

การออกแบบการทดสอบแบบโมดอลเพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือน ที่มีผลต่อเสียงในสปินเดิลมอเตอร์สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

Modal testing approach for investigation of vibration that induces noise in hard disk drive spindle motors

อภิรัฐ ศิลปพินิจ* จูติมา จินตนาวัน และ นกตัญญ์ อาชาวาคม

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท จ.กรุงเทพฯ 10330

โทร 0-2218-6610 โทรสาร 0-2252-2889 *อีเมลล์ apirat_sil@yahoo.com

บทคัดย่อ

เนื่องจากการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงของสปินเดิลมอเตอร์ชนิด Fluid-dynamic bearing ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (HDD) นั้น เกิดจากการกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic excitation) เป็นหลัก ดังนั้นในการศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงของสปินเดิลมอเตอร์โดยการทดสอบแบบโมดอล จะต้องออกแบบการทดสอบให้ใกล้เคียงกับการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจริง ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบการทดสอบแบบโมดอล ด้วยวิธีการกระตุ้นการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมกับมอเตอร์ขนาดเล็ก โดยพิจารณาวิธีการกระตุ้นทางกลโดยใช้ค้อนเคาะเปรียบเทียบกับกระตุ้นทางไฟฟ้าด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบ Sine-swept ให้กับมอเตอร์หนึ่งเฟสในช่วงความถี่ 0-20 kHz ในการทดสอบทำการทดสอบกับสปินเดิลมอเตอร์สำหรับ HDD ขนาด 3.5" นั้น เมื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency response functions, FRFs) และความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์ พบว่าลักษณะของโหมดที่ปรากฏใน FRFs จากการกระตุ้นทางกลนั้นจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เคาะเป็นหลัก แต่ลักษณะของโหมดที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นทางไฟฟ้าจะเกิดขึ้นอย่างเด่นชัดและครบถ้วนมากกว่าท้ายสุดเมื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่จากการทดสอบแบบโมดอลและสเปกตรัมเสียงของมอเตอร์ขณะทำงาน พบว่าการทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้าสามารถนำไปศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงได้เหมาะสม ทั้งนี้การทดสอบการสั่นสะเทือนโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้ายังสามารถปรับใช้กับมอเตอร์ขนาดเล็กลงไปใช้ใน HDD ขนาด 2.5" ได้เหมาะสมอีกด้วย

Abstract

The vibration that leads to the acoustic noise of fluid-dynamic bearing spindle motor in hard disk drive is primarily caused by the electromagnetic excitation. Therefore, in modal analysis, it is needed to use the testing that exhibits this

particular vibration. The purpose of this research is to design the modal testing with a suitable excitation for small motors. This test is performed to compare the frequency response functions (FRFs) from mechanical excitation by an impact hammer to those from electrical excitation by the electromagnetic force by the supplied sine-swept current fed to one phase of the motor with the frequency range of 0-20 kHz. Spindle motors for 3.5" HDD are used in the experiment. When the FRFs are compared to the motor's natural frequencies, it is found that the mechanically excited mode in FRFs depends on the impact position while the electrical excited mode occurs more clearly and consistently. When the FRFs from modal testing are compared to the sound spectrum of motor while running, It is also found that the modal testing by electrical excitation is more suitable for the study of the vibro-acoustic behaviors of small motors than that by mechanical excitation. Additionally, the electrically excited modal testing can also be applied to small motors in 2.5" HDD with good results.

1. บทนำ

HDD เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับการจัดเก็บและการอ่านข้อมูล ในปัจจุบันผู้ผลิตได้พัฒนาให้ HDD มีความจุข้อมูลที่สูงมากขึ้นในขณะที่ยังมีขนาดเท่าเดิม และยังได้พัฒนาให้อ่านข้อมูลที่รวดเร็วขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานที่มีประสิทธิภาพของส่วนประกอบภายใน HDD หลายส่วนๆ แต่ส่วนประกอบหลักและถือเป็นหัวใจสำคัญนั่นก็คือ สปินเดิลมอเตอร์ ซึ่งการพัฒนาให้สปินเดิลมอเตอร์หมุนเร็วขึ้นจะทำให้เซกเตอร์ที่บรรจุข้อมูลจะถูกหมุนมาพบหัวอ่านเร็วขึ้น เป็นการลดเวลาในการเข้าถึงข้อมูลและส่งผ่านข้อมูลไปที่หน่วยประมวลผลได้เร็วขึ้น แต่ผลกระทบที่ตามมาก็คือ การสั่นสะเทือนและการแพร่เสียงที่เกิดขึ้นจากการหมุนของมอเตอร์ที่มีมากขึ้นด้วย โดยงานวิจัยนี้จะเน้นศึกษาเรื่องการแพร่เสียงของมอเตอร์เป็นหลัก

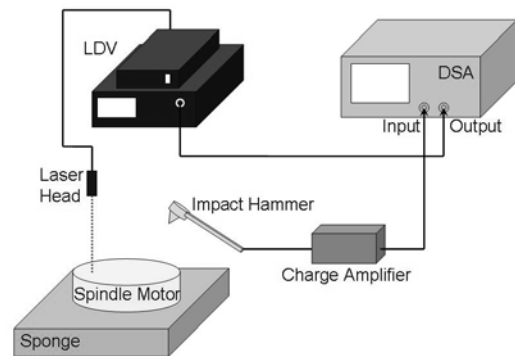
สาเหตุของการเกิดเสียงที่สำคัญจากการทำงานของสปินเดิลมอเตอร์นั้นมาจาก 3 แหล่งกำเนิดหลักด้วยกันคือ การกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic excitation) การกระตุ้นจากความไม่สมมาตรทางกล (Mechanical unbalance) และแหล่งกำเนิดทางอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic source) [1] ซึ่งจากการศึกษาถึงพฤติกรรมของเสียงที่เกิดจากการสั่นสะเทือนและแหล่งกำเนิดเสียงของสปินเดิลมอเตอร์ประเภท Fluid-dynamic bearing (FDB) ที่ใช้ใน HDD ปัจจุบันนั้นผู้วิจัยจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [2] พบว่าการกระตุ้นของแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดหลักของการเกิดเสียงในมอเตอร์และแรงดังกล่าวมีอิทธิพลอย่างมากในช่วงความถี่ 7-20 kHz การศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงของสปินเดิลมอเตอร์ในช่วงความถี่สนใจที่สูงดังกล่าวสามารถกระทำโดยการทดสอบแบบโมดอล โดยในการทดสอบจำเป็นต้องออกแบบการกระตุ้นการสั่นสะเทือนให้ใกล้เคียงกับลักษณะที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งจากการทดสอบการสั่นสะเทือนในเบื้องต้น [3] ใช้การกระตุ้นทางไฟฟ้าด้วยการจ่ายแหล่งกำเนิดแรงดันคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่ใดๆให้แก่มอเตอร์เพียงหนึ่งเฟส เพื่อหา FRFs และวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์ ผลการทดสอบยังให้จำนวนโหมดที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงความถี่ไม่สมบูรณ์ครบถ้วน โดยเฉพาะในช่วงความถี่สูงที่มีอิทธิพลต่อการเกิดเสียง และยังใช้เวลาในการทดสอบแต่ละครั้งค่อนข้างนาน

ในบทความนี้จึงเน้นไปที่การออกแบบการทดสอบแบบโมดอล โดยเน้นวิธีการกระตุ้นการสั่นสะเทือนที่ส่งผลต่อเสียงในมอเตอร์ขนาดเล็ก ทั้งนี้พิจารณาวิธีการกระตุ้นทางไฟฟ้าด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าเปรียบเทียบกับวิธีการกระตุ้นทางกล สปินเดิลมอเตอร์ที่นำมาศึกษาเป็นชนิดที่ใช้ใน HDD ขนาด 3.5" นอกจากนี้การออกแบบการทดสอบยังพิจารณาถึงการเลือกใช้เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่ดีที่สุดในช่วงความถี่ที่สามารถได้ยินได้กล่าวคือ 20 Hz-20 kHz เมื่อได้รูปแบบการทดสอบการสั่นสะเทือนที่ส่งผลต่อเสียงที่เหมาะสมแล้ว เราสามารถวิเคราะห์ฟังก์ชันการตอบสนองการสั่นสะเทือนเชิงความถี่หรือ Frequency response functions (FRFs) โดยเปรียบเทียบผลดังกล่าวกับสเปกตรัมเสียงของมอเตอร์ขณะทำงาน วิธีการทดสอบการสั่นสะเทือนดังกล่าวยังสามารถปรับใช้กับมอเตอร์ขนาดเล็กลงไปที่ใช้ใน HDD ขนาด 2.5" ได้อย่างเหมาะสมอีกด้วย

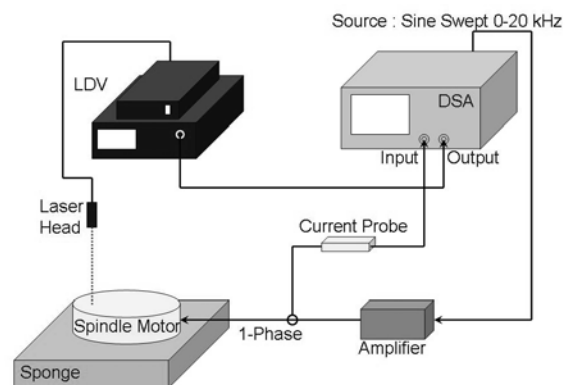
2. การทดสอบแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางกลและทางไฟฟ้า

การทดสอบแบบโมดอลบนมอเตอร์ขนาดเล็กเพื่อศึกษาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงนั้นสามารถกระทำได้โดยการกระตุ้นทางกลด้วยค้อนเคาะ [4] รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งเครื่องมือสำหรับการทดสอบดังกล่าว การทดสอบเริ่มจากการกระตุ้นโครงสร้างให้เกิดการสั่นสะเทือนด้วยค้อนเคาะ ทำให้เกิดแรงกระทำกับโครงสร้างโดยตรงในลักษณะของ Impulsive force โดยสัญญาณของแรงที่ใช้ในการกระตุ้นจะวัดจากทรานสดิวเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บริเวณหน้าสัมผัสของค้อนเคาะโดยสัญญาณนี้ส่งผ่านไป Charge amplifier เพื่อส่งต่อไปยัง Dynamic signal analyzer (DSA) เพื่อวิเคราะห์ต่อไป การวัดการสั่นสะเทือนในการทดสอบแบบโมดอล สามารถเลือกใช้เครื่องมือวัดทั้ง

Accelerometer และ Laser doppler vibrometer (LDV) ซึ่งจะกล่าวถึงการเลือกใช้เครื่องมือวัดทั้งสองในหัวข้อที่ 4 ต่อไป อย่างไรก็ตามในรูปที่ 1 และ 2 จะอธิบายเพียงวิธีการวัดการสั่นสะเทือนโดยใช้ LDV โดยเซ็นเซอร์จะวัดความเร็วที่เกิดขึ้นที่ผิวโครงสร้าง และแปลงสัญญาณการสั่นสะเทือนให้อยู่ในรูปของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปยัง DSA และประมวลผลตอบสนองเชิงความถี่ของการสั่นสะเทือนต่อแรงกระทำต่อไป



รูปที่ 1 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบโดยการกระตุ้นทางกลโดยใช้ LDV ในการวัดการสั่นสะเทือน



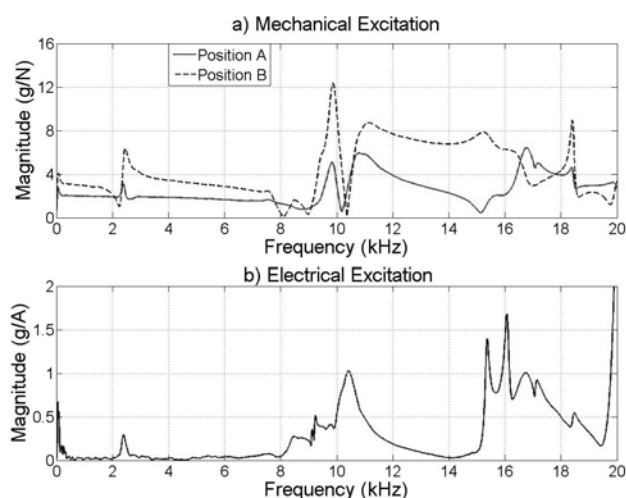
รูปที่ 2 การติดตั้งเครื่องมือทดสอบการโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้าโดยใช้ LDV ในการวัดการสั่นสะเทือน

ในขณะเดียวกันเราได้ปรับปรุงวิธีการกระตุ้นทางไฟฟ้าให้ดีขึ้น ในการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบโมดอล โดยการกระตุ้นทางไฟฟ้าด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะแสดงในรูปที่ 2 การทดสอบลักษณะนี้จะแตกต่างจากการกระตุ้นทางกลในส่วนการกำเนิดแรง กล่าวคือจะมีโพรบวัดกระแสไฟฟ้า (Current probe) และชุด Amplifier ซึ่งจะประกอบไปด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า วงจรไอซีเรกูเลเตอร์ และวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสไฟฟ้า ในที่นี้ DSA ทำหน้าที่ 2 ส่วนคือ ส่วนแรกทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณที่วัดได้ และส่วนที่สองทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าในรูปคลื่นไซน์ชอยดอลแบบปรับเปลี่ยนความถี่ (Sine-swept) ให้กับสปินเดิลมอเตอร์ในช่วงความถี่ 0-20 kHz ขั้นตอนการ

ทดสอบเริ่มจาก DSA จ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบปรับเปลี่ยนความถี่ให้กับชุด Amplifier ซึ่งทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนระดับของแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้ระดับกระแสไฟฟ้าคงที่และราบเรียบตลอดทุกช่วงความถี่ สำหรับจ่ายให้กับวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำของสปินเดิลมอเตอร์เพียงหนึ่งเฟส และไม่ทำให้มอเตอร์หมุน กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นรอบๆวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นผลให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีส่วนประกอบทั้งในทิศทางตามแนวรัศมี (Radial) และแนวเส้นสัมผัสวงกลม (Tangential) กระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นที่วงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและโรเตอร์ การสั่นสะเทือนเกิดขึ้นจากภายในมอเตอร์จะส่งผ่านมาสู่ผิวโครงสร้างด้านนอกและแพร่ไปสู่เสียงต่อไป ในการทดสอบทำการวัดสัญญาณของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยใช้โพรบวัดกระแสไฟฟ้าซึ่งจะแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าและส่งต่อไปยัง DSA สำหรับการสั่นสะเทือนของสปินเดิลมอเตอร์นั้นยังคงใช้ LDV ในการวัดสัญญาณ สัญญาณการสั่นสะเทือนจะส่งต่อไปยัง DSA เพื่อประมวลผลตอบสนองเชิงความถี่ของการสั่นสะเทือนต่อกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ต่อไป

3. การเปรียบเทียบผลตอบสนองการสั่นสะเทือนของการกระตุ้นทางกลและทางไฟฟ้า

ในการศึกษานี้จะทำการทดสอบการสั่นสะเทือนด้วยการกระตุ้นทางกลและทางไฟฟ้า เพื่อหาวิธีการกระตุ้นที่เหมาะสมกับ FDB สปินเดิลมอเตอร์สำหรับ HDD ขนาด 3.5" มีจำนวนของ Pole และ Slot เท่ากับ 12 และ 9 ตามลำดับ ในส่วนของการกระตุ้นทางไฟฟ้า ทำโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมกับกำลังของมอเตอร์ขนาด 500 mV แบบปรับเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 0-20 kHz ให้กับวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำเพียง 1 เฟส สำหรับการเปรียบเทียบผลจากการกระตุ้นทั้งสองวิธีนี้จะวัดการสั่นสะเทือนในตำแหน่งเดียวกันที่บริเวณฐานของมอเตอร์ใกล้กับแกนกลางของฐานในทิศทาง Transverse ด้วย Accelerometer เพื่อถ่ายทอดการทดสอบขึ้นต้น



รูปที่ 3 FRFs ของการกระตุ้นทางกลเปรียบเทียบกับทางไฟฟ้า

a) FRFs ของการกระตุ้นทางกล b) FRFs ของการกระตุ้นทางไฟฟ้า

การเปรียบเทียบ FRFs ระหว่างการกระตุ้นทางกลและทางไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 3 สำหรับการกระตุ้นทางกลที่ตำแหน่ง A และ B หมายถึงตำแหน่งที่ใช้ค้อนเคาะที่ใกล้กับบริเวณแกนกลางและที่ขอบนอกของฐานของมอเตอร์ตามลำดับ โหมดการสั่นสะเทือนสามารถระบุได้ที่มีความถี่ที่มีขนาดการสั่นสะเทือนสูงสุดปรากฏ ซึ่งมอเตอร์ที่นำมาทดสอบพบว่าโหมดการสั่นสะเทือนจำนวนมากในช่วงความถี่ที่ได้ยินและบางโหมดปรากฏใกล้กันและไม่สามารถแยกได้ชัดเจน จากผลของ FRFs ในรูปที่ 3 พบว่าการกระตุ้นทางกลที่ตำแหน่งต่างกันในช่วงความถี่ 2-12 kHz ในรูปที่ 3a) จะพบลักษณะของโหมดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดียวกัน แต่จะไม่พบบางโหมดอย่างชัดเจนในช่วงความถี่ 15-20 kHz หากเคาะบริเวณขอบนอกของฐาน สำหรับการกระตุ้นทางกลโดยใช้ค้อนเคาะนั้น ลักษณะโหมดของโครงสร้างมอเตอร์ที่ปรากฏจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการเคาะเป็นสำคัญ กล่าวคือการเคาะที่บริเวณใกล้แกนกลางของมอเตอร์จะให้ผล FRFs ที่มีโหมดปรากฏชัดเจนกว่าเมื่อเทียบกับการเคาะที่ขอบนอก ในส่วนของการกระตุ้นทางไฟฟ้าจะเห็นว่าในช่วงความถี่ต่ำ จะพบโหมดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 2.4 kHz ซึ่งตรงกับโหมดที่พบจากการกระตุ้นทางกล และในช่วงความถี่ 7-12 kHz ก็ยังคงพบโหมดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นในบริเวณเดียวกันหลายโหมด และในช่วงความถี่ 15-20 kHz จะพบโหมดหลายโหมดได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกระตุ้นทางกล และเมื่อเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติที่พบจากการวัดการสั่นสะเทือนที่ฐานของมอเตอร์จากการกระตุ้นทางกลและทางไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 1 ในส่วนของการกระตุ้นทางกลจะเห็นว่าในช่วงความถี่ 7-20 kHz จะไม่พบโหมดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 7.7, 9.55, 15.06 และ 16.1 kHz อย่างชัดเจนเหมือนกรณีการกระตุ้นทางไฟฟ้า และค่าความถี่ธรรมชาติในบางโหมดอาจจะมีการเลื่อนตำแหน่งไปบ้างเมื่อเปรียบเทียบกับกระตุ้นทางไฟฟ้า

ตารางที่ 1 ความถี่ธรรมชาติที่พบจากการกระตุ้นทางกลและทางไฟฟ้า

Mode	Natural Frequency (kHz)	
	Mechanical Excitation	Electrical Excitation
1	2.4	2.4
2	-	7.7
3	8.5	8.4
4	-	9.55
5	9.84	9.9
6	10.78	10.6
7	-	15.06
8	15.3	15.4
9	-	16.1
10	16.8	16.9
11	17.2	17.2
12	18.4	18.4

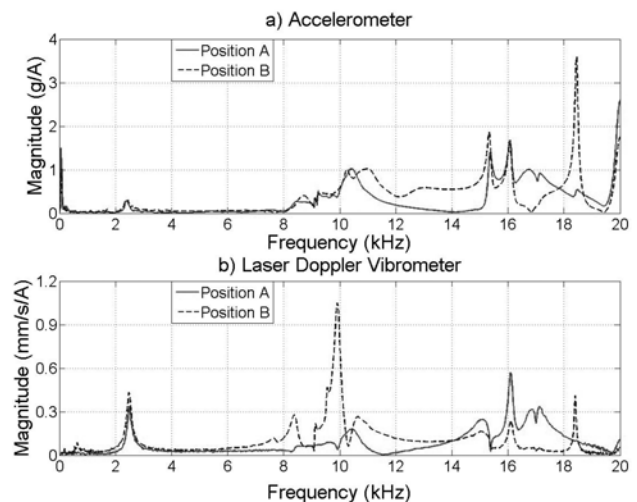
จากตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาจำนวนโหมดของการสั่นสะเทือนที่พบในการกระตุ้นทางไฟฟ้า จะเห็นลักษณะของโหมดที่เกิดขึ้นอย่างเด่นชัด และจำนวนโหมดที่พบมีมากกว่าการกระตุ้นทางกลอีกด้วย เพราะฉะนั้น การทดสอบการสั่นสะเทือนโดยวิธีการกระตุ้นทางไฟฟ้าด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจึงน่าจะเหมาะสมกับมอเตอร์ที่มีขนาดเล็กมากกว่าการทดสอบโดยการกระตุ้นทางกล เนื่องจากให้ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่เด่นชัดและจำนวนโหมดที่พบมีความสมบูรณ์มากกว่าการกระตุ้นทางกล การกระตุ้นทางไฟฟ้ายังมีข้อดีคือเราสามารถควบคุมแรงแม่เหล็กได้คงที่ผ่านการจ่ายกระแสไฟฟ้า ทำให้ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนซ้ำรูปแบบเดิมทุกครั้งที่เราทำการทดสอบ นอกจากนี้ลักษณะแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการจ่ายกระแสเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กยังมีลักษณะคล้ายคลึงกับปรากฏการณ์การเกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าขณะมอเตอร์ทำงานจริง และจากการศึกษา [2] พบว่าแรงแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเป็นสาเหตุหลักของการเกิดเสียง กล่าวคือแรงดังกล่าวกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนบริเวณแกนขดลวดและโรเตอร์ภายในมอเตอร์ และการสั่นสะเทือนจะส่งผ่านมาสู่ผิววนอกผ่านโครงสร้างมอเตอร์ และแพร่ไปสู่เสียงในที่สุด ซึ่งจะต่างจากการกระตุ้นทางกลที่เป็นการกระตุ้นการสั่นสะเทือนที่ภายนอกโดยตรง ดังนั้นการกระตุ้นทางไฟฟ้าจึงน่าจะเหมาะสมสำหรับการนำไปศึกษาการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงต่อไป

4. การเลือกใช้เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมกับมอเตอร์ขนาดเล็กในช่วงความถี่ที่ได้ยินได้

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาการเลือกใช้เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมกับช่วงความถี่ที่ได้ยินกล่าวคือช่วงความถี่ 20 Hz-20 kHz โดยเปรียบเทียบผล FRFs จากการใช้เครื่องมือวัดที่แตกต่างกัน เมื่อทดสอบการสั่นสะเทือนโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้ากับสปินเดิลมอเตอร์โดยใช้ Accelerometer เป็นของ Brüel & Kjær Type 4397 และ LDV เป็นของ Polytec ซึ่งประกอบไปด้วย Vibrometer controller model OFV-5000 และ Differential fiber optical sensor head model OFV-512 วัดการสั่นสะเทือน จะได้ผล FRFs จากเครื่องมือวัดทั้งสองดังแสดงในรูปที่ 4 ในแต่ละแบบแสดงผลการวัดการสั่นสะเทือนที่ฐานของมอเตอร์ในทิศทาง Transverse เปรียบเทียบกันสองตำแหน่ง โดยที่ตำแหน่ง A และ B เป็นตำแหน่งที่วัดการสั่นสะเทือนที่ใกล้กับแกนกลางและที่ใกล้กับขอบนอกของฐานของมอเตอร์ตามลำดับ จากรูปที่ 4 พบว่า FRFs ที่ได้จากการวัดการสั่นสะเทือนด้วย Accelerometer และ LDV จะให้ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่มีโหมดการสั่นสะเทือนปรากฏได้ครบถ้วนในช่วงความถี่ 0-20 kHz ได้ไม่ต่างกัน

เนื่องจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นบนมอเตอร์นั้นเป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระทำระหว่างวงแหวนขดลวดเหนี่ยวนำและโรเตอร์ ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นกับทั้งสองส่วน และจะส่งผ่านไปสู่ฐานของมอเตอร์และโรเตอร์ที่ผิววนอกของมอเตอร์และแพร่ไปสู่เสียงต่อไป การศึกษาการแพร่ของเสียงจึงต้องพิจารณาการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นทั้งที่ฐานของมอเตอร์ในทิศทาง Transverse และโรเตอร์ในทิศทาง Transverse และแนวรัศมี ซึ่งลักษณะการสั่นสะเทือนดังกล่าวจะมีผลต่อการแพร่เสียงมากกว่าการสั่นสะเทือนในแนวอื่นๆ เมื่อพิจารณาประเด็น

ของการวัดการสั่นสะเทือนในหลายทิศทางและหลายตำแหน่งบนโครงสร้างมอเตอร์จะพบว่า LDV สามารถวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นบนมอเตอร์ได้ทุกตำแหน่งและทิศทางโดยที่เครื่องมือวัดไม่ต้องสัมผัสกับชิ้นงานโดยตรง ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดของ Accelerometer เนื่องจากมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับมอเตอร์ที่มีขนาดเล็กและจะต้องติดตั้งบนตัวชิ้นงานโดยตรง ทำให้ไม่สามารถวัดการสั่นสะเทือนของชิ้นงานในบริเวณที่มีรูปทรงสลับซับซ้อนได้ ดังนั้นการเลือกใช้ LDV จึงเหมาะสมกับการวัดการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงของมอเตอร์ขนาดเล็กในช่วงความถี่ 0-20 kHz

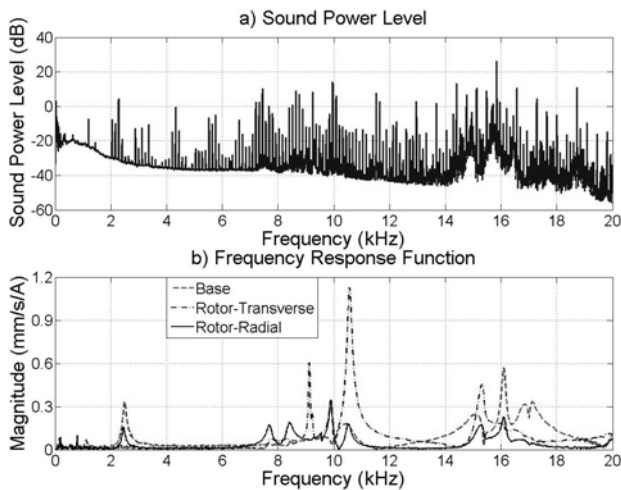


รูปที่ 4 FRFs ของการวัดด้วย Accelerometer เปรียบเทียบกับ LDV

a) FRFs ของ Accelerometer b) FRFs ของ LDV

5. การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของการสั่นสะเทือนของมอเตอร์กับสเปคตรัมเสียง

หลังจากได้พิจารณาวิธีการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบโมดอลที่เหมาะสมโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้าและวัดการสั่นสะเทือนด้วย LDV สำหรับมอเตอร์ขนาดเล็กแล้ว ในการศึกษาต่อไปนี้เป็นการศึกษาการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงของสปินเดิลมอเตอร์ที่ใช้ใน HDD ขนาด 3.5" โดยการเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ของการสั่นสะเทือนจากการทดสอบดังกล่าวข้างต้นกับสเปคตรัมของเสียงที่วัดได้ขณะมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 7,200 rpm การวัดเสียงทำโดยให้สปินเดิลมอเตอร์วางบนจุดรองรับที่ตั้งอยู่ภายในห้องไร้เสียงสะท้อน (Anechoic room) จุดรองรับมีลักษณะเป็นเชือกสองเส้นพาดทับกันเพื่อให้เสียงที่เกิดขึ้นจากการหมุนของมอเตอร์แพร่ออกได้ทุกทิศทาง มอเตอร์จะถูกขับด้วยแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายมาจาก Pulse-width modulation inverter เพื่อรักษาความเร็วรอบให้คงที่และวัดเสียงที่แพร่ออกมาด้วยไมโครโฟนทั้งหมด 10 ตัวที่ตั้งอยู่ในแต่ละตำแหน่งตามลักษณะของเครื่องทรงกลม โดยที่ระยะห่างระหว่างปลายไมโครโฟนถึงผิวโครงสร้างของมอเตอร์เท่ากันทุกตัวคือ 30 cm โดยสัญญาณเสียงที่วัดได้จากไมโครโฟนแต่ละตัวจะนำไปประมวลผลและคำนวณค่าระดับกำลังเสียง (Sound power level) ในช่วงความถี่ที่หูสามารถได้ยินได้ กล่าวคือในช่วงความถี่ 20 Hz-20 kHz ต่อไป



รูปที่ 5 FRFs เปรียบเทียบกับสเปกตรัมเสียงที่ความเร็ว 7,200 rpm
a) สเปกตรัมของเสียง b) FRFs ของการกระตุ้นทางไฟฟ้า

การเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากการทดสอบแบบโมดอลพื้นฐานของมอเตอร์และโรเตอร์ในทิศทาง Transverse และแนวรัศมีที่ตำแหน่งใดๆ กับผลสเปกตรัมของระดับกำลังเสียงที่หมุนด้วยความเร็ว 7,200 rpm แสดงในรูปที่ 5 สำหรับสเปกตรัมเสียงสามารถคำนวณค่าระดับกำลังเสียงรวมตลอดช่วงความถี่ได้เท่ากับ 29.58 dB และค่าระดับเสียงรวมของห้องวัดเสียง (Background noise) มีค่าเท่ากับ 10.48 dB ในสเปกตรัมเสียงจะพบลักษณะของยอดแหลมเกิดขึ้นที่หลาย ๆ ความถี่และพบลักษณะของยอดแหลมที่อยู่รวมกันอย่างหนาแน่นเกิดขึ้นเป็นยอดภูเขาเช่นเดียวกับการเกิดโหมดการสั่นสะเทือน จากการเปรียบเทียบในรูปที่ 5 พบว่ายอดแหลมของเสียงที่เกิดขึ้นในแต่ละความถี่นั้นใกล้เคียงกับเรโซแนนซ์ของการสั่นสะเทือนที่พบในผลตอบสนองเชิงความถี่จากการวัดพื้นฐานของมอเตอร์และโรเตอร์ทั้งในทิศทางตามแนวรัศมีและทิศทาง Transverse นั้นหมายความว่าเมื่อความถี่ของการสั่นสะเทือนเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมอเตอร์ จะส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงและมีเสียงแพร่ออกมาจากโรเตอร์และฐานของมอเตอร์ดังขึ้นอีกด้วย โดยเฉพาะในช่วงความถี่ 14.6-16.5 kHz จะพบการขยายของเสียงเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากพบปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ของการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่นี้มากกว่าช่วงอื่นๆ ดังนั้นการทดสอบการสั่นสะเทือนโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้าด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถกระตุ้นการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อเสียงได้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในขณะที่มอเตอร์กำลังทำงาน

6. สรุป

ในการศึกษาวิธีการทดสอบการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อเสียงเพื่อหาวิธีการกระตุ้นการสั่นสะเทือนที่เหมาะสมกับมอเตอร์ที่มีขนาดเล็กพบว่าการใช้การกระตุ้นทางไฟฟ้าด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าและใช้ LDV ในการวัดการสั่นสะเทือนที่ฐานของมอเตอร์และโรเตอร์ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของการแพร่เสียงนั้น ให้ผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่เด่นชัดและจำนวนโหมดการสั่นสะเทือนที่พบครบถ้วน

สมบูรณ์ตลอดช่วงความถี่ 0-20 kHz อีกทั้งผลตอบสนองการสั่นสะเทือนที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีการดังกล่าวเมื่อนำไปพิจารณาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมเสียงที่วัดได้จากการทำงานของมอเตอร์พบว่าโหมดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในผลตอบสนองเชิงความถี่มีความสำคัญอย่างมากกับพฤติกรรมการแพร่เสียงของสปินเดิลมอเตอร์ โดยเฉพาะในช่วงความถี่ 7-20 kHz ซึ่งเป็นช่วงที่แรงแม่เหล็กไฟฟ้ามีอิทธิพลต่อการเกิดเสียงมากที่สุด ดังนั้นการกระตุ้นทางไฟฟ้าด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าและวัดการสั่นสะเทือนด้วย LDV จึงเหมาะสมสำหรับการนำไปศึกษาการสั่นสะเทือนที่แพร่ไปสู่เสียงต่อไป เมื่อนำวิธีการทดสอบการสั่นสะเทือนโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้าด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้าไปปรับใช้กับสปินเดิลมอเตอร์ที่มีขนาดเล็กลงไปที่ใช้ใน HDD ขนาด 2.5" และวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นด้วย LDV พบว่าสามารถปรับใช้กับมอเตอร์ขนาดเล็กได้อย่างเหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.สุรพงศ์ สุวรรณกวิน อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการออกแบบและจัดทำชุด Amplifier สำหรับการทดสอบการสั่นสะเทือนแบบโมดอลโดยการกระตุ้นทางไฟฟ้า ซึ่งทำให้บทความฉบับนี้ประสบความสำเร็จด้วยลงดี จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- Beranek LL., Ver IL, 1992, Noise and Vibration Control Engineering : Principles and Applications., Wiley, New York, pp. 709-734
- Ajavakom, N., Jintanawan, T., Singhatanagid, P., and, Sripakagorn, P., 2007, On Investigation of Vibro-Acoustics of FDB Spindle Motors for Hard Disk Drives., Microsystem Technology, DOI 10.1007/s00542-006-0372-z.
- อภิรัฐ ศิลปพินิจ, บุรินทร์ โพธิ์ชัย, ปาจารย์ ถาวรล้ำเลิศ และ นภดณัย อาชาวคม, การศึกษาการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อเสียงของสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยการกระตุ้นทางไฟฟ้า, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21, พัทยา, ชลบุรี, 17-19 ตุลาคม 2550
- Jintanawan, T., Chungphaisan, K., Liwcharoenchai, K., Junkaew, P., and, Singhatanadgid, P., 2007, Role of Stator-base Interference Fit on Vibration Transmission and Acoustic Noise in FDB Spindle Motors for HDD., ASME Information Storage and Processing Systems Conference., Santa Clara, CA, pp. 261-263