

การประมาณค่าดิสเปอรัชันของอัลตราซาวด์ โดยวิธีฟูรีเยร์เซนทรอยด์ชีพและความสัมพันธ์คาร์เมอร์-โครนิก

มีชัย โลหะการ*

บทคัดย่อ

ค่าดิสเปอรัชันของสัญญาณอัลตราซาวด์ เป็นค่าที่มีความสำคัญค่าหนึ่ง เพราะเป็นค่าเฉพาะตัวของวัตถุแต่ละชนิด งานวิจัยนี้นำเสนอการประมาณค่าดิสเปอรัชันของสัญญาณอัลตราซาวด์ โดยวิธีฟูรีเยร์เซนทรอยด์ชีพพร้อมกับความสัมพันธ์คาร์เมอร์-โครนิก ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ โดยสัญญาณอัลตราซาวด์ถูกจำลองขึ้นมาจากสมการคณิตศาสตร์ซึ่งมีความถี่กลางอยู่ที่ 1 MHz และ 5 MHz โดยระบบที่จำลองขึ้นเป็นสัญญาณอัลตราซาวด์ที่ส่งเข้าไปในแท่งทองเหลืองที่แช่อยู่ในน้ำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการหาค่าดิสเปอรัชันของสัญญาณอัลตราซาวด์วิธีนี้มีความผิดพลาดที่ยอมรับได้ การคำนวณไม่ยุ่งยาก และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุที่ไม่เป็นแบบเนื้อเดียว เช่น เนื้อเยื่อจำลอง และกระดูก เป็นต้น

คำสำคัญ: อัลตราซาวด์ สถิติฟูรีเยร์ ดิสเปอรัชันของอัลตราซาวด์

1. บทนำ

ดิสเปอรัชันของอัลตราซาวด์ (Ultrasonic Dispersion) คือปรากฏการณ์ที่ค่าความเร็วอัลตราซาวด์ในวัตถุมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ การหาค่าดิสเปอรัชันนั้นมีหลายวิธี โดยแสดงไว้ในเอกสารอ้างอิง [1-3] เป็นการหาค่าดิสเปอรัชันโดยใช้แบบจำลองแบบวิธีฟอร์เวิร์ดโมเดล (Forward model) ซึ่งแบบจำลองที่สร้างขึ้นและเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่วัดจริง โดยวิธีดังกล่าวข้างต้นจะทำการปรับค่าตัวแปรโดยวิธีแมกซ์ลิคไลด์ลีสต์ (Maximum likelihood Estimator) นอกจากนี้ในวิธีที่แสดงในเอกสารอ้างอิง [4-6] ได้ใช้วิธีการวัดแบบทรานสมิชชัน (Transmission mode) ในการหาค่าดิสเปอรัชัน และเปรียบเทียบกับค่าจากการทดลอง โดยนำค่าที่

วัดได้จากคลื่นตกกระทบ (Incident wave) และคลื่นสะท้อน (Reflected wave) นอกจากนี้การหาค่าดิสเปอรัชันนั้นยังสามารถหาได้โดยใช้ความสัมพันธ์คาร์เมอร์-โครนิก (Kramer-Kronig relationship) [7-9] ค่าดิสเปอรัชันยังสามารถนำไปประยุกต์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของอัลตราซาวด์ (Ultrasonic attenuation coefficient) [10] สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Backscatter coefficient) [11] และขนาดของตัวแปรกระจาย (Scatter size) [12]

ในงานวิจัยนี้เป็นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการประมาณค่าดิสเปอรัชันของอัลตราซาวด์ในวัตถุ โดยใช้วิธีฟูรีเยร์เซนทรอยด์ชีพ ร่วมกับทฤษฎีความสัมพันธ์คาร์เมอร์-โครนิก (Kramers-Kronig Relation) ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) ที่ให้ผลการคำนวณที่มีความผิดพลาดน้อย และไม่ยุ่งยาก โดยละการคำนวณในส่วนของการเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction effect) ไว้ จากนั้นได้ทดสอบแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับสัญญาณอัลตราซาวด์จำลอง เพื่อเป็นการยืนยันว่าวิธีการนี้ถูกต้องผู้วิจัยได้ทำการทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบผลกับการคำนวณด้วย

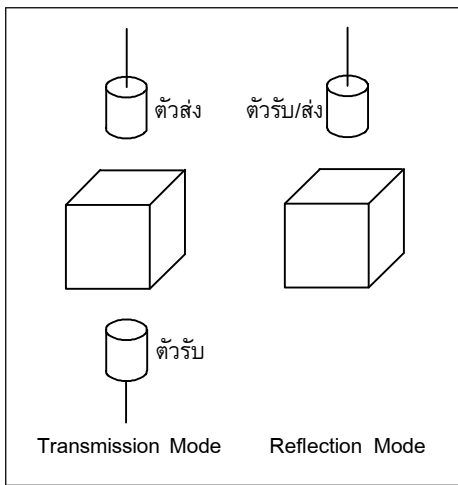
2. คลื่นอัลตราซาวด์ (Ultrasonic Signal)

คลื่นอัลตราซาวด์ หมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าขอบเขตการได้ยินของมนุษย์ เป็นคลื่นทางกายภาพซึ่งเกิดจากการสั่นของสื่อที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน โดยสามารถแบ่งการเคลื่อนที่ได้เป็นสองแบบคือ คลื่นตามยาว (Longitudinal wave) ดังตารางที่ 1 และคลื่นตามขวาง (Shear wave) โดยแตกต่างจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในรูปของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก จากการที่คลื่นนี้มีความถี่สูงจึงทำให้มีความยาวคลื่นสั้น เป็นผลทำให้สามารถกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบจากการเลี้ยวเบน และจากการที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านช่องเปิดที่มี

* ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่น จากคุณสมบัติที่สามารถควบคุมทิศทางของคลื่นได้แม่นยำนี้เอง จึงทำให้คลื่นอัลตราซาวด์ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง ทั้งทางการแพทย์ เช่น เครื่องอัลตราซาวด์ซึ่งใช้ในการตรวจสอบอวัยวะภายในร่างกายทางด้านอุตสาหกรรม เช่น การทำความสะอาดพื้นผิว การเชื่อมต่อวัสดุ การตรวจสอบพื้นผิว ทางด้านเครื่องมือวัดต่างๆ เช่น การวัดระยะทางต่างๆ การวัดความลึกของมหาสมุทร เป็นต้น โดยทั่วไปการวัดคลื่นอัลตราซาวด์ที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ โหมดส่งผ่าน (Transmission Mode) และโหมดสะท้อน (Reflection Mode) ในภาพที่ 1 เป็นโหมดการวัดคลื่นอัลตราซาวด์ทั้ง 2 แบบ โดยแบบที่นิยมใช้เป็นโหมดสะท้อน เพราะตัวส่งและตัวรับอยู่ในตำแหน่งเดียวกันทำให้สะดวก และประหยัดในการใช้งาน เพราะสามารถใช้ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ตัวเดียวในการใช้งาน ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ เครื่องมืออัลตราซาวด์ในโรงพยาบาลต่างๆ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โหมดการวัดแบบสะท้อน และใช้ค่าความเร็วของคลื่นตามยาวในการออกแบบแบบจำลอง



ภาพที่ 1 โหมดการวัดคลื่นอัลตราซาวด์

3. แบบจำลองคลื่นอัลตราซาวด์

คลื่นอัลตราซาวด์ สามารถเขียนโปรแกรมจำลองได้โดยใช้สมการที่(1) อยู่ในรูปของฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian Function) และไซน์ (Sine) เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นโลหะ และสะท้อนกลับ (Reflection) สามารถเขียนเป็นสมการอธิบายได้ดังสมการที่ (2) ซึ่งเป็นผลรวมสุดท้ายดังภาพที่ 4 และแสดงกราฟของฟังก์ชันต่างๆ 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^2 คือ ความแปรปรวน = 0.709 MHz
 t_0 คือ เวลาเริ่มต้น (s)
 t คือ เวลา (s)
 F_0 คือ ความถี่ของคลื่นอัลตราซาวด์ (MHz)

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

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

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

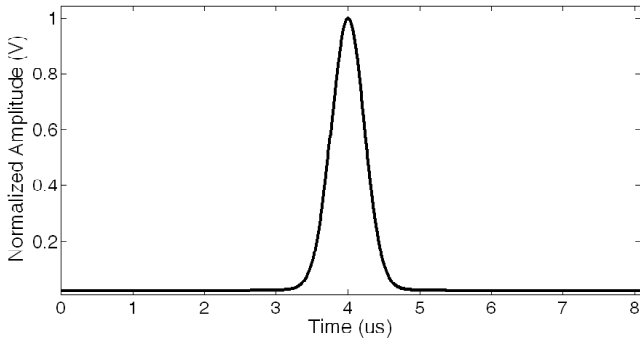
$$H(f) = \sum_M H_a^2(M, f) \cdot H_d(M, f) \quad (3)$$

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

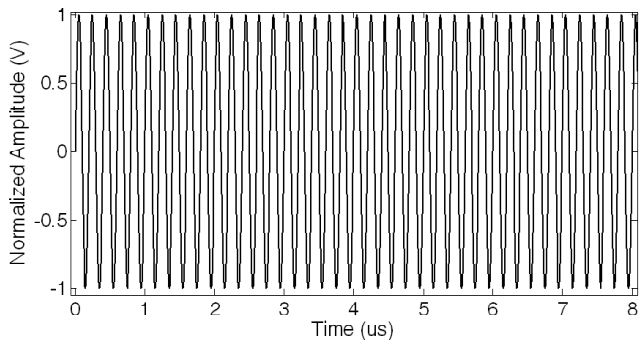
$$H_d(M, f) = \delta(Z) \quad (5)$$

ตารางที่ 1 ความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์ในวัสดุต่างๆ [13]

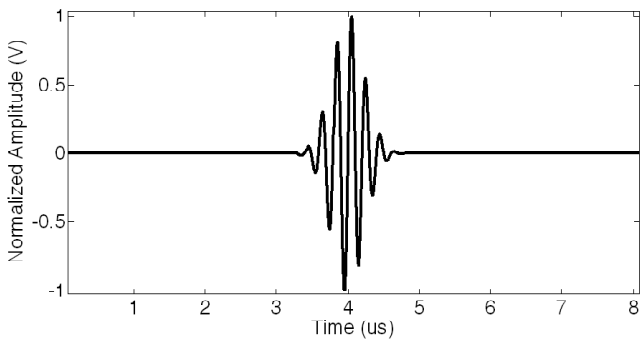
Material	Longitudinal Velocity (C) (mm / μ s)
Aluminum	6.350
Brass	4.430
Copper	4.700
Plexiglas	2.680
Stainless	5.610
Steel	5.940
Water	1.494



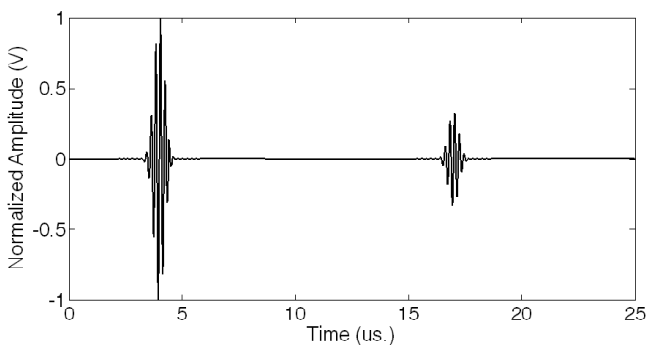
ภาพที่ 2 พังชนแกสเซียนที่ใช้ในงานวิจัยที่มี $\sigma = 0.709$



ภาพที่ 3 ข่ายความถี่ 5 MHz



ภาพที่ 4 พังกซ์ $e(t)$



ภาพที่ 5 พังกซ์ $s(t)$

ตารางที่ 2 ค่าการลดทอนสัญญาณอัลตราซาวด์ในเนื้อเยื่อ [5]

Tissue	Characteristic Impedance $\rho_0 c$	Attenuation at 1 MHz (dB/cm)
Blood	1-62	0.2
Liver	1-65	0.7
Fat	1-38	0.8
Brain	1-60	0.8
Lung	0.26-0.46	40
(Water)	1.49	0.002

4. ฟูริเยร์เซนทรอยด์ชิฟ (Fourier Centroid Shift)

หัวข้อนี้กล่าวถึง การประมาณค่าการลดทอนของสัญญาณอัลตราซาวด์ในวัตถุ โดยวิธีฟูริเยร์เซนทรอยด์ชิฟ เริ่มต้นจากสัญญาณอัลตราซาวด์ $s(t)$ (ดังภาพที่ 5) สะท้อนจากวัตถุ และถูกทำให้เป็นตัวเลข (Digitized) จากการสุ่มระยะห่างของตัวอย่าง (Sampling interval) $t = 1/F_s$ ใน N ตัวอย่าง เมื่อ $F_s =$ ความถี่แซมปลิง $T =$ สัญญาณดูเรชั่น (Signal duration) ต่อมาให้วินโดว์เคลื่อนที่ด้วยระดับที่คงที่บนสัญญาณสะท้อนกลับ $(s(t))$ ประมาณค่าลดทอนจากความถี่ศูนย์กลางหาได้จากสมการที่ (6) โดยโมเมนต์ลำดับต่างๆ สามารถหาได้ดังสมการที่ (7) [14, 15]

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

โดย $f_c(\tau_i)$ คือ ความถี่ศูนย์กลาง (MHz)

m_0 คือ โมเมนต์ลำดับที่ 0

m_1 คือ โมเมนต์ลำดับที่ 1

τ 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

$S(\tau_i, f)$ คือ สเปกตรัม ณ ตำแหน่งวินโดว์ที่ใช้

ต่อมาทำการวิเคราะห์สเปกตรัม โดยเพิ่มความแปรปรวนของการประมาณค่า โดยค่าความแปรปรวนสามารถหาได้จากสมการที่ (9) ภายในแบนด์วิธ (Bandwidth) ดังนั้นค่าการลดทอนของสัญญาณอัลตราซาวด์ สามารถประมาณให้เป็นเชิงเส้นโดยขึ้นอยู่กับความถี่ที่แสดงในสมการที่ (10)



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

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 df_c ความแตกต่างของตำแหน่งวินโดว์ dt ค่าความแปรปรวนและความเร็วของอัลตราซาวด์ในวัสดุที่แสดงในสมการที่ (8) แต่ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนที่หาได้มีหน่วยเป็น Neper/cmMHz โดยสามารถเปลี่ยนเป็นหน่วย dB/cmMHz ซึ่งเป็นหน่วยที่นิยมใช้กันได้ดังสมการที่ (11)

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

5. ความสัมพันธ์ค่าเมอร์โครนิค

จากที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าค่าดิสเพอร์ชัน และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของอัลตราซาวด์นั้นมีความสัมพันธ์กันโดยหากรู้ค่าใดค่าหนึ่งจะสามารถหาอีกค่าได้ กล่าวคือหากรู้ค่าดิสเพอร์ชันก็สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนได้ และในทางกลับกันหากรู้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนก็สามารถหาค่าดิสเพอร์ชันได้เช่นกัน ความสัมพันธ์คาร์เมอร์โครนิคได้มีคณะวิจัยได้ทำการศึกษาและสรุปไว้ในเอกสารอ้างอิงที่ [7] ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำความสัมพันธ์คาร์เมอร์โครนิคไปคำนวณค่าดิสเพอร์ชัน

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์คาร์เมอร์โครนิค

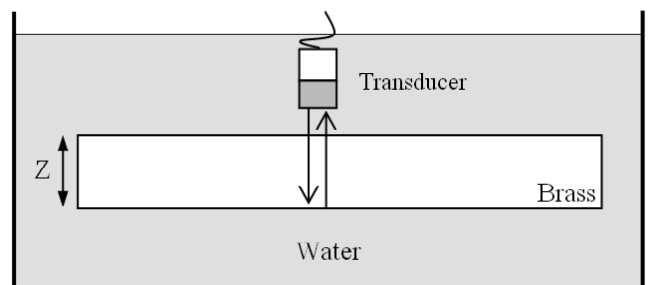
Order	Power Law	Kramers-Krönig relation
n odd	$y = n$	$\frac{1}{c(\omega)\omega^{n-1}} - \frac{1}{c(\omega_0)\omega_0^{n-1}} \approx -\frac{2}{\pi} \beta \ln \left \frac{\omega}{\omega_0} \right $
Order	Power Law	Kramers-Krönig relation
n even	$n - 1 < y < n + 1$	$\frac{-1}{c(\omega)} + \frac{1}{c(\omega_0)} = \alpha_0 \tan\left(\frac{\pi}{2} y\right) (\omega^{y-1} - \omega_0^{y-1})$

โดย $c(\omega)$ คือ ค่าดิสเพอร์ชันของอัลตราซาวด์
 ω_0 คือ ความถี่อ้างอิง (Reference Frequency)
 n คือ เลขยกกำลังซึ่งหากเป็นเลขคี่ให้ใช้สูตรแรก

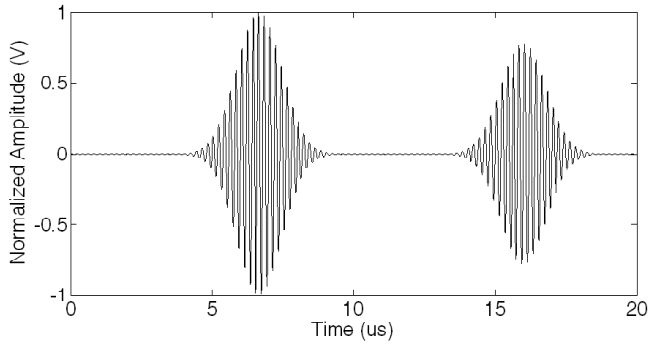
6. ผลการทดลอง

6.1 การจำลองทางตัวเลข (Numerical Simulation)

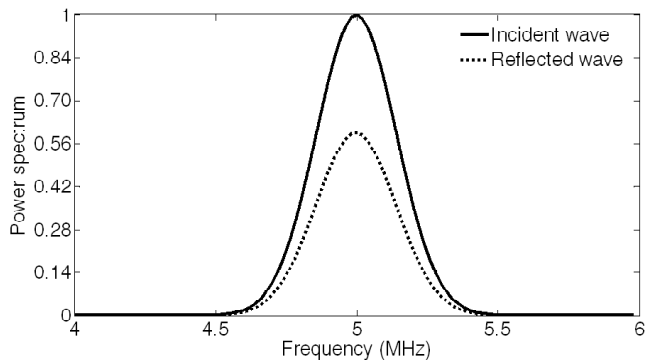
การทดลองได้สร้างระบบที่ต้องการวัด ดังภาพที่ 6 โดยทำการสร้างสัญญาณอัลตราซาวด์จำลองขึ้นมาที่มีความถี่ 5 MHz ซึ่งสอดคล้องกับทรานสดิวเซอร์ที่ใช้วัดจริง จากสมการที่ (1) ถึง (5) โดยคลื่นอัลตราซาวด์ถูกแรกเกิดจากผิวของโลหะด้านบน และคลื่นลูกที่สองเกิดจากผิวโลหะด้านล่าง ซึ่งระยะห่างของคลื่นทั้งสองเป็นไปตามระยะ Z ซึ่งสัมพันธ์กับสมการที่ (2) ส่วนขนาดของคลื่นลูกที่สองซึ่งเล็กลงเป็นไปตามสมการที่ (4) การทดลองได้นำค่าการลดทอนไปใส่ในคลื่นอัลตราซาวด์ที่สร้างขึ้นดังภาพที่ 7 จากนั้นแปลงสัญญาณให้อยู่ในโดเมนความถี่ดังภาพที่ 8 แล้วใช้วิธีฟูรีเยร์เซนทรอยด์ซิมทำการคำนวณหาค่าการลดทอนนั้น แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่ใส่ไปในสูตรการคำนวณ ซึ่งค่าที่ได้ควรมีค่าที่เท่ากันดังตารางที่ 4 และค่าความผิดพลาดของการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 5



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 4 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

6.2 การทดลองจริง

การทดลองจริงได้เตรียมอุปกรณ์ไว้ดังตารางที่ 6 โดยใช้การวางระบบดังภาพที่ 7 ซึ่งได้ทำการติดตั้งให้เหมือนกับการจำลองทางตัวเลขในหัวข้อ 6.1 เพื่อพิสูจน์ว่าวิธีการฟูริเยร์เซน-

ตารางที่ 5 ค่าความผิดพลาด

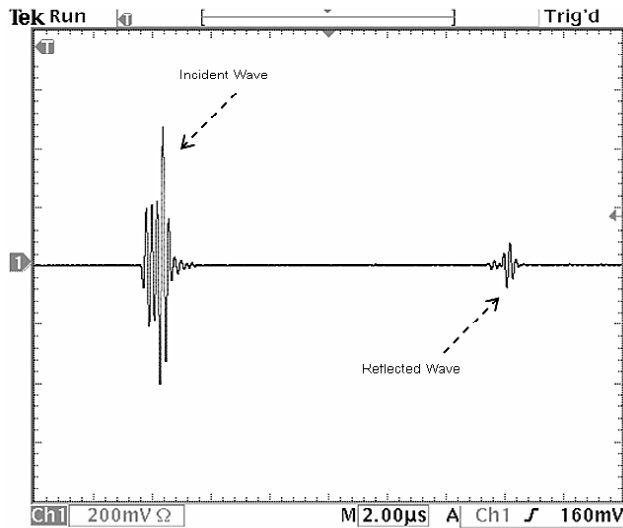
β (dB/cmMHz)	Error (%)	
	1 MHz	5 MHz
0.1	12.4000	0.1000
0.3	1.0667	0.0667
0.5	0.0800	0.0600
0.7	0.0000	0.0714
1.0	0.0000	0.0700
1.5	0.0000	0.0733
2.0	0.0000	0.0700
3.0	0.0000	0.0733

ทรอยด์ชิฟท์สามารถหาค่าได้จริงและถูกต้อง แท่งโลหะที่ใช้เป็นแท่งทองเหลืองขนาดความหนา 25 mm ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของสัญญาณอัลตราซาวด์ 0.5 dB/cmMHz [16] สัญญาณจากทรานสดิวเซอร์ถูกส่งผ่านทาง ช่องต่อ GPIB ของ ดิจิตอลออสซิลโลสโคปซึ่งนำค่าไปเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ ดังภาพที่ 11 และสเปกตรัมของสัญญาณแสดงไว้ในภาพที่ 12 จากนั้นนำค่าที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าการลดทอนโดยวิธีฟูริเยร์เซนทรอยด์ชิฟท์ ได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเท่ากับ 0.4485 dB/cmMHz ซึ่งมีความแตกต่างจากค่าการจำลองประมาณ 10.3%

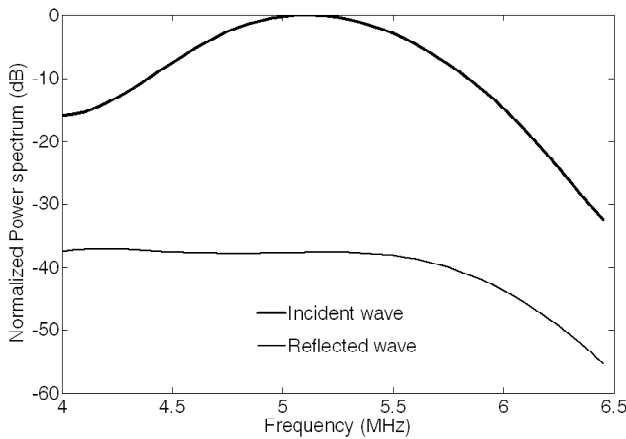
จากความสัมพันธ์ค่าเมอริโครนิกในหัวข้อที่ 5 สามารถหาค่าดิสเปอร์ชันได้จากค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน เพื่อความง่ายในการคำนวณได้เลือกใช้ค่า $n=1$ ในตารางที่ 3 และเลือกใช้ $\omega_0 = 5$ MHz ซึ่งเป็นความถี่เดียวกับความถี่กลางของทรานสดิวเซอร์ที่เลือกใช้ และ $c(\omega_0) = 4,430$ m/s ซึ่งเป็นค่าความเร็วในทองเหลืองในตารางที่ 1 หลังจากแทนค่าต่างๆ แล้วได้ค่าดิสเปอร์ชันดังภาพที่ 13

ตารางที่ 6 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

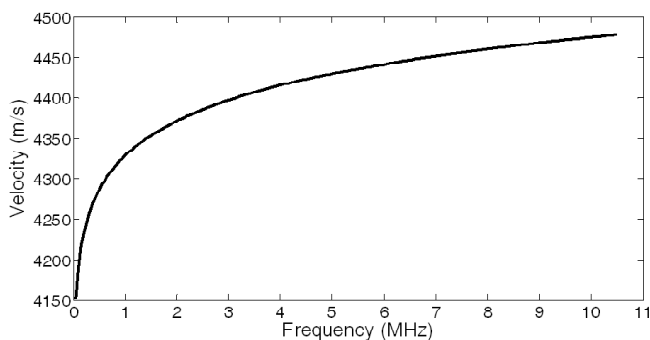
Instrument/Device	Model
Pulse Generator	Panametrics: Model500PR
Digital Scope	Tektronix: TDS3012
Ultrasonic Transducer	Panametrics: Model V309



ภาพที่ 11 สัญญาณอัลตราซาวด์ที่วัดจากสโคป



ภาพที่ 12 สเปกตรัมของสัญญาณที่วัดได้จากสโคป



ภาพที่ 13 ค่าดิสเปอรัชันที่คำนวณจากความสัมพันธ์ค่าแอมป์ครอนิก

7. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการหาค่าดิสเปอรัชันของสัญญาณอัลตราซาวด์โดยใช้วิธีฟูรีเยอร์เซนทรอยด์ซัพหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน

ทอนจากนั้นนำค่าที่ได้ไปหาค่าดิสเปอรัชันจากความสัมพันธ์ค่าแอมป์ครอนิกโดยได้ทดสอบการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณอัลตราซาวด์จากแบบจำลองที่ความถี่ 1 MHz และ 5 MHz ซึ่งเป็นการวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่ ผลการทดลองจากแบบจำลองสามารถสรุปได้ว่าวิธีฟูรีเยอร์เซนทรอยด์ซัพสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนได้ถูกต้อง จากนั้นได้ทำการวัดสัญญาณอัลตราซาวด์จากการทดลองจริง จากผลการทดลองสรุปได้ว่าค่าของสัมประสิทธิ์การลดทอนของแบบจำลองและการทดลองจริงมีค่าความผิดพลาดประมาณ 10% หลังจากนั้นนำค่าจากการทดลองจริงไปคำนวณหาค่าดิสเปอรัชันได้ค่าความเร็วของสัญญาณอัลตราซาวด์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ โดยผลของงานวิจัยนี้จะถูกนำไปพัฒนาต่อให้สามารถหาค่าดิสเปอรัชันในตัวกลางที่เป็นเจล และสร้างแบบจำลองที่คิดค่าการเลี้ยวเบนของคลื่นอัลตราซาวด์ (Diffraction effect) เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ทางการแพทย์ดังเอกสารอ้างอิงที่ [17]

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ แห่งห้องวิจัย BIOSIS และดร.ศิริเดช บุญแสง แห่งห้องวิจัย PASS LAB ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์การทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Abdellatif Bey Tamsamani, Steve Vandenplas, Mikaya L. D. Lumri, and Leo Van Biesen. "Experimental Validation for the Diffraction Effect in the Ultrasonic Field of Piston Transducers and Its Influence on Absorption and Dispersion Measurements," **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, 48, pp.547-559, 2001.
- [2] Steve Vandenplas, Abdellatif Bey Tamsamani, Mikaya L. D. Lumori, Zobeida Cisneros, and Leo Van Biesen. "Parametric Modeling with Beamspread Compensation and MIMO Frequency Domain Inversion Applied to Fine Saturated Sands," **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, 48, pp.985-997, 2001.



- [3] Luc Peirlinckx, Rik Pintelon, and Leo Pierre Van Biesen. "Identification of Parametric Models for Ultrasonic Wave Propagation in the Presence of Absorption and Dispersion," **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control** 40, pp.302-312, 1993.
- [4] Ping He. "Experimental Verification of Models for Determining Dispersion from Attenuation," **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control** 46, pp.706-714, 1999.
- [5] Ping He, Jun Zheng. "Acoustic Dispersion and Attenuation Measurement Using Both Transmitted and Reflected Pulses," **Ultrasonics** 39, pp.27-32, 2001.
- [6] Ping He. "Direct Measurement of Ultrasonic Dispersion Using a Broadband Transmission Technique," **Ultrasonics** 37, pp.67-70, 1999.
- [7] Kendall R. Waters, Michael S. Hughes, Joel Mobley, and James G. Miller, Fellow. "Differential Forms of the Kramers-Kronig Dispersion Relations," **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control** 50, pp.68-76, 2003.
- [8] Kendall R. Waters, Joel Mobley, and James G. Miller, Fellow. "Causality-Imposed (Kramers-Kronig) Relationships Between Attenuation and Dispersion," **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control** 52, pp.822-833, 2005.
- [9] Chin C. Lee, Mike Lahham, and B. G. Martin, "Experimental Verification of the Kramers-Kronig Relationship for Acoustic Waves," **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, 37, pp.286-294, 1990.
- [10] Renaldas Raisutis, Rymantas Kazys, and Liudas Mazeika. "Application of the Ultrasonic Characterization Methods for Highly Attenuating Plastic Materials," **NDT&E International**, Elsevier 40, pp.324-332, 2007.
- [11] Xucai Chen, Dan Phillips, Kari Q. Schwarz, Jack G. Mottley, and Kevin J. Parker, Fellow. "The Measurement of Backscatter Coefficient from a Broadband Pulse-Echo System: A New Formulation," **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control** 44, pp.515-525, 1997.
- [12] Timothy Allen Bigelow. **Estimating The Medical Ultrasound In Vivo Power Spectrum**, PhD. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2004.
- [13] Heinrich Kuttruff. **Ultrasonics Fundamentals and Applications**, ELSEVIER Applied-Science.1991.
- [14] T. Baldeweck, P. Laugier, A. Herment, G. Berger. "Application of Autoregressive Spectral Analysis for Ultrasound Attenuation Estimation Interest in Highly Attenuating Medium," **IEEE Transactions on Ferroelectrics and frequency control**, 42, pp.99-110,1995.
- [15] 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, pp.408-418,2003.
- [16] V. R. Singh and Ashok Kumar. "Development of A Focused Ultrasonic Transducer with Increased Efficiency," **Proceedings of IEEE-EMBS**, pp.4.47-4.48, 1995.
- [17] Hironori Tohmyoh, Takuya Imaizumi, and Masumi Saka. "Acoustic Resonant Spectroscopy for Characterization of Thin Polymer Films," **Rev. Sci. Instrum.**, 77, 2006, in press.