

การจำลองการไหลของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ขนาด 1.8 นิ้ว ที่ความเร็วรอบต่างกัน

Simulation of Airflow inside 1.8-in Hard Disk Drive at Various Rotational Speeds

สุภชัย พลน้ำเที่ยง (Supachai Polnumtiang)¹

เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต (Kiatfa Tangchaichit)²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงการไหลของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ขนาด 1.8 นิ้วที่มีขายตามท้องตลาดที่ความเร็วรอบแผ่นดิสก์ที่ 3600, 5400, และ 7200 รอบต่อนาที ในการศึกษาจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ 3 มิติ ตำแหน่งของแขนหัวอ่าน (Head Stack Assembly, HSA) ที่ทำการศึกษาคือตำแหน่งปลายสุดของแผ่นดิสก์ (Outer Diameter, OD) และใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ RNG k-epsilon ผลการศึกษาพบว่า ความดันสถิต (static pressure) ที่เกิดขึ้นภายในฮาร์ดดิสก์จะมีทั้งค่าที่เป็นบวกและลบ โดยเฉพาะที่บริเวณใกล้จุดศูนย์กลางการหมุน ความดันจะมีค่าเป็นลบ แต่จะมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นตามรัศมีของแผ่นดิสก์ที่ความเร็วรอบค่าหนึ่ง ซึ่งค่าความดันจะมากขึ้นเมื่อความเร็วของแผ่นดิสก์มากขึ้น ในส่วนของความเร็วของอากาศที่เกิดขึ้นภายในฮาร์ดดิสก์พบว่าจะมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้นตามรัศมีของแผ่นดิสก์และความเร็วของอากาศจะมากที่สุดที่บริเวณที่ใกล้กับแผ่นดิสก์ที่สุดที่ความเร็วรอบค่าหนึ่ง ซึ่งความเร็วภายในฮาร์ดดิสก์จะมากขึ้นเมื่อความเร็วรอบของแผ่นดิสก์มากขึ้นด้วย เส้นทางการไหลของอากาศของทุกความเร็วรอบจะมีรูปแบบที่คล้ายกันแต่จะมีความเร็วของการไหลเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความเร็วรอบขึ้น จากผลการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลในการศึกษาถึงการสั่นสะเทือนของหัวอ่านอันมีผลเนื่องจากการไหลของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ได้ต่อไป

Abstract

In this paper, the behavior of the turbulence airflow field caused by the spinning of the single disk inside a 1.8 inch Hard Disk Drive (HDD) in the market at various rotational speeds was investigated. Commercial software (Fluent Software) using the RNG k-epsilon turbulence model was used to simulate. The single arm position at Outer Diameter (OD-Position) was studied. Pressure and velocity showed the flow pattern. We observed that the pressure at the center of the disk was a negative pressure, which increased to a positive pressure along the disk radius. The magnitude of velocity of airflow increased linearly along the disk radius. When the rotational speed was increased, pressure and velocity also increased. The velocity path line of airflow inside the HDD was similar for all rotational speeds. This information can be used for vibration analysis of the actuator arm.

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

คำสำคัญ: ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, แบบจำลองความปั่นป่วน, ความดันสถิต

Keywords: Hard Disk Drive, Turbulence model, Static Pressure

บทนำ

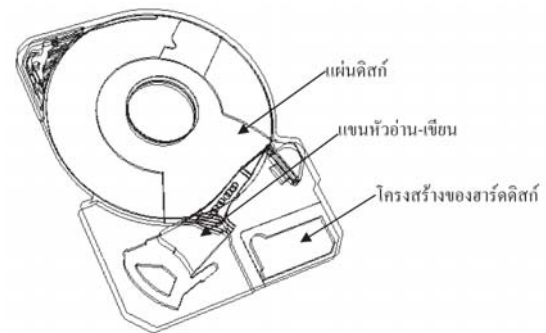
ฮาร์ดดิสก์จัดเป็นอุปกรณ์เก็บข้อมูลที่มีความสำคัญยิ่งในคอมพิวเตอร์ หรือแม้แต่อุปกรณ์อื่นๆ เช่น กล้องวิดีโอ โทรศัพท์มือถือ เป็นต้น และในอนาคตต่อไปข้างหน้าอุตสาหกรรมทางด้านจัดเก็บข้อมูลเหล่านี้จะต้องมีการแข่งขันกันเพิ่มขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค ฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบันมีความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลได้ในปริมาณมาก อีกทั้งใช้เวลาในการเข้าถึงข้อมูล (Access Time) ที่เร็วมากอันเนื่องมาจากเทคโนโลยีในการจัดเรียงแถบแม่เหล็ก (Track Density) ที่มีความละเอียดมากเพื่อการเขียนข้อมูลลงในแผ่นดิสก์ และความเร็วของมอเตอร์ที่ใช้หมุนแผ่นดิสก์ก็มีความเร็วสูงเช่นกัน ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาที่หลีกเลี่ยงไม่ได้เช่น 1. เกิดการสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่าน/เขียนอันเนื่องมาจากผลของการไหลอากาศที่เกิดขึ้นจากการหมุนที่ความเร็วสูงของแผ่นดิสก์ (Hayato et al., 2003) และ 2. การแกว่งตัวของแผ่นดิสก์อันเนื่องมาจากผลของความดันที่ตกลงบนแผ่นดิสก์ (Masayuki et al., 2001) เป็นต้น ความรุนแรงของอากาศที่ไหลอยู่ภายในจะต้องมีวิธีในการลดก่อนที่จะไปกระทบกับแขนหัวอ่าน/เขียน (Yoshiyuki et al., 2004) ฮาร์ดดิสก์ที่ได้มีการศึกษาจะมีขนาดตั้งแต่ 1 นิ้ว (M.A. Suraidi et al., 2006) 2.5 นิ้ว (Shigenori et al., 2006) และขนาด 3.5 นิ้ว

จากปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งสองประการทำให้การอ่าน-เขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์มีความคลาดเคลื่อนจึงทำให้มีนักวิจัยพยายามศึกษาถึงพฤติกรรมการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นภายในฮาร์ดดิสก์ขนาดต่างๆ เพื่อที่จะหาวิธีการในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าว อีกทั้งเป็นการเตรียมพร้อมที่จะรองรับเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ที่มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วในอนาคต

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงการไหลของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ขนาด 1.8 นิ้วที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาดที่ความเร็วรอบแผ่นดิสก์ที่ 3600, 5400, และ

7200 รอบต่อนาที ในการศึกษานี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ 3 มิติ ตำแหน่งของหัวอ่านที่ทำการศึกษาคือตำแหน่ง OD เท่านั้น ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ความเร็วของอากาศมีค่ามากที่สุด ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ GAMBIT และ FLUENT งานวิจัยนี้จะเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่าน/เขียนอันเนื่องมาจากความแรงของกระแสลมที่เกิดขึ้นในฮาร์ดดิสก์ต่อไป

แบบจำลองของฮาร์ดดิสก์และวิธีการคำนวณ



รูปที่ 1. ส่วนประกอบหลักของฮาร์ดดิสก์

รูปที่ 1 แสดงถึงแบบจำลอง 3 มิติของฮาร์ดดิสก์ขนาด 1.8 นิ้วที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาดซึ่งมีส่วนประกอบหลักอันประกอบไปด้วย 1. แผ่นดิสก์ 2. แขนหัวอ่าน/เขียน 3. โครงสร้างของฮาร์ดดิสก์ (ฝาครอบบนและล่าง) โดยกำหนดให้ทุกชิ้นส่วนมีคุณสมบัติเป็นผนัง (Wall) ที่อยู่กั้นที่ยกเว้นแผ่นดิสก์ที่ต้องกำหนดให้เป็นผนังที่สามารถเคลื่อนที่แบบหมุนได้ใน GAMBIT SOFTWARE ต่อจากนั้นก็ทำการสร้างกริดปริมาตร (Grid Volume) ที่แบบจำลองคุณสมบัติของกริดปริมาตรดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1. ข้อมูลต่างๆ ของกริดปริมาตรที่ใช้

Grid Size	0.05, 0.1, and 0.3 mm
Grid Type	Tetrahedral volume element
Grid Number	1,120,000 elements

จากนั้นทำการโดยที่เงื่อนไขของขอบเขต (Boundary Conditions) ที่ใช้กับแบบจำลองใน FLUENT SOFTWARE ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2. เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง

Rotational Speed	3600, 5400, 7200 rpm
Basic Equation	Navier-Stokes Equations
Turbulence model	RNG K-Epsilon Model
Assumption	No Slip at the wall Incompressible Flow Newtonian Fluid Flow Constant Air Density Turbulence Flow
Reynolds Number	11200 at 3600 rpm 16800 at 5400 rpm 22400 at 7200 rpm
Air Properties	at 40°C

ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้จากการคำนวณจะทำการเปรียบเทียบการไหลที่ความเร็วรอบต่างๆ ดังนี้ คือ 3600, 5400, และ 7200 รอบต่อนาที โดยจะเปรียบเทียบความดันและความเร็วของอากาศที่เกิดขึ้นภายในฮาร์ดดิสก์ที่ระนาบตัดต่างๆ คือระนาบเดียวกับหัวอ่านบน ระนาบเดียวกับหัวอ่านล่าง และระนาบตัดด้านข้างแบบจำลองฮาร์ดดิสก์

ความดันอากาศภายในฮาร์ดดิสก์

รูปที่ 2 และ 3 แสดงความดันที่เกิดขึ้นที่ระนาบเดียวกับหัวอ่านบนและล่างตามลำดับ

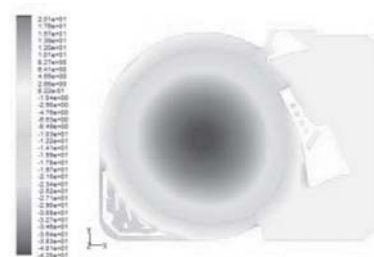
พบว่าความดันสูงสุดเกิดขึ้นที่ด้านหน้าของแขนหัวอ่านของทุกความเร็วรอบเนื่องจากที่บริเวณนี้แขนหัวอ่านได้วางตัวกั้นการไหลของอากาศไว้ และยังสังเกตเห็นอีกว่าที่ความเร็วรอบ 7200 รอบต่อนาทีจะมีค่าความดันสูงสุดและจะลดลงเมื่อความเร็วรอบลดลงตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าช่วงของความดันที่เป็นลบและบวกจะกว้างขึ้นตามลำดับความเร็วรอบที่สูงขึ้น และความดันจะเพิ่มจากลบเป็นบวกเมื่อรัศมีของแผ่นดิสก์เพิ่มมากขึ้นด้วย รูปที่ 3 จะเห็นเป็นช่องว่างมากกว่ารูปที่ 2 นั่นคือผลของรูปร่างของพื้นผิวของฝาครอบตัวล่าง



3600 rpm

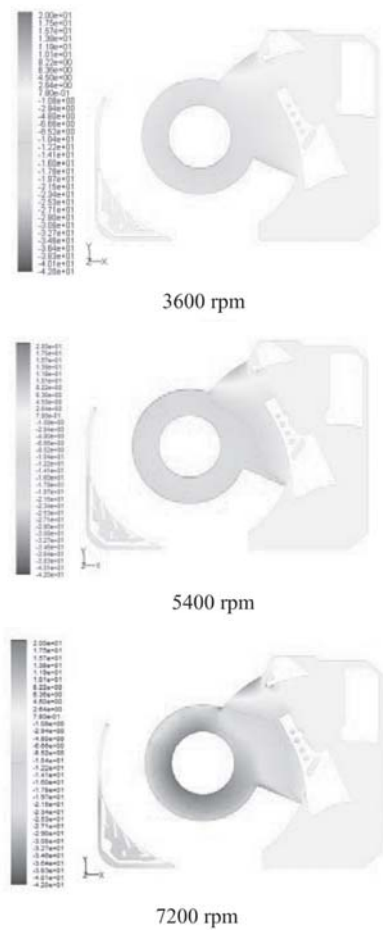


5400 rpm



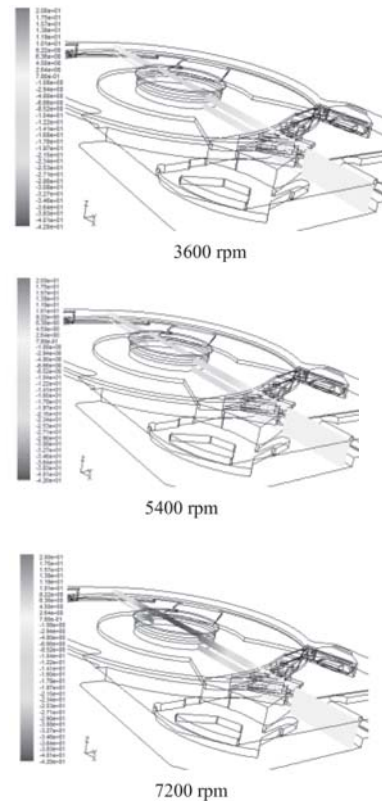
7200 rpm

รูปที่ 2. ความดันของอากาศที่ระนาบแขนหัวอ่านบน



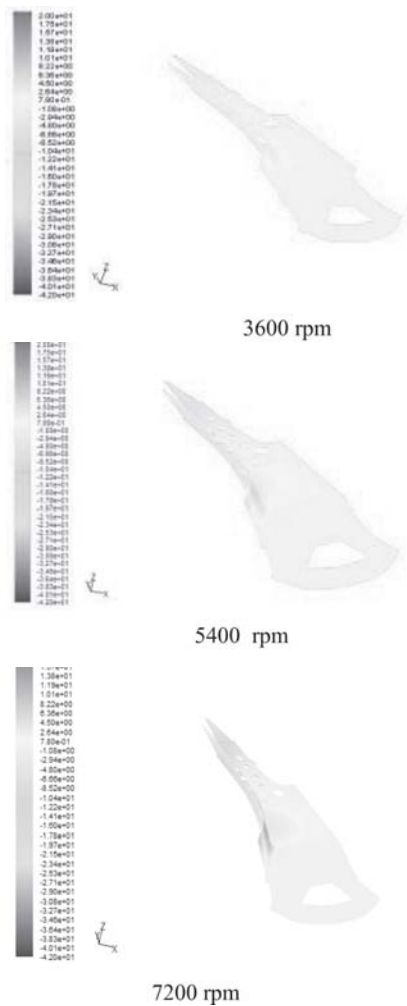
รูปที่ 3. ความดันของอากาศที่ระนาบแกนหัวอ่านล่าง

รูปที่ 4 แสดงความดันที่ระนาบตัดด้านข้างของฮาร์ดดิสก์พบว่าที่บริเวณที่ไกลจากแผ่นดิสก์จะมีความดันเกิดขึ้นค่อนข้างสูงและมีค่าเป็นบวกเนื่องจากห่างจากจุดศูนย์กลางของการหมุนและยังพบอีกว่าที่ความเร็วรอบสูงจะมีความดันบริเวณดังกล่าวสูงมากที่สุดด้วย



รูปที่ 4. ความดันของอากาศที่ระนาบตัดด้านข้าง

รูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าความดันที่เกิดขึ้นที่
แขนของหัวอ่านพบว่า ความดันมีค่ามากที่สุดที่บริเวณ
ด้านหน้าของแขนหัวอ่านและจะมากขึ้นเมื่อความเร็ว
รอบมากขึ้นด้วยและบริเวณปลายของหัวอ่านจะมีค่า



เป็นลบมากขึ้นเมื่อความเร็วรอบมากขึ้น

รูปที่ 5. ความดันที่กระทำกับแขนหัวอ่าน

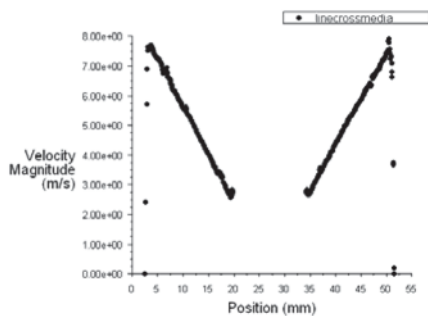
รูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบค่า
หนึ่งความดันที่เกิดขึ้นที่แผ่นดิสก์มีค่าติดลบที่
ศูนย์กลางของแผ่นดิสก์และจะเป็นบวกเพิ่มขึ้นเมื่ออัตรา
ของแผ่นดิสก์มากขึ้นและสิ่งที่สังเกตเห็นอีกอย่างคือ
เมื่อความเร็วรอบมากขึ้นช่วงของความดันที่เป็นบวก



และลบจะมีช่วงที่กว้างขึ้นด้วย

**รูปที่ 6. ความดันที่กระทำกับแผ่นดิสก์
ความเร็วอากาศภายในฮาร์ดดิสก์**

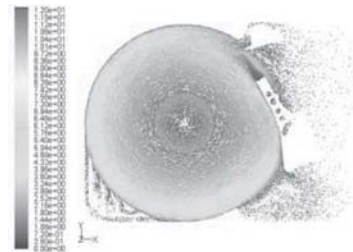
รูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วรอบค่าหนึ่ง ความเร็วของอากาศที่ใกล้กับแผ่นดิสก์จะเพิ่มขึ้นจาก จุดศูนย์กลางของแผ่นดิสก์ออกไปยังขอบของแผ่นดิสก์ ในลักษณะที่เป็นเชิงเส้นดังสมการ $V = \omega R$ เมื่อ V



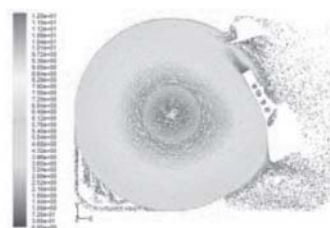
คือ ความเร็วเชิงเส้นของแผ่นดิสก์ ω คือ ความเร็วรอบของแผ่นดิสก์ และ R คือรัศมีของแผ่นดิสก์

รูปที่ 7. ความเร็วเชิงเส้นของอากาศที่ใกล้กับแผ่นดิสก์

รูปที่ 8 และรูปที่ 9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อ มีการเปลี่ยนความเร็วรอบความเร็วจะมีค่ามากขึ้น ตามความเร็วรอบการหมุนของทั้งสองระนาบคือ ระนาบเดียวกับหัวอ่านบน ระนาบเดียวกับหัว



3600 rpm

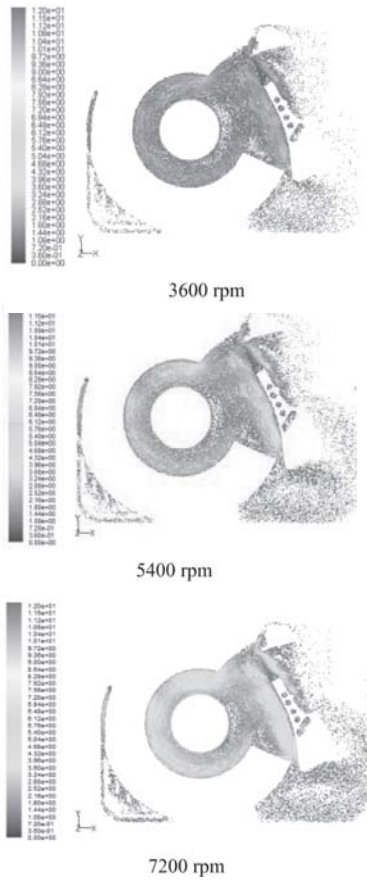


5400 rpm



7200 rpm

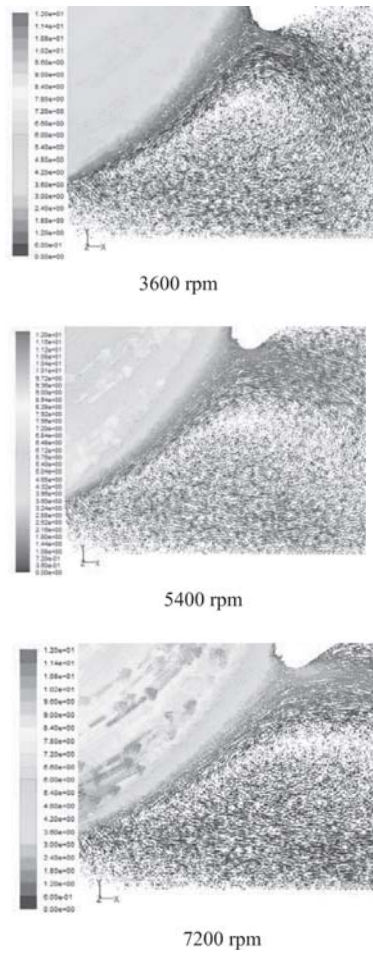
อ่านล่าง นอกจากนี้ยังพบอีกว่าบริเวณที่ห่างจากพื้นที่



รูปที่ 8. ความเร็วของอากาศที่ระนาบแกนหัวอ่านบน

รูปที่ 9. ความเร็วของอากาศที่ระนาบแกนหัวอ่านล่าง

รูปที่ 10 แสดงลักษณะการหมุนวนของ
อากาศที่ด้านหน้าของแกนหัวอ่าน (บริเวณเหนือ
ตำแหน่งของ Voice Coil Motor) จะสังเกตเห็นว่าที่
ความเร็วรอบต่ำการหมุนวนจะมีลักษณะคล้ายวงกลม

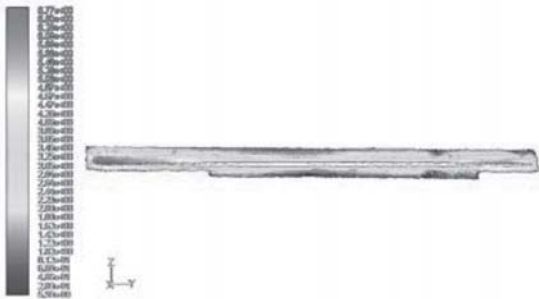


ของแผ่นดิสก์ความเร็วของอากาศแทบจะเป็นศูนย์

แต่เมื่อความเร็วรอบเพิ่มการหมุนวนจะมีลักษณะคล้าย
วงรีมากขึ้นตามลำดับ

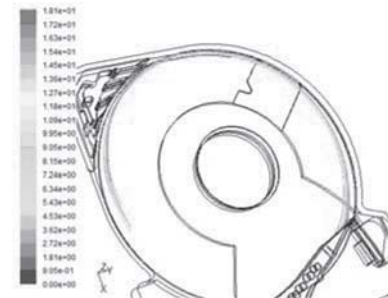
รูปที่ 10. การหมุนวนของอากาศที่เกิดขึ้นที่ด้านหน้า HSA

รูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าความเร็วของอากาศจะเพิ่มขึ้นจากศูนย์กลางของแผ่นดิสก์ออกไปยังขอบ และแสดงให้เห็นว่าความเร็วด้านบนแผ่นดิสก์จะมากกว่าด้านล่างของแผ่นดิสก์ อันมีผลเนื่องจากที่ฝาครอบล่างมีพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอจึงเป็นผลให้ความเร็วของอากาศ

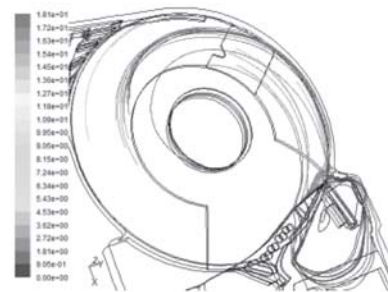


ช้ากว่าด้านล่าง

รูปที่ 11. ความเร็วของอากาศที่ระนาบตัดด้านข้าง



HGA ด้านบน



HGA ด้านล่าง

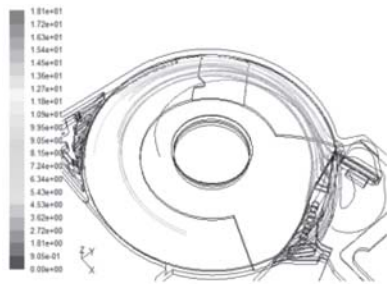
เส้นทางจำลองการไหลของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์

พิจารณาที่ความเร็วรอบ 3600 รอบต่อนาที

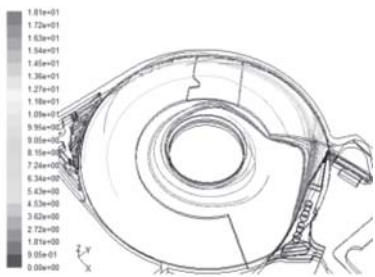
เมื่ออากาศไหลผ่าน Head Gimbal Assembly, (HGA) ตัวบนการไหลของอากาศจะมีทิศทางเดียวกันกับแนวการหมุนของขอบแผ่นดิสก์ซึ่งมีความเร็วที่ค่อนข้างสูง ในส่วนที่ไหลผ่าน HGA ตัวล่างอากาศจะแยกออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะไหลไปตามทิศทางการหมุนของแผ่นดิสก์แต่เมื่อได้ระยะหนึ่งจะวนเข้าสู่ศูนย์กลางการหมุน ส่วนที่เหลือจะถูกดูดให้ไหลผ่านด้านหลังของที่จอดหัวอ่าน (Ramp Load) ในลักษณะที่เป็นวงรีแล้วถูกดูดกลับให้ไหลผ่าน HGA ไปตามทิศทางการหมุนของแผ่นดิสก์ ดังแสดงในรูปที่ 12

รูปที่ 12. เส้นทางการไหลเมื่อผ่าน HGA

รูปที่ 13 แสดงการไหลของอากาศที่ผ่านแขนหัวอ่าน (Head Stack Assembly, HSA) ตัวบนและตัวล่าง (บริเวณที่ยื่นเข้าไปในบริเวณของแผ่นดิสก์) พบว่าที่แขนหัวอ่านตัวบนอากาศจะไหลไปตามแนวของแขนหัวอ่านจากนั้นไหลไปตามทิศทางการหมุนของแผ่นดิสก์ ที่แขนหัวอ่านตัวล่างอากาศไหลไปชนพื้นผิวที่ยกตัวขึ้นมาจากนั้นจะแยกเป็นสองส่วนคือส่วนแรกเมื่อชนแล้วหักเหเข้าสู่ศูนย์กลางการหมุนและส่วนที่เหลือไหลไปตามทิศทางการหมุนของแผ่นดิสก์



แขนหัวอ่านตัวบน



แขนหัวอ่านตัวล่าง

ส่วนนี้ความเร็วค่อนข้างสูง

รูปที่ 13. เส้นทางการไหลเมื่อผ่านด้านหน้า HSA

(บริเวณที่ยื่นเข้าไปในบริเวณของแผ่นดิสก์)

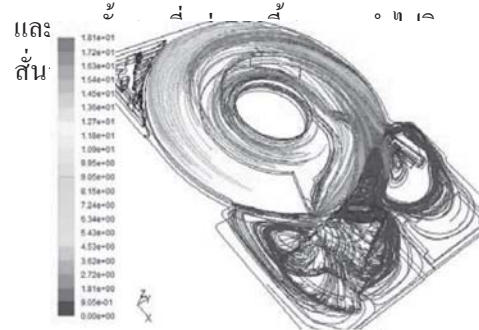
การไหลของอากาศเมื่อชนกับด้านหน้าของ HSA ในส่วนที่อยู่นอกบริเวณของแผ่นดิสก์ ดังแสดงในรูปที่ 14 อากาศจะชนแล้วเกิดการหมุนวนเป็นวงบริเวณด้านหน้าแล้วจะถูกดูดกลับเข้าสู่บริเวณของแผ่นดิสก์ในขณะที่บางส่วนมีการหักเหเข้าสู่ศูนย์กลางการหมุน



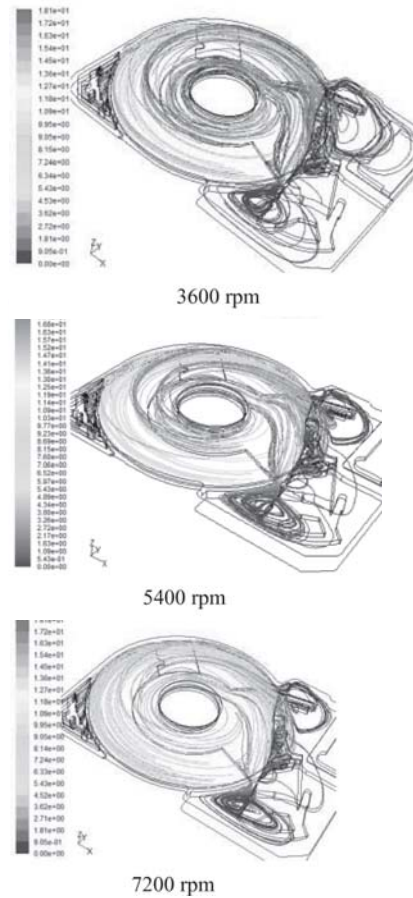
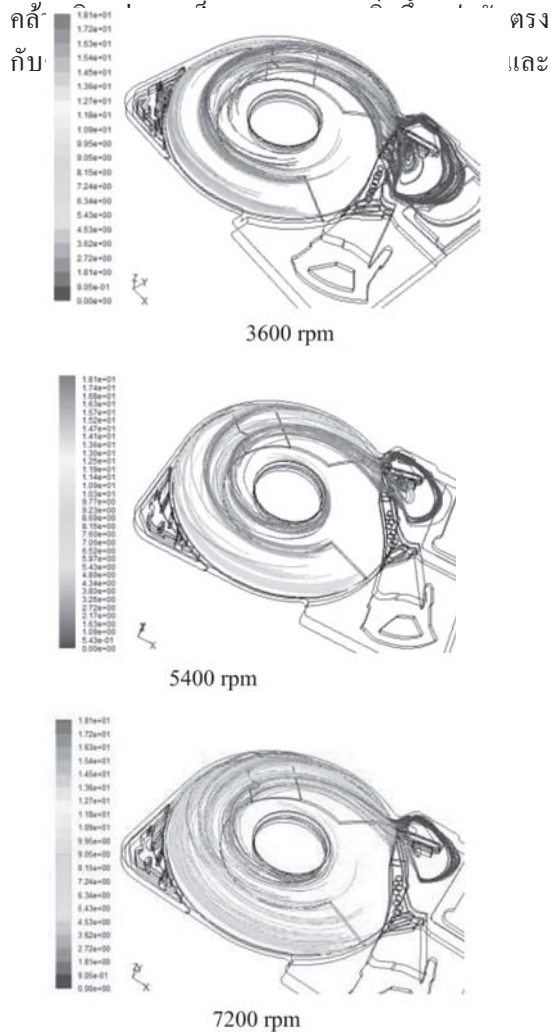
รูปที่ 14. เส้นทางการไหลเมื่อผ่านด้านหน้า HSA

(ส่วนที่อยู่นอกบริเวณของแผ่นดิสก์)

รูปที่ 15 แสดงการไหลของอากาศที่ผ่านพื้นผิวทั้งหมดของ HSA การไหลก็ยังคงเหมือนเดิมในส่วนที่กล่าวมา แต่ที่ต่างกันก็คือ บริเวณด้านหลังของแขนหัวอ่านและผิวบนล่างจะมีการหมุนเวียนของอากาศและความเร็วค่อนข้างต่ำด้วย เป็นสาเหตุให้เกิดแรงลากจูง (Drag Force) และแรงยก (Lift Force) ซึ่งมีสาเหตุมาจากความแตกต่างความดันที่ด้านหน้าและด้านหลัง ด้านบนและด้านล่างของ HSA ตามลำดับ



รูปที่ 15. อากาศไหลผ่านพื้นผิวทั้งหมด HSA
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่ความเร็วต่างกัน
เมื่อมีการเปลี่ยนความเร็วรอบการหมุน ผลที่
ได้คือรูปแบบการไหลของอากาศจะยังคงมีรูปแบบที่
คล้ายกัน



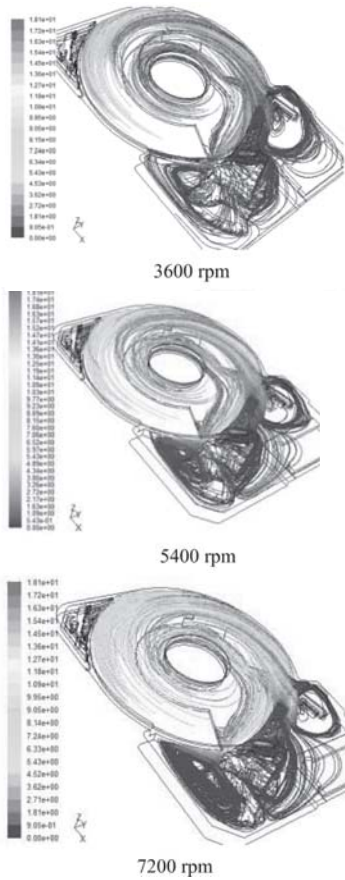
รูปที่ 17. เมื่อพิจารณาที่ด้านหน้า HSA

รูปที่ 16. เมื่อพิจารณาที่ HGA

สรุป

จากการศึกษาลักษณะการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นภายในฮาร์ดดิสก์ขนาด 1.8 นิ้วที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาดพบว่าช่วงของความดันจากลบไปเป็นบวก (แรงดูดไปเป็นแรงผลัก) จะมีความกว้างมากขึ้นและความดันของอากาศที่เกิดขึ้นภายในฮาร์ดดิสก์จะมีค่ามากขึ้นเมื่อความเร็วรอบของฮาร์ดดิสก์สูงขึ้น ความดันของอากาศที่บริเวณห่างจากแผ่นดิสก์จะมีค่าเป็นบวกเสมอ เนื่องจากห่างจากศูนย์กลางการหมุน ในส่วนของความเร็วของอากาศบริเวณใกล้กับแผ่นดิสก์มี

18 ตามลำดับ



รูปที่ 18. เมื่อพิจารณาทั้ง HSA

ลักษณะเป็นเชิงเส้นที่ทุกความเร็วรอบ นอกจากนี้ความเร็วของอากาศที่บริเวณด้านบนของแผ่นดิสก์จะมีความมากกว่าด้านล่างของแผ่นดิสก์ที่ทุกความเร็วรอบ เนื่องจากว่าที่ด้านล่างของแผ่นดิสก์มีพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอจึงมีผลให้ความเร็วลดลง เมื่อพิจารณาถึงเส้นทางการไหลของอากาศที่ความเร็วรอบค่าหนึ่งที่เกิดไหลผ่าน HGA อากาศจะแยกเป็นสองส่วนคือ ไหลไปตามแนวรัศมีของแผ่นดิสก์และหักเหไหลเข้าสู่ศูนย์กลางการไหลซึ่งมีผลเช่นเดียวกันกับไหลผ่านด้านหน้าของ HSA แนวเส้นทางการไหลของทุกความเร็วรอบจะมีลักษณะที่คล้ายกันแต่ที่ความเร็วรอบสูงการไหลของอากาศก็มีความเร็วสูงตามด้วย

ผลจากการศึกษาในครั้งนี้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการออกแบบฮาร์ดดิสก์ในกรณีที่ต้องการเพิ่มความเร็วรอบการหมุนและยังนำไปเป็นแนวทางในการศึกษาการสั่นสะเทือนของแผ่นดิสก์ (Disk Flutter)

และการสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่าน (Arm Vibration) อันมีผลสืบเนื่องมาจากการไหลของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท Seagate Technology (Thailand) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์และข้อมูลทางเทคนิคในการทำวิจัย ศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้าน ส่วน ประกอบ ฮาร์ด ดิสก์ ไดรฟ์ (I/UCRC in HDD Component) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ช่วยประสานงานทางด้านทุนในการทำวิจัยและขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาในการทำวิจัยครั้งนี้ ภายใต้โครงการพัฒนาทรัพยากรบุคคลในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์

เอกสารอ้างอิง

Hayato Shimizu, Toshihiko, Mikio Tokuyama, Hiromitsu Masuda, and Shigeo Nakamura. 2003. Numerical investigation of Positioning Error Caused by Airflow-induced Vibration of Head Gimbal Assembly in Hard Disk Drive. **IEEE Transaction on Magnetic**. Vol. 39(2)

Masayuki Tatewaki, Naozumi Tsuda and Tsugito Marayuyama. 2001. A Numerical Simulation of Unsteady Airflow in HDDs. **Fujitsu Sci. Tech. J.** p227-235

Yoshiyuki Hirono, Toshihiro Arisaka, Noroyo Nishijima, Toshihiko Shimizu, Shigeo Nakamura, and Hiromitsu Masuda. 2004. Flow induced Vibration Reduction in HDD by Using a Spoiler. **IEEE Transaction on Magnetic**. Vol.40

M.A. Suraidi, C.S. Tan, Q.D. Zhang, T.H. Yip, K. Sundraravadivelu. 2006. Numerical

investigation of airflow inside a 1-in Hard Disk drive. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials** 303.p124-p127

Shigenori Takada, Tatewaki Kusakawa, Norio Tagawa, Atsunobu Mori, Yoshiaki Mizoh, Masaru Nakatika. 2006.Study on flow induced vibration of head-disk assembly mechanisms in actual hard disk drive. **Springer-Verlag**.