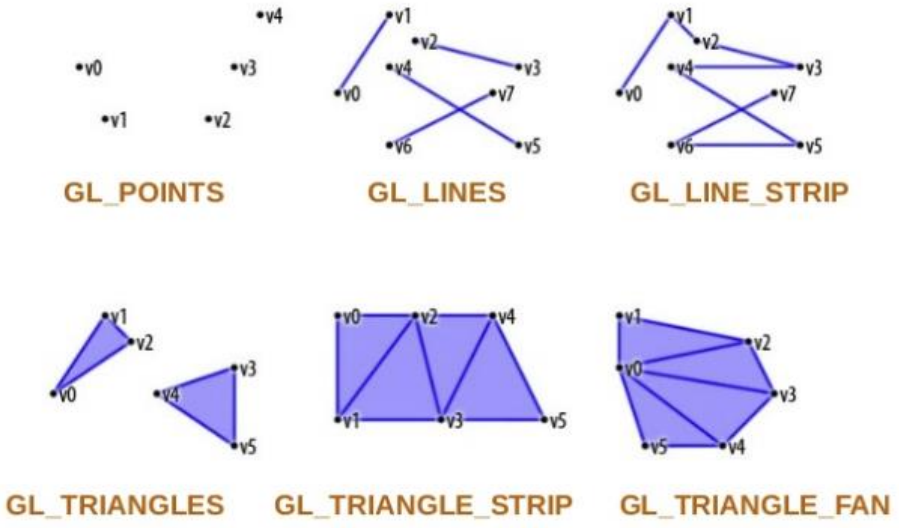
```
voidDrawScene ()
{
        //--- 필요한 작업 진행

        glUseProgram (shaderProgramID);

        glDrawArrays (GL_TRIANGLES, 0, 3);          //--- 도형 그리기

        glutSwapBuffers ();
}
```

함수 프로토타입

- 배열 데이터로부터 프리미티브 렌더링
  - void glDrawArrays (GLenum mode, GLint first, Glsizei count);
    - 배열 데이터로부터 프리미티브 렌더링 하기
      - mode: 렌더링 할 프리미티브의 종류
        - GL_POINTS, GL_LINE_STRIP, GL_LINE_LOOP, GL_LINES, GL_TRIANGLE_STRIP, GL_TRIANGLE_FAN, GL_TRIANGLES 등
      - first: 배열에서 도형의 시작 인덱스
      - count: 렌더링 할 인덱스 개수
    - 프리미티브 (primitive): 오픈지엘 렌더링의 기본 단위로 이용 가능한 가장 단순한 요소 → 점, 선, 삼각형
  - void glDrawElements (Glenum mode, Glsizei count, Glenum type, const Glvoid *indices);
    - 배열 데이터로부터 프리미티브 렌더링 하기, 배열 데이터의 인덱스를 사용
      - mode: 렌더링 할 프리미티브의 종류
        - GL_POINTS, GL_LINE_STRIP, GL_LINE_LOOP, GL_LINES, GL_TRIANGLE_STRIP, GL_TRIANGLE_FAN, GL_TRIANGLES 등
      - count: 렌더링할 요소의 개수
      - type: indices 값의 타입
        - GL_UNSIGNED_BYTE, GL_UNSIGNED_SHORT, 또는 GL_UNSIGNED_INT
      - indices: 바인딩 되는 버퍼의 데이터 저장소에 있는 배열의 첫 번째 인덱스 오프셋

Primitive types

- GL에서 그리기
  - glDrawArrays, glDrawElements 함수 등에서 수행됨
    - Points, lines, triangles들이 이 함수에 의해 그려진다.
  - Primitive types
    - Points: GL_POINTS
    - Line
      - Lines: GL_LINES
      - Line strips: GL_LINE_STRIP
      - Line loops: GL_LINE_LOOP
    - Triangle
      - Triangles: GL_TRIANGLES
      - Triangle strips: GL_TRIANGLE_STRIP
      - Triangle fans: GL_TRIANGLE_FAN



    - Geometry shader:
      - Adjacency:
        - Geometry shader에서 사용됨
        - 각 끝점이 대응하는 adjacent 버텍스를 가지고 있는 독립적인 조각
      - Lines with adjacency, Line strips with adjacency
      - Triangles with adjacency, Triangle strips with adjacency

함수 프로토타입

- 기본 속성 바꾸기
  - void glPointSize (GLfloat size);
    - 점 크기 설정
      - size: 점의 크기 (초기값: 1)
  - void glLineWidth (GLfloat width);
    - 선의 굵기 조정
      - width: 선의 굵기 (초기값: 1)
  - void glPolygonMode (GLenum face, GLenum mode);
    - 폴리곤 모드 설정
      - face: 모드를 설정할 면 (GL_FRONT_AND_BACK)
      - mode: 모드
        - GL_POINT, GL_LINE, GL_FILL

<세이더 사용하여 도형 그리기>

- 점 그리기
  - 고정된 좌표값의 한 개의 점을 고정된 색상으로 그리기
- 삼각형 그리기
  - 고정된 좌표값으로 고정된 색상으로 삼각형 그리기
- 삼각형 그리기
  - 메인 프로그램에서 좌표값을 정하여 버텍스 세이더로 보내서 고정된 색상으로 삼각형 그리기
- 삼각형 그리기
  - 좌표값과 색상을 메인프로그램에서 설정하기
  - 좌표값과 색상을 버텍스 세이더로 보내고, 버텍스 세이더에서 색상을 프래그먼트 세이더로 보내서 삼각형 그리기
  - 좌표값과 색상을 각각 버텍스 세이더와 프래그먼트 세이더로 보내서 삼각형 그리기

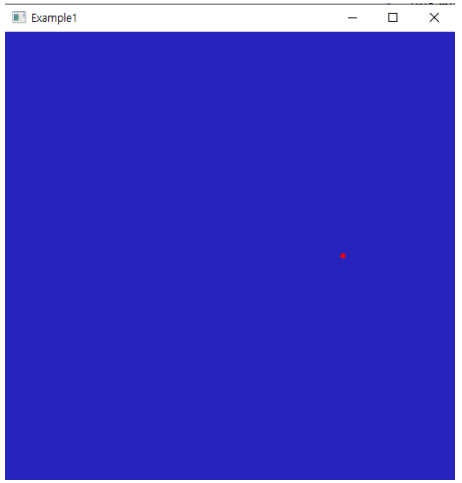
1. 첫 번째 세이더 프로그램: 화면에 점 찍기

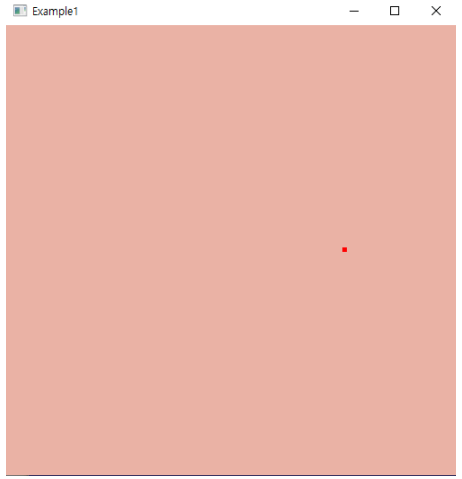
- *화면에 점 찍기: 세이더 내에 좌표값과 색상을 고정하여 사용하기*

- 배경색을 칠하고 화면에 고정된 위치에 점 찍기
  - 버텍스 세이더와 프래그먼트 세이더는 각각 별개의 파일로 저장하여 사용
    - 버텍스 세이더: vertex.glsl
    - 프래그먼트 세이더: fragment.glsl
      - 파일의 확장자는 다르게 설정 가능 (우리는 glsl로 설정하기로 함)

  - 세이더 코드 작성하기
    - 버텍스 세이더: 점의 좌표값 설정 ➔ (0.5, 0.0, 0.0)
    - 프래그먼트 세이더: 고정 색상 설정 ➔ (1.0, 0.0, 0.0)

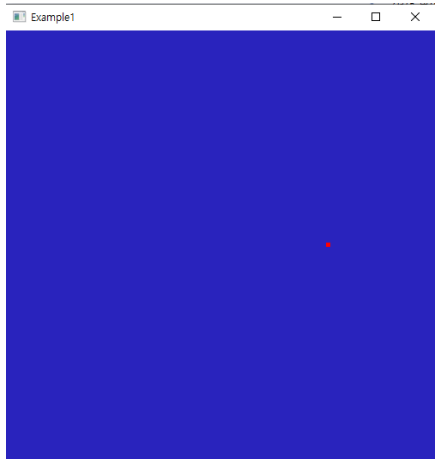
  - 메인 프로그램 작성하기
    - 화면 띄우기
    - 버텍스 세이더 객체와 프래그먼트 세이더 객체 만들기
    - 세이더 프로그램 만들어 두 세이더 객체 연결하기
    - 출력 콜백 함수에서 그리기 함수 호출하여 점 찍기





세이더 사용하여 점 찍기: 메인 함수

```
//--- 필요한 헤더파일 선언
//--- 아래 5개 함수는 사용자 정의 함수 임
void make_vertexShaders ();
void make_fragmentShaders ();
GLuint make_shaderProgram ();
GLvoid drawScene ();
GLvoid Reshape ( int w, int h );

//--- 필요한 변수 선언
GLint width, height;
GLuint shaderProgramID;  //--- 세이더 프로그램 이름
GLuint vertexShader;     //--- 버텍스 세이더 객체
GLuint fragmentShader;   //--- 프래그먼트 세이더 객체

//--- 메인 함수
void main (int argc, char** argv)          //--- 윈도우 출력하고 콜백함수 설정
{
        width = 500;
        height = 500;

        //--- 윈도우 생성하기
        glutInit(&argc, argv);
        glutInitDisplayMode (GLUT_DOUBLE | GLUT_RGBA);
        glutInitWindowPosition (100, 100);
        glutInitWindowSize (width, height);
        glutCreateWindow ("Example1");

        //--- GLEW 초기화하기
        glewExperimental = GL_TRUE;
        glewInit ();

        //--- 세이더 읽어와서 세이더 프로그램 만들기
        make_vertexShaders ();          //--- 버텍스 세이더 만들기
        make_fragmentShaders ();        //--- 프래그먼트 세이더 만들기
        shaderProgramID = make_shaderProgram ();
                                        //--- 세이더 프로그램 만들기

        glutDisplayFunc (drawScene);    //--- 출력 콜백 함수
        glutReshapeFunc (Reshape);

        glutMainLoop ();
}
```



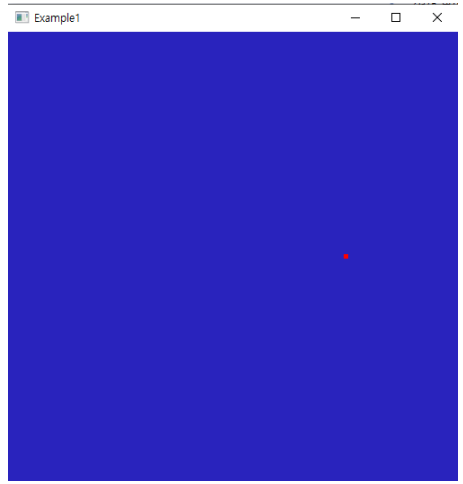
메인/출력 함수 만들기

```
//--- 출력 콜백 함수

GLvoid drawScene ()                                  //--- 콜백 함수: 그리기 콜백 함수
{
        GLfloat rColor, gColor, bColor;

        rColor = gColor = 0.0;
        bColor = 1.0;                                //--- 배경색을 파랑색으로 설정
        glClearColor(rColor, gColor, bColor, 1.0f);
        glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);

        glUseProgram (shaderID);

        glPointSize(5.0);
        glDrawArrays (GL_POINTS, 0, 1);              //--- 렌더링하기: 0번 인덱스에서 1개의 버텍스를 사용하여 점 그리기

        glutSwapBuffers();                           // 화면에 출력하기
}

//--- 다시그리기 콜백 함수

GLvoid Reshape ( int w, int h )                      //--- 콜백 함수: 다시 그리기 콜백 함수
{
        glViewport ( 0, 0, w, h );
}
```

세이더 코드

- 버텍스 세이더: *vertex.glsl 파일로 저장*

```
#version 330 core

void main()
{
    gl_Position = vec4(0.5, 0.0, 0.0, 1.0);          //--- (0.5, 0.0, 0.0) 으로 좌표값 고정
}
```



- 프래그먼트 세이더: *fragment.glsl 파일로 저장*

```
#version 330 core
out vec4 color;

void main ()
{
        color = vec4 (1.0, 0.0, 0.0, 1.0);          //--- 빨강색으로 색상 고정
}
```

세이더 객체만들기

```
//--- 버텍스 세이더 객체 만들기

void make_vertexShaders ()
{
    GLchar * vertexSource;

    //--- 버텍스 세이더 읽어 저장하고 컴파일 하기
    //--- filetobuf: 사용자정의 함수로 텍스트를 읽어서 문자열에 저장하는 함수

    vertexSource = filetobuf (“vertex.glsl");
    vertexShader = glCreateShader (GL_VERTEX_SHADER);
    glShaderSource (vertexShader, 1, &vertexSource, NULL);
    glCompileShader (vertexShader);

    GLint result;
    GLchar errorLog[512];
    glGetShaderiv (vertexShader, GL_COMPILE_STATUS, &result);
    If (!result)
    {
        glGetShaderInfoLog (vertexShader, 512, NULL, errorLog);
        std::cerr << “ERROR: vertex shader 컴파일 실패\n” << errorLog << std:: endl;
        return;
    }
}
```

```
//--- 프래그먼트 세이더 객체 만들기

void make_fragmentShaders ()
{
    GLchar  *fragmentSource;

    //--- 프래그먼트 세이더 읽어 저장하고 컴파일하기
    fragmentSource = filetobuf (“fragment.glsl”);    // 프래그세이더 읽어오기
    fragmentShader = glCreateShader (GL_FRAGMENT_SHADER);
    glShaderSource (fragmentShader, 1, &fragmentSource, NULL);
    glCompileShader (fragmentShader);

    GLint result;
    GLchar errorLog[512];
    glGetShaderiv (fragmentShader, GL_COMPILE_STATUS, &result);
    if (!result)
    {
        glGetShaderInfoLog (fragmentShader, 512, NULL, errorLog);
        std:: cerr << "ERROR: frag_shader 컴파일 실패\n" << errorLog << std:: endl;
        return;
    }
}
```

세이더 프로그램 만들기

```
//--- 세이더 프로그램 만들고 세이더 객체 링크하기

GLuint make_shaderProgram ()
{
    GLuint shaderID;
    shaderID = glCreateProgram();                          //--- 세이더 프로그램 만들기

    glAttachShader (shaderID, vertexShader);               //--- 세이더 프로그램에 버텍스 세이더 붙이기
    glAttachShader (shaderID, fragmentShader);             //--- 세이더 프로그램에 프래그먼트 세이더 붙이기

    glLinkProgram (shaderID);                              //--- 세이더 프로그램 링크하기

    glDeleteShader (vertexShader);                         //--- 세이더 객체를 세이더 프로그램에 링크했음으로, 세이더 객체 자체는 삭제 가능
    glDeleteShader (fragmentShader);

    glGetProgramiv (shaderID, GL_LINK_STATUS, &result);    // ---세이더가 잘 연결되었는지 체크하기
    if (!result) {
        glGetProgramInfoLog (shaderID, 512, NULL, errorLog);
        std::cerr << "ERROR: shader program 연결 실패\n" << errorLog << std::endl;
        return false;
    }

    glUseProgram (shaderID);                               //--- 만들어진 세이더 프로그램 사용하기
                                                           //--- 여러 개의 세이더프로그램 만들 수 있고, 그 중 한개의 프로그램을 사용하려면
                                                           //--- glUseProgram 함수를 호출하여 사용 할 특정 프로그램을 지정한다.
                                                           //--- 사용하기 직전에 호출할 수 있다.
    return shaderID;
}
```

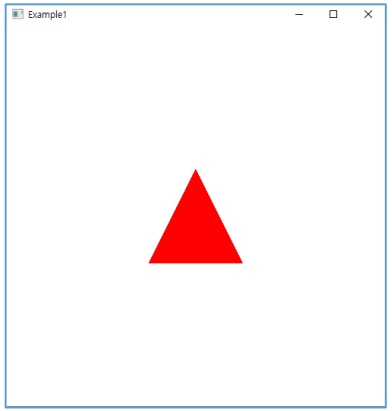
파일에서 문자열 읽어오기 샘플

- 파일에서 문자열 읽어오기 샘플 코드 (워밍업에서 구현한 본인의 코드 사용 가능)

```
#define _CRT_SECURE_NO_WARNINGS       //--- 프로그램 맨 앞에 선언할 것
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
char* filetobuf (const char *file)
{
	FILE *fptr;
	long length;
	char *buf;

	fptr = fopen (file, "rb");                  // Open file for reading
	if (!fptr)                                  // Return NULL on failure
		return NULL;
	fseek (fptr, 0, SEEK_END);                  // Seek to the end of the file
	length = ftell (fptr);                      // Find out how many bytes into the file we are
	buf = (char*) malloc (length+1);            // Allocate a buffer for the entire length of the file and a null terminator
	fseek (fptr, 0, SEEK_SET);                  // Go back to the beginning of the file
	fread (buf, length, 1, fptr);               // Read the contents of the file in to the buffer
	fclose (fptr);                              // Close the file
	buf[length] = 0;                            // Null terminator

	return buf;                                 // Return the buffer
}
```

2. 두번째 세이더 프로그램: 세이더 사용하여 삼각형 그리기 (1)

- *중앙에 빨간색 삼각형 그리기:*
  - *버텍스 세이더: 세이더 내에서 삼각형의 좌표값을 직접 설정*
  - *프래그먼트 세이더: 빨강색 고정하여 사용하기*



- 화면 중앙에 삼각형 그리기
  - 버텍스 세이더: 삼각형 좌표값 설정
  - 프래그먼트 세이더: 도형 색상 설정

- 버텍스 세이더와 프래그먼트 세이더는 각각 별개의 파일로 저장하여 사용
  - 버텍스 세이더: vertex.glsl
  - 프래그먼트 세이더: fragment.glsl

- 메인 프로그램 작성하기
  - 화면 띄우기
  - 버텍스 세이더 객체와 프래그먼트 세이더 객체 만들기
  - 세이더 프로그램 만들어 두 세이더 객체 연결하기
  - 출력 콜백 함수에서 그리기 함수 호출하여 삼각형 그리기

세이더 사용하여 삼각형 그리기

```
//--- 응용 프로그램의 삼각형 그리기 함수: 메인 함수, 그리기 함수
//--- 필요한 헤더파일 선언
//--- 아래 5개 함수는 사용자 정의 함수 임
void make_vertexShaders ();
void make_fragmentShaders ();
GLuint make_shaderProgram ();
GLvoid drawScene ();
GLvoid Reshape ( int w, int h );

//--- 필요한 변수 선언
GLint width, height;
GLuint shaderProgramID;  //--- 세이더 프로그램 이름
GLuint vertexShader;     //--- 버텍스 세이더 객체
GLuint fragmentShader;   //--- 프래그먼트 세이더 객체

//--- 메인 함수
void main (int argc, char** argv)          //--- 윈도우 출력하고 콜백함수 설정
{
        width = 500;
        height = 500;
        //--- 윈도우 생성하기
        glutInit(&argc, argv);
        glutInitDisplayMode (GLUT_DOUBLE | GLUT_RGBA);
        glutInitWindowPosition (100, 100);
        glutInitWindowSize (width, height);
        glutCreateWindow ("Example1");
        //--- GLEW 초기화하기
        glewExperimental = GL_TRUE;
        glewInit ();

        //--- 세이더 읽어와서 세이더 프로그램 만들기
        make_vertexShaders ();          //--- 버텍스 세이더 만들기
        make_fragmentShaders ();        //--- 프래그먼트 세이더 만들기
        shaderProgramID = make_shaderProgram ();
                                        //--- 세이더 프로그램 만들기

        glutDisplayFunc (drawScene);    //--- 출력 콜백 함수
        glutReshapeFunc (Reshape);

        glutMainLoop ();
}
```

세이더 사용하여 삼각형 그리기

```
//--- 출력 콜백 함수
void DrawScene ()                          //--- glutDisplayFunc()함수로 등록한 그리기 콜백 함수
{
        GLfloat rColor, gColor, bColor;

        rColor = nColor = 0.0;
        gColor = 1.0;                                   //--- 배경색을 초록색으로 설정
        glClearColor(rColor, gColor, bColor, 1.0f);
        glClear (GL_COLOR_BUFFER_BIT);

        glUseProgram (shaderProgramID);

        glDrawArrays (GL_TRIANGLES, 0, 3);                      //--- 삼각형 그리기: 0번 인덱스부터 3개의 버텍스를 사용하여 삼각형 그리기

        glutSwapBuffers();

}

//--- 다시그리기 콜백 함수
GLvoid Reshape ( int w, int h )                 //--- 콜백 함수: 다시 그리기 콜백 함수
{
        glViewport ( 0, 0, w, h );
}
```

세이더 사용하여 삼각형 그리기

```
//--- 버텍스 세이더 객체 만들기

void make_vertexShaders ()
{
    GLchar * vertexSource;

    vertexSource = filetobuf (“vertex.glsl");   //--- 버텍스세이더 읽어오기

      //--- 버텍스 세이더 읽어 저장하고 컴파일 하기
      vertexShader = glCreateShader (GL_VERTEX_SHADER);
      glShaderSource (vertexShader, 1, &vertexSource, NULL);
      glCompileShader (vertexShader);

      GLint result;
      GLchar errorLog[512];
      glGetShaderiv (vertexShader, GL_COMPILE_STATUS, &result);
      if (!result)
      {
          glGetShaderInfoLog (vertexShader, 512, NULL, errorLog);
          std::cerr << "ERROR: vertex shader error\n" << errorLog << std:: endl;
          return;
      }
}
```

```
//--- 프레그먼트 세이더  객체 만들기

    void make_fragmentShaders ()
    {
          GLchar  *fragmentSource;

          fragmentSource = filetobuf (“fragment.glsl”);    //--- 프래그먼트세이더 읽어오기

          //--- 프래그먼트 세이더 읽어 저장하고 컴파일하기
          fragmentShader = glCreateShader (GL_FRAGMENT_SHADER);
          glShaderSource (fragmentShader, 1, &fragmentSource, NULL);
          glCompileShader (fragmentShader);

          glGetShaderiv (fragmentShader, GL_COMPILE_STATUS, &result);
          if (!result)
          {
                  glGetShaderInfoLog (fragmentShader, 512, NULL, errorLog);
                   std:: cerr << "ERROR: fragment shader error\n" << errorLog << std:: endl;
                  return;
          }
    }
```

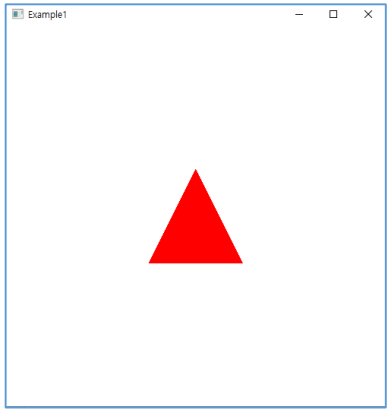
세이더 사용하여 삼각형 그리기

```
//--- 세이더 프로그램 만들고 세이더 객체 링크하기

GLuint make_shaderProgram
{
    GLuint shaderID = glCreateProgram();                    //--- 세이더 프로그램 만들기

    glAttachShader (shaderID, vertexShader);                //--- 세이더 프로그램에 버텍스 세이더 붙이기
    glAttachShader (shaderID, fragmentShader);              //--- 세이더 프로그램에 프래그먼트 세이더 붙이기

    glLinkProgram (shaderID);                               //--- 세이더 프로그램 링크하기

    glDeleteShader (vertexShader);                          //--- 세이더 프로그램에 링크하여 세이더 객체 자체는 삭제 가능
    glDeleteShader (fragmentShader);

    glGetProgramiv (shaderID, GL_LINK_STATUS, &result);     // ---세이더가 잘 연결되었는지 체크하기
    if (!result) {
            glGetProgramInfoLog (shaderID, 512, NULL, errorLog);
            cerr << "ERROR: shader program 연결 실패\n" << errorLog << endl;
            return false;
    }

    glUseProgram (shaderID);

    return shaderID;
}
```

세이더 사용하여 삼각형 그리기

- 버텍스 세이더: *vertex.glsl 파일로 저장*

```
#version 330 core

void main()
{
        const vec4 vertex[3] = vec4[3]    (vec4(-0.25, -0.25, 0.5, 1.0),
                                           vec4(0.25, -0.25, 0.5, 1.0),
                                           vec4(0.0, 0.25, 0.5, 1.0));

        gl_Position = vertex [gl_VertexID];
}
```



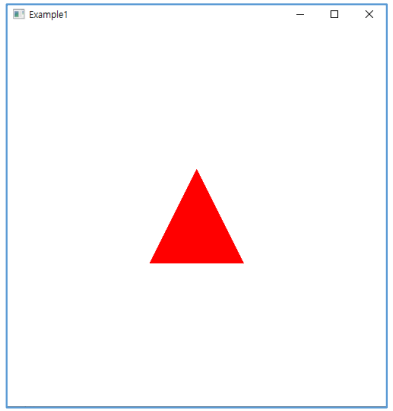
- gl_VertexID: 내장 변수로 해당 시점에 처리될 버텍스의 인덱스
  - gl_VertexID 입력값은 glDrawArrays()에 입력으로 들어간 첫 번째 인자값의 프리미티브 형태에 따라 두번째 인자값부터 시작해서 세 번째 인자인 count만큼의 버텍스까지 한 번에 하나씩 증가한다.
  - gl_VertexID의 값에 기반하여 각 버텍스에 다른 위치를 할당할 수 있다.

- gl_Position: 내장 변수로 해당 시점에 그릴 버텍스의 출력위치
  vec4 (0.0, 0.0, 0.5, 1.0)을 할당하면 화면의 중앙에 위치한다.

세이더 사용하여 삼각형 그리기

- 프래그먼트 세이더: *fragment.glsl 파일로 저장*

```
#version 330 core
out vec4 color;

void main ()
{
        color = vec4 (1.0, 0.0, 0.0, 1.0);
}
```

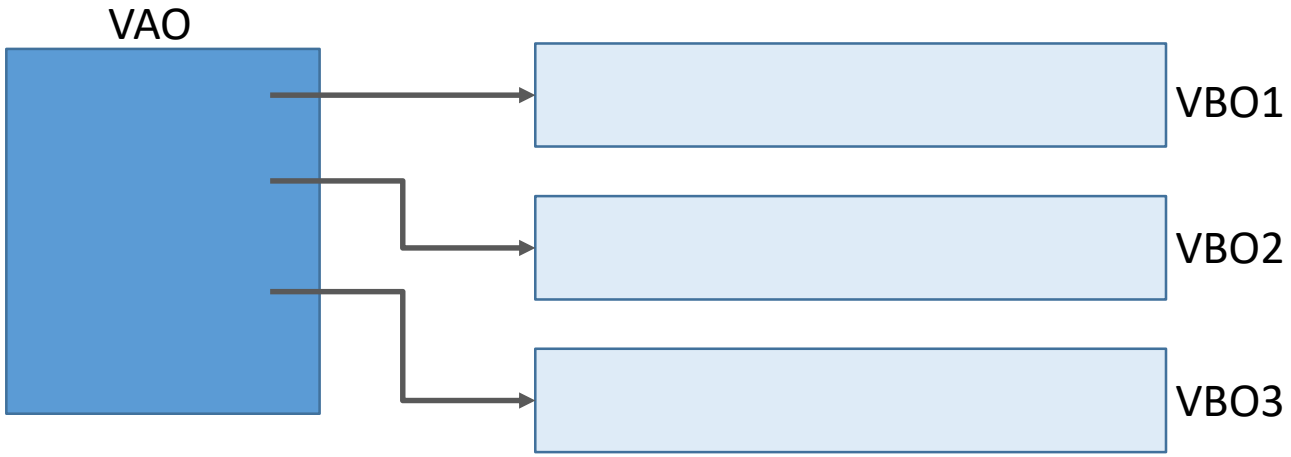


3. 세번째 세이더 프로그램: 세이더 사용하여 삼각형 그리기 (2)

- *응용 프로그램에서 버텍스 데이터를 세이더로 보내서 삼각형 그리기*
  - 위치, 색상 등의 속성을 세이더에서 고정하지 않고, 버퍼에 저장하여 세이더로 보내기

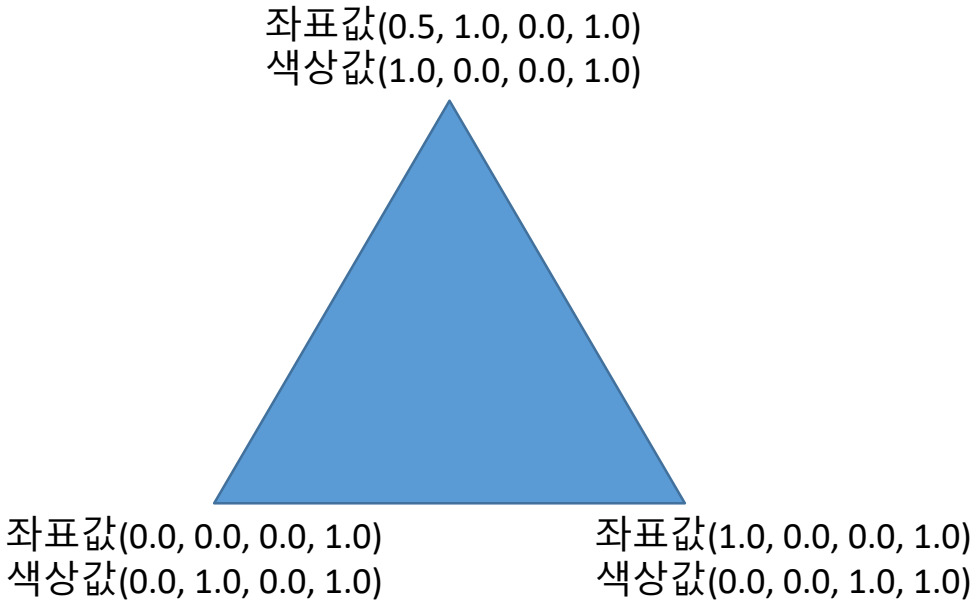
- **Vertex Buffer Objects (VBO)**
  - 버텍스 데이터를 GPU 메모리에 복사하기 위해 사용되는 배열
  - GL buffer object는 이 버텍스 배열을 저장, 초기화, 렌더링을 할 수 있게 한다.

- **Vertex Array Object (VAO)**
  - 하나의 오브젝트를 구성하는 속성들을 개별 VBO에 저장하고 하나의 VAO로 묶어서 사용한다.
    - VAO에는 버텍스 데이터가 직접 저장되는 것이 아니라 연결 정보만 저장
    - VAO는 VBO에 저장된 데이터 타입과 어떤 속성 변수가 데이터를 가져가게 되는지 저장



Vertex Specifications

- 버텍스의 속성들
  - 위치 (position)
  - 색상 (color)
  - 텍스처 좌표 (texture coordinates)
  - 그 외 데이터 들

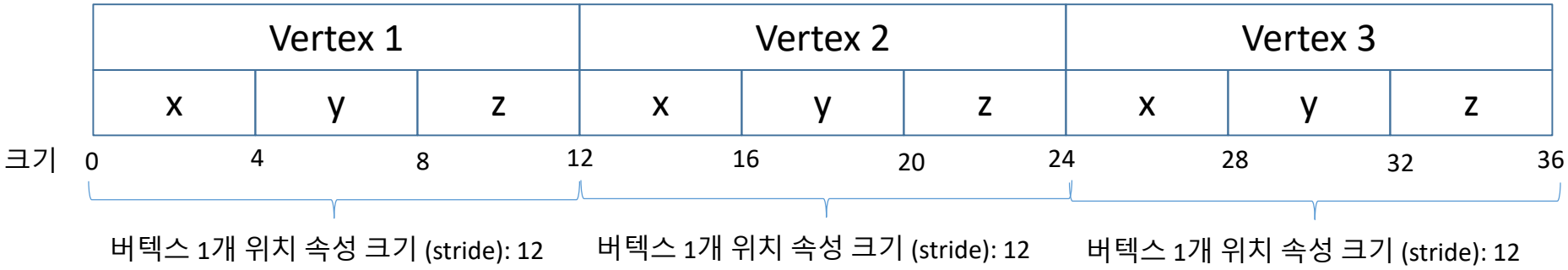



```
//--- vertex attribute: position
const float vertexPosition [] =
{
	0.5, 1.0, 0.0,
	0.0, 0.0, 0.0,
	1.0, 0.0, 0.0
};

//--- vertex attribute: color
const float vertexColor [] =
{
	1.0, 0.0, 0.0,
	0.0, 1.0, 0.0,
	0.0, 0.0, 1.0
};

// 두 속성을 한 개의 배열에 저장 ----------------
//--- vertex attributes: position color
const float vertexData [] =
{
	0.5, 1.0, 0.0,		1.0, 0.0, 0.0,
	0.0, 0.0, 0.0,		0.0, 1.0, 0.0,
	1.0, 0.0, 0.0,		0.0, 0.0, 1.0
};
```

Vertex Attribute

- 버텍스 속성 연결
  - 입력 데이터의 어느 부분이 vertex shader의 어떠한 정점 속성과 맞는지 직접 지정해야 함

  - 예) 삼각형의 위치 값
    - 한 개의 버텍스는 3개의 실수 값 (x, y, z 좌표값)으로 구성
    - 각 실수값은 4바이트로 구성
    - 즉, 한 개의 버텍스 속성 값(위치)은 12 바이트 (3개 실수 * 4바이트)로 구성



  - 위의 속성 값을 설정해야 함

Vertex Buffer Object

- **Vertex Buffer Object (VBO)**
  - 버텍스 데이터를 저장하기 위한 메모리 버퍼
    - 버텍스의 다양한 속성들을 저장한다.
    - Position, Normal, Vector, Color 등
    - VBO당 한 개 또는 여러 개의 속성을 저장할 수 있다.
  - 대용량 자료를 GPU에 보내줄 수 있음
  - 버퍼를 생성하고 바인드하고 실제 데이터를 넣어줌

```
GLuint VBO;
glGenBuffers (1, &VBO);                                  //--- 버퍼 id를 생성
glBindBuffer (GL_ARRAY_BUFFER, VBO);                     //--- 버퍼 객체에 저장할 데이터 타입 지정
                                                         //--- 바인드 후에 호출하는 모든 버퍼는 바인딩 된 버퍼를 사용한다.
glBufferData (GL_ARRAY_BUFFER, sizeof (vertexPosition), vertexPosition, GL_STATIC_DRAW);
                                                         //--- 사용자가 정의한 데이터를 현재 바인딩된 버퍼에 복사한다.
```

  - 현재 바인드된 버퍼가 몇 번째 attribute 버퍼인지 어떤 속성을 갖는지 알려주기위해 속성 포인터 설정하고 사용

```
glVertexAttribPointer (0, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 0, 0);
glEnableVertexAttribArray (0);
```

Vertex Array Object

- **Vertex Array Object (VAO)**
  - 한 개 또는 그 이상의 VBO를 포함하는 오브젝트로 렌더링할 완전한 객체의 정보들을 저장한다.
    - 하나의 오브젝트를 구성하는 위치, 색상같은 vertex 속성들을 개별 Vertex Buffer Object(VBO)에 저장하고 하나의 VAO로 묶는다.
    - 하나의 VAO에 여러 개의 VBO를 가질 수 있다.
  - VAO에는 버텍스 데이터가 직접 저장되는게 아니라 연결 정보만 저장
    - VAO는 VBO에 저장된 데이터 타입과 어떤 속성 변수가 데이터를 가져가게 되는지 저장
  - 보통 하나의 매쉬마다 하나의 VAO를 사용함

  - VAO를 생성하고 바인드 함

```
GLuint VAO;
glGenVertexArrays (1, & VAO);          //--- 버텍스 array 생성
glBindVertexArray (VAO);               //--- VAO를 가진다는 의미이고 아직 실제 데이터는 없음
```

함수 프로토타입

- Vertex Array Object (VAO), Vertex Buffer Object (VBO) 생성 및 바인딩 함수
  - void glGenBuffers (GLizei n, GLuint *buffers);
    - 버퍼 오브젝트 (VBO) 이름 생성
      - n: 생성할 이름 개수
      - buffers: 버퍼 오브젝트 이름을 가리키는 배열
  - void glBindBuffer (GLenum target, GLuint buffer);
    - 버퍼 오브젝트를 바인드 한다.
      - Target: 바인드할 버퍼 타겟 타입
        - GL_ARRAY_BUFFER: 버텍스 속성
        - GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER: 버텍스 배열 인덱스
        - GL_TEXTURE_BUFFER: 텍스처 데이터 버퍼
      - Buffer: 버퍼 오브젝트 이름
  - void glBufferData (GLenum target, GLsizeiptr size, const GLvoid *data, GLenum usage);
    - 버퍼 오브젝트의 데이터를 생성
      - target: 바인드할 버퍼 타겟 타입
        - GL_ARRAY_BUFFER, GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER, GL_TEXTURE_BUFFER…
      - size: 버퍼 오브젝트의 크기
      - data: 저장할 데이터를 가리키는 포인터
      - usage: 저장한 데이터를 사용할 패턴
        - GL_STATIC_DRAW: 한번 버텍스 데이터 업데이트 후 변경이 없는 경우 사용
        - GL_STREAM_DRAW: 데이터가 그려질 때마다 변경
        - GL_DYNAMIC_DRAW: 버텍스 데이터가 자주 바뀌는 경우 (애니메이션), 버텍스 데이터가 바뀔 때마다 다시 업로드 된다

함수 프로토타입

- void glGenVertexArrays (GLsizei n, GLuint *arrays);
  - 버텍스 배열 오브젝트 (VAO) 이름 생성
    - n: 생성할 VAO 개수
    - arrays: VAO 저장할 배열 이름
- void glBindVertexArray (GLuint array);
  - VAO를 바인드한다.
    - array: 바인드할 버텍스 배열의 이름

함수 프로토타입

- 정점 속성 설정 함수
  - void glVertexAttribPointer (GLuint index, GLint size, GLenum type, GLboolean normalized, GLsizei stride, const GLvoid *pointer)
    - 버텍스 속성 데이터의 배열을 정의
      - index: 설정할 vertex 속성의 인덱스 값을 지정. (세이더에서 layout (location = 0) → 속성의 위치가 0번째)
      - size: 버텍스 속성의 크기 (버텍스 속성이 vec3라면 3)
      - type: 데이터 타입 (vec3 라면 GL_FLOAT)
      - normalized: 데이터를 정규화할지 (GL_TRUE: [0, 1] 사이의 값으로 정규화, GL_FALSE: 그대로 사용)
      - stride: 연이은 vertex 속성 세트들 사이의 공백 (값이 공백없이 채워져 있다면 0, 1개 이상의 속성들이 저장되어 있다면 크기를 설정. 예) 버텍스 vec3라면 다음 버텍스 위치는 12바이트)
      - pointer: 데이터가 시작하는 위치의 오프셋 값
    - 각 vertex 속성은 VBO에 의해 관리되는 메모리로부터 데이터를 받는다.
    - 데이터를 받을 VBO (하나가 여러 VBO를 가질 수도 있음)는 glVertexAttribPointer 함수를 호출할 때 GL_ARRAY_BUFFER에 현재 바인딩된 VBO로 결정
    - 사용 예) glVertexAttribPointer (0, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 3 * sizeof(float), (void*)0);
  - void glEnableVertexAttribArray (GLuint index);
    - 버텍스 속성 배열을 사용하도록 한다.
      - index: 버텍스 속성 인덱스
    - 사용 예) glEnableVertexAttribArray (0);

1) Vertex Attribute 1개 인 경우

- 한 개의 VBO와 한 개의 VAO 사용하기 예)

- Vertex shader

```
#version 330 core

layout (location = 0) in vec3 vPos;              //--- 1개의 속성 - attribute로 설정된 위치 속성: 인덱스 0

void main()
{
        gl_Position = vec4 (vPos.x, vPos.y, vPos.z, 1.0);

}
```

- Fragment shader

```
#version 330 core

out vec4 FragColor;                              //--- 출력할 객체의 색상

void main()
{
        FragColor = vec4 (1.0f, 0.5f, 0.3f, 1.0f);
}
```

Vertex Attribute 1개 인 경우

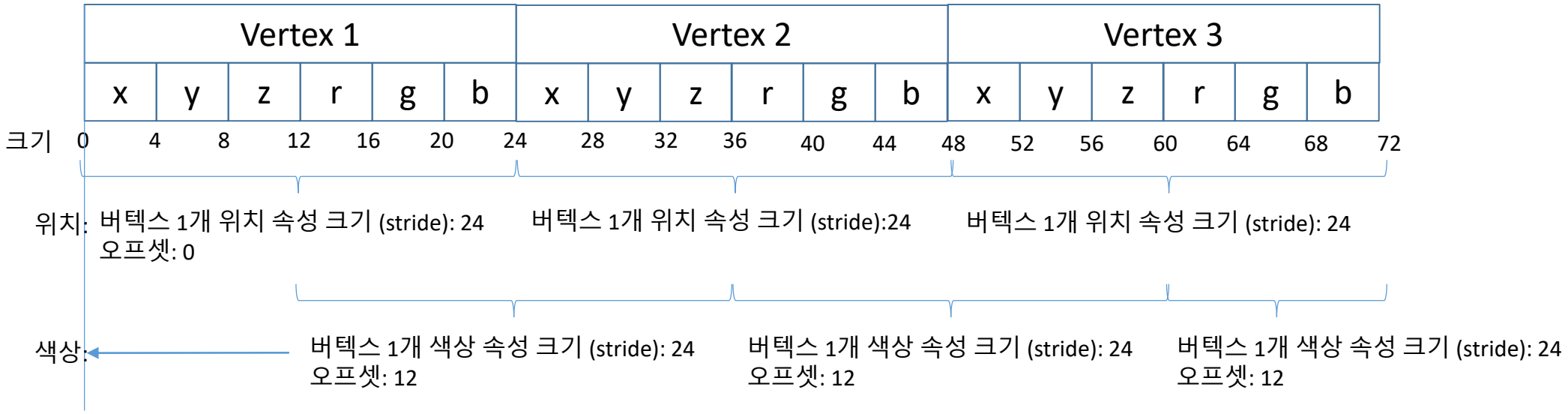
- 버텍스 위치 속성 설정하기 응용 프로그램 예)

```
//--- 변수 선언
GLuint VAO, VBO_position;

GLvoid InitBuffer ()
{
	//--- VAO와 VBO 객체 생성
	glGenVertexArrays (1, &VAO);
	glGenBuffers (1, &VBO_position);

	//--- 사용할 VAO 바인딩
	glBindVertexArray (VAO);

	//--- vertex positions 저장을 위한 VBO 바인딩.
	glBindBuffer (GL_ARRAY_BUFFER, VBO_position);

	//--- vertex positions 데이터 입력.
	glBufferData (GL_ARRAY_BUFFER, sizeof (vertexPosition), vertexPosition, GL_STATIC_DRAW);

	//--- 현재 바인딩되어있는 VBO를 0번째 attribute에 가져오도록 지정하고 그 인덱스의 attribute를 활성화
	glVertexAttribPointer (0, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 3*sizeof(float), 0);
	glEnableVertexAttribArray (0);
}
```

```
const float vertexPosition [] =
{
	0.5, 1.0, 0.0,
	0.0, 0.0, 0.0,
	1.0, 0.0, 0.0
};
const float vertexColor [] =
{
	1.0, 0.0, 0.0,
	0.0, 1.0, 0.0,
	0.0, 0.0, 1.0
};

// 위치와 색상을 한 개의 데이터로 저장
const float vertexData [] =
{
	0.5, 1.0, 0.0,		1.0, 0.0, 0.0,
	0.0, 0.0, 0.0,		0.0, 1.0, 0.0,
	1.0, 0.0, 0.0,		0.0, 0.0, 1.0
};
```

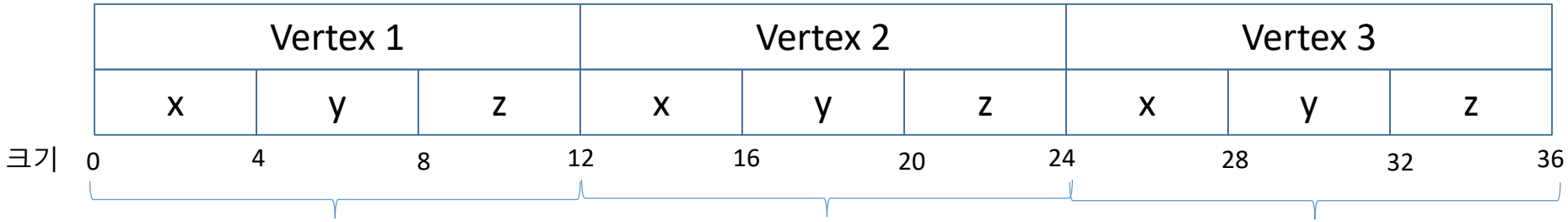
2) Vertex Attribute 2개인 경우

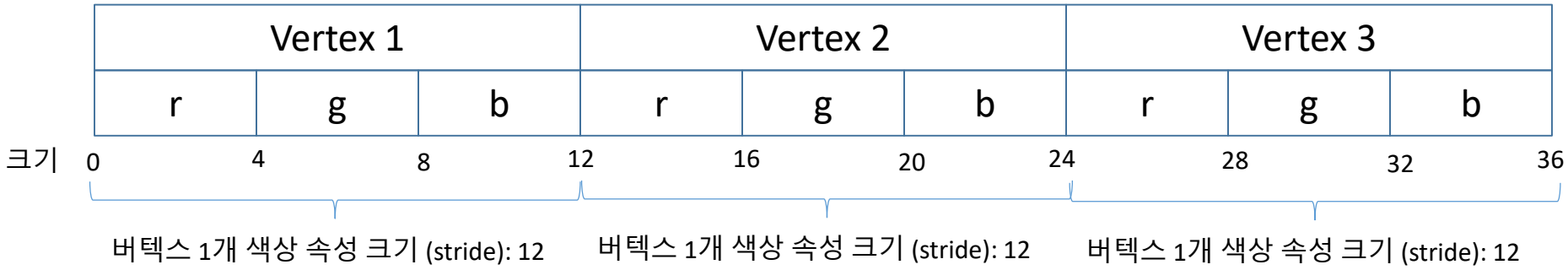
- 버텍스 포맷에 속성 추가
  ① 좌표값 외에 색상 값을 속성으로 추가하는 경우: 두 개의 속성을 같이 저장하는 경우



2) Vertex Attribute 2개인 경우

- 버텍스 포맷에 속성 추가
  ② 좌표값 외에 색상값을 속성으로 추가하는 경우: 두 개의 속성을 따로 저장하는 경우





2-1) Vertex Attribute: 2개 속성을 따로 저장할 때 (앞의 2번 경우)

(55페이지)

- VBO를 2개 생성
  - 각 VBO에 속성값 (위치, 색상) 저장
  - 세이더에 위치와 색상 저장하기
- VAO를 생성
  - VAO에 2개의 속성을 바인드하기

- Vertex Shader

```
#version 330 core

in vec3 vPos;                  //--- 메인 프로그램에서 입력 받음
in vec3 vColor;                //--- 메인 프로그램에서 입력 받음
out vec3 passColor;            //--- fragment shader로 전달

void main()
{
        gl_Position = vec4 (vPos.x, vPos.y, vPos.z, 1.0);
        passColor = vColor;
}
```

- Fragment Shader

```
#version 330 core

in vec3 passColor;             //--- vertex shader에서 입력 받음
out vec4 FragColor;            //--- 프레임 버퍼로 출력

void main()
{
        FragColor = vec4 (passColor, 1.0);
}
```

2-1) Vertex Attribute: 2개 속성을 따로 저장할 때

- 응용 프로그램

```
//--- 변수 선언
GLuint VAO, VBO_position, VBO_color;

void InitBuffer ()
{
	//--- Vertex Array Object 생성
	glGenVertexArrays (1, &VAO);
	glBindVertexArray (VAO);

	//--- 위치 속성
	glGenBuffers (1, &VBO_position);
	glBindBuffer (GL_ARRAY_BUFFER, VBO_position);
	glBufferData (GL_ARRAY_BUFFER, sizeof(vertexPosition), vertexPosition, GL_STATIC_DRAW);

	//--- 색상 속성
	glGenBuffers (1, &VBO_color);
	glBindBuffer (GL_ARRAY_BUFFER, VBO_color);
	glBufferData (GL_ARRAY_BUFFER, sizeof(vertexColor), vertexColor, GL_STATIC_DRAW);

	//--- vPos 속성 변수에 값을 저장
	GLint pAttribute = glGetAttribLocation (shaderProgramID, “vPos");
	glBindBuffer (GL_ARRAY_BUFFER, VBO_position);
	glVertexAttribPointer (pAttribute, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 3 * sizeof(float), 0);
	glEnableVertexAttribArray (pAttribute);

	//--- vColor 속성 변수에 값을 저장
	GLint cAttribute = glGetAttribLocation (shaderProgramID, “vColor");
	glBindBuffer (GL_ARRAY_BUFFER, VBO_color);
	glVertexAttribPointer (cAttribute, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 3 * sizeof(float), 0);
	glEnableVertexAttribArray (cAttribute);
}
```

```
const float vertexPosition [] =
{
	0.5, 1.0, 0.0,
	0.0, 0.0, 0.0,
	1.0, 0.0, 0.0
};
const float vertexColor [] =
{
	1.0, 0.0, 0.0,
	0.0, 1.0, 0.0,
	0.0, 0.0, 1.0
};
```

```
// 위치와 색상을 한 개의 데이터로 저장
const float vertexData [] =
{
	0.5, 1.0, 0.0,		1.0, 0.0, 0.0,
	0.0, 0.0, 0.0,		0.0, 1.0, 0.0,
	1.0, 0.0, 0.0,		0.0, 0.0, 1.0
};
```

함수 프로토타입

- 위치 가져오기 함수
  - GLint glGetAttribLocation (GLuint program, const GLchar *name);
    - Attribute 변수의 위치를 가져온다.
      - 리턴값: 속성 변수의 위치
        - 위치를 찾지 못하면 음수값을 리턴한다.
      - Program: 프로그램 이름
      - Name: 위치를 찾으려는 attribute 변수 이름

2-2) Vertex Attribute: 2개 속성을 한 변수로 저장 (앞의 1번 그림)

- 속성 추가하여 1개 이상의 속성을 사용 하는 경우 (VertexData 변수 사용) (54페이지)
  - Vertex Shader

```
#version 330 core
layout (location = 0) in vec3 vPos;        //--- 위치 변수: attribute position 0
layout (location = 1) in vec3 vColor;      //--- 컬러 변수: attribute position 1

out vec3 outColor;                         //--- 컬러를 fragment shader로 출력

void main()
{
   gl_Position = vec4 (vPos, 1.0);
   outColor = vColor;                      //--- vertex data로부터 가져온 컬러 입력을 ourColor에 설정
}
```

  - Fragment Shader

```
#version 330 core
out vec4 FragColor;
in vec3 outColor;

void main()
{
   FragColor = vec4 (outColor, 1.0);
}
```

2-2) Vertex Attribute: 2개 속성을 한 변수로 저장

- 응용 프로그램

```
//--- 변수 선언
GLuint VAO, VBO;

void InitBuffer ()
{
	//--- VAO 객체 생성 및 바인딩
	glGenVertexArrays (1, &VAO);
	glBindVertexArray (VAO);

	//--- vertex data 저장을 위한 VBO 생성 및 바인딩.
	glGenBuffers (1, &VBO);
	glBindBuffer (GL_ARRAY_BUFFER, VBO);

	//--- vertex data 데이터 입력.
	glBufferData (GL_ARRAY_BUFFER, sizeof (vertexData), vertexData, GL_STATIC_DRAW);

	//--- 위치 속성: 속성 위치 0
	glVertexAttribPointer (0, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 6 * sizeof(float), (void*)0);
	glEnableVertexAttribArray (0);

	//--- 색상 속성: 속성 위치 1
	glVertexAttribPointer (1, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 6 * sizeof(float), (void*)(3* sizeof(float)));
	glEnableVertexAttribArray (1);
}
```

```
const float vertexPosition [] =
{
	0.5, 1.0, 0.0,
	0.0, 0.0, 0.0,
	1.0, 0.0, 0.0
};
const float vertexColor [] =
{
	1.0, 0.0, 0.0,
	0.0, 1.0, 0.0,
	0.0, 0.0, 1.0
};
```

```
// 위치와 색상을 한 개의 데이터로 저장
const float vertexData [] =
{
	0.5, 1.0, 0.0,		1.0, 0.0, 0.0,
	0.0, 0.0, 0.0,		0.0, 1.0, 0.0,
	1.0, 0.0, 0.0,		0.0, 0.0, 1.0
};
```

void glVertexAttribPointer (GLuint index, GLint size, GLenum type, GLboolean normalized, GLsizei stride, const GLvoid *pointer)

- Index: 설정할 vertex 속성의 인덱스
- Size: 버텍스 속성의 크기
- Type: 데이터 타입
- Normalized: 데이터를
- Stride: 연이은 vertex 속성 세트들 사이의 공백 (값이 공백없이 채워져 있다면 0, 1개 이상의 속성들이 저장되어 있다면 크기를 설정.
- Pointer: 데이터가 시작하는 위치의 오프셋 값

3) 프래그먼트 세이더로 직접 데이터 전달하기

- Uniform 한정자를 사용하여 원하는 세이더로 직접 데이터 전달 가능
  - Uniform: CPU의 응용 프로그램에서 GPU의 세이더로 데이터를 전달하는 방법
    - Uniform은 global 변수
    - 변수 앞에 uniform 키워드를 붙여 변수 선언

- 유니폼 변수 다루기
  - GLint glGetUniformLocation (GLuint program, const GLchar *name);
    - 프로그램에서 uniform 변수의 위치를 가져온다.
      - program: 세이더 프로그램 이름
      - name: uniform 변수 이름
    - 리턴값: uniform 변수 위치 (-1: 위치를 찾지 못함)

  - void glUniform{1|2|3|4}(f|i|ui} (GLuint location, {GLfloat v0, GLfloat v1, GLfloat v2, GLfloat v3});
    - glUniform1f, glUniform2f, glUniform3f, glUniform4f…
    - 현재 프로그램에서 uniform 변수의 값을 명시
      - location: 수정할 uniform 변수의 위치
      - v0, v1, v2, v3: 사용될 uniform 변수 값

프래그먼트 세이더로 직접 데이터 전달하기

- 프래그먼트 세이더에 색상 직접 전달하기 예)

  - Vertex shader

```
#version 330 core

layout (location = 0) in vec3 vPos;    //--- attribute로 설정된 위치 속성: 인덱스 0

void main()
{
    gl_Position = vec4 (vPos.x, vPos.y, vPos.z, 1.0);
}
```

  - Fragment shader

```
#version 330 core

uniform vec4 vColor;                   //--- 응용 프로그램에서 변수 값 설정

out vec4 FragColor;                    //--- 출력할 객체의 색상

void main()
{
    FragColor = vColor;
}
```

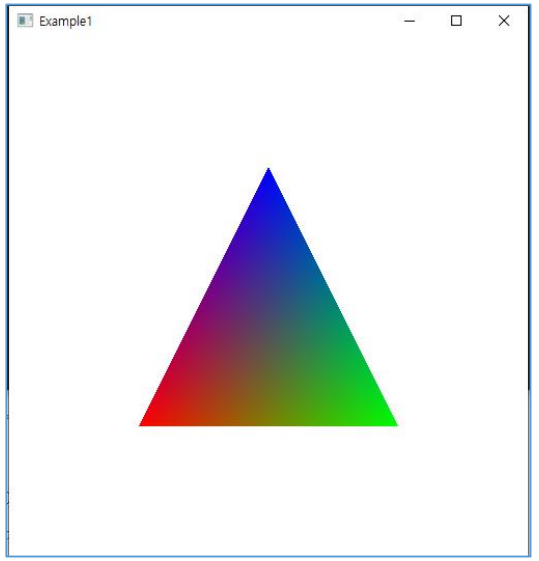
프래그먼트 세이더로 직접 데이터 전달하기

- 응용 프로그램

```
//--- 그리기 출력 콜백 함수에서 프래그먼트 세이더로 컬러 값을 보내기
void drawScene ()
{
        …
        //--- uniform 변수의 인덱스 값
        int vColorLocation = glGetUniformLocation (shaderProgramID, “vColor");

        //--- uniform 변수가 있는 프로그램 활성화:
        glUseProgram (shaderProgramID);

        //--- uniform 변수의 위치에 변수의 값 설정
        glUniform4f (vColorLocation, 1.0f, 0.0f, 0.0f, 1.0f);

        //--- 필요한 드로잉 함수 호출
        glBindVertexArray(VAO);
        glDrawArrays(GL_TRIANGLES, 0, 3);
        glutSwapBuffers();
}
```

<최종 예: 위치, 색상 속성을 사용하여 화면 중앙에 삼각형 그리기>

- Main (): 관련 콜백 함수 지정
  - 윈도우 띄우기
  - 필요한 콜백 함수 지정
  - 이벤트 루프 시작
- InitBuffer ():
  - VAO, VBO 만들기
  - 속성 (attributes) 설정하기
- InitShader ():
  - 세이더 객체 만들기, 컴파일 하기, 세이더 프로그램 만들고 링크하기
- 콜백 함수들
  - 각종 이벤트 처리하기
  - 출력 함수: display 콜백 함수
    - 화면에 출력하기 (glDrawArrays 또는 glDrawElements)
- 세이더 만들기
  - Vertex shader, fragment shader 파일 작성




```
const GLfloat triShape[3][3] = {          // 삼각형 꼭지점 좌표값
        {-0.5, -0.5, 0.0},
        { 0.5, -0.5, 0.0 },
        { 0.0,  0.5, 0.0} };

const GLfloat colors[3][3] = {            // 삼각형 꼭지점 색상
        {1.0,  0.0,  0.0},
        {0.0,  1.0,  0.0},
        {0.0,  0.0,  1.0} };
```

최종 예) 위치, 색상 속성을 사용하여 화면 중앙에 삼각형 그리기

//--- vertex shader: vertex.glsl 파일에 저장

```
#version 330 core
//--- in_Position: attribute index 0
//--- in_Color: attribute index 1

layout (location = 0) in vec3 in_Position;     //--- 위치 변수: attribute position 0
layout (location = 1) in vec3 in_Color;        //--- 컬러 변수: attribute position 1
out vec3 out_Color;              //--- 프래그먼트 세이더에게 전달

void main(void)
{
   gl_Position = vec4 (in_Position.x, in_Position.y, in_Position.z, 1.0);

    out_Color = in_Color;
}
```

//--- fragment shader: fragment.glsl 파일에 저장

```
#version 330 core
//--- out_Color: 버텍스 세이더에서 입력받는 색상 값
//--- FragColor: 출력할 색상의 값으로 프레임 버퍼로 전달 됨.

in  vec3 out_Color;              //--- 버텍스 세이더에게서 전달 받음
out vec4 FragColor;              //--- 색상 출력

void main(void)
{
      FragColor = vec4 (out_Color, 1.0);
}
```

최종 예) 위치, 색상 속성을 사용하여 화면 중앙에 삼각형 그리기

```
//--- 메인 함수
//--- 함수 선언 추가하기
const GLfloat triShape[3][3] = {                    //--- 삼각형 위치 값
                    { -0.5, -0.5, 0.0 }, { 0.5, -0.5, 0.0 }, { 0.0, 0.5, 0.0} };
const GLfloat colors[3][3] = {                      //--- 삼각형 꼭지점 색상
                    { 1.0,  0.0,  0.0  }, { 0.0,  1.0,  0.0  }, { 0.0,  0.0,  1.0  } };
GLuint vao, vbo[2];

void main (int argc, char** argv)                   //--- 윈도우 출력하고 콜백함수 설정
{
    //--- 윈도우 생성하기
    glutInit(&argc, argv);
    glutInitDisplayMode(GLUT_DOUBLE | GLUT_RGBA);
    glutInitWindowPosition(100, 100);
    glutInitWindowSize (800, 600);
    glutCreateWindow ("Example1");

    //--- GLEW 초기화하기
    glewExperimental = GL_TRUE;
    glewInit ();

    make_shaderProgram();
    InitBuffer();

    glutDisplayFunc (drawScene);
    glutReshapeFunc (Reshape);
    glutMainLoop();
}
```

```
//--- 그리기 콜백 함수

GLvoid drawScene()
{
    //--- 변경된 배경색 설정
    glClearColor(rColor, gColor, bColor, 1.0f);
    //glClearColor(1.0, 1.0, 1.0, 1.0f);
    glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT | GL_DEPTH_BUFFER_BIT);

    //--- 렌더링 파이프라인에 세이더 불러오기
    glUseProgram(shaderProgramID);

    //--- 사용할 VAO 불러오기
    glBindVertexArray(vao);

    //--- 삼각형 그리기
    glDrawArrays(GL_TRIANGLES, 0, 3);

    glutSwapBuffers();          //--- 화면에 출력하기
}

//--- 다시그리기 콜백 함수

GLvoid Reshape ( int w, int h )
{
        glViewport ( 0, 0, w, h );
}
```

최종 예) 위치, 색상 속성을 사용하여 화면 중앙에 삼각형 그리기

```
//--- 버퍼 생성하고 데이터 받아오기
GLuint vao, vbo[2];
void InitBuffer ()
{
    glGenVertexArrays (1, &vao);                //--- VAO 를 지정하고 할당하기
    glBindVertexArray (vao);                    //--- VAO를 바인드하기

    glGenBuffers (2, vbo);                      //--- 2개의 VBO를 지정하고 할당하기

//--- 1번째 VBO를 활성화하여 바인드하고, 버텍스 속성 (좌표값)을 저장
   glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, vbo[0]);

    //--- 변수 diamond 에서 버텍스 데이터 값을 버퍼에 복사한다.
    //--- triShape 배열의 사이즈: 9 * float
   glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, 9 * sizeof(GLfloat), triShape, GL_STATIC_DRAW);

    //--- 좌표값을 attribute 인덱스 0번에 명시한다: 버텍스 당 3* float
   glVertexAttribPointer(0, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 0, 0);

    //--- attribute 인덱스 0번을 사용가능하게 함
    glEnableVertexAttribArray(0);


//--- 2번째 VBO를 활성화 하여 바인드 하고, 버텍스 속성 (색상)을 저장
   glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, vbo[1]);

    //--- 변수 colors에서 버텍스 색상을 복사한다.
    //--- colors 배열의 사이즈: 9 *float
   glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, 9 * sizeof(GLfloat), colors, GL_STATIC_DRAW);

    //--- 색상값을 attribute 인덱스 1번에 명시한다: 버텍스 당 3*float
   glVertexAttribPointer(1, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 0, 0);

    //--- attribute 인덱스 1번을 사용 가능하게 함.
   glEnableVertexAttribArray(1);
}
```

```
//--- 세이더 프로그램 생성하기

void make_shaderProgram ()
{
    make_vertexShaders ();              //--- 버텍스 세이더 만들기
    make_fragmentShaders ();            //--- 프래그먼트 세이더 만들기

    //-- shader Program
    shaderProgramID = glCreateProgram();

    glAttachShader (shaderProgramID, vertexShader);
    glAttachShader (shaderProgramID, fragmentShader);
    glLinkProgram (shaderProgramID);

    //--- 세이더 삭제하기
    glDeleteShader (vertexShader);
    glDeleteShader (fragmentShader);

    //--- Shader Program 사용하기
    glUseProgram (shaderProgramID);

}
```

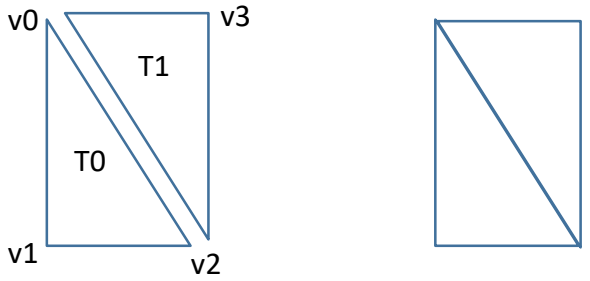
최종 예) 위치, 색상 속성을 사용하여 화면 중앙에 삼각형 그리기

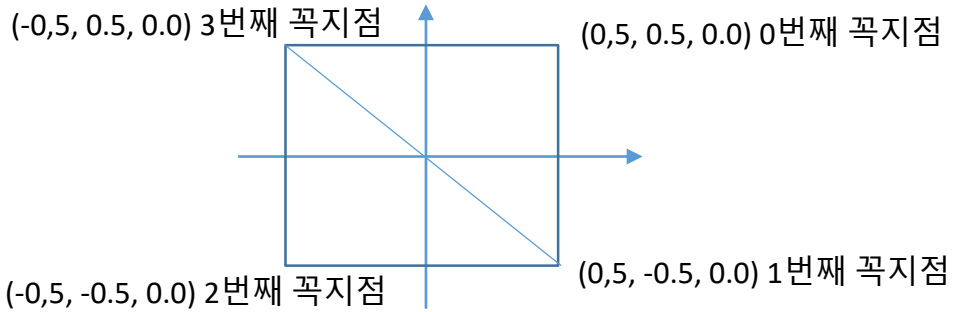
```
//--- 버텍스 세이더 객체 만들기

GLchar *vertexSource, *fragmentSource;     //--- 소스코드 저장 변수
GLuint vertexShader, fragmentShader;       //--- 세이더 객체
GLuint shaderProgramID;                    //--- 셰이더 프로그램

void make_vertexShaders ()
{
   vertexSource = filetobuf (“vertex.glsl");

   //--- 버텍스 세이더 객체 만들기
   vertexShader = glCreateShader (GL_VERTEX_SHADER);

  //--- 세이더 코드를 세이더 객체에 넣기
   glShaderSource(vertexShader, 1, (const GLchar**)&vertexSource, 0);

   //--- 버텍스 세이더 컴파일하기
   glCompileShader(vertexShader);

  //--- 컴파일이 제대로 되지 않은 경우: 에러 체크
      GLint result;
      GLchar errorLog[512];
      glGetShaderiv (vertexShader, GL_COMPILE_STATUS, &result);
      If (!result)
      {
          glGetShaderInfoLog (vertexShader, 512, NULL, errorLog);
          cerr << “ERROR: vertex shader 컴파일 실패\n” << errorLog << endl;
          return;
      }
}
```

```
//--- 프래그먼트 세이더 객체 만들기

void make_fragmentShaders ()
{
     fragmentSource = filetobuf (“fragment.glsl”);

    //--- 프래그먼트 세이더 객체 만들기
    fragmentShader = glCreateShader(GL_FRAGMENT_SHADER);

    //--- 세이더 코드를 세이더 객체에 넣기
    glShaderSource(fragmentShader, 1, (const GLchar**)&fragmentSource, 0);

   //--- 프래그먼트 세이더 컴파일
   glCompileShader(fragmentShader);

    //--- 컴파일이 제대로 되지 않은 경우: 컴파일 에러 체크
   GLint result;
    GLchar errorLog[512];
    glGetShaderiv (fragmentShader, GL_COMPILE_STATUS, &result);
    if (!result)
    {
        glGetShaderInfoLog (fragmentShader, 512, NULL, errorLog);
        cerr << "ERROR: fragment shader 컴파일 실패\n" << errorLog << endl;
        return;
    }
}
```

Element Buffer Object

- Element Buffer Object (EBO)
  - EBO는 VBO와 같은 버퍼인데, 버텍스 좌표값 대신 인덱스를 저장한다.
  - 사각형을 그린다면,
    - 사각형 -> 삼각형 2개 -> 6개의 정점 -> 2개의 정점이 중복, 즉 4개의 정점으로 생성 가능






```
float vPosition[] = {
   // 첫 번째 삼각형
    0.5f,  0.5f, 0.0f,  // 우측 상단
    0.5f, -0.5f, 0.0f,  // 우측 하단
   -0.5f,  0.5f, 0.0f,  // 좌측 상단
   // 두 번째 삼각형
    0.5f, -0.5f, 0.0f,  // 우측 하단
   -0.5f, -0.5f, 0.0f,  // 좌측 하단
   -0.5f,  0.5f, 0.0f   // 좌측 상단
};
```

2개가 같은 값

```
float vPositionList[] = {
    0.5f,  0.5f, 0.0f,  // 우측 상단
    0.5f, -0.5f, 0.0f,  // 우측 하단
   -0.5f, -0.5f, 0.0f,  // 좌측 하단
   -0.5f,  0.5f, 0.0f   // 좌측 상단
};
unsigned int index[] = {
   0, 1, 3,   // 첫 번째 삼각형
   1, 2, 3    // 두 번째 삼각형
};
```

Element Buffer Object

- 정점들을 저장하고, 그 정점을 사용하여 인덱스 리스트를 만든다.

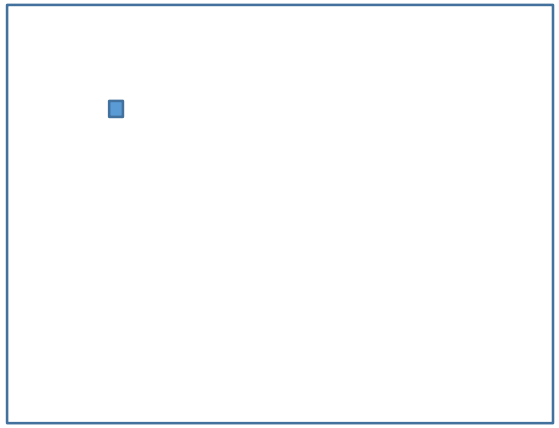
```
void InitBuffer ()
{
Gluint VAO, VBO_pos, EBO;

    glGenVertexArrays (1, &VAO);
    glGenBuffers (1, &VBO_pos);

    glBindVertexArray (VAO);
    glBindBuffer (GL_ARRAY_BUFFER, VBO_pos);
    glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, sizeof(vPositionList), vPositionList, GL_STATIC_DRAW);

    glGenBuffers (1, &EBO);
    glBindBuffer (GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER, EBO);          //--- GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER 버퍼 유형으로 바인딩
    glBufferData (GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER, sizeof(index), index, GL_STATIC_DRAW);
    glVertexAttribPointer (0, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 3 * sizeof(float), 0);
    glEnableVertexAttribArray (0);
}

Void drawScene ()
{
    glUseProgram (shaderProgramID);
    glBindVertexArray (VAO);
    glDrawElements (GL_TRIANGLES, 6, GL_UNSIGNED_INT, 0);          //--- 0번부터 6개의 꼭지점을 사용하여 삼각형을 그린다.
}
```

함수 프로토타입

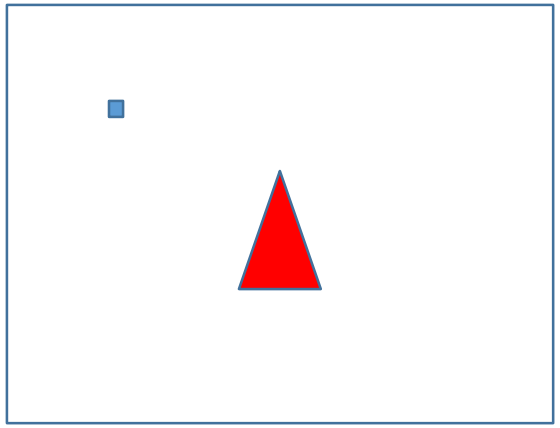
- 함수 프로토타입
  - void glDrawElements (GLenum mode, GLsizei count, GLenum type, const GLvoid *indices);
    - mode: GL_POINTS, GL_LINE_STRIP, GL_LINE_LOOP, GL_LINES, GL_TRIANGLE_STRIP, GL_TRIANGLE_FAN, GL_TRIANGLES
    - count: 렌더링할 요소의 개수
    - type: indices 값의 타입 (GL_UNSIGNED_BYTE, GL_UNSIGNED_SHORT, or GL_UNSIGNED_INT 중 1개)
    - indices: 바인딩 되는 버퍼의 데이터 저장소에 있는 배열의 첫 번째 인덱스 오프셋

실습 7

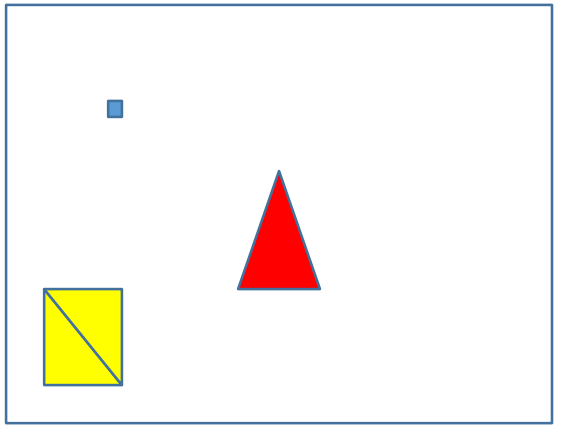
- 화면에 기본 도형 그리기
  - 키보드 명령에 따라, 마우스를 누르는 위치에 점, 선, 삼각형 또는 사각형 (삼각형 2개 붙이기) 그린다.
  - 색상과 크기는 자율적으로 정하고, 최대 10개의 도형을 그린다.
  - 키보드 명령
    - p: 점 그리기
    - l: 선 그리기
    - t: 삼각형 그리기
    - r: 사각형 그리기
    - w/a/s/d: 그린 모든 도형이 화면에서 위/좌/아래/우측으로 이동한다.
    - c: 모든 도형을 삭제한다.



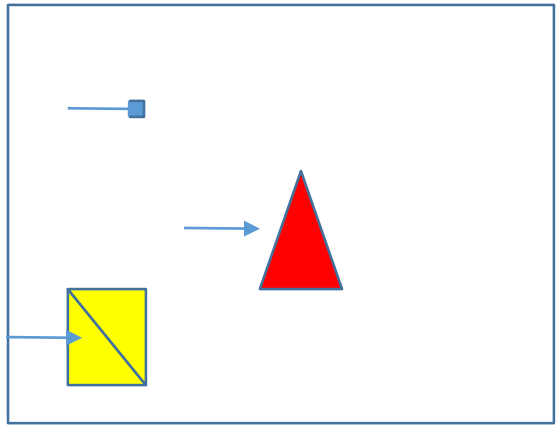
명령어 p



명령어 t



명령어 r



명령어 d (우측으로 이동)