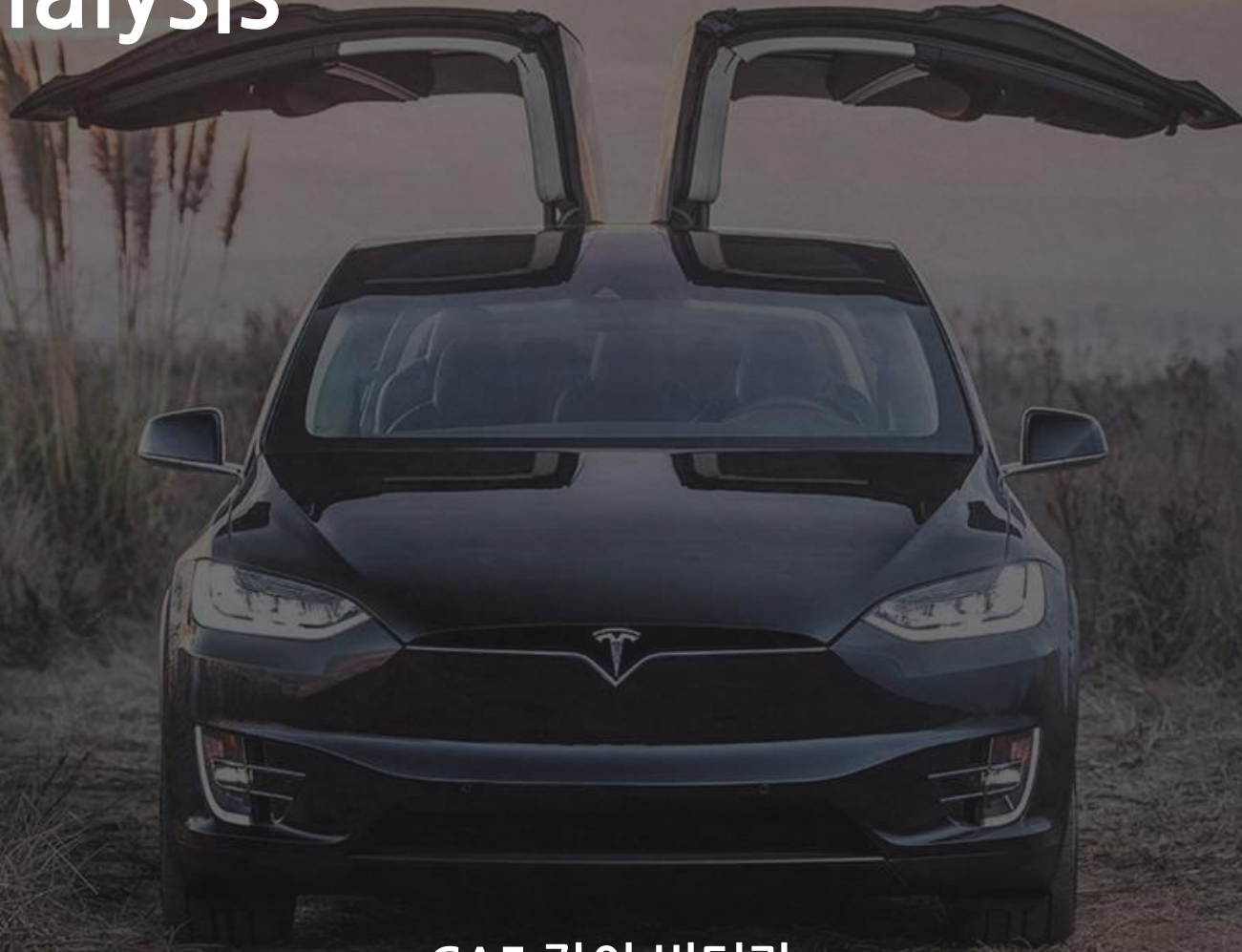


Falcon Wing Logic Design & Hinge Analysis



CAE 같이 버텨라

미래자동차공학과 2020005387 임규빈

미래자동차공학과 2019006117 최준형

미래자동차공학과 2018086926 이준한

Presentation INDEX

01 ————— What is falcon wing?

1. Falcon wing이 열리는 구조
2. 참고한 자료 및 제원

02 ————— 도어 작동 로직 구현

1. Movement 1
2. Movement 2
3. Movement 3

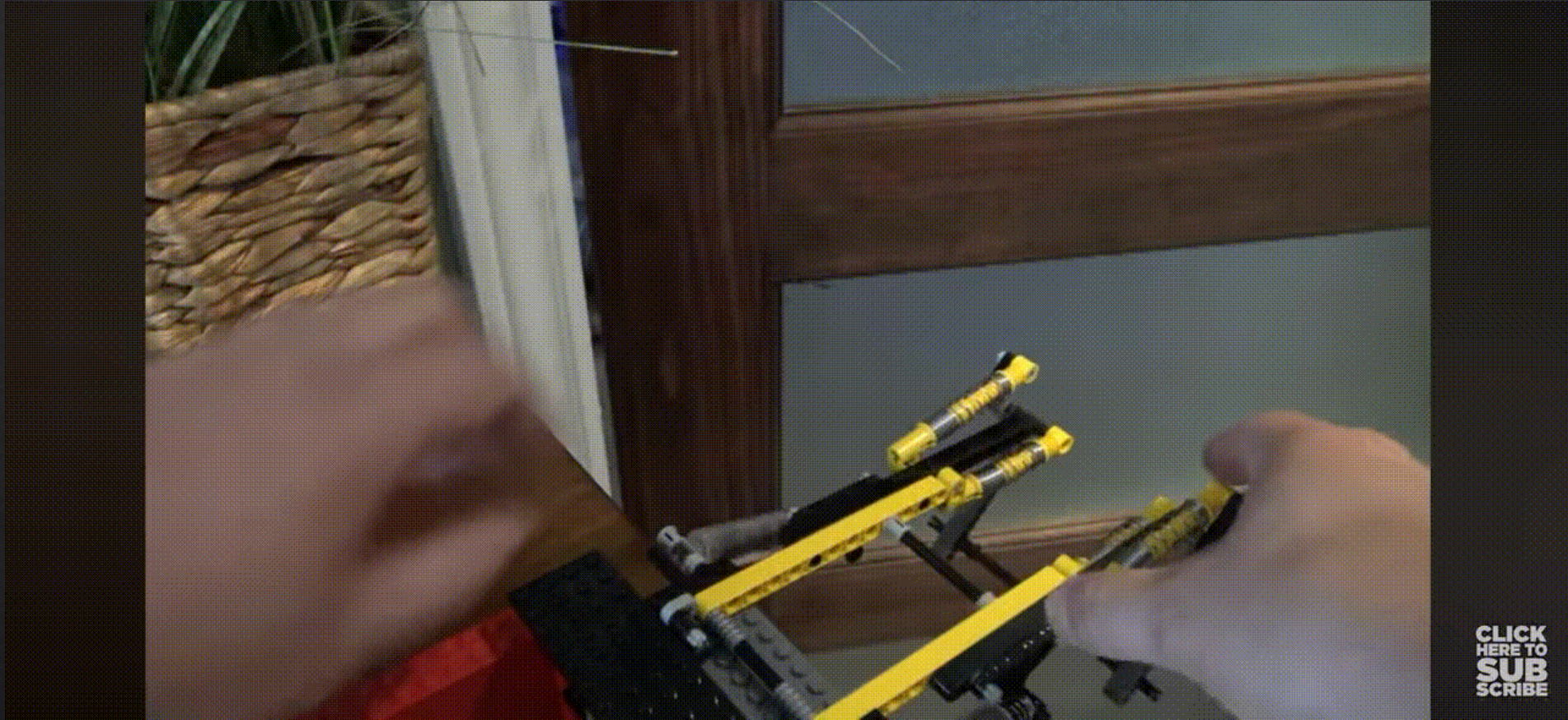
03 ————— Hinge 설계 및 해석

1. Hinge 설계
2. Matlab, comsol을 통한 해석
3. 수명계산

04 ————— 고찰 및 참고문헌

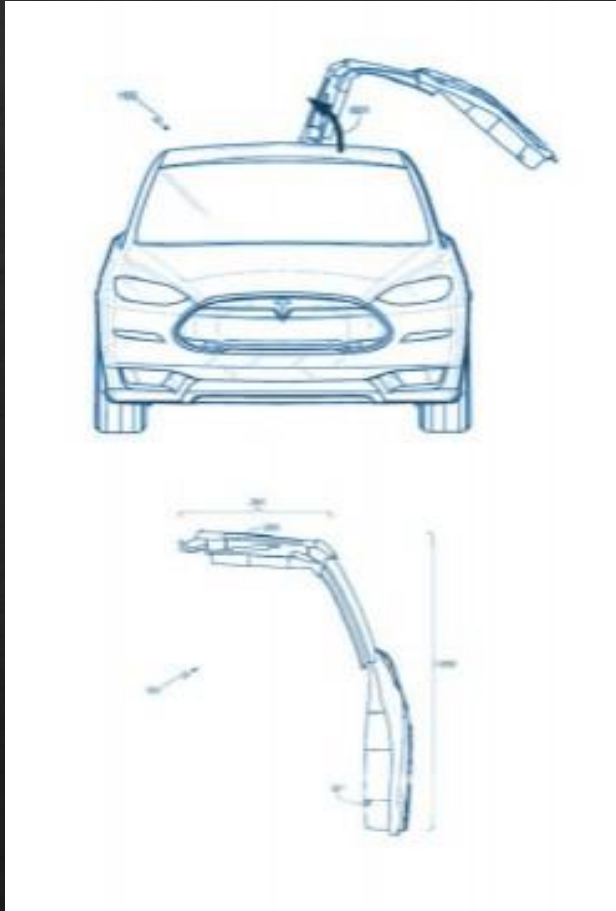
01 _____
What is falcon wing?

What is falcon wing?

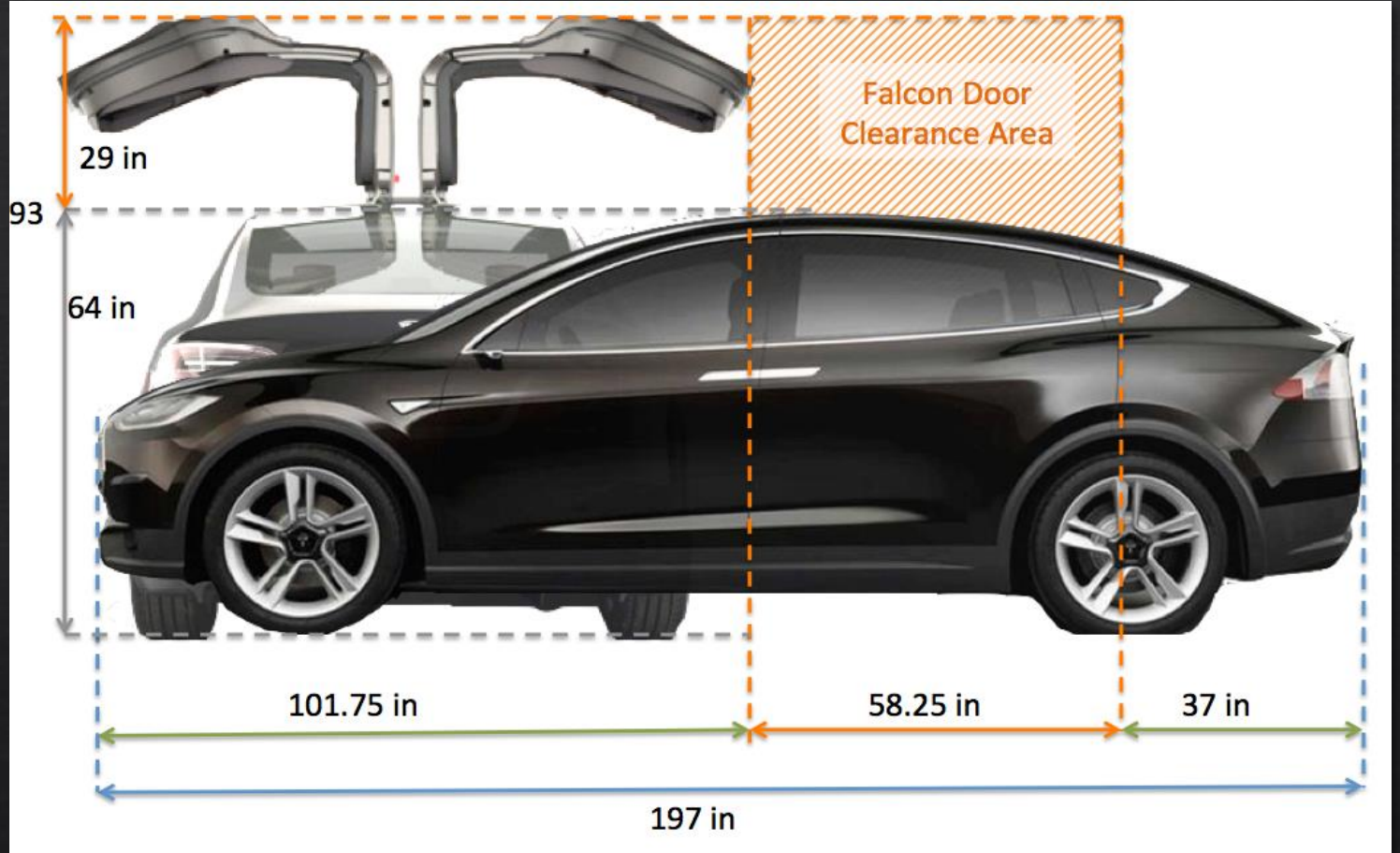


01 What is falcon wing?

참고자료



문의 구조



문의 길이

01 What is falcon wing?

제원 설정

1. 길이

- 1) 위의 지붕 부분의 문 (wide x length = cm^2)
= $147.955 \text{ (cm)} \times 73.66 \text{ (cm)}$
- 2) 옆 부분의 문 (wide x length = cm^2)
= $147.955 \text{ (cm)} \times 162.56 \text{ (cm)}$

2. 두께

- 0.7mm로 가정.
- 문을 얇은 철판 고려
- 문의 부자재로 인한 두께 무시

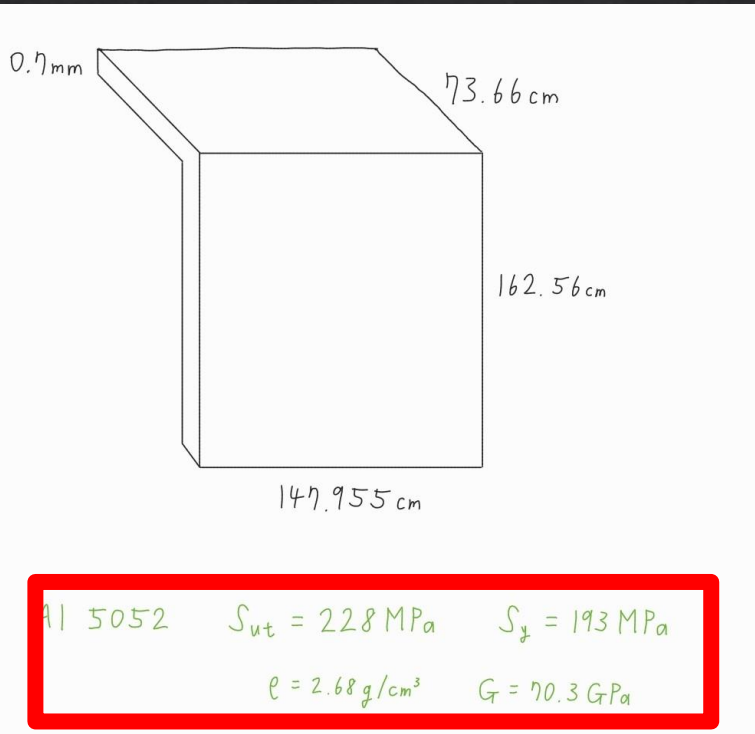
3. 무게

- 1) 위의 지붕 부분의 무게 (kg)
= 10 kg
- 2) 옆 부분의 무게 (kg)
= 20 kg

무게 균일 분포, 문의 무게중심: 가운데 가정

4. 재질

- 1) 재질 : Al 5052
 $S_{ut} = 228 \text{ MPa}$, $S_y = 193 \text{ MPa}$
 $G = 70.3 \text{ GPa}$, $\rho = 2.68 \text{ g/cm}^3$

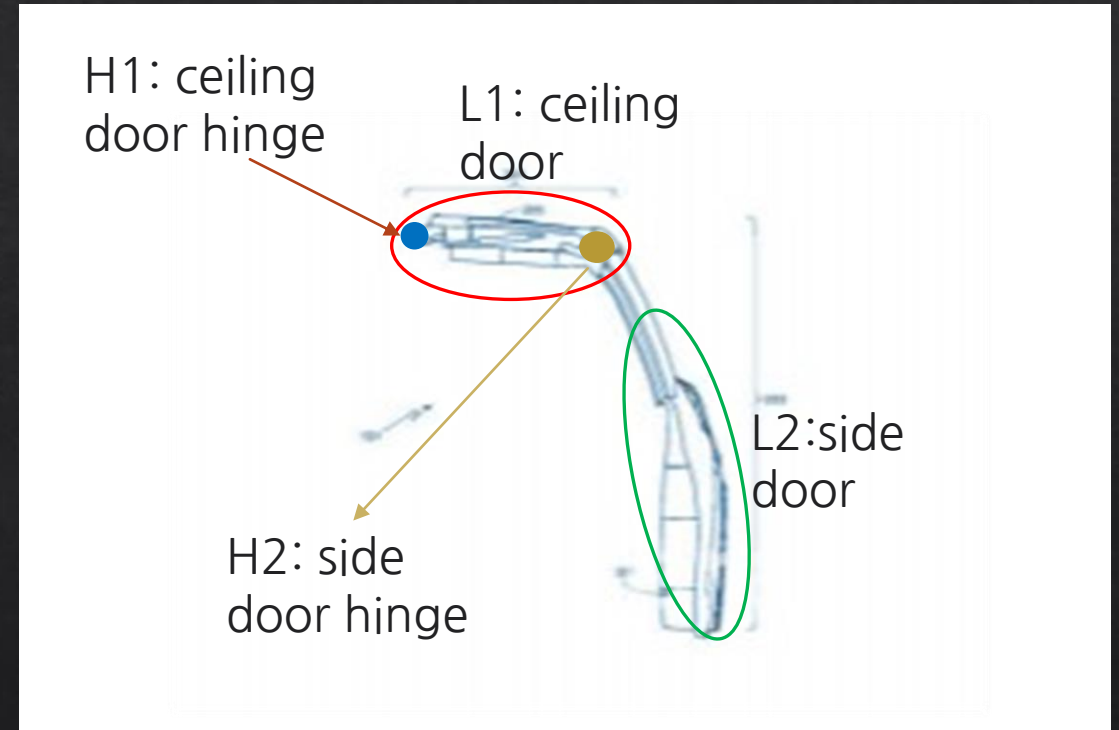


01 What is falcon wing?

CAD로 문의 움직임 구현

<동작 과정>

- (1) Ceiling door 또는 Side door을 들어올려
한계 거리에 접근시킴
- (2) 한계 거리를 유지하며
Ceiling door과 Side door을 들어올림
- (3) Side door hinge와 옆 차의 천장 모서리와의
거리가 L2가 된 경우, 도어를 활짝 펼침
- (4) Hinge를 1deg씩 조작하는 것을 1회로 하여
목표지점까지 작동 시간 측정



01 What is falcon wing?

CAD로 문의 움직임 구현

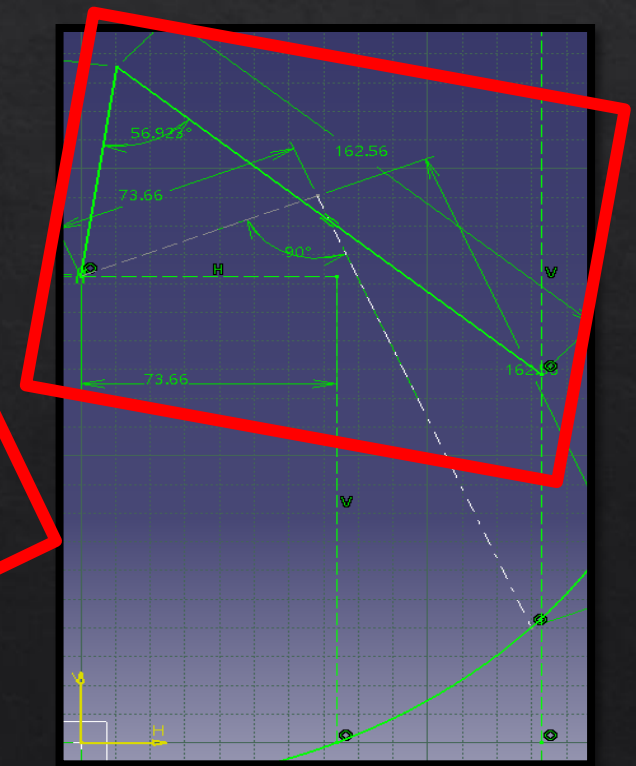
1단계

1,2번의 문이 90도를 유지한 채 옆 차와의 한계거리까지 벌어짐.



2단계

옆 차와의 한계 거리 유지한 채 문의 끝점은 수직으로 올라가면서 1,2번 문의 각도 좁아짐.



도어 작동 로직

- 옆 차에 닿지 않기 위한 한계 거리 설정
 - 옆 차와 힌지 사이 거리가
도어의 회전반경보다 길어질 경우
도어를 활짝 펼침
- ➔ 옆 차에 부딪히지 않으면서, 최단시간에
도어를 펼치는 로직 탐색 및 시뮬레이션

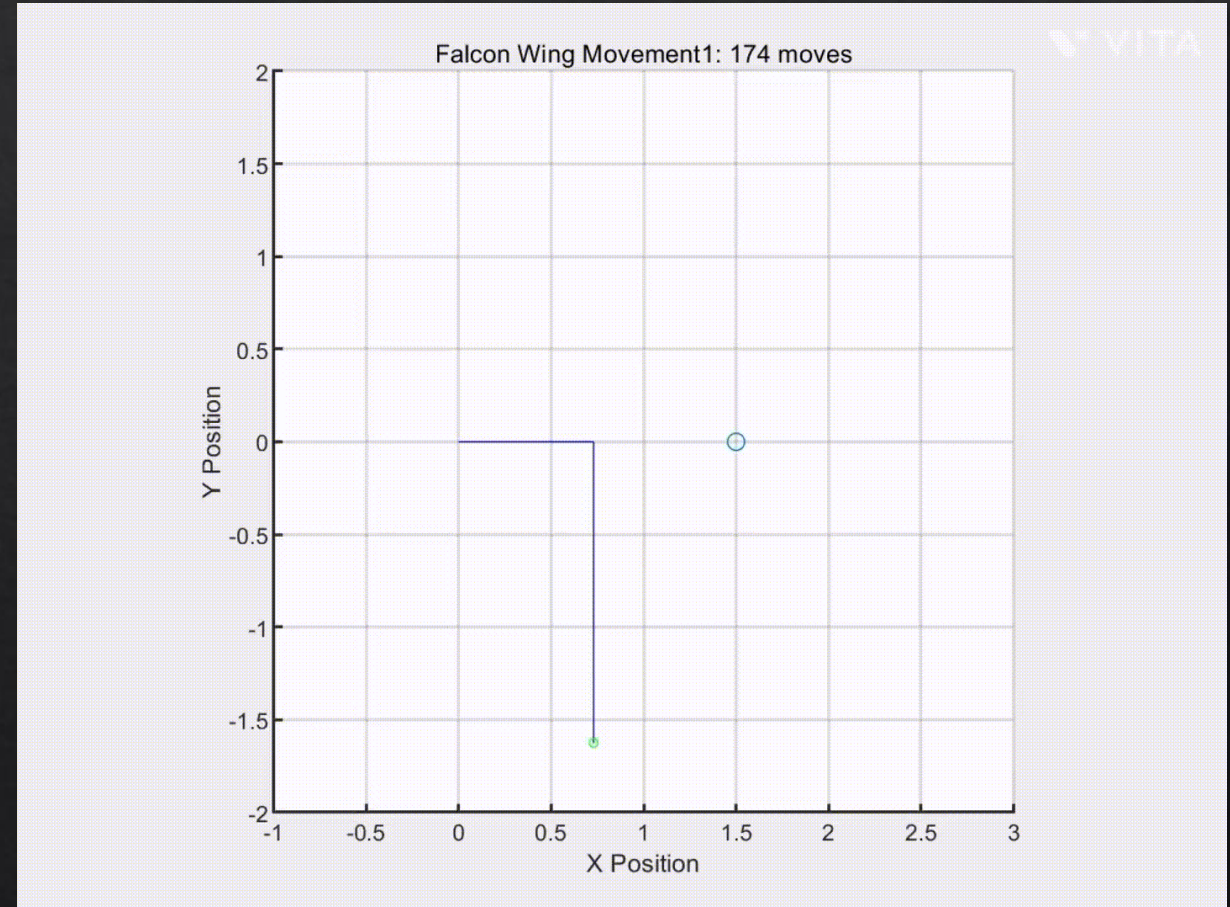


Movement 1

Movement1: H2를 먼저 펼침

- (1) H2를 한계거리까지 펼침
- (2) 한계 거리를 유지하며 H1을 들어올림
- (3) H2와 옆 차의 천장 모서리와의 거리가 L2가 된 경우, 도어를 활짝 펼침

➔ 로직 동작 횟수: 174회

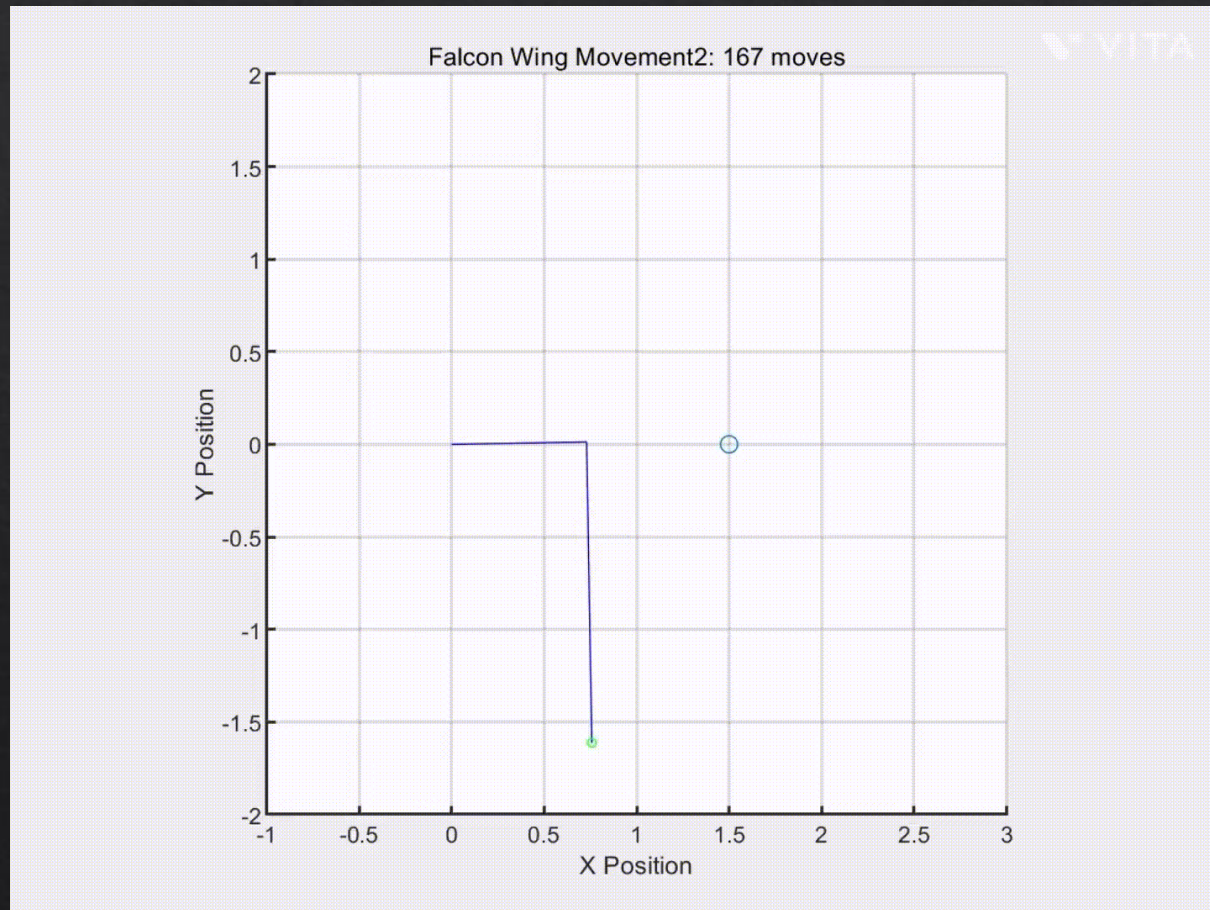


Movement 2

Movement2: H1을 먼저 펼침

- (1) H1를 한계거리까지 펼침
- (2) 한계 거리를 유지하며 H1을 들어올리며
H2 각도 조정
- (3) H2와 옆 차의 천장 모서리와의 거리가
L2가 된 경우, 도어를 활짝 펼침

➔ 로직 동작 횟수: 167회

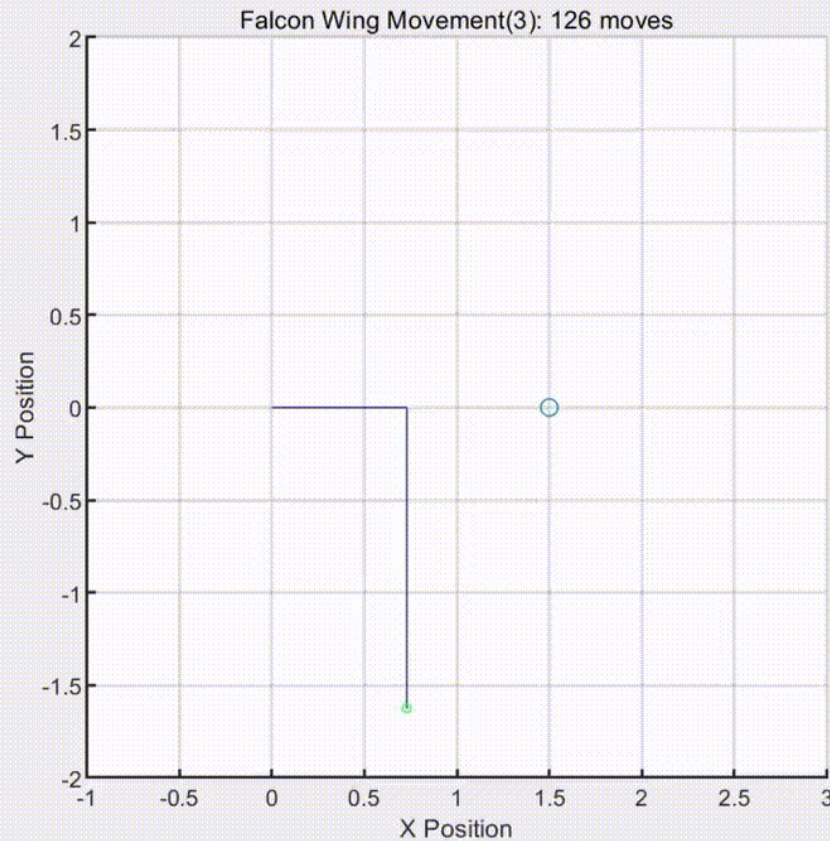


Movement 3

Movement3: H1을 30deg 먼저 들어올림

- (1) H1을 30도 들어올림
- (2) 한계 거리까지 H1과 H2를 같이 조정
- (3) H2와 옆 차의 천장 모서리와의 거리가 L2가 된 경우, 도어를 활짝 펼침

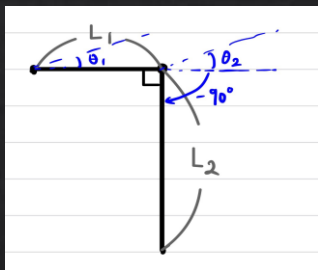
➔ 로직 동작 횟수: 126회



Matlab Code

1. 변수 값 선언

```
Robot_arm_test_2_noFeedback_2.m  x  +
1  function control_2dof_robot_arm_limit_x()
2  % 초기 매개변수 설정
3  L1 = 0.73; L2 = 1.6256; % 링크 길이
4  theta1 = deg2rad(0); % L1의 시작 각도
5  theta2 = deg2rad(-90); % L2의 시작 각도
6  minDist= 0.5;
7  otherCarLocationX = 1.5;
8  otherCarLocationY = 0;
```



- Theta1은 0°부터 시작
- Theta2는 -90°부터 시작
- 차 간의 거리: minDist로 선언 후
보통의 차간거리 0.5 m값 대입

2. 각도에 따른 문의 x,y 좌표

```
function [x, y] = forward_kinematics_L1(L1, theta1)
% 첫 번째 링크의 순방향 운동학
x = L1 * cos(theta1);
y = L1 * sin(theta1);
end

function [x, y] = forward_kinematics_L2(L1, L2, theta1, theta2)
% 두 번째 링크의 순방향 운동학
x = L1 * cos(theta1) + L2 * cos(theta1 + theta2);
y = L1 * sin(theta1) + L2 * sin(theta1 + theta2);
end
```

각도의 변화에 따른
각 링크의 끝점 좌표로 입력.

Case1: 174회

```

% 제어 루프
while (1)
    % 순방향 운동학으로 현재 위치 계산
    [x_L1, y_L1] = forward_kinematics_L1(L1, theta1);
    [x_L2, y_L2] = forward_kinematics_L2(L1, L2, theta1, theta2);

    % L1과 L2의 끝점 플로팅
    plot([0, x_L1], [0, y_L1], 'b-', 'DisplayName', 'L1');
    plot([x_L1, x_L2], [y_L1, y_L2], 'b-', 'DisplayName', 'L2');
    plot(x_L2, y_L2, 'o', 'MarkerSize', 3, 'MarkerEdgeColor', 'g');

    distanceToOtherCar = ((x_L1 - otherCarLocationX)^2 + (y_L1 - otherCarLocationY)^2)^0.5;

    % L2의 끝점이 x = minDist를 넘지 않도록 조절
    % L2의 끝점이 x = minDist를 넘는 경우, theta1을 증가
    if distanceToOtherCar < L2
        if (x_L2 < minDist + L1)
            theta2 = theta2 + deg2rad(1);
            moveCount = moveCount + 1;
        elseif (x_L2 > minDist + L1)
            theta2 = theta2 - deg2rad(1);
            theta1 = theta1 + deg2rad(1);
            moveCount = moveCount + 1;
        end
    else
        % L2의 끝점이 x = minDist를 넘는 경우
        % theta1을 90도까지 증가시킴
        % theta2를 -90도까지 증가시킴
        if (theta1 <= deg2rad(90)) || (theta2 <= deg2rad(-90))
            add1 = 1;
            add2 = 1;
        else
            if (theta1 >= deg2rad(90))
                add1 = 0;
            end
            if (theta2 >= deg2rad(-90))
                add2 = 0;
            end

            theta1 = theta1 + deg2rad(add1);
            theta2 = theta2 + deg2rad(add2);
            moveCount = moveCount + 1;
        end
    end

    % 종료 조건
    if (theta1 >= deg2rad(90) && theta2 >= deg2rad(-90))
        break;
    end
end

```

Case2: 167회

```

while(1)
    % 순방향 운동학으로 현재 위치 계산
    [x_L1, y_L1] = forward_kinematics_L1(L1, theta1);
    [x_L2, y_L2] = forward_kinematics_L2(L1, L2, theta1, theta2);

    distanceToOtherCar = ((x_L1 - otherCarLocationX)^2 + (y_L1 - otherCarLocationY)^2)^0.5;

    % L2의 끝점이 x = minDist를 넘지 않도록 조절
    % L2의 끝점이 x = 4를 넘는 경우, theta1을 조금 증가
    if distanceToOtherCar < L2
        if x_L2 < minDist + L1
            theta1 = theta1 + deg2rad(1);
            moveCount = moveCount + 1;
        else
            % L2의 끝점이 x = 4를 넘는 경우, theta2를 조금 줄임
            theta2 = theta2 - deg2rad(1);
            moveCount = moveCount + 1;
        end
    end
    if (theta1 <= deg2rad(90)) || (theta2 <= deg2rad(-90))
        add1 = 1;
        add2 = 1;
    else
        if (theta1 >= deg2rad(90))
            add1 = 0;
        end
        if (theta2 >= deg2rad(-90))
            add2 = 0;
        end

        theta1 = theta1 + deg2rad(add1);
        theta2 = theta2 + deg2rad(add2);
        moveCount = moveCount + 1;
    end
end

% 종료 조건
if (theta1 >= deg2rad(90) && theta2 >= deg2rad(-90))
    break;
end

```

Case3: 126회

```

while (1)
    % 순방향 운동학으로 현재 위치 계산
    [x_L1, y_L1] = forward_kinematics_L1(L1, theta1);
    [x_L2, y_L2] = forward_kinematics_L2(L1, L2, theta1, theta2);

    % 다른 자동차와의 거리 계산
    distanceToOtherCar = norm([x_L1 - otherCarLocationX, y_L1 - otherCarLocationY]);

    % L2의 끝점이 x = minDist를 넘지 않도록 조절
    if distanceToOtherCar < L2
        if theta1 <= deg2rad(30)
            theta1 = theta1 + deg2rad(1);
            theta2 = theta2 - deg2rad(1);
        else
            if x_L2 < minDist + L1
                theta1 = theta1 + deg2rad(1);
                theta2 = theta2 + deg2rad(1);
            else
                theta1 = theta1 + deg2rad(1);
                theta2 = theta2 - deg2rad(1);
            end
        end
        moveCount = moveCount + 1;
    else
        if (theta1 <= deg2rad(90)) || (theta2 <= deg2rad(-90))
            add1 = 1;
            add2 = 1;
        else
            if (theta1 >= deg2rad(90))
                add1 = 0;
            end
            if (theta2 >= deg2rad(-90))
                add2 = 0;
            end

            theta1 = theta1 + deg2rad(add1);
            theta2 = theta2 + deg2rad(add2);
            moveCount = moveCount + 1;
        end
    end

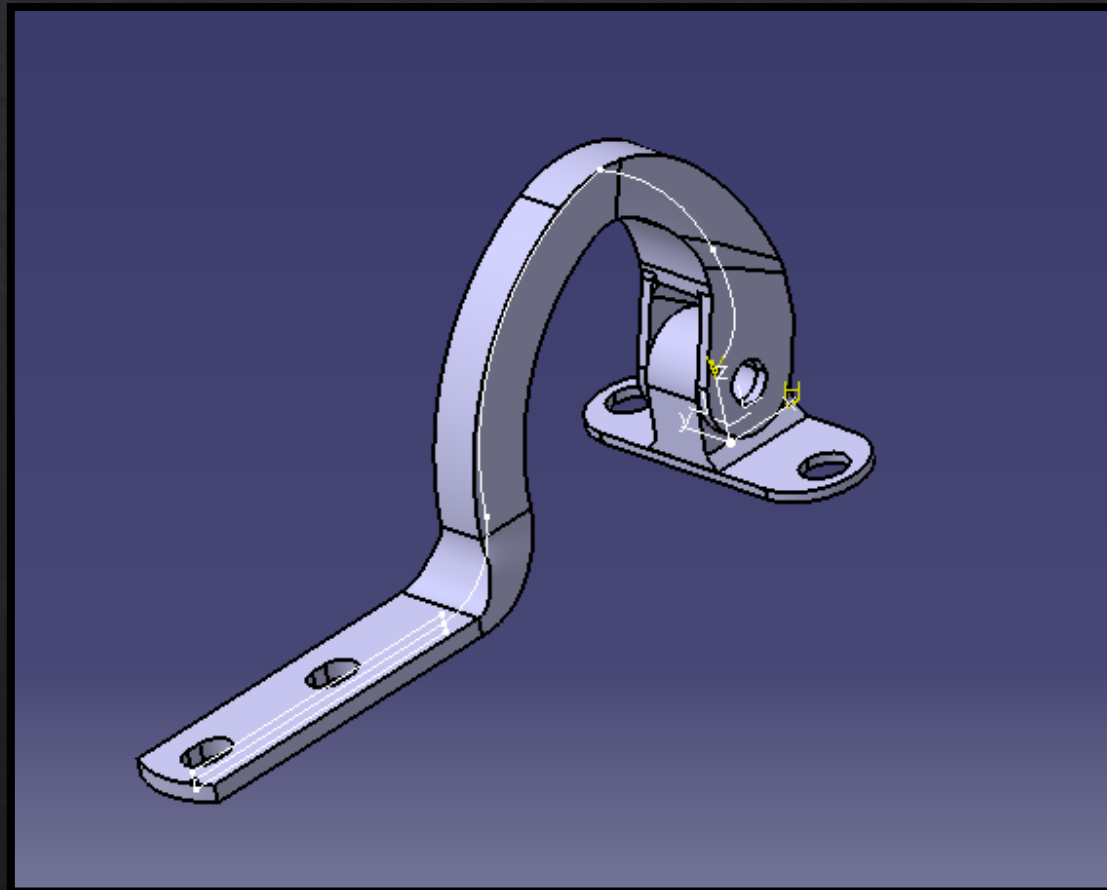
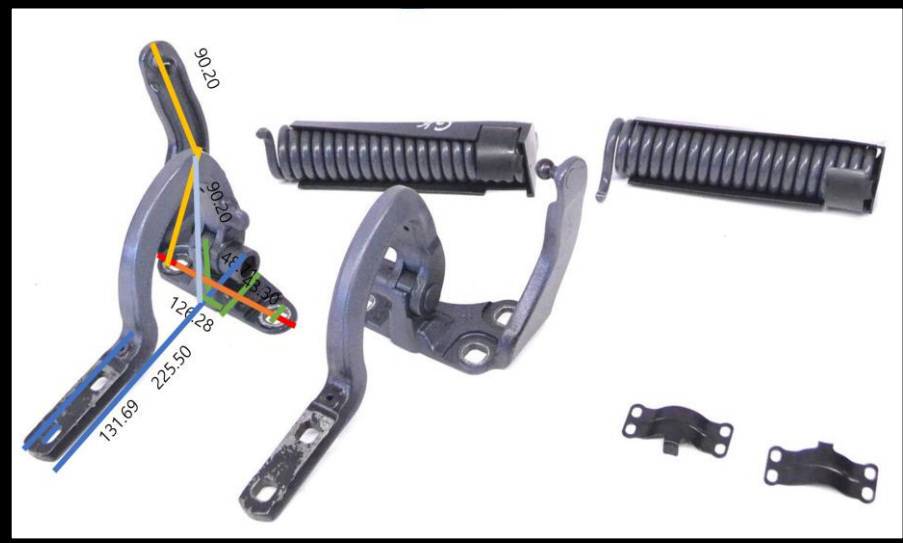
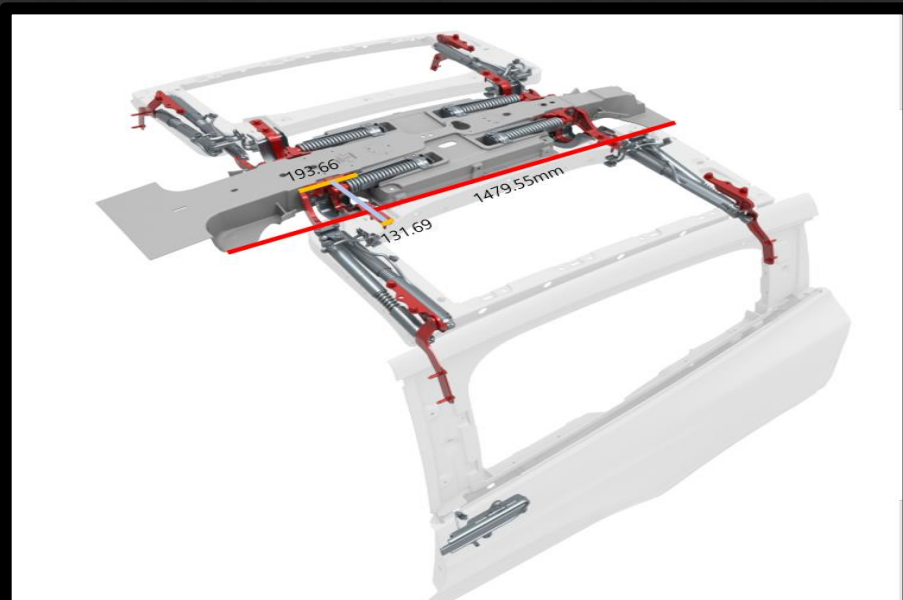
    % 종료 조건
    if (theta1 >= deg2rad(90) && theta2 >= deg2rad(-90))
        break;
    end
end

```

03

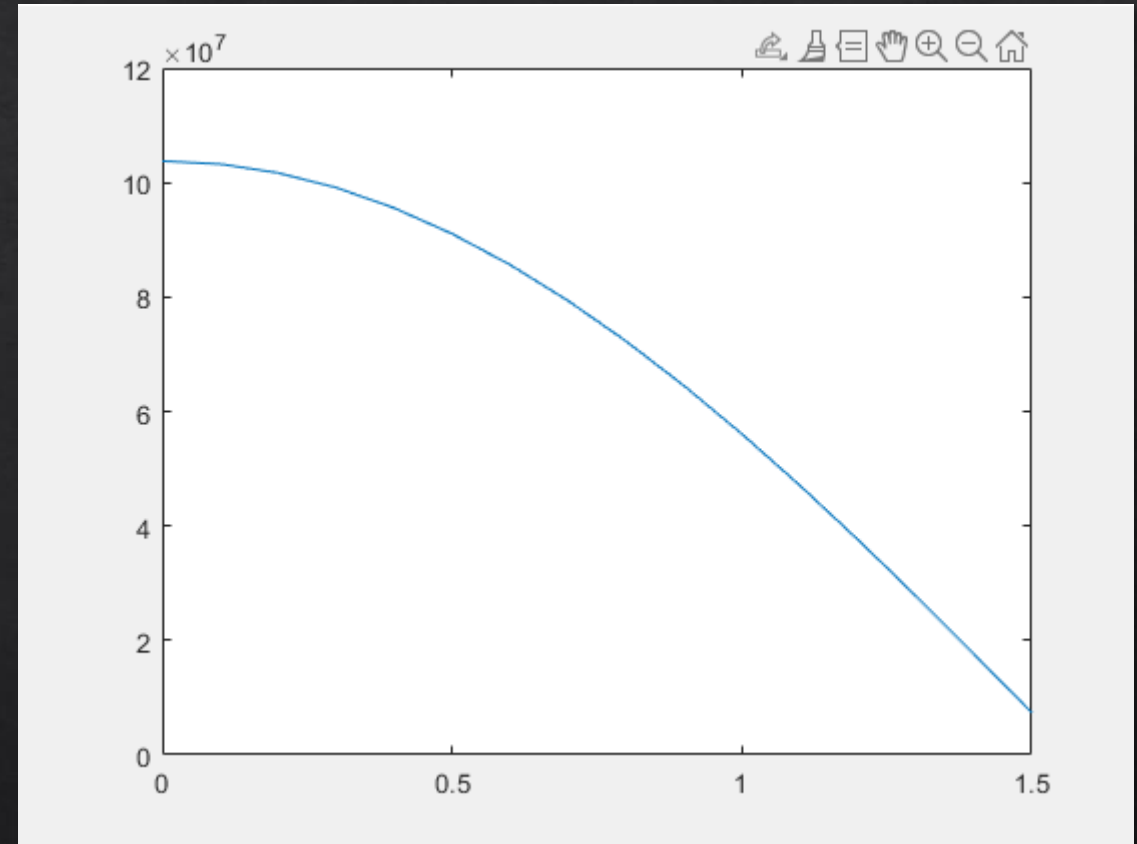
Hinge 설계 및 해석

Hinge



Max Stress

```
m1 = 10;  
m2 = 20;  
L1 = 0.736;  
L2 = 1.397;  
d = 0.03;  
A = 0.04;  
g = 9.81;  
  
theta = 0:0.1:pi/2;  
shStress = (0.5*L1*m1+(L1+0.5*L2)*m2)*cos(theta)*g*16/(pi*d^3);  
axiStress = (m1+m2)*g*sin(theta)/(2*A);  
vonMis = (axiStress.^2 + 3*shStress.^2).^0.5;  
  
plot(theta,vonMis);
```



<각도에 따른 Stress>

Moment

```

m1 = 10; % Mass of the first element
m2 = 20; % Mass of the second element
L1 = 0.7366 + 0.219; % Length of L1
L2 = 1.6256; % Length of L2
g = 9.81; % Acceleration due to gravity

w1 = m1 * g; % Weight of the first element
w2 = m2 * g; % Weight of the second element

maxMoment = -Inf; % Initialize to negative infinity
minMoment = Inf; % Initialize to positive infinity

maxTheta1 = 0;
maxTheta2 = 0;
minTheta1 = 0;
minTheta2 = 0;

% Initialize arrays to store Moment values
theta_1_values = pi/2:0.01:pi;
theta_2_values = pi/2:0.01:pi;
moment_values = zeros(length(theta_1_values), length(theta_2_values));

% Calculate Moment values and update max and min values
for i = 1:length(theta_1_values)
    for j = 1:length(theta_2_values)
        theta_1 = theta_1_values(i);
        theta_2 = theta_2_values(j);

        Moment = w1/2 * (L1 * cos(theta_1 - (pi/2))) + w2* (L2/2 * sin(-pi + theta_1 + theta_2) + L1 * cos(theta_1 - (pi/2)));
        moment_values(i, j) = Moment;

        % Update max and min values
        if Moment > maxMoment
            maxMoment = Moment;
            maxTheta1 = theta_1;
            maxTheta2 = theta_2;
        end

        if Moment < minMoment
            minMoment = Moment;
            minTheta1 = theta_1;
            minTheta2 = theta_2;
        end
    end
end
end

```

```

fprintf('Maximum Moment: %f\n', maxMoment);
fprintf('Theta_1 at Maximum Moment: %f\n', maxTheta1);
fprintf('Theta_2 at Maximum Moment: %f\n', maxTheta2);

fprintf('Minimum Moment: %f\n', minMoment);
fprintf('Theta_1 at Minimum Moment: %f\n', minTheta1);
fprintf('Theta_2 at Minimum Moment: %f\n', minTheta2);

% Calculate Final_force
Final_force = maxMoment / 0.219;

fprintf('Final Force: %f\n', Final_force);

% Create a 3D surface plot
figure;
surf(theta_1_values, theta_2_values, moment_values);
xlabel('Theta_1');
ylabel('Theta_2');
zlabel('Moment');
title('Moment values for Theta_1 and Theta_2');

% Optionally, you can add a colorbar to the plot
colorbar;

```

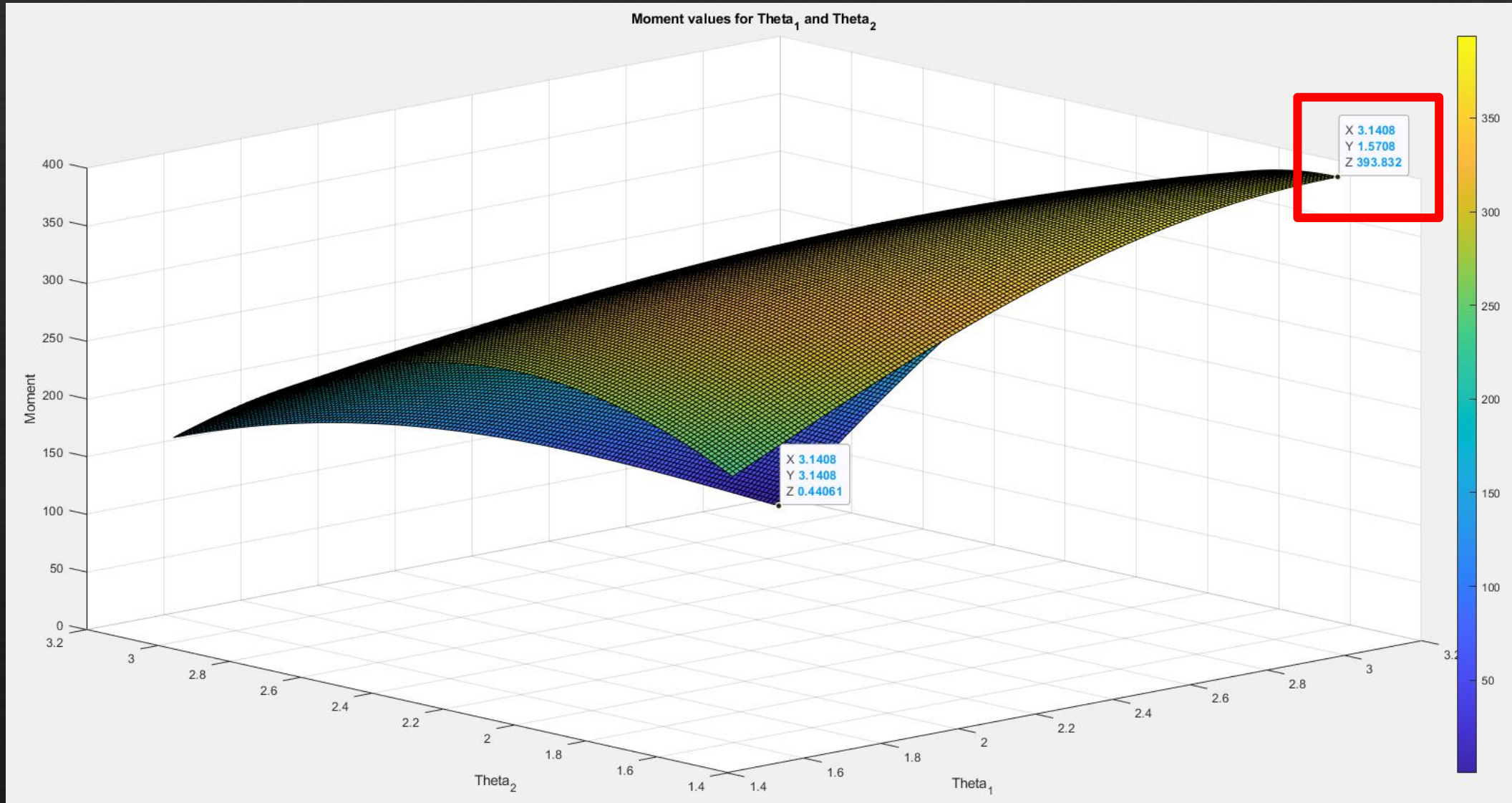
```

>> final
Maximum Moment: 393.832209
Theta_1 at Maximum Moment: 1.570796
Theta_2 at Maximum Moment: 3.140796
Minimum Moment: 0.440610
Theta_1 at Minimum Moment: 3.140796
Theta_2 at Minimum Moment: 3.140796
Final Force: 1798.320591

```

<각도에 따른 Moment>

Moment

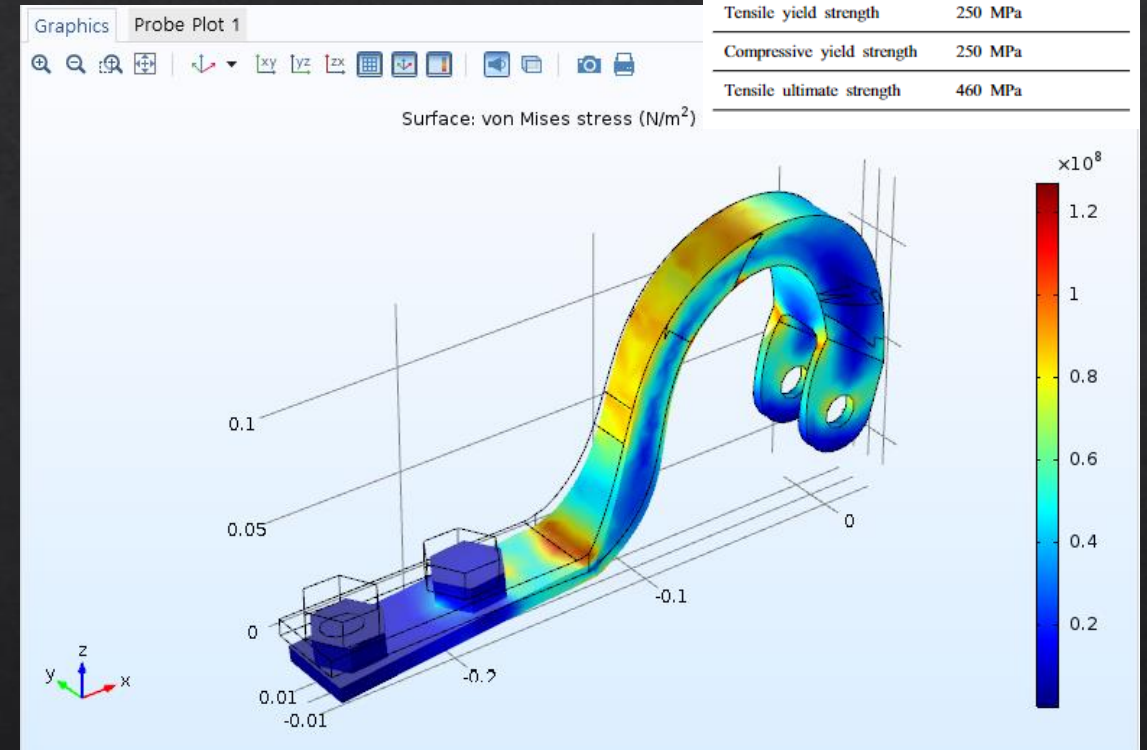
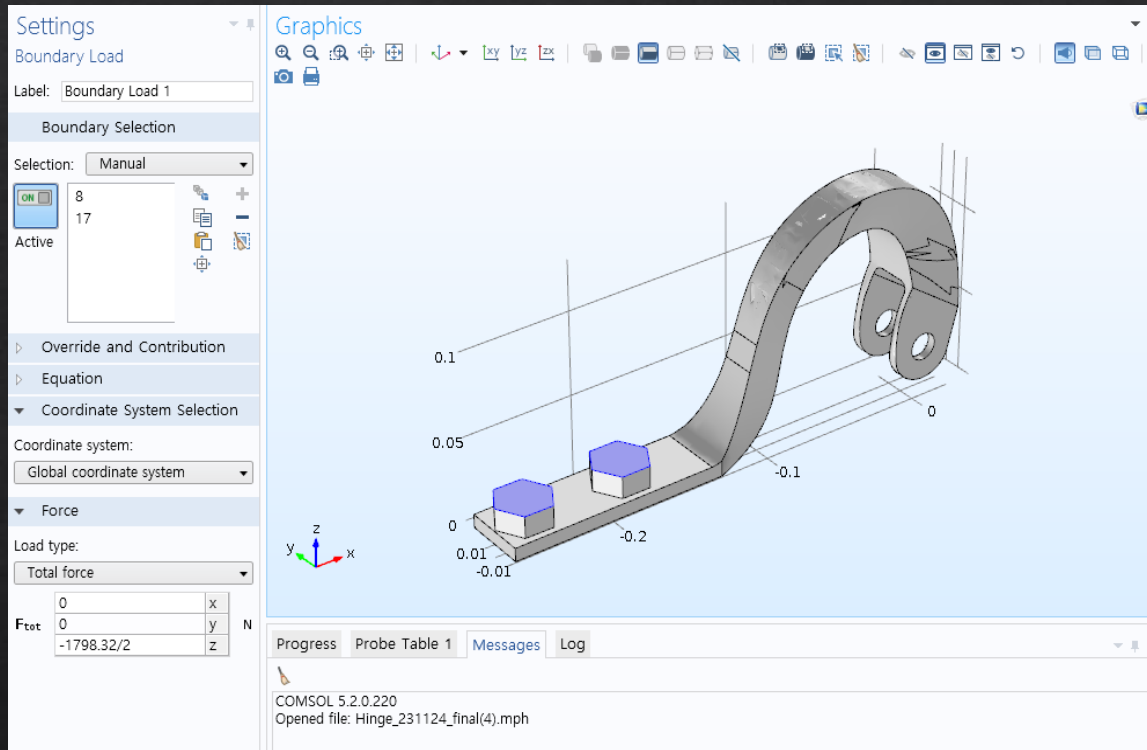


03 Hinge 설계 및 해석

COMSOL

Table 1 Material property

Properties	Values
Young's modulus	200,000 MPa
Poisson's ratio	0.3
Density	0.0000785 Kg/mm ³
Thermal expansion	0.000012 1/°C
Tensile yield strength	250 MPa
Compressive yield strength	250 MPa
Tensile ultimate strength	460 MPa



von Mises stress, Gauss-point evaluation (N/m ²), Domain Probe 1	Total displacement (mm), Boundary Probe 1
1.2705E8	0.66958

<Stress에 따른 Displacement>

수명계산

(b) Elastically calculated stresses and strains

From the linear-elastic calculations in ABAQUS/CAE:

$$\epsilon_{\max} = \sqrt{\frac{(\epsilon_{1,\max} - \epsilon_{1,\min})^2 + (\epsilon_{2,\max} - \epsilon_{2,\min})^2 + (\epsilon_{3,\max} - \epsilon_{3,\min})^2}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{(861.01 + 208.76)^2 + (-208.76 + 255.40)^2 + (-255.40 - 861.01)^2}{2}} \times 10^{-6}$$

$$= 1093.8 \times 10^{-6}$$

And $\epsilon_{\min} = 0$; $\Delta\epsilon = \epsilon_{\max} - \epsilon_{\min} = (1093.8 - 0) \times 10^{-6} = 1093.8 \times 10^{-6}$.

Also, $S_{\max} = 170.81$ MPa; $S_{\min} = 0$ MPa; $\Delta S = S_{\max} - S_{\min} = 170.81 - 0 = 170.81$ MPa.

(c) Estimates of inelastic stresses and strains

The Ramberg-Osgood parameters are

$$K' = \frac{1332}{(0.375)^{0.1085-0.0354}} = 1574.86 \text{ MPa}; \quad n' = \frac{-0.1085}{-0.6354} = 0.1708$$

The solution of two nonlinear equations, described by

$$\sigma_{\max} \epsilon_{\max} = S_{\max} \epsilon_{\max} = 170.81 \times 0.0010938 = 0.1868$$

$$\epsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E} + \left(\frac{\sigma_{\max}}{K'} \right)^{1/n'} = \frac{\sigma_{\max}}{203000} + \left(\frac{\sigma_{\max}}{1574.86} \right)^{0.1708}$$

yields: $\sigma_{\max} = 194.268$ MPa and $\epsilon_{\max} = 0.000962$. Similarly, solving the two nonlinear equations

$$\Delta\sigma\Delta\epsilon = \Delta S\Delta\epsilon = 170.81 \times 0.0010938 = 0.1868$$

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{1/n'} = \frac{\Delta\sigma}{203000} + 2 \left(\frac{\Delta\sigma}{2 \times 1574.86} \right)^{0.1708}$$

gives: $\Delta\sigma = 194.734$ MPa and $\Delta\epsilon = 0.000959$. Therefore, the inelastic mean stress is

$$\sigma_m = \sigma_{\max} - \frac{\Delta\sigma}{2} = 194.268 - \frac{194.734}{2} = 96.901 \text{ MPa}.$$

(d) Fatigue crack-initiation life

Using the Coffin-Manson-Morrow equation:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c$$

$$\Rightarrow \frac{0.000959}{2} = \frac{1332 - 97.134}{203000} (2N_f)^{-0.1085} + 0.375 (2N_f)^{-0.6354}$$

$$\Rightarrow N_f = 7.38 \times 10^7 \text{ cycles}$$

(e) Reduced fatigue crack-initiation life due to a defect

For $K_f = 2$, the solution of two nonlinear equations, described by

$$\sigma_{\max} \epsilon_{\max} = K_f^2 S_{\max} \epsilon_{\max} = 2^2 \times 170.81 \times 0.0010938 = 0.7473$$

$$\epsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E} + \left(\frac{\sigma_{\max}}{K'} \right)^{1/n'} = \frac{\sigma_{\max}}{203000} + \left(\frac{\sigma_{\max}}{1574.86} \right)^{0.1708}$$

yields: $\sigma_{\max} = 369.274$ MPa and $\epsilon_{\max} = 0.002024$. Similarly, solving the two nonlinear equations

$$\Delta\sigma\Delta\epsilon = K_f^2 \Delta S\Delta\epsilon = 2^2 \times 170.81 \times 0.0010938 = 0.7473$$

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{1/n'} = \frac{\Delta\sigma}{203000} + 2 \left(\frac{\Delta\sigma}{2 \times 1574.86} \right)^{0.1708}$$

gives: $\Delta\sigma = 388.537$ MPa and $\Delta\epsilon = 0.001923$. Therefore, the inelastic mean stress is

$$\sigma_m = \sigma_{\max} - \frac{\Delta\sigma}{2} = 369.274 - \frac{388.537}{2} = 175.006 \text{ MPa}.$$

Using the Coffin-Manson-Morrow equation:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c$$

$$\Rightarrow \frac{0.001923}{2} = \frac{1332 - 175.006}{203000} (2N_f)^{-0.1085} + 0.375 (2N_f)^{-0.6354}$$

$$\Rightarrow N_f = 7.33 \times 10^7 \text{ cycles}$$

Comments: The fatigue crack-initiation life can be significantly degraded if a casting-induced defect exists in the critical area of the lever arm. Possible remedies include re-designing the lever arm for an increased fatigue life in presence of a defect or eliminating defects by improved material processing.

수명계산

$$\begin{cases} \epsilon_{1,\max} = 1.044 \times 10^{-4} = 0.0001044 \\ \epsilon_{2,\max} = -3.7664 \times 10^{-5} = -0.000037664 \rightarrow \epsilon_{\max} = 4.16112 \times 10^{-4} \\ \epsilon_{3,\max} = -1.0051 \times 10^{-4} = -0.00010051 \end{cases} \rightarrow \epsilon_{\max} = \Delta\epsilon$$

$$S_{\max} = 1.2705 \times 10^8 \text{ Pa} = 127.05 \text{ MPa} = \Delta S$$

ⓐ Ramberg-Osgood

$$\text{연립방정식} \Rightarrow \begin{cases} \sigma_{\max} \epsilon_{\max} = S_{\max} \epsilon_{\max} = 0.05312 \\ \epsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E} + \left(\frac{\sigma_{\max}}{K'} \right)^{1/n'} = \frac{\sigma_{\max}}{200000} + \left(\frac{\sigma_{\max}}{1574.86} \right)^{0.1708} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_{\max} = 103.061 \\ \epsilon_{\max} = 0.000515 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \Delta\sigma\Delta\epsilon = \Delta S\Delta\epsilon = 0.05312 \\ \Delta\epsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right)^{1/n'} = \frac{\Delta\sigma}{200000} + 2 \left(\frac{\Delta\sigma}{2 \times 1574.86} \right)^{0.1708} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta\sigma = 103.012 \\ \Delta\epsilon = 0.000515 \end{cases}$$

$$\sigma_m = 103.061 - \frac{103.012}{2} = 51.525$$

$$\frac{0.000515}{2} = \frac{1332 - 51.525}{200000} (2N_f)^{-0.1085} + 0.375 (2N_f)^{-0.6354}$$

$$\Rightarrow N_f = 3.64208 \times 10^8$$

$$= 3642.08 \times 10^4$$

< Ramberg-Osgood >

$$\sigma = K\epsilon^n$$

σ : Stress

ϵ : Strain

K : Modulus

n : Ramberg-Osgood exponent

< Coffin-Manson-Morrow >

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma_f' - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c$$

N_f : fatigue life

$$\sigma_{\max} \epsilon_{\max} = S_{\max} \epsilon_{\max} \quad \& \quad \epsilon_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{E} + \left(\frac{\sigma_{\max}}{K'} \right)^{1/n'}$$

$$\Delta\sigma\Delta\epsilon = \Delta S\Delta\epsilon \quad \& \quad \Delta\epsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \left(\frac{\sigma_{\max}}{2K'} \right)^{1/n'}$$

<참고 계산 자료>

<손으로 푼 수명 값>

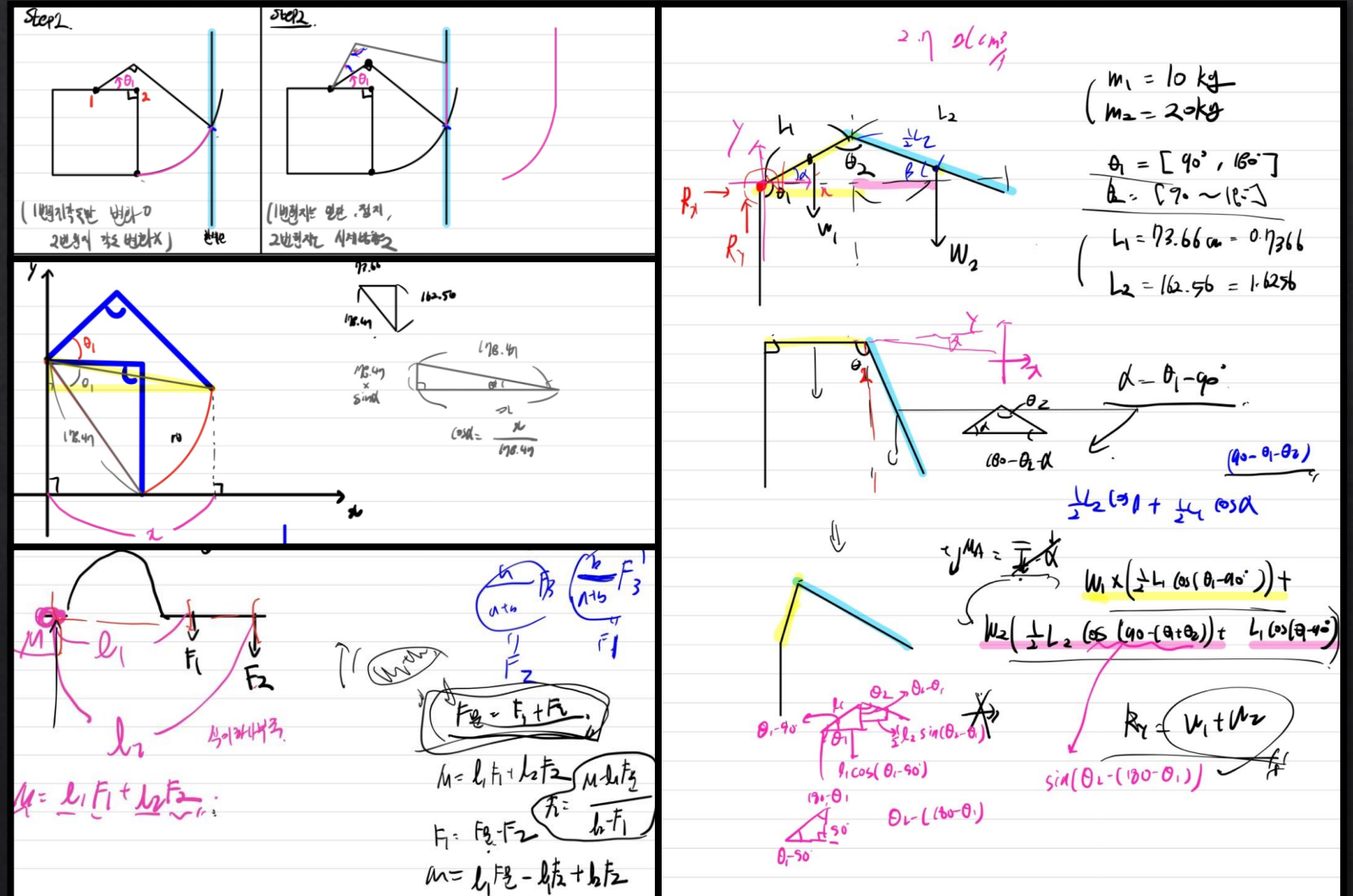
고찰

1.

문이 열리는 각도에 따른
힘의 변화를 예상하고 계산하는
과정에서의 어려움

2.

제원의 정보 부재에 따른 제원 값
가정으로 인한 오차 예상



3.

미래자동차에 접목될 기술 중
하나인 한국형 팔콘 윈도우어 예상



<Chat_gpt가 설계한 K-falcon wing>

참고문헌



<https://www.teslarati.com/teslas-falcon-wing-doors-work-explained-lego/>

[https://www.tesla.com/sites/default/files/pdfs/2016 Model X Emergency Response Guide.pdf?1512](https://www.tesla.com/sites/default/files/pdfs/2016%20Model%20X%20Emergency%20Response%20Guide.pdf?1512)

https://www.dbpia.co.kr/pdf/pdfView.do?nodeId=NODE01437660&googleIPSandBox=false&mark=0&ipRange=false&b2cLoginYN=false&isPDFSizeAllowed=true&accessgl=Y&language=ko_KR&hasTopBanner=true

Thank you.