

บทที่ 2

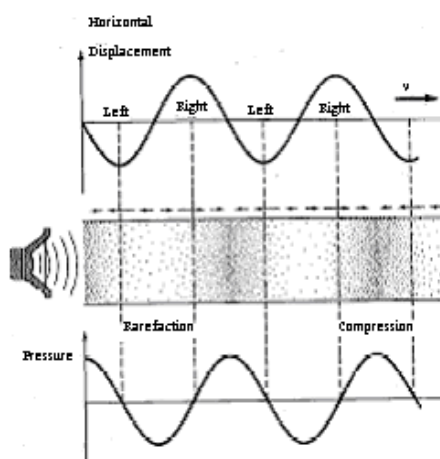
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับคลื่นเสียง

คลื่นเสียงเป็นคลื่นตามยาว (Longitudinal Wave) ที่กำเนิดขึ้นได้จากการสั่นของอากาศ โดยรอบ ผ่านเข้าไปยังตัวกลางต่างๆ ที่เป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ ซึ่งมีย่านความถี่ระหว่าง 20 เฮิรตซ์ ถึง 20 กิโลเฮิรตซ์ จัดเป็นช่วงคลื่นเฉพาะที่มีความสำคัญ เพราะเป็นคลื่นเสียงในช่วงที่หูของมนุษย์รับฟังได้ (Audible Range) คลื่นเสียงส่วนใหญ่ที่เราได้ยินนั้นจะถูกส่งผ่านอากาศ ส่วนคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 กิโลเฮิรตซ์ เรียกว่า คลื่นเหนือเสียง หรือ อัลตราโซนิก (Ultrasonic Wave) สำหรับคลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำ คือ ความถี่น้อยกว่า 20 เฮิรตซ์ เรียกว่า คลื่นใต้เสียง หรืออินฟราโซนิก (Infrasonic Wave)

2.1 คลื่นเสียง (Sound Wave)

2.1.1 การเกิดคลื่นเสียง และการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง

คลื่นเสียงเกิดจากการสั่นของวัตถุ พลังงานจากการสั่นของวัตถุ จะถ่ายโอนให้กับอนุภาคของอากาศ ทำให้อนุภาคของอากาศสั่น แล้วถ่ายโอนพลังงานที่ได้รับให้กับอนุภาคถัดไป มีผลให้คลื่นเสียงแผ่กระจายออกไปในอากาศ โดยรอบแหล่งกำเนิดโดยอนุภาคของอากาศไม่ได้เคลื่อนที่ไปพร้อมกับคลื่น หลังจากทีคลื่นเคลื่อนที่ผ่านไปแล้วอนุภาคของอากาศแต่ละตำแหน่งจะยังอยู่ที่เดิม ในการสั่นของอนุภาคของอากาศขณะคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่าน จะมีการสั่นแบบซิมเปิลฮาร์โมนิกส์ ในแนวเดียวกับการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง ดังนั้น คลื่นเสียงจึงเป็นคลื่นตามยาว หรือมักเรียกว่า คลื่นความดัน (Pressure Wave) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความดัน จะทำให้เกิดส่วนอัด (Compression) และส่วนขยาย (Rarefaction) สลับกันไป ดังภาพประกอบที่ 2-1



ภาพประกอบ 2-1 แสดงส่วนอัด และส่วนขยายของคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านอากาศ

2.1.2 ความยาวคลื่นเสียง

ความยาวคลื่นเสียง (Wavelength) คือ ระยะทางที่คลื่นเดินทางระหว่างแต่ละการสั่นที่สมบูรณ์ หรือการเดินทางครบรอบ (1 Cycle) สามารถกล่าวได้ว่า ความยาวคลื่นเป็นระยะห่างจากส่วนอัดของคลื่นถึงส่วนอัดที่ติดกัน หรือระยะห่างจากส่วนขยายถึงส่วนขยายที่ติดกัน หรือระยะห่างจากยอดคลื่นถึงยอดคลื่นที่ติดกัน ดังนั้นความยาวคลื่นสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$v = \lambda f \quad (2-1)$$

โดยที่ λ คือ ความยาวคลื่นเสียง หน่วย (m)

f คือ ความถี่คลื่นเสียง หน่วย (Hz)

v คือ อัตราเร็วของคลื่นเสียง หน่วย (m/s)

2.1.3 อัตราเร็วของคลื่นเสียง

เนื่องจากคลื่นเสียงเป็นคลื่นตามยาว ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ ดังนั้นอัตราเร็วคลื่นของเสียงจึงไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับสภาพของตัวกลาง และสมบัติของตัวกลางที่คลื่นเสียงผ่าน เช่น ความหนาแน่น ความยืดหยุ่น และอุณหภูมิ ความชื้นของตัวกลางนั้น เป็นต้น

ในงานวิจัยฉบับนี้ จะศึกษาเฉพาะการหาอัตราเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลางอากาศ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วถือว่าอากาศประพฤติตัวเช่นเดียวกับก๊าซอุดมคติ (Ideal Gas) จากทฤษฎีอัตราเร็วของคลื่นเสียงในก๊าซอุดมคติ คือ

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (2-2)$$

โดยที่ v คือ อัตราเร็วของคลื่นเสียงในก๊าซ หน่วย (m/s)

P คือ ความดันของก๊าซ หน่วย (Pa)

ρ คือ ความหนาแน่นของก๊าซ หน่วย (kg/m^3)

γ คือ ค่าคงตัวสำหรับก๊าซชนิดหนึ่ง (ของอากาศ = 1.4)

จากสมการความหนาแน่นของก๊าซ (ρ) คือ

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2-3)$$

เมื่อ M คือ น้ำหนักโมเลกุลหรือมวลของก๊าซทั้งหมดใน 1 โมล และ V คือ ปริมาตร

และสมการสถานะของก๊าซอุดมคติ

$$PV = nRT \quad (2-4)$$

เมื่อ R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ, n คือ จำนวนโมลของก๊าซ และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของก๊าซ สามารถแสดงอัตราเร็วของคลื่นเสียงในก๊าซได้เป็น

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\rho V}} \quad (2-5)$$

หรือ

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (2-6)$$

จากสมการ (2-6) อัตราเร็วของคลื่นเสียงในก๊าซอุดมคติจะขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซกับอุณหภูมิ และเป็นอิสระจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน แต่ในความเป็นจริงค่าอัตราเร็วของคลื่นเสียงจะขึ้นอยู่กับความดัน และความหนาแน่นของก๊าซด้วย กล่าวคือ ค่าความดันและความหนาแน่นของก๊าซจะลดลง เมื่อความสูงเหนือจากระดับน้ำทะเลเพิ่มขึ้น

อัตราเร็วที่ยอมรับของคลื่นเสียงในอากาศที่อุณหภูมิปกติ มีความสัมพันธ์ดังสมการ คือ

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \quad (2-7)$$

โดยที่ V_1 คือ อัตราเร็วของคลื่นเสียงที่อุณหภูมิ T_1 หน่วย (m/s)

V_2 คือ อัตราเร็วของคลื่นเสียงที่อุณหภูมิ T_2 หน่วย (m/s)

T_1 คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ที่หนึ่ง หน่วย (K)

T_2 คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ที่สอง หน่วย (K)

หรือสามารถหาอัตราเร็วของคลื่นเสียงในก๊าซอุดมคติและในอากาศที่อุณหภูมิ T ($^{\circ}\text{C}$) ใดๆ จะได้

$$v_t = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \quad (2-8)$$

โดยที่ v_t คือ อัตราเร็วของคลื่นเสียงที่อุณหภูมิ t $^{\circ}\text{C}$ หน่วย (m/s)

v_0 คือ อัตราเร็วของคลื่นเสียงที่อุณหภูมิ 0 $^{\circ}\text{C}$ หน่วย (m/s)

t คือ อุณหภูมิของตัวกลางที่กำหนดให้ หน่วย ($^{\circ}\text{C}$)

อัตราเร็วของคลื่นเสียงโดยประมาณในอากาศแห้งที่ 0 $^{\circ}\text{C}$ เท่ากับ 331 m/s และอัตราเร็วจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศเพิ่มขึ้น โดยแทนค่าในสมการ (2-8) จะได้

$$v_t = 331 + 0.6t \quad (2-9)$$

สามารถพิจารณาอัตราเร็วของคลื่นเสียงกับชนิดของตัวกลาง ที่คลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านไป และอุณหภูมิของตัวกลางจากตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 แสดงอัตราเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลางชนิดต่างๆ

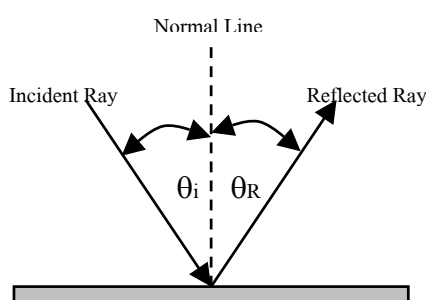
ตัวกลาง	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	อัตราเร็ว (m/s)
อากาศ	0	331
คาร์บอนไดออกไซด์	0	259
ไฮโดรเจน	0	1284
น้ำกลั่น	25	1498
น้ำทะเล	25	1531
ปรอท	25	1450
อะลูมิเนียม	20	5000
ทองแดง	20	3750
ตะกั่ว	20	1210
เหล็ก	20	5200

ที่มา: พรจิต ประทุมสุวรรณ, 2541 : 187

2.2 คุณสมบัติของคลื่นเสียง

2.2.1 การสะท้อนของคลื่นเสียง (Reflection of Sound Wave)

เมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่ชนสิ่งกีดขวาง หรือเคลื่อนที่ถึงผิวของรอยต่อของตัวกลาง หรือตัวกลางชนิดเดียวกันแต่คุณสมบัติต่างกัน จะทำให้เกิดการสะท้อนซึ่งเป็นไปตามกฎการสะท้อนของคลื่น ดังภาพประกอบที่ 2-2



ภาพประกอบ 2-2 แสดงการสะท้อนของคลื่นเสียง

2.2.1.1 กฎของการสะท้อน

- ก. ทิศทางคลื่นตกกระทบ เส้นแนวฉาก และทิศทางการสะท้อนต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน
- ข. มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน $\theta_i = \theta_R$

2.2.1.2 เงื่อนไขการเกิดคลื่นสะท้อน

- ก. คลื่นเสียงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อย ไปสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นมาก
 - (1) คลื่นที่สะท้อนจะกลับเฟส 180 องศา หรือ π เรเดียน และมีความเร็วเท่าเดิม
 - (2) คลื่นที่ผ่านไปในตัวกลางที่มีความหนาแน่นมาก จะไม่กลับเฟส แต่ความเร็วเปลี่ยนไป
- ข. คลื่นเสียงเคลื่อนที่จากตัวกลางที่มีความหนาแน่นมา ไปสู่ตัวกลาง มีความหนาแน่นน้อย

(1) คลื่นที่สะท้อนจะไม่กลับเฟส และมีความเร็วเท่าเดิม

(2) คลื่นที่ผ่านไปในตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อย จะไม่กลับเฟส แต่ความเร็วเปลี่ยนไป

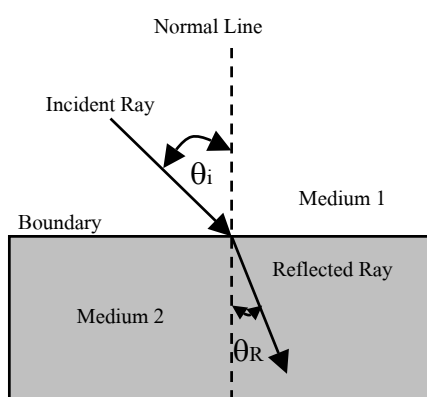
ค. การสะท้อนของคลื่นเสียงจะเกิดได้ดีเมื่อผิวสะท้อนเป็นผิว

เรียบ

ง. ขนาดของตัวสะท้อนก็มีผลต่อการสะท้อนของคลื่นเสียง โดยการสะท้อนของคลื่นเสียงจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อวัตถุ หรือตัวสะท้อนมีขนาดเท่ากับ หรือโตกว่าขนาดของความยาวคลื่นเสียง

2.2.2 การหักเหของคลื่นเสียง (Refraction of Sound Wave)

เมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่างชนิดกัน จะทำให้อัตราเร็วของคลื่นเสียงเปลี่ยนแปลง และอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปก็ทำให้อัตราเร็วของคลื่นเสียงเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งเป็นสมบัติการหักเหของคลื่น ในการหักเหของคลื่นเสียงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงเปลี่ยนไปด้วย ยกเว้นเมื่อคลื่นเสียงตกตั้งฉากกับผิวรอยต่อของตัวกลาง ทิศทางจะไม่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-3



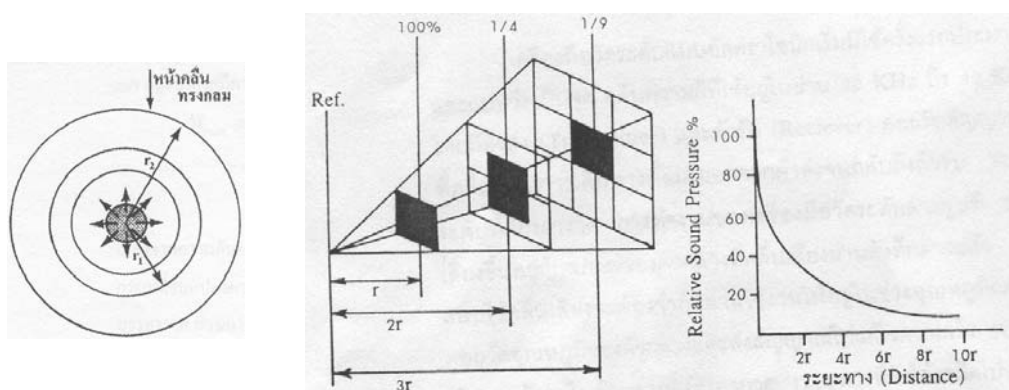
ภาพประกอบ 2-3 แสดงการหักเหของคลื่นเสียงผ่านรอยต่อของตัวกลาง 2 ชนิด

ภาพประกอบ 2-5 แสดงการแทรกสอดของคลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่ง

2.3 ความเข้มของคลื่นเสียง (Intensity of Sound Wave)

ความเข้มของคลื่นเสียง เป็นตัวกำหนดความดังและความเบาของคลื่นเสียง มีค่าขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของคลื่น แหล่งกำเนิดคลื่นเสียงที่มีกำลังมากจะให้คลื่นเสียงที่ดังกว่าแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงที่มีกำลังน้อย เมื่อตำแหน่งรับฟังคลื่นเสียงอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงมีระยะทางทั้งสองเท่ากัน

เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดคลื่นเสียง ที่ให้คลื่นเสียงออกมาทุกทิศทาง โดยมีหน้าคลื่นเป็นรูปทรงกลมและเคลื่อนที่ออกไปจากแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงด้วยอัตราเร็วคงที่ และแผ่กระจายออกไปเท่ากันในทุกๆ ทิศทาง ดังภาพประกอบที่ 2-6



ภาพประกอบที่ 2-6 แสดงหน้าคลื่นทรงกลมและระยะรัศมีของคลื่นเสียง

ถ้า P_{av} เป็นกำลังเฉลี่ยที่แผ่ออกจากแหล่งกำเนิดคลื่นเสียง พบว่ากำลังที่ตำแหน่งห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงเป็นระยะ r ใดๆ จะกระจายครอบคลุมเป็นรูปทรงกลมที่มีพื้นที่เท่ากับ $S = 4\pi r^2$ ดังนั้นสามารถหาความเข้มของคลื่นเสียงที่ตำแหน่ง r ใดๆ จากแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงซึ่งเขียนสมการ ได้ว่า

$$I = \frac{P_{av}}{S} = \frac{P_{av}}{4\pi r^2} \quad (2-10)$$

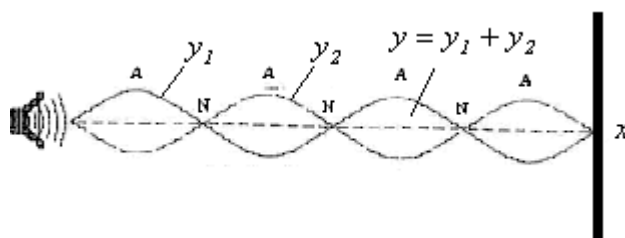
เมื่อ I คือ ความเข้มของเสียง

จากสมการ (2-10) ความเข้มของคลื่นเสียง อาจสรุปได้ว่า ถ้าแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงมีกำลังคลื่นเสียง P คงตัว แสดงว่าความเข้มของคลื่นเสียง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ จะลดลงเมื่อตำแหน่งนั้น ๆ อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงมากขึ้น และสามารถเขียนสมการของความเข้มที่ระยะ r_1 และ r_2 ได้เป็น $I_1 = \frac{P_{av}}{4\pi r_1^2}$ และ $I_2 = \frac{P_{av}}{4\pi r_2^2}$ ดังนั้นอัตราส่วนของความเข้มบนทรงกลมทั้งสองคือ

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (2-11)$$

2.4 คลื่นนิ่งของคลื่นเสียง (Standing Wave of Sound Wave)

คลื่นเสียงสามารถมีปรากฏการณ์คลื่นนิ่งได้เหมือนคลื่นทั่วๆ ไป เช่น คลื่นนิ่งของคลื่นน้ำ หรือคลื่นนิ่งของคลื่นในเส้นเชือก คลื่นนิ่งของคลื่นเสียงก็เกิดจากคลื่นเสียง 2 คลื่น ซึ่งมีความถี่ ความยาวคลื่น และแอมพลิจูดเท่ากัน เคลื่อนที่สวนทางกันในแนวเส้นตรงเดียวกัน แล้วมาซ้อนทับกัน โดยคลื่นความดันของคลื่นเสียงทั้งสองจะเกิดการรวมกันเป็นคลื่นความดัน จะมีตำแหน่งแอมพลิจูดเป็นศูนย์ เรียกตำแหน่งนี้ว่า บัพ หรือ โหนด (Nodes) และตำแหน่งแอมพลิจูดสูงสุด เรียกตำแหน่งนี้ว่า ปฏิบัพ หรือ แอนติโหนด (Antinodes) สลับกันไป ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวจะทำให้เกิดการแทรกสอดกันเป็นผลให้เกิด คลื่นคงที่ (Stationary Wave) ที่เรียกว่า คลื่นนิ่ง (Standing Wave) ดังภาพประกอบที่ 2-7



ภาพประกอบ 2-7 แสดงการเกิดคลื่นนิ่งของคลื่นเสียง

เมื่อพิจารณาการเกิดคลื่นนิ่งในเชิงคณิตศาสตร์ จากภาพประกอบที่ 2-7 ซึ่งกำหนดให้ $k = 2\pi/\lambda$ และ $\omega = 2\pi f$ ที่ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงเป็นระยะ x ใดๆ สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$y_1 = A \sin(kx - \omega t) \quad (2-12)$$

$$y_2 = A \sin(kx + \omega t) \quad (2-13)$$

โดยที่ y_1 คือ คลื่นเสียงตกกระทบ
 y_2 คือ คลื่นเสียงสะท้อน
 A คือ แอมพลิจูด
 k คือ เลขคลื่นเชิงมุม
 ω คือ ความถี่เชิงมุม
 t คือ เวลา

และอาศัยหลักการรวมคลื่นเสียงทั้งสอง คือ

$$y = y_1 + y_2 = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \omega t) \quad (2-14)$$

โดยอาศัยพื้นฐานทางตรีโกณมิติ

$$\sin a + \sin b = 2 \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) \sin\left(\frac{a+b}{2}\right) \quad (2-15)$$

เมื่อกำหนดให้ $a = kx - \omega t$ และ $b = kx + \omega t$
 ดังนั้นจะได้สมการ

$$y = (2A \sin kx) \cos \omega t \quad (2-16)$$

พบว่าที่ตำแหน่งหนึ่งมีการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกส์ด้วยแอมพลิจูดเท่ากับ $2A(\sin kx)$ โดยบางตำแหน่งจะมีค่าแอมพลิจูดสูงสุดเป็น $2A$ และบางตำแหน่งจะมีแอมพลิจูดเป็นศูนย์ ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวจะหาได้ดังนี้

พิจารณาที่ตำแหน่ง $\sin kx = 0$ จะเป็นตำแหน่งที่แอมพลิจูดต่ำสุด เมื่อ

$$kx = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots \quad (2-17)$$

เนื่องจาก $k = 2\pi/\lambda$ จะได้

$$x = \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, \dots, \frac{n\lambda}{2} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2-18)$$

ในทำนองเดียวกันที่ตำแหน่ง $\sin kx = \pm 1$ จะเป็นตำแหน่งที่แอมพลิจูดสูงสุด เมื่อ

$$kx = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots \quad (2-19)$$

$$x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots, \frac{n\lambda}{4} \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (2-20)$$

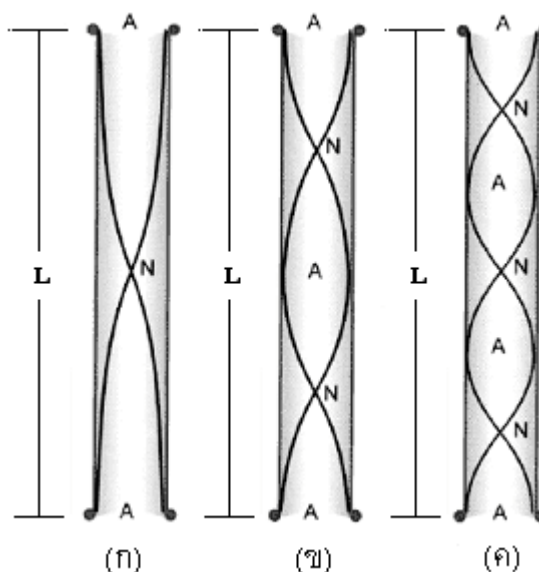
2.5 การเกิดคลื่นนิ่งของคลื่นเสียงภายในท่ออากาศ

ขณะที่คลื่นเสียงเข้าไปในท่อจะเกิดคลื่นนิ่งตามยาวของอากาศภายในท่อ จากผลรวมของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อนที่ปลายท่อ โดยเกิดจากการสั่นของอากาศภายในท่อด้วยความถี่คลื่นเสียงที่คงตัวอย่างอิสระ และจะเกิดความถี่ที่เรียกว่า ความถี่ธรรมชาติ (Natural

Frequency) หลายๆ ค่า คือ ความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) และความถี่โอเวอร์โทน (Overtone Frequency) ต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของท่อ ซึ่งมีด้วยกัน 2 แบบ คือ ท่อปลายเปิดทั้งสองด้าน (Pipe Open at Both Ends) และท่อปลายหนึ่งเปิดปลายหนึ่งปิด (Pipe Open-Closed at One End)

2.5.1 การเกิดคลื่นนิ่งของคลื่นเสียงภายในท่อปลายเปิดทั้งสองด้าน

เมื่อคลื่นเสียงเข้าไปทางปลายท่อ คลื่นเสียงจะสะท้อนที่ปลายท่อทั้งสองกลับไปกลับมา แล้วเกิดการแทรกสอดกัน เมื่อปรับความถี่ของคลื่นเสียงให้มีค่าพอเหมาะ จะเกิดคลื่นนิ่งที่มีแอมพลิจูดสูงมากขึ้น และถ้าที่ปลายท่อเป็นตำแหน่งของแอนติโนดของคลื่นพอดี เราจะได้ยินคลื่นเสียงออกมาจากท่อดังที่สุด ดังภาพประกอบ 2-8



- ภาพประกอบ 2-8 (ก) แสดงความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 1 ของคลื่นนิ่งภายในท่อปลายเปิดทั้งสองด้าน
 (ข) แสดงความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ของคลื่นนิ่งภายในท่อปลายเปิดทั้งสองด้าน
 (ค) แสดงความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ของคลื่นนิ่งภายในท่อปลายเปิดทั้งสองด้าน

เมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 2-8 โดยทำการเปรียบเทียบความยาวของท่อกับความยาวของคลื่นนิ่ง จะสามารถหาค่าความถี่คลื่นนิ่งของคลื่นเสียงภายในท่อที่ทำให้เกิดเสียงออกจากปากท่อดังมากที่สุด โดยกำหนดให้ L คือ ความยาวของท่อปลายเปิดทั้งสองข้าง

จากภาพประกอบ 2-8 (ก) เมื่อความยาว $L = \frac{\lambda_1}{2}$

และจากสมการ (2-1) เมื่อ $v = \lambda f$

จะได้ว่า $f_1 = \frac{v}{\lambda_1}$ หรือ $f_1 = \frac{v}{2L}$

เมื่อ f_1 คือ ความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) หรือ ฮาร์โมนิกส์ที่ 1 (First Harmonic)

λ_1 คือ ความยาวคลื่นฮาร์โมนิกส์ที่ 1

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาภาพประกอบที่ 2-8 (ข) เมื่อความยาว $L = \lambda_2$

จะได้ว่า $f_2 = \frac{v}{\lambda_2}$ หรือ $f_2 = \frac{v}{L} = 2f_1$

เมื่อ f_2 คือ ความถี่โอเวอร์โทนที่ 1 (First Overtone) หรือฮาร์โมนิกส์ที่ 2 (Second Harmonic)

λ_2 คือ ความยาวคลื่นฮาร์โมนิกส์ที่ 2

และพิจารณาภาพประกอบที่ 2-8 (ค) เมื่อความยาว $L = \frac{2\lambda_3}{3}$

จะได้ว่า $f_3 = \frac{v}{\lambda_3}$ หรือ $f_3 = \frac{3v}{2L} = 3f_1$

เมื่อ f_3 คือ ความถี่โอเวอร์โทนที่ 2 (Second Overtone) หรือฮาร์โมนิกส์ที่ 3 (Third Harmonic)

λ_3 คือ ความยาวคลื่นฮาร์โมนิกส์ที่ 3

จากการพิจารณา อาจสรุปได้ว่า ความถี่คลื่นนิ่งของคลื่นเสียงภายในท่อที่ทำให้เกิดเสียงออกจากปากท่อดังมากที่สุด สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2-21)$$

$$f_n = n \frac{v}{2L} = nf_1 \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2-22)$$

ตารางที่ 2-2 แสดงผลการคำนวณความถี่คลื่นนิ่งของคลื่นเสียงที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ ในแต่ละระดับช่องว่างอากาศภายในท่อปลายเปิดทั้งสองด้าน

ระดับช่องว่างอากาศ ภายในท่อ (cm)	ความยาวคลื่นนิ่งของ คลื่นเสียง (m)	อัตราเร็วคลื่นนิ่งของคลื่น เสียงในอากาศ ที่ 25 °C (m/s)	ความถี่ ฮาร์โมนิกส์ที่ 1 (Hz)	ความถี่ ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 (Hz)	ความถี่ ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 (Hz)	ความถี่ ฮาร์โมนิกส์ที่ 4 (Hz)	ความถี่ ฮาร์โมนิกส์ที่ 5 (Hz)
10	0.2	346	1730	3460	5190	6920	8650
20	0.4	346	865	1730	2595	3460	4325
30	0.6	346	577	1153	1730	2307	2883
40	0.8	346	433	865	1298	1730	2163
50	1.0	346	346	692	1038	1384	1730
60	1.2	346	288	577	865	1153	1442
70	1.4	346	247	494	741	989	1236
80	1.6	346	216	433	649	865	1081
90	1.8	346	192	384	577	769	961
100	2.0	346	173	346	519	692	865
110	2.2	346	157	315	472	629	786
120	2.4	346	144	288	433	577	721
130	2.6	346	133	266	399	532	665
140	2.8	346	124	247	371	494	618
150	3.0	346	115	231	346	461	577
160	3.2	346	108	216	324	433	541
170	3.4	346	102	204	305	407	509
180	3.6	346	96	192	288	384	481
190	3.8	346	91	182	273	364	455
200	4.0	346	87	173	260	346	433

2.5.2 การเกิดคลื่นนิ่งของคลื่นเสียงภายในท่อปลายหนึ่งเปิดปลายหนึ่งปิด

เมื่อให้คลื่นเสียงเข้าทางปลายท่อด้านเปิด คลื่นเสียงจะเข้าไปสะท้อนที่ด้านปิดของท่อ ทำให้คลื่นเสียงที่สะท้อนมีเฟสเปลี่ยนไป 180 องศา ที่ตำแหน่งผิวระนาบของด้านปิดของท่อ ซึ่งเป็นตำแหน่งโหนดของคลื่นเสียง บริเวณปลายท่อด้านเปิดซึ่งอนุภาคของอากาศสั่นได้โดยอิสระจะเป็นตำแหน่งแอนติโหนดของคลื่นเสียง ดังภาพประกอบที่ 2-9 ซึ่งเขียนสมการได้ ดังนี้



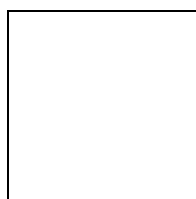
ภาพประกอบ 2-9 (ก) แสดงความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 1 ของคลื่นนิ่งภายในท่อปลายหนึ่งเปิด
ปลายหนึ่งปิด

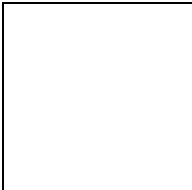
(ข) แสดงความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 2 ของคลื่นนิ่งภายในท่อปลายหนึ่งเปิด
ปลายหนึ่งปิด

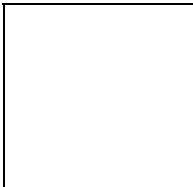
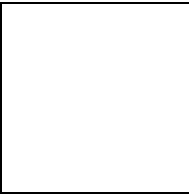
(ค) แสดงความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 ของคลื่นนิ่งภายในท่อปลายหนึ่งเปิด
ปลายหนึ่งปิด

โดยทำการเปรียบเทียบความยาวของท่อกับความยาวของคลื่นนิ่ง ซึ่งใช้หลักการเดียวกันกับการหาค่าคลื่นนิ่งของท่อปลายเปิดทั้งสองข้าง โดยกำหนดให้ L คือ ความยาวของท่อปลายหนึ่งเปิดปลายหนึ่งปิด

จากภาพประกอบ 2-9 (ก) เมื่อความยาว

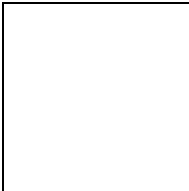


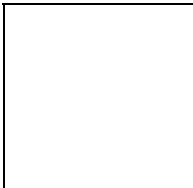
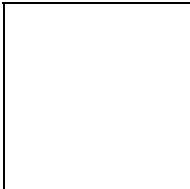
และจากสมการ (2-1) เมื่อ 

จะได้ว่า  หรือ 

เมื่อ f_1 คือ ความถี่มูลฐาน (Fundamental Frequency) หรือ ฮาร์โมนิกส์ที่ 1 (First Harmonic)

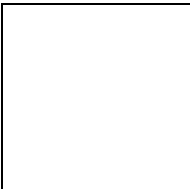
λ_1 คือ ความยาวคลื่นฮาร์โมนิกส์ที่ 1

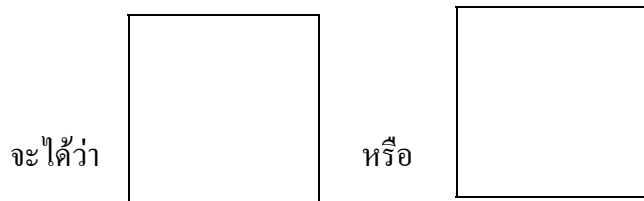
ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาภาพประกอบที่ 2-9 (ข) เมื่อความยาว 

จะได้ว่า  หรือ 

เมื่อ f_2 คือ ความถี่โอเวอร์โทนที่ 1 (First Overtone) หรือฮาร์โมนิกส์ที่ 2 (Second Harmonic)

λ_2 คือ ความยาวคลื่นฮาร์โมนิกส์ที่ 2

และพิจารณาภาพประกอบที่ 2-9 (ค) เมื่อความยาว 



เมื่อ f_3 คือ ความถี่โอเวอร์โทนที่ 2 (Second Overtone) หรือฮาร์โมนิกส์ที่ 3 (Third Harmonic)

λ_3 คือ ความยาวคลื่นฮาร์โมนิกส์ที่ 3

จากการพิจารณา อาจสรุปได้ว่า ความถี่คลื่นนิ่งของคลื่นเสียงภายในท่อที่ทำให้เกิดเสียงออกจากปากท่อดังมากที่สุด สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$\lambda_n = \frac{4L}{2n-1} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2-23)$$

$$f_n = \frac{(2n-1)v}{4L} = (2n-1)f_1 \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2-24)$$

จากการสังเกตพบว่าจะมีแต่ความถี่ฮาร์โมนิกส์คี่หรือโอเวอร์โทนคี่เท่านั้น สำหรับท่อปลายหนึ่งเปิดปลายหนึ่งปิด ซึ่งสามารถเขียนสมการใหม่ได้ว่า

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = n \frac{v}{4L} \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (2-25)$$

ตารางที่ 2-3 แสดงผลการคำนวณความถี่คลื่นนิ่งของคลื่นเสียงที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ ในแต่ละระดับช่องว่างอากาศภายในท่อปลายหนึ่งเปิดปลายหนึ่งปิด

ระดับช่องว่างอากาศ ภายในท่อ (cm)	ความยาวคลื่นนิ่งของ คลื่นเสียง (m)	อัตราเร็วคลื่นนิ่งของคลื่น เสียงในอากาศ ที่ 25 °C (m/s)	ความถี่ ฮาร์โมนิกส์ที่ 1 (Hz)	ความถี่ ฮาร์โมนิกส์ที่ 3 (Hz)	ความถี่ ฮาร์โมนิกส์ที่ 5 (Hz)	ความถี่ ฮาร์โมนิกส์ที่ 7 (Hz)	ความถี่ ฮาร์โมนิกส์ที่ 9 (Hz)
10	0.4	346	865	2595	4325	6055	7785
20	0.8	346	433	1298	2163	3028	3893
30	1.2	346	288	865	1442	2018	2595
40	1.6	346	216	649	1081	1514	1946
50	2	346	173	519	865	1211	1557
60	2.4	346	144	433	721	1009	1298
70	2.8	346	124	371	618	865	1112
80	3.2	346	108	324	541	757	973
90	3.6	346	96	288	481	673	865
100	4	346	87	260	433	606	779
110	4.4	346	79	236	393	550	708
120	4.8	346	72	216	360	505	649
130	5.2	346	67	200	333	466	599
140	5.6	346	62	185	309	433	556
150	6	346	58	173	288	404	519
160	6.4	346	54	162	270	378	487
170	6.8	346	51	153	254	356	458
180	7.2	346	48	144	240	336	433
190	7.6	346	46	137	228	319	410
200	8	346	43	130	216	303	389