

อิทธิพลของตำแหน่งเบ็นและมุมองศาเส้กต่อคุณลักษณะการสั่นสะเทือน ของระบบรองรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

Influence of Bend Location and Sag Angle on Suspension Vibration Characteristics

มนต์ศักดิ์ พิมสาร¹, วิรุฬห์ ทวีเหลือ^{2*}

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
*ติดต่อ: E-mail: wirunta@gmail.com, Tel. 08 6607 9973

บทคัดย่อ

ระบบรองรับ (Suspension) คือโครงสร้างที่รองรับหัวอ่านเขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มุมองศาเส้ก (Sag angle) คือมุมองศาของระบบรองรับตรงส่วนที่ยึดจับกับหัวอ่านเขียน ตำแหน่งของเบ็น (Bend location) คือส่วนที่อยู่ถัดจากแผ่นติดระบบรองรับ (Base plate) ก่อนถึงมุมลอยตัว (Free state angle) ของระบบรองรับ ในการพัฒนาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานได้มากที่สุด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้การวิเคราะห์ลักษณะแบบพลวัต โดยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการหาค่าที่เหมาะสมของมุมองศาเส้กและขนาดตำแหน่งเบ็น ซึ่งค่าที่มีความสำคัญต่อการออกแบบระบบรองรับคือค่าเกนของการบิดลำดับที่ 1 (1^{st} torsion gain) ในส่วนของตำแหน่งเบ็น และค่าเกนของการบิดลำดับที่ 2 (2^{nd} torsion gain) ในส่วนของมุมองศาเส้ก ค่าเกนของทั้งสองค่านี้จะต้องมีค่าน้อยที่สุด จึงจะส่งผลให้เซอร์โวมอเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ดังนั้นบทความนี้จึงสนใจหาค่าที่เหมาะสมของขนาดตำแหน่งเบ็นและมุมองศาเส้ก จากผลการวิจัยพบว่า ตำแหน่งเบ็นและมุมองศาเส้กมีอิทธิพลต่อคุณลักษณะการสั่นสะเทือนของระบบรองรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยในการวิเคราะห์มุมองศาเส้กสามารถลดค่าเกนของการบิดลำดับที่ 1 ได้ 76 เปอร์เซ็นต์และในการวิเคราะห์ตำแหน่งเบ็นสามารถลดค่าเกนของการบิดลำดับที่ 2 ได้ 80 เปอร์เซ็นต์ จากการหาค่าที่เหมาะสมของมุมองศาเส้กและขนาดตำแหน่งเบ็น

คำหลัก: มุมองศาเส้ก, ตำแหน่งเบ็น, ค่าเกนของการบิดลำดับที่ 1, ค่าเกนของการบิดลำดับที่ 2, ระบบรองรับ

Abstract

Suspension is structure that supports reading-writing head (slider) in hard disk drive. Sag angle is the angle of suspension near reading-writing head. Bend location is the area of base plate before free state angle. In order to develop the hard disk drive of high performance, it is necessary to study about the suspension. To satisfy operation condition of hard disk drive of high performance, the suspension shape is very important since it correlates to dynamic characteristics. Therefore, it is necessary to analyze the dynamic characteristics by using finite element analysis. First torsion gain in case of Bend location and Second torsion gain in case of Sag angle is especially critical among them that its value has to be low to make high performance of servo motor. In this paper, the objective is to reduce first torsion gain value and second torsion gain by considering the Bend location and Sag angle as the design variables. The results were as follows. Bend location and Sag angle has influence in vibration characteristics on hard disk drive suspension. First torsion gain and second torsion gain reduces by optimum design in Bend location and Sag angle. The result of Sag angle analysis reduces first torsion gain by 76 percent and Bend location analysis reduces second torsion gain by 80 percent.

Keywords: Sag angle, Bend location, First torsion gain, Second torsion gain, suspension

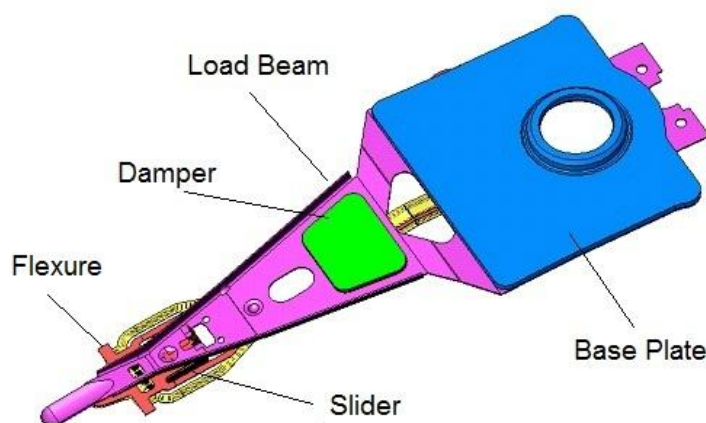
1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการนำฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มาใช้กันอย่างแพร่หลายและมีการใช้เทคโนโลยีในด้านต่าง ๆ นำมาพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งประสิทธิภาพของระบบรองรับเป็นส่วนหนึ่งที่น่าสนใจส่วนใหญ่ให้ความสำคัญในการพัฒนา ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการเพิ่มประสิทธิภาพ ของอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลและโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ไม่ให้การพัฒนาให้ดิสก์ไดรฟ์มีประมาณความหนาแน่นสูงในร่องการเก็บข้อมูลเป็นไปอย่างล่าช้า^[1] ระบบรองรับ คือตัวโครงสร้างที่รองรับหัวอ่านเขียน ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มุมองศาแฉ็ก (Sag angle) คือมุมองศาของระบบรองรับตรงส่วนที่ยึดจับกับหัวอ่านเขียน ตำแหน่งของเบ้น (Bend location) คือส่วนที่อยู่ถัดจากแผ่นติดระบบรองรับ (Base plate) ก่อนถึงมุมลอยตัว (Free state angle) ของระบบรองรับ การเพิ่มประสิทธิภาพให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มากขึ้น หัวอ่าน-เขียนเป็นส่วนที่สำคัญที่สุด ข้อมูลจะถูกประมวลผลโดยหัวอ่าน-เขียน ข้อผิดพลาดในการอ่านร่องข้อมูลอาจเกิดขึ้นได้จากการสั่นสะเทือนที่หัวอ่าน-เขียน รูปร่างของ ระบบรองรับ จึงมีความสำคัญมากเนื่องจากตัวระบบรองรับ มีความสัมพันธ์กับลักษณะแบบพลวัตในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำงานอยู่ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้การวิเคราะห์ลักษณะแบบพลวัต โดยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์^[2] และการหาค่าที่เหมาะสมของมุมองศาแฉ็กและขนาดตำแหน่งเบ้น หากมีค่าเกินของการบิดลำดับที่ 1 ในส่วนของตำแหน่งเบ้น และค่าเกินของการบิดลำดับที่ 2 ในส่วนของมุมองศาแฉ็กมาก จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของระบบเซอร์โวมอเตอร์ จึงต้องออกแบบ ระบบรองรับ ให้มีค่าเกินของการบิดลำดับที่ 1 และค่าเกินของการบิดลำดับที่ 2 น้อยที่สุด

2. การหาค่าที่เหมาะสมของ ระบบรองรับ ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

2.1 รูปทรงของ ระบบรองรับ ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

โดยทั่วไปแล้ว ระบบรองรับ (Head Gimbal Assembly) ประกอบไปด้วย ระบบรองรับ (Suspension) , แดมเปอร์ (Damper), หัวอ่าน-เขียน (Slider) และ เบสส์ เพลท (Base plate) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 1 โดยทั่วไปแล้ว คานรับภาระ (Load beams) ที่ติดกับ เฟล็กซ์เซอร์ จะเรียกว่า ระบบรองรับ แต่ถ้ามีเฉพาะ คานรับภาระ ไม่มี เฟล็กซ์เซอร์ ก็สามารถเรียกว่า ระบบรองรับ ได้เช่นกัน ระบบรองรับ มีการออกแบบให้มีระดับความอิสระ การเคลื่อนไหวไปในทิศทางปกติ และป้องกันการสั่นสะเทือนในทิศทางด้านข้าง ตัวเฟล็กซ์เซอร์มีโครงสร้างที่ยึดหยุ่นมาก ซึ่งมีตำแหน่งอยู่ระหว่าง คานรับภาระ และหัวอ่าน,เขียนเพื่อให้มีระดับความอิสระ บนการเคลื่อนไหวแบบพิทช์และโรล^[3] แบบจำลองของชุดจับยึดหัวอ่าน-เขียน ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนย่อย ๆ จำนวนมากซึ่งแต่ละชิ้นส่วนจะถูกผลิตขึ้นจากวัสดุที่แตกต่างกัน ได้แก่ Stainless Steel, Copper, Polyester, Polyimide, Slider ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุและค่าคงที่ของ ระบบรองรับ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 – ตารางที่ 5



รูปที่ 1 ลักษณะส่วนประกอบของระบบรองรับ^[4]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุและค่าคงที่ของ Stainless Steel^[4]

Property name	Value	Units
Young's Modulus	1.93×10^5	MPa
Poisson's ratio	0.31	-
Density	7.75×10^{-6}	kg/mm ³

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุและค่าคงที่ของ Copper^[4]

Property name	Value	Units
Young's Modulus	1.24×10^5	MPa
Poisson's ratio	0.34	-
Density	8.878×10^{-6}	kg/mm ³
Tensile Yield strength	540	MPa
Tensile Ultimate strength	600	MPa

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของวัสดุและค่าคงที่ของ Polyester^[4]

Property name	Value	Units
Young's Modulus	3,790	MPa
Poisson's ratio	0.30	-
Density	1.4×10^{-6}	kg/mm ³

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของวัสดุและค่าคงที่ของ Polyimide^[4]

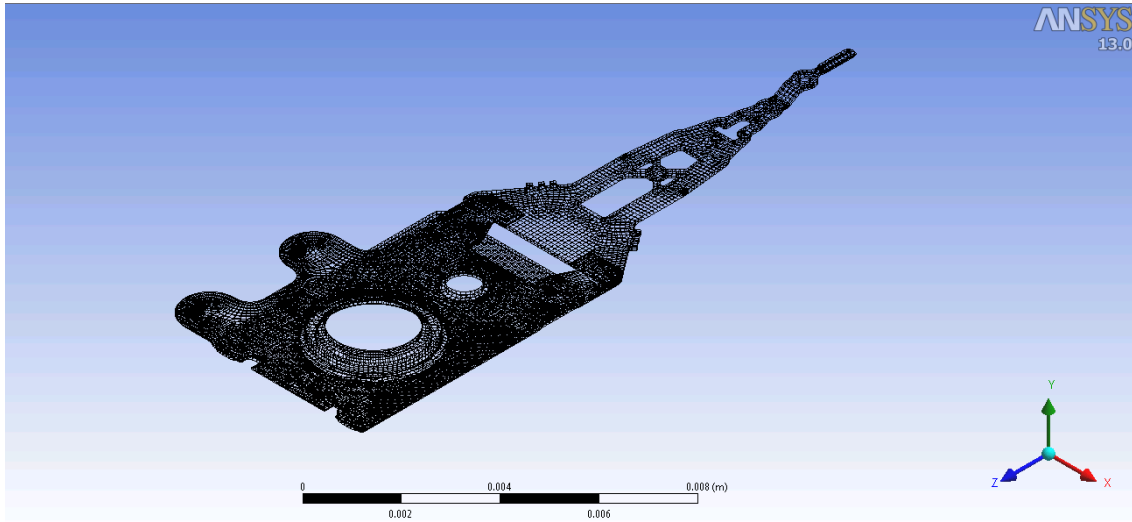
Property name	Value	Units
Young's Modulus	5,860	MPa
Poisson's ratio	0.33	-
Tensile Yield strength	150	MPa
Tensile Ultimate strength	200	MPa

ตารางที่ 5 คุณสมบัติของวัสดุและค่าคงที่ของ Slider^[4]

Property name	Value	Units
Young's Modulus	4×10^5	MPa
Poisson's ratio	0.30	-
Density	4.26×10^{-6}	kg/mm ³
Tensile Yield strength	1,000	MPa
Tensile Ultimate strength	1,000	MPa

2.2 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ ระบบรองรับ ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) มีการใช้เพื่อวิเคราะห์ลักษณะแบบพลวัตของ ระบบรองรับ เพื่อหาค่าสถานะที่ไม่มีภาระกระทำ (Free load) โดยใช้โปรแกรม ANSYS 13.0^[5] ในการวิเคราะห์ลักษณะแบบพลวัต และใช้ในการทำแบบจำลองโครงสร้างเอลิเมนต์ ซึ่งแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของ ระบบรองรับ ประกอบไปด้วย เอลิเมนต์จำนวน 26,386 เอลิเมนต์และโหนดจำนวน 103,486 โหนด ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งระบบรองรับและเฟล็กซ์เซอร์ ถูกประกอบด้วย โหนดที่ทับซ้อน (Coupling node) รอบ ๆ จุดเชื่อม ซึ่งจุดรอยบุ๋ม (Dimple points) จะใช้เพียงเพื่อจำกัดการเคลื่อนไหวในทิศทางปกติของ ระบบรองรับ



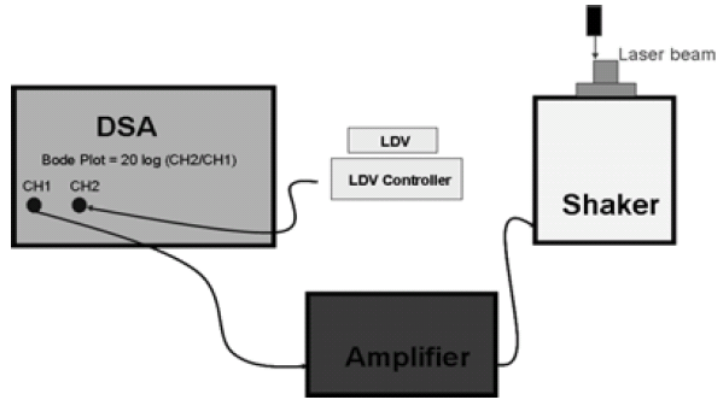
รูปที่ 2 แสดงการแบ่งรูปร่างของปัญหาเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ

2.3 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของ ระบบรองรับ และการตรวจสอบพิสูจน์

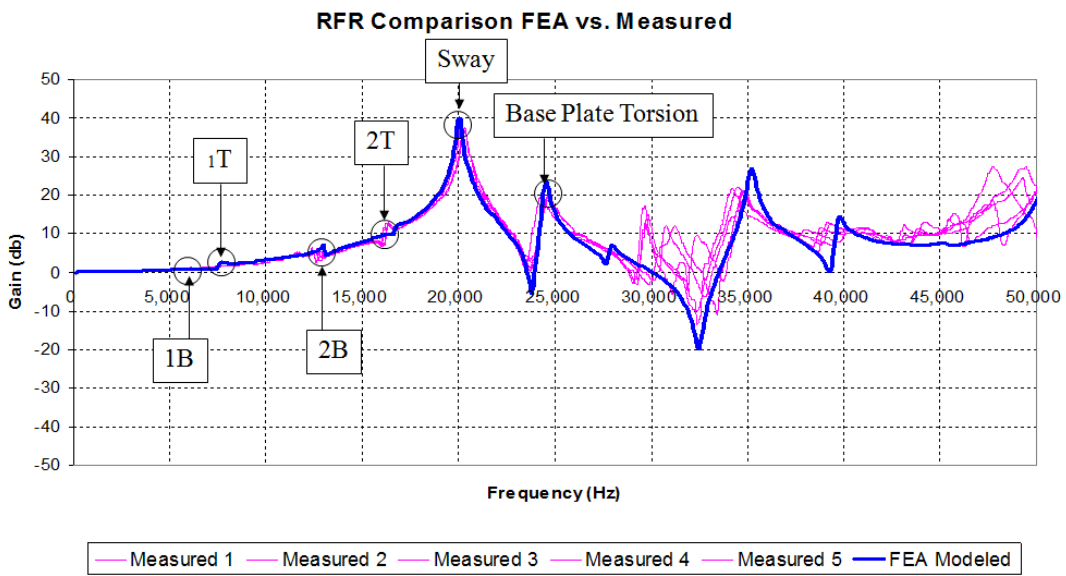
การคำนวณ ความถี่โมดอล (Modal Frequencies) ของโหมดหลักมีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 6 ในการทดสอบวัดการสั่นสะเทือนเพื่อใช้อ้างอิงกับผลการวิเคราะห์นี้ ได้ใช้ LDV (Laser Doppler Vibrometer) ในการวัดการสั่นสะเทือนโดยการตรวจจับจะทำการยิงแสงไปยังวัตถุที่ต้องการจะทำการทดสอบ การใช้งาน LDV ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3^[6] รูปแบบการสั่นสะเทือนต่าง ๆ ของ ระบบรองรับ แสดงไว้ในรูปที่ 5 ซึ่งความแตกต่างของความถี่ระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการทดลอง มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 1 % ซึ่งกราฟจากผลการทดลองจำนวน 5 ครั้งเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4 โดยเป็นผลการทดลองจากห้องปฏิบัติการของบริษัท Magnecomp Precision Technology

ตารางที่ 6 ความถี่ธรรมชาติของ ระบบรองรับ

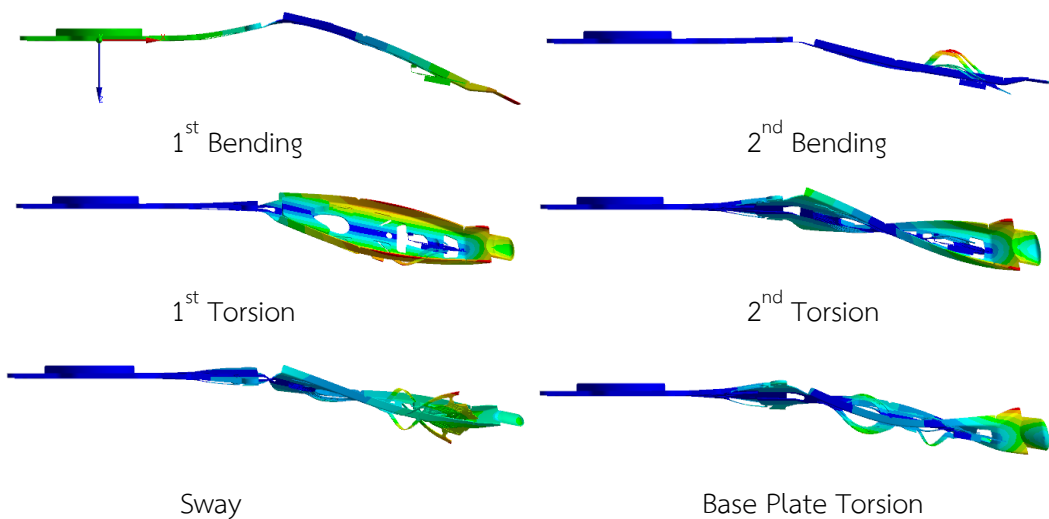
	Mode	Exp (Hz)	FEA (Hz)	Error (%)
1	1 st Bending	6,100	6,150	0.81
2	1 st Torsion	7,760	7,750	-0.13
3	2 nd Bending	12,800	12,960	1.23
4	2 nd Torsion	16,700	16,750	0.30
5	Sway	20,450	20,500	0.24
6	Base Plate Torsion	24,485	24,450	-0.14



รูปที่ 3 แสดงขั้นตอนการใช้งาน LDV^[6]



รูปที่ 4 แสดงกราฟจากผลการทดลองจำนวน 5 ครั้งเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 5 รูปแบบการสั่นของ ระบบรองรับ

2.4 การหาค่าที่เหมาะสมของมุมองศาเล็ก (Sag angle) ในระบบรองรับ

โดยทั่วไปแล้ว โหมดที่มีความวิกฤตที่สุดคือโหมดการส่ายและโหมดบิดลำดับที่ 2^[2] แต่โหมดที่มีความวิกฤตต่อคนรับภาระ ซึ่งเกี่ยวข้องกับมุมองศาเล็กคือโหมดบิดลำดับที่ 2 ซึ่งส่งผลกระทบในกระบวนการอ่านและเขียนข้อมูลของระบบรองรับ ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ดังที่แสดงในรูปที่ 5 มุมองศาเล็กในระบบรองรับ จะต้องเพิ่มขึ้นหรือลดลงเพื่อลดผลกระทบของค่าเกน (Gain) ดังที่ได้กล่าวมา อย่างไรก็ตาม มุมองศาเล็กจะต้องไม่มากเกินไปเพราะตัวหัวอ่าน,เขียน จะกระทบกับแผ่นดิสก์ ทำให้เกิดความเสียหายต่อข้อมูลของระบบรองรับ ได้ มุมองศาเล็กจะต้องไม่น้อยจนเกินไปเพื่อให้หัวอ่าน,เขียน สามารถติดตามอ่าน,เขียนตรวจสอบแผ่นดิสก์ได้ และมีผลต่อค่ากริมโพลด์ในขณะที่แผ่นดิสก์หมุนอยู่^[1] ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงไม่ให้มากหรือน้อยจนเกินไป เพราะมุมที่ได้จะต้องมีความสัมพันธ์กันกับระบบรองรับ เพราะฉะนั้น ในการศึกษาวิจัยจึงทำการออกแบบพารามิเตอร์ เพื่อลดค่าเกน ในโหมดบิดลำดับที่ 2 โดยรูปทรงตำแหน่งของมุมองศาเล็กในระบบรองรับ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6 โดยค่าของมุมองศาเล็กก่อนทำการหาค่าที่เหมาะสมคือ 0 องศา ซึ่งมุมองศาเล็กมีการกำหนดให้เพิ่มขึ้นทีละ 0.5 องศา จากค่าเริ่มต้นที่ 0 องศา เพื่อให้ได้ค่าเกนของโหมดบิดลำดับที่ 2 ที่น้อยที่สุดในที่นี้ ดำเนินการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการเพิ่มค่ามุมองศาเล็ก ซึ่งวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของมุมองศาเล็กให้กับ ระบบรองรับ ทำได้โดยใช้โปรแกรม ANSYS 13.0 เพื่อวิเคราะห์หาค่าเกนของโหมดบิดลำดับที่ 2 ในแต่ละระดับองศา ซึ่งค่าเกน (Gain) ที่ดีที่สุดของโหมดบิดลำดับที่ 2 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 7 กราฟเพื่อเปรียบเทียบระหว่างมุมองศาเล็กที่องศาต่าง ๆ เทียบกับค่าเกน ดังแสดงในรูปที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าเกนที่ได้จากการวิเคราะห์หลังจากปรับมุมองศาเล็กที่องศาต่าง ๆ

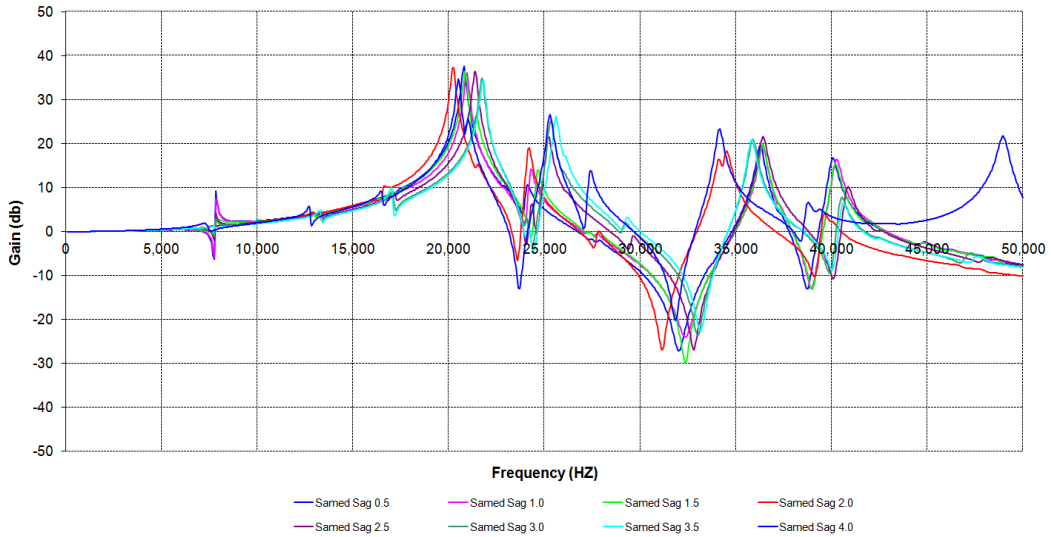
Sag	1 st Bending		1 st Torsion		2 nd Bending		2 nd Torsion		Sway		Base Plate Torsion	
	deg	Hz	Gain	Hz	Gain	Hz	Gain	Hz	Gain	Hz	Gain	Hz
0.0	5,700	0.53	8,000	4.41	13,100	5.83	21,100	36.56	21,600	37.78	27,500	7.68
0.5	6,000	0.95	7,350	9.17	13,000	5.25	17,450	9.77	20,850	36.00	24,150	10.12
1.0	6,000	0.78	7,750	7.54	13,000	4.42	17,650	9.85	20,900	36.06	24,350	13.91
1.5	6,050	0.47	8,000	2.60	12,950	4.41	17,700	9.95	20,900	36.77	24,700	13.65
2.0	6,050	0.47	8,100	0.94	13,050	3.87	17,560	10.13	20,950	37.37	24,750	19.13
2.5	6,050	0.57	8,115	3.34	13,350	4.55	17,250	8.51	20,950	36.40	25,250	21.41
3.0	6,100	0.58	8,185	4.00	13,350	4.65	17,100	9.07	20,950	34.94	25,350	25.18
3.5	6,050	0.62	8,275	6.00	13,300	4.88	17,000	10.00	20,955	34.56	25,650	25.78
4.0	6,100	0.90	8,350	7.56	13,350	5.12	16,500	9.10	21,000	34.16	25,750	25.88



รูปที่ 6 มุมองศาเล็ก (Sag angle)



FRF of Sag angle variation



รูปที่ 7 แสดงค่าเกณฑ์ความถี่ระดับต่าง ๆ เทียบกับมุมมองศาของมุมมองศาเล็ก (Sag angle)

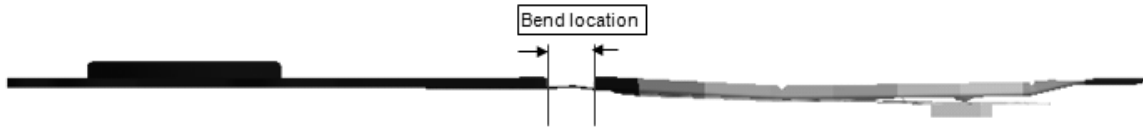
2.5 การหาค่าที่เหมาะสมระยะของตำแหน่งเบ้น (Bend location) ในระบบรองรับ

โหมดการบิดลำดับที่ 1 (1st torsion gain) เป็นโหมดที่มีความวิกฤตซึ่งต้องให้ความสนใจในส่วนของตำแหน่งเบ้น ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการอ่าน,เขียนข้อมูลและเกี่ยวกับประสิทธิภาพของ ระบบรองรับ ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องลดค่าเกณฑ์ของโหมดการบิดลำดับที่ 1 ซึ่งระยะของตำแหน่งเบ้น (Bend location) เท่านั้นที่จะถูกออกแบบ จึงทำการออกแบบพารามิเตอร์ เพื่อลดค่าเกณฑ์ ในโหมดบิดลำดับที่ 1 โดยรูปทรงและระยะตำแหน่งเบ้นใน ระบบรองรับ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 โดยระยะของตำแหน่งเบ้นก่อนทำการหาค่าที่เหมาะสมคือ 0.33 มิลลิเมตร ซึ่งมีการกำหนดให้ระยะตำแหน่งเบ้นเพิ่มขึ้นทีละ 0.01 มิลลิเมตร จากค่าเริ่มต้นที่ 0.200 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ค่าเกณฑ์ของโหมดบิดลำดับที่ 1 ที่น้อยที่สุดในที่นี้ ดำเนินการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยการเพิ่มระยะตำแหน่งเบ้น ซึ่งวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของมุมมองศาเล็กให้กับ ระบบรองรับ ทำได้โดยใช้โปรแกรม ANSYS 13.0 เพื่อวิเคราะห์หาค่าเกณฑ์ของโหมดบิดลำดับที่ 1 ในแต่ละระดับองศา ซึ่งค่าเกณฑ์ (Gain) ที่ดีที่สุดของโหมดบิดลำดับที่ 1 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 8 กราฟเพื่อเปรียบเทียบระหว่างระยะของตำแหน่งเบ้นที่องศาต่าง ๆ เทียบกับค่าเกณฑ์ แสดงในรูปที่ 9

ตารางที่ 8 ค่าเกณฑ์ที่ได้จากการวิเคราะห์หลังจากปรับระยะของตำแหน่งเบ้นที่ระยะต่าง ๆ

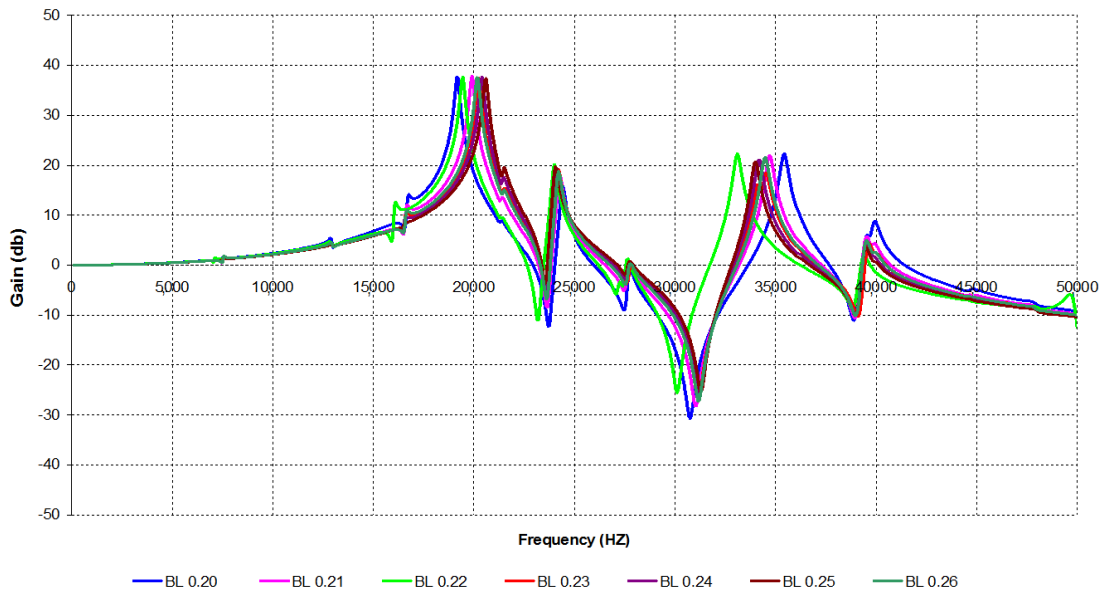
Bend	1 st Bending		1 st Torsion		2 nd Bending		2 nd Torsion		Sway		Base Plate Torsion	
	mm	Hz	Gain	Hz	Gain	Hz	Gain	Hz	Gain	Hz	Gain	
0.330	5,900	1.03	7,700	2.61	15,900	21.88	21,300	25.15	22,100	38.84	23,300	26.82
0.200	5,770	0.74	7,150	2.10	12,900	5.32	16,650	13.46	19,200	37.77	24,350	15.49
0.210	5,801	0.68	7,325	1.30	12,945	5.05	16,660	12.44	19,950	37.78	24,300	17.67
0.220	5,875	0.62	7,650	0.74	12,950	4.48	16,750	11.00	19,950	37.78	24,450	19.65
0.230	6,150	0.62	7,750	0.50	12,960	4.45	16,700	10.50	20,500	37.79	24,450	19.13
0.240	5,985	0.72	7,300	0.84	12,950	3.76	16,450	9.40	20,400	37.77	24,500	19.05

Bend	1 st Bending		1 st Torsion		2 nd Bending		2 nd Torsion		Sway		Base Plate Torsion	
	mm	Hz	Gain	Hz	Gain	Hz	Gain	Hz	Gain	Hz	Gain	Hz
0.250	5,965	0.75	7,200	0.94	12,950	3.72	16,250	8.56	20,600	37.77	24,550	19.32
0.260	5,675	0.77	7,100	1.20	12,965	4.18	16,000	10.56	20,200	37.78	24,650	18.41



รูปที่ 8 แสดงตำแหน่งเบ้น (Bend location)

FRF of Bend location variation



รูปที่ 9 แสดงค่าเกณฑ์ความถี่ระดับต่าง ๆ เทียบกับระยะของตำแหน่งเบ้น (Bend location)

3. สรุปผล

การวิเคราะห์ระบบรองรับเพื่อหาค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมของการบิดลำดับที่ 1 และการบิดลำดับที่ 2 ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 9 ผลลัพธ์จากการทดลองและการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 2 จะเห็นว่า ผลจากการทดลองและจากการวิเคราะห์ให้ผลสอดคล้องกัน ผลลัพธ์ที่ได้หลังจากปรับมุมมองเสาเสกที่ 2.5 องศา ค่าเกณฑ์ของการบิดลำดับที่ 2 มีค่าต่ำที่สุด โดยสามารถลดค่าเกณฑ์เมื่อเทียบกับก่อนการปรับองศาได้ถึง 76 เปอร์เซ็นต์และขนาดตำแหน่งเบ้นที่ 0.23 มิลลิเมตร ค่าเกณฑ์ของการบิดลำดับที่ 1 มีค่าต่ำที่สุด โดยสามารถลดค่าเกณฑ์เมื่อเทียบกับก่อนการปรับขนาดตำแหน่งเบ้นได้ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ผลการทดลองและการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ยังแสดงให้เห็นว่า สามารถเพิ่มค่าความถี่ธรรมชาติของระบบรองรับได้ในทุกโหมดของการสั่นสะเทือน

4. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบริษัท Magnecomp Precision Technology ที่เอื้อเพื่อผลการทดลองในการหาค่าความถี่ธรรมชาติของระบบรองรับ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yee-Pien Yang, Chein-Cherng Tu, (1996). Multiobjective Optimization of hard disk Suspension Assemblies: Part 1 – Structure Design and Sensitivity Analysis, *Computer & Structures*, Vol 59, No 4, pp. 757-770.
- [2] Yunsik Kim and Jongsoo Lee, (2002). Dynamic Analysis and Optimum Design of Suspensions for Information Storage Devices, *The Korean Society for Noise and Vibration Engineering Autumn Annual Conference*, Vol 1, October 2002, pp. 576 - 581.
- [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] ภากรณ์ ทรัพย์เจริญ (2551). การวิเคราะห์ห้มุมลอยตัวของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, วิทยานิพนธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [5] Kent L. Lawrence (2005). *ANSYS Tutorial Release 9.0*, ISBN: 1-58503-254-9, SDC Publications.
- [6] พิพัฒน์ อ่ำไพพิพัฒน์กุล, สันติ เศรษฐ์สิทธิโชค, ศศิพิมพ์ โพธิ์ผลิ, เทวิน พันภัย และ อีระ เจียศิริพงษ์กุล (2550). การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของ Pivot Bearing โดยการใช้ LDV พร้อมทั้งตรวจสอบการสั่นสะเทือนโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, จังหวัดชลบุรี*