การควบคุมเสียงชนิดแอกทีฟที่ใช้การหาเอกลักษณ์แบบออนไลน์และออฟไลน์

Active Noise Control Using On-line and Off-line Secondary Path Identifications

อนุสรณ์ เพชรสินจร และ สุวัฒน์ กุลธนปรีดา

Anusorn Phetsinchorn and Suwat Kuntanapreeda

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบความสามารถของการลดระดับเสียงรบกวนแบบมิติเดียวในท่อระหว่างวิธี On- และ Off-Line Secondary Path โดยมีรูปแบบของการควบคุมเป็นแบบป้อนไปข้างหน้าและตัวควบคุมเป็นแบบ FIR Filter ที่ใช้กฎการปรับตัวเองแบบ FXLMS ชุดทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 4 ส่วนหลักคือ ชุดท่อลำโพงคู่หนึ่งพร้อมตัวขยายกำลังแบบสเตริโอ ไมโครโฟนสองตัวและชุดประมวลผล DSP ผลการลดระดับเสียงกับชุดทดลองปรากฏว่าการควบคุมที่ใช้วิธีปรับส่วนของ Secondary Path แบบ On-Line นั้น สามารถลดระดับเสียงรบกวนได้ดีกว่าและเร็วกว่าวิธีปรับส่วนของ Secondary Path แบบ Off-Line และเมื่อทดลองให้ส่วนของ Secondary Path ของชุดทดลองมีการเปลี่ยนแปลง การควบคุมโดยวิธี On-Line Secondary Path ก็ยังสามารถลดระดับเสียงรบกวนได้ดีกว่า โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ค่าลำดับ (Order) ของตัวควบคุมที่ไม่สูงมากนัก

คำสำคัญ : การควบคุมเสียง, ออนไลน์

Abstract

The performances of single channel active noise control (ANC) using on- and off-line secondary path identification techniques were studied. The control architecture is feedforward. The controllers are adaptive FIR filters using the FXLMS adaptation rule. The experimental apparatus contains four main parts: a duct set, a pair of loudspeakers with a stereo power amplifier, two microphones and a DSP processing unit. The results show that the ANC using the on-line secondary path identification technique is able to reduce the noise level better and faster than the off-line. Moreover, when the secondary path is

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

changed, the ANC with the on-line technique performs better than the off-line, especially when the order of the controller is low.

Keywords : ANC, Active Noise Control, FXLMS, On-Line Secondary Path

1. บทนำ

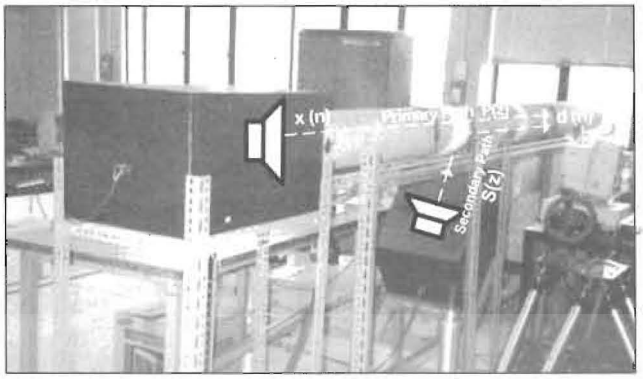
ปัญหามลพิษทางเสียงนั้นเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับความเจริญก้าวหน้าทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การก่อสร้างอาคารโดยอาศัยเครื่องมือกลขนาดใหญ่ การนำเครื่องจักรมาใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรมหรือแม้แต่การใช้ยานพาหนะในปัจจุบันก็ล้วนแต่ก่อให้เกิดมลพิษทางเสียงขึ้นทั้งสิ้น ซึ่งการที่จะลดระดับเสียงด้วยวิธีแบบพาสซีฟ (Passive) [1-2] เช่น การใช้วัสดุดูดซับเสียงมาบุผนังนั้น สามารถลดระดับของเสียงได้ดีในการทำงานย่านความถี่สูงแต่มีประสิทธิภาพการทำงานต่ำในย่านความถี่ต่ำ ในขณะที่การ ควบคุมแบบแอกทีฟ (Active) [3] ใช้งานได้ดีในย่านความถี่ต่ำ

ในงานวิจัยนี้ จะศึกษาออกแบบและสร้างตัวควบคุมเพื่อลดระดับเสียงแบบมิติเดียวในท่อแบบป้อนไปข้างหน้า (Feedforward Control) โดยใช้ตัวควบคุมแบบ FIR โดยใช้กฎการปรับตัวเองแบบ FXLMS โดยใช้วิธี On-Line Secondary Path และนำผลลัพธ์ที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับการควบคุมแบบ FXLMS โดยใช้วิธี Off-Line Secondary Path

2. ชุดควบคุมเสียงรบกวน

ในการทดสอบผลการทำงาน ผู้วิจัยได้ใช้ชุดทดลองที่ออกแบบและสร้างโดย สว่างทิตย์ ศรีกิจสุวรรณ และ สุวัฒน์ กุลธนปรีดา [4-5] ซึ่งประกอบด้วยชุดท่อปูนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. มีความยาวประมาณ 5 เมตร ลำโพงหนึ่งคู่พร้อมอุปกรณ์ขยายกำลัง ไมโครโฟนพร้อมอุปกรณ์ขยายสัญญาณสองชุด และคอมพิวเตอร์พร้อม DSP (Digital Signal Processor) ทำหน้าที่ในการคำนวณและประมวลผล รูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายชุดทดลองจริงของระบบ รูปที่ 2 แสดงแผนภาพชุดทดลองของระบบ รูปที่ 3 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของชุดทดลองที่ได้มาจากการทดสอบจริงในย่านความถี่ 50-500 Hz ค่าสัญญาณ input และ output ของผลตอบสนองได้มาจากไมโครโฟนวัดเสียงรบกวน $x(n)$ และไมโครโฟนวัดเสียง $d(n)$ ตามลำดับ แกนตั้งของกราฟเป็นตัวแทนของอัตราขยายซึ่งคำนวณได้จาก $20 \log \frac{x(n)}{d(n)}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

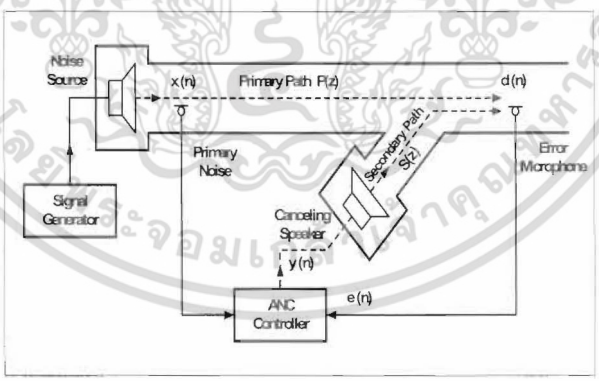


รูปที่ 1 ภาพถ่ายชุดทดลองจริงของระบบ

สังเกตว่าค่าความถี่ที่มีค่าอัตราขยายเป็นยอดสัญญาณ (peak) ขึ้นมาคือตำแหน่ง poles ของระบบ ซึ่งการควบคุมเสียงที่มีความถี่ตรง poles ของระบบจะไม่สามารถกระทำได้ ในงานวิจัยนี้ช่วงความถี่ของการทำงานถูกกำหนดด้วย frequency response ของลำโพงซึ่งมีย่านความถี่ทำงาน 20 ~ 400 Hz

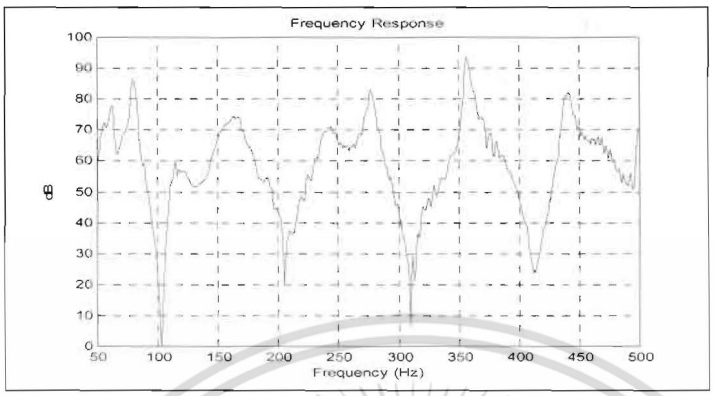
3. การควบคุมแบบ Active

การควบคุมแบบ Active มีหลักการทำงานพอสรุปโดยย่อดังนี้ จากรูปที่ 2 แหล่งกำเนิดเสียงรบกวน (ในที่นี้เป็นลำโพง) ซ้ายมือจะทำหน้าที่สร้างคลื่นสัญญาณเสียงรบกวนให้กับระบบ



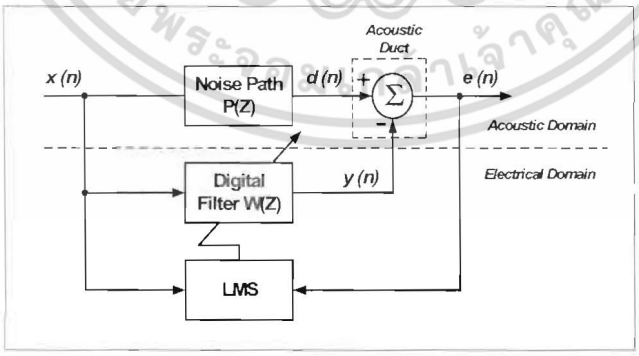
รูปที่ 2 แผนภาพชุดทดลองของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของชุดทดลอง

ในขณะที่ลำโพงตัวด้านล่างทำหน้าที่สร้างสัญญาณเสียงควบคุม $y(n)$ เพื่อใช้หักลบกับคลื่นเสียงรบกวน ค่าของคลื่นเสียงควบคุมนี้จะถูกกำหนดตามกฎการควบคุม ซึ่งคำนวณด้วยตัวประมวลผล DSP โดยใช้ข้อมูลจากสัญญาณเสียงรบกวนอ้างอิง $x(n)$ ก่อนการลดระดับเสียงที่วัดมาจากไมโครโฟนตัวซ้ายมือ และสัญญาณเสียงรบกวน $e(n)$ หลังจากการหักลบเสียง ณ ตำแหน่งที่ต้องการจะลดระดับเสียง ซึ่งวัดโดยไมโครโฟนตัวขวามือ หลักการทำงานนี้เรียกว่าการควบคุมแบบ feedforward แผนผังการทำงานนี้สรุปไว้ในรูปที่ 4 สัญญาณ $d(n)$ ในรูป คือสัญญาณเสียงรบกวน ณ ตำแหน่งที่ต้องการจะควบคุม ซึ่งคือ $x(n)$ ที่ถูกเปลี่ยนแปลงไปในขณะเคลื่อนที่ผ่านเส้นทางเดินของเสียงซึ่งแทนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอน $P(z)$

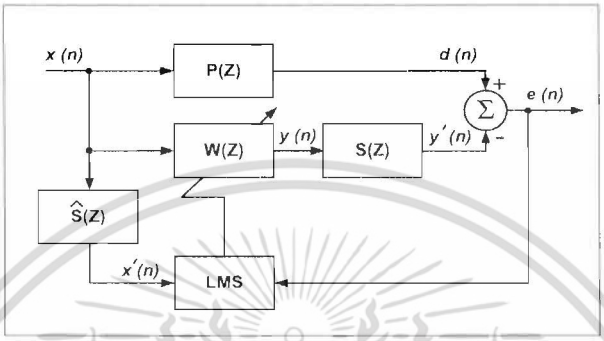


รูปที่ 4 แผนผังการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กฎการปรับค่าแบบ FXLMS

การควบคุมการลดระดับเสียงแบบป้อนไปข้างหน้า ใช้ตัวควบคุมแบบ FXLMS แสดงได้ดังรูปที่ 5 โดยได้มีการใช้ $\hat{S}(z)$ เพื่อทำการชดเชยผลที่เกิดจาก Secondary Path



รูปที่ 5 แผนผังการทำงานของ Feedforward FXLMS

โครงสร้างของตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบฟังก์ชัน FIR ซึ่งเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$y(n)=\sum_{l=0}^{L-1} w_l(n)\,x(n-l) \qquad (1)$$

โดยที่ n คือ ดัชนีเวลา L คือ ค่าลำดับ (Order) $w_l(n)$ คือ พารามิเตอร์ตัวที่ l ของฟังก์ชันค่าพารามิเตอร์ของการกรองสัญญาณ ส่วน $x(n)$ และ $y(n)$ คือ สัญญาณที่ทางเข้าและสัญญาณที่ทางออกของฟังก์ชันตามลำดับ

กฎการปรับตัวแบบ FXLMS ดัดแปลงมาจากกฎการปรับตัว LMS โดยมีการชดเชยผลของ Secondary Path และคณิตศาสตร์ของการปรับตัวหามาจากการ Minimize $\xi(n)=E\left[e^2(n)\right]$ ด้วยวิธี Steepest-descent Method ทำให้ได้กฎการปรับตัวแบบ FXLMS เป็นดังนี้

$$\mathbf{w}(n+1)=\mathbf{w}(n)+\mu\mathbf{x}'(n)e(n) \qquad (2)$$

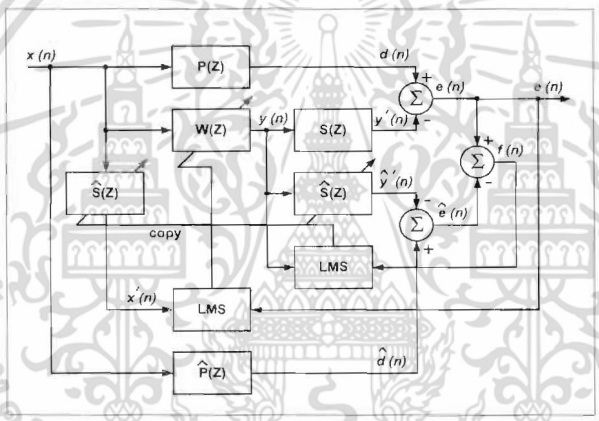
อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ $S(z)$ เป็นส่วนที่ไม่ทราบค่าจริง ดังนั้นจึงต้องทำการประมาณหาด้วยการทำแบบจำลองของฟังก์ชันถ่ายโอนส่วนทุติยภูมิ (Secondary-Path Modeling) ซึ่งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mathbf{x}'(n) = \hat{s}(n) * \mathbf{x}(n) \qquad (3)$$

โดยที่ $\hat{s}(n)$ คือฟังก์ชันประมาณของ $s(n)$ ที่ได้จากการแบบจำลองของฟังก์ชันถ่ายโอนส่วนทุติยภูมิ

จากที่ผ่านมา ส่วนของ Secondary Path $S(z)$ นั้นต้องทำการประมาณด้วย $\hat{S}(z)$ เพื่อทำการลดระดับเสียง โดยที่ $\hat{S}(z)$ ที่ทำการประมาณนั้นมีค่าคงที่ แต่ในงานบางชนิดส่วนของ Secondary Path มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา เพื่อให้การควบคุมมีประสิทธิภาพจึงต้องมีการประมาณส่วนของ Secondary Path อย่างต่อเนื่อง (On-Line Secondary Path) โดยมีลักษณะดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนผังการทำงานของ Feedforward FXLMS แบบ On-Line Secondary Path

จากรูปที่ 6 ส่วนของ $W(z)$ ยังคงใช้สัญญาณ $e(n)$ มาทำการปรับค่าพารามิเตอร์ตามหลักการของ LMS เช่นเดิม ขณะที่ส่วนของ Secondary Path $\hat{S}(z)$ จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์อย่างต่อเนื่องขณะที่ทำการควบคุม โดยใช้สัญญาณ $f(n)$ มาทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของ $\hat{S}(z)$ ตามหลักการของ LMS เช่นเดียวกัน และคณิตศาสตร์ของการปรับตัวหามาจากการ Minimize $\xi(n) = E\left[f^2(n)\right]$ ด้วยวิธี Steepest-descent Method ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมซึ่งแทนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอน $W(z)$ ใช้หลักการของ FXLMS algorithm เป็นดังนี้

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu_c \mathbf{x}'(n) e(n) \qquad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนของการปรับค่าพารามิเตอร์ของส่วนของ Secondary Path ซึ่งแทนด้วยฟังก์ชันถ่ายโอน $\hat{S}(z)$ ใช้หลักการของ LMS ได้ดังนี้

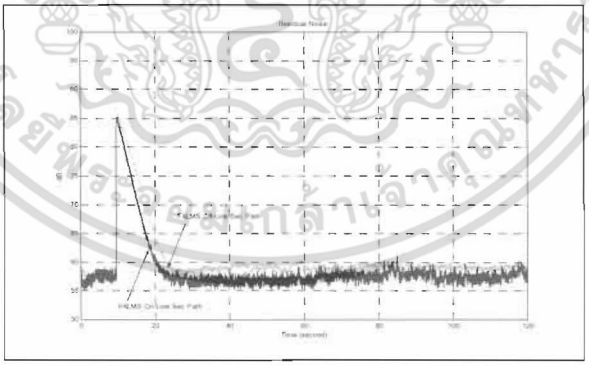
$$\hat{\mathbf{s}}(n+1) = \hat{\mathbf{s}}(n) + \mu_s \mathbf{y}(n) f(n) \qquad (5)$$

โดยที่ μ_c คือ อัตราการปรับตัว (Step Size) เพื่อปรับพารามิเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอน $W(z)$ และ μ_s คือ อัตราการปรับตัว (Step Size) เพื่อปรับพารามิเตอร์ของฟังก์ชันถ่ายโอน $\hat{S}(z)$

5. การควบคุม

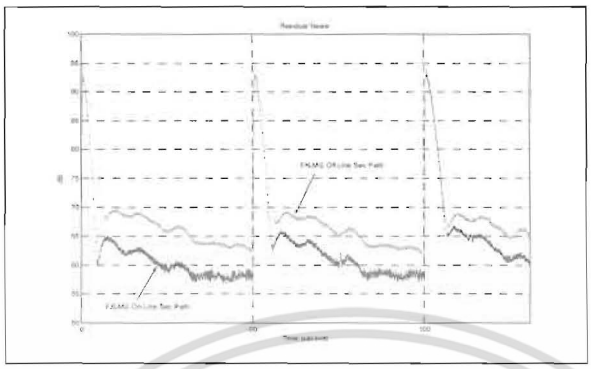
ในงานวิจัยนี้เงื่อนไขของการวัดสัญญาณเพื่อการประมวลผลและควบคุมมีค่าความถูกต้องของการแปลง AD/DA และอัตราการสุ่ม (Sampling rate) เท่ากับ 16 bits และ 5512 Hz ตามลำดับ

รูปที่ 7 เปรียบเทียบความสามารถในการลดระดับเสียงรบกวนของการควบคุมโดยวิธี FXLMS แบบ Off-Line และ On-Line Secondary Path เมื่อส่วนของ Secondary Path มีการเปลี่ยนแปลงโดยนำตัวต้านทานมาต่ออนุกรมกับสายสัญญาณที่ส่งออกจากการ์ด DSP ที่เวลาประมาณ 10 วินาที โดยป้อนค่าสัญญาณ Input เป็นฟังก์ชัน Sine มีแอมพลิจูด (Amplitude) ขนาด 0.3 Volt ที่ค่าความถี่ 300 Hz จากรูปจะเห็นว่าการควบคุมแบบ On-Line Secondary Path สามารถลดระดับเสียงรบกวนได้เร็วกว่าและมากกว่า Off-Line Secondary Path



รูปที่ 7 เปรียบเทียบผลระหว่าง FXLMS แบบ Off-Line On-Line Secondary Path

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 เปรียบเทียบผลระหว่าง FXLMS แบบ Off- Line และ On-Line Secondary Path เมื่อเสียงรบกวนเป็นสัญญาณกวาด (Sweep)

รูปที่ 8 เปรียบเทียบความสามารถในการลดระดับเสียงรบกวนของการควบคุมโดยวิธี FXLMS แบบ Off-Line และ On-Line Secondary Path เมื่อสัญญาณเสียงรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงความถี่โดยป้อนค่าสัญญาณ Input เป็นฟังก์ชัน Sine มีแอมพลิจูด (Amplitude) ขนาด 0.3 Volt ที่ค่าความถี่เปลี่ยนแปลงแบบกลับไปกลับมาระหว่าง 285 - 300 Hz โดยมีค่าคาบเวลาของการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 50 วินาที จะเห็นว่าการควบคุมโดยวิธี FXLMS แบบการหาเอกลักษณ์ส่วนของ Secondary Path แบบ On-Line นั้นสามารถลดระดับเสียงรบกวนได้ดีกว่าและเร็วกว่าโดยสามารถลดระดับเสียงรบกวนได้ประมาณ 37 เดซิเบล

6. สรุป

จากผลการทดลองจะเห็นว่าการควบคุมแบบ FXLMS แบบ On-Line Secondary Path สามารถลดระดับเสียงรบกวนได้ดีกว่าและเร็วกว่าการควบคุม โดยวิธี FXLMS แบบ Off-Line Secondary Path ทั้งในกรณีเมื่อให้ส่วนของ Secondary Path มีการเปลี่ยนแปลงและให้สัญญาณเสียงรบกวนมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ โดยรูปแบบการควบคุมที่ใช้ทดลองสามารถลดระดับเสียงรบกวนได้ดีในช่วงความถี่ 100-400 Hz และต้องไม่ตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบ ส่วนที่ความถี่ต่ำกว่า 100 Hz นั้น ไม่สามารถควบคุมได้เนื่องจากสัญญาณเสียงเริ่มมีสมบัติไม่เชิงเส้นอันเนื่องมาจากอุปกรณ์ของชุดควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และขอขอบคุณนายธนกร เพชรสินจร ผู้จัดเตรียมต้นฉบับในการตีพิมพ์ครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] B.J. Smith, R.J. Peters and S. Owen. Acoustics and Noise Control. 2nd ed. Addison-Wesley Longman, 1982.

[2] L.L. Beranek and I.L. Ver. Noise and Vibration Control Engineering : Principles and Applications. John Wiley and Sons, 1992.

[3] S.M. Kuo and D.R. Morgan. Active Noise Control Systems Algorithms and DSP Implementations. John Wiley and Sons, 1996.

[4] สว่างทิตย์ ศรีกิจสุวรรณ, สุวัฒน์ กุลธนปรีดา. "การควบคุมระดับเสียงรบกวนมิติเดียวแบบแอคทีฟ : การศึกษาเชิงทดลอง." การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย. ครั้งที่ 14 (พฤศจิกายน 2543) : 20-21.

[5] สว่างทิตย์ ศรีกิจสุวรรณ. "การควบคุมเสียงรบกวนแบบแอคทีฟภายในห้องปิดขนาดเล็กจากแหล่งกำเนิดเสียงเชิงกลภายนอก." วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรม เครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2544.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้