

การวิเคราะห์การตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Shock Analysis of a Suspension Assembly using a Finite Element Method

มนต์ศักดิ์ พิมสาร¹ และ ปรีชา สุดาจันทร์^{2*}

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

*ติดต่อ: E-mail: psudachun@yahoo.com, Tel. 089-4011405

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีขนาดเล็กลงทำให้มีการพกพาได้สะดวก อย่างไรก็ตามเมื่อพกพาไปที่ต่างๆ แล้วอาจทำให้เกิดการตกหล่นซึ่งจะส่งผลให้เกิดความเสียหายกับหัวอ่าน/เขียน ดังนั้นในการออกแบบจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงการตกกระแทกของหัวอ่าน/เขียนเอง ในบทความนี้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์การตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในเบื้องต้นได้นำเสนอรูปแบบการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมกับการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับการทดลอง ผลการเปรียบเทียบพบว่า เมื่อดูค่าผลของแรงตอบสนอง จากการตกกระแทกขณะที่หัวอ่าน/เขียน แยกออกจากแผ่นจานดิสก์นั้นพบว่ามีค่าความแตกต่างกันประมาณ 4%-6% และการตอบสนองการตกกระแทกจากทั้งสองวิธีมีรูปแบบเดียวกัน จากนั้นได้ทำการศึกษาผลกระทบของระยะเวลาของการตกกระแทกของหัวอ่าน/เขียน ซึ่งค่าที่ทำการศึกษาครั้งนี้ 0.5, 1 และ 2 มิลลิวินาที ผลของการวิเคราะห์ยังพบอีกว่าผลจากตอบสนองของแรงจากการตกกระแทกที่เวลา 2 มิลลิวินาทีนั้นให้ค่ามากที่สุด และจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการตกกระแทกที่ 1 และ 0.5 มิลลิวินาทีตามลำดับ ^[2]

คำหลัก: การตกกระแทกของชุดจับยึดหัวอ่าน/เขียน, ไฟไนต์เอลิเมนต์, หัวอ่าน/เขียน

Abstract

Nowadays, a hard disk drive is developed to be a small piece for portable purpose which will cause damage to a read/write head if it falls. Therefore, the design must consider the impact of the fall. This article presents the analysis of the fall using finite element method. At first, the finite element model of suspension arm with slider head is proposed and validated with the experimental result. The comparison between the simulated results and experimental results show that the reaction force during head slap out from the disk are difference about 4%-6% with the same response pattern. After that the study of pulse duration effect is carried out with 0.5, 1 and 2 ms. The results show that highest reaction force is found when the pulse duration is 2 ms and its magnitude is gradually reduced when the pulse durations are 1 ms. and 0.5 ms., accordingly.

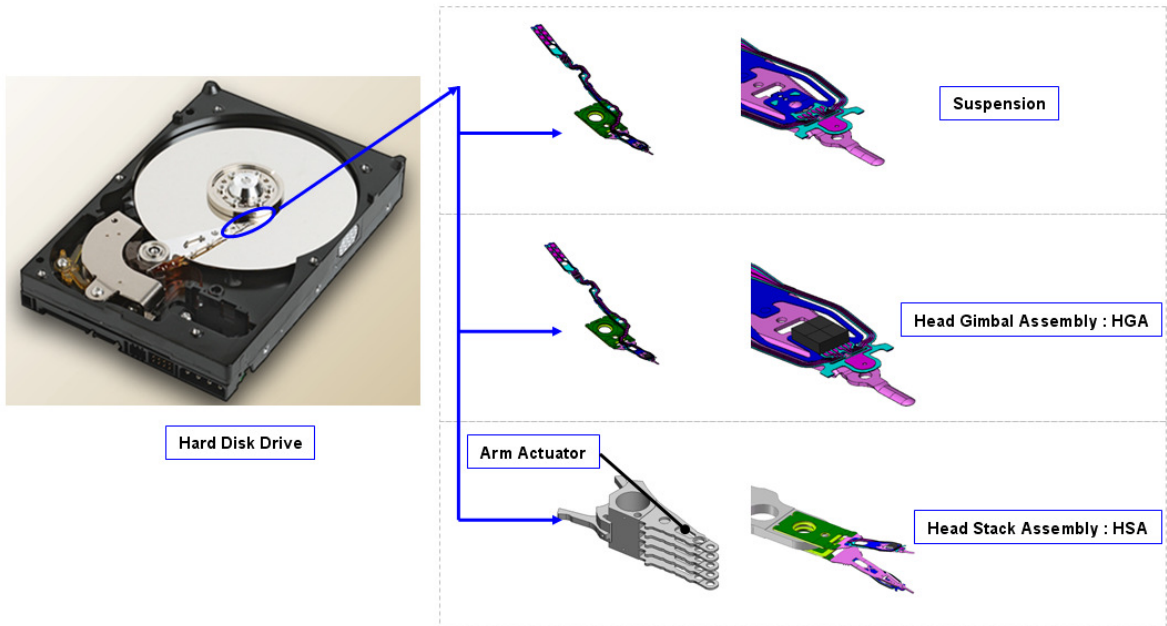
Keywords: Shock Analysis of Suspension. Finite Element Method, Slider head

1. บทนำ

ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้พัฒนาประสิทธิภาพเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างกว้างขวางเพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการหน่วยความจำที่เพิ่มมากขึ้นแต่ตัวอุปกรณ์มีขนาดเล็กลง เช่น เครื่องเล่น เอ็มพีสาม กล้องดิจิทัล ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบพกพา เครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก คอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะสำนักงาน จนกระทั่งรวมไปถึงคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ของระบบเครือข่าย

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ประกอบขึ้นจากชุดหัวอ่านสำเร็จ (Head Stack Assembly: HSA) ที่เกิดจากการประกอบชิ้นส่วนหัวอ่าน/เขียนประกอบสำเร็จ (Head Gimbal Assembly: HGA) หลายตัวเข้าด้วยกันบน E-Block (Actuator Pivot Flex Assembly) โดย HGA จากการประกอบหัวอ่าน/เขียน (Head Slider) เข้ากับแขนจับหัวอ่าน/เขียน (Suspension) ดังรูปที่ 1. [6]

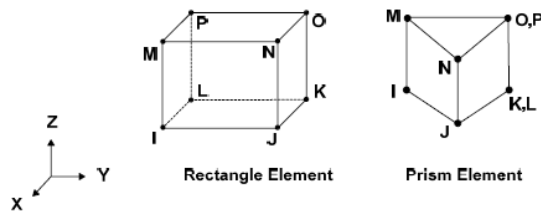
ชุดจับยึดหัวอ่าน/เขียน (Suspension) เป็นชิ้นส่วนที่รองรับทางกลศาสตร์ ใช้สำหรับจับยึดหัวอ่าน/เขียน (Head Slider) และพาหัวอ่าน/เขียนให้เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการเขียนหรืออ่านบนแผ่นจานบันทึกข้อมูล (Disk) ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำโดยไม่เกิดการชนระหว่างหัวอ่าน/เขียนกับผิวหน้าของแผ่นจานบันทึกข้อมูล ด้วยเหตุนี้เอง แขนจับยึดหัวอ่าน/เขียน จึงเป็นชิ้นส่วนสำคัญที่ต้องถูกประกอบเข้าไปใน HSA ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทุกตัว เนื่องด้วยขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานต้องมีการเคลื่อนที่และสั่นสะเทือนของชุดจับยึดหัวอ่าน/เขียน หรือผู้ใช้งานฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เองอาจจะมีการทำหล่น จนมีผลทำให้มีสั่นสะเทือนหรือกระทบกันระหว่าง หัวอ่าน/เขียนกับแผ่นจานบันทึกข้อมูล เพราะฉะนั้นความทนทานต่อการตกกระทบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ก็เช่นกันที่นักออกแบบต้องการพัฒนาให้สามารถทนทานต่อการตกกระทบได้มากขึ้น ซึ่งบทความนี้เป็นการศึกษาสภาวะของการตกกระทบของชุดจับยึดหัวอ่าน/เขียน ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง ลักษณะการตกกระทบขณะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานคือตัวหัวอ่าน/เขียนจะไปกระทบกับแผ่นจานบันทึกข้อมูลจนอาจจะทำให้เกิดความเสียหายบริเวณหน้าสัมผัสบนจานบันทึกข้อมูลได้



รูปที่ 1. รูปฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้านซ้าย ชิ้นส่วนประกอบด้านขวา

2. การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อใช้คำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาที่กำหนดขึ้นมา โดยกำหนดรูปร่างของขอบเขตของปัญหาเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) จากนั้นกำหนดสมการของแต่ละเอลิเมนต์เพื่อให้สอดคล้องกับปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ส่วนของเอลิเมนต์ต่างๆ เหล่านี้เชื่อมต่อกันที่จุดต่อ (Node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณค่าของตัวแปรที่ต้องการ การแบ่งสร้างเอลิเมนต์ย่อยสามารถทำได้หลายแบบด้วยกัน สำหรับบทความวิจัยนี้ได้แบ่งเอลิเมนต์ย่อยเป็นชนิด Solid 185 แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นรูปแบบสำเร็จของซอฟต์แวร์ และ Solid 185 นั้นเหมาะสำหรับรูปแบบที่เป็นปัญหาสามมิติของโครงสร้างที่เป็นของแข็ง ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์ได้แบ่งจุดที่เชื่อมต่อกันทั้งหมด 8 จุด (Node) และมีลำดับชั้นความเป็นอิสระเท่ากับ 3 (Degree of Freedom, DOF) คือการเคลื่อนที่ในแนวแกน X,Y และ Z ^[8]

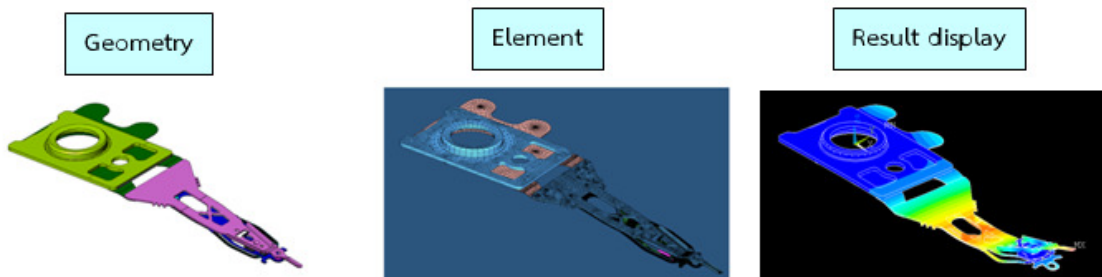


รูปที่ 2 รูปร่างของเอลิเมนต์ชนิด Solid 185

บทความวิจัยนี้ได้ออกแบบโครงสร้างของตัวชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้ได้ขนาดรูปร่างตามที่กำหนดด้วยโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) แสดงดังรูปที่ 3 หลังจากนั้นก็สามารถนำโครงสร้างนี้ไปสร้างให้เป็นเอลิเมนต์ (Element) ด้วยโปรแกรม ไฮเปอร์เมช (Hypermesh) สำหรับจำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 32950 เอลิเมนต์ ส่วนจำนวนโนด (Node) เท่ากับ 61279 โหนด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนและตกกระแทกด้วยโปรแกรมแอนซิส (Ansys) แสดงดังรูปที่ 4.



รูปที่ 3 ชิ้นส่วนประกอบของชุดจับยึดหัวอ่าน/เขียน

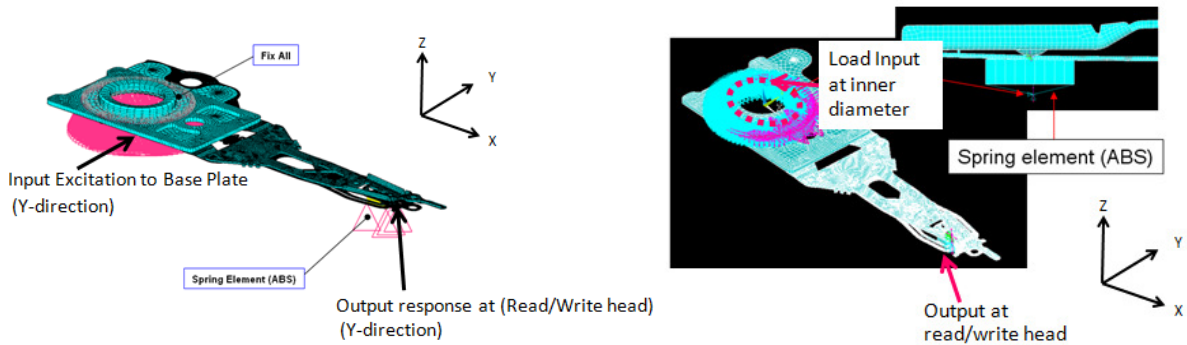


รูปที่ 4 รูปแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์

3. เงื่อนไขขอบเขตของการวิเคราะห์

ในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นั้นตัวชุดจับยึดหัวอ่าน/เขียนจะต้องประกอบเข้ากับชุดแอกชูเอเตอร์ ซึ่งจะถูกระงับยึดติดไว้กับชุดไพวอทแบร์ริง (Pivot bearing) และตัวโครงสร้างของตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เอง เป็นจุดยึดติดซึ่งเปรียบเสมือนเงื่อนไขของการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบัน สำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนและการตกกระแทกครั้งนี้เฉพาะตัวชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เท่านั้น (Suspension Level) ส่วนบริเวณหน้าผิวสัมผัสระหว่างเบสเพลท (Base Plate) กับผิวหน้าของแอกชูเอเตอร์จะถูกกำหนดให้เป็นจุดยึดติด (Fix all) และกำหนดให้บริเวณหัวอ่าน/เขียนเปรียบเสมือนสปริง (Spring Element) ผลมาจากแรงยก (Air Bearing Surface : ABS) เปรียบเสมือนสภาวะฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงาน

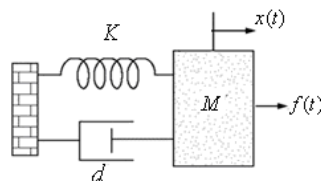
การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน บทความวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะในแนวแกน Y เท่านั้นดังแสดงรูปที่ 5 ด้านซ้ายมือ วิเคราะห์ด้วยความถี่โมดอล (Modal Frequency) กำหนดสัญญาณกระตุ้นที่บริเวณเบสเพลทในแนวแกน Y จากนั้นตรวจสอบผลการตอบสนองการกระจัดที่หัวอ่าน/เขียนในแนวแกน Y เช่นเดียวกัน ในส่วนการวิเคราะห์การตกกระแทกแบบชั่วครู่ (Transients Analysis) แสดงรูปที่ 5 ด้านขวามือ กำหนด Load input ไปที่บริเวณขอบด้านในของรูเบสเพลทด้วยสัญญาณ half sine acceleration จากนั้นตรวจสอบผลการตอบสนองที่บริเวณหัวอ่าน/เขียนด้วยเงื่อนไขเวลาของการตกกระแทกที่ต่างกัน



รูปที่ 5 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

รูปด้านซ้ายมือเป็นเงื่อนไขการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน : รูปด้านขวามือเป็นเงื่อนไขการวิเคราะห์การตกกระแทก

3.1 การจำลองทางคณิตศาสตร์ของการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (Vibration Mathematical Model)



รูปที่ 6 แบบจำลองทางกายภาพของระบบสั่นสะเทือน

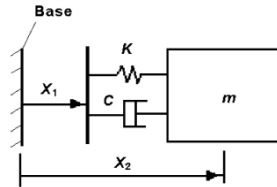
สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ที่สามารถเขียนได้ดังนี้^[8]

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

- โดยที่
- [M] คือ เมทริกซ์มวล (Mass Matrix)
 - [D] คือ เมทริกซ์ความหน่วง (Damping Matrix)
 - [K] คือ เมทริกซ์ความแข็งตริง (Stiffness Matrix)
 - {f(t)} คือ เวกเตอร์แรง

- $\{\ddot{x}(t)\}$ คือ เวกเตอร์ความเร่ง
- $\{\dot{x}(t)\}$ คือ เวกเตอร์ความเร็ว
- $\{x(t)\}$ คือ เวกเตอร์การกระจัด

3.2 การจำลองทางคณิตศาสตร์ของการวิเคราะห์การตกระแหกแบบชั่วคราว (Transient Mathematical Model)



รูปที่ 7 แบบจำลองทางกายภาพของระบบของการตกระแหกแบบชั่วคราว

สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ที่สามารถเขียนได้ดังนี้^[2]

$$m\ddot{x}_2 + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k(x_2 - x_1) = 0 \tag{2}$$

โดยที่ m คือ เมทริกซ์มวล (Mass Matrix)

c คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความหน่วง (Damping coefficient)

k คือ เมทริกซ์ความแข็งตึง (Stiffness Matrix)

x_1 คือ ระยะการกระจัดของฐาน (Displacement of Base)

x_2 คือ ระยะการกระจัดของมวล (Displacement of mass)

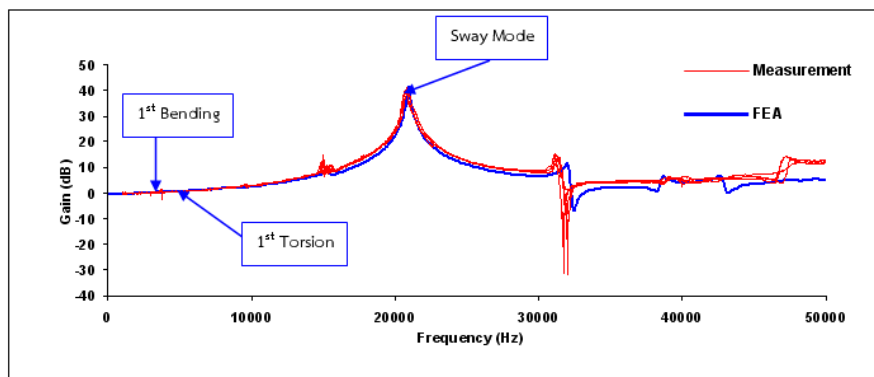
\ddot{x} คือ เวกเตอร์ความเร่ง

\dot{x} คือ เวกเตอร์ความเร็ว

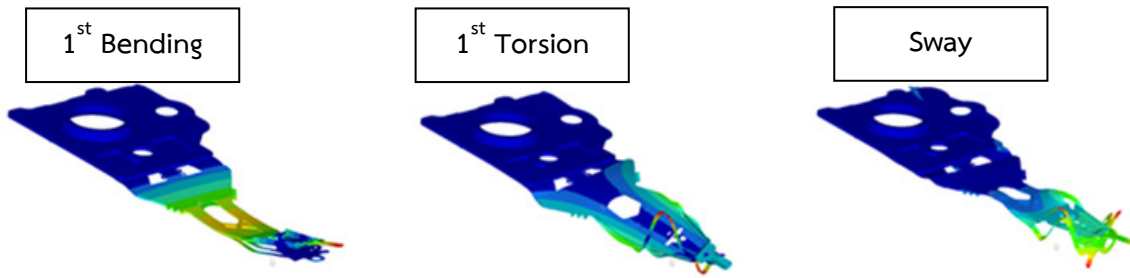
x คือ เวกเตอร์การกระจัด

4. การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนด้วยความถี่โหมด (Modal Frequency) และการตรวจสอบพิสูจน์

สำหรับการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนกำหนดบริเวณหน้าสัมผัสของเบสเพลทเป็นจุดยึดติด หลังจากนั้นทำวิเคราะห์ด้วยโหมดฟังก์ชันแล้ววิเคราะห์ผลการกระจัดที่หัวอ่าน/เขียน และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟต์ไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองของโหมดหลักพบว่า มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 0.3-1.3 % ดังแสดงในรูปที่ 8 สำหรับในส่วนของกราฟเปรียบเทียบค่าของ Gain (dB) ในแนวแกน วย (Y) เปรียบเทียบกับความถี่ในแนวแกน เอ็กซ์ (X) แสดงดังตารางที่ 1^[3] สำหรับลักษณะรูปร่าง (Mode Shape) ของชุดจับยึดหัวอ่าน/เขียนแต่ละความถี่โหมดหลักด้วยโปรแกรม Ansys. แสดงดังรูปที่ 9.



รูปที่ 8. Frequency Response Function (FRF)



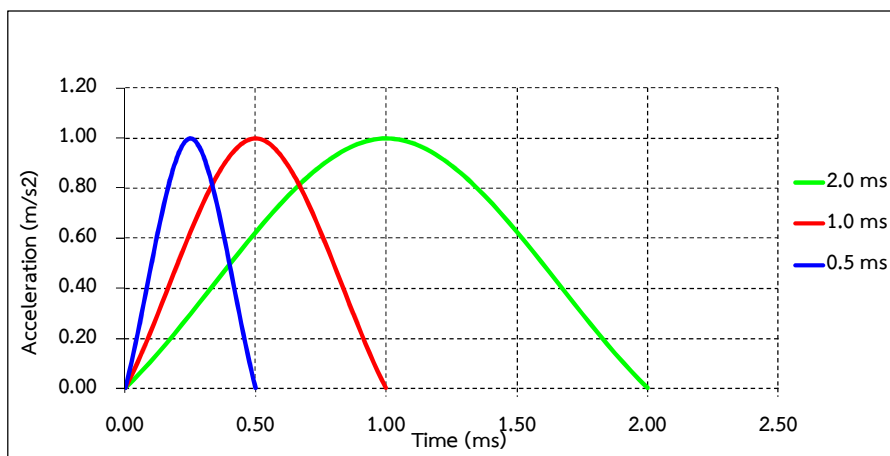
รูปที่ 9. แสดงพฤติกรรมรูปร่างของ Suspension ของแต่ละความถี่โหมดหลัก

Main Mode	Measurement (Hz)	FEA (Hz)	% difference
1st Bending	3846	3856	1.32
1st Torsion	8523	8568	0.77
Sway	20958	20895	0.30

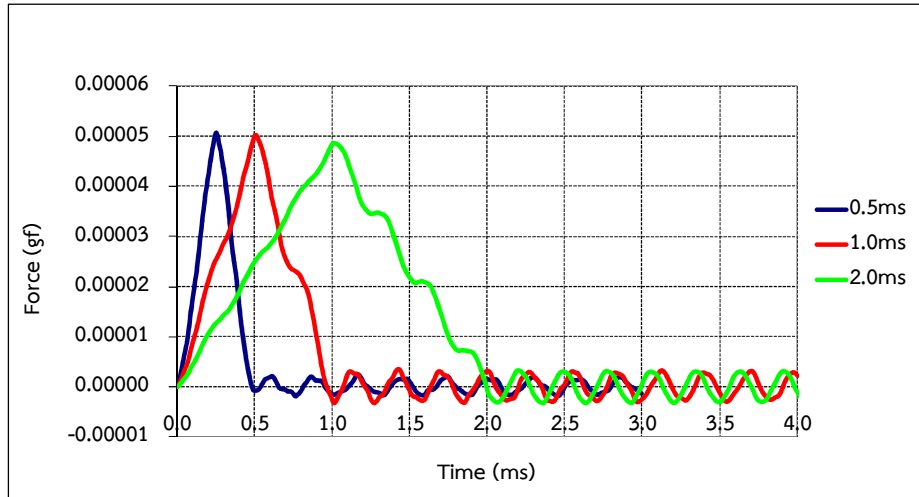
ตารางที่ 1 แสดงผลเปรียบเทียบผลการตอบสนองของการสั่นสะเทือน

5. การวิเคราะห์การตกกระแทกแบบชั่วครู่ (Transients Analysis)

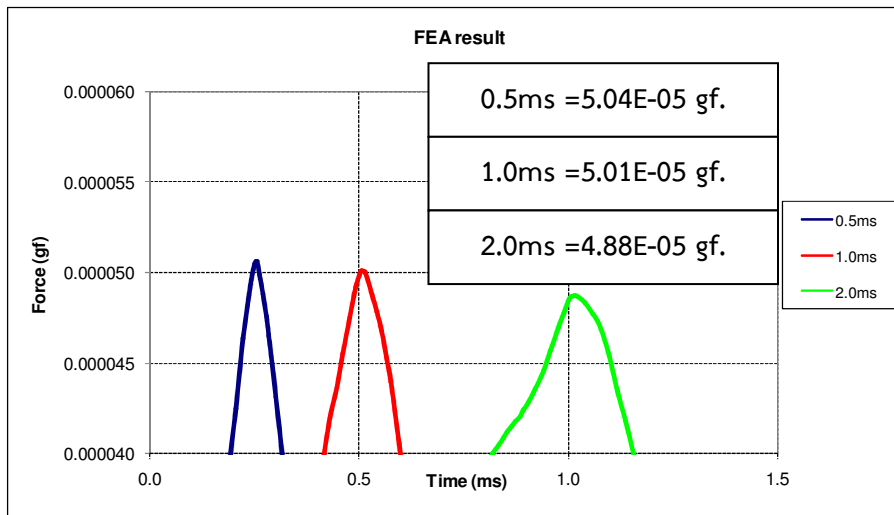
การวิเคราะห์การตกกระแทกในบทความนี้ ทำการศึกษาเฉพาะชุดจับยึดหัวอ่าน/เขียนที่เป็นแบบขึ้นเดียวเท่านั้น (Single Suspension) กำหนดโพลต์ที่มีความแตกต่างของความกว้างสัญญาณพัลส์ (Pulse width) ของความเร่งแบบครึ่งคาบ (Single half-sine acceleration) เริ่มต้นด้วย 0.5 , 1 และ 2 มิลลิวินาทีดังแสดงในรูปที่ 10 จากนั้นวิเคราะห์ผลกระทบของแรงตอบสนองที่บริเวณหัวอ่าน/เขียน ซึ่งกำหนดให้บริเวณเบสเพลทเป็นจุดยึดนี้ จากนั้นศึกษาการจำลองสภาวะการตกกระแทกด้วยค่าเวลาเบื้องต้นดังกล่าวเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหัวอ่านกับเบสเพลทขณะที่สภาวะการตกกระแทกที่แตกต่างกันของค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ดังที่กล่าวไว้เบื้องต้น ผลของการวิเคราะห์แสดงดังแสดงในรูปที่ 11 ^[2] พบว่ามีความคลาดเคลื่อนประมาณ 4%-6% ดังแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 10 แสดงค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์เริ่มต้น (Input pulse duration)



รูปที่ 11 แสดงผลของแรงตอบสนองขณะที่หัวอ่านแยกออกจากแผ่นจานดิสก์ (ศึกษาในกรณีทีระบบไม่มีความหน่วง)



รูปที่ 12 แสดงผลของแรงตอบสนองขณะที่หัวอ่านแยกออกจากแผ่นจานดิสก์แบบเฉพาะบริเวณ

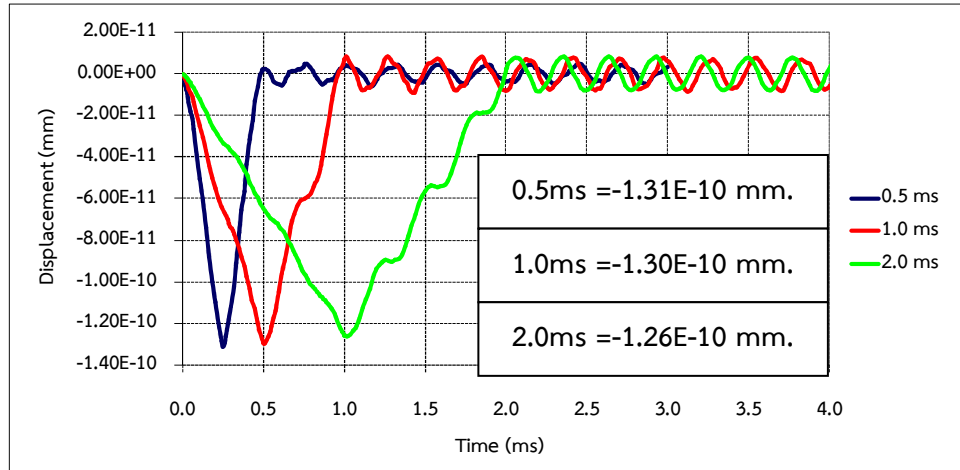
ค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์	ผลของแรงตอบสนอง (gf)	เปรียบเทียบกับ 1 หน่วยความเร่ง
0.5 ms	5.04E-05	194.69
1.0 ms	5.01E-05	195.83
2.0 ms	4.88E-05	200.81

****0.5 ms → G's/gram = 1/(5.04 E-05*101.98)=194.69 G's/gram ****

ตารางที่ 2 แสดงผลผลของแรงตอบสนองจากการตกกระทบบนขณะที่หัวอ่าน/เขียนแยกออกจากแผ่นจานดิสก์

Description	Unit	Measurement	FEA	% difference
0.5 ms Op-Shock	G's/gram	203.53	194.69	4.34
1 ms Op-Shock	G's/gram	207.54	195.83	5.64
2 ms Op-Shock	G's/gram	214.45	200.81	6.36

ตารางที่ 3 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าผลของแรงตอบสนองจากการตกกระทบบนขณะที่หัวอ่าน/เขียน



รูปที่ 13 แสดงผลของระยะเวลาการจัดที่หัวอ่าน/เขียน แยกออกจากเบสเพลทในแนวแกน Z. [1]

จากผลการวิเคราะห์การตกกระแทกแบบชั่วคราวนั้นยังสามารถทราบค่าระยะเวลาการจัดระหว่างหัวอ่าน/เขียนกับเบสเพลทในแนวแกน Z ซึ่งระยะเวลาการจัดที่มากที่สุดคือ 0.5 มิลลิวินาที ระยะเวลาการจัดเท่ากับ 1.31E-10 มิลลิเมตร, เวลา 1.0 มิลลิวินาที ระยะเวลาการจัดเท่ากับ 1.30E-10 มิลลิเมตร, และเวลา 2.0 มิลลิวินาที ระยะเวลาการจัดเท่ากับ 1.26E-10 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 13. [1]

ส่วนประกอบของ HSA	Property name	Yung's modulus (E) (MPa.)	Poisson's ratio	Density (Kg/mm ³)
Head Stack Assembly			-	
Arm Actuator	Stainless Steel 304	1.93e5	0.31	7.75e-6
Base plate	Stainless Steel 304	1.93e5	0.31	7.75e-6
Load Beam	Stainless Steel 304	1.93e5	0.31	7.75e-6
Trace Gimbal Assembly	1. Stainless Steel 304	1.93e5	0.31	7.75e-6
	2. Polyimide	5860	0.33	1.83e-6
	3. Copper	1.24e5	0.34	8.878e-6
	4. Cover layer	2.5	0.35	1.4e-6
Slider	Silicon Wafer	4.0e5	0.30	4.0e5

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางวัสดุที่ใช้สำหรับแบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [7]

6. สรุปผล

การวิเคราะห์การตกกระแทกนั้นพบว่าผลของแรงจากการตกกระแทกขณะหัวอ่าน/เขียนแยกออกจากแผ่นจานดิสก์โดยสรุปได้ดังนี้

6.1 จากผลการศึกษาวิเคราะห์หาผลกระทบของระยะเวลาในการตกกระแทกพบว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นจะทำให้แรงตอบสนองของจากการตกกระแทกเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ผลจากการศึกษาพบว่าที่เวลา 2 มิลลิวินาทีที่มีค่าผลแรงตอบสนองมากที่สุดคือ 200.81 G's/gram.

6.2 จากผลการเปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่ามากกว่าผลการทดลอง 4.34% ที่เวลา 0.5 มิลลิวินาที, 5.64% ที่เวลา 1 มิลลิวินาที และ 6.36% ที่เวลา 2 มิลลิวินาที ตามลำดับ

6.3 จากผลการวิเคราะห์การตกกระแทกแบบชั่วคราวนั้นยังสามารถทราบค่าระยะการกระจัดระหว่างหัวอ่าน/เขียน กับเบสเพลทในแนวแกน Z ซึ่งระยะการกระจัดที่มากที่สุดคือ 0.5 มิลลิวินาที, 1.0 มิลลิวินาที และ 2.0 มิลลิวินาทีตามลำดับ.

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ บริษัท Magnecomp Precision Technology PCL (Thailand) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์ทดสอบ.

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Lao, D.W Shu, B.J. Shi, B. Gu. (2006) The pulse width effect on the shock response of the hard disk drive. *Impact Engineering*, December 21, 2006.
- [2] Shock analysis of a head actuator assembly subjected to half-sine acceleration pulses, Dong-Wei Shua, Bao-Jun Shia, Hui Menga, Fook Fah Yapa, Da-Zhi Jianga, Quock Ngb, Razman Zambrin, Joseph H.T. Laub, Chao-Shan Chengb, *Impact Engineering*, September 26, 2005.
- [3] Chung Joo Kim, Jeong Il Chun, Young Kyu Byu, Kwang Choon Ro, Chung Choo Chung, Tae gun Jeong, (1997). Suspension Dynamics of HDD for High Track Density, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol 21, No 11, pp. 1885-1895.
- [4] Edwards JR. Finite element analysis of the shock response and head slap behavior of a hard disk drive. *IEEE Trans Magn* 1999;35(2):863-7.
- [5] G.H. Jang and C.H. Seo, (2007) Finite Element Shock Analysis of an Operating Hard Disk Drive Considering the Flexibility of a Spinning Disk-Spindle, a Head-Suspension-Actuator, and a Supporting Structure.
- [6] ชาญชัย บวรโชคชัย. การลดของเสียแขนจับหัวอ่านด้วยวิธีซิกซ์ซิกม่า : กรณีศึกษากระบวนการผลิตแขนจับหัวอ่าน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [7] ภากรณ์ ทรัพย์เจริญ (2551). การวิเคราะห์มุมลอยตัวของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [8] พิพัฒน์ อ่ำไพพัฒน์กุล (2550). การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของ Pivot Bearing โดยการใช้ LDV พร้อมทั้งตรวจสอบการสั่นสะเทือนโดยไฟไนต์เอลิเมนต์. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [9] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, ไฟไนต์เอลิเมนต์ในวิศวกรรม, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.