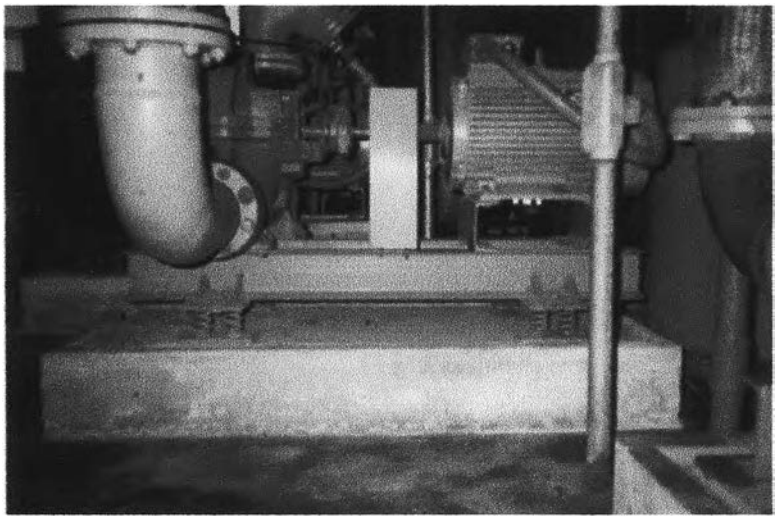
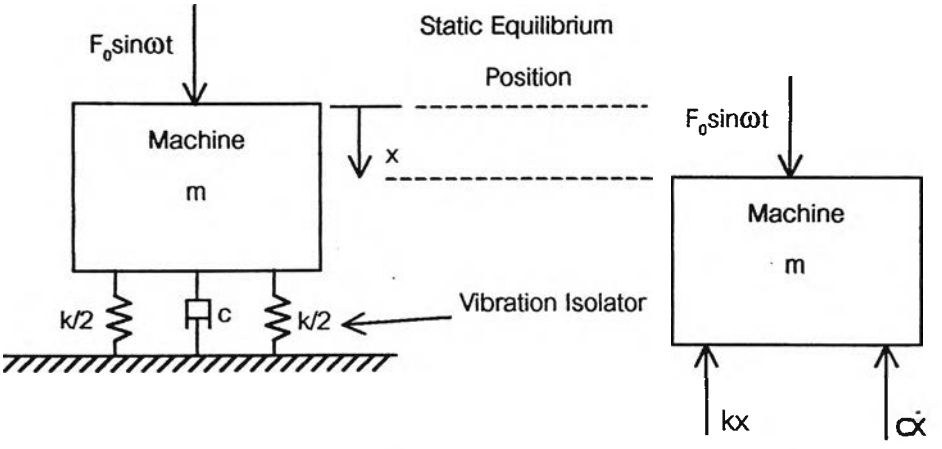
บทที่ 2
ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการกันการสั่นสะเทือน (Vibration Isolation)

เครื่องจักรหรือเครื่องยนต์ที่ติดตั้งกับฐานหรือพื้นโดยตรงโดยไม่มีการติดตั้งตัวกันการสั่นสะเทือน (Vibration Isolator) แรงไม่สมดุล (Unbalance Force) เนื่องจากการทำงานของเครื่องจักรจะส่งผ่านแรงทั้งหมดไปยังพื้นโดยตรง เมื่อผ่านไปเป็นเวลานาน พื้นที่รองรับเครื่องจักรจะมีอายุการใช้งานสั้นลงเนื่องจากต้องรับภาระความล้า (Fatigue Load) จากเครื่องจักร เครื่องจักรส่วนใหญ่จึงมีการติดตั้งสปริงที่มีค่าความแข็งสปริงเหมาะสม เรียกว่า ตัวกันการสั่นสะเทือน (Isolators) แทรกระหว่างพื้นกับโครงสร้างที่รองรับเครื่องจักร เพื่อลดแรงส่งผ่านไปยังพื้น (Transmitted Force) ดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 เครื่องจักรที่มีการติดตั้งตัวกันการสั่นสะเทือน



รูปที่ 2-2 ระบบเมื่อติดตั้งตัวกันการสั่นสะเทือน (Vibration Isolator) มีตัวหน่วง (Damper) และผังแรงอิสระ (Free Body Diagram)

สมการการเคลื่อนที่ของระบบสามารถเขียนโดยใช้ผังแรงอิสระ (Free Body Diagram) และกฎข้อที่สองของนิวตันได้เป็น

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \qquad (2\text{-}1)$$

เมื่อ m คือ มวลของเครื่องจักรและโครงสร้างที่รองรับเครื่องจักรทั้งหมดที่วางบนตัวกันการสั่นสะเทือน (kg)

x คือ การกระจัดจากตำแหน่งสมดุลทางสถิต (Static Equilibrium Position) ในแนวตั้งของเครื่องจักร (m)

c คือ ค่าความหน่วง (Damping) (Ns/m)

k คือ ค่าความแข็งสปริง (Spring Siffness) (N/m)

F_0 คือ ขนาดของแรงไม่สมดุล (Unbalance Force)

ω คือ ความเร็วรอบของเครื่องจักร (rpm)

ผลเฉลยของสมการนี้ที่สภาวะคงตัว (Steady State) สามารถเขียนได้เป็น

$$x = X \sin(\omega t - \phi) \qquad (2\text{-}2)$$

โดย

$$X = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \qquad (2\text{-}3)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left[\frac{c\omega}{k - m\omega^2}\right] \qquad (2\text{-}4)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left[\frac{c\omega}{k - m\omega^2}\right] \quad (2\text{-}4)$$

เมื่อ X คือ ขนาดของการกระจัดจากตำแหน่งสมดุลทางสถิตในแนวตั้งของเครื่องจักร (m)

ϕ คือ มุมเฟสที่เทียบกับแรงที่มากระตุ้น (radian)

จากรูปที่ 2-2 แสดงระบบที่มีแรงไม่สมดุล $F_0 \sin \omega t$ มากระตุ้น ขนาดของแรงที่ส่งผ่านตัวสปริงและตัวหน่วงไปยังฐานรอง (ซึ่งเวกเตอร์แรงจากสปริงและตัวหน่วงจะมีทิศทางต่างกัน 90 องศา) แสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} F_T &= \sqrt{(kX)^2 + (c\omega X)^2} \\ &= kX\sqrt{1 + \left(\frac{c\omega}{k}\right)^2} \\ &= kX\sqrt{1 + \left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \end{aligned} \quad (2\text{-}5)$$

โดย F_T คือ แรงที่ส่งผ่านไปยังพื้น (N)

ω_n คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ (rad/s)

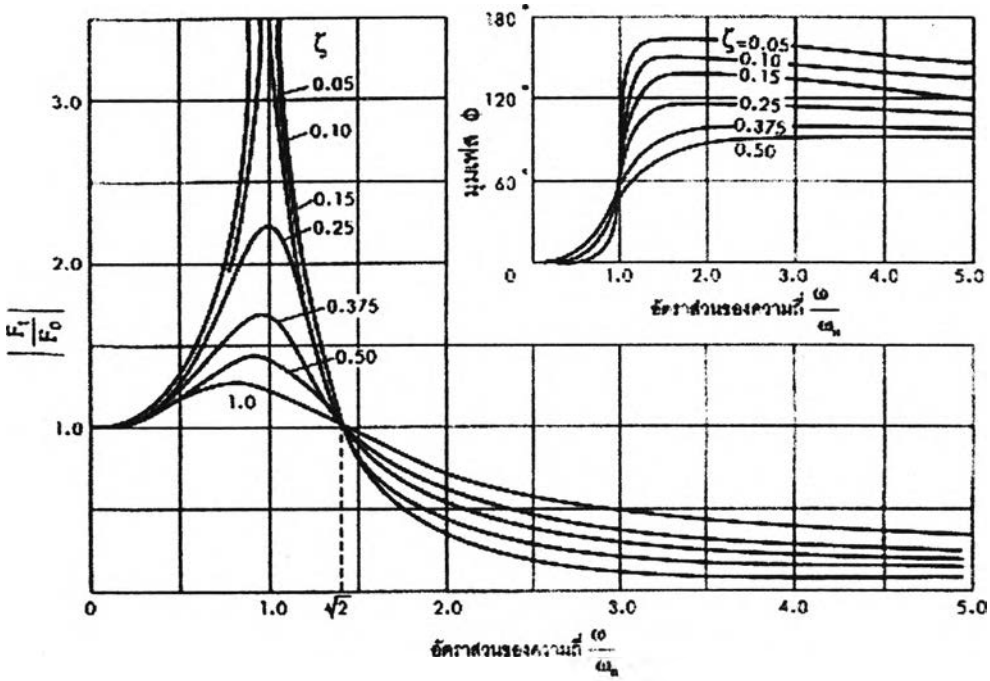
ζ คือ ค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio)

จากสมการ 2-3 ดังนั้น

$$\begin{aligned} F_T &= \frac{F_0\sqrt{1 + \left(\frac{c\omega}{k}\right)^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{m\omega^2}{k}\right)^2 + \left(\frac{c\omega}{k}\right)^2}} \\ &= \frac{F_0\sqrt{1 + \left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \end{aligned} \quad (2\text{-}6)$$

พิจารณาค่าการส่งผ่าน

ขนาดของอัตราส่วนระหว่าง F_T **และ** F_0 **คือ ค่าการส่งผ่าน (Transmissibility, TR) เมื่อพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านและมุมเฟสกับอัตราส่วนความถี่ โดยมีค่าอัตราส่วนความหน่วงต่าง ๆ กันจะได้ดังรูปที่ 2-3**



รูปที่ 2-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านและมุมเฟสกับอัตราส่วนความถี่ โดยมีค่าอัตราส่วนความหน่วงต่าง ๆ กัน สำหรับระบบ 1 ลำดับขั้นความเสรี

จากรูปที่ 2-3 สังเกตเห็นว่า

1. ค่าการส่งผ่านจะน้อยกว่า 1 เมื่ออัตราส่วนความถี่ $\omega/\omega_n > \sqrt{2}$ ดังนั้น การเลือกตัวกันการสั่นสะเทือนต้องเลือกให้ค่าอัตราส่วนความถี่มีค่ามากกว่า $\sqrt{2}$ เสมอ

2. เมื่ออัตราส่วนความถี่มีค่ามากกว่า $\sqrt{2}$ ค่าการส่งผ่านจะมีค่าลดลง

3. ค่าความหน่วงที่น้อยกว่าสามารถลดค่าการส่งผ่านได้ดีกว่า ในช่วงอัตราส่วนความถี่เพิ่มขึ้นมากกว่า $\sqrt{2}$

4. การมีค่าความหน่วงของระบบมีความจำเป็นเมื่อต้องการแปรความเร็วรอบเครื่องจักรผ่านความถี่ธรรมชาติของระบบ เนื่องจากช่วยลดขนาดการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งความถี่ธรรมชาติได้

5. สำหรับระบบที่ไม่มีตัวหน่วงที่ตำแหน่งอัตราส่วนความถี่เป็น 1 ค่าการส่งผ่านจะมีค่ามากที่สุด เนื่องจากเป็นตำแหน่งความถี่ธรรมชาติของระบบ

6. ในระบบที่ไม่มีตัวหน่วง (ζ=0) จะเขียนสมการ 2-6 ใหม่ได้ในรูป

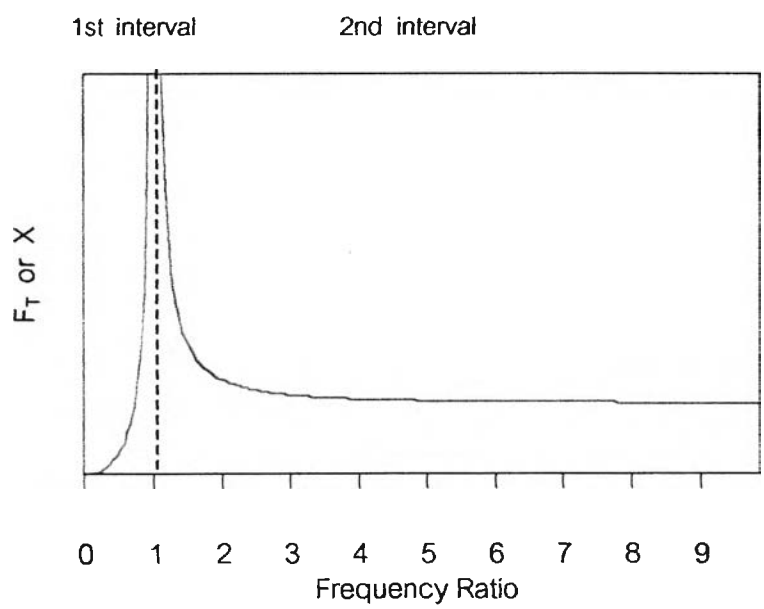
$$F_T = kX$$

$$= \frac{F_0}{\left|1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right|} \qquad (2\text{-}7)$$

$$TR \quad T_R = \frac{1}{\left|1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right|} \qquad (2\text{-}8)$$

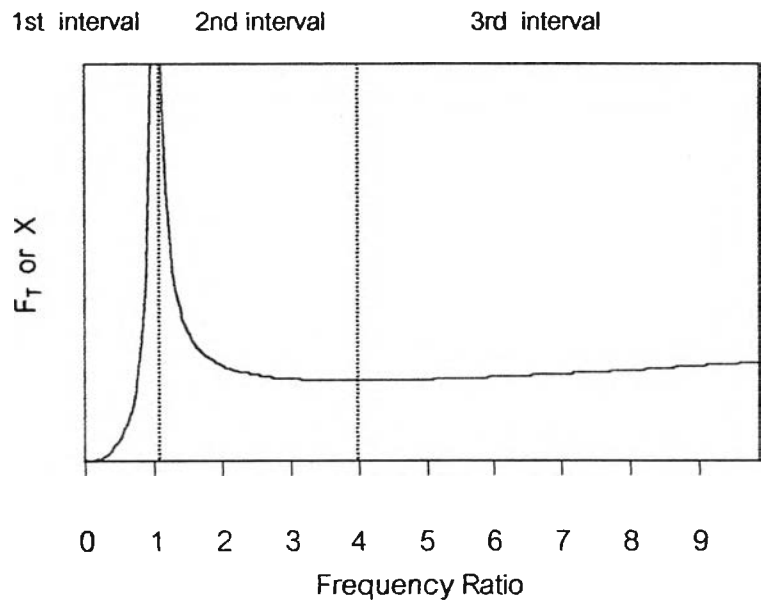
พิจารณาแรงส่งผ่านไปยังพื้นและขนาดการกระจัด

สำหรับระบบ 1 ลำดับขั้นความเสรีที่ไม่มีค่าความหน่วง และขนาดของแรงไม่สมดุล F_0 แปรผันตามความเร็วรอบของเครื่องจักรยกกำลังสอง (ω^2) เมื่อนำแรงส่งผ่านไปยังพื้นหรือขนาดการกระจัดมาพล็อตกับอัตราส่วนความถี่หรือความเร็วรอบของเครื่องจักร เส้นกราฟจะมีแนวโน้มเหมือนกันดังรูปที่ 2-4



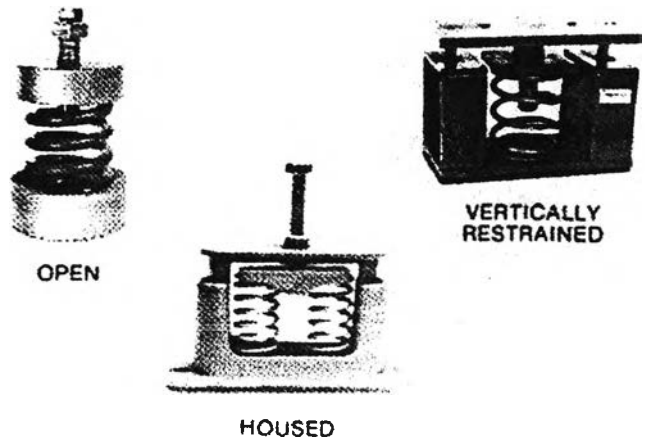
รูปที่ 2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ส่งผ่านไปยังพื้นหรือขนาดการกระจัดกับอัตราส่วนความถี่สำหรับระบบ 1 ลำดับขั้นความเสรีโดยไม่มีค่าความหน่วง และความถี่ธรรมชาติ 400 rpm

แต่สำหรับระบบ 1 ลำดับขั้นความเสรีที่มีค่าความหน่วง และขนาดของแรงไม่สมดุลแปรผันตามความเร็วรอบของเครื่องจักรยกกำลัง 2 เมื่อนำแรงส่งผ่านไปยังพื้นหรือขนาดการกระจัดมาพล็อตกับอัตราส่วนความถี่หรือความเร็วรอบของเครื่องจักร เส้นกราฟจะมีแนวโน้มเหมือนกันดังรูปที่ 2-5 สังเกตว่า ลักษณะของกราฟในช่วงแรกและช่วงที่ 2 จะเหมือนกับรูปที่ 2-4 (เหมือนกับระบบที่ไม่มีค่าความหน่วง) แต่ในช่วงที่ 3 เมื่อความเร็วรอบของเครื่องจักรเพิ่มขึ้นแรงส่งผ่านไปยังพื้นและขนาดการกระจัดมีแนวโน้มมากขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งต่างจากระบบที่ไม่มีค่าความหน่วงที่มีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ ความกว้างของช่วงที่ 2 ขึ้นกับอัตราส่วนความหน่วง และความถี่ธรรมชาติ



รูปที่ 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ส่งผ่านไปยังพื้นหรือขนาดการกระจัดกับอัตราส่วนความถี่สำหรับระบบ 1 ลำดับขั้นความเสรีโดยมีค่าอัตราส่วนความหน่วง 0.05 และความถี่ธรรมชาติ 400 rpm

ประเภทของตัวกันการสั่นสะเทือนและฐานรองรับเครื่องจักร



ตัวกันการสั่นสะเทือนแบบสปริงรองรับ (Spring mountings)

ตัวกันการสั่นสะเทือนแบบยางรองรับ (Rubber mountings)

Rubber Spring Spring and Rubber

ตัวกันการสั่นสะเทือนแบบแขวน

รูปที่ 2-6 ตัวกันการสั่นสะเทือนแบบต่าง ๆ

รูปที่ 2-6 แสดงตัวกันการสั่นสะเทือนแบบต่าง ๆ วัสดุที่มักนำมาใช้ทำตัวกันการสั่นสะเทือนได้แก่ สปริงโลหะ ยาง และไม้ก๊อก (Cork) ค่าความแข็งสปริงจะขึ้นกับรูปร่าง ขนาด และเกรด (Grade) ของวัสดุ

ตัวกันการสั่นสะเทือนแบบแขวน (Hangers) และแบบรองรับ (Mountings) ที่ทำจากยางจะมีช่วงระยะหดตัว (Deflection) อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.5 นิ้ว ซึ่งเหมาะสำหรับใช้งานกับเครื่องจักรความเร็วรอบสูง ๆ ที่มีขนาดเล็ก เช่น ปั๊ม (Pump) ที่มีขนาดต่ำกว่า 3 HP, การยึดติดท่อ, เครื่องเป่าลมเย็นที่มีขนาดเล็ก เป็นต้น

สปริงโลหะแบบรองรับ (Steel spring mountings) มีการใช้งานอย่างมากในปัจจุบัน มีระยะหดตัวได้สูงถึง 5 นิ้ว ดังนั้นจึงสามารถใช้กับเครื่องจักรขนาดใหญ่ได้ดี

การติดตั้งฐานเหล็กกล้าหรือคอนกรีตเป็นการทำให้ฐานของเครื่องจักรมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น ช่วยทำให้เครื่องจักรที่มีมิติสูง ๆ มีเสถียรภาพ (Stability) มากขึ้น น้ำหนักของฐานเครื่องจักรที่เป็นเหล็กกล้าจะน้อยกว่าเมื่อเทียบกับฐานคอนกรีต สิ่งสำคัญในการติดตั้งฐานเครื่องจักร คือ ต้องมีความแข็งแรง และความถี่ธรรมชาติต้องไม่อยู่ในช่วงความถี่ที่เครื่องจักรทำงาน ฐานคอนกรีตมักใช้เพื่อจุดประสงค์ในการเป็นอิเนอร์เชียบล็อก (Inertia block) เพิ่มมวลให้กับระบบ ช่วยทำให้แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนลดลง