บทที่ 15

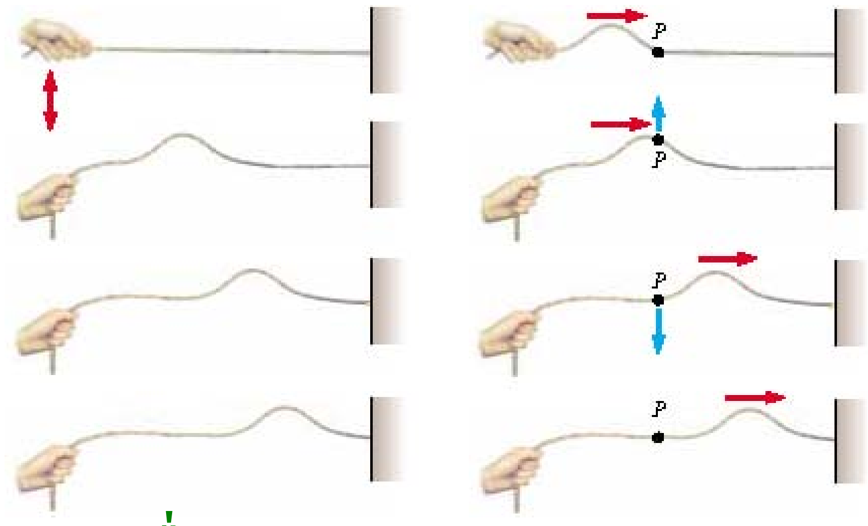
คลื่น และ เสียง

ดร.ทักษ์กมนต์ วิจักษณ์ธนาวุฒิ

<u>คลื่นกล</u> คลื่นกลทุกชนิดจะต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่

แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. <u>คลื่นตามขวาง</u> อนุภาคของตัวกลางจะสั่นตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น เช่น คลื่นน้ำ คลื่นในเส้นเชือก



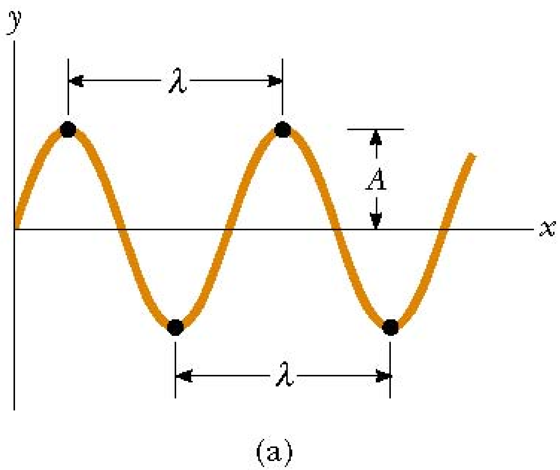
พิจารณาที่จุด P

*ไม่ได้เคลื่อนที่ไปกับคลื่น

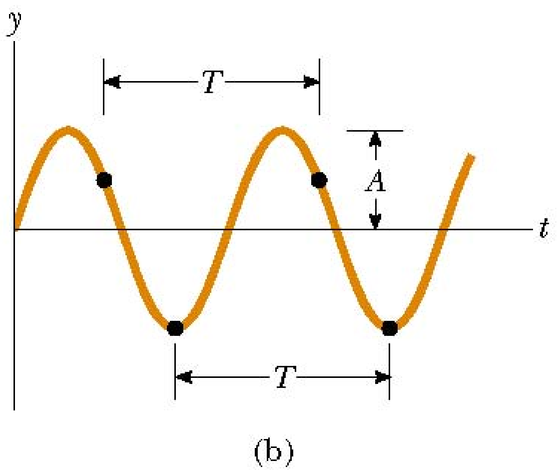
*สั่นตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น

2. <u>คลื่นตามยาว</u> อนุภาคของตัวกลางสั่นขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น เช่น คลื่นเสียง

สมบัติของคลื่น



(a)



(b)

- ความยาวคลื่น (λ)

  คือ ระยะที่วัดจากจุดสูงสุดหนึ่งไปยังจุดสูงสุดที่อยู่ใกล้กัน

- แอมปลิจูด (A)

  คือ การกระจัดสูงสุดของตัวกลาง

- คาบเวลา (T)

  คือ เวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ไปได้ 1 ความยาวคลื่น

- ความถี่ (f)

  คือ จำนวนคลื่นที่ผ่านจุดๆหนึ่งในเวลา 1 วินาที

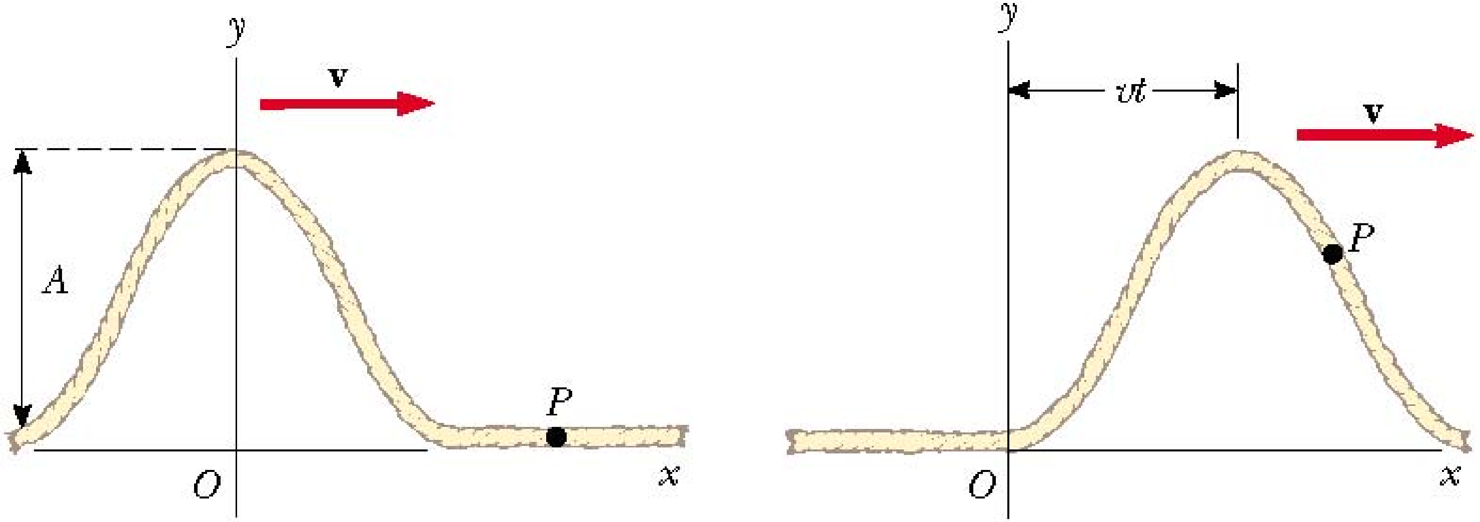
- อัตราเร็วของคลื่น (v)

  คือ ระยะที่คลื่นเคลื่อนที่ไปใน 1 วินาที

ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราเร็ว ความยาวคลื่น และความถี่ เป็นดังสมการ

$$\boxed{v = f\lambda}$$

ฟังก์ชันคลื่น (wave function)



(a) Pulse at $t = 0$ (b) Pulse at time t

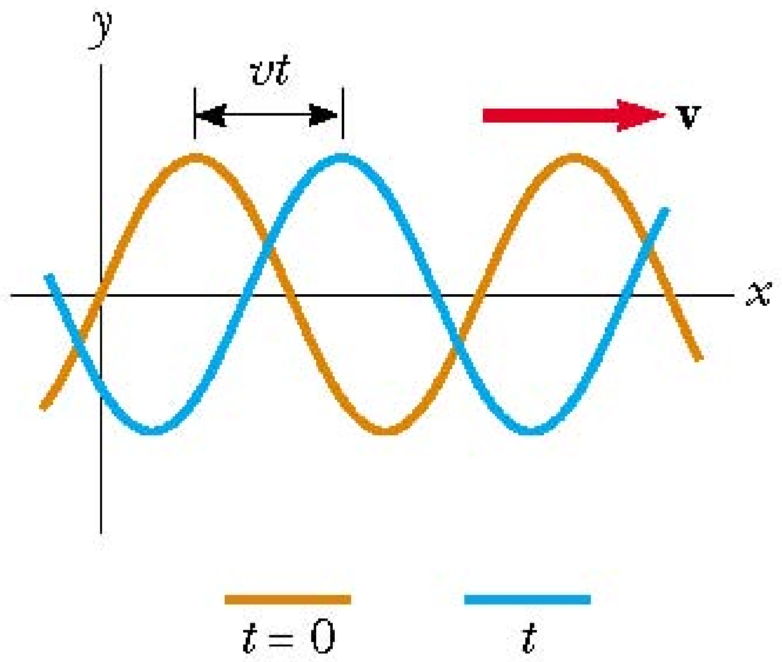
ที่เวลา t = 0 จะได้ฟังก์ชันคลื่นดังนี้ y(x,t) = f(x)

ที่เวลา t ใดๆ คลื่นเคลื่อนที่ไปทางขวาด้วยระยะทาง vt

จะได้ฟังก์ชันคลื่นเป็น y(x,t) = f(x-vt)

ในทำนองเดียวกันถ้าคลื่นเคลื่อนที่ไปทางซ้ายจะได้ y(x,t) = f(x+vt)

คลื่นแบบไซน์ (sinusoidal waves)



ฟังก์ชันคลื่นไซน์ใน 1 มิติ คือ

$$y(x,t) = A\sin(kx - \omega t + \phi)$$

เมื่อ เลขคลื่น $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$

ความถี่เชิงมุม $\omega = \dfrac{2\pi}{T} = 2\pi f$

และ ϕ คือ เฟสเริ่มต้น

และ จาก $v = f\lambda$ จะได้ $v = \dfrac{\omega}{k}$

จากฟังก์ชันคลื่นไซน์ เมื่อเฟสเริ่มต้นเป็นศูนย์ จะได้

$$y = A\sin(kx - \omega t)$$

ความเร็วของอนุภาคที่จุดใดๆของคลื่น คือ

$$v = \frac{\partial y}{\partial t} = -\omega A\cos(kx - \omega t)$$

ความเร่งของอนุภาค คือ

$$a = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\omega^2 A\sin(kx - \omega t)$$

และสมการคลื่น คือ $$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

ตัวอย่าง คลื่น sinusoidal ขบวนหนึ่งเคลื่อนที่ไปทางแกน +x โดยมีการกระจัดสูงสุดของตัวกลางเท่ากับ 15 cm ความยาวคลื่น 40 cm และความถี่ 8 Hz และเมื่อเวลา t=0 การกระจัดของคลื่นเท่ากับศูนย์แต่การกระจัดของตัวกลางเท่ากับ 15 cm จงหา

(a) คาบ ความถี่เชิงมุม เลขคลื่น และความเร็วของคลื่น

(b) ฟังก์ชันคลื่น

วิธีทำ

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi \text{ rad}}{40.0 \text{ cm}} = 0.157 \text{ rad/cm}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{8.00 \text{ s}^{-1}} = 0.125 \text{ s}$$

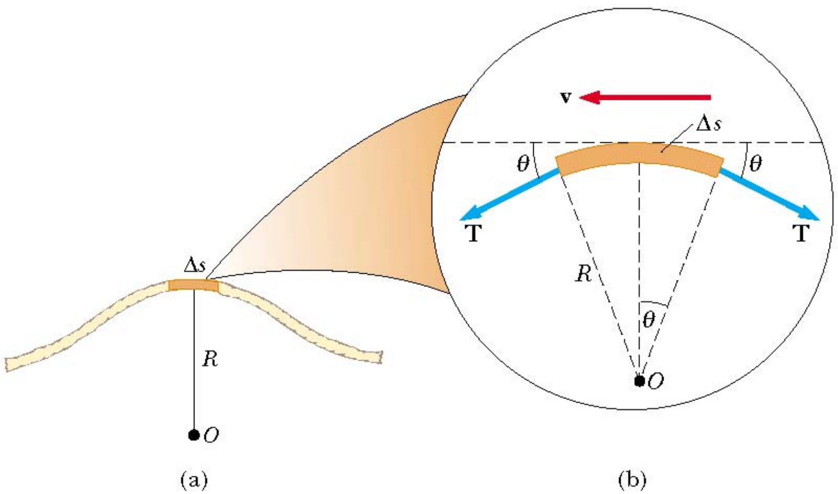
$$\omega = 2\pi f = 2\pi(8.00 \text{ s}^{-1}) = 50.3 \text{ rad/s}$$

$$v = \lambda f = (40.0 \text{ cm})(8.00 \text{ s}^{-1}) = 320 \text{ m/s}$$

$$y = A\sin(kx - \omega t + \frac{\pi}{2}) = A\cos(kx - \omega t)$$

$$y = (15.0 \text{ cm})\cos(0.157x - 50.3t)$$

อัตราเร็วคลื่นในเส้นเชือก



จากรูป $F_r = 2T\sin\theta \approx 2T\theta$

ให้ μ คือ มวลต่อความยาวเชือก $\equiv \dfrac{m}{\Delta s}$

ดังนั้น $m = \mu\Delta s = 2\mu R\theta$

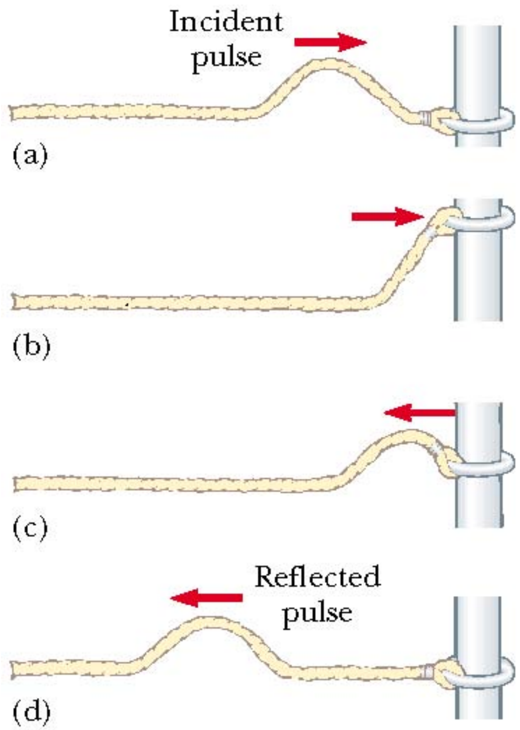
จากกฎข้อสองของนิวตัน จะได้ $F_r = ma_r = m\dfrac{v^2}{R}$

และ $$v^2 = \frac{F_r R}{m} = \frac{2T\theta R}{2\mu R\theta} = \frac{T}{\mu}$$

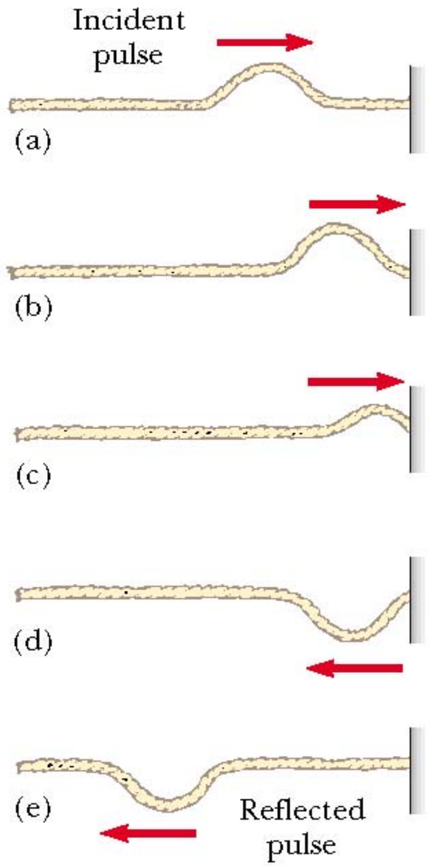
จะได้ อัตราเร็วคลื่นในเส้นเชือก $$\boxed{v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}}$$

การสะท้อนของคลื่น

ปลายอิสระ



ปลายตรึง



คลื่นสะท้อนจากปลายอิสระเหมือนคลื่นตกกระทบ แต่ทิศทางตรงกันข้าม

คลื่นสะท้อนจากปลายตรึงมีการเปลี่ยนเฟสไป 180 องศา

หลักการซ้อนกันของคลื่น

ถ้าคลื่นตั้งแต่สองคลื่นหรือมากกว่า สามารถเคลื่อนที่ผ่านที่แห่งเดียวกันได้โดยไม่ขึ้นต่อกัน สามารถหาคลื่นลัพธ์ที่เกิดจากการแทรกสอดของคลื่นทั้งหมดได้เป็น

$$y = y_1 + y_2 + y_3 + \dots$$

เช่น กำหนดให้

$$y_1 = A\sin\left(kx - \omega t + \phi_1\right)$$

$$y_2 = A\sin\left(kx - \omega t + \phi_2\right)$$

จะได้คลื่นลัพธ์

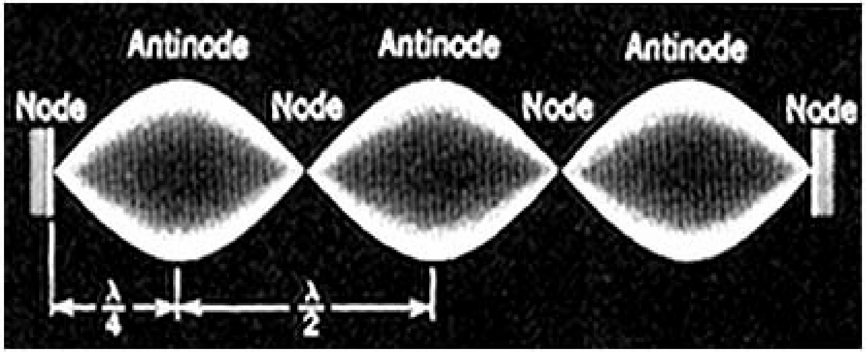
$$y = \left[2A\cos\left(\frac{1}{2}\Delta\phi\right)\right]\sin\left[kx - \omega t + \frac{\phi_2 + \phi_1}{2}\right]$$

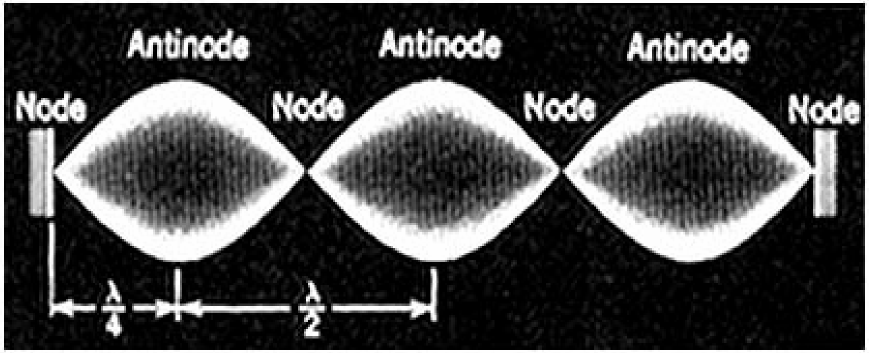
คลื่นนิ่ง (Standing waves)

คลื่นนิ่ง เกิดจากคลื่น 2 ขบวนที่มีความยาวคลื่น ความเร็ว และแอมปลิจูดเท่ากัน เคลื่อนที่สวนทางกันในตัวกลางเดียวกัน

คลื่นทั้งสองจะรวมกันโดยการแทรกสอด ตำแหน่งที่แทรกสอดแบบเสริมกันมากที่สุด เรียกว่า *ตำแหน่งปฏิบัพ (antinode)* และ ตำแหน่งที่แทรกสอดแบบหักล้างกันมากที่สุด เรียกว่า *ตำแหน่งบัพ (node)*

ตัวอย่างเช่น คลื่นนิ่งบนเส้นเชือกที่ขึงตรึงที่ปลายทั้งสองข้าง





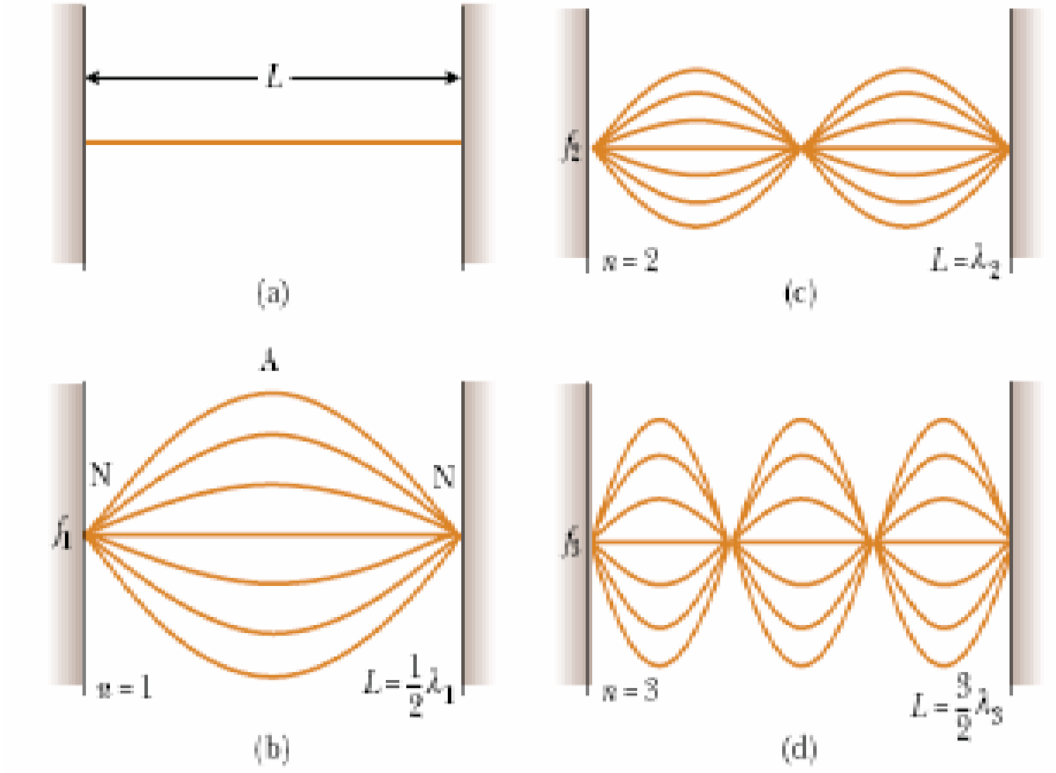
ตำแหน่งของ ปฏิบัพ (antinode) คือ

$$x_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{2} \quad (n = 0, 1, 2, 3, \ldots)$$

ตำแหน่งของ บัพ (node) คือ

$$x_n = \frac{n\lambda}{2} \quad (n = 0, 1, 2, 3, \ldots)$$

ระยะห่างระหว่างจุดบัพเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเช่นเดียวกันกับจุดปฏิบัพ



พิจารณาคลื่นนิ่งในเส้นเชือก ที่ปลายทั้งสองของเชือกเป็นจุดบัพ และเชือกยาว L จะได้

$$L = \frac{n\lambda_n}{2} \qquad (n = 1, 2, 3, \ldots)$$

เมื่อ n คือ จำนวนลูป (loop)

จาก $v = f\lambda$ จะได้

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L} \quad (n = 1, 2, 3, \ ...)$$

ความถี่ f_n นี้เรียกว่า ความถี่ตามธรรมชาติ (Natural Frequency)

โดยความถี่ตามธรรมชาติต่ำสุด เรียกว่า ความถี่มูลฐาน

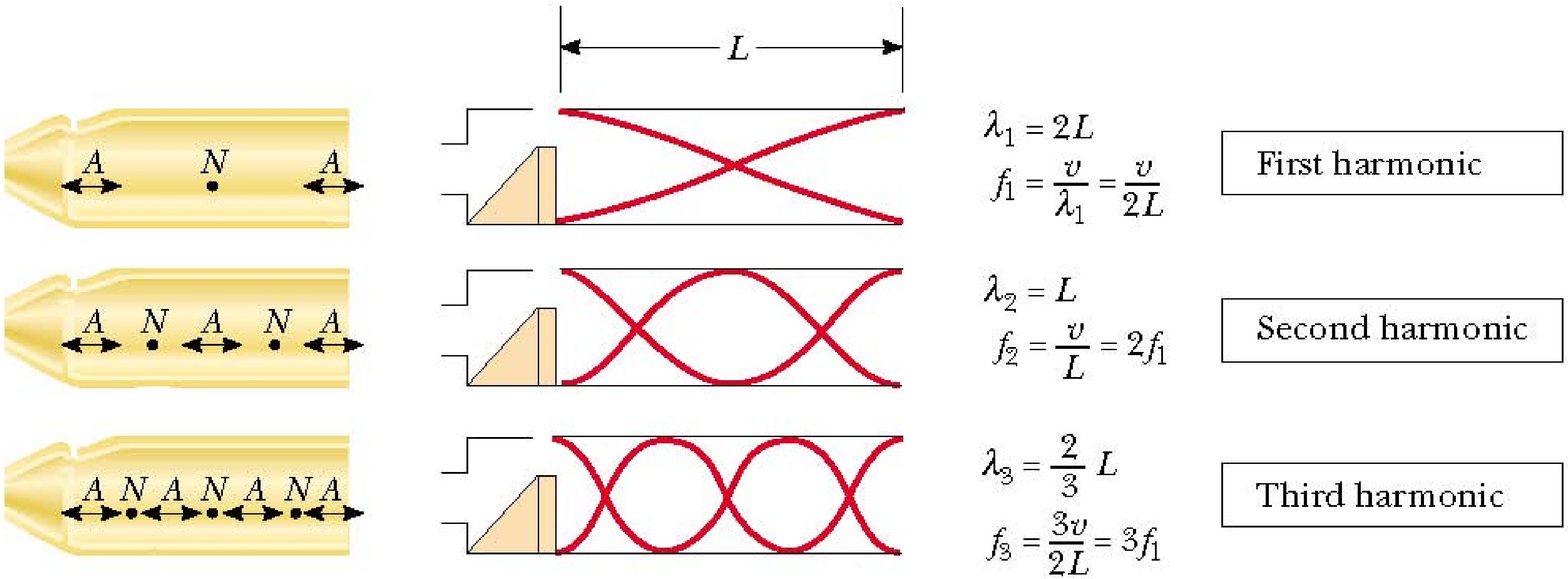
เมื่ออัตราเร็วของคลื่นในเส้นเชือก คือ $v = \sqrt{T / \mu}$ จะได้

$$f_n = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}} \qquad (n = 1, 2, 3, \ldots)$$

ถ้า n=1 จะเรียกว่า ฮาร์โมนิกที่ 1 และ n=2 เรียกว่า ฮาร์โมนิกที่ 2 เป็นต้น

คลื่นนิ่งในท่ออากาศ

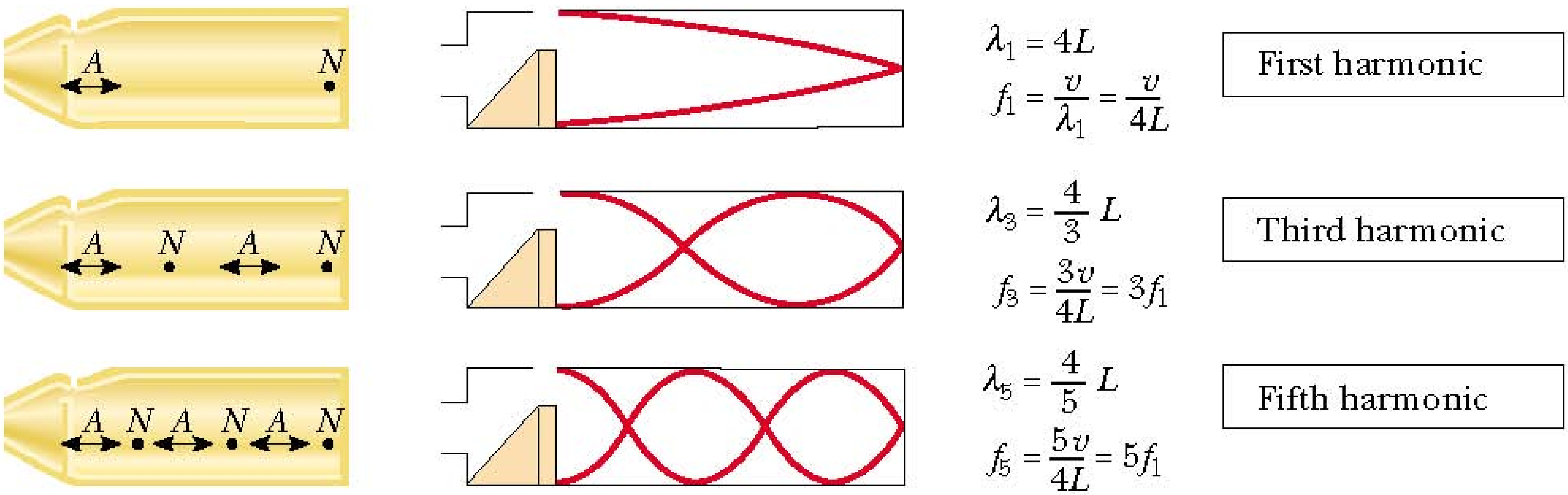
ท่อปลายเปิดทั้ง 2 ข้าง



(a) Open at both ends

$$f_n = n\frac{v}{2L} \quad (n = 1, 2, 3, \ldots)$$

ท่อปลายเปิดข้าง-ปลายปิดข้าง



(b) Closed at one end, open at the other

$$f_n = n\frac{v}{4L} \qquad (n = 1, 3, 5, \ldots)$$

ตัวอย่าง คลื่น 2 ขบวนเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามทำให้เกิดคลื่นนิ่ง โดยแต่ละคลื่นเป็นดังนี้

$$y_1 = (4.0 \text{ cm})\sin(3.0x - 2.0t)$$
$$y_2 = (4.0 \text{ cm})\sin(3.0x + 2.0t)$$

ในที่นี้ x และ y มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

(ก) จงหาการกระจัดสูงสุดของการเคลื่อนที่ที่ x=2.3 เซนติเมตร

(ข) จงหาตำแหน่งของบัพ และ ปฏิบัพ

วิธีทำ (ก) หาคลื่นลัพธ์จาก

$$y = y_1 + y_2$$
$$y = (4.0 \text{ cm})\sin(3.0x - 2.0t) + (4.0 \text{ cm})\sin(3.0x + 2.0t)$$
$$y = (4.0 \text{ cm})\left[\sin(3.0x - 2.0t) + \sin(3.0x + 2.0t)\right]$$

จาก $$\sin A + \sin B = 2\sin\left(\frac{A+B}{2}\right)\cos\left(\frac{A-B}{2}\right)$$

จะได้

$$y = (4.0\ \text{cm})\left[2\sin\left(\frac{3x-2t+3x+2}{2}t\right)\cos\left(\frac{3x-2t-3x-2t}{2}\right)\right]$$

$$y = (8.0\ \text{cm})\sin 3x\cos(-2t)$$

$$y = \left[(8.0\ \text{cm})\sin 3x\right]\cos 2t$$

ที่ x=2.3 เซนติเมตร จะได้การกระจัดสูงสุดเท่ากับ

$$\begin{aligned} y_{\max} &= (8.0\ \text{cm})\sin(3.0\times 2.3\ \text{cm}) \\ &= (8.0\ \text{cm})\sin(6.9\ \text{rad}) \\ &= 4.6\ \text{cm} \end{aligned}$$

(ข) $k = 2\pi/\lambda = 3\ \mathrm{rad/cm}$ นั่นคือ $\lambda = 2\pi/3$ เซนติเมตร

ดังนั้นตำแหน่งปฏิบัพ คือ

$$x_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{2} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\pi}{3}\ \mathrm{cm} \qquad (\mathrm{n}=1,2,3,\ldots)$$

และตำแหน่งบัพ คือ

$$x_n = n\frac{\lambda}{2} = n\left(\frac{\pi}{3}\right)\mathrm{cm} \qquad (\mathrm{n}=1,2,3,\ldots)$$

อัตราเร็วของคลื่นเสียงขึ้นกับสมบัติของตัวกลาง

- สมบัติความยืดหยุ่น (มอดุลัส)
- สมบัติเฉื่อย (ความหนาแน่น)

$$v = \sqrt{\frac{\text{Modulus}}{\text{density}}}$$

เช่น อัตราเร็วของคลื่นเสียง $v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$

และ อัตราเร็วคลื่นในเส้นเชือก $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$

อัตราเร็วของคลื่นเสียงขึ้นกับอุณหภูมิ

สำหรับคลื่นเสียงในอากาศ

$$v = (331 \text{ m/s})\sqrt{1 + \frac{T_C}{273°C}}$$

ตัวอย่าง (ก) ถ้าเคาะปลายด้านหนึ่งของแท่งอลูมิเนียมด้วยค้อน จะเกิดคลื่นตามยาวที่แผ่ไปตามแท่งอลูมิเนียมด้วยอัตราเร็วเท่าใด ถ้าค่าโมดูลัสของยังของอลูมิเนียมเท่ากับ $7.0 \times 10^{10}\ \mathrm{N/m^2}$ และความหนาแน่นของอลูมิเนียมเท่ากับ $2.7 \times 10^{3}\ \mathrm{kg/m^3}$

วิธีทำ จากสมการอัตราเร็วของคลื่นเสียงในโลหะ

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{7.0 \times 10^{10}}{2.7 \times 10^{3}}}$$

$$v = 5.1 \times 10^{3} \quad \mathrm{m/s}$$

ตอบ

(ข) ถ้าโมดูลัสเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ $2.1\times10^{9}\ \mathrm{N/m^{2}}$ และน้ำมีความหนาแน่นเท่ากับ $10^{3}\ \mathrm{kg/m^{3}}$ จงหาอัตราเร็วของคลื่นเสียงในน้ำ

วิธีทำ จากสมการอัตราเร็วของคลื่นเสียงในของเหลว

$$v=\sqrt{\frac{B}{\rho_0}}=\sqrt{\frac{2.1\times10^{9}}{10^{3}}}$$

$$v=1.5\times10^{3} \qquad \mathrm{m/s}$$ ตอบ

(ค) ถ้าอุณหภูมิของอากาศเท่ากับ 40 C อัตราเร็วของเสียงในอากาศจะเป็นเท่าไร

วิธีทำ **จากสมการอัตราเร็วของคลื่นเสียงในอากาศ**

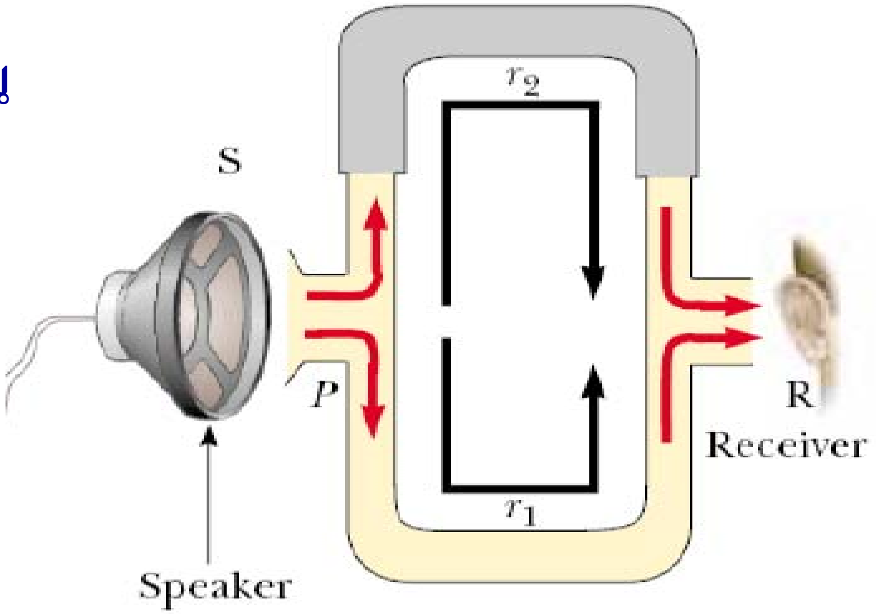
$$v(t) \approx v_0\sqrt{1+\frac{t}{273}} \approx 331 + 0.6t$$

$$v\,(40\ ^0C) = 331 + (0.6 \times 40) = 355 \quad m/s$$

ตอบ

การแทรกสอดของคลื่นเสียง

ถ้าคลื่นเสียงสองขบวนมารวมกัน เช่น คลื่นเสียงตามแนว r_1 และ r_2 ในภาพ จะเกิด



การแทรกสอดแบบเสริมกัน (constructive interference) เมื่อ

$$\Delta r = (2n)\frac{\lambda}{2}$$

การแทรกสอดแบบหักล้าง (destructive interference) เมื่อ

$$\Delta r = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$$

Δr คือ ผลต่างวิถีของคลื่นทั้งสอง

λ คือ ความยาวคลื่น

n คือ จำนวนเต็ม

ความเข้มของคลื่นเสียง

ความเข้มเสียง (Intensity, I)

คือ กำลังเสียง (Power, $\mathscr{P}$) ต่อพื้นที่ที่รับเสียง (Area, A) $I = \dfrac{\mathscr{P}}{A}$

กำลังเสียง (Power, $\mathscr{P}$)

คือ อัตราการถ่ายโอนพลังงาน (พลังงาน, E ต่อเวลา, t) $\mathscr{P} = \dfrac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}$

เมื่อ E คือพลังงานเชิงกลรวม $E = K + U = \dfrac{1}{2}\rho A(\omega s_{\max})^2\lambda$

สามารถหากำลังเสียงได้ ดังนี้

$$\mathscr{P} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{E}{T} = \frac{1}{2}\rho A(\omega s_{\max})^2\left(\frac{\lambda}{T}\right) = \frac{1}{2}\rho A v(\omega s_{\max})^2$$

ความเข้มเสียง ในรูปของตัวแปรต่างๆ คือ

$$I = \frac{\mathscr{P}}{A} = \frac{1}{2}\rho v(\omega s_{max})^2 = \frac{P_{max}^2}{2\rho v} = \frac{P_{max}^2}{2\sqrt{\rho B}}$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง

v คือ อัตราเร็วเสียง

ω คือ ความถี่เชิงมุมของคลื่นเสียง

s_{max} คือ แอมปลิจูดของคลื่น

P_{max} คือ แอมปลิจูดของความดัน

$$P_{max} = \rho v \omega s_{max} = BkA$$

เมื่อ k คือ เลขคลื่น

B คือ บัลค์โมดุลัส

<u>ตัวอย่าง</u> แหล่งกำเนิดคลื่นเสียงที่เป็นจุด ให้กำเนิดคลื่นเสียงที่มีกำลังเฉลี่ย 80.0 W จงคำนวณหา

(a) ความเข้มเสียงที่ระยะห่าง 3.00 m จากแหล่งกำเนิดคลื่นเสียง

$$I = \frac{\mathscr{P}}{A} = \frac{\mathscr{P}}{4\pi r^2} = \frac{80.0\ \mathrm{W}}{4\pi(3.00\ \mathrm{m})^2} 0.707\ \mathrm{W/m^2}$$

(b) ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงที่ทำให้เกิดความเข้มเสียง

$1.00 \times 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2}$

$$r = \sqrt{\frac{\mathscr{P}}{4\pi I}} = \sqrt{\frac{80.0\ \mathrm{W}}{4\pi(1.00\times 10^{-8}\ \mathrm{W/m^2})}} = 2.52\times 10^{4}\ \mathrm{m}$$

ระดับเสียงในหน่วยเดซิเบล

เนื่องจากความเข้มเสียงที่มนุษย์สามารถได้ยินหรือความดังนั้นครอบคลุมช่วงความเข้มที่กว้างมาก จึงสะดวกกว่าที่จะพิจารณาโดยใช้มาตรส่วนลอการิทึม (Logarithmic)

ระดับเสียง β มีนิยาม คือ
$$\boxed{\beta = 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right)}$$

เมื่อ $I_0 = 1.00 \times 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2}$

หน่วยของระดับเสียง คือ เดซิเบล (decibel , dB)

ระดับเสียงบอกถึงความดังของเสียงเช่นเดียวกับความเข้มเสียง

ตัวอย่าง เครื่องจักรกลสองเครื่องอยู่ห่างจากคนงานเป็นระยะทางเท่าๆกัน คนงานวัดความเข้มเสียงของเครื่องจักรกลแต่ละเครื่องได้เท่ากับ $2.00\times10^{-7}\,\mathrm{W/m^2}$ จงหา

(a) เมื่อให้เครื่องจักรกลทำงานเพียงเครื่องเดียว ระดับเสียงที่เกิดขึ้นมีค่ากี่เดซิเบล

$$\beta_1 = 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

$$= 10\log\left(\frac{2.00\times10^{-7}\,\mathrm{W/m^2}}{1.00\times10^{-12}\,\mathrm{W/m^2}}\right) = 10\log(2.00\times10^{5}) = 53\ \mathrm{dB}$$

(b) เมื่อให้เครื่องจักรกลทั้งสองเครื่องทำงานพร้อมๆกัน ระดับเสียงที่เกิดขึ้นมีค่ากี่เดซิเบล

$$\beta_2 = 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

$$= 10\log\left(\frac{4.00\times10^{-7}\,\mathrm{W/m^2}}{1.00\times10^{-12}\,\mathrm{W/m^2}}\right) = 10\log(4.00\times10^{5}) = 56\ \mathrm{dB}$$

(c) ถ้าต้องการให้ความดังมีค่าเป็นสองเท่าต้องใช้เครื่องจักรกลจำนวนกี่เครื่อง

$$10 = \beta_2 - \beta_1$$

$$10 = 10\log\left(\frac{I_2}{I_0}\right) - 10\log\left(\frac{I_1}{I_0}\right)$$

$$10 = 10\log\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$

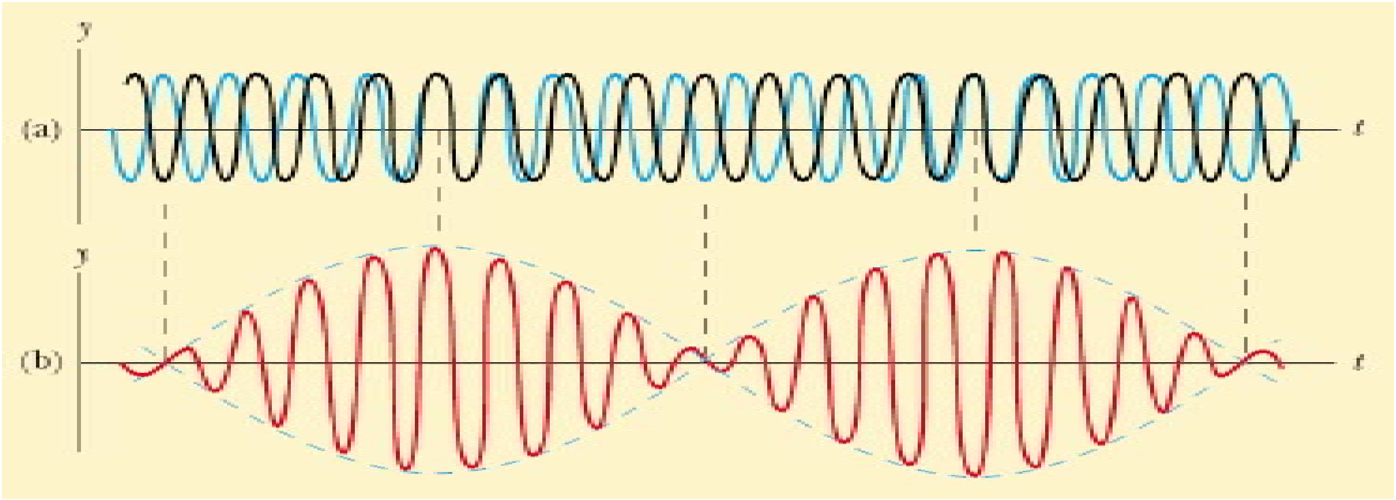
$$\log\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = 1$$

$$\frac{I_2}{I_1} = 10$$

$$I_2 = 10I_1$$

ดังนั้นต้องใช้เครื่องจักร 10 เครื่องจึงจะมีความดังเป็นสองเท่าของเครื่องเดียว

บีต (Beat)



การเกิดบีต เป็นปรากฏการณ์จากการแทรกสอดของคลื่นเสียง 2 ขบวน ที่มีความถี่ต่างกันเล็กน้อย และเคลื่อนที่อยู่ในแนวเดียวกันเกิดการรวมเป็นคลื่นเดียวกัน คลื่นลัพธ์มีการแปรของแอมปลิจูดที่มีลักษณะเป็นคาบ เป็นผลทำให้เกิดเสียงดังเสียงค่อยสลับกันไปด้วยความถี่ค่าหนึ่ง

ความถี่บีต (Beat Frequency) หาได้จาก

$$f_{\text{beat}} = \left| f_1 - f_2 \right|$$

ตัวอย่าง สายเปียโนที่เหมือนกันทุกประการจำนวน 2 เส้น แต่ละเส้นมีความยาว 0.750 เมตร และถูกตั้งสายให้มีความถี่ 440 Hz จากนั้นได้เพิ่มแรงตึงในสายเปียโนเส้นหนึ่งให้มีค่าเพิ่มขึ้น 1.0 % ถ้าทำให้สายเปียโนนี้สั่นพร้อมๆกัน ความถี่บีตที่เกิดขึ้นมีค่าเท่าใด

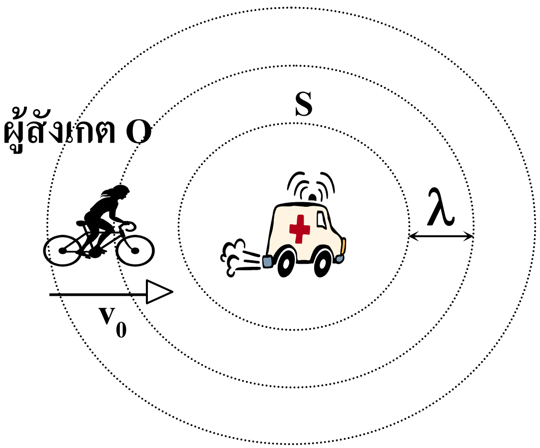
วิธีทำ จากโจทย์จะได้ $T_2 = 1.01T_1$

จาก $$\frac{f_2}{f_1} = \frac{\left(v_2/2L\right)}{\left(v_1/2L\right)} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{\sqrt{T_2/\mu}}{\sqrt{T_1/\mu}} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} = \sqrt{\frac{1.01T_1}{T_1}} = 1.005$$

$$f_2 = 1.005f_1 = 1.005(440\ \text{Hz}) = 442\ \text{Hz}$$

$$f_{\text{beat}} = 442 - 440 = 2\ \text{Hz}$$

ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (The Doppler Effect)



ผู้สังเกต O เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว v_0 ตรงเข้าหาต้นกำเนิดคลื่น S ซึ่งอยู่นิ่ง ผู้สังเกตจะได้ยินเสียงที่มีความถี่ f' ซึ่งมากกว่าความถี่ปกติของเสียงจากต้นกำเนิด

<u>กรณี 1</u> ผู้สังเกตเคลื่อนที่เข้าหาต้นกำเนิดเสียงที่อยู่นิ่ง

$$f' = \frac{v + v_0}{v/f} = f\left(1 + \frac{v_0}{v}\right)$$

เมื่อ v_0 คือ อัตราเร็วของผู้สังเกต

v คือ อัตราเร็วเสียงของต้นกำเนิดเสียง

f' คือ ความถี่ที่ผู้สังเกตได้ยิน

f คือ ความถี่ของต้นกำเนิดเสียง

นั่นคือ ผู้สังเกตจะได้รับคลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำกว่าปกติ

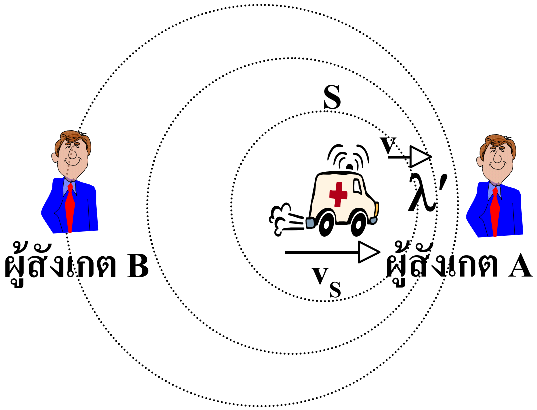
กรณี 2 ผู้สังเกตเคลื่อนที่ออกห่างจากแหล่งกำเนิดเสียงที่อยู่นิ่ง

$$f' = \frac{v - v_0}{v/\lambda} = f\left(1 - \frac{v_0}{v}\right)$$

นั่นคือ ผู้สังเกตจะได้รับคลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำกว่าปกติ

เมื่อรวมกรณีที่ 1 และ 2 เข้าด้วยกัน จะได้

$$f' = f\left(1 \pm \frac{v_0}{v}\right)$$



กรณี 3 ต้นกำเนิดเคลื่อนที่เข้าหาผู้สังเกตที่อยู่นิ่ง

$$f' = f\left(\frac{v}{v - v_s}\right)$$

เมื่อต้นกำเนิดเสียง S เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว v_s ตรงเข้าหาผู้สังเกต A และหนีห่างจากผู้สังเกต B ซึ่งต่างอยู่นิ่ง ผู้สังเกต A จะได้ยินเสียงที่มีความถี่สูงกว่าปกติ ในขณะที่ผู้สังเกต B จะได้ยินเสียงที่มีความถี่ต่ำกว่าปกติ

เมื่อ f' คือ ความถี่ที่ผู้สังเกตได้ยิน

f คือ ความถี่จากต้นกำเนิดเสียง

v คือ อัตราเร็วเสียงในอากาศ

v_s คือ อัตราเร็วของต้นกำเนิดเสียง

นั่นคือ ผู้สังเกตจะได้รับคลื่นที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ปกติของต้นกำเนิดคลื่นเสียงเสมอ

กรณี 4 ต้นกำเนิดเสียงเคลื่อนที่ออกห่างจากผู้สังเกตที่อยู่นิ่ง

$$f' = f\left(\frac{v}{v + v_s}\right)$$

นั่นคือ ผู้สังเกตจะได้รับคลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ปกติของต้นกำเนิดคลื่นเสียงเสมอ

เมื่อรวมกรณีที่ 3 และ 4 จะได้

$$f' = f\left(\frac{v}{v \mp v_s}\right)$$

<u>กรณี 5</u> ทั้งผู้สังเกตและต้นกำเนิดเสียงเคลื่อนที่

$$f' = f\left(\frac{v \pm v_0}{v \mp v_S}\right)$$

เมื่อผู้สังเกตและต้นกำเนิดเคลื่อนที่สัมพัทธ์เข้าหากัน

v_0 จะเป็น + และ v_S เป็น -

เมื่อผู้สังเกตและต้นกำเนิดเคลื่อนที่สัมพัทธ์ออกห่างกัน

v_0 จะเป็น - และ v_S เป็น +

และ v_0 คือ อัตราเร็วของผู้สังเกต , v_S คือ อัตราเร็วของต้นกำเนิดคลื่น

ตัวอย่าง รถพยาบาลคันหนึ่งแล่นบนทางหลวงด้วยอัตราเร็ว 33.5 m/s โดยเปิดเสียงไซเรนความถี่ 400 Hz จงหาความถี่ของเสียงไซเรนที่ผู้สังเกตซึ่งยืนอยู่ริมถนนได้ยิน

(ก) เมื่อรถพยาบาลเคลื่อนที่เข้ามา

(ข) เมื่อรถพยาบาลเคลื่อนที่เลยห่างออกไปตามลำดับ

(กำหนดให้อัตราเร็วของเสียงในอากาศ = 343 m/s)

วิธีทำ (ก) จากสมการของกรณีที่ผู้สังเกตอยู่นิ่งและต้นกำเนิดเสียงเคลื่อนที่เข้าหา ความถี่ของไซเรนที่ผู้สังเกตได้ยิน คือ

$$f' = f\left(\frac{v}{v - v_S}\right) = 400\left(\frac{343}{343 - 33.5}\right) = 443.3 \text{ Hz}$$

ตอบ

จากสมการสำหรับในกรณีที่รถแล่นเลยผ่านไปผู้สังเกตริมถนนจะได้ยินเสียงที่มีความถี่เป็น

$$f' = f\left(\frac{v}{v+v_s}\right) = 400\left(\frac{343}{343+33.5}\right)$$

$= 364.4$ Hz <u>ตอบ</u>

<u>ตัวอย่าง</u> ขณะที่ค้างคาวออกหากินในเวลากลางคืน ค้างคาวจะปล่อยคลื่นอัลตราซอนิค (Ultrasonics) ซึ่งเป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่หูของมนุษย์จะรับฟังได้ สมมุติว่าค้างคาวตัวหนึ่งบินด้วยอัตราเร็ว $v_b = 9\ \mathrm{m/s}$ และมีแมลงตัวหนึ่งบินสวนเข้าหาค้างคาวด้วยอัตราเร็ว $v_m = 8\ \mathrm{m/s}$ ค้างคาวเปล่งเสียงอัลตราซอนิคความถี่ f_b ออกไปกระทบกับแมลง แล้วมีคลื่นสะท้อนจากแมลงกลับมายังค้างคาวด้วยความถี่ f' ถ้าพบว่า $f' = 83\ \mathrm{kHz}$ จงหา

(ก) ความถี่ f_m ของค้างคาวที่แมลงได้ยิน

(ข) ความถี่ f_b ที่ค้างคาวเปล่งออกมา

(ก) เมื่อให้ค้างคาวเป็นผู้สังเกต และ แมลงเป็นต้นกำเนิดเสียง และทั้งสองเคลื่อนที่สัมพัทธ์เข้าหากัน ดังนั้น จากสมการ

$$f' = f\left(\frac{v + v_0}{v - v_S}\right)$$

จากโจทย์ ค้างคาวได้ยินเสียงที่สะท้อนจากแมลงด้วยความถี่ 83 Hz แทนค่าจะได้

$$83 = f_m\left(\frac{v + v_b}{v - v_m}\right)$$

$$83 = f_m\left(\frac{343 + 9}{343 - 8}\right)$$

$$f_m = 79 \quad \mathrm{kHz}$$

ตอบ

(ข) **หาความถี่ f_b ที่ค้างคาวเปล่งออกมา โดยกำหนดให้แมลงเป็นผู้สังเกตซึ่งได้ยินความถี่ 79 kHz**

$$f_m = f_b\left(\frac{v + v_0}{v - v_S}\right)$$

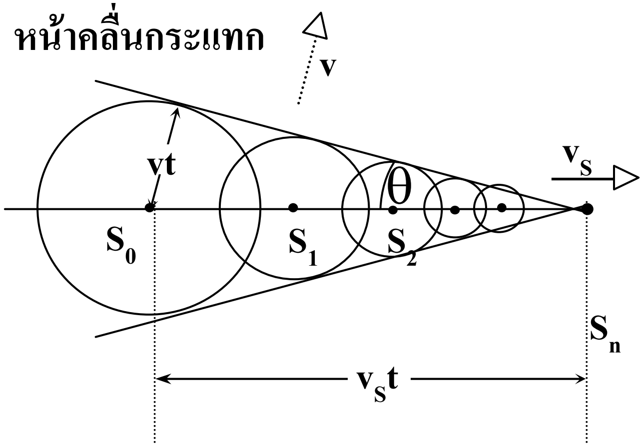
$$79 = f_b\left(\frac{343 + 8}{343 - 9}\right)$$

$$f_b = 75 \ \ \mathrm{kHz}$$

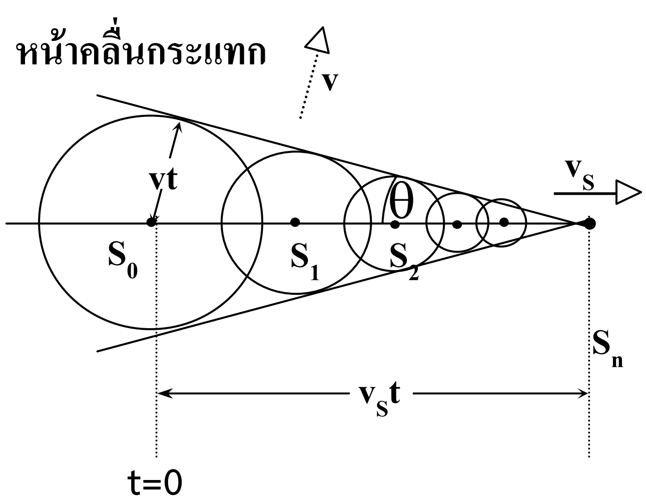
<u>**ตอบ**</u>

คลื่นกระแทก (Shock Waves)

ปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เป็นการพิจารณาเฉพาะเมื่อต้นกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วต่ำกว่าอัตราเร็วของคลื่น



ถ้าอัตราเร็วของต้นกำเนิดคลื่น v_S มากกว่าอัตราเร็วของคลื่นในตัวกลาง v หน้าคลื่นที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคตัวกลางจะแผ่ออกเป็นรูปกรวย โดยมีต้นกำเนิดคลื่นอยู่ที่ยอดกรวยดังรูป



เราเรียกหน้าคลื่นที่เกิดจากการอัดตัวของตัวกลางในลักษณะนี้ว่า คลื่นกระแทก วงกลมแต่ละวงแทนหน้าคลื่นที่เกิดขึ้นในขณะต้นกำเนิดอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ถ้าให้ θ เป็นมุมระหว่างแนวการเคลื่อนที่ของต้นกำเนิดกับหน้าคลื่นกระแทก จะได้

$$\sin\theta = \frac{vt}{v_S t} \quad \text{หรือ} \quad \frac{1}{\sin\theta} = \frac{v_S}{v}$$

ค่าอัตราส่วน $\dfrac{v_S}{v} = \dfrac{1}{\sin\theta}$ เรียกว่า เลขมัค (Mach Number)

เช่น เครื่องที่กำลังบินด้วยเลขมัค 2.5 หมายความว่า เครื่องบินลำดัง กล่าวมีความเร็วมากกว่าอัตราเร็วเสียง 2.5 เท่า เครื่องบินจึงมีอัตราเร็ว เหนือเสียง (Supersonic Speed) คลื่นกระแทกจะเริ่มปรากฏขึ้นเมื่อต้น กำเนิดคลื่นมีค่าเลขมัค 1 เป็นต้นไป

คลื่นกระแทกไม่จำเป็นต้องเกิดจากต้นกำเนิดเสียงเคลื่อนที่เสมอไป วัตถุ ที่เคลื่อนที่ในอากาศด้วยอัตราเร็วเหนือเสียงทุกชนิด เช่นเครื่องบินไอพ่น จรวด และลูกปืน ล้วนสามารถทำให้เกิดคลื่นกระแทกได้ทั้งสิ้น

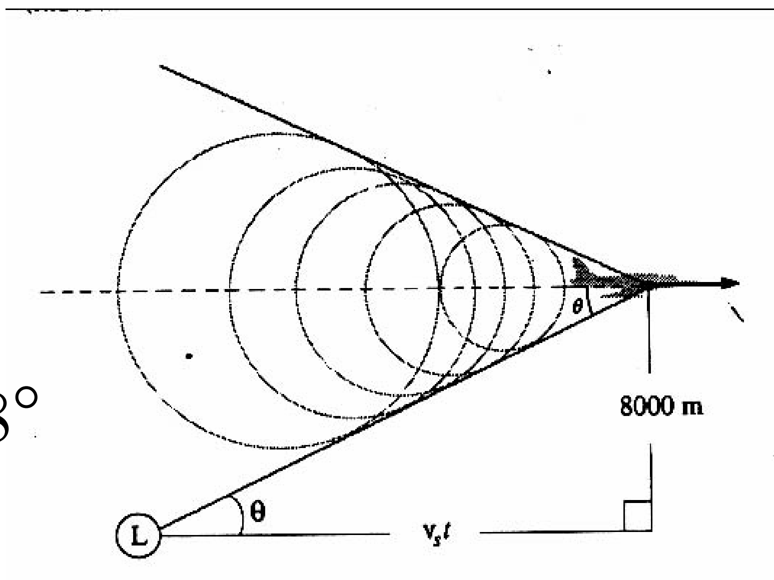
ตัวอย่าง เครื่องบินไอพ่นลำหนึ่งกำลังบินด้วยอัตราเร็วมัค 1.75 ที่ระดับความสูง 8000 m ถ้าในระดับความสูงนี้อัตราเร็วเสียงเท่ากับ 320 m/s เมื่อเครื่องบินผ่านแนวตรงศีรษะของเราไปแล้ว นานเท่าใดเราจึงจะได้ยินเสียงของโซนิกบูม (เนื่องจากมีคลื่นกระแทกเคลื่อนที่มากระทบผิวพื้นโลกในบริเวณที่เราสังเกต)

วิธีทำ จากรูปแสดงสถานการณ์ที่คลื่นกระแทกเคลื่อนที่ลงมาถึงตัวเรา (L)

$$\frac{1}{\sin\theta} = \frac{v_S}{v}$$

$$\sin\theta = \frac{v}{v_S}$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{v}{v_S}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1}{1.75}\right) = 34.8^\circ$$



เนื่องจากเครื่องบินมีอัตราเร็วมัค 1.75 นั่นคือมีอัตราเร็วมากกว่าเสียง 1.75 เท่า ดังนั้น

$$v_s = (1.75)(320) = 560 \ \ m/s$$

พิจารณาจากรูปสามเหลี่ยมมุมฉากจากรูป จะได้

$$\tan\theta = \frac{8000}{v_s t}$$

$$t = \frac{8000}{(560)(\tan 34.8^0)} = 20.5 \ \ s$$

นั่นคือ เราจะได้ยินเสียงของโซนิกบูมเมื่อเครื่องบินผ่านเหนือศีรษะไปแล้ว 20.5 s <u>ตอบ</u>