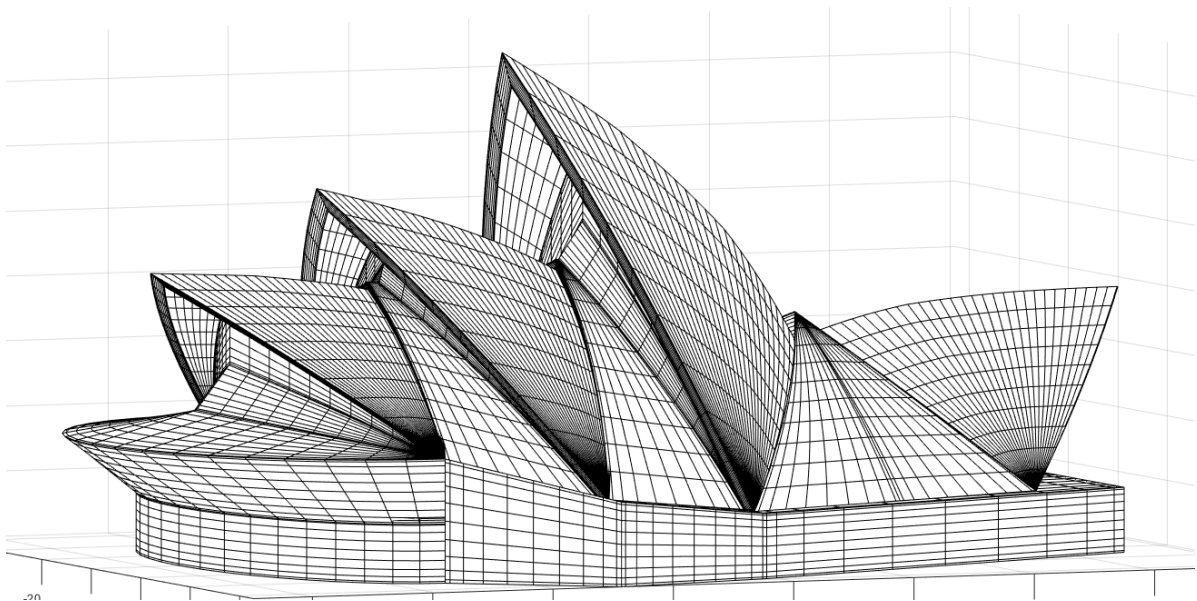


REPORT

Term Project

Bezier surface 와 Ferguson surface 를 이용하여 물건 형상화

- Sydney Opera House



기계공학 전공

2016121150

윤준영

차례

1. 시드니 오페라 하우스의 특징

2. Bezier Surface 를 그리기 위한 조정점 찾기

(1) 호의 중심점과 중심각 구하기

(2) 호의 양 끝점과 곡률반경 r 을 알고 있을 때 중심각 α 와 회전각 θ 구하기.

(3) Bezier curve – 원호

(4) 각 구조물의 좌표 구하기

3. MATLAB 을 이용하여 Bezier Surface 그리기

(1) 지붕 그리기

(2) 내부 천장 그리기

(3) 건물 A 와 D 하단

(4) 건물 사이의 곡면

(5) 기단

4. 결과 및 분석

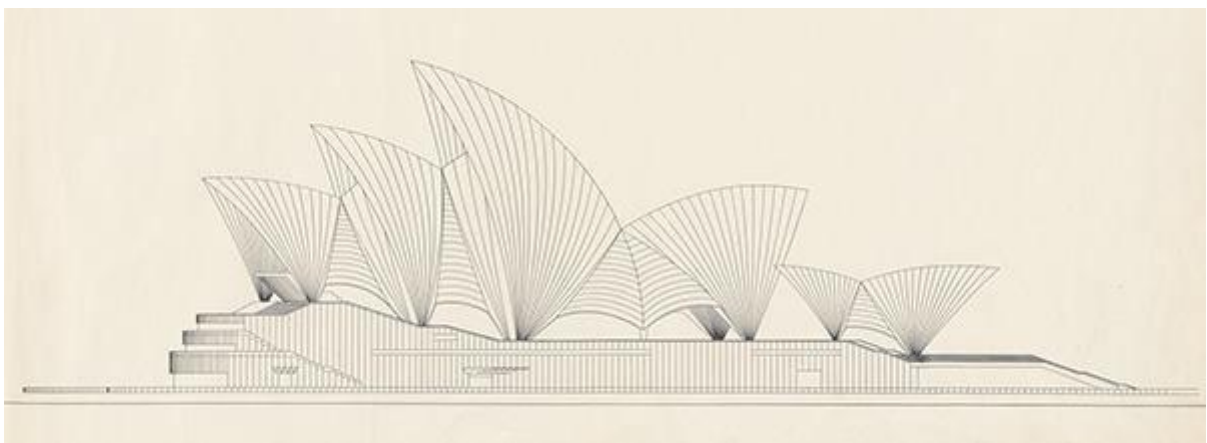
1. 시드니 오페라 하우스의 특징



<시드니 오페라 하우스>

시드니의 랜드마크인 시드니 오페라 하우스는 1973 년 완공되었으며 예른 웃손이라는 건축가가 과일 껍질을 벗기던 도중 떠올린 것으로 알려져 있다. 두 주 상영관이 있는 동관과 서관과 베넬롱 기념관으로 이루어져 있고, 동관과 서관은 4 개, 기념관은 2 개의 지붕으로 이루어져 있다. 이 4 개의 지붕은 같은 구(과일)에서 떼어져 나온 껍질처럼 같은 곡률 반경으로 이루어져 있는 것이 특징이다.

4 개의 건물은 각각 좌측부터 건물 A, B, C, D 로 표현하기로 한다.



<시드니 오페라 하우스 측면도>

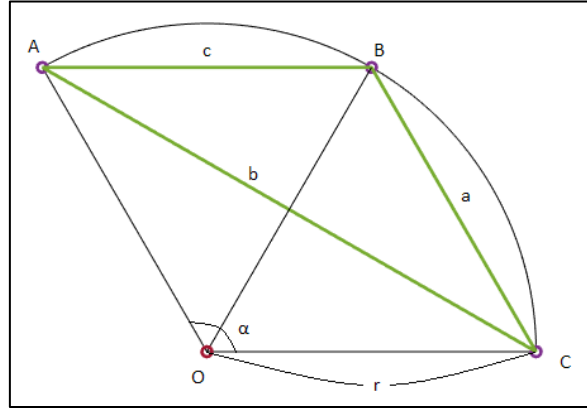
2. Bezier Surface 를 그리기 위한 조정점 찾기

(1) 호의 중심점과 중심각 구하기

임의의 호를 따라 그리기 위해서 호의 반지름과 중심각을 구해야 한다.

먼저 호의 양쪽 끝의 점 A와 점 C, 그리고 호 위의 점 B를 지정하여 좌표를 얻는다.

구한 세 점으로 삼각형을 만들어 외접원의 특성을 이용하여 중심각과 반지름을 구한다.



<호AC의 중심각과 반지름>

삼각형 ABC의 넓이 S는 사인법칙에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C} = 2r$$

$$S = \frac{1}{2}ab \sin C = \frac{abc}{4r}$$

따라서 원호의 반지름은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r = \frac{abc}{4S}$$

세 점의 좌표를 알 때 벡터로 표시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a = |\vec{r}_{BC}| \quad b = |\vec{r}_{CA}| \quad c = |\vec{r}_{AB}|$$

$$S = \frac{1}{2} |\vec{r}_{CB} \times \vec{r}_{CA}|$$

$$r = \frac{|\vec{r}_{BC}| \cdot |\vec{r}_{CA}| \cdot |\vec{r}_{AB}|}{2 |\vec{r}_{CB} \times \vec{r}_{CA}|}$$

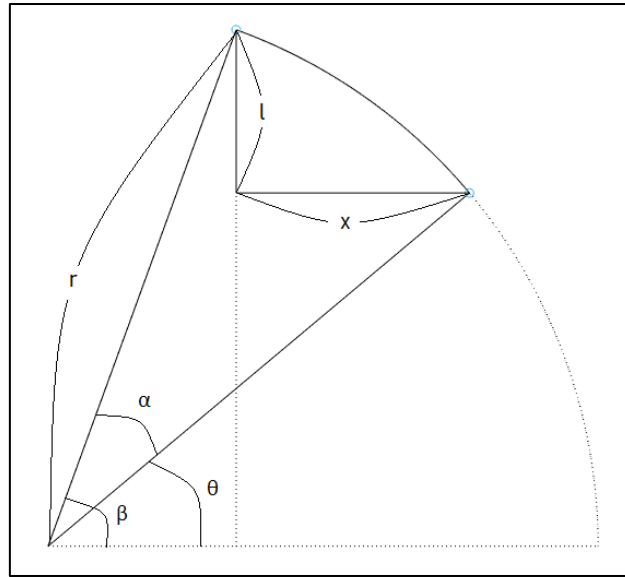
호의 중심각은 원주각의 두배이다. 따라서

$$\angle AOB = 2\angle ACB = 2\angle C, \quad \angle BOC = 2\angle BAC = 2\angle A$$

$$\alpha = \angle AOB + \angle BOC = 2\angle C + 2\angle A$$

$$\alpha = 2 \cos^{-1} \frac{\vec{r}_{CB} \cdot \vec{r}_{CA}}{|\vec{r}_{CB}| \cdot |\vec{r}_{CA}|} + 2 \cos^{-1} \frac{\vec{r}_{AB} \cdot \vec{r}_{AC}}{|\vec{r}_{AB}| \cdot |\vec{r}_{AC}|}$$

(2) 호의 양 끝점과 곡률반경 r 을 알고 있을 때 중심각 α 와 회전각 θ 구하기.



< α 와 θ >

$\beta = \theta + \alpha$ 로 두고, r , θ , β 를 이용해 x 와 l 을 표현하면 다음과 같다.

$$r \cos \theta - r \cos \beta = r(\cos \theta - \cos \beta) = x$$

$$r \sin \beta - r \sin \theta = r(\sin \beta - \sin \theta) = l$$

삼각함수의 관계를 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\cos \theta - \cos \beta = -2 \sin \left(\frac{\theta + \beta}{2} \right) \sin \left(\frac{\theta - \beta}{2} \right) = 2 \sin \left(\frac{\theta + \beta}{2} \right) \sin \left(\frac{\beta - \theta}{2} \right) = \frac{x}{r}$$

$$\sin \beta - \sin \theta = 2 \cos \left(\frac{\theta + \beta}{2} \right) \sin \left(\frac{\beta - \theta}{2} \right) = \frac{l}{r}$$

위 두 식을 나누어서 연립하면 θ 와 β 를 구할 수 있다.

$$\frac{x}{l} = \tan \left(\frac{\theta + \beta}{2} \right), \quad \frac{\theta + \beta}{2} = \tan^{-1} \frac{x}{l}$$

$$\frac{x}{r} = 2 \sin \left(\tan^{-1} \frac{x}{l} \right) \sin \left(\frac{\beta - \theta}{2} \right)$$

$$\frac{\beta - \theta}{2} = \sin^{-1} \frac{x}{2r \sin \left(\tan^{-1} \frac{x}{l} \right)}$$

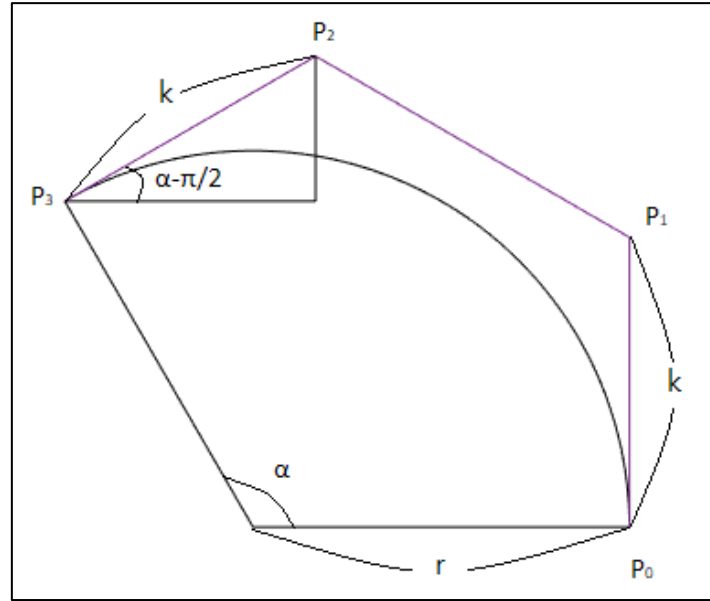
$$\beta = \tan^{-1} \frac{x}{l} + \sin^{-1} \frac{x}{2r \sin \left(\tan^{-1} \frac{x}{l} \right)}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{x}{l} - \sin^{-1} \frac{x}{2r \sin \left(\tan^{-1} \frac{x}{l} \right)}$$

$$\alpha = \beta - \theta = 2 \sin^{-1} \frac{x}{2r \sin \left(\tan^{-1} \frac{x}{l} \right)}$$

(3) Bezier curve – 원호

반지름이 r 이고 중심각이 α 인 원호를 Bezier curve로 그리기 위해서 먼저 조정점을 찾아야 한다.



<반지름이 r 이고 사이각이 α 인 원호>

조정점의 좌표들은 각각 다음과 같다.

$$P_0(r, 0), P_1(r, k), P_2\left(r\cos\alpha + k\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right), r\sin\alpha - k\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)\right), P_3(r\cos\alpha, r\sin\alpha)$$

매개변수 $0 \leq t \leq 1$ 가 $t = 0.5$ 일 때 베른스타인 다항식을 적용하면 다음과 같다.

$$x(0.5) = r(0.5)^3 + 3r(0.5)^3 + 3\left(r\cos\alpha + k\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)\right)(0.5)^3 + r\cos\alpha(0.5)^3 = r\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$y(0.5) = 0(0.5)^3 + 3k(0.5)^3 + 3\left(r\sin\alpha - k\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)\right)(0.5)^3 + r\sin\alpha(0.5)^3 = r\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

위 첫 식을 k 에 대해 나타내면 다음과 같다.

$$k = \frac{8r\cos\frac{\alpha}{2} - 4r(1 + \cos\alpha)}{3\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}$$

앞의 조정점에서 z 축을 θ 만큼 회전시키면

$$\begin{aligned} &P_0(r\cos\theta, r\sin\theta), \quad P_1(r\cos\theta - k\sin\theta, r\sin\theta + k\cos\theta), \\ &P_2\left(\left(r\cos\alpha + k\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)\right)\cos\theta - \left(r\sin\alpha - k\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)\right)\sin\theta, \right. \\ &\quad \left.\left(r\cos\alpha + k\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)\right)\sin\theta + \left(r\sin\alpha - k\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)\right)\cos\theta\right), \\ &P_3(r\cos\alpha\cos\theta - r\sin\alpha\sin\theta, r\cos\alpha\sin\theta + r\sin\alpha\cos\theta) \end{aligned}$$

$\beta = \theta + \alpha$ 로 두고 각 좌표를 x 방향으로 $-r \cos \beta$, y 방향으로 $-r \sin \theta$ 만큼 평행이동하면 x 축과 y 축과 만나는 원호를 얻을 수 있다.

$$P_0(r \cos \theta - r \cos \beta, r \sin \theta - r \sin \theta), \quad P_1(r \cos \theta - k \sin \theta - r \cos \beta, r \sin \theta + k \cos \theta - r \sin \theta),$$

$$P_2 \left(\begin{pmatrix} (r \cos \alpha + k \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)) \cos \theta - (r \sin \alpha - k \sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)) \sin \theta - r \cos \beta, \\ (r \cos \alpha + k \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)) \sin \theta + (r \sin \alpha - k \sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)) \cos \theta - r \sin \theta \end{pmatrix} \right),$$

$$P_3(r \cos \alpha \cos \theta - r \sin \alpha \sin \theta - r \cos \beta, r \cos \alpha \sin \theta + r \sin \alpha \cos \theta - r \sin \theta)$$

$\beta = \theta + \alpha$ 를 이용하여 정리하면

$$P_0(r \cos \theta - r \cos \beta, 0), \quad P_1(r \cos \theta - k \sin \theta - r \cos \beta, k \cos \theta),$$

$$P_2 \left(\begin{pmatrix} (r \cos \alpha + k \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)) \cos \theta - (r \sin \alpha - k \sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)) \sin \theta - r \cos \beta, \\ (r \cos \alpha + k \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)) \sin \theta + (r \sin \alpha - k \sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)) \cos \theta - r \sin \theta \end{pmatrix} \right),$$

$$P_3(0, r \sin \beta - r \sin \theta)$$

앞에서 구한

$$r \cos \theta - r \cos \beta = r(\cos \theta - \cos \beta) = x$$

$$r \sin \beta - r \sin \theta = r(\sin \beta - \sin \theta) = l$$

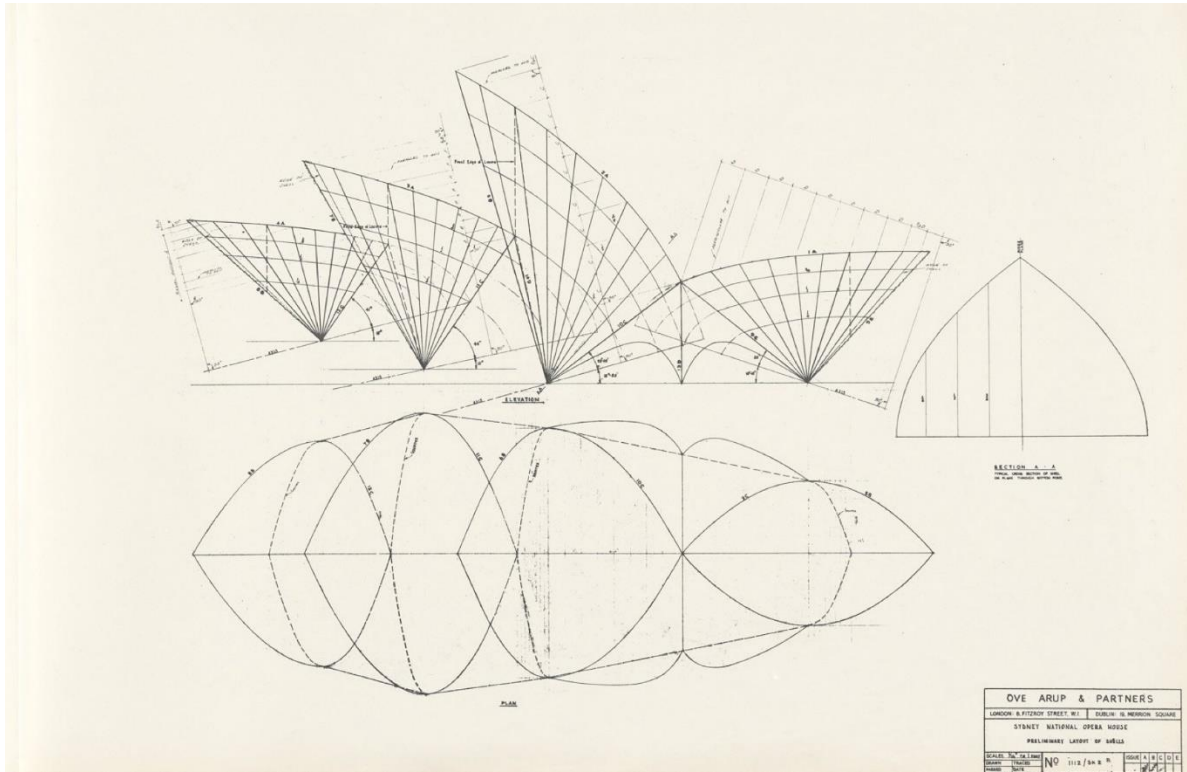
식을 사용하면 다음과 같이 더 간단하게 나타낼 수 있다.

$$P_0(x, 0), \quad P_1(r \cos \theta - k \sin \theta - r \cos \beta, k \cos \theta),$$

$$P_2 \left(\begin{pmatrix} (r \cos \alpha + k \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)) \cos \theta - (r \sin \alpha - k \sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)) \sin \theta - r \cos \beta, \\ (r \cos \alpha + k \cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)) \sin \theta + (r \sin \alpha - k \sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)) \cos \theta - r \sin \theta \end{pmatrix} \right),$$

$$P_3(0, l)$$

(4) 각 구조물의 좌표 구하기



<시드니 오페라 하우스 설계도>

앞에서 서술한 수식을 활용하기 위해서는 (1)에서 사용한 x 와 l 값을 알아야 한다.

x 값과 l 값을 구하기 위해 설계도를 통해 각 구조물의 좌표를 구하였다. 지어진 지 오래된 건물이라 고해상도의 설계도를 구할 수 없어 설계도의 픽셀을 통해 좌표를 구하고 스케일링하여 실물과 같은 비율로 맞추어야 한다.

설계도 위의 그림은 yz 평면, 아래 그림은 yx 평면으로 설정했다.

각 지붕의 좌표점은 설계도에서 나타난 지붕의 상단부분의 점 10 개의 좌표를 지붕의 지지점(점 O)에 대해 나타내었다. 지붕은 지지점 O 와 점 10 개를 각각 잇는 같은 곡률반경을 가지는 호로 이루어져 있다. (왼쪽부터 지붕 A, B, C, D로 칭하였다.)

A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y(pixel)	-201	-161	-119	-81	-44	-10	21	49	76	100
Z(pixel)	180	178	176	174	170	166	161	156	150	144

B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y(pixel)	-164	-135	-94	-54	-16	21	53	83	111	137
Z(pixel)	307	300	289	277	266	253	240	227	213	199

C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y(pixel)	-137	-101	-48	-1	43	83	119	151	177	200
Z(pixel)	467	446	413	379	344	308	271	232	192	151

D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y(pixel)	-189	-144	-101	-59	-18	23	63	102	143	183
Z(pixel)	151	167	178	185	190	193	195	196	197	197

지붕 C 에서 호 C01 의 수직높이는 67.45m 로 알려져 있다. 이를 통해 픽셀을 미터(m)로 바꾸어 점 A1~D10 의 거리(l)를 구한다.

$$467\text{pixel}=67.45\text{m} \rightarrow 1\text{pixel}=0.14443255\text{m}$$

다음은 차례대로 A 1~10, B 1~10, C1~10, D1~10 의 $l(\text{m})$ 값이다.

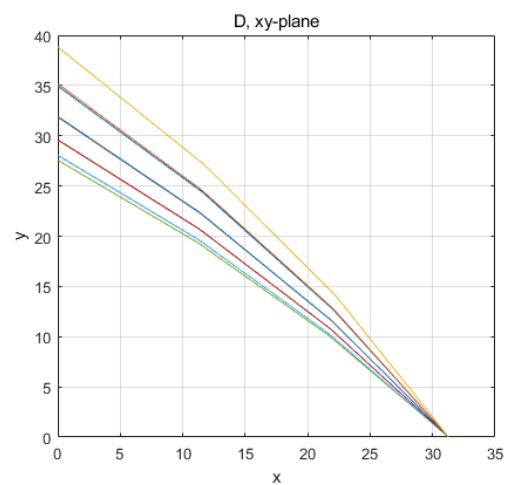
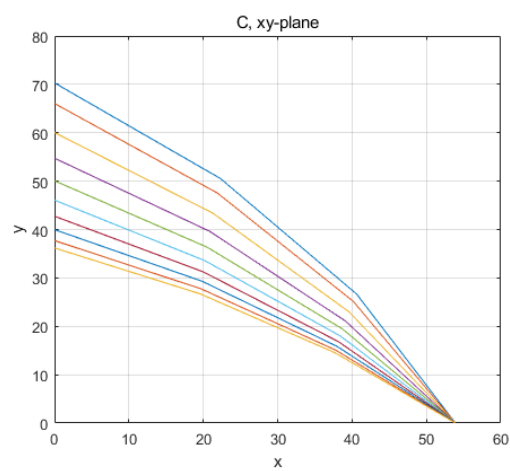
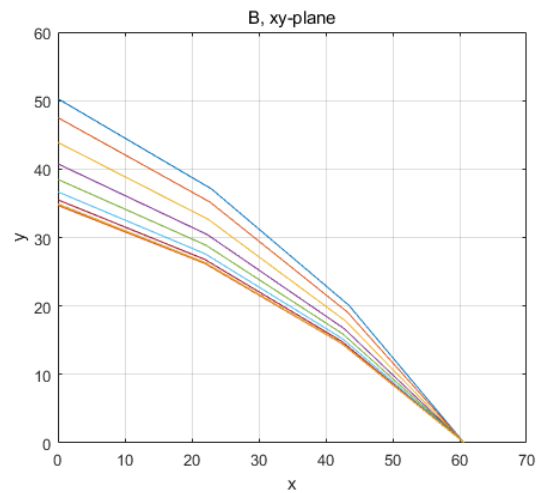
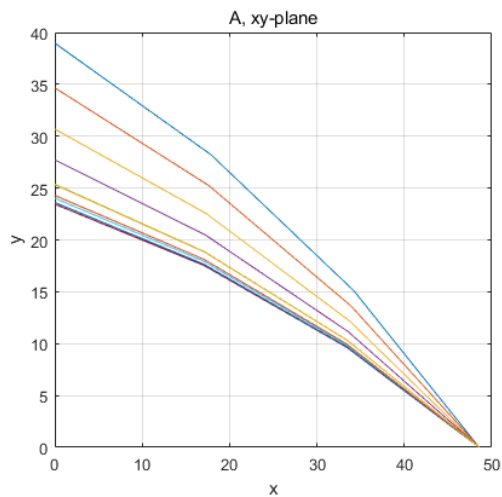
38.9703	34.6653	30.6854	27.7209	25.3626	24.0193	23.4506	23.6168	24.2870	25.3215
50.2710	47.5148	43.8935	40.7610	38.4885	36.6671	35.4990	34.9091	34.6909	34.8947
70.2925	66.0480	60.0522	54.7401	50.0715	46.0722	42.7486	39.9807	37.7168	36.1950
34.9401	31.8489	29.5593	28.0460	27.5651	28.0727	29.5978	31.9127	35.1592	38.8354

설계도 아래 그림에서도 마찬가지로 방법으로 x 를 구할 수 있다.

	A	B	C	D
$x(m)$	48.57	60.676	53.902	31.275

구한 l 와 x 을 통해 앞에서 서술할 식을 이용하여 중심각 α 와 회전각 θ 를 구한 후 조정점들의 좌표를 구해 x 축으로 회전시켜진 xy 평면에서의 호를 그릴 수 있다.

지붕 A, B, C, D에서 xy 평면에 그려진 호는 다음과 같이 나타난다.



이 조정점들을 x 축을 적절히 회전시키면 설계도에서 나타난 형상을 얻을 수 있다.

회전각 δ 는 처음에 구한 픽셀좌표를 통해 얻을 수 있다.

$$\delta = \tan^{-1} \frac{Y}{X}$$

A 1~10, B 1~10, C1~10, D1~10 의 $\delta(\text{rad})$ 값은 다음과 같다.

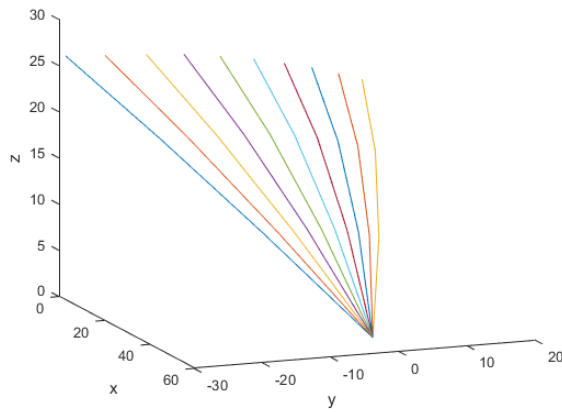
2.4113	2.3061	2.1653	2.0065	1.8241	1.6310	1.4411	1.2665	1.1018	0.9638
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

2.0614	1.9937	1.8853	1.7633	1.6309	1.4880	1.3535	1.2203	1.0904	0.9679
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

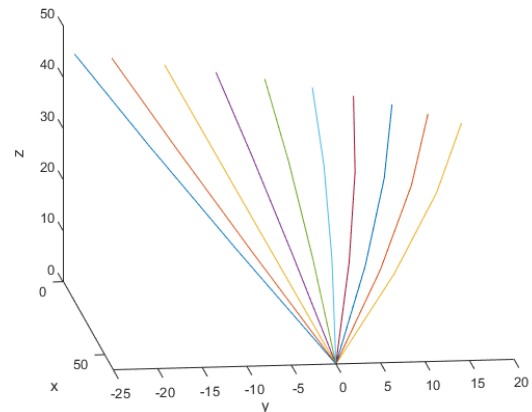
1.8562	1.7935	1.6865	1.5734	1.4464	1.3076	1.1570	0.9938	0.8260	0.6467
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

2.4675	2.2824	2.0869	1.8795	1.6653	1.4522	1.2583	1.0910	0.9429	0.8222
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

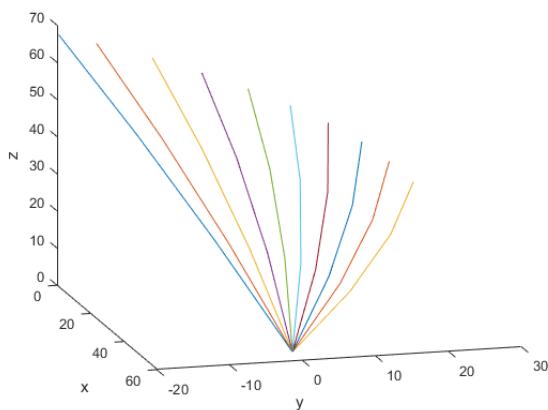
x 축을 δ 만큼 회전시키면 A, B, C, D 의 각 호는 다음과 같이 나타난다.



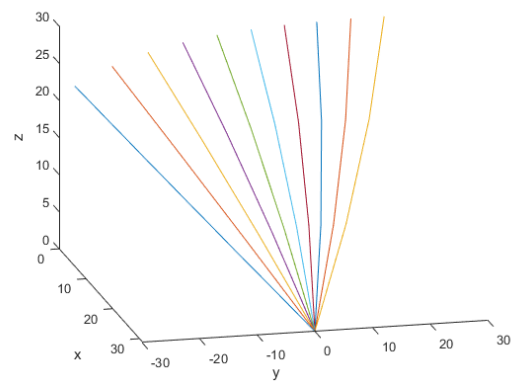
<지붕 A>



<지붕 B>



<지붕 C>



<지붕 D>

위 조정점들로 Bezier surface 를 만들고 x 축 대칭시키면 위의 설계도와 같은 형상을 얻을 수 있다.

3. 조정점을 이용하여 Bezier Surface 그리기

MATLAB 을 이용하여 Bezier surface 를 만들었다.

(1) 지붕 그리기

코드 (A)

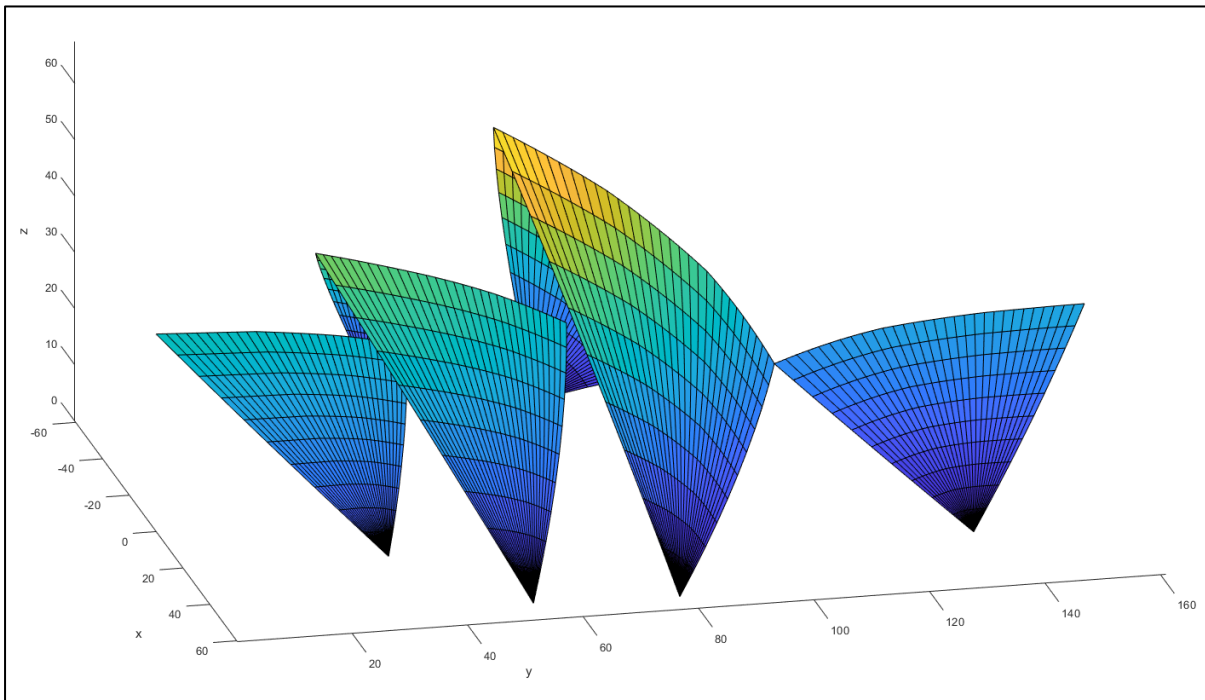
```
clear;
%% Bezier Patch Matrix
t=0.1; u = 0:t:1; v = 0:t:1;
M = [1 0 0 0; -3 3 0 0; 3 -6 3 0; -1 3 -3 1];
U=cat(2,0*u'+1 ,u', (u.^2)', (u.^3)');
V=cat(2,0*v'+1 ,v', (v.^2)', (v.^3)');
%% coordinate ; A
rya=[-201 -161 -119 -81 -44 -10 21 49 76 100 ];
rza=[180 178 176 174 170 166 161 156 150 144 ];
ryya=rya*0.14443255;
rzza=rza*0.14443255;
pya=29.093; pza=9.119;
% ry, rz = pixel coordinate / ryy, rzz = real coordinate (m)
% py, pz = translation
%% xy-plane ; A
la=sqrt(ryya.^2+rzza.^2);
da=atan2(rza,rya);
xa=48.5700;
ra=232.30882;
plua=atan(xa./la); mina=asin(xa./(2*ra*sin(plua)));
% plua = (th + b)/2, mina = (b - th)/2
tha=plua-mina; ba=plua+mina; a=mina*2;
% th = b - a, b = th + a, a = b - th
ka=(8*ra*cos(a/2)-4*ra*(1+cos(a)))./(3*cos(pi/2-a));
% x1=r*cos(th)-r*cos(b);
x1a=xa*ones(1,10);
x2a=ra*cos(tha)-ka.*sin(tha)-ra*cos(ba);
x3a=(ra*cos(a)+ka.*cos(pi/2-a)).*cos(tha)-(ra*sin(a)-ka.*sin(pi/2-a)).*sin(tha)-ra*cos(ba);
% x4=r*cos(a).*cos(th)-r*sin(a).*sin(th)-r*cos(b);
x4a=zeros(1,10);
xxa=[x1a; x2a; x3a; x4a];
% y1=r*sin(th)-r*sin(b);
y1a=zeros(1,10);
y2a=ka.*cos(tha);
y3a=(ra*cos(a)+ka.*cos(pi/2-a)).*sin(tha)+(ra*sin(a)-ka.*sin(pi/2-a)).*cos(tha)-ra*sin(ba);
% y4=r*cos(a).*sin(th)+r*sin(a).*cos(th)-r*sin(b);
y4a=la;
yya=[y1a; y2a; y3a; y4a];
zza=zeros(4,10);
%% x-axis rotate ; A
xxxa=xxa; yyyy=yya; zzza=zza;
%preallocation
for i=1:4
    for j=1:10
        yyyy(i,j)=cos(da(j))*yya(i,j)-sin(da(j))*zza(i,j);
        zzza(i,j)=sin(da(j))*yya(i,j)+cos(da(j))*zza(i,j);
    end
end
```

```

% Bezier Patch ; A
for ii=0:2
    for i=1:4
        for j=1:4
            Bx(i,j,ii+1)=xxxa(i,j+3*ii);
            By(i,j,ii+1)=yyya(i,j+3*ii);
            Bz(i,j,ii+1)=zzza(i,j+3*ii);
        end
    end
end
for ii=1:3
    RX = U*M*Bx(:, :, ii)*M'*V'; RY = U*M*By(:, :, ii)*M'*V'; RZ =
    U*M*Bz(:, :, ii)*M'*V';
    hold on
    % mesh(Bx(:, :, ii), By(:, :, ii), Bz(:, :, ii), 'EdgeColor', 'b');
    surf(RX, RY+pya, RZ+pza);
    surf(-RX, RY+pya, RZ+pza);
end

```

지붕 B 와 C, D 의 경우에도 픽셀좌표 ry, rz, x 만 바꾸어 주어 surface 을 구한 후 py 와 pz 로
평행이동 시켜주어 실행시키면 다음과 같은 그림을 얻을 수 있다.

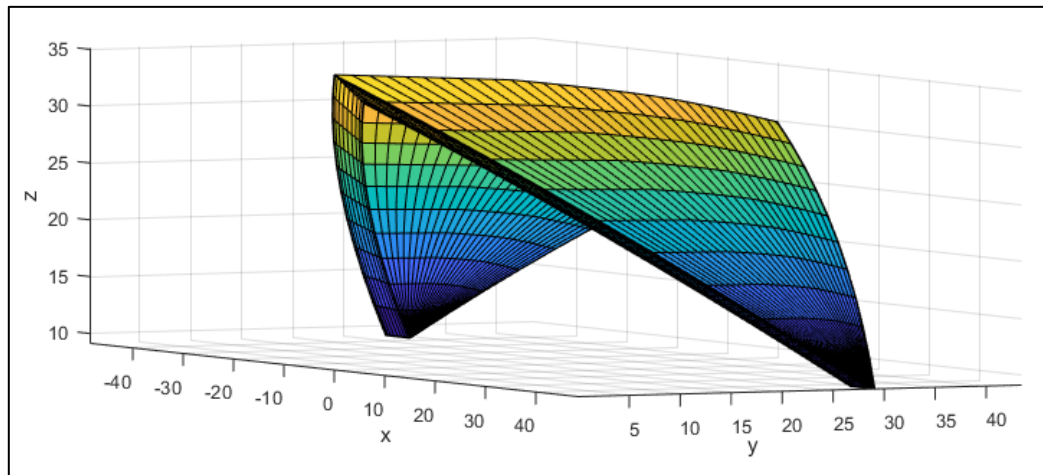


<지붕 A, B, C, D>

(2) 내부 천장

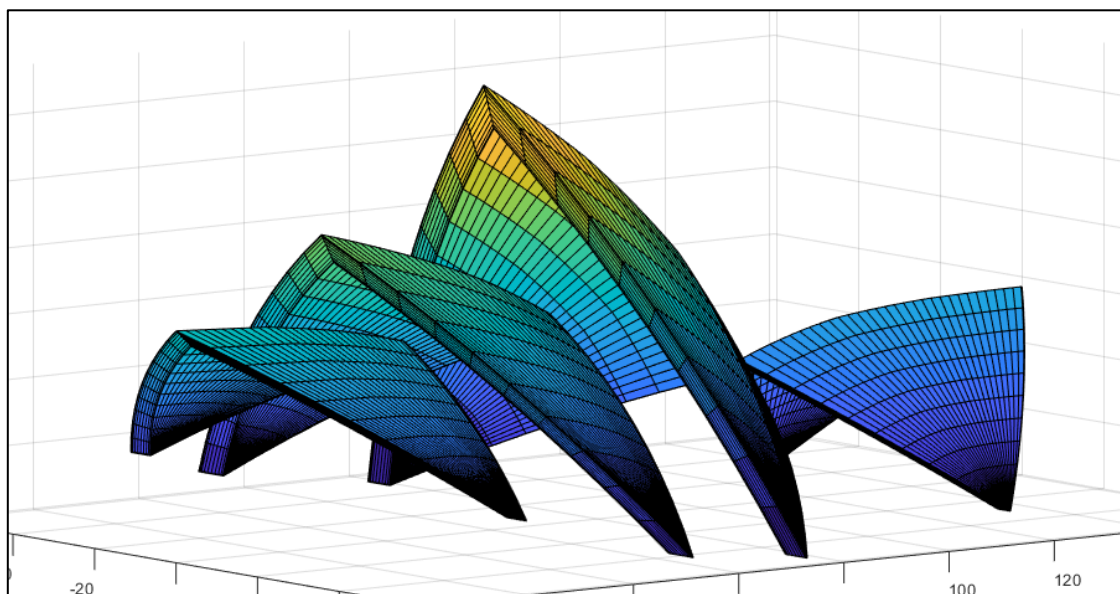
A 지붕의 조정점을 0.9 배하여 Bezier surface 를 그리면 내부의 천장을 표현할 수 있다.

1 번 호와 0.9 배 한 1 번 호를 이용해 또다른 Bezier surface 를 그리고 10 번 호도 마찬가지로 그리면 두 평면을 이어서 지붕의 두께를 줄 수 있다. (사진과 비교한 결과 0.9 배가 가장 실물과 유사했다.)



<지붕 A 의 내부 천장>

마찬가지로 B, C, D 도 수행하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.



사용한 코드는 다음과 같다. (A)

```
%% inside-ceiling ; A
cl=0.9;
xxxxa=xxxa*cl;
yyyya=yyya*cl;
zzzza=zzza*cl;
for ii=0:2
    for i=1:4
        for j=1:4
            Bx(i,j,ii+1)=xxxxa(i,j+3*ii);
            By(i,j,ii+1)=yyyya(i,j+3*ii);
            Bz(i,j,ii+1)=zzzza(i,j+3*ii);
        end
    end
end
for ii=1:3
    RX = U*M*Bx(:, :, ii)*M'*V'; RY = U*M*By(:, :, ii)*M'*V'; RZ =
    U*M*Bz(:, :, ii)*M'*V';
    surf(RX,RY+pya,RZ+pza);
    surf(-RX,RY+pya,RZ+pza);
end
% front
Bx=[xxxxa(:,1) xxxa(:,1) xxxxa(:,1) xxxxa(:,1) ];
By=[yyyya(:,1) yyya(:,1) yyyyaa(:,1) yyyyaa(:,1) ];
Bz=[zzzza(:,1) zzza(:,1) zzzza(:,1) zzzza(:,1) ];
RX = U*M*Bx*M'*V'; RY = U*M*By*M'*V'; RZ = U*M*Bz*M'*V';
surf(RX,RY+pya,RZ+pza);
surf(-RX,RY+pya,RZ+pza);
% rear
Bx=[xxxxa(:,10) xxxa(:,10) xxxxa(:,10) xxxxa(:,10) ];
By=[yyyya(:,10) yyya(:,10) yyyyaa(:,10) yyyyaa(:,10) ];
Bz=[zzzza(:,10) zzza(:,10) zzzza(:,10) zzzza(:,10) ];
RX = U*M*Bx*M'*V'; RY = U*M*By*M'*V'; RZ = U*M*Bz*M'*V';
surf(RX,RY+pya,RZ+pza);
surf(-RX,RY+pya,RZ+pza);
```

지붕 B와 C, D도 같은 방법으로 하였다..

(3) 건물 A 와 D 하단



<건물 A 의 하단부>



<건물 D 의 하단부>

건물 A 의 하단은 세 부분으로 이루어져 있다. 첫번째 부분은 천장에서 수직으로 내려오는 부분(Part 1)과 경사져서 바닥부분으로 내려오는 부분(Part 2), 그리고 마지막부분은 완만한 경사로 바닥의 원호와 만나는 부분(Part 3)이다.

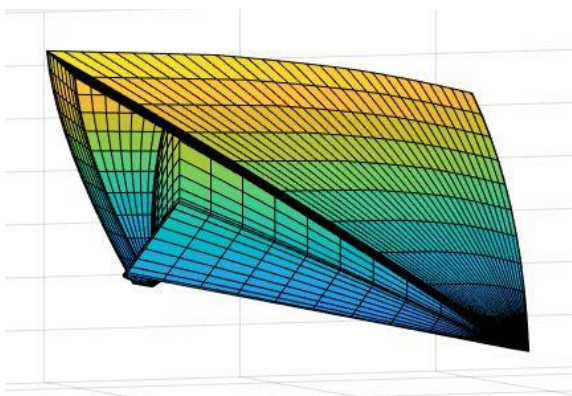
적절한 원호를 택하고 각각의 원호의 $x y z$ 좌표의 비율을 조절함으로써 각 부분을 그릴 수 있다.

먼저 Part 1 을 그리기 위해 건물 A 의 내부 천장을 이루는 3 번째 호를 사용하였다. 내부 A3 호의 z 성분을 조정하여 원본 호와 z 의 좌표를 0.5 곱한 호를 이용하여 평면을 만들었다.

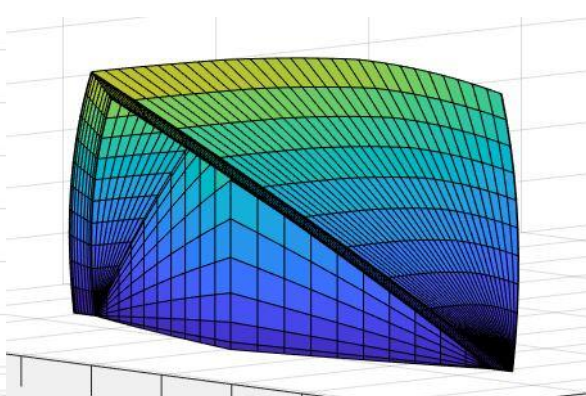
Part 2 는 z 성분을 조정한 세번째 호와 z 성분을 0.2 곱한 두번째 호를 사용하였다.

Part 3 는 건물 전체의 기단과 이어져 있기 때문에 후에 기단을 설계할 때 만들었다.

건물 D 의 하단은 수직으로 내려오는 부분 하나로 이루어져 있고 7 번 호의 원본과 z 좌표를 0 으로 만든 7 번 호를 사용하였다.



<건물 A 의 하단부>



<건물 D 의 하단부>

사용한 코드는 다음과 같다. (A 와 D 하단)

```
%% under A, under D
Bx=[xxxxa(:,3) xxxxa(:,3) xxxxa(:,3) xxxxa(:,3)];
By=[yyyya(:,3) yyyyd(:,3) yyyyd(:,3) yyyyd(:,3)];
Bz=[zzzza(:,3) zzzza(:,3) zzzza(:,3)*0.5 zzzza(:,3)*0.5];
RX = U*M*Bx*M'*V'; RY = U*M*By*M'*V'; RZ = U*M*Bz*M'*V';
surf(RX,RY+pya,RZ+pza); surf(-RX,RY+pya,RZ+pza);

Bx=[xxxxa(:,2) xxxxa(:,2) xxxxa(:,3) xxxxa(:,3)];
By=[yyyya(:,2) yyyyd(:,2) yyyyd(:,3) yyyyd(:,3)];
Bz=[zzzza(:,2)*0.2 zzzza(:,2)*0.2 zzzza(:,3)*0.5 zzzza(:,3)*0.5];
RX = U*M*Bx*M'*V'; RY = U*M*By*M'*V'; RZ = U*M*Bz*M'*V';
surf(RX,RY+pya,RZ+pza); surf(-RX,RY+pya,RZ+pza);

Bx=[xxxxd(:,7) xxxxd(:,7) xxxxd(:,7) xxxxd(:,7)];
By=[yyyyd(:,7) yyyyd(:,7) yyyyd(:,7) yyyyd(:,7)];
Bz=[zzzzd(:,7) zzzzd(:,7) zzzzd(:,7)*0 zzzzd(:,7)*0];
RX = U*M*Bx*M'*V'; RY = U*M*By*M'*V'; RZ = U*M*Bz*M'*V';
surf(RX,RY+pyd,RZ+pzd); surf(-RX,RY+pyd,RZ+pzd);
```

(4) 건물 사이의 곡면



<건물 A, B, C, D 사이의 곡면>

각 건물 사이에도 각각 4 종류의 곡면이 존재한다.

1) 건물 A와 B 사이

(내부 천장의 호는 원본 건물의 호에서 xyz 좌표값을 90%로 감소시킨 호이다.)

Part 1 : A의 8번 호의 원본과 z좌표를 5% 증가시켜 사용했다.

Part 2 : z좌표를 5% 증가시킨 호 A8과 y와 z좌표를 74%로 축소시킨 B의 내부 천장의 두번째 호를 이용했다.

Part 3 : y와 z좌표를 74%로 축소시킨 B의 내부 천장의 두번째 호와 z좌표를 85% 축소시킨 내부 천장의 세번째 호를 사용했다.

Part 4 : 내부 천장의 세번째 호의 원본과 그 호를 z좌표를 85% 축소시켜 사용했다.

2) 건물 B와 C 사이

Part 1 : B8번 호의 원본과 z좌표를 5% 증가시켜 사용했다.

Part 2 : z좌표를 5% 증가시킨 호 B8과 y와 z좌표를 57%로 축소시킨 C의 내부 천장의 첫번째 호를 이용했다.

Part 3 : y 와 z좌표를 57%로 축소시킨 C 의 내부 천장의 첫번째 호와 z좌표를 75% 축소시킨 내부 천장의 세번째 호를 사용했다.

Part 4 : 내부 천장의 세번째 호의 원본과 그 호를 z좌표를 75% 축소시켜 사용했다.

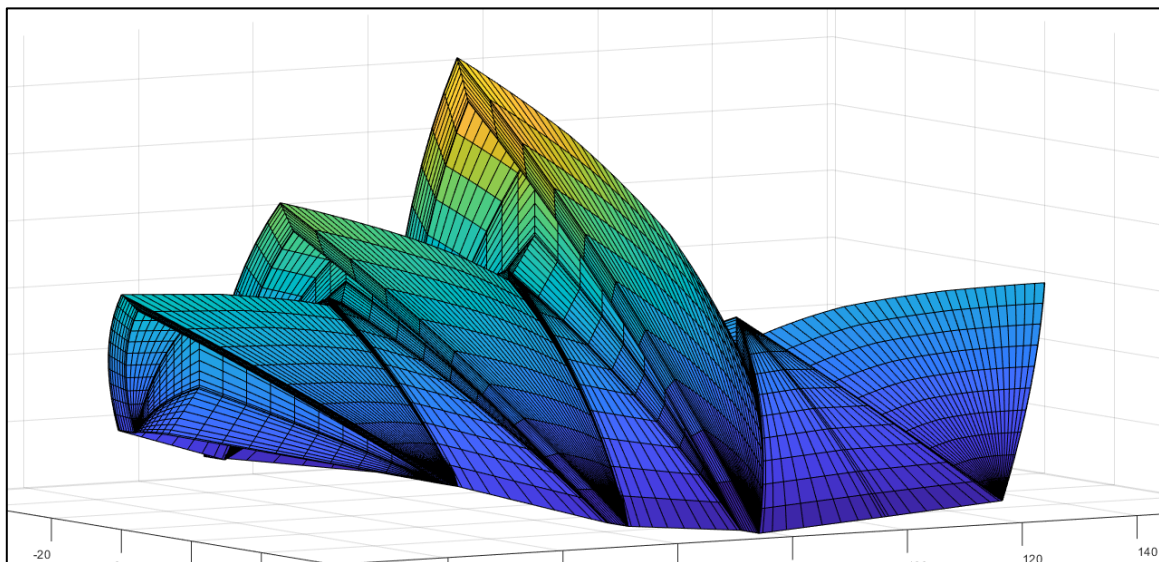
3) 건물 C 와 D 사이

Part 1 : 호 C10 의 원본과 z좌표를 20% 증가시켜 사용했다.

Part 2 : z좌표를 20% 증가시킨 호 C10 과 x좌표는 C10 과 D1 의 평균, y좌표는 C10 의 최대값과 같고, z좌표는 20% 증가시킨 C10 의 z좌표로 이루어진 곡선으로 만들었다.

Part 3 : Part 2 의 두번째 곡선과 D1 의 z좌표를 20% 증가시켜 사용했다.

Part 4 : 호 D1 의 원본과 z좌표를 20% 증가시킨 곡선을 사용했다.



<건물 A, B, C, D 사이의 곡면>

사용된 코드는 다음과 같다. (A 와 B 사이)

```
%% behind ; A
sa=0.74;
Bx=[xxxa(:,8) xxxa(:,8) xxxa(:,8) xxxa(:,8)];
By=[yyya(:,8) yyya(:,8) yyya(:,8) yyya(:,8)];
Bz=[zzza(:,8)*1.05 zzza(:,8)*1.05 zzza(:,8) zzza(:,8)];
RX = U*M*Bx*M'*V'; RY = U*M*By*M'*V'; RZ = U*M*Bz*M'*V';
surf(RX,RY+pya,RZ+pza); surf(-RX,RY+pya,RZ+pza);

Bx=[xxxa(:,8) xxxa(:,8) xxxxb(:,2) xxxxb(:,2)];
By=[yyya(:,8)+pya yyya(:,8)+pya yyyyb(:,2)*sa+pyb yyyyb(:,2)*sa+pyb];
Bz=[zzza(:,8)*1.05+pza zzza(:,8)*1.05+pza zzzzb(:,2)*sa+pzb
zzzzb(:,2)*sa+pzb];
RX = U*M*Bx*M'*V'; RY = U*M*By*M'*V'; RZ = U*M*Bz*M'*V';
surf(RX,RY,RZ); surf(-RX,RY,RZ);
```

```

Bx=[xxxxb(:,3) xxxxb(:,3) xxxxb(:,2) xxxxb(:,2)];
By=[yyyyb(:,3) yyyyb(:,3) yyyyb(:,2)*sa yyyyb(:,2)*sa];
Bz=[zzzzb(:,3)*0.85 zzzzb(:,3)*0.85 zzzzb(:,2)*sa zzzzb(:,2)*sa];
RX = U*M*Bx*M'*V'; RY = U*M*By*M'*V'; RZ = U*M*Bz*M'*V';
surf(RX,RY+pyb,RZ+pzb); surf(-RX,RY+pyb,RZ+pzb);

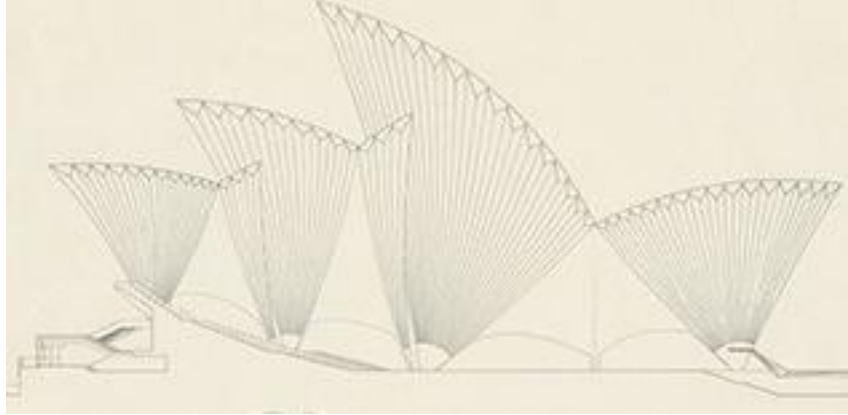
Bx=[xxxxb(:,3) xxxxb(:,3) xxxxb(:,3) xxxxb(:,3)];
By=[yyyyb(:,3) yyyyb(:,3) yyyyb(:,3) yyyyb(:,3)];
Bz=[zzzzb(:,3) zzzzb(:,3) zzzzb(:,3)*0.85 zzzzb(:,3)*0.85];
RX = U*M*Bx*M'*V'; RY = U*M*By*M'*V'; RZ = U*M*Bz*M'*V';
surf(RX,RY+pyb,RZ+pzb); surf(-RX,RY+pyb,RZ+pzb);

```

B와 C사이, C와 D사이도 같은 방법으로 하였다.

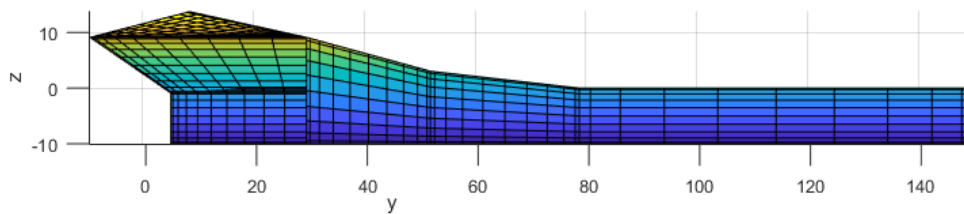
(5) 기단

기단 부분은 따로 정확한 치수의 설계도가 없고 설계도마다 다른 모양이고 실물도 또 다른 모양이었다. 그렇기 때문에 다음 설계도를 참고하여 만들었다.

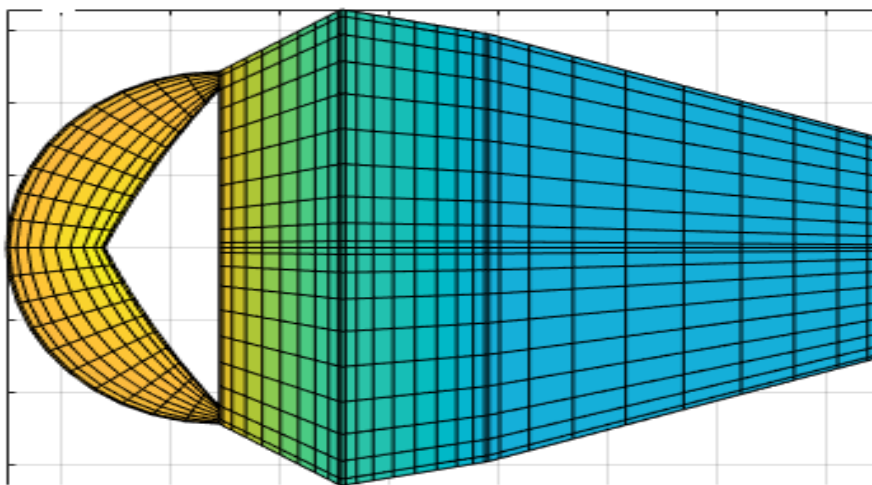


<설계도>

yz에서의 도면이 없기 때문에 임의로 건물 B, C, D에는 x좌표에 5m 여유를 두고, 건물 D의 y좌표에 15m여유를 두고 만들었다. 건물 A의 아래부분은 여유를 두지 않고 위에서 만들지 못한 A의 하단 부분의 Part 3 영역과 이어서 만들었다.



<기단 - yz평면>



<기단 - yx평면>

사용된 코드는 다음과 같다. (일부)

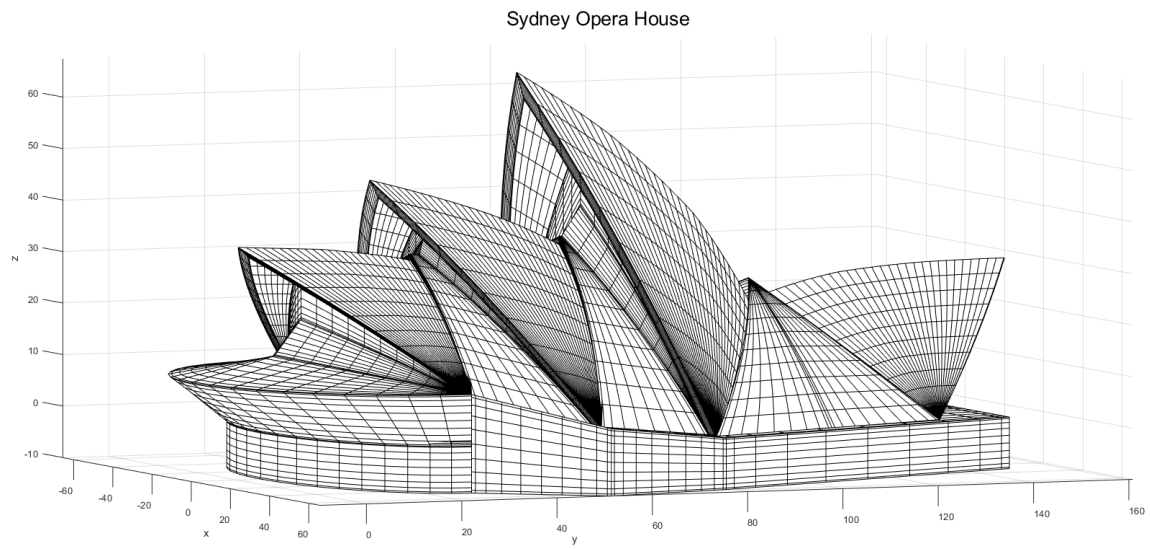
```
%% podium
tgn=tan((xc-xd)/(pyd-pyc));
xe=(pyd+15-pyc)*tgn;
Bx = [0 0 xc+5 xc+5; 0 0 xc+5 xc+5; 0 0 xe xe; 0 0 xe xe];
By = [pyc pyc pyc pyc; pyc pyc pyc pyc; pyd+15 pyd+15 pyd+15 pyd+15;
pyd+15 pyd+15 pyd+15 pyd+15];
Bz = [0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0];
RX = U*M*Bx*M'*V'; RY = U*M*By*M'*V'; RZ = U*M*Bz*M'*V';
surf(RX,RY,RZ); surf(-RX,RY,RZ);

Bx = [0 0 xe xe; 0 0 xe xe; 0 0 xe xe; 0 0 xe xe];
By = [pyd+15 pyd+15 pyd+15 pyd+15; pyd+15 pyd+15 pyd+15 pyd+15; pyd+15
pyd+15 pyd+15 pyd+15; pyd+15 pyd+15 pyd+15 pyd+15];
Bz = [0 0 0 0; 0 0 0 0; -10 -10 -10 -10; -10 -10 -10 -10];
RX = U*M*Bx*M'*V'; RY = U*M*By*M'*V'; RZ = U*M*Bz*M'*V';
surf(RX,RY,RZ); surf(-RX,RY,RZ);

Bx = [xc+5 xc+5 xc+5 xc+5; xc+5 xc+5 xc+5 xc+5; xe xe xe xe; xe xe xe
xe];
By = [pyc pyc pyc pyc; pyc pyc pyc pyc; pyd+15 pyd+15 pyd+15 pyd+15;
pyd+15 pyd+15 pyd+15 pyd+15];
Bz = [-10 -10 0 0; -10 -10 0 0; -10 -10 0 0; -10 -10 0 0];
RX = U*M*Bx*M'*V'; RY = U*M*By*M'*V'; RZ = U*M*Bz*M'*V';
surf(RX,RY,RZ); surf(-RX,RY,RZ);

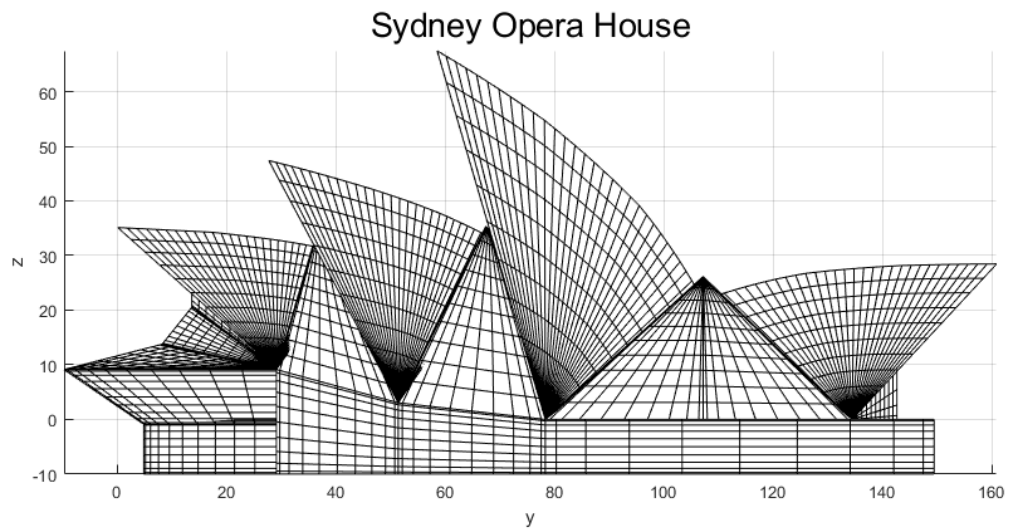
Bx = [xc+5 xc+5 xc+5 xc+5; xc+5 xc+5 xc+5 xc+5; xb+5 xb+5 xb+5 xb+5;
xb+5 xb+5 xb+5 xb+5];
By = [pyc pyc pyc pyc; pyc pyc pyc pyc; pyb pyb pyb pyb; pyb pyb pyb
pyb];
Bz = [-10 -10 0 0; -10 -10 0 0; -10 -10 pzb pzb; -10 -10 pzb pzb];
RX = U*M*Bx*M'*V'; RY = U*M*By*M'*V'; RZ = U*M*Bz*M'*V';
surf(RX,RY,RZ); surf(-RX,RY,RZ);
```


4. 결과 및 분석



<결과>

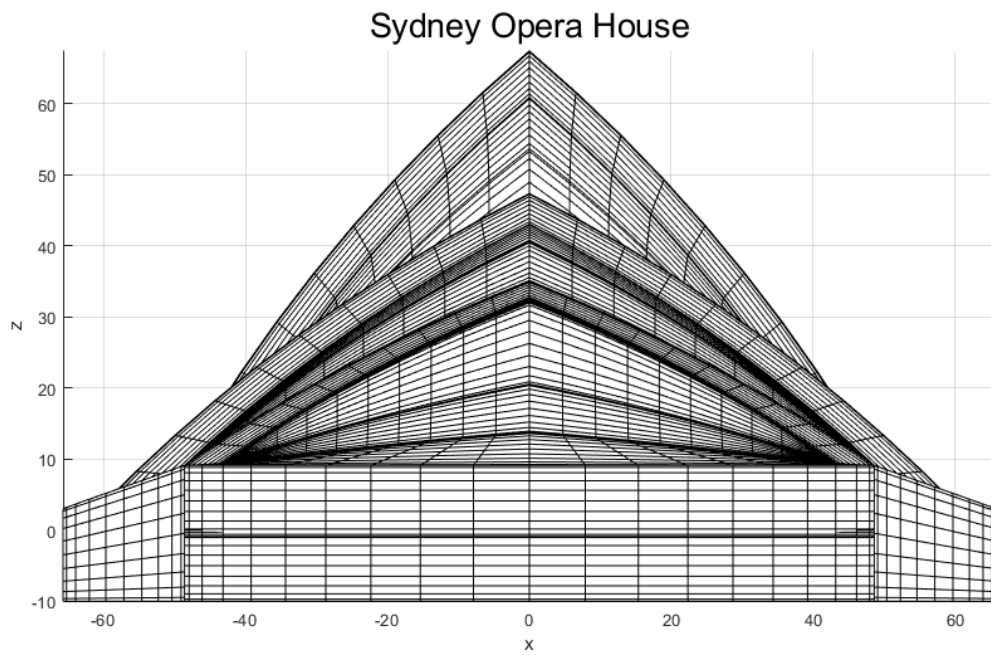




<측면>



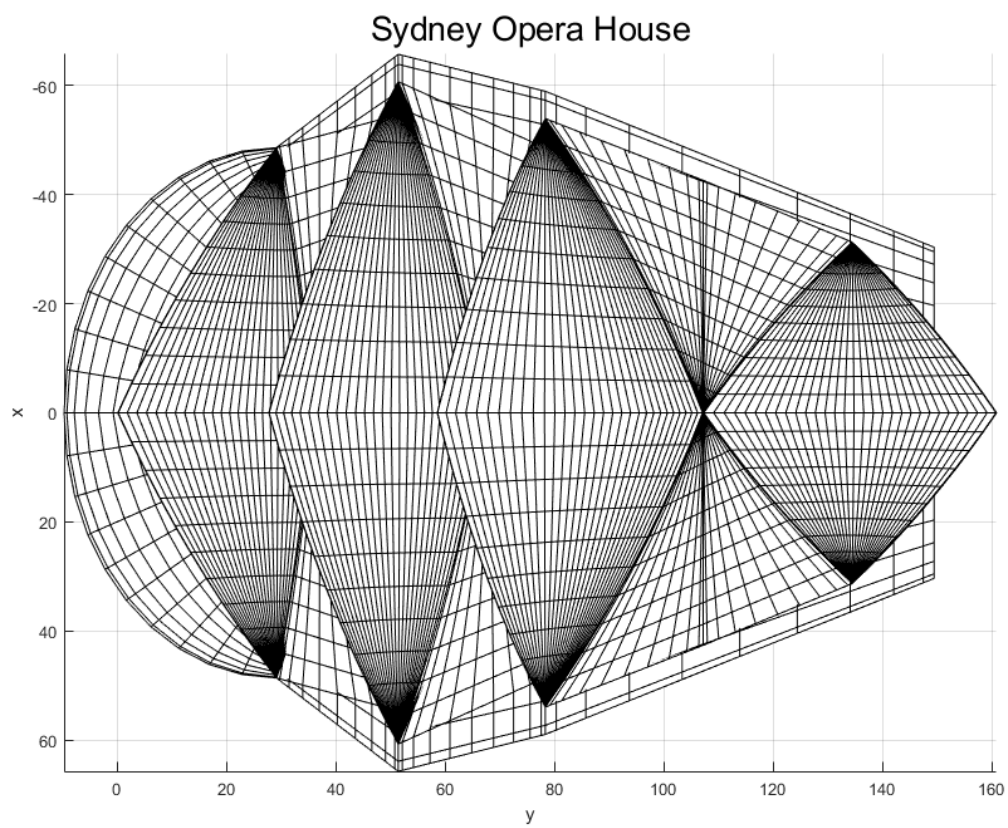
실물과 비교해 본 결과 지붕 A의 아래부분과 연단, 각 지붕아래 출입구 부분이 다르다는 것을 알 수 있었다. 이 부분은 정확한 설계도가 없었기 때문에 오차가 발생했다.



<정면>



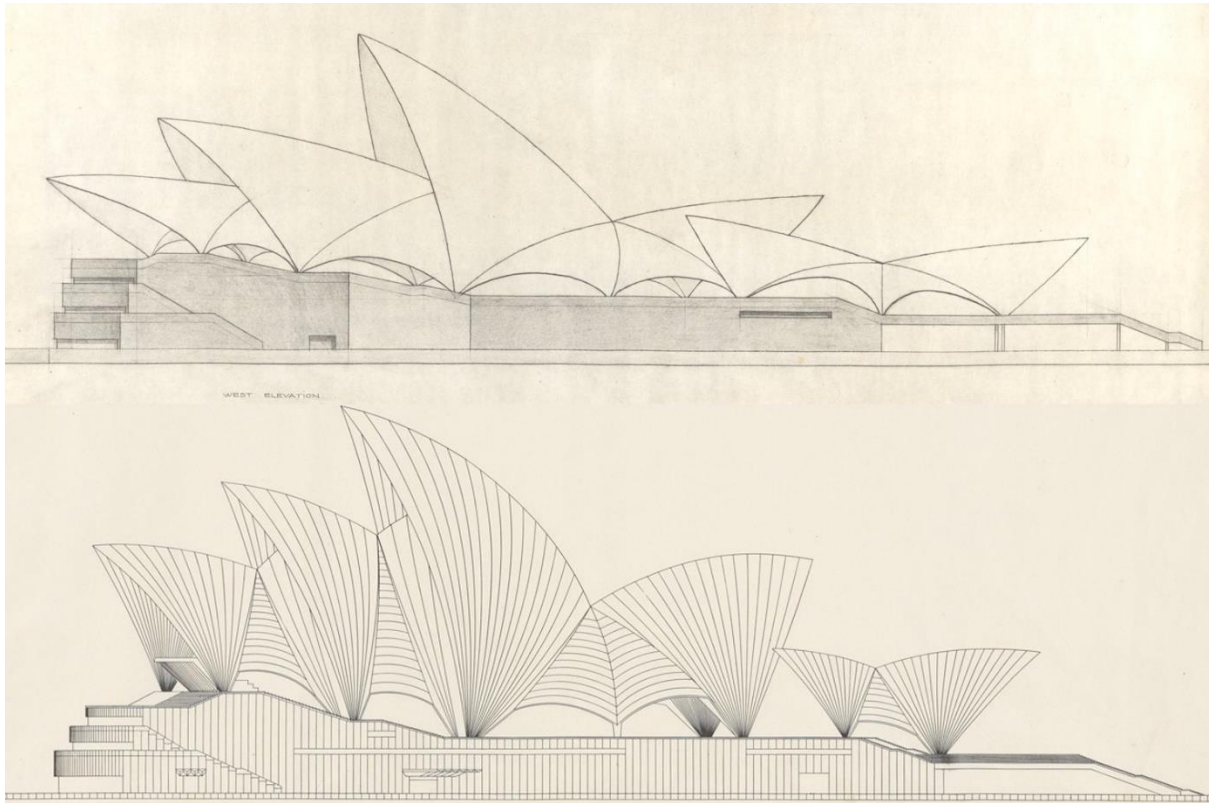
실물과 비교했을 때 MATLAB으로 구현한 결과가 폭이 더 넓게 나왔다는 것을 알 수 있었다. 이는 찾은 설계도보다 실제 건물의 폭이 더 좁았기 때문이다. 이는 상단에서 보았을 때 더 잘 드러났다.



<상단>



상단에서 봤을 때 설계한 결과가 폭이 더 넓은 것을 명확하게 알 수 있었다. 설계도의 치수가 다른 이유는 다른 자료를 통해 알 수 있었다.



초기 설계의 경우 오페라 하우스의 높이가 더 낮게 계획되었는데 실제 건축할 당시 높이가 높게 수정되었다고 한다. 하지만 이번 설계에선 기존 높이로 만들어진 설계도를 실제 높이에 맞춘 비율로 조절하였기 때문에 이러한 오차가 발생하였다.