

1.[2점] 2011년 7월에 서울 광진구에 있는 39층짜리 테크노마트 건물에서 진동이 심하게 발생하여 사람들이 긴급히 대피하는 소동이 있었다. 진동이 심하게 발생한 원인은 무엇이고, 이 건물에서 이러한 진동을 예방하기 위한 방안은 무엇인지 각각 서술하여라.

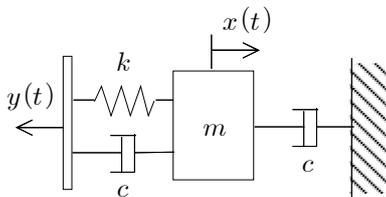
2.[6점] 다음 설명이 맞으면 O표, 틀리면 X표를 () 안에 하되, 판단 근거를 제시하여라. (답도 맞고 판단 근거도 타당해야만 득점)

(a) 두 음파가 합쳐져서 맥놀이(beat)현상이 나타나고 있다. 두 음파의 진동수 차이가 작아지면, 맥놀이가 반복되는 시간 즉 주기는 길어진다. ()
판단 근거 :

(b) ‘빈 수레가 요란하다’는 격언이 있다. 이를 기계진동학에 연관시켜 보면, 자동차 차체가 가벼울 때 고유진동수가 커져서 바닥 가진에 의한 진동의 전달률이 커진 상황이다. ()
판단 근거 :

(c) 전기 세탁기에서 탈수 작업 때 원통이 고속으로 회전한다. 이 때 회전수가 증가할수록 세탁기의 진동이 커진다. ()
판단 근거 :

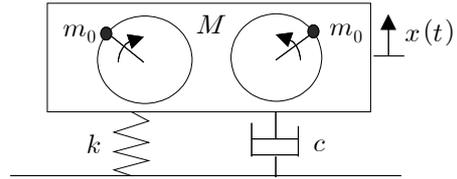
3.[6점] 질량 m 인 물체가 그림과 같이 스프링과 2개의 감쇠기(damper)에 결합된 1자유도계가 왼쪽에서 진동 변위 $y(t)$ 의 가진을 받고 있다. 오른쪽 벽은 고정되어 있다. 질량 m 인 물체의 진동 변위를 $x(t)$ 라고 한다.



(a) 질량 m 인 물체에 가해지는 힘들을 나타내는 자유물체도(free-body diagram)를 작성하고, 운동방정식을 뉴턴법칙에 따라 유도하여라.

(b) 가진 변위가 $y(t) = Y \sin(30\pi t)$ 이고, 물체의 응답 변위 진폭이 5.0 mm 라 할 때, 오른쪽 벽에 전달되는 힘의 크기는 몇 N인가? ($k = 14000 \text{ N/m}$, $c = 3500 \text{ N}\cdot\text{s/m}$)

4.[6점] 그림과 같이 전체 질량이 M 인 물체 내에서 편심 질량이 각각 m_0 인 두 회전체가 회전 반지름 e 로서 1분에 N 바퀴씩 회전하고 있다. 받침대의 강성과 감쇠를 고려하여, 회전 불균형에 따른 수직방향 진동을 해석한다.

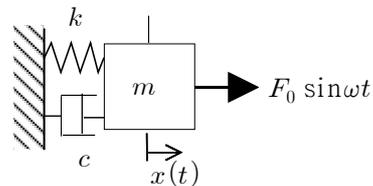


(a) 질량 M 인 물체 주변에 작용하는 외력을 나타내는 자유물체도(free-body diagram)를 그리고, 운동방정식을 유도하여라. (최종 결과는 문제에 주어진 기호만 사용하여 표현함)

(b) 물체의 전체 질량이 160 kg이고, 받침대의 강성은 900 kN/m이며, 감쇠계수는 600 kg/s이다. 회전수가 1800 rpm일 때, 불균형 힘의 크기가 4000 N으로 측정되었다. 편심에 의해 생기는 진동의 변위 진폭을 계산하여라.

(c) (b)의 조건에 추가하여 각 편심질량 m_0 가 1.2 kg 임을 알 때, 회전 반지름 e 값을 계산하여라.

5.[6점] Consider a simple spring-damper-mass system shown below. The system is exerted by a harmonic force $F(t) = F_0 \sin \omega t$. The system has mass $m = 80 \text{ kg}$, damping coefficient $c = 40 \text{ kg/s}$, stiffness $k = 320 \text{ N/m}$. The harmonic force has the magnitude $F_0 = 50 \text{ N}$ and driving frequency $\omega = 4.5 \text{ rad/s}$.



(a) Determine the amplitude X and phase θ of the steady-state response $x_p(t) = X \sin(\omega t - \theta)$.

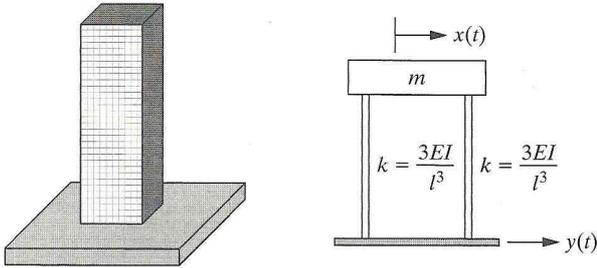
(b) The response is expressed by the following complete solution.

$$x(t) = A e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi) + X \sin(\omega t - \theta)$$

Determine the amplitude A and phase ϕ of the response if the system is initially at rest.

1.[2점] 광화문 광장에 있는 세종대왕 동상은 경기도 이천에서 제작하여 2009년 10월에 광화문 광장으로 옮긴 것이다. 동상을 수송하기 위하여 Low Bed Trailer라는 무진동(無振動) 특수차량이 동원되었다. 차량 무게가 약 17t이고 길이가 16.7m이다. 주행 중 노면 굴곡에 의한 타이어의 진동이 차체에 전달되지 않고 차단되는 원리를 서술하여라.

2.[4점] 아래 그림에 보이는 것처럼 진동하는 지반 위의 건축물을 스프링과 질량체로 이루어진 1자유도 계로 모델링한다. 건물 벽체의 굽힘은 두 개의 보로 간주되며, 보 하나의 강성은 $4.5 \times 10^6 \text{ N/m}$ 이고 감쇠 계수는 $150,000 \text{ kg/s}$ 이다. 건물 질량 $2 \times 10^5 \text{ kg}$ 은 이 보 위에 집중된 것으로 간주된다. 지반의 진동수가 1.2 Hz 이고 변위 진폭이 0.15 m 일 때, 건물 끝의 변위 진폭을 계산하여라.



3.[4점] 다음 설명이 맞으면 O표, 틀리면 X표를 () 안에 하되, 판단 근거를 제시하라. (답도 맞고 판단 근거도 타당해야만 득점)

(a) 두 음파가 합쳐져서 맥놀이(beat)현상이 나타나고 있다. 그 중 한 음파의 진동수가 약간 커지고 다른 음파의 진동수가 같은 양 만큼 작아져서 두 음파의 진동수 차이가 처음의 1/2로 작아지면, 합쳐진 음파의 최대 진폭은 커진다. ()

(b) 고속 프레스의 진동을 최소화하기 위해서는 고유진동수가 회전진동수보다 훨씬 작도록 설계하는 게 좋지만, 고유진동수를 아무리 작게 하더라도 진폭이 0이 되지는 않는다. ()

4.[4점] 감쇠를 무시할 수 있는 1자유도계에서 조화 가진 진동의 운동방정식은 다음과 같다.

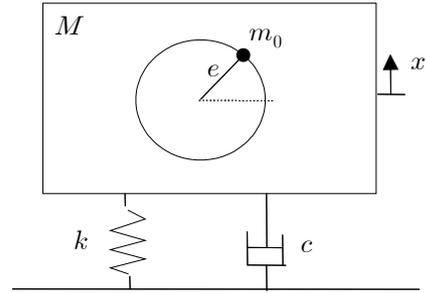
$$m \ddot{x}(t) + k x(t) = F_0 \sin \omega t$$

이 미분방정식의 제차해(homogeneous solution)는

$$x_h(t) = A_1 \cos \sqrt{\frac{k}{m}} t + A_2 \sin \sqrt{\frac{k}{m}} t$$

이다. 구동진동수 ω 가 $\sqrt{k/m}$ 와 일치할 때, 공진(resonance)이 발생한다. 이 때의 강제진동 응답, 즉 특수해(particular solution) $x_p(t)$ 를 유도하여 구하여라. (문제에 주어진 기호 만 사용하여야 함)

5.[6점] 그림과 같이 전체 질량이 M 인 물체 내에서 편심 질량이 m_0 인 회전체가 회전 반지름 e 로서 1분에 N 바퀴씩 회전하고 있다. 회전 불균형에 따른 수직 방향 진동을 해석한다.



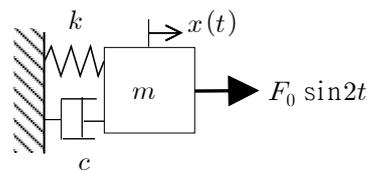
(a) 질량 M 인 물체 주변에 작용하는 외력을 나타내는 자유물체도(free-body diagram)를 그리고, 운동방정식을 뉴턴법칙에 따라 유도하라. (최종 결과는 문제에 주어진 기호만 사용하여 표현함)

(b) 회전 불균형에 의한 진동의 진폭을 X_r 이라 할 때, 바닥에 전달되는 힘의 크기 F_T 를 무차원화 하면

$$\frac{F_T}{m_0 e \omega_r^2}$$

이다. 이를 힘 전달률이라 부른다. 감쇠비 ζ 가 0, 0.5, 0.7인 경우에 대하여 진동수 비 r (=회전진동수/고유진동수)의 함수로 힘 전달률 그래프를 그려라.

6.[6점] Consider a simple spring-damper-mass system shown below. The system is exerted by a harmonic force $F(t) = F_0 \sin 2t$.



The standard form of the equation of motion of the system is

$$\ddot{x} + 2 \dot{x} + 16 x = (0.3 \text{ N/kg}) \sin 2t$$

(a) Determine the amplitude X and phase θ of the steady-state response $x_p(t) = X \sin(2t - \theta)$.

(b) The response is expressed by the following complete solution.

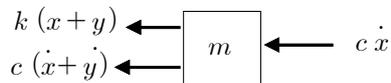
$$x(t) = A e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi) + X \sin(2t - \theta)$$

Determine the amplitude A and ϕ of the response if the system is initially at rest.

1. 서술 (핵심어 : 발 구르는 진동수, 건물의 고유진동수, 공진)

2. (a) O $T_b = \frac{2\pi}{\omega_b} = \frac{2\pi}{|\omega_a - \omega_b|}$ 이므로, $|\omega_a - \omega_b|$ 가 작아지면 T_b 는 커짐.
 (b) O 바닥 가진의 진동 변위 전달률 X_b/Y 의 그래프에서, m 이 작아 $\omega_n (= \sqrt{k/m})$ 이 커서 진동수 비 $r (= \omega_b/\omega_n)$ 이 크지 않아 X_b/Y 가 1보다 큰 상황임.
 (c) X 회전 불균형의 정규화 진폭 mX_r/m_0e 의 그래프에서, 회전수가 증가할수록 진동수 비 $r (= \omega_r/\omega_n)$ 이 커서 정규화 진폭이 1로 수렴하므로 커지지 않음.

3. (a)



$$-c\dot{x}(t) - c[\dot{x}(t) + \dot{y}(t)] - k[x(t) + y(t)] = m\ddot{x}(t)$$

$$\Rightarrow m\ddot{x}(t) + 2c\dot{x}(t) + kx(t) = -c\dot{y}(t) - ky(t)$$

(b) $y(t) = Y \sin(30\pi t) \Rightarrow x(t) = X \sin(30\pi t - \theta), \quad X = 5.0 \text{ mm}$

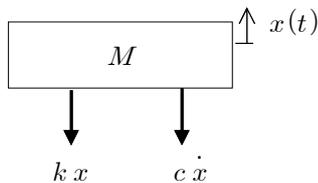
$$F_{tr}(t) = c\dot{x}(t) = c(30\pi)X \cos(30\pi t - \theta)$$

$$F_T = c(30\pi)X$$

$$= (3500 \text{ N}\cdot\text{s/m})(30\pi)(5.0 \times 10^{-3} \text{ m})$$

$$= 1649 \text{ N}$$

4. (a)



$$-kx - c\dot{x} = (M - 2m_0)\ddot{x} + 2m_0 \frac{d^2}{dt^2}(x + e \sin \omega_r t)$$

$$= M\ddot{x} - 2m_0\ddot{x} + 2m_0\ddot{x} - 2m_0 e \omega_r^2 \sin \omega_r t$$

$$\Rightarrow M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 2m_0 e \omega_r^2 \sin \omega_r t$$

$$\Rightarrow M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 2m_0 e \left(\frac{2\pi N}{60}\right)^2 \sin \frac{2\pi N}{60} t$$

(b) $M = 160 \text{ kg}$, $k = 900 \text{ kN/m}$, $c = 600 \text{ kg/s}$, $N = 1800 \text{ rpm}$, $F_0 = 4000 \text{ N}$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{900 \times 10^3 \text{ kg/s}^2}{160 \text{ kg}}} = 75.0 \text{ rad/s}, \quad \omega_r = \frac{(2\pi \text{ rad})(1,800 / \text{min})}{60 \text{ s/min}} = 188.5 \text{ rad/s}$$

$$r = \frac{188.5}{75.0} = 2.513, \quad \zeta = \frac{600 \text{ kg/s}}{2\sqrt{(160 \text{ kg})(900 \times 10^3 \text{ kg/s}^2)}} = 0.0250$$

$$\begin{aligned} X &= \frac{2m_0 e}{M} \frac{\omega_r^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega_r^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega_r)^2}} \quad (2m_0 e \omega_r^2 = F_0) \\ &= \frac{F_0}{M\omega_r^2} \frac{r^2}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \\ &= \frac{(4000 \text{ N})}{(160 \text{ kg})(188.5 \text{ rad/s})^2} \frac{2.513^2}{\sqrt{(1-2.513^2)^2 + [2(0.0250)(2.513)]^2}} \\ &= (0.7036 \times 10^{-3} \text{ m})(1.188) = 0.836 \times 10^{-3} \text{ m} = 0.836 \text{ mm} \end{aligned}$$

(c) $m_0 = 1.20 \text{ kg}$, $F_0 = 4000 \text{ N}$, $\omega_r = 188.5 \text{ rad/s}$

$$F_0 = 2m_0 e \omega_r^2$$

$$\Rightarrow e = \frac{F_0}{2m_0 \omega_r^2} = \frac{4000 \text{ N}}{2(1.20 \text{ kg})(188.5 \text{ rad/s})^2} = 46.9 \times 10^{-3} \text{ m} = 46.9 \text{ mm}$$

5. (a) $m = 80 \text{ kg}$, $c = 40 \text{ kg/s}$, $k = 320 \text{ N/m}$, $F_0 = 50 \text{ N}$, $\omega = 4.5 \text{ rad/s}$, $F(t) = F_0 \sin \omega t$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{320 \text{ N/m}}{80 \text{ kg}}} = 2.00 \text{ rad/s}, \quad r = \frac{\omega_r}{\omega_n} = \frac{4.5}{2.00} = 2.25$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}} = \frac{40 \text{ kg/s}}{2\sqrt{(80 \text{ kg})(320 \text{ kg/s}^2)}} = 0.125, \quad f_0 = \frac{50 \text{ N}}{80 \text{ kg}} = 0.625 \text{ m/s}^2$$

$$\begin{aligned} X &= \frac{f_0}{\omega_n^2} \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} = \frac{0.625 \text{ m/s}^2}{(2.00 \text{ rad/s})^2} \frac{1}{\sqrt{(1-2.25^2)^2 + [2(0.125)(2.25)]^2}} \\ &= (0.15625 \text{ m})(0.2438) = 0.0381 \text{ m} = 38.1 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\zeta r}{1-r^2} = \tan^{-1} \frac{2(0.125)(2.25)}{1-(2.25)^2} = \tan^{-1}(-0.138) = -0.1376 \text{ rad} (= -7.88^\circ)$$

θ 는 감쇠로 인한 위상지연이므로 $0 < \theta < \pi$. 따라서 $\theta = -0.1376 + \pi \text{ rad} = 3.00 \text{ rad} (= 172.1^\circ)$

(b) $x_0 = v_0 = 0$

$$\omega_d = \sqrt{1-0.125^2} (2.00 \text{ rad/s}) = 1.984 \text{ rad/s}, \quad \zeta\omega_n = (0.125)(2.00 \text{ rad/s}) = 0.250 \text{ rad/s}$$

$$x(t) = A e^{-0.25t} \sin(1.984 t + \phi) + (0.0381 \text{ m}) \sin(4.5 t - 3.00)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (-0.25 \text{ rad/s}) A e^{-0.25t} \sin(1.984 t + \phi) + (1.984 \text{ rad/s}) A e^{-0.25t} \cos(1.984 t + \phi) \\ &\quad + (4.5 \text{ rad/s})(0.0381 \text{ m}) \cos(4.5 t - 3.00) \end{aligned}$$

$$x(0) = A \sin\phi + (0.0381 \text{ m}) \sin(-3.00) = 0 \quad \Rightarrow \quad A \sin\phi = 0.00538 \text{ m} > 0$$

$$\begin{aligned} \dot{x}(0) &= (-0.25 \text{ rad/s}) A \sin\phi + (1.984 \text{ rad/s}) A \cos\phi + (0.17145 \text{ m/s}) \cos(-3.00) = 0 \\ &\Rightarrow \quad A \cos\phi = [(0.25)(0.00538) - (0.17145)(-0.99)]/1.984 \text{ m} = 0.0862 \text{ m} > 0 \end{aligned}$$

$\sin\phi > 0$ 이고 $\cos\phi > 0$ 이므로, $0 < \phi < \frac{\pi}{2}$

$$A = \sqrt{0.00538^2 + 0.0862^2} \text{ m} = 0.0864 \text{ m}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{0.00538}{0.0862} = \tan^{-1}(0.0624) = 0.0623 \text{ rad} (= 3.57^\circ)$$

1. 서술 (핵심어 : 진동 변위 전달률, 진동수 비, 고유진동수, 질량)

2. $k = 4.5 \times 10^6 \text{ N/m}$, $c = 150,000 \text{ kg/s}$, $m = 2 \times 10^5 \text{ kg}$, $Y = 0.15 \text{ m}$, $f_b = 1.2 \text{ Hz}$

$$k_{eq} = 2k = 2(4.5 \times 10^6 \text{ N/m}) = 9.0 \times 10^6 \text{ N/m}$$

$$c_{eq} = 2c = 2(150,000 \text{ kg/s}) = 300,000 \text{ kg/s}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m}} = \sqrt{\frac{9.0 \times 10^6 \text{ N/m}}{2 \times 10^5 \text{ kg}}} = 6.708 \text{ rad/s}$$

$$\omega_b = (2\pi \text{ rad}) f_b = (2\pi \text{ rad})(1.2 / \text{s}) = 7.54 \text{ rad/s}$$

$$r = \frac{\omega_b}{\omega_n} = \frac{7.54 \text{ rad/s}}{6.708 \text{ rad/s}} = 1.124$$

$$\zeta = \frac{c_{eq}}{2\sqrt{mk_{eq}}} = \frac{300,000 \text{ kg/s}}{2\sqrt{(2 \times 10^5 \text{ kg})(9.0 \times 10^6 \text{ N/m})}} = 0.112$$

$$X = Y \frac{\sqrt{1 + (2\zeta r)^2}}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} = (0.15 \text{ m}) \frac{\sqrt{1 + [2(0.112)(1.124)]^2}}{\sqrt{[1 - (1.124)^2]^2 + [2(0.112)(1.124)]^2}}$$

$$= (0.15 \text{ m}) \frac{1.031}{0.364} = 0.424 \text{ m}$$

3. (a) O 최대 진폭 = $\frac{2f_0}{|\omega_a^2 - \omega_b^2|} = \frac{2f_0}{|(\omega_a + \omega_b)(\omega_a - \omega_b)|}$ 이므로 $|\omega_a - \omega_b|$ 가 작아지면
 최대 진폭은 커짐.

(b) O 회전 불균형의 정규화 진폭 mX_r/m_0e 의 그래프에서, 회전수가 증가할수록 진동수 비 $r(= \omega_r/\omega_n)$ 이 커져 정규화 진폭이 1로 수렴하므로 진폭이 0이 되지 않음.

4. $\sqrt{\frac{k}{m}} = \omega$ 이므로, $x_h(t) = A_1 \cos \omega t + A_2 \sin \omega t$

$$\text{표준형 미분방정식} \quad \ddot{x}(t) + \frac{k}{m} x(t) = \frac{F_0}{m} \sin \omega t$$

$$\text{미정계수법} \quad x_p(t) = A_0 t \cos \omega t + B_0 t \sin \omega t$$

$$\dot{x}_p = A_0 (\cos \omega t - \omega t \sin \omega t) + B_0 (\sin \omega t + \omega t \cos \omega t)$$

$$\ddot{x}_p = A_0 (-2\omega \sin \omega t - \omega^2 t \cos \omega t) + B_0 (2\omega \cos \omega t - \omega^2 t \sin \omega t)$$

$$[A_0 (-2\omega \sin \omega t - \omega^2 t \cos \omega t) + B_0 (2\omega \cos \omega t - \omega^2 t \sin \omega t)]$$

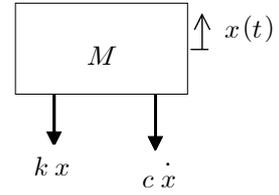
$$+ \frac{k}{m} [A_0 t \cos \omega t + B_0 t \sin \omega t] = \frac{F_0}{m} \sin \omega t$$

$$-2\omega A_0 - \omega^2 t B_0 + \frac{k}{m} t B_0 = \frac{F_0}{m} \Rightarrow A_0 = -\frac{F_0}{2m\omega}$$

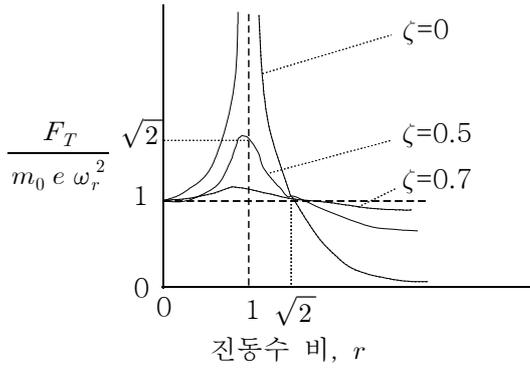
$$-\omega^2 t A_0 + 2\omega B_0 + \frac{k}{m} t A_0 = 0 \Rightarrow B_0 = 0$$

$$x_p(t) = -\frac{F_0}{2m\omega} t \cos \omega t$$

$$\begin{aligned}
5. (a) \quad -kx - c\dot{x} &= (M - m_0)\ddot{x} + m_0 \frac{d^2}{dt^2}(x + e \sin \omega_r t) \\
&= M\ddot{x} - m_0\ddot{x} + m_0\ddot{x} - m_0 e \omega_r^2 \sin \omega_r t \\
\Rightarrow M\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= m_0 e \omega_r^2 \sin \omega_r t \\
\Rightarrow M\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= m_0 e \left(\frac{2\pi N}{60}\right)^2 \sin \frac{2\pi N}{60} t
\end{aligned}$$



$$(b) \quad \frac{F_T}{m_0 e \omega_r^2} = \frac{\sqrt{1 + (2\zeta r)^2}}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}}$$



$$6. (a) \quad f_0 = 0.30 \text{ m/s}^2, \quad \omega = 2.00 \text{ rad/s}$$

$$\omega_n^2 = 16 \Rightarrow \omega_n = 4.00 \text{ rad/s}, \quad r = \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{2.00}{4.00} = 0.50$$

$$2\zeta\omega_n = 2 \Rightarrow \zeta = \frac{1}{\omega_n} = \frac{1}{4} = 0.250$$

$$\begin{aligned}
X &= \frac{f_0}{\omega_n^2} \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} = \frac{0.30 \text{ m/s}^2}{(4.0 \text{ rad/s})^2} \frac{1}{\sqrt{(1 - 0.5^2)^2 + [2(0.25)(0.5)]^2}} \\
&= (0.01875 \text{ m})(1.265) = 0.02372 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\zeta r}{1 - r^2} = \tan^{-1} \frac{2(0.25)(0.5)}{1 - 0.5^2} = \tan^{-1}(0.333) = 0.322 \text{ rad} (= 18.43^\circ)$$

$$(b) \quad x_0 = v_0 = 0$$

$$\omega_d = \sqrt{1 - 0.250^2} (4.00 \text{ rad/s}) = 3.873 \text{ rad/s}, \quad \zeta\omega_n = (0.250)(4.00 \text{ rad/s}) = 1.00 \text{ rad/s}$$

$$x(t) = A e^{-1.00t} \sin(3.873 t + \phi) + (0.02372 \text{ m}) \sin(2.00 t - 0.322)$$

$$\begin{aligned}
\dot{x}(t) &= (-1.00 \text{ rad/s}) A e^{-1.00t} \sin(3.873 t + \phi) + (3.873 \text{ rad/s}) A e^{-1.00t} \cos(3.873 t + \phi) \\
&\quad + (2.00 \text{ rad/s})(0.02372 \text{ m}) \cos(2.00 t - 0.322)
\end{aligned}$$

$$x(0) = A \sin\phi + (0.02372 \text{ m}) \sin(-0.322) = 0 \Rightarrow A \sin\phi = 0.007507 \text{ m} > 0$$

$$\dot{x}(0) = (-1.00 \text{ rad/s}) A \sin\phi + (3.873 \text{ rad/s}) A \cos\phi + (0.04744 \text{ m/s}) \cos(-0.322) = 0$$

$$\Rightarrow A \cos\phi = [(1.00)(0.007507) - (0.04744)(0.9486)]/3.873 \text{ m} = -0.009681 \text{ m} < 0$$

$$\sin\phi > 0 \text{ 이고 } \cos\phi < 0 \text{ 이므로, } \frac{\pi}{2} < \phi < \pi$$

$$A = \sqrt{0.007507^2 + (-0.009681)^2} \text{ m} = 0.01225 \text{ m} = 12.25 \text{ mm}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{0.007507}{-0.009681} = \tan^{-1}(-0.7754) = -0.660 \text{ rad} (= -37.8^\circ)$$

$$2\text{사분면 } \phi \Rightarrow \phi = -0.660 + \pi = 2.48 \text{ rad} (= 142.2^\circ)$$