

ก่อเกียรติ บุญชูกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์

รัชตพงษ์ บุญวัตรสกุล
นิสิตปริญญาโทบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพฯ 10330

การศึกษาสัญญาณการสั่นสะเทือนของเพลลาที่มีรอยแตกตามแนวหน้าตัด

Studying of Vibrational Behavior of a Shaft Containing a Transverse Crack

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดจากรอยแตกในเพลลา โดยทำการศึกษาว่าสามารถตรวจพบรอยแตกได้หรือไม่ และหาคำตอบอย่างง่ายที่เป็นตัวบ่งชี้ความเป็นไปได้ของการเกิดรอยแตกในเพลลา โดยคาดหวังว่าคำตอบดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ต่อการจัดการบำรุงรักษาเครื่องจักรที่มีเพลลาโดยทั่วไป ในเบื้องต้นได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบต่างๆ ที่คาดว่าสามารถแทนลักษณะของรอยแตกในเพลลาได้ โดยที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า รอยแตกที่เกิดขึ้นในเพลลาจะส่งผลให้ค่าความแข็งของเพลลาลดลง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในเบื้องต้นคือ การสั่นสะเทือนแบบบิดและการสั่นสะเทือนแบบเชิงเส้น ซึ่งผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นว่า เมื่อเกิดรอยแตกขึ้นในเพลลาจะส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติของเพลลาลดลง และน่าจะส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลขึ้นในเพลลา ซึ่งผลที่ได้นี้จะนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณการสั่นสะเทือนจริงที่ได้จากชุดทดลองที่จะสร้างขึ้นในลำดับต่อไป เพื่อทำการปรับปรุงและแก้ไขแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

Mathematical models of torsional vibration and linear vibration are used to investigate the possibility in detect vibration signal and vibration behavior of a shaft containing a transverse crack that can help in diagnosis the defects and maintenance rotating machinery. Models are based on the hypothesis that crack reduce the stiffness of shaft. Results from investigation are reduction in natural frequency of cracked shaft and amplitude increasing of unbalance signal. This results will be compared with the results from experimental for adapted and corrected mathematical models.

1. บทนำ

ในปัจจุบันการเฝ้าตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน (Vibration Monitoring) ได้กลายเป็นวิธีการพื้นฐานที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อตรวจวัดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องจักรกลหมุน (Rotating Machines) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับเครื่องจักรที่มีราคาแพง และมีความสำคัญกับการผลิต วิธีการเฝ้าตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนมีข้อได้

เปรียบกว่าวิธีการตรวจวัดวิธีอื่น ๆ คือ สามารถทำการตรวจวัดสภาพของเครื่องจักรได้โดยไม่ต้องถอดแยกชิ้นส่วนใดๆ ของเครื่องจักร และสามารถตรวจวัดได้ในขณะที่เครื่องจักรยังทำงานอยู่ การตรวจวัดโดยทั่วไปจะทำการตรวจวัดที่บริเวณตลับลูกปืน (Bearing) เนื่องจากเป็นชิ้นส่วนที่อยู่ติดกับเพลลาซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่มีการหมุนมากที่สุด การเฝ้าตรวจวัดสัญญาณการ

สั่นสะเทือน สามารถตรวจวัดความผิดปกติของเครื่องจักรได้หลายอย่างเช่น Unbalance, Misalignment, ความเสียหายของตลับลูกปืน เป็นต้น ซึ่งการวิเคราะห์ความถี่ของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดได้จะทำให้สามารถระบุถึงสาเหตุของความผิดปกตินั้นได้

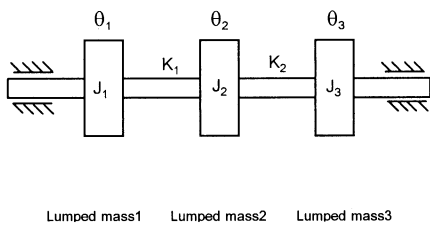
ความผิดปกติอีกชนิดหนึ่งซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในเครื่องจักรกลหมุน คือ รอยแตกในเพลลา (Shaft Crack) ซึ่งถ้าสามารถตรวจพบรอยแตกในเพลลาได้ในขณะเพิ่งเริ่มเสียหาย ก็จะสามารถทำการซ่อมบำรุงได้ทันก่อนที่จะเกิดความเสียหายอย่างรุนแรงกับตัวเครื่องจักร และป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ใกล้เคียง รวมไปถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการต้องหยุดการผลิตอย่างกระทันหัน ดังนั้นจึงได้เริ่มศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนซึ่งเกิดจากรอยแตกในเพลลาว่าสามารถตรวจพบได้หรือไม่หรือมีลักษณะของสัญญาณเป็นอย่างไร

2. แบบจำลองของรอยแตกในเพลลา (Crack Models)

ในการเริ่มต้นการศึกษาสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดจากรอยแตกในเพลลานั้น ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย ๆ สองแบบคือ การสั่นสะเทือนแบบบิด (Torsional Vibration) และการสั่นสะเทือนเชิงเส้น (Linear Vibration) ซึ่งตัวแปรที่จะพิจารณาในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือค่าความแข็ง (Stiffness) ของเพลลา โดยตั้งอยู่บนสมมติฐานว่ารอยแตกที่เกิดขึ้นในเพลลาจะส่งผลให้ค่าความแข็งของเพลลาลดลง

2.1 การสั่นสะเทือนแบบบิด (Torsional Vibration)

เมื่อพิจารณาการสั่นสะเทือนแบบบิด จะเห็นว่าเพลลาเป็นระบบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous Systems) ดังนั้นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเปลี่ยนระบบที่มีความต่อเนื่องไปเป็นระบบแบบมวลก้อน (Lumped Masses) ซึ่งจะแบ่งเพลลาออกเป็นมวลโดยพิจารณาเป็นจุด (Point Masses) ที่เชื่อมต่อกันด้วยสปริงที่ไม่มีมวล

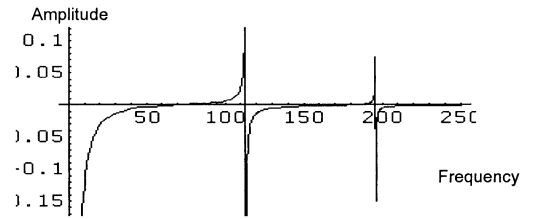


ซึ่งมีสมการการเคลื่อนที่คือ

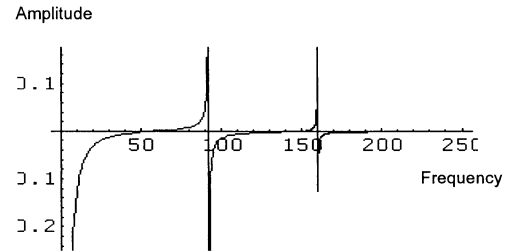
$$[J]\{\ddot{\theta}\} + [K]\{\theta\} = \{T\}$$

โดยที่

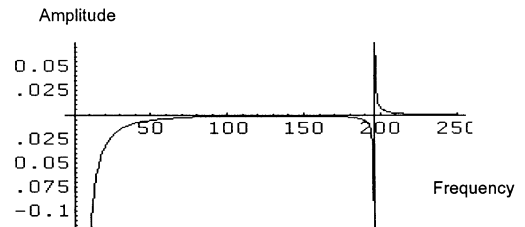
- [J] คือ Inertia Matrix
- [K] คือ Stiffness Matrix
- θ คือ มุมบิด
- T คือ แรงบิด



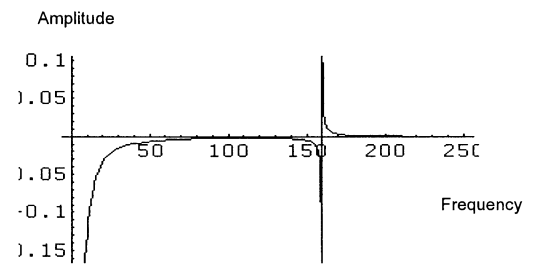
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 1 และความเร็วยรอบของเพลลาที่ไม่มีรอยแตก



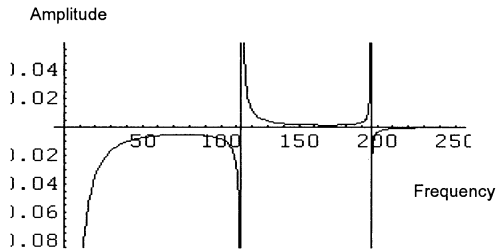
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 1 และความเร็วยรอบของเพลลาที่มีรอยแตก



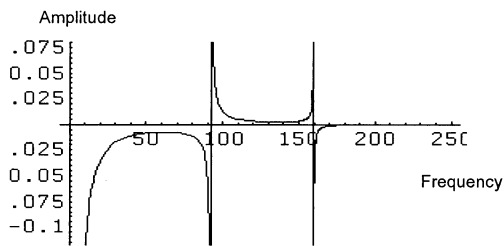
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 2 และความเร็วยรอบของเพลลาที่ไม่มีรอยแตก



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 2 และความเร็วยรอบของเพลลาที่มีรอยแตก



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 3 และความเร็วรอบของเพลลาที่ไม่มีรอยแตก



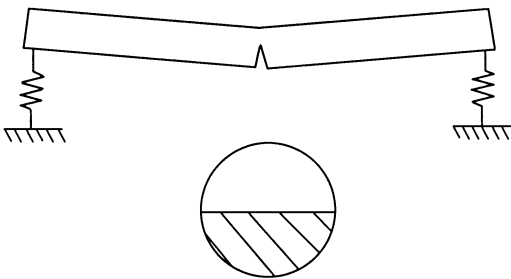
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการสั่นสะเทือนของ lumped mass 3 และความเร็วรอบของเพลลาที่มีรอยแตก

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของการสั่นสะเทือนกับความถี่ของเพลลาที่ไม่มีรอยแตกและเพลลาที่มีรอยแตกสักครึ่งหนึ่งของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมื่อให้แรงบิดจากภายนอกเป็นแบบกลับไปกลับมาคือ

$$T = T \sin \omega t$$

แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพลลาเกิดรอยแตกขึ้นจะส่งผลให้ค่าความถี่ธรรมชาติของเพลลาลดลงไม่ว่าจะพิจารณาที่ lumped mass ใดก็ตาม

2.2 การสั่นสะเทือนแบบเชิงเส้น (Linear Vibration)



เมื่อพิจารณาให้เพลลาเกิดการสั่นสะเทือนแบบเชิงเส้น เมื่อเพลลาหมุนไปจนรอยแตกอยู่บริเวณส่วนล่างของเพลลา น้ำหนักของเพลลาเองจะทำให้รอยแตกในเพลลาเปิดออกและเมื่อรอยแตกหมุนขึ้นมาอยู่ที่ส่วนบนของเพลลา รอยแตกก็จะปิดลงซึ่งก็จะเป็นเช่นนี้ในทุกๆ รอบของการหมุน และในการที่รอยแตกเปิดออกน่าจะส่งผลให้เพลลาเกิดความไม่สมดุล (Unbalance)

ดังนั้นสัญญาณการสั่นสะเทือนที่วัดได้น่าจะเหมือนกับสัญญาณที่ได้จากเพลลาที่เกิดความไม่สมดุล คือมีสัญญาณที่ความถี่เดียวกับความเร็วรอบของเพลลา ซึ่งผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งสองจะนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากชุดทดลองจริงที่จะสร้างขึ้น ว่ามีพฤติกรรมเป็นไปตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้หรือไม่เพื่อทำการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ให้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย ๆ สองแบบนี้ จะเห็นได้ว่าสิ่งที่จะเป็นตัวบ่งชี้ว่าเกิดรอยแตกขึ้นในเพลลานั้นมีหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นการลดลงของความถี่ธรรมชาติของเพลลา ซึ่งสามารถตรวจสอบจากค่าความเร็ววิกฤติ (Critical Speed) ของเพลลาขณะเริ่มเดินเครื่องหรือลดความเร็วเครื่องจักร แล้วเปรียบเทียบกับข้อมูลเดิมหรือข้อมูลที่มีอยู่ในคู่มือประจำเครื่อง อีกสิ่งหนึ่งซึ่งอาจเป็นสัญญาณบอกรอยแตกในเพลลาคือสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่เท่ากับความถี่รอบของเพลลา ซึ่งสัญญาณนี้น่าจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามความลึกของรอยแตกที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนแล้วพบว่าขนาดสัญญาณที่ความถี่เท่ากับความถี่รอบของเพลลาเพิ่มขึ้นแล้ว รอยแตกในเพลลาอาจเป็นอีกสมมติฐานหนึ่งที่น่าจะเป็นสาเหตุของความผิดปกตินี้

จะเห็นได้ว่าไม่มีสัญญาณใดเป็นลักษณะเฉพาะของรอยแตกในเพลลา ดังนั้นในการวิเคราะห์จะต้องอาศัยข้อมูลจากหลายๆ ทางมาประกอบการพิจารณาเพื่อยืนยัน ดังตัวอย่างเช่น J.J. Kottke ได้พบปัญหาการเพิ่มขนาดขึ้นของสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่เท่ากับความถี่รอบและที่สองเท่าของความถี่รอบในขณะที่มีการลดลงของอุณหภูมิของของไหลในเทอร์ไบน์ เมื่อทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ทำให้เกิดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่นี้เช่น Unbalance, Misalignment, Bent Shaft, Loose Bearing, Bearing Clearance เป็นต้น แล้วปรากฏว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนนี้ยังปรากฏอยู่ จึงสรุปว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงจะเกิดความแตกต่างเห็นสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ผิดปกติเมื่อทำการลดอุณหภูมิเท่านั้น ซึ่งเมื่อทำการหยุดเครื่องแล้วตรวจสอบด้วย Ultrasonic Inspection ก็ปรากฏว่าเกิดรอยแตกในเพลลาขึ้นจริง

3. สรุป

การเฝ้าตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนและการวิเคราะห์ที่ความถี่ มีคุณค่ามากในการตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายอย่างรุนแรงที่อาจจะเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามสัญญาณการสั่นสะเทือนแบบหนึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ดังนั้นความรู้เกี่ยวกับส่วนประกอบของเครื่องจักร สภาวะในการปฏิบัติงาน และการตรวจวัดเก็บข้อมูลอย่างสม่ำเสมอจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะช่วยให้การวิเคราะห์ความผิดปกติมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

4. เอกสารอ้างอิง

1. Victor Wowk, "Machinery Vibration Measurement and Analysis"
2. William T. Thomson, "Theory of Vibration with Applications"
3. Kottke, J.J. & Menning R.H. "Detection of a Transverse Crack in a Turbine Shaft – The Oak Creek Experience" ASME Paper 81-JPGC-Pwr-19