บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

อัลตราซาวด์เป็นการสั่นสะเทือนเชิงกลที่มีความถี่มากกว่าคลื่นเสียงที่มนุษย์สามารถได้ยินได้ คือ มีความถี่มากกว่า 20,000 เฮิร์ต (Hz) ซึ่งคลื่นที่เกิดจากการสะเทือนอาจแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

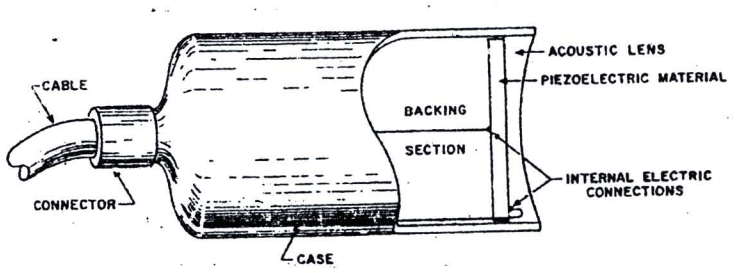
1. คลื่นเสียง (Sound) คลื่นเสียงเป็นคลื่นสั่นสะเทือนที่มนุษย์สามารถได้ยินได้ มีความถี่ 10 – 20,000 เฮิร์ต

2. คลื่นใต้น้ำ (Infrasound) มีความถี่น้อยกว่าคลื่นเสียงได้แก่ คลื่นในแม่น้ำ และมหาสมุทร

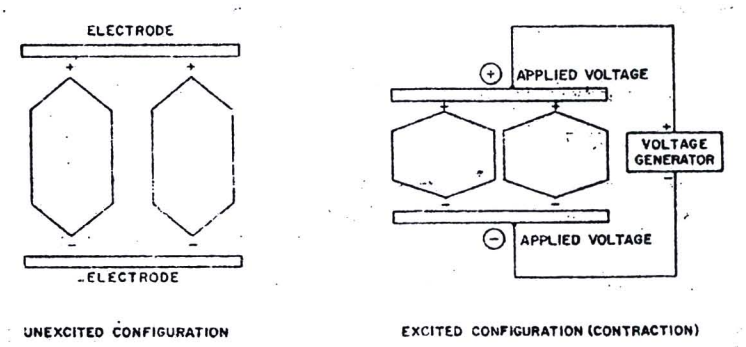
3. คลื่นเหนือเสียง, อัลตราซาวด์ (Ultrasound) เป็นคลื่นสั่นสะเทือนที่มีความถี่มากกว่าคลื่นเสียง คือมากกว่า 20,000 เฮิร์ต

2.1 การเกิดและการแผ่กระจายของคลื่นอัลตราซาวด์

คลื่นอัลตราซาวด์โดยทั่วไปสร้างมาจากเพียโซอิเล็คทริกทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducer) ซึ่งทรานสดิวเซอร์ประกอบไปด้วยผลึกเพียโซอิเล็คทริก เช่น ควอตซ์ (Quartz) พร้อมด้วย แบคกิ้งเซคชั่น (Backing Section) และ อะคูสติกเลนส์ (Acoustic Lens) ดังภาพที่ 2-1 ซึ่งจะทำหน้าที่โฟกัส (Focus) ลำอัลตราซาวด์ โดยอัลตราซาวด์เกิดจากวัสดุเพียโซอิเล็คทริก ซึ่งรูปร่างโมเลกุลของผลึกเพียโซอิเล็คทริกอย่างง่ายแสดงไว้ในภาพที่ 2-2 โมเลกุลแสดงประจุซึ่งเรียงตัวเป็นโครงสร้างของผลึก (Crystalline Structure) ทำให้ประจุบวกเรียงตัวอยู่ในทิศทางเดียวกัน คลื่นอัลตราซาวด์จะเกิดขึ้นเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเข้าไปที่แผ่นอิเล็คโทรดที่ผิวหน้าของผลึก โมเลกุลจะยืดหรือหด ซึ่งขึ้นอยู่กับขั้วของศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ผลึกจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาซึ่งได้สัดส่วนกับความมากน้อยของศักย์ไฟฟ้า



ภาพที่ 2-1 ภาพตัดของทรานสดิวเซอร์ที่ใช้สร้างคลื่นอัลตราซาวด์ [1]

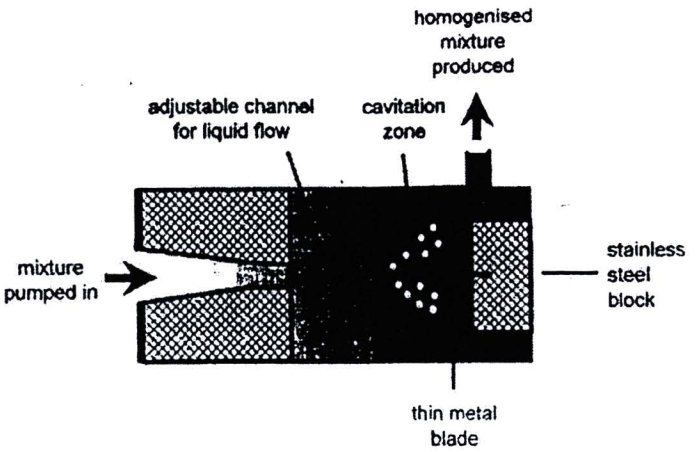


ภาพที่ 2-2 รูปร่างของโมเลกุลในวัสดุเพียโซอิเล็คทริก แสดงการหดตัวของโมเลกุลเมื่อได้รับศักย์ไฟฟ้าป้อนเข้าไป [1]

ซึ่งแหล่งของคลื่นอัลตราซาวด์และชนิดของอุปกรณ์ให้กำเนิดคลื่นที่สร้างขึ้นจากทรานสดิวเซอร์ (Transducer) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลหรือพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานเสียง โดยทั่วไปสามารถแบ่งทรานสดิวเซอร์เป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 3 ประเภท ได้แก่

1. ลิควิดไดร์ฟเวนทรานสดิวเซอร์ (Liquid Driven Transducer)

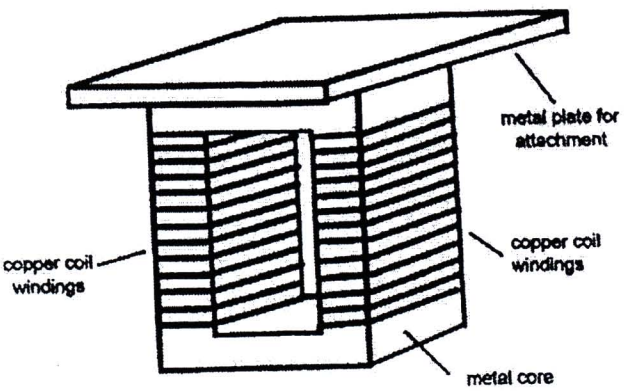
ลักษณะการทำงานของทรานดิวเซอร์ชนิดนี้ ทำให้เกิดคลื่นอัลตราซาวด์ได้โดยการบังคับของเหลวให้เคลื่อนที่ผ่านช่องขนาดเล็กและผ่านไปกระทบกับแผ่นโลหะขนาดบาง (Thin Blade) ซึ่งวางอยู่ในทิศทางการเคลื่อนที่ของของเหลว ทำให้แผ่นโลหะดังกล่าวเกิดการสั่นไปมา ในการสั่นแต่ละครั้งทำให้ผิวหน้าของโลหะเกิดปรากฏการณ์แคปวิเตชั่น (Cavitation) ขึ้นภายในของเหลวนั้น การเกิดคลื่นความดันสลับกับแคปวิเตชั่นเป็นผลทำให้ของเหลวสามารถผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น ลักษณะของทรานสดิวเซอร์ชนิดนี้แสดงดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 ลิควิดไดร์ฟเวนทรานสดิวเซอร์ (Liquid Driven Transducer) [2]

2. แมกนีโตสติกทีฟทรานสดิวเซอร์ (Magnetostrictive Transducer)

ทรานสดิวเซอร์ชนิดนี้เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล โดยใช้คุณสมบัติแมกนีโตสตริกชั่น (Magnetostriction) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่สารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic Materials) เช่น นิกเกิล (Nickel) หรือเหล็ก (Iron) ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของมิติหรือขนาดเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ลักษณะของทรานสดิวเซอร์ชนิดนี้คล้ายกับโซลีนอยด์ (Solenoid) ที่ใช้สารเฟอร์โรแมกเนติกเป็นแกน โดนแกนดังกล่าวประกอบขึ้นจากแผ่นนิกเกิลหรือนิกเกิลอัลลอย (Nickel Alloy) ขนาดบางจำนวนหลายชั้นโดยรูปที่ง่ายที่สุดจะมีลักษณะเป็นวงสี่เหลี่ยมที่พันด้วยลวดทองแดงในแต่ละด้านที่อยู่ตรงกันข้าม ดังภาพที่ 2-4



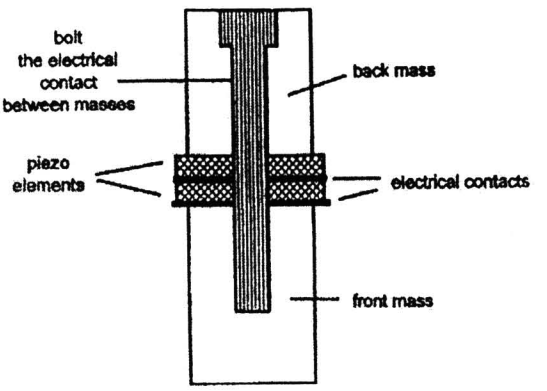
ภาพที่ 2-4 แมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ (Magnetostrictive Transducer) [2]

จากภาพเมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าสู่ขดลวด จะทำให้เกิดการลดขนาดของแกนซึ่งผลิตจากสารเฟอร์โรแมกเนติก (เรียกว่าเกิดแมกนีโตสตริกชั่น,Magnetostriction) และทำให้ขนาดของทรานสดิวเซอร์ลดลงไปด้วยและเมื่อหยุดให้กระแสไฟฟ้าจะทำให้แกนหรือทรานสดิวเซอร์กลับมามีขนาดเท่าเดิม ดังนั้นการให้และหยุดให้กระแสไฟฟ้าจะทำให้แกนมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดอย่างต่อเนื่องและทำให้เกิดแรงสั่นที่ต้องการขึ้นได้ ทั้งนี้จะต้องออกแบบทรานสดิวเซอร์ให้มีขนาดที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดการสั่นตามความถี่ของคลื่นที่กำหนดไว้

ข้อเสียของทรานสดิวเซอร์ชนิดนี้ได้แก่ สามารถสร้างคลื่นอัลตราซาวด์ได้ต่ำกว่า 100 กิโลเฮิร์ต (kHz) และระบบมีประสิทธิภาพในการใช้กระแสไฟฟ้าเพียง 60 % โดยจะสูญเสียพลังงานในรูปความร้อน ระบบนี้จึงมักต้องใช้การทำความเย็นภายนอกควบคู่ไปด้วย ส่วนข้อดีได้แก่ การที่ระบบนี้มีโครงสร้างที่แข็งแรงและทนทาน

3. เพียโซอิเล็คทริกทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducer)

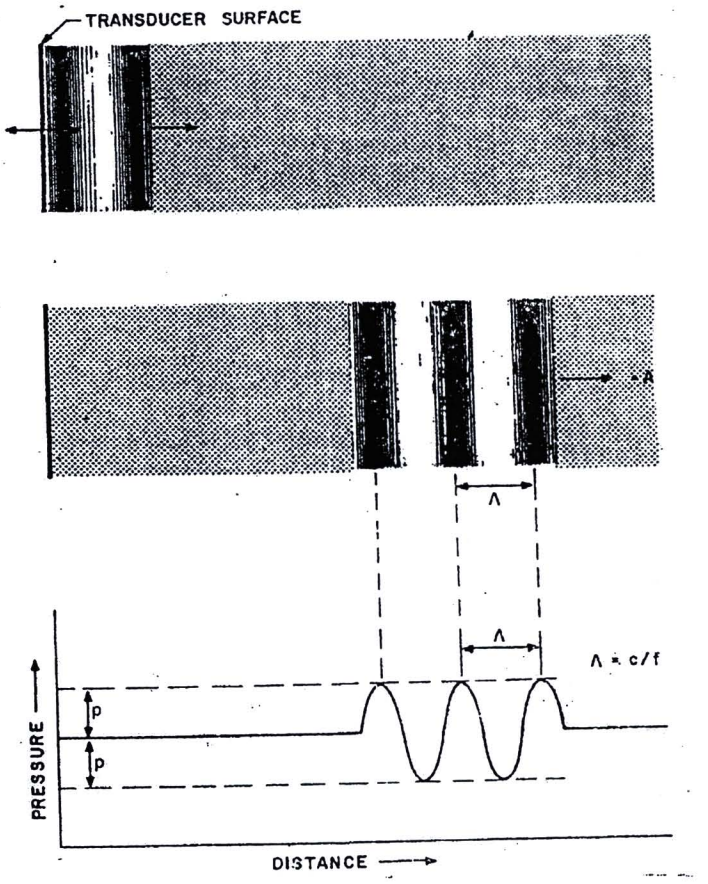
ทรานสดิวเซอร์ชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในการทำให้เกิดคลื่นอัลตราซาวด์โดยการใช้เซรามิกส์ (Ceramics) ที่มีส่วนผสมของสารเพียโซอิเล็คทริก (Piezoelectric Materials) เช่น แบเรียมไทแทเนต (Barium Titanate) หรือเลดเมตาไนโอเบต (Lead Metaniobate) ซึ่งใช้กับระบบโพรบ (Probe Systems) โดยจะมีลักษณะเป็นแผ่นกลมที่มีรูตรงกลาง ทรานสดิวเซอร์เซรามิกส์นี้จะมีความเปราะและแตกหักง่ายมาก ดังนั้นจึงต้องใช้แท่งโลหะมาประกบทั้งทางด้านหน้าและด้านหลัง ซึ่งนอกจากจะช่วยป้องกันการแตกหักแล้ว ยังช่วยป้องกันความเสียหายที่เกิดจากความร้อนส่วนเกินโดยทำหน้าที่เป็นตัวรับความร้อน โดยทั่วไปโครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ชนิดนี้จะประกบกันโดยใช้แผ่นเพียโซเซรามิกส์สองชนิด (เรียกว่า Sandwich Construction) ซึ่งจะทำให้การสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้นกว่าการใช้เพียงตัวเดียว เพียโซอิเล็คทริกทรานสดิวเซอร์แสดงดังภาพที่ 2-5 [1]



ภาพที่ 2-5 เพียโซอิเล็คทริกทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducer) [2]

2.2 การแผ่กระจาย (Propagation) ของคลื่นอัลตราซาวด์

เมื่อจุ่มเพียโซอิเล็คทริกทรานสดิวเซอร์ลงในของเหลว แล้วปล่อยไฟฟ้าเข้าไป จะเกิดการสั่นสะเทือนเป็นคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีการกด (Compression) และการปล่อย (Rarefaction) สลับกันแผ่กระจายไปในของเหลว คือเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเข้าไปในทรานสดิวเซอร์ จะทำให้เพียโซอิเล็คทริกทรานสดิวเซอร์ขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้บริเวณผิวหน้าของทรานสดิวเซอร์ไปกดของเหลวที่อยู่ติดกัน ทำให้ความหนาแน่นและความดันของของเหลวเพิ่มขึ้น การชนกันของโมเลกุลในบริเวณนี้จะมีผลไปกดของเหลวชั้นต่อๆ ไป ขณะที่บริเวณซึ่งถูกกดตอนแรกจะกลับมาอยู่ในสภาพเดิมแล้ว ดังนั้นการกดจึงผ่านของเหลวชั้นที่หนึ่งไปยังชั้นที่สองและผ่านไปเรื่อยๆ และเมื่อทรานสดิวเซอร์หดตัวก็จะทำให้ความดันและความหนาแน่นของของเหลวลดลง การกดและการปล่อยจะเดินทางไปด้วยความเร็วจำนวนหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่น (Density) และการกดอัด (Compressibility) ของสารนั้น ซึ่งภาพที่ 2-6 แสดงคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal) ในความหนาแน่นและความดัน [1]



ภาพที่ 2-6 การแผ่กระจายของอัลตราซาวด์ในตัวกลางที่เป็นของเหลว [1]

2.3 การสะท้อน (Reflection) ของคลื่นอัลตราซาวด์

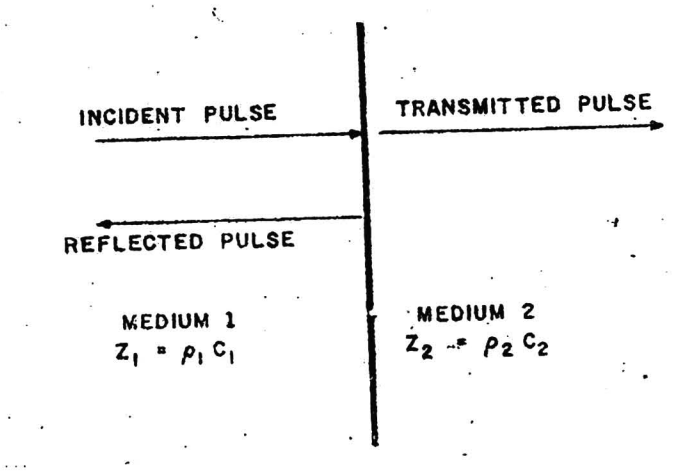
เมื่อคลื่นอัลตราซาวด์ไปกระทบพื้นผิวหน้าซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันจะสะท้อนกลับมาและเกิดปรากฏการณ์เช่นเดียวกันแต่ในทิศทางตรงกันข้าม ความแรงของคลื่นอัลตราซาวด์ที่สะท้อนกลับขึ้นอยู่กับค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ (Acoustic Impedance, Z) ของเนื้อวัสดุ ซึ่งเป็นผลคูณของความหนาแน่น (ρ) และความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์ (c) [1]

$$Z = \rho c \tag{2-1}$$

อัตราส่วน (Ratio, R) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างคลื่นสะท้อน (Reflected Pulse) กับคลื่นตกกระทบ (Incidence Pulse) ดังภาพที่ 2-7 หาได้จาก

$$R=\frac{Z_2-Z_1}{Z_1+Z_2} \tag{2-2}$$

เมื่อ R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient)



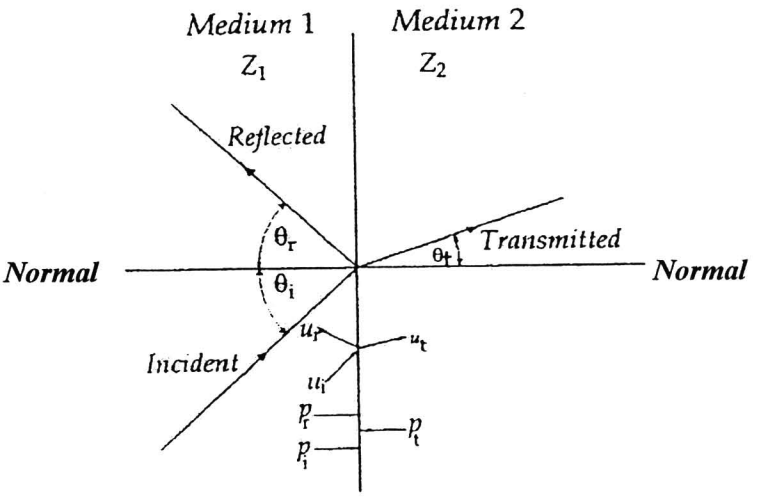
ภาพที่ 2-7 ลักษณะของอะคูสติกอิมพีแดนซ์ของคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อน และคลื่นทะลุผ่าน [1]

2.4 การหักเหของคลื่นอัลตราซาวด์

เมื่อคลื่นอัลตราซาวด์ผ่านตัวกลางที่มีความเร็วในการแผ่กระจายแตกต่างกัน จะมีการหักเห แสดงดังภาพที่ 2-8 เมื่อคลื่นอัลตราซาวด์ตกกระทบกับพื้นหน้าด้วยมุม θ_i คลื่นที่ส่งผ่านต่อไปจะทำมุม θ_t ซึ่งคำนวณได้จากกฎของสแนลล์ (Snell's Law) [1]

$$\sin\theta_t=\frac{C_2}{C1}\sin\theta_i \tag{2-3}$$

เมื่อ C_1 และ C_2 เป็นความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์ในตัวกลางที่หนึ่งและตัวกลางที่สอง ตามลำดับ



ภาพที่ 2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อน และคลื่นทะลุผ่าน [3]

2.5 ความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์

ความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์ในตัวกลางต่างๆ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและการกดอัดของตัวกลางนั้นๆ และเนื่องจากอนุภาคภายในแต่ละตัวของตัวกลางยึดติดกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค จำนวนครั้งของการเคลื่อนที่ไปกลับผ่านจุดสมดุลของอนุภาคต่อวินาที คือ ขนาดความถี่ของคลื่นอัลตราซาวด์ที่เคลื่อนที่แผ่กระจายเข้ามาในตัวกลาง หรือขนาดความยาวคลื่น ซึ่งก็คือระยะห่างระหว่างระนาบของการส่งพลังงาน ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์ดังสมการที่ (2-4)

$$c = f\lambda \qquad (2\text{-}4)$$

เมื่อ c คือ ความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์ที่เคลื่อนที่ในตัวกลาง (m/s)

f คือ ความถี่ของคลื่นอัลตราซาวด์ (Hz)

λ คือ ความยาวคลื่นในตัวกลาง (m)

โดยความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์ในเนื้อเยื่อของร่างกายจะมีความเร็วมากกว่าคลื่น อัลตราซาวด์ในอากาศถึง 5 เท่า โดยตารางที่ 2-1 แสดงความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์ในเนื้อเยื่อชนิดต่างๆ โดยความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ เช่น ที่อุณหภูมิ 20°Cความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์ในน้ำจะมีค่า 1,480 เมตร/วินาที และมีค่าเพิ่มเป็น 1,540 เมตร/วินาที เมื่อน้ำมีอุณหภูมิ 50°C [1, 3]

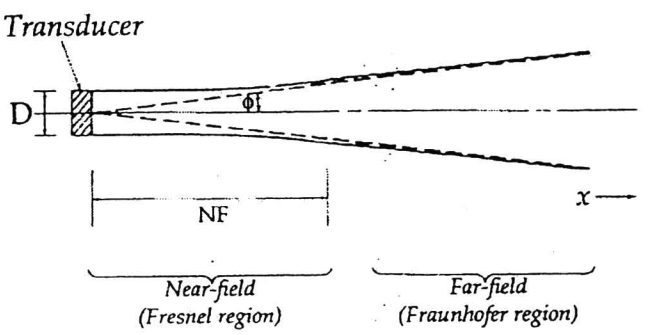
ตารางที่ 2-1 แสดงความเร็วและค่าอะคูสติกอิมพีแดนซ์ของคลื่นอัลตราซาวด์ในเนื้อเยื่อต่างๆ

Material	Acoustic Impedance ($g/cm^2 s$)	Velocity of Sound (m/s)
Aqueous humour	1.50×10^5	1500
Air (N.T.P.)	0.0004×10^5	330
Blood	1.61×10^5	1570
Bone	7.80×10^5	4080
Brain	1.58×10^5	1540
Castor oil	1.43×10^5	1500
Fat	1.38×10^5	1450
Kidney	1.62×10^5	1560
Lens of eye	1.84×10^5	1620
Liver	1.65×10^5	1550
Muscle	1.70×10^5	1580
Perspex	3.20×10^5	2680
Polythene	1.84×10^5	2000
Soft tissue (average)	1.63×10^5	1540
Vitreous humour	1.52×10^5	1520
Water (20°C)	1.48×10^5	1480

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ ๑๙ ก.ย. ๒๕๕๑
เลขทะเบียน 242465
เลขเรียกหนังสือ

2.6 ลักษณะลำคลื่นอัลตราซาวด์

เมื่อคลื่นอัลตราซาวด์ผ่านไปในตัวกลางจะทำให้เกิดสนามอัลตราซาวด์ (Ultrasound Field) แบ่งออกเป็น 2 ช่วง แสดงดังภาพที่ 2-9 คือ



ภาพที่ 2-9 ลักษณะลำคลื่นอัลตราซาวด์ [3]

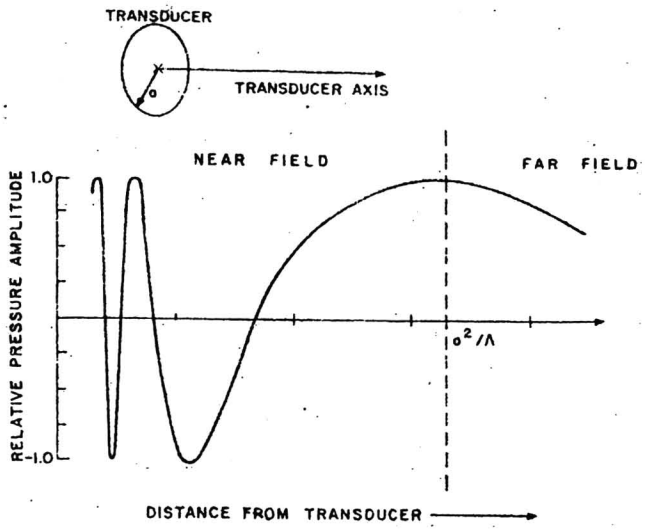
1. Near Field (Fresnel Region) เป็นช่วงที่คลื่นไฟฟ้าอยู่ใกล้ทรานสดิวเซอร์ ความยาวของ Near Field มีค่าเท่ากับ a^2 ซึ่ง a เป็นรัศมีของทรานสดิวเซอร์ ดังนั้น ลำอัลตราซาวด์จึงมีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของทรานสดิวเซอร์ ความสูงของคลื่นในช่วงนี้เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในระยะทางสั้นๆ เนื่องจากในบริเวณนี้มีการแทรกสอดของคลื่นที่ซับซ้อน ความสูงจะเปลี่ยนแปลงมากที่บริเวณแกนของทรานสดิวเซอร์ ดังภาพที่ 2-10 เมื่อคลื่นอัลตราซาวด์ผ่านบริเวณนี้เข้าสู่ Far Field ความสูงจะค่อยๆ ลดลงเนื่องจากมีการกระจาย และความยาวคลื่นอัลตราซาวด์ในตัวกลางนั้นจะมีความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$NF = \frac{r^2}{\lambda} = \frac{D^2}{4\lambda} \qquad (2\text{-}5)$$

เมื่อ NF คือ ความยาวของบริเวณ Near Field

r คือ รัศมีของพื้นหน้าของทรานสดิวเซอร์ (r = D/2)

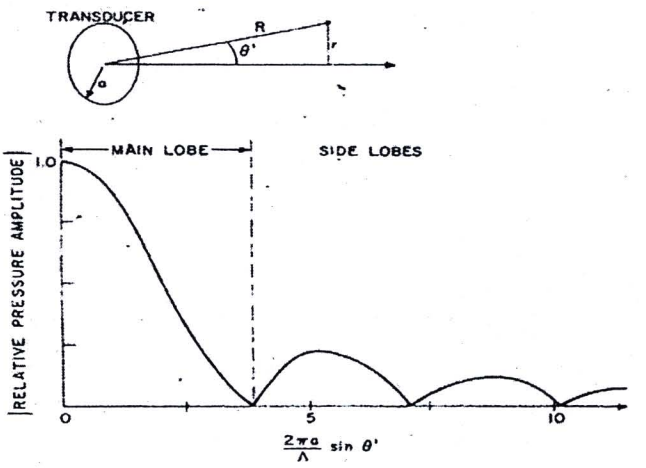
λ คือ ความยาวคลื่นของอัลตราซาวด์ในตัวกลาง



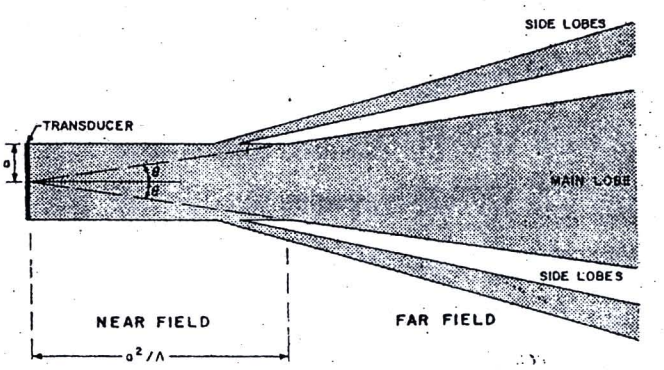
ภาพที่ 2-10 ความสัมพันธ์ของความสูงของคลื่นกับระยะทางบนแนวแกนของทรานสดิวเซอร์ ความสูงจะลดลงไปเรื่อยๆ ในระยะทางที่มากกว่า a^2/λ [1]

2. Far Field (Fraunhofer Region) เมื่อคลื่นอัลตราซาวด์ออกไปไกลจากทรานสดิวเซอร์ ลำของอัลตราซาวด์จะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อพิจารณาพื้นที่หน้าตัดของลำอัลตราซาวด์ จะเห็นว่าแบ่งเป็นกลีบๆ ดังภาพที่ 2-11 และภาพที่ 2-12 ซึ่ง Main Lobe ที่อยู่ตรงกลางจะมีพลังงานมากกว่า 80 % และจะมีความสูงของคลื่นที่ลดลงเรื่อยๆ และมี Side Lobe หลายๆ กลีบล้อมรอบ Main Lobe อยู่ มุมการเบนออกของคลื่นสามารถหาได้จากสมการ [1,3]

$$\text{Ø} = \sin^{-1}\left(0.61\frac{\lambda}{r}\right) \qquad (2\text{-}6)$$



ภาพที่ 2-11 ความสัมพันธ์ของความสูงของคลื่นกับระยะทางบนแนวแกนของทรานสดิวเซอร์ ความสูงจะลดลงไปเรื่อยๆ ในระระทางที่มากกว่า a^2/λ [1]



ภาพที่ 2- 12 แสดงความสูงของคลื่นอัลตราซาวด์ ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะทางที่ห่างออกไปจากทรานสดิวเซอร์ [1]

2.7 การสอบเทียบ (Calibration)

การสอบเทียบ (Calibration) คือ กระบวนการทำงาน (ภายใต้สภาวะที่ควบคุม) ซึ่งสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัด กับ ค่าที่แท้จริงจากมาตรฐานอ้างอิง ที่มีการสอบกลับได้ (Traceability) กล่าวคือ การสอบเทียบ(Calibration) คือการเทียบผลการวัดกับค่ามาตรฐานที่รู้ค่าอย่างแท้จริง การสอบเทียบ เน้นการวัดเพื่อสอบทางมาตรวิทยา โดยรายงานผลหรือค่าที่ได้จากเครื่องมือ ภายใต้การควบคุมกระบวนการและสภาวะอย่างเคร่งครัด ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่า ค่าที่วัดจากเครื่องมือนั้น สามารถเปรียบเทียบค่าของมันกับค่าที่แท้จริงได้

ซึ่งการสอบเทียบจะทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากเครื่องมือกับค่ามาตรฐาน ที่ใส่ให้เครื่องมือนั้นๆ หรือปรับแต่งเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด เพื่อทำให้เครื่องมืออุปกรณ์นั้นสามารถที่จะแสดงค่าได้ตรงกับขนาดหรือปริมาณของสิ่งที่เครื่องมือ/อุปกรณ์นั้นดำเนินการอยู่ ซึ่งโดยทั่วไปจะนิยามรวมไปถึงวิธีที่ใช้ในการแบ่งมาตราส่วนในการวัดด้วย ค่าที่ได้จากเครื่องมืออาจเป็นค่าแสดงผล หรือ ค่าสัญญาณที่ส่งออกจากเครื่องมือ ค่าที่ได้จากเครื่องมืออาจนำมาใช้เพื่อ

1. กำหนดตำแหน่งของสเกล (Scale) หรือค่าแสดงผลของเครื่องมือ
2. หาค่าความผิดพลาดของเครื่องมือเพื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน
3. ปรับแต่งเครื่องมือ เพื่อให้ค่าที่ได้จากเครื่องอยู่ในขอบเขตของความผิดพลาดที่กำหนด

สาเหตุที่ต้องทำการสอบเทียบเครื่องมือเป็นระยะๆ เนื่องจากในระหว่างการใช้งานเครื่องมือนั้นอาจทำให้เครื่องมือเกิดการเสื่อมคุณภาพได้ ความเที่ยงตรงของเครื่องมือจะเสื่อมลงไปตามจำนวนครั้งและระยะเวลาที่ใช้งาน การเสื่อมอันเนื่องจากสภาพแวดล้อม วิธีการใช้งาน ช่วงการวัดที่แตกต่างกันมาก การเก็บรักษาไม่ดีก็ทำให้เครื่องมือเสื่อมคุณภาพลง วิธีการติดตั้งเครื่องมือวัด หรือการติดตั้งเครื่องมือโดยการขาดความระมัดระวังก็อาจทำให้เกิดความเสื่อมในคุณภาพของเครื่องมือวัดได้เช่นกัน โดยทั่วไปการสอบเทียบทำได้ 2 วิธี คือ

1. สอบเทียบเครื่องมือวัดภายในบริษัท คือการปฏิบัติการสอบเทียบ ปรับเทียบเครื่องมือในห้องปฏิบัติการของบริษัทเอง โดยห้องปฏิบัติที่ว่าจะต้องเป็นห้องปฏิบัติการที่ได้มาตรฐาน (โดยมีเงื่อนไขและข้อกำหนดของห้องปฏิบัติการมาตรฐาน) เครื่องมือมาตรฐานทั่วไปภายในห้องปฏิบัติการจะแบ่งเป็น 2 ระดับ คือ

1.1 Reference Standard (Primary Standard) ใช้สำหรับสอบเทียบ Working Standard ของห้องปฏิบัติการ หรือเครื่องมือซึ่งมีค่าความถูกต้อง (Accuracy) สูงโดยเฉพาะ ดังนั้น Reference Standard จะต้องมีค่าความถูกต้อง (Accuracy) สูงมากพอ และ Reference Standard จะถูกส่งไปสอบเทียบกับ National Standard ตามระยะเวลาที่กำหนด

1.2 Working Standard (Secondary Standard) ใช้สำหรับสอบเทียบเครื่องมือทั่วไปที่ใช้ในโรงงานทั้งหมด ดังนั้น Working Standard จะถูกใช้งานอยู่เป็นประจำวิธีการสอบเทียบวิธีนี้เหมาะสำหรับโรงงานหรือบริษัทใหญ่ๆ ซึ่งมีเครื่องมือวัดจำนวนมาก

2. ส่งเครื่องมือวัดไปสอบเทียบที่ศูนย์สอบเทียบภายนอกบริษัท วิธีนี้บริษัทไม่ต้องลงทุนซื้อเครื่องมือมาตรฐานไม่ต้องดูแลรักษา ไม่ต้องเตรียมห้องปฏิบัติการและบุคลากร เพียงแต่ส่งเครื่องมือออกไปสอบเทียบปรับเทียบที่ศูนย์สอบเทียบที่ตั้งขึ้นเพื่อบริการสอบเทียบ/ปรับเทียบ [4]

2.8 การวัดกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์

วิธีการวัดกำลังคลื่นอัลตราซาวด์มีมากมายหลายวิธี อาทิเช่น การวัดแรงการแผ่รังสี (Radiation Force Balance) การใช้ไฮโดรโฟน (Hydrophone) การใช้ไฟเบอร์อ๊อฟติก (Fiber Optic) การใช้ตุ้มน้ำหนัก เป็นต้น

2.8.1 การวัดแรงการแผ่รังสี

งานวิจัยนี้เลือกใช้การวัดแรงการแผ่รังสี เนื่องมาจากเป็นวิธีที่สะดวกและง่าย ทั้งยังสามารถวัดค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์ได้ครอบคลุมค่ากำลังสูงๆ ทั้งยังเป็นวิธีการวัดกำลังคลื่นอัลตราซาวด์โดยดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนเป้าหมาย (Target) โดยตรง ซึ่งการวัดค่าพลังงานทั้งหมดที่ออกมาด้วยวิธีการวัดแรงการแผ่รังสีจะทำการตรวจวัดค่าแรงการแผ่รังสีของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ปล่อยออกมา โดยที่แรงการแผ่รังสีของคลื่นอัลตราซาวด์เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของโมเมนตัมจากคลื่นอัลตราซาวด์ไปยังเป้าหมายที่ยับยั้งการเคลื่อนที่ของลำคลื่นอัลตราซาวด์ ซึ่งในบางครั้งความดันของคลื่นก็ถูกนำมาใช้มากกว่าค่าแรงของคลื่น แรงดันของคลื่นหาได้จากแรงต่อพื้นที่ของเป้าหมาย ดังนั้นแรงทั้งหมดที่เกิดขึ้นบนเป้าหมายหรือแรงที่เกิดขึ้นได้มาจากการรวมตัวกันของความดันที่เกิดบนเป้าหมาย เพราะฉะนั้น แรงของคลื่นจะใช้ตรวจวัดค่าพลังงานของคลื่น อัลตราซาวด์ที่ปล่อยจากทรานสดิวเซอร์ไปยังเป้าหมาย และมีเซ็นเซอร์ (Sensor) ติดไว้ที่เป้าหมายเพื่อแสดงค่าของพลังงานที่ได้รับ โดยเซ็นเซอร์นั้นจะสามารถแสดงค่าพลังงานที่เป้าหมายสามารถยับยั้งไว้ได้ทันที ดังสมการ

$$F = \frac{hW}{c} \tag{2-7}$$

เมื่อ W คือ ค่าพลังงานทั้งหมด
c คือ ความเร็วของเสียงในตัวกลาง
h คือ ค่าเฉพาะที่เกิดขึ้นกับชนิดของตัวกลาง

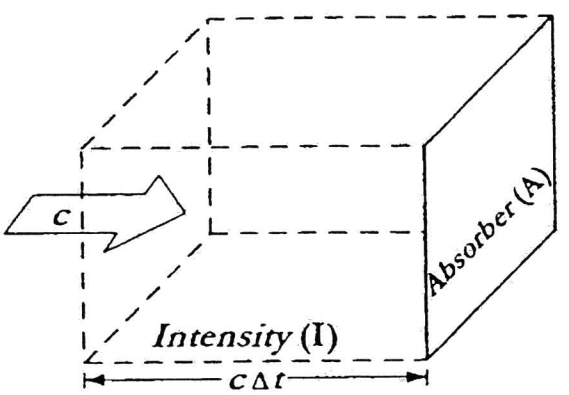
เนื่องจากคลื่นอัลตราซาวด์จัดเป็นคลื่นสั่นสะเทือนเชิงกลชนิดหนึ่ง การเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราซาวด์จึงเปรียบเสมือนการถ่ายทอดพลังงานของอนุภาคตัวหนึ่งไปยังอนุภาคอีกตัวตามความเร็วของอนุภาค โดยมีระยะขจัดของอนุภาคเปลี่ยนไปทำให้อนุภาคมีพลังงานจลน์ ดังนั้น เมื่อคลื่นอัลตราซาวด์แผ่กระจายในแนวระนาบผ่านตัวกลางที่ไม่มีการดูดซับพลังงานคลื่น ซึ่งค่าความเข้มจะมีค่าเท่ากันในทุกๆ จุดภายในลำคลื่นอัลตราซาวด์ ด้วยความเร็วคลื่น c ดังภาพที่ 2-13 เมื่อ

พลังงานคลื่นตกกระทบบนเป้ารับแบบดูดซับในช่วงเวลา Δt จะได้พลังงานที่ถูกดูดซับบนเป้ารับ (E_1) คือ

$$E_1 = IA\Delta t \tag{2-8}$$

ขณะเดียวกันก็จะเกิดแรง F บนเป้ารับแบบดูดซับในทิศทางตรงกันข้ามกับพลังงานที่คลื่นตกกระทบ เพื่อหยุดการเคลื่อนที่ในช่วงเวลา Δt ซึ่งเคลื่อนที่เป็นระยะทาง $c\Delta t$ ดังนั้น พลังงานที่เกิดขึ้นจากเป้ารับบนคลื่นที่ตกกระทบ (E_2) คือ

$$E_2 = Fc\Delta t \tag{2-9}$$



ภาพที่ 2-13 ความหนาแน่นของพลังงานคลื่นในแนวระนาบผ่านตัวกลางที่ไม่มีการดูดซับ [3]

ความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ (2-5) และ (2-6) เป็นไปตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 3 ของนิวตัน จะได้แรงดันการแผ่รังสีของคลื่นอัลตราซาวด์ ดังสมการ

$$IA\Delta t = Fc\Delta t \tag{2-10}$$

$$P = Fc = IA \tag{2-11}$$

สำหรับเป้ารับแบบสะท้อน จะเกิดแรงบนเป้ารับ 2 ครั้งด้วยกัน โดยครั้งแรกเกิดจากคลื่นตกกระทบบนเป้ารับ ส่วนครั้งที่สองเกิดจากคลื่นสะท้อนออกจากเป้ารับ ดังนั้น แรงดันการแผ่รังสีของคลื่นอัลตราซาวด์โดยใช้เป้ารับแบบสะท้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P = 2I \qquad (2\text{-}12)$$

2.8.2 วิธีการตุ้มน้ำหนัก

เป็นวิธีการหนึ่งของเทคนิคแรงการแผ่รังสี โดยจะดูค่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่เกิดขึ้นบนตัวเป้าหมายเมื่อวางตุ้มน้ำหนักลงบนแกนของเป้าหมายซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไปสำหรับบริษัทที่ทำหน้าที่สอบเทียบเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ โดยมีวิธีการคือนำแผ่นตุ้มน้ำหนักมาตรฐานที่มีค่าน้ำหนัก 100 มิลลิกรัม, 200 มิลลิกรัม, 500 มิลลิกรัม, 1 กรัม และ 2 กรัม มาวางลงบนแกนของตัวเป้าหมายที่ละค่าน้ำหนัก แล้วจึงอ่านค่าน้ำหนักที่ปรากฏบนหน้าจอแสดงผลของเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ จากนั้นนำค่าน้ำหนักที่อ่านได้มาคำนวณแปลงค่าเป็นกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ ซึ่งจากใบรับรองมาตรฐาน (Certificate) ที่แสดงดังภาคผนวก ข เป็นใบรับรองที่ได้จากการสอบเทียบเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์โดยวิธีใช้ตุ้มน้ำหนัก ซึ่งจะแสดงตัวอย่างวิธีการหาค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์ ดังตัวอย่างด้านล่าง

ตัวอย่างวิธีการคำนวณหาค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์โดยวิธีใช้ตุ้มน้ำหนักที่ค่า 1 กรัม โดยใช้น้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิ 20.8°C (1,484.8 m/s) และกำหนดให้ค่า g = 9.81 m/s

ตารางที่ 2-2 ผลการสอบเทียบเครื่องอัลตราซาวด์โดยใช้ตุ้มน้ำหนัก

น้ำหนักที่สอบเทียบ	ค่าน้ำหนักที่อ่านได้					
	1	2	3	4	5	6
1 g	1 g	1 g	1 g	1 g	1 g	1 g

คำนวณหาค่าเฉลี่ยของผลการวัด ($\bar{x}$)

$$\bar{x} = \frac{1g+1g+1g+1g+g+1g}{6}$$

$$\bar{x} = 1g$$

คำนวณหากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์

$$P = \frac{(1g/1000g)\times 9.81\times 1484.8}{\sin(90)^2} = 14.567W$$

จากการสอบเทียบเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์โดยการใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐานขนาด 1 กรัม ได้ค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์มีค่า 14.567 วัตต์ ซึ่งได้ค่าตรงกับที่แสดงผลในใบรับรองมาตรฐาน [3, 6]

2.9 เป้าหมายที่ใช้ในการสอบเทียบ (Target)

เป้าหมายที่นำมาใช้ในการสอบเทียบกำลังคลื่นอัลตราซาวด์จะต้องเกิดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากแรงดันที่เกิดจากสภาวะโดยรอบได้ดี โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ก็ต่อเมื่อเกิดจากคลื่นอัลตราซาวด์เท่านั้น ที่นิยมใช้โดยทั่วไปมี 2 ชนิดคือ

1. เป้าหมายที่ทำให้เกิดการดูดกลืน (Absorbing Target)

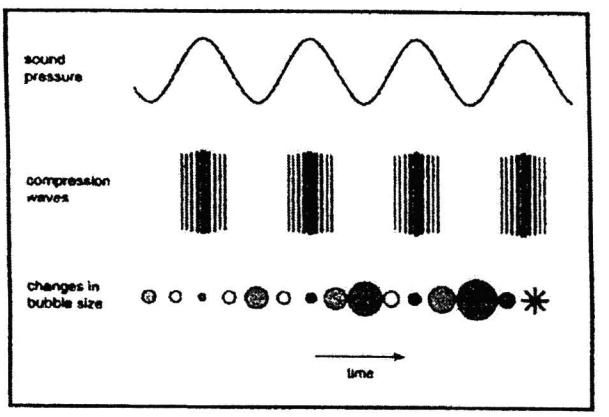
เป้าหมายชนิดนี้จะต้องมีคุณสมบัติทำให้เกิดการดูดกลืนมีค่าอย่างน้อย 99% ของคลื่น อัลตราซาวด์ที่มายังเป้าหมาย และต้องก่อให้เกิดการสะท้อนไม่เกิน 5% ซึ่งวัสดุที่นำมาทำจะเป็นยาง โดยจะมีลักษณะเป็นรูปวงกลมและเกิดการตัดให้มีลักษณะเป็นร่องที่บริเวณผิวด้านหน้า

2. เป้าหมายที่ทำให้เกิดการสะท้อน (Reflection Target)

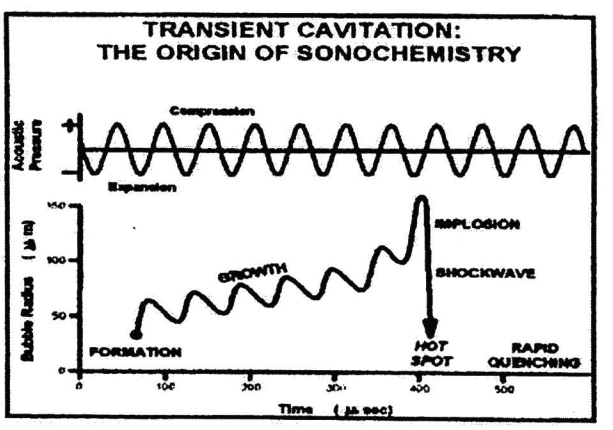
เป้าหมายแบบนี้ส่วนใหญ่จะทำมาจากโลหะบางๆ และมีแอร์แบค (air-backed) อยู่โดยรอบ มีความสามารถในการสะท้อน 100% โดยมุมการสะท้อนเมื่อคลื่นเดินทางมายังเป้าหมายจะมีค่าไม่เกิน 45 องศา [5]

2.10 ปรากฏการณ์แคปวิเตชั่น (Cavitation)

ปรากฏการณ์แคปวิเตชั่น หมายถึง กระบวนการที่เกิดขึ้นในตัวกลาง หรือสารละลายที่ได้รับคลื่นเสียงอัลตราซาวด์ โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีและทางกายภาพ (จากแรงกล) เนื่องมาจากฟองอากาศ (Bubbles) ที่เกิดขึ้น ซึ่งการที่ฟองอากาศเกิดขึ้นได้นั้นเนื่องมาจากโครงสร้างของของเหลวที่ได้รับคลื่นอัลตราซาวด์จะถูกบีบอัด (Compress) และคลายตัว (Stretch)ซ้ำไปมาเป็นจำนวนหลายพันรอบ ทำให้เกิดฟองอากาศขึ้นดังภาพที่ 2-14 และฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในของเหลวนี้จะสัมผัสกับแรงสั่นที่เกิดจากคลื่นอัลตราซาวด์เป็นระยะและเกิดการแลกเปลี่ยนแก๊สระหว่างกัน เป็นผลให้ฟองอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแตกออกในที่สุด แสดงดังภาพที่ 2-15



ภาพที่ 2-14 การเกิดฟองอากาศในตัวกลางเนื่องจากคลื่นอัลตราซาวด์ [2]



ภาพที่ 2-15 การเกิดฟองอากาศในตัวกลางเนื่องจากคลื่นอัลตราซาวด์ [2]

โดยน้ำที่นำมาใช้ในการสอบเทียบจะต้องป้องกันไม่ให้มีแก๊สในน้ำเพื่อป้องกันปรากฏการณ์คาวิเตชั่น ซึ่งฟองของแก๊สเพียงขนาดเล็กๆ ก็จะมีผลต่อค่าแอดเทนนูเอชั่น (Attenuation) ของคลื่นอัลตราซาวด์ให้มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยขณะที่ทำการสอบเทียบจะต้องป้องกันไม่ให้เกิดฟองอากาศขึ้น [2]