

การหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณในเครื่องยนต์ด้วยสัญญาณอคูสติกอิมิชชัน

Source Location on Diesel Engines using Acoustic Emission

พรชัย นีเวศน์รังสรรค์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ถนนจอก กรุงเทพฯ 10530

โทร 0-2988-3666 ต่อ 241 โทรสาร 0-2988-3666 ต่อ 241 อีเมล nporncha@mut.ac.th

Pornchai Nivesrangsarn

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

Nong-Chok, Bangkok 10530, Thailand, Tel: 0-2988-3666 ext. 241 Fax: 0-2988-3666 ext. 241

บทคัดย่อ

สัญญาณอคูสติกอิมิชชันที่ตรวจจับได้จากเครื่องยนต์เป็นสัญญาณที่ได้มาจากแหล่งกำเนิดหลายแหล่งซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดมาจากแหล่งกำเนิดทางกล (การเปิด/ปิดวาล์วที่หัวฉีดเชื้อเพลิง, การทำงานของวาล์วไอดีและไอเสีย เป็นต้น) และกระบวนการต่าง ๆ เนื่องจากของไหลในเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ (เช่นการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง การจุดระเบิด การไหลอากาศเข้าและออกจากห้องเผาไหม้ เป็นต้น) ปรากฏการณ์ทั่วไปซึ่งมักเกิดขึ้นกับคลื่นคือ การลดทอน, การสะท้อน, การหักเห และการเปลี่ยนโหมด ก็จะมีผลกระทบต่อสัญญาณอคูสติกอิมิชชัน และทำให้สัญญาณผิดเพี้ยนไปเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางเดินของคลื่น อคูสติกอิมิชชันเป็นคลื่นที่มีช่วงทำงานที่ความถี่ค่อนข้างสูง (ประมาณ 0.1-1 MHz) โดยไม่มีผลกระทบจากสัญญาณอื่นที่ความถี่ระดับกลางถึงต่ำ ในการศึกษานี้จะใช้สัญญาณอคูสติกอิมิชชันเพื่อทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดของสัญญาณบนเครื่องยนต์โดยใช้เวลาที่คลื่นเคลื่อนที่และความเร็วของคลื่น วิธีการที่ใช้จะเรียกว่า "การหาตำแหน่งด้วยความเร็วคลื่น" ซึ่งจะใช้เซนเซอร์อคูสติกอิมิชชัน 3 ตัววางเป็นรูปสามเหลี่ยมบนเครื่องยนต์ จึงทำให้สามารถทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณได้ ในการศึกษาจะจำลองการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณบนฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้สัญญาณจำลองจากการหักเหและสัญญาณจริงจากเครื่องยนต์ที่ทำงาน การทำนายตำแหน่งโดยใช้ความเร็วคลื่นและเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดถึงตัววัดพบว่า สามารถทำนายได้ดีกับสัญญาณจำลอง และสัญญาณที่ค่อนข้างชันหรือ มี Rise time น้อย ๆ ความแม่นยำของการทำนายตำแหน่งขึ้นอยู่กับความเร็วของคลื่นและการหาเวลาเริ่มต้นของคลื่น การใช้สัญญาณอคูสติกอิมิชชันเพื่อทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดได้แสดงให้เห็นความสามารถของคลื่นชนิดนี้ในการทำนายตำแหน่งของคลื่นที่มาจากแหล่งกำเนิดที่หลากหลายบนเครื่องยนต์ที่มีรูปร่างที่ซับซ้อน

คำสำคัญ: อคูสติกอิมิชชัน, เครื่องยนต์ดีเซล, การหาตำแหน่ง

Abstract

Typical Acoustic Emission signal acquired from the engines are multiple-source signals associated with mechanical (i.e. needle valve opening/closing in injector and inlet/exhaust valve closing) and fluid flow processes (i.e. fuel injection, combustion, inlet air, exhaust air) during the engine cycle. Typical wave phenomena are wave attenuation, wave reflection, wave refraction and wave mode conversion which can be distorted AE wave along its propagation path. AE sensor is sensitive to a source because AE wave has a medium to high working frequency around 0.1-1 MHz and will not be affected by vibration noise. In this study, AE signals are used to source locate on diesel engine using time arrival and wave velocity which called "wave velocity based technique". Triangular array of AE sensors can be used to locate source positions on cylinder head of a diesel engine using pencil lead break sources (simulated sources) and engine running sources (real sources). Using wave velocity based technique, simulated source and a small rise time signal (sharp signal) can be located. Accuracy of source location depends on wave velocity and wave time arrival. AE signal proves that it can use to locate multiple sources on a complex geometry of diesel engine.

Keywords: Acoustic Emission, Diesel Engines, Source location

1. บทนำ

โดยทั่วไปสัญญาณอนุสติกอิมิชชัน (Acoustic Emission signal) ที่ตรวจวัดมาจากเครื่องยนต์เป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ในเครื่องยนต์ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางกล การเสียดสี และกระบวนการของของไหล เช่น การเปิด/ปิดของวาล์ว ไอติและไอเสีย การเปิด/ปิดของวาล์วที่หัวฉีดน้ำมัน การเผาไหม้ การฉีดน้ำมัน การไหลของอากาศที่วาล์ว การทำงานของชิ้นส่วนเคลื่อนที่ต่าง ๆ เป็นต้น สัญญาณอนุสติกอิมิชชันที่ตรวจวัดได้เป็นสัญญาณที่มีความซับซ้อนและมีพฤติกรรมต่าง ๆ เหมือนคลื่นทั่วไป คือ การสะท้อน การหักเห การเปลี่ยนโหมด และการลดลงของแอมพลิจูดของคลื่น การหาแหล่งกำเนิดของสัญญาณเมื่อเครื่องยนต์ทำงานสามารถกระทำได้ด้วยการใช้สัญญาณอ้างอิงเช่นสัญญาณของตำแหน่งเพลลาข้อเหวี่ยง หรือสัญญาณของตำแหน่งศูนย์ตายบน [1-4] งานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้สัญญาณของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์เพื่อศึกษาถึงสภาวะผิดปกติของการทำงานของเครื่องยนต์ด้วยการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่าง ๆ ของแต่ละเหตุการณ์เช่น สัญญาณการทำงานของหัวฉีด [1], สัญญาณของวาล์วไอเสีย [2], และสัญญาณการเผาไหม้ [3] การศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ทางกลและของไหลระหว่างกระบวนการฉีดน้ำมันโดยใช้สัญญาณอนุสติกอิมิชชัน พบว่าสัญญาณอนุสติกอิมิชชันชี้ให้เห็นถึงกระบวนการก่อนการเริ่มต้นกระบวนการฉีดน้ำมัน การเปิดและปิดของวาล์วหัวฉีด [1] นอกจากนี้การวิเคราะห์สัญญาณของหัวฉีดด้วยเวลาและความถี่ พบว่าความถี่ของสัญญาณอนุสติกอิมิชชันมีอยู่ 2 ช่วงคือ ช่วง 100-250 kHz บ่งบอกถึงกระบวนการทางกล และช่วง 250-400 kHz แสดงถึงกระบวนการของของไหล ซึ่งพบได้ในเครื่องยนต์ดีเซลทั้งขนาดใหญ่และเล็ก [4] แต่การตรวจวัดสัญญาณนั้นต้องทำการวัดสัญญาณของเพลลาข้อเหวี่ยงและลำดับการจุดระเบิดจึงจะสามารถบอกถึงกระบวนการการฉีดน้ำมันที่เกิดขึ้นที่แต่ละกระบอกสูบ

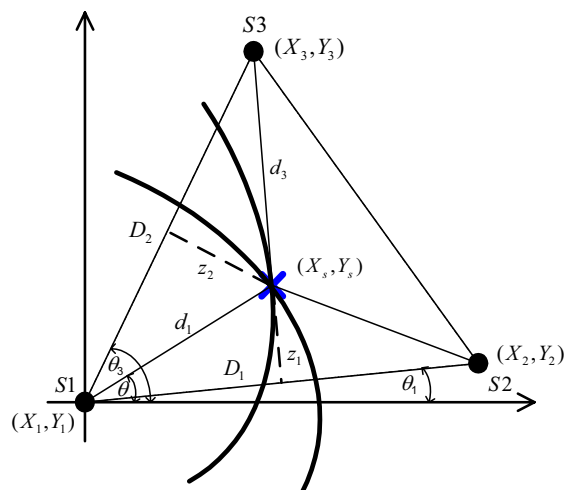
การลดลงของแอมพลิจูดของสัญญาณอนุสติกอิมิชชันได้มีการกล่าวถึงในหลายงานวิจัย [1-4] ว่าสัญญาณจะเห็นได้ชัดเจนถ้าเซ็นเซอร์อิมิชชันวางไว้อยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิด จากวิธีการที่กล่าวข้างต้นนี้ทำให้สามารถระบุกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ด้วยการใช้สัญญาณที่ชัดเจนและมีแอมพลิจูดสูงซึ่งตรวจวัดมาจากเซ็นเซอร์ที่วางอยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิด [2] แต่อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวนี้จำเป็นต้องรู้ลำดับการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ และความรู้พื้นฐานของกระบวนการต่าง ๆ ในวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์

โดยทั่วไปวิธีการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิด (Source location) ได้มีการใช้สำหรับหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดในโครงสร้างที่มีลักษณะแบบ plate/shell ตัวอย่างเช่น ท่อ [6], plate [7-11], I-Beam [12], และถึงบรรจุกรงกระบอก [13] ในบทความวิจัย

นี้จะใช้วิธีการหาตำแหน่งแบบระนาบโดยการใช้เซ็นเซอร์วางเป็นรูปสามเหลี่ยม วิธีนี้จะใช้ผลต่างของเวลาเริ่มต้นของสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์ ความเร็วของคลื่น และระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์ทั้งสาม ซึ่งทำให้สามารถกำหนดกราฟไฮเปอร์โบล่า 2 เส้น จุดที่ตัดกันของกราฟทั้งสองคือตำแหน่งของแหล่งกำเนิดของสัญญาณ [13-14] บทความวิจัยนี้จะแสดงการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอนุสติกอิมิชชันบนฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซลโดยใช้สัญญาณจำลองและสัญญาณจากเครื่องยนต์ทำงานจริง เพื่อศึกษาวิธีการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดในโครงสร้างที่ซับซ้อนและไม่สามารถ

2. วิธีการหาตำแหน่ง

วิธีการหาตำแหน่งบนระนาบเป็นวิธีการหาตำแหน่งในสองมิติ ซึ่งจะใช้เซ็นเซอร์สามตัววางเป็นรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 1 ซึ่งอาจเรียกว่า วิธีการหาตำแหน่งด้วยความเร็วคลื่น ตามทฤษฎีการตัดกันของกราฟไฮเปอร์โบล่าสองเส้นทำให้สามารถคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิด จากรูปที่ 1 เซ็นเซอร์ S1 S2 และ S3 วางตัวที่ตำแหน่ง (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) , และ (X_3, Y_3) ตามลำดับ ส่วนตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคือ (X_s, Y_s) สามารถคำนวณหาจากผลต่างของเวลาของสัญญาณของเซ็นเซอร์ทั้งสาม (ΔT_1 และ ΔT_2) ความเร็วของคลื่น (V) และระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์ (D_1) พารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังกล่าวจะนำมากำหนดกราฟไฮเปอร์โบล่าสองเส้น และจุดตัดกันคือตำแหน่งของแหล่งกำเนิด [13] กราฟไฮเปอร์โบล่าทั้งสองสามารถกำหนดตามสมการที่ (1) และ (2)



รูปที่ 1 วิธีการหาตำแหน่งด้วยเซ็นเซอร์สามตัว

$$D_1 = d_2 - d_1 = T_2 - T_1 = \Delta T_1 \cdot V \tag{1}$$

$$D_2 = d_3 - d_1 = T_3 - T_1 = \Delta T_2 \cdot V \tag{2}$$

เมื่อ δ_1 และ δ_2 คือค่าคงที่
และ d_i คือระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดและเซ็นเซอร์ ($i = 1, 3, 4$)

พิจารณาเซ็นเซอร์ S1 และ S2 จะได้ว่า d_1 คือระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดและ S1 สามารถคำนวณหาได้โดยใช้สมการการหาค่า Z_1 ดังสมการที่ 3 และ 4

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

$$Z_1^2 = d_2^2 - (D_1 - d_1 \cos(\theta - \theta_1))^2 \quad (4)$$

จากสมการที่ 1, 3 และ 4 จะได้

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

พิจารณาเซ็นเซอร์ S1 และ S3 ใช้วิธีการดังกล่าวข้างต้น Z_2 สามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

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

$$Z_2^2 = d_3^2 - (D_2 - d_1 \cos(\theta_3 - \theta))^2 \quad (7)$$

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

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

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

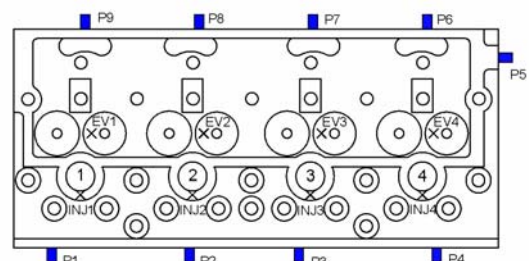
งานวิจัยนี้จะใช้วิธีการหานายตำแหน่งด้วยความเร็วคลื่นดังกล่าวข้างต้นเพื่อหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณบนฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซล โดยพิจารณาเฉพาะสัญญาณจากหัวฉีด และสัญญาณจากวาล์วไอเสียเปิด สัญญาณที่ใช้ทดลองจะเป็นสัญญาณจำลองขึ้นซึ่งจะใช้วิธีการหักดินสอ 2H [15] เป็นแหล่งกำเนิด และใช้สัญญาณที่ตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์อคูสติกอิมพัลซ์ขณะเครื่องยนต์ทำงานจริง การคำนวณด้วยวิธีการนี้จะสมมติว่าแหล่งกำเนิดสัญญาณบนฝาสูบอยู่บนระนาบ 2 มิติ แต่ตำแหน่งของแหล่งกำเนิด

สัญญาณบนฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งมีรูปร่างที่ซับซ้อนจะอยู่ในลักษณะ 3 มิติ จึงทำให้เกิดการคาดเคลื่อนของตำแหน่งไปประมาณ 2mm ซึ่งค่าที่คาดเคลื่อนนี้มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเซ็นเซอร์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10mm การศึกษาจะเปรียบเทียบผลจากทดลองด้วยสัญญาณทั้งสองแบบเพื่อแสดงถึงการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดบนฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซลด้วยสัญญาณอคูสติกอิมพัลซ์

3. การทดลอง

การทดลองการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณบนฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบ 4 จังหวะ ด้วยเซ็นเซอร์อคูสติกอิมพัลซ์ดังรูปที่ 2 การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการทดลองโดยใช้สัญญาณจำลองซึ่งใช้วิธีการหักดินสอ 2H บนตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่กำหนดคือ หัวฉีดน้ำมัน และฐานสปริงของวาล์วไอเสีย โดยจะใช้เซ็นเซอร์อคูสติกอิมพัลซ์ทั้งหมด 4 ตัวพร้อมชุดขยายสัญญาณ ตัวที่หนึ่งวางอยู่ที่ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเพื่อใช้เป็นตัวกำหนดการเริ่มต้นการตรวจจับสัญญาณ และส่วนที่เหลือจะวางอยู่รอบ ๆ ฝาสูบเป็นกลุ่มของเซ็นเซอร์ 3 ตัวและจะเปลี่ยนตำแหน่งเป็นกลุ่ม ๆ จนครบทั้ง 9 ตำแหน่งดังรูปที่ 2 สัญญาณที่เซ็นเซอร์ตรวจจับได้จะถูกบันทึกและเก็บไว้เพื่อประมวลผลต่อไป การทดลองนี้เซ็นเซอร์แต่ละตำแหน่งจะถูกบันทึกไว้ 5 ครั้ง ด้วยความถี่สุ่ม (Sampling rate) ที่ 5 MHz

การทดลองอีกส่วนจะเป็นการบันทึกสัญญาณจากเครื่องยนต์ทำงานจริง เซ็นเซอร์อคูสติกอิมพัลซ์ 4 ตัวพร้อมชุดขยายสัญญาณจะติดอยู่บนฝาสูบทางด้านข้าง เซ็นเซอร์อคูสติกอิมพัลซ์ที่ใช้ทดลองมีการจัดกลุ่มดังนี้คือ P1-P2-P6-P9, P1-P3-P7-P8, P7-P2-P8-P4 และ P6-P5-P7-P4 แต่ละเซ็นเซอร์จะบันทึกสัญญาณไว้ 5 ครั้งด้วยความถี่สุ่ม 2.5 MHz ให้ครอบคลุม 1 รอบของวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ การทดลองนี้เครื่องยนต์จะทำงานที่สภาวะไม่มีภาระ และมีการะที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที การทดลองนี้เป็นการแสดงการใช้วิธีการหาตำแหน่งของสัญญาณขณะเครื่องยนต์ทำงานจริง



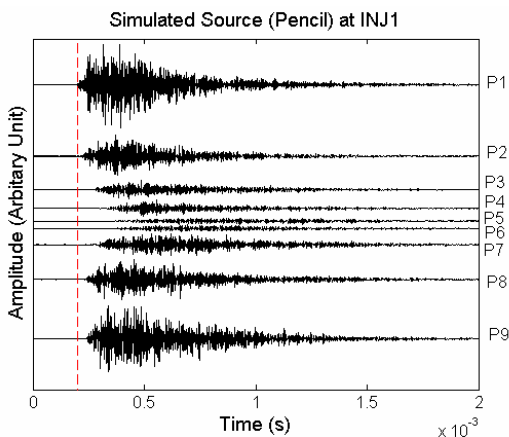
■ = Sensor positions (P1-P9) on cylinder head of diesel engine
X = Source positions on injectors (INJ) and exhaust valves (EV)

รูปที่ 2 ตำแหน่งเซ็นเซอร์และแหล่งกำเนิดสัญญาณบนฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซล

4. ผลการทดลอง

การทำนายตำแหน่งด้วยสัญญาณจำลอง

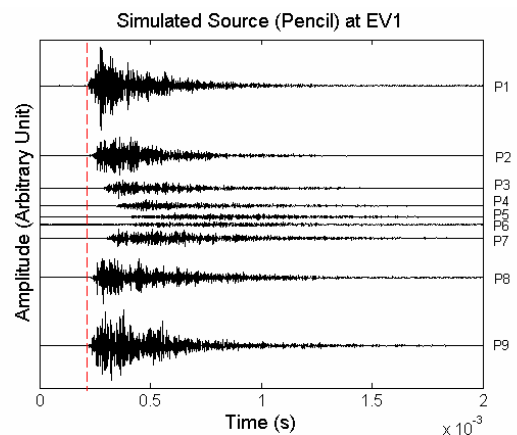
ตัวอย่างของสัญญาณอคูสติกอิมพัลส์ที่บันทึกได้จากเซ็นเซอร์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ (P1-P9) บนฝาสูบโดยใช้สัญญาณจำลอง (สัญญาณจากการหักเหของคลื่นเสียง) ที่ตัวหัวฉีดน้ำมัน (INJ) ของกระบอกสูบที่ 1 ดังรูปที่ 3 แอมพลิจูดของสัญญาณแสดงอยู่บนสเกลเดียวกัน สัญญาณอคูสติกอิมพัลส์ที่บันทึกได้มีความซับซ้อนมากเนื่องจากเส้นทางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและเป็นผลเนื่องมาจากพฤติกรรมของคลื่นที่มีการลดลงของแอมพลิจูด การสะท้อน หักเห และการเปลี่ยนโหมด การลดลงของแอมพลิจูดของสัญญาณจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อตัวเซ็นเซอร์ (ตัวรับ) อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดสัญญาณซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนที่ตำแหน่ง P4-P7 เส้นประที่แสดงในรูปเป็นจุดเริ่มต้นของสัญญาณของเซ็นเซอร์ P1 จะเห็นว่าจุดเริ่มต้นของสัญญาณของเซ็นเซอร์ ณ ตำแหน่งอื่น ๆ จะมากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์และแหล่งกำเนิดเพิ่มขึ้น ตัวอย่างสัญญาณอคูสติกอิมพัลส์จากแหล่งกำเนิดจำลองที่ฐานสปริงของวาล์วไอเสีย (EV) ของกระบอกสูบที่ 1 ดังรูปที่ 4 มีพฤติกรรมและปรากฏการณ์เช่นเดียวกับสัญญาณของแหล่งกำเนิดจากตัวหัวฉีด (INJ) ดังที่กล่าวข้างต้น นอกจากนี้ rise time และ decay time ของสัญญาณที่บันทึกได้ดังรูปที่ 3 และ 4 จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างแหล่งกำเนิดและตัวรับมากขึ้น



รูปที่ 3 ตัวอย่างสัญญาณอคูสติกอิมพัลส์ของเซ็นเซอร์บนฝาสูบจากแหล่งกำเนิด (หักเหของคลื่น) ที่หัวฉีด (INJ)

การทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณจำลองโดยใช้วิธีการทำนายตำแหน่งด้วยความเร็วคลื่น ต้องรู้ค่าความเร็วของคลื่น ระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์ และเวลาเริ่มต้นที่คลื่นมาถึงเซ็นเซอร์ ความเร็วของคลื่นอคูสติกอิมพัลส์ที่เคลื่อนที่บนเครื่องยนต์ดีเซลได้มีการศึกษาและมีค่าเท่ากับ 2650 m/s [5-6] ซึ่งเป็นค่าความเร็วที่จะใช้ในบทความนี้เพื่อใช้ทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิด ระยะห่างระหว่างเซ็นเซอร์สามารถคำนวณจากแบบ หรือคำนวณโดยใช้

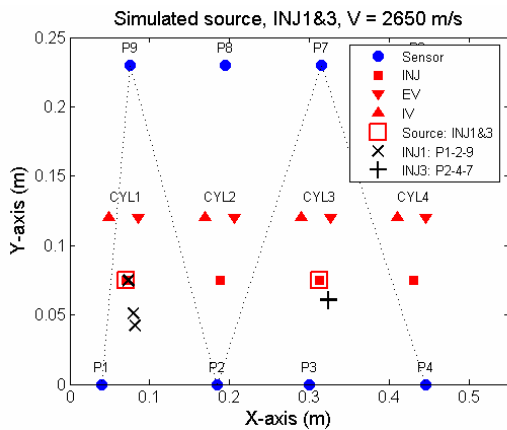
ตำแหน่งของแต่ละเซ็นเซอร์บนฝาสูบเครื่องยนต์ดีเซล ส่วนผลต่างของเวลาเริ่มต้นของแต่ละสัญญาณจะถูกคำนวณโดยใช้วิธี Threshold crossing ซึ่งกำหนดให้ค่า Threshold มีค่าประมาณ 0.2 เท่าของค่าแอมพลิจูดสูงสุด ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 5 และ 8 จนกระทั่งผลต่างของค่าตอบจากสมการที่ 5 และ 8 มีค่าน้อยกว่า 1mm ดังนั้นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดเทียบกับจุดอ้างอิง (S1 ในรูปที่ 1) สามารถคำนวณโดยใช้สมการ (9) และ (10) ตามลำดับ



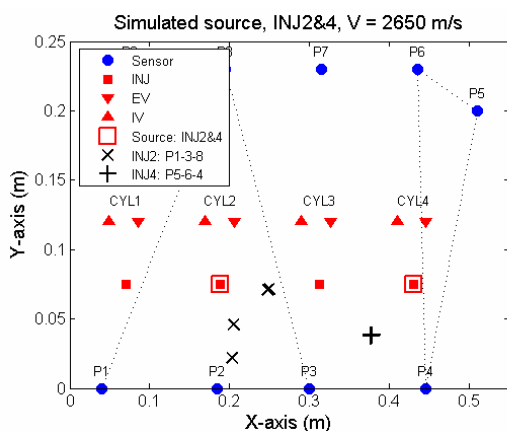
รูปที่ 4 ตัวอย่างสัญญาณอคูสติกอิมพัลส์ของเซ็นเซอร์บนฝาสูบจากแหล่งกำเนิด (หักเหของคลื่น) ที่วาล์วไอเสีย (EV)

จากรูปที่ 3 และ 4 หากมองดูด้วยตาเปล่าจะสามารถทำนายตำแหน่งอย่างคร่าว ๆ ได้ว่าแหล่งกำเนิดสัญญาณอยู่ใกล้กับกระบอกสูบที่ 1 ดังนั้นการใช้วิธีการทำนายตำแหน่งที่นำเสนอในบทความนี้จะทำนายตำแหน่งได้แม่นยำกว่า การทำนายตำแหน่งจะทดสอบโดยใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณจำลองที่ตัวหัวฉีด และฐานของวาล์วไอเสียของทั้ง 4 กระบอกสูบ (ดังรูปที่ 2) โดยที่การจัดเรียงของเซ็นเซอร์จะเป็นไปดังต่อไปนี้ P1-P2-P9, P1-P3-P8, P2-P4-P7 และ P5-P6-P4 สำหรับแหล่งกำเนิดที่กระบอกสูบ 1 ถึง 4 ตามลำดับ และแต่ละการทดลองจะบันทึกไว้ 5 ครั้ง และคำตอบของการทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่หัวฉีดและที่ฐานของวาล์วไอเสียแสดงไว้ดังรูปที่ 5 และ 6 สำหรับแหล่งกำเนิดที่หัวฉีดและฐานของวาล์วไอเสียตามลำดับ ซึ่งในรูปทั้งสองจะแสดงตำแหน่งของหัวฉีด วาล์วไอเสีย วาล์วไอเสีย ตำแหน่งของเซ็นเซอร์ทั้ง 9 ตำแหน่ง ตำแหน่งของแหล่งกำเนิด การจัดเรียงของเซ็นเซอร์ที่ใช้ทำนายตำแหน่ง (เช่น P1-P2-P9 หรือ P2-P4-P7 เป็นต้น) และตำแหน่งที่คำนวณได้จากสมการ 5, 8, 9 และ 10 จากรูปที่ 5 และ 6 พบว่าการทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่วาล์วไอเสียมีความแม่นยำกว่าแหล่งกำเนิดที่หัวฉีดซึ่งอาจเนื่องมาจากเส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่นที่แหล่งกำเนิดที่ฐานสปริงวาล์วมีความซับซ้อนน้อยกว่า หรืออาจเป็นเพราะคลื่นจากแหล่งกำเนิดหัวฉีดต้องเคลื่อนที่ผ่านหลาย

ตัวกลางจากตัวหัวฉีดไปยังฝาสูบ เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดที่หัวฉีดพบว่าการทำนายตำแหน่งของ INJ1 และ INJ3 มีความแม่นยำกว่าที่ INJ2 และ INJ4 โดยปกติการทำนายตำแหน่งโดยใช้เซ็นเซอร์สามตัวนี้ คำตอบของตำแหน่งจะอยู่ภายในสามเหลี่ยม แต่ในบางกรณีเช่นที่ INJ4 ดังรูปที่ 5(ข) ตำแหน่งที่ทำนายอยู่ภายนอกสามเหลี่ยมซึ่งอยู่ด้านตรงข้ามกับ P5



(ก) แหล่งกำเนิดที่ INJ1 และ INJ3

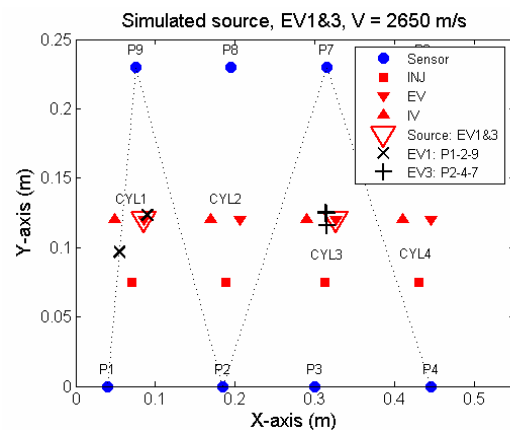


(ข) แหล่งกำเนิดที่ INJ2 และ INJ4

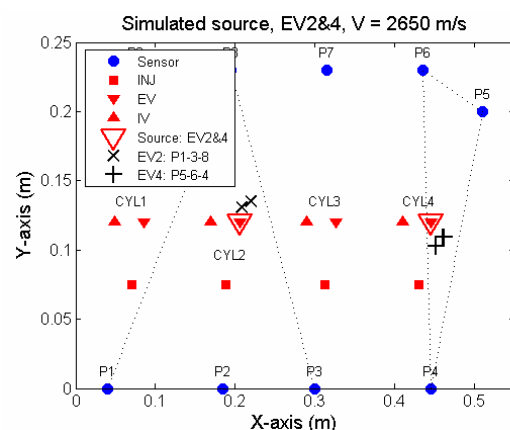
รูปที่ 5 การทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดจำลองที่ INJ

โดยทั่วไปวิธีการทำนายตำแหน่งโดยใช้ความเร็วคลื่นและเวลาเริ่มต้นของคลื่นของแต่ละสัญญาณได้มีการพิสูจน์ว่าใช้งานได้ดีสำหรับการทำนายตำแหน่งของโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน เช่น ท่อ [6], Plate [7-11], หรือเหล็กโครงสร้าง เช่น I-Beam [12] เป็นต้น ความแม่นยำของการทำนายตำแหน่งของวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางที่ทดสอบและการคำนวณหาเวลาเริ่มต้นของสัญญาณ สำหรับโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้จะสมมติให้ความเร็วของคลื่นอนุสติกอิมพัลส์คงที่ ดังนั้นความแม่นยำของการทำนายจะขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของเวลาเริ่มต้น

ของคลื่นที่ตรวจจับได้ที่แต่ละเซ็นเซอร์เท่านั้น แต่สำหรับกรณีที่โครงสร้างมีความซับซ้อนเช่น ฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซลทำให้ไม่สามารถที่จะหาความเร็วของคลื่นได้ถูกต้องเนื่องจากเส้นทางที่คลื่นเคลื่อนที่มีความซับซ้อนรวมทั้งเกิดจากผลของพฤติกรรมของคลื่นที่มีการสะท้อน หักเห และการเปลี่ยนโหมด โดยดูได้จากตัวอย่างของการทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดที่หัวฉีด (รูปที่ 5) ซึ่งคลื่นมีการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหลายตัว เช่นจากแหล่งกำเนิดที่ตัวโครงของหัวฉีดไปยังฝาสูบจนกระทั่งถึงตัวเซ็นเซอร์ ตัวกลางเหล่านี้อาจเป็นวัสดุต่างชนิดกันจึงทำให้เกิดการสูญเสียของพลังงานของคลื่นระหว่างที่คลื่นเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดไปยังตัวรับหรือเซ็นเซอร์ ในทางทฤษฎีถือว่าความเร็วของคลื่นขึ้นอยู่กับวัสดุ [16] แต่กรณีที่แหล่งกำเนิดอยู่ที่ฐานของวาล์วไอเสีย (รูปที่ 6) คลื่นอาจเคลื่อนที่ในตัวกลางเดียวคือโครงสร้างของฝาสูบ ดังนั้นความเร็วของคลื่นไม่เปลี่ยนแปลงจึงทำให้การทำนายตำแหน่งแม่นยำมากกว่า



(ก) แหล่งกำเนิดที่ EV1 และ EV3

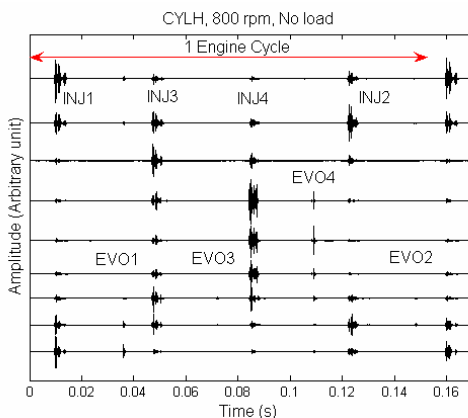


(ข) แหล่งกำเนิดที่ EV2 และ EV4

รูปที่ 6 การทำนายตำแหน่งของแหล่งกำเนิดจำลองที่ EV

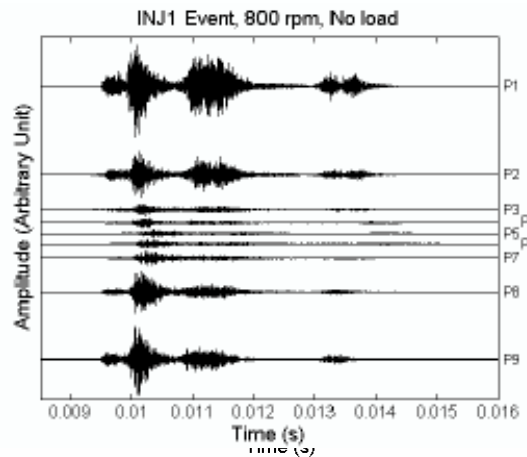
การทำนายตำแหน่งด้วยสัญญาณจากเครื่องยนต์ทำงาน

ตัวอย่างสัญญาณที่บันทึกจากเซ็นเซอร์ 9 ตำแหน่งบนฝาสูบ ดังรูปที่ 2 ขณะเครื่องยนต์ทำงานแบบไม่มีภาระที่ความเร็วรอบ 800 rpm แสดงไว้ในรูปที่ 7 สัญญาณที่บันทึกได้เป็นสัญญาณที่เครื่องยนต์ทำงาน 1 รอบวัฏจักรการทำงานของเครื่องยนต์ซึ่งสัญญาณที่เห็นได้ชัดเจนทั้ง 4 ระเบิดอกสูบ คือสัญญาณขณะหัวฉีดทำงาน (INJ) และ สัญญาณขณะวาล์วไอเสียเปิด (EVO) สัญญาณในรูปที่ 1 ไม่ได้ถูกบันทึกพร้อมกันจากเซ็นเซอร์ทั้ง 9 ตำแหน่ง แต่บันทึกโดยใช้สัญญาณอ้างอิงจากสัญญาณของเพลาค้อเหวี่ยงและสัญญาณของตำแหน่งศูนย์ตายบนของกระบอกสูบที่ 1 (TDC1) พร้อมกับเซ็นเซอร์ที่ตำแหน่งอื่น ๆ อีก 3 ตำแหน่ง ดังนั้นการผิดเพี้ยนของสัญญาณในแต่ละรอบการทำงานของเครื่องยนต์อาจเกิดขึ้นได้ จังหวะการจุดระเบิดของเครื่องยนต์จำเป็นต้องรู้เพื่อนำมา กำหนดเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในสัญญาณที่บันทึกได้ ซึ่งจังหวะการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ที่ทดสอบคือ 1-3-4-2 รายละเอียดของแต่ละสัญญาณ INJ1 แสดงไว้ในรูปที่ 8 และรูปที่ 9 สำหรับ EVO1 สัญญาณของ INJ1 ดังรูปที่ 8 เป็นสัญญาณที่เกิดมาจากแหล่งกำเนิดหลายแหล่งที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางกลและทางของไหลในระหว่างการทำงานของหัวฉีด การเผาไหม้ และชิ้นส่วนเคลื่อนที่อื่น ๆ [1, 4] สัญญาณของ INJ1 ประกอบด้วย 4 ส่วน ซึ่งแต่ละส่วนจะเกี่ยวข้องเนื่องกับกระบวนการที่กล่าวก่อนหน้านี้ ส่วนความแตกต่างของสัญญาณจะเกี่ยวเนื่องกับเส้นทางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน สำหรับสัญญาณของ EVO1 ดังรูปที่ 9 รูปร่างของสัญญาณมีความซับซ้อนน้อยกว่าสัญญาณของหัวฉีดเนื่องจากแหล่งกำเนิดสัญญาณน่าจะเกิดขึ้นบนฝาสูบเครื่องยนต์ สัญญาณของ EVO1 ดังรูปเกี่ยวข้องกับ การกระแทกของวาล์วไอเสียขณะเปิดและการไหลของอากาศเสียออกจากห้องเผาไหม้ผ่านทางวาล์วไอเสีย

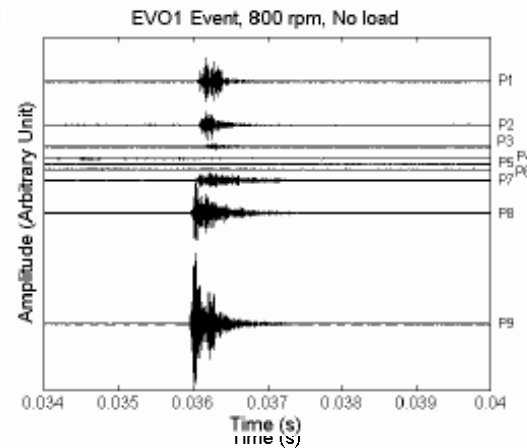


รูปที่ 7 ตัวอย่างสัญญาณที่บันทึกที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนฝาสูบขณะเครื่องยนต์ทำงานจริงแบบไม่มีภาระที่ความเร็วรอบ 800 rpm

สัญญาณ INJ1 และ EVO1 จะเห็นได้ชัดเจนเมื่อเซ็นเซอร์อยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดดังในรูปที่ 8 และ 9 การลดลงของแอมพลิจูดเห็นได้ทั้งสัญญาณของ INJ1 และ EVO1 โดยแอมพลิจูดจะลดลงตามระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดและเซ็นเซอร์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนที่เซ็นเซอร์ที่ตำแหน่ง P3-P7 เวลาเริ่มต้นของสัญญาณจะเพิ่มขึ้นตามเส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่นที่เพิ่มขึ้นหรือระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดและเซ็นเซอร์ที่เพิ่มขึ้น



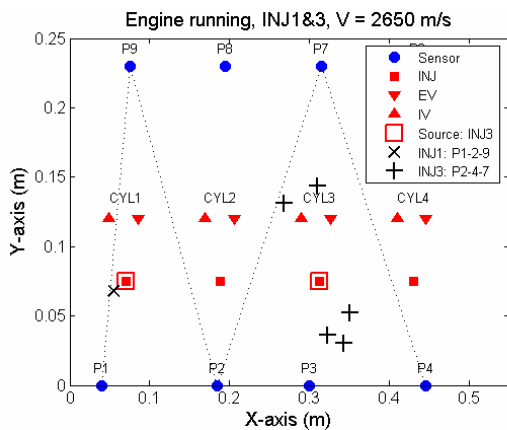
รูปที่ 8 ตัวอย่างสัญญาณของ INJ1 ตำแหน่งต่าง ๆ บนฝาสูบขณะเครื่องยนต์ทำงานจริงแบบไม่มีภาระที่ความเร็วรอบ 800 rpm



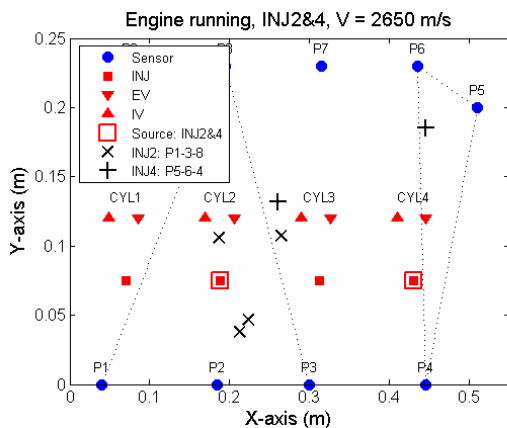
รูปที่ 9 ตัวอย่างสัญญาณของ EVO1 ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนฝาสูบขณะเครื่องยนต์ทำงานจริงแบบไม่มีภาระที่ความเร็วรอบ 800 rpm

การทำนายตำแหน่งโดยใช้เซ็นเซอร์สามตัววางเป็นรูปสามเหลี่ยมและใช้สมการที่ 5, 8, 9 และ 10 โดยความเร็วของคลื่นมีค่าเท่ากับ 2650 m/s ซึ่งเป็นค่าความเร็วเดียวกับการทดสอบโดยใช้สัญญาณจำลองที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ สัญญาณจากเซ็นเซอร์ทั้งสามที่ใช้ทำนายตำแหน่งจะถูกบันทึกไว้พร้อมกัน และเวลาเริ่มต้นของแต่ละสัญญาณคำนวณโดยใช้วิธี Threshold crossing เมื่อค่า Threshold มีค่าเท่ากับ 0.2 เท่าของแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณ

เซ็นเซอร์ที่ใช้ทำนายตำแหน่งของ INJ และ EVO ของกระบอกสูบที่ 1 – 4 จะมีการเรียงตัวดังนี้คือ P1-P2-P9, P1-P3-P8, P2-P4-P7 และ P5-P6-P4 โดยเซ็นเซอร์แต่ละกลุ่มจะถูกเก็บสัญญาณที่รอบการทำงานของเครื่องยนต์เดียวกัน



(ก) แหล่งกำเนิดที่ INJ1 และ INJ3



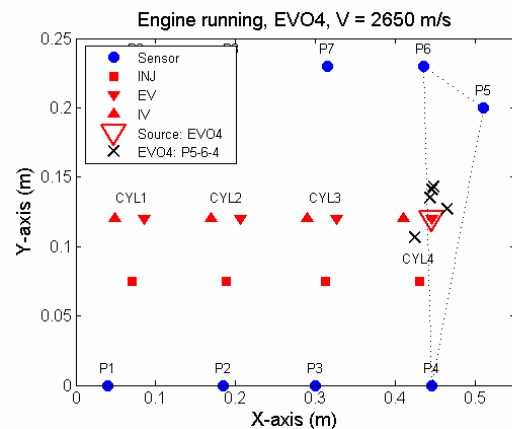
(ข) แหล่งกำเนิดที่ INJ2 และ INJ4

รูปที่ 10 การทำนายตำแหน่งเมื่อแหล่งกำเนิดจริงอยู่ที่ INJ ขณะเครื่องยนต์ทำงานจริงแบบไม่มีภาระที่ 800 rpm

รูปที่ 10 เป็นคำตอบของการทำนายตำแหน่งของสัญญาณหัวฉีดทั้ง 4 กระบอกสูบ จากรูปจะเห็นว่าตำแหน่งที่ทำนายได้อยู่กระจัดกระจายไม่ถูกต้อง และการทำนายที่บางตำแหน่งเช่น การทำนายตำแหน่งของ INJ1 ซึ่งไม่สามารถทำนายตำแหน่งจากสัญญาณที่ได้บันทึกไว้ 5 รอบของวัฏจักรการทำงานเครื่องยนต์ ที่แสดงไว้มีเพียงตำแหน่งเดียว และการทำนายตำแหน่งที่ INJ4 ก็สามารถทำนายได้เพียง 2 ตำแหน่งเท่านั้น หากเปรียบเทียบการทำนายตำแหน่งของสัญญาณจำลองที่หัวฉีดตำแหน่งเดียวกัน พบว่าคำตอบจากการใช้สัญญาณจำลองจะได้คำตอบที่ดีกว่า ทั้งนี้เพราะว่าสัญญาณจำลองเป็นแหล่งกำเนิดแหล่งเดียว แต่สัญญาณหัวฉีดรูป

ที่ 10 เป็นสัญญาณที่มาจากหลายแหล่ง รวมทั้งผลจากการสะท้อน การหักเห การเปลี่ยนโหมด และการลดลงของแอมป์ริจูด มีผลทำให้สัญญาณผิดเพี้ยนไปจึงทำให้การทำนายตำแหน่งไม่แม่นยำ

การทำนายตำแหน่งจากสัญญาณ EVO แสดงดังรูปที่ 11 สามารถทำนายได้เพียง EVO4 เท่านั้น เนื่องมาจากสัญญาณ EVO ที่กระบอกสูบอื่นมีขนาดสัญญาณใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน (Noise) จึงไม่สามารถนำมาคำนวณหาตำแหน่งได้ การทำนายตำแหน่งของสัญญาณ EVO4 ดังรูปที่ 11 ตำแหน่งที่ทำนายอยู่รวมกันเป็นกลุ่มใกล้เคียงกับ EV4 และมีความแม่นยำมากกว่าการใช้สัญญาณของ INJ1-INJ4 ซึ่งอาจเนื่องมาจากสัญญาณ EVO4 ที่ค่อนข้างชันซึ่งน่าจะมาจากการกระแทกช่วงที่วาล์วเปิดรวมกับการไหลของอากาศออกที่วาล์วไอเสีย



รูปที่ 11 การทำนายตำแหน่งเมื่อแหล่งกำเนิดอยู่ที่ EVO4 ขณะเครื่องยนต์ทำงานจริงแบบไม่มีภาระที่ 800 rpm

5. สรุป

การทำนายตำแหน่งโดยใช้เซ็นเซอร์ 3 ตัววางเรียงเป็นรูปสามเหลี่ยมสามารถนำมาใช้เพื่อหาตำแหน่งบนโครงสร้างที่ซับซ้อนเช่น ฝาสูบของเครื่องยนต์ดีเซล ด้วยสัญญาณอคูสติกอิมพัลส์ที่บันทึกได้จากเซ็นเซอร์ การทำนายตำแหน่งโดยใช้ความเร็วของคลื่นและเวลาเริ่มต้นของสัญญาณของแต่ละเซ็นเซอร์ สามารถทำนายได้ดีในกรณีที่สัญญาณค่อนข้างชัน (มีค่า Rise time น้อย) และเป็นสัญญาณที่มาจากแหล่งกำเนิดเดียว เช่นสัญญาณของแหล่งกำเนิดจำลอง (การหักดินสอ 2H) สำหรับการทำนายด้วยสัญญาณจากเครื่องยนต์ทำงานจริง ทำนายได้ใกล้เคียงเฉพาะสัญญาณของ EVO4 เท่านั้น เนื่องจากสัญญาณไม่ซับซ้อนและสัญญาณมีความชันมากกว่าสัญญาณของ INJ วิธีทำนายตำแหน่งแหล่งกำเนิดด้วยความเร็วนี้ต้องปรับปรุงและพัฒนาให้ทำนายได้แม่นยำยิ่งขึ้นโดยการศึกษาถึงผลกระทบต่อค่าความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ในหนึ่งตัวกลางหรือที่มากกว่าหนึ่งตัวกลาง ผลของความถี่ของสัญญาณ

และความซับซ้อนของโครงสร้าง เพื่อเพิ่มความสามารถของการ
ทำนายตำแหน่งด้วยสัญญาณอคูสติกอิมมิชชันให้แม่นยำขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J.D. Gill, R.L. Reuben, and J.A. Steel, A study of small HSDI diesel engine fuel injection equipment faults using acoustic emission, Proceedings EWGAE 2000, 24th European Conference on Acoustic Emission Testing, Paris, France, May 2000, pp. 281-286.
- [2] M.H. El-Ghamry, R.L. Reuben, and J.A. Steel, 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, 2003, pp. 805-823.
- [3] T.L. Fog, E.R. Brown, H.S. Hansen, L.B. Madsen, P.S. Rensen, J.A. Steel, R.L. Reuben and P.S. Pedersen, Exhaust valve leakage detection in large diesel engines, Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management COMADAM, Clayton, Australia, Vol. 1, 1998, pp. 269-278.
- [4] R.M. Douglas, P. Nivesrangsan, A.I.F. Robertson, E.R. Brown, E. R., J.A. Steel, R.L., Reuben, and T.L. Fog, 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, 2004, pp. 315-324.
- [5] P. Nivesrangsan, J.A. Steel, and R.L. Reuben, AE mapping of engines for spatially-located time series, Part I: Preliminary studies, Mechanical System and Signal Processing, Vol. 19, Issue 5, 2005, pp. 1034-1054.
- [6] R.K. Miller, A.A. Pollock, D.J. Watts, J.M. Carlyle, A.N. Tafuri, and J.J. Yezzi Jr., A reference standard for the development of acoustic emission pipeline leak detection techniques, NDT & E International, Vol. 32, No. 1, 1999, pp. 1-8.
- [7] A. Tobias, Acoustic emission source location in two dimensions by an array of three sensors, Non-Destructive Testing, Vol. 9, No. 1, 1976, pp. 9-12.
- [8] H. Jeong, and Y.S. Jang, Wavelet analysis of plate wave propagation in composite laminates, Composite Structures, Vol. 49, No. 4, 2000, pp. 443-450.
- [9] S.M. Ziola, and M.R. Gorman, Source location in thin plates using Cross-Correlation, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 90, No. 5, 1991, pp. 2551-2556.
- [10] L. Gaul and S. Hurlbaeus, Identification of the impact location on a plate using wavelets, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 12, No. 6, 1998, pp. 783-795.
- [11] R.D. Finlayson, M.A. Luzio, R.K. Miller, and A.A. Pollock, Continuous health monitoring of graphite epoxy motorcases (GEM), CINDE Journal, Vol. September/October, 2003, pp. 15-24.
- [12] K.M. Holford and D.C. Carter, Acoustic Emission Source Location, Key Engineering Materials, Vol. 167-168, 1999, 162-171.
- [13] R.K. Miller and P. McIntire, Non-Destructive Testing Handbook Vol.5 - Acoustic Emission, American Society for Non-Destructive Testing, USA, 1987.
- [14] S.P. Ying, D.R. Hamlin, and D. Tanneberger, A multichannel acoustic emission monitoring system with simultaneous multiple event data analyses, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 55, No. 2, 1974, pp. 350-356.
- [15] 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.
- [16] R. Halmshaw, Non-Destructive Testing, 2nd Edition, Edward Arnold, UK, 1991.