

การประมาณค่าการลดทอนอัลตราซาวด์โดยวิธีฟูรีเยร์เซนทรอยด์ชิฟ

มีชัย โลหะการ* และ อรอนงค์ วิริยานุรักษ์นคร**

บทคัดย่อ

ค่าการลดทอนสัญญาณอัลตราซาวด์ เป็นค่าที่มีความสำคัญค่าหนึ่ง เพราะเป็นค่าเฉพาะตัวของวัตถุแต่ละชนิด งานวิจัยนี้นำเสนอการประมาณค่าการลดทอนสัญญาณอัลตราซาวด์โดยวิธีฟูรีเยร์เซนทรอยด์ชิฟ (Fourier Centroid Shift) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ โดยสัญญาณอัลตราซาวด์ถูกจำลองขึ้นมาจากสมการคณิตศาสตร์โดยมีความถี่กลางอยู่ที่ 1 MHz และ 5 MHz โดยระบบที่จำลองขึ้นเป็นสัญญาณอัลตราซาวด์ที่ส่งเข้าไปในโลหะ ที่แช่อยู่ในน้ำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการหาค่าการลดทอนสัญญาณอัลตราซาวด์โดยวิธีฟูรีเยร์เซนทรอยด์ชิฟมีความผิดพลาดต่ำ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุที่ไม่เป็นแบบเนื้อเดียว เช่น เนื้อเยื่อและกระดูก เป็นต้น

คำสำคัญ: อัลตราซาวด์ สถิติฟูรีเยร์

1. บทนำ

ค่าการลดทอนของสัญญาณอัลตราซาวด์ (Ultrasonic Attenuation) เป็นหนึ่งในค่าที่มีความสำคัญค่าหนึ่งในการระบุลักษณะสมบัติของวัตถุต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น โลหะ อโลหะ หรือแม้กระทั่งเนื้อเยื่อ ดังงานวิจัย [1] เป็นการหาค่าลดทอนของแท่งทองแดงที่แช่อยู่ในน้ำโดยวิธี Angular Spectrum Approach โดยนำค่าการเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction Effect) มาพิจารณา และได้ทำการเปรียบเทียบวิธีที่ใช้กับการทดลองจริงด้วย ในงานวิจัย [2] เป็นการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectral Analysis) โดยวิธี Autoregressive (AR) ของ Yule-Walker สำหรับสัญญาณอัลตราซาวด์ เพื่อหาค่าการลดทอนของสัญญาณอัลตราซาวด์ในตัวกลางที่มีค่าการลดทอนสูง โดยได้สร้างแบบจำลองขึ้นมา และได้ทดลองกับสัญญาณที่จำลองขึ้น แต่ไม่ได้ทดลองวัตถุจริง นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในผิวหนังมนุษย์ [3] โดยใช้โหมดการสะท้อน (Reflection Mode)

ที่ความถี่ 20 MHz โดยสร้างแบบจำลองของสัญญาณ และเปรียบเทียบกับการวัดจริง พร้อมทั้งเปรียบเทียบค่าในเชิงสถิติในรูปแบบของ อายุ และเพศเพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์กับค่าการลดทอนของสัญญาณอัลตราซาวด์ ในงานวิจัย [4] ได้สร้างเนื้อเยื่อผสมขึ้นซึ่งประกอบขึ้นจากวัสดุหลายชนิด แล้วใช้ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ที่ความถี่ต่างกันคือ 5, 20 และ 50 MHz ได้ทำการวัด และคำนวณค่าการลดทอนแล้วเปรียบเทียบผลของทรานสดิวเซอร์ทั้งสามแบบ อีกทั้งยังนำค่าการลดทอนที่คำนวณได้ไปหาค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณอัลตราซาวด์ หรือที่เรียกว่า Ultrasonic Backscatter Coefficient อีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ นำเสนอวิธีการหาค่าการลดทอนของสัญญาณอัลตราซาวด์โดยวิธีฟูรีเยร์เซนทรอยด์ชิฟ ซึ่งเป็นวิธีใช้วิเคราะห์ในโดเมนความถี่ที่ให้การคำนวณที่มีความผิดพลาดน้อย และไม่ยุ่งยาก

2. คลื่นอัลตราซาวด์ (Ultrasonic Signal)

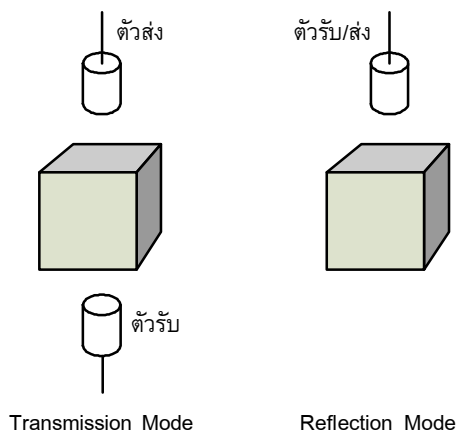
คลื่นอัลตราซาวด์นั้น หมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าขอบเขตการได้ยินของมนุษย์ เป็นคลื่นทางกายภาพเกิดซึ่งเกิดจากการสั่นของสื่อที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน โดยสามารถแบ่งการเคลื่อนที่ได้เป็นสองแบบคือ คลื่นตามยาว (Longitudinal wave) และคลื่นตามขวาง (Shear wave) ดังตารางที่ 1 โดยแตกต่างจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในรูปของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จากการที่คลื่นนี้มีความถี่สูงจึงทำให้มีความยาวคลื่นสั้น เป็นผลทำให้สามารถกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบจากการเลี้ยวเบน และจากการที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านช่องเปิดที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่น จากคุณสมบัติที่สามารถควบคุมทิศทางของคลื่นได้แม่นยำนี้เอง จึงทำให้คลื่นอัลตราซาวด์ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง ทั้งทางด้านการแพทย์ เช่น เครื่องอัลตราซาวด์ซึ่งใช้ในการตรวจสอบอวัยวะภายในร่างกาย ฯลฯ ทางด้านอุตสาหกรรม เช่น การทำความสะอาดพื้นผิว การเชื่อมต่อน็อต การตรวจสอบพื้นผิว ฯลฯ ทางด้าน

* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

** สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี



เครื่องมือวัดต่างๆ เช่น การวัดระยะทางต่างๆ การวัดความลึกของมหาสมุทร เป็นต้น โดยทั่วไปการวัดคลื่นอัลตราซาวด์ที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ โหมดส่งผ่าน (Transmission Mode) และ โหมดสะท้อน (Reflection Mode) ในภาพที่ 1 เป็นโหมดการวัดคลื่นอัลตราซาวด์ทั้ง 2 แบบ โดยแบบที่นิยมใช้เป็นโหมดสะท้อน เพราะตัวส่งและตัวรับอยู่ในตำแหน่งเดียวกันทำให้สะดวก และประหยัดในการใช้งาน เพราะสามารถใช้ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ตัวเดียวในการใช้งาน ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ เครื่องมืออัลตราซาวด์ในโรงพยาบาลต่างๆ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โหมดการวัดแบบสะท้อน และใช้ค่าความเร็วของคลื่นตามยาวในการออกแบบจำลอง



ภาพที่ 1 โหมดการวัดคลื่นอัลตราซาวด์

3. แบบจำลองคลื่นอัลตราซาวด์

คลื่นอัลตราซาวด์ สามารถเขียนโปรแกรมจำลองได้โดยใช้สมการที่ (1) อยู่ในรูปของฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian Function) และซายน์ เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นโลหะ และสะท้อนกลับ (Reflection) สามารถเขียนเป็นสมการอธิบายได้ดังสมการที่ (2) ซึ่งเป็นผลรวมสุดท้ายดังภาพที่ 4 และแสดงกราฟของฟังก์ชันต่าง ๆ ที่ใช้ในภาพที่ 2 ถึง 5

$$e(t) = \exp[-2\pi^2\sigma^2(t-t_0)^2] \sin(2\pi F_0 t) \quad (1)$$

โดย $e(t)$ คือ คลื่นตกกระทบ (Incident Wave)
 σ คือ Standard deviation = 0.709 MHz
 t_0 คือ เวลาเริ่มต้น (s)
 t คือ เวลา (s)
 F_0 คือ ความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิก (MHz)

$$s(t) = e(t) * h(t) \quad (2)$$

โดย $s(t)$ คือ คลื่นที่เดินทางไป-กลับในโลหะ (MHz)
 $*$ คือ การคอนโวลูชัน
 $h(t)$ คือ การตอบสนองของอิมพัลส์

การออกแบบ $h(t)$ สามารถทำได้ในโดเมนความถี่ดังสมการที่ (3) $H(f)$ เป็นการตอบสนองความถี่ (Frequency Response) ของ $h(t)$ โดย M คือ ตำแหน่งของขอบโลหะทั้ง 2 ด้าน Z เป็นระยะทางที่คลื่นอัลตราซาวด์เดินทาง β คือค่าการลดทอนของสัญญาณอัลตราซาวด์ เป็นตัวแปรหลักที่ต้องการหาในงานวิจัยนี้

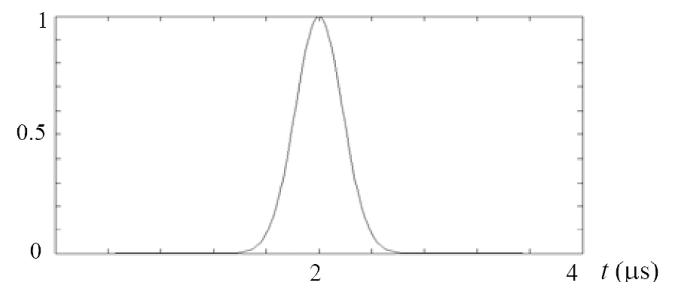
$$H(f) = \sum_M H_a^2(M, f) \cdot H_d(M, f) \quad (3)$$

$$H_a^2(M, f) = e^{-2Z\beta f} \quad (4)$$

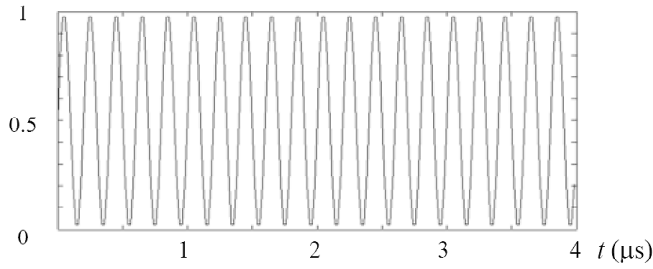
$$H_d(M, f) = \delta(Z) \quad (5)$$

ตารางที่ 1 ความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์ในวัสดุต่างๆ [5]

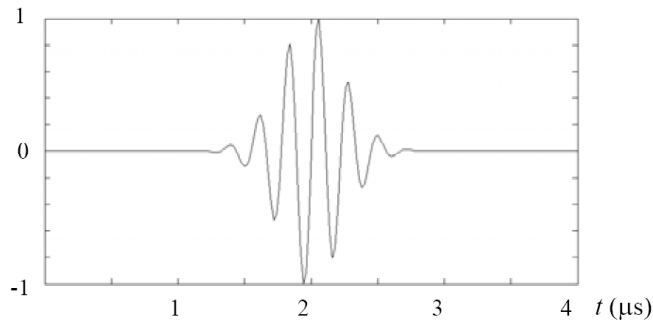
Material	Longitudinal Velocity (C)(mm/μs)
Aluminum	6.350
Brass	4.430
Copper	4.700
Plexiglas	2.680
Stainless	5.610
Steel	5.940
Water	1.494



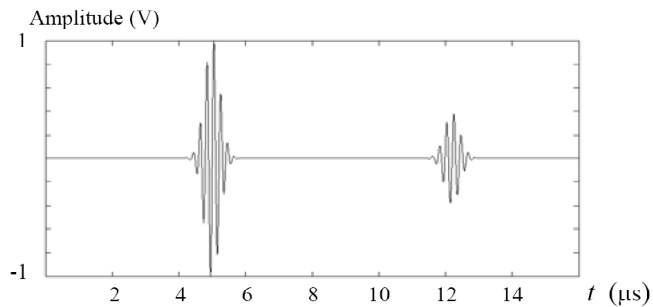
ภาพที่ 2 ฟังก์ชันเกาส์เซียนที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ 3 ข่ายโน้ความถี่ 5 MHz



ภาพที่ 4 ฟังก์ชัน $e(t)$



ภาพที่ 5 ฟังก์ชัน $s(t)$

ตารางที่ 2 ค่าการลดทอนสัญญาณอัลตราซาวด์ในเนื้อเยื่อ [5]

Tissue	Characteristic Impedance $\rho_0 c$ (10^6Ns/m^3)	Attenuation at 1 MHz (dB/cm)
Blood	1-62	0.2
Spleen	1-6	0.4
Liver	1-65	0.7
Fat	1-38	0.8
Brain	1-60	0.8
Muscle	1.65-1.74	1.5-2.5
Bone	3.2-7.4	11
Lung	0.26-0.46	40
(Water)	1.49	0.002

4. ฟูริเยร์เซนทรอยด์ชิฟต์ (Fourier Centroid Shift)

หัวข้อนี้กล่าวถึง การประมาณค่าการลดทอนของสัญญาณอัลตราซาวด์ในวัสดุ โดยวิธี ฟูริเยร์เซนทรอยด์ชิฟต์ เริ่มต้นจากสัญญาณอัลตราซาวด์ $s(t)$ (ดังภาพที่ 5) สะท้อนจากวัตถุและถูกทำให้เป็นตัวเลข (Digitized) จากการสุ่มระยะห่างของตัวอย่าง (Sampling interval) $t = 1/F_s$ ใน N ตัวอย่าง เมื่อ $F_s =$ ความถี่แซมปลิง $T =$ สัญญาณดูเรชั่น (Signal duration) ต่อมาให้วินโดว์เคลื่อนที่ด้วยขั้นที่คงที่บนสัญญาณสะท้อนกลับ ($s(t)$) ประมาณค่าลดทอนจากความถี่ศูนย์กลางหาได้จากสมการที่ (6) โดยโมเมนต์ลำดับต่างๆ สามารถหาได้ดังสมการที่ (7)

$$f_c(\tau_i) = \frac{m_1(\tau_i)}{m_0(\tau_i)} \quad (6)$$

โดย $f_c(t_i)$ คือ ความถี่ศูนย์กลาง (MHz)
 m_0 คือ โมเมนต์ลำดับที่ 0
 m_1 คือ โมเมนต์ลำดับที่ 1
 t คือ ตำแหน่งของวินโดว์บนสัญญาณ $s(t)$

$$m_j(\tau_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} f^j \cdot S(\tau_i, f) \cdot df \quad (7)$$

โดย f คือ ความถี่ (MHz)
 $s(t, f)$ คือ สเปกตรัม ณ ตำแหน่งวินโดว์ที่ใช้

ต่อมาทำการวิเคราะห์สเปกตรัม โดยเพิ่มความแปรปรวนของการประมาณค่า โดยค่าความแปรปรวนสามารถหาได้จากสมการที่ (9) ภายในแบนวิธ (Bandwidth) ดังนั้นค่าการลดทอนของสัญญาณอัลตราซาวด์ สามารถประมาณให้เป็นเชิงเส้นโดยขึ้นอยู่กับความถี่ดังแสดงในสมการที่ (10)

$$\beta = \frac{-8.68}{C\sigma^2(\tau)} \cdot \frac{df_c}{d\tau} \quad (8)$$

โดย β คือ สัมประสิทธิ์การลดทอน dB/cmMHz
 C คือ ความเร็วอัลตราซาวด์ในเนื้อเยื่อ (cm/sec)
8.68 คือ ค่าคงที่ที่เปลี่ยนหน่วยจาก neper เป็น dB
 df_c คือ ความแตกต่างของความถี่ศูนย์กลาง (MHz)
 $d\tau$ คือ ความแตกต่างของตำแหน่งของวินโดว์ (sec)



$$\sigma^2(\tau_i) = \frac{m_2(\tau_i)}{m_0(\tau_i)} - \left(\frac{m_1(\tau_i)}{m_0(\tau_i)} \right)^2 \quad (9)$$

โดย σ^2 คือ ค่าความแปรปรวน (MHz²)
 m คือ โมเมนต์ลำดับต่าง ๆ
 τ_i คือ ตำแหน่งของวินโดว์บนสัญญาณ $s(t)$

$$\alpha(f) = \beta \cdot f \quad (10)$$

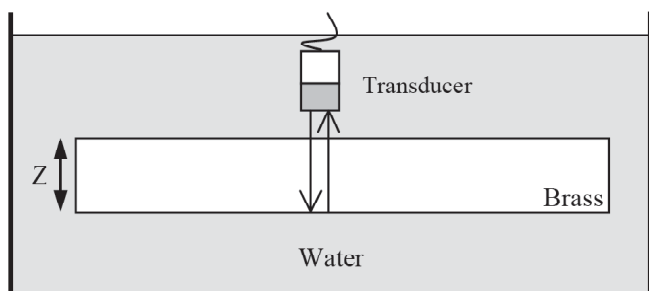
ดังนั้น สัมประสิทธิ์การลดทอนของสัญญาณอัลตราซาวด์สามารถหาได้จากความแตกต่างของความถี่ศูนย์กลาง dfc ความแตกต่างของตำแหน่งวินโดว์ $d\tau$ ค่าความแปรปรวนและความเร็วของอัลตราซาวด์ในวัสดุดังแสดงในสมการที่ (8) แต่ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่หาได้มีหน่วยเป็น Neper/cmMHz โดยสามารถเปลี่ยนเป็นหน่วย dB/cmMHz ซึ่งเป็นหน่วยที่นิยมใช้กัน ได้ดังสมการที่ (11)

$$\beta[\text{dB/cmMHz}] = 8.68 \cdot \beta[\text{Neper/cmMHz}] \quad (11)$$

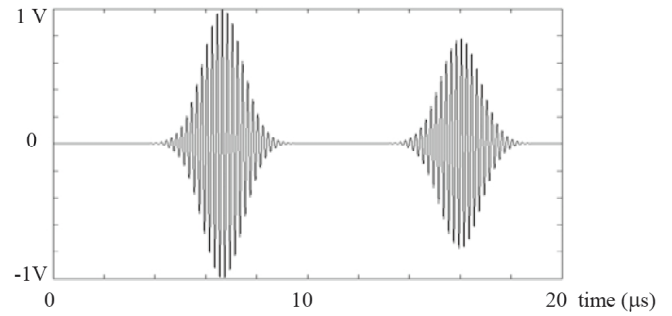
5. ผลการทดลอง

5.1 การจำลองทางตัวเลข (Numerical Simulation)

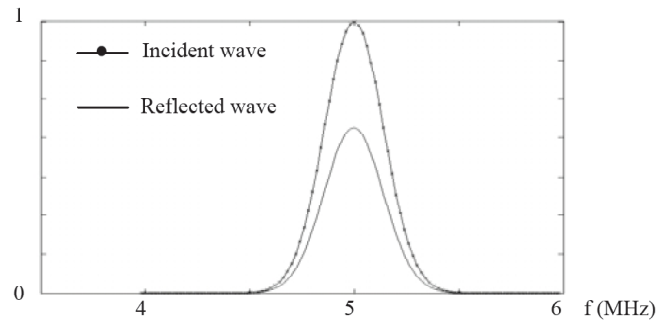
การทดลองได้สร้างระบบที่ต้องการวัด ดังภาพที่ 6 โดยทำการสร้างสัญญาณอัลตราซาวด์จำลองขึ้นมาที่ความถี่ 5 MHz ซึ่งสอดคล้องกับทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้วัดจริง จากสมการที่ (1) ถึง (5) โดยคลื่นอัลตราซาวด์ถูกแรกเกิดจากผิวของโลหะด้านบนและคลื่นลูกที่สองเกิดจากผิวโลหะด้านล่างซึ่งระยะห่างของคลื่นทั้งสอง เป็นไปตามระยะ Z ซึ่งสัมพันธ์กับสมการที่ (2) ส่วนขนาดของคลื่นลูกที่สอง ที่เล็กลงเป็นไปตามสมการที่ (4) การทดลองจะนำค่าการลดทอนไปใส่ในคลื่นอัลตราซาวด์ที่สร้างขึ้น จากนั้นใช้วิธีฟูรีเยร์เซนทรอยด์หาค่าการลดทอนนั้น แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่ใส่ไปในสูตรการคำนวณ ซึ่งค่าที่ได้ควรมีค่าที่เท่ากัน



ภาพที่ 6 ระบบที่ใช้ทดลอง



ภาพที่ 7 สัญญาณ $s(t)$ ที่ความถี่ 5 MHz



ภาพที่ 8 สเปกตรัมของสัญญาณ $s(t)$

$$\text{Error}(\%) = \frac{|\beta_{\text{theory}} - \beta_{\text{estimation}}|}{\beta_{\text{theory}}} \cdot 100 \quad (12)$$

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่คำนวณได้

β (dB/cmMHz)	Fourier Centroid Shift Method	
	1 MHz	5 MHz
0.1	0.1124	0.1001
0.3	0.3032	0.2998
0.5	0.5004	0.4997
0.7	0.7000	0.6995
1.0	1.0000	0.9993
1.5	1.5000	1.4989
2.0	2.0000	1.9986
3.0	3.0000	2.9978

ตารางที่ 4 ค่าความผิดพลาด

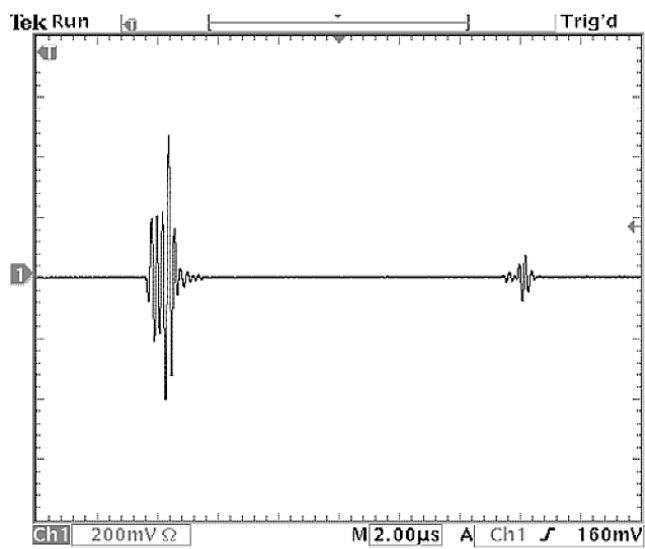
β (dB/cmMHz)	Error (%)	
	1 MHz	5 MHz
0.1	12.4000	0.1000
0.3	1.0667	0.0667
0.5	0.0800	0.0600
0.7	0.0000	0.0714
1.0	0.0000	0.0700
1.5	0.0000	0.0733
2.0	0.0000	0.0700
3.0	0.0000	0.0733

5.2 การทดลองจริง

การทดลองจริงได้เตรียมอุปกรณ์ไว้ดังตารางที่ 5 โดยใช้การวางระบบดังภาพที่ 6 ซึ่งได้ทำการติดตั้งให้เหมือนกับการจำลองทางตัวเลขในหัวข้อ 5.1 เพื่อพิสูจน์ว่าวิธีการฟูรีเยร์-เซนทรอยด์ชิฟต์สามารถหาค่าได้จริง และถูกต้อง แท่งโลหะที่ใช้เป็นแท่งทองเหลืองขนาดความหนา 25 mm ที่มีค่าการลดทอนของสัญญาณอัลตราซาวด์ 0.5 dB/cmMHz [6] สัญญาณจากทรานสดิวเซอร์ถูกส่งผ่านทาง ช่องต่อ GPIB ของดิจิตอลออสซิลโลสโคป ซึ่งนำค่าไปเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ดังภาพที่ 9 และสเปกตรัมของสัญญาณแสดงไว้ในภาพที่ 10 จากนั้นนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าการลดทอนโดยวิธีฟูรีเยร์เซนทรอยด์ชิฟ ได้ค่าการลดทอนเท่ากับ 0.4415 dB/cmMHz ซึ่งมีความแตกต่างจากค่าการจำลองประมาณ 11%

ตารางที่ 5 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

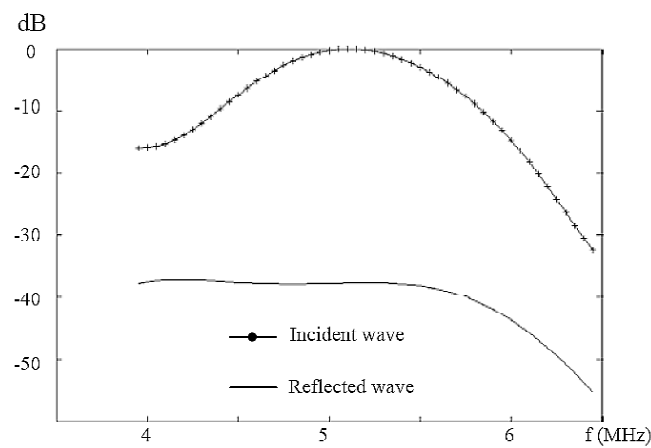
Instrument/Device	Model
Pulse Generator	Panametrics: Model 500PR
Digital Scope	Tektronix: TDS3012
Ultrasonic Transducer	Panametrics: Model V309



ภาพที่ 9 สัญญาณอัลตราซาวด์ที่วัดจากสโคป

6. สรุป

สัญญาณอัลตราซาวด์ เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เพราะมีความปลอดภัยในการใช้งาน งานวิจัยนี้เป็นการหาค่าการลดทอนของสัญญาณอัลตราซาวด์โดยใช้วิธี Fourier Centroid Shift กับสัญญาณอัลตราซาวด์จำลองที่ความถี่ 1 MHz และ 5 MHz ซึ่งเป็นการวิเคราะห์สัญญาณ



ภาพที่ 10 สเปกตรัมของสัญญาณที่วัดได้จากสโคป

ในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าวิธีการวิธีฟูรีเยร์เซนทรอยด์ชิฟสามารถหาค่าการลดทอนได้ถูกต้อง อย่างไรก็ตามสัญญาณอัลตราซาวด์ที่จำลองขึ้นนั้น เป็นสัญญาณในแท่งโลหะซึ่งมีความซับซ้อนน้อย และยังไม่ได้คิดค่าการเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction Effect) โดยผลของงานวิจัยนี้จะถูกนำไปพัฒนาต่อให้สามารถหาค่าการลดทอนในตัวกลางที่เป็นเนื้อเยื่อจริง เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ทางการแพทย์ได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.ศิริเดช บุญแสง แห่งห้องวิจัย PASS LAB และรศ.ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ แห่งห้องวิจัย Biomedical Signal and Imaging LAB ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์การทดลอง

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ping Wu, Tadeusz Stepinski “Quantitative estimation of ultrasonic attenuation in a solid in the immersion case with correction of diffraction effects,” Ultrasonics, Elsevier,38, 2000, pp.481-485.
- [2] T. Baldeweck, P. Laugier, A. Herment, G. Berge r (1995): “Application of Autoregressive Spectral Analysis for Ultrasound Attenuation Estimation Interest in Highly Attenuating Medium,” IEEE Transactions on Ferro-electrics and frequency control, 42, 1995, pp.99-110.
- [3] Celine Fournier, S. Lori Bridal, Alain Coron, Pascal Laugier “Optimization of Attenuation Estimation



in Reflection for In Vivo Human Dermis Characterization at 20 MHz," IEEE Transactions on Ferroelectrics and frequency control, 50, 2003, pp.408-418.

- [4] Valery Roberjot, S. Lori Bridal, Pascal Laugier, Genevieve Berger "Absolute Backscatter Coefficient over a Wide Range for Frequencies in a Tissue-Mimicking Phantom Containing Two Populations of Scatters," IEEE Transactions on Ferroelectrics

and frequency control, 1998, 43, pp.970-978.

- [5] Heinrich Kuttruff. (1991): "Ultrasonics Fundamentals and Applications," ELSEVIER Applied Science, 1991.
- [6] V. R. Singh and Ashok Kumar (1995): "Development of A Focused Ultrasonic Transducer with Increased Efficiency," Proceedings of IEEE-EMBS, 1995, pp.4.47-4.48.

