การวิเคราะห์ความเค้นเนื่องจากความสั่นสะเทือนในการออกแบบโครงสร้างล้อรถจักรยานยนต์ทำจากโลหะเบาผสมแมกนีเซียม

Vibration Stress Analysis in Design of Motorcycle Light Weight Magnesium Alloy Wheel Structures

จักร จันทลักขณา[1*] กนก ลิ้มสุมทรเพชร[2]
ศูนย์วิจัยวิศวกรรมคำนวณชั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถ.พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทร 0-29132500 ต่อ 8303 โทรสาร 0-25879541
Chak Chantalakhana* Kanok Limsamutphet
Research center on Advanced Computational Engineering (RACE) Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
1518 Pibulsongkram Rd, Bangsue Bangkok 10800 Thailand
Tel: 0-29132500 Ext. 8303 Fax: 0-25879541 E-mail: chak@kmitnb.ac.th[1], mr_kanok@yahoo.com[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการนำข้อมูลจากโหมดการสั่น เช่น ความถี่ธรรมชาติ และรูปร่างการสั่นมาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อออกแบบโครงสร้างของล้อรถจักรยานยนต์ทำจากโลหะผสมแมกนีเซียม ซึ่งเรียกกันทั่วไปว่า ล้อแม็ก ที่ตามลักษณะการใช้งานมีโอกาสเผชิญภาระพลวัตทั้งแบบแรนดอมจากสภาวะพื้นถนน การกระแทก รวมทั้งแบบฮาร์โมนิกจากการขับเคลื่อนจากเครื่องยนต์ ซึ่งโหมดการสั่นที่เกิดขึ้นใกล้ชิดกันเนื่องจากลักษณะสมมาตรของรูปทรงล้อแม็กเองหรือการออกแบบก้านล้อที่ให้ค่าความแข็งตึงในบางทิศทางใกล้เคียงกันล้วนส่งผลต่อโอกาสในการมีโหมดใกล้ชิดกัน ตัวอย่างของล้อแม็กแบบ 3 ก้าน และ 6 ก้าน ได้ถูกนำเสนอถึงการวิเคราะห์ความเค้นรวมที่เกิดจากโหมดการสั่นที่ใกล้ชิดกัน โดยใช้วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ และพิสูจน์ยืนยันผลการทำนายด้วยการทดสอบโมดัลที่ให้เทคนิคในการแสดงโหมดการสั่นที่เกิดในหลายทิศทาง

Abstract

This study is aimed to demonstrate using of modal data, natural frequency and mode shape, for analyzing of the light weight magnesium alloy motorcycle wheel commonly called the mag wheel design. In general, a mag wheel is subjected to many types of dynamic loadings such as random excitation from uneven road, shock from bumper or obstacle on a road and also harmonic excitation from engine traction. A mag wheel configuration, especially spoke design, has effected to structural strength due to dynamic loadings. Close vibration modes can be occurred in a mag wheel design due to symmetry of the spoke configuration and similar stiffness in directions. Mag wheels with 3-spoke and 6-spoke configurations are used as an example for showing the effects of design to vibration stress. The Finite Element (FE) method has been utilized for predicting modes of mag wheel's vibrations whose verified by modal testing. All modes from all direction of vibration is brought into single frequency response function.

1. บทนำ

โครงสร้างทางกลโดยมากจะต้องเผชิญภาระกระทำทั้งแบบภาระสถิตและภาระพลวัต ซึ่งในตัวอย่างของอุตสาหกรรมยานยนต์ส่วนใหญ่จะต้องมีการทดสอบความทนทานต่อภาระการสั่นสะเทือนเพื่อยืนยันมาตรฐานความทนทานผลิตภัณฑ์ [1] เช่นการทดสอบการสั่นสะเทือนชิ้นส่วนด้วยสัญญาณการสั่นแบบแรนดอม เป็นต้น ซึ่งการทดสอบการสั่นสะเทือนจากสัญญาณแรนดอมนี้ค่อนข้างมีความสำคัญต่อภาวะการล้าตัววัสดุ (Fatigue) ของชิ้นส่วน [2] โดยสัญญาณแบบแรนดอมสามารถที่จะกระตุ้นความถี่ธรรมชาติในหลายๆ โหมดของโครงสร้างทางกลให้แสดงพฤติกรรมออกมาได้พร้อมๆ กัน เฉพาะอย่างยิ่งถ้าโครงสร้างมีโหมดการสั่นที่ใกล้กัน (Close mode) และรูปร่างการสั่นนั้นทำให้เกิดการเสริมกันเช่นการดัด (Bending) และ การบิด (Torsion) ซึ่ง

เป็นผลให้เกิดความเค้นหลักจากการสั่นสะเทือนที่รวมกันแล้วเข้าใกล้จุด Endurance limit ได้

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอตัวอย่างชิ้นส่วนโครงสร้างทางกลที่ต้องการๆ ออกแบบในลักษณะให้เหมาะสมที่สุด (Optimal design) คือ ล้อแม็กรถจักรยานยนต์ ซึ่งต้องมีน้ำหนักเบาและแข็งแรงทนทาน อีกทั้งรูปร่างความสวยงามเองก็มีผลต่อเรื่องของการตลาด ทำให้เกิดข้อจำกัดต่างๆ มากมายในการออกแบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเน้นความสนใจในการออกแบบไปที่การวิเคราะห์โมดัล (Modal Analysis) ที่สามารถแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมทางโหมดการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง รวมทั้งรูปร่างการสั่นที่สามารถนำมาใช้พิจารณาลักษณะการเกิดความเค้นภายในโครงสร้างจากภาระพลวัตที่กระทำกับโครงสร้างได้

รูปแบบของการศึกษาได้อาศัยหลักการทางไฟไนต์อิลิเมนต์เพื่อสร้างสมการการเคลื่อนที่ (Equation of Motion) และแก้ปัญหาเพื่อหาค่าเจาะจง (Eigenvalues) และเวกเตอร์เจาะจง (Eigenvectors) ที่เกี่ยวข้องกับ ความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วง และรูปร่างการสั่นตามลำดับ โดยการวิเคราะห์จะพิจารณาโครงสร้างล้อแม็กจักรยานยนต์ในสภาวะที่ไม่มีการจับยึด (Free supported) ซึ่งลักษณะการเกิดรูปร่างการสั่นจะสัมพันธ์กับการประมาณสภาวะการจับยึดจริงที่ให้แกนล้อมีการยึดติดกับเพลาหมุน และบริเวณขอบนอกล้อมีการรองรับด้วยยางล้อ โดยจะทำการวิเคราะห์โหมดที่เกิดเพิ่มขึ้นมาจากกรณีสภาวะขอบเขตจับยึดจริง กับสภาวะที่ไม่มีการจับยึด จากนั้นจะนำผลการจำลองจากไฟไนต์อิลิเมนต์ไปยืนยันกับผลที่ได้จากการทดสอบโมดัล (Modal Testing) เพื่อนำเสนอเทคนิคการทดสอบเพื่อตรวจหาโหมดการสั่นทั้งหมดของโครงสร้าง และสิ่งสำคัญที่ต้องการนำเสนอในบทความนี้คือการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างที่ต้องเผชิญสภาวะพลวัตแบบสัญญาณแรนดอมโดยนำรูปร่างการสั่นสะเทือนมาวิเคราะห์ถึงการออกแบบรูปลักษณะของโครงสร้างล้อแม็กจักรยานยนต์ โดยจะได้นำตัวอย่างของรูปแบบล้อแม็กที่มีก้านล้อต่างๆ กันมาประกอบการวิเคราะห์ ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จะมีส่วนช่วยให้นักออกแบบสามารถปรับปรุงแก้ไขผลิตภัณฑ์ต้นแบบให้มีความเหมาะสมที่สุดทั้งแง่คุณภาพเชิงวิศวกรรม และรูปลักษณ์เชิงการตลาด

2. ทฤษฎี

2.1 แบบจำลองพลศาสตร์โมดัล

พิจารณาฟังก์ชั่นตอบสนองเชิงความถี่ (Frequency Response Function, FRF) ของแบบจำลองระบบการสั่นสะเทือนที่แทนด้วยก้อนมวล m ที่ยึดติดกับสปริงและตัวหน่วงที่มีค่าคงที่สปริง k และสัมประสิทธิ์ความหน่วง c จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณตอบสนองออกหารด้วยสัญญาณกระตุ้นเข้าดังนี้ [3]

$$H(\omega) = \frac{1/m}{-\omega^2 + j2\zeta\omega\omega_0 + \omega_0^{\ 2}} = \frac{R}{(j\omega - p)} + \frac{R^*}{(j\omega - p^*)}$$

(1)

โดย $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ หรือความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง และ $\zeta = c/(2\sqrt{km})$ คือค่าอัตราส่วนการหน่วง โดยเมื่อเขียนในรูปของค่าเจาะจง p นั้นจะอยู่ในรูปค่าเชิงซ้อน $-\sigma \pm j\omega_d$ โดยมีส่วนค่าจริง $\sigma = \zeta\omega_0$ และ ส่วนค่าจินตภาพ $\omega_d = \omega_0\sqrt{1-\zeta^2}$ สำหรับเทอม R จะเป็นค่าสเกลของฟังก์ชั่นมีค่าเท่ากับ $\mp j1/(2m\omega_d)$ ซึ่งเมื่อพิจารณาโครงสร้างที่มีความต่อเนื่องหรือพิจารณาว่าโครงสร้างมีโหมดการสั่นที่สนใจทั้งหมด n โหมด จะเขียนฟังก์ชั่นตอบสนองความถี่เป็นการรวมกันของโหมดการสั่น n โหมดเข้าด้วยกันโดยถ้าพิจารณาการกระตุ้นเข้าที่จุด j และการตอบสนองออกที่จุด i จะเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$H_{ij}(\omega) = \sum_{r=1}^{n} \frac{R_{ijr}}{(j\omega - p_r)} + \frac{R_{ijr}^{\ *}}{(j\omega - p_r^{\ *})} \qquad (2)$$

โดยที่ความถี่รีโซแนนซ์จะสามารถประมาณค่าฟังก์ชั่นตอบสนองความถี่ได้เป็น $H(\omega_d) \cong R/\sigma$ ซึ่งค่าสเกล R นี้จะเป็นสัดส่วนที่แสดงรูปร่างการสั่น ณ ความถี่รีโซแนนซ์

2.2 วิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ในการจำลองแบบ

รูปร่างของล้อแม็กจักรยานยนต์ถูกเลือกขึ้นมาโดยแบบแรกเป็นล้อแม็กที่มีก้านล้อ 3 ก้าน ซึ่งมีชิ้นงานจริงที่พร้อมสำหรับการทดสอบทางโมดัล ซึ่งเป็นชิ้นงานหล่ออลูมิเนียมอัลลอยด์ ซึ่งทำการวาดแบบสามมิติของชิ้นงานขึ้นมาและนำเข้าไปคำนวณทางกลศาสตร์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้วิธีการไฟไนต์อิลิเมนต์ในการหาคำตอบของสมการการเคลื่อนที่

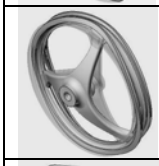
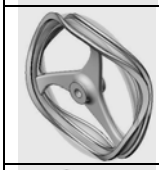
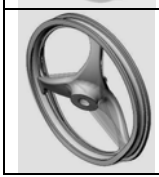
3. การวิเคราะห์ผลการทำนายด้วยไฟไนต์อิลิเมนต์

ประเด็นแรกของการวิเคราะห์พฤติกรรมทางพลศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ของโครงสร้างล้อแม็กจักรยานยนต์แบบ 3 ก้านนี้คือต้องการเปรียบเทียบผลจากการใช้สภาวะขอบเขต (Boundary Condition) แบบอิสระ (Free supported) และแบบจับยึดในลักษณะเหมือนการใช้งานจริง คือแกนล้อมีการยึดแบบเคลื่อนย้ายไม่ได้ (No translation) โดยพิจารณาว่าบริเวณขอบล้อถูกรองรับแบบอิสระด้วยความเป็นสปริงของยางล้อที่มีค่าความแข็งตึงสปริง (Stiffness) น้อยกว่าของตัวล้อแม็กเองมากๆ ซึ่งรูปร่างโหมดการสั่นที่แกนล้อไม่มีการขยับจะมีการเกิดขึ้นและให้ค่าความถี่ธรรมชาติของโหมดเหมือนกันทั้งกรณีจับยึดอิสระและจับยึดบังคับไว้ ซึ่งสรุปเป็นโหมดการสั่นต่างๆ ในตารางที่ 1

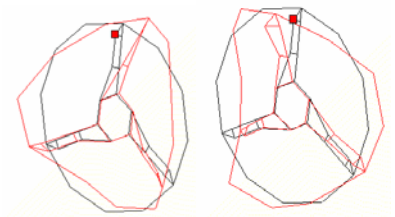
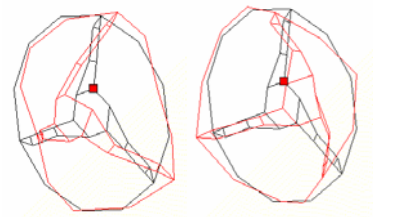
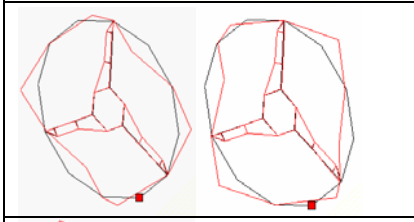
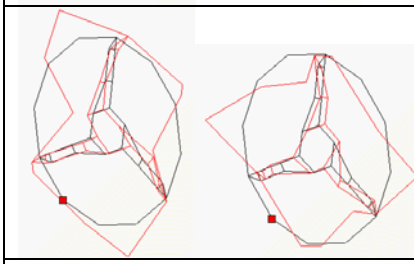
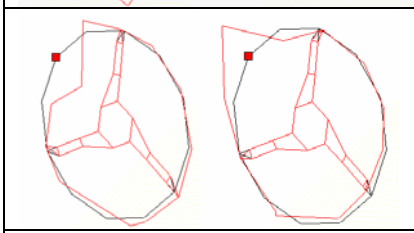
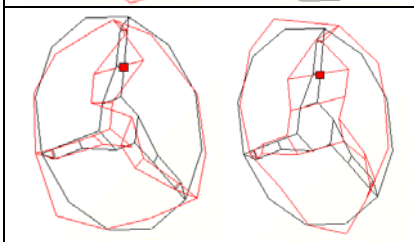
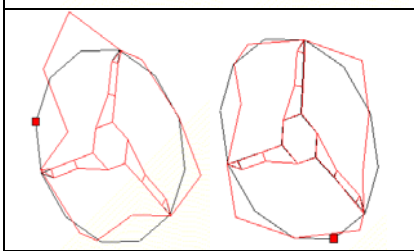
รูปร่างการสั่นจะถูกให้สัญลักษณ์ของโหมดไว้เพื่อการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบโมดัลในหัวข้อถัดไป โดยในตารางที่ 1 ได้จัดเรียงโหมดตามค่าความถี่ธรรมชาติน้อยไปมาก โดย 3 โหมดแรกของสภาวะจับยึดบังคับจะเป็นแบบขอบล้อแกว่ง (Rim Swing) แบบแกนและขอบเคลื่อนย้ายกลับเฟสกันตามแนวแกน หรือแบบแมงกะพรุน (Jellyfish) และแบบขอบล้อหมุนกลับเฟสกับแกนล้อตามแนวแกน (Axial Torsion) ซึ่งใน 2 โหมดแรกจะไม่เกิดขึ้นซ้ำอีกในสภาวะจับยึดอิสระ โดย Rim Swing จะกลายเป็น Hub Swing (G) และ Jellyfish ที่แกนอยู่กับที่ จะกลายเป็น Jellyfish (B) ที่เคลื่อนที่สัมพัทธ์กันของแกนล้อและขอบล้อ ส่วนโหมด A, C, D, E, F จะเกิดขึ้นเหมือนกันทั้งกรณีสภาวะขอบเขตจับยึดบังคับและอิสระ และมีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากัน ยกเว้นโหมดการสั่นตามแนวขอบล้อ (Circumferential modes) โหมด D และ F ที่

ให้ค่าความถี่ธรรมชาติไม่ตรงกัน เนื่องจากในกรณีสภาวะจับยึดอิสระ แกนล้อจะมีการขยับตัว

ตารางที่ 1 โหมดการสั่นของล้อแม็กด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

รูปร่างการสั่น	โหมดการสั่น
	โหมด 1 (จับยึดบังคับ) 200 Hz Rim Swing
	โหมด 2 (จับยึดบังคับ) 256 Hz Jelly fish
	โหมด 3 (จับยึดบังคับ) 305 Hz axial torsion
	โหมด 1 (จับยึดอิสระ) โหมด 4 (จับยึดบังคับ) 363 Hz 1st rim bending (A)
	โหมด 2 (จับยึดอิสระ) 500 Hz jelly fish (B)
	โหมด 3 (จับยึดอิสระ) โหมด 6 (จับยึดบังคับ) 885 Hz 2nd rim bending (C)
	โหมด 4 (จับยึดอิสระ) โหมด 5 (จับยึดบังคับ) 889 Hz 613 Hz 1st circumferential (D)
	โหมด 5 (จับยึดอิสระ) โหมด 7 (จับยึดบังคับ) 967 Hz 3rd rim bending (E)
	โหมด 6 (จับยึดอิสระ) โหมด 8 (จับยึดบังคับ) 1091 Hz 1243 Hz 2nd circumferential (F)
	Mode 7 (free) 1199 Hz hub swing (G)

ตารางที่ 3 โหมดการสั่นด้วยการทดสอบโมดัล (จับยึดอิสระ)

รูปร่างการสั่น (การกลับเฟสการสั่น)	โหมดการสั่น
	mode 1 315 Hz 1st rim bending (A)
	mode 2 494 Hz Jelly fish (B)
	mode 3 633 Hz 2nd rim bending (C)
	Mode 4 750 Hz 3rd rim bending (E)
	Mode 5 923 Hz 1st circumferential (D)
	Mode 6 1,131 Hz hub swing (G)
	Mode 7 1,549 Hz 2nd circumferential (F)

ซึ่งแง่การออกแบบโหมดที่ควรสนใจคือโหมดที่สามารถถูกกระตุ้นจากแรงกระทำได้ เช่นการกระแทกของล้อเองบนพื้นถนน นั่นคือ Circumferential หรือโหมด D และ F แต่โหมดทั้งสองค่อนข้างจะห่างจากกัน (Well-separated) หรือสภาวะจับยึดแบบบังคับโหมด F (1243 Hz) มีค่าความถี่เป็นสองเท่าของโหมด D (613 Hz) ซึ่งไม่ได้ก่อให้เกิดความเค้นหลักที่วิกฤต เหมือนกับในกรณีที่มีโหมดชิดกัน

การกระตุ้นการสั่นกับล้ออีกทางหนึ่งคือจากการส่งกำลังของเครื่องยนต์เองจากจานโซ่ไปที่แกนล้อหลัง ซึ่งสภาวะจับยึดแบบบังคับในโหมดแบบ Rim Swing และ Axial Torsion เป็นโหมดที่สามารถถูกกระตุ้นได้จากแกนล้ออีกทั้งโหมดทั้งสองมีโอกาสที่จะเกิดเป็นโหมดชิดได้เนื่องจากเป็นโหมดแรกๆ ของการสั่นโดยที่โหมด Rim Swing จะทำให้เกิดความเค้นดัด (Bending stress) ในโคนก้านล้อด้านใกล้แกนล้อ ส่วนโหมด Axial Torsion จะทำให้เกิดความเค้นดัดด้านข้าง (Lateral bending stress) ซึ่งเมื่อเกิดเป็นโหมดชิดหรือใกล้กันจะทำให้ความเค้นรวมมีผลจากทั้งสองโหมดและอาจทำให้อายุการใช้งานโครงสร้างต่อการล้าตัววัสดุสั้นลงกว่าที่ควรจะเป็น ฉะนั้นแล้วการออกแบบควรจะให้โหมดทั้งสองนี้มีการแยกห่างจากกันพอสมควร ซึ่งจะยกตัวอย่างเปรียบเทียบโดยใช้ แบบล้อแม็กที่มีก้านล้อ 6 ก้านมาทำการเปรียบเทียบ ดังแสดงลักษณะของล้อแม็กในรูปที่ 1

รูปที่ 1 ล้อแม็กแบบ 3 ก้าน และ 6 ก้าน

ซึ่งเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของโหมด Rim Swing และ Axial Torsion ด้วยสภาวะการจับยึดบังคับของทั้งสองแบบไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติล้อแม็ก 3 ก้าน และ 6 ก้าน

โหมด	ค่าความถี่ธรรมชาติ	
	3 ก้าน	6 ก้าน
Rim Swing	200 Hz	198 Hz
Axial Torsion	305 Hz	262 Hz

ซึ่งตารางที่ 2 สามารถสรุปได้ว่า กรณีล้อแม็ก 6 ก้านมีการเกิดโหมดชิดมากกว่าแบบ 3 ก้าน โดยมีข้อสังเกตอีกประการหนึ่งคือ โหมดแบบ Jellyfish ที่คั่นระหว่างโหมดทั้งสองนี้ได้ย้ายออกไปต่อจากโหมด Axial Torsion ในกรณีของล้อแม็ก 6 ก้าน เนื่องจากความแข็งตึงสปริงของก้านล้อที่เพิ่มมากขึ้น

กล่าวโดยสรุปแล้วตามที่เห็นกันทั่วไปว่าในรถจักรยานยนต์ล้อหน้ามักจะใช้ล้อแบบซี่มากกว่าล้อแม็กเพราะมีความแข็งแรงตามแนวเส้นรอบวงดีกว่า (Circumferential) [4] ซึ่งล้อหน้ามักจะเกิดการกระแทกก่อนอีกทั้งมีน้ำหนักเบาง่ายต่อการควบคุม ส่วนล้อหลังนิยมใช้เป็นล้อแม็กเนื่องจากต้องการๆ ออกแบบที่รับภาระขับเคลื่อนจากเครื่องยนต์และสามารถรับการบิดตัวด้านข้างได้เป็นอย่างดี แต่ก็มีข้อควรระวังในการออกแบบตามที่ได้กล่าวไปแล้วถึงการเกิดโหมดชิดที่อาจส่งผลต่ออายุการใช้งานที่สั้นลงเนื่องจากการล้าตัววัสดุ

ในส่วนถัดเป็นจะเป็นการพิสูจน์ยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนต์อิลิเมนต์กับการทดสอบทางโมดัล โดยจะเน้นไปที่วิธีการออกแบบการทดสอบเพื่อให้ได้โหมดการสั่นครบตามที่ทำนายไว้

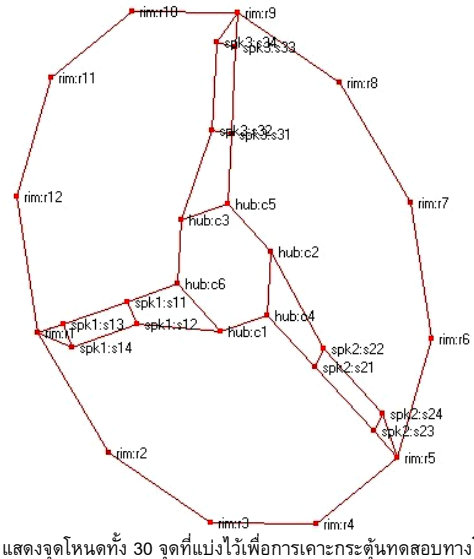
4. การทดสอบโมดัล (Modal Testing)

วิธีการกระตุ้นทดสอบจะใช้การกระตุ้นด้วยค้อน (Impact hammer) และใช้ตัวหยั่งสัญญาณความเร่งเพื่อตรวจวัดการตอบสนองตามจุดวัดหรือโหนด (Node) ซึ่งแบ่งจุดทดสอบออกเป็นทั้งหมด 30 จุดโหนดเพื่อวิเคราะห์ Bending modes ส่วนการทดสอบโหมดแนวเส้นรอบวง (Circumferential) จะใช้ทั้งหมด 12 จุดโหนดตามแนวเส้นรอบวง ซึ่งจำนวนจุดที่แบ่งนี้เพื่อให้ครอบคลุมการเคลื่อนที่ของโหมดการสั่นในทุกๆ โหมดที่ทำการทำนายด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ดังตารางที่ 1 ซึ่งในบางครั้งเป็นการยากที่จะได้โหมดการสั่นแสดงให้เห็นครบในฟังก์ชั่นตอบสนองความถี่จากการทดลองเพียงจุดวัดและกระตุ้นคู่เดียว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างแบบ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 4 เป็นการนำฟังก์ชั่นตอบสนองความถี่ 3 ฟังก์ชั่นที่ทำการทดสอบมาพลอตทาบเพื่อหาจำนวนโหมดการสั่นทั้งหมดของล้อแม็กแบบ 3 ก้าน โดยฟังก์ชั่นตอบสนองที่ 1 หรือเส้นเต็มบางในรูปที่ 4 เป็นการกระตุ้นและตรวจวัดที่จุด S23 ดังในรูปที่ 3 โดยจุดนี้แสดงโหมดการสั่นในสภาวะจับยึดอิสระทั้งหมดยกเว้นโหมดแนวเส้นรอบวงและโหมด (C) หรือโหมดหมายเลข 3 ในรูปที่ 4 เนื่องจากจุดกระตุ้นและตรวจวัดอยู่ตามแนวเส้นโหนด (Nodal line) ที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของโหมดนั้นๆ จึงทำการเปลี่ยนจุดกระตุ้นและตรวจวัดเพื่อให้แสดงโหมดหมายเลข 3 นี้ออกมา ซึ่งแสดงเป็นฟังก์ชั่นตอบสนองความถี่ที่ 2 หรือเส้นประในรูปที่ 4 ส่วนกรณีของโหมดการสั่นตามแนวเส้นรอบวงได้เปลี่ยนทิศทางการกระตุ้นเป็นตามเส้นรอบวง (รัศมี) และนำมาฟังก์ชั่นตอบสนองมาพลอตทาบกันเป็นเส้นทึบในรูปที่ 4

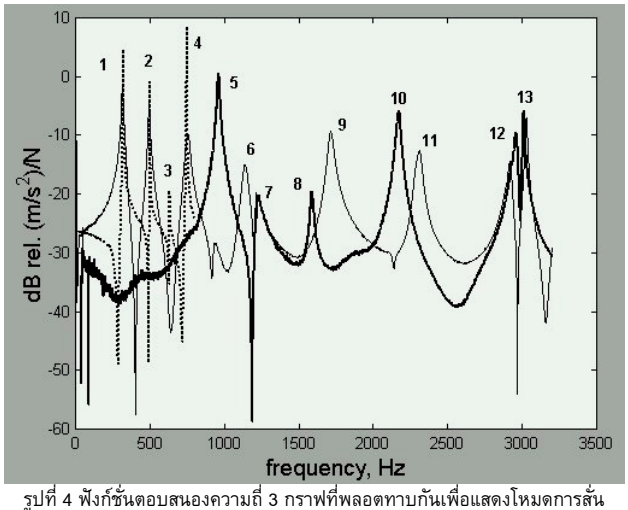
ในการศึกษานี้สนใจโหมดการสั่นถึงโหมดหมายเลข 8 ในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นโหมด F ในตารางที่ 1 โดยตารางที่ 3 ได้ให้รูปร่างการสั่นที่คำนวณจากโปรแกรม LMS-CADA-PC ซึ่งแสดงทั้งหมด 7 โหมดการสั่น โดยโหมดหมายเลข 6 และ 7 ในรูปที่ 4 เกิดเป็นโหมด Hub Swing ทั้งคู่ที่ความถี่ใกล้กัน ซึ่งในตารางที่ 3 แสดงโหมดการสั่นจากโหมด A ถึง F แต่อาจจะมีการสลับโหมดได้เนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของวัสดุในการหล่อขึ้นรูป

และกรณีที่ต้องการทราบโหมดการสั่นที่เกิดในกรณีของการจับยึดแบบบังคับ (ยึดแกนล้ออยู่นิ่ง) ก็สามารถนำผลการทดสอบแบบจับยึดอิสระนี้ไปทำการคำนวณได้เพื่อหาความถี่ของโหมด Rim Swing และ Axial Torsion ด้วยเทคนิควิธีแบบ Sub-structuring [3] ที่มีข้อดีกว่าการนำไปจับยึดกับฟิกเจอร์ที่ออกแบบขึ้นมาตรงที่จะไม่มีผลจากการหน่วงของความเสียดทานที่จุดต่อยึด รวมทั้งความแข็งตึงของฟิกเจอร์เองที่เข้ามาปฏิสัมพันธ์กับโครงสร้างที่ทดสอบ ซึ่งไม่ได้แสดงรายละเอียดในบทความวิจัยนี้

รูปที่ 2 ภาพถ่ายล้อแม็ก 3 ก้านที่ใช้ในการทดสอบโมดัล



รูปที่ 3 แสดงจุดโหนดทั้ง 30 จุดที่แบ่งไว้เพื่อการเคาะกระตุ้นทดสอบทางโมดัล



รูปที่ 4 ฟังก์ชั่นตอบสนองความถี่ 3 กราฟที่พลอตทาบกันเพื่อแสดงโหมดการสั่นทั้งหมดของล้อแม็ก

5. สรุป

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำตัวอย่างชิ้นส่วนทางกลคือ ล้อแม็กจักรยานยนต์ซึ่งต้องการการออกแบบให้เหมาะสมที่สุดทั้งด้านความแข็งแรง การใช้งาน และรูปทรงภายนอกที่สวยงาม ซึ่งโครงสร้างล้อแม็กจะเผชิญทั้งการกระตุ้นแบบแรนดอมจากพื้นถนนและแบบฮาร์โมนิกจากเครื่องยนต์ ซึ่งความเค้นจากการสั่นสะเทือนจะเป็นผลเกี่ยวข้องสำคัญต่ออายุการใช้งานโดยเฉพาะอย่างยิ่งการล้าตัววัสดุ ซึ่งรูปทรงของก้านล้อแม็กจะมีผลต่อการเกิดโหมดการสั่นว่ามีการใกล้ชิดกันระหว่างโหมดเพียงใด ซึ่งอาจทำให้ความเค้นหลักจากภาระพลวัตมีมากเกินกว่าช่วงจำกัดความทนทาน (Endurance limit) ซึ่งการวิเคราะห์รูปร่างการสั่นสามารถนำมาช่วยในการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวได้ โดยผลการทดสอบโมดัลแสดงให้เห็นถึงการทดสอบเพื่อให้ได้โหมดการสั่นครบทุกโหมดและยืนยันผลจากการทำนายด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนที่สองขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยวิศวกรรมคำนวณชั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ทุนเป็นผู้ช่วยวิจัยในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] MIL-STD 810F, Method 514.5, Vibration

[2] D. Schiff, 1990 Dynamic Analysis and Failure Modes of Simple Structures, John Wiley and Sons, Inc., New York.

[3] D. J. Ewins, 2000 Modal Testing: Theory, Practice and Application, Second Edition, Research Studies Press, Ltd., Hertfordshire.

[4] N. J. Salamon and R. A. Oldham, 1992 Analysis for Design of Spoked Bicycle Wheels, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 10, pp 319 – 333, Elsevier Science Publishers.