

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของ Actuator Arm ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ พร้อมทั้งตรวจสอบการสั่นสะเทือนโดยใช้ LDV

เทวิน พันภัย¹⁾ และ ธิระ เจียศิริพงษ์กุล²⁾

¹⁾ นักศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 12121

²⁾ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 12121

Email: tawin_ph@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาถึงการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่าน/เขียน (Actuator Arm) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ ของการสั่นสะเทือนในแขนหัวอ่าน/เขียน พร้อมกับเปรียบเทียบค่าที่ได้กับการทดสอบโดยใช้ LDV (Laser Doppler Vibrometer) ปรากฏว่าจากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนโดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) และผลการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน โดยการทดสอบด้วย LDV แสดงให้เห็นถึงค่าความถี่ธรรมชาติ ของทั้ง 2 วิธีมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษารูปแบบของการสั่นสะเทือนของตัว Head Stack Assembly (HSA) และเพื่อใช้ในการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแขนหัวอ่าน/เขียนในระดับสูงต่อไป

คำสำคัญ : แขนหัวอ่าน/เขียน, ความถี่ธรรมชาติ, ไฟไนต์เอลิเมนต์

Vibration analysis of Actuator Arm in HDD using FEM and identification using LDV

Tawin Phonpai¹⁾ and Thira Jearsipongkul²⁾

¹⁾ Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University 12121

²⁾ Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University 12121

Email: tawin_ph@hotmail.com

ABSTRACT

A hard disk drive (HDD) is a storage component, which is commonly used in computer, electronic device etc. It has been continuously developed by means of either capacity or size to achieve the customer's requirements. This paper is to study and to analyze the vibrations of the actuator arm in HDD using FEM (Finite Element Method) software and LDV (Laser Doppler Vibrometer) to find out the natural frequencies. The results of the natural frequencies from both FEM and LDV show a good agreement and this information can also be used to further study the vibrations of Head Stack Assembly (HSA) and to develop the finite element model of the actuator arm

Keywords : actuator arm, natural frequency, finite element method

บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันเทคโนโลยีการจัดเก็บข้อมูลถูกพัฒนาอย่างรวดเร็วเพื่อรองรับการใช้งานในรูปแบบต่างๆ ดังนั้นความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลจึงเป็นสิ่งที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนเครื่องคอมพิวเตอร์ เช่น อุปกรณ์ประมวลผล และ อุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล หรือ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เป็นต้น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลที่มีความนิยมอย่างแพร่หลาย โดยขีดความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลของตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ปรกติจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบการหมุนของจานดิสก์ หรือ ความเร็วในการอ่าน/เขียนข้อมูลของตัวหัวอ่านข้อมูล ดังนั้นในการหมุนที่ความเร็วรอบค่อนข้างสูง การสั่นสะเทือนจึงเป็นอีกปัจจัยที่ต้องได้รับการศึกษาและควบคุม (John R. Edwards., 1999)

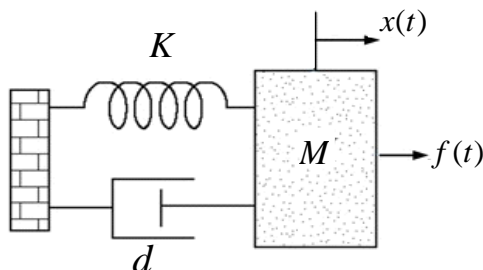
ในบทความนี้การสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่าน/เขียน จะถูกนำมาวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และตรวจสอบการสั่นสะเทือนโดยใช้ LDV ซึ่งเป็นตัวตรวจจับการสั่นสะเทือนทางแสง (L. M. Xu, S. Zeng, N.Q. Guo, R.M. Lin., 2000) เพื่อทำการหาค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies) ของแขนหัวอ่าน/เขียน ที่มีเงื่อนไขของขอบเขต (Boundary Conditions) ที่เหมือนกัน โดยการวิเคราะห์นี้จะถูกนำไปใช้เพื่อหาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแขนหัวอ่าน/เขียน ต่อไปในอนาคต เพื่อใช้เป็นแนวทางในการหาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของตัว HSA (Head Stack Assembly) (J. Luoa,et al., 2006)

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนทางกายภาพ

สำหรับการสั่นสะเทือนทางวิศวกรรม ซึ่งเป็นการสั่นของระบบที่ตกอยู่ภายใต้แรงกระทำหรือการสั่นโดยอิสระก็ตามจะต้องมีการรับกวนระบบซึ่งเป็นค่าอินพุท (Input) ที่ให้กับระบบและระบบจะมีการตอบสนอง (Response) เป็นผลลัพธ์ ในการศึกษาเรื่องการสั่นสะเทือนทางวิศวกรรมมักจะเกี่ยวข้องกับ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) เพื่อแทนสิ่งที่มีอยู่จริงทางกายภาพ โดยพยายามสร้างแบบจำลองที่มีพฤติกรรมคล้ายกับระบบจริงให้มากที่สุด เพื่อให้สมการคณิตศาสตร์ที่สามารถแทนการสั่นสะเทือนของระบบได้อย่างถูกต้อง ดังแสดงในรูปที่ 1 หลังจากที่ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการหาสมการการเคลื่อนที่ของแบบจำลองที่สร้างขึ้นมา แล้วก็หาผลเฉลยของสมการการเคลื่อนที่ จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สุดท้ายถือว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ในการอธิบายและสรุปผลลัพธ์ที่ได้ และนอกจากนี้ยังสามารถนำแบบจำลองของระบบไปพัฒนาสำหรับแก้ไขปัญหาในรูปแบบที่คล้ายกันได้ในอนาคต (กนต์ธร ชานีประศาสน์, 2545)

วิธีการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ที่จะเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ ดังในสมการที่ 1 เป็นการแก้ปัญหาแบบไอเกน (Eigenvalue Problem) แล้วสามารถนำค่าที่ได้ไปหาเวกเตอร์เจาะจง (Eigenvector) เพื่อใช้ในการศึกษารูปแบบการสั่นสะเทือน หลังจากนั้นนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ (Ewins, D. J., 1984)



รูปที่ 1 แบบจำลองทางกายภาพของระบบสั่นสะเทือน

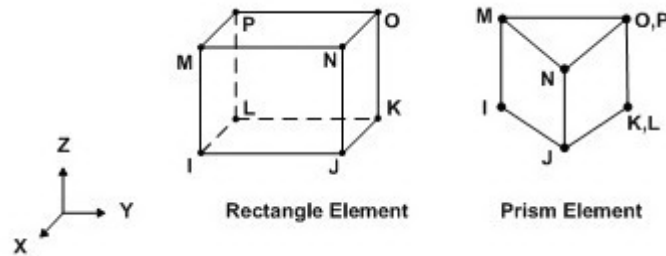
สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ที่สามารถเขียนได้ดังนี้

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [D]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

- โดยที่
- $[M]$ คือ เมทริกซ์มวล (Mass)
 - $[D]$ คือ เมทริกซ์ความหน่วง (Damping)
 - $[K]$ คือ เมทริกซ์ความแข็งตึง (Stiffness)
 - $\{f(t)\}$ คือ เวกเตอร์แรง
 - $\{\ddot{x}(t)\}$ คือ เวกเตอร์ความเร่ง
 - $\{\dot{x}(t)\}$ คือ เวกเตอร์ความเร็ว
 - $\{x(t)\}$ คือ เวกเตอร์การกระจัด

ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้คำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาที่กำหนดมาให้เช่นกัน โดยการแบ่งรูปร่างขอบเขตของปัญหาเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) แล้วสร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น เอลิเมนต์ต่างๆ เหล่านี้เชื่อมต่อกันที่จุดต่อ (Node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณค่าของตัวแปรที่ต้องการ ในบทความวิจัยนี้ได้แบ่งรูปร่างขอบเขตของปัญหาเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในแก้การปัญหา ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 เป็นการแบ่งรูปร่างของปัญหาหรือแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2549) การแบ่งเอลิเมนต์ย่อยสามารถแบ่งออกได้หลายแบบด้วยกันแต่ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งเอลิเมนต์ย่อยเป็นชนิด Solid185 ซึ่งเป็นรูปแบบสำเร็จรูปของซอฟต์แวร์ และ Solid185 นั้นเหมาะสำหรับรูปแบบที่เป็นปัญหาสามมิติของโครงสร้างที่เป็นของแข็ง ซึ่งในแต่ละเอลิเมนต์ได้แบ่งจุดที่เชื่อมต่อกันทั้งหมด 8 จุด (Node) และมีลำดับขั้นความเป็นอิสระเท่ากับ 3 (Degrees of Freedom, DOF) คือ การเคลื่อนที่ในแนวแกน X, Y และ Z



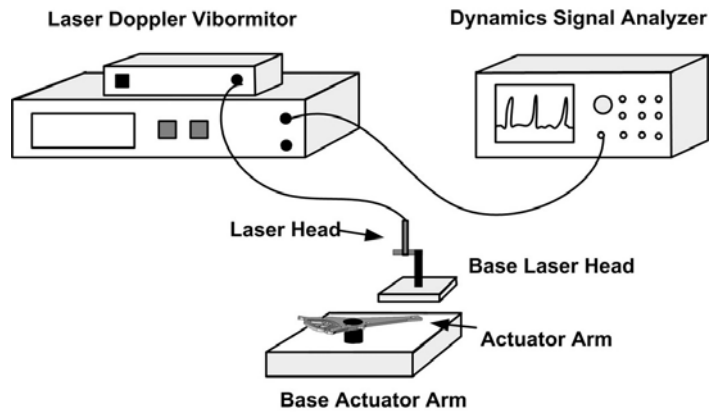
รูปที่ 2 เป็นการแบ่งรูปร่างของปัญหาของออกเป็นเอลิเมนต์ชนิด Solid185



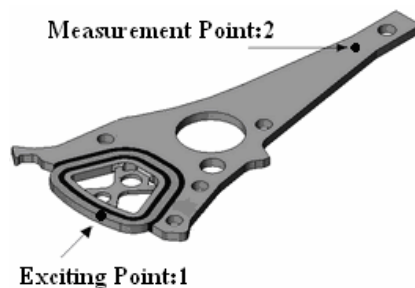
รูปที่ 3 การแบ่งรูปร่างของปัญหาหรือแบบจำลองของออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ

การทดสอบการสั่นสะเทือนด้วย Laser Doppler Vibrometer (LDV)

ในบทความนี้ได้เน้นการทดสอบการสั่นสะเทือนของโครงสร้างของแขนหัวอ่าน/เขียน (Actuator Arm) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยที่หัวอ่าน/เขียนที่นำมาทดลองนั้นเป็นแบบแขนเดี่ยว (Single Arm) โดยยึดแน่นติดอยู่กับส่วนที่เป็นฐานโลหะ โดยการยึดนั้นเป็นการยึดแน่นโดยไม่มีแบริง ทั้งนี้เป็นเพื่อที่จะศึกษาการสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่าน/เขียนเพียงอย่างเดียว ในการทดสอบหา Frequency Response Function (FRF) ของแขนหัวอ่าน/เขียน แสดงดังรูปที่ 4 เพื่อวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติและรูปแบบของการสั่นสะเทือน ทางผู้วิจัยทดสอบโดยใช้ Impact Hammer เป็นตัวกระตุ้น ความถี่ของการกระตุ้นจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0-10KHz โดยการเป็นการกระตุ้นที่จุดเดียว ในการทดสอบนั้นบริเวณที่จะทำการกระตุ้นจะอยู่บริเวณตำแหน่งหมายเลขที่ 1 หลังจากนั้นใช้อุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนทางแสง LDV ตรวจสอบจับการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของหัวอ่าน/เขียนที่ตำแหน่งหมายเลขที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 5 จากการทดสอบข้อมูลของแรงที่ใช้กระตุ้นโดย Impact Hammer และสัญญาณที่ได้จาก LDV จะถูกส่งไปยัง Dynamics Signal Analyzer เพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์และประมวลผลเพื่อหาความถี่ธรรมชาติและรูปแบบของการสั่นสะเทือน



รูปที่ 4 แบบจำลองการทดสอบหาความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่าน/เขียน



รูปที่ 5 รูปแบบในการกระตุ้นและการวัดการสั่นสะเทือนแขนหัวอ่าน/เขียนที่ใช้ในการทดสอบ

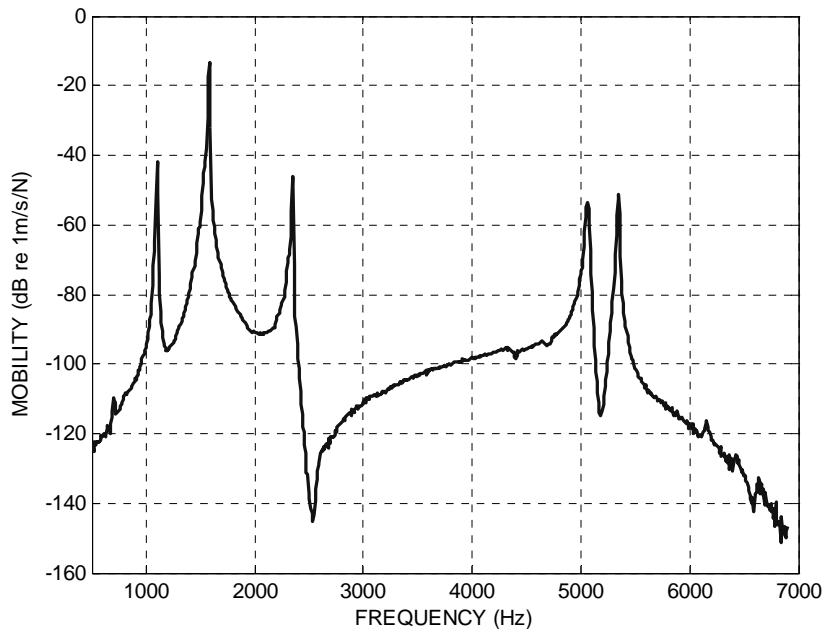
ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้จาก Dynamics Signal Analyzer จะอยู่ในรูปความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่าน/เขียน (Actuator Arm) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยการใช้ LDV เป็นตัววัดการสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่าน/เขียน ซึ่งผลการทดสอบจาก LDV ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 6 ในรูปแบบของ Frequency Response Function (FRF) จากการทดสอบสามารถอธิบายได้ว่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบนั้น เกิดการเคลื่อนที่ในหลายมิติ และพฤติกรรมการสั่นสะเทือนนั้นก็สามารถบอกได้ว่า แขนหัวอ่าน/เขียน มีความถี่ธรรมชาติ และรูปแบบการสั่นสะเทือนเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัว ค่าของความถี่ธรรมชาติได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 1 อย่างไรก็ตามในเชิงวิศวกรรมค่าความถี่ธรรมชาติดังกล่าวไม่ควรจะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับความถี่ที่เกิดจากการกระตุ้นจากภายนอกเพื่อป้องกันการเกิดการสั่นพ้อง (Resonance)

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของ Actuator Arm ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมทั้งตรวจสอบการสั่นสะเทือนโดยใช้

โหมด (Mode)	ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies) Hz
1	1,100
2	1,580
3	2,356
4	5,060
5	5,348

ตารางที่ 1 ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบด้วย LDV



รูปที่ 6 รูปแบบ Frequency response function ที่ได้จากการทดสอบด้วย LDV

จากการทำการทดสอบลักษณะของแขนหัวอ่าน/เขียน ที่นำมาทดสอบนั้น มีส่วนที่นำมารวมกันอยู่หลายส่วนด้วยกัน ในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์จึงจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขของขอบเขต (Boundary Conditions) หรือสมมุติฐานให้เหมือนหรือใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด และในบทความวิจัยนี้ผลของตัวหน่วงทางโครงสร้าง (Structure damper) ไม่ได้ถูกนำมาพิจารณา

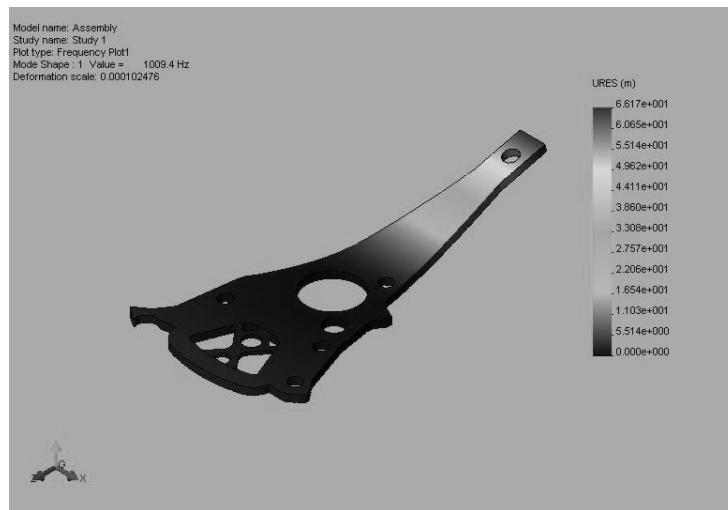
ผลการวิเคราะห์วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นได้กำหนดเงื่อนไขของขอบเขต (Boundary Conditions) ให้สอดคล้องกับความเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่าน/

เขียน ผลจากการวิเคราะห์ได้เลือกรูปแบบของการสั่นสะเทือนมาทั้งหมด 5 โหมด (Mode) ด้วยกัน โดยกำหนดขอบเขตของความถี่ตั้งแต่ 0 – 10KHz เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับทดสอบด้วย LDV ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติที่ได้ในโหมดที่ 1 เป็นการเคลื่อนที่ในส่วนของปลายแขน (Arm Bending) มีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 1,010 Hz โดยแสดงไว้ในรูปที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันมาก ในส่วนของความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 2 เป็นการเคลื่อนที่ในส่วนของคอยล์ (Coil Bending) ความถี่ธรรมชาติในโหมดที่ 3, 4 และ 5 เป็นการเคลื่อนที่จากการบิดของคอยล์ (Coil Torsion), การเคลื่อนที่ของแขนในส่วนที่สอง (Arm Second Bending), และการเคลื่อนที่ขึ้นลงของคอยล์ในลักษณะคล้ายรูปถ้วย (Coil Cupping) ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าความถี่ธรรมชาติมีความผิดพลาดเล็กน้อยเนื่องมาจากการกำหนดเงื่อนไขของขอบเขตในการวิเคราะห์ที่มีความคลาดเคลื่อน เช่น คุณสมบัติของวัสดุ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวาดแบบจำลองให้กับแขนหัวอ่าน/เขียนให้เหมือนจริง และการกำหนดบริเวณพื้นที่ที่ต้องการยึดแน่น (Fixed) ในทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นสามารถทำได้แต่ในทางความเป็นจริงแล้วไม่สามารถทำให้ทุกพื้นที่ของการทดสอบจริงนั้นเป็นแบบ Rigid Body ได้ เป็นต้น จึงเป็นสาเหตุให้ค่าความถี่ธรรมชาติมีความผิดพลาด ผลของการสั่นสะเทือนด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในโหมดที่ 2 , 3 , 4 และ 5 ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 8 , 9 , 10 และ 11 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบด้วย LDV กับค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ความผิดพลาดจากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะสังเกตได้จากโหมดที่การเคลื่อนที่ในส่วนของคอยล์นั้นมีความผิดพลาดมากที่สุด ทั้งนี้เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของคอยล์ในส่วนอื่นๆ เพราะการเคลื่อนที่ในส่วนนี้เป็นการเคลื่อนที่ของคอยล์เพียงอย่างเดียว มีผลมาจากความผิดพลาดในส่วนของการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของคอยล์หรือจากการวาดแบบจำลองในส่วนนี้

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของ Actuator Arm ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์
ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมทั้งตรวจสอบการสั่นสะเทือนโดยใช้



รูปที่ 7 แสดงรูปแบบการเคลื่อนที่ในส่วนของปลายแขน (Arm Bending) ในโหมดที่ 1



รูปที่ 8 แสดงรูปแบบการเคลื่อนที่ในส่วนของคอยล์ (Coil Bending) ในโหมดที่ 2

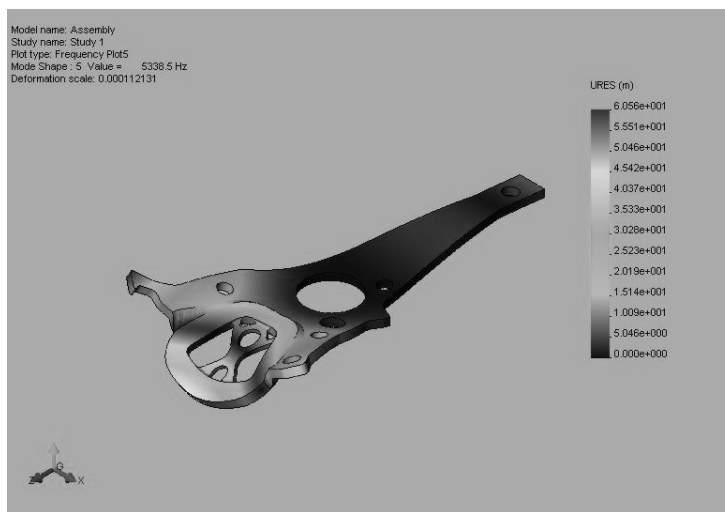


รูปที่ 9 แสดงรูปแบบการเคลื่อนที่จากการบิดของคอยล์ (Coil Torsion) ในโหมดที่ 3



รูปที่ 10 แสดงรูปแบบการเคลื่อนที่ของแขนในส่วนที่สอง (Arm Second Bending) ในโหมดที่ 4

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของ Actuator Arm ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์
 ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมทั้งตรวจสอบการสั่นสะเทือนโดยการใช้



รูปที่ 11 แสดงรูปแบบการเคลื่อนที่ขึ้นลงของคอยล์ในลักษณะคล้ายรูปถ้วย (Coil Cupping) ในโหมดที่ 5

โหมด (Mode)	ความถี่ธรรมชาติ (Hz) LDV	ความถี่ธรรมชาติ (Hz) FEM	%ความผิดพลาด ERROR
1	1,100	1,010	1
2	1,580	1,263	20
3	2,356	2,266	3.8
4	5,060	4,835	4.4
5	5,348	5,338	0.2

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบด้วย LDV กับการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

สรุป

จากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของหัวอ่าน/เขียน (Actuator Arm) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (HDD) โดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบโดยการใช้ LDV เป็นตัวตรวจสอบวัดการสั่นสะเทือน ความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นจากการกำหนดขอบเขตเงื่อนไขผล จากงานวิจัยนี้สามารถนำแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ไปศึกษารูปแบบของการสั่นสะเทือน ของแขนหัวอ่าน/เขียน หรือ Head Stack Assembly (HSA) และพัฒนาหรือศึกษาในรูปแบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้นได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบริษัท Seagate Technology (Thailand) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์ทดสอบ และขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้ ภายใต้โครงการพัฒนาทรัพยากรบุคคล ในอุตสาหกรรม Hard Disk Drive สัญญาเลขที่ HDD 08-002M

เอกสารอ้างอิง

- กนต์ธร ชานีประศาสน์. 2545. การสั่นทางกล. เพียร์สัน เอ็ด ดูเคชัน อินโดไชน่า จำกัด. กรุงเทพฯ ฯ.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2549. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยพิมพ์ครั้งที่ 5.
- Ewins, D. J., 1984. **Modal Testing: Theory and Practice**. John Wiley & Sons, Inc.
- J. Luo, D.W. Shua, B.J. Shia, Q.Y. Ngb, R. Zambrib, J.H.T. Lauba. 2006. "Study of the shock response of the HDD with ANSYS-LSDYNA" **Journal of Magnetism and Magnetic Materials** (2006), Available online 20 February 2006.
- John R. Edwards. 1999. "Finite Element Analysis of the Shock Response and Head Slap Behavior of a Hard Disk Drive", Western Digital Corporation, **IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS**. Vol. 35, No. 2, March 1999.
- L. M. Xu, S. Zeng, N.Q. Guo, R.M. Lin. 2000. "The QR Modes Measurement and Modeling in the Head Actuator Assembly", **IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS**, 2000.