

การประยุกต์การแปลงเวฟเลทสำหรับการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิด สัญญาณอคูสติกอิมิชชันบนเครื่องยนต์

Application of Wavelet Transform for Acoustic Emission Source Location on Diesel Engines

กิตติศักดิ์ สุดดวง และ พรชัย นิเวศน์รังสรรค์*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

51 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530 โทร/โทรสาร 0-2988-3666 ต่อ 241 *อีเมลล์: nporncha@mut.ac.th

Kittisak Suddoung and Pornchai Nivesrangsan *

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology,

51, Cheum-Sampan Road, Nong-Chok, Bangkok 10530, Tel/Fax: 0-2988-3666 ext. 241, *E-mail: nporncha@mut.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอคูสติกอิมิชชันบนฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซลด้วยเทคนิคการแปลงเวฟเลท สัญญาณอคูสติกอิมิชชันที่ตรวจวัดได้จากเครื่องยนต์เป็นสัญญาณที่มาจากแหล่งกำเนิดหลายแหล่งที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหรือเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการทางกล (เช่น การเปิด/ปิดวาล์วที่หัวฉีดเชื้อเพลิง, การทำงานของวาล์วไอดีไอเสีย เป็นต้น) และกระบวนการทางของไหล (เช่น การไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง การเผาไหม้ เป็นต้น) การบ่งชี้เหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับเครื่องยนต์จำเป็นต้องทราบลำดับการจุดระเบิดของเครื่องยนต์และตำแหน่งศูนย์ตายบนของเครื่องยนต์จึงจะสามารถบ่งชี้เหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดในแต่ละกระบอกสูบได้ สำหรับการศึกษานี้สัญญาณอคูสติกอิมิชชันที่บันทึกจากการทดลองสามารถคำนวณหาความเร็วคลื่นที่เหมาะสมและผลต่างของเวลาระหว่างเซ็นเซอร์ด้วยเทคนิคการแปลงเวฟเลทเพื่อใช้ทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดของสัญญาณบนเครื่องยนต์ เทคนิคการทำนายตำแหน่งจะใช้เซ็นเซอร์อคูสติกอิมิชชัน 3 ตัววางเป็นรูปสามเหลี่ยมบนฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซลและจะจำลองการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่หัวฉีดและวาล์วไอเสีย โดยใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณจำลอง (การหักดินสอด) และสัญญาณขณะเครื่องยนต์ทำงาน (สัญญาณจริง) การใช้เทคนิคการแปลงเวฟเลทเพื่อช่วยคำนวณเวลาที่แตกต่าง ความเร็วของคลื่นที่เหมาะสมได้แสดงให้เห็นว่าสัญญาณอคูสติกอิมิชชันสามารถใช้ทำนายตำแหน่งของคลื่นที่มาจากแหล่งกำเนิดหลายแหล่งบนเครื่องยนต์ที่มีรูปร่างที่ซับซ้อน

คำสำคัญ: อคูสติกอิมิชชัน การทำนายตำแหน่ง เครื่องยนต์ดีเซล และการแปลงเวฟเลท

Abstract

This paper proposes to acoustic emission source location method on cylinder head of a diesel engine using wavelet transform. Typical Acoustic Emission (AE) signals recorded from the engines are multiple-source signals associated with processes (events) during the engine cycle for example mechanical processes (i.e. needle valve opening/closing in injector and inlet/exhaust valve closing, etc.) and fluid flow processes (i.e. fuel injection, ignition, combustion, etc.). To map the events during the engine cycle, firing order and top dead center position have to know so that all events at each cylinder can be identified. In this study, detected AE signals are used to determine preferred wave speed and arrival time difference using wavelet transform so that source locate on diesel engine can be determined. Triangular array of AE sensors can be used to locate source positions on cylinder head of diesel engines using pencil lead break sources (simulated sources) and engine running sources (real sources). Using wavelet transform technique which determined arrival time difference and wave velocity, AE signals show that can be used to locate multiple sources on a complex geometry of diesel engine.

Keywords: Acoustic emission, Source location, Diesel engine, and Wavelet Transform

1. บทนำ

สัญญาณอคูสติกอิมพัลส์ (Acoustic Emission signal) ที่ตรวจวัดจากเครื่องยนต์เป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดหลายแหล่งในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางกล เช่น การเปิด/ปิดของวาล์วไอดีและไอเสีย การเปิด/ปิดของวาล์วที่หัวฉีดน้ำมัน และกระบวนการของของไหล เช่น การเผาไหม้ การฉีดน้ำมัน การไหลของอากาศผ่านวาล์ว นอกจากนี้ยังรวมถึงการทำงานของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ต่าง ๆ ในเครื่องยนต์ สัญญาณอคูสติกอิมพัลส์ที่ตรวจวัดได้เป็นสัญญาณที่มีความซับซ้อนและมีพฤติกรรมต่าง ๆ เหมือนคลื่นทั่วไปคือ การสะท้อน การหักเห การเปลี่ยนโหมด และการลดลงของแอมพลิจูดของคลื่น การหาแหล่งกำเนิดของสัญญาณเมื่อเครื่องยนต์ทำงานสามารถกระทำได้ด้วยการใช้สัญญาณอ้างอิงเช่นสัญญาณของตำแหน่งเพลลาข้อเหวี่ยง หรือสัญญาณของตำแหน่งศูนย์ตายบน และลำดับการจุดระเบิด [1-4] ซึ่งพบในงานวิจัยส่วนใหญ่ จึงทำให้สามารถระบุเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์และสามารถศึกษาถึงสภาวะผิดปกติของการทำงานของเครื่องยนต์ด้วยการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่าง ๆ (เช่น แอมพลิจูด ค่า RMS เป็นต้น) ของแต่ละเหตุการณ์เช่น สัญญาณการทำงานของหัวฉีด [1], สัญญาณของวาล์วไอดี [2], และสัญญาณการเผาไหม้ [3]

สัญญาณอคูสติกอิมพัลส์ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้สำหรับหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิด (Source location) เช่น การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดในโครงสร้างที่มีลักษณะแบบ plate/shell ตัวอย่างเช่น ท่อ [5], plate [6-10], I-Beam [11], และถังบรรจุทรงกระบอก [12] ถ้าต้องการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณบนโครงสร้างแบบเชิงเส้น (1 มิติ) จะใช้เซ็นเซอร์ 2 ตัว แต่ถ้าเป็นระนาบ (2 มิติ) จะใช้เซ็นเซอร์ 3 ตัว หรือ 4 ตัว วางเรียงกันเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยม โดยระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์จะถูกกำหนดไว้ จึงทำให้สามารถทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณได้ การหาตำแหน่งโดยใช้เซ็นเซอร์วางเรียงเป็นรูปสามเหลี่ยมได้มีการประยุกต์ใช้เพื่อหาตำแหน่งบนแหล่งกำเนิดบนฝาสูบเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก [13] โดยมีการศึกษาถึงการหาตำแหน่งจากสัญญาณของแหล่งกำเนิดจำลองโดยใช้เทคนิคการหักเหกลับ และสัญญาณจากการทำงานของเครื่องยนต์โดยพิจารณาที่หัวฉีดและวาล์วไอดี งานวิจัยนี้จะใช้เวลาที่แตกต่างระหว่างเซ็นเซอร์เทียบกับเซ็นเซอร์อ้างอิง และความเร็วของคลื่นอคูสติกอิมพัลส์ที่เคลื่อนที่บนบล็อกเครื่องยนต์ [14] โดยสามารถทำนายได้เป็นบริเวณของแหล่งกำเนิดสัญญาณ ส่วนความแม่นยำของการทำนายตำแหน่งจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของการหาผลต่างของเวลาระหว่างเซ็นเซอร์ และความเร็วของคลื่นอคูสติกอิมพัลส์

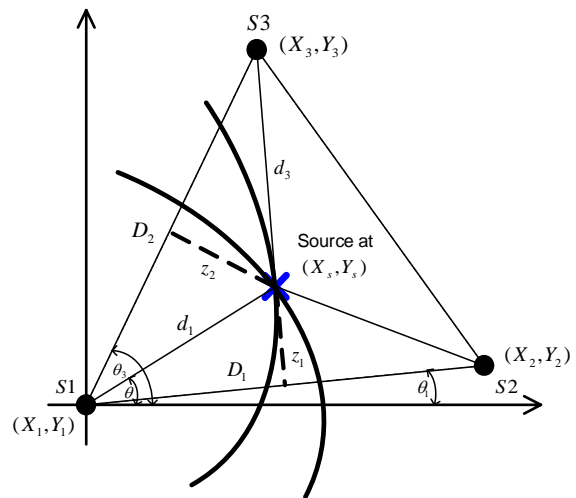
คลื่นอคูสติกอิมพัลส์เป็นคลื่นที่มีความซับซ้อน และมีการลดลงของแอมพลิจูดเกิดขึ้นตามเส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่นซึ่งได้มีการกล่าวถึงในหลายงานวิจัย [1-4, 13-14] คลื่นอคูสติกอิมพัลส์จะเห็นได้ชัดเจนเมื่อวางอยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิด ผลของการลดลงของแอมพลิจูดจะทำให้สัญญาณผิดเพี้ยนไปจึงทำให้ความแม่นยำของการทำนายตำแหน่งผิดพลาดไป ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่เสนอเทคนิคการหาความเร็วของคลื่นอคูสติกอิมพัลส์โดยใช้เทคนิคการแปลงเวฟเลท (Wavelet Transform, WT) [7, 15-16] โดยความเร็วของคลื่นอคูสติกอิมพัลส์จะ

ขึ้นอยู่กับความถี่ การใช้เทคนิคการแปลงเวฟเลทจะทำให้สามารถเห็นรายละเอียดของคลื่นอคูสติกอิมพัลส์ได้ชัดเจนขึ้นทั้งโดเมนเวลาและความถี่ จึงทำให้สามารถเลือกความเร็วที่เหมาะสมของคลื่นที่เคลื่อนที่ในวัสดุที่ศึกษาเพื่อทำการทำนายตำแหน่งแม่นยำยิ่งขึ้น

ในบทความวิจัยนี้จะใช้วิธีการแปลงเวฟเลทเพื่อใช้หาความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในบล็อกเครื่องยนต์ที่มีความถี่ต่าง ๆ รวมทั้งยังใช้สำหรับหาเวลาที่แตกต่างของคลื่นระหว่างเซ็นเซอร์ที่ใช้ตรวจจับคลื่นอคูสติกอิมพัลส์ การหาตำแหน่งจะใช้วิธีการทำนายตำแหน่งโดยใช้เซ็นเซอร์ 3 ตัววางเป็นรูปสามเหลี่ยม และใช้ผลต่างของเวลาเริ่มต้นของสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ ความเร็วของคลื่น และระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์ทั้งสาม ซึ่งทำให้สามารถกำหนดกราฟไฮเปอร์โบล่า 2 เส้น จุดที่ตัดกันของกราฟทั้งสองคือตำแหน่งของแหล่งกำเนิดของสัญญาณ [12-13] บทความวิจัยนี้จะจำลองการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอคูสติกอิมพัลส์บนฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้สัญญาณจำลองและสัญญาณจากเครื่องยนต์ทำงานจริง เพื่อศึกษาวิธีการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดในโครงสร้างที่ซับซ้อนและไม่สมมาตรโดยใช้เทคนิคการหาตำแหน่งแบบสามเหลี่ยมและการแปลงเวฟเลท

2. การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณ

การหาตำแหน่งบนระนาบเป็นวิธีการหาตำแหน่งในสองมิติซึ่งจะใช้เซ็นเซอร์สามตัววางเป็นรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 1 ซึ่งอาจเรียกว่า วิธีการหาตำแหน่งด้วยความเร็วคลื่น ตามทฤษฎีการตัดกันของกราฟไฮเปอร์โบล่าสองเส้นทำให้สามารถคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเซ็นเซอร์ S1 S2 และ S3 จะจัดวางตัวที่ตำแหน่ง (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) และ (X_3, Y_3) ตามลำดับ ส่วน (X_s, Y_s) คือตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณซึ่งสามารถคำนวณจากผลต่างของเวลาของสัญญาณของเซ็นเซอร์ทั้งสาม (ΔT_1 และ ΔT_2) ความเร็วของคลื่น (v) และระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์ (D_i) พารามิเตอร์ต่างๆ ดังกล่าวจะนำมากำหนดกราฟไฮเปอร์โบล่าสองเส้นและจุดตัดกันคือตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณ กราฟไฮเปอร์โบล่าทั้งสองสามารถกำหนดตามสมการที่ (1) และ (2)



$$d_1 = d_2 - d_1 = T_2 - T_1 = \Delta T_1 \cdot v \quad (1)$$

$$\delta_2 = d_3 - d_1 = T_3 - T_1 = \Delta T_2 \cdot V \quad (2)$$

เมื่อ δ_1 และ δ_2 คือค่าคงที่

และ d_i คือระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดและเซ็นเซอร์ ($i=1,2,3$)

เมื่อพิจารณาเซ็นเซอร์ S1 และ S2 จะได้ว่า d_1 คือระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดและ S1 สามารถคำนวณหาได้โดยใช้สมการการหาค่า Z_1 ดังสมการที่ (3) และ (4)

$$Z_1 = d_1 \cdot \sin(\theta - \theta_1) \quad (3)$$

$$Z_1^2 = d_1^2 - (D_1 - d_1 \cos(\theta - \theta_1))^2 \quad (4)$$

จากสมการที่ 1, 3 และ 4 จะได้

$$d_1 = \frac{D_1^2 - \delta_1^2}{2(\delta_1 + D_1 \cos(\theta - \theta_1))} \quad (5)$$

เมื่อพิจารณาเซ็นเซอร์ S1 และ S3 ใช้วิธีการดังกล่าวข้างต้น Z_2 สามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$Z_2 = d_1 \cdot \sin(\theta_3 - \theta) \quad (6)$$

$$Z_2^2 = d_1^2 - (D_2 - d_1 \cos(\theta_3 - \theta))^2 \quad (7)$$

จากสมการที่ 2, 6 และ 7 จะได้

$$d_1 = \frac{D_2^2 - \delta_2^2}{2(\delta_2 + D_2 \cos(\theta_3 - \theta))} \quad (8)$$

เมื่อคำนวณสมการที่ 5 และ 8 อย่างต่อเนื่อง จะได้ค่า d_1 ดังนั้นตำแหน่งของแหล่งกำเนิด (X_S, Y_S) สามารถคำนวณจาก

$$X_S = X_1 + d_1 \cos \theta \quad (9)$$

$$Y_S = Y_1 + d_1 \sin \theta \quad (10)$$

3. การแปลงเวฟเลท

การแปลงเวฟเลทแบบต่อเนื่อง (Continuous Wavelet Transform, CWT) ของฟังก์ชัน $f(t)$ ถูกกำหนดโดย [7]

$$WT_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (11)$$

เมื่อ $a > 0$ และ $*$ แทนด้วยจำนวนเชิงซ้อนสังยุค (Complex conjugate) หรือ $(a+ib)^* = (a-ib)$ ฟังก์ชันวิเคราะห์สำหรับ CWT สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (12)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสเกล a และความถี่ ω คือ $\omega = \omega_0 / a$ เมื่อ ω_0 คือค่าคงที่ที่เป็นบวก ดังนั้นฟังก์ชัน $\Psi_{a,b}(t)$ อาจพิจารณาเป็น window function ทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ ขนาดของ time window จะถูกควบคุมโดยสเกล a ซึ่งสามารถเปลี่ยนขนาดของ window ทั้งในโดเมนเวลาหรือโดเมนความถี่ การวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายระดับความละเอียดเป็นลักษณะพื้นฐานของเทคนิค

การแปลงเวฟเลท เวฟเลทแม่จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขที่ยอมรับได้เมื่อ

$$C_\Psi = \int \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (13)$$

เมื่อ $\hat{\Psi}(\omega)$ ใช้แทนผลการแปลงฟูเรียร์ของ $\Psi(t)$ จากสมการที่ 13 สามารถที่จะเลือกเวฟเลทแม่ได้หลายชนิด สำหรับการศึกษานี้จะใช้ Gabor function เพราะจะให้ความละเอียดทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ที่ดีกว่าเวฟเลทแม่ชนิดอื่นๆ [7] Gabor function กำหนดโดย

$$\Psi_g(t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \sqrt{\frac{\omega_0}{\gamma}} \exp \left[-\frac{(\omega_0/\gamma)^2}{2} t^2 \right] \exp(i\omega_0 t) \quad (14)$$

และฟูเรียร์

$$\hat{\Psi}_g(\omega) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{4\pi}} \sqrt{\frac{\gamma}{\omega_0}} \exp \left[-\frac{(\gamma/\omega_0)^2}{2} (\omega - \omega_0)^2 \right] \quad (15)$$

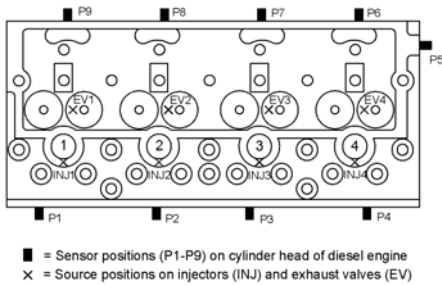
เมื่อ ω_0 และ γ คือค่าคงที่ที่เป็นบวก แม้ว่า Gabor function จะไม่สอดคล้องกับสมการที่ (13) แต่ไม่มีผลต่อการนำไปใช้ ถ้ากำหนดให้ $\gamma = \pi\sqrt{2/\ln 2} = 5.336$ ดังนั้น Gabor function ตามสมการที่ (14) อาจพิจารณาเป็น Gaussian window function มีตำแหน่งศูนย์กลางที่ $t=0$ และผลการแปลงฟูเรียร์ดังสมการที่ (15) จะมีตำแหน่งศูนย์กลางที่ความถี่ $\omega = \omega_0$ ดังนั้นฟังก์ชัน $\Psi_g((t-b)/a)$ จะมีตำแหน่งศูนย์กลางรอบ $t=b$ และผลการแปลงฟูเรียร์ $\left[a \exp(-ib\omega) \hat{\Psi}_g(a\omega) \right]$ จะมีตำแหน่งศูนย์กลางรอบ $\omega = \omega_0/a$ ดังนั้นการแปลงเวฟเลท $WT_f(a,b)$ โดยใช้ Gabor wavelet จะแสดงส่วนประกอบของเวลาและความถี่ของ $f(t)$ ที่ตำแหน่ง $t=b$ และ $\omega = \omega_0/a$ สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดให้ $\omega_0 = 2\pi$ ดังนั้น $1/a$ เท่ากับความถี่ $f = \omega/2\pi$

งานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการแปลงเวฟเลทมาใช้วิเคราะห์หาความเร็ว ณ ความถี่ที่เหมาะสมของคลื่นที่เคลื่อนที่ในบลิคเครื่องยนต์ และผลของการแปลงเวฟเลทจะนำมาใช้หาเวลาแตกต่างของคลื่นที่เคลื่อนที่ไปยังเซ็นเซอร์ จากความเร็วที่เลือกและผลต่างของเวลาที่คำนวณได้จะนำมาใช้ทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณบนฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซล โดยพิจารณาเฉพาะสัญญาณจากหัวฉีด และวาล์วไอดีเสีย การทดลองจะใช้สัญญาณจำลองซึ่งจะใช้วิธีการหักดินสอ 2H [17] และใช้สัญญาณที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์อคูสติกอิมพัลชันขณะเครื่องยนต์ทำงานจริง การคำนวณด้วยวิธีการที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2 จะสมมติว่าแหล่งกำเนิดสัญญาณบนฝาสูบอยู่บนระนาบ 2 มิติ แต่ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณบนฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งมีรูปร่างที่ซับซ้อนจะอยู่ในลักษณะ 3 มิติ จึงทำให้เกิดการคาดเคลื่อนของตำแหน่งไปประมาณ 2-3 mm ซึ่งค่าที่คาดเคลื่อนนี้มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเซ็นเซอร์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm การศึกษานี้จะเปรียบเทียบผลจากการทดลองด้วยสัญญาณทั้งสองแบบเพื่อแสดงถึงการหาตำแหน่ง

ของแหล่งกำเนิดบนฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซลด้วยสัญญาณอคูสติกอิมพัลส์

4. การทดลอง

การทดลองการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณบนฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ 4 จังหวะ ด้วยเซ็นเซอร์อคูสติกอิมพัลส์ชนิดรูปที่ 2 การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการทดลองโดยใช้สัญญาณจำลองซึ่งใช้วิธีการหักคินสอ 2H บนตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่กำหนดคือ หัวฉีดน้ำมัน และฐานสปริงของวาล์วไอเสีย โดยจะใช้เซ็นเซอร์อคูสติกอิมพัลส์ทั้งหมด 4 ตัวพร้อมชุดขยายสัญญาณเซ็นเซอร์ตัวที่หนึ่งวางอยู่ที่ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเพื่อใช้เป็นตัวกำหนดการเริ่มต้นการตรวจจับสัญญาณ และส่วนที่เหลือจะวางอยู่รอบฝาสูบเป็นกลุ่มของเซ็นเซอร์ 3 ตัวและจะเปลี่ยนตำแหน่งเป็นกลุ่ม ๆ จนครบทั้ง 9 ตำแหน่ง สัญญาณที่ตรวจวัดได้จะถูกบันทึกและเก็บไว้เพื่อประมวลผลต่อไป การทดลองนี้เซ็นเซอร์แต่ละตำแหน่งจะถูกบันทึกไว้ 5 ครั้ง ด้วยความถี่สุ่ม (Sampling rate) ที่ 5 MHz



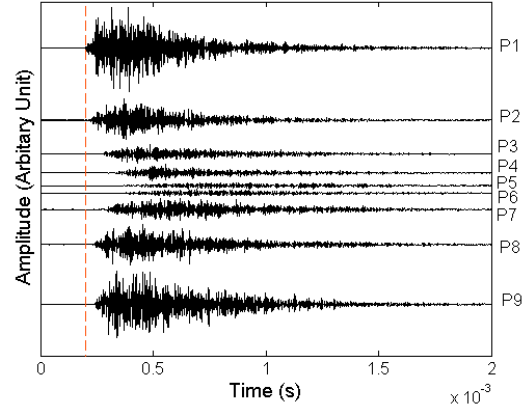
รูปที่ 2 ตำแหน่งเซ็นเซอร์และแหล่งกำเนิดสัญญาณบนฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซล

การทดลองอีกส่วนจะเป็นการบันทึกสัญญาณจากเครื่องยนต์ทำงานจริง เซ็นเซอร์อคูสติกอิมพัลส์ 4 ตัวพร้อมชุดขยายสัญญาณจะติดตั้งอยู่ด้านข้างของฝาสูบ เซ็นเซอร์อคูสติกอิมพัลส์ที่ใช้ทดลองมีการจัดกลุ่มดังนี้คือ P1-P2-P6-P9, P1-P3-P7-P8, P7-P2-P8-P4 และ P6-P5-P7-P4 แต่ละเซ็นเซอร์จะบันทึกสัญญาณไว้ 5 ครั้ง และใช้ความถี่สุ่ม 2.5 MHz ให้ครอบคลุม 1 รอบของวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ การทดลองนี้เครื่องยนต์จะทำงานที่สภาวะปกติไม่มีภาระด้วยความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที

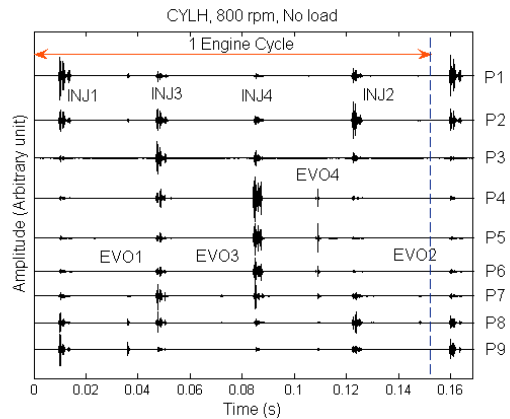
5. ผลการทดลอง

ตัวอย่างของสัญญาณอคูสติกอิมพัลส์ของสัญญาณจำลองที่ตัวหัวฉีดน้ำมัน (INJ) ของกระบอกสูบที่ 1 ที่บันทึกได้จากเซ็นเซอร์ที่ตำแหน่งต่างๆ (P1-P9) บนฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซลแสดงดังรูปที่ 3 แอมป์ริจูดของสัญญาณแสดงอยู่บนสเกลเดียวกัน แอมป์ริจูดของสัญญาณจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์และแหล่งกำเนิดเพิ่มขึ้น โดยจะเห็นได้ชัดเจนที่ตำแหน่ง P4-P7 เส้นประที่แสดงไว้ในรูปคือตำแหน่งเริ่มต้นของสัญญาณอคูสติกอิมพัลส์ที่เซ็นเซอร์ตำแหน่งที่ P1 จะเห็นว่าเวลาเริ่มต้นของสัญญาณที่เซ็นเซอร์ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์และแหล่งกำเนิดเพิ่มมากขึ้น

สัญญาณดังรูปเป็นสัญญาณที่มีความซับซ้อนมากเนื่องจากพฤติกรรมของคลื่นที่จะเกิดการสะท้อน การหักเห การเปลี่ยนโหมดและการลดลงของแอมป์ริจูดตามเส้นทางที่คลื่นเคลื่อนที่ นอกจากนี้ rise time และ decay time ของสัญญาณที่บันทึกได้จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดและเซ็นเซอร์เพิ่มขึ้น

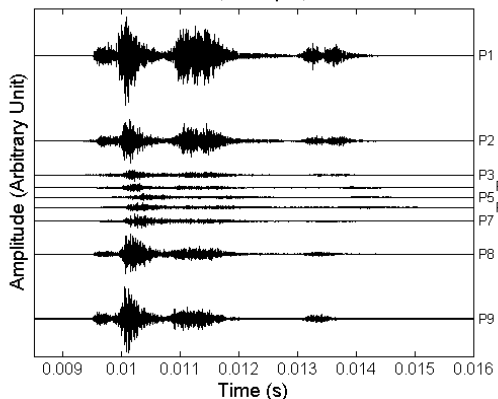


รูปที่ 3 สัญญาณอคูสติกอิมพัลส์จากแหล่งกำเนิดจำลองที่ตำแหน่งหัวฉีดของกระบอกสูบ 1



(ก) สัญญาณต่าง ๆ บนฝาสูบ

INJ1 Event, 800 rpm, No load



(ข) สัญญาณของหัวฉีดที่กระบอกสูบ 1

รูปที่ 4 สัญญาณที่บันทึกที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนฝาสูบขณะเครื่องยนต์ทำงานจริงแบบไม่มีภาระที่ความเร็วรอบ 800 rpm

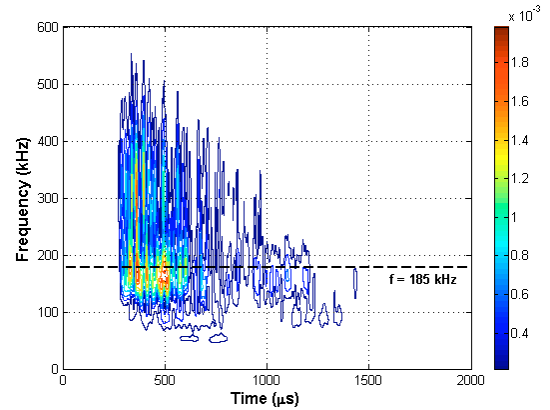
รูปที่ 4 เป็นตัวอย่างสัญญาณที่บันทึกจากเซ็นเซอร์ 9 ตำแหน่งบนฝาสูบขณะเครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระที่ความเร็วรอบ 800 rpm สัญญาณที่บันทึกได้เป็นสัญญาณที่เครื่องยนต์ทำงาน 1 รอบวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ซึ่งสัญญาณที่เห็นได้ชัดเจนทั้ง 4 ครอบงวน คือ สัญญาณขณะหัวฉีดทำงาน (INJ) และ สัญญาณขณะวาล์วไอเสียเปิด (EVO) สัญญาณในรูปที่ 4(ก) ไม่ได้ถูกบันทึกพร้อมกับเซ็นเซอร์ทั้ง 9 ตำแหน่ง แต่บันทึกโดยใช้สัญญาณอ้างอิงจากสัญญาณของเพลาค้อเหวี่ยงหรือสัญญาณของตำแหน่งศูนย์ตายบนของกระบอกสูบที่ 1 (TDC1) พร้อมกับเซ็นเซอร์ที่ตำแหน่งอื่น ๆ อีก 3 ตำแหน่ง ดังนั้นจึงมีการผิดเพี้ยนของสัญญาณในแต่ละรอบการทำงานของเครื่องยนต์ สัญญาณดังรูปจำเป็นต้องทราบจังหวะการจุดระเบิดของเครื่องยนต์เพื่อนำมากำหนดเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในสัญญาณ ซึ่งจังหวะการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ดีเซลที่ทดลองคือ 1-3-4-2 รายละเอียดของสัญญาณ INJ1 ของแต่ละเซ็นเซอร์แสดงไว้ในรูปที่ 4(ข)

จากรูปที่ 3 และ 4 พบว่าสัญญาณจำลองด้วยการหักดินสอซับซ้อนน้อยกว่าสัญญาณการทำงานของเครื่องยนต์ที่เกิดมาจากแหล่งกำเนิดหลายแหล่ง การลดลงของแอมพลิจูดและพฤติกรรมของคลื่นอื่น ๆ ที่พบในสัญญาณจำลองก็สามารถพบในสัญญาณการทำงานของเครื่องยนต์ การระบุเหตุการณ์ต่าง ๆ ดังสัญญาณดังรูปที่ 4 จะต้องใช้สัญญาณอ้างอิงและลำดับการจุดระเบิด จึงจำเป็นต้องมีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดตำแหน่งศูนย์ตายบนของลูกสูบที่ตำแหน่งกระบอกสูบที่ 1 สำหรับงานวิจัยนี้จะนำเสนอเทคนิคการทำนายตำแหน่งโดยใช้เซ็นเซอร์ติดตั้งบนผิวของฝาสูบซึ่งยึดด้วยฐานยึดแม่เหล็ก จึงทำให้สะดวกในการติดตั้ง วิธีการทำนายนั้นจำเป็นต้องศึกษาหาความเร็วของคลื่นอนุสติกอิมิชันที่เคลื่อนที่ในบล็อกเครื่องยนต์ เทคนิคการแปลงเวฟเลทได้ถูกนำมาใช้ศึกษาหาความเร็วของคลื่นอนุสติกอิมิชัน ผลการแปลงเวฟเลทของสัญญาณหัวฉีดบนโดเมนเวลาและความถี่แสดงดังรูปที่ 5(ก) และ (ข) แถบสีด้านขวาของรูป คือ สเกลสีของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลท ซึ่งจะทำให้เห็นรายละเอียดของสัญญาณที่เกิดขึ้นที่เวลาและความถี่ต่าง ๆ ซึ่งพบว่าสัญญาณของหัวฉีดขณะเครื่องยนต์ทำงานประกอบด้วย ความถี่ 2 ช่วงคือ ช่วง 100-250kHz และ 250-400kHz ซึ่งลักษณะสัญญาณหัวฉีดก็เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยที่มีการศึกษาเกี่ยวกับสัญญาณหัวฉีด [1,4] คือ คาดว่าน่าจะเป็นสัญญาณที่เกี่ยวข้องกระบวนการทางการไหลที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานของหัวฉีดและการเกิดการเผาไหม้ในจังหวะกำลังของวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซล

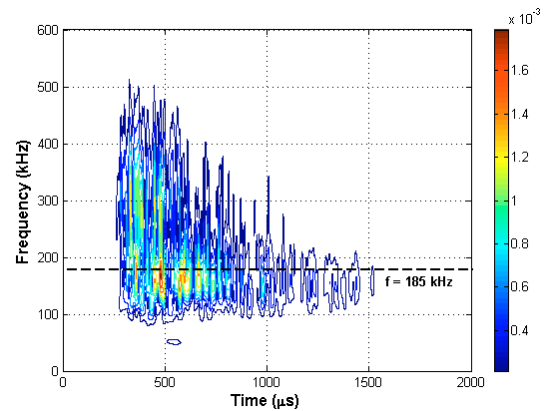
รูปที่ 6 จะเป็นสัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเลท ณ เวลาต่าง ๆ ที่ความถี่ 185 kHz ซึ่งจะถูกนำมาใช้สำหรับคำนวณหาผลต่างของเวลาระหว่างเซ็นเซอร์ที่ตรวจวัดสัญญาณอนุสติกอิมิชันด้วยเทคนิค Threshold Crossing โดยค่า Threshold มีค่าเท่ากับ 20% ของค่ามากที่สุดของสัมประสิทธิ์การแปลงเวฟเลท จากเวลาที่คำนวณได้สามารถนำมาใช้สำหรับการหาความเร็วของคลื่นอนุสติกอิมิชันและการทำนายตำแหน่งบนฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซล

ความเร็วของคลื่นอนุสติกอิมิชันที่เคลื่อนที่บนบล็อกเครื่องยนต์ได้วัดและคำนวณโดยใช้เทคนิคที่กล่าวไว้ดังรูปที่ 6 พบว่าความเร็วของคลื่นที่ความถี่ต่าง ๆ มีลักษณะดังรูปที่ 7 ความเร็วของคลื่นสามารถ

แบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงความถี่ 100-250 kHz, 250-450 kHz และ 600-1200 kHz โดยสัญญาณช่วง 600-1200 kHz เป็นช่วงที่ไม่เหมาะสมเนื่องจากแอมพลิจูดของสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกับแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวน (noise) สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาที่ความถี่ช่วงแรกเท่านั้น ซึ่งพบว่าความถี่ที่เหมาะสมกับการทำนายตำแหน่งอยู่ในช่วงความถี่ 185 kHz และมีความเร็วของคลื่นอนุสติกอิมิชันที่วัดได้ประมาณ 1814 m/s



(ก) สัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเลทบนโดเมนเวลาและความถี่ที่เซ็นเซอร์ตำแหน่ง P5

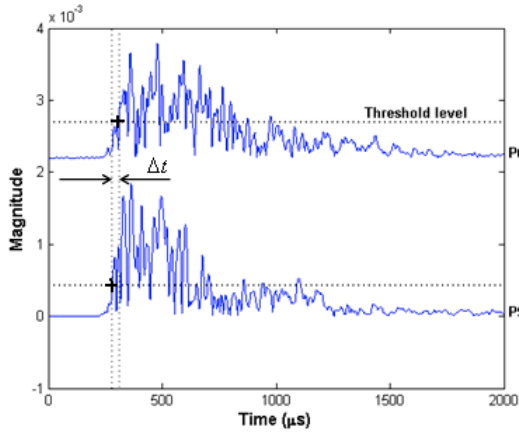


(ข) สัมประสิทธิ์ของการแปลงเวฟเลทบนโดเมนเวลาและความถี่ที่เซ็นเซอร์ตำแหน่ง P6

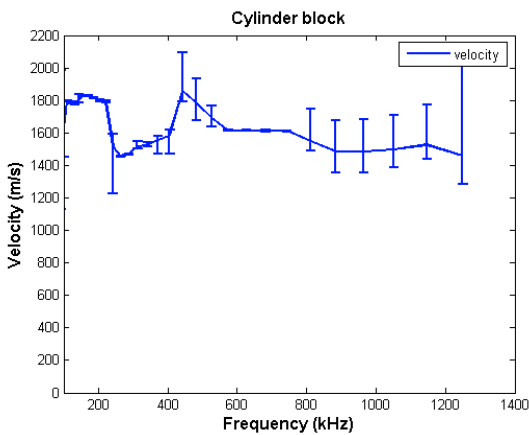
รูปที่ 5 ผลของการแปลงเวฟเลทของสัญญาณหัวฉีดเมื่อเครื่องยนต์ทำงานที่ 800 rpm, ไม่มีภาระ

วิธีการทำนายตำแหน่งโดยใช้ความเร็วคลื่นและเวลาเริ่มต้นของคลื่นของแต่ละสัญญาณได้มีการพิสูจน์ว่าใช้งานได้สำหรับการทำนายตำแหน่งของโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน เช่น ท่อ [5], Plate [6-10], หรือเหล็กโครงสร้าง เช่น I-Beam [11] เป็นต้น ความแม่นยำของการทำนายตำแหน่งของวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางที่ทดสอบและการคำนวณหาเวลาเริ่มต้นของสัญญาณ สำหรับโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนที่ได้กล่าวถึงก่อนหน้านี้จะสมมติให้ความเร็วของคลื่นอนุสติกอิมิชันคงที่ ดังนั้นความแม่นยำของการทำนายตำแหน่งจะขึ้นอยู่กับการศึกษาความแตกต่างของเวลาเริ่มต้นของคลื่นที่ตรวจจับได้ที่แต่ละเซ็นเซอร์เท่านั้น แต่สำหรับโครงสร้างที่ซับซ้อน เช่น ฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซลทำให้สามารถที่จะหาความเร็วของของคลื่นได้โดย

ประมาณ เนื่องจากเส้นทางที่คลื่นเคลื่อนที่มีความซับซ้อนรวมทั้งเกิดจากผลของพฤติกรรมของคลื่นที่มีการสะท้อน การหักเห และการเปลี่ยนโหมด



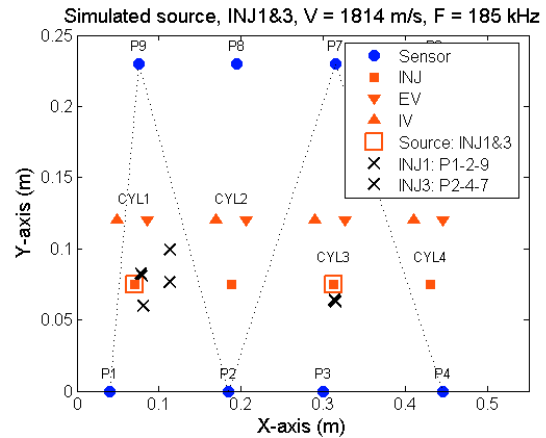
รูปที่ 6 การหาผลต่างเวลาด้วยเทคนิค Threshold Crossing จากผลการแปลงเวฟเลท



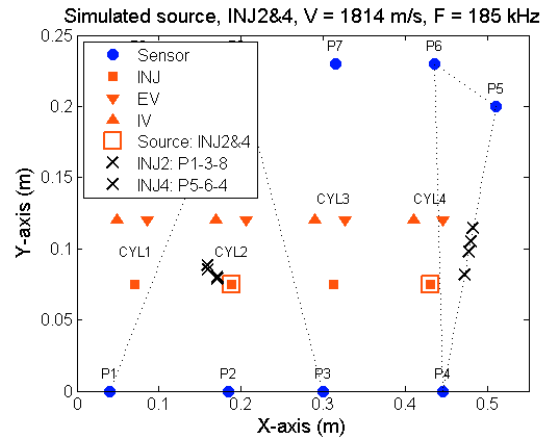
รูปที่ 7 ความเร็วของคลื่นที่วัดได้บนบล็อกเครื่องยนต์ที่มีความถี่ต่างๆ

การทำนายตำแหน่งจะทดสอบโดยใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณจำลองที่ตัวหัวฉีดและฐานสปริงของวาล์วไอเสียทั้ง 4 กระบอกสูบ (รูปที่ 2) มีการจัดวางเรียงตำแหน่งของเซ็นเซอร์เป็นรูปสามเหลี่ยมดังนี้ P1-P2-P9, P1-P3-P8, P2-P4-P7 และ P5-P6-P4 สำหรับแหล่งกำเนิดที่กระบอกสูบ 1 ถึง 4 ตามลำดับ และแต่ละการทดลองจะบันทึกไว้ 5 ครั้ง การทำนายตำแหน่งจะใช้ความเร็วของคลื่นที่มีความถี่ 185 kHz ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1814 m/s ส่วนการหาเวลาที่แตกต่างระหว่างเซ็นเซอร์จะใช้เทคนิคการแปลงเวฟเลทดังรูปที่ 6 และคำตอบของการทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่หัวฉีดและที่ฐานสปริงของวาล์วไอเสียแสดงดังรูปที่ 8 และ 9 สำหรับแหล่งกำเนิดที่หัวฉีดและฐานของวาล์วไอเสียตามลำดับ ซึ่งในรูปทั้งสองจะแสดงตำแหน่งของหัวฉีด วาล์วไอดี วาล์วไอเสีย ตำแหน่งของเซ็นเซอร์ทั้ง 9 ตำแหน่ง ตำแหน่งของแหล่งกำเนิด การจัดเรียงของเซ็นเซอร์ที่ใช้ทำนายตำแหน่ง (เส้นประ) และตำแหน่งที่คำนวณได้จากสมการที่ 5, 8, 9 และ 10 การใช้สัญญาณจำลองสามารถทำนายตำแหน่งได้เป็นบริเวณและอยู่ใกล้กับตำแหน่งของหัวฉีด (ดังรูป

ที่ 8) และวาล์วไอเสีย (ดังรูปที่ 9) ยกเว้นตำแหน่งของหัวฉีดของกระบอกสูบ 4 ซึ่งได้ผลการทำนายที่ไม่ถูกต้องเหมือนตำแหน่งอื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากมาจากตำแหน่งของหัวฉีด 4 อยู่ใกล้บริเวณขอบของฝาสูบและมีโครงสร้างที่ซับซ้อน หรืออาจเป็นเพราะคลื่นจากแหล่งกำเนิดที่หัวฉีดต้องเคลื่อนที่ผ่านหลายตัวกลางจากตัวหัวฉีดไปยังฝาสูบจึงทำให้คลื่นที่ตรวจวัดได้ที่เซ็นเซอร์ผิดเพี้ยนไปเนื่องจากผลของการสะท้อน การหักเห และการเปลี่ยนโหมดของคลื่น



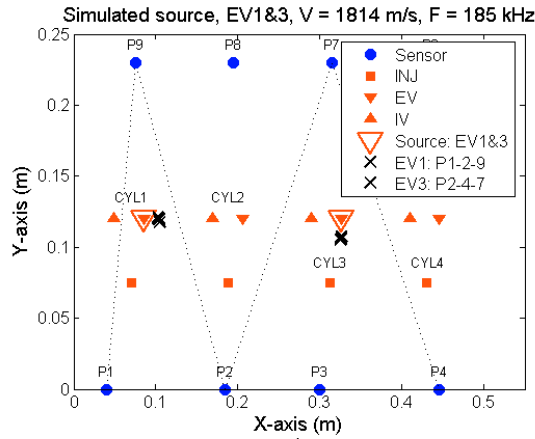
(ก) แหล่งกำเนิดที่ INJ1 และ INJ3



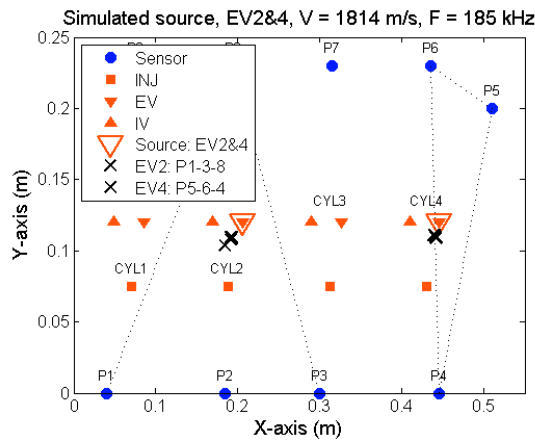
(ข) แหล่งกำเนิดที่ INJ2 และ INJ4

รูปที่ 8 การทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดจำลองที่ INJ

การทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดด้วยสัญญาณอคูสติกอิมพัลส์ที่ตรวจวัดได้จากการทำงานของเครื่องยนต์ดีเซลที่ทำงานด้วยความเร็วรอบ 800 rpm และไม่มีภาระโดยสัญญาณจาก 5 วัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์จะถูกนำมาใช้เพื่อทำนายตำแหน่ง เซ็นเซอร์ที่ใช้ทำนายตำแหน่งของ INJ และ EVO ของกระบอกสูบที่ 1-4 จะมีการจัดวางเรียงเซ็นเซอร์เป็นรูปสามเหลี่ยมดังนี้ P1-P2-P9, P1-P3-P8, P2-P4-P7 และ P5-P6-P4 และใช้สมการที่ 5, 8, 9 และ 10 การทำนายตำแหน่งจะใช้ความเร็วของคลื่นที่มีความถี่ 185 kHz ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1814 m/s ส่วนการหาเวลาที่แตกต่างระหว่างเซ็นเซอร์จะใช้เทคนิคการแปลงเวฟเลทดังรูปที่ 6



(น) แหล่งกำเนิดที่ EV1 และ EV3



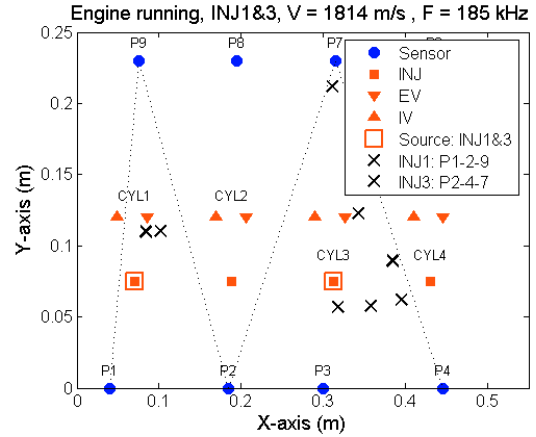
(ข) แหล่งกำเนิดที่ EV2 และ EV4

รูปที่ 9 การทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดจำลองที่ EV

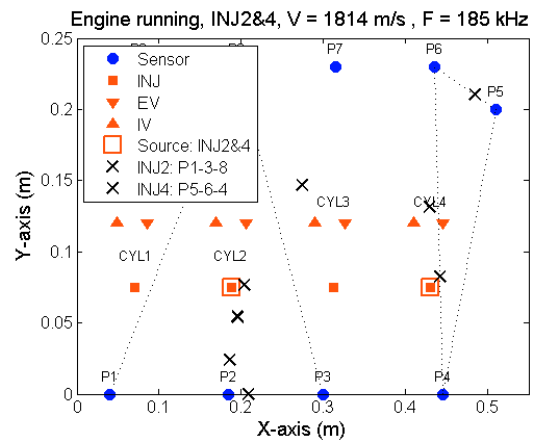
รูปที่ 10 เป็นคำตอบของการทำนายตำแหน่งของสัญญาณหัวฉีดทั้ง 4 กระจบokus จากรูปจะเห็นได้ว่าตำแหน่งที่ทำนายได้จะอยู่กระจบกระจายสามารถทำนายได้บางส่วน เนื่องจากความซับซ้อนของสัญญาณอคูสติกอิมพัลส์ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดหลายแหล่งจึงทำให้คำตอบผิดพลาดไป ส่วนการทำนายตำแหน่งของสัญญาณจากวาล์วไอเสียที่แสดงดังรูปที่ 11 นั้นสามารถทำนายได้เฉพาะที่วาล์วไอเสียของกระจบokusที่ 4 เท่านั้น เนื่องจากสัญญาณที่กระจบokusอื่นมีขนาดสัญญาณใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน จึงไม่สามารถนำมาคำนวณหาตำแหน่งได้และคำตอบของการทำนายตำแหน่งของสัญญาณวาล์วไอเสียมีความถูกต้องมากกว่าสัญญาณจากหัวฉีดถึงแม้ว่าสัญญาณหัวฉีดจะมีสัญญาณที่ค่อนข้างชัดเจนมากกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกระบวนการที่เกิดขึ้นและโครงสร้างภายในที่ตำแหน่งวาล์วไอเสียมีความซับซ้อนน้อยกว่า

ผลของการทำนายตำแหน่งด้วยเทคนิคการแปลงเวฟเลขสามารถให้คำตอบที่ดีกว่าวิธีการเดิมที่ได้มีการศึกษาในงานวิจัยไว้ก่อนหน้านี้ [13-14] เนื่องจากความเร็วที่ใช้วัดมาจากสัญญาณบนโดเมนเวลา โดยความเร็วของคลื่นอคูสติกอิมพัลส์ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 2650 m/s ซึ่งไม่ได้พิจารณาถึงผลของความถี่ของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ จึงทำให้ความเร็วที่วัดได้นั้นเป็นความเร็วที่ไม่เหมาะสม ซึ่งเมื่อนำมาพิจารณาจะเห็นว่าความเร็วที่ใช้ในการทำนายตำแหน่งนั้นเป็นความเร็วของคลื่นที่ไม่อยู่

ในช่วงความถี่ใดเลย (ดังแสดงในรูปที่ 7) ดังนั้นการใช้เทคนิคการแปลงเวฟเลขเพื่อช่วยในการวิเคราะห์ความเร็วของคลื่นอคูสติกอิมพัลส์ชั้นแสดงให้เห็นว่าสามารถเลือกค่าความเร็วที่เหมาะสมได้รวมทั้งใช้ในการคำนวณหาเวลาที่แตกต่างกันระหว่างเซ็นเซอร์จึงทำให้คำตอบของการทำนายตำแหน่งมีความแม่นยำมากขึ้น

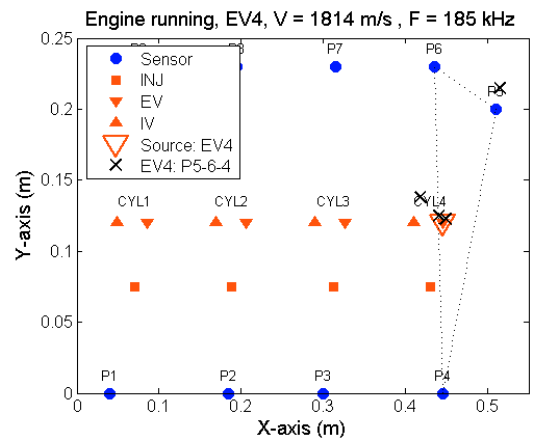


(ก) แหล่งกำเนิดที่ INJ1 และ INJ3



(ข) แหล่งกำเนิดที่ INJ2 และ INJ4

รูปที่ 10 การทำนายตำแหน่งเมื่อแหล่งกำเนิดจริงอยู่ที่ INJ ขณะเครื่องยนต์ทำงานจริงแบบไม่มีภาระที่ 800 rpm



รูปที่ 11 การทำนายตำแหน่งเมื่อแหล่งกำเนิดจริงอยู่ที่ EV4 ขณะเครื่องยนต์ทำงานจริงแบบไม่มีภาระที่ 800 rpm

6. สรุป

การทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณด้วยการใช้เซ็นเซอร์ 3 ตัววางเป็นรูปสามเหลี่ยมและเทคนิคการแปลงเวฟเลทแสดงให้เห็นว่าสัญญาณอนุสติกอิมพัลส์ที่ตรวจวัดได้สามารถนำมาใช้ทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณบนโครงสร้างที่ซับซ้อน เช่น ฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซล สัญญาณจำลองซึ่งเป็นสัญญาณจากแหล่งกำเนิดเพียงแหล่งเดียวสามารถทำนายได้ดี สำหรับสัญญาณที่ตรวจวัดจากการทำงานของเครื่องยนต์ซึ่งเป็นสัญญาณที่มาจากแหล่งกำเนิดหลายแหล่งพบว่าตำแหน่งที่ทำนายได้ส่วนใหญ่จะกระจายและจะทำนายได้ดีเฉพาะสัญญาณจากวาล์วไอเสียเปิดของกระบอกสูบ 4 การทำนายตำแหน่งด้วยเทคนิคการแปลงเวฟเลทสามารถให้คำตอบที่มีความถูกต้องมากขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีการทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดด้วยความเร็วนี้จะต้องศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากพฤติกรรมของคลื่นที่เคลื่อนที่ในบล็อกเครื่องยนต์ เช่น การสะท้อน การลดลงของแอมพลิจูด เป็นต้น เพื่อให้การทำนายตำแหน่งถูกต้องยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Gill, J.D., Reuben, R.L., and Steel, J.A., Proceeding EWGAE 2000. A study of small HSDI diesel engine fuel injection equipment faults using acoustic emission. 24th European Conference on Acoustic Emission Testing, Paris, France, May pp. 281-286.
- [2] El-Ghamry, M.H., Reuben, R.L., and Steel, J.A., 2003. The development of automated pattern recognition and statistical feature isolation techniques for the diagnosis of reciprocating machinery faults using acoustic emission. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 17, pp. 805-823.
- [3] Fog, T.L., Brown, E.R., Hansen, H.S., Madsen, L.B., Rensen, P.S., Steel, J.A., Reuben, R.L., and Pedersen, P.S., 1998. Exhaust valve leakage detection in large diesel engines. Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management COMADAM, Clayton, Australia, Vol. 1, pp. 269-278.
- [4] Douglas, R.M., Nivesrangsana, P., Robertson, A.I.F., Brown, E.R., Steel, J.A., Reuben, R.L., and Fog, T.L., 2004. Acoustic emission as a tool to reveal diesel diesel injector performance. Proceeding of the 17th International Conference on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, COMADEM, Cambridge, UK, pp. 315-324.
- [5] Miller, R.K., Pollock, A.A., Watts, D.J., Carlyle, J.M., Tafuri, A.N., and Yezzi Jr, J.J., 1999 A reference standard for the development of acoustic emission pipeline leak detection techniques. NDT & E International, Vol. 32, No. 1, pp. 1-8.
- [6] Tobias, A., 1976. Acoustic emission source location in two dimensions by an array of three sensors. Non-Destructive Testing, Vol. 9, No. 1, pp. 9-12.
- [7] Jeong, H., and Jang, Y., 2000. Wavelet analysis of plate wave propagation in composite laminates. Composite Structures, Vol. 49, No. 4, pp. 443-450.
- [8] Ziola, S.M., and Gorman, M.R., 1991. Source location in thin plates using Cross-Correlation. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 90, No. 5, pp. 2551-2556.
- [9] Gaul, L., and Hurlebaus, S., 1998. Identification of the impact location on a plate using wavelets. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 12, No. 6, pp. 783-795.
- [10] Finlayson, R.D., Luzio, M.A., Miller, R.K. and Pollock, A.A., 2003. Continuous health monitoring of graphite epoxy motorcases (GEM). CINDE Journal, Vol. September/October, pp. 15-24.
- [11] Holford, K.M., and Carter, D.C., 1999. Acoustic Emission Source Location. Key Engineering Materials, Vol. 167-168, pp. 162-171.
- [12] Miller, R.K., and McIntire, P., 1987. Non-Destructive Testing Handbook Vol.5 - Acoustic Emission, American Society for Non-Destructive Testing, USA.
- [13] Nivesrangsana, P., Steel, J.A., and Reuben, R.L., 2007. Source location of acoustic emission in diesel engines. Mechanical Systems and Signal Processing, V. 21, Issue 2, pp. 1103-1114.
- [14] Nivesrangsana, P., Steel, J.A., and Reuben, R.L., 2005. AE mapping of engines for spatially-located time series. Part I: Preliminary studies, Mechanical System and Signal Processing, Vol. 19, Issue 5, pp. 1034-1054.
- [15] Ding, Y., Reuben, R.L., and Steel, J.A., 2004. A new method for waveform analysis for estimating AE wave arrival times using wavelet decomposition. NDT&E International, Vol. 34, No.4, pp. 279-290.
- [16] Shehadeh, M., Steel, J.A., and Reuben, R.L., 2006. Acoustic emission source location for steel pipe and pipeline applications: the role of arrival time estimation., Proceeding of IMechE part E Journal of Process Mechanical Engineering, Vol. 220, pp. 121-133.
- [17] ASTM, "ASTM E976-99: Standard guild for determining the reproducibility of acoustic emission sensor response," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 3.03, 1999, pp. 395-403.