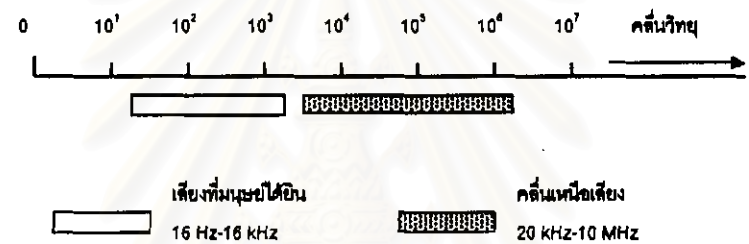
บทที่ 4

ทฤษฎีเกี่ยวกับคลื่นเหนือเสียง

การนำคลื่นเหนือเสียง (Ultrasound) มาใช้ประโยชน์ถูกใช้ตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 20 แต่ปัญหาใหญ่ที่ทำให้ไม่มีการนำคลื่นเหนือเสียงมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเนื่องจากปัญหาด้านการสึกกร่อนของอุปกรณ์, การออกแบบให้มีขนาดใหญ่โดยให้ความเข้ม (intensity) มีค่าสูงทำได้ยาก, การระบายความร้อนของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (ultrasonic transducer), ประสิทธิภาพของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง, ปัญหาด้านเสียงรบกวนและราคาอุปกรณ์สูงไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน เป็นต้น



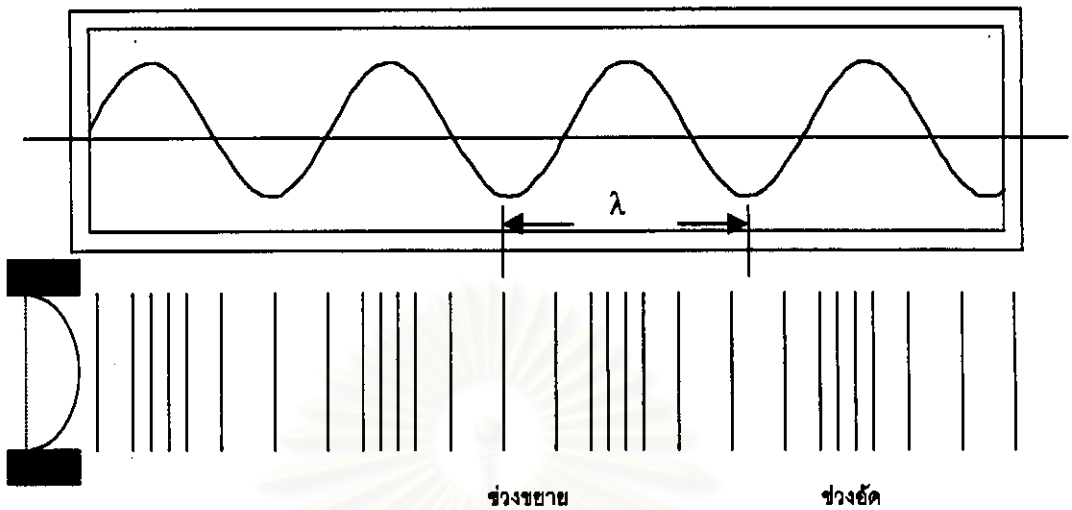
รูปที่ 4.1 คลื่นเสียงที่ความถี่ต่างๆ

คลื่นเหนือเสียง คือ คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่ามนุษย์ได้ยิน (รูปที่ 4.1) โดยทั่วไปมนุษย์จะได้ยินเสียงในช่วง 16 เฮิร์ซ - 16 กิโลเฮิร์ซ สำหรับคลื่นเหนือเสียงที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์จะมีความถี่อยู่ในช่วง 20 กิโลเฮิร์ซ - 10 เมกกะเฮิร์ซ การนำไปใช้งานสามารถแบ่งได้ 2 ช่วงความถี่ คือ

1. ช่วงความถี่สูง (1-10 เมกกะเฮิร์ซ) มีการประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจสอบสิ่งที่อยู่ใต้ของเหลว ต่อมามีการพัฒนาจนสามารถทำให้เห็นภาพของเนื้อเยื่อภายในร่างกายได้เช่นเดียวกับการใช้รังสี (ionizing radiations) จึงใช้ในการวินิจฉัยและการรักษาทางการแพทย์

2. ช่วงความถี่ต่ำ (20-100 กิโลเฮิร์ซ) ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น อุปกรณ์ทำความสะอาด, กระบวนการแตกเซลล์, ถังปฏิกรณ์เร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

การเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงมีความสัมพันธ์คล้ายกับการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์มอนิก (Simple harmonic; SHM) เนื่องจากมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาซ้ำที่เดิม จึงมีแอมพลิจูดและเวลาครบรอบของการเคลื่อนที่คงที่ (รูปที่ 4.2)



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบลักษณะของคลื่นเสียงกับเส้นโค้งไซน์

คลื่นเสียงเป็นคลื่นตามยาว (longitudinal wave) คือการเคลื่อนที่จะอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทพลังงาน โดยอนุภาคตัวกลางจะสั่นไปมาหรือย้ายตำแหน่งในแนวเดียวกับทิศทางการเคลื่อนที่ของพลังงาน การเคลื่อนที่ของคลื่น (propagation of wave) ไปในตัวกลาง จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของโมเลกุลเกิดเป็นส่วนอัด (compression) และส่วนขยาย (rarefaction) ของความดันสลับไปมาในตัวกลาง บริเวณพื้นผิวหน้าของของเหลวที่ถูกอัดจะทำให้ความหนาแน่นและความดันของของเหลวเพิ่มมากขึ้น เกิดการชนกันของโมเลกุลบริเวณนี้มากจึงส่งผลไปกดของเหลวในชั้นถัดไปเรื่อยๆ บริเวณที่ถูกกดตอนแรกจะกลับมาอยู่ในสภาพเดิม และเมื่ออยู่ในส่วนขยายจะทำให้ความดันและความหนาแน่นลดลง ส่วนอัดและส่วนขยายนี้จะเดินทางด้วยความเร็วค่าหนึ่งขึ้นกับความหนาแน่นและค่าสัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น (compressibility) ของสารที่เป็นตัวกลาง ความยาวคลื่น (เมตร) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

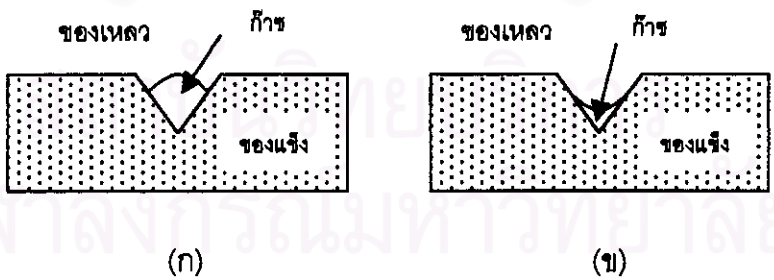
$$\lambda = c / f \quad \text{..... (4.1)}$$

โดย c คือ ความเร็วของคลื่นเสียงในตัวกลาง (เมตรต่อวินาที)

f คือ ความถี่ของคลื่นเสียง (เฮิร์ซ)

4.1 ปรากฏการณ์จากการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงในตัวกลาง

เมื่อคลื่นเสียงเดินทางผ่านตัวกลางของเหลว ถ้าขนาดของคลื่นหรือแอมปลิจูดในช่วงความดันขยาย (rarefaction cycle) มีค่าสูงเพียงพอที่จะเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลว (tensile strength) จนสูญเสียโครงสร้างของของเหลว จะเกิดเป็นช่องว่างหรือฟองขึ้น ในทางทฤษฎี ปรากฏการณ์นี้แทบจะไม่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากแอมปลิจูดของคลื่นต้องมีค่าสูงมากเป็นค่าหลายพันบาร์จึงจะเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลวได้ อย่างไรก็ตาม ถ้าหากว่าภายในของเหลวนั้นมีจุดกำเนิด (nuclei) เช่น ฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมาก ปรากฏอยู่ทั้งภายในตัวของเหลวเอง หรืออยู่ที่บริเวณผิวของของแข็งที่ปนอยู่ในของเหลวนั้น หรือแม้กระทั่งที่บริเวณผิวของภาชนะที่บรรจุของเหลวนั้นๆ เมื่อคลื่นเสียงเดินทางผ่านของเหลวนี้ ฟองอากาศในของเหลวเหล่านี้จะถูกแรงกระทำทั้งแรงอัดและแรงขยายเนื่องจากความดันของเสียง ฟองจึงมีขนาดโตขึ้นและหดตัวลงสลับกันเป็นจังหวะตามแรงดันของคลื่นเสียงเกิดเป็นสิ่งที่เรียกว่า คาวิเทชัน (cavitation) ในขณะที่คาวิเทชันโตและหดตัวลงนี้ จะมีก๊าซภายในของเหลวแพร่ผ่านเข้าและออกจากฟองอากาศเหล่านี้สลับกันไป สำหรับฟองก๊าซที่ติดอยู่บริเวณผิวของของแข็งก็เช่นเดียวกัน ในช่วงจังหวะขยายของคลื่นเสียง ซึ่งทำให้ความดันภายนอกฟองหรือภายในตัวกลางมีค่าลดลง ถ้ามีค่าน้อยลงจนความดันภายในฟองมีค่ามากเพียงพอที่จะเอาชนะแรงตึงผิวได้ ฟองก๊าซที่ผิวของแข็งจะขยายตัวออกมาจนสามารถหลุดออกมาเป็นฟองในของเหลวได้เช่นกัน ดังรูปที่ 4.3 โดยทั่วไป ก่อนที่จะมีการผ่านคลื่นเหนือเสียงเข้าในของเหลว กรณีที่ระบบมีความดันภายในของเหลวสูง ลักษณะของฟองก๊าซจะมีลักษณะโค้งเว้าเข้าไปในบริเวณช่องว่างของผิวของแข็ง ดังรูป 4.3 ข การเกิดคาวิเทชันจึงเกิดได้ยากกว่าในกรณีที่เริ่มต้นความดันภายในของเหลวมีค่าน้อย ผิวของฟองก๊าซจึงโค้งนูนออกมา ดังรูปที่ 4.3 ก



รูปที่ 4.3 ฟองก๊าซที่อยู่บนผิวของแข็ง
(ก) เมื่อความดันภายในของเหลวมีค่าน้อย
(ข) เมื่อความดันภายในของเหลวมีค่ามาก

ฟองอากาศและฟองก๊าซเหล่านี้ เรียกว่า จุดกำเนิดฟอง (cavitation nuclei) ซึ่งทำให้การเกิดคาวิเทชันง่ายขึ้น คาวิเทชันที่เกิดขึ้นนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. คาวิเทชันแบบคงตัว (stable cavitation) คาวิเทชันชนิดนี้จะเกิดขึ้นในสภาวะที่ความถี่และความเข้มของคลื่นเสียงเหมาะสมกับคุณสมบัติทางกายภาพของสารละลาย ทำให้คาวิเทชันมีขนาดค่อนข้างคงที่ในหลายช่วงคลื่น

2. คาวิเทชันแบบชั่วคราว (transient cavitation) คาวิเทชันจะมีขนาดใหญ่ขึ้นประมาณ 2 เท่าในแต่ละช่วงคลื่นและยุบตัวในส่วนอัด การยุบตัวของคาวิเทชันนี้จะทำให้เกิดเป็นฟองเล็กๆ ซึ่งจะเป็นจุดกำเนิด (nuclei) สำหรับการเกิดคาวิเทชันต่อไปและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว (shock wave) เนื่องจากการยุบตัวของคาวิเทชันจะเกิดขึ้นในเวลารวดเร็วมากคือในระดับนาโนวินาที จึงสมมติว่าไม่มีการแพร่ของก๊าซเข้า-ออกจากคาวิเทชัน ภายในคาวิเทชันสามารถประกอบด้วยไอของของเหลวหรือก๊าซหรือทั้งสองอย่าง ถ้าไม่มีก๊าซภายในคาวิเทชันนี้ การยุบตัวของคาวิเทชันจะเกิดขึ้นอย่างรุนแรง เนื่องจากไม่มีก๊าซภายในฟองมาทำหน้าที่รับแรงกระแทก ส่วนไอของเหลวภายในฟอง สามารถเกิดการควบแน่นและระเหยได้อย่างอิสระในช่วงการยุบตัวของคาวิเทชัน ทำให้การยุบตัวของคาวิเทชันเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ (คือ มีขนาดเล็กลงจนมีรัศมีมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด) มากกว่าในกรณีที่มีก๊าซ ซึ่งจะทำหน้าที่รับแรงกระแทกเนื่องจากไม่สามารถแพร่ออกจากคาวิเทชันได้ในเวลาของการยุบตัวซึ่งสั้นมาก การยุบตัวจึงเกิดอย่างไม่สมบูรณ์ ในทางทฤษฎีสามารถคำนวณค่าอุณหภูมิสูงสุด (T_{max}) และความดันสูงสุด (P_{max}) ที่เกิดขึ้นภายในคาวิเทชัน ณ ขณะที่เกิดการยุบตัวได้จากสมการต่อไปนี้

$$T_{max} = T_o \{P_m(K\text{-}1)/P\} \quad \text{..... (4.2)}$$

$$P_{max} = P \{P_m(K\text{-}1)/P\}^{K/(K\text{-}1)} \quad \text{..... (4.3)}$$

โดยที่ T_o คือ อุณหภูมิของของเหลว (เคลวิล)

K คือ ค่าโพลีโทรพิกอินเด็ก (polytropic index) ของก๊าซ (-)

P คือ ความดันภายในคาวิเทชัน เมื่อมีขนาดใหญ่ที่สุด โดยทั่วไปมีค่าเท่ากับ P_v ของของเหลว ซึ่งถ้าภายในคาวิเทชันมีก๊าซบรรจุอยู่ P จะมีค่าเท่ากับ $P_v + P_g$ (กิโลปาสคาล)

P_m คือ ความดันภายในคาวิเทชันของเหลว ณ เวลาที่เกิดการยุบตัวของฟอง โดยทั่วไปมีค่าเท่ากับ $P_h + P_a$ (กิโลปาสคาล)

P_v คือ ความดันไอภายในคาวิเทชัน (กิโลปาสคาล)

P_g คือ ความดันของก๊าซภายในคาวิเทชัน (กิโลปาสคาล)

P_h คือ ความดันของของเหลวเนื่องจากแรงกดของน้ำ (กิโลปาสคาล)

P_a คือ ความดันของคลื่นเหนือเสียง (กิโลปาสคาล)

จากการคำนวณ ค่าอุณหภูมิสูงสุดและความดันสูงสุด ที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของคาวิเทชันแบบชั่วคราวนี้มีค่าสูงได้ในอันดับของหลายพันเคลวินและหลายร้อยความดันบรรยากาศ ตามลำดับ

ค่าแอมปลิจูดของคลื่นเสียงต่ำสุดที่ต้องการเพื่อทำให้เกิดฟองเหล่านี้ได้ เรียกว่า คาวิเทชันเทรสโฮลด์ (cavitation threshold) ค่านี้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลายตัว อาทิเช่น ค่าความหนืดของของเหลว, อุณหภูมิ, ความถี่ และการที่มีของแข็งหรือก๊าซปรากฏอยู่ในของเหลว เป็นต้น การที่มีฟองอากาศเล็กๆปรากฏในของเหลวนั้นจะช่วยทำให้เกิดคาวิเทชันได้ง่ายขึ้น นั่นคือ ค่าคาวิเทชันเทรสโฮลด์มีค่าลดลง ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ฟองเหล่านี้จะกลายเป็นคาวิเทชันแบบคงตัวหรือคาวิเทชันแบบชั่วคราวขึ้นอยู่กับขนาดเริ่มต้นของฟองหรือถ้าฟองเริ่มต้นมีขนาดเล็กเกินไปก็ไม่สามารถโตได้ก็จะหดตัวเล็กลงและในที่สุดก็ละลายไปในของเหลว ฟองบางชนิดที่มีขนาดระหว่างที่จะเป็นได้ทั้งคาวิเทชันแบบคงตัวหรือแบบชั่วคราว ก็อาจเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า เรคติฟายด์ดิฟฟิวชัน (rectified diffusion) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเพิ่มขึ้นและลดลงตามจังหวะของความดันของคลื่นที่ผ่านมา โดยมีแนวโน้มที่จะโตขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดกลายเป็นคาวิเทชันแบบชั่วคราวและยุบตัวอย่างรวดเร็วในที่สุด ซึ่งบางครั้งคาวิเทชันเหล่านี้ก็อาจจะโตขึ้นแต่ไม่กลายเป็นคาวิเทชันแบบชั่วคราวโดยจะลอยขึ้นสู่ผิวน้ำออกสู่อากาศภายนอกในที่สุด ปรากฏการณ์นี้สามารถนำไปใช้ได้ในการไล่ก๊าซ (degassing) ออกจากระบบนั่นเอง

ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อความยากง่ายในการเกิดคาวิเทชัน (หรือคาวิเทชันเทรสโฮลด์นั่นเอง) ได้แก่

1) ก๊าซและอนุภาคของแข็งที่ปรากฏในของเหลว

การที่มีก๊าซหรืออนุภาคของแข็งปรากฏในของเหลวจะเป็นจุดอ่อนของโครงสร้างของของเหลวนั้น ทำให้ค่าแรงดึง (tensile strength) ของของเหลวลดลง ทำให้ค่าคาวิเทชันเทรสโฮลด์ลดลง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การที่มีก๊าซปรากฏภายในของเหลว จะทำให้ความรุนแรงเนื่องจากการยุบตัวของคาวิเทชันที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง เนื่องจากก๊าซจะทำหน้าที่รับแรงกระแทกของการเปลี่ยนแปลงแรงดันอย่างรวดเร็ว (shock wave) ที่เกิดขึ้น เนื่องจากก๊าซไม่สามารถแพร่ออกจากคาวิเทชันได้ในช่วงเวลายุบตัวอันสั้นของคาวิเทชัน การยุบตัวจึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ รวมทั้งยังทำให้ค่าอุณหภูมิและความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของคาวิเทชันมีค่าลดลง ดังสมการ (4.2) และ (4.3) ซึ่งค่า P มีค่าเท่ากับ $P_v + P_a$ ดังนั้นความรุนแรงเนื่องจากการยุบตัวของคาวิเทชันที่เกิดขึ้นจึงลดลงด้วย

2) ความดันภายในของเหลว

การเพิ่มความดันภายในของเหลว ส่งผลทำให้จุดกำเนิดฟองบางส่วนอาจจะยุบตัวลงจนละลายเข้าไปในของเหลว จำนวนของจุดกำเนิดจึงมีน้อยลง นอกจากนั้นแล้วการเพิ่มความดันในระบบ จะทำให้ฟองอากาศที่ติดอยู่บริเวณผิวของของแข็งมีขนาดเล็กลงและลักษณะโค้งเว้าเข้าข้างใน ทำให้ต้องการความดันของคลื่นสูงมากขึ้นที่จะเอาชนะแรงตึงผิวของของเหลวให้ฟองอากาศเหล่านี้หลุดออกมาเป็นคาวิเทชันต่อไปได้ จึงทำให้ค่าคาวิเทชันเทรสโฮลด์มีค่าสูงขึ้น การเกิดคาวิเทชันจึงยากขึ้นด้วย

อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความดันภายในของเหลวจะทำให้ความรุนแรงเนื่องจากการยุบตัวของคาวิเทชันที่มากขึ้น จากสมการที่ (4.3) เนื่องจากค่า P_m เท่ากับ $P_h + P_a$ ดังนั้นเมื่อ P_h มีค่าสูงขึ้น จะทำให้ความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของคาวิเทชันมีค่าสูงขึ้นด้วย นอกจากนั้นแล้ว เวลาที่ใช้ในการยุบตัวของคาวิเทชันสามารถคำนวณได้จาก

$$\tau = 0.915R_m(\rho/P_m)^{1/2}(1+P_{vg}/P_m) \quad \text{..... (4.4)}$$

โดยที่ P_{vg} คือ ความดันของไอหรือก๊าซภายในคาวิเทชัน (กิโลปาสคาล)

R_m คือ รัศมีของคาวิเทชันก่อนการยุบตัว (ไมโครเมตร)

ดังนั้น เมื่อ P_m มีค่ามากขึ้น τ จะลดลง ซึ่งหมายถึงจะทำให้การยุบตัวของคาวิเทชันจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วขึ้น ส่งผลให้ผลกระทบของคลื่นเสียงต่อระบบมีค่ามากขึ้นด้วยตามลำดับ

3) ความหนืดของของเหลว

เนื่องจากการเกิดคาวิเทชัน ค่าความดันของเสียงในช่วงขยายจะต้องเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของของเหลว ดังนั้นถ้าค่าแรงดึงดูดนี้มีค่าสูงขึ้นก็จะทำให้ค่าคาวิเทชันเทรสโฮลด์มีค่าสูงขึ้นด้วย แรงดึงดูดนี้จะเพิ่มขึ้นถ้าของเหลวมีความหนืดมากขึ้น ดังนั้นของเหลวที่มีค่าความหนืดสูงจะทำให้เกิดคาวิเทชันได้ยากกว่าของเหลวที่มีค่าความหนืดต่ำกว่า

4) ความถี่ของคลื่นเสียง

จากที่กล่าวมาแล้วว่า การเกิดคาวิเทชันเนื่องจากการสูญเสียโครงสร้างของของเหลวในช่วงความดันขยายของคลื่นเหนือเสียง ซึ่งจะต้องใช้เวลาค่าหนึ่งที่เพียงพอจึงจะทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ ซึ่งหากว่าเวลาที่ต้องการนี้มีค่ามากกว่าช่วงเวลาในช่วงขยายของคลื่นซึ่งเป็นช่วงที่จะทำให้เกิดคาวิเทชัน คาวิเทชันก็จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากมีเวลาไม่เพียงพอ ($f = 1/T$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย f คือความถี่ของคลื่น [รอบต่อวินาที หรือ เฮิร์ซ] และ T คือคาบ [วินาที] โดยที่ช่วงเวลาของความดันขยายมีค่าเท่ากับ $T/2$) ดังนั้นการเพิ่มความถี่ของคลื่นเสียงซึ่งหมายถึงการลดช่วงเวลาของความดันขยายจะทำให้การเกิดคาวิเทชันยากขึ้นหรือค่าคาวิเทชันเทรสโฮลด์เพิ่มขึ้นนั่นเอง ดังนั้นค่าแอมปลิจูดของคลื่นเสียงที่ต้องใช้เพื่อให้เกิดฟองที่ความถี่สูงๆก็จะต้องมีค่าสูงขึ้น

เกี่ยวกับความรุนแรงเนื่องจากการยุบตัวของคาวิเทชันที่เกิดขึ้น ที่ความถี่สูง คาบหรือเวลาของแต่ละรอบของคลื่นจะมีค่าสั้นลง ดังนั้นอาจจะไม่เพียงพอให้คาวิเทชันยุบตัวได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นค่าความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของคาวิเทชันก็จะมีค่าน้อยกว่ากรณีการยุบตัวอย่างสมบูรณ์

5) อุณหภูมิ

โดยทั่วไปจะพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ค่าความหนืดของของเหลวมีค่าลดลง รวมทั้งค่าความดันไอ (vapor pressure) จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะส่งผลให้ค่า คาวิเทชันเทรสโฮลด์มีค่าลดลง นั่นคือ ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น การเกิดคาวิเทชันจะง่ายขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาฟองเดี่ยวที่มีขนาด R_o ในของเหลวที่มีความดันเนื่องจากแรงกดของน้ำ (hydrostatic pressure; P_h) ถ้าฟองนี้อยู่ในสมดุล แรงดันภายในฟองต้องมีค่าเท่ากับแรงดันภายนอก ที่จะพยายามทำให้ฟองยุบตัว เขียนสมการสมดุลแรงได้ดังนี้

$$P_v + P_g = P_h + 2\sigma/R_o \quad \text{.....(4.5)}$$

โดย σ คือ แรงตึงผิวของของเหลว

เมื่อมีคลื่นเหนือเสียงเดินทางผ่านของเหลวที่มีฟองนี้ ซึ่งมีขนาดความดัน (P_a) เท่ากับ $P_A \sin(2\pi ft)$ (P_A คือแอมปลิจูดของคลื่น) โดยมีค่าขึ้นกับเวลา ในระหว่างช่วงอัดของคลื่น ค่า P_a จะมีค่าเป็นบวก ดังนั้นในระหว่างนี้ค่าความดันในของเหลวจะเพิ่มขึ้นจาก P_h เป็น P_h+P_a และในระหว่างช่วงขยายของคลื่น ค่า P_a จะมีค่าเป็นลบ ดังนั้นค่าความดันในของเหลวจะเท่ากับ P_h-P_a สมการ (4.5) จึงเขียนใหม่ได้ว่า

$$P_v + P_g = P_h \pm P_a + 2\sigma/R_o \quad \text{.....} \qquad (4.6)$$

ถ้าสมมติว่า ค่า P_g และ σ มีค่าน้อยมาก จนละทิ้งได้

$$P_v = P_h \pm P_a \quad \text{.....} \quad (4.7)$$

จากสมการ (4.7) จะเห็นว่า ถ้า P_v มีค่ามากกว่าค่าน้อยที่สุดที่เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเสียงอยู่ในช่วงขยาย ซึ่งทำให้เทอมขวามือมีค่าน้อยที่สุดคือเท่ากับ P_h - P_a คาวิเทชันนี้จะมีขนาดโตขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ค่า P_v ของของเหลวเพิ่มขึ้น ดังนั้น คาวิเทชันจะสามารถโตได้ง่ายขึ้น จึงเป็นการเพิ่มผลกระทบของคลื่นเหนือเสียงต่อระบบด้วย ในอีกทางหนึ่ง การเพิ่มขนาดของแอมปลิจูดของคลื่นหรือ P_A ก็จะทำให้เกิดคาวิเทชันได้ง่ายขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง หากเราพิจารณาค่าของแรงตึงผิว (σ) เข้าไปในสมการจะได้

$$P_v - (2\sigma/R_o) = P_h - P_a \quad \text{.....} \quad (4.8)$$

โดยทั่วไป การเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ค่าแรงตึงผิวของของเหลวมีค่าลดลง ดังนั้นจะทำให้คาวิเทชันสามารถโตได้ง่ายขึ้น หรือค่าคาวิเทชันเทรสโฮลด์ลดลงนั่นเอง

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาสมการ (4.2) จะพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งจะส่งผลให้ค่า P_v สูงขึ้น จะทำให้อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของคาวิเทชันมีค่าลดลง

6) ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง

โดยทั่วไป การเพิ่มความเข้มของเสียง คือการเพิ่มค่า P_A ซึ่งจะทำให้ความดันและอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดจากการยุบตัวของคาวิเทชัน รวมทั้งเวลาใช้ในการยุบตัวคาวิเทชันมีค่าสูงขึ้นด้วย ดังสมการ (4.2), (4.3) และ (4.4) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเข้มของเสียงก็มีขีดจำกัด เนื่องจากขนาดของฟองที่ใหญ่ที่สุด (R_{max}) มีค่าขึ้นอยู่กับแอมปลิจูดของคลื่นเสียงด้วย ดังสมการ

$$R_{max} = (4/3\omega)^*(P_a - P_h)^*(2/\rho P_a)^{1/2}[1+2(P_a+P_h)/(3P_h)]^{1/3} \quad \text{.....(4.9)}$$

ถ้าขนาดของแอมปลิจูดสูงมากเกินไปอาจจะทำให้ขนาดของคาวิเทชันมีขนาดใหญ่มาก ซึ่งต้องการเวลาในการยุบตัวสูงขึ้น จึงอาจทำให้คาวิเทชันไม่สามารถยุบตัวได้อย่างสมบูรณ์ภายในช่วงเวลาความดันขยายของคลื่น 1 รอบ ดังนั้นจึงทำให้ความรุนแรงเนื่องจากการยุบตัวของคาวิเทชันจึงน้อยลง การเลือกค่าความเข้มของคลื่นเหนือเสียงที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อผลที่ได้รับ จึงเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งในการพิจารณาการใช้คลื่นเหนือเสียง

4.2 <u>การประยุกต์ใช้คลื่นเหนือเสียง</u> สามารถแยกได้ 3 กรณีคือ

4.2.1 ใช้ในกระบวนการทางเคมี คลื่นเหนือเสียงทำให้เกิดผลดีต่อระบบ เช่น ลดการใช้สารเร่งปฏิกิริยา, ลดเวลาในการทำปฏิกิริยา เป็นต้น เช่น

4.2.1.1 ปฏิกิริยาต่อสารเนื้อผสม (Heterogeneous reaction)

- ระบบของผสม (solid-liquid system) การใช้คลื่นเหนือเสียงจะช่วยทำความสะอาดผิวของแข็งเพื่อเพิ่มผิวสัมผัส เป็นการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น สำหรับผงฝุ่น (powder) หรืออนุภาคขนาดเล็ก คลื่นเหนือเสียงจะสามารถลดขนาดและทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของของแข็งและของเหลวได้ โอกาสการสัมผัสกันจึงมีสูงขึ้น
- ระบบสารแขวนลอย (liquid-liquid system) การนำคลื่นเหนือเสียงมาใช้จะสามารถเพิ่มพื้นที่การสัมผัส (interfacial contact area) ให้กับกระบวนการอิมัลชิฟิเคชัน (emulsification)

4.2.1.2 ปฏิกิริยาต่อสารเนื้อเดียว (homogeneous reaction) คลื่นเหนือเสียงจะช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดได้เร็วขึ้น เนื่องจากมีอุณหภูมิในบริเวณที่ฟองยุบตัวสูงมาก

4.2.2 ใช้ในกระบวนการทางกายภาพ การทำความสะอาดผิวของแข็งจะใช้คลื่นเหนือเสียงที่พลังงานสูง ฟองที่ยุบตัวจะทำให้เกิดแรงกล (mechanical force) บนผิวของของแข็ง ซึ่งสามารถทำความสะอาดพื้นผิววัสดุที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อนได้ โดยจุ่มวัสดุที่ต้องการทำความสะอาดลงในเครื่องมือ ซึ่งจะมีการกำหนดจุดวางเพื่อให้วัสดุได้รับความเข้มเสียงมากสุด

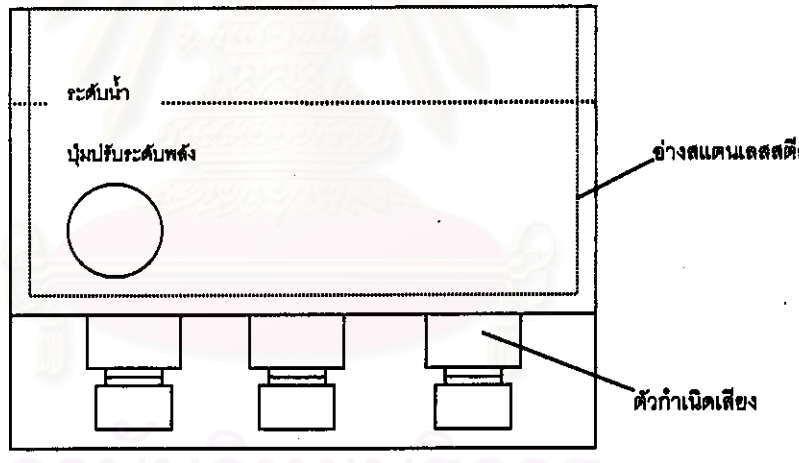
ใช้ในกระบวนการไล่ก๊าซ (degassing process) โดยคลื่นเหนือเสียงที่พลังงานสูงจะทำให้เกิดฟอง ก๊าซที่ผสมอยู่ในของเหลวจะแพร่เข้ามาในฟอง เมื่อฟองใหญ่ขึ้นก็จะลอยขึ้นไปยังผิวหน้าของของเหลว จะใช้ในอุตสาหกรรมหลอมเหล็กกล้า, แก้ว, เส้นใยสังเคราะห์และเรซิน เป็นต้น

ช่วยทำความสะอาดเยื่อแผ่นในกระบวนการกรอง เป็นการเพิ่มอัตราการกรองให้กับระบบ โดยสามารถเพิ่มอัตราการกรอง, ช่วยในการผสมหรือทำให้เกิดเป็นสารแขวนลอย (emulsions) ซึ่งจะใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร, สี, เครื่องสำอางและเภสัชกรรม

4.2.3 ใช้ในกระบวนการทางชีวภาพ มีการนำคลื่นเหนือเสียงมาใช้ในการทำให้ผนังเซลล์แตกและช่วยเพิ่มการถ่ายเทมวลสารผ่านผนังเซลล์ได้

4.3 อุปกรณ์ทดลองที่ใช้ร่วมกับคลื่นเหนือเสียง

4.3.1 อ่างทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic cleaning bath) อุปกรณ์นี้ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงที่ได้รับมีค่าระหว่าง 1-5 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และโดยทั่วไปจะใช้ความถี่ของคลื่นเหนือเสียงระหว่าง 20-40 กิโลเฮิร์ซ ข้อดีของอ่างทำความสะอาดชนิดนี้คือ ใช้งานได้สะดวก, ง่ายและกว้างขวาง, สามารถเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาได้โดยไม่มีเศษโลหะที่เกิดจากการกัดกร่อนที่ผิวหน้าของตัวกำเนิดเสียงเข้ามาสู่ระบบ สำหรับการใช้งาน ภายในอ่างจะบรรจุด้วยน้ำหรือของเหลวชนิดอื่นซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้คลื่นเหนือเสียงเดินทางผ่านไปยังภาชนะที่บรรจุด้วยสารที่ต้องการให้เกิดปฏิกิริยา ซึ่งจุ่มลงในอ่างนี้อีกทีหนึ่ง ภาชนะที่ใช้นี้ควรจะมีผิวด้านล่างเรียบตั้งฉากกับทิศทางของคลื่นเหนือเสียงที่เดินทางมาจากก้นอ่าง และควรจะจุ่มภาชนะนี้ในบริเวณที่มีความเข้มของเสียงมากที่สุด อุปกรณ์ชนิดนี้มีข้อด้อยคือ ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงที่ได้รับภายในอ่างมีค่าไม่สม่ำเสมอ, ความเข้มของคลื่นเหนือเสียงที่ได้ค่อนข้างต่ำ และโดยส่วนใหญ่ไม่สามารถปรับความถี่ได้ (รูปที่ 4.4)

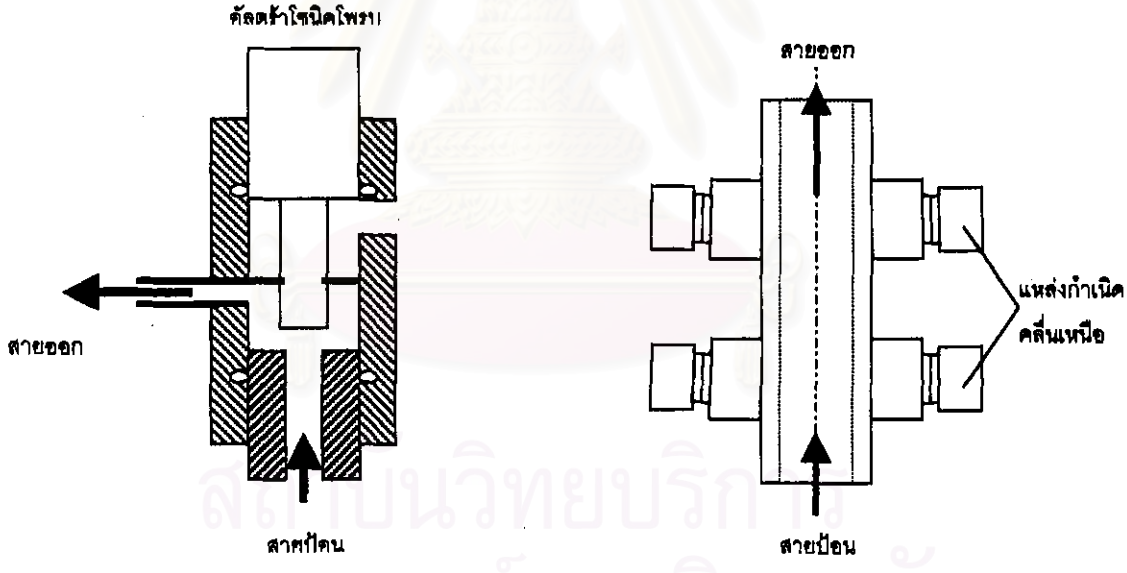


รูปที่ 4.4 อ่างทำความสะอาดด้วยคลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic cleaning bath)

4.3.2 อัลตร้าโซนิคโพรบ (Ultrasonic probe) จะเป็นอุปกรณ์กำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่มีการส่งพลังงานไปยังระบบโดยตรงและได้ใช้วิธีลดขนาดพื้นที่หน้าตัดของหัวส่งที่ต่อมาจากคอมโพซิททรานดิวเซอร์ (composite transducer) เพื่อเพิ่มความเข้มของคลื่นเหนือเสียงให้สูงขึ้น สำหรับการใช้งาน ทำได้โดยจุ่มหัวส่งลงในสารละลาย ความเข้มของคลื่นเสียงที่ได้รับจากอุปกรณ์นี้มีค่าระหว่าง 10-100 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ข้อดีของอุปกรณ์ชนิดนี้คือ ให้ความเข้มของคลื่นเสียงสูง, สามารถปรับความเข้มของเสียงให้เหมาะสมกับสารแต่ละชนิด โดยปรับจากการกำลังไฟฟ้าที่

ป้อนและเลือกขนาดของหัวส่ง (horn) ให้เหมาะสม แต่เนื่องจากมีการจุ่มตัวกำเนิดคลื่นลงในสารละลายโดยตรงทำให้มีข้อด้อยคือ เกิดการสึกกร่อนของหัวส่ง สารที่จะทำปฏิกิริยาจึงเกิดการปนเปื้อนได้, เหมาะสำหรับสารปริมาณน้อยและถ้าความเข้มของพลังงานมากเกินไปจะทำให้เกิดการสูญเสียคุณสมบัติของสารได้และส่วนใหญ่ไม่สามารถปรับความถี่ได้

4.3.3. ระบบที่มีการใช้อัลตร้าโซนิคกรณีที่สารมีปริมาณมาก การติดตั้งทำได้หลายลักษณะ เช่น (ก) ระบบที่มีการจุ่มตัวกำเนิดเสียงให้สัมผัสกับสารละลายโดยตรง โดยการปล่อยให้มีการไหลล้นออกทางด้านบน (รูปที่ 4.5 ก) ทำให้ความเข้มของคลื่นเสียงสูงและสามารถใช้กับสารปริมาณมากได้ แต่จะเกิดการปนเปื้อนในระบบเนื่องจากการกัดกร่อนของหัวส่ง และยังส่งผลให้ประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานมีค่าลดลง และ (ข) เครื่องมือที่มีการติดตั้งตัวกำเนิดเสียงภายนอกถังปฏิกรณ์หรือท่อ แล้วส่งพลังงานผ่านผนังของอุปกรณ์เข้าไปยังของเหลวภายในถังปฏิกรณ์หรือท่อ (รูปที่ 4.5 ข) เป็นต้น



รูปที่ 4.5 อุปกรณ์ที่มีการใช้คลื่นเหนือเสียง ที่สามารถทำงานแบบต่อเนื่อง
(ก) ระบบที่มีการจุ่มตัวกำเนิดเสียงให้สัมผัสกับสารละลายโดยตรง
(ข) เครื่องมือที่มีการติดตั้งตัวกำเนิดเสียงภายนอกถังปฏิกรณ์

4.4 **ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง** ที่นิยมใช้กันทั่วไป แบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1. ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจากพลังงานกล (mechanical transducer) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนจากพลังงานการเคลื่อนที่ (kinetic energy) ของของไหล (stream fluid) ไปเป็นพลังงานคลื่นเสียง ซึ่งจะสร้างคลื่นเสียงให้มีความถี่ได้สูงสุด 100 กิโลเฮิร์ซ
2. ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงจากพลังงานไฟฟ้า (electromechanical transducer) จะเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสียง เช่น การใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (magnetostrictive oscillators), การเคลื่อนที่ของคอยล์ (moving coil) และจากเพียซโซอีเล็คทริคทรานสดิวเซอร์ (piezoelectric transducer) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ในช่วงกว้างมาก

การใช้เพียซโซอีเล็คทริคทรานสดิวเซอร์ เพื่อเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสียงจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องมือชนิดอื่น มีโครงสร้างไม่สลับซับซ้อนและง่ายต่อการปฏิบัติงานรวมถึงการควบคุม สุดท้ายคือ สามารถประยุกต์ใช้กับเครื่องมือได้อย่างกว้างขวาง ดังนั้นในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะขอกล่าวเฉพาะแหล่งกำเนิดเสียงจากเพียซโซอีเล็คทริคทรานสดิวเซอร์ซึ่งเป็นประเภทที่ได้นำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

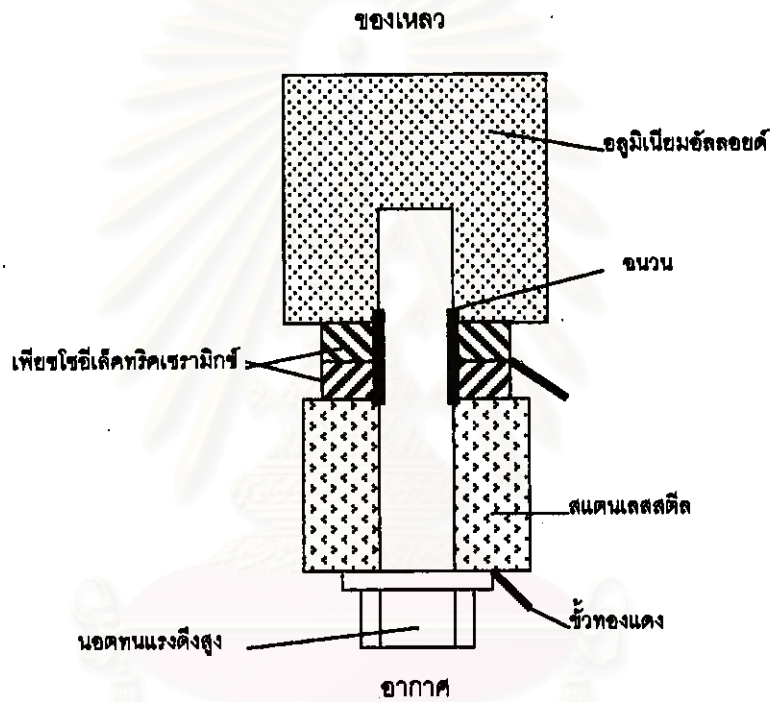
เพียซโซอีเล็คทริคซิตี้ (piezoelectricity) เป็นชื่อที่ใช้เรียกปรากฏการณ์เมื่อมีการทำให้โครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัวของไดโพล (electric dipole) อย่างเป็นระเบียบ เมื่อถูกแรงกระทำจากภายนอกจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้นและมีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุ (capacitor)

การทำให้โมเลกุลแสดงการจัดเรียงตัวของประจุในโครงร่างผลึกมีทิศทางเดียวกันทำได้โดยการให้ความร้อนแก่วัสดุจนถึงอุณหภูมิระดับหนึ่งซึ่งเรียกว่า อุณหภูมิคูรี (Curie temperature) จะทำให้ไดโพล (dipole) เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ที่จุดนี้จะใส่ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปและลดอุณหภูมิลง ทำให้โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันขึ้นซึ่งเป็นคุณสมบัติของ เพียซโซอีเล็คทริคซิตี้ ดังนั้นหากนำวัสดุที่มาดำเนินการในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี จะทำให้วัสดุเสียคุณสมบัติเพียซโซอีเล็คทริคซิตี้ไป

วัสดุที่มีคุณสมบัติเพียซโซอีเล็คทริค (piezoelectric material) ซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติได้แก่ ผลึกควอซท์ (quartz), ผลึกเกลือ หรือพลอยสีต่างๆ ปัจจุบันมีการพัฒนานำเซรามิกส์ (ceramic) มาใช้แทน เนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถขึ้นรูปได้, เฉื่อยต่อปฏิกิริยา, ควบคุมคุณสมบัติได้, แข็งแรง, ประสิทธิภาพสูง, ทนต่อแรงกดดันได้สูงและมีค่าอุณหภูมิคูรีค่อนข้างสูง (ประมาณ 350 องศาเซลเซียส)

4.5 ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูง

การนำเซรามิกส์ที่มีคุณสมบัติเพียซโซอีเล็คทริคหรือเพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกซ์ (Piezoelectric ceramic) มาใช้ในการกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่มีความเข้มสูง มีข้อจำกัดเนื่องจากคุณสมบัติทางกลของวัสดุ จึงมีการปรับปรุงเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูงที่เรียกว่า คอมโพซิททรานสดิวเซอร์ (composite transducer) หรือแซนวิชทรานสดิวเซอร์ (sandwich transducer) ซึ่งประกอบด้วยเพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกซ์ 2 ชิ้น, โลหะส่งผ่านคลื่นเสียง 2 ชิ้น ยึดเข้าหากันด้วยนอตทนแรงดึงสูง (high strength bolt) ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูง

การออกแบบตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงชนิดนี้ จะต้องทำการเลือกวัสดุให้มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้ เช่น เพียซโซอีเล็คทริคเซรามิกซ์จะเลือกใช้ชนิดที่ให้ความเข้มสูง สำหรับโลหะส่งผ่านคลื่นเสียงแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนด้านหน้า คือ ส่วนที่จะส่งผ่านพลังงานไปยังตัวกลางที่ต้องการและส่วนด้านหลังซึ่งไม่ต้องการให้พลังงานถูกส่งผ่านไปยังอากาศที่สัมผัสอยู่ สำหรับส่วนด้านหน้าจะเลือกโลหะที่มีค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ (acoustic impedance) อยู่ระหว่างตัวเซรามิกซ์และของเหลว เพื่อให้พลังงานสามารถส่งผ่านไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ของโลหะด้านหน้ามีค่าประมาณ

$$Z_{metal} = \sqrt{Z_{ceramic} \times Z_{liquid}} \quad \text{.....} \quad (4.10)$$

ส่วนด้านหลังจะเลือกโลหะที่มีค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์สูง เนื่องจากอะคูสติกอิมพีแดนซ์ของอากาศมีค่าน้อยมาก ดังนั้นถ้าค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์มีค่าแตกต่างกันมาก พลังงานจะเกิดการสะท้อนกลับมาทั้งหมดและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของโลหะด้านนี้จะพยายามให้มีขนาดเล็กเพื่อลดปริมาณพลังงานที่จะส่งผ่านไปยังอากาศ ดังนั้นสามารถสร้างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงที่มีการส่งผ่านพลังงานด้านอากาศน้อยมากเมื่อเทียบกับด้านหน้าที่สัมผัสกับตัวกลางของเหลว และการสร้างตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง ในขั้นต้นจะต้องกำหนดความถี่ที่ต้องการก่อน แล้วจึงคำนวณหาความยาวคลื่นของคลื่นเสียง โดยทั่วไปความยาวทั้งหมดของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงความเข้มสูงที่เหมาะสมมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($\lambda/2$)

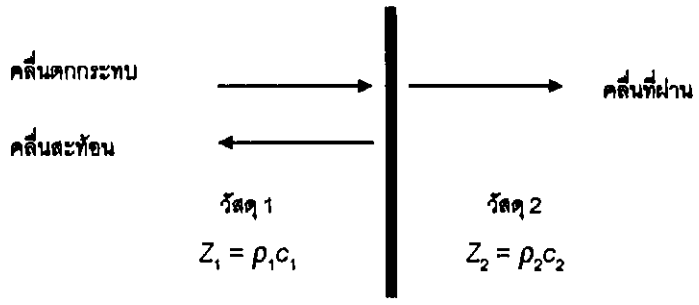
เมื่อคลื่นเหนือเสียงเดินทางไปกระทบพื้นหน้าที่มีคุณสมบัติเชิงกลต่างกันจะสะท้อนกลับมาและเกิดปรากฏการณ์เช่นเดียวกันแต่ในทิศทางตรงกันข้าม ความแรงของคลื่นเหนือเสียงที่สะท้อนกลับจะขึ้นอยู่กับค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ของเนื้อวัสดุซึ่งเท่ากับผลคูณของความหนาแน่นและความเร็วของคลื่นเหนือเสียงในตัวกลางนั้น

$$Z = \rho c \quad \text{.....} \quad (4.11)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (pressure reflection coefficient) คืออัตราส่วนระหว่างส่วนที่สะท้อนกลับ (reflected pulse) ต่อส่วนที่ตกกระทบ (incidence pulse) (รูปที่ 4.7) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ

$$R = (Z_2 - Z_1)/(Z_2 + Z_1) \quad \text{.....} \quad (4.12)$$

การสะท้อนของคลื่นจะมีความแตกต่างกันเมื่อไปกระทบพื้นหน้าที่มีลักษณะแตกต่างกัน เมื่อคลื่นเสียงกระทบพื้นหน้าที่ตั้งฉากกันจะได้คลื่นที่สะท้อนกลับมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่คลื่นตกกระทบพื้นเอียงหรือพื้นผิวขรุขระกรณีที่เป็นวัสดุเดียวกัน ซึ่งจะให้การสะท้อนกลับของคลื่นมีค่าน้อยกว่า



รูปที่ 4.7 การสะท้อนของคลื่นเสียง

วงจรจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่เครื่องกำเนิดเสียง ดังรูปที่ 4.8 สามารถคำนวณค่าพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียงได้จาก

$$P = VI \cos \theta \quad \text{..... (4.13)}$$

โดย P คือ กำลังไฟฟ้าที่ป้อน (วัตต์)

V คือ ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (โวลท์)

I คือ กระแสไฟที่ไหลในวงจร (แอมแปร์)

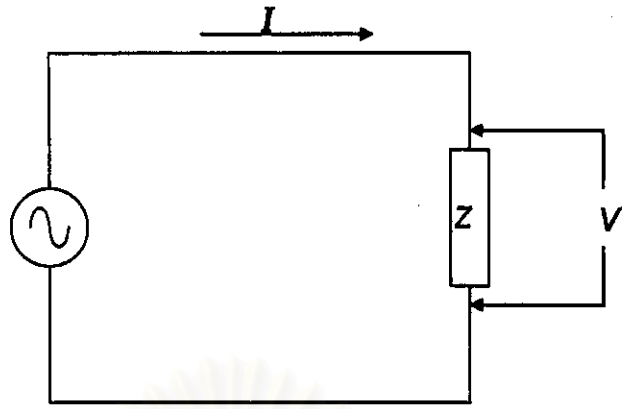
θ คือ เฟสที่แตกต่างระหว่างความต่างศักย์กับกระแสที่ไหลในวงจร (องศา)

ถ้ากำหนดให้ไม่มีการสูญเสียพลังงาน ค่าความเข้มเสียงที่ได้รับสามารถคำนวณได้จาก

$$I = P/A \quad \text{..... (4.14)}$$

โดย I คือ ความเข้มของคลื่นเหนือเสียง ณ จุดกำเนิดเสียง (วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (ตารางเซนติเมตร)



รูปที่ 4.8 วงจรจ่ายไฟแก่ตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง

ในการปฏิบัติงาน แหล่งจ่ายไฟจะมองค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ของตัวกำเนิดคลื่นเหนือเสียง (piezoelectric transducer) มีคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ (capacitor; $Z=-j/(\omega C)$) ดังนั้นในการจ่ายไฟให้แก่ระบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าสูงที่สุด จะต้องนำขดลวดเหนี่ยวนำ (inductor; $Z=j\omega L$) มาต่อเข้าในระบบ เพื่อกำจัดเฟสที่แตกต่างกัน (phase shift; θ) ของความต่างศักย์และกระแสที่วัดได้ นั่นคือเพื่อให้ได้ค่า θ เท่ากับศูนย์หรือมีค่าน้อยที่สุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย